

基于旋流气浮技术的除油工艺技术研究

马文杰*, 贺煜峰, 杨宏旭, 李小龙, 李凤娟

(中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司, 天津 300452)

摘要:旋流气浮技术作为新一代油水分离技术具有极大的应用潜力。从旋流气浮技术工艺原理出发,考察了溶气压力、气液比和旋流强度等因素对生成气泡的影响,对旋流气浮的浮选效率进行了分析。结果表明,溶气压力、气液比和旋流强度能直接影响气泡的生成尺寸和分布概率密度,进而决定气浮设备的浮选性能,同时根据单因素方差分析表明这3种因子的最适水平分别为500 kPa、6%和20g($g=9.8\text{ m/s}^2$);利用正交实验设计,综合评估溶气压力、气液比和旋流强度对浮选性能的影响,结果表明,当溶气压力为600 kPa、气液比约为6%、旋流强度约为18g时,设备整体运行效果最佳,此时的油品去除率不低于90%,悬浮物去除率不低于81%。

关键词:含油废液;旋流气浮;溶气压力;气液比;旋流强度

中图分类号:X741

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)S-0347-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.073

Oil removal technology based on cyclone gas flotation

MA Wen-jie*, HE Yu-feng, YANG Hong-xu, LI Xiao-long, LI Feng-juan

(Safety & Environmental Protection Branch, CNOOC Energy Technology & Services Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract:As a new generation of oil-water separation technology, cyclone gas flotation technology has a great application potential. The process principle of cyclone gas flotation technology is explored, and the influences of the pressure of dissolved gas, the ratio of gas to liquid, swirling intensity and other factors on bubble formation are investigated. The oil-removing efficiency of cyclone gas flotation is analyzed. Results show that the pressure of dissolved gas, the ratio of gas to liquid and the swirling intensity all can directly affect the bubble size and distribution probability density. Furthermore, the flotation performance of gas flotation equipment is determined, and the optimal levels of these three factors are obtained as 500 kPa, 6% and 20g, respectively through single-factor analysis of variance. As the orthogonal experimental design is utilized to comprehensively evaluate the effects of the pressure of dissolved gas, the ratio of gas to liquid, the swirling intensity on flotation performance, it is found that the overall performance of the equipment reaches the best when the pressure of dissolved gas is 600 kPa, the ratio of gas to liquid is about 6% and the swirling intensity is around 18g. The removal rates of oil and suspended matters are not less than 90% and 81%, respectively under these conditions.

Key words: spent oily liquid; cyclone gas flotation; pressure of dissolved gas; ratio of gas to liquid; swirling intensity

含油污废水的合规处理是油田生产的重点问题,而除油则是含油污水处理中的重要环节^[1]。“隔油+气浮+深度处理”工艺是当前国内主流的技术方法,其中气浮技术作为核心工序,因除油效率高、技术成熟而被普遍应用^[2]。近年来,将气浮工艺与其他分离技术联用,成为国内外学者研究的热点,随之出现了很多非常规气浮工艺,气浮和离心分离技术结合的旋流气浮技术就是其中之一^[3-5]。低强度旋流气浮技术属于高负荷、紧凑型的第三代气浮技术^[6],该技术利用弱离心力场强化油滴与气泡的碰撞、粘附,可提高浮选效率。当前,国外相继推出了低强度旋流气浮设备,而国内因缺乏对分离机制等方面的基础性研究,在设备研发上遇到了难题^[7-8]。因此,本研究首先探讨低强度旋流气浮技术分离机制,研究旋流强度、气液比和溶气压力3个因素对分离效果的影响,进而优化其浮选性能,以期

为低强度旋流气浮除油设备的制造和应用提供参考。

1 旋流气浮分离机制及影响因素

1.1 旋流气浮技术机制原理

气浮技术是在待处理水中通入大量高度分散的微气泡,使之作为载体与水中的悬浮物(油滴、固体颗粒)碰撞粘附,最后依靠界面张力、浮力等作用使油相从污水中剥离^[9]。旋流气浮的离心力会促使油滴同气泡做定向运动(沿径向方向向中心运动),增强了油滴的惯性,提高其摆脱流线束缚的能力,结合密度差的存在使气泡与油滴的碰撞较传统气浮更为有序稳定^[10-12],浮选性能得到大幅提升。

1.2 旋流气浮分离效率影响因素

气泡生成尺寸、分布状态是影响气浮浮选效果的主要因素,研究气泡的生成情况对气浮设计及应

收稿日期:2021-01-13;修回日期:2021-05-20

作者简介:马文杰(1985-),男,学士,工程师,主要从事海上油田污水处理技术研究,通讯联系人,mawj5@enooc.com.cn。

用具有重要的现实意义^[13-14]。溶气压力的影响范围包括溶气效率和溶气水质,同时不同压力生成的气泡尺寸和概率分布也存在显著差异;气液比与溶气压力共同决定溶气效率,也影响着生成气泡的尺寸和密度;旋流强度,或称离心力强度(定义为离心加速度与重力加速度之比值)是影响旋流气浮浮选性能的一个关键操作变量,但迄今为止,对旋流离心力强度还缺乏系统性的研究,但可以肯定,离心力强度对生成气泡的尺寸有直接影响^[15]。

2 实验部分

本研究设计了一套旋流气浮分离设备,针对影响气泡生成的关键因素溶气压力、气液比和旋流强度,在固定工艺设备其他参数的情况下,对三者分别设置水平梯度进行实验。同时,由于这 3 种因素不仅单独对气泡的生成产生影响,且它们之间也会出现交联效应,对结果产生综合性作用,因此采用均匀分散性和整齐可比性更强的正交实验法,考察几种参数对气浮工艺浮选效率的影响,确定最优的运行设计方案。

2.1 实验材料和方法

在本实验中,以海上某平台生产返排液为供试材料,其基本理化性质见表 1。

表 1 供试材料组成成分

项目	数值
pH	6.8±0.4
含油量/(mg·L ⁻¹)	553±44
悬浮物含量 SS/(mg·L ⁻¹)	327±28
粒径中值/μm	41.7±4.9
生化需氧量 COD/(mg·L ⁻¹)	10000±240

旋流气浮装置设计如图 1 所示,装置设计参数详见表 2。

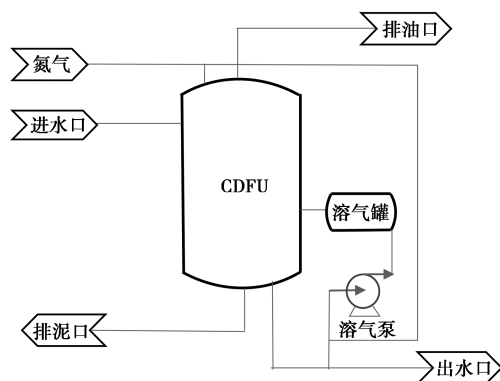


图 1 旋流气浮装置设计图

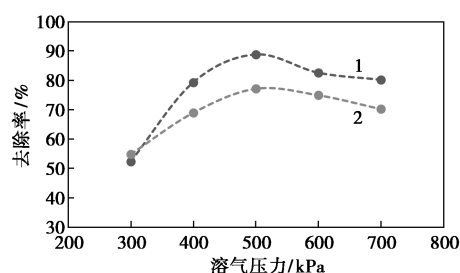
表 2 旋流气浮工艺设计参数

项目	参数
撬装尺寸	L×W×H=6000 mm×2300 mm×2600 mm
设备净重/t	9
运行重量/t	14
设计压力/kPa	600
运行压力/kPa	200
工作温度/℃	10~40
溶气介质	氮气/天然气
设计处理量/(m ³ ·h ⁻¹)	10
水力停留时间/min	3~8
溢流管直径/mm	8~10
长径比	10~12

2.2 实验结果

2.2.1 溶气压力对分离效果的影响

固定气液比 4%、旋流强度 15 g 和其他参数水平,通过调节溶气泵和溶气罐,依次将溶气压力设定为 300、400、500、600 和 700 kPa,考察不同溶气压力下,气泡生成尺寸的变化和气浮除油、除固的效率,结果如图 2 所示。溶气压力与气浮除油率、除 SS 率整体呈抛物线趋势,随着压力的增大,去除率先升高后下降;进行单因素 ANOVA 分析可知,不同溶气压力下,油滴和固体悬浮物的去除效率差异性显著 ($P<0.05$)。综上表明,溶气压力的设定对旋流气浮油水分离具有显著影响,最适压力应在 400~600 kPa 之间。



1—除油率;2—除固率

图 2 不同溶气压力下目标物去除率

图 3(a)~图 3(e) 分别是溶气压力为 300、400、500、600 和 700 kPa 时,释气后产生的气泡。由图 3 可见,随着压力的增大,气泡的直观尺寸明显减小,分布密度逐渐变大。但当压力过高时,气泡的直径和密度均有所回落,除油率也有所下降。在已有的研究中也表明,虽然高压利于低尺寸气泡的生成,但高密度也会增加气泡聚并的可能,优劣势相互抵消整体上已无益于浮选性能的提升^[16-18]。

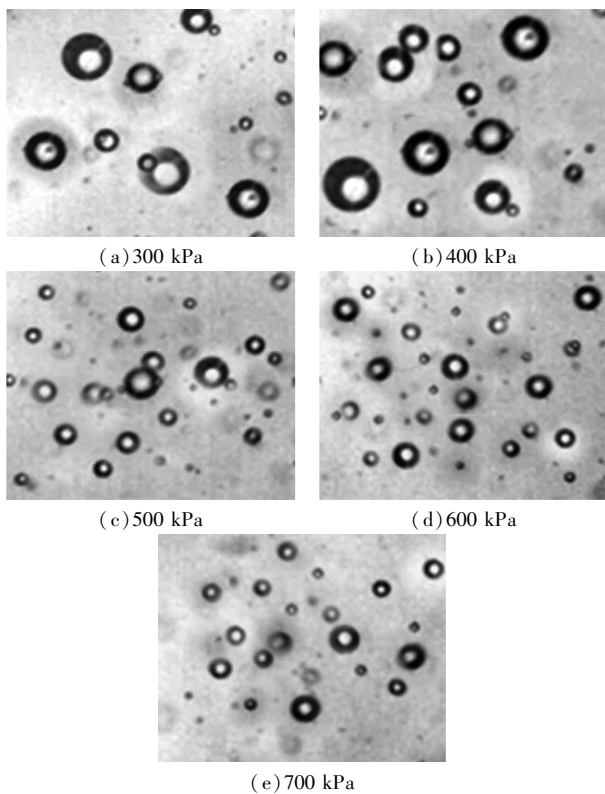


图 3 不同溶气压力下气泡分布图

2.2.2 气液比对分离效果的影响

固定溶气压力为 500 kPa、旋流强度 15g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 和其他参数水平,通过调节溶气量与溶气水量改变气液比,梯度为 2%、4%、6%、8% 和 10%,考察不同气液比对气泡生成尺寸和气浮除油、除固的影响,结果如图 4 所示。进行单因素 ANOVA 分析可知,不同气液比下油滴和固体悬浮物的去除效率差异性显著 ($P < 0.05$),在所设置的梯度范围内,随着气液比的增大,除油率和除固率呈线性升高然后下降,极值分别相差 24.5% 和 27.7%,除油率最高点约为气液比 6%,除固最高点约为气液比 4%。

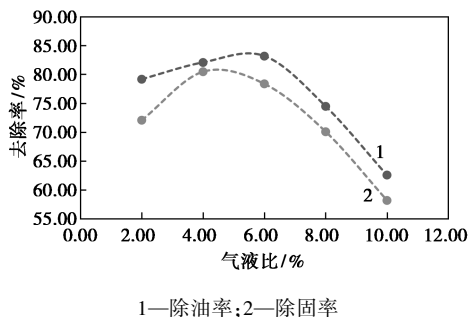


图 4 不同气液比下目标物去除率

图 5(a) ~ 图 5(e) 分别是气液比为 2%、4%、6%、8% 和 10% 时气泡生成情况。由图 5 可见,随着气液比的增加,直径略微增大,气泡数量和分布密度先增加后有所下降;当气液比为 6% 左右时,气泡平

均直径趋于平稳状态,超过 6% 时,生成气泡的尺寸增大明显,分布密度也显著下降,表明高气液比时气泡也容易发生聚并,导致气泡分布不够均匀,严重影响除油效率。研究表明,低气液比表示溶气水并未达到饱和状态,所以释气后析出气泡的直径和数量均偏少。本实验表明最适气液比应为 6% 左右,虽然有可能发生气泡聚并现象,但整体上气泡直径仍然维持在较小的尺寸范围内,概率密度也较为合适,有利于浮选性能的提高。

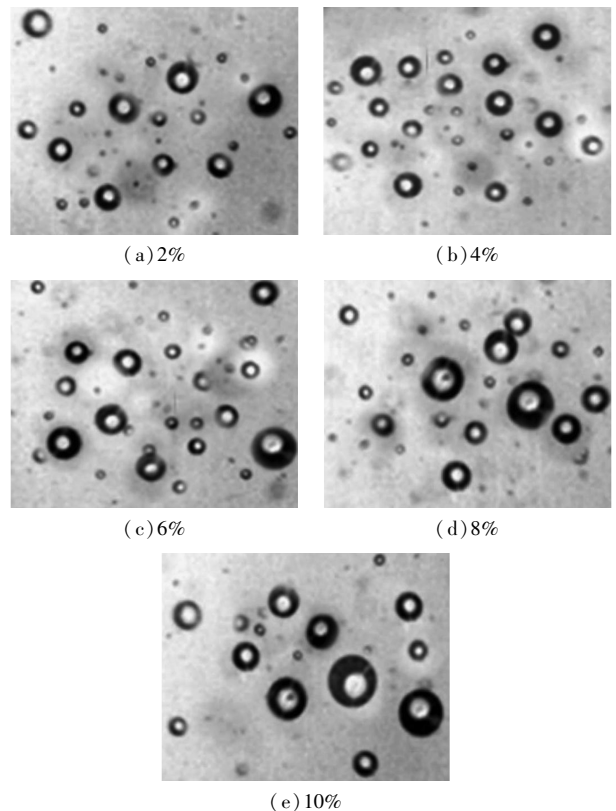


图 5 不同气液比下气泡分布图

2.2.3 旋流强度对分离效果的影响

固定溶气压力 500 kPa、气液比 4% 和其他参数水平,改变旋流强度考察不同旋流强度对气泡生成尺寸和除油效率的影响。本实验中水力旋流强度是以射流器出口处区域的数值水平作为代表,因为旋流强度为离心加速度与重力加速度之比,本文将重力加速度视为常数 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,并以重力加速度的倍数来表示旋流强度数值,故要测定离心力强度只需测出离心加速度,而离心加速度与切向速度有如下关系^[19]:

$$a_i = v^2/r \tag{1}$$

式中: a_i 为离心加速度, m/s^2 ; v 为切向速度, m/s ; r 为半径, m 。

因此对旋流强度的控制只需控制流体切向速度

即可,使旋流强度分别达到 5.2g、10.2g、15.1g、19.8g 和 25.2g,稳定运行 1 h 后取样测定,结果如图 6 所示。进行单因素 ANOVA 分析可知,不同旋流强度下油滴去除效率差异性显著($P < 0.05$),但悬浮物去除效率变化程度弱,除油率和除固率极高值点约为 20g 时。

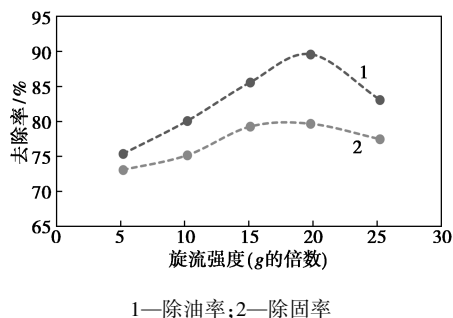


图 6 不同旋流强度下目标物去除率

图 7(a)~图 7(e) 是旋流强度分别为 5.2g、10.2g、15.1g、19.8g 和 25.2g 时气泡生成情况。提高旋流强度,生成气泡的直径逐渐变小,密度逐渐变大,气泡分布更为均匀,褚良银等^[20]的研究也表明离心力强度增大会使生成气泡的直径有所减小。但根据实际除油率的测定,当旋流强度超过 25g 时,除油率大幅下降,原因可能是过大的旋流强度造成液相的不稳定,影响了气泡的上浮,从而导致了除油效率的降低^[21]。

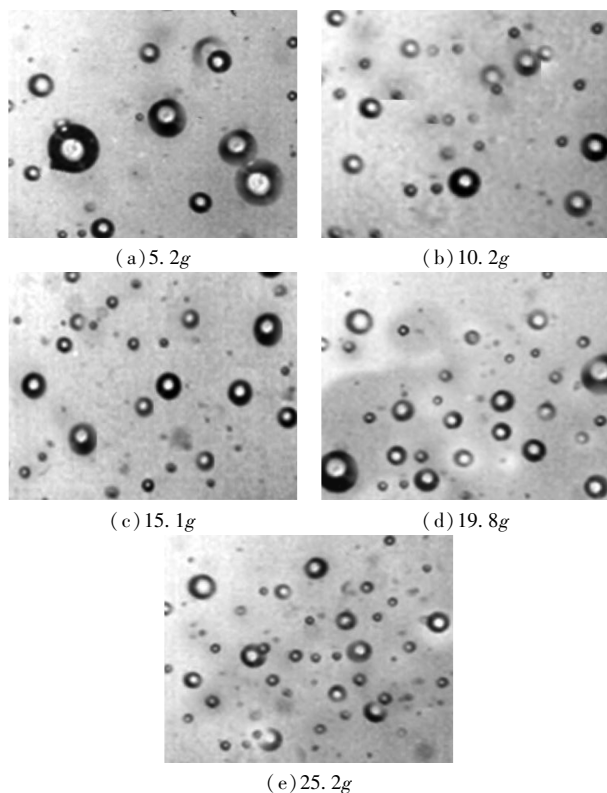


图 7 不同旋流强度下气泡分布图

2.2.4 低强度旋流气浮参数优化实验

通过前述实验证明溶气压力、气液比和旋流强度这 3 种因素强烈影响着气泡的生成,并确定了各因子的最佳水平区间。但考虑到它们之间会出现关联效应,对结果产生综合性作用,因此采用均匀分散性和整齐可比性更强的正交实验法,考察几种参数对气浮工艺浮选效率的影响,确定最优的运行设计方案。本次正交实验设计为 $L_9(3^3)$,表 3 为正交实验因素水平设计表,3 个因素水平的设置依据前述实验结果而定。

表 3 正交实验因素水平表

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	溶气压力/kPa	气液比/%	水力旋流强度/(g 的倍数)
1	400	2	14.7
2	500	4	18.1
3	600	6	21.3

根据表 4 中正交实验结果可见,所有实验水平下,旋流气浮设备出水的悬浮物含量和含油量分别低于 120 和 100 mg/L,去除率最高分别达 81.7% 和 90.1%,首先证明了旋流气浮工艺能够有效地对含油废液进行多相分离。

表 4 正交实验结果

实验号	因素			水相		油相
	A	B	C	悬浮物含量/ (mg·L ⁻¹)	含油量/ (mg·L ⁻¹)	含水率/ %
1	1	1	1	108	97.9	7.1
2	1	2	2	82	81.5	6.0
3	1	3	3	112	85.1	3.4
4	2	1	2	76	80.4	6.3
5	2	2	3	101	77.9	4.6
6	2	3	1	75	95.6	6.9
7	3	1	3	95	82.3	4.1
8	3	2	1	69	67.8	7.2
9	3	3	2	60	54.8	5.5

各评价指标极差计算见表 5。

表 5 各评价指标极差

实验号	变量	因素		
		A	B	C
悬浮物含量	k1	101	93	84
	k2	84	84	73
	k3	75	82	103
	R	26	11	30
含油量	k1	88.2	86.9	87.1
	k2	84.6	75.7	72.2
	k3	68.3	78.5	81.8
	R	19.9	11.2	14.9

续表

实验号	变量	因素		
		A	B	C
含水率	k1	5.5	5.8	7.1
	k2	5.9	5.9	6.4
	k3	5.6	5.3	4.0
	R	0.3	0.6	3.1

从表5可得到悬浮物去除效果的最佳组合为A3B3C2,出水含油量的最佳组合为A3B2C2,油相含水率的最理想组合为A1B3C3。首先考察液相悬浮物含量, $R(C) > R(A) > R(B)$,其中 $R(A)$ 和 $R(C)$ 相近且远大于 $R(B)$,表明溶气压力和旋流强度均对废液悬浮物去除效果产生强烈的影响且影响力度相当,而气液比3个水平的差异对废液悬浮物的去除效果影响较低;其次考虑出水的含油量, $R(A) > R(C) > R(B)$,其中 $R(A)$ 远大于 $R(B)$ 和 $R(C)$,表明对污水除油效果的影响力以溶气压力最高,气液比最弱,在设备参数设定时,应重点考虑溶气压力对污水除油的影响;最后考察油相中含水率的结果, $R(C) > R(B) > R(A)$,其中 $R(C)$ 远高于 $R(A)$ 和 $R(B)$,表明旋流强度对水相中的含水率影响力远大于溶气压力和气液比,这也符合当前在旋流强度研究中,溢流管和液面距离增大,水不容易混入溢流管中,导致油相中的含水率较低的现象,因此在设备参数设定时,也要加强考虑旋流强度对油相含水率的影响。综上所述,评估溶气压力、气液比和旋流强度3个因素的不同水平搭配,最佳参数组合为A3B3C2,即溶气压力为600 kPa、气液比为6%和旋流强度为18.1g时,该套旋流气浮设备的处理效果最优,推荐在实际应用时采用该组参数水平进行进一步实验。

3 结论

旋流气浮技术是处理含油污废水、对其进行多相分离的有效措施。为了宏观考察技术参数中气液比、溶气压力和旋流强度对旋流气浮浮选效率的影响,本研究以某平台返排液(含油废水)为供试材料,并设计了一套旋流气浮组合设备进行实验,结果如下:

(1)溶气压力、气液比和旋流强度是影响气泡直径和概率密度的主要因素,并直接影响设备浮选效果。单因素方差分析表明,最适溶气压力为500 kPa,最适气液比约为6%,最适旋流强度约为20g,在上述参数水平下,生成气泡的尺寸和密度最为理

想,有利于提高气浮浮选效果。

(2)根据正交实验结果,将设备溶气压力调至600 kPa、气液比调为6%左右、旋流强度调为18g左右时,整体气浮浮选效果最优,其油污去除率可达90%(无化学药剂)、悬浮物去除率可达80%,具备良好的处理能力和现场应用前景。

参考文献

- [1] 谭振兴.油田返排液处理技术研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(13):205-206.
- [2] 刘剑飞,李惠芳,陈京宁,等.旋流气浮除油装置预处理含油污水[J].化工环保,2020,40(6):586-589.
- [3] 邹启贤,陆正禹.油田废水处理综述[J].工业水处理,2001,(8):1-3,33.
- [4] 李爱阳,朱志杰.PAC絮凝-膜分离法处理油田废水的研究[J].工业水处理,2008,(2):20-22.
- [5] 李建平,孙继涛.几种气浮除油工艺的应用比较[J].工业用水与废水,2015,46(6):28-31.
- [6] 罗小明,付浩,潘悦文,等.低强度旋流气浮处理含油污水实验研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):149-154.
- [7] 刘杨.油田酸化压裂返排液油水分离实验研究[D].青岛:中国石油大学,2016.
- [8] 沈哲.特低渗油田采出水涡流多相协同臭氧气浮处理技术研究[D].成都:西南石油大学,2018.
- [9] 刘杨,王振波.水力旋流器分离效率影响因素的研究进展[J].流体机械,2016,44(2):39-42.
- [10] 韩严和,陈家庆,桑义敏,等.旋流气浮中气泡-颗粒碰撞效率影响因素理论分析[J].过程工程学报,2013,13(2):186-190.
- [11] 孙志强.海上采出污水气浮旋流一体化装置设计及其研究[D].武汉:长江大学,2020.
- [12] Dilruba Y, Subhashish M, Geoffrey M E. Analysis of dynamic interactions in a bubble-particle system in presence of an acoustic field[J]. Minerals Engineering, 2019, 131(15):111-123.
- [13] 韩旭,陈家庆,李锐锋,等.含油污水处理用旋流气浮一体化设备的CFD数值模拟[J].环境工程学报,2012,6(4):1087-1092.
- [14] Lee B H, Song W C, Kim H Y, et al. Enhanced separation of water quality parameters in the DAF (dissolved air flotation) system using ozone[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2007, 56(10):149-155.
- [15] Måns L, Lennart J. Residence time distribution characterization of the flow structure in dissolved air flotation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(1):93-101.
- [16] Khalid A H, Hassan A H, James C. CANMET hydrocyclone: An emerging alternative for the treatment of oily waste streams[J]. Minerals Engineering, 2004, 17(5):643-649.
- [17] 朱梦影,程涛,孔冰,等.旋流气浮装置试验对比分析[J].当代化工,2020,49(7):1468-1471.
- [18] 苏楷然.密闭气浮装置中气泡分布及污水除油性能实验研究[D].青岛:中国石油大学,2016.
- [19] Rubio J, Souza M L, Smith R W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(3):139-155.
- [20] 褚良银,赵扬,陈文梅,等.水力旋流器分离性能强化研究[J].过滤与分离,2004,(1):1-4.
- [21] Rubio J, Souza M L, Smith R W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique[J]. Minerals Engineering, 2001, 20(15):139-155. ■