

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2020.08.005

世界首套全底吹全热态连续炼铜技术生产实践

袁俊智,王新民,赵福生,刘华

(包头华鼎铜业发展有限公司,内蒙古 包头 014000)

摘要:华鼎铜业发展有限公司先后经过三个阶段的改造形成了世界上首条全底吹全热态连续炼铜生产线,即底吹熔炼+底吹吹炼+底吹精炼。该工艺具有原料适应性强、整体脱杂优势明显,现场环境条件好、运行成本低等特点。介绍了全底吹全热态连续炼铜工艺和在运行过程中的生产实践。

关键词:连续炼铜;全底吹;全热态;生产实践

中图分类号:TF811

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2020)08-0025-05

Production Practice of World's First Full Bottom Blowing and Full Hot Continuous Copper Smelting Technology

YUAN Jun-zhi, WANG Xin-min, ZHAO Fu-sheng, LIU Hua

(Baotou Huading Copper Development Co., Ltd., Baotou 014000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Huading Copper Development Co., Ltd., successively replaced the original traditional copper smelting process through three stages of transformation, forming the world's first full-bottom blowing full-hot continuous copper smelting production line, namely SKS smelting + BCC converting + anode furnace refining. The whole process has the characteristics of strong adaptability to raw materials and furnaces, obvious advantages of overall impurity removal, good on-site environmental conditions and low operating costs. The continuous bottom-blowing and full-hot continuous copper smelting process and production practice during operation are introduced.

Key words: continuous copper smelting; full bottom blowing; full hot state; production practice

1992年中国恩菲工程技术有限公司发明了氧气底吹技术,并应用于铜冶炼领域,经过十几年的技术升级和进步,该技术已应用于国内外十几个新建和改造项目。作为中国拥有自主知识产权的炼铜新技术,氧气底吹技术具备热强度高、节能环保、投资成本少等优点,并以其优越的经济效益和社会效益受到多国青睐,是当前世界最具竞争力的铜冶炼技术之一。包头华鼎铜业发展有限公司(以下简称华鼎铜业)成立于2003年,2004年12月15日建成一套年产3万t铜的密闭鼓风炉系统。由于产能落

后、耗能高和环保压力大等原因,华鼎铜业从2009年主动淘汰落后冶炼工艺,逐步向技术先进、成熟可靠、节能、安全、环保、自动化水平高的全底吹炼铜工艺发展,这期间先后经历了三个阶段的改造,最终形成了世界上首条全底吹全热态连续炼铜生产线。

1 项目改造历史

第一阶段:2009年淘汰落后的鼓风炉+侧吹炉吹炼工艺,改为富氧底吹熔炼+PS转炉吹炼+固定式反射阳极炉工艺。

收稿日期:2020-05-29

作者简介:袁俊智(1979-),男,山东庆云人,高级工程师

第二阶段:2016年冶炼主厂房增加一台 $\Phi 4.4\text{ m}\times 18\text{ m}$ 的氧气底吹熔炼炉,将原有 $\Phi 3.8\text{ m}\times 15\text{ m}$ 的底吹熔炼炉升级改造为底吹连续吹炼炉,用于铜铋的吹炼,两台炉子呈阶梯布置,熔炼炉产出的热态铜铋通过溜槽直接流入吹炼炉进行吹炼。形成富氧底吹熔炼+底吹连续吹炼+固定式反射阳极精炼的工艺。

第三阶段:2019年淘汰固定式反射阳极炉,将原有的两台PS转炉($\Phi 3.6\text{ m}\times 8.1\text{ m}$)升级改造为底吹回转式阳极炉($\Phi 3.6\text{ m}\times 10\text{ m}$),改为富氧底吹熔炼+底吹连续吹炼+底吹回转式阳极精炼工艺。三种底吹炉型呈阶梯状布置,改造后熔炼炉产出的铜铋通过溜槽流入连续吹炼炉内进行吹炼,吹炼产出的粗铜通过溜槽流入底吹精炼炉进行火法精炼并浇铸。该工艺实现了底吹熔炼炉、底吹连续吹炼炉与底吹精炼炉三种底吹工艺的连续生产结合,具有更节能、更安全、更环保、自动化水平更高的显著优势。华鼎铜业全底吹全热态连续炼铜工艺模型如图1所示。

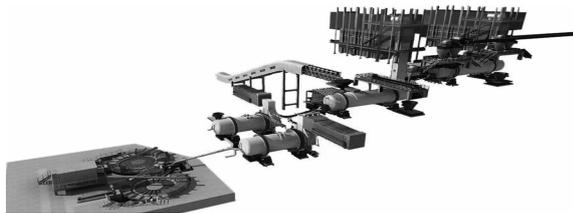


图1 全底吹全热态连续炼铜工艺模型图
Fig.1 Model of full bottom blowing and hot continuous copper smelting process

2 全底吹全热态连续铜冶炼技术特点

1)原料适应性强、回收率高、作业率高、热利用率高
实践证明,底吹熔炼炉对于复杂矿料,如高硫铜精矿、低硫铜精矿、氧化矿、金精矿、银精矿、高砷矿、高硅矿、块矿等的处理适应性比较强,同时,铜、金、银等金属回收率比较高。此外,根据生产实践,底吹连续吹炼过程中,利用吹炼富裕热可处理较高品位的冷杂铜,矿铜和冷铜之比最大达1:1,解决了其他连续吹炼工艺冷铜无法加入或加入比例过低的问题,可以降低10%~20%火法冶炼系统的成本。

2)脱杂能力强

底吹熔炼阶段送入炉内的混气氧气浓度在75%左右,压力在0.4~0.7 MPa;底吹连续吹炼阶

段送入炉内的混气氧气浓度在25%~30%,压力在0.6~0.8 MPa。高氧势使熔液溶解更多的氧,在熔体剧烈搅拌过程中, O_2 直接或优先将Cu氧化成 Cu_2O 作为载体进行传递,使杂质氧化后挥发至烟气中或通过造渣脱除,对杂质的脱除极为有利。另外,底吹熔炼、底吹连续吹炼和底吹精炼所需的气体都是从底部氧枪鼓入熔池内,气体对熔池的搅拌动力学最优,杂质的脱除更有利。

3)冶炼反应强度大

全底吹炼铜工艺中熔炼、吹炼和精炼所使用的供气元件—氧枪,均采用底吹模式,气体通过炉体底部的氧枪喷入炉内,由于气量大,熔体搅拌效果好,加快了渣金反应速度。首次将底吹技术应用到回转式精炼炉,突破了传统的透气砖精炼搅拌强度小、效率低、寿命低的难题。通过改良氧枪,配入合适的氮气、天然气、氧气和空气的混合气比例,提升造渣速度,大大缩短了氧化还原时间。同时,粗铜精炼环节的除杂能力较传统氧化还原方式有明显的提高,使全底吹炼铜工艺的原料适应性更强。

4) SO_2 浓度高、制酸成本低、冶炼环境好、无专门环集烟气系统

底吹熔炼富氧浓度可达75%,烟气量小,烟气 SO_2 浓度高;底吹连续吹炼连续作业,单位处理铜铋量小,烟气量稳定,相对于传统PS转炉只有1/3作业,因此烟气 SO_2 浓度高。另外全热态炼铜工艺中底吹熔炼、吹炼、精炼全部采用热态熔体从上一个环节流入下一个环节,极大地减少了传统通过行车吊运带来的热量损失,以及吊运包子带来的环保压力,无专门的环集烟气处理系统,极大地降低了生产成本。

3 全底吹全热态铜冶炼工艺操作

华鼎铜业全底吹连续炼铜工艺在生产实践过程中,针对提高作业率和负荷率、降低系统能耗、改进氧枪结构、延长炉寿命等方面,对生产工艺操作及控制参数进行不断优化和完善,并取得了良好效果。

3.1 底吹熔炼工艺操作

底吹熔炼是将富氧空气通过底部氧枪连续喷入铜铋层,通过气体、炉渣及液态熔体之间的冶金反应产出熔渣渣和高品位的铜铋。通过调控铜铋品位、炉渣渣型和过程温度来控制熔炼过程,调控过程主要是靠对物料量、物料成分、送气量和气体浓度等参数的控制实现的。

3.1.1 渣型控制

炉渣渣型控制的目的在于将炉渣控制在熔点较

低、黏性较小和流动性较合适的成分范围内。合理的渣型能有效降低熔炼温度、减少炉渣对炉体耐火砖的侵蚀、降低熔炼燃料成本、提高有价金属回收率。华鼎铜业底吹熔炼炉的 Fe/SiO_2 约在1.8,产出的铜硫含铜在71%~73%。

3.1.2 过程温度控制

熔炼过程温度和处理物料成分、熔炼产物的成分相关。华鼎铜业富氧熔炼过程入炉的含铜混合物料 $\text{Fe}+\text{S}$ 含量在45%~50%。由于生产过程中排渣是间歇性的,可通过测温装置测量温度、计算氧料比以及观察渣流动性、颜色,掌控熔炼过程的熔体温度,然后及时加减物料来调整熔炼温度,使熔池温度控制合适。华鼎铜业熔炼炉渣温控制在 $(1\ 200\pm 10)^\circ\text{C}$,铜硫温度略低于渣温,以渣子能顺利排出为准。

3.1.3 铜硫品位控制

铜硫品位是通过控制物料的氧化程度来实现的,即根据物料成分和工艺要求,确定对应工艺条件下的目标品位铜硫所需要的氧气耗氧量,再根据铜硫品位的实际化验结果与目标品位的差异,调整不同成分物料投入比例,最终使实际的铜硫品位接近目标铜硫品位。华鼎铜业经过反复试验、总结摸索出铜硫品位在71%~73%,较为适合下阶段的吹炼过程。

3.2 底吹连续吹炼工艺操作

底吹连续吹炼是通过控制粗铜品位、炉渣渣型和过程温度来控制吹炼过程,吹炼过程是个硫化物氧化和氧化物造渣过程。

3.2.1 粗铜品位控制

粗铜品位是通过控制铜硫的氧化程度来实现的,即根据铜硫成分和工艺要求,依据冶金原理计算,确定对应工艺条件下目标粗铜品位需要的理论氧气消耗量。通过实践中粗铜品位实际化验结果,通过大数据总结出目标粗铜品位对应的氧气消耗量关系来确定吹炼粗铜品位是否到达目标粗铜品位。

3.2.2 渣型控制

炉渣 Fe/SiO_2 是通过控制溶剂石英石的加入量来控制的,在吹炼过程中,调整合适的 Fe/SiO_2 ,通过加入合适的 SiO_2 与氧化生成的 FeO 快速结合,可降低 Fe_3O_4 含量。华鼎铜业底吹连续吹炼炉生产期间 Fe/SiO_2 控制在1.1~1.2。

3.2.3 过程温度控制

温度过高对氧枪区炉衬损耗过高。排渣、排铜时用测温枪或热电偶测量温度,当操作温度高于目

标温度或熔体流动性较好时,适当增加冷料来降低吹炼温度;当操作温度低于目标温度时,则适当减少冷料加入量来提高吹炼温度。华鼎铜业底吹吹炼炉,渣温控制在 $(1\ 200\pm 10)^\circ\text{C}$,铜温要略低于渣温,以炉渣顺利排出为准。

3.3 底吹回转式阳极炉工艺操作

底吹精炼目的是脱除粗铜中的杂质,并将熔铜中的硫和氧控制在合适的范围内,产出合格的阳极板,供电解精炼。华鼎铜业底吹精炼主要分为加料、预氧化、氧化、还原和浇铸5个过程。

3.3.1 加料和预氧化控制

华鼎铜业底吹回转阳极炉单炉处理粗铜量在160~170 t,由于连续吹炼炉的特点,阳极炉加料过程需阶段性加入,共分2~3次,单次加入粗铜量在40~50 t,为了减少氧化时间,在加完第二次料后,利用待料时间就将炉体转到生产位,进行预氧化。

3.3.2 氧化精炼控制

在 $1\ 150\sim 1\ 200^\circ\text{C}$ 的高温下,通过氧化枪由底部鼓入空气和氧气的混合气进行氧化,氧化的作用主要有:氧化、挥发杂质、脱硫且将熔铜中的硫和氧含量控制在适当的水平。氧化终点通过人工观察取样以及化验结果进行综合比对来判定。氧化精炼时送气量在 $2\ 500\sim 3\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ (标态,下同),配氧浓度在23%~25%,粗铜含硫在0.7%左右。

3.3.3 还原精炼控制

生产过程中,提前将还原枪安装好,待氧化过程终点结束,将炉体转出,氧化枪更换为还原枪,开始通入天然气和氮气的混合气,进行还原作业。生产过程中还原终点通过人工取样观察以及化验结果进行综合比对来判定。一般还原后的熔铜控制含氧量在0.05%左右,还原期送气量在 $350\sim 400\ \text{m}^3/\text{h}$ 。阳极精炼各阶段周期时间排布(h):待料1、预氧化1、氧化1.5~2.0、还原1、浇铸3。

4 全底吹全热态铜冶炼取得效果

1) 冶炼脱杂能力显著

在各种火法铜冶炼工艺中, Pb 、 Zn 、 As 、 Sb 、 Bi 为最难除去的杂质,而底吹吹炼和底吹精炼炼铜过程中,氧气先将 Cu 氧化成 Cu_2O 作为载体进行传递,粗铜中氧势高,将会溶解有更多的氧,有利于杂质的脱除。

为了摸索各种工艺与炉型对杂质脱除的影响,在查阅大量文献和资料的基础上,结合华鼎铜业生产过程中产品的化验结果,对比发现大量资料显示

的脱除率高低不一,数据参差不齐。原因主要是各家冶炼厂的配料成分不同、工艺操作的参数变化大、中间物料的计量不同,而且化验结果很难做到在同一标准下比较。因此华鼎铜业将前期的底吹熔炼+

PS转炉+固定式精炼炉炼铜模式和目前的全底吹炼铜模式比较得出的结果,前者参考性、准确性要更高一些。两种工艺流程杂质脱除对比情况如表2所示。

表1 华鼎铜业采用两种工艺流程杂质脱除对比情况

Table 1 Comparison of impurity removal by two processes in Huading Copper Industry

生产工艺流程	生产日期	炉号	混矿杂质成分/%					阳极板杂质成分/%				
			Pb	Zn	As	Sb	Bi	Pb	Zn	As	Sb	Bi
底吹熔炼+PS转炉+ 固定式精炼炉炼铜	2019-06-01— 2019-06-05	487						0.12	0.004 9	0.26	0.020	0.029
		488						0.12	0.003 4	0.23	0.021	0.029
		489						0.07	0.001 3	0.29	0.023	0.027
		490						0.096	0.002 6	0.24	0.025	0.021
		491	0.85	0.99	0.87	0.07	0.02	0.14	0.004 1	0.21	0.028	0.025
		492						0.23	0.008 4	0.21	0.022	0.024
		493						0.12	0.001 2	0.25	0.028	0.031
		494						0.19	0.008 4	0.23	0.025	0.035
		495						0.17	0.005 0	0.28	0.029	0.022
		496						0.15	0.004 4	0.30	0.021	0.023
		平均值	0.85	0.99	0.87	0.07	0.02	0.14	0.004 4	0.25	0.024 2	0.026
底吹熔炼+底吹吹炼+ 底吹精炼炼铜	2019-08-19— 2019-08-23	663						0.120	0.000 6	0.25	0.023	0.023
		664						0.084	0.000 6	0.20	0.017	0.024
		665						0.084	0.000 8	0.21	0.029	0.026
		666						0.085	0.000 8	0.30	0.023	0.021
		667	0.96	1	0.81	0.08	0.04	0.089	0.000 4	0.22	0.02	0.026
		668						0.110	0.000 5	0.28	0.027	0.019
		669						0.092	0.002 5	0.25	0.025	0.028
		670						0.140	0.003 7	0.20	0.018	0.026
		671						0.140	0.002 9	0.22	0.025	0.021
		672						0.110	0.002 0	0.28	0.028	0.023
		平均值	0.96	1	0.81	0.08	0.04	0.105 4	0.001 48	0.241	0.023 5	0.023 7

铜冶炼吹炼工艺中,间断性作业的PS转炉是当前脱杂能力最强的工艺炉型,其脱杂能力要明显优于其它吹炼炉型。通过对华鼎铜业前后两套工艺的杂质脱除结果对比可知,在入炉混矿杂质品位大致相同的前提下,全底吹连续炼铜工艺的脱杂效果与PS转炉相当,个别元素脱除效果甚至更优。铜冶炼行业中,采用连续吹炼工艺,各环节生产节奏紧凑,火法精炼炉作为最后一道环节,其具有彻底的脱杂能力对整个全底吹炼铜脱杂效果至关重要。华鼎铜业精炼炉采用底吹模式以及特殊的造渣法,使得各杂质元素在精炼环节也有着很好的脱除效果,脱除率Pb在70%~90%,As在50%~90%,Sb在50%~70%,Bi在30%~50%,粗铜杂质含量越高,其在精炼炉脱除率越高,反之越低。

2)无低空、外溢烟气,无环集烟气系统,烟气处理成本低,环保效果好

华鼎铜业全底吹连续炼铜各炉产生的热态熔体从上一个环节流入到下一个环节,全部采用溜槽方

式,且溜槽全封闭,彻底解决了低空烟气,而且排铜、排渣产生的环集烟气直接当配气进入制酸系统,不需要单独的环集烟气系统,极大地减少了烟气处理成本。由于全底吹连续冶炼的特点,各炉体烟气稳态排放,周期内进入制酸转化和吸收的SO₂气量和浓度相对稳定,转化吸收效果好,最终尾气排放的SO₂浓度在10 mg/m³以下,较国家超低排放标准100 mg/m³低得多,且排放浓度也较稳定。

3)炉内反应均匀、温度变化小,炉体整体寿命长,系统作业率高

在冶金炉生产过程中,熔体冲刷侵蚀、温差变化、化学反应等原因是造成炉体炉衬损坏的主要原因。全底吹三连炉全部采用底部氧枪喷入气体,传热传质好。气体底吹形成的扩散区使得炉内反应更加均匀、区域广、死角少,炉内无温差变化,炉衬除氧枪反应区特殊部位外,侵蚀很小。而氧枪区日常可以通过转出炉体测量,及时更换来解决,非常方便。底吹熔炼炉自2016年启炉至今仍未进行过大修,预

计大修寿命4~6年或更长;底吹吹炼炉小修1年以上,大修2~3年以上;底吹回转式阳极炉已运行近12个月的时间,根据目前炉衬状况初步判断小修不低于1年,大修2~3年以上,整体系统作业率在96%以上。

4)充分利用连续吹炼炉余热处理冷铜,节约成本。热态铜锍通过溜槽流入底吹连续吹炼炉,极大地减少了热量损耗,而且在吹炼过程中各种反应过程也释放大量的热量,这就给底吹连续吹炼炉能够处理冷铜提供了绝佳的条件。华鼎铜业利用这些余热处理高品位冷铜,最大可做到1:1,充分利用能量的同时节约了生产成本。

5)回转式阳极炉首次采用氧化还原氧枪来替代传统的透气砖

目前国内外火法铜冶炼精炼主体设备大多采用回转式阳极炉,其氧化、还原过程采用透气砖通入氮气进行搅拌。华鼎铜业回转式阳极炉首次采用底吹氧化还原枪替代透气砖,在鼓入氧化或还原气体的同时伴有氮气,小时鼓入气量为传统阳极炉的2~3倍,熔体搅拌效果远远好于透气砖方式,更加有利于熔体内氧化还原反应的发生,打破了当前世界上回转式阳极炉精炼工艺使用透气砖技术的形式。使用氧化还原枪操作要更加简单,其次采用底部鼓入氧化、还原气体,搅拌能力强,反应效果更优。

5 结语

2019年7月1日全底吹全热态炼铜生产线贯通以来,运行11个月总体生产平稳,达到了设计的预期效果,有以下一些突出优点:

1)对炉料适应性强、整个环节脱杂优势明显,适合处理高杂铜金精矿。

2)炉子、流槽密封好,无烟气外溢,且不会产生吊运的低空烟气,环境效果好。

3)氧势高、熔炼强度大,自热熔炼,能耗低。

4)烟气SO₂浓度高且量小、稳定连续,制酸尾气SO₂排放浓度远低于国家最低排放标准。

5)无单独环集烟气处理系统,大大降低了环集烟气的处理成本。

6)炉内反应均匀、温差变化小,炉体整体寿命长。

7)全热料生产,利用吹炼炉余热可以大量处理高品位冷铜,最大可以做到1:1,大幅度降低生产成本。

8)存在的问题:底吹连续吹炼受限于炉体体积小,吹炼浓度不宜过高等因素影响,炉内粗铜层偏薄,吹炼炉所产粗铜含硫较高,在0.5%~0.8%,目前正在通过优化氧枪结构、位置,提高操作水平等方法来降低粗铜含硫,如炉体容积相对够大,预计粗铜含硫能到0.3%~0.5%或更低(新建项目不存在该问题)。

参考文献

- [1] 梁帅表,陈知若. 氧气底吹炼铜的技术与发展[J]. 有色冶金节能,2013,29(2):16-19.
LIANG S B, CHEN Z R. Application and development of oxygen bottom-blowing copper smelting technology[J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2013, 29(2): 16-19.
- [2] 陈晓东. 贵溪冶炼厂铜冶炼过程As、Sb、Bi的危害及控制措施浅议[J]. 有色金属(冶炼部分),1996(3):1-5.
CHEN X D. Harmfulness and control measures of As, Sb and Bi in copper smelting process of Guixi smelter[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 1996(3): 1-5.
- [3] 兰旭,蔡兵. 云锡双顶吹铜冶炼工艺技术的应用[J]. 有色冶金设计与研究,2014,35(3):21-23.
LAN X, CAI B. Application of double top-blown copper smelting process in Yunxi project[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2014, 35(3): 21-23.
- [4] 袁俊智,王新民. 华鼎铜业双底吹连续炼铜的生产实践[J]. 有色设备,2017(6):34-37.
YUAN J Z, WANG X M. Production practice of double bottom blowing continuous copper smelting in Huading Copper[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment, 2017(6): 34-37.