

Thoughts on Application Countermeasures of Absorption Heat Pump Technology in Industrial Systems

Zhijun Fang

Jiangxi Copper Group Guixi Smelter, Guixi, Jiangxi, 335424, China

Abstract

The operation of industrial systems generates substantial emissions of exhaust gases, wastewater, and waste heat, which has become a critical bottleneck constraining sustainable industrial development. According to 2023 statistics from the International Energy Agency (IEA), 54% of global industrial energy consumption is lost as waste heat, with medium-temperature waste heat (80~150°C) accounting for as much as 38% of this total - equivalent to approximately 7.8×10^{18} J of energy wasted annually. In this context, absorption heat pump technology has emerged as one of the most promising solutions for industrial waste heat recovery due to its unique thermally-driven characteristics. Through thermodynamic cycles, this technology can effectively transform low-grade industrial waste heat into usable thermal energy. It not only enables heat recovery at scales of several gigajoules (GJ) per hour, but can also improve overall industrial system energy efficiency by more than 20%.

Keywords

industrial systems; absorption heat pump technology; waste heat recovery; application

工业系统中吸收式热泵技术的应用对策思考

方志军

江西铜业集团贵溪冶炼厂，中国·江西 贵溪 335424

摘 要

工业系统的运行伴随着大量废气、废水和废热的排放，已成为制约工业可持续发展的关键瓶颈问题。根据国际能源署（IEA）2023年统计数据，全球工业能耗总量的54%以余热形式流失，其中80-150°C中温区余热占比高达38%，相当于每年约 7.8×10^{18} J的能量被浪费。在这一背景下，吸收式热泵技术因其独特的热驱动特性，成为工业余热回收领域最具前景的技术方案之一。该技术通过热力学循环将低品位工业余热转化为可用热能，不仅能实现每小时数吉焦（GJ）级的热能回收，更能使工业系统整体能效提升20%以上。

关键词

工业系统；吸收式热泵技术；余热回收；应用

1 引言

工业生产虽然能够推动人类生产力的进步与发展，但是工业系统运行中产生的能源消耗之大，也对社会经济的进一步发展产生了影响。如何对工业余热进行回收，提高工业系统运行中的能源利用率，减少能源浪费问题，成为现阶段相关从业者亟待解决的问题。将吸收式热泵技术应用到工业系统当中，具有十分重要的意义。但是，如何将吸收式热泵技术应用到工业系统当中，却是一个值得深入思考的问题。

2 吸收式热泵技术原理及系统特性

2.1 技术基本原理

吸收式热泵是一种以热能为驱动力的高效能量转换装

置，其工作原理基于热力学吸收循环，可有效的将低温余热热量提取出来，通过工质对的吸收—解吸的方式进行内循环，转化为中温热源，以达到实现热能的品位提升。满足实际工艺系统的运行需求。该系统主要由发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、溶液热交换器以及节流装置等主要核心组件。

2.2 工质体系分析

作为吸收式热泵的关键要素，热交换介质是热泵能否搞笑运行的关键。氨水（ $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ）工质溶液和溴化锂（ $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ）工质溶液就是吸收式热泵技术得到有效应用的关键之一。当前工业应用中采用的这两类工质，各有优势。

2.3 系统工作流程

目前，溴化锂工质溶液是现阶段应用最广泛的工质之一，作为吸收式热泵采用的主要工质^[1]。吸收式热泵系统运行过程可分为四个主要阶段（如图1所示），其分为发生过程—冷凝过程—蒸发过程—吸收过程的循环流程。

【作者简介】方志军（1993-），男，中国江西上饶人，本科，工程师，从事热能与动力工程研究。

表 1 溴化锂和氨水工质性能

工质性能	溴化锂 (LiBr-H ₂ O)	氨水 (NH ₃ -H ₂ O)
优点	制冷剂(水)汽化潜热大,无结晶风险(在适当浓度范围内)	适用温度范围广(-60~200℃)
缺点	对碳钢等金属材料具有腐蚀性,腐蚀速率可达0.3-0.5 mm/year(140℃工况)	需增设精馏装置,系统复杂度提高约30%

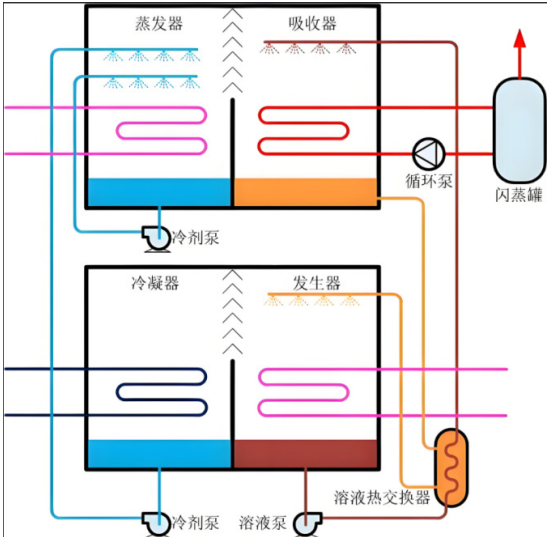


图 1 吸收式热泵系统运行流程

高温烟气或高温蒸汽(余热)把稀溶液在发生器中加热,产生制冷剂蒸汽(发生过程);产生的制冷剂蒸汽进入冷凝器中放热凝结,并把热量传递给工艺用水(冷凝过程);凝结后的液态制冷剂通过冷却剂泵经节流后送入蒸发器内,然后吸收低温热源的热量后蒸发(蒸发过程);蒸发后的制冷剂蒸汽被来自发生器的浓溶液吸收,同时释放吸收热(吸收过程);整个循环过程将低温热源汇集后传递给工艺热水,达到回收低温余热的目的。

2.4 技术优势与现存局限分析

吸收式热泵技术相较于传统压缩式热泵具有显著的节能优势,其电能消耗仅相当于压缩式系统的 20%,这一特性使其在工业节能领域具有独特价值。系统采用热驱动原理,可直接利用 80-150℃ 的工业废热作为驱动能源,实现能源的梯级利用。

在结构设计方面,由于没有压缩机等运动部件,系统运行噪音控制在 60dB 以下,大幅改善了工作环境。然而,该技术仍存在若干亟待突破的局限:首先,系统体积较压缩式热泵增大 30-50%,这对安装空间提出了更高要求;其次,部分负荷性能下降明显,当负荷率降至 50% 时,系统 COP 值将衰减约 25%;此外,较高的初始投资成本(约 5000 元/kW)也在一定程度上限制了技术推广。

3 工业系统中吸收式热泵技术的应用必要性

3.1 工业能源利用现状与挑战

现代工业生产过程中存在着突出的能源利用效率问题,该问题目前已成为各行业亟待解决的问题,是制约工业绿色

发展的主要瓶颈。

工业过程中的余热损失主要通过三个主要途径流失:首先是锅炉排烟系统,其排放温度通常在 150-250℃ 之间;其次是工艺冷却水系统,带走的余热温度在 60-90℃ 范围;最后是各类生产设备的表面散热,温度维持在 80-120℃ 水平。这些废热若不加以回收利用,不仅造成巨大的能源浪费,还会对环境产生额外的热污染。特别值得注意的是,在钢铁、石化等高耗能行业,余热损失比例甚至超过 50%,这既增加了生产成本,又加剧了碳排放压力。

3.2 余热回收的技术经济价值分析

吸收式热泵技术在工业余热回收领域展现出显著的综合效益。从能源效益角度来看,该技术可提升工业系统整体能源利用率 20-35%,每回收 1GJ 余热相当于节约标准煤 34.12kg,大幅降低了能源消耗强度。经济效益方面,实际工程案例表明,典型项目的投资回收期稳定在 2.5-4 年之间,通过优化系统运行管理,可实现年运行成本降低 15-25%,具有较好的投资价值。在环境效益维度,单套吸收式热泵系统年均可实现 5000-10000 吨 CO₂ 减排,同时通过闭式循环设计可减少冷却水用量 30% 以上,有效缓解了工业用水压力。

这些效益指标充分证明了吸收式热泵技术在推动工业绿色低碳转型中的重要价值,为工业企业实施节能改造提供了可靠的技术选择。值得注意的是,随着碳交易市场的完善和能源价格波动,该技术的经济回报率有望进一步提升。

3.3 技术应用的意义

吸收式热泵技术在工业领域的推广应用具有深远的价值意义,主要体现在以下三个方面:首先,是调整能源的结构方面,该项技术可以有效的替代传统意义上的燃煤锅炉,将能源转变为清洁能源,达到的高效利用的目的,实现能源的梯级利用,显著优化工业用能结构,并成为推动工业绿色转型的重要技术支撑。

表 2 典型行业余热回收潜力分析

行业	余热温度(℃)	回收潜力(%)	适用 AHP 类型
石化	90-180	40-55	第一类
钢铁	150-350	30-45	第二类
食品	60-120	50-65	第一类

4 工业系统中吸收式热泵技术的优化应用策略

4.1 高效余热回收技术创新应用

吸收式热泵技术在工业余热回收领域的创新应用需要

系统性的技术升级方案。以溴化锂溶液工质系统为例,其在燃气锅炉烟气余热回收中的实际运行数据显示,对于120-180℃温度区间的烟气余热回收率可达65%以上,展现出显著的技术优势。然而,深入分析表明现有系统仍存在两个关键性技术瓶颈:一是效能指标偏低,COP值普遍维持在1.4-1.6区间,未能充分发挥技术潜力;二是余热二次利用率不足,仅达到30-40%的水平。

针对这些问题,本研究提出三个维度的优化措施:首先,建立基于热力学分析的余热品位分级利用体系,通过精确计算确定最佳回收比例,实现能量的梯级利用;其次,对热交换器传热结构进行创新设计,采用波纹管等强化传热技术,可使传热系数提升20-25%,显著改善换热效率;第三,重点优化工质循环系统,开发新型高效溶液泵,预计可降低循环功耗15-20%。这些技术创新措施的实施,将有效突破当前的技术瓶颈,为吸收式热泵技术在工业领域的规模化应用奠定坚实基础。

4.2 系统集成与协同优化实施策略

吸收式热泵系统的性能提升必须采用整体优化的系统工程方法,重点从三个维度推进集成优化工作。在多维度系统集成方面,首先需要实现热力系统与生产工艺流程的深度耦合,确保热能供需的精准匹配;其次要开发具有自适应特性的先进调控算法,提升系统动态响应能力;最后应构建多能互补的综合能源体系,实现不同能源形式的协同优化。在关键技术优化方向上,重点包括:采用多级吸收技术可使系统效率提升12-15%;基于夹点分析原理重构换热网络,显著改善热回收效率;建立考虑能耗、成本、可靠性等多目标的优化模型,实现运行参数的最优配置。

4.3 新型工质与材料的研发应用方向

为应对日益严格的环保要求和技术挑战,新型工质和材料的研发应用已成为吸收式热泵技术发展的关键突破口。从表4的新型工质性能比较可以看出,传统LiBr-H₂O工质虽然工作温区适中(5-150℃)、COP值较好(1.5-1.8),但存在腐蚀性高、环保性一般的缺陷;相比之下,新兴的离子液体工质不仅拓宽了工作温区(-20-200℃),提升了

COP值(1.6-2.0),更兼具低腐蚀性和优良环保性的特点;而NH₃-H₂O工质则在超低温领域(-60℃)展现出独特优势。

基于此,研发工作应重点聚焦三个方向:首先,在高性能工质体系方面,需要开发具有更宽温区适应性的离子液体工质,研究纳米流体添加剂对工质性能的增强作用,并通过实验优化工质配比;其次,在新型结构材料领域,应着力研发耐腐蚀复合传热管、高性能防腐涂层和新型密封材料;最后,在系统兼容性研究上,要深入探究工质-材料相互作用机理、长期运行稳定性规律以及失效机理分析。

5 结语

综上所述,吸收式热泵技术在工业系统中的应用潜力非常大。但是,受到多方面因素的影响,吸收式热泵技术的应用还有很多不成熟之处,如:系统运行稳定性不足(负荷波动下COP波动达±25%)、经济性门槛较高(初始投资较压缩式系统高40-60%)、环境适应性受限(极端工况下效率衰减20-25%)。

未来要提高余热回收技术,不但需要加强系统与集成技术的优化应用,同时也要提升新型工质与材料的研究与应用,才能从根本上提高吸收式热泵系统的运行性能,为工业系统的绿色、生态化发展提供保证,为实现"双碳"目标做出重要贡献。

参考文献

- [1] 冶永福. 热电厂利用“吸收式热泵”进行余热供暖技术的分析研究[J]. 节能,2020,39(6):132-134.
- [2] 张建平. 吸收式热泵技术在工业余热回收中的应用与前景[J]. 科技资讯,2024,22(16):206-208.
- [3] 赵云凯,娄晓静. 吸收式热泵利用排汽余热(火用)分析[C]//全国工业烟气余热深度回收利用技术与产业发展论坛论文集. 2019:112-115.
- [4] 杨向儒,刘仁杰,高飞. 清洁能源耦合吸收式热泵技术研究现状[J]. 模型世界,2023(5):58-60.
- [5] 周勇,郝日鹏,魏航,等. 基于吸收式热泵技术的区域清洁供暖研究[J]. 工业加热,2021,50(9):36-40.