菱镁矿浮选除杂捕收剂的研究进展*

董丽鑫[1],代淑娟[1],周晓蕾[2],周滨[3],李鹏程[1]

(1.辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051;
2.辽宁省工业和信息化发展研究院, 辽宁 沈阳 110084;
3.辽宁华子玉科技有限公司, 辽宁 海城市 114200)

摘要:随着高品质菱镁矿资源的逐渐枯竭,通过选矿手段对低品位菱镁矿石进行精细提纯具有重要意义。最有效的菱镁矿选矿方法是浮选法,而决定浮选效果的关键因素是浮选捕收剂。介绍了菱镁矿浮选捕收剂的国内外研究现状,并从宏观角度常规表征测试技术和微观角度分子模拟技术两个方面分析了捕收剂与菱镁矿及其脉石矿物作用机理的研究进展。通过综合分析认为:需加强对协同除杂新型捕收剂方面的研究;通过试验与分子模拟技术相结合来验证捕收剂的浮选性能和作用机理将是今后研究的热点;新型捕收剂的研制在具有高选择性和捕收能力的同时,还应具备绿色、环保无污染的特性。研究结果可为菱镁矿资源的可持续发展和浮选药剂的研制提供参考。

关键词:低品位菱镁矿;浮选;捕收剂;药剂作用机理;发展方向

中图分类号:TD923;TD97 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0233-08

Research Progress on Flotation Impurity Removal Collector for Magnesite

DONG Lixin[1], *DAI Shujuan*[1], *ZHOU Xiaolei*[2], *ZHOU Bin*[3], *LI Pengcheng*[1]

(1.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China;
2.Department of Industry and Information Technology of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110084, China;
3.Liaoning Huaziyu Technology Co., Ltd., Haicheng, Liaoning 114200, China)

Abstract: With the exhaustion of high-grade magnesite resources, it is of great significance to carry out fine purification of low-grade magnesite through beneficiation methods. The most effective beneficiation method for magnesite is flotation, and the key factor determining the flotation effect is flotation collector. The research status of flotation collectors for magnesite at home and abroad was introduced, and the research progress of the interaction mechanism of collectors and magnesite and its gangue minerals were analyzed from two aspects, including macroscopic conventional characterization test technology and microscopic molecular simulation technology. Comprehensive analysis indicates that it is necessary to strengthen the research on new collectors for synergistic impurity removal. The combination of experiments and molecular simulation techniques to verify the flotation performance and mechanism of collectors will be the focus of future research. The new collector should also have the characteristics of green, environmental protection and no pollution while having high selectivity and collecting ability. The research results can provide a reference for the sustainable development of magnesite resources and the development of flotation reagents.

Key words: Low-grade magnesite, Flotation, Collector, Action mechanism of reagent, Development direction

0 引言

菱镁矿是制备优质耐火材料和制取镁的原料[1]。中国是世界上菱镁矿资源最为丰富的国家之一,我国的菱镁矿资源主要分布在辽东地区,储量占全国总储量的85%以上[2]。虽然我国菱镁矿储量大,但随着多年来对菱镁矿资源的开采利用不合理,导致高品质菱镁矿资源逐渐紧缺[3]。因此,低品位菱镁矿资源亟需得到合理的开发利用。

学者们通过工艺矿物学鉴定方法,总结了菱镁

* **收稿日期**:2024-11-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51874168);辽宁省科技计划重点研发项目(2024JH2/102400013)
作者简介:董丽鑫(1998—),女,辽宁丹东人,硕士研究生,主要从事菱镁矿选矿及浮选药剂研究。E-mail:1595813927@qq.com
通信作者:代淑娟(1967—),女,辽宁新民人,博士,教授,主要从事难处理金矿选冶及菱镁矿选矿。E-mail:shujuandai@163.com

矿与其常见脉石矿物的性质特点,并发现复杂的连生包裹关系以及硅钙等杂质含量高是造成低品位菱镁矿石浮选除杂困难的主要原因[4]。菱镁矿石中常见的脉石矿物主要有石英、角闪石、滑石等硅酸盐类矿物,以及以白云石为主的含钙碳酸盐类矿物。浮选法是菱镁矿石提纯除杂最常用的手段,而捕收剂是浮选药剂的核心因素[5]。捕收剂能使矿物的疏水性增强,同时让矿物颗粒有效地吸附在浮选泡沫上,选择性地捕收目的矿物[6]。因此,针对不同的脉石矿物要运用合适的捕收剂,才能使菱镁矿与脉石矿物有效浮选分离。

基于此,本文详细总结归纳了近年来菱镁矿浮选除杂捕收剂的国内外研究进展,并且介绍分析了捕收剂在矿物表面作用机理的研究进展,尤其是分子模拟技术在菱镁矿与脉石矿物浮选分离机理中的应用,旨在为菱镁矿浮选除杂捕收剂的应用与研发提供借鉴与指导。

1 菱镁矿浮选除杂捕收剂的国内外研究现状

近年来,在实践中发现传统的单一捕收剂的泡沫发黏、药剂消耗量大、选择性差、不能高效脱除菱镁矿石中的脉石矿物等问题逐渐显现。为了解决传统捕收剂存在的弊端,提高选别出的菱镁矿精矿的品位,学者们逐渐致力于改性捕收剂、组合捕收剂、阴阳离子组合捕收剂和合成新型捕收剂等用于菱镁矿浮选除杂方面的研究。含硅脉石矿物是菱镁矿石浮选除杂的主要去除矿物,其次是含钙和铁的脉石矿物[7]。因菱镁矿中铁含量少,且部分以类质同象铁存在,所以只有在铁含量较高时,采用磁选法除杂。针对矿物性质和晶体结构特性的差异,合理运用浮选工艺与浮选药剂,能够更有效脱除不同的脉石矿物[8]。常用的菱镁矿浮选工艺有反浮选和反浮选-正浮选联合工艺,而且不同的捕收剂适用于不同的工艺。

1.1 菱镁矿反浮选除硅捕收剂的研究进展

由于菱镁矿石中的硅酸盐类脉石矿物石英、滑石、角闪石等均属非极性矿物,其表面疏水性略强,可浮性较好,通过反浮选工艺可以使其从菱镁矿石中有效脱除。反浮选工艺具有药剂制度简单、易操作和耐低温等优点。菱镁矿反浮选除杂常运用阳离子胺类捕收剂脱除含硅脉石矿物,也有少数学者应用阴阳离子混合捕收剂脱除含硅杂质和部分含钙杂质。阳离子捕收剂主要通过铵根氢原子与矿物发生作用,由于胺类捕收剂难溶于水,需要先将其进行酸化,与酸作用后可生成铵盐,才能易溶于水[9]。近年来,选矿学者们通过改性、复配等方式研制出一些具有选择性捕收能力的新型捕收剂。

针对反浮选除硅捕收剂的研究,高禄等[10]以改性十二胺为捕收剂,在捕收剂用量为 250 g/t、硅酸钠用量为 250 g/t 的条件下,获得了 MgO 品位达到 49.25%、回收率达到 89.06%的良好指标。于连涛等[11]针对辽宁海城某低品位菱镁矿,以 LKD 为捕收剂,通过一粗二精浮选流程,得到了 MgO 品位 97.10%、产率 72.28%的良好浮选指标。YAO Jin 等[12]将新型咪唑啉捕收剂用于浮选脱硅,有效促进了菱镁矿与石英的浮选分离,该捕收剂具有高选择性和环境友好性等优点,对石英有很强的吸附作用,使石英的浮选回收率高达 95%,而菱镁矿的回收率仅为 2.99%。王营等[13]以十二胺为捕收剂,创新性地采用超声波和浮选相结合,相比于常规的浮选,超声强化浮选工艺可有效提高石英的回收率,抑制十二胺对菱镁矿的捕收,提高浮选法分离效率。马阳[14]以辽宁某高硅菱镁矿石为研究对象,研制出了新型捕收剂 XY73,该捕收剂的有效成分为某叔胺和某磷酸酯,通过浮选试验取得了良好的脱硅效果。ZHONG Wenxing 等[15]采用 α-氯油酸(α-COA)和六偏磷酸钠(SHMP)分别作为浮选分离白云石和菱镁矿的捕收剂和抑制剂,研究发现,SHMP 能选择性地吸附在白云石表面,从而对菱镁矿产生独特的抑制作用;由于菱镁矿表面发生了更强的吸附,α-COA 对菱镁矿具有更强的收集能力。在人工混合矿物的微浮选中,使用 α-COA 作为捕收剂,SHMP 作为抑制剂,成功地实现了菱镁矿与白云石的分离,高登选择性指数高达 6.42。GAO Gui 等[16]以庚十二胺乙基咪唑啉季铵盐(ODD)作捕收剂,在矿浆 pH 为 7.0 和 ODD 浓度为 40 mg/L 的条件下,实现了菱镁矿与石英的有效分离,达到了高效浮选脱硅的目的。

综上所述,通过采用反浮选工艺和高效新型阳离子捕收剂可有效脱除菱镁矿石中的含硅脉石矿物,提高菱镁矿的精矿品位与回收率。然而,由于菱镁矿石中的脉石种类和含量复杂多变,反浮选脱硅工艺的有效实施面临着巨大的挑战,新型高效捕收剂的研发依然至关重要。

1.2 菱镁矿正浮选除钙捕收剂的研究进展

虽然通过反浮选工艺和运用高效新型的捕收剂可以脱除菱镁矿石中的一部分含钙脉石矿物,但是菱镁矿与常见的含钙脉石矿物白云石等均属于碳酸盐类矿物,晶体结构和化学性质相似,属三方晶系,通过反浮选难以完全浮选分离,正浮选是脱除菱镁矿中含钙杂质的常用浮选工艺[17]。正浮选工艺常采用阴离子脂肪酸类捕收剂,该类捕收剂的键合原子为氧原子,主要有高级脂肪酸及其钠盐等,其中油酸和油酸钠较为常用。使用阴离子捕收剂时,因其难溶于水,常需将其溶于煤油等溶剂后再使用,还需要对浮选温度进行一定的考察。

近年来,为达到钙镁分离的目的,学者们在菱镁矿正浮选除钙捕收剂方面做了大量研究。陈英铭等[18]在十二烷基硫酸钠(SDS)浓度为 20×10^{-5} mol/L 和适宜的矿浆 pH 的条件下,实现了菱镁矿和白云石的有效浮选分离。针对甘肃某难选低品位菱镁矿石,胡晓星等[19]研发了具有选择性强和耐低温特性的新型脱钙捕收剂 BK434,通过工业试验,获得了 MgO 品位为 46.04%、CaO 含量为 1.60%、SiO_2 含量为 0.05%的高纯度菱镁矿。罗娜[20]采用十二烷基苯磺酸钠(SDBS)与油酸钠作为组合捕收剂,发现组合捕收剂具有协同吸附作用,能使油酸钠更容易在溶液中分散,提高了其捕收能力,可以在一定程度上实现菱镁矿与白云石的浮选分离。薛铭等[21]将油酸钠与 Tween-80 组合为捕收剂,以瓜尔胶为调整剂,采用正浮选流程进行浮选试验,试验结果表明,组合捕收剂具有耐低温的性能,并且适量的瓜尔胶可以达到抑制白云石的效果。WANG Enlei 等[22]将油酸钠和十二烷基磷酸酯组合使用,通过浮选试验得到 MgO 含量为 47.10%的人工混合矿精矿,精矿回收率为 84.45%。该组合捕收剂能选择性吸附在菱镁矿的表面上,增强其疏水性,使菱镁矿与角闪石有效分离。

由现有的研究成果可知,研究人员在实验室通过将油酸钠和十二烷基磷酸酯、十二烷基苯磺酸钠、Tween-80 等药剂组合使用,取得了较好的浮选分离试验效果,达到了钙镁分离的目的。但是正浮选为浮多抑少工艺,药剂消耗量大,成本高,因此难以实现工业上的应用。

1.3 菱镁矿反浮选-正浮选联合工艺协同除硅/钙捕收剂研究

针对复杂难选的菱镁矿石,单步浮选难以除净脉石矿物。因此,有学者采用反浮选-正浮选相结合的工艺,即先通过反浮选脱除含硅杂质,再通过正浮选脱除含钙杂质,以获得高质量的菱镁矿精矿。

在此方面,谭欣等[23]采用等可浮反浮选-正浮选强化脱杂流程(见图 1),以 BK-428 阳离子捕收剂进行等可浮反浮选,以 BK410B 阴离子捕收剂进行正浮选,将 SiO_2 含量由 4.14%降至 0.28%,CaO 含量由 2.91%降至 0.53%。

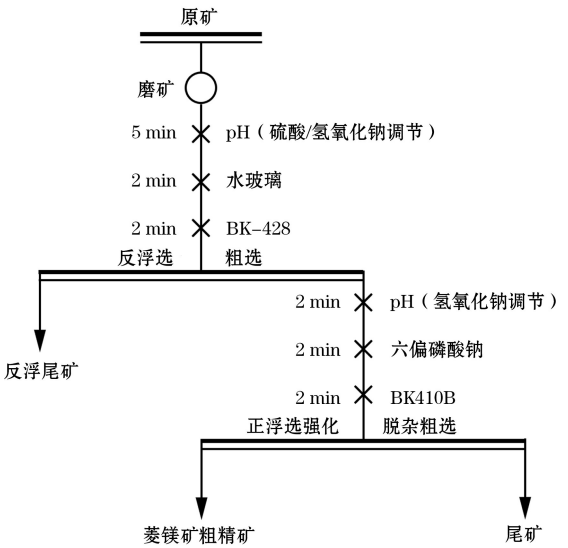


图 1 等可浮反浮选-正浮选强化脱杂流程

Fig.1 Process of iso-flotabillity reverse-direct flotation

丁淑庆[24]以十二胺作为反浮选脱硅的捕收剂,以油酸钠作为正浮选提镁的捕收剂,采用反-正浮选工艺取得了 MgO 品位为 46.49%的菱镁矿精矿,使精矿的 SiO_2 和 CaO 含量分别降至 0.23%和 0.82%。黄朝德等[25]采用反-正浮选工艺,以十八胺作为反浮选的捕收剂,以油酸作为正浮选的捕收剂,在找到最佳的浮选条件后进行闭路试验,在原矿 MgO 品位为 42.26%的条件下,获得了 MgO 品位为 46.12%的菱镁矿精矿。胡生操等[26]对新疆地区某菱镁矿石进行预先脱泥后,以十八胺为捕收剂进行反浮选脱硅,使用新型捕收剂 YSM-091 进行正浮选脱钙,通过闭路试验,在原矿 MgO 品位为 41.20%的条件下,获得了 MgO 品位为 46.12%、回收率为 77.83%的精矿,达到了提纯除杂的目的。

综上所述,国内外学者在菱镁矿除杂捕收剂方面开展了大量的研究工作,并获得了一定的研究成果。针对以石英、滑石等脉石矿物为主的菱镁矿石,采用单一反浮选可实现含硅脉石矿物的有效脱除。但针对部分含硅脉石角闪石、绿泥石等的新型捕收

剂的研究较少,浮选除杂效果有待提高。虽然实验室试验表明,含钙脉石可采用正浮选有效脱除,但反-正联合浮选流程在工业实践中存在工艺不稳定、分选指标差等问题,会导致浮选除杂效果显著降低,主要原因是循环水含有的微细粒矿物及矿物和药剂溶解、水合产生的离子对浮选产生了不利影响。对于低品位堆存菱镁矿而言,脉石矿物种类多、嵌布关系复杂,部分脉石矿物具有泥化特性等是导致这类矿石难选的主要因素。在今后对菱镁矿浮选除杂捕收剂的研究工作中要综合考虑以上因素,在通过单步浮选协同脱除硅钙等杂质的捕收剂方面应进一步加强研究。

2 菱镁矿浮选除杂捕收剂的作用机理研究进展

近年来,国内外大量专家学者通过各种表征测试技术揭示了菱镁矿浮选除杂捕收剂与矿物的作用机理,发现阳离子胺类捕收剂与矿物表面作用形式通常是物理吸附,对含硅脉石矿物具有较好的选择性,阴离子脂肪酸类捕收剂与矿物表面作用形式通常是化学吸附,对含钙脉石矿物选择性较强。

在浮选药剂作用机理的研究中,一方面可以通过试验研究从宏观角度进行表征测试;另一方面还可以利用计算机分子模拟技术从微观尺度上构建吸附模型,从而更科学地揭示药剂的吸附机理。

2.1 表征测试技术的研究进展

药剂作用机理的研究离不开表征测试技术,常用的表征参数或手段有接触角、Zeta 电位、扫描电子显微镜、红外光谱、表面张力、泡沫性能测试和 X 射线光电子能谱(XPS)等。

众多学者通过常规的表征测试技术对捕收剂与菱镁矿及其脉石矿物的作用机理进行了研究。刘秉锋[27]通过溶液化学、接触角和红外光谱分析,得出结论:LS55 新型阳离子捕收剂对含硅脉石矿物的选择性更好,在石英和白云石表面的作用形式为物理吸附,在菱镁矿表面的作用形式为化学吸附。SUN 等[28]首次使用 N,N-二甲基十八胺(NDOA)作为捕收剂,通过接触角检测证明了该捕收剂能增强石英表面的疏水性,通过红外光谱鉴定了该捕收剂是通过氢键和静电作用在石英表面上,根据 XPS 检测发现,NDOA 能优先吸附在石英的 O 位点上,研究证实了 NDOA 能有效将菱镁矿与石英分离。赵伟渲等[29]通过 Zeta 电位和红外光谱分析发现,CO_3^{2-} 的加入加强了十二胺和油酸钠对菱镁矿的捕收能力,可提高菱镁矿的回收率。

LIU Wenbao 等[30]以乙醇胺基表面活性剂双(2-羟乙基)十二烷基胺(BHDA)为捕收剂进行浮选试验,通过机理分析发现,BHDA 在石英表面发生以静电吸附为主的物理吸附作用,与传统的捕收剂十二胺相比,BHDA 对菱镁矿粉具有更好的脱硅和提纯性能。通过在叔胺捕收剂中引入羟乙基,可以在石英表面形成更多的氢键,从而增强吸附的稳定性(见图 2)。

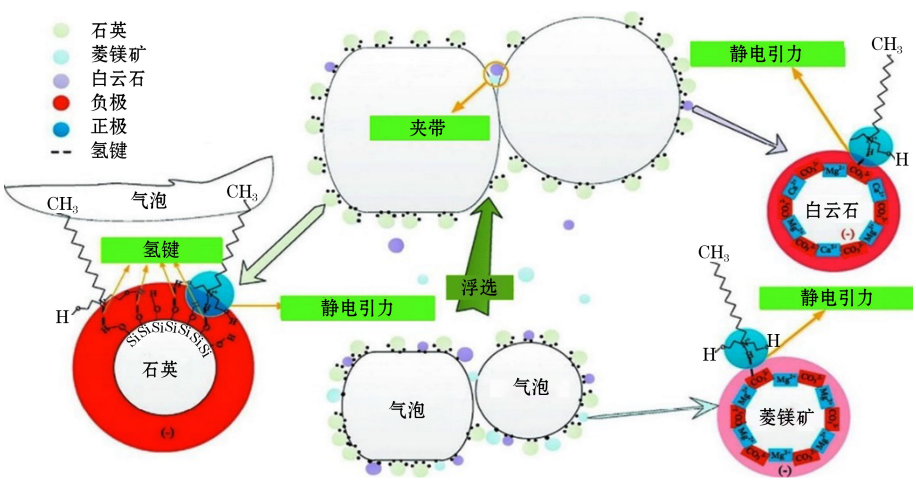


图 2 菱镁矿和 BHDA 的吸附模型

Fig.2 Adsorption models of BHDA with magnesite

SUN Haoran 等[31]以 N-十六烷基三甲基氯化铵(HTAC)为捕收剂,进行了分离菱镁矿和石英的反浮选试验,通过 Zeta 电位和 XPS 检测分析发现 HTAC 主要吸附在石英上,具有很高的选择性,能有效将菱镁矿与石英分离。YAO Jin 等[32]将油酸和十二烷基磷酸酯组合使用,通过 Zeta 电位、红外

光谱和 XPS 研究,发现该捕收剂能选择性地吸附在菱镁矿的 Mg 位点上,增强其表面的疏水性,使菱镁矿与白云石有效浮选分离(见图 3)。

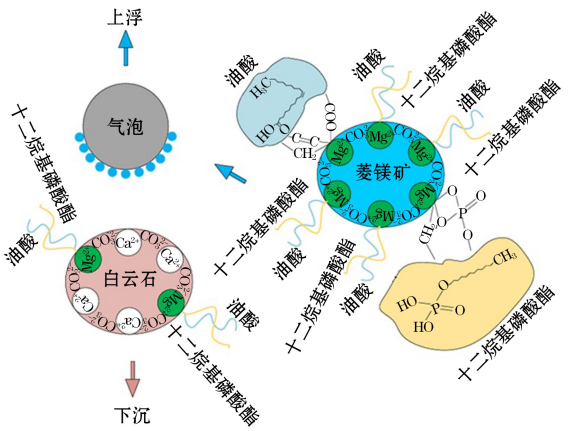


图 3 组合捕收剂与菱镁矿、白云石的作用示意

Fig.3 Schematic of the reaction of the mixed collector on magnesite and dolomite

班小淇等[33]通过红外光谱、接触角检测,发现在白云石、菱镁矿表面十二胺主要产生静电吸附作用,加入少量 Fe^{3+} 能提高捕收剂对白云石的捕收效率。LI Pengcheng 等[34]在醚胺(EAH)的体系下,通过 Zete 电位和红外光谱分析,发现菱镁矿、白云石和石英 3 种单矿物与捕收剂之间发生的是物理吸附。

2.2 分子模拟技术研究进展

通过分子模拟技术可以模拟药剂在矿物表面的相互作用,建立药剂分子吸附模型,使用工作站对分子模型进行模拟,从而基于计算化学的基本理论从微观角度更科学更深入地探索捕收剂与矿物间的作用机理[35]。分子模拟技术常采用量子力学和分子力学的方法[36]。最常用的模拟软件是 Material Studio(简称 MS),可以在原子尺度(nm~pm)上对矿物晶体表面化学特性、浮选药剂分子结构和浮选药剂与矿物表面作用机理进行深入研究[37]。

近年来,部分学者借助分子模拟技术揭示了捕收剂对菱镁矿及其脉石矿物的作用机理。LIU Wenbao 等[38]以异丙醇胺作为新型捕收剂进行浮选试验,通过试验和理论计算相结合的方法,研究了异丙醇胺在菱镁矿上的吸附机理,分子动力学模拟结果与浮选试验结果相吻合,研究结果在分子尺度上揭示了引入异丙醇基团的机理,这对于筛选官能团和新型捕收剂的研发至关重要。李鹏程等[39]通过第一性原理,遵循密度泛函理论,采用 MS 软件的 CASTEP 模块,研究了捕收剂 LKD 在溶解前后对菱镁矿、白云石的表面作用机理,证明了捕收剂 LKD 在白云石表面的作用强于菱镁矿表面,可以达到钙镁分离的效果。丁鉴煦等[40]采用试验与模拟计算相结合的方法,将 0.15 g 碳酸钠与 0.05 g 十二胺组合使用,通过 MS 软件构建并优化了捕收剂与矿物的吸附模型,发现捕收剂在菱镁矿表面存在静电吸附与络合吸附,揭示了矿药之间的作用机理。张多阳等[41]使用 MS 软件对菱镁矿、方解石和白云石 3 种矿物的晶体结构、解理面和药剂与矿物的吸附模型进行了模拟与优化,还分别计算了这 3 种矿物的态密度、能带结构、与常见浮选药剂的前线轨道以及相互作用能等参数,深入研究了药剂与矿物的吸附机理。SUN Haoran 等[42]以十二胺(DDA)为捕收剂,以乙二胺四(亚甲基膦酸)钠(EDTMPS)作为螯合抑制剂,通过分子动力学模拟计算发现 EDTMPS 的预吸附削弱了 DDA 与菱镁矿之间的相互作用,并且在 EDTMPS 的作用下,DDA 的 N 原子与菱镁矿表面之间的距离从 2.636 Å 扩大到 8.003 Å,有利于增强 DDA 对石英的选择性,使石英与菱镁矿高效地浮选分离。韩聪等[43]采用基于密度泛函理论的第一性原理计算方法,研究了菱镁矿与白云石两种矿物解理表面的性质及其对两种矿物浮游性的影响。

综上所述,与传统研究方法相比,通过分子模拟技术计算研究捕收剂与矿物的吸附机理,可以使研究成本变得更低。同时,在计算机计算速度越来越快的时代发展优势下,通过分子模拟技术对捕收剂进行筛选和设计的效率越来越高[44-45]。总之,基于严谨的密度泛函理论,分子模拟技术能极大地降低实际试验与模拟计算过程中存在的误差和偶然性,其计算结果与效率更高效科学。但近年来关于菱镁矿除杂捕收剂方面的分子模拟技术的研究较少,值得广大的科学工作者进一步深入研究。

3 结语

(1) 学者们在菱镁矿浮选除杂捕收剂方面做了大量的研究,研究结果表明,通过采用适宜的浮选工艺和捕收剂可以有效脱除菱镁矿石中的脉石矿物,从而提高菱镁矿精矿的品位和回收率。今后,还需要研制出通过单步浮选就能协同脱除硅钙等杂质的高选择性新型捕收剂,这对菱镁矿选矿行业和资源的合理利用是十分重要的。

(2) 对菱镁矿浮选除杂捕收剂应用分子模拟技术进行的研究还相对较少。借助计算机模拟软件来科学高效的筛选、设计捕收剂,研究矿物表面与药剂的作用机理和构建吸附模型,能够使研究更加高效、科学和准确。利用试验与模拟计算相结合的方法筛选出更利于菱镁矿与其脉石矿物浮选分离的药剂将是今后研究的热点。

(3) 针对菱镁矿选矿的现有捕收剂的不足,并且考虑实际工业生产方面的应用,研究人员依然需要致力于研发出新型高效、耐低温并且低成本的捕收剂,包括取代基的引入、捕收剂的合成、组合药剂等方面。同时,基于绿色发展理念和"双碳"目标,菱镁矿资源的开采利用要科学合理,药剂的研发需要符合绿色环保的要求,做到安全无毒并且易处理。

参考文献(References):

[1] 何艳,王连勇,崔家新,等.菱镁矿制备氧化镁技术进展及趋势[J].矿产综合利用,2024,45(5):95-101.
HE Yan, WANG Lianyong, CUI Jiaxin, et al. Technology progress and development trend of preparing magnesium oxide from magnesite [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024,45(5):95-101.

[2] 中华人民共和国自然资源部.中国矿产资源报告[M].北京:地质出版社,2023:7-8.
Ministry of Natural Resources of the Peoples Republic of China. China Mineral Resources [M]. Beijing: Geology Press,2023:7-8.

[3] 张艳利,张小会,程庆先,等.我国耐火原料的现状与发展[J].耐火与石灰,2023,48(1):12-18.
ZHANG Yanli, ZHANG Xiaohui, CHENG Qingxian, et al. Present situation and development trend of refractory raw materials in China[J]. Refractories & Lime,2023,48(1):12-18.

[4] 董丽鑫,代淑娟,李鹏程,等.辽宁海城某菱镁矿石工艺矿物学研究[J].非金属矿,2024,47(4):78-80+102.
DONG Lixin, DAI Shujuan, LI Pengcheng, et al. Process mineralogy research on a magnesite ore in Haicheng, Liaoning Province[J]. Non-Metallic Mines,2024,47(4):78-80+102.

[5] 刘秉锋,郭小飞,代淑娟,等.浮选法提纯低品位菱镁矿研究进展[J].矿业研究与开发,2021,41(4):124-130.
LIU Bingfeng, GUO Xiaofei, DAI Shujuan, et al. Research progress of purification of low-grade magnesite by flotation [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4): 124-130.

[6] 朱一民.2023 年浮选药剂研究进展[J].有色金属(选矿部分),2024(3):1-22.
ZHU Yimin. Progress of flotation reagents in 2023 [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2024(3): 1-22.

[7] 王纪镇,荆茂晨,赵博辉,等.菱镁矿及其脉石矿物浮选化学研究进展[J].中国有色金属学报,2022,32(12):3823-3842.
WANG Jizhen, JING Maochen, ZHAO Bohui, et al. Research progress of the flotation chemistry of magnesite and its gangue minerals [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(12):3823-3842.

[8] 徐勇强,张真兴,白雪杰,等.菱镁矿石的分选提纯及材料制备研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(2):107-113.
XU Yongqiang, ZHANG Zhenxing, BAI Xuejie, et al. Research progress on purification and material preparation of magnesite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(2):107-113.

[9] 闫雅雯,罗惠华,赵军,等.胺类捕收剂的应用现状及发展前景[J].矿产保护与利用,2022,42(2):59-66.
YAN Yawen, LUO Huihua, ZHAO Jun, et al. Application status and development prospect of amine collectors [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(2):59-66.

[10] 高禄,龙小柱.4 种捕收剂对低品位菱镁矿浮选效果的研究[J].现代盐化工,2022,49(6):16-18.
GAO Lu, LONG Xiaozhu. Study on the effect of four kinds of trapping agents on the flotation of low-grade magnesite ore[J]. Modern Salt and Chemical Industry,2022,49(6):16-18.

[11] 于连涛,李晓安,刘文刚,等.捕收剂 LKD 对某低品位菱镁矿的浮选效果影响[J].矿业研究与开发,2015,35(9):32-35.
YU Liantao, LI Xiaoan, LIU Wen'gang, et al. Flotation effect of collector LKD on low-grade magnesite[J]. Mining Research and Development,2015,35(9):32-35.

[12] YAO Jin, SUN Yishen, YIN Wanzhong, et al. Study on the effects of a novel imidazoline siliconophilic collector in the desilication process of magnesite: Separation experiments, adsorption mechanisms, and separation model [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 353 (Part A):128461.

[13] 王营,印万忠,任森,等.超声波强化菱镁矿与石英浮选分离及其机理研究[J].金属矿山,2023(12):86-92.
WANG Ying, YIN Wanzhong, REN Sen, et al. Study on ultrasonic enhanced flotation separation of magnesite and quartz and its mechanism[J]. Metal Mine,2023(12):86-92.

[14] 马阳.辽宁某高硅菱镁矿新型除杂捕收剂研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2023.
MA Yang. Research on a new collector for reverse flotation of magnesite with high silicon in Liaoning Province[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2023.

[15] ZHONG Wenxing, YIN Wanzhong, WANG Yulian, et al. Selective flotation of magnesite from dolomite using α-chloro-oleate acid as collector[J]. Powder Technology,2020, 373:147-151.

[16] GAO Gui, SUN Haoran, WANG Yulian, et al. Study on the separation effects of the novel collector ODD on magnesite and quartz [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2024,60(4):190522-190533.

[17] 吴晟,侯庆冬,罗旭东,等.菱镁矿除钙提纯技术及镁钙基耐火材料开发应用的研究进展[J].钢铁研究学报,2024,36(10):1290-1297.
WU Sheng, HOU Qingdong, LUO Xudong, et al. Research progress on purification technology of calcium removal from magnesite and development and application of magnesia-calcium-based refractories[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(10):1290-1297.

[18] 陈英铭,马鹏举,柴文翠,等.烷基硫酸盐捕收剂对菱镁矿和白云石的浮选性能研究[J].矿产保护与利用,2023,43(2):53-59.
CHEN Yingming, MA Pengju, CHAI Wencui, et al. Flotation performance of alkyl sulfate collector for magnesite and dolomite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2023,43(2):53-59.

[19] 胡晓星,朱阳戈,郑桂兵,等.BK434在某低品位菱镁矿正浮选降钙中的应用[J].矿业研究与开发,2016,36(9):24-26.
HU Xiaoxing, ZHU Yangge, ZHENG Guibing, et al. Application of novel collector BK434 to remove dolomite from low-grade magnesite ore by flotation[J]. Mining Research and Development,2016,36(9):24-26.

[20] 罗娜.菱镁矿与白云石的浮选分离强化研究[D].沈阳:东北大学,2018.
LUO Na. Study on intensifying flotation separation of magnesite and dolomite[D]. Shenyang: Northeastern University,2018.

[21] 薛铭,印万忠.低温组合药剂对菱镁矿与白云石浮选分离影响[J].有色金属(选矿部分),2024(4):124-135.
XUE Ming, YIN Wanzhong. Effect of low-temperature combined reagent on flotation separation of magnesite and dolomite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(4):124-135.

[22] WANG Enlei, LI Xiaoan, DAI Shujuan, et al. Research on the mechanism of a mixed collector onto magnesite surface to improve the flotation separation of magnesite from hornblende[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2021,57(4):125-138.

[23] 谭欣,苏建芳,朱阳戈,等.辽宁某低品位菱镁矿提质降杂试验研究与工业实践[J].矿产保护与利用,2018(1):54-60.
TAN Xin, SU Jianfang, ZHU Yangge, et al. The experimental research and industrial practice on improving quality and reducing impurities by flotation from a low grade magnesite ore in Liaoning[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2018(1):54-60.

[24] 丁淑庆.辽宁某高硅高钙低品位菱镁矿选矿工艺试验[J].现代矿业,2024,40(7):128-132,138.
DING Shuqing. Beneficiation process test of a high-silicon, high-calcium and low-grade magnesite ore in Liaoning province[J]. Modern Mining,2024,40(7):128-132+138.

[25] 黄朝德,郑刚,魏炜,等.低品位菱镁矿反正浮选试验研究[J].化工矿物与加工,2022,51(8):35-38.
HUANG Chaode, ZHENG Gang, WEI Wei, et al. Research on reverse-direct flotation of low grade magnesite ore[J]. Industrial Minerals & Processing,2022,51(8):35-38.

[26] 胡生操,王晨晨,付金涛,等.新疆某菱镁矿浮选工艺实验研究[J].矿产综合利用,2022(2):69-73.
HU Shengcao, WANG Chenchen, FU Jintao, et al. Research on flotation process test of magnesite in Xinjiang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(2):69-73.

[27] 刘秉锋.新型阳离子捕收剂在菱镁矿石浮选中的应用研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2022.
LIU Bingfeng. Study on application of a new cationic collector in flotation of magnesite ore[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2022.

[28] SUN Haoran, YIN Wanzhong, YAO Jin. Study of selective enhancement of surface hydrophobicity on magnesite and quartz by N, N-dimethyloctadecylamine: separation test, adsorption mechanism, and adsorption model[J]. Applied Surface Science,2022,583:152482.

[29] 赵伟渲,马英强,孟迪,等.典型阴阳离子与晶质结构性差异菱镁矿在浮选体系下的相互作用[J].中国有色金属学报,2024,34(6):2084-2098.
ZHAO Weixuan, MA Yingqiang, MENG Di, et al. Interaction between typical anions/cations and structural differences in crystal structure of magnesite in flotation systems[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(6):2084-2098.

[30] LIU Wenbao, LIU Wengang, DAI Shujuan, et al. Enhancing the purity of magnesite ore powder using an ethanolamine-based collector: Insights from experiment and theory[J]. Journal of Molecular Liquids,2018,268:215-222.

[31] SUN Haoran, YIN Wanzhong, YANG Bin, et al. Efficiently separating magnesite from quartz using N-hexadecyltrimethylammonium chloride as a collector via reverse flotation[J]. Minerals Engineering, 2021, 166:106899.

[32] YAO Jin, SUN Haoran, YANG Bin, et al. Selective co-adsorption of a novel mixed collector onto magnesite surface to improve the flotation separation of magnesite from dolomite[J]. Powder Technology,2020,371:180-189.

[33] 班小淇,顾畔,印万忠,等.菱镁矿浮选体系中Fe^{3+}对白云石的选择性活化及机理分析[J].矿产综合利用,2022(5):125-129.
BAN Xiaoqi, GU Pan, YIN Wanzhong, et al. Study on reverse flotation process of magnesite and dolomite in dodecylamine system[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(5):125-129.

[34] LI Pengcheng, DAI Shujuan, SUN Wenhan, et al. Study on regulators of purifying magnesite ore by cationic reverse flotation[J]. Scientific Reports,2021,11(1):16987.

[35] 薛春丽,李志红,郝波,等.羟肟酸类捕收剂对煤系石英浮选的机理研究[J].矿业研究与开发,2024,44(10):248-256.

XUE Chunli, LI Zhihong, HAO Bo, et al. Study on the mechanism of hydroxamic acid collectors on coal-bearing quartz flotation[J]. Mining Research and Development, 2024,44(10):248-256.

[36] 寇德瑞.表面活性剂的苯环结构对煤尘润湿性的影响机制[J].矿业研究与开发,2024,44(9):143-150.
KOU Derui. Influence mechanisms of the benzene ring structure of surfactant on the wettability of coal dust[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):143-150.

[37] 迟晓鹏,叶子涵,衷水平,等.能带理论在铜冶炼渣浮选中的应用及展望[J].金属矿山,2022(4):13-22.
CHI Xiaopeng, YE Zihan, ZHONG Shuiping, et al. Application and prospect of band theory in the flotation of copper smelting slag[J]. Metal Mine,2022(4):13-22.

[38] LIU Wenbao, LIU Wengang, ZHAO Bing, et al. Novel insights into the adsorption mechanism of the isopropanol amine collector on magnesite ore: a combined experimental and theoretical computational study [J]. Powder Technology,2019,343:366-374.

[39] 李鹏程.菱镁矿石中碳酸盐矿物的溶解特性及其对矿物可浮性的影响[D].鞍山:辽宁科技大学,2023.
LI Pengcheng. Dissolution characteristics of carbonate minerals in magnesite ore and its influence on floatability of minerals[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2023.

[40] 丁鉴煦,王国胜.低品位菱镁矿免焙烧利用研究[J].非金属矿,2023,46(2):56-60.
DING Jianxu, WANG Guosheng, Study on utilization of low-grade magnesite without roasting[J]. Non-Metallic Mines,2023,46(2):56-60.

[41] 张多阳,印万忠,马英强,等.菱镁矿、白云石和方解石的浮选第一性原理研究[J].金属矿山,2019(5):62-68.
ZHANG Duoyang, YIN Wanzhong, MA Yingqiang, et al. First-principles study on flotation of magnesite, dolomite and calcite[J].Metal Mine,2019(5):62-68.

[42] SUN Haoran, YANG Bin, ZHU Zhanglei, et al. New insights into selective-depression mechanism of novel depressant EDTMPS on magnesite and quartz surfaces: Adsorption mechanism, DFT calculations, and adsorption model[J]. Minerals Engineering,2021,160:106660.

[43] 韩聪,魏德洲,高淑玲,等.菱镁矿和白云石的表面性质及浮游性的密度泛函理论研究[J].中国矿业,2020,29(12):170-175+182.
HAN Cong, WEI Dezhou, GAO Shuling, et al. Density functional theory study on surface properties and floatability of magnesite and dolomite[J]. China Mining Magazine, 2020,29(12):170-175+182.

[44] 寇凯博,李岗,严国超,等.表面活性剂对无烟煤调控机制[J].矿业研究与开发,2022,42(12):147-154.
KOU Kaibo, LI Gang, YAN Guochao, et al. Regulation mechanism of surfactant on anthracite[J]. Mining Research and Development,2022,42(12):147-154.

[45] 李克卿,孙浩然,黄睿雯,等.菱镁矿脱硅中分子结构特征对胺类捕收剂选择性捕收效应的影响研究[J].金属矿山,2023(12):123-131.
LI Keqing, SUN Haoran, HUANG Ruiwen, et al. Effect of amine collectors with different structures on the separation of magnesite from quartz[J]. Metal Mine, 2023(12): 123-131.