



微纳米气泡发生器在水处理中的应用

微纳米气泡的出现及其不同于普通气泡的特点,使其在水处理等领域显现出优良的技术优势和应用前景,介绍了微纳米气泡以及其比表面积大、停留时间长、自身增压溶解、界面电位高、产生自由基、强化传质效率等特点,论述了微纳米气泡在水体增氧、气浮工艺、强化臭氧化、增强生物活性等环境污染控制领域的应用研究。

引言

微米气泡 (microbubble) 通常是指存在于水中直径为 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 的微小气泡,直径小于 200nm 的超微小气泡称为纳米气泡 (nanobubble),介于微米气泡和纳米气泡之间的气泡称为微纳米气泡 (micro-nano bubble),与传统大气泡 (coarse bubble, 直径 $>50\text{mm}$) 和小气泡 (fine bubble, 直径 $<5\text{mm}$) 相比,微纳米气泡直径小,其传质特性和界面性质均显著不同于传统大气泡。

1 微纳米气泡的基本特性

1.1 比表面积大

微纳米气泡拥有较大的比表面积,气泡的比表面积可表示为 $S/V=3/r$ 。在气泡体积不变时,气泡比表面积与气泡半径成反比,气泡半径为 $10\ \mu\text{m}$ 和 1mm 的气泡相比,在一定体积下前者的比表面积理论上是后者的 100 倍。

1.2 水中停留时间长

传统充氧曝气,气泡直径大,与水体接触表面积小,气泡快速上升到水面并破裂消失,停留时间过短,溶氧效果差。而微纳米气泡在水中上升的速度较慢,从产生到破裂的历程通常达到几十秒甚至几分钟。有研究表明,直径 1mm 气泡在水中上升的速度为 $6\text{m}/\text{min}$,而直径为 $10\ \mu\text{m}$ 气泡上升速度为 $3\text{mm}/\text{min}$,后者是前者的 $1/2000$ 。

1.3 自身增压溶解

水中的气泡四周存在气液界面,气液界面的存在使得气泡受到水的表面张力作用。对于具有球形界面的气泡,表面张力能够压缩气泡内的气体,从而使气体更易溶解到水中,压力的上升会增加气体的溶解度。随着比表面积的增加,气泡缩小的速度逐渐变快,最终完全溶解。实验发现不同的产生方法和表面活性剂,微气泡收缩的临界直径不同。表面活性剂为 L-150A 时,机械搅拌法和超声法产

嘉盛（香港）科技有限公司

生气泡的收缩直径分别为 100, 50 μm ; 表面活性剂为 1%SDS 时, 机械搅拌法和超声波法产生气泡的收缩直径分别为 80, 40 μm 。

1.4 界面电位高

微纳米气泡的表面电荷产生的电势差常用电位表示, 电位是影响气泡表面吸附性能的重要因素, 其值的高低在很大程度上决定了微纳米气泡界面的吸附性能。Ushikubo 等研究发现, 氧气微纳米气泡的电位一般在 $-45 \sim -34 \text{ mV}$, 而空气微纳米气泡的电位则为 $-20 \sim -17 \text{ mV}$ 。

1.5 产生自由基

微纳米气泡不需要外界刺激即可产生自由基。微米气泡在收缩时, 由于双电层的电荷密度迅速增高, 气泡破裂时, 气液界面消失的剧烈变化将界面上高浓度的正负离子积蓄的能量释放, 此时可激发产生大量的羟基自由基。羟基自由基具有超强氧化作用, 可降解水中正常条件下难以降解的污染物如苯酚等。研究发现, pH 值较低时有利于羟基自由基的生成, 此外, 微纳米气泡的气体种类也会影响到气泡破裂时自由基的生成量。

1.6 强化传质效率

气体的传质速率很大程度上取决于气液相的传质面积, 而气液比表面积取决于截留在液体中的气体体积以及气泡直径。气液比表面积可表示为 $a=6H_0/dB$, 气体截留率 H_0 越大, 气泡直径 dB 越小, 则气液比表面积 a 值越大, 由此可以得出气泡直径的大小直接影响氧的传质效率。

2 微纳米气泡在水处理中的应用

2.1 微纳米气泡在水体增氧中的应用

污染物直接排放到附近的河流和湖泊中, 微生物在分解污染物的过程中迅速消耗水体中的溶解氧, 导致含氧量迅速下降, 河流发黑发臭, 生态系统遭到破坏。对水体进行曝气复氧, 不仅可有效解决发黑发臭问题, 而且不会产生二次污染。] 采用微米气泡发生装置, 考察了微米曝气与普通曝气对黑臭河水的处理效果。相同曝气强度下, 微米气泡可产生更高的溶解氧(DO), 曝气 60 min 时, DO 可达 9.87 mg/L, 而普通曝气在 100 min 时才达到 6.54 mg/L。同时微米气泡对 COD、NH₃-N、Geosmin 和 2-MIB 的最大去除率分别比普通曝气高出 12%、10%、16%、12%。利用日本的超微气泡曝气机进行实验研究, 发现该技术能够很好地提高水中的溶解氧并有效消解底泥有机物, 减少底泥厚度, 实现水体的修复。

2.2 微纳米气泡在气浮工艺中的应用

气浮工艺是指在水体中通入或产生大量的微细气泡，使其黏附在杂质絮体上，依靠浮力使其上浮在水面，从而实现固液的高效分离，微纳米气泡电位高、与悬浮物的接触时间较长使气泡与悬浮物黏附效率提高，从而气浮效率可大大增强。比较了微米气泡气浮工艺与传统气泡气浮工艺对印染废水的预处理效果。结果表明：微纳米气泡气浮工艺能够减少絮凝剂的投加量并能加快预处理的速率，相比传统气泡，微纳米气泡对 COD、色度和油的去除效率要高出 30, 110, 40 个百分点，处理后废水的可生化性由 0.290 提高至 0.363。有学者提出了利用微纳米气泡治理含藻污水，将藻类俘获在气泡表面，实现清水与蓝藻的分离。

2.3 微纳米气泡在强化臭氧化中的应用

臭氧是一种强氧化剂，被广泛用于水体中无机和有机化合物的去除，改善饮用水的口感和色度。虽然臭氧具有强氧化性，但本身却无法氧化分解一些有机物或将有机物彻底分解。而研究发现，臭氧微纳米气泡却能有效地分解一些难分解的有机物，微气泡破裂瞬间可激发产生大量羟基自由基，增强对污染物的分解效果。利用臭氧微气泡与普通气泡对模拟印染废水进行处理试验，臭氧微气泡工艺每消耗 1g 臭氧去除 TOC 的量是普通气泡工艺的 1.3 倍，自由基的数量也较高，处理效果显著优于普通气泡。考察了微气泡臭氧化工艺的污泥减量化效果，对比传统的臭氧气泡接触工艺，微气泡臭氧化可显著增强臭氧的利用率、提高污泥的溶解率。微气泡系统中臭氧的利用率大于 99%。

2.4 微纳米气泡在增强生物活性中的应用

研究发现微纳米气泡对动植物有促进生物活性的作用，这种作用并非只是溶解氧增加的结果。在相同溶解氧条件下，在微纳米气泡溶液中培养的生菜，其生长速度要快于不含微纳米气泡的溶液的生长速度，所以微纳米气泡可在细胞生理活动中发挥作用。将微纳米气泡技术用于净化海底污泥，利用微纳米气泡对细菌生物活性的促进作用，来加快对污泥中污染物的降解，微纳米气泡不仅可提升微生物对污泥的净化效果，而且净化时间还大大缩短。

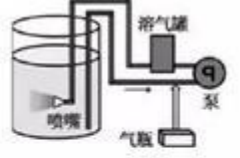

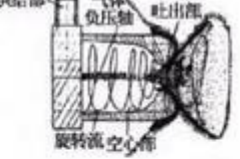
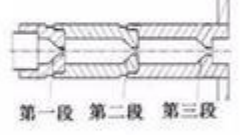

3 微纳米气泡发生装置

根据微纳米气泡产生的不同机制可将现有的微纳米气泡产生方式分为分散空气法、溶气释气法、超声空化法、电解法、化学法等。超声空化法是利用超声波引起的压力变化使液体内部产生空化，从而产生微纳米气泡。化学法则是投加化学药品，利用其化学反应生成微纳米气泡。电解法利用水或其他物质电解产生微纳米气泡。上述 3 种方法一般适用于所需气泡的数量较少、尺寸精度要求较高

嘉盛（香港）科技有限公司

的领域，如高精度传递、船舶减阻等。在对气泡需求量较大且直径范围要求不高的水处理应用中溶气释气法和分散空气法则最为常用，详细介绍见表 1。

表 1 常用微纳米气泡发生装置及其优缺点比较

分类	原理	优点	缺点	实例图片
溶气释气法	<p>加压溶气 减压释气 通过加压使空气强制溶解于水中，形成过饱和状态，然后减压气体重新释放出来，产生大量微气泡。气泡的大小和强度取决于释放空气时的各种条件和水的表面张力。</p>	<p>加压条件下，空气的溶解度大，产生气泡的数量多，粒度均匀，上浮稳定。</p>	<p>工作时须先将气体溶于水，后通过释气产生微气泡，整个过程不连续，微气泡的产生效率低。</p>	
压力溶气叶轮散气	<p>舍弃先溶气后释气的理念，直接采取叶轮组件直接散气产生微气泡，或结合压力溶气与叶轮散气，同时实现气液混合、增压溶气、减压释气 3 个过程。</p>	<p>气液混合、增压溶气、减压释气三个过程在 1 个泵内完成，提高了气泡发生效率。</p>	<p>原理简单，但实际操作复杂，有时形成的气泡较大，直径很难控制在 50 μm 以下。</p>	
分散空气法	<p>高速旋流 气液混合流体进入装置空心部旋转，比重差异使气体在中心轴形成负压气体轴，负压气体轴的气体通过外部液体和内部高速旋转液体之间缝隙时被切断变为微纳米气泡。</p>	<p>可快速产生大量微纳米气泡。气泡浓度、均匀性方面表现出较好的优势，溶氧效率高。</p>	<p>气体吸入量难以控制，流体参数变化严重影响气泡释放，流路复杂，加工难度高。</p>	
	<p>过流断面渐缩突扩 过流断面逐渐缩小，后突然扩大，水流在通道内剧烈碰撞，形成涡流，对气泡进行切割，过流断面再次收缩时，流态剧变，紊动更为剧烈，气泡进一步变小，最终产生微纳米气泡。</p>	<p>流道较宽，不宜堵塞，混合搅拌作用较强，维修方便。</p>	<p>内壁加工光洁度要求高，水质水量变化幅度较大时，难以调节充氧量。</p>	
	<p>微多孔结构 利用某些介质（冶金粉末、陶瓷或塑料作材料，再掺以适当的黏合剂，在高温下烧结而成）的微多孔结构，当压缩气体经过微孔介质时，被微孔切割成微纳米气泡。</p>	<p>该方式相对简单，微孔介质孔径越小，分布越窄，形成气泡粒径越小越集中。</p>	<p>由于介质的孔径很小，对于装置的制造加工要求相对较高，而且容易造成堵塞。</p>	

传统溶气释气法主要由 3 部分组成：即压力溶气系统、溶气释放系统、气浮分离系统。虽被广泛应用于气浮技术中，但仍存在一定不足，如能源利用不合理，产生微气泡不连续且效率较低。该方法主要有以下两方面的演进：一是在保留原有先加压溶气后减压释气的理念，提高气液两相气压差和降低气液两相界面张力。通过投加表面活性剂可以将溶气罐的操作压力从 3 MPa 降低到 2 MPa，显著降低 33%。二是舍弃原有先溶气后释气的理念，而是直接采取叶轮组件直接散气产生微气泡，或压力溶气技术与叶轮散气技术相结合，这一理念促使了微纳米气泡泵的出现。

分散空气法主要是通过高速旋流、水力剪切等方式制造极端条件，把空气反复剪切破碎，混合在水体中以产生大量的微纳米气泡。高速旋流法最先由日本提出，基于高速旋流的原理，重新设计优化了微纳米装置，可大量且高效地产生气

嘉盛（香港）科技有限公司

泡，气泡直径范围缩小到 $5\text{nm}\sim 20\ \mu\text{m}$ 。过流断面渐缩突扩使气液混合流体经过反复的收缩、扩散、撞击、反流、挤压和旋流最终产生微纳米气泡，文丘里管、多次穿孔、卡门涡街等类型的微纳米气泡发生装置均是基于上述原理。对于微多孔结构，最先出现的装置是扩散盘，压缩气体通过多孔板上的微孔进入水体，为了使从微孔产生的气泡尽可能的小，扩散盘通过旋转的方式产生剪切力使气泡破碎至合适的尺寸。提出多孔管制造微气泡，利用金属微孔管内外压差提供推动力，推动管内气体从微孔管上的微孔流出，在管外壁形成微气泡，再通过管外高速流过的剪切流将气泡带走，产生的气泡直径为 $20\sim 70\ \mu\text{m}$ 。研究了孔径更小、分布更均匀的陶瓷微孔膜管制造微气泡，结果发现陶瓷微孔膜管无论从产生气泡的性能，还是物化性能方面均优于金属微孔膜管。近年来，一种采用 SPG 膜作为气-液分散介质的微纳米气泡产生方法得到人们的关注。

虽然微纳米气泡在水体修复中的优势明显，现有微纳米气泡发生装置亦可大量产生微纳米气泡，但在水处理领域的应用中并非十分普遍。相比传统的曝气设备(鼓风曝气、机械曝气)，微纳米气泡装置在结构构造、运行能耗、稳定性方面还存在不足，如装置加工比较困难，曝气头易堵塞，部分装置对气液混合流体速度要求高等问题。开发出结构简单、功耗较低、性能优良的发生装置是微纳米气泡技术应用中亟待解决的问题。

4 结语与展望

微纳米气泡所表现出的特性远远超出了人们对传统气泡的认识，对气泡的应用不再仅局限在减小气泡直径来增加溶氧效率，而是更广泛地探究微纳米气泡更多的潜在特性，如强化臭氧化，促进生物活性等，强调微纳米气泡装置与其他技术联用，使得微纳米气泡在水处理领域的应用前景更加广阔。

现有微纳米气泡发生装置的工作原理不同，使用时对装置选择要有针对性，过流断面渐缩突扩的微纳米气泡发生装置，充氧量调节幅度不大，水量水质变化幅度较大时不宜采用，而在既需提高溶解氧又需对水体进行混合搅拌的领域具有较大优势。

对于微纳米气泡发生装置，其性能仍需优化，流体数值计算模拟可以考察流动的细微结构以及发展过程，可进一步提高对微纳米气泡发生机理的认识，有利于提出高效最优的方案，所以需加强对微纳米气泡发生装置的数值计算模拟。