

浮选过程中气-液界面特性研究进展

王市委^{1,2}, 石开仪¹, 李远³, 陶秀祥²

(1. 六盘水师范学院化学与材料工程学院, 贵州省煤炭洁净利用重点实验室, 贵州 六盘水 553004; 2. 中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221116; 3. 贵州省煤炭产品质量监督检验院, 贵州 六盘水 553004)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。近年来, 表面活性剂(起泡剂)在矿物浮选中的作用研究尤为重要, 因其揭示了气泡-颗粒碰撞或粘附前的气-液界面特性信息, 对浮选效果的优化具有重要理论指导意义。本文重点概述了气-液界面电位测试技术、气-液界面张力表征技术及气-液界面吸附特性测试技术, 介绍了气-液界面吸附特性的图像轮廓-张力法(PAT)测试方法, 阐述了不同气-液界面特性下 Stefan-Reynolds 模型、Taylor 模型及 Stokes-Reynolds-Young-Laplace 及 Stokes-Reynolds 模型计算参数, 并展望了气-液界面特性的研究工作。

关键词: 矿业工程; 浮选; 界面吸附; 水化膜薄化; 气-液界面; 轮廓-张力法

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.06.012

中图分类号: TD923 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)06-0077-06

矿物浮选技术在工业生产中的应用, 主要基于不同矿物表面间的亲疏水性的差异。换言之, 表面疏水强的颗粒将粘附气泡, 上浮成为浮选精矿; 而表面疏水性差或亲水强的颗粒则留在了浮选矿浆中成为了浮选尾矿^[1]。为了增加矿物表面亲疏水性差异, 浮选过程中需要加入一定量的浮选药剂^[2-4]。加入的浮选药剂一类吸附在固-气界面, 被称为捕收剂^[5]; 另一类吸附在气-液界面, 所谓的起泡剂^[6]。起泡剂的作用不仅是调节气泡的尺寸及运动速度, 还起到防止气泡兼并及维持其稳定性的作用^[7-8], 从而改善浮选环节, 提高目的矿物回收率^[9]。气泡剂的添加在降低气泡尺寸的同时, 也减小的气-液界面张力, 从而使气泡保持分散状态, 进而防止其兼并生产气絮团, 降低浮选矿化效率^[10]。浮选过程中随着起泡剂用量的不断增加, 气泡尺寸不断减小, 但当起泡剂添加量达到临界浓度(CCC)时, 气泡尺寸不再产生变化, 同时气泡团聚现象彻底消失^[10]。

在表面活性剂研究的科学范畴, 起泡剂的界

面活性及其在复杂的多相浮选体系中的功能和作用具有一定的独特性, 并且矿物浮选过程所需的时间尺度短, 很难达到静态胶体体系或动态热力学平衡过程。因此, 我们需进一步探索起泡剂在气-液界面上的相互作用机理及其产生的浮选效果差异性机制。本文旨在总结和评论近年来研究者在气-液界面特性所做的研究成果及气-液界面物理或化学特性的相关测试技术的研发进展。

1 气-液界面电位研究进展

目前, 在微细粒浮选中, 对气泡性质的研究多集中在其尺寸和水动力学性质上, 而对于其表面电动电位对浮选效果的影响尚缺乏研究。浮选过程中, 不仅颗粒浮选效率受气泡表面电位影响, 其表面润湿行为也受气泡表面电位的影响^[11]。Graciaa 等^[12]通过沿水平轴不断转动的电泳装置测量了气泡在去离子水中的表面电位为-65 mV。Yang 等^[13]通过微电泳法测量了气泡表面电位, 研究结果表明, 在一定 pH 值下, 气泡表面电位不仅

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(52264032); 六盘水市高灰细粒煤泥深度提质利用重点实验室(52020-2019-05-04); 贵州省煤炭洁净利用重点实验室(黔科合平台人才[2020]2001)

作者简介: 王市委(1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向为低阶煤浮选基础理论。

受电解质浓度的影响,还受溶液中金属离子类型的影响。Liu 等^[14]研究发现表面活性剂对油泡表面电动行为的影响取决于表面活性剂分子的类型、浓度和电离程度;随着十二胺盐酸盐浓度的变化,油泡表面的 Zeta 电位由负到正,同时油泡的等电点 (IEP) 也发生了显著转变。Saulnier 等^[15]研究表明,在表面活性剂溶液中,气泡表面达到平衡电位需要一定时间,这个时间主要取决于表面活性剂溶液浓度与其临界胶束浓度之间差距,在不同浓度的表面活性剂溶液中,气泡表面达到平衡电位所需时间的差异反映了活性剂分子在气泡表面吸附动力学和饱和程度的差异。

Elmahdy 等^[16]研究发现,非离子型起泡剂的浓度和种类会对气泡表面的电动电位产生很小的影响,而气泡尺度对其表面电位影响很大。同时, Bueno-Tokunaga 等^[17]研究发现,常规捕收剂的种类和用量不同,对气泡表面的电位影响不同,然而相比较捕收剂,起泡剂对气泡表面电位的影响并不大;当捕收剂和起泡剂用量一定时,在酸性或碱性条件下,气泡的尺寸会减小,而气泡尺寸的变化会影响其表面电位情况。研究者对不同溶液环境下,气泡表面的电动电位的分布范围也进行了相关研究。通过超声波技术产生的纳米泡,其表面的电位在溶液临界胶束浓度附近发生显著变化;在低浓度的表面活性剂溶液中,气泡表面电位随浓度的增加而呈现线性增加;而在高浓度溶液范围内其表面电位不发生变化^[18]。Ushikubo 等^[19]研究了不同气体类型在水中形成的气泡的表面电位,研究表明,不同气体形成的气泡的表面负电位具有不同的范围,其绝对值范围如下: 34~45 mV (O₂)、17~20 mV (空气)、29~35 mV (N₂)、20~27 mV (CO₂) 以及 11~22 mV (Xe); 同时不同气体形成的气泡具有不同的外形和稳定性。

Wu 等^[20]通过测试油砂颗粒、气泡及二者混合后的电位分布来判断油砂颗粒与气泡的粘附程度。与上述方法相似, Kusuma 等^[21]通过研究目标矿物(即镍黄铁矿)、脉石矿物(如蛇纹石、橄榄石、镁铝)及二者混合后在水溶液中的电位分布来判断两种颗粒的粘附程度,并通过原子力显微镜 (AFM) 测试二者之间相互作用,实验研究发现 Zeta 电位分布情况和 AFM 力测量结果吻合较好。因此,通过研究矿物表面电荷性质及矿物

颗粒间的相互作用,可以获得目标矿物和脉石矿物相互作用机制^[22]。然而,上述气-液界面表面电位测试并没有阐明气泡表面流动状态对其表面电位的影响;同时,上述气泡表面电位对矿物浮选效果的影响分析未结合疏水作用力,因而具有一定的片面性。

2 气-液界面张力研究进展

浮选过程中为了提高目标矿物的选择性和回收率,通常会添加无机药剂或有机药剂(表面活性剂)。表面活性剂(起泡剂或捕收剂)在气-水界面吸附会产生如下效果: 1) 减小了气泡尺寸,使其比表面积得到增加,提高了颗粒与其碰撞效率,同时可以防止气泡产生团聚; 2) 减小气泡上升速度及表面流动性; 3) 增加了浮选精矿泡沫的稳定性。这些表面活性剂的添加会影响气-水界面和固液-界面的性质,最终影响到矿粒与气泡的相互作用。因此,研究表面活性剂在气泡表面上的吸附至关重要。表面活性剂在气泡表面的动态吸附通常采用 Langmuir 吸附等温线对其吸附动力学进行建模。吸附过程中,气泡表面张力的变化,主要通过悬垂气泡张力计进行测量。测量过程中,气泡在玻璃毛细管端生成,随着气泡半径的增加,毛细管内的压力也随之变化,同时在气泡周围的液体中产生相应的速度场。为了建立描述该过程的模型,通常作以下假设^[23]: 1) 液体是粘度为常数的不可压缩牛顿流体; 2) 界面流体满足线性 Boussinesq 模型; 3) 界面扩展时,界面吸附不影响界面法向速度的连续; 4) 气泡在生成过程中保持径向流。

Wang 等^[24]研究发现,随着气泡轮廓的增大,气泡动态表面性质表现为: 气泡表面扩展引起的表面活性剂浓度的稀释作用大于因表面活性剂从主体向表面传递所引起的增浓作用; 气泡表面的浓度不能达到平衡浓度,且还可能由于表面扩展而产生表面粘性效应。Phan 等^[25]研究表明,起泡剂甲氧基聚丙烯乙二醇 (Dowfroth 250) 在气泡表面的动态吸附速率要远小于十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 在气泡表面的吸附。Nguyen 等^[26]的研究结果表明,微米级尺寸对气泡表面的动态张力影响很大,而浮选过程中毫米级尺寸对气泡表面的动态张力影响很小。Basařová 等^[27]通过对气

泡表面动态张力的测试发现，表面活性中的杂质成分能显著降低气泡动态表面张力并抑制气泡与矿物表面粘附及铺展速率。同时，Basařová等^[28]还发现具有较短亲疏水链的表面活性剂能及时的完成气-液界面交换，因此，其能快速的降低气泡表面动态张力并且不阻碍气泡在矿物表面的铺展速率。Liu等^[29]研究了在十二烷基胺溶液中，气泡尺寸及其表面张力受沉淀物生成影响的变化过程。

Le等^[30]研究了捕收剂十六烷基三甲基溴化铵（CTAB）和起泡剂甲基异丁基甲醇（MIBC）在气液界面的协同吸附作用，实验表明捕收剂和起泡剂的协同吸附作用增加了气-液界面张力，这种现象不能用现有的吸附模型进行解释。Salamah等^[31]提出了只含有一个参数变量的吸附模型并且捕收剂十六烷基三甲基溴化铵（CTAB）在气液界面的吸附实验结果与模型吻合度很高。基于吉布斯吸附等温模型，Nguyen等^[23]采用了新的吸附模型对N-烷基叔胺在气-液界面的吸附过程进行了拟合，并采用了郎缪吸附模型对烷基三甲基溴化铵在气泡表面吸附过程进行了拟合并获得了较好效果。George等^[32]进行的阳离子和阴离子表面活性剂浓度吸附实验表明，溶液表面张力的降低导致气泡表面稳定的水化膜较厚并导致气泡表面从疏水到亲水表面转变。Nguyen和Phan^[33]研究了气泡表面温度梯度对其局部表面张力及表面流动性的影响。上述气-液界面张力研究过程仅基于毛细管端部生产的单气泡，并未与实际复杂的浮选体系建立起联系；同时，尚未建立气-液界面张力变化、气-液界面流动状态与实际矿物浮选效果间的相关关系。

3 气-液界面吸附特性研究

在浮选过程中，由于介质粘性阻力的影响，上升气泡的上半部和下半部的表面流体力学性质和表面活性剂浓度分布情况是不同的，会受到雷诺数、马朗格尼参数及动力吸附层的影响。气泡表面由于张力梯度会产生Marangoni流动，这种流动会对吸附在气泡表面颗粒的流动方向和速率产生一定影响^[34]。同时，由于运动气泡表面活性剂吸附层浓度的非均匀分布会影响到气泡的稳定性、排液速率以及寿命^[35]。气泡性质主要取决于气泡表面动态吸附层的性质，因此，气泡表面吸

附层性质的测定和分析能很好的反映三相周边形成过程^[36]。Warszyński等^[37]通过一种简易装置来证明气泡表面的活性剂吸附层在上升的过程中处于非平衡态，气泡到达气液界面时，其顶部薄化破裂的速度要快于初始态的气泡。

大量理论研究证明，浮选过程中气泡在浮力的作用下，气泡尾部活性剂浓度要大于吸附平衡浓度，而气泡上部活性剂浓度要小于吸附平衡浓度^[38]。Jachimska等^[38]研究发现在正丁醇溶液中，气泡自由表面距离气泡形成点较远（ $L=39.5\text{ cm}$ ）时，其平均寿命比位于较近（ $L=4\text{ cm}$ ）形成点气泡的寿命要短。同时，Krzan和Malysa^[39]研究了气泡在起泡剂正构醇、正丁醇、正己醇及壬醇溶液中的速度分布情况，气泡速度分布结果如前所述。同时，在表面活性剂溶液中添加电解质也会影响到气泡的速度分布情况。Kowalczyk等^[40]研究表明随着正辛醇、 α -萜品醇和N-辛基-三甲基溴化铵溶液浓度的增加，气泡在粗糙的疏水性表面上的铺展时间逐渐增加；同时，浮选速率常数也由 0.8 s^{-1} 降到了 0.01 s^{-1} 。

Zawala等^[41]研究了在水溶液中气泡尺寸、形状及碰撞速度对其在气-液界面聚结时间的影响。Kosior等^[42]研究发现低浓度的 α -樟脑油和正辛醇溶液能够缩短气泡在疏水表的铺展时间，而在高浓度溶液中，气泡在固体表面的铺展行为会被抑制。Kowalczyk等^[43]研究发现在己胺溶液中气泡在云母表面的铺展时间不仅受溶液浓度的影响，还受溶液pH值的影响。上述气-液界面吸附特性研究仅基于单个上升气泡的表面吸附特性，并未与复杂的浮选泡沫环境建立起相关联系；同时，对多相浮选体系气泡间的协调作用尚未开展相关研究。

4 气-液界面张力及轮廓分析技术

研究气-液界面吸附特性最常用的是气-液界面张力测量技术，通常为威廉姆板或杜努伊环法^[44]。由于浮选过程中起泡剂的用量低，并且一些大分子的气泡剂在溶液中的弥散速度慢，故平衡界面张力及气液界面吸附动力学过程可通过气液界面轮廓-张力分析法，其中气-液界面可以通过悬垂液滴法或浸没气泡法形成^[45]。液界面轮廓-张力分析法通过分析气-液界面随时间变化而变化的形状，

进而通过杨氏-拉普拉斯方程解析出气-液界面张力变化及吸附量变换过程^[46]。

通过悬垂液滴-气泡轮廓提取法测试甲基环己烷甲醇 (MCHM) 表面活性作为无捕收剂性能起泡剂的可能性, 实验结果表明 MCHM 分子比甲基异丁基甲醇 (MIBC) 占据更大的表面积, 并且具有更高的表面活性功能^[47]。起泡剂和抑制剂在气-液界面协同吸附作用对界面张力影响的研究表明, 与纯的 Dowfroth 200 溶液相比, Dowfroth 200 和两种不同的抑制剂 (Stypress 504 和 Depamin 267) 混合溶液中的气-液界面张力较低^[48]。Dowfroth 250 和十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 在气-液界面的吸附动力学研究表明: 通过扩散控制-吸附模型和动力学控制-吸附模型拟合的结果可知, 扩散控制-吸附模型能很好地解释 SDBS 在气-液界面的吸附动力学; 由于 Dowfroth 250 在气-液界面的吸附-弥散速率非常慢, 只有动力学控制-吸附模型可以描述其在气-液界面的吸附动力学过程^[49]。

5 结论与展望

目前, 通过现有先进的测试技术可以表征气-液界面动态吸附和气泡表面特征。同时, 现有分析测试系统可表征一种或两种混合表面活性剂的气-液界面吸附情况。浮选过程中, 分子量大的聚合类抑制剂不会吸附在气-液界面, 但当起泡剂已经吸附在气-液界面时, 浮选系统内会产生抑制剂-起泡剂在气-液界面的共同吸附现象。如何将上述共同吸附现象与浮选结果先关联是未来研究的重点, 也是基础胶体和界面科学与矿业行业应用相关联的桥梁。只有上述关联的建立, 研究人员才能选择合理的药剂及实现新药剂的设计/合成。同时, 进一步建立气-液界面特性与气泡-矿物颗粒矿化过程间的关联也至关重要。尽管单个气泡表面特性的研究成果对矿物浮选提供了一定的理论指导意义, 但气-液界面性质的改变对浮选泡沫性质和稳定性的影响研究同样至关重要。此外, 传统测试技术测试泡沫性质和稳定性的过程中未包含颗粒粘附现象, 故偏离情况始终存在。起泡剂类型的选择如何影响气泡-颗粒碰撞、气泡-颗粒间水化薄膜薄化和破裂, 以及对矿物颗粒表面去润湿的影响, 尚未得到令人满意的结果。因此, 未来上述研究内容至关重要, 因其提供了气泡-颗粒碰

撞前的气-液界面特性信息, 同时对于浮选效果优化具有重要理论指导意义。

参考文献:

- [1] 王市委, 陶秀祥, 陈松降, 等. 低阶煤的油泡浮选研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):48-58.
- [2] WANG S W, TAO X X, CHEN S J, et al. Development of oily bubble flotation research for low-rank coal[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):48-58.
- [3] 朱一民. 2020 年浮选药剂的进展[J]. *矿产综合利用*, 2021(2):102-118.
- [4] ZHU Y M. Development of flotation reagent in 2020[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(2):102-118.
- [5] 朱一民. 2019 年浮选药剂的进展[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):1-17.
- [6] ZHU Y M. Development of flotation reagent in 2019[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):1-17.
- [7] 朱一民, 周菁. 2018 年浮选药剂的进展[J]. *矿产综合利用*, 2019(4):1-10.
- [8] ZHU Y M, ZHOU J. The development of flotation reagent in 2018[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(4):1-10.
- [9] KRASOWSKA M, ZAWALA J, BRADSHAW-HAJEK B H, et al. Interfacial characterisation for flotation: 1. Solid-liquid interface[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2018, 37:61-73.
- [10] LASKOWSKI J S. Frothers and Flotation Froth[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1993, 12(1):61-89.
- [11] FINCH J A, NESSET J E, ACUÑA C. Role of frother on bubble production and behaviour in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2008, 21(12):949-957.
- [12] 胡盘金, 郑永兴, 宁继来, 等. 含砷硫化铜矿浮选除砷研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):45-51.
- [13] HU P J, ZHENG Y X, NING J L, et al. Research progress of arsenic removal from arsenic bearing copper sulphide ore by flotation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):45-51.
- [14] XING Y, XU M, GUI X, et al. The role of surface forces in mineral flotation[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2019, 44:143-152.
- [15] CORONA-ARROYO M A, LÓPEZ-VALDIVIESO A, LASKOWSKI J S, et al. Effect of frothers and dodecylamine on bubble size and gas holdup in a downflow column[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 81:109-115.
- [16] 邱鸿鑫, 陈浙锐, 王光辉. 水分子在伊利石表面的吸附作用机理分析[J]. *矿产综合利用*, 2020(3):197-202.

- QIU H X, CHEN Z R, WANG G H. Analysis of adsorption mechanism of water molecules on illite surface[J]. *Multi-purpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):197-202.
- [12] GRACIAA A, MOREL G, SAULNER P, et al. The ζ -potential of gas bubbles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, 172(1):131-136.
- [13] YANG C, DABROS T, LI D, et al. Measurement of the zeta potential of gas bubbles in aqueous solutions by microelectrophoresis method[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 243(1):128-135.
- [14] LIU J, MAK T, ZHOU Z, et al. Fundamental study of reactive oily-bubble flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(9):667-676.
- [15] SAULNIER P, BOURIAT P, MOREL G, et al. Zeta potential of air bubbles in solutions of binary mixtures of surfactants (monodistributed nonionic/anionic surfactant mixtures)[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1998, 200(1):81-85.
- [16] ELMAHDY A M, MIRNEZAMI M, FINCH J A. Zeta potential of air bubbles in presence of frothers[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, 89(1):40-43.
- [17] BUENO-TOKUNAGA A, PÉREZ-GARIBAY R, MARTÍNEZ-CARRILLO D. Zeta potential of air bubbles conditioned with typical froth flotation reagents[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 140:50-57.
- [18] CHO S, KIM J, CHUN J, et al. Ultrasonic formation of nanobubbles and their zeta-potentials in aqueous electrolyte and surfactant solutions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 269(1):28-34.
- [19] USHIKUBO F Y, ENARI M, FURUKAWA T, et al. Zeta-potential of micro-and/or nano-bubbles in water produced by some kinds of gases[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, 43(26):283-288.
- [20] WU C, WANG L, HARBOTTLE D, et al. Studying bubble-particle interactions by zeta potential distribution analysis[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 449:399-408.
- [21] KUSUMA A M, LIU Q, ZENG H. Understanding interaction mechanisms between pentlandite and gangue minerals by zeta potential and surface force measurements[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 69:15-23.
- [22] DUAN J, WANG J, GUO T, et al. Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates-effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2014, 4:224-232.
- [23] NGUYEN C V, NGUYEN T V, PHAN C M. Dynamic adsorption of a gemini surfactant at the air/water interface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 482:365-370.
- [24] ZHILONG W, HONGYU G, TONGMING L. Measuring dynamic surface tension of surfactant solutions by using growing bubble method[Z]. 2010: 50, 463-468.
- [25] PAN L, JUNG S, YOON R. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 361(1):321-330.
- [26] NGUYEN A V, PHAN C M, EVANS G M. Effect of the bubble size on the dynamic adsorption of frothers and collectors in flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 79(1):18-26.
- [27] BASAŘOVÁ P, SUCHANOVÁ H, SOUŠKOVÁ K, et al. Bubble adhesion on hydrophobic surfaces in solutions of pure and technical grade ionic surfactants[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 522:485-493.
- [28] BASAŘOVÁ P, VÁCHOVÁ T, MOORE G, et al. Bubble adhesion onto the hydrophobic surface in solutions of non-ionic surface-active agents[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 505:64-71.
- [29] LIU W, PAWLIK M, HOLUSZKO M. The role of colloidal precipitates in the interfacial behavior of alkyl amines at gas-liquid and gas-liquid-solid interfaces[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 72:47-56.
- [30] LE T N, PHAN C M, NGUYEN A V, et al. An unusual synergistic adsorption of MIBC and CTAB mixtures at the air-water interface[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 39:255-261.
- [31] SALAMAH A, PHAN C M, PHAM H G. Dynamic adsorption of cetyl trimethyl ammonium bromide at decane/water interface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 484:313-317.
- [32] GEORGE J E, CHIDANGIL S, GEORGE S D. A study on air bubble wetting: Role of surface wettability, surface tension, and ionic surfactants[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 410:117-125.
- [33] NGUYEN T B, PHAN C M. Surface flow of surfactant layer on air/water interface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 530:72-75.
- [34] DUNÉR G, GAROFF S, PRZYBYCIEN T M, et al. Transient marangoni transport of colloidal particles at the liquid/liquid interface caused by surfactant convective-diffusion under radial flow[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 462:75-87.
- [35] SHARMA A, RUCKENSTEIN E. Effects of surfactants on wave-induced drainage of foam and emulsion films[J]. *Colloid & Polymer Science*, 1988, 266(1):60-69.

- [36] KRASOWSKA M, ZAWALA J, MALYSA K. Air at hydrophobic surfaces and kinetics of three phase contact formation[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, 147:155-169.
- [37] WARSZYŃSKI P, JACHIMSKA B, MALYSA K. Experimental evidence of the existence of non-equilibrium coverages over the surface of the floating bubble[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, 108(2-3):321-325.
- [38] JACHIMSKA B, WARSZYŃSKI P, MALYSA K. Effect of motion on lifetime of bubbles at n-butanol solution surface[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, 143(2-3):429-440.
- [39] KRZAN M, MALYSA K. Influence of electrolyte presence on bubble motion in solutions of sodium n-alkylsulfates (C8, C10, C12)[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2012, 48(1):49-62.
- [40] KOWALCZUK P B, ZAWALA J, KOSIOR D, et al. Three-phase contact formation and flotation of highly hydrophobic polytetrafluoroethylene in the presence of increased dose of frothers[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(3):839-843.
- [41] ZAWALA J, DORBOLO S, VANDEWALLE N, et al. Bubble bouncing at a clean water surface[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(40):17324-17332.
- [42] KOSIOR D, ZAWALA J, KRASOWSKA M, et al. Influence of n-octanol and α -terpineol on thin film stability and bubble attachment to hydrophobic surface.[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics Pccp*, 2013, 15(7):2586-2595.
- [43] KOWALCZUK P B, ZAWALA J, DRZYMALA J, et al. Influence of hexylamine on kinetics of flotation and bubble attachment to the quartz surface[J]. *Separation Science and Technology*, 2016, 51(15-16):2681-2690.
- [44] DEY S, PANI S, SINGH R. Study of interactions of frother blends and its effect on coal flotation[J]. *Powder Technology*, 2014, 260:78-83.
- [45] ZHOLOB S A, MAKIEVSKI A V, MILLER R, et al. Optimisation of calculation methods for determination of surface tensions by drop profile analysis tensiometry[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, 134-135:322-329.
- [46] BERRY J D, NEESON M J, DAGASTINE R R, et al. Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 454:226-237.
- [47] HARVEY P A, NGUYEN A V, JAMESON G J, et al. Influence of sodium dodecyl sulphate and Dowfroth frothers on froth stability[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(3):311-315.
- [48] SCHREITHOFER N, WIESE J, MCFADZEAN B, et al. Frother-depressant interactions in two and three phase systems[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 100(1):33-40.
- [49] PHAN C M, NGUYEN A V, EVANS G M. Dynamic adsorption of sodium dodecylbenzene sulphonate and dowfroth 250 onto the air-water interface[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(6):599-603.

Advance in Gas-Liquid Interface Characterization in Flotation Process

Wang Shiwei^{1,2}, Shi Kaiyi¹, Li Yuan³, Tao Xiuxiang²

(1.School of Chemistry and Materials Engineering, Liupanshui Normal University, Guizhou Provincial Key Laboratory of Coal Clean Utilization, Liupanshui, Guizhou, China; 2.School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, China; 3.Guizhou Provincial Coal Product Quality Supervision and Inspection Institute, Liupanshui, Guizhou, China)

Abstract: This is an essay in the field of mining engineering. Recently, the application research of surfactants such as frother agents has become significantly important in mineral flotation, because it provides huge information on the characteristics of the gas-liquid interface before the bubble-particle collision or attachment. Moreover, it proposes important theories for the optimization of the flotation process. This article focuses on the potential measurement, tension test, and adsorption characteristics of the gas-liquid interface. The profile analysis tensiometry (PAT) test method for the adsorption characteristics of the gas-liquid interface is also introduced. Meanwhile, the research work on the characteristics of the gas-liquid interface has prospected.

Keywords: Mining engineering; Flotation; Interface adsorption; Hydration film thinning; Gas-liquid interface; Profile analysis tensiometry