

微细颗粒矿物纳米气泡浮选机理研究进展

吴健¹, 马芳源^{2*}

(1. 辽宁排山楼黄金矿业有限责任公司; 2. 辽宁科技大学矿业工程学院)

摘要:自2000年纳米气泡被证实可稳定存在于疏水表面以来,其稳定性研究迅速发展,相关报道大量涌现,纳米气泡也随之在多个科学领域中被广泛应用。在浮选领域,纳米气泡相关的理论研究日益丰富。目前,纳米气泡对微细颗粒矿物浮选的影响机理是研究焦点。为深化微细颗粒浮选的基础理论,系统总结了纳米气泡在微细颗粒矿物浮选中的强化机制,主要包括:体相纳米气泡对浮选过程的强化机理、表/界面纳米气泡引发的颗粒间作用力机制、表/界面纳米气泡诱导矿物表面液膜破裂的机制,以及表/界面纳米气泡对颗粒表面疏水性质的影响机制。在此基础上,根据当前纳米气泡强化微细颗粒矿物浮选的研究现状,指明了纳米气泡对矿物颗粒浮选影响的研究重点,为纳米气泡浮选微细颗粒矿物提供新的研究思路和技术途径。

关键词:纳米气泡;浮选;微细颗粒;表面性质;机理;研究进展

中图分类号:TD923

文章编号:1001-1277(2025)11-0010-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251102

引言

在过去的二十几年里,纳米气泡一直是科学领域研究热点,主要原因是纳米气泡的各种特殊性质已经应用于多个领域,如污水处理^[1]、养殖业^[2]、医疗^[3]等。特别是纳米气泡在矿物浮选方面的强化作用已经得到广泛论证,如煤^[4]、赤铁矿^[5]、金红石^[6]、石墨^[7]、粉煤灰^[8]等。纳米气泡分为表/界面纳米气泡和体相纳米气泡。表/界面纳米气泡通常指的是在疏水表面形成高度为10~100 nm、三相接触线直径为50~500 nm的球形帽状气泡^[9-10];而体相纳米气泡通常指小于1 μm的球形气泡^[7]。鉴于二者在形态和存在环境上的差异,纳米气泡对矿物浮选的强化机制需分别从体相纳米气泡和表/界面纳米气泡2个角度进行探讨。本文综述了体相纳米气泡和表/界面纳米气泡强化微细颗粒矿物浮选的机理。在此基础上,指明了纳米气泡在矿物浮选强化机制方面的重点研究方向,为纳米气泡强化矿物浮选提供了新的理论研究途径。

1 体相纳米气泡对微细颗粒矿物浮选的影响

在宏观尺度上,体相纳米气泡对微细颗粒矿物的强化作用,主要通过气泡与颗粒的碰撞频率、黏附概率及脱落概率来阐述其强化机制。这三者共同决定了矿物颗粒被捕收成为泡沫产品的概率^[5,7]。

SOBHY等^[11]研究表明,由于纳米气泡的比表面

积大,可以增加气泡-颗粒的碰撞概率和黏附概率,从而降低颗粒从气泡表面的脱附概率,进而实现矿物颗粒的强化浮选。MEYER等^[12]建立了碰撞频率模型用来阐述气泡-颗粒之间的碰撞频率,颗粒与气泡的碰撞频率随着气泡单位液体个数的增加而增加。众所周知,颗粒成为泡沫产品的先决条件是能够被气泡矿化,而气泡-颗粒间的碰撞也是颗粒被有效矿化的先决条件。根据VINNETT等^[13]的报道,假设浮选柱收集区典型气含率为0.2、平均气泡尺寸为500 μm,可计算出气泡数密度约为 3.1×10^3 个/mL。相比之下,AZEVEDO等^[14]利用饱和容器获得了 1.6×10^9 个/mL的纳米气泡,ETCHEPARE等^[15]报道离心多相泵产生的纳米气泡数密度高达 4×10^9 个/mL。也就是说,纳米气泡的数密度比常规气泡高出6个数量级。结合MEYER等^[12]的理论模型,颗粒-气泡之间的碰撞频率显著增加,因此矿物颗粒得到有效矿化,进而起到了强化矿物浮选的作用。然而,体相纳米气泡的个数密度对浮选调控的影响还不清楚,需要通过大量的试验研究和表征手段证实。

2 表/界面纳米气泡对矿物浮选的影响

2.1 纳米气泡与矿物表面的相互作用

纳米气泡与疏水界面之间的相互作用力采用原子力显微镜(AFM)进行表征。AFM表征发现,纳米气泡使得亲水颗粒在靠近疏水表面时,在相距较远处

收稿日期:2025-07-23; 修回日期:2025-08-30

基金项目:辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJ212510146016)

作者简介:吴健(1989—),男,工程师,研究方向为细颗粒矿物分选;E-mail:798393959@qq.com

*通信作者:马芳源(1991—),男,讲师,博士,研究方向为细颗粒矿物浮选;E-mail:1209468883@qq.com

出现斥力。然而,纳米气泡与疏水表面的长程疏水作用取决于颗粒表面的疏水性,颗粒表面疏水性越强,桥接作用越显著^[16]。表/界面纳米气泡的存在提高了疏水表面-纳米气泡间的作用力和作用范围,并随着表/界面纳米气泡尺寸的增大而增大。超强疏水界面与表/界面纳米气泡相互作用时,最大吸引力和黏附力分别增加了6.22 nN和11.83 nN^[17]。有研究发现,亲水探针可以扫描出纳米气泡的真实形状,且接近力曲线第一个拐点到零点的距离等于纳米气泡的垂直高度,而疏水探针在扫描过程中导致表/界面纳米气泡在水平方向发生严重变形,无法获得其真实尺寸。此外,强疏水探针所获得的接近力曲线中最大吸引力及缩回力曲线中的黏附力均高于亲水探针和中等疏水探针^[18]。亲水颗粒与纳米气泡之间的作用始终表现为斥力,且随颗粒与气泡表面碰撞速度的增加,斥力也随之增大,说明增大碰撞速度并不能促进颗粒与气泡之间的黏附。相反,疏水颗粒与纳米气泡之间的主要作用为疏水引力,其机制可用经典的DLVO理论解释:颗粒表面越疏水,流体阻力对其黏附的抑制作用越弱^[19]。

尽管目前AFM可用于表征表/界面纳米气泡与疏水表面之间的作用力规律,但在不同温度、表面活性剂或盐溶液条件下,二者之间力的变化规律尚不明确,未来需系统研究不同环境对表/界面纳米气泡与疏水表面间作用力的影响。尤其值得注意的是,表/界面纳米气泡与疏水表面之间作用力的性质尚未完全明确,可能除疏水力外还存在其他力。在纳米气泡浮选过程中,纳米气泡与矿物颗粒表面的作用力直接影响微细颗粒的矿化效果,深入探究其作用规律对调控微细粒矿物浮选具有重要意义,未来应加强该方面的研究。

2.2 纳米气泡对矿物表面间作用力的影响

微观尺度下,纳米气泡对颗粒之间作用的影响一直是研究热点。起初在1982年,ISRELACHVILI等^[20]报道经过活性剂处理的2个云母疏水表面之间存在一种相互吸引的力,研究发现这种力既非静电力也非色散力,其作用范围在几十纳米至几百纳米,当时被称为“长程疏水相互作用力”。1994年,PARKER等^[21]发现2个疏水表面之间的作用力随距离呈阶梯状变化,并将其归因于疏水界面间的纳米气泡。然而,1997年LJUNGGREN等^[22]证实了表面纳米气泡的存活时间极短,推翻了2个疏水界面间引力是纳米气泡导致的结论。直到2000年,LOU等^[23]通过AFM在云母表面观测到尺寸最小约为10 nm、寿命可达数小时的纳米气泡,为纳米气泡是导致2个疏水界面间存在引力的结论提供了依据。事实上,迄今尚无确切结

论证明表/界面纳米气泡是导致2个疏水界面产生引力的唯一原因,但已有研究证实,存在纳米气泡时疏水界面间的引力大于无纳米气泡的情况^[24]。因此,学界普遍认为表/界面纳米气泡是导致疏水界面间引力的主要因素。

AFM研究表明,疏水二氧化硅胶体探针与疏水二氧化硅晶片之间存在由纳米气泡桥接产生的毛细力。研究者在纯水及低于40%的乙醇溶液中检测到,疏水表面上的2个纳米气泡之间(或表/界面纳米气泡与疏水界面之间)在约230 nm内存在较强的长程吸引力^[25-26],该引力即为ISRELACHVILI等^[20]所提出的“长程疏水相互作用力”。现有研究还表明,当表/界面纳米气泡存在时,在亲水颗粒向疏水表面靠近的过程中,三相接触线不会沿颗粒表面扩展,从而导致亲水颗粒与疏水表面之间的作用力逐渐转变为斥力。与无纳米气泡的情况相比,表/界面纳米气泡使亲水颗粒与疏水表面在更远的距离上出现斥力^[21]。因此,纳米气泡在疏水界面间发挥桥接作用,增强二者之间的疏水作用,这也是疏水界面间出现长程吸引力的重要原因。在涉及2个疏水界面之间存在表/界面纳米气泡的研究中,可观察到明显的吸引力“阶梯式”变化现象,这被解释为纳米气泡所引起的“毛细管桥接”效应^[27]。AZADI等^[28-29]系统阐述了表/界面纳米气泡与长程疏水力的关系,指出颗粒间的远距离疏水吸引力源于表/界面纳米气泡的存在,并认为该力的本质为毛细管力。此外,具有台阶式变化特征的长程疏水吸引曲线也被认为是表/界面纳米气泡桥接作用的结果。单个纳米气泡桥接可引起单步“台阶”现象,而多个纳米气泡桥接则会导致多步“台阶”现象的出现^[21,29-32]。然而,迄今为止,由表/界面纳米气泡引发的疏水表面间毛细管力的物理本质尚未被完全解析^[33-34]。这种毛细管力可能是多种力共同作用的结果,因此未来有必要重点研究其具体性质。

表/界面纳米气泡诱导的毛细管力在浮选过程中对微细疏水性颗粒的回收具有显著强化作用。ZHANG等^[35]通过激光粒度分析发现,纳米气泡能够有效促使微细鳞片石墨发生团聚,使其表观尺寸增大17.37 μm ,从而增强宏观气泡对石墨的捕收效果;TANG等^[36]利用光学显微镜观测也证实,存在纳米气泡时微细石墨的表观尺寸明显大于无纳米气泡的情况,进一步表明纳米气泡通过毛细管力促进颗粒团聚,强化石墨的浮选回收。ZHOU等^[37]研究也显示,纳米气泡可有效诱导微细白钨矿团聚,显著改善其浮选回收率。值得注意的是,表/界面纳米气泡所形成的微细颗粒团聚体的稳定性尚不明确。在高速剪切或超声等外力环境中,团聚体是否能够保持稳定仍需

通过多种试验手段进行系统验证。

2.3 纳米气泡对矿物表面性质的影响

表/界面纳米气泡对矿物表面的首要影响就是矿物表面的疏水性。表/界面纳米气泡的形态与宏观气泡差异很大,整体呈现宽而扁平结构^[38]。通常情况下,表/界面纳米气泡高度介于十到几十纳米,半径在几十至几百纳米^[39-40],目前已经证实表/界面纳米气泡横向扩展距离可达到 $8\text{ }\mu\text{m}$ ^[41],这意味表/界面纳米气泡具有超大的接触角。通过AFM观测发现,表/界面纳米气泡在疏水表面的接触角可达 165° ,而同环境下宏观气泡的接触角仅为 72.6° ,也就是说,表/界面纳米气泡的接触角比宏观气泡接触角高出1倍多^[42]。由此可见,表/界面纳米气泡的接触角远大于宏观气泡,表明其能够显著增强疏水表面的疏水性,从而有助于提高浮选过程的选择性。此外,表/界面纳米气泡的接触角与疏水表面的性质密切相关,表面疏水性越强,接触角越大,这一变化规律与宏观接触角的变化规律完全一致^[43-45]。

表/界面纳米气泡对矿物表面的第二个影响是促进水化膜的破裂。研究表明,表/界面纳米气泡有助于破坏矿物表面的水化膜。最大的表/界面纳米气泡顶点及其周围的表面力会使水化膜发生扭曲形变,导致水化膜的结构失稳并破裂^[46-47],从而进一步增强颗粒表面的疏水性。现有研究还发现,在表/界面纳米气泡存在的情况下,无论是中度疏水表面还是强疏水表面都容易与纳米气泡发生黏附。此时水化膜破裂的临界厚度均大于无纳米气泡时的情形,且表面疏水性越强,这一差异越明显^[16]。纳米气泡在矿物表面的形成有效增强了宏观气泡与矿物表面之间的疏水作用,有助于在颗粒-宏观气泡相互作用过程中促使水化膜薄化乃至破裂。矿物表面疏水性越好,纳米气泡诱导水化膜薄化或破裂的效果越显著。此外,研究发现NaCl溶液的引入会导致表/界面纳米气泡沿着疏水界面相互合并^[16],使纳米气泡的尺寸增加。然而,目前尚无研究系统探讨纳米气泡在疏水表面的合并现象对水化膜薄化或破裂过程的影响,未来应针对该问题开展深入分析。

表/界面纳米气泡对矿物表面的第三个影响是降低表面电位。TANG等^[36]在石墨浮选机理的研究中发现纳米气泡覆盖石墨表面后,其表面电位显著降低,从而减小了柴油在石墨表面吸附时所受的静电斥力,促进柴油在石墨表面的高效吸附,并显著增强石墨表面的疏水性。WANG等^[45]在微细辉钼矿中也得到了类似结果。MA等^[46]发现,在相同柴油浓度下,表/界面纳米气泡能够提高柴油在石墨表面的吸附速率和最大吸附量,增强石墨表面的疏水性,进而增强

石墨颗粒间的疏水引力,有助于微细鳞片石墨维持较大且稳定的表观尺寸,从而保障其高效回收。然而,目前关于表/界面纳米气泡强化捕收剂在矿物表面吸附的作用机制研究仍较缺乏,后续研究应重点关注表/界面纳米气泡对药剂吸附行为的影响机理。

3 结论

1)体相纳米气泡对矿物的浮选效果取决于纳米气泡-矿物颗粒之间的碰撞频率。然而,体相纳米气泡的个数密度对浮选过程调控的影响尚不清楚,需要通过大量的试验研究和表征手段证实。

2)表/界面纳米气泡与疏水表面之间力的变化规律可以通过AFM的研究手段实现。但是,不同温度、表面活性剂或盐溶液条件下,该作用力的变化规律尚不清楚。未来研究应重点建立不同环境对表/界面纳米气泡与疏水表面之间作用力变化的联系。此外,目前对表/界面纳米气泡与疏水表面之间作用力的性质仍不清楚,除疏水力外可能还存在其他相互作用力。

3)表/界面纳米气泡引起的疏水表面间毛细管力的性质尚未得到解析,毛细管力的性质可能是多种力共同作用的结果。未来应着重研究表/界面纳米气泡引起的毛细管力的性质。此外,表/界面纳米气泡引起的微细颗粒团聚体的稳定性尚未得到证实,如高速剪切或超声环境中团聚体的稳定性需通过系统试验予以验证。

4)表/界面纳米气泡在疏水表面兼并现象对水化膜薄化或破裂的影响尚未见报道,未来需深入探讨这一问题。此外,有关表/界面纳米气泡强化捕收剂在矿物表面吸附作用的机制尚不清楚,后续研究应聚焦于表/界面纳米气泡对药剂吸附的影响。

[参考文献]

- [1] 宋占龙,汤涛,潘蔚,等.微纳米气泡强化臭氧氧化降解含酚废水[J].化工进展,2024,43(8):4 614-4 623.
- [2] 张羽嘉,徐书含,李德天,等.氧纳米气泡制备及其在农业领域的应用研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(11):1 780-1 791.
- [3] LI H, LV W H, ZHANG Y, et al. PLGA-PEI nanobubbles carrying PDLIM5 siRNA inhibit EGFR-TKI-resistant NSCLC cell migration and invasion ability using UTND technology [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2023, 82: 104346.
- [4] 郭思瑶,董红卫,赵通林,等.纳米气泡浮选细粒煤的效果及机理[J].矿产综合利用,2024,45(1):194-198.
- [5] DONG P T, ZHONG X W. Investigation of nanobubble enhanced reverse anionic flotation of hematite and associated mechanisms [J]. Powder Technology, 2020, 379: 12-25.
- [6] WANG Y H, XIAO W, QIN W Q. Nanobubble enhances rutile flotation separation in styrene phosphoric acid system [J]. Separations, 2023, 10(4): 243.
- [7] 李明娇,南楠,马芳源,等.微细鳞片石墨纳米气泡浮选与传统浮

- 选的对标研究[J].矿产保护与利用,2024,44(1):40-45.
- [8] HUANG H, YANG X, WU Z X, et al. An investigation of nanobubble enhanced flotation for fly ash decarbonization [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 679: 132563.
- [9] ZHOU L M, WANG X Y, SHIN H, et al. Ultrahigh density of gas molecules confined in surface nanobubbles in ambient water [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(12): 5 583-5 593.
- [10] DONG P T. Recent advances in fundamentals and applications of nanobubble enhanced froth flotation: A review [J]. *Minerals Engineering*, 2022, 183: 107554.
- [11] SOBHAY A, TAO D. Nanobubble column flotation of fine coal particles and associated fundamentals [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 124: 109-116.
- [12] MEYER C J, DEGLOND D A. Particle collision modeling—A review [J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(8): 719-730.
- [13] VINNETT L, LEDEZMA T, ALVAREZ-SILVA M, et al. Gas holdup estimation in flotation machines using image techniques and superficial gas velocity [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 96/97: 26-32.
- [14] AZEVEDO A, ETCHEPARE R, CALGAROTO S, et al. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 94: 29-37.
- [15] ETCHEPARE R, OLIVEIRA H, NICKNIG M, et al. Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation [J]. *Minerals Engineering*, 2017, 112: 19-26.
- [16] 张凡凡. 浮选过程界面纳米气泡强化作用基础研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [17] ZHANG F F, XING Y W, SUN L J, et al. Characteristics of interfacial nanobubbles and their interaction with solid surfaces [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 550: 149258.
- [18] ZHANG F F, GUI X H, XING Y W, et al. Study of interactions between interfacial nanobubbles and probes of different hydrophobicities [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(32): 20 363-20 372.
- [19] 邢耀文. 颗粒气泡间相互作用力及液膜薄化动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [20] ISRELACHVILI J, PASHLEY R. The hydrophobic interaction is long range, decaying exponentially with distance [J]. *Nature*, 1982, 300(25): 341-342.
- [21] PARKER J L, CLAESSEON P M, ATTARD P. Bubbles, cavities, and the long-ranged attraction between hydrophobic surfaces [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1994, 98(34): 8 468-8 480.
- [22] LJUNGGREN S, ERIKSSON J C. The lifetime of a colloid-sized gas bubble in water and the cause of the hydrophobic attraction [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1997, 129/130: 151-155.
- [23] LOU S T, LI X J, ZHANG Y, et al. Nanobubbles on solid surface imaged by atomic force microscopy [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B Nanotechnology and Microelectronics Materials Processing Measurement and Phenomena*, 2000, 18(5): 2 573-2 575.
- [24] LI C W, ZHANG H J. Surface nanobubbles and their roles in flotation of fine particles—A review [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 106: 37-51.
- [25] HAMPTON M, NGUYEN A. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, 154(1): 30-55.
- [26] HAMPTON M A, NGUYEN A V. Systematically altering the hydrophobic nanobubble bridging capillary force from attractive to repulsive [J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2009, 333(2): 800-806.
- [27] NGUYEN A V, NALASKOWSKI J, MILLER J D, et al. Attraction between hydrophobic surfaces studied by atomic force microscopy [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 72(1): 215-225.
- [28] AZADI M, NGUYEN A V, YAKUBOV G E. Attractive forces between hydrophobic solid surfaces measured by AFM on the first approach in salt solutions and in the presence of dissolved gases [J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2015, 31(6): 1 941-1 949.
- [29] ZHANG F F, SUN L J, YANG H C, et al. Recent advances for understanding the role of nanobubbles in particles flotation [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 291: 102403.
- [30] SAKAMOTO M, KANDA Y, MIYAHARA M, et al. Origin of long-range attractive force between surfaces hydrophobized by surfactant adsorption [J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2002, 18(15): 5 713-5 719.
- [31] THORMANN E, SIMONSEN A C, HANSEN P L, et al. Force trace hysteresis and temperature dependence of bridging nanobubble induced forces between hydrophobic surfaces [J]. *ACS Nano*, 2008, 2(9): 1 817-1 824.
- [32] CARAMBASSIS A, JONKER L C, ATTARD P, et al. Forces measured between hydrophobic surfaces due to a submicroscopic bridging bubble [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80: 5 357-5 360.
- [33] 孟令轩, 赵通林, 范兆琳, 等. 纳米气泡强化超细颗粒浮选机理研究现状及展望 [J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(2): 162-168.
- [34] 王睿, 南楠, 马芳源, 等. 纳米气泡的制备方法及其强化微细颗粒矿物浮选机理的研究进展 [J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(1): 46-52.
- [35] ZHANG D, MA F Y, TAO Y J. Study on effect of nanobubble on ultra-fine flake graphite (UFG) flotation [J]. *Particulate Science and Technology*, 2023, 41(7): 1 062-1 070.
- [36] TANG C L, MA F Y, WU T Y, et al. Study on surface physical and chemical mechanism of nanobubble enhanced flotation of fine graphite [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 122: 389-396.
- [37] ZHOU W G, CHEN H, OU L M, et al. Aggregation of ultra-fine scheelite particles induced by hydrodynamic cavitation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 157: 236-240.
- [38] 张立娟, 方海平, 胡钧. 纳米气泡的科学之谜 [J]. *物理*, 2018, 47(9): 574-583.
- [39] SONG B, WALCZYK W, SCHÖHHERR H. Contact angles of surface nanobubbles on mixed self-assembled monolayers with systematically varied macroscopic wettability by atomic force microscopy [J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2011, 27(13): 8 223-8 232.
- [40] YANG S J, DAMMER S M, BREMOND N, et al. Characterization of nanobubbles on hydrophobic surfaces in water [J]. *Langmuir: The*

- ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2007, 23(13): 7 072–7 077.
- [41] XU C L, PENG S H, QIAO G G, et al. Nanobubble formation on a warmer substrate[J]. Soft Matter, 2014, 10(39): 7 857–7 864.
- [42] OHNSON D J, SMALEK A A, AL-RASHID B A M, et al. Atomic force microscopy of nanofiltration membranes: Effect of imaging mode and environment [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 389: 486–498.
- [43] ZHOU W G, WU C N, LV H Z, et al. Nanobubbles heterogeneous nucleation induced by temperature rise and its influence on minerals flotation[J]. Applied Surface Science, 2020, 508: 145282.
- [44] ZHANG L J, ZHANG X H, ZHANG Y, et al. The length scales for stable gas nanobubbles at liquid/solid surfaces [J]. Soft Matter, 2010, 6(18): 4 515–4 519.
- [45] WANG X, YUAN S, LIU J, et al. Nanobubble-enhanced flotation of ultrafine molybdenite and the associated mechanism [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 346: 118312.
- [46] MA F Y, TAO D P. A study of mechanisms of nanobubble-enhanced flotation of graphite[J]. Nanomaterials, 2022, 12(19): 3 361.
- [47] STOCKELHUBER K W, RADOEV B, WNGER A, et al. Rupture of wetting films caused by nanobubbles [J]. Langmuir, 2004, 20(1): 164–168.

Research progress on nanobubble flotation mechanism of fine particle minerals

Wu Jian¹, Ma Fangyuan²

(1. Liaoning Paishanlou Gold Mining Co., Ltd.;

2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning)

Abstract: Since the confirmation of nanobubbles' stable existence on hydrophobic surfaces in 2000, research on their stability has developed rapidly with numerous related reports, leading to widespread applications of nanobubbles across various scientific fields. In flotation, theoretical studies related to nanobubbles have become increasingly comprehensive. Currently, the mechanism of how nanobubbles influence the flotation of fine particle minerals is a key research focus. To deepen the fundamental theory of fine particle flotation, the enhancement mechanisms of nanobubbles in fine particle mineral flotation were systematically summarized, mainly including the enhancement mechanism of bulk nanobubbles on the flotation process, the interparticle force mechanism induced by surface/interface nanobubbles, the mechanism of liquid film rupture on mineral surfaces induced by surface/interface nanobubbles, and the influence mechanism of surface/interface nanobubbles on particle surface hydrophobicity. Based on this analysis and the current research status of nanobubble-enhanced fine particle flotation, research gaps regarding the impact of nanobubbles on mineral particle flotation were identified, providing new research ideas and technical approaches for nanobubble flotation technology of fine particles.

Keywords: nanobubble; flotation; fine particle; surface property; mechanism; research progress