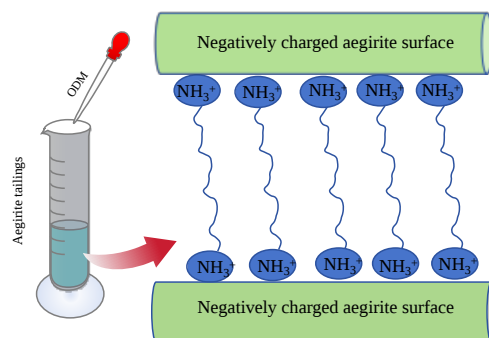


Study on the influence of diamine agents on the flocculation settling performance of aegirite and their adsorption mechanisms

Yiming HU, Yang CAO, Cheng YANG, Yang HUANG, Xiangpeng GAO, Mingyang LI*

School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China

Abstract: Aegirite is a gangue mineral often associated with iron ore. Due to its low hardness, it is easier to be crushed and argillated than iron ore in the grinding process. The argillated fine aegirite further increases the difficulty of iron tailings treatment. In this study, the effects of 6 kinds of diamines with different molecular chain lengths and both ends were amino on the flocculation performance of aegirite were explored through flocculation sedimentation test, and 1,8-octamethylene diamine (ODM) with the best flocculation effect was selected through free sedimentation test, flocculant type test, pH test and flocculant concentration test in sequence. The adsorption mechanism of ODM on the surface of fluorite was investigated using Zeta potential measurements, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis. The results of flocculation and sedimentation test showed that the best flocculation effect of ODM on aegirite was achieved when pH=6 and ODM concentration was 0.1wt%. In this case, aegirite settles completely within 60 s, and the rate of flocculation settlement is about 4 times that of free settlement. In addition, the Zeta potential of aegirite before and after the flocculation reaction was measured by the mechanism test. After adding the flocculant, the zero potential point of aegirite moved from 4.56 to 6.56, indicating that the interaction between the flocculant and the surface of aegirite was obvious. The adsorption behavior of the flocculant on the surface of aegirite was verified by FTIR analysis, and the functional groups belonging to the flocculant were adsorbed on the surface of aegirite. The adsorption mechanism was verified by XPS. It was found that the high resolution spectra of C 1s and N 1s after the treatment of the agent showed obvious new peaks, which further indicated that the agent was adsorbed on the surface of aegirite, and the binding energy of the upper peak of the Fe 2p spectrum was shifted by 0.1 eV, indicating that the adsorption behavior was non-chemisorption. The mechanism test results showed that ODM acts on the surface of aegirite mainly through electrostatic adsorption and hydrogen bond adsorption, and electrostatic adsorption played a dominant role in the adsorption process.



Keywords: aegirite; flocculation; diamine reagent; hydrogen bond adsorption; electrostatic adsorption

收稿: 2023-12-29, 修回: 2024-04-12, 网络发表: 2024-05-16; Received: 2023-12-29, Revised: 2024-04-12, Published online: 2024-05-16

基金项目: 安徽省高等学校科学研究重点项目(编号: 2022AH050305); 安徽省优秀青年教师培育项目(编号: YQZD2023027); 金属矿山安全与健康国家重点实验室开放课题(编号: 2022-JSKSSYS-07)

作者简介: 胡义明, 教授, 资源与环境专业, E-mail: huyiming9@126.com; 通讯联系人, 李明阳, 副教授, 主要从事复杂矿综合利用, E-mail: my.l@outlook.com

引用格式: 胡义明, 曹阳, 杨诚, 等. 二胺类药剂对萤石絮凝沉降性能的影响及吸附机理研究. 过程工程学报, 2024, 24(11): 1318-1325.

Hu Y M, Cao Y, Yang C, et al. Study on the influence of diamine agents on the flocculation settling performance of aegirite and their adsorption mechanisms (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2024, 24(11): 1318-1325, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.223367.

二胺类药剂对萤石絮凝沉降性能的影响及吸附机理研究

胡义明, 曹 阳, 杨 诚, 黄 洋, 高翔鹏, 李明阳*

安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032

摘 要: 萤石是一种常与铁矿石伴生的脉石矿物, 由于其自身硬度较低, 在磨矿过程中极易泥化, 对铁尾矿絮凝造成不利影响。本研究通过絮凝沉降实验探索了 6 种分子两端均为氨基的二胺类药剂对萤石絮凝性能的影响, 并通过对比实验筛选出了絮凝效果最佳的絮凝剂 1,8-辛二胺(ODM)。絮凝沉降实验结果表明, 在 pH=6、ODM 质量浓度为 0.1wt% 时 ODM 对萤石的絮凝效果最佳, 此时萤石可在 60 s 内沉降完全, 絮凝沉降速度约是自由沉降的 4 倍。此外, 通过 Zeta 电位测量、红外光谱分析(FTIR)和 X 射线光电子能谱测试(XPS)等表征得出 ODM 在萤石表面的吸附机理。实验结果表明, ODM 主要通过静电吸附和氢键吸附作用于萤石表面, 且静电吸附在吸附过程中占据主导作用。

关键词: 萤石; 絮凝; 二胺类药剂; 氢键吸附; 静电吸附

中图分类号: TQ424; TD951

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2024)11-1318-08

1 前言

我国铁矿石大多是贫、细矿, 必须通过细磨提高铁矿物与脉石的解离度才能获得较好的分选指标^[1]。然而, 在磨矿过程中会产生大量浊度高、自然沉降速度慢、上清液悬浮物含量高的微细脉石, 这些矿石在分选过程混入铁尾矿中, 导致尾矿处理面临极大困难, 并对生态环境和尾矿库的安全运行造成隐患^[2]。萤石是一种硬度较低(硬度 5~6)的硅酸盐造岩矿物, 在磨矿过程中较铁矿易过粉碎泥化, 泥化的微细萤石使铁尾矿处理难度进一步增大。

针对这一问题, 通常采用絮凝工艺对微细脉石进行处理。微细颗粒通过絮凝工艺会聚集变大进而形成絮团, 从而加快其聚沉速度, 达到固液分离的目的^[3,4]。絮凝剂是絮凝工艺中关键的药剂, 通常分为无机絮凝剂和有机絮凝剂。无机絮凝剂存在用量大、污染严重且难以降解等问题。相比之下, 有机絮凝剂具有用量少、性质稳定、絮凝速度快等优点, 是目前絮凝剂研究和开发的重点^[5,6]。

有机絮凝剂主要分为两大类, 即天然改性絮凝剂和合成有机絮凝剂。天然有机絮凝剂主要有淀粉类、木质素类、甲壳素类、植物胶类、纤维素类絮凝剂等^[7-9]。人工合成有机絮凝剂多以胺类药剂为主, 主要有双氰胺-甲醛类阳离子絮凝剂、聚丙烯酰胺、二甲基二烯丙基氯化铵-丙烯酰胺共聚物、有机胺-环醚聚合物阳离子絮凝剂、(甲基)丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵-丙烯酰胺共聚物等, 其中聚丙烯酰胺的应用最为广泛^[10-12]。此外, 聚丙烯酰胺等高分子聚合物型絮凝剂的絮凝方式主要以吸

附架桥和网捕卷扫为主, 其产生的絮体粒径较大, 但密度较低; 小分子型絮凝剂主要以电荷中和方式为主, 其产生的絮体特性则截然相反^[13]。Liu 等^[12]发现, 改性多胺类淀粉絮凝剂在高岭土悬浮液的絮凝处理中可表现出显著的性能; Jiang 等^[9]发现聚醚胺可以通过氢键吸附和静电吸附有效吸附在长石、石英等微细粒脉石表面。

二胺类絮凝剂是一种长碳链双端位氨基结构的有机物, 其结构中的两个带正电的端位氨基通过静电吸附作用于带负电的微细粒矿物表面^[14], 且分子中长碳链可以进一步增强矿物间疏水作用进而使矿物快速絮凝^[15], 具有成为萤石絮凝剂的潜力, 其结构式如图 1 所示。本研究选择了 6 种不同碳链长度的二胺类药剂, 通过絮凝沉降实验考察了 6 种药剂对萤石的絮凝效果并筛选出絮凝效果最强的絮凝剂 1-8 辛二胺(ODM), 进一步采用 Zeta 电位测量、红外光谱分析(FTIR)和 X 射线光电子能谱测试(XPS)探究了 ODM 在萤石表面的吸附机理。

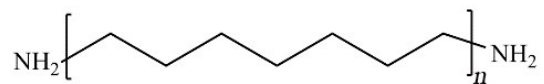


图 1 二胺类絮凝剂的化学式

Fig.1 Chemical formula of diamine flocculant

2 实验

2.1 材料与试剂

实验所用萤石矿样取自安徽霍邱李楼铁矿。首先将所取块状矿样进行破碎, 人工分拣后通过陶瓷球磨机

进行研磨处理,取-37 μm 粒级矿物作为实验样品。霓石矿样的化学成分及 X 射线衍射(XRD)结果分别如表 1 和图 2 所示,结果表明霓石样品的纯度符合实验要求。

表 1 霓石的化学成分

Table 1 Chemical composition of aegirite

Chemical composition	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O
Content/wt%	27.91	56.069	0.692	0.24	0.429	2.42	12.24

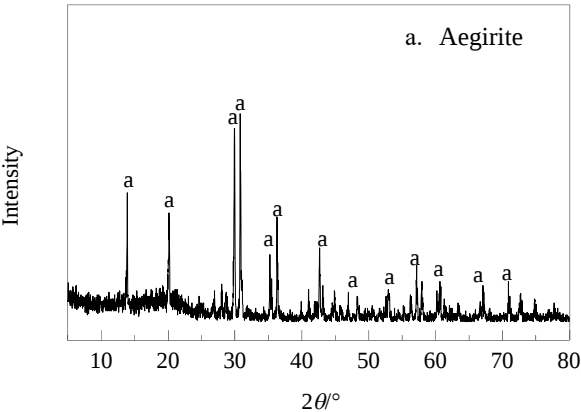


图2 霓石XRD图谱
Fig.2 XRD pattern of aegirite

6 种二胺类絮凝剂分别为 1,6-己二胺(HDM)、1,8-辛二胺(ODM)、1,10-二氨基癸烷(DAM)、1,12-二氨基十二烷(DAN)、双(六甲撑)三胺(BHM)和聚乙烯亚胺(PEI),均为分析纯。pH 调节剂 NaOH 和 HCl 为化学纯,药剂均购买于上海阿拉丁科技有限公司。实验用水为电阻率 18.25 Ωm 的去离子水。

2.2 实验设备与分析仪器

ZetaPALS 电位分析仪(美国布鲁克海文仪器公司),XPM 型三头玛瑙研磨机(江西永盛选矿设备制造有限公司),SW5 实验室絮凝搅拌仪(上海默西科学仪器有限公司),PHS-3C 型精密 pH 计(上海精密科学仪器有限公司),UV3600 红外光谱仪(FTIR,日本岛津公司),101-3 电热真风干燥箱(北京科委永兴仪器有限公司),ESCALAB 250XI 型 X 射线光电子能谱仪(XPS,美国塞莫费舍尔仪器公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 絮凝实验

絮凝实验过程中,考虑到霓石矿浆在絮凝过程均表现为浑浊溶液,采用浊度、透光度等指标的效果不甚理想。相比之下,随着絮凝时间延长,霓石矿浆出现明显的分层现象,因此,本实验通过测量沉降高度并计算沉降速率作为絮凝剂性能指标。另外,在沉降过程中,絮

凝剂效果越好,霓石矿物形成的絮团体积越大且结构越稳定,进而使得霓石矿浆沉降高度升高、沉降时间缩短、沉降速率加快。

絮凝实验在絮凝实验搅拌仪上完成,在室温条件下,向 250 mL 量筒中按需加入 200 mL 不同质量浓度的矿浆和絮凝剂,先快速搅拌 2 min (180 r/min),再慢速搅拌 3 min (90 r/min)。然后,使其自然沉降,且每间隔一段时间记录一次沉降液面高度,沉降高度大于 200 mm 时,视作完全沉降。每组沉降实验重复 3 次,取平均值作为实验结果。

2.3.2 Zeta 电位测试

在 Zeta 电位仪上进行 Zeta 电位测试。首先,将霓石在三头玛瑙研磨机中进一步研磨至-2 μm ,称取 20 mg 霓石样品置于烧杯中。为维持系统电导率稳定并防止极化现象,保证 Zeta 电位测量结果的准确性,测试时以 1×10^{-3} mol/L 的 KCl 溶液为背景溶液。在充分搅拌后进一步加入 pH 调整剂调节矿浆 pH 至特定值,并搅拌 2 min 后加入絮凝剂,继续搅拌至溶液均匀分散,静置 1 min 后用注射器抽取 1 mL 上清液注入样品槽中进行电位测量。实验最终数据取 3 次测量结果的平均值。

2.3.3 傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试

采用红外光谱仪对样品进行 FTIR 测试。称取 1 g 粒级为-2 μm 的霓石至 100 mL 烧杯中并加入 50 mL 去离子水,调节 pH 至 6 后加入质量浓度为 0.1wt% 的 ODM,搅拌 1 h 使药品与矿物充分作用。将矿浆过滤后置于真空干燥箱中并在 40℃ 条件下干燥 24 h。取 1 mg 真空干燥后的样品与溴化钾粉末按质量比 1:100 比例均匀混合后制成压片,放入红外光谱仪中进行 FTIR 测试。

2.3.4 X 射线光电子能谱(XPS)测试

XPS 检测在以单色 Al K α 辐射作为激发源的 X 射线光电子能谱仪上进行。能量和能量步长分别设置为 100 和 1 eV。O 1s, Fe 2p 和 N 1s 的高分辨光谱均根据 C 1s 284.8 eV 的结合能进行校准。XPS 检测所用样品制备方法与 FTIR 测试样品相同。

3 结果与讨论

3.1 絮凝实验

3.1.1 自由沉降实验

图 3 为不同浓度霓石在无絮凝剂条件下随时间的自由沉降情况。由图可知,随着沉降时间延长,不同质量浓度霓石的沉降高度均逐渐增大。此外,质量浓度为 4wt% 和 6wt% 的霓石沉降速度较为接近,且大于 8wt% 和 10wt% 的霓石沉降速度。这可能是低浓度霓石矿浆颗

粒之间的相互作用适中造成的,既能够形成有助于沉降的团聚体,又未达到高浓度时可能出现的过度絮凝和流体动力学阻力增加的情况。另外,考虑到实际生产中,在相近的沉降速率下,浓度越高处理成本越低,因此选择质量浓度为6wt%的霓石矿浆做后续实验。

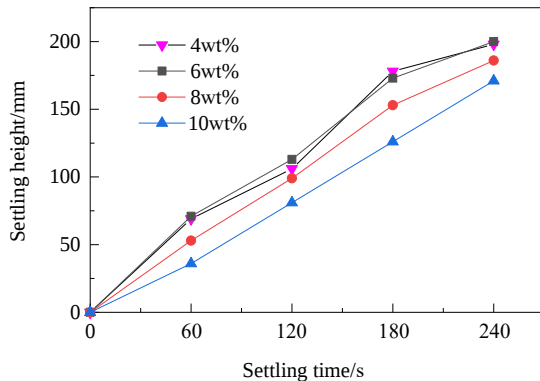


图3 不同质量浓度霓石的自由沉降效果

Fig.3 Free settling effect of aegirite with different mass concentrations

3.1.2 絮凝剂种类实验

确定最佳霓石矿浆浓度为6wt%后,进一步探究二胺类絮凝剂对霓石沉降速率的影响,结果如图4所示。由图可知,加入絮凝剂后霓石的沉降速率出现明显差异,且絮凝剂对霓石的絮凝效果依次为ODM>BHM>DAM>HDM>DAN>PEI。其中絮凝效果最优的是ODM,在180 s就已经完全沉降,表明ODM的引入使霓石微细颗粒快速絮凝成较大的颗粒,提高了霓石的沉降速率。另外,添加BHM, DAM和HDM后霓石的沉降速率与自由沉降速率接近,未能表现出絮凝效果。然而,加入DAN和PEI后霓石沉降速率下降,原因可能是这两种药剂在吸附于霓石表面后提高了矿物表面电性,进而使得矿物间静电斥力增大,导致霓石沉降速率下降。絮凝剂种类实验表明,ODM可显著提高霓石的沉降速率,故而在后续的霓石沉降实验中对ODM絮凝性能的影响因素进一步探索。

3.1.3 pH条件实验

pH值对ODM絮凝性能的影响如图5所示,由图可知,pH值对霓石的沉降速度影响较大。在实验pH范围内,霓石的沉降速度随pH升高而降低,且当pH大于9后沉降速度几乎不变。在低pH值下,溶液中的 H^+ 浓度较高,可以中和颗粒表面的负电荷,减少颗粒间的静电排斥力,从而促进絮凝作用的发生。然而,随着pH值升高,矿物颗粒之间的静电斥力增加,形成的絮体结构变得更加松散,沉降速度减慢。此外,由于ODM的溶解度

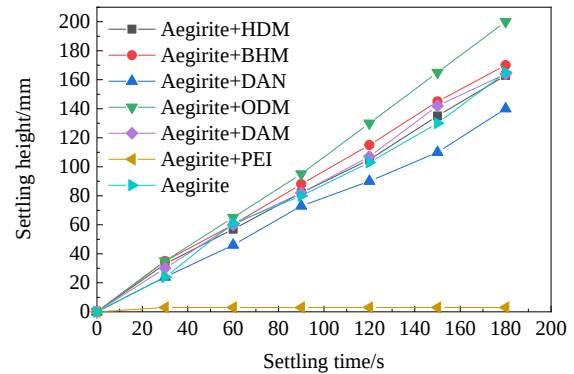


图4 不同絮凝剂对霓石的絮凝效果

Fig.4 Flocculation effect of different flocculants on aegirite

随pH值升高而降低,在一定程度上减弱了絮凝效果。在pH值为6的实验过程中,观察到微细颗粒的絮凝反应异常剧烈,溶液迅速变得清澈,短时间内便形成大量的絮凝颗粒,表明此条件下絮凝剂能够迅速将细小颗粒聚集成较大的絮体,沉降速率提高显著。当沉降完成后,通过轻微摇动量筒,只有量筒底部的沉降层界面产生轻微的晃动,而没有细小颗粒重新分散造成的浑浊现象。这一现象进一步证实在该条件下,絮凝效果最佳,上清液与底部的沉淀之间界面清晰,易于分离。

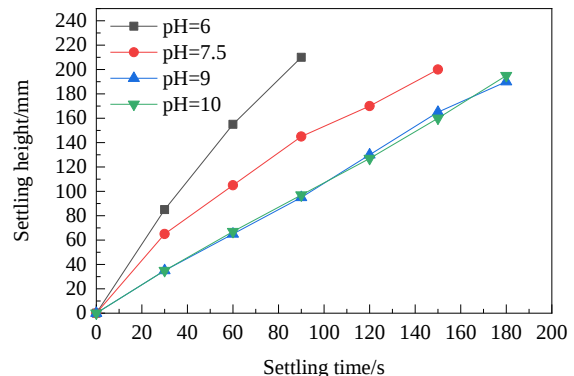


图5 霓石矿浆不同pH值下的絮凝效果

Fig.5 Flocculation effect of aegirite pulp at different pH values

3.1.4 絮凝剂浓度实验

在最佳絮凝pH值条件下,继续探究ODM质量浓度对絮凝效果的影响。从图6中可看出,当ODM质量浓度为0.1wt%时沉降速度最快,完全沉降所用的时间不到60 s,絮凝反应非常剧烈,相较于3.1.1节自由沉降实验中6wt%的霓石完全沉降时间需240 s相比,絮凝沉降时间缩短了75个百分点,絮凝沉降速度约是自由沉降的4倍。然而,ODM质量浓度为0.05wt%和0.2wt%时的絮凝效果相对较差,两者均在95 s后达到完全沉降。以上

结果表明,絮凝剂ODM在一定的浓度范围内,能够有效地在颗粒之间形成桥接,促进絮体的形成。在0.1wt%的浓度条件下,ODM能够提供足够的絮凝剂分子来连接颗粒,形成稳定的絮体。浓度过低(如0.05wt%)可能无法提供足够的絮凝剂分子来进行有效的桥接,而浓度过高(如0.2wt%)可能导致矿浆黏度增加,形成松散的絮体,影响沉降速度。

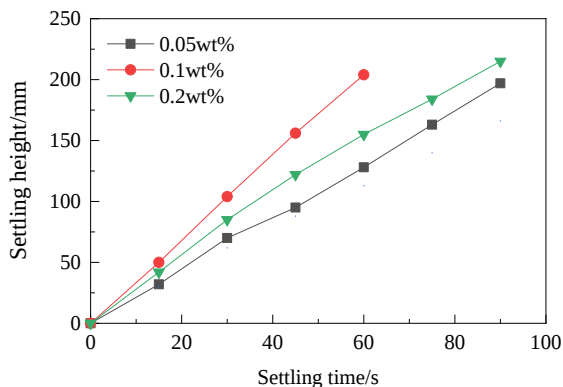


图6 霓石絮凝剂的浓度选择

Fig.6 Concentration selection of aegirite flocculant

综上,二胺类絮凝剂在霓石絮凝过程中表现出的絮凝效果各异,其中ODM的效果最佳。此外,在pH值为6、ODM质量浓度为0.1wt%的条件下,霓石的沉降速度显著提高,表明ODM是一种高效的霓石絮凝剂。

3.2 ODM在霓石表面的吸附行为及机理

3.2.1 Zeta 电位分析

图7为不同pH值条件下霓石Zeta电位的测量结果。如图所示,在不添加ODM时,霓石电位随着pH的增大逐渐下降,霓石矿物零电位点为4.56。添加ODM后霓石电位升高,零电位点右移至6.56。霓石零电位点偏移程度较大,说明ODM与霓石表面的相互作用明显,剧烈

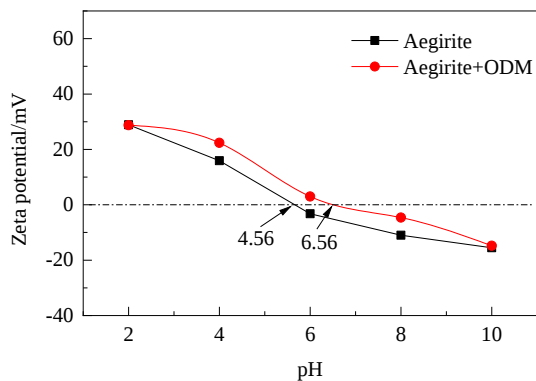


图7 ODM对霓石Zeta电位的影响

Fig.7 Effect of ODM on Zeta potential of aegirite

吸附在霓石表面。此外,ODM是带正电的双氨基长碳链结构,且霓石表面在实验pH范围内带负电,表明ODM在霓石表面的吸附方式可能以静电吸附为主^[16]。

3.2.2 FTIR 分析

为了验证ODM在霓石表面的吸附行为,对吸附ODM前后的霓石表面进行了FTIR测试,结果如图8所示。由图可知,ODM在3331.81 cm^{-1} 处为伯胺中-N-H的伸缩振动峰,2923.74 cm^{-1} 处为C-H的饱和对称伸缩振动峰,1476.32 cm^{-1} 处的吸收峰属于-CH₃基团的伸缩振动。霓石吸附ODM后,霓石谱图在3368.83 cm^{-1} 处出现新特征峰,这是由于ODM中的伯胺基与矿物表面出现静电吸附,导致伯胺基的电荷密度出现变化,进而使得伯胺基由3331.81 cm^{-1} 处偏移至3368.83 cm^{-1} ^[17]。此外,1470.06 cm^{-1} 处-CH₃基团的伸缩振动吸收峰出现右移且相较于霓石1460.06 cm^{-1} 处的振动峰峰宽增加^[18];相比之下,ODM在2923.74 cm^{-1} 处的C-H饱和对称伸缩振动峰在吸附后消失,这可能是位于ODM两端的-NH₂作用于矿物表面,使得紧密吸附后矿物结构与ODM之间形成空间位阻,限制了碳链结构中的C-H振动造成的。综上,FTIR分析结果验证了Zeta电位分析结果,即ODM吸附于矿物表面,并以静电吸附为主要吸附形式。

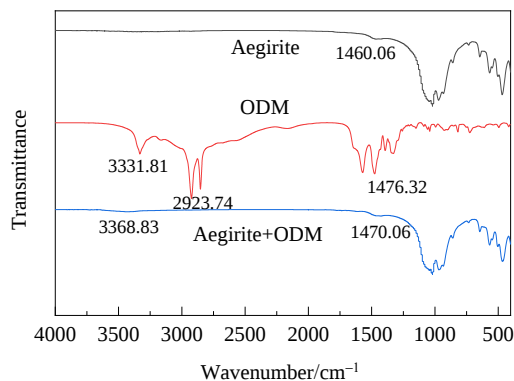


图8 ODM在霓石上吸附的FTIR光谱

Fig.8 FTIR spectra of adsorption of ODM on aegirite

3.2.3 XPS 分析

为了验证吸附机理,对ODM处理前后的霓石进行XPS分析,对吸附中的电子转移进行分析。C 1s, N 1s, O 1s和Fe 2p的高分辨率光谱如图9所示。

由图9(a)和9(b)中可以看出,经ODM处理后霓石表面的C 1s峰被拟合出三个峰,其中284.8 eV为C-C键, C=O键所对应的峰由空气中污染导致,另外,285.7 eV出现的新峰为C-N键,这是由于ODM分子中的氨基与霓石表面作用引起的,这与FTIR的分析结果相符合。

图9(c)和9(d)中,原重晶石矿未出现明显的N 1s峰,而经ODM处理后的重晶石在401.4 eV和399.4 eV处出现两个峰。401.4 eV处的峰属于质子化N,399.4 eV处的峰属于去

质子化N^[19],因此401.4 eV处的峰对应于-NH³⁺...O-或-NH³⁺,399.4 eV处的峰对应于-NH₂...O-或-NH₂。在ODM分子式中,N原子具有孤对电子,很容易与溶液中

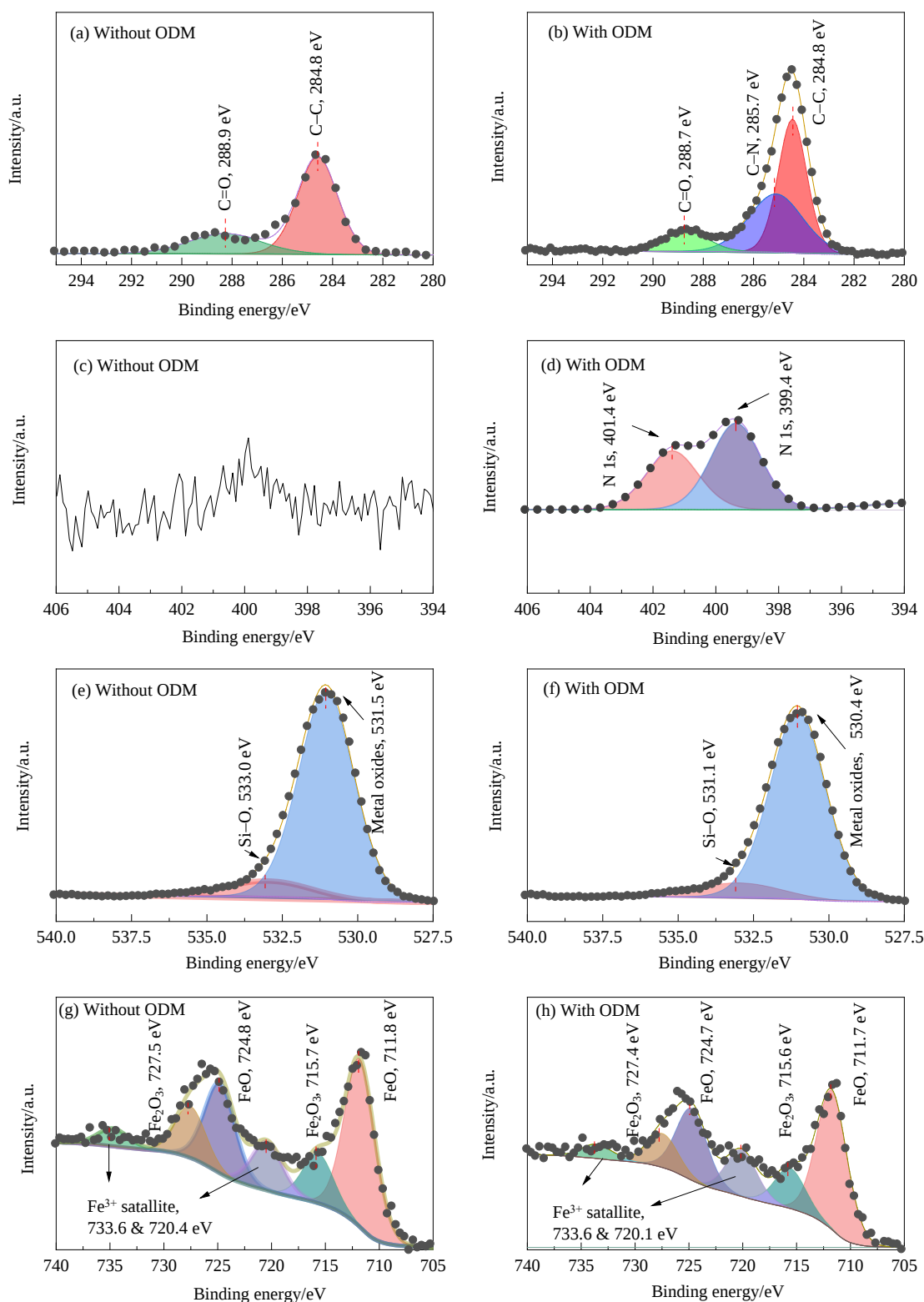


图9 添加ODM前后重晶石表面的高分辨率XPS谱图: (a), (b) C 1s; (c), (d) N 1s; (e), (f) O 1s; (g), (h) Fe 2p
Fig.9 High-resolution XPS spectra of the surface of the aegirite before and after the addition of ODM: (a), (b) C 1s; (c), (d) N 1s; (e), (f) O 1s; (g), (h) Fe 2p

的氢原子形成配位键。因此,在ODM水解过程中,氨基在溶液中可部分或全部转变为 -NH^{3+} ,这使得 -NH_2 和 -NH^{3+} 同时存于絮凝剂溶液中,表明静电吸附和氢键吸附均为ODM作用于霓石表面的吸附形式^[20]。图9(e)和9(f)表明,O 1s的谱图主要由Si-O键和金属氧化物所对应的两个峰拟合而成,从添加ODM后霓石图谱中明显看出, Si-O键和金属氧化物的峰强度下降,这是由于霓石中Si-O键断裂及金属离子溶解导致。对于图9(g)和9(h), Fe 2p的谱图区域则主要包括FeO、 Fe_2O_3 及 Fe^{3+} 卫星峰的对峰位,添加ODM后,霓石表面Fe的峰位结合能整体向更低结合能方向移动了0.1 eV,偏移程度较小,表明ODM与Fe位点未发生化学反应。

综上,ODM在霓石表面发生非化学吸附,静电吸附是ODM在霓石表面发生吸附的主要原因^[21]。此外,霓石在破碎过程中Si-O键断裂产生一些 -Si^+ 和 -Si-O- 位。为了维持电荷平衡,出现了 -Si^+ 与 $\text{-Si}\cdots\text{OH}^-$ 。因此,在中性pH条件下, OH^- 和 -Si-O- 位的存在使霓石表面带负电^[22],这与霓石Zeta电位图一致。因此,含有带正电的 -NH^{3+} 的ODM极易通过静电作用吸附在霓石表面。

3.2.4 絮凝剂吸附模型

通过Zeta电位、FTIR和XPS分析,研究了二胺类絮凝剂在霓石表面的吸附机理。同时,为了更好地理解絮凝剂吸附机理,建立了吸附模型示意图,如图10所示。Zeta电位显示,霓石等电位点为4.56,在pH为6时,霓石表面带负电荷。ODM通过静电和氢键吸附作用附着在霓石表面。部分ODM一端吸附在霓石表面,另一端吸附在不同霓石表面,并在霓石微细粒间形成桥联结构,从而形成矿物絮团,表明ODM具有良好的絮凝效果。同时,ODM双端氨基水解可以降低矿物间静电斥力,进一步提高了絮凝效果。

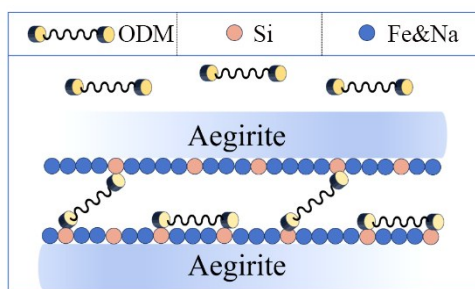


图10 ODM在霓石上絮凝机理图

Fig.10 Flocculation mechanism diagram of ODM flocculation on aegirite

4 结论

以6种二胺类药剂为絮凝剂,研究了二胺类药剂对

霓石的絮凝作用,通过絮凝沉降实验,结合Zeta电位测试、FTIR测试和XPS测试,分析了1,8-辛二胺(ODM)对霓石矿物表面的絮凝机理,得到以下结论:

(1) 絮凝实验表明,在6种二胺类絮凝剂中,ODM对霓石絮凝效果最好。0.1wt%质量浓度的ODM絮凝剂加入到pH值为6的霓石矿浆中,霓石沉降速度显著提高,并在60 s内已完全沉降。

(2) Zeta电位实验中,霓石的等电位点在ODM吸附前后由4.56移动至6.56,说明ODM大量吸附在霓石表面。FTIR和XPS光谱分析结果表明ODM在霓石表面的吸附作用以静电吸附为主,少量以氢键吸附。

(3) ODM是一种极为有效的霓石絮凝剂,在铁尾矿絮凝中发挥重要的作用。

参考文献

- [1] 杨任新,董亚宁,李明阳,等. 霓石、镜铁矿晶体各向异性及粒度差异对可浮性的影响[J]. 金属矿山, 2020, 12: 101-107.
Yang R X, Dong Y N, Li M Y, et al. Effect of crystal anisotropy and particle size difference of aegirite and specularite on floatability [J]. Metal Mine, 2020, 12: 101-107.
- [2] 张洁,赖月,杨朝辉,等. 污泥脱水絮凝剂的研究进展及应用探索[J]. 工业水处理, 2024, 44(2): 48-62.
Zhang J, Lai Y, Yang Z H, et al. Research progress and application of sludge dewatering flocculant [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(2): 48-62.
- [3] 牛福生,李卓林,张晋霞. 微细粒赤铁矿絮凝体物理特性表征研究[J]. 矿产保护与利用, 2016, 5: 70-73, 78.
Niu F S, Li Z L, Zhang J X. Characterization study on physical characteristics of fine-grained hematite [J]. Conservation and Utilization of Mineral, 2016, 5: 70-73, 78.
- [4] 丁淑芳,潘凤娇,邹洪顺达. 天然淀粉接枝改性絮凝剂的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 633-638.
Ding S F, Pan F J, Zou H S D. Research progress on grafting modified flocculants of natural starch [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(2): 633-638.
- [5] 李明阳,梁锐,杨诚,等. 海藻酸钠在选矿领域的应用研究进展[J]. 金属矿山, 2021, 12: 11-20.
Li M Y, Liang R, Yang C, et al. Application and research progress of sodium alginate in the mineral processing field [J]. Metal Mine, 2021, 12: 11-20.
- [6] Tang X M, Wang H H, Xiang Z B, et al. Flocculation performance enhancement of organic polymer flocculants via adjusting cationic block length: molecular structure and characteristics [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 181: 253-265.
- [7] Dwari R K, Mishra B K. Evaluation of flocculation characteristics of kaolinite dispersion system using guar gum: a green flocculant [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(5): 745-755.
- [8] Liu H Y, Liu Z, Hui L F, et al. Cationic cellulose nanofibers as sustainable flocculant and retention aid for reconstituted tobacco sheet with high performance [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 210: 372-378.
- [9] Jiang X S, Chen J, Ban B Y, et al. Application of competitive adsorption of ethylenediamine and polyetheramine in direct float of quartz from quartz-feldspar mixed minerals under neutral pH

- conditions [J]. Minerals Engineering, 2022, 188: 107850.
- [10] Liu X R, Fu Q Z, Liu Z Y, et al. Alkaline pre-fermentation for anaerobic digestion of polyacrylamide flocculated sludge: simultaneously enhancing methane production and polyacrylamide degradation [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 131407.
- [11] Maruyama H, Seki H. Evaluation of flocculation performance of polysaccharide-protamine complex flocculant by flocculation model [J]. Biochemical Engineering Journal, 2022, 180: 108356.
- [12] Liu W, Ma J J, Pang H P, et al. Synthesis of a polyamine-modified starch flocculant and its application [J]. Iranian Polymer Journal, 2021, 30(7): 675-683.
- [13] Saba B, Cornish K. Polyamine flocculants and creaming agent enhance guayule latex processing [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 184: 115062.
- [14] Jiang X S, Shi J, Chen C, et al. Flotation mechanism and application of PEA with different chain lengths in quartz flotation [J]. Chemical Engineering Science, 2021, 246: 116813.
- [15] Kermad A, Hassani A, Hadjaj N, et al. Enhancing anti-reflective and hydrophobic properties of glass surfaces by nanostructuration and grafting of saturated carbon chains [J]. Applied Surface Science, 2020, 507: 144843.
- [16] Wang C Y, Wang Y, Xiao W C, et al. Carboxylated superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles modified with 3-amino propanol and their application in magnetic resonance tumor imaging [J]. BMC Cancer, 2023, 23(1): 1-10.
- [17] Hudson R L, Yarnall Y Y, Gerakines P A. Infrared spectral intensities of amine ices, precursors to amino acids [J]. Astrobiology, 2022, 22(4): 452-461.
- [18] Lin M Y, Huang T P, Chin C H, et al. Infrared spectra of isotopomers of chloromethylene in solid argon [J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 2018, 345: 17-21.
- [19] Buckley A N, Parker G K. Adsorption of *n*-octanohydroxamate collector on iron oxides [J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 121: 70-89.
- [20] Hu W, Li Z Y, Yang J L. Water on silicene: a hydrogen bond-autocatalyzed physisorption-chemisorption-dissociation transition [J]. Nano Research, 2017, 10: 2223-2233.
- [21] Wang L Y, Chen T J, Pu P P. Mixing of graphene nanoplatelets with magnesium alloy powders by electrostatic adsorption [J]. Materials Research Express, 2020, 7(3): 036524.
- [22] Pan G J, Zhang G F, Shi Q, et al. The effect of sodium alginate on chlorite and serpentine in chalcopyrite flotation [J]. Minerals, 2019, 9(3): 196.