



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.202002020

中图分类号 X705

文献标识码 A

张伯涵, 许萧, 杨强. 气泡尺寸对清洗固体表面油脂及颗粒污染物的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 375-382.

ZHANG Bohan, XU Xiao, YANG Qiang. Effect of bubble size on cleaning of oil and particles on solid surface[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 375-382.

气泡尺寸对清洗固体表面油脂及颗粒污染物的影响

张伯涵¹, 许萧¹, 杨强^{1,2,*}

1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237

2. 华东理工大学, 高浓度难降解有机废水处理技术国家工程实验室, 上海 200237

第一作者: 张伯涵(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 气泡强化污染物去除机制。E-mail: ecust_zbh@163.com

*通信作者: 杨强(1983—), 男, 博士, 教授。研究方向: 含油废水处理技术。E-mail: qyang@ecust.edu.cn

摘要 为明确气泡清洗技术在罐底油泥清洗中的应用情况, 考察了气泡尺寸差异对固体表面清洗效果的影响。搭建了玻璃表面油污气泡清洗可视化实验装置, 并设计了气泡发生器。该发生器可通过调节气液比产生多种尺寸分布的气泡。实验中产生的气泡直径分布于 80~1 200 μm 。研究了气泡尺寸、清洗时间、距离和角度等参数对清洗效果的影响, 结果表明, 在液体流量为 2.5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下, 清洗去除率随气泡尺寸的增大而提高, 气泡的平均直径为 800 μm 时的清洗效果最好, 能够将去除率从用水清洗的 4.5% 提高到 68.3%, 且当基底与水流方向为 45° 时的清洗去除率高于垂直或平行放置。上述结果说明, 气泡撞击和破裂产生的水射流和涡流冲刷作用是主要的清洗机制。本研究结果可为高效处理油泥污染问题提供理论和实践参考, 为罐底油泥清洗开拓新的解决路径。

关键词 气泡; 气泡发生器; 固体表面; 罐底油泥清洗

在油田和炼油厂的生产、储运以及含油污水处理过程中, 会产生大量含油污泥。妥善处理与处置含油污泥, 避免造成环境污染一直是油田和环保部门非常重视的问题^[1]。含油污泥主要分为落地油泥、罐底油泥和炼油厂油泥。沉积在储罐罐底的油泥会直接影响油品质量, 所以罐底的定期清理必不可少^[2]。传统的射流清洗方法会造成水资源浪费, 使用化学清洗剂可能造成二次污染。而气泡清洗法具有低能耗和自身清洁的特点, 为罐底油泥的去除与清洗提供了新的手段。

气泡清洗法已被广泛应用在金属表面清洗、瓷器清洗等固体表面清洗领域。张学发等^[3]验证了微气泡在金属脱脂应用上的可行性和优越性; CHAHINE 等^[4]建立了空化气泡清洁表面颗粒的力学模型; 黄河等^[5]的研究验证了气泡清洗瓷器表面的安全性。除了实验验证和应用研究, 很多学者也对气泡清洗过程和机理做过论证。TUZIUTI^[6]研究了微米级气泡清洗表面油脂的过程; YAMASHITA 等^[7]发现空化气泡的物理作用是去除材料表面附着颗粒的主要因素; REUTER 等^[8]研究了单个气泡去除玻璃表面附着颗粒机理; MAEKAWA 等^[9]认为微小气泡的上浮并带走油脂是固体表面清洗的机制之一。以上研究都表明气泡清洗在固体表面清洗领域具有应用潜力。

收稿日期: 2020-02-04; 录用日期: 2020-05-02

基金项目: 中国检验检疫科学研究院横向课题(2018JK020)

为明确气泡清洗技术在罐底底泥清洗中的应用情况,本研究考察了气泡尺寸差异对固体表面清洗效果的影响。通过搭建玻璃表面油污气泡清洗可视化实验装置,设计了可产生多种尺寸分布的气泡发生器,以研究不同尺寸气泡对固体表面粘附性污染物清洗效果的差异,并分析清洗时间、距离和角度等参数对清洗效果的影响,以期为高效处理油泥污染问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 气泡发生器

常用的气泡产生方法有加压溶气法和流体剪切法^[10]。加压溶气法的原理是在对流体加压使气体过饱和溶解后,突然释放压力使气体以微小气泡的形式逸出,产生的气泡尺寸一般在100 μm以下^[11];流体剪切法是依靠湍流剧烈的剪切力在气液流体中产生气泡,比较常见的是文丘里式和涡流式^[12-13],产生的气泡尺寸大约为数百微米^[14]。本研究参考现有气泡发生的方法和原理,优化设计了气泡发生器。发生器的主要结构包括文丘里结构的入口部分和具有中心圆柱的旋流腔(见图1),通过调节气泡发生器的气液比产生不同尺寸的气泡。

图1为实验采用的自制气泡发生器的结构示意图。气泡发生器的尺寸为58 mm×26 mm×61 mm,使用树脂材料3D打印技术制作完毕供实验使用。水通过水泵送至气泡发生器左侧的液体入口,空气通过空气压缩机送至右侧的气体入口。入口部分的文丘里结构能够使流体在以不同气液比例进入喷头时实现稳定混合;气液流体向下一起进入下部的旋流腔体,依靠旋流作用,部分空气在中心螺旋圆柱的表面被挤压,压力增大使更多空气溶入水中,并在出口处因突然释压以微小气泡形式析出,未溶解的部分空气也因流体剪切力被分割为气泡形态,从而实现调节进气和进水的比例获得不同尺寸范围的气泡。

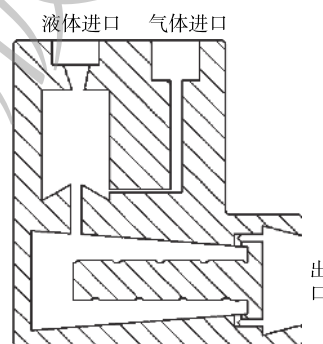


图1 气泡发生器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bubble generator structure

1.2 实验装置

本研究搭建了气泡对玻璃表面油脂及颗粒污染物的可视化清洗实验装置(见图2)。污染物是黏度为0.350 Pa·s的硅油和粒径为5~50 μm的二氧化硅颗粒的均匀混合物。水经过水泵(江苏威乐泵业科技有限公司YE2-80M1-2,中国)通过气泡发生器进入水箱,再由水箱出口回到水泵,形成循环。水箱为玻璃材质,尺寸为40 cm×30 cm×30 cm,边壁挂有槽,用于固定微气泡发生喷头的位置和放置带有污染物的基底,水槽距离底部17 cm,距离水面8 cm。涂有污染物的玻璃基底放在气泡发生器出口的正前方,通过调整基底到气泡发生器出口处的距离和基底的倾斜角度来研究不同因素对清洗效果的影响。控制液体流量保持 $2.500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 不变,调节进气流量从 $0.125 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 至 $1.000 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,从而研究不同气液比下产生的不同尺寸气泡对清洗效果的影响。通过高速摄像机拍摄产生的气泡图像,使用MATLAB软件统计气泡尺寸分布,并通过显微镜观察清洗前后玻璃表面污染物的变化。

1.3 测量与分析方法

通过图像方法^[14]测量气泡尺寸。使用配

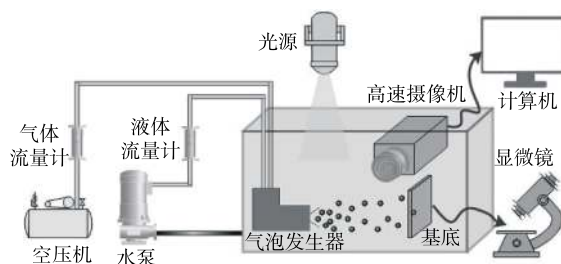


图2 实验流程示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

有微透镜 (AF Micro-Nikkor, 60 mm, f/2.8D) 的高速相机 (Photron Fastcam SA-X2, 日本) 记录气泡的运动, 并通过定位摄像机焦点位置的标尺来测定每个实验的长度像素。由于气泡边界清晰, 可将气泡分离成单独和重叠的气泡, 用 MATLAB 分析图像获得气泡的几何尺寸^[15], 然后再根据图像分析结果统计出不同操作条件下产生的气泡尺寸分布情况。

污染物清洗效果的测量分析分为直接观测和称重量化两个部分。在清洗前后使用显微镜 (上海光学仪器一厂 XSP-8CA, 中国) 直接观察基底上的污染物。由于污染物中混有二氧化硅颗粒, 可以直观地表征污染物的残留量、分布和位置变化。每次实验时, 在同一基底上涂抹 0.100 0 g 污染物, 误差控制在 1% 以内, 并在每次清洗前后用电子天平称出污染物质量, 按照式 (1) 计算去除率。

$$R = \frac{m_{\text{清洗前}} - m_{\text{清洗后}}}{m_{\text{清洗前}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为去除率; $m_{\text{清洗前}}$ 为清洗前玻璃基底上污染物的质量, g; $m_{\text{清洗后}}$ 为清洗后玻璃基底上残留污染物的质量, g。

2 结果与讨论

2.1 气液比对气泡尺寸分布的影响

在相同液体流量下, 进气流量控制在 $0.125 \sim 1.000 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 进行实验, 产生的气泡经高速摄像拍摄后图像如图 3 所示, 气泡的尺寸分布数据见图 4。由图 3 和图 4 可见, 随着气液比的增大, 气泡尺寸也逐渐增大; 当气液比为 0.05 时, 气泡尺寸较小, 平均尺寸小于 $100 \mu\text{m}$; 随着气量的增加, 大气泡从无到有, 并且逐渐增多, 而微小气泡的数量变化不大。当进气量较小时, 进入喷头的气

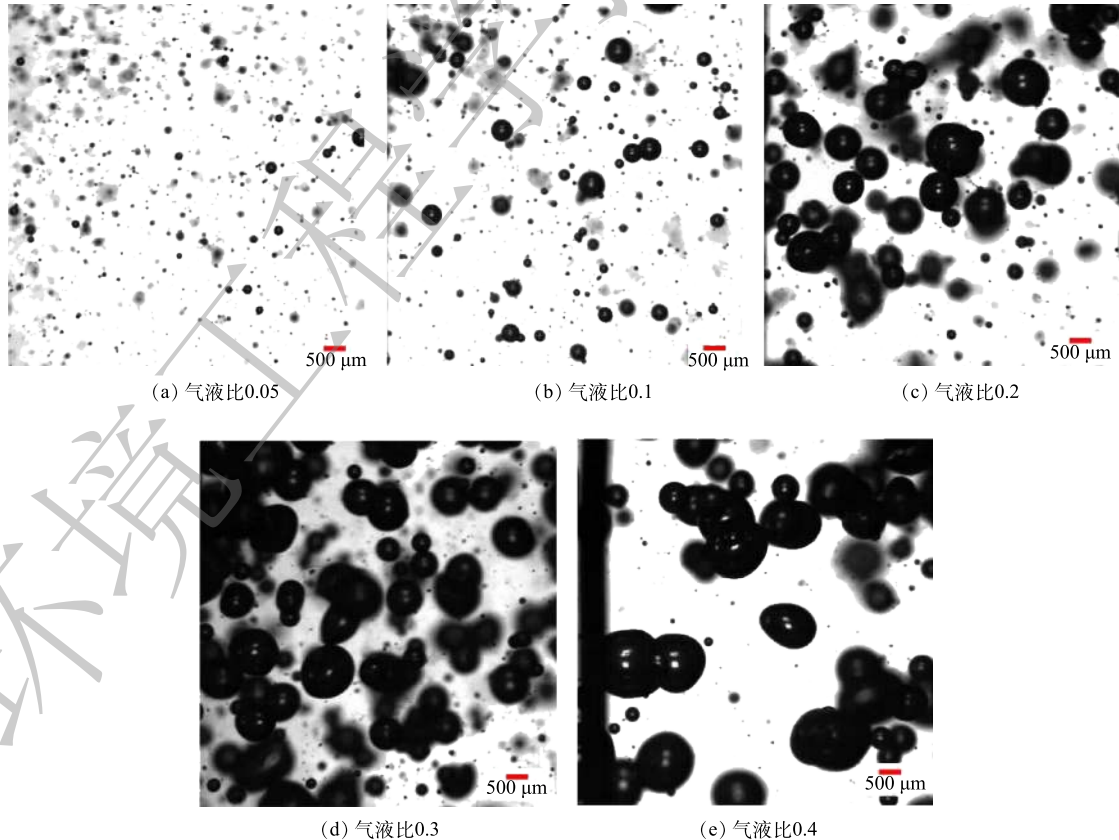


图 3 气液比分别为 0.05~0.4 时体系中气泡图像
Fig. 3 Bubble images at gas-liquid ratio of 0.05~0.4

体在旋流作用下被挤压在中心实体圆柱表面, 增大的压力使其溶于水中, 并在出口常压释放时以微气泡的形态析出, 此类气泡尺寸一般为数十微米^[16]。然而, 由于溶解度和固定接触面积的限制, 只有一定量的气体能够溶入水中。随着进入喷头的气量增大, 剩余气体被高速流体剪切为气泡, 此类气泡尺寸较大, 并随操作条件的变化而变化。根据该结果, 当气液比为0.05~0.4时, 可分别得到平均尺寸约为80、250、500、800及1 200 μm 的不同尺寸气泡分布状态。这一结果可为后续实验对清洁效果的对比提供控制参数。

2.2 气泡尺寸对清洗效果的影响

当控制清洗时间为60 s、液体流量为 $2.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 在与水流垂直的方向放置基底玻璃片, 并使之与气泡发生喷嘴出口相距10 cm, 每次实验固定初始污染物为0.100 0 g, 考察污染物的清洗效果。图5为不同气液比下, 清洗前后污染物在玻璃载片上残留样貌的显微镜图像; 图6为清洗后玻璃载片上污染物的残留量。当仅使用水流清洗时, 污染物仍残留0.095 5 g, 且通过对比清洗前后的显微镜照片可知, 污染物样貌并无明显变化; 当调节气液比为0.05时, 清洗效果与仅用水清洗时的效果相近, 污染物残留量仅降低到0.092 4 g; 当调节气液比为0.1时, 清洗效果有明显提升; 而当气液比大于0.2时, 玻璃基底上开始出现部分清洁区域, 并且因硅油减少而使油膜变薄, 未被去除的颗粒物在流体冲击作用下形成污染物聚集; 当气液比为0.3和0.4时, 玻璃基底表面出现大部分清洁区域, 污染物质量降低到0.035 0 g以下, 所以在2种工况下玻璃基底上油污清洗的强化作用很明显。

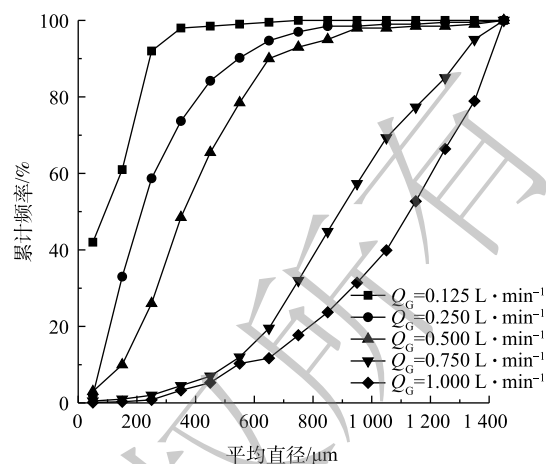


图4 气液比分别为0.05~0.4时体系中气泡尺寸分布
Fig. 4 Bubble size distribution at gas-liquid ratio of 0.05~0.4

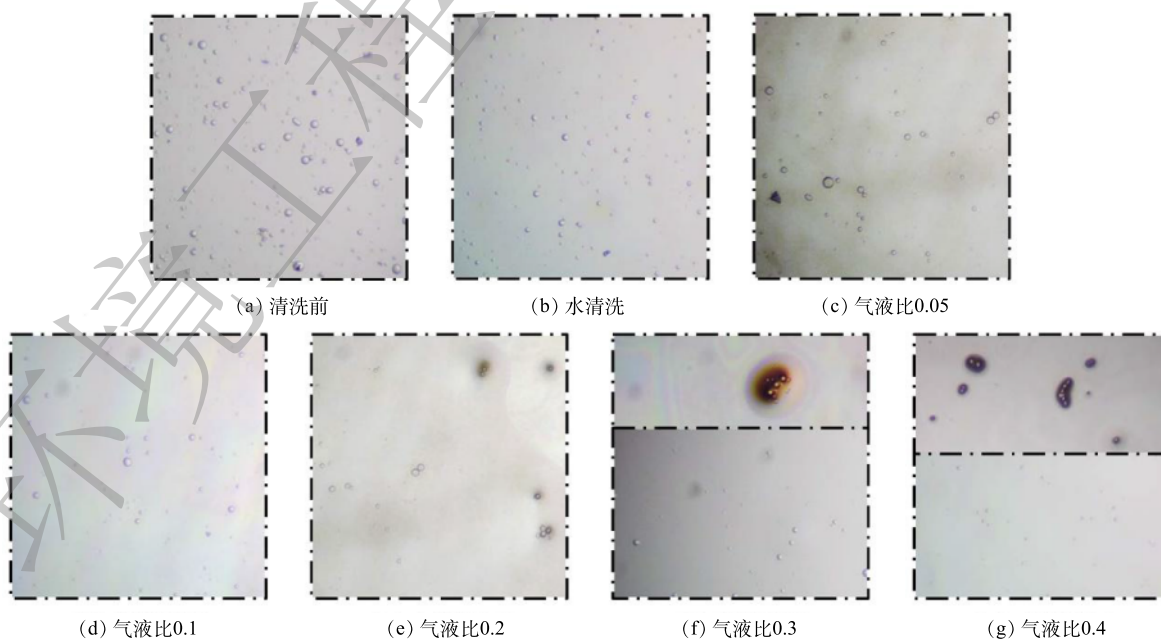


图5 玻璃基底上污染物的显微图像

Fig. 5 Microscopic images of contaminants on the glass substrate

通过对气泡清洗玻璃基底上污染物去除率的计算,可以更直观地观察气泡尺寸差异的影响(见图 7)。水清洗的去除效率仅为 4.5%,加入平均直径为 80 μm 的微小气泡后,对去除效率的影响也非常有限,去除率仅为 7.8%。然而,随着气泡尺寸的增加,去除率也随之逐步提高。平均尺寸为 800 μm 的气泡对污染物的清洗效果最好,去除效率达到了 68.3%。而气液比为 0.4 时,气泡平均尺寸为 1 200 μm ,去除率却略低于 800 μm 的气泡。分析其原因,可能是由于此时的气泡更大,但数量相对减少,更容易破裂和上浮,在玻璃基底上的作用范围相对减小。根据实验现象和结果,结合现有研究分析,气泡清洗固体表面油脂的过程和机制如图 8 所示。流体夹带气泡接触油脂层,气泡流动引起气水界面快速变化^[6],当较大气泡溃灭时,形成微小水射流并在周围形成涡流^[8,17]。根据 FOLDYNA 等^[18]的研究,与连续的液体射流相比,一滴或一团液体撞击目标会产生更高的冲击压力,从而对油脂带来额外冲击并促使其脱落;另外,尺寸微小的气泡具有比表面积大、表面带负电荷等特性,能够粘附脱落的油脂^[3],与尾流夹带作用携带的油脂一起上浮^[19],最终完成清洗去除过程。

2.3 清洗参数对清洗效果的影响

在相同操作条件下,产生的气泡在不同位置有不同的尺寸分布,且处理时间的变化也会影响对污染物的去除,所以又进一步研究了清洗距离和时间对清洗效果的影响。实验条件为,控制气体流量至 0.750 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,即保持气液比为 0.3 固定不变,每次实验固定初始污染物为 0.100 0 g,分别把玻璃基底放置于距离气泡发生器出口 8 cm 和 10 cm 处,并分别处理 30、60 和 90 s。表 1 为不同实验条件下,清洗后玻璃基底上污染物残留量;图 9 为不同清洗时间和距离条件下的去除率。结果表明,随着清洗时间的增加,去除效果是增强的。当处理时间固定在 30 s 时,清洗距离为 8 cm 的条件下,去除效率为 39.5%,高于清洗距离为 10 cm 的去除率(19.1%);而当处理时间为 60 s 时,清洗距离为 8 cm 的条件下去除效率提高至 71.0%,而清洗距离为 10 cm 条件下去除效率也有较大提升,两者相差仅 2.8%;当处理时间增加至 90 s 时,清洗距离 10 cm 条件下去除效率达到 89.0%,反而高于 8 cm 距离条件下的 81.4%。分析其原因,距离 10 cm 处的气泡分布更为分散,作用范围更大,在处理时间更充足的情况下会累积更好的清洗效果。由此说明,继续增加处理时间也不能较大幅度地提升清洗效果,而气泡清洗作用是有距离限制的,即在其他反

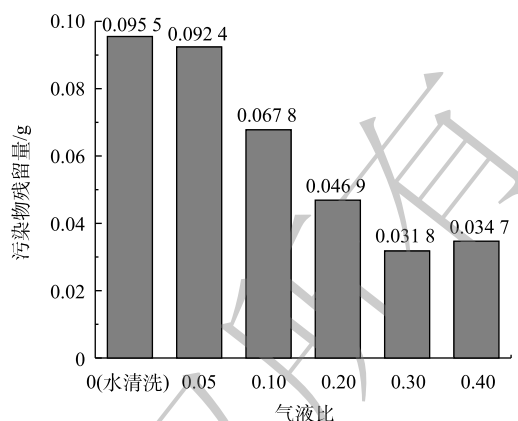


图 6 不同气液比下清洗后玻璃基底上污染物的残留量

Fig. 6 Residual contaminants on glass substrates after cleaning at different gas-liquid ratios

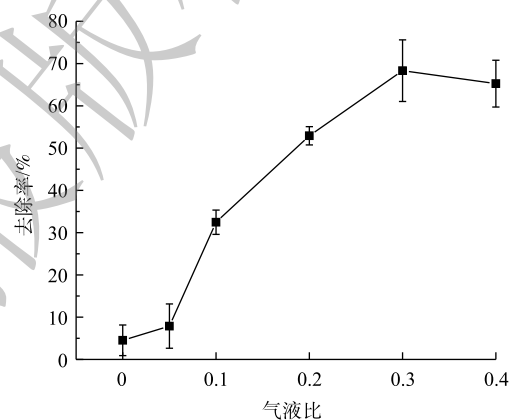


图 7 不同尺寸气泡清洗玻璃基底上污染物的去除率

Fig. 7 Removal efficiency of cleaning contaminants on glass substrates by bubbles with different sizes



图 8 清洗过程和机制示意图

Fig. 8 Schematic diagram of cleaning process and mechanism

表1 不同时间和距离清洗后玻璃基底上污染物的残留量

Table 1 Residual contaminants on glass substrates after cleaning at different times and distances

清洗距离/cm	清洗时间/s	污染物残留量/g
8	30	0.060 5
8	60	0.029 0
8	90	0.018 6
10	30	0.080 9
10	60	0.031 8
10	90	0.011 0

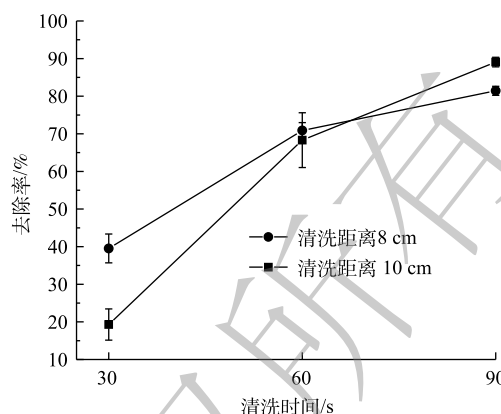


图9 不同时间和距离清洗玻璃基底上污染物的去除率
Fig. 9 Removal efficiency of cleaning contaminants on glass substrates at different times and distances

应条件不变的情况下, 存在一个最佳清洗距离, 所以在清洗过程中应选择合适的清洗距离和时间。

另外, 基底放置的角度对清洗效果也有影响。玻璃基底表面与清洗水流流动方向的夹角即清洗角度。清洗角度为 0° , 即指玻璃片平行于水流方向放置; 清洗角度 90° , 即指垂直于水流方向放置。控制气液比为0.3、清洗距离为10 cm、清洗时间为60 s不变, 分别在清洗角度为 0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 和 90.0° 时进行实验。清洗后玻璃表面污染物残留量如表2所示, 去除率如图10所示。结果显示, 不管是水清洗还是气泡清洗, 当清洗角度设置为 45° , 都获得了更好的清洗效果。尤以水清洗的对比更为明显, 当放置角度为 0° 和 90° 时, 去除效率均不到5.0%; 而放置角度为 45° 时, 去除效率提高至35.0%。因此, 为便于污染物从表面去除, 应将基底按特定角度放置。

表2 不同角度清洗后玻璃基底上污染物的残留量

Table 2 Residual contaminants on glass substrates before and after cleaning at different angles

清洗角度/ $^\circ$	水清洗后污染物残留量/g	气泡清洗后污染物残留量/g
0	0.098 6	0.034 4
22.5	0.085 1	0.026 5
45.0	0.065 0	0.023 4
67.5	0.080 1	0.026 9
90.0	0.095 5	0.031 8

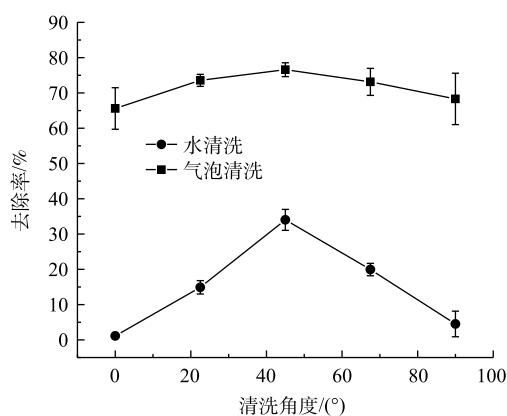


图10 不同角度清洗玻璃基底上污染物的去除率
Fig. 10 Removal efficiency of cleaning contaminants on glass substrates at different angles

3 结论

1) 调节气泡发生器的入水气液比, 可以得到不同尺寸的气泡。当比值在0.05~0.4内调节时, 利用高速摄像机和图像处理软件可测得气泡的平均尺寸为80~1 200 μm 。

2) 设置清洗距离为10 cm, 在与水流垂直的方向放置基底, 在清洗时间为60 s、液体流量为 $2.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下, 采用单独水洗和微小气泡清洗2种方式对污染物的去除率均不到10%, 且清洗效果随气泡尺寸的增大而增强。当气液比为0.3, 即气泡平均尺寸约为800 μm 时, 清洗效果最好, 污染物的去除率达到68.3%。

3) 当处理时间为较短的 30 s 时, 清洗距离选择 8 cm, 清洗效果更好; 而当处理时间为较充足的 90 s 时, 由于清洗距离为 8 cm 处的气泡更为分散, 作用范围更大, 该条件下气泡清洗效果更好。另外, 当把基底放置在与水流方向呈 45° 夹角时, 清洗效果最好。

参 考 文 献

- [1] 曾宏德. 油泥清洗工艺中的药剂化学研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [2] 王飞, 梁政, 邓雄, 等. 储油罐底部油泥清洗技术进展及综合处理技术开发[J]. *清洗世界*, 2011, 27(6): 23-27.
- [3] 张学发, 杨昆, 马骏, 等. 微/纳米气泡技术在金属表面脱脂处理中的应用研究[J]. *清洗世界*, 2011, 27(10): 29-33.
- [4] CHAHINE G L, KAPAH I A, CHOI J, et al. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 528-549.
- [5] 黄河, 杨庆峰, 吴来明. 微纳米气泡清洗“南海一号”出水瓷器的安全性评价研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2017, 29(3): 30-37.
- [6] TUZIUTI T. Influence of sonication conditions on the efficiency of ultrasonic cleaning with flowing micrometer-sized air bubbles[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 604-611.
- [7] YAMASHITA T, ANDO K. Low-intensity ultrasound induced cavitation and streaming in oxygen-supersaturated water: Role of cavitation bubbles as physical cleaning agents[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 52: 268-279.
- [8] REUTER F, METTIN R. Mechanisms of single bubble cleaning[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 550-562.
- [9] MAEKAWA S, MIYAMOTO M, HINOMOTO N, et al. Degreasing of solid surfaces by microbubble cleaning[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(3): 1236-1243.
- [10] AGARWAL A, NG W J, LIU Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment[J]. *Chemosphere: Environmental Toxicology and Risk Assessment*, 2011, 84(9): 1175-1180.
- [11] TSUGE H. Fundamentals of microbubbles and nanobubbles[J]. *Bulletin of the Society of Sea Water Science*, 2010, 64(1): 4-10.
- [12] 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.
- [13] LEE C H, CHOI H, JERNG D, et al. Experimental investigation of microbubble generation in the venturi nozzle[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 136: 1127-1138.
- [14] Xu X, Ge X, QIAN Y D, 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.
- [15] VAZIRIZADEH A, BOUCHARD J, CHEN Y. Effect of particles on bubble size distribution and gas hold-up in column

flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 157: 163-173.

[16] 邓超, 杨丽, 陈海军, 等. 微纳米气泡发生装置及其应用的研究进展[J]. *石油化工*, 2014, 43(10): 1206-1213.

[17] 杨红兵, 丁为民, 陈坤杰. 气泡对蔬菜的清洗作用及清洗参数模型的建立[J]. *江西农业学报*, 2007, 19(6): 102-104.

[18] FOLDYNA J, SITEK L, ŠVEHLA B, et al. Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2004, 11(3/4): 131-137.

[19] 刘建华, 张杰, 李康伟. 气泡去除夹杂物技术研究现状及发展趋势[J]. *炼钢*, 2017, 33(2): 1-9.

(本文编辑: 靳炜, 郑晓梅, 张利田)

Effect of bubble size on cleaning of oil and particles on solid surface

ZHANG Bohan¹, XU Xiao¹, YANG Qiang^{1,2,*}

1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

2. National Engineering Laboratory for Industrial Wastewater Treatment, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

*Corresponding author, E-mail: qyang@ecust.edu.cn

Abstract In order to clarify the application of bubble cleaning technology in tank bottom sludge cleaning, the effect of bubble size on the cleaning performance of solid surfaces was investigated. A visualized experimental device for cleaning oil and particles on glass surfaces was set up. A bubble generator was designed to produce bubbles with an average diameter changing from 80 to 1 200 μm by adjusting the gas-liquid ratio. The effects of bubble size and cleaning parameters such as time, distance and angle on the cleaning effect were studied. The results showed that the removal efficiency increased with the increase of the bubble size at a liquid flow rate of $2.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. The best cleaning effect occurred for the bubbles with average diameter of 800 μm , which could improve the removal efficiency of 4.5% by water washing to 68.3%. Furthermore, the removal efficiency was higher when the angle between the substrate and the water flow was 45° than that placed horizontally and vertically. The above results showed that the scouring effect of water jet and vortex caused by the collision and breakup of bubbles were the main cleaning mechanisms for the surfaces. The research results provide theoretical and practical references for the efficient treatment of oily sludge pollution, and open up a new solution path for tank bottom sludge cleaning.

Keywords bubble; bubble generator; solid surface; tank bottom oily sludge cleaning