

炉窑烟气余热与轧机废乳液耦合处理技术

王耀国^{1, 2}, 樊振国^{1, 2}, 孙朝阳^{1, 2}, 苗璐璐^{1, 2}

(1. 洛阳职业技术学院, 河南 洛阳 471000;

2. 洛阳职业技术学院建筑节能工程技术研究中心, 河南 洛阳 471000)

摘要 针对铝工业生产中高温烟气余热浪费与轧机废乳液处理能耗高的双重挑战, 本研究提出了一种创新的能质耦合协同处理技术。通过自主研发的自清洁式板式换热器高效回收烟气余热, 并以此为热源驱动废乳液的减压蒸发破乳过程。研究表明, 该系统烟气侧余热两级回收率超过 70%, 粉尘净化效率达 96%; 废乳液侧油与 COD 去除率分别超过 90% 与 80%。耦合系统实现综合能耗和处理成本双降, 为铝工业绿色低碳转型提供了高效可行的技术方案。

关键词 铝工业; 高温烟气; 废乳液; 余热回收; 减压蒸发

基金项目: 2024 年度河南省高等学校重点科研项目“铝工业炉窑高温烟气和轧机废乳液耦合处理技术研究”(项目编号: 24B480011); 河南省科学技术协会 2026 年度科技决策咨询研究项目“绿色低碳目标下河南省能源结构转型与产业协同升级对策研究”(项目编号: SKXJCZX-2026-100B)。

中图分类号: TK115; X758

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.003

0 引言

铝加工是我国重要的基础工业, 近些年产能持续增长。然而, 在生产中铝熔炼炉窑排放出的 300 ~ 400 °C 高温烟气, 以及后续轧制工序产生成分复杂、化学稳定性强的废乳液, 给环境带来了严峻的考验。近年来, 在余热回收与废液处理方面取得了诸多进展, 如高效换热器设计^[1]、MVR 蒸发^[2]、膜分离^[3]等技术。熊瑞^[4]等研发的除尘与换热一体化装置, 实现烟气除尘和换热效率分别 99.98%、70% 以上; 钟晴^[5]等研制的新型复合凝絮剂, 有效提高了废乳液的絮凝破乳处理能力。然而, 将高温烟气余热直接用于废乳液处理的集成化研究尚显不足。

本研究针对上述问题, 提出并构建铝工业炉窑高温烟气与轧机废乳液的耦合处理技术方法。通过研发关键装备、数值模拟与实验验证等方法, 构建能源回收、污染物脱除、资源循环协同处理模式, 以期为铝工业的节能减排与绿色发展提供创新性解决方案。

1 原理与方法

1.1 能质耦合理论基础

联合处理的核心在于实现能量品位匹配与物质转化协同。铝熔炼烟气(350 ~ 400 °C)属于中高品位余热资源^[6], 其焓值占比高。而废乳液的有效破乳温

度区间(70 ~ 150 °C)正位于该烟气余热的热能品位范围内^[7], 构成了理想的热力学梯级利用基础。理论分析表明, 通过优化设计, 耦合系统的焓效率可比传统分置系统提高 25% 以上。能量传递不仅提供了破乳所需热量, 更通过影响废乳液油水界面膜的分子热运动与流变特性, 降低界面膜强度与体系粘度, 从而协同促进油滴的聚并与分离。

1.2 研究方法

研究主要包括三大模块: (1) 高温烟气余热回收装备: 重点研发高效抗结垢自动化换热装备, 建立其传热模型并进行数值模拟优化; (2) 轧机废乳液处理工艺: 通过实验研究确定减压蒸发破乳的关键工艺参数及其影响规律; (3) 耦合系统集成与评估: 将前两者有机结合, 构建联合处理系统, 并从能源、环境、经济多维度评估其综合效应。

1.3 数值模拟与实验

1. 余热回收数值模拟。利用计算流体力学(CFD)软件, 建立自清洁换热器的三维传热传质模型, 模拟分析烟气温度、流速等参数对余热回收效率及除尘性能的影响。模拟数据及结果如表 1 所示。

2. 废乳液处理实验。废乳液处理实验采用正交试验设计, 考察蒸发温度(70 ~ 90 °C)、系统压力(0.05 ~

作者简介: 王耀国(1986-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 节能环保设备与技术。

表1 进出口烟气温度与余热回收率模拟数据

模拟实验	数据类型	测试点	测试点	测试点	测试点	测试点	...	测试点	测试点	测试点	测试点
		1	2	3	4	5		28	29	30	31
进口实验	进口烟气温度	300	310	320	330	340	...	570	580	590	600
	余热回收率	58.0	58.9	60.1	61.4	62.8	...	88.0	88.3	88.5	88.7
出口实验	出口烟气温度	80	90	100	110	120	...	170	180	190	200
	余热回收率	82	80.1	77.8	75.2	72	...	43.5	34.8	28	25

0.09 MPa)、pH值(2.0、4.0、6.0)和蒸发时间(30 min、60 min、90 min)对油去除率和COD去除率的影响。样品取自实际铝加工厂,采用标准方法分析成分与性能。正交试验结果如表2所示。

表2 正交试验结果分析表

试验号	因素			评价指标		
	温度(°C)	压力(MPa)	pH值	时间(min)	油去除率(%)	COD去除率(%)
1	70	0.05	2.0	30	72.1	65.4
2	70	0.07	4.0	60	76.2	68.3
3	70	0.09	6.0	90	68.4	61.5
4	80	0.05	6.0	60	87.3	79.5
5	80	0.07	2.0	90	90.2	82.1
6	80	0.09	4.0	30	83.6	75.4
7	90	0.05	4.0	90	84.5	76.1
8	90	0.07	6.0	30	79.7	71.6
9	90	0.09	2.0	60	81.3	73.6

2 核心装备开发与构建

2.1 高效余热回收设备开发

针对铝工业烟气高粉尘、易结垢的特性,研发了“自清洁板式换热器”,结构示意图如图1所示。其创新点在于集成旋转清洗叶片于烟气通道中,叶片转动既可刮除换热板表面积灰,其特殊凹槽设计又能调节烟气流速、延长换热时间。联动控制系统根据换热效率衰减自动启停清洗程序,实现在线不间断自清洁。

通过数值模拟,研究了该换热器的关键性能。模拟结果显示,在0~1 000 °C范围内,其除尘效率均高于95%。模拟实验表明,随着进口烟气温度升高,余热回收率上升,在350~400 °C的典型工况下,回收率可达60%以上;相对应地,出口烟气温度与回收率呈负相关,优化设计可将排烟温度降至120 °C左右,实现高效热量提取。

2.2 耦合系统构建

基于上述研究,构建了如图2所示的铝熔保护烟气与轧机废乳液联合处理系统。系统工作流程为:高温烟气进入自清洁板式换热器,将热量传递给纯水/循环水;产生的热水(80~90 °C)通过智能调温设

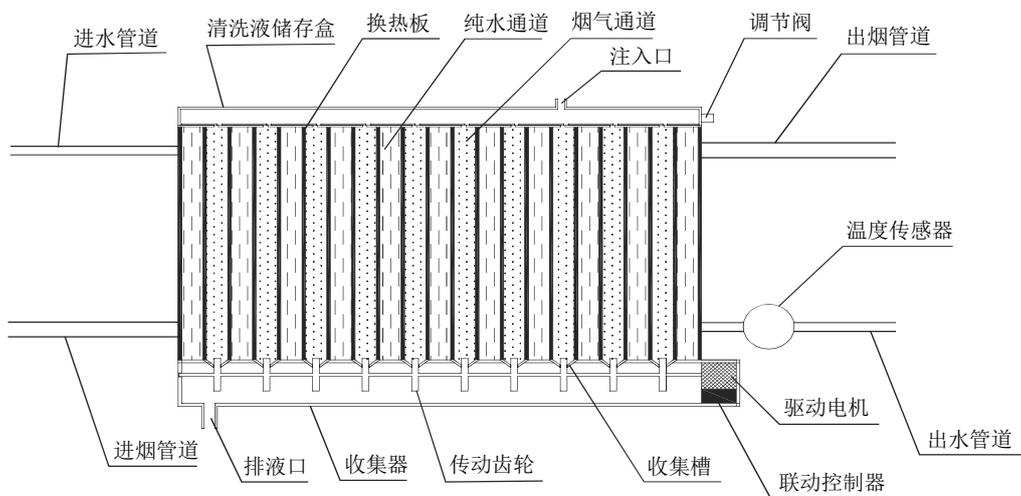


图1 自清洁间壁式换热器外观示意图

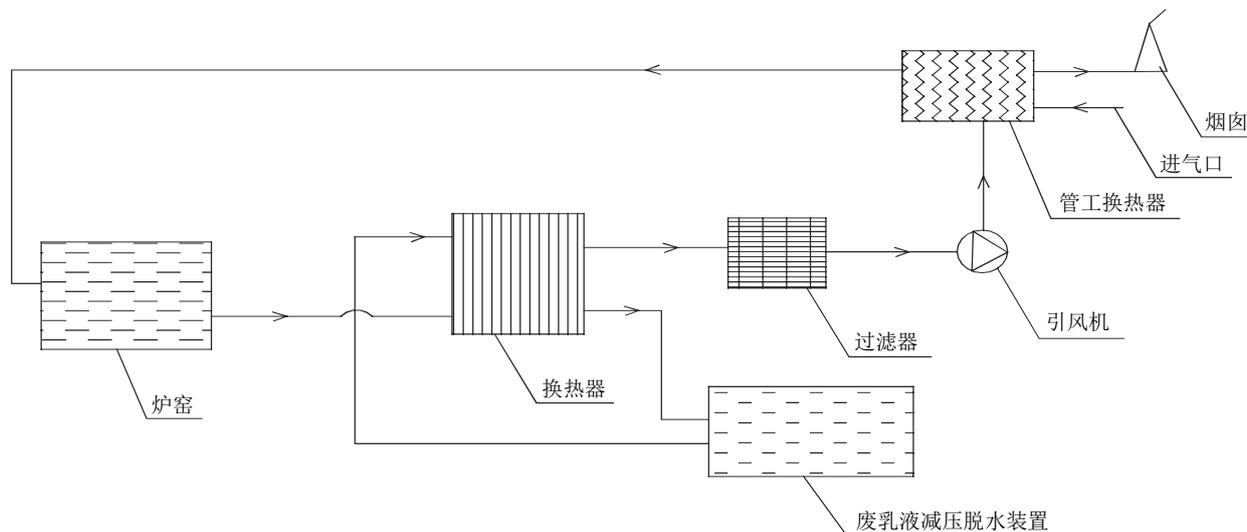


图 2 铝熔保护烟气和轧机废乳液联合处理系统示意图

备作为稳定热媒进入废乳液减压脱水装置；废乳液经预处理后，在减压脱水装置中利用烟气余热进行低温蒸发破乳；破乳后产物进行油、水、固分离；降温净化的烟气最终通过再次气—气热交换，加热的空气送入炉膛进行助燃，换热后烟气由烟囱排放。

该系统实现了能量流与物质流的闭环协同：烟气余热作为废乳液处理的驱动能源，废乳液处理过程则成为烟气余热的稳定热源，二者在温度品位上精准匹配。

3 集成处理效果评估

在实际运行参数下，耦合系统表现出优异的综合性能：

1. 烟气侧：对入口 400 °C 烟气，余热回收率稳定在约 72%，排烟温度约 100 °C。烟气粉尘浓度从 450 mg/Nm³ 降至 18 mg/Nm³，去除率 96%。

2. 废乳液侧：油去除率稳定在 89% ~ 92%，COD 去除率在 76% ~ 80%。工艺水回用率约 75%，回用水质达标（COD < 100 mg/L，油 < 5 mg/L）。

3. 系统能效：与传统分设系统相比，联合系统综合能耗降低约 40%，其中蒸汽消耗减少达 68%。系统焓效率达到 68.2%。

4. 经济环境效益：处理每吨废乳液成本下降 40% ~ 50%。资源综合利用率达 80% 以上，实现了危险废物的资源化，并显著降低了碳排放与危废产量。

4 结论

本研究验证了烟气余热与废乳液热破乳过程的能质耦合机理，以及烟气余热驱动低温废乳液处理的可行性。自主研发的“自清洁式板式换热器”有效解决

了烟气换热面结垢难题，通过模拟实验确定废乳液减压蒸发破乳的最佳工艺参数，在此条件下实现了 90.2% 的油去除率和 82.1% 的 COD 去除率。耦合技术实现了能源梯级利用与污染物协同资源化，综合能耗降低约 40%，处理成本大幅下降，为铝工业同时解决余热回收与危废处理两大难题提供了一体化解决方案，具有重要的工程应用价值和行业推广前景。

参考文献：

- [1] 李逸飞, 刘汉涛, 韩星星, 等. 通道结构对板式换热器换热性能的影响 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(08): 68-75.
- [2] 李元琛. 铝热轧废乳液的蒸发处理方法 [J]. 轻金属, 2023(04): 58-62.
- [3] 马什林. 铝热轧废乳液处理工艺技术探讨 [J]. 有色金属加工, 2023, 52(03): 66-69.
- [4] 熊瑞, 王志, 何京东, 等. 高温含尘烟气深度净化与余热回收一体化技术及装备 [J]. 环境工程, 2023, 41(04): 1-8.
- [5] 钟晴, 刘宏, 李珊, 等. 聚硅氯化铝与新型有机絮凝剂 FP-1 复配处理轧制废乳液 [J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 98-103.
- [6] 蒋一鸣. 加热炉烟气余热回收技术研究与应用 [J]. 节能技术, 2022, 40(02): 175-179.
- [7] 周伟. 废乳液处理的新工艺及零排放探讨 [J]. 工业水处理, 2021, 41(07): 105-108.