

# 控制侧吹炉四氧化三铁含量的生产实践

徐 静 孙立民 黄雅芳 马凯敏

(山东恒邦冶炼股份有限公司, 山东 烟台 264100)

**[摘 要]** 侧吹炉采用富氧空气氧化熔炼铜精矿的过程中会生成一定量的四氧化三铁。当渣中四氧化三铁含量较高时,会导致熔体粘度增加,使熔池内形成炉结,进而导致炉底上升,熔池的容积降低,严重时可产生泡沫渣,造成喷炉事故。本文结合侧吹炉的生产实践,对侧吹炉熔炼过程中四氧化三铁的产生及控制措施进行了探讨,并介绍了各部位四氧化三铁的消除措施。结果表明四氧化三铁产生的原因主要是原料带入及炉渣过氧化,生产中,可采取控制原料中四氧化三铁含量和高熔点的杂质含量、调整煤的加入量、添加适量的石英石等措施控制四氧化三铁含量。

**[关键词]** 侧吹炉; 熔炼渣; 四氧化三铁; 炉结

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2022)01-0018-04

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.01.005

## 0 前言

某公司的侧吹炉为双侧吹竖式熔池熔炼炉,主要处理复杂含金铜精矿。喷枪通过风口向熔体的渣层喷吹富氧空气,炉渣和铜铈在风口下熔池里完成分离。铜铈从铜井虹吸口放出,送转炉吹炼;熔炼渣从渣井溢流口放出,经缓冷后回收其中的有价金属。侧吹炉炼铜的熔炼工艺和过程总体上与传统的炼铜技术一致,其关键设备在于熔炼炉。某公司的熔炼炉为一大型侧吹熔池熔炼炉,炉体下部两侧共设置了28个内径为36 mm的富氧风口,风口区面积达25 m<sup>2</sup>。侧吹炉的主要特点是熔体厚度可高达1.5~2 m,风口位于渣层中,风口中心线距渣层表面500~600 mm,即富氧空气直接吹入渣层进行熔池熔炼。

铜熔炼过程主要是通过富氧空气将精矿中的硫化亚铁氧化,形成高品位的铜铈。而硫化亚铁的氧化过程中会生成一定量的四氧化三铁。当渣中四氧化三铁含量较高时,会导致熔体粘度增加,渣铜分离效果变差,造成渣含铜量升高。四氧化三铁的析出

还会使熔池内形成炉结,导致炉底上升,熔池的容积减少,严重时可产生泡沫渣,造成喷炉事故,损坏设备,造成人员伤亡。若通过提升炉温来维持正常作业,又会导致能耗增加,成本上升,而且高温对炉砖寿命会造成一定影响。因此,有效控制侧吹炉炉渣中的四氧化三铁含量,对降低渣含铜量,提高炉砖寿命,保证正常生产具有非常重要的意义。本文结合侧吹炉的生产实践,对侧吹炉熔炼过程中四氧化三铁的产生及控制措施进行了探讨,并介绍了各部位四氧化三铁的消除措施。

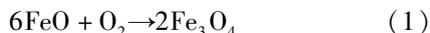
## 1 四氧化三铁的产生

### 1.1 原料带入四氧化三铁

侧吹炉主要处理复杂金精矿,炉料种类繁多,入炉物料多时可达数十种;原料成分复杂,导致杂质含量较高。为了保证造硫熔炼反应的进行,实现自热反应,必须控制合适的硫铁比,因此多种原料须以合适的配比配合使用,而每种原料中的四氧化三铁含量各不相同,若配比不合理,则会造成原料带入的四氧化三铁量大大增加<sup>[1]</sup>。

### 1.2 炉渣中的四氧化三铁

侧吹熔炼过程发生的基本反应是硫化铁的氧化反应。富氧空气直接鼓入熔池渣层,发生如下反应,生成Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。



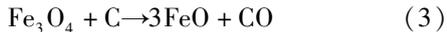
渣中Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的作用是传递氧气使熔体中的FeS

**[收稿日期]** 2020-09-16

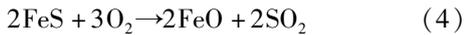
**[作者简介]** 徐静(1991—),男,山东烟台人,助理工程师,主要从事冶金生产技术管理工作。

**[引用格式]** 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.

和碳氧化:



除反应(1)外,还有部分氧气直接氧化熔体中的FeS:



炉料中的高价硫化物(FeS<sub>2</sub>、CuS、CuFeS<sub>2</sub>等)离解成元素硫和低价硫化物,元素硫与渣中的Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>以及鼓风中的氧气发生反应:



进入铜铈中的FeS有一部分溶入渣中:



侧吹熔炼炉中相界面大,搅拌强度高,有利于上述硫和氧气之间的反应。当通入氧气量过高时,由于富氧空气直接鼓入渣层,过多的氧气参与反应会导致炉渣按反应(1)过氧化,产生泡沫渣,最终导致喷炉事故的发生。因此,氧气量的控制对渣中的四氧化三铁含量有着重要的影响。

### 1.3 铜铈中的四氧化三铁

铜铈主要由硫化亚铜和硫化亚铁互相溶解而

成,含铜量为20%~70%,含硫量为15%~25%。侧吹炉产出的铜铈含铜量为50%~55%,含硫量为20%~25%。通常熔炼炉中熔体温度为1250~1300℃,铜铈的主要化学成分是Cu、Fe、S,通常这三者之和占铜铈量的85%~94%;铜铈中还含有少量的Ni、Co、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Ag、Au、Se和微量脉石,此外还有2%~4%的氧。一般认为熔融铜铈中的Cu、Pb、Zn、Ni等金属以硫化物形态(Cu<sub>2</sub>S、PbS、ZnS、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>)存在。而Fe除了以FeS形态存在外,还以氧化物(FeO或Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)形态存在。侧吹炉铜铈成分化验结果见表1。

表1 侧吹炉铜铈成分 %

成分	Cu	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	Zn	As	Pb
含量	55.0	21.6	13.6	0.4	1.0	0.2	1.5

其中,四氧化三铁含量为5%~7%。

铜铈的密度随铜品位的提高而增大,一般为4.1~4.6 g/cm<sup>3</sup>。而四氧化三铁密度为5.18 g/cm<sup>3</sup>,熔点高达1597℃。由于四氧化三铁密度大于铜铈,在熔池中四氧化三铁呈下沉趋势,最终沉积在炉底形成炉结,所以铜铈中的四氧化三铁只是其沉降后残留的部分。

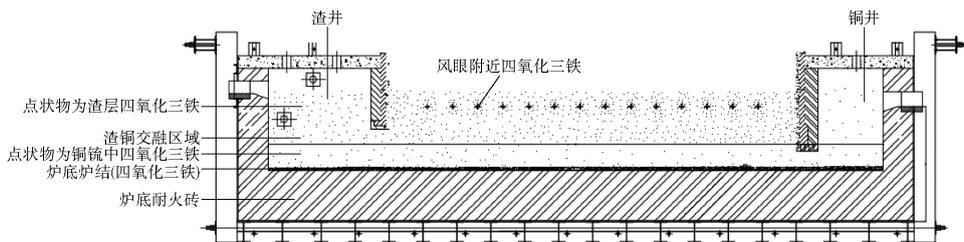


图1 侧吹炉四氧化三铁分布示意图

## 2 四氧化三铁含量的控制措施

根据上述分析可知,四氧化三铁产生的原因主要是原料带入与炉渣过氧化。为保证正常生产,将四氧化三铁含量控制在合理范围内,既降低生产成本又避免发生喷炉事故,可从以下几方面进行控制。

### 2.1 控制原料中四氧化三铁含量

对入厂原料中铁含量较高的优质铜矿、硫铁矿及配入量较多的其他原料进行取样,分析其中的四氧化三铁含量,根据侧吹炉配矿模型(表2)控制原料四氧化三铁含量为5%以下,尽量减少原料带入的四氧化三铁。

表2 侧吹炉配矿模型

矿种	矿量/ t	品位/%										
		Cu	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Pb	Zn	Sb	Bi	MgO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
混配矿1	15.0	10.63	25.71	28.46	14.56	1.12	0.45	0.58	0.07	0.01	0.56	3.50
优质铜矿	5.0	21.30	24.08	32.12	3.02	0.56	0.10	0.02	0.01	0.01	2.47	4.20
渣精矿	8.0	20.00	9.00	28.00	15.00	1.82	2.50	3.00	1.00	0.02	0.72	6.50
硫铁矿	5.0	0.81	42.06	39.98	9.71	0.20	0.01	0.02	0.01	0.02	0.06	5.40
混配矿2	14.0	11.38	26.05	30.38	12.87	0.92	1.04	2.08	0.31	0.02	0.70	2.50
制粒混配矿	47.0	11.26	27.06	25.59	15.47	1.34	1.28	1.65	0.56	0.01	0.60	3.20
铜料小计	94.0	11.89	25.83	28.07	13.94	1.18	1.08	1.48	0.42	0.01	0.69	3.58

## 2.2 控制原料中高熔点的杂质含量

入炉物料中 Zn、Mg 等高熔点杂质含量较高时,需要通过提高氧气浓度、氧料比等方式提高熔体温度,以保证炉渣良好的流动性。而炉内通入氧气量过多会导致炉渣发生反应(1)的过氧化,最终导致炉内四氧化三铁含量增加。因此,需严格控制原料中的

表 3 投入煤量与渣中四氧化三铁含量的关系

投入煤量/t·h <sup>-1</sup>	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
渣中 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 含量/%	16.26	15.50	14.29	13.29	12.15	11.53	9.97

由表 3 可以看出,加入煤量越多,渣中四氧化三铁含量越低。虽然增加煤量能有效降低四氧化三铁含量,但同时会使综合能耗增加,进而导致生产成本增加。在保证正常生产的同时,控制耗煤量可有效降低生产成本。通过化验,喷炉渣中四氧化三铁含量为 21.97%,目前侧吹炉投矿量为 94 t/h,耗煤量在 1.4 t/h 左右,对比表 3 可以看出,为控制生产成本,仍可摸索降低煤量,但同时需对渣中四氧化三铁含量加强监测,控制在 21.97% 以内,避免喷炉事故的发生。

侧吹炉的炉缸、铜铤池和炉渣虹吸池以及炉顶下部由耐火砖砌筑,但其他侧墙、端墙和炉顶均为水套结构,正常生产过程中会带走大量热。加煤既可以控制还原性气氛,也可以保证熔炼热平衡。某公司用块煤作为还原剂控制渣中四氧化三铁含量,同时提供一部分热量,但其燃烧效率、反应效率较低。因此,在摸索降低块煤加入量的同时,可探索用粉煤作为还原剂并进行补热。

## 2.4 添加适量的石英石

熔炼炉渣以 FeO-SiO<sub>2</sub> 系及 FeO-SiO<sub>2</sub>-CaO 系、FeO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系等为主体,受石英石的加入量、粒度等因素影响,造渣反应中氧化亚铁与石英石的接触受限,反应(1)中产生的四氧化三铁不可能全部参与后续反应,也不可能全部与石英石接触造渣。

表 4 列出了几种炉渣成分及温度对液态炉渣性质的影响。在一定炉渣成分范围内,表 4 中箭头表示提高某组分含量,炉渣性质升高(↑)或降低(↓)。可通过控制石英石的粒度,添加适量的石英石<sup>[2-3]</sup>加速造渣来控制四氧化三铁的含量,但根据表 4 可以看出 SiO<sub>2</sub> 含量超过一定范围后会导致炉渣粘度上升,因此需要提高操作温度来保证炉渣的流动性。石英石加入量是否合适,可通过炉渣的铁硅

Zn、Mg 等高熔点杂质含量。炉料中 Zn 含量最好控制在 3.5% 以下,Mg 含量最好控制在 2.0% 以下。

## 2.3 调整煤的加入量

加入适量的煤可增加炉内的还原气氛,加强熔炼反应(3)的进行。投入煤量与渣中四氧化三铁含量关系见表 3。

比进行判断,铁硅比对炉渣中四氧化三铁量的影响如图 2 所示。侧吹炉要求的铁硅比控制范围较宽,为 1.3~2.0。根据图 2,铁硅比降低,渣中四氧化三铁含量随之减少。根据实际生产情况,当铁硅比控制在 1.5~1.7 时,既能保证炉渣的流动性,又能较低渣含铜量。

表 4 炉渣成分对炉渣性质的影响

组分性质	SiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	温度
粘度	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓
电导率	↓	↑	-	↓	↑	↑	↑	↑
密度	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓
表面张力	↓	↓	↓	↓	↑	↓	-	↓

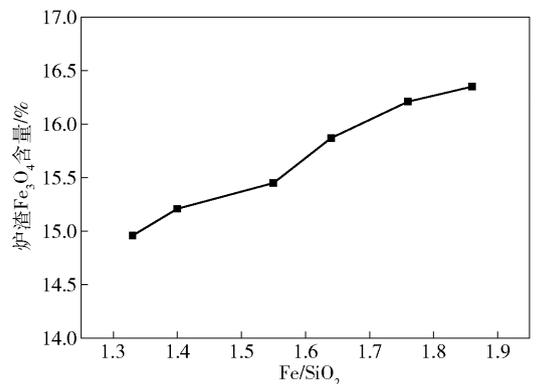


图 2 铁硅比对炉渣中四氧化三铁量的影响

## 3 四氧化三铁的消除

### 3.1 炉底沉积四氧化三铁的消除

四氧化三铁沉积是炉底产生炉结的主要原因,炉底存在合适厚度的炉结有利于保护炉底砖不受熔体冲刷,减少炉砖损耗,延长炉子使用寿命。但当炉结过厚时,则会导致炉内熔池容积减少,影响正生产。

由于侧吹炉内熔池液面可达 2 m 以上,熔池内搅拌剧烈,比重较轻的煤块在熔体渣层消耗反应殆

尽,无法进入炉底消耗炉结。减少炉结最有效的措施是提高炉温将炉结熔化,但持续高温操作会使炉砖寿命降低。加入生铁柱是控制炉结的一个有效方法<sup>[4]</sup>。生铁是含碳量大于2.11%的铁碳合金,其重量可以保证生铁柱加入熔池后能进入炉底与炉结发生反应,因为铜钼中的FeS具有溶解铁的能力,生铁进入炉底后被溶解,其中的碳元素与四氧化三铁发生反应(3),对炉底炉结进行消耗,可有效控制炉底炉结厚度。

### 3.2 风眼区域四氧化三铁的消除

熔炼过程中,高浓度富氧空气直接鼓入熔池渣层,炉内风口位置是氧化氛围最强的区域,所以该处四氧化三铁含量最高,同时由于通入的混氧温度相对较低,导致风口位置最容易形成炉结。风口位置炉结的产生会降低炉内反应效率,造成跑空风现象,对后续余热锅炉、电收尘运行造成影响。这部分炉结可以通过增加打风眼频次、更换长钎子打风眼、倒换风眼提高炉温等方式进行消除。

### 3.3 铜井渣井拱洞区域四氧化三铁的消除

侧吹熔炼炉的铜井、渣井位于本床两侧,炉渣通过溢流排出,铜钼通过虹吸原理排出。渣井、铜井与本床连接的拱洞部分的畅通是生产正常运行的重要保障。此区域熔体搅动相对平缓,易产生四氧化三铁的沉积,当沉积过高时,便会导致拱洞堵塞,使熔

体无法排出,严重时需停车处理。正常生产过程中要定期对拱洞进行探测,当发现拱洞熔体发黏或不畅通时,需立即进行生产调整,同时通过烧氧等方式将黏渣或炉结消除。

## 4 结论

对于侧吹炉而言,渣中四氧化三铁含量的控制有着重要的意义。由于侧吹炉富氧空气直接鼓入渣层,极易导致渣中四氧化三铁的产生,进而产生泡沫渣造成喷炉事故。目前仍在继续摸索能控制四氧化三铁含量的有效方法,同时摸索降低煤的投入量,将四氧化三铁控制在产生泡沫渣的极限,在有效降低成本和综合能耗的同时保证正常生产。

### [参考文献]

- [1] 马永明,连国旺. 闪速炉炼铜中渣四氧化三铁的来源与控制[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(2): 25-30.
- [2] 丁友声. 密闭鼓风炉富氧熔炼中 $Fe_3O_4$ 的危害[J]. 有色冶炼, 2001, 30(5): 39-41.
- [3] 丁友声. 密闭鼓风炉富氧熔炼中降低 $Fe_3O_4$ 的实践[J]. 安徽冶金, 2001(1): 31-33.
- [4] 昂正同. 闪速炼铜过程中四氧化三铁的生成与控制[J]. 矿冶, 2002(4): 69-72.

## Production Practice of Controlling Ferroferrous Oxide Content in Side-blowing Furnace

XU Jing, SUN Li-min, HUANG Ya-fang, MA Kai-min

**Abstract:** A certain amount of ferroferrous oxide will be produced in the process of smelting concentrate by oxygen-enriched air oxidation in side-blowing furnace. When the ferroferrous oxide content in slag is too high, the viscosity of melt will increase and accretion will form in the bath to make the furnace bottom rise so as to reduce the bath volume. In more serious situation, the foamed slag will be produced, resulting in slag-spillage accident. In this article, by combining the production practice of side-blowing smelting furnace, the ferroferrous oxide generation in smelting process in side-blowing furnace and controlling measures were discussed, and the elimination measures of ferroferrous oxide in various parts were introduced. The results show that the main cause of ferroferrous oxide is its inclusion in raw material and slag peroxidation. In production, the ferroferrous oxide content can be controlled by means of controlling the content of ferroferrous oxide and high-melting-point impurities in raw material, adjusting coal feed amount, adding appropriate amount of quartz and other measures.

**Key words:** side-blowing furnace; smelting slag; ferroferrous oxide; accretion