

利用色选技术从高铝熟料的废料中回收耐材的技术

刘玉林^{1,2,3}, 刘长淼^{1,2,3}, 彭团儿^{1,2,3}, 徐健¹

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 国家非金属矿产资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006; 3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710541)

摘要: 铝矾土在烧成熟料后, 含铁高的铝矾土熟料因颜色差异被人工手选挑出; 而手选出的高铁铝矾土熟料因无法满足耐火材料的要求而被抛弃。本实验以高铝熟料的废料为原料, 先将原料破碎为至 5~10 mm, 再通过色选机对原料进行分选, 最后可得到全铁含量低于 2% 的合格耐火材料原料。精矿产品全铁品位为 1.48%, 产率为 33.12%。该技术可有效提高耐火行业的铝矾土利用率, 具有较为广泛的应用前景。

关键词: 铝矾土熟料; 高铁废料; 光电色选; 耐火材料

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.022

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0168-06

引用格式: 刘玉林, 刘长淼, 彭团儿, 等. 利用色选技术从高铝熟料的废料中回收耐材的技术[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 168-173.

LIU Yulin, LIU Changmiao, PENG Tuaner, et al. Technology of recovering refractory from waste of bauxite chamotte by color separation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 168-173.

铝矾土, 又称矾土矿或铝土矿, 主要化学组成为氧化铝, 广泛应用在各个行业领域, 如工业炼铝; 精密铸造、耐火材料、陶瓷、压裂材料等^[1]。

随着我国工业化经济的快速发展, 我国铝土矿开采量逐年升高, 已经成为世界第一大铝生产国和消费国。根据美国地质调查局发布的《矿产商品摘要 2021》数据显示^[2], 2020 年, 我国铝土矿储量约为 10 亿 t, 仅占世界储量的 3%, 而 2019 年中国铝产量为 3 500 万 t, 超过全球产量 (6 320 万 t) 的 50%。与此同时, 我国优质的铝土矿消耗殆尽, 铝土矿资源品质日益下降, 可开发利用的后备资源严重不足, 对外依存度大。铝土矿已成为我国紧缺的大宗矿产资源之一, 被列入我国战略性矿产目录^[3]。

铝矾土是生产耐火材料的主要原料, 铝矾土经过煅烧得到高铝矾土熟料, 高铝熟料主要用于

高铝质耐火材料, 也可用来制作电熔棕刚玉。我国传统高铝熟料生产方法是将开采的铝矾土破碎成 25~250 mm, 放入热工窑炉中煅烧, 开采过程中产生的 20%~30% 碎矿、欠烧料、过烧料和杂质料等被遗弃, 造成严重的资源浪费^[4]。前人^[5-7]对铝矾土中铁杂质的分选除杂做了大量研究; 但针对高铝熟料的分选除杂相关研究工作较少, 而实际生产中通常以手选, 效率低下。铝矾土综合利用的相关研究主要为低品位的铝矾土制备莫来石^[8]、聚合氯化铝铁^[9]、压裂支撑剂^[10]、铝硅质陶瓷^[11]、多孔陶瓷^[12]等, 但从高铝熟料的废料中回收合格的耐火材料原料的相关研究未见报道。高铝熟料废料因含铁杂质较高不满足耐火材料的相关要求而当废料来处理, 目前, 阳泉地区的铝矾土熟料价格在 1 800~2 600 元/t, 而高铝熟料废料一般以低于 500 元/t 价格销售, 其主要用途为耐火

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 科技部重点研发计划专项课题 (2018YFC1901501)

作者简介: 刘玉林 (1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿业固废综合利用工作。

骨料。

本实验以铝矾土煅烧后抛除的高铁废料为研究对象，提出了采用色选回收合格的铝矾土熟料的新工艺，从铝矾土熟料的废料中回收合格铝矾土熟料，能有效提高铝矾土的资源利用率，具有较为广泛的应用前景。

1 矿石性质

矿石来自山西阳泉某铝矾土熟料厂，为高铝熟料中手选出的废料（后统称废料），其含铁量超过 2.0%，因不满足 YB/T 5179—2005《高铝矾土熟料》对铁含量的指标要求而被抛弃，其主要的化学分析结果见表 1。

表 1 原料的化学成分分析结果/%
Table 1 Chemical composition analysis results of raw materials

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
50.10	36.90	3.42	2.35	0.39	0.047	0.60	0.15

矿石为煅烧后的铝矾土，其物质组成主要为莫来石、刚玉，并含有少量的赤铁矿、石英等。

2 实验

2.1 实验原理

废料的颜色有黑、黄褐色、白色三种。一般情况下，白色物料含铁较低，黑色物料的含铁较高。将物料通过色选机进料口均匀地铺在传送带上，通过传送带的转动使物料以恒定速度抛过光电检测系统。在特定的灯光照射下，有 CCD 传感器对物料进行动态扫描，并转换成信号传入控制系统，电脑对设定分选参数的物料进行甄别，然后由控制系统发出指令驱动喷射电磁阀动作，将其中设定颜色参数的物料颗粒吹至出料斗的分选槽。

2.2 实验方法

废料采用鄂式破碎至 5~10 mm，作为色选的原料。分选的样品经过缩分混匀，用三头研磨机研磨至-0.075 mm 后送分析检测。

色选实验：色选机的主要参数为颜色、感光度、色斑，实验选取颜色分别为白、黑，实验分别确定选白及选黑实验的较佳工艺参数，最终确定废料的色选工艺流程。

采用日本理学 Smart Lab X 射线衍射仪分析样

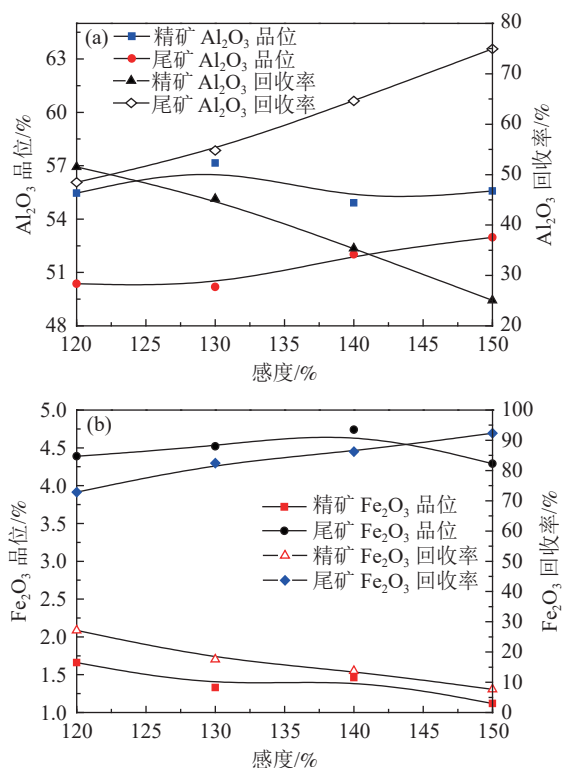
品的物相组成，X 射线衍射条件：加速电压为 40 kV，管电流 50 mA，Cu 靶 K α 射线 ($\lambda=1.542 \text{ \AA}$)， 2θ 范围为 $5\sim 80^\circ$ ，测试步长 $0.02^\circ/\text{min}$ ；采用等离子体发射光谱仪 ICAP 7400 Radial 对分析样品进行化学成分，分析方法按 JY/T 0567—2020 标准执行。

3 结果与讨论

3.1 白色物料分选条件实验

3.1.1 感度条件实验

实验选定分选颜色为白色，色选机给矿速率为 20%，皮带速度 3.5 m/s，色斑参数为 30；调节色选机感光度参数分别为 120、130、140、150。实验得到白色精矿产品与尾矿产品，实验结果见图 1。



(a-Al₂O₃; b-Fe₂O₃ 全铁)

图 1 不同感度参数对色选产品的 Al₂O₃ 与 Fe₂O₃ 品位与回收率的影响

Fig.1 Effect of different sensibility parameters on the grade and recovery of Al₂O₃ and Fe₂O₃ of color separation products

实验过程中，精矿产率随着感度参数的增加而下降，由 49.63% 降低至 24.16%。由图 1 可看出，随着色选机的感度增加，精矿 Fe₂O₃ 品位逐步降低；Al₂O₃ 品位先增加后降低，感度为 130 时，

Al_2O_3 品位达到极大, 为 57.15%; 尾矿 Al_2O_3 品位呈上升趋势, Fe_2O_3 品位先升高后降低。精矿的 Al_2O_3 回收率随着感度的上升而降低, Fe_2O_3 回收率随着感度的上升而增加。

感度即感光度, 是通过在颜色上识别合格品与不合格品的界限值; 铝矾土在煅烧后的物相主要为刚玉、莫来石。刚玉多为无色或白色, 而莫来石多呈白色或灰白色, 当 Fe 杂质元素的氧化物在高温下大部分与主晶相形成固溶体^[13], 会呈现黑色、红褐色等颜色。选定分选颜色为白色, 即以不含 Fe 杂质元素的刚玉、莫来石等矿物为选别目的矿物, 设置的感度值越高, 以为被挑选出的物料颜色更白, 产率越低, 选别产品的含铁量越低。实验选定感度为 130 为下一步实验的感度条件。

3.1.2 色斑条件实验

实验选定分选颜色为白色, 色选机给矿速率为 20%, 皮带速度 3.5 m/s, 感度参数为 130; 调节色斑参数分别为 20、30、40、50, 选别得到白色精矿产品与尾矿产品, 实验结果见图 2。

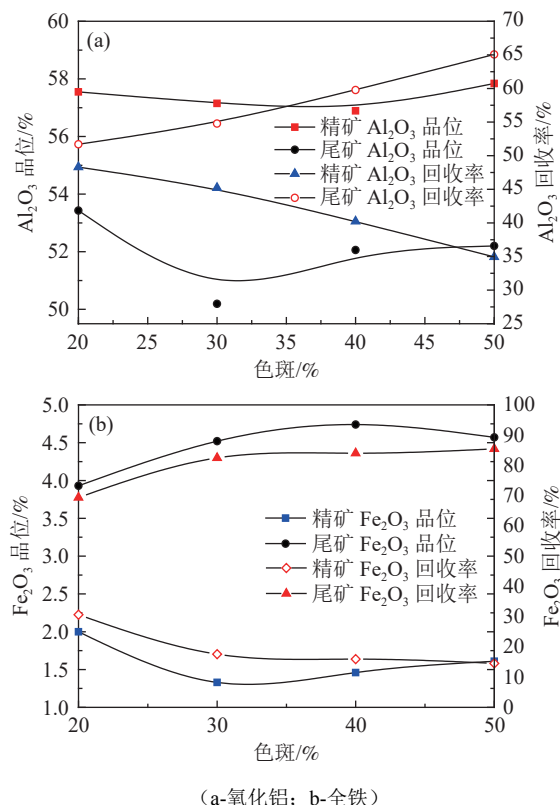


图 2 不同色斑参数对色选产品的 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 品位与回收率的影响

Fig.2 Effect of different color spot parameters on the grade and recovery of Al_2O_3 and Fe_2O_3 of color separation products

实验过程中, 精矿产率随着色斑参数的增加而降低, 由 46.45% 降低至 32.59%。由图 2 可看出, 随着色选机的色斑比例 (即色斑参数) 增加, 分选得到精矿的 Fe_2O_3 品位先降低后增加, 色斑比在 30 较低, 为 1.12%, 精矿的 Fe_2O_3 回收率逐渐上升, 在色斑参数上升至 30 以后逐渐趋于不变。精矿 Al_2O_3 的品位总体趋于稳定。

色斑是指分选物料中选定颜色的占比。由于色选分选的物料粒度为 5~10 mm, 所以相当一部分物料中存在白色物质与他色物质未解离, 色斑参数主要界定目的颜色物质所占有的比率, 设定色斑参数值越高, 表明选别的物料中选定颜色所占的比率越高。由于色选是采用拍照成像进行分选, 故因物料的成像角度以及嵌布包裹存在一定误差。实验确定色斑参数为 30 较为适宜。

3.2 黑色物料分选条件实验

3.2.1 感度条件实验

实验选定分选颜色为黑色, 色选机给矿速率为 20%, 皮带速度为 3.5 m/s, 色斑参数为 30; 调节感光度参数分别为 45、55、65、75。实验得到黑色的精矿产品与尾矿产品, 实验结果见图 3。

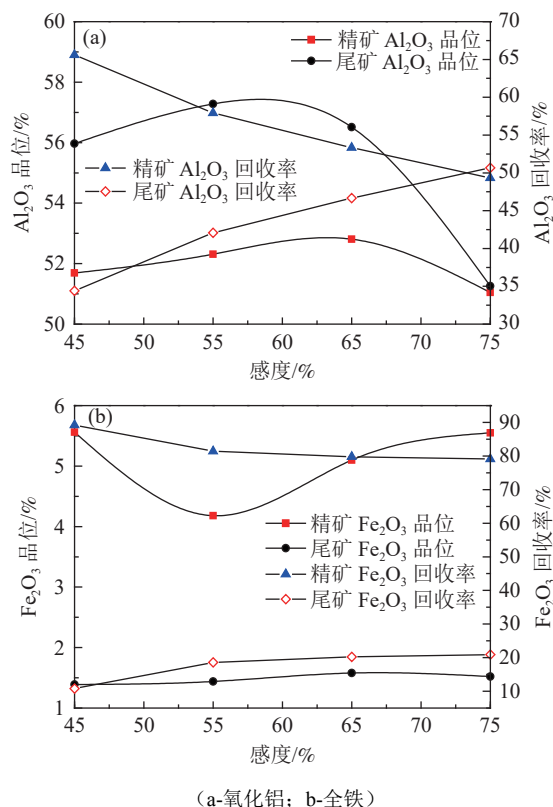


图 3 不同感度参数对色选产品的 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 品位与回收率的影响

Fig.3 Effect of different sensibility parameters on the grade and recovery of Al_2O_3 and Fe_2O_3 of color separation products

实验过程中，精矿的产率随着感度参数的增加而下降，由 67.37% 降低至 50.86%。由图 3 可知，选定感度参数为 55 时，得到尾矿产品中 Fe_2O_3 的含量较低，同时 Al_2O_3 的品位及回收率在较高水平，故选黑时选择感度参数为 55 较为适宜。

3.2.2 色斑条件实验

实验选定分选颜色为黑色，色选机给矿速率为 20%，皮带速度为 3.5 m/s，感度条件为 55；调节色斑参数分别为 20、30、40、50。实验选别得到黑色精矿产品与尾矿产品，实验结果见图 4。

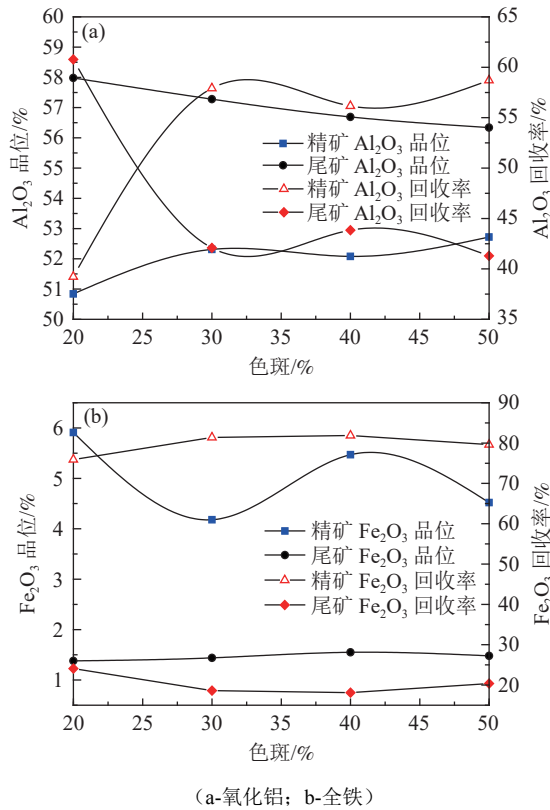


图 4 不同色斑参数对色选产品的 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 品位与回收率的影响

Fig.4 Effect of different color spot parameters on the grade and recovery of Al_2O_3 and Fe_2O_3 of color separation products

实验过程中，精矿的产率随着色斑参数的增加而上升，由 26.42% 上升至 56.14%。由图 4 可知，随着色选机的色斑比例增加，分选得到尾矿中 Al_2O_3 的品位逐渐减低，而 Fe_2O_3 的品位逐渐升高，在色斑比在 30 时，为尾矿中全铁品位较低，且其尾矿中全铁回收率达到较高。故选黑时选择感度参数为 30。

3.3 回收低铁铝矾土熟料实验

实验流程：先选黑抛除高铁废料，再选白回

收合格耐火材料熟料，分别得到白色精矿、红褐色中矿与黑色尾矿。实验流程见图 5，实验结果见表 2。

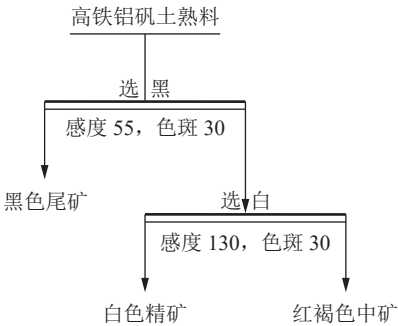


图 5 铝矾土熟料色选实验流程

Fig.5 Test flow of bauxite clinker color separation

表 2 高铁铝矾土熟料色选实验结果

Table 2 Test results of color sorting of high iron bauxite clinker

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Al_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3
白色精矿	33.21	60.39	1.46	35.49	12.97
红褐色中矿	48.99	55.83	3.69	48.4	48.35
黑色尾矿	17.80	51.15	8.12	16.12	38.68
合计	100.00	56.51	3.74	100.00	100.00

对原料以及三种产品进行 X 射线衍射分析，XRD 图谱见图 6，并计算矿物含量，得到具体物质组成见表 3。

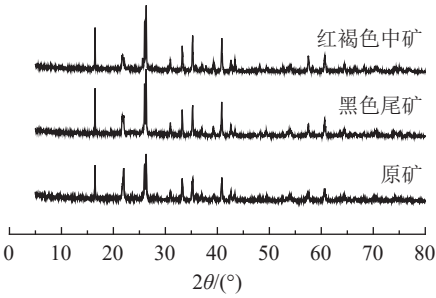


图 6 原矿及分选后三种产品的 XRD

Fig.6 XRD diffraction of the raw ore and three products after sorting

表 3 原料及分选后产品主要物质组成结果/%

Table 3 Results of main material composition of raw materials and sorted products

产品名称	莫来石	刚玉	方石英	赤铁矿	斜长石
原矿	71.0	11.5	12.0	3.5	1.0
精矿	71.0	13.0	10.0	0.2	5.0
中矿	79.5	7.0	10.0	1.0	1.0
尾矿	70.0	10.0	8.0	5.0	5.5

由表 2、3 可知, 通过色选对铝矾土熟料中的铁(主要为赤铁矿)具有较好的分选效果。色选能回收 33.21% 低铁铝矾土精矿, 且其全铁品位降低至 1.46%, 满足中华人民共和国冶金行业标准 YB/T 5179—2005《高铝矾土熟料》对高铝矾土熟料的指标要求^[4]。此外, 分选获得的高铁尾矿可以用于制备 RTO 重质蓄热体的原料。

4 结 论

(1) 色选对煅烧后的高铝熟料的废料具有较好的分选效果, 针对废料中的白色物质进行分选回收时, 较佳分选参数为: 感度 130, 色斑: 30; 针对铝矾土废料中的黑色物质进行分选降杂时, 较佳分选参数为: 感度 55, 色斑: 30。

(2) 采用先选黑除杂, 后选白回收合格的铝矾土熟料的实验流程, 可以得到全铁品位为 1.46% 的铝矾土熟料精矿, 精矿产品满足 YB/T 5179—2005《高铝矾土熟料》相关指标要求, 可以回收得到 33.21% 的合格耐火材料。此外, 可以富集得到高铁尾矿, 有效提高其的利用价值。

参考文献:

- [1] 李欢欢. 低质铝矾土的性能及应用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
- LI H H. Research on the characteristic and utilization of low grade bauxite[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2018.
- [2] USGS, Mineral Commodity Summaries 2021[R]. Virginia: U. S. U. S. Government Publishing Office, 2021: 20-22.
- [3] 韩跃新, 柳晓, 何发钰, 等. 我国铝土矿资源及其选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4):151-158.
- HAN Y X, LIU X, HE F Y, et al. Current situation of bauxite resource and its beneficiation technology in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4):151-158.
- [4] 郭玉香, 曲殿利, 姚瑶. 不同品级铝矾土均化烧结性能及微观结构的研究[J]. 人工晶体学报, 2016(45): 273-278(284).
- GUO Y X, QU D L, YAO Y. Study on homogenized sintering performance and microstructure of different grades of bauxite[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016(45): 273-278(284).
- [5] 夏飞龙, 李军旗, 陈朝轶, 等. 磁化焙烧对高铁铝土矿铁元素的分离回收影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(9):27-31.
- XIA F L, LI J Q, CHEN C Y, et al. Effect of magnetization-roasting on iron recovery from high iron bauxite[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(9):27-31.
- [6] 陈蔚萍, 陈迎伟, 代永信. 铝矾土除铁、硅、钛氧化物工艺的研究[J]. 广州化工, 2009(37):73-74.
- CHEN W P, CHEN Y W, DAI Y X. Study of the technology on removing silica, titanite and ferric oxide impurities from bauxite[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2009(37):73-74.
- [7] 李正丹, 王秀峰, 万兵, 等. 某低品位含铁铝土矿选矿试验研究[J]. 有色金属, 2019(1): 62-66(83).
- LI Z D, WANG X F, WAN B, et al. Beneficiation test of a low grade iron-bearing bauxite[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2019(1): 62-66(83).
- [8] 闫明伟, 李勇, 陈俊红, 等. 高铁低铝矾土莫来石的合成及机理[J]. 硅酸盐学报, 2016(44):1792-1797.
- YAN M W, LI Y, CHEN J H, et al. Synthesis and mechanism of mullite ceramic prepared from laterite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016(44):1792-1797.
- [9] 张占梅, 郑怀礼, 陈春艳. 高铁铝矾土制备聚合氯化铝铁及其在污水处理中的应用研究[J]. 环境污染治理与设备, 2006(7)6: 52-55.
- ZHANG Z M, ZHENG H L, CHEN C Y. Preparation and application of polymerized aluminum ferrum chloride with bauxite[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006(7)6: 52-55.
- [10] 刘运连. 高铁铝土矿制备高强度石油压裂支撑剂的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- LIU Y L. Study on preparation of high strength petroleum fracturing proppant from high iron bauxite[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [11] 伍世衍. 利用低品位铝土矿制备低烧高强硅铝质陶瓷的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- WU S Y. Preparation and study of the bauxite tailings using for high-strength silicon-aluminum ceramics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [12] 兰阳. 铝土矿尾矿多孔陶瓷的制备及其力学性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- LAN Y. Preparation and mechanical properties of porous ceramics from bauxite tailings[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [13] 王金相, 钟香崇. 我国 DK 型烧结高铝矾土的结晶相和玻璃相的研究[J]. 硅酸盐学报, 1982, 10(3): 289-297.
- WANG J X, ZHONG X C. A study of the crystalline and glassy phases of sintered Chinese bauxites(DK type)[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1982, 10(3): 289-297.
- [14] 中国钢铁工业协会. 高铝矾土熟料: YB/T 5179—2005[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- China Iron and Steel Association. Bauxite clinker : YB/T 5179—2005 [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.

Keywords: Muddy molybdenum ore; Compound collector; Synergistic effect