苛化淀粉制备条件对赤铁矿反浮选脱硅的影响研究*

来有邦，袁腾，边新峰

（河北钢铁集团司家营研山铁矿有限公司， 河北 唐山市 063700）

摘要：针对河北某鞍山式赤铁矿，系统探讨了苛化淀粉制备条件对赤铁矿反浮选脱硅效果的影响。通过单因素变量试验和闭路流程试验，明确了苛化比、苛化温度及苛化时间等关键制备参数的优化组合方案。结果表明，在苛化比为8∶100、苛化温度为90 ℃及苛化时间为30 min的最佳试验条件下，苛化淀粉的选择性抑制性能得到显著提升。闭路试验中，铁精矿和尾矿铁品位分别为67.02%和20.65%，铁回收率达到87.63%。红外光谱及Zeta电位分析揭示了苛化淀粉在分子结构和吸附性能上的变化机理，结果证实，淀粉经苛化处理后，可使其羟基与羧基得到有效暴露，这一机制增强了抑制剂与赤铁矿表面的化学吸附能力，从而实现了对赤铁矿的选择性抑制。研究结果为赤铁矿反浮选脱硅工艺的绿色可持续发展提供了新思路。

关键词：赤铁矿；苛化淀粉；反浮选；苛化条件；机理分析

中图分类号：TD951　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)05-0256-08

Study on the Influence of Preparation Conditions of Caustic Starch on Reverse Flotation Desilication of Hematite

LAI Youbang, YUAN Teng, BIAN Xinfeng

(Sijiaying Yanshan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron & Steel Group, Tangshan, Hebei 063700, China)

Abstract: A systematic study was conducted on the influence of preparation conditions of caustic starch on the reverse flotation desilication effect of a certain Anshan style hematite ore in Hebei province. Through single-factor variable tests and closed-circuit process test, the optimization combination scheme of key preparation parameters such as causticity ratio, causticity temperature, and causticity time was clarified. The results show that under the optimal conditions of a causticity ratio of 8∶100, a causticity temperature of 90 ℃, and a causticity time of 30 min, the selective inhibition performance of caustic starch was significantly improved. In the closed-circuit test, the iron grades of iron concentrate and tailings were 67.02% and 20.65%, respectively, with an iron recovery rate of 87.63%. Infrared spectroscopy and Zeta potential analysis revealed the mechanism of changes in the molecular structure and adsorption properties of caustic starch. The results confirmed that after causticization treatment, starch can effectively expose its hydroxyl and carboxyl groups, which enhances the chemical adsorption ability of the inhibitor on the surface of hematite, thereby achieving selective inhibition of hematite. The research result provides a novel approach for the green and sustainable development of the reverse flotation desilication process for hematite.

Key words: Hematite, Caustic starch, Reverse flotation, Caustic conditions, Mechanism analysis

0 引言

铁矿石是钢铁工业的“粮食”[1]，提升铁矿资源供应能力对我国钢铁工业高质量发展至关重要[2-3]。我国是世界上铁矿石资源总量相对丰富的国家，但我国铁矿石资源面临品位较低、贫矿及难选矿多、中小型矿多、矿石类型复杂等问题[4-6]。近年来，随着铁矿石需求量的日益增大，矿山开采规模迅速增长，导致入选矿石品位逐渐降低、复杂难选铁矿石增多[7-9]。当前铁矿石资源现状也直接导致部分矿石品位低、成本高的铁矿山面临生存危机[10]，对我国钢铁行业的高质量发展和铁矿石资源综合利用率以及自给率带来了巨大挑战[11-13]。因此，如何降低选矿生产成本，实现低品位难选铁矿石资源高效回收，已成为选矿工作者亟需解决的课题之一[14-15]。

在赤铁矿反浮选工艺中，淀粉因其具有优异的抑制性能和环保特性，成为最常用的抑制剂之一[16-17]。淀粉是一种天然的多糖有机高分子化合

* **收稿日期**：2024-11-29

基金项目：河钢集团重点科技项目(HG2023215)

作者简介：来有邦(1988—)，男，河北滦州人，高级工程师，主要从事选矿技术研究与管理工作。E-mail：lyb1190@126.com

物,分子结构中含有大量的羟基和醚键等亲水性基团,这些基团能够通过氢键或化学吸附,与赤铁矿表面发生强相互作用,形成稳定的吸附层和水膜[18]。这种相互作用增强了赤铁矿表面的亲水性,从而抑制其可浮性[19-20]。此外,淀粉分子较大,其遮盖效应可以有效屏蔽捕收剂的疏水作用,进一步降低赤铁矿的可浮性[21]。然而,天然淀粉溶解性较差,需通过苛化处理以增强其溶解性和选择性抑制性能[22-23]。苛化淀粉是在碱煮条件下生成的改性淀粉,其分子结构在苛化过程中会发生显著变化,包括糖苷键的断裂引发分子链的降解,羟基缔合的破坏导致更多极性基团(如羧基和羰基)暴露等[24-25]。这些极性基团通过化学吸附与赤铁矿表面的铁离子形成强配位键,进一步增强了吸附层的稳定性和覆盖效果,显著降低赤铁矿表面的自由能,从而降低其可浮性[26]。

苛化淀粉的性能受苛化比、苛化温度和苛化时间等关键制备条件的影响较为显著。不同苛化条件会对淀粉分子的降解程度及功能基团的生成效果产生差异,进而对淀粉抑制性能和赤铁矿的浮选指标产生重要影响。因此,本文针对河北某难选鞍山式赤铁矿矿石,通过单因素变量试验和闭路试验开展选矿工艺技术条件研究,以取得较为理想的选矿指标。研究对提高同类型难选铁矿的选矿效率和推动绿色矿业发展具有重要意义。

1 矿石性质和试验方法

1.1 矿石性质

矿石样品取自河北某选矿厂,经自然阴干后进行混匀、缩分。矿样的主要化学成分分析结果见表1。原矿中Fe品位为51.43%,是矿石中的主要有价元素;脉石矿物主要以SiO_2为主,含量为20.22%。此外,CaO、MgO及Al_2O_3等脉石矿物含量分别为3.85%、4.47%和1.78%。

表1 矿石主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of samples ores %

TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
51.43	20.22	3.85	4.47	1.78

矿石X射线衍射(XRD)分析图谱如图1所示。分析可知,原矿中有用矿物主要为赤铁矿,脉石矿物主要为石英。

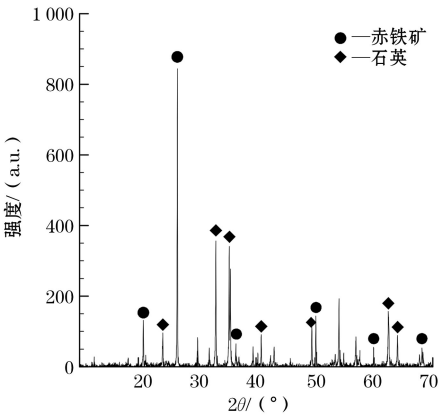


图1 原矿XRD图谱

Fig.1 XRD pattern of ores

1.2 试验方法

(1)浮选条件试验。本研究所有浮选试验均在XFD型单槽浮选机中进行,浮选条件试验流程如图2所示,即采用"一粗一精"流程。首先,称取一定量矿样放入浮选槽内,加入水调浆后,调整搅拌速度和充气量为固定值。依次加入pH调整剂(NaOH)、抑制剂(苛化淀粉)、活化剂(CaO)和捕收剂(TD-Ⅱ),进行反浮选试验。

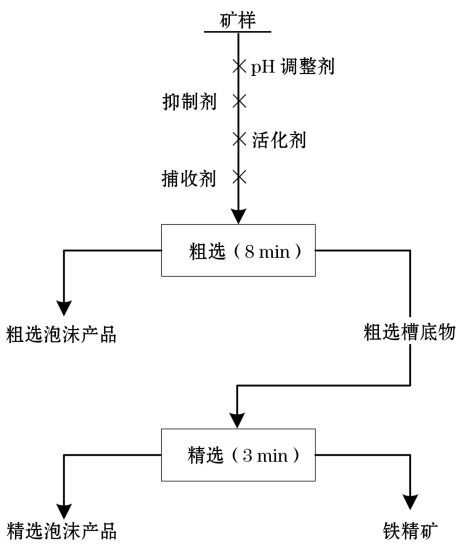


图2 浮选条件试验流程

Fig.2 Process of flotation conditional test

浮选试验结束后,对泡沫产品和槽内产品分别进行过滤、烘干、称重和化验,计算铁品位和铁回收率。为进一步探索苛化淀粉制备条件对赤铁矿反浮选脱硅效果的影响,在确定最优NaOH、CaO、TD-Ⅱ用量的基础上,开展了苛化淀粉制备及其对赤铁矿抑制效果的研究。苛化淀粉制备时,取适量淀粉于烧杯中,并加入一定量的去离子水,搅拌均匀

后向烧杯中加入 NaOH 固体,搅拌均匀后置于水浴锅中加热,并持续搅拌至制备完成。

(2) 红外光谱测试。采用液体涂抹法制备样品,使用 VERTEX 80v 傅里叶变换红外吸收光谱仪对样品进行测试。将光谱纯溴化钾粉末置于玛瑙研钵中,充分研磨后取适量溴化钾粉末置于模具中制成透明薄片,取适量待测溶液均匀涂抹于薄片表面。最终将制备完成的样品置于傅里叶变换红外吸收光谱仪中,在室温下进行红外光谱测试。

(3) Zeta 电位测试。采用 BeNano 90 Zeta 电位分析仪对改性前后淀粉溶液的 Zeta 电位进行测定。取 5 mL 淀粉溶液置于烧杯中,加入浓度为 1 000 mol/L 的 NaCl 溶液,将其稀释定容至 100 mL 后,使用 NaOH 和 HCl 溶液调节溶液 pH,最后取适量的溶液注入样品池开始测定。每个样品重复测量 3 次,取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 浮选条件试验

2.1.1 基础浮选条件确定试验

浮选过程中,药剂制度是影响浮选效果的关键因素。为研究苛化淀粉制备条件对赤铁矿反浮选效果的影响,确定最优浮选试验基础条件,本研究首先在固定抑制剂(苛化淀粉,700 g/t)用量条件下,考察了 NaOH(0～1 500 g/t)、CaO(0～1 250 g/t)和 TD-Ⅱ(0～1 000 g/t)用量对精矿铁品位及铁回收率的影响。药剂用量试验结果如图 3 所示。

由图 3(a)可知,随着 NaOH 用量的增加,精矿铁品位呈现快速上升趋势,铁回收率呈下降趋势,当 NaOH 用量超过 1 000 g/t 后变化趋于平稳。该现象表明,NaOH 用量为 1 000 g/t 条件下对矿浆 pH 调节的效果最佳,能够有效促进抑制剂在脉石矿物表面的吸附。当 NaOH 用量增加到 1 500 g/t 时,精矿铁品位变化不大,铁回收率有所下降。这可能是由于矿浆碱性过强,其中的 OH^- 与捕收剂产生竞争吸附,降低了捕收剂对脉石矿物的选择性吸附,间接导致铁回收率下降。综合考虑浮选指标与药剂消耗,确定 NaOH 用量为 1 000 g/t。

由图 3(b)可知,当 CaO 添加量在 0～1 000 g/t 范围时,精矿铁品位随活化剂用量的增加而大幅提升,而铁回收率则呈现下降趋势;继续增加活化剂用量至 1 250 g/t,精矿铁品位提升不明显,且铁回收率持续下降,这可能是由于 CaO 用量过高,矿浆中 Ca^{2+} 浓度较高,并与捕收剂发生反应生成难溶性脂肪酸钙沉淀,降低了捕收剂的捕收效果。基于试验结果,确定活化剂用量为 1 000 g/t。

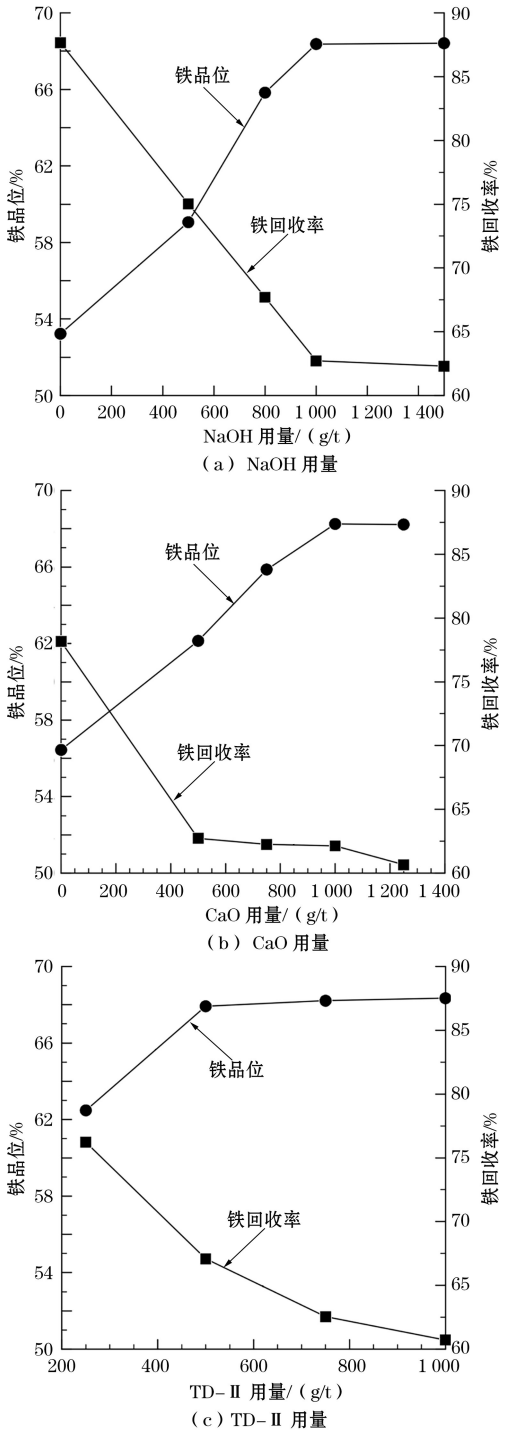


图 3 药剂用量对赤铁矿反浮选的影响

Fig.3 Effect of reagent dosage on reverse flotation of hematite

由图 3(c)可知,随着 TD-Ⅱ用量的增加,精矿铁品位逐渐上升,而铁回收率逐步下降。该现象表明,适量的捕收剂能够有效吸附于脉石矿物表面,增

强其疏水性,从而实现脉石矿物与有用矿物的有效分离。然而,当捕收剂用量过多时,可能引起非选择性吸附或泡沫过度稳定现象,导致部分铁矿物进入尾矿中,进而影响铁回收率。综合考虑精矿铁品位与铁回收率浮选指标,将捕收剂用量确定为 750 g/t。

综上所述,最佳基础浮选条件为:NaOH 用量为 1 000 g/t,CaO 用量为 1 000 g/t,捕收剂 TD-Ⅱ用量为 750 g/t。

2.1.2 苛化淀粉制备条件对赤铁矿反浮选的影响

在上述试验的基础上,进一步考察了苛化淀粉制备条件对赤铁矿反浮选效果的影响,探究了苛化比(0∶100～10∶100)、苛化温度(70～100 ℃)和苛化时间(0～30 min)对精矿铁品位和铁回收率的影响。

苛化比对赤铁矿反浮选效果的影响结果如图 4 所示。结果表明,在抑制剂的制备过程中,苛化比对精矿的铁品位和铁回收率具有显著影响。当苛化比从 0∶100 增加到 8∶100 时,铁回收率从 42%提高至 62%,增幅较大,这可能是由于适量 NaOH 的加入可有效提高淀粉的溶解性,并促进亲水基团的形成,进而增强了淀粉对赤铁矿的抑制作用。然而,继续增加苛化比,铁回收率的增幅趋于平缓,而精矿铁品位存在小幅下降,表明过量 NaOH 可能导致淀粉分子的过度苛化,进而降低其抑制效果。综合考虑精矿铁品位与回收率指标,确定最佳淀粉苛化比为 8∶100。

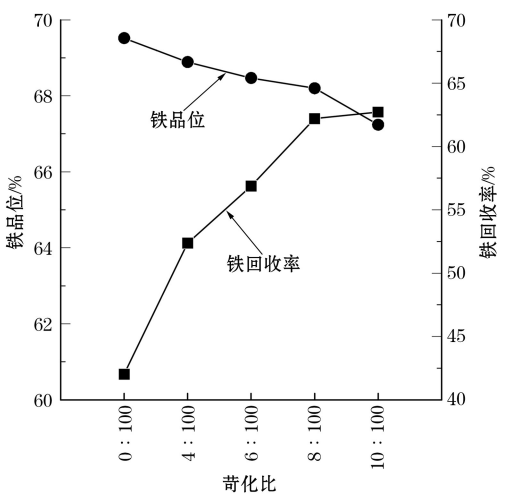


图 4 苛化比对赤铁矿反浮选的影响

Fig.4 Effect of causticity ratio on reverse flotation of hematite

在苛化时间为 30 min、苛化比为 8∶100 条件下,开展了苛化温度对赤铁矿反浮选效果的影响研究,结果如图 5 所示。

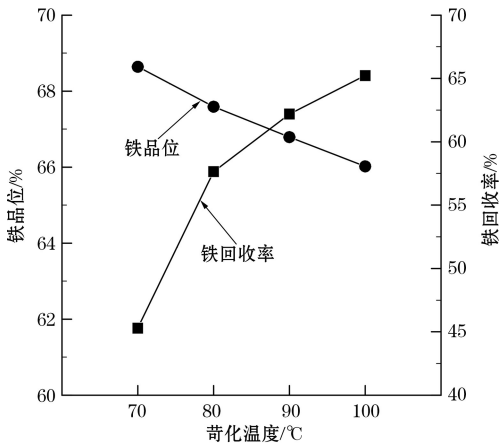


图 5 苛化温度对赤铁矿反浮选的影响

Fig.5 Effect of causticity temperature on reverse flotation of hematite

试验结果表明,随着苛化温度的升高,铁回收率呈现明显上升趋势,而精矿铁品位在整个温度范围内变化较小(3%以内),基本稳定在较高水平(超过 66%)。当苛化温度在 70～90 ℃范围内增加时,铁回收率提高幅度较大,表明适当升高温度能够显著增强淀粉分子的膨胀和水合作用,促使其分子结构发生显著变化,包括糖苷键的断裂和羟基、羧基的暴露,从而增强淀粉分子对赤铁矿表面的选择性吸附。当苛化温度高于 90 ℃时,铁回收率增幅趋于平缓,这可能是由于在较高温度下,淀粉的结构变化已趋于稳定,且过高的温度可能导致部分淀粉分子的降解,降低其抑制性能。综合考虑精矿铁品位与铁回收率浮选指标,确定最佳淀粉苛化温度为 90 ℃。

图 6 为苛化时间对赤铁矿反浮选效果的影响。

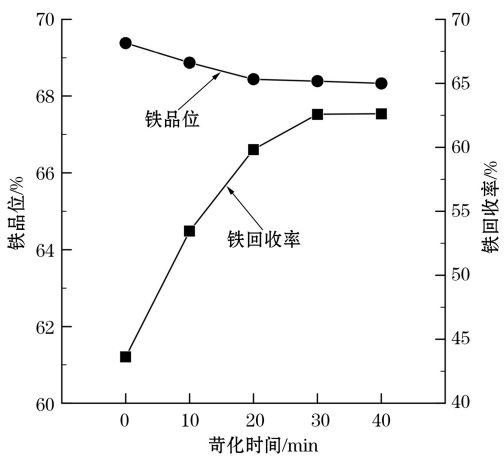


图 6 苛化时间对赤铁矿反浮选的影响

Fig.6 Effect of causticity time on reverse flotation of hematite

结果显示,随着苛化时间的延长,铁回收率逐步

提高,而铁品位略有下降。在 0～30 min 内,铁回收率增长明显,表明此阶段淀粉分子得到充分改性,即羟基和羧基得到有效暴露,增强了淀粉分子对赤铁矿的选择性吸附,从而提升了浮选效率。苛化时间超过 30 min 后,铁回收率和铁品位变化均不明显,因此确定最佳淀粉苛化时间为 30 min。

2.2 闭路流程试验

基于上述单因素变量条件试验,采用"一粗三扫一精"流程进行赤铁矿反浮选闭路试验,各中矿循序返回,闭路试验流程如图 7 所示,试验结果见表 2。闭路试验中磨矿细度为－0.074 mm 占 85%,浮选流程中 NaOH 用量为 1 000 g/t、苛化淀粉用量为 700 g/t、CaO 用量为 1 000 g/t、TD-Ⅱ用量为 750 g/t。

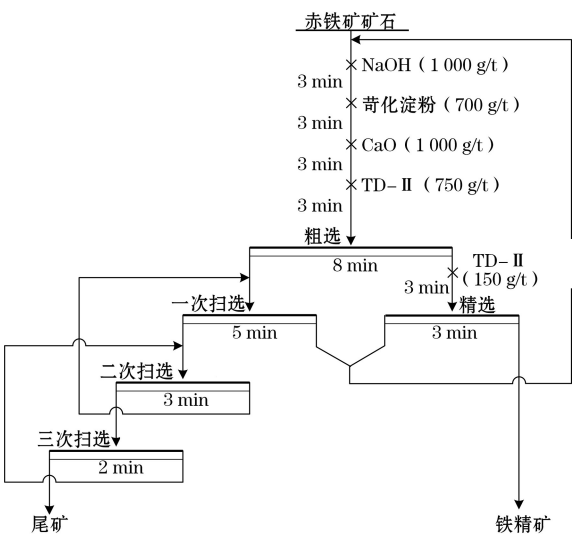


图 7 赤铁矿反浮选闭路试验流程

Fig.7 Closed-circuit test process for reverse flotation of hematite

表 2 赤铁矿反浮选闭路试验结果

Table 2 The results of closed-circuit test for reverse flotation of hematite %

产品	产率	铁品位	铁回收率
铁精矿	68.57	67.02	87.63
尾矿	31.43	20.65	12.37
给矿	100.00	51.43	100.00

由表 2 可知,铁精矿中铁品位由原矿中的 51.43%提高至 67.02%,铁回收率达到 87.63%,精矿产率为 68.57%;尾矿铁品位控制在 20.65%。综合分析,该闭路流程得到的浮选指标良好,基本满足选矿厂的生产需要。

3 机理分析

3.1 淀粉改性对分子结构与矿物表面作用的影响机理

红外光谱能够提供分子内部结构和官能团变化的关键信息,有助于揭示苛化过程中淀粉分子的结构变化,如水合作用、膨胀及糖苷键断裂等。为此,对普通淀粉与苛化淀粉的红外光谱进行了对比分析,结果如图 8 所示。

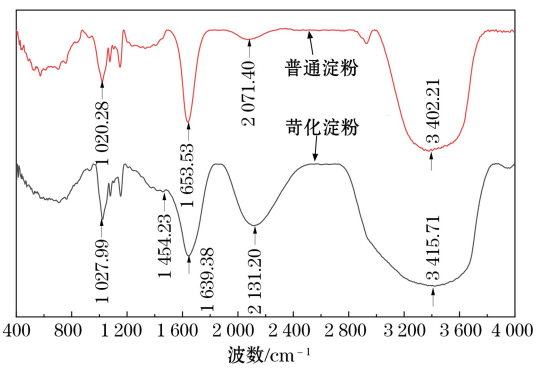


图 8 普通淀粉与苛化淀粉的红外光谱对比

Fig.8 Comparison of infrared spectra of ordinary starch and causticized starch

由图 8 可知,普通淀粉在波数为 3 402 cm^{-1} 处存在—OH 伸缩振动峰;而苛化后,该峰略微位移至 3 415 cm^{-1} 处。在波数为 1 635 cm^{-1} 处,普通淀粉表现出较弱的吸附水—OH 弯曲振动峰;而苛化后,该峰强度略有增强,这可能与羧基和新的羟基环境的形成有关。在波数为 1 384 cm^{-1} 处,普通淀粉的吸收峰较弱,反映了原始多糖分子的特性;而苛化后,1 454 cm^{-1} 处出现了宽而强的吸收峰,表明苛化过程中产生了羧酸盐(R—COO^-),其中两个羧基氧原子的对称 C—O 伸缩振动显著增强了该区域的吸收特征。此外,在波数为 1 000～1 200 cm^{-1} 区域,普通淀粉的 C—O 和 C—C 伸缩振动峰相对较弱;而苛化淀粉在该区域的吸收强度显著增强,这反映了苛化过程中 C—O—C 键的生成以及多糖结构的部分降解和重排。综上所述,苛化处理显著改变了淀粉的红外光谱特征,尤其是通过引入更多的羟基和羧基,提高了淀粉的亲水性和选择性抑制性能。

图 9 为苛化淀粉处理前后赤铁矿的红外光谱分析结果。苛性淀粉处理后,波数为 1 645 cm^{-1} 处出现了一振动峰,该峰通常与羧基(—COO^-)的不对称伸缩振动或 H—O—H 弯曲振动相关,表明苛性

淀粉分子中的羧基与赤铁矿表面 Fe^{3+} 离子可能发生了配位作用,形成了稳定的化学吸附层。赤铁矿在波数为 1 083 cm^{-1} 处的特征峰经苛性淀粉处理后完全消失,可能是由于苛性淀粉中的羟基与赤铁矿表面离子发生了强烈的化学吸附或络合作用,置换了原有的表面吸附物。赤铁矿在波数为 500～750 cm^{-1} 区域内的 Fe—O 振动峰在加入苛性淀粉后整体强度减弱,表明苛性淀粉对赤铁矿表面晶格结构产生了一定的影响。此外,赤铁矿在波数为 3 000～3 700 cm^{-1} 区域的宽吸收带的形态和强度有显著增强,这可能与水分子作用有关,表明苛化淀粉分子通过大量的—OH 基团与赤铁矿表面形成了新的氢键网络。综上所述,苛性淀粉的加入显著改变了赤铁矿的红外光谱特征,表明其对赤铁矿表面具有较强的吸附能力。

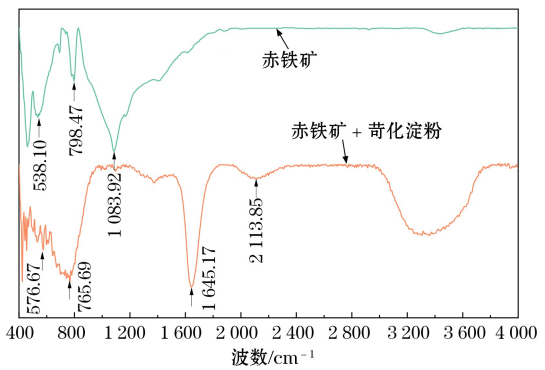


图 9 苛性淀粉处理前后赤铁矿的红外光谱对比

Fig.9 Comparison of infrared spectra of hematite before and after caustic starch treatment

3.2 淀粉对赤铁矿 Zeta 电位的影响机理

为了进一步探讨赤铁矿与淀粉抑制剂的表面作用机制,开展了针对赤铁矿、赤铁矿＋普通淀粉、赤铁矿＋苛化淀粉的 Zeta 电位分析检测,如图 10 所示。结果表明,赤铁矿的等电点位于酸性范围,在中性至碱性条件下表面电性由正转负,Zeta 电位显著降低。普通淀粉的加入对赤铁矿表面电性的改变较弱,仅表现为轻微的负电位偏移,而苛化淀粉则显著降低了 Zeta 电位,尤其是在碱性条件下,负电位大幅增强,这表明苛化淀粉通过其羟基和羧基的化学吸附,与赤铁矿表面 Fe^{3+} 离子形成了稳定的吸附层,从而提高了淀粉的选择性抑制性能。上述结果与浮选试验的结果一致,为进一步探讨苛化淀粉在赤铁矿反浮选工艺中的作用机理提供了有力的依据。

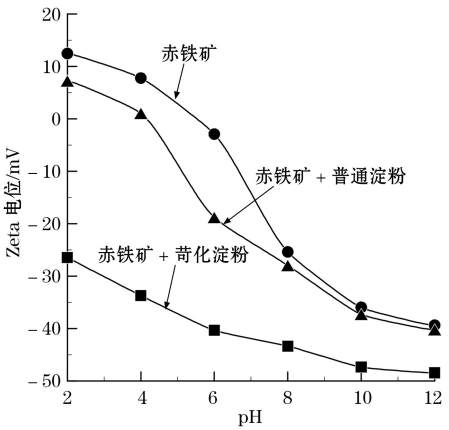


图 10 不同 pH 下淀粉对赤铁矿表面 Zeta 电位的影响

Fig.10 Effect of starch with different pH on Zeta potential of hematite surface

4 结论

(1) 以河北某鞍山式赤铁矿为研究对象,通过矿石性质分析发现,原矿铁品位为 52.45%,铁矿物以赤铁矿为主,脉石矿物主要为石英,此外还含有少量的钙、镁和铝矿物。

(2) 浮选工艺参数优化试验结果表明,最佳基础浮选条件为:NaOH 用量为 1 000 g/t,苛化淀粉用量为 700 g/t, CaO 用量为 1 000 g/t, TD-Ⅱ用量为 750 g/t。

(3) 苛化淀粉的制备条件显著影响其对赤铁矿的抑制性能。基于浮选条件试验,确定苛化淀粉最佳制备条件为:苛化比为 8∶100、苛化温度为 90 ℃、苛化时间为 30 min。采用“一粗三扫一精”的闭路浮选流程,获得了铁品位为 67.02%、铁回收率为 87.63%的铁精矿。

(4) 红外光谱和 Zeta 电位分析结果表明,苛化作用可以改变淀粉的分子结构,使其中的羟基和羧基得到暴露,进而增加抑制剂的亲水性和选择性抑制性能。特别是通过与赤铁矿表面的 Fe^{3+} 作用后形成的稳定化学吸附层,显著降低了赤铁矿表面的自由能,从而强化了淀粉的抑制效果。

参考文献(References):

[1] 韩跃新,张小龙,高鹏,等.中国铁矿石选矿技术发展与展望[J].金属矿山,2024(2):1-24.
HAN Yuexin, ZHANG Xiaolong, GAO Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine,2024(2):1-24.

[2] 刘鸿,李颖,王舰,等.复合捕收剂在低温反浮选铁矿石中的协同效应[J].矿业研究与开发,2023,43(5):211-215.

LIU Hong, LI Ying, WANG Jian, et al. Synergistic effect of composite collector in low-temperature reverse flotation of iron ore[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(5):211-215.

[3] 吴俊杰,刘恩建,郭小飞,等.我国典型贫铁矿石预选技术研究新进展[J].金属矿山,2023(4):124-130.
WU Junjie, LIU Enjian, GUO Xiaofei, et al. New development of research on pre-concentration technology of typical poor iron ore in China[J]. Metal Mine, 2023(4): 124-130.

[4] 付心壮.浮选药剂在赤铁矿和石英表面吸附特性量化解析及浮选行为预测[D].长沙:中南大学,2023.
FU Xinzhuang. Quantitative analysis of adsorption characteristics of flotation reagents on hematite and quartz surfaces and prediction of flotation behavior[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[5] 依爽,郑业超,赵通林,等.基于新型耐低温捕收剂的铁矿反浮选脱硅试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8): 242-247.
YI Shuang, ZHENG Yechao, ZHAO Tonglin, et al. Experimental study on reverse flotation desiliconization of iron ore based on new low-temperature resistant collector [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(8): 242-247.

[6] 杨诚,张晨,李明阳,等.有机抑制剂在铁矿石反浮选中的应用研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(4):141-149.
YANG Cheng, ZHANG Chen, LI Mingyang, et al. Research development of application of organic depressant in iron ore reverse flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(4):141-149.

[7] 王普蓉,徐国印.云南某低品位难选鲕状赤铁矿选矿工艺研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):197-201.
WANG Purong, XU Guoyin. Study on beneficiation process of a low-grade refractory oolitic hematite ore in Yunnan[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6):197-201.

[8] HU Z C, LU D E, WANG Y H, et al. A novel pneumatic dry high-intensity magnetic separator for the beneficiation of fine-grained hematite [J]. Powder Technology, 2024, 433:119216.

[9] 徐泽平.淀粉的理化改性及其对赤铁矿反浮选的影响研究[D].武汉:武汉科技大学,2023.
XU Zeping. Study on physicochemical modification of starch and its effect on hematite reverse flotation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2023.

[10] 汪桂杰.几种改性淀粉对赤铁矿的抑制机理及其应用研究[D].长沙:中南大学,2014.
WANG Guijie. Research on mechanism and application of several kinds of modified starch as hematite inhibitor[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[11] 杨光,苏兴国,马自飞,等.东鞍山贫杂铁矿石选矿技术研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(5):140-148.
YANG Guang, SU Xingguo, MA Zifei, et al. Research status and development trend of beneficiation technology for Donganshan iron ore with low grade and complex composition[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5):140-148.

[12] 张凛,骆洪振,王海亮,等.国外某高硫铁矿磁浮联合选矿工艺试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(11):261-267.
ZHANG Lin, LUO Hongzhen, WANG Hailiang, et al. Experimental study on magnetic flotation combined beneficiation process of a high sulfur iron mine abroad[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(11):261-267.

[13] 梁爽,路亮,张行荣.有机抑制剂在黄铁矿浮选中的研究进展[J].中国矿业,2020,29(增刊2):300-302+307.
LIANG Shuang, LU Liang, ZHANG Xingrong. Research on organic depressors of pyrite flotation[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Suppl.2):300-302+307.

[14] CHENG K, WU X Q, TANG H H, et al. The flotation of fine hematite by selective flocculation using sodium polyacrylate[J]. Minerals Engineering, 2022, 176:107273.

[15] 朱智超,张少平,兰舟,等.海南某铁矿工艺矿物学特征及磁选工艺优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):197-201.
ZHU Zhichao, ZHANG Shaoping, LAN Zhou, et al. Study on process mineralogical characteristics and optimization of magnetic separation process of an iron ore mine in Hainan[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(1):197-201.

[16] 姚富兴,马艺闻,张伦旭,等.赤铁矿常温/低温浮选捕收剂研究进展[J].矿产保护与利用,2023,43(6):130-139.
YAO Fuxing, MA Yiwen, ZHANG Lunxu, et al. Development of room-temperature and low-temperature collectors for hematite flotation:a comprehensive review[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6):130-139.

[17] WEI B X, QI H N, WANG Z Y, et al. The ex-situ and in-situ ultrasonic assisted oxidation of corn starch:a comparative study [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 61:104854.

[18] 朱一民,葛婧,刘杰,等.鞍千磁赤铁矿石磁选-反浮选工艺优化研究[J].矿产保护与利用,2023,43(3):82-88.
ZHU Yimin, GE Jing, LIU Jie, et al. Optimization study of magnetic separation-reverse flotation process for magnetic hematite ore in Anqian[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3):82-88.

[19] YANG S Y, WANG L G. Structural and functional insights into starches as depressant for hematite flotation [J]. Minerals Engineering, 2018, 124:149-157.

[20] 王强强,王浩林,王礼平,等.抑制剂淀粉的研发、抑制与应用[J].金属矿山,2017(8):122-126.
WANG Qiangqiang, WANG Haolin, WANG Liping, et al. Research, application and development trend of starch depresent[J]. Metal Mine, 2017(8):122-126.

[21] 徐艳玲.赤铁矿反浮选中淀粉抑制剂的分子结构效应及作用机理[D].武汉:武汉理工大学,2024.

XU Yanling. Molecular structure effect and applied mechanism of depressant starch in the reverse flotation of hematite[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2024.

[22] 田付强,李亚超,曹亦俊,等.淀粉及其衍生物抑制剂在矿物浮选中的应用和作用机理研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(1):82-88.
TIAN Fuqiang, LI Yachao, CAO Yijun, et al. Research progress in application and mechanism of starch and its derivative depressants in mineral flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(1):82-88.

[23] 戴思行,王欠欠,刘诚,等.淀粉类调整剂在矿物浮选中的应用和作用机理研究进展[J].矿产综合利用,2021(4):73-79.
DAI Sixing, WANG Qianqian, LIU Cheng, et al. Research progress of application and interaction mechanism of starch-based regulators in mineral flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2021(4):73-79.

[24] SHRIMALI K, MILLER J D. Polysaccharide depressants for the reverse flotation of iron ore[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2016,69(1):83-95.

[25] 姜永良.齐大山选矿厂低温反浮选捕收剂的研制与应用[D].鞍山:辽宁科技大学,2022.
JIANG Yongliang. Development and application of collector for low temperature reverse flotation in Qidashan mill[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2022.

[26] 董振海,智慧,满晓霏,等.新型低温捕收剂反浮选齐大山选厂混磁精矿工艺研究[J].矿冶工程,2023,43(2):52-56.
DONG Zhenhai, ZHI Hui, MAN Xiaofei, et al. Reverse flotation of mixed magnetic concentrate in Qidashan concentrator with new low-temperature collector[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(2):52-56.