

# 顶吹熔炼高氧气浓度高铜铕品位作业的研究及实践

赵祥林 刘贤龙

(大冶有色金属有限责任公司冶炼厂, 湖北黄石 435005)

**[摘要]** 某冶炼厂采用澳斯麦特炉富氧顶吹熔池熔炼技术, 为了建设绿色工厂, 将3台转炉生产减少为2台炉, 将澳斯麦特炉处理量从210 t/h降低至180 t/h, 导致产能下降。为了提升粗铜产能, 该厂将氧气浓度由55%提高至62%~65%, 将铜铕品位由67%提高至72%~75%, 研究提高氧气浓度和铜铕品位对铜冶炼的影响, 进行高氧气浓度高铜铕品位作业可行性论证, 并通过试验研究, 对澳斯麦特炉工序、锅炉收尘工序、沉降电炉工序、转炉工序遇到的问题进行分析, 并提出相应的解决措施。通过高氧气浓度高铜铕品位作业, 一降低熔炼烟气量, 提高澳炉处理能力; 二提高熔炼热效率, 降低澳炉系统的能耗; 三大幅度降低铜流量, 缩短转炉吹炼时间, 提高转炉处理能力; 四大幅度降低熔炼和吹炼总烟气量, 降低制酸系统负荷。

**[关键词]** 富氧顶吹熔炼; 铜冶炼; 澳斯麦特炉; 铜铕品位; 氧气浓度; 能耗; 绿色工厂

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2022)06-0009-07

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.06.003

## 0 前言

某铜冶炼厂的火法熔炼系统历经反射炉、诺兰达炉和澳斯麦特炉的变革。2010年开始引进澳斯麦特炉(以下简称“澳炉”)富氧顶吹熔池熔炼技术, 火法系统采用澳炉熔炼+PS转炉吹炼+阳极炉精炼的作业模式, 配备有1台澳炉、5台转炉和2个制酸系统, 设计产能为粗铜30万t/a、硫酸97万t/a。

通过系统的优化, 2019年粗铜产能最高达到32.5万t/a、硫酸108万t/a。

目前, 绿色发展已经成为全球主流趋势, 有色金属冶炼作为传统高能耗高污染行业, 建设绿色工厂逐渐成为行业内未来发展的趋势<sup>[1]</sup>。基于建设绿色工厂的需要, 该冶炼厂将三台转炉生产减少为两台, 澳炉处理量从210 t/h降低至180 t/h, 预测粗铜年产量下降至25.5万t(表1)。

表1 年产32.5万t及25.5万t粗铜相关生产数据

年产粗铜/ 万 t	日产粗铜/ t	澳炉处理量/ t·h <sup>-1</sup>	氧气浓度/ %	铜铕品位/ %	转炉运行数/ 台	澳炉烟气量/ Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	转炉烟气量/ Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
32.5	890	205	72	55	3	127 623	204 000
25.5	720	180	67	55	2	117 534	137 700

在澳炉处理量180 t/h、开两台转炉的情况下, 粗铜年产量仅有25.5万t, 想要进一步提升产能规模, 面临以下几个问题: 1) 澳炉富氧浓度偏低, SO<sub>2</sub>

浓度低、烟气量大, 澳炉加料量受到限制; 2) 澳炉铜铕品位控制较低, 仅有55%, 自热反应热量不足, 需要燃烧大量粉煤补充热量, 能耗高, 热效率低; 3) 由于铜铕品位低且量大, 转炉吹炼时间长, 处理能力不足, 且烟气量大; 4) 由于澳炉和转炉烟气量大, 加上系统漏风, 导致制酸系统处理能力不足。

针对上述问题, 将澳炉铜铕品位从55%提高到62%~65%, 氧气浓度从67%提高至72%~75%, 希望通过高氧气浓度熔炼, 降低熔炼烟气量, 提高澳

**[收稿日期]** 2022-07-31

**[作者简介]** 赵祥林(1986—), 男, 湖南衡阳人, 本科, 工程师, 从事铜冶炼技术研究及技术管理、生产管理等工作。

**[引用格式]** 赵祥林, 刘贤龙. 顶吹熔炼高氧气浓度高铜铕品位作业的研究及实践[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(6): 9-15.

炉处理能力;提高熔炼热效率,降低澳炉系统的能耗;大幅度降低铜铈量,缩短转炉吹炼时间,提高转炉处理能力;大幅减少熔炼和吹炼总烟气量,降低制酸系统负荷。高富氧浓度高铜铈品位熔炼同时影响熔炼炉内氧势变化,动能的传递、物质反应的过程,对熔炼过程有着极大的影响。

## 1 高氧气浓度高品位作业的利弊分析

提高氧气浓度,具有以下优点:1)可降低熔炼烟气量,减少澳炉尾气烟尘量,提高直收率;2)可减少烟气对澳炉耐火砖的冲刷,提高澳炉寿命;3)降低澳炉熔池熔体喷溅频次,减少锅炉结焦;4)减少澳炉和转炉烟气无组织散排量,实现产能规模的提升;5)提高  $\text{SO}_2$  浓度,从而有利于提高制酸系统效率;6)提高澳炉熔池冶化强度,使反应更加彻底;7)减少烟气热量损失,提高热效率,降低能耗<sup>[2]</sup>。

提高铜铈品位,具有以下优点:1)降低铜铈产出率,降低转炉负荷和烟气总量;2)缩短转炉吹炼时间,使其处理能力提升;3)转炉转进转出频次降低,漏风率下降;4)澳炉炉料  $\text{FeS}$  的氧化程度高,脱硫率大,热效率高;5)铜铈品位进一步提高,吹炼系统工艺具有更多选择。

然而,提高氧气浓度和铜铈品位,会产生以下弊端:1)氧气浓度过高,风量过低,触动工艺连锁;喷枪冷却不足,导致喷枪寿命缩短;2)风氧量下降,喷枪对熔池传质传热效果下降,物料反应不完全;热传递不够,澳炉溶体可能出现炉渣温度高、铜铈温度低的问题,导致电炉电耗高;3)澳炉渣多铜铈少,炉渣  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量上升;4)铜铈和炉渣熔点升高;5)烟气热量下降,蒸发量不足,收尘进口温度低;6)铜铈品位和炉渣熔点高,电炉电耗高;7)溜槽粘接严重,放铜、放渣困难;8)铜铈品位上升,炉渣量增大,铜在渣中损失增多;9)转炉热量减少,冷料处理能力下降。铜铈品位上升后,铜铈包壳增多,但转炉吹炼热量降低,冷料处理能力不足。

通过分析高氧气浓度、高品位作业利弊可以发现,熔池温度、渣型、铜铈品位和富氧浓度关系紧密,相互影响。

## 2 高氧气浓度、高品位作业的研究及实践

某冶炼厂开展高氧气浓度、高铜铈品位试验,针

对其中遇到的问题进行了大量理论研究,并在后期实践中采取相关措施优化应用。

### 2.1 澳炉工序

高氧气浓度、高品位作业的核心在于澳炉系统,要解决喷枪寿命缩短及工艺连锁限制、熔池传质传热变差、熔池四氧化三铁含量上升、高温熔体熔点升高等问题。

#### 2.1.1 喷枪寿命缩短及工艺连锁

将澳炉富氧浓度从 67% 提高到 72% ~ 75%,最大的影响是降低了喷枪风量,影响喷枪冷却效果。澳炉 PCS 系统要求喷枪风量不得低于  $8000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,否则会触动工艺连锁报警,同时为了确保喷枪冷却效果,保证喷枪寿命,一般控制喷枪管内的气体流速不低于  $70 \text{ m/s}$ 。

澳炉入炉精矿和产出铜铈及炉渣的成分见表 2。

表 2 入炉精矿、铜铈和炉渣成分

元素	Cu	S	Fe	$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{H}_2\text{O}$
入炉精矿成分/%	24.00	28.00	27.00	7.00	3.00	10.00
铜铈成分/%	65.00	22.00	10.00	-	-	-
炉渣成分/%	0.80	-	37.00	33.00	-	-

根据表 2,通过物料平衡和热平衡计算,结合生产实际,在生产的铜铈品位为 65%、确保喷枪冷却效果的前提下,澳炉最低小时处理量见表 3。

表 3 澳炉加料量计算

喷枪风量/ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	喷枪氧量/ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	氧气浓 度/%	喷枪内风氧 流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最低加料量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
12 500	27 250	75	70	186
14 000	25 800	72	70	180

根据表 2 和表 3,得到以下结论:1)当澳炉小时处理量超过 180 t 时,可以将氧气浓度提高至 72%;当小时处理量超过 186 t 时,可以将氧气浓度提高到 75%;2)当澳炉控制生产,小时处理量低于 180 t 时,必须调整氧气浓度以确保喷枪得到足够的冷却。因此,只要澳炉小时处理能力达到 180 t 以上,完全可以将澳炉氧气浓度提高到 72% 以上,即澳炉具备将氧气浓度提升至 72% ~ 75% 的条件。

在试验过程中,澳炉小时处理量超过 180 t 时,富氧浓度基本控制在 72% ~ 75%,平均 73%,喷枪没有出现明显弯曲,寿命基本维持在 8 ~ 10 d。

#### 2.1.2 熔池传质传热不足

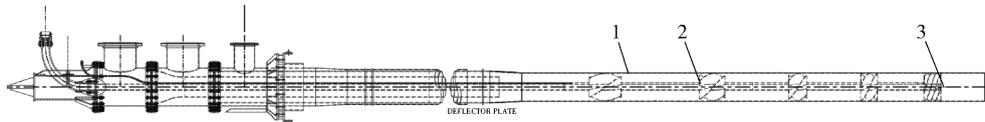
顶吹浸没熔炼技术的核心为赛洛喷枪<sup>[3]</sup>,氧气

浓度提高后,喷枪风氧量下降,对熔池的搅拌减弱,影响物料的传质传热<sup>[4]</sup>,导致以下后果:

1) 热量难以传递到澳炉底部,存在炉渣温度高、铜硫温度低的问题,流入电炉的铜硫温度低,导致电炉电耗高。

2) 澳炉炉内物料混合不均匀,存在局部夹生料和过氧化的现象。

试验后,澳炉炉壳底部温度下降 10 ℃,堰口时常有结块,且结块的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量最高达到 28%;从堰口观察熔体发现,熔体中存在反应不完全的半熔



1 - 风管管道; 2 - 螺旋; 3 - 混气室

图1 澳炉喷枪结构

针对喷枪传质传热不足的问题,首先缩小第 1 组螺旋、第 2 组螺旋与水平方向的夹角,对第 1 组螺旋和第 2 组螺旋进行改进,第 1 组螺旋出风口与水平夹角从 63.44°降低至 58°,第 2 组螺旋出风口与水平夹角从 69.68°降低至 65.16°,增强风氧沿水平方向运动的动能,提高澳炉熔池水平方向的搅动。第 3 组、第 4 组和第 5 组螺旋出风口与水平夹角保持不变,分别为 70.32°、75.23°、81.03°。通过改造,增大风氧对熔池水平方向的搅拌。

### 2.1.2.2 提高喷枪对熔池纵向的搅拌

为了提高喷枪对熔池纵向的搅拌,尝试将喷枪下放,增加喷枪对熔池的传质传热效果,但是喷枪不能接触铜硫层,否则容易烧枪。

澳炉的熔体放出口为具有虹吸作用的堰口,采用溢流的方式连续排放熔体。生产时,澳炉内部熔体高度维持在 2 100 mm,铜硫面 1 100 mm,为了防止铜硫烧枪,一般控制枪位不低于铜硫面以上 500 mm,所以枪位控制在 1 600 mm 以上是合理的。因此,可以将喷枪浸没熔池深度从 200 ~ 300 mm 调整到 300 ~ 500 mm。

通过改造喷枪和调整枪位,澳炉熔池内传质传热增强<sup>[4]</sup>,熔体大流量现象已经消除,效果明显。

### 2.1.3 熔池四氧化三铁含量上升

将铜硫品位提高到 62% ~ 65%,必须要研究熔池中熔体的物理化学性能和成分变化,而且四氧化三铁含量的变化是关键,关系到熔池熔体熔点的变化、温度的控制、渣型的选择等。

根据铜冶金铜硫中  $\text{FeS}$  活度与炉渣中四氧化三

铁活度的关系图<sup>[5]</sup>可以发现:1) 温度降低、铜硫品位提高、活度  $\alpha_{\text{FeO}}$  上升,均会导致四氧化三铁含量上涨;2) 当铜硫品位接近 80% 时,  $\alpha_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$  显著升高。造硫熔炼最佳铜硫品位为 60% 以下,不得超过 70%。试验结果也证明了这一点。高铜硫品位高氧浓度实验前后的关键参数见表 4。

### 2.1.2.1 提高喷枪对熔池水平方向的搅拌

为了提高喷枪对熔池水平方向的搅拌,改变喷枪螺旋角度,缩小出风口与水平方向的夹角。

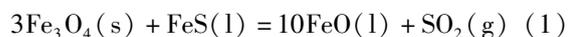
喷枪结构如图 1 所示,澳炉喷枪共有 5 组螺旋,靠近混气室为第 1 组螺旋,它决定了喷枪传送出来的空气和氧气的角度。

表 4 实验前后澳炉关键参数

项目	试验前	试验前期 (试验一个月)	试验后期
铜硫品位/%	55.98	62.78	62.01
氧气浓度/%	66.8	72	72
加料量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	180	205	205
炉温/ $^{\circ}\text{C}$	1 180	1 203	1 198
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ 含量/%	6.6	8.01	7.68
$\text{Fe}/\text{SiO}_2$	1.3	1.26	1.20
煤单耗/ $\text{t}\cdot\text{t}^{-1}$	0.025 8	0.024 9	0.023 1

当澳炉铜硫品位为 50% ~ 60% 时,四氧化三铁含量为 6.6%;当铜硫品位提升到 60% 以上时,四氧化三铁含量上涨至 8.01%。进一步提升铜硫品位,澳炉炉内反应明显变差,四氧化三铁含量增加,堰口结块多,熔体大流量频繁。

熔池中四氧化三铁、铜硫和炉渣三相之间的平衡关系,可以用下式表达:



$\text{FeS}$  活度大、 $\text{FeO}$  活度小以及  $\text{SO}_2$  分压低有利于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的还原,使其参与造渣。从式 (1) 也可以看出,铜硫品位提高会导致  $\text{FeS}$  活度下降,氧气浓度提

高会导致  $\text{SO}_2$  分压上涨, 均会促进四氧化三铁的产生; 另外, 由于  $\text{FeO}$  活度降低可抑制四氧化三铁产生, 可以通过加入  $\text{SiO}_2$  来调整  $\text{FeO}$  活度, 即降低炉渣的铁硅比<sup>[6]</sup>, 但是  $\text{SiO}_2$  熔点较高, 如果炉渣中含硅量过高, 会导致炉渣熔点升高。

通过上述分析, 可采取以下措施控制四氧化三铁含量:

1) 澳炉设计的铁硅比为 1.2 ~ 1.4, 可适当增加  $\text{SiO}_2$  的含量, 将铁硅比控制在 1.1 ~ 1.3, 从而有效地降低四氧化三铁含量并防止硅饱和。如表 5 所示, 试验中将澳炉铁硅比从 1.3 降低至 1.26, 后期进一步降低至 1.20。

2) 适当提高炉温。将澳炉炉温从 1 180 °C 提高到 1 203 °C, 可以有效降低磁性氧化铁含量。试验后期磁性氧化铁含量有所下降, 温度调整到 1 195 °C。

3) 严禁喷枪口正压, 将锅炉进口压力控制在 -20 Pa, 长期维持微负压, 有效降低  $\text{SO}_2$  分压, 从而抑制四氧化三铁的产生。

如表 4 所示, 试验前期, 四氧化三铁含量从 6.6% 提高到 8.01%, 试验后期采取了措施后又降低至 7.68%。

#### 2.1.4 熔体熔点上升

铜铈与炉渣的成分与入炉料成分、喷枪的搅动、铜铈品位有很大的关系。随着铜铈品位和氧气浓度的提高, 四氧化三铁含量增加, 喷枪对熔池的搅拌作用变弱, 传质传热效果变差, 熔池熔体的物相组成会发生变化, 直接影响炉渣和铜铈的熔点<sup>[7]</sup>, 表现为澳炉喷枪端压力增加, 熔池喷溅量增大, 结焦增多, 熔体黏度增大, 喷枪结焦难以掉落等; 锅炉结焦严重, 掉焦频繁; 沉降电炉的铜铈和炉渣黏度大, 熔体粘溜槽, 排放困难。

针对上述问题, 采取以下措施:

1) 提高澳炉炉温和电炉铜渣温度, 将澳炉炉温从 1 180 °C 提高到 1 203 °C, 后期降低至 1 195 °C; 将电炉铜渣温度从 1 202 °C 提高至 1 215 °C, 通过提高温度降低熔体黏度。

2) 提高铜铈品位后, 渣量增大, 精矿中的氧化钙不足, 炉渣钙含量仅有 1% ~ 3%。通过加入石灰石, 提高原料钙硅比, 将炉渣钙含量控制在 3% ~ 5%, 可以有效降低炉渣熔点。

## 2.2 锅炉收尘工序

提高氧气浓度和铜铈品位, 对锅炉及收尘系统的主要影响是热量下降, 出现蒸发量不足、电收尘进

口温度过低的问题。

### 2.2.1 蒸发量不足

氧气浓度提高后, 烟气的量减少, 烟气带走的热量减少, 但是可以通过提高澳炉加料量来维持澳炉烟气的量, 确保烟气的量不下降。同时随着氧气浓度的提高, 相同烟气的热焓提高, 会导致锅炉蒸发量上涨<sup>[7]</sup>。

为了确保蒸发量, 采取以下措施:

1) 提高澳炉处理量, 确保澳炉烟气的量不出现大幅下降。

2) 加强锅炉结焦维护, 提高振打频次和加入合理的结焦抑制剂, 减少烟道结焦, 提高锅炉热效率。

3) 提高锅炉查漏补漏次数, 减少锅炉漏风现象, 特别要注意锅炉下降段和水平段区域的补漏工作, 因为这个区域的烟气温度为 400 ~ 500 °C, 是  $\text{SO}_2$  氧化产生  $\text{SO}_3$  的区域。

试验前后锅炉及收尘的关键参数见表 5。

表 5 试验前后锅炉及收尘关键参数

项目	试验前	试验前期 (试验一个月)	试验后期
电收尘进口温度/°C	361	358	355
电收尘出口温度/°C	310	307	307
锅炉日蒸发量/t	1 197	1 200	1 174
吨矿蒸发量/t	0.295 4	0.307 7	0.269 8

从表 5 可以看出, 试验进行后电收尘进、出口温度都降低了, 烟气带走热量下降, 但是加料量得到提高, 小时处理量从 180 t 提高到 205 t; 氧气浓度提高后烟气的热焓上涨, 总蒸发量基本不变, 后期蒸发量降低, 这与锅炉结焦减少有一定关系。

### 2.2.2 电收尘进口温度低

电收尘温度低, 容易存在露点腐蚀温度, 但从表 5 来看, 电收尘进口温度变化并不大, 达到 355 °C, 露点腐蚀问题暂时不存在, 但电收尘依然需要加强补漏工作, 减少漏风、产生露点腐蚀。

## 2.3 沉降电炉工序

提高氧气浓度和铜铈品位, 对电炉系统的主要影响是: 渣含铜量上升, 电耗提高, 放铜、放渣困难。

### 2.3.1 渣含铜量升高

铜铈品位提高, 导致铜在渣中的损失增多, 这是根据分配定律得出的结论。在一定温度下, 一种物质溶解在两个互不相溶的液相中, 平衡时该物质在两相中的浓度比为一个常数, 即:

$$K_{\text{铜渣}}/K_{\text{铜硫}} = K_{\text{Cu}} \quad (2)$$

式中,  $K_{\text{铜渣}}$  为铜在渣中的溶解量;  $K_{\text{铜硫}}$  为铜在铜硫中的溶解量;  $K_{\text{Cu}}$  为铜在熔体中的分配系数。

因此当铜硫品位提高时,理论上渣中含铜量也会上升,而且随着渣量的增大,铜在渣中的损失会进一步增大,导致金属直收率下降<sup>[8]</sup>。

试验前后电炉工序的关键参数见表6。

表6 试验前后电炉工序关键参数

项目	试验前	试验前期 (试验一个月)	试验后期
铜硫温度/℃	1 202	1 215	1 215
渣温/℃	1 250	1 255	1 252
铜硫率/%	40.1	33	29.7
炉渣率/%	50.9	55	54.7
渣含铜量/%	0.738	0.737	0.777
吨矿电单耗/kW·h	28.53	31.9	33.1

如表6所示,铜硫品位提高后,炉渣率从50.9%提高到54.7%,渣含铜量从0.738%提高至0.777%,炉渣量上升约5%,渣量和渣含铜量的上升,导致澳炉系统直收率下降。

针对上述问题,采取以下措施控制渣含铜量:

1)适当提高铜硫和炉渣的温度,同时提高铜硫与炉渣的温度差。

2)控制合理的铜硫面和渣面,保持低渣面;沉降电炉炉后两个放渣口采用单边放渣,另一边备用的方式均衡放渣。

3)还原炉渣中的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,降低炉渣黏度。例如,为了提高澳炉进入电炉熔体的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量,可以增大块煤用量,但是块煤用量增大会减少粉煤用量,进一步降低喷枪的传质传热效果,所以块煤与粉煤的比例不宜过大;在电炉内增加喷吹设备,尝试鼓入一定量的硅粉,降低  $\text{FeO}$  活度,促使  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  还原;在电炉内烧柴油还原  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。

### 2.3.2 电炉电耗上升

从表6可以看出,试验进行后电炉电单耗从  $28.53 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}_{\text{矿}}$  提高到  $33.1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{t}_{\text{矿}}$ ,电炉每日电耗从12万  $\text{kW}\cdot\text{h}$  提高到13万  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,这是喷枪传质传热差、进入电炉的铜硫温度低所致;另外,铜硫品位上升后,铜硫黏度增大,需要更高的温度来降低黏度。

电耗控制可以通过以下措施进行:1)控制电炉负压,减少热损失;2)炉内烧柴油或者喷吹硅粉还

原,利用柴油具有还原性和硅粉能够与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  及  $\text{FeS}$  反应生成铁橄榄石的原理,降低  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量;3)优化电压极控制,提高功率。

通过实践,电炉目前电耗基本控制在12万  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,达到试验前的水平。

### 2.3.3 电炉放铜硫、放渣困难

铜硫黏度增大,粘接电炉的陶瓷溜槽严重,导致清理难度大,放铜时间从13~15 min/包提高至17~20 min/包,影响放铜效率及转炉进铜效率。

针对上述问题,从以下几个方面采取措施:1)提高铜硫温度,降低铜硫黏度;2)提高放铜口直径,从55 mm 提高到60 cm;3)将陶瓷放铜溜槽改成铜水套,降低清理难度。

目前采取了前两项措施,放铜时间降至16 min左右,基本能够满足生产需要,后期将进一步采取第3项措施,降低职工清理溜槽劳动强度。

## 2.4 转炉工序

提高氧气浓度和铜硫品位,对转炉系统产生的主要影响是:铜粘铜包导致铜硫包壳的冷料增多;热量减少,转炉处理冷料能力下降。

### 2.4.1 铜硫包壳增多

提高铜硫品位后,每个铜包产生铜硫包壳1~1.5 t,每天产生铜硫包壳50~70 t,加上转炉造渣期缩短,处理铜硫冷料能力下降,转炉自产冷料难以平衡。实践中,转炉在铜硫品位低于60%时冷料能够平衡,如果铜硫品位超过60%,则会导致冷料难以平衡。

针对上述问题,主要从生产协调方面采取措施减少冷料:转炉需要进料时给电炉铜包,电炉听从转炉指令放铜,放铜后立刻拉出铜包,再利用转炉行车立刻将铜包吊走,并将铜硫加入转炉,减少铜硫在铜包中的停留时间,从而减少粘接,目前冷料产生量为50 t/d左右。

### 2.4.2 转炉热量减少

提高铜硫品位后,铜硫中  $\text{FeS}$  含量下降,脱硫率上升,直接导致转炉造渣期缩短,热量减少,难以消耗产生的铜硫包壳,出现铜硫包壳堆积难以处理的难题。

铜硫包壳的增多必须要有解决的路径,单靠转炉无法全部处理,可以采取以下措施处理:1)考虑将铜硫包壳开路,直接外卖;2)将铜包壳破碎后重新返回澳炉处理。

根据热平衡计算,铜硫包壳返回澳炉处理只需

要足够的热量就行,不需要额外消耗氧气、溶剂等物料。1 t 冷料返回澳炉处理重新变成热态铜铈需要消耗 50 kg 粉煤,算上热损失,消耗的粉煤约为 0.1 t。目前采取将铜铈包壳回炉处理的措施,澳炉每小时处理能力达到 2 ~ 5 t,基本能够平衡转炉产生的冷料。

### 3 试验成效

理论及实践证明,澳炉富氧顶吹熔炼技术可以实现高氧气浓度高铜铈品位作业。通过本次试验,将澳炉的富氧浓度提高至 72% ~ 75%,铜铈品位提高至 62% ~ 65%,在顶吹熔炼炉中达到较好水平,同时提高了产能规模和转炉能力,降低制酸系统负

荷以及实现节能降耗。试验前后的参数对比见表 7、表 8。

表 7 试验前后参数对比

系统	项目	试验前	试验后期
澳炉	铜铈品位/%	55.98	62.01
	氧气浓度/%	66.8	72
	加料量/ $t \cdot h^{-1}$	180	205
	煤单耗/ $t \cdot t^{-1}$	0.025 8	0.023 1
转炉	每日处理铜包数/包	56	64
	粗铜日产量/t	700	820
	粗铜年产量/万 t	25.5	28.5

表 8 试验前后制酸烟气量对比

时间	年产粗铜/ 万 t	日产粗铜/ t	澳炉处理量/ $t \cdot h^{-1}$	氧气浓度/ %	铜铈品位/ %	转炉开炉 数/台	澳炉烟气量/ $Nm^3 \cdot h^{-1}$	转炉烟气量/ $Nm^3 \cdot h^{-1}$
往年	32.5	890	205	72	55	3	127 623	204 000
试验前	25.5	700	180	67	55	2	117 534	137 700
试验后	28.5	820	200	73	63	2	124 843	137 700

#### 3.1 产能提升

通过高氧气浓度高铜铈品位作业,提高了转炉的处理能力,降低了制酸系统的压力,澳炉小时处理能力提高到 200 t,粗铜产能从年产 25.5 万 t 提高到 28.5 万 t。

#### 3.2 转炉处理能力上升

澳炉产出高品位铜铈,铜铈产出率从 40% 降低至 29.7%,铜铈量下降 25%,转炉吹炼时间缩短,每天 2 台炉可以处理 64 包热态铜铈,产出 820 t 粗铜。

#### 3.3 制酸系统负荷下降

试验转炉少开 1 台,硫酸总风量与试验前基本一致,但比往年总风量减少约 7 万  $Nm^3/h$ 。转炉处理的热态铜铈减少,转炉一周期总风量降低,同时转进、转出频次降低,漏风率下降,制酸系统负荷降低,有利于绿色工厂的建设。

#### 3.4 节能降耗

虽然高氧气浓度高铜铈品位作业导致电炉每日电耗增加约 10 000  $kW \cdot h$ ,但是澳炉煤单耗从 0.025 8  $t/t$  下降至 0.023 1  $t/t$ ,下降幅度达到 10%,综合能耗下降明显。

### 4 结束语

本次试验对于富氧顶吹炉具有十分重要的意

义。在铜冶炼行业,顶吹炉产出铜铈品位低,吹炼系统基本都选择 PS 转炉,工艺选择受到限制。在国内铜行业越来越重视环境保护和绿色发展的今日,PS 转炉已经逐步面临淘汰,提高顶吹炉铜铈品位,让吹炼工艺有了更多的选择,同时也确保了顶吹熔炼炉在未来铜冶炼熔池熔炼领域能够继续生存。

#### [参考文献]

- [1] 王晓彬,方掩,李璐,等.绿色工厂建设探索与研究[J].资源信息与工程,2020,35(1):127-131.
- [2] 刘贤龙,骆伟,姜志雄,等.澳斯麦特炉炼铜高富氧操作生产实践[J].中国有色冶金,2020,49(3):28-32.
- [3] 赵明,程利振.顶吹浸没冶金技术应用现状及展望[J].有色冶金设计与研究,2017,38(1):13-19.
- [4] 毛其明,李皓月.澳斯麦特浸没式喷枪顶吹(TSL)技术[C]//中国首届熔池熔炼技术及装备专题研讨会,2007:23-29.
- [5] 彭容秋.重金属冶金学[M].长沙:中南大学出版社,2009.
- [6] 徐静,孙立民,黄雅芳,等.控制侧吹炉四氧化三铁含量的生产实践[J].有色冶金节能,2022,38(1):18-21.
- [7] 王森.艾萨炉高富氧浓度和高冰铜品位生产实践[J].中国有色冶金,2016,45(1):6-9.
- [8] 彭容秋.铜冶金[M].长沙:中南大学出版社,2004.

## Research and Practice of Top Blown Smelting with High Oxygen Concentration and High Copper Matte Grade

ZHAO Xiang-lin, LIU Xian-long

**Abstract:** A smelter adopts Ausmelt oxygen enriched top blowing bath smelting technology. In order to build a green plant, the production of three converters was reduced to two, and the processing capacity of Ausmelt furnace was reduced from 210 t/h to 180 t/h, leading to a decline in production capacity. In order to improve the production capacity of crude copper, the plant increased the oxygen concentration from 55% to 62% ~ 65%, and the copper matte grade from 67% to 72% ~ 75%. This paper studied the impact of increasing the oxygen concentration and copper matte grade on copper smelting, carried out feasibility demonstration, and analyzed the problems encountered in the Ausmelt furnace process, boiler dust collection process, settling electric furnace process, and converter process through experimental research, and put forward corresponding solutions. Through the operation of high oxygen concentration and high copper matte grade, the first is to reduce the amount of smelting flue gas and improve the processing capacity of Ausmelt furnace; Second, improve smelting heat efficiency and reduce energy consumption of Ausmelt furnace system; Third, the copper matte quantity is greatly reduced, the converter converting time is shortened, and the converter processing capacity is improved; Fourth, the total flue gas volume of smelting and converting is greatly reduced to reduce the load of the acid making system.

**Key words:** oxygen enriched top blowing smelting; copper smelting; Ausmelt furnace; copper matte grade; oxygen concentration; energy consumption; green factory

(上接第 8 页)

## Research Progress on the Preparation Technology of Electronic Grade DCS

LIANG Jun, LIU Jian-hua, CHANG Xin, YUAN Zhen-jun, WAN Ye

**Abstract:** Electronic-grade dichlorosilane (DCS) is mainly used for strained silicon epitaxial growth and thin film deposition production process of silicon oxide, silicon nitride and metal silicides in advanced integrated circuit chip processing. The fast deposition speed, even deposition film and low temperature associated with the usage of DCS has resulted in its widespread use in IC manufacturing, but its import dependence remains an issue. This paper introduced the principles and applications of DCS preparation methods such as distillation purification, adsorption complexation and disproportionation reactions. It compared the above three methods, summarized future research directions, and provided an outlook on the application of advanced silicon-based precursors using electronic-grade DCS as raw material.

**Key words:** dichlorosilane; polysilicon; integrated circuit; electron gas; precursor; distillation purification; adsorption complexation; disproportionation reaction