

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

螺旋肋-多孔介质文丘里气泡发生器产气特性研究

蔡伟华^{1,2}, 刘鑫龙¹, 蔡本安¹, 王金成¹, 张文超^{1,3*}

(¹ 东北电力大学能源与动力工程学院热流体科学与核工程实验室, 吉林 吉林 132012; ² 华东交通大学土木工程与建筑学院, 江西 南昌 330013; ³ 清华大学先进堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 气泡发生器在化工、水处理和石油等领域得到广泛应用。为优化气泡破碎效果, 本文开发了一种螺旋肋-多孔介质文丘里气泡发生器 (SPVBG), 通过实验与数值模拟探究气泡发生器产气特性及其影响因素。实验结果表明, 与多孔介质-文丘里气泡发生器 (PVBG) 相比, 在相同运行工况下, SPVBG 产生的气泡平均直径更小、更均匀。随着水流量的增大或气流量的减小, SPVBG 产生的气泡平均直径减小。基于实验结果, 开发了 SPVBG 的气泡粒径预测关联式。数值分析结果表明, 湍动能随着水流量增大而增强, 扩张段内近壁面处湍动能大。与 PVBG 相比, SPVBG 在扩张段的湍动能、径向速度和压降更大, 近壁面高湍动能区内气泡分布概率更高, 因此气泡破碎效果更好。相关研究成果为文丘里气泡发生器的优化提供了一种新的思路。

关键词: 螺旋肋-多孔介质; 文丘里管; 气泡; 实验研究; 数值模拟

中图分类号: TK72

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-18

Study on gas production characteristics of swirl rib and porous medium Venturi bubble generator

CAI Weihua^{1,2}, LIU Xinlong¹, CAI Benan¹, WANG Jincheng¹, ZHANG Wenchao^{1,3*}

(¹ Laboratory of Thermo-fluid Science and Nuclear Engineering, School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China; ² School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; ³ Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract: Bubble generators are widely used in chemical engineering, water treatment, petroleum and other fields. To optimize the bubble breakup effect, a spiral rib-porous media Venturi bubble generator (SPVBG) was developed in this paper. The gas production characteristics and influencing factors of the bubble generator were investigated through experiments and numerical simulations. The experimental results show that, compared with the porous media-Venturi bubble generator (PVBG), the average bubble diameter produced by SPVBG is smaller and more uniform under the same operating conditions. The average bubble diameter generated by SPVBG decreases with the increase of water flow rate or the decrease of gas flow rate. Based on the experimental results, a correlation formula for predicting the bubble size of SPVBG was developed. Numerical analysis results indicate that the turbulent kinetic energy increases with the rise of water flow rate, and the turbulent kinetic energy is high near the wall in the

收稿日期: 2026-01-14 修回日期: 2026-05-01

通信作者: 张文超 (1984—), 男, 博士, 副教授, wenchaozhang@neepu.edu.cn

第一作者: 蔡伟华 (1982—), 男, 博士, 教授, caiwh@neepu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52206194); 先进堆工程与安全教育部重点实验室项目 (ARES-2023-09); 吉林省教育厅科学研究计划项目 (JJKH20240158KJ)

引用本文: 蔡伟华, 刘鑫龙, 蔡本安, 王金成, 张文超. 螺旋肋-多孔介质文丘里气泡发生器产气特性研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-18

Citation: CAI Weihua, LIU Xinlong, CAI Benan, WANG Jincheng, ZHANG Wenchao. Study on gas production characteristics of swirl rib and porous medium Venturi bubble generator[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-18

diffuser section. Compared with PVBG, SPVBG has greater turbulent kinetic energy, radial velocity and pressure drop in the diffuser section, and a higher probability of bubble distribution in the high turbulent kinetic energy region near the wall, resulting in better bubble breakup effect. The relevant research results provide a new idea for the optimization of Venturi bubble generators.

Keywords: swirl rib and porous medium; Venturi tube; bubble; experimental study; numerical simulation

引 言

在工程领域中,微气泡具有提升气液交换、吸附效率作用,因此广泛地应用于化学工程^[1,2],水处理工程^[3],气浮技术^[4],石油工程^[5]等领域中。文丘里气泡发生器通过喉管的高速射流携带气泡在扩张段内碎化产生微气泡,具有结构简单、能耗小等优点,是用于产生微气泡的重要装置之一。

传统文丘里管气泡发生器产生的气泡粒径不均匀、气泡数密度不够高,因此,学者们根据其基本原理进行改进。Huang等^[6]进行了微型结构文丘里气泡发生器产气特性实验研究,发现小尺寸的文丘里通道产生的气泡直径小于常规尺寸文丘里。Ding等^[7,8]设计新型串联矩形文丘里气泡发生器,发现气泡起泡频率随水流速增加显著增强;还研究了注气孔位置位于喉管处较于注气孔在进水管时成泡平均粒径更小,能耗更低。Sadatomi等^[9]开发将管道插入圆球体的微气泡发生器,吴翔等^[10]将金属烧结管嵌入到文丘里管喉管中,使喉管入口处直径小于喉管直径,增大气泡发生器湍动能,有利于气泡破碎。Murai等^[11]讨论了亚音速流动下文丘里管微泡发生器的产气机制,发现由于正压梯度,大气泡在文丘里管发散部分迅速流回,为亚音速文丘里管提供了防止大气泡产生的功能。上述研究针对传统文丘里气泡发生器气泡粒径不均、数密度低的缺陷,从结构尺寸优化、流道形式创新、气液混合方式改进等方面展开改进探索,均有效实现了气泡细化,为文丘里发生器结构优化提供了重要参考。

含有螺旋结构的文丘里气泡发生器,对减小气泡粒径优势显著,是气泡发生器的主要开发方向之一。国内外学者围绕旋流与文丘里结构结合的研究,在切向入口设计方面,Bie等^[12]设计切向进口文丘里管,发现旋流可扩大气泡分布范围,减少小气泡被涡流捕获;Wang等^[13]提出切向入口旋流-文丘里发生器,证实其气泡破碎模式更丰富、性能优于传统文丘里。旋流-文丘里耦合装置开发方面;Mawarni等^[14]证实旋流微泡发生器可生成更均匀的

小气泡;Wu等^[15]的涡流式发生器富氧能力优于传统文丘里;Ding等^[16]的涡流文丘里发生器气泡质量更优,且更适用于酸性废水处理;Wang等^[17]证实旋流文丘里在微气泡生成和传质上更具优势。结构优化方面,冯子夏等^[18]提出的交叉板式破旋结构可显著减小气泡粒径、改善均匀性;丁国栋等^[19]设计的旋流式发生器流道更优,优化后微气泡直径大幅减小。含螺旋结构的文丘里气泡发生器在减小气泡粒径、提升均匀性及传质效率上优势显著。国内外学者通过设计切向入口、涡流结构等,结合实验与模拟证实,旋流可强化气泡破碎、扩大分布范围,优化起旋元件等结构能进一步提升性能。

由于多孔介质孔径小、孔数多,多孔介质气泡发生器产生的气泡具有粒径小、均匀和数密度高等优点,得到了学者们的关注^[20-22]。但微孔生成气泡时容易发生聚并现象,导致气泡粒径增大^[23-26]。文丘里管扩散段有效防止气泡聚合的同时碎化大气泡,一些学者将文丘里管与多孔介质结合进行研究。Bokanyi等^[27]将喉管替换为多孔介质,发现喉管中的多孔介质直径需要基于体积含气率确定。Liew等^[28]在文丘里气泡发生器的进气口处设置多孔介质孔板,产生负压自吸气,达到节能的目的。Cai等^[29]在文丘里喉管内放置多孔介质棒,增加喉管处的剪切流速,使气泡发生器产生的气泡粒径更小分布更均匀。学者们将多孔介质气泡发生器与文丘里管扩散段结合,或替换喉管为多孔介质、或在进气口设多孔介质孔板、或在喉管内放置多孔介质棒,均通过优化结构强化了剪切、实现了气泡细化,为二者协同设计提供了参考。

为综合利用螺旋导叶和多孔介质材料在气泡碎化过程中的优势,本文在PVBG的基础上^[29],加装螺旋导叶,设计了SPVBG。通过实验研究水流量和气流量对SPVBG气泡直径的影响,利用数值模拟解析实验现象的内在机理,说明SPVBG与PVBG在产气性能上差异的内在原因。

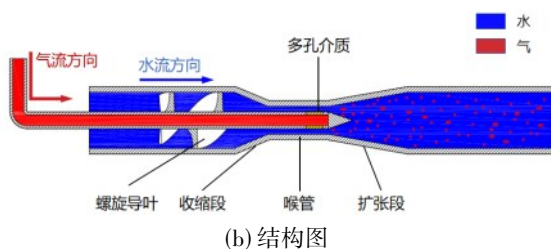
1 实验简介

1.1 实验系统

图1为SPVBG的实物图与结构图。SPVBG由文丘里管及含有螺旋导叶和多孔介质的进气管组成。其中,文丘里管包含收缩段、喉管和扩张段,进气管插入文丘里管内部,多孔介质部分位于文丘里喉管处,采用金属粉末烧结而成,直径20 mm,长度15 mm,平均孔径为0.5 μm 。螺旋导叶个数为3^[30],螺旋导叶紧贴文丘里管内壁,螺距130 mm,长度62 mm。压缩空气进入进气管后,在管内外压差作用下,气体从多孔介质的微孔溢出,在外部高速剪切流的切割作用下生成气泡,流入扩张段后,进一步碎化大气泡并防止气泡聚集。图2为SPVBG的尺寸图。PVBG除无螺旋导叶外,其余尺寸参数均与SPVBG一致。



(a) 实物图



(b) 结构图

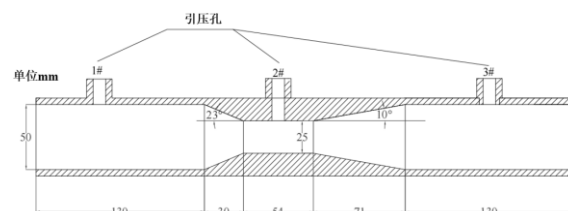
图1 SPVBG实物图与结构图

Fig 1 Physical image and structural diagram of SPVBG

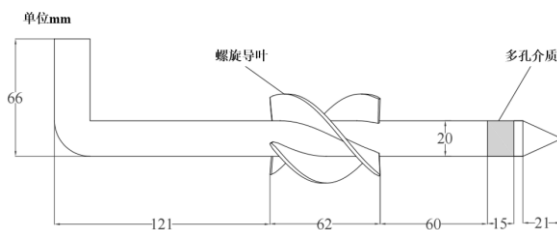
1.2 实验系统及运行工况

图3为实验系统图,主要由水回路、气回路、数据采集系统与高速摄像系统组成。其中,气回路包括空气压缩机、气体阀门、气体流量计以及压力传感器。水回路包括水泵、涡轮流量计、阀门、压力传感器。数据采集系统采用西安舟正科技数据采集卡DAQM-4202。各仪表及数据采集系统的测量范围及精度如表1所示。

为了探究水流量和气流量对SPVBG产气特性的影响规律,设计表2所示的实验工况。作为对比,



(a) 外壳尺寸图



(b) 进气管尺寸图

图2 SPVBG尺寸图

Fig 2 Dimension diagram of SPVBG

PVBG进行相同运行参数的实验。

1.3 气泡尺寸统计

实验过程中采用高速摄影仪(图像分辨率为1280×1024像素,帧率为2000 fps)拍摄扩张段和观察窗内的气泡。由于文丘里管为圆柱形结构,直接拍摄会导致气泡形变。为此,将SPVBG置于长方形透明观察水箱内,水箱充满去离子水以降低折射率差异,减小光学畸变误差^[31]。每组工况重复3次拍摄以确保数据可重复性。

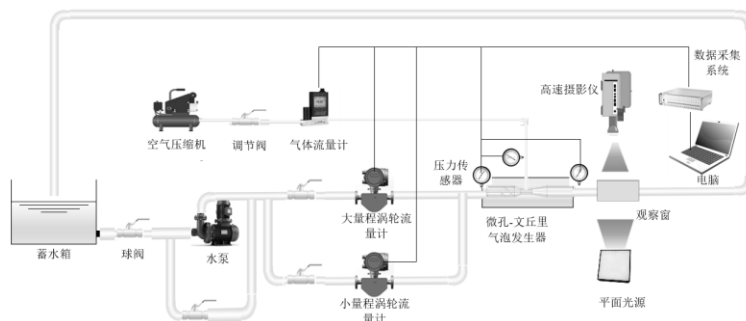
将原始图像导入气泡处理软件Image Pro Plus,以观察段上的刻度尺为参照,标记并得到气泡直径。在标记过程中,气泡的选取原则为对焦效果好且没有重叠,如图4中圆圈内的气泡。为减小统计误差,每组工况至少取两组不同时刻的气泡图像进行处理,气泡数量至少100个。气泡处理流程如图5所示,将原始图像导入软件中,先进行锐化处理,然后调节亮度及对比度,标记边界后进行二值化处理,得到气泡面积 S ,根据式(1)计算等效直径 d 。

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (1)$$

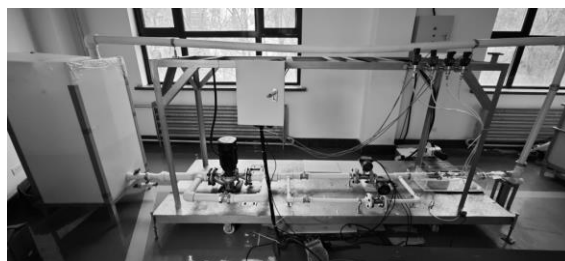
2 数值方法

2.1 连续相基本方程

连续性方程:即质量守恒方程,是任何流动形式都必须满足的最基本的定律。该定律的描述为在单位时间内流入控制体的质量和流出控制体的质量之和应该是相同的。由此连续性方程的表达



(a) 实验流程图



(b) 实验回路图

图3 实验系统图

Fig 3 Experimental system diagram

表1 仪表及数据采集精度

Table 1 Instruments and data acquisition accuracy

测量仪表	量程	精度	数据采集精度
涡轮流量计1	1~10 m ³ /h	0.01	0.001
涡轮流量计2	2~20 m ³ /h	0.01	0.001
气体流量计	0~2 L/min	0.015	0.001
压力传感器1型	0~0.6 MPa	0.0025	0.001
压力传感器2型	-0.1~0.6 MPa	0.0025	0.001

表2 实验工况

Table 2 Experimental operating conditions

工况	气流量(L/min)	液体流量(m ³ /h)	含气率(%)
1	1.02	2.01	3
2	1.01	3.98	1.5
3	0.99	6.01	1
4	1.01	8.02	0.75
5	1.01	10.01	0.6
6	0.31	5.99	0.3
7	0.59	6.01	0.6
8	0.91	6.01	0.9
9	1.21	6.02	1.2
10	1.49	5.99	1.5
11	1.81	6.01	1.8

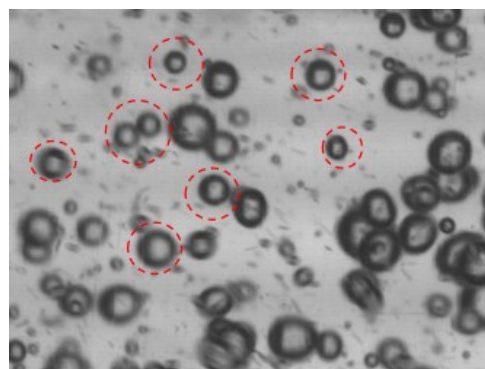


图4 选取气泡样本示意图

Fig 4 Schematic diagram of selected bubble samples

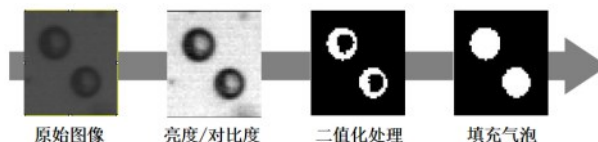


图5 气泡处理流程图

Fig 5 Bubble processing flow diagram

式如式2所示：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度, kg/m³; u_i 为速度矢量, m/s。

动量方程:是牛顿第二定律在流体运动中的表达。对于任一流体微元,其动量对时间的变化率等于外部施加在该流体微元上的各项力的和。动量

方程的表达式如式3所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_m g_i + F_i \quad (3)$$

式中: τ_{ij} 为应力张量,Pa; p 为静压,Pa; g_i 为重力加速度分量, m/s^2 ; F_i 为外部体积力,N。

2.2 DPM模型选择

采用 Fluent DPM 模型开展气泡发生器的数值模拟,核心原因在于该模型能够适配气液两相的离散相流动特性,且支持气液两相双向耦合计算。该模型可将气泡等效为离散质点,精准捕捉气泡在文丘里管扩散段的分布特征,从而为发生器气泡破碎机理的深入分析提供量化支撑数据。

Fluent 中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨迹。颗粒的作用力主要为曳力 F_D 、压力梯度力 F_p 、Magnus 升力 F_L ,平衡方程(颗粒惯性=作用在颗粒上的各种力)在笛卡尔坐标系下的形式(x方向)为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (4)$$

$F_D(u-u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力:

$$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p} \quad (5)$$

式中, u 为流体的速度, m/s ; u_p 为颗粒的速度, m/s ; μ 为流体的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; C_D 为曳力系数, ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; ρ_p 为颗粒的密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒的直径,m; Re 为相对 Reynolds 数。

压力梯度力 F_p :

$$F_p = V_p \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

式中, V_p 为颗粒体积, m^3 ; $\frac{dp}{dx}$ 为压力梯度, N/m^3 。

Magnus 升力 F_L :

$$F_L = \frac{3}{4} V_p \rho_s \omega u_s \quad (7)$$

式中, ω 为旋转轴角速度, rad/s ; u_s 为流体和颗粒的速度差, m/s 。

2.3 模型建立与验证

图6为SPVBG与PVBG的模型图,几何模型与实验段的结构和尺寸参数一致。

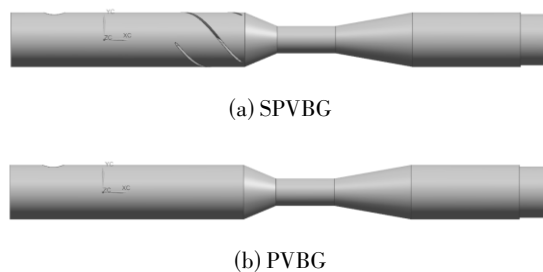


图6 几何模型图

Fig 6 Geometric model diagram

SPVBG 与 PVBG 两种结构均采用非结构化四面体网格,对多孔介质、喉管等区域进行局部加密,壁面处布设边界层网格。此外,SPVBG 对螺旋肋附近做局部加密。用入口单相流速均为 0.283 m/s 工况开展网格无关性验证,进出口压降随网格数量的变化规律如图7所示,根据计算结果,SPVBG 与 PVBG 分别选取 342 万与 317 万数量的网格进行后续计算。

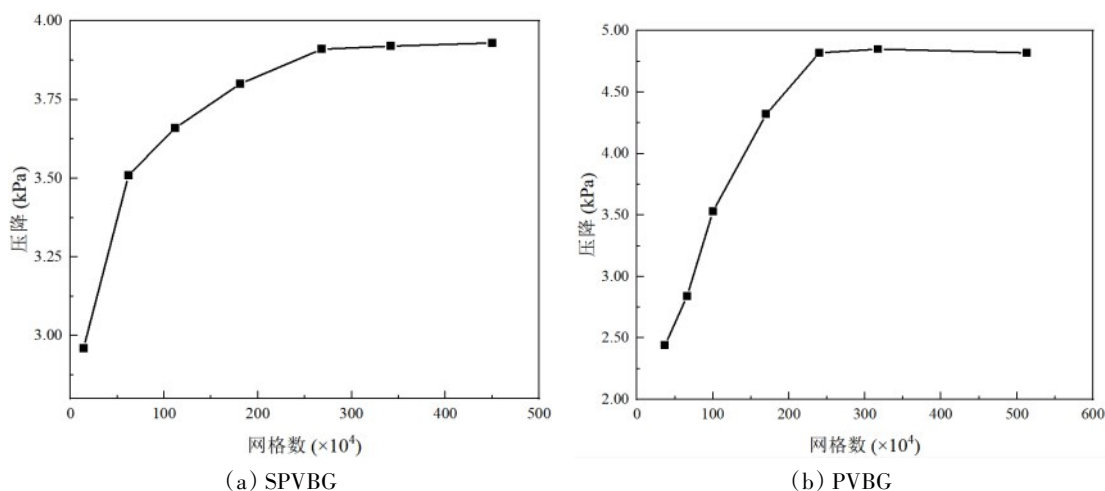


图7 气泡发生器压降随网格数量变化图

Fig. 7 Diagram of the pressure drop of the bubble generator varying with the number of meshes

液相为连续相,湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 。气相以气泡形式作为离散相,采用离散相模型DPM。数值模拟气流量、水流量和气泡粒径与实验测量值一致。出口采用压力出口,为常压边界。壁面采用无滑移边界,使用标准壁面函数。求解采用压力基求解器,压力-速度耦合采用PISO算法,动量、湍动能与耗散率均使用二阶迎风格式。将气泡发生器的进出口边界定义为Escape边界,其余壁面边界均定义为Reflect边界。

气泡分布位置对气泡碎化效果有重要影响,因此在数值模型验证时,验证指标为扩张段气泡分布规律。分别选取水流量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 与 $4\text{ m}^3/\text{h}$,气流量为 $1\text{ L}/\text{min}$ 做验证工况,将气泡发生器扩张段划分为如图8所示的5个区域,SPVBG与PVBG扩张段气泡分布规律的数值模拟与实验结果对比如图9所示。由图可见,两种发生器模拟与实验的平均误差为17.2%,能证明所构建的数值分析模型具备可靠性。

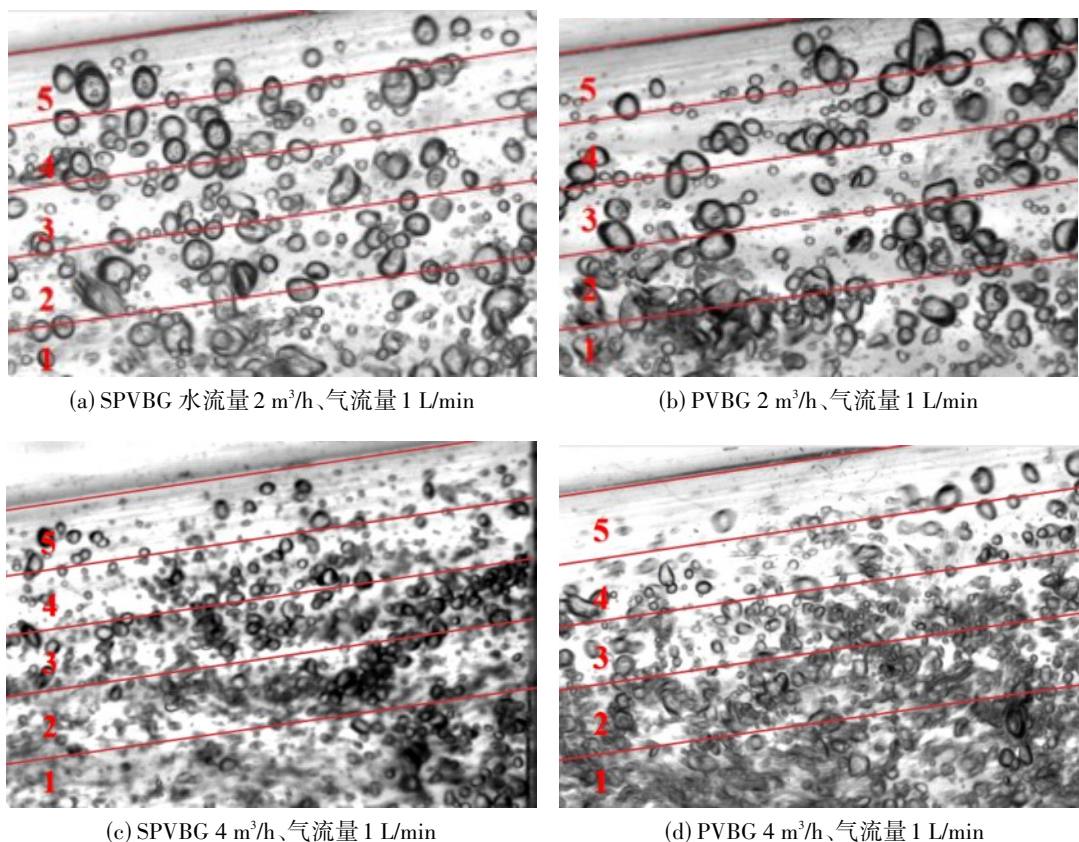


图8 扩张段划分区域

Fig 8 Division of Zones in the Expansion Section

3 结果与讨论

3.1 气泡行为

图10为水、气流量分别为 $4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1\text{ L}/\text{min}$ 时SPVBG与PVBG的扩张段内气泡分布图。图中红线为图20中的最大湍动能50%的位置,对比发现相较于PVBG,含有螺旋导叶的SPVBG在扩张段内近壁面区域气泡分布更为密集。

图11是水、气流量为 $4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1\text{ L}/\text{min}$ 时SPVBG与PVBG在观察段的气泡分布对比图。由图11(a)

与(b)对比可知,SPVBG、PVBG产生的气泡平均直径分别为 0.41 mm 和 0.60 mm 与PVBG相比,SPVBG所产生的气泡直径更小。表明SPVBG具有更优的气泡破碎性能。

3.2 影响因素

图12给出了气流量为 $1\text{ L}/\text{min}$ 时,SPVBG与PVBG在水流量 $2\sim 10\text{ m}^3/\text{h}$ 范围内的气泡直径分布规律,图13为对应平均气泡直径及标准差统计结果。可以看出,随着水流量由 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 逐步提升至 $10\text{ m}^3/\text{h}$,含气率由3%减小到0.6%,SPVBG所产气泡平

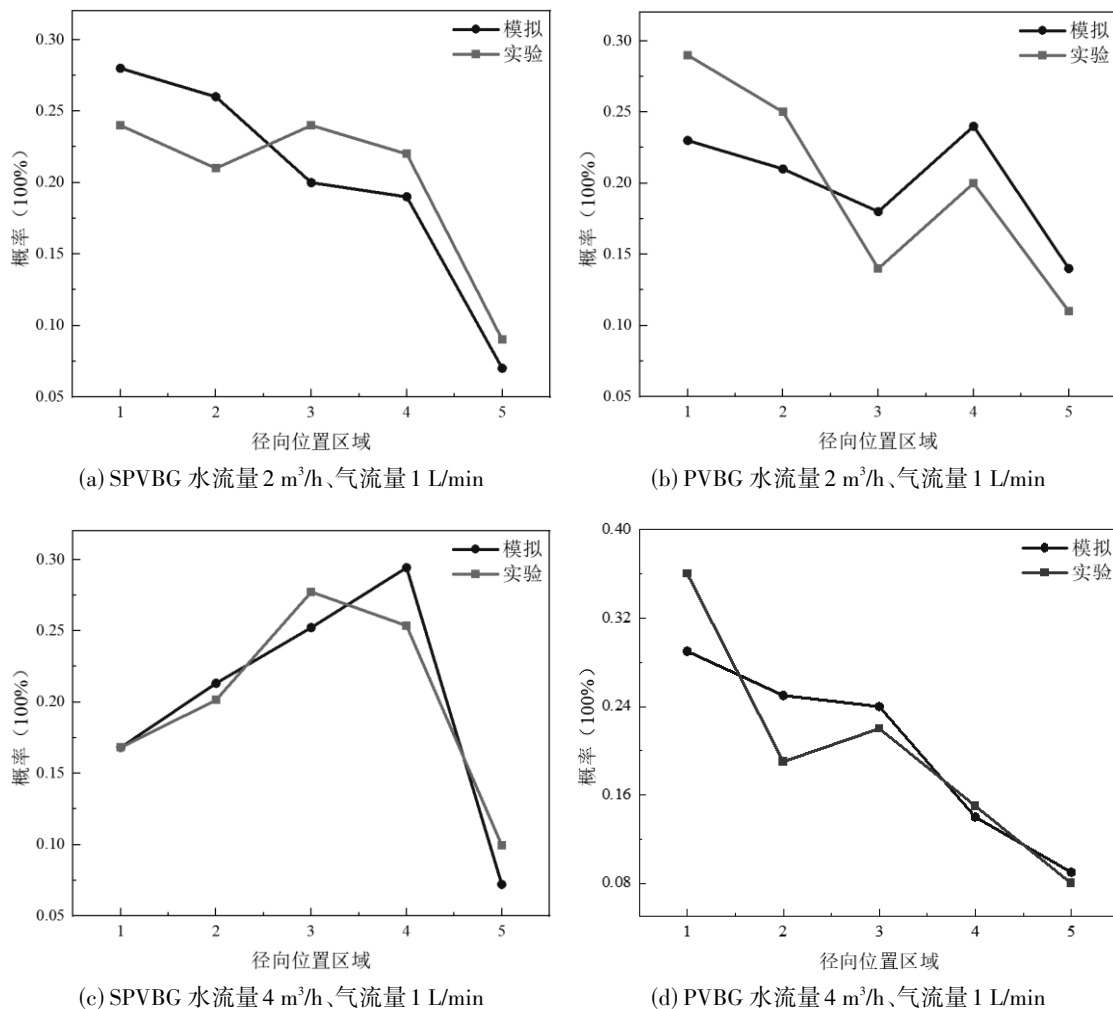


图9 数值分析模型验证

Fig 9 Numerical analysis model verification

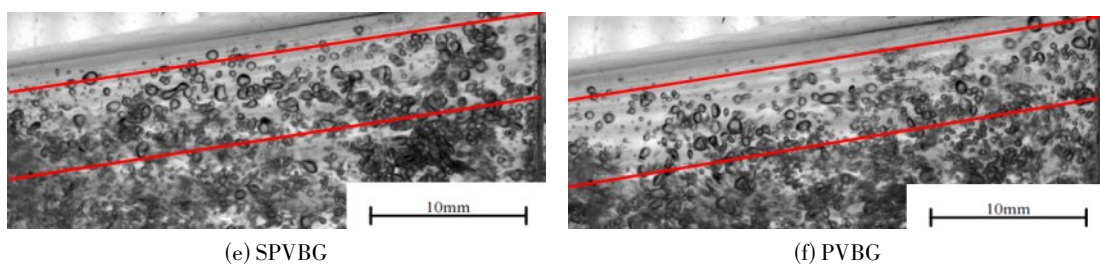


图10 扩张段气泡分布

Fig 10 Bubble distribution in the diffuser

均直径由 0.7 mm 降至 0.19 mm, 粒径标准差由 0.16 mm 减小至 0.05 mm, 表明增大水流量可显著减小气泡尺寸并提升粒径均匀性。其主要原因在于: 水流量提升使喉口射流速度增大, 液相剪切作用增强, 使得多孔介质出口处气泡的初始脱离直径降低^[32-33]; 同时, 更高的液速也强化了扩张段内湍流破碎效应, 进一步促进气泡破碎。

在相同工况范围内, PVBG 气泡平均直径由 1.29 mm 减小至 0.22 mm, 标准差由 0.41 mm 降至 0.05 mm, 变化趋势与 SPVBG 一致。但 SPVBG 所产气泡直径更小、粒径分布更集中, 说明螺旋肋的引入能够有效强化气液混合与剪切破碎效果, 在各工况下均表现出更优的气泡生成性能。

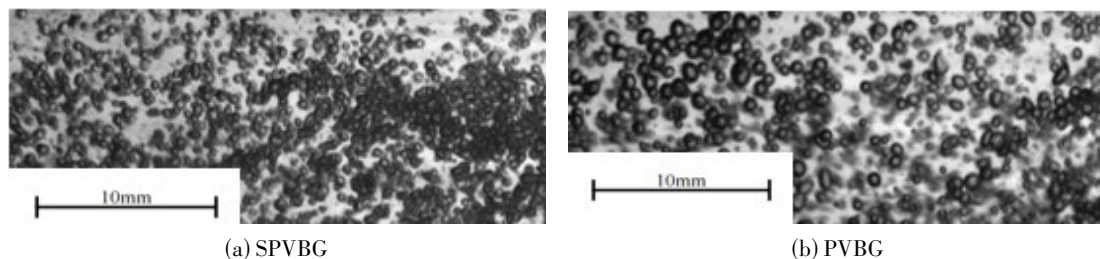


图11 观察段气泡对比图

Fig 11 Bubble comparison diagram at the observation window

图14、15分别为水流量固定为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 时,不同气流量下SPVBG与PVBG的气泡直径分布及平均粒径对比。当气流量为 $0.3\text{ L}/\text{min}$ 时,气泡主要集中在 $0\sim 0.4\text{ mm}$ 区间内,平均直径仅 0.22 mm ,标准差低至 0.05 mm ,表现出良好的碎化与均匀性水平。随着气流量提高,含气率随之逐步提高,气泡平均直径与标准差整体呈小幅上升趋势,表明气泡粒径略有增大且分布均匀性略有下降,这是由于进气量增加会使多孔介质出口处气泡的脱离直径有所上升所致^[34]。

尽管气流量变化会对气泡尺寸产生一定影响,但在同一气流量条件下,SPVBG的平均气泡直径与粒径标准差均显著低于PVBG,进一步证实螺旋肋结构能够持续改善流场分布、增强局部剪切强度,从而在不同进气量下均能生成粒径更细、均匀性更优的气泡。

结合本文实验所用装置的固定几何尺寸,确定PVBG与SPVBG的公称水流量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$,公称注气流量为 $1\text{ L}/\text{min}$ 。SPVBG合理的气液比推荐范围为 $0.3\%\sim 1.2\%$,PVBG合理的气液比推荐范围为 $0.3\%\sim 0.75\%$,两种发生器在合理的气液比推荐范围内产生的气泡平均粒径均小于 0.3 mm ,可为该结构尺寸下发生器的实际运行与工况调控提供明确的流量与气液比参考。通过对比SPVBG和PVBG的产气特性发现,SPVBG在合理的气液比推荐范围内产生气泡平均粒径比PVBG小 $8\%\sim 14\%$ 。在本实验工况下,选用3片螺旋肋、螺距 130 mm ,搭配 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的多孔介质及文丘里管收缩段角度 23° 、扩张段角度 10° ,可产生平均粒径为 0.19 mm 、标准差为 0.05 mm 的气泡,为后续结构优化提供实验依据。

3.3 气泡直径预测关联式

气泡发生器产生气泡的大小与水流量、气流量的运行参数有关,同时与表面张力系数、液体密度、动力黏度等流体物性参数有关^[35]。利用Yin等^[36]提

出的关系式基本形式,结合表3实验数据,开发SPVBG的气泡平均直径预测关联式如式(8):

式中为 d 气泡平均直径, m ; D 为喉管内径减小孔介质外径, m ; Re 为水的Reynolds数, α 为含气率, σ 为表面张力系数, N/m ; ρ 为液相密度, kg/m^3 ; μ 为水的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

图16为SPVBG的气泡平均直径预测值与实验值结果对比图,SPVBG气泡平均直径拟合关联式的预测值与实验值的最大偏差为 6% ,PVBG气泡平均直径拟合关联式的预测值与实验值的最大偏差为 18% ^[29],SPVBG拟合关联式的预测误差显著低于PVBG,展现出更优的预测精度。

3.4 机理分析

本节通过数值模拟,分析SPVBG扩张段内水的湍动能、压降、气泡在扩张内分布等流场特性,揭示气泡破碎机理

扩张段内的湍动能是气泡破碎的关键因素^[37]。为研究水流量对SPVBG扩张段内湍动能大小的影响,不同水流量下的湍动能分布如图17所示。由图可知湍动能随水流量增大而增大。图18为SPVBG与PVBG在水流量 $2\sim 10\text{ m}^3/\text{h}$ 时扩张段内湍动能沿轴向分布对比图,由图中可知,两种气泡发生器扩张段内湍动能沿轴向方向先增大后减小。图19为不同水流量下SPVBG与PVBG扩张段内平均湍动能对比图,各水流量条件下SPVBG扩张段内的湍动能比PVBG大 $6\%\sim 29\%$ 。为了对比SPVBG与PVBG湍动能的径向分布规律,统计水流量为 $4\text{ m}^3/\text{h}$ 时两种气泡发生器在扩张段内 $X=249\text{ mm}$ 处湍动能的径向分布,如图20所示。由图可知,由轴心到壁面湍动能先增大后减小,在径向位置 14.3 mm (SPVBG)和 13.6 mm (PVBG)处到达最大。在 $0\text{ mm}\sim 17\text{ mm}$ 之间SPVBG的湍动能比PVBG大。

图21为不同水流量下SPVBG与PVBG的扩张段内径向位置 $7.1\text{ mm}\sim 17\text{ mm}$ 之间内气泡分布概率

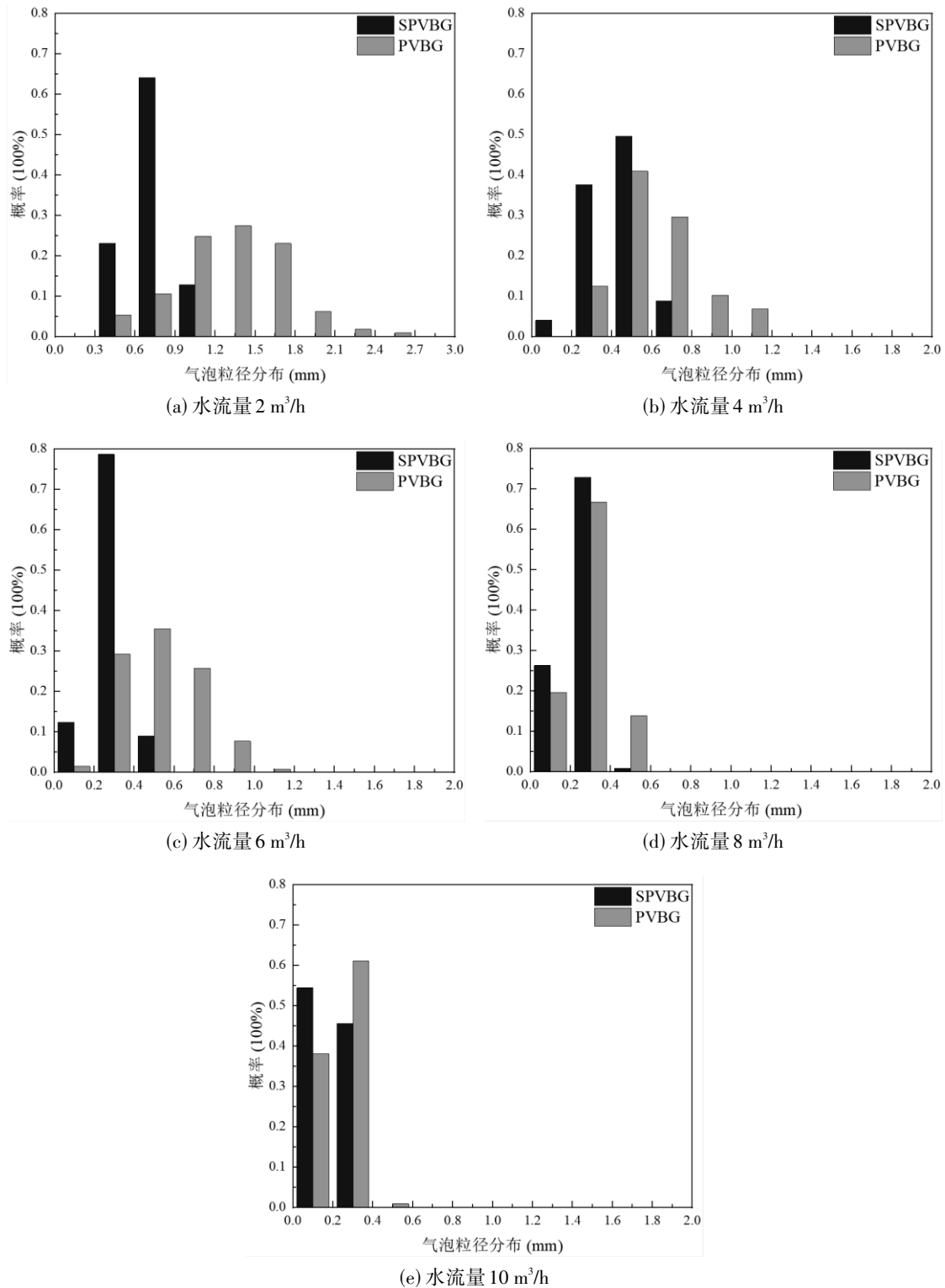


图 12 不同水流量下气泡粒径分布图

Fig 12 Bubble size distribution diagram under different water flow rates

的统计结果,该区域的湍动能较高,为图 20 中 SPVBG 最大湍动能值的 50% 以上的区域。由图 21 可知,此区域内 SPVBG 的气泡分布概率各工况平均比 PVBG 大 7%,与图 10 所示的该区域气泡分布

相符。

图 22、23 分别为不同水流量下 SPVBG 与 PVBG 的扩张段内高湍动能区下方 1 mm 处于同一位置的气泡径向速度与轴向速度对比图。由图可知,在不

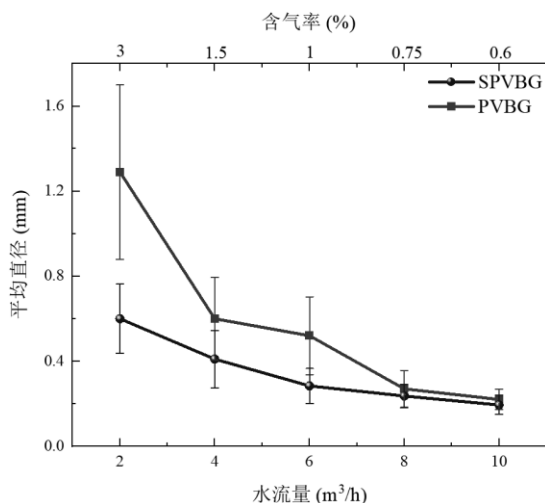


图13 不同水流量下平均气泡直径及标准差分布

Fig 13 Distribution of average bubble diameter and standard deviation under different water flow rates

同水流量下 SPVBG 比 PVBG 扩张段内气泡径向速度平均大 30%, 而 PVBG 比 SPVBG 扩张段内气泡轴向速度平均大 45%。以 SPVBG 与 PVBG 扩张段高端动能区下方 1 mm 处轴向位置 $X=266$ mm 处的气泡为例, 图 24 为该气泡在水流量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的气泡运动轨迹图, 由图可知, 两种发生器同一位置气泡在运动 0.01 s 后由于 SPVBG 产生的气泡径向速度更大, 比 PVBG 产生的气泡更容易进入高端动能区域, 有利于气泡的碎化。

扩张段压力梯度的增大更有利于气泡破碎^[38]。图 25 为扩张段压降模拟结果。由图可知, 在不同水流量时 SPVBG 的扩张段压降比 PVBG 大, 较大的压力梯度下气泡更容易变形。因此, 在湍动能的作用下破碎效果更好。

4 结论

本文通过实验与数值模拟, 研究 SPVBG 的产气特性与气泡破碎机理, 结论如下:

(1) SPVBG 扩张段内近壁面区域的气泡分布更密集。SPVBG 在合理的气液比推荐范围内产生气泡平均粒径比 PVBG 小 8%~14%, 且气泡粒径分布更均匀, 体现了螺旋肋对气泡碎化与均匀分布的强化效果。

(2) 运行参数对 SPVBG 的气泡粒径调控具有显著规律性, 随着水流量的增大或气流量的减小, 气泡平均直径呈逐渐减小趋势, 且粒径分布愈发集中。基于实验数据构建了 SPVBG 的气泡直径关联

式, 该关联式对气泡直径的预测结果与实验值的误差在 6% 以内, 可为该类型发生器的工程设计与工况调控提供参考。

(3) 数值模拟结果揭示了 SPVBG 强化气泡破碎的机理, 发生器扩张段内的湍动能随水流量的增大呈显著上升趋势, 与 PVBG 相比, SPVBG 扩张段内的湍动能提升 6%~29%, 气泡径向速度更大, 使气泡在高端动能区域的数量增加, 因此产生的气泡直径更小。

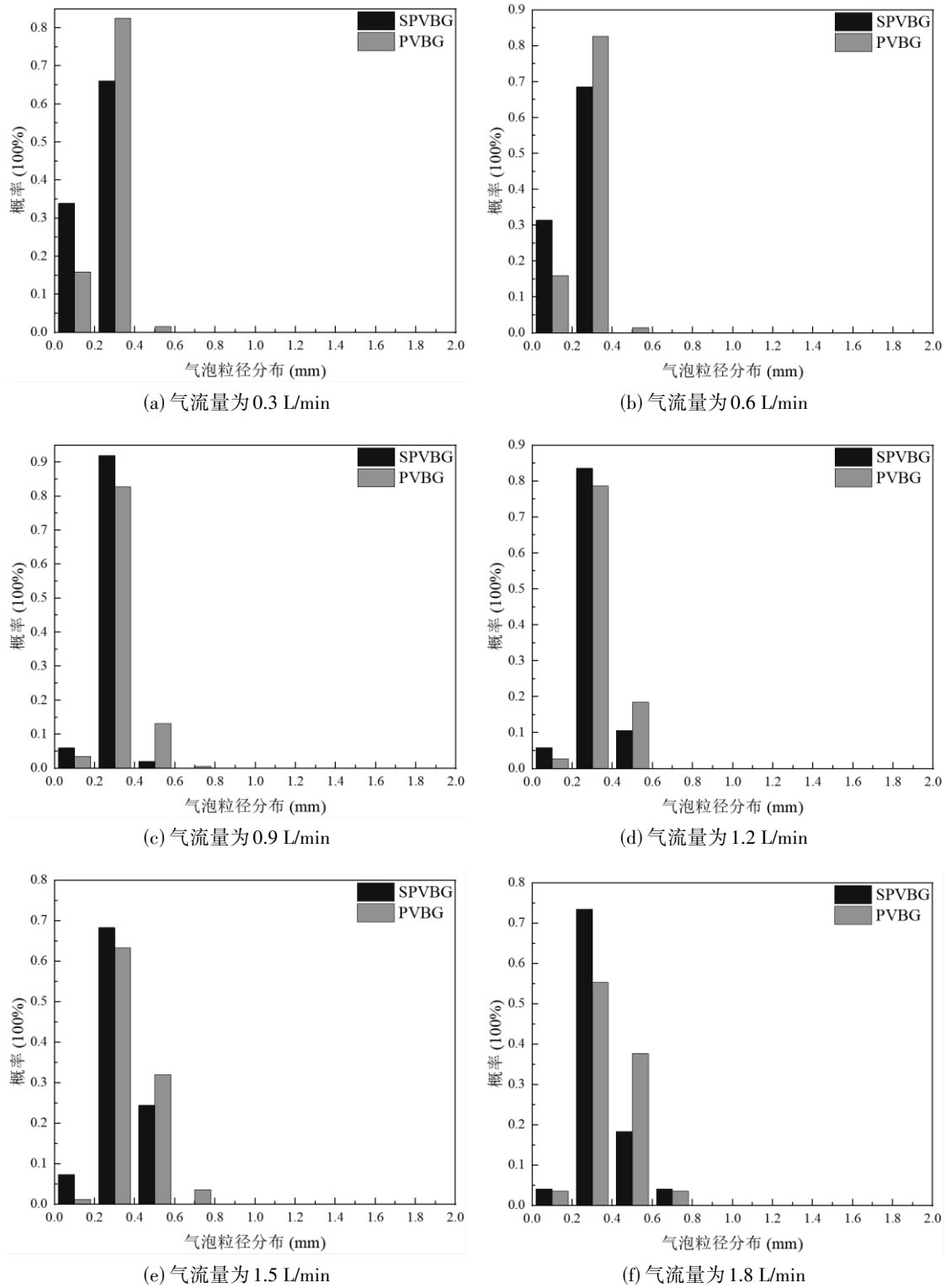


图 14 不同气流量下的气泡粒径分布图

Fig 14 Bubble size distribution diagram under different gas flow rates

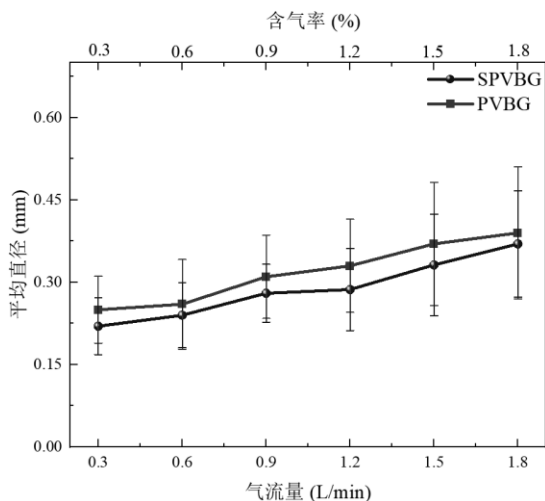


图 15 不同气流量下平均气泡直径及标准差分布

Fig 15 Distribution of average bubble diameter and standard deviation under different gas flow rates

表 3 气泡直径预测关联式所用实验数据

Table 3 Experimental data used for bubble diameter prediction correlation

D(mm)	D(mm)	含气率 (%)	Re	预测值 (mm)	误差 (%)
0.7	5	3	15628	0.71	0.9
0.41	5	1.5	31256	0.38	-6.2
0.28	5	1	46885	0.28	0.5
0.24	5	0.75	62513	0.24	-0.5
0.19	5	0.6	78141	0.21	5.8
0.22	5	0.3	46885	0.22	-1.6
0.24	5	0.6	46885	0.25	2.4
0.28	5	0.9	46885	0.28	-1.8
0.29	5	1.2	46885	0.3	6.1
0.33	5	1.5	46885	0.33	0.6
0.37	5	1.8	46885	0.36	-2.1

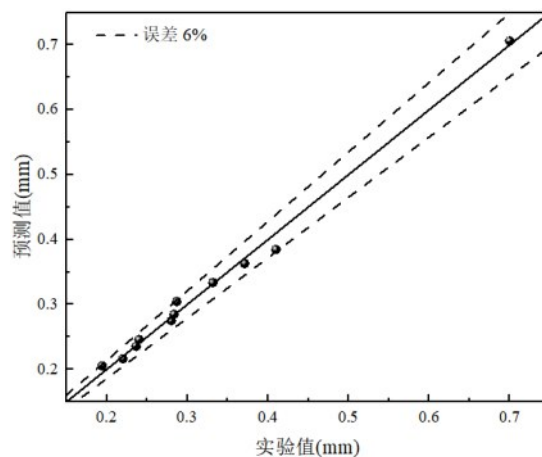
$$\frac{d}{D} = 0.000759316(1 + 52.26\alpha) \left(\frac{1.54\sigma\rho D}{\mu^2} \right)^{0.6} Re^{-0.3508} \quad (8)$$


图 16 SPVBG 预测值与实验值对比图

Fig 16 Comparison diagram of SPVBG predicted values and experimental values

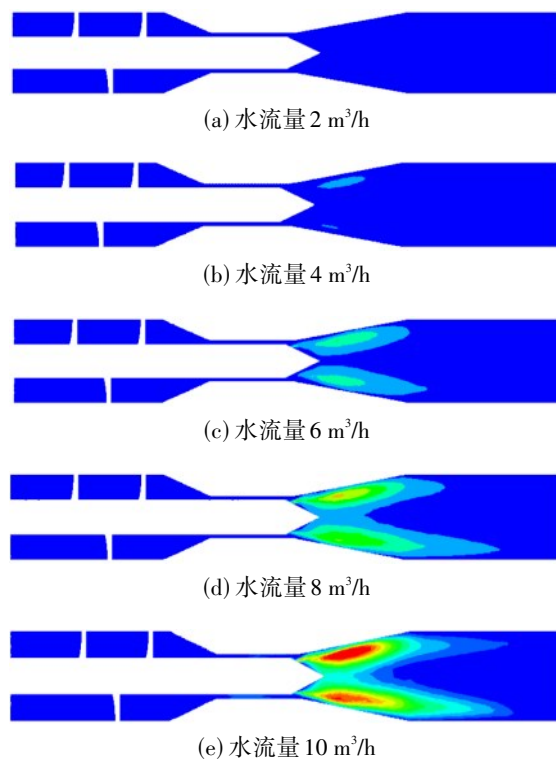


图 17 SPVBG 在不同水流量时的湍动能分布云图

Fig 17 Cloud diagram of SPVBG turbulent kinetic energy distribution at different water flow rates

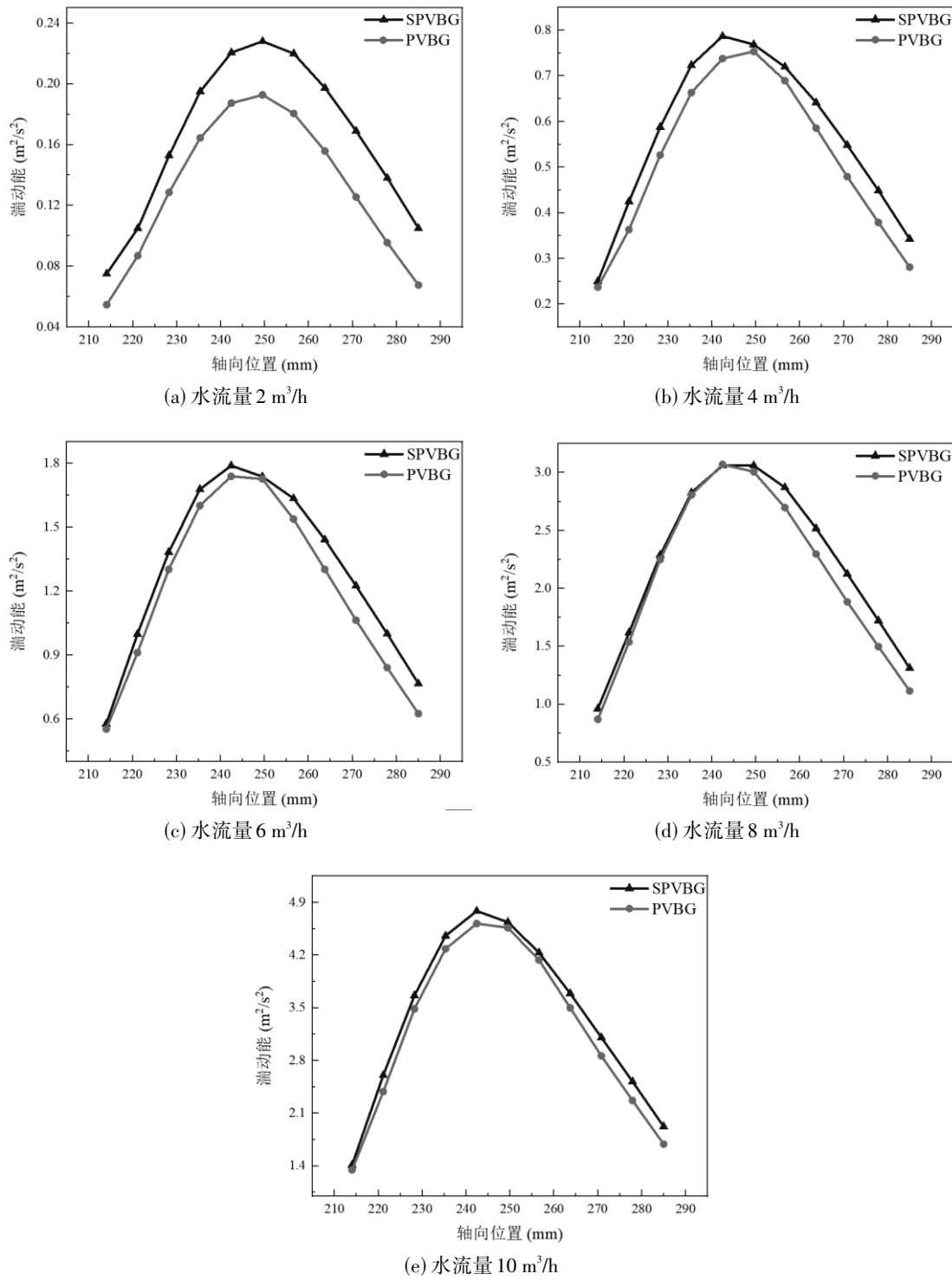


图18 不同水流量下沿轴向湍动能的分布图

Fig 18 Distribution diagram of turbulent kinetic energy along the axial direction under different water flow rates

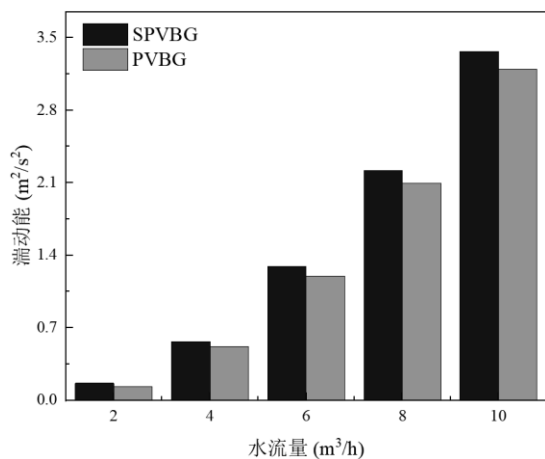


图19 不同水流量下SPVBG与PVBG扩张段平均湍动能对比图

Fig 19 Comparison of average turbulent kinetic energy in the diffuser section between SPVBG and PVBG under different water flow rates

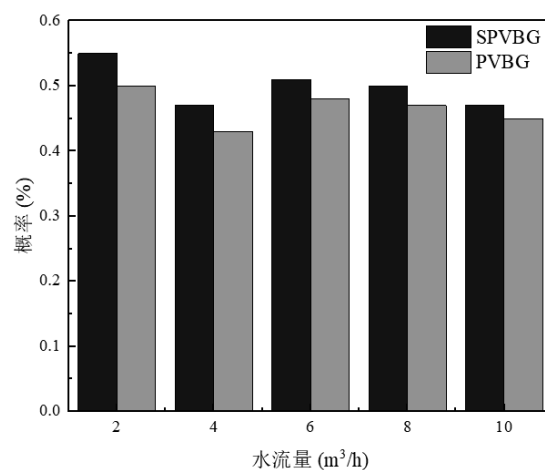


图21 不同水流量下SPVBG与PVBG扩张段气泡在高端动能区分布概率

Fig 21 Distribution probability of bubbles in high turbulent kinetic energy zones of the expansion section for SPVBG and PVBG under different water flow rates

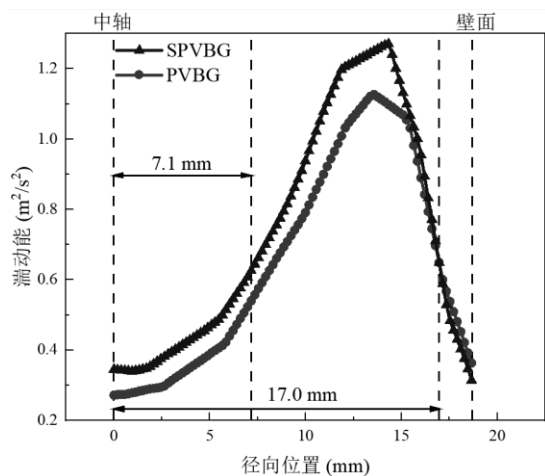


图20 水流量为4 m³/h时扩张段X=249 mm处径向位置湍动能分布

Fig 20 Turbulent kinetic energy distribution at radial position X=249 mm in the diffuser when water flow rate is 4 m³/h

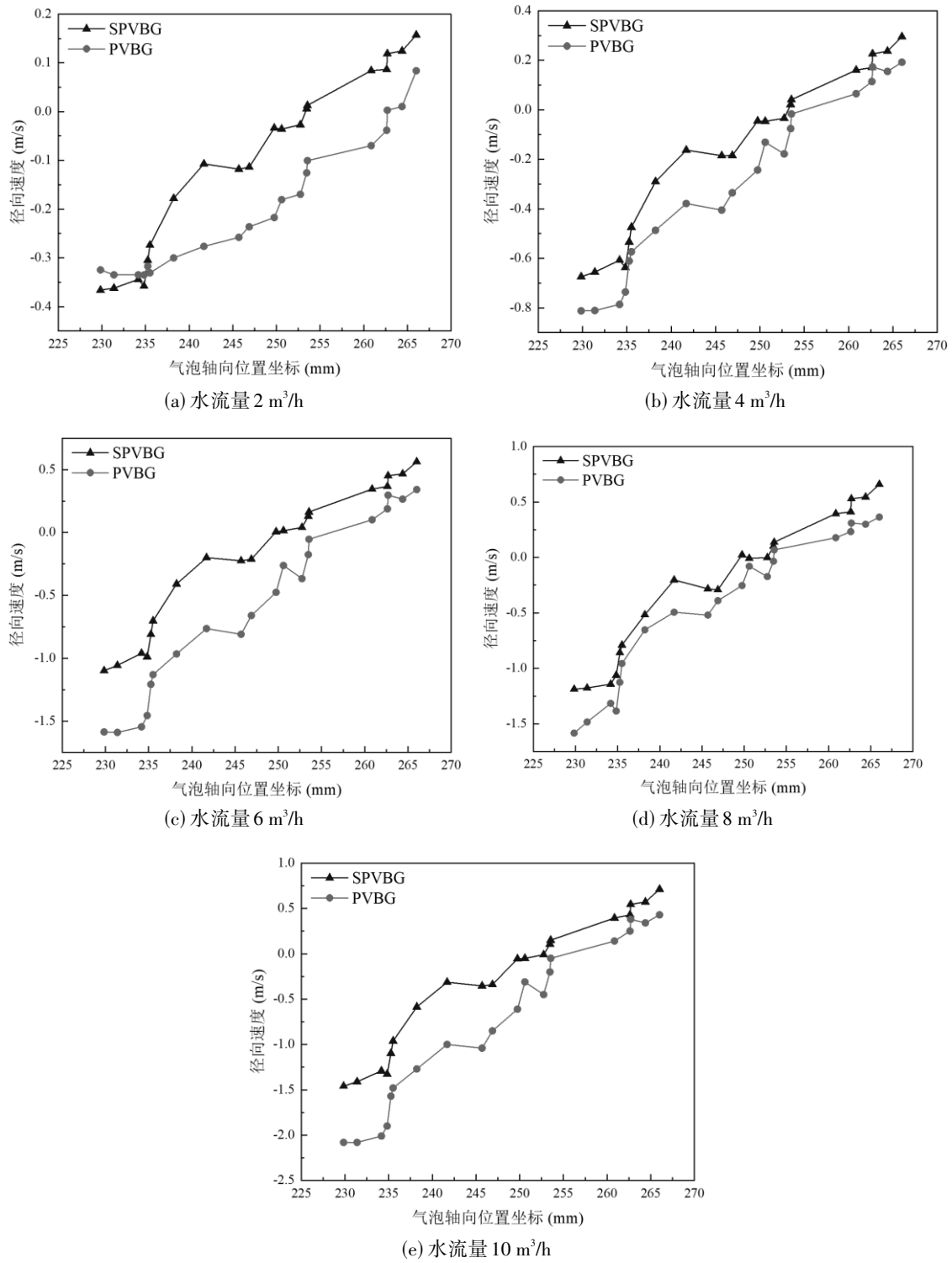


图22 不同水流量时高端动能区下1 mm处气泡径向速度分布图

Fig 22 Radial velocity distribution of bubbles at 1 mm under the high turbulent kinetic energy region at different water flow rates

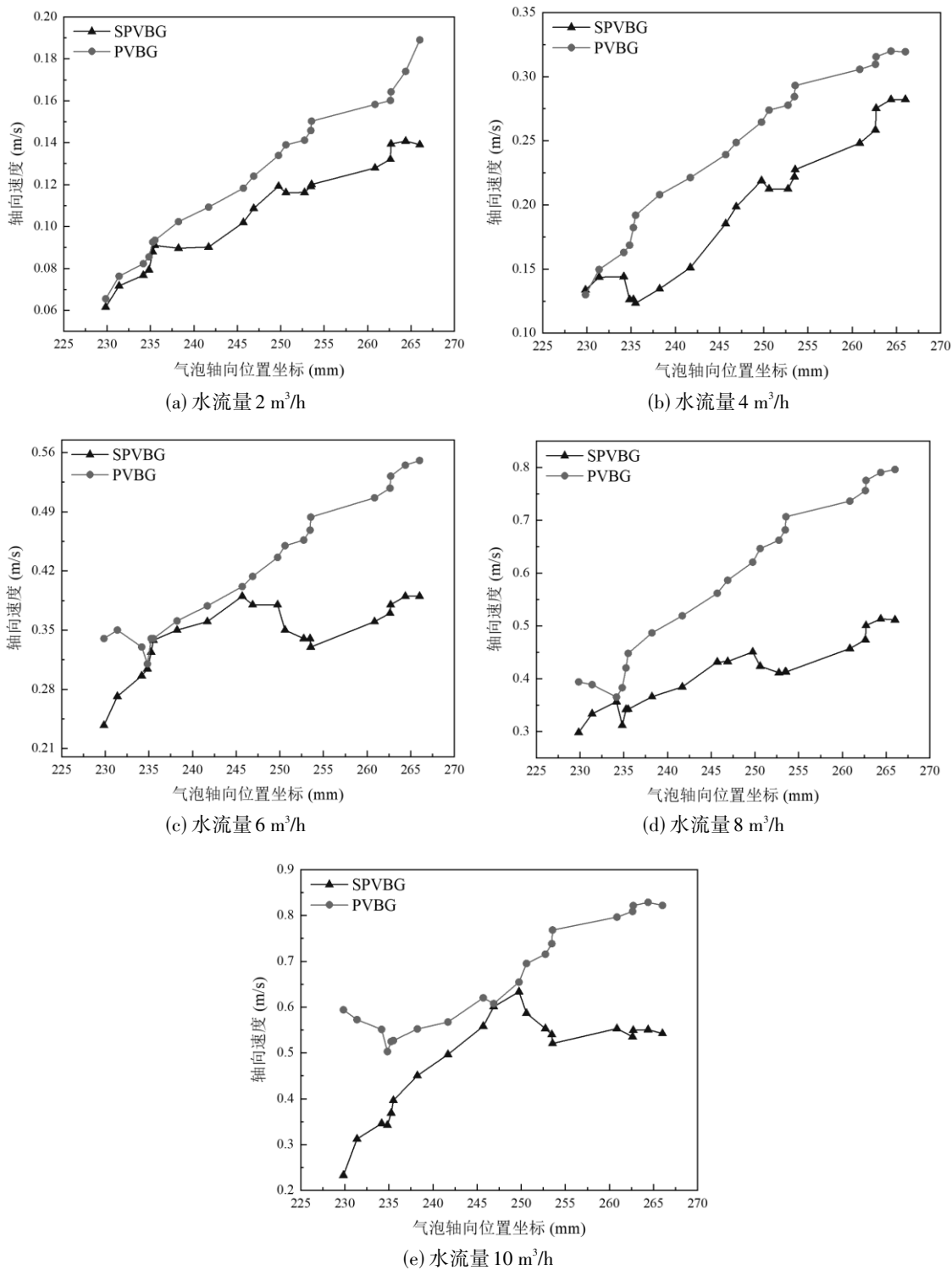


图 23 不同水流量时高湍动能区下 1 mm 处气泡轴向速度分布

Fig 23 Axial velocity distribution of bubbles at 1 mm under the high turbulent kinetic energy region at different water flow rates

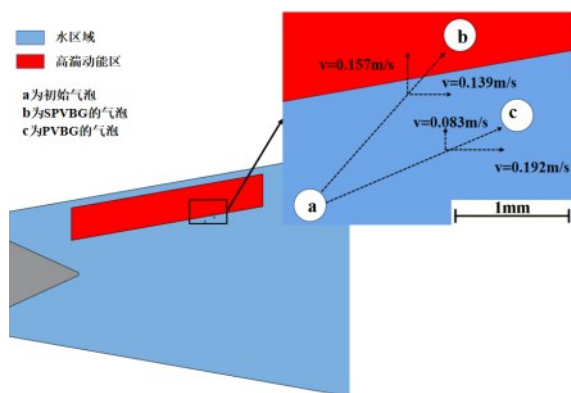
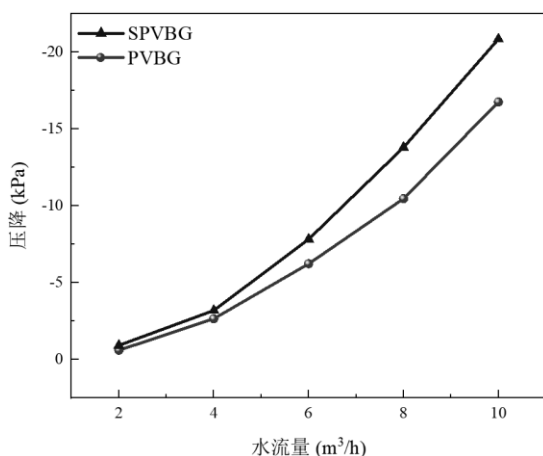
图24 水流量为2 m³/h时气泡运动0.01 s轨迹图Fig 24 Trajectory Diagram of Bubble Movement at 0.01 s
When Water Flow Rate is 2 m³/h

图25 不同水流量下SPVBG与PVBG压降对比

Fig 25 Pressure drop comparison between SPVBG and PVBG
under different water flow

参考文献

- [1] Zhang Y, Zhang Z J, Feng D D, et al. Effect of microbubbles on preparation of precipitated silica by carbonization: physical-chemical structure, kinetic parameters and mass transfer characteristics[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2021, **1**: 100002.
- [2] Xie B Q, Ma W Y, Chen Y, et al. Visualization of gas-liquid flow behavior and local mass transfer performance in plate microbubble column reactor utilizing the colorimetric technique [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **510**: 161756.
- [3] Guduru A T, Singh A, Mansuri A, et al. Magnetic nanoparticle loaded ozone microbubbles for effective degradation of organic pollutants from sewage water[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, **71**: 107283.
- [4] 崔怡洲, 李成祥, 翟霖晓, 等. 亚毫米气泡和常规尺寸气泡气液两相流流动与传质特性对比[J]. 化工学报, 2024, **75**(1): 197-210.
Cui Y Z, Li C X, Zhai L X, et al. Comparative study on the flow and mass transfer characteristics of submillimeter bubbles and conventional bubbles in gas-liquid two-phase flow[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(1): 197-210.
- [5] Elobeid M O, Alhems L M, Al-Sarkhi A, et al. Effect of inclination and water cut on venturi pressure drop measurements for oil-water flow experiments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, **147**: 636-646.
- [6] Huang J, Sun L C, Du M, et al. An investigation on the performance of a micro-scale Venturi bubble generator[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **386**: 120980.
- [7] Ding G D, Li Z L, Chen J Q, et al. An investigation on the bubble transportation of a two-stage series venturi bubble generator[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, **174**: 345-356.
- [8] 丁国栋, 陈家庆, 李振林, 等. 注气孔位置对文丘里管式微气泡发生器成泡特性的影响分析[J]. 化工学报, 2021, **72**(11): 5552-5562.
Ding G D, Chen J Q, Li Z L, et al. Analysis of the effect of air injection hole position on bubble formation characteristics of Venturi-type microbubble generator[J]. CIESC Journal, 2021, **72** (11): 5552-5562.
- [9] Sadatomi M, Kawahara A, Matsuura H, et al. Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, **41**: 23-30.
- [10] 吴翔. 微气泡发生器在旋流气浮技术中的应用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
Wu X. Research on the application of microbubble generator in the cyclone flotation technology[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [11] Murai Y, Tasaka Y, Oishi Y, et al. Bubble fragmentation dynamics in a subsonic Venturi tube for the design of a compact microbubble generator[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, **139**: 103645.
- [12] Bie H Y, Li Y, Zhang R H, et al. Effect of swirl flow on the bubble motion and spatial distribution in a venturi tube[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **480**: 148341.
- [13] Wang X Y, Shuai Y, Zhang H M, et al. Bubble breakup in a swirl-venturi microbubble generator[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, **403**: 126397.
- [14] Mawarni D I, Juwana W E, Yuana K A, et al. Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using the swirl flow type of microbubble generator[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, **48**: 102846.
- [15] Wu M, Song H Y, Liang X, et al. Generation of micro-nano bubbles by self-developed swirl-type micro-nano bubble generator[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2022, **181**: 109136.
- [16] Ding G D, Chen J Q, Lu J Q, et al. Carbon dioxide stripping from acidic wastewater through a vortex venturi tubular microbubble generator[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, **12**(5): 113925.
- [17] Wang X Y, Shuai Y, Zhou X R, et al. Performance comparison of swirl-venturi bubble generator and conventional venturi bubble generator[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2020, **154**: 108022.
- [18] 冯子夏, 丁国栋, 陈家庆, 等. 破旋结构对旋流文丘里管式微气泡发生器成泡性能的影响[J]. 化工进展, 2025, **44**(10): 5570-5581.
Feng Z X, Ding G D, Chen J Q, et al. Influence of rotation-

- breaking structure on the bubble formation performance of swirl Venturi tube microbubble generator[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, **44**(10): 5570–5581.
- [19] 丁国栋, 陈家庆, 王春升, 等. 轴向旋流式微气泡发生器的结构与数值模拟[J]. 过程工程学报, 2018, **18**(5): 934–941.
Ding G D, Chen J Q, Wang C S, et al. Structural design and numerical simulation of axial-swirling type micro-bubble generator[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, **18**(5): 934–941.
- [20] Cao Y Z, Lin D T, Yin Z Y, et al. Investigation of transport and deposition behavior and mechanisms of micro-nano-bubbles in porous media[J]. Journal of Hydrology, 2025, **660**: 133379.
- [21] Lei M, Zou J H, Zou H, et al. On bubble size characterization and modulation mechanisms of ceramic membrane microbubble generator tandem dissolved gas release system[J]. Powder Technology, 2026, **467**: 121607.
- [22] Guo Y L, Wang S. Influence of porous structure on bubble dynamics and boiling heat transfer characteristics on the vertically heating surface *via* LBM approach[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, **162**: 108592.
- [23] 徐振华, 赵红卫, 方为茂, 等. 金属微孔管制造微气泡的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006(9): 78–82.
Xu Z H, Zhao H W, Fang W M, et al. Research on microbubbles generation by metal microporous tube[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006(9): 78–82.
- [24] 吴胜军, 方为茂, 赵红卫, 等. 陶瓷微孔膜管制造微气泡的研究[J]. 膜科学与技术, 2009, **29**(6): 61–65.
Wu S J, Fang W M, Zhao H W, et al. Research on microbubbles generated by ceramic microporous tube[J]. Membrane Science and Technology, 2009, **29**(6): 61–65.
- [25] 吴胜军, 方为茂, 赵红卫, 等. 高速剪切流剪切形成微气泡的研究[J]. 水处理技术, 2009, **35**(5): 44–48.
Wu S J, Fang W M, Zhao H W, et al. Research on microbubbles formation by high-speed cross-flow[J]. Technology of Water Treatment, 2009, **35**(5): 44–48.
- [26] 吴胜军, 方为茂, 赵红卫, 等. PE微孔形成微气泡及其理论研究[J]. 四川化工, 2008, **11**(6): 1–4.
Wu S J, Fang W M, Zhao H W, et al. Studies of microbubble formation by PE microporous and its theoretics[J]. Sichuan Chemical Industry, 2008, **11**(6): 1–4.
- [27] Bokányi L, Csöke B. Preparation of clean coal by flotation following ultra fine liberation[J]. Applied Energy, 2003, **74**(3/4): 349–358.
- [28] Liew K C S, Rasdi A, Budhijanto W, et al. Porous venturi-orifice microbubble generator for oxygen dissolution in water[J]. Processes, 2020, **8**(10): 1266.
- [29] 蔡伟华, 王玉航, 张文超, 等. 多孔介质-文丘里气泡发生器产气特性[J]. 化工学报, 2024, **75**(10): 3488–3497.
Cai W H, Wang Y H, Zhang W C, et al. Gas production characteristics of a porous media-Venturi bubble generator[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(10): 3488–3497.
- [30] 李欢, 高亮, 张梦, 等. 改进型螺旋纹文丘里施肥器的设计与实现[J]. 河北农业大学学报, 2019, **42**(3): 115–119.
Li H, Gao L, Zhang M, et al. Design and implementation of an improved Venturi fertilizer apparatus with helical blades[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, **42**(3): 115–119.
- [31] Yin J L, Qian Y L, Ma Y F, et al. Experimental study on the bubble trajectory in an axial gas-liquid separator applied for tritium removal for molten salt reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, **320**: 133–140.
- [32] Mirsandi H, Smit W J, Kong G, et al. Bubble formation from an orifice in liquid cross-flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **386**: 120902.
- [33] Kulkarni A A, Joshi J B. Bubble formation and bubble rise velocity in Gas – Liquid systems: a review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, **44**(16): 5873–5931.
- [34] Marshall S H, Chudacek M W, Bagster D F. A model for bubble formation from an orifice with liquid cross-flow[J]. Chemical Engineering Science, 1993, **48**(11): 2049–2059.
- [35] Chakraborty I, Biswas G, Ghoshdastidar P S. Bubble generation in quiescent and co-flowing liquids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, **54**(21/22): 4673–4688.
- [36] Yin J L, Li J J, Li H, et al. Experimental study on the bubble generation characteristics for an venturi type bubble generator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **91**: 218–224.
- [37] Xing Y, Zhong T, Yao Y P, et al. Bubble breakup and size evolution in turbulent vortex flow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2025, **223**: 84–95.
- [38] 邵梓一, 张海燕, 孙立成, 等. 文丘里式气泡发生器内气泡破碎机制分析[J]. 化工学报, 2018, **69**(6): 2439–2445.
Shao Z Y, Zhang H Y, Sun L C, et al. Bubble breakup mechanism in Venturi-type bubble generator[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(6): 2439–2445.