

# The waste heat recovery technology in the power system

Subing Shu

Anhui Xiangyuan Engineering Technology Co., Ltd., Bengbu, Anhui, 233000, China

## Abstract

The waste heat resources generated during the operation of the power system exhibit diversity and complexity, and can be classified into three temperature levels: high, medium, and low. The assessment of waste heat resources requires the use of methods such as energy analysis, entropy analysis, and available energy analysis, combined with digital means to improve the assessment accuracy. Advanced technologies such as organic Rankine cycle, heat pipe heat exchangers, and absorption heat pumps provide technical support for waste heat recovery. Through cascade utilization and multi-energy complementary integration optimization, the system efficiency can be significantly improved, and economic analysis provides a basis for project decision-making. The promotion and application of waste heat recovery technology will create favorable conditions for achieving energy conservation and carbon emission reduction goals.

## Keywords

Waste heat recovery; Power system; Energy efficiency optimization; Economic analysis

# 动力系统中的余热回收技术

爻苏兵

安徽祥源工程技术有限公司, 中国·安徽 蚌埠 233000

## 摘要

动力系统运行过程中产生的余热资源具有多样性和复杂性特征,可分为高、中、低温三个温度等级。余热资源评估需采用能量分析、熵分析和可用能分析等方法,结合数字化手段提高评估精度。有机朗肯循环、热管式换热器和吸收式热泵等先进技术为余热回收提供了技术支撑。通过梯级利用和多能互补集成优化可显著提升系统效率,经济性分析则为项目决策提供依据。余热回收技术的推广应用将为能源节约和碳减排目标实现创造有利条件。

## 关键词

余热回收; 动力系统; 能效优化; 经济性分析

## 1 引言

随着全球能源危机与环境问题日益严峻,提高能源利用效率已成为各国实现可持续发展的核心策略。工业生产、能源发电、交通运输等领域的动力系统,在运行过程中会产生大量中高温余热,这类能量若直接排放至自然环境中,不仅造成宝贵的能源资源浪费,还会引发热污染、加剧温室效应,对生态环境形成双重压力。余热回收技术通过专业换热、能量转换等方式捕获并再利用这部分余热,将其转化为电能、热能等可利用形式重新投入生产生活,既能显著提升动力系统的整体能效,大幅降低化石能源消耗与企业运营成本,又能有效减少碳排放与污染物排放,是落实节能降耗要求、助力实现“双碳”目标的重要技术支撑。近年来,随着高温导热材料、热电转换新材料、耐腐蚀合金等新材料的研发突破,以及梯级利用、联供发电等新工艺的不断涌现,

余热回收技术的回收效率、适用范围与稳定性均得到大幅提升,突破了传统技术在中低温余热回收上的瓶颈。这一技术正迎来革新与突破的重要机遇,也为各行业绿色转型与能源结构优化提供了更广阔的发展空间。

## 2 动力系统余热资源特性与评估方法

动力系统余热资源具有多样性和复杂性特征,主要来源于发电厂、钢铁冶金、水泥生产等工业过程。根据温度范围,可将余热划分为高温余热(400°C以上)、中温余热(200-400°C)和低温余热(200°C以下)。不同温度等级的余热在热力学品质和可利用性上存在显著差异,高温余热具有较高的能量密度和品位,回收利用价值较大;而低温余热虽然数量庞大,但由于温度低、分布分散等特点,回收技术难度较高。

余热资源评估需考虑热流体的温度、流量、热容以及化学组成等多项参数。品质评估方法包括能量分析法、熵分析法和可用能分析法。能量分析侧重于余热的数量;熵分析关注能量品质退化过程;可用能分析则综合考量能量数量与

【作者简介】爻苏兵(1990—),男,中国安徽蚌埠人,本科,中级,从事热能与动力工程研究。

品质，能更全面地反映余热资源的实际可利用潜力。实际评估过程中，通常需结合工艺参数、运行数据与热力学计算，构建完整的余热资源评估模型。

现代余热评估技术已逐步融入数字化与智能化手段。红外热成像技术能直观呈现热量分布；计算流体动力学 (CFD) 仿真可预测复杂系统中的热流动行为；物联网传感器网络则

实现了余热特性的实时监测。这些先进技术为精确评估余热资源提供了强有力支持，使评估结果更加精准和可靠<sup>[1]</sup>。

评估结果直接影响余热回收系统的设计和经济效益分析，是余热回收项目决策的重要依据，也为动力系统能效优化提供了科学参考。

余热等级	温度范围	主要来源	能量品质	利用特点
高温余热	>400℃	发电厂、钢铁冶金、水泥窑炉	高能量密度、高品位	回收价值大，技术成熟，易高效利用
中温余热	200~400℃	工业窑炉排烟、换热设备排放	中品位、能量密度中等	可用于发电、供热、工艺预热，利用方式多样
低温余热	<200℃	设备散热、低温烟气、冷却水	低品位、温度低	总量庞大、分布分散，回收技术难度高

### 3 先进余热回收技术及设备的研究进展

有机朗肯循环 (ORC) 系统已成为中低温余热回收的核心技术，其工质选择研究取得显著进展。环保型工质如碳氢化合物、氢氟烯烃等逐步替代传统氟利昂，提高了系统效率和环境友好性。同时，双工质 ORC、超临界 ORC 等结构创新使系统在温度匹配和能量转换效率方面有了突破性提升，特别适用于冶金、水泥等行业的复杂余热回收场景。

热管式换热器以其高效传热特性在余热回收领域广泛应用。新型相变材料的研发和微纳米结构表面处理技术大幅提升了热管传热效率，尤其在高温烟气余热回收中表现出色。此外，回热式余热锅炉经过结构优化和材料升级，成功解决了低温腐蚀问题，延长了设备使用寿命，提高了系统可靠性。

基于热泵原理的余热深度回收技术在低温余热领域展现出巨大潜力。吸收式热泵通过溶液吸收过程实现温度提升，已在石化和食品加工行业实现规模化应用。相变蓄热技术通过特定材料相变过程储存余热能量，有效解决了余热供需时空不匹配问题，提高了余热利用的灵活性和经济性。先进制造技术与余热回收设备研发的融合是近年来的重要趋势。3D 打印技术使得复杂结构换热器制造成为可能，大幅提升了换热效率。同时，耐高温合金、陶瓷基复合材料等新型材料的应用极大拓展了余热回收设备的工作温度范围和抗腐蚀能力<sup>[2]</sup>。这些技术进步使得以往难以回收的高温、腐蚀性强的余热资源得到有效利用，为动力系统能效提升开辟了新途径。

### 4 余热回收系统的集成优化与经济性分析

余热回收系统的集成优化需考虑工况适应性和系统匹配度。梯级利用是余热回收的核心理念，通过“高质高用、

低质低用”原则合理分配不同品位余热，可显著提升能量利用效率。多能互补集成技术将余热回收与光伏发电、生物质能等协同运行，形成灵活高效的能量网络。在水泥厂案例中，高温余热用于发电，中低温余热用于原料预热和地区供热，实现了余热全谱系利用，系统效率提升约 25%。

余热回收系统优化方法经历了从经验设计到精确计算的演进。温熵复合曲线分析为系统优化提供了直观工具，通过最小化温差驱动力损失，实现优化设计。热力管网平衡优化对提高余热回收效率具有决定性意义，通过调整流量分配和管道参数，可实现全系统能耗最小化。热集成与过程集成相结合的优化方法在石化、钢铁等行业展现出显著成效。

余热回收项目的经济性评估是决策核心依据。投资回收期、净现值和内部收益率构成基本指标体系<sup>[3]</sup>。高温余热发电项目投资回收期通常在 2-4 年，而低温余热利用项目回收期较长，但随着能源价格上涨和环保要求提高，其经济性正逐步提升。能源成本敏感性分析显示，当能源价格上涨 20% 时，项目净现值平均提高约 30%。

余热回收系统实施面临初始投资高、系统调控复杂等挑战。风险规避策略包括分期建设、模块化设计和弹性运行模式。政策支持是推动余热回收的重要保障，财政补贴、税收优惠能有效降低项目风险。各国政府逐步将余热回收纳入节能减排强制性措施，通过能效标准和碳交易机制形成激励机制。成功的余热回收项目均体现出技术、经济与政策的有机结合，为构建高效、清洁的循环经济体系提供支撑。

### 5 结语

动力系统余热回收技术是破解能源浪费难题、提升能源利用效率的核心手段，在工业生产、交通运输、建筑供暖等多个领域具有广泛应用前景。工业锅炉排烟、汽轮机乏汽、发动机尾气等各类动力系统运行过程中，会产生大量不同温

度等级的余热资源，这些未被充分利用的能量既是能源浪费的主要来源，也是可挖掘的“隐形能源库”。通过精准评估余热的温度、流量、成分等核心特性，针对性选择适配的回收技术路径，能够构建从高温到低温的全谱系能源梯级利用体系，让能源在不同场景下实现最大化价值。ORC 有机朗肯循环系统凭借对中低温余热的高效转化能力，可将 70-300℃ 的余热转化为电能或机械能，填补了传统回收技术的应用空白；热管式换热器则以传热效率高、结构紧凑的优势，在高温余热回收中表现突出，有效降低了系统能耗损失。先进设备的创新应用，不仅拓宽了余热回收的温度范围，更将整体效率提升 15%-30%。在项目实施过程中，系统集成优化与全生命周期经济性分析至关重要。通过整合余热收集、传输、转化等环节，协调设备兼容性与运行稳定性，同时综合考量初期投资、运维成本、能源收益及环保效益，能够在

技术可行性与经济合理性之间找到最优平衡点，推动项目规模化落地。随着高温耐腐新材料、高效传热新工艺的持续迭代，以及“双碳”目标下节能减排政策的大力支持，动力系统余热回收技术正朝着高效化、智能化、低成本化方向发展。未来，该技术将在工业升级、交通转型、建筑节能等领域发挥更关键的支撑作用，大幅降低化石能源依赖，减少碳排放总量，为我国实现碳中和目标注入强劲动力。

#### 参考文献

- [1] 冯霄,钱立伦,苏长荪.低温余热动力回收系统余热流换热器蒸发温度的优化[J].工程热物理学报, 1985(02):121-124.
- [2] 何依.基于LNG冷能的余热回收动力循环技术研究[D].辽宁石油化工大学,2020.
- [3] 吴昕,潘福敏,欧大生,等.动力装置余热回收系统:结构和设计[J].船海工程, 2016.