

引用格式:王基福,刘培松,都韶军,等.铜阳极泥硫酸化焙烧工艺设备智能化改造[J].有色设备,2025,39(2):76-82.

WANG Jifu, LIU Peisong, DU Shaojun, et al. Intelligent transformation of equipment for sulfate roasting process of copper anode slime[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 76-82.

# 铜阳极泥硫酸化焙烧工艺设备智能化改造

王基福, 刘培松, 都韶军, 石凤滨

(江铜国兴(烟台)铜业有限公司 稀贵分厂, 山东 烟台 264006)

**[摘要]** 铜电解精炼过程中产生的阳极泥,其中贵金属和稀散金属可被提取,具有重要的经济价值。基于某冶炼企业铜阳极泥焙烧工艺存在的问题如预处理不充分、喂料不均匀、窑尾负压波动大、窑体易变形以及射流泵内压过高等,结合 EMERSON-DeltaV DCS 控制系统,提出了调整浓密压滤方式、增加 DCS 连锁控制阳极泥浆化槽的液位、阳极泥浆化槽与给料槽间的液位连锁、增设负压延时保护、改善加热系统的燃料使用和增设射流泵传感器等措施。改造后,提高了回转窑的铜阳极泥日处理能力,改善了作业环境,降低了能源消耗,减轻了工人的劳动强度,有效降低了生产成本,延长了设备使用寿命。

**[关键词]** 铜阳极泥; 硫酸化焙烧; 回转窑; DCS 控制系统; 废渣; 回收

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0076-07

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.010

## 0 引言

阳极泥是电解精炼过程中由阳极上未被完全溶解而沉淀于电解槽底部的一种细腻不溶性泥状物质,是提取贵金属和稀散金属的关键来源。阳极泥根据来源和所含金属元素的不同,可分为铅阳极泥、锌阳极泥、镍阳极泥和铜阳极泥等。其中,国内外对铜阳极泥的处理工艺主要有传统火法流程、半湿法流程、全湿法流程和选冶联合流程 4 大类<sup>[1]</sup>。相比于其他类型,半湿法流程因具有资金投入少、生产周期短、有价金属直收率高等优势<sup>[2]</sup>而被更广泛应用,其主要工艺流程为铜阳极泥→硫酸化焙烧除硒→低酸脱铜→氯化分金→亚钠分银→金银电解<sup>[3]</sup>。然而,传统的硫酸化焙烧除硒方法存在着自动化程度低、环境污染严重、设备故障率高、粗硒品位低等不足<sup>[4-5]</sup>。基于上述所出现的问题,近年来有诸多学者对硫酸化焙烧除硒过程进行了技术优化。房孟钊<sup>[6]</sup>通过改进回转窑窑尾出料系统和吸收塔材质,采用高负压、低气流的控制模式进行回转窑焙烧作业,大幅度提升了粗硒质量,降低了整个系统的能源消耗。黄维<sup>[7]</sup>设计制作了吸收塔的新型导气管和

密闭窑尾烟罩,不但使烟气能够与塔液充分接触,减少烟气通过塔液的阻力,而且有效改善了现场作业环境。肖瑞伟<sup>[8]</sup>通过优化循环水管道设计出一种减少循环水内粗硒的方法,解决了射流泵内循环水易堵塞、检修次数频繁的问题。张剑<sup>[9]</sup>选用新型保温材料并回收利用燃烧尾气余热,不仅改善了回转窑的整体保温性,还提高了回转窑的热利用率。本文结合生产实践,针对生产过程中遇到的铜阳极泥预处理不充分、喂料不均匀、窑尾负压波动大、窑体易变形以及射流泵内压力过高等问题,基于 EMERSON-DeltaV DCS 控制系统对上述问题进行优化改造,以提高回转窑生产效率及稳定焙烧渣质量。

## 1 铜阳极泥硫酸化焙烧除硒工艺及原理

铜阳极泥硫酸化焙烧除硒工艺流程主要包括浓密压滤、硫酸浆化和回转窑焙烧几个环节,如图 1 所示。

1) 浓密压滤。通过管道将铜电解产生的泥浆直接泵送至贵金属车间的浓密机进行浓密和压滤。压滤的阳极泥落入阳极泥浆化槽,压滤的上清液通过管道回送到电解系统。

**[收稿日期]** 2024-11-13

**[第一作者]** 王基福(1995—),男,山东烟台人,硕士,主要从事贵金属冶炼生产工作。

2) 硫酸浆化。铜阳极泥和 98% 浓硫酸按泥酸比 1:0.8~1.2 进行充分混合浆化,浆化时间 4 h 以上,等待泵入给料槽。

3) 回转窑焙烧。将浆化完成的物料通过喂料系统中的链轮勺均匀送入回转窑焙烧,焙烧过程中硒及硒化物被氧化成  $\text{SeO}_2$ , 硫酸分解成  $\text{SO}_2$ 。利用  $\text{SeO}_2$  在 315 °C 升华的特点,通过控制窑温的方式使  $\text{SeO}_2$  优先释放出来,通过射流泵的负压抽取烟气从窑头的排气管进入吸收塔中,与水形成亚硒酸,同时被烟气中的  $\text{SO}_2$  还原成粗硒混合于吸收塔塔液中,经粗硒压滤机压滤得到粗硒产品。阳极泥中其他杂质及化合物发生一系列的硫酸化反应转化成硫酸盐,产生的焙烧渣被送往下一道工序。

主要化学反应见式(1)~(7)。

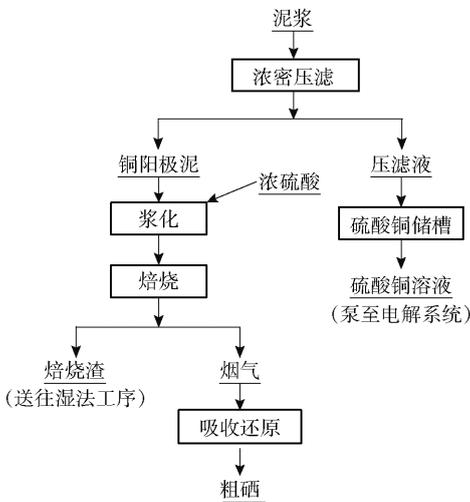
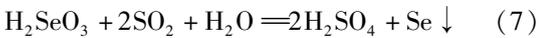
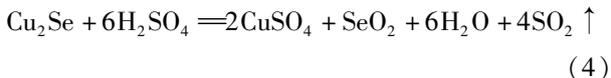
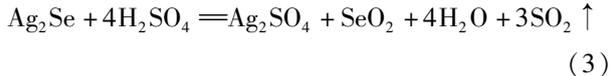
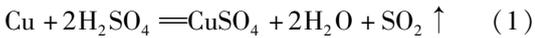


图1 硫酸化焙烧生产工艺流程

Fig.1 Production process of sulfate roasting

## 2 存在的问题

在某冶炼企业铜阳极泥焙烧工艺改进前,存在如下问题。

1) 浓密压滤时间过长,影响生产连续性。

浓密压滤的作用是将泥浆中的阳极泥和电解液进行固液分离。然而,当浓密压滤的时间过长,会造成阳极泥中缺失水量,物料在浆化槽内搅拌的不充分,导致物料在运输过程中堵塞管道,并影响浆化物料在回转窑反应不彻底,降低焙烧渣质量。当压滤机间歇性放阳极泥,造成卸料时间过长,无法确保卸料时间低于 2 h,从而影响物料的浆化时间,导致生产的不连续性。

2) 浆化时间不足,影响焙烧渣质量。

为了提高焙烧渣质量和降低回转窑结窑风险,浆化物料的时间需要维持在 4 h 以上<sup>[10]</sup>。但在生产过程中,出现浆化时间不足,导致浆化槽内的铜阳极泥与浓硫酸出现严重的分层现象,未能得到充分混合反应,导致铜阳极泥的除杂效果降低,出现“夹心”生料和“拉稀”现象,影响中间物料焙烧渣的质量;并且物料输送困难,容易堵塞管道<sup>[11]</sup>。此外,可能出现浆化槽内物料不足影响回转窑连续运行的情况;当压滤机连续性放阳极泥,造成浆化槽内的泥量过多,无法满足泥酸比 1:0.8~1.2 的生产指标,一定程度上造成物料浆化不均匀,进而引发焙烧渣出现结块情况。

3) 给料槽运行不稳定,影响均匀喂料。

当给料槽内物料不足时,回转窑出现停料空烧现象<sup>[12]</sup>,不仅造成额外过多使用燃料,还可能会引起窑体产生变形问题;另外,当给料槽补液过高时,造成“冒槽”现象,不仅会腐蚀管道,增加作业风险,还容易造成喂料系统不均,使得部分物料直接进入回转窑焙烧,导致窑内温度变化较大,增加了燃料的消耗和焙烧渣的含硒量。

4) 窑内负压波动较大,影响生产的稳定性。

当窑尾负压过低时,产生的烟气无法及时排出,造成窑内烟气大量积聚,使得焙烧的烟气再次被还原成硒及硒化物落入窑内;若窑头和窑尾密封不严密,导致烟气外溢,不仅恶化工作环境,还影响生产作业。当窑尾负压过高时,烟气中的  $\text{SeO}_2$  未能与塔液充分反应,与烟气携带的部分贵金属同时被抽送到射流泵泵体内,造成过多的热量及贵金属的损失,导致回转窑的能耗增加,粗硒品位和贵金属回收率下降<sup>[13]</sup>。当窑内负压起伏大,仍然继续往回转窑送料,会加重回转窑的运转负荷,使得进入回转窑的物料不能反应完全,产生结窑现象。

5) 窑体旋转和加热器无联锁,易产生窑体变形。

天然气是燃气式焙烧回转窑加热系统的核心燃料。整个回转窑的窑体长度为 12 m,窑体的头部和尾部设有支撑点,而中间无支撑点。当回转窑的驱动电机运转不畅或因异常情况突然发生断电,回转窑窑体因无外力驱动而停止旋转,但加热系统仍在持续供热。这一状况会产生不利影响:①在高温环境下,硫酸未能与物料充分反应而挥发,硒化物不能被完全转化,致使物料烧结形成“鹅蛋”,导致焙烧渣含硒量升高<sup>[14]</sup>;②窑内温度过高,窑体发生变形,产生设备事故,并造成燃料浪费。

6) 射流泵循环水温度过高,造成焙烧系统负压量不足。

射流泵的主要功能是用于抽出回转窑的内部烟气以稳定焙烧系统负压量。当回转窑日处理铜阳极泥量提高后,进入吸收塔的烟气热量增多,射流泵内部循环水水温会逐步上升,射流泵的负压产出量随循环水的温度升高而衰减,当水温达到 70 ℃ 以上,衰减比较严重,导致泵内部压力高,降低了射流泵的抽真空效果,并且长期会导致泵体汽蚀,致使射流泵无法正常工作,烟气无法有效处理,污染作业环境<sup>[15-16]</sup>。

### 3 DCS 控制系统及其配置

针对上述出现的问题,利用 DCS 控制系统能够实时准确监测生产过程工艺参数的特点,对回转窑焙烧生产线做出如下的改进措施。其中,DCS 控制系统的配置如图 2 所示。

工程师站和操作员站作为上位机系统,可远程监控整个焙烧生产系统的运行状态。工程师站不仅具备系统的组态功能,还有操作功能;而操作员站仅限于操作,无权对系统配置做出修改。整个生产系统的网络通信依托以太网技术实现数据的有效传输。现场设备传输的不同信号与控制柜中的各类卡件如 DI、DO、AI、AO 模块相匹配。控制器则负责控制现场设备的状态,并向操作员反馈过程数据。作为下位机,回转窑 PLC 柜直接控制从喂料到窑内反应的整个生产过程。

为建立上位机和下位机间的同步数据传输,采用 Profibus-DP 现场总线,完成 DCS 控制系统和回转窑 PLC 柜之间的通信网络,实现了对回转窑焙烧

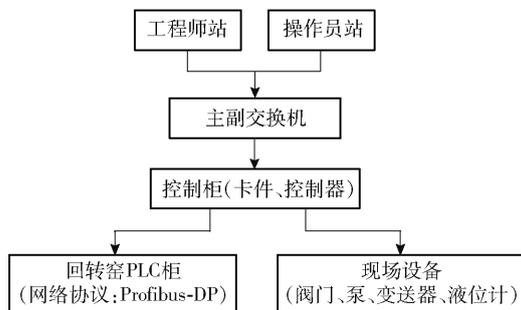


图 2 DCS 控制系统的配置

Fig. 2 Configuration of DCS control system

生产线的远程控制,并有效提升回转窑运行状态的实时监测能力。

## 4 技术改进措施

### 4.1 保障浓密压滤时间,提升生产作业率

为了优化生产流程并显著提升作业效率,确保浓密压滤过程的持续时间得到有效保障。通过调整泥浆的厚度和浓密机耙架的提升高度,使得物料的浓密度高于压滤机的压滤量,并保证压滤机进料阀的进料压力低于 0.7 MPa,以实现精准压滤,并能有效控制卸料时间不超过 2 h,促进生产线的连续稳定运行,从而大幅度提高整体生产效率。

### 4.2 稳定浆化时间,提高硒的回收率

由阳极泥浆化槽的规格  $\Phi 2\ 000 \times 1\ 850\ \text{mm}$ ,在其上方配置 1 台 E+H FMR60 系列的雷达物位计以实现阳极泥浆化槽液位的精准计量。根据阳极泥浆化槽溢流口与出料口的高度,在工程师站 DCS 控制系统中的 Control Studio 分别设置液位高高报、高报和液位低报、低低报阈值,通过将组态好的软件进行下装,实现了在工程师站和多个操作员站对浆化槽液位监测变化情况。根据浆化槽内搅拌料浆溅起的高度及料面的缓冲距离,将高报阈值设置为低于溢流口 100 mm 处,而高高报阈值则位于溢流口下方 50 mm 处;低报阈值设置为高于出料口 50 mm 处,低低报阈值则位于出料口上方 30 mm 处。此种设置方式可对槽内料浆液位进行提前告警,便于作业人员根据实际生产情况进行补料或给料的调整。设置液位高高报和低低报的二级保护机制旨在防止料浆溢出或耗尽,而设置液位高报的目的是防止在加浓硫酸和卸铜阳极泥时发生溢流,减少“冒槽”现象发生。设置液位低报的目的为满足浆化时间提醒作业人员可提前做好准备,同时可有效保证浆化槽

内物料的充足性。

### 4.3 设置联锁保护装置,提高自动化程度

在浆化泵和给料槽之间新增规格  $\Phi 2\ 000 \times 1\ 100\ \text{mm}$  的储料槽,并在工程师站 DCS 控制系统中的 DeltaV Explorer、Control Studio 和 DeltaV Operate Configure 进行设置液位高低报阈值、设置联锁保护装置和完善系统操作画面。储料槽内置搅拌设施能有效保证存储料浆质量,储料槽的上方安装型号为 E + H FMR60 系列的雷达物位计监测物料实时液位,设置液位高低报阈值并与浆化泵之间设置启停联锁。当储料槽液位低于或高于阈值时,触发联锁浆化泵自动对储料槽进行补料或停料作业,保证储料槽内物料的充足性。储料槽与给料槽之间安装博雷 S19-92 系列切断阀,并在给料槽安装雷达物位计以有效监测物料实时液位,当给料槽液位低于或高于阈值时,触发联锁 DCS 系统能有效开启或关闭切断阀,完成储料槽与给料槽之间的补料作业,确保给料槽内的料浆充足性及稳定性。通过上述措施可实现上料-储料-补料-给料的自动化无人操作,并能够确保给料槽的链轮勺均匀喂料,有效提高生产运行的整体质量及稳定性,减少操作人员作业劳动量,为安全生产提供有效保障。

### 4.4 增设延时保护,减轻设备运转负荷

在窑尾负压和回转窑窑尾处的放空阀门间设置了联锁保护装置并加设报警和联锁延时保护。加设联锁延时保护的目的在于防止其他情况造成的瞬间波动所引起的系统误操作而设置的有效保护。当窑尾负压高于临界阈值并超出预设延时,触发管道放空阀门,打开放空阀进行窑尾卸压至正常窑尾负压值再将放空阀关闭;当窑尾负压低于临界阈值并超出预设延时,触发 DCS 系统报警,通过增开射流泵台数的方式调整窑尾负压至正常窑尾负压值。设置这一联锁保护机制能够减轻回转窑的运转负荷,改善焙烧渣质量。

### 4.5 新增窑体驱动减速机和加热器联锁,减少设备事故发生

天然气进气主管道和排气管道处安装博雷 F15 系列切断阀,并且在回转窑上方和侧方一共安装了 4 台防爆型天然气气体检测报警器 (Exd IIC T6 GB 防护等级 IP67),二者之间做联锁保护机制。当天然气的烧嘴损坏或天然气进气主管道破损,天然气气体检测报警器检测到天然气有泄漏,气体报警器

被触发能第一时间进行有效联锁,立即关闭天然气主管进气阀门;同时打开排空阀,将留存在管道内部的部分天然气外排。当回转窑驱动减速机停止,停止回转窑的旋转状态,触发联锁保护装置,停止加热器供热装置。这一改造可有效减少安全生产事故的发生概率,保证作业现场的安全生产,减少能源损耗。

### 4.6 新增传感器,降低设备故障率

在射流泵现场新增显示操作箱,配备 1 台四回路温度巡检仪和 3 台两回路电流数显仪。在 3 个冷却循环水箱的上方单独增加 EJA530E 系列压力变送器 1 台,可实时检测冷却循环水箱压力,同时射流泵水箱安装防腐 K 型热电偶实时进行有效的温度监测,操作人员根据现场温度反馈值映射出射流泵内部循环水的实时情况,通过综合分析得出射流泵内部的压力状态,从而判断出哪个射流泵能够提供较好的窑尾负压;同时在射流泵电机电源线上新增电流传感器,监测通过射流泵电流大小判断其正常、超负荷还是空转的运行状态。这一举措有利于工作人员及时养护设备,提高设备的使用效率及延长寿命。

## 5 生产实践应用

目前,经过改造后焙烧生产线的整体工艺流程如图 3 所示。通过上述技术改进措施,取得了较好的效果。

1) 浓密机运作的的关键参数是提耙高度和驱动压力。其中,提耙高度一般保持在  $15 \sim 16\ \text{mm}$ ,可保证浓密机较好的搅动效果。驱动压力与回转窑的给料电机频率密切相关。当回转窑的给料电机频率设置为  $15\ \text{Hz}$  时,驱动压力达到  $0.4 \sim 0.6\ \text{MPa}$ ,此时物料的浓密量接近于压滤机的压滤量;当回转窑的给料电机频率设置为  $18\ \text{Hz}$  和  $22\ \text{Hz}$  时,驱动压力可分别达到  $0.6 \sim 0.8\ \text{MPa}$  和  $0.8 \sim 1.0\ \text{MPa}$ ,此时物料的浓密量高于压滤机的压滤量。在此情况下,接收的泥浆量由原先的  $2 \sim 3\ \text{t}$  提升至  $4 \sim 5\ \text{t}$ ,扩大了泥浆的接收量,进而提高铜阳极泥的日处理量。

2) 浆化槽的高度是  $1\ 850\ \text{mm}$ ,对其做出以下报警阈值设置方式,如表 1 所示。在生产期间,浆化槽未出现冒槽和内部物料耗尽的情况,且物料的浆化时间满足了至少  $4\ \text{h}$  的要求。另外,从浆化槽泵入储料槽的管道运行顺畅,未发生堵塞,回转窑的连续

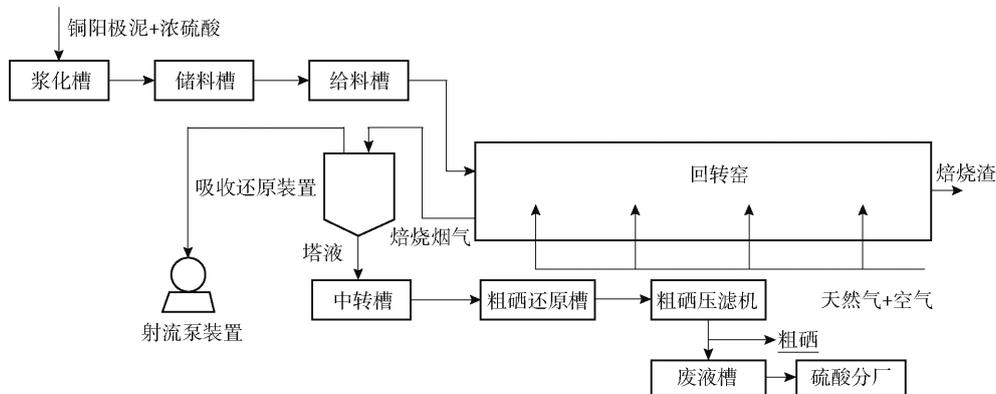


图 3 改造后的硫酸化焙烧生产工艺流程

Fig. 3 Modified production process of sulfate roasting

运行效率提升 20%，粗硒回收率也由原来的 92% 提升至 95% 以上。

表 1 浆化槽的报警阈值

Table 1 Alarm threshold for slurry tank mm

名称	高度值
浆化槽溢流口	1 600
浆化槽高高报阈值	1 550
浆化槽高报阈值	1 500
浆化槽低报阈值	290
浆化槽低低报阈值	270
浆化槽出料口	240

3) 回转窑实现上料-储料-补料的自动化无人操作是基于浆化泵和储料槽液位的联锁、储料槽液位和给料槽与储料槽间切断阀的联锁, 2 个联锁的具体数值如表 2 和表 3 所示, 其中储料槽和给料槽的尺寸分别是  $\Phi 2\,000\text{ mm} \times 1\,100\text{ mm}$  和  $\Phi 1\,400\text{ mm} \times 1\,100\text{ mm}$ 。2 个联锁的增加有效将浆化槽到回转窑之间操作的连贯性提高了 10%，操作人员的作业劳动量减少了 10% ~ 15%。

表 2 浆化泵和储料槽液位的联锁值

Table 2 Interlock value for slurry pump and level of storage tank mm

名称	高度值
储料槽溢流口	950
储料槽高报值	900(停泵)
储料槽低报值	500(开泵)
储料槽出料口	150

表 3 储料槽液位和给料槽与储料槽间切断阀的联锁值

Table 3 Interlock value for level of storage tank and shut-off value between feed tank and storage tank mm

名称	高度值
给料槽溢流口	950
给料槽高报值	储料槽和给料槽的高度差值为 2, 延时 5 s(关阀)
给料槽低报值	300(开阀)
给料槽出料口	150

4) 回转窑工作时, 窑尾负压保持在  $-1\,000 \sim -300\text{ Pa}$ 。当窑尾负压低于范围值时, 通过增开 1 ~ 2 台射流泵或更换盘根的方式, 烟气积聚厂房的概率下降了 50% 以上, 有效改善了作业环境; 当窑尾负压高于范围值时, 触发放空阀卸压, 有效降低回转窑运转负荷, 天然气的日消耗量由原来的  $260\text{ Nm}^3$  降到  $220\text{ Nm}^3$ , 节省了天然气的能耗。

5) 天然气气体检测报警器高低限报警值为 50% LEL 和 25% LEL。当天然气主管道或烧嘴处泄漏, 超过报警器高低限报警值, 触发报警器和切断阀的联锁, 有效保障生产的安全性。当停止回转窑的驱动减速机, 触发驱动减速机和加热器的联锁, 停止回转窑供热系统, 降低窑体变形发生概率, 节省天然气消耗  $20 \sim 25\text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

6) 射流泵工作时, 水箱压力为  $-70 \sim -30\text{ kPa}$ , 温度  $\leq 70\text{ }^\circ\text{C}$ , 电流为  $24 \sim 27.5\text{ A}$ 。当水箱压力或温度高于正常运行范围值时, 需要倒换射流泵, 增加射流泵的抽真空效果, 更换原射流泵水箱冷却水用于

下次生产;当电流显示值高于正常运行范围值时,停止射流泵,常见原因有轴承或叶轮磨损变形,需检查射流泵情况;当电流显示值低于正常运行范围值时,射流泵作业效率偏低,常见原因有叶轮或管道内存有粗硒,及时进行清理。这不仅降低了作业环境污染率,延长射流泵使用寿命约2~3 a,还降低了射流泵叶轮磨损率达20%,节省维保费用约2万元。

## 6 结论

经过一系列的技术改造和设备优化,回转窑焙烧生产线及配套设施已达到预期的性能指标,显著提高了生产的稳定性和效率。

1)通过浓密机和回转窑给料电机的紧密结合,动态调整运行参数,能实现浓密机泥浆的接收量由原来的2~3 t提高至4~5 t,为提升回转窑铜阳极泥的日处理能力奠定了坚实基础。

2)通过在浆化槽加装雷达物位计和设置报警阈值,能够实时监控泥酸量和浆化时间,保障铜阳极泥的浆化质量和物料输送的顺畅性,促进粗硒回收率由原来的92%提升至95%以上。

3)通过增加浆化泵和储料槽液位、储料槽液位和给料槽与储料槽间切断阀的联锁,实现了岗位的无人化作业,降低了操作人员劳动强度达10%~15%,同时回转窑的连续性提升10%。

4)通过增设窑尾负压和回转窑窑尾放空阀的联锁保护机制,调整窑尾负压范围,不仅使烟气积聚厂房的概率下降了50%以上,改善了作业环境,还降低设备的运转负荷,天然气的日消耗量由原来的260 Nm<sup>3</sup>降至220 Nm<sup>3</sup>。

5)通过增加窑体驱动减速机和加热器联锁,有效减少了天然气不必要的损耗,节省天然气消耗20~25 Nm<sup>3</sup>/h,降低了窑体变形的发生概率,可防止物料烧结。

6)通过在射流泵增加温度和电流传感器及压力变送器,能够实时监控射流泵的运行状态,降低射流泵叶轮磨损率达20%,节省维保费用约2万元,延长设备使用寿命2~3 a。

因此,智能化生产是回转窑实现产业升级的关键所在。在未来的发展中,智能化改造将推动铜冶炼行业的产业升级和技术进步,进而提升整个行业的竞争力和可持续发展能力。

### [参考文献]

- [1] 郭学益,陈建儒,王松松,等.铜阳极泥典型处理工艺研究进展[J].中国有色金属学报,2023(12):4130-4151.
- [2] 肖鹏,王红军,叶逢春,等.稀散金属硒、碲回收工艺现状与展望[J].金属矿山,2020(4):52-60.
- [3] 刘元辉,张善辉,贺东晓,等.高硒碲铜阳极泥协同高铜渣硫酸化焙烧工艺研究[J].中国有色冶金,2024,53(5):95-102.
- [4] 邱亚丽,石凤浜,吕克新.铜阳极泥焙烧及分铜工序的技术改造[J].有色冶金节能,2020,36(2):13-17.
- [5] 周彝.回转窑焙烧蒸硒工艺优化实践[J].有色冶炼,2002(3):28-29.
- [6] 房孟钊.从铜阳极泥中高效分离回收硒的技术优化[J].硫磷设计与粉体工程,2022(5):36-39.
- [7] 黄维.回转窑烟气环集系统改造[J].铜业工程,2020(2):82-84.
- [8] 肖瑞伟.回转窑循环水系统优化改造[J].铜业工程,2021(3):58-59.
- [9] 张剑.降低回转窑天然气单耗技术改造实践[J].湖南有色金属,2021(4):35-36.
- [10] 李伟.大冶公司蒸硒回转窑的改造实践[J].湖南有色金属,2008(1):67-69.
- [11] 马志玫.铜阳极泥硫酸化焙烧工艺改造与实践[J].甘肃冶金,2010(3):115-117.
- [12] 农大桂.铜阳极泥处理工艺的改进[J].中国有色冶金,2004(6):44-46.
- [13] 吕喜聪.从阳极泥中高效回收硒的工艺、设备改进综述[J].铜业工程,2014(3):40-44.
- [14] 朱瑛昕,钱宏光,李新.从铜阳极泥中回收粗硒的生产实践:中国熔池熔炼技术及装备专题研讨会论文集[C].北京:冶金出版社,2007.
- [15] 潘天宇,谷文.提高硫酸化焙烧-还原法处理电解铜阳极泥生产粗硒回收率的生产实践[J].中国有色冶金,2020,49(1):54-56.
- [16] 姜子维,叶凌,曹霞,等.发烟硫酸智能装酸系统的设计与应用[J].硫酸工业,2024(6):61-64.

## Intelligent transformation of equipment for sulfate roasting process of copper anode slime

WANG Jifu, LIU Peisong, DU Shaojun, SHI Fengbang

(JCC Guoxing (Yantai) Copper Co., Ltd., Rare and Precious Metals Branch, Yantai 264006, China)

**Abstract:** The anode sludge produced during the copper electrolytic refining process, in which precious and rare metals can be extracted, has important economic value. Based on the problems existing in the copper anode sludge roasting process of a smelting enterprise, such as insufficient pretreatment, uneven feeding, large fluctuation of negative pressure at the end of the kiln, easy deformation of the kiln body, and excessive pressure in the jet pump, combined with the EMERSON - DeltaV DCS control system, optimization measures were proposed, such as adjusting the dense pressure filtration method, increasing DCS interlock control of the anode slime tank's liquid level, establishing liquid level interlock between the anode slime tank and the feed tank, adding negative pressure delay protection, improving fuel usage in the heating system, and adding vacuum pump sensors. After these improvements, the daily processing capacity of the rotary kiln for copper anode slime had been increased, the working environment had been improved, energy consumption had been reduced, the labor intensity of workers had been reduced, production costs had been effectively lowered, and equipment lifespan had been extended.

**Keywords:** copper anode slime; sulfate roasting; rotary kiln; DCS control system; waste; recycling ▲

(上接第 69 页)

to simulate the distribution of electric field, thermal field, and Joule heat during the melting process of the electric furnace. User-defined functions (UDF) are utilized to incorporate source terms such as electromagnetic force and Joule heat into the momentum conservation equation and energy conservation equation. Additionally, complex physical phenomena in the arc zone and molten pool zone, such as electrothermal conversion, electromagnetic induction, and magnetic field disturbance, are taken into account. The simulation results show that the current flows from the electrodes, forming distinct current paths between the electrodes and the furnace bottom, between the electrodes themselves, and between the electrodes and the furnace side walls. As the melting time increases, Joule heat accumulates near the arc, causing the furnace temperature to rise continuously and resulting in a pronounced proximity effect. After 40 minutes of melting, the maximum value of Joule heat is  $3.07 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ , and the highest temperature is 5 182 K; by 50 minutes, the maximum value of Joule heat increases to  $3.45 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ , and the highest temperature rises to 5 379 K. Furthermore, as the applied voltage increases, a crucible zone with higher temperature gradually forms below the electrodes. The highest temperature in the arc zone increases from 4 853 K to 5 833 K, and the peak temperature of the molten pool rises from 1 891 K to 2 026 K. This indicates that increasing the applied voltage helps to raise the overall temperature of the ore zone, thereby enhancing the melting efficiency.

**Keywords:** multi-physics field; submerged arc furnace; temperature field; Joule heat; ferronickel; molten pool; melting ▲