

液态锂铅合金鼓泡器的气泡行为数值模拟

谢波, 翁葵平

中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900

摘要 液态金属包层的氚燃料循环是实现聚变堆、聚变-裂变混合堆正常运行的核心技术之一。氚燃料循环系统由氚净化、氚提取、氚储存、氚测量、氦/水冷却、氚回收等子系统构成, 而液态金属鼓泡器位于包层主回路与氚提取系统之间, 具有氚在线监测与氚去除的重要功能, 是不可缺少的关键部件。由于氢同位素在液态锂铅中的极低溶解度和液态合金的高温、活泼、物理等特性, 鼓泡器的研制十分困难。为完成液态锂铅合金鼓泡器 (LLLB) 的设计与建造, 采用流体力学方法建立了描述气泡直径与粒度分布、气含率特征等动力学行为的代数模型。数值模拟结果表明, 床层气含率和稳定气泡粒度分布均不受喷嘴孔径的影响; 低气速下气泡破碎远快于气泡的聚并, 绝大部分初始气泡直径大于最大稳定直径, 其破碎后的直径取决于最大稳定气泡直径的大小; 气泡比表面积和传质表面积增大的主要因素是气泡直径分布的变化。

关键词 锂铅合金; 鼓泡床; 气泡; 模拟

中图分类号 TL64

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)14-0044-05

Numerical Simulation of Bubble Behavior in the Liquid Lithium Lead Bubbler

XIE Bo, WENG Kuiping

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China

Abstract The tritium fuel cycle of the liquid metal blanket is a core technology for the normal operation of a fusion reactor or a fusion-fission hybrid reactor. The tritium fuel circulation system consists of the tritium purification, the tritium extraction, the tritium storage, the tritium measurement, the helium/water cooling and the tritium recovery subsystem. The liquid metal bubbler located between the blanket main circuit and the tritium extraction system is an indispensable key component for its important functions in tritium monitoring and removal. However, the development of a bubbler is difficult as the solubility of hydrogen isotopes in liquid lithium lead is very low and the liquid alloy has some unique characteristics in high temperature, with respect to an effective design and building of Liquid Lithium Lead Bubbler (LLLB) for the Tritium Breeding Module (TBM) of fusion reactor. An algebraic model to describe the gas holdup characterization, the bubbler diameter and the size distribution is developed under the assumptions that the gas phase is non-Newtonian and there is no frictional force between gas and liquid phases. Simulation results show that bubbles would break up much faster than while being coalesced under low gas velocity. In LLLB, the breakage is a dominant feature for bubbles after they leave the orifice. Initial bubbles formed over the orifice are mostly larger than the largest stable bubble. They would break up quickly and their sizes are reduced to below the maximum diameter d_s of stable bubbles. Moreover, the gas-liquid surface area would be increased even though the gas holdup does not change significantly. A high mass transfer area could be obtained by injecting more small initial bubbles with diameters under d_s .

Keywords lithium-lead alloy; bubbler; bubble; simulation

收稿日期: 2010-03-24

基金项目: ITER 计划专项国内配套研究项目 (2009GB109006)

作者简介: 谢波, 副研究员, 研究方向为氢同位素分离与氚工艺, 电子信箱: xiebomaps@gmail.com

0 引言

聚变能是最终解决人类能源危机的有效途径之一。随着聚变能技术研究从物理可行性到工程可行性的跨越,包层技术已成为聚变堆工程、聚变-裂变混合堆工程成败的核心技术之一^[1]。由于液态金属锂铅(Li₁₇Pb₈₃)包层具有独特的优势,从而成为主要设计方案之一^[2],可采用氦-氢鼓泡器的方式从液态锂铅中提取氦^[3]。液态锂铅鼓泡器(Liquid Lithium Lead Bubbler, LLLB)的概念设计中,考虑到液态锂铅的物化参数(表面张力、黏度、密度)与水银相仿^[4],为了便于今后实现氦的在线提取、提高提取效率,LLLB选用气提式鼓泡器,通过旋转喷头不断向锂铅熔体中喷入氦-氢混合的小气泡,锂铅熔体中的氦通过扩散进入气泡并随气泡上升离开熔体表面。为了解这种特殊的气-液接触模式,研究LLLB中气泡流和液态金属流的运动规律,本文采用流体力学方法建立了代数模型,对气泡直径分布、粒度分布、气含率特征等动力学行为进行了数值模拟,期望对LLLB的工程设计与建造提供理论参考。

1 代数模型描述

1.1 机制分析

有研究结果表明^[5],聚并-破碎是气泡在液相中的主要行为,聚并使气泡直径增大,破碎使气泡直径减小,气泡的聚并-破碎平衡决定了鼓泡器中气泡的尺寸。由于氦-氢混合气的密度远小于液态锂铅的密度,加上气泡的可变形性和锂铅的高黏度,流动状况较一般的气液两相流动要复杂得多,单一地依靠流体力学中的双流体模型、离散模型、分离流模型和粒数衡算方程(Population Balance Equations, PBE),难以全面地描述气泡-液体两相湍流脉动特性及其相互作用。若采用多种模型框架,运用迭代和蒙特卡洛等方法求解时,会导致模型异常复杂,难以在短时间内完成系统描述与评估。本文将分散的气泡流连续介质化,多相共存并按各自的运动规律运动,同时考虑分散相的非连续性,设置假设条件和选择合适的经验公式,在PBE衡算方程的框架内推导气泡动力学方程。

1.2 假设条件

根据上述分析提出如下假设:

- 1) 忽略气泡的重力作用,气泡群运动时,气泡的容积流量沿鼓泡床高不变,且气泡在上升过程中不发生横向运动,气泡尾涡夹带液体也随之上升。
- 2) 在喷嘴口形成的大气泡,破碎后形成的小气泡再次聚并成大气泡的速率远小于大气泡破裂成小气泡的速率。
- 3) 忽略气液相间作用,对某一特定气泡群可依据动量守恒定律进行动量衡算。
- 4) 假设液态锂铅鼓泡床为圆筒形结构,高40cm,内径30cm,锂铅液位高度为20cm。

1.3 气泡行为模型

根据粒数衡算方程衡算方法,时间 $t=0$ 时喷嘴口形成体

积为 V 、气泡的粒数浓度为 $N(V, 0)$ 的气泡群,经破碎衍生成某一时刻 t 时体积为 V 、气泡的粒数浓度为 $N(V, t)$ 的气泡群,则有

$$\frac{\partial N(V, t)}{\partial t} = B_b - D_b \quad (1)$$

式中, B_b 为由更大气泡破碎生成体积为 V 的气泡的生成速率, D_b 为体积为 V 的气泡因破碎成更小气泡而死亡的速率。忽略气泡的重力作用,定义气泡群稠度系数为 K ,流态特性指数为 m ,则气泡流剪应力为

$$\tau = -K \left| \frac{\partial U_z}{\partial r} \right|^{1/m} \quad (2)$$

式中, U_z 为单位时间单位面积上气泡的向上流量,即气泡的容积通量; r 为径向坐标,因假定气泡在上升过程中不发生横向运动,即为轴对称,气泡运动状态只是 r 的函数。忽略气液相间的物质交换,对气泡群进行动量衡算,有

$$\frac{\partial}{\partial r} (r\tau) + r \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

假设沿轴向压降 p 是均匀的,则 $\partial p / \partial r$ 可用定值 $\Delta p / L$ 代替,联合式(2),有

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[rK \left(\frac{\partial U_z}{\partial r} \right)^{1/m} \right] = \frac{\Delta p}{L} r \quad (4)$$

式中, L 为床层高度。边界条件 $r=0$ 时, $\partial U_z / \partial r = 0$; $r=R$ 时, $U_z = 0$ 。对式(4)积分,有

$$U_z = -\frac{1}{1+m} \left(\frac{\Delta p}{2KL} \right)^m R^{1+m} (1 - \xi^{1+m}) \quad (5)$$

式中, R 为床层半径, ξ 为无因次径向坐标(r/R)。整个系统气体的轴向总容积通量即为鼓泡床气体的体积流量 V_g ,故有

$$V_g = \int_0^R 2\pi r U_z dr = -\frac{\pi}{3+m} \left(\frac{\Delta p}{2KL} \right)^m R^{3+m} \quad (6)$$

参数 m 确定后,可由式(6)求出气泡群稠度系数:

$$K = \frac{\rho_{LiPb} g}{2 \left(\frac{3+m}{R^{1+m}} U_{\alpha} \right)^{1/m}} \quad (7)$$

式中, ρ_{LiPb} 为液态锂铅密度, U_{α} 为表观气速。整理式(6)并代入式(5)可消去 K ,令表观气速 $U_{\alpha} = V_g / \pi R^2$,则 U_z 可表示为

$$U_z = \frac{3+m}{1+m} U_{\alpha} (1 - \xi^{1+m}) \quad (8)$$

假设气泡群的横截面积为 ΔS ,一定气速下气泡的产生频率为 n ,单位时间气泡的上升距离即气泡的上升速度为 U_b ,根据物料衡算,气泡群的局部气含率 ε 和平均气含率 $\bar{\varepsilon}$ 分别为

$$\varepsilon = \frac{nV}{U_b \Delta S} = \frac{U_z}{U_b} \quad (9)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{U_{\alpha}}{U_b} \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(8),得

$$\varepsilon = \frac{3+m}{1+m} \bar{\varepsilon} (1 - \xi^{1+m}) \quad (11)$$

这与国外普遍采用的经验公式 $\varepsilon = \frac{m+2}{m} \bar{\varepsilon} (1-\xi^m)^{[6]}$ 十分近似。

除了气含率, 气泡直径和粒度也是表征气泡行为的重要参数。气泡在鼓泡床内不断受到来自液相的湍动涡旋袭击, 当液相袭击能量高于气泡的表面能时, 气泡发生破碎。依据 Kolmogoroff-Hinze 理论^[7], 存在一个最大稳定气泡直径 d_s , 只有超过该尺寸的气泡才会在液体漩涡的冲击下发生破碎。最大稳定气泡计算式为

$$d_s = C_h \frac{\sigma^{0.6}}{\rho_{L, \text{pb}} (gU_{oz})^{0.4}} \quad (12)$$

式中, C_h 为拟和参数, σ 为表面张力。

对于不同气泡粒级, 有

$$\frac{dN(d_j)}{dt} = B_b(d_j) - D_b(d_j) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

当 $d_j \leq d_s$ 时, 式(13)的结果为 $B_b(d_j)$; 当 $d_j > d_s$ 时, 式(13)结果不变。因此, 只要求出气泡破碎速率、生成速率等参数, 便可根据式(13)解出气泡群中不同直径气泡密度随时间的变化关系, 再利用不同体积气泡在鼓泡床内的直径-上升速率关系便得出该气泡群中不同体积气泡随时间的轴向位置, 进而得到气泡的轴向分布。气泡破碎速率采用 Hean Luo^[8] 提出的模型, 气泡的上升速率采用 Fan-Tsuchiya 公式^[9]计算, 不同孔径的喷嘴产生的气泡直径采用 Miyahara 等^[10]提出的公式计算, Sauter 气泡平衡直径 d_{sr} 按 Kyriakides 离散方式^[11]计算。通过比较不同直径气泡在流体中的上升速率的关系, 可以容易地将对时间的粒数分布转换为对鼓泡床轴向距离的分布函数。

2 结果与讨论

2.1 气含率特征

液态锂铅-氩鼓泡床局部气含率的径向分布如图 1 所示。假设采用不同孔径的单孔喷嘴时, 气含率随表观风速的变化关系如图 2 所示。从图 1 可以看出, 鼓泡床中心气含率最大, 沿径向呈复杂抛物线分布, 随半径增大而单调减小; 由于边界条件的限制, 在鼓泡床层边壁区气含率为零, 且不随风速的变化而变化。从图 2 可以看出, 单孔喷嘴的鼓泡床气

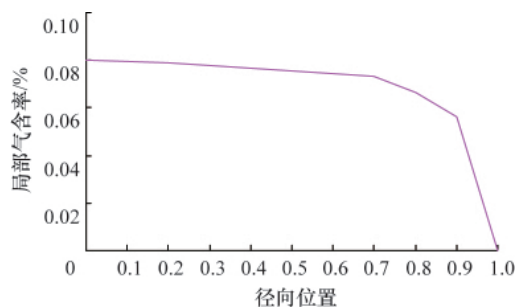


图 1 气含率径向分布计算结果

Fig. 1 Results of gas holdup radial distribution

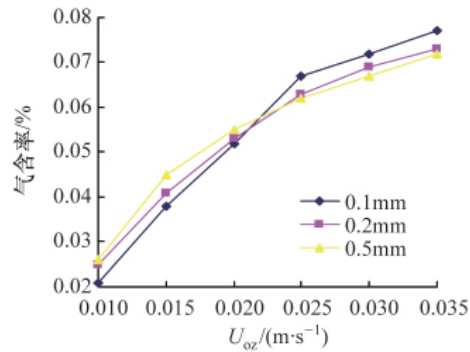


图 2 不同孔径喷嘴对气含率的影响

Fig. 2 Comparison of gas holdups of nozzles diameter

含率并不受孔径影响, 只是在较高风速下, 小孔径气含率才略高于大孔径。

由上可知, 本文根据连续介质流理论推导的局部气含率计算公式与国外的经验公式, 实质是相同的, 都从流变学角度定义了气泡群稠度系数 K 和流态特性指数 m 。不同的鼓泡速率对应不同的 K 值和 m 值, 随表观风速的增加, m 减小, 气含率分布越不均匀。这也就说明, 本文建立的气泡行为模型从理论的角度是符合液态锂铅-氩体系的。

2.2 气泡直径分布

假定喷嘴孔径分别为 0.1, 0.2 和 0.5mm, 表观风速分别为 0.015, 0.03m/s, 孔口形成的初始气泡尺寸和 Sauter 气泡平衡直径的轴向分布如图 3 所示。

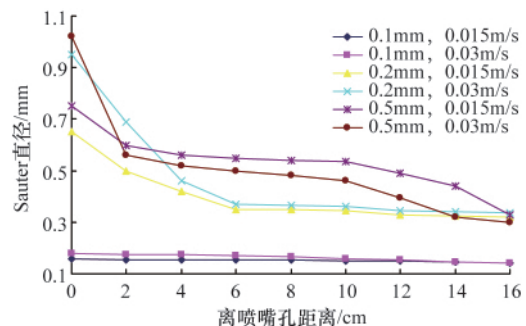


图 3 气泡直径的轴向分布

Fig. 3 Axial distribution of Sauter bubble diameters

从图 3 可以看出, 风速较高时, 喷嘴口形成较大气泡, Sauter 气泡平衡直径较大, 随着气泡的上升, 大气泡破碎, 小气泡增多, d_{sr} 逐渐减小, 且在距离喷嘴孔 6~10cm 范围内达到平衡值。这说明大气泡的破碎粒度减小到最大稳定粒度后便不再破碎, 形成稳定气泡群, 而初始气泡群中直径小于最大稳定直径的气泡在床层中是稳定的, 其直径不发生改变, 因此, 当大气泡破碎完成后, 床层中的气泡尺寸分布便会稳定下来。喷嘴大小对气泡最终平衡值几乎没有影响, 喷嘴产生的初始气泡中, 绝大部分是大于最大稳定直径的气泡, 其破碎后的直径取决于最大稳定气泡直径的大小。风速变化虽然

会影响初始气泡直径,但更重要的是影响最大稳定气泡直径 d_s 。高气速下, d_s 减小,这是因为高表观气速下的床层湍动旋涡能量更高,易得到更多的粒度更小的新生小气泡,气泡分布向小气泡集中。

鼓泡床设计的一个重要指标是传质比表面积,根据 Sauter 直径 d_{32} 与气泡比表面积 a 的关系^[12]:

$$a=6\varepsilon/d_{32} \quad (14)$$

可计算出不同喷嘴口径下的气泡比表面积,计算结果如图 4 所示。可以看出,喷嘴口径越小,气泡比表面积越大,因此在鼓泡器旋转喷头设计中,必须考虑能产生小于最大稳定气泡直径的小气泡群,考虑采用多个微孔喷嘴设计。

2.3 气泡粒度分布

图 5 比较了 0.1 和 0.5mm 两种喷嘴口径在表观气速 0.03m/s 下气泡的分布情况。将距离喷嘴孔 16cm 处区间气泡粒度分布的计算结果与距离喷嘴孔 4cm 处区间气泡分布进行比较,大气泡所占的粒数百分比降低,小气泡粒数百分比升高,粒度分布变窄。在 0.03m/s 的表观气速下,两种不同口径喷嘴所得到的稳定气泡直径分布的差异并不明显,床层气泡分布主要受流体湍动情况的影响。

从 2 个图的比较还可以看出,小孔喷嘴比大孔喷嘴得到的气泡直径更小。在相同的表观气速下,小孔喷嘴产生的初始气泡直径较大孔喷嘴小,原始小气泡数量多。据此,可以推断,在低气速下由于最大稳定气泡直径 d_s 增大,大于 d_s 的大气泡比例降低,产生的新生小气泡数量减少,原始气泡的比重将大大增加。

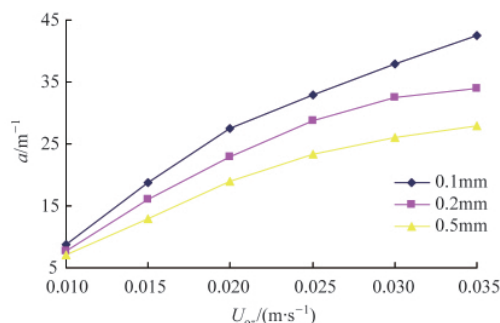


图 4 不同喷嘴口径下的气泡比表面积
Fig. 4 Interfacial area of bubble under different nozzle diameters

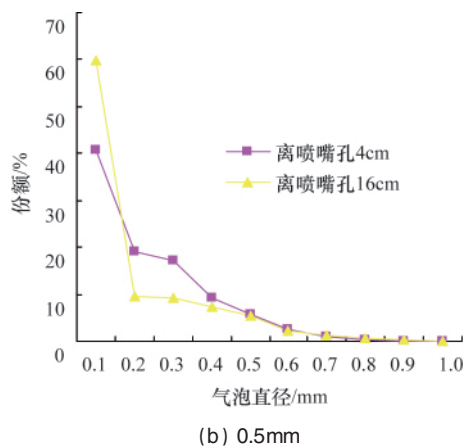
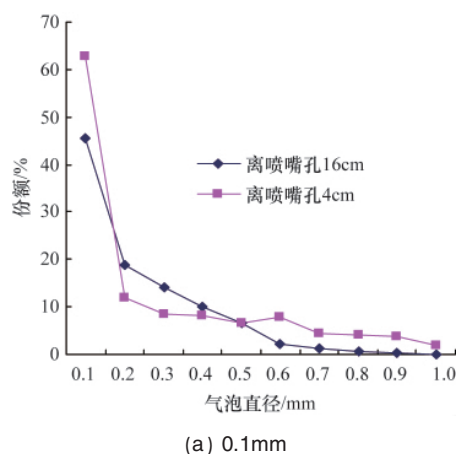


图 5 两种喷嘴口径产生气泡的轴向尺寸分布
Fig. 5 Axial size distribution of bubbles produced by nozzles of different diameters

3 结论

本文从气泡流运动的非牛顿性特征着手,建立了反映液态锂铝合金中气泡动力学行为的连续介质流模型,模型虽然简单却能较好地揭示鼓泡床中气含率特征、气泡直径与粒度分布等流变学指标间的关系。在离开喷嘴孔时气泡群中,同时包含有大于最大稳定气泡直径 d_s 的大气泡和直径小于 d_s 的原始小气泡,气泡的原始分布取决于喷速大小和喷孔直径,大气泡经过破碎稳定后,形成大量直径小于 d_s 的新生小气泡。显然,决定床层中最终气泡平衡值的不是喷孔产生的气泡大小,而是 d_s 和初始气泡中小于最大稳定气泡直径部分的分布情况。倘若建立模型时忽略 1.2 节中的假设条件,模型

可能会更精确,但也会更加复杂,难以使用。但在接下来的工作中,还必须建立针对液相循环流动的模型和气泡-液体两相湍流代数应力模型,加上实验参数的测量比对,才能全面地掌握液态锂铝合金鼓泡器中流变学的真正特征。

参考文献 (References)

[1] 朱志强, 高胜, 章毛连, 等. 聚变堆液态金属锂铅实验回路温度测量与控制方法探索[J]. 计量学报, 2007, 28(z1): 240-243.
Zhu Zhiqiang, Gao Sheng, Zhang Maolian, et al. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(z1): 240-243.

[2] 吴宜灿, 汪卫华, 刘松林, 等. 聚变发电反应堆概念设计研究 [J]. 核科学与工程, 2005, 25(1): 76-85.

- Wu Yican, Wang Weihua, Liu Songlin, *et al.* *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2005, 25(1): 76–85.
- [3] 蒋国强, 罗德礼, 陆光达, 等. 氘和氚的工程技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 324.
Jiang Guoqiang, Luo Deli, Lu Guangda, *et al.* Tritium and industry techniques of tritium[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 324.
- [4] Alpy N, Dufrenoy T, Terlain A. Hydrogen extraction from Pb-17Li: Tests with a packed column [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1998, 39–40 (1–4): 787–792.
- [5] 梁斌, 胡强, 周慧, 等. 单孔及微孔曝气低气速鼓泡床内气泡行为比较 [J]. 化工学报, 2005, 56(10): 1881.
Liang Bin, Hu Qiang, Zhou Hui, *et al.* *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2005, 56(10): 1881.
- [6] Pflieger D, Becker S. Modeling and simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56 (4): 1737–1747.
- [7] Bhavaraju S M, Russell T W F, Blanch H W. The design of gas sparged devices for viscous liquid systems[J]. *AIChE Journal*, 1978, 24(3): 454–466.
- [8] Luo Hean, Svendsen H F. Theoretical model for drop and bubble breakup in turbulent dispersions[J]. *AIChE Journal*, 1996, 42(5): 1225–1233.
- [9] Lin T J, Tsuchiya K, Fan L S. Bubble flow characteristics in bubble columns at elevated pressure and temperature [J]. *AIChE Journal*, 1998, 44(3): 545–560.
- [10] Miyahara T, Iwata M, Takahashi T. Bubble formation pattern with weeping at a submerged orifice [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1984, 17(6): 592–597.
- [11] Kyriakides N K, Kastinakis E G, Nychas S G., *et al.* Bubbling from nozzles submerged in water: Transitions between bubbling regimes [J]. *Can J Chem Eng*, 1997, 75: 684–691.
- [12] Shah Y T, Kelkar B G, Godbole S P, *et al.* Design parameters estimations for bubble column reactors[J]. *AIChE Journal*, 1992, 28(3): 353–379.

(责任编辑 代丽)



时间: 2010年8月
地点: 陕西·西安

第十一届全国物理力学学术会议

主办: 中国力学学会

会议议题

物理力学发展方向
化学激光器中的反应流气体的非平衡现象
强光与物质相互作用的非线性过程
特殊环境(微重力、高压、高超声速)条件的物性

通信地址: 长沙市国防科技大学
光电科学与工程学院定向能技术研究所 (410073)
网 址: <http://www.cstam.org.cn>