

富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术的开发、工业化应用及发展方向

李建辉¹, 葛晓鸣², 柳庆康²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 烟台国润铜业有限公司, 山东 烟台 264000)

[摘要] 中国恩菲工程技术有限公司与烟台国润铜业有限公司合作开发了富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术, 经过三年多的稳定生产和不断优化, 行业评价为该技术达到了国际领先水平。文章回顾了该技术的开发背景、开发过程以及工业化生产过程中的创新与优化, 介绍了该技术的特点, 并对其发展方向进行了展望。

[关键词] 富氧侧吹熔炼; 多枪顶吹连续吹炼; 连续炼铜

[中图分类号] TF811

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2021)03-0064-04

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.03.013

0 引言

我国铜冶炼技术近年来得到了快速发展, 熔炼多采用闪速熔炼、氧气底吹熔炼、富氧侧吹熔炼、TSL 熔炼等高强度冶炼工艺, 吹炼逐步采用连续吹炼技术替代 P-S 转炉吹炼。烟台国润铜业有限公司(以下简称“烟台国润”)发展过程中遇到了诸多瓶颈, 中国恩菲工程技术有限公司(以下简称“中国恩菲”)充分利用其丰富的连续炼铜经验, 结合烟台国润的实际情况和发展规划, 与其联合开发了富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术, 完成了工业化生产线的建设, 并已稳定生产三年多。

1 开发背景

1.1 环保形势和连续炼铜技术发展的要求

目前仍有许多工厂的铜钼吹炼采用 P-S 转炉

吹炼工艺, 热态铜钼通过吊车和包子加入到 P-S 转炉内, 产出的吹炼渣和粗铜也采用同样的方式运至后续工序。该工艺存在低空污染严重、间断作业效率低、烟气处理系统大等缺点。随着环保要求的不断提升, P-S 转炉吹炼工艺被先进的连续吹炼工艺所替代是大势所趋^[1-2]。

此前主流的铜钼连续吹炼技术有闪速吹炼(旋浮吹炼)、三菱顶吹连续吹炼、氧气底吹连续吹炼等。闪速吹炼(旋浮吹炼)工艺成熟, 作业率高, 单系列规模大, 主要存在热态铜钼需要冷却、破碎, 难以处理自产返料(如残极、废阳极板), 生产成本低等缺点; 三菱顶吹连续吹炼技术已有 40 多年的运行业绩, 生产稳定、环境保护好、自动化程度高, 但存在技术引进困难的实际问题; 氧气底吹连续吹炼为我国自主研发的连续炼铜工艺, 建设投资低、技术指标先进, 主要存在氧枪寿命较短、单系统产能偏低等缺点, 正在工业生产中不断完善。

1.2 企业发展的瓶颈

烟台国润前身为 1970 年筹建的烟台冶炼厂, 是伴随新中国有色金属工业诞生的最早铜冶炼企业之一。原有生产系统存在多个制约企业发展的问題: (1) 熔炼渣含铜高, 有价金属回收率低; (2) 单位产品综合能耗高, 生产成本低; (3) 冶炼系统的余热未回收利用; (4) 吹炼工艺风眼粘结较重, 需频繁清

[收稿日期] 2020-09-08

[作者简介] 李建辉(1985-), 男, 山东潍坊人, 工程师, 硕士, 主要从事重有色金属的设计工作。

[引用格式] 李建辉, 葛晓鸣, 柳庆康. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术的开发、工业化应用及发展方向[J]. 有色设备, 2021, 35(3): 64-67.

理,劳动强度大。根据铜冶炼工艺现状及发展方向,结合企业现状,烟台国润与中国恩菲合作,决定开发富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术进行升级改造。

2 开发过程

2.1 开发基础

(1) 富氧侧吹熔炼的开发基础

富氧侧吹熔炼技术起源于苏联的瓦钮科夫工艺,1949年由苏联瓦钮科夫教授发明,1977年20 m²炉子在诺里尔斯克实现工业化。1985年哈萨克斯坦巴尔喀什厂建成35 m²炉子成功投产。该技术具有熔炼强度大、原料适应性强、环境保护好等优点,近年来在我国得到了快速推广应用。

烟台国润于2007—2008年将鼓风炉改造成侧吹熔池熔炼炉,受限于当时各方面的制约,该侧吹炉虽然未大范围使用水冷技术,富氧浓度偏低(<35%),铜铈品位低(55%~60%),但仍积累了大量宝贵的侧吹熔池熔炼生产经验。

上述情况为本项目富氧侧吹熔炼实现大熔炼强度、高铜铈品位、高富氧浓度、长炉寿的目的提供了良好的工业实践基础。

(2) 多枪顶吹连续吹炼的开发基础

日本三菱连续炼铜法的历史已有40余年,目前有四座冶炼厂采用该工艺进行生产,粗铜产能均在20万t/a~30万t/a,工艺成熟,指标先进。中国有色工程设计研究总院(中国恩菲前身)、大冶有色、云铜、烟台鹏晖(烟台国润前身)曾组团对三菱法进行了详细的考察,并展开了广泛的技术座谈和交流,形成了完整的技术考察报告。

中国恩菲有大量铜铈连续吹炼的工程经验,对各种吹炼炉不断探索研究,并自主成功研发了底吹连续吹炼技术;除此之外,中国恩菲还拥有大量的顶吹炉冶炼工程经验和专业的冶金炉设计团队,为开发新的多枪顶吹连续吹炼炉奠定了良好的基础。

2.2 数值模拟

本技术富氧侧吹熔炼要求产出高品位(大于70%)铜铈,多枪顶吹连续吹炼又是一个全新工艺,为更好的发现规律、规避风险,本开发引入了相应的多相流模型,采用VOF模型及湍流模型描述熔炼炉和吹炼炉内熔体流动过程和熔体喷溅,为模拟研究提供理论基础,为工业生产控制提供重要参考。实

际生产结果证明,模拟的最佳操作条件与实际生产控制参数非常相近。

2.3 连续吹炼渣型的选择

目前连续吹炼的渣型有两种,分别为钙渣和硅渣。钙渣的特点是能大量溶解磁性铁且保证流动性,鉴于该特征使得吹炼安全性大大增加,闪速吹炼、三菱吹炼均采用铁钙渣,但该渣系对炉衬的腐蚀较强,炉体必须衬铜水套保护。硅渣的特点是脱杂质能力强,对耐材侵蚀轻,但易产生磁性铁,渣流动性差,易产生泡沫渣,生产安全性较差。本技术最终确定采用钙渣作为多枪顶吹连续吹炼的渣型,渣层区域设计相应的保护措施。

2.4 热力学全计算研究与在线智能控制系统的开发

指导工业生产必须采用热力学模拟,本项目产业化方案采用国际冶金和化工领域广泛使用的METSIM工艺模拟软件,基于单元模块进行化学和过程控制,模拟双底吹连续炼铜过程的物料平衡和能量平衡。通过模型的建立、分析和计算,准确得到了各种不同工况下的质量平衡和能量平衡,为新技术实现产业化提供了帮助和支持。

连续炼铜工艺的瞬时性和连续性,对工艺控制系统提出了更高的要求,为此中国恩菲开发了在线智能控制系统,系统内置的连续炼铜工艺数学模型可以准确、快速地计算出熔炼产出的铜铈量,并将其做为连续吹炼的输入条件,两段工艺协同计算,动态反馈调整,以实现生产连续稳定作业。

2.5 热态三连炉完全连续炼铜的综合设计

本技术的又一关键点和核心点是“三连”,熔炼炉、吹炼炉和火法精炼炉通过流槽热态连接,每台炉是否正常作业均会对整个系统产生影响,为此在设计过程中全面考虑了各种非正常作业情况,最大程度上避免互相制约的情况,提高作业率。侧吹炉渣排放口和流槽以及小火车均为两套,既降低了劳动强度,又确保生产的稳定性;铜铈排放口设置两个,当吹炼炉维护时,可暂时将铜铈外放;粗铜流槽设置外放路径,当精炼炉不能进料时,可暂时浇铸成锭。

在上述大量工作的基础上,富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜生产线顺利建成并一次性投产成功。该生产线年处理混合铜精矿45万t,产粗铜12万t,现已稳定生产三年多,实现了清洁生产,各项技术经济指标先进,技术开发获得成功。

3 主要技术指标

烟台国润富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜生产线的主要技术指标详见表1。

表1 热态三连炉连续炼铜技术主要技术指标表

序号	名称	数据	备注
一	总体指标		
1	系统总作业率/%	>96	
2	侧吹炉寿命/a	3	
3	多枪顶吹炉寿命/a	3	
4	铜回收率/%	98.8	从铜精矿至阳极板
5	金回收率/%	98.0	从铜精矿至阳极板
6	银回收率/%	97.0	从铜精矿至阳极板
7	硫捕集率/%	99.2	从铜精矿至阳极板
8	硫回收率/%	98.0	从铜精矿至阳极板
9	粗铜能耗/(kgce/t·Cu)	<100	
10	渣选尾矿含铜/%	<0.23	
11	尾气SO ₂ 浓度/(mg/Nm ³)	<50	
二	富氧侧吹熔炼		
1	处理铜精矿量/(t/h)	60~63	
2	配入煤量/(t/h)	1.2~1.5	防止泡沫渣
3	一次风量/(Nm ³ /h)	13 000~15 000	
4	一次风压/kPa	~120	
5	富氧浓度/%	83~85	
6	铜铈品位/%	72~75	
7	渣铁硅比	1.6~1.8	
8	熔炼渣含铜/%	1.2~1.4	
9	烟尘率/%	1.0~1.5	
三	多枪顶吹连续吹炼		
1	工艺风量/(Nm ³ /h)	10 000~12 000	
2	风压/kPa	90~110	
3	富氧浓度/%	30~35	
4	粗铜含铜/%	98.5~99.2	
5	粗铜含硫/%	<0.3	
6	渣铁钙比	2.3~2.5	
7	吹炼渣含铜/%	18~22	
8	总液面高度/mm	1 100~1 150	
9	其中渣层厚度/mm	50~150	

4 工艺优点

富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术实现了真正意义上的完全连续炼铜,具有原料适应性强、熔炼强度大、脱杂能力强;工艺流程短、环境保护好、劳动强度低;工艺整体效率高;系统作业率高;生产控制难度小;生产成本低等优点。

原料适应性强、熔炼强度大、脱杂能力强:富氧侧吹熔炼属于强化熔池熔炼工艺,既可以处理普通铜精矿,又可以处理低品位、高杂铜精矿等,富氧浓度高(约85%),冶炼温度高(渣温约1 300℃),系统整体脱杂能力强。

工艺流程短、环境保护好、劳动强度低:侧吹炉产出的熔炼渣连续溢流排放,高品位铜铈虹吸溢流连续排放,通过流槽连续加入多枪顶吹炉,吹炼渣溢流排放,粗铜虹吸排放,通过流槽连续加入阳极炉,全过程实现完全连续,各排放口及流槽均设置了集烟罩。

工艺整体效率高:由于熔炼渣含铜低(小于1.2%),渣选矿产出的渣精矿返料也大幅减少;熔炼和吹炼烟尘率低(约1.0%);铜铈品位高(大于70%),从而产出的吹炼渣返量少;所有热态物料均无包子运转,不产出包壳冷料,仅有少数流槽壳。即全系统返料少,一次精矿使用率最高,工艺整体效率高。

系统作业率高:侧吹炉和多枪顶吹炉炉寿匹配合理,侧吹炉除正常点检外可以一直送风熔炼;多枪顶吹炉更换喷枪不影响其他喷枪正常吹炼。

生产控制难度小:侧吹炉生产系统稳定;多枪顶吹炉反应主要集中在100 mm厚的渣层,易于调控;各排放口等考虑处置意外状况的措施,系统生产控制难度小。

生产成本低:侧吹熔炼富氧浓度高(83%~85%),块煤主要起到还原磁性铁作用,煤率低;多枪顶吹炉也采用富氧(30%~35%)进行连续吹炼,完全自热;吹炼作业贯彻薄渣层,低枪压的思路。粗铜能耗可降至低于100 kgce/(t·Cu),生产成本低,综合技术经济指标先进。

5 工业化生产中的创新与优化

热态三连炉生产线建成投产后,随着生产经验

的积累,烟台国润对该技术的相关工艺控制和设备进行了优化,技术成熟度和先进性进一步提升。

5.1 侧吹炉二次风口优化布置

为完全燃烧单体硫和一氧化碳,侧吹炉需要补入二次风,目前国内大多数冶炼厂二次风口设置在两侧炉墙上,存在风口处易粘结、单体硫燃烧不充分、人工清理风口频率高、粘结物掉落影响炉况等缺点。结合侧吹炉炉膛高,喷溅物难以到达炉顶的特点,生产中将二次风口位置由侧墙改为炉顶加料口和上升烟道之间,并巧妙设置了观察口和清理口,克服上述缺点的同时,对降低侧吹炉烟尘率也起到了积极作用。

5.2 粗铜含硫控制技术

多枪顶吹连续吹炼将富氧空气穿透渣层直接吹入粗铜层,氧气主要与粗铜中的铜进行氧化反应,生成的 Cu_2O 再与混在渣层中铜硫的 Cu_2S 和 FeS 发生交互反应,产出粗铜。根据文献资料和考察报告,三菱法粗铜含硫约为 0.7%。烟台国润生产前期,粗铜质量指标与三菱法类似,后期通过渣型调整,过氧化程度控制,安全抑制泡沫渣等手段,实现了粗铜含硫 0.05% ~ 0.3%,大大缩短了火法精炼作业时间,提高了全系统的产能,而且粗铜含硫可根据实际生产情况灵活调整,实现指标先进的同时,操作空间大,易于控制。

5.3 多枪顶吹炉喷枪快速、简易更换技术

多枪顶吹炉的喷枪为自耗式喷枪,需要根据消耗情况定期更换。据了解三菱法喷枪更换方法为焊接,该方式存在操作难度较大,参与人员多、特种作业安全隐患等缺点,烟台国润生产人员对喷枪进行了改进,发明了喷枪快速、简易更换技术。该技术整个喷枪更换过程小于 2 min,劳动强度低,对生产系统影响小^[1]。

6 发展方向

烟台国润三年多的稳定生产充分证明了富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术的先进性和可靠性,结合行业的发展形势,笔者认为该技术的发展方向如下。

(1)大型化发展:富氧侧吹熔炼目前最大的设

计能力为 30 万吨铜/年;多枪顶吹连续吹炼实际最大产能可达 30 万吨铜/年;双闪工艺单系列产能已达 40 万吨铜/年,甚至更高。随着行业规模化发展趋势,要求该技术必须具备大规模生产的能力。多枪顶吹连续吹炼理论分析单系列产能达到 40 万吨/年,风险不大;大型化发展重点应落在提高富氧侧吹熔炼的冶炼能力上。

(2)精细化控制:目前该技术,尤其多枪顶吹连续吹炼的控制存在热态铜硫无法计量,枪位未有准确测量等问题,生产控制依靠一线员工的经验判断居多,随着科技的发展和检测手段的多元化,应实现各方面的准确计量、控制,减少人为因素对生产的影响。

(3)搭配处理冷料:近年来铜精矿的加工费呈逐年降低的趋势,生产企业的利润空间大幅压缩,多枪顶吹连续吹炼富氧浓度可在较大范围内调整,能充分利用吹炼反应自热,企业可根据资源情况搭配处理杂铜等物料,提高经济效益,提升企业竞争力。

7 结语

中国恩菲和烟台国润在大量的基础工作上开发了富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术,并在烟台国润技改项目上实现了工业化,经过三年多的稳定生产和不断优化,该技术表现出了原料适应性强、工艺流程短、环境保护好、工艺整体效率高、作业率高、建设投资省、生产成本低、综合技术经济指标好等优点,被协会评价为“世界领先水平”,标志着其成为近年来获得工业化运行验证的最新现代强化绿色炼铜技术,必将带动铜冶炼产业整体技术水平提升。该技术既适用于新厂建设,又适用于传统吹炼技术的改造,应用前景广阔。

[参考文献]

- [1] 蒋继穆. 连续炼铜杂谈[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(5): 1-8.
- [2] 陈小龙, 吕克新, 张均杰. 国润铜业铜冶炼环保节能技术改造项目回顾与展望[J]. 有色冶金节能, 2020, 36(6): 71-76.

(下转第 75 页)

- [3] 杨清平, 赵兴宽, 吴国珉, 等. 铲运机自动化出矿技术及其应用前景[J]. 采矿技术, 2016, 16(6): 21-24.
- [4] 于润沧, 刘诚, 朱瑞军, 等. 矿山信息模型矿业信息化的发展方向[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(5): 1-3.
- [5] 赵兴宽, 王贻明, 郭蕊, 等. 自动化铲运机在缓倾斜中厚矿体开采中的应用[J]. 铜业工程, 2017(1): 39-43.
- [6] 尹川邦, 裴德军. 铲运机轮胎优化改进[J]. 中国矿山工程, 2016, 45(4): 91-94.

Research on the Application of the LHD Automated Mining System in the Cut-and-fill Mining Stope

LIANG Xin-min, WNAG Huai-yong, CHEN Xiao-wei, ZHANG Wei-guo

Abstract: Automated mining is the trend and important symbol of the modern mining. It can effectively reduce the number of underground workers, improve the mining environment, and reduce the operating costs of enterprises. It has significant economic and social benefits. The article introduces the development status, application cases and cost-saving and profit-increasing of the automated mining system at home and abroad. Combining with the demand of building automated stope in an underground deep mining mine, innovated the management process and the layout of stope preparation work, which needs to match with the automated mining equipment. The article also provides a new solution idea for the application of LHD Automated mining system in similar mines using Cut-and-fill mining method.

Key words: automated mining; cost-saving and profit-increasing; deep mining; cut-and-fill mining method



(上接第 67 页)

The Development, Industrial Application and Future of Copper Smelting Technology by Three Continuous Furnaces in Thermal Operation which means Oxygen-enriched Side-blowing Smelting Furnace—Multi-lance Top-blowing Continuous Converting Furnace—Pyrometallurgical Anode Refining Furnace

LI Jian-hui, GE Xiao-ming, LIU Qing-kang

Abstract: China ENFI Engineering Corporation and Yantai Guorun Copper Co., Ltd. have jointly developed the copper smelting technology by three continuous furnaces in thermal operation which means oxygen-enriched side-blowing smelting furnace—multi-lance top-blowing continuous converting furnace—pyrometallurgical anode refining furnace. After more than three years of stable production and continuous optimization, this technology is recognized by the industry as having reached the international advanced standard. This paper reviews the development background, performance history, and innovation and optimization in the industrial application of this technology, introduces its characteristics, and prospects the development direction of this technology.

Key words: oxygen-enriched side-blowing smelting; multi-lance top-blowing continuous converting; continuous copper smelting

