Mine Engineering 矿山工程, 2025, 13(2), 352-361
Published Online March 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2025.132039

Hans汉斯

表面活性剂在矿物浸出中的强化作用：原理、应用与展望

赵元勋，李陈敏，李小娣*，余军霞

武汉工程大学化学与环境工程学院，湖北 武汉

收稿日期：2025年2月18日；录用日期：2025年3月10日；发布日期：2025年3月21日

摘　要

随着矿产资源的日益枯竭，如何提高矿物的浸出效率成为矿业领域中的关键问题。表面活性剂作为一种具有特殊分子结构的物质，通过降低溶液表面张力、改善矿石的润湿性、促进固液界面反应等多种方式，有效地增强矿物浸出效果。本文综述了表面活性剂在矿物浸出中的作用机制，包括其对矿石表面润湿性的改善、化学反应的促进、以及离子扩散与传质的影响。此外，本文还探讨了表面活性剂在不同矿物(如铜矿、磷钾伴生矿、低品位锰矿等)中的应用实例，展示了不同类型表面活性剂对矿物浸出效率的提升作用。最后，讨论了表面活性剂强化矿物浸出的影响因素，如表面活性剂种类、矿石性质及浸出条件等，为矿业高效、绿色、可持续发展提供了理论支持和技术参考。

关键词

表面活性剂，矿物浸出，强化作用，润湿性，化学反应，扩散与传质，矿石性质

Enhancing Mineral Leaching with Surfactants: Mechanisms, Applications, and Prospects

Yuanxun Zhao, Chenmin Li, Xiaodi Li*, Junxia Yu

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Feb. 18th, 2025; accepted: Mar. 10th, 2025; published: Mar. 21st, 2025

Abstract

As mineral resources continue to deplete, enhancing the leaching efficiency of minerals has become

*通讯作者。

文章引用: 赵元勋, 李陈敏, 李小娣, 余军霞. 表面活性剂在矿物浸出中的强化作用: 原理、应用与展望[J]. 矿山工程, 2025, 13(2): 352-361. DOI: 10.12677/me.2025.132039

a critical issue in the mining industry. Surfactants, with their unique molecular structures, effectively enhance mineral leaching through various mechanisms, including reducing solution surface tension, improving ore wettability, and facilitating solid-liquid interface reactions. This review explores the mechanisms by which surfactants influence mineral leaching, such as enhancing ore surface wettability, promoting chemical reactions, and influencing ion diffusion and mass transfer. Furthermore, the paper discusses the application of surfactants in the leaching of different minerals, such as copper ores, phosphorite-potash associated ores, and low-grade manganese ores, highlighting the role of various surfactant types in improving leaching efficiency. Finally, the review examines factors affecting surfactant-enhanced mineral leaching, including surfactant type, ore properties, and leaching conditions, providing theoretical insights and technical references for the efficient, green, and sustainable development of the mining industry.

Keywords

Surfactants, Mineral Leaching, Enhancement, Wettability, Chemical Reactions, Diffusion and Mass Transfer, Ore Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

人类文明史就是人类开发利用矿产资源的历史。目前，矿产资源中有 86 种以上的化学元素可供人类使用。矿产资源的大量消耗推动了中国的快速发展，也不断提高了人民的生活水平。中国未来维持经济发展需要多少能源和矿产资源是一个重要的关注话题。值得注意的是，中国多数矿产资源的储量在全球占比偏低，资源供需矛盾日益加剧，这对矿业发展构成了严峻挑战。矿物浸出作为矿业发展中的关键环节，在矿产资源开发中占据着核心地位。传统的矿物浸出方法在处理复杂矿石时，往往面临浸出率低、反应速度慢、能耗高等问题，难以满足现代矿业高效、绿色、可持续发展的需求[1] [2]。如何提高矿物浸出效率，降低生产成本，减少环境污染，成为矿业领域亟待解决的关键问题。

表面活性剂是一类具有特殊分子结构的物质，其分子由亲水基团和疏水基团组成，能够显著降低溶液的表面张力，改变界面性质。将表面活性剂应用于矿物浸出过程，能够有效改善矿物与浸出剂之间的界面接触，促进化学反应的进行，从而提高矿物的浸出效率[3]。因此，表面活性剂强化矿物浸出技术作为一种具有广阔应用前景的新型技术，受到了国内外学者的广泛关注。

1.2. 表面活性剂概述

表面活性剂(Surface Active Agent，简称 Surfactant)是一类能够显著改变溶液体系界面状态的物质，即使添加量很少也能产生明显效果[4]。表面活性剂的种类非常丰富，根据不同的分类标准可以进行多种分类[5]。例如，按照亲水基团的性质，可以将其分为阴离子型表面活性剂、阳离子型表面活性剂、两性型表面活性剂和非离子型表面活性剂。其中，阴离子表面活性剂的亲水基团带有负电荷，例如十二烷基磺酸钠(SDS)。当这类表面活性剂在水中解离时，磺酸根离子会带负电[6]。由于其优异的去污、乳化和发泡性能，阴离子表面活性剂在洗涤剂、乳化剂等领域得到了广泛应用；阳离子表面活性剂的亲水基团带有正电荷，常见的如季铵盐类化合物，如新洁尔灭，主要用于杀菌、消毒、抗静电等方面[7]；两性型表面

活性剂在分子结构中同时包含可溶于水的正电性和负电性基团，其性质会随着溶液 pH 值的变化而发生改变[8] [9]。在不同的环境条件下，它们既可以表现出阳离子表面活性剂的特性，也可以表现出阴离子表面活性剂的特性。

2. 表面活性剂强化矿物浸出的作用机制

2.1. 改变矿石表面润湿性

2.1.1. 表面张力与接触角

表面张力，源自液体表面层分子引力的非均衡状态，表现为沿液体表面作用于任意一条界线上的力。它的方向与液体表面相切，同时垂直于所作用的界线。从微观角度来看，液体表面分子受到向内的拉力，使其有向液体内部收缩的趋势，这种收缩趋势导致了表面张力的产生。表面张力的大小与液体的性质、温度以及与液体接触的另一相物质的性质有关，通常用符号 γ 表示，单位为 N/m。

接触角指的是在气、液、固三相交汇的点上，气－液界面所做的切线在液体一侧与固－液交界线之间形成的夹角，通常用 θ 表示。它是表征液体在固体表面润湿行为的重要物理量。

矿石表面的润湿性对矿物浸出过程有着至关重要的影响。润湿性良好的矿石表面，浸出剂能够更迅速、更均匀地在矿石表面铺展和渗透，增加浸出剂与矿石中目标成分的接触面积，从而促进化学反应的进行，提高矿物的浸出效率[10]。相反，若矿石表面润湿性较差，浸出剂在矿石表面的铺展和渗透受阻，导致浸出剂与目标成分的接触不充分，浸出反应难以充分进行，浸出效率降低。

不同类型的表面活性剂在改变表面张力与接触角方面有着不同表现。阴离子表面活性剂，因其带负电的亲水基团，在与矿石表面作用时，会通过静电作用吸附在矿石表面带正电的位点上。阳离子表面活性剂则凭借带正电的亲水基团，与矿石表面带负电的位点结合。非离子表面活性剂没有明显的带电基团，它以独特的亲水亲油平衡值(HLB)在矿石表面和溶液表面发挥作用。在溶液表面，非离子表面活性剂分子的亲水基团和疏水基团会根据体系的亲水亲油需求进行排列，有效降低溶液表面张力。

2.1.2. 表面活性剂降低表面张力

当表面活性剂加入到溶液中时，在浓度较低的情况下，表面活性剂分子会在溶液表面发生定向排列，其亲水基团朝向水相，疏水基团朝向气相，这种定向排列有效地降低了溶液表面分子间的作用力，从而显著降低了溶液的表面张力。

表面活性剂降低溶液表面张力的能力，使得其能够有效地改善矿石的润湿性。当表面活性剂溶液与矿石表面接触时，表面活性剂分子会在矿石表面发生吸附，改变矿石表面的性质。对于亲水性矿石，表面活性剂的亲水基团与矿石表面相互作用，进一步增强了矿石表面的亲水性，使浸出剂更容易在矿石表面铺展和渗透；对于疏水性矿石，表面活性剂的疏水基团与矿石表面的疏水部位相互作用，而亲水基团则朝向水相，使原本疏水性的矿石表面转变为亲水性，从而提高了矿石对浸出剂的润湿性[11]。

不同类型表面活性剂在降低表面张力和改善润湿性方面的效率和效果也有所不同。一般来说，阴离子表面活性剂在降低表面张力方面效果较为显著，能快速使溶液表面张力下降到较低水平，从而对亲水性矿石的润湿性改善作用明显；阳离子表面活性剂虽然也能降低表面张力，但在某些情况下，由于其与矿石表面的静电作用较强，可能会导致吸附层较为紧密，在一定程度上影响其降低表面张力的速率，但对于特定的带负电矿石，其改善润湿性的效果突出；非离子表面活性剂降低表面张力的过程相对较为温和，它更多地是通过调整体系的亲水亲油平衡来改善润湿性，对于一些对表面电荷敏感程度较低的矿石体系，非离子表面活性剂的作用较为稳定。

2.2. 促进固液界面反应

2.2.1. 吸附作用与化学反应活化

表面活性剂在矿石表面的吸附是其促进固液界面化学反应活化的重要基础。在固液界面，表面活性剂分子凭借其独特的两亲性结构，通过多种方式与矿石表面发生吸附作用。表面活性剂在矿石表面的吸附能够显著改变矿石表面的性质，进而对化学反应活化起到促进作用。一方面，吸附后的表面活性剂分子在矿石表面形成一层定向排列的分子膜，这层分子膜降低了矿石表面的自由能，使得化学反应的活化能降低。另一方面，表面活性剂的吸附改变了矿石表面的电荷分布和电子云密度。以硫化矿为例，表面活性剂的吸附会使硫化矿表面的电子云发生重排，增强了矿石表面的活性位点，促进了氧化还原反应的进行。在硫化铜矿的浸出过程中，阳离子表面活性剂的吸附能够使铜矿表面的电子云向表面活性剂分子转移，使得铜矿表面的铜原子更容易被氧化成铜离子，从而加速浸出反应。

阴离子表面活性剂主要通过静电作用和化学作用吸附在矿石表面，对于一些金属氧化物矿石，阴离子表面活性剂的吸附不仅能改变表面电荷，还能与金属离子发生化学反应，形成稳定的表面络合物，进一步增强表面活性位点，促进化学反应。阳离子表面活性剂在硫化矿浸出中，除了静电吸附使电子云转移促进氧化还原反应外，其吸附还可能改变硫化矿表面的晶体结构，使内部的金属离子更容易暴露和反应。非离子表面活性剂的吸附主要靠分子间作用力，虽然其对表面电荷和电子云密度影响较小，但它在矿石表面形成的吸附膜可以起到隔离和保护作用，防止反应产物在矿石表面的过度积累，维持反应的持续进行。

2.2.2. 扩散与传质的影响

在矿物浸出的固、液界面，离子的扩散与传质是影响浸出的关键因素，表面活性剂的加入能够对这一过程产生重要影响。表面活性剂分子在溶液中形成的胶束结构对离子的扩散具有重要作用。一旦表面活性剂的浓度攀升至临界胶束浓度(CMC)，溶液里便会大批量地生成胶束。这些胶束具有独特的结构，其内部由疏水基团组成，外部是亲水基团。对于一些非极性或弱极性的离子，它们能够溶解在胶束的疏水内核中，从而实现快速扩散。

表面活性剂能够降低固液界面的传质阻力。在未添加表面活性剂的浸出体系中，矿石表面与浸出剂之间存在较大的界面张力，这会阻碍离子的传质过程。表面活性剂分子在固液界面的吸附，降低了界面张力，使得浸出剂能够更紧密地接触矿石表面，减少了离子从矿石表面进入溶液的阻力。同时，表面活性剂的吸附还可能改变固液界面的双电层结构，影响离子在界面的迁移行为。在一些酸性浸出体系中，表面活性剂的加入使得固液界面的双电层厚度减小，离子在电场作用下的迁移速率加快，促进了离子的传质。

阴离子表面活性剂形成的胶束，其表面带有负电荷，对于带正电的离子有较好的吸引和增溶作用，能够促进带正电离子在溶液中的扩散；阳离子表面活性剂形成的胶束带正电，对带负电离子的扩散促进作用明显；非离子表面活性剂形成的胶束没有明显的电荷，但其对一些非极性或弱极性的溶质有较好的增溶效果，在含有这类溶质的浸出体系中，能有效促进溶质的扩散和传质。

3. 表面活性剂在不同矿物浸出中的应用实例

3.1. 铜矿石浸出

铜作为一种重要的有色金属，在电气、电子、建筑、机械制造等众多领域有着广泛的应用。随着全球经济的快速发展，对铜的需求持续增长，而优质铜矿石资源逐渐减少，低品位、复杂难处理铜矿石的开发利用成为研究热点。表面活性剂在铜矿石浸出中的应用，为提高铜矿石浸出效率提供了新的途径。

艾纯明为解决高泥矿石渗透性差和提取率低的问题，在铜矿柱浸试验中向富浸出液中添加十二烷基硫酸钠作为渗透剂[12]。铜矿石的浸出率从 50.1%增加到 58.5%，增加了 8.4%。十二烷基硫酸钠作为一种阴离子表面活性剂，其分子结构包含亲水基团(硫酸根)和疏水基团(十二烷基)。当 SDS 添加到浸出液中时，疏水基团会吸附在矿石表面，而亲水基团则朝向溶液。这种吸附作用降低了矿石表面的疏水性，使其更容易被浸出液润湿。润湿性的改善使得浸出液能够更均匀地覆盖矿石表面，从而提高了浸出效率。

3.2. 磷钾伴生矿提钾

我国可溶性钾盐资源严重匮乏，而非可溶性钾资源如磷钾伴生矿却较为丰富。从磷钾伴生矿中提取可溶性钾对于缓解我国钾资源短缺问题、保障农业生产和国民经济发展具有重要意义。在磷钾伴生矿提钾过程中，表面活性剂的应用为提高钾的浸出率提供了新的思路和方法。

周建峰在研究表面活性剂强化磷钾伴生矿中钾的浸出时，发现月桂醇对钾浸出的促进作用最大，当向 80 mL 浸出液中加入 1 mL 月桂醇时，钾的浸出率可从 89.5%提高到 97.8% [13]。

添加月桂醇与未添加月桂醇所得残渣的水接触角分别为 45˚和 17˚。添加月桂醇所得残渣的较大接触角证实了表面活性剂的疏水机制在提高浸出效率方面起重要作用。月桂醇是一种非离子表面活性剂，能够显著降低浸出液的表面张力，使浸出液更容易润湿矿石表面并渗透到矿石的微小孔隙中。并且月桂醇吸附在磷钾伴生矿表面后，其疏水基团(长链烷基)朝向外部，使得矿石表面变得更加疏水。这种疏水化作用减少了水分子在矿石表面的附着，导致水接触角增大。矿石表面疏水化后，残渣对浸出液的吸附能力降低，从而减少了浸出液在残渣中的滞留，使更多的浸出液能够参与钾的浸出反应。

3.3. 低品位锰矿石浸出

随着高品位锰矿资源的逐渐减少，低品位锰矿石的开发利用成为研究热点。低品位锰矿石中锰含量较低，杂质含量较高，传统的浸出方法往往面临浸出率低、成本高等问题。表面活性剂的引入为低品位锰矿石的高效浸出提供了新的途径。

曾祥飞探究了柠檬酸三钠强化低品位锰矿中 Mn^{2+}的浸出，发现在温度 50℃、固液比 1:5、酸矿比 0.58:1、反应时间 3.5 h，添加 5 mg/L 的柠檬酸三钠能使 Mn^{2+}浸出效率达到 91.8%，比无柠檬酸三钠时提高了 13.8% [14]。柠檬酸三钠抑制了 $CaSO_4{\cdot}2H_2O$ 的 020、040 和 041 晶面的生长，从而获得了具有短柱状形态和较小片状结构的 $CaSO_4{\cdot}2H_2O$ 晶体。$CaSO_4{\cdot}2H_2O$ 晶粒细化后不易包裹在菱锰矿表面，从而增加了菱锰矿与 H^+反应的概率，提高了 Mn^{2+}的浸出效率。

4. 表面活性剂强化矿物浸出的影响因素

4.1. 表面活性剂种类

不同类型的表面活性剂由于其分子结构和性质的差异，在矿物浸出过程中表现出不同的强化效果。阴离子表面活性剂的亲水基团带负电荷，常见的如十二烷基硫酸钠(SDS)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)等。阳离子表面活性剂的亲水基团带正电荷，如十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)。非离子表面活性剂的分子结构中不存在带电荷的基团，其具备水溶性是源于分子含有的聚氧乙烯醚基以及端点羟基，像聚氧乙烯失水山梨醇脂肪酸酯(吐温系列)、脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO 系列)等都属于此类。两性表面活性剂在分子中同时具有可溶于水的正电性和负电性基团，其性质随溶液 pH 值的变化而改变。

4.2. 矿石性质

矿石的性质对表面活性剂强化矿物浸出效果有着显著影响[15] [16]。不同化学成分的矿石，其表面性

质和化学反应活性存在差异，从而对表面活性剂的作用效果产生不同影响。

4.2.1. 化学成分的影响

不同化学成分的矿石，其表面性质和化学反应活性存在差异，从而对表面活性剂的作用效果产生不同影响。在铜矿石浸出中，若矿石中含有较多的碱性氧化物，如氧化钙、氧化镁等，这些碱性氧化物会与浸出剂发生反应，消耗浸出剂，同时改变溶液的 pH 值，进而影响表面活性剂的性能和作用效果[17]。在酸性浸出体系中，碱性氧化物与酸反应会使溶液的酸性减弱，可能导致某些表面活性剂的活性降低，影响其在矿石表面的吸附和对浸出的促进作用[18]。

矿石中杂质元素的含量也会对表面活性剂强化浸出产生影响[19]。一些杂质元素可能会与表面活性剂发生化学反应，或者占据表面活性剂的吸附位点，从而降低表面活性剂的有效浓度和作用效果。例如，某些金属杂质离子可能会与阴离子表面活性剂发生沉淀反应，使得溶液中表面活性剂浓度降低，无法充分发挥其降低表面张力、促进固液界面反应等作用。

4.2.2. 结构特性的影响

矿石的结构特性，如粒度、孔隙度、比表面积等，对表面活性剂强化浸出效果有着重要影响[20]。矿石粒度越小，比表面积越大，表面活性剂与矿石的接触面积也越大，有利于提高浸出效率。矿石的孔隙度和比表面积也会影响浸出剂和表面活性剂在矿石内部的扩散和渗透。具有较高孔隙度和较大比表面积的矿石，浸出剂和表面活性剂能够更容易地进入矿石内部，与目标成分发生反应，从而提高浸出效率。

矿石的结构特性还可能影响表面活性剂在矿石表面的吸附和作用方式[21]。表面粗糙度较大的矿石，表面活性剂分子可能更容易在其表面吸附和聚集，形成更稳定的吸附层，从而增强对浸出的促进作用。然而，若矿石表面过于粗糙或存在大量的微孔，也可能导致表面活性剂分子在吸附过程中发生团聚或堵塞微孔，影响其作用效果。比如，当表面活性剂分子在微孔中团聚后，无法有效分散在溶液中，也就难以在整个矿石表面均匀吸附，降低了其对浸出反应的促进作用。

4.3. 浸出条件

浸出条件对表面活性剂强化矿物浸出效果有着重要影响，主要包括温度、酸碱度(pH 值)和浸出时间等因素。

4.3.1. 温度

温度是影响矿物浸出过程的关键因素之一[22]。温度升高通常会加快化学反应速率，这是因为温度升高会增强分子的热运动，使反应物分子具有更高的能量，更容易克服反应的活化能，从而促进化学反应的进行。在表面活性剂强化矿物浸出体系中，温度的变化不仅影响化学反应速率，还会对表面活性剂的性能产生影响。适当提高温度可以增强表面活性剂对矿物表面的润湿性和吸附作用，从而提浸出率。但温度过高可能会导致表面活性剂的分解或失活，使其失去降低表面张力和促进固液界面反应的能力，进而降低矿物浸出率。

4.3.2. 酸碱度(pH 值)

酸碱度(pH 值)对表面活性剂强化矿物浸出效果的影响也十分重要[23]。溶液的 pH 值会影响表面活性剂的分子结构和电荷性质，进而影响其在矿石表面的吸附和作用效果。不同类型的表面活性剂在不同的 pH 值条件下，其离子化程度和电荷分布会发生变化。在酸性条件下，阴离子表面活性剂的活性可能会增强，因为酸性环境有利于其亲水基团的解离，使其更易与矿石表面发生吸附和相互作用。然而，在碱性条件下，阳离子表面活性剂的性能可能会受到影响，其亲水基团的电荷性质可能会发生改变，导致其在

矿石表面的吸附能力下降。溶液的 pH 值还会影响矿石中某些成分的溶解和沉淀平衡，以及浸出剂与矿石之间的化学反应。

4.3.3. 浸出时间

浸出时间也是影响矿物浸出率的重要因素之一[24] [25]。在一定范围内，随着浸出时间的延长，矿物与浸出剂以及表面活性剂的接触时间增加，化学反应进行得更加充分，矿物浸出率会逐渐提高。但当浸出时间达到一定程度后，矿物浸出率可能会趋于稳定，继续延长浸出时间对浸出率的提升作用不明显。这是因为在浸出过程中，随着反应的进行，矿石表面的活性位点逐渐被消耗，浸出反应速率逐渐降低，当达到反应平衡时，浸出率不再随时间增加而显著提高。过长的浸出时间还可能导致一些不利影响，如增加生产成本、引入更多杂质、促进副反应的发生等。

5. 表面活性剂强化矿物浸出的表征技术与新兴方法

5.1. 表征技术

在表面活性剂强化矿物浸出的研究中，多种表征技术被广泛应用，以深入探究表面活性剂与矿石之间的相互作用机制，以及对矿物浸出过程的影响。

表面张力测定是研究表面活性剂在矿物浸出体系中作用的重要手段之一[26]。表面张力是液体表面层由于分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力，其大小与液体的性质、温度以及与液体接触的另一相物质的性质有关。在矿物浸出体系中，表面活性剂的加入会显著改变溶液的表面张力。通过测量表面张力的变化，可以了解表面活性剂在溶液中的吸附行为和浓度变化，进而推断其对矿物浸出的影响。

接触角测量是评估矿物表面润湿性的重要技术。当接触角 θ 小于 90°，液体能够在固体表面铺展，表明固体表面被液体润湿，此时固体表面具有亲水性；若接触角 θ 大于 90°，液体在固体表面形成液滴，难以铺展，说明固体表面不易被液体润湿，具有疏水性；当接触角 θ 等于 0°时，液体完全铺展在固体表面，润湿性达到最佳状态。

5.2. 数值模拟方法

随着计算机与人工智能技术的飞速发展，数值模拟方法在表面活性剂强化矿物浸出研究中得到了广泛应用[27]。数值模拟是指通过建立数学模型，利用计算机对物理过程进行模拟和分析的方法。在表面活性剂强化矿物浸出领域，数值模拟可以对浸出过程中的多物理场进行耦合分析，深入探究表面活性剂的作用机制和浸出过程的内在规律[28]。

数值模拟方法具有诸多优势。它可以在虚拟环境中对各种复杂的浸出条件进行模拟，避免了实际实验中因条件限制而无法实现的情况，大大节省了时间和成本。通过数值模拟，可以深入分析浸出过程中各个因素的相互作用，揭示表面活性剂强化矿物浸出的微观机制，为实验研究提供理论指导[26]。数值模拟还能够对浸出过程进行实时监测和预测，帮助研究人员及时调整工艺参数，提高矿物浸出的效率和质量[29]。

数值模拟方法也存在一定的局限性。建立准确的数学模型需要对浸出过程的物理化学机制有深入的理解和认识，而实际的矿物浸出过程往往非常复杂，涉及多种化学反应和物理过程，难以完全准确地描述，这可能导致模型的误差。数值模拟虽然能够提供一些定性和定量的分析结果，但不能完全替代实验研究，仍需要通过实验来验证和完善模拟结果[30]。

6. 表面活性剂强化矿物浸出的研究现状与展望

6.1. 研究现状总结

表面活性剂强化矿物浸出技术在近年来取得了显著的研究进展，在作用机制、应用研究以及研究方法与技术等方面均取得了丰富的成果。

在作用机制方面，研究揭示了表面活性剂通过改变矿石表面润湿性、促进固液界面反应等方式，有效提高矿物浸出效率。表面活性剂分子独特的两亲性结构使其能够在矿石表面和溶液界面发生吸附，降低表面张力，改变接触角，从而改善矿石的润湿性，促进浸出剂与矿石的接触和反应。表面活性剂还能通过吸附作用改变矿石表面的电荷分布和电子云密度，促进离子的扩散与传质，加速化学反应的进行。

在应用研究方面，虽然表面活性剂在多种矿物浸出中取得了较好的效果，但在实际工业应用中，还面临着一些问题。表面活性剂的成本较高，增加了矿物浸出的生产成本，限制了其大规模应用；部分表面活性剂的稳定性和生物降解性较差，可能会对环境造成污染，需要开发更加环保、低成本的表面活性剂。

在研究方法上，现有的实验研究方法虽然能够提供重要的数据，但往往难以完全模拟实际工业生产中的复杂条件；数值模拟方法虽然具有一定的优势，但建立准确的数学模型仍然面临挑战，模型的准确性和可靠性有待进一步提高。未来的研究需要针对这些不足，加强基础研究，深入探究作用机制，开发新型表面活性剂，优化研究方法，以推动表面活性剂强化矿物浸出技术的进一步发展和实际应用。

6.2. 面临的挑战与问题

表面活性剂强化矿物浸出技术在实际应用中仍面临诸多挑战，限制了其大规模推广和工业应用。

表面活性剂的成本是一个重要的制约因素。目前，大部分表面活性剂的合成和生产过程较为复杂，原材料成本较高，导致其市场价格相对昂贵。在矿物浸出过程中，需要添加一定量的表面活性剂才能达到理想的强化效果，这进一步增加了生产成本。在一些低品位矿石浸出中，由于矿物处理量大，表面活性剂的用量也相应增加，使得生产成本大幅上升，影响了该技术的经济效益。一些新型表面活性剂虽然具有良好的性能，但由于合成难度大、产量低，其成本更是居高不下，限制了其在工业生产中的应用。

在实际工业应用中，表面活性剂与其他添加剂或工艺的兼容性也是一个难题。矿物浸出过程中通常会使用多种添加剂，如氧化剂、还原剂、络合剂等，表面活性剂可能会与这些添加剂发生相互作用，影响其性能和效果。在某些铜矿石浸出体系中，表面活性剂与氧化剂之间可能会发生化学反应，导致表面活性剂的活性降低，或者影响氧化剂的氧化能力。表面活性剂强化矿物浸出技术可能需要对现有的浸出工艺进行调整和优化，以适应表面活性剂的加入，这在实际操作中可能会面临技术和设备改造的困难。

此外，表面活性剂在矿物浸出过程中的作用机制尚未完全明确，尤其是在复杂的多矿物体系中，表面活性剂与多种矿物之间的相互作用以及对浸出过程的综合影响还需要进一步深入研究。这使得在实际应用中，难以准确选择合适的表面活性剂和优化浸出工艺条件，增加了技术应用的不确定性。

6.3. 未来研究方向与趋势

为了克服当前表面活性剂强化矿物浸出技术面临的挑战，推动该技术的进一步发展和实际应用，未来的研究可以从以下几个方向展开。

在新型表面活性剂研发方面，应致力于开发低成本、高性能、环境友好的表面活性剂。从天然可再生资源中提取或合成表面活性剂是一个重要的研究方向，如利用植物油、淀粉、纤维素等天然原料合成表面活性剂。这些天然原料来源广泛、价格相对较低，且具有良好的生物降解性和环境友好性。通过对天然原料进行化学改性，引入具有特定功能的基团，制备出具有优异性能的表面活性剂。利用植物油中

的脂肪酸与环氧乙烷反应，合成具有良好乳化和分散性能的非离子表面活性剂。

深入研究表面活性剂的作用机制，尤其是在微观层面的作用机制，对于优化表面活性剂的选择和应用具有重要意义。借助先进的分析测试技术，如分子动力学模拟、原位光谱技术、扫描探针显微镜等，深入探究表面活性剂与矿石表面的微观相互作用过程。分子动力学模拟可以从原子层面揭示表面活性剂分子在矿石表面的吸附、扩散和聚集行为，以及与浸出剂离子之间的相互作用机制；原位光谱技术能够实时监测浸出过程中表面活性剂与矿石表面的化学反应和化学键的变化；扫描探针显微镜可以直观地观察表面活性剂在矿石表面的微观吸附形态和分布情况。

表面活性剂强化矿物浸出技术与其他先进技术的集成应用将是未来的发展趋势。将表面活性剂强化浸出技术与生物浸出技术相结合，利用微生物的代谢作用和表面活性剂的协同效应，提高矿物浸出效率。

研究表面活性剂在工业生产中的添加方式和设备，确保表面活性剂能够均匀地分散在浸出体系中，充分发挥其作用。同时，加强对表面活性剂强化矿物浸出过程的环境影响评估，制定相应的环境保护措施，实现矿物资源的绿色、可持续开发利用。

7. 结论

表面活性剂强化矿物浸出技术在提高矿物浸出效率方面展现出了显著的优势，其作用机制主要包括改变矿石表面润湿性和促进固液界面反应。通过降低表面张力，表面活性剂能够改善矿石与浸出剂的润湿性，使浸出剂更好地接触矿石表面，促进化学反应的进行；同时，通过吸附作用改变矿石表面的电荷分布和电子云密度，促进离子的扩散与传质，加速化学反应的进行。

然而，表面活性剂强化矿物浸出技术在实际应用中仍面临诸多挑战。表面活性剂的成本较高，增加了矿物浸出的生产成本；部分表面活性剂的稳定性和生物降解性较差，可能会对环境造成污染；表面活性剂与其他添加剂或工艺的兼容性也是一个难题，其作用机制在复杂多矿物体系中尚未完全明确。

未来的研究应致力于开发低成本、高性能、环境友好的新型表面活性剂，深入研究其在微观层面的作用机制，尤其是在复杂多矿物体系中的协同作用机制。加强表面活性剂强化矿物浸出技术与其他先进技术的集成应用，如与生物浸出技术、膜分离技术、人工智能等技术结合，实现浸出过程的智能化控制和优化。通过中试和工业应用研究，解决实际生产中的工程问题，推动该技术的实际应用，实现矿物资源的绿色、可持续开发利用。表面活性剂强化矿物浸出技术具有广阔的应用前景和研究价值，对矿业的发展具有重要意义。

基金项目

武汉工程大学第十五届研究生教育创新基金资助项目(项目编号：CX2023145)。

参考文献

[1] 周有勤. 金的地质冶金学及其应用[J]. 黄金科学技术, 2013(5): 76-80.

[2] 田庆华, 王浩, 辛云涛, 郭学益. 难处理金矿预处理方法研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(2): 83-89.

[3] 宛鹤, 何廷树, 谢建宏, 刘思伟. 磁化处理技术在矿物加工中的应用[J]. 黄金, 2011, 32(1): 53-55.

[4] 刘佳奇, 霍冀川, 雷永林, 等. 发泡剂及泡沫混凝土的研究进展[J]. 化学工业与工程, 2010, 27(1): 73-78.

[5] Kralova, I. and Sjöblom, J. (2009) Surfactants Used in Food Industry: A Review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **30**, 1363-1383. https://doi.org/10.1080/01932690902735561

[6] Mohr, A., Pozo Vila, T., Korth, H., Rehage, H. and Sustmann, R. (2008) Hydrophobic *n*-Diazeniumdiolates and the Aqueous Interface of Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) Micelles. *ChemPhysChem*, **9**, 2397-2405. https://doi.org/10.1002/cphc.200800399

[7] Gonçalves, R.A., Holmberg, K. and Lindman, B. (2023) Cationic Surfactants: A Review. *Journal of Molecular Liquids*, **375**, Article ID: 121335. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121335

[8] 纪卿, 云喜玲. 表面活性剂的分类、性能及其应用原理[J]. 集宁师专学报, 2003, 25(4): 58-59.

[9] de Guertechin, L.O. (2001) Classification of Surfactants. In: Knowlton, J. and Pearce, S., Eds., *Handbook of Cosmetic Science and Technology*, Elsevier Science, 14-22.

[10] 赵前飞, 杨洪英, 佟琳琳. 典型脉石矿物表面 CN-吸附规律及润湿性研究[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(2): 340-348.

[11] 赵濉, 陈兴锋, 张磊, 严峰, 张路. 含聚醚基团阴离子表面活性剂对 PMMA 表面润湿性的影响[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(3): 32-39, 49.

[12] Ai, C., Sun, P., Wu, A., Chen, X. and Liu, C. (2019) Accelerating Leaching of Copper Ore with Surfactant and the Analysis of Reaction Kinetics. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **26**, 274-281. https://doi.org/10.1007/s12613-019-1735-7

[13] Zhou, J., Liu, C., Ma, J., Qin, Y., Wu, Z., Yang, L., *et al.* (2018) Intensification of Potassium Leaching from Phosphorus-Potassium Associated Ore with Lauryl Alcohol. *Separation and Purification Technology*, **191**, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.007

[14] Zeng, X., Shu, J., Chen, M., Wang, J., He, D., Wei, Y., *et al.* (2022) A Cost-Effective Method for Enhancing Manganese Leaching from Rhodochrosite Caused by Surfactant-Regulated Crystal Growth of $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. *Hydrometallurgy*, **211**, Article ID: 105870. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105870

[15] 王一雍, 张廷安, 陈霞, 鲍丽. 添加剂对一水硬铝石矿增溶溶出过程的影响[J]. 矿冶工程, 2007(1): 57-60.

[16] Wang, L., Yin, S. and Wu, A. (2021) Ore Agglomeration Behavior and Its Key Controlling Factors in Heap Leaching of Low-Grade Copper Minerals. *Journal of Cleaner Production*, **279**, Article ID: 123705. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123705

[17] 宋广君, 寻克刚. 石灰在黄金选厂的作用及应用[J]. 黄金科学技术, 2004(1): 19-23.

[18] 李孟婷, 郑星群, 李莉, 魏子栋. 碱性介质中氢氧化和析氢反应机理研究现状[J]. 物理化学学报, 2021, 37(9): 21-37.

[19] Judge, W.D. and Azimi, G. (2020) Recent Progress in Impurity Removal during Rare Earth Element Processing: A Review. *Hydrometallurgy*, **196**, Article ID: 105435. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105435

[20] 李洪枚, 柯家骏. 细菌浸出含镍硫化矿的研究进展[J]. 矿产综合利用, 1999(5): 28-33.

[21] 李诗浩, 马强, 王龙, 等. 黄铁矿浮选活化机理研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(2): 124-130, 140.

[22] 童格, 顾帼华, 王艳红, 黄娇, 巫銮东. 闪锌矿微生物浸出过程溶解动力学研究进展[J] .有色金属工程, 2022, 12(6): 75-82.

[23] 张瑞洋, 卢涛, 孙春宝, 寇珏, 魏德洲. 表面活性剂吐温 20 对胶硫钼矿生物浸出的促进机理[J]. 工程科学学报, 2018, 40(7): 793-799.

[24] 周桂英, 阮仁满, 温建康, 武彪. 紫金山铜矿浸出过程黄铁矿的氧化行为[J]. 北京科技大学学报, 2008(1): 11-15.

[25] Li, J., Kawashima, N., Kaplun, K., Absolon, V.J. and Gerson, A.R. (2010) Chalcopyrite Leaching: The Rate Controlling Factors. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 2881-2893. https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.029

[26] 邱天, 言兰, 王福增, 谢鸿, 税妍, 张涛, 姜峰. 材料去除过程中 Rehbinder 效应的研究进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 59-74.

[27] 于耕, 宗平. GILS 组合进场策略研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(11): 1-2.

[28] Saldaña, M., Jeldres, M., Galleguillos Madrid, F.M., Gallegos, S., Salazar, I., Robles, P., *et al.* (2023) Bioleaching Modeling—A Review. *Materials*, **16**, Article 3812. https://doi.org/10.3390/ma16103812

[29] Cisternas, L., Lucay, F. and Botero, Y. (2019) Trends in Modeling, Design, and Optimization of Multiphase Systems in Minerals Processing. *Minerals*, **10**, Article 22. https://doi.org/10.3390/min10010022

[30] 孙建孟, 王克文, 李伟. 测井饱和度解释模型发展及分析[J]. 石油勘探与开发, 2008(1): 101-107.