



DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1171

## 微气泡发生器的研究与应用进展

翟霖晓, 崔怡洲, 李成祥, 石孝刚, 高金森, 蓝兴英

(中国石油大学(北京)重质油全国重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 微气泡具有体积小、稳定性高、停留时间长、比表面积大和具有较强自增压效应等优点, 可以显著增加气液两相的接触面积和接触时间, 强化气液两相的传质速率。目前, 多种基于不同原理的微气泡发生器均可以有效产生微气泡, 而不同领域利用微气泡的侧重点有所不同, 因此其应用的微气泡发生技术也有所区别。本文综述了微气泡发生器在水处理过程、生物和医学领域、矿物浮选过程以及化工过程中的应用, 重点阐述了各工业过程中常用的微气泡发生器类型和微气泡发生器的发泡原理, 简述了各类微气泡发生器的气泡生成效果, 指出了微气泡发生器的结构和操作条件对微气泡发生性能的影响, 总结了各类微气泡发生器的使用条件。当下, 依靠单一原理的微气泡发生技术仍具有一定的局限性, 而耦合式微气泡发生器结合多种微气泡生成原理的优势, 可以产生尺寸更小、分布更均匀的微气泡, 因此耦合式微气泡发生器的研发对未来微气泡技术的应用具有重要意义。本文最后对微气泡发生器的应用前景、研发方向等进行了总结和展望。

**关键词:** 微气泡; 气液两相; 过程强化; 微气泡发生器; 微气泡应用; 耦合式微气泡发生器

**中图分类号:** TQ051.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6613 (2024) 01-0111-13

## Research and application process of microbubble generator

ZHAI Linxiao, CUI Yizhou, LI Chengxiang, SHI Xiaogang, GAO Jinsen, LAN Xingying

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Microbubbles have advantages including small size, high stability, long residence time in the fluid, large specific surface area, and high self-pressurization effect, etc. Microbubbles can greatly improve the contact area and contact time for gas-liquid system, which can intensify the interphase mass transfer between gas and liquid. Many different types of generators can produce microbubbles. The specific type of the generator is largely dependent on its application fields. This work reviewed the application of microbubble generator in water treatment, biological and medical field, mineral flotation, and chemical process. This review mainly focused on the type of generator and its working mechanisms in generating microbubbles. The bubble-generating characteristic of each type of microbubble generator was described. The influence of the structure and operating condition on the generator performance was reviewed. The suitable application condition of each type of microbubble generator was summarized. It was concluded that the microbubble generation technologies based on single mechanism would often have limitations. In contrast, the coupled microbubble generator, combining the advantages of multiple generation mechanisms, can generate smaller and more uniform microbubbles. Therefore, the development of coupled

收稿日期: 2023-07-11; 修改稿日期: 2023-09-11。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U22B20149); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (22021004)。

第一作者: 翟霖晓 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为油气加工工艺与工程。E-mail: zhailinxiao317@163.com。

通信作者: 石孝刚, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为多相反应工程。E-mail: shixiaogang68@cup.edu.cn。

引用本文: 翟霖晓, 崔怡洲, 李成祥, 等. 微气泡发生器的研究与应用进展[J]. 化工进展, 2024, 43(1): 111-123.

**Citation:** ZHAI Linxiao, CUI Yizhou, LI Chengxiang, et al. Research and application process of microbubble generator[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(1): 111-123.

microbubble generator is of great significance for the future application. Finally, the possible application prospect and research direction of microbubble generator were summarized and previewed.

**Keywords:** microbubble; gas-liquid two-phase; process intensification; microbubble generator; microbubble application; coupled microbubble generator

气液两相体系普遍存在于化工、制药、食品和环境等领域, 气液相之间的接触面积和接触时间是限制气液两相体系工业应用的两个关键因素。2017年, ISO将直径介于1~100 $\mu\text{m}$ 的气泡定义为微气泡<sup>[1]</sup>。目前普遍将尺寸1~1000 $\mu\text{m}$ 以内的气泡统称为微气泡。相较于常规的毫米或厘米级气泡, 微气泡具有更高的稳定性、更长的停留时间、更大的比表面积和更快的气体溶解速度。得利于这些特性, 微气泡技术得到了人们的广泛关注。20世纪70年代, Sebba<sup>[2]</sup>就对微气泡工业应用潜力进行了分析, 在后续的几十年里, 科研领域对于微气泡在工业中的应用研究不断深入; 80年代时, 溶气气浮技术已经能够生成尺寸为10~120 $\mu\text{m}$ 的微气泡, 并在水处理领域得到了应用<sup>[3]</sup>; 90年代时, Kaster等<sup>[4]</sup>成功将微气泡技术应用于酵母发酵过程中; 90年代中期, 我国研制的旋流微气泡浮选柱投入工业生产<sup>[5]</sup>; 进入21世纪以来, 随着对于化工过程更加高效、集成化的需求, 微气泡强化气液传质的优势逐渐受到关注, 微气泡强化技术在化工过程领域中的应用也逐渐发展起来<sup>[6-7]</sup>。

目前微气泡技术在水处理<sup>[8]</sup>、矿物浮选<sup>[9]</sup>、化工<sup>[17]</sup>、医学<sup>[10]</sup>和生物研究<sup>[11]</sup>等领域已经实现了一定的应用。在对微气泡的应用过程中, 微气泡尺寸和微气泡体系的气含率是影响微气泡工业强化效果的关键。为了更加高效、可控地制备微气泡, 多年来, 研究者们对微气泡的制备方法进行了深入研究, 研发了多种微气泡发生器, 其中包括文丘里管式<sup>[12]</sup>、旋流式<sup>[13]</sup>、溶气-释气式<sup>[14]</sup>、射流式<sup>[15]</sup>、电解式<sup>[16]</sup>、超声/声压式<sup>[17]</sup>、多孔陶瓷膜式<sup>[18]</sup>、多孔玻璃膜(SPG膜)式<sup>[19]</sup>和耦合式<sup>[20]</sup>等多种类型。

表1总结了各工业应用过程中几种常用的微气泡发生器。水处理过程中一方面要求微气泡尺寸要足够小, 利用小尺寸的微气泡在破裂时产生具有超高氧化还原电位的羟基自由基的特性, 降解难以氧化分解的污染物, 同时也能加快氧气的溶解速度。另一方面, 要尽量避免微气泡产生过程中新物质的引入和高剪切力对溶液中絮凝体的破坏。溶气-释气式、微孔曝气式和电解式微气泡发生器既能产生尺寸较小、气含率较高的微气泡,

表1 各领域常用微气泡发生器类型及其对应的气泡尺寸和气含率范围

主要应用领域	微气泡发生器类型	气泡尺寸/ $\mu\text{m}$	气含率/%
水处理过程	溶气-释气式 <sup>[21-22]</sup>	0~50	—
	微孔曝气式 <sup>[23]</sup>	10~50	0~30
	电解式 <sup>[24]</sup>	约100	—
耦合生物反应器	搅拌式 <sup>[25]</sup>	20~1000	—
	喷射器阵列式 <sup>[15]</sup>	230~600	35~55
矿物浮选过程	射流式 <sup>[26-27]</sup>	—	0~30
	微孔曝气式 <sup>[28]</sup>	0~1000	0~30
化工过程	文丘里管式 <sup>[12, 29]</sup>	50~800	0~1
	超声/声压式 <sup>[30]</sup>	—	—
	微孔曝气式 <sup>[31]</sup>	30~100	约15

同时能够避免新物质的引入和高剪切作用力的出现。耦合生物反应器中要尽可能增加相界面积以提高气相传质速率, 因此需要有较高的气含率, 而气泡尺寸尽量小即可, 但需要严格注意的是避免高剪切力和高压环境对微生物造成的破坏。搅拌式和喷射器阵列式微气泡发生器有适度的剪切力且不依赖高压环境, 能产生尺寸较小、气含率较高的微气泡群, 更加适合于耦合生物反应器过程。矿物浮选过程中对微气泡尺寸的要求相对较低, 主要利用的是气泡与矿物颗粒之间的碰撞和黏附作用, 尺寸分布较大的微气泡群更加适合于矿物浮选过程, 小气泡能够增加气泡与颗粒之间的碰撞概率, 大气泡带动小气泡移动, 加强浮选效果。射流式和微孔曝气式微气泡发生器既能满足矿物浮选过程对气泡尺寸的需求, 又能满足气泡数量的需求。化工过程主要利用的是微气泡的强化传质效果, 需要兼顾气泡尺寸和气含率, 尽可能提高气液相界面积。文丘里管式、超声/声压式和微孔曝气式这三种发生器能够产生尺寸较小和气含率较高的微气泡, 在化工过程中发挥重要作用。综上所述, 不同领域的工业应用需要根据需求选择合适的微气泡发生器, 以获得最佳的微气泡强化效果。本文对水处理过程、耦合生物反应器、矿物浮选过程和化工过程中常用的微气泡发生器及其性能影响因素进行了综述。

## 1 水处理过程

微气泡技术是强化废水处理的有效手段之一,微气泡强化技术主要应用于以下四种污水处理方法:活性污泥法、生物膜法、絮凝法和电解法。在活性污泥法和生物膜法中微气泡的作用是增加氧气在水中的溶解量,强化好氧微生物处理污水的效率;絮凝法中微气泡能够强化吸附污水中的絮凝团,并将絮凝团带到水面上,从而起到强化净水的作用;电解法的原理是通过电解水过程产生强氧化性气体对污水中的有机物进行氧化处理,同时电解产生的微气泡能够吸附悬浮在水中的颗粒物,进一步增强污水处理效果。

水处理过程要求微气泡尺寸较小且分布均匀从而加强氧气的曝气作用,同时又要避免微气泡产生过程中高剪切力造成的絮凝团破坏,影响水处理效果。目前在水处理工业主要使用三种微气泡发生器来产生微气泡,即溶气-释气式<sup>[22]</sup>、微孔曝气式<sup>[23]</sup>和电解式<sup>[24]</sup>微气泡发生器,而旋流式<sup>[32]</sup>微气泡发生器在水处理领域也有一定的应用研究。

### 1.1 溶气-释气式

溶气-释气法是产生大量且尺寸均匀微气泡的有效方法之一,相比于其他微气泡发生器,溶气-释气式微气泡发生器对于水处理过程中增强氧气的曝气作用具有一定的优越性。溶气-释气式微气泡发生器原理如图1所示,这类发生器是将气体在高压条件下溶解于液相当中形成气相的过饱和溶液,在经过发生器出口喷嘴时,过饱和溶液中的气相因为压力降低会以微气泡的形式析出。

气体的溶解量和喷嘴结构是影响溶气-释气法产生微气泡效果的两个重要因素。气体的溶解量主要影响产生微气泡的数量和直径, Maeda等<sup>[14]</sup>研究发现溶气-释气法产生的微气泡数量和微气泡直径

随溶解气体浓度的增加而增加。喷嘴结构则会影响空化作用,进而改变微气泡的尺寸, Kim等<sup>[33]</sup>将喷嘴结构改为破碎盘式喷嘴出口,在气体通过喷嘴产生微气泡后,微气泡与破碎盘碰撞,进一步减小了微气泡的尺寸。Yamashita等<sup>[34]</sup>使用多孔陶瓷膜作为加压容器的喷嘴,与未改进的情况相比,微气泡的数量提升了39%。

目前溶气-释气法在工业废水处理和含油污水处理过程中应用占比较大,李军令<sup>[35]</sup>改进的原油脱盐工艺,将离心技术和溶气-释气式微气泡发生器结合能够产生粒径分布为5~30 $\mu\text{m}$ 的微气泡,原油除油率和除渣率分别可以达到73.60%和71.66%,化学需氧量(COD)能够降低32.7%。但是溶气-释气法产生微气泡的过程能耗较大、微气泡体系气含率较低,同时存在高压环境,对设备和管线的承压能力都有一定的要求。

### 1.2 微孔曝气式

近年来随着多孔膜技术的发展,微孔曝气式微气泡发生器在水处理过程中也得到了大量应用。与其他微气泡生成方式相比,多孔膜结构简单、设备要求低。根据气泡形成的动力学原理,在多孔膜表面微气泡形成和释放的力主要包括将微气泡保持在孔隙的表面张力、微气泡的浮力以及作用在微气泡顶部的气相惯性力,当浮力和惯性力克服表面张力时,微气泡从膜表面脱落。

多孔膜制备微气泡的优点主要是可以通过控制多孔膜的膜孔径来控制生成微气泡的尺寸, Melich等<sup>[36]</sup>研究表明随着膜孔径的减小,生成的微气泡尺寸减小、尺寸分布增加。膜材料的种类也是影响微气泡尺寸的因素之一, SPG膜和陶瓷膜是生成微气泡的两种常用多孔膜材料, Kukizaki<sup>[37]</sup>对比了SPG膜和陶瓷膜生成微气泡的尺寸,发现利用陶瓷膜生成的微气泡尺寸大于使用SPG膜产生的微气泡尺寸。

由于膜孔之间的距离无法精确控制,孔隙排列太紧密会导致相邻气泡之间的聚并, Kukizaki等<sup>[38]</sup>发现表面活性剂的加入可以有效抑制微气泡的聚并,同时在十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和Tween 20两种表面活性剂存在下产生了平均直径分别为35.6 $\mu\text{m}$ 和43.0 $\mu\text{m}$ 的微气泡。此外还有流体振荡<sup>[39-40]</sup>和液相剪切<sup>[18,28]</sup>两种方式来抑制微气泡的聚并,减小微孔膜产生的微气泡尺寸,其中液相剪切是减小微气泡尺寸最常用的方式。

液相剪切是通过较高流速的液流剪切膜上正在

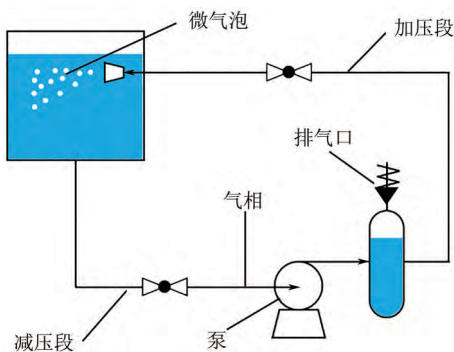


图1 溶气-释气式微气泡发生器<sup>[7]</sup>



生成的气泡, 通过提供足够的惯性力来使气泡脱离膜表面<sup>[28]</sup>, 其过程如图2所示, 液相剪切由于操作简单, 被广泛应用于多孔膜微气泡生成过程中。为了进一步增强作用在膜表面的液相剪切力, Xie等<sup>[18]</sup>通过在膜组件中插入螺旋内构件的方式, 进一步增加了迪恩涡的产生, 在最佳实验条件下连续制备了直径为64~87 $\mu\text{m}$ 的微气泡。

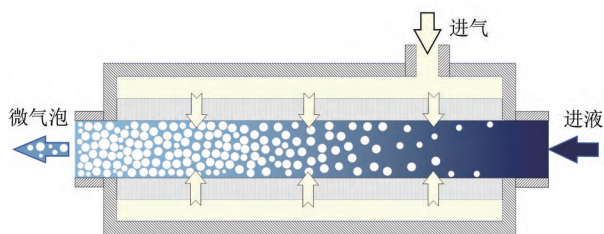


图2 基于液相剪切流动的陶瓷膜式微气泡发生器

Liu等<sup>[41]</sup>采用SPG膜生成微气泡, 促进了废水处理中好氧生物的生长, 在稳定条件下SPG膜基于面积的COD去除能力能够控制在 $6.69\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。Zhang等<sup>[42]</sup>研究发现, 在最优条件下, 使用SPG膜生成微气泡处理合成城市废水时, COD和氨去除效率分别为91.7%和53.9%。

但是在污水处理过程中, 膜孔道容易堵塞, 需要经常更换或清洗多孔膜结构, 因此多孔膜结构在水处理过程的应用中也存在一定的局限性。

### 1.3 电解式

电解法能够产生尺寸分布范围较窄的微气泡群, 作为一种简单、绿色的微气泡生成方法, 电解法制备微气泡是强化水处理效果的一条重要途径。电解法强化污水处理过程主要体现在两个方面: 一方面, 电解废水的过程中电极表面会生成氧气、氯气等强氧化性气体, 对水中的有机物质进行氧化分解; 另一方面是电解产生的金属离子能够吸收水中的悬浮颗粒形成絮凝体, 在微气泡的带动下脱离水体, 达到净化水体的目的。

电解法生成微气泡的过程分为两个阶段: 第一个阶段微气泡在电极表面成核, 第二个阶段是微气泡脱离电极表面之后的继续生长<sup>[43]</sup>。电解法生成微气泡的显著优势是可以通过控制电流的方式控制微气泡的生成<sup>[44]</sup>, Coey等<sup>[45]</sup>使用透明铂阴极电解酸化水时, 产生了半径为2~10 $\mu\text{m}$ 的微气泡。

电解质浓度、电极电压、电流密度和电极形状等都对电极附近微气泡的生成有较大的影响。Tanaka等<sup>[46]</sup>发现微气泡的聚并受电解质溶液浓度的

影响, 溶液浓度的增大会抑制微气泡的聚并现象。Yu等<sup>[47]</sup>设计了一种新型的锥形亲氧电极, 通过高效和定向的运输, 提高了氢微气泡的产生速率。

电解水产生的微气泡数量较少、能源消耗较大, 同时需要经常清洗电极以保证电解的强度, 因此电解法更适用于小规模的水处理过程。

### 1.4 旋流式

液相旋流式微气泡发生器是一种高效的微气泡发生装置, 可以连续不断产生微气泡, 具有广阔的工业应用前景, 与孔口型微气泡发生器相比, 旋流型微气泡发生器产生的微气泡尺寸更小、分布更均匀。目前液相旋流微气泡发生器主要分为两类: 一是依靠液体加压后, 通过切向入口进入反应器产生旋流; 二是通过添加旋流内构件的方式实现旋流效果。

切向旋流微气泡发生器的结构如图3所示, 液体切向进入发生器后, 会在旋流中心产生负压, 负压作用下气体可以自动吸入发生器, 在高速旋转液体的剪切和破碎作用下产生微气泡。Alam等<sup>[13]</sup>设计的旋流微气泡发生器在空气流量为0.25L/min和1L/min时, 成功生成了平均半径为25 $\mu\text{m}$ 的微气泡。

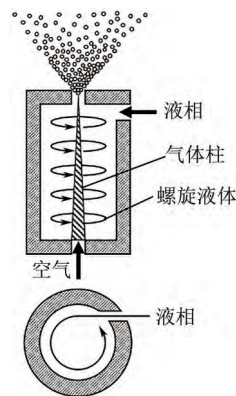
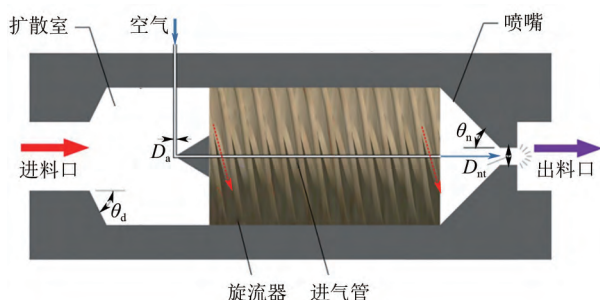


图3 切向旋流式微气泡发生器<sup>[48]</sup>

在反应器内部添加静态旋流器同样可以实现产生微气泡需要的旋流效果, 如图4所示, 这种方式是将静态旋流器固定在反应器内壁上, 从旋流器的中心注入气体, 旋流器产生的旋流与气柱碰撞, 在高剪切力下产生微气泡。Kim等<sup>[32]</sup>通过添加内构件的方式生成了尺寸良好的微气泡, 并通过对比发现, 使用旋流式微气泡发生器时, 其直接接触膜蒸馏体系的性能更加显著, 水蒸气的渗透通量提高了37%。

旋流式微气泡发生器的气泡产生效果与液体流量 ( $Q_L$ )、气体流量 ( $Q_G$ ) 以及发生器的几何构造

图4 添加内构件型旋流式微气泡发生器<sup>[32]</sup>

有重要的关系。通常情况下，液体流量越大、气体流量越小会产生平均直径越小的微气泡，Xu等<sup>[49]</sup>的研究表明，对于一个特定的旋流微气泡发生器，存在一个最优的出口直径，产生所需微气泡直径同时也可以减少能源消耗。

在实际应用过程中，为了达到较好的气泡破碎效果，旋流式发生器内部存在较高的液相剪切力，会破坏水处理过程中产生的絮凝体，因此旋流式微气泡发生器主要作用于增强水处理过程中的曝气过程。

## 2 生物和医学

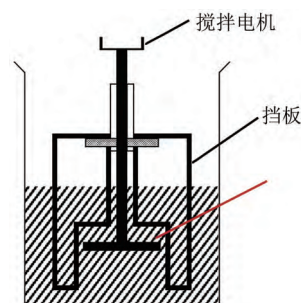
微气泡在生物反应器中的作用主要是增强曝气效果，加快微生物的生长繁殖、增加产物量。Zhang等<sup>[25]</sup>成功利用搅拌式微气泡发生器促进毕赤酵母发酵生产人血清白蛋白；随着多孔膜技术的发展，多孔膜技术在生物反应器中得到了应用，宋艳梅<sup>[50]</sup>使用膜片式微孔曝气器生成二氧化碳微气泡，强化了微藻的固碳作用；Zimmerman等<sup>[51]</sup>将振荡射流式微气泡发生器应用于气升式循环生物反应器，减少了多孔膜式微气泡发生器气泡聚并问题的发生。生物反应器要求微气泡发生器有适度剪切力、良好的微气泡发生效果和较低的能耗水平，常见的发生器类型主要有机械搅拌式、振荡射流式和喷射器阵列式三种类型。

微气泡技术在超声造影剂<sup>[52]</sup>、药物运输介质<sup>[53]</sup>以及药物研发<sup>[54]</sup>等医学领域的作用已经得到了广泛研究，在医学应用过程中，药物和氧气输送的理想气泡尺寸一般 $<10\mu\text{m}$ <sup>[55]</sup>。微流控技术能够连续产生尺寸可控、高分散性的微气泡，是生产应用于医学领域微气泡的理想技术<sup>[56]</sup>。

### 2.1 机械搅拌式

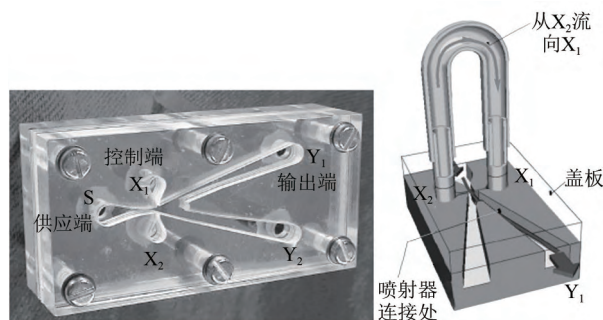
机械搅拌式微气泡发生器主要依靠电机带动旋转转盘，通过旋转产生的剪切力将大气泡破碎成小

气泡。Zhang等<sup>[25]</sup>和Weber等<sup>[57]</sup>在研究中使用了机械搅拌（其结构如图5所示）的方式产生微气泡用于微生物的培养，他们的装置由一个通过轴承支撑轴与高速电机相连的不锈钢圆盘组成。当圆盘以4000r/min旋转时，能够形成局部剪切区，气体被泵入剪切区，可以产生尺寸分布范围为20~1000 $\mu\text{m}$ 微气泡，根据Weber等<sup>[57]</sup>的研究，与常规气泡相比，在通过机械搅拌产生微气泡的方式强化里氏木霉微气泡发酵生产纤维素酶的过程中，传质系数提高了5倍，细胞质量生产力提高了近2倍。机械搅拌式微气泡发生器耦合生物反应器需要控制适当的剪切力以避免对微生物造成破坏。

图5 搅拌式微气泡发生器<sup>[25]</sup>

### 2.2 振荡射流式

振荡射流是减小多孔膜表面微气泡聚并的有效方式之一，由于膜孔之间的距离无法精确控制，孔隙排列太紧密会导致相邻气泡之间的合并，在生成微气泡时发生气泡聚并的现象。流体振荡通过采用流体振荡器（图6）使气相产生压力波动，气泡在振荡气流的惯性力作用下从孔隙中喷出，减小了微气泡之间的聚并，产生数量更多、尺寸更小的微气泡。Rehman等<sup>[58]</sup>使用振荡射流式微气泡发生器在液相流量为40~100L/min的条件下，生成的微气泡尺寸大部分分布在80~120 $\mu\text{m}$ 之间。Zimmerman等<sup>[51]</sup>在气升式循环生物反应器中加入振荡射流式微

图6 流体振荡器结构<sup>[58]</sup>



气泡发生器,测试了钢铁厂废气中生长微藻的可行性,结果表明,藻类生物量稳定增长,存活率达到了100%。Hanotu等<sup>[59]</sup>使用配有流体振荡器的气升式生物反应器培养酵母,在微气泡鼓泡条件下,酵母细胞产量达到了0.31mg/h,6h后的平均生长产量增加了18%。

### 2.3 喷射器阵列式

喷射器阵列式的微气泡发生器,其结构如图7所示,该装置首先通过八爪型分布器产生5~7mm的气泡,大气泡具有较大的终端速度,会逆着液相流动方向向上运动。发生器的顶部装有孔径较小的筛板,液相通过小孔后会产生强劲的射流,将上升的大气泡击碎,形成微气泡,由于微气泡的终端速度较小,在液相的携带作用下从反应器底部流出。Turney等<sup>[15]</sup>利用射流阵列式结构生成了气泡尺寸为230~600 $\mu\text{m}$ 的微气泡、气含率为35%~55%,该微气泡发生器的传质系数( $k_La$ )达到了0.83s<sup>-1</sup>。Hernandez-Alvarado等<sup>[61]</sup>设计的射流式微气泡发生器可以产生气泡尺寸在500~900 $\mu\text{m}$ 的微气泡,气含率可以达到10%~60%。

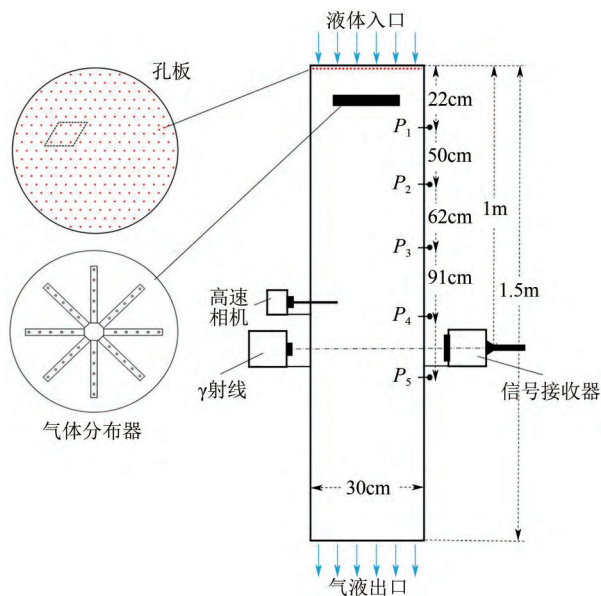


图7 喷射器阵列式<sup>[60]</sup>

### 2.4 微流控技术

与传统微气泡产生方式相比,微流控装置是产生稳定单分散微气泡的有效手段。微流控装置生成微气泡的结构主要包括三种,即T型流、流动聚焦和共轴流,其结构如图8所示。

T型结构微气泡的形成机理主要分为三类。

①无限破裂机制:气泡的形成主要受液相的局部剪

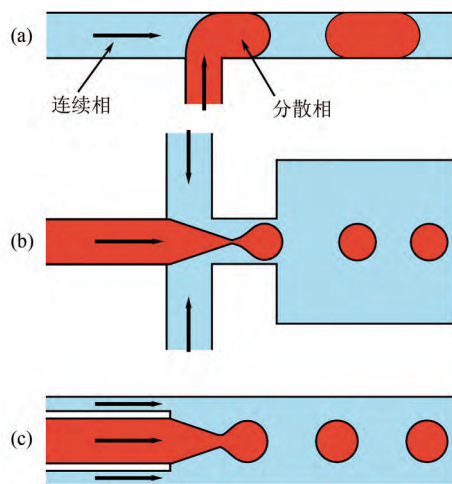


图8 微流控技术<sup>[63]</sup>

切应力控制。②限制破裂机制:由气体堵塞引起的液相堵塞,使得液相上游压力增加,对气相进行挤压破碎,形成微气泡。③部分破裂机制:气体被通道部分限流,破碎过程受挤压压力和剪切力共同作用。流动聚焦过程中气相受到通道壁面和液相的共同作用,导致气体流线随时间线性坍塌,在坍塌过程中形成微气泡。在共轴流中,气体在液流中通过微米喷嘴注入,液流与喷嘴平行流动,在液体流动施加的黏性应力作用下,与喷嘴相适应的气泡在喷嘴后方形成,气体可以在微通道中进行拉伸和压缩<sup>[62]</sup>。无论何种微流控装置,微气泡的形成都是由于气液界面的不稳定性引起的。

微通道内气泡的形成和破裂主要受到气液流速、微通道结构、流体表面张力、黏度和流变性能等物性参数的影响<sup>[63]</sup>。微流控技术生成的微气泡直径可以通过输入流量和压力条件来控制<sup>[64]</sup>,Jiang等<sup>[65]</sup>使用流动聚焦方法,通过调节气体压力和液体流速生成了尺寸在2~7 $\mu\text{m}$ 的微气泡;相关研究表明通过微流控技术和电场相结合的方式可以显著减小微气泡的尺寸<sup>[66-67]</sup>。

随着微流控技术的发展,阶梯乳化微流控方法<sup>[68]</sup>作为一种新兴的微气泡生成方法得到了研究者的关注。阶梯乳化微流控方法的原理是依靠微装置的空间限制,在分散相前后两端形成速度差,从而使分散相能够实现自发的掐断过程,而不再依赖于连续相的剪切和挤压作用。

## 3 矿物浮选

矿物浮选是一种利用气泡和颗粒界面性质差异实现不同价值矿物分离的复杂物理化学过程,其主

要过程是通过颗粒与气泡之间的碰撞、黏附实现的。在矿物浮选的过程中,通过加入微气泡的方式增加气泡与目标矿物之间的碰撞与黏附作用,能够起到强化浮选效果的作用。在矿物浮选过程中主要选择射流式微气泡发生器来产生微气泡,文献中也有关于微孔曝气式微气泡发生器用于矿物浮选过程的报道<sup>[28]</sup>。

射流微气泡发生器结构简单、操作方便,微气泡的生成效果理想,能够很好地耦合浮选设备,射流微气泡发生器主要由喷嘴、吸入室、进气管、喉管和扩散管组成,其结构如图9所示。射流微气泡发生器的基本原理是:加压液体通过喷嘴喷出后形成高速射流,在气室中形成负压,空气被吸入后与液体射流混合,气体在喉管的高湍流环境下被破碎成微气泡。射流微气泡发生器可以生成较高气含率的微气泡体系,Tian等<sup>[70]</sup>探究了不同操作参数条件下气含率的变化,发现在液体流量为 $2.799\text{m}^3/\text{h}$ 、气体流量为 $0.554\text{L/s}$ 的条件下,气含率可以达到27.36%,而气泡直径分布在 $370\mu\text{m}$ 左右。

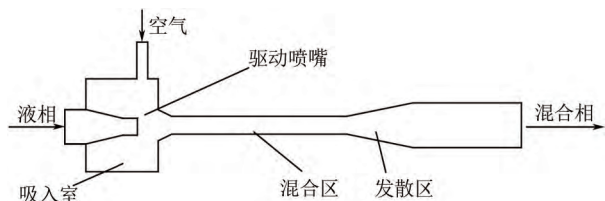


图9 射流式微气泡发生器<sup>[69]</sup>

喉管长度是影响射流微气泡发生器性能的主要因素,惠恒雷等<sup>[71]</sup>分析了微气泡在不同喉嘴距条件下的尺寸变化情况,最终确定了射流微气泡发生器的最优喉嘴距范围为1~2倍的喷嘴出口直径长度。

矿物浮选过程中气泡尺寸是影响浮选效果最重要的因素,同时为了保证较好的浮选效果,微气泡浮选过程不适合在强湍流条件下进行,这一条件也限制了浮选过程中对于微气泡发生器的选择。射流微气泡浮选柱<sup>[26]</sup>和旋流-静态微气泡浮选柱<sup>[72]</sup>因其优异的浮选效果,成为矿物浮选过程中常用的两种浮选设备,这两种设备都采用了射流结构来生成微气泡。艾光华等<sup>[73]</sup>使用旋流-静态浮选柱回收微细粒黑钨矿,与传统浮选机相比,获得的精矿质量分数能够提高10.43%,回收率能够提高2.15%。秦华江等<sup>[74]</sup>采用旋流-静态浮选柱回收尾矿中的钼元素,能够获得钼品位31.096%,回收率62.71%的钼精矿产品。

## 4 化工过程

目前对于微气泡强化传质过程已经有了大量研究。鲁志强等<sup>[75]</sup>的研究表明微气泡能够加速鼓泡塔内气液相之间的传质速率;田洪舟等<sup>[76]</sup>发现在微气泡存在下,浆态床中氢气的传质速率提升了20~50倍;吴梦思等<sup>[77]</sup>通过模拟计算了尺寸为 $5\text{mm}$ 的常规气泡和尺寸为 $500\mu\text{m}$ 的微气泡在柴油加氢过程中的传质效果,通过对比发现,当气泡尺寸减小到 $500\mu\text{m}$ 时,体积传质系数增加了约29倍,产品硫含量大幅度降低;Janajreh等<sup>[30]</sup>利用超声/声压法产生微气泡加快了酯交换过程,促进生物柴油的生产;张志炳教授团队<sup>[78-80]</sup>对微气泡强化化工过程进行了探索,针对不同工业体系,提出了一系列微气泡发生方式和微气泡调控方法;张晓国等<sup>[81]</sup>报道了选择性管式液相加氢(FITS)技术生产喷气燃料工艺,利用氢气微气泡不断补充反应液相中的溶解氢,该项技术具有流程简单、氢耗低及能耗低等特点,产品中碱氮脱除率达到了50%,硫醇硫脱除达到了94%,脱酸率达到了99%;谢清峰等<sup>[82]</sup>报道的FITS技术,其在进行重整油加氢脱烯烃工艺时,实现了生产装置的长周期运行,全馏分重整生成油的溴指数小于 $300\text{mg}/100\text{g}$ ,二甲苯的溴指数小于 $10\text{mg}/100\text{g}$ ,显示了微气泡良好的强化传质性能。此外,微孔曝气式微气泡发生器在间甲基苯甲酸合成研究中也得到了应用<sup>[31]</sup>。在化工方向应用的报道中,文丘里管式和超声/声压式是两类常见的已公开的发生器类型。

### 4.1 文丘里管式

文丘里管式微气泡发生器主要由收缩段、喉管和发散段三部分组成,其结构如图10所示。该类发生器在喉管位置处液体流速增加,导致压力减小,气体通过自吸效应进入发生器,随后气相在液相的带动下进入到发散段,随着液体流速减小、压力回升,在液相的剪切破碎作用下产生微气泡。Feng等<sup>[84]</sup>设计的文丘里管式微气泡发生器能够产生平均直径为 $230\sim 600\mu\text{m}$ 的气泡。

文丘里管式微气泡发生器的几何结构对微气泡的生成效果具有重要影响,研究表明文丘里管的发

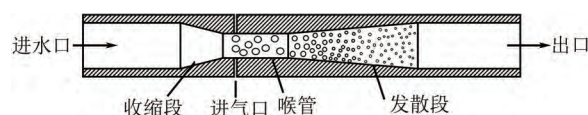


图10 文丘里管式微气泡发生器<sup>[83]</sup>



散角度是影响微气泡发生性能最重要的因素。Li等<sup>[83]</sup>考察了文丘里管的注气孔直径、注气孔数以及发散角三个参数对微气泡尺寸的影响,发现注气孔的直径和数量只影响初始气泡尺寸,而发散角对最终生成的微气泡尺寸影响最明显。此外,气体的进气方式对微气泡尺寸也有一定的影响。曹俊雅等<sup>[85]</sup>研究了错流、并流和逆流三种进气方式,实验结果表明并流进气方式下气泡脱离时间更短,生成的微气泡尺寸更小;丁国栋等<sup>[86]</sup>和颜攀等<sup>[87]</sup>研究了注气孔位置对微气泡生成的影响,发现当注气孔在喉管位置时产生的微气泡尺寸最小,但是当注气孔位于进水管上游位置时,微气泡的生成效率更高。

根据文丘里管式微气泡发生器的原理,相关研究者设计了结构更加紧凑的Sadatomi式微气泡发生器和孔口型微气泡发生器,其结构分别如图11和图12所示。在液体流量为25L/min、气体流量为0.24L/min的条件下,Sadatomi式微气泡发生器可以产生直径为120 $\mu\text{m}$ 的微气泡<sup>[88]</sup>;在气体流量为0.1L/min、液体流量为0.6L/min时,孔口型微气泡发生器能够生成气泡直径集中在200 $\mu\text{m}$ 附近的气泡群<sup>[89]</sup>。

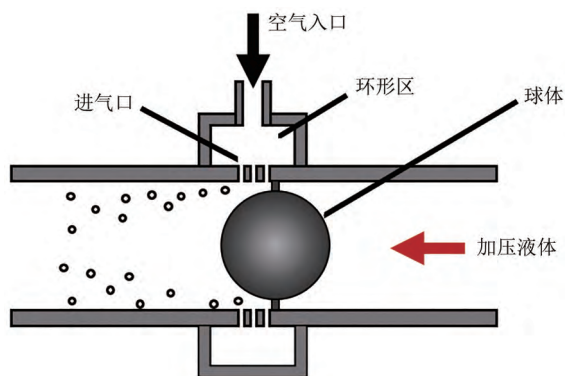


图11 Sadatomi式微气泡发生器<sup>[88]</sup>

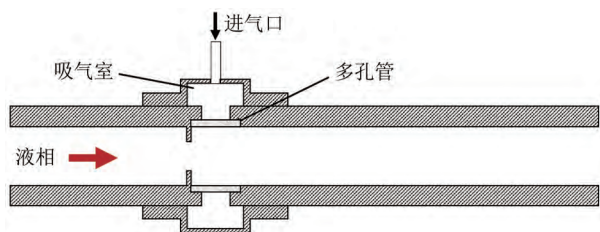


图12 孔口型微气泡发生器<sup>[89]</sup>

陈强等<sup>[90]</sup>设计了一种强化鼓泡床加氢反应器气液传质的装置,采用文丘里管式微气泡发生器产生微气泡,显著降低了装置的操作压力,提高了加氢

过程中气液固之间的传质效率。王喜彬等<sup>[91]</sup>使用文丘里管式微气泡发生器提高了悬浮床加氢效率,通过对比发现,使用文丘里管式微气泡发生器的条件下反应总压减小了3MPa,轻油收率(质量分数)增加了2%,甲苯不溶物的质量分数降低了1.09%。李方<sup>[92]</sup>设计了一种含有文丘里管式微气泡发生器的悬浮床加氢装置,该装置能够提高轻油收率(质量分数)2%~5%,同时显著降低甲苯不溶物的产率。

## 4.2 超声/声压式

生物柴油作为一种替代能源得到了研究者的广泛关注,但是目前生物柴油的生产仍然面临许多困难,其中酯交换过程是影响生物柴油生产的关键步骤,为了能够加快酯交换的过程,提高生物柴油的生产效率,相关学者提出利用超声法产生微气泡以加快酯交换反应过程<sup>[30]</sup>。超声波产生微气泡的原理有空化假说和毛细管假说两种。空化假说认为当超声波作用于液体时,液体内部出现局部拉应力而形成负压,压强的降低使原来溶于液体的气体过饱和,从液体逸出,形成小气泡;毛细管假说认为,空化是由超声场中的毛细管波的破碎而发生的。空化假说常应用于高频区(>100kHz),而毛细管假说则应用于低频区(<100kHz)。Makuta等<sup>[93]</sup>在超声频率为18.77kHz的条件下,产生了直径均匀的12 $\mu\text{m}$ 微气泡。超声/声压法可以产生气泡尺寸较小、分布较窄的微气泡群,但是该方法产生微气泡数量较少、设备成本较高、能耗较大。

微气泡强化传质最突出的优势在于可以提高气液相界面积进而提升体积传质系数 $k_La$ ,相界面与气泡尺寸、气含率有关。表2总结了传质强化相关研究中气泡尺寸、气含率范围和能达到的最大体积传质系数。从表2可以看出,若将气泡尺寸严格控制在100 $\mu\text{m}$ 范围内则很难达到较高的气含率(因为通常是在较低的气液比下才能稳定产生微气泡),而当气泡尺寸不局限于微气泡所定义的尺寸(1~100 $\mu\text{m}$ )时,可以通过适当增大气液比来提高气含率,此时能达到更大的气液相界面面积,进一步提高体积传质系数。因此将微气泡技术应用于强化

表2 传质强化效果相关研究总结

参考文献	气液比	气泡平均尺寸/ $\mu\text{m}$	气含率/%	比表面积/ $\text{m}^{-1}$	$k_La$ / $\text{s}^{-1}$
Muroyama等 <sup>[94]</sup>	0.01~0.07	32~50	0.6~0.8	1000	0.028
Muroyama等 <sup>[95]</sup>	0.01~0.07	30~60	1~1.75	1500~2500	0.015
Ansari等 <sup>[96]</sup>	0.021	250	10	—	0.83
Turney等 <sup>[15]</sup>	0.026~0.26	230~600	35~55	5500~9200	0.8



传质过程中时,需要兼顾气泡尺寸和气含率对传质速率的影响。

此外,化工过程所使用的微气泡发生器还要充分考虑实际应用环境,如含微孔结构的微气泡发生方式不适用于含有固体杂质或易结垢的体系,否则会造成发生器堵塞问题,降低设备运行周期;另外,还需要综合考虑微气泡发生器自身的能耗,需要在发生器引入的能耗和传质强化带来的收益之间达到平衡。综上,结构简单、性能稳定的微气泡发生器更加适用于条件苛刻的化工过程。

## 5 适用于多领域的耦合式微气泡发生器

单一的微气泡生成方式很难产生尺寸均匀、分布范围较小的微气泡群,或者难以在较宽的操作范围内保持稳定的性能,将多种微气泡生成方式的优点结合起来的耦合式微气泡发生器是当下微气泡发生器的重要研究方向之一。传统文丘里管式微气泡发生器生成的微气泡尺寸较大、气含率较低,但是文丘里管的结构简单,容易与其他方式相结合,因此被大量应用于耦合式微气泡发生器的开发中。此外,还有机械搅拌和溶气-释气法相结合<sup>[97]</sup>以及超声法和微流控技术相结合<sup>[98]</sup>的耦合式微气泡发生器。

Wang等<sup>[99]</sup>设计了旋流式与文丘里管式相结合的微气泡发生器,如图13所示。从气泡生成效率和传质效率两个方面对传统文丘里管式微气泡发生器和新型旋流文丘里管式微气泡发生器进行了比较,发现在相同的实验条件下,新型旋流文丘里管式微气泡发生器可以生成比传统文丘里管式微气泡发生器尺寸更小的微气泡,体积传质系数也大于传统的文丘里管式微气泡发生器。

丁国栋等<sup>[100]</sup>将微孔布气结构、液相旋流和文丘里结构三种技术结合,设计了一种轴向旋流式气泡发生器,如图14所示。与常规文丘里管式微气

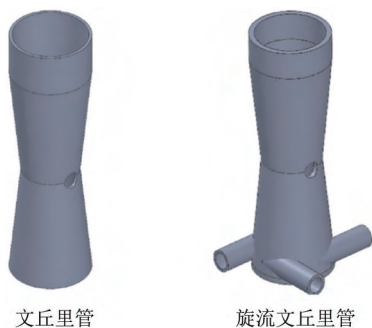


图13 旋流-文丘里管式微气泡发生器<sup>[99]</sup>

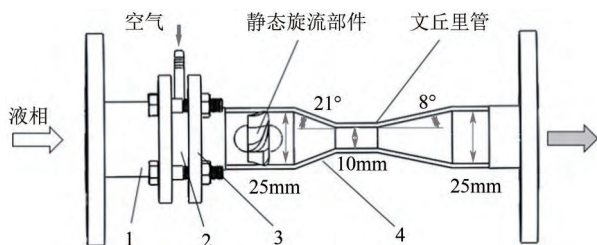


图14 轴向旋流式微气泡发生器<sup>[100]</sup>

1—进水管; 2—环形气体注入机构; 3—连接法兰盘;  
4—新型气泡破碎机构

泡发生器对比,该发生器喉管处的表观液速明显增大,径向速度梯度、湍动能和湍流耗散率更高,即气泡受到的剪切破碎作用更强,产生的气泡尺寸更小。

## 6 结语与展望

本文主要介绍了微气泡强化技术在化工、水处理、浮选过程和生物反应器中的应用,总结了近年来微气泡发生器的研究进展。微气泡发生器的种类繁多,各种发生器的气泡生成原理也有所不同,且影响微气泡尺寸的因素众多,因此在工业应用过程中要根据具体使用环境和生产需求,选择合适的微气泡发生器以达到最优的强化效果。

(1) 在水处理过程中,溶气-释气式、微孔曝气式、电解式和旋流式微气泡发生器产生的微气泡尺寸相对较小,但是溶气-释气式产生的微气泡体系气含率较低;微孔曝气式要考虑膜组件使用寿命问题,需要不断更换多孔膜,以保证水处理效率;电解过程产生微气泡能耗较高;旋流式微气泡发生器在某些含有絮凝体的水处理过程中不适用。

(2) 在耦合生物反应器过程中,机械搅拌式、喷射器阵列式和振荡射流式微气泡发生器具有低剪切力、低能耗、高气泡生成率的特点,在耦合生物反应器方面已经得到了大量的研究应用,研发具有更低剪切力的微气泡发生器对于提升生物反应器的生产效果具有重要意义。

(3) 在浮选过程中,射流式微气泡发生器结构简单、设备成本低,已经广泛应用于射流微气泡浮选柱和旋流-静态微气泡浮选柱设备中。

(4) 在化工过程中,结构简单、微气泡产生效率高的文丘里管式微气泡发生器更能适用于多样的液体环境;超声/声压式微气泡发生器能够产生尺寸分布较窄的微气泡,尽管在实验室条件下已经验证了其优异的强化传质效果,但是在工业应用过程

中还需要考虑其设备成本和能耗问题。

(5) 结合多种微气泡发生器优点的耦合式微气泡发生器, 可以弥补单一微气泡发生装置的不足, 进一步增强微气泡的生成效果, 生成尺寸和分布范围较小的微气泡群, 相比于单一原理的微气泡发生器, 对于耦合式微气泡发生器的研究具有更加广阔的发展前景。

目前, 不同应用领域利用微气泡优势的侧重点以及所受应用条件的限制有所不同, 因此不同领域重点利用的微气泡发生原理也有所不同。在对微气泡发生器进行优化设计过程中, 其应用领域与应用方式是首先需要考虑的重点因素, 在此基础上, 不断提升微气泡发生器的处理量、可操作的气液比范围以及微气泡产生效率, 仍是今后需要重点关注的问题。针对现有微气泡发生器存在的问题, 设计结构更加紧凑、能耗小、生产成本低、气泡产生效率更高的微气泡发生器, 是微气泡发生器研究的重要方向。

### 参考文献

- [1] Fine bubble technology—General principles for usage and measurement of fine bubbles—Part 1: Terminology: ISO 20480-1: 2017[S]. International Organization for Standardization, 2017.
- [2] SEBBA F. Microfoams—An unexploited colloid system[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1971, 35(4): 643–646.
- [3] ZABEL T. The advantages of dissolved-air flotation for water treatment[J]. Journal: American Water Works Association, 1985, 77(5): 42–46.
- [4] KASTER J A, MICHELSEN D L, VELANDER W H. Increased oxygen transfer in a yeast fermentation using a microbubble dispersion[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1990, 24(1): 469–484.
- [5] 谢广元, 欧泽深, 高敏, 等. FCMC-1500 型旋流微泡浮选柱在煤泥浮选中的应用研究[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(11): 26–28.  
XIE Guangyuan, OU Zeshen, GAO Min, et al. Application of FCMC-1500 cyclone micro-bubble flotation column in coal slime flotation[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(11): 26–28.
- [6] KARAMAH E F, BISMO S, ANNASARI L, et al. Mass transfer study on micro-bubbles ozonation in a bubble column[J]. 2010, 2: 243–252.
- [7] 张志炳. 微界面传质强化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.  
ZHANG Zhibing. Microinterfacial mass transfer intensification[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [8] ABADIE T, AL MA AWALI S M, BRENNAN B, et al. Oxygen transfer of microbubble clouds in aqueous solutions—Application to wastewater[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 257: 117693.
- [9] RAJAPAKSE N, ZARGAR M, SEN T, et al. Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution, bubble size and rise velocity in dissolved air flotation: A review[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 289: 120772.
- [10] AMBIKA RAJENDRAN M. Ultrasound-guided microbubble in the treatment of cancer: A mini narrative review[J]. Cureus, 2018: e3256–e3256.
- [11] CHENG Jun, XU Junchen, YE Qing, et al. Strengthening mass transfer of carbon dioxide microbubbles dissolver in a horizontal tubular photo-bioreactor for improving microalgae growth[J]. Bioresource Technology, 2019, 277: 11–17.
- [12] YIN Junlian, LI Jingjing, LI Hua, 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.
- [13] ALAM H S, REDHYKA G G, BAHURUDIN, et al. Design and performance of swirl flow microbubble generator[J]. Chemical Engineering & Technology, 2018, 7(40): 66–69.
- [14] MAEDA Y, TAYA C, HOSOKAWA S, et al. Influence of dissolved gas concentration on diameter and number density of micro-bubbles[C]// Proceedings of ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 2012: 2579–2585.
- [15] TURNEY D E, ANSARI M, KALAGA D V, et al. A micro-jet array for economic intensification of gas transfer in bioreactors[J]. Biotechnology Progress, 2019, 35(1): e2710.
- [16] 徐一丹, 庞明军, 费腾, 等. 电解法产生微气泡的实验研究[J]. 实验室科学, 2015, 18(6): 17–21.  
XU Yidan, PANG Mingjun, FEI Teng, et al. Experimental study on microbubbles generated by electrolytic process[J]. Laboratory Science, 2015, 18(6): 17–21.
- [17] MAKUTA T, SUZUKI R, NAKAO T. Generation of microbubbles from hollow cylindrical ultrasonic horn[J]. Ultrasonics, 2013, 53(1): 196–202.
- [18] XIE B Q, ZHOU C J, SANG L, et al. Preparation and characterization of microbubbles with a porous ceramic membrane[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2021, 159: 108213.
- [19] KUKIZAKI M, GOTO M. Spontaneous formation behavior of uniform-sized microbubbles from Shirasu porous glass (SPG) membranes in the absence of water-phase flow[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 296(1/2/3): 174–181.
- [20] WANG Xinyan, SHUAI Yun, ZHANG Haomiao, et al. Bubble breakup in a swirl-Venturi microbubble generator[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403: 126397.
- [21] 杜明辉, 王勇, 高群丽, 等. 臭氧微气泡处理有机废水的效果与机制[J]. 化工进展, 2021, 40(12): 6907–6915.  
DU Minghui, WANG Yong, GAO Qunli, et al. Mechanism and efficiency of ozone microbubble treatment of organic wastewater[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(12): 6907–6915.
- [22] ZHANG Wenhui, ZHANG Jinzhao, ZHAO Bo, et al. Microbubble size distribution measurement in a DAF system[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(18): 5179–5183.
- [23] 高会萌. 基于微气泡曝气的生物膜反应器废水处理技术[J]. 科学技术创新, 2022(15): 54–57.  
GAO Huimeng. Biofilm reactor wastewater treatment technology based on microbubble aeration[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(15): 54–57.
- [24] 曹伟丽, 王彦龙, 郭明, 等. 采油污水的电气浮处理技术研究[J]. 应用化工, 2014, 43(8): 1547–1548, 1552.  
CAO Weili, WANG Yanlong, GUO Ming, et al. Study of electro-floatation of oilfield wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2014, 43(8): 1547–1548, 1552.
- [25] ZHANG Wei, LI Zhengjian, AGBLEVOR F A. Microbubble fermentation of recombinant *Pichia pastoris* for human serum albumin production[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(6): 2073–2078.
- [26] 郝晓君. 华阳二矿选煤厂射流浮选柱分选试验研究[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(2): 91–93.  
HAO Xiaojun. Experimental study on separation of jet flotation column in Huayang No. 2 coal mine[J]. West-China Exploration Engineering, 2023, 35(2): 91–93.
- [27] 程雄伟, 王怀法. 新型射流浮选柱充气性能试验研究[J]. 矿产综合



- 利用, 2019(4): 38–41.
- CHENG Xiongwei, WANG Huaifa. Experimental study on the aeration performance of a new type of jet flotation column[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 38–41.
- [28] TAO Xihuan, LIU Yefei, JIANG Hong, et al. Microbubble generation with shear flow on large-area membrane for fine particle flotation[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2019, 145: 107671.
- [29] GORDIYCHUK A, SVANERA M, BENINI S, et al. Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 70: 51–60.
- [30] JANAJREH I, ELSAMAD T, NOORUL HUSSAIN M. Intensification of transesterification *via* sonication numerical simulation and sensitivity study[J]. Applied Energy, 2017, 185: 2151–2159.
- [31] 周士磊, 郑权, 王岚, 等. 微气泡分散对间甲基苯甲酸合成过程的强化作用[J]. 现代化工, 2023, 43(7): 199–201.
- ZHOU Shilei, ZHENG Quan, WANG Lan, et al. Strengthening effect of dispersive air microbubbles on synthesis process of *m*-toluic acid[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(7): 199–201.
- [32] KIM Y-B, LEE H-S, FRANCIS L, et al. Innovative swirling flow-type microbubble generator for multi-stage DCMD desalination system: Focus on the two-phase flow pattern, bubble size distribution, and its effect on MD performance[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 588: 117197.
- [33] KIM Hyun-Sik, LIM Ji-Young, PARK Soo-Young, et al. Effects on swirling chamber and breaker disk in pressurized-dissolution type micro-bubble generator[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1102–1106.
- [34] YAMASHITA H, AOYAGI H, MINAGAWA H. Enhancement of microbubble generation in a pressurized dissolution process by packing the nozzle with porous ceramics[J]. Water Science and Technology, 2012, 65(1): 69–75.
- [35] 李军令. 旋流溶气气浮技术在电脱盐含盐污水处理中的应用[J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(3): 15–20.
- LI Junling. Application of cyclone dissolved air floatation technology in the treatment of electric desalting salt-containing waste water[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2022, 52(3): 15–20.
- [36] MELICH R, VALOUR J-P, URBANIAK S, et al. Preparation and characterization of perfluorocarbon microbubbles using Shirasu porous Glass (SPG) membranes[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 560: 233–243.
- [37] KUKIZAKI M. Microbubble formation using asymmetric Shirasu porous glass (SPG) membranes and porous ceramic membranes—A comparative study[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 340(1/2/3): 20–32.
- [38] KUKIZAKI M, BABA Y. Effect of surfactant type on microbubble formation behavior using Shirasu porous glass (SPG) membranes[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 326(3): 129–137.
- [39] ZIMMERMAN W B J, TESAR V. Bubble generation for aeration and other purposes: US12447629[P]. 2012–10–16.
- [40] TESAR V. High-frequency fluidic oscillator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 234: 158–167.
- [41] LIU Chun, TANAKA H, MA Jin, et al. Effect of microbubble and its generation process on mixed liquor properties of activated sludge using Shirasu porous glass (SPG) membrane system[J]. Water Research, 2012, 46(18): 6051–6058.
- [42] ZHANG Lei, LIU Junliang, LIU Chun, et al. Performance of a fixed-bed biofilm reactor with microbubble aeration in aerobic wastewater treatment[J]. Water Science and Technology, 2016, 74(1): 138–146.
- [43] CHANDRAN P, BAKSHI S, CHATTERJEE D. Study on the characteristics of hydrogen bubble formation and its transport during electrolysis of water[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 138: 99–109.
- [44] SAKAI O, KIMURA M, SHIRAFUJI T, et al. Underwater microdischarge in arranged microbubbles produced by electrolysis in electrolyte solution using fabric-type electrode[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(23): 231501–231503.
- [45] COEY J M D, MÖBIUS M, GILLEN A J, et al. Generation and stability of freestanding aqueous microbubbles[J]. Electrochemistry Communications, 2017, 76: 38–41.
- [46] TANAKA Y, KIKUCHI K, SAIHARA Y, et al. Bubble visualization and electrolyte dependency of dissolving hydrogen in electrolyzed water using solid-polymer-electrolyte[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(25/26): 5229–5236.
- [47] YU Cunming, CAO Moyuan, DONG Zhichao, et al. Aerophilic electrode with cone shape for continuous generation and efficient collection of H<sub>2</sub> bubbles[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(37): 6830–6835.
- [48] LI Hengzhen, HU Liming, XIA Zhiran. Impact of groundwater salinity on bioremediation enhanced by micro-nano bubbles[J]. Materials, 2013, 6(9): 3676–3687.
- [49] XU Xiao, GE Xiaoling, QIAN Yundong, et al. Effect of nozzle diameter on bubble generation with gas self-suction through swirling flow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 138: 13–20.
- [50] 宋艳梅. 膜片式微孔曝气器强化能质传递促进微藻固定CO<sub>2</sub>研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- SONG Yanmei. Strengthening energy and mass transfer with diaphragm microporous aerators to promote CO<sub>2</sub> fixation by microalgae[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [51] ZIMMERMAN W B, ZANDI M, HEMAKA BANDULASENA H C, et al. Design of an airlift loop bioreactor and pilot scales studies with fluidic oscillator induced microbubbles for growth of a microalgae *Dunaliella salina*[J]. Applied Energy, 2011, 88(10): 3357–3369.
- [52] SOYSAL U, AZEVEDO P N, BUREAU F, et al. Freeze-dried microfluidic monodisperse microbubbles as a new generation of ultrasound contrast agents[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2022, 48(8): 1484–1495.
- [53] JENG H-A. Synthesis of multifunctional microbubbles through precursor microfluidic droplet generation[M]. Michigan: ProQuest LLC, 2019.
- [54] KHAN A H, JIANG Xinyue, SURWASE S, et al. Effectiveness of oil-layered albumin microbubbles produced using microfluidic T-junctions in series for *in vitro* inhibition of tumor cells[J]. Langmuir, 2020, 36(39): 11429–11441.
- [55] SALARI A, GNYAWALI V, GRIFFITHS I M, et al. Shrinking microbubbles with microfluidics: Mathematical modelling to control microbubble sizes[J]. Soft Matter, 2017, 13(46): 8796–8806.
- [56] LIN Hangyu, CHEN Junfang, CHEN Chuanpin. A novel technology: Microfluidic devices for microbubble ultrasound contrast agent generation[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2016, 54(9): 1317–1330.
- [57] WEBER J, AGBLEVOR F A. Microbubble fermentation of *Trichoderma reesei* for cellulase production[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(2): 669–676.
- [58] REHMAN F, MEDLEY G J D, BANDULASENA H, et al. Fluidic oscillator-mediated microbubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants[J]. Environmental Research, 2015, 137: 32–39.

- [59] HANOTU J, KONG D X, ZIMMERMAN W B. Intensification of yeast production with microbubbles[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 100: 424–431.
- [60] MUTHARASU L C, KALAGA D V, SATHE M, et al. Experimental study and CFD simulation of the multiphase flow conditions encountered in a novel down-flow bubble column[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 350: 507–522.
- [61] HERNANDEZ-ALVARADO F, KALAGA D V, TURNEY D, et al. Void fraction, bubble size and interfacial area measurements in co-current downflow bubble column reactor with microbubble dispersion[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 168: 403–413.
- [62] FU Taotao, MA Youguang. Bubble formation and breakup dynamics in microfluidic devices: A review[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 135: 343–372.
- [63] VAN HOEVE W, DOLLET B, GORDILLO J M, et al. Bubble size prediction in co-flowing streams[J]. EPL (Europhysics Letters), 2011, 94(6): 64001.
- [64] WANG Shiyang, DHANALIWALA A H, HOSSACK J A. Modeling microbubble production rates from expanding nozzle flow-focusing microfluidic devices[C]// 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. IEEE, 2013: 667–670.
- [65] JIANG Chunxiang, LI Xiang, YAN Fei, et al. Microfluidic-assisted formation of multifunctional monodisperse microbubbles for diagnostics and therapeutics[J]. Micro & Nano Letters, 2011, 6(6): 417.
- [66] KOTHANDARAMAN A, HARKER A, VENTIKOS Y, et al. Novel preparation of monodisperse microbubbles by integrating oscillating electric fields with microfluidics[J]. Micromachines, 2018, 9(10): 497.
- [67] KOTHANDARAMAN A, ALFADHL Y, QURESHI M, et al. Effect of the mixing region geometry and collector distance on microbubble formation in a microfluidic device coupled with AC-DC electric fields[J]. Langmuir, 2019, 35(31): 10052–10060.
- [68] ZHAN Wei, LIU Ziwei, JIANG Shaokun, et al. Comparison of formation of bubbles and droplets in step-emulsification microfluidic devices[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 106: 469–481.
- [69] LI Xiaoheng, SU Wenbing, LIU Yu, et al. Comparison of bubble velocity, size, and holdup distribution between single- and double-air inlet in jet microbubble generator[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2021, 16(2): e2611.
- [70] TIAN H, PI S, FENG Y, et al. One-dimensional drift-flux model of gas holdup in fine-bubble jet reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 386: 121222.
- [71] 惠恒雷, 仇性启, 张建伟, 等. 射流气泡发生器喉嘴距优化试验研究[J]. 节能, 2011, 30(4): 28–32, 2.  
HUI Henglei, QIU Xingqi, ZHANG Jianwei, et al. Experimental research into optimization on the distance between pipe and nozzle of the jet bubble generator[J]. Energy Conservation, 2011, 30(4): 28–32, 2.
- [72] SU Wenbing, YAN Xiaokang, WANG Lijun, et al. Effect of height of flotation column on flow field[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2019, 14(3): e2311.
- [73] 艾光华, 刘炯天, 曹亦俊, 等. 旋流-静态微泡浮选柱强化回收微细粒黑钨矿[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 3983–3990.  
AI Guanghua, LIU Jiongtian, CAO Yijun, et al. Strengthened recovery of fine wolframite by cyclonic-static microbubble flotation column[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 3983–3990.
- [74] 秦华江, 张海军, 何川, 等. 旋流-静态微泡浮选柱回收钨精选尾矿中钨金属[J]. 中国钨业, 2016, 40(4): 6–9.  
QIN Hua Jiang, ZHANG Haijun, HE Chuan, et al. Study on the recovery of molybdenum in molybdenum cleaner tailings using cyclonic-static microbubble flotation column[J]. China Molybdenum Industry, 2016, 40(4): 6–9.
- [75] 鲁志强, 杨丽, 张晨, 等. 微气泡技术在鼓泡塔中的实验研究[J]. 石油化工, 2018, 47(7): 676–680.  
LU Zhiqiang, YANG Li, ZHANG Chen, et al. Experimental study of microbubble technology in bubble column[J]. Petrochemical Technology, 2018, 47(7): 676–680.
- [76] 田洪舟, 杨高东, 杨国强, 等. 微界面强化重油浆态床低压加氢的传质基础[J]. 化工学报, 2020, 71(11): 4927–4935.  
TIAN Hongzhou, YANG Gaodong, YANG Guoqiang, et al. Mass transfer basis of low-pressure hydrogenation for heavy oil in microinterface-intensified slurry-bed reactor[J]. CIESC Journal, 2020, 71(11): 4927–4935.
- [77] 吴梦思, 田洪舟, 丁方园, 等. 微界面强化柴油加氢脱硫过程的模拟计算研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2022, 58(4): 706–712.  
WU Mengsi, TIAN Hongzhou, DING Fangyuan, et al. Simulation study on micro-interface intensified diesel hydrodesulfurization process[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2022, 58(4): 706–712.
- [78] 张志炳, 田洪舟, 曹宇, 等. PX生产PTA的内置微界面机组强化反应系统及工艺: CN111389314A[P]. 2020–03–31.  
ZHANG Zhibing, TIAN Hongzhou, CAO Yu, et al. Enhanced reaction system and process with built-in micro-interface unit for PTA production from PX: CN111389314A[P]. 2020–03–31.
- [79] 张志炳, 周政, 张锋, 等. 一种苯选择性加氢反应系统及方法: CN111569815B[P]. 2020–05–14.  
ZHANG Zhibing, ZHOU Zheng, ZHANG Feng, et al. Abenzene selective hydrogenation reaction system and method: CN111569815B[P]. 2020–05–14.
- [80] 张志炳, 周政, 张锋, 等. 一种柴油加氢的反应系统及方法: CN111871339A[P]. 2020–07–16.  
ZHANG Zhibing, ZHOU Zheng, ZHANG Feng, et al. A reaction system and method for hydrogenation of diesel fuel: CN111871339A[P]. 2020–07–16.
- [81] 张晓国, 谢清峰, 李思, 等. 喷气燃料FITS加氢技术的工业应用[J]. 炼油技术与工程, 2017, 47(9): 21–24.  
ZHANG Xiaoguo, XIE Qingfeng, LI Si, et al. Commercial application of FITS hydrotreating technology for jet fuel[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2017, 47(9): 21–24.
- [82] 谢清峰, 夏登刚, 姚峰, 等. 重整生成油全馏分FITS加氢脱烯烃技术的应用[J]. 炼油技术与工程, 2016, 46(1): 7–12.  
XIE Qingfeng, XIA Denggang, YAO Feng, et al. Application of FITS hydrogenation process for olefin removal of full fraction of reformat[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2016, 46(1): 7–12.
- [83] LI Jingjing, SONG Yuchen, YIN Junlian, et al. Investigation on the effect of geometrical parameters on the performance of a Venturi type bubble generator[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 325: 90–96.
- [84] FENG Yirong, MU Hongfeng, LIU Xi, et al. Leveraging 3D printing for the design of high-performance Venturi microbubble generators[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(17): 8447–8455.
- [85] 曹俊雅, 马梦杰, 李平平, 等. 进气方向对文丘里微气泡发生器气泡直径的影响[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(5): 127–134.  
CAO Junya, MA Mengjie, LI Pingping, et al. Effect of bubble intake direction on bubble diameters generated by a Venturi microbubble generator[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(5): 127–134.
- [86] 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 Guodong, CHEN Jiaqing, LI Zhenlin, 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.
- [87] 颜攀, 黄正梁, 王靖岱, 等. 文丘里气泡发生器的气泡尺寸及分布[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(10): 2070–2076.
- YAN Pan, HUANG Zhengliang, WANG Jingdai, et al. Bubble size and its distribution for Venturi bubble generator[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(10): 2070–2076.
- [88] SADATOMI M, KAWAHARA A, KANO K, et al. Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(5): 615–623.
- [89] JUWANA W E, WIDYATAMA A, DINARYANTO O, et al. Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type microbubble generator[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 141: 436–448.
- [90] 陈强, 蔡连波, 李小婷, 等. 用于强化鼓泡床加氢反应器气液传质的装置: CN105038845B[P]. 2017–08–29.
- CHEN Qiang, CAI Lianbo, LI Xiaoting, et al. Device for enhanced gas-liquid mass transfer in a bubbling bed hydrogenation reactor: CN105038845B[P]. 2017–08–29.
- [91] 王喜彬, 方向晨, 孙万付, 等. 一种悬浮床加氢技术的强化传质方法: CN102051207A[P]. 2011–05–11.
- WANG Xibin, FANG Xiangchen, SUN Wanfu, et al. An enhanced mass transfer method for suspended bed hydrogenation technology: CN102051207A[P]. 2011–05–11.
- [92] 李方. 一种原料油悬浮床加氢装置: CN203451487U[P]. 2014–02–26.
- LI Fang. A kind of feedstock oil suspended bed hydrogenation device: CN203451487U[P]. 2014–02–26.
- [93] MAKUTA T, TAKEMURA F, HIHARA E, et al. Generation of micro gas bubbles of uniform diameter in an ultrasonic field[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 548: 113.
- [94] MUROYAMA K, IMAI K, OKA Y, et al. Mass transfer properties in a bubble column associated with micro-bubble dispersions[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 100: 464–473.
- [95] MUROYAMA K, OKA Y, FUJIKI R. Transport properties of micro-bubbles in a bubble column[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2012, 45(9): 666–671.
- [96] ANSARI M, TURNEY D E, YAKOBOV R, et al. Chemical hydrodynamics of a downward microbubble flow for intensification of gas-fed bioreactors[J]. AIChE Journal, 2018, 64(4): 1399–1411.
- [97] SWART B, ZHAO Yubin, KHAKU M, et al. *In situ* characterisation of size distribution and rise velocity of microbubbles by high-speed photography[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 225: 115836.
- [98] CARUGO D, BROWNING R J, IRANMANESH I, et al. Scaleable production of microbubbles using an ultrasound-modulated microfluidic device[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 150(2): 1577–1589.
- [99] WANG Xinyan, SHUAI Yun, ZHOU Xiaorui, et al. Performance comparison of swirl-Venturi bubble generator and conventional Venturi bubble generator[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2020, 154: 108022.
- [100] 丁国栋, 陈家庆, 王春升, 等. 轴向旋流式微气泡发生器的结构设计及数值模拟[J]. 过程工程学报, 2018, 18(5): 934–941.
- DING Guodong, CHEN Jiaqing, WANG Chunsheng, 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.