



浮选颗粒与气泡间动态作用过程研究进展

李 美, 蒋 昊, 刘志龙, 王 宾, 滕 鑫

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 颗粒与气泡间的相互作用对浮选过程有着至关重要的作用, 二者能否发生有效黏附是决定浮选效率高低的关键。高速摄影技术能直接观察气泡-颗粒相互作用微观动态过程, 具有可视化、直接化等优点, 在颗粒-气泡碰撞、黏附、三相接触线(TPC)形成、脱附等方面应用广泛。本文总结了基于高速摄影技术探究颗粒-气泡相互作用的研究进展, 颗粒与气泡间碰撞黏附过程研究主要采用颗粒沉降法, TPC的形成过程研究主要采用单气泡上升法, 颗粒的脱附过程及黏附力的研究则主要采用单气泡驱动法。这些研究结果表明, 颗粒的形状和粗糙度、气泡的大小和运动速度、表面活性剂浓度和类型、矿物疏水性等因素均会对颗粒-气泡间的碰撞-黏附-脱附过程产生重要影响。

关键词: 碰撞黏附; 三相接触线; 矿物颗粒; 气泡; 高速摄影技术

文章编号: 1004-0609(2022)-06-1796-14

中图分类号: TD923

文献标志码: A

引文格式: 李 美, 蒋 昊, 刘志龙, 等. 浮选颗粒与气泡间动态作用过程研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1796-1809. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40171

LI Mei, JIANG Hao, LIU Zhi-long, et al. Research progress of dynamic interaction process between flotation particles and bubbles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1796-1809. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40171

浮选是目前实现矿物分离最有效、应用最广泛的方法, 可浮性较好的矿物颗粒与气泡选择性黏附, 形成矿化泡沫后上浮, 进入精矿产品, 其他可浮性较差的颗粒则留在浮选槽进入下一工艺或者成为尾矿^[1]。因此, 在整个浮选过程中, 颗粒与气泡形成有效黏附是实现矿物分选的关键步骤。气泡-颗粒的相互作用过程主要分为碰撞、黏附、脱附三个基本过程, 其中气泡与颗粒的黏附是最为重要的, 决定了浮选的效率^[2-3]。

由于浮选过程的流体环境复杂, 多个因素共同影响着气泡-颗粒间的相互作用。早期关于颗粒-气泡相互作用过程的研究一般进行了简化处理, 以便于研究某一因素对气泡-颗粒相互作用过程的影响^[4-5]; 通常会将颗粒看作质点, 其对气泡及周围

流体的影响均忽略不计; 气泡也被看作刚性的球体, 在碰撞黏附过程均不会发生形变^[6-7]。随着研究的开展, 人们对颗粒-气泡相互作用过程的认知不断深入, 将颗粒本身的大小、重力、粗糙度, 气泡的大小、形变、表面流动性等因素逐渐纳入研究范围, 开展了更加广泛的研究^[8-10], 研究对象也从玻璃微珠等简单的物质逐渐向实际的矿物颗粒转变^[11-12], 逐步建立起系统全面的碰撞黏附及脱附模型, 使人们对浮选机理有了更加深入及多方位的了解。为此, 本文总结概括了基于高速摄影技术研究气泡-颗粒间碰撞-黏附-脱附动态过程的国内外研究进展, 为今后更加深入研究颗粒-气泡间的微观动态过程提供借鉴。

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-08-10

通信作者: 蒋 昊, 研究员, 博士; 电话: 15367312226; E-mail: jianghao-1@126.com

1 基于高速摄影技术的气泡与颗粒间碰撞黏附研究方法

高速摄影技术是利用摄像机快速拍摄照片, 每秒至少可拍摄 1000 帧, 最多可达每秒 20 亿帧^[13], 最后用图像处理软件进行数据处理, 获得动态视频, 并从中提取有用的数据信息。最后用图像处理软件进行数据处理, 获得动态视频, 并从中提取有用的数据信息。该项技术已广泛应用于各项科学研究中, 比如撞击测试、弹道、生物移动等, 也可用于植物生态、天气等极慢速移动物体的长时间观察^[14-16]。高速摄影技术在浮选研究的应用使得颗粒-气泡作用的微观过程动态可视化, 极大地推动了对于颗粒-气泡碰撞黏附的研究, 也促进了对矿物与气泡间相互作用机理的研究。

目前, 利用高速摄影技术研究气泡-颗粒的碰撞黏附实验主要有三种方式, 如图 1 所示。第一种是颗粒沉降法^[17-19], 即气泡固定不动, 颗粒向静止的气泡沉降。该方法适用于研究颗粒与气泡碰撞后在气泡表面的滑移轨迹与滑移时间或者气泡与颗粒碰撞黏附概率及黏附角大小等方面。第二种是单气泡上升法^[6, 20-21], 即将矿物平面固定在距离气泡产生点一定距离处, 气泡向固定的矿物平面碰撞。该方法适用于碰撞黏附过程中气泡的运动及变形情况, 或者三相接触线形成时间和机理等方面的研究, 并且还可以利用该方法研究气泡大小、运动速度及矿物表面粗糙度等因素对碰撞黏附时间的影响。第三种是气泡驱动法^[11, 22], 毛细管鼓出单个气泡, 并驱动气泡向矿物移动, 或者气泡固定不动, 驱动矿物向气泡移动, 发生黏附之后, 再反向运动离开。这种方法一般用来研究颗粒气泡间脱附运动, 若与表面张力仪等共同使用, 则可在观察气泡颗粒间黏附及脱附过程的同时记录矿物或者气泡的受力情况。

2 气泡与矿物颗粒间的碰撞黏附概率

2.1 碰撞黏附概率的计算及模型建立

由于颗粒与气泡的碰撞黏附是一个微纳米尺度

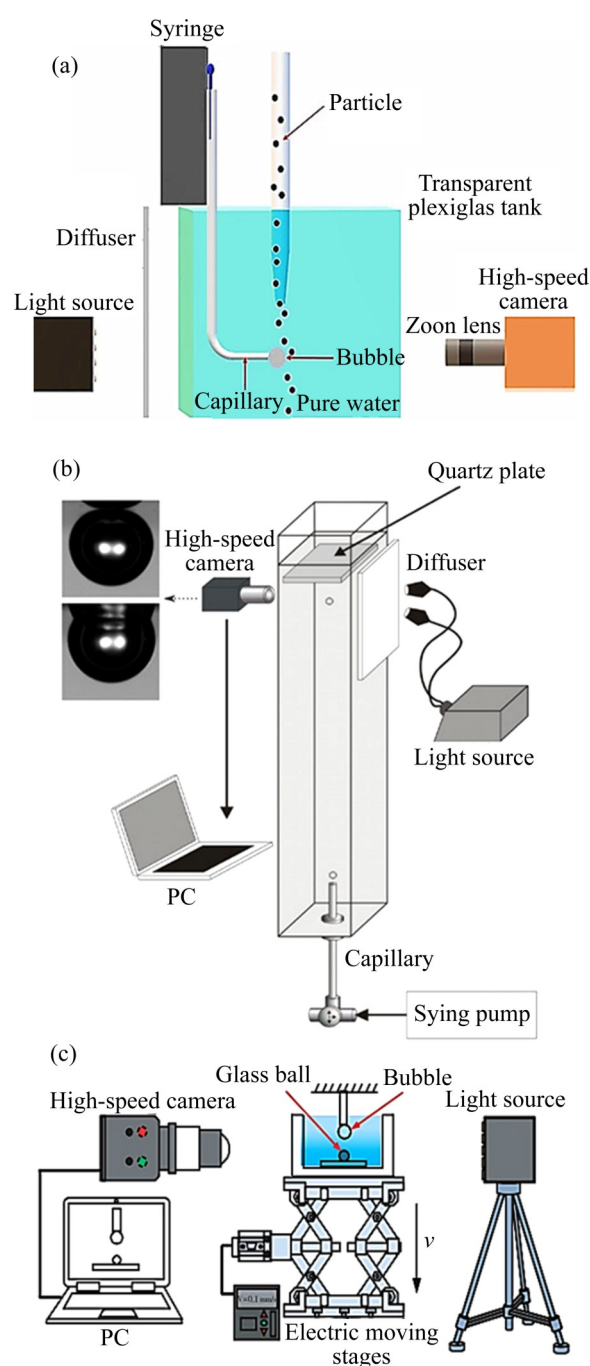


图1 高速摄影装置示意图^[19, 21, 11]

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed photography device: (a) Particle sedimentation method^[19]; (b) Single bubble rising method^[21]; (c) Bubble driving method^[11]

的作用过程, 液体环境也十分复杂, 很难用简单的数学模型来模拟。对气泡-颗粒碰撞作用机制的认识最早可以追溯到 1948 年, SUTHERLAND^[23]利用势流条件下的流线方程求出颗粒与气泡的临界碰撞轨迹, 首先建立了关于颗粒与气泡的碰撞黏附模型, 他认为颗粒被气泡富集的概率(P)可以表达

为式(1):

$$P = P_c \times P_a \times P_d \quad (1)$$

式中: P_c 为气泡和颗粒间的碰撞概率; P_a 为碰撞后发生黏附的概率; P_d 为不会发生脱附的概率。在该模型中, SUTHERLAND^[23] 假设颗粒没有惯性, 气泡为不可变形的刚性球体, 颗粒沿气泡周围的流线运动。然而由于该模型仅考虑了势流或者非黏性的情况, 利用该模型推导出的理论数据无法与实际实验结果吻合。尽管如此, Sutherland 假设仍然为后续研究者提供了理论框架, 在颗粒-气泡碰撞黏附理论研究中具有里程碑式的意义, 极大地推动了后续学者对这方面的研究。

FLINT 等^[7] 认识到 Sutherland 假设的不足, 利用 Navier-Stokes 方程, 通过数值求解了颗粒接近气泡的运动方程, 并确定了矿物浮选的碰撞概率。REAY 等^[24] 又进一步改善了 Flint 的分析, 建立了新的碰撞概率公式(见式(2)):

$$P_c \propto \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^2 \quad (2)$$

式中: D_p 、 D_b 分别为颗粒和气泡的直径。由于 SUTHERLAND^[23]、REAY 等^[24] 均是在势流及 Stokes 流的假设中建立的碰撞概率公式, 而势流是忽略流体黏性的, Stokes 流则是速度十分缓慢的流体, 与实际的实验环境相差较大, 仅适用于雷诺数很大的情况, 适用性较差。随着人们对于浮选认知的加深, WEBER 等^[25] 推导出在低雷诺数情况下的碰撞概率(P_c)(见式(3)):

$$P_c = \frac{3}{2} \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^2 \left[1 + \frac{(3/16)Re}{1 + 0.249Re^{0.56}} \right] \quad (3)$$

式中: Re 为气泡的雷诺数。随着浮选的发展, 颗粒与气泡碰撞黏附通常发生在浮选槽内部一个复杂和高度湍流的环境中。在此基础上, YOON 等^[26] 提出用一个简单的通式概况出在不同的气泡雷诺数 Re 条件下颗粒-气泡的碰撞概率, 如式(4)所示:

$$P_c = A \left(\frac{R_p}{R_b} \right)^n \quad (4)$$

式中: R_p 和 R_b 分别为颗粒和气泡的半径; A 和 n 是根据气泡雷诺数变化的参数, 如表1所示。

浮选过程中颗粒与气泡的作用分为两个基本子过程, 即气泡-颗粒碰撞和黏附, 显然, 并不是所

表1 式(4)中对应不同流态条件下的 A 、 n 值

Table 1 Values of A and n in Equation (4) corresponding to different flow conditions

Flow condition	A	n
Stokes	3/2	2
Intermediate (Weber and Paddock, 1983)	$\frac{3}{2} \left[1 + \frac{(3/16)Re}{1 + 0.249Re^{0.56}} \right]$	2
Intermediate	$\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15}$	2
Potential	3	1

有与气泡碰撞的粒子都会附着在一起^[27]。颗粒与气泡碰撞之后, 开始沿气泡表面滑动, 并在其上停留有限的一段时间, 这段时间通常称为“滑移时间”; 在这个过程中, 气泡和颗粒间的液膜发生薄化破裂, 称为“诱导时间”; 当“滑移时间”大于“诱导时间”时, 气泡和颗粒发生黏附^[28-29]。在此基础上, 结合 SUTHERLAND 的势流模型^[23], YOON^[30] 采用能够发生吸附区域面积与气泡和颗粒的总面积之比来描述碰撞概率, 与 SUTHERLAND 不同的是, 他认为颗粒与气泡的脱附角为 $\pi/2$, 当颗粒进入气泡下半球后吸附将不能发生。YOON^[30] 计算得到流速表达式后将之分别带入斯托克斯流、中间流与势流条件下的流线方程, 计算出了3种流态下的黏附概率, 如式(5)所示。

$$E_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left(\frac{-3U_{t_i}}{2R_b(R_b/R_p + 1)} \right) \right] \quad (Re < 1)$$

$$E_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left(\frac{-U_{t_i}(45 + 8Re^{0.72})}{30R_b(R_b/R_p + 1)} \right) \right] \quad (1 < Re < 200)$$

$$E_a = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left(\frac{-3U_{t_i}}{2(R_b/R_p)} \right) \right] \quad (200 < Re < 2000) \quad (5)$$

至此, 计算颗粒-气泡在浮选中的碰撞黏附概率形成了一个较为全面的模型, 适用于不同的环境条件。但是, 该计算模型仍然存在一定的局限性, 由于模型建立时假设颗粒远小于气泡的尺寸, 对气泡周围流场的影响较小。因此, 颗粒较小时, 该数学模型能较好地与实验数据拟合, 然而当颗粒受到惯性和重力影响时, 数学模型的计算则偏离实验

数据。

在传统的碰撞黏附模型基础上, 很多研究学者综合考虑实际实验条件, 完善理论模型, 使之更好的适应不同条件^[31]。闫红杰等^[32]基于 YOON^[30]的黏附模型以 CPT 浮选柱为研究对象, 忽略矿物颗粒在液相中的扩散, 建立了浮选过程中的多相流模型。利用该模型建立了矿粒在气-液两相中的运输方程, 并通过数值计算得到颗粒的碰撞概率为 0.017, 捕收概率为 0.904, 实现了浮选过程中矿物颗粒的定量描述。NGUYEN 等^[33]对气泡周围颗粒的运动方程进行了完整的计算分析, 其结果验证了 SUTHERLAND^[23]关于气泡-粒子相互作用的理论, 并对其进行修正和推广, 使之包含了离心效应。利用修正模型计算并证明了广义 Sutherland 理论仅与超细颗粒(直径 $<10\text{ }\mu\text{m}$)的计算模拟相吻合。对于非超微颗粒, 该模型在相切角和碰撞效率方面与数值结果有很大的偏差。该计算模型给出的切角偏差对浮选过程中气泡附着颗粒的建模和预测具有重要意义。FIROUZI 等^[34]建立了完全移动(势流)和不移动(Stokes 流)气泡表面的全粒子运动方程, 包括惯性力、重力和微水动力修正, 并对其进行数值求解。结果表明, 微流体动力学修正因子对碰撞角和效率有显著影响。广义 Sutherland 方程在计算离心力时只考虑了一个微流体力学修正因子。当考虑(全)微水动力的四个修正因子时, GSE 结果与数值结果不同。

2.2 不同因素对颗粒气泡碰撞黏附概率的影响

浮选时, 通过不同的破碎、磨矿方法得到的矿物颗粒形状、大小及表面粗糙度等方面均存在较大的差异。有研究发现, 与球磨机相比, 棒磨机磨出

的颗粒粗糙度和长径比较高; 由于不同的研磨方法, 即棒磨、球磨和自磨, 重晶石和方解石颗粒具有不同的可浮性, 具有较高平整度(较低圆度)的颗粒具有较高的疏水性和较好的浮选性能^[35-36]。气泡的大小、浮选环境及浮选过程中添加各类表面活性剂可以改善矿物表面疏水性, 使泡沫稳定等, 也会对颗粒-气泡的碰撞黏附产生很大的影响。

研究颗粒-气泡碰撞黏附过程的影响一般是采用颗粒沉降法, XIA 等^[37]利用玻璃微珠和玻璃碎片研究了不同形状的颗粒对黏附角及浮选回收率的影响, 黏附角原理图和黏附情况如图 2 所示。研究发现, 不添加捕收剂的情况下, 玻璃碎片的黏附角及浮选回收率均高于玻璃微珠, 但是捕收剂的加入可以减弱颗粒的不规则形状在黏附角和浮选回收率方面的优势。VERRELLI 等^[38]则通过诱导时间方程, 定量的表征颗粒形状对颗粒-气泡碰撞黏附过程的影响, 诱导时间主要是指颗粒与气泡间液膜开始薄化至临界厚度所用的时间, 主要受颗粒开始滑动的极角、颗粒形状及靠近速度等因素的影响, 实验数据显示不规则的颗粒比球形颗粒的诱导时间减小一个数量级。VAZIRI HASSAS 等^[39]和 XIA^[40]同样提到不规则的颗粒形状会缩短诱导时间, 锋利的颗粒边缘触发了液膜的薄化破裂过程, 加速液膜的排液, 从而缩短诱导时间。并且不规则颗粒的表面积较大, 表面会吸附更多捕收剂, 颗粒形状也会对颗粒表面张力产生影响, 这些因素均会对颗粒-气泡间液膜的薄化、破裂产生影响。

覃文庆等^[41-42]研究发现, 矿物颗粒大小与气泡尺寸间存在对应关系, 合适的匹配尺寸能有效提高浮选的回收率。他们在不同粒级的锡石与氢气泡的碰撞研究中发现, $<10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\sim 38\text{ }\mu\text{m}$

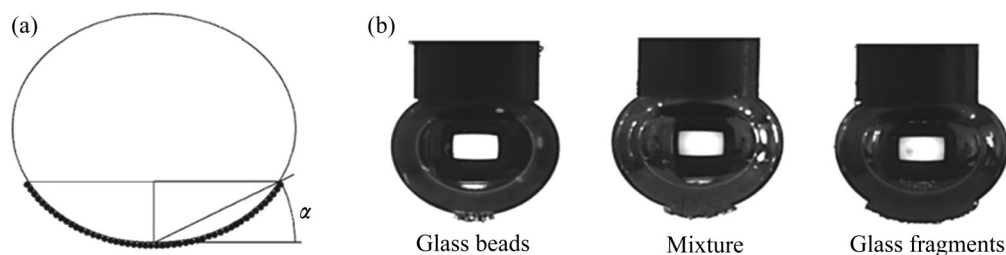


图2 颗粒-气泡黏附角测定原理图和不同颗粒在气泡表面附着图像^[37]

Fig. 2 Principle diagram of particle-bubble adhesion angle measurement(a) and image of different particles attached to bubble surface(b)^[37]

和 38~74 μm 的锡石分别与 50~150 μm 、约 250 μm 、约 74 μm 和约 74 μm 尺寸的气泡相匹配, 并且理论计算的结果表明, 碰撞概率随着颗粒尺寸的减小以及气泡尺寸(<150 μm)的增大而显著降低。廖世双等^[43]和陈兰兰等^[44]研究纳米气泡对浮选回收率的影响时发现, 纳米气泡的引入对微细粒矿物颗粒的回收有积极作用, 可显著提高浮选回收率。NGUYEN 等^[45]采用数值计算的方法, 分析了在势流条件下气泡和颗粒间的碰撞黏附过程, 计算结果表明颗粒的密度对碰撞和黏附过程有很多大的影响, 大颗粒在势流条件下可以抵消惯性力对气泡与可移动表面相互作用的负效应。FIROUZI 等^[34]通过数值研究了颗粒密度、粒径和膜厚对气泡-颗粒碰撞角和效率的影响。微流体动力效应由于阻碍了粒子接近上升气泡的速度而降低了碰撞效率, 在一组临界粒径和密度下, 无论是移动气泡表面还是静止气泡表面, 碰撞角都有一个最小值。

LECRIVAIN 等^[46]研究玻璃球和棒状的玻璃纤维在气泡表面的运动轨迹和吸附情况发现, 当碰撞角度小于 50°时, 数值模拟计算的结果可以与玻璃球的实验结果很好地吻合; 玻璃纤维则出现两种不同的情况, 如图 3 所示, 当玻璃纤维与气泡的碰撞发生在下半部分 30°处时, 只有纤维的头部与气泡接触, 黏附比较弱; 而当玻璃纤维在气泡上游发生碰撞时, 玻璃纤维与气泡呈相切式黏附, 整个纤维

体均与气泡接触, 接触面积大, 黏附也比较强。

由上述研究结果可知, 不规则的粗糙颗粒在颗粒-气泡碰撞黏附中更具有优势: 首先, 不规则的形状及粗糙表面在与气泡碰撞后锋利的边缘会触发二者间液膜的薄化, 可以极大缩短诱导时间; 其次, 不规则的边缘增加了比表面积, 可以吸附更多的捕收剂, 使表面疏水性增加; 最后, 不规则的颗粒形状受流体的影响更大, 颗粒周围流体对不规则颗粒的作用力分布不均匀, 容易改变其运动轨迹, 且颗粒与气泡的碰撞角度也对二者间的黏附强度有较大的影响。气泡尺寸和颗粒大小间存在一定的匹配关系, 可通过调控颗粒/气泡的大小来实现浮选回收率最优。

3 颗粒气泡间 TPC 的形成及机理分析

3.1 三相接触线的形成

气泡与矿物相互作用是浮选进行的基础, 在浮选过程中, 气泡与矿物颗粒的作用主要分为如下三个阶段:

- 1) 矿粒与气泡相互接近并发生碰撞;
- 2) 矿粒与气泡间的水化膜发生薄化直至破裂;
- 3) 矿粒在气泡表面黏附, 即颗粒与气泡相界面形成与调整。

其中, 矿物颗粒与气泡的碰撞黏附为浮选提供

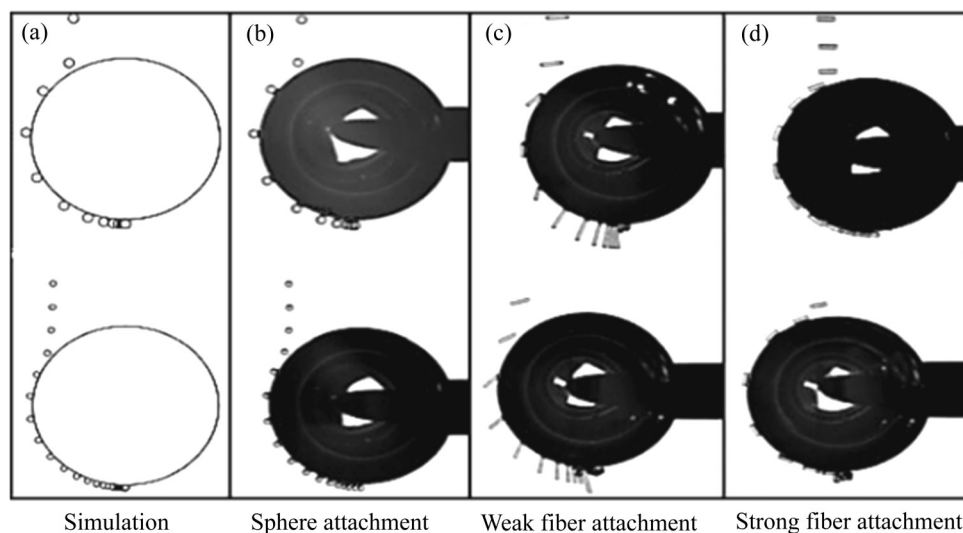


图3 模拟玻璃球的附着、玻璃球的实验附着、玻璃纤维的实验弱附着和玻璃纤维的实验强附着^[46]

Fig. 3 Simulated adhesion of glass balls(a), experimental adhesion of glass balls(b), experimental weak adhesion of glass fibers(c), experimental strong adhesion of glass fibers(d)^[46]

了可能,而能否形成固-液-气三相接触线使矿粒稳定的黏附在气泡表面是浮选成功的必要条件。矿物颗粒与气泡接近后,当二者之间的液膜破裂后即可形成三相接触线,液膜薄化破裂所需的时间称为 t_{TPC} 。 t_{TPC} 主要包括两部分组成,如式(6)所示^[47]:

$$t_{\text{TPC}} = t_{\text{D}} + t_{\text{B}} \quad (6)$$

式中: t_{D} 为液膜排液时间; t_{B} 为气泡与矿物碰撞-反弹过程所经历的时间。 t_{B} 主要受表面活性剂组成和浓度的影响,而 t_{D} 根据矿物的亲/疏水性有较大差异。很多研究结果表明^[48-49], t_{TPC} 主要受颗粒-气泡间液膜的排液时间 t_{D} 的影响,受 t_{B} 的影响较小。

液膜的稳定性由液膜间多种作用力共同决定,其主要影响因素有:1)矿物与气泡表面液膜的吸附状态;2)溶液的组成与浓度;3)矿物的亲/疏水性;以及4)矿物的表面形貌(物理/化学作用下的表面改性及表面粗糙度等)。而其中最重要的影响因素是矿物的亲/疏水性,疏水性不同的矿物表面对TPC形成的影响也是不同的。

3.2 影响TPC形成的因素

3.2.1 动态吸附层理论

迄今为止,TPC形成机理存在几种不同的解释。首先是关于动态吸附层(DLA)的理论,在含有表面活性物质(SAS)的溶液中,SAS会在气泡表面吸附形成一定吸附层,降低气泡表面的流动性,增大了黏滞阻力。连续介质中黏滞阻力的存在导致了SAS在上升气泡表面形成不均匀吸附,即形成了动态吸附层(DAL)^[50]。根据相关理论^[51],当气泡运动速度达到稳定后,表面活性剂分子在气泡表面的吸附速率与脱附速度亦达到平衡,此时在表面活性物质的吸附速率等于其脱附速率。表面活性物质在运动气泡顶端的吸附量(Γ_{top})最小,在底部的吸附量 Γ_{rear} 要高于达到平衡时的吸附量 Γ_{eq} ^[51-52],即 $\Gamma_{\text{rear}} > \Gamma_{\text{eq}} > \Gamma_{\text{top}}$ 。实验证明,当 $\Gamma_{\text{eq}}/c > 10^{-4} \text{ cm}$ 时,气泡顶端实际上并没有吸附有表面活性剂分子,即 $\Gamma_{\text{top}} \approx 0$ 。随后,有研究证明,即使当 $\Gamma_{\text{eq}}/c < 10^{-4} \text{ cm}$ 时,运动气泡顶端的吸附量也要远小于平衡吸附量^[52-54]。这种表面活性剂在气泡表面吸附的不均匀性取决于气泡运动速度与表面活性剂的浓度。

关于上升气泡动态吸附层的形成及其性质目前已有许多理论和实验研究。ZAWALA等^[55]发现表面活性剂在气泡表面形成动态吸附层(DAL)是影响

气泡运动速度、变形及寿命的主要因素。连续介质对上升气泡表面产生黏性阻力,导致表面活性剂吸附分布不均匀,气泡表面的活性剂浓度梯度降低气泡的移动性,使运动速度和变形减慢。图4(a)所示为气泡在低浓度($1.5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$)表面活性剂中的运动轨迹,可见从脱离毛细管处开始,气泡经历了加速-减速-达到最终速度几个过程,气泡形状也随着速度变化而变化;图4(b)所示为气泡在高浓度($5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$)的表面活性剂溶液中的运动轨迹,可见由于该溶液中分子浓度较高,在气泡表面吸附较快,DAL能较快形成。因此,在高浓度表面活性剂溶液中,气泡的速度和形状都迅速达到稳定状态^[56-57]。KRASOWSKA等^[58]和 NIECIKOWSKA等^[59]研究云母片表面电荷改性对碰撞气泡形成TPC的影响时发现,上升气泡表面DAL的形成对气泡碰撞的结果至关重要。如图5(a1)所示,云母片距离气泡产生部位较近,仅为10 mm(气泡处于加速阶段),气泡带正电(表面活性剂吸附覆盖均匀),TPC只在带负电的固体表面形成(见图5(a2));而由图5(b1)可知,当气泡产生部位与云母片距离较远(约为300 mm)时,气泡达到最终速度,DAL的形成使气泡顶部带负电,TPC只能在带正电荷的改性

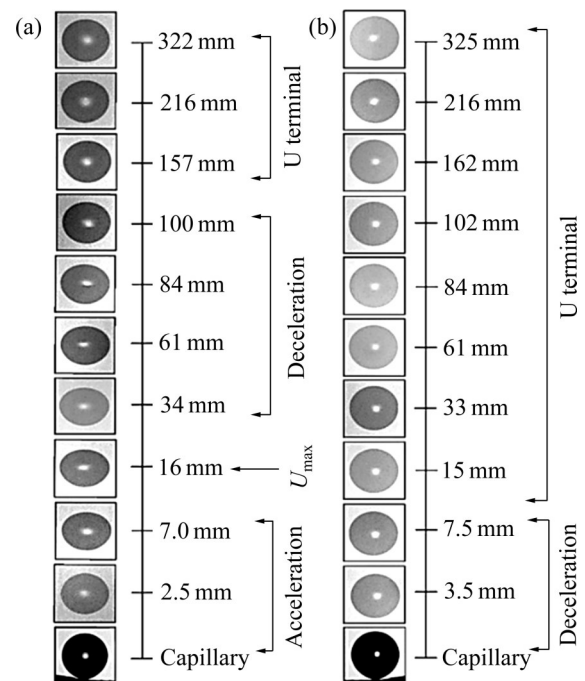


图4 不同浓度溶液中气泡速度和形状变化^[56]

Fig. 4 Changes in velocity and shape of bubbles in solutions of different concentrations^[56]: (a) n-pentanol $1.5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$; (b) n-pentanol $5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$

云母表面可观察到(见图5(b1))。

3.2.2 矿物表面性质的影响

从2.2节的研究可以发现,矿物颗粒的形状对颗粒-气泡间的碰撞概率有很大的影响,而颗粒形状对浮选的影响通常与表面粗糙度的影响相结合。颗粒表面粗糙度主要对颗粒-气泡的黏附时间产生影响,颗粒-气泡的黏附时间主要由三部分构成:1)诱导时间,颗粒与气泡间液膜开始薄化直至达到临界破裂厚度所用的时间;2)液膜破裂开始形成三相接触线;3)三相接触线扩张,直至颗粒稳定黏附在气泡上^[60-61]。探究表面粗糙度对颗粒-气泡相互作用的影响一般聚焦在对诱导时间和接触角的影响上。KRASOWSKA等^[6]利用单气泡上浮法研究了不同表面粗糙度的聚四氟乙烯平面与气泡黏附的诱导时间,发现随着粗糙度增加,诱导时间显著减小;他们针对这种现象提出两种可能性:一是由于表面粗糙度大,液膜更容易达到临界厚度;二是由于粗糙表面空隙截留大量空气,促进了气泡和颗粒的黏附。ZAWALA等^[20]也发现表面粗糙度增大能

够缩短气泡-颗粒的反弹和黏附时间。XIA^[62-63]则提出表面粗糙不一定对颗粒-气泡的黏附有积极的影响,他通过实验发现亲水的光滑煤炭表面与气泡黏附时间比粗糙煤炭与气泡黏附时间短,黏附的稳定性也高,接触角随表面粗糙度的增大而增大。这是由于粗糙的亲水性煤炭浸入水中后,表面的沟槽、空隙等被水侵占,水分子进一步覆盖粗糙表面,增大了粗糙表面与气泡的黏附及薄膜薄化破裂的阻力。XING等^[64]则研究了表面粗糙度对于脱附力的影响,发现亲水(接触角 $<90^\circ$)光滑颗粒的脱附力大于粗糙颗粒,疏水(接触角 $>90^\circ$)颗粒则相反;表面粗糙度增大使亲水性气泡颗粒的团聚体稳定性降低,但使疏水性气泡颗粒的团聚体稳定性提高。以上学者的研究成果均与Wenzel模型吻合得很好,如图6所示,亲水性粗糙矿物表面的空隙易被水充满,降低了接触角及三相接触线;疏水性矿物表面的空隙则不易被水充填,空气的存在增大了接触角及三相接触线,也容易产生纳米气泡,促进颗粒-

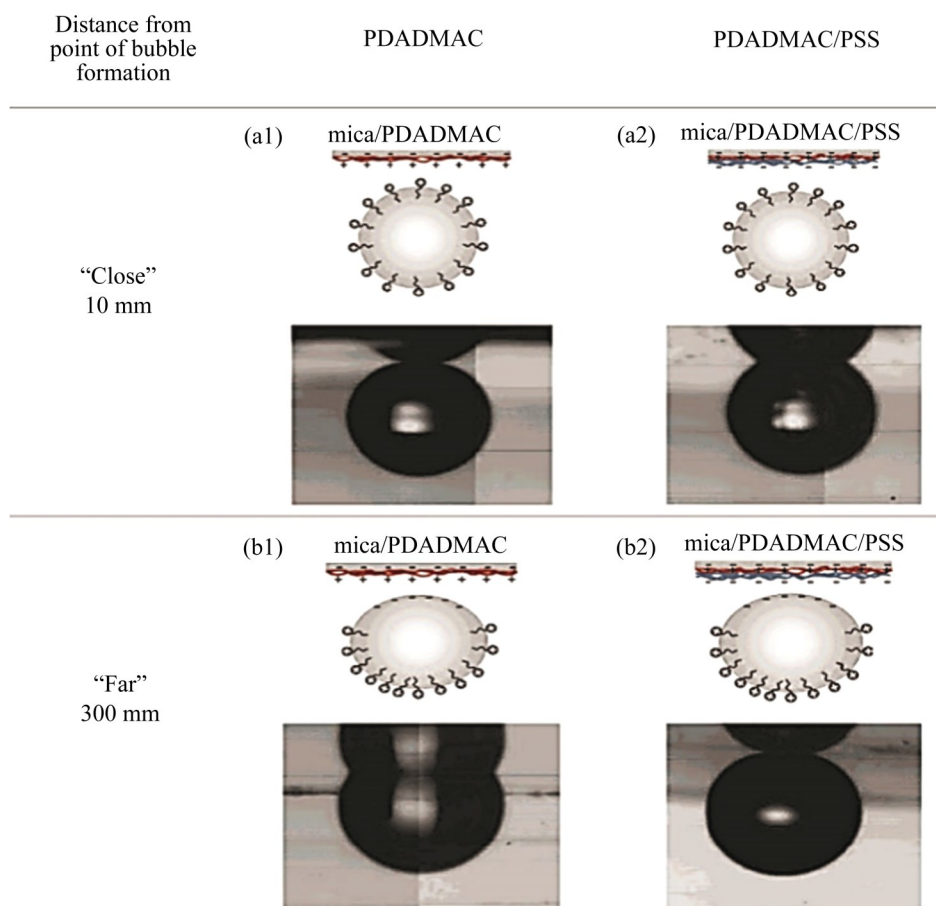


图5 气泡-云母表面TPC形成示意图^[58]

Fig. 5 Schematic diagram of TPC formation on bubble-mica surface^[58]

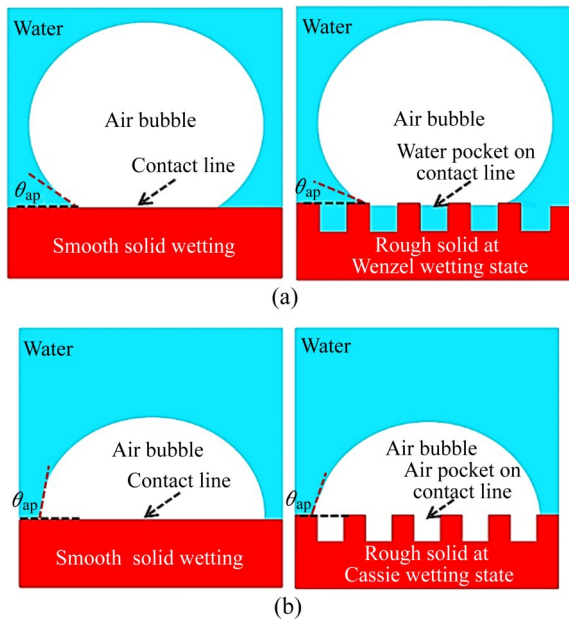


图6 表面粗糙度对不同接触角的矿物-气泡黏附影响机理原理图^[64]

Fig. 6 Principle diagrams of influence mechanism of surface roughness on mineral-bubble adhesion with different contact angles^[64]: (a) Contact angle $< 90^\circ$; (b) Contact angle $> 90^\circ$

气泡的碰撞黏附。

矿物本身的疏水性及添加表面活性剂后对矿物表面电性的改变, 对TPC的影响也是至关重要的。李国胜等^[65]通过研究气泡在不同性质的煤炭表面碰撞和黏附过程发现, 表面接触角大、疏水性较强的焦煤表面形成TPC所需时间小于亲水性的褐煤, 在其表面形成的铺展面积大于在褐煤表面形成的铺展面积, 验证了煤炭表面的疏水性对气泡矿化过程有较大的影响。ZAWALA等^[21]认为表面活性剂的浓度是TPC形成机制的重要因素, 他们发现在CTAC浓度较低($1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-6}$ mol/L)时, CTAC选择性吸附在气泡表面, 使气泡的电性由负变为正, 静电作用使带正电的气泡与带负电的石英黏附; CTAC浓度较高($> 3 \times 10^{-6}$ mol/L)时, CTAC则大量吸附在石英表面, 使石英表面具备较高的疏水性, 促进液膜的薄化破裂。KOSIOR等^[66]的研究发现, 不论是在去离子水还是在各种表面活性剂溶液中, 高疏水性的聚四氟乙烯表面总能形成TPC, 形成TPC的时间随表面活性剂浓度的增高而延长; 而亲水性的云母在去离子水、非离子及阴离子表面活性剂中均不能形

成TPC, 仅在阳离子表面活性剂中能观察到TPC的形成, 且TPC形成时间随表面活性剂浓度的增高而缩短。

综上所述, 矿物本身的亲/疏水性、表面电性、粗糙度及表面活性剂的添加对TPC的形成是十分重要的。表面活性剂的加入使气泡更加稳定, 变形幅度和运动速度均减小, 且可以改善矿物表面的疏水性及表面电性; 表面粗糙度对亲水和疏水性矿物的影响也是截然不同的, 粗糙的疏水性矿物表面的空隙易截留大量空气, 增大接触角和三相接触线, 亲水性粗糙矿物则相反; 这些均有利于气泡-颗粒间的黏附, 增加颗粒-气泡聚集体的稳定性。

4 颗粒-气泡间的脱附

4.1 颗粒-气泡间的脱附理论

脱附是指黏附到气泡上的颗粒在上浮过程中发生脱落进入矿浆的过程, 对粗颗粒的浮选具有重要影响。KLASSEN和MOKROUSOV^[67]认为矿物颗粒发生脱附的原因是浮选中存在破坏力的作用。破坏力主要来源于: 矿化气泡的上升运动、液体的流动、颗粒在气泡表面上的滑移、气泡运动状态的突然改变、矿浆中颗粒与矿化气泡的碰撞与摩擦、气泡与障碍物的碰撞以及气泡发生的振荡形变等。随后, SCHULZE等^[68]进一步发展了颗粒-气泡间的力学理论, 将颗粒受到的作用力分为黏附力(毛细管力、静水压力、浮力)和脱附力(拉普拉斯压力、重力、离心力)两大部分^[69]。对于黏附在气泡表面的矿粒, 当其与气泡的作用力不能在当前体系下维持稳定黏附时, 即脱附力大于黏附力时, 矿物颗粒将发生脱附。CHENG等^[70]测量出颗粒与气泡间的脱附力, 计算了颗粒与气泡间不同作用力的理论值, 得到二者的脱附概率 P_d , 如式(7)所示:

$$P_d = 1 / (1 + F_a / F_d) \quad (7)$$

式中: F_a 表示总吸附力; F_d 表示总脱附力。二者均与气泡和颗粒的直径有关, 因此脱附概率与气泡和颗粒的直径也密切相关。经式(7)计算后可以知, 气泡和颗粒直径越大, 脱附概率也越大^[70]。高速摄影结果也表明, 颗粒与气泡接触后, 将沿气泡表面向下滑动直至气泡底部, 并在底部摆动, 重力、惯性离心力和流体力促使其从气泡表面脱附, 但表面疏水力、表面张力及剩余水静压力将维持颗粒-气

泡结合体的稳定^[30,71]。

4.2 颗粒-气泡间脱附的影响因素

为了更系统详细地研究气泡与颗粒矿化后二者间脱附的过程及相互作用力的变化,目前的研究多以单个气泡和颗粒为研究对象,采用高速摄影仪记录颗粒-气泡的脱离过程,测量脱附过程中的接触角、三相润湿周边等参数的变化,计算黏附力的大小,或者结合表面张力仪等直接记录脱附过程中力的变化。郭芳余等^[72]研究了不同形状的煤颗粒-气泡间黏附/脱附行为,结果表明,球形颗粒比不规则的长条形和三角锥形颗粒更容易发生脱附。丁世豪等^[22]利用颗粒气泡脱附高速动态测试系统研究发

现,颗粒从气泡表面脱附主要分为两个阶段,气泡拉伸变形接触角增大和气泡滑动三相润湿周边减小。黏附角与接触角呈正相关,当颗粒-气泡间受到外力影响时,气泡通过增大接触角来提高黏附力抵抗外力的影响,维持系统的稳定。然而,NGUYEN等^[73]的研究发现,在气泡与颗粒间的气-液-固三相接触线上,气泡与颗粒不分离,这与现有理论中的常规考虑相矛盾。高速摄影仪拍摄的图片显示,气泡与颗粒的分离发生在靠近固体表面的空气-水界面的毛细颈处,这种分离总是在固体表面留下微小的残余气体(见图7)。WANG等^[74]设计了一种集成薄膜排水设备(Integrated thin film drainage apparatus, 简称ITFDA),如图8所示,用

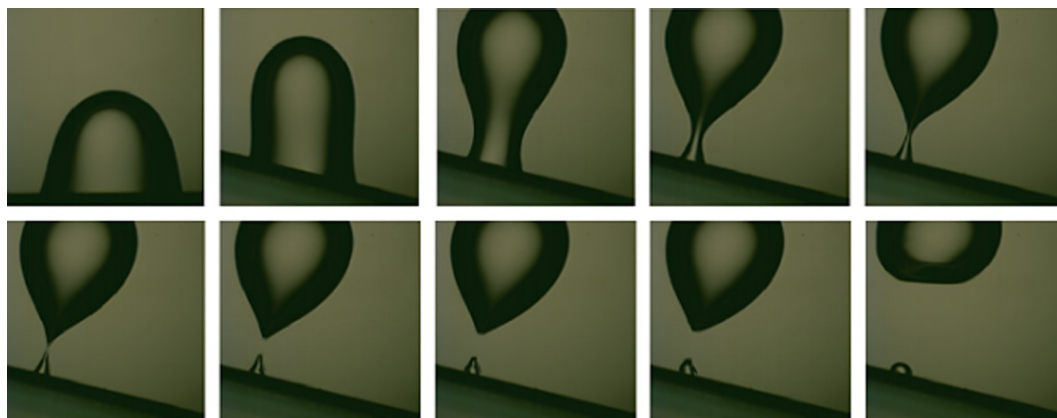


图7 气泡与倾斜疏水硅片表面分离的顺序图像($\theta=110^\circ$)^[73]

Fig. 7 Sequence image of separation of bubbles and inclined hydrophobic silicon wafer surface ($\theta=110^\circ$)^[73]

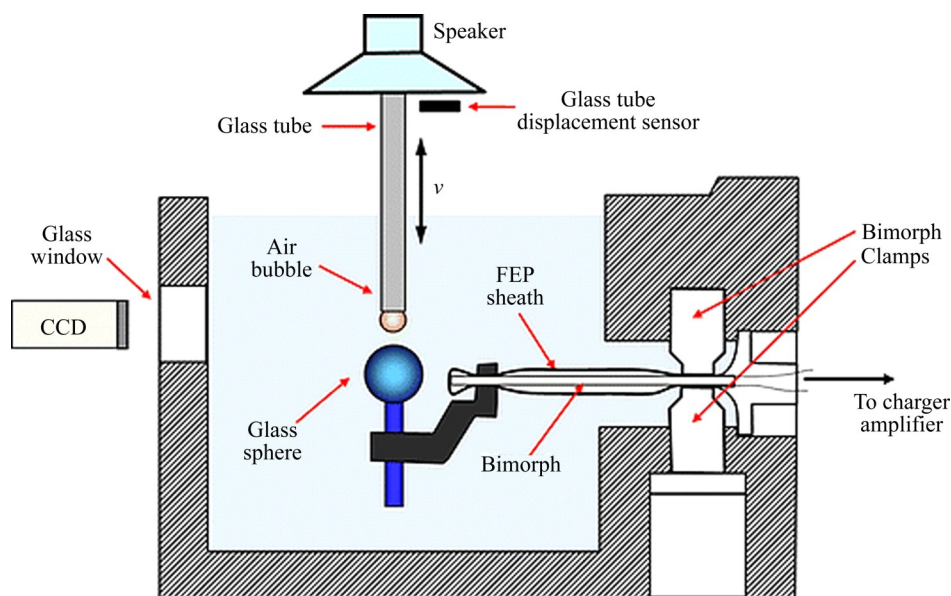


图8 集成薄膜排水装置示意图^[74]

Fig. 8 Schematic diagram of integrated membrane drainage device^[74]

于测量固体颗粒、不互溶液滴或气泡之间的液膜排水动力学。该设备通过控制上方扬声器的振动频率和振幅, 实现颗粒-气泡的碰撞及脱附, CCD可及时记录各个界面的几何形状变化, 并且右侧的压电双晶片可以精确地测量颗粒-气泡间的动态相互作用力。试验结果表明, 该ITFDA设备能够测量水溶液中气泡与固体颗粒之间的流体阻力、膜滤时间等重要物理参数, 为研究颗粒-气泡间的脱附提供了有效的工具。此外, 也有很多研究学者结合CCD和音频信号发生器及扬声器, 模拟颗粒在浮选槽中经历的外来作用力, 探究矿化气泡上颗粒的脱附情况。FOSU等^[75]利用类似的装置测量了不同粒度的浮选精矿从气泡表面脱离所需要的力, 结果表明, 接触角大的颗粒所需的脱附力更大, 解离度高的颗粒更易附着在气泡表面, 且需要更大的脱附力; 对于相同粒径的颗粒, 不规则颗粒比圆形颗粒需要更大的脱附力。XU等^[76]利用一种新的电声技术对不同直径和疏水性的石英颗粒和球形玻璃珠进行了分离实验。两种颗粒的脱附力均随颗粒接触角和介质黏度的增大而增大, 脱附力由颗粒与气泡脱附时的最大振幅计算得出。在低振动频率下, 准静态模型可以很好地预测实验分离力。相比之下, 在高振动频率下, 特别是在高黏度介质中, 准静态模型不能预测实验分离力。在高黏度下, 控制动态接触角的三相接触线的运动速率降低, 可以产生更稳定的气泡-颗粒聚集体。

5 结论与展望

1) 在颗粒-气泡间的动态过程研究中, 目前已经形成了较为全面的碰撞黏附概率的数学计算模型。与圆形平滑颗粒相比, 不规则、粗糙颗粒更有利于颗粒在气泡表面的黏附, 均可以促进液膜薄化, 缩短诱导时间。不规则的颗粒形状受流体的影响较大, 容易改变其运动轨迹, 增加黏附概率; 粗糙颗粒表面水化膜更容易到达临界液膜厚度, 且疏水性粗糙颗粒表面容易截留空气或产生纳米气泡, 有利于颗粒与气泡的黏附。

2) 颗粒-气泡间的相互作用力是影响TPC形成的直接原因。无论是动态吸附层, 还是颗粒表面性

质及微纳米气泡的吸附, 都是通过改变颗粒-气泡间的相互作用力进而改善矿物浮选效率。疏水力和静电相互作用力是主要的作用力, 今后的研究可以更多针对颗粒-气泡间相互作用力来源展开, 深入了解不同作用力的产生方式, 从而实现颗粒-气泡间相互作用力的调控, 提高浮选效率。

3) 关于颗粒-气泡间的脱附过程的研究主要依靠高速摄像机拍摄的清晰图像来观察气泡与颗粒脱附过程中矿物表面接触角变化及气泡的拉伸和变形情况; 利用扬声器模拟流场中的干扰因素, 观察颗粒的脱附运动状态及脱附概率; 采用表面张力仪及压电陶瓷技术清晰记录过程中气泡与颗粒间相互作用力的变化。脱附力和毛细管作用力是影响气泡-颗粒产生脱附的关键因素, 颗粒大小、表面粗糙度、捕收剂浓度、振动模式等均会对颗粒-气泡脱附过程的界面变化及相互作用力产生影响。

4) 目前, 关于颗粒-气泡间动态过程的实验研究大多是静止溶液中的单气泡实验, 如碰撞黏附及脱附概率模型的建立多以玻璃微珠作为研究对象; 关于颗粒-气泡间TPC形成的研究主要还是在块状的矿物与单气泡间进行。由于理论模型建立时对很多条件进行了简化, 在今后的理论研究中应侧重模拟实际矿浆环境进行颗粒-气泡相对运动、矿化气泡兼并及稳定性等方面的研究, 更加注重理论与工业生产的衔接。

REFERENCES

- [1] 王 超, 孙春宝, 寇 珏. 浮选过程中颗粒-气泡黏附作用机理及研究进展[J]. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1423-1433. WANG Chao, SUN Chun-bao, KOU Jue. Mechanism and research progress of the bubble-particle attachment in flotation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(12): 1423-1433.
- [2] XING Y, GUI X, PAN L, et al. Recent experimental advances for understanding bubble-particle attachment in flotation[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246: 105-132.
- [3] KRASOWSKA M, MALYSA K, BEATTIE D A. Recent advances in studies of bubble-solid interactions and wetting film stability[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2019, 44: 48-58.
- [4] 陈泉源, 张泾生, 王淀佐. 气泡与颗粒作用研究新进展[J]. 国外金属矿选矿, 2001, 38(2): 17-19, 24.

- CHEN Quan-yuan, ZHANG Jing-sheng, WANG Dian-zuo. New progress in the study of the interaction between bubbles and particles[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2001, 38(2): 17-19, 24.
- [5] 卓启明, 刘文礼, 徐宏祥, 等. 浮选中颗粒-气泡间相对运动研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2867-2877.
- ZHUO Qi-ming, LIU Wen-li, XU Hong-xiang, et al. Research progress of relative motion between particles and bubbles in froth flotation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2867-2877.
- [6] KRASOWSKA M, ZAWALA J, MALYSA K. Air at hydrophobic surfaces and kinetics of three phase contact formation[J]. *Advances in Colloid Interface and Interface Science*, 2009, 147/148: 155-169.
- [7] FLINT L R, HOWARTH W J. The collision efficiency of small particles with spherical air bubbles[J]. *Chemical Engineering Science*, 1971, 26(8): 1155-1168.
- [8] 邢耀文, 桂夏辉, 韩海生, 等. 颗粒气泡黏附科学: 微纳尺度下颗粒气泡黏附试验研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1857-1866.
- XING Yao-wen, GUI Xia-hui, HAN Hai-sheng, et al. Bubble-particle attachment science: Experimental advances in bubble-particle attachment on a micro-nano scale[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1857-1866.
- [9] 邢耀文, 桂夏辉, 曹亦俊, 等. 颗粒气泡黏附科学: 宏观尺度下颗粒气泡黏附研究进展及困境[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 582-587.
- XING Yao-wen, GUI Xia-hui, CAO Yi-jun, et al. Bubble-particle attachment science: Advances and dilemma in bubble particle attachment on a macroscopic scale[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 582-587.
- [10] 高迅佑, 全晓军, 林涛, 等. 气泡在自由液面破裂时间分析及颗粒的影响[J]. *低温工程*, 2020(4): 1-6, 84.
- GAO Xun-ji, QUAN Xiao-jun, LIN Tao, et al. Burst time analysis of free liquid surface bubbles and study of particle effects[J]. *Cryogenics*, 2020(4): 1-6, 84.
- [11] 张志军, 赵治府, 赵亮, 等. 颗粒与气泡脱附的研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 423-431.
- ZHANG Zhi-jun, ZHAO Zhi-fu, ZHAO Liang, et al. Advances in detachment of particle and bubble[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 423-431.
- [12] 杨义红, 沈政昌, 谭明, 等. 浮选系统中颗粒与气泡的碰撞行为研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2020(3): 95-99, 105.
- YANG Yi-hong, SHEN Zheng-chang, TAN Ming, et al. A study on the collision interaction between particles and bubbles in flotation system[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(3): 95-99, 105.
- [13] 李瑞海. 初识 Phantom(幻影)Flex 4K 高速摄影机[J]. *影视制作*, 2016, 22(3): 92-94.
- LI Rui-hai. Meet phantom flex 4K high speed camera[J]. *Audio & Video Production*, 2016, 22(3): 92-94.
- [14] 倪宝玉, 张阿漫. 气泡高速摄影和载荷测试技术综述[J]. *力学与实践*, 2013, 35(6): 11-18.
- NI Bao-yu, ZHANG A-man. The review of high-speed imaging and load test technologies for bubble dynamics[J]. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(6): 11-18.
- [15] 岳晓明, 杨晓冬. 电火花加工过程高速摄影研究综述[J]. *电加工与模具*, 2019(6): 1-5, 23.
- YUE Xiao-ming, YANG Xiao-dong. Research status of high-speed observation of electrical discharge machining process[J]. *Electromachining & Mould*, 2019(6): 1-5, 23.
- [16] YAN Hong-jie, XIAO Jun-bing, SONG Yan-po, et al. Cold model on bubble growth and detachment in bottom blowing process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(1): 213-221.
- [17] YANG H, XING Y, SUN L, et al. Kinetics of bubble-particle attachment and detachment at a single-bubble scale[J]. *Powder Technology*, 2020, 370: 251-258.
- [18] SUBASINGHE G K N, ALBIJANIC B. Influence of the propagation of three phase contact line on flotation recovery[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 57(1): 43-49.
- [19] LI S F, SCHWARZ M. P, YANG W L, et al. Experimental observations of bubble-particle collisional interaction relevant to froth flotation, and calculation of the associated forces[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 151: 106335.
- [20] ZAWALA J, DRZYMALA J, MALYSA K. An investigation into the mechanism of the three-phase contact formation at fluorite surface by colliding bubble[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, 88(3/4): 72-79.
- [21] ZAWALA J, KARAGUZEL C, WIERTEL A, et al. Kinetics of the bubble attachment and quartz flotation in mixed solutions of cationic and non-ionic surface-active substances[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 523: 118-126.
- [22] 丁世豪, 贾文杰, 刘梦云, 等. 基于高速动态的颗粒气泡脱附过程动力学研究[J]. *金属矿山*, 2020(4): 61-65.
- DING Shi-hao, JIA Wen-jie, LIU Meng-yun, et al. Dynamic study of particle-bubble detachment process based on high-speed dynamic camera[J]. *Metal Mine* 2020(4): 61-65.
- [23] SUTHERLAND K L. Physical chemistry of flotation; kinetics of the flotation process[J]. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 1948, 52(2): 394-425.
- [24] REAY D, RATCLIFF G. Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: Effects of bubble size and particle size on collection efficiency[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1973, 51(2): 178-185.

- [25] WEBER M E, PADDOCK D. Interceptional and gravitational collision efficiencies for single collectors at intermediate reynolds numbers[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983, 94(2): 328–335.
- [26] YOON R H, LUTTRELL G H. The effect of bubble size on fine particle flotation[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1989, 5(3): 101–122.
- [27] HEWITT D, FORNASIERO D, RALSTON J. Bubble particle attachment efficiency[J]. *Minerals Engineering*, 1994, 7(5): 657–665.
- [28] RALSTON J, DUKHIN S S, MISHCHUK N A. Wetting film stability and flotation kinetics[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2002, 95(2): 145–236.
- [29] LUTTRELL G H, YOON R H. Production and processing of fine particles[M]. Amsterdam: Pergamon, 1988: 159–167.
- [30] YOON R H. The role of hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interaction[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 58(1): 129–143.
- [31] 桑义敏, 陈家庆, 韩严和, 等. 气浮工艺中气泡-颗粒碰撞效率和理论计算模型研究[J]. *工业水处理*, 2014, 34(2): 5–10. SANG Yi-min, CHEN Jia-qing, HAN Yan-he, et al. Bubble-particle collision efficiency in flotation and its theoretical model[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(2): 5–10.
- [32] 闫红杰, 毛 成, 孙 伟, 等. 浮选过程颗粒输运行为数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(2): 552–560. YAN Hong-jie, MAO Cheng, SUN Wei, et al. Numerical simulation of particle transport behavior in flotation process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(2): 552–560.
- [33] NGUYEN C M, NGUYEN A V, MILLER J D. Computational validation of the generalized Sutherland equation for bubble-particle encounter efficiency in flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 81(3): 141–148.
- [34] FIROUZI M, NGUYEN A V, HASHEMABADI S H. The effect of microhydrodynamics on bubble-particle collision interaction[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(9): 973–986.
- [35] ULUSOY U, HIÇYILMAZ C, YEKELER M. Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2004, 43(8): 1047–1053.
- [36] RAHIMI M, DEGHANI F, REZAI B, et al. Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2012, 19(4): 284–289.
- [37] XIA Wen-cheng, MA Guang-xi, BU Xiang-ning, et al. Effect of particle shape on bubble-particle attachment angle and flotation behavior of glass beads and fragments[J]. *Powder Technology*, 2018, 338: 168–172.
- [38] VERRELLI D I, BRUCKARD W J, KOH P T L, et al. Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 58(1): 80–89.
- [39] VAZIRI HASSAS B, CALISKAN H, GUVEN O, et al. Effect of roughness and shape factor on flotation characteristics of glass beads[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 492: 88–99.
- [40] XIA W C. Role of particle shape in the floatability of mineral particle: An overview of recent advances[J]. *Powder Technology*, 2017, 317(1): 104–116.
- [41] REN L Y, ZHANG Y M, QIN W Q, et al. Collision and attachment behavior between fine cassiterite particles and H₂ bubbles[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(2): 520–527.
- [42] QIN W Q, REN L Y, WANG P P, et al. Electro-flotation and collision-attachment mechanism of fine cassiterite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(4): 917–924.
- [43] 廖世双, 欧乐明, 周伟光. 空化过程微纳米气泡性质及其对细粒矿物浮选的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(7): 1567–1574. LIAO Shi-shuang, OU Le-ming, ZHOU Wei-guang. Micro-nano bubbles properties induced by hydrodynamic cavitation and their influences on fine mineral flotation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(7): 1567–1574.
- [44] 陈兰兰, 卢东方, 王毓华, 等. 超声波技术在矿物浮选中的研究、应用现状及发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(4): 1042–1056. CHEN Lan-lan, LU Dong-fang, WANG Yu-hua, et al. Research and application of ultrasonic technology in mineral flotation and development trend[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(4): 1042–1056.
- [45] NGUYEN P T, NGUYEN A V. Validation of the generalised Sutherland equation for bubble-particle encounter efficiency in flotation: effect of particle density[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(2): 176–181.
- [46] LECRIVAIN G, PETRUCCI G, RUDOLPH M, et al. Attachment of solid elongated particles on the surface of a stationary gas bubble[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 71: 83–93.
- [47] KOSIOR D, ZAWALA J, MALYSA K. When and how α -terpineol and n-octanol can inhibit the bubble attachment to hydrophobic surfaces[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2011, 47(1): 169–182.
- [48] KOWALCZUK P B, ZAWALA J. A relationship between time of three-phase contact formation and flotation kinetics of naturally hydrophobic solids[J]. *Colloids and Surfaces A:*

- Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 506: 371–377.
- [49] 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.
- [50] DUKHIN S S, MILLER R, LOGLIO G. Physico-chemical hydrodynamics of rising bubble[J]. *Studies in Interface Science*, 1998, 6: 367–432.
- [51] DUKHIN S S, LOTFI M, KOVALCHUK V I, et al. Dynamics of rear stagnant cap formation at the surface of rising bubbles in surfactant solutions at large Reynolds and Marangoni numbers and for slow sorption kinetics[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 492: 127–137.
- [52] JACHIMSKA B, WARSZYŃSKI P, MAŁYSA 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.
- [53] JACHIMSKA B, WARSZYŃSKI P, MAŁYSA K. Influence of adsorption kinetics and bubble motion on stability of the foam films formed at n-octanol, n-hexanol and n-butanol solution surface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 192(1): 177–193.
- [54] JACHIMSKA B, WARSZYŃSKI P, MAŁYSA K. Effects of motion in n-hexanol solution on the lifetime of bubbles at the solution surface[J]. *Progress in Colloid and Polymer Science*, 2001, 116: 120–128.
- [55] ZAWALA J, KOSIOR D, MAŁYSA K. Formation and influence of the dynamic adsorption layer on kinetics of the rising bubble collisions with solution/gas and solution/solid interfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 222: 765–778.
- [56] KRZAN M, ZAWALA J, MAŁYSA K. Development of steady state adsorption distribution over interface of a bubble rising in solutions of n-alkanols (C5, C8) and n-alkyltrimethylammonium bromides (C8, C12, C16)[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, 298(1/2): 42–51.
- [57] MAŁYSA K, KRASOWSKA M, KRZAN M. Influence of surface active substances on bubble motion and collision with various interfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2005, 114/115: 205–225.
- [58] KRASOWSKA M, KOLASINSKA M, WARSZYŃSKI P, et al. Influence of polyelectrolyte layers deposited on mica surface on wetting film stability and bubble attachment[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(15): 5743–5749.
- [59] NIECIKOWSKA A, ZAWALA J, MILLER R, et al. Dynamic adsorption layer formation and time of bubble attachment to a mica surface in solutions of cationic surfactants (CnTABr)[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 365(1): 14–20.
- [60] WANG W, LI K, MA M, et al. Review and perspectives of AFM application on the study of deformable drop/bubble interactions[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 225: 88–97.
- [61] 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.
- [62] XIA W C. Role of surface roughness in the attachment time between air bubble and flat ultra-low-ash coal surface[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 168: 19–24.
- [63] CHEN Y, XIA W, XIE G. Contact angle and induction time of air bubble on flat coal surface of different roughness[J]. *Fuel*, 2018, 222: 35–41.
- [64] XING Y, ZHANG Y, DING S, et al. Effect of surface roughness on the detachment between bubble and glass beads with different contact angles[J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 812–816.
- [65] 李国胜, 韩加展, 邓丽君, 等. 气泡在煤炭表面的碰撞和黏附过程[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(11): 2841–2846.
- LI Guo-sheng, HAN Jia-zhan, DENG Li-jun, et al. Collision and adhesion process of air bubbles on coal surface[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2841–2846.
- [66] KOSIOR D, ZAWALA J, NIECIKOWSKA A, et al. Influence of non-ionic and ionic surfactants on kinetics of the bubble attachment to hydrophilic and hydrophobic solids[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 470: 333–341.
- [67] KLASSEN V I, MOKROUSOV V A. An introduction to the theory of flotation[M]. Butterworths: London Butterworths, 1963: 493–495.
- [68] SCHULZE H J. New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: A theory on the upper particle size of floatability[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1977, 4(3): 241–259.
- [69] AMIRFAZLI A, NEUMANN A W. Status of the three-phase line tension: A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2004, 110(3): 121–141.
- [70] CHENG T W, HOLTHAM P N. The particle detachment process in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 1995, 8(8): 883–891.
- [71] CHAU T T, BRUCKARD W J, KOH P T L, et al. A review

- of factors that affect contact angle and implications for flotation practice[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, 150(2): 106–115.
- [72] 郭芳余, 张友飞, 罗佳倩, 等. 颗粒形状对长焰煤颗粒气泡脱附行为的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(11): 217–222.
- GUO Fang-yu, ZHANG You-fei, LUO Jia-qian, et al. Effect of particle shape on detachment behavior between long flame coal particles and bubble[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11): 217–222.
- [73] NGUYEN N N, CHU A T T, SHERMAN H M, et al. A new paradigm of bubble-particle detachment interaction: How and where do the bubble and the particle detach? [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 159: 106607.
- [74] WANG L, SHARP D, MASLIYAH J, et al. Measurement of interactions between solid particles, liquid droplets, and/or gas bubbles in a liquid using an integrated thin film drainage apparatus[J]. *Langmuir*, 2013, 29(11): 3594–3603.
- [75] FOSU S, SKINNER W, ZANIN M. Detachment of coarse composite sphalerite particles from bubbles in flotation: Influence of xanthate collector type and concentration[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 71: 73–84.
- [76] XU D, AMETOV I, GRANO S R. Detachment of coarse particles from oscillating bubbles—The effect of particle contact angle, shape and medium viscosity[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 101(1): 50–57.

Research progress of dynamic interaction process between flotation particles and bubbles

LI Mei, JIANG Hao, LIU Zhi-long, WANG Bin, TENG Xin

(School of Resource Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The interaction between particles and bubbles plays an important role in the flotation process, and whether effective adhesion or not is the key to determining the flotation efficiency. High-speed photography technology can directly observe the bubble-particle interaction dynamical microscopic process, which has a wide application in particle-bubble collision, adhesion, and three-phase contact line (TPC) formation, desorption and etc. This paper mainly summarizes the research progress of particle-bubble interaction based on high-speed photography technology. The particle-bubble collision and adhesion process are observed by the particle sedimentation method, and the TPC formation process is researched by the single bubble rise method, and the particle desorption process and adhesion force are found by the single-bubble driving method. These research results suggest that the shape and roughness of the particles, the size and movement speed of the bubbles, the concentration and type of surfactants, and the hydrophobicity of minerals would all have an important impact on the process of collision, adhesion and desorption between particle and bubble.

Key words: collision and adhesion; three-phase contact line; mineral particles; bubbles; high-speed photography

Received date: 2021-04-23; **Accepted date:** 2021-08-10

Corresponding author: JIANG Hao; Tel: +86-15367312226; E-mail: jianghao-1@126.com

(编辑 何学锋)