

引用格式:任焱辉,董志鹏,何黎明,等.富氧底吹铜冶炼“三连炉”系统中杂质元素走向分析[J].有色设备,2025,39(2):109-117.

REN Yanhui, DONG Zhipeng, HE Liming, et al. Analysis of impurity element trends in the “triple furnace” system of oxygen enriched bottom blown copper smelting[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 109-117.

# 富氧底吹铜冶炼“三连炉”系统中杂质元素走向分析

任焱辉, 董志鹏, 何黎明, 李明

(国投金城冶金有限责任公司, 河南灵宝 472000)

**[摘要]** 根据生产工艺状况,按照时间进度,对采用富氧底吹自热熔炼的“三连炉”系统进行为期一年的生产数据跟踪记录,通过对数据进行统计分析,探究杂质元素 Pb、Zn、As、Sb、Bi 和 Ni 的分布走向。结果表明:入炉混合料中,返回配料的铅占总铅的 45.57%,主要集中在渣精矿和吹炼渣中;返回配料中的镍占总镍的 36.43%,也主要集中在渣精矿和吹炼渣中;铋主要富集在熔炼锅炉灰中返回系统配料,锑主要富集在渣精矿中返回系统配料,这 2 种杂质元素在阳极板中的含量仅次于镍;其余杂质元素返回配料的比例不是很大。以上为后续配矿和渣选矿工艺的优化提供参考依据。

**[关键词]** 富氧底吹;三连炉;杂质元素;走向分析;铜冶炼;As;Sb;Bi;Ni

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0109-09

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.015

## 0 前言

河南某大型铜冶炼企业采用富氧底吹“三连炉”炼铜系统以及不锈钢永久阴极铜电解精炼技术。该技术配备世界上规模最大的单套收砷系统,可以处理低品位的铜精矿以及复杂难处理的多金属伴生矿,工艺有如下主要特点:对原料适应性很强,对物料的粒度、水分均没有严格的要求,既可以处理粉料,也可以处理块料,操作易于调节控制等<sup>[1-3]</sup>。受原料供求关系影响,目前系统处理的原料不但种类日渐繁多,而且成分日渐复杂。其中,Pb、Zn、As、Sb、Bi 和 Ni 等杂质元素含量呈上升趋势,对产品质量及冶炼作业过程影响较大<sup>[4-6]</sup>。

为了控制三连炉系统中间产品杂质含量,释放

后续工段脱杂压力,提高企业综合回收能力及经济效益<sup>[7-8]</sup>,本文以公司某时段实际生产数据为依据,以熔炼炉入炉物料及熔炼炉、吹炼炉及阳极炉产物为考察对象,详细分析了 Pb、Zn、As、Sb、Bi 和 Ni 在富氧底吹三连炉系统中的分布与走向,为今后生产提供参考依据。

## 1 “三连炉”系统入炉物料

熔炼炉入炉物料主要由新矿(铜精矿、含砷复杂金精矿等)、渣精矿、吹炼渣、锅炉烟灰及其他返料(包含精炼渣、电解黑铜渣、吹炼包底铜、阳极泥分银渣等)组成,其物料成分如表 1 所示。吹炼炉入炉物料主要为熔炼产出的冷热铜铋,精炼阳极炉入炉物料主要为吹炼产出的粗铜。

表 1 熔炼炉入炉物料成分

Table 1 Composition of materials entering the melting furnace

元素	Au/(g·t <sup>-1</sup> )	Ag/(g·t <sup>-1</sup> )	Cu/%	Fe/%	S/%	Pb/%	Zn/%	As/%	Sb/%	Bi/%	Ni/%
含量	23.62	156.55	12.06	25.36	24.18	1.71	1.56	1.73	0.29	0.06	0.06

[收稿日期] 2025-01-18

[第一作者] 任焱辉(1994—),男,河南郑州人,助理工程师,主要从事富氧底吹铜冶金工艺和侧吹冶炼处理铜冶炼固废工艺的生产、技术工作。

## 2 投入与产出物料杂质元素含量分布

混合物料经富氧底吹熔炼产出的热冷铜锍分别流向吹炼炉和外放铜包,吹炼炉产出的粗铜经流槽进入阳极炉进行精炼并产出阳极板送往电解车间。其中,冷铜锍缓缓冷破碎后作为吹炼炉生产冷料或者外售,熔炼渣经缓缓冷送往选矿车间并与缓缓冷破碎后的吹炼渣、精炼渣以及余热锅炉灰返备料配矿进熔

炼炉,收集的熔炼电尘灰外售;干法收砷骤冷烟灰及硫酸钙外售,烟气中其他杂质在制酸及尾气脱硫捕集下来。

根据检验中心的分析数据(熔炼渣及铜锍均为热态取样)及计划入炉混配原料的成分,采用综合加权平均的计算方法,得出熔炼-吹炼入炉物料与产出物料中杂质元素的含量,如表 2 所示。

表 2 “三连炉”系统投入与产出杂质元素含量分析

Table 2 Analysis of impurity element content in input and output of the “triple furnace” system

杂质元素		Pb	Zn	As	Sb	Bi	Ni	%
熔炼炉	投入	混合精矿	1.714	1.569	1.728	0.291	0.063	0.059
	产出	铜锍	2.650	0.739	0.359	0.161	0.048	0.159
		熔炼渣	0.922	2.090	0.560	0.364	0.025	0.031
		熔炼锅炉灰	19.993	2.863	14.294	0.253	1.212	0.026
		熔炼电尘灰	32.113	3.264	6.573	0.843	1.802	0.015
		骤冷烟灰	0.040	—	71.13	0.210	0.453	—
		硫酸钙	0.050	—	49.69	0.504	0.542	—
吹炼炉	投入	铜锍	2.650	0.739	0.359	0.161	0.048	0.159
	电解残极	0.200	0.105	0.207	0.144	0.038	0.129	
	产出	粗铜	0.477	0.115	0.421	0.191	0.043	0.152
		吹炼渣	9.773	2.761	0.181	0.080	0.040	0.273
		锅炉灰	6.591	1.164	0.328	0.106	0.202	0.085
		电尘灰	30.00	5.470	1.361	0.150	1.018	0.029
	阳极炉	投入	粗铜	0.477	0.115	0.421	0.191	0.043
阳极铜		0.159	0.105	0.250	0.144	0.038	0.129	
产出		精炼渣	8.018	0.259	2.85	0.396	0.037	0.395
精炼灰		6.483	0.144	19.17	0.234	0.284	0.030	

## 3 杂质元素的分配及走向行为分析

### 3.1 铅的分配与走向

从表 2、表 3 可以看出,在富氧底吹熔炼过程中,Pb 主要富集于熔炼渣中,占总量的 34.96%,此外还有部分 Pb 分布于铜锍、电尘灰和锅炉灰中;在吹炼过程中 79.61% 的铅进入渣中,13.69% 和 6.25% 进入粗铜和电尘灰中。铅元素分布具体走势如图 1 所示。

在富氧底吹熔炼过程中,当熔体中存在足够的

FeS 时,在造硫过程中 Pb 的氧化物易发生硫化反应(反应式见式(1)),生成的 PbS 大部分溶解于铜锍中。但是在控制富氧浓度 73% ~ 75% 以及铜锍品位较高的生产条件下,抑制了下列反应的发生(反应式见式(2) ~ (3)),增加了 Pb 被氧化造渣除去的能力,大幅减少了铜锍中的含铅量。在熔炼过程中,Pb 的氧化物、硫化物及单质由于熔点、沸点低,且在冶炼温度  $1190 \pm 30$  °C 下饱和蒸气压很高,会有相当大一部分直接挥发进入气相中,造成了铅在熔炼渣中富集程度略高于铜锍。而铅在吹炼炉中因氧化

表 3 “三连炉”系统产物中主要杂质元素的分布率

Table 3 Distribution rate of main impurity elements in the products of the “triple furnace” system %

杂质元素		Pb	Zn	As	Sb	Bi	Ni	
熔炼炉	投入	100	100	100	100	100	100	
	产出	混合物料	29.16	8.88	3.92	10.45	14.34	55.79
		铜铋	34.96	86.57	21.07	81.48	25.95	33.53
		熔炼渣	6.61	1.03	4.68	0.49	10.95	0.23
		锅炉灰	27.82	3.09	5.65	4.31	42.69	0.37
		电尘灰	1.04	0.12	45.31	2.29	2.60	0.15
吹炼炉	投入	99.20	98.45	91.96	91.38	92.16	92.69	
	产出	冷热电铋	0.80	1.55	8.04	8.62	7.84	7.31%
		粗铜	13.69	12.21	87.18	88.79	69.36	66.13%
		吹炼渣	79.61	83.50	10.64	10.58	18.39	33.69%
		锅炉灰	0.45	0.29	0.16	0.13	0.77	0.08%
		电尘灰	6.25	4.00	2.02	0.50	11.48	0.09%
阳极炉	投入	100	100	100	100	100	100	
	产出	粗铜	36.40	95.14	49.75	74.85	90.00	86.73
		阳极铜	63.05	4.84	48.56	25.10	9.78	13.27
		精炼渣	0.55	0.02	1.69	0.05	0.23	0.01

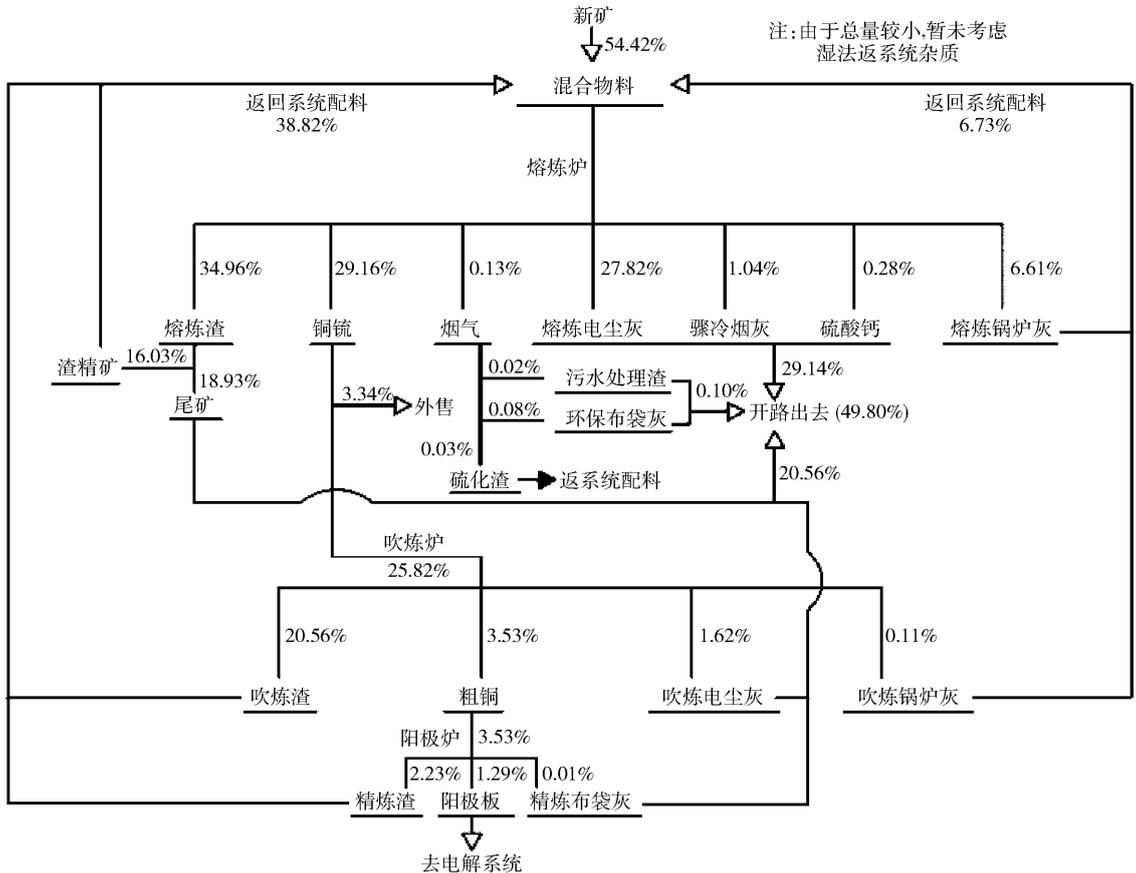
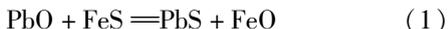


图 1 铅元素在流程中分布走势

Fig. 1 Distribution trend of lead element in the process

气氛强,吹炼烟尘率又低,所以会大量进入渣中,其反应式见式(4)。



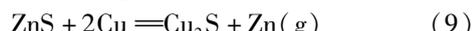
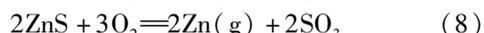
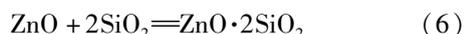
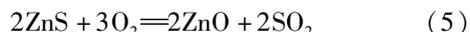
从铅的走势可以看出,虽然“三连炉”系统有较强的铅脱杂能力,但是仍有接近 45% 的铅返回系统中进行再冶炼,另外原料中的含铅量逐年增加,导致系统对铅的脱杂能力已不能满足产品的质量要求。因此,若能把熔炼锅炉灰和吹炼渣开路出系统以外处理,则可减少占入炉混合料中总铅的 49.80% 的铅返回熔炼炉,这对于提高熔炼炉投料量、减少锅炉结焦、提高铜铈和粗铜品质、降低吹炼炉和阳极炉的后续处理成本、提高阳极板和阴极铜质量均有一定的实际意义。

### 3.2 锌的分配与走向

在熔炼过程中 Zn 主要富集于熔炼渣中,占总量

的 86.57%,此外还有部分 Zn 分布于铜铈和电尘灰,分别在总量的 8.88% 和 3.09%;在吹炼过程中,83.50% 的锌进入吹炼渣中,12.21% 和 4.00% 进入粗铜和电尘灰中。锌元素分布具体走势如图 2 所示。

ZnO 容易与 SiO<sub>2</sub> 结合造渣,在高品位铜铈、高氧浓度的熔炼工况下,ZnS 的氧化概率大幅增加,大部分 Zn 进入渣中(反应式见式(5)~(6));同时,锌的蒸气压很大,反应生成的金属 Zn 易挥发进入烟尘中<sup>[9]</sup>(反应式见式(7)~(9))。因此,在高氧浓度、高品位铜铈操作条件下,能够较好地脱去杂质锌。在吹炼过程中,铜铈中的锌被迅速氧化后大量进入渣中,少量进入粗铜和烟尘中。



从锌的走势可以看出,“三连炉”系统有很强

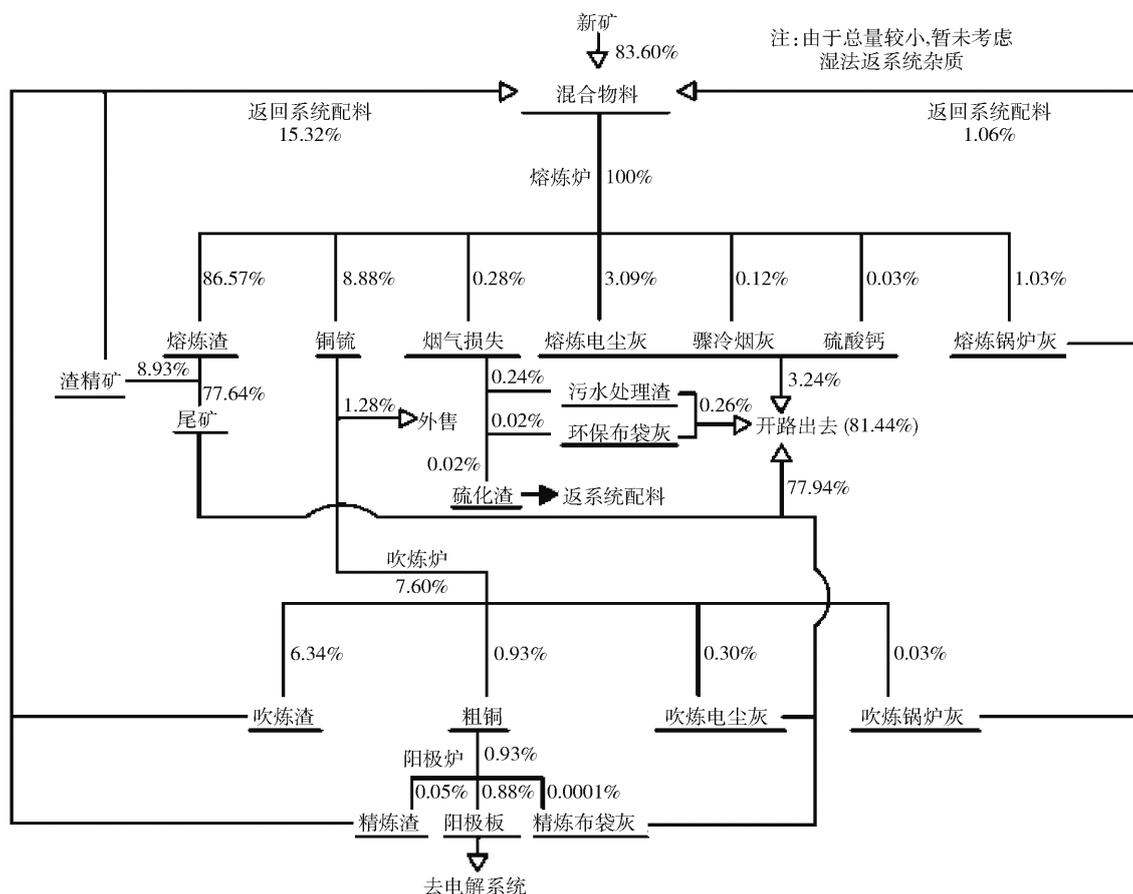


图 2 锌元素在流程中分布走势

Fig. 2 Distribution trend of zinc element in the process

的锌脱杂能力,但仍有接近 16% 的锌返回系统再冶炼。目前,锌在系统中不是制约产品质量的主要因素,但是随着原料中锌含量的增加,需要进一步提高系统中锌的脱除能力,同时回收冶炼渣和烟灰中锌,实现资源化利用。

### 3.3 砷的分配与走向

在熔炼过程中 As 主要富集于硫酸钙和骤冷烟

灰中,占入炉砷总量的 57.90%、3.92%、21.07%、4.68% 和 5.65% 的 As 分布于铜钼、熔炼渣、锅炉灰和电尘灰中,剩余 6.78% 的砷,则主要以硫化砷渣的形式产出并返回熔炼炉。在吹炼过程中,87.18% 的砷进入到粗铜中,10.64% 和 2.02% 的砷进入到渣和烟尘中。砷元素分布具体走势如图 3 所示。

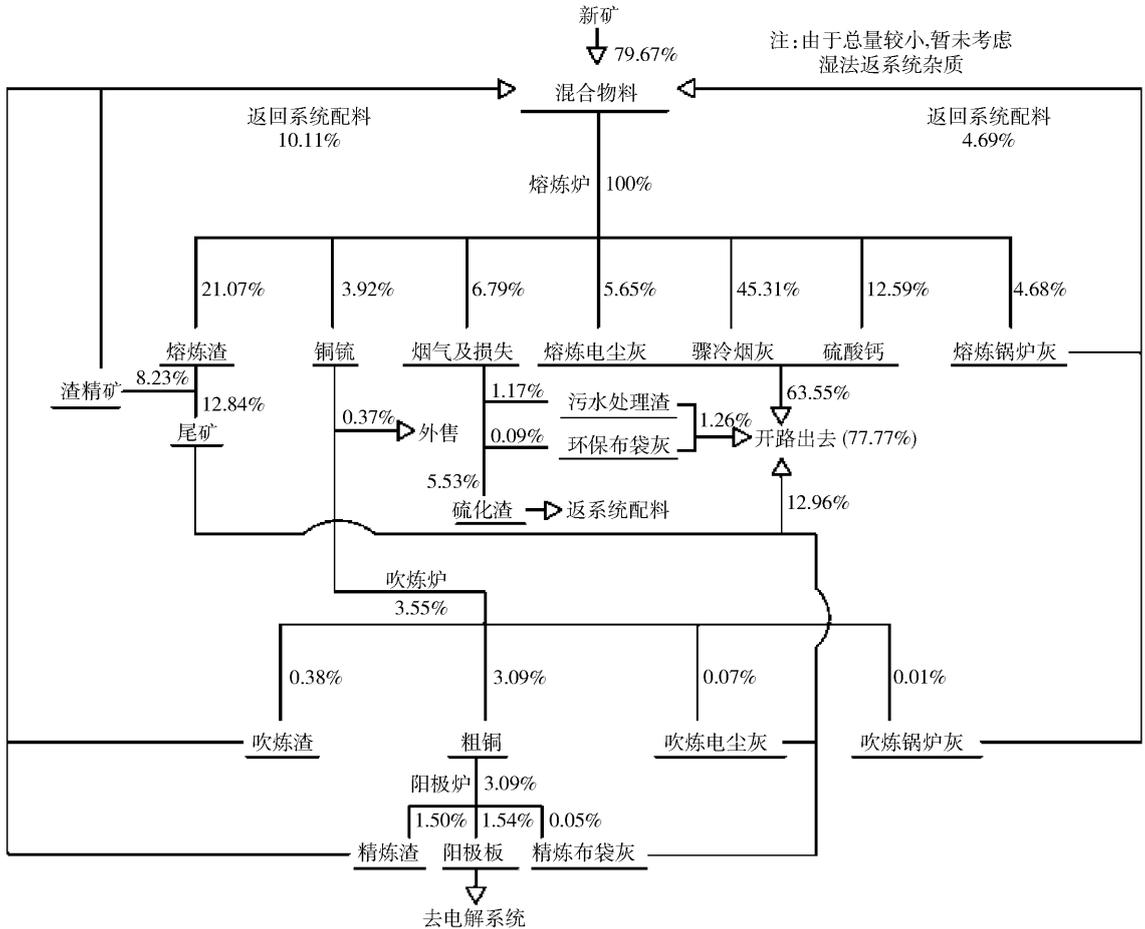
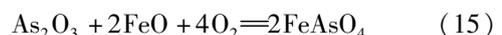
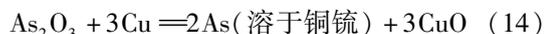
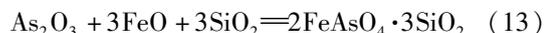
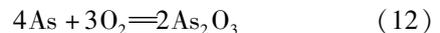
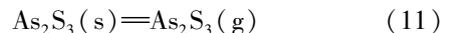


图 3 砷元素在流程中分布走势

Fig. 3 Distribution trend of arsenic element in the process

在富氧底吹熔炼环境下,  $As$ 、 $As_2S_3$  及  $As_2O_3$  均有较高的蒸气压,砷主要以三价态迅速挥发进入烟尘中<sup>[10-11]</sup>,反应式见式(10)~(11);由于底吹熔炼的特性,氧气与铜钼充分接触,阻碍了高价砷氧化物的生成,因此,熔炼渣中的砷主要以五价态形式存在(反应式见式(12)~(13)).在吹炼过程中,因氧化气氛强、铜钼及粗铜品位高,砷主要溶解于粗铜中,少部分以偏砷酸盐和砷酸盐的形式进入渣中(反应式见式(14)~(15)).



在提高熔炼炉氧浓度和铜钼品位过程中,进入铜钼和阳极炉粗铜中的砷含量会进一步提高。因此,阳极炉需要进行 2 遍造渣工艺,既造碱渣脱砷和锑,又造酸渣脱铅,这样会导致耐火砖化学腐蚀严重,容易造成炉体发红、烧穿的工艺事故,同时耐火

砖的寿命半年就需要翻修 1 次,大幅度提高了生产成本。因此,如何在现有的工艺条件下,提高系统脱砷的能力是亟需解决的问题。

### 3.4 铋的分配与走向

在熔炼过程中 Sb 主要富集于熔炼渣中,占总量

的 81.48%,此外还有部分 Sb 分布于铜铈和电尘灰,分别占总量的 10.45% 及 4.31%;在吹炼过程中,88.79% 的铋进入粗铜中,10.58% 进入吹炼渣。铋元素分布具体走势如图 4 所示。

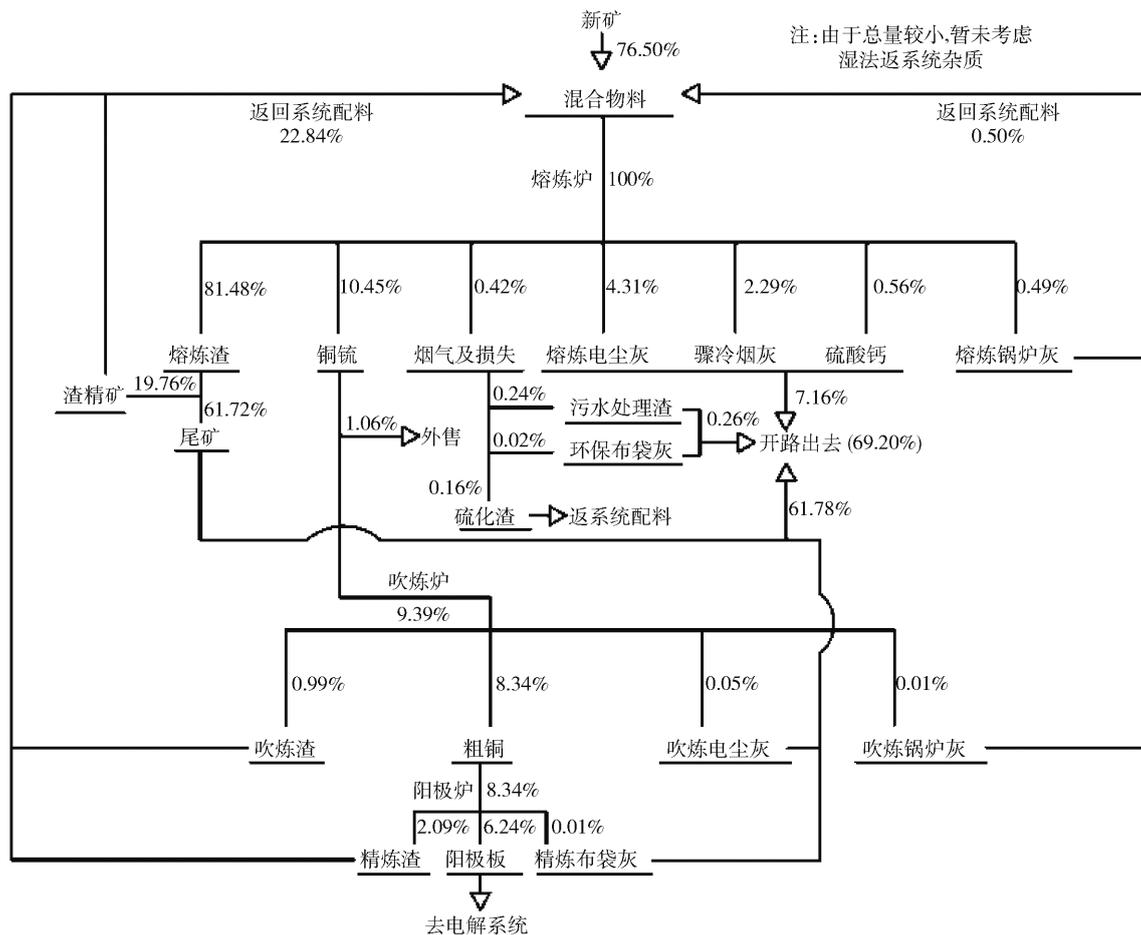


图 4 铋元素在流程中分布走势

Fig. 4 Distribution trend of antimony element in the process

铜精矿中的铋主要以辉铋矿 ( $Sb_2S_3$ ) 和复杂的含铋硫化矿形式存在,在熔炼过程中易分解为  $Sb_2S_3$ , 同时部分被氧化成  $Sb_2O_3$  (反应式见式(16)), 二者均有一定的蒸气压, 部分可挥发直接进入烟尘中<sup>[12]</sup>。底吹熔炼工艺中,富氧浓度高达 73% 以上, 进入烟尘中的 Sb 会减少, 而进入渣中的  $Sb_2O_3$  会迅速增加, 部分未被氧化的  $Sb_2S_3$  进入铜铈中。在吹炼过程中,由于氧浓度不高,进入渣中的铋很少,大部分进入粗铜和烟气中。



因此,吹炼炉对铋的去除效率较低,最有效的除铋工序是熔炼炉,通过提高氧浓度和铜铈品位,使更

多的铋氧化进入熔炼渣中,铜铈含铋会更低,然而,随着原料中铋含量的增加,熔炼炉脱铋能力有限。因此,阳极炉需要进一步提高脱铋的能力,协同脱除砷。因此,如何在现有的工艺条件下提高系统脱铋的能力是亟需解决的问题。

### 3.5 铋的分配与走向

在熔炼过程中,铋 (Bi) 主要富集于电尘灰中, 占总量的 42.69%。此外,还有部分铋分布于铜铈、熔炼渣和锅炉灰中,分别占总量的 14.34%、25.95% 和 10.95%。在吹炼中 69.36% 的铋进入粗铜中,11.48% 和 18.39% 的铋分别进入电尘灰及渣中。铋元素分布具体走势如图 5 所示。

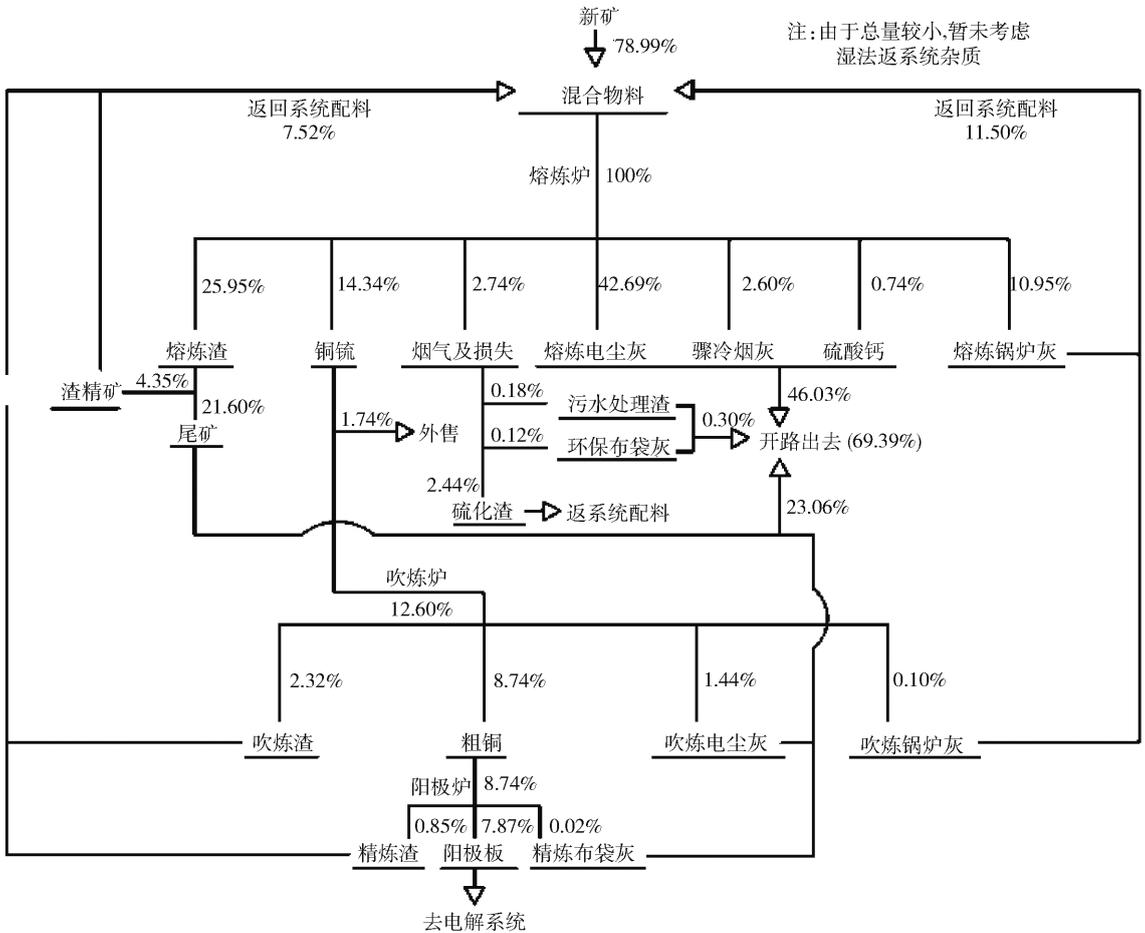
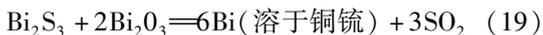
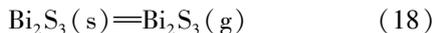
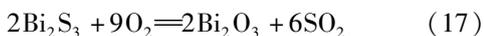


图5 铋元素在流程中分布走势

Fig.5 Distribution trend of bismuth element in the process

在熔炼过程中, Bi 与 Sb 的性质相似, 铋的氧化物进入渣相, 部分未被氧化的  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  进入到铜铈中。Bi 及其硫化物及氧化物的饱和蒸气压要高于锑, 尤其是  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  有较大的蒸气压, 在熔炼工况下会更多地进入烟尘中, 反应式见式 (17) ~ (18)。此外, 由于铋的硫化物和氧化物发生交互反应, 产生的金属 Bi 会溶解于铜铈中 (反应式见式 (19)), 随着富氧浓度的增大, 该反应速度提高, 进而导致铜铈中 Bi 的含量增加。在吹炼过程中, Bi 和 Sb 的分布基本相似, 受其饱和蒸气压高于 Sb 的影响, 导致进入电尘灰中的 Bi 比 Sb 相对较高。



因此, 提高熔炼炉富氧浓度, 对铋的脱除不利。生产中需要根据物料锑、铋、铅含量的不同, 对应采用不同的熔炼炉富氧浓度; 原料采购时, 铅和锑含

量高, 铋就要低一些, 反之亦然。

### 3.6 镍的分配与走向

在熔炼中 Ni 主要富集于铜铈中, 占总量的 55.79%, 此外还有 33.53% 和 9.89% 的 Ni 分布于熔炼渣和烟气中。在吹炼过程中, 66.13% 的镍进入粗铜中, 还有 33.69% 的镍进入渣中。镍元素分布具体走势如图 6 所示。

Ni 的性质与 Cu 较为接近, 当熔体中存在 FeS 时, NiO 易被 FeS 硫化成 NiS、 $\text{Ni}_2\text{S}_3$ , 反应式见式 (20) ~ (21)。



但在高氧浓度、高品位铜铈的工况条件下, 造铈过程中 FeS 浓度降到很低, NiS 和  $\text{Ni}_2\text{S}_3$  更多地被氧化从而进入渣中, 同时镍的硫化物和氧化物有可能发生交互反应, 反应生成的金属 Ni 又会溶解于铜铈中<sup>[13]</sup>。因此, Ni 主要富集在铜铈中, 其余进入渣

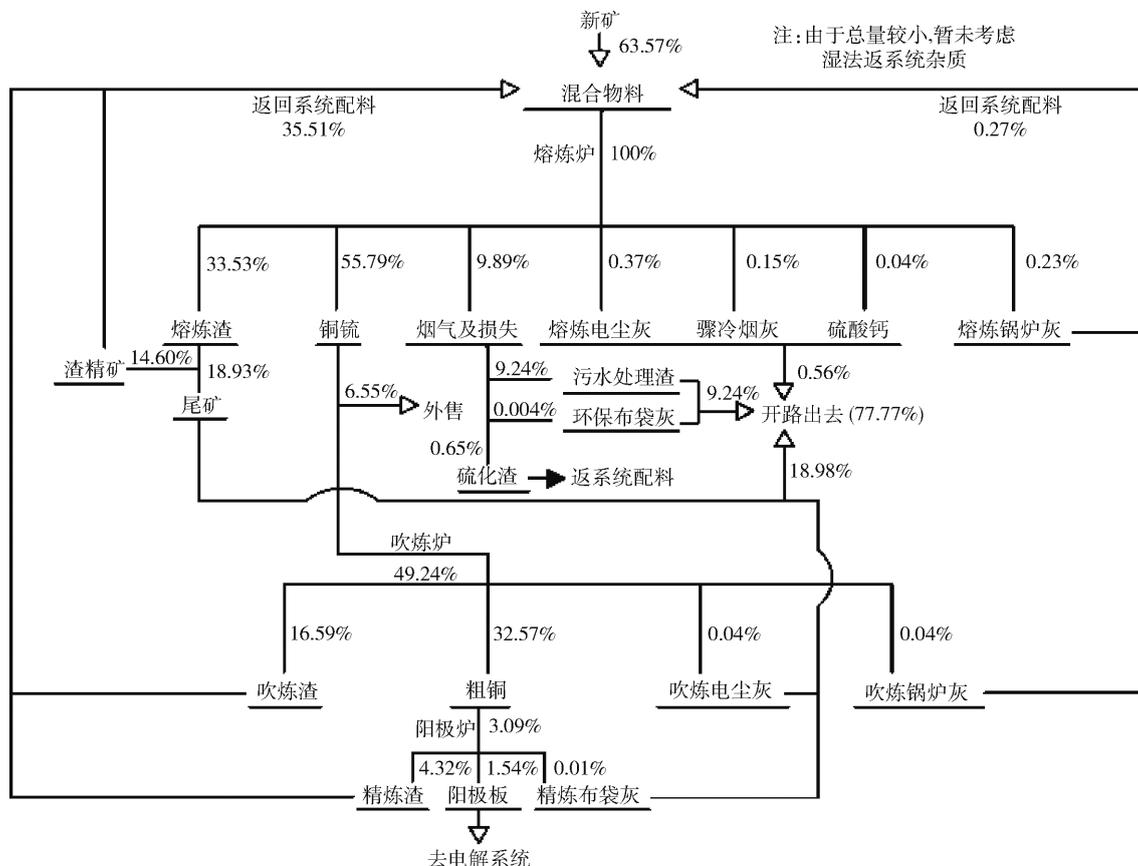


图 6 镍元素在流程中分布走势

Fig. 6 Distribution trend of nickel element in the process

中,进入铜锍中的镍在吹炼过程中与在熔炼过程中的行为相似,大量进入粗铜,粗铜中的镍氧化进入渣中。

生产中希望更多的镍进入阳极板<sup>[14]</sup>,但从镍在熔炼渣和吹炼渣中的分布比例看,熔炼炉氧浓度对镍的分布影响不是很大,因此,在处理低镍原料,镍对冶炼过程和阳极板质量的影响较小。

#### 4 应用措施

1) 强化氧化环境:加速铅、锌等杂质元素的金属硫化物向金属氧化物的转化。例如:①通过向熔池底部喷射高浓度氧气,显著提升熔体氧势,进一步增强氧化反应;②优化氧枪分布,提高底吹气体与熔池搅拌能力,增强熔池动力学条件,加速金属硫化物与氧气的接触反应,缩短氧化时间。

2) 优化造渣条件:促进金属氧化物与二氧化硅结合。例如:①调控炉渣碱度与 SiO<sub>2</sub> 含量,通过调整炉渣中 Fe/SiO<sub>2</sub> 比例(通常控制在 1.4 ~ 1.6),可

降低渣相黏度并提升金属氧化物造渣效率;②引入复合造渣剂,添加 CaO、硼砂、碳酸钠等辅助造渣剂,进一步降低渣相熔点,促进渣-锍分离。

3) 铜锍品位控制:根据生产实践中铜锍品位的变化,砷、锑、铅在不同铜锍品位中的含量也随之发生变化。当铅含量较低时,铜锍品位较高,而砷较高。为利用此特点,在高砷低铅矿时控制较低的铜锍品位并减少铜锍中砷的含量,在低砷高铅矿时控制较高的铜锍品位并降低铜锍品位中的铅含量。

4) 中间物料开路处理:将吹炼渣、精炼渣、烟灰等含贵金属及杂质元素的中间物料,不将其返回系统进行再处理,可拟建冶金炉进行单独处理,减小系统的杂质循环,又释放了系统的产能。

#### 5 结论

1) 入炉混合料中,返回配料的铅占到总铅的 45.57%,主要集中在渣精矿和吹炼渣中;返回配料

中的镍占到总镍的 36.43%,也主要集中在渣精矿和吹炼渣中;其余杂质元素返回配料的比例不是很大;铋主要富集在熔炼锅炉灰中返回系统配料,锑主要富集在渣精矿中返回系统配料,这 2 种杂质元素在阳极板中的含量仅次于镍。

2) 配矿时要根据新矿成分,合理配入渣精矿和熔炼锅炉灰,调控产品中杂质含量;在控制入炉原料铋含量的前提下,熔炼炉尽可能选择高富氧浓度、高品位铜铈工艺,加强对铅、锑的氧化和造渣脱除,渣选矿的铅、锑回收率也会随着降低。

3) 渣选矿工艺要研究对砷、锑、铋、铅的抑制办法,尽量减少杂质元素返回系统;技改工作要关注锅炉灰、吹炼渣的开路处理,减少各种杂质的返炉量,以提高熔炼炉投料量、减少锅炉结焦影响、降低铜铈后续处理成本和提高阳极板质量。

#### [参考文献]

- [1] 曲胜利,董准勤,陈涛. 富氧底吹熔炼处理复杂铜精矿过程中杂质元素的分布与走向[J]. 中国有色冶金, 2016,45(3):22-24.
- [2] 何秀梅. 铜冶炼过程中杂质元素走向探析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(2):55-57.
- [3] 唐都作,顾鹤林,宋兴诚. 云南锡业铜熔炼系统杂质元素走向研究[J]. 中国有色冶金, 2015,44(3):4-7.

- [4] 王治永. 富氧侧吹铜冶炼冰铜品位变化对杂质走向的影响[J]. 有色矿冶, 2018,34(2):32-34.
- [5] 陈青. 铜冶炼富氧底吹炉电收尘器的设计与运行[J]. 硫酸工业, 2016(3):23-26.
- [6] 全瑞玺. 离子液脱硫工艺在铜冶炼烟气脱硫中的应用实践[J]. 硫酸工业, 2023(3):46-49.
- [7] 张喆秋,袁露成,黄林青,等. 砷、锑、铋在铜冶炼过程中的分布及其在冶炼副产物中的回收综述[J]. 有色金属科学与工程, 2019,10(1):13-19,27.
- [8] 杨应宝,戚永辉,余小吕,等. 铜底吹熔炼过程中 Pb、Zn、As 分布影响机理分析[J]. 中国有色冶金, 2024,53(3):19-29.
- [9] 王治永. 富氧侧吹铜冶炼冰铜品位变化对杂质走向的影响[J]. 有色矿冶, 2018,34(2):32-34.
- [10] 王舒敏. 金隆铜业铜冶炼过程中砷的走向调查[J]. 有色金属工程, 2016,6(3):83-86.
- [11] 马永明,邱建文,连国旺. 铜冶炼过程中砷元素的走向及分布规律[J]. 世界有色金属, 2019(18):19,21.
- [12] 徐远,葱军,张宇云,等. 铜冶炼火法过程中锑的分布与走向研究[J]. 云南冶金, 2024,53(3):117-121.
- [13] 段兴文. 镍在铜火法冶炼过程中的行为及走向的探讨[J]. 金川科技, 2005(2):32-35.
- [14] 鲁根启. 云南铜业股份有限公司现流程元素分布调查[D]. 昆明:昆明理工大学, 2000.

## Analysis of impurity element trends in the “triple furnace” system of oxygen enriched bottom blown copper smelting

REN Yanhui, DONG Zhipeng, HE Liming, LI Ming

(Guotou Jincheng Metallurgy Co., Ltd., Lingbao 472000, China)

**Abstract:** Based on the production process status and time schedule, a one-year production data tracking record will be conducted on the “triple furnace” system using oxygen-enriched bottom-blowing self heating melting. Through statistical analysis of the data, the distribution trends of impurity elements Pb, Zn, As, Sb, Bi, and Ni will be explored. The results showed that in the furnace feed mixture, the lead returned accounted for 45.57% of the total lead, mainly concentrated in the slag concentrate and blowing slag; the nickel returned accounted for 36.43% of the total nickel, also mainly concentrated in the slag concentrate and blowing slag; percentages of the rest of the impurity elements returned were little; bismuth was mainly enriched in the melting boiler ash returned to the system, antimony was mainly enriched in the slag concentrate returned to the system, and the content of the two impurity elements was only second to nickel in the anode plate. The above provides a reference basis for the subsequent optimization of ore allocation and slag beneficiation process.

**Keywords:** oxygen-rich bottom-blowing; triple furnace; impurity elements; trend analysis; copper smelting; As; Sb; Bi; Ni

