

# 微孔介质发泡技术孔径 对微气泡质量影响的实验研究

蔡小垒<sup>1</sup>, 陈家庆<sup>1,2\*</sup>, 杨 驰<sup>2</sup>, 潘威丞<sup>2</sup>, 牛任杰<sup>2</sup>

(1.北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2.北京石油化工学院, 北京 102617)

**摘要:**通过自行搭建的微气泡粒径在线测量评价平台与气浮柱处理含油污水实验平台,系统讨论了微孔材料孔径对所产生的微气泡粒径分布以及含油污水处理效果的影响。研究表明,微孔材料表面的微孔本质上由材料按压成型后自然形成的不规则微孔通道,并非均匀且排列整齐分布;当微孔孔径分别为 0.2、1.0、3.0  $\mu\text{m}$  时,产生的微气泡平均粒径分别为 39.42、43.89、45.07  $\mu\text{m}$ ,微孔孔径越小,产生的微气泡平均粒径越小,越有利于油水分离效率的提高。

**关键词:**微孔介质发泡;孔径;气泡粒径;分离效率

中图分类号:O359

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)07-0159-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.07.038

## Experimental study for effect of micro-pore diameter on micro bubble quality by using micro-porous medium

CAI Xiao-lei<sup>1</sup>, CHEN Jia-qing<sup>1,2\*</sup>, YANG Chi<sup>2</sup>, PAN Wei-cheng<sup>2</sup>, NIU Ren-jie<sup>2</sup>

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2.Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** The effects of micro-porous material pore diameter on the generated micro bubble diameter and treatment efficiency of oily sewage are researched through using the online measurement and evaluation system of micro bubble diameter and the experimental system for oily sewage treatment by flotation column. The experimental results show that the micro-pores on the surface of micro-porous medium are essentially irregular pore channels naturally formed by pressing modeling of materials, which is far from uniform or orderly distribution. When the micro-pores diameter are 0.2  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$ , the average diameters of the micro bubbles generated are 39.42  $\mu\text{m}$ , 43.89  $\mu\text{m}$  and 45.07  $\mu\text{m}$  respectively. The smaller the micro-pore diameter, the smaller the average diameter of micro bubble is, and the more conducive to the improvement of oil-water separation efficiency.

**Key words:** micro-porous medium foaming; micro-pore diameter; micro bubble diameter; separation efficiency

气浮分离过程中微气泡质量是影响碰撞效率进而决定分离效率的关键<sup>[1-2]</sup>。微孔介质发泡技术是一种新型高效的微气泡发生技术,具有结构简单、运行成本低和发泡质量较高等优点而逐渐受到了广泛关注<sup>[3-4]</sup>。在围绕微孔介质发泡特性研究方面,清华大学袁乃驹教授等于1992年对液下浸没板式微孔介质上的气泡形成规律进行了研究<sup>[5]</sup>。自2006年以来,日本宫崎县工业技术中心的Masato Kukizaki等研究了水质、SPG(shirasu porous glass)膜孔径(43~85 nm)以及工况参数对管式微孔介质气泡发生器所产生的微细气泡粒径分布的影响<sup>[6]</sup>。2011年左右,日本熊本大学Michio Sadatomi等利用高速摄影方法研究了孔板节流降压-环空微孔介质负压吸气管式微细气泡发生器所产生的微气泡粒径分布,但所得气泡的平均直径在0.12~0.63 mm,算

不上真正意义上的微细气泡。2012年以来,清华大学黄霞教授等基于显微镜观察法研究了SPG膜产生微细气泡的过程以及对好氧活性污泥法中混合液特性的影响,讨论了微细气泡曝气过程中SPG膜的结垢和结构变化等,遗憾的是结论中仅仅描述了特定条件下微细气泡的直径在20~50  $\mu\text{m}$ <sup>[7-8]</sup>。但纵观国内外已有的研究工作,迄今尚未建立完备的微孔材料微孔孔径大小与微气泡粒径分布,以及微气泡粒径分布对含油污水处理性能影响的有效关系,因此无法为微孔介质材料孔隙的选择以及气浮处理或气液传质过程中的工程化设计研发提供硬件设备和基础性数据支撑。本文中基于管式微孔介质气泡发生器,自行搭建微气泡粒径在线测量评价平台与气浮柱处理含油污水实验平台,分别针对0.2、1.0、3.0  $\mu\text{m}$  3种级别微孔孔径的微孔管式微气泡发生

收稿日期:2016-12-21;修回日期:2017-05-04

基金项目:北京市属高等学校“长城学者”培养计划资助项目(CIT&TCD20150317);2014年度北京市教委科技发展计划重点项目暨北京市自然科学基金重点项目(B类)(KZ201410017019);国家级URT项目(2013J00042)

作者简介:蔡小垒(1987-),男,博士生,研究方向为油气水多相流高效分离技术与设备;陈家庆(1970-),男,教授,博士生导师,研究方向为油气水多相流高效分离技术与设备,通讯联系人,010-81292237, jiaqing@bupt.edu.cn。

器所产生的微气泡粒径分布进行了在线带压测量,以后利用这 3 种微气泡发生器为相同水质的含油污水气浮分离过程提供微气泡源,讨论了气浮分离过程中油水分离特性的变化趋势,以期进一步解释微孔介质发泡技术发泡机理以及微孔孔径对气浮分离过程的影响,从而推进微孔介质发泡技术以及气浮技术的应用和发展。

## 1 实验仪器与方法

### 1.1 微气泡发生器

本文中所示管式气泡发生器结构如图 1 所示,主要由外筒体、微孔材料管以及上下端盖等组成,其中微孔材料管将外筒体与上下端盖之间围成的内部空间分割为外部环形高压气腔和内部圆柱形水腔 2 部分。微气泡发生器在开启时,一般应首先供给高压气体使整个环形高压气腔维持较高的气压,然后再经微气泡发生器处理水入口通入液体,以避免处理水逆流通过微孔材料管而导致杂质堵塞材料内部微孔。工作过程中,微气泡的产生过程主要包括膨胀、分离和破碎 3 个阶段<sup>[9]</sup>。发泡过程中,由于气液

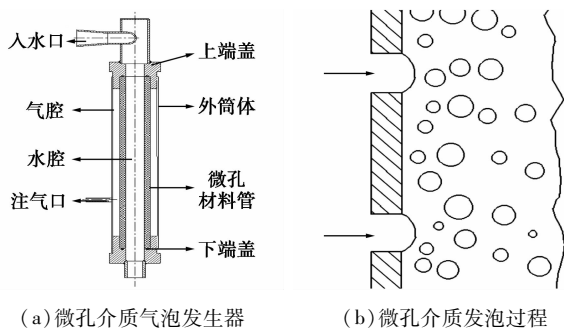


图 1 微孔发泡技术产生微气泡机理

接触面积较大,因此会有部分气体溶解入处理水,经减压释放后形成溶气释放过程,也有利于进一步强化气浮分离效果。本次实验过程中,分别针对微孔材料管孔径为 0.2、1.0、3.0  $\mu\text{m}$  的 3 个微气泡发生器进行了研究。

### 1.2 微气泡粒径在线测量方法

微气泡粒径测量方法采用激光衍射法,该方法测量速度快、误差较小、应用较为广泛<sup>[10]</sup>。微气泡粒径在线测试系统主要借助日本岛津公司的 SALD2100 激光粒度仪,该设备主要包括样品池、激光光源及光学元件、检测器等。测试原理主要是利用微气泡、油滴或颗粒等对光的散射或衍射现象实现,粒径不同产生衍射现象也不同;衍射光信号经傅里叶透镜后聚焦到光电探测器上,以将光信号转换成电信号并传输至电脑上;利用相应的内部测量软件对这些信号进行处理解析,最终得到颗粒粒径分布数据。测量过程中,为避免微气泡黏附在样品池内表面而对下次测量结果产生影响,还自行配套了样品池清洗管线。

### 1.3 气浮柱处理含油污水实验方法

气浮柱处理含油污水实验的主要目的是对微气泡发生器所产生的微气泡质量进行间接评价,进而确定微孔孔径对于气浮油水分离性能的影响。气浮柱处理含油污水流程主要由进水系统、气浮分离、回流注气 3 部分组成。进水系统主要作用是泵送含油污水进入气浮柱内;气浮分离部分主要是指逆流式气浮柱,该气浮柱高 2.53 m,底部设有循环排出口,中部偏下设有循环入水口,气浮柱顶部设有集油槽以收集浮选后富集的油相;回流注气部分主要是气

(上接第 158 页)

- [4] Chmielniak T, Sciazko M. Co-gasification of biomass and coal for methanol synthesis[J]. *Applied Energy*, 2003, 74(3/4): 393-403.
- [5] Walter A, Lagostera J. Feasibility analysis of co-fired combined-cycles using biomass-derived gas and natural gas[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(11): 2888-2896.
- [6] Adams II T A, Barton P I. Combining coal gasification, natural gas reforming, and solid oxide fuel cells for efficient polygeneration with CO<sub>2</sub> capture and sequestration[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92: 2105-2115.
- [7] Van Dijk C P, Rovner J M, Solbakken A, et al. Methanol from coal and natural gas: US, 4407973[P]. 1983-10-04.
- [8] 周齐宏, 胡山鹰, 陈定江, 等. 基于合成气的联供联产系统仿真[J]. *计算机与应用化学*, 2006, 23(2): 118-122.
- [9] 周齐宏, 胡山鹰, 陈定江, 等. 基于合成气的联供联产系统的 3E 分析[J]. *计算机与应用化学*, 2006, 23(3): 193-197.

- [10] Zhou L, Hu S Y, Chen D J, et al. Study on systems based on coal and natural gas for producing dimethyl ether[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48: 4101-4108.
- [11] 卞潮渊, 慕韩锋. 基于煤和天然气联合制取合成气工艺研究进展[J]. *化工进展*, 2016, 35(10): 3136-3141.
- [12] Salkuyeh Y K, Adams II T A. Combining coal gasification, natural gas reforming, and external carbonless heat for efficient production of gasoline and diesel with CO<sub>2</sub> capture and sequestration[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74: 492-504.
- [13] 刘敬尧, 何畅, 李璟. 以合成气为核心的多联供多联产集成能源化工系统[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(2): 293-298.
- [14] Song X P, Guo Z C. A new process for synthesis gas by co-gasifying coal and natural gas[J]. *Fuel*, 2005, 84(5): 525-531.
- [15] Adams II T A, Barton P I. Combining coal gasification and natural gas reforming for efficient polygeneration[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92: 639-655. ■

浮柱循环排水口与循环入水口之间连接的循环注气管路,主要由齿轮泵、微气泡发生器、配套用水/气管路以及阀门仪表等。实验过程中,实验所用含油污水由清水和 32# 白油按一定比例混合而成,为使油、水混合均匀稳定且不发生分层,实验前将油水两相利用静态混合器充分混合,浮油和分散油(粒径 > 10  $\mu\text{m}$ ) 占绝大部分,而乳化油(粒径 0.1 ~ 10.0  $\mu\text{m}$ ) 仅占 6.5% 左右,平均油滴粒径为 30.3  $\mu\text{m}$ 。实验过程中,油水分离效率由下式计算得出:

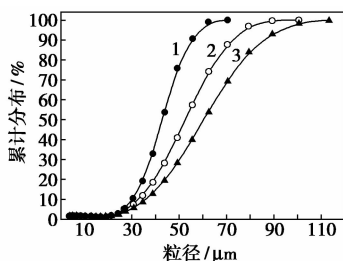
$$E = [(O_{in} - O_{out}) / O_{in}] \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $E$  表示分离效率;  $O_{in}$  表示初始含油浓度;  $O_{out}$  表示循环水含油浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微孔孔径对微气泡粒径分布的影响

图 2 所示为在处理水流量为 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$ 、注气比 10% 和注气压差 0.06 MPa 时,3 种微气泡发生器所产生的微气泡粒径累计分布和频率分布曲线。从图 2 中可以看出,3 种微气泡发生器所产生的微气泡粒径主要集中在 0 ~ 120  $\mu\text{m}$ ,微气泡粒径频率分布符合正态分布规律,相应的微气泡平均粒径分别为 39.42、43.89、45.07  $\mu\text{m}$ 。



1—累计分布(0.2  $\mu\text{m}$ ); 2—累计分布(1.0  $\mu\text{m}$ );  
3—累计分布(3.0  $\mu\text{m}$ )

图 2 不同处理水流量下微气泡平均粒径变化曲线

根据 Forrester 等提出的多孔材料表面单气泡形成理论模型<sup>[11]</sup>为:

$$d = (5d_0\gamma/C_D U_0 \rho_L)^{0.5} \quad (2)$$

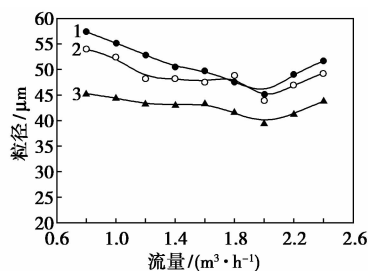
其中,  $C_D$  为流体剪切系数;  $U_0$  表示流体剪切流速;  $d_0$  为微孔孔径;  $\gamma$  为表面张力。

在相同注气比条件下,微孔孔径越小,其分割形成的微气流直径也越小,在相同液流流量的冲刷下切割形成的微气泡粒径也越小。可见改变微孔材料孔径大小能够实现调节微气泡平均粒径及其分布的目的。但由于微孔介质材料表面的微孔孔径不一且非均匀排列,因此并不能完全按照多孔材料表面单

气泡形成理论模型进行理论计算,而需要利用实验方法对微孔介质材料孔径与所产生的微气泡粒径分布建立经验关系,从而更好地为微气泡发生技术提供基础性数据支撑。

### 2.2 处理水流量对微气泡平均粒径分布的影响

图 3 所示为注气比 10%、注气压差 0.06 MPa 时,不同处理水流量下 3 种微气泡发生器所产生的微气泡平均粒径变化曲线。从图 3 中可以看出,处理水流量由 0.8  $\text{m}^3/\text{h}$  增加至 2.4  $\text{m}^3/\text{h}$  时,微气泡平均粒径分布曲线呈先减小后增大的趋势,且 3 种微气泡发生器所产生的微气泡平均粒径在处理水流量为 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$  时达到最小值,分别为 39.42、43.89、45.07  $\mu\text{m}$ 。



1—平均粒径(0.2  $\mu\text{m}$ ); 2—平均粒径(1.0  $\mu\text{m}$ );  
3—平均粒径(3.0  $\mu\text{m}$ )

图 3 不同处理水流量下微气泡平均粒径变化曲线

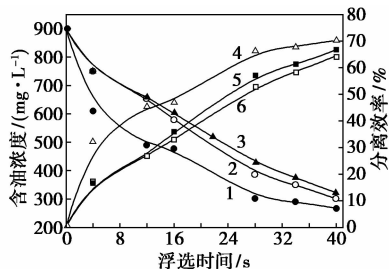
处理水流量主要是通过改变水流对于微孔管剪切分散的气流的剪切冲刷强度和微气泡之间碰撞聚并效率来影响所产生的微气泡粒径分布。

以微孔孔径为 3.0  $\mu\text{m}$  的微气泡发生器为例,当处理水流量由 0.8  $\text{m}^3/\text{h}$  增加至 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$  时,流体剪切应力由 2.23 Pa 增大到 11.08 Pa,增大了 3.97 倍,处理水流量的增加有效提高了流体对微气流的剪切冲刷作用,同时湍流强度的增加也相应地提高了微气泡之间的碰撞聚并效率,但由于此时剪切作用对微气泡粒径分布的影响起主要作用,因此导致微气泡平均粒径减小;当处理水流量由 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$  继续增加至 2.4  $\text{m}^3/\text{h}$  时,处理水剪切应力由 11.08 Pa 继续增大至 15.20 Pa,此时强湍流引起的总碰撞聚并效率的提高对微气泡粒径分布的影响起主要作用,导致微气泡平均粒径随处理水流量的增大而增大。

### 2.3 微孔孔径对气浮分离效率的影响

在保持初始污水含油浓度约为 900 mg/L、注气比为 6% 和处理水流量为 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$  条件下,计算分析了不同微孔孔径的微气泡发生器处理含油污水的

分离性能。如图 4 所示,气浮处理含油污水实验过程中,底部含油污水的含油浓度随时间逐渐降低,且变化趋势逐渐变缓;当浮选时间达到 40 min 时,微孔孔径为 0.2  $\mu\text{m}$  的微气泡发生器对应的油水分离效率最高为 70.3%,其次为微孔孔径为 1.0  $\mu\text{m}$  的微气泡发生器对应的分离效率为 66.6%,微孔孔径 3.0  $\mu\text{m}$  的微气泡发生器对应的分离效率最低,仅为 64.3%。可以得出,当微孔材料孔径在 0.2~3.0  $\mu\text{m}$  变化时,微孔管孔径越小,含油污水净化效果越好。



1—含油浓度(0.2  $\mu\text{m}$ ); 2—含油浓度(1.0  $\mu\text{m}$ );  
3—含油浓度(3.0  $\mu\text{m}$ ); 4—分离效率(0.2  $\mu\text{m}$ );  
5—分离效率(1.0  $\mu\text{m}$ ); 6—分离效率(3.0  $\mu\text{m}$ )

图 4 不同微孔孔径的微气泡发生器处理含油污水分离性能的变化曲线

主要原因在于,在固定注气比条件下,微气泡平均粒径越小,相应的处理水内微气泡数密度相对越大,越有利于提高微气泡与油滴之间的碰撞聚并效率,进而促进油水分离效率的提升。因此采用微孔介质发泡技术作为气浮用微气泡来源时,为保证气浮分离效率可以适当采用微孔孔径较小的微孔介质材料,使其能够产生足够数量密度和较小粒径的微气泡群,以满足气浮对微气泡质量的要求。但由于微孔孔径越小,其微孔被杂质堵塞几率也越大,因此选择微孔材料时也应考虑所处理含油污水内杂质情况。

### 3 结论

借助于自行搭建的微气泡粒径在线测量评价平台,研究了 0.2、1.0、3.0  $\mu\text{m}$  3 种微孔孔径的微孔介质微气泡发生器所产生的微气泡粒径分布,以及微孔孔径和水流量对气泡粒径分布的影响规律,同时利用气浮柱研究了微孔介质气泡发生器所产生的微气泡处理含油污水的分离性能,主要结论如下。

(1) 在处理量为 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$ 、注气比 10% 和注气压差 0.06 MPa 时,3 种微气泡发生器所产生的微气泡平均粒径分别为 39.42、43.89、45.07  $\mu\text{m}$ 。当微孔材料孔径在 0.2~3.0  $\mu\text{m}$  时,微孔孔径越小,所产

生的微气泡平均粒径越小。

(2) 处理水流量对气泡粒径分布的影响主要是通过改变水流对微孔渗出气流的剪切冲刷强度和微气泡之间碰撞聚并效率,在不同处理水流量的工况下研究了微气泡发生器所产生的微气泡平均粒径变化趋势,结果表明,3 种微气泡发生器在额定处理水流量 2.0  $\text{m}^3/\text{h}$  时所产生的微气泡平均粒径值达到最小,分别为 39.42、43.89、45.07  $\mu\text{m}$ 。

(3) 利用气浮分离效率间接评价微气泡质量结果表明,微孔介质材料的微孔孔径越小,产生的微气泡平均粒径越小,越有利于油水分离效率的提高,因此在选择微孔介质材料时,可以通过选择孔径更小的微孔介质材料来提高所生产的微气泡质量,进而提高气浮分离效率。但由于孔径越小,其被堵塞几率越大,因此应在保证分离效率的同时适当增大微孔介质孔径,以提高微气泡发生器的使用寿命。

### 参考文献

- [1] 陈家庆.环保设备原理与设计[M].2版.北京:中国石化出版社,2008.
- [2] 莫同鸿,段文益,伍远平,等.气旋浮高效油水分离器试验研究[J].石油机械,2010,38(12):5-8.
- [3] Fakhru'l-Razi A, Pendashteh A, Abdullah L C. Review of technologies for oil and gas produced water treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170: 530-551.
- [4] 蔡小垒,王春升,陈家庆,等. BIPTCFU-III 型旋流气浮一体化采出水处理样机及其在秦皇岛 32-6 油田的试验分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26(6): 80-85.
- [5] 李琳,丁富新,马树东,等.微孔介质上气泡形成规律的研究[J].清华大学学报:自然科学版,1993,33(3):34-40.
- [6] 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.
- [7] 吴胜军,方为茂,赵红卫,等.陶瓷微孔管制造微气泡的研究[J].膜科学与技术,2009,29(6):61-65.
- [8] Zhang Lei, Masahiro Shoji. Aperiodic bubble formation from a submerged orifice[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(18): 5371-5381.
- [9] Nagra H, Kamotani Y. Prediction of bubble diameter at detachment from a wall orifice in liquid cross-flow under reduced and normal gravity conditions[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(1): 55-69.
- [10] 范欣,何利民,王鑫,等.气浮工艺中微气泡的数码显微动态测量[J].工程热物理学报,2010,31(7):1159-1162.
- [11] Arakawa T, Yamamoto T, Shoji S. Micro-bubble formation with organic membrane in a multiphase microfluidic system[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2008, 143(1): 58-63. ■