

甘肃某石英岩矿选矿提纯试验研究

李晓慧¹, 任子杰^{1,2}, 高惠民^{1,2}, 沈彦旭¹, 刘志¹, 宋昱晗^{1,2}

1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070

中图分类号: TD973.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0093-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.014

摘要 针对甘肃某石英岩矿进行选矿试验研究, 在对原矿进行工艺矿物学研究的基础上, 研究磁选、擦洗、浮选等工艺对石英岩矿含铁杂质的去除效果, 并对比了“磁选—擦洗”与“磁选—浮选”工艺的提纯效果。以 SiO₂ 含量为 99.42%、Al₂O₃ 含量为 2 400 μg/g、Fe₂O₃ 含量为 1 814 μg/g 的石英岩矿为原料, 采用“磨矿—磁选—浮选”选矿工艺提纯效果较好。结果表明, 试样经铁球磨矿后, 在磁感应强度 1.4 T 条件下进行三段磁选除铁, 再以 H₂SO₄ 为调整剂、松醇油为起泡剂、PSK-78 石油磺酸钠为捕收剂进行反浮选试验, 可获得 SiO₂ 含量为 99.61%、Fe₂O₃ 含量为 185 μg/g、回收率为 51.34% 的石英精矿。该工艺除铁效果显著、污染小, 可大幅度提升产品的附加值, 具有良好的应用前景。

关键词 石英岩; 磁选; 擦洗; 浮选

1 前言

石英的主要成分为 SiO₂, 是一种造岩矿物, 也是一种非常典型的非金属矿物^[1,2]。它具有耐高温、化学性质稳定等特点, 广泛应用于玻璃制品、航空航天、信息技术等领域, 是国民经济发展中重要的原材料^[3-5]。通常石英岩矿床规模较大, 地质产状稳定, 开采条件好, 矿石中 SiO₂ 含量大都在 90% 以上, 适合大规模工业开发^[6]。石英岩矿中常见的赤褐铁矿、绿帘石等脉石矿物均为弱磁性矿物, 可以通过磁选工艺去除^[7]。长石、云母作为石英岩中常见的伴生脉石矿物, 因长石和石英均属于架状硅酸盐矿物, 二者在晶体结构及化学性质方面相近, 故分离比较困难, 通过浮选分离石英和长石、云母等杂质矿物是目前最有效的途径^[8-11]。浮选方法主要有氢氟酸法、无氟有酸法、无氟无酸法等^[12]。氢氟酸法是目前最为成熟的方法, 但会引起生产安全、环境污染、健康危害等问题^[13], 目前采用无氟有酸法来浮选分离石英和长石较为普遍。另外, 擦洗也可去除石英颗粒表面的污染铁及粘性杂质矿物。

随着光纤、半导体等高新技术产业飞速发展, 能作为优质原料直接利用的石英资源日趋枯竭^[14], 合理地开发利用现有的石英资源、探索适宜的提纯工艺已成为当务之急^[15]。甘肃某石英岩矿矿物共生关系复杂,

为提升产品的附加值对该矿石进行了提纯试验研究, 以确定合理的选矿工艺流程及最佳工艺参数。

2 试样性质与试验方法

2.1 原矿性质

试验中使用的矿石样品采集自甘肃某地石英岩矿, 主要为粒度>200 mm 的石英矿块, 肉眼观察呈灰白色。原矿化学分析结果见表 1, XRD 图谱见图 1, 偏光显微镜照片见图 2。

表 1 原矿试样 ICP 测试分析结果(氧化物经换算)/(μg·g⁻¹)
Table 1 ICP test and analysis results of raw ore samples (the oxides are converted)

成分	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	MnO	As ₂ O ₃	P ₂ O ₅
含量	2 400	1 814	750	267	194	93	61	56	43
成分	BaO	K ₂ O	B ₂ O ₃	SrO	Li ₂ O	Cr ₂ O ₃	ZnO	CuO	PbO
含量	40	31	25	24	15	9	6	5	4
成分	V ₂ O ₅	CoO	SnO ₂	Bi ₂ O ₃	BeO	Sb ₂ O ₃	NiO	CdO	
含量	2	2	1	1	1	1	1	1	

由 ICP、XRD 和偏光显微镜观察综合分析, 该石英岩矿主要矿物成分为石英, SiO₂ 含量为 99.42%, 主

收稿日期: 2022-10-25

作者简介: 李晓慧(1999—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为非金属矿选矿提纯研究, E-mail: 2559663466@qq.com。

通信作者: 任子杰(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为非金属矿选矿提纯与矿物材料、矿山固废资源化, E-mail: rzj424711087@163.com。

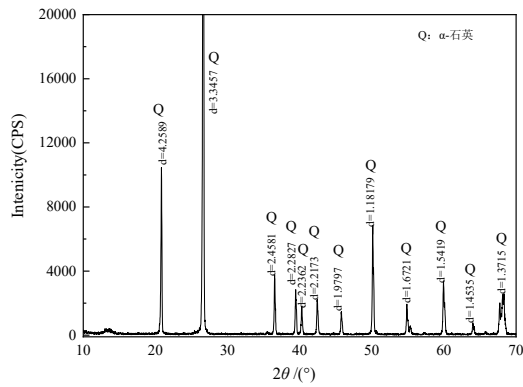


图1 原矿试样 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of raw ore samples

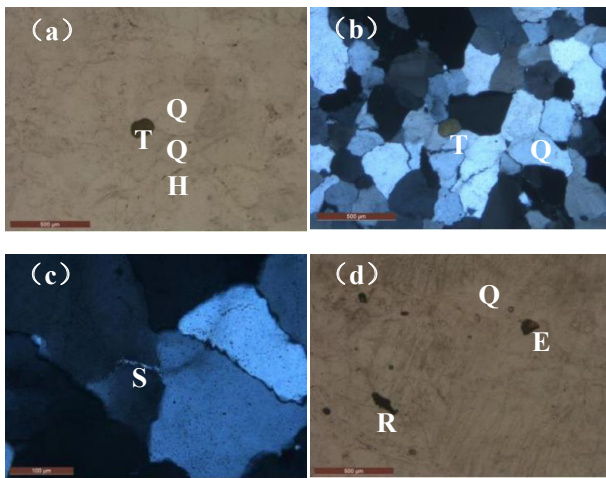


图2 原矿偏光显微镜照片(a)~(d)(Q 石英、T 电气石、H 赤褐铁矿、R 金红石、L 绿帘石、S 绢云母)
Fig. 2 Polarizing microscope photos of raw ore (a) ~ (d) (Q—Quartz, T—Tourmaline, H—Hematite, R—Rutile, E—Epidote, S—Sericite)

要杂质矿物有赤(褐)铁矿、绿帘石、电气石、绢云母和金红石等, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量分别为 $2\ 400\ \mu\text{g/g}$ 和 $1\ 814\ \mu\text{g/g}$ 。岩石为中细粒变晶结构, 局部变余砂状结构, 块状构造。大部分矿石为无色、粒状、颗粒大小比较均匀。石英颗粒多为直边接触或缝合线接触, 颗粒间有尘线(微细粒赤(褐)铁矿)、微细鳞片的绢云母。石英颗粒部分表面干净, 部分表面较脏。少量的石英颗粒内部含金红石矿物包裹体。原矿 Fe 元素含量较高, 仅可用作低档玻璃原料, 若要加工成优质浮法玻璃或光伏玻璃原料, 提高其附加值, 须通过选矿提纯工艺除去含铁杂质矿物。

2.2 试样制备

原矿经颚式破碎机粗碎、对辊破碎机细碎、筛分后得到粒径为 $+0.6\ \text{mm}$ 的石英矿样, 对 $+0.6\ \text{mm}$ 粒级矿样进行闭路磨矿分级(磨矿介质为铁球), 得到的 $-0.6+0.1\ \text{mm}$ 粒级石英砂(占原矿的 61.19%)即为本试验待处理样品。

2.3 试验方法

本试验的目的主要是提高石英精矿中 SiO_2 的含量, 降低铁杂质的含量。原矿中 Fe 元素主要赋存于微量的赤(褐)铁矿、绢云母、电气石和绿帘石中。

去除磁性杂质及加工过程中混入的机械铁主要通过磁选法^[16], 尤其强磁选工艺可最大限度地去除赤铁矿、褐铁矿、电气石和绿帘石等弱磁性矿物。

绢云母、白云母等非磁性矿物难以通过磁选分离。擦洗可使覆盖在石英颗粒表面的脉石矿物及磨矿中形成的含铁薄膜脱落分离, 还可进一步擦碎未成单体的矿物集合体, 为石英砂下一步的选矿提纯提供基础。

浮选是分离伴生在石英砂中的含铁矿物的重要手段之一^[17]。它利用不同矿物之间表面性质的差异, 应用浮选药剂分离出含铁矿物, 降低石英中的铁含量。

3 试验结果与讨论

3.1 磁选

3.1.1 磁选段数的影响

采用 SLon-100 型周期式脉动高梯度磁选机对试样进行磁选条件试验, 在矿浆流速为 $1.0\ \text{cm/s}$ 、脉动频率为 $200\ \text{r/min}$ 、磁场磁感应强度为 $1.4\ \text{T}$ 、磁选介质为细钢棒的条件下, 分别对试样进行一段、二段、三段、六段(磁选至没有尾矿)磁选试验, 考察磁选段数对铁杂质含量的影响, 试验结果见图 3。

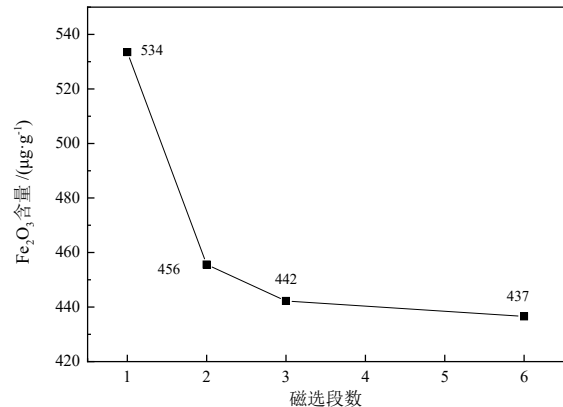


图3 不同磁选段数的磁选精矿 Fe_2O_3 含量
Fig. 3 Fe_2O_3 content of magnetic concentrate with different number of magnetic separation stages

由图 3 可知, 随着磁选段数的增加, 石英精矿 Fe_2O_3 含量逐渐降低。三段磁选后精矿 Fe_2O_3 含量降至 $442\ \mu\text{g/g}$ 。六段磁选与三段磁选相比 Fe_2O_3 含量变化不明显, 说明三段磁选使石英岩矿中解离的磁性杂质基本被去除, 增加磁选段数意义不大, 故后续试验采用三段磁选。

3.1.2 磁场磁感应强度的影响

磁场磁感应强度是影响磁选效果的重要因素, 磁

场磁感应强度低会使一部分弱磁性矿物难以分离, 提高磁场磁感应强度则会增加生产成本。为了考察磁场磁感应强度对试样铁杂质含量的影响, 分别在 1.2 T、1.4 T、1.6 T 三种磁场磁感应强度下对试样进行三段磁选。

由图 4 可知, 随着磁场磁感应强度不断增加, 石英内包裹的赤(褐)铁矿等含铁矿物包裹体被去除, 同时弱磁性矿物也更易被去除, 故 Fe₂O₃ 含量也随之降低。当磁场磁感应强度增加至 1.4 T 时, 增加磁场磁感应强度磁选精矿 Fe₂O₃ 含量变化不大, 且高磁场磁感应强度下用电成本更高, 故磁场磁感应强度选 1.4 T 较为合适。

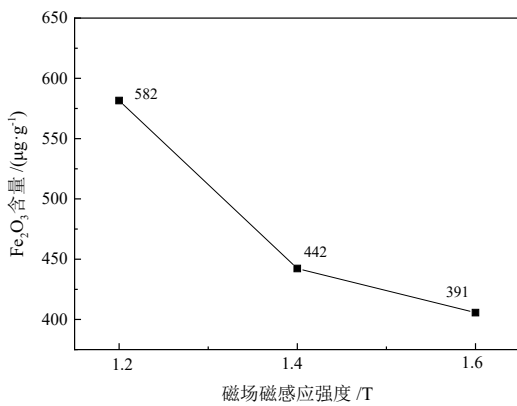


图 4 不同磁场磁感应强度的磁选精矿 Fe₂O₃ 含量
Fig. 4 Fe₂O₃ content of magnetic separation concentrate with different magnetic field induction intensity

3.2 磁选—擦洗

为进一步降低磁选精矿中 Fe₂O₃ 含量, 分别进行酸性(质量浓度 10% 的 H₂SO₄)、中性、碱性(质量浓度 10% 的 NaOH 溶液)擦洗试验。擦洗后的浆料筛分, -0.1 mm 粒级矿泥作为尾矿。试验流程见图 5, 试验结果见图 6。

由图 6 可知, 经过擦洗作业后, 精矿 Fe₂O₃ 含量均出现了不同程度的降低。酸性条件下效果最好, 可将精矿 Fe₂O₃ 含量降至 305 μg/g, 碱性擦洗与中性擦洗效果相比差距较小。出现这种现象的主要原因是酸性条件下擦洗是通过机械力作用以及酸液浸泡溶解一部分未解离的脉石矿物, 从而使 Fe₂O₃ 含量降低。而中性以及碱性擦洗只是单纯依靠机械力的磨剥作用。

虽然经过擦洗后的精矿 Fe₂O₃ 含量有所下降, 但含量仍然较高。

3.3 磁选—浮选

磁选—浮选原则工艺流程见图 7。试验首先通过使用不同捕收剂种类、不同药剂制度以及不同浮选方式(正浮选、反浮选)来探究浮选对石英岩矿的铁杂质去除效果。

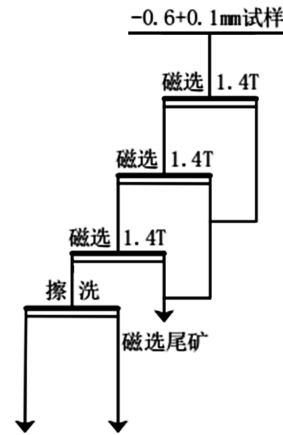


图 5 磁选—擦洗试验流程
Fig. 5 Flowsheet of magnetic separation—scrubbing test

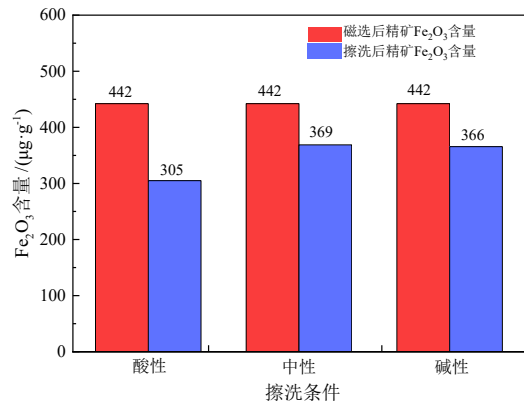


图 6 磁选—擦洗试验结果
Fig. 6 Results of magnetic separation—scrubbing test

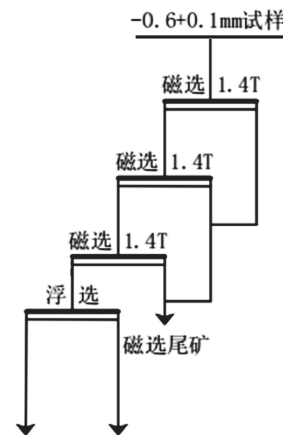


图 7 磁选—浮选试验流程
Fig. 7 Flowsheet of magnetic separation flotation

3.3.1 正浮选

以 H₂SO₄ 作 pH 调整剂, 捕收剂十二胺用量 160 g/t, 抑制剂玉米淀粉用量 10 g/t, 在 pH=4.0~5.0、浮选矿浆质量浓度为 30% 的条件下对磁选精矿进行正浮选, 比较不同抑制剂对浮选精矿产率与铁杂质含量的影响。试验结果见表 2。

由表 2 可知, 在浮选过程中添加抑制剂能有效地降低精矿 Fe₂O₃ 含量, 说明抑制剂对含铁杂质矿物起

到了一定的抑制作用。但可能是抑制剂对颗粒表面较脏的石英也产生了抑制作用,导致石英精矿产率大幅下降。

3.3.2 反浮选试验研究

使用十二胺在弱酸条件下正浮选石英会由于夹带绢云母等脉石矿物导致精矿 Fe_2O_3 含量偏高,故进一步在酸性和碱性条件下利用阴离子捕收剂进行反浮选试验,比较不同捕收剂对浮选精矿产率与铁杂质含量的影响。

以 NaOH 与 H_2SO_4 作 pH 调整剂,起泡剂松醇油用量 75 g/t,在 $\text{pH}=10.0\sim 11.0$ 时分别添加用量各 160 g/t 的油酸钠及石油磺酸钠(PSK-13)进行反浮选。调整

表 3 反浮选产物化学元素分析结果

Table 3 Chemical element analysis results of reverse flotation

试验条件	浮选药剂	产物	产率/%	Fe_2O_3 含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	浮选回收率/%
浮选碱性条件 $\text{pH}=10.0\sim 11.0$	油酸钠	精矿	45.69	370	45.76
		尾矿	54.31	392	54.24
		总计	100.00	-	100.00
	石油磺酸钠 (PSK-13)	精矿	82.81	363	82.93
		尾矿	17.19	495	17.07
		总计	100.00	-	100.00
浮选酸性条件 $\text{pH}=2.0\sim 3.0$	石油磺酸钠 (PSK-13)	精矿	96.03	283	96.17
		尾矿	3.97	582	3.85
		总计	100.00	-	100.00
	石油磺酸钠 (PSK-78)	精矿	83.76	185	83.91
		尾矿	16.24	696	16.09
		总计	100.00	-	100.00

由表 3 可知,在碱性环境下,使用油酸钠和 PSK-13 浮选精矿 Fe_2O_3 含量均有所降低,但降幅很小。在酸性条件下,使用 PSK-13 和 PSK-78 浮选精矿 Fe_2O_3 含量分别为 283 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和 185 $\mu\text{g}/\text{g}$,相比磁选精矿 Fe_2O_3 含量有明显降低,说明在酸性环境下两种石油磺酸钠都能够有效地分离石英与含铁脉石矿物,且 PSK-78 提纯效果最好。这可能是由于不同石油磺酸钠的活性物含量、原料油分子量、原料油芳烃含量等的差异导致捕收性能有所差异。

对原矿采用破碎—预先筛分—磨矿—筛分—磁选—反浮选工艺流程,以确定的最佳参数为条件进行试验,最终得到 SiO_2 含量为 99.61%、 Fe_2O_3 含量为 185 $\mu\text{g}/\text{g}$ 回收率为 51.34% 的石英精矿,满足平板玻璃、器皿玻璃、品质玻璃、日用陶瓷用石英砂原料要求。

4 结论

(1)甘肃某地石英矿为石英岩矿,主要成分为石英,杂质矿物为绢云母(白云母)、金红石、赤褐铁矿、

表 2 正浮选产物化学元素分析结果

Table 2 Chemical element analysis results of positive flotation

试验条件	产物	产率/%	Fe_2O_3 含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	浮选回收率/%
浮选添加 抑制剂	精矿	46.88	270	46.95
	尾矿	53.12	531	53.05
	总计	100.00	-	100.00
浮选未添加 抑制剂	精矿	68.31	328	68.42
	尾矿	31.69	741	31.58
	总计	100.00	-	100.00

松醇油用量为 150 g/t,在 $\text{pH}=2.0\sim 3.0$ 时分别添加用量各 600 g/t 的石油磺酸钠(PSK-13)及石油磺酸钠(PSK-78)进行反浮选。试验结果见表 3。

电气石和绿帘石等,矿物组成复杂,含铁矿物较多。

(2)“磁选—擦洗”或“磁选—浮选”工艺均能使石英砂中的铁杂质含量大幅降低。反浮选 pH 值为 2.0~3.0、起泡剂松醇油用量 150 g/t、捕收剂 PSK-78 用量 600 g/t 时除铁效果显著。而擦洗作业的效果明显比浮选差,且硫酸用量较大,会对环境造成污染。

(3)试验最终采用“破碎—预先筛分—磨矿—筛分—磁选—反浮选”选矿工艺,将石英砂 SiO_2 含量由 99.42% 提高到 99.61%, Fe_2O_3 的含量由 1 814 $\mu\text{g}/\text{g}$ 降至 185 $\mu\text{g}/\text{g}$,除铁效果明显,满足平板玻璃、器皿玻璃、品质玻璃、日用陶瓷用石英砂原料要求。

(4)试验结果可为该类石英岩矿的开发利用提供技术依据。

参考文献:

- [1] 汪灵. 石英的矿床工业类型与应用特点[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 39-47.
WANG L. Industrial types and application characteristics of quartz deposit[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019,

- 39(6): 39-47.
- [2] 周鹏, 高惠民, 任子杰. 湖北某石英岩矿提纯试验研究[J]. 金属矿山, 2018(12): 104-108.
ZHOU P, GAO H M, REN Z J. Experimental study on purification of a quartz ore in Hubei Province[J]. *Metal Mine*, 2018(12): 104-108.
- [3] 徐凯. 硅砂质量对玻璃生产的影响[J]. 江苏建材, 2001(4): 13-15.
XU K. Influence of silica sand quality on glass production[J]. *Jiangsu Building Materials*, 2001(4): 13-15.
- [4] 杨涛, 蒋述兴. 高纯超细电子级石英粉的制备技术综述[J]. 化工矿产地质, 2006(3): 185-188.
YANG T, JIANG S X. Review on preparation technology of high purity and ultrafine electronic grade quartz powder[J]. *Chemical and Mineral Geology*, 2006(3): 185-188.
- [5] 高惠民, 张凌燕, 管俊芳, 等. 石墨、石英、萤石选矿提纯技术进展[J]. 金属矿山, 2020(10): 58-69.
GAO H M, ZHANG L Y, GUAN J F, et al. Progress of beneficiation purification technology of graphite, quartz and fluorite[J]. *Metal Mine*, 2020(10): 58-69.
- [6] 刘治. 河源断裂带石英岩矿成矿地质特征[J]. 能源与环保, 2021, 43(7): 137-139.
LIU Z. Metallogenic geological characteristics of quartzite deposit in Heyuan fault zone[J]. *Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(7): 137-139.
- [7] NOURI S, HOSEINIAN F S, REZAI B, et al. New pretreatment method for high-tension electrical separation of zircon from quartz[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(8): 1737-1743.
- [8] XIE R, ZHU Y, LIU J, et al. A self-assembly mixed collector system and the mechanism for the flotation separation of spodumene from feldspar and quartz[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 171: 107082.
- [9] SEKULIĆ, CANIĆ N, BARTULOVIĆ Z, et al. Application of different collectors in the flotation concentration of feldspar, mica and quartz sand[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(1): 77-80.
- [10] WEI Q, FENG L, DONG L, et al. Selective co-adsorption mechanism of a new mixed collector on the flotation separation of lepidolite from quartz[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 612: 125973.
- [11] 范培强, 谢贤, 宋强, 等. 国内高纯石英砂选矿与深加工研究现状[J]. 矿冶, 2018, 27(3): 18-22.
FAN P Q, XIE X, SONG Q, et al. Research status of mineral processing and deep processing of high purity quartz sand in China[J]. *Mining and Metallurgy*, 2018, 27(3): 18-22.
- [12] 李爱民. 我国石英与长石浮选分离的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 27-34.
LI A M. Research progress of flotation separation of quartz and feldspar in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(6): 27-34.
- [13] 于福顺, 邵怀志, 蒋曼, 等. 长石石英浮选分离试验及混合捕收剂作用机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 122-127.
YU F S, SHAO H Z, JIANG M, et al. Flotation separation test of feldspar quartz and study on action mechanism of mixed collector[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(12): 122-127.
- [14] 颜玲亚, 刘艳飞, 于海军, 等. 中国高纯石英资源开发利用现状及供需形势[J]. 国土资源情报, 2020(10): 98-103.
YAN L Y, LIU Y F, YU H J, et al. Development and utilization of high-purity quartz resources in China and its supply-demand situation[J]. *Land and Resources Information*, 2020(10): 98-103.
- [15] 詹建华, 王依, 陈正国, 等. 我国脉石英资源现状分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2020(5): 1-4.
ZHAN J H, WANG Y, CHEN Z G, et al. Analysis of pulsar resources in China[J]. *China Non-Metallic Mineral Industry Guide*, 2020(5): 1-4.
- [16] 岳丽琴. 高纯石英制备技术评述[J]. 矿产综合利用, 2014(1): 16-19.
YUE L Q. Review on preparation technology of high purity quartz[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2014(1): 16-19.
- [17] 文贵强, 靳小涛, 李勇, 等. 汉中地区某石英岩矿提纯工艺研究[J]. 建材世界, 2016, 37(5): 30-34.
WEN G Q, JIN X T, LI Y, et al. Study on purification technology of quartzite ore in Hanzhong area[J]. *Building Materials World*, 2016, 37(5): 30-34.

Experimental Study on Mineral Processing and Purification of a Quartzite Ore in Gansu

LI Xiaohui¹, REN Zijie^{1,2}, GAO Huimin^{1,2}, SHEN Yanxu¹, LIU Zhi¹, SONG Yuhan^{1,2}

1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, China

Abstract: The beneficiation experiments of a quartzite ore in Gansu province were carried out. Based on the process mineralogy study of the raw ore, the different technological processes such as magnetic separation, scrubbing and flotation on the removal of iron impurities in quartzite ore were studied. The purification effect of "magnetic separation-scrubbing" and "magnetic separation-flotation" process was compared. The results showed that the process of "grinding-magnetic separation-flotation" was more conducive to purification for the quartzite ore with SiO₂ of 99.42%, Al₂O₃ of 2 400 μg/g and Fe₂O₃ of 1 814 μg/g. After iron ball milling, the sample was subject to three-stage magnetic separation to remove iron under the magnetic induction intensity of 1.4 T. Then the reverse flotation test was carried out with H₂SO₄ as the regulator, pine oil as frother and PSK-78 sodium petroleum sulfonate as the collector. Finally, the quartz concentrate with SiO₂ content of 99.61%, Fe₂O₃ content of 185 μg/g and recovery of 51.34% was obtained. The process has remarkable iron removal effect and little pollution, and it can greatly improve the added value of products and has a good application prospect.

Keywords: quartzite; magnetic separation; scrubbing; flotation

引用格式: 李晓慧, 任子杰, 高惠民, 沈彦旭, 刘志, 宋昱晗. 甘肃某石英岩矿选矿提纯试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 93-98.

LI Xiaohui, REN Zijie, GAO Huimin, SHEN Yanxu, LIU Zhi, SONG Yuhan. Experimental study on mineral processing and purification of a quartzite ore in Gansu[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 93-98.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn