

闪蒸技术在粗铅冶炼系统余热锅炉乏汽回收中的应用

甫耀富 徐宗旺 邱学军 蒋培富

云南驰宏资源综合利用有限公司 云南 曲靖 655000

摘要:为解决粗铅冶炼系统余热锅炉排污乏汽直排所引发的能源损耗、环境污染及设备腐蚀等问题,本研究将闪蒸技术引入粗铅冶炼系统余热锅炉的乏汽回收流程。通过将200℃高温炉水导入密闭闪蒸装置,借助压力骤降引发的相变效应,生成 $\leq 0.5\text{MPa}$ 的低压蒸汽并入生产管网,同时冷凝水被同步回收用于循环利用,从而构建起全流程闭环回收体系。项目投运后彻底杜绝了乏汽外排,显著提升能源利用效率,降低运维支出,为行业余热锅炉节能改造提供了切实可行的工程范例。

关键词:粗铅冶炼;余热锅炉;乏汽回收;闪蒸技术;节能降耗

引言

粗铅冶炼属于典型的高能耗、高资源消耗型产业,余热锅炉作为关键节能设备,主要承担回收冶炼烟气余热并产出工业蒸汽的重要任务。为保障锅炉汽水品质,需持续排放温度达200℃的不合格高温炉水,该炉水进入排污扩容器后迅速扩容,产生大量高温乏汽。受制于乏汽压力剧烈波动及回收技术适配难度大等因素,国内多数企业仍采取直接排空方式,不仅造成热能与水资源的严重浪费,还引发厂区“蒸汽雾”弥漫、设备腐蚀加剧,并增加企业环保合规压力。为破解这一行业难题,本研究将闪蒸技术引入粗铅冶炼系统余热锅炉乏汽回收,通过定制化工艺设计、设备选型与系统集成,构建适配粗铅冶炼工况的乏汽回收技术体系,实现高温炉水与乏汽的高效再利用,为同类设备节能改造提供可复制的技术实践路径。

1 项目背景与核心问题

1.1 粗铅系统余热锅炉运行现状

公司粗铅生产系统配套4台冶金炉窑余热锅炉,覆盖熔炼、还原、氧化全工艺阶段。为保障锅炉安全稳定运行,4台锅炉通过连续+定期排污方式,持续排出3t/h的200℃不合格高温炉水,炉水排入排污扩容器后迅速扩容产生大量高温乏汽。自系统投产以来,炉水与乏汽未采取任何回收措施,直接放空排放,形成长期、持续性的能源与资源浪费,成为生产系统节能降耗的核心短板。

1.2 现存问题的技术痛点

高温炉水与乏汽直接排空,除引发能源浪费、环境恶化等问题外,还存在显著的技术层面痛点:一是乏汽压力波动范围大(0.1~0.6MPa),常规回收技术难以适配;二是高温高湿介质对回收设备耐温、耐腐蚀性能要求高;

三是回收系统需与现有生产流程无缝衔接,不能影响主工艺的连续运行,对系统适配性与稳定性要求严苛。

2 闪蒸技术乏汽回收方案设计

2.1 设计原则

(1) 工况适配原则:精准匹配4台余热锅炉3t/h的排污量、0.1~0.6MPa的压力波动工况,确保闪蒸回收系统与现有生产流程无缝衔接,不影响主生产系统运行。(2) 高效回收原则:依托闪蒸技术相变特性,无需额外消耗外部能源,实现炉水与乏汽热能高效转化及水资源回收,最大化提升汽、热、水综合回收效率。(3) 安全稳定原则:设置完善的压力控制、安全泄压、液位与温度监测装置,确保系统在冶炼负荷波动时稳定运行,满足特种设备安全运行要求。(4) 经济可行原则:优化设备选型与工艺设计,兼顾耐温、耐腐蚀性能与系统冗余性,控制项目投资,确保技术应用的可推广性。

2.2 核心技术原理

闪蒸回收技术的关键在于借助压力骤降引发的相变作用,达成200℃高温炉水与乏汽热能资源化及水资源同步回收,技术原理见图1。把高温排污炉水和排污扩容器产生的乏汽一同引入密闭闪蒸罐,借助罐内压力调节装置,让压力从0.6MPa迅速降至0.5MPa以下,使高温炉水处于过饱和态,部分炉水瞬间汽化生成低压蒸汽;罐内压力骤降环境能强化乏汽热能留存,与炉水汽化蒸汽混合,形成压力稳定且 $\leq 0.5\text{MPa}$ 的低压蒸汽,完全契合粗铅冶炼熔炼、还原等各工序工业蒸汽使用要求^[1]。整个过程无需消耗电力、燃料等外部能源,仅依靠炉水与乏汽自身热能实现蒸汽转化,热转化效率超85%;同时回收相变产生的冷凝水,实现热能与水资源的双重高效利用,从技术层面化解了乏汽压力波动大、回收难等行业难题。

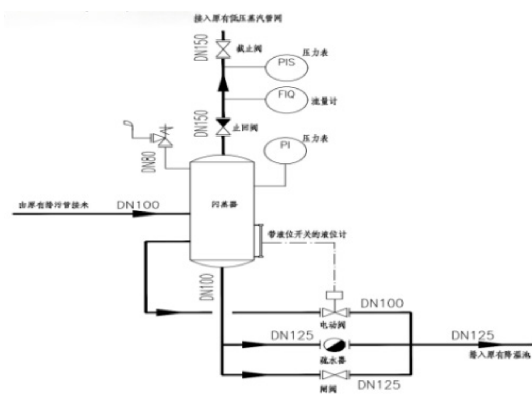


图1：乏汽回收装置原理图

（图中包含介质入口、闪蒸罐、压力调节装置、蒸汽出口、冷凝水出口五大核心模块；箭头标注高温炉水+乏汽→混合管道→闪蒸罐→低压蒸汽接入生产管网、冷凝水接入回收系统的流向；关键参数：入口温度200℃、罐内压力 $\leq 0.5\text{MPa}$ 、蒸汽出口压力0.4~0.5MPa）。

2.3 设备组成与选型

闪蒸回收体系以闪蒸罐作核心，配备专用输送、监测调控、冷凝水收集等辅助装置，设备选型全面考量粗铅冶炼200℃高温、高湿、微腐蚀的工况特性，兼顾设备性能与系统运行平稳性，核心设备规格、材质及技术参数详见表1，全部设备均契合《特种设备安全技术规范》标准。

表1：设备组成与选型参数

设备类别	核心设备	规格参数	材质	核心技术要求	功能特点
核心设备	闪蒸罐	2套，单罐容积6m ³ ，设计处理量1.5t/h炉水，工作压力0~1.0MPa，工作温度 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ 。	S31603耐高温不锈钢。	密闭腔体设计，配压力自动调节系统，调节精度 $\pm 0.01\text{MPa}$ ；设超压泄压装置，泄压值0.55MPa。	单罐覆盖2台锅炉排污需求，具备系统冗余；保障压力骤降与相变效果，实现稳定产汽。
输送设备	低压管道	高温排污管道：DN80，设计压力1.0MPa；蒸汽输送管道：DN100，设计压力0.6MPa；全程采用50mm岩棉保温。	排污管：S31603不锈钢；蒸汽管：碳钢防腐。	保温层导热系数 $\leq 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，管道热损耗 $\leq 5\%$ 。	减少热能损耗，保障200℃高温炉水稳定输送，确保蒸汽品质。
监测控制设备	测控装置	截止阀门（DN80）、疏水阀组（排水能力1t/h）、电磁流量计量装置（精度 $\pm 0.5\%$ ）、液位/温度传感器（温度精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）。	不锈钢/工业级合金。	传感器响应时间 $\leq 1\text{s}$ ，数据传输延迟 $\leq 0.5\text{s}$ ；疏水阀组无蒸汽泄漏。	快速排出冷凝水，精准监测炉水流量、蒸汽产量及罐内压力/温度/液位参数，实现实时调控。
回收利用设备	冷凝水收集装置	专用集水池（有效容积10m ³ ）、加压输送泵（扬程50m，流量10m ³ /h，工作温度 $\leq 100^{\circ}\text{C}$ ）。	S304不锈钢。	水泵设汽蚀消除装置，集水池配在线水质监测仪（监测pH、电导率）。	高效收集冷凝水，加压输送至生产补水系统；实时监测水质，确保循环回用安全性。

2.4 系统流程设计

本研究搭建单装置集成处理搭配全流程闭环的闪蒸乏汽回收工艺路径，达成高温炉水、乏汽热能转化及水资源循环再用，具体流程如下：

（1）介质汇集：4台余热锅炉排出的200℃高温排污炉水经保温汇总管输送，排污扩容器产生的高温乏汽经密闭管道引入闪蒸罐前级混合管，二者充分混合完成热能初步汇聚。（2）闪蒸产汽：混合介质进入密闭闪蒸罐，借助压力调节装置使压力迅速下降，炉水相变汽化，与乏汽融合生成 $\leq 0.5\text{MPa}$ 低压蒸汽，净化后接入生产蒸汽管网，供粗铅冶炼各环节使用^[2]。（3）冷凝水回收：闪蒸相变产生的冷凝水，经疏水阀组快速排出，汇入带水质监测的专用不锈钢集水池，保证水质契合生产补水标准。（4）循环再用：合格冷凝水经加压泵输送至冶金炉窑水套补水系统，或用于余热锅炉补水、现场生产清洗等，形成“高温炉水→闪蒸产汽→冷凝水→循环补水”的闭环架构。（5）智能

调控：把闪蒸罐压力、炉水流量、蒸汽产量、冷凝水回收量等关键参数接入粗铅生产DCS控制系统，达成实时监测、异常预警与自动调节，确保系统稳定运转。

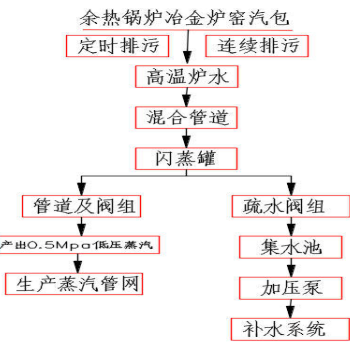


图2：闪蒸技术乏汽回收系统工艺流程

（注：图中按工艺顺序标注：余热锅炉冶金炉窑汽包→高温炉水→混合管道→闪蒸罐（配压力调节/安全泄压装置）→管道及阀组→生产蒸汽管网；闪蒸罐同时连接

疏水阀组→冷凝水集水池（配水位监测）→加压泵→生产补水系统（炉窑水套）；所有单元均接入DCS智能控制系统，标注核心参数：200℃、 $\leq 0.5\text{MPa}$ 、95%以上水资源回收率）

2.5 关键技术创新点

2.5.1 炉水-乏汽集成闪蒸处理技术

突破传统单一介质回收方式，把200℃高温炉水与压力不稳定的乏汽同时引入闪蒸罐开展集成处理，借助混合管道达成热能集中，攻克了乏汽压力波动大、回收成效差的技术难题，整体热回收效率提高到85%以上。

2.5.2 精准压力调控促成相变技术

研制契合粗铅冶炼工况的闪蒸罐压力自动调控系统，调控精度达 $\pm 0.01\text{MPa}$ ，能实现压力迅速、精准降低，保障炉水稳定相变汽化，持续生成 $\leq 0.5\text{MPa}$ 的达标低压蒸汽，完全契合生产用汽需求。

2.5.3 无外部能源消耗的闭环回收技术

整个回收系统运行全程无需耗费电力、燃料等外部

能源，仅依靠高温炉水与乏汽自身热能实现蒸汽转化和冷凝水回收，构建无外部能源消耗的能源-水资源闭环回收体系，符合节能降耗的技术发展趋势^[3]。

2.5.4 与主系统协同运作的智能控制技术

将闪蒸回收系统与粗铅生产DCS控制系统无缝融合，达成关键运行参数的实时监测、自动调整与异常警报，系统能依据主生产系统的用汽需求和锅炉排污量，自动调节闪蒸罐压力，确保回收系统与主生产系统协同稳定运转。

3 闪蒸技术应用成效

本项目实施后，闪蒸技术成功实现粗铅冶炼系统余热锅炉乏汽的全量回收，彻底消除了炉水与乏汽直排问题，在技术性能、能源资源回收、生产运行等方面均取得显著成效，核心技术指标与应用前后对比见表2。项目实现了蒸汽、除盐水的高效回收，创造了良好的经济效益，系统整体运行稳定，无故障停机记录，完全满足粗铅冶炼的工业生产要求。

表2：闪蒸技术应用前后核心技术指标对比表

评价维度	具体指标	应用前	应用后	技术提升效果
技术性能	乏汽回收效率	0%	100%	实现乏汽全量回收，解决行业回收难题
	蒸汽压力稳定性	无	0.4~0.5MPa，波动 $\pm 0.01\text{MPa}$	蒸汽压力稳定，完全匹配生产用汽要求
	热转化效率	0%	$\geq 85\%$	依托介质自身热能，实现高效热转化
	系统运行稳定性	/	连续运行 $\geq 8000\text{h}/\text{年}$ ，无故障停机	与主生产系统协同稳定，满足连续生产要求
资源回收	低压蒸汽回收量	0t/h	$\geq 3.0\text{t}/\text{h}$	实现合格低压蒸汽持续回收
	除盐水替代量	0t/h	$\geq 2.0\text{t}/\text{h}$	冷凝水直接回用，替代新鲜除盐水
	水资源回收利用率	$\leq 70\%$	$\geq 95\%$	提升25个百分点，实现水资源循环利用
生产运行	设备腐蚀速率	$\geq 0.1\text{mm}/\text{a}$	$\leq 0.01\text{mm}/\text{a}$	设备腐蚀速率降低90%以上
	电气设备受潮故障率	$\geq 3\text{次}/\text{月}$	0次/年	彻底消除高湿引发的设备故障
	系统维护频次	/	$\leq 1\text{次}/\text{月}$	实现低频次维护，降低运维技术难度

4 结语

本研究聚焦粗铅冶炼系统余热锅炉乏汽回收难题，运用闪蒸技术工艺优化、设备定制化选型及系统集成，构建了适配200℃高温、压力波动工况的炉水-乏汽一体化闪蒸回收技术体系，解决了乏汽回收难题。该体系依托压力骤降相变效应，实现热能高效转化与水资源闭环回收，核心技术指标达行业先进水平，乏汽回收效率100%、热转化效率 $\geq 85\%$ 、水资源回收利用率 $\geq 95\%$ ，产出低压蒸汽压力稳定，匹配生产需求。系统与现有流程衔接紧密，运行稳定，降低设备腐蚀速率，提升整体稳定性。项目

实施后效益良好，为粗铅冶炼行业提供可复制推广路径，也为其他有色冶金行业余热回收节能改造提供参考，对推动行业绿色低碳发展意义积极。

参考文献

[1]宋冬根.铅锌冶炼厂炉窑余热回收与利用技术[M].北京:冶金工业出版社,2020.
[2]王志强.工业锅炉节能改造技术手册[M].上海:上海科学技术出版社,2022.
[3]张磊,李明,赵伟.有色冶金余热锅炉乏汽回收技术优化与实践[J].有色金属工程,2023,13(5):112-118.