

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.05.009

脱铜阳极泥熔炼高铅渣熔点“测不准”问题分析

胡爱琳, 赵俊学, 辛鑫, 王泽, 康毅, 张笑天, 崔雅茹, 李彬

(西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

摘要: 脱铜阳极泥熔炼高铅渣在熔点测定过程中由于挥发会导致测定结果偏离“真值”(“测不准”)。以卡尔多炉工艺熔炼脱铜阳极泥的高铅渣为研究对象, 尝试通过研究挥发机制预测升温过程的适时炉渣组成, 进一步以适时炉渣组成与熔点测定值对应, 以消除挥发的影响。采用 FactSage 7.1 软件计算熔炼渣的熔点和挥发反应的 ΔG , 用半球法测定熔化温度, 利用 TG 热重分析仪测定渣样的失重变化规律。结果表明, 高温下含铅渣挥发主要是 PbO 以及少量的 Bi_2O_3 、 As_4O_6 、 TeO_2 、 SeO_2 和 Sb_4O_6 挥发导致的, 在 950~1 200 °C 高温段挥发最明显, 当 PbO 含量分别为 14.52%、25.07%、28.75% 和 41.25% 时, 铅渣挥发率分别为 35.25%、49.48%、55.92% 和 58.39%。FactSage 计算熔点值比半球点及流动温度实测值偏高。对脱铜阳极泥熔炼高铅渣所测半球点温度和流动温度与适时炉渣成分(基于原始炉渣成分及挥发失重的测算)对应, 得到更接近“真值”的新成分—熔点的对应关系。

关键词: 脱铜阳极泥; 熔炼高铅渣; 挥发; 熔点; 测不准

中图分类号: TF812

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2022)05-0067-08

Analysis on the Melting Point Measurement Uncertainty of High-Lead Slag in Copper Removal Anode Slime Smelting

HU Ailin, ZHAO Junxue, XIN Xin, WANG Ze, KANG Yi, ZHANG Xiaotian, CUI Yaru, LI Bin

(School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In the process of melting point measurement of high-lead slag in copper removal anode slime smelting, the results may deviate from the "true value" due to evaporation (referred to as "uncertainty"). In this article, high-lead slag produced by the Kaldor furnace process for copper removal anode slime smelting was taken as object, a method was suggested to predict the timely slag composition during the heating process based on evaporation mechanism, and to use the timely slag composition to correspond to the measured melting point to eliminate the effect of evaporation. The FactSage 7.1 software was used to calculate the melting point of the smelting slag and the ΔG of the evaporation reaction, the melting points were measured by the hemisphere method, and the weight loss of the slag samples were measured by TG. The results show that the weight loss of lead-containing slag at high temperature is mainly caused by the evaporation of PbO and a small amount of Bi_2O_3 , As_4O_6 , TeO_2 , SeO_2 and Sb_4O_6 . The evaporation is obvious at the high temperature of 950—1 200 °C, when the PbO content is 14.52%, 25.07%, 28.75% and 41.25% respectively, the slag evaporation rates can reach 35.25%, 49.48%, 55.92% and 58.39% respectively. The melting point calculated by FactSage is higher than the measured hemispherical point and flow temperature. The measured hemispheric point temperature and flow temperature of the high-lead slag smelted from

收稿日期: 2021-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674185, 51674186)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51674185, 51674186)

作者简介: 胡爱琳(1994—), 女, 硕士研究生, 冶金工程专业。E-mail: 1162463002@qq.com

引用格式: 胡爱琳, 赵俊学, 辛鑫, 等. 脱铜阳极泥熔炼高铅渣熔点“测不准”问题分析[J]. 有色金属工程, 2022, 12(5): 67-74.

HU Ailin, ZHAO Junxue, XIN Xin, et al. Analysis on the Melting Point Measurement Uncertainty of High-Lead Slag in Copper Removal Anode Slime Smelting[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(5): 67-74.

copper removal anode slime correspond to the timely slag composition (based on the calculation of the original slag composition and evaporation weight loss), and a new composition-melting point relationship closer to the “true value” is obtained.

Key words: copper removal anode slime; high-lead smelting slag; evaporation; melting point; measurement uncertainty

铜阳极泥是铜电解精炼的副产品^[1],其产出量通常约为阳极板的0.2%~1.0%。铜阳极泥的成分和物相主要受阳极板的成分、电解工艺条件和后期储存条件的影响。铜阳极泥中含有价元素,例如Pb、Se、Ag、Te、As、Au、Cu和铂族元素等,并且是提取稀有贵金属的主要原料之一^[2-4]。国内外处理铜阳极泥的方法有很多,应用较为广泛的工艺有传统火法工艺、卡尔多炉工艺、选冶联合工艺、全湿法工艺、住友法、“INER”法等。

卡尔多炉工艺是将脱铜阳极泥经卡尔多炉熔炼得到贵铅合金,贵铅合金再经吹炼脱除铅铋后得到富含贵金属的多尔合金。熔炼及吹炼过程产出的渣Pb、Se、Te、As等含量比较高,其中Pb含量可达9.79%~33.25%。崔雅茹等^[5]以PbO-FeO_x-CaO-SiO₂-ZnO为基本渣系,探讨了不同PbO含量时的熔渣挥发动力学特性随温度的变化,发现含铅渣的挥发率随温度的升高而增加,随渣中铅含量的升高而增加。NAKADA等^[6]模拟研究了城市生活垃圾熔化过程中铅的挥发行为,发现铅的挥发会对炉渣黏度产生影响。WANG等^[7]在研究含铅球团的挥发动力学时发现,冶炼温度显著影响铅的挥发速率,煤粉的粒度和球团中碳的含量对铅挥发率也有一定影响。SHIMA等^[8]研究了FeO对CaO-SiO₂-Al₂O₃-FeO熔渣中PbO挥发的影响,发现PbO的挥发速率主要受制于熔渣中PbO的含量。YOO等^[9]通过研究电弧炉灰中铅的挥发动力学发现,高温下电弧炉灰中铅存在明显挥发,挥发反应由固-固扩散控制。MATSUDA等^[10]对在不同的N₂-CO-CO₂、N₂-HCl和N₂-H₂S混合气体气氛下CaO-SiO₂-Al₂O₃熔渣中铅的挥发性能进行了研究,发现在各种气氛下都存在铅的挥发行为。这些研究表明铅的挥发行为大量存在于冶金生产过程

中。但在对直接炼铅的含铅渣进行高温物化性能测定的过程中,氧化铅等物质会挥发引起炉渣成分中铅含量和物相组成发生变化,使测得的物化性能发生偏差(本文称之为“测不准”)。而目前对脱铜阳极泥熔炼渣的研究主要集中于工艺调控^[11-12],缺乏对熔炼过程中组分的挥发(包括反应及挥发)和迁移对炉渣性能的影响评价,因此该类炉渣的性能参数是缺失或失准的,如熔点、黏度等。基于此,本文对脱铜阳极泥卡尔多炉冶炼炉渣“测不准”问题进行研究,以评价炉渣的挥发特性对熔点测定结果的影响,为获得更加准确的熔点值及对应的成分修正提供参考。

1 试验

“测不准”问题的核心原因是测定过程挥发造成了炉渣组成变化。为此,提出以适时成分与熔点测定结果对应的修正方案,即在测定熔点的同时,检测或推算(基于挥发机制)对应温度的炉渣成分变化,以适时成分来对应性能的测定结果(称为“真值”)。为了更系统地分析脱铜阳极泥熔炼过程中炉渣的挥发行为,通过现场调研选取了脱铜阳极泥熔炼过程中产出的熔炼渣其典型成分(见表1),通过半球点法测定渣样的实际熔点值,利用Factsage软件计算炉渣在不同温度下的挥发反应,利用TG测定对应熔点值时的挥发量,进而测算熔点对应的适时炉渣组成。

1.1 试验原料

试验用熔炼渣为脱铜阳极泥熔炼过程中产出的熔炼渣,将渣样品进行破碎至6~10 mm后进行缩分、磨碎,选取磨碎粒度为-74 μm的渣为原料。采用X射线荧光光谱仪(Thermo Fisher 3600,美国赛默飞世尔科技公司)测定样品成分,结果见表1。

表1 脱铜阳极泥熔炼高铅渣的主要成分

Table 1 Main components of high lead slag from copper removal anode slime smelting

Component	PbO	Na ₂ O	BaSO ₄	As ₂ O ₃	TeO ₂	SeO ₂	SiO ₂	Bi ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃
1#	14.52	39.26	52.14	7.63	1.39	0.31	0.80	1.20	0.65
2#	25.07	29.93	40.29	6.45	1.17	0.31	2.79	4.84	2.98
3#	28.75	29.98	30.64	6.85	1.26	0.35	3.25	6.05	3.39
4#	41.25	11.19	17.54	8.69	0.20	0.49	8.16	12.02	6.48

/%

1.2 试验步骤

1) 利用 FactSage 7.1 热力学软件计算脱铜阳极泥高铅渣在熔炼过程中, 在 600~1 200 °C 所挥发的物质和炉渣失重情况。

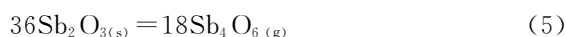
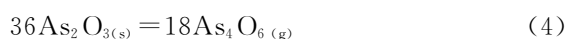
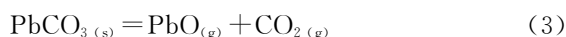
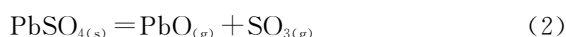
2) 将破碎后的样品制备成直径为 3 mm×3 mm 的圆柱体试样, 利用东北大学研发的 RDS-05 全自动炉渣熔点熔速测定仪测定样品的半球点温度和流动温度。测定过程为: 将样品置于刚玉垫片上, 入炉升温, 设置升温速率为 10 °C/min, 在温度达到 600 °C 时, 调节高度框, 使高度框与渣样高度正好重合, 当高度变为 50% 时, 记录的温度即半球点温度, 当高度为 25% 时的温度记为流动温度。

3) 采用同步分析仪 (Setsysevo, 法国 Setaram 公司) 进行炉渣 TG 曲线的测定, 记录炉渣在加热过程中失重变化情况, 进而分析炉渣在高温或保温过程中的挥发特性。测试过程中, 采用高纯氩气作为保护气体和吹扫气体, 流量为 50 mL/min, 以 10 °C/min 的升温速率升至 1 200 °C, 保温 1 h。

2 结果与讨论

2.1 熔炼渣挥发反应的热力学计算

脱铜阳极泥熔炼高铅渣在熔炼过程中可能所发生的主要挥发反应有:



利用 FactSage 计算反应式 (1)~(8) 的 ΔG° , 结果如图 1 所示。可以看出, 不同组元挥发起始温度的高低排序为: $T_{\text{SeO}_2} < T_{\text{As}_2\text{O}_3} < T_{\text{Sb}_2\text{O}_3} < T_{\text{PbCO}_3} < T_{\text{TeO}_2} < T_{\text{PbO}} < T_{\text{PbSO}_4} < T_{\text{Bi}_2\text{O}_3}$, 表明在升温过程中 SeO_2 最容易挥发, 挥发起始温度在 300 °C 附近, Bi_2O_3 最难挥发, 挥发起始温度在 1 800 °C 附近。在实际冶炼过程中, 化合物的活度低使反应难度增加, 实际的挥发温度可能会比计算的温度还要高, 但是通过计算可以对不同组元挥发顺序进行一个基本的判定, 具有一定的指导价值。

利用 FactSage 中 Equilib 模块计算了 1#~4# 在 600~1 200 °C 时, 对应温度下易挥发组元的挥发

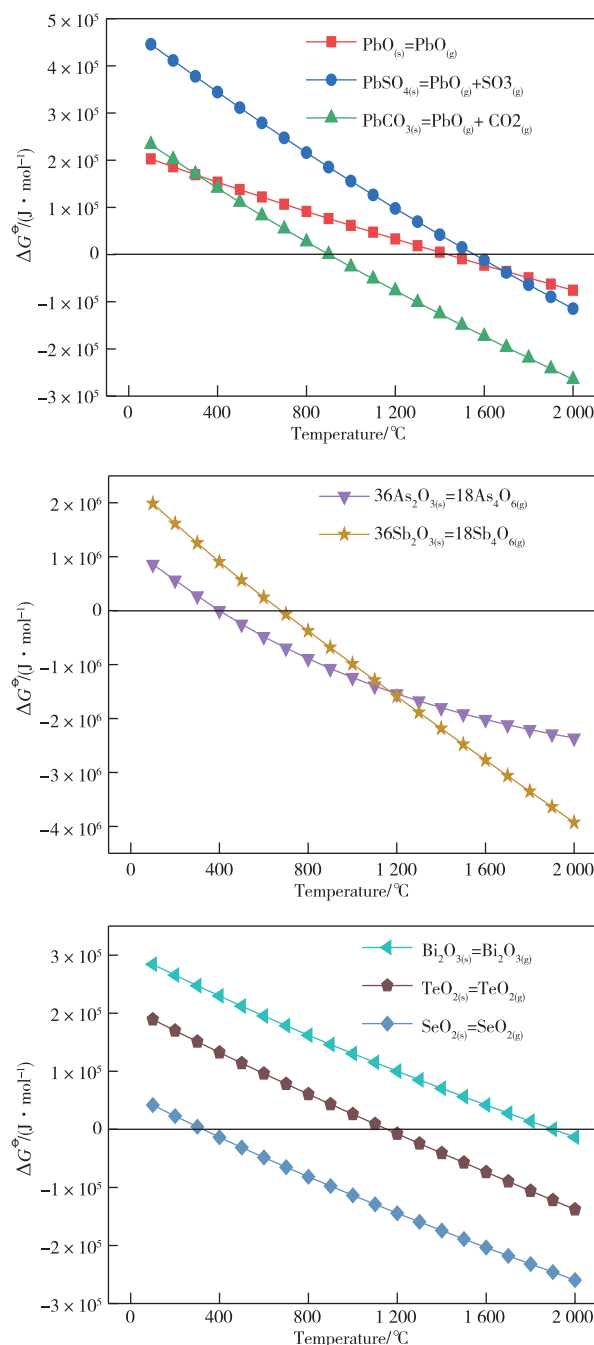


图 1 熔炼渣挥发反应的标准吉布斯自由能与温度关系图

Fig. 1 The relationship between standard Gibbs free energy and temperature of smelting slag volatilization reactions

率和渣的失重率, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, PbO 在 600~800 °C 时挥发量很少, 当温度升至 900 °C 时, PbO 开始剧烈挥发, 且 PbO 可挥发量的变化趋势与炉渣失重的一样, 可以认为 PbO 的挥发决定着炉渣挥发程度的大小。 As_4O_6 随着温度的升高存在少量的挥发, TeO_2 、 SeO_2 和 Sb_4O_6 从 600 °C 开始存在微量的挥发并且随着温度的升高挥发量基本不发生改变。 Bi_2O_3 在 600~800 °C 时基本不会发

生挥发,当温度升至 900 ℃ 时, Bi_2O_3 开始挥发,到 1 000 ℃ 时保持稳定。综合来看,在熔点测定温度

区间,主要发生的是 PbO 的挥发,对其他挥发物的影响较小。

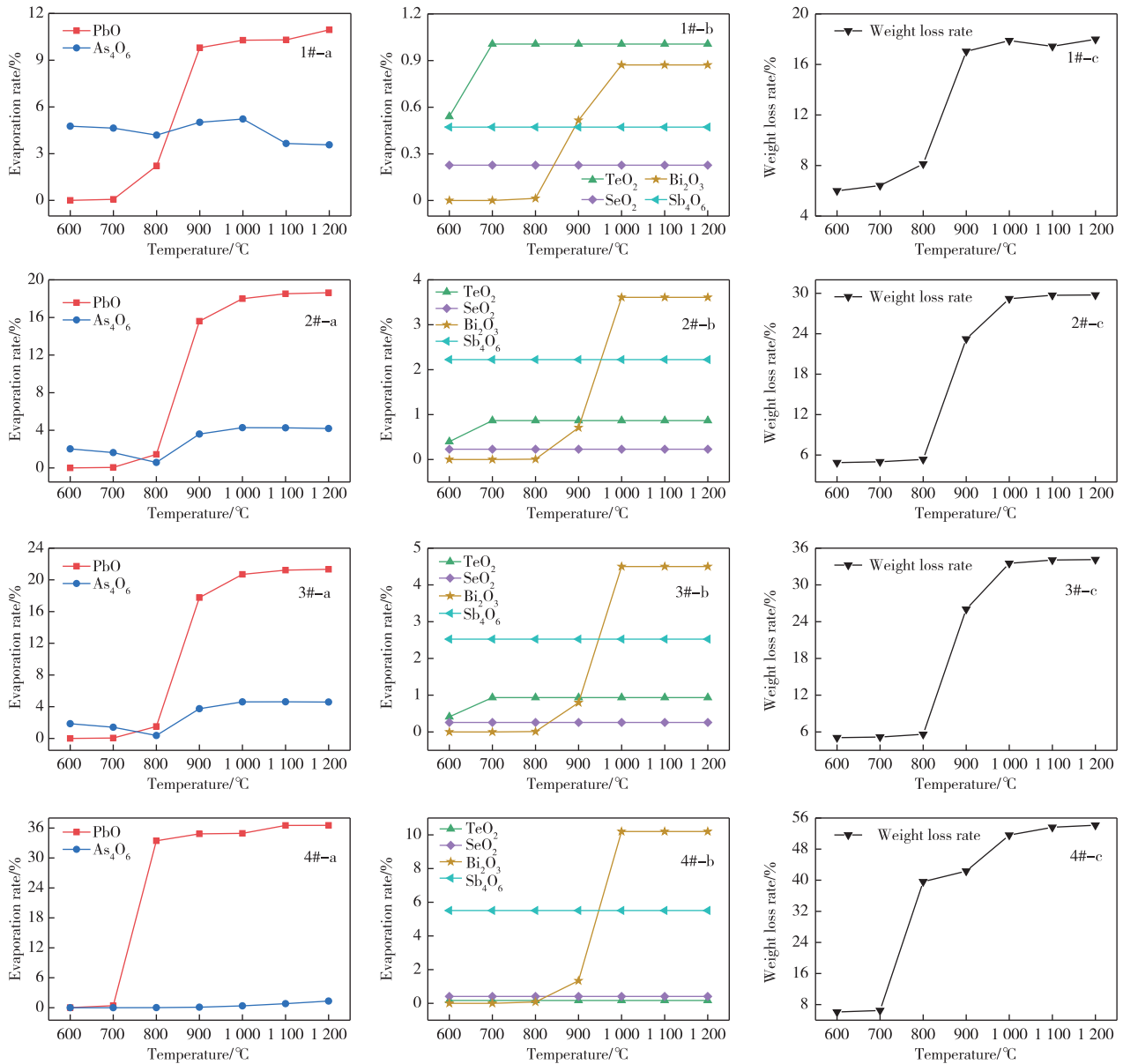


图2 理论计算1#~4#高铅渣在600~1 200 ℃下易挥发组元的挥发率和渣的失重率

Fig. 2 Theoretical calculation of the evaporation rates of the volatile components and the weight loss rate of 1#-4# high-lead slag at 600-1 200 °C

2.2 熔点变化分析

表2给出了典型炉渣的半球点温度和流动温度的测定结果。根据对测定样品前后的质量变化可以计算出,在半球点温度和流动温度测定过程中,铅渣出现了明显的失重现象,且随着渣中铅含量的提高,炉渣的失重率增大。其中,挥发量最少的1#在半球点温度时的失重率为0.54%,在流动温度时的失重率为1.08%(PbO 含量为14.52%),而挥发量最多的4#在半球点温度时的失重率为4.16%,在流

动温度时的失重率为10.47%(PbO 含量为41.25%)。

利用FactSage热力学软件计算炉渣的理论熔点值和半球法测定炉渣的半球点温度和流动温度,并绘制出炉渣的理论熔点值与半球点温度和流动温度的对比图,如图3所示。从图3可以发现,虽然炉渣的半球点温度、流动温度与理论熔点值变化趋势相同,但两组数据之间存在很大的差距,流动温度与理论计算值相差10~137 ℃。数据之间存在较大差

表 2 半球点温度、流动温度测定结果及失重情况

Table 2 Hemispheric point temperature, flow temperature measurement results and weight loss

No.	PbO content/%	Hemispheric point temperature/℃	Weight loss rate/%	Flow temperature/℃	Weight loss rate/%
1 #	14.52	855	0.54	950	1.08
2 #	25.07	936	1.27	1069	4.47
3 #	28.75	933	1.81	1076	5.62
4 #	41.25	994	4.16	1135	10.47

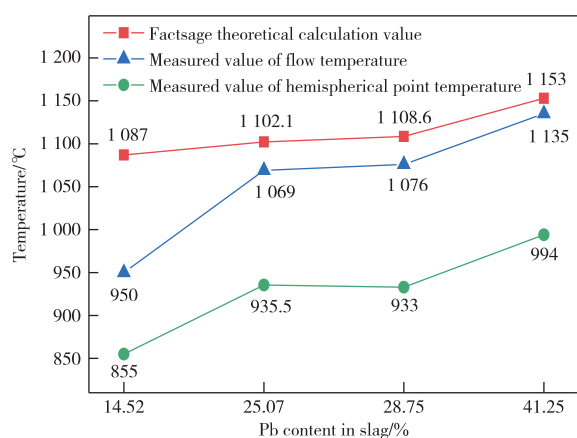


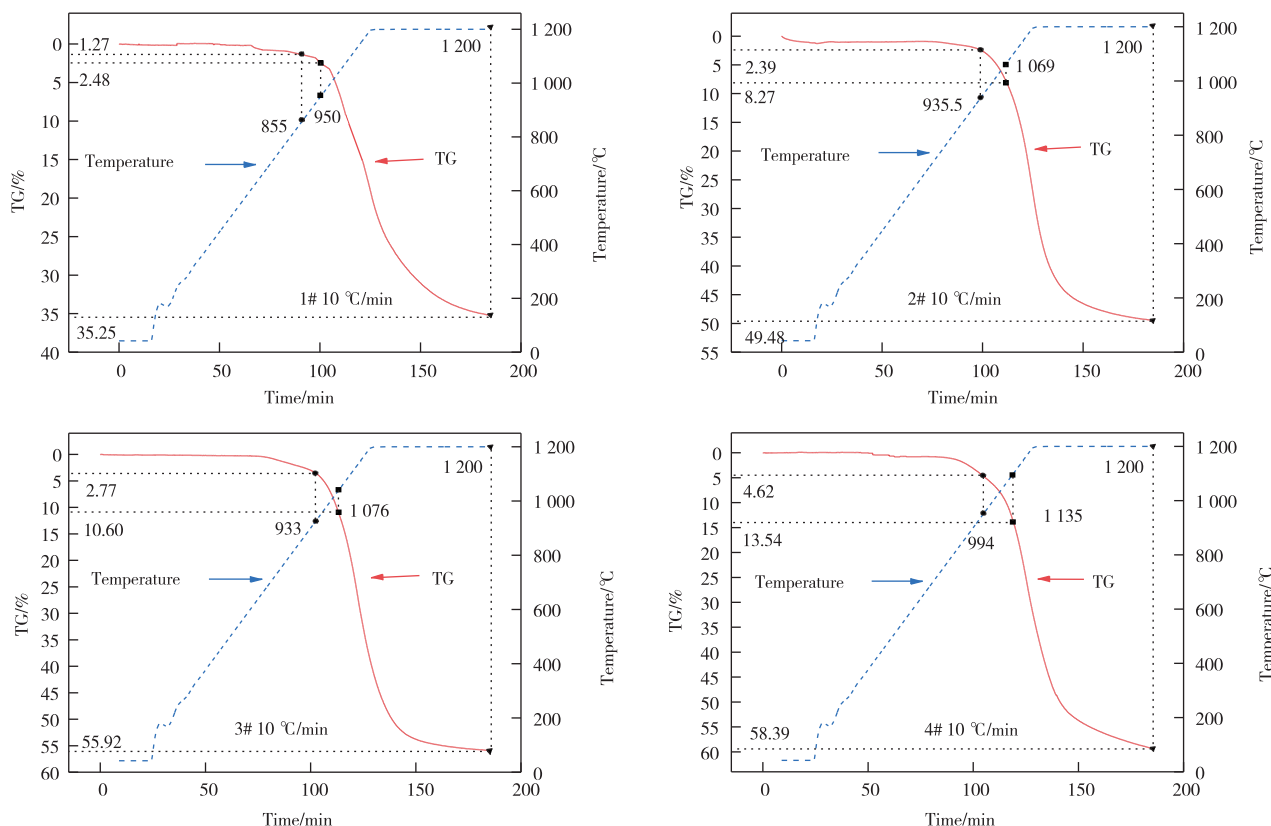
图 3 高铅渣半球点温度、流动温度与 FactSage 理论熔点值之间的对比

Fig. 3 Comparison between hemispheric point temperature, flow temperature and Factsage theoretical melting point of high-lead slag

距的原因可能是:FactSage 理论计算结果是基于体系固相消失,即全熔的温度,与半球点法测定的流动温度基本对应。从图 3 还可以看出,渣中 PbO 含量越多,渣的熔点越高,而在实际熔点测定过程中, PbO 存在挥发的现象会使测定的结果比 FactSage 理论计算结果偏低。并且还可以看出渣中 PbO 含量越多,所测得的流动温度实测值与理论熔点值偏差越小。因此,在实际测定脱铜阳极泥熔炼高铅渣熔点过程中,应该考虑 PbO 和其他物质挥发对熔点产生偏差的影响。

2.3 试样加热过程中温度对高铅渣挥发量的影响

为了进一步验证脱铜阳极泥熔炼高铅渣在高温过程中挥发的现象,选取 1 #、2 #、3 #、4 # 不同 PbO 含量的高铅渣进行热重-差热分析,不同炉渣组分的热重曲线(TG 曲线)如图 4 所示。可以看出,



1 # PbO=14.52%, 2 # PbO=25.07%, 3 # PbO=28.75%, 4 # PbO=41.25%

图 4 不同 PbO 含量熔炼渣的 TG 曲线

Fig. 4 TG curves of smelting slag with different PbO content

从室温升温至 1 200 ℃时,不同 PbO 含量的熔炼渣均出现了明显的失重。首先,从室温升温至半球点温度时存在少量的失重,1#~4# 所对应的半球点温度 855、935.5、933、994 ℃时的失重量在 1.27%~4.62%;其次,从半球点温度升温至流动温度时开始大量失重,1#~4# 所对应的流动温度 950、1 069、1 076、1 135 ℃时的失重量在 2.48%~13.54%;最后,从流动温度至 1 200 ℃,随着温度的升高,失重幅度快速增大。在 1 200 ℃,当 PbO 含量分别为 14.52%、25.07%、28.75% 和 41.25% 的铅渣挥发率分别为 35.25%、49.48%、55.92% 和 58.39%。炉渣的失重率比 PbO 的含量大很多的原因:炉渣在熔化后发生大量挥发,产生气泡,气泡破裂造成炉渣飞溅,使渣内其他物质被夹带出来。虽然炉渣内也含有其他易挥发组元,但其含量很少,主要的挥发还是 PbO 和挥发产生的气泡破裂所导致的。因此在高温进行炉渣性能(如黏度、导电性、表面张力等物理性能及化学性能)测定时,更应考虑挥发的影响。

炉渣在熔点测定过程、TG 测定过程和 FactSage 理论计算熔点值在半球点温度和流动温度下的失重情况如表 3 和表 4 所示。1#~4# 所对应的半球点温度 855、935.5、933、994 ℃和流动温度

950、1 069、1 076、1 135 ℃时的 TG 测定过程中失重量和熔点测定过程中获取的炉渣失重量趋势基本一致。TG 测定过程比熔点测定过程失重量多的原因是,在 TG 测定过程中需要通保护气,气流速度也会加剧挥发,从而使测定的结果比熔点测定结果偏高。而采用 FactSage 理论计算的失重量远高于 TG 测定及熔点测定过程测定的失重量。可以推测,熔点测定和 TG 测定都是一种非平衡态的结果,而 FactSage 理论计算是基于平衡的计算,达到平衡的时间很长,所以挥发量将远大于非平衡态,对应失重量将明显增加。同时,FactSage 理论计算熔点值明显偏高,也导致在该温度下所计算的挥发失重量明显增大,其中主要挥发组元 PbO 导致炉渣化学组成也将发生明显的变化,所以 FactSage 计算结果怎样与实际测定值对应需要进一步研究。

取炉渣熔点测定过程中重量变化为参考,并考虑其主要是由 PbO 挥发引起,计算半球点温度和流动温度时的适时炉渣成分,得到原渣和半球点、流动温度对应的适时(修正后的)炉渣成分,并将其余测定的半球点、流动温度对应,而不是将测定结果与原始炉渣组成对应,如表 5 所示。适时(修正后的)炉渣成分对应的半球点或流动温度,更接近实际炉渣性能的“真值”。

表 3 不同 PbO 含量渣样在实验和 FactSage 理论计算中半球点温度失重率对比

Table 3 Different PbO contents slag samples with in experiment and FactSage theoretical calculation of hemispheric point temperature weight loss rate

No.	Weight loss rate of melting point measurement process	Weight loss rate of TG measurement process	Calculation of weight loss rate by factage theory	Theoretical calculation of weight loss rate of volatile components						/%
				PbO	Bi ₂ O ₃	As ₄ O ₆	Sb ₄ O ₆	TeO ₂	SeO ₂	
1#	0.54	1.18	10.48	8.84	0.13	0.35	0.47	0.47	0.23	
2#	1.27	1.72	25.12	17.30	2.63	2.27	2.22	0.47	0.23	
3#	1.81	2.77	28.69	19.76	2.97	2.65	2.52	0.52	0.26	
4#	4.16	4.51	51.58	34.92	10.20	0.37	5.51	0.17	0.41	

表 4 不同 PbO 含量渣样在实验和 FactSage 理论计算中流动温度失重率对比

Table 4 Different PbO contents slag samples with in experiment and FactSage theoretical calculation of flow temperature and weight loss rate

No.	Weight loss rate of melting point measurement process	Weight loss rate of TG measurement process	Calculation of weight loss rate by factage theory	Theoretical calculation of weight loss rate of volatile components						/%
				PbO	Bi ₂ O ₃	As ₄ O ₆	Sb ₄ O ₆	TeO ₂	SeO ₂	
1#	1.08	2.30	12.34	10.19	0.40	0.59	0.47	0.47	0.23	
2#	4.47	7.34	27.17	18.37	3.61	2.27	2.22	0.47	0.23	
3#	5.62	10.34	31.64	21.07	4.50	2.77	2.52	0.52	0.26	
4#	10.47	12.72	52.30	34.94	10.20	1.06	5.51	0.17	0.41	

表5 脱铜阳极泥熔炼高铅渣半球点温度和流动温度修正结果

Table 5 Correction results of hemispheric point temperature and flow temperature of high-lead slag smelted from copper removal

anode slime										
No.	Contents/%									Temperature/℃
	PbO	Na ₂ O	BaSO ₄	As ₂ O ₃	TeO ₂	SeO ₂	SiO ₂	Bi ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	
1 #	14. 52	39. 26	52. 14	7. 63	1. 39	0. 31	0. 80	1. 20	0. 65	—
1 #-RB	14. 06	39. 47	52. 42	7. 67	1. 40	0. 31	0. 80	1. 21	0. 65	855
1 #-RL	13. 59	39. 69	52. 71	7. 71	1. 41	0. 32	0. 81	1. 21	0. 66	950
2 #	25. 07	29. 93	40. 29	6. 45	1. 17	0. 31	2. 79	4. 84	2. 98	—
2 #-RB	24. 11	30. 32	40. 81	6. 54	1. 18	0. 31	2. 83	4. 91	3. 02	936
2 #-RL	21. 57	31. 33	42. 17	6. 75	1. 22	0. 32	2. 92	5. 07	3. 12	1 069
3 #	28. 75	29. 98	30. 64	6. 85	1. 26	0. 35	3. 25	6. 05	3. 39	—
3 #-RB	27. 43	30. 54	31. 20	6. 98	1. 28	0. 35	3. 31	6. 16	3. 45	933
3 #-RL	24. 50	31. 77	32. 46	7. 26	1. 34	0. 37	3. 45	6. 41	3. 59	1 076
4 #	41. 25	11. 19	17. 54	8. 69	0. 20	0. 49	8. 16	12. 02	6. 48	—
4 #-RB	38. 70	11. 67	18. 30	9. 07	0. 21	0. 51	8. 51	12. 55	6. 77	994
4 #-RL	34. 38	12. 50	19. 59	9. 70	0. 23	0. 54	9. 11	13. 43	7. 24	1 135

Note:-RB means the hemispherical point temperature corresponds to the timely composition of the slag,-RL means the flow temperature corresponds to the timely composition of the slag

3 结论

1)通过 FactSage 理论计算可以得出脱铜阳极泥熔炼高铅渣在高温过程中主要存在 PbO 的挥发和 Bi₂O₃、As₄O₆、TeO₂、SeO₂ 和 Sb₄O₆ 少量的挥发。当将渣升温至 900 ℃时,PbO 开始剧烈挥发,并且 PbO 挥发量的趋势与炉渣失重曲线趋势一样,PbO 的挥发决定着炉渣挥发程度的大小。

2)含铅渣的挥发率随着温度的不断升高而升高,并且随着渣中 PbO 含量的升高而升高,尤其在高温阶段失重急剧增加,半球点温度、流动温度测定值随原始渣中 PbO 含量的升高而升高,采用 FactSage 计算的熔点值更接近且高于流动温度测定值。

3)对脱铜阳极泥熔炼高铅渣所测半球点温度和流动温度时的炉渣成分进行修正得到适时炉渣成分—熔点的对应关系,对应的值更接近炉渣的熔点“真值”。

参考文献:

- [1] 宾万达,卢宜源. 贵金属冶金学[M]. 长沙:中南大学出版社,2011.
BIN Wanda, LU Yiyuan. Precious metal metallurgy[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.
- [2] 邱光文,徐远志. 高银铜阳极泥湿法处理流程研究[J]. 有色金属设计,2000,27(2):19-24.
QIU Guangwen, XU Yuanzhi. Study on the wet treatment process of high-silver-copper anode slime[J].

Nonferrous Metals Design,2000,27(2):19-24.

- [3] 侯慧芬. 从铜阳极泥中综合回收重有色金属和稀、贵金属[J]. 上海有色金属,2000,21(2):88-93.
HOU Huifen. Comprehensive recovery of heavy nonferrous metals, rare and precious metals from copper anode slime[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2000,21(2):88-93.
- [4] 杨天足. 贵金属冶金及产品深加工[M]. 长沙:中南大学出版社,2005.
YANG Tianzu. Precious metal metallurgy and product deep processing [M]. Changsha: Central South University Press,2005.
- [5] 崔雅茹,王国华,赵俊学,等. PbO-FeO_x-CaO-SiO₂-ZnO 挥发性高铅渣的挥发动力学[J]. 过程工程学报,2018,18(2):393-398.
CUI Yaru, WANG Guohua, ZHAO Junxue, et al. Volatilization kinetics of PbO-FeO_x-CaO-SiO₂-ZnO lead-bearing slag[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2018,18(2):393-398.
- [6] NAKADA H, MIHARA N, KAWAGUCHI Y, et al. Volatilization behavior on of lead from molten slag under conditions simulating municipal solid waste melting[J]. J Mater Cycles Waste Manage, 2008, 10(1):19-23.
- [7] WANG D Y, ZHANG J L, WU S L. Study on the volatilization kinetics of lead in carbon containing pellets made of Zn-Pb-bearing dusts[J]. Baosteel Technical Research,2014,8(4):9-14
- [8] SHIMA D, KAGEYAMA H, OSADA S, ET al. Effect of coexisting FeO on volatilization of PbO from

- CaO-SiO₂-Al₂O₃-FeO molten slag in N₂ atmosphere [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2011, 44.
- [9] YOO J M, KIM B S, LEE J C, et al. Kinetics of the volatilization removal of lead in electric arc furnace dust[J]. Materials Transactions, 2005, 46(2): 323-328.
- [10] MATSUDA H, KAGEYAMA H, KAWAGUCHI Y, et al. Dynamic studies on lead volatilization from CaO-SiO₂-Al₂O₃, molten slag under N₂-CO-CO₂, N₂-HCl and N₂-H₂S gas atmospheres[J]. Journal of Material Cycles and Waste Manage, 2014, 16(4): 677-683.
- [11] 李若贵. 我国铅锌冶炼工艺现状及发展[J]. 中国有色冶金, 2010, 39(6): 13-20.
- LI Ruogui. Status and development of lead and zinc smelting process in China [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010, 39(6): 13-20.
- [12] 陈会成. 液态高铅渣直接还原新工艺的研发及生产[J]. 世界有色金属, 2010, 26(8): 46-48.
- CHEN Huicheng. Liquid high lead slag directly restores the development and production of new process[J]. World Nonferrous Metals, 2010, 26(8): 46-48.

(编辑 王爱平)

(上接第 66 页, Continued from P66)

- [16] TAO D P. A thermodynamic model for solid solutions and its application to the C-Fe-Co, C-Fe-Ni and Mn-Cr-Pt solid dilutions [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 366(2): 239-247.
- [17] 高逸锋. 分子相互作用体积模型在铁基固态合金体系中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- GAO Yifeng. Research on the application of the molecular interaction volume model in the Fe-based solid alloy systems[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [18] MAZANDARANY F N, PEHLKE R D. Thermodynamic properties of solid alloys of chromium with nickel and iron[J]. Metallurgical Transactions, 1973, 4(9): 2067-2075.
- [19] CONARD B R, MCANENCY T B, SRIDHAR R. Thermodynamics of iron-nickel alloys by mass spectrometry[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1979, 9(3): 463-468.
- [20] TOMISKA J. Determination of thermodynamic mixing effects of solid Fe-Co alloys by means of knudsen cell mass spectrometry and calculation of the phase diagram [J]. Zeitschrift fur Metallkunde, 1986, 77: 97-102.
- [21] SMITH R P. The activity of carbon in iron-cobalt alloys at 1 000 °C[J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Incorporated, 1965, 233: 397.
- [22] WADA T, WADA H, ELLIOTT J F, et al. Thermodynamics of the Fcc Fe-Ni-C and Ni-C alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1971, 2(8): 2199-2208.
- [23] TOMISKA J. Ternary thermodynamics by computer-aided Knudsen cell mass spectrometry Fcc solid Fe-Ni-Co alloys, Zeitschrift fur Metallkunde, 2004, 95(1/2): 136-141.
- [24] BROZ P, VRESTAL J, TOMISKA J. Computer-Aided thermodynamics of solid ternary Fe_{1-x}(Ni_{0.86}Cr_{0.14})_x alloys by Knudsen cell mass spectrometry[J]. Ztschrift fur Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft fur Physikalische Chemie, 1995, 99(6): 802-806.
- [25] RAMANATHAN R, OATES W A. Activity coefficient of carbon in Fe-Co-Ni-C alloys at 1 273 K[J]. Metallurgical Transactions A, 1980, 11(3): 459-466.
- [26] WANG J J, LU X G, ZHU N Q, et al. Thermodynamic and diffusion kinetic studies of the Fe-Co system[J]. CALPHAD-Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 2017, 58: 82-100.
- [27] TAO D P. Prediction of thermodynamic properties of the C-Fe-Co-Ni solid solutions by binary infinite dilute activity coefficients [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 390(1/2): 70-75.

(编辑 王爱平)