

基于硫化铋低温碱性熔炼的熔体物化性质分析

牟文宁¹, 辛海霞¹, 雷雪飞¹, 翟玉春²

(1. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 秦皇岛市资源清洁转化与高效利用重点实验室, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 基于硫化铋精矿低温碱性熔炼技术, 采用半球点法、旋转柱体法、阿基米德法和拉筒法, 测定 Bi₂S₃-NaOH 体系的熔化温度、高温密度以及熔体的粘度和表面张力, 研究不同 NaOH 含量和温度对 Bi₂S₃-NaOH 体系物化性质的影响, 结果表明, 随着温度的升高, Bi₂S₃-NaOH 体系熔化过程分为缓慢收缩, 快速收缩和流动阶段, 熔化温度随着 NaOH 含量的增加先减小, 达到最低共熔温度后逐渐增大; Bi₂S₃-NaOH 熔体的高温密度、表面张力、粘度在 NaOH 含量一定条件下都随着温度的升高增加而减小, 温度一定条件下随着氢氧化钠含量的增加而减小。研究结果可为硫化铋精矿低温清洁冶金技术的优化提供基础数据参考。

关键词: 低温碱性熔炼; 熔化温度; 粘度; 表面张力; 高温密度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.02.037

中图分类号: TD989;TF815 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 02-0203-07

铋是重要的稀有重金属, 具有熔点低、冷胀热缩、比重大、无毒性等特性, 成为医药、冶金、化工、电子等领域^[1-4]不可或缺的原料。全球铋金属储量约为 37 万 t^[5], 主要以辉铋矿 (Bi₂S₃)、泡铋矿 (Bi₂O₃)、菱铋矿 (nBi₂O₃·mCO₂·H₂O)、铜铋矿 (3Cu₂S·4Bi₂S₃)、方铅铋矿 (2PbS·Bi₂S) 的矿物形式存在。中国铋储量居世界第一, 约为 24 万 t, 占世界总储量的 75%, 铋产量占全球的 89%。随着资源的多年开采和铋需求的不断增加, 铋矿严重短缺, 矿石品位急剧下降。传统的火法冶炼存在能耗大、生产成本低、环境污染严重的缺点^[6-7], 湿法工艺存在流程冗长、工序繁杂、废水排放量大等问题^[8-9]。低温、清洁、高效的处理方法——低温碱性熔炼崭露头角, 备受冶金行业的关注。

低温碱性熔炼是以碱性熔体为介质, 在低于传统火法冶炼温度 (不超过 900℃) 下熔炼金属资源, 得到金属单质或可溶性碱式金属盐的过程^[10]。低温碱性熔炼为复杂多相反应过程, 熔炼温度较低, 不产生熔融渣, 熔炼过程形成的液态相包括熔盐与液态金属两相, 既具有湿法冶金的特性, 又具有火法冶金特点。该方法最早由前苏联学者谢里科会姆 (З.А.С е р и к о в ы м) 于 1948 年提出, 而后由斯米尔洛夫 (С м и р н о в М.П.) 完成研究^[11]。我国冶金学者对该技术进行了推广, 用于从复杂资源中提取 SiO₂^[12-16], 铝灰、废弃电路板等含金属氧化物或单质的二次资源的回收利用^[17-19], 及处理铋精矿、锑精矿、铅精矿等原生硫化矿或多金属复杂矿物^[20-22]。

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51234009); 河北省高等学校青年拔尖人才项目 (BJ201604); 中央高校基本科研业务专项资金资助 (N182304016)

作者简介: 牟文宁 (1982-), 女, 副教授, 博士, 主要从事复杂矿产资源的综合利用研究。

低温碱性熔炼技术虽在有色金属复杂资源处理方面取得了良好的效果,但作为一个全新的领域,其基础理论研究仍是空白。整个提炼过程中存在大量的液-固-液-液分离,有效分离是整个过程顺利进行的保证,而熔体的物性(熔融温度、高温密度、粘度、表面张力等)是决定各相分离的关键因素。

本研究基于重金属硫化物的低温碱性还原熔炼技术的原理,开展以 NaOH 为熔炼介质的硫化铋碱性熔体的物化性质研究,测定不同碱性成分下体系的熔化温度、粘度、表面张力、密度,以期为重金属矿的低温碱性熔炼新方法的建立提供基础数据参考。

1 试验

1.1 试验原料及仪器

试验所需原料为氢氧化钠和硫化铋,均为化学纯。试验所用仪器为 RDS-05 型全自动炉渣熔点熔速测定仪和 ND-II 型炉渣粘度测试仪。

1.2 试验方法

1.2.1 完全熔化温度的测定

采用半球点法测定样品的熔化温度,所用仪器为全自动炉渣熔点熔速测定仪^[23]。将样品压制成高约 3 mm、直径约 2 mm 的圆柱体,放入加热炉内加热。随着炉膛温度的升高,样品高度降低。样品高度下降至原高度 1/5 时的温度记录为完全熔化温度。

1.2.2 高温密度的测定

采用阿基米德法测定样品的高温密度^[24],所用仪器为 ND-II 型炉渣粘度测试仪。在一定的炉温下,将特定形状的铅锤通过铅丝悬挂浸入被测熔体,记录浸入前后的质量 m_1 和 m_2 ,通过式(1)计算熔体的高温密度。

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V_{\text{锤}}} \quad (1)$$

其中, $V_{\text{锤}}$ 采用纯水标定,根据铅锤浸入水前后的质量 m_1 和 $m_{\text{锤}}$,利用式(2)计算。

$$V_{\text{锤}} = \frac{m_1 - m_{\text{锤}}}{\rho_{\text{水}}} \quad (2)$$

1.2.3 表面张力的测定

采取拉筒法^[25]测量样品的表面张力,所用设备为 ND-II 型炉渣粘度测试仪。在一定炉温下,将铅丝悬挂的铅制圆筒垂直浸入被测熔体中,向上提拉圆筒,当筒下表面与液面恰好接触时,在液体表面张力的作用下圆筒受到向下的拉力达最大,得到铅筒拉起液体的最大质量 m_{max} ,再根据液体质量与表面张力的关系式(5)即可获得被测熔体的表面张力。

$$\sigma = (m_{\text{max}} \cdot g / 4\pi r) C \quad (3)$$

式中 g -重力加速度; r -铅筒的半径; C -设备修正系数。

采用已知表面张力的液体(纯水)作为标准物质,通过测试处于水表面上的铅筒被拉离水表面时的最大拉力 $m_{\text{水}}$,根据式(4)即可得出校正系数 C 。

$$C = (4\pi r \cdot \sigma_{\text{水}}) / (m_{\text{水}} \cdot g) \quad (4)$$

1.2.4 粘度的测定

采用旋转柱体法(吊丝法)测定样品的粘度,所用仪器为 ND-II 型炉渣粘度测试仪。原理是浸在流体中的刚性物体旋转时,会受到流体的粘性力矩的作用,粘性力矩的大小与流体的粘度成正比:

$$\eta = k \cdot \Delta\theta \quad (5)$$

式中: η 为粘度, Pa·s; $\Delta\theta$ 为扭角变化量; k 为仪器常数,采用蓖麻油为标准液进行标定。蓖麻油粘度与温度的关系式为:

$$\eta = 4.306 \times 10^{-11} \cdot e^{6993/T} \quad (6)$$

根据式(6)计算某一温度 T 下蓖麻油的粘度,再利用式(5),通过测量某一深度下蓖麻油的 $\Delta\theta$ 标定出仪器常数 k 。根据测量的高温熔体扭角变化量即可求得该高温熔体的粘度。

2 结果与讨论

2.1 低温碱性还原熔炼原理

低温碱性还原熔炼是在较低的温度下，采用氢氧化钠或碳酸钠为熔炼介质，金属元素被 S^{2-} 还原成液态纯金属或合金，同时捕集贵金属，硫以 Na_2S 、 Na_2SO_4 形态得以固定，消除低浓度 SO_2 排放的过程。本研究采用氢氧化钠为熔炼介质，硫化铋的低温碱性熔炼物料的 XRD 分析见图 1 (a)。

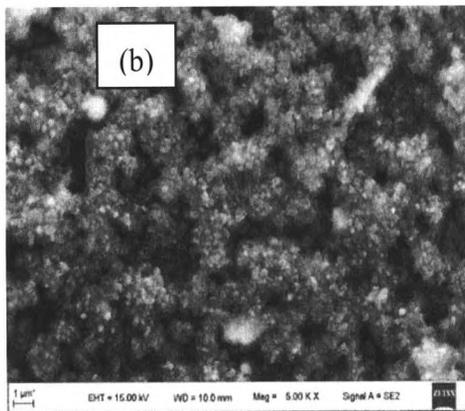
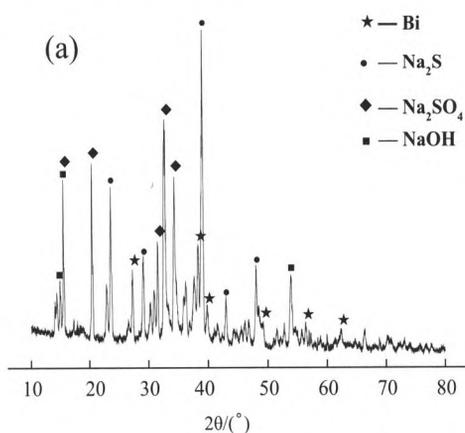


图1 Bi_2S_3 与 $NaOH$ 熔体的 XRD 图 (a) 和 SEM 图 (b)
Fig. 1 XRD pattern (a) and SEM image (b) of the reaction melt of Bi_2S_3 and $NaOH$

由图 1 可知，熔炼物料的主要物相为金属 Bi 、 Na_2S 、 Na_2SO_4 以及过量的 $NaOH$ ，可知硫化铋在熔融氢氧化钠中发生的化学反应为：



由图 1(b) 熔炼产物的 SEM 分析可知样品粒度较细，颗粒粘结在一起，具有一定的金属光泽，表明金属 Bi 的生成。

2.2 硫化铋和氢氧化钠混合体系熔化温度的测定

将 Bi_2S_3 与 $NaOH$ 按不同比例混合，研究不同组分混合体系熔化温度随氢氧化钠含量变化的规律，样品收缩率与温度的关系见图 2。

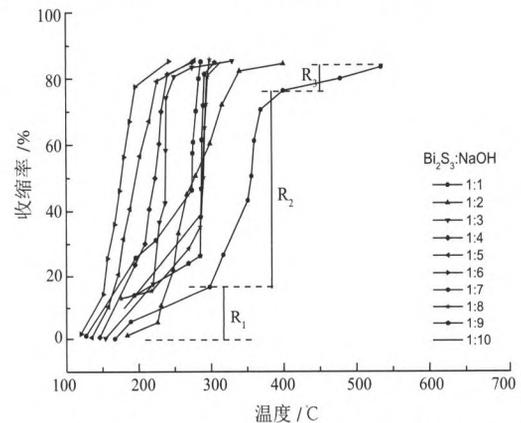


图 2 不同组分的 Bi_2S_3 - $NaOH$ 体系熔化的收缩曲线
Fig. 2 Melt shrinkage curves of Bi_2S_3 - $NaOH$ system with different compositions

由图 2 可知，当 Bi_2S_3 与 $NaOH$ 配比为 1:1 时，样品温度低于 $298\text{ }^\circ\text{C}$ 时，样品收缩率较低，小于 16.6%，该阶段为缓慢收缩阶段 R_1 。温度继续升高，样品收缩显著加快， $369\text{ }^\circ\text{C}$ 时收缩率达 70.6%，收缩率增加了 54%，此阶段为快速收缩阶段 R_2 。温度再继续升高，样品收缩逐渐减缓，在高于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时，几乎无收缩，样品坍塌为流动阶段 R_3 。

一定氢氧化钠含量的范围内，随着氢氧化钠含量的增加， R_1 阶段的初始温度逐渐降低，由料碱比 1:1 时的 $184\text{ }^\circ\text{C}$ ，降低至料碱比 1:6 时的 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 。 R_2 和 R_3 阶段的起始温度也逐渐降低，分别由料碱比 1:1 时的 $298\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $369\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 1:6 时的 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $243\text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明随着氢氧化钠含量的增加，样品开始收缩温度逐渐降低，缓慢收缩阶段逐渐变窄，快速收缩阶段的起始温度逐渐降低，收缩速率增加，样品开始坍塌的温度逐渐降低。

根据不同组分的 Bi_2S_3 - $NaOH$ 混合体系的熔点数据，绘制样品完全熔化温度随氢氧化钠含量变化的曲线见图 3。

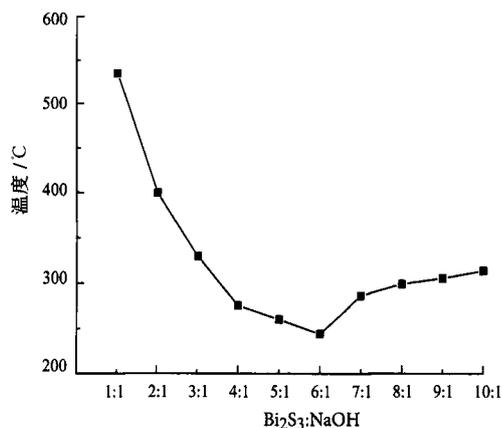


图3 不同组分的 $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 体系熔点与氢氧化钠含量的关系

Fig.3 Relationship between melting point of $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ system with different components and NaOH content

由图3可知, $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 混合体系的熔化温度随着氢氧化钠含量的增加逐渐降低, 这是由氢氧化钠的熔点相对于硫化铋较低所致; 当 Bi_2S_3 与 NaOH 比例为 1:6 (氢氧化钠含量为 85.71%) 时, 体系组分同时熔化, 混合物熔点达到最低为 243°C , 此时的温度称之为最低共融温度或最低共熔点; 之后随着氢氧化钠含量的增加, 混合物体系的熔点均逐渐增高至氢氧化钠熔点 321°C 。

2.3 硫化铋和氢氧化钠混合熔体的高温密度的测定

不同组分混合体系高温密度随温度变化的规律见图4。

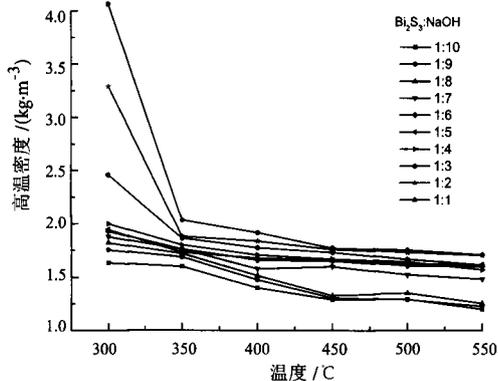


图4 不同组分的 $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 体系高温密度与温度的关系

Fig.4 Relationship between high temperature density of $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ system with different components and temperature

为避免误差, 每个温度点测量 6 次取平均密度值。由图4可知, Bi_2S_3 与 NaOH 配比一定的条件下,

混合熔体的密度随着温度的升高而减小。这是因为温度升高, 体系熔化的质点越多, 质点的热运动加强, 质点间距离加大, 熔融体系体积膨胀, 密度降低。当 NaOH 与 Bi_2S_3 的配比小于 4:1 时, 混合熔体的密度在温度低于 450°C 时, 随着温度的升高降低幅度较大, 在温度高于 450°C 时, 随着温度的升高降低幅度较小。同一温度条件下, $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 混合体系的密度随着氢氧化钠含量的增加而降低, 这是由于氢氧化钠含量较少时, 体系中的 Bi_2S_3 没有完全熔化, 随着温度的升高, 体系快速熔化碱熔反应加速, 导致密度迅速降低; 在高温下混合熔体已完全融化, 体系趋于稳定, 温度的升高对熔体密度的影响较小。在氢氧化钠含量较高时, 体系熔融温度较低, 已完全熔化, 体系稳定, 温度升高对密度的影响较小。

2.4 硫化铋和氢氧化钠混合熔体的表面张力的测定

不同组分 $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 混合熔体的表面张力随温度的变化规律, 结果见图5。

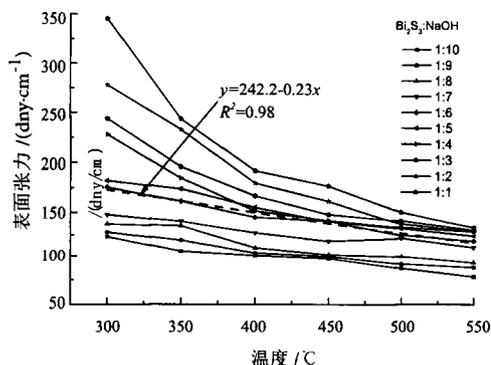


图5 不同组分的 $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 体系表面张力与温度的关系

Fig.5 Relationship between surface tension of $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ system with different components and temperature

为避免误差, 每个温度点测量 6 次取平均表面张力值。由图5可知, Bi_2S_3 与 NaOH 配比一定的条件下, 混合熔体的表面张力随着温度的升高而逐渐减小; 因为温度升高, 质点的热运动增加, 体积膨胀, 位于液体内部的质点与液体表面上质点间的相互作用力减弱, 表面张力降低。同一温度条件下, $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-NaOH}$ 混合熔体的表面张力随着氢氧化钠的含量增加而减小, 这是因为氢氧化钠的含量越高, 体系中阴阳离子间的作用力越弱, 表面张力也降低。氢氧化钠含量大时温度对体系的表面张力影

响较小，相反氢氧化钠量少体系表面张力受温度的影响较大。当 Bi_2S_3 与 NaOH 比例为 6:1 时，表面张力与温度为较好的线性关系，方程为：

$$y=242.2-0.23x \quad (R^2=0.98) \quad (8)$$

2.5 硫化铋和氢氧化钠混合熔体粘度的测定

研究温度和氢氧化钠含量对不组分 Bi_2S_3 - NaOH 混合体系粘度的影响，得到的体系粘度随温度变化的曲线见图 6。

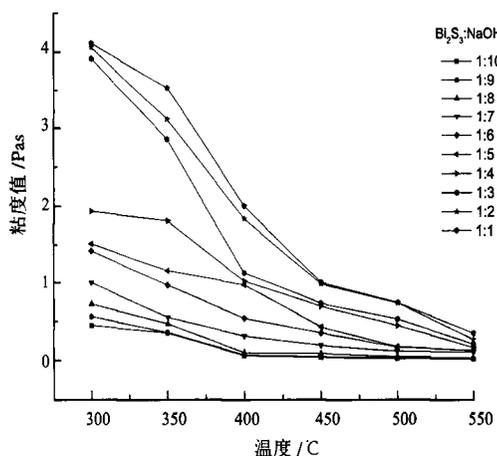


图 6 不同组分的 Bi_2S_3 - NaOH 体系粘度与温度的关系

Fig. 6 Relationship between viscosity of Bi_2S_3 - NaOH system with different components and temperature

为减少误差，每个温度点测量 20 次取粘度平均值。

由图 6 可知，随着温度的升高 Bi_2S_3 - NaOH 混合体系的粘度显著降低。粘度是流体粘滞性的一种量度，是流体流动力对其内部摩擦现象的一种体现，决定了熔体的流动性，并影响反应速率。粘度与温度间存在指数函数关系：

$$\eta = A \exp(E_n/RT) \quad (9)$$

其中：A 为常数； E_n 为粘流活化能。

当温度升高时，有利于克服熔体中质点流动的能障——粘流活化能，熔体中原子或原子团相互间摩擦力的减小，体系的粘度降低；温度降低时，熔体中质点活动能力逐渐变差，粘度平缓上升。同一温度下 Bi_2S_3 - NaOH 混合熔体的粘度随着氢氧化钠含量的增加而减小，这是因为氢氧化钠含量的增加，体系的熔点降低，随着温度的升高，体系中熔化的硫化铋的不断增多，流动性增加，流体的流动力减小，粘度减小。

3 结 论

(1) Bi_2S_3 - NaOH 体系的熔化过程可分为缓慢收缩段，快速收缩段和流动阶段； Bi_2S_3 - NaOH 体系的熔化温度随着 NaOH 含量的增加逐渐降低，当 Bi_2S_3 : NaOH 为 1:6 时达到最低共熔温度，而后随着 NaOH 含量的增加逐渐增大。

(2) 一定组分的 Bi_2S_3 - NaOH 熔体，其高温密度、表面张力和粘度都随着温度的升高而减小；温度一定的条件下， Bi_2S_3 - NaOH 熔体的高温密度、表面张力和粘度都随着 NaOH 含量的增加而减小，且在 NaOH 含量低时减小幅度大， NaOH 含量高时缓慢降低。

(3) 当 Bi_2S_3 与 NaOH 比例为 6:1 时， Bi_2S_3 - NaOH 熔体的表面张力与温度呈现较好的线性关系为： $y=242.2-0.23x$ ($R^2=0.98$)。

参考文献：

- [1] Mary P, Gong X. LIMETS 3, a novel system for high strain fatigue testing in lead-bismuth eutectic[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 450(1-3): 256-261.
- [2] Qvist S. An approach to quantifying the chemical conditions necessary to form a magnetite layer on steels in lead and lead-bismuth eutectic[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 454(1-3): 105-113.
- [3] Chen L, Hao Z, Yang T, et al. An efficient technology for smelting low-grade bismuth-Lead concentrate: oxygen-rich side blow process[J]. JOM, 2015, 67(9): 1997-2004.
- [4] 李二军, 陈浪, 章强, 等. 铋系半导体光催化材料 [J]. 化学进展, 2010, 22(12): 2282-2289.
- [5] Li E J, Chen L, Zhang Q, et al. Bismuth Semiconductor Photocatalytic Material [J]. Chemical Progress, 2010, 22(12): 2282-2289.
- [6] 龙涛, 陈其慎, 于汶加, 等. 中国铋供需形势分析及对策建议 [J]. 中国矿业, 2016, 25(5): 11-15.
- [7] Long T, Chen Q S, Yu W J, et al. Analysis of Bismuth Supply and Demand Situation in China and Countermeasures [J]. China Mining, 2016, 25 (5) : 11-15.
- [8] Khmel'nitskaya O D, Beskrov'naya V P. A technology of precious metals recovery from gold-bismuth ores[C]// World Gold 2007 by the Co-Products and the Environment-Proceedings. Australia: 2007.
- [9] 谢祥贵. 铋矿浆电解实践 [J]. 湖南有色金属, 1999, 5(6): 28-31.
- [10] Xie XG. Electrolysis Practice of Bismuth Pulp [J]. Hunan Nonferrous Metals, 1999, 5 (6) : 28-31.

- [8] 唐朝波,唐谟堂,姚维义,等.脆硫铅锑精矿短回转窑还原造锍熔炼半工业试验[J].矿冶工程,2004,4(1):51-53.
Tang C B, Tang M T, Yao W Y, et al. Semi-industrial Test of Matte Smelting in Short Rotary Kiln [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2004, 4 (1) : 51-53.
- [9] 李仕庆,何静,唐谟堂.火法-湿法联合工艺处理铅铋银硫化矿综合回收有价金属[J].有色金属,2003,55(3):39-42.
71/5000
Li S Q, He J, Tang M T. Recovery of Valuable Metals from Lead-bismuth Silver Sulfide Ore by Combined Fire-wet Process [J]. Nonferrous Metals, 2003, 55 (3) : 39-42.
- [10] 郭学益,刘静欣,田庆华,等.有色金属复杂资源低温碱性熔炼原理与方法[J].有色金属科学与工程,2013,4(2):8-13.
Guo X Y, Liu J X, Tian Q H, et al. Principle and Method of Low Temperature Alkaline Smelting of Nonferrous Metal Complex Resources [J]. Science and Engineering of Nonferrous Metals, 2013, 4 (2) : 8-13.
- [11] Шлычков А Ю, Маценко Ю А. Low temperature process of lead extraction in accumulator battery scrap separation [J]. Цветные металлы, 1999(8):22-25.
- [12] 牟文宁,崔富晖,辛海霞,等.低品位红土镍矿焙烧-碱浸过程中硅的转化[J].中国冶金,2017,27(4):32-36.
Mu W N, Cui F H, Xin H X, et al. Conversion of Silicon during Calcination and Alkaline Leaching of Low grade Laterite Nickel Ore [J]. China Metallurgy, 2017, 27 (4) : 32-36.
- [13] Mu W, Zhai Y. Dissolution kinetics of nickeliferous laterite ore in molten sodium hydroxide system. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(2):330-335.
- [14] 吕晓妹,段华美,翟玉春,等.碱熔法从硼精矿中提取硅的研究[J].材料导报B:研究篇,2011,25(12):8-11.
Lu X M, Duan H H, Zhai Y C, et al. Study on Silicon Extraction from Boron Concentrate by Alkali Fusion Method [J]. Materials Review B: Research, 2011, 25 (12) : 8-11.
- [15] Ning Z, Song Q, Zhai Y, et al. Desilication kinetics of calcined boron mud in molten sodium hydroxide media [J]. J. Cent. South Univ., 2016, 23: 2191-2198.
- [16] 王晨晔,包炜军,许德华,等.低浓度碱介质中钢渣碳酸化反应特征[J].钢铁,2016,51(6):87-93.
Wang C H, Bao W J, Xu D H, et al. Carbonation Characteristics of Steel Slag in Low Concentration Alkaline Medium [J]. Steel and Iron, 2016, 51 (6) : 87-93.
- [17] 郭学益,刘静欣,田庆华.废弃电路板多金属粉末低温碱性熔炼过程的元素行为[J].中国有色金属学报,2013(9):1-4.
Guo X Y, Liu J X, Tian Q H. Element Behavior in Low Temperature Alkaline Smelting Process of Polymetallic Powder of Waste Circuit boards [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013 (9) : 1-4.
- [18] 刘旸,刘静欣,秦红,等. Na₂CO₃-NaOH-NaNO₃-Air 体系低温碱性熔炼工艺从废弃电路板中综合回收有价金属[J].有色金属:冶炼部分,2014,46(8):2805-2811.
Liu Y, Liu J X, Qin H, et al. Low Temperature Alkaline Smelting Process of Na₂CO₃-NaOH-NaNO₃-Air System for the Comprehensive Recovery of Valuable Metals from Waste Circuit Boards [J]. Nonferrous Metals (smelting), 2014, 46 (8) : 2805-2811.
- [19] 刘旸,刘静欣,秦红,等. NaOH-NaNO₃-Air 体系低温碱性熔炼处理废弃电路板多金属粉末[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(8):2805-2811.
Liu Y, Liu J X, Qin Hong, et al. Low Temperature Alkaline Smelting of Waste Circuit Boards by NaOH-NaNO₃-Air [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2015, 46 (8) : 2805-2811.
- [20] 肖剑飞,唐朝波,唐谟堂,等.硫化铋精矿低温碱性熔炼新工艺研究[J].矿冶工程,2009,29(5):82-85.
Xiao J F, Tang C B, Tang M T, et al. Research on New Low Temperature Alkaline Smelting Process of Bismuth Sulfide Concentrate [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2009, 29 (5) : 82-85.
- [21] 叶龙刚,唐朝波,唐谟堂,等.硫化锑精矿低温熔炼新工艺[J].中南大学学报,2012,43(9):3338-3343.
Ye L G, Tang C B, Tang M T, et al. New Low Temperature Smelting Process of Antimony Sulfide Concentrate [J]. Journal of Central South University, 2012, 43 (9) : 3338-3343.
- [22] 胡宇杰,唐朝波,唐谟堂,等.再生铅低温碱性固硫熔炼的试验研究[J].工程科学学报,2015,37(5):588-594.
Hu Y J, Tang C B, Tang M T, et al. Experimental Study on Low Temperature Alkaline Sulfur Smelting of Recycled Lead [J]. Journal of Engineering Science, 2015, 37 (5) : 588-594.
- [23] 赵磊,付春霞,张吉文.保护渣熔点熔速及粘度的测量技术研究[C]//山东省金属学会理化检验学术委员会理化检验学术交流会议论文集.济南:2009.
Zhao L, Fu C X, Zhang J W. Measurement Technology of Melting Rate and Viscosity of Protective Slag Melting Point [C]// Proceedings of Chemical and Physical Inspection Academic Committee of Shandong Institute of Metals. Jinan: 2009.
- [24] 朱桥,王秀峰.高温熔体密度测量研究进展[J].硅酸盐通报,2013,32(6):1087-1091.
Zhu Q, Wang X F. Research Progress of High Temperature Melt Density Measurement [J]. Chinese Journal of Silicate, 2013, 32 (6) : 1087-1091.
- [25] 范建峰,袁章福,柯家骏.高温熔体表面张力测量方法的进展[J].化学通报,2004(11):802-807.
Fan J F, Yuan Z F, Ke J J. Development of Surface Tension Measurement Methods for High Temperature Melt [J]. Chemical Bulletin, 2004 (11):802-807.

(下转 202 页)

[9] 闻轲. 矿物红外光谱学. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
 Wen L. Mineral Infrared Spectroscopy. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
 [10] 周灵初, 张一敏. 十二烷基磺酸钠捕收红柱石作用机理

研究 [J]. 金属矿山, 2010(6).
 [11] Zhou L C, Zhang Y M. Study on the Mechanism of Sodium Dodecyl Sulfonate Collecting Andalusite [J]. Metal Mine, 2010(6).

Adsorption Mechanism of Sodium Oleate on Andalusite

Zhou Hailing, Liu Yongsheng

(Department of Civil Engineering, City College of Anhui University of Architecture, Hefei, Anhui, China)

Abstract: The adsorption behaviour of sodium oleate on andalusite and powder quartz as well as the effect of pH value has been investigated through Zeta potential and IR spectral analyses. The results showed that ion-molecular association was an important active component in flotation process. The results of Zeta potential and infrared spectra analyses revealed that sodium oleate has adsorption on andalusite and powder quartz, but the adsorption effect of andalusite which was chemical adsorption was stronger than powder quartz, which can realize the flotation separation of the two. Flotation conditions for the concentration of sodium oleate was 3.3×10^{-3} mol/L, pH = 9.

Keywords: Powder quartz; andalusite; Sodium oleate; Adsorption; Mechanism

//
 (上接 208 页)

Analysis of Physicochemical Properties of Melt Based on Low Temperature Alkaline Melting of Bismuth Sulfide

Mu Wenning¹, Xin Haixia¹, Lei Xuefei¹, Zhai Yuchun²

(1. School of Resources & Materials, Northeastern University at Qinghuangdao, Key Laboratory of Resources Cleaner Conversion and Efficient Utilization Qinhuangdao City, Qinhuangdao, Hebei, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: Based on the low temperature alkaline smelting technology of bismuth sulfide concentrate, the melting temperature, high temperature density, viscosity and surface tension of Bi₂S₃-NaOH system were measured by hemispheric point method, rotating column method, Archimedes method and pulling cylinder method, and the effects of different NaOH content and temperature on the physicochemical properties of Bi₂S₃-NaOH system were investigated. The results show that with the increase of temperature, the melting process of Bi₂S₃-NaOH system is divided into slow shrinkage, rapid shrinkage and flow phase. The melting temperature decreases first with the increase of NaOH content to reach the lowest eutectic point, and then increases gradually. The high temperature density, surface tension and viscosity of Bi₂S₃-NaOH melt decrease with the increase of temperature at a certain NaOH content, and decrease with the increase of NaOH content at a certain temperature. The study can provide basic data for the optimization of low temperature clean metallurgical technology of bismuth sulfide concentrate.

Keywords: Low temperature alkaline melting; Melting temperature; Viscosity; Surface tension; High temperature density