

DOI: 10.7652/xjtuxb201612001

中国燃煤锅炉节能减排技术近况及展望

林宗虎

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 燃煤锅炉是温室气体 CO₂ 及大气污染物的重要排放源,加强对燃煤锅炉节能减排技术的研究和应用对于 CO₂ 的减排和大气品质的改善具有重要意义。由此,对近期燃煤电站锅炉和燃煤电站锅炉的节能减排技术和方法进行了分析和评议,这些方法和技术包括推行严格的节能减排政策、利用大型超临界压力燃煤发电机组、采用整体煤气化联合循环、研发煤炭综合利用技术和 CO₂ 捕集技术、改造燃煤工业锅炉、采用先进排烟净化设备等,并对该领域未来研究和发展方向进行了展望及建议。

关键词: 燃煤锅炉;节能;减排

中图分类号: TK22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)12-0001-05

Recent Situation and Prospect of Technologies for Energy Saving and Emission Reduction of Coal-Fired Boilers in China

LIN Zonghu

(School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an710049, China)

Abstract: Coal-fired boiler is a main exhaust source of greenhouse gas CO₂ and air pollutants. Therefore, enhancing the research and application of technologies for energy saving and emission reduction of coal-fired boiler is very important to CO₂ reduction and air quality improvement. Recent technologies and methods for energy saving and emission reduction for coal-fired utility boiler and industrial boiler are analyzed and reviewed respectively. These technologies and methods include promoting strict policy for energy saving and emission reduction, using large capacity supercritical pressure coal-fired power generation unit, using IGCC, developing coal based co-production system and CO₂ capture technique, reforming industrial boiler, and using advanced cleaning apparatus of boiler exhausted gas. The research and development of the technologies are finally anticipated and suggested.

Keywords: coal-fired boiler; energy saving; emission reduction

气候变暖和温室气体 CO₂ 等的减排是当前各国面对的全球性战略问题。在 2009 年哥本哈根气候变化大会上中国庄严承诺,2020 年中国单位 GDP (国内生产总值)的 CO₂ 排量(质量分数)要比 2005 年减少 40%~45%,而这是一个不易达到的指标。中国既要持续发展经济又要减排 CO₂,就只有依靠科技创新、走改革发展的道路。根据中国国情和科

学分析表明,这一 CO₂ 减排任务可以通过三大措施来实现:各行各业通过节能提效、降低能耗可减少 CO₂ 排量 26%~30%;通过发展低碳能源和可再生能源可减少 CO₂ 排量 8%~10%;通过化石能源清洁化可减少 CO₂ 排量 6%~7%。

2015 年 4 月 25 日发表的《中共中央国务院关于加速推进生态文明建设的意见》中的主要目标之

一为到2020年单位GDP的CO₂排放强度比2005年下降40%~45%。由此可见,这一减排指标是一定要达到的。

近年来,中国大气污染和雾霾环境十分严重,为了提高空气品质、保障人民健康,必须迅速加强工业废气污染物的控制和治理。

减排任务的完成与加强燃煤锅炉的节能减排有着密切的关系。中国一次能源以煤炭为主,2014年底煤电机组约占发电机组的62%,2013年中国CO₂、SO₂、NO_x和烟尘排放量均居世界第一,其中燃煤电站锅炉排出的CO₂、SO₂、NO_x和烟尘分别占各总排放量的50%、38%、43%和17%。此外,中国现存的大量效能不高的燃煤工业锅炉也是一个重要的大气污染源。因此,针对主要污染源的燃煤锅炉进行节能减排对于完成减排任务是十分重要的。

1 中国燃煤电站锅炉的近期节能减排技术和措施

1.1 实行“上大关小”的强制性机制

中国原有煤电机组主要由效率不高的中小型机组构成,一般10⁵ kW以下的机组发电煤耗≤400 g/(kW·h),而10⁶ kW超超临界压力机组的煤耗仅为273 g/(kW·h)。因而,关停10⁵ kW以下的中小型机组、发展超临界压力机组对于节能减排是十分有效的。2005年全国平均发电煤耗为370 g/(kW·h),到2014年平均发电煤耗已降为319 g/(kW·h)。

2014年9月国家发改委、环保部、国家能源局联合下发的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014年~2020年)》^[1](以下简称“行动计划”)明确规定:东部地区新建燃煤电厂的大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机排放极限值,即在基准氧含量(氧的质量分数)为6%的条件下,标准状态(20℃、101.325 kPa状态)的烟尘、SO₂、NO_x排放的质量浓度分别不高于10、35、50 mg/m³(文中排放浓度均指标准状态下的浓度);中部地区新建燃煤电厂的发电机组原则上接近或达到此限值;鼓励西部地区的接近或达到此限值。亦即要求:新建燃煤发电机组的排放浓度应向燃气轮机电厂看齐,各现役机组经5年改造后平均煤耗应低于310 g/(kW·h),新建电厂平均煤耗应低于300 g/(kW·h),即煤耗超过当前的国际先进水平,成为超低排放燃煤发电机组。

1.2 确立燃煤发电机组的环保示范项目

2014年国家能源局确立了13个环保示范项

目,对天津军粮城电厂、山东章丘电厂、河北裕华电厂等进行超低排放改造。在煤电环保改造中,采用技术成熟的石灰石—石膏湿法烟气脱硫技术脱硫,和采用低氮燃烧器、加装一层催化剂等脱硝技术,已使排烟中的SO₂、NO_x排放浓度达到“行动计划”规定的排放限值,但烟尘的质量浓度要低于10 mg/m³的要求不易达到。在2015年2月通过天津市环保局验收的第一个环保改造示范项目的军粮城电厂9号机组,采用了湿式静电除尘器使烟尘排放浓度低于限值要求,实时监测数据显示:SO₂排放的质量浓度为9.2 mg/m³,NO_x排放的质量浓度为39.6 mg/m³,标烟尘排放的质量浓度为2.9 mg/m³,达到煤电超低排放标准,其中烟尘排放浓度已低于燃气轮机排放限值。军粮城电厂的湿式静电除尘器安装在脱硫吸收塔顶部,烟气自下而上进入除尘器以去除细微颗粒与雾滴,净化后的烟气从顶部排出。湿式静电除尘器收集的悬浮液体及冲洗水靠重力流回脱硫吸收塔浆液池。该除尘器创新性地采用机制导电玻璃钢作为阳极材料,保证了除尘器本体的耐腐蚀性能,使用寿命可达25年。

在新建燃煤发电机组方面,北京、福建、江苏等11个省份新建机组的大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机排放限值。近日投产的福建石狮市鸿山镇的神华福能鸿山电厂首台10⁶ kW超超临界煤电机组,其烟气实时排放环保参数检测结果为:烟尘排放的质量浓度为8.01 mg/m³,SO₂排放的质量浓度为20.87 mg/m³,NO_x排放的质量浓度为27.6 mg/m³,均小于超低排放标准的限值。

常规燃煤电站采用超低排放改造后,发电成本仅增加0.015~0.02元/(kW·h),而燃煤改为燃气后发电成本将平均增加0.6元/(kW·h)^[2]。根据环境保护部2015年发表的《“十二五”生态环境保护成就报告》^[3]的统计,中国已完成煤电超低排放改造8.4×10⁷ kW,约占全国煤电装机的1/10,正在进行改造的超过8.1×10⁷ kW。

在政府组织支持和指导下,由产学研协同取得的煤电超低排放科研成果,具有重要的社会和经济意义。此成果初步解决了煤电发展与环境污染增大之间的矛盾,可避免将大量发电成本低的燃煤机组改为发电成本高的燃气机组所支持的改造和运行费用,显著减少了天然气进口量,并在较长时期内依托中国主力一次能源煤炭的充分利用,确保中国一次能源的安全性。

1.3 采用先进的燃煤发电技术^[4]

1.3.1 采用超临界和超超临界煤电机组 一般煤电机组发电效率均低于 40%，超临界机组可达到 42%，而超超临界机组可将发电效率提高到 45%~50%。因而，积极发展超临界煤电机组不仅可以显著地节能提效、减少大量煤炭燃用，同时也起到重要减排作用。超临界及以上的发电机组全球有 600 多台，中国已有 150 多台。

1.3.2 采用整体煤气化联合循环(IGCC)发电机组 在这类发电机组中，煤先在气化炉中气化成煤气，经净化后，清洁煤气送入燃气轮机机组发电。燃气轮机机组的排气温度很高，可送入余热锅炉产生蒸汽，再利用蒸汽带动蒸汽轮机机组发电，这样发电效率可达 45%~50%。如采用纯氧气化，合成器中 N₂ 很少，主要为高浓度的 CO₂ 和 H₂，有利于 CO₂ 的捕集和减排。全球现有该设备 30 台左右，中国华能天津 250 MW 的 IGCC 有一台示范机组，已实现满负荷、长周期稳定运行，其烟气排放实测数据为：SO₂ 与粉尘排放的质量浓度为均小于 1 mg/m³，NO_x 排放的质量浓度低于 50 mg/m³。

1.3.3 发展煤炭多联产技术 这是国际上正在发展的煤炭综合利用技术。煤经煤气化和净化后，可用于生产电力、油、氨肥及其他化工产品，由此可提高 10%~20% 的煤炭利用率，且 CO₂ 较易捕集排出，是提高煤炭利用率的发展方向，对此中国正在研发中。

2 中国燃煤工业锅炉的近期节能减排技术和措施^[4-5]

2.1 采用先进的节能减排技术

中国工业锅炉有 55 万多台，大多为燃煤火床炉，年耗煤达 4×10⁸ t 且热效率不高，实际运行热效率一般为 70%~80% 或更低，因而节能提效潜力较大。

2.1.1 采用强化燃烧技术 一般可通过优化炉拱结构、优化配风和加入添加剂等方法来提高锅炉燃烧效率，以达到节煤减排的目的。近年来，富氧燃烧用于工业锅炉和工业窑炉后得到显著节能减排效果，其为使空气流过高分子膜，由于氧气渗透率高于氮气，因而膜后空气中含氧量可提高 27%~30%。该富氧经除湿稳压并预热到 100℃ 后送入炉膛助燃。由于空气中大量氮气不参与吸热，使得排烟量减少，排烟热损失减少。

富氧燃烧可提高火焰温度，增强辐射传热并增大燃烧的速度和强度，由此可降低不完全燃烧损失，

有利于燃尽和消除黑烟污染。江西阜宁化肥厂和辽宁瓦房店轴承集团在工业锅炉上采用此技术后使锅炉热效率提高 10% 左右，并消除了排烟黑度不合格现象。济南钢铁集团的石灰回转窑用此法后降低煤耗达 10%。

2.1.2 采用冷凝式锅炉 锅炉排烟中含有水蒸气，若将该水蒸气冷凝使其汽化潜热得以利用，便可提高锅炉的热效率。这类锅炉称为冷凝式锅炉，特别适用于燃气锅炉。由于燃气成分主要是 CH₄，所以燃烧后烟气中水蒸气含量高，气化潜热大，冷凝后可显著提高锅炉热效率。冷凝式锅炉用于燃煤锅炉的效果相对较小，用于由燃煤改为燃气工业锅炉的效果很好。在当前燃用天然气锅炉的排烟温度下，烟气中水蒸气带走的热损失约占排烟热损失的 75%，若将排烟温度降到 60℃ 以下，回收水蒸气潜热和烟气显热后可使锅炉热效率提高 10% 以上，而水蒸气冷凝设备的制造费用可在一年内回收。

2.1.3 燃煤火床炉改为煤粉炉 燃煤火床炉一般热效率较低，其改为煤粉炉后可有效提高热效率，但首先要有煤粉供应单位，否则对蒸发量小于 35 t/h 的锅炉带有自制煤粉设备是不经济的。

2.1.4 燃煤火床炉改为燃气炉 燃气工业锅炉一般热效率比火床炉高得多。全自动燃气工业锅炉热效率可达 90%，其排出的烟尘和有害气体也比火床炉少得多。燃煤锅炉的烟尘排放量为燃气锅炉的 500 倍，SO₂ 排放量为燃气锅炉的 4 000 倍，NO_x 排放量为燃气锅炉的 4 倍，CO₂ 排放量为燃气锅炉的 2 倍。为了改善环境，不少地方政府对燃用天然气寄予厚望，纷纷提出将大量燃煤工业锅炉改成燃气锅炉。但是，天然气存在气源不足和经济性较差的问题，燃气成本约为燃煤的 2 倍多。如果燃气供应充足，当地政府有能力给企业和居民适当的财政补贴，则将这种分散污染源且烟气净化力度不足的燃煤工业锅炉改为燃气锅炉，不失为一种节能减排的有效措施。

2.2 采用烟气洁净装置

近期，中国燃煤工业锅炉都加装了各种高效价廉的烟气洁净设备，以降低排烟中的烟尘量和气体污染物，使之达到规定的排烟标准。

3 燃用清洁煤以节能减排

燃煤锅炉燃用清洁煤可提高热效率，降低排烟中烟尘和有害气体排量。清洁煤有洗煤、配煤和型煤 3 种。原煤经洗选后可去除 50%~80% 灰分，

30%~40%硫分,因而燃用时可提高热效率,降低烟尘、 SO_x 和 NO_x 排量。配煤按煤颗粒度分为粉煤配煤和粒煤配煤。前者供煤粉炉燃用,后者供火床炉燃用。工业锅炉的火床炉燃用粒煤配煤时由于煤中不含粉煤且具有较稳定的热值等煤质指标,因而可节煤 10%以上,烟尘排量可减少 60%。型煤利用黏结剂将粉煤和低品位煤炭经机械加工而成,供工业锅炉或民用炉灶燃用,可提高锅炉热效率。

发展清洁煤技术是中国近期和将来发展燃煤锅炉和防治大气污染的重要措施,必将得到日益重视和发展推广。

4 中国燃煤电站锅炉节能减排技术与措施展望

4.1 发展高效率煤电机组

中国尚处于工业化阶段,随着经济技术持续发展、能源耗量的增加以及人民对空气质量改善要求的提高,必然对燃煤电站锅炉的高效清洁发电提出了更高的要求。因此,高效率、高参数超临界压力煤电机组,整体煤气化联合循环发电机组和煤炭多联产装备等将得到较快发展。

4.2 发展高效率排烟污染物治理设备

重点研发高性能电除尘技术,发展烟尘凝聚、超细粉尘捕集技术,开发新型脱硫、脱硝装置以及多污染物协同控制技术。

4.3 发展烟气中 CO_2 捕集和利用技术

燃煤锅炉排烟中含有大量 CO_2 气体,是大气中温室气体的一个重要来源。在现有排烟污染物限制标准中尚未列入对 CO_2 气体的限制值,但国内外已开展研发烟气中 CO_2 的捕集和利用技术。欧盟规定,到 2020 年新建燃煤电站锅炉必须加装 CO_2 捕集设备。

4.3.1 燃烧前捕集 CO_2 技术 发电方式采用整体煤气化联合循环发电机组,可应用燃烧前捕集 CO_2 技术。其可将气化炉中产生的合成煤气中的 CO ,通过加水的变换反应变为 H_2 ,然后将 CO_2 分离出来。若采用纯氧气化,合成气中主要为 CO_2 和 H_2 ,有利于 CO_2 分离减排,这种 CO_2 减排成本只有常规煤粉锅炉 CO_2 减排成本的 1/2。

4.3.2 烟气中 CO_2 的物理吸收捕集技术 利用溶剂甲醇、二甲醚、聚乙二醇或固体吸附剂沸石、活性炭等,对烟气中 CO_2 的溶解和吸附程度随压力而变化的原理,来捕集和排出 CO_2 ,这些溶剂或吸附剂都在压力高时吸收 CO_2 气体,再在压力低时使 CO_2 析

出并排出。这种方法吸附剂用量少,而 CO_2 捕集排除率高。

4.3.3 CO_2 的膜分离法 由于 CO_2 气体对高分子膜的渗透率高于混合气体中的 N_2 等气体,所以可在烟气流过膜后得到 CO_2 的分离与捕集。此法投资少、耗能低、占地小,但一般需经两级处理后才能达到所需 CO_2 的纯度。

4.3.4 采用富氧燃烧捕集 CO_2 采用纯氧燃烧,烟气中主要气体为 CO_2 和水蒸气,通过水蒸气冷凝便可分离出 CO_2 气体。

4.3.5 利用乙醇氨等溶剂的 CO_2 化学吸收法 烟气经脱硫、脱硝和除尘后进入吸收器,吸收 CO_2 后的溶剂入再生器并被加热到 $100\text{ }^\circ\text{C}\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 析出 CO_2 。析出的 CO_2 经冷凝器并用压缩机加压后送入储罐,再生后的溶剂可送入吸收器再利用。北京热电厂用此法已于 2008 年投入商业运行,年产纯度 99.99% 的液态 CO_2 3 000 t,可制成达国家食品级标准的干冰出售,总投资 2 300 万元,已有收益。

2009 年底上海石洞口电厂建成 $12\times 10^4\text{ t/a}$ 的烟气脱 CO_2 工程,该装置能耗低,达国际领先水平,为国际上最大燃煤电厂 CO_2 捕集工程。

4.3.6 利用氨水洗涤烟气的 CO_2 化学吸收法 用氨水洗涤烟气,可脱除烟中 CO_2 气体并生成以碳酸氢铵(NH_4HCO_3)为主的副产品,后者可用作农肥。此法经中南大学开发后,在 2010 年已由安徽理工大学在淮化集团中试用成功。中试设备可处理烟气 $1\text{ }000\text{ m}^3/\text{h}$,减排 CO_2 达 $110\text{ m}^3/\text{h}$, CO_2 脱除效率为 80%,可生产 NH_4HCO_3 农肥 270 kg/h 。

4.4 发展 CO_2 气体捕集扣的利用技术

CO_2 气体用途广泛,化学用途为与其他物质反应制取尿素、合成醇、合成酸等,物理用途为焊接保护、灭火、制干冰进行人工降雨等,生物用途为植物气肥和果蔬保鲜剂等。此外, CO_2 气体还可用作制冷剂和油田的驱油剂,其驱油成本较低,采油率较高,是一种较新的驱油方法。捕集到的 CO_2 气体还能用于养殖微藻来生产生物柴油和饲料。气体品质达国家食品标准的 CO_2 还可供广大食品工业应用。随着科技和经济的发展, CO_2 的应用面和利用技术一定会更加广泛和先进。

5 中国燃煤工业锅炉节能减排技术与措施展望

(1) 强制性淘汰效率低的蒸发量 10 t/h 以下的小型燃煤锅炉,发展区域性应用的高效清洁的大型

燃煤工业锅炉,或根据当地情况走清洁能源替代的道路。

(2)淘汰落后的除尘技术,采用静电和布袋除尘技术,采用干法和湿法脱硫技术和选择性非催化还原烟气脱硝技术。

(3)研发价廉、实用、高效的烟气多种污染物协同脱除技术。

6 结 论

(1)燃煤锅炉是中国温室气体 CO_2 和大气污染物的主要排放源,因此重点加强其节能减排措施对于中国实现 CO_2 减排的国际承诺和空气质量的改善具有重要的经济和社会意义。

(2)燃煤锅炉的持续发展与环境恶化互为矛盾。中国初步实现的煤电锅炉的超低排放研究成果成功地破解了这一矛盾,使煤电锅炉得以持续发展,中国主力一次能源煤炭得以持续地合理应用。今后,超低排放技术必将进一步深化研发,以期获得更高的排烟洁净度。

(3)燃煤锅炉节能减排的要点是提高机组效率和排烟的洁净化,因而各种增效技术和措施以及新型高效污染物协同控制的烟气洁净设备将得到重点研发和应用。

(4)排烟中的 CO_2 捕集和利用技术正在国内外重点研发,不久将在煤电锅炉上得到应用。其中,采用化学法捕集 CO_2 的技术已取得了一定的成效,但耗能、耗水仍较大,因而应重点研发耗水、耗能较小的价廉高效的 CO_2 捕集技术及 CO_2 利用技术。

(5)在政府的组织指导下进行的产学研协同创新科研已为燃煤锅炉节能减排取得了一系列重要成果,使中国 CO_2 减排和大气污染改善取得了预期进展。中国已经胜利完成了“十二五”规划的预定减排任务。按照目前的科技水平,到 2020 年中国对世界承诺的 CO_2 减排任务一定可以顺利完成。随着科技研发的创新深化,中国大气质量一定可以迅速得到逐年优化和改善。

参考文献:

- [1] 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) [R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2014.
- [2] 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: 1-396.

- [3] 陈吉宁. “十二五”生态环境保护成就报告 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.
- [4] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1-1293.
- [5] 王善武, 钱风华. 工业锅炉行业“十二五”回顾、“十三五”发展展望与建议 [J]. 工业锅炉, 2016(1): 1-15.

[本刊相关文献链接]

- 谢贝贝, 王文毓, 聂鑫, 等. 超临界循环流化床锅炉水冷壁并联双通道内流动不稳定性数值分析. 2016, 50(7): 45-50. [doi:10.7652/xjtuxb201607008]
- 郭宇朦, 李会雄, 张庆, 等. 倾斜上升光管上母线处超临界压力水传热关联式的建立. 2016, 50(1): 72-77. [doi:10.7652/xjtuxb201601012]
- 邱硕, 王雪强, 毕胜山, 等. 模型下的陕西省节能与温室气体减排潜力分析. 2016, 50(11): 28-35. [doi:10.7652/xjtuxb201611005]
- 李皓宇, 刘敬樟. 糠醛渣流化床燃烧过程中床料粘结机理研究. 2015, 49(6): 145-150. [doi:10.7652/xjtuxb201506023]
- 赖欢, 陈振华, 高荣, 等. 大型高速低温风洞冷量回收的方法研究. 2016, 50(6): 136-142. [doi:10.7652/xjtuxb201606021]
- 张向宇, 陆续, 高宁, 等. 烟气脱硝用尿素水解制氨工艺试验研究. 2016, 50(7): 39-44. [doi:10.7652/xjtuxb201607007]
- 刘香浪, 张英杰, 李云龙, 等. 面向低碳制造的切削液供给系统优化研究. 2016, 50(2): 91-97. [doi:10.7652/xjtuxb201602016]
- 沈艳荣, 杨冬, 王龙, 等. 600 MW 超临界 W 火焰锅炉流动不稳定性数值分析. 2015, 49(5): 68-72. [doi:10.7652/xjtuxb201505011]
- 朱晓静, 毕勤成. 垂直上升内螺纹管中高压汽-水两相流截面含汽率的测量. 2015, 49(3): 50-55. [doi:10.7652/xjtuxb201503009]
- 韩小渠, 严俊杰, 穆祺伟, 等. 褐煤烟气预干燥发电系统变工况特性的仿真研究. 2015, 49(1): 27-33. [doi:10.7652/xjtuxb201501005]
- 王玉珍, 王树众, 李艳辉, 等. 超临界 CO_2 萃取油泥砂中柴油的可行性及经济性分析. 2015, 49(5): 128-133. [doi:10.7652/xjtuxb201505020]
- 杨柳, 李旭祥. 大气降尘中重金属元素及铅同位素分析. 2014, 48(2): 118-124. [doi:10.7652/xjtuxb201402020]
- 李千军, 刘光耀, 韩伟, 等. 采用喷射式热泵提高火电机组给水温度的理论研究. 2013, 47(11): 25-28. [doi:10.7652/xjtuxb201311005]
- 阎维平, 马凯, 高正阳, 等. 增压富氧燃煤锅炉省煤器管束磨损研究. 2013, 47(3): 53-59. [doi:10.7652/xjtuxb201303010]
- 张冬青, 杨冬, 刘计武, 等. 超临界循环流化床下降水冷屏流量分配特性试验研究. 2012, 46(5): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201205006]

(编辑 苗凌)