

赤泥主要物相的表面性质对其沉降性能的影响

李小斌^{1,2}, 赵东峰¹, 章 宣¹, 刘桂华^{1,2}, 彭志宏^{1,2}, 周秋生^{1,2}

(1. 中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 难冶有色金属资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410083)

摘 要: 测定甘油、苯及二碘甲烷与氧化铝生产中赤泥主要物相之间的接触角, 采用 Owens 二液法估算各物相的表面自由能, 分析了赤泥主要物相的表面性质与其沉降性能之间的关系, 并讨论针铁矿在高压处理后沉降性能变差的原因。结果表明: 甘油-苯和甘油-二碘甲烷测定数据估算的溶剂化趋势按水化石榴石、硅酸二钙、水合铝硅酸钠、钛酸钙、针铁矿、赤铁矿、石灰石的顺序递减, 而其沉降性能与之相反, 即溶剂化趋势越小, 沉降性能越好。赤泥主要物相中, 针铁矿高压处理后转变为赤铁矿, 固相粒径变小, 溶剂化趋势增加, 从而导致其沉降性能恶化。

关键词: 赤泥; 表面自由能; Owens 二液法; 沉降性能; 针铁矿

中图分类号: TF09; O647.11

文献标志码: A

Effect of surface property of main minerals in red mud on their sedimentation ability

LI Xiao-bin^{1,2}, ZHAO Dong-feng¹, ZHANG Xuan¹, LIU Gui-hua^{1,2}, PENG Zhi-hong^{1,2}, ZHOU Qiu-sheng^{1,2}

(1. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Refractory Non-ferrous Metals Resources, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The contact angles of glycerol, benzene and diiodomethane on the main minerals in red mud from alumina production were measured, and the corresponding surface free energy values were estimated by Owens two liquids method. And then, the relationship between the sedimentation ability of the minerals and their surfacial properties was discussed. Further, the reason for the sedimentation ability of goethite getting worse after high-pressure treatment was also discussed. The results show that the solvent tendency reduces in the following order: hydration garnet, dicalcium silicate, sodium alumino-silicate hydrate (DSP), calcium titanate, goethite, hematite and limestone, while the sedimentation ability tendency is reverse. Less solvent tendency improves their sedimentation. In addition, the sedimentation ability of fresh hematite deteriorates due to the thinning in grain size and the decrease in solvent tendency when goethite changes into hematite in aluminate solution at high pressure.

Key words: red mud; surface free energy; Owens two liquids method; sedimentation ability; goethite

赤泥是氧化铝生产中的残渣, 物相复杂, 主要有赤铁矿、针铁矿、水合铝硅酸钠(方钠石)、硅酸二钙、水化石榴石、钛酸钙、石灰石以及少量未溶出的氧化铝水合物等^[1-4]。氧化铝工业一般采用絮凝沉降的方法将赤泥与溶液进行分离。但随着铝土矿资源的日益贫

化, 杂质矿物含量的增大, 氧化铝生产中赤泥量显著增大^[5], 沉降性能明显恶化, 赤泥分离洗涤过程已成为氧化铝生产过程瓶颈之一^[6]。为了强化赤泥沉降分离过程, 胡少伟等^[7]从宏观上针对粒度、固含量、絮凝剂、温度、时间等因素对赤泥絮凝沉降过程的影响

进行了研究,但未就微观机理进行阐述。絮凝过程是絮凝剂官能团与赤泥表面发生相互作用^[8],因而,赤泥表面性质^[9]将对絮凝沉降性能的影响至关重要,但有关这方面的研究报道极少,针对赤泥主要物相的表面性质对沉降性能的影响未见报道。此外,高建阳等^[10]认为针铁矿是赤泥分离洗涤过程中沉降性能恶化的主要原因,有关其它物相的沉降分离性能也未见报道。因此,本文作者试图通过测定赤泥中主要物相的接触角以计算其表面自由能,用极性力与色散力之比表征物相的表面性质,结合沉降实验分析固相表面性质与沉降性能之间的关系,以期对赤泥液固分离过程研究提供理论依据。

1 实验

1.1 实验原料

石灰石产于北京红星化工厂,振动磨磨细,粒度小于75 μm 。

针铁矿(化学纯)产于上海试一化学试剂有限公司。

赤铁矿:硫酸铁溶液与氢氧化钠溶液反应并过滤、洗涤、干燥、焙烧(500 $^{\circ}\text{C}$),其红外谱特征峰与图库里赤铁矿的特征峰吻合。

硅酸二钙:CaO粉末和 SiO_2 粉末按摩尔比2:1混匀并在1000 $^{\circ}\text{C}$ 焙烧1 h,冷却后以振动磨磨细,粒度小于75 μm 。

钛酸钙:CaO粉末和 TiO_2 粉末按摩尔比1:1混匀并在1000 $^{\circ}\text{C}$ 焙烧1 h,冷却后以振动磨磨细,粒度小于75 μm 。

水合铝硅酸钠(Sodium alumino-silicate hydrate, DSP):高岭土在铝酸钠溶液($\alpha_k=2.0$, $\rho_k=200$ g/L)中常压溶出^[11](110 $^{\circ}\text{C}$),过滤洗涤,干燥。

水化石榴石:高岭土用铝酸钠溶液($\alpha_k=2.0$, $\rho_k=178$ g/L)在92 $^{\circ}\text{C}$ 溶出3 h,过滤取上清液($\rho(\text{SiO}_2)$ 为8~10 g/L),添加氧化钙在90 $^{\circ}\text{C}$ 反应3 h,过滤洗涤所得滤渣为水化石榴石。

1.2 接触角的测定过程

实验先将所得物相的粉末过筛(粒径 <74 μm),压片后用极性的丙三醇(即甘油)和非极性的苯及二碘甲烷测定接触角,压片过程采用YP-2红外压片机(上海山岳科学仪器有限公司)生产,压力控制在22 MPa。

由于物相的粒度大小对接触角的测定有重要影响,故对所得物相进行粒度分析,其粒度分布表如表

1所列(表中的 D_{10} 、 D_{25} 、 D_{50} 、 D_{75} 和 D_{90} 分别代表累积粒度分布率为10%、25%、50%、75%和90%的粒径)。由表1看出,各物相中赤铁矿为1 μm 以下,其它物相的平均粒度均处于2~8 μm 之间。

采用上海梭伦信息科技有限公司生产的CL200B型接触角测定仪。测量时,用微量进样器将检测液体在距固体表面约3 mm处滴加在固体表面形成座滴,取5次接触角的平均值作为该座滴的接触角,取5个座滴的接触角平均值作为该液体在该表面的接触角^[12]。

1.3 沉降实验

分别取5 g石灰石、针铁矿、赤铁矿、硅酸二钙、钛酸钙、水合铝硅酸钠和水化石榴石加入到150 mL钢弹中,并分别移取100 mL铝酸钠溶液至钢弹中,编号依次为1#~7#。在95 $^{\circ}\text{C}$ 的低压釜中溶出30 min后;将溶出浆液转移到带有刻度的玻璃沉降管中,在沉降管加入2 mL絮凝剂(聚丙烯酰胺,相对分子质量为 2.3×10^7 ,水解度为30%),然后在90 $^{\circ}\text{C}$ 下进行沉降分离。

2 结果与讨论

2.1 赤泥主要物相接触角的测定

固体表面因原子排列、键合方式等不同,不仅表面剩余价键不同,且表面性质差异明显,这种表面性质的差异可通过固体润湿性来表征。润湿性可以用接触角来表征,液滴在固液接触边缘的切线与固体平面间的夹角称为接触角。接触角越小,润湿性越好。本研究测定甘油、苯及二碘甲烷与赤泥主要物相之间的接触角,其实验结果如表2所列。

由表2可知,甘油与硅酸二钙、水合铝硅酸钠、水化石榴石、钛酸钙的润湿性差,而与赤铁矿、石灰石、针铁矿的润湿性好。苯与水合铝硅酸钠的润湿性最好,而与赤铁矿的润湿性最差。二碘甲烷与石灰石的润湿性最好,而与水化石榴石的润湿性最差。

2.2 赤泥中主要物相表面自由能的计算

表面自由能是分子间力的一种直接体现,液体或固体表面分子受到不平衡的分子间力的影响,与内部分子比较,具有附加的能量^[13]。它可用Owens二液法^[14]进行测定和计算。表面自由能的测定选用的液体须有不同的极性,即从极性液体和非极性液体中各选一种液体。本文作者选用的甘油是极性液体,而苯和

表 1 赤泥主要物相的粒度分布

Table 1 Grain size distribution of main minerals in red mud

Accumulative particle distribution	Grain size/ μm						
	Limestone	Goethite	Hematite	Dicalcium silicate	Calcium titanate	DSP	Hydration garnet
$D_{10}^{1)}$	8.07	12.35	0.82	14.64	4.80	12.78	8.39
$D_{25}^{1)}$	5.20	7.93	0.73	12.60	3.77	8.63	6.16
$D_{50}^{1)}$	2.59	4.05	0.62	7.55	2.48	5.08	4.09
$D_{75}^{1)}$	1.06	1.07	0.54	3.22	1.29	2.47	1.79
$D_{90}^{1)}$	0.72	0.67	0.46	0.82	0.54	1.16	0.88
$D_{(4,3)}^{1)}$	3.59	5.92	0.63	7.64	2.60	6.13	4.37

1) D_{10} , D_{25} , D_{50} , D_{75} , D_{90} and D_{50} are average particles sizes in mass; $D_{(4,3)}$ —Average particle size in volume.

表 2 测试液体在赤泥主要物相表面的平均接触角

Table 2 Average contact angle of text liquids on main minerals of red mud

Tested liquid	Average contact angle/($^{\circ}$)						
	Goethite	Hematite	DSP	Hydration garnet	Calcium titanate	Limestone	Dicalcium silicate
Glycerol	32.78	43.34	28.18	28.26	27.8	42.92	28
Benzene	9.27	15.24	7.95	9.31	10.36	13.38	14.30
Diiodomethane	11.27	12.93	17.93	23.76	12.51	10.41	18.26

二碘甲烷是非极性液体, 分别计算甘油-苯和甘油-二碘甲烷两组表面自由能数据, 以确定赤泥主要物相的表面自由能。

Owens/Went 固体表面自由能估算法主要用于估算特殊固体表面与测试液体的方法。Owens 构建了一个两参数体系用于描述分子间作用力, 如式(1)所示:

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_S^D \gamma_L^D)^{1/2} + 2(\gamma_S^P \gamma_L^P)^{1/2} \tag{1}$$

采用两种测试液体, 将表面自由能数据及测得的接触角代入式(1)中可得如下方程组:

$$\gamma_{L1}(1 + \cos \theta_1) = 2(\gamma_S^D \gamma_{L1}^D)^{1/2} + 2(\gamma_S^P \gamma_{L1}^P)^{1/2} \tag{2}$$

$$\gamma_{L2}(1 + \cos \theta_2) = 2(\gamma_S^D \gamma_{L2}^D)^{1/2} + 2(\gamma_S^P \gamma_{L2}^P)^{1/2} \tag{3}$$

式中: γ_L 为液体表面自由能; γ_L^D 为液体色散力; γ_L^P 为液体极性力; γ_S^D 为固体色散力; γ_S^P 为固体极性力。

由式(2)和(3)可求出 γ_S^D 和 γ_S^P , 据 $\gamma_S = \gamma_S^D + \gamma_S^P$ 即算得固体表面自由能, 实验用测试液体表面自由能数据^[15]如表 3 所列。

色散力表示范德华力以及所应用的测试液体与固体表面形成的一些相互作用力。极性力理论上表示一些特殊的偶极相互作用力, 如偶极-偶极、氢键以及其他一些特殊的分子间作用力。固体极性力越大, 说明其在溶液中的溶剂化趋势越大, 故可用极性力与色散力之比来表征赤泥主要物相的溶剂化趋势。本研究用甘油-苯和甘油-二碘甲烷组合分别算得赤泥主要物相的表面自由能数据如表 4 及 5 所列。

表 3 测试液体的表面自由能数据

Table 3 Surface free energy of tested liquids

Tested liquid	$\gamma_L^P / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L^D / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_L / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	γ_L^P / γ_L^D	Polarity
Glycerol	26.4	37.5	63.9	0.71	Polar
Benzene	0	28.86	28.86	0	Non-polar
Diiodomethane	2.3	48.5	50.8	0.05	Non-polar

表 4 甘油-苯组合表面自由能计算结果

Table 4 Calculated surface free energy from glycerol-benzene analysis results

Mineral	$\gamma_S^D / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_S^P / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	γ_S^P / γ_S^D	$\gamma_S / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
Goethite	28.48	25.86	0.91	54.34
Hematite	27.85	19.81	0.71	47.66
DSP	28.58	28.38	1.00	56.96
Hydration garnet	28.48	28.46	1.00	56.94
Calcium titanate	28.39	28.82	1.00	57.21
Limestone	28.08	19.86	0.71	47.94
Dicalcium silicate	27.97	29.22	1.04	57.19

由表 4 可以看出, 赤泥主要物相的色散力(γ_S^D)均为 28 mN/m 左右, 但极性力(γ_S^P)之间存在很大差别, 说明测试液体与赤泥主要物相间范德华力相差不大,

表 5 甘油-二碘甲烷组合表面自由能计算结果

Table 5 Surface free energy from glycerol-diiodomethane analysis results

Mineral	$\gamma_S^D/$ (mN·m ⁻¹)	$\gamma_S^P/$ (mN·m ⁻¹)	γ_S^P/γ_S^D	$\gamma_S/$ (mN·m ⁻¹)
Goethite	40.83	14.67	0.36	55.50
Hematite	43.13	8.49	0.20	51.62
DSP	38.08	18.87	0.50	56.95
Hydration garnet	35.93	20.71	0.58	56.64
Calcium titanate	39.54	17.85	0.45	57.39
Limestone	43.59	8.43	0.19	52.02
Dicalcium silicate	37.94	19.07	0.50	57.01

而它们间偶极-偶极作用力相差较大。赤泥主要物相的溶剂化趋势(即 γ_S^P/γ_S^D)从小到大的顺序为石灰石、赤铁矿、针铁矿、水合铝硅酸钠、水化石榴石、钛酸钙、硅酸二钙。而它们的表面自由能(即 γ_S)按钛酸钙、硅酸二钙、水合铝硅酸钠、水化石榴石、针铁矿、石灰石、赤铁矿的顺序减小。

由表 5 看出, 赤泥主要物相的溶剂化趋势按石灰石、赤铁矿、针铁矿、钛酸钙、水合铝硅酸钠、硅酸二钙、水化石榴石的顺序增大, 这与表 4 的顺序基本一致, 表 4 的数据中水合铝硅酸钠、水化石榴石、钛酸钙、硅酸二钙四者的 γ_S^P/γ_S^D 相差不大, 而它们的顺序与表 5 所得顺序的差异, 可能是由实验误差引起的。甘油-二碘甲烷算出的表面自由能与表 4 中甘油-苯估算的表面自由能顺序相同。

2.3 物相的表面性质与沉降性能之间的关系分析

石灰石、针铁矿、赤铁矿、硅酸二钙、钛酸钙、水合铝硅酸钠和水化石榴石这 7 种主要物相在赤泥中普遍存在, 而且它们的存在对赤泥沉降性能有较大影响。故研究此 7 种主要物相表面性质与沉降性能间的关系。

沉降实验结果如图 1 所示。由图 1 可看出, 赤泥主要物相在絮凝剂作用下均能沉降, 虽然它们中部分物相的沉降性能相差不大, 但能分辨出它们的沉降性能按石灰石、赤铁矿、针铁矿、钛酸钙、水合铝硅酸钠、硅酸二钙、水化石榴石的顺序递减, 这与用 Owens 理论的甘油-二碘甲烷组合推测的溶剂化趋势顺序完全吻合, 说明赤泥主要物相的沉降性能与其表面性质密切相关, 即物相的溶剂化趋势越小, 其沉降性能越好。

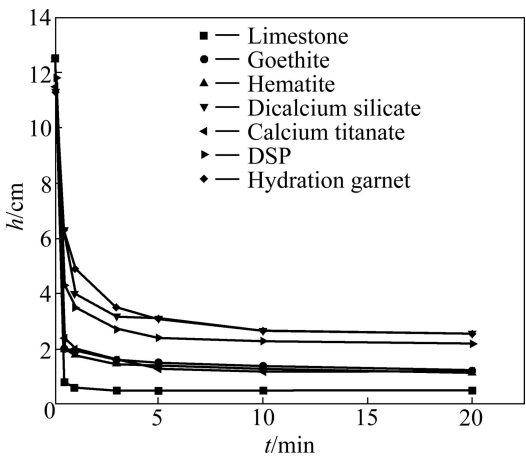


图 1 赤泥主要物相的沉降数据

Fig. 1 Sedimentation data of main minerals in red mud (Concentration of sodium aluminate solution: $\rho(\text{AO})=180 \text{ g/L}$, $\alpha_k=1.45$)

2.4 针铁矿在铝酸钠溶液中的沉降性能

在赤泥主要物相中, 石灰石、赤铁矿的沉降性能较好, 而钛酸钙、水合铝硅酸钠、硅酸二钙、水化石榴石沉降性能依次降低, 这均符合生产实际。但针铁矿的沉降性能良好, 却与文献[10]中的结论不一致。该文献中指出, 铝土矿中含铁矿物以赤铁矿、铝赤铁矿为主, 赤泥浆液有较好的沉降性能; 若以针铁矿、铝针铁矿为主, 赤泥浆液的沉降速度很慢, 有的甚至没有清液层, 无法满足工业生产的要求。

本研究根据接触角算得的表面自由能数据却说明针铁矿溶剂化趋势小, 且低压釜溶出后浆液沉降实验表明针铁矿沉降性能更好。为了解释该问题, 本文作者对针铁矿及赤铁矿进行高压处理并添加絮凝剂进行沉降。

配制 $\rho(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 180 g/L 、 α_k 为 1.45 左右的铝酸钠溶液, 分别取 5 g 针铁矿和赤铁矿于高压釜钢弹中, 并移取 100 mL 铝酸钠溶液, 将溶出浆液转移至沉降管中, 在 $260 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高压釜中处理 1 h; 2 mL 聚丙烯酰胺, 在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行沉降分离。在针铁矿的沉降过程中, 添加絮凝剂后, 无大絮团产生, 前 2 min 沉降过程不明显, 溶液很浑浊, 但 3 min 时能分辨出有固体沉降物, 随着时间的延长, 上层液体逐渐澄清; 10 min 后, 取上清液过滤烘干测得浮游物含量为 8 g/L , 说明针铁矿在高压釜中处理后沉降性能变差了; 但同样条件下的赤铁矿却能快速分离, 浮游物含量为 0.2 g/L , 沉降性能好。

不同处理条件下的针铁矿沉降性能迥异, 且高压处理后的针铁矿和赤铁矿沉降性能也大不相同。为了

解释该现象, 对针铁矿低压处理产物(条件: 温度 95 ℃, 氧化铝浓度为 180 g/L、 α_k 为 1.45 左右, 时间为 30 min)、针铁矿高压处理产物和赤铁矿高压处理产物的进行了 XRD 检测, 如图 2 所示, 其 XRD 谱显示低压釜中处理后, 针铁矿与原矿一样, 呈无定形固体; 而针铁矿在高压釜中转变为赤铁矿, 赤铁矿在高压釜中处理后无变化。针铁矿和赤铁矿在高压处理后均为赤铁矿, 其沉降性能却不同, 故须观察其微观结构, 其扫描电镜照片如图 3 所示。由图 3 看出, 针铁矿高

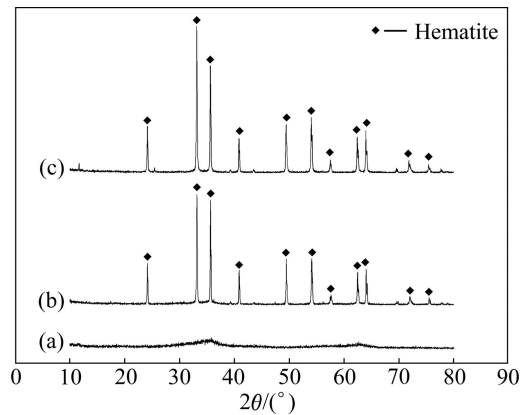


图 2 针铁矿不同处理方式产物的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of products from goethite treated at different temperature treatments: (a) 950 ℃, 30 min, goethite; (b) 260 ℃, 60 min, goethite; (c) 260 ℃, 60 min, hematite

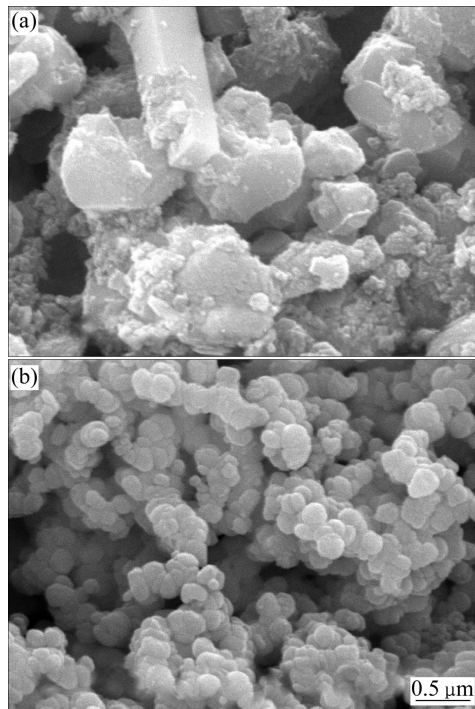


图 3 针铁矿和赤铁矿高压处理后产物的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of products from goethite (a) and hematite (b) treated at 260 ℃, 60 min

压处理后变成的赤铁矿存在较多细小颗粒, 故难于沉降; 而赤铁矿高压处理后形貌规则, 为球状颗粒的团聚体, 因而易于沉降。

在本研究中测得的甘油和二碘甲烷与针铁矿、针铁矿低压处理后产物和针铁矿高压处理后产物之间的接触角以及计算的表面自由能数据如表 6 所列。

表 6 针铁矿不同处理方式后产物的表面自由能数据

Table 6 Surface free energy of products from goethite treated at different temperature

Solid	Contact angle/(°)	
	Glycerol	Diiodomethane
Goethite	32.78	11.27
Product from goethite at 950 ℃, 30 min	34.22	18.21
Product from goethite at 260 ℃, 60 min	26.37	12.65

Solid	Data of surface free energy/(mJ·m ⁻²)			
	$\gamma_s^D / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_s^P / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	γ_s^P / γ_s^D	$\gamma_s / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
Goethite	40.83	14.67	0.36	55.50
Product from goethite at 950 ℃, 30 min	39.23	15.17	0.39	54.40
Product from goethite at 260 ℃, 60 min	39.24	18.69	0.48	57.93

由表 6 看出, 针铁矿低压处理后的产物极性力相对原矿增大了 0.5 mJ/m², 极性力与色散力之比增大 0.03, 说明低压处理前后针铁矿的溶剂化趋势基本无变化; 而针铁矿高压处理后产物的极性力增大了 4.02 mJ/m², 极性力与色散力之比增大了 0.12, 说明其溶剂化趋势明显增大。针铁矿在低压釜中处理后表面能基本不变, 而在高压釜中转变为赤铁矿, 固相表面能明显增大。

3 结论

- 1) 甘油-苯和甘油-二碘甲烷估算赤泥主要物相的表面自由能及溶剂化趋势排序基本一致; 其溶剂化由小到大的趋势按石灰石、赤铁矿、针铁矿、钛酸钙、水合铝硅酸钠、硅酸二钙、水化石榴石。
- 2) 溶剂化趋势越小, 沉降性能越好, 说明赤泥主要物相的沉降性能与其表面性质密切相关。
- 3) 针铁矿在低压处理($t=95\text{ }^{\circ}\text{C}$)后沉降性能好, 而高压处理($t=260\text{ }^{\circ}\text{C}$)后沉降性能变差。因为针铁矿在高压釜中转变为赤铁矿, 其溶剂化趋势增大, 且产品中

存在较多细微颗粒, 导致浮游物浓度高, 沉降性能恶化。

REFERENCES

- [1] AKINCI A, ARTIR R. Characterization of trace elements and radionuclides and their risk assessment in red mud[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(4): 417–421.
- [2] 刘万超, 杨家宽, 肖波. 拜耳法赤泥中铁的提取及残渣制备建材[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(1): 187–192.
LIU Wan-chao, YANG Jia-kuan, XIAO bo. Recovering iron and preparing building material with residues from Bayer red mud[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(1): 187–192.
- [3] LI Xiao-bin, XIAO Wei, LIU Wei. Recovery of alumina and ferric oxide from Bayer red mud rich in iron by reduction sintering[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(5): 1342–1347.
- [4] PARAMGURU R K, RATH P C, MISRA V N. Trends in red mud utilization—A review[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2005, 26(1): 1–29.
- [5] ZHANG Ying, ZHENG Shi-li, DU Hao. Alumina recovery from spent Bayer liquor by methanol[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(s): s165–s168.
- [6] 陈锋, 王连嵩, 毕诗文. 一种带有苯环结构的羟肟酸类赤泥絮凝剂的合成及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(3): 498–503.
CHEN Feng, WANG Lian-song, BI Shi-wen. Synthesis and application of a new high-molecular-mass hydroxamic acid flocculant containing phenyl[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(3): 498–503.
- [7] 胡少伟, 彭志宏, 郝红杰. 新型赤泥分离洗涤工艺研究及其产业化应用[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
HU Shao-wei, PENG Zhi-hong, HAO Hong-jie. Research and industrialization of new separation and washing process of red mud[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [8] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 105–110.
YANG Zhong-yu. *Alumina production technology*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1993: 105–110.
- [9] CHVEDOV D, OSTAP S, LE T. Surface properties of red mud particles from potentiometric titration[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 182(1/2/3): 131–141.
- [10] 高建阳, 朱军, 祝凤美. 富铁三水铝土矿中铁矿物的反应特性[J]. *矿业工程*, 2008, 6(4): 39–41.
GAO Jian-yang, ZHU Jun, ZHU Feng-mei. Research on reaction properties of ferrous mineral in hydrargillite[J]. *Mining Engineering*, 2008, 6(4): 39–41.
- [11] ZHAO Qing-jie, YANG Qiao-fang, CHEN Qi-yuan. Behavior of silicon-containing minerals during Bayer digestion[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(s1): s1–s9.
- [12] 王晖, 顾帼华, 邱冠周. 接触角法测量高分子材料的表面自由能[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(5): 942–947.
WANG Hui, GU Guo-hua, QIU Guan-zhou. Evaluation of surface free energy of polymers by contact angle goniometry[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, 37(5): 942–947.
- [13] 范克雷维伦 D W. 聚合物的性质: 性质的估算及其与化学结构的关系[M]. 许元泽, 赵得禄, 吴大诚, 译. 北京: 科学出版社, 1981: 121–129.
van KREVELEN D W. *Properties of polymers: Their estimation and correlation with chemical structure*[M]. XU Yuan-ze, ZHAO De-lu, WU Da-cheng, transl. Beijing: Science Press, 1981: 121–129.
- [14] OWENS D K, WENDT R C. Estimation of the surface free energy of polymers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1969, 13(8): 1741–1747.
- [15] LUNER P E, OH E. Characterization of the surface free energy of cellulose ether films[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 181(1/3): 31–48.

(编辑 李艳红)