

# 超高电流密度铜电解技术的开发及应用

谢文义, 万 双

(阳谷祥光铜业有限公司, 山东 阳谷 252327)

[摘 要] 铜冶炼原料含杂越来越高导致铜阳极板含杂也越来越高,传统电解技术处理高杂质阳极板存在 A 级铜合格率低、产能低、能耗高等问题,近些年开发的超高电流密度电解技术基本解决高杂质阳极板的电解精炼问题,但还存在进液装置易堵塞、槽电压及直流电耗高等问题。阳谷祥光铜业有限公司在原有高电流密度电解的基础上对电解装置、电解液循环系统、电解液过滤系统等进行了创新性改造,并在实践中进行了技改优化,还制定了标准作业程序,最终实现了在电流密度 420~580 A/m<sup>2</sup> 下稳定运行、A 级铜产率 100%、残极率小于 13%、吨铜综合能耗 51.91 kg 标煤的理想生产目标。

[关键词] 铜电解; 高杂质阳极板; 超高电流密度; A 级铜产率; 残极率; 能耗; 漂浮阳极泥; 阳极钝化

[中图分类号] TF811; TF803.2+7 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2021)04-0036-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.04.007

## 0 引言

铜冶炼行业内,含杂质元素 Pb、Zn、As、Sb、Bi、Sn 等元素较高的铜精矿越来越多,受火法冶炼工艺限制,除杂效果不理想,造成阳极板品质下降,对后续工艺干扰因素增多。电解精炼不可避免地需处理高杂质阳极板。传统电解技术处理高杂质阳极板存在以下缺点:由于阳极板杂质含量高,使得电解精炼产生更多沉降或漂浮阳极泥,造成阳极泥机械夹杂和 A 级铜表面生长大量粒子,影响 A 级铜质量;因阳极板杂质含量高导致电解液杂质含量高,需要采用比正常生产更低的电流密度,使得产能降低;因为高杂质阳极板易导致严重的阳极钝化、浓差极化,使槽压升高、电效降低、能耗增加。

如何在保证 A 级铜质量的前提下,提高电流密度、强化电解生产、提高电解槽的生产效率,一直是铜电解生产领域研究的难题<sup>[1]</sup>。近些年开发的超高电流密度电解技术在现有电解槽结构的基础上,

通过改善进、出液装置解决了高杂质阳极板的电解精炼问题。目前高电流密度电解研究的热点有高电流密度电解装置的开发、导流装置开发、内置芯片可测可测阴阳极导电装置开发、导电排的开发、永久阴极开发、排列电极方法开发、监测电解槽内电解过程状态的装置开发等。

本文在简述超高电流密度电解精炼理论的基础上,综述了高电流密度电解技术的国内、外研究开发现状,并以阳谷祥光铜业有限公司(以下简称“公司”)自主开发的超高电流密度电解装置的生产实践为基础,分析该工艺的优化控制对策,以期今后超高电流密度电解技术的研究、开发提供参考。

## 1 超高电流密度电解精炼理论

### 1.1 电解液微观自然对流规律

通过对电解反应机理和离子迁移过程的建模研究,找到了极化和钝化的根源,发现了电解液微观自然对流规律<sup>[2]</sup>。铜电解精炼过程中,由于电解液存在温度差和密度差,形成自然对流现象。在铜电解精炼过程中,两电极附近的硫酸铜溶液存在密度差异,靠近阳极,由于阳极溶解,金属离子浓度较高,电解液密度增加;而在阴极附近,由于电沉积反应的发生,使得局部密度下降,因此在

[收稿日期] 2020-09-01

[作者简介] 谢文义(1976—),男,高级工程师,主要从事铜冶炼技术管理工作,2001年毕业于昆明理工大学冶金工程专业。

[引用格式] 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.

阴阳极间发生电解液的自然对流。电解液从电解液喷嘴中喷入电解槽槽体内部。能保证电解液中金属离子具有比较高的迁移速度,从而消除浓差极化现象。高电流密度会加快电解速度,当阳极表面产生的  $\text{Cu}^{2+}$  速度远大于对流扩散速度时,就会造成阳极表面铜离子浓度过高而在阳极表面形成  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  晶体层,它隔离并阻止了  $\text{Cu}^{2+}$  的进一步生成,引起阳极钝化,且它会随着阳极泥层的覆盖更加恶化。采用平行流技术以后,当电流密度在  $380 \sim 430 \text{ A/m}^2$  范围内,槽电压  $E$  槽与电流密度仍呈线性关系,不会产生阳极钝化现象<sup>[3]</sup>。以此为理论基础,开发出超高电流密度铜电解新工艺,破解了浓差极化和阳极钝化这一世界难题,电流效率高达 99.5% 以上。

### 1.2 内循环电解理念

通过对杂质电行为和流体力学研究,首次提出内循环电解理念<sup>[4]</sup>。电解液在阴极板侧下喷射进入阴阳极板间,平行式进液,平行式出液,阴极表面电解液向上流动,阳极表面电解液向下运动,电解液在阴阳极间强制“内循环”。只在上下方向和槽体宽度方向上流动,从出液装置上的出液口流出,使得从喷嘴喷出的电解液只在相邻阴阳极间的间隙中流动,在阴阳极的长宽侧面平行地流动,没有沿槽体长度方向上的流动,不产生紊流。阴阳极板间形成一个一个单独且紧邻的小电解槽,相邻小电解槽内的电解液不互相对流,使得电解槽内的电解液没有紊流,漂浮阳极泥快速随电解液流动排出电解槽,沉降阳极泥快速沉降,使得每个小电解槽相互独立,小电解槽产生漂浮阳极泥和沉降阳极泥不会相互掺混<sup>[5]</sup>,提高了 A 级铜质量。阳极表面电解液向下运动带动阳极表层附着阳极泥快速沉降,消除阳极泥漂浮和阳极钝化。高电流密度电解技术能有效弱化同等阳极条件下的阳极钝化现象,解决了阳极泥漂浮和阳极钝化问题,以此开发出射流电解新技术。传统铜电解精炼工艺采用高位槽供液方式,从电解槽一端或底部进入。电解液循环量一般在单槽  $25 \sim 35 \text{ L/min}$ ,铜电解槽内极板间电解液流速最慢。平行射流电解新技术直接由泵通过管道对电解槽供液装置供液,电解液以  $0.5 \sim 2.5 \text{ m/s}$  速度在靠近阴极板侧下部由喷嘴强制平行喷射进入阴阳极板间。电解液循环量可以达到  $75 \sim 100 \text{ L/min}$ ,高于常规不锈钢阴极电解工艺 3 倍。实现了高电流密度、大循环

量条件下可以处理高杂质阳极铜。

## 2 高电流密度电解技术开发情况

高电流密度电解技术的平行流装置是一种新型的多个电解液入口技术及装置<sup>[6]</sup>,目前国内外主要有 PFD、DBSA、交错平行流装置、超高电流密度电解装置等,各装置的差别主要在于电解液进、出方式不同,由此导致电解液与阳极泥的沉降方向也不一样,具体情况见表 1。主要高电流密度电解技术电解液流动示意图见图 1。各高电流密度电解装置的具体工艺控制参数见表 2,由表 2 可知,超高电流密度电解工艺适用的电流密度高、电解液含铜高、槽电压高、添加剂用量较低。

PFD(平行流装置)是由 Mettop 公司与 Montanwerke Brixlegg 公司联合开发的高电流密度电解装置,2005 年首次在奥地利 Montanwerke Brixlegg 公司应用,电流密度为  $385 \sim 442 \text{ A/m}^2$ ,2007 年奥地利 Montanwerke Brixlegg 公司在 52 个电解槽中安装了 PFD,电解生产能力从 7.3 万 t 提高到 10.8 万 t<sup>[6]</sup>。

DBSA(双向平行流装置)由中国瑞林工程技术有限公司等 2015 年合作完成,采用  $\geq 380 \text{ A/m}^2$  电流密度工况运行,国内中铝东南铜业 40 万 t/a 采用此工艺<sup>[7-8]</sup>。

交错平行流装置是五矿铜业(湖南)有限公司在 2016 年开发成功的另一种平行流装置,电流密度则为  $300 \text{ A/m}^2$  以上,6 月该工艺实现商业化,产能规模为 10 万 t/a<sup>[10]</sup>。

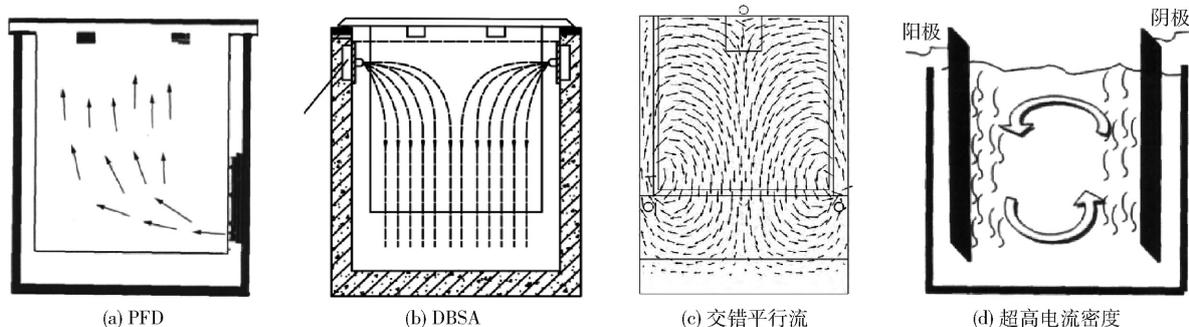
超高电流密度电解装置<sup>[1]</sup>是由公司自主开发的电解新工艺,适用电流密度为  $420 \sim 580 \text{ A/m}^2$ ,由导流方式、出液方式、循环方式、喷射单元等构成电解液处理过程中的基本单元。导流方式采用靠近阴极从下而上流动的最佳方式;出液方式采用槽侧壁上方的出液箱连接溢流口进行出液;喷射单元的装置是喷头,靠近阴极板侧,且射流方向与水平的夹角为  $0 \sim 30^\circ$ ;循环单元的管道设置高位排气装置和电解液增压、稳压控制系统等。实现了高电流密度、大循环量条件下可以处理高杂质阳极铜,年产能提高 50%。

## 3 超高电流密度电解工艺技术特点

阳谷祥光铜业有限公司 2015 年自主开发了超高电流密度电解装置,其工艺和设备技术都有创新发展。

表1 主要高电流密度电解工艺开发情况

装置	PFD	DBSA	交错平行流	超高电流密度电解装置
导流方式	单边侧下进液, 上出液, 阴阳极间中间向上流动	两侧边上部进液, 向下流动	下部交错进液, 由侧壁向下、由底部向上的一个大循环	靠近阴极板从下而上流动, 靠近阳极板从上向下流动, 阴阳极间内循环流动
出液方式	槽中间两端溢流	从底部虹吸而出	槽中间两端溢流	槽侧壁上方配有出液箱, 与两侧溢流口密封连接
循环方式	无分液包、高位槽	有分液包、高位槽	有分液包、高位槽	无分液包、高位槽, 加液系统设置高位排气装置且有电解液增压、稳压控制系统, 循环泵配置涡流开关
供液器	薄型箱体	槽壁上方专用溶液通道	槽壁两根溶液支管	面板与槽体内侧封闭空腔
喷射单元	每1组极板间对应2个喷头, 喷头位于极板中间位置, 水平方向	每1组极板间对应4个喷头, 每侧2个, 喷头极板中间位置, 水平方向	每1组极板间对应1个支管分液孔, 分液孔位于极板中间位置, 与水平方向夹角为60°	每1组极板间对应2个喷头, 喷头靠近阴极板侧, 与水平的夹角为0~30°
极板限位装置	集成电解槽侧壁下方薄型箱体上	集成电解槽下方侧壁上	无	电解槽侧壁上方以及下方面板上
集成方式	分体式, 用不锈钢挂件悬挂于侧壁上	与电解槽一体	分体式, 由嵌入在槽内套筒固定在侧壁上	集成于槽上
电解槽内极板间电解液流场	溶液从电解槽下部一侧进入阴极板和阳极板之间, 再从顶部溢出, 与阳极泥沉降方向相反(见图1(a)), 平行阴极板流场)	溶液从集成在电解槽两侧边上部的专用溶液通道进入, 平行进入每块阴极和阳极板之间, 再向下流动, 从底部端头虹吸而出, 与阳极泥沉降方向一致(图1(b)), 平行阴极板流场)	电解液呈现出由侧壁向上、由自由表面向下的两个漩涡, 极间下部区域电解液具有较大的速度, 电解液整体向下运动, 与阳极泥沉降方向相同(图1(c)), 平行阴极板流场)	喷头靠近阴极板侧, 阴极表面电解液向上流动, 阳极表面电解液向下运动, 与阳极泥沉降方向一致, 电解液对阳极板表面自上而下有侧切功能(图1(d)垂直阴极板方向流场)
优点	工艺基建投资少, 年运行成本低; 蒸汽消耗降低, 综合能耗低; 采用大容量循环槽; 采用变频泵直接向电解槽供液; 高电解液循环量	双喷嘴双向平行进液, 溶液从电解槽上口进, 不需要太大的供液压力, 不需要用泵供液, 降低了循环系统能耗, 降低溶液循环时的动力消耗。	下部交错进液具有较大的极间电解液流动速度与较均匀的速度场	电解槽内的电解液没有紊流, 装配有出液装置; 槽体为耐腐蚀材料一次整体浇铸成型, 槽壁更薄; 对阳极钝化现象有弱化作用, 蒸汽消耗低
存在的问题	槽电压及直流电耗高; A级铜容易长气孔; 电解液温度高; 不锈钢永久阴极板易弯曲及绝缘板易烧坏; 容易发生阳极钝化	槽电压及直流电耗高	少数A级铜结晶粗糙; 铋元素含量较为接近国家标准, 其余远小于国标; 电解液射入参数不当; 槽电压及直流电耗高	长期使用进液装置易出现堵塞; 槽电压及直流电耗高
业绩	奥地利 Montanwerke Brixlegg 公司 10 万 t 等	中铝东南铜业 40 万 t 等	五矿铜业 10 万 t	祥光铜业 40 万 t



(a) PFD

(b) DBSA

(c) 交错平行流

(d) 超高电流密度

(a)、(b)、(c) 图为 x 特征截面; (d) 为 z 特征截面

图1 电解液流动示意图

表2 主要高电流密度电解工艺控制参数

参数名称	PFD	DBSA	交错平行流	超高电流密度电解装置
电流密度/(A·m <sup>-2</sup> )	385~442	350~400	≥300	420~580
电解槽数	104	1 088	360	720
单槽阴极板数	54	55	54	54
阴极周期	4/6/6	8	7/7/7	6/6/7
单槽电解液流量/(L·min <sup>-1</sup> )	90	60~70	35~40	80~90
电解液含铜/(g·L <sup>-1</sup> )	40~50	45	40~48	49~55
电解液含酸/(g·L <sup>-1</sup> )	150~200	180~190	160~180	160~185
电解液含氯/(mg·L <sup>-1</sup> )	40~60	60	—	40~60
骨胶/g·t <sup>-1</sup> 铜	45~90	60~90	—	50~65
硫脲/g·t <sup>-1</sup> 铜	40~70	60~70	—	50~65
槽电压/V	0.4~0.46	0.32~0.45 <sup>[11]</sup>	—	0.35~0.55

### 3.1 超高电流密度电解装置

超高电流密度电解电解液的进液方式为靠近阴极从下而上流动的最佳的导流方式。该电解装置的优点主要体现在以下几个方面。

1) 采用超高电流密度工况运行。该工艺电流密度420~580 A/m<sup>2</sup>,与现有高电流密度电解技术相比,生产效率提高50%。电能转化为热能的量足以维持电解液温度,通过理论计算,在山东当地气温条件下,电流密度500 > i > 338 A/m<sup>2</sup>时电解热能收支平衡,蒸汽耗量为0<sup>[12]</sup>。当电流密度达到500 A/m<sup>2</sup>及以上时,热量无法平衡,电解液的温度就会逐步升高,夏季生产时表现尤为明显。研发的电解液降温冷却自动控制系统解决了电解液温度无法平衡问题,采用低温循环水对电解液进行冷却、降温。该技术综合能耗比国标先进值低25%,技术指标世界领先。对相同品质阳极板电解精炼,阳极泥产出率增加、金银含量提高,降低了A级铜含银量,有更多杂质进入阳极泥中。电解液的供给、分配和平行喷射单元集成于槽上,形成一个电解槽整体,运行高效、安全,不但能获得高品质的A级铜,而且能大幅度降低电解精炼系统投资,有效降低生产运行费用。另外,电解槽槽壁薄,可节约大量厂房面积及管线布置,降低装配成本。

2) 供液装置的开发及应用。供液装置镶嵌在槽体内侧壁上,利用底部平行于极板的供液方式,保证超高电流密度下电解生产所需要的电解液循环要求。同时,极板不会触及镶嵌在槽体内侧壁上的供液装置,从而保证了供液装置的安全性,使生产顺

利、安全运行。该装置的集成可拆卸结构容易维护和更换,制造和维护的费用较低,可降低生产运行成本。

3) 极板等间距限位装置的开发及应用。该限位装置能使阳极板在电解槽内同级之间上下做到平行等距,能达到吨铜节电30~100 kW·h的效果,还可以减少防止由于阴极板在电解槽内的摆动,而导致的碰撞、短路、烧板现象,使槽面管理更简单,电效和产能得到提高。

4) 喷射单元的开发及应用。电解液喷射装置实现电解液靠近阴极板向上流动,在阳极板附近向下运动,确保整个阴极板表面始终处于电解液循环状态的同时,有利于阳极泥的沉降。

5) 出液装置的开发及应用。出液装置为出液箱,出液箱的两端各设置有用于与溢流口密封连接以使得电解液回流的连接管,使得漂浮阳极泥能及时排出,减少漂浮阳极泥造成的阴极板长粒子而引起的阴极板短路问题,利于提高电流效率和产品质量。

### 3.2 电解液循环系统工艺

电解系统通过电解槽、冷却装置、驱动装置与导电排配合使用,使铜电解过程中电流密度较高,电解槽电压较低,从而使铜的产率较高且耗能较低<sup>[13]</sup>。

该系统主要创新点:在进行铜电解的过程中,通过采用低铜高酸的电解液,降低了电解槽中电解液的电阻,即降低了电解过程中电解槽中的电解液电势降,从而实现高电流密度下铜电解过程生产成本低、生产效率高的目的。为保证电解液的清洁,减少

如漂浮阳极泥等对 A 级铜质量的影响,需对上清液进行过滤,以除去上清液或电解液中的杂质。

换热装置和电解槽之间的供液管道的最高点设置有排气装置,解决了电解槽进液端带气问题,避免了在 A 级铜表面有时出现的严重的气孔或麻孔现象<sup>[14]</sup>。公司自主研发了循环管道电解液增压、稳压控制系统,使得系统压力和流量稳定,取消了高位槽及分液器。另外,公司还自主研发了电解液降温冷却自动控制系统。

### 3.3 电解液过滤系统工艺

电解液过滤系统包括电解槽、循环槽、压滤机、净化过滤机、浓密机等,该系统工艺创新特征是:电解液在电解槽与循环槽构成的循环回路中循环流动<sup>[15]</sup>。从循环槽内抽取部分电解液进行过滤,过滤得到的滤液返回循环槽。系统通过对电解液分步净化过滤,可提高电解液的净化过滤效率。阳极泥浆经过一次浓密沉降、两次压滤后其杂质悬浮物可以控制在 20 mg/L 以下,电解液过滤机滤液中杂质悬浮物可以控制在 1 mg/L 以下。悬浮物的减少,加上平行流进液方式,使得“干净的”溶液与“脏阳极液”不互相对流掺混,“脏阳极液”接触阴极板的几率变小,阴极板含银降低,质量提升。

## 4 生产实践及优化

公司在使用超高电流密度电解工艺进行生产时,遇到残极率高、综合电耗及电流效率不理想等问题,通过采取下述措施达到了理想的生产目标。

### 4.1 降低残极率

主要对策如下:原经历 1 个阳极周期后,55 块残极均出槽,每槽阳极端板较厚(仅单面电解 3 个阴极周期)。现 2 个阳极周期出 1 次阳极端板(第 1 个周期出槽 53 块残极,第 2 个周期出槽 55 块残极),对电解专用吊车、阳极机组进行改造。采用新的出槽作业方式后,2 个阳极周期单槽残极重量降低 320 kg,综合残极率降低 0.76%。对策实施后,残极率由 15% 下降至 13% 以下。

### 4.2 降低综合电耗

综合电耗比常规电解电耗高。主要对策:为减少辅助用电,对生产辅助设施与工序,包括循环泵、电解专用吊车、以及相关机组照明与空调,均制定标准作业程序,从而降低无用功;电解专用吊车减少停车、空车现象。1 个阳极周期内,需更换阴极 3 次。

电解专用吊车大车行走电机功率  $4 \times 37$  kW。单极作业时间取决于剥片速度,双极作业时间取决于吊车速度。单极作业时间为 7.5 h,双极作业时间为 11.5 h。优化采用“单单双”出装槽作业方式,总作业时间 10 h,缩短了出装槽电解专用吊车作业时间<sup>[16]</sup>,节省了电能。超高电流密度电解装置极板等间距限位装置的开发及应用达到了节电 30 ~ 100 kW·h/t 铜的节电效果。

### 4.3 提高电流效率

往年年修检修主进液分管(DN200 FRP)时发现在管壁内部分点长有铜粒子,表明循环管道上有漏电的现象,原因是部分电解液管道与管架没有用橡胶垫隔开。电解槽不锈钢零部件常有铜析出,证明存在槽内漏电。主要对策:电解液管架全部设计为悬挂式,取消了不锈钢地面支撑,特殊点需要做地面支撑的,管架和地面做绝缘处理;全部电解液管道和管架间补加橡胶垫,上次年修没有发现管壁长铜粒子现象;更换电解槽导电排下方老化破损绝缘橡胶垫和玻璃钢绝缘板<sup>[18]</sup>,并制定更换标准。

主要高电流密度电解技术经济指标年平均均值见表 3。超高电流密度电解工艺生产技术条件:  $\text{Cu}^{2+}$  49 ~ 55 g/L;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  160 ~ 185 g/L; 电解液流量为 80 ~ 90 L/min; 电解液温度为 65 ~ 70 °C; 电解液的压力为 0.2 MPa; 电流密度为 580 A/m<sup>2</sup>。由表 3 数据可知,蒸汽单耗 24.41 kg/t, 综合能耗 51.91 kgce/t, 残极率 13%。直流电单耗高,但蒸汽单耗降低,综合能耗降低。在电解过程中,在阴极板上可析出完全符合 GB/T 467—2010 标准的 A 级铜, A 级铜平均含银低于  $4.1 \times 10^{-6}$ , 杂质总量低于  $23 \times 10^{-6}$ 。在电解槽数量为 720 个时,生产能力可提高至 40 ~ 43 万 t/a, 年产能可提高 50%。

## 5 结论

阳谷祥光铜业有限公司于 2015 年自主开发了超高电流密度电解装置,创新技术包括电解装置、电解液循环系统、电解液过滤系统等,实际生产实践中,通过采取一些技改措施并制定标准作业程序,实现了在电流密度 420 ~ 580 A/m<sup>2</sup> 下稳定运行、A 级铜率 100%、残极率小于 13%、吨铜综合能耗 51.91 kg 标煤的理想生产目标。

1) 在电解装置方面,采用超高电流密度 420 ~ 580 A/m<sup>2</sup> 工况运行,增设电解液降温冷却自动控制

表3 主要高电流密度电解技术经济指标年平均值

指标名称	PFD	DBSA	交错平行流	超高电流密度电解装置
年工作日/d	350	350	350	350
年产量/万 t	29.19	30	19.83	43.41
电流效率/%	98.37	98.5	96.3	99.5
电解槽数/个	720	720	744	720
残极率/%	15.99	12.5 ~ 13.5	14.5 ~ 15.5	< 13
槽时利用率/%	95	97	—	93.5
吨铜交流电耗/kWh	500.88	300 ~ 320	—	515
吨铜直流电耗/kWh	451	350 ~ 400	—	403.6
吨铜蒸汽单耗/kg	58.22	50	—	24.41
吨铜综合能耗(标煤)/kg	69.05	—	—	51.91
阴极铜含铜/%	> 99.993 5	> 99.995 7	> 99.997 8	> 99.997 7
阴极铜含银/%	< 4.5 × 10 <sup>-6</sup>	(4 ~ 5) × 10 <sup>-6</sup>	—	< 4.1 × 10 <sup>-6</sup>
阴极铜杂质总量/%	< 75 × 10 <sup>-6</sup>	< 43 × 10 <sup>-6</sup>	< 22 × 10 <sup>-6</sup>	< 23 × 10 <sup>-6</sup>

系统解决电解液温度平衡问题,改进供液装置保证供液安全,开发电解液喷射单元确保阴极板表面处于电解液循环状态,改进出液装置及时排出漂浮阳极泥。

2)在电解液循环系统方面,采用低铜高酸的电解液,在供液管道的最高点设置排气装置,自主研发循环管道电解液增压、稳压控制系统,取消高位槽及分液器。

3)在电解液过滤系统方面,在循环槽增设分步净化过滤装置,确保电解液纯净度。

4)在生产实践中,通过改变出槽作业方式,残极率由 15% 下降至 13% 以下;通过采用极板间距限位装置和制定标准作业程序,实现了吨铜节电 30 ~ 100 kW·h 和缩短作业时间的效果;通过采用悬挂式电解液管架、管道和管架间补加橡胶垫和制定更换标准等措施,杜绝了该现象的发生。

#### [参考文献]

- [1] 阳谷祥光铜业有限公司. 超高电流密度电解或电积槽: CN103255443B[P]. 2013-10-23.
- [2] 周松林, 陈迎武, 梁源, 等. 高效节能强化平行流电解技术及产业化[Z]. 阳谷祥光铜业有限公司, 2015-08-12.
- [3] 宁万涛, 梁源, 高俊江. 铜电解槽内电解液的最佳导流方式[C]//第十届中国闪速冶炼技术研讨会论文集, 山东阳谷, 2017: 241-249.
- [4] 周松林. 平行流电解新技术理论研究及应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(2): 1-3.
- [5] 阳谷祥光铜业有限公司. 一种超高电流密度平行流电解槽及

其出液装置: CN105297079B[P]. 2017-05-31.

- [6] 吴继烈. 高电流密度铜电解技术的理论及实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(2): 13-17.
- [7] 姚素平. DBSA 集成铜电解工艺成套技术和装备开发及应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(10): 58-62.
- [8] 邓文涛. 双向平行流技术在铜电解工艺中的应用及优势[J]. 有色冶金设计与研究, 2019(6): 22-25.
- [9] 周中元. 基于 CFD 的平行流铜电解槽槽型优化设计[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(6): 4-8.
- [10] 王冕纯, 马海博. 平行流铜电解精炼工艺与生产实践[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(4): 7-11.
- [11] 章小兵, 袁剑平. 200 kt/a 常规不锈钢电解与双向平行流高效电解工艺方案比较[J]. 中国有色冶金, 2016, 45(1): 10-12.
- [12] 梁源, 王亚民, 杨家庭, 等. 高强度 PFD 铜电解精炼与传统工艺比较[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015, 44(9): 30-34.
- [13] 阳谷祥光铜业有限公司. 一种铜电解系统及运行方法: CN103334123A[P]. 2013-10-02.
- [14] 阳谷祥光铜业有限公司. 铜电解供液系统: CN203795002U[P]. 2014-8-27.
- [15] 阳谷祥光铜业有限公司. 一种铜电解过程中电解液的处理方法和处理系统: CN106637305A[P]. 2017-05-10.
- [16] 孙光冉. 金冠铜业电解出装槽作业的分析设计[J]. 工业, 2016(1): 317-319.
- [17] 周松林. 高强度铜电解精炼新工艺与生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(2): 1-4.
- [18] 谢文义, 万双. 平行流电解阴极贫化防治及实践[J]. 山东冶金, 2020, 42(1): 23-25.
- [19] 谢文义. 高强度平行流电解提高 A 级铜表面质量实践[J]. 山东冶金, 2018(6): 76-80.

## Development and application of ultra-high current density copper electrolysis technology

XIE Wen-yi, WAN Shuang

**Abstract:** The increasingly high impurity content in raw materials for copper smelting has resulted in more than more impurities contained in copper anode plates. The conventional electrolytic technology for treating high-impurity anode plates has problems of low yield rate of Grade-A copper, low production capacity and high energy consumption, etc. Although the ultra-high current density electrolysis technology developed in recent years has basically solved the problems in the electrorefining of high-impurity anode plates, it's still trapped by the liable blockage of electrolyte feeding device, high cell voltage and DC power consumption, among other problems. Based on the existing high current density electrolysis technology, Xiangguang Copper Co., Ltd has made innovative modification to the electrolysis device, electrolyte circulation system and electrolyte filtration system, updated and optimized the technology in actual practice, developed standard operating procedures and finally realized the ideal production goals, i. e., stable operation at the current density of 420 ~ 580 A/m<sup>2</sup>, Grade-A copper yield rate of 100%, spent anode ratio of less than 13%, and standard coal consumption of 51.91 kg per ton of copper.

**Key words:** copper electrolysis; high-impurity anode plate; ultra-high current density; Grade-A copper yield rate; spent anode ratio; energy consumption; floating anode slime; anode passivation

## 全球矿供应悄然变化 铜精矿 TC 翻番

自4月份进口铜精矿TC触及低位开始反弹后,TC持续走高,截至8月13日,SMM进口铜精矿指数报价58.74美元/t,较4月初29.57美元/t的低位价格已经翻番。而此前CSPT小组公布的第三季度铜精矿TC/RC地板价也较一季度小幅增加。

近期,各大矿企纷纷披露二季度产量,据SMM统计,今年二季度,全球铜产量持续增加,多数矿企铜产量上涨。其中力拓及泰克较去年同期大幅上涨,MMG、Lundin、泰克、Codelco、英美资源、BHP也较一季度均环比产量增加。

去年受疫情影响,铜矿产量下降造成铜精矿紧缺,今年以来,各大矿企纷纷从疫情中好转,铜产量较去年有明显增加。并且自今年铜价持续走高并触及历史高位后,各大矿商纷纷加快步伐积极生产,铜精矿产量持续增加。

秘鲁国家统计局(INEI)的数据显示,上半年,铜产量同比增长14.4%,产量最大的为安塔米纳(Antamina)22.68万t,同比增长40.2%,占总产量的20.9%。其次为塞罗贝尔德(Cerro Verde),产量19.98万t,同比增长10.8%,占总产量的18.4%。上半年,秘鲁全国铜总产量为108万t,随着7月份朱斯塔(Mina Justa)铜矿投产,该国有望实现全年250万t的生产目标。

另外,紫金矿业旗下的刚果(金)卡莫阿-卡库拉一期项目已于7月1日正式实现商业生产。自5月底开展带料试车以来,选厂已处理50万t矿石,铜产量一直稳步上升,日均铜产量超过500t,接近约550t(年均20万t)的设计稳态产能。迄今为止,约3.27万t铜精矿已运至当地铜冶炼厂或出口到国际市场。根据项目生产指导目标,预计今年生产精矿含铜金属8万~9.5万t。

SMM认为,2021年全球铜矿产量增幅将攀升至7%,新扩建的铜矿增量是主要增长动力,近2/3的增量在年中后释放。从全年来看,2021年全球铜精矿供需呈现紧平衡的格局。而年内则呈现先紧后缓的走势。总体来看,至今为止在高铜价的利益推动下,矿端未看到较大的中断,这也为TC的上升提供了支撑。

(资料来源:中国有色金属报)