

液池内气溶胶对孔板鼓泡体积影响的实验研究

张吉斌, 吕焕文

Experimental Research on Effect of Aerosol in Liquid Pool on Size of Bubbles from Submerged Orifice

Zhang Jibin and Lyu Huanwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.05.0245>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单个浸没孔气泡动力学特性的数值模拟

Numerical Simulation of Gas Injected Bubble Dynamics from Single Submerged Orifice

核动力工程. 2020, 41(6): 194–197

严重事故下吸湿性气溶胶的自然去除研究

Study on Natural Removal of Hygroscopic Aerosols in Reactor Severe Accident

核动力工程. 2020, 41(1): 145–149

严重事故下多组分吸湿性气溶胶的重力沉降研究

Study on Gravity Sedimentation of Multicomponent Hygroscopic Aerosols in Reactor Severe Accident

核动力工程. 2021, 42(4): 80–85

一种通风流量孔板光圈调节器的研制

Design of a Ventilation Flow Orifice Plate Aperture Regulator

核动力工程. 2019, 40(6): 168–172

新型旋叶分离器分离特性与机理研究

Study on Separation Characteristics and Mechanism of a New Swirl Vane Separator

核动力工程. 2021, 42(2): 29–34

IVR-ERVC下压水堆压力容器下封头传热及应力/应变分析

Heat Transfer and Stress / Strain Analysis of PWR RPV Lower Head under IVR-ERVC

核动力工程. 2018, 39(5): 126–132



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)05-0245-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.05.0245

液池内气溶胶对孔板鼓泡体积影响的实验研究

张吉斌, 吕焕文

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 液池内的孔板鼓泡是安全壳内气体过滤排放过程中的重要现象。过滤过程中, 孔板鼓泡体积直接影响气泡的上升速度与气液接触面积, 因此是影响过滤器过滤效率的重要参数之一。随着过滤的进行, 液池内滞留的气溶胶可能成为孔板鼓泡体积的影响因素之一。本文采用可视化实验, 对含 BaSO₄ 和 TiO₂ 气溶胶液池内的孔板鼓泡过程进行研究, 观察和分析孔板鼓泡体积的变化规律, 进而获取气溶胶对孔板鼓泡体积的影响机制。研究表明, 高温液池和 TiO₂ 会使得生成气泡体积增加, 添加 BaSO₄ 的影响并不明显, 实验还发现了生成气泡顶部含“小气腔”的情况, 表面张力及“小气腔”的变化是气泡体积改变的主要机制。

关键词: 气溶胶; 气泡; 孔板; 温度; 表面张力

中图分类号: TL331 **文献标志码:** A

Experimental Research on Effect of Aerosol in Liquid Pool on Size of Bubbles from Submerged Orifice

Zhang Jibin, Lyu Huanwen

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China.

Abstract: The bubble formation from a submerged orifice in a liquid pool is an important phenomenon in the filtration and discharge process of gas in the containment. During filtration, the size of bubbles from the submerged orifice directly affects the rising speed and the gas-liquid contact area of the bubbles, and thus is one of the important parameters affecting the filter filtration efficiency. As the filtration proceeds, the aerosol content in the liquid pool, among others, may affect the bubble size. This paper conducts a visual experiment to study the bubble formation from a submerged orifice in a liquid pool containing BaSO₄ or TiO₂ aerosol and to observe and analyze the change law of the size of bubble from the submerged orifice, thus to gain the mechanism of the effect of aerosol on size of bubble from the submerged orifice. The results show that high temperature liquid pool and TiO₂ can increase the bubble size, but adding BaSO₄ has no obvious effect. Also, the experiment shows the presence of “small air cavity” on the top of the bubbles formed, and the changes of surface tension and “small air cavity” form the main change mechanism of bubble size.

Key words: Aerosol, Bubble, Orifice, Temperature, Surface tension

0 引 言

安全壳过滤排放系统是保障安全壳结构完整

性的重要措施之一。通过含孔板进行气体过滤是一种简单、高效的过滤方式。在过滤过程中, 在

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-11-23

作者简介: 张吉斌(1985—), 男, 高级工程师, 现从事反应堆总体设计研究工作, E-mail: 328637531@qq.com

孔板形成鼓泡，将安全壳内含放射性气溶胶的气体导入液池。在鼓泡过程中，放射性固体颗粒、放射性气体或无机盐可以通过气泡的边界传递到液相，并滞留在液相中，从而达到净化液池气相的效果。被过滤气体通过气泡的边界进入液池，因此气泡的体积将直接决定气液的接触面积，进而影响过滤效率。对液池内孔板的孔边鼓泡体积进行研究，对孔板的优化设计及评估过滤系统的过滤效率十分重要。

在反应堆发生严重事故时，过滤液池内会有大量不可溶性气溶胶颗粒滞留。因此，液相中的这些颗粒物对孔板鼓泡体积产生的影响值得关注。对于液池内的鼓泡现象，早期学者曾对气泡受力^[1]、液相粘度^[2]、鼓泡接触角^[3]等多方面的影响进行过细致研究。而目前国内外学者更关注于特定研究背景下的鼓泡现象，如魏楠^[4]研究了颗粒床内的鼓泡现象；田震^[5]进行了高温高压环境的鼓泡研究；Babu^[6]与李应治^[7]分别研究了液池内表面活性剂与可溶性气溶胶对鼓泡现象的影响。虽然针对液池内孔板鼓泡体积变化的现有研究已较为深入，但关于液池内不可溶性气溶胶颗粒对气泡生成特性影响的研究相对较少。Ata等^[8]通过实验研究发现，疏水颗粒 SiO₂ 会导致鼓泡体积减小；李应治^[9]对 BaSO₄ 悬浊液中的孔板鼓泡体积进行了研究，气泡所受表面张力减小，进而使得气泡体积减小。总之，目前关于液相内气溶胶颗粒对气泡体积影响机制的研究尚有不足，相关研究有待进一步深入。本文将针对 BaSO₄ 及 TiO₂ 气溶胶颗粒悬浊液，通过实验研究气相流量、液相温度和气溶胶种类对孔板鼓泡体积的

影响规律及机制。

1 实验装置与实验方法

利用高速摄影捕捉气泡动态是气泡研究中十分成熟且有效的可视化实验方式^[4-7]，本文也采取可视化的实验方式。实验回路如图 1 所示，实验水箱尺寸为 300 mm×200 mm×700 mm，底部安装孔口直径为 1 mm 的圆形孔板。管路与水箱分别设有控温装置，控温采用比例-积分-微分（PID）控制装置进行参数整定，在温度控制闭环进行 PID 控制，以实现气液相温度快速及准确的控制。鼓泡气源进入实验水箱前经过一个变温水箱成为湿饱和空气，以排除液相蒸发对实验结果的影响。气相流量采用质量流量计测量。通过阀门调节气相流量，流量范围为 0.05~0.20 L/min。在水箱后部设置光源与均光板以保证气泡图像清晰。气泡长大与脱离的过程可由高速摄影仪拍摄并储存，以做后续分析。采用 Matlab 软件对拍摄的气泡图像进行处理，并获取气泡的特征参数。在原始图像内的噪声以及背景去除、中值滤波、二值化填充后可获取较为清晰的气泡轮廓如图 2 所示。图像处理时假设气泡为周向对称的近似椭球体^[10]，并由获取的二维气泡轮廓计算气泡的三维尺寸。计算时对比像素点的距离，获取气泡内最合适的中心点及对称轴，并采取切片的处理思路^[10]将气泡垂直于对称轴切成许多小薄片（图 3）。

将每个薄片均看作圆柱体，用微分和积分的方法对所有圆柱体积进行累加，可获得整个气泡的体积。实验中的液相包括去离子水与气溶胶颗粒悬浊液，选用的气溶胶颗粒为粒径 300 nm 的

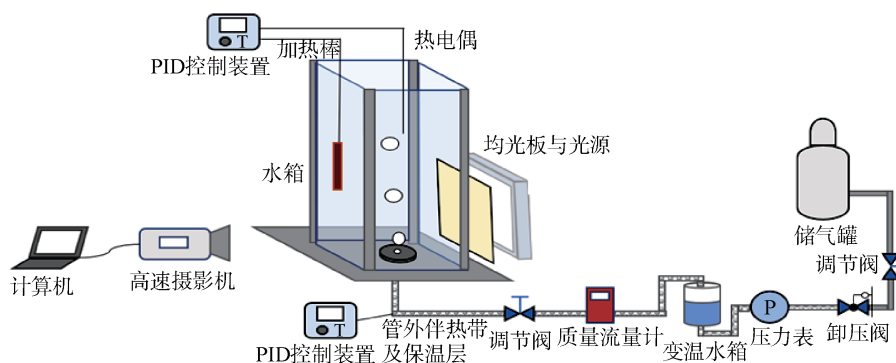


图 1 实验回路

Fig. 1 Experimental Loop

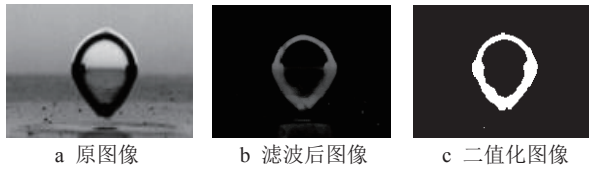


图2 气泡图像的预处理
Fig. 2 Preprocessing of Bubble Image

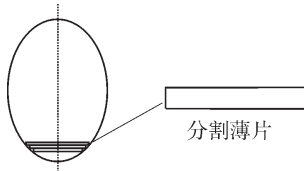


图3 切片法分割气泡示意图
Fig. 3 Schematic Diagram of Bubble Segmented in Slice Method

BaSO₄ 及 TiO₂ 颗粒。颗粒物的加入会降低液相的可见度，为获得清晰的气泡图像，实验选用悬的浊液浓度均为 0.004 g/L。

2 实验结果与分析

2.1 气溶胶对孔板气泡体积的影响

孔板气泡在生长过程中会受到气相的动量力 F_m 、曳力 F_d 、浮力 F_b 等动力以及表面张力 F_σ 、对流作用力 F_p 和惯性阻力 F_i 等阻力共同作用^[9]。在气泡脱离瞬间，气泡受力平衡：

$$F_m + F_b + F_p = F_\sigma + F_d + F_i \quad (1)$$

式中，气相的动量力和表面张力是影响气泡生成体积的主要因素，气泡浮力与气泡体积呈正相关^[1]。在孔口气相流速较低时，表面张力决定着生成气泡的体积，Krevelen 等给出了相应的气泡体积预测公式^[1]：

$$V_b = \frac{\sigma \pi D_o}{(\rho_l - \rho_g) g} \quad (2)$$

式中， V_b 为气泡体积； g 为重力加速度； σ 为液相表面张力； D_o 为孔口直径； ρ_l 、 ρ_g 分别为液相、气相密度。

在气体流量较高时，流量将是主要影响因素，Davidson 等认为，高流量下气泡表面张力的影响可以忽略，并给出了气泡体积预测公式^[11]：

$$V_b = k \frac{Q_G^{6/5}}{g^{3/5}} \quad (3)$$

式中， Q_G 为气相流量； k 为修正系数。

通过实验获得不同流量及温度下悬浊液内孔板的气泡体积，从对比结果可以看出，与去离子

水工况相比，25℃ 下 BaSO₄ 悬浊液内的孔板气泡体积变化不大，而 TiO₂ 悬浊液中的孔板气泡体积增大。当实验温度升到 60℃ 时，TiO₂ 及 BaSO₄ 悬浊液内的孔板气泡体积均显著增大。对液相的表面张力测量结果显示，相比于去离子水，TiO₂ 悬浊液的表面张力有所增加（由约 72 mN/m 增至 73 mN/m），而 BaSO₄ 悬浊液的表面张力并无显著变化。由上述分析结合式（2）可推断，在其他外力受实验条件控制均不发生改变时，表面张力的增大是 TiO₂ 悬浊液内气泡的脱离体积变化的原因。在此基础上，固定实验气相流量为 0.2 L/min，提高液相温度进行测试。测试结果表明，液相温度增加到 60℃，2 种悬浊液的表面张力均显著降低（<68 mN/m）。由式（2）和前述分析可知，气泡脱离体积与表面张力呈正相关，即随着表面张力的降低，气泡体积变小。然而，结果显示 2 种悬浊液内孔板的气泡体积显著增大，即实验结果的变化趋势与已有结论不符。

如图 4 所示，相比于 25℃ 工况，高温悬浊液内生成的孔板气泡形态也明显改变。这表明含气溶胶的高温液池内气泡体积的影响机制可能产生了变化。温度升高造成的表面张力变化已不是气泡体积变化的主要影响因素。

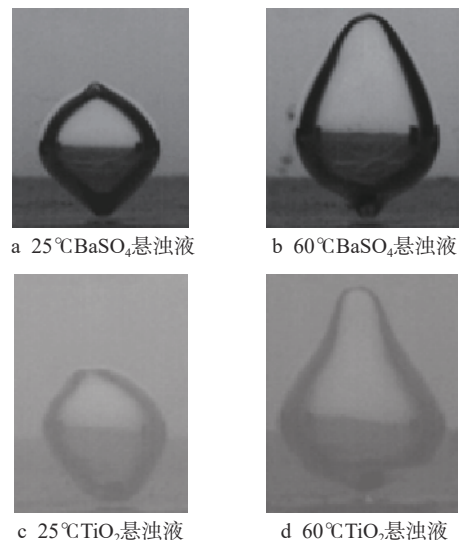


图4 气泡随温度及气溶胶种类的变化
Fig. 4 Variation of Bubbles with Temperature and Aerosol Types

2.2 液池气溶胶的影响机制探究

为进一步探究气溶胶颗粒对孔板鼓泡体积的

影响机制,需要对悬浊液内孔板气泡的形态变化进行细致观察分析。结果发现,气泡形态与体积的改变源于一个气泡顶部含“小腔室”的特殊现象,且“小腔室”普遍存在于各个实验工况所生成的孔板气泡中,如图 5a、图 6 红圈内的“小腔室”所示。所谓“小腔室”为浮于气泡顶部液膜内的小型气体空间。此气体空间的形成应与气泡的脱离过程息息相关。在气泡脱离过程中,孔口处会形成颈部收缩,并使得液体进入孔口。断裂后的颈部伸长部分会在惯性作用下弹回,并与孔口内的液相搅混。此时,可能会有部分气体以“小腔室”的形式嵌入液体内部,最终存留于气泡顶部液膜。类似的现象及其形成原因未见报道,相关问题有待进一步探究。实验中观察到了“小腔室”与气泡间的液膜断裂、腔室融入气泡的现象(图 6)。连续的气相经孔口进入气泡,在惯性的作用下会到达气泡顶部液膜内表面,并沿着液膜向四周运动,在气泡内部做如图 5b 所示的循环运动^[12]。顶部液膜会受到气相流动的影响产生方向相反的流动趋势,即受到横向断开的力。同时,当液相温度升高,液相的表面张力和粘度显著降低^[13],液膜将更容易断开。通过观察发现,当液相为去离子水时,气泡与“小腔室”间的液膜在气泡长大过程中未发生断裂。但当气泡脱离时,在惯性的作用下液膜会受到一个较大的扰动,进而发生断裂(图 6)。由于液膜断裂现象发生于气泡脱离后,因此并未对所生成的孔板气泡体积产生显著影响。

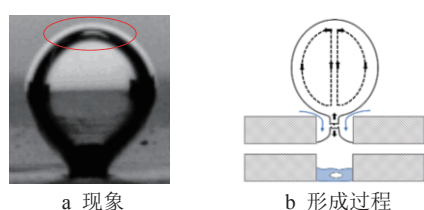


图 5 “小腔室”现象及其形成过程

Fig. 5 “Small Cavity” Phenomenon and its Formation

从图 6 可以看出,当液相为气溶胶悬浊液时,气泡与“小腔室”间的液膜于气泡生长期间便发生了断裂。液膜断裂后,气泡内气相运动的阻力突然减小,在惯性的作用下涌入“小腔室”,促使气泡顶部显著凸起。此时气泡所受惯性阻力 F_i 迅速增大。由式(1)可知,此时气泡脱离时所

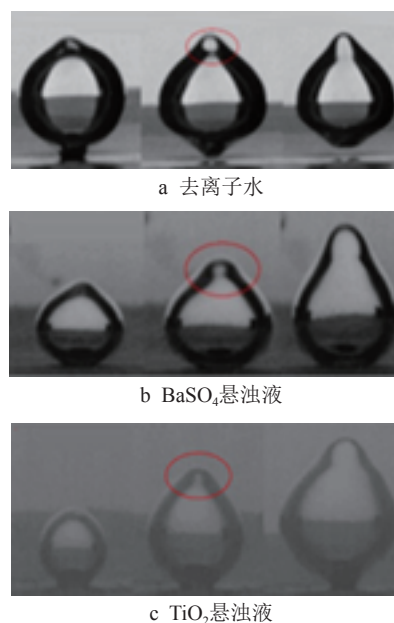


图 6 不同液相内液膜断开现象

Fig. 6 Liquid Film Fracture in Different Liquid Phases

需的浮力 F_b 随之增大,即气泡脱离体积增大。综上所述可知,60℃气溶胶颗粒悬浊液中液膜的提前断裂间接增加了气相惯性阻力,从而促使气泡的脱离体积显著增大。实验结果表明,气溶胶颗粒悬浊液中的“小腔室”液膜更容易受气流的影响而较早发生断裂,不同类型的气溶胶颗粒的影响也有所不同。如图 7 所示,选用疏水性 BaSO₄ 颗粒悬浊液内气泡顶部液膜均能较早地断裂,因此气泡的体积均显著增加。相比之下,亲水性 TiO₂ 颗粒悬浊液内不同气泡的液膜断裂时间有明显的波动,从而使得气泡体积也表现出较大的波动。而去离子水中的孔板气泡在生长过程中没有出现“小腔室”破裂,因此呈现出图 7 中所示的鼓泡体积变化规律。

由此可以推测,疏水性较强的气溶胶颗粒对气泡内部气流的影响更为敏感,而有关气溶胶颗粒对“小腔室”破裂的影响机理有待进一步探索。

3 结论

本文对含气溶胶液池内孔板鼓泡可视化实验结果进行了描述,并结合气泡受力情况探究了 0.004 g/L 的 BaSO₄ 与 TiO₂ 悬浊液可能对气泡体积产生的影响,主要结论如下:

(1) 常温液池内添加 TiO₂ 颗粒会使得气泡

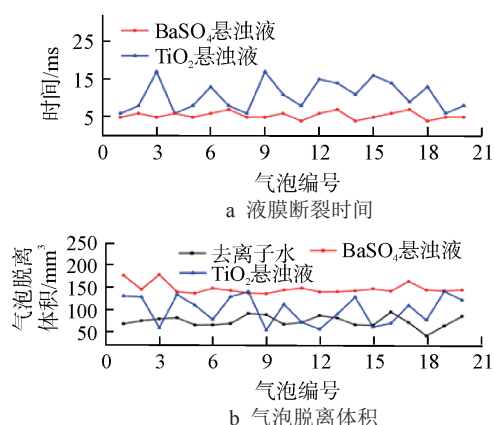


图7 不同液相内气泡脱离体积与液膜断裂时间

Fig.7 Detached Bubble Size and Liquid Film Fracture Time in Different Liquid Phases

脱离体积增加，而添加 BaSO₄ 颗粒的影响则不明显；60℃ 液相内添加 TiO₂ 或 BaSO₄ 颗粒均会使得气泡脱离体积显著增加。

(2) 气溶胶颗粒会通过改变表面张力的方式影响气泡脱离体积。添加 TiO₂ 颗粒会增大液池内的表面张力，进而增大生成气泡的体积，而添加 BaSO₄ 颗粒的影响并不显著。

(3) 实验中观察到气泡顶部含“小腔室”的现象，气溶胶颗粒可能会通过促使高温液池内气泡与“小腔室”间的液膜在气泡长大期间断裂的方式增大气泡的脱离体积。其中，添加 BaSO₄ 颗粒的影响更为显著，添加 TiO₂ 颗粒的影响相对较弱。

参考文献：

[1] VAN KREVELEN D W, HOF TIJZER P J. Studies of gas-bubble formation: calculation of interracial area in bubble contactors[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1950,

46(1): 29-35.

[2] DAVIDSON J F, SCHÜLER B O G. Bubble formation at an orifice in a viscous liquid[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1997, 75 Suppl 1: S105-S115.

[3] GERLACH D, BISWAS G, DURST F, et al. Quasi-static bubble formation on submerged orifices[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(2): 425-438.

[4] 魏楠, 吴晷, 薄宇轩, 等. 气泡在颗粒床层表面的生成脱离行为[J]. *化工进展*, 2021, 40(2): 678-687.

[5] 田震. 高温高压鼓泡塔中气泡运动的实验观察与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[6] BABU R, DAS M K. Effects of surface-active agents on bubble growth and detachment from submerged orifice[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 179: 172-184.

[7] 李应治, 周艳民, 孙中宁, 等. 鼓泡过滤可溶性气溶胶特性实验研究[J]. *核动力工程*, 2019, 40(S2): 21-25.

[8] ATA S, NG K Y, LAW E, et al. Influence of particles on the formation of bubbles from a submerged capillary[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 66: 47-53.

[9] 李应治. 单孔鼓泡特性的可视化实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

[10] 汤华鹏, 温济铭, 谷海峰. 基于高速摄影测量气泡体积的图像处理技术研究[J]. *应用科技*, 2019, 46(2): 108-115.

[11] DAVIDSON J F, SCHUELER B O G. Bubble formation at an orifice in an inviscid liquid[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1960(38): 335-342.

[12] PAN W T, CHEN X L, DAI G C, et al. Enhanced effect of bubble deformation on internal particle transport[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(2): 905-918.

[13] 马航海. 简明工程流体力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016: 6-11.

(责任编辑: 孙 凯)