

中长期煤利用中大气污染控制技术路线

郝吉明^{1,2}, 王金南³, 王志轩⁴, 高翔⁵, 高晋生⁶, 李凡⁷, 姜培学⁸, 许嘉钰^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084; 3. 环境保护部环境规划院, 北京 100012; 4. 中国电力企业联合会, 北京 100761; 5. 浙江大学能源工程学系, 杭州 310027; 6. 华东理工大学, 上海 200237; 7. 太原理工大学, 太原 030024; 8. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要: 能源利用与大气污染密切相关, 我国以煤为主的能源结构决定了煤炭使用过程中排放的大气污染物是造成我国大气污染的主要原因。本研究在分析我国主要行业煤炭消费现状的基础上, 提出了煤炭消费重点行业——电力行业、炼焦行业和工业锅炉及炉窑 2020 年中期和 2030 年长期主要大气污染物污染控制技术路线以及煤炭清洁利用的中长期战略要点。

关键词: 煤炭; 大气污染; 能源结构; 排放控制; 技术路线

中图分类号: X32 文献标识码: A

Technology Roadmap on Air Pollution Control for Coal Utilization in Medium and Long Term

Hao Jiming^{1,2}, Wang Jinnan³, Wang Zhixuan⁴, Gao Xiang⁵, Gao Jinsheng⁶, Li Fan⁷,
Jiang Peixue⁸, Xu Jiayu^{1,2}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China; 3. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 4. China Electricity Council, Beijing 100761, China; 5. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 6. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 7. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 8. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Air pollution is closely related to energy consumption. Coal-dominated energy structure in China determines that the main cause of air pollution is from coal consumption. Based on the analysis of current coal consumption status in major sectors in China, coal utilization pollution control technology roadmap for the main sectors, such as electric power industry, coking, industrial boiler and stove, and core strategies for coal clean utilization in the medium-term (2015—2020) and long-term (2015—2030) are suggested in this study.

Key words: coal; air pollution; energy structure; emission control; technology roadmap

一、前言

从 1980 年至今的 30 余年内, 作为我国能源消

费的主要能源, 煤炭一直占我国一次能源生产和消费量比重在 70 % 左右, 远高于经济合作与发展组织 (OECD) 国家 20 % 左右的平均值。我国煤炭消

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2015-11-13

作者简介: 郝吉明, 清华大学环境学院, 教授, 中国工程院院士, 研究领域为能源清洁利用与大气污染防治, 涉及我国酸雨防治策略、城市机动车污染控制、区域性复合型大气污染来源与控制等; E-mail: hjm-den@tsinghua.edu.cn

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”(2011-ZD-7)

本刊网址: www.enginsci.cn

费总量大、地区分布不均衡、消费结构不合理及技术水平低等因素带来了严重的大气污染问题，并制约着城市与区域空气质量的改善。同时，日益严格的环境空气质量标准和主要大气污染物持续减排要求对我国煤利用过程中的污染控制提出了很高的要求。为了改善我国的空气质量，必须发展最佳控制技术，实现我国煤炭的清洁化利用。

二、煤利用及其大气污染物的排放与控制现状

(一) 煤炭消费现状

随着我国社会经济的快速发展，煤炭使用量急剧增加，从 2000 年的 1.4×10^9 t 增长到 2012 年的 3.5×10^9 t^[1]，12 年间增长了 2.5 倍；到 2013 年，我国的煤炭消费量已占全球煤炭消费总量的 50.3%，分别是美国和欧盟的 4.2 倍和 6.7 倍^[2]。由于其他化石能源的相对贫乏和新能源发展配套技术障碍尚需解决，在未来很长时间内我国以煤为主的能源结构不会改变。

根据全国各省煤炭统计数据，2012 年我国煤炭消费量为 4.36×10^9 t。从煤炭消费对象分布来看，电力行业、炼焦行业、工业锅炉、工业窑炉消费了我国 85% 以上的煤炭。我国 2012 年主要煤炭消费对象的煤炭消费比例如图 1 所示，其中电力行业是第一用煤大户，占全国煤炭消费总量的 46%。其次为工业锅炉、炼焦行业和工业炉窑，占全国煤炭消费总量的比例依次为 19%、17% 和 4%。

(二) 煤利用的大气污染物排放现状

根据我国环境统计数据^[3]，2012 年我国 SO₂、

NO_x 和烟粉尘排放量分别为 2.1176×10^7 t、 2.3378×10^7 t 和 1.2343×10^7 t。

利用自上而下大气污染物排放清单编制方法，计算得到电力行业、炼焦行业、工业锅炉、工业窑炉煤炭消费带来的大气污染物 SO₂、NO_x 和烟粉尘排放量的排放情况如图 2 所示。由于不同的煤炭使用对象其大气污染物控制技术不同，造成了其排放的不同种类大气污染物占污染物排放总量的比例不同，但是煤炭使用排放的 SO₂、NO_x 和烟粉尘排放量占我国 SO₂、NO_x 和烟粉尘排放总量的比例都超过 70%，分别为 89%、71%、87%。

(三) 煤利用的大气污染物控制现状

1. 电力行业

燃煤电厂大气污染物排放标准执行《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)。2005—2012 年全国带烟气脱硫设施的火电机组装机容量从 0.48×10^8 kW 增长至 7.18×10^8 kW，全国燃煤机组脱硫比例由 2005 年的 14% 提高到 2012 年的 92%；在发电量增长 90%、发电用煤量增长 80%

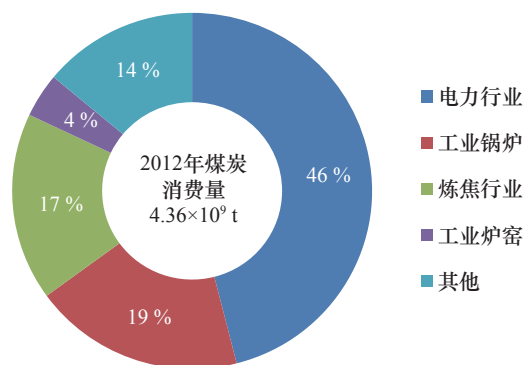


图 1 2012 年我国煤炭消费分布

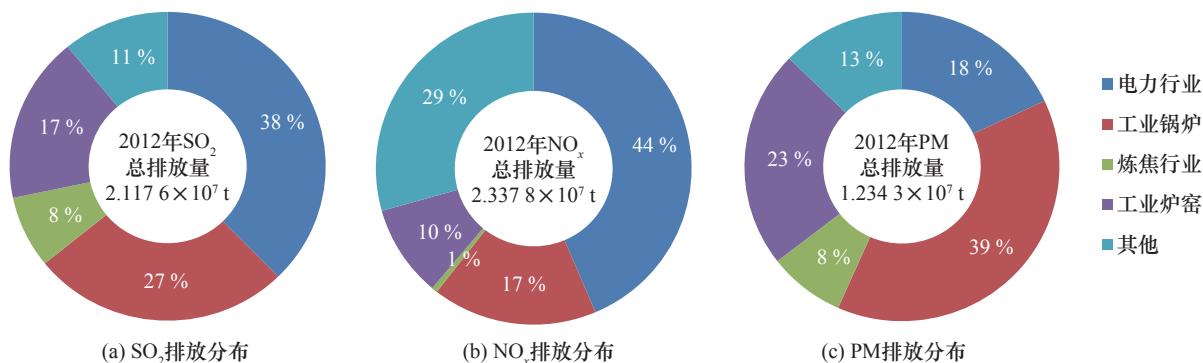


图 2 2012 年我国煤炭消费典型污染物排放分布

的情况下,SO₂排放量降低了40%。“十二五”期间,NO_x减排也被纳入国家大气污染物总量减排的重点任务。通过大规模脱硝设施的建设,2010—2012年全国带烟气脱硝设施的火电机组装机容量从 0.89×10^8 kW增长至 2.26×10^8 kW,全国燃煤机组脱硝比例由2010年的13%提高到2012年的28%;在发电用煤量增长12%的情况下,NO_x排放量降低了1.5%^[4]。

2. 炼焦行业

炼焦行业大气污染物排放标准执行《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB 16171—2012)。目前,我国仍然有少数焦化企业没有同步建设装煤和推焦除尘装置,甚至没有完整的煤气净化车间,因此对环境造成严重的污染。

3. 工业锅炉及炉窑

工业锅炉的大气污染物排放标准执行《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)。

钢铁生产过程炉窑的大气污染物排放标准执行2012年颁布的《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(GB 28662—2012)、《炼铁工业大气污染物排放标准》(GB 28663—2012)、《钢铁工业大气污染物排放标准》(GB 28664—2012)、《轧钢工业大气污染物排放标准》(GB 28665—2012)、《铁合金工业污染物排放标准》(GB 28666—2012)。

水泥生产过程炉窑的大气污染物排放标准执行《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2013)。

目前燃煤工业锅炉采用较多的是燃烧后的烟气湿法和半干法脱硫技术,包括半干法、石灰石/石膏法、双碱法、氧化镁法、氨法等。我国工业炉窑行业的烟气脱硫主要集中在钢铁行业。我国自20世纪末开始重视烧结烟气SO₂污染问题,目前国内各钢铁企业采用的烧结烟气脱硫技术主要以半干法和氨法为主。

我国已有部分燃煤工业锅炉采用选择性非催化还原(SNCR)和选择性催化还原(SCR)技术控制氮氧化物排放,我国工业炉窑行业氮氧化物的控制工作还没有正式开展,尚处于示范应用阶段。全国仅少数几家企业安装脱硝装置。

目前,烟尘控制技术主要有电除尘、布袋除尘、湿式除尘、机械式除尘等,广泛应用于工业锅炉和工业炉窑行业。

三、中长期煤利用大气污染控制技术路线

我国中长期煤利用大气污染控制技术路线图如图3所示。

(一)“高效清洁燃烧—污染物协同控制—废物资源化”一体化燃煤发电污染物控制技术

燃煤发电排放的主要污染物为烟尘、二氧化硫、氮氧化物、重金属及固体废物。利用污染控制技术控制烟尘、二氧化硫、氮氧化物、重金属的排放;利用资源化技术减少煤电的固体废物排放。“高效清洁燃烧—污染物协同控制—废物资源化”体现了燃煤发电污染物过程控制与末端治理相结合、废物综合利用的技术路线。

1. 技术方向

污染物过程控制技术需要发展超超临界、循环流化床、热电联产、空冷等高效火电机组;提高机组的发电效率,持续降低供电煤耗。在远期进一步发展高效火电机组,积极推进整体煤气化联合循环(IGCC)示范。污染末端控制主要是在国内外现有成熟技术的基础上增效、开发成本低和污染物综合去除效率高的多种污染物协同控制技术。废物资源化主要是以大宗粉煤灰和脱硫石膏为原材料的高附加值产品生产技术。

2. 关键技术

整体煤气化联合循环发电技术:整体煤气化联合循环在我国仍处于示范阶段,其技术具有发电效率高、环保性能好等特点,如将来二氧化碳受强制性指标限制,整体煤气化联合循环将作为很好的解决温室气体问题的有效途径之一。因此,我国的能源结构和可持续发展战略决定了我国更需要整体煤气化联合循环,而它能否被接受和认可取决于其造价的高低、运营成本、可靠性等。即进一步降低造价、提高效率并控制污染物、二氧化碳的排放是整体煤气化联合循环未来发展的主题。

多污染物同时控制技术:基于传统石灰石—石膏法湿法的脱硫脱硝脱汞一体化技术、氨法脱硫脱硝脱汞一体化技术、基于传统干法的脱硫脱硝脱汞一体化技术、钠法干式脱硫脱硝一体化技术;环保一体化装置和系统可以降低工程的投资和运行管理费用,并且可以发挥装置潜在能力;主要问题是氧化剂成本高,装置运行成本高,存在二次废水需要



图 3 煤利用中大气污染控制技术路线

处理的问题；技术不成熟尚不能商业化，目前未有大型商业示范工程。

3. 烟尘污染控制

2015—2020 年，以当前处于国际领先水平并持续改进的电除尘技术（如极配方式的改进、烟气调质、移动电极、高频电源等）为主，同时规范发展袋式除尘技术和电袋复合除尘技术；

2021—2030 年，以更高性能的电除尘技术（如绕流式、气流改向式、膜式、湿式电除尘器等）和改进的袋式除尘技术、电袋复合除尘技术相结合为主，同时快速发展利于烟尘凝聚、超细粉尘捕集的

技术。

4. SO₂ 污染控制

2015—2020 年，以当前我国广泛应用的、持续改进的传统脱硫技术如石灰石石膏湿法为主，同时资源化脱硫技术（如氨法脱硫、有机胺脱硫、活性焦脱硫等）在条件合适的地区和机组上得到广泛应用；

2021—2030 年，以高性能、高可靠性、高适用性、高经济性的脱硫技术为主，同时规范发展资源化脱硫技术，推广应用可行的新型脱硫技术及多污染物协同控制技术。

5. NO_x 污染控制

2015—2020年，以高性能的低氮燃烧技术和选择性催化还原为主，同时试点应用可行的脱硫脱硝一体化技术（如湿法脱硫脱硝一体化技术、低温选择性催化还原脱硫脱硝一体化技术等）。

2021—2030年，以更高性能的低氮燃烧技术和高性能、高可靠性、高适用性、高经济性的烟气脱硝技术为主，同时规范发展脱硫脱硝一体化技术，试点应用可行的新型脱硝技术及多污染物协同控制技术。

6. Hg 污染控制

2015—2020年，以现有非汞污染物控制设施（包括脱硝、除尘、脱硫设施）对汞的协同控制为主；

2021—2030年，以燃烧前和燃烧中控制汞的生成量和现有非汞污染物控制设施对汞的协同控制为主，逐步发展基于现有非汞污染物控制设施的脱汞技术和单项脱汞技术。

7. 废物资源化技术

2015—2020年，以大宗粉煤灰和脱硫石膏利用为主，推广示范大掺量粉煤灰混凝土路面材料技术，高铝粉煤灰大规模生产氧化铝联产其他化工、建材产品成套技术，粉煤灰冶炼硅铝合金技术，余热余压烘干、煅烧脱硫石膏技术，利用脱硫石膏改良土壤技术等高附加值利用；

2021—2030年，以大宗粉煤灰和脱硫石膏高附加值利用为主，示范粉煤灰分离提取碳粉、玻璃微珠等有价值组分和高附加值产品技术，超高强 α 石膏粉、石膏晶须、预铸式玻璃纤维增强石膏成型品、高档模具石膏粉等高附加值产品生产技术。推动废物资源化利用产业链延伸，逐步形成区域循环经济。

（二）基于源头和过程控制的燃煤工业锅炉和工业炉窑污染控制技术

燃煤工业锅炉排放的污染物与电站锅炉相同；燃煤工业窑炉因冶炼、焙烧、烧结、熔化、加热的物料不同，排放的污染物种类各不相同，燃煤工业锅炉的污染物控制技术大多适用于燃煤工业窑炉排放的常规污染物的控制。“清洁能源替代/规模化—污染物高效脱除—多种污染物协同控制/副产品回收利用”是燃煤工业锅炉的大气污染物控制的技术路线；工业窑炉大气污染物控制主要执行“先进工艺—污染物高效脱除—多种污染物协同控制/副产

品回收利用”的技术路线。

1. 技术方向

燃煤工业锅炉及窑炉量大面广，存在大部分单台污染物排放量少、排放高度低、污染物末端控制装置效率低、成本高的问题，尤其是目前国内外尚未成功开发低温选择性催化还原脱硝装置，氮氧化物去除效率不高。燃煤工业锅炉及窑炉，尤其是燃煤工业锅炉的污染排放应该淘汰 $10\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下小型燃煤锅炉主要走清洁能源替代以及依靠大型化、提高热效率、采用先进工艺的过程控制为主的技术路线。末端控制技术应采用多种污染物协同控制而不是一体化的同时控制技术。副产品回收利用技术主要针对脱硫副产品。

2. 关键技术

多种污染物协同控制技术：研发基于湿法的高效脱硫和协同脱硝脱汞技术，研发基于干法/半干法的高效脱硫和协同脱硝脱汞技术，研制在常见排烟温度下能同时脱硫脱硝的催化剂及相应技术。

低温脱硝技术：适合排烟温度为 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温选择性催化还原脱硝技术，能够满足 $60\%\sim 70\%$ 的燃煤锅炉和窑炉的排烟氮氧化物排放控制的需求；适合排烟温度为 $150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温选择性催化还原脱硝技术，能够满足大部分的燃煤锅炉和窑炉的排烟氮氧化物排放控制的需求；但是排烟温度越低，适合的选择性催化还原脱硝催化剂的成本越高。

3. 燃煤工业锅炉污染控制

2015—2020年，淘汰机械、湿法等落后除尘技术，全部采用静电和布袋除尘技术、干法和湿法脱硫、低氮燃烧、选择性非催化还原烟气脱硝技术为主，同时多种污染物协同脱除技术（硫资源可回收的多脱技术）初具规模；

2021—2030年，以静电和袋式除尘技术为主、传统脱硫技术中更加关注湿法脱硫技术的改进及选择性非催化还原脱硝技术的应用；提高同时多种污染物协同脱除技术（硫资源可回收的多脱技术）的比例。

4. 燃煤工业窑炉污染控制

2015—2020年，钢铁行业烧结机以静电和布袋烟气除尘技术、氨法脱硫技术为主，初步采用选择性催化还原脱硝技术；水泥行业新型干法窑炉主要采用布袋除尘技术、干法和湿法脱硫技术、低氮燃烧技术和选择性非催化还原脱硝技术，适当发展

适合于新型水泥干法窑炉的选择性催化还原脱硝技术；同时多种污染物协同脱除技术初具规模；

2021—2030 年，钢铁行业烧结机以布袋除尘技术、氨法脱硫技术为主，部分采用选择性催化还原脱硝技术；水泥行业新型干法窑炉主要采用布袋除尘技术、干法和湿法脱硫技术、低氮燃烧技术、选择性非催化还原脱硝技术；提高同时多种污染物协同脱除技术的比例。

（三）“大型化—资源化—清洁化”的现代炼焦污染控制技术

焦化工艺产生的污染包括大气污染、水污染、固体废物污染和噪声污染，其中大气污染（颗粒物）和水污染是主要环境问题。焦化生产大气污染治理技术主要针对颗粒物，吸附在颗粒物上的多环芳烃等有害污染物可随颗粒物一并脱除。可以通过干法熄焦技术及安装烟气净化装置控制气态污染物的排放。逐步建设和推广焦化生态园区，通过提高炼焦行业的总体水平解决炼焦行业的污染问题。

1. 技术方向

全面实现焦炉大型化，淘汰炭化室高 4.3 m 及以下的焦炉、全面实现干法熄焦、推广焦炉加热用煤气的精脱硫和低 NO_x 的燃烧技术，实现煤焦油集中加工和深度加工。

2. 关键技术

干法熄焦技术：采用干熄焦技术，可降低强粘结性的焦、肥煤配比，有利于保护资源、降低炼焦成本。此工艺适合新建焦炉熄焦工艺或大型焦炉湿法熄焦改造。与湿法熄焦相比，干法熄焦存在投资较高及本身能耗较高的缺点。

3. 2021—2030 年，建成若干个 1×10^7 t 级焦化生态园区，推广焦炉加热用煤气的精脱硫和低 NO_x 的燃烧技术。

四、煤炭清洁利用的中长期综合战略要点

为了应对挑战，实现大气环境质量改善的目标，我国必须制定长远的煤炭清洁利用战略，并使用全球最佳的煤利用污染控制技术，执行全球最严格的排放标准，在煤炭使用的清洁化水平上达到全球领先。

一是优化能源结构，降低煤炭占我国一次能源

的比重。在近期大力增加天然气的供应量，发展核能；在中远期大力发展风能、太阳能、生物质能等可再生能源。力争在 2030 年将煤炭占我国一次能源的比重降低至 50% 以下。

二是要改善我国煤炭的消费结构，促进煤炭消费向电力等大型燃煤设备转移，减少煤炭在工业和民用部门的终端消费。力争在 2020 年和 2030 年电力部门的煤炭消费比重增长至 60% 和 65%^[5]。

三是要控制区域煤炭消费总量，优化煤炭消费的空间分布。在北京、上海等煤炭消费强度大、工业化基本完成的区域，减少煤炭消费量；在东部其他地区控制煤炭消费的增长速度；引导增加煤炭消费量的高能耗项目向西部布局。

四是要制订长远的大气污染物控制目标。从改善空气质量，保障人民群众身体健康的角度出发，力争在 2030 年把我国煤炭利用环节的 SO_2 、 NO_x 、一次颗粒物排放量分别控制在 9.6×10^6 t、 7.6×10^6 t 和 3.6×10^6 t 以下^[5]。除此之外，为应对全球控制污染履约的压力，燃煤大气 Hg 排放需要控制在 127 t。

五、结语

煤炭作为我国一次能源的支柱，实现其清洁利用既是推动我国发展方式转变的重要动力，也是实现全面现代化、保障人民身体健康和权益的基本要求。本研究主要从改善我国大气环境的需求出发，既从技术的视角提出了煤利用中长期主要大气污染物污染控制技术路线，又考虑到先进减排技术所带来的污染物减排潜力逐渐变小，提出了为了进一步降低污染物排放量必须降低煤炭使用的增长速度的煤炭清洁利用的中长期战略要点，研究成果对我国煤炭的污染控制具有指导意义。

致谢

本文为中国工程院重大咨询项目“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”课题四的核心内容之一，参加本课题研究的主要专家有：雷宇、蒋洪强、吴文俊、田贺忠、苗茂谦、常丽萍、黄先腾、谢绍东、张九天、刘建民、王小明、薛建明、刘志强、许月阳、刘涛、李忠华、郭俊、张原、宋贺强、鲁军、吴诗勇、胥蕊娜、王书肖、马永亮、吴学成、张涌新、

徐甸、赵斌、高佳佳、卢云、刘开运等，在此一并致谢！

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [2] Group B P. BP statistical review of world energy[EB/OL]. [2014].

<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/2014-in-review.html>.

- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2012中国环境统计年报[Z]. 2012.
- [4] 《中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目》课题组. 煤炭使用对中国大气污染的贡献[EB/OL]. [2014]. <http://www.nrdc.cn/coalcap/console/Public/Uploads/2014/12/30/AirPollutionContribution.pdf>.
- [5] 郝吉明等. 煤利用中的污染控制和净化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.