

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.02.005

阴极铜表面质量缺陷把控关键性技术实践

周楠

(江西铜业股份有限公司 贵溪冶炼厂,江西 贵溪 335424)

摘要:阴极铜质量的稳定关系到企业品牌形象的稳固和产量任务的顺利完成。获得板面平整、结晶致密、化学成分合格、物理外观良好的阴极铜一直是贵溪冶炼厂电解车间提升工艺技术水平的工作重点。通过对阴极铜表面质量影响因素的综合分析,深入追踪阴极铜电解生产环节中由物料指标控制、循环系统生产环境、产品输出洗涤质量所带来的一系列不足之处,从中总结归纳出阴极铜表面质量缺陷把控关键性技术措施,为阴极铜电解生产质量的提高做出进一步的保障。

关键词:阴极铜;表面质量;电解;工艺;生产实践

中图分类号:TF811

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)02-0028-07

Practice of Key Techniques for Controlling Surface Quality Defects of Cathode Copper

ZHOU Nan

(Guixi Smelter, Jiangxi Copper Company Limited, Guixi 335424, Jiangxi, China)

Abstract: The stability of copper cathode quality is related to the stability of enterprise brand image and the successful completion of production tasks. Obtaining cathode copper with flat surface, dense crystal, qualified chemical composition and good physical appearance has always been the key work of electrolytic workshop of Guixi Smelter to improve process technology level. Through a comprehensive analysis of the factors affecting the surface quality of cathode copper, a series of deficiencies in the production process of copper cathode electrolysis brought about by material index control, circulation system production environment and product output washing quality in the production process of cathode copper electrolysis were deeply tracked, and the key technical measures for the control of cathode copper surface quality defects were summarized to further guarantee the improvement of cathode copper electrolysis production quality.

Key words: cathode copper; surface quality; electrolysis; technology; plant practice

阴极铜表面质量反应的是产品物理外观的品相,优质的阴极铜产品质量可以保证后期加工时电铜的拉伸、延展、导电性能。为打造引领行业发展的世界知名品牌,江西铜业集团有限公司全力实施高质量发展“三年再提升行动”,朝着高质量实现“双过半”目标,在抢抓机遇中乘势而上,加快构建现代化产业体系。为彰显江铜的品牌影响力和品牌美誉

度,企业要从过去的注重生产速度向注重产品质量进行创新转变。提高阴极铜产品质量是公司的基本要求,也是江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂(以下简称贵冶)电解车间的重点攻关项目。为提升贵冶阴极铜产品在市场上的产品竞争力与经济效益,确保产品质量的连续性和稳定性,满足客户日益增长对阴极铜质量的要求,贵冶铜电解车间不断改善优

收稿日期:2023-10-08

作者简介:周楠(1987-),男,本科,工程师

化铜电解精炼生产运行工艺关键性技术经济指标,规范生产管理手段,对各项攻关项目开展更大范围的研究与应用,并持续跟踪应用效果,不断总结、完善与创新,进一步提高阴极铜精炼技术和产品质量。

1 阴极铜表面质量影响因素分析

1.1 物料供给

传统的铜电解精炼采用薄铜始极片为阴极,阳极铜板为阳极,电解液主要成分是含游离硫酸根的硫酸铜溶液^[1]。阳极铜的主品位高低情况、夹杂在铜基体中与铜晶粒界面处各类粒度极细小的杂质含有量情况,以及阳极铜的物理规格、外观与垂直度等工艺技术指标都能严重影响阴极铜产品表面质量^[2]。铜始极片成分的稳定及其单重标准偏差都是阴极铜能够稳定电解精炼生产的良好开端。经机组加工工序制作而成的始极片,其关联的始极片悬垂度是工艺控制技术关键指标,也是阴阳极极间短路与阴极铜电流效率的重要影响因素。

1.2 阴极铜生产环境

铜电解过程中,阴阳极板之间的电解液成分不断发生变化,因此需要源源不断地循环成分相对稳定的电解液作为优质载体^[3]。通过日常生产摸索工艺控制参数,形成相对稳定的指标控制标准,通过对循环系统总体积模块的精准计算,进一步精细控制电解液流量、温度、铜酸浓度等工艺指标。同时,为了保持电解液成分在技术条件所要求的范围内,确保阴极铜生产处于较好的环境载体之中,必须持续对电解液进行净化和调整,以稳控电解液中的铜、酸、杂质浓度的平衡,降低对阴极铜产品质量的危害^[4-6]。

1.3 阴极铜外观洗涤质量

阴极铜产品外观品相洁净度能最直观地表现阴极铜外观洗涤质量。阴极铜板面附着的铜绿等杂质如果进入铜加工熔炉,就会导致液态金属激烈搅动和沸腾,致使生产出带缺陷的铜加工产品,无法应用于关键产品^[7],因此提升阴极铜产品洗涤质量也是贵冶电解车间的重要工作之一。

2 阴极铜表面质量缺陷问题综合分析

阴极铜表面质量缺陷主要分为三个方面。第一,阴极铜表面存在凹陷,主要表现为电铜表层生长气孔或麻孔;第二,阴极铜表面形成凸瘤,表现为阴极铜各类节瘤粒子的生长;第三,阴极铜表面附着杂物,在产品输出时电铜洗涤质量影响阴极铜表层外观品质。

2.1 阴极铜表层气孔

在铜电解精炼生产过程中,电铜表层时而出现的气孔或麻孔会使阴极铜表面电流密度分布不均,电流密度较大的局部区域其杂质易在其中析出,而气孔或麻孔中的气泡也阻隔了铜离子在阴极表面的析出,进而影响阴极铜成分^[8-10]。同时,阴极铜表层气孔或麻孔易夹杂残留电解液,对机组的洗涤操作提出巨大挑战,阴极铜表面未洗涤干净易形成铜绿,造成品质变差。图1为阴极铜表层气孔或麻孔形成示意图。

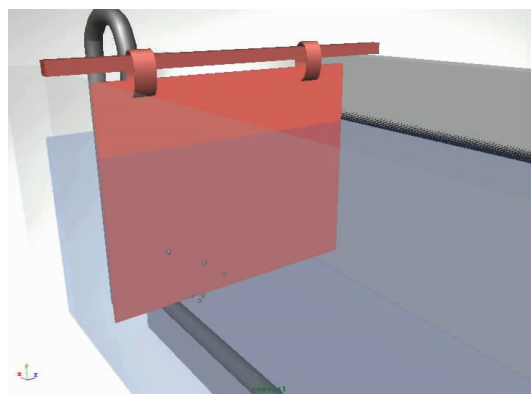


图1 阴极铜表层产生的气孔或麻孔

Fig.1 Air holes or pockmarks produced on the surface layer of cathode copper

分析阴极铜表层气孔或麻孔的成因,大致可分为以下几种情况:

集液高位槽电解液跑空;

循环集液槽液位偏低,液下循环泵吸入口离液面较近,吸入空气;

电解液循环系统管道泄漏点较多;

循环系统管道及分配包排气不畅,停循环时、重新开循环时未排气;

高位槽与电解槽高低位差太大,高落差容易形成负压,从法兰、阀门处吸入空气,同时高位槽回流过大时致使循环集液槽内电解液翻腾,卷起大量气体,循环液下泵吸入含有大量空气的电解液。

贵冶电解车间一系列共分有5个生产系统,其中老7.5万t生产系统存在时间最久,生产槽数较多,其高位槽在安装位置在20m高度,到电解槽落差巨大,系统体积控制稍微波动就会导致空气进入电解液中,导致阴极铜生长气孔,对阴极铜质量影响较为严重。

2.2 阴极铜表层凸瘤

阳极铜表层凸瘤粒子的生长主要原因是电铜表

层电力线的均匀分布被破坏,局部区域电流密度相对较高,就会形成节瘤粒子^[11]。阴阳极板间距的均匀排列,以及电解液载体的工艺稳态精细化控制又是其中电流密度分布均匀的两个最主要原因。因此,以下从物料指标控制与阴极铜生长环境载体两大方面深入分析。

2.2.1 极板物料指标控制力度不足

影响阴阳极板间距均匀排列的最主要因素是极板的垂直度^[12]。阳极铜铣耳两侧铣削长度不规则,阳极经压力机校平后在横送梁定位不准,其原因为横送控制油缸无减速。阳极铣削装置电机功率为 5.5 kW,皮带传动,无法提高铣削深度,所以阳极板悬垂度指标控制较差。阳极拒收率不够,单重偏差与极板锥度将会超标。随着超大量薄铜始极片生产需要,其板面应力分布实时不断变化,因此贵冶电解机组整形工序现有压纹装置已很难适应。为消除应力,提高始极片的垂直度,压纹辊选择对始极片的细纹路压纹较深,但是在电解过程中过深的纹路缩短了极间距离,容易生成纹路粒子。同时压纹纹路较窄,对于整体板面的塑型能力有限,消除应力能力不太理想。因此,为强化应力重整,减少二次应力效应,需要研发新型压纹设备与压纹方式,提升铜始极片垂直度工艺技术关键指标。薄铜始极片压纹整形装置示意图如图 2 所示。



图 2 薄铜始极片压纹整形装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of embossing and shaping device for thin copper starting sheet

在极板出装槽作业过程当中,提高阴阳极板出装槽作业质量亦是进一步强化阴阳极板在电解槽内的垂直分布,进而控制阴阳极板极间各种成型凸瘤粒子的生长,最终让阴极铜表面质量得到质的提高,达到企业制定的标杆指标,并为今后类似的项目攻关提供可借鉴思路。

2.2.2 电解液环境载体稳态化控制欠缺

电解液环境载体铜酸比波动大,电解液导电性

变化大,会造成槽内通过每块极板的电流不均匀,导致凸瘤粒子的生长^[13]。循环系统体积平衡是控制电解液铜、酸、添加剂等浓度稳定性的关键,给电化学反应提供良好的电解液环境载体,保障优质阴极铜电解精炼过程能顺利进行^[14],因此电解液循环系统总体积动态平衡控制是铜电解生产的重要工艺指标之一。

如图 3 所示,贵冶铜电解循环系统的主要组成部分由各个储存槽罐与管道构成,全系统电解液在其中动态流通形成循环总回路。在日常生产运行时电解液的分配存放和换液、生产现场清洗用水导流和系统水分蒸发量的不确定性,提高了总体积的控制难度。建立循环系统总体积精算控制标准,以此基准计算铜酸补充量、电解液净化量和添加剂吨铜消耗量,才能精准控制电解液成分,进一步提高电解液循环系统的稳定性。

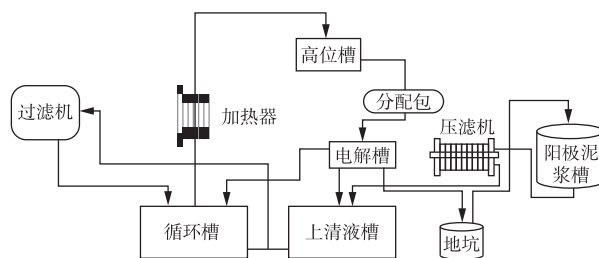


图 3 铜电解循环系统动态平衡示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic balance of copper electrolysis cycle system

同时,铜电解过程中,阳极溶解时夹杂的 As、Sb、Bi 都以 3 价形态溶入电解液,并立即水解而分散于电解液和阳极泥等各物料中^[15-16],杂质 As、Sb、Bi 水解后在系统的具体分布情况如图 4 所示。由图 4 分析可知,杂质 As 大部分进入电解液,而 Sb 和 Bi 大部分进入阳极泥,因此杂质 As 对阴极铜产品质量的影响力度较大。随着产能的扩大,外购杂铜原料复杂多变,同时又受采购因素影响,无法均衡进入电解系统进行精炼,导致系统电解液成分波动较大。低砷阳极进入系统时,溶解的 As 含量偏低,导致 As/(Sb+Bi) 的摩尔比偏低,最终造成漂浮阳极泥的大量形成,影响阴极铜产品质量。含高砷的粗杂铜进入精炼系统时,不仅超出现有除杂能力,同时影响阴极铜正常生产。高杂阳极含镍较高时,会造成系统镍离子浓度超标,影响阴极铜质量,同时也增加了电解液电阻,造成电解电耗上升。因此每日都要根据电解液样品的化验结果精准计算吨铜净液量,以适应高杂原料阳极电解技术工艺,从而提高阴极铜表面质量。

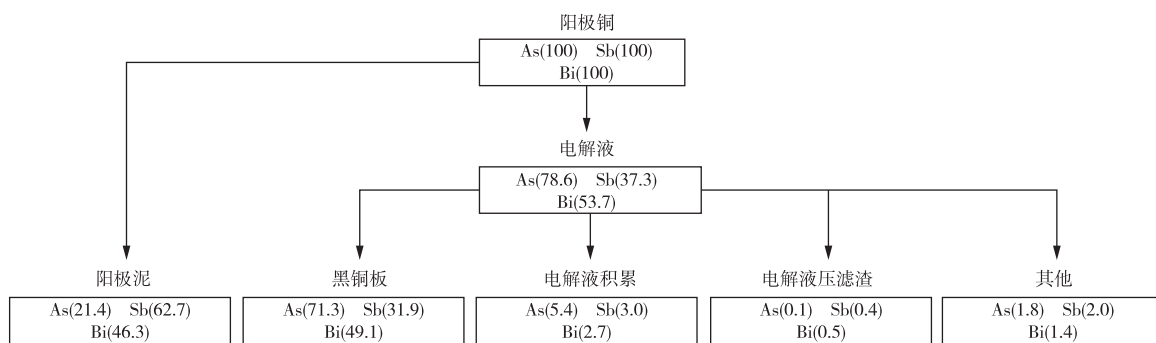


图 4 阳极杂质 As、Sb、Bi 进入电解系统的分布

Fig. 4 Distribution of anode impurities As, Sb, and Bi into the electrolytic system

2.3 阴极铜表面外观洗涤质量有待加强

通电生产过程中电解槽内液位线的改变, 电解液表面漂浮的少量杂质附着在阴极铜液位线, 最终形成阴极铜上口白尘而影响外观。电铜在吊机吊出槽后, 吊耳内残存的酸水渗出, 造成板面存在硫酸铜结晶。洗涤水箱分为三个清洗区域, 洗涤完成后吊耳的夹缝中还存在残留的电解液。阴极铜板面残酸结晶是最明显的外观品相问题, 其中吊耳处结晶占比达 83%。分析发现, 吊耳处结晶无法完全化开, 积液吸附在夹缝中, 机组洗涤喷头角度不对, 喷头水流冲击力不够, 最终造成阴极铜表面质量洁净度不达标。

3 阴极铜表面质量缺陷把控关键性技术措施

3.1 阴极铜表层气孔防治技术措施

为防止阴极铜表层气孔生长, 消除循环系统吸入空气的风险隐患, 需保证循环集液槽液下泵的抽液量, 确保高位槽回液管维持少量溢流, 在高位槽出口管上增设气动阀防止高位槽跑空, 在电解槽的槽头阀上装节流孔板, 平衡电解液供求稳定; 严格控制循环集液槽液位体积, 以尽可能消除液下循环泵吸入空气的风险, 降低高位槽回液管中的电解液与循环集液槽液面落差; 发现漏点及时处理, 及时将泄露严重的玻璃钢管道和 FPR 管道阀门更换为较为稳定与耐用的聚丙烯和钢衬复合 PE 材质, 进一步降低循环系统吸入空气的可能性; 在分配包上增设排气阀, 保持排气通畅; 系统因检修等原因停止循环后开启循环时一定要注意充分排气。

改造原有老旧高位槽, 由原来的厂房三楼移至厂房二楼, 大大降低了液位落差。贵冶电解车间根据高位槽的标高设计在一系列东扩生产系统已经成功应用的先例, 完成高位槽与 3 台 TS20 板式换热器的基础地基浇筑; 将高位槽吊装至指定位置, 铺设

高位槽的回液管, TS20 板式换热器与高位槽的对接管, 高位槽的出口管道阀门, 高位槽出风口与环保风机的对接管, 安置分液器, 安装高位槽出口 DN300 铸铁隔膜阀和气动阀。提前把高位槽出口 3 个 DN300 气动阀所需的电源和风源、仪表上显示操作联锁方式确认, 高位槽温度计、液位计安装方案确定好。图 5 为新高位槽设计示意图。分配包重新设计为长筒状容器, 材质由原来的玻璃钢 FPR 改为钢带骨架复合 PE 材质, 目前在主循环管道上都是采用该材质材料, 其耐温、绝缘、稳定性佳, 能有效降低泄漏风险, 并且日常维修能够更简单快捷。这项系统改造工作完成后能从根本上解决老 7.5 万 t 生产系统的阴极铜表层生长气孔的问题。

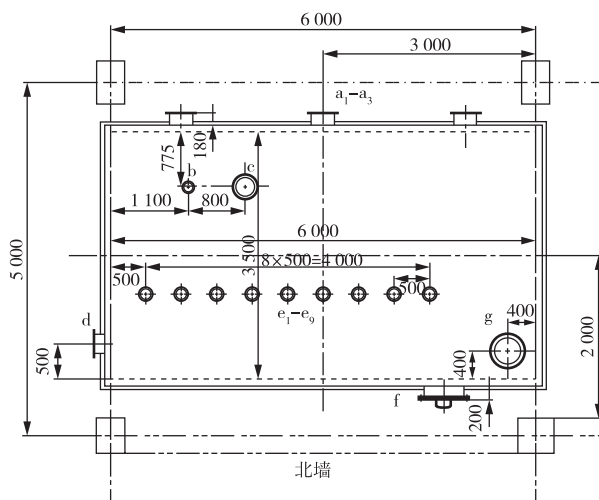


图 5 新高位槽设计示意图(单位:mm)

Fig. 5 Schematic diagram of the new high tank design (Unit:mm)

3.2 阴极铜表层凸瘤粒子防治技术措施

3.2.1 强化极板物料指标控制力度

为提高阳极铈耳对称性, 采用双向液压阀组控制减速方式, 提高了横送装置的稳定性及定位的精

确性。对铣削系统进行了改进,将铣削电机功率由 5.5 kW 提高到 15 kW,对皮带轮传动比重新设计,铣刀转速由原来 1 000 r/min 提高到 2 000 r/min,改进后铣耳长度可达到 60 mm,阳极垂直度显著提高。增设阳极称重装置与厚度检测装置,加强阳极拒收。薄铜始极片压纹辊压纹时,适当拓宽纹路和减少纹路深度对于消除压纹应力有着综合提升效果,其示意效果图如图 6 所示。

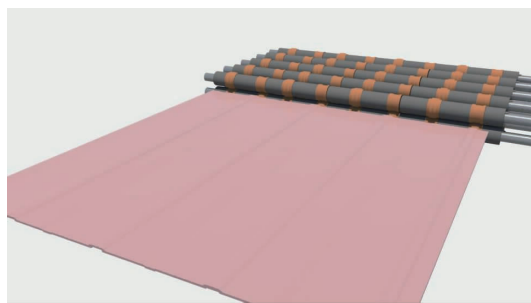


图 6 压纹辊改造后宽纹压纹效果图

Fig. 6 Wide grain embossing effect after embossing roller modification

测试后以纹路宽度 30 mm、深度 1.4 mm 投入生产应用中,铜始极片垂直度有明显的提高趋势,抽取改造前后一个月验证试验始极片垂直度数据进行对比,结果如图 7 所示。通过图 7 数据对比分析可知,薄铜始极片指标垂直度统计数据平均值达到 9.85 mm,进入电解槽生产极间距离分布更加均匀,生产出的阴极铜外观平整,板面粒子现象得到显著改善,阴极铜质量实现跨越式提升。

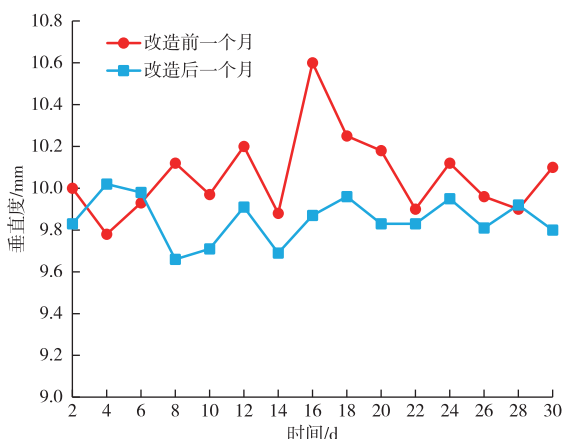


图 7 改造前后一个月验证试验始极片垂直度

Fig. 7 Perpendicularity of starting plate before and after one-month verification experiment

均衡传统法电解各类阳极装槽比例,确保循环系统电解液成分不会大幅波动。阳极整缸时单块极

距应均匀,板面上下保证良好的垂直度,装槽尽量保持阳极在槽内悬垂方向略北,对于车间阳极装槽的作业方向可以解释为“略往南靠”。始极片下槽应注意与阳极板均匀对称,对于偏差过大的单个槽子需打好阴阳极排列,防止侧面粒子产生或整槽肥边形成凸瘤。极板照缸操作时做到极距均匀,阴极板应适当远离阳极脱模面,靠近浇筑面。对于板面变形、导电棒损坏、板面形成铜瘤等不合格的始极片应及时挑出更换。重新定位好各个阴极铜液位标准,解决电铜上口粗糙问题。过程管理中及时发现阴极铜表层凸瘤生长,及时去除,防止电铜结晶粗糙甚至形成粒子,从而改善电铜外表质量。加强通电初期对初始短路率的检查,加大极间短路考核力度,从而强化出装槽质量。通过改变作业顺序,极间短路处理与出装槽作业错开操作,保证日均单遍短路平均处理量超过 80%,及时消除阴极铜结瘤粒子生长。

3.2.2 循环系统稳态控制精细化

建立循环系统体积平衡精算控制自动化系统并应用于日常铜电解精炼生产,稳步优化系统总体积工艺技术指标。精算单极槽、双极槽、半周期阳极槽和空电解槽 4 类存液槽的总体积,再加上循环系统总回路体积,提高体积控制计划精确度。为控制电解液成分,结合循环系统体积控制为核心的分级指令管控模式,推算系统电解液补给量与蒸发量,在合理范围内消化存液、换液、倒返净化液、生产用水、机组动态换水等因素造成的体积波动。建立循环系统总体积精算数学模型,确定各个组成部分数据控制标准,导入由控制站、操作站、工程师站和通信线路构成的 HS2000DCS 自动监控系统,可在 HS2000DCS 自动监控系统上观察实时时间点与过去任何一个时间点当中的循环系统总体积动态平衡的变化过程。贵冶铜电解车间的循环系统总体积控制计算参考数据如表 1 所示。

与此同时,当阴极铜出装槽作业操作时,为确保循环系统总体积控制动态平衡,应将槽下阳极泥地坑槽、阳极泥浆储存槽、上清液储存槽当中的电解液及时地进行优化过滤,并将滤后液导流至循环储槽进行动态循环,使整个循环系统体积能相互流通,保证电解液成分的相对稳定,同时也减少了循环过程中电解液温度的流失。

为应对阳极杂质含量上升,提高杂质脱除效率,贵冶电解车间提高各生产系列吨铜日均净液量至 $0.31 \text{ m}^3/\text{t}$ 。电解液系统含 As 较低时,采取在电解液循环槽加入含砷硫酸铜结晶母液的富砷液,提高

表 1 贵冶铜电解循环系统总体积控制计算参考数据

名称	尺寸/m			标准 液位/m	实时 液位/m	阴极板		阳极板		数量/ 个	体积/ m ³
	长	宽	直径			厚/mm	面积/m ²	厚/mm	面积/m ²		
地坑	2.6	1.95		1.0	1.0					2	10.14
阳极泥浆槽			4.50	0.5	0.5					1	7.95
上清液槽			5.70	0.5	0.5					2	12.75
循环槽			6.60	2.5	2.5					4	342.12
过滤机	3.9		2.62							1	21.02
高位槽	6.0	4		1.8	1.8					1	43.20
分配包	6.5		0.80							1	3.27
上酸主管	197		0.25							1	9.67
上酸主管	521		0.15							1	9.20
回酸主管	150		0.25							1	7.36
回酸主管	999		0.15							1	17.65
单极槽	5.648	1.154			1.482	0.6	1.02	45	0.940 8	159	1 194.31
双极槽	5.648	1.154			1.482	0.6	1.02	26	0.940 8	159	1 336.41
瞬时体积											3 015.05
标准体积											3 015.05
体积偏差											0

电解液中 As/(Sb+Bi) 比值。采用“高砷自行沉杂”和适量增大净液量相结合的净液方式,控制电解液中的砷含量在一定范围,减少漂浮阳极泥的形成。多余的杂质溶解进入电解液,适量增大净液量除杂。针对杂质 Ni 在电解液中的累积富集,增开临时冷冻结晶缸,优化冷冻结晶预冷,提高结晶效果。定期清洗预冷换热器,采用脱镍滤液进行二段预冷,冷冻结晶槽装液温度由 40 ℃降低到 30 ℃左右,提高了除镍效率。

3.3 提高阴极铜表面外观洗涤质量

改变电解槽内液位提放方式,由高→中→低改为低→中→高,液位线白尘能基本清洗干净。但是部分阴极铜出现白尘被铜包裹现象,因此继续增加 24 h 高液位,对电铜上口进行泡洗。优化洗涤管喷射角度,并用蒸气对吊耳口吹洗。自主研发的射流喷射器使新水在喷射器内瞬间加温并高速喷出,安装在洗涤室前段,喷头改为可调节喷头,喷嘴改为柱状喷射。在洗涤室出口处安装高压气体喷嘴去除吊耳内的残留洗涤水。在洗涤室入口处安装吊耳喷嘴,将原有洗涤区域扩展到 5 个。洗涤改造后效果示意图如图 8 所示。改造后阴极铜整体板面及吊耳内部结晶清洗完全,有效提升了阴极铜表面质量洁净度。



图 8 洗涤喷射器改造后洗涤效果示意图
Fig. 8 Schematic diagram of washing effect after
modification of washing injector

4 结论

通过对阴极铜表面质量影响因素的综合分析,追踪阴极铜电解各生产环节中的不足之处,在已有工艺技术基础之上,精细管理手段,加强过程管控力度,采取阴极铜表面质量缺陷把控关键性技术措施,为阴极铜电解生产质量的提高提供了保障。

参考文献

[1] 林鸿汉. 铜电解系统铜、酸、杂质平衡工艺优化改造实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(3):35-38.

- LIN H H. Practice of optimization and transformation of copper, acid and impurity balance process in copper electrolysis system[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(3): 35-38.
- [2] 李俊标, 邹贤, 占康乐. 金隆铜电解精炼生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(2): 76-79.
- LI J B, ZOU X, ZHAN K L. Production practice of copper electrorefining in Jinlong Copper [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(02): 76-79.
- [3] 唐文忠, 张海涛. 提高高纯电解铜产出率研究与实践[J]. 世界有色金属, 2020(14): 15-16.
- TANG W Z, ZHANG H T. Research and practice on improving the output rate of high-purity electrolytic copper[J]. World Nonferrous Metals, 2020(14): 15-16.
- [4] 陈世民. 阴极铜底部结粒原因分析及应对措施[J]. 铜业工程, 2022(2): 42-45.
- CHEN S M. Analysis of the causes of copper cathode bottom granulation and countermeasures [J]. Copper Engineering, 2022(2): 42-45.
- [5] 朱红, 后洁琼, 李中建, 等. 铜酸比例对铜电解阴极铜质量的影响机理分析[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 29-35.
- ZHU H, HOU J Q, LI Z J, et al. Mechanism analysis of the influence of copper-acid ratio on the quality of copper cathode for copper electrolysis[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 29-35.
- [6] 孔德颂, 罗劲松, 王有维, 等. 铜电解阳极钝化及漂浮阳极泥控制技术研究进展[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(1): 1-8.
- KONG D S, LUO J S, WANG Y W, et al. Research progress of copper electrolysis anode passivation and floating anode slime control technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(1): 1-8.
- [7] 徐鑫, 范翔, 程良良. 30万吨铜电解系统的工艺技术优化[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(2): 24-26.
- XU X, FAN X, CHENG G G. Process optimization of 300 kt copper electrolysis system[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021, 37(2): 24-26.
- [8] 魏晓玲, 吴斌. 铜电解高杂阳极板处理过程深度管控及生产实践[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(3): 38-41.
- WEI X L, WU B. Depth control of copper electrolysis high impurity anode plate treatment process and production practice[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(3): 38-41.
- [9] 曾箐雨. 铜电解精炼极间短路行为研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- ZENG J Y. Study on short circuit behavior between poles in copper electrolytic refining[D]. Beijing: North University of Technology, 2020.
- [10] 王宏丹, 夏文堂, 任兵芝, 等. 工艺条件对电解铜粉过程能耗的影响规律研究[J]. 粉末冶金工业, 2019, 29(4): 12-16.
- WANG H D, XIA W T, REN B Z, et al. Study on the influence of process conditions on energy consumption in electrolytic copper powder process [J]. Powder Metallurgy Industry, 2019, 29(4): 12-16.
- [11] 蒙毅, 刘欢, 李纯, 等. 铜电解短路的阴极电流变化与结瘤形貌[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 262-270.
- MONG Y, LIU H, LI C, et al. Cathodic current change and nodulation morphology during short circuit of copper electrolysis[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 262-270.
- [12] 易淑芳, 曹昌盛, 乐安胜, 等. 高电流密度下阴极铜电解精炼生产实践[J]. 中国金属通报, 2020(8): 87-88.
- YI S F, CAO C S, LE A S, et al. Production practice of cathodic copper electrolytic refining under high current density[J]. China Metal Bulletin, 2020(8): 87-88.
- [13] 王宏丹. 极间射流条件下铜电解过程传输行为及冶金效果研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- WANG H D. Research on the transport behavior and metallurgical effect of copper electrolysis process under inter-polar jet conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [14] 贾建华. 提高铜电解阴极铜质量的生产实践[J]. 世界有色金属, 2019(11): 193-194.
- JIA J H. Production practice of improving cathode copper quality in copper electrolysis[J]. World Nonferrous Metals, 2019(11): 193-194.
- [15] 谢文义, 万双. 超高电流密度铜电解技术的开发及应用[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 36-42.
- XIE W Y, WAN S. Development and application of ultra-high current density copper electrolysis technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 36-42.
- [16] 张彤, 公旭中, 赵立新, 等. 铜电解精炼液净化脱砷新工艺[J]. 矿冶, 2021, 30(3): 97-102.
- ZHANG T, GONG X Z, ZHAO L X, et al. New process for purifying and removing arsenic from copper refining electrolyte liquid[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(3): 97-102.