



空化过程微纳米气泡性质及其 对细粒矿物浮选的影响

廖世双, 欧乐明, 周伟光

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 利用一套自行设计的, 运用水力空化原理产生微纳米气泡的发生装置, 通过激光粒度仪, 纳米粒径电位分析仪以及表面张力仪等手段研究水力空化过程产生的微纳米气泡性质, 并考察了在浮选药剂溶液中预先引入微纳米气泡对细粒—水硬铝石矿物浮选行为的影响。结果表明: 水力空化预处理油酸钠溶液能够产生微纳米级气泡; 随油酸钠浓度、溶液 pH 值和空化强度的增大, 溶液中微纳米气泡的平均尺寸分布不断减小; 空化时间较短时, 油酸钠溶液中能够形成较多的亚微米及纳米级气泡, 随空化时间延长, 溶液体系微纳米气泡的平均尺寸分布增大。外加充气为空化体系提供了大量气核, 促使空化过程产生大量微纳米气泡, 气泡兼并现象显著导致测定的微纳米气泡尺寸分布逐渐增大; 微纳米气泡具有较好的稳定性, 尤其是亚微米及纳米级气泡, 其能在溶液体系稳定存在 1 h 以上; 预先在浮选药剂溶液中引入微纳米气泡能够显著强化细粒—水硬铝石矿物浮选, 尤其是在低药剂浓度条件下。

关键词: 微纳米气泡; 水力空化; 尺寸分布; 浮选

文章编号: 1004-0609(2019)-07-1567-08

中图分类号: TD952

文献标志码: A

微细颗粒和气泡间碰撞概率低是限制细粒矿物难以高效浮选回收的主要原因之一^[1]。为强化细粒矿物浮选回收, 国内外科研工作者提出了许多解决方案, 包括疏水聚团浮选^[2]、选择性絮凝^[3]和微泡浮选^[4]等, 但迄今为止, 这些技术仍难以实现大规模工业应用。将水力空化技术与传统浮选相结合, 利用水力空化原理产生微纳米气泡, 强化细粒矿物浮选捕收的技术路线已经在柱浮选领域成功应用^[5-6]。即使在浮选机领域, 由于具有设备操作简便, 能量转换效率高, 易实现工业大型化等优点, 水力空化技术依然被认为是解决细粒矿物浮选的潜在方向之一^[7]。

在矿物加工行业, 文丘里管是最常用的水力空化装置。当液流流经文丘里管收缩喉部时, 流速变大, 根据 Bernoulli 方程, 当液流速度达到一定值时, 液体内部产生负压, 溶解在液体中气核析出, 形成微纳米气泡^[8]。相比于常规尺寸气泡, 微纳米气泡具有独特的表面物理化学性质, 如比表面积大、生存周期长等, 这也决定了这些微泡具有异于常规尺寸气泡的特性和作用^[9]。研究发现, 溶液中的微纳米气泡可以增加颗

粒与气泡碰撞和吸附的概率^[10]; 吸附在疏水颗粒表面的微纳米气泡由于气泡桥连作用会促进颗粒的疏水聚团, 增大颗粒的表观粒径^[11]; 微纳米气泡的存在能够促进浮选气泡在矿物表面的粘附, 从而减小药剂用量^[12]。

气泡尺寸分布是表征气泡性质最重要的指标之一^[13]。浮选领域常用表征气泡尺寸分布的方法主要分为图像分析技术和激光衍射技术两类^[14]。相比而言, 激光衍射技术由于具有实时测量和无侵入、无破坏性等优点, 日益成为测定气泡尺寸分布的主流方法^[15]。在浮选领域里利用激光衍射技术测定浮选过程气泡尺寸分布已有相关研究^[16], 但利用激光衍射技术实时测量空化微纳米气泡尺寸分布的研究工作仍较少。虽然空化微纳米气泡对矿物浮选的影响已有大量研究报道^[17-18], 但从微纳米气泡自身性质出发, 揭示这一影响的内在机理的研究报道不多, 这也极大地限制了对空化过程微纳米气泡性质变化及其影响浮选过程的认识。因此, 本文将利用激光衍射技术实时考察空化过程微纳米气泡性质变化, 并探究空化微纳米气泡

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674291); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2014CB643402); 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室资助项目(2018TP1002)

收稿日期: 2018-04-27; **修订日期:** 2018-09-04

通信作者: 欧乐明, 教授, 博士; 电话: 13974801597; E-mail: olmpaper@csu.edu.cn

对细粒矿物浮选的影响，为更好地理解空化微纳米气泡强化细粒矿物浮选机制提供基础认识。

1 实验

1.1 矿样与试剂

试验所用一水硬铝石单矿物取自河南小关，块矿经破碎、手选、瓷球细磨后筛分得到小于 37 μm 粒级部分。矿样化学元素分析如表 1 所示。由表 1 可知，矿样主要成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 和 TiO_2 ，A/S 为 58.375，纯度满足试验要求。矿样粒度检测结果如表 2 所示。由表 2 可知，颗粒粒度主要分布在小于 37 μm 区间。

表 1 一水硬铝石化学元素分析

Table 1 Chemical analysis results of diasporite (mass fraction, %)

Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Others
70.400	1.206	8.712	19.682

表 2 一水硬铝石粒度检测结果

Table 2 Particle size of diasporite analysis results

$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	Volume average diameter/ μm
2.706	11.371	35.475	15.825

试验所用药剂油酸钠 NaOl 、 HCl 和 NaOH 均为分析纯，试验用水为一次蒸馏水。

1.2 试验方法

1.2.1 微纳米气泡的产生

微纳米气泡产生装置如图 1 所示。它是由内径 14 mm 的橡胶管连接蠕动泵(WT-600EAS)，空化管和气泡发生器组成的闭合系统。每次试验取蒸馏水 1400 mL，加入不同浓度油酸钠，调节 pH 后将溶液加入到搅拌槽中。搅拌 3 min 后，将溶液移入到气泡发生器中。设置相应的空化强度，开启蠕动泵，溶液依次经过蠕动泵和空化管回到气泡发生器，完成整个循环过程。空化处理一定时间后，取溶液用于后续的检测或浮选试验。空化管实物图如图 2 所示，其收缩喉部结构参数如图 3 所示。

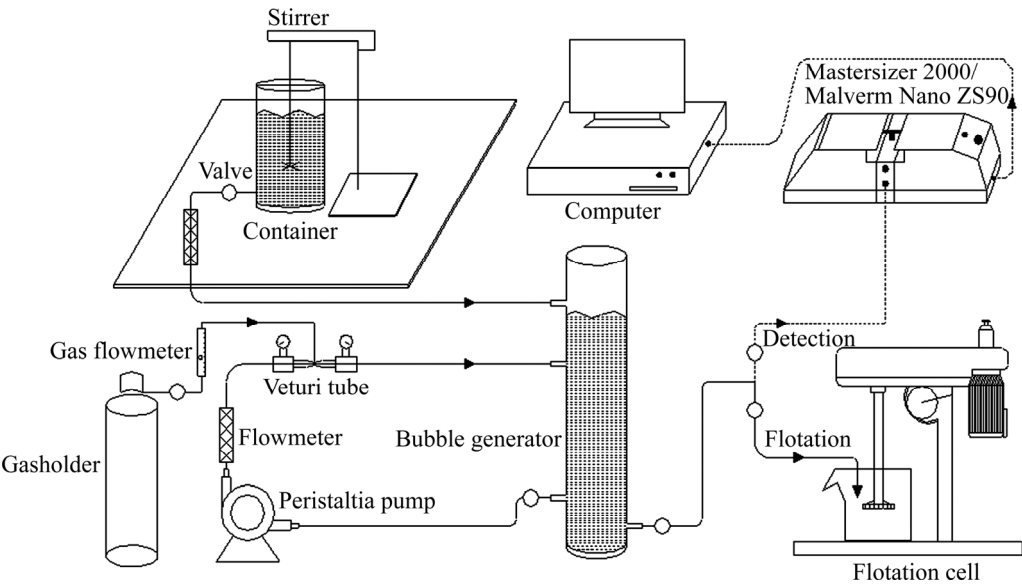


图 1 微纳米气泡产生和检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-nano bubble generation and detection system

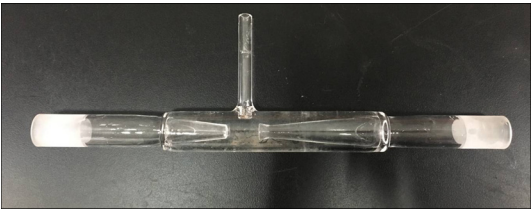


图 2 空化管实物图

Fig. 2 Physical map of cavitation pipe

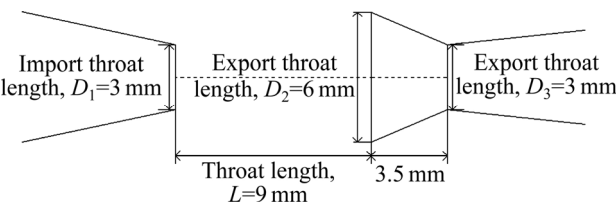


图 3 空化管喉部结构参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cavitation pipe throat structure

1.2.2 微纳米气泡尺寸测定

气泡尺寸检测装置采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)。当溶液空化处理完成后, 实时测量溶液中微纳米气泡尺寸分布。不同条件下重复测量3次, 取平均值作为最终值。

1.2.3 气泡表面电位测定

采用 Malvern Nano ZS 90 纳米粒径电位分析仪测量微纳米气泡表面电位^[19]。调控蠕动泵转速, 使得空化管喉部液流速度达到 16.2 m/s, 随后将浓度为 2×10^{-4} mol/L 的油酸钠溶液加入至空化系统中处理 3 min。待空化处理完成, 抽取 200 mL 溶液, 经磁力搅拌器缓慢搅拌 10 min 后再抽取 5 mL 溶液进行 Zeta 电位测试。不同 pH 值条件重复测量 3 次, 取平均值作为最终值。

1.2.4 表面张力测定

采用 GBX3S 测量溶液的表面张力。配制不同浓度的油酸钠溶液, 空化或者不空化, 取 30 mL 溶液加入到样品烧杯中, 根据吊片法测定表面张力。试验温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 每个条件重复试验 3 次, 取平均值作为最终值。

1.2.5 单矿物浮选试验

浮选采用 160 mL XFG_{II} 型挂槽浮选机。每次试验取细粒一水硬铝石 8 g, 加入 152 mL 空化或者不空化的油酸钠溶液组成浮选矿浆。浮选机转速 1400 r/min, 持续搅拌 3 min, 浮选 5 min。刮泡采用手工刮泡, 最终将刮得的泡沫产品过滤, 烘干, 称量, 计算回收率。

2 结果与讨论

2.1 微纳米气泡性质研究

2.1.1 油酸钠浓度对微纳米气泡尺寸分布的影响

图 4 所示为油酸钠浓度对微纳米气泡尺寸分布的影响。由图 4 可知, 溶液中油酸钠浓度越高, 微纳米气泡尺寸分布越小。当油酸钠浓度达到 2×10^{-4} mol/L 时, 空化产生的气泡尺寸主要集中在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内, 并明显检测到有纳米级气泡生成。杨氏-拉普拉斯方程^[8]如式(1)所示:

$$P_i = P_o + 2\gamma/R \quad (1)$$

式中: P_i 为气泡内部压力; P_o 为气泡外部压力; γ 为溶液表面张力; R 为气泡尺寸。

根据杨氏-拉普拉斯方程可知, 当气泡内外压力保持不变时, 溶液表面张力越小, 气泡尺寸越小^[8]。图 5 所示为油酸钠浓度对溶液表面张力的影响。由图

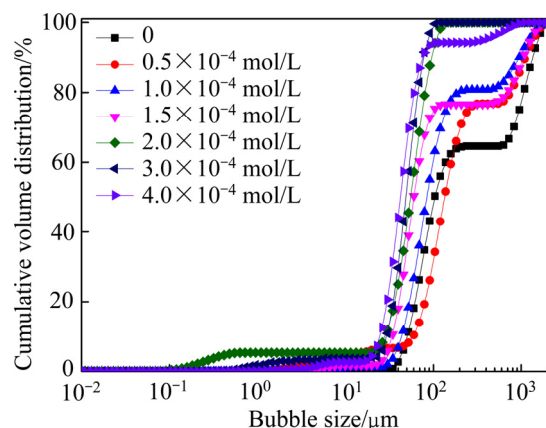


图 4 油酸钠浓度对微纳米气泡尺寸分布的影响

Fig. 4 Effect of sodium oleate concentration on size distribution of micro-nano bubbles (Nature pH, $v=16.2$ m/s, $t=3$ min, aeration rate=0)

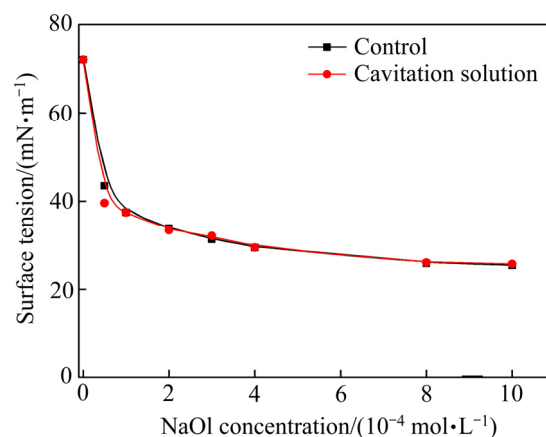


图 5 油酸钠浓度对溶液表面张力的影响

Fig. 5 Effect of sodium oleate concentration on surface tension of solution (Nature pH, $v=16.2$ m/s, $t=3$ min, aeration rate=0)

5 可知, 油酸钠能够显著降低溶液表面张力, 但水力空化过程对溶液表面张力影响不大。因此, 油酸钠降低溶液表面张力是导致空化过程微泡尺寸分布减小的主要原因之一。同时, 邓丽君等^[20]研究发现, 高浓度表面活性剂的加入能够抑制气泡间的兼并行为, 这同样有利于减小气泡尺寸。

2.1.2 pH 对微纳米气泡尺寸分布的影响

图 6 所示为 pH 对微纳米气泡尺寸分布的影响。由图 6 可知, 随着溶液 pH 升高, 微纳米气泡尺寸减小。酸性条件下, 溶液中生成气泡的尺寸主要在 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ 区间, 而中性和碱性条件下, 溶液中生成的气泡尺寸集中在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 区间, 且 $\text{pH} > 9.2$ 时, 明显伴有纳米级气泡的生成。这与油酸钠的发泡能力

和微纳米气泡表面电位有关。在油酸钠用量一定的情况下,油酸钠的发泡能力随着pH升高而加强,pH为10时,发泡能力达到最大^[21]。无外加充气量的情况下,溶液中溶解的气核数量是一定的,而在中性及碱性条件下,由于油酸钠发泡能力的加强,空化将会产生大量的气泡,这必然会导致生成的气泡尺寸减小。图7所示为微纳米气泡表面电位随pH的变化,由图7可知,在pH 2至12的测试区间范围内,气泡表面电位均为负值,且溶液pH越大,气泡表面电负性越强。这是因为随溶液pH升高,吸附在微泡表面的OH⁻数量增加^[22]。气泡电负性增强将增大气泡间的排斥力,减弱气泡聚集和兼并现象,造成气泡尺寸分布减小^[19]。

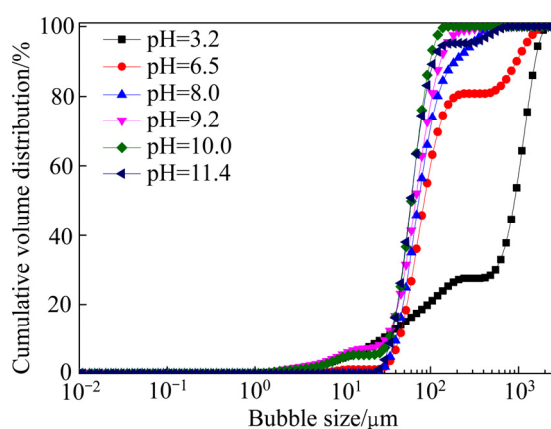


图6 pH对微纳米气泡尺寸分布的影响

Fig. 6 Effect of pH on size distribution of micro-nano bubbles ($c(\text{NaOl})=1 \times 10^{-4}$ mol/L, $v=16.2$ m/s, $t=3$ min, aeration rate=0)

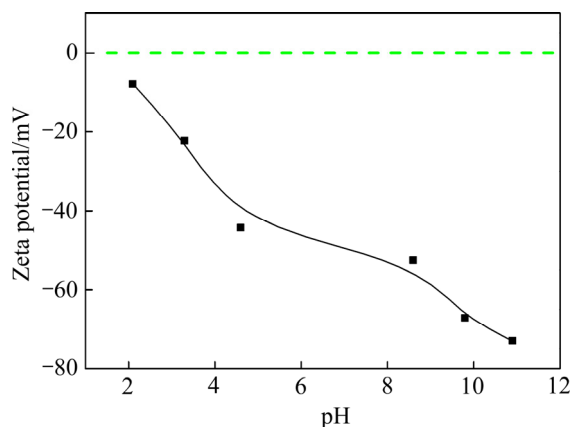


图7 pH对微纳米气泡表面电位的影响

Fig. 7 Effect of pH on the surface potential of micro-nano bubbles (mainly nanobubbles) ($c(\text{NaOl})=2 \times 10^{-4}$ mol/L, $v=16.2$ m/s, $t=3$ min, aeration rate=0)

2.1.3 空化强度对微纳米气泡尺寸分布的影响

研究发现,水力空化过程中,空化管喉部液流速度能够有效反映空化强度,空化管喉部液流速度越高,

空化强度越强,反之亦然^[23]。因此,本文拟用空化管喉部液流速度表征空化强度。图8所示为空化强度对微纳米气泡尺寸分布的影响。由图8可知,随着空化管喉部液流速度增大,溶液中生成的微纳米气泡尺寸变小。当液流速度超过16.2 m/s时,溶液中明显测得有纳米级气泡生成,这证明微纳米气泡尺寸随空化强度增大而减小。当空化管喉部液流速度的增大,液流内部压力减小,压力差的增大有利于气核析出生成微纳米气泡。与此同时,大尺寸气泡由于曲率半径大,附加压力小^[24],空化过程中随液流高速流动时液膜容易破裂,亦造成气泡尺寸分布减小^[15]。

2.1.4 空化时间对微纳米气泡尺寸分布影响

图9所示为空化时间对微纳米气泡尺寸分布的影响。由图9可知,空化时间能够显著影响微纳米气泡

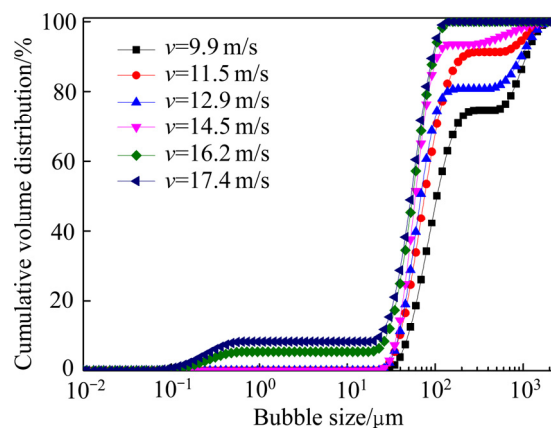


图8 空化强度对微纳米气泡尺寸分布的影响

Fig. 8 Effect of cavitation intensity on size distribution of micro-nano bubbles ($c(\text{NaOl})=2 \times 10^{-4}$ mol/L, nature pH, $t=3$ min, aeration rate=0)

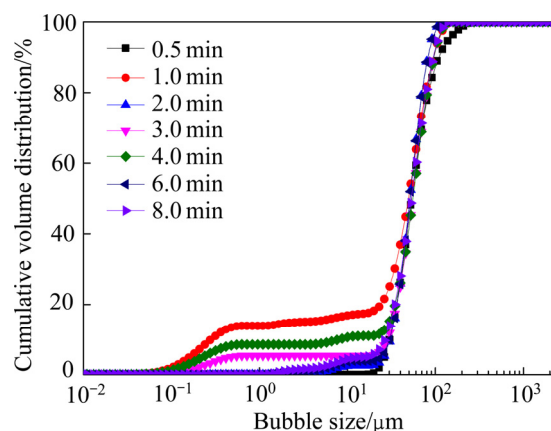


图9 空化时间对微纳米气泡尺寸分布的影响

Fig. 9 Effect of cavitation time on the size distribution of micro-nano bubbles ($c(\text{NaOl})=1 \times 10^{-4}$ mol/L, nature pH, $v=16.2$ m/s, aeration rate=0)

尺寸分布。空化初期,液流整体扰动剧烈,溶液中生成的微米级尤其是纳米级气泡数量较少,导致激光粒度仪难以测得其体积含量。随着空化时间延长,液流逐渐稳定,溶液中气核迅速析出生成微纳米气泡,此时溶液中微纳米气泡数量较多,试验中也明显测得纳米级气泡含量较高。但当空化时间继续延长,气泡的兼并现象加剧,同时溶液中气核由于逸散作用脱离液相体系^[25]。溶液中气核数量显著减少,导致微纳米气泡尺寸分布增大。CHO等^[26]的研究也发现了类似规律。

2.1.5 充气量对微纳米气泡尺寸分布影响

图10所示为充气量对微纳米气泡尺寸分布的影响。由图10可知,充气量越高,微纳米气泡尺寸分布越大。ANDRIY等^[27]的研究也得出了类似规律。GRAU等^[28]研究发现微纳米气泡尺寸增大的原因是充气导致溶液中气核的长大。SADA等^[29]则认为充气会加剧气泡的聚集和兼并现象,充气量越大,气泡的聚集和兼并现象越明显,气泡尺寸也就越大。但是,当充气量过大时,溶液上层会产生明显泡沫层,这反而不利于对微纳米气泡尺寸分布的测量。因此,选择一个合适的充气量尤为重要。

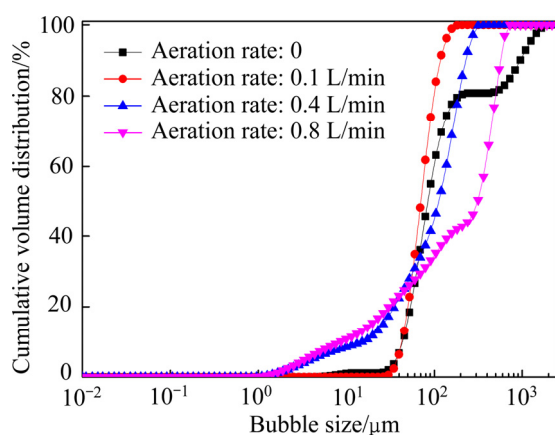


图10 充气量对微纳米气泡尺寸分布的影响

Fig. 10 Effect of aeration rate on size distribution of micro-nano bubbles ($c(\text{NaOI})=1 \times 10^{-4}$ mol/L, nature pH, $t=3$ min, $v=16.2$ m/s)

2.1.6 微纳米气泡稳定性

图11所示为放置时间对微纳米气泡尺寸分布的影响。由图11可知,随着放置时间的延长,微纳米气泡尺寸分布曲线向左移动,这说明微纳米气泡尺寸分布变小。这是因为在同一体系下,小气泡($1 \sim 10 \mu\text{m}$)内部压力通常大于大气泡($10 \sim 100 \mu\text{m}$)内部压力,压力差的存越大,直到大气泡液膜不能承受内部压力而破裂^[24]。有研究发现,当停止空化后,大气泡会在相当

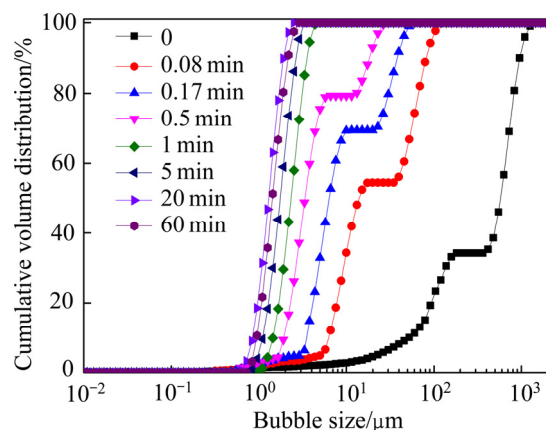


图11 放置时间对微纳米气泡尺寸分布的影响

Fig. 11 Effect of placement time on size distribution of micro-nano bubbles ($c(\text{NaOI})=0$, nature pH, $t=3$ min, $v=16.2$ m/s, aeration rate=0)

短的时间里破裂,有的甚至达到了毫秒级别^[30]。当静置1 min后,溶液中基本只存在纳米级气泡,也说明微米级气泡稳定性差。而静置1 h后纳米级气泡仍然存在,这表明纳米气泡在油酸钠溶液中具有较强的稳定性。由图7可知,中性条件下,气泡表面电位值在50~60 mV范围内,气泡间静电斥力强,气泡聚集现象弱,这是导致微纳米气泡,尤其是纳米级气泡能够长时间稳定存在的重要原因之一。

2.2 微纳米气泡对细粒矿物浮选的影响

根据 Yoon-Luttrell 碰撞概率方程^[31]:

$$P_c = \left[\frac{3}{2} + \frac{4R_e^{0.72}}{15} \right] \left[\frac{D_p}{D_b} \right]^2 \quad (2)$$

式中: P_c 为颗粒-气泡碰撞概率; R_e 为流体雷诺数; D_p 为颗粒直径; D_b 为气泡尺寸。

可知,在矿物颗粒粒径 D_p 确定的条件下,气泡尺寸 D_b 越小,颗粒-气泡碰撞概率 P_c 越大。取一水硬铝石颗粒直径 D_p 为 $15.825 \mu\text{m}$, 流体雷诺数为1和100分别绘制气泡尺寸对颗粒-气泡碰撞概率的影响示意图,结果如图12所示。由图12也可以发现颗粒-气泡碰撞概率随着气泡尺寸的增大而减小。大量文献表明^[32-33],作为影响细粒浮选的主要因素,碰撞概率越大,细粒浮选理论效果越好。

综上所述,水力空化过程能够产生微米级甚至是纳米级气泡,这显著减小了浮选过程中气泡的尺寸,理论上,细粒矿物的浮选行为将得到改善。为验证水力空化过程产生的微纳米气泡对浮选的影响,以一水

硬铝石为浮选对象,进行浮选试验。试验结果如图13所示。由图13可知,微纳米气泡能够明显促进一水硬铝石浮选,尤其是在低油酸钠浓度下,其提升浮选或收率的效果尤为显著,这再次证明了微纳米气泡能够有助于强化细粒矿物浮选回收。

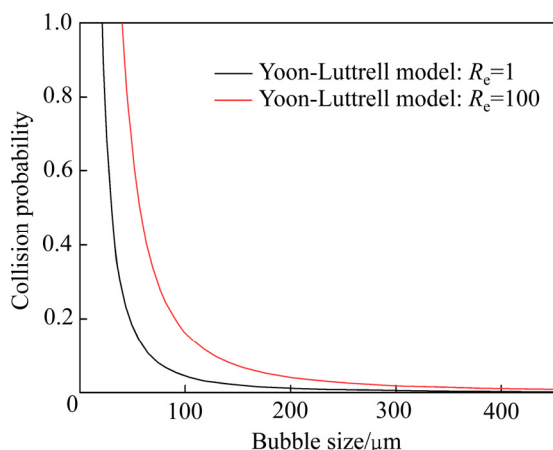


图12 气泡尺寸对颗粒-气泡间碰撞概率的影响

Fig. 12 Effect of bubble size on collision probability between particles and bubbles

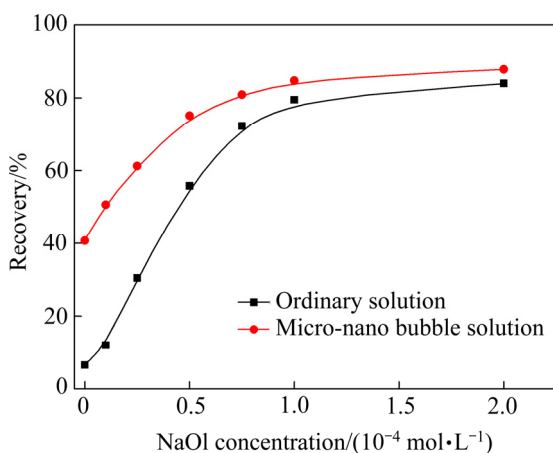


图13 微纳米气泡对细粒一水硬铝石矿物浮选行为的影响

Fig. 13 Effect of micro-nano bubbles on flotation behavior of fine-grained diasporic minerals

3 结论

1) 水力空化能够产生微纳米气泡,纳米级气泡能稳定存在于油酸钠溶液中1 h以上,而微米级气泡稳定性不如纳米级气泡。

2) 微纳米气泡尺寸随着油酸钠浓度、溶液pH、空化强度增大而减小。空化时间能够显著影响微纳米气泡尺寸分布,适宜的空化时间(1~3 min)有助于促进

亚微米甚至纳米级气泡生成,但空化时间过长(>4 min),空化微纳米气泡中亚微米级和纳米级气泡占比迅速减小。外加充气为空化过程提供了大量气核,能够显著促进空化过程成功微纳米气泡的生成,并使得微纳米气泡尺寸分布增大。

3) 预先向溶液中引入微纳米气泡能够强化细粒一水硬铝石矿物的浮选,显著提高细粒一水硬铝石浮选回收率。低油酸钠浓度条件下,微纳米气泡强化细粒矿物浮选效果尤为明显。

REFERENCES

- [1] 姚伟,李茂林,崔瑞,成岚.微细粒矿物的分选技术[J].现代矿业,2015,1(1):66-69.
YAO Wei, LI Mao-lin, CUI Rui, CHENG Lan. Beneficiation technology for microfine disseminated minerals[J]. Modern Mining, 2015, 1(1): 66-69.
- [2] LI Dong, YIN Wan-zhong, LIU Qi, CAO Shao-hang, SUN Qian-yu, ZHAO Chen, YAO Jin. Interactions between fine and coarse hematite particles in aqueous suspension and their implications for flotation[J]. Minerals Engineering, 2017, 114: 74-81.
- [3] LIU Wen-li, SUN Wei, HU Yue-hua. Effects of water hardness on selective flocculation of diasporic bauxite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 2248-2254.
- [4] NG W S, SONSIE R, FORBES E, FRANKS G V. Flocculation/flotation of hematite fines with anionic temperature responsive polymer acting as a selective flocculant and collector[J]. Minerals Engineering, 2015, 77: 64-71.
- [5] TUSSUPBAYEV N K, RULYOV N N, KRAVCHENCO O V. Microbubble augmented flotation of ultrafine chalcopryrite from quartz mixtures[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2015, 125(1): 5-9.
- [6] XIONG Yu, PENG F. Optimization of cavitation venturi tube design for pico and nano bubbles generation[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25: 523-529.
- [7] 张昆明,陆小菊,黄永春,杨锋,黄承都,任仙娥,黄琼.水力空化及其在生物资源领域中的应用研究进展[J].广西科技大学学报,2018,29(2):8-14.
ZHANG Kun-ming, LU Xiao-ju, HUANG Yong-chun, YANG Feng, HUANG Cheng-du, REN Xian-e, HUANG Qiong. Hydrodynamic cavitation and its application progress in biological resource field[J]. Journal of Guangxi University

- of Science and Technology, 2018, 29(2): 8–14.
- [8] 冯其明, 周伟光, 石 晴. 纳米气泡的形成及其对微细粒矿物浮选的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 9–15.
- FENG Qi-ming, ZHOU Wei-guang, SHI Qing. Formation of nanobubbles and their influences on ultrafine mineral flotation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 9–15.
- [9] 武 君, 张晓东, 刘学武, 夏远景, 李志义. 水力空化及应用[J]. 化学工业与工程, 2013, 20(6): 387–391.
- WU Jun, ZHANG Xiao-dong, LIU Xue-wu, XIA Yuan-jing, LI Zhi-yi. Hydrodynamic cavitation and its application[J]. Chemical Industry and Engineering, 2013, 20(6): 387–391.
- [10] 邓 超, 杨 丽, 陈海军, 杨谋存, 朱跃钊. 微纳米气泡发生装置及其应用的研究进展[J]. 石油化工, 2014, 43(10): 1206–1213.
- DENG Chao, YANG Li, CHEN Hai-jun, YANG Mou-cun, ZHU Yue-zhao. Progress in research and application of micro-nano bubble generating device[J]. Petrochemical Technology, 2014, 43(10): 1206–1213.
- [11] FAN Mao-ming, DANIEL T, HOMAKER R, LUO Zhen-fu. Nanobubble generation and its application in froth flotation(part IV):mechanical cells and specially designed column flotation of coal[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20: 641–671.
- [12] 陶有俊, 刘 谦, TAO Daniel, 陶秀祥. 纳米泡提高细粒煤浮选效果的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 820–823.
- TAO You-jun, LIU Qian, TAO Daniel, TAO Xiu-xiang. Enhancing efficiency of fine coal flotation by picobubbles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 820–823.
- [13] AHMADI R, KHODADADI D A, ABDOLLAHY M, FAN M M. Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopryrite particles[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(4): 559–566.
- [14] 许灿辉. 矿物浮选气泡速度和尺寸分布特征提取方法与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- XU Can-hui. Bubble velocity measurement and size distribution estimation for mineral flotation process[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [15] MAZAHERNASAB R, AHMADI R. Determination of bubble size distribution in a laboratory mechanical flotation cell by a laser diffraction technique[J]. Physicochem Probl Miner Process, 2016, 52(2): 690–702.
- [16] SAMANTHA G D C, ACHILLES J B D, MARISA B M M. The influence of some parameters on bubble average diameter in an electroflotation cell by laser diffraction method[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4: 3681–3687.
- [17] AHMADI R, KHODADADI D A, ABDOLLAHY M, FAN M M. Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopryrite particles[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24: 559–566.
- [18] ZHOU Wei-guang, OU Le-ming, SHI Qing, CHEN Hao. Aggregation of ultra-fine scheelite particles induced by hydrodynamic cavitation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 157: 236–240.
- [19] CALGAROTO S, WILBERG K Q, RUBIO J. On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation[J]. Minerals Engineering, 2014, 60: 33–40.
- [20] 邓丽君, 曹亦俊, 王利军. 起泡剂溶液的表面张力对气泡尺寸的影响[J]. 中国科技论文, 2014, 9(12): 1340–1343.
- DENG Li-jun, CAO Yi-jun, WANG Li-jun. Effect of surface tension on bubble size in frother solutions[J]. China Science Paper, 2014, 9(12): 1340–1343.
- [21] 万里平, 孟英峰, 李永杰. 油酸钠泡沫循环利用研究[J]. 西南石油大学学报, 2009, 12(6): 123–126.
- WAN Li-ping, MENG Ying-feng, LI Yong-jie. Study on recirculating utilization of sodium oleate foam[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 12(6): 123–126.
- [22] UDDIN S, JIN L, MIRNEZAMI M, FINCH J A. An apparatus to measure electrical charge of bubble swarms[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2013, 389: 298–305.
- [23] 杨会中. 水力空化强化效应实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- YANG Hui-zhong. Experimental study on enhance effect of hydrodynamic cavitation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [24] 刘 炜. 多孔锆钛酸铅压电陶瓷的制备与性能表征[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- LIU Wei. Preparation and characterization of porous PZT ceramics[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [25] ZHANG Xue-hua, LI Gang, MAEDA N, HU Jun. Removal of induced nanobubbles from water/graphite interfaces by partial degassing[J]. Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids, 2006, 22(22): 9238–9243.
- [26] CHO S H, KIM J K, CHUN J H, KIM J D. Ultrasonic formation of nanobubbles and their zeta-potentials in aqueous electrolyte and surfactant solutions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2005, 269: 28–34.
- [27] ANDRITY G, MICHELE S, SERGIO B, PIETRO P. Size distribution and Satur mean diameter of micro bubbles for

- Venturi type bubble generator[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 70: 51–60.
- [28] GRAU R A, HEISKAMEN K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(12): 1164–1172.
- [29] SADA E, YASUNZSHZ A, KATOH S, NZSHIOKA M. Bubble formation in flowing liquid[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1978, 56: 669–672.
- [30] LÜ Ming, NING Zhi, YAN Kai, FU Juan, SUN Chuan-hua. Instability and breakup of cavitation bubbles within diesel drops[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, 23(1): 262–267.
- [31] 任浏祎. 细粒锡石颗粒-气泡间相互作用及其对浮选的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- REN Liu-yi. Interaction between fine cassiterite particles and bubbles and its effects on flotation[D]. Changshang :Central South University, 2012.
- [32] 李 振, 王纪镇, 印万忠, 符艳红, 杨 超, 赵 伟, 于伟. 细粒矿物浮选研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2016(2): 70–74.
- LI Zhen, WANG Ji-zhen, YIN Wan-zhong, FU Yan-hong, YANG Chao, ZHAO Wei, YU Wei. Research progress of fine particles flotation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2016(2): 70–74.
- [33] 朱阳戈, 张国范, 冯其明, 卢毅屏, 欧乐明. 微细粒钛铁矿的自载体浮选[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(3): 554–560.
- ZHU Yang-ge, ZHANG Guo-fan, FENG Qi-ming, LU Yi-ping, OU Le-ming. Autogenous-carrier flotation of fine ilmenite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(3): 554–560.

Micro-nano bubbles properties induced by hydrodynamic cavitation and their influences on fine mineral flotation

LIAO Shi-shuang, OU Le-ming, ZHOU Wei-guang

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

Abstract: By using a homemade micro-nano bubbles generator based on hydrodynamic cavitation principle, the properties of micro-nano bubbles generated and their effects on the flotation behaviors of fine diasporic minerals were studied through laser particle size analyzer, Zetasizer and surface tension meter, etc. The results show that hydrodynamic cavitation pretreatment of sodium oleate solution (NaOl) can produce micro-nano bubbles in the bulk solution. With the increase of NaOl concentration, the pH values of solution and cavitation intensity, the average size distribution of micro-nano bubbles in the solution continuously decreases. When the cavitation time is short, submicron and nanoscale bubbles can be formed in NaOl solution, while as cavitation time raises, the average size distribution of bubbles in the solution system increases. The additional aeration provides a large number of gas nuclei for the cavitation system, which promotes the generation of a large number of micro-nano bubbles in the cavitation process, and the bubble merger results in a significant increase in the size distribution of the micro-nano bubbles. Micro-nano bubbles have good stability, especially submicron and nanoscale bubbles, which can stably exist in the solution system for more than one hour. Lastly, the introduction of micro-nano bubbles in the flotation agent solution before flotation can significantly enhance the fine diasporic flotation, especially at low agent concentration.

Key words: micro-nano bubble; hydrodynamic cavitation; size distribution; flotation

Foundation item: Project(51674291) supported by the National Science Foundation of China; Project(2014CB64340) supported by the National Basic Research Development Program of China; Project(2018TP1002) supported by the Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources, China

Received date: 2018-04-27; **Accepted date:** 2018-09-04

Corresponding author: OU Le-ming; Tel: +86-13974801597; E-mail: olmpaper@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)