

工业锅炉能效提升与节能改造技术分析

张凯鑫

新疆昆仑工程咨询管理集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 文章聚焦工业锅炉能效提升与节能改造技术。阐述了工业锅炉分类、工作原理、能源消耗特点及我国能效现状,分析锅炉本体、燃烧设备、运行管理和燃料等因素对能效的影响。随后介绍燃烧优化、余热回收利用等关键技术,并展望高效低氮燃烧技术融合、新能源耦合等未来趋势,为工业锅炉节能降耗与绿色发展提供参考。

关键词: 工业锅炉;能效提升;节能改造技术

引言:工业锅炉作为工业生产的关键能源转换设备,广泛应用于多领域,但能耗大、能效低等问题突出。我国工业锅炉年耗能巨大,碳排放占比高,且整体能效与国际先进水平有差距,区域间能效不均,老旧低效锅炉仍大量存在。在此背景下,深入分析工业锅炉能效影响因素,探索有效的能效提升与节能改造技术,具有重要的现实意义和紧迫性。

1 工业锅炉概述与能效现状分析

1.1 工业锅炉的分类与工作原理

工业锅炉是工业生产中不可或缺的能源转换设备,广泛应用于化工、发电、制造业、集中供暖等多个领域,核心功能是将燃料的化学能转化为热能,为生产生活提供蒸汽或热水。其分类方式多样,按燃料类型可分为燃煤、燃油、燃气及生物质锅炉,其中燃煤锅炉占我国工业锅炉总量的80%以上;按容量可分为小型($\leq 20\text{t/h}$)、中型($20\text{--}75\text{t/h}$)和大型($> 75\text{t/h}$),我国98.9%的工业锅炉容量小于 35t/h ,平均容量不足 3t/h ;按燃烧方式可分为层燃、室燃和循环流化床锅炉。工作原理核心是燃料在炉膛内充分燃烧,释放的热量传递给锅筒内的水,使水加热成蒸汽或热水,再通过管道输送至用能设备,完成能量转换^[1]。整个过程需经过燃料供给、燃烧、传热、排烟四个关键环节,各环节的协同运行直接决定锅炉的运行效率和稳定性。

1.2 工业锅炉能源消耗特点

工业锅炉能源消耗具有总量大、品种集中、损耗偏高、负荷波动大等显著特点。从消耗总量来看,我国工业锅炉年消耗能源约20亿吨标准煤,占全国碳排放总量约40%,是主要的高耗能设备之一。燃料消耗以煤炭为主,辅以天然气、燃油和生物质,其中原煤因价格低廉、供应充足,成为多数中小型锅炉的首选燃料,但未经过洗选加工的原煤也加剧了能耗浪费。能耗损耗主要集中在排烟、不完全燃烧和散热三个方面,传统锅炉排烟温

度偏高,余热浪费严重,不完全燃烧损失可达3%以上,低负荷运行时散热损失更是翻倍。工业锅炉运行负荷波动较大,多数锅炉平均运行负荷仅为额定负荷的50%左右,“大马拉小车”现象普遍,导致辅机能耗增加,进一步降低了能源利用效率,同时不同行业、不同季节的用能需求差异也使得能耗分布呈现明显不均衡性。

1.3 我国工业锅炉能效现状

当前我国工业锅炉能效整体呈现“稳步提升、区域不均、差距明显”的发展现状。近年来,随着节能政策推进和技术升级,我国工业锅炉能效水平逐步提高,但与国际先进水平仍有5-8个百分点的差距。截至2021年底,我国各类锅炉保有量约35万台,其中高效节能锅炉占比逐步提升,但仍有大量老旧低效锅炉在运行,部分锅炉运行效率低于能效限定值。从区域分布来看,东部沿海地区因产业升级较快,高效锅炉普及率较高,能效水平相对领先;而中西部地区和乡镇企业仍大量使用老旧燃煤锅炉,能效偏低且污染严重。工业锅炉能效提升还面临设备改造资金不足、运维技术落后、燃料质量不稳定等问题,据测算,若全面推进节能改造,我国工业锅炉年节能量可达3000万吨标准煤,节能降碳潜力巨大。

2 工业锅炉能效影响因素分析

2.1 锅炉本体因素

锅炉本体是影响能效的核心载体,其设计、材质和结构直接决定能量转换效率。首先,本体设计合理性至关重要,炉膛容积、受热面布置、烟气流道设计等若不符合规范,会导致燃料燃烧不充分、热量传递受阻。其次,制造材质的性能影响能效和设备寿命,传统锅炉多采用普通碳钢,耐热、耐腐蚀性能较差,易出现结垢、腐蚀现象,每增加1mm水垢,将多耗煤3%~4%;而采用耐高温、耐腐蚀的合金材料或复合涂层,可减少热损失,延长设备使用寿命。锅炉密封性能不佳会导致漏风,过量空气系数过高,造成热量流失,部分锅炉过量空气系数

甚至高达5以上,严重影响能效^[2]。

2.2 燃烧设备因素

燃烧设备是燃料充分燃烧的关键,其性能缺陷和配置不合理会直接影响锅炉能效。我国燃煤工业锅炉的燃烧设备普遍存在较多缺陷,机械炉排常出现漏煤量偏大、侧密封不严、运行跑偏、受热变形断裂等问题,导致灰渣含碳量增加,不完全燃烧损失加剧。配风装置设计不合理也是重要影响因素,部分调风门不严密、调节不灵活,炉排风室间密封不佳,各风室互相串风,无法实现火床各燃烧区段的合理布风,导致燃料燃烧不均衡。燃烧器性能也直接决定燃烧效率,老旧燃烧器雾化效果差、火焰分布不均,易出现火焰偏烧现象,而高效燃烧器可实现燃料与空气的精准混合,提升燃烧充分性。燃烧设备与锅炉本体、燃料类型的匹配度不足,例如层燃锅炉对煤种适应性较差,当燃用煤种与设计煤种不符时,燃烧效率会显著下降。

2.3 运行管理因素

运行管理水平是影响工业锅炉能效的人为因素,直接决定设备能否长期处于最佳运行状态。当前我国工业锅炉运行管理存在诸多不足,部分企业缺乏专业运维团队,司炉人员技术素质普遍偏低,对锅炉基础知识、操作规范和维护保养知识了解不全面,难以根据工况变化进行精准调节。运行监测仪表不全或失灵也是常见问题,许多锅炉缺少流量表、氧量表、煤量表等关键仪表,无法准确测定蒸汽流量、燃煤量、过量空气系数等经济运行参数,导致运行人员无法及时判断锅炉运行状态。另外,运维制度不完善,缺乏定期维护保养和能效检测,锅炉结垢、积灰、漏风等问题无法及时处理,长期积累会显著降低能效;同时,不合理的运行操作,如空燃比调节不当、负荷控制不合理,也会造成大量能源浪费,部分企业因操作不当导致的能耗浪费可达10%-15%。

2.4 燃料因素

燃料的种类、质量和适配性是影响工业锅炉能效的重要物质基础,直接决定燃烧效率和热量利用率。我国工业锅炉燃料以原煤为主,且多为未经过洗选加工的原煤,颗粒度不均匀,细末含量高达45%-65%,块粒含量仅15%-30%,且煤种经常变化,不同煤种的热值、灰分、水分差异较大,导致锅炉燃烧工况不稳定。燃料质量不佳,如灰分过高、热值偏低,会增加不完全燃烧损失和排渣热损失,同时加剧受热面结垢和磨损;水分过高会降低燃料热值,增加燃烧所需的热量消耗,影响燃烧温度和效率。燃料与锅炉燃烧方式的适配性不足,例如循环流化床锅炉适合燃用劣质煤,若使用优质煤会造成能

源浪费,而层燃锅炉对煤种适应性较差,煤种变化会导致燃烧效率大幅下降,进一步影响锅炉整体能效。

3 工业锅炉能效提升关键技术

3.1 燃烧优化技术

燃烧优化技术是提升工业锅炉能效的核心技术之一,核心是通过精准调控燃烧过程,实现燃料充分燃烧、减少能源浪费,同时降低污染物排放。该技术主要包括空燃比自适应调节、负荷匹配调控和燃烧参数优化三个方面。空燃比自适应调节通过监测烟气 O_2 浓度,实时计算最优空燃比,自动控制风机转速与给料机频率,确保燃料充分燃烧,可将不完全燃烧损失降低至3%以下^[3]。负荷匹配调控可根据锅炉出力需求变化,自动调整给料量和风机风量,避免“大马拉小车”式能耗浪费,某化工企业20吨燃煤锅炉应用后,节能率达13.9%。通过优化炉膛温度、燃烧时间等参数,采用分级燃烧、低氮燃烧等方式,可在提升燃烧效率的同时,减少 NO_x 等污染物生成,实现节能与环保的协同提升,该技术适配各类燃料锅炉,改造投入低、回收周期短,是当前应用最广泛的能效提升技术之一。

3.2 余热回收利用技术

余热回收利用技术是减少能源浪费、提升锅炉能效的关键手段,核心是将锅炉排烟、排渣等过程中流失的余热进行回收再利用,遵循“分级回收、梯级利用”的原则。根据余热温度可分为高温、中低温和低温余热回收三类,高温烟气($> 300^{\circ}C$)可通过余热锅炉与空气预热器串联回收显热,提升系统效率3%-8%;中低温烟气($100-300^{\circ}C$)可采用省煤器、烟气换热器回收热量,降低排烟温度 $30-60^{\circ}C$,提升锅炉热效率2%-4%;低温烟气($< 100^{\circ}C$)可通过冷凝式回收装置,回收显热与潜热,使天然气锅炉效率超95%。此外,排渣余热可通过冷渣器回收,用于预热助燃空气或加热给水,进一步提升能源利用率。该技术可使锅炉热效率从70%-80%提升至90%以上,燃料消耗降低5%-10%,投资回收期通常为1.5-2年,应用前景广阔。

3.3 锅炉本体改造技术

锅炉本体改造技术主要针对老旧锅炉的结构缺陷,通过优化本体设计、更换优质材料、完善密封保温等方式,提升能量转换效率,延长设备使用寿命。核心改造内容包括受热面改造、密封性能改造和保温性能改造三个方面。受热面改造通过增加受热面面积、优化受热面布置,提升传热效率,可采用鳍片管、波纹管等高效传热元件,减少热量损失;密封性能改造通过更换密封件、修复炉排间隙等,降低漏风率,控制过量空气系数在合

理范围,减少热量流失。保温性能改造采用高效保温材料,包裹锅筒、炉膛和烟道,降低散热损失,尤其适用于老旧锅炉的节能升级。另外,对于低效落后锅炉,可通过改造炉膛结构、更换燃烧系统等,使其达到能效标准,相比新建锅炉,本体改造投资成本低、见效快,是存量锅炉能效提升的重要途径,可使老旧锅炉能效提升5-10个百分点。

3.4 智能控制技术

智能控制技术是依托物联网、人工智能、大数据分析等技术,对锅炉燃烧全流程进行动态感知、精准调控的一体化技术,可打破传统人工经验调节的局限性,实现锅炉高效、安全、稳定运行。该技术核心包括多维度监测、AI动态优化和远程运维管理三个模块。多维度监测通过火焰图像传感器、炉压传感器、CO传感器等,实时监测锅炉运行参数,及时发现火焰偏烧、炉管结焦等问题,触发分级预警并自动处置。AI动态优化可根据燃料热值波动、负荷变化,自动调整燃烧参数,适配不同工况,比传统控制方式适配性提升50%。远程运维管理支持通过手机APP查看运行状态、远程调控设备,减少人工值守,1人可管理5-8台锅炉,大幅降低运维成本。应用该技术后,锅炉故障发生率可降低75%,运维人员工作量减少60%,同时实现能耗可视化、可追溯,为能效优化提供数据支撑。

4 未来技术发展趋势

4.1 高效低氮燃烧技术的深度融合

未来,高效低氮燃烧技术将向多技术深度融合、全工况适配的方向发展,实现节能与环保的协同升级,满足“双碳”目标和超低排放要求。一方面,高效燃烧技术与低氮燃烧技术将深度融合,通过优化燃烧器结构、改进配风方式,采用分级燃烧、富氧燃烧等技术,在提升燃料燃烧效率的同时,从源头减少NO_x生成,将排放浓度稳定控制在80-120mg/m³,无需额外增加末端脱硝设备,降低环保投入。另一方面,将结合智能控制技术,实现燃烧参数的实时动态优化,适配不同燃料、不同负荷工况,解决传统燃烧技术适配性差的问题^[4]。此外,将加强高温材料、高效燃烧器等核心部件的研发,突破高参数燃烧技

术瓶颈,推动高效低氮燃烧技术在大型工业锅炉、循环流化床锅炉中的广泛应用,同时结合碳捕集利用技术,实现燃烧过程的低碳化,进一步提升锅炉能效和环保性能。

4.2 新能源与工业锅炉的耦合

新能源与工业锅炉的耦合是未来工业锅炉绿色低碳发展的核心趋势,核心是将太阳能、风能、生物质能、氢能等新能源与传统工业锅炉系统相结合,优化能源结构,减少化石燃料消耗,降低碳排放。生物质能与工业锅炉的耦合将逐步普及,通过将生物质燃料与煤炭、天然气混合燃烧,或改造锅炉适配纯生物质燃烧,实现可再生能源的高效利用。未来将推动太阳能、风能与锅炉系统的协同运行,利用太阳能预热给水、风能驱动辅机,降低电网供电依赖,结合储能技术,解决新能源波动性问题,实现能源的稳定供给。氢能、低纯度生物天然气等新型新能源与锅炉的耦合技术将逐步研发应用,推动锅炉系统向“化石能源+新能源”的混合供能模式转型,同时结合数字孪生技术,优化耦合系统运行参数,实现能效最大化,助力工业领域实现碳达峰、碳中和目标。

结束语

工业锅炉能效提升与节能改造意义重大,关乎能源节约与环境保护。通过分析能效影响因素,采用燃烧优化、余热回收利用等关键技术,可有效提升锅炉能效。未来,高效低氮燃烧技术的深度融合以及新能源与工业锅炉的耦合,将为工业锅炉绿色低碳发展开辟新路径。持续推进相关技术研究与应用,是实现工业领域可持续发展的必然选择。

参考文献

- [1]李春春.锅炉系统的节能改造与效益分析[J].资源节约与环保,2025(2):1-4,9.
- [2]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.
- [3]王炳力,于在海,邢晋,等."双碳"战略下热电锅炉能效评价与碳减排研究进展[J].工业锅炉,2023(3):1-8.
- [4]孙建军.工业锅炉烟气余热回收系统能效提升分析[J].中国新技术新产品,2025(23):76-78.