

射流鼓泡反应器喷嘴结构的数值模拟与分析

刘鑫源,马宏方,张海涛,李涛*

(华东理工大学大型工业反应器工程教育部工程研究中心,上海200237)

摘要:利用CFD的模拟方法研究射流鼓泡反应器内不同喷嘴结构对射流鼓泡反应器的混合和传质性能影响,选择4种喷嘴结构(圆形缩径式、扭转三角形、三棱多边形和三棱圆锥式喷嘴)为考察对象。在相同的操作条件下,对比喷嘴结构在反应器内的流体速度分布、湍动能分布、气含率分布以及气泡直径分布的特性,发现采用旋扭三角形喷嘴的射流鼓泡反应器中,产生更小、更均匀的气泡,平均气含率得到显著提升,气液之间的接触面积增大,提高了气液传质效率,所需混合时间更少。

关键词:射流鼓泡反应器;CFD;喷嘴结构;气泡分布器;湍动能

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0369-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.065

Numerical simulation and analysis on structure of nozzle in jet bubbling reactor

LIU Xin-yuan, MA Hong-fang, ZHANG Hai-tao, LI Tao*

(Large Industrial Reactor Engineering Research Center of the Ministry of Education,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract:The influences of the structure of the nozzle in jet bubbling reactor on the mixing and mass transfer performance of the jet bubbling reactor are studied by means of CFD simulation method through selecting circular reduced diameter, torsional triangle, triangular polygon and triangular conical nozzle as the objects. Under the same operation conditions, the characteristics of nozzle structure in the reactor are compared, including fluid velocity distribution, turbulent kinetic energy distribution, gas content distribution and bubble diameter distribution. It is found that in the jet bubbling reactor with torsional triangular nozzle, smaller and more uniform bubbles are generated, the average gas holding rate is significantly higher, the contact area between gas and liquid is larger, the gas-liquid mass transfer efficiency is higher, and the time needed by mixing is less.

Key words: jet bubbling reactor; CFD; nozzle structure; bubble distributor; turbulent kinetic energy

目前工业上主要合成醋酸的方法是甲醇低压羧基法^[1],射流鼓泡反应器是甲醇羧基合成法制醋酸工艺的关键设备,相对于搅拌釜式反应器,前者具有操作方便、结构简单、反应器内气液两相混合效果较好等优点。在鼓泡塔顶部利用喷嘴引入一股垂直向下的液体射流,从塔底的气体分布器通入气体,利用高速液体射流对气泡产生剪切破碎作用,从而实现气液两相的高效混合和传质过程^[2-4]。

研究者们对射流鼓泡反应器内的气泡尺寸^[5-6]、气含率^[7-9]等关键气泡参数进入深入的探讨和研究。喷嘴作为流体射流的核心部件,喷嘴的结构对射流的流场分布^[10-12]、卷吸特性^[13-14]、气液混合及传质^[15-16]等均具有影响。不同喷嘴结构因独特的设计,导致了气液接触面积的差异,这种差异会直接影响气液相间的传质效率,进而对宏观反应速率产生显著影响,最后关系到反应器内部液体循环的流畅性。液体射流喷嘴结构优化的研究主要是新

型喷嘴流道、喷嘴型式和喷嘴结构参数优化等^[17-26]方面。别海燕等^[24]对液-液喷射器喷嘴结构进行优化,发现椭圆形喷射器混合能力较强,混合时间较短。黄正梁等^[25]进行旋扭三角形喷嘴和缩径圆口喷嘴实验对比,发现前者气液传质性能优于后者。Quinn^[26]运用热线测流法和皮托管静力进行实验研究圆形喷嘴和等边三角形的平均流向涡度、半速度宽度、射流的质量夹带和平均流向速度,结果表明,正三角形喷嘴在产生小尺度涡方面具有显著优势,这些小尺度涡结构能够诱发剧烈的湍流脉动,从而具备更高的混合效率。

本文中利用CFD模拟探究了不同喷嘴结构对射流鼓泡反应器流动性能的影响。根据某工程公司关于新型喷嘴实验专利^[27-28],设计了4种不同出口形状喷嘴:圆形缩径式喷嘴、旋扭三角形喷嘴、三棱多边形喷嘴和三棱圆锥式喷嘴。随后建立了与喷嘴结构相应的射流鼓泡反应器三维模型,在相同工况

收稿日期:2024-03-27;修回日期:2024-06-09

作者简介:刘鑫源(1998-),男,硕士生,1983200805@qq.com;李涛(1968-),男,博士,教授,研究方向为C1化工、催化剂反应工程和过程系统工程,通讯联系人 li@ecust.edu.cn。

条件下进行数值模拟,通过对比分析不同喷嘴结构对引射流体速度分布、气含率分布和湍动能分布等流动特性的影响,确定了最优喷嘴结构,为射流鼓泡反应器的优化设计提供有力支持。

1 模型建立及网格划分

1.1 物理模型和网格划分

射流鼓泡反应器由几个关键部分组成,包括射流喷嘴、气相分布器、筒体以及出口,结构示意图如图 1 所示。喷嘴结构几何参数主要包括液相入口直径 r_1 、出口过渡段直径 r_2 、喷嘴的收缩角 α 、喷嘴出口直径 d_j ,还有喷嘴长度 M 等,射流的流量和速度要求决定了喷嘴的出口直径 d_j ,如图 2 所示。

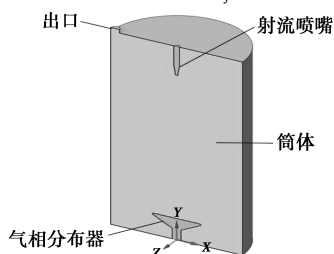


图 1 射流鼓泡反应器简图

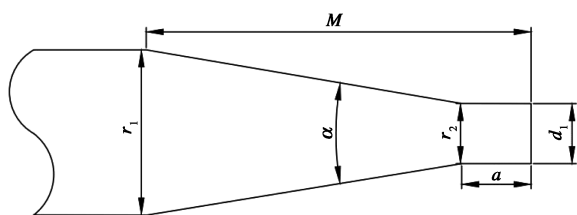


图 2 圆形缩径式喷嘴结构示意图

射流鼓泡反应器通过 SOLIDWORKS 建立三维模型,导入 Workbench 中 Space Claim 板块进行前处理,前处理结束后将其导入到 Fluent Meshing 进行网格划分。在提高计算效率的同时也注重确保计算精度,结合了结构化六面体网格与非结构化四面体网格的方法,对射流鼓泡反应器三维模型进行精细的网格划分。对反应器内的气体分布器、液体射流喷嘴以及出口等关键部位进行网格加密处理,完成网格划分后得到如图 3 所示的射流鼓泡反应器模型。

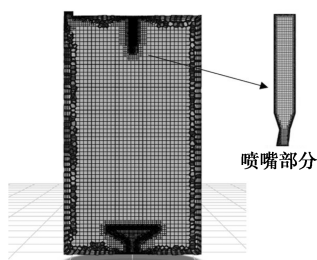


图 3 射流鼓泡反应器结构网格划分

为深入探究喷嘴结构对射流鼓泡反应器性能的影响,设计了 4 种不同的喷嘴结构,如图 4 所示,分别是圆形缩径式喷嘴、扭转三角形喷嘴、三棱多边形喷嘴和三棱圆锥式喷嘴。圆形缩径式喷嘴的出口直径设定为 6.4 mm,为确保流量和喷射效果的有效对比,旋钮三角形喷嘴、三棱多边形喷嘴和三棱圆锥式喷嘴的出口面积与圆形缩径喷嘴出口面积保持一致,确定喷嘴相应的结构尺寸,如表 1 所示。

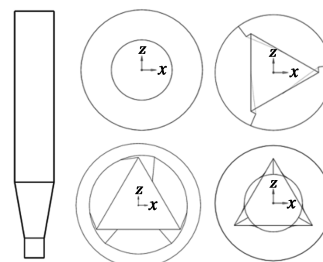


图 4 4 种喷嘴结构示意图

表 1 喷嘴结构主要特征

类型	出口类型	r_1 / mm	d_1 / mm	M / mm	a / mm	r_2 形状
圆形缩径式喷嘴	圆形	12.8	6.4	25	5	圆形
扭转三角形喷嘴	三角形	12.8	8.6	25	10	三角形
三棱多边形喷嘴	三角形	12.8	8.6	25	5	多边形
三棱圆锥式喷嘴	三角形	12.8	8.6	25	10	圆形

1.2 控制方程及边界条件

1.2.1 控制方程

质量守恒方程:

$$(\partial/\partial t)(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1)$$

式中: α_q 为 q 相的体积分数; ρ_q 为 q 相的密度; \vec{v}_q 为 q 相速度; t 为时间; S_q 为反应源项; n 为相数。本研究中,方程右边为 0。

动量守恒方程:

$$(\partial/\partial t)(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lit,q} + \vec{F}_{ul,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \quad (2)$$

式中: $\bar{\tau}_q$ 是第 q 相的压力应变张量; p 是所有相共享的压力; \vec{v}_{pq} 是相间速度。本文中相间动量传输和外部作用力项为 0。

气液两相模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,模拟中假设流体不可压缩。

湍动能 k 方程:

$$\partial(\rho k)/\partial t + \partial(\rho k u_i)/\partial x_i =$$

$$(\partial/\partial x_j)[(\mu + \mu_t/\sigma_k)(\partial_k/\partial x_j)] + G_k + G_b - \rho_\epsilon - Y_m \quad (3)$$

耗散速率 ϵ 方程:

$$\begin{aligned} &\partial(\rho\epsilon)/\partial t + \partial(\rho\epsilon u_i)/\partial x_i = \\ &(\partial/\partial x_j)[(\mu + \mu_t/\sigma_\epsilon)(\partial\epsilon/\partial x_j)] - \\ &\epsilon^2/(k + \sqrt{\nu\epsilon})\rho C_2 + \rho C_1 E_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$$C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta + 5)], \eta = S(k/\epsilon), S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

式中: G_b 为因浮力引起的湍动能; G_k 为因层流速度梯度引起的湍动能; Y_m 为可压缩湍流中过渡扩散引起的波动;模拟参数 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2, C_2 = 1.9$ 。

1.2.2 初始条件及边界条件

射流鼓泡反应器模拟设置如下:气体分布器进气设定为速度入口条件,进口处的气相分率设置为 1.0,气体出口设定为压力出口条件;喷嘴射流入口处设置为速度入口条件,进口处的液相分率设定为 1.0,出口边界同样设置为压力出口;初始条件设置气体分布器内气含率为 1,射流鼓泡反应器内的其余部分气含率为 0。CFD 模拟中选用的气液两相分别为液态水和空气。

2 结果与讨论

利用已构建完成的射流鼓泡反应器三维模型,对 4 种不同喷嘴形状的射流鼓泡反应器进行深入的流体力学特性模拟研究。设定射流雷诺数为 $Re = 30\ 000$ 以及表观气速 $v_g = 0.08\ \text{m/s}$,比较分析喷嘴出口不同位置以及各喷嘴中心轴面上引射流体的速度分布、湍动能分布、气含率分布以及气泡直径分布,更深入地了解喷嘴形状对射流鼓泡反应器内流体流动特性的影响。

2.1 速度分布

图 5 展示了 4 种不同喷嘴结构的射流鼓泡反应

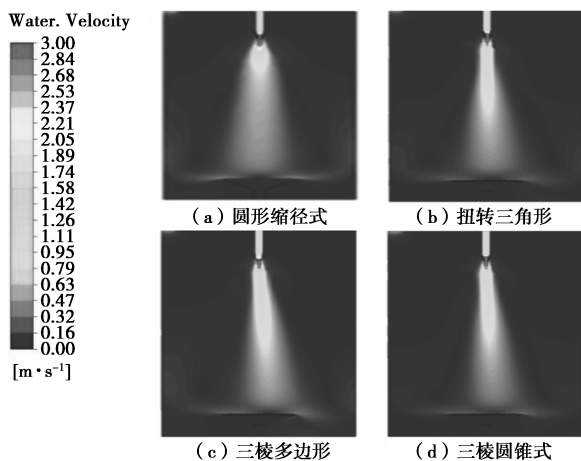
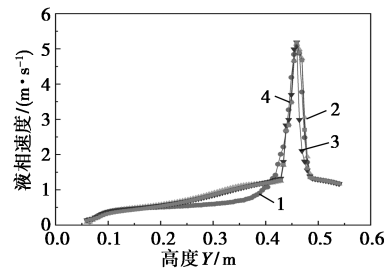


图 5 中心轴剖面速度分布

器中心轴面速度分布情况,从中可以看到,液体以一定速度从喷嘴射流而出后,当射流与周围静止的流体交汇时,会形成速度差异显著的间断面,这种间断面是不稳定的,因此射流在混合过程中会遭遇阻力,流速降低,能量减弱^[9],为克服这种阻力,射流以扩散角 β 向四周扩散,从而带动周围的静止液体并轴向发展,射流中心区域形状与文献[3]中描述的“纺锤形”相吻合。可以看出圆形缩径式喷嘴射流向周围射流形成对称,而其余 3 种喷嘴的不规则射流在一定距离内保持高速流动,最后在扩散段进行减速。

图 6 展示了 4 种喷嘴结构的射流鼓泡反应器在射流中心线上的速度分布情况。从图中可以看出,0.42~0.46 m 段为反应器的射流核心区,在 $Y = 0.46\ \text{m}$ 的位置是整个速度的转折点,之前由于喷嘴的横截面积减小速度不断增大,在离开喷嘴后速度骤降,在 $Y = 0.42\ \text{m}$ 之后,流体速度缓慢降低,发现圆形缩径喷嘴较其他 3 种喷嘴流体射流速度衰减较快,前者湍动能能力较小,在射流过程中能量以圆形向周围扩散,能量耗散较大,速度降低较快。



1—圆形缩径式;2—扭转三角形;3—三棱多边形;4—三棱圆锥式

图 6 沿射流中心线的速度分布曲线

图 7 为喷嘴中心剖面速度分布,发现三棱多边形喷嘴出口出速度增加较慢,对 0.45~0.50 m 中心线速度进行分析,如图 8 所示, $Y = 0.46\ \text{m}$ 为喷嘴出

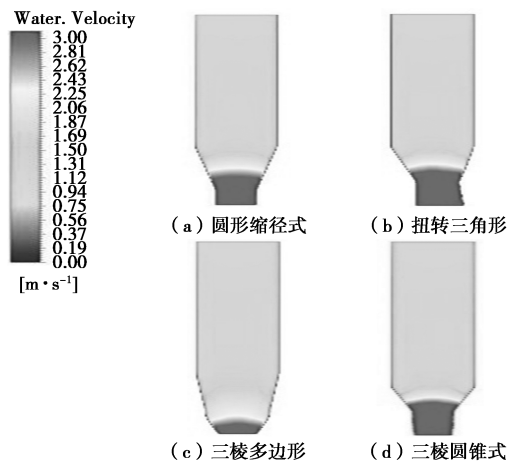
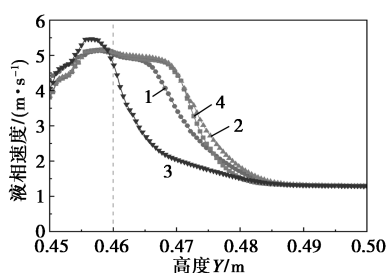


图 7 喷嘴中心剖面速度分布



1—圆形缩径式;2—扭转三角形;3—三棱多边形;4—三棱圆锥式

图 8 各喷嘴中心线的速度分布曲线

口的高度,发现三棱多边形和圆形缩径式喷嘴速度增加较慢。射流出口为高速流体与静止流体进行混合,在三棱多边形喷嘴中流体在离开喷嘴后还有速度增加,显示出该喷嘴的湍流强度更为显著,具备更强的剪切能力。

2.2 湍动能分布

湍动能是评估湍流发展、衰退和混合能力的关键参数。图 9 和图 10 分别呈现了 4 种结构喷射器中心轴面的湍动能分布状况及中心线上湍动能变化趋势。从图中可以看出,当流体从喷嘴喷出后,湍动能首先经历增长阶段,随后逐渐减弱,流体在射流的过程中发生剧烈的碰撞,在 $Y=0.36$ m 处湍动能达

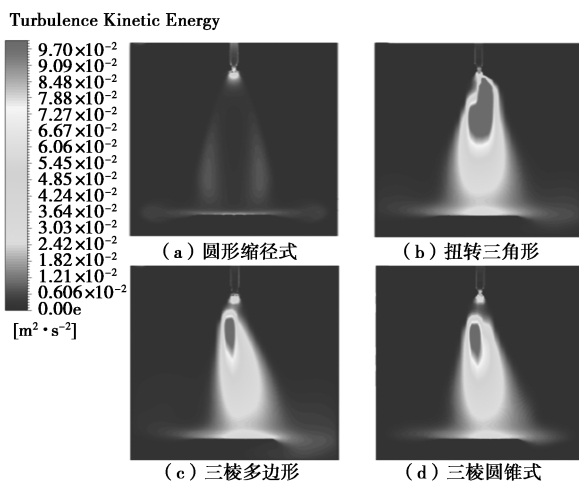
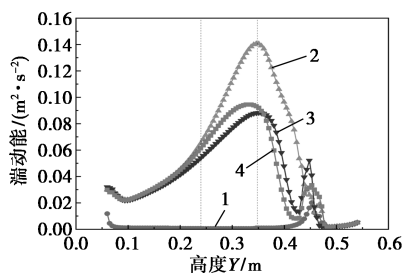


图 9 中心轴剖面湍动能分布图

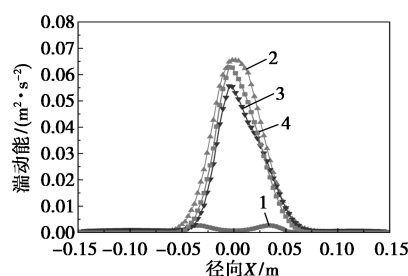


1—圆形缩径式;2—扭转三角形;3—三棱多边形;4—三棱圆锥式

图 10 沿射流中心线的湍动能分布曲线

到峰值,随着湍动能的逐渐减小,2 股流体最终完全混合,湍动能趋于稳定。观察到圆形缩径式喷嘴湍动能集中在喷嘴出口处,而其他 3 种喷嘴的流体离开后,湍动能的持续汇集较为明显,衰退较慢,表明喷嘴混合能力、剪切能力较强。

通过图 9 发现圆形缩径式喷嘴中流体湍动能以圆形向周围扩散,对 $Y=0.24$ m 平面进行观测,如图 11 平面 X 轴的湍动能分布,发现圆形缩径式喷嘴流体的湍动能以中心轴对称扩散,湍动能不如其他 3 种喷嘴射出流体,而扭转三角形喷嘴湍动能汇集优点较为明显。

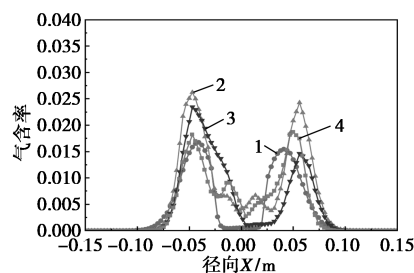


1—圆形缩径式;2—扭转三角形;3—三棱多边形;4—三棱圆锥式

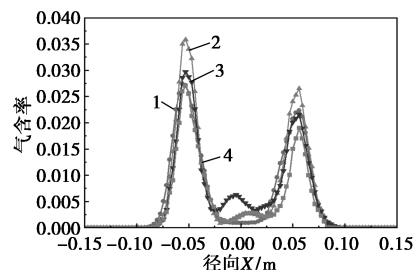
图 11 $Y=0.24$ 平面 X 轴的湍动能分布曲线

2.3 局部气含率分布

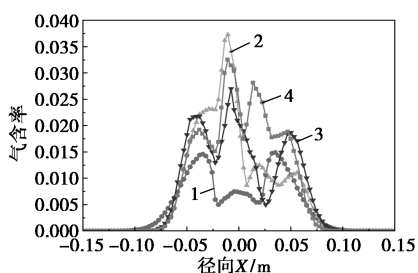
气含率是反应器内气相体积分数的衡量指标,是评估气液混合及传质过程的关键参数之一。图 12 为不同喷嘴射流鼓泡反应器内不同高度局部气含率对比,轴向高度为 0.14、0.24、0.34、0.44 m。由图 12(a)和(b)中可以观察到射流鼓泡反应器存在局部气含率较低的现象,随径向位置逐渐远离中心,局部气含率呈现上升趋势,并在离中心 0.05 m



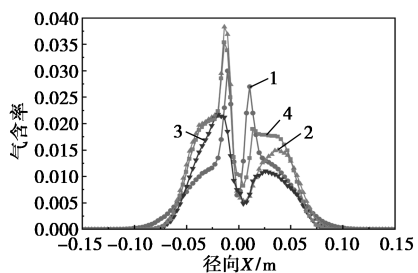
(a) $Y=0.14$ m



(b) $Y=0.24$ m



(c) $Y=0.34\text{ m}$



(d) $Y=0.44\text{ m}$

1—圆形缩径式;2—扭转三角形;3—三棱多边形;4—三棱圆锥式

图12 不同喷嘴射流鼓泡反应器内不同高度局部气含率对比

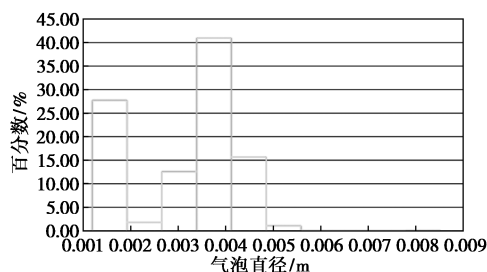
处达到最高点,但当继续接近壁面时,局部气含率开始逐渐降低。当轴向高度为0.34、0.44 m的位置,局部气含率随径向位置的增加表现出显著的波动现象,这是因为射流的主要作用区域位于中心,该区域的湍流涡对气泡具有破碎和挤压作用,使得气体在液体中的分布变得更为稀疏,从而降低局部气含率。

由图12发现圆形缩径式喷嘴内反应器内局部气含率分布较为对称。局部气含率出现一边较高的情况,因为有出口的存在,影响了整个反应器流体域。发现扭转三角形喷嘴的反应器射流中心区域边界局部气含率较高,说明该喷嘴对气泡的破碎、挤压作用显著。当剪切力与破碎作用增强时,气相与液相的混合效果会更显著,气体出口径向射流速度和剪切应力增大,导致总气含率得以提升。

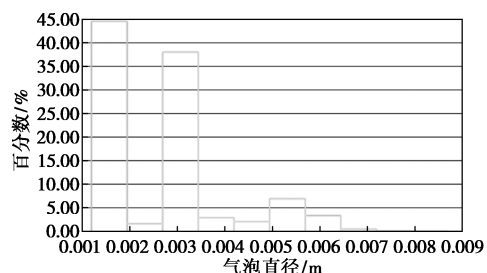
2.4 气泡分布直径

气泡尺寸大小受气泡并聚、破碎等行为影响,而气泡在液体中的面积和停留时间决定了气液之间的传质效率。一般在气体流量保持一定情况下,气泡越小,界面面积越大,气泡的停留时间也会增加,传质效果更为显著。随着液气比的增大,流体对气泡产生的剪切应力相应增强,因此气泡破裂的概率远大于气泡合并的概率,射流与气泡之间的碰撞作用会显著加剧液体的湍动和搅动程度,有效减少混合所需的时间。

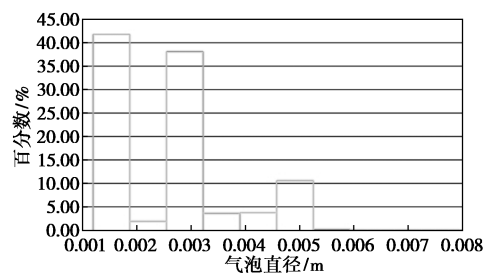
如图13不同喷嘴射流鼓泡反应器内气泡分布直径所示,经过不同喷嘴的入射,反应器内的气泡大小分布情况不相同,圆形缩径式喷嘴反应器内气泡并聚的数量大于气泡破碎的数量,气泡的破碎和分散过程能使气泡被剪切成更小直径的气泡,其他3种喷嘴内的反应器气泡破碎比例相对较高,喷嘴展现出较强的剪切能力。随着气体在反应器内停留时间增长,有助于气液两相在反应器内的分散效果更充分,气体和液体在反应器内有更多的机会进行接触和混合,进而提高了反应器整体的效率和性能。扭转三角形喷嘴射流对气泡的剪切能力较为突出,直径小的气泡占比较大,直径大的气泡占比较



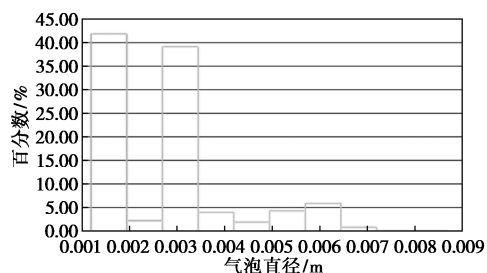
(a) 圆形缩径式



(b) 扭转三角形



(c) 三棱多边形



(d) 三棱圆锥式

图13 不同喷嘴射流鼓泡反应器内气泡分布直径

小,喷嘴对气泡的破碎能力较为显著,气泡更小,更有利于气液的高效混合和传质。

3 结论

经过对 4 种结构的射流鼓泡反应器对比分析,研究了引射流体速度分布、湍动能分布、气含率分布和气泡直径大小分布的特性,主要得出以下结论。

(1)在引射流体速度分布方面,不同结构的反应器呈现出显著的差异。三棱多边形喷嘴能够更有效地提升流体速度,从而增强混合和传质效果。

(2)圆形缩径式喷嘴的湍动能较小,能量衰减较快,相对于其余 3 种喷嘴混合能力较弱。

(3)在相同操作条件下,对反应器内气泡直径和平均气含率对比分析发现,扭转三角形喷嘴在气泡的剪切破碎方面优于其余 3 种喷嘴,产生更小、更均匀的气泡,使得平均气含率得到显著提升,气液之间的接触面积增大,可以提高气液传质效率,减少所需混合时间。

参考文献

- [1] 金东.我国醋酸生产技术的进展[J].精细与专用化学品, 2018,26(7):35-37.
- [2] Amiri T Y, Moghaddas J S, Moghaddas Y. A jet mixing study in two phase gas-liquid systems [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(3):352-366.
- [3] 郭天琪, 黄正梁, 王靖岱, 等.射流鼓泡反应器的混合特性[J].化工学报, 2015, 66(11):4438-4445.
- [4] 李蒙, 王浩同, 蒋燕, 等.射流鼓泡反应器内气泡分布特性[J].石油化工, 2017, 46(10):1288-1293.
- [5] Vanarase A U, Muzzio F J. Effect of operating conditions and design parameters in a continuous powder mixer [J]. Powder Technology, 2010, 208(1):26-36.
- [6] 李良超, 王嘉骏, 顾雪萍, 等.气液搅拌槽内气泡尺寸与局部气含率的 CFD 模拟[J].浙江大学学报:工学版, 2010, 44(12):2396-2400, 2415.
- [7] Schfer R, Merten C, Eigenberger G. Bubble size distributions in a bubble column reactor under industrial conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6/7):595-604.
- [8] Hibiki T, Ishii M. Lift force in bubbly flow systems [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(22):6457-6474.
- [9] Krepper E, Lucas D, Prasser H M. On the modelling of bubbly flow in vertical pipes [J]. Nuclear Engineering & Design, 2005, 235(5):597-611.
- [10] 邱庆刚, 刘丽娜.喷嘴结构对流场性能影响的研究[J].石油化工高等学校学报, 2011, 24(1):68-72.
- [11] 付必伟, 赵江, 王斌, 等.喷嘴结构对射流特性的影响[J].清洗世界, 2013, 29(1):15-18.
- [12] 吴德松, 廖华林, 杨斌.直旋混合射流喷嘴结构参数对流场特性的影响[J].水动力学研究与进展, 2014, 29(4):421-428.
- [13] 禹言芳, 李春晓, 孟辉波, 等.不同形状喷嘴的射流流动与卷吸特性[J].过程工程学报, 2014, 14(4):549-555.
- [14] 宋岩, 韩东, 司泽田, 等.花瓣形喷嘴的射流流动与卷吸特性研究[J].机械制造与自动化, 2020, 49(5):16-20.
- [15] 李干禄, 韦策, 吴昊, 等.气升式反应器气液混合及传质特性的 CFD 模拟[J].南京工业大学学报, 2018, 40(4):118-124.
- [16] Amiri M J, Morteza S, Farzaneh V, et al. Studies on the hydrodynamic behavior and mass transfer in a down-flow jet loop reactor with a coaxial draft tube [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2001, 76(1):39-46.
- [17] 左海宁, 白璐, 周家日, 等.异形喷嘴内部流场的可视化研究[J].湖南工业大学学报, 2013, 27(1):43-47.
- [18] Mi J, Nathan G J. Statistical properties of turbulent free jets issuing from nine differently-shaped nozzles [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2010, 84(4):583-606.
- [19] Xu M Y, Zhang J P, Mi J C, et al. PIV measurements of turbulent jets issuing from triangular and circular orifice plates [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2013, 56(6):1176-1186.
- [20] Yang X, Long X, Yao X. Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 5(6):95-106.
- [21] 付必伟, 赵江, 王斌, 等.喷嘴结构对射流特性的影响[J].清洗世界, 2013, 29(1):15-18.
- [22] Zhu Y, Cai W, Wen C, et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5):898-905.
- [23] 李俊, 张庆, 周一铮.喷嘴结构对水射流性能影响的分析[J].机械制造与自动化, 2015, 44(5):102-104.
- [24] 别海燕, 李春红, 安维中, 等.喷嘴结构对液-液喷射器性能影响的 CFD 模拟[J].计算机与应用化学, 2016, 33(10):1068-1073.
- [25] 黄正梁, 帅云, 杨遥, 等.喷嘴结构对射流鼓泡反应器混合和传质性能的影响[J].化工学报, 2018, 69(11):4648-4654.
- [26] Quinn W. Measurements in the near flow of an isosceles triangular turbulent free jets [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(1):111-126.
- [27] 江继峰, 徐曼, 陈迎, 等.喷射反应器管口喷嘴: CN107497392B [P]. 2019-07-16.
- [28] 徐曼, 江继峰, 陈迎, 等.新型喷射反应器管口喷嘴结构: CN207463183U [P]. 2018-06-08. ■