

工业锅炉能效分析与节能降碳路径探讨

刘超¹ 李娟² 石腾达²

1. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 国家市场监管重点实验室(特种设备安全与节能), 中国特种设备检测研究院 北京 100029
2. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 国家市场监管技术创新中心(锅炉清洁低碳高效燃烧与安全评价), 中国特种设备检测研究院 北京 100029

摘要: 工业锅炉是工业生产核心热能设备, 在多领域广泛应用, 能耗占工业总能耗比重高, 是节能降碳关键。为响应双碳目标, 解决其能效低、能源浪费、碳排放过量问题, 本文系统梳理工业锅炉概况, 构建能效评估指标体系, 介绍评估方法与标准。结合实际调查分析现状与问题, 剖析四大关键影响因素。从技术创新、管理优化、政策支持三方面提出节能降碳路径, 为工业锅炉能效提升和碳排放减少提供支撑, 助力工业绿色低碳转型与双碳目标实现。

关键词: 工业锅炉; 能效分析; 节能降碳路径

引言: 我国双碳战略深入推进, 工业领域节能降碳任务艰巨。工业锅炉是工业生产不可或缺的热能供给设备, 运行能效影响企业能耗成本与碳排放。当前, 我国工业锅炉存在能效参差不齐、老旧设备多、节能技术应用不足、管理体系不完善等问题, 造成能源浪费与环境压力。虽已有相关研究, 但成果针对性不强、可行性不足。本文聚焦工业锅炉能效与节能降碳路径, 梳理理论现状、剖析因素、提出优化路径, 具重要理论与现实意义。

1 工业锅炉概述

工业锅炉是指为工业生产、生活提供热能或动力的锅炉设备, 额定工作压力一般不超过3.82MPa, 额定蒸发量不超过45.5t/h, 主要用于化工、冶金、建材、纺织、食品等多个工业领域, 是工业生产的“心脏”。工业锅炉按燃料类型可分为燃煤、燃油、燃气、生物质、电锅炉等, 其中燃煤锅炉曾应用最广泛, 近年来随着环保政策收紧, 燃气、生物质等清洁燃料锅炉推广力度不断加大。按燃烧方式可分为层燃、室燃、循环流化床锅炉, 不同类型锅炉在结构、运行方式、能效水平上存在明显差异。工业锅炉核心系统由燃烧系统、换热系统、控制系统、给水系统组成, 其工作原理是通过燃料燃烧释放热量, 传递给工质(水或蒸汽), 再通过工质输送满足工业生产的热力需求^[1]。

2 工业锅炉能效评估指标与方法

2.1 能效评估指标体系构建

工业锅炉能效评估指标体系以科学性、系统性、实用性为原则, 构建核心指标与辅助指标相结合的多层次体系, 全面反映锅炉运行能效水平。核心指标为锅炉热效率, 即锅炉有效利用热量与燃料输入热量的比值, 是

衡量锅炉能效的核心标准, 直接体现燃料能量的利用效率。辅助指标包括能耗指标、热损失指标、污染物排放指标, 其中能耗指标指单位产品或单位产能的燃料消耗量, 如吨蒸汽耗煤量、吨产品耗气量; 热损失指标包括排烟热损失、机械未完全燃烧热损失、化学未完全燃烧热损失、散热损失等, 是分析能效偏低原因的关键依据; 污染物排放指标包括CO₂、NO_x、SO₂排放量, 结合能效评估实现节能与降碳协同考量, 确保指标体系贴合双碳目标要求。

2.2 常用能效评估方法

工业锅炉常用能效评估方法主要有正平衡法、反平衡法两种, 两种方法互补使用, 适用于不同场景。正平衡法直接通过测量锅炉有效利用热量与燃料输入热量, 计算得出锅炉热效率, 操作简单、直观, 适用于锅炉稳态运行时的能效快速检测, 但其测量精度受燃料热值、工质参数测量准确性影响较大。反平衡法通过测量锅炉各项热损失, 利用热量平衡原理, 用1减去各项热损失占比得出热效率, 该方法能精准识别各项热损失的具体数值, 便于分析能效偏低的核心原因, 适用于锅炉能效深入分析与节能改造效果评估^[2]。另外, 还有对比分析法、核算分析法, 对比分析法通过同类型、同参数锅炉能效对比, 识别能效差距; 核算分析法基于锅炉长期运行数据, 实现能效常态化监测与评估。

2.3 能效评估标准的解读与应用

我国工业锅炉能效评估主要遵循《工业锅炉能效限定值及能效等级》(GB 24500-2020), 该标准明确了不同类型、不同参数工业锅炉的能效限定值、目标能效值及能效等级划分, 是工业锅炉能效评估、节能改造的核

心依据。标准将工业锅炉分为一级、二级、三级能效，一级能效为最高水平，能效值不低于目标能效值，三级能效为最低水平，能效值不得低于能效限定值，未达到限定值的锅炉需进行节能改造或淘汰。实际应用中，需结合锅炉类型、燃料种类、运行工况，严格按照标准开展能效测试与评估，确保评估结果科学准确，为能效提升与节能降碳提供可靠依据。

3 工业锅炉能效现状分析

3.1 工业锅炉能源消耗总体情况

当前，我国工业锅炉能源消耗总量较大，占工业总能耗的25%~30%，是工业领域主要用能设备之一。从燃料消耗结构来看，燃煤锅炉仍占据一定比例，但其消耗占比逐年下降，近年来随着清洁低碳转型推进，燃气、生物质、电锅炉等清洁燃料锅炉推广速度加快，燃料消耗结构不断优化。从行业分布来看，化工、冶金、建材等行业工业锅炉能源消耗占比最高，此类行业生产规模大、热力需求稳定，锅炉运行时间长，能源消耗总量突出。从能耗强度来看，我国工业锅炉平均能耗强度高于发达国家水平，单位蒸汽耗煤量、耗气量普遍偏高，能源浪费现象较为严重，主要原因是老旧锅炉占比高、节能技术应用不足、运行管理不规范等，节能降碳潜力巨大。

3.2 工业锅炉能效水平调查

结合国内多地工业锅炉能效调查数据，当前我国工业锅炉平均热效率约为82%~85%，相较于发达国家90%以上的平均水平，仍存在5~8个百分点的差距。从能效等级分布来看，三级能效锅炉占比约30%，二级能效锅炉占比约50%，一级能效锅炉占比仅约20%，高效节能锅炉应用比例偏低。从燃料类型来看，燃气锅炉平均热效率最高，约为88%~90%，生物质锅炉次之，燃煤锅炉平均热效率最低，约为78%~82%。从行业来看，食品、纺织等轻工业工业锅炉能效水平相对较高，化工、冶金等重工业因锅炉运行负荷波动大、工况复杂，能效水平相对偏低，不同行业、不同类型锅炉能效水平差异明显，整体能效提升空间广阔。

3.3 工业锅炉能效存在的问题

当前我国工业锅炉能效存在的问题较为突出，主要集中在四个方面。一是老旧设备存量较大，部分运行超过15年的老旧锅炉仍在运行，此类锅炉结构落后、热损失大，能效水平远低于现行标准，且维护成本高，难以实现高效运行。二是节能技术应用不足，余热回收、智能燃烧控制等先进节能技术普及率偏低，大量锅炉未配备完善的余热回收系统，排烟热损失、散热损失严重^[3]。三是运行工况不合理，部分企业锅炉运行负荷与额定负

荷匹配度不高，频繁出现低负荷、超负荷运行，导致燃烧效率下降，能效降低。四是能效监测体系不完善，部分企业未安装智能能效监测设备，无法实时掌握锅炉运行能效，难以开展针对性的能效优化工作。

4 影响工业锅炉能效的关键因素分析

4.1 燃料因素

燃料因素是影响工业锅炉能效的核心因素，直接决定燃烧效率与热量利用效率。燃料品质对能效影响最为明显，燃料发热量、灰分、水分、挥发分等指标均会影响燃烧效果，高热值、低灰分、低水分的燃料燃烧效率高，热损失小，能效水平高；反之，低热值、高灰分燃料燃烧不完全，机械未完全燃烧热损失、排烟热损失增大，能效降低。燃料预处理工艺也会影响能效，未经过破碎、筛分、干燥的燃料，粒径不均匀、水分含量高，燃烧时易出现结渣、积灰现象，影响传热效率，增加热损失。此外，燃料供给稳定性也会影响能效，燃料供给不均匀、配比不合理，会导致燃烧工况波动，降低燃烧效率与锅炉能效。

4.2 设备因素

设备因素是影响工业锅炉能效的基础因素，主要包括锅炉自身结构、设备老化程度、辅助设备性能三个方面。锅炉自身结构不合理，如炉膛结构设计缺陷、受热面布置不当，会导致燃料燃烧不充分、热量传递效率低，增加热损失；循环流化床锅炉、高效燃气锅炉等先进结构锅炉，能效水平明显高于传统层燃锅炉。设备老化会显著降低能效，锅炉受热面结垢、腐蚀，会减少传热面积、降低传热效率，排烟温度升高，排烟热损失增加；燃烧设备磨损、密封性能下降，会导致漏风、燃料泄漏，影响燃烧效率。辅助设备性能不佳，如风机、水泵运行效率低，会增加辅助能耗，间接降低锅炉整体能效。

4.3 运行管理因素

运行管理因素对工业锅炉能效的影响具有长期性、可控性，直接决定锅炉运行工况与能效水平。操作人员技能水平不足，对燃烧调整、参数控制不熟练，会导致燃料与空气配比不合理、运行参数偏离最佳范围，燃烧效率下降，能效降低；部分操作人员操作不规范，频繁启停锅炉、随意调整负荷，也会增加能源浪费。运行管理制度不完善，缺乏完善的能效监测、考核、激励机制，企业对锅炉能效提升重视不足，未定期开展能效检测与节能优化工作。

4.4 环境因素

环境因素虽对工业锅炉能效影响相对间接，但仍不可忽视，主要包括环境温度、空气质量、场地条件三个

方面。环境温度过低,会增加锅炉散热损失,尤其是冬季,锅炉炉膛、管道散热加快,有效利用热量减少,能效降低;环境温度过高,会影响锅炉冷却系统运行,导致排烟温度升高,排烟热损失增加。空气质量较差,空气中粉尘、颗粒物较多,会加速锅炉受热面积灰、腐蚀,降低传热效率,增加热损失;空气中湿度较大,会导致燃料受潮,燃烧效率下降,同时加速设备腐蚀老化。场地条件受限,锅炉安装空间不足、通风不畅,会影响燃烧工况与烟气排放,导致燃烧不完全、排烟阻力增大,间接降低锅炉能效^[4]。

5 工业锅炉节能降碳路径探讨

5.1 技术创新路径

技术创新是工业锅炉节能降碳的核心支撑,重点从锅炉改造、节能技术应用、清洁能源替代三个方面推进。一是老旧锅炉节能改造,对未达到能效限定值的老旧锅炉,开展受热面改造、燃烧系统改造、密封性能改造,减少热损失,提升燃烧效率;推广高效节能锅炉替代老旧设备,如高效燃气锅炉、循环流化床锅炉,从源头提升能效。二是推广先进节能技术,普及烟气余热回收、冷凝水回收利用技术,降低排烟热损失与水资源浪费;应用智能燃烧控制技术,实现燃料与空气精准配比、运行参数实时优化,提升燃烧效率。三是推进清洁能源替代,逐步减少燃煤锅炉使用,推广燃气、生物质、太阳能等清洁燃料锅炉,降低碳排放与污染物排放,实现节能与降碳协同。

5.2 管理优化路径

管理优化是工业锅炉节能降碳的重要保障,完善运行管理制度,建立健全锅炉能效监测、考核、激励机制,将能效指标纳入企业绩效考核,推动企业重视节能降碳工作;制定规范的操作流程,明确燃烧调整、参数控制、设备维护等操作标准。提升操作人员技能水平,定期开展专业培训,重点培训燃烧优化、参数控制、设备维护等技能,规范操作行为,减少人为因素导致的能源浪费。强化能效常态化监测,为锅炉安装智能能效监测设备,实

时采集运行参数、能效数据,精准识别能效偏低原因,开展针对性地优化调整,实现能效动态提升。

5.3 政策支持路径

政策支持是工业锅炉节能降碳的重要推动力量,通过完善相关标准体系,修订完善工业锅炉能效标准、节能改造标准,提高能效限定值,扩大高效节能锅炉推广范围;强化标准执行,加大对未达标锅炉的整治力度,推动老旧锅炉淘汰。加大政策扶持力度,出台节能改造补贴、高效锅炉购置补贴等政策,降低企业节能改造与设备更新成本;设立节能降碳专项资金,支持节能技术研发与成果转化。加强宣传引导与监管,普及工业锅炉节能降碳知识,提升企业绿色发展意识;加强日常监管,定期开展工业锅炉能效检测,严厉打击能效造假、违规运行等行为,推动节能降碳政策落地见效。

结束语

工业锅炉作为工业领域核心用能设备,其能效水平直接关系到能源利用效率、企业生产成本与双碳目标实现。本文通过系统分析工业锅炉概述、能效评估指标与方法、能效现状,明确当前我国工业锅炉能效存在的差距与问题,深入剖析燃料、设备、运行管理、环境四大关键影响因素,从技术创新、管理优化、政策支持三个维度,提出切实可行的节能降碳路径。未来可聚焦重点行业,开展针对性研究,优化完善节能降碳路径,推动工业锅炉行业绿色低碳转型,为工业领域实现碳达峰、碳中和目标提供有力支撑。

参考文献

- [1]叶旭放,陈志刚,许崇涛,等.工业锅炉能效分析与节能降碳路径探讨[J].节能技术,2025,43(5):449-453.
- [2]郎冬余,包钢,林贺勇,等.基于焓、火用分析的工业锅炉能效软件开发[J].工业锅炉,2025(2):10-16.
- [3]徐超,陈雷,范翔宇,等.工业锅炉能效测试与节能策略分析[J].资源节约与环保,2025(6):13-16.
- [4]王川岁.工业锅炉能效检验检测方法优化研究[J].塑料包装,2025,35(4):215-217,67.