



新型低温捕收剂 DGT-P 对齐大山铁矿石的反浮选应用研究

谷晓恬¹, 朱一民¹, 刘杰^{1,2}, 韩跃新^{1,2}, 马玉宁¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省难采选铁矿石高效开发利用技术工程实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 在实验室自主研发的新型组合型捕收剂 DGT-P 体系下, 针对齐大山铁矿选矿分厂的混合磁选精矿进行了浮选实验研究, 确定了较佳的药剂制度, 并考查了浮选效率。在矿浆温度 20 ℃、pH 值=10.0、捕收剂 DGT-P 用量 800 g/t、抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、不添加活化剂的条件下, 经过“一粗一精一扫”的浮选闭路实验, 针对铁品位为 48.22% 的浮选给矿, 可获得精矿铁品位 69.23% 及铁回收率 91.52% 的良好浮选指标。本研究表明新型低温捕收剂 DGT-P 是一种高效、选择性高的低温浮选捕收剂, 该药剂的推广与应用将会有效解决我国铁矿阴离子反浮选过程中能源浪费问题。

关键词: 浮选; 低温捕收剂; 组合药剂; 铁矿石

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.02.001

中图分类号: TD985 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 02-0001-06

鞍山式赤铁矿占弱磁性铁矿资源的 50% 以上, 为我国主要铁矿资源之一。在鞍山式贫杂铁矿石的加工与利用过程中, 弱磁-强磁-反浮选工艺发挥了重要的作用。但是, 铁矿浮选药剂的研制开发仍然存在一些不足之处, 如 (1) 对细粒复杂难选铁矿石缺乏捕收效果好且选择性高的高效选矿药剂, 致使浮选尾矿品位偏高; (2) 目前使用的浮选药剂配置温度 (通常为 50 ~ 70 ℃) 和使用温度高 (通常为 35 ~ 45 ℃), 为此需要消耗大量的加热蒸汽, 从而消耗大量的能源, 排放大量的 CO₂。

铁矿石反浮选捕收剂可以分为阴离子及其改性类捕收剂、阳离子及其改性类捕收剂、两性螯合类捕收剂以及组合型捕收剂。较传统的油酸及油酸钠等阴离子捕收剂, 通过引入卤素原子^[1]、提高药剂饱和度^[2-3] 及引入具有强化学活性的官能团^[1,3] 等, 获得的改性阴离子捕收剂^[1,4], 有助于提高捕收剂的低温捕收性能。阳离子及其改性捕收剂, 如醚胺类^[5-6]、多胺类^[7]、季铵盐类^[8] 等, 应用于铁矿石反浮选过程中, 一般不需要加热, 耐低

温性能较好, 但是同时存在泡沫粘性大、选择性差等问题。相比之下, 两性螯合型捕收剂具有更好的溶解度、耐低温性和选择性^[9-11], 但其主要问题是药剂合成过程复杂且生产成本低。组合型捕收剂的优势是能够发挥组合药剂中各药剂之间的协同作用, 弱化单个药剂的不足, 获得更理想的捕收效果。开发组合药剂是浮选药剂发展的必然产物, 是浮选药剂发展的主要方向之一。因此, 本研究考查了一种组合型捕收剂 DGT-P, 在低温条件下对齐大山铁矿石的反浮选性能, 以期实现对齐大山铁矿石的高效低温反浮选。

1 矿样来源及性质分析

本研究以鞍钢齐大山铁矿选矿分厂的弱磁、强磁混合磁选精矿为研究对象。齐大山铁矿是我国目前最大的赤铁矿矿山, 其矿石种类属于高硅贫铁、低钙、低镁、低铝的鞍山式赤铁矿石。齐大山铁矿选矿分厂的混合磁选精矿的化学多元素分析以及铁物相分析结果, 分别见表 1 及表 2。

齐大山铁矿中含有的铁矿物主要有磁铁矿、

收稿日期: 2023-02-05

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目青年拔尖人才 (XLYC2007055)

作者简介: 谷晓恬 (1986-), 女, 博士研究生, 主要从事铁矿石浮选捕收剂的研究工作。

表 1 齐大山铁矿混合磁选精矿的化学多元素分析/%
Table 1 Chemical analysis of the mixed concentrates from the magnetic separation of Qidashan iron ore

TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
48.22	13.55	30.82	0.16	0.74	0.15

表 2 齐大山铁矿混合磁选精矿的铁物相分析
Table 2 Iron phase analysis of the mixed concentrates from the magnetic separation of Qidashan iron ore

名称	磁铁矿 中铁	赤褐铁 矿中铁	碳酸铁 中铁	硫化铁 中铁	硅酸铁 中铁	TFe
含量/%	40.21	6.59	0.78	0.18	0.52	48.22
占有率/%	83.39	13.67	1.62	0.37	1.08	100.00

赤铁矿、假象和半假象赤铁矿和少量镜铁矿，还有一定的褐铁矿及针铁矿，微量的菱铁矿、铁白云石、黄铁矿等。脉石矿物主要是石英，同时还有少量的硅酸盐类矿物、角闪石、透闪石、阳起石、绢云母、绿泥石及碳酸盐类矿物等，以及微量的磷灰石、电气石。

2 实验试剂、设备及实验方法

2.1 实验试剂

本研究采用实验室自制的 DGT-P 作为捕收剂，是一种含有醚基、胺基及羧基等多种极性基团的阴阳离子组合型捕收剂。其他实验所用试剂见表 3。

表 3 实验中所需的化学试剂
Table 3 Chemical reagents used in the tests

试剂名称	主要成分	试剂纯度	用途
盐酸	HCl	分析纯	pH 值调整剂
氢氧化钠	NaOH	分析纯	pH 值调整剂
玉米淀粉	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	工业纯	抑制剂
氯化钙	CaCl ₂	化学纯	活化剂

2.2 实验设备及方法

浮选实验在吉林省长春探矿机械厂生产的 XFD-63 型单槽浮选机中进行，采用 500 mL 浮选槽及 1992 r/min 转机搅拌速度。称取 150.00 g 混合磁选精矿矿样，加入一定量的自来水，配置 40% 浓度的矿浆，搅拌 3 min 后，依次加入 pH 值调整剂、抑制剂及捕收剂，每种药剂之后搅拌 3 min，然后刮泡 6 min。考查捕收剂 DGT-P 用量、矿浆 pH 值、抑制剂玉米淀粉用量以及温度对浮选指标的影响。

在较佳浮选条件下，进行一次粗选、一次精选和一次扫选的浮选开路实验，实验流程见图 1，精选前需要再次调节矿浆的 pH 值至较佳条件，并

加入适量的捕收剂；扫选不需要调节 pH 值，也不添加任何药剂。浮选所得的精矿、中矿及尾矿产品分别进行过滤、烘干、称重并化验，进而计算产品中铁品位及铁精矿回收率。

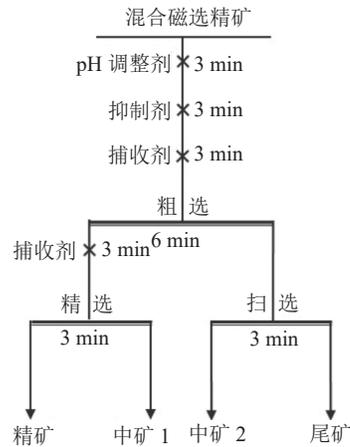


图 1 浮选开路实验流程
Fig.1 Open-circuit flotation test flow

在较佳药剂制度条件下，根据开路浮选实验各阶段的分选指标，进行一次粗选、一次精选和一次扫选的浮选闭路实验，实验流程见图 2，精选前需要再次调节矿浆的 pH 值至较佳条件，并加入适量的捕收剂；扫选不需要调节 pH 值，也不添加任何药剂。浮选所得的精矿、中矿及尾矿产品分别进行过滤、烘干、称重并化验，进而计算产品中铁品位及铁精矿回收率。

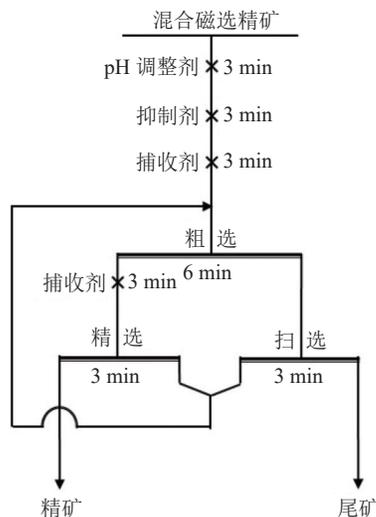


图 2 浮选闭路实验流程
Fig.2 Closed-circuit flotation test flow

3 实验结果与分析

3.1 矿浆 pH 值对浮选指标的影响

在矿浆温度 20 ℃、捕收剂 DGT-P 用量 800 g/t、

抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、未添加活化剂条件下，进行了矿浆 pH 值对浮选指标的影响研究，实验结果见图 3。

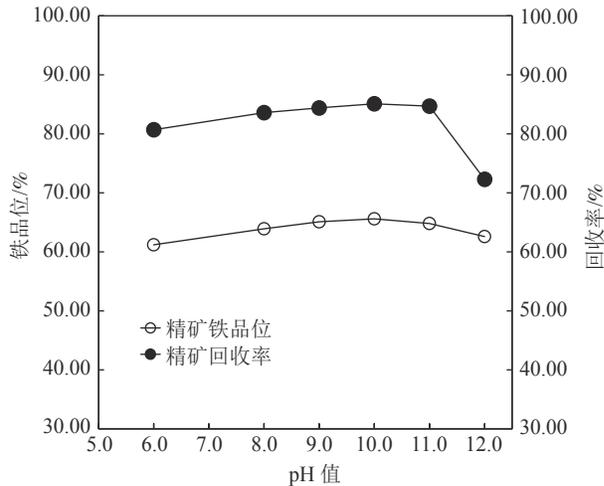


图3 pH 值对浮选指标的影响

Fig.3 Effect of pH value on flotation indexes

从图 3 实验结果可以看出，在 pH 值 6.0 ~ 10.0 范围内，铁精矿的回收率随 pH 值升高而小幅度提高，从 80.71% 提高至 85.13%；当 pH 值在 10.00 ~ 11.00 范围内，回收率基本不变；进一步增加 pH 值至 12.00，回收率出现明显下降，当 pH 值为 12.00 时，铁精矿回收率为 72.32%。精矿中铁品位的变化趋势与回收率基本一致，但变化程度较小：当 pH 值在 6.00 ~ 10.00 范围内，铁品位从 61.24% 提高至 65.58%；当 pH 值 > 10.00 时，铁品位开始下降，在 pH 值为 12.00 时，铁品位下降至 62.61%。从 pH 值条件实验结果来看，较佳的浮选 pH 值为 10.00。

3.2 DGT-P 用量对浮选指标的影响

在矿浆温度 20 °C、矿浆 pH 值为 10.0、抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、未添加活化剂条件下，进行了捕收剂 DGT-P 用量对浮选指标的影响研究，实验结果见图 4。

从图 4 实验结果可以看出，当捕收剂用量从 200 g/t 增加至 800 g/t 时，精矿铁品位从 47.63% 提高至 65.58%；进一步增加药剂用量至 1000 g/t，回收率有小幅度降低至 65.08%。铁回收率的变化趋势整体与铁品位相反。当捕收剂用量从 200 g/t 增加至 700 g/t 时，精矿回收率从 91.84% 降低至 85.21%；DGT-P 用量在 700 ~ 800 g/t 范围内变化很小；从 800 g/t 进一步增加 DGT-P 用量至 1000 g/t，回收率继续降低至 81.11%。

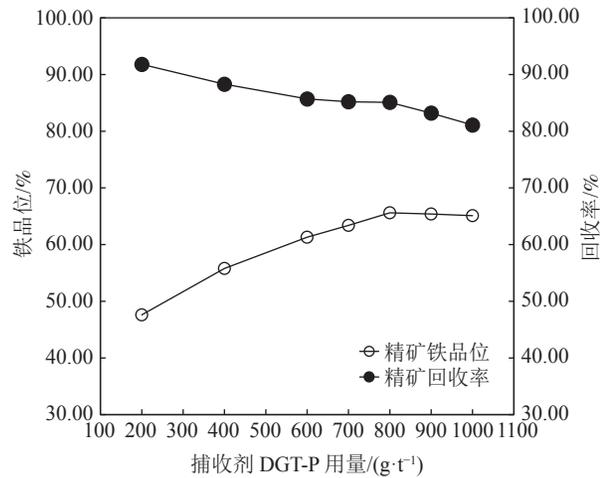


图4 捕收剂 DGT-P 用量对浮选指标的影响

Fig.4 Effect of DGT-P dosage on flotation indexes

综合考虑精矿回收率与铁品位两者的平衡，以期得到较优化的浮选指标，较合适的捕收剂用量确定为 800 g/t。

3.3 抑制剂用量对浮选指标的影响

在矿浆温度 20 °C、矿浆 pH 值为 10.0、捕收剂用量 800 g/t、未添加活化剂条件下，采用玉米淀粉作用抑制剂，进行了玉米淀粉用量对浮选指标的影响研究，实验结果见图 5。

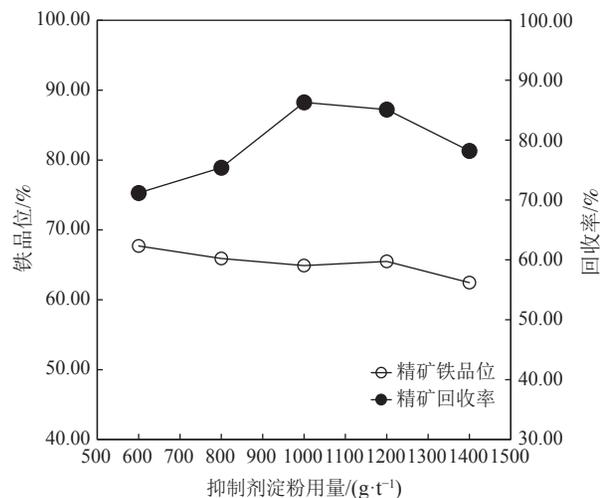


图5 抑制剂玉米淀粉用量对浮选指标的影响

Fig.5 Effect of corn starch dosage on flotation indexes

从图 5 实验结果可以看出，当抑制剂用量从 600 g/t 增加至 1000 g/t 时，精矿回收率从 71.18% 提高至 86.33%；当抑制剂用量高于 1000 g/t 后，精矿回收率开始下降，在 1000 ~ 1200 g/t 用量范围内，下降幅度较小，从 86.33% 下降至 85.13%，当抑制剂用量增加到 1400 g/t，回收率下降至 78.22%。精矿铁品位，随抑制剂用量从 600 g/t 增

加至 1000 g/t, 从 67.73% 降低至 64.98%; 在抑制剂用量为 1200 g/t 时, 铁品位增加至 65.58%; 进一步增加抑制剂用量至 1400 g/t, 精矿铁品位从 65.58% 降低至 62.46%。

综合考虑精矿回收率与铁品位两者的平衡, 以期得到较优化的浮选指标, 采用玉米淀粉作为抑制剂, 较合适的抑制剂用量确定为 1200 g/t。

3.4 活化剂用量对浮选指标的影响

在矿浆温度 20 °C、矿浆 pH 值为 10.0、捕收剂用量 800 g/t、抑制剂用量 1200 g/t 条件下, 采用 CaCl₂ 作用活化剂, 进行了活化剂用量对浮选指标的影响研究, 实验结果见图 6。

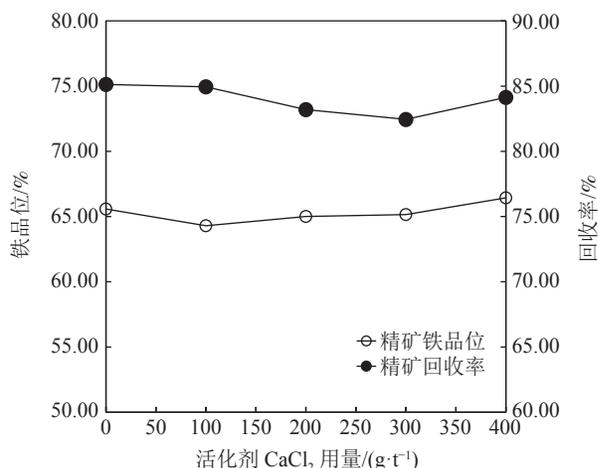


图 6 活化剂 CaCl₂ 用量对浮选指标的影响
Fig.6 Effect of CaCl₂ dosage on flotation indexes

从图 6 实验结果可以看出, 当活化剂用量从 0 g/t 增加至 300 g/t 时, 精矿回收率呈下降趋势, 从 85.13% 降低至 82.45%; 当用量继续增加至 400 g/t 时, 铁品位提高至 84.14%。活化剂用量在 0 ~ 400 g/t 范围内, 精矿铁品位变化幅度较小, 且有微弱的上升趋势, 整体保持在 64.30% ~ 66.44% 之间。

从活化剂用量条件实验结果来看, 精矿回收率与铁品位均变化较小, 说明在捕收剂 DGT-P 体系中, 活化剂对浮选指标影响较小, 在不添加活化剂条件下, 即可获得 TFe 品位 65.58% 和回收率 85.13% 的浮选指标。因此在新型捕收剂 DGT-P 浮选体系中, 齐大山铁矿混合磁选精矿反浮选过程无需额外添加任何活化剂。

3.5 矿浆温度对浮选指标的影响

在矿浆 pH 值为 10.0、捕收剂用量 800 g/t、抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、未添加活化剂条件

下, 进行了矿浆温度对浮选指标的影响研究, 实验结果见图 7。

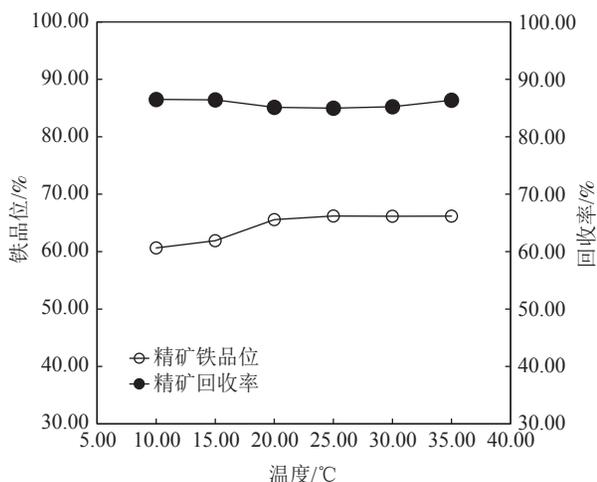


图 7 温度对浮选指标的影响
Fig.7 Effect of temperature on flotation indexes

从图 7 实验结果可以看出, 当矿浆温度从 10 °C 增加 35 °C 时, 铁精矿的回收率基本保持不变; 回收率较低值出现在矿浆温度为 25 ~ 30 °C 之间时, 此时回收率分别为 84.98% 及 85.23%; 其他温度下, 回收率保持在 85.13% (在 20 °C 时) ~ 86.50% (在 10 °C 时) 之间。对于精矿铁品位, 当矿浆温度从 10 °C 增加 25 °C 时, 它从 60.63% 提高至 66.20%; 当矿浆温度从 25 °C 增加 35 °C 时, 铁品位没有明显变化。

从温度条件实验结果来看, 在 10 ~ 35 °C 范围内都能获得较稳定的浮选指标, 可见 DGT-P 的捕收性能对于温度的变化反应不敏感, 适合作为低温捕收药剂使用。

3.6 浮选开路实验

在矿浆温度为 20 °C、矿浆 pH 值为 10.0、捕收剂 DGT-P 用量 800 g/t、抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、未添加活化剂条件下, 对齐大山铁矿混合磁选精矿进行了一粗一精一扫的浮选开路实验, 实验流程见图 1, 各阶段浮选产品的指标见表 4。

表 4 浮选开路实验结果
Table 4 Results of the open-circuit flotation test

产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
精矿	58.30	68.65	83.01
中矿1	6.13	55.86	7.10
中矿2	3.32	53.34	3.67
尾矿	32.25	9.30	6.22
合计	100.00	48.22	100.00

从表 4 实验结果可以看出，采用 DGT-P 作为捕收剂，经过一粗一精一扫的浮选开路实验，能够获得精矿铁品位 68.65%、回收率 83.01% 的浮选指标。

3.7 浮选闭路实验

基于开路浮选实验结果，针对齐大山铁矿混合磁选精矿，在矿浆温度为 20 ℃、矿浆 pH 值为 10.0、捕收剂用量 800 g/t、抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、未添加活化剂条件下，进行了一粗一精一扫的浮选闭路实验，实验流程见图 2，闭路实验结果见表 5，闭路实验数-质量流程图见图 8。

表 5 浮选闭路实验结果

产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
精矿	63.74	69.23	91.52
尾矿	36.26	11.28	8.48
合计	100.00	48.22	100.00

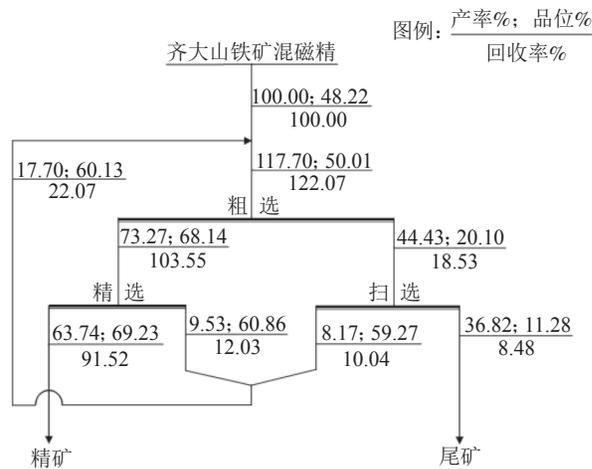


图 8 闭路浮选实验数-质量流程

Fig.8 Quantity-quality flowsheet of the closed-circuit flotation test

由图 8 可知，采用 DGT-P 作为捕收剂，玉米淀粉作为抑制剂，对齐大山铁矿混合磁选精矿进行实验室闭路浮选实验，在低温条件下，可获得精矿铁品位 69.23%、回收率 91.52% 的良好指标。

4 结论

(1) 采用新型耐低温捕收剂 DGT-P，针对铁品位为 48.22% 的鞍钢齐大山铁矿选矿厂混合磁选精矿，在矿浆温度为 20 ℃、矿浆 pH 值为 10.0、捕收剂 DGT-P 用量 800 g/t、抑制剂玉米淀粉用量 1200 g/t、未添加活化剂条件下，经过一粗一精一

扫的浮选闭路实验，可获得精矿铁品位 69.23%、回收率 91.52% 的良好浮选指标。

(2) DGT-P 组合型捕收剂同时含有多种极性基团，在低温条件下，能够实现对齐大山铁矿石的高效反浮选。

参考文献：

- [1] 林祥辉, 路平, 陈让怀, 等. 高效新品种捕收剂 RA-315 的制取及应用研究[J]. 矿冶工程, 1993(9):31.
- [2] 赵立群, 王春女, 张敏, 等. 中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析[J]. 地质与勘探, 2020, 56(3):635-643.
- [3] 罗光明. 耐低温捕收剂 TA-19 在李楼铁矿的研究及应用[J]. 矿业工程, 2020, 18(5):41-44.
- [4] 郭文达, 朱一民, 王鹏, 等. 新型酰胺基羧酸捕收剂 DWD-1 用于铁矿反浮选试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2016 (3): 22-25+39.
- [5] 任建蕾. DTX 体系下东鞍山含碳酸盐铁矿石常温浮选行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [6] 薛敏. 齐大山铁矿开采矿石工艺矿物学及可选性研究[J]. 金属矿山, 2010(5):86-88.
- [7] 周永锋, 罗溪梅, 宋水祥, 等. 四种阳离子捕收剂对赤铁矿和石英浮选行为的影响[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(2): 56-61.

quartz[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(2):56-61.

[8] H Sahoo, S S Rath, B Das. Use of the ionic liquid tricapryl methyl ammonium salicylate (TOMAS) as a flotation collector of quartz [J]. *Sep. Purif. Technol.* 2014, 136: 66-73.

[9] 朱一民, 陈金鑫, 任建蕾, 等. 新型捕收剂 DTX-1 常温分步浮选东鞍山铁矿混合磁选精矿 [J]. *金属矿山*, 2014(7):61-64.

ZHU Y M, CHEN J X, REN J L, et al. Stepwise flotation with a new collector DTX-1 at room temperature for the mixed magnetic separation concentrates of Donganshan iron ore[J].

Metal Mine, 2014(7):61-64.

[10] 刘宗丰. 赤铁矿反浮选 DKZ-1 捕收剂的合成及性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

LIU Z F. Synthesis and collection mechanism of new collector DKZ-1 on reverse floatation of hematite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

[11] 梅建庭, 赫荣安, 杨威. KS-II 捕收剂的设计和合成及应用 [J]. *矿业工程*, 2009(5):26-28.

MEI J T, HE R A, YANG W. Design, synthesis and application of collector KS- II [J]. *Mining Engineering*, 2009(5):26-28.

Research on the Application of a New Low-Temperature Collector DGT-P in Qidashan Iron Ore Reverse Flotation Process

Gu Xiaotian¹, Zhu Yimin¹, Liu Jie^{1,2}, Han Yuexin^{1,2}, Ma Yuning¹

(1.College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China;

2.Liaoning Technology and Engineering Laboratory of Effective Exploitation of Refractory Iron Ores, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: With the newly developed compound collector DGT-P, flotation tests were carried out for the mixed magnetic separation concentrates of Qidashan iron ore. The optimum reagent regime was determined and the flotation efficiency was investigated. Under the conditions of pulp temperature 20 °C, pH value=10.0, collector DGT-P dosage 800 g/t, inhibitor corn starch dosage 1200 g/t and no activator added, good flotation indexes of 69.23% concentrate iron grade and 91.52% iron recovery were obtained through the closed circuit process with "one coarse, one fine and one sweep". This study shows that DGT-P is an efficient and highly selective low-temperature collector, which could effectively solve the problem of energy waste in the anionic reverse flotation of iron ores in China.

Keywords: Flotation; Low-temperature collector; Compound collector; Iron ore