

安全壳内水池气泡破碎后夹带液滴的粒径分布

魏严淞¹, 陈林林¹, 郑光宗¹, 陈 峰², 谷海峰³, 季松涛¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213;
3. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对安全壳内气溶胶再夹带问题,设计液池表面气泡破碎特性研究可视化试验装置,进行典型试验条件下的气溶胶再夹带试验,验证高速摄影拍摄法对百微米级含气溶胶液滴进行测量的可行性;通过对液滴进行拍摄和分析,研究液池中气溶胶种类、质量浓度、水温对气泡破碎后液滴粒径分布的影响。结果表明:气溶胶种类、质量浓度、水温均对液滴粒径分布产生影响;升高温度和提高气溶胶悬浊液质量浓度,均使得液滴粒径分布变小;BaSO₄悬浊液较TiO₂悬浊液更不易生成夹带液滴;不同试验条件下的液滴粒径分布公式拟合结果较好。

关键词: 气泡破碎;夹带液滴;气溶胶;粒径分布

中图分类号:O359

文献标志码:A

Particle size distribution of entrained droplets generated by pool bubble breaking in containment

WEI Yansong¹, CHEN Linlin¹, ZHENG Guangzong¹, CHEN Hao², GU Haifeng³, JI Songtao¹

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China;
3. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problem of aerosol re-entrainment in containment, a visual experimental device was designed to study the bubble breaking characteristics on the surface of liquid pool. The aerosol re-entrainment experiments under typical experimental conditions were carried out to verify the feasibility of the high-speed photography method for measuring 100-micron scale aerosol droplets. The effects of aerosol type, mass concentration and water temperature on the droplet size distribution after bubble breaking were studied by high-speed photography. The results show that the aerosol type, mass concentration and water temperature all have a certain effect on the droplet size distribution. Increasing the temperature and increasing the mass concentration of the aerosol suspension make the droplet size distribution smaller. BaSO₄ suspension is less likely to generate entrained droplets than TiO₂ suspension. The fitting results of the droplet size distribution formula under different test conditions are better.

Keywords: bubble breaking; entrained droplets; aerosol; particle size distribution

核电厂发生严重事故后,反应堆一回路内大量的放射性气溶胶释放到安全壳内^[1],而这些气溶胶与普通意义上的气溶胶相同,其粒径分布呈现尺度谱分布特征^[2]。在专设安全设施的作用下,部分气溶胶会滞留在安全壳内形成的水池中,事故现象导致水池沸腾时,上升的气泡会在池水表面破碎产生液滴,液滴随着气流夹带气溶胶再次进入气相空间。气溶胶再夹带现象导致的裂变产物释放率相对较小,但持续时间较长,会导致再夹带在二次释放效应对源项的贡献较大。

根据气体通过水池表面的速度大小不同,液滴夹带有两种形式^[3]。一种是在弱气流时,池水表面气泡破碎产生膜液滴和喷射液滴,如图1所示为气泡破碎产生液滴过程的示意图,其中膜液滴来源于气

收稿日期:2020-07-16,修回日期:2020-10-07。

基金项目:国家科技重大专项,编号:2017ZX06004006。

第一作者简介:魏严淞(1983—),男,副研究员,硕士生导师,研究方向为反应堆安全与事故分析。E-mail:weiyansong@ciae.ac.cn。

通信作者简介:季松涛(1967—),男,工学博士,研究员,博士生导师,研究方向为反应堆安全及燃料性能。E-mail:songtaoji@139.com。

泡液帽破碎产生液滴;喷射液滴来源于气泡破碎后,空腔处液相回流形成射流。另一种是强气流时,池水表面形成搅混流,高速气流的剪切力使液相发生破碎并夹带液滴进入气相空间,如图2所示。

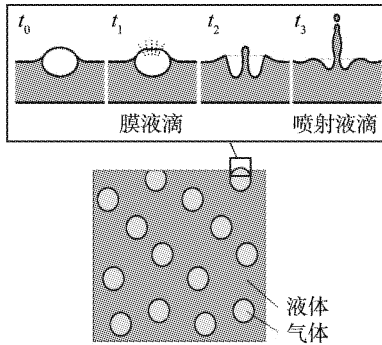


图1 气泡破碎产生液滴过程的示意图^[3]

Fig.1 Diagram of process of bubble breaking to produce droplet^[3]

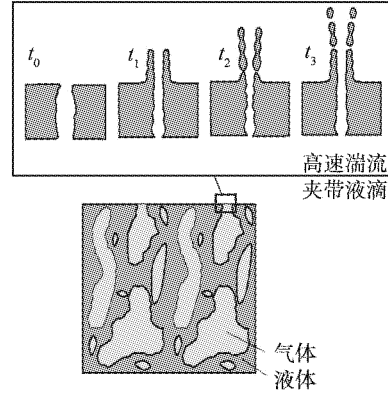


图2 高速湍流夹带液滴^[3]

Fig.2 High-speed turbulent entrained droplets^[3]

由于核反应堆严重事故情况下,液池中以气泡流为主,其中膜液滴数量众多而粒径较小,是气溶胶夹带的主要来源,因此现有对气溶胶夹带行为研究主要关注膜液滴的形成。

目前,国外已建成部分试验平台开展事故下气溶胶再夹带行为的相关研究,主要有德国 Kernforschungszentrum Karlsruhe 研究中心针对气溶胶再夹带行为进行的试验(resuspension source term, REST);瑞士苏黎世联邦理工的 REVENT 试验,围绕 THAI 设施开展的 TH14 和 TH15 试验等。国内,清华大学马超等^[4-5]、哈尔滨工程大学张阿漫等^[6]对自由液面单气泡破碎现象进行了试验研究,然而这些研究并不是以严重事故下气溶胶夹带现象为背景,水池中不含气溶胶。

本文中,在理论分析和参考国内外试验结果的基础上^[7-8],针对安全壳内的严重事故工况条件,设计液池表面气泡破碎特性研究可视化试验平台;利用高速摄影法和图像处理技术得到膜液滴数量和粒径,分析气溶胶种类、质量浓度、水温对气溶胶再夹带行为的影响;根据试验数据进行液滴粒径分布分析,建立液滴粒径频度分布公式。

1 气溶胶再夹带数学模型

气溶胶再夹带行为是指溶解在液体中或沉积在固体表面的物质由于液体沸腾或蒸汽闪蒸而以液滴形式被带入空间中的现象^[9]。现阶段分析气溶胶膜液滴和喷射液滴的模型具有代表性的是 Kataoka-Ishii 模型^[10],模型示意图如图3所示。

按照离池面的竖直距离 z 划分 3 个不同夹带机制区域,分别是:近界面区、动量控制区和沉积控制区。

为了对不同区域夹带机制进行讨论,定义以下无量纲参数:

$$\hat{z} = \frac{z}{\sqrt{\sigma/(g\Delta\rho)}}, \quad (1)$$

$$\hat{D} = \frac{D}{\sqrt{\sigma/(g\Delta\rho)}}, \quad (2)$$

$$\hat{j}_g = \frac{j_g}{\sqrt[4]{\sigma g \Delta\rho / \rho_g^2}}, \quad (3)$$

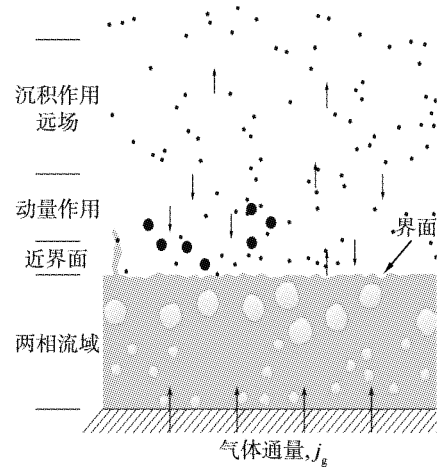


图3 Kataoka-Ishii 模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of Kataoka-Ishii model

$$N_{\mu_g} = \frac{\mu_g}{[\rho_g \sigma \sqrt{\sigma/(g\Delta\rho)}]^{1/2}}, \quad (4)$$

$$N_{\mu_l} = \frac{\mu_l}{[\rho_l \sigma \sqrt{\sigma/(g\Delta\rho)}]^{1/2}}, \quad (5)$$

式中： z 、 D 、 j_g 、 μ_g 、 μ_l 分别为离池面高度、容器直径、表面气体流速、气体黏度、液体黏度；等号左侧为相应的无量纲参数； σ 为液体表面张力； g 为重力加速度， g 取 10 N/kg ； ρ_l 和 ρ_g 分别为液体密度和气体密度； $\Delta\rho$ 为液体和气体密度差。

近界面区限定为临近水池表面的区域，夹带行为包括所有水池表面生成的液滴。近表面区 $\hat{z}_{\text{nsr}}$ 的上限的表达式为

$$\hat{z}_{\text{nsr}} = 1.038 \times 10^3 \hat{j}_g N_{\mu_g}^{0.5} \hat{D}^{-0.42} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.23}. \quad (6)$$

此区域内夹带因子 E 与表面气速无关，夹带因子 E_{nsr} 的计算公式为

$$E_{\text{nsr}} = 4.84 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-1}. \quad (7)$$

动量控制区限定为中间高度范围，夹带行为包括了由于初始动量到达高度 z 的液滴以及最终速度低于气体流速的部分液滴。动量控制区的上限 $\hat{z}_{\text{mcr}}$ 的表达式为

$$\hat{z}_{\text{mcr}} = 1.97 \times 10^3 N_{\mu_g}^{0.33} \hat{D}^{-0.42} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.23}, \quad (8)$$

此区域内夹带因子 E 随着高度递减直至所有最终速度高于表面速度的液滴掉入水池中。需要区分低层气流和中间气流下的2种夹带行为。根据 Sterman 的结论，低层和中层的夹带因子计算公式为

$$E_{\text{m-low}} = 2.21 \hat{N}_{\mu_g}^{1.25} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.31} \hat{j}_g \hat{z}^{-1}, \quad (9)$$

$$E_{\text{m-int}} = 6.09 \times 10^9 \hat{j}_g^{2.76} \hat{z}^{-0.23} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.26} \hat{N}_{\mu_l}^{2.2} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_l} \right)^{-0.31}. \quad (10)$$

从底层到中层气流的转变由下式给出：

$$\hat{j}_g \leq 6.39 \times 10^{-4} \hat{z}, \quad (11)$$

沉积控制区的液滴在容器壁上的沉积成为决定夹带粒子数量的主要影响因素。此机制下，夹带因子随着 z 增大而逐渐减小。该区域内的夹带因子 $E_{\text{d-dep}}$ 为

$$E_{\text{d-dep}} = 7.13 \times 10^{-4} \hat{j}_g^3 N_{\mu_g}^{0.5} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-1} e^{-0.205 \hat{z}/\hat{D}}, \quad (12)$$

如果沉积项可以忽略，则夹带因子与 z 无关，并在整个沉积控制区内为常数，沉积控制区的夹带因子 E_{dcr} 计算式则为

$$E_{\text{dcr}} = 1.99 \times 10^{-3} \hat{j}_g^3 N_{\mu_g}^{0.5} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-1}, \quad (13)$$

Kataoka-Ishii 三分区模型在严重事故分析程序中得到了应用，如 MELCOR 程序采用了该模型对气溶胶夹带行为进行计算。

三分区模型在数学模型角度提出了再夹带因子 E 计算方法。为了对模型进行试验方面的验证^[11]，需要用到再夹带因子定义式。再夹带因子是上升通过水池表面液体质量流量 $\dot{m}_l$ 与气体质量流量 $\dot{m}_g$ 之

比,它同样可以被定义为液相和气相的密度和表面速度乘积之比。再夹带因子定义式为

$$E = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} = \frac{\rho_l j_l}{\rho_g j_g}, \quad (14)$$

对于含气溶胶悬浊液液相表面产生夹带液滴过程,研究者关心的气溶胶的夹带率可用下式计算

$$E = \frac{cm_{\text{dro}}}{m_g}, \quad (15)$$

式中: m_{dro} 是夹带液滴质量, m_g 是通气量, c 是液滴中气溶胶质量浓度,这里认为液滴质量浓度与悬浊液相同。

基于目前的试验测量手段,通气量 m_g 容易得到;而气溶胶测量方面,由于采取的测量手段不同,测量得到的气溶胶粒径范围不同。本试验通过高速摄影拍摄法实现百微米级夹带液滴的测量,为气溶胶夹带率计算和模型验证提供支持。

令 $p(d_p)$ 为液滴粒径概率分布的函数, M_3 为液滴直径分布三阶矩,将 $p(d_p)$ 从 d_1 积分到 d_2 , 其中 d_1 、 d_2 分别是测量得到的夹带液滴直径的下限和上限,液滴总体积计算式为

$$\phi = \frac{\pi M_3}{6} = \frac{\pi}{6} \int_{d_1}^{d_2} p(d_p) d_p^3 d(d_p), \quad (16)$$

夹带液滴总质量为

$$m_{\text{dro}} = \rho \phi = \frac{\pi \rho}{6} \int_{d_1}^{d_2} p(d_p) d_p^3 d(d_p). \quad (17)$$

因此,液滴粒径概率分布函数 $p(d_p)$ 是实现计算的关键。

2 气泡破碎试验

2.1 试验平台设计与搭建

在明确试验需求的前提下,设计了液相表面气泡破碎试验平台,其示意图如图4所示。试验平台主要由液相循环回路、气体供应回路和图像采集系统组成^[12]。

液相循环回路主要由可视化溢流水箱、预热水箱、加热水箱、蠕动泵、搅拌器、温控装置组成。其中,溢流水箱是实验装置的可视化试验段,气泡在溢流水箱表面发生破碎。主体循环回路通过蠕动泵实现液相循环和可视化装置的溢流,保证液池表面处气溶胶质量浓度与主体一致。预热水箱和搅拌器配合,制备气溶胶悬浊液并均匀混合、预热。预热水箱的水经蠕动泵进入加热水箱进行加热,循环流动过程中达到目标温度后,方可进行试验测量。

供气回路主要由空压机、储气罐、减压阀、注射泵和调节阀组成,为主试验段提供稳定气源。气体经过减压阀后压力降至0.2 MPa,穿过溢流水箱下方气室和孔板进入可视段。使用调节阀改变气体流量能够控制单气泡生成频率,

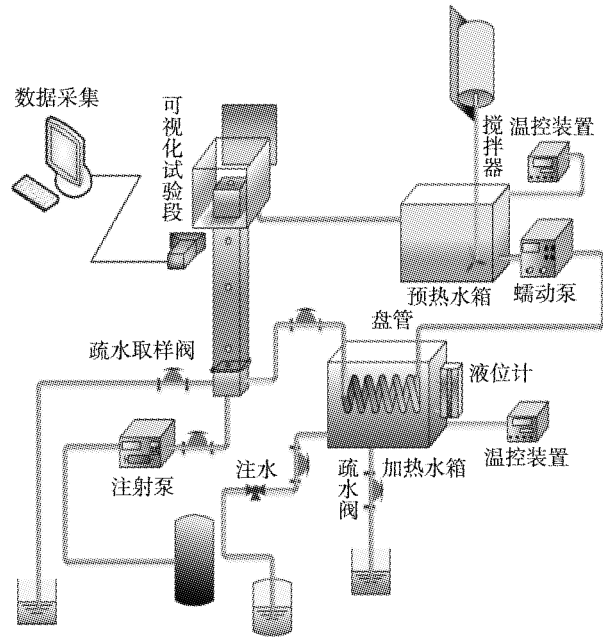


图4 液相表面气泡破碎试验平台示意图

Fig.4 Schematic diagram of liquid surface bubble crushing test platform

单气泡大小可通过改变气室中气相体积来控制,通常气相体积越大,生成的单气泡越大^[13]。

图像采集系统由高速摄影仪和计算机组成。试验采用高速摄影仪型号为 PSI Phantom V611,采样率为 7 500 Hz,加装尼康 105 mm 镜头调节焦距。搭建完成的液相表面气泡破碎试验装置如图 5 所示。

2.2 试验步骤

实验中选择 TiO_2 ^[14] 与 BaSO_4 作为工质配制气溶胶悬浊液。所用的 TiO_2 悬浊液质量浓度分别为 0.05、0.1、0.2 g/L, BaSO_4 悬浊液质量浓度为 0.1 g/L。液相表面气泡破碎试验条件如表 1 所示。

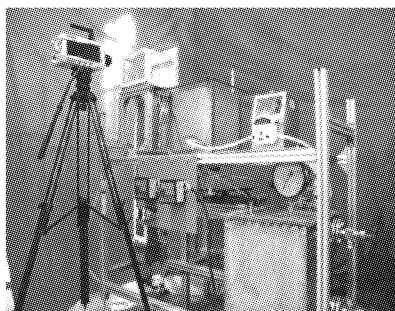


图 5 液相表面气泡破碎试验装置

Fig. 5 Liquid surface bubble crushing test apparatus

表 1 气泡破碎试验条件

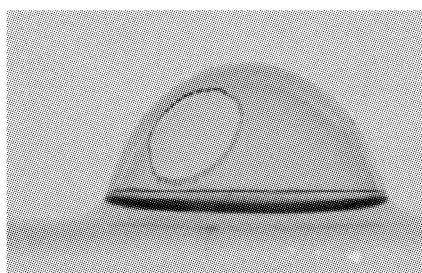
Tab. 1 Test conditions for bubble breakage

溶质	质量浓度/(g·L ⁻¹)	液相温度/℃
蒸馏水	—	16、40、60
TiO_2	0.05	19、47
TiO_2	0.10	17、52
TiO_2	0.20	18、49、77
BaSO_4	0.10	19

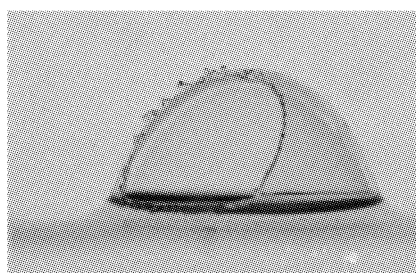
利用超声波振动仪配制目标质量浓度的气溶胶悬浊液,倒入预热水箱中搅拌和预热。开启蠕动泵,将溶液由管路驱动进入可视化溢流段。当液相从溢流水箱顶部溢流时开启加热水箱加热器,加热到指定温度后完成试验启动阶段。

调节液相循环流量以使得液相表面平静。开启空气供应系统,调节减压阀控制气相压力为 0.2 MPa。通过调节气体流量和改变气室中气相体积,使得孔板出口生成直径为 8~15 mm 的单气泡。

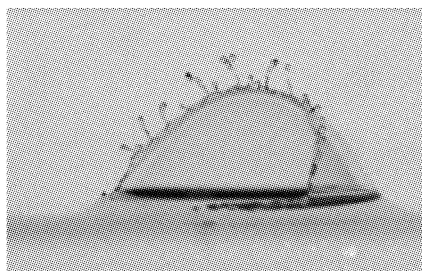
打开可视溢流水箱背景光源,调节高速摄影仪的高度和前后距离,拍摄获取溢流水箱中间位置的比例标尺,用于对气泡和破碎液滴大小进行计算。微调高速摄影仪镜头以拍摄液池表面气泡的浮动、排液以及发生破碎现象。液池表面气泡破碎行为图像如图 6 所示,为拍摄的实验过程中一组气泡破碎过程,以气泡开始破碎时作为 0 时刻。



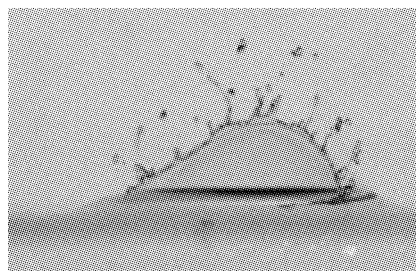
a) $t = 1.65 \text{ ms}$



b) $t = 3.55 \text{ ms}$



c) $t = 5.62 \text{ ms}$



d) $t = 7.59 \text{ ms}$

图 6 液池表面气泡破碎行为图像

Fig. 6 Images of bubble breaking behavior on pool surface

3 结果与讨论

3.1 夹带液滴粒径分布的影响因素

含气溶胶池水表面气泡破碎具有不同的特点,气溶胶能够进入气泡液膜部分,影响液体表面张力、液膜厚度和液膜破碎过程(包括破碎起始点、液膜卷曲速率等),进而影响破碎液滴粒径分布^[15]。按照表1中条件开展试验,研究温度、气溶胶悬浊液质量浓度和气溶胶种类对夹带液滴粒径分布的影响。

3.1.1 温度的影响

质量浓度同为0.20 g/L的 TiO_2 悬浊液中,不同温度条件下悬浊液表面液滴的粒径分布见图7。

由图7可见,随着温度升高,气泡破碎生成的液滴粒径分布会向左移动,即生成的液滴粒径会减小。但是在高温情况下,液相表面可能发生气溶胶聚集现象,此时生成的液滴数目减少,而液滴粒径增加。

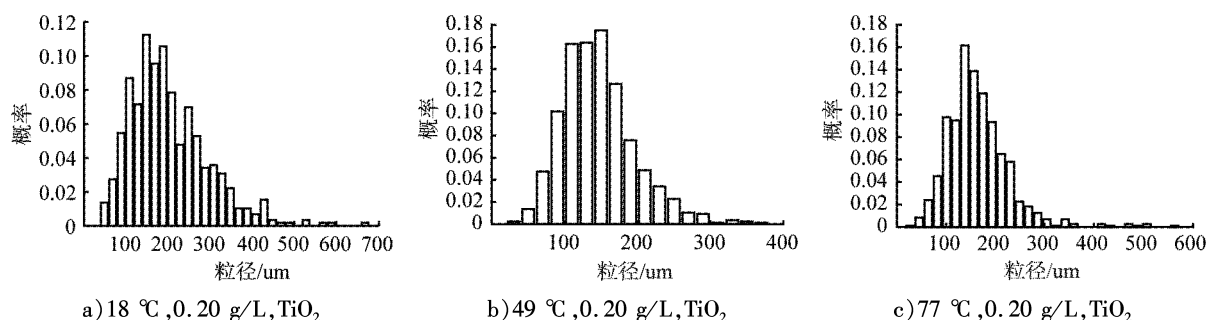


图7 不同温度条件下 TiO_2 悬浊液表面液滴的粒径分布

Fig.7 Particle size distribution of liquid droplets on surface of TiO_2 suspension at different temperatures

3.1.2 气溶胶悬浊液质量浓度的影响

在反应温度均为18 °C条件下,不同质量浓度的 TiO_2 悬浊液条件下表面液滴的粒径分布如图8所示。

由图8可知,随着质量浓度的增大,气泡破碎生成的液滴分布具有向左移动的趋势。由于小液滴质量较小,更容易被气流携带到气相环境中,因此增大气溶胶质量浓度的同时,携带进入气相环境中的气溶胶质量同步增加。

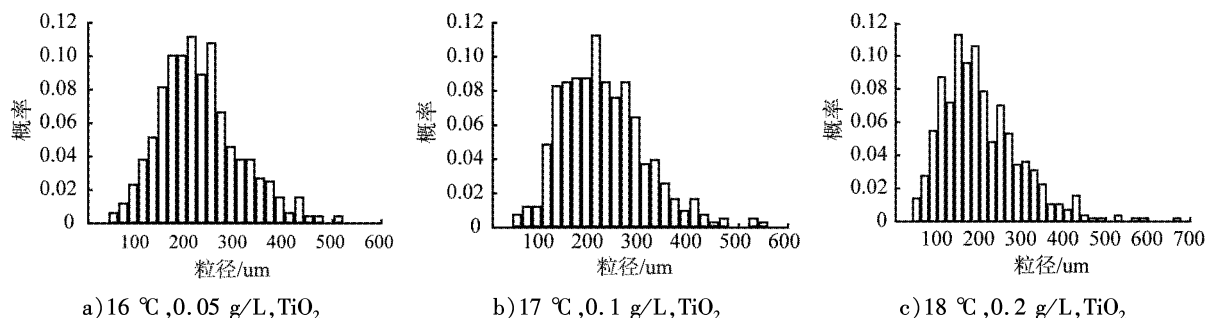


图8 不同质量体积条件下 TiO_2 悬浊液表面液滴的粒径分布

Fig.8 Particle size distribution of liquid droplets on surface of TiO_2 suspension under different mass and volume conditions

3.1.3 气溶胶种类的影响

在反应温度为18 °C且质量浓度为0.1 g/L时 BaSO_4 悬浊液表面液滴的粒径分布如图9所示。

将图9与图8b)对比后发现,在相近条件下,2种不同种类的悬浮液的液滴粒径分布区别不大,但是,加入 BaSO_4 使得液相表面张力减小,液膜卷曲速率降低,同时气泡破碎时液膜更厚,容易形成鸭蹼结构阻碍破碎液滴的形成,单气泡破碎生成大液滴的概率增大,而总液滴数量减少。因此,相对于 TiO_2 液相, BaSO_4 悬浊液较更不易生成夹带液滴,气溶胶释放效果变差。

3.2 液滴粒径概率分布

基于液滴粒径分布测量结果,结合经验公式,液滴粒径概率分布公式为

$$p(x) = b \frac{n^n}{\Gamma(x)} x^{n-1} e^{-nx}, x = d_p / \bar{d}_p, \quad (18)$$

式中: b 和 n 是待拟合参数, x 是归一化的液滴直径。 $\Gamma(x)$ 为伽马函数, 定义为

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt. \quad (19)$$

气泡破碎生成的膜液滴遵循一定的分布,通过对试验数据进行分析,发现公式(18)能够表征液滴粒径分布。对结果进行拟合时,首先需要对液滴直径进行归一化操作,即归一化的液滴直径等于测量值除以平均值。

温度为 19 °C、质量浓度为 0.05 g/L 时 TiO_2 气溶胶悬浊液表面气泡破碎生成液滴粒径分布拟合曲线如图 10 所示,可以证明拟合曲线与试验数据吻合较好。

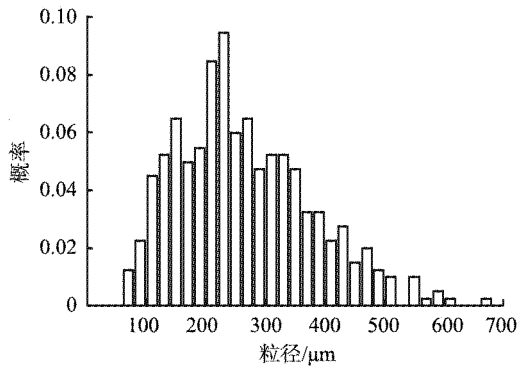


图9 温度为 19 °C 且质量浓度为 0.1 g/L 时 BaSO_4 悬浊液表面液滴的粒径分布

Fig. 9 Particle size distribution of droplets on surface of BaSO_4 suspension obtained when temperature is 19 °C and mass concentration is 0.1 g/L

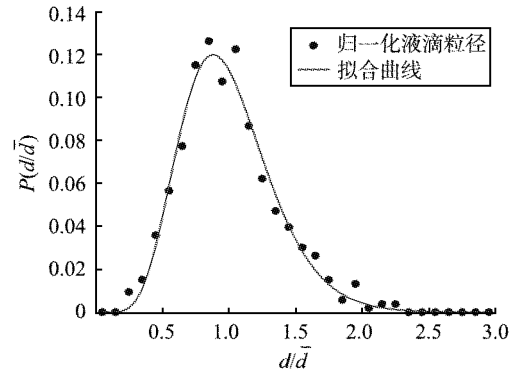


图10 温度为 19 °C 且质量浓度为 0.05 g/L 时 TiO_2 悬浊液表面液滴粒径分布拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of droplet size distribution on surface of TiO_2 suspension obtained when temperature is 19 °C and mass concentration is 0.05 g/L

将所有试验条件得到的液滴粒径进行拟合得到不同的 n 值和 b 值,不同条件下液滴粒径分布拟合值如表 2 所示。除个别工况拟合度较低,大部分试验结果对应拟合度在 0.92 以上,说明给出的拟合公式能够用来描述液滴粒径分布情况。

表2 不同条件下液滴粒径分布拟合值

Tab. 2 Fitting values of droplet size distribution under different conditions

液相	质量浓度/(g·L ⁻¹)	温度/°C	拟合 n 值	拟合 b 值	R^2
去离子水	—	16	4.569	0.099	0.913
		40	8.116	0.097	0.934
		60	6.891	0.102	0.803
TiO_2	0.05	19	8.432	0.098	0.980
		47	11.646	0.095	0.927
TiO_2	0.10	17	7.039	0.100	0.981
		52	7.205	0.099	0.923

续表					
液相	质量浓度/(g·L ⁻¹)	温度/℃	拟合 n 值	拟合 b 值	R^2
TiO ₂	0.20	18	5.004	0.102	0.964
		49	9.412	0.099	0.987
		77	8.700	0.109	0.973
BaSO ₄	0.10	19	4.884	0.100	0.923

4 结论

- 1) 设计了液池表面气泡破碎特性研究可视化试验平台,进行了典型试验条件下的气溶胶再夹带试验,验证了高速摄影拍摄法对百微米级含气溶胶液滴进行测量的可行性。
- 2) 对影响气溶胶夹带的各影响因素进行研究,发现升高温度和提高气溶胶悬浊液质量浓度,均使得液滴粒径分布变小,BaSO₄ 悬浊液较 TiO₂ 悬浊液更不易生成夹带液滴。
- 3) 根据试验数据进行液滴粒径分布分析,建立液滴粒径频度分布公式,各试验条件下的拟合结果较好。

参考文献 (References):

[1]JI S T, WEI Y S, SUN X T, et al. Study on aerosol deposition behavior in the containment with a PCS under Severe Accident Conditions[C]//NURETH17(国际反应堆热工水力大会),2017.

[2]于明州, SEIPENBUSCH M. 工业纳米颗粒气溶胶测量及数值模型构建[J]. 中国粉体技术, 2013, 19(5): 34-38.

[3]KOCH M K, VOSSNACKE A, STARFLINGER J, et al. Radionuclide re-entrainment at bubblingwater pool surfaces[J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(9): 1015-1028.

[4]马超, 薄涵亮. 气泡破裂产生膜液滴现象可视化实验研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(S1): 231-235.

[5]马超, 薄涵亮. 气泡破裂产生膜液滴理论模型的建立与验证[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(11): 2036-2043.

[6]张阿漫, 王超, 王诗平, 等. 气泡与自由液面相互作用的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 300-312.

[7]SCHMIDT E W, GUPTA S, FREITAG M, et al. Icone 23-2060 wet resuspension of insoluble material from a boiling sump[C]. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering(ICONE), 2015.

[8]李丰, 薛云翔, 李俊峰, 等. 池式夹带过程实验研究[J]. 化工设备与管道, 2018, 55(4): 30-34.

[9]OECD Nuclear Energy Agency. Short overview on the definitions and significance of the late phase fission product aerosol/vapor source[R]. Paris: Committee on the safety of nuclear installations/OECD nuclear energy agency, 1994.

[10]ISAO K, MAMORU I. Mechanistic modeling of pool entrainment phenomenon[J]. International journal of heat and mass transfer, 1984, 27(11): 1999-2014.

[11]薛云翔, 李俊峰, 黄卫星. 池式夹带实验及数值模拟[J]. 化学工程师, 2019, 33(6): 22-26.

[12]张鹏, 李纬, 邸智, 等. 池式夹带高速区试验研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(12): 2188-2193.

[13]孙秋南, 温济铭, 丁铭, 等. 曝气装置结构对多孔板鼓泡特性的影响[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(2): 337-343.

[14]陈林林, 孙雪霆, 魏严淦, 等. 安全壳内气溶胶扩散泳行为的试验方法研究[J]. 辐射防护, 2017, 37(1): 45-49.

[15]郭赞, 石渡佑树, 池尻智史, 等. 粒子网格混合方法模拟液滴夹带起始点[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(5): 91-94.