

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.02.008

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

李良斌,代红坤,李强,易超,张朝文

(中铜东南铜业有限公司,福建 宁德 352000)

摘要:简要介绍了旋浮熔炼+旋浮吹炼与富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺流程,通过对比分析这两种工艺的生产技术指标、造渣熔剂消耗、冶炼能耗和杂质元素适应性,阐明了它们各自的工艺特点,为我国后续新建或升级改造铜冶炼项目的工艺选择提供参考。

关键词:铜;旋浮熔炼;旋浮吹炼;富氧侧吹熔炼;多枪顶吹连续吹炼

中图分类号:TF811

文献标志码:B

文章编号:1007-7545(2021)02-0051-09

Comparison of Suspension Smelting+Vortex Floating Converting and Oxygen-enriched Side Blown Smelting+Multi Top Blown Lance Continuous Converting Process

LI Liang-bin, DAI Hong-kun, LI Qiang, YI Chao, ZHANG Chao-wen

(China Copper Southeast Copper Co., Ltd., Ningde 352000, Fujian, China)

Abstract: Processes of suspension smelting + vortex floating converting and oxygen-enriched side blown smelting + multi top blown lance continuous converting were briefly introduced. Process characteristics of these two kinds of processes were illustrated through comparative analysis of production technology index, smelting slag flux consumption, energy consumption, and impurity element adaptability. It will provide reference to projects for subsequent new or upgraded copper smelting technology.

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

21 世纪开始我国新建了多家铜冶炼企业,一些老的铜冶炼企业也先后进行了搬迁或技术升级改造,这些新建或改造的铜冶炼企业均采用目前世界上最先进的铜冶炼工艺,其中氧气底吹熔炼^[1-3]、富氧双侧吹熔炼^[4-6]、白银炉熔炼^[7-8]、氧气底吹吹炼^[9-10]和多枪顶吹连续吹炼等国内自主研发的铜冶炼新工艺也得到迅速推广应用。旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺^[5-6]是一种高效的强化冶炼工艺,源自于“双闪”炼铜工艺,特点是充分利用含铜物料的巨大比表

面积,将深度脱水的铜精矿或冰铜与富氧空气,通过喷嘴喷入反应塔进行充分混合并在极短的时间内完成氧化、熔化、造铜和造渣等一系列反应,具有高投料量、高冰铜品位、高富氧浓度和高热负荷的“四高”特点,且具有自动化水平高、装备先进和节能环保等优点。经过近 20 年的发展完善,已成为成熟可靠的铜冶炼工艺,是 40 万 t 级别新建大型铜冶炼企业的首选。富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺^[5-6]来源于双炉侧顶吹粗铜连续吹炼工艺,是赤峰云铜

收稿日期:2020-10-25

作者简介:李良斌(1989-),男,湖南新宁人,硕士,工程师

有色金属有限公司(以下简称赤峰云铜)和赤峰金峰冶金技术发展有限公司联合开发的新工艺,该技术于2014年11月在赤峰云铜年产130 kt粗铜项目中首次实现了工业化生产,而且生产运行平稳高效,后又经过不断革新优化。赤峰云铜在阴极铜搬迁扩建项目中,采用两套独立的“金峰双侧吹熔炼+金峰连续吹炼”工艺,升级改造为 2×200 kt/a高纯阴极铜的冶炼企业^[11],该项目于2019年建成投产,目前生产运行稳定。该工艺具有技术成熟、配套设施完善、综合能耗水平低、环境保护友好、投资省、运行成本低等优势,而且主要的技术经济指标处于行业领先水平。本文从工艺流程、主要技术经济指标、造渣熔剂消耗、冶炼能耗以及杂质元素适应性等角度对旋浮熔炼+旋浮吹炼与富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼两种工艺进行比较分析,为我国后续新建或升级改造铜冶炼项目的工艺选择提供参考。

1 工艺介绍

1.1 旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺

冶金工作者持续对闪速冶炼工艺理论及其设备技术进行研究,通过不断的创新发展和技术革新,闪速冶炼被广泛应用于铜精矿的闪速熔炼、铜钼的闪速吹炼、高品位铜精矿的一步炼铜,同时在其他复杂硫化矿石和非硫化矿物处理方面也取得了可喜的成果。闪速吹炼工艺是在闪速炉一步炼铜工艺的基础上研发的,1995年在美国肯尼科特公司尤他冶炼厂首次将“双闪”炼铜工艺投入工业生产。2005年祥光铜业将“双闪”炼铜工艺引入中国,并对喷嘴、精矿干燥与输送、装料系统等关键设备的新技术进行不断的开发应用,形成独具特色的旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺,并在国内得到推广应用。目前仍在生产运行的闪速熔炼炉有41台^[12],一步炼铜闪速炉有4台,闪速吹炼炉有6台,另有1家双闪冶炼企业在建。

旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺流程详见图1。铜精矿、渣精矿、吹炼渣以及造渣熔剂石英砂按旋浮熔炼炉混合物料成分的要求配料后,送往蒸汽干燥机进行干燥。干燥后的混合铜精矿通过浓相气力输送系统送至炉顶干矿仓。干矿仓内的混合铜精矿通过失重计量装置准确计量后,采用旋浮精矿喷嘴加入旋

浮熔炼炉的反应塔内,与旋流富氧空气充分混合并在反应塔高温区剧烈反应,反应得到的混合熔体落入沉淀池中继续完成冰铜和熔炼渣的最终形成和分离过程。熔融的冰铜通过风淬装置粒化后,送至冰铜堆场储存。产生的熔炼渣送至渣选车间进行处理,产生的渣精矿返旋浮熔炼炉配料,尾矿外售。冰铜堆场的冰铜送往冰铜磨进行研磨和干燥,细目的冰铜粉送至炉顶冰铜仓。炉顶冰铜仓的冰铜通过失重计量装置,与造渣熔剂生石灰粉一起通过冰铜喷嘴加入旋浮炉的反应塔内,与旋流富氧空气充分混合后在反应塔内剧烈反应,反应得到的混合熔体落入沉淀池中继续完成造铜和造渣反应。旋浮吹炼产生的粗铜进入阳极炉或NGL炉进一步脱杂处理,废铜模、不合格阳极板、电解产生的残极和不合格阴极板等高铜冷料也加入阳极炉或NGL炉进行处理,得到的阳极铜通过圆盘浇铸机浇铸成阳极板送电解。吹炼渣通过风淬装置粒化后返回熔炼炉配料。旋浮熔炼和旋浮吹炼产生的高温烟气经余热锅炉、沉尘室和电收尘降温除尘后,一并送至制酸系统,收集的烟尘均返回旋浮熔炼炉或旋浮吹炼炉处理。

旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺具有炉寿长、处理量大、富氧浓度高、作业率高、综合能耗低等显著优点,得到新建和改造项目的青睐。目前旋浮熔炼炉炉寿在10 a以上,旋浮吹炼炉炉寿命普遍在3~5 a,最长已经超过5 a。旋浮熔炼炉混合物料小时处理量达到290 t以上(不含烟尘),旋浮吹炼炉冰铜粉小时处理量达到90 t,单套系统年产阴极铜最大达到480 kt。富氧浓度基本都控制在80%以上,甚至超过90%,某冶炼企业将氧气浓度提高到95%以上,也取得了较好的效果^[13]。旋浮熔炼炉的年平均作业率超过98%,旋浮吹炼炉年平均作业率超过96%(月均作业率超过98%,目前各炼厂一般每季度需进行一次月修,对铜口内衬砖进行更换)。采用旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺年产400 kt阴极铜,粗铜综合能耗为110~120 kgce/t,阴极铜综合能耗为200~220 kgce/t,制酸电耗在70 kWh/t左右,硫捕集率在99.9%以上。经过20多年的运行实践和不断优化改进,旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺已十分成熟,在环境指标、技经指标、自动化程度以及操作运行等方面均优于其它铜冶炼工艺。

表 1 已投产和在建的旋浮熔炼+旋浮吹炼与富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺的铜冶炼厂

Table 1 Copper smelters in operation and under construction with suspension smelting+vortex floating converting and oxygen-enriched side blown smelting+multi top blown lance continuous converting process

冶炼厂	工艺	设计能力/kt	生产情况
肯尼科特	闪速熔炼+闪速吹炼	1 200 *	1995 年投产,2019 年开始进行旋浮改造
祥光铜业	旋浮熔炼+旋浮吹炼	400	一期项目 2007 年 8 月投产,2011 年 4 月采用自主研发的旋浮喷嘴的二期改造项目投产,目前实际产能 450 kt/a
铜陵金冠	闪速熔炼+闪速吹炼	400	2012 年 12 月投产,目前实际产能达到 420 kt/a
金川防城港	闪速熔炼+闪速吹炼	400	2013 年 12 月投产,目前实际产能达到 450 kt/a
东南铜业	旋浮熔炼+旋浮吹炼	400	2018 年 9 月投产
大冶有色	旋浮熔炼+旋浮吹炼	400	项目正在建设过程中,预计 2021 年投产
赤峰云铜	富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼	2×200	2014 年 11 月双炉侧顶吹粗铜连续吹炼新工艺投产,2019 年搬迁扩建项目投产,同时老厂关闭
南国铜业	富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼	300	2019 年 4 月投产
烟台国润	富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼	200	侧吹炉 2008 年 2 月投产,2017 年 7 月富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼+火法阳极精炼工艺项目投产
卢阿拉巴铜冶炼厂	富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼	400 *	2019 年 11 月投产

注: * 铜精矿

2 生产技术指标和熔剂消耗对比

2.1 主要生产技术指标对比

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主要生产技术指标对比详见表 2。在熔炼工序,旋浮熔炼的投料量大,但原料需要经过干燥处理才能入炉,而侧吹熔炼的原料不需要干燥处理,且对原料的粒度要求较宽泛,粉状和块状物料配料后直接通过皮带加入熔炼炉内,因此旋浮熔炼的烟尘率远高于侧吹熔炼炉。侧吹熔炼采用高冰铜品位控制,但由于侧吹熔炼过程具有良好的动力学条件,渣含铜与旋浮熔炼接近。两种工艺在温度控制上较为接近,生产过程中侧吹熔炼需要配入 1.4%~1.6%的燃煤进行补热,旋浮熔炼基本可以实现自热反应,仅在炉况波动时需要燃烧少量的天然气进行补热。

在吹炼工序,旋浮熔炼和旋浮吹炼是两个独立的过程,旋浮熔炼产出的冰铜经风淬粒化后储存,再经过冰铜磨细磨干燥后才能进入旋浮吹炼炉进行处理,备配料系统较为复杂。而侧吹熔炼产出的熔融白冰铜通过溜槽直接进入多枪顶吹连续吹炼炉,不仅能充分利用熔融冰铜的显热,而且在连续吹炼过程中还能处理电解产生的残极以及流程中的高品位

冷铜。两种吹炼工序均采用铁酸钙渣型,温度控制也基本相近,但由于多枪顶吹连续吹炼工艺原料是白冰铜,渣率远低于旋浮吹炼炉,烟尘率也只有旋浮吹炼炉的 10%左右。

2.2 熔炼工序石英砂消耗对比

旋浮熔炼和侧吹熔炼均采用石英砂作为造渣熔剂,侧吹熔炼炉熔炼和炉渣贫化过程在同一个炉内完成,在剧烈搅动的高温熔渣层中,入炉物料中硫化物的熔化速度超过了它的氧化速度,形成了以炉渣为基体并溶解了一定数量的液态硫化物、铜钼粒子、烟尘、部分难熔物质和气相产物的混合“乳浊液”^[16]。“乳浊液”中一定数量的液态硫化物有效抑制了 Fe₃O₄ 的生成,加速了相凝聚与分离,强化了传质传热过程,减少了铜在炉渣中的溶解,即使 Fe/SiO₂ 达到 2.0 左右,熔炼炉渣含铜也能控制在 2%以下。旋浮熔炼炉的氧化反应主要在反应塔内完成,在沉淀池中继续完成造渣和铜渣分离过程,炉渣中的 Fe/SiO₂ 直接决定了炉渣的性质,加入石英砂过低,渣中 Fe₃O₄ 溶解度降低;加入石英砂过多,渣熔点上升,渣发黏。闪速熔炼渣中 Fe/SiO₂ 一般控制在 1.2~1.4。若处理同一批次铜精矿,旋浮熔炼需要消耗的石英砂是侧吹熔炼的 1.5~1.7 倍。

表2 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主要生产技术指标对比
Table 2 Comparison of main production technical indexes of suspension smelting+vortex floating converting and oxygen-enriched side blown smelting+multi top blown lance continuous converting process

工序	项目	旋浮熔炼+旋浮吹炼	富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼
熔炼	投料量/(t·h ⁻¹)	260~290	150~200
	作业率/%	>98	>98
	入炉物料水分/%	0.2~0.3	6~8
	冰铜品位/%	68~70	74~75
	渣含铜/%	1.5±0.2	1.5±0.2
	烟尘发生率/%	6~7	1~2
	渣 Fe/SiO ₂	1.25~1.4	1.9~2.1
	冰铜温度/℃	1 270~1 290	1 260~1 280
	熔炼渣温/℃	1 290~1 310	1 310~1 330
	工艺氧浓/%	80~85	83~87
吹炼	吨矿燃料率	2~3 m ³	煤 1.4~1.6 t
	投料量/(t·h ⁻¹)	80~90	40~60
	作业率/%	>96	>98
	烟尘率/%	9~12	0.5~1.5
	粗铜 Cu/%	98.5~99	>99
	粗铜 S/%	0.25	0.03
	渣含铜/%	18~22	22~26
	渣 CaO/Fe	0.2~0.4	0.2~0.4
	渣 Fe ₃ O ₄ /%	30~50	30~50
	粗铜温度/℃	1 260~1 270	1 200~1 240
	炉渣温度/℃	1 270~1 280	1 270~1 280
	工艺氧浓/%	80~85	26~28
	每吨冰铜	8~12	/
	天然气消耗/m ³		
	每吨粗铜		
	综合能耗/kgce	110~120	80~90

2.3 吹炼工序造渣熔剂消耗对比

旋浮吹炼和多枪顶吹连续吹炼工序均采用流动性较好的 Cu₂O-CaO-Fe₃O₄ 三元系炉渣,钙基渣对 Fe₃O₄ 有较强的熔解能力,增加了渣的流动性,从客观上减少了泡沫渣的生成。旋浮吹炼采用生石灰粉作为造渣熔剂,渣中 Fe₃O₄ 含量与氧化气氛有关,也与渣中 CaO/Fe 及 SiO₂ 含量有关。渣含铜越高渣中 Fe₃O₄ 含量会降低,旋浮吹炼渣含铜一般控制在 18%~22%,在渣含铜一定时,渣 Fe₃O₄ 含量随着渣中 CaO/Fe 提高或 SiO₂ 含量降低而降低。旋浮吹炼炉的 CaO/Fe 一般控制在 0.2~0.4,入炉冰铜粉 SiO₂ 含量低时,CaO/Fe 可适当低控。多枪顶吹连续吹炼对造渣熔剂的品质要求相对宽泛,采用石灰石作为造渣熔剂,粒度一般控制在 10~25 mm

即可。由于多枪顶吹连续吹炼炉处理的是品位 74%~75% 的白冰铜,白冰铜中含 Fe 为 3%~4%,旋浮吹炼炉处理的冰铜品位为 68%~70%,冰铜中含 Fe 为 6%~8%,因此旋浮吹炼炉造渣需要消耗的熔剂是多枪顶吹连续吹炼(换算成生石灰粉)的 1.5~2.5 倍,产出的吹炼渣量也是多枪顶吹连续吹炼的 1.5~2.5 倍。吹炼渣量的下降,提高了多枪顶吹连续吹炼的直收率,同时需要返回熔炼工序处理的吹炼渣量也大大降低。

3 冶炼能耗对比

3.1 熔炼工序能耗对比

旋浮熔炼由于其工艺特点,混合含铜物料需要干燥到含水<0.3%才能入炉处理,蒸汽干燥机每吨湿精矿需要消耗 1.6 MPa 的饱和蒸汽 0.13~0.15 t。侧吹熔炼备料简单,对原料适应性强,块状物料和粉状物料均可直接入炉,原料含水一般在 6%~8%。在冰铜品位控制方面,侧吹熔炼直接产出品位为 75% 左右的白冰铜,旋浮熔炼产出的冰铜品位一般为 68%~70%,侧吹熔炼深度氧化过程中,铜精矿中更多的 S 和 Fe 氧化释放热量留在了熔炼工序。侧吹熔炼混合铜精矿中渣精矿配比 1%~2%,吹炼渣配比 2%~3%,入炉混合物料中造渣熔剂石英砂配比 3%~5%,入炉混合物料铜精矿配比在 90%~93%;旋浮熔炼炉混合铜精矿中渣精矿配比 3%~5%,吹炼渣配比 5%~7%,入炉混合物料中石英砂配比 9%~12%,因此入炉混合物料中铜精矿配比只有 75%~83%。同时旋浮熔炼的烟尘率也远高于侧吹熔炼,大量的流程物料产出和配入在一定程度上增加了旋浮熔炼炉的冶炼能耗。为维持热平衡,侧吹熔炼需要配入 1.4%~1.6% 的燃煤进行补热,而旋浮熔炼配料稳定时基本可以实现自热,仅在炉况波动燃烧少量的天然气进行补热。

3.2 吹炼工序能耗对比

侧吹熔炼产出的熔融态白冰铜通过溜槽连续排放至吹炼炉连续吹炼成粗铜,旋浮熔炼炉产出的冰铜通过冰铜风淬装置粒化后,送至冰铜堆场储存,在入旋浮吹炼炉前,再通过冰铜磨进行研磨和干燥,才能满足吹炼入炉的需求。通过对某旋浮熔炼+旋浮吹炼冶炼企业冰铜风淬系统和冰铜磨系统消耗的能耗进行计算,熔融冰铜风淬冷却的潜热损失以及冰铜风淬系统设备设施水、电和 N₂ 消耗为每吨冰铜 38~40 kgce,冰铜磨及其附属设备设施每吨冰铜需要消耗 10~11 kgce,在冰铜排放时环集脱硫系统需

多处理 9 万~13 万 m³ 的烟气(标态)。旋浮吹炼炉的炉体循环水系统会带走大量的热量,多枪顶吹连续吹炼炉外壳为钢板,内衬耐火材料,炉体带走的热量较少。旋浮吹炼炉工艺氧浓控制在 80%~85%,烟气带走的热量约占总热收入的 37%;多枪顶吹连续吹炼炉工艺氧浓控制在 26%~28%,烟气带走的热量约占总热收入的 60%。多枪顶吹连续吹炼富余热量用于处理电解工序产生的残极以及阳极精炼产生的精炼渣。旋浮吹炼工艺电解工序产出的残极需要返回阳极炉、NGL 炉、竖炉或倾动炉进行处理,增加了阳极精炼工序的天然气消耗,精炼渣破碎处理后返回熔炼炉处理。

通过对两家采用上述两种工艺年产 400 kt 阴极铜的冶炼厂的综合对比,采用侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺冶炼厂的每吨粗铜综合能耗为 80~90 kgce,每吨阴极铜综合能耗为 150~160 kgce,采用旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺冶炼厂的每吨粗铜综合能耗为 110~120 kgce,每吨阴极铜综合能耗为 200~220 kgce,综合比较,富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺综合能耗每吨阴极铜比旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺低 40~60 kgce。

4 杂质元素适应性对比

对两家分别采用旋浮熔炼+旋浮吹炼与富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺的铜冶炼企业熔炼和吹炼工序杂质元素脱除率进行跟踪分析,对比结果详见表 3。表 3 表明,侧吹熔炼对 Zn、As 和 Pb 元素的脱除率优于旋浮熔炼,特别是对 Pb 的脱除接近旋浮熔炼的 2 倍,对 Bi 和 Sb 的脱除略低于旋浮熔炼。多枪顶吹连续吹炼对 Zn 的脱除与旋浮吹炼相差不大,但对 As、Pb 和 Sb 元素的脱除明显优于旋浮吹炼炉。

表 3 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杂质元素脱除率对比
Table 3 Comparison of removal rate of impurities in suspension smelting+vortex floating converting and oxygen-enriched side blown smelting+multi top blown lance continuous converting process /%

工艺	Zn	As	Pb	Bi	Sb	综合脱除率
旋浮熔炼	87.29	77.04	41.13	87.17	84.18	75.36
富氧侧吹熔炼	96.48	88.94	79.6	70.14	74.41	81.91
旋浮吹炼	99.58	54.45	59.15	—	46.19	64.84
多枪顶吹连续吹炼	97.66	73.78	73.89	46.79	78.53	74.13

通过跟踪分析可知,旋浮熔炼+旋浮吹炼对杂质的适应性不及富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼,当原料含 Pb 和 Zn 等杂质元素偏高时,熔炼余热锅炉极易形成大块粘结,掉落的大块多为半熔融状态,严重影响锅炉及后续烟灰输送系统的运行。在杂质 Pb 的脱除方面,多枪顶吹连续吹炼虽不及传统的 PS 转炉,但远优于旋浮吹炼炉,配合侧吹熔炼对杂质 Pb 脱除率高的优势,富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺对杂质 Pb 具有较好的适应性。目前旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺对 Pb 元素的脱除率低,为满足电解工序对阳极板含 Pb 的要求,被迫通过阳极精炼工序反复造渣脱 Pb,增加了阳极精炼工序的氧化还原时间和精炼渣量,在一定程度上制约了火法系统的能力。精炼渣中含有大量机械夹杂的金属铜,金属铜颗粒具有延展性,不易被破碎,目前没有很好的破碎工艺可供选择;旋浮熔炼要求精炼渣破碎到 5 mm 以下才能参与配料,破碎后的精炼渣对备配料皮带系统以及干燥机金属盘管磨损较大,成为了旋浮熔炼+旋浮吹炼工艺的难点。某企业尝试从旋浮熔炼炉沉淀池顶加入块状物料,但效果不理想,且极易导致未完全熔融的精炼渣从渣口流出,导致渣包缓冷过程中放炮。富氧侧吹熔炼和多枪顶吹连续吹炼均可以处理块状含铜物料,流程物料处理方式较为灵活。

5 结语

随着我国铜消费量和冶炼产能的不断增长,铜冶炼工艺有了翻天覆地的进步。近 10 年新建和技术升级改造的铜冶炼项目,铜精矿熔炼工艺和铜钼吹炼工艺技术均达到了世界先进水平。“双闪”炼铜为国外引进技术,国内铜冶炼企业对该技术进行引进、消化吸收和再创新,形成了独具特色的旋浮熔炼+旋浮吹炼新工艺,其中旋浮喷嘴和风淬系统等核心关键设备技术实现国产化,并具有自主知识产权,摆脱了对国外技术的依赖。国内冶炼企业自主研发的富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼铜冶炼工艺技术产业化后,工艺技术水平不断提高,能耗指标优异,成为新建和升级改造项目的优先选择,得到迅速的推广应用,冶炼总产能也不断上升。新建或升级改造项目冶炼工艺的选择应综合考虑项目战略定位、区位条件、市场环境、原料结构、冶炼成本和工艺技术特点等因素,选择最佳的工艺。旋浮熔炼+旋浮吹炼新工艺仍是单系统 400 kt 以上阴极铜铜冶炼项目的重要选择之一,且产能越高优势越明显,但

随着富氧侧吹熔炼十多枪顶吹连续吹炼工艺技术的不断进步,以及双系统生产经营优势的凸显以及单系统产能的不断突破,其工艺灵活性和技经指标的优越性将成为200~300 kt阴极铜铜冶炼项目的首选,对400 kt阴极铜以上铜冶炼项目也形成有力的竞争,我国铜冶炼企业也必将引领世界铜冶炼技术的发展和进步。

参考文献

- [1] 郭学益,王亲猛,廖立乐,等.铜富氧底吹熔池熔炼过程机理及多相界面行为[J].有色金属科学与工程,2014,5(5):28-33.
GUO X Y, WANG Q M, LIAO L L, et al. Mechanism and multiphase interface behavior of copper sulfide concentrate smelting in oxygen-enriched bottom blowing furnace[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(5): 28-33.
- [2] WANG Q M, GUO X Y, TIAN Q H. Copper smelting mechanism in oxygen bottom-blown furnace [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(4): 946-953.
- [3] 谢云,黄进,张理勤,等.底吹熔炼炉试生产过程的探讨[J].世界有色金属,2018(19):7-8.
XIE Y, WANG J, ZHANG L Q, et al. Discussion on trial production process of bottom blowing smelting furnace[J]. World Nonferrous Metals, 2018(19): 7-8.
- [4] 黄贤盛,王国军.金峰铜业有限公司双侧吹熔池熔炼工艺试生产总结[J].中国有色冶金,2009,38(2):10-13.
WANG X S, WANG G J. Summary of Jinfeng Copper Co., Ltd. both side-blown bath smelting pre-production[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2009, 38(2): 10-13.
- [5] 韩志.双炉侧顶吹粗铜连续吹炼代替PS转炉吹炼[J].有色冶金设计与研究,2015,36(5):18-21.
HAN Z. PS converter converting replaced by double-furnace side top-blown blister copper continuous converting [J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy, 2015, 36(5): 18-21.
- [6] 韩志.双炉侧顶吹粗铜连续吹炼工艺介绍及应用意义[J].科学与创新,2015(19):84-85.
HAN Z. The double side of the furnace top crude copper continuous converting process and its application significance[J]. Science and Technology & Innovation, 2015(19): 84-85.
- [7] 廖文江.“白银炼铜法”工艺的发展和展望[J].有色冶金设计与研究,2019,40(2):30-31,50.
LIAO W J. Development and prospect of Baiyin Copper Smelting Process[J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy, 2019, 40(2): 30-31, 50.
- [8] 冯治兵,潘小龙.“白银炼铜法”双侧吹富氧熔池熔炼工艺发展综述[J].世界有色金属,2018(11):1-3.
FENG Z B, PAN X L. “Baiyin Copper Smelting” oxygen enrichment molten pool melting process development[J]. World Nonferrous Metals, 2018(11): 1-3.
- [9] 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.
YANG H W, WANG Z K, NAN J F, et al. Plant practice of continuous bottom blowing of copper[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(7): 26-30.
- [10] 袁俊智,王新民,赵福生,等.世界首套全底吹全热态连续炼铜技术生产实践[J].有色金属(冶炼部分),2020(8):25-29.
YUAN J Z, WANG X M, ZHAO F S, et al. Production practice of world's first full bottom blowing and full hot continuous copper smelting technology[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(8): 25-29.
- [11] 俞向东,申屠华德,师凯.赤峰云铜有色金属有限公司2×850 kt/a铜冶炼烟气制酸及低温热回收设计总结[C]//第三十八届中国硫与硫酸技术年会,杭州,2018:66-68.
YU X D, SHEN T H D, SHI K. Design summary of acid production and low temperature heat recovery from 2×850 kt/a copper smelting flue gas in Chifeng Yuncopper Nonferrous Metal Co., Ltd. [C]//The 38th Annual Meeting of China Sulfur and Sulfuric Acid Technology, Hangzhou, 2018: 66-68.
- [12] 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.
- [13] 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 commissioning of Guangxi Jinchuan Nonferrous Metals Co., Ltd. [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019, 48(1): 1-7.
- [14] 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.
- [15] 杜龙,刘旸,张小明. 富氧侧吹熔炼和连续吹炼工艺的环保优势[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(1): 19-21.
- DU L, LIU Y, ZHANG X M. Environmental advantages of oxygen enriched side blowing smelting and continuous blowing process [J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy, 2020, 41(1): 19-21.
- [16] 朱祖泽,贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京:科学出版社, 2003:328-332.
- ZHU Z Z, HE J Q. Modern Copper Metallurgy[M]. Beijing: Science Press, 2003:328-332.

(上接第 45 页)

- [9] 张立川,梁新星,赵声贵,等. 生物堆浸-萃取-电积生产阴极铜的工艺设计[J]. 云南冶金, 2020, 49(4):42-47.
- ZHANG L C, LIANG X X, ZHAO S G, et al. The process design of cathode copper production by heap bioleaching-extraction-electrodeposition [J]. Yunnan Metallurgy, 2020, 49(4):42-47.
- [10] ZHANG S, LIU W Y. Application of aerial image analysis for assessing particle size segregation in dump leaching[J]. Hydrometallurgy, 2017, 171:99-105.
- [11] 盛汝国,张宇鹏,钟传刚,等. 一种生物堆浸矿堆翻堆的方法:CN201710547559. X[P]. 2017-07-06.
- SHENG R G, ZHANG Y P, ZHONG C G, et al. A leaching heap rehandle method:CN201710547559. X[P]. 2017-07-06.