

浮选颗粒-气泡湍流脱附机理与试验技术方法研究进展

丁世豪^{1,2}, 史文庆^{1,2}, 陈宏基^{1,2}, 徐梦迪^{1,2}, 桂夏辉^{1,2}, 邢耀文^{1,2}

(1. 中国矿业大学 炼焦煤资源绿色开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 国家煤加工与净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: 浮选是细粒矿物及煤炭提质除杂的重要方法, 但其分选过程存在明显的尺寸效应, 其中湍流诱发颗粒-气泡脱附是导致浮选存在分选粒度上限的主要原因。为了提高浮选粒度上限, 强化粗粒浮选效果, 颗粒-气泡脱附研究一直是领域内的热点与难点。从颗粒-气泡准静态脱附理论、湍流脱附机制以及试验技术方法 3 个方面对颗粒-气泡脱附研究现状进行了系统综述。目前颗粒-气泡法向脱附机理已经形成广泛共识, 毛细力是维持颗粒-气泡矿化气絮体稳定的主要作用力, 颗粒-气泡脱附可分为气泡拉伸变形、气泡滑动收缩及气泡颈缩断裂 3 个阶段。同时, 颗粒-气泡湍流脱附机制认识已日趋系统, 颗粒的离心运动、气泡的变速运动以及气泡的振荡是引起颗粒-气泡脱附的主要机制。此外, 脱附力测试技术、高速动态摄像技术、粒子图像测速技术及数值模拟等试验方法的综合运用, 形成了一个涵盖“脱附力测试、界面行为捕捉、流场解析和过程仿真”的综合研究体系, 极大地推动了颗粒-气泡脱附研究向更微观、更深层次的方向发展, 为揭示浮选颗粒-气泡湍流脱附机理提供了充足可靠的试验保障。最后提出了未来颗粒-气泡脱附研究的发展方向, 包括不同分离角度下毛细力数学模型构建、湍流诱发颗粒-气泡脱附能量作用机制及多元湍流协同诱导多颗粒-气泡脱附机制研究。上述关键科学问题的解决不仅有助于完善脱附理论, 还将对提高浮选粒度上限和强化粗颗粒浮选具有重要指导意义。

关键词: 浮选; 颗粒-气泡; 湍流; 脱附; 试验技术方法

中图分类号: TD923 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)07-3639-19

Advances in theoretical and experimental methods of bubble-particle turbulent detachment in flotation

DING Shihao^{1,2}, SHI Wenqing^{1,2}, CHEN Hongji^{1,2}, XU Mengdi^{1,2}, GUI Xiahui^{1,2}, XING Yaowen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coking Coal Resources Green Exploitation, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Chinese National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Flotation is an effective method to improve the quality of fine minerals and coal, but the separation process exhibits significant size effects. The bubble-particle detachment caused by turbulence is the main reason for the upper limit of separation particle size in flotation. To increase the upper limit of flotation size and enhance the flotation effect of coarse particles, the study of bubble-particle detachment has always been a hot and difficult point in the field. The research status of bubble-particle detachment is reviewed from three aspects: quasi-static detachment theory, turbulent detachment mechanism and experimental methods. There is now a broad consensus on the normal detachment mechanism of

收稿日期: 2024-06-23 策划编辑: 钱小静 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0718

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (M-0230, 52274278, 52174265)

作者简介: 丁世豪 (1996—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士。E-mail: dsh2205@163.com

通讯作者: 邢耀文 (1989—), 男, 河北秦皇岛人, 教授, 博士。E-mail: cumtxyw@126.com

引用格式: 丁世豪, 史文庆, 陈宏基, 等. 浮选颗粒-气泡湍流脱附机理与试验技术方法研究进展[J]. 煤炭学报, 2025, 50(7): 3639-3657.

DING Shihao, SHI Wenqing, CHEN Hongji, et al. Advances in theoretical and experimental methods of bubble-particle turbulent detachment in flotation[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(7): 3639-3657.



移动阅读

bubble-particle aggregates, where capillary force is the main force maintaining the stability of the bubble-particle mineralized aggregates. Bubble-particle detachment can be divided into three stages: bubble stretching process, bubble sliding process, and bubble necking process. Moreover, understanding of the bubble-particle turbulence detachment mechanism has become more systematic, with centrifugal motion of particles, variable-speed motion of bubbles, and bubble oscillation being key factors leading to detachment. In addition, the comprehensive application of experimental methods such as detachment force testing technology, high-speed dynamic photography technology, particle image velocity measurement technology and numerical simulation has created a comprehensive research framework encompassing “detachment force testing, interface behavior capture, flow field analysis, and process simulation”. This comprehensive approach has greatly promoted the development of bubble-particle detachment research to a more microscopic and deeper direction, and provided sufficient and reliable experimental guarantee for revealing the bubble-particle turbulent detachment. Finally, the development direction of bubble-particle detachment research in the future is proposed, including the construction of capillary force mathematical model under different separation angles, the mechanism of bubble-particle detachment energy induced by turbulence, and the study of multi-bubble-particle detachment mechanisms induced by multi-scale turbulent vortices. Solving these key scientific problems will not only improve detachment theory but also provide important guidance for increasing the flotation size limit and enhancing coarse particle flotation performance.

Key words: flotation; bubble-particle; turbulence; detachment; experimental methods

0 引 言

浮选以表界面和溶液化学为基础,根据矿物表面疏水性差异实现有用矿物与脉石的选择性分离,被广泛应用于细粒金属、非金属矿物及煤炭的深度洁净提质^[1]。据统计,全世界每年有超过 20 亿 t 的矿石通过浮选回收,浮选已成为矿物加工领域最重要的物理分选方法^[2-3]。然而,同传统重力选矿相比,浮选存在明显的尺寸效应,粒度过粗或过细都会导致浮选效率显著降低。对于微细颗粒,由于其较低的质量和斯托克斯数,使得颗粒难以摆脱流线束缚与气泡发生碰撞,颗粒-气泡碰撞概率显著降低^[4]。而对于粗颗粒,浮选过程中复杂的湍流环境会降低气絮体稳定性,导致颗粒-气泡脱附概率显著升高^[5-6]。因此,在常规浮选过程中为确保浮选效果,通常要求矿物颗粒粒度介于 20~250 μm ^[7-9]。对于该粒度范围外的粗颗粒,需要消耗更多的能量将其磨细至合适粒度,并完成矿物解离才能进行浮选回收^[10-11]。

近年来,随着我国矿产资源需求的持续攀升和优质资源的日益匮乏,新开采矿石低品质化加剧,愈发呈现“贫、细、杂”特征。这一现状不仅增加了浮选前期破碎与磨矿作业能耗,还加剧了因细磨作业而产生的微细颗粒分选难题^[12-13]。为克服这一难题,粗颗粒浮选被寄予厚望^[14-16],其凭借降低碎磨能耗、简化工艺流程、提升系统处理能力的优势,可有效缓解矿石低品质化带来的困扰。然而,粗颗粒因其较强的惯性效应,更易受湍流影响而发生脱附,导致其浮选回收率显著降低。因此,提高浮选粒度上限,强化粗颗粒

浮选回收,已成为该领域内研究热点与难点^[17-19]。颗粒-气泡脱附过程的深入理解与精准调控,对于破解粗颗粒浮选难题,实现低品位矿石高效回收,具有至关重要的意义。笔者从颗粒-气泡准静态脱附理论、湍流脱附机制以及试验技术方法 3 个方面对颗粒-气泡脱附研究现状进行了系统综述,并在最后提出了未来颗粒-气泡脱附研究方向,旨在为丰富完善现代浮选脱附理论提供思路借鉴。

1 颗粒-气泡准静态脱附研究进展

1.1 颗粒-气泡脱附模型研究

自浮选初期开始,颗粒-气泡间的稳定性分析就是浮选领域内的研究重点,通常采用力平衡分析对颗粒-气泡间稳定性进行判断^[20-21]。颗粒-气泡气絮体在上浮过程中通常会受到多种力的作用,其中一些力倾向于使颗粒-气泡脱附,这种力统称为脱附力(F_{de})。相反,还有一些力倾向于维持颗粒-气泡稳定,这种力统称为黏附力(F_{at})。

1.1.1 颗粒与气液界面间力平衡模型

颗粒-气泡脱附模型最早起源于对颗粒在自由气液界面下的受力分析^[22-24],如图 1 所示。该模型最早由 NUTT^[22]于 1960 年建立,此后经 SCHULZE^[23]和 NGUYEN^[25]等完善。该模型假设颗粒为光滑球形,三相润湿周边沿 Z 轴对称分布。规定 Z 轴方向为正方向,与重力方向相反。因此,定义作用于颗粒上的黏附力为正值,而促使颗粒脱附的力记为负值。颗粒在脱附过程中受到 4 种力的作用。

第 1 种力为毛细力(F_{c})。毛细力由液体表面张力

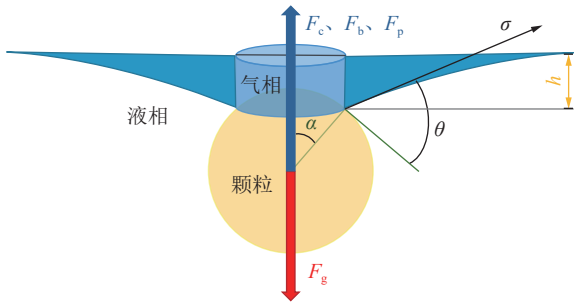


图 1 颗粒与气液界面间几何结构^[23]

Fig.1 Geometric structure between particle and the gas-liquid interface^[23]

产生, 沿着气-液界面的切线方向作用在颗粒表面的三相润湿周边上。由于颗粒是轴对称的几何形状, 毛细力在水平方向的分量为 0, 只存在垂直方向的分量, 其表达式为

$$F_c = 2\pi R_p \sigma \sin \alpha \sin (\theta - \alpha) \quad (1)$$

式中: σ 为液体表面张力, N/m; R_p 为颗粒半径, m; θ 为接触角, ($^\circ$); α 为颗粒中心角 (三相润湿周边两端与颗粒圆心连线夹角的一半), ($^\circ$)。可以看出, 毛细力与颗粒半径和接触角密切相关, 并且在 $\alpha = \theta/2$ 时取得最大值, 最大毛细力为

$$F_{c_{\max}} = \pi R_p \sigma (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

第 2 种力为浮力 (F_b)。考虑到颗粒有部分体积位于空气中, 所以在浮力计算时应采用浸没在液相中的颗粒体积, 其表达式为

$$F_b = \rho_l g \frac{\pi R_p^3}{3} (2 + 3 \cos \alpha - \cos^3 \alpha) \quad (3)$$

式中: ρ_l 为液体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\pi R_p^3 (2 + 3 \cos \alpha - \cos^3 \alpha) / 3$ 为颗粒浸没液体中的体积, m^3 。

第 3 种力为静压力 (F_p)。静压力由液体静压强产生, 作用在三相润湿周边围绕的平面上, 其表达式为

$$F_p = \rho_l g h \pi (R_p \sin \alpha)^2 \quad (4)$$

式中: h 为弯液面的弯曲深度 (即从自由气-液界面到三相润湿周边的垂直距离), m。

第 4 种力为重力 (F_g)。颗粒重力的表达式为

$$F_g = -\frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_s g \quad (5)$$

式中: ρ_s 为颗粒密度, kg/m^3 。

在静态条件下, 悬浮在气-液界面上的颗粒处于力学平衡状态, 其力平衡表达式为

$$F_c + F_b + F_p + F_g = 0 \quad (6)$$

1.1.2 颗粒与气泡间力平衡模型

NGUYEN^[25]考虑了气泡尺寸对矿化气絮体稳定性的影响, 进而完善了颗粒-气泡力平衡模型。准静态下颗粒-气泡间的几何结构如图 2 所示。该模型中颗粒主要受毛细力、压力、浮力和重力 4 种力的作用, 其中毛细力、浮力和重力的表达式与前文相同。不同之处在于, 由于气泡内部和外部存在压力差, 颗粒压力项增加了额外的拉普拉斯压力项, 其表达式为

$$F_{PL} = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha \frac{2\sigma}{R_b} \quad (7)$$

式中: R_b 为气泡直径, m。

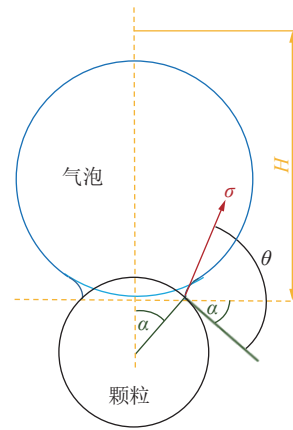


图 2 准静态下颗粒-气泡几何结构^[25]

Fig.2 Quasi-static geometric structure of particle and bubble interaction^[25]

与静压力的作用不同, 拉普拉斯压力促使颗粒脱附。因此, 静压力与拉普拉斯压力的相对大小决定了总压力大小, 进而决定了总压力作用效果^[26]。颗粒所受总压力的表达式为

$$F_p = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{2\sigma}{R_b} - \rho_l g H \right) \quad (8)$$

式中: H 为接触线距离气泡顶端的高度, m。NGUYEN^[25]通过数学推导后给出了 H 的计算式:

$$H = R_b + R_p \sqrt{1 - \left(\frac{R_p}{R_b} \right)^2 \sin^2 \alpha} \quad (9)$$

学者研究发现拉普拉斯压力远大于静压力, 导致总压力为负, 不利于颗粒-气泡黏附^[27]。在准静态平衡状态下, 作用在颗粒上的合力为 0, 其力平衡表达式为

$$F_c + F_b + F_p = F_g \quad (10)$$

将各力的表达式代入式 (10), 并将浸入液相的颗粒体积改写为总体积减去浸入气相的颗粒体积, 并进行调整后可得:

$$2\pi R_p \sigma \sin \alpha \sin (\theta - \alpha) - \frac{\pi R_p^3 \rho_1^3 g}{3} (2 - 3 \cos \alpha + \cos^3 \alpha) + \left(\rho_1 g H - \frac{2\sigma}{b} \right) \pi R_p^2 \sin^2 \alpha = \frac{4\pi R_p^3 g (\rho_s - \rho_l)}{3} \quad (11)$$

式(11)左侧的力为黏附力(F_{at}),用于维持颗粒-气泡矿化气絮体稳定,这些力是三相接触线位置的函数,即对于具有特定接触角的颗粒,黏附力会随着圆心角 α 的变化而变化;式(11)右侧为脱附力 F_{de} ,这些力的大小与三相接触线位置无关。在实际浮选过程中,除颗粒重力外,脱附力还包括其他分量(F_{ex}),如湍流产生的流体力。在平衡状态下作用在颗粒上的力等于0,即:

$$F_c + F_b + F_p = F_g + F_{ex} \quad (12)$$

可以看出,颗粒-气泡发生脱附时的临界脱附力由最大黏附力决定,即当临界脱附力超过颗粒-气泡间最大黏附力时,颗粒-气泡发生脱附。NGUYEN^[25]研究了球形颗粒黏附力 F_{at} 随中心角 α 变化规律,发现在不同颗粒尺寸下,黏附力均随中心角的增大呈现先增大后减小的趋势,黏附力存在最大值,如图3所示。

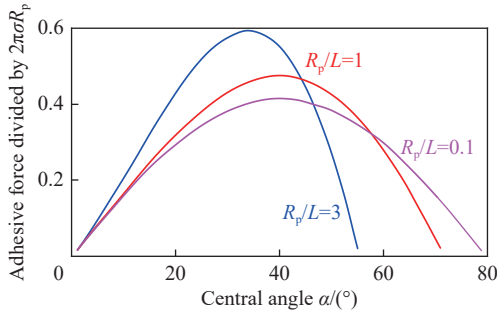


图3 在 $\theta=80^\circ$ 时黏附力与中心角 α 之间的关系^[25]

Fig.3 Relationship between attachment force and central angle α at $\theta=80^\circ$ ^[25]

为求出 F_{at} 随 α 变化时的最大值,需计算 F_{at} 对 α 的导数:

$$\frac{dF_{at}}{d\alpha} = \sin (\theta - 2\alpha_m) + \left(\frac{R_b R_p}{L^2} - \frac{R_p}{R_b} \right) \sin 2\alpha_m + O\left\{ \left(R_p / L \right)^2 \right\} = 0 \quad (13)$$

$$L = \sqrt{\sigma / (\rho_l g)} \quad (14)$$

式中: α_m 为黏附力取最大值时颗粒的中心角度, $(^\circ)$; L 为毛细长度, m ; $O\left\{ \left(R_p / L \right)^2 \right\}$ 为关于 $\left(R_p / L \right)^2$ 的高阶无穷小量。求解式(13)可得:

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\sin \theta}{\sqrt{1 + 2A \cos \theta + A^2}} \right) \quad (15)$$

$$A = \frac{R_p}{R_b} - \frac{R_b R_p}{L^2} \quad (16)$$

式中: A 为中间变量。通过将式(15)代入式(11)可以计算颗粒-气泡间最大黏附力 T 。NGUYEN^[25]计算发现当 $R_p/L \ll 1$ 时,最大黏附力计算公式可以化简为

$$T = \pi R_p \sigma \left(\sqrt{1 + 2A \cos \theta + A^2} - \cos \theta - A \right) + O\left\{ \left(R_p / L \right)^3 \right\} \quad (17)$$

对于实际浮选过程,通常 $R_p/R_b \leq 0.1$ 且 $R_b/L \leq 1$,将这些条件代入式(16)可得 $A \leq 0.1$ 。NGUYEN^[25]通过数学推导进一步发现,式(15)和式(16)中, A 可近似取为0。因此,颗粒-气泡间最大黏附力 T 计算表达式可进一步化简为

$$T = \pi R_p \sigma (1 - \cos \theta) \quad (18)$$

由式(18)和式(2)可知,颗粒-气泡间最大黏附力与最大毛细力公式相一致,表明毛细力是主要的黏附力。因此,当外力大于颗粒-气泡间最大毛细力时,颗粒将从气泡表面脱附。

1.2 颗粒-气泡脱附试验研究

除颗粒-气泡脱附理论研究外,研究人员还开展了对颗粒-气泡脱附力的试验测量,旨在揭示各种因素对颗粒-气泡稳定性的影响。试验操作中,一般将颗粒置于金属悬臂末端,气泡固定于疏水基板表面,通过驱动颗粒或气泡运动实现彼此分离,同时借助力学传感器记录脱附过程力学信息,从而实现了对颗粒-气泡临界脱附力的精准量化。NICKLAS等^[28]利用该方法研究了颗粒-气泡尺寸效应对临界脱附力的影响,如图4所示。研究发现临界脱附力随颗粒尺寸的增加而增加,而气泡尺寸变化对脱附力大小影响不大。DING等^[29]的研究也表明,虽然脱附力随颗粒尺寸增加而增加,但颗粒尺寸增加会导致颗粒的稳定性下降。具体而言,颗粒尺寸的增加通过延长气絮体三相润湿周边的长度,增大了颗粒-气泡间的临界脱附力;然而,颗粒尺寸的增加也导致颗粒的表观重力增大和惯性作用增强,使颗粒更易受流体扰动而脱附。SPYRIDOPOULOS等^[30]考察了颗粒表面疏水性对脱附力的影响,发现临界脱附力与颗粒表面接触角之间存在正相关关系。HAN等^[31]运用该方法对不同疏水性基板与气泡间的最大黏附力进行了系统测试,结果表明基板与气泡间黏附力随颗粒疏水性的增加而增加。此外,通过最大黏附力模型(式(18))所计算的临界脱附力数值与试验测量数据相吻合,验证了模型的有效性和可靠性。

在对颗粒-气泡脱附力进行精确测量的同时,研究人员还致力于揭示脱附过程中三相润湿周边和接触角等动力学参数的变化规律^[32]。目前,对于颗粒-气泡法向脱附行为已达成广泛共识。SCHIMANN^[33]

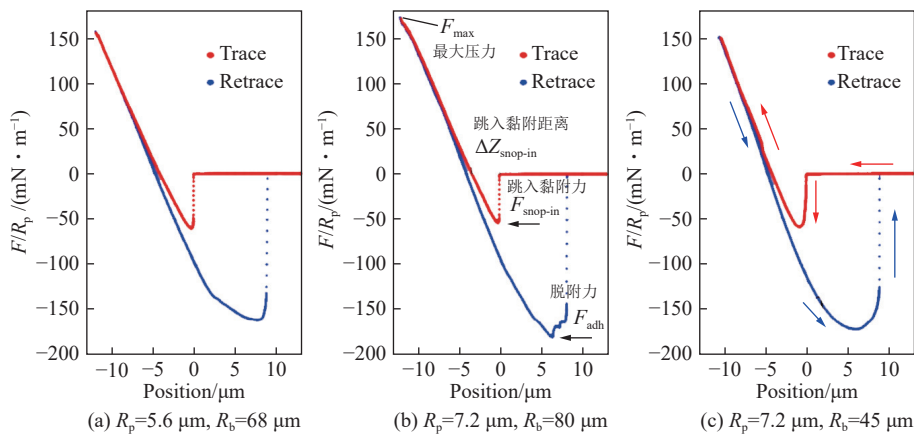


图 4 颗粒-气泡尺寸效应对颗粒-气泡脱附力的影响^[28]

Fig.4 Effect of particle-bubble size on detachment force^[28]

根据试验测试结果对颗粒-气泡脱附动力学演化规律进行了系统描述, 将颗粒-气泡的脱附过程划分为气泡拉伸变形、气泡滑动收缩和气泡颈缩断裂 3 个阶段。在气泡拉伸变形阶段, 接触角持续增大, 三相润湿周边长度保持固定; 当接触角等于前进接触角时, 进入气泡滑动收缩阶段, 此时三相润湿周边在颗粒表面收

缩; 脱附过程的最后阶段为气泡颈缩断裂阶段, 随着颗粒与气泡分离距离的增加, 气泡颈部逐渐变窄直至完全脱附。ZHANG 等^[34-35]通过试验验证了 SCHIMANN 提出的脱附规律, 如图 5 所示, 并指出接触角增加至前进接触角是三相润湿周边开始收缩的必要条件。

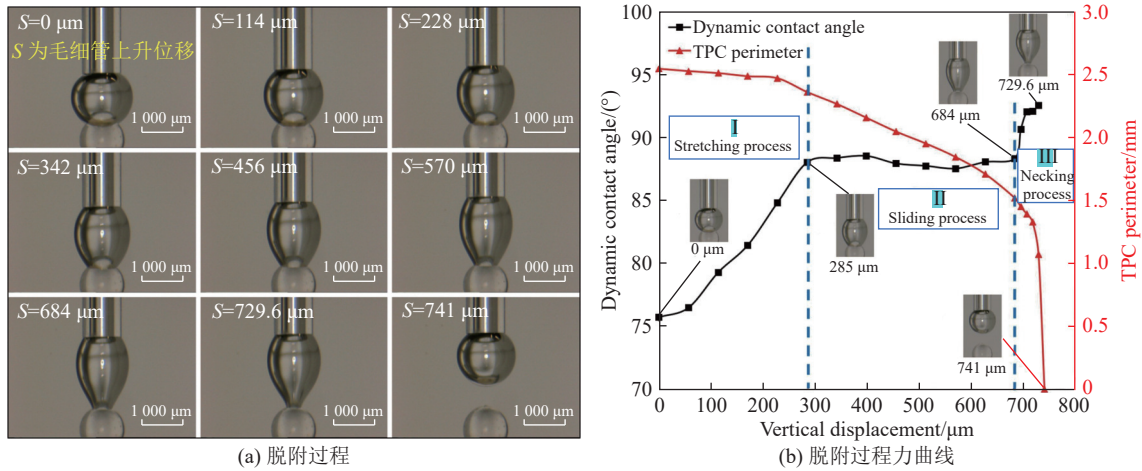


图 5 颗粒-气泡脱附动力学规律^[35]

Fig.5 Kinetics of bubble-particle detachment^[35]

最近, NGUYEN 等^[36]借助高速相机对平板-气泡/颗粒-气泡脱附过程进行了深入研究, 发现气泡脱附并非仅遵循三相润湿周边滑动收缩至 0 的模式, 而是表现为先收缩后断裂的滑动-断裂模式, 并最终在颗粒表面留下微小气泡, 如图 6a 所示。在此基础上, 尹青临等^[37]进一步分析了颗粒-气泡脱附前后的受力情况, 指出在三相润湿周边滑动收缩阶段, 为了保持前进接触角固定, 气泡会在颗粒表面形成反向毛细颈部, 如图 6b 所示。随着三相润湿周边的收缩, 反向毛细颈部处的曲率半径 r_c 迅速减小, 最终在拉普拉斯压力 F_{PL} 作用下发生断裂脱附, 并在颗粒表面留下微小气泡。此外, 由于三相润湿周边的滑移速度随颗粒疏水

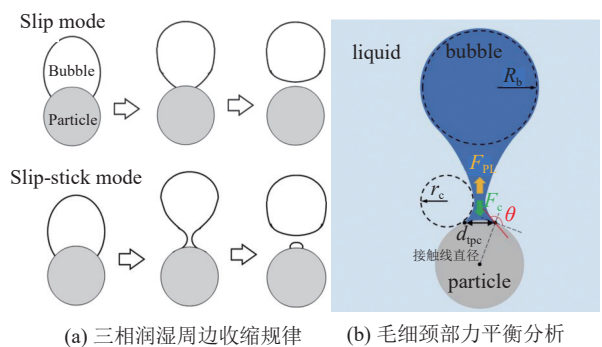


图 6 颗粒-气泡脱附过程三相润湿周边收缩示意^[36-37]

Fig.6 Schematic diagram of contraction of three-phase contact line during bubble-particle detachment process^[36-37]

性的提高而减小,使得反向毛细颈部处曲率的增加速率也随之增大。这意味着随着颗粒疏水性的增强,最终留在颗粒表面的微气泡大小也会相应增加。

在实际浮选过程中,颗粒-气泡脱附并不局限于法向方向,而是可能沿任意角度发生。NGUYEN 等^[38]对颗粒-气泡切向脱附毛细力进行了理论推导,发现与法向毛细力公式相比少了 $\pi/\sin(\Delta\theta/2)$,这意味着矿化气泡更容易在切向上发生脱附。GUO 等^[39]在此基础上研究了不同分离角度下疏水性对毛细力的影响,发现无论颗粒的疏水性如何变化,颗粒与气泡间最大

毛细力都会随着分离角度的增大而减小,如图 7 所示。DING 等^[40]借助高速摄像技术与数值模拟技术对比了矿化气泡在法向与切向脱附的行为,发现与法向脱附过程中矿化气泡两侧接触角同步增加的情况不同,切向脱附过程中接触角的变化表现为一侧增加而另一侧减少。由此可见,尽管已有学者开始关注分离角度对矿化气泡脱附动力学和毛细力模型的影响,但相关研究尚处在初步探索阶段,不同脱附方向下的动态接触角、三相润湿周边及毛细力大小演化规律及数学模型仍不明晰。

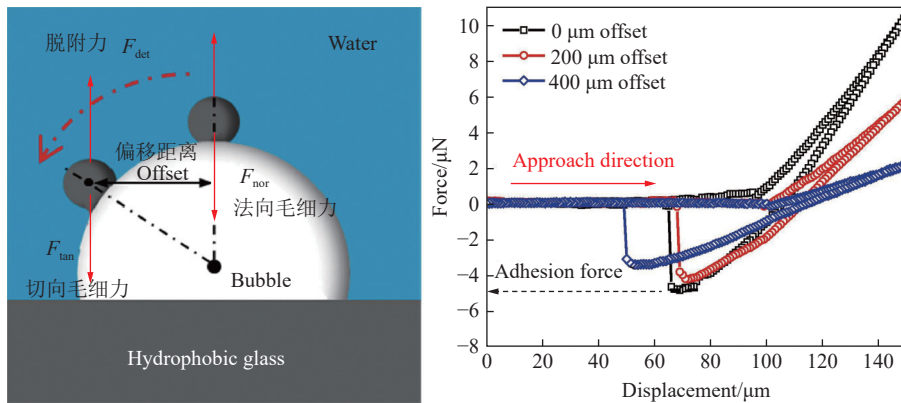


图 7 不同分离角度下脱附力测试^[39]

Fig.7 Detachment force tests at different separation angles^[39]

2 颗粒-气泡湍流脱附研究进展

近年来,研究人员致力于深化颗粒-气泡湍流脱附研究,希望通过调控流场动力学环境来提高粗颗粒浮选的回收率^[41-43]。早期,KLASSEN 等^[44]通过对浮选过程颗粒-气泡矿化气絮体运动行为分析归纳出引发颗粒脱附的 6 种机制,包括气泡上浮、颗粒滑动、流体作用、气泡碰撞、颗粒碰撞以及气泡路径改变,如图 8 所示。同时,SPEDDEN 等^[45]发现气泡兼并引发的振荡也是导致颗粒-气泡脱附的重要方式。最近,WANG 等^[46]和 CHIPILI 等^[47]分别对矿浆相和矿浆泡沫界面的颗粒-气泡湍流脱附机制进行了详细的综述。

目前湍流脱附理论研究主要以 SCHULZE^[48]提出的湍流离心脱附机制为主。该理论认为颗粒-气泡矿化气絮体被困在湍流涡中心,颗粒则在湍流涡的带动下在气泡表面做高速离心运动。当颗粒所承受的离心力超过其与气泡间的毛细力时,颗粒便会从气泡表面脱附。通常情况下,密度大于液相的颗粒倾向于从涡旋中心向外迁移,而密度小于液相的气泡则更可能聚集在涡旋中心。在 SCHULZE 的理论中,邦德数被用作判断脱附发生的准则,即当邦德数大于 1 时,颗粒-气泡发生脱附。GOEL 等^[49]对邦德数进行了改进,

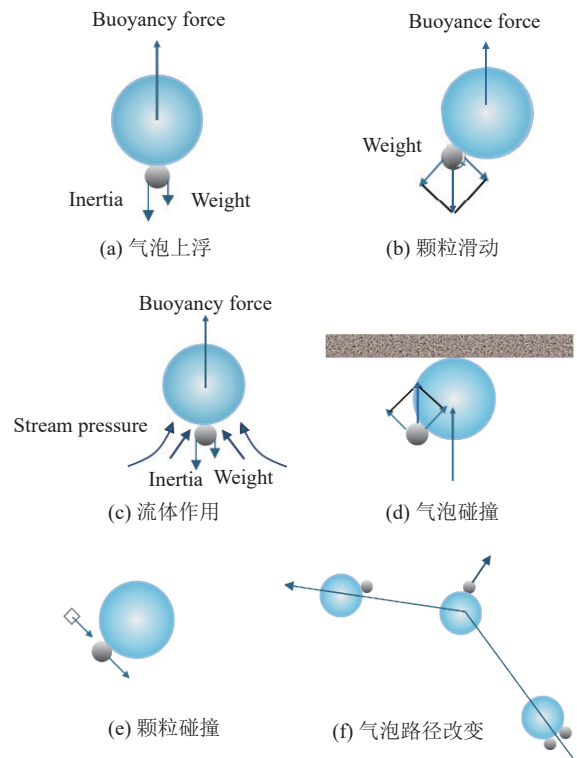


图 8 颗粒-气泡脱附机制示意^[44]

Fig.8 Schematic diagram of bubble-particle detachment mechanism^[44]

将浮力引入邦德数计算, 并认为矿化气絮体在湍流涡中的旋转半径应为气泡半径而非气泡直径。利用图 9a 所示的试验系统研究了改进后的邦德数与脱附概率的关系。结果显示, 改进后的邦德数在预测不同粒度颗粒的脱附概率时仍与实际值有较大偏差。当邦德数等于 1 时, 脱附概率接近 50%; 当邦德数等于 2 时, 脱附概率接近 90%, 如图 9b 所示。

WANG 等^[50]试验发现邦德数小于 1 时颗粒-气

泡也会发生脱附, 指出这可能与颗粒-气泡切向脱附有关。DING 等^[29]近期通过试验证实了这一观点, 如图 10 所示, 不同尺寸的颗粒在振荡气泡表面表现出不同的脱附行为和脱附振幅分布: 粗颗粒与气泡发生法向脱附, 脱附振幅分布集中; 而细颗粒则倾向于在气泡表面滑动并沿近似切线方向脱离气泡, 脱附振幅分布分散。颗粒的切向脱附正是导致其稳定性远大于理论值的重要原因。

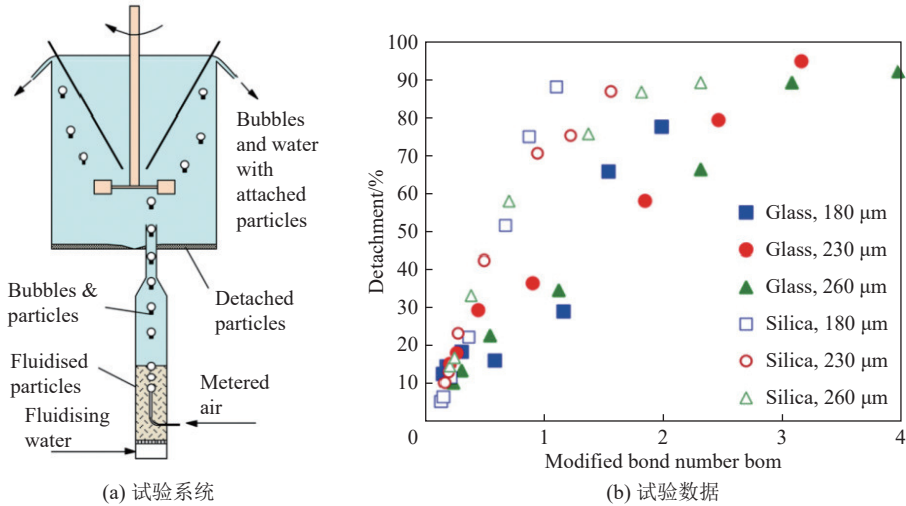


图 9 不同邦德数下颗粒-气泡脱附概率^[49]

Fig.9 Detachment probability of particle-bubble interactions under different Bond numbers^[49]

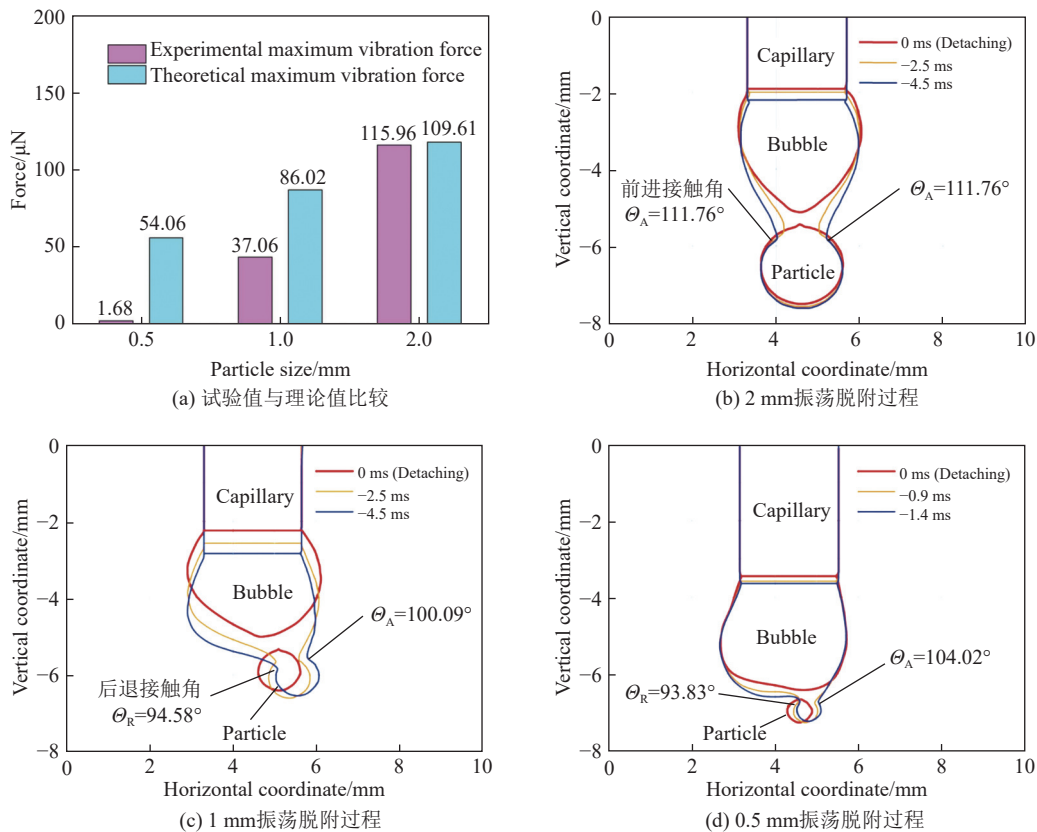


图 10 脱附方式对颗粒-气泡临界脱附力的影响^[29]

Fig.10 Effect of detachment methods on critical detachment force of particle-bubble interaction^[29]

与此同时, 研究学者设计了多种试验装置来重构浮选过程中的湍流环境, 并利用高速动态摄像技术研究矿化气泡的脱附行为。WANG 等^[50]设计了一种能够产生受限旋转湍流涡的试验装置对 SCHULZE 提出的离心脱附机制进行了试验验证, 如图 11a 所示。试验结果显示, 在旋转湍流涡的作用下, 颗粒在气泡表面进行高速离心运动, 其脱附时平均离心加速度约为重力加速度的 23 倍。WANG 等^[51]还发现颗粒离心脱附并非唯一的脱附机制, 矿化气泡的不规则变速运动以及气泡振荡也是引发颗粒脱附的潜在机制。其中, 气泡振荡的能量主要来源于气泡间的兼或湍流扰动作用。在此基础上, HOQUE 等^[52]利用 Fluent 数值模拟研究了受限涡旋场内湍流耗散率分布, 量化了颗粒脱附所需的临界流场能量。SHI 等^[53]发现矿化气泡的脱附行为受流场结构显著影响, 其中剪切场导致气泡加速或振荡脱附, 而涡旋场则诱发颗粒离心脱附。OMELKA 等^[54-55]通过脉冲阻尼器营造了与浮选机内相同湍流强度的流场环境, 避免了试验过程中叶轮对气絮体运动的影响, 如图 11b 所示。结果发现导致颗粒脱附的主要机制不是离心力, 而是由于流场剪切引起的气泡振荡。ZHANG 等^[56]用振动格栅

产生各向同性湍流场, 并研究其对颗粒-气泡脱附的影响, 如图 11c 所示, 发现颗粒-气泡的 3 种脱附方式: 剪切脱附、拉伸脱附和涡选脱附。由此可见, 颗粒-气泡除了受湍流拉应力沿径向脱附以外, 也可以受湍流切应力或拉应力-切应力协同作用沿任意方向脱附。

3 颗粒-气泡脱附试验技术方法

颗粒-气泡脱附作为浮选领域的重要研究内容, 其动力学机制的深入探索离不开各类先进试验技术和数值模拟方法的支持。目前, 脱附力测试技术、高速动态摄像技术、粒子图像测速技术及数值模拟等试验方法的综合运用, 形成了一个涵盖“脱附力测试、界面行为捕捉、流场解析和过程仿真”的综合研究体系, 极大地推动了颗粒-气泡脱附研究向更微观、更深层次的方向发展, 为揭示浮选颗粒-气泡湍流脱附机理提供了充足可靠的试验保障。下面对颗粒-气泡脱附试验技术方法展开介绍, 并对相关脱附试验进展进行综述。

3.1 脱附力测试技术

精确测量颗粒-气泡间脱附力是评估气絮体稳定性的关键。为此, 张志军等^[57]采用各种技术手段对颗

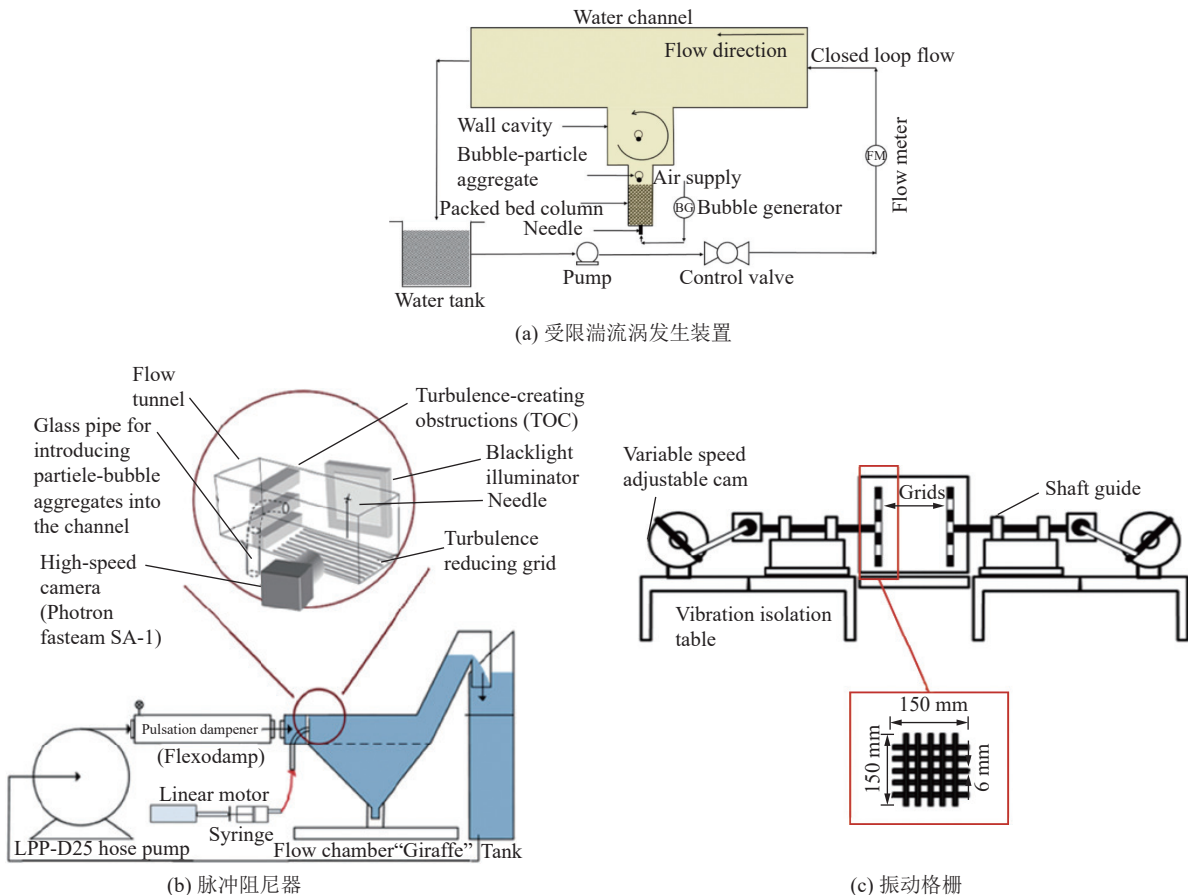


图 11 湍流激发装置示意^[52, 55-56]

Fig.11 Schematic diagram of turbulence excitation device^[52, 55-56]

粒-气泡脱附力进行试验测试,旨在揭示不同变量影响下的颗粒-气泡脱附规律,并以此探寻粗颗粒浮选过程强化方法。根据已有研究成果,可将脱附力测量方法分为间接法和直接法。

3.1.1 间接法

由于早期测量仪器的限制,研究人员大多采用间接法来表征气絮体稳定性,即通过测量引起颗粒-气泡脱附的临界速度或加速度来计算脱附力,常见的间接法包括摆锤法^[58]、离心法^[22]以及气泡振荡法^[59],如图12所示。

摆锤法最早由 MITROFANOV 等^[58]提出,试验装置如图12a所示。气絮体被置于一个支架上底端,摆锤对支架的冲击使颗粒-气泡气絮体产生强烈振动。通过调整摆锤初始释放位置来精确控制摆锤的冲击速度,并通过测定引起颗粒-气泡脱附的临界摆锤冲击速度,来评估颗粒-气泡气絮体的稳定性。离心法由 NUTT^[22]提出,该方法通过增加试管转速使黏附在气液界面上的颗粒发生脱附,如图12b所示。SCHULZE 等^[48]利用离心法来量化了颗粒在气液界面的黏附强度,并推算出颗粒的最大可浮尺寸。随后,CHENG 等^[59]发现气泡振荡法比离心法更贴近真实的浮选过程,且测得的脱附力大小与理论预测值相一致,如图12c所示。研究认为颗粒-气泡矿化气絮体在外力作用下的振动可以看作是一个弹簧-质量系统,在特定振动频率条件下,可通过测量颗粒发生脱附时所需的临界脱附振幅来计算临界脱附力。

XU 等^[60]运用气泡振动技术系统研究了颗粒接触角、形状、介质黏度以及振动频率对颗粒-气泡脱附的影响。结果表明气絮体临界脱附力随接触角和介

质黏度的增加而增大。在低振动频率下,经典力平衡模型可以较好地预测脱附力,但在高振动频率或高黏度介质中,经典力平衡模型则无法准确预测脱附力。这是因为在高振动频率或高黏度介质中三相润湿周边移动速率减缓,其位置在振动过程中几乎保持不变。AWATEY 等^[61]、FOSU 等^[62]使用相同方法测量不同粒度颗粒的临界接触角,发现随着粒度增加,颗粒上浮所需的临界接触角增大。对于相同粒度的颗粒,其表面疏水性越好、接触角越大,所需的脱附力也越大。WANG 等^[63]利用该方法发现油性气泡上的油性涂层膜显著提高了油性气泡对湍流扰动的抵抗力。ZHANG 等^[64]利用电磁激振器取代扬声器研究了不同振动模式对气絮体稳定性的影响,如图13所示。结果表明颗粒-气泡气絮体在正弦波振动下最稳定,其次为三角波,最后为方波。这是因为在相同振幅和频率下,方波振动产生的加速度最大,故只需较小振幅即可使颗粒与气泡脱附。

3.1.2 直接法

德国马普高分子研究所 BUTT^[65]和 DUCKER 等^[66]借助 AFM 胶体探针技术首次测量了颗粒-气泡间相互作用力,如图14a所示。在试验中,他们将颗粒固定在胶体探针的悬臂上,并在颗粒下方生成气泡,通过调整悬臂的运动以精确控制颗粒与气泡间的相对距离,从而直接测量两者间的相互作用力。PITOIS 等^[67]利用 AFM 研究了接触角滞后对脱附力和脱附功的影响,根据力曲线测量结果发现,在脱附过程忽略接触角滞后会导致理论计算与试验测量结果产生明显偏差。NGUYEN 等^[68]通过对颗粒-气泡间力曲线进行分析,计算出单个胶体颗粒的前进和后退接触角。

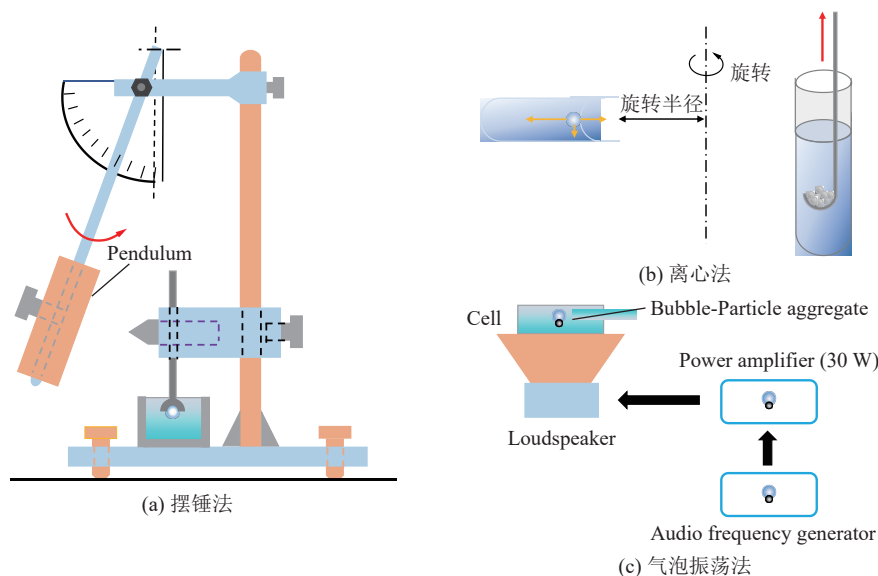
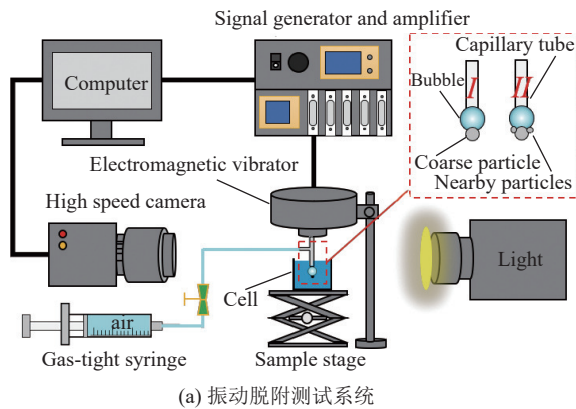
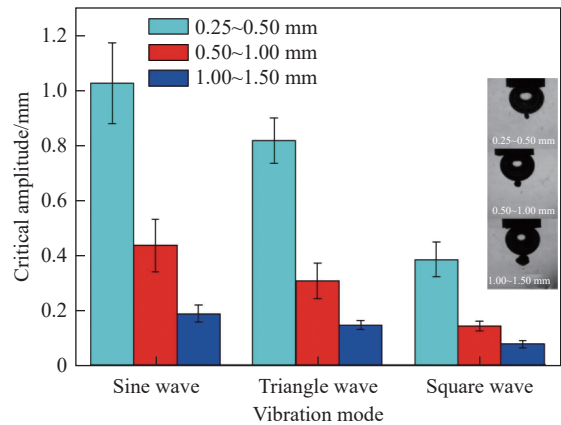


图12 间接法测量颗粒-气泡脱附力装置示意^[22, 58-59]

Fig.12 Schematic diagram of apparatus for indirect measurement of particle-bubble detachment force^[22, 58-59]



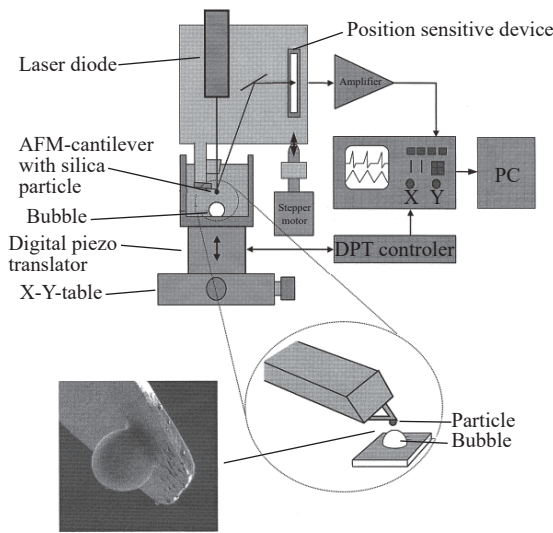
(a) 振动脱附测试系统



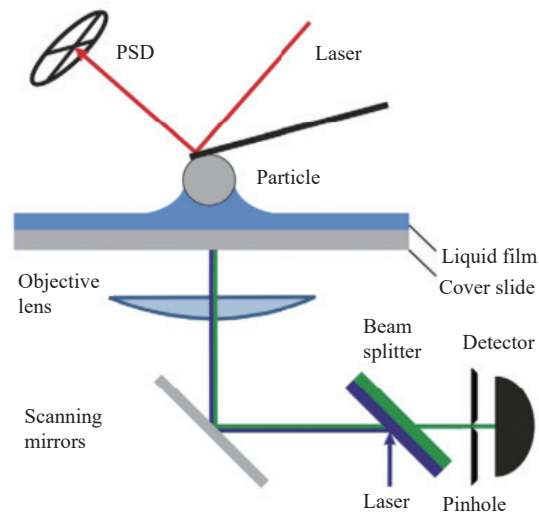
(b) 振动波形对颗粒-气泡脱附的影响

图 13 颗粒-气泡振荡脱附研究^[64]

Fig. 13 Study on bubble-particle vibration detachment^[64]



(a) AFM胶体探针技术



(b) AFM与激光共聚焦显微镜联用技术

图 14 AFM 测量颗粒-气泡间相互作用力装置示意^[69-70]

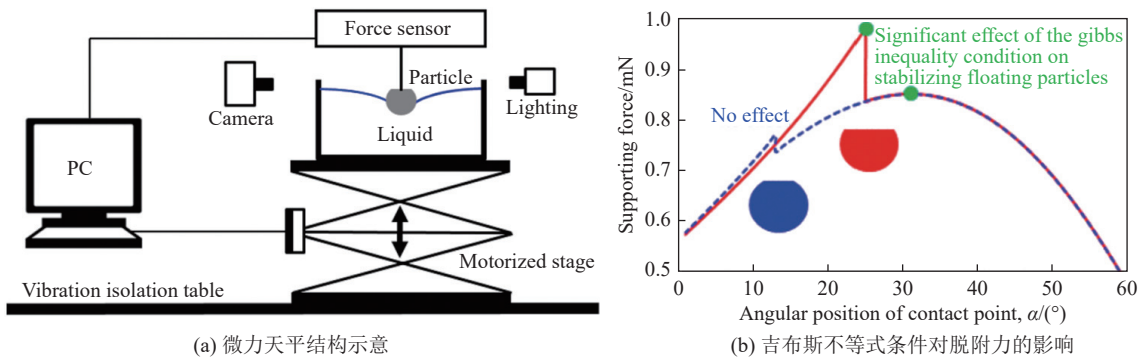
Fig. 14 Schematic diagram of AFM setup for measuring interaction force between bubble and particle ^[69-70]

由于 AFM 设备的局限性限制了其对三相润湿周边动态监测及接触角实时测量, 只能通过获取的力曲线间接推测液桥形态变化。为此, SCHELLENBERGER 等^[69]创新性地 将激光共聚焦显微镜与 AFM 联用, 实现了对颗粒-气泡脱附过程气液界面形状和毛细力的同步测试, 如图 14b 所示。激光共聚焦显微镜凭借其薄层光学切片功能, 能够对气液界面进行三维结构重建。试验发现, 在颗粒脱附过程中存在明显的接触角滞后, 当毛细力达到最大值后, 三相润湿周边开始收缩, 毛细力随之减小。这一技术的应用极大地提升了对颗粒-气泡间相互作用及脱附过程细节的观察与理解。

AFM 技术的另一个局限在于测量范围较小^[71-72]。通常情况下, AFM 仅能精确测量纳牛级别的力, 这对于量化实际浮选过程中颗粒-气泡间相互作用力存在

困难。考虑到浮选中常见的颗粒尺寸介于几十至几百微米, 测定这类颗粒在脱附过程中的脱附力无疑是一项极具挑战的任务。鉴于此, 研究者们着手开发了一系列新型仪器, 诸如微力天平^[73]、薄液膜排液分析仪^[27]以及浮选微纳力学测试仪^[74]等, 旨在克服 AFM 在测量粗颗粒与气泡间相互作用力的局限性, 以期更准确地量化和理解浮选过程中颗粒-气泡的脱附机制。

目前, 微力天平法已被广泛用于测量微牛级范围内颗粒-气泡间相互作用力^[24]。SPYRIDOPOULOS 等^[30]使用该装置研究了颗粒疏水性和表面活性剂对颗粒-气泡间脱附力的影响, 发现临界脱附力与颗粒接触角呈正相关关系。FENG 等^[75]以不同的角度截断球形颗粒, 并使用微力天平来测量将截断的球体从气液界面推入水中的力, 如图 15 所示。研究结果表



(a) 微力天平结构示意图

(b) 吉布斯不等式条件对脱附力的影响

图 15 微力天平测量颗粒-气泡间相互作用力^[75]

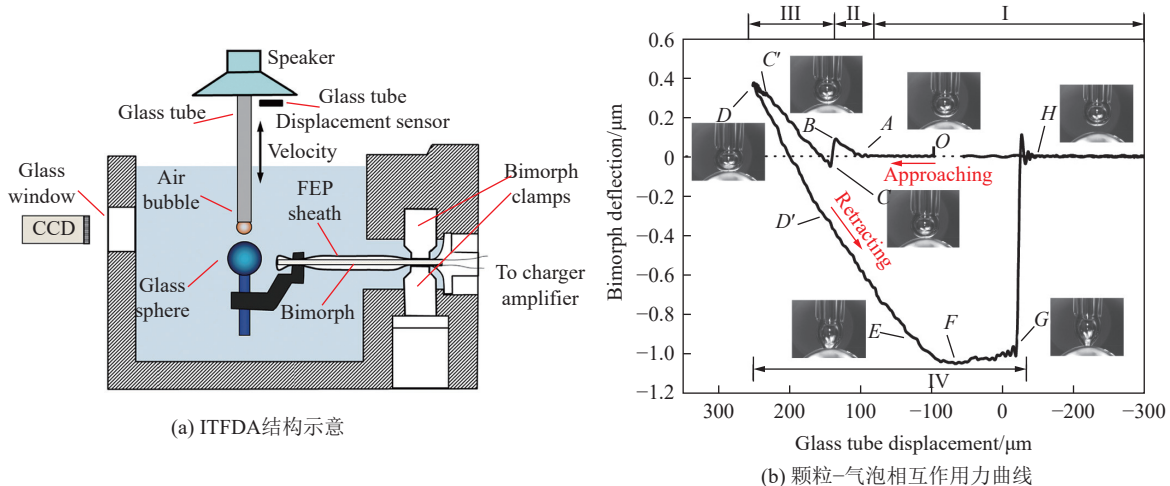
Fig.15 Measurement of the interaction force between particle and bubble using a microbalance^[75]

明,当截断角小于临界值时,吉布斯不等式条件不影响颗粒-气泡脱附力;而当截断角大于临界值时,吉布斯不等式条件决定了颗粒-气液界面的黏附强度,此时颗粒经典力平衡理论不再适用。MA 等^[76]利用微力天平研究了颗粒在穿越气-液界面时的垂直黏附力和弯液面形状的变化,发现相邻颗粒的存在限制了中心颗粒周围的气液界面,即阻碍了颗粒表面三相润湿周边的移动,从而降低其垂直黏附力。

WANG 等^[27]利用压力双晶片力学传感器技术^[77]研发了一种集成薄膜液排液装置 (ITFDA),如图 16a 所示,该装置能够精确捕捉并分析颗粒、液滴及气泡在相互作用过程中的力学行为。在试验过程中,ITFDA 利用高频扬声器的隔膜作为驱动马达,控制附着在毛细管上的气泡或油滴进行上下运动,运动速度最高可达 50 mm/s,从而可以在多种复杂的流体动力学条件下进行力学参数测量。WANG 等^[78]利用 ITFDA 对颗粒-气泡脱附过程相互作用力进行测试,发现颗粒与气泡间相互作用力呈现先增大后减小的趋势,如图 16b 所示。同时发现,在气泡脱附的初始阶段,三相润湿周边会被“钉扎”在固体颗粒的表面,即三相

润湿周边长度保持不变,此时接触角呈现持续增大的趋势,当增加到等于前进接触角时,三相润湿周边才会在颗粒表面滑移收缩,最终完成整个脱附过程。该研究结果与 SCHIMANN 的发现相一致。SHAHAL-AMI 等^[79]利用 ITFDA 对颗粒-气泡黏附和脱附过程中的相互作用力和气泡形貌变化展开了深入研究。研究结果表明表面张力、流体黏度以及气泡接近速度在决定气泡轮廓变化和相互作用力方面起到了决定性作用。

ZHANG 等^[74]基于梳齿电容传感器技术开发了一款具有微牛和纳牛级别分辨率的微纳力学测试仪器 (MMTM),这款仪器主要用于精确测量微米颗粒与气泡间的相互作用力,如图 17 所示。DING 等^[80]利用 MMTM 测量了有无纳米气泡下颗粒-气泡间的脱附力,发现纳米气泡的存在增加了颗粒-气泡间脱附力。GUO 等^[39]则运用 MMTM 对不同疏水性颗粒与气泡表面不同位置的垂直黏附力进行测试。研究发现,无论颗粒疏水性如何,垂直黏附力都会随着颗粒与气泡表面偏移距离的增大而减小。同时,在试验中观察到,在施加垂直力时,气泡表现出了类似胡克弹



(a) ITFDA结构示意图

(b) 颗粒-气泡相互作用力曲线

图 16 ITFDA 测量颗粒-气泡间相互作用力^[27, 78]

Fig.16 Measurement of interaction force between particle and bubble using ITFDA^[27, 78]

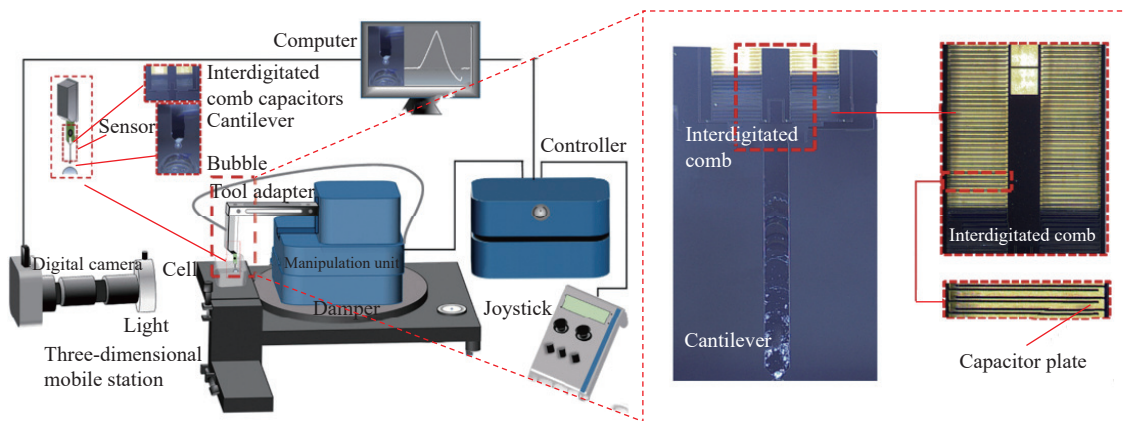


图 17 微纳力学测试仪结构示意图^[74]

Fig.17 Schematic diagram of micro-nanomechanical testing apparatus^[74]

性体的特性,即在力-位移曲线中始终存在一个线性区域。此外,他们还发现气泡表面不同位置的胡克弹性系数随颗粒与气泡表面偏移距离的增大而逐步减小,这一趋势与垂直黏附力随距离减小的现象相吻合。最近,SUN 等^[81]利用电阻桥式力传感器开发了一种用于测量气泡-固体表面间相互作用力的新型试验系统,该系统力学分辨率约为 1.5 μN,如图 18 所示。在试验过程中,通过收集“时间-位移-力”信号并捕获实时图像来详细测量气泡-固体表面间黏附与脱附动力学。

3.2 高速动态摄像技术

目前,高速动态摄像机已成为研究颗粒-气泡脱附行为的有力工具,实现了对脱附过程中接触角和三相润湿周边变化的精确捕捉,为揭示颗粒-气泡在不同条件下的动态脱附规律提供了丰富数据支持。

FENG 等^[82]利用高速相机测量颗粒的静态接触角,发现由于接触角滞后的存在,测得的静态接触角大小保持正态分布。WANG 等^[83]研究了颗粒-气泡脱附过程中的动态接触角,发现接触角沿三相接触线呈不对称分布。当左侧接触角达到前进接触角时,气絮体左侧三相接触点收缩。相反,当气絮体右侧的三相接触点由于其接触角没有达到后退接触角而固定在颗粒表面。ZHANG 等^[35]和丁世豪等^[84]研究了颗粒-气泡脱附过程接触角和三相润湿周边的动态变化规律。研究发现气泡拉伸阶段,三相润湿周边固定在颗粒表面,接触角由平衡接触角增大到前进接触角;气泡滑动阶段,接触角保持不变,三相润湿周边滑动减小。

与此同时,研究人员也借助高速相机研究各种因素对颗粒-气泡动态脱附行为的影响。WANG 等^[85]发现颗粒-气泡碰撞的脱附过程对颗粒疏水性变化高

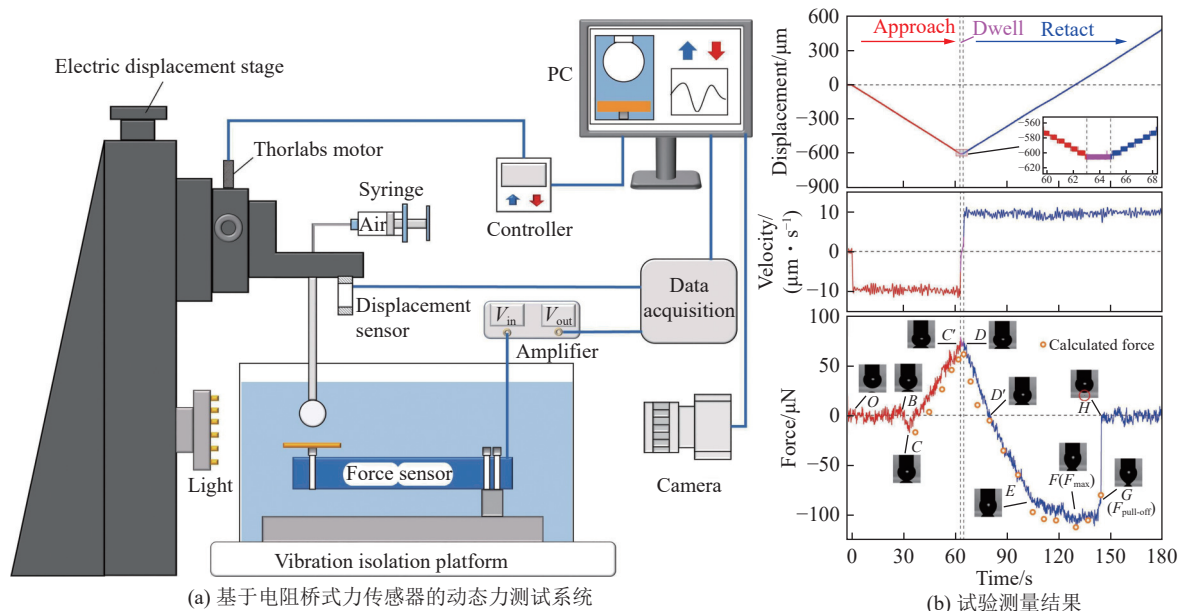


图 18 采用电阻桥式力传感器测量颗粒-气泡间相互作用力^[81]

Fig.18 Measurement of the interaction force between particle and bubble using a resistive bridge force sensor^[81]

度敏感, 1 mm 颗粒仅在接触角为 $22^{\circ}\sim 41^{\circ}$ 脱附, 低于 22° 难以形成矿化气泡上浮, 高于 41° 难以脱附。LIU 等^[86]研究了气泡尺寸比对颗粒-气泡兼并脱附的影响, 发现当 2 个相同尺寸的气泡兼并时, 振荡强度最高, 从而导致颗粒脱附的概率也最高。史文庆等^[87]研究了颗粒尺寸对颗粒-气泡涡旋湍流脱附的影响, 发现 2 mm 颗粒质量大, 在气絮体上浮阶段直接发生脱附; 而 1 mm 颗粒和 0.5 mm 颗粒质量小, 气絮体由湍流槽底部向湍流涡中心旋转迁移, 同时颗粒在气泡表面高速旋转发生离心脱附, 如图 19 所示。此外, 颗粒稳定性分析表明传统邦德模型并不能对湍流场中的颗粒-气泡气絮体稳定性进行准确判断, 颗粒易受湍流涡加速或气泡振荡的影响, 导致颗粒脱附时邦德数在 1 左右波动。DING 等^[88]研究了邻近颗粒对颗粒-气泡脱附的影响, 发现临近颗粒的存在提高了中心颗粒与气泡间的稳定性, 延长了气絮体在壁腔内的运动时间。这种增强可归因于中心颗粒附近的颗粒引起气液界面形状的改变, 增大了前进接触角, 从而增大了中心颗粒与气泡间的毛细力。

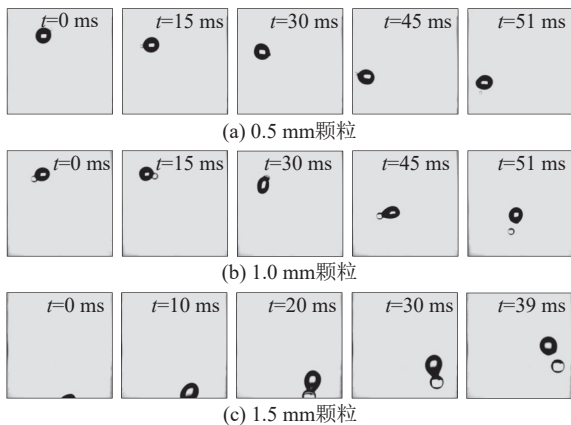


图 19 颗粒尺寸对颗粒-气泡离心脱附的影响^[87]

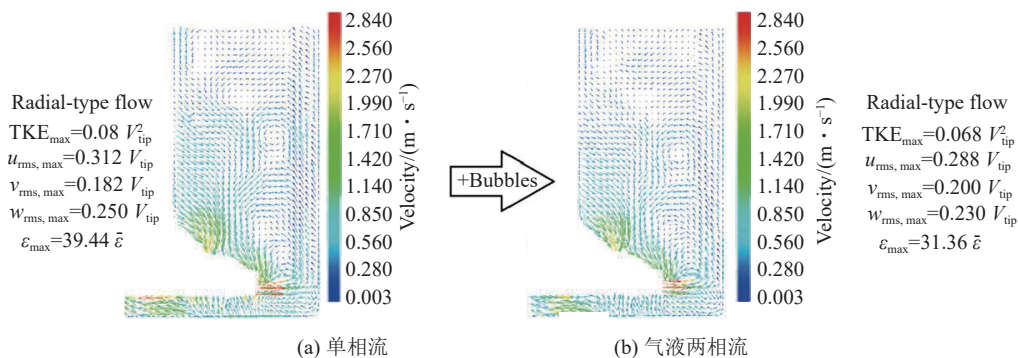
Fig.19 Effect of particle size on centrifugal detachment of particle-bubble interaction^[87]

3.3 粒子图像测速技术

粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 是一种可以无干扰地测量流体瞬时速度场的测量技术。与单点测量仪器相比, PIV 可以同时测得二维平面或三维立体空间内多个测点的二维或三维流速矢量, 是目前流体力学领域应用最广泛的流速测量技术^[89-90]。湍流耗散率是颗粒-气泡脱附概率计算的重要参数, 也是诱发颗粒-气泡脱附的重要原因。然而, 湍流耗散率的获取非常困难, 湍流耗散率不是一个可以直接从试验中测量的变量, 通常需要根据测得的速度矢量数据进行计算^[91-92]。

近期, WANG 等^[93]系统比较了热丝法、激光多普勒测速法 (LDV)、PIV 法和粒子跟踪测速法 (PTV) 等不同的试验技术测量湍流耗散率时的优缺点, 发现 PIV 法是测量湍流耗散率最直接有效的方法, 局部湍流耗散率可以通过速度梯度计算。同时, WANG 比较了二维 PIV 和三维 PIV 的测量结果, 认为二维 PIV 具有更高的空间分辨率。YAN 等^[94]利用 PIV 对 Wemco 浮选机中的气-液-固三相流体动力学特性进行试验研究。DARABI 等^[95-96]采用 PIV 测量了机械搅拌浮选机内部单相流和气液两相流的能量耗散率, 如图 20 所示。研究显示, 在靠近叶轮区域, 能量耗散率显著增强, 而气泡的存在反而降低了整体的能量耗散水平。基于这些数据, DARABI 等进一步探究了叶轮转速和气泡表观速度对机械搅拌浮选机内颗粒-气泡黏附、脱附以及浮选回收率的影响, 发现尽管流体动力学环境的变动未显著影响颗粒的黏附概率, 但随着表观气速的增大, 脱附概率呈下降趋势。

与此同时, SATHE 等^[97]、YAO 等^[98]采用粒子图像测速和激光诱导荧光联用技术, 实现了物体运动行为捕捉与流场特征参数提取的同步测试。该系统的结构示意图如图 21 所示, 其工作原理是通过光学分离与图像处理算法分别提取气泡运动图像和荧光粒子



V_{tip} —叶轮尖端速度; TKE—湍动能; u_{rms} 、 v_{rms} 、 w_{rms} —径向、轴向、切向的速度分量; ϵ —湍动能耗散

图 20 机械搅拌式浮选机内速度矢量分布^[95]

Fig.20 Velocity vector distribution in a mechanically agitated flotation cell^[95]

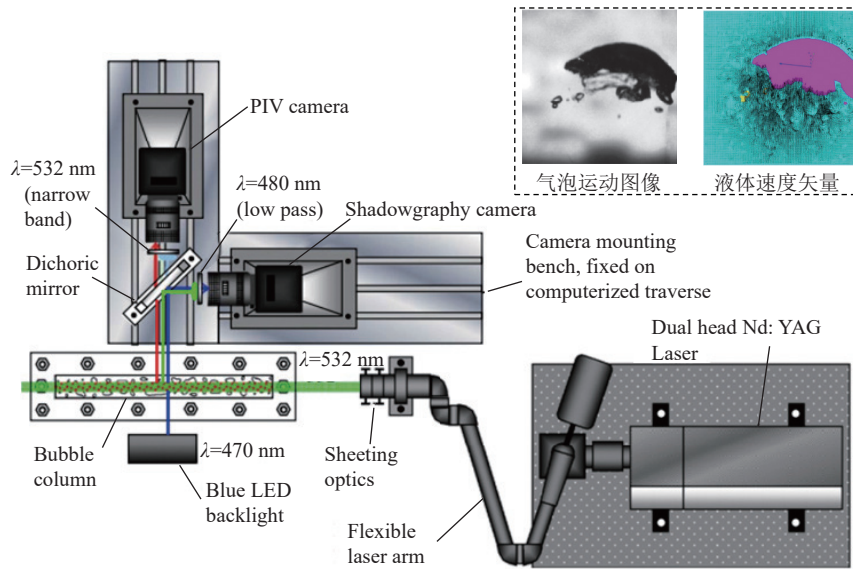


图 21 PIV-LIF 运动图像同步测量装置及测量结果^[97]

Fig.21 PIV-LIF synchronized measurement device and results^[97]

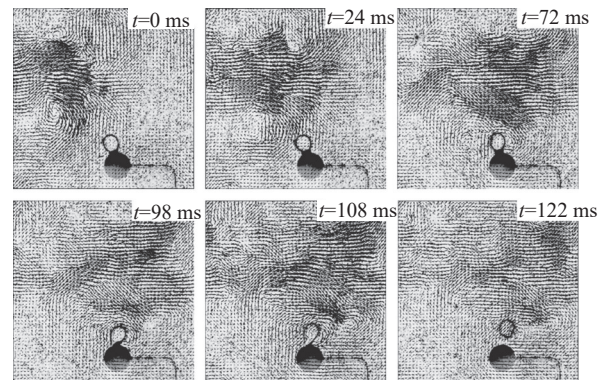
信息,其中光学分离是通过使用不同波长的光和相应的滤光片来实现的。

ZHANG 等^[56]利用该方法测量了气泡脱附过程周围瞬时速度的同时从原始 PIV 图像中提取气泡运动、变形与滑动脱附图像,实现了对脱附过程流场的可视化研究,如图 22a 所示。试验发现当流体运动足够强时,气泡就从颗粒上脱附,颗粒-气泡矿化气絮体周围流体运动是其脱附的重要原因。此外,利用 PIV 对颗粒-气泡脱附时的瞬时流场进行了一系列试验,以识别不同的脱附机制,并区分湍流流动对气絮体脱附的影响。图 22b 为气泡脱附时临界速度场,可以从原始 PIV 图像中识别出法向剪切、切向剪切、法向-切向协同剪切以及涡旋湍流作用机制。

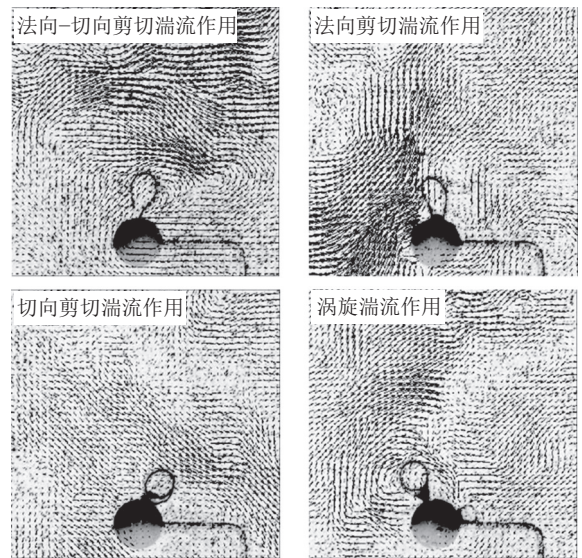
3.4 CFD 数值模拟方法

近年来,越来越多的科研人员开始尝试运用数值模拟技术来研究颗粒-气泡脱附^[99-102]。CFD 数值模拟方法的不断提升与完善,不仅拓宽了对颗粒-气泡脱附过程的认知维度,而且还为建立和完善颗粒-气泡脱附模型提供了关键的数值验证工具。KOH 等^[103]以丹佛浮选机为模型进行数值模拟,通过提取浮选机内湍流耗散率,分别计算了颗粒-气泡碰撞、黏附和脱附概率。WANG 等^[104]利用 2 种不同的 CFD 模型,即 LES 和 RANS 模型,研究了受限涡旋内的流场特性,并量化了颗粒-气泡脱附概率。在此基础上,HOQUE 等^[52]利用 CFD 模拟得到了流场涡度分布,并结合力平衡分析,提出了颗粒-气泡脱附所需的临界涡度,如图 23 所示。

除了传统的基于 Navier-Stokes 方程的数值模拟方法外,Lattice Boltzmann 方法(LBM)发展迅速,并



(a) 颗粒-气泡脱附过程流动可视化

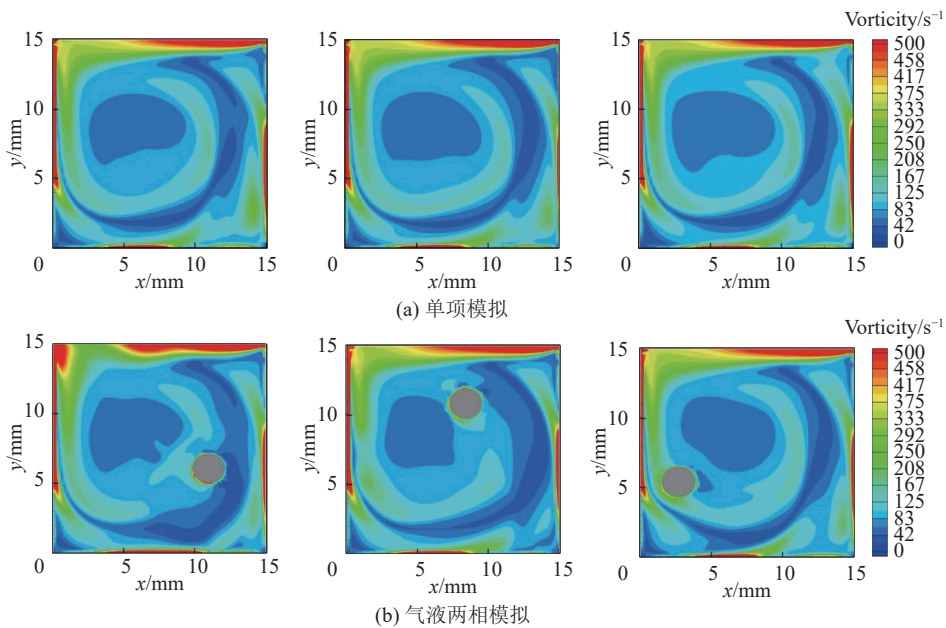


(b) 颗粒-气泡脱附流场作用机制

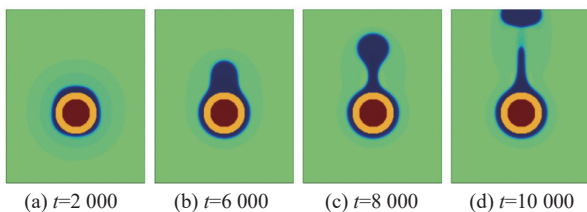
图 22 颗粒-气泡脱附过程流场动力学^[56]

Fig.22 Fluid dynamics of flow field during particle-bubble detachment process^[56]

逐渐在复杂气液界面模拟研究中被广泛应用^[105-108]。

图 23 有无气泡存在时流场涡量分布云^[52]Fig.23 Vorticity distribution contour with and without bubbles in the flow field^[52]

YU 等^[109]通过 LBM 模拟研究不同条件下微通道内气泡的形成与脱附,并将仿真结果与试验结果进行了比较,结果吻合度高。ZHANG 等^[110]采用可视化试验和 LBM 模拟研究了水下微米孔内的气泡动态特性,结果表明在低气体流速下,气泡脱附前依次经历了成核、稳定生长和颈缩 3 个阶段,数值模拟能较好地对这一过程进行预测。YANG 等^[111]模拟了不同条件下气泡的形成和脱附,研究了各种物理参数(体积、充气率)和物理性质(表面张力、润湿性)对气泡脱附时直径的影响。YUAN 等^[112]和 WANG 等^[113]通过 LBM 分别模拟了气泡从平面和圆柱表面的生长和脱附,发现随着气泡的增长,气泡先被拉伸,然后在靠近表面处形成 1 个颈部,最后在颈部破裂,并留下 1 个微小气泡,如图 24 所示。

图 24 气泡生长与分离过程^[113]Fig.24 Growth and detachment process of bubbles^[113]

4 颗粒-气泡脱附研究展望

现有脱附研究主要关注单个颗粒-气泡在单一流场条件下的法向脱附行为。然而,在实际浮选中,气泡表面通常黏附多个颗粒,且湍流环境复杂多变,

导致颗粒-气泡在任意方向上脱附。基于此,本文对浮选颗粒-气泡脱附研究的未来发展方向做出以下展望:

1) 颗粒-气泡法向脱附机理已形成共识,脱附过程可分为气泡拉伸变形、气泡滑动收缩及气泡颈缩断裂 3 个阶段。然而,在实际浮选中,颗粒-气泡会受多种湍流应力作用而沿任意方向脱附。不同分离方向下颗粒-气泡的毛细力数学模型与动态脱附规律仍不明确。因此,厘清不同分离角度下的毛细力模型与动力学是研究浮选颗粒-气泡湍流脱附机理的关键。

2) 早期由于缺乏同步解析颗粒-气泡脱附行为与流场特征的方法,研究主要关注颗粒和气泡的运动特性,忽略了流场结构对矿化气絮体稳定性的影响。近年来,随着脱附力测试、高速动态摄像、粒子图像测速及数值模拟等技术的综合运用,推动了颗粒-气泡脱附研究向更微观和更深层次的发展。因此,深入理解不同分离角度下颗粒-气泡的动力学,并进一步研究湍流流场结构及其诱发颗粒脱附机制是全面认识颗粒-气泡湍流脱附过程的关键。

3) 现有研究大多探讨了颗粒-气泡在单一流场条件下的动态脱附行为。然而,在实际浮选过程中,气泡表面通常黏附许多颗粒,且湍流是由多种不同尺寸的涡旋交织而成。因此,深入研究多元湍流涡协同诱导多颗粒-气泡脱附机制,不仅对于拓宽和完善浮选颗粒-气泡脱附理论体系具有重要学术价值,对于提升浮选颗粒粒度上限及推动粗颗粒浮选技术的发展同样具有重要的实践指导意义。

5 结 论

1) 颗粒-气泡法向脱附机理已经形成广泛共识,毛细力是维持颗粒-气泡矿化气絮体稳定的主要作用力,颗粒-气泡脱附可分为气泡拉伸变形、气泡滑动收缩及气泡颈缩断裂 3 个阶段。

2) 颗粒-气泡湍流脱附机理的研究主要从颗粒和气泡的运动特性出发,探讨了导致颗粒从气泡表面脱附的不同机制。研究发现颗粒离心运动、气泡变速运动以及气泡振荡是引起颗粒-气泡脱附的关键因素。

3) 脱附力测试技术、高速动态摄像技术、粒子图像测速技术及数值模拟等试验方法的综合运用,形成了一个涵盖“脱附力测试、界面行为捕捉、流场解析和过程仿真”的综合研究体系。通过动态脱附力测试装置实现脱附力的精准量化,高速动态摄像与粒子图像测速技术提升对界面行为和流场特性的精细观测,而 CFD 数值模拟方法则拓宽了脱附过程的认知维度。这些技术的协同应用极大地推动了颗粒-气泡脱附研究向更微观、更深层次的方向发展,为揭示浮选颗粒-气泡湍流脱附机理提供了充足可靠的试验保障。

4) 提出了未来颗粒-气泡脱附研究的发展方向,包括不同分离角度下毛细力数学模型构建、湍流诱发颗粒-气泡脱附能量作用机制及多元湍流协同诱导多颗粒-气泡脱附机制研究。这些关键科学问题的解决不仅有助于完善浮选颗粒-气泡脱附理论,对于提高浮选粒度上限与实现粗颗粒浮选过程强化同样具有指导意义。

参考文献(References):

- [1] 桂夏辉,邢耀文,曹亦俊,等.低品质煤泥浮选过程强化研究进展及其思考[J].煤炭学报,2021,46(9):2715-2732.
GUI Xiahui, XING Yaowen, CAO Yijun, et al. Recent advances and thinking in process intensification of low quality coal slime flotation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2715-2732.
- [2] HASSANZADEH A, SAFARI M, HOANG D H, et al. Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 180: 107509.
- [3] 谭明,沈政昌,杨义红.矿物分选装备技术研究进展[J].绿色矿山,2024,2(1):85-93.
TAN Ming, SHEN Zhengchang, YANG Yihong. Research progress of mineral processing equipment technology[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(1): 85-93.
- [4] WANG D W, LIU Q. Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 173: 107220.
- [5] KROMAH V, POWOE S B, KHOSRAVI R, et al. Coarse particle separation by fluidized-bed flotation: A comprehensive review[J]. *Powder Technology*, 2022, 409: 117831.
- [6] JANISHAR ANZOOM S, BOURNIVAL G, ATA S. Coarse particle flotation: A review[J]. *Minerals Engineering*, 2024, 206: 108499.
- [7] JAMESON G J. New directions in flotation machine design[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(11-13): 835-841.
- [8] NORORI-MCCORMAC A, BRITO-PARADA P R, HADLER K, et al. The effect of particle size distribution on froth stability in flotation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 184: 240-247.
- [9] RAHMAN R M, ATA S, JAMESON G J. The effect of flotation variables on the recovery of different particle size fractions in the froth and the pulp[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 106: 70-77.
- [10] AWATEY B, SKINNER W, ZANIN M. Incorporating fluidised-bed flotation into a conventional flotation flowsheet: A focus on energy implications of coarse particle recovery[J]. *Powder Technology*, 2015, 275: 85-93.
- [11] DANKWAH J B, ASAMOAH R K, ZANIN M, et al. Influence of water rate, gas rate, and bed particle size on bed-level and coarse particle flotation performance[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 183: 107622.
- [12] MWALE A H, MUSONGE P, FRASER D M. The influence of particle size on energy consumption and water recovery in comminution and dewatering systems[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(9): 915-926.
- [13] 沈政昌,李仕亮,史帅星,等.低碳选矿技术发展现状及发展策略研究[J].绿色矿山,2023,1(1):48-55.
SHEN Zhengchang, LI Shiliang, SHI Shuaixing, et al. Development status and development strategy research of low carbon mineral processing technology[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 48-55.
- [14] CHEN J R, CHIMONYO W, PENG Y J. Flotation behaviour in reflux flotation cell: A critical review[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 181: 107519.
- [15] BRILL C, VERSTER I, FRANKS G V, et al. Aerosol collector addition in coarse particle flotation: A review[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2023, 44(7): 522-531.
- [16] ATA S, JAMESON G J. Recovery of coarse particles in the froth phase: A case study[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 45: 121-127.
- [17] KOHMUENCH J N, MANKOSA M J, THANASEKARAN H, et al. Improving coarse particle flotation using the HydroFloat™ (raising the trunk of the elephant curve)[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 121: 137-145.
- [18] 罗亨通,封东霞,杨多,等.粗颗粒浮选技术及其应用[J].矿产保护与利用,2022,42(1):129-137.
LUO Hengtong, FENG Dongxia, YANG Duo, et al. Coarse particle flotation technology and its application[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(1): 129-137.
- [19] JAMESON G J, EMER C. Effect of bubble loading on the recovery of coarse mineral particles by flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2024, 215: 108788.
- [20] RALSTON J, DUKHIN S S. The interaction between particles and bubbles[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, 151(1-2): 3-14.
- [21] STEVENSON P, ATA S, EVANS G M. The behavior of an oscillating particle attached to a gas-liquid surface[J]. *Industrial & En-*

- gineering Chemistry Research, 2009, 48(17): 8024–8029.
- [22] NUTT C W. Froth flotation: The adhesion of solid particles to flat interfaces and bubbles[J]. *Chemical Engineering Science*, 1960, 12(2): 133–141.
- [23] 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.
- [24] GAUTAM A, JAMESON G J. The capillary force between a bubble and a cubical particle[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 36: 291–299.
- [25] NGUYEN A V. New method and equations for determining attachment tenacity and particle size limit in flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 68(1–4): 167–182.
- [26] KOWALCZUK P B, DRZYMALA J. Letter to the Editor, “Detachment of coarse particles from oscillating bubbles-The effect of particle contact angle and medium viscosity” by D. Xu, I. Ametov and S.R. Grano (Int. J. Miner. Process. 101, 50–57, doi:10.1016/j.minpro.2011.07.03)[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 104: 80–81.
- [27] WANG L X, 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.
- [28] NICKLAS J, DITSCHERLEIN L, PEUKER U A. Particle-bubble interactions: An investigation of the three-phase contact line by atomic force microscopy[J]. *Langmuir*, 2023, 39(38): 13630–13640.
- [29] DING S H, YIN Q L, ZHANG Y F, et al. Mechanism of the hydrophobic particles with different sizes detaching from the oscillating bubble surface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 646: 128986.
- [30] SPYRIDOPOULOS M T, SIMONS S J R. Direct measurement of bubble-particle adhesion forces on the effects of particle hydrophobicity and surfactants[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004, 82(4): 490–498.
- [31] HAN S, YOU K, KIM K, et al. Measurement of the attachment force between an air bubble and a mineral surface: Relationship between the attachment force and flotation kinetics[J]. *Langmuir*, 2019, 35(29): 9364–9373.
- [32] 赵亮. 颗粒-气泡脱附界面行为和力学行为研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
ZHAO Liang. The study of interface behaviors and force behaviors during particle-bubble detachment[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2021.
- [33] SCHIMANN H C. Force and energy measurement of bubble-particle detachment[D]. Blacksburg: Virginia Tech, 2004.
- [34] ZHANG Z J, ZHAO L, ZHUANG L, et al. The process analysis and dynamic force calculation of an air bubble detaching from a flat coal surface[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(3): 438–448.
- [35] ZHANG Z J, ZHAO L, ZHUANG L. Direct force measurement of critical detachment force between a particle and an air bubble using dynamic interaction force apparatus[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 159: 106627.
- [36] 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.
- [37] 尹青临, 丁世豪, 何琦, 等. 基于微气泡残留的疏水性颗粒-气泡脱附新机制研究[J]. *金属矿山*, 2021(12): 41–47.
YIN Qinglin, DING Shihao, HE Qi, et al. A new mechanism of hydrophobic particle-bubble detachment based on microbubble residue[J]. *Metal Mine*, 2021(12): 41–47.
- [38] NGUYEN A, SCHULZE H J. *Colloidal science of flotation*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [39] GUO F Y, HE Q, XING Y W, et al. Vertical adhesion force between particle and different positions on bubble surface[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 164: 106807.
- [40] DING S H, YU K, HE Q, et al. Bubble-particle detachment in flotation: A comparative study of the tangential and vertical direction [J]. *Powder Technology*, 2023, 426: 118655.
- [41] 丁世豪, 尹青临, 张友飞, 等. 浮选颗粒-气泡间脱附过程能量作用机制[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2817–2824.
DING Shihao, YIN Qinglin, ZHANG Youfei, et al. Energy mechanism of detachment between particle and bubble[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2817–2824.
- [42] GAUTAM S, JAMESON G J. The detachment of particles from bubbles at various locations in a turbulent flotation cell[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 132: 316–325.
- [43] CHIPILI C, BHONDAYI C. The role of the water-air and pulp-froth interfaces on particle detachment: Impact of particle size, type, contact angle and bubble rise velocity[J]. *Minerals Engineering*, 2024, 205: 108453.
- [44] KLASSEN V I, MOKROUSOV V A. *An introduction to the theory of flotation*[M]. London: Butterworths, 1963.
- [45] SPEDDEN H R, HANNAN W. Attachment of mineral particles to air bubbles in flotation[J]. *Mineral Technology*, 1984, 12: 23–54.
- [46] WANG G C, NGUYEN A V, MITRA S, et al. A review of the mechanisms and models of bubble-particle detachment in froth flotation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 170: 155–172.
- [47] CHIPILI C, BHONDAYI C. The role of the pulp-froth interface on particle detachment and selectivity[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 287: 102296.
- [48] SCHULZE H J. Dimensionless number and approximate calculation of the upper particle size of floatability in flotation machines [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1982, 9(4): 321–328.
- [49] GOEL S, JAMESON G J. Detachment of particles from bubbles in an agitated vessel[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 36: 324–330.
- [50] WANG G C, EVANS G M, JAMESON G J. Bubble-particle detachment in a turbulent vortex I: Experimental[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 92: 196–207.
- [51] WANG G C, EVANS G M, JAMESON G J. Bubble movement in a rotating eddy: The implications for particle-bubble detachment [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 161: 329–340.
- [52] HOQUE M M, DOROODCHI E, JAMESON G J, et al. Numerical estimation of critical local energy dissipation rate for particle detachment from a bubble-particle aggregate captured within a con-

- fined vortex[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 180: 107508.
- [53] SHI W Q, DING S H, YIN Q L, et al. Effect of turbulence intensity on bubble-particle detachment mechanism in a confined vortex [J]. *Powder Technology*, 2024, 445: 120131.
- [54] OMELKA B, SCHREITHOFER N, HEISKANEN K. Effect of hydrophobicity and frother concentration on bubble-particle interactions in turbulent flow[C]//Proceedings of the XXV International Mineral Processing Congress, 2010, 3: 2205–2214.
- [55] OMELKA B, SCHREITHOFER N, WIERINK G, et al. Particle detachment in flotation[C]//Proceedings of the Proceedings of the VI International Minerals Processing Seminar, 2009: 257–263.
- [56] ZHANG M, WANG G C, EVANS G M. Flow visualizations around a bubble detaching from a particle in turbulent flows[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 92: 176–188.
- [57] 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 Zhijun, ZHAO Zhifu, ZHAO Liang, et al. Advances in detachment of particle and bubble[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 423–431.
- [58] MITROFANOV S, YATSENKO N, KUROCHKINA A. Determining the critical inertial forces causing mineral particles to detach from air bubbles[J]. *Tsvetnye Metally*, 1970, 43: 87–89.
- [59] CHENG T W, HOLTHAM P N. The particle detachment process in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 1995, 8(8): 883–891.
- [60] 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(1–4): 50–57.
- [61] AWATEY B, THANASEKARAN H, KOHMUENCH J N, et al. Critical contact angle for coarse sphalerite flotation in a fluidised-bed separator vs. a mechanically agitated cell[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 60: 51–59.
- [62] FOSU S, AWATEY B, SKINNER W, et al. Flotation of coarse composite particles in mechanical cell vs. the fluidised-bed separator (The HydroFloat™)[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 77: 137–149.
- [63] WANG Y S, DONG L S, BU X N, et al. Study on inhibition mechanisms of detachment of coal particles from oily bubbles in flotation column[J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119368.
- [64] ZHANG Y F, XING Y W, DING S H, et al. Effect of vibration mode on detachment of low-rank coal particle from oscillating bubble[J]. *Powder Technology*, 2019, 356: 880–883.
- [65] BUTT H J. A technique for measuring the force between a colloidal particle in water and a bubble[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1994, 166(1): 109–117.
- [66] DUCKER W A, XU Z H, ISRAELACHVILI J N. Measurements of hydrophobic and DLVO forces in bubble-surface interactions in aqueous solutions[J]. *Langmuir*, 1994, 10(9): 3279–3289.
- [67] PITOIS O, CHATEAU X. Small particle at a fluid interface: Effect of contact angle hysteresis on force and work of detachment [J]. *Langmuir*, 2002, 18(25): 9751–9756.
- [68] NGUYEN A V, NALASKOWSKI J, MILLER J D. The dynamic nature of contact angles as measured by atomic force microscopy [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 262(1): 303–306.
- [69] SCHELLENBERGER F, PAPADOPOULOS P, KAPPL M, et al. Detaching microparticles from a liquid surface[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(4): 048002.
- [70] PREUSS M, BUTT H J. Direct measurement of forces between particles and bubbles[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1999, 56(1–4): 99–115.
- [71] XING Y W, XU M D, GUI X H, et al. The application of atomic force microscopy in mineral flotation[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 256: 373–392.
- [72] 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.
XING Yaowen. Interaction force between bubble and particle and the thinning dynamics of the thin liquid film[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [73] SHERMAN H, NGUYEN A V, BRUCKARD W. An analysis of bubble deformation by a sphere relevant to the measurements of bubble-particle contact interaction and detachment forces[J]. *Langmuir*, 2016, 32(46): 12022–12030.
- [74] ZHANG Y F, XING Y W, DING S H, et al. New method to measure interaction force between particle and air bubble/water droplet using a micro-Newton mechanics testing instrument[J]. *Powder Technology*, 2020, 373: 142–146.
- [75] FENG D X, NGUYEN A V. How does the Gibbs inequality condition affect the stability and detachment of floating spheres from the free surface of water?[J]. *Langmuir*, 2016, 32(8): 1988–1995.
- [76] MA X Z, NGUYEN C V, NGUYEN A V. Effect of geometric constraint caused by nearby particles on the detachment from the particle-laden interface[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 173: 107199.
- [77] PARKER J L. A novel method for measuring the force between two surfaces in a surface force apparatus[J]. *Langmuir*, 1992, 8(2): 551–556.
- [78] WANG L X, XU Z H, MASLIYAH J H. Dissipation of film drainage resistance by hydrophobic surfaces in aqueous solutions[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(17): 8799–8805.
- [79] SHAHALAMI M, WANG L X, WU C, et al. Measurement and modeling on hydrodynamic forces and deformation of an air bubble approaching a solid sphere in liquids[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 217: 31–42.
- [80] DING S H, XING Y W, ZHENG X, et al. New insights into the role of surface nanobubbles in bubble-particle detachment[J]. *Langmuir*, 2020, 36(16): 4339–4346.
- [81] SUN L J, LIU Q S, GUO H, et al. Bubble adhesion dynamics on solid surfaces: Interfacial behavior, force, and energy perspectives using a self-developed dynamic force testing system[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 355: 129651.
- [82] FENG D X, NGUYEN A V. Contact angle variation on single floating spheres and its impact on the stability analysis of floating particles[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 520: 442–447.
- [83] WANG G C, FENG D X, NGUYEN A, et al. The dynamic contact angle of a bubble with an immersed-in-water particle and its implications for bubble-particle detachment[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 151: 22–32.
- [84] 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 Shihao, JIA Wenjie, LIU Mengyun, et al. Dynamic study of particle-bubble detachment process based on high-speed dynamic camera[J]. *Metal Mine*, 2020(4): 61–65.
- [85] WANG Y L, LIU Q S, HE Q, et al. Collision-induced detachment behavior of bubble-particle aggregate at air-water interface[J]. *Powder Technology*, 2024, 446: 120189.
- [86] LIU X Y, GUO H, DING S H, et al. Bubble-particle detachment behavior during bubble coalescence: Role of bubble size[J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119347.
- [87] 史文庆, 刘新宇, 丁世豪, 等. 湍流场中浮选颗粒-气泡脱附行为的尺寸效应研究[J]. *金属矿山*, 2023(4): 65–72.
SHI Wenqing, LIU Xinyu, DING Shihao, et al. Study on size effect of flotation particle-bubble detachment behavior in turbulent field[J]. *Metal Mine*, 2023(4): 65–72.
- [88] DING S H, SHI W Q, LIU X Y, et al. New insights into the role of nearby particles in bubble-particle detachment[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 675: 132095.
- [89] 阮晓东, 刘志皓, 瞿建武. 粒子图像测速技术在两相流测量中的应用研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(6): 785–788.
RUAN Xiaodong, LIU Zhihao, QU Jianwu. Study on application of PIV technique in two-phase flow measurement[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(6): 785–788.
- [90] HOQUE M M, SATHE M J, MITRA S, et al. Comparison of specific energy dissipation rate calculation methodologies utilising 2D PIV velocity measurement[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 137: 752–767.
- [91] XU D, CHEN J. Accurate estimate of turbulent dissipation rate using PIV data[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44: 662–672.
- [92] SHENG J, MENG H, FOX R O. A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(20): 4423–4434.
- [93] WANG G C, YANG F, WU K, et al. Estimation of the dissipation rate of turbulent kinetic energy: A review[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 229: 116133.
- [94] YAN Y H, YANG W, FANG X, et al. Experimental investigation of multi-phase hydrodynamics and bubble-particle interactions in a Wemco 56 flotation cell[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 172: 107115.
- [95] DARABI H, JAVAD KOLEINI S M, DEGLON D, et al. Particle image velocimetry study of the turbulence characteristics in an aerated flotation cell[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(46): 13919–13928.
- [96] DARABI H, JAVAD KOLEINI S M, DEGLON D, et al. Investigation of bubble-particle attachment, detachment and collection efficiencies in a mechanical flotation cell[J]. *Powder Technology*, 2020, 375: 109–123.
- [97] SATHE M J, THAKER I H, STRAND T E, et al. Advanced PIV/LIF and shadowgraphy system to visualize flow structure in two-phase bubbly flows[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(8): 2431–2442.
- [98] YAO N, WANG Y P, LIU J T, et al. Bubble rise characteristics in oscillating grid turbulence[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 164: 106832.
- [99] GOMEZ-FLORES A, HEYES G W, ILYAS S, et al. Effects of artificial impeller blade wear on bubble-particle interactions using CFD (k- ϵ and LES), PIV, and 3D printing[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 186: 107766.
- [100] WANG A, HOQUE M M, MORENO-ATANASIO R, et al. Development of a flotation recovery model with CFD predicted collision efficiency[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 159: 106615.
- [101] YANG M Y, ZHANG Z J, WU N. Effect of turbulence on the detachment between an air bubble and a glass bead with different hydrophobicity: Experiments and simulations[J]. *Powder Technology*, 2024, 446: 120195.
- [102] HUANG X B, ZHANG Z J. Numerical simulation of particle and bubble detachment process in turbulent flow environment using CFD-DEM[J]. *Particulate Science and Technology*, 2024, 42(5): 703–714.
- [103] KOH P T L, SCHWARZ M P. CFD modelling of bubble-particle attachments in flotation cells[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(6–8): 619–626.
- [104] WANG G C, EVANS G M, JAMESON G J. Bubble-particle detachment in a turbulent vortex II: Computational methods[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 102: 58–67.
- [105] BEGMOHAMMADI A, FARHADZADEH M, RAHIMIAN M H. Simulation of pool boiling and periodic bubble release at high density ratio using lattice Boltzmann method[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 61: 78–87.
- [106] GONG S, CHENG P. A lattice Boltzmann method for simulation of liquid-vapor phase-change heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(17-18): 4923–4927.
- [107] GONG S, CHENG P. Lattice Boltzmann simulation of periodic bubble nucleation, growth and departure from a heated surface in pool boiling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 64: 122–132.
- [108] SUN T, LI W Z, YANG S. Numerical simulation of bubble growth and departure during flow boiling period by lattice Boltzmann method[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44: 120–129.
- [109] YU Z, HEMMINGER O, FAN L S. Experiment and lattice Boltzmann simulation of two-phase gas-liquid flows in microchannels[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(24): 7172–7183.
- [110] ZHANG J, YU Y, QU C, et al. Experimental study and numerical simulation of periodic bubble formation at submerged micron-sized nozzles with constant gas flow rate[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 168: 1–10.
- [111] YANG Z L, DINH T N, NOURGALIEV R R, et al. Numerical investigation of bubble growth and detachment by the lattice-Boltzmann method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(1): 195–206.
- [112] YUAN J J, WENG Z H, SHAN Y G. Modelling of double bubbles coalescence behavior on different wettability walls using LBM method[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 168: 107037.
- [113] WANG H Y, LOU Q, LIANG H, et al. Numerical simulation of bubble dynamics and heat transfer in the 2D saturated pool boiling from a circular surface[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 170: 107098.