

火力发电中烟气余热利用技术研究

张旺世 石彪 何金海 王浩
华能平凉发电有限责任公司 甘肃 平凉 744000

摘要: 火力发电过程中,大量高温烟气携带的余热被直接排放,造成能源浪费与环境负担。烟气余热利用技术通过回收余热,可显著提升能源利用效率、降低碳排放。余热锅炉、热管换热器等传统技术已广泛应用,热泵等新兴技术也不断突破。当前,多技术耦合、智能化调控成为发展主流,新型材料应用与新能源协同为余热利用开辟新路径。深入研究这些技术,对推动火力发电行业绿色低碳转型意义重大。

关键词: 火力发电; 烟气余热利用; 技术

引言

在“双碳”目标驱动下,火力发电行业面临着能源高效利用与节能减排的双重挑战。烟气作为燃煤发电的主要副产物,蕴含着可观的余热资源,其直接排放不仅造成能源损失,还加剧了温室效应与大气污染。如何高效回收利用烟气余热,成为提升火电系统能效的关键。本文聚焦余热锅炉、热管换热器等典型余热利用技术,分析其应用现状与原理,探讨未来技术发展趋势,以期为火力发电行业绿色发展提供理论参考与技术支撑。

1 火力发电中烟气余热利用的重要性

火力发电作为能源供应的重要支柱,在燃烧化石燃料产生电能的过程中,排放的高温烟气蕴含着大量余热资源。这些余热若直接排放至大气,不仅造成能源的极大浪费,还会使周边环境温度升高,加剧热岛效应。高效利用烟气余热,能够显著提升火力发电系统的整体能源利用率,让原本被浪费的能量重新投入到生产流程中,实现能源的梯级利用。从热力学角度来看,火力发电装置的效率受制于卡诺循环的理论限制,而烟气余热的回收利用可有效降低系统的冷源损失。通过在烟道中布置余热回收装置,如余热锅炉、换热器等设备,将高温烟气的热量传递给需要加热的介质,这些介质可以是水、空气或其他工质。被加热后的水可用于产生蒸汽,驱动汽轮机发电,增加额外的电能产出;被预热的空气送入锅炉参与燃烧过程,能够提高燃料的燃烧效率,减少燃料消耗。这种对烟气余热的深度挖掘,使得火力发电系统从单纯的能量转换,转变为更高效能量综合利用体系。在工业实践中,烟气余热利用技术的应用还能带来显著的经济效益和环境效益。减少燃料的消耗意味着降低了发电成本,提高了企业的市场竞争力;减少了因燃料燃烧不充分产生的污染物排放,减轻了对大气环境的污染。对烟气余热的有效利用,能够降低设备因长

期处于高温环境下运行所承受的热应力,延长设备使用寿命,减少设备维护成本和停机检修时间,进一步保障火力发电系统的稳定、高效运行。火力发电中烟气余热利用是提升能源利用效率、降低生产成本、实现绿色可持续发展的关键环节,对火力发电行业的技术革新与长远发展具有深远意义。

2 火力发电中烟气余热利用技术分析

2.1 余热锅炉技术

余热锅炉作为火力发电烟气余热利用的核心设备,通过特殊设计的受热面结构,将高温烟气的热量传递给工质,实现热能向蒸汽动能的转化。其内部布置的过热器、蒸发器和省煤器等组件,依据烟气温度梯度进行科学配置,使烟气在流动过程中依次与不同功能的受热面接触,最大限度回收热量。当温度可达300-500℃的烟气进入余热锅炉后,先将热量传递给过热器中的蒸汽,使其达到所需的过热温度,随后热量继续传递给蒸发器产生饱和蒸汽,最后在省煤器中预热给水,降低排烟温度。该技术的显著特点在于其高效的热量回收能力和稳定的蒸汽输出性能。通过合理优化受热面的材质、管径及布置方式,可使余热锅炉的热效率达到85%以上,产生的蒸汽压力和温度能够满足多种工业用汽需求,如驱动汽轮机发电、为工业生产提供热源等。在大型火力发电企业中,余热锅炉的应用可使机组热效率提升3-5个百分点,每年减少标准煤消耗数万吨。余热锅炉也面临着高温烟气腐蚀、积灰结渣等问题,需采用特殊的耐腐蚀材料和高效的清灰装置,并定期进行维护检修,以确保设备长期稳定运行^[1]。

2.2 热管换热器技术

热管换热器基于相变传热原理,利用密封管内的工质在蒸发段吸收烟气热量汽化,在冷凝段释放热量液化,通过工质的循环流动实现热量的高效传递。其独特

的结构设计使热管具有极高的导热性能,导热系数可达金属的数百倍甚至上千倍。在烟气余热回收应用中,热管换热器可将温度为150-300℃的烟气热量传递给另一侧的空气或水等介质,实现烟气的降温与介质的升温。该技术的优势在于其紧凑的结构、高效的传热性能以及良好的等温性。热管换热器的体积小、重量轻,安装灵活,可根据现场空间进行定制化设计。其传热效率比传统换热器提高30%-50%,能有效降低烟气温度,提高能源回收利用率。热管的等温特性可使换热器两侧的温差保持在较低水平,减少不可逆的热损失。热管内部为真空密封结构,工质与外界隔离,减少了腐蚀和泄漏风险。在实际应用中,热管的使用寿命受工作温度、工质性质等因素影响较大,且一旦热管出现故障,更换和维修难度较高。

2.3 低温省煤器技术

低温省煤器主要用于回收火力发电中烟气尾部的低温余热,通常布置在空气预热器之后、除尘器之前,利用烟气余热加热凝结水或其他低温介质。当温度在120-180℃的烟气通过低温省煤器时,将热量传递给管内的凝结水,使凝结水温度升高,从而减少汽轮机抽汽量,提高机组的发电效率。该技术通过精确控制烟气与工质的流量和温度,实现余热的深度回收。低温省煤器采用高效的传热管型和合理的管束布置,增强了传热效果,降低了烟气阻力。在实际运行中,低温省煤器可使排烟温度降低20-30℃,机组热效率提高0.5-1.5个百分点。低温省煤器还能有效减轻后续脱硫设备的负荷,降低脱硫系统的运行成本。然而,低温省煤器面临着低温腐蚀和积灰堵塞的问题,尤其是在处理含硫量较高的烟气时,酸性气体在低温表面凝结会加剧金属的腐蚀。需要采用耐腐蚀材料来抵御侵蚀,优化运行参数,如控制烟气温度高于酸露点,以延长设备使用寿命^[2]。

2.4 热泵技术

热泵技术通过消耗少量高品位能源(如电能、机械能),将低温烟气中的热量提升至较高温度,实现余热的有效利用。在火力发电烟气余热回收中,常见的有吸收式热泵和压缩式热泵。吸收式热泵利用溶液的吸收和解吸过程,以蒸汽或高温热水为驱动热源,将低温烟气热量传递给高温热水;压缩式热泵则通过压缩机对工质进行压缩、冷凝、节流和蒸发等循环过程,实现热量从低温烟气向高温介质的转移。该技术的突出优势在于其较高的能量提升效率和灵活的应用方式。热泵技术能够将烟气中原本难以利用的低温余热转化为可用于供暖、热水供应等领域的高品质热能,能源利用系数(COP)

可达3-5。在冬季供暖季节,可利用热泵回收的烟气余热为城市供热系统提供热源,替代部分燃煤锅炉,减少污染物排放。热泵系统可根据实际需求进行调节,实现余热回收与供热的精准匹配。热泵技术也存在设备投资成本较高、系统复杂、维护要求较高等问题,且热泵的性能受环境温度和烟气参数波动影响较大,需要配备完善的控制系统来保证稳定运行。

3 火力发电中烟气余热利用技术的发展趋势

3.1 多技术耦合集成化

(1)火力发电烟气余热利用过程中,多技术耦合集成化旨在突破单一技术的局限性,通过将多种余热回收与利用技术有机结合,实现系统性能全面提升。例如,将传统的余热锅炉技术与吸收式热泵技术相结合,余热锅炉先将烟气余热转化为蒸汽,蒸汽驱动吸收式热泵进一步提升热量品位,不仅提高了热量回收效率,还能满足不同用户对热量品质的需求,可同时为工业生产提供高温蒸汽和为区域供热提供低温热水。(2)在实际工程应用中,多技术耦合集成还体现在与其他工艺流程的融合。将烟气余热利用系统与脱硫脱硝工艺集成,利用余热对脱硫脱硝后的烟气进行再热,避免烟气温度过低导致的设备腐蚀和白烟问题,同时降低了额外的加热能耗,实现了能源的梯级利用和环保效益的协同提升。这种集成模式优化了整个火力发电系统的运行流程,减少了设备占地面积和投资成本。(3)随着对能源高效利用要求的不断提高,多技术耦合集成的复杂程度也在不断增加。未来的集成系统将朝着更加精细化、协同化的方向发展,通过对不同技术的参数优化和运行匹配,构建高度耦合的余热利用体系,实现对烟气余热资源的深度挖掘与最大化利用,提升火力发电企业的能源综合利用效率和市场竞争力。

3.2 智能化与精准调控

(1)智能化与精准调控技术在火力发电烟气余热利用中的应用,依托先进的传感器技术、大数据分析和人工智能算法,实现对余热利用系统的实时监测与优化控制。通过在余热回收设备、管网和用户端部署大量传感器,可实时采集温度、压力、流量等关键参数,这些数据经过边缘计算和云端分析,能够快速准确地反映系统运行状态和余热资源的变化情况。(2)基于数据分析结果,人工智能算法可构建系统运行的数学模型,预测不同工况下余热利用系统的性能表现,并自动生成最优的调控策略。当烟气流量和温度发生波动时,智能控制系统能够迅速调整余热回收设备的运行参数,如调节换热器的换热面积、控制热泵的功率输出等,确保余热利用

系统始终处于高效运行状态,避免因参数不合理导致的能源浪费和设备损耗。(3)智能化与精准调控还体现在对用户侧需求的响应上。通过对用户用热规律的分析 and 预测,余热利用系统能够提前调整运行模式,精准匹配用户的热量需求。在夜间工业生产负荷降低或居民供热需求减少时,系统可自动降低余热回收和供应强度,实现能源的按需分配和高效利用,同时降低系统的运行成本和能耗水平^[3]。

3.3 新型材料与结构创新

(1)新型材料的研发与应用为火力发电烟气余热利用技术带来了新的突破。高性能的换热材料能够显著提高换热器的传热效率,降低热阻。如纳米涂层材料可应用于换热器表面,减少污垢沉积,提高表面光洁度,降低热阻,增强传热性能;新型陶瓷基复合材料具有耐高温、耐腐蚀的特性,适用于高温高腐蚀的烟气环境,延长了设备的使用寿命,提高了系统运行的稳定性和可靠性。(2)在结构创新方面,通过优化余热回收设备的内部结构,可进一步提升其性能。采用螺旋通道、多孔介质等新型结构设计,能够增加流体的湍流程度,强化传热效果,同时减小设备的体积和重量。例如,螺旋折流板换热器相比传统的弓形折流板换热器,减少了流动阻力,提高了传热系数,在相同的换热需求下,可降低设备的投资成本和运行能耗。(3)随着材料科学和制造工艺的不断进步,未来新型材料与结构创新将朝着更加复合化、功能化的方向发展。开发兼具高传热性能、耐腐蚀、抗磨损等多种功能的复合材料,设计更加紧凑高效、适应复杂工况的设备结构,以满足火力发电烟气余热利用在不同场景下的应用需求,推动余热利用技术向更高水平发展。

3.4 与新能源协同发展

(1)在能源结构转型的大背景下,火力发电烟气余热利用与新能源协同发展成为必然趋势。将余热利用系统与太阳能、风能等可再生能源发电系统相结合,可有效弥补新能源发电的间歇性和波动性问题。在太阳能

光照不足或风力较弱时,利用火力发电的烟气余热进行发电或供热,保障能源的稳定供应;在新能源发电充足时,余热利用系统可作为辅助能源,满足高峰负荷需求,提高整个能源系统的稳定性和可靠性。(2)从能源存储角度来看,烟气余热与储能技术的协同也具有重要意义。通过将余热转化为电能或化学能进行存储,如利用余热驱动的可逆固体氧化物电池实现电能-化学能的双向转化,可将暂时无法利用的余热储存起来,在需要时释放,提高能源的利用效率和灵活性。这种协同模式有助于实现能源的跨时段、跨季节调配,优化能源资源的配置。(3)火力发电烟气余热利用与新能源的协同发展还体现在能源综合利用的产业链延伸上。构建以火力发电为基础,余热利用与新能源发电、储能、综合能源服务相结合的综合能源体系,可实现多种能源形式的互补互济和协同优化运行,推动能源生产和消费向清洁低碳、安全高效的方向转型,助力实现“双碳”目标,促进能源行业的可持续发展^[4]。

结语

综上所述,烟气余热利用技术在火力发电领域已取得显著成效,多种技术协同应用大幅提升了能源回收效率。面对能源结构转型与环保要求升级,仍需进一步推动技术创新与集成优化。未来,多技术耦合、智能化精准调控将成为发展重点,新型材料与新能源协同应用也将为余热利用带来新突破。持续深化相关研究,对实现火电行业可持续发展具有深远意义。

参考文献

- [1]赵麟.分析火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术[J].中国设备工程,2023(5):108-110.
- [2]赵冠雄.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术研究[J].现代工业经济和信息化,2022,12(7):252-253,335.
- [3]席丝笛.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术分析[J].科海故事博览,2024(32):46-48.
- [4]高嘉文.分析火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术[J].电脑校园,2021(10):1411-1413.