



中国可持续能源项目

威廉与佛洛拉·休斯基金会
能 源 基 金 会
项目资助号: G-1206-16338

中国替代燃料汽车排放特性和应用现状研究

**Research of emission performance and application
status of alternative-fuel vehicles in China**



北京理工大学

汽车动力及排放测试国家重点专业实验室

2013 年 12 月

致 谢

感谢能源基金会中国可持续能源项目为本报告提供资金支持，同时也诚挚地感谢为本报告提出宝贵意见与建议的业内专家与同事。

报告作者

葛蕴珊，郝利君，李兰

报告声明

本报告所有观点、解释、结论均属作者个人意见，不代表项目资助方。报告仅限于研究、个人学习或某个组织的内部传阅，不得翻印或者用于商业目的。如有不妥与谬误之处，敬请读者不吝批评和指正。

联系方式

北京市海淀区中关村南大街 5 号 邮编:100081

电话: 010 -68912035

目录

第 1 章 中国天然气和甲醇供应现状	7
1.1 我国天然气的供应状况	7
1.2 我国甲醇的供应状况.....	8
第 2 章 天然气汽车与 LPG 汽车保有量与产量	9
2.1 我国天然气汽车.....	9
2.1.1 天然气汽车保有量.....	9
2.1.2 天然气汽车产量	10
2.1.3 我国天然气汽车产量车型分布	11
2.1.4 生产天然气汽车的主要企业及排名	13
2.1.5 两用燃料轿车生产企业排名	14
2.2 LPG 汽车	15
第 3 章 甲醇汽油燃料车排气污染物排放特性.....	16
3.1 实验主要内容.....	16
3.2 实验方法.....	16
3.2.1 常规污染物测试系统及循环	16
3.2.2 挥发性有机物检测方法及设备	17
3.2.3 醛酮类化合物实验方法及设备	21
3.3 实验一 M15 甲醇汽油车排气污染物排放特性.....	26
3.3.1 M15 甲醇汽油车常规污染物排放特性	27
3.3.2 M15 甲醇汽油车醛酮化合物排放特性	31
3.3.3 M15 甲醇汽油车挥发性有机物排放特性	33
3.4 实验二 M100 纯甲醇车排气污染物排放特性	35
3.4.1 M100 纯甲醇车常规污染物排放特性	35
3.4.2 M100 纯甲醇车醛酮化合物排放特性	39

3.4.3	M100 纯甲醇车挥发性有机物排放特性	43
3.5	实验三 甲醇汽油燃料车燃油蒸发污染物排放特性	45
3.5.1	甲醇汽油车总碳氢化合物燃油蒸发排放特性	45
3.5.2	甲醇汽油车醛酮化合物燃油蒸发排放特性	48
3.5.3	甲醇汽油车挥发性有机物燃油蒸发排放特性	49
3.5.4	实验三小结.....	50
3.6	实验四 不同比例甲醇汽油的排放特性	51
3.6.1	不同比例甲醇汽油的常规气态污染物排放特性	52
3.6.2	不同比例甲醇汽油的 VOCs 排放特性	54
3.6.3	不同比例甲醇汽油的醛酮类化合物排放特性	56
3.6.4	专用催化器对甲醇燃料汽车排放的影响	58
3.6.5	实验四小结.....	61
第 4 章	汽油/CNG 双燃料车排气排放污染物排放特性	63
4.1	实验主要内容	63
4.2	实验方法.....	63
4.3	实验一 厦门汽油/CNG 双燃料车排气排放污染物排放特性	63
4.3.1	汽油/CNG 双燃料车排气中常规污染物排放特性.....	63
4.3.2	汽油/CNG 车的醛酮化合物排放特性	67
4.3.3	汽油/CNG 车的挥发性有机物排放特性	68
4.3.4	实验一小结	69
4.4	实验二 北京市汽油/CNG 双燃料出租车排放污染物排放特性 ..	70
4.4.1	北京市汽油/CNG 双燃料出租车排气中常规污染物排放特 性	70
4.4.2	实验二小结	74
第 5 章	天然气公交车排放污染物排放特性	75
5.1	公交车车载实验目的和意义	75

5.2	实验设备和方法.....	76
5.2.1	实验主要测试设备.....	76
5.2.2	实验设备的安装.....	77
5.3	实验一 国 V 公交车排放污染物的排放特性	79
5.3.1	国 V 公交车试验车辆分类	79
5.3.2	排放污染物中常规污染物中 CO 的排放特性	80
5.3.3	排放污染物中常规污染物中 NO _x 的排放特性	81
5.3.4	排放污染物中常规污染物中 THC 的排放特性	83
5.3.5	实验一小结.....	84
5.4	实验二 国 V 公交车与国 IV 公交车 NO _x 对比	85
5.4.1	A 系列机型三种不同排放水平的机型 NO _x 排放特性....	85
5.4.2	B 系列机型三种不同排放水平的机型 NO _x 排放特性...	86
5.4.3	实验二小结.....	87
第 6 章	LPG 公交车与柴油公交车实际道路排放特性对比.....	88
6.1	实验内容.....	88
6.2	实验方法.....	88
6.3	实验结果.....	89
6.3.1	试验车辆排气中常规污染物平均排放值	89
6.3.2	试验车辆排气中 CO ₂ 中的排放特性	89
6.3.3	试验车辆排气中 CO 中的排放特性	90
6.3.4	试验车辆排气中 NO _x 中的排放特性	91
6.3.5	试验车辆排气中 THC 中的排放特性	93
6.4	实验小结.....	93
附录	替代燃料相关资料	95
第 1 章	车用替代燃料简介	95
1.1	替代燃料概述.....	95

第 2 章 甲醇燃料	97
2.1 甲醇燃料在国内外的应用现状	97
2.2 甲醇燃料特性	99
2.3 影响汽车发动机性能的甲醇燃料的主要性质	101
2.4 甲醇燃料内燃机技术现状.....	103
2.5 甲醇燃料汽车的排气污染	110
2.5.1 国外甲醇汽油车辆的排放研究进展	110
2.5.2 国内甲醇汽油车辆的排放研究进展	110
第 3 章 天然气 (CNG) 及天然气汽车相关技术.....	113
3.1 天然气汽车分类.....	113
3.2 车用天然气燃料特点及燃烧特性	114
3.2.1 CNG 燃料特点	114
3.2.2 车用 CNG 的燃烧特性.....	118
3.3 车用 CNG 供给系统	119
3.3.1 车用 CNG 供给系统发展概况	119
3.3.2 压缩天然气发动机技术发展	127
3.3.2.2 天然气发动机研发现状	127
3.4 液化天然气 (LNG) 汽车	137
3.4.1 LNG 燃料特性	137
3.4.2 液化天然气汽车的发展状况	138
3.4.3 LNG 汽车发动机燃料供给系统	139
3.5 天然气汽车排气污染物排放现状	141
第 4 章 液化石油气 (LPG) 汽车.....	143
4.1 车用液化石油气 (LPG) 燃料	143
4.2 液化石油气 (LPG) 汽车及其燃料供给装置	144
4.3 LPG 汽车燃料供给系统的技术现状	145

4.4	LPG 汽车改装技术	150
4.5	LPG 汽车性能及排放	152
	参考文献	155

第 1 章 中国天然气和甲醇供应现状

1.1 我国天然气的供应状况

天然气由于其具有清洁、高效的特点，已成为 21 世纪可持续发展能源的一个主要选择。而且，由于天然气易于获得，污染物排放量较低，便于使用等特点，将成为代替石油的主要能源。事实证明，21 世纪以来，天然气在我国的能源结构中的地位越来越重要。我国的天然气资源拥有量十分丰富，约为 33 万亿立方米。已探明的天然气储量约为 4 万亿立方米，主要分布在陕甘宁鄂尔多斯盆地中部地区、四川盆地川东地区、新疆塔里木地区和青海柴达木四大气源区，在近海拥有渤海、东海和南海三大气源区。但由于各方面技术问题，天然气的实际开采量与存储量存在很大矛盾。近些年，我国天然气产量迅速提高，但仍无法实现自给自足，需要依靠进口来满足居民以及化工生产的需求。根据数据显示，2006 年，天然气进口量占年产量的 0.016%，至 2012 年，该比例已增长至 40%。历年我国天然气产量和进口量如表 1.1 所示。

表 1.1 2006-2012 中国天然气产量和进口量/ 10^9m^3

年份	产量	进口量	总量
2006	588.14	9.63	597.77
2007	688.81	40.78	729.59
2008	774.73	46.71	821.44
2009	841.29	77.45	918.74
2010	950.76	167.3	1118.06
2011	1011.78	316.14	1327.92
2012	1067.31	426.45	1493.76

1.2 我国甲醇的供应状况

甲醇可以由煤、天然气和生物质生产，原料来源丰富。早期制取甲醇是从干木材干馏时得到的焦木酸分出，因此甲醇也可归属于生物质能源。目前工业生产甲醇，只要有煤炭和天然气等原料生成的合成气（氢与一氧化碳的混合物）在高温高压下通过催化剂合成制得。甲醇用途十分广泛，在国民经济中几乎找不到另外一种有机产品有甲醇如此广阔的应用范围。而且随着科学技术的不断发展与进步，甲醇的应用领域仍在不断扩大，已突破其传统的应用范围，未来的潜在开发前景十分诱人。

2006 年我国共有甲醇生产企业 167 家，产量为 755.56 万吨，2007 年全国甲醇生产企业 177 家，产量达 1012.26 万吨，增长 22%，2012 年全国甲醇产量已超 3000 万吨，目前，全国甲醇产能在 30 万吨以上的生产企业近 20 家。2005~2008 年，中国甲醇进口总量在 473.35 万吨。2009 年进口甲醇 527.79 万吨，超过前 5 年进口量之和。大量低价甲醇的进口，使国内甲醇市场雪上加霜，对我国甲醇行业造成了严重损害。因此商务部对沙特阿拉伯、马来西亚、印度尼西亚、新西兰等国进口的甲醇进行反倾销立案调查。自 2009 年起至今甲醇年进口量维持在 500 万吨以上。历年我国甲醇产量和进口量如表 1.2 所示。

表 1.2 2006-2012 中国甲醇产量和进口量/10⁴吨。

年份	产量	进口量	总量
2006	755.56	112.8	868.33
2007	1012.26	84.52	1096.78
2008	1108.48	143.41	1251.89
2009	1123.07	527.79	650.86
2010	1575.25	518.92	2094.17
2011	1984.12	570.15	2554.27
2012	2640.13	500.24	3140.37

第 2 章 天然气汽车与 LPG 汽车保有量与产量

2.1 我国天然气汽车

2.1.1 天然气汽车保有量

在石油日益紧缺的国际大环境中,天然气的挖掘及使用已成为解决能源危机的重要举措。我国“十五”期间“清洁汽车关键技术研究开发与示范应用”项目的实施,使得国内燃气汽车得以迅速发展。我国的天然气汽车保有量从 2000 年的不足 1 万辆发展到 2005 年的 24 万辆。2006 年截至 2010 年年底,全球天然气汽车保有量已超过 1267 万辆,同时天然气加气站也超过 18200 座。2012 年天然气汽车保有量比 2011 年增长 17%,截止 2013 年 6 月我国天然气汽车保有量已达 136.596 万辆。预估 2013 年底,该数量将增至 150 万辆,并且以预计到 2020 年将达到 300 万辆的规模,未来 5 年复合增长率将高达 27%。我国历年天然气汽车保有量见表 2.1。

表 2.1 我国历年天然气汽车保有量(万辆)

年份	CNG 汽车	LNG 汽车	(保有量) 合计
2001	2.5509	0.0000	11.0182
2002	4.5205	0.0493	13.2804
2003	8.9013	0.0122	20.6095
2004	10.0946	0.0120	21.0321
2005	12.7000	0.4763	24.1031
2006	19.4774	0.0000	30.2356
2007	25.7640	0.0000	33.6242
2011	47.8687	61.7003	109.5690
2012	-	-	126.1957
2013	-	-	150.0000

(数据来源:节能与新能源汽车网)

从数据表中可清楚的看出，CNG 汽车总数每年都有增长趋势，尤其是 2001~2003 年，年增长率超过了 75%。2004 年之后，CNG 汽车总数已明显超过 LNG 汽车数量，值得一提的是 2007 年，全国 CNG 汽车保有量已达 25 万辆，占天然气汽车保有量的 76.6%。近五年，随着 LNG 储气罐、加气设备等低温燃料供给系统技术基本成熟，使得天然气汽车超长距离行驶成为可能，带动了天然气汽车长途客运和长途载货市场的启动。2008 年以来，LNG 汽车以新的生命力活跃在燃气汽车的舞台。并且在短短的三年时间，数量超过 CNG 汽车 28.9%。LNG 汽车保有量与 CNG 汽车保有量的直观对比可见图 2-1 我国历年天然气汽车保有量柱形图。

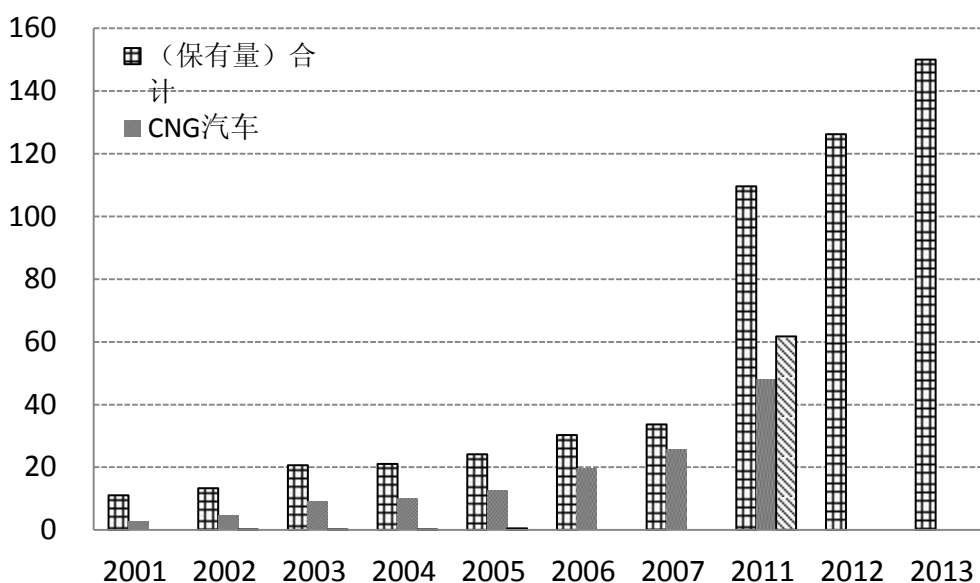


图 2-1 我国历年天然气汽车保有量柱形图 (万辆)

(数据来源：节能与新能源汽车网)

2.1.2 天然气汽车产量

近两年，中国天然气汽车的总产量迅速增长，我国历年天然气汽车产量可见柱形图 2-2。据统计，近五年来，其中 LNG (液化天然气) 汽车在以年均 20%

以上的销售速度增长，CNG(压缩天然气)汽车销量年均增长速度在 30%以上。2012 年产量为 16.6267 万辆，较 2011 年产量增长了 73.6%。2013 年 1~6 月总产量为 11.0999 万辆，半年的产量超过 2011 年的年产量 1.5224 万辆，预估 2013 年总产量可至 24 万辆。

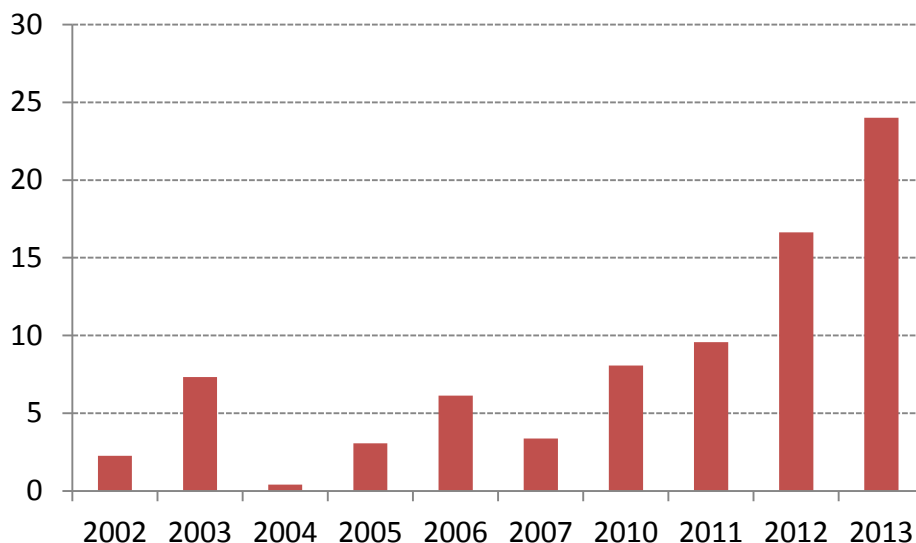


图 2-2 我国历年天然气汽车产量柱形图（万辆）

（数据来源：节能与新能源汽车网）

图中可直观的对比出历年来产量的发展趋势并不稳定，在 2004 年天然气总产量为 0.4226 万辆，为十年来最低值。天然气汽车产量受影响因素较多，其中最重要的是天然气价格。中国天然气的定价依然保持着政府定价，这在很大程度上影响了天然气行业的竞争力。由于石油和煤炭等能源尤其是传统能源的价格，对天然气行业的发展产生了很大的影响，与世界其他国家相比，中国的天然气行业的价格偏高。考虑到整体经济性能，天然气汽车的发展仍然受到价格等的影响。

2.1.3 我国天然气汽车产量车型分布

统计近三年来，各种车型的天然气汽车产量，见表 2.4。

表 2.2 我国近三年天然气汽车各车型产量（万辆）

	2011	2012	2013 (上半年)
两用燃料乘用车	6.1052	8.7695	5.8418
两用燃料客车	0.6812	1.3937	0.6556
两用燃料其他车型	0.0472	0.8085	0.8358
天然气客车	2.8496	4.0733	1.8007
天然气其他车型	0.1015	1.5817	1.966

（数据来源：节能与新能源汽车网）

2011~2013 年各车型的天然气汽车的产量分布见柱形图 2-3。对比近三年的数据，2012 年两用燃料乘用车比 2011 年增长 43.64%，两用燃料客车则增加了一倍，天然气客车产量也比 2011 年增长了 43.94%。其中增长最为迅速的是其他车型产量，包括两用燃料其他车型和天然气其他车型，如货车、清洁车、牵引车等，其 2012 年产量为 2011 年的 15 倍以上。根据 2013 年上半年各车型产量的数据，其六个月的产量已高于 2011 年全年其他车型的天然气汽车产量，预估全年产量至少是上半年的两倍。

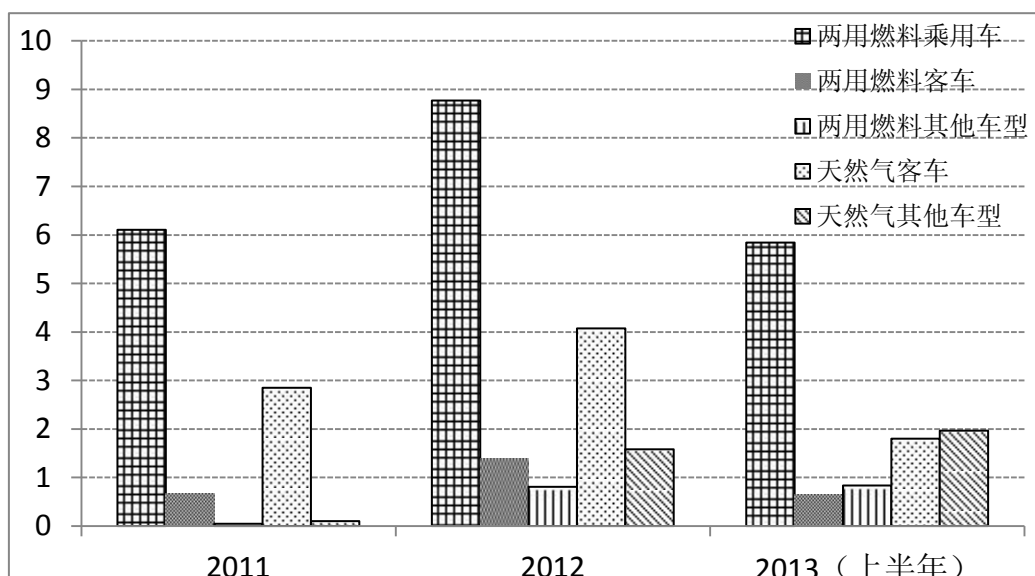


图 2-3 各种车型的天然气汽车产量分布柱形图（万辆）

2.1.4 生产天然气汽车的主要企业及排名

以 2012 年为例，两用燃料乘用车总产量为 8.7695 万辆，占天然气汽车总产量的 52.74%，天然气客车总产量为 4.0733 万辆，占天然气汽车总产量的 24.52%。两种车型共占有天然气汽车年生产总量的 77.26%。

2012 年国内天然气客车生产企业排行前十名，见表 3.1。郑州宇通客车股份有限公司 2012 年天然气客车的产量是排名第二位的金龙联合汽车工业（苏州）有限公司的 2 倍，产量达 6808 辆。据统计，2012 年天然气客车总产量为 4.0733 万辆。排名前十名的生产企业的天然气客车年生产总量为 2.7048 万辆，占当年天然气客车总产量的 66.4%。

表 2.3 2012 年国内天然气客车主要生产企业排名

排名	企业名称	产量(辆)
1	郑州宇通客车股份有限公司	6808
2	金龙联合汽车工业(苏州)有限公司	3349
4	成都客车股份有限公司	2654
5	中通客车控股股份有限公司	2535
6	厦门金龙联合汽车工业有限公司	2264
7	丹东黄海汽车有限责任公司	2017
8	扬州亚星客车股份有限公司	1671
9	东风扬子江汽车(武汉)有限责任公司	1504
10	北汽福田汽车股份有限公司	1326

(数据来源：节能与新能源汽车网)

2.1.5 两用燃料轿车生产企业排名

2012 年国内两用燃料轿车生产企业排行前十名，见表 3.2。排名前四位企业领用燃料轿车的年产量超过 1.3 万辆，排名第四的上海大众汽车有限公司的产量是排名第五位东风悦达起亚汽车有限公司产量的 2 倍。排名第一的一汽-大众汽车有限公司产量为排名第十的安徽江淮汽车股份有限公司产量的 10.45 倍。据统计，2012 年天然气客车总产量为 8.7695 万辆。排名前十名的生产企业的天然气客车年生产总量为 8.3238 万辆，占当年天然气客车总产量的 94.92%。

表 2.4 2012 年国内两用燃料轿车主要生产企

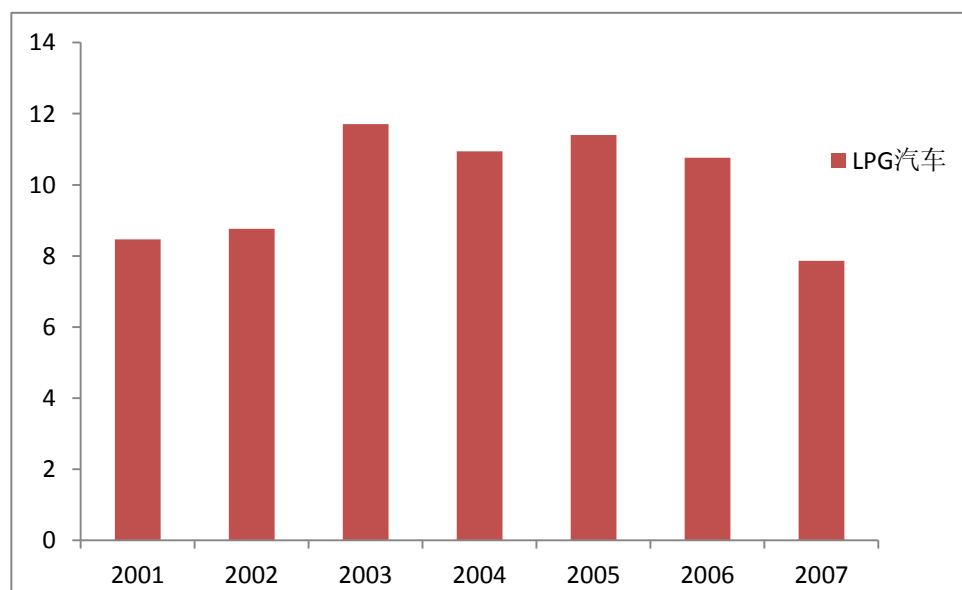
排序	企业名称	产量（辆）
1	一汽-大众汽车有限公司	18110
2	神龙汽车有限公司	16219
3	北京现代汽车有限公司	13636
4	上海大众汽车有限公司	13268
5	东风悦达起亚汽车有限公司	6718
6	重庆长安铃木汽车有限公司	4632
7	奇瑞汽车股份有限公司	3093
8	比亚迪汽车有限公司	3011
9	重庆力帆乘用车有限公司	2818
10	安徽江淮汽车股份有限公司	1733

（数据来源：节能与新能源汽车网）

2.2 LPG 汽车

2001~2007 年全国 LPG 汽车保有量见图 2-4。由图可知，LPG 七年以来的发展较缓慢，而且近年来保有量有逐年下降的趋势。因为车用 LPG 的成分变化多，难以保证在实际使用过程的排放控制质量，LPG 正在被逐渐被 NG 车辆更新替代。

以 2011 年 LPG 液化石油气车型产量分布为例（见图 2-5），目前在全国其他城市和地区的应用相对较少，气体燃料汽车的发展主要以天然气汽车为主。液化石油气公交车在我国推广使用量远低于天然气汽车，并且有逐渐被天然气汽车取代的趋势。目前最大的车队在广州市，广州市 LPG 公交车的数量在 7800 万辆左右，是最大的 LPG 公交车队，有关 LPG 公交车的实际排放控制效果，争议较多。目前全国 LPG 公交车保有量 11615 辆，出租车 36020 辆，主要分布在广州、沈阳、武汉和哈尔滨市，上述大部分车辆开始登记注册日大部分是



2005-2008 年左右。

图 2-4 2001~2007 年全国 LPG 汽车保有量

第 3 章 甲醇汽油燃料车排气污染物排放特性

3.1 实验主要内容

近年来,随着人们环保意识的增强,机动车污染物的排放越来越受到社会广泛的关注。在汽油机上使用甲醇燃料,发动机不需做大的变动,汽油机采用甲醇或甲醇/汽油的混合燃料,尾气中的常规污染物如 HC、CO 的排放幅度降低,但排气中有较多的甲醛,甲醇等非常规污染物。这些物质严重的危害到人类的健康,是近年来排放研究的重点。到目前位置,国内对甲醇发动机排放特性的研究重点主要集中于发动机台架试验,不能反映车辆实际运行工况的排放情况,因此有必要对整车的排放特性进行研究,为其推广应用提供依据。本次研究主要由四个实验组成。实验一讨论了 M15 (15%甲醇+85%汽油) 甲醇汽油燃料车排气中常规污染物和非常规污染物的排放特性,研究了甲醇车专用催化剂对醛酮类污染物的催化效果。实验二讨论了 M100 (100%甲醇) 甲醇汽油车排气中常规污染物和非常规污染物的排放特性。实验三讨论了 M15 甲醇汽油燃料车燃油蒸发污染物排放特性。实验四研究了 M15 (15%甲醇+85%汽油)、M20 (20%甲醇+80%汽油)、M30 (30%甲醇+70%汽油)、M50 (50%甲醇+50%汽油)、M85 (85%甲醇+15%汽油)、M100 (100%甲醇) 甲醇车排放及装有专用催化剂甲醇车的常规排放和非常规排放特性,得到不同甲醇汽油掺混比例汽车的排放特性,为今后甲醇燃料汽车的推广应用提供依据。

3.2 实验方法

3.2.1 常规污染物测试系统及循环

实验循环为国家标准《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国 III、IV 阶段) GB 18352.3—2005》规定的运转循环(见图 3-1),单个实验循环持续 1180 秒,由两部分组成,1 部由 4 个城区循环 ECE 组成,每个城区循环包含 15 个

工况（怠速、加速、匀速、减速等）。试验 2 部由 1 个城郊循环 EUDC 组成，该城郊循环包含 13 个工况（怠速、加速、匀速、减速等）。

实验中样车首先在温度为 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的实验室中静置 16 小时，然后在底盘测功机上进行国家标准中规定的 I 型整车排放实验(冷起动排气污染物实验)。采用 ONO SOKKI PECD9400 电力测功机，HORIBA 7200CVS 定容取样系统稀释排气。用 HORIBA 7400H 气体分析仪分析排放污染物测量气体污染物，用氢焰离子化测定仪(FID)测量 HC，用不分光红外线检测仪(NDIR)测定 CO，用化学发光测定仪(CLD)测量 NO_x ，排放测试值单位为 g/km 。

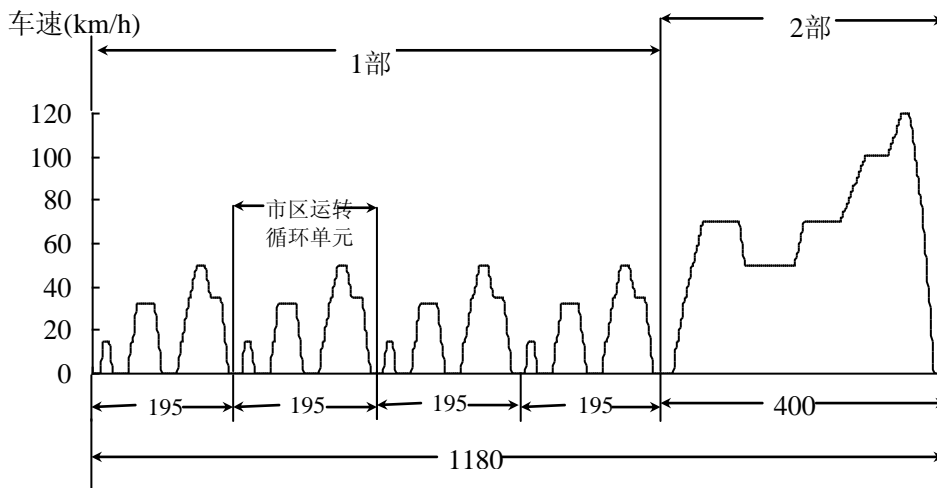


图 3-1 GB18352.3-2005 规定的 I 型试验用运转循环

3.2.2 挥发性有机物检测方法与设备

1. 检测方法的确定

挥发性有机化合物（Volatile Organic Compounds, VOCs）是指在常压下、沸点范围在 $50\sim 260^{\circ}\text{C}$ 的各种有机化合物的总称。美国环保署 EPA 所列的 188 种污染物名单中有多种属于挥发性有机物 VOCs 的范畴，如苯、甲苯、二甲苯等。

由于 VOCs 种类很多，而且浓度和毒性也存在很大的差异，如果将每种挥

发性有机物都逐一测定将十分费时和昂贵,而且也是不必要的。在 1986 年 Lars Molhave 提出了采用总挥发性有机化合物 (Total Volatile Organic Compounds, TVOC)这一量化指标来表示挥发性有机物总污染水平,TVOC 是指利用 Tenax GC 或 Tenax TA 采样,非极性色谱柱(极性指数小于 10)进行分析,保留时间在正己烷和正十六烷之间所有的挥发性有机化合物总和。按照这个定义,空气中总挥发性有机物的测定方法可以采用固相吸附—热脱附—气相色谱质谱法、采样罐吸附—气相色谱质谱法、固相吸附—溶剂萃取—气相色谱质谱法等。其中,固相吸附—热脱附—气相色谱质谱法因其可测定低浓度的污染物,不使用有毒有害试剂,可实现自动化测定,容易保存和运送捕集管等优点而被广泛应用。

目前国际上广泛采用的相关参考标准是美国环保局(U.S.EPA)公布的“空气中毒性有机物测量方法概要”(TO 法)和“室内空气污染测量方法概要”(IP 法)。EPA 声称,这两种标准都是非官方标准,几乎里面提及的所有方法在使用过程中都具有灵活性,使用者可根据实际情况进行更改。一般来说,IP 法实质上与 TO 法是相似的,TO-1/17 法和 IP-1B 法都使用吸附管,TO14/15 和 IP-1A 法使用吸附罐。另外,国际标准化组织 ISO 也有两个关于室内空气和工作场所挥发性有机物采样测量分析标准 ISO16017-1:2001 和 ISO16000-6 :2004,内容与美国 EPA TO-17 标准类似,均为固相吸附采样-GC/MS 测量分析。

本研究按美国 EPA 的标准方法 TO-17,用 Tenax TA®吸附管—热脱附—气相色谱质谱(GC/MS)法对各种替代燃料汽车及发动机排放的挥发性有机物进行测量分析研究。

2. 实验步骤及实验设备

采用恒流量采样泵(美国 SKC 公司, AirChek2000)采样,稀释样气经玻璃纤维滤膜过滤后通过 Tenax TA 吸附管采集 VOCs, Tenax TA 吸附管使用前需经老化以去除干扰成分。采样管流量设为 400mL/min,采集 1180s。采样后的管置于冰箱中密封遮光 4℃以下保存,7 天之内进行前处理。

利用二次热解析-气相色谱/质谱联用仪(图 3-2)对采样后的 Tenax TA®吸附管(英国 Markes 公司,图 3-3)进行处理分析。用干燥的惰性气体吹扫吸附管后,将吸附管加热,热脱附出的挥发性有机组份随载气进入冷阱,经二次热

脱附进入气相色谱/质谱联用仪进行定性定量分析。全自动热脱附仪（Thermal Desorption, TD）为英国 Marks 公司生产的 UNITY；气相色谱仪（Gas Chromatography, GC）是美国 Agilent 6890N，气相色谱柱为 HP-5MS(30m×0.25 mm×0.25μm)；质谱仪（Mass Spectrometer, MS）为美国 Agilent5795C，配备 NIST 标准谱图库；仪器具体设定参数如表 3.1 所示。



图 3-2 Agilent 二次热解析-气相色谱/质谱联用仪

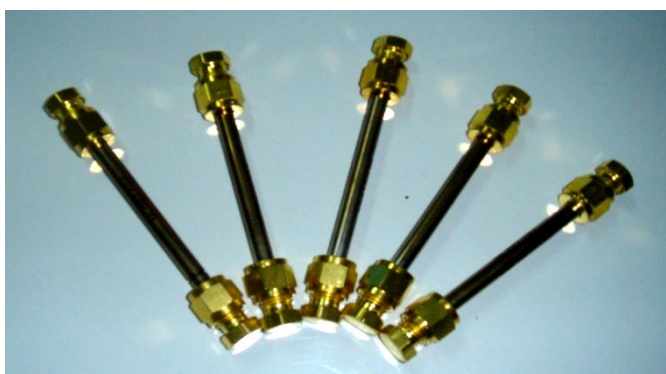


图 3-3 Tenax TA 吸附管

表 3.1 二次热解析-气相色谱/质谱联用仪的参数设置

热解析(TD)	脱附温度：280°C(5min)	低温吹扫：1min
	柱头压：8.5psi	分流比：75:1

冷阱升温程序: -10°C — $40^{\circ}\text{C}/\text{s}$ — 280°C (3min)

气相色谱 (GC) 载气: 氦气 (99.999%) 柱流量: 1mL/min
程序升温: 35°C (10min) — $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ — 280°C

质谱 (MS) 传输线温度: 250°C 离子源: 电子轰击能量(EI) 70eV
离子源温度: 200°C 溶剂延迟时间: 2.5min
扫描模式: SCAN 扫描范围: 35amu-450amu
电子倍增器电压: 1.0Kv NIST05 谱库检索

将样品的总离子流色谱图 (图 3-4) 与 NIST05 标准谱图进行匹配检索 (检索相似度大于 85%), 结合色谱保留时间进行定性。

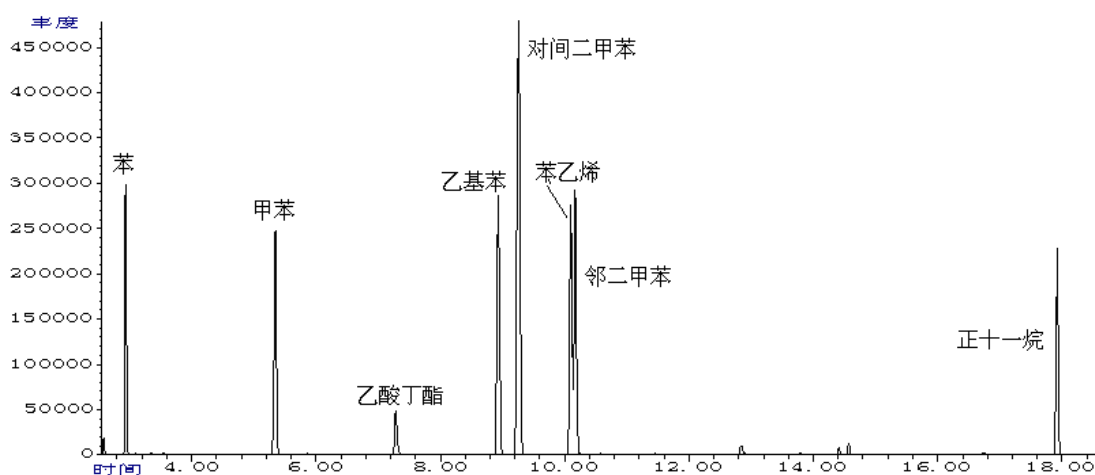


图 3-4 标准物质总离子流图 (TIC)

采用峰面积外标法对挥发性有机物进行定量分析, 购买了 9 种 VOCs 标准

溶液（国家环境保护总局标准样品研究所），即苯、甲苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、乙苯、苯乙烯、乙酸丁酯、正十一烷。用微量进样器分别取标准溶液 1 μ L、2 μ L、4 μ L、10 μ L、20 μ L、40 μ L，采用美国 Marks 公司的标准气体制备装置，在流动载气的载入下将标准物质注入到 Tenax 吸附管内，将配制好的标准系列吸附管通过二次热解吸进行 GC/MS 分析，标准物质总离子流图如图 3-4 所示。以目标化合物的含量为横坐标，以扣除空白响应后的峰面积为纵坐标绘制目标化合物的标准曲线，如表 3.2 所示。根据所绘制的标准曲线，以样品中各组分的峰面积对其含量进行回归，从而实现定量，其他未知组分和总挥发性有机化合物（VOCs）的定量以甲苯的响应系数计算。

表 3.2 目标化合物的标准曲线

物质名称	定量离子	出峰时间	标准曲线	相对标准偏差
苯	78	2.909	$y=131943457x-574654$	0.9948
甲苯	91	5.329	$y=157642243x-665662$	0.9988
乙酸丁酯	43	7.373	$y=76414318x-487531$	0.9971
乙苯	91	8.861	$y=180478776x-550402$	0.9992
对间二甲苯	91	9.170	$y=275762503x-618723$	0.9995
苯乙烯	91	9.992	$y=129898584x-743599$	0.9982
邻二甲苯	91	10.045	$y=143618299x-370780$	0.9993
正十一烷	57	17.378	$y=79113705x-225747$	0.9990

3.2.3 醛酮类化合物实验方法及设备

因为 Tenax TA[®]能够吸附的有机物范围是沸点在 100~400 $^{\circ}$ C 之间的芳烃、非极性组分以及一些挥发性弱（沸点高于 150 $^{\circ}$ C）的有机物，不能吸附己醛以下的低分子的醛酮类有机物，因而本研究中对低分子醛酮类化合物单独进行测量研究，本研究中挥发性有机物定义不包括这类低分子醛酮类有机物。

1. 方法选择

目前，针对醛酮化合物的测定方法有 AHMT 分光光度法、酚试剂分光光度

法、乙酰丙酮分光光度法**错误!未找到引用源。**，这些方法采用含有反应试剂的吸收瓶采样。还有红外分析仪检测法，这是一种根据朗伯-比尔定律和气体对红外线的选择性吸收规律，用红外法检测甲醇燃料汽车非常规排放成分含量的方法**错误!未找到引用源。****错误!未找到引用源。**。此外，还有利用激光光声光谱法**错误!未找到引用源。**，气相色谱法**错误!未找到引用源。**、离子色谱法和高效液相色谱法等方法测定。分光光度法和比色法由于所用仪器简单操作成本低，被广泛应用，但其灵敏度低，操作较烦琐。随着经济和科技的发展，高速、高效、高灵敏度、样品用量少的气相色谱和高效液相色谱技术日趋成熟。高效液相色谱分析灵敏度高且选择性好，为醛酮类物质分析测定的较为理想的方法[55]。

美国环保署发布的 TO-5 和 TO-11A 技术标准**错误!未找到引用源。**，采用 2,4-二硝基苯肼（2,4-DNPH）吸附剂对空气中甲醛等低分子醛酮类有机物的采样分析方法，在美国的车油空气质量提高项**错误!未找到引用源。**（Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program ,AQIRP)中即采用这种方法，这种方法方法具有操作简便快捷、结果稳定等特点，在国际上得到广泛应用**错误!未找到引用源。**，本研究确定采用 2,4-DNPH 吸附管--高效液相色谱法作为标准测定方法。

2. 实验方法及流程

采用恒流量采样泵（美国 SKC 公司，AirChek2000）采样，稀释样气经玻璃纤维滤膜过滤后通过 2，4-DNPH 采样管采集醛酮。采样管流量设为 1200mL/min，采集 1180s。

醛酮类样品的前处理采用固相萃取方法（Solid Phase Extract, SPE），SPE 是一个柱色谱分离过程，分离机理、固定相和溶剂的选择与高效液相色谱法相近。具体操作过程如下：将 2，4-DNPH 采样管置于固相萃取器（美国 Supelco 公司，图 3-5）上，准确倒入 3ml 乙腈（色谱纯，美国 Fisher 公司）进行样品洗脱；将洗脱液收集于小试管中，用 0.45 μ m 微孔滤膜对洗脱液进行过滤；将过滤后的洗脱液倒入 5ml 容量瓶中，用乙腈定容至 5ml 标线处，再用超声波脱气器处理 15min，除去洗脱液中的气泡，最后将样品分置于样品瓶中，贴上标签放于冰箱中保存。前处理后的样品均在 7 天之内进行分析。



图 3-5 固相萃取装置



图 3-6 高效液相色谱仪

依据美国 EPA 发布的标准方法 TO-11A 对醛酮类化合物进行分析。经过前处理后的醛酮类物质通过高效液相色谱仪 HPLC(美国 Agilent 1200LC, 图 3-6) 进行分析处理。高效液相色谱仪包括在线真空脱气机、紫外检测器、柱温箱、四元泵、自动进样器, 色谱柱为 Agilent Eclipse XDB-C18(4.6mm×150mm, 5 μ m)。紫外检测器的辐射源是可发射波长为 190nm 至 600nm 紫外线的氙弧放电灯, 具体的分析条件如表 3.3 所示。

表 3.3 HPLC 分析条件

项目	指标	项目	指标
流速	1.0 ml/min	流动相	60%乙腈 / 40%水

进样体积	25 μ l	梯度	均相等梯度
温度	25 $^{\circ}$ C	检测波长	360nm

根据保留时间进行定性分析，采用外标法定量，标准溶液（美国 Supelco 公司）含有 14 种醛酮类化合物的衍生物，这 14 种醛酮类化合物为甲醛 (formaldehyde, FOR)、乙醛 (acetaldehyde, ACE)、丙烯醛 (acrolein, ACR)、丙酮 (acetone, ATE)、丙醛 (propionaldehyde, PRO)、丁烯醛 (crotonaldehyde, CRO)、2-丁酮 (methyl ethyl ketone, MEK)、甲基丙烯醛 (methacrolein, MET)、丁醛 (butyraldehyde, BUT)、苯甲醛 (benzaldehyde, BEN)、戊醛 (valeraldehyde, VAL)、甲基苯甲醛 (tolualdehyde, TOL)、环己酮 (cyclohexanone, CYC)、己醛 (hexanaldehyde, HEX)。由于丙烯醛和丙酮的保留时间几乎一致，在色谱柱中很难分开，因此一起定量。14 种醛酮类化合物特性见表 3.4，在 XDB-C18 柱上的标准色谱图见图 3-7。

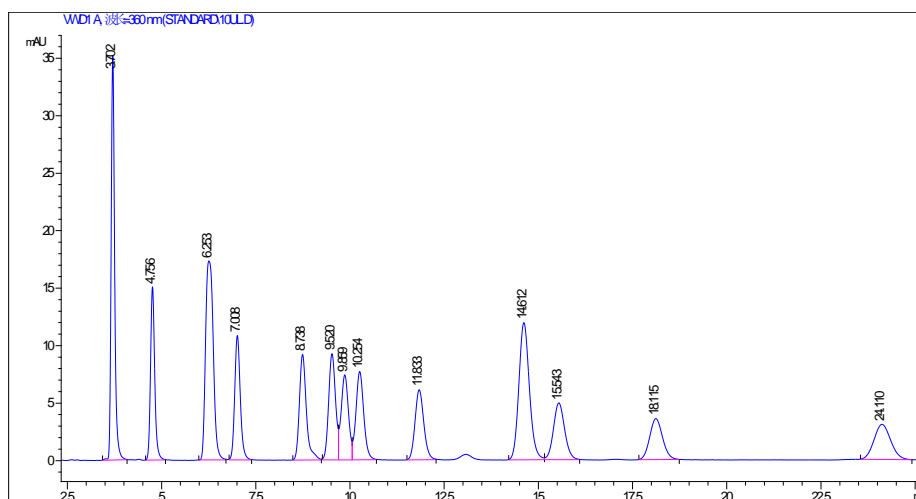


图 3-7 醛酮类衍生物在 XDB-C18 柱上的标准色谱图

表 3.4 14 种醛酮类化合物特性

名称	沸点/°C	出峰时间/min	分子式
甲醛	-21	3.702	HCHO
乙醛	20	4.756	CH ₃ CHO
丙烯醛	52.69	6.253	C ₂ H ₃ CHO
丙酮	56.29	6.253	CH ₃ COCH ₃
丙醛	48	7.008	C ₂ H ₅ CHO
丁烯醛	102.35	8.738	C ₃ H ₅ CHO
2-丁酮	79.57	9.52	CH ₃ COC ₂ H ₅
甲基丙烯醛	68	9.859	CH ₂ C(CH ₃)CHO
丁醛	75.7	10.254	C ₃ H ₇ CHO
苯甲醛	179	11.833	C ₆ H ₅ CHO
戊醛	103	14.612	C ₄ H ₉ CHO
甲基苯甲醛	199~204	15.543	CH ₃ C ₆ H ₄ CHO
环己酮	156.7	18.115	C ₆ H ₁₀ O
己醛	128	24.11	C ₅ H ₁₁ CHO

在高效液相色谱仪中分别设置标准溶液的进样体积为 0.5 μ L、1 μ L、2 μ L、5 μ L、10 μ L、20 μ L，在给定的色谱条件下进行分析，记录峰面积。为了方便计算，根据醛酮腙衍生物的反应方程式，将醛酮腙衍生物的含量换算出对应的醛酮化合物的含量，以醛酮目标组分的含量为横坐标，以扣除空白响应后的峰面积的平均值为纵坐标绘制标准曲线，曲线方程及相关系数如表 3.5 所示。根据所绘制的标准曲线，以样品各组分的峰面积对其含量进行回归，从而实现定量。

表 3.5 醛酮类化合物的标准曲线

化学物质	标准曲线	相关系数	RSD%
------	------	------	------

甲醛	$Y=39.5831554x+0.0945798$	0.9999	0.31%
乙醛	$Y=29.4118202x+0.311986$	0.9999	0.27%
丙烯醛+丙酮	$Y=50.5652502x-0.1692096$	0.9999	0.22%
丙醛	$Y=23.0412714x-0.2702525$	0.9999	0.23%
丁烯醛	$Y=20.9908197x+0.1257449$	0.9999	0.19%
丁酮	$Y=22.2728907x-2.2690313$	0.9991	0.28%
甲基丙烯醛	$Y=16.895953x+1.4477462$	0.9995	0.29%
丁醛	$Y=18.9919747x+0.6199411$	0.9999	0.84%
苯甲醛	$Y=13.3801106x-0.1091313$	0.9999	0.14%
戊醛	$Y=35.8235502x-0.0072466$	0.9999	0.19%
甲基苯甲醛	$Y=12.9693126x-0.2582609$	0.9999	0.31%
环己酮	$Y=4.86750669x-0.0144752$	0.9998	0.26%
正己醛	$Y=13.1505299x-0.0447244$	0.9999	0.16%

3.3 实验一 M15 甲醇汽油车排气污染物排放特性

对五辆汽油/M15 车辆的排气污染物进行测量，按行驶里程将车辆标记为 A、B、C、D 和 E，具体信息如下表 3.6 所示。

表 3.6 试验车辆基本信息

车辆编号	车辆类型	排量 (L)	燃油类型	排放标准	行驶里程 (km)
A 车	小型轿车	1.8	汽油/M15	国 IV	1000
B 车	小型轿车	1.8	汽油/M15	国 IV	10848
C 车	小型轿车	1.6	汽油/M15	国 IV	17635
D 车	小型轿车	1.8	汽油/M15	国 III	20000
E 车	小型轿车	1.8	汽油/M15	国 IV	62253

3.3.1 M15 甲醇汽油车常规污染物排放特性

对 A、B、C、D、E 五辆试验车燃用纯汽油和 M15 甲醇汽油时排气的常规污染物进行了研究，结果如表 3.7 所示。由于燃用替代燃料时车辆的排放情况与车辆的原车性能密切相关，因此以燃用汽油时的排放量为基准，燃用 M15 时的污染物换算为相对排放量，结果如图~图所示。

从表和图~图中可以看出，五辆车燃用 M15 燃料后降低了 CO 和 THC 的排放量，但是增加了 NO_x 的排放量。与燃用汽油相比，M15 燃料车辆排放的 CO 和 THC 分别下降了 9%~25% 和 6%~20%，排放的 NO_x 增加了 23%~133%。

由此可见甲醇燃料车能够有效降低 CO 和 THC 的排放，但是会增加 NO_x 的排放，因此降低甲醇汽油燃料车的 NO_x 排放是甲醇车研究的重点。造成这个排放结果主要是因为甲醇和汽油燃料的物理化学性质不同，因此二者在发动机内的燃烧情况不同。燃油中的碳在燃烧中会直接转化为 CO，碳含量的高低直接影响了发动机的 CO 排放。甲醇的含碳量为 37.5% 低于汽油的含碳量 85.8%，因此甲醇燃料能够降低 CO 的排放。同时，汽油燃料不含氧，而甲醇本身的氧质量分数高达 50%，这样就促进了燃料的燃烧，使得燃烧更充分、更完全，因此降低了 HC 的排放量。但也正是由于甲醇含氧量高，在燃烧过程中比汽油更容易形成“富氧”状态，再加上甲醇燃烧时火焰传播速度较快，燃烧充分且燃烧温度较高，因此促进了 NO_x 的生成。

表 3.7 汽油/M15 燃料常规污染物排放结果

比排放 (g/km)	A 车		B 车		C 车		D 车		E 车	
	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15
CO	0.524	0.446	0.632	0.532	0.609	0.496	0.371	0.279	0.822	0.747
THC	0.072	0.067	0.045	0.043	0.085	0.068	0.056	0.046	0.091	0.083
NO _x	0.025	0.043	0.065	0.09	0.072	0.151	0.115	0.141	0.033	0.077

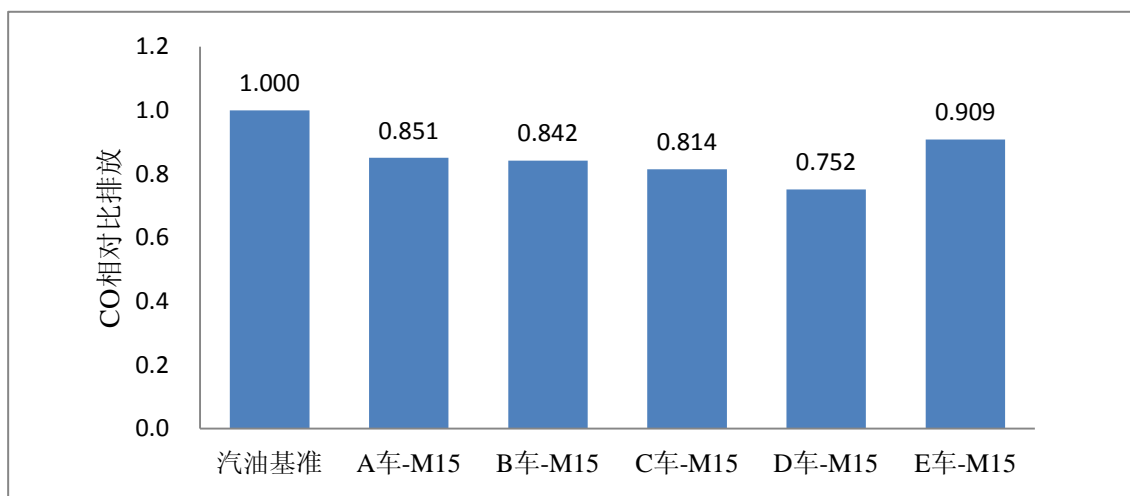


图 3-8 燃用 M15 燃料时 CO 的相对排放结果

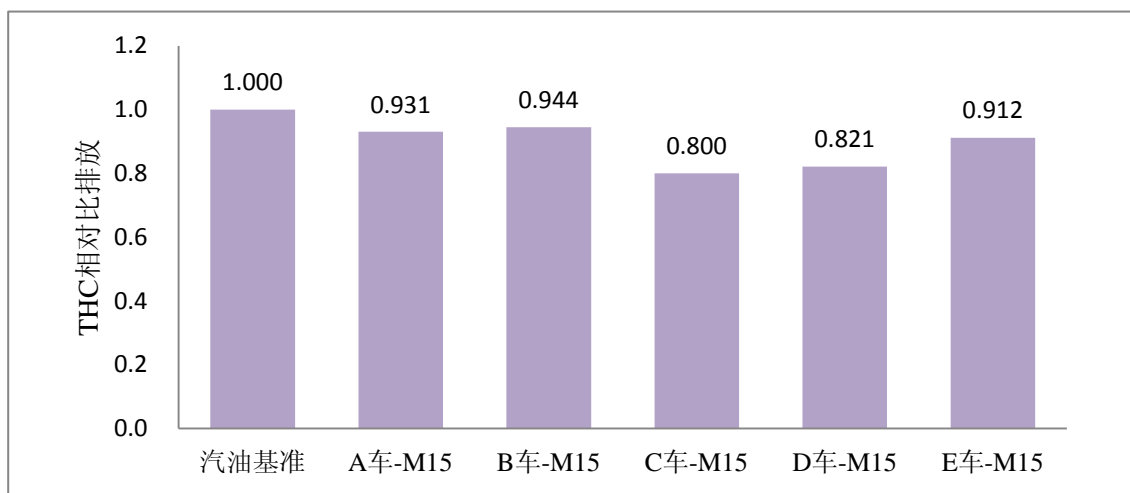


图 3-9 燃用 M15 燃料时 THC 的相对排放结果

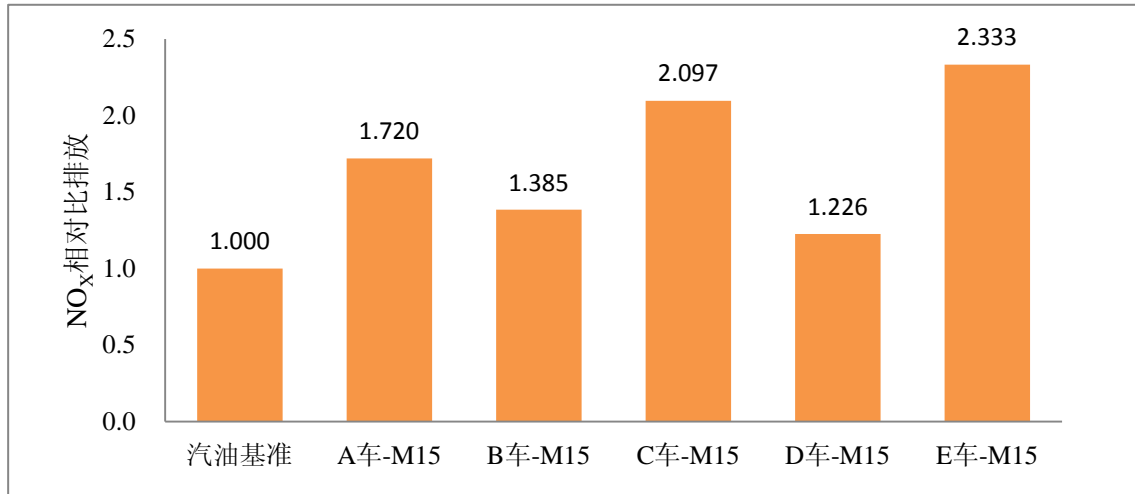


图 3-10 燃用 M15 燃料时 NO_x 的相对排放结果

为了分析常规污染物在各工况下的排放情况，对 A、B 两辆车的常规污染物在各个工况（四个 195 秒的 ECE 工况和一个 400 秒的 EUDC 工况）的排放量占总排放量的比例进行了研究，结果如图~图所示。从图中可以看出，无论是汽油还是 M15 汽油燃料，CO 的排放主要发生在第一个 ECE 循环工况，其次为 EUDC 循环工况。A、B 车的两种燃料在第一个 ECE 循环工况排放的 CO 占 CO 总排放量的百分比分别为 84%（A-汽油）、91%(A-M15)、81%（B-汽油）和 78%(B-M15)。与 CO 的排放类似，车辆的 THC 排放也主要发生在第一个 ECE 循环工况，其次为 EUDC 循环工况。A、B 车的两种燃料在第一个 ECE 循环工况排放的 THC 占 THC 总排放量的百分比分别为 63%（A-汽油）、54%(A-M15)、57%（B-汽油）和 38%(B-M15)。造成这个结果的主要原因是：为了使车辆冷启动成功启动，此时喷入气缸的燃油量较多，但由于此时发动机温度较低，燃料燃烧不充分从而导致了排放恶化，同时三元催化器也由于温度较低而处于预热状态，对污染物的催化效果不明显；在 EUDC 循环工况时，由于温度较高燃料可以充分燃烧，并且催化器已经经过了充分的预热，能够有效的降低污染物的排放，因此此阶段的 CO 和 THC 排放量较少。不同于 CO 和 THC 的排放规律，NO_x 的排放主要发生在 EUDC 循环工况，A、B 车的两种燃料在 EUDC 循环工况排放的 NO_x 占 NO_x 总排放量的百分比分别为：40%（A-汽油）、30%(A-M15)、51%（B-汽油）和 54%(B-M15)。NO_x 的生成条件为“高温”并且“富氧”，车

辆在冷启动的第一个 ECE 循环工况时温度较低，没有达到生成 NO_x 的温度条件；而在 EUDC 的高速工况阶段，为了达到此工况的动力性，喷入气缸的燃油量不断增加，此时车辆一直处于高速运转状态，温度较高，为 NO_x 的生成准备了良好的“高温富氧”环境。

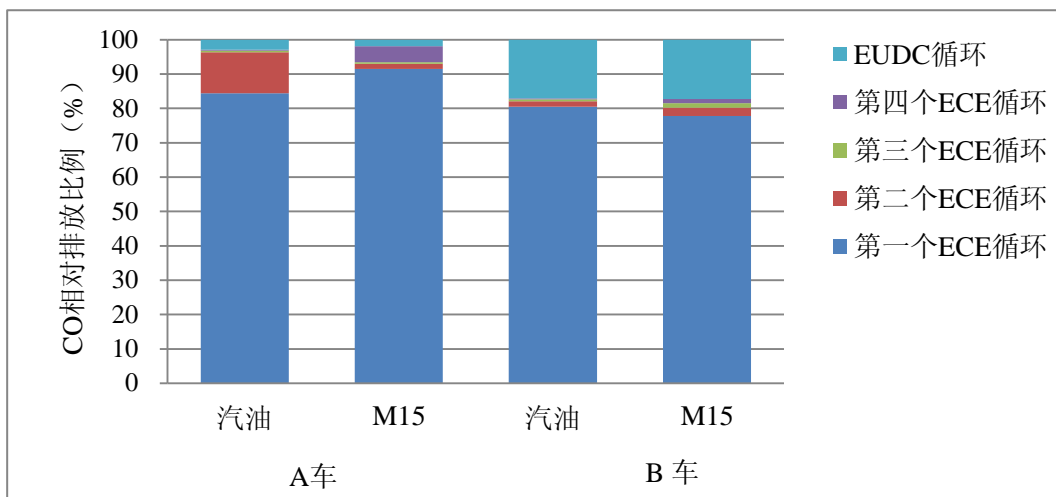


图 3-11 CO 各工况相对排放比例 (%)

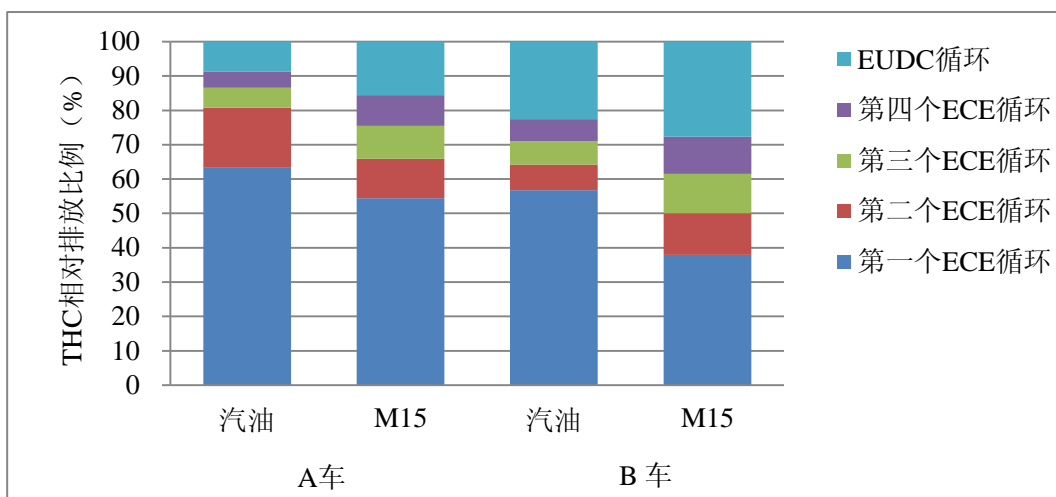


图 3-12 THC 各工况相对排放比例 (%)

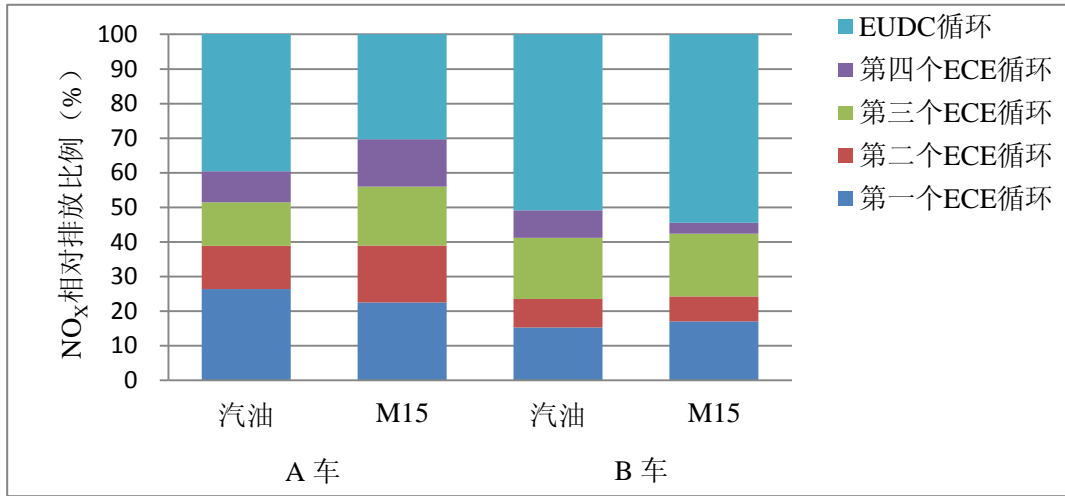


图 3-13 NO_x 各工况相对排放比例 (%)

3.3.2 M15 甲醇汽油车醛酮化合物排放特性

A~E 五辆车燃用汽油和 M15 燃料时排气中醛酮化合物的排放结果如表所示。在对五辆车的测试中，丁烯醛、丁醛、甲基苯甲醛和己醛都没有检测到，因此以十种醛酮化合物进行分析。

表 3.8 汽油/M15 燃料的醛酮化合物排放结果

比排放量 mg/km	A 车		B 车		C 车		D 车		E 车	
	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15
甲醛	1.496	1.878	0.994	1.459	1.069	1.728	1.156	2.195	0.632	1.111
乙醛	0.386	0.317	0.014	0.211	0.568	0.991	0.442	0.476	0.308	0.249
丙烯醛+丙酮	0.241	0.263	0.607	0.687	0.163	0.277	0.378	0.373	0.207	0.090
丙醛	0.076	0.077	0.092	0.129	0.134	0.165	0.196	0.191	0.047	0.024
丁酮	0.216	--	--	--	0.261	0.531	--	--	0.144	0.187
甲基丙烯醛	--	0.159	0.300	0.434	--	--	0.368	0.376	--	--
苯甲醛	0.133	0.138	0.145	0.169	--	--	--	--	0.074	0.082
戊醛	0.015	0.025	--	--	--	--	--	--	--	--

环己酮	--	--	--	0.301	--	--	--	--	0.303	--
总量	2.564	2.965	2.152	3.389	2.194	3.691	2.541	3.612	1.716	1.775

从表可以看出，A~E 五辆车燃用汽油和 M15 燃料时排放的甲醛是主要的醛酮化合物，占醛酮化合物总排放的 37%~64%。与燃用汽油相比，燃用 M15 时甲醛的排放量明显增加，而其他种类醛酮化合物的排放量则有增有降。以汽油的醛酮化合物排放量为基准，A~E 车燃用 M15 时排放的甲醛以及醛酮化合物总量的相对排放结果如图和图所示。从图中可以明显得看到，与汽油相比，车辆燃用 M15 时排放的醛酮化合物总量增加了 2%~62%，其中甲醛增加了 26%~90%。

造成这个结果的主要原因与甲醛的生成机理有关系，甲醛是碳氢化合物氧化过程中的一个重要的中间产物，发动机的甲醛排放来自于碳氢氧化生成的甲醛和甲醛自身的氧化消耗。虽然甲醇含氧量高、含碳量低能够更好的完全燃烧，但是 M15 燃料中含有甲醇使得甲醇汽油混合燃料更容易脱氢生成甲醛。

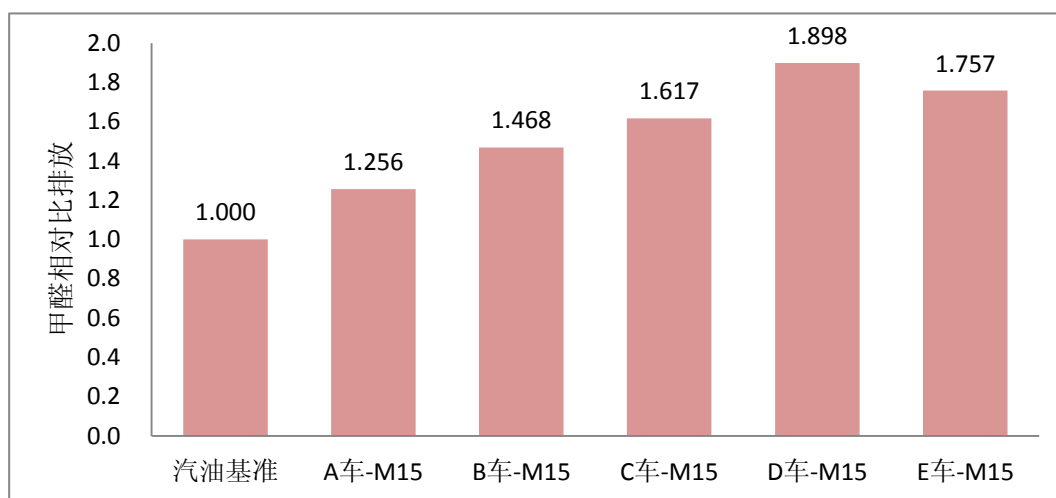


图 3-14 燃用 M15 燃料时甲醛的相对排放结果

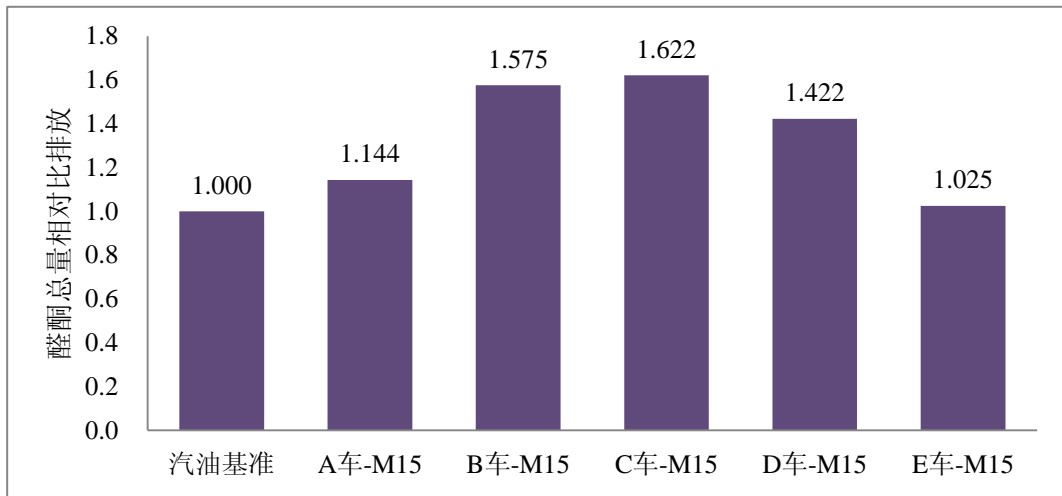


图 3-15 燃用 M15 燃料时醛酮化合物总量的相对排放结果

3.3.3 M15 甲醇汽油车挥发性有机物排放特性

对 A~E 五辆车燃用汽油和 M15 燃料时排气中的挥发性有机物进行检测分析，其中对九种目标 VOCs 进行定性定量分析，结果如表所示。

从表中数据可以看出，车辆燃用汽油和 M15 燃料时排放的苯、甲苯、乙苯和二甲苯（邻、间、对二甲苯）（总称 BTEX）是主要的 VOCs 排放物，占总目标 VOCs 的 85%~97%。与汽油相比，燃用 M15 燃料时排放的九种目标 VOCs 整体呈下降趋势。以车辆燃用汽油时 VOCs 的排放量为基准，燃用 M15 燃料时的 BTEX 物质以及总目标 VOCs 的相对排放量如图和图所示。从图中可以看到，与汽油相比，A~E 五辆车燃用 M15 后的 BTEX 物质以及目标 VOCs 的排放量有不同程度的降低，VOCs 总量下降了 24%~71%，其中 BTEX 物质下降了 23%~74%。

试验中测得的目标 VOCs 均是分子量较小的苯系物，造成上述结果的主要原因是燃油本身的组分含量，甲醇不含有直链烃类，燃料组分比较单一；而对于汽油而言本身包含了 C₄~C₁₂ 的烃类化合物，其不饱和烃类含量较高容易进行成核、缩聚等反应因而促进了 VOCs 的形成。

表 3.9 汽油/M15 燃料的挥发性有机物排放结果

比排放量 mg/km	A 车		B 车		C 车		D 车		E 车	
	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15
苯	0.497	0.434	0.802	0.580	0.412	0.294	0.318	0.062	0.363	0.306
甲苯	1.559	1.231	0.707	0.225	0.948	0.655	0.247	0.335	0.910	0.792
乙酸正丁酯	0.021	0.018	0.015	0.003	0.019	0.014	0.016	0.020	0.021	0.021
乙苯	0.335	0.217	1.014	0.058	0.172	0.122	1.258	0.262	0.310	0.164
对间二甲苯	0.481	0.342	0.599	0.030	0.27	0.184	1.029	0.227	0.420	0.260
苯乙烯	0.089	0.037	0.038	0.035	0.049	0.023	0.071	0.106	0.052	0.031
邻二甲苯	0.380	0.274	0.383	0.017	0.217	0.150	0.735	0.183	0.277	0.192
正十一烷	0.028	0.015	0.029	0.066	0.017	0.011	0.039	0.069	0.025	0.014
总量	3.390	2.568	3.587	1.014	2.104	1.453	3.713	1.264	2.376	1.780

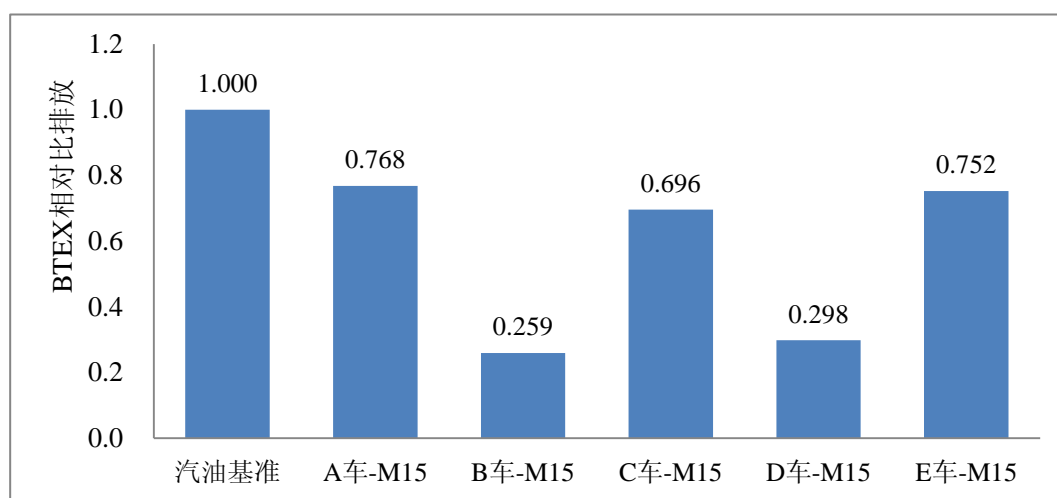


图 3-16 燃用 M15 燃料时 BTEX 物质的相对排放结果

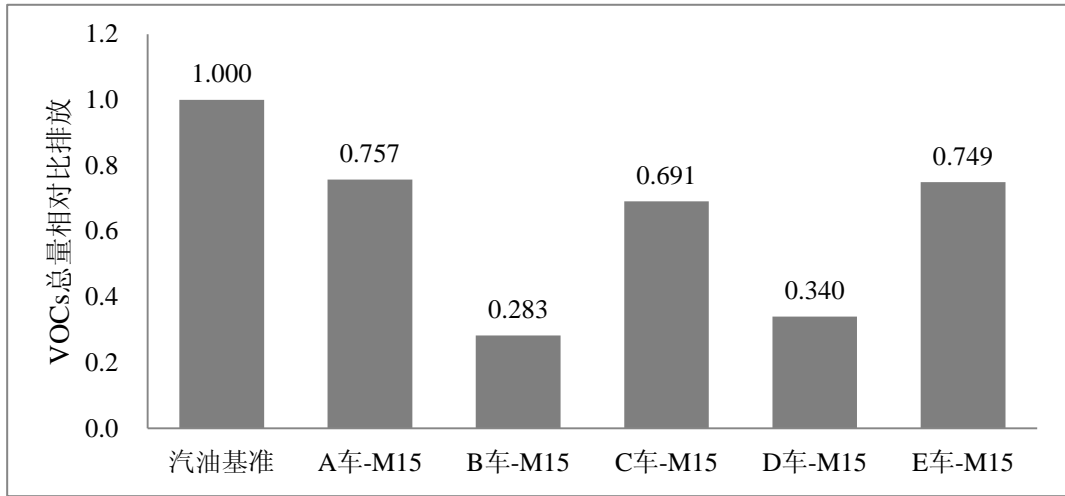


图 3-17 燃用 M15 燃料时 VOCs 总量的相对排放结果

3.4 实验二 M100 纯甲醇车排气污染物排放特性

对五辆汽油/M100 车辆的排气污染物进行研究，按行驶里程分别标记为 V1、V2、V3、V4 和 V5，车辆具体信息如下表 3.10 所示。

表 3.10 实验二车辆基本信息

车辆编号	车辆类型	排量 (L)	燃油类型	排放标准	行驶里程 (km)
V1	小型轿车	1.8	汽油/M100	国 III	2215
V2	小型轿车	1.5	汽油/M100	国 IV	3012
V3	小型轿车	1.6	汽油/M100	国 IV	20300
V4	小型轿车	1.8	汽油/M100	国 IV	22751
V5	小型轿车	1.8	汽油/M100	国 III	30970

3.4.1 M100 纯甲醇车常规污染物排放特性

对 V1、V2、V3、V4、V5 五辆车燃用纯汽油和 M100 纯甲醇燃料时的常规

污染物进行了研究，常规污染物的排放结果如表所示。

表 3.11 汽油/M100 燃料的常规污染物排放结果

比排放 (g/km)	V1		V2		V3		V4		V5	
	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100
CO	1.270	1.151	0.874	0.382	0.956	0.279	0.942	0.686	0.998	0.786
THC	0.068	0.53	0.038	0.035	0.0376	0.036	0.097	0.075	0.121	0.099
NO _x	0.024	0.061	0.063	0.132	0.014	0.020	0.056	0.166	0.036	0.120

从表可以看出，车辆燃用 M100 纯甲醇后排放的 CO 和 THC 有不同程度的降低，排放的 NO_x 有不同程度的增加。以燃用汽油时排放的常规污染物为基准，五辆车燃用 M100 纯甲醇时常规污染物的相对排放量如图~图所示。从图中可以明显看出，燃用 M100 纯甲醇后 CO 和 THC 的排放量分别降低了 9%~71%和 4%~23%，NO_x 的排放量增加了 43%~233%。这主要是因为甲醇与汽油燃料的理化性质不同导致二者的燃烧过程与燃烧产物不同。如何降低 NO_x 排放依然是甲醇燃料的重点研究课题。

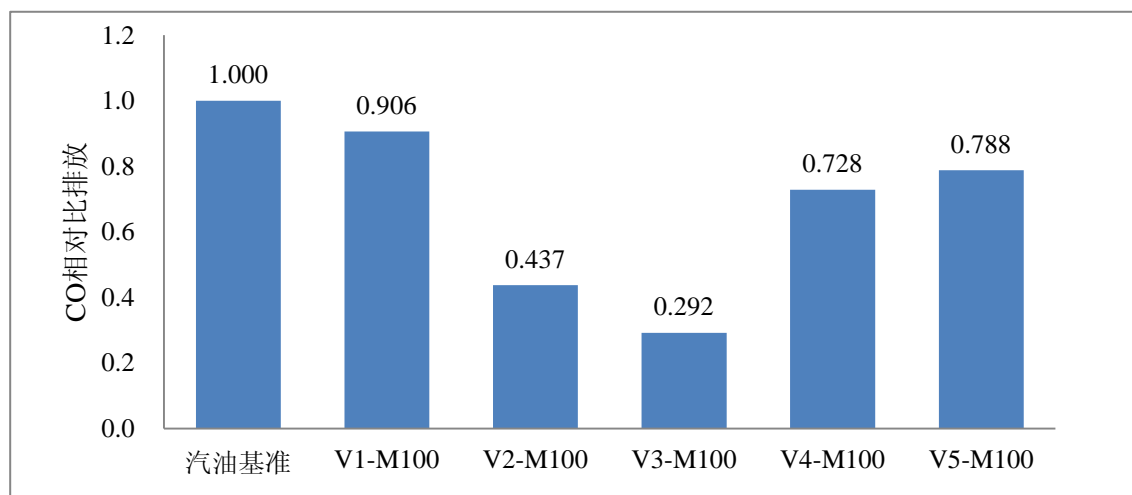


图 3-18 燃用 M100 燃料时 CO 的相对排放结果

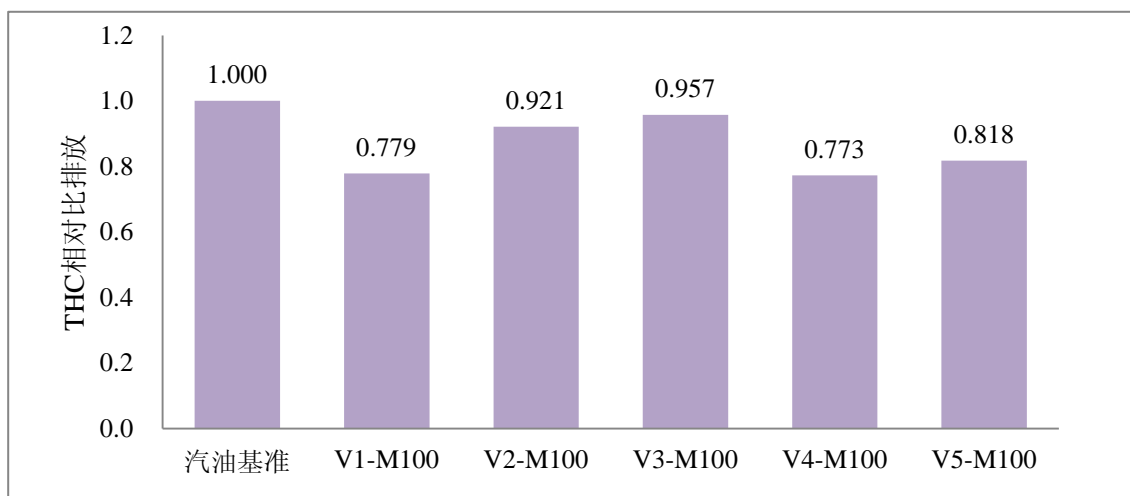


图 3-19 燃用 M100 燃料时 THC 的相对排放结果

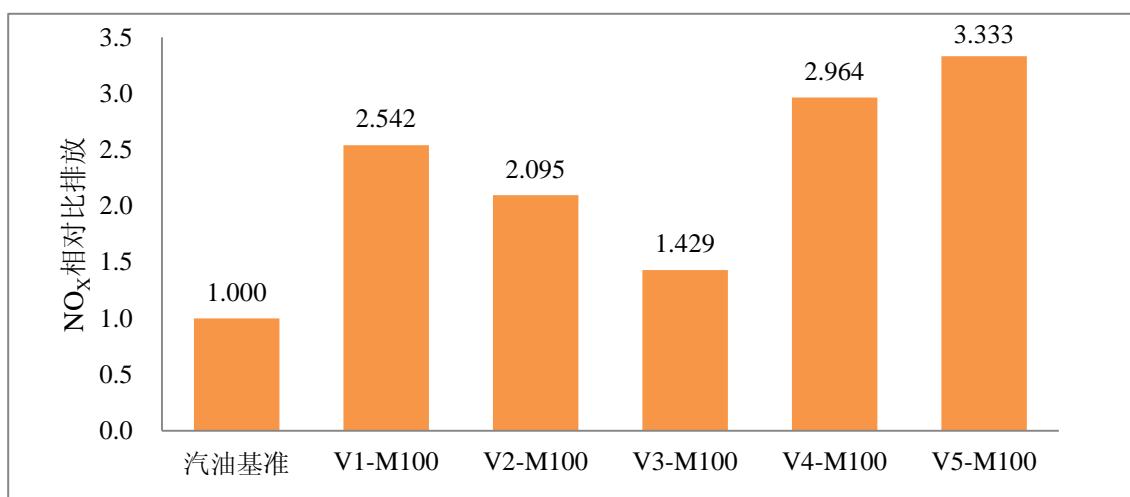


图 3-20 燃用 M100 燃料时 NO_x 的相对排放结果

为了研究纯甲醇车辆的常规污染物在各工况的排放情况，对 V1 和 V5 两车的常规污染物在各个工况的排放量占总排放量的比例进行了研究，结果如图~图所示。

从图中可以看出，无论是汽油还是纯甲醇燃料，CO 的排放主要发生在第一个 ECE 循环工况，V1、V5 车的两种燃料在第一个 ECE 循环工况排放的 CO 占 CO 总排放量的百分比分别为 70% (V1-汽油)、85% (V1-M100)、73% (V5-汽油) 和 91% (V5-M100)。与 CO 的排放类似，车辆的 THC 排放主要发生在第

一个 ECE 循环工况，其次为 EUDC 循环工况。V1、V5 车的两种燃料在第一个 ECE 循环工况排放的 THC 占 THC 总排放量的百分比分别为 53% (V1-汽油)、58%(V1-M100)、57% (V5-汽油) 和 40%(V5-M100)。这主要是因为车辆冷启动是发动机温度较低，混合气较浓，燃料燃烧不充分同时三元催化器处于预热状态不能有效净化排气而 EUDC 循环工况时，发动机温度较高燃油燃烧充分同时催化器能够有效净化排气。不同于 CO 和 THC 的排放规律，NO_x 的排放主要发生在 EUDC 循环工况，V1、V5 车的两种燃料在 EUDC 循环工况排放的 NO_x 占 NO_x 总排放量的百分比分别为：55% (V1-汽油)、57%(V1-M100)、50% (V5-汽油) 和 54%(V5-M100)。这一结果主要与高负荷时发动机的高温富氧状态有关。

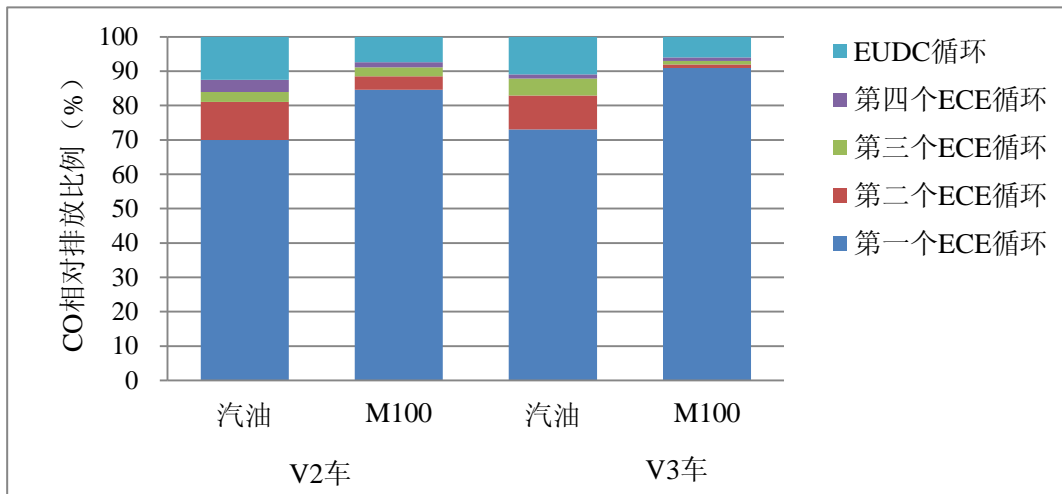


图 3-21 汽油/M100 车辆的 CO 各工况相对排放比例 (%)

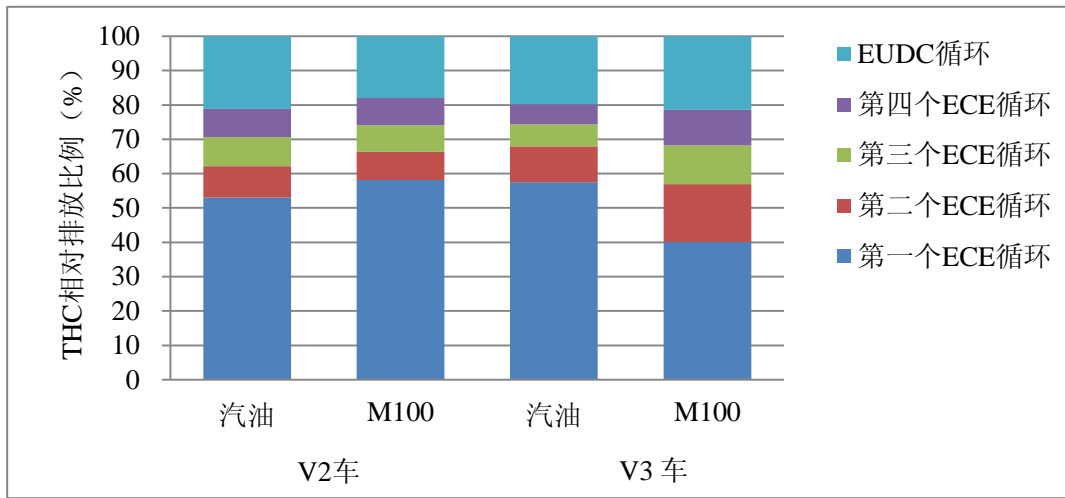


图 3-22 汽油/M100 车辆的 THC 各工况相对排放比例 (%)

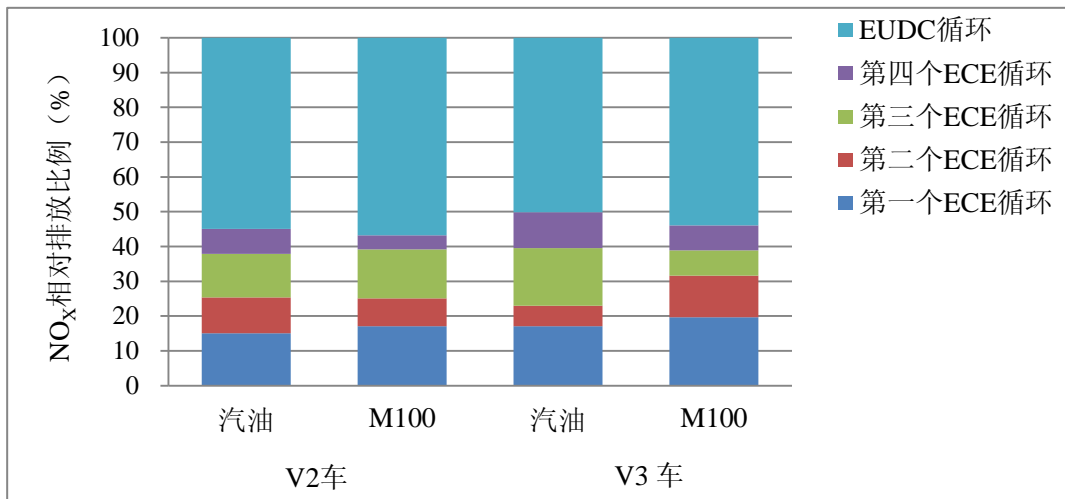


图 3-23 汽油/M100 车辆的 NO_x 各工况相对排放比例 (%)

3.4.2 M100 纯甲醇车醛酮化合物排放特性

对 V1~V5 车燃用汽油和 M100 纯甲醇燃料时排放的醛酮化合物进行检测研究，具体结果如表所示。对五辆车的醛酮化合物分析过程中均没有检测到甲基苯甲醛、环己酮和己醛，因此以十一种醛酮化合物进行研究分析。

从表中数据可以看出，五辆车燃用汽油和 M100 纯汽油时排放的甲醛是主

要的醛酮化合物排放物，占醛酮化合物排放总量的 36%~94%。与燃油汽油相比，燃油 M100 后排放的甲醛呈增加趋势，其他醛酮化合物的排放量有增有减。

表 3.12 汽油/M100 燃料的醛酮化合物排放结果

比排放量 mg/km	V1		V2		V3		V4		V5	
	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100
甲醛	0.974	1.688	0.667	1.251	0.483	1.009	1.784	5.348	1.278	4.824
乙醛	0.348	0.849	0.323	0.769	0.080	0.813	0.761	0.269	0.526	0.107
丙烯醛+丙酮	0.106	0.440	0.123	0.343	0.336	0.219	0.474	0.181	0.236	0.054
丙醛	0.089	0.142	0.133	0.175	0.104	0.194	0.141	0.076	0.068	0.010
丁烯醛	--	--	--	--	--	--	0.052	--	0.052	--
丁酮	--	--	--	--	--	--	0.123	0.068	0.123	--
甲基丙烯醛	0.156	0.291	0.152	0.735	0.076	0.373	0.039	--	--	0.087
丁醛	--	--	--	--	0.063	0.146	--	0.020	--	--
苯甲醛	--	--	--	--	--	--	0.258	0.121	0.227	0.045
戊醛	--	--	--	0.113	0.058	0.081	--	--	--	--
总量	1.673	3.409	1.399	3.386	1.200	2.836	3.631	6.084	2.510	5.127

以燃油汽油时车辆排放的醛酮化合物为基准，燃油 M100 纯甲醇时排放的甲醛以及醛酮化合物相对排放量如图和图所示。从图中可以明显看出，与汽油相比，燃油 M100 纯甲醇后甲醛排放量增加了 73%~277%，醛酮化合物总排放量增加了 68%~142%。可见，M100 燃料车的醛酮化合物排放情况比较恶劣，加强研究降低纯甲醇燃料车甲醛排放的措施非常必要。

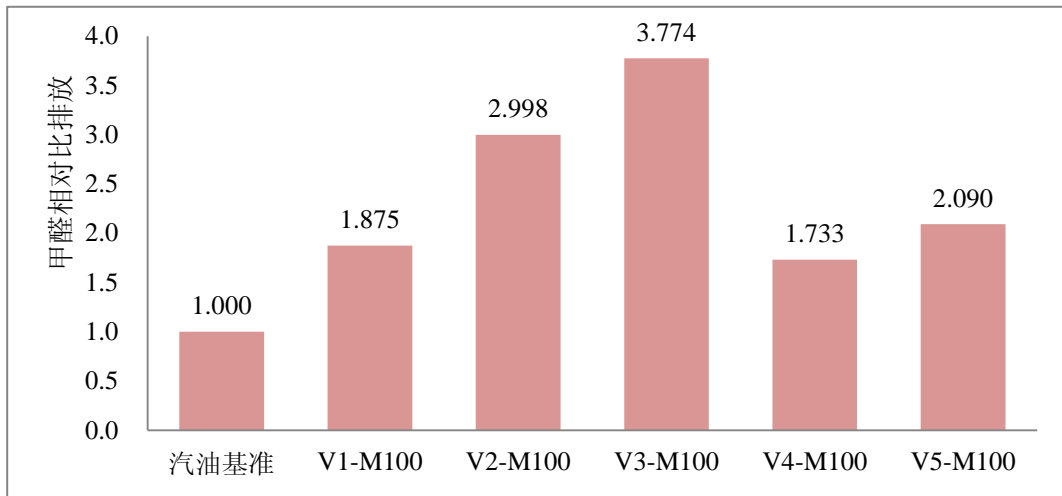


图 3-24 燃用 M100 燃料时甲醛的相对排放结果

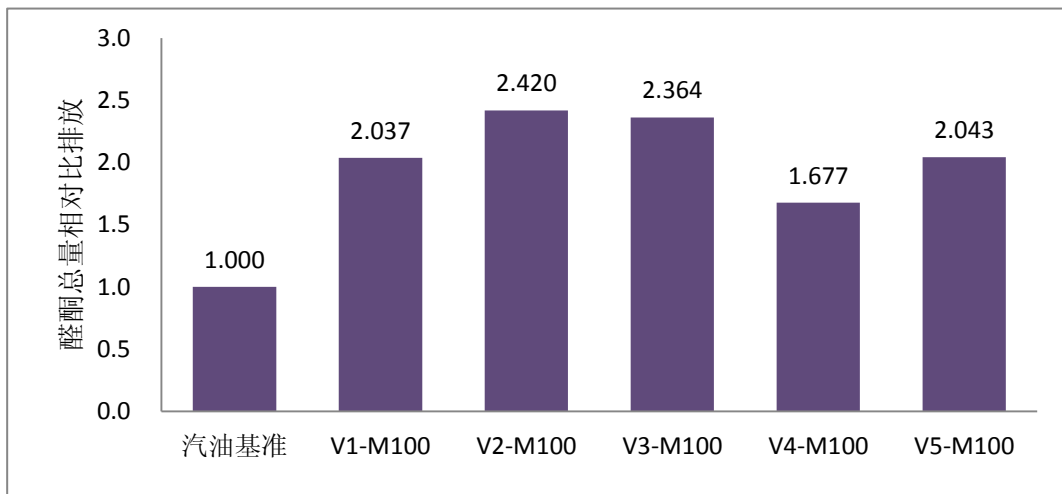


图 3-25 燃用 M100 燃料时醛酮化合物总量的相对排放结果

根据加州空气资源委员会 CARB 的规定, 车辆甲醛的排放限值为 15mg/mile, 即 9.322mg/km。虽然上述甲醇燃料排放的甲醛低于此限值, 但是甲醛对人体的毒性一定程度上阻碍了甲醇燃料的推广, 因此必须要针对醛酮化合物开发研究针对性的专用催化器。

图是 V2 车在是否安装催化器时醛酮化合物的排放结果。从图中可以看出, M100 纯甲醇车不安装任何催化器时甲醛排放量比安装催化器时增加了近 40 倍, 因此, 催化器特别是甲醇燃料车的专用催化器的研究对降低甲醇燃料车的

醛酮化合物排放有重要意义。

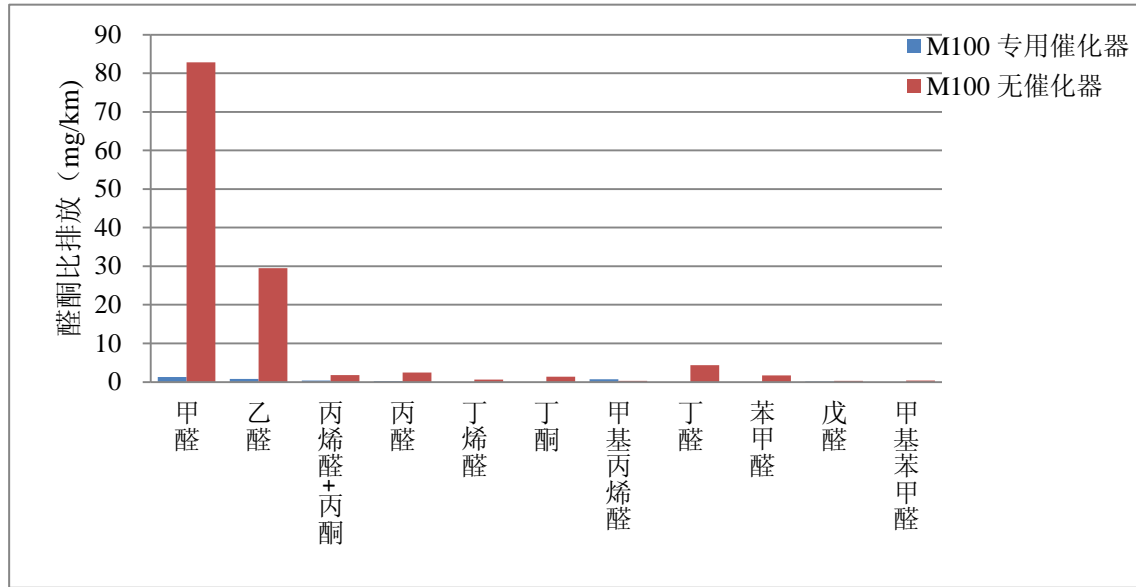


图 3-26 M100 燃料车是否安装催化器的醛酮化合物排放结果

图是 V2 车燃用 M100 燃料时在不同催化剂催化处理下的醛酮化合物的排放结果。结果表明，与原车催化剂相比，使用专用催化剂后，车辆排放的醛酮化合物总量下降了 38%，所有检测到的醛酮化合物均有一定程度的下降，其中甲醛降低了 40%，乙醛下降了 37%。可见，如果甲醇车要实现大范围推广使用，必须对其配备专用催化剂。同时，优化甲醇的燃烧过程、加强冷启动标定技术以及合理安排专用催化剂在排气管系中的位置对降低甲醛排放也很重要，需要进一步研究。

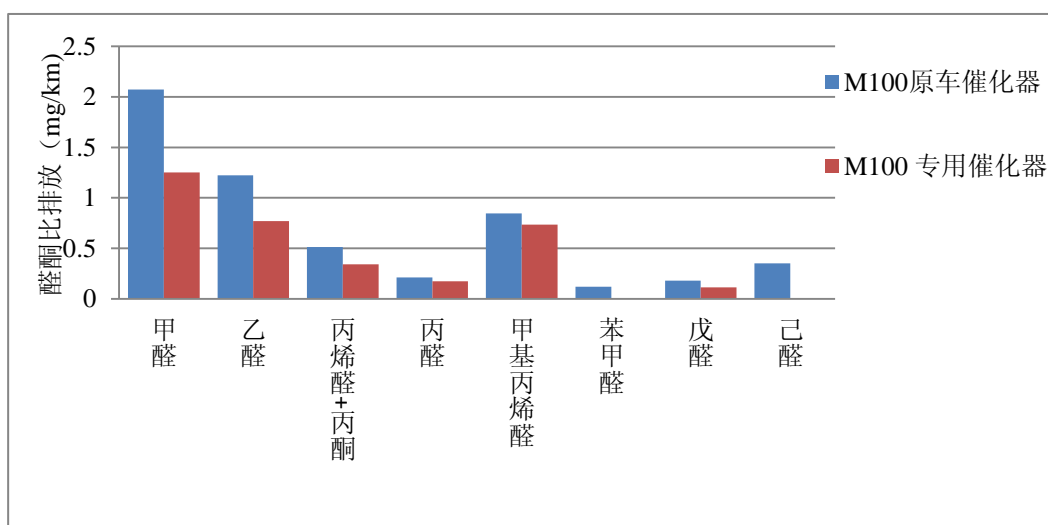


图 3-27 M100 车辆安装原车催化器和专用催化器时醛酮化合物的排放结果

3.4.3 M100 纯甲醇车挥发性有机物排放特性

对 V1~V5 五辆车燃用汽油和 M100 纯甲醇时排放的挥发性有机物进行了研究，结果如表所示。从表中数据可以看出，五辆车无论燃用汽油或者 M100 燃料，排放的 BTEX 物质是主要的 VOCs 排放物，占车辆 VOCs 排放总量的 95%~99%。与汽油相比，燃用 M100 纯甲醇后排放的 VOCs 明显减少，这主要是因为汽油燃料本身含有苯等多碳分子，容易生成 VOCs，而纯甲醇燃料不含多碳烷烃，不容易形成苯环。

表 3.13 汽油/M100 燃料的挥发性有机物排放结果

比排放量 mg/km	V1		V2		V3		V4		V5	
	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100	汽油	M100
苯	1.211	0.664	0.327	0.104	7.788	0.869	0.848	0.203	0.832	0.300
甲苯	11.162	7.239	0.422	0.301	40.708	40.737	1.875	0.588	2.097	1.188
乙酸正丁酯	--	--	0.002	--	0.005	--	0.021	0.015	0.014	--
乙苯	8.233	4.278	0.060	0.057	22.280	0.803	0.402	0.110	0.399	0.279
对间二甲苯	4.875	2.532	0.103	0.075	13.191	0.476	0.577	0.161	0.621	0.490
苯乙烯	0.481	0.033	0.011	0.001	0.211	0.071	0.116	0.020	0.082	0.058

邻二甲苯	2.408	1.172	0.076	0.058	7.834	0.401	0.439	0.130	0.488	0.152
正十一烷	0.044	0.025	0.003	0.001	0.194	0.082	0.037	0.009	0.003	0.001
总量	28.413	15.942	1.003	0.598	92.210	43.440	4.313	1.235	4.537	2.469

为了更清楚的分析 M100 燃料对 VOCs 排放量的影响，以车辆燃用汽油时 BTEX 物质以及 VOCs 总量为基准，燃用 M100 纯甲醇时 BTEX 和 VOCs 的相对排放量如图和图所示。从图中可以明显看出，燃用 M100 纯甲醇时排放的 BTEX 物质和 VOCs 总量均降低了 40%~71%

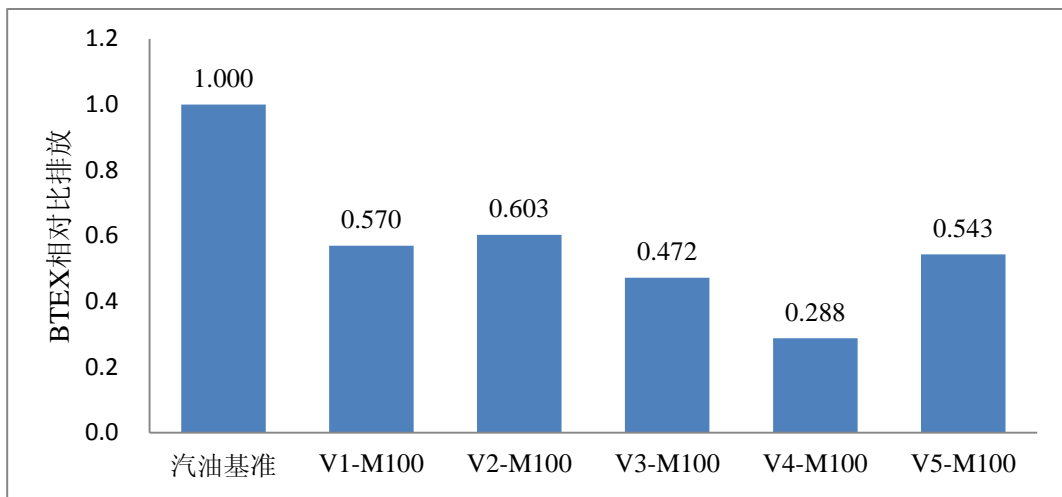


图 3-28 燃用 M100 燃料时的 BTEX 物质相对排放结果

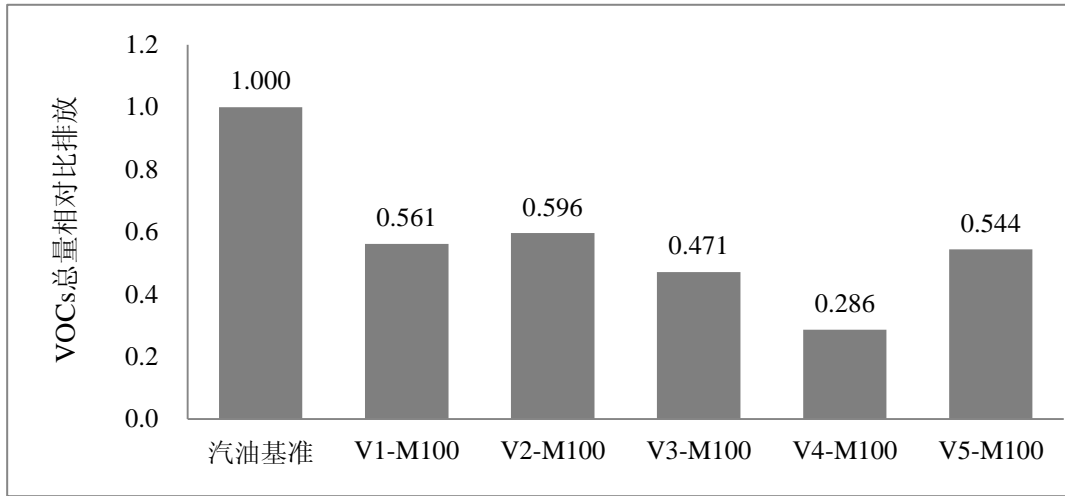


图 3-29 燃用 M100 燃料时的 VOCs 总量相对排放结果

3.5 实验三 甲醇汽油燃料车燃油蒸发污染物排放特性

本章按照国标的规定，在密闭室内测试车辆燃用汽油和 M15 时蒸发排放的碳氢化合物和非常规污染物。在密闭室内将车辆的门窗全部关闭以消除车辆内饰挥发物质的影响。

3.5.1 甲醇汽油车总碳氢化合物燃油蒸发排放特性

表列出了车辆燃油蒸发总排放量，由于汽油中含有苯类物质以及少量的醛酮类物质，因此对燃油蒸发排放也测量了这两类物质。从表中可以看出，与燃用汽油相比，车辆燃用 M15 燃料置于密闭室内时产生的蒸发排放量明显增加，总碳氢化合物增长了 63%，其中非常规污染物中的醛酮化合物和挥发性有机物分别增长了 17%和 23%。特别需要指出，增长最明显的污染物是甲醇，汽车燃用 M15 燃料时甲醇的蒸发排放量是燃用汽油时的将近 138 倍，同时，甲醇也是 M15 燃料燃油蒸发排放的主要物质，占 HC 总蒸发量的 40%。这主要是因为与汽油相比，M15 甲醇燃料中本身含有较多的容易挥发的甲醇。

表 3.14 汽油/M15 车辆 THC 燃油蒸发排放结果

蒸发排放量 (g/test)	热浸损失		昼间损失		燃油蒸发排放总量	
	汽油	M15	汽油	M15	汽油	M15
醛酮化合物	0.002	0.002	0.004	0.005	0.006	0.007
挥发性有机物	0.030	0.036	0.357	0.440	0.387	0.476
甲醇	0.004	0.070	0.004	1.045	0.008	1.115
HC	0.130	0.169	1.596	2.650	1.726	2.819

燃油蒸发排放与燃料的挥发性有密不可分的关系，雷德饱和蒸气压可以量化的表述这一性质。雷德饱和蒸气压是指试样在 37.8℃ 下用雷德式饱和蒸气压测定器所测出的蒸气压最大压力。有研究表明，汽油燃料的蒸气压将随燃料组分中氧含量的增加而增加。对于汽油燃料本身不含氧，但是纯甲醇燃料的含氧量为 50%（质量分数），将甲醇以一定比例与汽油掺混后，必然会增加混合燃料的蒸气压。一般情况下，纯甲醇的饱和蒸气压为 32kPa，远低于汽油的蒸气压 53.7kPa，二者以一定比例混合以后，研究证明蒸气压并没有按线性关系变化。如图所示，是不同配比的甲醇汽油在标准规定的情况下测定的各自的饱和蒸气压值。

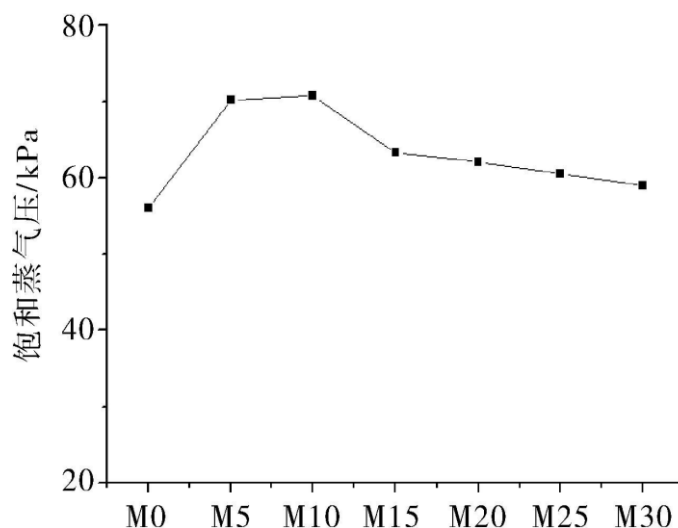


图 3-30 不同配比甲醇汽油的饱和蒸气压

从图中可以看出,甲醇汽油混合燃料的饱和蒸气压随着甲醇含量的增加先增大后减小。在 10%体积的甲醇加入汽油后,混合燃料的饱和蒸气压达到最大值,当甲醇含量继续增加时,混合燃料的饱和蒸气压会稍微下降,但是仍然高于纯汽油的饱和蒸气压。这主要是因为汽油以正构烷烃为主,为非极性的混合物;甲醇则是脂肪族含氧化合物,是极性的;当甲醇为纯物质时,甲醇因为本身有氢键,会产生强烈的自缔合作用。由于它们性质差别很大,当混合形成溶液时,两者的物理化学性质发生很大变化:汽油分子间引力减弱,甲醇缔合的分子将离解,从而使溶液中各组分分子之间的吸引比各自本身小得多。低含量甲醇汽油混合燃料中,甲醇分子间形成的氢键被完全破坏,因而溶液中甲醇的挥发能力将比纯甲醇大的多,即二者混合后形成了饱和蒸气压较大的共沸物。

通过 SGS 公司的测定,本次试验的 M15 甲醇汽油混合燃料的饱和蒸气压是 69.5kPa,明显高于汽油燃料的饱和蒸气压 57.0kPa。

虽然低比例甲醇汽油混合燃料的 I 型排放量都较汽油燃料有所降低,但是较高的饱和蒸气压带来的燃油蒸发排量却不容忽视。检测监控替代燃料车辆的燃油蒸发污染物的排放量并对其立法设定限值是非常必要的。

从表中还可以发现,对两种燃料而言,蒸发污染物的昼间损失明显高于热浸损失,成为燃油蒸发总排放的主要贡献者。另外,两种燃料的热浸蒸发排放量相差不多,但 M15 的昼间排放量比汽油燃料高了 63%。这主要是因为,热浸损失主要和车辆的化油器有关,对于化油器式车辆而言,热浸试验前浮子室中的燃油可以达到 70℃左右。这部分燃油随着时间的推移会蒸馏出来而成为排放污染物,馏出体积百分比越大,则排放污染物越多。对于燃油喷射式车辆而言,由于不存在浮子室,因此热浸损失值都比较低。另一方面,温度和时间变化也是影响热浸和昼间损失的重要因素。图是昼间损失期间即 24 小时内密闭室温度从 20℃升高到 35℃再降为 20℃时车辆燃用汽油时的 THC 蒸发量随时间和温度的变化。可以看出,在整个的 24 小时内随时间的推移,THC 蒸发量逐渐增加,这带来的不仅仅是污染环境,还在不知不觉中浪费了大量的能源,长期下来经济损失严重。因此,降低车辆尤其是替代燃料车辆的燃油蒸发排放量势在必行,可行的方法一般有以下几个:燃油内加入适当的燃油添加剂降低

燃油的饱和蒸气压，利用先进技术重新设计吸附脱附碳罐，将碳罐容量加大并优化选择合适的吸附阀和脱附阀的材料和压力等。

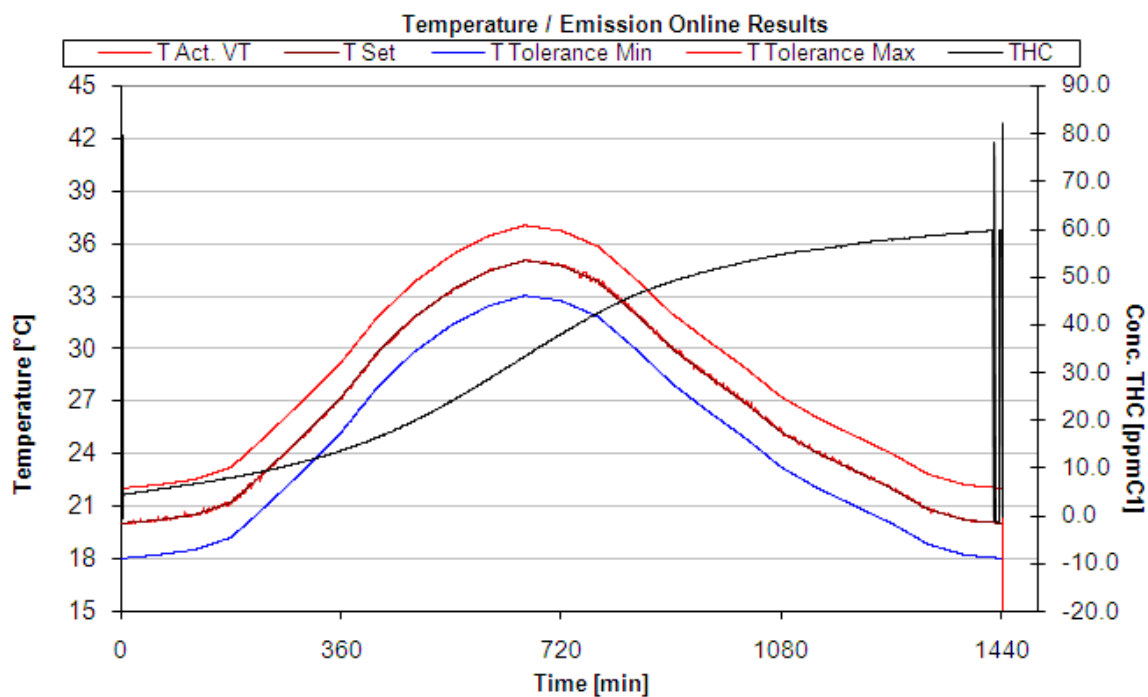


图 3-31 车辆昼间试验期间 THC 的排放趋势

3.5.2 甲醇汽油车醛酮化合物燃油蒸发排放特性

表给出了车辆燃用汽油和 M15 甲醇汽油时的密闭室内的醛酮类化合物燃油蒸发排放量，并分别列出热浸期间排量和昼间换气期间的排放量。其中，丁烯醛、丁酮、丁醛、苯甲醛、甲基苯甲醛、环己酮和己醛均未检测到，以其余几种醛酮化合物的排放量展示结果。

表 3.15 汽油/M15 车辆醛酮类化合物燃油蒸发排放结果

醛酮蒸发排放量 (mg)	热浸损失		昼间损失	
	汽油	M15	汽油	M15

甲醛	0.891	0.885	1.082	1.338
乙醛	0.228	0.251	0.893	1.006
丙烯醛+丙酮	0.117	0.203	0.653	0.932
丙醛	0.036	0.066	0.186	0.253
甲基丙烯醛	0.159	0.143	0.931	1.146
戊醛	0.136	0.077	0.333	0.394
总量	1.567	1.623	4.079	5.070

从表中数据可以看出，无论车辆使用哪种燃料，甲醛都是燃油蒸发中醛酮化合物的主要组成成分。

对于热浸损失，车辆燃用汽油和 M15 燃料时，甲醛分别占其热浸期间排放量的 57%和 55%，同时乙醛的蒸发量也比较高，分别占到各自热浸蒸发排放量的 14%和 15%。这主要与甲醛和乙醛的物理化学特性有关，在醛酮类化合物中，甲醛和乙醛的分子量较小，沸点较低，容易蒸发。热浸期间温度高，在碳氢化合物的氧化蒸发过程中，伴随着醛酮化合物的形成，而甲醛、乙醛等相对其他大分子量的醛酮类化合物更容易蒸发排放出来。

对于昼间换气排放量，车辆燃用汽油和 M15 燃料时蒸发排放的甲醛分别占各自昼间损失的 27%和 26%，蒸发排放量比较高的还有乙醛和甲基丙烯醛，乙醛分别占汽油和 M15 燃料昼间损失的 22%和 20%，甲基丙烯醛占汽油和 M15 燃料昼间损失的比例均为 23%。这主要是因为昼间换气时间持续 24 个小时，温度变化是模拟车辆不行驶时的停车一天的燃油箱燃油蒸发情况，即温度变化范围较大，各种污染物有足够的时间随温度的变化生成和消耗。

另一方面，与车辆燃用汽油燃料相比，燃用 M15 燃料时的昼间损失较高，而热浸损失方面，燃用 M15 燃料时的蒸发量与燃用汽油时相差不多。

3.5.3 甲醇汽油车挥发性有机物燃油蒸发排放特性

表给出了车辆燃用汽油和 M15 甲醇汽油时的密闭室内的挥发性有机物燃油蒸发排放量，并分别列出热浸期间排放量和昼间换气期间的排放量。

表 3.16 汽油/M15 车辆挥发性有机物燃油蒸发排放结果

挥发性有机物 蒸发排放量 (mg)	热浸损失		昼间损失	
	汽油	M15	汽油	M15
苯	0.009	0.375	5.898	43.553
甲苯	19.484	23.255	208.677	226.803
乙酸正丁酯	0.004	--	--	0.017
乙苯	5.567	6.610	80.037	92.564
对间二甲苯	3.303	3.914	47.396	54.804
苯乙烯	0.211	0.184	0.225	0.375
邻二甲苯	1.668	2.071	15.212	21.595
正十一烷	0.110	0.124	0.093	0.212
总量	30.355	36.434	357.502	439.923

从表中数据可以看出，无论是热浸损失还是昼间损失，甲苯的蒸发量均高于其他挥发性有机物。

对于热浸损失，车辆燃用汽油和 M15 燃料时甲苯的蒸发排放量占各自热浸期总蒸发量的比例均为 64%。同时，燃用 M15 燃料时的甲苯蒸发量比燃用汽油时多 19%，除甲苯外，其他物质也比燃用汽油时排放量多。

对于昼间损失，车辆燃用汽油和 M15 燃料时甲苯的蒸发排放量占各自昼间总损失的 58%和 51%。此外，乙苯和二甲苯（对、间、邻二甲苯总和）的蒸发量也较高。还可以看出汽车燃用 M15 燃料时的挥发性有机物昼间蒸发量明显高于燃用汽油的昼间蒸发量。这主要是因为 M15 燃料的饱和蒸气压远高于纯汽油的饱和蒸气压，具体原因 3.5.1 节已经叙述，此处不再赘述。

3.5.4 实验三小结

本章利用密闭室实验对汽油和 M15 燃料的燃油蒸发排放的碳氢化合物和

非常规污染物排放进行了研究，结论如下：

(1) 车辆燃用 M15 甲醇汽油燃料时蒸发排放的甲醇是主要的蒸发排放污染物，占 HC 的 40%。M15 车辆的燃油蒸发排放明显高于汽油，具体为：总碳氢化合物高出 63%，其中，醛酮类化合物高出 17%，挥发性有机物高出 23%，尤为突出的是甲醇，高出了 138 倍。

(2) 汽油中掺入低比例的甲醇时，甲醇和汽油容易发生反应生成饱和蒸气压较高的共沸物，会导致甲醇汽油混合燃料的燃油蒸发排放量增多，甚至超过标准限值 2g/test，因此甲醇汽油燃料车必须配备大容量的吸附碳罐。

(3) 在新技术以及替代燃料的不断发展下，车辆的 I 型冷启动污染物排放量基本都能控制在现行排放标准限值以内，但是替代燃料车辆如 M15 甲醇汽油燃料车由于燃料的饱和蒸气压的升高，其燃油蒸发排放不容乐观。为了更好地保护环境，减少车主的经济损失，监管替代燃料车辆的燃油蒸发排放并对其制定限值标准刻不容缓。

3.6 实验四 不同比例甲醇汽油的排放特性

研究了不同比例的甲醇/汽油燃料汽车（M15、M20、M30、M50、M85 和 M100）及装有专用催化器甲醇车的常规排放和非常规排放特性。

实验车辆为 4 辆轻型车，分别定义为 CarA、B、C、D。实验时，先进行原车状态(纯汽油)的排放实验，然后再更换为甲醇/汽油掺混燃料，重新进行排放实验。其中 CarA 更换为 M15（甲醇的体积分数为 15%），CarB 更换为 M20、M30 和 M50（甲醇的体积分数分别为 20%、30%和 50%），CarC 更换为 M85（甲醇的体积分数为 85%），CarD 更换为纯甲醇 M100。实验车辆基本信息如表 3.17 所示。实验用燃料为市售 93 # 汽油和工业甲醇。需要指出的是，3.6.1~3.6.3 节中实验车辆安装的均为原车催化器。

表 3.17 实验车辆基本信息

车辆编号	车辆类型	排量 (L)	燃油类型	行驶里程 (km)
------	------	--------	------	-----------

CarA	桑塔纳轿车	1.8	汽油/M15	1000
CarB	捷达轿车	1.6	汽油/M20/M30/M50	105000
CarC	桑塔纳轿车	1.8	汽油/M85	1000
CarD	桑塔纳轿车	1.8	汽油/M100	2275

3.6.1 不同比例甲醇汽油的常规气态污染物排放特性

对 4 辆测试车燃用纯汽油及不同掺混比例甲醇/汽油燃料时的常规气态污染物排放进行了实验，结果如表 3.18。从表中可以看出，与汽油车相比，甲醇/汽油燃料车的 CO 和 HC 排放分别减少了 10.5~34.1%和 18.7~49.2%，而 NO_x 排放增加了 53.3~474.4%。甲醇燃料使 CO 和 HC 排放降低的原因有两个方面：一方面，甲醇中含有 37.5%的碳而汽油中含有 85.5%的碳。燃油中的碳在燃烧的过程中会直接转化为 CO，因此燃油中的甲醇会使 CO 排放降低。另一方面，甲醇中含有 50%的氧，当燃油中加入甲醇时会使氧含量增加，从而降低 CO 和 HC 排放。由于甲醇燃烧时的火焰传播速度较快并且燃烧温度较高，从而导致了 NO_x 排放的增加。

表 3.18 甲醇/汽油燃料汽车常规排放结果（单位：g/km）

比排放量 g/km	CarA		CarB				CarC		CarD	
	汽油	M15	汽油	M20	M30	M50	汽油	M85	汽油	M100
CO	0.507	0.428	1.028	0.92	0.853	0.678	1.213	1.038	0.901	0.674
HC	0.078	0.049	0.305	0.164	0.163	0.155	0.144	0.097	0.091	0.074
NO _x	0.014	0.021	0.222	0.48	0.493	0.584	0.043	0.247	0.032	0.168

对 M20、M30、M50 和 M100 甲醇车常规污染物在各个工况的排放占总排放量的百分比进行研究，结果如图 3-32~3-34 所示。从表中可以看出，无论是汽油车还是各种比例甲醇/汽油掺混燃料车，CO 的排放大多数发生在第一个 195 循环工况，M20、M30、M50 和 M100 甲醇车在该工况排放的 CO 分别占总排放量的 91.53%、94.71%、94.63%和 90.85%。HC 的排放规律也是如此，M20、M30、M50 和 M100 甲醇车在第一个 195 工况排放的 HC 占总排放量的百分比

分别为 54.35%、47.99%、53.49%和 40.08%。甲醇车的 NO_x 排放多数发生在 EUDC 循环工况，M20、M30、M50 和 M100 甲醇车 EUDC 循环排放的 NO_x 分别占总排放量的 30.31%、31.7%、46.62%和 61.87%。

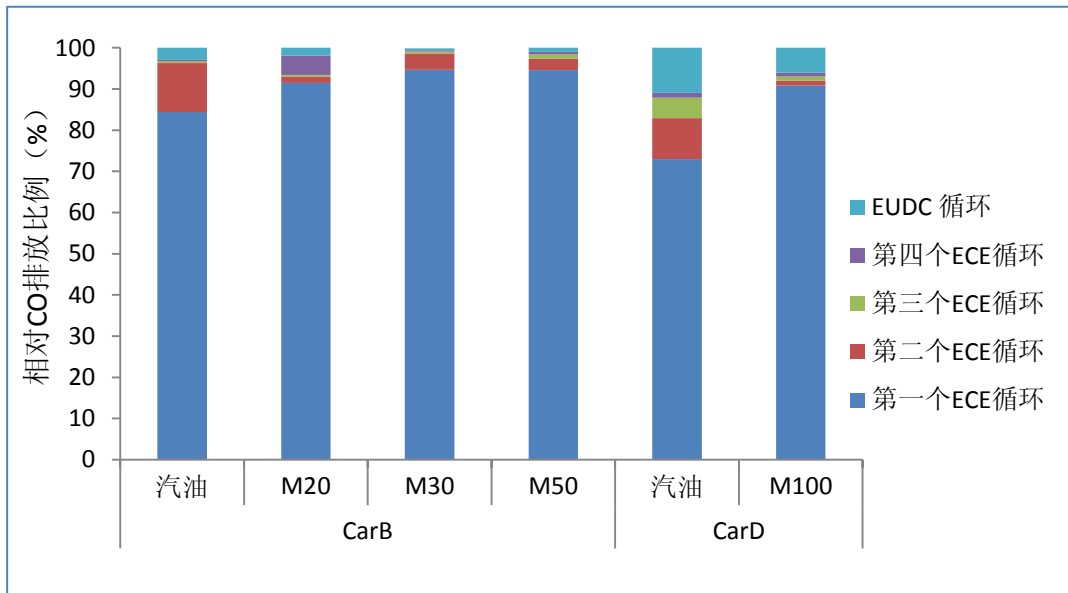


图 3-32 CO 各工况相对排放比例 (%)

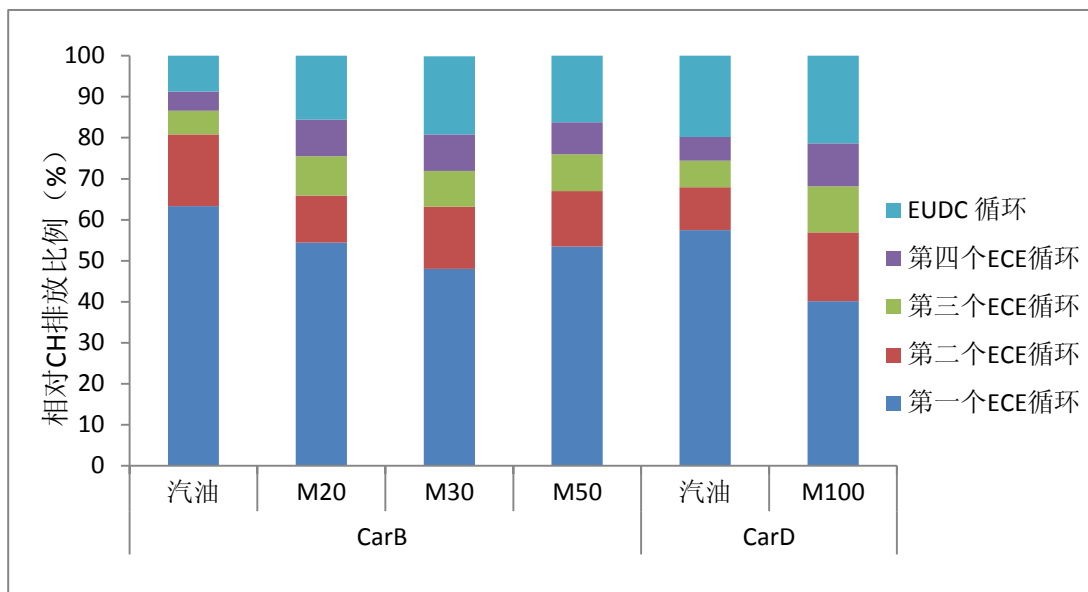


图 3-33 CH 各工况相对排放比例 (%)

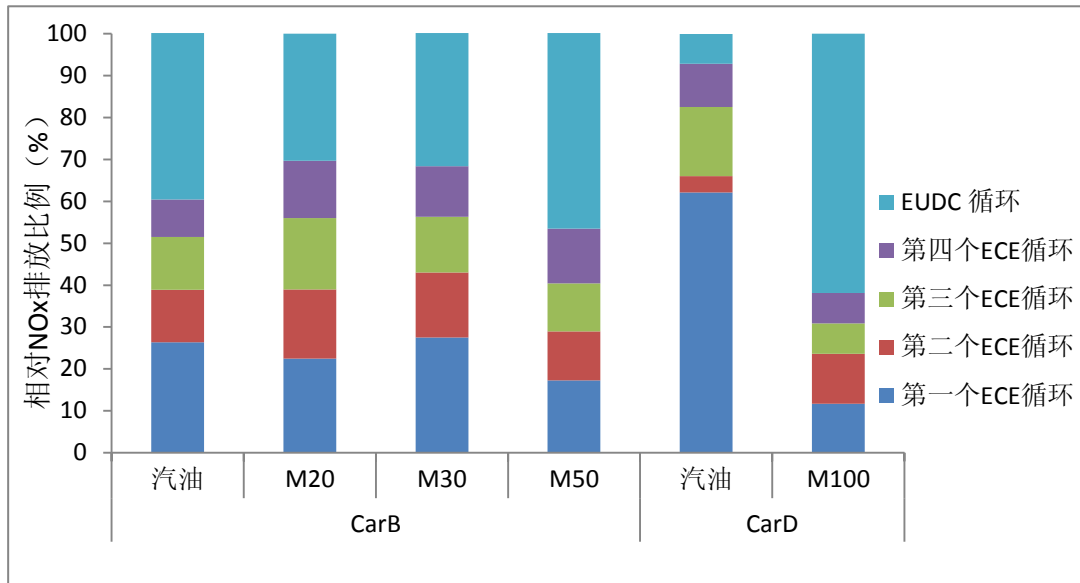
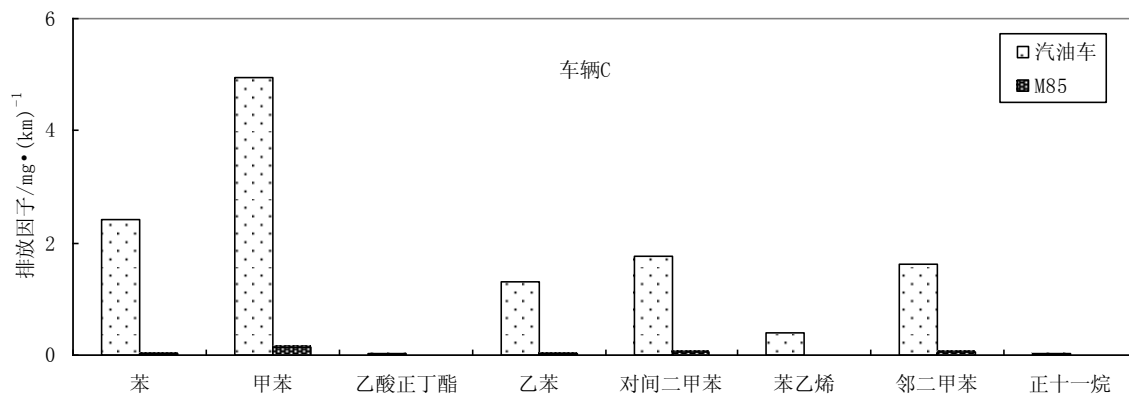
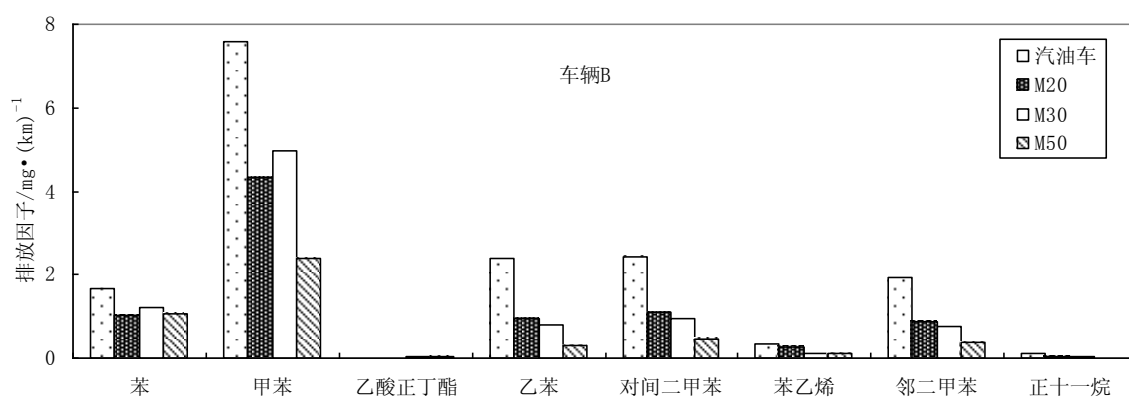
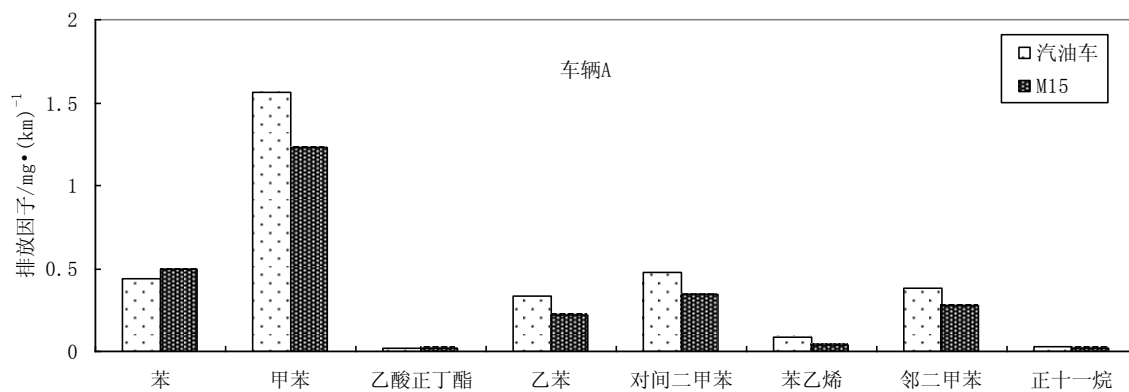


图 3-34 NOx 各工况相对排放比例 (%)

3.6.2 不同比例甲醇汽油的 VOCs 排放特性

对不同比例甲醇/汽油燃料车排放的 VOCs 进行研究, 选取可用标液能够精确定量的 VOCs 物质进行分析, 如图 3-35 所示。苯、甲苯、乙苯和二甲苯(BTEX) 是主要的 VOCs 物质, 能够占到总 VOCs 的 95%。甲醇车与汽油车相比, 甲醇车的总 VOCs 和 BTEX 排放都有不同程度的减少。对于 BTEX 排放, M85 的降幅最大, 为 97.4%, 而 M15 的降幅最小, 只有 19.7%。甲苯是各种甲醇车 VOCs 排放较多的物质, 能够占到 50%左右。燃油中的不饱和烃是形成苯系物的先驱, 而甲醇中不含有不饱和烃, 因此会使甲醇车的苯系物排放降低。



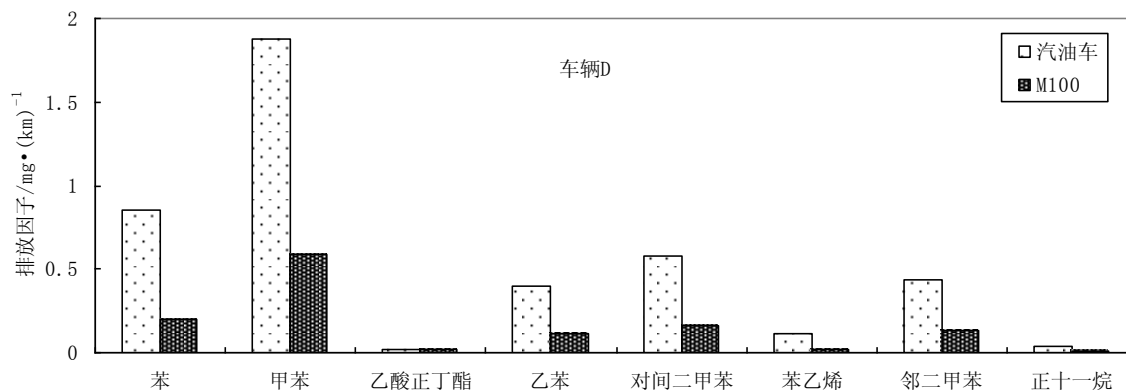
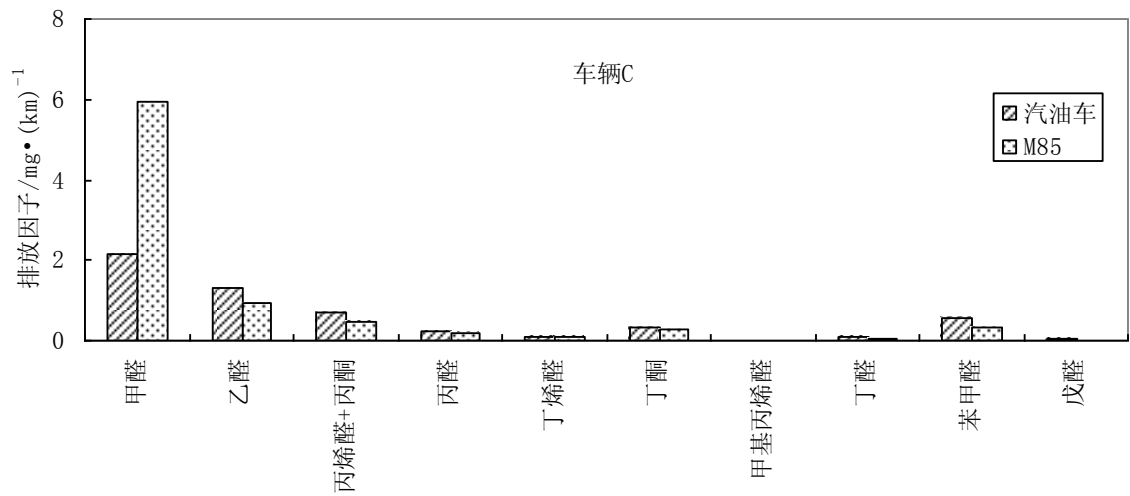
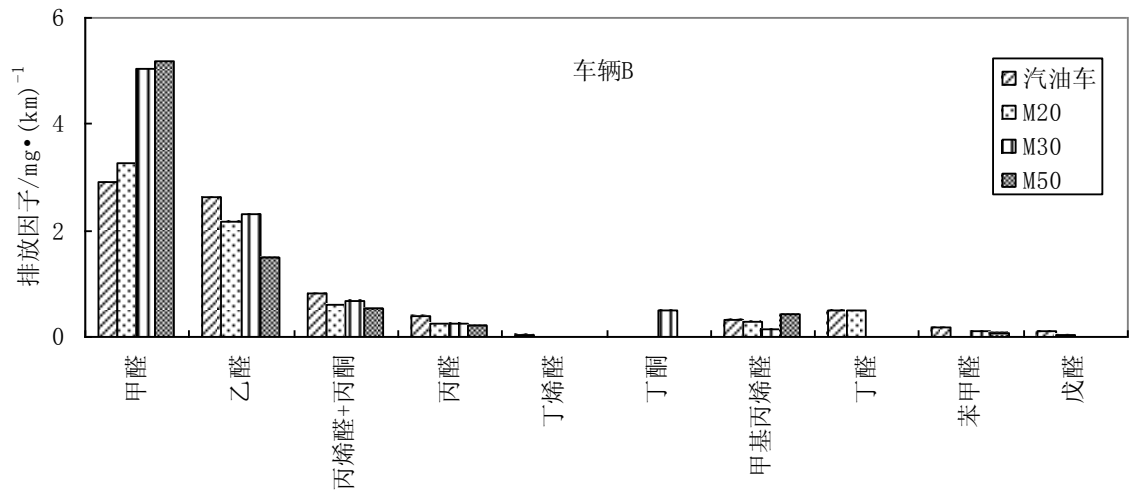
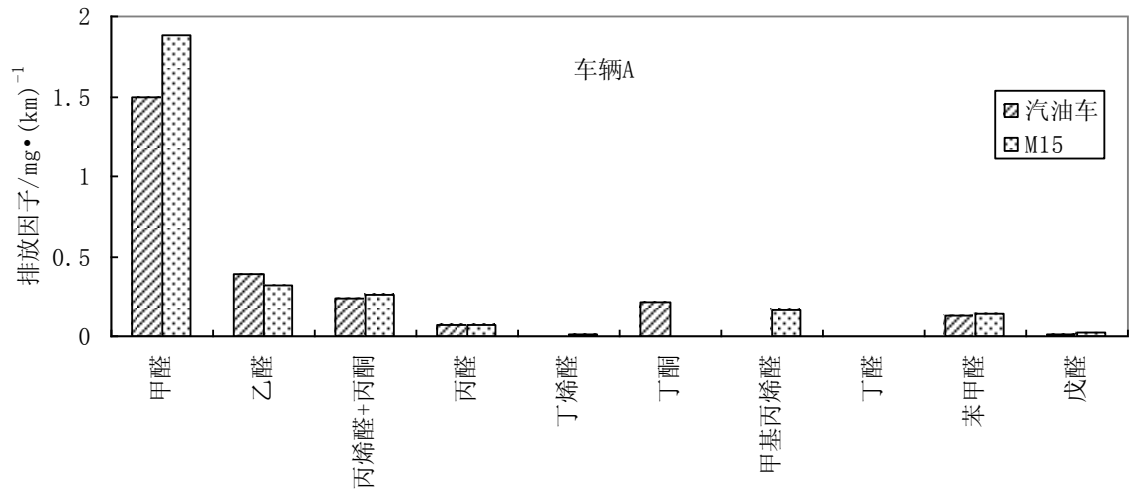


图 3-35 甲醇/汽油燃料汽车 VOCs 排放的定量结果

3.6.3 不同比例甲醇汽油的醛酮类化合物排放特性

对不同比例甲醇/汽油燃料车排放的醛酮类化合物进行研究，在被测试的 4 辆车中基本都未检测到甲基苯甲醛、环己酮和己醛，因此只对其它 11 种醛酮类化合物进行分析，结果如图 3-36 所示。对于所有的甲醇/汽油燃料车，甲醛排放都是最多的，其次是乙醛、丙烯醛+丙酮、苯甲醛和丙醛。甲醛主要来源于醇类和链烷烃，但是甲醇氧化生成甲醛要比 HC 氧化生成甲醛更容易，从而造成甲醇燃料汽车较高的甲醛排放。从图中可以看出，随着甲醇在燃油中的比例增大，甲醛排放也随着增加。与相应的汽油车相比，中、低比例甲醇燃料车(M15、M20、M30 和 M50)的甲醛排放只有较少的增长，增幅为 12.1~77.6%，而高比例甲醇燃料车 (M85 和 M100) 的甲醛排放是相应汽油车的 3 倍。但对不同比例甲醇/汽油燃料车，乙醛排放却比相应的汽油车降低了 12.8~64.7%。对于其它的醛酮类化合物，甲醇车排放有增有减。



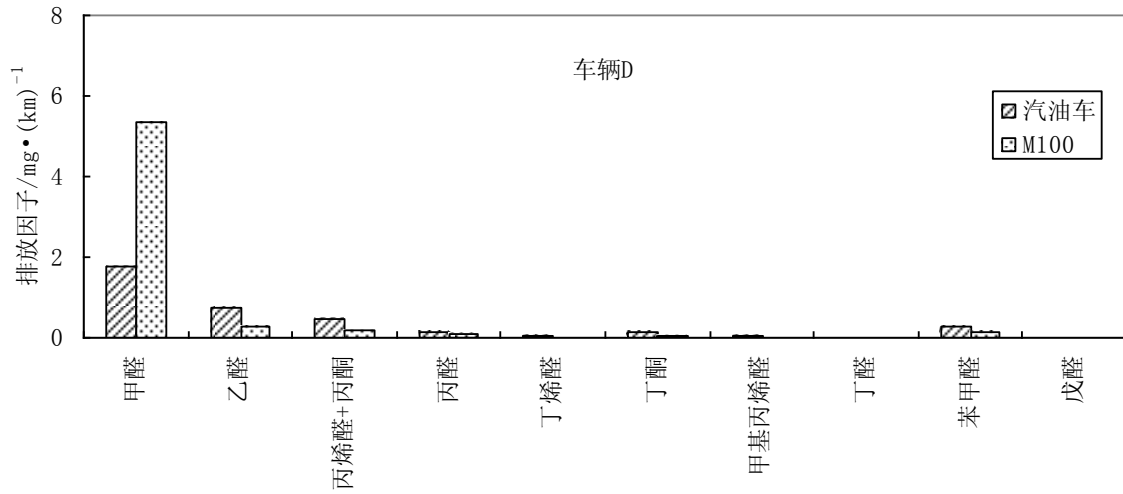


图 3-36 甲醇/汽油燃料汽车醛酮类化合物排放结果

3.6.4 专用催化剂对甲醇燃料汽车排放的影响

1. 专用催化剂对常规排放的影响

甲醇/汽油燃料车的甲醛排放是其发展的最大障碍，甲醇车的生产厂家为增强催化剂对甲醛等有害物质的催化作用，制成专为甲醇燃料汽车设计的专用催化剂。对 M15、M85 和 M100 甲醇车分别安装专用催化剂后的排放进行了研究，常规排放结果如图 3-37 所示。采用专用催化剂后，甲醇车的 CO、HC 和 NO_x 排放分别比采用原车催化剂时降低了 23.7~49.5%、10.3~34.7%和 2.8~57.9%。

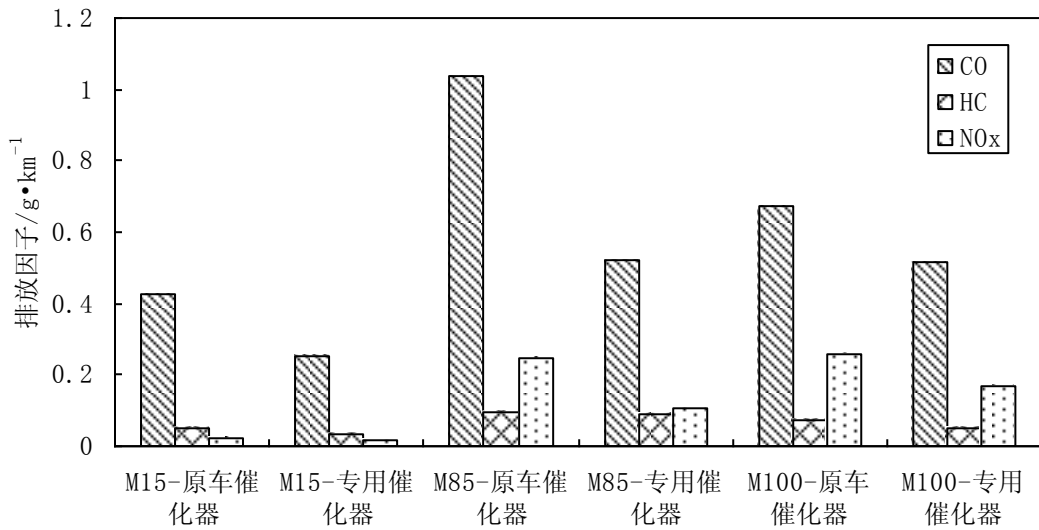


图 3-37 甲醇车安装原车催化器和专用催化器的常规排放结果

2. 专用催化器对 VOCs 和醛酮类化合物的影响

专用催化器的主要目的是减少甲醇/汽油燃料车的甲醛排放，在对装有专用催化器甲醇车的醛酮类化合物排放进行研究的同时，也对其 VOCs 排放中的主要物质 BTEX 进行了研究，结果如图 3-38 所示。专用催化器使 M15 的甲醛排放由 1.88mg/km 降为 0.56mg/km，M85 的甲醛排放由 5.96mg/km 降为 4.97mg/km，使 M100 的甲醛排放由 5.73mg/km 降为 3.79mg/km，降幅分别为 70.2%、16.5%和 33.8%。专用催化器也使甲醇车的 BTEX 排放有所减少，但其它的醛酮类化合物排放有升有降。

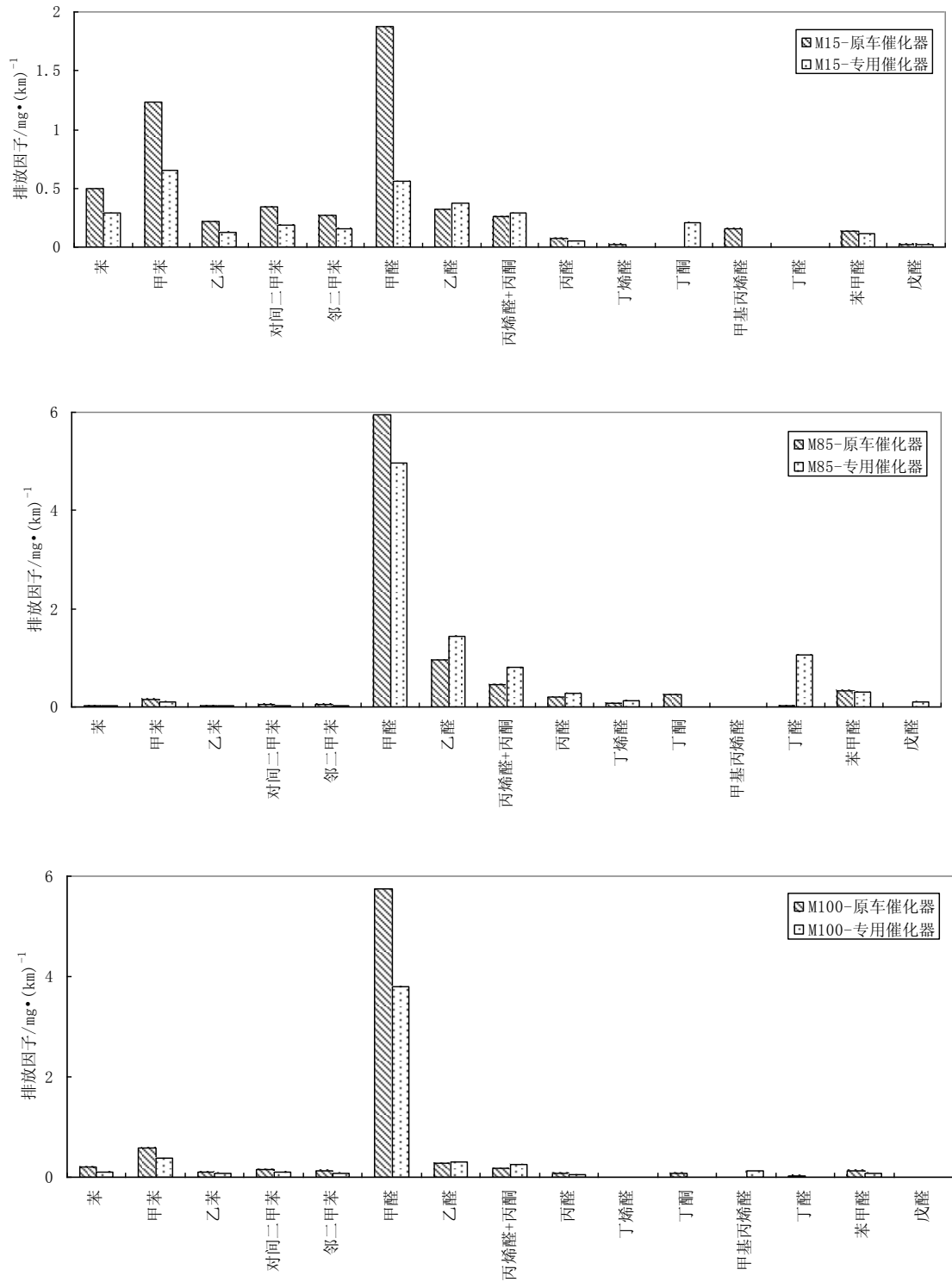


图 3-38 甲醇车安装原车催化器和专用催化器的 VOCs 和醛酮类化合物的排放结果

3. 专用催化剂对比反应活性的影响

为了评价甲醇车采用专用催化剂后的环境影响,对其醛酮类化合物的比反应活性进行了研究,结果如图 3-39 所示。专用催化剂使 M15 的 SR 值由 6.14 降为 4.74,使 M85 的 SR 值由 6.23 降为 6.03,使 M100 的 SR 值由 6.73 降为 6.64。由于甲醛的 MIR 值非常高,达到了 7.15。采用专用催化剂后甲醛排放的大幅下降,使得 SR 值迅速下降。因此,专用催化剂使甲醇车对环境更为友好。对于被测试车辆 A,在燃用汽油时的 SR 值为 5.63,而在采用 M15 甲醇/汽油混合燃料和专用催化剂后的 SR 值只有 4.74。这意味着低比例的甲醇车采用专用催化剂有可能比汽油车对环境的影响还小。

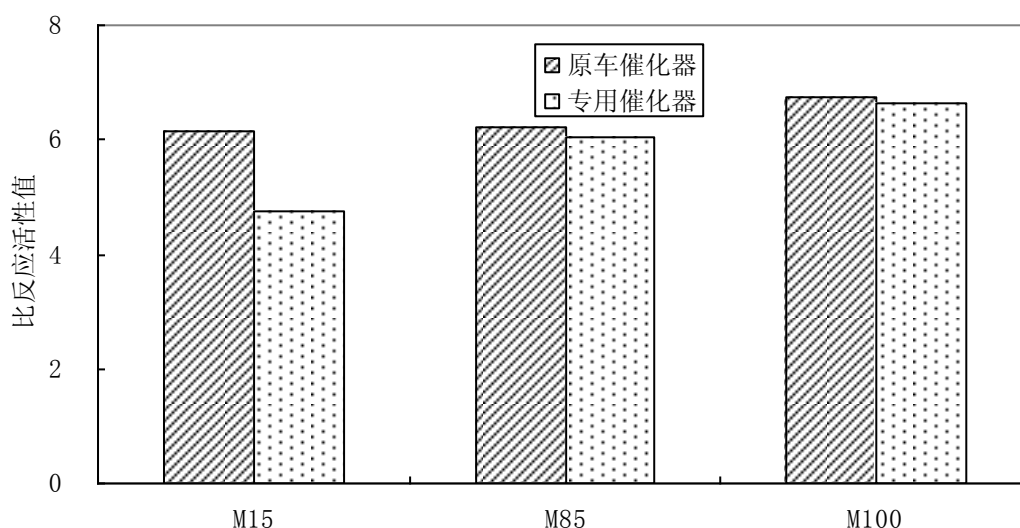


图 3-39 甲醇车安装原车催化剂和专用催化剂的比反应活性

3.6.5 实验四小结

本实验对不同比例的甲醇/汽油燃料汽车 (M15、M20、M30、M50、M85 和 M100) 的常规排放、VOCs 和醛酮类化合物排放及专用催化剂对甲醇汽车排放的影响进行了研究,得到了以下几点结论:

(1) 与汽油车相比,甲醇/汽油燃料车的 CO 和 HC 排放分别减少了 10.5~34.1%和 18.7~49.2%,而 NO_x 排放增加了 53.3~474.4%。汽油车和甲醇车的 CO 和 HC 排放大多数发生在第一个 195 循环工况,而甲醇车的 NO_x 排放多数

发生在 EUDC 循环工况。

(2) 不同比例甲醇/汽油燃料车排放的挥发性有机物中，其中烷烃、烯烃和芳香烃分别占 41.6~57.5%、1.9~17.4%和 33.7~50.9%。与相应的汽油车比较，甲醇车排放的芳香烃比重都有所增大，而甲醇车的总 VOCs 和 BTEX 排放都有不同程度的减少。对于 BTEX 排放，M85 的降幅最大，为 97.4%，而 M15 的降幅最小，只有 19.7%。甲苯是各种甲醇车 VOCs 排放较多的物质，能够占到 50%左右。

(3) 随着甲醇在燃油中的比例增大，甲醛排放也随着增加。中、低比例甲醇燃料车（M15、M20、M30 和 M50）的甲醛排放的增幅只有 12.1~77.6%，而高比例甲醇燃料车（M85 和 M100）的甲醛排放是相应汽油车的 3 倍。乙醛排放却比相应的汽油车降低了 12.8~64.7%。对于其它的醛酮类化合物，甲醇车排放有增有减。

(4) 采用专用催化器后，甲醇车的 CO、HC 和 NO_x 排放分别比采用原车催化器时降低了 23.7~49.5%、10.3~34.7%和 2.8~57.9%。专用催化器使 M15、M85 和 M100 的甲醛排放分别减少了 70.2%、16.5%和 33.8%。BTEX 排放也都有所减少，但其它的醛酮类化合物排放有升有降。专用催化器使 M15、M85 和 M100 的 SR 值由 6.14、6.23 和 6.73 分别降为 4.74、6.03 和 6.64，专用催化器使甲醇车对环境更为友好。

第 4 章 汽油/CNG 双燃料车排气排放污染物排放特性

4.1 实验主要内容

本章共包含两组实验，实验一对厦门汽油/CNG 双燃料车排气的常规污染物和非常规污染物采样分析，讨论了 CNG 在用车的基本排放情况；实验二对北京市汽油/CNG 双燃料出租车排气的常规污染物和非常规污染物进行了分析。

4.2 实验方法

参照 3.2 中实验方法，此处不再赘述。

4.3 实验一 厦门汽油/CNG 双燃料车排气排放污染物排放特性

实验车辆基本信息如

表所示。

表 4.1 汽油/CNG 双燃料车辆基本信息

车辆编号	车辆类型	整备质量 (kg)	排量 (L)	燃油类型	排放标准	行驶里程 (km)
Car1~10	小型轿车	1500	1.8	汽油/CNG	国 IV	6 万~13 万

4.3.1 汽油/CNG 双燃料车排气中常规污染物排放特性

对 10 辆汽油/CNG 双燃料在用出租车进行常规污染物检测，检测结果如表 4.2 所示。从表中数据可以看出，与汽油燃料相比，燃用 CNG 燃料时除个别车辆外，大部分车辆排放的 CO 有所降低，降低比例为 1%~37%，这主要是因为

CNG 燃料本身的含碳量低于汽油的含碳量,燃烧后很容易直接生成 CO₂ 和 H₂O;但是 Car2 和 Car7 燃用 CNG 时 CO 排放量分别增加 2%和 3%,主要与在用车的三元催化器老化程度有关;THC 的排放量除了 Car1 降低了 10%以及 Car8 保持不变以外,其余车辆均有所增加,增加比例为 11%~384%;大部分车辆排放的 NO_x 基本有所下降,降低比例为 3%~67%,专门设计的汽油/CNG 双燃料车,使用 CNG 燃料时,车辆的电子喷射系统能够精确控制空燃比等参数使得燃料在理论空燃比附近燃烧,再加上 CNG 的最高燃烧温度低于汽油,因此 NO_x 排放会降低;然而也有车辆的 NO_x 排放有一定比例的增加,Car6、Car7 燃用 CNG 时 NO_x 分别增加了 23%和 4%。总体而言,CNG 在用车很难同时降低三种常规污染物的排放,这与文献^[38,71]的研究结果一致,10 辆在用车在燃用汽油和 CNG 时仍能满足国 IV 标准的只有 Car1 和 Car8 两辆车。从表中数据可以看出,汽油/CNG 双燃料在用车随已行驶里程的不同排放情况也不同,并不是简单的线性变化,分析可能的原因主要是车辆原车性能与燃油品质不同造成不同行驶里程的车辆催化器的劣化程度不一,同时与车辆的日常保养和维护也有很大关系。

除常规污染物排放外,CNG 作为替代燃料的优势在于可以降低温室气体 CO₂ 的排放,从表中数据可以看出,除 7 号车和 9 号车燃用 CNG 时 CO₂ 增加了 2%和 1%外,其他车辆的 CO₂ 均成下降趋势,下降比例为 15%~19%。由此可以看出,CNG 燃料车可以有效降低 CO₂ 的排放,但是其常规污染物排放有增有减使得 CNG 燃料的清洁性、低排放特性并不是一直都能维持在很好的水平。作为汽油/CNG 双燃料车,车辆的三元催化器并没有针对 CNG 燃料进行专门设计,再加上车辆日常的工作状态引起催化器的不同程度的老化而导致排放并不尽如人意。但是,CNG 燃料对降低 CO₂ 排放方面的贡献却不可忽视,因此在 CNG 燃料车的推广过程中应注意三元催化器的研究以及相关排放法规、改装车标准的制定。

表 4.2 车辆燃用汽油/CNG 时常规污染物排放结果

比排放量 g/km	CO		T.HC		NO _x		CO ₂		行驶里程 km
	汽油	CNG	汽油	CNG	汽油	CNG	汽油	CNG	

Car1	0.800	0.643	0.031	0.028	0.069	0.045	199.0	164.0	7 万+
Car2	5.147	5.265	0.970	1.124	3.179	1.703	192.0	163.0	6 万+
Car3	1.891	1.385	0.034	0.078	0.137	0.075	215.0	174.0	12 万+
Car4	5.959	4.244	0.058	0.107	0.092	0.030	206.0	174.0	12 万+
Car5	2.040	1.641	0.148	0.565	0.199	0.173	199.0	163.0	6 万+
Car6	0.576	0.392	0.025	0.121	0.053	0.065	205.0	166.0	6 万+
Car7	4.892	5.047	0.817	0.910	2.529	2.640	196.0	200.0	10 万+
Car8	0.913	0.573	0.049	0.049	0.070	0.068	200.0	163.0	12 万+
Car9	6.840	6.793	1.276	1.561	2.420	2.425	190.0	191.0	10 万+
Car10	3.887	3.212	0.460	0.802	2.113	1.416	195.0	161.0	8 万+

汽油/CNG 双燃料在用车的三种常规污染物在各工况排放所占总排放的比例如图 4-1、图 4-2 和图 4-3 所示。对于 CO 排放，第一个 ECE 循环和 EUDC 循环工况即冷启动和高速运转时候的排放量较高，相对排放比例分别为 17%~58% 和 27%~60%。THC 的排放情况类似于 CO，第一个 ECE 循环和 EUDC 循环的相对排放比例较高，分别为 18%~75%和 21%~41%。而对于 NO_x 排放，大部分车辆的在 EUDC 工况的排放量较高，相对排放比例分别为 29%~77%。

造成这种情况的主要原因是因为汽车冷启动时候三元催化器 TWC 还没有达到正常工作的温度，因此催化转化效果差导致排放较差，同时车辆冷启动之后运行第一个 ECE 工况时由于负荷较低，混合气较稀薄，导致发动机燃烧失火情况严重，燃烧不稳所以 CO 和 THC 的排放较高；汽车高速运转时候温度较高，燃烧比较完全，由于是高温富氧状态，因此 NO_x 排放较高，此外，由于车辆是汽油/CNG 双燃料车，车辆的发动机是按照汽油的性质进行设计，虽然 CNG 有较高的压缩比，但是为了适应汽油燃料，车辆发动机仍然不能放大压缩比，因此导致 CNG 燃料会出现动力不足的情况，尤其是在 EUDC 的高速工况，为了达到标准规定的速度而不断增加喷油量，此时进入气缸的燃料加浓，容易燃烧不完全而排放较多 CO 和 THC。双燃料车的排放情况与车辆的日常工作状态和维护保养密切相关，定期的日常维护与车辆保养能够延长三元催化器的寿命，可以有有效的净化排气。

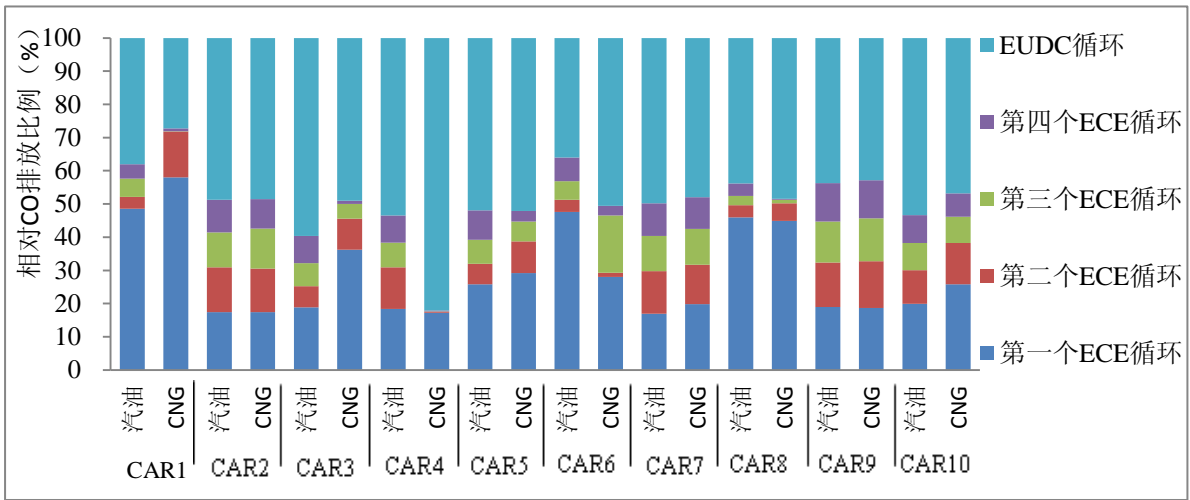


图 4-1 CO 各工况相对排放比例 (%)

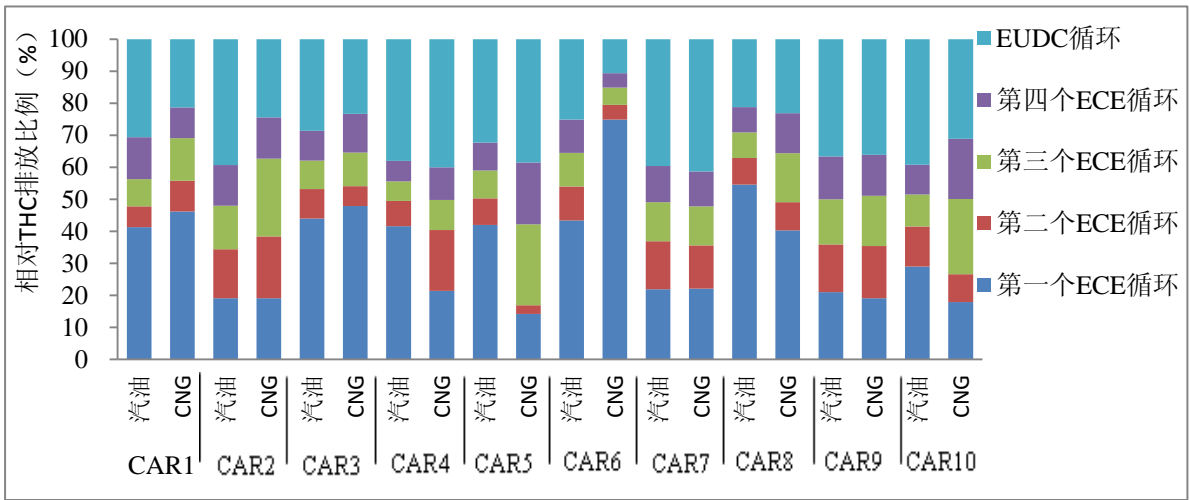


图 4-2 THC 各工况相对排放比例 (%)

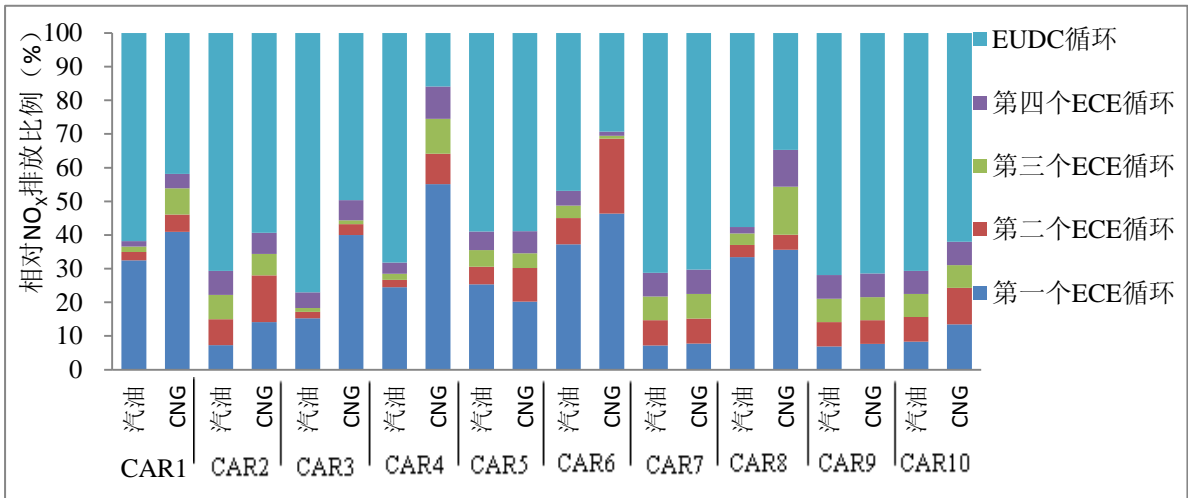


图 4-3 NO_x 各工况相对排放比例 (%)

4.3.2 汽油/CNG 车的醛酮化合物排放特性

Car1 无论燃用汽油还是 CNG 排气中都没有检测到丁烯醛、甲基丙烯醛、丁醛、甲基苯甲醛、环己酮和己醛，因此以剩余八种醛酮化合物展示结果，结果如图 4-4 所示。可以看出车辆燃用 CNG 的醛酮化合物排放有明显的改善，但甲醛仍然是主要的醛酮化合物排放物，燃用汽油和 CNG 时，甲醛在醛酮化合物排放总量中所占比例分别为 42%和 53%。因此对于醛酮化合物排放，降低甲醛排放是研究工作的重中之重。与汽油相比，车辆燃用 CNG 燃料时排放的醛酮化合物总量比燃用汽油时降低了 41%，其中甲醛排放降低了 25%。因为 CNG 主要成分为甲烷 (CH₄) 结构简单，燃烧后更容易生成 CO₂ 和 H₂O。可见，在降低醛酮类污染物的排放方面，CNG 对环境更为友好，作为汽车代用燃料的优势更为明显。

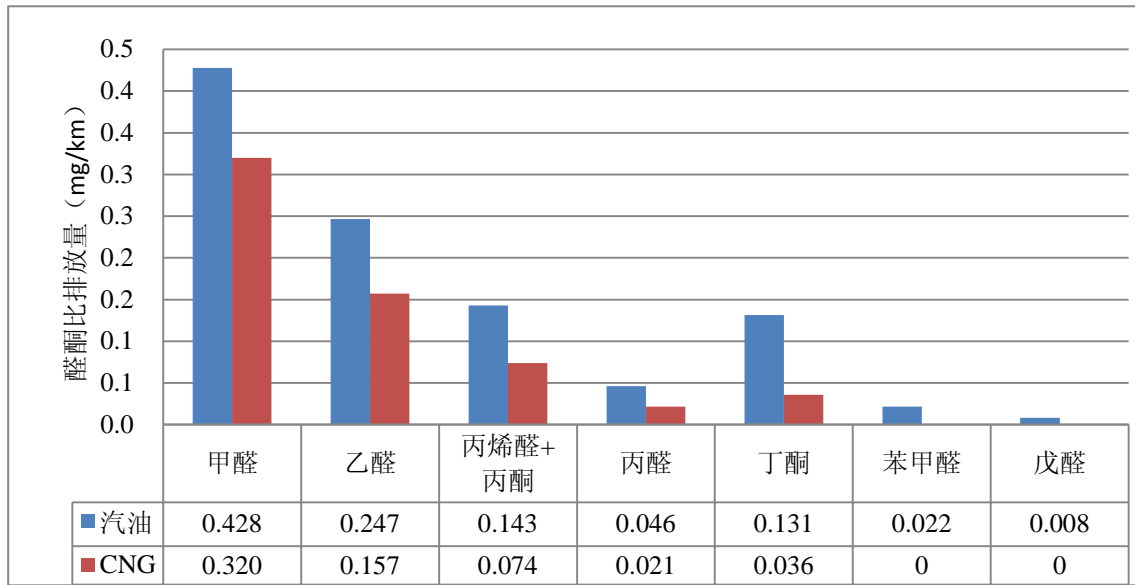


图 4-4 汽油/CNG 燃料车醛酮化合物排放结果

4.3.3 汽油/CNG 车的挥发性有机物排放特性

Car1 燃用汽油和 CNG 时排气中的挥发性有机物排放结果如图 4-5 所示。从图中可以看出，以清洁燃料受到重用的 CNG 汽车也排放出相当的苯系物等挥发性有机物，主要的原因可能有以下几个：第一，对于苯系物单环的生成机理除了燃料中本身含有带苯环的物质外还包括了来自燃料的低分子饱和烃和不饱和烃物质通过成核、缩聚等反应形成单环进而形成甲苯等带支链的苯系物。天然气的主要成分为甲烷，大部分天然气的甲烷含量在 90%以上，然而天然气也含有少量的 H_2 、CO 和 H_2S 等可燃气，甚至有的天然气还含有乙烷、丙烷、丁烷和戊烷等烷烃^[72]，这些物质在天然气的燃烧过程中都有可能通过成核、缩聚反应生成苯系物。第二，此车辆为汽油/CNG 双燃料车，燃用 CNG 时不像燃用汽油时候发动机可以利用汽油液体燃料的蒸发潜热来降低进气温度，因此燃用 CNG 时燃烧室周围零件的热负荷较高，高温下容易造成润滑油的裂解，润滑油一般为多碳成分，高温裂解并不能燃烧完全的情况下就容易形成苯系物等挥发性有机物。第三，有研究称，苯系物在催化器中存在氧化转化和生成两个过程，对不同物质两个过程的发生速率不同^[73]，因此催化器也是影响苯系

物等挥发性有机物生成的原因之一。总之，因为燃料结构本身的复杂性以及车辆运行工况的多变性，CNG 燃料车排放的苯系物的生成机理至今还没有明确结果，需要进一步的研究。

从图中可以看出 BTEX 物质是主要的 VOCs 排放物。Car1 燃用汽油和 CNG 时的 BTEX 物质排放量在总的目标 VOCs 排放量中所占比例分别为 94%和 95%。与汽油相比，车辆燃用 CNG 燃料后排放的 VOCs 下降了 31%，其中 BTEX 下降了 31%。根据上述的分析可以知道造成这一结果主要可能的原因是和燃料自身的组分构成有关，汽油燃料本身含有苯等物质，因此排放量较高。

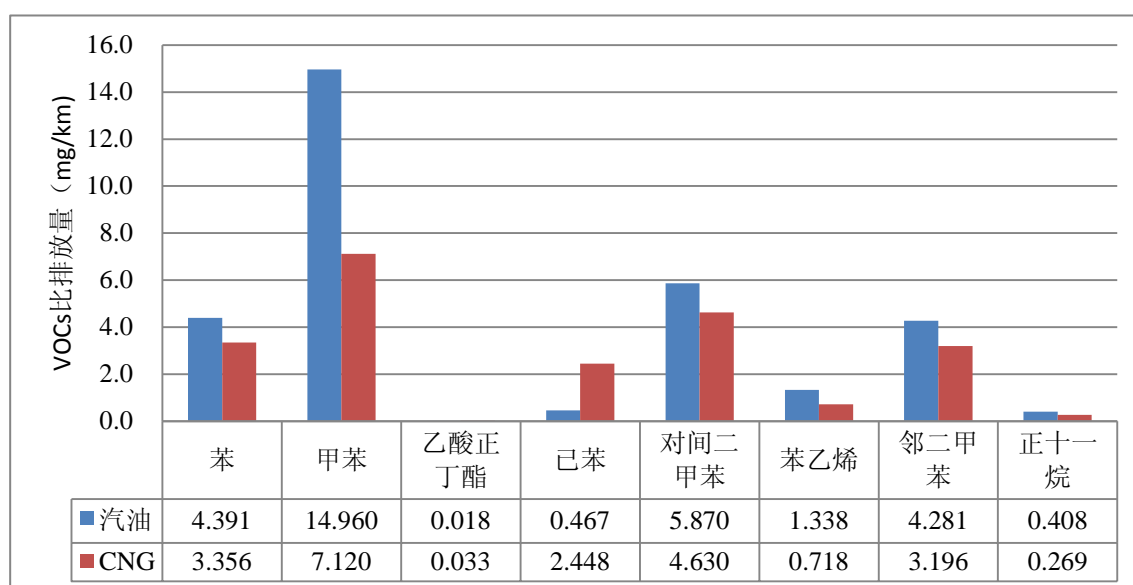


图 4-5 汽油/CNG 燃料车 VOCs 排放结果

4.3.4 实验一小结

本章对汽油/CNG 燃料车辆进行了 I 型冷启动排放测试，对排气中常规和非常规污染物进行了采样分析，得到了如下结论：

(1) 与燃用汽油相比，CNG 燃料在用车的三种法定常规污染物排放量有增有减，排放水平不能一直维持在较好的水平，在抽样测量的 10 辆汽油/CNG 在用车中，只有两辆车在燃用两种燃料时均能满足标准规定的排放限值。

(2) 车辆排放的 CO 和 THC 主要产生于第一个 ECE 工况和 EUDC 工况，排放的 NO_x 主要产生于 EUDC 工况，这主要和车辆冷启状态以及高速运转状态的催化器预热程度以及催化器的老化程度有关。

(3) CNG 燃料对降低 CO₂ 的排放方面有一定优势，同时在一定程度上能够有效降低非常规污染物的排放，但总体而言，汽油/CNG 双燃料在用车的排放情况并不理想，应加严在用车检测制度并加快对 CNG 燃料排放和改装等事项的立法监控。

4.4 实验二 北京市汽油/CNG 双燃料出租车排放污染物排放特性

实验二对北京市汽油/CNG 双燃料出租车排气的常规污染物和非常规污染物采样分析，讨论了 CNG 在用车的基本排放情况，车辆基本信息如 5.3 所示。

表 4.3 实验二汽油/CNG 双燃料车辆基本信息

车辆编号	车辆类型	整备质量 (kg)	排量 (L)	燃油类型	排放标准	行驶里程 (km)
CAR1~5	小型轿车	1343	1.6	汽油/CNG	京 V	30~1.9 万

4.4.1 北京市汽油/CNG 双燃料出租车排气中常规污染物排放特性

对 5 辆汽油/CNG 双燃料在用出租车进行常规污染物检测，检测结果如表 4.2 所示。从表中数据可以看出，CAR1 燃用汽油和燃用 CNG 时的常规污染物排放量与其余四辆车相比，规律明显不同，初步分析应该是 CAR1 的三元催化器劣化程度较大，与燃料品质以及车辆的日常保养和维护有很大关系。燃用 CNG 燃料时除 CAR1 排放的 CO 增长 67.12% 外，大部分车辆有所降低，降低比例为 30%~40%，这主要是因为 CNG 燃料本身的含碳量低于汽油的含碳量，燃烧后更容易直接生成 CO₂ 和 H₂O；THC 的排放量除了 CAR1 增长 2.5 倍以上，其余四辆车增加比例为 22%~82%；五辆车排放的 NO_x 升高，增长比例为 87%~720 %。由于汽油/CNG 双燃料车，使用 CNG 燃料时，由于 CNG 是气体，易压缩，要控制燃料在理论空燃比附近燃烧更加困难，再加上 CNG 的最高燃

烧温度高于汽油，因此 NO_x 排放会升高；从数据表中可知，CAR1 的总体排放性能较差，可能是油品以及车辆保养不当等因素造成三元催化剂劣化。总体而言，CNG 在用车很难同时降低三种常规污染物的排放，这与文献^[38,71]的研究结果一致，5 辆在用车在燃用汽油和 CNG 时都能满足京 IV 标准，并且低于限值 50%以上。

除常规污染物排放外，CNG 作为替代燃料的优势在于可以降低温室气体 CO_2 的排放，从表中数据可以看出，5 辆车的 CO_2 均成下降趋势，下降比例为 12%~18.5%。由此可以看出，CNG 燃料车可以有效降低 CO_2 的排放，但是其常规污染物排放有增有减使得 CNG 燃料的清洁性、低排放特性并不是一直都能维持在很好的水平。作为汽油/CNG 双燃料车，车辆的三元催化器并没有针对 CNG 燃料进行专门设计，再加上车辆日常的工作状态引起催化器的不同程度的老化而导致排放并不尽如人意。但是，CNG 燃料对降低 CO_2 排放方面的贡献却不可忽视，因此在 CNG 燃料车的推广过程中应注意三元催化器的研究以及相关排放法规、改装车标准的制定。

表 4.4 车辆燃用汽油/CNG 时常规污染物排放结果

比排放量 g/km	CO		THC		NO _x		CO ₂		行驶里程 km
	汽油	CNG	汽油	CNG	汽油	CNG	汽油	CNG	
CAR1	0.146	0.244	0.0117	0.0418	0.0119	0.0258	145.5	119.0	9430
CAR2	0.252	0.165	0.0196	0.0329	0.0172	0.0322	147.2	120.0	7508
CAR3	0.327	0.200	0.0308	0.0392	0.0097	0.0414	142.6	119.2	6500
CAR4	0.243	0.168	0.0238	0.0433	0.0048	0.1190	139.5	121.8	3548
CAR5	0.163	0.103	0.0146	0.0179	0.0084	0.0414	150.8	123.4	6500

汽油/CNG 双燃料在用车的三种常规污染物在各工况排放所占总排放的比例如图 4-6~4-8 所示。对于 CO 排放，第一个 ECE 循环和 EUDC 循环工况即冷启动和高速运转时候的排放量较高，相对排放比例分别为 50%~97%和 1.9%~48%。THC 的排放情况类似于 CO，第一个 ECE 循环和 EUDC 循环的相对

排放比例较高，分别为 40%~92%和 4%~47%。对于 NO_x 排放，第一个 ECE 循环和 EUDC 循环的相对排放比例较高，分别为 30%~76%和 7%~30%。

造成这种情况的主要原因是因为汽车冷启动时候三元催化器 TWC 还没有达到正常工作的温度，因此催化转化效果差导致排放较差，同时车辆冷启动之后运行第一个 ECE 工况时由于负荷较低，混合气较稀薄，导致发动机燃烧失火情况严重，燃烧不稳所以 CO、THC 和 NO_x 的排放较高；汽车高速运转时候温度较高，燃烧比较完全，由于是高温富氧状态，因此 NO_x 排放较高，此外，由于车辆是汽油/CNG 双燃料车，车辆的发动机是按照汽油的性质进行设计，虽然 CNG 有较高的压缩比，但是为了适应汽油燃料，车辆发动机仍然不能放大压缩比，因此导致 CNG 燃料会出现动力不足的情况，尤其是在 EUDC 的高速工况，为了达到标准规定的速度而不断增加喷油量，此时进入气缸的燃料加浓，容易燃烧不完全而排放较多 CO 和 THC。双燃料车的排放情况与车辆的日常工作状态和维护保养密切相关，定期的日常维护与车辆保养能够延长三元催化器的寿命，可以有效的净化排气。

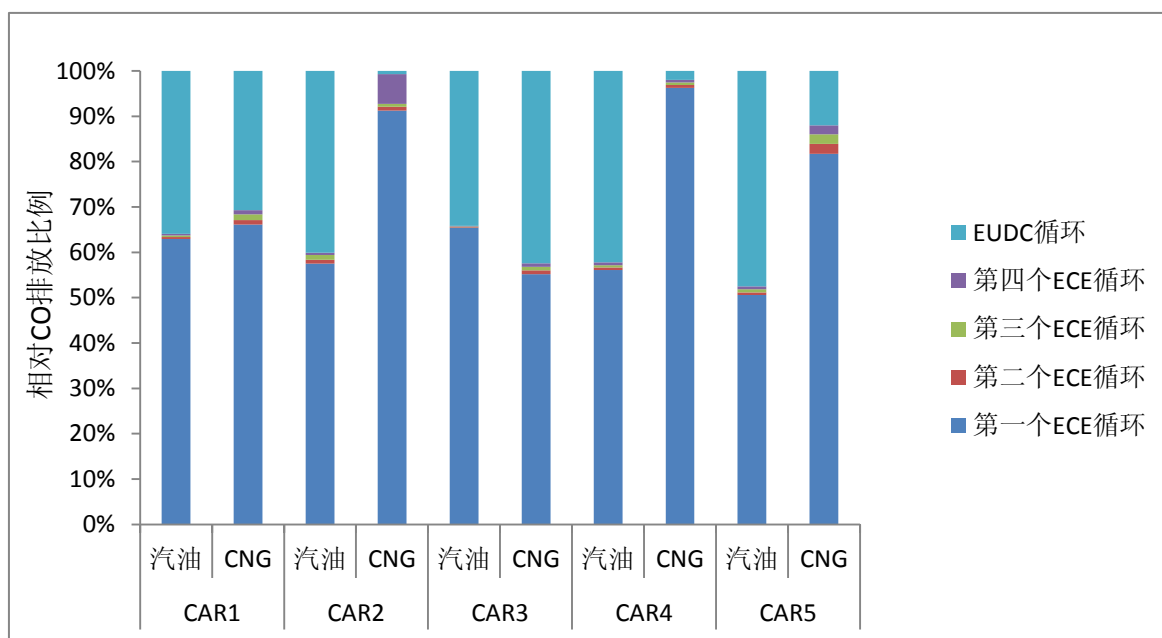


图 4-6 CO 各工况相对排放比例 (%)

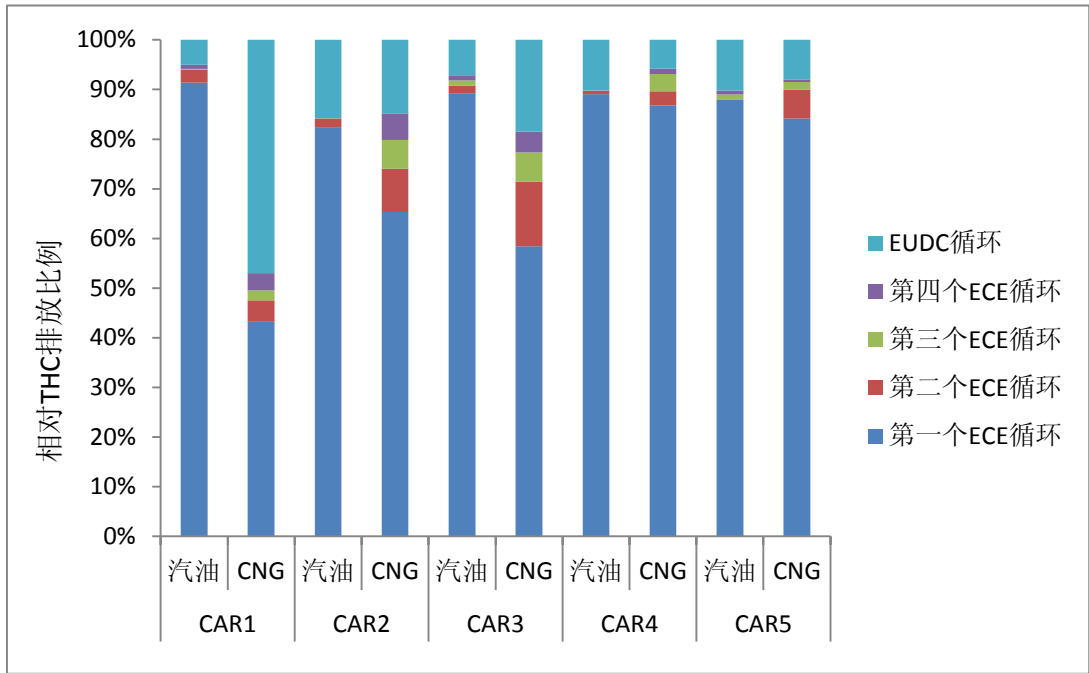


图 4-7 THC 各工况相对排放比例 (%)

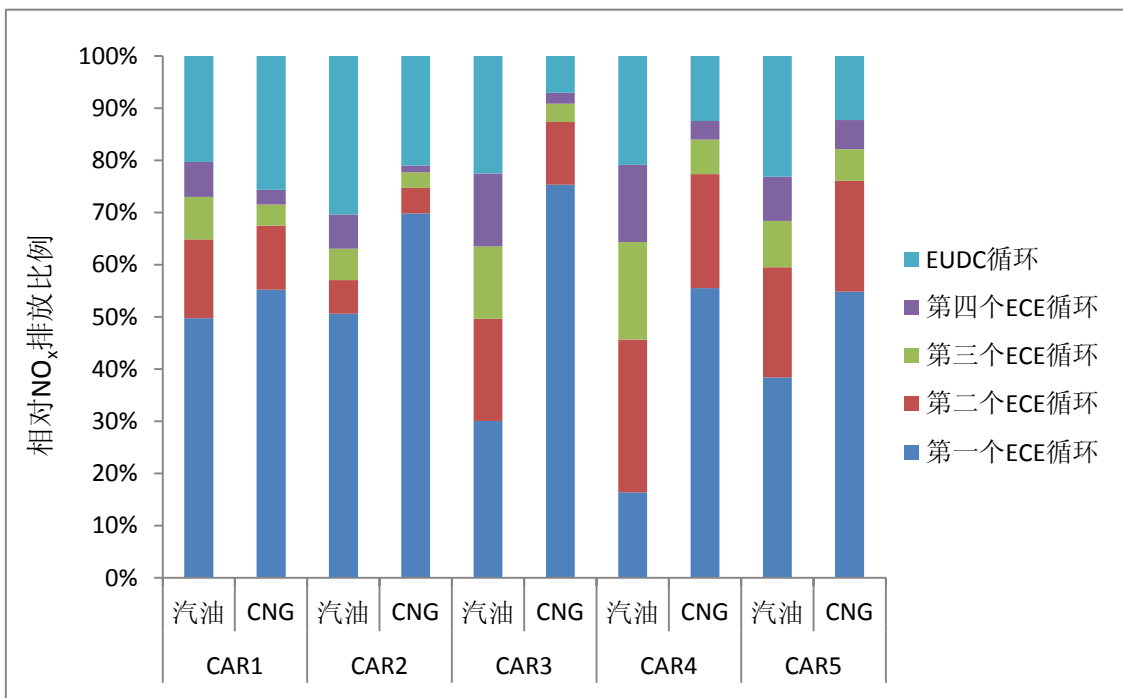


图 4-8 NO_x 各工况相对排放比例 (%)

4.4.2 实验二小结

本章对汽油/CNG 燃料车辆进行了 I 型冷启动排放测试，对排气中常规污染物进行了采样分析，得到了如下结论：

(1) 与燃油汽油相比，CNG 燃料在用车的三种法定常规污染物排放量有增有减，排放水平不能一直维持在较好的水平，但在抽样测量的 5 辆汽油/CNG 在用车中，燃油两种燃料时均能满足京 V 标准规定的排放限值。

(2) 车辆排放的 CO、THC 和 NO_x 主要产生于第一个 ECE 工况和 EUDC 工况，这主要和车辆冷启状态以及高速运转状态的催化器预热程度以及催化器的老化程度有关。

(3) CNG 燃料对降低 CO₂ 的排放方面有一定优势，同时在一定程度上能够有效降低非常规污染物的排放。

第 5 章 天然气公交车排放污染物排放特性

5.1 公交车车载实验目的和意义

“十二五”期间，机动车排放的 NO_x 削减量已经被列为 NO_x 总量减排约束性指标，国务院要求，在“十二五”末，北京市机动车排放的 NO_x 总量要在 2010 年的基准上降低 10% 左右。根据环保部“2010 机动车污染防治年报”公布的研究结果，全国范围内，重型柴油车的 NO_x 排放量占机动车排放 NO_x 总量的 60% 左右，因此控制重型柴油机的 NO_x 排放是完成 NO_x 总量减排目标的关键。

目前，全国已全面实施了机动车的国 III 排放标准，北京市已经先于全国提前实施了机动车的国 IV 排放标准。2012 年 5 月 31 日，北京市实施了汽柴油的京五标准，比欧 V 更加严格的机动车京 V 标准也即将发布。虽然机动车排放法规越来越严格，但是大量的研究发现，法规中要求的型式认证工况和在用车排放的检测方法并不能很好的代表机动车日常使用过程中的实际工况。再加上大气环境、地理条件、交通状况和驾驶员等因素，以及可能存在的不正当策略，相对于台架测试结果，机动车的实际道路排放很可能远远大于预期，这在使用 SCR、DPF、DOC 等先进后处理技术的机动车上表现的更为明显。因此，美国 EPA 已经通过并实施重型车的 NTE(Not-to-exceed)法规，欧洲也在欧 VI 标准中增加了使用 PEMS(portable emission measurement system)对机动车进行实际道路测试的要求。北京市也已经发布了《重型汽车整车污染物排放限值及测试方法》征求意见稿，作为实际道路排放检测的地方标准。

目前，北京市的公交车队存在很大比例的满足国 IV 标准的公交车，并且若干线路已经在使用满足欧 V 标准的公交车，其中包括很大比例的天然气车辆。这些国 IV 和国 V 车辆在实际道路中，特别是在北京市区内平均车速低、怠速比例大的工况下的排放特性如何，相比于国 III 公交车究竟能否起到理想的减排效果，有待深入研究。同时，北京市区存在大量的重型卡车，其排放标准基本为国 III 水平，并且由于燃油、维护等因素影响，可能会使实际排放进一步增高，这些车辆的排放情况也需要引起重视。

综上所述，为了保证北京市新增国 IV/V 柴油车在实际使用中能够有效控制 NO_x 的排放，需要对目前北京市正在使用的国 IV/V 柴油车以及天然气客车在实际道路上的排放进行客观评价，评价其在实际道路上的排放情况，在研究评价的基础上，根据北京市“十二五”期间 NO_x 总量控制的要求，一方面对新增重型柴油车以及天然气车提出更明确的排放控制目标，以便敦促发动机厂选择适合北京市城市工况的排放控制技术路线（SCR 或者 EGR），或者改变 SCR 控制策略，达到有效控制公交车在北京市实际道路上 NO_x 排放的目标；另一方面，也可以优化正在北京市使用的柴油车和天然气车的后处理技术，更有效的降低 NO_x 排放，完成 NO_x 总量减排要求。总之，测试并评价这些车辆在实际道路中的排放情况，对于研究现有的机动车排放技术路线、指导将来的车辆选型有着重要意义，对于未来新的压燃式及气体燃料点燃式发动机及汽车的排放标准，特别是实际道路排放法规有着重要的参考价值。

5.2 实验设备和方法

5.2.1 实验主要测试设备

实验中使用的主要仪器和设备的名称、用途等信息见表 5.1 所示。

表 5.1 污染物测量系统仪器及设备

仪器/设备	数量	模块	用途	重量（约）
SEMTECH-DS	1	NDIR	测量 CO_2/CO	50kg
		HFID	测量 THC	
		NDUV	测量 NO_2/NO	
		Ambient sensor	测量环境温湿度	
		GPS	测量经纬度、海拔并计算车速	10kg
EFM	测量排气温度、流量	10kg		
发电机	1	/	供给各测试仪器所需的 220VAC	80kg
12V 电池	1	/	稳压，并提供紧急电源	25kg

标准气体	3 瓶	/	对 SEMTECH-DS 各模块进行标零、标量距等操作	25kg
------	-----	---	-----------------------------	------

美国 Sensors 公司生产的 SEMTECH-DS 车载排放测试仪主要用来测量气态污染物，其分别采用不分光红外分析法(NDIR)测量 CO 和 CO₂，加热型氢火焰离子检测器(HFID)测量 THC，不分光紫外分析法(NDUV)测量 NO 和 NO₂，电化学分析法测量 O₂ 含量。仪器在使用前需经约 45 分钟的预热稳定，预热后采用纯 N₂ 进行标零，使用标准气体进行准确性及精确性校准，以保证仪器测量的准确性。SEMTECH-DS 流量计 EFM 可以保证响应时间为 1s，并且可以减少排气压力的波动，在排气流量较低时也能保持数据记录的稳定性。流量计带有清洗功能，测量前后通过气体反吹对压力管进行清洗，保证取样口和取样管的清洁。SEMTECH-DS 自带全球卫星定位系统(GPS)可以记录车辆行驶过程中逐秒的地理位置(即经度、纬度、高度)和行驶速度信息。另外设备对环境的要求为工作温度: 0~45℃(不带环境箱)，-10~43℃(带环境箱)，保存温度: -40~60℃，相对湿度: < 90%。各气态污染物的测量范围及精度如表 5.2 所示，其中 THC 的测试模块 HFID 可以自动根据 THC 浓度改变测量量程。

表 5.2 SEMTECH-DS 各气态污染物的测量范围和精度

污染物	测量范围	分辨率	测量精度
CO ₂	0-20%	0.01%	±3%
CO	0-8%	10ppm	±50ppm 或±3%
	0-100ppm	0.1ppm	±5ppm 或±2%
THC	0-1000ppm	1ppm	±5ppm 或±2%
	0-10000ppm	1ppm	±25ppm 或±2%
NO	0-2500ppm	1ppm	±15ppm 或±3%
NO ₂	0-500ppm	1ppm	±10ppm 或±3%

5.2.2 实验设备的安装

各种仪器在测试车辆中的安装示意图和实际照片分别如图 5-1 和图 5-2 所

示。SEMTECH-DS 将气体浓度、排气流量、环境温湿度、车速等信息逐秒记录下来并自动进行数据对正。测试仪器由发电机和电池供电。为了模拟公交车在实际运行条件下的负荷，在车内加装了 50 桶左右桶装水。全部仪器、人员、配重等共约 2000kg。

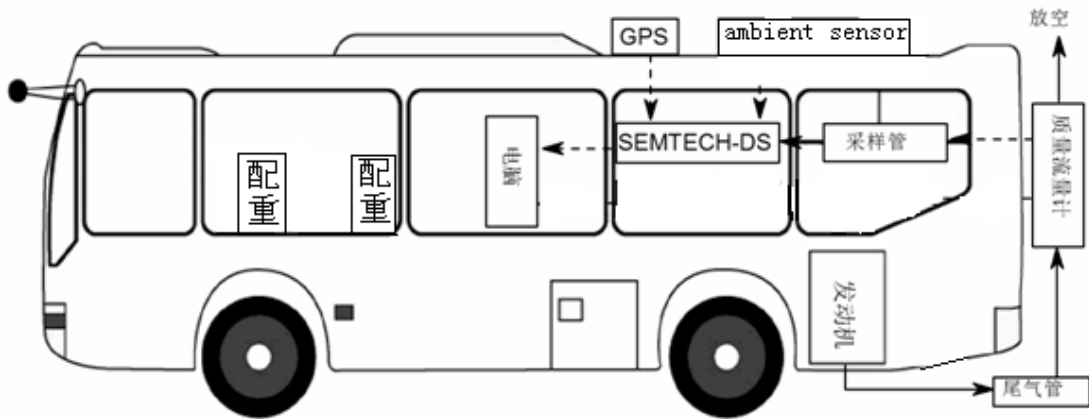


图 5-1 测试系统的安装示意图



图 5-2 测试系统的实际安装图

5.3 实验一 国 V 公交车排放污染物的排放特性

相对于国 IV 公交车以加装 SCR 系统的柴油车为主的情况，国 V 公交车的技术路线更加广泛，除了走 SCR 路线的柴油车，还有加装 SCR 的 CNG 车以及加装 DOC 的 CNG 车等。针对这种情况，国 V 公交车试验共进行了 694 路、728 路、505 路、695 路、632 路、438 路、645 路等 7 条公交线路的测试，共计 18 辆公交车。

5.3.1 国 V 公交车试验车辆分类

从全部测试车辆发动机的燃油类型、后处理型式、空燃比（理论空燃比燃烧或者稀燃）及生产厂家来看，测试的 7 个线路全部公交车可以大概分为如表 5.3 所示的几种。

表 5.3 全部测试车辆发动机燃油类型、后处理型式、空燃比及生产厂家

测试路线	燃油类型	后处理型式	空燃比	生产厂家
505、645	柴油	SCR	稀燃	A 系列
694	柴油	SCR	稀燃	B 系列
695	CNG	SCR	稀燃	B 系列
632	CNG	二元氧化催化器	稀燃	A 系列
438	CNG	三元催化器(TWC)	理论空燃比	C 系列
728	LNG	DOC+SCR	稀燃	B 系列

按照表 5.3 所示的发动机种类，可以将车辆分为如下几类：

1. 柴油+SCR（B 系列、A 系列），代表路线：505、645、694。
2. CNG+TWC（C 系列），代表路线：438。
3. CNG 发动机+二元氧化催化器（A 系列），代表路线：632。

4. CNG 发动机+SCR (B 系列), 代表路线: 695。

5. LNG 发动机+DOC+SCR (B 系列), 代表路线: 728。

对于 CO、NO_x、THC 三种污染物, 分别分析 5 种不同种类发动机各种污染物的排放情况。为了便于对比, 尽量选取平均车速接近 20km/h 的测试行程数据。

5.3.2 排放污染物中常规污染物中 CO 的排放特性

如图 5-3 所示为 5 种类型发动机典型路线、典型测试行程的 CO 整体排放因子情况。

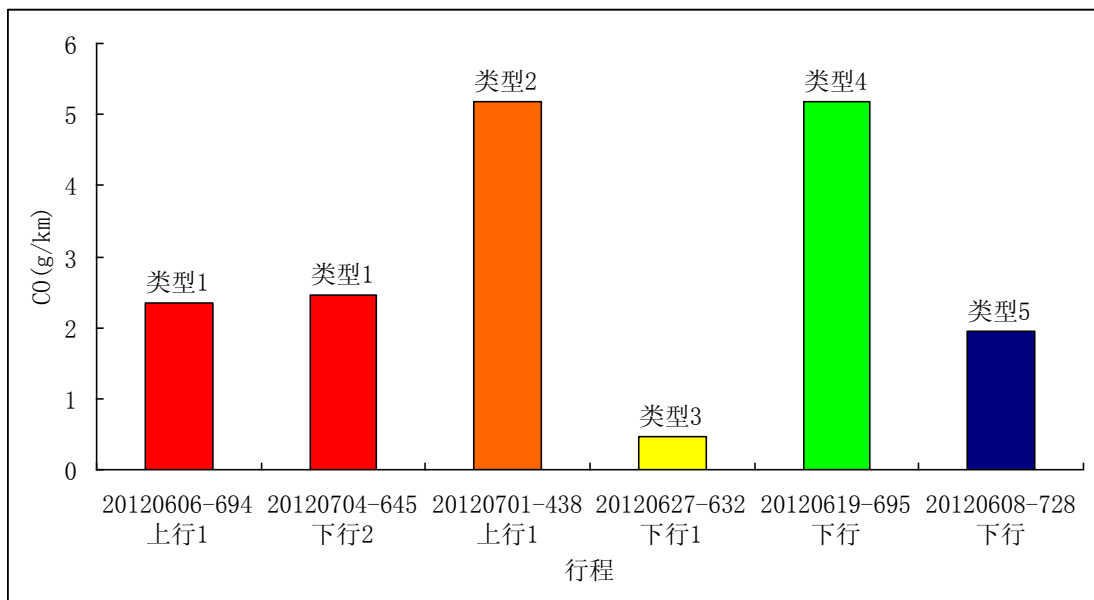


图 5-3 各种类型发动机 CO 排放情况

从图 5-3 可以看出:

类型 1 发动机 (即柴油机) 的 CO 排放比 CNG 发动机要低, 这是由于虽然除了类型 2 的大部分 CNG 机器都是稀燃, 但是柴油机的空燃比要更高一些, 因此在 CO 排放方面表现良好。

类型 2 发动机 (即在理论空燃比附近燃烧, 并使用三元催化剂的 C 系列 CNG 发动机), 原机 CO 排放较高, 由于车辆已经接近报废年限, 三元催化剂

不可避免在一定程度上失活，造成最终 CO 排放较高。

类型 3 发动机（即使用二元氧化催化器的 A 系列 CNG 发动机），CO 排放很低，可见其专门氧化 CO 和 HC 的后处理装置工作情况良好。

类型 4 发动机（即只使用 SCR 系统的 B 系列 CNG 发动机），CO 排放最高，由于 CNG 发动机燃烧比柴油机浓，并且没有专门的氧化 CO 的后处理装置，造成 CO 排放不容乐观。

类型 5 发动机（即在 SCR 系统前加装了 DOC 的 B 系列 LNG 发动机），CO 排放比类型 4 有明显改善，可见其 DOC 装置有效地氧化了 CO。

5.3.3 排放污染物中常规污染物中 NO_x 的排放特性

如图 5-4 所示为 5 种类型发动机典型路线、典型测试行程的 NO_x 整体排放因子情况。

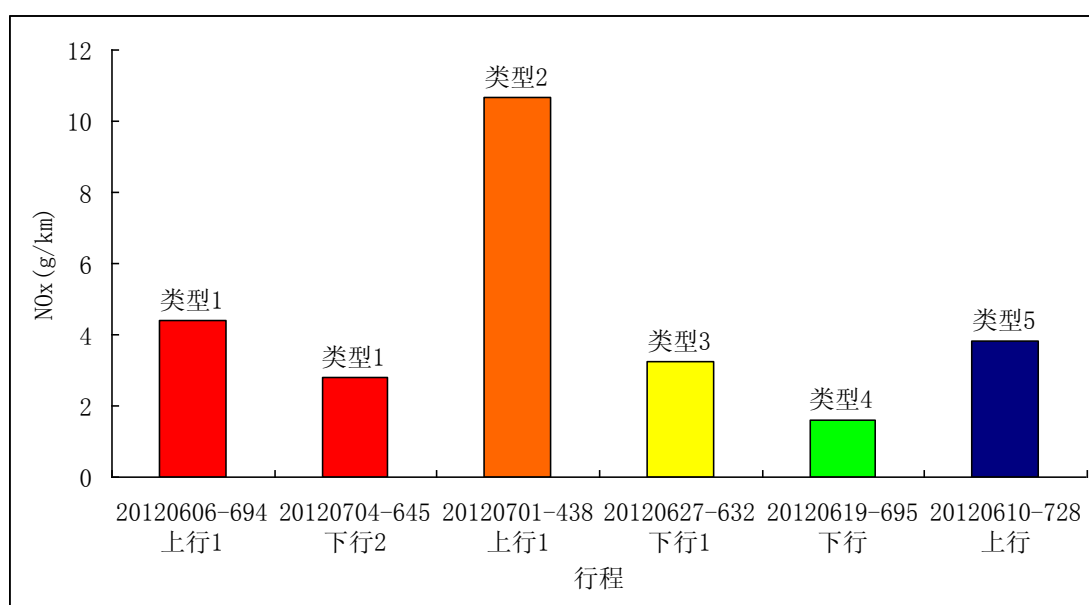


图 5-4 各种类型发动机 NO_x 排放情况

从图 5-4 可以看出：

类型 1 发动机（即柴油机）的 NO_x 排放值相对较低，但是相比于国 5 排放限值，还有待进一步改善，这可以通过改进喷射策略，对后处理系统添加

保温措施等进行优化。

类型 2 发动机（即在理论空燃比附近燃烧，并使用三元催化剂的 C 系列 CNG 发动机），由于原机 NO_x 排放较高并且催化剂失活， NO_x 排放较高。

类型 3 发动机（即使用二元氧化催化器的 A 系列 CNG 发动机）， NO_x 排放较低，但比加装 SCR 系统的其他厂家 CNG 发动机， NO_x 排放有待改善。

类型 4 发动机（即使用 SCR 系统的 B 系列 CNG 发动机）， NO_x 排放较低，其 SCR 系统工作良好。这主要是由于 CNG 发动机空燃比比柴油机低，燃烧温度较高。使用几种不同类型发动机的车辆，其排气温度随车速的变化曲线如图 5-5 所示。

类型 5 发动机（即使用 SCR 系统的 B 系列 LNG 发动机），其 NO_x 排放比同厂家的 CNG 发动机稍高，可能是由于测试路线在长安街，车辆长期在低速工况运行，排气温度较低，SCR 系统转化效率比较低。

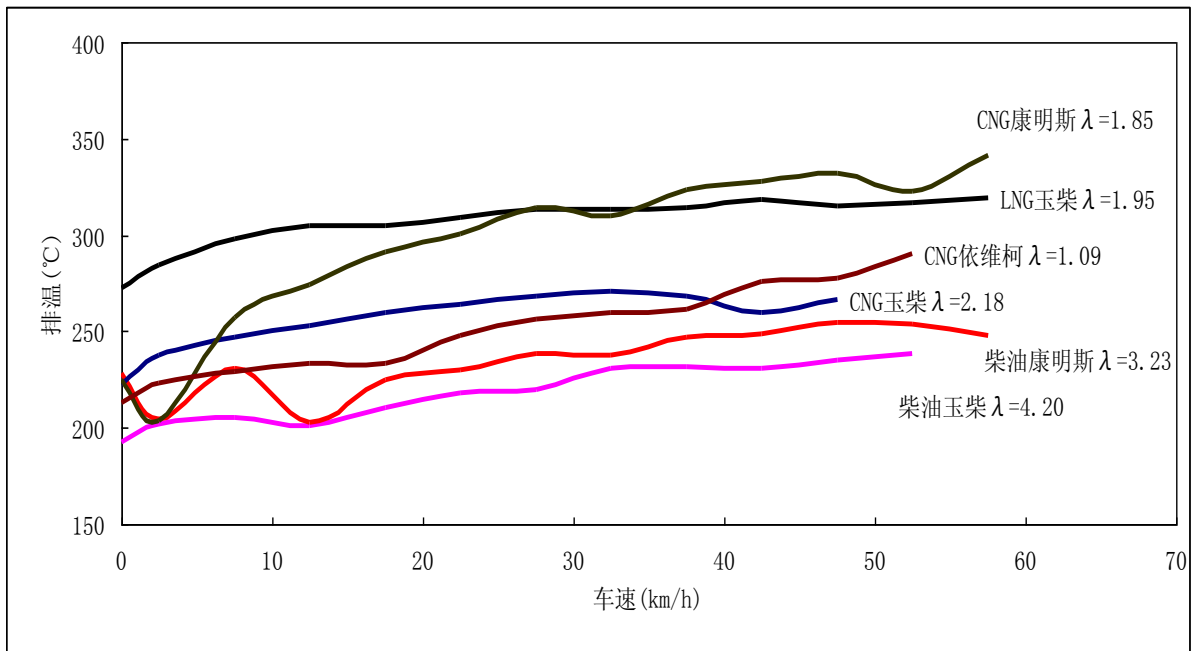


图 5-5 使用不同类型发动机的车辆排气温度随车速变化曲线

总之，对于装有 SCR 系统的公交车，其 NO_x 排放情况很大程度上取决于排气温度的高低。如图 5-6 所示，随着排气温度上升， NO_x 排放迅速下降。排气温度达到标定值时，系统才会喷射尿素并与 NO_x 进行反应。并且随着排气温度

升高，NO_x 的反应效率也会逐步提高。因此对于城市公交车，由于负荷率低，最好应优化整车控制策略，尽可能提高其排气温度。

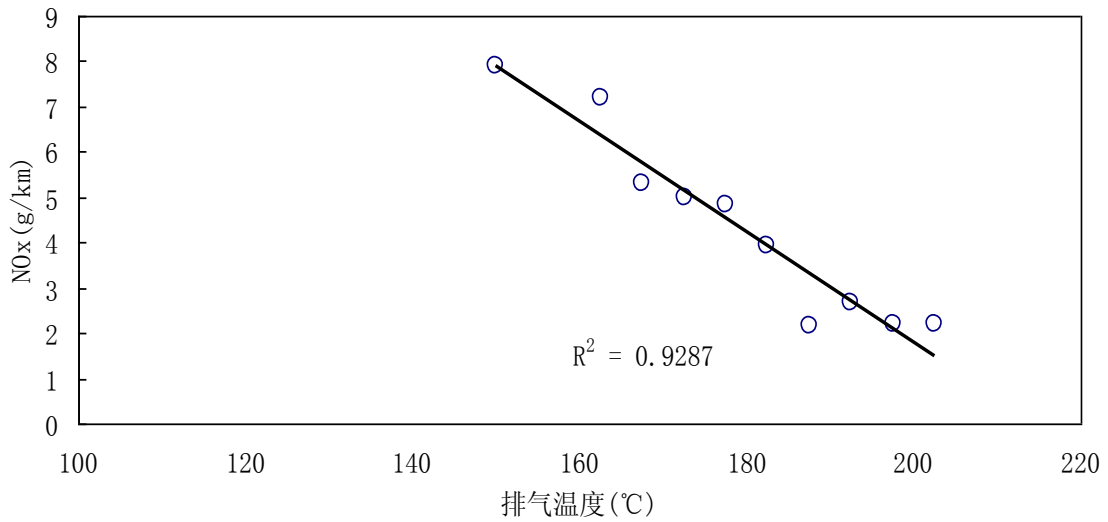


图 5-6 类型 1 的某个测试行程中 NO_x 排放因子随排气温度变化

5.3.4 排放污染物中常规污染物中 THC 的排放特性

如图 5-7 所示为 5 种类型发动机典型路线、典型测试行程的 THC 整体排放因子情况。

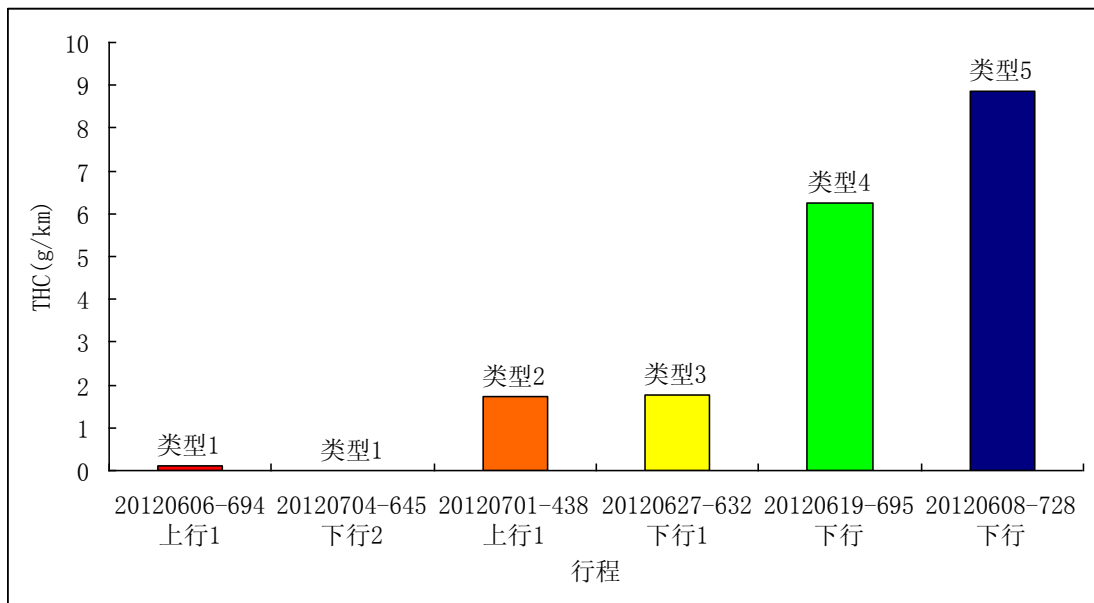


图 5-7 各种类型发动机 THC 排放情况

从图 5-7 可以看出：

类型 1 发动机（即不同厂家的柴油机），其 HC 排放特性良好，接近仪器的检测下限，这契合柴油机的稀薄燃烧特点。

类型 2 发动机（即在理论空燃比附近燃烧，并使用三元催化剂的 C 系列 CNG 发动机），HC 排放不如柴油机。

类型 3 发动机（即使用二元氧化催化器的 A 系列 CNG 发动机），THC 排放比其他 CNG 发动机低，可见其专门氧化 CO 和 HC 的后处理装置工作情况良好。

类型 4 发动机（即使用 SCR 系统 B 系列 CNG 发动机），其 THC 排放较高，尤其在急加速和急加速时尤其明显。

类型 5 发动机（即在 SCR 系统前加装了 DOC 的 B 系列 LNG 发动机），THC 排放没有比不加装 DOC 的 CNG 发动机有明显改善，说明 CNG 活性较低，DOC 没有能很好催化 CNG 的氧化反应。

5.3.5 实验一小结

1. 柴油机的原机排放，特别是针对国 IV 以上排放法规的柴油机，存在 NO_x 高，HC 和 CO 低的特性。如果 SCR 系统能良好运转，特别是在低

速低负荷时有效地降低柴油机 NO_x 排放，会达到令人满意的排放效果。这需要有效的热管理来提高低速低负荷时 SCR 的工作效果。

2. 使用 SCR 系统的 NG 发动机，由于排气温度比柴油机高，NO_x 的排放相对理想。NG 发动机的原机排放，CO 和 HC 排放较高，这明显地表现在频繁加减速的工况下。因此如果能加装 DOC，CO 排放能得到有效改善，但是对 THC 排放效果不理想。
3. 使用 EGR 来降低 NO_x 排放的 CNG 发动机，低速低负荷的 NO_x 减排效果比 SCR 系统好很多，但是高速时不如 SCR 系统。加装二元氧化催化器以后，能有效改善 CO 和 HC 排放。

5.4 实验二 国 V 公交车与国 IV 公交车 NO_x 对比

目前北京市很多路线的公交车提前使用了更高标准的国 V 车型。为了判断这些车型是否能真正起到明显的减排效果，需要将这些车型与已经广泛使用的国 IV 公交车进行对比。

由于每个测试车辆的额定质量、整备质量不尽相同，每次试验时的载重量和仪器质量也稍有区别，为了有同样的参考标准，使用 g/kg CO₂ 作为 NO_x 排放因子的单位，并参考荷兰 TNO 的研究，假设内燃机有效效率为 41%，计算得到国 IV 与国 V 重型柴油车 3.5g/(kW.h) 与 2 g/(kW.h) 的排放限值分别对应 3.1g/kg CO₂ 和 5.4 g/kg CO₂。

A 系列和 B 系列两个公司的发动机为目前公交车的主流机型，分别对比两个公司的国 V 柴油机、国 IV 柴油机和国 V CNG 机型。

5.4.1 A 系列机型三种不同排放水平的机型 NO_x 排放特性

A 系列三种不同排放水平的机型 NO_x 排放（单位为 g/kg CO₂）情况见图 5-8 所示。从图中可以看出：

1. A 系列国 V 柴油机比国 IV 柴油机型的 NO_x 排放有了一定程度的改善，但是主要体现在中等速度范围内，速度超过 40km/h 后，改善程度不明显，但是此时两者都能达到国 V 限值。两者的共同缺点是在 10km/h

以下， NO_x 排放超过国 IV 限值，对 NO_x 的控制情况都不够理想。

2. 主要使用 EGR 降低 NO_x 的 A 系列 CNG 发动机， NO_x 排放不能达到国 V 限值。但是其优势是在低速范围内比柴油机 NO_x 排放低。

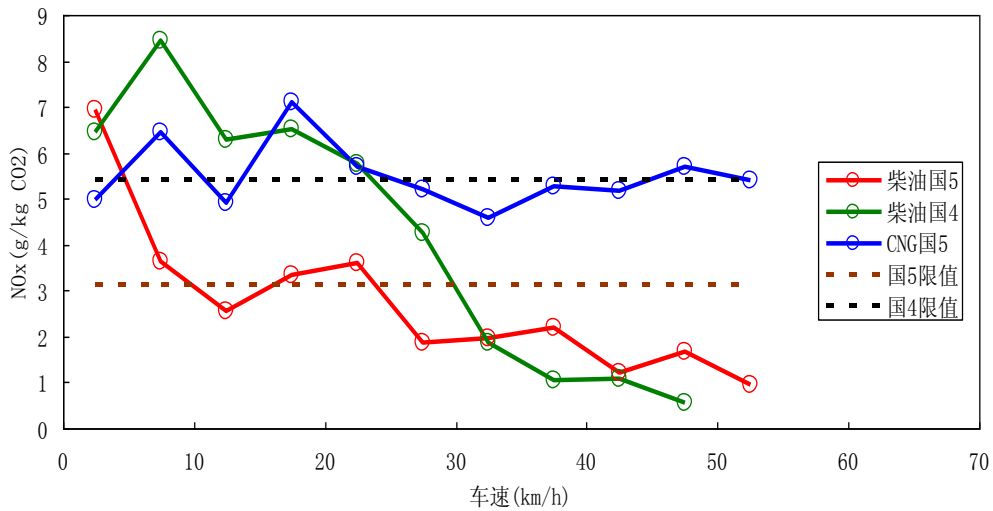


图 5-8 A 系列机型 NO_x 排放因子对比

5.4.2 B 系列机型三种不同排放水平的机型 NO_x 排放特性

B 系列三种机型的 NO_x 排放（单位为 g/kg CO_2 ）情况见图 5-9 所示。从图中可以看出：

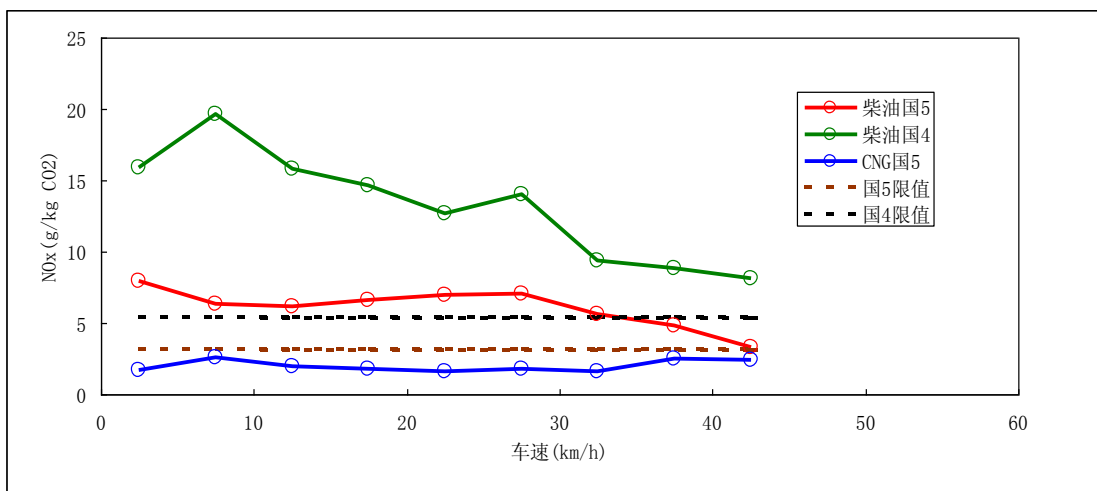


图 5-9 B 系列机型 NO_x 排放因子对比

1. B 系列国 V 柴油机比国 IV 柴油机型的 NO_x 排放有了相当程度的改善。但是其国 IV 柴油机远未达到限值，而国 V 柴油机只有在速度超过 35km/h 以后，NO_x 排放才能达标。该厂家车型 NO_x 排放情况还有待改善。
2. B 系列 NG 发动机 NO_x 排放在全速度范围都比较理想，可见其 SCR 系统工作良好，这主要得益于其相对柴油机高的排气温度。

5.4.3 实验二小结

1. 对于柴油机，从满足国 IV 法规升级到满足国 V 法规，主要是在 SCR 系统的标定策略、保温措施等方面进行改进。实验结果表明，在 NO_x 排放方面，国 V 柴油机比国 IV 柴油机有了明显进步。但是这种改进仅局限于中高速工况，在北京市区交通拥堵、平均速度低的工况条件下，SCR 的效果并没有很好的发挥，因此 NO_x 排放有待于进一步改善。
2. 对于 CNG 发动机，如果使用 SCR 系统改善 NO_x 排放，由于排气温度比柴油机高，可以较好的达到国 V 标准。如果使用 EGR+DOC 策略，虽然低速 NO_x 排放较好，但是中高速不能达标。
3. CNG 发动机的 CO 和 THC 排放有待改善，如果能使用 DOC 来氧化 CO 和 THC，能起到很好的效果。柴油机的 CO、THC 排放情况比 CNG 好很多。

第 6 章 LPG 公交车与柴油公交车实际道路排放特性对比

6.1 实验内容

7 辆 LPG 公交车和 2 辆柴油车的参数见表 6.1 所示。其中 LPG 公交车和 2 号柴油车的发动机为玉柴的产品，1 号柴油车发动机为康明斯产品。

表 6.1 试验车辆参数

车辆序号	LPG1	LPG2	LPG3	LPG4	LPG5	LPG6	LPG7	diesel1	diesel2
燃料类型	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	diesel	diesel
整车型号	ZK6118 HG	ZK6118 HG	ZK6118 HG	ZK6118 HG	ZK6110 HGV	ZK6110 HGV	ZK6110 HGV	BK612 5DK	ZK6127 HA
发动机 型号	YC6112 ZLQE	YC6112 ZLQE	YC6112 ZLQE	YC6112 ZLQE	YC6G2 20P-30	YC6G2 20P-30	YC6G2 20P-30	ISBE22 0 31	YC6L31 0-30
最大设计 总质量/ kg	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	18000	17500
整车外型 长×宽× 高/mm	11200 ×2500 ×3265	11200 ×2500 ×3265	11200 ×2500 ×3265	11200 ×2500 ×3265	11370 ×2500 ×3150	11370 ×2500 ×3150	11370 ×2500 ×3150	11850 ×2495 ×3200	12000 ×2550 ×3600
后处理 系统	TWC	TWC	TWC	TWC	TWC	TWC	TWC	无	无

6.2 实验方法

参照 5.2 中实验方法，此处不予赘述。

6.3 实验结果

6.3.1 试验车辆排气中常规污染物平均排放值

测试车辆的平均排放值见表 6.2 所示。

6.2 测试车辆的平均排放值

车辆序号	平均车速	CO ₂ (g/km)	CO(g/km)	NO(g/km)	NO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)	HC(g/km)
LPG1	22.83	539.57	0.21	8.09	1.94	10.04	0.12
LPG2	23.72	575.20	0.31	11.21	4.10	15.30	0.16
LPG3	24.70	808.04	0.35	9.71	2.07	11.78	0.56
LPG4	24.60	636.67	0.34	8.09	0.37	8.47	0.76
LPG5	26.39	573.80	0.22	14.00	3.56	17.56	0.57
LPG6	23.66	761.47	0.18	11.52	2.90	14.42	0.08
LPG7	24.70	582.33	0.28	14.23	5.12	19.35	0.27
diesel1	31.19	675.67	1.52	9.00	0.51	9.52	0.00
diesel2	18.73	935.02	3.70	9.21	0.44	9.65	0.15

6.3.2 试验车辆排气中 CO₂ 中的排放特性

如图 6-1 所示，除了 2 号柴油车的 CO₂ 排放在低速范围内稍高以外，柴油车的 CO₂ 排放与 LPG 公交车相差不大。虽然单位能量的燃料，LPG 的 CO₂ 排放要低，但是由于柴油机的效率高于 LPG 发动机，因此 CO₂ 排放相差不大。同时，由于实验车辆的载荷和工况不完全一致，会造成实验数据的误差。

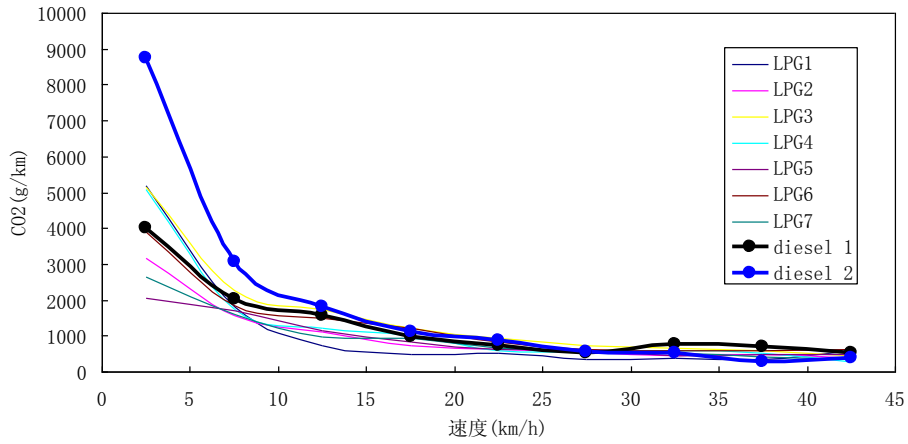


图 6-1 CO₂ 排放因子随车速的变化

6.3.3 试验车辆排气中 CO 中的排放特性

如图 6-2 所示，柴油车的 CO 排放比 LPG 公交车高出很多。这主要是因为 LPG 为进气道喷射，混合气较为均匀，同时 LPG 混合气的燃烧温度较高，有利于 CO 的氧化，同时由于 LPG 公交车三元催化剂的存在，使得其 CO 排放较低。

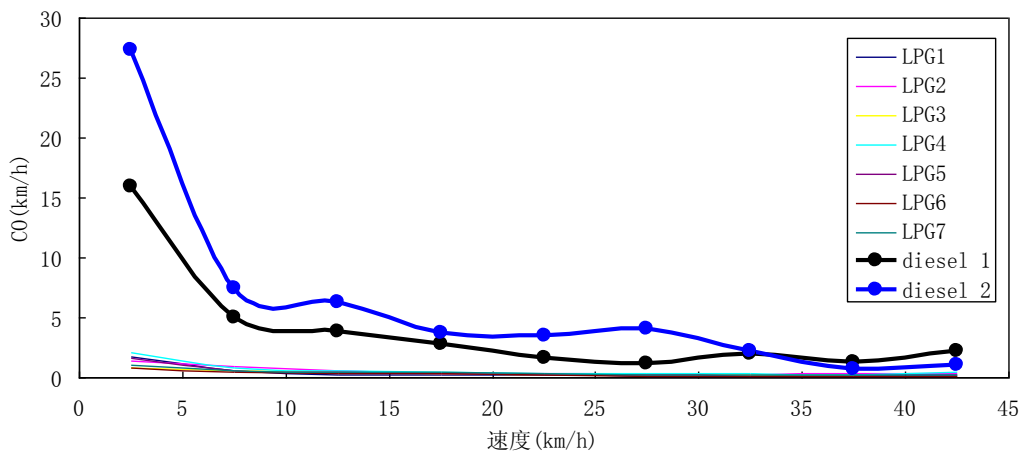


图 6-2 CO 排放因子随车速的变化

6.3.4 试验车辆排气中 NO_x 中的排放特性

从表 6.2 中可以看出，柴油车的 NO_x 排放低于 LPG 公交车。但是如图 7-3 所示，两者随着车速的变化，NO_x 排放的趋势并不一致。柴油车的 NO_x 排在低速范围很高，并随着速度的增加逐渐降低。而 LPG 公交车的 NO_x 随着车速的变化没有柴油机那么明显，并且在高速时 NO_x 排放超过柴油车。

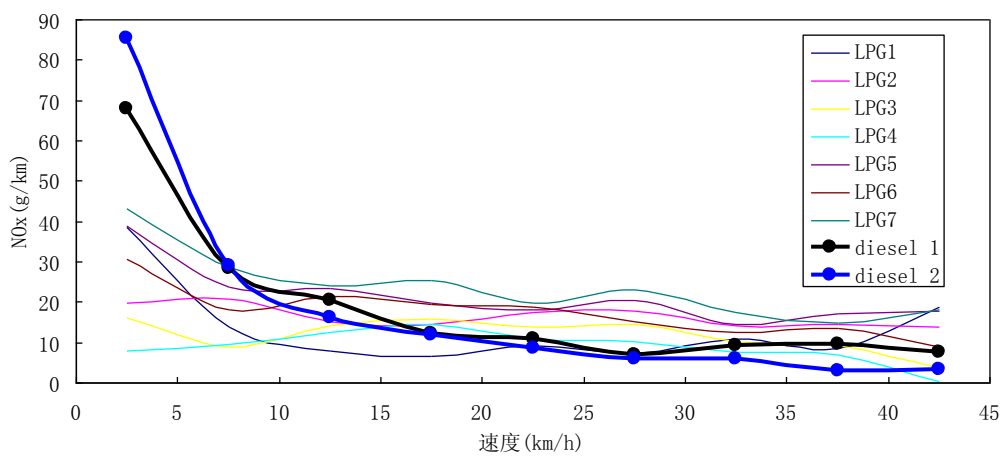


图 6-3 NO_x 排放因子随车速的变化

如图 6-4 所示，以 g/kg CO₂ 表示的 NO_x 排放因子可以看出，国 III 公交车的 NO_x 排放与 CO₂ 的比值随着车速的增加而变化不大。但是 LPG 公交车的 NO_x 排放相对 CO₂ 却越来越高。

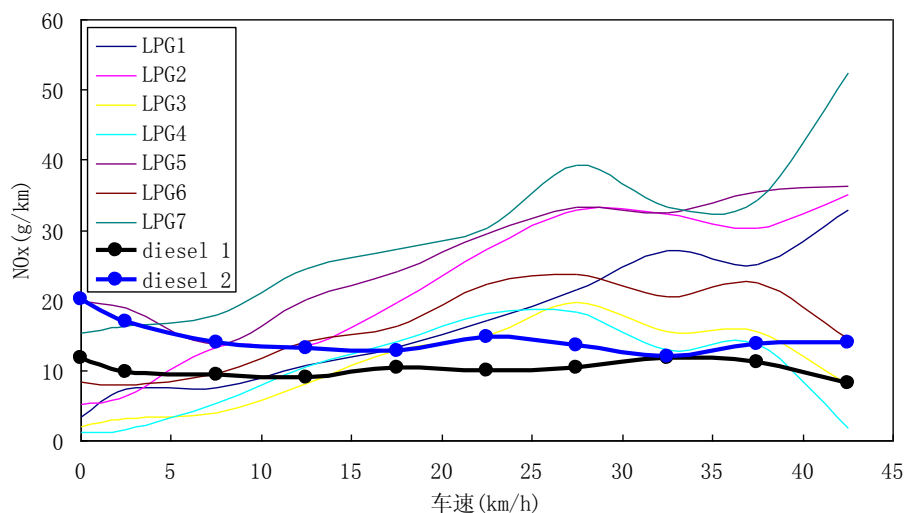


图 6-4 NO_x 与 CO_2 比值随车速的变化

如图 6-5 所示，以 1 号 LPG 车为例，由于其空燃比全大于 1，并且多分布在 1-2 的区间内，因此非常适合于 NO_x 的生成。由于 LPG 的反应活性低，要达到燃烧完全并提高经济性的效果，就必须增大点火提前角，这就又增加了 NO_x 的反应时间和缸内温度。虽然 LPG 的汽化潜热大，燃烧速度慢等因素会制约 NO_x 的生成，但是其 NO_x 排放总体还是不容乐观。

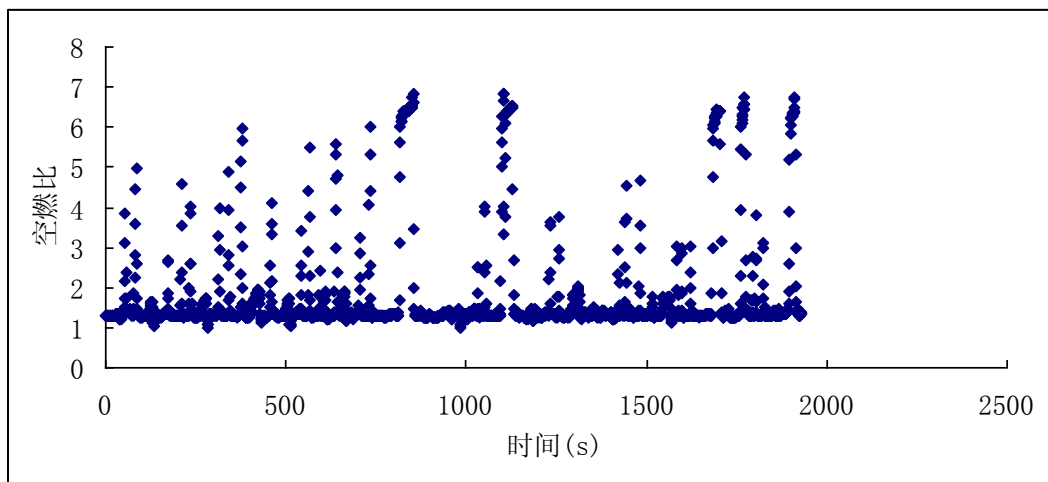


图 6-5 1 号 LPG 车辆的空燃比分布

如图 6-6 所示，仍然以 1 号车为例，随着车速的增加，LPG 公交车的空燃比增加。这与柴油车质调节的情况正好相反。可以预见，随着空燃比的增加，三元催化器对 NO_x 的转化效率会降低，因此高速时 NO_x 排放会更差。

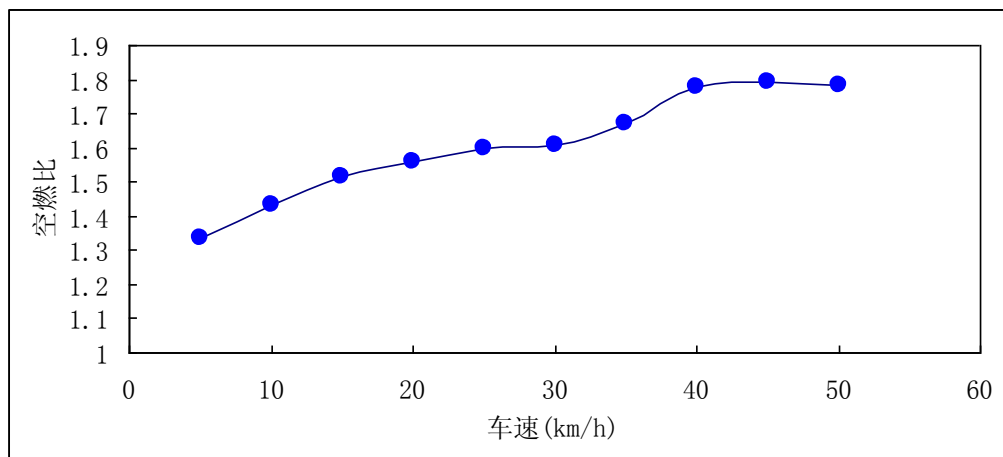


图 6-6 1号车辆的空燃比随速度的变化

6.3.5 试验车辆排气中 THC 中的排放特性

柴油车、LPG 车的 THC 排放如图 6-7 所示（1 号柴油车测试过程中 FID 出错）。可以看出 LPG 的 THC 排放非常分散，有些高于柴油车，有些却较低。这可能跟两款发动机的 LPG 供给方式为单点喷射有关，这会造成各缸均匀性不好。由于三元催化器的存在，虽然 LPG 发动机的进气是已经预混合的混合气，在缸内停留时间长，狭隙效应等会增加 THC 排放，并且燃烧速度慢使 THC 进一步增加，TWC 的催化仍然可以使其 THC 排放与柴油车在同一水平。

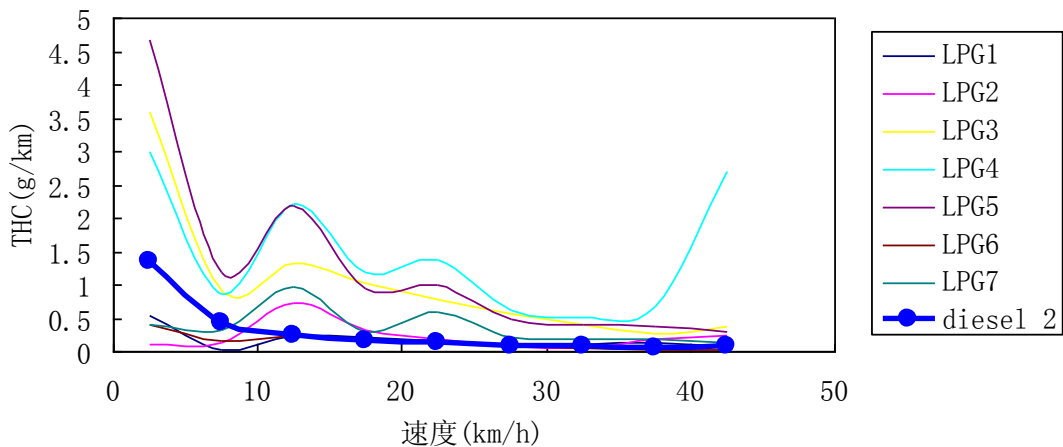


图 6-7 柴油车、LPG 车的 THC 排放

6.4 实验小结

1. 由于混合均匀，并且有三元催化剂的存在，LPG 发动机的 CO 排放低于柴油机。
2. 由于测试机型主要优化了经济性，并且空燃比的范围不利于三元催化剂对 NOx 的转化，因此 LPG 公交车的 NOx 排放情况不容乐观并且随

着车速增加变得更差。

3. 由于三元催化剂的转化，LPG 公交车的 THC 排放与柴油机处于相同的水平。

附录 替代燃料相关资料

第 1 章 车用替代燃料简介

1.1 替代燃料概述

我国从 1993 年起就成为原油净进口国以来，原油供求矛盾日益突出，成为制约我国经济发展的长期压力。另外，随着经济的快速增长，我国已全面进入现代交通运输时代，由此产生的环境污染问题日益严重。国家《“十一五”规划纲要》中明确提出，要开发天然气、燃料乙醇等石油替代品，采取措施节约石油资源。因此，发展替代燃料对于我国减少对进口原油的依赖和保护环境具有十分重要的战略意义。

《美国能源政策法规》给代用燃料的定义为：甲醇、非自然乙醇、其它酒精燃料或至少 85% 的这些燃料和汽油或者柴油的混合燃料、压缩天然气(CNG)、液化天然气(LNG)、液化石油气(LPG)、氢气、煤炭衍生物的液体燃料以及生物质能源等。作为车辆替代燃料，为了能够更好的满足车辆的经济性、动力性以及排放性能，替代燃料通常需要满足下面几个条件^[1]：(1)来源广泛，价格便宜；(2)热值能满足发动机的动力性要求；(3)在一定的气压、温度、一定时间内能够完成燃烧以满足车辆的起动性能、加速性能和行驶性能等方面的要求；(4)排放污染程度必须在国标限值范围内，排气对人体健康、自然环境等方面不存在有害影响；(5)较高的能量密度并方便储运；(6)替代燃料的应用不应造成原有发动机结构的较大变动，对发动机的可靠性和使用寿命不会有不良影响。

现阶段，车用替代燃料有很多种类，大致可以分为下面几类^{[2][3]}：(1)醇类燃料，其中最具有代表性的是甲醇和乙醇燃料，这两种燃料经常和汽油混合掺烧作为能源使用；(2)气体燃料，组分以碳氢化合物为主，主要有天然气(CNG)和液化石油气(LPG)两类；(3)二甲醚(DME)；(4)合成柴油，根据合成柴油原料的不同，分为 CTL、BTL 和 GTL3 类，其中 CTL 以煤为原料，BTL 以生物质为原料，GTL 以天然气为原料；(5)电能和氢能，这两种能源主要以

电池和燃料电池的形式进行利用。

表 1.1 列出了常用的这几种车用替代燃料的基本特性。从表中可以看出，在这些替代燃料中，除乙醇外，甲醇因为来源广泛，合成简单，价格便宜等特点，成为人们关注的热点，也是被研究最广泛的替代燃料之一。除此之外，天然气燃料也可以利用各种原料生产得到，成为汽车的理想清洁燃料；虽然续航里程较短，但是正是这一特点使得天然气汽车非常适用于城市公交车以及中小城市的出租车辆，充分显示了天然气在环保、经济、安全、战略上的优越性，在国内外都得到高度重视。甲醇和天然气的很多的优点让它成为很多国家的汽车行业很有竞争力的非石油替代燃料。

表 1.1 几种替代燃料性质对比

燃料	优点	缺点
乙醇	是极好的车用燃料，形成臭氧的烃和毒性物排放极低，可利用再生能源生产，并立足本国资源	燃料费用高，车辆续驶里程稍短
甲醇	是较好的车用燃料，形成臭氧的烃物排放极低，可利用再生能源生产。	本身具有毒性，车辆续驶里程稍短
天然气 (甲烷)	形成臭氧的烃和毒性物排放极低，可利用各种原料生产得到，特别适用于运输公司	费用高，续驶里程短，缺乏加注灵活性
液化石油气 (丙烷)	比当今汽油价格低，广泛适用于当今的清洁燃料，形成臭氧的烃和毒性物排放极低，特别适用于运输公司	费用随需求而增加，供应受到限制，安全性能差

资料来源：吴冠京等.车用清洁燃料，石油工业出版社，2004.

基于上述背景，本课题主要研究车用甲醇燃料和天然气（NG）燃料以及液化石油气（LPG）的污染物排放特性

第 2 章 甲醇燃料

2.1 甲醇燃料在国内外的应用现状

20 世纪 60 年代，为了净化内燃机的排气，一些国家对低污染的醇类燃料产生了兴趣，并开始进行研究。德国、日本、美国等国家政府和一些汽车公司都曾大力推动醇类燃料汽车的研究、试验和示范推广。中国由于目前在汽车制造技术上还比较落后，较多地采用了甲醇汽油混合燃料配制和甲醇专用汽车两种办法。

在德国，最开始使用甲醇汽油是因为第二次世界大战中的燃料短缺，但是二战结束后石油资源不断开发并多元利用导致甲醇汽油渐渐受到冷落，以至后来不再使用甲醇汽油。现在，德国车用汽油主要遵循欧盟标准体系规定的汽油燃油质量标准。根据欧盟汽油标准的规定，汽油燃料中可以加入少量甲醇来达到燃料要求的氧含量，但对甲醇的加入量进行了规定，要求甲醇的加入量最大不能超过 3%（体积分数），而且规定汽油中加入甲醇后一定要加入相应的防腐剂。

在日本，20 世纪 80 年代为了减少氮氧化物 NO_x 和碳烟等污染物的排放量并寻找多样化的能源以减少对石油的依赖，日本曾做了许多关于甲醇汽车的开发和研究，以早日缓解城市大气污染并推进替代能源的发展。使用 M3 甲醇汽油在对 22 辆不同类型车辆进行试验后发现，有若干试验车辆出现了驱动性恶化，有若干车辆在高温下出

现怠速不稳现象并且有部分车辆出现低温起动困难，此外还有油耗增加、金属部件腐蚀和橡胶部件断裂等等因甲醇的腐蚀性、溶胀性等原因造成的车辆零部件故障。因此，日本从那时起就禁止在汽油中混入低比例甲醇。

在美国，甲醇汽油在 20 世纪 80 年代和 90 年代的美国主要应用形式为 M85 燃料，当第一辆专门设计使用 M85 燃料的灵活燃料汽车（FFV）开始商业化生产后，甲醇汽车的数量有了较大幅度的上升。1981 年，福特汽车公司生产了 40 辆 Escort 汽车专用甲醇为燃料，共行驶了 300 万英里。1983 年，又

生产了 582 辆甲醇燃料汽车，行驶了 3500 万英里。然而，在此之后的一段时间内，甲醇汽油在美国的使用出现大幅度下降。这其中有很多方面的原因：作为汽车燃料甲醇存在一定的缺陷，特别是甲醇有毒不受美国欢迎；甲醇的热值较低，使用甲醇燃料的车辆活动范围较小；美国农业作物丰富，由此而来的乙醇燃料因毒性小和安全性比较好得到迅速推广；此外，CNG、LNG、电力等替代燃料在美国的发展空间比较大，这都使甲醇燃料受到冷落。目前在美国，甲醇是以原料的形式与异丁烯反应生成甲基叔丁基醚（MTBE），再以不同比例调入汽油中，但是不能直接以低剂量加入汽油中。

在中国，因为缺油少气但相对富煤，针对日趋紧缺的石油现状，实施多元化的能源战略十分必要。国内不少专家提出，在煤炭清洁转化基础上大力发展煤基醇醚燃料应该是能源战略的选择和出路。

我国从“六五”起，由国家立项，原国家科委、计经委、化工部、交通部和中科院共同在山西省组织石油、化工、汽车、环境、卫生等部门的科研院所参加，对甲醇燃料进行专项课题攻关。组织对 M15 甲醇汽油掺烧技术进行试验研究，在省运汾阳公司组织了 475 辆中吨位载货汽车进行示范运营，建立了四个 M15 加油站，累计运营里程 8000 余万公里，获得了理想的应用效果，积累了甲醇掺烧方面的经验。目前甲醇汽车的研究也主要为两种形式，一是甲醇与汽油混合掺烧；二是纯甲醇（M100）作汽车燃料研究。国家已经将山西省作为示范省启动了甲醇汽车示范工程，该省自行研制成功“华顿甲醇汽油”在太原经凯迪拉克、凌志 400、雅阁、富康、捷达、桑塔纳、金杯、解放 140、微型车等十几种车型共 23 辆汽车试验使用，污染物平均降低了 30%以上。此次检测认定，其各项指标均达到或超过同标号国标无铅汽油，环保与节能功效突出，取得较为理想的效果。

奇瑞公司在 2005 年就已经开始销售 A5 车型，此车型实现了醇燃料与汽油在任意比例掺混下的燃料供给方式，还能够 CNG 气体燃料，除此以外还能够识别不同比例的醇燃料，能够进行醇、汽油及天然气各种燃料之前的任意切换。

陕西省技术监督局颁布了《车用燃料甲醇》、《车用 M15 甲醇汽油》和《车用 M25 甲醇汽油》的地方质量标准。陕西省推广使用甲醇汽、柴油工

作领导小组已经在四个城市的五十辆大轿车、20 辆中巴车、5 辆小面包车、2 辆吉普车和 33 辆小轿车上试验使用了最新的 M15 甲醇汽油，行驶里程达到 50 多万公里。

实验证明，甲醇作为燃料应用于汽车已基本突破技术关，特别是以 15% 的比例将甲醇掺入汽油中燃烧。目前，高比例甲醇汽油计划将在山西、陕西和上海，两省一市作为实验试点进行实验和应用情况试验。经过多年的研究开发，我国在甲醇燃料汽车的开发方面已具有了一定基础，在甲醇汽油作为替代燃料带来的车辆的动力性、排放性和经济性等方面也做了较多的研究。这一切都将极大的推动我国燃料甲醇能源与甲醇汽车项目的进展，为维护我国的能源安全作出贡献。

2.2 甲醇燃料特性

生产甲醇燃料的资源丰富，可从储藏量较大的煤炭及天然气中提炼，或采用生物材料生产，生产工艺成熟。近几年的研究及应用表明，在内燃机中使用甲醇燃料，可以获得良好的动力性、经济性及排放特性。甲醇毒性高，需保证安全存放。目前使用的甲醇燃料主要有 M85（85%甲醇和 15%汽油的混合物）M100（纯甲醇）。

甲醇又叫做木醇、木精，纯甲醇是无色透明的，是易燃、易挥发的液体，能与水、乙醇、乙醚、酮和苯类等有机溶剂相混溶。甲醇有一定毒性，其蒸气与空气形成的混合物具有爆炸性，遇到明火有燃烧爆炸的危险，同时甲醇还具有腐蚀性。甲醇和汽油的理化性质比较接近，如表 2.1 所示是汽油和甲醇燃料理化特性参数。

表 2.1 甲醇和汽油的物理化学性质对比

性质	甲醇	汽油
分子式	CH ₃ OH	C ⁴ - C ¹⁴ 的碳氢化合物
相对分子质量	32.04	约 100

元素质量组成/%		
O	50	碳氢化合物
C	37.5	
H	12.5	
密度(20℃) / (kg/L)	0.792	0.73
沸点/℃	64.7	27~225
汽化热/(kJ/kg)	1167	293~841
燃烧热/(kJ/kg)	19930	43030
蒸汽压(38℃) /mmHg	239	362~775
水中溶解度/(mg/L)	互溶	100~200
闪点/℃	12	6.1
蒸汽密度(101.325kPa, 10℃) / (g/L)	1.4	2~5
自然温度/℃	500	456
辛烷值	112 (RON)	70~90 (MON)
理论空燃比/(kg/kg)	6.5	14.8
层流燃烧速度/(m/s)	52	38

从上表可以看出，甲醇作为车辆发动机的替代燃料有很多优势：

- 甲醇燃烧性能好。和汽油相比，甲醇燃料本身含氧量为 50%(质量分数)，在燃烧过程中有能够自己供氧，使燃烧更加均匀充分，减少局部缺氧或富氧情况，从而降低 CO 和 HC 的排放量；同时，甲醇的含碳量较低，在气缸内充分燃烧后排出的最终产物为 CO₂ 和 H₂O，因此，使用甲醇燃料一定程度上能够减少 CO₂ 排放，也会使发动机的热效率和经济性有所改善^[4]。
- 甲醇的辛烷值较高，有较好的抗爆性能。甲醇的马达法辛烷值为 106，研究法辛烷值为 112，和汽油混合后的辛烷值也比较高，能够提高相应发动机的压缩比，从而提高发动机的热效率和有效功率。有研究表明^[5]，发动机使用 M15 甲醇汽油后功率能够提高 2%，而燃料能耗降低 6%~8%。
- 甲醇的燃烧速度和火焰传播速度较高使其燃烧的定容比例较高，有利于

提高燃烧热效率。

- 甲醇燃料生产途径多，生产来源丰富而且生产工艺和技术路线基本成熟，价格低廉，因此可以大规模替代，其经济性优于其它车用替代燃料。

除此应用优势以外，甲醇也存在一些缺陷，但都可以通过相应的技术措施进行一定程度的改善。例如，可以在调配甲醇汽油混合燃料时加入助溶剂以促进极性不同的甲醇和汽油互溶；可以通过选择合适的发动机机件材质和热处理工艺等方法抑制甲醇汽油的腐蚀性；可以通过使用耐溶胀材料或者在燃油中添加溶胀抑制剂等方法解决甲醇汽油溶胀性问题等^[6]。

值得一提的是，虽然甲醇有很好的亲水性，易溶于水并且易降解，但是甲醇沸点较低，是容易挥发的 3 级职业性接触有害物质，一定浓度的甲醇经过皮肤、口和呼吸道时对人体都有一定程度的伤害^[7]。评价认为：“甲醇在储运和加油过程中有甲醇蒸发逸散，在正常无意外事故泄漏(大量排放)的情况下，对大气质量没有明显影响”，但是考虑到甲醇汽油的燃烧产物，甲醇燃料汽车排放的甲醛对环境的潜在危害不容忽视，特别是在城市高流量汽车环境中，多辆甲醇汽车同时持续排放的排气中含有的甲醇以及甲醛等有毒物质，会对道路上行人以及道路两边居住人群的健康造成伤害。因此，为了更好地将甲醇燃料发展和应用为车辆的替代燃料，应使车辆排气检测与净化技术与甲醇燃料汽车推广同步进行。

将甲醇掺入汽油制作出的车用燃料成为甲醇汽油，与汽油相比，由于甲醇的掺入形成的甲醇汽油的物理化学性质会发生明显的变化，如饱和蒸气压和馏程等性质均会发生较大变化使得甲醇汽油的挥发性改变使甲醇汽油的燃烧特性发生了明显的改变^[8]。

2.3 影响汽车发动机性能的甲醇燃料的主要性质

1. 化学成分及燃烧产物

由于甲醇燃料中含有氧，所以化学当量比比汽油和柴油要低，且由于含氧及 C/H 值较大，所以完全燃烧时产生较多的水及较少的 CO₂。由于排气中含水量高，所以冬天在醇内燃机汽车后面将有明显的白色蒸气尾巴。在醇内燃机起

动、暖机期间及缸内温度不高时，容易在缸壁上形成冷凝物，促使酸性物质的生成及磨损的增加。醇类燃料燃烧后，混合气的分子变更系数增大。

2. 醇的沸点及凝固点

相对于汽油来说，醇类燃料低的沸点有助于燃料-空气混合气的形成。然而由于其中缺少高挥发性的组分，故对起动不利。

醇的凝固点温度很低，所以无需担心在环境温度较低时的化油器结冰现象。

3. 热值

甲醇和乙醇的热值是优质汽油的 47.0%和 64.5%，而在理论空燃比下，单位重量的醇类燃料-空气混合气的热值与石油燃料混合气的热值基本一样，因此相应地调整供油系统，增加供油量，并不会影响内燃机的输出功率。

4. 汽化潜热

醇由于具有极性，分子间有强的氢键，汽化潜热大，混合气的温降也较大。 $\lambda = 1$ 时汽油在绝热状态下，温降约 20°C ，而纯甲醇的温降则为 122°C 。高的汽化潜热所产生的冷却效应妨碍了在运行温度下的完全汽化，使甲醇雾化、汽化困难，难以形成均匀、雾化良好的混合气。压缩终了缸内温度降低，使压燃着火的延迟期变长，同时还会影响起动性能。尽管温降不小，但还不至于达到凝点温度。但也有好的一面，醇较高的汽化潜热可以降低压缩负功、提高充气效率。

5. 辛烷值

由于醇类燃料具有较高的辛烷值，因此醇类内燃机可采用较高的压缩比，提高内燃机的热效率；并且，醇类燃料也是提高汽油辛烷值的优良添加剂。

6. 十六烷值

由于醇类的十六烷值很低，因此，在压燃式内燃机中使用醇类燃料存在许多困难，通常都需添置火花点火装置。

7. 着火极限

醇类的着火上、下极限都比石油燃料宽，因而能在稀混合气区工作，有利于排气净化及降低油耗，同时也有利于空燃比的控制。

8. 着火延迟期

醇类代用燃料的十六烷值低，着火性差，这就必然使着火延迟，工作粗暴。

9. 火焰传播速度

醇类燃料的火焰传播速度比汽油高,如均匀混合的汽油的火焰传播速度为 38m/s,而甲醇为 52m/s,这对于醇类燃料的使用是十分有利的。

10. 醇类燃料发动机热效率的综合分析

醇类燃料的热值低,因而所需的循环供油量要大大地增加;高的汽化潜热,提高了充气效率,降低了缸内温度,因而压缩比可以提高;快速的燃烧速度使得热效率提高;醇类燃料的 C / H 值较汽油和柴油小,完全燃烧时,将产生较少的 CO₂ 和较多的 H₂O,对于相同的燃烧热值,燃烧产物的比热也相对较高,这也有利于热效率的提高。另外,醇类燃料具有较宽的着火界限,燃烧速度快,在稀混合气中仍能保持较高的火焰传播速度,快速燃烧使定容燃烧部分增加,这也有利于热效率的提高,而且循环的压力波动也比汽油机小。

2.4. 甲醇燃料内燃机技术现状

由于醇类燃料与石油燃料相比有许多不同的特点,现有的汽油或柴油供油设备必须进行必要的改进,才能使内燃机燃用醇类燃料取得良好的效果。虽然,醇类燃料能量密度比汽油和柴油低,但其运输及贮存方式与石油燃料接近,因而与气体燃料相比,更便于运输车辆使用。

● 醇混合燃料发动机

在汽油机或柴油机的燃烧过程中掺烧一定比例的醇类燃料,并且保证该发动机的性能无明显下降,以这种工作方式工作的发动机称为醇混合燃料发动机。

在内燃机中掺烧醇类燃料的多少通常用醇类燃料在总燃料中所占的容积百分比(Vol%)或重量百分比(Wt%)来表示。如 M10, M15, M100 表示甲醇容积占 10%, 15%, 100%。E5、E10 则表示乙醇容积占 5%、10%。此外也有用能量百分比来表示的。

为保证内燃机燃用醇类燃料获得良好的效果,需要根据醇混合燃料(柔性燃料)的性质,改进内燃机结构及设计良好的控制装置。如在燃料调整方面调整汽油的组分或加入添加剂以改善点燃式醇类燃料内燃机的起动性能及避免汽阻;在醇类燃料中加入着火改善剂以改善醇类燃料在压燃式内燃机中使用时

的着火性能。在内燃机结构方面，点燃式内燃机增加起动时混合气的加浓装置及混合气的预热装置；在压燃式内燃机上添加辅助的点火装置；改变内燃机的压缩比、优化控制点火提前角及喷油提前角等。

(1) 在点燃式内燃机上掺烧醇混合燃料（柔性燃料）

在点燃式内燃机中掺烧醇类燃料不仅可以以醇代油，而且与燃用纯汽油相比，还具有如下优点：

- a) 辛烷值提高，可以在无铅汽油中加醇类燃料，达到含铅汽油所具备的抗爆能力；
- b) 可以扩大混合气的着火界限，燃用稀混合气，提高燃油经济性；
- c) 可以提高压缩比，从而提高内燃机的动力性和经济性；
- d) 减少燃烧室表面的燃烧沉积物；
- e) 改善排放性能等。

1. 醇混合燃料（柔性燃料）控制系统

国内外对点燃式内燃机燃料中掺烧 15%的甲醇(M15)的试验研究工作进行得较多。选择 M15 的原因在于 M15 是内燃机稍作变动的最高可接受的掺烧比极限。目前国外正式成为商品的则是 M3 及 E100 因为使用这类混合燃料，内燃机结构不需改变，材料也是相容的。

醇类燃料辛烷值高，且有一定的挥发性。易于与汽油混合，较适合作点燃式内燃机的燃料。含较少甲醇的甲醇-汽油混合燃料，与汽油性质较接近，在现有汽油机结构变动很少的情况下就能使用，而且不会因燃料供应不足而受到影响。但是它们容易损害橡胶和合成材料，这在设计供油系统时必须加以考虑。醇类燃料冷起动性能差，因此需要掺入 15%的汽油或短时使用汽油喷射来起动。

德国在 70 年代试验了“M15”混合燃料——15%甲醇，85%汽油。甲醇在当地从煤中提炼，该项目的目的是减轻德国对石油进口的依赖。在该项目的研究中，有数百辆 M15 汽车行驶了几年。目前研究的一些领域，包括能够交替燃用甲醇和汽油，以及视燃料来源情况燃用两者按任意比例混合燃料的发动机。图 2-1 所示，为可交替燃用汽油和甲醇的多燃料汽车，一个传感器通过诸如介电常数的方法测定油箱中汽油—甲醇混合比，发动机电子控制装置相应地在整个工况范围内调节喷油量和点火时刻。

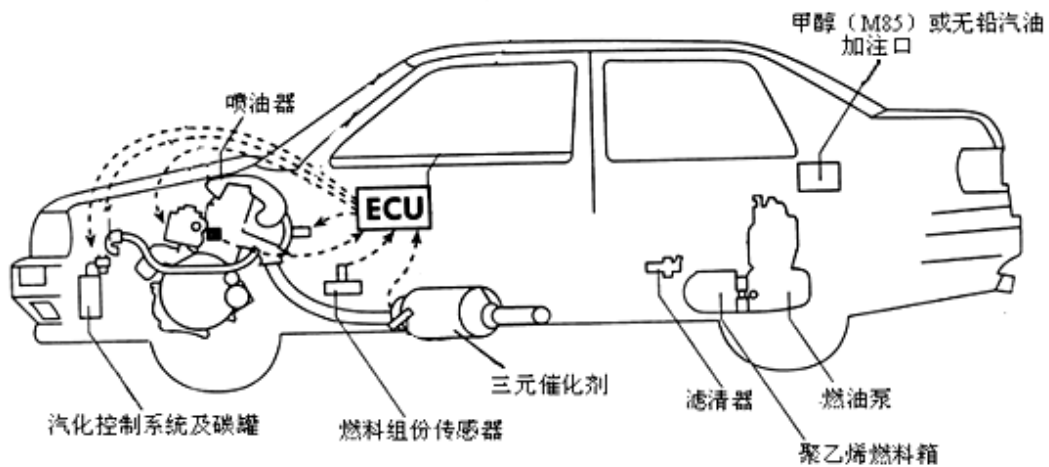


图 2-1 可交替燃用汽油和甲醇的多燃料汽车

1-进气系统；2-爆震传感器；3-火花塞；4-喷油器；5-EGR 反馈；6-电子控制单元；7-甲醇 (M85) 或无铅汽油；8-燃油泵及油量传感器；9-氟化高密度聚乙烯燃料箱；10-燃料滤清器；11-三元催化剂；12-氧传感器；13-燃料组份传感器；14-汽化控制系统及碳罐。

2. 汽油和醇类两用燃料电控燃油喷射系统

上述系统采用一套燃料喷射系统，可交替燃用汽油、甲醇或汽油、甲醇混合燃料，采用燃料组分（介电常数）传感器测定油箱中汽油—甲醇混合比，发动机电子控制装置相应地在整个工况范围内调节喷油量和点火时刻。

另外，很多燃用醇类燃料车辆采用两套燃料喷射系统，包括汽油电控燃油喷射系统、醇类燃料喷射系统及闭环反馈控制系统，可分别向内燃机进气系统喷入汽油和醇类燃料，工作在燃用汽油状态或燃用醇燃料状态，经标定匹配后也可燃用混合燃料。该类系统需要在进气系统安装多种燃料喷射装置，这装置包括喷射装置元件、输油泵及滤清器等。

(2) 在压燃式内燃机中掺烧醇类燃料

使用醇类燃料，压燃式内燃机比点燃式内燃机需要更彻底的改装。因醇类燃料的十六烷值太低，着火性能差；自燃温度高，压燃困难；汽化潜热大，延迟期加长；与柴油不易相溶，乳化困难；对多种塑料和金属有损害作用及带来喷油泵和喷油嘴中的润滑、腐蚀问题等。

由于压燃式内燃机的类型和燃烧室的型式很多，可变动的方案也较多。具体的方法有乳化液、文丘里混合法和双燃料喷射系统法等。

1. 乳化液法

利用少量的表面活性剂(如司班、吐温及高级醇等)将醇类与柴油形成稳定期为一天或数天不等的乳化液，可以由单一的油箱向喷油泵供给预先制备好了的乳化液。或者是利用较多的助溶剂使醇类与柴油形成稳定期很长、分层温度可达零度以下的透明的乳化液。相关研究表明利用醇类和柴油微乳化液在等烟度极限情况下的输出功率，燃料容积油耗量比柴油平均增加 8%~9%，而以能耗量来计量时，则能耗量略有降低。

2. 文丘里混合法

文丘里混合法是利用醇类燃料表面张力及粘度低的特点，易蒸发的特点在进气总管或进气歧管上分别安装文丘里管，醇类从一定高度的油箱中被引到文丘里管，利用文丘里管收缩喉口处的加速气流将醇类引入，并被歧管处的进气流粉碎雾化，以利于醇类的引入和雾化。起动时由于文丘里管中气流速度较低，基本上不向缸内提供醇类，因此起动比较容易。文丘里管的结构也比较简单，各缸间混合气的分配较均匀。

利用文丘里管法将醇类雾化，并与空气混合，然后通过进气道在进气冲程将燃料送入气缸，在压缩终了通过喷油嘴喷入气缸的柴油引燃。

3. 双燃料喷射系统

内燃机具有两套分开的喷油泵—喷油嘴系统，其中一套喷射醇类燃料，另一套喷射引燃柴油，在缸盖进气道上安装醇类燃料喷油嘴，采用低压喷射方式在进气冲程将醇类喷入进气道，与空气雾化混合后进入气缸。

另一种醇类燃料喷射系统采用高压喷射，与引燃柴油喷射方式相同，即燃烧室布置两种燃料喷嘴，喷嘴布置方案、引燃油束喷射角度、喷油定时和引燃油量将影响发动机性能指标。国外相关研究表明这种方法已获得较好的运行效果，掺烧的醇类达到 90%(容积比)时仍能获得可靠的着火性能及较好的燃烧性能。

● 单一醇燃料内燃机

单一醇燃料内燃机比掺烧醇类燃料内燃机具有更多的优点，如不存在混合

燃料的分配问题且不需要增加专门的混合装置。但由于醇类燃料的物性与汽油和柴油不同，首先要解决纯醇燃料发动机的起动性及燃烧稳定性问题。具体方案有：火花塞点火；采用电热塞助燃；甲醇裂解法或变质法

a) 火花塞点燃式醇燃料内燃机

点燃式内燃机本身就有点火系统，能使纯醇内燃机点火燃烧。而在压燃式内燃机上须安装点火系，用火花能量点燃混合气。采用这种方案要注意的是喷油嘴、工质运动和火花塞的位置的匹配，通常采用长火花塞，而且火花塞位于喷油嘴的下游。

有关的开发研究和实车试验表明，采用火花点火方式的纯甲醇发动机将是最有希望的机种。

点燃式内燃机燃用甲醇或乙醇来代替汽油时，内燃机需进行一系列设计修改：

1. 混合气的形成装置必须与醇类燃料较低的热值及较少的空气需要量相适应；
2. 采用高压压缩比以利用醇类燃料高辛烷值的特性，提高输出功率及改善经济性；
3. 为供给各个气缸均匀的燃油-空气混合气，蒸发潜热、蒸汽压力和挥发性能的变化对混合气的形成装置提出了更高的要求，须采用更合适的混合气形成装置；
4. 火花塞和火花塞间隙的选择；
5. 采用适当措施改善冷起动性能。点燃式纯醇内燃机改善冷起动性能的措施有辅助汽油喷射、热分解燃油、催化分解燃油、提高点火能量、改善燃油的雾化质量、燃油中添加低沸点的添加剂等。

MAN 公司开发研究的自然吸气式 M2566UH 型甲醇发动机的排量为 11.4L，标定功率为 150kW，结构如下图 2-2 所示。点火不采用压燃方式，而改用火花塞点燃，火花塞电极上镀了白金，寿命约为 2.5 万公里，显然仍不够长。

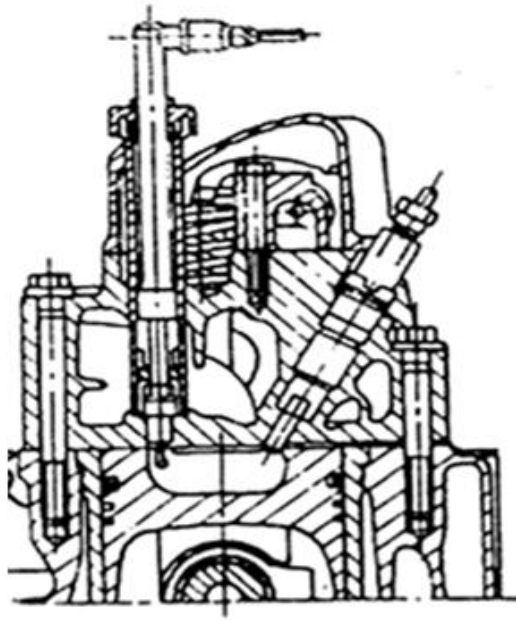


图 2-2 M2566UH 型甲醇发动机

该甲醇发动机由柴油机改制而成，保持了原柴油机的 M 燃烧方式，即甲醇大部分被喷在燃烧室壁上，逐步汽化。甲醇蒸气与燃烧室中的高速旋转空气混合，由火花塞点燃。该甲醇发动机的烟度值为零。在低速区内，甲醇发动机的转矩比原柴油机高得多。将甲醇的发热量折算到与柴油相当时，甲醇发动机的燃油消耗率仅在低速区稍差一些，在其余区域均略有改善。

将实车路试后的发动机解体后进行检查，曲轴、连杆和活塞均未见明显磨损；根据机油定期检查结果，也看不出有金属磨损增大的现象。喷油嘴针阀开启压力在行驶 50000km 后降低到 13MPa，但并没有给发动机的正常运转产生重大影响；仅在针阀座面，弹簧与支座端面处有些磨损现象。这些小问题可通过调整弹簧预紧力来解决。目前，在如何提高火花塞寿命、降低燃油消耗率和火花塞制造成本等方面还在进一步研究。

该公司开发的增压中冷 M2566LUH 型甲醇发动机与自然吸气的 M2566UH 型发动机同属一个系列，基本零件可以通用；混合气形成方式和燃烧方式均与自然吸气相同。与原柴油机相比，该机在低速区的转矩更大，完全无黑烟。若

把甲醇消耗率折算成柴油消耗率的话，在低速区比原柴油机稍差一些，在中、高速区基本相同。

由于甲醇机在低速区不受冒烟极限的束缚，就可发出比柴油机更大的转矩。

甲醇发动机的最大优点是没有炭烟排放；NO_x排放量约为直喷式柴油机的二分之一；与非直喷式(预燃室式)柴油机相比也有一定程度的下降。采用机外净化处理后，CO 和 HC 排放量达到很低的水平；另外，醛类的排放量也可控制在有关法规以内。

该发动机使用了经过特殊处理的缸套，活塞速度虽然达到 13.8m / s，但也未发生腐蚀和磨损现象。由于甲醇粘度低，存在喷油泵柱塞磨损加重的问题，在中型 6A105 发动机上，因泵的尺寸较大，在柱塞套上钻强制润滑孔后，就不再磨损了。4A95L 型发动机的泵很小，难以在柱塞套上钻孔，用开槽的方法加强润滑，发动机经累计运行数千小时，车辆行驶近 7000km 后，均未发生磨损。

相关研究结果表明，甲醇不仅是车用发动机的一种有吸引力的代用燃料，而且将成为车用发动机解决排放问题的有效途径。

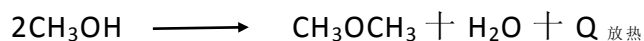
b) 压燃式甲醇发动机

目前也有研究人员在研究采用压燃方式，经初步研究表明，从技术角度考虑，纯甲醇发动机采用压燃方式也是可行的。

压燃式甲醇发动机首先要解决发动机的起动性及燃烧稳定性问题。具体方案有：1.采用电热塞助燃；2.甲醇裂解法或变质法

采用电热塞助燃方式是在压燃式甲醇发动机启动过程起作用。

日本北海道大学村山正研究室研究用催化的办法使一部分甲醇变质成为二甲基醚(Dimethyl Ether, 简称为 DME)。由于 DME 的自燃温度为 350℃，所以能和柴油一样被压燃。DME 的生成反应方程式如下：



这种变性反应可利用排气热量在催化反应器中完成。生成的 DME 可从进气管与新鲜空气混合后进入气缸；也可以通过一个设置在气缸盖中的阀门进入副室，起燃后进入气缸助燃促进醇燃料燃烧，即 DME 点火室式。DME 被压燃后起点火作用，将喷入气缸的大部分甲醇引燃。

以吸入式为对象的实际运转试验表明,使用甲醇部分变质的方法能有效地实现甲醇发动机的压燃,并在很宽的范围内平稳地运转。与柴油机相比,燃烧热效率有所提高,NO_x的排放量有所降低。

2.5 甲醇燃料汽车的排气污染

2.5.1 国外甲醇汽油车辆的排放研究进展

通用汽车的 Williams 等在 9 辆车(可变燃料甲醇车、燃用 M90 的甲醇车、纯甲醇车各 1 辆,汽油车 6 辆,供油方式为节气门单点喷射)上研究了 M15、M50、M85、M90 和 M100 的甲醇、甲醛和碳氢化合物组分,试验设备为底盘测功机、蒸发密闭室、排放分析仪、气相色谱仪(Varian Vista 6000)、高效液相色谱仪(Varian 5000),试验类型为基于美国 FTP 75 工况的排气、蒸发排放试验,结果表明,随着甲醇体积分数的增加、HC 排放减少,甲醇车的甲醇排放比汽油车高几倍,有机碳成分中 85-90%为甲醇、5-7%为甲醛、3-9%为碳氢^[9]。

美国环保局的 Gabele 等在 3 辆车(汽油车 2 辆、甲醇车 1 辆,供油方式为节气门单点喷射)上研究了 M5、M90 的常规和非常规排放,试验设备为底盘测功机、蒸发密闭室、排放分析仪、气相色谱仪、高效液相色谱仪,试验类型为蒸发、不同工况下的排气排放试验,测试工况包括 FTP 75、HFET(油耗测试循环)、NYCC(纽约市区循环)、SCC-12 和 SCC-36(评估道路实际排放的速度修正循环),结果表明,M5 排气中的常规排放与汽油相比没有明显区别、但在 FTP 75 工况下醛类排放升高,M90 的醛类排放比 M5 高一个数量级,蒸发试验中 M5 的碳氢排放和汽油相似^[10]。

2.5.2 国内甲醇汽油车辆的排放研究进展

西安交通大学的李毅等在一台排量为 1.584 升的进气道多点电喷汽油机(4G18)上对 M10、M30 和 M85 的常规和非常规排放进行了研究,试验类型为 5 种温度(-25、-15、-7、5、15℃)冷起动和怠速热车期间的准瞬态采样,

试验设备为 MEXA-7100DEGR 排放测试仪和 GC-2010 型气相色谱仪，结果表明甲醇的添加可以减少 CO 和 HC 在温度下的排放、甲醇和甲醛的排放与甲醇含量成正比关系^[11]。

天津大学的姚春德等在一台排量为 1.5 升的进气道多点喷射国 3 汽油机上对 M15 和 M50 的常规和非常规排放进行了研究，实验设备为水力测功机（WE32H）和傅立叶变换红外（FTIR）光谱测试仪，实验类型为怠速（冷启动和热车）、高怠速、负荷特性，结果表明除高怠速下各种燃料的排放变化不明显，其他工况下、随甲醇含量增加、CO 和 HC 减少、NO_x 不变、甲醇和甲醛增加、乙醛减少^[12]。

天津大学的张仲荣等在一台排量为 2.835 升的 4 缸、水冷、进气道多点喷射甲醇发动机（HL495JIQ）上对 M85 和 M100 的非常规排放进行了研究，实验设备为测控系统（PowerlinkDDM16）和气相色谱仪（HP6890-G1530A），实验类型为负荷特性试验，结果表明甲醇和甲醛在无负荷工况排放最大、随负荷增加排放先降低后增加，催化器对甲醇和甲醛转化效率明显，对甲醇的转化效率优于甲醛^[13]。

天津大学的尹超等将一台 6 缸、水冷、进气道多点喷射汽油机改造成纯甲醇发动机，在原机和改造后的发动机上对常规和非常规排放进行了研究，实验设备为排放分析仪（AVL i60）、傅立叶变换红外（FTIR）光谱测试仪，实验类型为法规重型汽油机瞬态循环，结果表明甲醇发动机的 CO、HC、NO_x 排放低于汽油机，甲醛、乙醛高于汽油机，甲醇发动机和汽油机催化器后的氨排放高于催化器前、甲醇发动机的增加幅度更大^[14]。

北京理工大学的葛蕴珊和北京创意杰发动机有限公司等对一辆进气道喷射伊兰特轿车改装为纯甲醇车前后的常规和非常规排放进行了研究，实验设备为底盘测功机、排放分析仪、二次热脱附-气相色谱质谱联用仪、高效液相色谱仪，实验类型为法规轻型车 I 型试验，结果表明甲醇车的 CO、HC、NO_x、VOCs（挥发性有机物）排放低于汽油车，甲醛排放高于汽油车^[15]。

北京理工大学的谭建伟等对一辆排量为 1.6 升的进气道喷射捷达双燃料（汽油、纯甲醇）轿车催化器前后的醛酮排放进行了研究，实验设备为底盘测功机（PECD9400）、高效液相色谱仪（HPLC），实验类型为轻型车 I 型试验和

等速工况，结果表明催化剂对甲醇和汽油的净化率分别达到 49 和 23%，各工况催化剂前后、甲醇车的甲醛排放均高于汽油车^[16]。

中国汽车技术研究中心的高俊华等在北京实施国 3 标准前选用两辆国 3 标准进气道喷射汽油车对汽油、M15、E10 的常规和非常规排放进行了研究，实验设备为底盘测功机(RPL1220)、排放分析仪(AMA4000)、密闭室(SHED-1)和气相色谱仪(HP6890)，YQZ7180 型车(15000km)按国 2 法规要求进行 I 型试验(常规、非常规)和蒸发试验，结果表明蒸发试验三种燃料的排放相同，常规排放基本一致(误差小于 6.4%)，M15 的甲醛、乙醛和甲醇排放高、E10 乙醛和乙醇排放高、汽油苯排放高；HG7202 型车(85000km、已完成耐久试验)按国 3 法规要求进行 I 型试验(常规)，结果表明 E10 的 CO、HC 和 NO_x 排放比汽油分别降低 17、8 和 21%，M15 的比例依次为 50、30 和 4%^[17]。

第3章 天然气（CNG）及天然气汽车相关技术

3.1 天然气汽车分类

天然气汽车可按多种方式进行分类。

● 按天然气燃料贮存状态的不同，大致可分为四种：

- a) 常压天然气（Natural Gas）汽车
- b) 压缩天然气（CNG—Compressed Natural Gas）汽车
- c) 液化天然气（LNG—Liquefied Natural Gas）汽车
- d) 吸附天然气（ANG—Absorbed Natural Gas）汽车

目前，天然气采用常压贮存的气包式常压天然气汽车已十分少见了，一般都是采用高压气瓶盛装天然气的压缩天然气汽车，将天然气压缩至 20MPa 左右贮存在高压气瓶中，但仍然存在天然气的储存能力较小，气瓶自重较大的缺点；液化天然气汽车所携带的燃料是将深冷至-162℃的 LNG 储存在低压低温绝热容器中，容器自重较轻，存储能力较大，但生产 LNG 投资费用及能耗高，经济效益比 CNG 差，另外，储存 LNG 对容器的绝热保温能力要求高。因此，LNG 汽车在世界各国均处于试验阶段，尚未商品化；吸附天然气汽车所携带的天然气燃料采用活性炭等吸附剂吸附。该活性炭颗粒结构中微孔多，适合大量吸附天然气，每克活性炭颗粒的表面积可达 3000m²，比重为 0.6~0.7。在常温、3.5MPa 压力下，每克活性炭吸附甲烷可达 17g。标准状态下，每立方米活性炭可吸附甲烷 170m³。吸附天然气汽车仍处于研究开发阶段，若天然气吸附技术实用化，则可大大降低压缩成本，提高天然气汽车的燃料携带能力，增加天然气汽车的续驶里程。

目前，尽管各种天然气汽车的天然气燃料贮存状态及储存容器不同，但发动机本身的结构及工作情况基本相同。技术最成熟并得到广泛推广使用的天然气汽车主要是压缩天然气（CNG）汽车。

● 按发动机燃料供给系统的不同进行分类

压缩天然气汽车按其燃料供给系统的组成不同或根据天然气发动机使用

燃料的特点不同，可分为以下几种：

- a) 单一燃料 CNG 汽车：这是一种针对天然气单一燃料的特性而专门设计制造的汽车。它使用的发动机可以最大限度地发挥气体燃料的优势，多用于气源供应充分的地区，如油田，或是气源供应稳定的城市公交车辆。
- b) 天然气—汽油两用燃料汽车：该种汽车配备两套燃料供给系统，采用任何一种燃料无论是天然气还是汽油，其发动机都能正常工作，利用选择开关即能实现发动机从一种燃料到另一种燃料的转换，两种燃料不允许同时混合使用。该车用发动机需同时兼用汽油与天然气两种燃料，又称灵活燃料发动机。该类汽车在天然气供气系统尚未形成网络的地区较为适用。两用燃料发动机可以方便地通过对现有点燃式汽油发动机的改造实现。
- c) 柴油—天然气双燃料汽车：该汽车发动机同时使用天然气和柴油两种燃料，以少量的柴油作为引燃剂，其余大部分燃料为天然气燃料。

3.2 车用天然气燃料特点及燃烧特性

3.2.1 CNG 燃料特点

天然气分为气田气和油田伴生气，其主要成份是甲烷。由于各地天然气成分及生产工艺存在差别，因此导致了各地车用天然气燃料成分的差异。

由于天然气从高压气瓶到发动机的过程中要经过几次减压，减压过程中会出现局部低温，因此作为汽车燃料的天然气与管道天然气相比，需要满足更严格的气质标准，以避免天然气在减压降温过程中造成水和烃类的凝结聚集，使材料腐蚀失效或管道堵塞而影响正常工作。这就要求对进入加气站的天然气在压缩前和压缩后进行净化和干燥处理。这一过程可以概括为“三脱”：即脱水、脱烃、脱硫。

脱水，即脱除天然气中的水分，使含水量 $<16\text{mg}/\text{m}^3$ ，以防止 CNG 在减

压膨胀降温过程中使供气系统造成冰堵。

脱烃，即脱去天然气中的轻烃，使乙烷及重烃含量 $<3\%$ ，以防止发动机点火燃烧不正常。

脱硫，即脱除天然气中的硫化氢等酸性气体。使其分压 $\leq 0.35\text{kPa}$ ，以防止对设备管线和气瓶的腐蚀。

天然气经过净化和干燥后方可对加气站的气瓶充气储存或给 CNG 汽车气瓶充气。因此车用天然气是除去绝大部分硫、硫化物、水及重烃的以甲烷为主的天然气。

美国消防协会（NFPA）关于压缩天然气（CNG）汽车燃料（1992 年版）规定的 CNG 气质要求如下：（以储气瓶内条件为准）：

H_2S 和可溶性硫化物分压 $\leq 0.00035\text{MPa}$

水蒸汽 $\leq 16\text{mg}/\text{m}^3$

CO_2 分压 $\leq 0.048\text{MPa}$

$\text{O}_2 \leq 0.5\%$ （V）

我国为了保障国内天然气汽车事业的健康发展，也制订了有关的压缩天然气汽车技术标准。表 3.1 为中国石油天然气总公司制定的《汽车用压缩天然气》技术要求的行业标准。表 3.2 为天然气与汽油及柴油的物性比较。

表 3.1 汽车用压缩天然气技术要求

项目	质量指标	试验方法
高位发热量/（ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ）	>31.4	GB/T 11062
硫化氢（ H_2S ）含量 /（ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ）	<20	GB/T11060.1 或 GB/T 11060.2
总硫（以硫计）含量/ （ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ）	<270	GB/T 11061
二氧化碳（ CO_2 ）含量 （V/V）/%	<3.0	SY/T 7506
水露点	低于最高操作压力 下最低环境温度 5°C	SY/T 7507 （计算确定）

注：1.为确保压缩天然气的使用安全，压缩天然气应有特殊气味，必要时加入适量加臭剂，保证天然气的浓度在空气中达到爆炸极限的 20%前能被察觉。
2.气体体积为在 101.325kPa，20℃ 状态下的体积

表 3.2 天然气、汽油及柴油物性比较

燃料种类		天然气	汽油	柴油
性质		(甲烷)		
主要成分质量分数/%		75C, 25C	85C, 15H	86C, 13H
密度/(kg·m ⁻³)	气相	0.715	-	-
	液相	424	700~780	840
沸点/℃		-161.5	30~190	170~350
凝固点/℃		-182.5	-57	-20~0
临界温度/℃		-82.6		
临界压力/MPa		4.62		
汽化热/(kJ·kg ⁻¹)		510	310	270
气/液容积比(15℃)		624		
理论空燃比	质量比	17.25	14.8	14.3
	体积比	9.52	8586	9417
低热值/(MJ·kg ⁻¹)		50.05	43.9	42.5
混合气热值/(MJ·m ⁻³)		3.39	3.73-3.83	3.79
辛烷值(RON)		130	80~99	20~30
着火极限/%		5~15	1.3~7.6	1.5~8.2
着火温度(常压下)/℃		537	390~420	230
火焰传播速度/(cm·s ⁻¹)		34~37	35~47	
火焰温度/℃		1918	2197	2054

天然气作为车用发动机燃料具有以下特点：

1. 天然气是一种较清洁燃料。在常温下为气态，以气态进入内燃机，燃料与空气同相，混合均匀，燃烧比较完全，可大幅度降低 CO 和 HC

的排放量，彻底改善微粒排放污染。天然气经净化处理后，其有害物质含量比液体燃料要小得多，如 S 的含量远低于汽、柴油。由于天然气火焰温度低，也会使 NO_x 排放量减少。此外以甲烷为主要成份的天然气是碳氢原子比最小的烃类化合物，以产生相同热量计算甲烷产生的 CO_2 也可比汽油及柴油降低 20% 以上，这对减小造成地球变暖的“温室效应”也是大有好处的。

2. 天然气使用特性好。以天然气为燃料的发动机，冷起动性能好，运转平稳，不含汽、柴油中存在的胶质，因而在燃烧中不会产生如汽、柴油燃料中胶质产生的积炭。并且，气体燃料不会对机油产生稀释，因此发动机寿命长，使汽车大修里程提高。
3. 天然气有较好的抗爆性。天然气辛烷值高，约为 130，高级汽油的辛烷值在 96 左右，所以天然气不需要添加剂或加抗爆剂等。当天然气应用于汽油机，可适当增大发动机压缩比和点火提前角，以提高发动机性能。
4. 天然气还具有较好的安全性。天然气储存在经专门设计加工的、高强度的气瓶内，传输和加注均是在封闭的管道内进行，气瓶不易破坏，管路不会泄露。即使有泄漏现象发生，由于天然气比空气轻，在空气中遇微风即被驱散，加上天然气燃点高（ 537°C 以上），不易形成可燃性混合气，所以汽车用天然气不易产生火灾事故，比用汽油更安全。
5. 天然气的携带性差。常温下天然气极难液化，只有采用先进的膨胀制冷技术将其冷却到 -162°C 才能液化。而且，无论是液化设备还是车上贮罐，造价都很高。目前广泛采用的天然气燃料均采用高压（20MPa 左右）贮存在高压气瓶内，使汽车自重加大，车体内有效空间减小，同时限制了汽车的续驶里程。
6. 天然气发动机动力性下降。由于天然气燃料本身是气态，会占据部分气缸容积，充入缸内的空气量比使用液体燃料大约少 10% 左右，使相同体积的可燃混合气热值降低，与同排量的汽油机相比，使用天然气时发动机功率有所下降。

3.2.2 车用 CNG 的燃烧特性

目前大部分气体燃料发动机，都是由原液态燃料发动机改装而来，而且一些天然气汽车是由原汽油车改装而成的两用燃料汽车，可以燃用天然气，也可以燃用汽油。为了兼顾天然气、汽油两种燃料在发动机工作过程中不同的燃烧特性。在改装时，对原汽油机的结构参数，如压缩比、进排气道尺寸都未做改变，只是加设天然气燃料供给系统的零部件及燃料转换装置。一般汽油机在改用天然气以后，发动机的动力性能与原汽油机相比会有一定程度的下降。其功率降低的多少是衡量改装系统以及改装质量好坏的重要指标。

由汽车发动机的原理可知，发动机的输出功率可简单地表示为：

$$P_e = k H_u V_s n \phi_c \eta_i \eta_m \quad (3-1)$$

式中： V_s ——发动机气缸的工作的容积，L；

n ——发动机的转速，r / min；

H_u ——可燃混合气的热值；

ϕ_c ——发动机的充量系数；

η_i ——发动机的指示效率；

η_m ——发动机的机械效率；

k ——常数。

通过分析发动机使用不同燃料时这些相关参数的变化，就可以比较出发动机功率损失的程度。

1. 天然气空气的混合气热值降低

天然气的热值约为 50.05MJ/kg，汽油的热值为 43.9MJ/kg，天然气体的热值比汽油的热值约高 12%。但天然气与空气的混合气的热值为 2.76MJ/kg，而汽油与空气的混合气热值为 2.8MJ/kg，天然气与空气的混合气热值要比汽油空气的混合气热值低 1.5%左右。

2. 充量系数减小

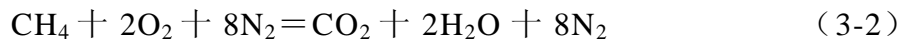
由于气体燃料供给系统需增加气体燃料与空气的混合装置，在混合管道过长、过细时，进气系统的阻力增大，因此充量系数有所降低。由于天然气占据一定的气缸容积，使空气进气量比使用液体燃料时减少约 1/10。

3. 发动机热效率的减小

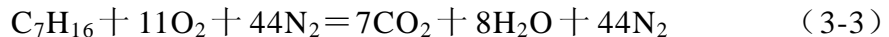
天然气和空气的混合气与汽油和空气的混合气一样，都是通过火焰传播而燃烧的。但天然气在燃烧时，火焰的传播速度却较慢，这样，不仅燃烧速度降低，而且还会增加传热损失，因此天然气发动机的热效率较低。

4. 燃烧前后气体摩尔数的变化

天然气发动机功率下降的原因之一，是由于天然气燃烧后分子改变系数减小。以天然气的主要成分甲烷为例，燃烧的反应式为：



由此看出，天然气燃烧前后气体的摩尔数没有变化，即分子改变系数等于 1，而汽油燃烧时，以庚烷为例，其燃烧的反应式为：



燃烧后的气体摩尔数由 56 增加到 59。分子改变系数为 1.05。

因此，与汽油相比较，天然气燃烧前后摩尔数基本没有改变，从而影响到功率输出。

此外，当发动机改装前后机械损失功率相等时，由于天然气发动机的指示功率降低了，也使其机械效率有所降低。

综上所述，使用天然气燃料时，汽车发动机的输出功率要比使用汽油机时有所降低，对改装的天然气发动机来说，输出功率比使用汽油时约低 15% 左右，最大扭矩相差可达 13%。

3.3 车用 CNG 供给系统

压缩天然气供给系统的主要功能是根据汽车发动机各种运行工况的需要调节可燃混合气的空燃比并提供合适的混合气量。自压缩天然气系统在汽车上应用以来，相关技术已得到了长足的发展，天然气发动机的性能也有了大幅度的提高。

3.3.1 车用 CNG 供给系统发展概况

根据技术发展的完善程度可将其产品分为三代：第一代机械控制混合器

供气系统；第二代产品是在第一代机械式供气系统基础上发展起来的电子控制混合器式供气系统；第三代产品为电子控制天然气喷射系统。

1. 机械控制式混合器供气系统

机械控制式混合器供气系统的基本组成见下图 4-1。早期车用汽油机燃料供给系统大多采用化油器，因此第一代的 CNG 发动机都是由化油器式发动机增加一套天然气供给系统而实现的。气瓶内的高压天然气先通过减压器降压，然后在混合器内与空气混合。以文丘里管式混合器为例，其构造与化油器的喉管相似，如下图 4-2 所示，内腔周围开有一圈小孔。由于截面收缩，空气在喉管中流过时产生真空度，减压后的天然气从周围的小孔进入混合器与空气混合后成为天然气-空气混合气，被送往发动机进气管。混合器可以装在化油器的前面或后面。

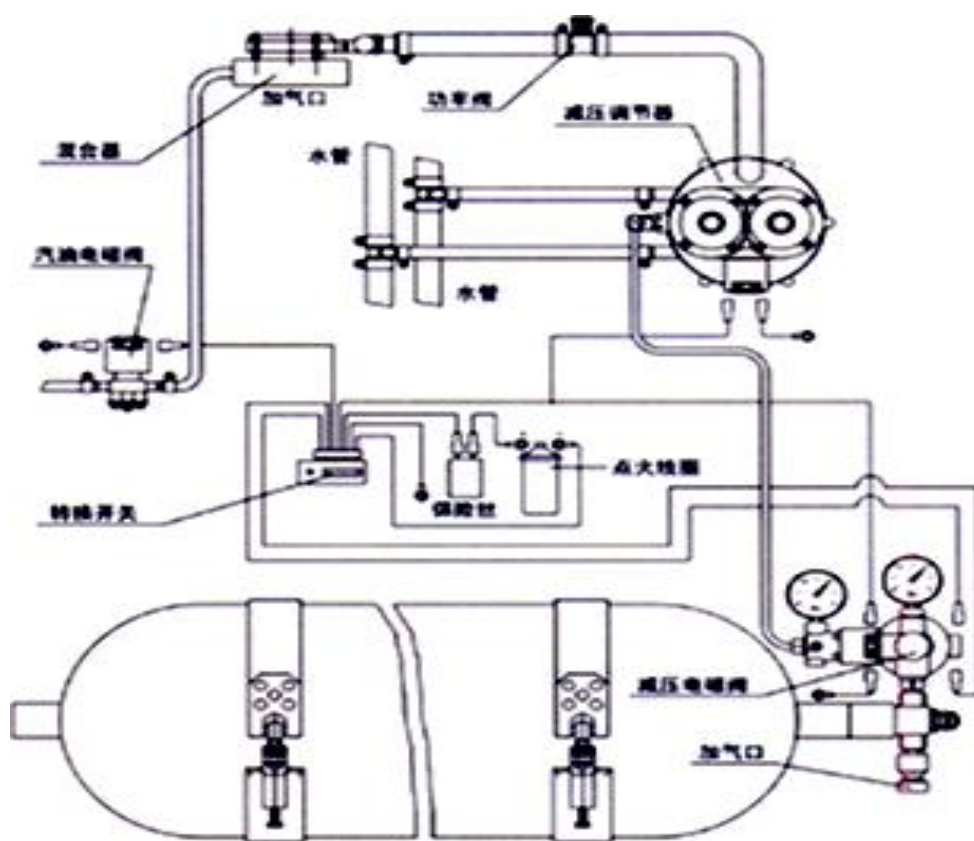


图 3-1 机械控制式混合器供气系统



图 3-2 文丘里管式混合器

2. 电子控制混合器式供气系统

电子控制混合器式供气系统是在第一代机械控制式混合器基础上,加装电控系统,依据排气管中氧气传感器的信号判断混合气的空燃比,进行闭环控制,并采用三元催化后处理器降低排放。

下图 3-3 所示的车用发动机天然气供给系统是在原文丘里管式混合器供气系统基础上改装实现的。在天然气混合器的供气管路内有功率调节器,天然气流量由步进电机控制,电子控制单元依据氧传感器的信号控制步进电机的动作来改变天然气的流量,以保证在各工况下都能供给发动机接近理论混合比的混合气。

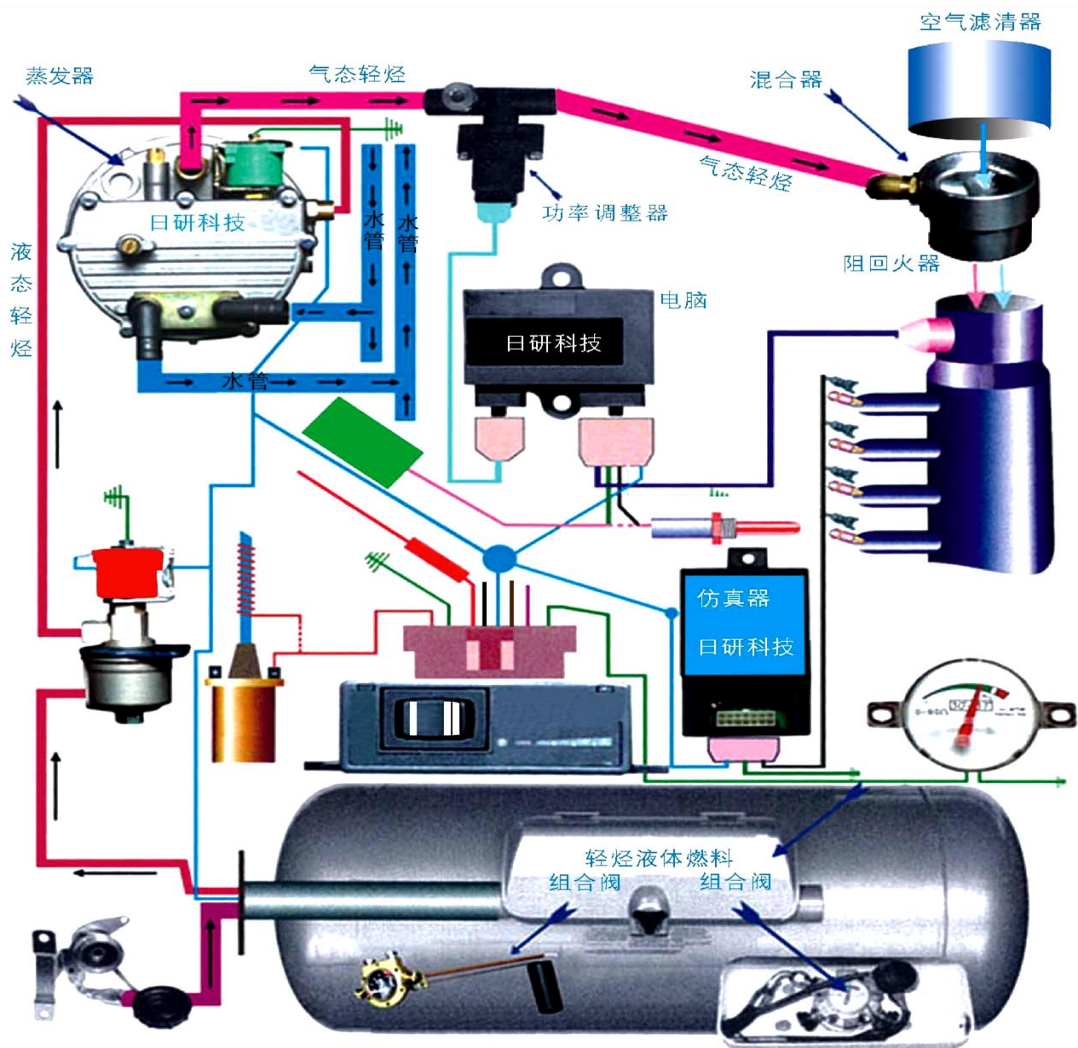


图 3-3 车用发动机天然气供给系统

由于这种单一调节阀控制的天然气流量范围较大，当发动机怠速时，天然气流量较小，因而难以控制精确（会使发动机怠速不稳），因此，一些天然气发动机又增加了怠速调节装置。第二代电子控制混合器式供气系统相比第一代机械控制式混合器系统，混合气的总空燃比控制较为精确，但混合气的各缸分配均匀性依然受进气管等因素影响，不能实现对各缸性能的精确控制，难以满足日益严格的排放法规，因此天然气供气系统逐步过渡到电子控制天然气喷射系统。

3. 电子控制天然气喷射系统

电子控制天然气喷射系统按系统的布置方案不同可分为单点电控喷射系

统和多点电控喷射系统，多点电控喷射又可进一步分为同时喷射、分组喷射和顺序喷射几种控制方式。

(1) 电控单点喷射系统：

美国福特公司 GFI—II 型 CNG 系统，如下图 3-4 所示。它采用组合式流量控制阀，实现从小流量到最大流量同样精度的控制，精确控制的燃气量由气体喷嘴喷入进气总管。在发动机各种工况下，准确地控制空气/燃料比。天然气调压器将燃气的压力调节在常压至 0.69MPa。该系统可应用在汽油机（1~8L）和柴油机（30~300kW）上。系统部件包括天然气调压器、电子控制单元、天然气喷射阀、温度传感器，一个燃料选择开关（用于双燃料）等。该系统的工作原理如下：压力为 20MPa 的压缩天然气贮存在气瓶内，高压天然气流经高压管进入 GFI 调压器，天然气压力降至常压~0.69MPa。计算机确定发动机瞬时所需的燃气量并转向控制七个喷射阀的合理组合，天然气经橡胶软管至空气滤清器中的喷嘴；该系统同时优化控制点火系统以得到最佳的点火时间。

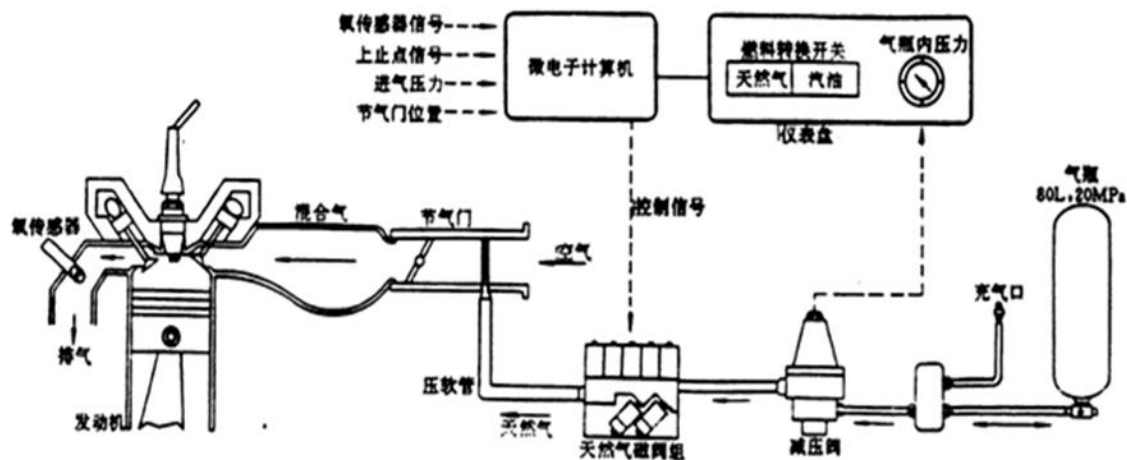


图 3-4 美国福特公司 GFI—II 型 CNG 系统

沃尔沃 THG103 低排放 CNG 稀燃发动机（正常工况 A/F 是 22:1 至 26:1，怠速时是 20:1），如图 3-5 所示，排量为 9.16L，开式燃烧室，稀薄燃烧方式。高压天然气由单级减压系统减至 1MPa，再由 4 只 PWM 电磁控制喷射阀喷入

进气总管，该发动机以稍高一些的 CO 及 HC 排放为代价，获取了最低的 NOx 排放。

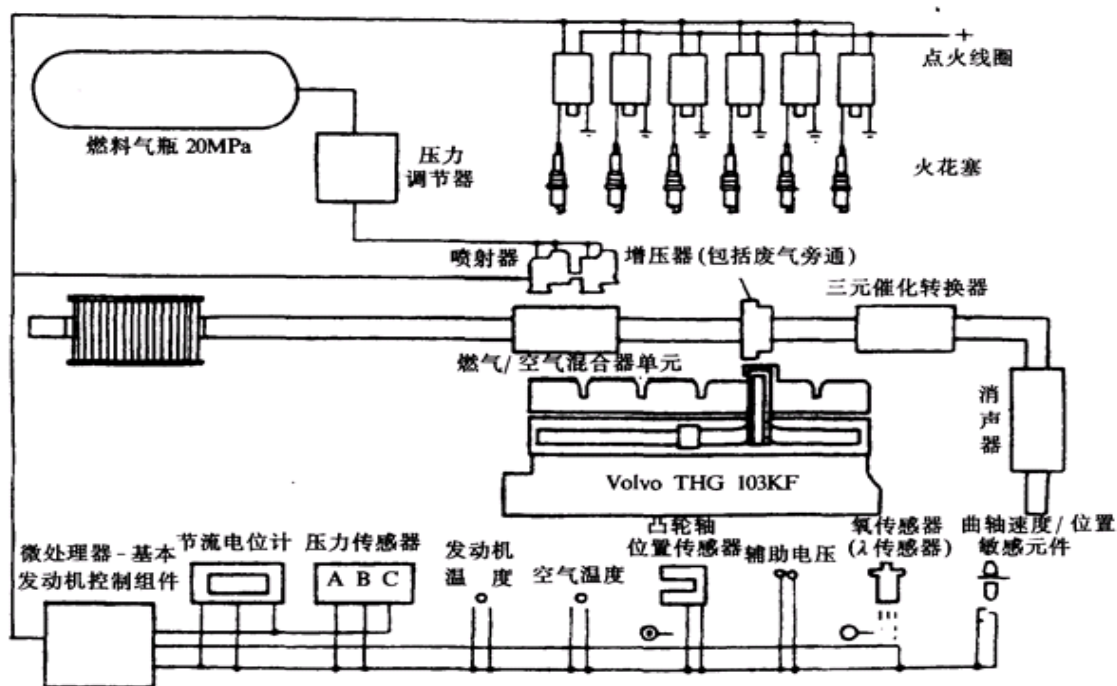


图 3-5 沃尔沃 THG103 低排放 CNG 稀燃发动机

单点喷射系统控制相对简单，国内玉柴等早期开发的单一燃料天然气及 LPG 发动机单点喷射系统可保证形成较均匀的混合气，避免各缸间充量浓度不均匀对发动机的性能及排放造成的影响。但混合气量的各缸分配均匀性依然受进气管等因素影响，不能实现对各缸性能的精确控制，难以满足日益严格的排放法规，因此天然气供气系统逐步过渡到电子控制天然气喷射系统。

(2) 电控多点喷射系统

1) 多点同时喷射或分组喷射系统

荷兰 TNO 研究所在 1995 年将德国大众汽车公司的 VW2.5L T4 发动机改用天然气，采用多点电控喷气系统，如图 3-6 所示。MEGA 压力调节器将天然气压力减至最大 195kPa，并随进气管压力自动补偿。燃料分配器对天然气喷射量的控制是通过步进电机控制天然气的流通截面实现的。该系统具有自学习功能。该电控天然气喷射系统采用多点连续喷射方式。

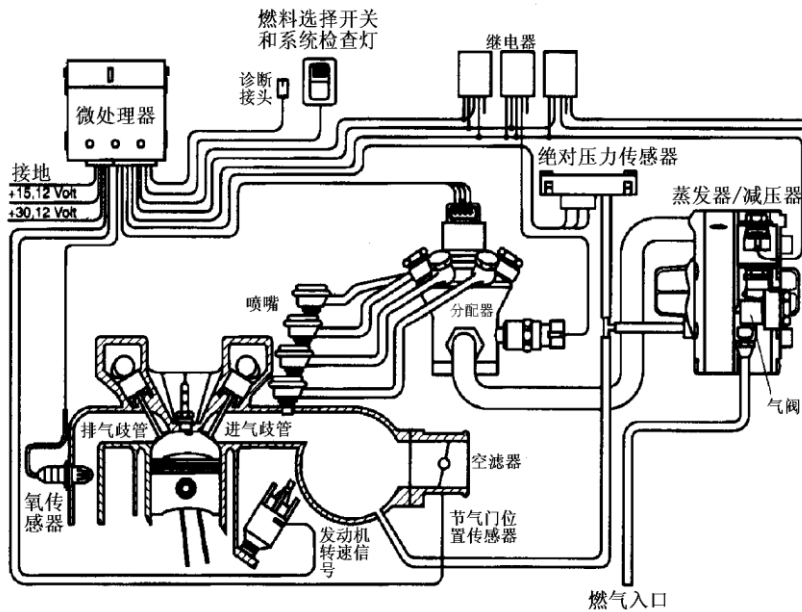


图 3-6 TNO 公司天然气系统

在这种方式中，膜片式喷射阀内部有一个可自由移动的膜片，喷射阀的工作完全是被动进行的，也就是说喷射阀的喷射过程不是由电子控制单元直接控制的。天然气向各个歧管的分配及流量计量由天然气分配器完成，分配器的结构如图 2-18 所示。由电子控制单元控制的数字式线性执行器（步进电机）安装在分配器体内，由它驱动内部的滑阀，控制天然气的流通截面大小以精确计量天然气的流量，计量后的天然气再由各分配口引向各进气歧管。该执行器可由电控单元输出的不同输入信号控制，且控制过程具有自学习功能。分配器向每个气缸分配的相同数量的燃气由喷射阀喷射到各缸进气门的前方。

2) 多点顺序喷射系统

本田天然气汽车的电控多点气体喷射系统（PGM—GI）在汽油喷射系统（PGM—FI）基础上改造而成的。天然气的喷射压力由两级减压器减压在 255kPa 后，供给电子控制的多点喷射阀。在控制单元控制下由喷射阀喷到发动机进气阀处。因为天然气喷射阀要确保高于汽油喷射器 770 倍的体积流量，而且还要解决润滑问题，因此，在设计该喷射阀时重点放在精选内部零件材料、降低压力损失以及保证高效率的磁路上。为保证耐久性、降低工作噪声，橡胶

座和橡胶限制器装在柱塞上；为了提高喷射阀的响应特性，喷射阀驱动装置采用电流峰值保持控制方式；为了减小车重，CNG气瓶采用全复合材料，容积为100L，重量为45kg。该系统采用氧传感器反馈控制的三元催化转换系统，该催化转换器专为NGV开发，催化剂由钯、铂、铑组成。本田天然气汽车的排放污染物比汽油车低许多，在ULEV限值的1/10以下，实现了超低污染物排放。

戴姆勒—克莱斯勒公司研制的M906LAG天然气发动机结构如图3-7所示。

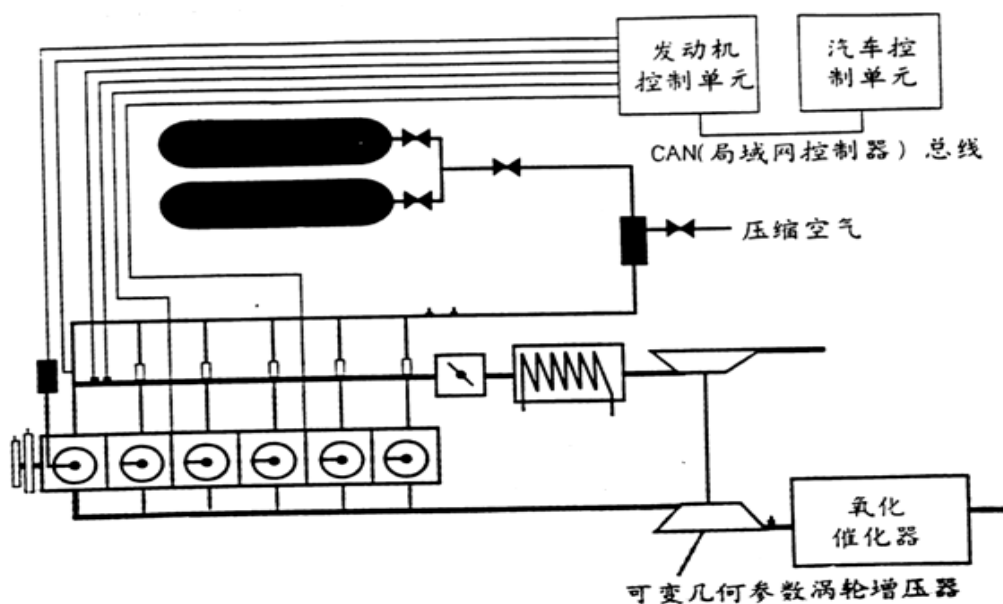


图 3-7 M906LAG 天然气发动机结构原理

M906LAG天然气发动机排量6.88L，标定转速2500r/min时功率达205kW，最高转矩1000N·m(1300r/min)。发动机每缸装有天然气喷射阀，喷气量由电控单元控制。发动机压缩比为10.5，采用了可变几何参数的涡轮增压器，增压比达2.6。6个独立的点火线圈供电电压为24V，最大点火电压为32kV。天然气发动机作了稳态循环(ESC)试验，排放值比欧3标准值低50%以上。

多点顺序喷气方式可实现对每一缸的定时定量供气，可以减轻和消除由于气门重叠角存在造成的天然气直接逸出，而使HC排放增加和燃料浪费。进气阀处喷射还可由软件严格控制气体燃料喷射时间与进排气门及活塞运动的相

位关系，易于实现定时定量供气和层状进气，根据发动机转速和负荷，更准确地控制空燃比指标，进一步提高发动机的经济性及改善排放特性。目前，国内天然气轿车、客车大多采用电控多点顺序喷气方式。

3.3.2 压缩天然气发动机技术发展

3.3.2.1 压缩天然气（CNG）发动机分类

由于天然气着火温度较高，发动机压缩过程中缸内气体温度达不到其自燃点，因此必须靠电火花点火；或者喷入少量柴油，柴油自燃再引燃天然气。因此按天然气发动机的点火方式不同，可以分为两种，即火花塞点火的天然气发动机及柴油引燃的天然气发动机即双燃料发动机，前者又包括两种，单燃料（CNG）发动机和两用燃料（CNG 和汽油）发动机。

3.3.2.2 天然气发动机研发现状

目前，国内应用的天然气汽车发动机的大多是在原有汽油机或柴油机基础上经改装而成的两用燃料或双燃料发动机。部分天然气汽车发动机，如北京公交车用天然气发动机是针对天然气燃料特点而进行改进设计的单燃料（CNG）发动机。

1. 火花塞点火的天然气发动机

a) 两用燃料（CNG 或汽油）发动机

国内目前改装的天然气汽车发动机大多属于这一种。采用已定型的汽油机，保留原机供油系统，经改装增加一套压缩天然气的供给装置。采用任何一种燃料无论是 CNG 还是汽油，发动机都能正常工作，利用选择开关即能实现发动机从一种燃料到另一种燃料的转换。

目前，国内市场上几个主流且销量非常好的 CNG 双燃料车主要有现代伊兰特 CNG 轿车、新丽舍 CNG、捷达伙伴 CNG、比亚迪 F3 CNG 等。

一般来讲，CNG 双燃料车型在汽油和 CNG(压缩天然气)两种燃料之间进行转换时，由于两种燃料固有的特性，会存在 12%-30%的动力损失。这种损失与

车辆所搭载的 CNG 燃气供气装置、油气转换装置等因素密切相关。从目前已有的数据来看，捷达 CNG 实现油气转换时的燃气功率损耗为 22.06~21.43%，伊兰特 CNG 的油气转换燃气功率损耗为 14.63%，而新爱丽舍 CNG 双燃料车仅为 14.1%，是三款车中动力损失最少的一款。新爱丽舍 CNG 双燃料车采用 PSA 全球开发和应用的最新技术，其汽油喷射系统选用与新爱丽舍相同的 BOSCH ME7.4 汽油电控单元，并适配 PSA 认可的意大利 LOVATO 最新一代的 CNG 压缩天然气多点喷射系统，该系统处于国内汽油与 CNG 两用燃料轿车市场上的领先水平。

面对持续攀升的油价和日益紧缺的能源，CNG 双燃料车无疑将成为最有利于全面推广和普及的清洁能源车型。在需求增长刺激下，相信会有更多像新爱丽舍 CNG 一样甚至更先进的新能源车型涌现出，让国内用户的汽车生活更为经济和环保。

图 3-8 所示为目前市场上 CNG 或汽油两用燃料轿车装配的典型的燃气多点喷射系统。

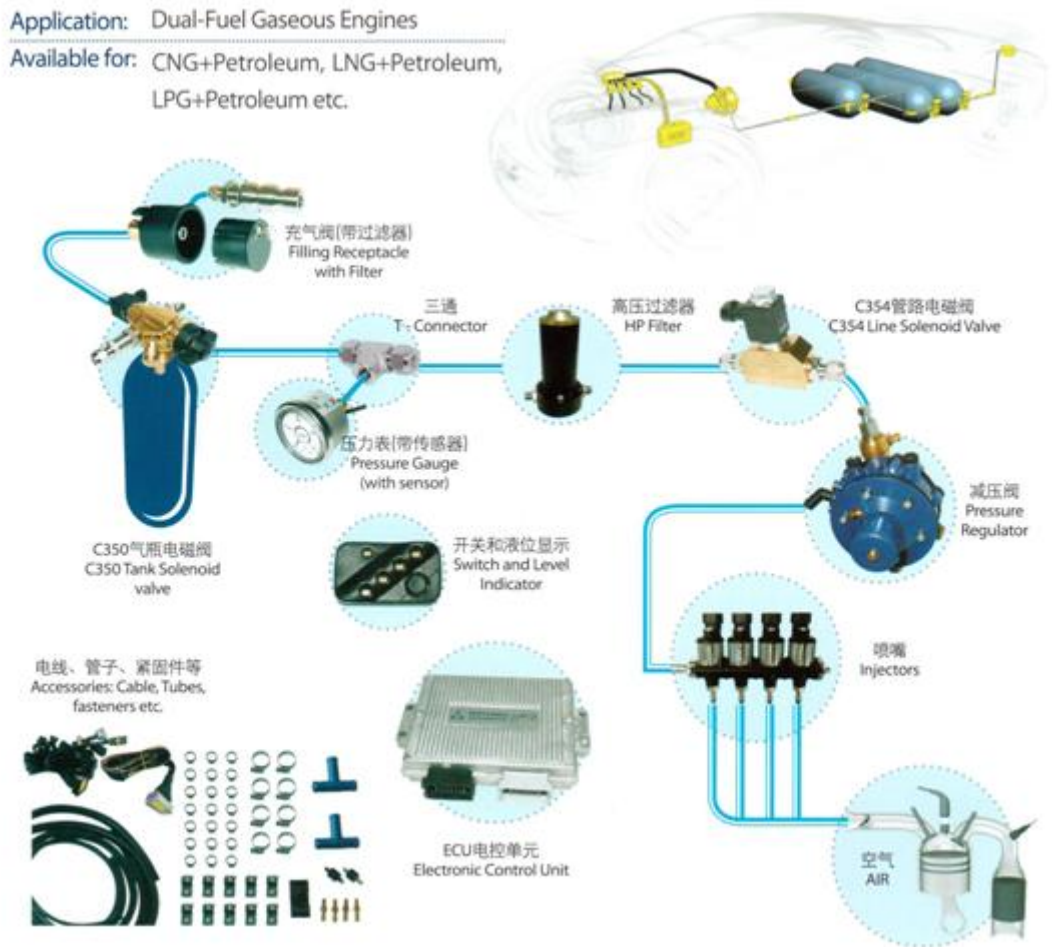


图 3-8 两用燃料轿车装配的典型的燃气多点喷射系统

b) 单燃料天然气发动机

单燃料天然气发动机，其发动机的结构专为燃用 CNG 燃料而设计，以保证气体燃料能有效利用。

1) 由汽油机改装的单燃料天然气发动机

目前国外公司在汽油机基础上开发出仅燃用天然气单一燃料的发动机，并应用于汽车上，以改善排放性能，如日本日产公司研制的 Nissan AD Van 小型超低污染天然气汽车将原汽油机压缩比从 9.5 提高到 12.8，使发动机动力性和转矩有较大提高。低速时其排放结果为：NO_x 为 0.02g/km，CO 为 0.15g/km，THC 为 0.07g/km，远低于限定值（日本汽油机排放限值 NO_x 为 0.48g/km，CO 为 2.70g/km，THC 为 0.39g/km）。

本田 CIVIC GX 压缩天然气汽车发动机以 1.6L、4 缸汽油机为基础，将压缩比从 9.4 提高到 12.5，发动机的进气管及排气系统进行了改进，且气缸垫、活塞、活塞销、连杆等也适当改进以适应较高的压缩比。由于天然气不具有润滑性且无汽化潜热作用，CNG 发动机的活塞材料改为有高耐热性能的合金材料。此外，为了降低气门及气门座接触面的磨损，本田公司开发了专门用于气门座和气门锥面的新材料。气门座的材料中添加了可增加高温强度及高润滑性的材料。气门锥面材料中添加了硬质晶粒，增加了气门锥面的硬度。为了防止燃烧气体中的水分及高温对火花塞电极的腐蚀，火花塞电极改为白金材料。配气系统采用可变气阀正时控制。天然气的供给采用电子控制的多点喷射系统，该系统在天然气供给系统一节中已有阐述。该系统采用氧传感器反馈控制的三元催化转换系统，该催化转化器专为 NGV 开发，催化剂由钯、铂、铑组成。本田天然气汽车的排放污染物比汽油车低许多，在 ULEV 限值的 1/10 以下，实现了超低污染物排放。此外，该 NGV 汽车排出的 CO₂ 比汽油车减少 23%。该发动机的最大转矩与原汽油机相比，约降低了 5%，而最大功率通过提高标定转速（由原来的 6000r/min 提高到 6500r/min）比原汽油机增大了 8%左右。

一汽集团研制的 CA6102N—2 型天然气发动机，改进了进气道结构，压缩比从原来的 6.75 提高到 8.8，最大功率及最大转矩分别达到原汽油机的 95%和 94%。

2) 在柴油机基础上改装的单燃料天然气发动机

将柴油机改装为火花塞点火式天然气发动机，对发动机原有结构改动较大。

首先要降低压缩比。根据国外研究结果：燃用天然气的单燃料非增压发动机合理的压缩比为 12 左右，允许的最高压缩比可达 15。降低压缩比可通过改进设计活塞顶部燃烧室的形状实现，活塞顶部燃烧室的设计应有利于天然气发动机燃烧过程的组织。国外对天然气发动机的燃烧室结构的研究表明：使用不同挤气面积的燃烧室结构，产生的 NO_x 和非甲烷 HC 排放物显著不同，开式燃烧室具有 NO_x 排放低和热效率高的特点。

由于天然气的燃烧速率较低，排温升高，应改进气门和气门座的材料。

改装后的单燃料天然气发动机需安装点火系统，火花塞的布置及点火系统的选配、安装等需进行优化设计。大多数情况是为了降低改装成本，在喷油嘴

安装孔处攻丝，安装火花塞。但考虑到火花塞周围的冷却条件发生变化，应改进水套结构，改善缸盖的散热条件。

单燃料天然气发动机的燃烧方式由原柴油机的质调节变为量调节，进气总管需安装节气门体，进气管的真空度增大，应考虑气门组件等的防漏油措施。

柴油机的气门重叠角一般较大，改装为天然气发动机后，气门重叠角的大小依据发动机的实际情况应进行适当调整。若天然气供气系统采用混合器预混合供气方式，可燃混合气的形成是在进气管或进气道内完成，扫气过程是用混合气进行，使天然气消耗率增大且增加 HC 排放，故气门重叠角应适当减小。如依维柯 8220 及 8460TC 型天然气发动机，气门重叠角减为 0 度以减少进气充量中燃料的逃逸量，且气缸中形成自然的废气再循环，降低了最高燃烧温度及 NO_x 的生成量。若采用天然气喷射阀定时喷射方式，可不改变气门重叠角，就可达到更优良的性能。

国外对车用柴油机改燃天然气的研究较早，据有关资料报道，改造成电火花点火式天然气发动机的机型有较多已投放市场。例如依维柯 8220 及 8460TC 型、康明斯 B5.9—195G 及 C8.3G 型、日本的 4BE1 型、卡特彼勒 3306 型及福特 380 型、沃尔沃 THG103 低排放 CNG 稀燃发动机及戴姆勒—克莱斯勒公司研制了 M906LAG 天然气发动机等，其中许多涡轮增压机型的改造也很成功。

早在 1999 年戴姆勒—克莱斯勒公司开发的 M906LAG 天然气发动机提供用户使用，M906LAG 天然气发动机采用电子控制多点喷射技术，其性能指标在同类产品中居领先地位。上海客车制造有限公司在 SK6115Q-3 公共汽车上成功装用了 M906LAG 天然气发动机，一次充气行驶 500km。

2000 年，北京公交公司的环保客车一部分配装了康明斯 B5.9-195G 型天然气发动机，它是在 6B5.9 型柴油机(102x120mm)基础上改装的涡轮增压天然气发动机，排量为 5.9L，压缩比由 17 降为 10.5，活塞顶部采用碗形燃烧室。电子点火模块控制无分电器点火系统，火花塞为专用型，适用于稀薄燃烧及高能点火，点火电压高达 40000V。燃气控制阀，怠速旁通阀，燃气切断阀，废气控制阀及保护系统均采用电子模块控制。控制单元根据传感器信号，控制燃气阀开度，供给正确的燃气量。燃气压力控制在 0.42-0.69Mpa 范围内。增压器的涡轮部分是水冷的。充量经空气对空气中冷器冷却。该发动机的排放质量满

足美国联邦环保属低排放车辆标准。

康明斯西港有限公司于 2012 年 10 月 4 日宣布研发 ISB6.7G 6.7 升中型天然气发动机，以满足不断增长的车用市场需求。ISB6.7G 天然气发动机主要针对校车、中型卡车和专用车市场，以康明斯 ISB6.7 升柴油机为机体机，采用康明斯西港火花塞点火(SI)系统、天然气化学计量比控制系统、冷却废气再循环技术等，废气后处理是通过一种简单，无需维护成本的三元催化剂实现。发动机使用天然气可以压缩天然气或以液化天然气形式存储。康明斯西港 8.9 升 ISLG 发动机已经有 16000 台投入使用。11.9 升 ISX12G 发动机也于 2013 年开始生产。ISB6.7G 发动机的研发将进一步完善了高性能天然气发动机的产品系列，为客户选择车用天然气发动机提供更宽泛的选择空间。”

国内潍柴、玉柴、朝柴及一汽集团也推出了在柴油机基础上改装的单燃料天然气发动机。

潍柴天然气发动机是在相应型号潍柴柴油机基础上改装生产的，取消了柴油机的燃油系统(高压油泵、喷油器、高压油管等件)，增加了燃气供给系统(气瓶、滤清器、高压切断阀、减压器、燃气热交换器和节温器、喷射阀等件)。燃气供给系统采用美国 WOODWOOD OH2.0 单点燃气电控喷射系统，如图 3-9 所示，采用闭环控制稀薄燃烧。天然气发动机采用点燃式燃烧方式(气缸盖上的喷油器安装孔改为火花塞安装孔)，增加了点火控制系统(点火 ECU、点火线圈、高压线、火花塞)；增加了混合器和节气门，使燃气和空气在混合器中混合。因燃气机排气温度高，增压器采用水冷中间壳，进、排气门座采用耐磨、耐高温材料，采用带隔热材料的排气管。

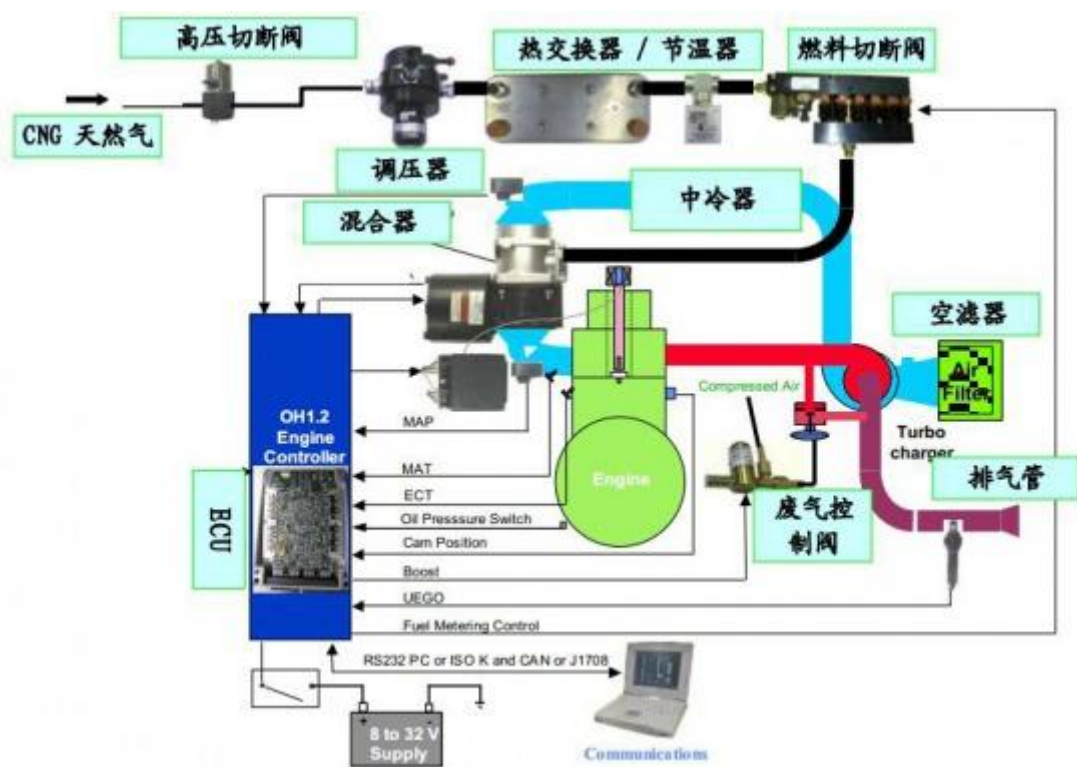


图 3-9 潍柴天然气发动机燃气系统

玉柴天然气发动机结构及原理如图 3-10 所示。高压的压缩天然气从储气钢瓶出来，经过天然气滤清器过滤后，经高压电磁阀进入高压减压器，高压电磁阀的开合由 ECM 控制，高压减压器的作用是将高压的压缩天然气（工作压力 200bar-300bar）经过减压加热将压力调整至 7bar-9bar。高压天然气在减压过程中由于减压膨胀，需要吸收大量的热量，为防止减压器结冰，从发动机将发动机冷却液引出到减压器对燃气进行加热。经减压后的天然气进入电控调压器，电控调压器的作用是根据发动机运行工况精确控制天然气喷射量。天然气与空气在混合器内充分混合，进入发动机缸内，经火花塞点燃进行燃烧，火花塞的点火时刻由 ECM 控制，氧传感器即时监控燃烧后的尾气的氧浓度，推算出空燃比，ECM 根据氧传感器的反馈信号和控制 MAP 及时修正天然气喷射量。

制硬件完善程度的不同，天然气可替代柴油的比率明显不同，但最终效果需满足两个要求：①将柴油喷射量减少到预选的百分数；②将与之相当的天然气量送入气缸。

柴油引燃方式天然气发动机的引燃油量控制方法有以下几种：

1)采用原柴油机机械控制直列泵控制引燃油量

早期，大多数双燃料（柴油—天然气）发动机，引燃油量是由原来的机械式喷油泵控制，只增加一套供气系统，而不必对柴油机做很大改动，就可实现双燃料运行，用天然气替代较多的柴油。怠速工况一般运行在柴油单燃料状态，且中小负荷工况天然气替代柴油的比例较小，因而在长期使用过程中，天然气在所消耗的燃料总量中只能达到 40-60%。

国内天津大学、北京理工大学等有关单位在国产 6130 柴油机基础上开发了柴油—天然气双燃料发动机，以少量柴油作为“引燃燃料”，天然气作为主要燃料，供气方式采用多点喷射控制方式。由于空气和天然气已在缸外预先混合，因而天然气—空气混合气的着火与燃烧，与火花点燃式发动机相似。该双燃料发动机既可用柴油引燃天然气工作，也可用 100%的柴油燃料工作。该双燃料发动机的燃料供给系统包括天然气供气系统和柴油供给系统两部分，还有自动转换装置，当天然气储气瓶压力不足时则自动转换使发动机燃用柴油。当使用减速刹车时，则关闭天然气的供应。

2) 采用电子控制柴油喷射系统控制引燃油量

加州圣地亚哥市的 Clean Air Partner 公司与阿尔伯达州卡尔加里市代用燃料系统(AFS)公司联营，共同开发多点喷射的双燃料控制系统并应用在 10.3 升卡特彼勒 3176B 重载发动机上，在发动机的压缩比不变情况下，两种燃料均采用电子控制，所燃用的天然气通常占燃料总量的 60~90%。发动机根据需要能转换为 100%燃用柴油。

美国 BKM 公司研制了具有先进水平的“微引燃”双燃料系统，用接近 1%的引燃柴油为天然气发动机提供所需的点火能量。这一系统的核心是采用 Servojet 电控液压泵喷嘴控制点火油量及天然气多点电子控制顺序喷射装置和专用的计算机软件。这一系统为降低小负荷时的未燃碳氢排放及提高天然气替代柴油的百分率，采用了断缸、增压空气旁路、废气再循环及优化引燃油的喷

射正时等措施，大大降低了小负荷时的未燃 HC 排放也提高天然气替代柴油的百分率，从而在所有工况范围内，使天然气在所消耗的燃料总量中超过了 95%。废气排放质量达到了 1994 年加州排放标准。

康明斯—西港公司研制开发的大马力天然气发动机的重型卡车在美国加州投入使用，此举标志着康明斯成为全球首家将重型天然气发动机投入商业运营的制造商。康明斯—西港公司研制的 ISX—G 型天然气发动机是在康明斯旗舰产品 ISX 全电控大马力柴油机的平台基础上，采用西港公司的高压直喷燃油系统，在发动机工作时预先喷入少量柴油，压燃之后再喷入天然气。采用该技术后优质柴油机的原有结构基本不变，发动机的动力性和燃油经济性不受任何影响，而尾气排放却大大降低。康明斯—西港燃气发动机如图 3-11 所示。

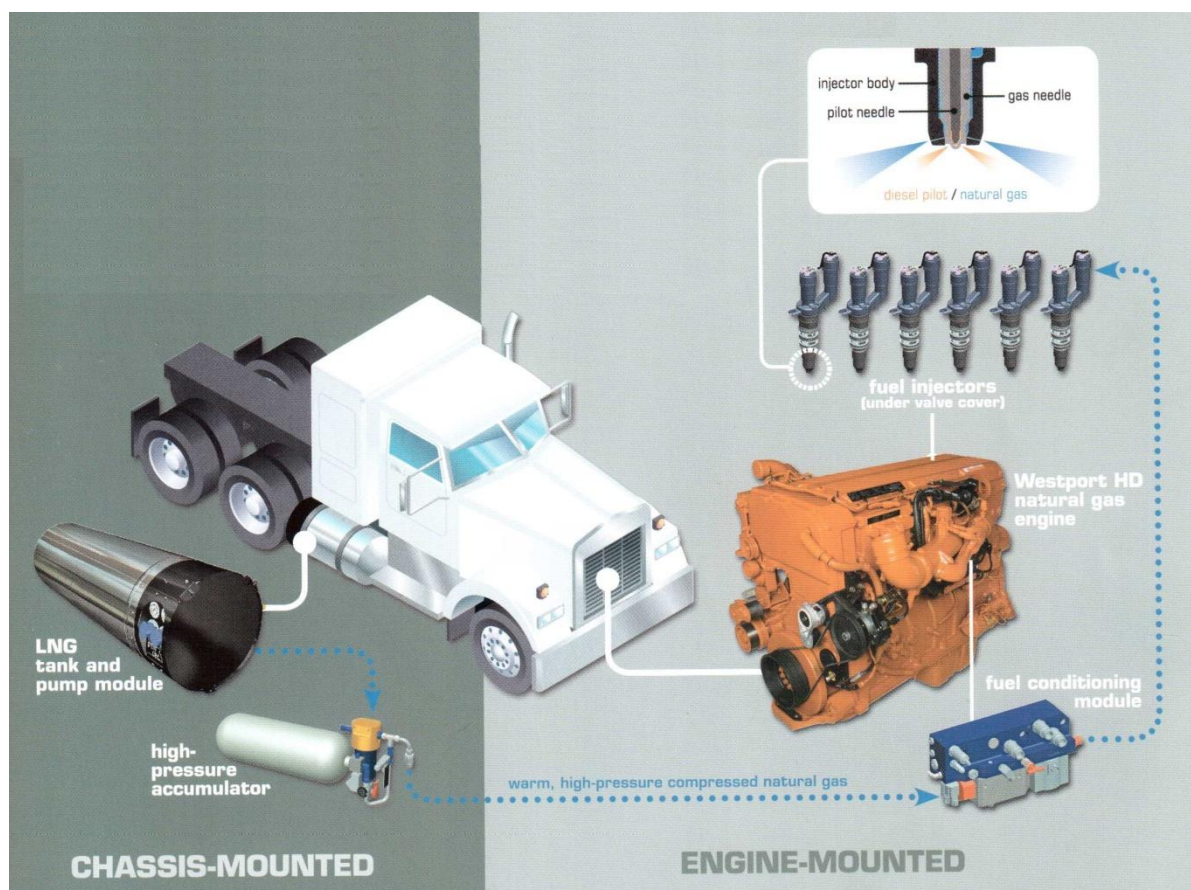


图 3-11 康明斯—西港柴油-天然气双燃料发动机

3.4 液化天然气 (LNG) 汽车

液化天然气汽车是继 CNG 汽车和 LPG 汽车之后于近年才开始发展起来的一种新型环保汽车,从本质上讲也是天然气汽车,但由于汽车携带的 LNG 比 CNG 具有更高的燃料密度、压力低、所需燃料箱自重轻,汽车一次充气的行驶里程较 CNG 远得多,LNG 同时又能像油品一样运输,同时具有 CNG 和 LPG 的优点,而克服了它们的不足,因此具有更强的实用性,且由于我国能源战略结构的调整,今后将有更多的 LNG 资源通过进口进入我国使用,被认为是今后燃气汽车的发展方向。

3.4.1 LNG 燃料特性

由于液化天然气 (LNG) 具有良好的储运特性,作为汽车燃料越来越受到重视,并与 LPG、CNG 气体燃料一起被认为是气体燃料发动机汽车的主导燃料。

液化天然气(LNG)由含 90%以上甲烷 (CH₄) 的天然气气体通过“三脱”净化处理(脱水、脱烃、脱酸),实施液化处理而成,其主要成份为液体甲烷。在液化处理过程中,主要采用工艺是利用膨胀制冷工艺,使天然气气体中的甲烷成份在-162℃液化分离,形成液化天然气的主导成份。液化后的体积是气态体积的 1/625。

LNG 的分子量和 H/C 比均与 CNG 基本相同,只是 LNG 通过深冷前的预处理,几乎除尽了天然气中的全部杂质;而后的深冷液化处理通常又可分离出不同液化点的重烃类成份和其它气体成份。因此,LNG 实际上是纯度较高和获得良好净化的液体甲烷。尽管天然气液化工艺比较复杂,但它良好的储运特性和使用性能,使其在天然气工业中占有重要组成。与汽油相比,它具有辛烷值高,抗爆性好、燃烧完全、降低运输成本等优点;与压缩天然气 (CNG) 相比,它具有储存效率高、加一次气行驶路程远,车装气瓶压力小、重量轻等优点。

液化天然气 (LNG) 与压缩天然气 (CNG) 和液化石油气 (LPG) 一样,作为气体燃料均被列为清洁燃料,特别是作为汽车发动机的燃料一直被推荐使用,减少城市污染有利于环境保护。

3.4.2 液化天然气汽车的发展状况

在九十年代初，美国海德里拉公司（HYDRA RIG INC）进行 LNG 性能及使用可行性研究，承担了近十个天然气汽车（NGV）项目，并签订了小型、重型 LNG 汽车的改型合同，掌握了 LNG 的充装汽化、汽车改制以及销售等一整套技术和经验，并且该公司已获得美国有关 LNG/CNG 转换技术的专利权。近二十年来，美国在 LNG 汽车开发方面有明显的进展。其他国家如俄罗斯、加拿大、德国、日本等国家都在积极进行 LNG 汽车推广研究。

我国也较早地开展了 LNG 汽车技术及 LNG 液化装置及贮存装置的研究。

吉林油田与中国科学院低温实验中心合作研制了一套 500L/h 的 LNG 装置。中科院低温实验中心与四川绵阳燃气集团公司合作研制了 LNG—20 型装置，每小时生产 LNG18~20L，供 LNG 汽车用，另外还研制了一套 300L/h 的 LNG 液化装置，用于绵阳的第一台东风 LNG 汽车，应用情况良好。开封深冷仪器厂曾以小型斯特林液化装置，生产少量 LNG，供公共汽车使用，并对 LNG 汽车的燃料系统进行了研制，并于 1990 年在开封市内对三辆 LNG 公共汽车在公交路线上作了运营试验。

目前，北京市已有 LNG 示范加气站及并有 LNG 汽车运营；乌鲁木齐单一燃料 LNG 公交示范项目工程课题，有 20 辆单一燃料 LNG 公交示范车辆正在运营；长沙市单一燃料 LNG 公交示范项目工程课题，有 52 辆单一燃料 LNG 公交示范车辆正在运营，运行情况都正常。

2013 年 3 月 27 日，中国南京公交与客车发展高峰论坛在南京金陵江滨酒店举行。北京公交集团有限公司副总经理冯幸福在发言中介绍，为了减少污染物排放，北京今后将不再采购柴油公交车，所有新采购车辆均为新能源及天然气公交客车。冯幸福透露，2013 年，北京公交集团将投资近 37 亿元，采购 3155 辆 LNG 公交车，替换柴油公交车。从产品类型上看，北京公交计划采购的 3155 辆 LNG 公交车将分为以下几类车型：16 米和 18 米级铰接车；13.7 米级单机车及双层车等特大型车；12 米级大型城市及城郊公交车；8 米级公交车。为了保证这批 LNG 公交车的应用，冯幸福表示：“预计还需配套建设 30-40 座 LNG 撬装式充液站。中石油第一座 LNG 撬装充液站于 2012 年 2 月在潞城场站投入使用

用。此后，中石油、中石化又配套建设成 8 座 LNG 撬装站，6 座已投产使用，2 座正在调试及验收。”

3.4.3 LNG 汽车发动机燃料供给系统

液化天然气发动机与压缩天然气发动机结构及燃烧工作情况基本上是一样的，区别主要在于燃料储存的状态及储存容器的不同，LNG 在低压低温绝热状态下储存。另外，液化天然气蒸发变成气体时，吸收的热量较多，应采用可靠的蒸发气化系统。图 3-11 所示为液化天然气汽车发动机燃料供给系统的组成。图 3-12 所示为液化天然气气瓶



图 3-11 液化天然气汽车发动机燃料供给系统



图 3-12 所示为液化天然气气瓶

液化天然气容器必须具有很好的绝热性能，以防止液化天然气过早汽化，容器设有绝缘材料制成的夹层，绝缘材料要求具有较低的导热系数和密度。液化天然气储存在容器底部，可达到总容积的 90%，容器内上部约有 10%的储气容积。发动机运行时容器内的天然气以液态和气态两种形式并存，当容器内压力大于 0.2MPa 时，从罐内流出的是上部的天然气蒸气，当容器内压力小于 0.2MPa 时，则由罐底流出液态的天然气，经过蒸发器从冷却水或废气中得到热量而蒸发。两者经自动转换阀控制后，流入滤清器及减压器，减压后的天然气进入喷气阀喷入进气管与空气混合后供发动机燃用。

LNG 容器除了具有良好的保温性能外，还必须具有足够的强度。以美国 NK1200G 型机车发动机所配备的 LNG 容器为例，它是由绝热材料包裹的可装运低温（-162℃）液化天然气的不锈钢罐体，绝热材料为玻璃纤维和铝箔交替分层，绝热层外侧为 12.7mm 厚高抗拉强度的碳素钢壁，此钢壁用以保护低温罐体免遭撞损。同时，为了加强罐体绝热特性，在两层钢体间抽成真空。

目前，LNG 储罐大多设计为低压容器，以保持其储存 LNG 时具有比 CNG 气瓶更轻的重量，并要求 LNG 储罐具有良好的绝热性能，车用 LNG 储罐一般采用双层金属真空加多层缠绕绝热技术。但由于液化天然气与周围大气存在温差，LNG 燃料总要吸收一部分热量，一部分 LNG 气化，国外技术可保证 LNG 日蒸发率在 2%以内(7 天之内不产生蒸发损失)。当储罐内压力过高时，罐内气态天然气必须泄放掉，以保证罐内压力不超过安全压力值(1.6MPa)。

汽化器是液化天然气发动机燃料供给系统的关键部件之一。多数汽化器的加热介质采用冷却系统的冷却液，由控制系统根据发动机工况调节其汽化量。有的汽化器与排气管联接在一起，利用发动机的排气来加热液化天然气，使之迅速气化。

3.5 天然气汽车排气污染物排放现状

宫长明等基于单循环燃料喷射控制策略及冷起动，在一台 125 mL 单缸电控喷射点燃式发动机上，试验研究了 LPG(液化石油气) 与甲醇循环喷射量的质量比和 LPG 迟后甲醇喷射时刻对甲醇掺烧 LPG 发动机甲醛和未燃甲醇排放的影响。甲醇掺烧 LPG 发动机中 LPG 仅起辅助起动作用。试验结果表明：增大 LPG 与甲醇循环喷射量质量比可使甲醇掺烧 LPG 发动机着火性能改善，未燃甲醇排放减少，甲醛排放增多；合理控制 LPG 迟后甲醇喷射时刻可显著改善着火性能，减少未燃甲醇排放，而甲醛排放稍有增加；LPG 迟后甲醇在曲轴转角为 276° 时(上止点前) 喷射，缸内最大压力达 4.46 MPa，未燃甲醇的体积分数减小到 1173×10^{-6} 。甲醇掺烧 LPG 发动机时起动工况的甲醛和未燃甲醇排放量随 LPG 与甲醇循环喷射量的质量比和 LPG 迟后甲醇喷射时刻的变化呈相反的变化趋势。

王军方，葛蕴珊等利用颗粒物数量测试仪器 ELPI 对瞬态循环下的汽油车和天然气汽车颗粒物排放特性进行了研究，研究表明：汽油车排放的颗粒物明显多于天然气汽车，两种燃料车辆排放的颗粒物中粒径小于 70nm 的颗粒物均占绝对优势，占总排放量的 80%~90%；大于 200nm 的颗粒物在总排放颗粒物中占的比例非常小；颗粒物数量排放浓度与车辆速度基本成正比例关系，颗粒物数量排放随速度的增加而增加；在车辆速度大于 70km/h 后，颗粒物数量排放随车速急剧增加。

王军等通过用 YZ4102Q 柴油机改装的 CNG/ 柴油双燃料发动机进行燃用双燃料和纯柴油两种情况下的对比试验，研究了 CNG/ 柴油双燃料发动机 THC、CO、NO_x 和烟度的排放特性，结果表明：双燃料发动机的 THC 和 CO 排放比原柴油机高，但 NO_x 和烟度的排放比原柴油机低。双燃料发动机在起动、怠

速和低负荷工况下从降低排放的角度出发，应以燃烧柴油为主，不宜混烧气体燃料。高负荷时应以燃烧天然气和少量柴油运行。

郑建军等通过车载实验，怠速法检测、简易工况法检测数据评价分析等方法，研究了重庆市在用 CNG 车辆排放情况，比较了 CNG 车与同类型汽油、柴油车排气污染物排放情况。研究发现，目前 CNG 在用车并非绝对的环保汽车，其中在 NO_x 的排放上，CNG 车排放高于同类型汽油、柴油车 0.03~14 倍；在 CO、THC 的排放上，不同测试工况下 CNG 汽车表现出的污染物排放情况不一致。

解淑霞等利用便携式排放测试系统(PEMS)，对 25 辆压缩天然气-汽油双燃料出租车在实际道路上分别使用汽油和天然气时的 CO₂、CO、NO_x 和 THC 排放进行了对比测试。研究表明：实际道路上，原装车使用天然气相比汽油时，CO₂、CO 的排放平均分别降低 22%和 24%，NO_x 和 THC 的排放平均分别增加 27%和 22%；改装车使用天然气比使用汽油时，CO₂、CO 的排放平均分别降低 25%和 32%，NO_x 和 THC 的排放平均分别增加 200%左右。双燃料车使用天然气相对使用汽油时的 CO、NO_x 和 THC 排放变化与发动机的改装技术、排气组成及三效催化剂性能等有关。

第 4 章 液化石油气 (LPG) 汽车

作为“十五”期间全国 16 个“重点推广、应用燃气汽车”和“单一燃料 LPG 公共汽车示范城市”的长春市，截至 2003 年 9 月末，长春市 LPG 公交车已达 1200 辆，LPG 出租车 6862 辆。到 2004 年底，长春市燃气汽车总量将达 10245 辆，占公交车和出租汽车总量的 76%。2004 年 5 月 31 日，广州市举办了 100 辆崭新的单燃料大型 LPG 公交车和 60 辆单燃料 LPG 出租车营运典礼。广州市总体思路是“2003 年打基础、2004 年上台阶、2005 年全面达标”，将广州市 6500 辆柴油公交车和 16000 辆汽油出租车全部更新、改造为单燃料的 LPG 车，同时配套建设 52 座加气站。

沈阳市以中油燃气汽车系统工程公司为主大力推广 LPG 汽车。该市现有 LPG 汽车 4500 辆，其中 LPG 出租车 4000 辆，LPG 公交车 500 辆，LPG 加气站达 10 座。预计到今年底，全市 LPG 汽车将达到 7000 辆，LPG 加气站将达到 12 座。沈阳市规划到 2008 年，LPG 加气站达到 40 座，推广 LPG 汽车达到 20900 辆，其中 LPG 出租车达 18400 辆，LPG 公交车达到 2500 辆。

4.1 车用液化石油气 (LPG) 燃料

液化石油气 (LPG) 是指由天然气处理厂和炼油厂生产的，由含三个或四个碳原子的烃类如丙烷 (C_3H_8)、丁烷 (C_4H_{10}) 为主的一种混合物，是油田伴生气和天然气处理厂、炼油厂的副产品。LPG 可在室温和相对较低的压力 (400~1200kPa) 下会转化为液体，在汽车上以液态形式储存和运输，有较高的能量密度；根据液化石油气的用途不同，对成分的要求也不一样，车用液化石油气的成分要求比较高，为此各国都为车用液化石油气气体质量制定了标准。

我国为了确保液化石油气汽车行业的健康发展，对车用液化石油气气体质量也制定了标准。对影响车用液化石油气的使用性能的主要指标，如饱和蒸气压、丙烷含量、丁二烯及硫(特别是硫化氢)的含量等作了严格限制，对残留物、C3 以下组分、C4 以上组分及含水量等也应作出相应规定。

4.2 液化石油气 (LPG) 汽车及其燃料供给装置

回顾 LPG 用于汽车，其初衷不是为了解决排放问题，而是出于经济利益。在意大利和荷兰等国，LPG 作为代用燃料用于汽车已有 40 多年历史。20 世纪 70 年代石油危机以来，人们认识到燃料结构应当多元化。LPG 作为炼油工业的副产品过去往往被当作废物白白烧掉，故价格低廉，在澳大利亚只有汽油的一半左右，在韩国为 1 / 3。中国各地 LPG 价格不一，但都比汽油低得多。近些年来，随着人们对节能与环保的日益重视，推广应用 LPG 的步伐逐渐加快。

与天然气汽车类似，LPG 汽车按燃料供给系统的不同也可分为三种：单燃料 (LPG) 汽车、两用燃料 (LPG 和汽油) 汽车及双燃料 (LPG 和柴油) 汽车。

1. 单燃料 (LPG) 汽车，其发动机的燃料供给系统专为燃用 LPG 燃料而设计，其结构保证气体燃料能有效利用。

2. 两用燃料 (LPG 和汽油) 汽车，可在两种燃料中进行选用，设有两套燃料供给系统，采用任何一种燃料无论是 LPG 还是汽油，发动机都能正常工作，利用选择开关即能实现发动机从一种燃料到另一种燃料的转换，两种燃料不允许同时混合使用。

3 双燃料 (LPG 和柴油) 汽车，是指当汽车发动机工作于双燃料状态时，用压燃的少量柴油引燃 LPG 与空气的混合气而实现燃烧对外做功。该种发动机也可用纯柴油工作。因此，该系统有同时供给汽车两种燃料的装备，配备两个供给系统及两个独立的燃料储存系统。依据发动机的运行工况，燃料品质，发动机参数，按一定比率同时向发动机供给 LPG 和柴油。低负荷时自动转换到纯柴油的工作方式。

由于 LPG 的主要成分是丙烷(C_3H_8)和丁烷(C_4H_{10})，故 LPG 分子中碳氢原子数量之比小于汽油和柴油，燃烧产物中所含 CO 和 CO_2 相对较少；LPG 在常温常压下为气态，易于与空气生成均匀混合气，故燃烧较完全，产生的 CO 和炭烟较少；LPG 含硫量低，所以微粒物排放减少；LPG 中的丙烷燃烧产生的臭氧量比汽油低。故人们将其看作是一种低污染燃料。

LPG 发动机与汽油机相比，使用寿命延长；燃料的混合和分配性好，抗爆性好，燃烧性能好，经济性好；燃烧积碳较少；运转较平稳。

LPG 汽车目前也存在较多的问题。由于储存 LPG 需要较大的特殊容器，整个系统具有一定的压力，且重量增加，使汽车的有效载荷减少；气门磨损较严重；加速性能较差；续驶里程短。同时，LPG 的加气站等配套设施投资较大，成本较高，且受资源条件限制，影响了 LPG 汽车的推广应用。

4.3 LPG 汽车燃料供给系统的技术现状

自 LPG 系统在汽车上应用以后，相关技术已经得到了长足的发展。根据技术发展的完善程度可将其产品分为三代。

1. 机械控制式混合器供给系统

机械控制的 LPG 混合器供给系统的一个典型代表就是意大利 Landi Renzo 公司的 LPG 机械混合系统，如图 4-1 所示，混合器为文丘里管系统。

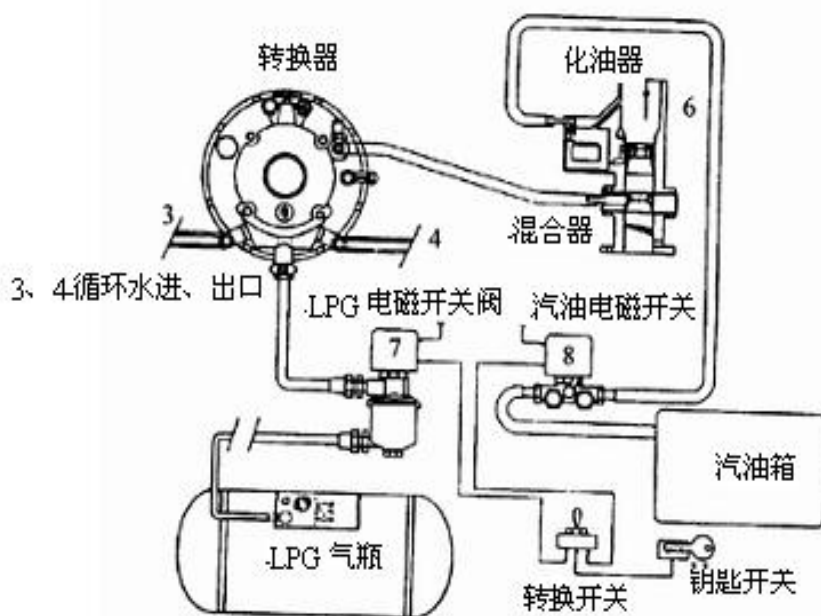


图 4-1 Landi Renzo 的机械式 LPG 系统

该系统由 LPG 气瓶、一个电磁式 LPG 关断阀、蒸发调压器和一个混合器组成。该系统应用在两用燃料（汽油和 LPG）汽车上，在汽油管路中必须安装关断电磁阀，该电磁阀在使用 LPG 时关闭而在使用汽油时打开。蒸发调压器置于 LPG 关断阀的后面，紧挨着关断阀。发动机冷却水通过调压器，以防止在

LPG 从液态转化为气态时因调压器温度大幅度降低而造成管件结冰。液态 LPG 通过管路在气瓶压力作用下压入调压器，在调压器中液态的 LPG 汽化为蒸汽。然后，LPG 蒸汽从调压器进入混合器并在该处与空气混合。接着，可燃混合气被送入发动机气缸内，燃烧做功。LPG 消耗量的计量和控制精度需通过调压器和混合器的共同调整来实现。这是最简单的 LPG 系统。

与 Landi Renzo 系统相似的第一代产品还有 Lovato, Tartarini 等的 LPG 系统。

2. 电控 LPG 燃料混合系统

各国越来越严格的排放法规迫使制造厂开发更好的供气系统以克服第一代产品存在缺点。现代电子技术的发展使得在一定程度上克服第一代产品的缺点成为可能。第一代产品主要的缺点就是缺乏对所供给 LPG 流量的精确控制信息。为了实现这种控制，第二代产品开发了一个控制用的微处理器，它可以配合调压器和混合器对流量进行测量和控制。其中，主要的流量计量功能仍然由调压器和混合器来完成，但它们受模拟或数字的控制。这种类型的系统适合在装有 TBI（节气门体喷射）的汽油发动机上使用，由闭环对三元催化剂进行控制。微处理器读取发动机转速、进气歧管压力和排气中的氧浓度信号，然后通过一个电磁阀或其他精密的流量控制装置，在 LPG 供应管路中精确地控制送入混合器的 LPG 流量。

荷兰 LPG 汽车制造商 Eurogas 曾设计出一种电子控制的 LPG 系统。电控单元的输入信号是发动机的转速和 λ 传感器信号。电控单元控制一个数字式线性执行机构（步进电机），对位于调压器和混合器之间的气体管线内的气体流量进行调节，实现闭环控制。图 4-2 是 Eurogas 设计的一种第二代 LPG 系统。

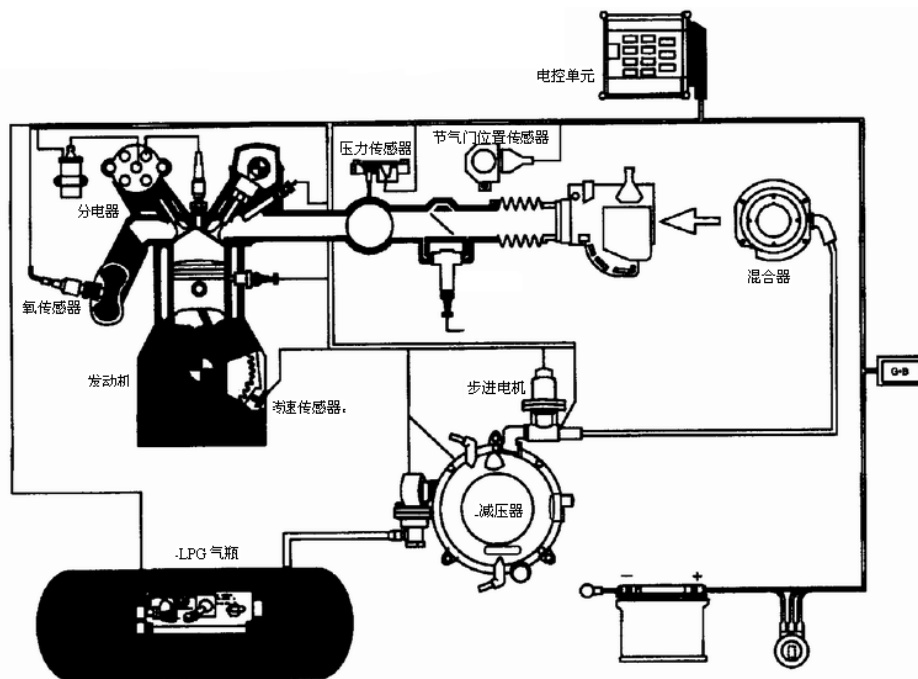


图 4-2 Eurogas 的电控 LPG 系统示意图

类似的第二代 LPG 系统还有 AG、BRC、Koltec、Vialle 和 Necam 等公司的产品。

3. 电控 LPG 喷射系统

为了提高 LPG 在各缸的分配均匀性及防止回火等可能造成的不良后果，一些 LPG 设备制造商已经开始生产多点 LPG 喷射系统。多点喷射系统由微处理控制器控制，具有自学习功能而无需手动调节。人们将这些设备称为第三代产品。这些系统中，LPG 以液态或气态的形式喷射。布置方式又分为以下几种：

- ①单点喷射系统，包括连续和定时两种；
- ②多点喷射系统，包括同步定时喷射和顺序喷射二种；
- ③高压直接喷射(喷入气缸内)，包括多点同步定时和多点顺序定时两种。

(1) 多点电子气体喷射系统 (MEGI)

MEGI 系统 (也称为 MEGI 喷射系统)，是由 Koltec、Necam 和 TNO 共同开发的第三代 LPG 系统。该系统将 LPG 以气体的形式喷入气缸。其主要目的是防止回火带来的后果。其他的目标包括更精确地测量和控制 LPG 流量以及提高车辆的可靠性。图 4-3 为 LPG 的 MEGI 系统。

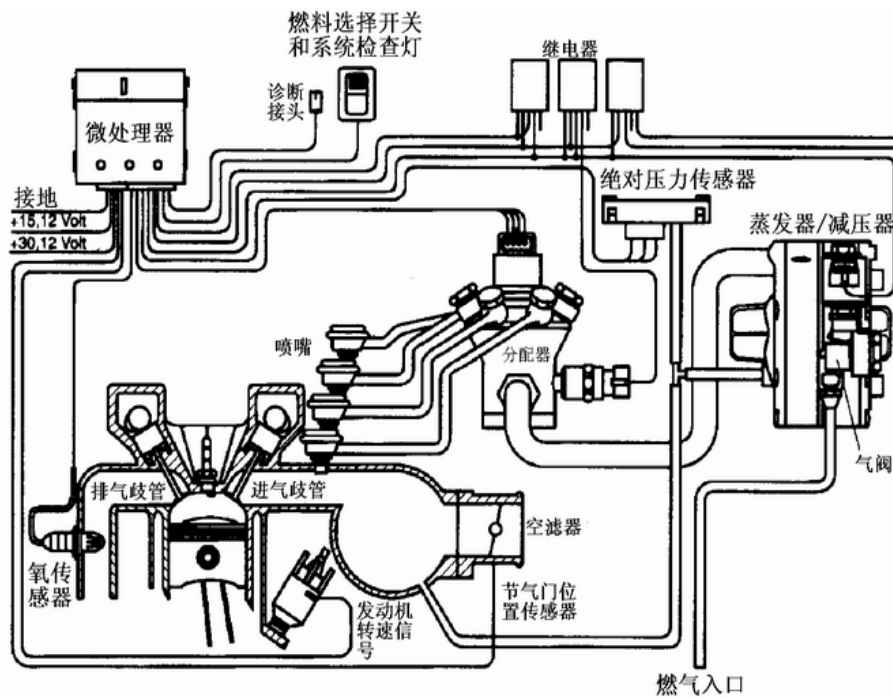


图 4-3 MEGI 多点 LPG 喷射系统

在 MEGI 系统中，由 1 个两级减压器将来自气瓶的 LPG 控制在适当的压力下。气体分配器向每一个气缸供给相同数量的燃料。随后，LPG 通过喷射管和喷射阀将 LPG 喷在进气门的正前方。LPG 喷射系统由微处理器控制，具有自学习功能，无需人工调整。代表发动机性能、排放和燃料消耗的信号由微处理器测量，并转化为执行机构的位置信号。微处理器集成于气体控制单元内，控制数字线性执行器（步进电机），以供给正确的喷射数量。

(2) Vialle 液态丙烷喷射 (LPI) 系统

LPG 除了采用气态形式喷射外，还能在中等压力下以液态形式喷射，如图 4-4 所示 Vialle 的 LPI 系统。以前，这种系统应用于单点喷射，近几年来，在多点喷射系统中也逐渐得到了应用，目的在于防止进气管内可能产生的回火。同时，该系统的目标还在于实现 LPG 发动机与汽油喷射相同的性能以及获得精确的控制和高的可靠性。在发动机以 LPG 为燃料运行时，仍可使用汽油发动机管理系统对其控制，因为两种燃料都是以液态形式喷入发动机内的。

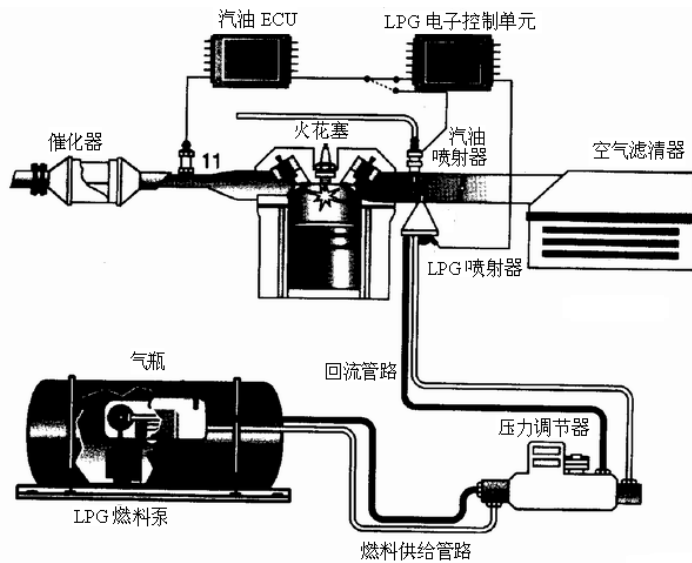


图 4-4 Vialle 液态丙烷喷射系统 (LPI) 设计方案图

LPI 系统包括一个位于气瓶内的 LPG 燃料泵，燃料泵压缩 LPG 燃料并促使其循环以防止 LPG 在喷射器底部附近汽化。压力传感器置于喷射器的下部，以保持液态 LPG 的压力比气瓶中的压力高 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，从而达到防止燃料汽化的目的。LPG 喷射器置于进气歧管的进气口，它把 LPG 顺序地喷射到每一缸的进气门前。多余的 LPG 则经压力控制单元回流至气瓶。输出到 LPG 喷射器的信号实际上来自于汽油微处理器。因为两种喷射器具有可兼容性，汽油的喷射控制信号可用作 LPG 微处理器的输入信号。另一个重要的输入参数是液态 LPG 的压力。传感器仍连接在汽油微处理器上，因此它仍然对发动机进行控制。只要 LPG 系统还遵从它的指令，系统就不会检测到异常情况的发生。

LPI 系统由保留下来的汽油微处理器进行基本的计算并执行特定的功能，如 λ 控制等。LPI 系统符合 OEM(原始设备制造商)标准，因此可以应用在中型或重型汽车上。此时该系统配有完全独立的发动机控制和管理系统。LPI 系统的扩展功能包括随车诊断、自学习模块、减速控制(减少燃料供给)、点火控制等。

第三代产品将电子控制装置推向了一个完善的水平，使得有可能将 LPG 电控装置与那些正在使用汽油的管理装置集成在一起，既可以喷射液态燃料，也可以喷射气态燃料到进气歧管。LPG 电控装置还具有自学习和无需调整的特

性。很多系统现在已经在世界各地上市，这些系统能够精确地控制喷射到进气歧管的燃料数量，从而确保最佳的性能和可靠性。

4.4 LPG 汽车改装技术

在汽车用柴油机或汽油基础上安装一套燃气装置，包括储气、供气、油气转换、电控及操作系统，与原车燃油系统协调联接一起，形成燃油系统和 LPG 系统两个独立系统，该系统能自如地实现燃料工作方式的转换，即双燃料（LPG 和柴油）或两用燃料（LPG 和汽油）工作方式。针对 LPG 的燃料特点也可将发动机改装为单一燃料 LPG 发动机。

1. 两用燃料（LPG 和汽油）汽车

当前改装的 LPG 汽车大多为两用燃料（LPG 和汽油）汽车，且已全面达到商品化阶段。现举例介绍一下两用燃料汽车燃料供给系统的构造及工作原理。

图 4-5 为车用 LPG—汽油两用燃料发动机中使用的机械式 LPG 燃料供给系统总成示意图。在该系统中，转换开关 5 及电磁阀 7、8 实现燃料 LPG 与汽油的切换。LPG 经滤清器 6 过滤后，进入液化气体蒸发减压器 15。由于 LPG 的汽化过程是吸热过程，因此需由发动机循环热水对其进行加热。

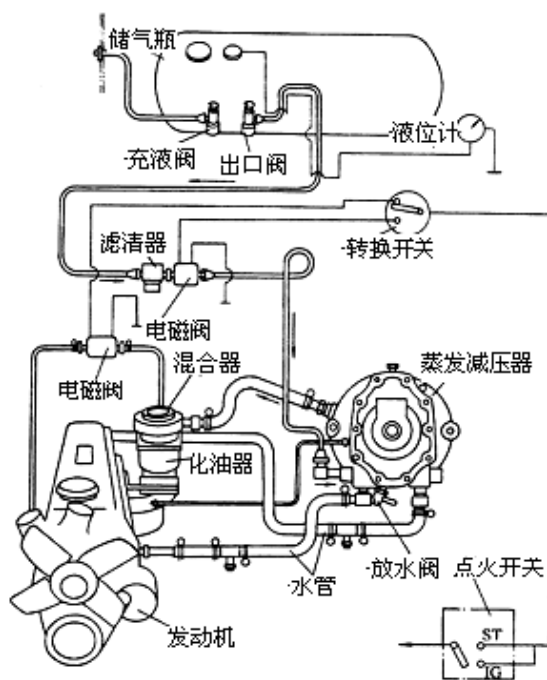


图 4-5 LPG—汽油两用燃料供给系统

1—储气瓶；2—充液阀；3—出口阀；4—液位计；5—转换开关；6—滤清器；7、8—电磁阀；9—混合器；10—化油器；11—发动机；12—水管；13—放水阀；14—点火开关；15—液化气体蒸发减压器

机械式 LPG 燃料供给系统虽然可以实现在车用发动机上燃用 LPG 燃料，但无法使发动机在最佳状态下工作，也不能在降低有害排放物方面充分发挥气体燃料的优势。目前，各种电子控制燃气供给系统已经应用到气体燃料发动机上，并已获得明显的经济效益和社会效益。

2. 单一燃料 LPG 发动机

若将柴油机或汽油机改装为单燃料（LPG）发动机，通常发动机的结构参数要进行调整。柴油机需要增加点火系统，并同时降低压缩比，以避免在燃用气体燃料时，可能产生的爆燃现象。而将汽油机改装时，则要提高压缩比，以适应气体燃料辛烷值高、抗爆燃性好的特点。点火提前角也要适当调整，一般要比原汽油机的点火提前角增大 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 为宜。

丰田汽车公司将 4.1L 的 15B-F 柴油机（108x112mm）改装为液化石油气发动机，压缩比从 18.4 降至 9.5，活塞顶部燃烧室形状改进为开式盆形，采用电子控制点火系统及空燃比反馈控制系统，混合气控制在理论空燃比，并通过三元催化剂净化排气中的 CO、HC 和 NO_x。全负荷工况下，液化石油气发动机低速区域转矩大幅度提高，超过了原柴油机转矩值，但在原柴油机标定转速点附近，功率和转矩都有所降低，标定转速点功率约下降 5%。13 工况排放中的 HC、NO_x 分别由原柴油机的 1.6 g/kW.h、4.4g/kW.h 降至 0.8 g/kW.h、1.5g/kW.h，而 CO 由 4.5g/kW.h 增至 28g/kW.h（限制值为 76 g/kW.h）。加速噪声由原来的 82dB(A) 降至 78dB(A)，正常行驶噪声由 75dB(A) 降至 67dB(A)。

3. 双燃料（LPG 和柴油）汽车

车用柴油机改装为双燃料（LPG 和柴油）发动机，必须保留原柴油供给系统用以提供引燃空气与 LPG 混合气的少量柴油，并需要配备一套 LPG 供给系统。这时发动机同时具有两套燃料供给装置，汽车同时携带两种燃料。而且燃料供给控制的难度也增大了许多，既要考虑 LPG 的控制，又要考虑柴油的控制；

既要处理好 LPG 与柴油之间的合理配比，又要处理好 LPG、柴油与空气之间的合理配比。

双燃料（LPG 和柴油）发动机的 LPG 供给系统等也是由液化石油气气瓶、汽化器、减压器、调节阀和混合器等组成。

LPG—柴油双燃料发动机和柴油机一样，用纯柴油起动。待发动机冷却水温度达到正常范围后，打开液化气气瓶阀门，液化气在瓶内气体压力作用下流入蒸发器，在蒸发器内液化气吸收来自发动机冷却水的热量，完全汽化成气体。气态液化气流入减压器降压，使其由气瓶内的压力降至某一数值。该数值可根据发动机运行要求进行调整。降压后的液化气进入调节阀，调节阀根据发动机运行工况，利用混合器真空度自动调节流入混合器的液化气量。液化气进入混合器和空气均匀混合后进入气缸，在压缩行程末期由喷入的少量柴油引燃，燃烧做功。

4.5 LPG 汽车性能及排放

两用燃料(汽油或 LPG)发动机燃用 LPG 时，动力性较用汽油时有所下降。其原因是：燃用汽油时，汽油在化油器中只有部分汽化，进一步的汽化在进气管和气缸内完成。其汽化潜热来自空气和发动机机件，故混合气温度低，密度大；而在燃用 LPG 时，燃料在进入混合器与空气混合前，已被预热并气化，以气态进入发动机，燃料所占容积大，容积利用率低，并且混合气温度高，密度小，致使实际进入气缸的混合气质量少，故其输出功率小，发动机功率的恢复必须通过进一步优化混合器安装位置、电控加浓、电控液态石油气喷射等方法实现。

发动机燃用 LPG 时，经济性较用汽油时有所提高。主要原因是因为混合气形成质量高，LPG 和汽油的低热值分别为 46000kJ/kg 和 44000kJ/kg。假定燃料的质量消耗率与其低热值成反比，则 LPG 的消耗应比汽油低 3%-5%，但实际更低一些，原因在于 LPG 能在更高的空燃比下产生最大转矩，并且发生最大转矩的空燃比比汽油更接近理论空燃比。LPG 的燃料经济性在较大的混合气浓度范围内都比汽油低，尤其在稀混合气区燃料经济性更好。和汽油相比，LPG 的稀

限拓宽了，这对于组织稀燃，提高效率、节能、降低排污意义重大。

采用四川西恩基公司生产的 LPG 供气系统(包括蒸发调压器和比例调节混合器等部件)，配置在解放 CA6102 型汽油机上，将压缩比由 6.75 提高到 7.2，并加大点火提前角，燃用 LPG 试验达到了良好的效果。与燃用 70# 汽油、压缩比为 6.75 的原机相比，3000r/min 时的标定功率损失只有 5%左右，实现了 LPG 和汽油两用燃料的改装。但因采用 7.2 的压缩比，故需燃用 90# 汽油。采用性能优良的供气系统，适当提高压缩比及增大点火提前角，是降低 LPG 和汽油两用燃料发动机功率损失的重要手段之一。

双燃料（LPG 和柴油）发动机，以通常的方式喷入微量柴油，作为点燃液化石油气与空气混合气的引燃油，可节省高质量的柴油，且仍具有柴油机多数优良的特性，例如，柴油机具有的高热效率、优异的转矩—速度特性、高的输出功率、可以增压及良好的排放特性，以及较好的可靠性、长寿命、较低维修费用等。它结构坚实，能够耐受偶然的冲击和爆燃负荷，而且对常规的柴油机作极小的改动即可。它既不损害柴油机的性能，又不失去在必要时转换为纯柴油的选择性。具有合适的转换方式的双燃料发动机远远优于使用纯柴油的柴油机。液化石油气以气态形式和空气均匀混合后进入发动机气缸，少量柴油喷入引燃，液化石油气—柴油燃料在气缸内充分完全燃烧，排气烟度在较大的负荷范围内可获得明显改善，全负荷工况下排气温度也低于燃用纯柴油时的数值。但由于液化石油气的混入，预混合燃烧量增大，使 NO_x 排放量及发动机噪声有增大的倾向。未燃碳氢化合物排放量与液化石油气的供给方式有关，若采用进气道内预混合方式，则未燃碳氢化合物的排放量大大增加；而采用缸内高压喷入方式，丙烷的排放量基本不增加，其它未燃碳氢化合物，特别是甲烷和乙烯的排放量则大大下降。

将柴油机改装为双燃料发动机，由于引燃油的点火可靠，几乎所有的气体燃料都能不同程度地用在此类发动机中，如沼气、液化石油气、低热值煤气等。限于目前的技术水平，它的推广仍受到一些问题的限制，如使用两种或多种燃料时的控制系统和特殊的储存设施、气体燃料的预燃过程及随后引燃油燃烧过程之间产生的中间化学反应所引起的不良状态、低负荷和怠速时的低效率和不良的排放特性、高负荷时爆燃问题等，因而双燃料发动机中气体燃料的应用仍

面临着较多的关键技术攻关的问题，需要做深入系统的工作。

参考文献

- [1]. 侯亚玲.甲醛排放影响因素及气相色谱在新能源检测中的应用研究[D].陕西:长安大学,2009.
- [2]. 王丹,朱向荣.车用代用燃料研究及发展趋势[J]. 汽车工艺与材料. 10:1~5. 2005.
- [3]. 钱华,伏晴艳.机动车替代燃料及清洁化发展趋势[J].环境与职业医学, 2004,21(4):298~303.
- [4]. 赵贤俊,王海成,刘晓辉.甲醇燃料产业化的现状和趋势[J].化工技术经济,2006,(9)
- [5]. 蔡少婵,许伯彦,罗远荣.车用汽油机燃用高浓度甲醇燃料的试验研究[J].小型内燃机, 1994,23 (4):7-11.
- [6]. 王殿虎,夏晓,郇延建.橡胶材料对甲醇汽油的抗溶胀性研究[J].橡塑技术与装备,2009,35(5):24-26.
- [7]. 曾东建,黄海波,吴晓云等.甲醇汽油加入防水添加剂的试验研究[J].车用发动机,2007(6):83-86.
- [8]. 钟洪权等.甲醇汽油的技术发展及应用前景.云南化工,2006,33(5):51-54.
- [9]. Williams R L, Lipari F, Potter R A. Formaldehyde, Methanol and Hydrocarbon Emissions from Methanol-fueled Cars[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1990, 40:747-756.
- [10]. Gabele P A, Baugh J O, Black F, et al. Characterization of Emissions from Vehicles Using Methanol and Methanol-Gasoline Blended Fuels[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1985,35:1168-1175.
- [11]. 李毅,高广新,刘圣华,等.环境温度对甲醇/汽油发动机冷起动排放影响的研究[J].西安交通大学学报,2011,45(11):6-10.
- [12]. 姚春德,耿鹏,王姝荔,等.掺甲醇汽油对国III汽油机排放性能影响[J].环境科学学报,2012,32(12):3078-3086.
- [13]. 张仲荣,范国梁,宋崇林,等.火花点火式电控甲醇发动机非常规污染物的排放特性[J].燃烧科学与技术,2006,12(1):86-89.
- [14]. 尹超,高俊华,尧命发.甲醇发动机与汽油发动机瞬态排放特性的对比研究[J].

汽车工程,2011, 33(9):753-756.

[15]. 葛蕴珊, 尤可为, 王军方, 等. 甲醇燃料汽车的排放特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2008,28(4):314-318.

[16]. 谭建伟, 葛蕴珊, 王军方, 等. 甲醇燃料车醛酮类污染物排放特性研究[J]. 环境科学, 2009,30(8):2199-2203.

[17]. 高俊华, 崔正来, 高海洋. 轿车燃用汽油-醇类混合燃料的试验研究[J]. 汽车工程, 2006,28(6):534-538.

[18]. 孙济美主编. 天然气和液化石油气汽车. 北京: 北京理工大学出版社, 1999年3月

[19]. 崔心存. 内燃机的代用燃料. 北京: 机械工业出版社, 1990, 8

[20]. 朱仙鼎主编. 特种发动机原理与结构. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.9

[21]. Christopher S Weaver. Natural Gas Vehicles-A Review of the State of the Art. SAE Paper892133

[22]. Stuart R. Natural Gas as a Transportation Fuel. SAE931829. Andrea Unich. Natural Gas: a Promising Fuel for IC Engine. SAE930929

[23]. 邹祖焯主编. 国外代用燃料汽车发展概览. 北京: 中国铁道出版社, 1998.12

[24]. 周龙保主编, 刘巽俊、高宗英副主编. 内燃机学. 北京: 机械工业出版社, 1999.5

[25]. 吉宗吾, 计多嘉. 《天然气汽车译文选》. 北京: 石油工业出版社, 1991. 7

[26]. Roy C Meyer et al. Development of ACNG Engine, SAE910881. M.van der Steen. Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations. TNO Paper VM9608

[27]. 何学良, 李疏松. 《内燃机燃烧学》. 北京: 机械工业出版社, 1990.5

[28]. 钱仁一. 燃气汽车的应用及相关问题. 世界汽车, 天津: 中国汽车技术研究中心, 1999 (3)

[29]. 纪铁辉. 气体燃料发动机讲座. 柴油机, 1996 (4)

[30]. Todashi Narushima. Development of Ultra Low Emission Light Duty NGV. 内燃机关, 1993 VOL.32

[31]. 赵源泰编译. 沃尔沃 7HG103 低排放 CNG 发动机. 天然气汽车信息, 1996 (3)

[32]. Mitsunori Ishii, et al. Experimental Studies on a Natural Gas Vehicle. SAE942005.

[33]. Vladimir I. Abram. Adaptive Engine Control Unit with Feed Back Knock Signal.

SAE920241

- [34]. 傅彬.戴姆勒—克莱斯勒公司的商用车清洁发动机.商用汽车.北京: 国家机械工业局, 商用汽车杂志社, 2000 年第 1 期, 总第 71 期。
- [35]. 闫峰等. 清洁可靠的强劲动力 CA6102N 型系列天然气发动机. 天然气汽车. 北京: 中国天然气总公司石油信息所, 1998 (3)
- [36]. 任雄峰. 重型点燃式甲烷发动机. 小型内燃机. 天津: 天津内燃机研究所, 1993 (4)
- [37]. 罗贝尔托.季利尼. 供重型汽车用的新型气体发动机. 内燃机世界, 1998.2
- [38]. 黄保康. 康明斯 B 系列天然气发动机简介. 国外内燃机, 1997 (1)
- [39]. 施国林. 压缩天然气发动机的开发. 小型内燃机, 1997 (4)
- [40]. Patrik Einewall. et al. Combustion Chambers for Supercharged Natural Gas Engines. SAE970221.
- [41]. Sean Song, Philip. A. Dual-fuelling of a Prechamber Diesel Engine with Natural Gas. ASME, Paper85-DGP-3
- [42]. 胡征钦译. Б Е Л А 3 —548 А Г Д 压缩天然气汽车.天然气汽车信息, 1996 (1)
- [43]. 赵源泰译.用于柴油甲烷双燃料的电子燃料喷射装置.天然气汽车信息, 1995(4)
- [44]. Kresimir Gebert, et al. Strategies to Improve Combustion and Emission Characteristics of Dual-Fuel Pilot Ignited Natural Gas Engines. SAE971712
- [45]. 段纓, 于海涛译.重型汽车双燃料发动机的发展.国外内燃机, 1997 (6)
- [46]. Beck N J, George A F and van der lee B. Electronic Fuel Injection for Dual Fuel Diesel Methane. SAE891652
- [47]. 糜振琥.气体燃料发动机燃料特性探讨.柴油机, 1987 (6)
- [48]. 张付军, 郝利君等. 电控顺序喷射天然气专用发动机的开发. 中国工程热物理学会, 99 代用燃料分会论文。
- [49]. 刘瑞林等. 车用汽油机实现快速燃烧的途径. 内燃机工程, 1993 (1)
- [50]. 夏来庆等. EQ6100 汽油机新型燃烧系统的研究. 内燃机学报, 1991 (2)
- [51]. 沙济忠. Ricardo 星云式燃烧室在天然气发动机中的应用前景. 柴油机, 1992(3)
- [52]. 武得钰等. 点燃式发动机紊流燃烧室的设计与研究. 内燃机学报, 1992 (2)
- [53]. 汤亚美. 高能 (电子) 点火系统与供油系统匹配实验研究. 内燃机工程, 1994

(3)

- [54]. 龚金科. 汽油机点火能量的研究. 内燃机工程, 1994 (4)
- [55]. 袁大宏. 高能点火对汽油机性能的影响. 小型内燃机, 1992 (3)
- [56]. 曹敬麟, 许世新. 对汽油机点火系统能量的探讨. 汽车技术, 1990 (4)
- [57]. 陈泽智, 夏来庆, 郑彪, 马元骥. 高能点火放电方式对全烧式沼气发动机性能的影响. 太阳能学报, 1997 (1)
- [58]. 张佑国. 火花塞的构造和使用维护. 北京: 人民交通出版社, 1985, 1
- [59]. 蒋德明. 内燃机原理. 北京: 农业机械出版社, 1986
- [60]. 方祖华等. 点燃式内燃机气体燃料电控喷射技术的研究. 燃烧科学与技术, 1997 (2)
- [61]. 方祖华. 天然气发动机缸内直喷技术和燃烧特性的研究. 吉林工业大学博士论文, 1997
- [62]. (德)谢费尔特, (德)瓦尔泽著; 陈励志等译; 何赐文, 陈励志校. 未来的汽车技术. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [63]. [日]Biwa T. 28/32 气体喷射发动机技术状况. 柴油机, 1991 (5)
- [64]. 金秋. 火花点火式二冲程天然气发动机的开发. 小型内燃机, 1996 (3)
- [65]. [日]太田勇等. 3t 货车用液化石油气发动机的开发. 国外内燃机, 1998 (1)
- [66]. Gewen Fang and X.Gao. Improvement of Combustion from Spark Ignition Engines Fueled with Dual Fuels. SAE952411
- [67]. M.van der Steen, J.J.Seppen. Economic Assessment of Different Bus Engine Technologies and Fuels for the Future. TNO Paper VM9704
- [68]. Kresimir Gebert, et al. Strategies to Improve Combustion and Emission Characteristics of Dual-Fuel Pilot Ignited Natural Gas Engines. SAE971712
- [69]. Hong H, Krepec T and Cheng R M H. Optimization of Electronically Controlled Injectors for Direct for Direct Injection of Natural Gas in Diesel Engines. SAE930928, 1993
- [70]. 刘巽俊. 内燃机的排放与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [71]. 国家环境保护总局. GB18352.1-2001 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (I) [s]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [72]. 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB18352.2-2001 轻型汽车污

染物排放限值及测量方法（II）[s]. 北京:中国环境科学出版社, 2001.

[73]. 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB18352.3-2005 轻型汽车污染物排放限值及测量方法（III、IV）[s]. 北京:中国环境科学出版社, 2005.

[74]. 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）（二次征求意见稿）[EB/OL].

[75]. Yassine M K, Pan M L. Impact of Ethanol Fuels on Regulated Tailpipe Emissions[J]. SAE Paper2012-01-0872, 2012.

[76]. Bielaczyc P, Szczotka A, Woodburn J. A Study of Gasoline-Ethanol Blends Influence on Performance and Exhaust Emissions from a Light-Duty Gasoline Engine[J]. SAE Paper 2012-01-1052,2012.

[77]. Storey J M, Barone T, Norman K, et al. Ethanol Blend Effects On Direct Injection Spark-Ignition Gasoline Vehicle Particulate Matter Emissions[J]. SAE Paper 2010-01-2129, 2010.

[78]. Graham L A, Belisle S L, Baas C L. Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(19):4498-4516.