

# 闪速炉纯氧冶炼技术应用实践

许俊, 张建平, 张更生, 来有寿, 陈文武

(广西金川有色金属有限公司, 广西防城港 538000)

[摘要] “双闪”炼铜工艺采用富氧强化熔炼技术,富氧浓度一般设计控制在80%~90%。广西金川闪速炉投产后,存在燃料消耗高、烟气系统温度高、锅炉烟灰熔化粘结、喷嘴结瘤、反应不完全等一系列问题,严重限制了生产效率的提升。针对此问题,企业对供风系统进行联锁控制和阀门自动启闭改进,并给喷嘴增加了气流导向部件。此改进实现了奥托昆普闪速炉喷嘴纯氧(富氧浓度100%)冶炼,同时冶炼控制更加稳定,产能得到相应提高,熔炼炉生产负荷提高至270 t/h(设计最高负荷246 t/h),吹炼炉生产负荷提高至100 t/h(设计最高负荷90 t/h)。闪速炉纯氧冶炼后,双炉实现自热生产,燃料消耗降低,减少了碳排放,而且由于空气使用量降低,减少了氮气带入,减少了氮氧化合物的排放。

[关键词] 闪速炉; 熔炼; 吹炼; 富氧浓度; 纯氧冶炼; 喷嘴; 供风控制系统; 气流导向部件

[中图分类号] TF811

[文献标志码] B

[文章编号] 1672-6103(2022)03-0030-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.03.005

闪速熔炼是富氧悬浮熔炼技术,熔炼速度取决于炉料与炉气间的传热和传质速度,而传热和传质速度又随两相接触表面积的增加而增高。闪速熔炼技术便是基于这种原理,将富氧空气、干燥且比表面积大的精矿(或铜硫粉)、石英粉(或生石灰粉)和返回的烟尘粉等以适当的比例加入反应塔顶部的喷嘴,气体与物料强烈混合后高速喷入反应塔。进入反应塔后,气体受热发生体积急剧膨胀,产生一个上升力使物料呈悬浮状态,布满整个反应塔截面,并发生剧烈的氧化放热反应,从而强化冶炼过程,显著提高炉子生产能力,降低燃料消耗。20世纪80年代以后,高投料量、高品位、高富氧浓度、高热强度等“四高”技术成为了闪速熔炼炉发展的总趋势。

广西金川有色金属有限公司冶炼厂(以下简称“广西金川”)闪速熔炼系统设计平均投料量为246 t/h(混合干精矿),富氧浓度仅为65%;闪速吹炼炉设计平均投料量86 t/h,富氧浓度80%。投产初期,闪速熔炼炉生产负荷提升到230 t/h以后,为

了保证熔体排放温度,反应塔不能进行自热反应,需要补充燃料,出现燃料消耗高、沉淀池顶和西端墙烧红现象严重、烟气系统温度高、进入制酸系统的烟气体量偏大、锅炉烟灰熔化粘结等问题,严重限制了生产的高效进行。闪速吹炼炉生产能力低,自身烟尘处理能力有限,中央油量长期维持在300~500 kg/h,能源消耗高,这使得吹炼炉热负荷高,加上砖体散热不够,导致反应塔顶吊挂砖过热发红,吊砖钩烧损后易出现掉砖、局部炉顶塌陷等情况,对吹炼炉安全连续稳定运行造成不利影响。

针对上述问题,广西金川为了提高生产效率,大胆尝试纯氧冶炼工艺,并对关键喷嘴设备及其控制系统进行了改造,经过一段时间的生产调整后,达到了理想效果。

## 1 闪速炉冶炼强度

自1995年美国肯尼科特冶炼厂开始采用“双闪”工艺炼铜以来,单系列铜冶炼产能达到40万t/a,冶炼富氧浓度越来越高。国内几家“双闪”铜冶炼厂闪速炉富氧浓度情况见表1。

由表1可知,目前国内闪速炉富氧浓度基本控制在80%~90%,平均生产负荷基本与设计能力相当。其中,闪速熔炼炉最高投料量为260 t/h(混合干精矿,不包括石英和烟尘),闪速吹炼炉最高投

[收稿日期] 2022-03-16

[作者简介] 许俊(1987—),男,冶金工程师,四川仪陇人,本科,毕业于中南大学冶金工程,长期从事铜金属冶炼技术管理工作。

[引用格式] 许俊,张建平,张更生,等. 闪速炉纯氧冶炼技术应用实践[J]. 中国有色冶金, 2022,51(3):30-35.

表1 国内几家铜冶炼厂闪速炉富氧浓度控制

Tab.1 Oxygen enrichment concentration control of flash furnace in several domestic copper smelters

铜冶炼厂炉窑	广西金川(设计值)		国内某公司1		国内某公司2	
	闪速熔炼	闪速吹炼	闪速熔炼	闪速吹炼	闪速熔炼	闪速吹炼
富氧浓度/%	65	80	88	84	81	82
平均负荷/(t·h <sup>-1</sup> )	246	85	236	75	221	75

料量为 85 t/h(铜铈粉)。

## 2 冶炼负荷提升产生的问题

广西金川 2 台闪速炉均采用奥图泰公司的单喷嘴,虽然已达到设计产能但是还存在结瘤、反应不完全等问题,吹炼炉单喷嘴表现得尤为突出。多次出现铜铈成分不变的情况下,提高氧气单耗而吹炼渣含铜下降的问题,导致粗铜含硫量过高,阳极炉氧化时间长达 7~8 h,严重影响冶炼系统生产效率。如果在原来的设计基础上进一步通过加大投料量和鼓风强度提高冶炼强度,会存在以下主要问题。

1) 喷嘴超负荷运行,易造成富氧风反窜,造成安全风险。正常生产时二次风在氧气阀站出口进行混合,形成富氧风后进入单喷嘴。增加投料量提高生产负荷后,风量增大,喷嘴喉口部压力升高,超过临界压比,不能完全快速通过喷嘴,导致背压过高反窜进入氧气和二次风管道,严重影响生产安全,存在安全风险。

2) 风量增大导致风速增大,使得氧料掺混效果差,氧气利用率低。当富氧风风速升高时,其在反应塔停留时间减少,降低了和物料混合的时间,使氧料掺混效果差,导致反应塔内反应不均,反应塔局部区域发红或异常高温,有时会形成生料堆,影响熔体排放,严重时部分精矿进入排烟锅炉形成粘结,导致系统停产;另外,氧利用率下降还会导致烟气中三氧化硫产生率提高,使得化工系统废酸浓度增加,除增加石灰消耗以外,还经常由于废酸浓度高倒逼冶炼降负荷生产。

3) 冶炼强度增加,热强度增加,闪速炉耐火材料的冷却强度和冷却元件也必须跟进增强。

4) 在高富氧浓度和高投料量熔炼时,弃渣中的铜含量一般均会增加,增大了铜损失<sup>[1]</sup>。

## 3 改造思路

通过对大量的生产数据进行分析,企业认为在目前奥图泰公司提供的喷嘴结构等条件下,

设计投料量和富氧风总量已接近喷嘴的临界点,物料成分和参数波动均会对闪速炉系统的生产造成较大的扰动。若要提升“双闪”系统的冶炼强度,需要对喷嘴及其辅助系统进行改进。

1) 优化供风控制系统。针对富氧风反窜存在安全风险的问题,对供风系统进行优化改进,确保系统的安全稳定运行。

2) 改进喷嘴结构。针对因风速大氧料掺混效果差而导致的一系列生产问题,可采取降低鼓风量的措施,但是总风量降低以后,风矿比降低,通过喷嘴进入反应塔的物料不足以扩散,就会造成物料偏析不均匀现象,气固之间传质传热变差,反而引起炉况的恶化。为了解决此问题,需要改进喷嘴结构,增加风与物料的掺混动力。

3) 提高富氧浓度。降低总风量以后,必须提高富氧浓度,以确保物料反应所需要的氧气。

## 4 改进关键设备

### 4.1 改进和优化供风供氧系统

通过优化工艺风系统的供气阀组配置和连锁控制方案实现工艺风系统预定流量与恒定压力运行模式,确保系统的安全稳定运行。

在混氧阀站前端的工艺风管网上设置旁路系统,主路与旁路末端分别设置切换开关阀组,主路切换开关阀组前端设置流量调节阀组,原设计的工艺风流量放空阀组作为工艺风压力调节阀组使用。管网优化后,富氧工艺风供气系统配置详见图 1。

通过上述优化改造后,实现了氧气流量与二次风压力连锁自动控制,连锁自控系统可根据实际氧气管道反馈压力与设定压力差值自动调整压力调节阀开度,完全实现鼓风机在定流量运行过程中的恒压力控制,有效避免了风氧互窜情况的发生,为供风系统稳定运行和纯氧冶炼提供了必要基础。

### 4.2 改进喷嘴结构

#### 4.2.1 闪速炉中央喷嘴的工作原理

单喷嘴是将原料(混合干精矿或铜铈粉、熔剂

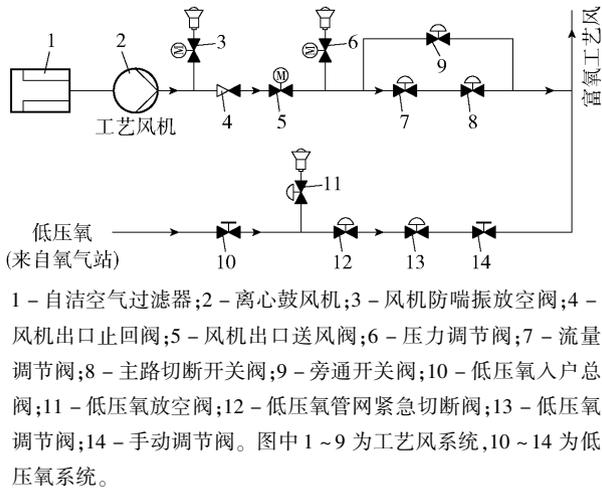


图1 富氧工艺风系统配置示意

Fig.1 Configuration diagram of oxygen enriched process air system

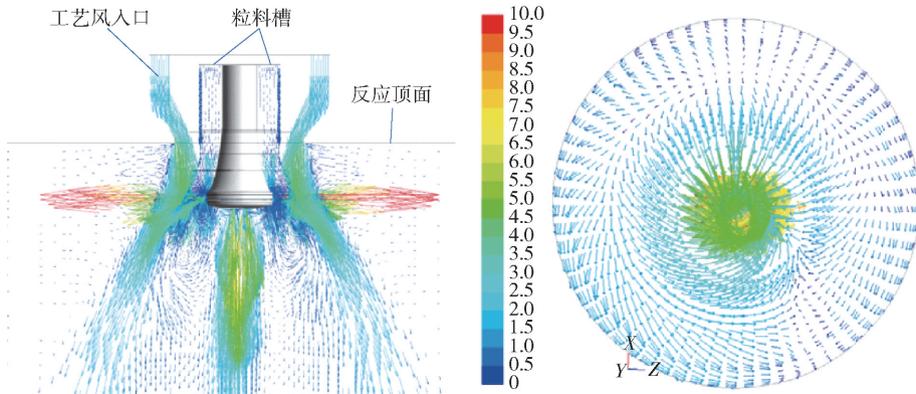


图2 原设计闪速炉喷嘴工作原理

Fig.2 Working principle diagram of original flash furnace nozzle

#### 4.2.2 闪速炉中央喷嘴的改造

通过运用质量守恒方程、动量守恒方程、离散相模型、组分传输方程等进行理论计算,确定在鸟巢水套下部增加一个气流导向部件,通过该钢套使富氧风在径向方向增加径向动力,并通过富氧风产生的旋向动力带动物料旋转,以弥补风矿比降低后的掺混动力不足的问题。同时将风环改为斜孔,使分散风旋流。图3为喷嘴改造示意图,图4为改造后闪速炉中央喷嘴工作原理。

#### 4.2.3 气流导向部件角度的确定

安装气流导向部件使物料与氧气更充分混合,反应区在反应塔内稍有上移,主要变化有以下几方面:物料打散效果更好,反应塔壁温度上升(未影响反应塔壁挂渣);烟尘发生率有所增加;同

和烟尘)、富氧空气进行充分混合并合理分布的一种设备,是闪速炉的核心装备,对闪速炉工艺的稳定、生产效率、能耗指标等有着关键的影响。闪速炉单喷嘴是利用工艺风产生  $80 \sim 120 \text{ m/s}$  的气流作为动能,将混合物料通过喷嘴与同时喷入的工艺风进行混合,在此过程中消耗气流的动能,进入反应塔后气流速度为  $15 \sim 25 \text{ m/s}$ 。进入炉内的原料主要由分料器进行分散,保证物料均匀分散并与富氧空气充分混合。

原设计闪速炉喷嘴工作原理见图2,外侧的富氧风经过喉口加速后带动内层物料向下朝四周扩散,喷嘴头部一周的分散风辅助物料向水平方向分散,使物料成弥散状态充满整个反应塔圆柱体,进行剧烈的物理和化学反应,实现传质传热过程。

时因氧气利用率提高,对酸浓度控制有利。从反应塔工况变化来看,使用气流导向部件后,在炉子微负压状态下,观察口喷烟现象明显减少,表明反应更加稳定。

气流导向部件与喷嘴风环配合使用,可以形成内外互补的效果。针对不同规格的喷嘴和物料,其使用角度会有不同,需要进行必要的试验后使用。

闪速熔炼炉气流导向部件角度为  $10^\circ$  时,对炉况控制无明显副作用影响,仅表现反应区上移,喷射器调风锥粘接稍重;气流导向部件角度为  $15^\circ$  时,反应塔壁温度急剧升高,出现发红和水套气化现象。因此,闪速熔炼炉气流导向部件角度不宜超过  $15^\circ$ 。

表2为单喷嘴优化改造前、后工艺参数对比,改造后的单喷嘴气流导向部件角度为  $15^\circ$ 。



图3 喷嘴改造示意

Fig. 3 Nozzle reconstruction schematic diagram

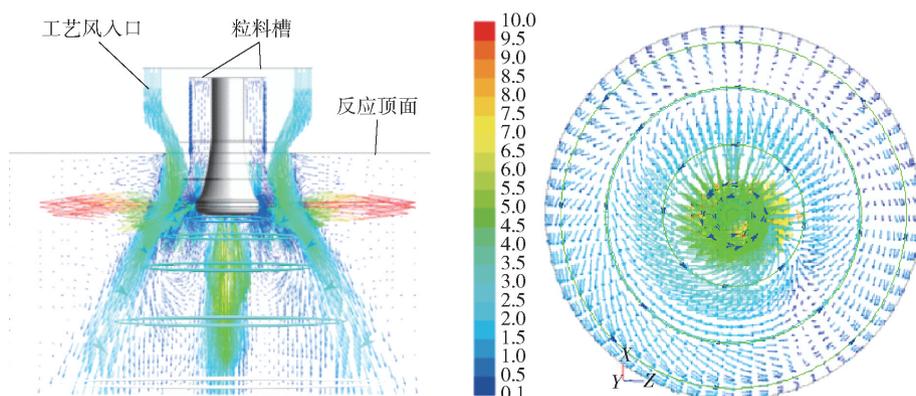


图4 改造试验后闪速炉喷嘴工作原理

Fig. 4 Working principle diagram of reconstructed flash furnace nozzle

表2 单喷嘴优化改造前、后工艺参数对比

Tab. 2 Comparison of process parameter before and after the nozzle transformation

项目	投料量/ (t·h <sup>-1</sup> )	烟灰/ (t·h <sup>-1</sup> )	二次风量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	氧量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	富氧 浓度/%	中央氧/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	氧单耗/ (Nm <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	分散风 压/kPa	分散风量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
改造前(月平均值)	236	21	2 496	104	35 881	93	1 500	160.9	634	2 952
改造后(月平均值)	245	25	760	99	38 863	99	1 143	163.6	645	2 872

## 5 工业试验

### 5.1 改造后闪速炉高富氧冶炼工业试验

#### 5.1.1 闪速吹炼炉改进试验

2018年3月首先在吹炼炉安装气流导向部件进行试验,工艺风旋流后有利于物料与氧气混合,在提高氧气利用率的同时增加了物料在反应塔内停留时间。

2019年冷修前化工烟气洗涤稀酸浓度在150 g/L以下,控制相对平稳,超标次数相对较少,烟尘率无明显变化。2020年7月年修期间,更换20°气流导向部件再进行试验,发现因富氧风旋流强度过大,氧料径向速度过高,导致反应塔壁发红、水套

气化,而且各项调整工艺参数均不能适应现场生产需求;然后利用月修期间更换为原有的角度为15°气流导向部件,目前运行正常。表3为铜铈喷嘴改造前、后吹炼炉炉况及主要参数对比情况。

闪速吹炼炉气流导向部件角度为15°时,对炉况控制较好,改善了铜铈粉与反应富氧风之间掺混效果,提高了铜铈粉与反应富氧风之间传质传热效果;同时弥补了铜铈粉在风动溜槽内流态化效果不佳,从而解决了其加入铜铈喷嘴时与氧混合不均匀的问题,极大地提高了吹炼炉反应塔的氧利用率。铜铈粉中Cu<sub>2</sub>S的着火温度在430~680℃,而且水碎矿石孔隙率低,因此通过紊流强化氧料接触和延长反应时间对其起到的效果较为明显。

表 3 喷嘴改造前、后吹炼炉炉况及主要参数对比

Tab. 3 Comparison of blowing furnace conditions and main parameters before and after the transformation of nozzle

对比项	改造前	改造后	说明
稀酸量 (处理渣毛) (不处理渣毛)	150 g/L × 50 m <sup>3</sup> /h 135 g/L × 47 m <sup>3</sup> /h	124 g/L × 43 m <sup>3</sup> /h 115 g/L × 41 m <sup>3</sup> /h	稀酸浓度超过 150 mg/L × 50 m <sup>3</sup> /h 次数明显减少
吹炼炉氧单耗/(Nm <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	173.41	164.79	氧单耗降低
重油单耗/(kg·h <sup>-1</sup> )	510.52	377.46	在铜钽粉品质良好的情况下可以实现自热, 并能处理吹炼炉所产烟灰
综合富氧浓度/%	84.99	87.34	仍然有提高空间
反应塔壁温度/℃	65 ~ 314	87 ~ 231	改造后铜钽粉品质差,控制渣温在 1 270 ~ 1 290 ℃
反应塔挂渣	较厚,不均匀	较薄,均匀	改造后反应塔下方水套冲刷强度较改造之前降低

### 5.1.2 闪速熔炼炉改进实验

2019 年系统冷修,在熔炼炉单喷嘴鸟巢水套下部安装角度为 10°气流导向部件,主要变化有以下几方面:气流导向部件使物料与氧气更充分混合,反应区在反应塔内稍有上移;物料打散效果更好,反应塔壁温度上升(未影响反应塔壁挂渣);烟灰发生率有所增加;原料杂质上升后在脱除效率方面未见

异常。

2020 年 7 月年修更换角度为 15°气流导向部件后,因富氧风旋流强度过大,氧料径向速度过高,导致反应塔壁发红、水套气化,通过调整工艺参数均不能适应现场生产需求。熔炼炉气流导向部件角度降低至 10°后,运行正常。喷嘴改造前、后熔炼炉炉况及主要参数对比情况见表 4。

表 4 喷嘴改造前、后熔炼炉炉况及主要参数对比情况

Tab. 4 Comparison of smelting furnace conditions and main parameters before and after the transformation of nozzle

对比项	改造前	改造后	说明
稀酸量	136 g/L × 45 m <sup>3</sup> /h	135 g/L × 44 m <sup>3</sup> /h	稀酸浓度超过 150 g/L × 50 m <sup>3</sup> /h 次数明显减少
熔炼炉氧单耗/(Nm <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	160.9	163.6	精矿品位变化使氧单耗有所升高
重油单耗/(kg·h <sup>-1</sup> )	252.98	133.93	重油单耗大幅降低,正常生产期间中央油枪停用
综合富氧浓度/%	93	97	仍然有提高空间
反应塔壁温度/℃	98 ~ 191	115 ~ 223	反应塔壁温度有所上升
反应塔挂渣	较薄,不均匀	较厚,均匀	改造后反应塔下方水套冲刷较改造之前降低

### 5.2 改造后闪速炉纯氧冶炼生产实践

通过前期改造试验,“双闪”喷嘴的适应能力大幅加强,炉况稳定,炉温高、锅炉下红灰、废酸浓度高的问题均得到较大程度的改善。系统稳定之后,“双闪”开始逐步提高生产负荷及富氧浓度试验。2020 年 8 月开始,将熔炼炉生产负荷提高至 270 t/h(设计最高负荷 246 t/h),吹炼炉生产负荷提高至 100 t/h(设计最高负荷 90 t/h),富氧浓度均提高至 100%,生产稳定,各项技术指标正常。

闪速熔炼炉工艺风停用,富氧浓度为 100%,熔炼炉在投料负荷达到 180 t/h 时可以实现自热反应,反应塔不需燃油。闪速炉富氧浓度提高至 100%后,通过闪速炉中央氧中压、低压切换,氧气站供氧可以满足吹炼 100 t/h、熔炼 270 t/h 生产,减少了氧气散发和能源浪费。

单喷嘴改造后,反应塔氧利用率得到大幅提升,增加富氧浓度未对后续烟灰盐化和酸浓度控制产生影响;同时,冷修期间完成了反应塔水套及冷却系统的升级改造,反应塔可以适应更高的热负荷;另外,富氧浓度增加会相应地减少烟量,提高 SO<sub>2</sub> 浓度,减轻环保压力。

## 6 结论

广西金川针对闪速炉冶炼存在的燃料消耗高、烟气系统温度高、锅炉烟灰熔化粘结、喷嘴结瘤、反应不完全等一系列问题,对闪速炉的喷嘴系统进行改进,并进行了纯氧冶炼工艺试验,取得了满意效果。

1) 对供风系统进行改造,通过联锁控制和阀门自动启闭避免了风氧互窜问题,消除了安全风险。

2) 在现有闪速炉喷嘴鸟巢水套中心增加 1 个气流

导向部件,该部件使富氧风在径向方向形成一定的夹角,产生的旋向动力带动物料旋转起来,以弥补风矿比降低后出现掺混动力不足的问题。同时,将风环改为斜孔,使分散风旋流,加强了对物料的分散作用。

3)在一系列改造和生产实践后,实现了奥托昆普闪速炉喷嘴纯氧冶炼,同时冶炼控制更加稳定,产能得到相应提高,熔炼炉生产负荷提高至 270 t/h (设计最高负荷 246 t/h),吹炼炉生产负荷提高至 100 t/h (设计最高负荷 90 t/h)。

4)闪速炉纯氧冶炼后,双炉实现自热生产,燃料消耗降低,减少了碳排放;闪速炉纯氧冶炼后,减少了氮气带入,从而降低高温下氮氧化物的产生,减小氮氧化合物的排放量。

#### [参考文献]

- [1] 魏炜,刘凤霞,许晓飞,等. 撞击流颗粒包覆过程的流体动力学行为[J]. 流体动力学, 2015, 3(3):19-27.  
WEI Wei, LIU Fengxia, XU Xiaofei, et al. The behavior of fluid dynamics during particles coating in stream [J]. International Journal of Fluid Dynamics, 2015, 3(3): 19-27.
- [2] 姜桂平,廖春发. 闪速熔炼精矿喷嘴的发展历程及其生产实践[J]. 铜业工程, 2008 (2): 31-34.  
JIANG Guiping, LIAO Chunfa. Development course and production practice of flash smelting nozzle [J]. Copper Engineering, 2008(2): 31-34.
- [3] 孙彦文,艾元方,陈红荣. 旋流燃烧器颗粒分散特征研究

[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(4): 8-12.

- SUN Yanwen, AI Yuanfang, CHEN Hongrong. Study on characteristic of particles distribution for swirling burner [J]. Nonferrous Metals( Extractive Metallurgy), 2016(4): 8-12.
- [4] 董广刚,葛哲令,曾庆晔. 闪速炼铜技术的自主创新与发展[J]. 铜业工程, 2015(6):31-35.  
DONG Guanggang, GE Lingze, ZENG Qingye. The development and self-innovation of flash copper smelting technology [J]. Copper Engineering, 2015(6): 31-35.
- [5] 陈卓,王云霄,宋修明,等. 高投料量下炼铜闪速炉内熔炼过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2916-2921.  
CHEN Zhuo, WANG Yunxiao, SONG Xiuming, et al. Numerical simulation of smelting process in copper flash smelters at high loading rate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2916-2921.
- [6] 陈卓,毛永宁,赵荣升,等. 闪速炉熔炼配风对反应过程的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 730-737.  
CHEN Zhuo, MAO Yongning, ZHAO Rongsheng, et al. Influences of reaction air parameters on smelting process in flash furnace[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(2): 730-737.
- [7] 安志鹏,王兴林,高桃英,等. 闪速炉工艺风机定流量与恒压力供气调控试验及应用[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(1): 181-182, 191.  
AN Zhipeng, WANG Xinglin, GAO Taoying, et al. Control test and application of constant flow and constant pressure air supply by fan in flash furnace process [J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(1): 181-182, 191.

## Application practice of technology for pure oxygen smelting in flash furnace

XU Jun, ZHANG Jian-ping, ZHANG Geng-sheng, LAI You-shou, CHENG Wen-wu

(Guangxi Jinchuan Nonferrous Metals Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China)

**Abstract:** The oxygen-enriched intensified smelting technology is used in the Double-Flash copper smelting process, the concentration of the enriched oxygen is usually controlled between 80% and 90% in the design. After the flash furnace of Guangxi Jinchuan Company was put into production, there were a series of issues such as high fuel consumption, high temperature of off-gas system, melting and caking of boiler soot, nozzle accretion, incomplete reaction, etc., which severely limit the uplifting of production efficiency. Aiming at these issues, the Company has improved the interlock control and valve automatic on/off for the air supply system, and the air flow guide components are added to the nozzle. With this improvement, the nozzle pure oxygen (enriched oxygen concentration 100%) smelting in Outokumpu flash furnace is realized, furthermore, the smelting control is more stable, the production capacity is increased accordingly, the production load of the smelting furnace is enhanced to 270 t/h (the designed maximum load is 246 t/h) and the production load of the converting furnace is enhanced to 100 t/h (the designed maximum load is 90 t/h). After the pure oxygen smelting in flash furnace, the self-thermal production is achieved for the double-furnace, which cuts fuel consumption and reduces carbon emission, and because the air consumption is lowered, there is less nitrogen entrainment, and the emission of nitrogen oxides is reduced.

**Key words:** flash furnace; smelting; converting; oxygen concentration; pure oxygen smelting; nozzle; air supply control system; air flow guiding component