2020 年 5 月 May 2020

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39595



# 铅富氧侧吹氧化熔炼多元多相平衡分析

刘燕庭<sup>1,2</sup>,杨天足<sup>1</sup>,李明周<sup>3</sup>

(1. 中南大学 冶金与环境学院,长沙 410083;2. 长沙有色冶金设计研究院有限公司,长沙 410001;3. 江西理工大学 材料冶金化学学部,赣州 341000)

**摘** 要:利用已开发的铅富氧侧吹氧化熔池熔炼多相平衡热力学数学模型,计算某典型铅侧吹氧化熔炼生产工况,验证模型热力学分析的可行性,进而考察氧料比(*R*<sub>OC</sub>)、石英熔剂率(*R*<sub>SiO2</sub>)、石灰熔剂率(*R*<sub>CaO</sub>)、返尘加入率(*R*<sub>B,dust</sub>)、熔炼渣温度(*T*<sub>Slag</sub>)等工艺参数对产物产率及其组成的影响。结果表明:提高*R*<sub>OC</sub>、*R*<sub>SiO2</sub>、*R*<sub>CaO</sub>、*R*<sub>B,dust</sub> 或*T*<sub>Slag</sub>,在提升一次粗铅品位和产品质量的同时,必然会导致渣含铅升高、一次粗铅收率降低,部分杂质元素入渣脱除率降低;当这些工艺参数控制过高时,一次粗铅品位反而会降低;综合考虑产物产率、一次粗铅品位、富铅渣流动性、烟灰利用率和物料挥发性,*R*<sub>OC</sub>、*R*<sub>SiO2</sub>、*R*<sub>CaO</sub>、*R*<sub>B,dust</sub>和*T*<sub>Slag</sub>建议分别控制在112 Nm<sup>3</sup>/t、4%、3%、21%和1323 K 左右。

关键词: 富氧侧吹,铅熔池熔炼;多相平衡;化学平衡常数法 文章编号: 1004-0609(2020)-05-1110-09 中图分类号: TF812 文献标志码: A

近年来,多种短流程直接炼铅工艺(如 SKS 法、 Kivcet 法、Kaldo 法、Ausmelt/Isasmelt 法、富氧侧吹 法等)<sup>[1-3]</sup>被推广应用,而富氧侧吹法<sup>[4]</sup>以其具有原料 适应性强、流程短、可连续、设备简单、低污染、效 率高和投资少等优点,在我国铅生产中推广迅速<sup>[5]</sup>。 铅富氧侧吹氧化熔炼过程是一个高温、多相、多组分 的复杂反应过程,各操作工艺参数间交互影响,对过 程产出的影响很大,亟需基础理论方面研究,支撑过 程多元多相反应机理的系统分析。然而,现有侧吹铅 冶炼文献多集中于对工艺与设备的评述、对比和分 析<sup>[6-8]</sup>。因此,系统开展铅富氧侧吹熔池熔炼过程分析 研究,对揭示该过程物料演变、元素分配等产出行为 规律,探寻较优工艺参数条件,实现过程优化控制等 具有重要的理论指导意义。

因受冶金炉设备规模和高温实验重复性差等局限,传统火法冶金试验常采用静态实验方法,其结果 往往难以精确,且研究周期和成本较高<sup>[9]</sup>。随着计算 机软硬件发展,借助计算机模拟技术,采用多相平衡 计算模型<sup>[10-11]</sup>,对高温冶炼过程进行系统分析,具有 研究效率高、重现性好、实验成本低、安全性有保障 等优点。目前国内外学者针对铜和铅闪速冶炼<sup>[12-14]</sup>、 铅底吹<sup>[9, 15]</sup>和顶吹<sup>[16]</sup>熔炼等火法冶金过程,开展了相 关过程的分析研究,取得了与生产实践相吻合的结果, 揭示了过程元素分配规律,优化了生产过程。

鉴于富氧侧吹炉内高温熔池搅拌强烈,反应迅速 接近热力学平衡状态<sup>[17]</sup>。本文基于多相平衡原理,在 前期建立铅富氧侧吹氧化熔池熔炼过程多相平衡模型 和仿真系统的基础上,系统考察操作工艺参数对产物 产率、产物主要元素和组分含量的影响,分析该过程 的物料演变行为规律,以期为准确预测产出和优化工 艺参数提供理论依据。

# 铅富氧侧吹熔池熔炼多相平衡数 模系统及模拟

## 1.1 数模建立

铅富氧侧吹熔炼多相多组分反应体系采用化学平衡常数法构建<sup>[18-19]</sup>多相平衡数学模型,即在恒温恒压条件下,根据熔炼体系中各元素的总摩尔数已知条件,联立化学反应平衡常数方程和各元素质量守恒方

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA061002);中国博士后科学基金资助项目(2019M662268)

收稿日期: 2019-08-26; 修订日期: 2019-11-25

通信作者:杨天足,教授,博士;电话:13508482570; E-mail: tianzuyang@163.com

程,建立描述各元素在各产物各组分分配行为的非线 性方程组,代入各产物组分活度因子<sup>[13-14,20-23]</sup>,采用 迭代法求解方程组,计算出体系中各产物含量及其各 组分的摩尔分数。基于 MetCal 软件开发平台<sup>[12,21,24]</sup> 和前期研发的铅富氧侧吹氧化熔池熔炼多相平衡数学 模型与计算系统,可系统考察分析操作工艺参数对过 程产出的影响。

#### 1.2 模拟计算

采用所构建的铅富氧侧吹氧化熔池熔炼多相平衡 数学模型与计算系统,以国内某侧吹铅冶炼企业氧化 熔炼工段 2018 年 11~12 月和 2019 年 1~3 月的平均操 作参数作为工况条件,计算该厂该时期铅富氧侧吹氧 化熔炼过程的平均产物组成,并与实际生产数据进行 对比。

# 1.2.1 工况条件

原料总投入量 55 t/h,其中,混合铅精矿占 51.2%, 硫精矿占 15%、铅泥占 1%、铅锑矿占 4%、银精矿占 1%、返尘占 21%、石英砂占 2.8%、石灰石占 4%。富 氧浓度 90%,氧料比 112 Nm<sup>3</sup>/t,冷却水量 700 t/h,冷 却进水和出水温差为 1.5 K,熔炼温度根据热平衡计算 获取。经计算,原料的物相组分含量见表 1。

1.2.2 计算结果及分析

一次粗铅、富铅渣和烟尘各元素的模型计算值和 生产分析测试平均值,见表 2。 由表 2 可知,与生产实测值相比,除富铅渣中微量元素外,一次粗铅、富铅渣和烟尘中 Pb、Zn、S、Cu、As、Sb、Bi、Cd、Au、Ag质量分数计算值的相对误差均低于 10%。由此可见,前期所构建模型和计算系统能较好地反映铅富氧侧吹熔池熔炼过程实际,具有较好预测过程产出和优化工艺参数的潜力,可作为对该过程进行热力学分析的有效工具。

# 2 铅富氧侧吹熔炼过程多元多相平 衡分析

通过改变氧料比(R<sub>OC</sub>)、石英熔剂率(R<sub>SiO2</sub>)、石灰 熔剂率(R<sub>CaO</sub>)、返尘加入率(R<sub>Dust</sub>)和熔炼渣温度 (T<sub>Slag</sub>), 考察铅富氧侧吹氧化熔炼产物的变化情况。

#### 2.1 氧料比的影响

在石英熔剂率 3%,石灰熔剂率 4%,返尘加入率 21%、熔炼温度 1323 K 条件下,模拟计算了氧料比 Roc 在 105~115 Nm<sup>3</sup>/t 范围内变化时,产物产率及其组 成变化,结果见表 3 和图 1。

表 3 中一次粗铅、富铅渣、烟尘和烟气产率分别 为各产物产出质量占产物总产出质量的百分比。由表 3 可知,随 *R*<sub>oc</sub>增加,一次粗铅产率降低,烟气产率 微量降低,而富铅渣和烟尘产率升高。

## 表1 原料物相组成

 Table 1
 Phase composition of raw materials (mass fraction, %)

		1					/							
PbS	ZnS	$Cu_2S$	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeS <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ag	Au	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$\mathrm{Bi}_2\mathrm{S}_3$	CdS	$H_2O$	PbO
30.81	5.43	1.04	2.10	8.95	0.81	4.32	0.06	0.01	0.21	1.54	0.07	0.17	6.53	1.54
FeO	ZnO	CaO	S	PbSO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )	3 ZnSC	D <sub>4</sub> Cu	$SO_4$	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CdO	Others
0.32	1.31	2.53	4.60	15.02	0.04	4.23	3 0.	06	0.12	0.10	0.01	0.00	1.91	6.17

#### 表2 计算结果与生产数据

V - 1	DI	Mass fraction/%										
value	Phase	Pb	Zn	Cu	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	S	As	Sb	Bi	Cd
Calculated	Crude	96.60	$8.14 \times 10^{-4}$	0.40	$6.93 \times 10^{-7}$	-	-	0.66	0.46	0.75	0.33	$1.19 \times 10^{-2}$
Measured	lead	96.47	$8.00 \times 10^{-4}$	0.40	-	-	-	0.69	0.48	0.78	0.35	$1.20 \times 10^{-2}$
Calculated	<u>C1</u>	41.15	11.85	1.48	10.51	5.00	7.24	0.25	0.18	1.71	0.05	0.86
Measured	Slag	39.69	11.43	1.46	11.31	5.30	7.65	0.40	0.13	1.92	0.06	0.90
Calculated	Dust	52.72	1.51	0.32	2.36	2.20	3.19	10.90	0.29	0.71	0.02	8.35
Measured		53.35	1.52	_	-	_	_	10.71	0.31	0.76	_	8.96

表3 Roc对产物产率的影响

<b>Table 3</b> Effect of $R_{OC}$ on yields of product					
R <sub>OC</sub> /					
$(Nm^3 \cdot t^{-1})$	Crude lead	Lead-rich slag	Gas	Dust	
105	17.94	34.48	34.94	12.64	
106	16.57	35.75	34.91	12.77	
107	15.13	37.10	34.87	12.90	
108	13.64	38.51	34.82	13.03	
109	12.10	39.98	34.76	13.16	
110	10.53	41.49	34.70	13.28	
111	8.93	43.04	34.63	13.41	
112	7.30	44.61	34.55	13.53	
113	5.66	46.21	34.48	13.65	
114	4.01	47.83	34.40	13.77	
115	2.34	49.45	34.31	13.89	





**Fig. 1** Effect of  $R_{OC}$  on main elements of product: (a) Crude lead; (b) Lead-rich slag; (c) Dust

由图 2 可知,提高 *R*<sub>oc</sub>,炉内氧势增强,铅精矿 中硫化物氧化、氧化物造渣趋势增强,PbS 和 PbO 交互反应趋势增强,Zn、S、Cu、Fe等杂质元素在一 次粗铅含量降低,一次粗铅品位相对升高;富铅渣中 Pb含量升高,Ca、Si、Fe等杂质含量相对降低;烟尘 中除 Fe含量降低外,其它元素变化不明显。当 *R*<sub>oc</sub> 继续提高至>112 Nm<sup>3</sup>/t 后,随着精矿中 PbS 的耗尽和 Pb 的过氧化,渣中 PbO 的含量急剧升高,PbO 的生 成量持续增大,而粗铅产率持续降低,金银在粗铅中 富集率升高,粗铅品位稍微降低,渣含 Pb 和烟尘含 Pb 线性增大;一次粗铅 S 含量降低,富铅渣中含量稍 有升高,烟尘中含量更高且变化不明显。

可见,提高 R<sub>oc</sub>可提高一次粗铅品位和产品质量的同时,必然会导致渣含铅升高、一次粗铅收率降低,过高的 R<sub>oc</sub>反而导致粗铅品位降低。综合考虑产物产率,一次粗铅品位和各产物组成的变化情况,建议 R<sub>oc</sub> 控制在 112 Nm<sup>3</sup>/t 左右。

#### 2.2 石英熔剂率的影响

在氧料比 112 Nm<sup>3</sup>/t、石灰熔剂率 4%、返尘加入 率 21%、熔炼温度 1323 K 条件下,模拟计算了石英 熔剂率 R<sub>SiO2</sub>在 0~5%范围内变化时产物产率及其组成 变化,结果见表 4 和图 2。

表 4 结果表明, 随 R<sub>sio2</sub>增加, 一次粗铅产率降低, 烟气和烟尘产率微量降低, 而富铅渣产率升高。

图 2 数据表明,提高 *R*<sub>SiO2</sub>,一次粗铅品位先微幅 升高后稍有降低,*R*<sub>SiO2</sub>=2%为品位降低起始点,而富 铅渣和烟尘中 Pb 含量分别线性增大和减小; Zn、Cu 和 Fe 在一次粗铅、富铅渣和烟尘中含量均呈降低趋

表4 R<sub>SiO2</sub>对产物产率的影响

Table 4	Effect of $R_{SiO_2}$	on yields	of product
---------	-----------------------	-----------	------------

$R_{\rm SiO_2}$	Yield/%					
%	Crude lead	Lead-rich slag	Gas	Dust		
0	14.26	36.86	35.28	13.60		
0.5	13.17	38.08	35.16	13.59		
1.0	12.04	39.34	35.05	13.58		
1.5	10.88	40.63	34.93	13.57		
2.0	9.70	41.94	34.80	13.56		
2.5	8.50	43.27	34.68	13.54		
3.0	7.30	44.61	34.55	13.53		
3.5	6.10	45.96	34.43	13.52		
4.0	4.89	47.31	34.30	13.50		
4.5	3.67	48.67	34.18	13.49		
5.0	2.45	50.03	34.05	13.47		



图 2 R<sub>SiO</sub>,对产物主要元素含量的影响

**Fig. 2** Effect of  $R_{SiO_2}$  on main elements of product: (a) Crude lead; (b) Lead-rich slag; (c) Dust

势,烟尘中含量变化不明显;一次粗铅中 S 含量降低, 在富铅渣和烟尘中 S 含量分别微量降低和升高; Ca 和 Si 在富铅渣中含量分别线性降低和升高,烟尘中 Ca 含量微量增大,烟尘中 Si 含量线性增大。这是由 于提高 R<sub>SiO2</sub>,侧吹过程氧化生成的 PbO 等氧化物造渣 趋势增大,渣中 PbO 和 PbSO4 含量快速升高,其他化 合物含量相对降低。

可见,提高 *R*<sub>SiO2</sub> 虽然可提高一次粗铅品位,但也 会导致渣含铅升高,渣中 CaO 与 SiO2 质量分数比和 FeO 与 SiO2 质量分数比降低。当 *R*<sub>SiO2</sub>过高时,熔渣流 动性变差,渣中 Pb 含量升高,一次粗铅品位反而会 降低。因此,为确保较高的一次粗铅品位和收率,并 根据 FeO-CaO-SiO<sub>2</sub> 渣系相图,使得 CaO/SiO<sub>2</sub> 控制在 流动性较好区域(生产实践一般控制在 0.7 附近),建议 R<sub>SiO</sub>,控制在 3%左右。

#### 2.3 石灰熔剂率的影响

在氧料比 112 Nm<sup>3</sup>/t、石英熔剂率 3%、返尘加入 率 21%、熔炼温度 1323 K 条件下,模拟计算了石灰 熔剂率 R<sub>CaO</sub>在 0~7%范围内变化时,产物产率及其组 成变化,结果见表 5 和图 3。

## 表5 R<sub>CaO</sub>对产物产率的影响

Table 5Effect of  $R_{CaO}$  on yields of product

R <sub>CaO</sub> /	Yield/%					
%	Crude lead	Lead-rich slag	Gas	Dust		
0	15.62	35.29	35.26	13.83		
0.5	14.69	36.32	35.19	13.80		
1.0	13.72	37.40	35.12	13.76		
1.5	12.72	38.52	35.04	13.73		
2.0	11.68	39.68	34.95	13.69		
2.5	10.62	40.88	34.86	13.65		
3.0	9.53	42.10	34.76	13.61		
3.5	8.43	43.35	34.66	13.57		
4.0	7.30	44.61	34.55	13.53		
4.5	6.17	45.89	34.45	13.49		
5.0	5.02	47.19	34.34	13.45		
5.5	3.87	48.50	34.23	13.40		
6.0	2.71	49.81	34.12	13.36		
6.5	1.54	51.14	34.00	13.32		
7.0	0.41	52.44	33.88	13.27		

由表 5 可知,随 R<sub>CaO</sub>增加,一次粗铅产率降低,烟气和烟尘产率微量降低,而富铅渣产率升高。

由图 3 可知,提高 *R*<sub>CaO</sub>,一次粗铅品位先微幅升高,*R*<sub>CaO</sub>>4%后品位开始降低,而富铅渣和烟尘中 Pb含量分别线性增大和减小;Zn、Cu 和 Fe 在一次粗铅、富铅渣和烟尘中含量降低,而在烟尘中含量变化不明显;S 在一次粗铅中含量降低,在富铅渣和烟尘中含量分别微量降低和升高;Ca 和 Si 在富铅渣中含量分别升高和降低,而在烟尘中 Si 含量微量增大;烟尘中Ca 含量线性增大。这是由于提高 *R*<sub>CaO</sub>,侧吹过程氧化生成的 PbO 等氧化物造渣趋势增大,渣中 PbO 和 PbSO<sub>4</sub>含量快速升高,其他化合物含量相对降低。

可见,提高  $R_{CaO}$  可提高一次粗铅品位,但也会导 致渣含铅升高,渣中 CaO 与 SiO<sub>2</sub> 质量分数比升高, 当  $R_{CaO}$  过高时,游离态的 CaO 导致熔渣流动性变差,



图 3 R<sub>CaO</sub> 对产物主要元素含量的影响

**Fig. 3** Effect of  $R_{CaO}$  on main elements of product: (a) Crude lead; (b) Lead-rich slag; (c) Dust

渣中 Pb 含量升高,一次粗铅品位降低。因此,为获 取较高的一次粗铅质量和收率,根据 FeO-CaO-SiO<sub>2</sub> 渣系相图,使得 CaO 与 SiO<sub>2</sub>质量分数比控制在 0.7 附 近,建议 *R*<sub>CaO</sub>控制在 4%左右。

## 2.4 返尘加入率的影响

在氧料比 112 Nm<sup>3</sup>/t、石英熔剂率 3%、石灰熔剂 率 4%、熔炼温度 1323 K 条件下,模拟计算了返尘加 入率 R<sub>B,dust</sub>在 16%~23%范围内变化时,产物产率及其 组成变化,结果见表 6 和图 4。

由表 6 可知,随着 R<sub>B,dust</sub>增加,由于加入返尘中 Pb 主要以 PbSO<sub>4</sub>和 PbO 形态存在,不利于交互反应

表 6	R <sub>B,dust</sub> 对产物产率的影响	
-----	------------------------------	--

**Table 6** Effect of  $R_{B,dust}$  on yields of product

$R_{\rm B,dust}$		Yield/%		
%	Crude lead	Lead-rich slag	Gas	Dust
16.0	20.34	30.99	35.15	13.52
16.5	19.34	32.00	35.14	13.52
17.0	18.25	33.10	35.12	13.52
17.5	17.09	34.30	35.08	13.53
18.0	15.85	35.59	35.03	13.53
18.5	14.54	36.95	34.97	13.53
19.0	13.17	38.39	34.90	13.53
19.5	11.76	39.88	34.83	13.53
20.0	10.31	41.42	34.74	13.53
20.5	8.82	43.00	34.65	13.53
21.0	7.30	44.61	34.55	13.53
21.5	5.77	46.25	34.46	13.53
22.0	4.22	47.91	34.35	13.52
22.5	2.65	49.59	34.25	13.52
23.0	1.08	51.27	34.14	13.51

的发生,导致一次粗铅产率降低,富铅渣产率升高。

由图 4 可知,由于加入返尘的主要成分为 PbSO<sub>4</sub> 和 PbO,提高 *R*<sub>B,dust</sub>,炉内 PbS 和 PbO 交互反应趋势 增强,一次粗铅品位升高;当 *R*<sub>B,dust</sub>>21%后,随着 PbS 耗尽,加入过量返尘中的 PbSO<sub>4</sub>和 PbO 更容易入 渣,导致渣中 Pb 含量升高,烟尘中 Pb 含量降低,一 次粗铅收率降低,而粗铅和富铅渣中 Zn、Cu、Fe、S 等含量相对降低;富铅渣中 Si 和 Ca 含量降低,而烟 尘中 Si 和 Ca 含量微幅升高。经核算,富铅渣中 FeO 与 SiO<sub>2</sub>质量分数比、CaO 与 SiO<sub>2</sub>质量分数比变化不 大。

因此,在侧吹熔炼过程中,虽然提高 *R*<sub>B,dust</sub> 可提 高系统内资源回收利用率,但 *R*<sub>B,dust</sub> 应控制适宜,否 则会导致一次粗铅收率降低、渣中 Pb 含量升高。为 保证适宜的产物产率、较高的一次粗铅品位和良较高 的资源利用率,建议 *R*<sub>B,dust</sub> 控制在 21%左右。

# 2.5 熔炼渣温的影响

在氧料比 112 Nm<sup>3</sup>/t、石英熔剂率 3%、石灰熔剂 率 4%、返尘加入率 22%条件下,模拟计算了熔炼温 度 *T*<sub>Slag</sub>在 1173~1573 K 范围内变化时产物产率及其组 成变化,结果见表 7 和图 5。

由表 7 可知, 随着 T<sub>Slag</sub> 增加, 一次粗铅产率降低, 烟气和烟尘产率稍有升高, 而富铅渣产率微量降低。



**Fig. 4** Effect of  $R_{B,dust}$  の main elements of product: (a) Crude lead; (b) Lead-rich slag; (c) Dust

Table 7	Effect of $T_{Slag}$	on yields	of product
---------	----------------------	-----------	------------

$T_{\text{Slag}}$	Yield/%					
K	Crude lead	Lead-rich slag	Gas	Dust		
1173	8.28	44.95	33.47	13.31		
1223	7.71	44.84	34.10	13.35		
1273	7.42	44.75	34.41	13.42		
1323	7.30	44.61	34.55	13.53		
1373	7.26	44.43	34.60	13.70		
1423	7.23	44.20	34.58	13.98		
1473	7.19	43.86	34.49	14.46		
1523	7.11	43.36	34.31	15.22		
1573	6.99	42.58	34.01	16.42		



图5 T<sub>Slag</sub>对产物主要元素含量的影响

**Fig. 5** Effect of  $T_{\text{Slag}}$  on main elements of product: (a) Crude lead; (b) Lead-rich slag; (c) Dust

由图 5 可知,提高 *T*<sub>Slag</sub>,炉内氧化反应和 PbSO<sub>4</sub>、 ZnSO<sub>4</sub> 等分解反应趋势增强,一次粗铅品位和渣含铅 微量升高,烟尘含铅相对微幅降低;当 *T*<sub>Slag</sub>>1323 K 后,随着 Pb、PbS 和 PbO 等化合物挥发性增强,一次 粗铅品位和富铅渣中 Pb 含量微幅降低,烟尘中 Pb 含 量小幅升高;一次粗铅和富铅渣中 Zn 和 Cu 含量均微 量升高,烟尘中 Zn 和 Cu 含量微幅降低;一次粗铅和 富铅渣中 S 含量降低,烟尘中 S 含量变化不大;一次 粗铅和烟尘中 Fe 含量降低,富铅渣中 Fe 含量微幅升 高;富铅渣中 Si 和 Ca 含量微幅升高,烟尘中 Si 和 Ca 含量微幅降低; 经核算渣中 FeO 与 SiO<sub>2</sub>质量分数 比、CaO 与 SiO<sub>2</sub>质量分数比变化不大。因此,为确保 较高的一次粗铅品位和较低的含铅原料挥发性,建议 *T*<sub>Slag</sub>控制在 1323 K 左右。

# 3 结论

 基于所构建的铅富氧侧吹氧化熔炼多相平衡 数学模型与计算系统,计算了某典型侧吹铅氧化熔炼 生产工况,计算结果与生产实践基本吻合,表明该模 型具有较好预测过程产出和优化工艺参数的潜力,可 作为对该过程进行模拟分析的有效工具。

2) 铅富氧侧吹熔炼过程分析结果表明,提高操作 工艺参数(R<sub>OC</sub>、R<sub>SiO2</sub>、R<sub>CaO</sub>、R<sub>B,dust</sub>或 T<sub>Slag</sub>),在提高一 次粗铅品位和产品质量的同时,必然导致渣含铅升高、 一次粗铅收率降低。部分杂质元素入渣脱除率降低, 当这些工艺参数过高时一次粗铅品位反而会降低。

3) 根据铅富氧侧吹熔炼过程分析结果,为同时保证适宜的产物产率、较高的一次粗铅品位、良好的富铅渣流动性、较好的资源利用率和较低的挥发性, R<sub>oc</sub>、 R<sub>SiO2</sub>、R<sub>CaO</sub>、R<sub>B,dust</sub>和 T<sub>Slag</sub>建议分别控制在 112 Nm<sup>3</sup>/t、 4%、3%、21%和 1323 K 左右。

## REFERENCES

- 王成彦,陈永强. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势:铅 冶金[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 8(6): 1-7.
   WANG Cheng-yan, CHEN Yong-qiang. Lead and zinc metallurgy technology situation and development treads of China: Lead metallurgy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2016, 8(6): 1-7.
- [2] 李卫锋,张晓国,郭学益,张传福. 我国铅冶炼的技术现状及进展[J]. 中国有色冶金, 2010, 39(2): 29-33.
  LI Wei-feng, ZHANG Xiao-guo, GUO Xue-yi, ZHANG Chuang-fu. Status and progress of lead smelting technology in China[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010, 39(2): 29-33.
- [3] CHENG L. Development of lead-zinc smelting technology in China[J]. Erzmetall, 2017, 70(4): 203–213.
- [4] LISIENKO V G, MALIKOV G K, MOROZOV M V, BELYAEV V V, KIRSANOV V A. Modeling heat-and-mass exchange processes in the Vanyukov furnace in specific operational conditions[J]. Russian Journal of

Non-Ferrous Metals, 2012, 53(3): 272–278.

[5] 刘 军,刘燕庭. 富氧侧吹直接炼铅工艺研究与应用[J].
 中国有色冶金, 2013(1): 34-36.
 LIU Jun, LIU Yan-ting. Research and application of ovvgen enriched side blown direct lead smelting process[I].

oxygen-enriched side-blown direct lead smelting process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2013(1): 34-36.

- [6] 蔺公敏, 宾万达. 硫化铅精矿氧气侧吹熔池熔炼直接炼铅 新技术[J]. 中国有色冶金, 2005(1): 15-17.
   LIN Gong-min, BIN Wan-da. Oxygen side-blown bath smelting of lead sulfide concentrate—A new process for direct lead smelting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2005(1): 15v17.
- [7] CHEN L, YANG T, BIN S, LIU W, ZHANG D, BIN W, ZHANG L. An efficient reactor for high-lead slag reduction process: Oxygen-rich side blow furnace[J]. JOM, 2014, 66(9): 1664–1669.
- [8] CHEN L, HAO Z, YANG T, LIU W, ZHANG D, ZHANG L, BIN S, BIN W. A comparison study of the oxygen-rich side blow furnace and the oxygen-rich bottom blow furnace for liquid high lead slag reduction[J]. JOM, 2015, 67(5): 1123–1129.
- [9] 陈 霖, 王振虎, 陈 威, 肖 辉, 刘伟锋, 张杜超, 杨天 足. 富氧底吹炼铅氧化熔炼元素分配热力学模拟[J]. 有色 金属(冶炼部分), 2018(9): 1-6.
  CHEN Lin, WANG Zhen-hu, CHEN Wei, XIAO Hui, LIU Wei-feng, ZHANG Du-chao, YANG Tian-zu. Thermodynamic simulation on elements distribution of lead concentrate oxidative smelting in oxygen-rich bottom-blow smelting process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(9): 1-6.
- [10] LEAL A M M, KULIK D A, KOSAKOWSKI G. Computational methods for reactive transport modeling: A Gibbs energy minimization approach for multiphase equilibrium calculations[J]. Advances in Water Resources, 2016, 88: 231–240.
- [11] EWING M E, ISAAC D A. Mathematical modeling of multiphase chemical equilibrium[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2015, 29(3): 1–12.
- [12] 李明周,周孑民,张文海,李贺松,童长仁.铜闪速吹炼
   过程多相平衡热力学分析[J].中国有色金属学报,2017, 27(7):1493-1503.

LI Ming-zhou, ZHOU Jie-min, ZHANG Wen-hai, LI He-song, TONG Chang-ren. Multiphase equilibrium thermodynamics analysis of copper flash converting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,

1117

27(7): 1493-1503.

- [13] 汪金良,张文海,张传福. 硫化铅矿闪速熔炼过程的热力 学分析[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2952-2957.
  WANG Jin-liang, ZHANG Wen-Hai, ZHANG Chuang-fu. Thermodynamic analysis of lead sulfide flash smelting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2952-2957.
- [14] 汪金良,张传福,张文海. 铅闪速熔炼过程的多相平衡模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 429-434.
  WANG Jin-liang, ZHANG Chuan-fu, ZHANG Wen-hai. Multi-phase equilibrium model of lead flash smelting process[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(2): 429-434.
- [15] 谭鹏夫,张传福. QSL 炼铅过程的热力学分析[J]. 中南工 业大学学报(自然科学版), 1996, 27(6): 676-679.
  TAN Peng-fu, ZHAGN Chuan-fu. The Thermodynamic Analysis of QSL Lead Smelting Process[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science Edition), 1996, 27(6): 676-679.
- [16] 田思雨,胡宇杰,王宇菲,陈艺锋,刘鹏程.基夫赛特炉 搭配沉铁渣炼铅的热力学分析与试验研究[J].中国有色 冶金,2017,46(3):62-66.
  TIAN Si-yu, HU Yu-jie, WAN GYu-fei, CHEN Yi-feng, LIU Peng-cheng. Thermodynamics analysis and experimental study of smelting of PbS and iron-precipitation residue in Kivcet furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2017,46(3): 62-66.
- [17] 刘 军,刘燕庭,陈 文. 铜镍矿富氧侧吹熔池熔炼工艺
  [J]. 甘肃冶金, 2013, 35(1): 4-6.
  LIU Jun, LIU Yan-ting, CHEN Wen. The process of oxygen-enriched side-blown bath smelting for copper-nickel mine[J]. Gansu Metallurgy, 2013, 35(1): 4-6.
- [18] SHIMPO R, WATANABE S, GOTO S, OGAWA O. An application of equilibrium calculations to the copper

smelting operation[J]. Advances in Sulphide Smelting, 1983, 1: 295–316.

- [19] SHIMPO R, GOTO S, OGAWA O, ASAKURA I. A study on the equilibrium between copper matte and slag[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1986, 25(2): 113–121.
- [20] 谭鹏夫,张传福,张瑞瑛. QSL 炼铅过程的计算机模型[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1996, 27(5): 40-43.
  TAN Peng-fu, ZHAGN Chuan-fu, ZHANG Rui-ying. A computer model of QSL lead smelting process[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science Edition), 1996, 27(5): 40-43.
- [21] LI M, ZHOU J, TONG C, ZHANG W, CHEN Z, WANG J. Thermodynamic modeling and optimization of the copper flash converting process using the equilibrium constant method[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(4): 1794–1807.
- [22] SHUVA M A H, RHAMDHANI M A, BROOKS G A, MASOOD S, REUTER M A. Thermodynamics data of valuable elements relevant to e-waste processing through primary and secondary copper production: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 795–809.
- [23] 黄金堤,李 静,童长仁,李明周,徐志峰. 废杂铜精炼 过程中动态多元多相平衡热力学模型[J]. 中国有色金属 学报,2015,25(12): 3513-3522.
  HUANG Jin-di, JING LI, TONG Chang-ren, LI Ming-zhou, XU Zhi-feng. Dynamic multicomponent and multiphase equilibrium thermodynamics model during scrap copper refining process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(12): 3513-3522.
- [24] LI M, ZHOU J, TONG C, ZHANG W, LI H. Mathematical model of whole-process calculation for bottom-blowing copper smelting[J]. Metallurgical Research & Technology, 2018, 115(1): 1–15.

# Multielement and multiphase equilibrium analysis of lead oxygen-enriched side-blown oxidation smelting

LIU Yan-ting<sup>1, 2</sup>, YANG Tian-zu<sup>1</sup>, LI Ming-zhou<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Changsha Design and Research Institute of Nonferrous Metallurgy, Changsha 410001, China;

3. Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry,

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** With the developed multi-phase equilibrium thermodynamic mathematical model of lead oxygen-enriched side-blown oxidation bath smelting, the production conditions of a typical lead side-blown oxidation smelting were calculated, and the feasibility of thermodynamic analysis of the model was verified. Then the effects of the oxygen-to-feed ratio ( $R_{OC}$ ), quartz flux rate ( $R_{SiO_2}$ ), lime flux rate ( $R_{CaO}$ ), back-dust addition rate ( $R_{B,dust}$ ) and slag temperature ( $T_{Slag}$ ) were investigated on the yield and compositions of the products. The results show that the improvement of  $R_{OC}$ ,  $R_{SiO_2}$ ,  $R_{CaO}$ ,  $R_{B,dust}$  or  $T_{Slag}$  will inevitably lead to the increase of lead content in slag, the decrease of yield of primary lead and the decrease of removal rate of some impurity elements in slag, while the grade of primary lead grade, fluidity of lead-rich slag, utilization ratio of back-dust and volatility of materials,  $R_{OC}$ ,  $R_{SiO_2}$ ,  $R_{CaO}$ ,  $R_{B,dust}$  and  $T_{Slag}$  should be controlled at about 112 Nm<sup>3</sup>/t, 4%, 3%, 21% and 1323 K, respectively.

Key words: oxygen-enriched side-blown; lead bath smelting; multi-phase equilibrium; chemical equilibrium constant method

Foundation item: Project(2011AA061002) supported by the National High Technology Research and Development Program of China; Project(2019M662268) supported by the China Postdoctoral Science Foundation

Received date: 2019-08-26; Accepted date: 2019-11-25

Corresponding author: YANG Tian-zu; Tel: +86-13508482570; E-mail: tianzuyang@163.com

(编辑 龙怀中)