

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.004

微纳米气泡物化特性及其水处理应用研究进展

张志强¹, 常娜¹, 王社平^{1,2}, 卢金锁¹, 赵子聪¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 微纳米气泡因其独特的物化性质而在环境治理、水质净化、生物医学和提高农业生产等领域展现出巨大的优势和发展潜力。在总结分析微纳米气泡产生技术原理、方式和物化特性的基础上,梳理了微纳米气泡技术应用于曝气、臭氧氧化、气浮、消毒及减缓膜污染等水处理研究方向的最新动态,明确了基于微纳米气泡的水处理技术的效能强化与不足,展望了微纳米气泡水处理技术未来的研究与应用方向,以期微纳米气泡水处理技术的研究与应用提供参考。

关键词: 微纳米气泡; 发生方式; 水处理; 研究进展

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0024-07

State-of-the-art of the Micro-nano Bubble Physicochemical Properties and Its Applications in Water Treatment

ZHANG Zhi-qiang¹, CHANG Na¹, WANG She-ping^{1,2}, LU Jin-suo¹, ZHAO Zi-cong¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: Due to their unique physicochemical properties, micro-nano bubbles (MNBs) have shown great advantages and development potential in the fields of environmental treatment, water purification, biomedicine and agricultural production. This paper summarized the generation principle, methods and physicochemical properties of MNBs, and further reviewed the latest research progress on the MNBs technologies used in aeration, ozone oxidation, air flotation, disinfection and membrane fouling mitigation. In addition, as a novel water treatment technology, the enhancement of treatment efficiency and the related deficiency of MNBs were also clarified. At last, the development and application prospects of MNBs in water treatment were illustrated which can provide reference for the research and application of micro-nano bubble water treatment technology.

Key words: micro-nano bubble; generation method; water treatment; research progress

近年来,微纳米气泡因其独特的物化性质和潜在的应用价值而备受关注。按照气泡尺寸大小,微

纳米气泡可分为微米气泡(10~50 μm)、亚微米气泡(0.2~10 μm)和纳米气泡(<0.2 μm)。相比于宏观

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(52000146); 中国博士后科学基金资助面上项目(2020M673351); 国家自然科学基金资助面上项目(51778523)

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@xauat.edu.cn

大气泡(0.6~5 mm),微纳米气泡直径小,比表面积大,具有自身增压溶解特性,能够有效提高气液传质效率及水中氧的总含量(溶解形式与气泡形式之和);微纳米气泡内部气体以高压高密度聚集态形式存在,具有独特的稳定性,其气泡上升速率慢,能够在水中悬浮稳定存在几个小时甚至几天,是一种较为理想的气体缓释和输运媒介^[1]。微纳米气泡湮灭溶解时具有高温高压效应,释放能量产生具有强氧化性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$);微纳米气泡表面呈现负电性,具有典型的双电层结构^[2]。鉴于此,微纳米气泡技术在环境治理、生物医学、船舶减阻、药物传递、清洗行业及农业生产等多个领域具有重要的研究和应用价值。

在水处理领域,曝气是实现充氧、气浮、反冲洗等多种功能目的的主要技术手段,相比于传统鼓风曝气、机械曝气等技术,微纳米气泡技术呈现出显著的技术优势与多功能性,目前研究人员在微纳米气泡水质处理与改善技术方面开展了大量工作,并取得了良好的成果^[3]。以微纳米气泡水处理应用研究为核心,梳理了微纳米气泡产生的技术原理、类别及特点,并从微纳米气泡物化特性角度,总结了基于微纳米气泡的新型水处理技术研究进展,归纳了微纳米气泡技术的不足和研究方向,以期微纳米气泡水处理技术的研究与应用转化提供参考。

1 微纳米气泡的产生方法

针对水中微纳米气泡的研究可以追溯到20世纪60年代的空化研究,但直到20世纪90年代中期,微纳米气泡发生技术产生的气泡直径才达到微米级,极大推动了微纳米气泡技术的研究。微纳米气泡的产生是由于均匀液相在特定条件下发生空化现象引起的,其发生技术大致可分为水力空化、超声空化、电解空化及化学反应等(见图1)^[4]。

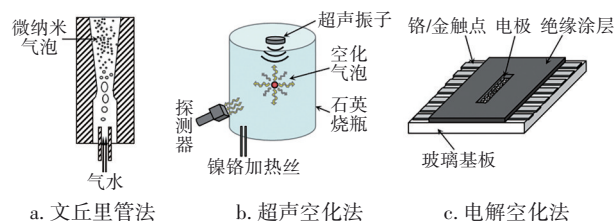


图1 微纳米气泡产生方式

Fig.1 Generation methods of micro-nano bubble

水力空化的基本原理是通过改变流体水力条件造成局部压力减小而引发空化效应。水力空化

产生微纳米气泡装置主要分为多孔板型和文丘里管型两类^[5]。多孔板型微纳米气泡发生装置的核心单元由内部装有多孔板的水流管和不锈钢穿孔进气管组成,加压水通过水流管流经多孔板时流速发生变化导致压力降低,气体经不锈钢进气管被吸入并在高强水力剪切作用下生成大量的微纳米气泡。文丘里管型发生装置因体积小、泵功率低以及可以产生高密度微纳米气泡的优点而得到了广泛应用,其主要由渐缩管段、喉管段和渐扩管段三部分组成[见图1(a)],加压液体与气体由渐缩管进入喉管,形成气液两相流,气体在高速水流的剪切作用下产生微纳米气泡。

超声空化的基本原理是在超声波作用下,液体产生拉应力造成负压环境,液体中溶解性气体过饱和而发生空化效应,进而产生微纳米气泡,其技术装置如图1(b)所示。该技术能够有效控制气泡破裂,同时在气泡尺寸精密控制方面也展现出良好的效果。

电解空化是利用电解水过程在电极两侧产生氢气和氧气获取微纳米气泡[见图1(c)],或通过电解某种物质获取含有特定气体的微纳米气泡。电解法制备的微纳米气泡在电极附近较为密集,气泡与电极间的附着效应促使气泡发生融合,致使气泡尺寸增大且难以控制。为了解决该问题,研究人员开发出微管道电解和微电极阵列电解技术,前者结合电解与压力脉冲技术,将产生的微纳米气泡通过规定尺寸的微量移液管获取数量单一、尺寸可控的微纳米气泡;后者利用一定形状的微电极阵列作为气泡发生位点,该方法能够在水环境中产生尺寸均匀的微米级($<50\ \mu\text{m}$)气泡^[6]。

化学反应空化主要通过物质之间的化学反应来产生微纳米气泡,例如过氧化氢分解能够获得大量的氧气微纳米气泡,但是所用化学试剂成本过高,且容易造成水体的二次污染,无法在自然水体中直接使用^[7]。

在现有的微纳米气泡技术中,超声空化法与电解空化法功耗高,效率较低,气泡产量小,且超声空化产生的气泡内气体主要为水蒸气,不可用于水体增氧、臭氧消毒等^[6];化学反应空化因成本高、易污染水体,限制了其在实际生产中的应用;水力空化法因其设备简单、实施方便、能耗低、维护成本低而在水处理中最为常用,但是对设备设计与控制要求

较高,这些参数需要在微纳米气泡发生装置设计中进一步深入优化^[5]。

2 微纳米气泡的物化特性与表征方法

微纳米气泡是直径 $<50\ \mu\text{m}$ 的微气泡,其在水中停留时间长且表面电荷较高^[2],气泡在持续收缩的过程中,表面张力的作用促使气泡内气体溶解,从而提高气液传质效率,直至气泡湮灭,气液界面周围化学势的分散导致活性氧化剂的产生,如羟基

自由基。

微纳米气泡体积小,在水中因受到较小的浮力进而减缓其上升速度,而体积较大的普通气泡会在产生后迅速上升到水面并破裂消失。关于气泡尺寸,目前常见的检测方法包括图像分析、光学显微镜、原子力显微镜、电子显微镜、静态光散射、动态光散射及纳米颗粒跟踪分析等^[5]。表1列出了应用的微纳米气泡观测方法^[8-13]。

表1 微纳米气泡生成方式及观测方法

Tab.1 Generation and observation methods of micro-nano bubble

空化方式	气泡尺寸/ μm	观测设备	观测方法	优势	缺点
水力空化	0 ~ 2 400	高速摄像机	图像分析	效率较高、操作简单	设备设计及控制要求高
	10 ~ 100	数码相机	图像分析		
	0.2 ~ 1.2	Zeta 仪	动态光散射		
	0.032 ~ 0.46	纳米颗粒跟踪分析仪	纳米颗粒跟踪分析		
超声空化	0.006 ~ 0.06	激光衍射粒度分析	图像分析	有效控制气泡破裂	效率低,功耗大
电解空化	20 ~ 1 000	高速摄像机	图像分析	操作便捷	效率低,功耗大
	0 ~ 0.5	原子力显微镜、纳米颗粒跟踪分析仪	原子力显微镜、纳米颗粒跟踪分析		
化学反应	0.2 ~ 0.5	原子力显微镜	原子力显微镜	操作便捷	成本较高,易二次污染
	0 ~ 0.036	原子力显微镜	原子力显微镜		
	0.06 ~ 0.4	纳米颗粒跟踪分析仪	纳米颗粒跟踪分析		

图像分析可用于检测最小尺寸为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的气泡,且在使用上有一些限制,例如拍摄图像需要透明的屏障、摄像机的高分辨率与速度以及低浓度的气泡^[4]。在一些研究中,将图像分析与其他技术结合可以提高测量的有效性^[14]。光学显微镜由于分辨率较低,仅可以检测微米气泡,但无法检测纳米气泡^[15];电子显微镜与原子力显微镜可检测至纳米级气泡,其中电子显微镜仅适用于真空环境,原子力显微镜可用于真空、气体及液体环境^[12];静态和动态光散射技术可以研究溶液中物体的结构和动力学,静态光散射通过测量散射强度的角分布来推断物体的结构信息,动态光散射是弹性光散射的延伸,通过测量布朗运动引起的散射光在张力中的波动来研究非均匀动力学系统。因此动态光散射在微纳米气泡检测中的应用更为常见,但是该技术只提供平均粒径和相关分布^[16]。纳米颗粒跟踪分析可以被用于分析颗粒大小和计数,跟踪每个粒子的运动轨迹,得知粒径信息,对于小颗粒和弱散射样品颗粒,尤其是纳米气泡,具有明显优势。

Zeta 电位决定了微纳米气泡与其他材料(如有

机、无机及生物物质)之间的相互作用,是影响工程应用的重要因素^[17]。微纳米气泡表面吸附着大量带负电荷的离子如 OH^- , OH^- 的周围分布着正电荷离子层(如 H_3O^+),正负电荷共同形成双电层^[2]。双电层之间的电势差即 Zeta 电位,主要取决于溶液的 pH。当 $\text{pH}<4.5$ 时,气泡的 Zeta 电位值为正;当 $\text{pH}>4.5$ 时,气泡的 Zeta 电位值为负。在碱性溶液($\text{pH}>10$)中,微纳米气泡的 Zeta 电位值可达 $-100\ \text{mV}$ ^[18]。此外,所用气体类型也会影响气泡的 Zeta 电位值,通常空气微纳米气泡表面电位在 $-20\sim-17\ \text{mV}$ (pH 为 $5.7\sim6.2$)范围内,而纯氧气形成的微纳米气泡表面电位在 $-45\sim-34\ \text{mV}$ (pH 为 $6.2\sim6.4$)范围内。微纳米气泡 Zeta 电位的测定主要有单粒径观测法、声学法和电泳光散射法三种。相比于单粒径观测和声学测定法,电泳光散射技术灵敏度、准确性和通用性更高,使用也更广泛,其通过对样品施加外加电场,使溶液中的带电粒子定向迁移,并根据电场强度确定 Zeta 电位^[5]。

随着微纳米气泡尺寸的减小,内部压力增大,其大小与其直径呈负相关,两者之间的关系可以由

Young-Laplace 方程表示^[17]:

$$p = p_l + 2\sigma/r \quad (1)$$

式中: p 为气体压力; p_l 为液体压力; σ 为气泡表面张力; r 为气泡半径。

根据亨利定律,气泡周围溶解的气体量与气体压力呈正相关。根据传质的双膜理论,气液界面位于气膜和液膜之间,液相和气相的总质量传递系数分别由下式中的 K_l 与 K_g 表示^[18]:

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{K_g H} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_g H} \quad (2)$$

式中: H 为亨利定律常数; k_g 、 k_l 分别为气泡的气相与液相传质系数。

对于微纳米气泡,传质阻力主要存在于液相,因此可以假定 $K_l \approx k_l$ 。对于遵循斯托克斯定律的微纳米气泡,其传质系数可由下式计算得出:

$$k_l = \frac{D}{d} \left[1 + \left(1 + \frac{du}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3)$$

式中: d 为气泡直径; u 为气泡上升速度; D 为液膜厚度。

式(3)表明,随着微纳米气泡尺寸的减小,传质系数增大。废水通常含有表面活性杂质,这些化合物会迅速吸附并固定在微纳米气泡的表面,不仅减少了表面流动,还会有表面活性剂分子充当气体分子通过界面的物理屏障,改变微纳米气泡的液膜厚度,从而降低传质速率^[18]。Kawahara等^[19]研究海水体系中微纳米气泡氧传递规律时发现,随着气泡直径的增大,传质系数增大,这与式(3)的预测值相反,推测是由于水体湍流引起的,因此对方程式提出更改,液相传质系数 K_l 与气泡的平均直径 d_{32} 和气泡上升速度 u 的乘积之间的关系可由下式表示:

$$\frac{K_l \mu}{\sigma} = 7.46 \times 10^{10} \times \left(\frac{ud_{32}}{D} \right)^{0.756} \quad (4)$$

式中: μ 为液体黏滞系数。

微纳米气泡在水中破裂时,在气液界面可产生羟基自由基。5,5-二甲基-1-吡咯啉-N-氧化物(DMPO)能够与液相中的羟基自由基反应生成寿命的自旋加合物,研究者们基于此机理检测到微纳米气泡破裂过程中产生的自由基,且根据电子自旋共振(ESR)光谱线的谱峰对比发现,溶液pH降低,自由基生成数量增加,同时所使用气体类型也会影响自由基数量。例如,与氮气微纳米气泡相比,氧气微纳米气泡更有利于生成羟基自由基;臭氧微纳

米气泡破裂时,气泡表面的负电荷离子会促进其内部的臭氧分子逐渐分解,生成大量羟基自由基^[20],其标准氧化还原电位(2.80 V)远高于臭氧和过氧化氢等氧化剂(分别为2.07和1.77 V),可以与大多数有机化合物反应。这些发现对废水处理具有重要意义。

3 水处理应用

与传统的曝气方式相比,微纳米气泡技术能够提升氧分子从气相到液相的溶解速率,缩短废水在处理构筑物中的停留时间,提高废水处理效率,优化处理厂的设计并减少其占地面积,降低处理成本^[3]。在应用微纳米气泡技术的水处理中,当前最常见的研究主要集中在强化曝气及臭氧氧化、提高气浮效率、改善消毒效果与减缓膜污染方面^[20-26],具体见表2。

表2 微纳米气泡技术在水处理方面的应用

Tab.2 Application of micro-nano bubble technology in water treatment

项 目	作用目标	气体类型	处理时间/min	去除效率/%
臭氧氧化	COD	O ₃		20
	洗涤剂/光刻胶	O ₃	10	70
	农药	O ₃	10	45
气浮	COD	空气		97
	色度	空气		20
	硝酸盐	空气		47
	丝状藻细胞			86
	球状藻细胞			80
	浊度及总二氧化硅	空气		92
消毒	大肠杆菌	O ₃	60	>99
	鼠伤寒沙门菌	O ₃		>99
	尖孢镰刀菌	O ₃	20	>99
	果胶杆菌	O ₃	30	>99

3.1 强化曝气

曝气工艺在废水处理中应用广泛,主要通过提高曝气速率以改善有机污染物降解及微生物生长速率。在曝气过程中,气泡尺寸分布会影响水中溶解氧的含量,较小尺寸的气泡具有更大的比表面积,并且可以提供更好的氧气传输速率。与传统的鼓风曝气处理装置相比,将微纳米气泡技术应用于废水好氧处理时,氧利用率和体积传质系数提高了近一倍,有机物降解所用时间也大幅度减少,且显示出更高的微生物生长速率。Xiao等^[27]研究了微纳米气泡对生物膜生长的影响,微纳米气泡水的加入可以将生物膜内的溶解氧从(7.497±0.009) mg/L

增加到 10.012 mg/L,且较高的溶解氧水平($\text{DO} > 7.497 \text{ mg/L}$)可持续 200 s 以上,其通过高溶解氧浓度和氧转移效率提供过量氧气,加速水体及生物膜中溶解氧的补充,为生物膜内细胞代谢过程提供了电子供体,从而促进生物膜的形成。此外,研究发现,与传统曝气生物膜相比,微纳米曝气生物膜中含有较多的 α -多糖,而且 β -多糖的体积约为传统的两倍,此差异表明微纳米曝气可通过改变微生物群落组成以及微生物代谢方式(如碳水化合物合成途径)来影响生物膜的形成^[28]。

3.2 强化臭氧氧化

臭氧氧化技术具有高效、环保的优点,然而臭氧在水中的滞留时间短,传质系数低,因此如何提高其溶解效率并增加水相中臭氧浓度是提高其控制效率的首要问题^[18]。微纳米气泡停留时间长且传质效率高,可以很好地解决上述问题。Xia等^[20]研究表明,将臭氧微纳米气泡技术用于处理受有机物污染的地下水时,30 min即可将苯和氯苯去除95%以上,硝基氯苯去除率可达35%。Chu等^[21]用臭氧微纳米气泡技术处理含有残留偶氮染料、碱和表面活性剂的纺织废水,结果显示色度去除率可达80%,同时COD去除率提高了20%;机制研究表明,臭氧微纳米气泡产生的羟基自由基以及更高的传质效率可以促进染料分子的氧化。

臭氧在低浓度及短间接接触的条件下可以有效灭活细菌、病毒和某些藻类,已被广泛应用于水处理,微纳米气泡的应用进一步提高了其效率^[26]。使用臭氧微纳米气泡时,即使在少量臭氧的情况下,也能获得较好的杀菌效果^[18]。与传统的臭氧消毒工艺相比,应用微纳米气泡时,对大肠杆菌的抑制效果更明显(约99.99%的灭活率),气泡破裂时产生的羟基自由基及冲击波是大肠杆菌失活的主要原因,但各影响因素造成的失活程度仍有待进一步研究^[26]。臭氧微纳米气泡水对尖孢镰刀菌和果胶杆菌具有极高的消毒活性,且随着溶解臭氧初始浓度的增加,对这两种植物病原的消毒活性和持久性都有所提高。但是使用臭氧微纳米气泡技术后,溴酸盐生成量比常规曝气技术高。对于该问题,Li等^[29]发现在添加氨(0.04 mmol/L)的条件下,臭氧微纳米气泡氧化过程中溴酸盐的生成量减少了约30%,其最大可降低到比传统臭氧化过程更低的水平,因此在臭氧微纳米曝气技术应用于水处理过程

时,添加氨水是控制溴酸盐生成量的有效方法。

3.3 提高气浮效率

气浮是根据密度进行分离的过程,气泡附着在絮体颗粒表面,形成气泡颗粒团块,并上升到液体表面,完成气浮过程,微纳米气泡的存在显著减小了气浮气泡的平均粒径,由此提高了颗粒与气泡之间的碰撞和黏附效率,可以大幅度提高气浮效果^[30]。对于有机物,即总有机碳和溶解有机碳及其他脂肪族/芳香族化合物,应用微纳米气泡时其去除率可达30%以上。有研究表明,微纳米气泡可以有效分离藻类与淡水,细胞去除率约90%,叶绿素a减少92%^[24]。采用混凝/絮凝气浮工艺的微纳米气泡技术是一种经济有效的废水处理方法,试验表明废水澄清效率可提高40%,浊度、总固体物和总二氧化硅的去除率约为95%^[25]。之后的研究需要对操作进行优化,以证明微纳米气泡气浮工艺在实际大规模应用中的可行性。

3.4 减缓膜污染

膜污染导致膜的透水性恶化和运行成本的增加,是膜过滤技术广泛应用的主要障碍,化学清洗虽然能有效去除污染,但会造成膜材料损坏,缩短膜组件使用寿命。Dayarathne等^[17]的室内过滤实验结果表明,微纳米气泡的加入可以减少膜表面浓差极化和污染层的形成,渗透通量和溶质截留率分别提高了24.62%和0.8%,且作为非化学清洗,不会造成环境污染,是一种更适用的清洗方法。Ye等^[31]研究微纳米气泡技术对海水脱盐性能的影响时发现,微纳米气泡的注入可以减轻膜结垢,提高膜通量,有效脱盐处理时间可延长至360 min,且微纳米发生装置在较高的泵压下,可以产生大量较小尺寸的微纳米气泡,更有利于提高脱盐效率,但提高泵压后总能耗仅增加3%左右,比能耗提高显著。利用微纳米气泡减缓膜污染还能减少化学药剂的使用,但需进一步研究其污染治理机制,以及物理作用(湍流引起的剪切、微纳米气泡聚集增加的气体浮力)与化学作用(自由基氧化)的程度区别。

此外,微纳米气泡技术还可以在其他条件下用于清洗。例如,Ushida等^[32]证明对于疏水性有机物(脂肪、蛋白质和着色剂)污染的纺织品,微纳米气泡水比无气泡水清洁效果提高了5%。在生物膜污染的掺硼金刚石涂层电极上,Rice等^[33]利用微纳米气泡水也得到了较好的清洁效果。在半导体器件

生产中,硅片表面光刻胶极难通过化学药剂去除,而电子自旋共振实验表明,由于溶解臭氧浓度的提高与微纳米气泡破裂时产生的羟基自由基作用,臭氧微纳米气泡水清洗可以显著提高光刻胶的去除率^[34]。

4 研究展望

① 微纳米气泡的稳定产生是该技术研究与应用的根本前提。目前,微纳米气泡发生装置存在能耗高、气泡产生量不足且气泡相对不均等问题,研发微纳米气泡的稳定产生及尺寸可控的技术和装备仍是今后研究的重点。

② 在水处理方面,将微纳米气泡技术与混凝工艺、强氧化技术联合应用,可强化微气泡对难降解有机污染物的氧化分解能力,但对发生装置联用条件的选择与优化仍需进一步研究。

③ 迄今为止,微纳米气泡技术在水处理方面的应用大多数局限于实验室规模,与实际水体的类别、有机污染程度、水力条件等均有所不同,还需进行现场试验,以探究微纳米气泡技术不同应用方式对水体中有机污染物的物化作用效果。

④ 传统加氯消毒工艺因消毒副产物的生成影响水质安全,而微纳米气泡具有持续溶解氧气、产生自由基的特性,据此利用微纳米气泡技术开发消毒新工艺,探究其在管网中对致病微生物的影响,使饮用水的化学安全性与微生物安全性达到统一。

参考文献:

- [1] BASSO A, HAMAD F A, GANESAN P. Effects of the geometrical configuration of air-water mixer on the size and distribution of microbubbles in aeration systems[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2018, 13 (6): 2259.
- [2] 翟伟哲,王永刚,王旭,等. 微纳米气泡的特性及在水处理技术上的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(7): 95-98.
ZHAI Weizhe, WANG Yonggang, WANG Xu, *et al.* Characteristics of micro-nano bubbles and their application in water treatment technology [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43 (7): 95-98(in Chinese).
- [3] YAO K M, CHI Y, WANG F, *et al.* The effect of microbubbles on gas-liquid mass transfer coefficient and degradation rate of COD in wastewater treatment [J]. Water Science & Technology, 2016, 73 (8): 1969-1977.
- [4] ZHANG X Y, WANG Q S, WU Z X, *et al.* An experimental study on size distribution and zeta potential of bulk cavitation nanobubbles[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27 (2): 152-161.
- [5] HARIS S, QIU X B, KLAMMLER H, *et al.* The use of micro-nano bubbles in groundwater remediation: a comprehensive review [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 11: 100463.
- [6] 田立平,鞠玲,王晓波,等. 微纳米气泡制备技术及应用研究[J]. 能源与环境, 2020 (4): 69-73.
TIAN Liping, JU Ling, WANG Xiaobo, *et al.* Preparation technology and application of micro nano bubbles [J]. Energy and Environment, 2020 (4): 69-73(in Chinese).
- [7] 刘季霖. 微纳米气泡发生装置研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
LIU Jilin. Research on Micro-nano Bubble Generator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012(in Chinese).
- [8] MIDTVEDT D, EKLUND F, OLSEN E, *et al.* Size and refractive index determination of subwavelength particles and air bubbles by holographic nanoparticle tracking analysis[J]. Analytical Chemistry, 2020, 92(2): 1908-1915.
- [9] BAE K, GO G S, NOH N S, *et al.* Bubble characteristics in pressurized bubble column associated with micro-bubble dispersion[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 386(6): 121339.
- [10] LI M D, BUSSONNIÈRE A, BRONSON M, *et al.* Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles [J]. Minerals Engineering, 2019, 132: 268-274.
- [11] HAIN N, HANDSCHUH-WANG S, WESNER D, *et al.* Multimodal microscopy-based identification of surface nanobubbles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 547: 162-170.
- [12] PARK Y K, DIEZ-SILVA M, FU D, *et al.* Static and dynamic light scattering of healthy and malaria-parasite invaded red blood cells [J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(2): 020506.
- [13] KLEMESHEV S A, PETROV M P, ROLICH V I, *et al.* Static, dynamic and electric light scattering by aqueous colloids of diamond [J]. Diamond and Related Materials, 2016, 69: 177-182.

- [14] HU L M, XIA Z R. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 342:446–453.
- [15] REN L Y, ZHANG Y M, QIN W Q, *et al.* Investigation of condition-induced bubble size and distribution in electroflotation using a high-speed camera [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(1):7–12.
- [16] SHAFI A S, MCCLEMENTS J, ALBAIJAN I, *et al.* Probing phospholipid microbubbles by atomic force microscopy to quantify bubble mechanics and nanostructural shell properties [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 181:506–515.
- [17] DAYARATHNE H N P, CHOI J, JANG A. Enhancement of cleaning-in-place (CIP) of a reverse osmosis desalination process with air micro-nano bubbles [J]. *Desalination*, 2017, 422:1–4.
- [18] KHUNTIA S, MAJUMDER S K, GHOSH P. Microbubble-aided water and wastewater purification: a review [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2012, 28 (4/6):191–221.
- [19] KAWAHARA A, SADATOMI M, MATSUYAMA F, *et al.* Prediction of micro-bubble dissolution characteristics in water and seawater [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(5):883–894.
- [20] XIA Z R, HU L M. Treatment of organics contaminated wastewater by ozone micro-nano-bubbles [J]. *Water*, 2019, 11(1):55.
- [21] CHU L B, XING X H, YU A F, *et al.* Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles [J]. *Chemosphere*, 2007, 68(10):1854–1860.
- [22] IKEURA H, KOBAYASHI F, TAMAKI M. Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(3):345–349.
- [23] LIU S, WANG Q H, MA H Z, *et al.* Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 71(3):337–346.
- [24] BUI T T, NAM S, HAN M. Micro-bubble flotation of freshwater algae: a comparative study of differing shapes and sizes [J]. *Separation Science and Technology*, 2015, 50(7):1066–1072.
- [25] BUI T T, HAN M. Removal of *Phormidium* sp. by positively charged bubble flotation [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 72:108–114.
- [26] PHAEPHIPHAT A, MAHAKARNCHANAKUL W. Surface decontamination of *Salmonella Typhimurium* and *Escherichia coli* on sweet basil by ozone microbubbles [J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2018, 4(1):1558496.
- [27] XIAO W T, XU G R. Mass transfer of nanobubble aeration and its effect on biofilm growth: microbial activity and structural properties [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703:134976.
- [28] CHEN H, HE L N, LIU A N, *et al.* Start-up of granule-based denitrifying reactors with multiple magnesium supplementation strategies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 155:204–211.
- [29] LI P, WU C, YANG Y X, *et al.* Effects of microbubble ozonation on the formation of disinfection by-products in bromide-containing water from Tai Lake [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 193:408–414.
- [30] ZHOU W G, OU L M, SHI Q, *et al.* Different flotation performance of ultrafine scheelite under two hydrodynamic cavitation modes [J]. *Minerals*, 2018, 8 (7):264.
- [31] YE Y B, YU S L, HOU L A, *et al.* Microbubble aeration enhances performance of vacuum membrane distillation desalination by alleviating membrane scaling [J]. *Water Research*, 2019, 149:588–595.
- [32] USHIDA A, HASEGAWA T, TAKAHASHI N, *et al.* Effect of mixed nanobubble and microbubble liquids on the washing rate of cloth in an alternating flow [J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2012, 15 (6): 695–702.
- [33] RICE D, WESTERHOFF P, PERREAULT F, *et al.* Electrochemical self-cleaning anodic surfaces for biofouling control during water treatment [J]. *Electrochemistry Communications*, 2018, 96:83–87.
- [34] TAKAHASHI M, ISHIKAWA H, ASANO T, *et al.* Effect of microbubbles on ozonized water for photoresist removal [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(23):12578–12583.

作者简介:张志强(1988–),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,主要研究方向为微纳米气泡水处理应用理论技术、城镇排水管网风险识别与防控技术。

E-mail: zzq@xauat.edu.cn

收稿日期:2020-11-05

修回日期:2020-12-16

(编辑:丁彩娟)