

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.03.001

“双闪”铜冶炼工艺技术的发展

涂建华, 罗铜

(中国瑞林工程技术股份有限公司, 南昌 330031)

摘要:“双闪”铜冶炼工艺技术具有环境指标优越、综合能耗低、自动化程度高等优势,在中国得到广泛应用,目前中国已建成4个“双闪”铜冶炼厂,1个正在建设。通过对肯尼科特犹他冶炼厂、阳谷祥光铜业有限公司、铜陵有色金冠铜业分公司、广西金川有色金属有限公司、中铜东南铜业有限公司以及阳新弘盛铜业有限公司“双闪”铜冶炼工艺技术进行对比,研究了铜精矿干燥、铜精矿输送、闪速熔炼、冰铜粒化、冰铜制粉和输送、闪速吹炼、阳极精炼、残极处理以及烟气处理等工艺技术的发展情况,为“双闪”铜冶炼工艺技术的应用,以及未来的发展方向提供思路。

关键词:铜冶炼;双闪;闪速熔炼;闪速吹炼;工艺技术;发展

中图分类号:TF811

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2022)03-0001-09

Development of “Double Flash” Copper Smelting Technology

TU Jian-hua, LUO Tong

(China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330031, China)

Abstract: “Double flash” copper smelting technology has been widely used in China due to its advantages of superior environmental indicators, low comprehensive energy consumption and high degree of automation. Four “double flash” copper smelters have been built and one is under construction in China. By comparing the “double flash” copper smelting technologies of Kennecott Utah smelter, Yanggu Xiangguang Copper Co., Ltd., Tongling Nonferrous Jinguan Copper Company, Guangxi Jinchuan Nonferrous Metals Co., Ltd., China Copper Southeast Copper Co., Ltd., and Yangxin Hongsheng Copper Co., Ltd., development of copper concentrate drying, copper concentrate conveying, flash smelting, matte granulation, matte pulverization and conveying, flash converting, anode refining, anode scrap treatment, and off-gas treatment technology were studied. It can provide ideas for application of “double flash” copper smelting technology and its future development direction.

Key words: copper smelting; double flash; flash smelting; flash converting; process technology; development

闪速吹炼工艺是在闪速炉一步炼铜工艺基础上开发应用的连续吹炼工艺。1949年,世界上第一台闪速炉(奥托昆普闪速炉)在芬兰投产,标志着闪速炼铜工艺的到来。在1995年闪速吹炼炉首次实现工业化应用。为了不断地满足生产需要,闪速炼铜工艺技术和设备不断地创新发展,从而形成了“双

闪”铜冶炼工艺技术。

美国肯尼科特犹他冶炼厂(简称犹他冶炼厂)是全球第一家采用“双闪”工艺的铜冶炼厂,于1995年6月投产,产能为32万t/a^[1-2]。犹他冶炼厂也是国外唯一一家采用“双闪”工艺的铜冶炼厂。尽管“双闪”铜冶炼工艺技术在国外应用不多,但在中国得到

收稿日期:2021-10-29

作者简介:涂建华(1981-),男,教授级高级工程师

了广泛应用,截至目前,中国已建成4个“双闪”铜冶炼厂,1个正在建设。阳谷祥光铜业有限公司(简称祥光铜业)是继肯尼科特之后世界上第二座采用“双闪”工艺的铜冶炼厂,其设计规模为40万t/a(一期20万t/a)阴极铜,分两期建设,一期工程于2007年8月投产,二期工程于2011年4月投产^[3-4]。铜陵有色金冠铜业分公司(简称金冠铜业)是继祥光铜业之后第3座采用“双闪”工艺的铜冶炼厂。金冠铜业“双闪”铜冶炼工艺充分吸收了犹他冶炼厂和祥光铜业闪速吹炼技术方案设计与生产操作等方面的经验,结合铜陵有色在闪速熔炼技术上多年的生产经验,在工艺配置、设备选型方面进行了诸多技术创新,其设计规模为40万t/a阴极铜,于2012年12月投产^[5]。广西金川有色金属有限公司(简称广西金川)则是继金冠铜业之后第4座采用“双闪”工艺的铜冶炼厂,该厂的规模为40万t/a阴极铜,于2013年11月投产^[6]。之后是中铜东南铜业有限公司(简称东南铜业),其设计规模为40万t/a阴极铜,于2018年8月投产^[7]。阳新弘盛铜业有限公司(简称阳新弘盛)是目前在建的采用“双闪”工艺的铜冶炼厂,其设计规模也是40万t/a阴极铜,预计将在2022年投产^[8]。

各“双闪”铜冶炼厂的规模及投产时间见表1。在这些铜冶炼厂中,中国瑞林工程技术股份有限公司(简称中国瑞林)完整设计了其中的4个,分别是祥光铜业、金冠铜业、东南铜业、阳新弘盛,其中东南铜业是首个中国工程公司自主完成设计建设的国产化“双闪”铜冶炼厂;另外,中国瑞林还设计了广西金川的电解和渣选系统,对犹他冶炼厂进行了改造设计。

表1 “双闪”铜冶炼厂的规模及投产时间

Table 1 Capacity and operation time of “double flash” copper smelter

冶炼厂	规模/(kt·a ⁻¹)	投产时间
犹他冶炼厂	320	1995年6月
祥光铜业	400, 可达450	一期2007年8月, 二期2011年4月
金冠铜业	400, 正扩产至480	2012年12月
广西金川	400	2013年11月
东南铜业	400	2018年9月
阳新弘盛	400	预计2022年

1 “双闪”铜冶炼技术的工艺流程

采用“双闪”铜冶炼工艺技术冶炼厂的工艺流程差别不大,都是闪速熔炼+闪速吹炼+阳极精炼三

步,最后阳极板进行电解得到阴极铜,工艺流程如图1所示。不同点在于,后续采用“双闪”的铜冶炼厂,其工艺技术都是吸取了已投产“双闪”铜冶炼厂的经验,并结合环保政策、工厂所在地条件等实际情况进行了改进和优化。

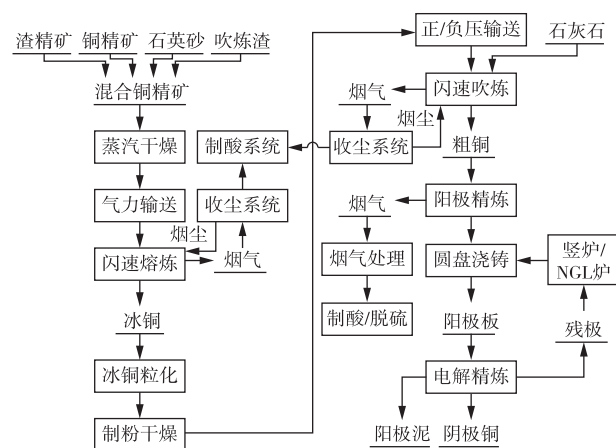


图1 “双闪”铜冶炼工艺流程图

Fig. 1 “Double flash” copper smelting process flow chart

2 “双闪”铜冶炼技术的进展

2.1 铜精矿干燥

冶炼厂获得的铜精矿原料一般含有6%~14%的水,水分含量越大,在冶炼过程中的能耗越大,产生的烟量也越高。另外,闪速熔炼炉要实现自热反应,也要求含水率控制在0.3%以内,因此铜精矿需要进行干燥处理。

目前,常采用的干燥技术有气流干燥、回转窑干燥和蒸汽干燥,各“双闪”铜冶炼厂铜精矿干燥工艺技术如表2所示。犹他冶炼厂采用的是回转窑干燥法,也是唯一一家采用回转窑干燥法干燥铜精矿原料的“双闪”铜冶炼厂^[9]。在犹他冶炼厂之后建设的所有“双闪”铜冶炼厂,铜精矿干燥均采用了蒸汽干燥。就干燥效率和环保效果而言,为了使铜精矿原料含水量控制在0.3%以下,蒸汽干燥技术是最佳选择^[10]。气流干燥工艺,由于能耗高、污染大、占地面积大等因素影响,除了早期的贵溪冶炼厂、金隆铜业有限公司(简称金隆铜业)等采用过外,后来的冶炼厂均未采用该技术,且贵溪冶炼厂和金隆铜业都已经把气流干燥拆除,改为蒸汽干燥了。

在5家采用蒸汽干燥的冶炼厂中,所采用的蒸汽干燥机各有不同,主要分为两类,盘管式蒸汽干燥机和直管式蒸汽干燥机,其中祥光铜业、金冠铜业和

东南铜业采用的是盘管式蒸汽干燥机,广西金川和阳新弘盛采用的是直管式蒸汽干燥机。祥光铜业一期和金冠铜业采用的是进口设备,祥光铜业二期和东南铜业采用的是国产设备,广西金川和阳新弘盛采用的直管式蒸汽干燥机均为国产设备。蒸汽干燥机所用蒸汽压力方面,除了广西金川实现了 1 MPa 以下的蒸汽压力外,其他均采用的是 1 MPa 以上的蒸汽。

另外,各冶炼厂根据生产实际情况,对蒸汽干燥都有局部改造,比如祥光铜业在蒸汽干燥机筒体前端约 4 m 范围内的外壁设蒸汽伴热系统,有效防止了湿物料黏壁;在蒸汽干燥机筒体内部前端约 2 m 的区域内,适当减少加热管的环数,避免了该区域内物料黏附在换热管之间^[11];广西金川通过对蒸汽干燥机进行相关改造,形成了独特的低压节能蒸汽干燥技术,提升了干燥效果^[12]。

表 2 各铜冶炼厂铜精矿干燥工艺技术

Table 2 Drying technology of copper concentrate in each copper smelter							
冶炼厂	干燥方式	干燥机台数	干燥能力/(t·h ⁻¹)	干燥后含水量/%	设备规格/m	蒸汽压力/MPa	设备厂商
犹他冶炼厂	回转窑干燥	1	235	≤0.3	Φ3.8×40	—	—
祥光铜业	盘管式蒸汽干燥	2	160(一期),200(二期)	≤0.3	Φ4.44×10.14	2~2.2(一期)	一期进口,二期国产
金冠铜业	盘管式蒸汽干燥	2	2×180	≤0.3	Φ4.44×10.725	2.1~2.3	进口
广西金川	直管式蒸汽干燥	2	2×180	≤0.3	Φ4.2×19	设计 1.6,实际 0.6	国产
东南铜业	盘管式蒸汽干燥	2	2×180	≤0.3	Φ4.5×11.04	1.3~1.6	国产
阳新弘盛	直管式蒸汽干燥	2	2×180	≤0.3	Φ4.5×13	1.3~1.6	国产

2.2 铜精矿输送

在铜精矿输送技术上,6 家冶炼厂均采用浓相气力输送技术,该技术输送固气比较高、且能实现水平和垂直输送,配置较为灵活,因此得到了广泛使用。各“双闪”铜冶炼厂铜精矿输送技术详细情况见表 3。但浓相气力输送技术的气源压力较高,一般≥0.5 MPa,且设备易损件多,维护检修工作量大^[13]。在单闪铜

冶炼厂比如贵溪冶炼厂、紫金铜业、白银有色等,其铜精矿输送采用的是气力提升技术,与浓相气力输送技术相比,气力提升技术气源压力一般<0.1 MPa、压力低、易损件少、日常检修维护工作少、能耗更低,且采用气力提升与风动溜槽组合的输送方案,也能实现垂直输送和水平输送^[13]。未来“双闪”铜冶炼厂也可以考虑采用气力提升技术。

表 3 各铜冶炼厂铜精矿输送技术和参数

Table 3 Conveying technology of copper concentrate in each copper smelter				
冶炼厂	输送方式	输送量/(t·h ⁻¹)	输送距离/m	气源压力/MPa
犹他冶炼厂	浓相气力输送	—	—	—
祥光铜业	浓相气力输送	一期 2×100,二期 2×160	水平 60,垂直 50	0.8
金冠铜业	浓相气力输送	2×180	水平 20,垂直 50	0.6~0.7
广西金川	浓相气力输送	4×100	水平 90,垂直 50	0.4~0.6
东南铜业	浓相气力输送	2×170	水平 32,垂直 45	0.5~0.75
阳新弘盛	浓相气力输送	2×180	水平 40,垂直 46	0.75

2.3 闪速熔炼

闪速熔炼是“双闪”铜冶炼工艺的核心工艺之一,各“双闪”铜冶炼厂闪速熔炼炉工艺技术参数如表 4 所示^[7,9,14-16]。从表 4 可以看出,各个铜冶炼厂闪速熔炼反应塔尺寸差别不大,但所采用的上升烟道形式和精矿喷嘴各有不同。早期建设的铜冶炼厂基本都采用奥图泰的精矿喷嘴,包括祥光铜业初期采用的也是奥图泰的精矿喷嘴,在后续的生产中,祥光铜业为了改变引进喷嘴对生产的不良影响,发明了旋浮喷嘴和相关生产工艺,使得“双闪”技术指标得以进一步优化,成为“双闪”工艺的发展方向,也应用在后续建设的东南铜业、阳新弘盛的熔炼炉

中^[7,17]。在上升烟道形状上,犹他冶炼厂和祥光铜业采用的是圆筒形,其他采用的都是方形烟道。在铜水套上,早期建设的闪速熔炼炉,铜水套都是引进,后面建设的几个冶炼厂,包括金冠铜业、东南铜业、阳新弘盛等逐步采用的是国产铜水套。另外,近期建设的铜冶炼厂,在渣含铜、烟尘率等方面,都优于早期建设的冶炼厂。在富氧浓度上,近期建设的铜冶炼厂比早期建设冶炼厂的高。

在生产中,各个铜冶炼厂在闪速熔炼炉上都遇到了不同程度的问题,各铜冶炼厂均根据实际情况提出了针对性的措施。祥光铜业通过在熔炼炉上升烟道安装两个天然气烧嘴,增加粉煤自动加料与喷

吹系统,有效控制了上升烟道黏结^[11]。金冠铜业通过摸索不同装入量条件下精矿喷嘴的操作参数、根据铜精矿铅锌含量调整配比、加强返库烟尘拌料均匀性控制等,解决了闪速熔炼炉烟尘率高的问题^[5]。而广西金川将闪速熔炼炉反应塔周围沉淀池顶由吊

挂砖形式改造为吊挂平水套形式,提高了冷却强度,解决了区域温度过高、挂渣较少、南北两侧砖体发红问题,消除了炉顶南侧吊挂砖出现脱落塌陷现象^[18];通过在上升烟道喉口部增加点油枪和采用爆破处理,解决了上升烟道喉口部结瘤问题^[6]。

表4 各铜冶炼厂闪速熔炼工艺技术和参数

Table 4 Flash smelting process technology and parameters of copper smelters

冶炼厂	犹他冶炼厂	祥光铜业	金冠铜业	广西金川	东南铜业	阳新弘盛
熔炼方式	闪速熔炼	旋浮熔炼	闪速熔炼	闪速熔炼	旋浮熔炼	旋浮熔炼
反应塔尺寸/m	Φ7.0×7.5	Φ6.3×7.0	Φ7.0×7.93	Φ7.0×8.0	Φ7×7.93	Φ7×7.93
上升烟道形状	圆筒形	圆筒形	方形	方形	方形	方形
水套	—	进口奥图泰 钻孔式水套	反应塔连接部水套为 进口奥图泰钻孔式水套, 其他为国产预埋管式水套	—	国产预埋管式 水套	国产预埋管式水套, 反应塔和烟道连接部 是铜钢复合水套
精矿喷嘴型号	奥图泰 CJD 中央 喷射扩散型喷嘴	祥光旋流精矿喷嘴	CJD 改进型喷嘴*	奥图泰 CJD 喷嘴	祥光旋流 精矿喷嘴	祥光旋流精矿喷嘴
精矿喷嘴能力/(t·h ⁻¹)	—	≤350	120~290	60~290	110~330	80~330
投料量/(t·h ⁻¹)	170~190	270	290	260	110~291	279
冰铜品位/%	69	70	70	68	70	70
渣含铜/%	—	2.3	2.3	2.1	1.71	1.5
烟尘率/%	—	7	7.2	9.3	5.83	5
渣 Fe/SiO ₂	—	1.42	1.42	1.3~1.4	1.35	1.35
富氧浓度/%	—	64	66.53	65	69.38	68

注: * CJD 改进型喷嘴是铜陵有色与奥图泰在奥图泰 CJD 喷嘴基础上共同研发的

2.4 冰铜粒化

为了得到能满足闪速吹炼炉要求的冰铜粉,闪速熔炼炉产出的冰铜需要先进行粒化。目前,冰铜粒化主要有两种工艺:水淬粒化和风淬粒化,各铜冶炼厂冰铜粒化工艺技术如表5所示。

祥光铜业开始采用的水淬粒化是保尔沃特公司的 INBA 转鼓技术,但在生产中,出现了溜槽出口端结瘤、渣浆泵堵塞、冰铜颗粒细以及冰铜爆炸等问题^[3],后根据实际情况开发了冰铜风淬粒化系统,取代了水淬粒化^[14]。风淬粒化技术解决了水淬放炮以及冰铜粒度细等问题,现在也应用在东南铜业和阳新弘盛^[7]。

金冠铜业采用的是冰铜水淬粒化,设置了3套粒化、脱水及运输装置,在生产初期,出现了捞冰铜机故障、细冰铜颗粒大量进入浓密池、水淬循环水水质会恶化等问题。通过对捞冰铜机斗子结构改进、降低捞冰铜作业高度等措施,解决了捞冰铜机故障问题;通过在斗子内衬钢丝网、将浓密机底流引入水淬池但不进入捞冰铜的斗子、在水淬池的溢流口增设闸板提升溢流高度、通过控制冰铜放炮减少细颗粒冰铜的产生等措施,解决了细冰铜颗粒大量进入

浓密池的问题;通过向浓密池加入固体碱、每天定量抽取 200~300 m³ 循环水送硫酸污水处理等措施,解决了水淬循环水水质恶化问题^[5]。

广西金川采用的是传统水淬工艺对冰铜进行粒化,配置了4台水淬铜钼斗式提升机、3台热水渣浆泵、3台冷水渣浆泵,在生产初期,出现的主要问题由水淬放炮、水淬冰铜颗粒小、振动脱水筛故障率高等问题,通过对水淬喷头结构及放铜、防砸溜槽小头进行改造,增设打散风管,增大水淬铜钼粒度等,消除了放炮现象^[6]。

表5 各铜冶炼厂冰铜粒化工艺技术和参数

Table 5 Matte granulation process technology and parameters of copper smelters

冶炼厂	冰铜粒化方式	粒化能力/ (t·h ⁻¹)
犹他冶炼厂	高压水淬粒化	120~140
祥光铜业	开始采用水淬粒化,2012年改造为风淬粒化	150
金冠铜业	水淬粒化	3×150
广西金川	传统水淬工艺粒化	2×180
东南铜业	风淬粒化	2×150
阳新弘盛	风淬粒化	2×150

2.5 冰铜制粉和输送

目前,冰铜制粉都是采用立式磨,但是所制备的冰铜粉如何进行输送,各铜冶炼厂还是有所区别,各铜冶炼厂冰铜制粉和输送工艺技术如表 6 所示^[18]。犹他冶炼厂、祥光铜业和广西金川均采用浓相气力输送技术把冰铜粉送到吹炼炉上方的冰铜仓,而金冠铜

业、东南铜业和阳新弘盛采用的是中国瑞林研发的冰铜磨烟气收尘与冰铜粉输送一体化技术,该技术省去了设置浓相气力输送,直接通过烟气把冰铜粉带到设置在吹炼炉上方的收尘器中,通过收尘器收集烟气中的冰铜粉送入冰铜仓,从而同时完成冰铜干燥烟气处理和冰铜粉输送,是一种节能高效的技术^[19]。

表 6 各铜冶炼厂冰铜制粉、输送工艺技术和参数

Table 6 Matte pulverizing and conveying technology and parameters of copper smelters				
冶炼厂	冰铜制粉方式	制粉能力/(t·h ⁻¹)	冰铜粉输送工艺	冰铜粉输送能力/(t·h ⁻¹)
犹他冶炼厂	立式磨	—	浓相气力输送	—
祥光铜业	立式磨	100	浓相气力输送	120
金冠铜业	立式磨	100	冰铜磨烟气收尘与冰铜粉输送一体化技术	100
广西金川	立式磨	100	浓相气力输送	2×120
东南铜业	立式磨	100	冰铜磨烟气收尘与冰铜粉输送一体化技术	100
阳新弘盛	立式磨	100	冰铜磨烟气收尘与冰铜粉输送一体化技术	100

2.6 闪速吹炼

闪速吹炼也是“双闪”铜冶炼工艺的核心工艺之一,各铜冶炼厂闪速吹炼炉工艺技术参数^[20-22]如表 7 所示。从表 7 可以看出,除了犹他冶炼厂和祥光铜业外,其他各个铜冶炼厂闪速吹炼反应塔尺寸都一样。在上升烟道形状上,早期建设的吹炼炉采用的都是圆筒形烟道,近期建设的东南铜业和正在建设的阳新弘盛则采用的是方形烟道,且东南铜业是首次采用方形烟道,根据实际使用情况反馈,可根据实际生产过程中的黏结情况调节角度和天然气用量的烧嘴,能达到控制黏结的目的,生产中从未因为烟道出口的黏结影响生产,且方形烟道的天然气消耗仅为圆筒形烟道的一

半左右。在铜水套上,早期建设的闪速吹炼炉,铜水套都是引进的钻孔式水套,后面建设的东南铜业和正在建设的阳新弘盛则采用了国产预埋管式铜水套。

另外,各铜冶炼厂所采用的冰铜喷嘴各有不同,早期建设的铜冶炼厂基本都采用奥图泰的冰铜喷嘴,包括祥光铜业开始也采用的是奥图泰的冰铜喷嘴,后来祥光铜业发明了旋浮喷嘴和旋浮吹炼工艺,使得闪速吹炼的技术指标得以进一步优化,并得到推广,已应用在后续建设的东南铜业、阳新弘盛的吹炼炉中,同时向犹他冶炼厂进行了技术和喷嘴设备的输出^[7,23-24]。在粗铜品位、烟尘率和富氧浓度等方面,各个铜冶炼厂差别不大。

表 7 各铜冶炼厂闪速吹炼炉工艺技术和参数

Table 7 Process technology and parameters of flash converting furnace in each copper smelter						
冶炼厂	犹他冶炼厂	祥光铜业	金冠铜业	广西金川	东南铜业	阳新弘盛
吹炼方式	闪速吹炼	旋浮吹炼	闪速吹炼	闪速吹炼	旋浮吹炼	旋浮吹炼
反应塔尺寸/m	Φ4.25×6.5	Φ4.3×6.0	Φ5.0×7.0	Φ5.0×7.0	Φ5.0×7.0	Φ5.0×7.0
上升烟道形状	圆筒形	圆筒形	圆筒形	圆筒形	方形	方形
水套	奥图泰钻孔式水套	奥图泰钻孔式水套	奥图泰钻孔式水套	奥图泰钻孔式水套	国产预埋管式水套	国产预埋管式水套
冰铜喷嘴型号	2020 年 8 月改用祥光旋流冰铜喷嘴	祥光旋流冰铜喷嘴	奥图泰 CJD 型	奥图泰	祥光旋流冰铜喷嘴	祥光旋流冰铜喷嘴
冰铜喷嘴能力/(t·h ⁻¹)	—	120	40~110	100	40~110	30~110
粗铜品位/%	—	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5
烟尘率/%	—	7.2	7	9.5	7.82	8.5
富氧浓度/%	—	80	74.5	80	77	78

在生产中,各个铜冶炼厂在闪速吹炼炉上也遇到了一些问题。祥光铜业在把喷嘴更换为旋浮流冰铜喷嘴后,出现了随着投料量加大,烟气对反应塔顶部冲刷加剧、吊挂砖得不到很好冷却而导致的拱起和脱落情况,在 2013 年,把反应塔顶吊挂砖部分改

为吊挂平水套结构,较好地解决了该问题^[23];另外,通过对竖直水套的堆焊层整体提高 200 mm,解决了烟气结露对铜水套造成的腐蚀问题^[21]。金冠铜业在投产初期出现了吹炼炉烟尘率高的情况,通过降低分布风量与工艺风速、减少冰铜失重计量给料

量波动和对喷嘴分布器及时清理黏结,解决了该问题^[5]。广西金川通过控制合理渣含铜、钙铁比和烟气残氧量,并在闪速吹炼炉上升烟道喉口部增设点油枪和采用爆破处理,解决了上升烟道喉口部结瘤问题^[6]。

2.7 阳极精炼

各“双闪”铜冶炼厂均是采用回转式阳极炉来精炼吹炼炉产出的粗铜,各厂阳极炉工艺技术参数如表8所示。虽然阳极精炼一直采用的是回转式阳极炉,但铜冶炼设计企业和生产企业始终在对回转式阳极炉进行改进。目前,各“双闪”铜冶炼厂的阳极炉基本都采用了透气砖技术和稀氧燃烧技术。

表8 各铜冶炼厂阳极炉技术参数

Table 8 Technical parameters of anode furnace in each copper smelter

冶炼厂	设备	数量/台	单炉处理能力/t	规格/m
犹他冶炼厂	回转式阳极炉	2	600	Φ4.60×13.70
祥光铜业	回转式阳极炉	2	630	Φ4.88×14.63
金冠铜业	回转式阳极炉	2	660	Φ4.90×14.18
广西金川	回转式阳极炉	2	660	Φ5.0×15.50
东南铜业	回转式阳极炉	2	600	Φ4.90×14.38
阳新弘盛	回转式阳极炉	2	680	Φ5.0×14.50

2.8 残极处理

残极是阳极板在电解车间电解产生的,残极处理是铜冶炼的最后工序,各“双闪”铜冶炼厂残极处理工艺技术参数如表9所示。大部分的“双闪”铜冶炼厂在处理残极时采用的都是竖炉进行熔化,然后送保温炉暂存,最后通过与阳极炉共用的圆盘浇铸机浇铸成阳极板。广西金川则是采用倾动炉来处理残极,并配有独立的圆盘浇铸机,倾动炉本是处理废杂铜原料的炉子,用来处理残极还可以搭配处理废杂铜。而在2018年投产东南铜业,考虑到将来有可能处理海外粗铜,其残极处理采用的是中国瑞林研发的NGL炉,NGL炉结合了倾动炉和回转式阳极炉的优点,能够很好地将杂铜或块状粗铜进行熔化并精炼;在配置上,采用了NGL炉与阳极炉并列布置的方式,共用圆盘浇铸机,节省了占地和投资。

2.9 烟气处理

烟气处理是铜冶炼工厂重要的工艺步骤。在“双闪”铜冶炼过程中,会产生烟气的工序包括:铜精矿干燥、熔炼、吹炼、冰铜粒化、冰铜干燥、阳极精炼、环集等,各“双闪”铜冶炼厂的烟气处理工艺^[25-27]见表10。

铜精矿干燥、冰铜磨烟气主要是含尘,基本没有

二氧化硫等污染物,通过布袋收尘器收尘达标后即可排放。但犹他冶炼厂是采用回转窑干燥铜精矿,温度较高,所产出的烟气中含有二氧化硫,为满足排放标准,设置了氢氧化钠洗涤系统。

表9 各铜冶炼厂残极处理工艺技术和参数

Table 9 Anode scrap treatment process and technical parameters in each copper smelter

冶炼厂	残极处理设备	处理能力
犹他冶炼厂	竖炉+保温炉	50 t/h
祥光铜业	竖炉+保温炉	40 t/h
金冠铜业	竖炉+保温炉	40 t/h
广西金川	倾动炉(Φ12.5 m×5 m)	300 t/炉
东南铜业	NGL炉(Φ4.9 m×13.00 m)	450 t/炉
阳新弘盛	竖炉+保温炉	40 t/h

熔炼和吹炼是“双闪”铜冶炼工艺二氧化硫的主要产出点,产出的含二氧化硫高温烟气都是通过余热锅炉降温并回收余热,再经电收尘器进一步收尘后送制酸系统制备硫酸。

阳极精炼烟气,基本都是降温后通过布袋收尘器收尘,再送脱硫系统处理,也有些厂把阳极炉氧化期烟气送入制酸系统。

冰铜粒化尾气、吹炼渣粒化尾气,主要是水汽,也含有少量的二氧化硫,对于排放标准不高的地区都是直接排放,要求高的地方则是通过脱硫处理后排放。

环集烟气由于含有烟尘、二氧化硫等,通常是收尘后再进行脱硫处理。一般情况下,其他烟气也会汇入环集烟气系统统一进行脱硫。

烟气制酸方面,目前,制酸技术包括常规转化和高浓度转化技术,常规制酸技术由于二氧化硫浓度低使得系统烟气量大,造成投资大、运行成本高,目前除了犹他冶炼厂外,其他厂已经基本不采用。而采用高浓度转化技术的铜冶炼厂中,其技术来源也有不同,祥光铜业采用的是LUREC高浓度转化,广西金川采用的是预转化高浓度转化,金冠铜业、东南铜业和阳新弘盛均采用的是中国瑞林非平衡态高浓度转化技术。

污染物排放方面,祥光铜业通过后续一系列改造后才满足特别排放限值,东南铜业和阳新弘盛均是从一开始就按执行特别排放限值进行设计,金冠铜业和广西金川尚未执行特别排放限值。随着环保要求的提高和政策要求,未来可能所有的铜冶炼厂都要执行特别排放限值,已执行特别排放限值企业所采取的技术,将具有很大的参考意义。

表 10 各铜冶炼厂烟气处理工艺

Table 10 Off-gas treatment process of copper smelters

名称	犹他冶炼厂	祥光铜业	金冠铜业	广西金川	东南铜业	阳新弘盛
精矿干燥收尘	布袋收尘器 + NaOH 洗涤塔	沉尘室 + 布袋收尘器 + 二级布袋收尘器	沉尘室 + 布袋收尘器	沉尘室 + 布袋收尘器	沉尘室 + 布袋收尘器	沉尘室 + 布袋收尘器
熔炼收尘	余热锅炉 + 电收尘器	余热锅炉 + 120 m ² 卧式双室四电场电收尘器	余热锅炉 + 120 m ² 卧式双室四电场电收尘器	余热锅炉 + 180 m ² 卧式双室五电场电收尘器	余热锅炉 + 120 m ² 卧式双室四电场电收尘器	余热锅炉 + 132 m ² 卧式双室四电场电收尘器
冰铜粒化尾气	—	湿法净化 + 双氧水脱硫	水淬尾气直排	水淬尾气直排	旋流板湿式除尘器洗涤后送脱硫系统处理	动力波洗涤器 + 电除雾, 送环集脱硫
冰铜磨烟气	布袋收尘器	沉尘室 + 布袋收尘器 + 排放烟气二级除尘器	沉尘室 + 布袋收尘器	布袋收尘器	沉尘室 + 布袋收尘器 + 排放烟气二级除尘器	沉尘室 + 布袋收尘器 + 二级布袋收尘器
吹炼收尘	余热锅炉 + 电收尘器	余热锅炉 + 40 m ² 卧式单室四电场电收尘器	余热锅炉 + 50 m ² 卧式单室四电场电收尘器	余热锅炉 + 90 m ² 卧式双室五电场电收尘器	余热锅炉 + 50 m ² 卧式单室四电场电收尘器	余热锅炉 + 50 m ² 卧式单室四电场电收尘器
制酸系统	熔炼和吹炼各采用独立的两级动力波洗涤, 混合后进电除雾, 净化后的烟气采用双转双吸, 采用 HRS 低温热回收	两级洗涤, 两转两吸, LUREC 高浓度转化; 两套净化、两套干吸转化	两级洗涤, 两转两吸, 非衡态高浓度转化; 一套净化、两套干吸转化	两级洗涤, 两转两吸, 预转化高浓度转化, 低温热回收; 一套净化、两套干吸转化	两级洗涤, 两转两吸, 非衡态高浓度转化; 一套净化、两套干吸转化	两级洗涤, 两转两吸, 非衡态高浓度转化; 一套净化、两套干吸转化
硫酸尾气	—	双氧水法脱硫	氢氧化钠法脱硫, 正在改为双氧水法脱硫	离子液脱硫	双氧水法脱硫	有机胺脱硫
吹炼渣粒化尾气	—	—	水淬尾气直排	水淬尾气直排	送环集脱硫	动力波洗涤器 + 电除雾, 送环集脱硫
阳极炉烟气	脱硫洗涤塔	高温陶瓷膜除尘器除尘 + 双氧水法脱硫 + 臭氧氧化法脱硝	水冷换热器 + 布袋收尘器, 氧化期进入制酸系统, 其他期进入硫酸尾气脱硫	布袋收尘后进环集脱硫	板式烟气冷却器 + 布袋收尘器, 氧化期进入制酸系统, 其他期进入环集脱硫	板式烟气冷却器 + 布袋收尘器, 后进环集脱硫
环集烟气	布袋收尘器 + NaOH 洗涤塔	布袋收尘 + 离子液脱硫	布袋收尘	高效洗涤塔除尘 + 离子液脱硫	布袋收尘后, 送有机溶剂回收法脱硫系统	布袋收尘后进有机胺脱硫
残极处理烟气	—	直接进入环集系统	竖炉和保温炉烟气进入硫酸尾气脱硫	布袋收尘后进环集脱硫	—	竖炉烟气经环集布袋后进环集脱硫, 保温炉烟气送环集脱硫
排放标准	美国标准	2018 年 9 月开始执行特别排放限值: 颗粒物 ≤ 10 mg/m ³ 、SO ₂ ≤ 100 mg/m ³ 、NO _x ≤ 100 mg/m ³ 、硫酸雾 < 20 mg/m ³	颗粒物 ≤ 80 mg/m ³ 、SO ₂ ≤ 400 mg/m ³ 、NO _x ≤ 240 mg/m ³ 、硫酸雾 < 40 mg/m ³	—	特别排放限值: 颗粒物 ≤ 10 mg/m ³ 、SO ₂ ≤ 100 mg/m ³ 、NO _x ≤ 100 mg/m ³ 、硫酸雾 < 20 mg/m ³	—

3 结语

对比研究了目前已投产和在建的“双闪”铜冶炼厂的工艺技术情况,主要包括铜精矿干燥、铜精矿输送、闪速熔炼、冰铜粒化、冰铜制粉和输送、闪速吹炼、阳极精炼、残极处理和烟气处理等工艺技术的发展情况,可为“双闪”铜冶炼工艺技术的应用,以及未来的发展方向提供思路和经验。另外,随着国家“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”重大战略的提出,未来“双闪”铜冶炼工艺技术的发展提升方向将会进一步朝着绿色低碳方向进行。

参考文献

- [1] RAJNEET K, COLIN N, DAVID K, et al. Kennecott-Outotec ‘double flash’ technology after 16 years[C]//13th International Flash Smelting Congress, Zambia, 2011.
- [2] ARSENIO E, GLEN H, DAVID K, et al. Rio Tinto Kennecott Smelter-20 Years Strong! [C]//14th International Flash Smelting Congress, Las Vegas, USA, 2014.
- [3] 周松林. 祥光“双闪”铜冶炼工艺及生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2009(2): 11-15.
ZHOU S L. Xiangguang “double-flash” copper smelter process and production practice[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2009(2): 11-15.
- [4] 周俊. 铜冶炼工艺技术的进展与我国铜冶炼厂的技术升级[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(8): 1-10.
ZHOU J. Advances in copper smelting and converting process and technical upgrading in Chinese smelters[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(8): 1-10.
- [5] 孙来胜, 柴满林, 孟凡伟. 铜陵有色“双闪”铜冶炼工艺生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 10-14.
SUN L S, CHAI M L, MENG F W. Plant practice of “double-flash” copper smelting in Tongling Nonferrous Metals[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(9): 10-14.
- [6] 万爱东, 郭万书, 张更生, 等. 广西金川公司铜“双闪”冶炼技术及试生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 1-5.
WAN A D, GUO W S, ZHANG G S, et al. “Double-flash” copper smelting technology and pilot production practice in Guangxi Jinchuan Group Limited [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(9): 1-5.
- [7] 李良斌, 杨堃, 郎立杰, 等. 旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺试生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(2): 31-35.
LI L B, YANG K, LANG L J, et al. Pilot production practice of suspension smelting and vortex floating converting process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(2): 31-35.
- [8] 张冠华, 曹龙文, 魏文. “双闪”铜冶炼保温烟气脱硝技术方案比选[J]. 硫酸工业, 2020(8): 42-46.
ZHANG G H, CAO L W, WEI W. Comparison and selection of double-flash copper smelting heat preservation flue gas denitration technology scheme[J]. Sulphuric Acid Industry, 2020(8): 42-46.
- [9] 蔡桂香. 肯尼科特冶炼厂最近的生产和环境控制[J]. 有色冶炼, 2003, 32(3): 51-56.
CAI G X. Recent operation and environmental control in the Kennecott smelter[J]. Non-ferrous Smelting, 2003, 32(3): 51-56.
- [10] CHEN S L, MANSIKKAVIITA H. The beneficial effects of feeding dry copper concentrate to smelting furnaces and development of the dryers[C]//JONES R T. Southern African Pyrometallurgy 2006, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 5-8 March 2006.
- [11] 谢文义. 祥光铜业闪速熔炼系统维修改造[J]. 山东冶金, 2013(3): 72-73.
XIE W Y. Maintenance and reformation of Xiangguang copper’s flash smelting system[J]. Shandong Metallurgy, 2013(3): 72-73.
- [12] 王博, 来有寿, 王取敏. 精矿蒸汽干燥低压节能技术在广西金川公司的应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(2): 9-12.
WANG B, LAI Y S, WANG Q M. Application of low-pressure steam drying technology in Guangxi Jinchuan Company [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(2): 9-12.
- [13] 涂建华. 闪速炼铜工艺干铜精矿输送技术的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(2): 13-16.
TU J H. Study on conveying technology for dry copper concentrate in copper flash smelting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(2): 13-16.
- [14] 葛哲令. 祥光熔炼二期扩产改造与试生产总结[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(2): 43-45.
GE Z L. Summary on reconstruction and pilot production of second stage project in Xiangguang Copper[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(2): 43-45.
- [15] 周俊, 孙来胜, 孟凡伟, 等. 铜陵新建闪速熔炼—闪速吹炼项目概述[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(2): 5-9, 13.
ZHOU J, SUN L S, MENG F W, et al. An overview of

- Tongling new flash smelting and flash converting project[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(2):5-9,13.
- [16] 李栋,崔大韩. $\Phi 7\text{ m} \times 8\text{ m}$ 炼铜闪速溶炼炉的设计[J]. 中国有色冶金, 2018,47(1):6-7.
- LI D, CUI D W. Design of $\Phi 7\text{ m} \times 8\text{ m}$ copper smelting flash smelting furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018,47(1):6-7.
- [17] 李良斌,代红坤,李强,等. 旋浮熔炼+旋浮吹炼与富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺比较[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(2):51-59.
- LI L B, DAI H K, LI Q, et al. Comparison of suspension smelting + vortex floating converting and oxygen-enriched side blown smelting + multi top blown lance continuous converting process [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(2):51-59.
- [18] 刘平,郭万书,张更生,等. 广西金川公司“双闪”冶炼工艺投产五周年技术评述[J]. 中国有色冶金, 2019,48(1):1-7.
- LIU P, GUO W S, ZHANG G S, et al. Technical review on the 5th anniversary of the “double flash” smelting process of Guangxi Jinchuan Company[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019,48(1):1-7.
- [19] 胡俊,涂建华,唐尊球,等. 一种冰铜粉制备和输送设备及厂房一体化配置系统: ZL 201820017419. 1[P]. 2018-01-05.
- HU J, TU J H, TANG Z Q, et al. An integrated configuration system for matte powder preparation and conveying equipment and workshop: ZL201820017419. 1[P]. 2018-01-05.
- [20] 刘卫东. 闪速吹炼的生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(2):12-15.
- LIU W D. Flash converting production practice[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(2):12-15.
- [21] 曾庆晔,董木森,张慧强,等. 祥光铜业闪速吹炼炉炉体寿命延长的实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(2):55-59.
- ZENG Q Y, DONG M S, ZHANG H Q, et al. Practice on lifetime extension of flash converting furnace body in Xiangguang Copper Co., Ltd. [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(2):55-59.
- [22] 吴继烈. 冰铜闪速吹炼工艺评述[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(6):34-39.
- WU J L. Review of flash converting of copper matte[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(6):34-39.
- [23] 董广刚,何静. 祥光二期旋浮吹炼炉生产实践及优化[J]. 铜业工程, 2016(1):51-56.
- DONG G G, HE J. Production practice & optimization of vortex floating converting in Xiangguang II phase furnace[J]. Copper Engineering, 2016(1):51-56.
- [24] 从被卡脖子到输出欧美! 探访聊城民企技术反向出口“逆袭之路”[EB/OL] [2021-07-22]. http://gxt.shandong.gov.cn/art/2021/4/22/art_15171_10289306.html.
- [25] 周松林. 低碳铜冶炼工艺技术研究与应用[J]. 中国有色冶金, 2010,39(4):1-5.
- ZHOU S L. Research and application of low carbon copper smelting process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010,39(4):1-5.
- [26] 梁海卫. 美国肯尼柯特冶炼厂 HRS 系统介绍[J]. 硫酸工业, 2003(1):11-15.
- LIANG H W. Heat recovery system (HRS) of a smelter sulphuric acid plant in Kennecott, USA [J]. Sulphuric Acid Industry, 2003(1):11-15.
- [27] 张化刚,曹汝俊,董木森. 祥光铜业冶炼烟气超低排放与资源综合利用[J]. 硫酸工业, 2019(11):14-23.
- ZHANG H G, CAO R J, DONG M S. Ultra-low emission of smelting off-gas and comprehensive utilization of resources in Xiangguang Copper Industry[J]. Sulphuric Acid Industry, 2019(11):14-23.