

加压下气泡在液体中的行为

钟良才^{1,2}, 周航¹, 王龙¹, 张库¹

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 多金属共生矿生态利用教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过物理实验,研究了容器压力、喷嘴孔径和吹气流量对气泡形貌、直径和上升速度的影响. 结果表明,在常压下,大孔径喷嘴形成的气泡呈扁平状,其上升过程形状变化大;而在大的压力下,其形成的气泡呈椭球状,上升过程形状稳定. 常压下吹气流量对大孔径产生的气泡等效直径影响较小,在小的喷嘴孔径下,吹气流量能明显增加气泡的等效直径,而压力对改变小气泡等效直径的作用不明显. 在低的吹气流量和高的容器压力下,较大孔径的喷嘴也能产生较小的气泡. 在大孔径下吹气,压力在 0.1 ~ 0.2 MPa 时,不同的吹气流量下的气泡等效直径相差小;而当压力增加到 0.3 ~ 0.4 MPa 时,不同吹气流量的气泡等效直径差别变大. 压力增加,气泡的上升速度降低,且在大的吹气流量下,压力对气泡运动速度的影响更为明显;大孔径喷嘴产生的气泡一般有更大的上升速度. 在常压下,气体流量对气泡上升速度起着决定性影响,而加压到 0.4 MPa,喷嘴孔径对气泡上升速度起着决定性作用.

关 键 词: 容器;液体;底吹;气泡行为;容器压力;喷嘴孔径;吹气流量

中图分类号: TF 70 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)03-0388-05

Behavior of Bottom Injection Bubbles in Liquid Under Elevated Pressures

ZHONG Liang-cai^{1,2}, ZHOU Hang¹, WANG Long¹, ZHANG Ku¹

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ecological Utilization of Multi-metal Intergrown Ores, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHONG Liang-cai, E-mail: zhonglc@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The influences of vessel pressure, nozzle diameter and gas flow rate on bubble's behavior, diameter and rising velocity were investigated through physical experiment. The results showed that the bubbles from larger diameter nozzle show flat shape and their shapes change obviously during their up-rising process under atmosphere pressure, while the bubbles show oval-shaped and their shapes are stable in up-rising process under larger pressure. Gas flow rate has small effect on the bubble's diameter with large diameter nozzle under atmosphere pressure, but it can obviously increase the bubble's diameter and pressure has little influence on bubble's diameter from small nozzle. With low gas flow rate and high pressure, the small bubbles can be obtained from the larger diameter nozzle. The difference of bubble's diameter with different flow rates in injecting gas with the large nozzle is small under 0.1 ~ 0.2 MPa pressure, while the difference becomes large when the pressure is increased to 0.3 ~ 0.4 MPa. Rising velocity of bubbles decreases with increase in pressure and the influence of pressure on bubble's rising velocity is more obvious at large gas flow rate. The bubbles from the large nozzles usually have higher rising velocity. Under atmosphere, the gas flow rate has important effect on rising velocity of bubbles, but under pressure up to 0.4 MPa, the nozzle diameter has more important effect on their velocity.

Key words: vessel; liquid; bottom injection; bubble behavior; vessel pressure; nozzle diameter; gas flow rate

多相流（特别是气液两相流）广泛存在于钢铁冶炼的生产流程中,如铁水预处理中喷吹法（如镁气泡在铁液中的上浮）、复吹转炉冶炼、底吹氩钢包精炼、中间包气幕挡墙、浸入式水口吹氩等。

研究气泡的运动规律有助于深入了解冶金反应器中现象的物理本质,气泡的形成、气泡直径及气泡在液体中的上升速度的研究对高效发挥气液反应器的功能十分重要. 在气液系统中,离散的上升气泡有可能聚合成大的气泡或者大的气泡分解成离散的小气泡. 气泡形成的行为决定于气泡在气液系统中初始气泡尺寸和初始位置;气泡在液体中的上升速度决定了气液两相间的接触时间,进而决定了气液混合的相间传输过程. 因此,研究气泡在液体中的行为有十分重要的理论和实际意义.

目前,大多数研究^[1-6]主要考察常压下气泡在液体中的行为,而对加压下气泡在液体中的行为研究较少. 在冶金中,通过增加压力,可以在高温下增加某些气态元素如钙、镁、氮在金属熔体中的溶解度. 采用钙、镁对钢液进行脱氧、脱硫时,为了提高钙、镁的利用率,可以在加压下进行^[7-9],通过增加压力也可获得高氮不锈钢^[10-11]. 本文通过物理实验研究加压条件下气泡在液体中的行为,考察压力、底部喷孔直径和吹气流量条件下气泡的形貌、气泡直径和上升速度.

1 实验原理与方法

本研究采用的实验设备如图 1 所示,主要由有机玻璃耐压容器、气瓶、空压机和照相机组成. 实验时,向压力容器加入水,将压力容器的液面升至 385 mm 的高度,通过空压机将容器内的压力升到一定的值,从喷孔吹入一定流量的气体,保证从喷孔流出的气体在液体中形成单个的气泡上浮,利用照相机拍摄液体中气泡的行为. 在圆形容器外侧安装一个方形容器,在圆形和方形容器之间的空间放入水,以避免圆形容器的弧形侧壁对气泡形状折射的影响. 利用会声会影软件确定气泡的平均速度,一次实验统计 10 个气泡的上升数据,然后计算各个气泡在容器内的平均上浮速度. 对计算的数据进行平均,减少偶然误差对实验造成的影响. 利用 Photoshop 软件确定气泡的外形尺寸,统计 5 个气泡上升过程的外形尺寸,考察容器压力、吹气流量以及喷嘴孔径对气泡外形尺寸的影响,分析气泡直径的变化. 本研究将气泡的等效直径 d 定义为其长轴 d_{Bl} 和短轴 d_{Bs} 的算术平均值,即

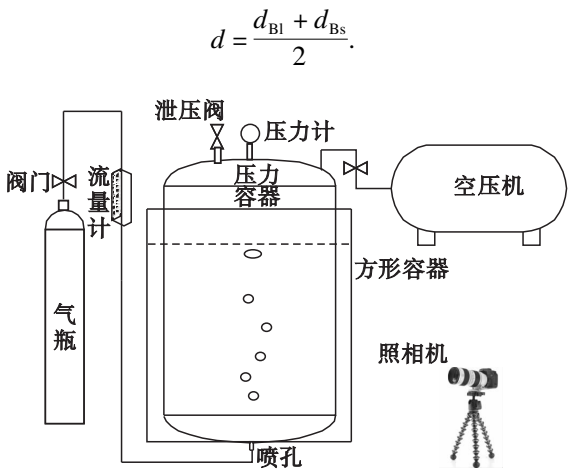


图 1 实验设备示意图
Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2 实验结果及讨论

图 2 是流量为 48 mL/min,孔径为 8 mm,不同压力条件下单个气泡在上升过程中的形貌变化.

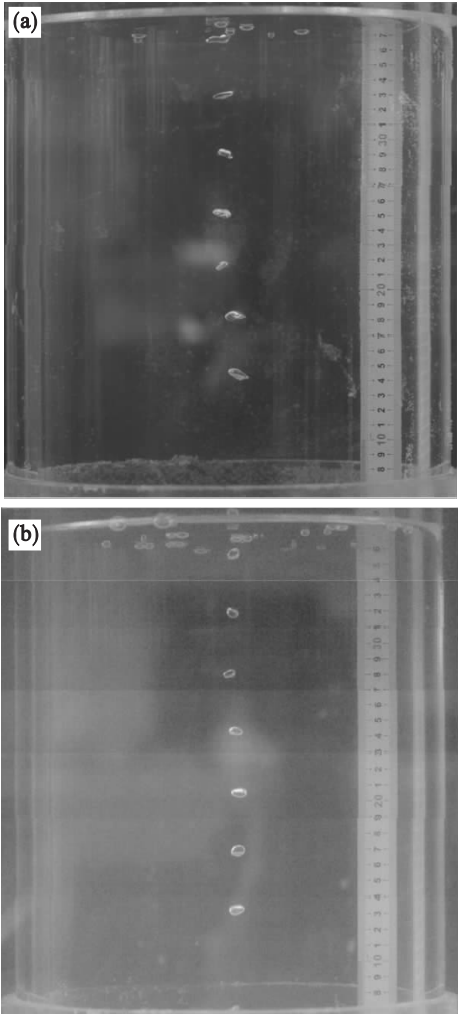


图 2 不同压力对气泡上升过程形貌的影响
Fig. 2 Influence of pressure on bubble's appearance during its up-rising
(a) — $p = 0.1 \text{ MPa}$; (b) — $p = 0.4 \text{ MPa}$.

从图 2 可以发现,常压条件下气泡呈扁平状,在上升过程中形貌变化大,气泡的形状不稳定. 加压 (0.4 MPa) 下气泡变小,呈椭球状,在上升过程中形貌基本不变. 可见增加压力可以使气泡在上升过程中形貌稳定.

图 3 为常压下气泡等效直径与吹气流量和喷嘴孔径的关系. 从图中可以看出,喷嘴孔径一定时,随吹气流量增加,气泡等效直径增大. 流量对大孔径下产生的气泡等效直径影响较小,在 8 mm 孔径下,当流量从 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡的等效直径增加了 0.45 mm;而在 1 mm 孔径下,当流量从 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡的等效直径增加了 1.21 mm,可见流量对小孔径产生气泡的等效直径影响较为显著.

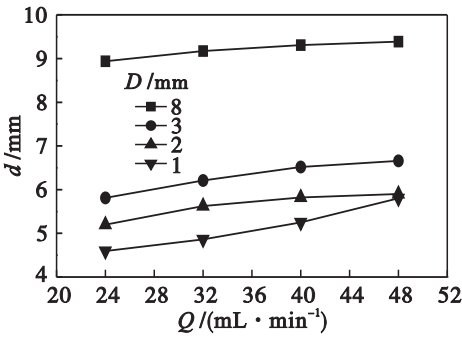


图 3 压力为 0.1 MPa 时气泡等效直径与吹气流量的关系
Fig. 3 Relationship of bubble's equivalent diameter with gas flow rates at 0.1 MPa pressure

图 4 为 1 mm 喷嘴孔径下气泡等效直径与吹气流量和容器压力之间的关系. 由图可知,在吹气流量一定时,随压力增加,气泡的等效直径下降. 在常压下,当气体流量由 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡等效直径由 4.59 mm 增加到 5.80 mm,气泡等效直径增加了 1.21 mm;而在容器压力为 0.4 MPa 时,当气体流量由 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡等效直径由 4.05 mm 增加到 4.80 mm,气泡等效直径增加了 0.75 mm. 由此可知,在小的喷嘴孔径下,气泡等效直径主要与吹气流量有关,吹气流量能显著地改变气泡的等效直径,而压力对改变气泡等效直径的作用不明显.

图 5 为 8 mm 喷嘴孔径条件下,气泡等效直径与吹气流量和容器压力关系. 从图中可以看出,在气体流量为 24 mL/min 时,气泡等效直径随着体系压力的增大从 9.0 mm 逐渐减小到 5.8 mm,气泡等效直径减小的幅度为 3.2 mm. 由此可知容器压力增大,气泡等效直径减小,在低的吹气流量和高的容器压力下,较大的孔径也能产生小的气泡. 当气体流量为 48 mL/min 时,气泡等效直径

随着体系压力的增大从 9.39 mm 减小到 7.53 mm,气泡等效直径减小的幅度为 1.86 mm,说明气泡等效直径受到容器压力和吹气流量的双重制约,吹气流量的增大,会对气泡的等效直径产生重要的影响. 在大孔径下吹气,压力在 0.1 ~ 0.2 MPa 时,不同的吹气流量下的气泡等效直径相差小;而当压力增加到 0.3 ~ 0.4 MPa 时,不同吹气流量的气泡等效直径差别变大.

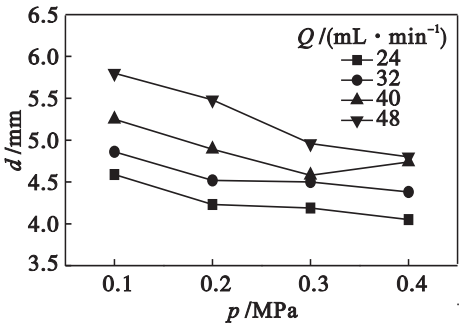


图 4 1 mm 孔径下气泡等效直径与压力的关系
Fig. 4 Relationship between bubble's equivalent diameter and pressure for 1 mm diameter orifice

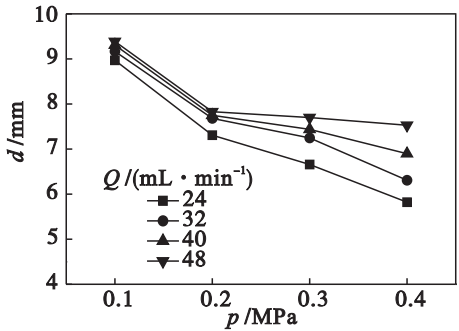


图 5 8 mm 孔径下气泡等效直径与压力的关系
Fig. 5 Relationship between bubble's equivalent diameter and pressure for 8 mm diameter orifice

图 6 给出了 24 mL/min 流量条件下,气泡等效直径与喷嘴孔径和容器压力的关系. 对于 8 mm 孔径喷嘴产生的气泡,压力对气泡等效直径的影响较大;然而对于 1 mm 孔径喷嘴,压力对气泡等效直径的影响并不明显. 可见,喷嘴孔径和压力对气泡的等效直径有决定性影响.

图 7 和图 8 为同一孔径下,不同吹气流量和容器压力的气泡上升速度. 由图可知,吹气流量增大,气泡的上升速度有增大的趋势. 这主要是因为流量增大使从孔口吹入气泡的初始动能增大了;另一方面,随气体流量的增加,可以形成大气泡,其受到的浮力增加,所以气泡在液体中的上升速度增大. 从图 7 中可以看出,容器压力为 0.1 MPa 时,当流量从 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡

运动速度从 266.7 mm/s 增加到 300.5 mm/s,增加的幅度为 33.8 mm/s;而当容器内压力0.4 MPa 时,气泡的上升速度从 234.9 mm/s 增加到 249.1 mm/s,增加的幅度仅为 14.2 mm/s,常压下吹气流量对气泡上升速度的影响较为明显.容器内压力增大,气泡的上升速度降低,当容器内压力由 0.1 MPa 增加到 0.4 MPa,气泡的运动速度由 300.5 mm/s 减小到 249.1 mm/s. 因此,压力增加,能够延长气泡在液体中的停留时间,有利于气液间的反应.

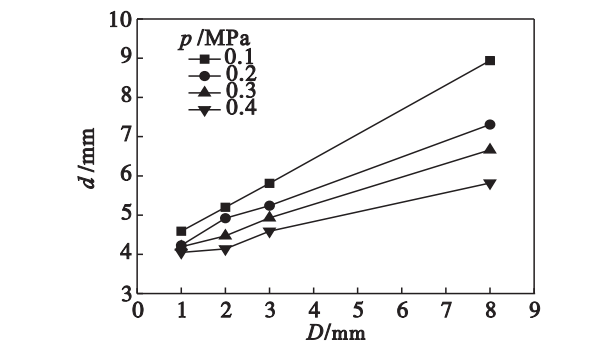


图 6 流量为 24 mL/min 下的气泡等效直径与孔径的关系
Fig. 6 Relationship of bubble's equivalent diameter with orifice diameter at 24 mL/min gas flow rate

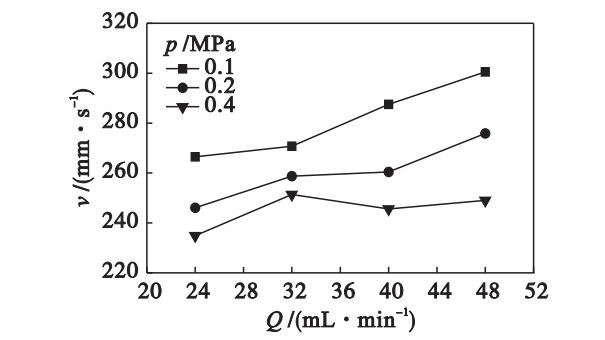


图 7 1 mm 孔径下的气泡上升速度
Fig. 7 Bubble's rising velocity with 1 mm diameter orifice

从图 8 可以看出,喷嘴孔径为 2 mm,容器压力为 0.1 MPa 时,当流量从 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡的运动速度由 268.15 mm/s 增加到 309 mm/s,增加的幅度为 40.85 mm/s;容器压力为 0.3 MPa 时,当流量从 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡的上升速度从 251.7 mm/s 增加到 278.06 mm/s,增加的幅度为 36.26 mm/s;而当容器压力为 0.4 MPa 时,当流量从 24 mL/min 增加到 48 mL/min 时,气泡的上升速度从 248.07 mm/s 增加到 265.43 mm/s,增加的幅度仅为 17.36 mm/s. 可见当压力增加时,流量对气泡上升速度的影响会减弱. 从图 5 也可以看出,当吹气流量为 48 mL/min 时,容器内压力由

0.1 MPa 增加到 0.4 MPa,气泡速度从 300.5 mm/s 减小到 249.0 mm/s,容器内压力增加气泡的平均等效直径会减小,导致气泡体积减小,气泡受到的浮力也会减小,这样气泡的上升动力减小,于是在加压条件下气泡的上升速度会减小.

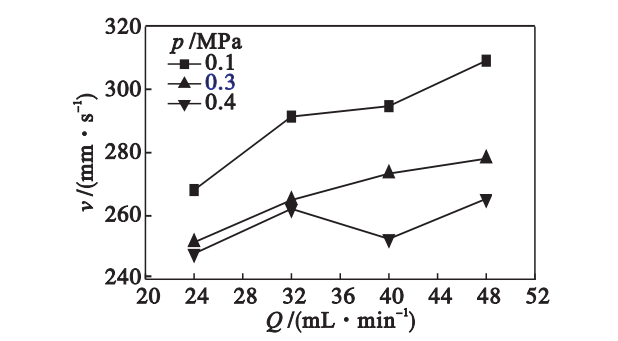


图 8 2 mm 孔径下的气泡上升速度
Fig. 8 Bubble's rising velocity with 2 mm diameter orifice

上述的结果表明,气泡在液体中上浮的行为受到液面上压力的影响. 常压下,气泡呈现扁平状,压力为 0.4 MPa 时,气泡为椭球状且气泡尺寸变小. 正是由于气泡尺寸在液体内部压力增加后变小,其密度增加,气泡受到的浮力 $(\rho_l - \rho_g)g V_g$ 下降,使得气泡的上浮速度降低,在液体中的停留时间延长.

3 结 论

- 1) 在常压下,大孔径喷嘴形成的气泡呈扁平状,其上升过程形状变化大;而在大的压力下,其形成的气泡呈椭球状,上升过程形状稳定.
- 2) 气泡等效直径受到容器压力的影响,容器内压力增加会导致气泡尺寸的减小,在大的孔径下,压力对气泡尺寸的影响比小孔径(1 mm)更为明显;喷嘴孔径会对气泡的尺寸产生决定性影响,大孔径喷嘴产生的气泡等效直径比小孔径产生的气泡等效直径要大;在常压下,流量的改变对大孔径喷嘴产生的气泡等效直径影响较小,而对小孔径(1 mm)喷嘴产生的气泡等效直径影响较大.
- 3) 气泡上升速度受到容器压力的影响,容器内压力的增加,气泡的上升速度降低,且在大的吹气流量下,压力对气泡运动速度的影响更为明显;气泡上升速度受到喷嘴孔径的影响,大孔径喷嘴产生的气泡一般有更大的上升速度. 在常压下,气体流量对气泡上升速度起着决定性影响,而加压到 0.4 MPa,喷嘴孔径对气泡上升速度起着决定性影响.