

煤炭清洁发电技术进展与前景

岑可法, 倪明江, 高翔, 骆仲泱, 王智化, 郑成航

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 杭州 310027)

摘要: 近年来, 我国大气复合污染问题日益突出, 燃煤是造成大气污染的主要原因之一, 我国电力行业耗煤量约占全国耗煤总量的一半, 实现燃煤电厂烟气污染物高效控制是重中之重。本文介绍了我国煤炭清洁发电实现超低排放的最新进展及未来发展前景。通过理论研究、技术研发及集成应用, 形成了符合我国国情的燃煤烟气污染物超低排放技术路线, 建立了超低排放清洁环保岛, 实现了污染物排放优于天然气机组排放标准限值, 为我国大气污染防治特别是高耗能密度区域的污染物减排提供了一条重要出路。研究综述了近年来我国超低排放技术的示范应用情况, 通过费效分析表明超低排放可实现污染物大幅度减排, 具有良好的环境、经济和社会效益。未来, 我国燃煤电厂还将进一步发展烟气污染物深度脱除技术及二氧化碳捕集技术, 最终实现燃煤烟气污染物的近零排放, 为建设全世界最清洁的燃煤电厂奠定坚实的技术基础。

关键词: 煤炭; 高耗能密度; 大气污染; 超低排放; 清洁发电

中图分类号: X511 **文献标识码:** A

Progress and Prospects on Clean Coal Technology for Power Generation

Gen Kefa, Ni Mingjiang, Gao Xiang, Luo Zhongyang, Wang Zhihua, Zheng Chenghang

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027)

Abstract: Recently, air pollution has taken Chinese a great concern. The emission control of electricity industry is the key to the air quality improvement since electricity industry accounts for over 50 % of China's coal consumption. This work introduces the progress and prospects of ultra-low emission control technologies based power generation technologies. The ultra-low emission control technologies and integrated systems are developed and optimized by the support of a series of national projects to reach the emission level of natural gas power generation units in using coal-fired units. The application and promotion of these technologies are proven to be an important solution for the air quality improvement, especially in regions with high energy-consumption, since these technologies have shown great potential for deep-cut in pollutant emissions, which will benefit both the society and the environment. In the future, the research will focus on the deep-cut of various pollutants and high-efficiency CO₂ capture to lay a solid foundation for the construction of the world's cleanest coal-fired power plants.

Key words: coal; high energy consumption density; air pollution; ultra-low emissions; clean power generation

收稿日期: 2015-11-09; **修回日期:** 2015-11-18

作者简介: 岑可法, 能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为洁净煤技术、能源与环境系统工程等;

E-mail: kfcen@sun.zju.edu.cn

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“先进清洁煤燃烧与气化技术”

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

当前，我国能源开发利用和环境保护面临诸多问题和挑战。一是伴随着我国经济的持续快速增长，我国能源消耗呈快速增长态势。回顾我国能源消费史，改革开放头 20 年，能源消耗翻一番，支撑了国内生产总值（GDP）翻两番；21 世纪头 10 年，能源消耗又翻一番，支撑了国内生产总值翻 1.4 番；若延续这样的增长态势，按 2020 年国内生产总值翻一番测算，能源消费总量将超过 5.5×10^9 tce (tce 为吨标准煤)。二是能源消耗的快速增长使我国大气环境面临十分严峻的挑战。2013 年全国 SO_2 、 NO_x 和烟（粉）尘排放 2.0439×10^7 t、 2.2274×10^7 t 和 1.2781×10^7 t^[1]，已远超出我国大气环境承载容量，需要进一步加快能源清洁利用，大幅减少大气污染物的排放。三是在大力发展清洁能源过程中（主要包括发展可再生能源或相对清洁的天然气等）存在诸多不足问题。如 2013 年我国发电量为 5.3976×10^{12} kW·h，其中可再生能源发电仅约占 19.5%（水电 16.9%，风电、太阳能及其他 2.6%）^[1]。我国一次能源消耗中非化石能源（水能、核能、风能、太阳能等）约占 9.4%，根据《可再生能源发展“十二五”规划》到 2020 年我国非化石能源占一次能源比例可望达到 15%。由此可见，我国以煤炭为主体的能源消费结构短期内难以发生重大改变。

为解决燃煤造成的环境污染，全国各地相继推出了以天然气替代燃煤的措施；但我国天然气资源

有限，2013 年我国天然气产量为 1.21×10^{11} m³，仅相当于 2.06×10^8 t 煤炭，“煤改气”将会造成严重的天然气供需失衡。因此，2013 年年底国家发展与改革委员会和国家能源局连续发文指出：各地在发展“煤改气”、燃气热电联产等天然气利用项目时，不能“一哄而上”，避免供需出现严重失衡。着力抓好煤炭清洁使用，确保已建燃煤发电机组脱硫脱硝设施改造达标并正常投运，实现既改善环境质量又缓解天然气供应压力的目标。

鉴于我国能源生产及消费现状，亟需大力推进煤炭清洁高效利用。其中电力行业是我国主要耗煤行业，与国外发达国家相比，我国煤炭利用整体仍较为分散，如图 1 所示，2013 年中国电力行业耗煤量约占煤炭总消耗量的一半（46%），远低于 2010 年美国的 92%、德国的 80%^[1-3]。面对煤炭利用过程中不够集中、不够高效、不够清洁等问题，一方面需要压缩煤炭的比例，另一方面要实现煤炭清洁利用。同时，针对我国煤炭污染集中源和分散源的特点需采取不同的对策。集中源如火电厂，其特点是便于实时监控和污染便于集中治理，可通过烟气污染物超低排放技术的应用，实现污染排放优于天然气发电标准限值；分散源如工业锅炉、民用散煤等，其特点是难以监控和在末端进行经济性可接受的深度治理，可通过改用天然气、生物质等相对清洁的燃料，在减排的同时将分散煤集中于大型燃煤电厂利用，提高煤炭利用效率和治污水平，大幅降低污染物排放水平。

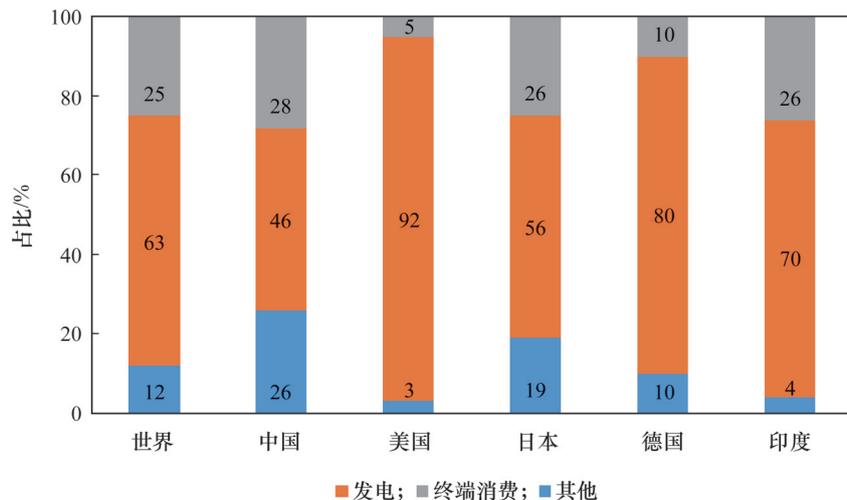


图 1 不同用途煤炭消费结构的国际比较^[1-3]

注：美国、德国、日本数据是 2010 年，中国是 2013 年；“其他”包括供热、制气、煤炭转换、液化、能源部门自用及损失等

另一个需引起重视的问题是：与欧洲、美国、日本等发达地区和国家相比，我国经济发展仍严重依赖于高能耗、高污染的产业；能源结构方面，还存在着空间分布不平衡、消费结构不合理与清洁高效利用水平较低等突出问题。如表 1、图 2 所示，京津冀、长三角、珠三角等重点地区的一次化石能源消费强度约为全国平均值的 5.10 倍、美国的 5.66 倍、日本的 1.10 倍；煤炭消费强度则约为全国平均值的 4.92 倍，美国的 15.7 倍、日本的 2.74 倍；且上述高用能密度区域化石能源消费仍以煤为主。大量化石能源的消费也造成上述地区大气污染物排放强度约为全国平均水平的 5 倍，更是远高于欧洲、美国、日本等发达地区和国家水平。因此，针对上述区域能源结构及污染排放问题，一方面需进行产业结构调整，降低煤炭能源消费强度，另一方面需鼓励以燃煤烟气污染物超低排放技术为代表的先进煤炭清洁发电技术在火电行业的推广应用，并进一步拓展实现其他行业烟气污染物的超低排放。超低排放已成为中国现阶段高效清洁集中可持续利用煤炭、保障能源安全的一条重要出路。

二、燃煤电厂烟气污染物超低排放技术

(一) 超低排放关键技术发展现状

近年来，国家通过“863”计划、科技支撑计划、自然科学基金、“973”计划等科技项目部署了大量经费用于支持燃煤电厂大气污染物控制理论提升及技术研发工作，在 SO_2 、 NO_x 、颗粒物（PM）、汞等污染物控制方面取得了重大突破，为探索建立一套使燃煤电厂主要污染物排放达到国家天然气燃气轮机排放限值的多种污染物高效协同脱除技术系统提供了有力保障。

SO_2 控制方面，发展了石灰石/石灰-石膏湿法、烟气循环流化床法、海水法等脱硫技术，其中石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术在我国已投运燃煤脱硫机组中占 90% 以上的份额，其脱硫效率一般可达 95% 以上。针对当前量大面广的石灰石/石灰-石膏湿法脱硫机组难以满足环保新要求的现状，浙江大学深入研究了湿法烟气脱硫的强化传质与多种污染物协同脱除机理，在此基础上开发了 pH 值分区控制、筛板塔内构件强化传质、脱硫添加剂等

表 1 一次化石能源消费强度对比^[1-3]

能源消费	纽约州	华盛顿州	加利福尼亚州	美国	日本	中国	中国重点地区
化石能源消费 / $\times 10^4$ tce	9 370	3 844	20 967	280 214	59 157	327 791	105 053
煤炭消费 / $\times 10^4$ tce	201	168	123	71 700	16 814	240 812	74 573
化石能源消费强度 / $\times 10^4$ tce·km ⁻²	766.2	223.0	519.1	305.9	1 578.6	339.8	1 731.6
煤炭消费强度 / $\times 10^4$ tce·km ⁻²	16.4	9.8	3.0	78.3	448.7	249.6	1 229.2

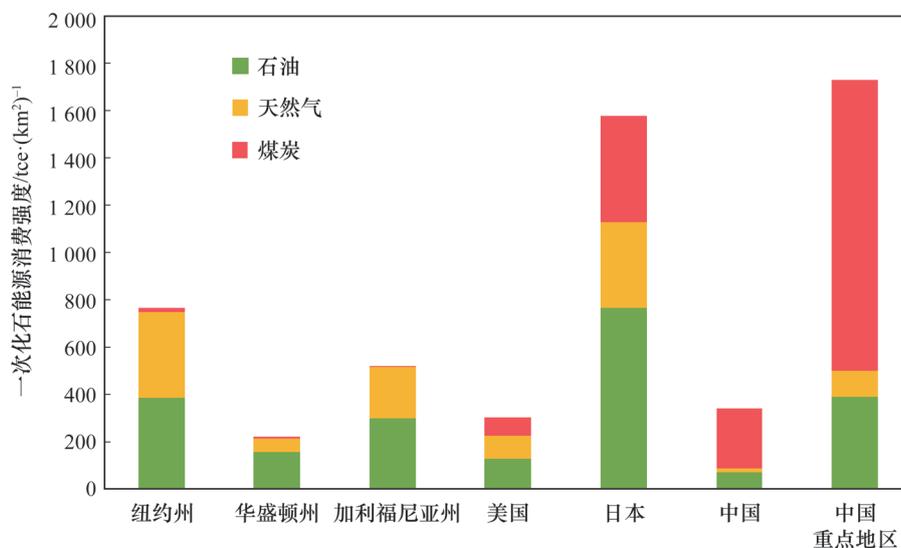


图 2 一次化石能源消费强度对比图^[1-3]

系列脱硫增效关键技术^[4-8]，并在50~1 000 MW燃煤机组上实现了示范应用，脱硫效率突破了99%，SO₂排放浓度可低于20 mg·m⁻³；同时可协同脱除颗粒物、NO_x、汞等污染物。高效脱硫关键技术也在钢铁烧结机、玻璃炉窑、垃圾焚烧等行业得到了推广应用。

NO_x控制方面，发展了有低NO_x燃烧技术、选择性非催化还原法（SNCR）烟气脱硝技术、选择性催化还原法（SCR）烟气脱硝技术和SNCR-SCR耦合脱硝技术等，其中选择性催化还原法烟气脱硝技术在我国已投运燃煤脱硝机组中占95%以上的份额，其脱硝效率一般为70%~85%，最高可达90%以上。针对部分机组NO_x排放超标，尤其是低负荷下NO_x超标现象严重，大量废烟气脱硝催化剂面临再生等问题，浙江大学通过技术研发形成了具有高脱硝效率、高单质汞/二价汞（Hg⁰/Hg²⁺）转化率、低SO₂/SO₃转化率、宽温度窗口、高抗磨性能的催化剂配方及其活性恢复方法^[8-11]，在含1 000 MW等级燃煤机组上也实现了产业化推广应用，排放浓度可低于50 mg·Nm⁻³；具有自主知识产权的脱硝催化剂再生改性工艺技术及装备，已成功应用于300 MW及1 000 MW机组等催化剂再生改性项目，实现NO_x高效脱除的协同控制汞等污染物。

颗粒物控制方面，发展了静电除尘、袋式除尘和电袋复合除尘等除尘技术，其中现有近80%的火电机组安装了静电除尘器，而随着袋式除尘器滤袋材料性能的改善及排放标准的严格，袋式除尘器和电袋复合除尘器应用呈上升趋势。为提高颗粒物控制效率，浙江大学近年来还研发了湿式静电除尘、高效凝并、高效供电电源等多种高效除尘关键技术^[12-14]。通过在湿法烟气脱硫塔后采用新型湿式静电除尘技术（WESP），形成脱硫塔前除尘、脱硫塔内除尘及脱硫塔后除尘的多级PM_{2.5}控制系统，PM_{2.5}总捕集效率可达到99%以上，烟尘排放浓度小于5 mg·Nm⁻³，且可实现脱硫塔后污染物控制装备的SO₂脱除效率达到70%以上^[13,14]。目前，浙江大学研发的湿式静电多种污染物协同控制技术已在300 MW机组、热电机组等实现了示范应用。

汞等污染物协同控制方面，脱硫塔前一级除尘装备本身可协同控制一部分吸附在颗粒上的Hg、SO₃等污染物；而通过对选择性催化还原法脱硝催化剂配方改性及向烟气中添加活性组分，可以将大

部分单质汞氧化成二价汞，以利于在后续的脱硫塔内吸收脱除并固定于脱硫副产物中；而脱硫后的湿式静电除尘技术可高效脱除PM_{2.5}的同时，协同脱除塔后烟气中携带的SO₃酸雾、细小浆液滴、汞等多种污染物，脱汞效率可达85%以上，Hg排放浓度小于0.002 mg·Nm⁻³，SO₃酸雾去除效率可达80%以上，能有效解决蓝烟/黄烟、“石膏雨”以及汞、雾滴排放等污染新问题。

针对单一污染物高效脱除及其他污染物协同控制技术，通过对SO₂、NO_x、颗粒物、汞等多种污染物高效脱除与协同控制关键技术的集成开发，形成了能达到天然气燃气轮机排放标准限值要求的燃煤电站超低排放环保岛技术，其系统工艺流程简图见图3。

目前，燃煤电站超低排放技术正在京津冀鲁、长三角、珠三角等重点区域的燃煤发电机组和热电联供机组上推广应用。如在嘉兴电厂1 000 MW燃煤机组上实施烟气清洁化排放改造，采用高效协同脱除技术，对现有的除尘、脱硫、脱硝系统进行提效，实现超低排放，该机组是国内首台达到超低排放的燃煤机组，被国家能源局授予“国家煤电节能减排示范电站”称号；在广东顺德五沙热电300 MW燃煤机组上采用选择性催化还原法高效脱硝、筛板强化脱硫除尘一体化、卧式湿式静电除尘等关键技术，实现烟气污染物超低排放；在嘉兴新嘉爱斯热电220 t·h⁻¹热电联产锅炉上通过耦合选择性催化还原法脱硝+常规除尘+高效湿法烟气脱硫+湿式静电深度净化等高效协同脱除技术，实现烟气污染物超低排放；上述工程示范通过不同的减排技术路线均使燃煤机组烟气的主要污染物排放浓度达到国家燃气排放标准限值要求。随着燃煤发电机组超低排放示范工程的深入推进，我国煤电行业将取得革命性进步，可望建成世界上最大的清洁高效煤电体系^[15]。

（二）超低排放技术经济效益分析

根据《火电工程限额设计参考造价指标（2012年水平）》^[16]及某300 MW发电机组的运行情况调研，分别对燃煤锅炉超低排放发电、燃气锅炉发电及燃气蒸汽联合循环发电成本进行核算，结果如表2所示（其中，燃料价格以燃气3.6元·Nm⁻³，煤炭600元·t⁻¹计算）。若燃煤机组进行超低排放改造，发电成本增加约0.016分·(kW·h)⁻¹，而

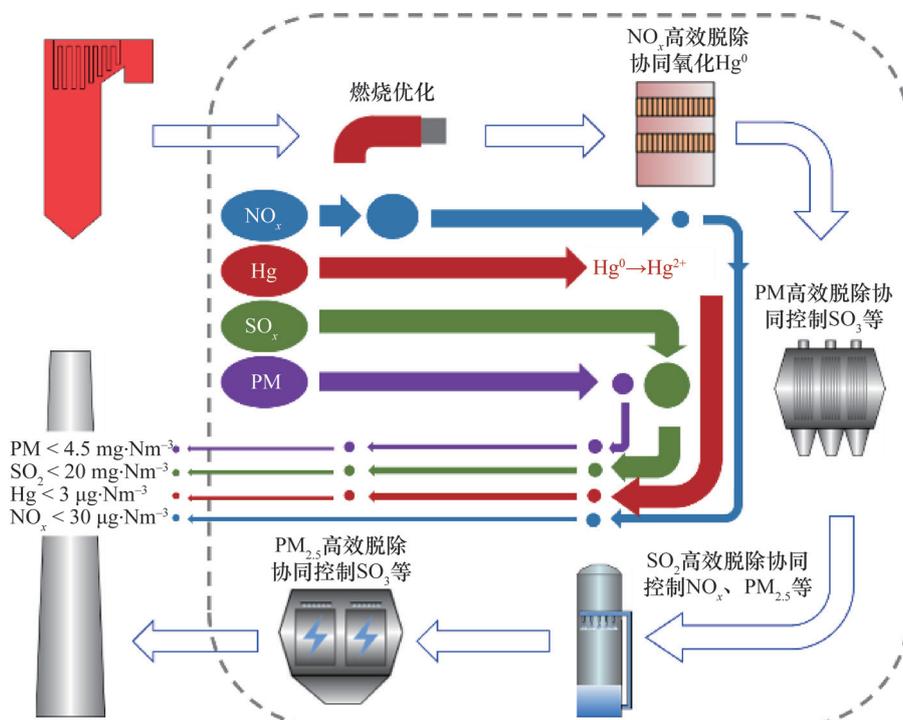


图 3 燃煤电站超低排放环保岛

改造成燃气蒸汽联合循环发电，发电成本增加 $0.482 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ (未考虑机组投资)，改造成燃气锅炉发电成本增加 $0.6366 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。针对不同容量、不同污染物排放水平的燃煤机组，其超低排放改造的投资成本及运行成本有所差别，超低排放改造增加发电成本 $1.5 \sim 2.0 \text{ 分} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ；而“煤改气”根据不同地区、燃气价格不同发电成本亦有所不同，发电成本增加 $0.3 \sim 0.8 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。超低排放技术发电与天然气发电相比，具有较好的经济效益。

(三) 超低排放技术环境效益分析

2013 年，全国烟（粉）尘、二氧化硫、氮氧化物排放量分别为 $1.2781 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $2.0439 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $2.2274 \times 10^7 \text{ t}$ ，其中电力行业烟尘、二氧化硫、氮氧化物年排放量分别为 $1.42 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $7.8 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $8.34 \times 10^6 \text{ t}$ ，分别占全国排放量的 11.1%、38.2%、37.4%^[1]。

随着超低排放技术的进一步推广，烟气污染物的减排效益逐渐凸显。据中国电力企业联合会初步统计，2014 年火电行业烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放量为 $9.8 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $6.2 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $6.2 \times 10^6 \text{ t}$ ，分别比 2013 年下降约 31.0%、20.5%、25.7%，全面提前完成《节能减排“十二五”规划》规定的电力二氧化硫排放 $8 \times 10^6 \text{ t}$ ，氮氧化物 $7.5 \times 10^6 \text{ t}$ 的减排目标。经测算，若燃煤烟气污染物超低排放技术在全国燃煤机组推广应用，预计燃煤烟气污染物排放量仅为：颗粒物为 $8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 SO_2 为 $5.3 \times 10^5 \text{ t}$ 、 NO_x 为 $7.6 \times 10^5 \text{ t}$ ，为解决我国燃煤大气污染与能源资源双重约束问题提供了一条重要出路。

三、燃煤清洁发电技术发展趋势及前景

2011 年环保部颁布“史上最严格”的《火电厂大气污染物排放标准 (GB 13223—2011)》^[17]，2013 年环保部颁布《关于执行大气污染物特别排放限值

表 2 不同发电方式的发电成本对比

发电类型	常规燃煤电站发电技术	燃煤电站超低排放技术	燃气-蒸汽联合循环发电技术	燃气锅炉发电技术
发电成本 / 元·(kW·h) ⁻¹	0.450	0.466	0.932	1.0836
与常规燃煤电站发电对比增加成本 / 元·(kW·h) ⁻¹	—	0.016	0.482	0.6336

的公告》，国家针对燃煤电厂持续采取严格的大气环境管理措施，严格控制大气污染物新增量。2013年9月，国务院出台《大气污染防治行动计划》^[18]，2014年10月，国家发改委、环保部、国家能源局联合印发《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）》（2093号文）^[19]，要求“东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值，中部地区新建机组原则上接近或达到燃气轮机组排放限值，鼓励西部地区新建机组接近或达到燃气轮机组排放限值。”2015年3月，李克强总理在政府工作报告中提出要加强煤炭清洁高效利用，推动燃煤电厂超低排放改造；浙江、山东、江苏、广东、山西、河南等地方政府也纷纷出台超低排放相关扶持政策。一系列政策的出台有力地推动了燃煤发电机组超低排放升级改造，据《“十二五”生态环境保护成就报告》统计，我国已完成煤电行业超低排放改造 8.4×10^7 kW，约占全国煤电装机1/10，正在进行改造的超过 8.1×10^7 kW^[15]。

随着我国经济的进一步发展，人均用能水平的不断提高，以及对空气质量改善的需求，未来大气污染物排放要求必将日趋提高。在新能源发展尚不满足我国现阶段经济和社会发展需求时，煤炭清洁发电技术是我国目前能源客观条件下的必然选择。尤其是在人口密集、经济发达的重点地区，更清洁的煤炭发电技术是未来燃煤电厂发展与立足的必由之路。

未来，燃煤电厂将进一步发展燃煤烟气深度净化技术，浙江大学已研发了活性分子多种污染物一体化脱除技术，目前已在 $6 \times 10^4 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 炭黑尾气上工业应用，实现了烟气 NO_x 由初始浓度 $800 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ 降至 $10 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ， SO_2 由初始浓度 $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ 降至 $30 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ，脱除效果远低于火电厂污染物国家燃煤排放标准（GB 13223—2011，重点地区 $\text{NO}_x < 100 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ 、 $\text{SO}_2 < 50 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ，而且也优于超低排放要求（ $\text{NO}_x < 50 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ， $\text{SO}_2 < 35 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ），为我国燃煤电厂超低排放提供了具有自主知识产权的新技术方案。未来活性分子多种污染物一体化脱除技术将在大型燃煤电厂中实现应用。同时，随着 CO_2 排放控制需求的提高，未来将进一步大力发展廉价 CO_2 捕集技术及 CO_2 利用技术，并在燃煤电

厂实现示范应用，真正实现燃煤电厂烟气污染物的近零排放，达到甚至优于天然气发电污染物及温室气体排放水平，为燃煤电厂的绿色清洁发电、经济的可持续发展提供一条有效途径。

四、结语

当前在我国能源资源短缺和节能减排双重约束下，发展清洁煤技术是当前我国重大战略需求，通过利用煤炭清洁发电最新的研究和工程实践，实现煤电产业转型升级，是我国大气污染防治的一条重要可持续发展路线。

燃煤清洁发电技术是当前国际能源环境领域的战略性前沿课题之一，也是研究热点和难点问题之一。针对我国大气污染治理的严峻态势，通过燃煤烟气污染物超低排放的新思路，实现燃煤烟气颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、汞及其化合物等多种污染物排放达到或优于燃气机组排放水平，具有良好的经济、环境和社会效益。通过活性分子污染物一体化脱除技术等具备主要烟气污染物排放进一步降低的能力，实现近零排放。未来，污染物的深度脱除及二氧化碳捕集及封存技术将会持续发展，为我国建设全世界最清洁的燃煤发电体系奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] BP 中国. BP 世界能源统计年鉴2013[EB/OL]. [2015-11-08]. http://www.bp.com/zh_cn/China/reports-and-publications/bp_2013.html.
- [3] IEA. Energy Balances of OECD Countries 2014 [EB/OL]. [2015-11-08]. http://dx.doi.org/10.1787/energy_bal_oecd-2014-en.
- [4] 李存杰, 张军, 张涌新, 等. 基于pH值分区控制的湿法烟气脱硫增效研究[J]. 环境科学学报. doi: 10.13671/j.hjkxxb. 2015.0137
- [5] 张军, 张涌新, 郑成航, 等. 复合脱硫添加剂在湿法烟气脱硫系统中的工程应用[J]. 中国环境科学, 2014, 09: 2186-2191.
- [6] 许昌日. 燃煤烟气 NO_x/SO_2 一体化强化吸收试验研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2014.
- [7] 王惠挺. 钙基湿法烟气脱硫增效关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2013.
- [8] 谢克昌, 等. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] 姜焯, 高翔, 吴卫红, 等. 选择性催化还原脱硝催化剂失活研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 14: 18-31, 13.
- [10] 姜焯, 张涌新, 吴卫红, 等. 用于选择性催化还原烟气脱硝的 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 催化剂钾中毒动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 23: 3899-3906.

- [11] 毛剑宏, 宋浩, 吴卫红, 等. 电站锅炉SCR脱硝系统导流板的设计与优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 06: 1124-1129.
- [12] 万益, 黄薇薇, 郑成航, 等. 湿式静电除尘器喷嘴特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 02: 336-343.
- [13] 杨正大, 常倩云, 岳涛, 等. 湿式静电协同脱除SO₂、PM 试验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 06: 1365-1370.
- [14] 万益. 湿式静电除尘水膜均布及细颗粒物强化脱除研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2014.
- [15] 陈吉宁. “十二五”生态环境保护成就报告 [R]. 中华人民共和国环境保护部, 2015.10
- [16] 电力规划设计总院. 火电工程限额设计参考造价指标(2012年水平) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [17] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. [2013-09-12]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年) [EB/OL]. [2014-09-19]. http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201409/t20140919_626240.html.