

余热回收在工业能源管理中的应用研究

刘伟杰

(山东历控能源有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 提高余热回收利用水平对于推动工业节能减排、实现“双碳”目标意义重大。本文以工业余热回收关键技术作为切入点,深入剖析不同温度级别和能量形态的余热资源特性,系统研究余热锅炉、热管换热器、热泵系统、有机朗肯循环及吸收式制冷等技术的原理与应用方法。通过具体的实践案例,详细探讨余热回收在工业能源管理中的具体应用效果,旨在为工业企业提升能源管理水平、实现余热资源高效利用提供参考。

关键词 工业余热; 能源管理; 热能回收

中图分类号:X7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.024

0 引言

工业余热回收利用在节能减排领域发挥着关键作用。随着我国工业化进程的持续推进，工业生产过程中产生的余热资源数量巨大，这些余热以烟气、冷却水、废气等多种形式存在，若得不到有效利用将造成严重的能源浪费。有效回收工业余热既能显著降低企业能源消耗成本，又能减少温室气体排放，还可改善区域环境质量。在我国“双碳”目标的大背景下，余热回收利用成为实现节能降耗的重要技术路径。推进余热回收技术创新与应用，对促进工业绿色转型、构建现代能源体系有着重大的战略价值。

1 工业余热资源利用现状

我国各工业领域广泛存在工业余热资源, 2020 年我国可回收余热资源总量达 13 亿吨标准煤, 预计 2026 年升至 14.55 亿吨标准煤。国内目前工业余热资源回收利用率仅 33.5%, 和发达国家相比差距明显。不同行业余热利用技术发展程度不同, 钢铁行业烧结余热发电技术相对成熟, 利用率达 30% ~ 50%, 水泥行业低温余热发电技术国产化程度较高, 新型干法水泥生产线余热发电规模持续扩大, 化工行业因工艺复杂程度高, 主要采用热泵和热交换器进行余热回收, 整体利用效

率不高,焦化、造纸等行业余热回收尚处于起步阶段^[1]。

2 余热资源的分类

2.1 按温度级别分类

工业余热资源按温度级别可划分为高温余热、中温余热及低温余热的类别,其中温度在 500 ℃ 以上的高温余热主要存在于钢铁、有色金属及建材等行业。处于 200 ~ 500 ℃ 区间的中温余热广泛分布在石化工业的裂解气体及各类工业窑炉的烟气之中。温度低于 200 ℃ 的烟气及 100 ℃ 以下的液态余热被归类为低温余热,虽数量可观但回收难度大。

2.2 按其能量形态分类

余热按能量形态可分为可燃性余热、载热性余热和有压性余热三大类别。表 1 为工业余热形态分类及其主要特征对比表。

3 工业能源管理中余热回收的技术原理与方法

3.1 余热锅炉技术

余热锅炉系统主要由锅筒、省煤器、蒸发器及过热器等核心部件构成，其中锅筒配备高效旋风分离装置与除雾系统，确保产出蒸汽的纯净度。在实际运行过程中，温度介于 300 ~ 600 ℃ 的烟气进入设备后，

表 1 工业余热形态分类及其主要特征对比表

余热类型	主要特征	典型来源	回收技术要点	应用领域
载热性余热	热量依附于载热介质，品位差异大，回收难度中等	工业炉窑烟气、冷却水、散热设备表面	热交换器选型及防腐设计是关键	供热制冷、余热发电、生活热水
可燃性余热	含有未完全燃烧物质，化学能转化效率高	转炉煤气、焦炉煤气、高炉煤气	需考虑燃烧安全性及污染物控制	工业燃料、热电联产、化工原料
有压性余热	压力能与热能并存，品质较高，易于回收	减压阀放散气、闪蒸汽、压缩空气	压力能梯级利用及系统匹配性	机械驱动、蒸汽发电、换热制冷

经过多级换热实现能量转化：给水先在省煤器中预热至接近饱和温度，继而流入蒸发器完成气化过程，最终蒸汽在过热器中达到所需温度参数。该技术采用自然循环与强制循环两种工作方式，前者依靠汽水密度差形成稳定循环，运行可靠且成本较低；后者借助水泵驱动，适用于高压系统环境。在传热面设计方面，光管式结构便于维护，翅片式能提升 30%~50% 的换热效率，而膜式壁设计则具备良好的气密性。余热锅炉技术在钢铁、水泥及化工等行业得到广泛应用，系统整体热效率可达 50%~70%，每年可减少数千吨二氧化碳排放。该技术不仅实现了显著的节能减排效果，投资回收期仅需 1.2~1.8 年^[2]。表 2 为余热锅炉技术的应用场景与典型案例。

表 2 余热锅炉技术的应用场景与典型案例

行业	应用场景	典型案例与效益
钢铁	高炉煤气、转炉烟气余热回收	柳州钢铁：回收 350℃ 烟气生成 1.9 MPa 蒸汽，年节煤 6 160 吨，投资回收期 1.2 年
化工	反应釜废气、催化裂解余热	某化工厂：余热满足 80% 蒸汽需求，年节省成本数百万元
水泥	窑头 / 窑尾烟气余热发电	安徽某水泥厂：余热发电占用电 30%，年减排 CO ₂ 近千吨
垃圾焚烧	焚烧烟气热能回收	新型系统降低二噁英排放 45%，延长大修周期至 3 年
玻璃制造	熔炉烟气余热利用	某玻璃窑：余热利用率超 70%，蒸汽压力达 2.5 MPa
焦化	焦炉荒煤气余热回收	河北某焦化厂：荒煤气温度从 750℃ 降至 450℃，年产蒸汽 10 万吨，减排 CO ₂ 4.3 万吨

3.2 热管换热器技术

热管换热器技术基于工质相变原理实现高效传热，广泛应用的热管换热器主要由密封外壳和内部工质构成，其中工质类型依据工作温度区间选择，水蒸气适用于 300~550 K 温度范围，钾钠液态金属则可应对 750 K 以上的高温环境。普通换热器传热系数一般为 15~45 W/(m²·K)，而热管换热器可达 200~350 W/(m²·K)，传热效率提升 5~10 倍。热管内部填充导热材料制成的毛细芯结构对传热效果起关键作用，采用烧结铜粉毛细芯技术处理 300℃ 废气时，换热效率可提升 25%。在实际工程应用中，热管换热器多采用管束式布置方式，通过中间隔板将换热空间分为蒸发段与冷凝段。蒸发段吸收余热使工质气化，气态工质携带大量潜热流向冷凝段释放热量。这种相变传热机制使热管表现出优异的等温性，温差可控制在 3~5℃ 以内。热管换热器独特的模块化结构设计使系统占地面积减

少 40%，且支持单根热管在线更换维护。一些新型复合毛细结构技术突破传统局限，使热管临界传热功率提升至 80~120 W/cm²^[3]。

3.3 热泵技术

热泵技术基于热力学第二定律原理，运用制冷剂循环系统实现低位热能向高位热能的转化升级。热泵系统通过消耗少量的高品位机械能或电能，使低温热源中的热量得到有效利用。制冷剂在蒸发器中吸收低温余热能量后发生相变，由液态转化为气态；气态制冷剂经压缩机作用升压升温，温度可提升至 80~150℃；高温高压气体进入冷凝器释放热量，转变为高压液体；最后通过节流装置降压，重返蒸发器开启新一轮循环。热泵系统的性能系数（COP）一般可达 3~7。表 3 为传统余热回收技术与热泵技术对比表。

表 3 传统余热回收技术与热泵技术对比表

指标	传统方法（余热锅炉 / 热交换器）	热泵技术
温度适应范围	仅适用于中高温余热（> 150℃）	可处理低温余热（30~150℃）
能效比（COP）	效率较低（通常 < 1）	COP 达 3~4，高温热泵可达 6.67
环保性	依赖化石燃料，排放 CO ₂ 和粉尘	无燃烧过程，减排 CO ₂ 50%~70%
初始投资	较低	较高，但投资回收期仅 1~3 年
应用灵活性	需固定热源匹配	可适配多品位余热，支持多场景耦合

工业余热回收常见的热泵类型有机械蒸汽压缩热泵与吸收式热泵，实际工程应用中，热泵系统需结合具体工况进行优化设计且制冷剂选择尤为关键。目前广泛应用的是具有良好热力性能和环境友好性的 R134a、R407C 及 R410A 等环保型工质作制冷剂。

3.4 有机朗肯循环（ORC）技术

有机朗肯循环（ORC）技术利用低沸点有机工质替代传统水蒸气工质，实现了中低温余热的高效转化利用。核心部件包括工质泵、蒸发器、膨胀机和冷凝器等，工质泵将液态工质加压至 2.0~3.5 MPa，经蒸发器吸收 80~400℃ 的工业余热后转化为高温高压蒸气。膨胀机是系统的核心动力装置，目前主流的径向出气式涡轮机械效率可达 82%，在 1.8~2.5 MPa 的进气压力下产生稳定的机械功率。系统选用的有机工质对整体性能影响显著，R245fa 因其 154.1℃ 的临界温度和 15.3℃ 的沸点，在 200~300℃ 的余热利用场景下热效率可达 12%~15%。该技术在钢铁冶金行业表现突

出,以高炉煤气余热回收为例,250℃的余热可产生4.5~6.0 MW的发电功率。化工行业的裂解气体余热利用中,装机容量在2~3 MW的ORC机组年发电量达1 600~1 800万度。近期开发的新型螺杆膨胀机在部分负荷工况下表现优异,其70%~85%的等熵效率为系统效率提升提供了新的技术支撑^[4]。

3.5 吸收式制冷技术

吸收式制冷技术基于吸收—解吸过程实现制冷循环,主要采用溴化锂—水溶液或氨—水溶液作为工质对。系统由蒸发器、吸收器、冷凝器、发生器、溶液泵及热交换器等核心部件构成。在制冷过程中,制冷剂水在真空蒸发器内低温蒸发吸收冷水热量;溴化锂浓溶液吸收水蒸气后被稀释,经溶液泵输送至发生器;废热在发生器中加热稀释溶液使制冷剂蒸气分离,浓缩后的溴化锂溶液重新返回吸收器;制冷剂蒸气经冷凝器冷凝为液态,降压后进入蒸发器完成制冷循环。在热力学特性方面,该技术利用真空环境下水的低沸点(约5.5℃)实现高效蒸发吸热,系统效率主要取决于溴化锂溶液浓度变化(一般为55%~65%)。考虑到工业余热温度分级,该技术最适合回收200℃以下的低温余热,尤其在60~100℃废热水或低压蒸汽回收方面具备显著优势。相较于传统压缩式制冷,吸收式制冷具备显著环保优势,碳排放可减少80%以上^[5]。

4 案例分析

4.1 案例背景

庆云隆盛热电有限公司坐落于山东省德州市庆云县开发区工业园,是该区域唯一的热源企业。该公司装机规模为2×130 t/h循环流化床锅炉及1×25 000 kW抽凝式汽轮机,承担工业园区蒸汽供应和发电任务,在供暖季还需为庆云县提供城市供暖服务。公司在运营过程中面临多重挑战:供热能力不足制约城市供暖面积拓展,锅炉烟气余热大量浪费,供暖成本居高不下。运营数据显示,两台锅炉排放烟气温度在52~54℃区间,蕴含大量可利用的低品位热能。

4.2 余热回收技术的具体应用

本项目构建“烟气换热塔+蒸汽驱动溴化锂吸收式热泵”双级回收系统。烟气换热塔直径7 m、高度20 m,采用立式结构设计,内部配备高效除雾装置与喷淋系统。在余热回收过程中,温度52~54℃的锅炉烟气从塔底部进入,与塔顶喷淋的24℃循环水充分接触换热,烟气降温至30℃以下排出,循环水温度升至32℃。系统设置两台流量1 200 m³/h、扬程32.5 m的余热水泵进行介质输送,单台水泵功率132 kW,采用“一用一备”运行模式。经换热塔加热的32℃循环水进入制热量26 MW的溴化锂吸收式热泵机组,该机组利用0.9 MPa、

300℃的蒸汽作为驱动热源,每小时消耗蒸汽约22吨。热泵机组内部构建高效换热回路,使45℃的供暖回水经过热泵升温至70℃后输入供暖管网。整个系统通过PLC控制柜实现自动化运行,设置多重参数监测点,对烟气温度、系统压力、水温、流量等关键参数进行实时监控。为保证系统稳定运行,配置容积8 m³的加药罐,投加碱液调节循环水水质,配套一台流量50 m³/h、扬程40 m的冲洗泵执行定期清洗任务。系统运行数据显示,在2023—2024供暖季期间,机组运行稳定,日均回收热量达1 200 GJ,系统COP值稳定在1.82,体现出良好的节能效果。机组日耗电量约3 300 kW·h,主要用于余热水泵与各类辅助设备的驱动。整套系统实现了烟气余热的高效回收利用,每供暖季可为50万m²建筑面积提供稳定热源,显著提升了供热系统的能源利用效率。

4.3 效果评价

项目实现显著的经济收益。2023—2024年供暖季系统回收余热价值达416.9万元,运行成本(含电费、药剂费等)仅为47.18万元,创造净效益369.71万元。项目总投资约1 200万元,静态投资回收期4.5年,具有良好的经济可行性。系统每年供暖季可为约50万m²建筑面积提供清洁供暖,减少原煤消耗约5 000吨。项目为解决城市供暖能力不足问题提供创新思路,推动供热系统向清洁化、低碳化方向转型。

5 结束语

工业余热回收技术已进入快速发展阶段,各类回收利用技术日趋成熟。创新集成应用余热回收技术,对提升工业能源利用效率、推动节能减排具有重要意义。企业应结合自身特点,优化系统设计,强化运行管理,实现余热资源的梯级利用和系统集成,从而推动工业生产向低碳高效方向转型。

参考文献:

- [1] 周玉龙.工业企业余热回收与梯级利用技术探索[J].石化技术,2025,32(01):379-381.
- [2] 孙鹏.工业锅炉烟气余热回收技术及其节能应用研究[J].工业加热,2025,54(03):60-63.
- [3] 王嘉浩,强天伟,向俊,等.重力式气-气型热管换热器的设计与应用[J].制冷与空调(四川),2022,36(06):835-842.
- [4] 李志涛,吴家欢,章高霞.ORC低温余热发电技术在陶瓷行业内的应用前景[J].能源研究与管理,2022(01):103-107.
- [5] 吴尚,李瑞深.吸收式制冷在低温公用工程中的应用[J].安徽化工,2020,46(04):13-15,111.