

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.12.006

# 溶出温度对三水铝石与一水软铝石混合型 铝土矿溶出及赤泥沉降性能的影响

郑洁, 齐利娟, 关晓鸽, 于晴, 郑纯辉

(中铝郑州有色金属研究院有限公司, 郑州 450041)

**摘要:**以三水铝石与一水软铝石混合型铝土矿为研究对象,研究了溶出温度对其溶出及沉降性能的影响。溶出试验结果表明:三水铝石在 145 ℃ 低温条件下较短时间就能全部溶出,且随着溶出时间的延长,氧化铝溶出率呈降低趋势;提高溶出温度到 240 ℃ 以上,一水软铝石溶出,氧化铝溶出率显著升高,但同时也会造成碱耗增加;沉降试验结果表明:高温溶出矿浆的赤泥沉降性能显著优于低温溶出矿浆,达到相同的沉速,絮凝剂添加量减少约 50%。

**关键词:**三水铝石;一水软铝石;温度;溶出;沉降

**中图分类号:**TF821

**文献标志码:**A

**文章编号:**1007-7545(2023)12-0038-05

## Effect of Digestion Temperature on Digestion and Settling Properties of Gibbsite and Boehmite Hybrid Bauxite

ZHENG Jie, QI Lijuan, GUAN Xiaoge, YU Qing, ZHENG Chunhui

(Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd. of CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** The effect of digestion temperature on digestion and settling properties of gibbsite and boehmite hybrid bauxite were studied applying gibbsite and boehmite hybrid bauxite as objects. The results of digestion tests show that gibbsite can be completely dissolved in a short time at 145 ℃, and the alumina digestion rate drops with the prolongation of digestion time. When increasing the digestion temperature to 240 ℃ above, the alumina digestion rate of boehmite rises significantly, but alkali consumption increase at the same time. The settling test results show that the settling performance of red mud from high temperature dissolving pulp is significantly better than that from low temperature dissolving pulp. When reaching the same settling rate, the amount of flocculant added is reduced by about 50%.

**Key words:** gibbsite; boehmite; temperature; digestion; settling

随着国内铝土矿储量减少、品位下降,铝土矿的进口量逐年递增<sup>[1]</sup>,2019年开始中国铝土矿年进口量持续超过1亿吨,2022年达到1.25亿吨。进口铝土矿类型主要为三水铝石型、三水铝石与一水软铝石混合型<sup>[2]</sup>两种,其中进口量最大的几

内亚矿和澳矿普遍为混合型铝土矿。对于三水铝石型铝土矿,采用低温拜耳法溶出就能保证较高的氧化铝溶出率,国内外很多专家对此进行了系统的研究<sup>[3-4]</sup>,国外氧化铝企业普遍采用低温拜耳法进行氧化铝生产。对于三水铝石与一水软铝石

收稿日期:2023-07-10

基金项目:中国铝业股份有限公司科技项目(中铝股份科发字[2022]111号)

作者简介:郑洁(1986-),女,硕士,工程师

混合型铝土矿(以下简称混合型铝土矿),采用低温拜耳法溶出则会造成一水软铝石损失,欧洲专利<sup>[5]</sup>采用一段低温、二段高温的二段溶出工艺,该工艺能显著提高氧化铝溶出率,但工艺流程复杂、设备投资成本高,较难实现工业应用。因此对混合型铝土矿的溶出及赤泥沉降性能进行深入研究,确定适宜的生产工艺对混合型铝土矿的经济高效利用具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。

本文以国外进口混合型铝土矿为研究对象,通过研究不同溶出温度对该铝土矿溶出性能及赤泥沉降性能的影响,探讨混合型铝土矿的经济利用方案,以期为我国氧化铝生产提供科学指导。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

混合型铝土矿为进口矿,化学成分(%): $\text{Al}_2\text{O}_3$  44.75、 $\text{SiO}_2$  2.04、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  25.51、 $\text{TiO}_2$  2.39、 $\text{K}_2\text{O}$  0.023、 $\text{Na}_2\text{O}$  0.034、 $\text{CaO}$  0.035、 $\text{MgO}$  0.024、LOI 24.73,铝硅比 A/S=21.94,有效氧化铝 TAA=39.58%。物相组成为(%):三水铝石 60.8、一水软铝石 2.4、高岭石 1.9、石英 1.2、赤铁矿 10.8、铝针铁矿 18.9、锐钛矿 1.0、金红石 1.4。图 1 为试验用混合型铝土矿的 XRD 谱。

从物相组成和图 1 可以看出,该铝土矿为三水铝石与一水软铝石混合型铝土矿,三水铝石和一水软铝石的含量分别为 60.8% 和 2.4%,一水软铝石中氧化铝含量约为 2.04%;含硅矿物主要为高岭石和石英,其含量分别为 1.9% 和 1.2%,高岭石中氧化铝含量约为 0.75%;含铁矿物主要为铝针铁矿和赤铁矿,其含量分别为 18.9% 和 10.8%,铝针铁矿中氧化铝含量约为 2.21%。

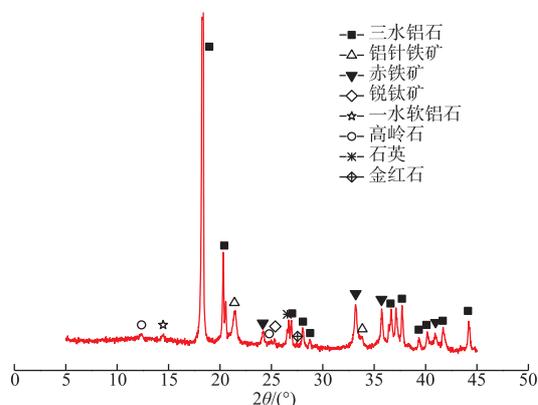


图 1 试验用铝土矿的 XRD 谱  
Fig. 1 XRD pattern of bauxite

该混合型铝土矿若采用低温 145 °C 拜耳法溶出工艺,仅能回收三水铝石中的氧化铝,理论氧化铝溶出率约为 88.45%,一水软铝石和铝针铁矿则不反应直接进入赤泥,造成氧化铝损失。若提高溶出温度,一水软铝石将全部溶出,理论氧化铝溶出率将提高 4.5 个百分点,达到 92% 以上。

试验用溶出母液为工业铝酸钠溶液,其全碱( $\text{Na}_2\text{O}_T$ )、苛碱( $\text{Na}_2\text{O}_K$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )浓度分别为 223.39、191、112.51 g/L,分子比为 2.79。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 铝土矿溶出试验

溶出试验采用 Y 型熔盐/甘油溶出器,内置 6 个钢弹,控温精度为  $\pm 1$  °C,钢弹转速为 30 r/min。根据拜耳法溶出配料分子比计算出配矿量,并称取粒度合格的铝土矿至钢弹中,同时加入一定量的铝酸钠溶液,钢弹密封后放入已预热到试验温度的加热炉中,并开启搅拌。溶出至预定时间后取出钢弹快速冷却,溶出矿浆过滤分离,所得赤泥用热水洗涤后置于干燥箱中烘干,烘干后采用荧光光谱分析仪进行赤泥化学成分分析,滤液进行苛碱、氧化铝和二氧化硅浓度分析。

氧化铝实际溶出率计算公式:

$$\eta_A = \frac{(A/F)_{矿} - (A/F)_{泥}}{(A/F)_{矿}} \times 100\%$$

式中,  $(A/F)_{矿}$  为矿石中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的质量比;  $(A/F)_{泥}$  为赤泥中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的质量比。

#### 1.2.2 溶出矿浆赤泥沉降试验

溶出赤泥的沉降性能试验采用 250 mL 沉降管,在恒温水浴槽中进行,试验温度 98 °C。首先将一定固含的溶出矿浆(转移至)倒入沉降管中,将沉降管在水浴槽中保温一定时间后,加入絮凝剂,记录沉降时间并在沉降一定时间后取一定量的上清液,过滤洗涤烘干后计算上清液的浮游物含量。沉降结束后测定计算赤泥的压缩液固比。

## 2 结果与讨论

### 2.1 溶出温度和溶出时间对氧化铝溶出率的影响

在溶出温度分别为 145、220、240、260、270 °C,母液苛碱浓度 191 g/L、溶出液  $\alpha_K=1.34$  的条件下,研究不同溶出温度和溶出时间对氧化铝溶出率的影响。试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,溶出温度及溶出时间对氧化铝溶出率都有显著影响。相同溶出温度条件下,氧化铝溶出率随着溶出时间的延长呈降低趋势;相同溶出时间条件下,氧化铝溶出率差距显著。

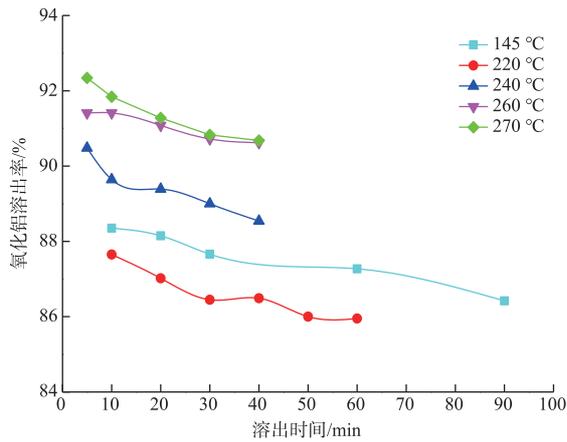


图2 溶出温度及溶出时间对氧化铝溶出率的影响

Fig. 2 Influences of digestion temperature and time on digestion rate of alumina

溶出温度为 145 °C 时,溶出时间 10 min,氧化铝溶出率约为 88.4%,与理论氧化铝溶出率基本一致,说明三水铝石在 145 °C 溶出温度条件下,较短时间就能完全溶出;延长溶出时间到 90 min,氧化铝溶出率从 88.3% 降低到约 87%,分析原因是延长溶出时间,溶出液中二氧化硅发生脱硅反应生成钠硅渣,造成铝损失<sup>[8]</sup>。

提高溶出温度至 220 °C 时,随着溶出时间从 10 min 延长到 60 min,氧化铝溶出率从 87.6% 逐渐降低到 86%,与 145 °C 时的溶出结果相比,氧化铝溶出率略有降低,说明一水软铝石在 220 °C 条件下仍然较难溶出,同时升高温度又加速钠硅渣的生成,造成氧化铝损失<sup>[8-9]</sup>。

继续提高溶出温度至 240~270 °C,氧化铝溶出率显著升高。在溶出时间 5 min 条件下,溶出温度 240 °C 时,氧化铝溶出率约为 90.5%,升高溶出温度到 270 °C,氧化铝溶出率达到 92.5%,与低温 145 °C 的溶出结果相比,氧化铝溶出率提高了约 4 个百分点,与理论计算基本一致。其说明溶出温度大于 240 °C 时,铝土矿中的一水软铝石溶出,提高了氧化铝溶出率,且溶出温度越高,一水软铝石的反应速度越快,溶出温度 270 °C 时,溶出时间 5 min 一水软铝石已基本全部溶出。

## 2.2 溶出温度和溶出时间对赤泥 N/S 的影响

在溶出温度分别为 145、220、240、260、270 °C,母液苛碱浓度 191 g/L、溶出液  $\alpha_K=1.34$  的条件下,研究了不同溶出温度和溶出时间对溶出赤泥 N/S 的影响。试验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着溶出温度的升高和溶出时间的延长,溶出赤泥

N/S 均呈升高趋势。溶出温度为 145 °C 时,随着溶出时间从 10 min 延长到 90 min,赤泥 N/S 从 0.09 升高至 0.18;溶出温度提高至 220 °C 时,随着溶出时间从 10 min 延长到 60 min,赤泥 N/S 从 0.35 升高到 0.55,与溶出温度为 145 °C 时相比,赤泥 N/S 显著升高;继续升高溶出温度至 270 °C,随着溶出时间从 5 min 延长到 40 min,赤泥 N/S 从 0.45 升高到 0.65。整体来说,相同溶出温度条件下,随着溶出时间的延长或相同溶出时间,随着溶出温度的升高,赤泥 N/S 均呈升高趋势,说明升高溶出温度、延长溶出时间都能促进脱硅反应,生成钠硅渣进入赤泥,造成氧化铝和氧化钠的损失。

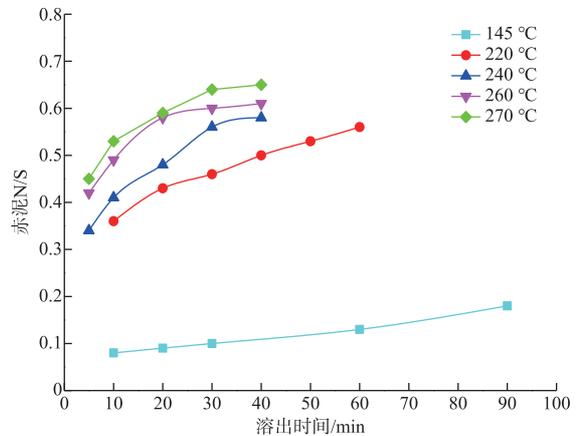


图3 溶出温度和溶出时间对溶出赤泥 N/S 的影响

Fig. 3 Influences of digestion temperature and time on N/S of red mud

总的来说,针对该混合型铝土矿,提高溶出温度能显著提高氧化铝溶出率、降低矿耗,但同时也会造成赤泥 N/S 升高、碱耗增加。

## 2.3 溶出赤泥物相分析

分别选取溶出温度 145 °C、溶出时间 60 min,以及溶出温度 270 °C、溶出时间 30 min 的溶出赤泥进行 XRD 物相分析,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,溶出温度为 145 °C、溶出时间 60 min 时,溶出赤泥的物相组成主要包括铝针铁矿、赤铁矿、石英、锐钛矿、金红石和一水软铝石;溶出温度提高到 270 °C 时,一水软铝石和石英的峰消失,出现钙霞石的峰,说明在高温条件下一水软铝石溶出,石英反应生成钙霞石。根据矿石中一水软铝石的含量 2.4% 进行理论计算,一水软铝石全部溶出,预计氧化铝溶出率增加 4.5 个百分点;根据矿石中 1.2% 的石英进行理论计算,石英完全反应生成钙霞石,造成氧化铝溶出率损失 1 个百分点;整体来说,理论上高温 270 °C

溶出比低温 145 °C 溶出时氧化铝溶出率高出 3.5 个百分点,与试验结果一致。

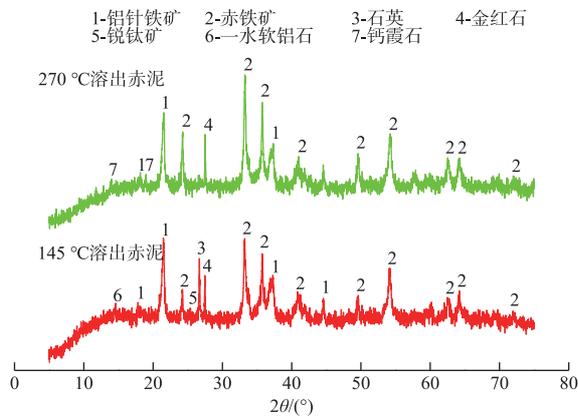


图 4 溶出赤泥的 XRD 谱  
Fig. 4 XRD patterns of digested red mud

### 2.4 理论物料消耗成本核算

根据以上试验结果,不考虑生产运行成本,仅对理论矿耗和化学碱耗进行物料消耗成本核算,结果如图 5 所示。假设铝土矿价格为 600 元/t,氢氧化钠价格为 3 000 元/t。

从图 5 可以看出,溶出温度 145 °C,溶出时间 10 min 时,理论物料消耗成本最低约为 1 530 元(以每吨 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 计,下同),随着溶出时间的延长,成本呈升高趋势,溶出 60 min 时约为 1 560 元。溶出温度为 220 °C 时,理论物料消耗成本最高,约为 1 600~1 675 元。溶出温度为 240~270 °C 时,溶出时间 5 min 时理论物料消耗成本最低,约为 1 540 元,延长溶出时间,理论生产成本显著升高。针对该混合型铝土矿,采用低温溶出工艺和高温短时间溶出工

艺的理论生产成本相差不大,但随着矿石和氢氧化钠价格的波动,其生产成本也会波动,具体选择何种溶出工艺还需进行详细经济评价及投资成本核算后确定。

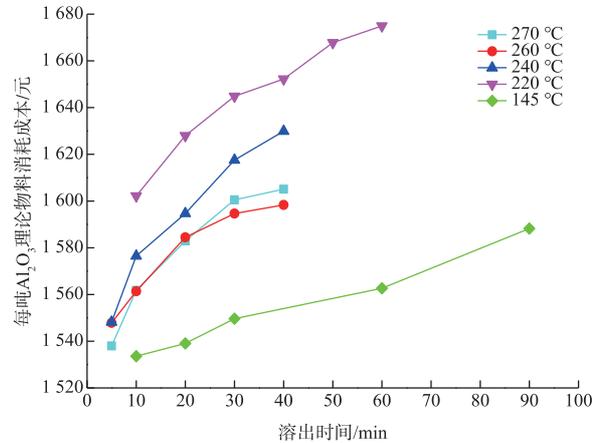


图 5 理论物料消耗成本核算结果  
Fig. 5 Accounting results of theoretical material consumption cost

### 2.5 溶出温度对赤泥沉降性能的影响

赤泥的沉降分离工序是氧化铝生产过程的一个重要环节,赤泥沉降性能的好坏直接影响氧化铝生产是否能够顺利进行,因此要确定该铝土矿的生产工艺,必须对赤泥沉降性能进行评价。

为了对比该矿石高低温溶出矿浆的沉降性能,分别将铝土矿在 145 °C 和 260 °C 进行了溶出,溶出矿浆苛碱浓度在沉降管中稀释至约 155 g/L,在 98 °C 水浴锅中保温 30 min 后,添加分离絮凝剂进行赤泥沉降性能测定,三种絮凝剂型号分别为 CY-6300、911-3 和 ZLKY-1,试验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 低温 145 °C 溶出矿浆沉降试验结果

Table 1 Settlement test results of digestion pulp at low-temperature 145 °C

絮凝剂种类	每吨干赤泥絮凝剂添加量/g	Na <sub>2</sub> O <sub>k</sub> /(g · L <sup>-1</sup> )	固含/(g · L <sup>-1</sup> )	沉降速度/(m · h <sup>-1</sup> )	压缩液固比
CY-6300	53.65	152	75	2.26	5.33
CY-6300	165.93	152	72	9.75	4.31
CY-6300	220.39	152	73	12.04	4.58
ZLKY-1	73.10	152	82	6.05	4.17
ZLKY-1	103.36	152	77	10.08	4.16
ZLKY-1	131.86	152	76	13.15	4.09
911-3	147.28	152	81	9.69	3.83
911-3	149.48	158	80	12.21	3.95
911-3	196.46	155	81	14.03	4.03

表2 高温260℃溶出矿浆沉降试验结果  
Table 2 Settlement test results of digestion pulp at high-temperature 260℃

絮凝剂	每吨干赤泥絮凝剂添加量/g	Na <sub>2</sub> O <sub>k</sub> /(g·L <sup>-1</sup> )	固含/(g·L <sup>-1</sup> )	沉降速度/(m·h <sup>-1</sup> )	压缩液固比
CY-6300	99.67	156	72	8.27	3.38
CY-6300	101.21	156	79	12.25	2.77
CY-6300	131.44	156	76	16.28	2.98
911-3	44.05	156	73	11.13	2.77
911-3	51.02	156	78	15.12	2.73
911-3	94.04	150	77	27.05	2.72
ZLKY-1	52.66	156	76	6.48	3.01
ZLKY-1	62.63	156	77	10.92	2.69
ZLKY-1	78.53	156	76	12.87	2.87

从表1和表2可以看出,在矿浆稀释苛碱浓度155 g/L左右、固含70~80 g/L条件下,溶出温度为145℃,赤泥沉降速度达到约10 m/h时,CY-6300、911-3和ZLKY-1三种絮凝剂的每吨干赤泥絮凝剂添加量分别为165.93、103.36、149.48 g;溶出温度为260℃时,达到相同的沉降速度,三种絮凝剂的添加量分别为101.21、51.02、62.63 g。整体来说,与低温溶出矿浆相比,达到相同的沉降速度,高温溶出矿浆的絮凝剂添加量降低了约50%。

同时从表中还可以看出,低温溶出赤泥的压缩液固比约为3~5,高温溶出赤泥的压缩液固比约为2~3,高温溶出赤泥的压缩性能显著优于低温溶出赤泥。综上所述,高温溶出矿浆的沉降性能要显著优于低温溶出矿浆,其原因可能是赤泥的物相经高温处理后,结晶状态更加完善,形貌更加规则,因而易于沉降<sup>[10]</sup>。

### 3 结论

1)三水铝石与一水软铝石混合型进口铝土矿中的三水铝石在145℃低温条件下较短时间就能溶出,且随着溶出时间的延长,氧化铝溶出率呈降低趋势。溶出温度低于240℃时,进口矿中的一水软铝石较难溶出。

2)提高溶出温度能显著提高混合型铝土矿氧化铝溶出率、降低矿耗,但同时也会造成赤泥N/S升高、碱耗增加。

3)高温溶出矿浆的沉降性能显著优于低温溶出矿浆,达到相同的沉降速度时,絮凝剂添加量减少约50%。

5)针对一水软铝石含量2.4%的进口矿,假设铝土矿价格为600元/t,氢氧化钠价格为3000元/t,对理论矿耗和化学碱耗进行物料消耗成本测算,采用低温溶出工艺和高温短时间溶出工艺的理论消耗成

本相差不大,但随着矿石和氢氧化钠价格的波动,其生产成本也会波动,具体选择何种溶出工艺还需进行详细经济评价及投资成本核算后确定。

### 参考文献

[1] 张舒琳. 中国铝土矿进口需求保持强劲[J]. 中国远洋海运, 2018(12):78-80.  
ZHANG S L. China's bauxite import demand remains strong[J]. Maritime China, 2018(12):78-80.

[2] 孙志伟, 鹿爱莉. 我国铝土矿资源开发利用现状、问题和对策[J]. 中国矿业, 2008(17):13-15.  
SUN Z W, LU A L. Status quo and issue and countermeasures of bauxite exploitation in China[J]. China Mining Magazine, 2008(17):13-15.

[3] 杨会宾, 涂赣峰, 潘晓林, 等. 高铁三水铝石矿溶出动力学[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(2):18-22.  
YANG H B, TU G F, PAN X L, et al. Dissolution kinetics of high iron gibbsitic bauxite[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(2):18-22.

[4] 潘晓林, 于海燕, 涂赣峰, 等. 石灰对三水铝石型铝土矿低温溶出行为的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(4):551-555.  
PAN X L, YU H Y, TU G F, et al. Effect of lime on digestion of gibbsitic bauxites at low temperature[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(4):551-555.

[5] LAMERANT J M. Process for the treatment of bauxites containing a mixture of alumina-trihydrate and alumina-monohydrate:EP0652181A1[P]. 1995-05-10.

[6] 姜跃华. 三水/一水软铝石混合型矿溶出工艺优化[J]. 轻金属, 2011(增刊1):57-59.  
JIANG Y H. Digestion process optimization of gibbsite mixed with boehmite[J]. Light Metals, 2011(Suppl. 1):57-59.

- stress; performance, microbial community, metabolic function and network analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 325: 124731. DOI: 10. 1016/j. biortech. 2021. 124731.
- [29] LOVLEY D R, FRAGA J L, COATES J D, et al. Humics as an electron donor for anaerobic respiration[J]. *Environmental Microbiology*, 1999, 1(1): 89-98.
- [30] LIU L J, JI M, WANG F, et al. Insight into the short-term effect of fulvic acid on nitrogen removal performance and *N*-acylated-*L*-homoserine lactones (AHLs) release in the anammox system [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135285. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2019. 135285.
- [31] ZHANG L, WANG Y P, SODA S, et al. Effect of fulvic acid on bioreactor performance and on microbial populations within the anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 318: 124094. DOI: 10. 1016/j. biortech. 2020. 124094.
- [32] 常尧枫, 郭萌蕾, 谢军祥, 等. 厌氧氨氧化脱氮除碳功能菌群结构及代谢途径[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1138-1145.
- CHANG Y F, GUO M L, XIE J X, et al. The structure and metabolic pathway of functional bacteria for nitrogen and carbon removal in Anammox[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1138-1145.
- [33] 周梦雨, 彭党聪, 韩芸, 等. 间歇曝气对部分硝化-厌氧氨氧化处理氨氮废水的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1120-1127.
- ZHOU M Y, PENG D C, HAN Y, et al. Partial nitrification-anaerobic ammonia oxidation for the treatment of moderately concentrated ammonia-nitrogen wastewater: effect of intermittent aeration on nitrogen removal performance[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1120-1127.
- [34] HU Q, ZHOU N, RENE E R, et al. Stimulation of anaerobic biofilm development in the presence of low concentrations of toxic aromatic pollutants [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281: 26-30.

#### (上接第 17 页)

- [14] 赵明, 程利振. 顶吹浸没冶金技术应用现状及展望[J]. *有色冶金设计与研究*, 2017, 38(1): 13-19.
- ZHAO M, CHENG L Z. Application situation and prospect of top submerged smelting technology [J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2017, 38(1): 13-19.
- [15] 保自坤, 陈学刚, 庄福礼, 等. “富氧顶吹熔炼-侧吹还原熔炼直接炼铅工艺”搭配处理低品位铅锌共生氧化矿生产实践[J]. *中国有色冶金*, 2014, 43(6): 5-9.
- BAO Z K, CHEN X G, ZHUANG F L, et al. Operational practices of oxygen-enriched top-blown smelting and side-blown reduction smelting lead process for treating low-grade Pb-Zn paragenetic oxidized ore [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2014, 43(6): 5-9.
- [16] BALE C W, CHARTRAND P, DEGTEROV S A. FactSage thermochemical software and databases [J]. *Calphad*, 2009, 33(2): 295-311.
- [17] BALE C W, BELISLE E, CHARTRAND P. FactSage thermochemical software and databases [J]. *Calphad*, 2016, 54(2): 35-53.

#### (上接第 42 页)

- [7] 张正勇. 三水/一水软铝石混合型铝土矿溶出实验研究[J]. *轻金属*, 2019(1): 10-13.
- ZHANG Z Y. Experimental study on digestion of gibbsite and boehmite mixture [J]. *Light Metals*, 2019(1): 10-13.
- [8] 毕诗文. 铝土矿的拜耳法溶出[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 93-94.
- BI S W. Bayer dissolution of bauxite [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 93-94.
- [9] 刘桂华, 范旷生, 李小斌. 氧化铝生产中的钠硅渣[J]. *轻金属*, 2006(2): 13-17.
- LIU G H, FAN K S, LI X B. Sodium aluminosilicate hydrate in alumina production [J]. *Light Metals*, 2006(2): 13-17.
- [10] 李小斌, 赵东峰, 章宣, 等. 赤泥主要物相的表面性质对其沉降性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(1): 281-286.
- LI X B, ZHAO D F, ZHANG X, et al. Effect of surface property of main minerals in red mud on their sedimentation ability [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(1): 281-286.