

重点行业贴息贷款关键技术研究

二〇一四年十月

1 项目意义和必要性

我国正面临着日益严峻的大气污染物控制和温室气体减排的双重压力。

一方面，污染物减排是改善环境质量、解决区域性环境问题的重要手段。“十一五”期间减排任务的完成，贡献最大的就是工程减排，而技术创新及其推广应用是工程减排的核心。未来几年是我国全面建设小康社会的关键时期，工业化、城镇化将继续快速发展，污染防治任务十分艰巨。“十二五”规划纲要将二氧化硫（SO₂）和氮氧化物（NO_x）纳入我国大气污染物排放总量控制的硬性指标，PM_{2.5}等细粒子和黑炭污染也成为社会关注的焦点问题。同时我国区域性大气环境问题日益突出，2013年发生的包括北京在内涉及我国中东部130多万平方公里的严重雾霾污染事件更是引起了全社会对环境污染问题的空前关注。我国环境问题的解决，除了制度创新，技术进步和技术示范推广将发挥非常重要的作用。

另一方面，在面对全球气候变化和温室气体减排国际压力下，绿色低碳发展已经是我国可持续发展的必然选择，预计中国在2025年或2030年之前将实现绝对总量减排。而我国当前以煤为主的能源结构短期内难以改变，同时随着经济发展和生活水平的提高，能源消耗总量仍将不断增加。因而，绿色低碳技术的大规模应用将是我国污染物减排和低碳发展的重要途径。化石能源的低碳化应用、能源效率的提高和可再生能源大范围应用推广都依赖于技术的创新和应用。

污染物和温室气体减排具有明显的协同效应，尤其我国以煤为主的能源结构使得我国大气污染与CO₂排放“同根、同源”。技术进步和推广是我国环境治理和低碳发展的重要支柱，国务院2013年印发的《大气污染防治行动计划》中也明确提出了“加快企业技术改造，提高科技创新能力”的要求。

因而，要通过建立中央环保专项资金的贴息贷款制度，解决中国的大气污染问题，对绿色技术的鼓励和支持必然是贴息贷款的核心之一，而甄别前沿且在中国具有较为显著的污染物减排潜力和推广前景的核心技术，是针对技术进行贴息贷款的关键环节。本研究紧密结合《大气污染防治行动计划》，利用文献查阅、国内外调研、专家访谈和实地调研等手段，基于技术成本—效益分析等方法，在火电、钢铁和水泥三个大气污染重点行业甄选影响大气污染治理的关键绿色技术，作为贴息贷款的备选技术。

2 国际重点领域绿色技术发展及展望

2.1 绿色技术的概念及内涵

绿色技术，也可称为对环境友好的技术或环境健康技术。这一概念源于 1992 年联合国环境发展大会通过的《21 世纪议程》。从广义上理解，绿色技术是一切能够获得持续发展，支撑世界经济，保护生态环境，减少贫困和人类痛苦的技术。绿色技术亦可看作把保护环境、改善生态与提高效率、发展经济统一起来的一项全新的技术模式。从企业角度，又可把它看作是在选择生产技术、开发新产品时，必须考虑减少从生产原料开始到生产全过程的各环节对环境的破坏，即必须做出有利于环境保护、有利于生态平衡的选择，要根据环境价值，选择利用现代科学技术全部潜力的无污染技术。

绿色技术可以有各种不同的分类。根据绿色技术影响社会经济的广度和不同侧面，将其分为三个层次：第一层次为污染防治技术，主要是传统的末端污染控制技术，如废水、废气、废物的净化处理技术等。第二层次是环境友好技术，指在生产、流通和消费各个环节可以提高资源能源效率，减少污染物的排放及对生态环境的影响，提高产业绿色化水平的技术，包括清洁生产、节能和清洁能源、资源综合利用及再生技术，还包括绿色交通、绿色建筑等技术。第三层次是生态保护技术，指促进生态环境不断改善、维护生态平衡、提高生态服务功能的技术，包括生态修复技术、生态农业、林业技术、水土保持、生物多样性保护、生态景观建设技术等。

2.2 国际重点领域绿色技术

2.2.1 电力

IPCC 第五次评估报告第三工作组报告（2014）认为，电力行业绿色低碳发展的重点方向主要是：能源利用效率的提高，减少非二氧化碳温室气体的排放，高碳燃料（煤炭）向低碳燃料（天然气）的转变，可再生能源，核能及 CCS 技术的应用等。

根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）发布的《能源技术展望 2012》（Energy Technology Perspectives 2012）称，如今全球将近三分之一的化石能源（主要是煤和天然气），都被电力生产部门使用。而在发电和供热过程中，却有 56% 的能量损失，这造成了 12Gt CO₂ 的排放，这一部分 CO₂ 占全球 CO₂ 排放量的 40%，发电厂是 CO₂ 减排的关键。各种绿色技术的应用对上述 CO₂ 减排量所作出的累计贡献百分比如下：提高能源转化和利用效率对 CO₂ 减排贡献为 5%；节约电力对 CO₂ 减排贡献为 28%；其他可再生能源对 CO₂ 减排贡献为 5%（其中生物能源 3%、地热能 1.5%、海洋能 0.5%）；风能对 CO₂ 减排贡献为 7%；聚光太阳能（Concentrating Solar Power, CSP）发电技术对 CO₂ 减排贡献为 5%；太阳能光伏技术（Photovoltaic, PV）对 CO₂ 减排贡献为 7%；氢能对 CO₂ 减排贡献为 4%；核能对 CO₂ 减排贡献为 14%；碳捕捉和封存（Carbon Capture and Storage, CCS）技术对 CO₂ 减排贡献的百分比为 18%。因此，CCS 技术是电力行业重要的绿色技术之一。目前主流的碳捕捉工艺按操作时间可分为三类：燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集。其中，燃烧前捕集技术以整体煤气化联合循环技术为基础，先将煤炭气化成清洁气体能源，从而把 CO₂ 在燃烧前就分离出来，不进入燃烧过程，燃烧前捕捉实现起来最为复杂。燃烧后捕集是在燃烧排放的烟气中捕集 CO₂，目前常用的 CO₂ 分离技术主要有化学吸收法（利用酸碱吸收）和物理吸收法（变温或变压吸附）。燃烧后只能捕捉到排出 CO₂ 的 10%。富氧燃烧采用传统燃煤电站的技术流程，但通过制氧技术，将空气中大比例的 N₂ 脱除，直接采用高浓度的 O₂ 与抽回的部分烟气（烟道气）的混合气体来替代空气，这样得到的烟气中有高浓度的 CO₂ 气体，可以直接进行处理和封存。

燃煤发电是污染物和 CO₂ 排放强度较高的行业，因而 IEA 提出燃煤发电减少污染物和 CO₂ 排放的关键环节（图 1）。

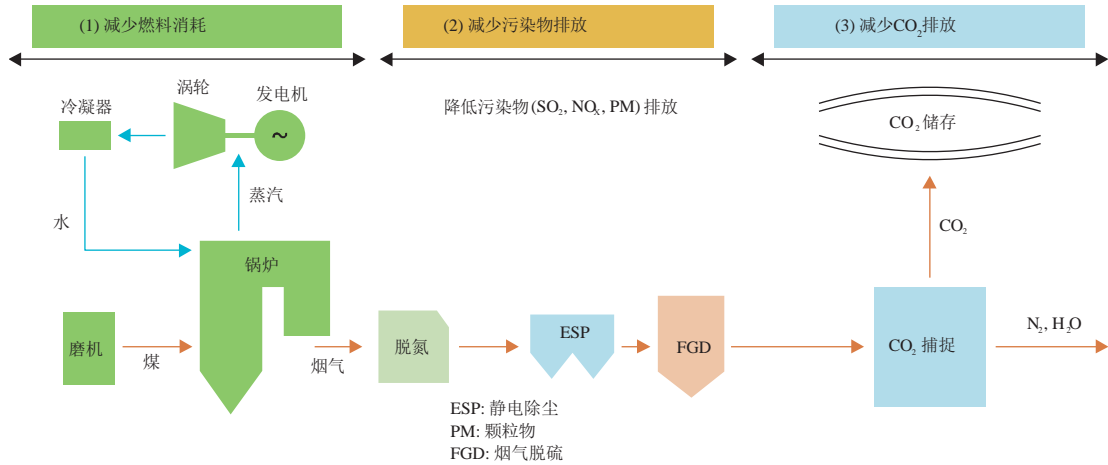


图 1 燃煤发电减少污染物和 CO₂ 排放的关键环节

针对燃煤和燃气的不同发电技术，其整个发电过程中的污染物排放量往往差别较大，当前较为前沿的燃煤和燃气发电技术，其相应的排放水平和如果采用 CCS 所需要额外消耗的能量情况见表 1。

表 1 不同工艺燃煤和燃气电厂的污染物排放水平比较

燃料类型	电厂类型	CO ₂ 排放 (g/kWh)	NO _x 排放 (mg/Nm ³)	SO ₂ 排放 (mg/Nm ³)	PM 排放 (mg/Nm ³)	最大负荷 (MW _e)	容量因数 (%)	CCS 能量消耗 (%)
煤	煤粉燃烧 (超超临界)	740	<50 - 100 (SCR)	<20 - 100 (by FGD)	<10	1 050	80	
	循环流化床	880 - 900	<200	<50 - 100	<50	460	80	7 - 10 (燃烧后和富氧燃烧)
	煤粉燃烧 (高级超临界)	669 (700°C)	<50 - 100 (by SCR)	<20 - 100 (by FGD)	<10	<1 000 (可能)	-	
	IGCC	669 - 740	<30	<20	<1	335	70	
	煤气化燃料电池	500 - 550	<30	<20	<1	<500	-	7
天然气	NGCC	400	<20	几乎没有	0	410	80	
	天然气燃料电池	300 - 330	<20	几乎没有	0	<600	-	8

数据来源：IEA，2012

在电力行业脱硫技术方面，目前国际普遍采用的脱硫方法可分为煤燃烧前脱硫、燃烧中脱硫和燃烧后脱硫（即烟气脱硫）三大类。烟气脱硫是目前控制燃煤电厂二氧化硫排放最有效的技术。应用最为广泛的烟气脱硫技术有石灰石-石膏湿法、氨法、海水法、烟气循环流化床法等。

控制火电厂 NO_x 排放的方法有两大类：一类为低 NO_x 燃烧技术，在燃烧过

程中控制 NO_x 的生成；另一类是烟气脱硝技术，从烟气中脱除生成的 NO_x。综观国际上控制火电厂 NO_x 排放的低 NO_x 燃烧技术，大概可分为三类，即低氮燃烧器、空气分级燃烧技术、燃料分级燃烧技术。由于该类技术工艺成熟，投资与运行费用较低，已在火电厂的 NO_x 排放控制中得到了较多的应用（表 2）。

表 2 低 NO_x 技术控制效果比较

技术名称	效果	优点	缺点
空气分级燃烧（OFA）	最多 30%	投资低 有运行经验	并不是对所有炉膛都适用，有可能引起炉内腐蚀和结渣，并降低燃烧效率。
低投入运行的燃烧器数目	15%-30%	投资低，易于锅炉改造，有运行经验	有引起炉内腐蚀和结渣的可能，并导致飞灰含碳量增加
燃料分级燃烧（再燃）	可达到 50%	适用于新的和改造现有锅炉，可减少已形成的 NO _x ，中等投资	可能需要二次燃料，可能导致飞灰含碳量增加，运行经验较少。国内外研究热点
低氧燃烧	根据原来运行条件，最多降低 20%	投资最少，有运行经验	导致飞灰含碳量增加
烟气再循环（FGR）	最多 20%	能改善混合和燃烧，中等投资	增加再循环风机，使用不广泛
低 NO _x 燃烧器（LNB）	与空气分级燃烧合用时可达 60%	适用于新的和改装的锅炉，中等投资，有运行经验	结构比常规燃烧器复杂，有可能引起炉膛结渣和腐蚀，并降低燃烧效率

数据来源：IEA，2012；UNEP 网址资料等

此外，国际社会也非常重视非化石能源发电技术，这类技术对于减少污染物和碳排放具有非常重要的作用，主要包括生物质发电；生物质混燃；燃料电池；燃气轮机（简单循环和联合循环）；地热发电；水力发电；船舶发电；公用事业规模核电；模块化核电；住宅和商业建筑太阳能发电；公用事业规模太阳能发电；陆上风电；海上风电；废物转化为能源等。同时，也包括电力传输和智能电网管理，先进的计量基础设施；配电自动化和网格效率；电动汽车；能量储存；高温超导传输；高压直流输电；微电网；智能电网数据管理和分析；电压和伏安无功优化等。电力传输和智能电网管理技术允许电力分配得到更有效的管理、减少损

失、最大限度地减少中断，并给电网运营商和客户为管理电力使用提供有价值的数据和减少相关排放。微电网是结合现场发电（如 CHP 和太阳能装置）的能力维持供电，即使周围的电网被破坏。

2.2.2 钢铁

钢铁是工业部门第二大能源消耗产业，同时也是最大的 CO₂ 排放产业。钢铁行业仅 2009 年就消耗 26EJ 的能源，CO₂ 排放量达到 2.3Gt。在钢铁行业中，提高能源转化利用效率对 CO₂ 减排的贡献率可以达到 50%，CCS 技术对 CO₂ 减排的贡献也高达 37%。除此之外，对 CO₂ 减排的贡献率由高到低依次为回收技术、天然气-直接还原铁技术、高炉技术等。在中长期，能源效率的提高依然是钢铁行业节能和减少排放的重点方向，而从 2030 年开始，CCS 将发挥越来越重要的作用（图 2）。

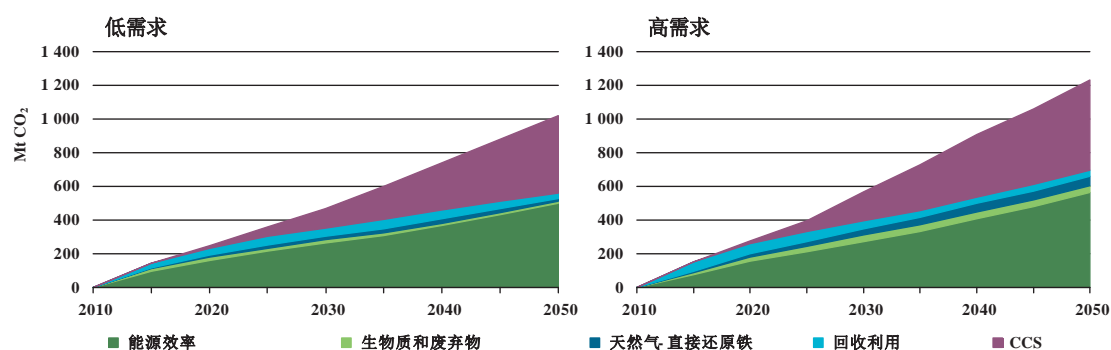


图 2 全球钢铁行业不同技术领域未来减排潜力

数据来源：IEA，2012

钢铁工业生产中，烧结、焦化、炼铁、炼钢和有色金属冶炼过程是大气污染物的主要来源。为降低对大气污染影响程度，目前国际上钢铁行业所应用的绿色技术见表 3。

表 3 钢铁行业核心绿色技术

绿色技术	研究需求
熔融还原炼铁工艺 (Smelting Reduction)	提高熔融还原炼铁的热量交换 HIs melt 炼钢工艺降低煤使用量 整合 HIs melt 和 Isarna 进程炉边、炉子直接配对
高炉炉顶煤气循环 (Top-gas recycling blast furnace)	现行的实验火炉成功
使用高密度活性材料 (Use of highly reactive)	发展创新结块、降低高炉的还原剂

materials)	
使用木炭和废塑料 (Use of charcoal and waste plastic)	证明技术可行, 集中研究提高生物炭的机械稳定性
熔融氧化物电解法 (production of iron by molten oxide electrolysis)	获取技术的可行性以及最优化运行的参数
氢气闪速熔炼法 (hydrogen smelting)	获取技术的可行性以及最优化运行的参数
碳捕捉和封存技术 (Carbon Capture and Storage)	重点研究在碳捕获过程中的能源减量

数据来源: IEA, 2012; UNEP 网址资料等

其中, 熔融还原炼铁工艺是日本川崎钢铁公司开发的, 以预还原流态化床与熔融还原竖炉作为联合设备。包括流态化矿粉预还原-竖炉熔融还原和精矿粉直接喷入竖炉进行熔融还原两种工艺, 是用富氧热风并以低质量焦炭粉作为燃料和还原剂, 直接用粉矿进行预还原, 然后在熔融还原竖炉完成还原的二步法熔融还原, 目标是用非焦煤替代焦炭为能源冶炼生铁。

高炉炉顶煤气循环主要工艺的核心环节是将高炉炉顶煤气合适处理后把其中的还原成分 (CO 和氢气) 喷入风口或炉身适当位置, 从而重新回到炉内参与铁氧化物的还原, 以加强碳和氢元素的利用。该工艺被认为可改善高炉性能、降低能耗以及减少 CO₂ 的产生。

熔融氧化物电解法是氧化铁矿在 1600°C 的温度下, 溶解在二氧化硅和氧化钙溶剂中, 在电流通过时, 带负电荷的氧离子移向阳极, 阳极产生出氧气。带正电荷的铁离子移向阴极, 阴极产生铁, 并聚集在电解槽底部的收集池中。熔融氧化物电解工艺生产的是完全不含碳的铁, 因此不会产生 CO₂, 仅产生氧。

氢气闪速熔炼法是使铁精矿粉在悬浮状态下, 被热还原气体还原成金属化率较高还原铁的工艺。热还原气体可以是 H₂, 也可以是由煤、重油等经过不完全燃烧产生的还原气体 CO, 或者是 H₂ 和 CO 的混合气体。从环保和还原动力学观点来说, 氢气非常适合作还原剂和燃料。氢气闪速熔炼法所生产的铁水可直接供后面炼钢工序。试验发现, 该项新技术利用 H₂、CH₄ 和煤分别作燃料生产 1t 铁水时, 对应的 CO₂ 排放量分别为 71、650 和 1145kg, 而常规高炉炼铁生产 1t 铁水对应的 CO₂ 排放量高达 1671kg。因此, 即使采用煤作燃料, 新技术也比常规高炉炼铁工艺排放的 CO₂ 量显著降低。

2.2.3 水泥

水泥工业是矿业加窑业的非金属材料制造工业，也是高耗能、高 CO₂ 排放的产业。2009 年水泥产量为 3048Mt，耗用工业部门四分之一的能源，CO₂ 排放量为 2.3Gt。中国是水泥第一生产大国，目前约占世界水泥产量的 50%，亟需国际水泥行业节能和 CO₂ 减排技术经验，从而进一步减少温室气体排放，实现水泥工业的绿色转型。

水泥在生产和高温煅烧过程中产生大量的 CO₂ 和 NO_x，为降低对大气污染影响程度，目前国际上水泥行业所应用的绿色技术主要有提高能源效率（政策&措施）、替代燃料和 CO₂ 捕捉与封存技术等。水泥生产从原料开采、破碎到熟料煅烧、冷却、混合，水泥粉磨，库存、运输等各个环节都存在着极大的节能和减少排放的潜力（图 3）。

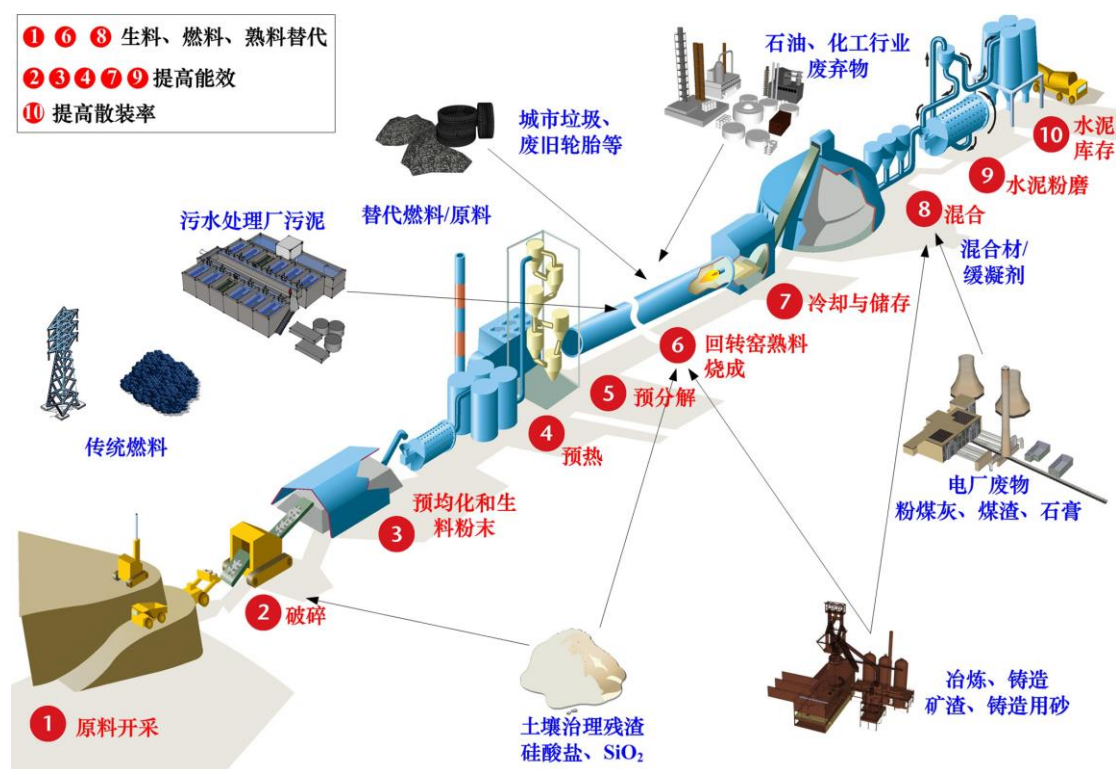


图 3 水泥生产全过程的节能和减排排放的环节

在中长期，水泥行业节能和减少排放的主要领域是替代熟料和 CCS，熟料生产是水泥生产过程中能源消耗和污染物排放的主要环节（图 4）。

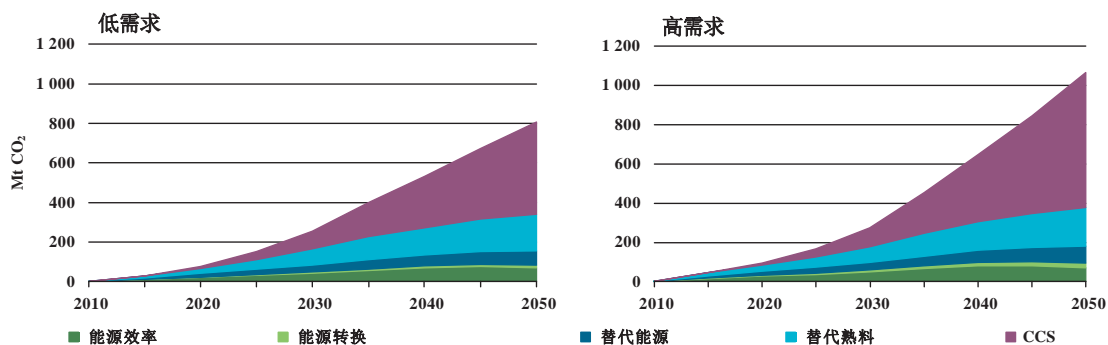


图 4 全球水泥行业不同技术领域未来减排潜力

数据来源：IEA，2012

而生料替代、熟料替代等都能极大提高水泥的资源利用效率，从而节约能源和资源消耗。使用废弃物替代燃料是国际水泥行业普遍采用的技术，燃料替代率高、数量大、种类多是发达国家水泥行业的主要特征，未来全球水泥燃料替代仍有较大发展空间（图 5）。发达国家有超过 2/3 的水泥厂使用替代燃料，全世界水泥行业 2005 年利用替代燃料达到 1150 万吨。欧洲水泥行业燃料替代率达到 18%，荷兰、比利时、德国、奥地利等国家的替代率都超过了 50%。德国水泥行业的替代率从 2000 年的 25.7% 迅速上升为 49.9，几乎翻了一番，荷兰是世界水泥行业燃料替代率最高的国家，2007 年达到 92%。

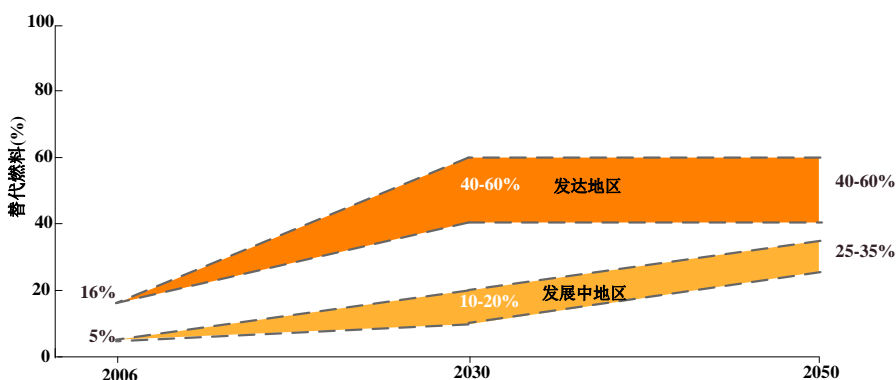


图 5 全球水泥替代燃料发展趋势

数据来源：WBCSD&IEA

对于水泥行业各技术的 CO₂ 减排成效，国际能源署在《能源技术展望 2012》中按照以下三种情形推断：1) 不采取任何手段，到 2050 年地球平均温度将上升 6 度，即 6DS 情形；2) 采取一些手段后，到 2050 年地球平均温度将上升 4 度，即 4DS 情形；采取一些手段后，到 2050 年地球平均温度将上升 2 度，即 2DS 情形。结论是采用能源混合应用技术，提高能源利用效率的话，在 4DS 的目标

中实现 CO₂ 减排较 2009 年降低 23%，在 2DS 的目标中实现 CO₂ 减排较 2009 年降低 29%；该技术与 CCS 技术搭配使用，可以在在 4DS 的目标中实现 CO₂ 减排较 2009 年降低 31%-36%，在 2DS 的目标中实现 CO₂ 减排较 2009 年降低 47%-52%。在所有技术中，燃料转换和可替代燃料的选择技术可以最有效的降低 CO₂ 排放量，能源使用效率的提高可以减少 20%的 CO₂ 排放。除此之外，其他绿色技术对 CO₂ 减排的贡献情况依次为替代燃料技术以及其他燃料转换（热量）技术。水泥行业的主要绿色技术方向见表 4。

表 4 全球水泥行业绿色技术方向

技术	研发需求	示范需求	发展重要节点
能效提高和实施最佳可行技术	继续提高当前的最佳可行技术 流化床技术		淘汰小水泥的湿法技术 新水泥窑的全球标准
替代燃料	当前可行的替代燃料进行确定和分类		全球比例从2010年的4%提高到2050年的30%
替代熟料	研究替代物质的特性，评价在区域层面的可行性，发展和实施混合水泥的全球标准		全球熟料-水泥比到2050年达到0.66 - 0.67
CCS 燃烧后	示范项目研发	2015-20	到2050年，约50%-70%的新建大型水泥厂和30%-45%的水泥厂技术改造升级需要配套CCS
CCS 富氧燃烧	烟气净化	2020-30	

数据来源：IEA，2012

另外，可用于水泥生产过程源头控制 NO_x 产生的低氮燃烧器、空气分级燃烧技术、燃料分级燃烧技术等有益于能源利用效率提高的技术，高效脉冲袋式收尘等除尘技术以及从烟气中的 NO_x 选择性催化还原法（SCR）、选择性非催化还原法（SNCR）、联合脱硝法（SNCR/ SCR）等末端治理技术也是需要借鉴和研究的相关绿色技术。

3 中国重点行业关键技术甄选方法

本研究主要采用多属性综合评估方法甄选关键技术，同时结合国内各个部门出台的节能环保技术名录，最终确定重点行业关键技术目录。

多属性综合评估是通过构建数学模型（或算法）将多个评估指标值“合成”为一个整体性的综合评估值，用于确定重点行业关键技术的排序。多属性综合评估方法流程相对简单（技术流程图见图6），可直接反映资源能源效率和综合环境影响，并将这些不同维度的信息加以综合，便于在不同的技术间进行比较，是系统、全面地筛选重点行业节能减排核心技术的有效方法。该方法根据评估目的及被评估系统的特点用于选择较为先进适用的技术或方案。即，在获得若干个系统的评估指标值 $\{x_{i,j}\}$ 的基础上选用或构造综合评估函数：

$$y = f(w, x)$$

式中 $w = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}^r$ 为指标权重向量， $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^r$ 为系统的状态向量。

在多属性综合评估过程中，专家评估发挥非常重要的作用，因为许多环节和技术指标、权重因子等都很难获取客观准确的评价数值，因而需要借助行业专家知识和经验实现评估。

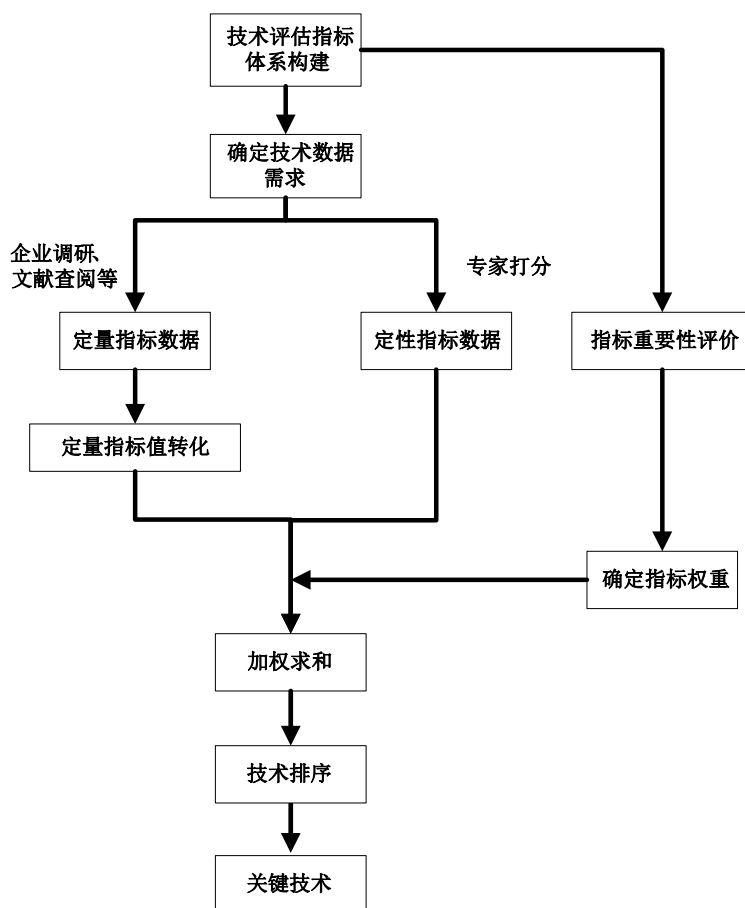


图 6 关键技术甄选路线图

首先确定甄选指标体系，包括资源能源消耗、资源能源综合利用、污染物排放、技术经济成本、技术特性等（表 5）。其中，资源消耗重点考虑水资源、铁矿石、石灰石等；能源消耗重点考虑化石能源（煤、石油和天然气）和电力；污染物排放重点考虑 SO₂、NO_x 和颗粒物；成本效益重点考虑投资成本、运行成本等。

表 5 关键技术甄选指标体系

指标类型	指标
定量指标	资源消耗
	能源消耗
	污染物排放
	成本效益
	技术特性
定性指标	技术自动化水平
	技术普及程度
	技术推广应用前景
	技术国产化水平

关键技术的节能减排效益评估。节能减排效益是一个相对的概念，需要进行

技术的两两比较或对比应用该技术前后的效果才能得到。技术两两比较时的节能效益可用以下公式表示：

$$S_{(i_2 \rightarrow i_1)}^N = \frac{\sum(Y_{i_1j} \times \varphi_j)}{Q_{i_1}} - \frac{\sum(Y_{i_2j} \times \varphi_j)}{Q_{i_2}}$$

$S_{(i_2 \rightarrow i_1)}^N$ —— 技术 i_2 相对于技术 i_1 的节能量

Y_{i_1j} —— 技术 i_1 在一定生产周期（年）内所消耗的能源 j 的量

Y_{i_2j} —— 技术 i_2 在一定生产周期（年）内所消耗的能源 j 的量

φ_j —— 能源 j 的折标煤系数

Q_{i_1} —— 技术 i_1 在一定生产周期（年）内的技术产出

Q_{i_2} —— 技术 i_2 在一定生产周期（年）内的技术产出

这里技术 i_1 取同类技术的全国平均水平，从而分析的关键技术（ i_2 ）的节能量是相对于全国平均水平的节能量。

技术的减排效益也是通过两两比较才能获得，计算公式如下：

$$D_{[(i_2|i_1)]} = \frac{\sum E_{i_1j}}{Q_{i_1} \times \partial_j} - \frac{\sum E_{i_2j}}{Q_{i_2} \times \partial_j}$$

$D_{(i_2 \rightarrow i_1)}$ —— 技术 i_2 相对于技术 i_1 的减排效益

E_{i_1j} —— 技术 i_1 在一定生产周期（年）内所产生的污染物 j 的量

E_{i_2j} —— 技术 i_2 在一定生产周期（年）内所产生的污染物 j 的量

∂_j —— 污染物 j 的污染当量值

Q_{i_1} —— 技术 i_1 在一定生产周期（年）内的技术产出

Q_{i_2} —— 技术 i_2 在一定生产周期（年）内的技术产出

如果某项技术的减排效益主要为节能，如减少煤的消耗，可间接带来二氧化硫等污染物的减排，这部分效益可通过产排污系数进行折算。计算公式如下：

$$D_i = \sum \sum S_{ij} \times \beta_{jk} / \partial_k$$

S_{ij} —— 技术 i 在应用一定时间内（年），节省投入品 j 的量

β_{jk} ——投入品 j 对污染物 k 的产生系数

δ_k ——污染物 k 的污染当量值

根据所评估技术的各项指标情况，结合专家经验进行综合分析和评估，确定最终入选的关键技术。

4 重点行业关键绿色技术

火电、钢铁和水泥是我国污染物排放的重点行业，也是我国工业绿色、低碳发展重要行业。根据《2013 年环境统计年报》，火电、钢铁和水泥三个行业的SO₂排放量占全国工业SO₂排放量的47%，三个行业的氮氧化物排放占全国工业氮氧化物排放量的72%。因而三大重点行业的技术改造升级和绿色发展，对于我国工业的绿色发展至关重要。我国许多主管部门都出台了重点行业的节能、环保技术目录，如发改委发布的《国家重点节能技术推广目录》，工信部发布的《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录》，以及环保部发布的《国家先进污染防治示范技术名录》和《国家鼓励发展的环境保护技术目录》等。本研究结合已有国家技术名录、文献研究与专家访谈和企业调研，归纳、梳理和分析三大重点行业的绿色技术及其成本和应用潜力。

4.1 电力

(1) 1000 兆瓦级超超临界广义回热技术

- 适用条件

 - 燃煤电厂

- 技术内容

该技术充分利用汽轮机抽汽，与锅炉空气预热器以及锅炉尾部的低温省煤器等配合，加热锅炉空预器的进、出口风，一方面可提高空预器冷端进口风温，提升空预器冷端的平均温度，防止空预器的低温腐蚀和堵塞，另外一方面可提高进入锅炉二次风温和磨煤机的出口风温，提高磨煤机出力和煤种的适应性，大大改善锅炉的燃烧效果，降低飞灰含碳量，提高锅炉燃烧效率。同时，由于抽汽量的增加，减少了低压缸排汽量，降低汽轮机的排汽损失。由于锅炉空预器进口风温的提高，会造成空预器出口烟温的提高，但是由于锅炉尾部低温省煤器的投运，可确保最终的排烟温度比改造前的排烟温度降低，从而提高锅炉效率。

结合弹性回热技术，可提高低负荷工况下的给水温度，降低进入锅炉的给水温度变化，提高锅炉的运行安全性。由于给水温度的提高，抬高了锅炉尾部的烟

气温度，实现脱硝系统的全天候投运，提高了火电机组的环保效益。

- 节能减排效果

根据上海外高桥第三发电厂的经验，在年平均负荷率约 75% 的情况下，示范工程单位供电煤耗由 2008 年投产时的 287 克/千瓦时下降到 2011 年的 276 克/千瓦时，可节约标准煤约 11 万吨，同时减排二氧化碳约 30 万吨。

- 技术经济分析

约 1 亿元/每台机组。

- 投资回收期

约 2.3 年

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，“十二五”技术普及率可达 5% 左右。

(2) 冷热电联供的分布式能源技术

- 适用条件

具有稳定的天然气供应来源和具有稳定冷热电用户的区域，包括符合上述条件的宾馆、医院、大型商用建筑、写字楼、机场、工厂等。

- 技术内容

该技术是在热电联供的基础上发展起来的，是分布式能源发展的主要方向和形式，是一种建立在能量梯级利用基础上的综合产、用能系统。通过对不同一次能源转换技术的集成运用，在一个区域内同时满足用户对冷、热、电等多种终端用能的需求，以实现能源梯级利用、高效利用。该技术首先利用一次能源驱动发动机供电，再通过各种余热利用设备对余热进行回收利用，最终实现更高能源利用率、更低能源成本、更高供能安全性以及更好环保性能等多功能目标。

- 节能减排效果

能源效率可以从普通热电效率 40% 提高到 75%~90%，节能率达到 20% 以上，推广 100 兆瓦每年可节能约 8 万吨标煤，减排约 20 万吨二氧化碳。该技术具有节能减排、环境友好，提高供能可靠性等多方面优点。

- 技术经济分析

0.6~1 万元/千瓦

- 投资回收期

约 3~4 年

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，“十二五”技术普及率若装机规模 5000 万千瓦，可达 50%左右。

(3) 燃气-蒸汽联合循环发电技术

- 适用条件

主要的天然气、煤层气、页岩气和煤制气等管道覆盖区域，液化天然气接收站覆盖区域。

- 技术内容

该技术核心是燃气轮机技术的高性能提升，利用燃气轮机做功后的高温排气在余热锅炉中产生蒸汽，再送到汽轮机中做功。将具有较高平均吸热温度的燃气轮机循环与具有较低平均放热温度的蒸汽轮机循环结合起来，即把燃气循环和蒸汽循环联合在一起的循环。该技术发电效率高，单位煤耗大大降低，同时减少了对环境的污染。

- 节能减排效果

按照燃煤折算单位发电煤耗 240 克/千瓦时，2012 年我国燃煤电厂发电煤耗 307 克/千瓦时，估算相当于单位发电量减排二氧化碳约 160~170 克/千瓦时。该技术发电效率高达 57%，比一般燃煤电厂高出 17%左右，单位电能二氧化碳排放量仅为燃煤电厂的 40%左右。

- 技术经济分析

3500 元/千瓦

- 投资回收期

10~15 年

- 推广前景

燃气-蒸汽联合循环发电技术在全国已有 3.7 万兆瓦的应用，其中江苏华电戚墅堰发电有限公司 4 台 400 兆瓦级机组较具代表性。该技术普及率约 4%，尚处于局部推广阶段，应用前景广阔。

(4) 外滤分室反吹袋式除尘技术

- 适用条件

燃煤电厂

- 技术内容

外滤分室反吹袋式除尘器主要由气流均布装置、尘气室、过滤组件、净气室、回转反吹清灰系统及其他辅助设备组成。主要工作步骤为过滤与清灰。过滤过程：锅炉出口含尘烟气，在引风机的作用下，通过除尘器的进口烟道、进口截止阀进入到除尘器，先由气流均布装置对烟气进行均布，并拦截较大颗粒，减少对前排滤袋的冲刷，烟气在尘气室经过滤袋，粉尘被过滤在滤袋外，净烟气汇入分室腔，经过净气室吸入引风机。清灰过程：该技术依据微压清灰机理，利用引风机出口净化烟气，对弹性滤袋进行反吹清灰，反吹气流气压低、气量大，对于实现高过滤精度所依赖的粉尘初层保持性能好。清灰基本步骤如下：随着过滤的进行，滤袋外表面粉尘层逐渐增厚，当阻力上升到设定值时，反吹截止阀打开，导通反吹清灰气源，回转清灰机构开始工作，回转臂从停位转到第 1 个分室的出风口，屏蔽向上流动的净烟气，使该分室处于离线状态，反吹气流经反吹管路、回转机构、环形风筒、分室腔，再进入到各条滤袋。反吹气流先鼓涨滤袋，破坏粉尘层形态，再透过滤袋气化滤袋外粉尘层，从而削弱粉尘间粘附力，外围粉尘依靠自身重力沉降，离线反吹持续一定的时间，粉尘有足够的时间落入灰斗，避免二次吸附。该分室完成清灰后，回转臂转动到下一个分室清灰，直到所有分室清灰完毕，完成一个清灰循环。

- 节能减排效果

经山西漳山电厂 2X600MW 机组、内蒙古京泰 2X300MW 机组、广东湛江电厂 300MW 机组、上海吴泾 2X300MW 机组等多个项目的应用实践，外滤分室反吹袋式除尘器出口烟尘浓度远低于 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ，通常在 $10\text{ mg}/\text{m}^3$ 左右，经过湿法脱硫烟尘浓度可进一步降至 $5\text{ mg}/\text{m}^3$ 以下，实现烟尘近零排放。且滤袋寿命超过 5 年，且寿命期间滤袋破袋率接近于 0，可以保证除尘效果的长期稳定。

本除尘器能耗低，仅为相同机组规模的 5 电场静电除尘器能耗的 40-60%。

- 技术经济分析

约 2 千万元/ 300MW 机组，3500 万元/600MW 机组。

- 投资回收期

约 6 年。

- 推广前景

该技术成果已在多台 300MW 煤粉炉机组，300MW 循环流化床锅炉机组，600MW 煤粉炉机组上 5 年多成功运行经验，技术成熟可靠，可在燃煤电厂大规模推广，“十三五”技术普及率可达 20%左右。

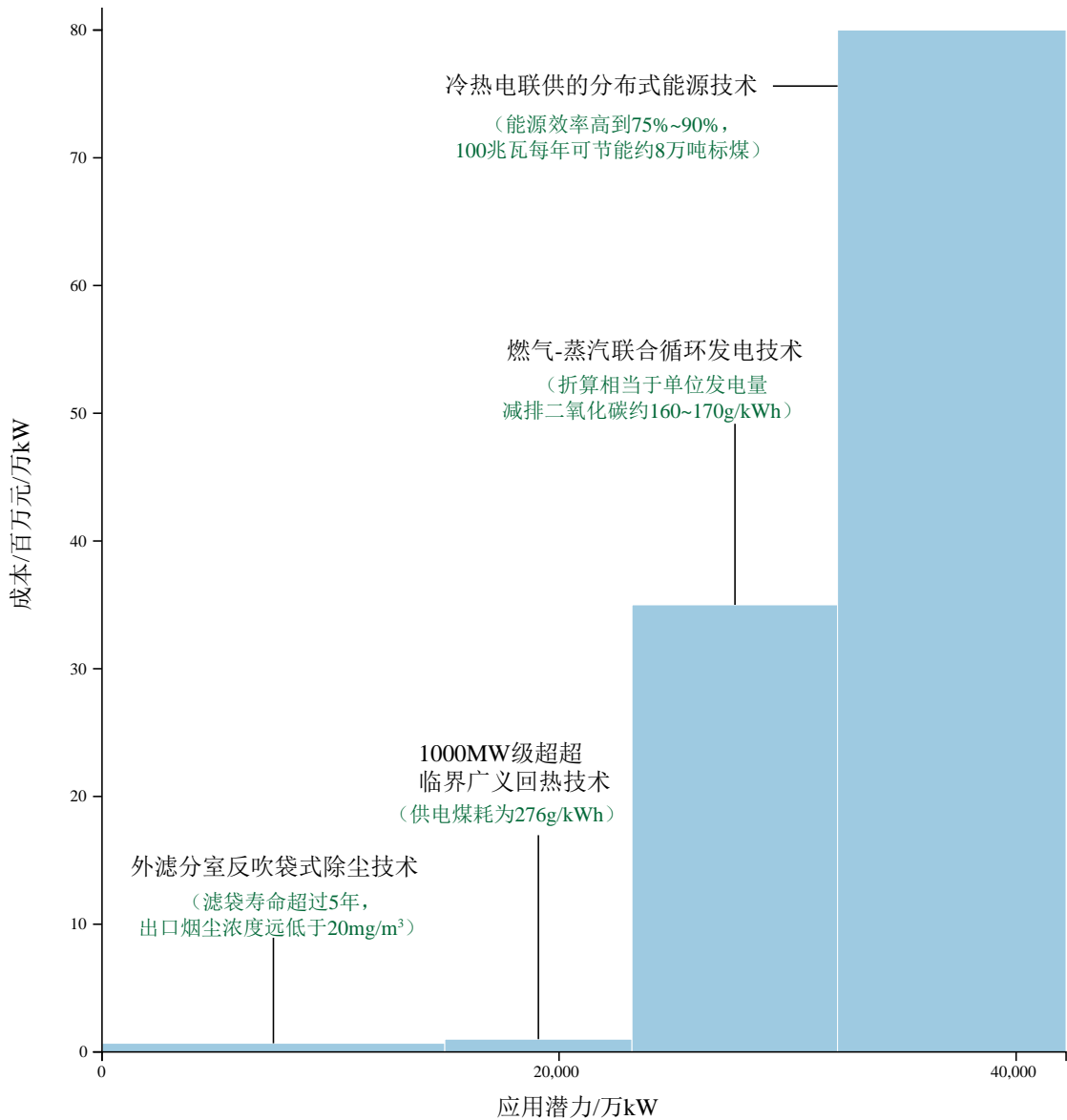


图 7 火电行业关键技术成本和应用潜力

4.2 钢铁

(1) 活性焦（碳）协调处理技术

- 适用条件

大中型钢铁厂

- 技术内容

钢铁行业的烧结烟气是钢铁行业中主要的 SO_2 和 NO_x 来源，相对于单独的脱硫措施，烧结烟气联合脱硫脱硝技术具有联合去除 SO_2 和 NO_x 的协同效果。活性焦（碳）协调处理技术的主要原理为在一个活性炭吸附器中，用活性炭吸附 SO_2 ，并在氨还原 NO_x 过程中起催化作用，实现同时脱硫脱氮，消耗的吸附剂可在高温下通过解析再生。活性焦（炭）吸附过程主要包括吸附、解析和硫回收 3 个阶段。整个工艺系统由烟气系统、活性炭移动床污染物脱除系统、解析气体制酸系统、活性炭添加及筛分输送系统以及相应的电气、仪控（含监测装置）等组成。活性焦（碳）是一种多孔含碳物质，具有微晶结构，孔径分布范围较广。晶体中有微孔（ $<2\text{nm}$ ）、中孔（ $2\sim 200\text{ nm}$ ）和大孔（ $>200\text{ nm}$ ），丰富的孔道结构使活性炭具有巨大的比表面积，这决定了活性焦（碳）具有良好的吸附性能。此外，活性焦（碳）表面上含有多元素含氧官能团，因此活性炭既是优良的吸附剂，也是特殊的催化剂。活性焦（碳）烟气脱硫技术的实质是用煤治理燃煤造成的污染。活性焦（碳）烟气脱硫技术工艺过程简单，脱硫过程不消耗水，活性焦（碳）可循环使用，副产品易加工处理，不存在废水、废渣等二次污染问题。同时，活性焦（碳）空隙结构可以吸附液态和气态的二噁英，而固态的二噁英会通过活性焦（碳）的集尘作用被吸附。

- 节能减排效果

根据太原钢铁厂的经验，太钢投资 7 亿多元人民币，建成国内第一家烧结活性炭法脱硫脱硝装置，实现 2 台 450m^2 烧结机全脱硫，2009、2010 年各投运一套。这项技术由太钢集成，脱硫设备由日本住友公司提供，能够实现脱硫、脱硝、脱二噁英、脱重金属、除尘“五位一体”的功效。太钢引进烧结烟气的活性焦（炭）法处理技术以来，各污染物的脱除率均处于较高水平，且各污染物排放浓度均能

满足国家新标准规定的浓度限值。太钢每年的 SO₂ 排放量由 6821 吨减少为 341 吨，粉尘排放量由 1050 吨减少为 210 吨，NO_x 排放量由 2774 吨减少为 1660 吨，二噁英排放量由 11.52g 减少为 2.47g，实现了良好的烧结烟气多种污染物协同控制目标。活性焦（碳）吸附法运行成本约为 8-9 元/吨烧结矿，或 13,000~15,000 元/吨 SO₂。

- 技术经济分析

5-7 亿多元人民币。

- 投资回收期

5 年

- 推广前景

当前中国仅个别重点钢铁企业采用该技术

(2) 烧结烟气循环利用工艺

- 适用条件

可以应用于带式烧结机工艺的新建烧结厂和老厂技术改造。

- 技术内容

该工艺是烧结过程中产生的烟气没有全部外排，而是将其中一部分热烟气再次引入烧结过程循环使用，采用该工艺可在节能、减排两方面带来效益。该技术基于一部分热烟气被再次引入烧结过程的原理。一方面，热烟气再次通过烧结料层时，可以提供一部分热量，废气中的一氧化碳在烧结过程中可再次参加反应，从而降低固体燃耗。另一方面，由于烟气的循环利用，有利于改善烧结生产作业率和烧结矿质量，可以大幅度降低外排烟气量，从而降低后续烟气处理装置的投资和运行费用。在 2012 年 10 和 2013 年 4 月，该技术分别实现上海宝钢不锈钢有限公司 132 平方米烧结机中试装置和宁波钢铁有限公司 430 平方米烧结机示范工程的建成投运。依托中试装置，宝钢股份开展了一系列热态试验，详细考察了不同工况对烧结工序节能量、烧结矿产/质量、外排废气总量和污染物排放的影响，获得了大型烧结机烟气循环利用的关键设备、工艺和技术参数。本技术在宁

钢示范工程的产业化实践表明，烧结烟气循环节能减排效果显著，烟气外排量仅为传统工艺的 70% 左右，从而大幅度降低了后续除尘、脱硫等设施的一次性投资和运行费用。

- 节能减排效果

中试研究表明，环冷废气循环、烧结废气循环、混合废气循环三种工况较无循环的基准工况的节能量分别为 3.1、2.4、3.6kgce/t-s，节能效率分别为 4.1%、3.1% 和 4.7%；示范工程实践表明，该技术可降低 5% 工序能耗，每吨烧结矿节约 4 千克标煤，相当于每吨减排约 10~11 千克二氧化碳。减少烧结外排废气 30% 左右。减少烧结烟气脱硫脱硝净化投资及运行成本约 30%。减少有机污染物排放。从节省燃料角度来看，每生产 1 吨烧结矿可节省固体燃料约 1.4 千克，每年可节省固体燃料约 6500 吨，按照平均每吨 1000 元（焦粉约 1200 元/吨，煤约 800~900 元/吨）估算，每年可节省约 650 万元。废气排放总量大幅度减少，减轻烧结主排风机、主电除尘器和二氧化硫等污染物脱除装置的负荷，降低设备投资和运营费用；有效降低粉尘和其他污染物的排放量。

同时，热烟气再次通过烧结料层燃烧带时，烟气中的二噁英和氮氧化物能够通过热分解被部分破坏，硫氧化物和粉尘能够被部分吸附并滞留于烧结料层中；循环中的 CO 参加反应，可减少外排烟气中的 CO 含量。

- 技术经济分析

一台 430 平方米烧结机组投资约 4500 万元，烟气循环系统包括循环管道、热风罩、多管除尘器、循环风机、切换阀、补偿器、变频设备等。若按外排烟气量为 70%，选用主排风机可采用国产设备，节省投资约 1000 万元。

- 投资回收期

1 年左右

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，目前我国要求烧结外排烟气全脱硫，且烧结工序耗电量较大，本技术有较大推广潜力。

(3) 焦炉烟道废气余热煤调湿分级技术

- 适用条件

适用于炼焦煤料水分较高的炼焦厂，尤其是南方及沿海气候湿润地区。主要用于焦炉烟道废气余热温度大于 230℃，炼焦入炉煤的正常水分在 8%~15%。

- 技术内容

主要是利用焦化厂余热，如高温烟道气、上升管处煤气余热、焦炭显热等，在装炉前将配合煤加热预处理，脱除煤料中的部分水分，保持装炉煤水分稳定在 6% 左右，然后装炉炼焦。该技术以焦炉烟道废气为热源的煤的气流调湿分离分级，利用焦炉烟道废气的余热将待入炉炼焦煤料在煤调湿装置中除去部分水分，并稳定控制入炉煤水分的技术。济钢集团国际工程技术有限公司自主开发了以焦炉烟道废气为热源的移动式刮板流化床煤调湿技术，构建出小颗粒均匀流化和大颗粒稳定移动的双区域，在流化床设备内利用废气余热脱出配合煤中部分水分，同时将配合煤按要求进行粒度分级从而达到调整水分、优化炼焦煤粒度的功能。该技术炼焦煤水分每降低 1%，若装干煤量不变，则炼焦耗热量降低 54 千焦/千克。按年产 110 万吨焦炭计算，水分每降低 1%，每年减少焦化废水处理量约 1.1 万吨。昆钢煤调湿是该技术首次应用在捣固焦炉上填补了国内外空白，处于国内领先水平。该技术可以大幅降低焦化工序能耗，减少废水排放量，同时能够提高焦炭产量和质量，为焦炉烟道废气余热高效回收利用开辟了一条新的途径。

- 节能减排效果

国内运行的煤调湿装置大多以蒸汽为热源，本技术利用烟道气的余热干燥入炉煤，热效率高，节能效果好。炼焦煤水分每降低 1%，若装干煤量不变，则吨焦耗热量降低约 54 千焦，减排二氧化碳 3~10 千克。采用煤调湿技术，减少炼焦过程带入碳化室的水分，减少焦化污水产生，相应也减少了蒸氨用蒸汽，也减轻了废水处理装置的负荷。同时，装炉煤水分降低，在保持结焦时间不变的情况下，火道平均温度降低 20~30℃，烟道气中 NO_x 含量有所降低。

- 技术经济分析

项目投资估算 3000 万元（60 万吨产生的焦炉）。

- 投资回收期

以提高焦炉产量和降低焦炉能耗计，投资回收期 6-7 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，当前国内仅有不到 30 套技术应用，“十二五”技术普及率可达 5% 左右。

(4) 钢渣辊压破碎-余热有压热闷工艺技术

- 适用条件

适用于钢铁行业钢渣综合利用。

- 技术内容

该技术包括钢渣辊压破碎和余热有压自解两个阶段，由钢渣倾翻装置将盛有熔融钢渣的渣罐运至倾翻区进行倾翻，倾翻后体系密闭，辊压破碎装置进行辊压破碎，待钢渣冷却破碎到一定的温度和粒度后，将其转运至余热有压热闷装置中，在 0.3~0.7 兆帕压力条件下热闷 1.5 小时，利用钢渣余热加热水所产生的高温高压饱和水蒸气进行钢渣中不稳定物质游离氧化钙和氧化镁的快速消解，再通过转运台车将其运至卸料点进行卸料、磁选。该技术是钢渣热闷处理技术领域的重大突破和升级换代，具有自动化、机械化、连续化和洁净化等特点，整个处理过程均由计算机控制完成。与以往热闷技术相比，处理周期由 12 小时缩短至 4 小时；处理后 10 毫米以下钢渣约占 85%，渣铁分离良好，游离氧化钙含量小于 3%；处理每吨钢渣电耗约为 5.0 千瓦时，较以往技术相比降低约 20% 左右；同等规模的生产线建设成本降低约 30% 左右。

- 节能减排效果

该技术可以有效提高钢渣的回收利用率，减少烟粉尘的无组织排放。济源钢铁的钢渣辊压破碎—余热有压热闷钢渣处理生产线投资约 5000 万元。投运以来，生产线运行顺畅，钢渣处理率达到 99% 以上。单位钢渣处理成本折合吨钢仅约 2.4 元，降低了单位能耗。与原有工艺相比，分选后尾渣金属铁含量由 3.0% 降到了 1.2% 左右，每年可多回收金属铁 7000 余吨。与不采用该技术相比，每处理 1

吨钢渣，可节省柴油约 3~4 升，折合标准煤约 4~5 千克，约减排二氧化碳 10~11 千克。

- 技术经济分析

处理规模 50 万吨/年的生产线，设备投资额约 4500 万元。

- 投资回收期

投资回收期 5~7 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，国内当前有不到 15% 的钢铁企业使用。其处理过程更加洁净高效，在钢渣产量逐年增加的情况下该技术推广前景广阔。

(5) 捣固炼焦技术

- 适用条件

大型钢铁企业

- 技术内容

该技术是一种能够通过增加配煤中高挥发分、弱粘结性或不粘结性的低价煤的含量来扩大炼焦煤资源的方法。将配合煤在捣固箱内捣实成体积略小于炭化室的煤饼后，由托板从焦炉侧推入炭化室内高温干馏，称为捣固炼焦。煤料捣成煤饼后，一般堆密度可由顶装工艺散装煤的 0.75t/m^3 提高到 $1.00\sim 1.15\text{t/m}^3$ 。因煤料颗粒间距缩小，接触致密，堆密度大，有利于多配入 15%~20% 甚至更多的高挥发分煤和弱黏结煤，或者在配煤比不变的情况下，改善和提高焦炭质量。用 60%~70% 的高挥发分气煤或 1/3 焦煤，配以适量的焦煤、瘦煤，要求挥发分在 30% 左右，黏结指标 Y 值为 11~14mm，这样的煤料捣固效果最好。捣固煤料粉碎度应保持：粒度 $\leq 3\text{mm}$ 占 90%~93%， $\leq 0.5\text{mm}$ 应在 40%~50%。对难于粉碎的煤料要在配煤前预粉碎。捣固煤料最合适的水分为 8%~11%，最好控制在 9%~10%。水分不足时，要在运煤胶带上增加喷水设备。为保证雨季时，煤料水分不宜过大，应设置防雨煤棚。应尽量保持配煤煤种的稳定，频繁变换煤种

容易影响焦炭质量和生产操作。捣固炼焦工艺作为一种能够增加配煤中高挥发分、弱粘结性甚至不粘结性煤含量以扩大炼焦原料煤资源的方法,现已成为一种成熟的炼焦工艺,被国内外广泛采用。捣固后煤的堆密度增大,炼焦时粘结性增大,从而提高焦炭质量,同时可以扩大弱粘煤用量,缓解炼焦煤资源紧缺的不利局面。

- 节能减排效果

产量相同时,与炭化室高 450 mm 顶装焦炉相比较,捣固焦炉具有减少出焦次数、减少机械磨损、降低劳动强度、改善操作环境和减少无组织排放的优点。装煤逸散烟尘采用炉顶消烟除尘车进行燃烧、洗涤除尘,完成无烟装煤操作,使装煤的污染物排放量减少 90%。采用捣固炼焦可以多用 15%~20%的弱黏结煤。每吨焦炭耗煤按 1.34 吨计,则 18070 万吨冶金焦耗炼焦精煤 24214 万吨。如果采用捣固炼焦多用 15%弱黏结性煤,则节省强黏结性煤 3632 万吨。

- 技术经济分析

2×64 孔 5.5m 单热式捣固焦炉,年产焦炭约 130 万 t,配套处理能力为 160t/h 干熄焦装置,工程投资估算为 11 亿元。运行费用约为 1300 元/t 焦,与顶装焦炉基本相同。

- 投资回收期

投资回收期约 6 年。

- 推广前景

我国捣固炼焦年产能已超过 2 亿 t,但钢铁企业应用较少,不到全国总产能的 5%;预计“十二五”期末,推广比例将达到 15%~20%。

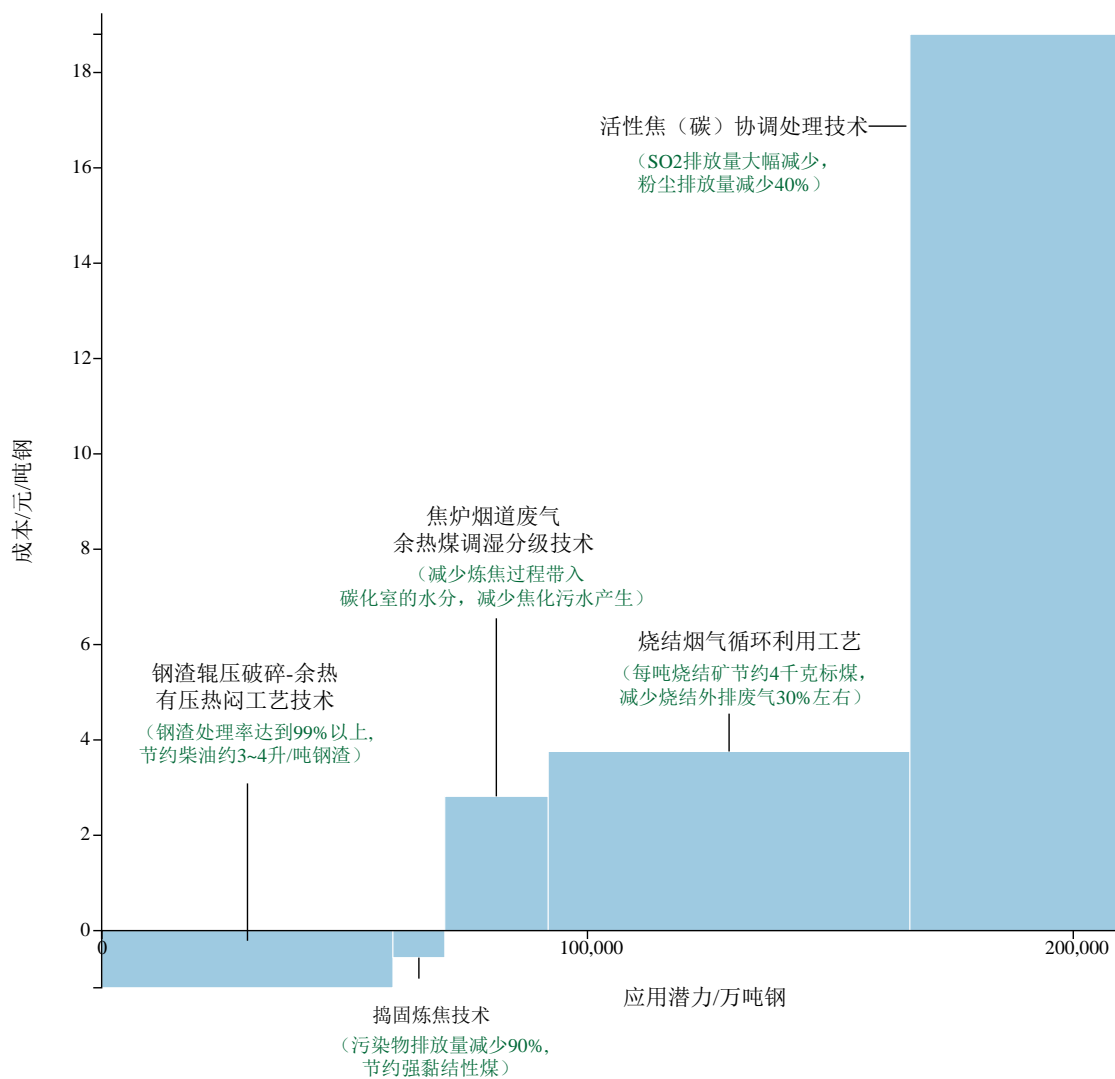


图 8 钢铁行业关键技术成本和应用潜力

4.3 水泥

(1) 水泥窑协同处置城市生活垃圾技术

● 适用条件

适用于适合进行相应工艺改造的 2000t/d 以上新型干法水泥生产线。要求企业必须能实现连续监控及连续稳定运行，并装有用于净化废气的高效袋除尘器。我国的生活习惯和能源结构特征使得城市生活垃圾中厨余物和渣土含量较大，二者合计占比达到 90%左右；厨余物的占比大，决定了生活垃圾的水分含量大；渣土占比大。渣土和惰性物质含量大，决定了我国城市垃圾热值处于较低水平。因此，需要将生活垃圾进行合理分类，并需要加入辅助燃料。国务院 2013 年发布

的 41 号文件（关于化解产能严重过剩矛盾的指导意见）中明确指出，支持利用现有水泥窑无害化协同处置城市生活垃圾和产业废弃物，进一步完善费用结算机制，协同处置生产线数量比重不低于 10%。因而，该技术近期将有较大发展潜力。

- 技术内容

该技术充分利用水泥窑一系列优势，如处理温度高，燃烧过程充分；没有废渣排出；固化金属离子；尾气处理性能好；控制二噁英排放等。利用水泥窑协同处置城市生活垃圾既可以消纳城市生活垃圾，实现资源合理利用和环境保护的目的，还可以为水泥行业节约资源、降低能耗。本技术指标以 5000t/d 生产线每天处理垃圾 200t，即吨熟料回收垃圾 40kg，同时取其燃料替代率 5~10%。水泥窑协同处理废弃物具有以下特性：窑系统的碱性环境和强化的气流方式有利于吸收气相中的挥发成分。这种内部气体清洁过程实现了诸如 SO₂，HCl 和大多数重金属的低排放；1450℃的熟料反应温度可以把灰渣结合到熟料中，尤其是还可以把金属以化学键方式结合到熟料中。

- 节能减排效果

由于垃圾具有一定热值，经计算，其煤耗可降低 2 kgce/tcl，但电耗增加 1~2kW·h/tcl。每吨熟料可回收城市生活垃圾 40kg/tcl，考虑其原料替代率 2~4%，则吨熟料 CO₂ 减排 4.36~8.78kg/tcl，烟尘减排 3.33~6.66g/tcl，NO_x 减排 18.7~37.4g/tcl。

- 技术经济分析

技术投资 7000~12000 万元，运行成本降低 1.5~3 元/tcl，新增收益 7.5~9 元/tcl（以每吨城市生活垃圾补助 150 元）。

- 投资回收期

预计投资回收期 5~10 年。

- 推广前景

目前普及率很低，预计 2015 年可达 2%，2020 年可达 10%。

(2) 水泥立磨/联合粉磨系统

- 适用条件

适用于新建新型干法水泥生产线水泥生料和燃烧粉磨系统，及原有粉磨系统设备的升级改造，要求企业所处位置交通方便，便于技术提供方进行设备维护及配件更换。

- 技术内容

立磨亦即辊式立磨，是一种比球磨机节能的粉磨设备。具有粉磨效率高、电耗低、入磨物料粒度大、产品细度易于调节、设备工艺流程简单、占地面积小、噪声低、扬尘小、使用维护简单、运行费用低、耐磨材料少等诸多优点。立磨系统集成破碎、粉磨、烘干、分级、输送五种工序于一体。由于立式磨结构及粉磨方式合理，使立式磨的粉磨效率比球磨机高。

- 节能减排效果

电耗为 25~30kWh/t 水泥，比球磨机系统低 10~15kWh/t；比球磨机节电 30%~40%。

- 技术经济分析

以 5000t/d 水泥生产线配套的立磨粉磨系统为例，投资成本约为 5400 万元，年运行维护成本约为 2500 万元

- 投资回收期

投资回收期约为 2~3 年。

- 推广前景

2010 年技术普及率不到 5%；“十二五”预计推广比例约为 30%。

(3) 预分解窑协同处置城镇污水厂污泥技术

- 适用条件

适用于适合进行相应工艺改造的 2000t/d 以上新型干法水泥生产线。水泥企

业采用此项技术需要综合考虑各项指标，包括运输距离，运输过程中的密闭，以及定期监测汞等污染物含量等问题，保证整个利用过程的节能减排。

● 技术内容

根据所处置污泥含水量的不同，利用水泥窑系统协同处置污泥具有不同的技术路线，目前国内水泥行业所采用的技术途径主要有两种：（1）湿法处置，进厂污泥经计量后，直接送入水泥回转窑进行协同处置；（2）干法处置，在水泥厂配套建设一个烘干预处理系统，利用预热器废气余热（温度约 280℃）将污泥（含水率约 80%）烘干至含水率低于 30%，对烘干所产生的大量废气进行再次处理；含水率低于 30%的污泥已成散状物料，经输送及喂料设备送入分解炉焚烧；在分解炉喂料口处设有撒料板，将散状污泥充分分散在热气流中，由于分解炉的温度高、热熔大，污泥能快速、完全燃烧；污泥烧尽后的灰渣随物料一起入窑煅烧。处理后的干污泥中约含有 30%左右的 SiO₂、CaO 等矿物质，可作为水泥熟料生产用的原料，并且含有约 15MJ/kg 的热值，也可替代部分燃料。

● 节能减排效果

采用湿法处置的污泥处理能力约为 150~200t/d，采用干法处置的污泥处理能力约为 500~600t/d。该技术可有效降低填埋所占用的土地资源。随着污泥含水率的进一步降低以及干燥污泥处理能力的增强，低含水率的污泥在分解炉的处置利用，不会对系统的热稳定性造成干扰。此外，干燥污泥由于含有比煤粉更高的有机氮化物以及更高的挥发分含量，因此很适合作为分级燃烧的脱硝燃料使用，能在一定程度上降低窑系统 NO_x 的产生量。

● 技术经济分析

该技术采用湿法处置的设备投资约为 800 万元，运行维护成本为 350 元/吨污泥；采用干法处置的投资约为 4000 万元，运行维护成本为 500 元/吨污泥。该技术可以直接减少污水处理厂处置污泥的建设投资，约为 20~70 万元/吨·日。其投资及运行成本回收，主要依靠相应的政策支持，各地区对水泥企业协同处置城镇污水厂污泥的补贴标准有所不同，大致为 200~300 元不等。

● 投资回收期

如果水泥企业协同处置所获得的补贴标准按 500~800 元/吨污泥计算，投资回收期为 4~6 年。

- 推广前景

目前，此项技术在我国正处于起步阶段，仅有少数几家水泥厂在试运行。北京、广州等地已有我国自己设计建造并已投入运行的生产线，在已取得经验的基础上可以逐步推广。当前技术普及率不到 1%；“十二五”预计推广比例为 10%。

(4) 水泥窑 NO_x 减排技术

- 适用条件

适用于新型干法水泥生产线。水泥生产企业需根据自身具体情况选择合适的 NO_x 减排技术及装备，同时注意保证窑系统运行的稳定。侧重侧重工艺过程的低氮排放。

- 技术内容

NO_x 减排技术主要包括：①优化窑和分解炉的燃烧制度，维持窑系统运行的稳定；②改变配料方案，掺用矿化剂降低熟料烧成温度和时间，改进生料易烧性；③采用低 NO_x 燃烧器、低 NO_x 分解炉等先进设备；④在窑尾分解炉和管道中的阶段燃烧技术等。水泥煅烧过程中经济、实用的技术主要是采用低 NO_x 燃烧器、分级燃烧的分解炉及过程参数控制几种措施。在环保要求很高的情况下，需要在窑尾分解炉和管道中采用选择性非催化还原（SNCR）技术。SNCR 技术（selective no-catalyst return）的工作原理是以氨（NH₃）作为还原剂，在 950℃~1050℃温度范围内，无催化剂作用，氨（NH₃）有选择性的将废气中的氮氧化物还原为氮气（N₂）和二氧化碳（CO₂）。SNCR 技术的工艺流程主要是在窑尾分解炉的某些部位喷入氨水或尿素等溶液，使之与烟气中的氮氧化物（NO_x）化合，将其还原成氮气（N₂）和水，最适宜的反应温度为 950℃~1050℃。

- 节能减排效果

采用低 NO_x 燃烧综合技术措施，NO_x 削减率为 10%~30%；采用 SNCR 技术，NO_x 去除率可达 50%~60%，排放浓度可降低至 200~500mg/Nm³。

- 技术经济分析

此项技术的投资成本主要依据所采用具体技术的不同而差异较大，低 NO_x 燃烧综合技术投资约为 400 万元，选择性非催化还原（SNCR）技术投资约为 500 万元。SNCR 技术运行成本较高，排放浓度低于 400 mg/Nm³ 时，约为 5~10 元/t 熟料。

- 投资回收期

投资回收期为 5-10 年。

- 推广前景

2010 年技术普及率不到 1%；预计“十二五”期末推广应用比例为 20%。

(5) 水泥行业能源管理和控制系统

- 适用条件

适用于水泥企业的能源管理和控制

- 技术内容

该技术通过对水泥生产过程能源消耗（如，水、气（汽）、风、电）的使用过程数据进行监测、记录、分析、指导。能源管理系统由服务器主机、以太网或者局域网连通的通讯网络、无线传输部分、有线传输部分和能源管理软件、各计量点（流量计、液位计、温度、压力等）、电表等部分组成，可实现数据采集系统功能、监控系统功能和能源管理功能。该技术实时监控企业各种能源的详细使用情况，为节能降耗提供直观科学的依据，为企业查找能耗弱点，促进企业管理水平的进一步提高及运营成本的进一步降低。使能源使用合理，控制浪费，达到节能减排，节能降耗，再创造效益的目的。通过数据分析，可以帮助企业对每条生产线、每个工作班组以及主要耗能设备进行实时考核，杜绝浪费，并可以帮助企业进一步优化工艺，以降低单位能耗成本，提高企业综合竞争力。

- 节能减排效果

该技术总体上吨熟料可降低煤耗 1%~2%，降低电耗 2%~6%，单位吨产品减排二氧化碳约 4~10 千克。以 5000 吨/日新型干法水泥生产线为例，每年生产天

数取 300 天，则每年节约标煤 1650~3300 吨，节约电耗约 200~600 万度，共减排二氧化碳约 6200~14000 吨。

- 技术经济分析

按 5000 吨/日生产线计，水泥行业能源管理和控制系统单位产品投资约为 1 元/吨水泥，总投资约为 200 万元，其中硬件设备费 100 万元，软件设备费 60 万元，其他支出 40 万元，年运行维护费用约为 10~20 万元。

- 投资回收期

以 5000 吨/日新型干法水泥生产线为例，技术投资 200 万元，年运行维护费用为 10~20 万元，吨熟料节约成本 1.5~4.0 元，投资回收期为 0.5~1 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，“十二五”技术普及率可达 20% 左右。

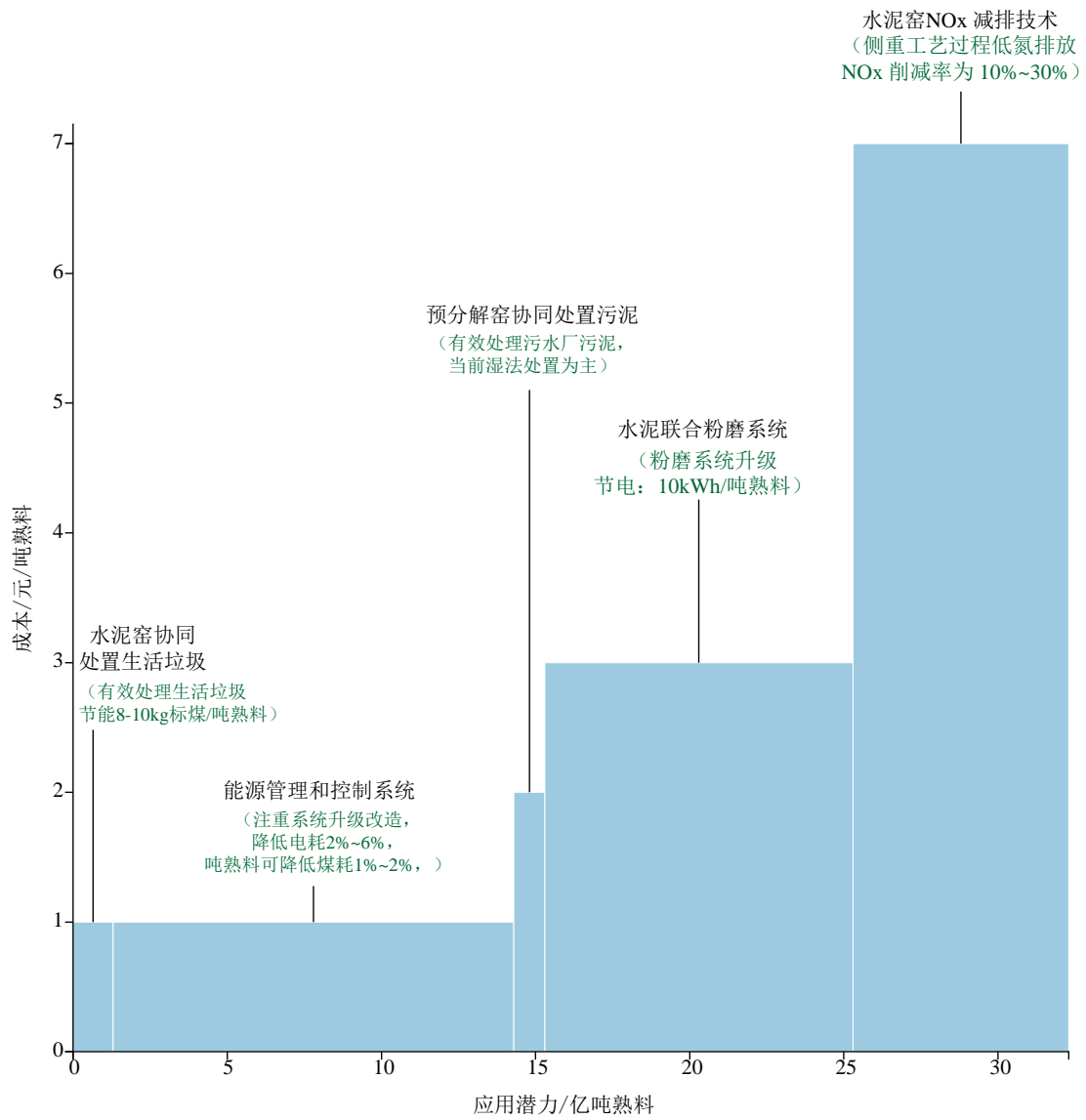


图 9 水泥行业关键技术成本和应用潜力

附件：备选技术

钢铁

热轧加热炉系统化节能技术

- 适用条件

 - 各类钢铁炉窑

- 技术内容

该技术综合考虑了本体能耗与运行能耗的降低。在本体能耗降低的方面，技术设计开发了单控双通道拓展火焰烧嘴，取消炉膛压下及延长不供热的热回收段的长度，设计了预热段和热回收段独特的扰流墙，开发了高效预热器。突破了传统工业炉低温排烟的技术瓶颈，将排烟温度降低到了 250℃ 以下，达到了目前国内热轧加热炉排烟温度最低。在运行能耗降低的方面，本技术采用了脉冲燃烧技术，并配套研发了系列的脉冲燃烧控制技术。脉冲燃烧宽温度场自动调节装置使用时，燃烧器根据设定温度与检测温度的偏差进行两侧供热比例分配，从而实现炉宽温度场的自动调节，有效提高炉宽温度场温度均匀性，最终提高产品质量。该技术通过对炉型优化、工艺装备及控制技术的研发，形成了独有的炉膛高效传热、低温排烟、极限余热回收，先进燃烧控制等技术，大大降低了加热炉的能耗和氮氧化物排放水平。

- 节能减排效果

目前国内加热炉的吨钢能耗多在 1.20 吉焦以上，应用该技术后吨钢能耗可减少至 1.07 吉焦，比国内先进水平节能 10% 以上，氮氧化物排放仅 3.9×10^{-5} ，吨钢约减排二氧化碳 10~15 千克。

- 技术经济分析

 - 产量为 350 吨/小时的热轧加热炉投资为 1500 余万元。

- 投资回收期

1~2 年

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，未来 10 年技术普及率可达 50%左右。

低热值煤气实现高风温的顶燃式热风炉技术

- 适用条件

①适用于缺少高热值煤气，或高炉煤气热值较低的钢铁企业，而仅需用低热值煤气满足高炉高风温的要求，从而达到降本增效和节能减排的目的。②顶燃式热风炉可以适用不同的燃烧介质条件（有或者没有高热值煤气），可以适用不同容积的高炉要求，可以适用不同等级的风温要求。

- 技术内容

该技术采用“旋流+交错”燃烧方式的顶燃式热风炉具有燃烧效率高、温度波动小、烟气分布均匀、燃烧稳定、结构简单等优点，而在国内外顶燃式热风炉则以“旋流”燃烧方式为主。该技术集成创新一种“燃烧炉+高温板式换热器”的工艺技术，单烧低热值煤气，将空、煤气预热到所需温度，实现高风温。交错旋流型顶燃式热风炉达到如下技术指标：燃烧效率为烟气中残余一氧化碳含量 8×10^{-5} 毫克/立方米，燃烧器温度波动 500°C ，燃烧稳定性无脉动，风温水平 1300°C ，烟气分布均匀度 87.5%。

- 节能减排效果

该技术可利用低热值煤气实现 1300°C 高风温，提高了能源利用率，起到了节能降焦的作用。以 2500 立方米高炉计算，风温提高 100°C ，高炉焦比吨铁降低 30 千克，热风炉通过提高燃烧效率实现吨铁节约高炉煤气用量约 12~13 标立方米，热风炉燃烧二氧化碳吨铁减少排放量约 90~95 千克。

- 技术经济分析

以 2500 立方米高炉为例，每座高炉热风炉总投资为 1.2 亿元。

- 投资回收期

以 2500 立方米高炉为例，投资回收期约 1.5 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，5 年内技术普及率可达 40% 左右。

高炉炼铁-转炉界面铁水“一罐到底”技术

- 适用条件

本技术适用于钢铁行业高炉炼铁-转炉界面铁水输送。

- 技术内容

该技术针对转炉车间需设置倒罐站/混铁车/鱼雷罐车/混铁炉等铁包转运工序及配套车辆等导致铁水温降大的问题，采用转炉铁水罐承接、运输高炉铁水，将缓冲贮存、铁水预处理、转炉兑铁、容器快速周转及铁水保温等功能集为一体。工艺成熟、工序界面简化、物流通畅，加快了生产节奏，使整个工艺紧凑。

- 节能减排效果

可提高铁水入炉温度 30~50℃，吨钢节能约 8~10 千克标煤，相当于吨钢减排二氧化碳约 20~30 千克。以首钢水城钢铁(集团)有限责任公司第二炼钢厂（3×100 吨转炉）及炼铁系统（3#和 4#高炉）工程为例，按年产能力 300 万吨粗钢计，吨钢总工序能耗平均减小 14.879 千克标煤。按每吨标煤燃烧排放 36 千克废气、产生二氧化碳排放 2.62 吨、产生二氧化硫排放 17 千克计算，年减少能耗 4.46 万吨标煤，减少废气 1605.6 吨，减排二氧化碳 11.7 万吨，减排二氧化硫 758.2 吨。

- 技术经济分析

基于首钢水城钢铁(集团)有限责任公司的情况，3×100 吨转炉及炼铁系统（3#和 4#高炉）工程的建设投资 7462 万元。

- 投资回收期

2.5 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，绝大多数钢铁企业还是传统设计，本技术应用前景广阔。

炼焦荒煤气显热回收利用技术

- 适用条件

适用于钢铁联合企业中的焦化厂或独立焦化厂的各类顶装、捣固焦炉，煤化工行业中的焦化厂。

- 技术内容

该技术采用与高温荒煤气换热，装置内的循环水温度升高后进入汽包内汽化，产生的蒸汽并入蒸汽管网或用于发电。荒煤气经过焦炉上升管余热回收装置后，部分热量回收，温度下降。后续工艺流程与传统工艺相同，即用循环氨水喷洒降温后入初冷器。但循环氨水量、初冷器冷却水循环量可大幅减少，焦化工序能耗、吨钢能耗明显下降。采用可回收荒煤气显热的焦炉上升管取代传统上升管，回收的热量产生 0.6 兆帕蒸汽。产生的蒸汽直接并入蒸汽管网运行或用于发电。该技术采用高导热率固体粉末作为导热剂，不同其他的水夹套、导热油、热管的传热形式。煤气回收车间循环氨水、煤气初冷器冷却循环水降低约 30%，循环冷却水补水量下降，水处理化学药剂用量下降，氨水循环泵、冷却水循环泵电机耗电下降 13%~15%。焦炉上升管表面温度由 200℃降低到 50℃。上升管内筒清扫量降低。

- 节能减排效果

与传统焦化工艺相比，采用该技术炼焦工序吨焦能耗降低 10 千克标煤，减排二氧化碳约 25 千克。炼焦工序能耗降低 7%~10%，吨钢能耗下降 4 千克标煤，相当于每吨约减排 10~11 千克二氧化碳。吨焦生产 0.6~0.9 兆帕饱和蒸汽 0.1 吨。

- 技术经济分析

每套装置对应 2 座 6 米焦炉，年产焦炭 110 万吨，投资约 2000 万元（不含发电系统）。

- 投资回收期

1~2.5 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，“十二五”推广应用前景广阔。

高温高压干熄焦技术

- 适用条件

适用于所有年产 30 万吨焦炭以上常规顶装焦炉、捣固焦炉以及热回收焦炉。但若考虑到企业整体投资经济效益、酚氰废水出路等综合因素，干熄焦技术比较适用于大中型钢铁联合企业直属焦化厂。《焦化行业准入条件》（2008 年修订）中明确规定钢铁企业新建焦炉要同步配套建设干熄焦装置，但对独立焦化企业没有明确要求，也是考虑到企业实际情况。

- 技术内容

在炼焦生产中，高温红焦冷却有两种熄焦工艺：一种是传统的采用水熄灭炽热红焦的工艺，简称湿熄焦，另一种是采用循环惰性气体与红焦进行热交换冷却焦炭，简称干熄焦（英文缩写 CDQ）。传统湿法熄焦采用水直接熄灭炽热红焦，不但热能不能回收，而且吨焦产生 0.3~0.4 吨水蒸汽夹带大量烟尘及少量硫化物等有害物质放散，既严重污染大气及周围环境，同时还大量消耗水。干法熄焦是采用惰性气体将焦炭冷却并回收焦炭显热的工艺。推出炭化室的焦炭落入干熄焦用焦罐车的焦罐内，并通过装料装置送入干熄炉冷却室，采用惰性气体与焦炭换热，冷却的焦炭由排焦装置连续排出并送下一工序。加热后的惰性气体可进入余热锅炉换热回收蒸汽并发电，冷却后的惰性气体返回熄焦工序。

- 节能减排效果

干熄焦生产过程中消耗的能源介质有焦炭（烧损）、水、电、蒸汽、压缩空气、氮气等，回收的能源介质是蒸汽或电力。回收减自身消耗后，每吨干熄焦净回收能量 35~45kgce。据初步估算，按 8744 万 t 焦炭采用干熄焦技术，直接节能效果是：①回收中高压蒸汽 4372~5246 万 t；②节约熄焦用水 3497~3935 万

m3; ③净回收标煤约 349 万 t。

干熄焦利用惰性气体,在密闭系统中将热焦炭熄灭,并配合良好的除尘设施,可将熄焦过程对环境的污染降到最低水平,减少了常规湿法熄焦过程中排放的含酚、HCN、H₂S、NH₃ 的废气。同时,干熄焦产生的蒸汽相当于替代了燃煤锅炉产生的蒸汽,从而降低燃煤对周围环境的影响。据初步估算,按 8744 万 t 焦炭采用干熄焦技术,直接环保效果是:①少排放大气污染物 0.57~0.60 万 t;②回收中高压蒸汽可代替燃煤蒸汽锅炉,相当于节约动力煤 729~875 万 t(按 1 吨动力煤产 6 吨中高压蒸汽计),即少排放大气烟尘 1.28~1.53 万 t、SO₂ 10.9~13.1 万 t、CO₂ 1020~1225 万 t。

- 技术经济分析

处理能力 170t/h 焦炭干熄焦装置的投资估算约 1.7 亿元。运行费用约 5100 万元/年。

- 投资回收期

投资回收期约 7 年。

- 推广前景

2010 年,我国钢铁企业焦化厂高温高压干熄焦率仅为 10%左右;预计“十二五”期末,高温高压干熄焦技术的推广比例将达到 30%~40%。

高炉脱湿鼓风技术

- 适用条件

鉴于脱湿鼓风对高炉冶炼的有利影响,现代高炉应广泛采用脱湿鼓风。优先适用的情况包括需要炉缸具有较高和充足热量与地区湿度变动大而风机能力又感不足的高炉。同时需要考虑当地气象条件。如果高炉所处地区大气比较干燥,一年中大部分时间空气含湿量较小,可能出现大部分时间脱湿很少,甚至无湿可脱,这样经济效益甚低。

- 技术内容

高炉脱湿鼓风是指去除高炉鼓风中的水分，使高炉鼓风中的湿度降低到最佳操作所要求的数值，并保持稳定。以前，高炉鼓风大多采用自然湿度鼓风，冬季被看作是高炉生产的黄金季节。这主要是因为冬季气温较低，空气湿度较小，密度较大，因而使鼓风的水分减少，质量流量增加。而夏季温度高，鼓风湿度大，随鼓风带入高炉的水分在高炉风口回旋区发生分解反应而吸收热量，导致风口前的燃烧温度下降，增加焦比。一般认为鼓风湿分变化 $1\text{g}/\text{m}^3$ 相当于降低风温 6°C 。湿度的变化对冶炼焦比影响十分明显，对高炉稳定性的干扰更为直接，因此，采用高炉鼓风脱湿技术，在低湿度前提下稳定鼓风湿分，进而稳定高炉炉况，降低焦比，增加产量。脱湿鼓风一般的工艺参数为：进风温度 $\geq 22^\circ\text{C}$ ，进风相对湿度：80%，进风含湿量 $\geq 17\text{g}/\text{Nm}^3$ ；出风温度： 8°C ，出风含湿量： $7.5\text{g}/\text{Nm}^3$ 。高炉脱湿鼓风适用于高炉采用喷吹燃料特别是喷吹煤粉的时候。它有利于喷吹技术的实现，降低高炉焦比，有利于炉况稳定和生铁质量的提高。当高炉为全焦生产时，采用脱湿鼓风除了浪费能源外，还可能对高炉冶炼及生铁质量带来不利影响。为了维持高炉稳定的热制度，高炉往往采用加湿鼓风。对一些操作水平还不高，提高热风炉风温和节能潜力较大的高炉，首先应着眼于改进操作水平，通过技术改造提高热风温度和挖掘节能潜力，而不应轻易考虑上脱湿装置。高炉是否采用脱湿鼓风，应根据具体情况通过技术经济综合比较而定。首先应充分考虑当地气象条件、喷吹燃料价格、电力供应情况及供电价格和调湿方式等因素。我国东北、华北、西北地区常年大气湿度较小，采用脱湿鼓风更应慎重研究。

● 节能减排效果

高炉脱湿鼓风技术调整了鼓风中的水分，固定了含湿量，是使高炉节能增产的技术之一，主要节能减排效果如下：①稳定炉况：由于脱湿鼓风使进入高炉的湿度相对稳定，能有效地降低高炉风口前火焰温度的波动，稳定高炉炉况。②降低焦比：脱湿鼓风能够减少高炉风口水分分解热而节约焦炭，降低焦比。风中湿度每减少 $1\text{g}/\text{m}^3$ ，焦比降低约 $0.6\sim 0.8\text{kg}/\text{t}$ 。③提高入炉风温。脱湿鼓风可提高入炉风温。风中湿度每减少 $1\text{g}/\text{m}^3$ ，入炉风温可提高 6°C ，进而能够多喷煤粉。④风机吸入侧去除了大部分的水蒸汽，在高炉需要同等量的干空气的情况下，风机的功率消耗有所下降，可以部分弥补因设置脱湿装置而增加的功率消耗。

● 技术经济分析

以高炉年产 120 万 t 铁水为例，采用脱湿鼓风技术，项目总投资 2000 多万元。增加运行费用 500 多万元。

- 投资回收期

投资回收期约 2 年。

- 推广前景

目前，我国高炉脱湿鼓风技术普及率仅为 1%，“十二五”期末预计推广比例将达到约 20%。

转底炉处理含铁尘泥技术

- 适用条件

难以在产能规模为 50 万吨/年以上的企业运行，适用于较小规模钢铁企业。在含铁粉尘处理领域，1 座千万吨级的钢铁厂每年生产所产生的含铁粉尘约 50 万吨，转底炉技术用来处理含铁粉尘是较合适的途径。

- 技术内容

转底炉（Rotary Hearth Furnace）处理含铁尘泥技术是指将钢铁厂产生的含氧化锌、氧化铁等粉尘制成小球，敷设在转底炉的环形旋转台车面上，用烧嘴对其进行高温辐射加热还原，还原后的成型物可直接送至高炉作为原料再利用。转底炉最初的目的只是用于处理含铁废料，但很快就有美国、德国、日本等国将其转而开发用于铁矿石的直接还原，通过在 1200~1400℃ 高温下短时间内对含碳球团的快速加热还原，获得直接还原铁或用来分离钢铁厂固体废弃物中的铁与 Zn、Pb 等有价值金属元素的工艺。这对于合理利用自然资源、保护人类环境有积极的作用，因而受到了冶金界的普遍关注。

- 节能减排效果

转底炉以煤、焦炭或木炭为还原剂，以天然气、煤气、燃油和煤粉等作供热燃料，还能处理和回收钢铁企业的含铁废料。因此，与传统的高炉炼铁相比，转底炉可使用铁原料、还原剂和燃料的种类更广泛，灵活性更大。以我国马钢 20 万

吨/年处理量生产线为例，如果脱锌率、金属化率高于 85%、80%，成球合格率在 85%左右，实际强度达 15MPa，加入高炉替代烧结矿冶炼，预计年节约燃料 2.5 万吨。从转底炉出来的烟气温度高达 1100℃，如用于余热锅炉，可提高系统能源利用水平。

- 技术经济分析

以年处理含铁尘泥 37 万 t 为例，项目总投资约 1.5 亿元。运行费用 2 亿元以上。

- 投资回收期

投资回收期约 6 年。

- 推广前景

2010 年，该技术普及率在 5%左右；“十二五”期末预计推广比例将达到 35%左右。

水泥

利用预分解窑协同处置危险废物技术

- 适用条件

适用于适合进行相应工艺改造的 2000t/d 以上新型干法水泥生产线。要求企业必须能实现连续监控及连续稳定运行，并装有用于净化废气的高效袋除尘器，以及适用的危险废物处置和投料手段与装备，必要的监控设施和管理制度，确保不产生二次污染。危险废物的适宜+加入点通常为水泥回转窑的窑头或者窑尾烟室。

- 技术内容

利用预分解窑能销毁许多其他行业产出的危险废物，包括废液、污泥、废酸、废碱、过期药品、化学试剂、漆渣、飞灰、污染土壤、油墨以及乳化液等，实现无害化、资源化处置，经济及社会效益显著。预分解窑销毁危险废物具有以下特点：窑内气体温度在 1700~1900℃，物料温度在 1450℃左右（高于传统焚烧炉

的 850~1200℃)，废料在高温区停留时间长，处于负压状态，使有毒有害的有机物组分彻底分解。熟料煅烧的碱性条件有利于废物中氯、硫、氟等元素的中和。废物焚烧残渣通过固相和液相反应成为水泥熟料矿物，无残渣排放，重金属能被结合或固化在熟料矿物中，避免二次污染，可为回转窑提供部分热能，实现节能减排。

- 节能减排效果

与专业焚烧炉相比，利用预分解窑协同处置危险废物具有运行成本低、处置彻底、资源化等方面的优势，危险废弃物处置量可达 0.1Mt/年。另据美国环境保护署测量结果表明，预分解窑在协同处置危险废物时，比单纯使用煤的工作状况更好，空气中的有害物排放量不会增加，不造成新的污染，对空气质量无影响。

- 技术经济分析

利用预分解窑协同处置危险废物所需的投资仅为采用传统焚烧炉投资的 1/2 左右，且效果更好。以处置能力为 10 万吨/年的系统为例，技术总投资约 3000 万元，运行费用为 4000~6000 万元/年，如果水泥企业处置危险废物所获得的补贴标准按每吨废物为 1000 元计。

- 投资回收期

投资回收期为 4~6 年。

- 推广前景

当前技术普及率不到 1%；“十二五”预计推广比例为 5%。

水泥膜法富氧燃烧技术

节煤效果不明显，但是可以提产，成本较高，主要是制氧，企业动力不足

- 适用条件

适合现有预分解窑的技术改造，包括窑头、窑尾燃烧装置的改造。

- 技术内容

该技术是利用空气中各组分透过膜时的渗透率不同，在压力差驱动下，使空

气氧气优先通过膜而得到富氧空气，然后用含氧浓度高的富氧空气喷入窑炉中进行燃烧。当氧浓度在 20%~25%左右，规模小于 15000 标立方米/小时，膜法富氧技术投资、维护以及操作费用仅为深冷法和变压吸附法的 2/3~3/4。该技术火焰温度和燃尽温度高，燃烧速度快，热量利用率高，排气量少，空气过剩系数低，利用降低出预热器废气带走热量，增加窑产量，提高熟料煨烧质量等作用，同时有利于劣质煤的燃烧，有助于降低燃料成本。

- 节能减排效果

应用该技术会使每吨熟料电耗略增加 5~6 度，但与采用传统空气相比，该技术可节约煤耗约 5%~10%，吨熟料二氧化碳排放量降低 16 千克以上。以日产 5000 吨/日新型干法水泥生产线为例，以每年生产 300 天计，吨熟料煤耗为 111 千克标煤，则全年可节约标煤 0.8 万吨以上，减排二氧化碳 2.1 万吨以上。

- 技术经济分析

该技术的投资成本与膜组件采用国产或进口有很大关系，总体上的技术改造成本为 10~30 元/吨熟料。对于日产 5000 吨生产线，投资估算为 1500~4500 万元，年运行维护费用约为 100~250 万元。目前国内已可自主生产技术所用膜组件。

- 投资回收期

以 5000 吨/日水泥生产线为例，应用富氧燃烧技术，每吨熟料可降低成本 4.4~10.3 元，因此投资回收期为 2~7 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，“十二五”技术普及率可达 5%左右。

预烧成窑炉技术

- 适用条件

可应用于预分解窑的新线建设或对分解炉系统的技术改造，需配套相应的耐火材料，并注意原料中的碱、氯等有害元素。

- 技术内容

该技术通过提高回转窑入窑物料温度，大幅度减少或消除水泥回转窑内残留的低效传热过程，解决水泥烧成中的热瓶颈问题，实现熟料的细粒快烧和高效冷却，并通过采用抗结皮材料、耐高温材料和隔热材料，改变回转窑的长径比、转速和斜度等配套措施，从而明显提高水泥质量，降低烧成热耗和粉磨电耗，提高熟料质量的综合效果。

- 节能减排效果

该技术可以实现窑熟料产量大幅度提高，熟料烧成热耗下降，水泥熟料强度增加，窑尾废气浓度降低等。较传统新型干法水泥技术，增加产量 10%~20%左右，降低烧成热耗 5%~10%，吨熟料二氧化碳排放量减排约 15 千克以上。

- 技术经济分析

对于新线投资，与传统新型干法生产线相当，即 300~350 元/吨熟料。对于技术改造，投资成本按新增产量计算，约为 200~300 元/吨熟料。以 5000 吨/日新型干法生产线改造为例，投资为 3000~9000 万元，年运行维护成本基本与传统新型干法生产线相当。

- 投资回收期

以 5000 吨/日生产线新型干法生产线改造为例，投资为 3000~9000 万元，热耗降低 5%~10%，则吨熟料生产成本降低 5.9~10.8 元，投资回收期为 1.5~9 年。

- 推广前景

该技术成果尚处于局部推广阶段，“十二五”技术普及率可达 3%左右。

大推力、低一次风量多通道燃烧器技术

- 适用条件

普遍适用于新型干法水泥生产线烧成系统。使用时应注意与水泥回转窑的窑型、燃料种类及特性相匹配，通过调控相关通道的推力来调控火焰形状，以适应窑的操作要求。

- 技术内容

大推力、低一次风量多通道燃烧器是通过合理设计燃烧器的风速和通道，有效利用二次风、降低一次风量、形成大推力的燃烧技术。具备有效利用二次风，降低一次风量，形成大推力，具有一次风用量少（8%以内）、燃烧效率高、风速高、推力大、调节灵活、火焰形状可调等优点。

- 节能减排效果

多通道燃烧器一次风用量较低，约为 7%~10%，较传统燃烧器低 4%~7%；而一次风用量每降低 1%，熟料单位热耗便可降低 8 kJ/kg，因此多通道燃烧器可比三通道燃烧器降低热耗约 33kJ/kg。与传统燃烧器相比，可节煤 10%左右。

- 技术经济分析

此项技术节能减排效果显著，除具有节煤的特点外，还可使用无烟煤、高灰分、低热值的廉价低质煤以及替代燃料，并且生产的熟料质量高。此项技术改造投资约 100 万元，运行维护简单，经济效益显著，投资回收期约为 1~3 年。

- 投资回收期

投资回收期为 2-3 年。

- 推广前景

此项技术目前已经成熟，得到行业内的普遍认可，技术普及率逐年提高。可以烧替代燃料的多通道燃烧器也有少量应用，但因使用时间尚短，须待积累经验后，逐步扩大应用。2010 年技术普及率不到 5%，预计“十二五”期末推广应用比例为 30%。

水泥企业 ERP 解决方案

- 适用条件

适用于大中型水泥生产企业或集团企业的信息化管理。

- 技术内容

本方案结合国内水泥企业通用管理模式，以供应链、财务为主线，生产、质量为辅线，形成全面的水泥企业信息化解决方案。本方案由财务、销售、采购、

库存、生产、称重管理、质量、人力资源、决策支持等几个主要子系统所构成，提供二次开发平台及源代码，实现与工业控制系统 DCS（Distributed Control System）、地磅系统的管理和集成，具有灵活的报表自定义等功能。

将现代网络信息技术、ERP（Enterprise Resource Planning）企业信息化管理理念与系统应用于水泥制造业，形成水泥制造企业信息化总体规划。针对水泥生产过程数字化技术理论和软硬件产品的应用，范围覆盖了从自动化系统、先进控制、过程优化、生产调度管理到企业经营决策和物流管理、供应链管理各个层次。将流程工业从过程控制、过程优化、生产调度、企业管理和经营决策五个层次演变为 ERP/MES/PCS 三层结构。即：注重生产过程的过程控制系统 PCS（Process Control System）；注重企业层面经营管理问题的企业资源规划 ERP（Enterprise Resource Planning）；注重生产与管理结合问题的中间层即制造执行系统 MES(Manufacturing Execution System)，解决了流程工业企业中原本难以处理的、具有生产与管理双重性质的信息管理问题。

- 节能减排效果

该系统可以全面优化企业管理模式，降低企业成本，相当于降低吨水泥熟料煤耗 2%，从而取得良好的节能减排效果。通过应用设备管理模块，使主机设备安全运转率超过 92%，直接节约了运维成本，相当于吨水泥节电约 2kWh。

- 技术经济分析

采用此系统的单位投资为吨水泥 6 元，单位运行费用为吨水泥 0.3 元，年运行费用 18 万元。

- 投资回收期

投资回收期为 3~5 年。

- 推广前景

近几年，国内水泥行业信息化需求扩大，2010 年技术普及率不到 1%，预计“十二五”期末该方案推广应用比率约为 5%。