

铜精矿富氧顶吹浸没熔炼技术升级改造

顶侧复合连续炼铜系统开发之工艺流程再造

陆金忠 孙晓峰 李海春

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 富氧顶吹浸没熔炼工艺是在特定时期引进并在国内实现消化创新和广泛应用的铜冶炼技术,为我国铜冶炼行业从传统熔炼工艺向现代强化熔炼工艺的跨越作出重要贡献。近年来,连续炼铜技术和短流程技术快速发展,造钼熔炼在高富氧浓度、高铜钼品位、高温和高处理能力方向上不断突破。在高质量发展要求和技术快速进步的背景下,国内各生产企业结合自身实际围绕铜冶炼系统的绿色节能降耗开展了系列探索和研究,取得了一系列成果。本文围绕新时期铜精矿富氧顶吹浸没熔炼工厂技术升级改造的工艺创新与流程再造进行探索,提出总体思路 and 开发方向,包括主体设备供风装置增加侧吹喷枪,并对冶金炉炉体结构及其他配套设施进行相应的改造,取消原料制粒系统和沉降电炉,实现高品位铜钼冶炼和连续炼铜,以期对顶吹熔池熔炼工厂技术和装置的升级改造提供技术储备、指导及参考,推动行业向低碳、绿色、环保方向迈进。

[关键词] 铜冶炼; 富氧顶吹浸没熔炼; 连续炼铜; 控制优化; 工艺升级

[中图分类号] TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)02-0001-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.001

0 前言

20世纪末,中国铜冶炼行业从澳大利亚引进了富氧顶吹浸没熔池熔炼技术,包括艾萨熔炼法(ISASMELT)和澳斯麦特法(AUSMELT)。顶吹浸没熔炼技术属于熔池熔炼范畴,核心设备是1台立式圆形冶炼炉和多层套管式喷枪,该技术的特点是物料从顶部加料口加入,富氧空气由位于炉子中心的喷枪鼓入熔池,通过氧化熔融炉渣中的FeO等物质形成 Fe_3O_4 等不稳定氧化物,普遍认为溶解在渣中的 Fe_3O_4 能够起到某种催化剂的作用^[1],通过

Fe_3O_4 进行氧的传递,与原料中的硫化物进行交互反应,完成造钼和造渣过程,产出铜钼和炉渣的混合熔体;混合熔体通过排放口排入沉降电炉进行铜钼和炉渣的分离;铜钼从沉降电炉排出后进入P-S转炉吹炼生产粗铜,也有企业采用顶吹浸没吹炼铜钼周期性操作生产粗铜;烟气由炉顶烟道口通过竖式锅炉排出。

相对反射炉熔炼和矿热电炉熔炼等传统铜冶炼工艺,富氧顶吹浸没熔炼工艺具有处理能力大、生产效率高、投资省、自动化程度高等优点^[2]。20世纪末至21世纪初将近20年间,富氧顶吹浸没熔炼工艺在国内外铜冶炼行业得到广泛的应用,其中云南铜业、滇中铜业、谦比希铜冶炼厂、四川会理昆鹏铜业引进了ISASMELT工艺,侯马冶炼厂、大冶有色、铜陵有色、葫芦岛有色、云锡铜业、新疆有色等采用了AUSMELT工艺。

随着连续炼铜技术、短流程技术和熔炼炉渣选矿技术的进步与发展,顶吹浸没铜冶炼技术配套沉降电炉和物料制粒系统存在的流程长、低温冶炼不适用于生产高品位铜钼、炉体缺乏水冷结构致使炉寿命短等问题日益凸显,其相对技术优势已明显弱化。

如何对该技术的工艺控制理论和生产作业流程

[收稿日期] 2024-01-19

[作者简介] 陆金忠(1969—),男,正高级工程师,副总工程师,主要从事铜、镍、铅等重金属火法冶炼设计,固废和危废的资源化、无害化处置。

[引用格式] 陆金忠,孙晓峰,李海春.顶侧复合连续炼铜系统开发之工艺流程再造[J].绿色矿冶,2024,40(2):1-5.

LU Jinzhong, SUN Xiaofeng, LI Haichun. Process reengineering of combined top blown and side blown continuous copper smelting system development[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 1-5.

进行变革,使其冶炼指标达到目前先进冶炼技术水平,使该类冶炼厂通过技术改造注入新的活力,已成为我国铜冶炼行业必须面对的重大挑战。本文针对顶吹浸没熔炼技术的工艺控制理念和生产流程进行分析研究,提出技术升级改造的新思路和主要举措,包括主体设备供风装置增加侧吹喷枪,并对冶金炉炉体结构及其他配套设施进行相应的改造。

1 富氧顶吹浸没熔炼技术的劣势分析

相比其他先进铜冶炼工艺,富氧顶吹浸没熔炼技术的劣势主要为冶炼工艺流程长、能耗高、氧气和燃料热值利用率低、熔炼产出铜硫品位低、氧枪和炉寿命短等。

1) 配料需要制粒系统,增加投资和能耗。为降低系统烟尘率,物料制备系统配置了混合物料制粒系统,通过对制粒系统喷淋水保证成球率,物料中增加的水分在熔炼过程中使能耗大幅增加。

2) 需配套沉降电炉,增加投资和电耗^[3]。由于富氧顶吹浸没熔炼搅动强度大,铜硫和熔炼渣不能在炉内有效分离,需搭配沉降电炉进行沉降分离。熔炼产出的炉渣和铜硫混合熔体需通过流槽流入沉降电炉,增加了操作工序;炉渣排放过程也导致了熔体温度的降低,在沉降电炉中需要进行二次提温,既延长了冶炼工艺流程,又增加了电能消耗。

3) 不易生产高品位铜硫,难以与连续吹炼工艺匹配。生产试验表明,富氧顶吹浸没熔池熔炼工艺不易生产含 Cu 量 70% 以上的高品位铜硫^[4],难以与连续吹炼工艺匹配,进而带来 P-S 转炉吹炼工艺的环保问题。

4) 氧枪寿命低。氧枪寿命一般为 10 ~ 15 d,较高的富氧浓度也会进一步影响氧枪寿命。

5) 氧气和燃料热利用率低,能耗高。富氧顶吹浸没熔池熔炼技术属于低温冶炼,熔炼过程需要严格控制炉渣中的 Fe_3O_4 含量,需加还原煤以防产生泡沫渣;生产低品位铜硫,部分 Fe 和 S 的氧化热无法在熔炼炉利用,也需要补充燃料维持热平衡;低温冶炼热力学条件相对较差,导致了氧气利用率和燃料热值利用率比较低的问题。据测算,加入顶吹浸没熔炼炉的燃料煤中的 30% C 在熔炼过程中以 CO 形态溢出进入烟气中,通过套筒风、二次风口补入二次风在炉膛上部或余热锅炉燃烧,燃料热利用率偏低。反应需要的氧气从喷枪集中喷入熔池,喷枪浸没深度在渣层下部 300 mm 左右,氧气的利用率约

95%。

6) 炉衬寿命低。顶吹炉内反应区较少配置铜水套,只是在炉壳外设置了水冷结构,操作温度较高时,耐火材料受到的冲刷侵蚀非常显著,导致炉寿命大幅缩短。

2 铜精矿冶炼技术的发展概况

近十多年以来,国内的铜冶炼技术已经有了较大的变化和发展,主要方向是大型化、连续化,炉渣进行选矿回收有价金属。大型化主要指单系列生产规模超过 20 万 t/a,连续化主要指熔炼产出品位 68% ~ 75% 的铜硫,吹炼采用连续送风、间断或连续排放的技术替代当前的 P-S 转炉吹炼,减少烟量,提高烟气的 SO_2 浓度,消除铜硫吊运过程的低空污染。

2.1 “双闪”工艺

闪速熔炼技术搭配闪速吹炼技术,简称“双闪”工艺。闪速熔炼产出品位 68% ~ 70% 的铜硫,铜硫经过粒化后,再进行磨矿加入闪速吹炼炉,产出吹炼渣和粗铜,吹炼渣含 Cu 量为 22% ~ 25%、含硫量低于 0.2%。

受铜硫磨碎工艺制约,与闪速吹炼搭配的熔炼铜硫品位很难再有提高的空间,且相比与其他工艺搭配,吹炼渣量较大。

2.2 “双底吹”工艺

底吹熔炼搭配底吹吹炼技术,简称“双底吹”技术。底吹熔炼产出品位低于 78% 的铜硫,铜硫通过流槽间断或连续加入底吹吹炼炉,产出粗铜和炉渣。铜硫可以冷态或/和热态结合的方式加入。

受低温冶炼条件限制,吹炼过程中粗铜含硫量较高,为 0.3% ~ 0.6%^[5],吹炼渣含铜量低于 20%,直收率较高。吹炼渣型可以是铁橄榄石渣型,也可以采用铁酸钙渣型。

底吹吹炼炉具备操作简单的优势,喷枪可以在外部检修,在没有铜水套冷却的条件下,炉寿命延长,大修周期也达到了 4 年以上。

2.3 “侧+顶”工艺

富氧侧吹熔炼+多枪顶吹吹炼,简称“侧+顶”技术^[6-7]。富氧侧吹熔炼产出品位低于 78% 的铜硫,铜硫通过流槽连续加入多枪顶吹炉,顶吹炉采用连续送风,产出含硫量低于 0.1% 的粗铜,可以搭配处理冷态铜硫。

吹炼粗铜含硫量可以灵活控制在 0.05% ~ 0.20%,对应的渣含铜量在 20% ~ 35%,粗铜品质

好,吹炼渣型可以是铁橄榄石渣型,也可以采用铁酸钙渣型。

2.4 其他工艺

1) 底吹熔炼 + 闪速吹炼。利用底吹熔炼低温冶炼的优势,处理含 Fe、S 较低的原料,产出品位 68% ~ 70% 的铜锍,铜锍经粒化、磨矿后加入闪速吹炼炉生产粗铜,闪速吹炼操作与“双闪”技术相同。

2) 侧吹熔炼 + 底吹吹炼。利用侧吹熔炼可以实现高温冶炼的优势,生产低于 78% 的高品位铜锍,铜锍通过虹吸口连续地排入底吹吹炼炉。该工艺将侧吹熔炼和底吹吹炼各自的优点充分地发挥出来。

3) 双底吹两步炼铜。国内某厂将“双底吹”技术延伸,将底吹吹炼和精炼在同一台炉内进行周期性操作,吹炼结束后直接进行还原作业,产出阳极铜并直接浇铸成阳极板。该工艺取消了阳极炉,但是需要配置 2 台吹炼炉交替作业。

总体来看,国内铜冶炼技术的发展整体已经向着去 P-S 转炉吹炼的方向迈进。一些仍在采用 P-S 转炉吹炼的铜冶炼企业也在进行这方面的技术储备和研究。

国内某厂采用“双底吹”工艺完成了底吹熔炼 + P-S 转炉吹炼的工艺技术升级;某厂正在进行采用闪速熔炼 + 多枪顶吹吹炼工艺替代闪速炉 + P-S 转炉工艺的研究。

3 顶吹浸没熔炼工艺重塑与流程再造

国内铜冶炼技术近些年在工艺技术方面有了较大的突破,主要是在铜锍连续吹炼和炉渣处理方面不断优化和提升。顶吹浸没熔炼工厂的改造也应在吸收铜锍连续吹炼和炉渣处理技术突破成果的前提下,对熔炼工艺过程、过程控制和主体装置进行系统性变革,缩短流程、降低能耗。

3.1 改造方向

3.1.1 铜锍实现连续吹炼

顶吹浸没熔炼工厂的整体改造方向是朝着连续炼铜技术迈进,即采用底吹吹炼、多枪顶吹吹炼等连续吹炼工艺替代目前的 P-S 转炉。

一是解决铜锍吊运带来的低空污染问题,以及转炉吹炼漏风造成的烟气量大、烟气 SO_2 浓度低、烟气系统不稳定和环境烟气量大等问题。

二是铜锍通过虹吸排放,由流槽流入底吹吹炼、多枪顶吹吹炼炉,实现连续吹炼操作,稳定烟气量和提高

烟气 SO_2 浓度,减少环境烟气量,降低劳动强度。

3.1.2 炉渣处理

侧吹熔炼炉、底吹熔炼炉、闪速熔炼炉的炉渣均直接排入渣包,缓冷后通过选矿回收渣中的有价金属。铜熔炼炉渣选矿技术当前已经比较成熟,铜精矿火法冶炼系统的金属回收率也达到了 98.5% 以上,典型的是在底吹熔炼炉渣含铜量 3% ~ 5% 的条件下,能够保证金属回收率。

借鉴其他熔炼工艺,顶吹浸没熔炼工厂改造后的熔炼炉渣也可以不用经过沉降电炉进行分离,直接在熔炼炉排放经缓冷后送选矿,通过渣选矿保证金属回收率。

3.2 机理支撑

3.2.1 由低温冶炼转变为中高温冶炼

借鉴闪速熔炼、侧吹熔炼工艺,改进后的熔炼系统应适度提高冶炼温度,将冶炼温度由原来的 1 200 °C 左右提高到 1 250 ~ 1 300 °C。提高熔炼温度后,主要有以下优势。

1) 改善熔炼反应的热力学条件,提高冶炼效率。

2) 大幅降低炉渣黏度,可以消除或减少 Fe_3O_4 引起的泡沫渣风险,并能够将炉渣中的 Fe/SiO_2 从 1.3 提高至 1.5 ~ 1.8,减少熔剂 SiO_2 的消耗,降低熔炼渣量,大幅减少辅助材料消耗。

3) 提高冶炼温度降低炉渣黏度后,可改善铜锍和炉渣的分离条件,使炉渣含铜量大幅降低,可以将炉渣和铜锍直接由熔炼炉分别排放,取消沉降电炉工序,降低能耗。

3.2.2 提高富氧浓度

国外已有企业将顶吹浸没熔炼富氧浓度提高至 80% 以上,提高富氧浓度后,可以减少烟气量,从而减少烟气带走的热量,达到降低能耗的目的。目前采用该技术的冶炼厂在生产指标上均取得了不同程度的提高,顶吹浸没熔炼系统的后期改造将延续此项冶炼技术。

3.2.3 增加侧吹风,改善动力学反应条件

借鉴侧吹熔炼技术和 AOD 侧顶复吹技术,在现有顶吹浸没熔炼炉渣层合适的高度增加侧吹喷枪,实现熔炼炉顶部和侧部复合供给富氧空气。供气方式的改变改善了冶炼动力学条件,使整个熔池液体处于活泼搅拌和循环运动中,无明显死区^[8],加上提高冶炼温度后热力学条件改善,可以改进或改变冶炼机理,提高工艺氧气和燃料及物料的化学反应热效率,同时也为提高产能创造了条件。

3.3 熔炼主体装置主要改进

1) 设置虹吸排渣装置。该装置已经在葫芦岛宏跃北方铜业实施和运行,采用倾转流槽,实现渣包间的不堵渣口切换。

2) 铜钼虹吸排放。借鉴侧吹熔炼技术,设置铜钼虹吸排放装置,与连续吹炼炉通过流槽相连。

3) 侧吹枪作为主力供风装置后,顶枪作为辅助供风,风量减小,使喷溅情况将得到改善,可以缩短炉身高度,缩短部分由余热锅炉上升烟道进行改造。

4) 通过增设反应区水冷结构,消除由于冶炼温度提高和动力学条件改变带来的耐火材料寿命短的问题。

5) 投产后,需要根据炉渣含铜量的情况对操作液面、操作温度、排放制度、顶枪和侧枪配合制度进行优化,以取得最佳的冶炼指标。

3.4 改造后的优势分析

3.4.1 实现高品位铜钼冶炼

高温操作降低了炉渣黏度,因此可以减弱和消纳熔炼炉生产高品位铜钼造成的炉渣中 Fe_3O_4 升高引起泡沫渣的风险,并减少了熔体排放时在流槽的粘结,为熔炼产出铜品位 70% 以上的铜钼、后段实现连续吹炼创造了条件。

提高铜钼品位可以将吹炼渣期过剩的化学反应热前移至熔炼炉,而且在高富氧浓度条件下能够更充分地利用化学反应热,降低熔炼过程的能耗。

3.4.2 取消原料制粒系统

改造后的熔炼系统利用熔池熔炼烟尘率低的优势,因此可以简化物料制备系统,取消制粒系统,从而去除制粒加水工序,减少物料中水蒸发消耗的能量,可大幅降低熔炼能耗。该项操作已在大冶有色等多家工厂得到应用。

3.4.3 取消沉降电炉

铜钼和炉渣分离条件改善后,具备了炉渣和铜钼从熔炼炉分别排放的条件。铜钼通过虹吸排放系统进入连续吹炼炉,炉渣通过虹吸连续排放,进入渣包缓冷后选矿。取消沉降电炉后,每吨熔体可减少约 $60 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电耗,大幅降低了冶炼能耗和成本。

采用虹吸系统对熔体连续排放,不但能简化操作,而且还降低了劳动强度,改善操作环境,大幅降低熔体排放劳动强度和排放材料的消耗。

3.4.4 实现连续铜冶炼

高品位铜钼的产出为铜钼连续吹炼改造创造了条件,为采用“富氧顶吹 + P-S 转炉吹炼”工艺冶炼企业提供一种改造思路,也解决该工艺的环保难题。

4 结束语及建议

随着连续炼铜技术和短流程技术的发展,造钼熔炼均向着高富氧浓度、高铜钼品位、高温和高处理能力方向发展,国内各生产企业也进行了系列探索和研究,取得了一些成果。本文针对现有顶吹浸没熔炼工厂的技术升级改造提出工艺重塑与流程再造的思路与设想,期盼有助于促进顶吹熔池熔炼工厂向低碳、绿色、环保方向发展,并且在生产效率方面有大的提升。

该设想已经在国内某厂付诸实施,预计带来产能提升、冶炼能耗降低、烟气处理量减小、辅助材料单耗降低、人员配置减少等诸多优点,效益有待系统投运后对实际指标进行系统性测算。改造后的中高温作业可能会使顶吹喷枪寿命缩短的问题更加凸显,目前已经有专业厂家从材料、结构方面进行试验和研究,已取得较好成果,届时可以进行联合改进。

[参考文献]

- [1] W. G. 达文波特, M. 金, M. 施莱辛格. 铜冶炼技术 [M]. 杨吉春, 董方, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006: 129.
- [2] 赵震宇. 顶吹浸没铜熔炼技术述评 [J]. 有色矿冶, 2004, 20(5): 33 - 36.
- [3] 蒋继穆. 连续炼铜杂谈 [J]. 中国有色冶金, 2020, 49(5): 1 - 8.
- [4] 宣善伦. 澳斯麦特炉生产高品位冰铜的生产试验 [J]. 中国有色冶金, 2016, 45(1): 13 - 16.
- [5] 杨宏伟, 王占柯, 南君芳, 等. 底吹铜连续吹炼的生产实践 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2020(7): 26 - 30.
- [6] 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, 75.
- [7] 徐风. 三连炉连续炼铜工艺生产实践 [J]. 有色冶金节能, 2022, 38(2): 45 - 48.
- [8] 魏季和, 贺元, 史国敏. 侧顶复吹条件下 AOD 转炉熔池内流体流动的数学模拟: 模型对侧顶复吹过程的应用及结果 [J]. 过程工程学报, 2011, 11(1): 40 - 43.

Process Reengineering of Combined Top Blown and Side Blown Continuous Copper Smelting System Development

LU Jinzhong, SUN Xiaofeng, LI Haichun

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The oxygen-enriched top blown submerged smelting process is a copper smelting technology introduced in a specific period and realized digestion innovation and wide application in China. It has made an important contribution to the leap of China's copper smelting industry from traditional smelting process to modern intensive smelting process. In recent years, with the rapid development of continuous copper smelting technology and short process technology, matte smelting has made continuous breakthroughs in the direction of high oxygen concentration, high matte grade, high temperature and high processing capacity. Under the background of high-quality development requirements and rapid technological progress, domestic production enterprises have continuously carried out a series of exploration and research on green energy saving and consumption reduction of copper smelting system in combination with their own reality, and achieved a series of results. This paper focused on the process innovation and process reengineering of the technological upgrading and transformation of the copper concentrate oxygen-enriched top blown submerged smelting plant in the new era, and put forward the general idea and development direction, including the addition of side blown lances to the main equipment air supply device, and the corresponding transformation of the structure of the metallurgical furnace body and other supporting facilities, the abolition of the raw material granulation system and the settling electric furnace, the realization of high-grade copper matte smelting and continuous copper smelting. The upgrading and transformation of the melting plant technology and equipment provides technical reserves, guidance and reference, and promotes the industry to move towards low-carbon, green and environmental protection.

Key words: copper smelting; oxygen-enriched top blown immersion smelting; continuous copper smelting; control optimization; process upgrades