研究论文

DOI：10.11949/0438-1157.

基于响应面法的剪切减压微气泡生成技术条件优化

盛绍西[1]，倪佳静[1]，彭志良[2]，钱谦[1]，徐佳佳[1]，杨逸飞[1]，汪威[1]

（[1]武汉工程大学机电工程学院，湖北武汉 430010；[2]江苏旭泽流体设备有限公司，江苏扬州 225000）

摘要： 微气泡发生技术的性能取决于所生成微气泡的物理特性（粒径、数量、尺寸分布）。气浮技术的效率高度依靠微气泡的生成和停留时间。以空气和水体为研究对象，采用剪切混合与减压析气相结合的方式产生微气泡，通过高速摄像和图像处理分析充气压力、液体流量及减压压差对微气泡密度和粒径分布的影响，并利用Box-Behnken响应面法进行参数优化。实验结果表明，微气泡的密度和粒径与充气压力、液体流量、变压压差呈显著相关性，充气压力影响最为显著，其次分别是流量和压差。在I_p=1.2 MPa、ΔP=0.24 MPa、q=940 L/h的条件下，气泡密度均值为18.90 n/mm^2，且气泡粒径主要集中在20-60 μm之间，效果较优。

关键词： 气泡浮选；微气泡；响应面法；图像处理

中图分类号： TQ 021.4；TQ 021.1　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-10

Optimization of operating conditions for shear-depressurization microbubble generation technology based on response surface methodology

SHENG Shaoxi[1], NI Jiajing[1], PENG Zhiliang[2], QIAN Qian[1], XU Jiajia[1], YANG Yifei[1], WANG Wei[1]

([1]*School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430010, *Hubei, China*; [2]*Jiangsu Xuze Fluid Equipment Co., Ltd., Yangzhou* 225000, *Jiangsu, China*)

Abstract: The performance of microbubble generation technology depends on the physical characteristics (particle size, quantity, and size distribution) of the generated microbubbles. The efficiency of flotation technology highly relies on the generation and residence time of microbubbles. Taking air and water as the research objects, microbubbles were generated using a combination of shear mixing and depressurization. High-speed photography and image processing were employed to analyze the effects of gas pressure, liquid flow rate, and depressurization pressure drop on the density and size distribution of microbubbles, and the Box-Behnken response surface methodology was utilized for parameter optimization. The experimental results indicate that the density and particle size of the microbubbles have a significant correlation with the gas pressure, liquid flow rate, and pressure drop. The gas pressure has the most significant impact, followed by the flow rate and pressure drop. Under the optimal conditions of I_p = 1.2 MPa, ΔP = 0.24 MPa, and q = 940 L/h, the average bubble density is 18.90 n/mm^2, and the bubble size is mainly concentrated in the range of 20-60 μm, indicating good performance.

Keywords: bubble flotation; microbubbles; response surface methodology; image processing

收稿日期： 2026-08-02　　**修回日期：** 2026-09-24

通信作者： 汪威（1984—），男，博士，教授，wangwwit @163.com

第一作者： 盛绍西（2001—），男，硕士研究生，3255451813@qq.com

基金项目： 扬州市揭榜挂帅专项（SJB2025000061）；扬州市产业前瞻与关键技术专项（SCY2025000047）

引用本文： 盛绍西, 倪佳静, 彭志良, 钱谦, 徐佳佳, 杨逸飞, 汪威. 基于响应面法的剪切减压微气泡生成技术条件优化[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-10

Citation: SHENG Shaoxi, NI Jiajing, PENG Zhiliang, QIAN Qian, XU Jiajia, YANG Yifei, WANG Wei. Optimization of operating conditions for shear-depressurization microbubble generation technology based on response surface methodology[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-10

引 言

微气泡(通常指直径小于100 μm的细小气泡)因具备比表面积大、上升速度慢、界面Zeta电位高以及收缩破裂时能产生大量自由基等独特的理化特性,近年来在多相流强化分离与反应过程中展现出巨大的技术优势[1]。在环境水处理领域,微气泡不仅能通过诱发羟基自由基强化高级氧化过程以彻底降解有机污染物,还能大幅提高臭氧等消毒气体的利用率并有效改善富营养化水体的底质[2]。得益于极大的气液接触面积和基于杨-拉普拉斯效应的内部高压,微气泡能够打破常规曝气系统的传质瓶颈,实现极高的体积传质系数与气体绝对溶解率[3]。在气浮工艺中,微气泡能够与微细悬浮物和乳化油滴高效匹配结合,在降低甚至免除混凝剂用量的同时,显著提升固液与油水分离效率及浮渣稳定性[4][5],微气泡技术作为一项清洁绿色技术,具备高效油水分离的潜力[6][7]。微气泡技术高度依赖微气泡的密度和粒径,常规微气泡发生技术产生的气泡粒径较大(大于50 μm),上升速度过快,在水中的停留时间短,导致设备体积庞大但处理效率受限[8][9]。

表1 微气泡产生方法

Table 1 Methods for microbubble generation

产生方法	核心原理	气泡粒径(μm)	气泡数密度(n/mm^2)
传统溶气减压法(DAF)	气体在高压下溶解于水中,流经减压阀过饱和气体析出成核	40 - 100	5~15
微孔散气法(Dispersed Air)	将高压气体通过多孔介质强制压入水中	100 - 1000	< 1
流体剪切法(Hydrodynamic)	高速水流产生强烈剪切应力撕裂大气团。	50 - 200	5~10

微气泡发生技术的性能首先取决于所生成气泡的微观物理特性,即气泡的粒径、数量、尺寸分布及稳定性[8][9]。气泡粒径越小且数量聚集越多,能够提供越庞大的气液接触比表面积和更高的体积传质系数,而均匀的尺寸分布则能有效避免微气泡的二次聚并[10]。在实际发生过程中,理想气泡特性的获取并非由单一参数决定,气液流量、压力分布及设备几何尺寸等不同运行参数之间存在着高度复杂的耦合作用[11]。在传统的工业除油和水处理领域中,通过传统溶气减压法、微孔散气法或流体剪切法等产生的气泡粒径往往较大,通常大于50 μm,微气泡的有效停留时间极短,通常仅为3到10分钟。由于大粒径气泡占据空间大且容易聚并,其气泡数密度较低,通常不超过15 n/mm^2(表1)[12][13][14][15]。

基于溶气减压的微气泡生成技术是目前工业应用最为广泛且技术最成熟的微气泡生成技术之一,其微气泡的生成高度依赖于溶气水经过释放器时的减压突变过程[16]。研究表明,气泡在剪切流壁附近受到的升力与剪切力,与壁距存在一定的关联性,从而影响分离效果[17]。流体剪切法依赖于液体与气体之间的剪切力和湍流作用。当气体以较大体积(如气流或气团)进入高速流动的液体中时,液体与气体之间的速度差和黏性力会在气液界面产生强烈的剪切应力,将气体撕裂成微小气泡[18]。入水口通过离心泵控制液相保持高速流动状态,充气口高压气体在时间继电器作用下间歇充气形成多个大气团,垂直充入高速液体,当液体流速远高于气体流速(或气体静止),形成速度梯度(即剪切速率)。气液界面在剪切作用下发生瑞利-泰勒不稳定性(Rayleigh-Taylor instability)或凯尔文-亥姆霍兹不稳定性(Kelvin-Helmholtz instability),导致气体破碎产生大量气泡的同时形成过饱和溶气气体(图1)[19]。过饱和溶气气体在减压阀压力骤降导致气体溶解度急剧降低,溶解气体以微气泡形式析出,形成密集微气泡[20][21]。

溶气减压法通过在系统内建立高压环境使气体过饱和溶解于液体中,随后经骤然降压驱动气体以微细气泡的形式析出。在该过程中,微气泡的粒径、数量及浓度高度依赖于气体压力、释气压差以及液体流量这三大核心运行参数的协同作用。气体压力决定了气体在液相中的溶解量,较高的溶气压力能够提供更充足的气源[22]。压差是驱动气泡成核与析出的动力;合适的压差越大不仅能显著增加微气泡的成核数量,还能有效限制气泡的初始生长尺寸[23]。液体流量影响着流体剪切时的湍流强度与剪切力。明晰并优化气体压力、释放压差与液体流

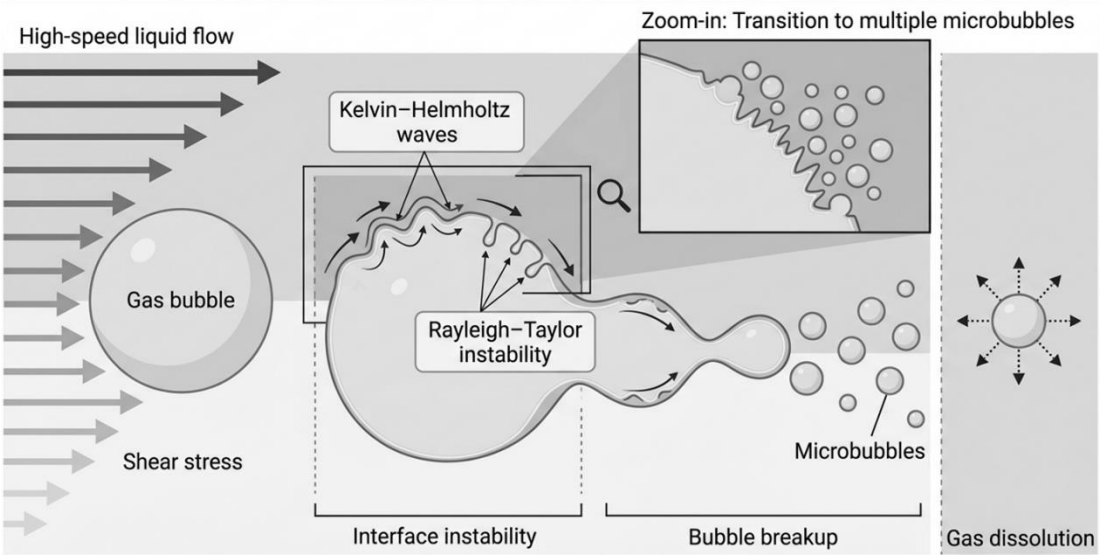


图 1 流体剪切溶气示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Fluid Shear Dissolved Air Process

量的关系，是提升溶气减压微气泡发生技术性能的关键。

本文通过对微气泡的一系列实验和高速摄像分析，研究在高压溶气水减压过程中微气泡生成特性的影响因素，利用MatLab程序图像技术，分析溶气减压过程中微气泡的粒径分布和气泡密度，研究充气压力、液体流量和减压压差的作用规律。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

该实验利用减压阀和气液混合器来产生微气泡。首先，水池的水在计量泵作用下以一定流量从侧面通道进入气液混合器，气瓶内高压气体以一定充气压力垂直充入气液混合器。气液混合器外壁具备多个水平切向通道，水流通过气液混合器的多个水平切向通道与高压液体产生持续的剪切力和旋流场，高压气体在剪切力作用下形成气体核生成过饱和的溶气气体。旋流和混合器内部压力会约束微气泡的生长和聚并，过饱和溶气水流经减压阀时压力骤降，导致气体溶解度急剧降低，使原本溶解在水中的气体迅速过饱和，从而以微小气泡的形式从水中析出（图2）。微泡的大小和压差相关，其理论成核临界值由方程(1)表示[24][25]：

$$R_{min} = \frac{2\sigma}{\Delta P} \tag{1}$$

式中，σ为液体表面张力系数，N/m；ΔP为变压阀压差，Pa。水在常温（25℃）下的表面张力系数σ = 0.072 N/m，只有当气泡半径大于此值时，才能稳定存在并继续生长，更小的气核会因为表面张力过大而消失[26]。

1.2 实验流程

为研究不同条件下微气泡的生成效果，建立了微观机理研究的实验平台。通过高速摄像机即时拍摄观察不同条件下的微气泡状态。高速相机(FASTCAM Mini AX50)的拍摄速度为3000fps，分辨率为1024×1024，用于记录气泡的粒径和数量。

本系统通过高压充气生成微气泡，充气量显著影响微气泡的大小和数量分布。为保证气体以较大体积（如气流或气团）进入高速流动的液体，通过时间继电器控制充气过程为间歇充气，充气时长I_t= 0.3 s，充气时间间隔 Δt= 3s。液相进入：原水池中的液相通过离心泵通入系统入水口，至稳定出水，通过计量泵调整流量。保持液相流速、压力一定。气相进入：气瓶中的压缩空气垂直通入气液混合器，持续30–50 s后通过气瓶压力阀调整气相输入，实验参数如表2。实验装置稳定运行2–3分钟后进行取样拍摄：通过烧杯在取样口进行取样，为避免气泡生成后的聚并和破碎，在第5秒通过高速相机拍摄获取图样，拍摄完成后关闭气瓶阀门和离心泵。重复上述实验取六组数据，每组条件下取三张照片，取气泡数量为中位数的照片进行实验数据处理。

对高速相机拍摄的图片进行数字图像分析，提前拍摄100 μm标尺确定比例尺，将图像输入到ImageJ软件中，将标尺长度设置为图像100 μm标

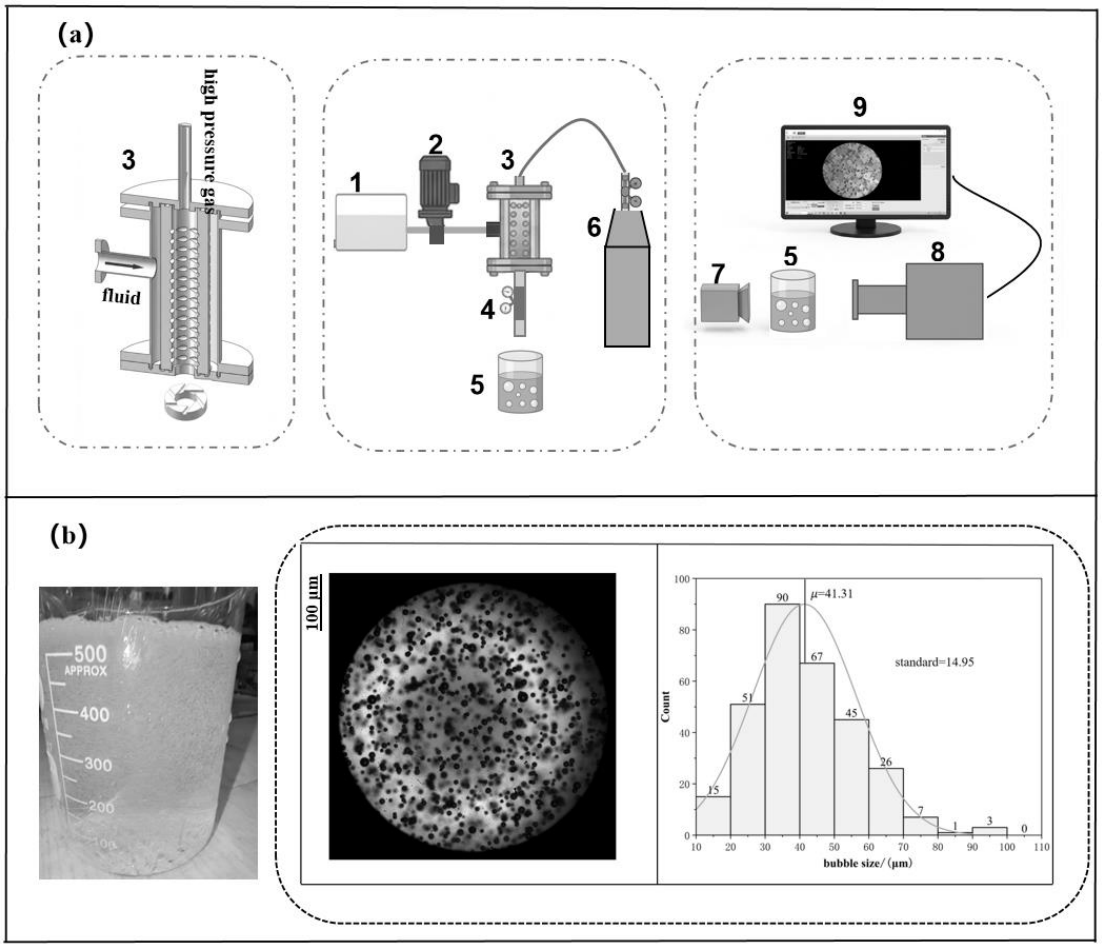


图2(a)　实验装置示意图;(b)微气泡的粒径分布

Fig. 2　(a) Schematic diagram of the experimental setup; (b) Particle size distribution of microbubbles

注:1—水池;2—计量泵;3—气液混合器;4—减压阀;5—溶气水;6—气瓶;7—照明灯;8—高速摄像机;9—计算机

表 2　主要实验参数

Table 2　Main experimental parameters

参数	充气压力	流量	压差	充气时长	充气间隔
符号	I_p(MPa)	q(L/h)	ΔP(MPa)	I_t(s)	Δt(s)
预定值(范围)	0.8 -1.3	700~1100	0.20 -0.30	0.3	3

准,通过边缘检测记录空间坐标,降噪和增强对比让气泡边缘清晰,图像中气泡清晰可见后手动添加每个气泡的直径(粒径),对于重叠的气泡通过气泡圆弧两个切线计算半径,拉长两倍统计直径。通过图像标尺计算得到微气泡的数量、粒径。并用气泡数密度衡量气泡的生成效果,用式(2)表示:

$$B_d=N_b/S \tag{2}$$

式中,B_d为气泡数密度,n/mm^2;N_b为拍摄面积可视微气泡数量,n;S为拍摄面积,mm^2。

2　实验结果与讨论

2.1　充气压力对气泡的影响

通过实验发现,溶气过程中当压力过大过小(I_p<0.8 MPa,I_p>1.3 MPa)时,溶气效率差,取样为水体-气体-过程反复,无明显溶气水或者溶气水不显著。压力过大或者过小气体在混合器内气液碰撞效率差。当0.8MPa<I_p<1.3MPa,气泡数量与粒径一定程度成反比关系,气泡数量越多,气泡粒径分布越小。充气压力为1.2 MPa时,气泡数密度增至18个/mm^{2}以上,气泡粒径正态分布期望值为41.37μm,气泡生成效果较优(图3)。

在I_p=0.8-1.3 MPa、ΔP=0.25 MPa、q=860 L/h条件下,气泡数密度及其分布情况。结果表明,当充气压力为1.2 MPa时,气泡数密度增至18个/mm^{2}以上,而在其他压力条件下,气泡数密度则维持在较低水平。在充气压力为1.0 MPa时,气泡粒径分布

较大，正态分布期望值为86 μm，区间差值均小于86.57μm。相比之下，其他工况下的气泡粒径分布集中，正态分布期望值在40 μm~50 μm之间（图3）。根据实验现象推测：当充气压力过小或过大时，气体在混合器内的气液碰撞效率较差，这种低效的碰撞导致无法形成显著的溶气水，取样时会出现水体与气体反复交替的现象，气泡生成数量大幅减少。在0.8 MPa<I_p<1.3 MPa的有效区间内，气泡数量与粒径在一定程度上呈现反比关系。当压力达到1.2 MPa时，气液碰撞与溶解效率较优，减压时析出的微气泡数量多，且这些大量释出的气泡粒径分布较小。如果在1.0 MPa时，溶解状态不稳定，会导致析出的气泡粒径分布变大。

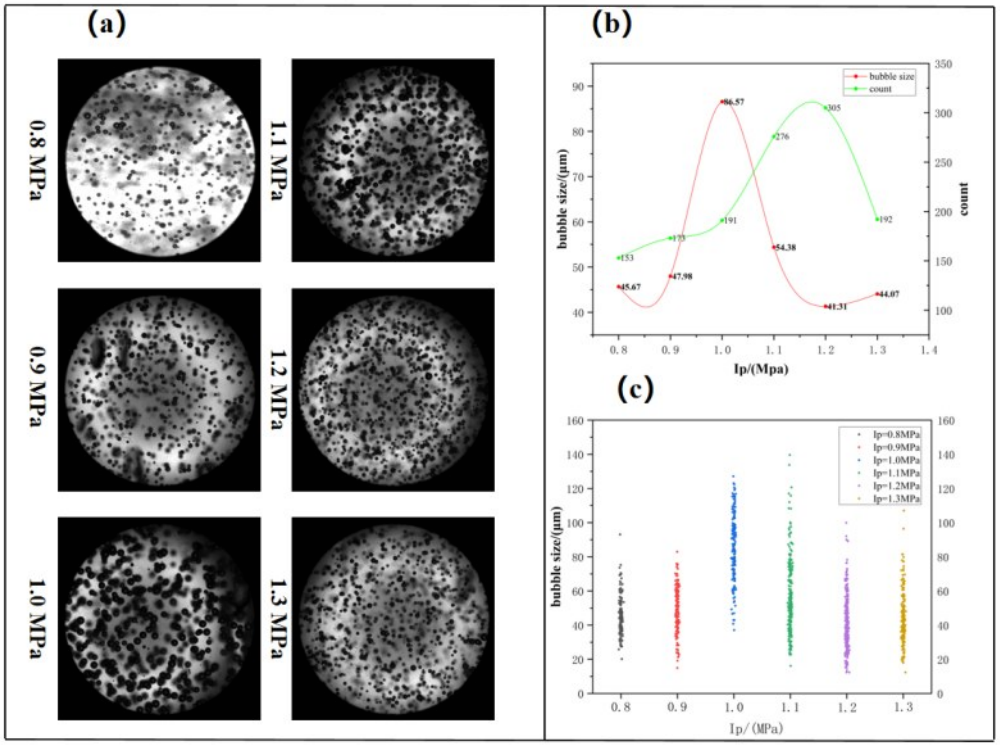


图3 (a)不同充气压力下微气泡分布；(b)不同充气压力下微气泡数量与粒径分布；(c)充气压力对微气泡粒径及数量的影响

Fig. 3 (a) Spatial distribution of microbubbles under different aeration pressures; (b) Microbubble count and size distribution under different aeration pressures; (c) Effect of aeration pressure on microbubble size and quantity

2.2 充气过程流量对气泡的影响

在I_p=1 MPa、ΔP=0.25 MPa、q=700~1100 L/h条件下，气泡数密度及其分布情况。微气泡粒径分布随着液体流量增加而增大，数量在940 L/h时达到最多(图4)。液体流量显著影响微气泡的粒径分布，推测可能是因为液体流量过大，液体与气体之间的剪切力效果越差，气泡切割溶气效率差。微气泡数量在流量范围内呈现正态分布，940 L/h时达到最多。

在I_p=1 MPa、ΔP=0.25 MPa、q=940 L/h条件下，气泡数密度增至11个/mm²以上，气泡粒径正态分布期望值为45 μm，且分布较为集中，80%的置信区间为30-60 μm，气泡效果最佳。实验表明，随着流量在700 L/h至1100 L/h范围内变化，微气泡的数量呈现正态分布规律(图4)。在流量为940 L/h时，剪切力与流体动力的匹配达到最佳，气泡切割与溶气效率最高，此时气泡数量达到最多。微气泡的粒径分布会随着液体流量的增加而增大，当液体流量过大时，液体与气体之间的剪切力效果反而会变差。可能是因为剪切力效果的下降直接导致气泡切割不充分，溶气效率降低，从而使得最终减压析出或未完全破碎的气泡粒径偏大。

2.3 压差对微气泡的影响

通过实验发现，随着压差的增加，微气泡的生成数量呈现出先上升后下降趋势，当ΔP从0.20 MPa增加至0.24 MPa时，微气泡数量稳步上升，从245个增加至最高峰330个。当ΔP超过0.24 MPa后，气泡数量开始明显下降。在0.28 MPa时达到最低谷（239个），并在0.30 MPa时仅保持在241个的较

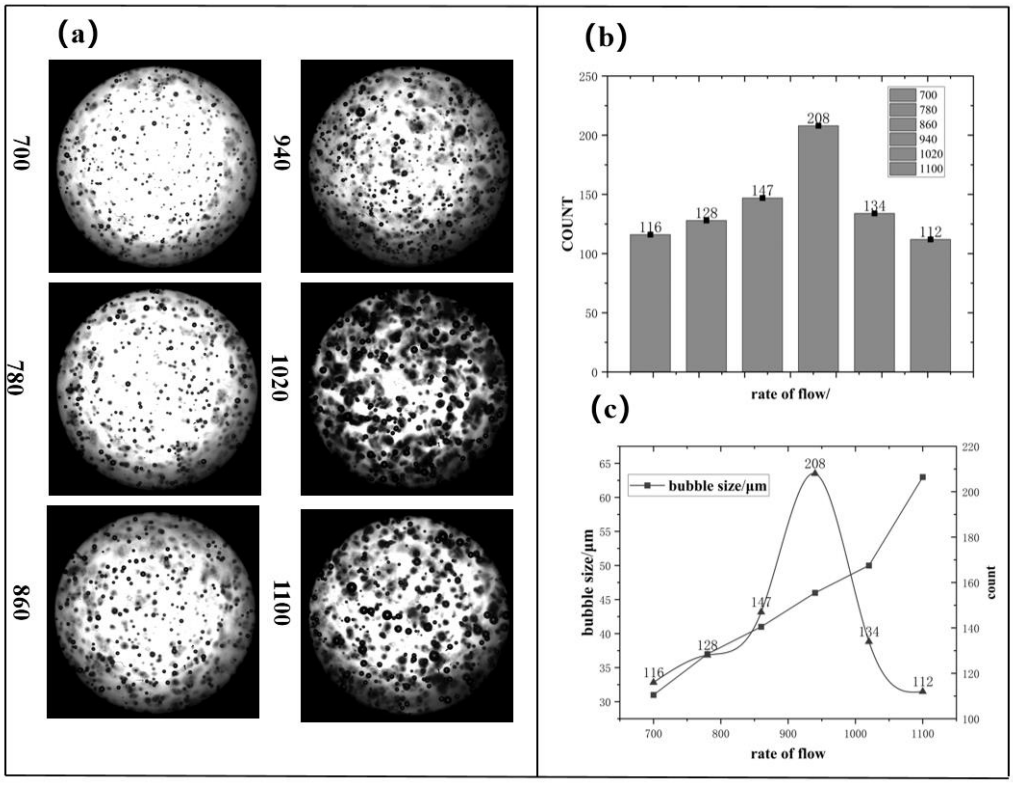


图 4　(a)不同流量下微气泡分布；(b)不同流量下微气泡数量与粒径分布；(c)流量对微气泡粒径及数量的影响

Fig.4　(a) Spatial distribution of microbubbles at different flow rates; (b) Microbubble count and size distribution at different flow rates; (c) Effect of flow rate on microbubble size and quantity

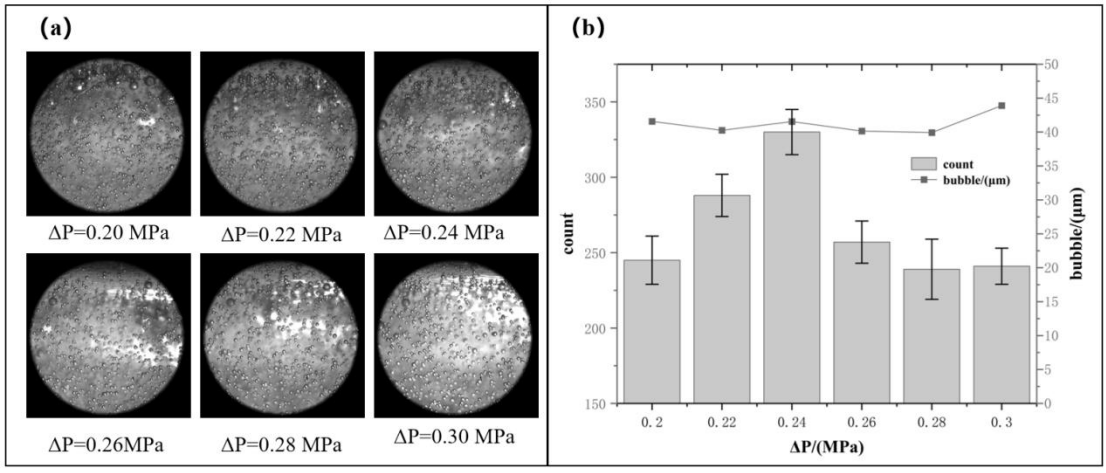


图 5　(a)不同压差下微气泡分布；(b)不同压差下微气泡数量与粒径分布

Fig. 5　(a) Spatial distribution of microbubbles under different pressure drops; (b) Microbubble count and size distribution under different pressure drops

低水平(图 5)。适度增加压差有助于提高发泡效率，但过高的压差反而会抑制微气泡的稳定生成。

微气泡的粒径期望值表现为前期平稳波动，后期急剧增大，在0.20 MPa-0.28 MPa粒径期望值基本维持在40 μm左右，当压差进一步增大到0.30 MPa时，气泡的粒径期望值会有小幅度增加，可能是过高的压差导致气流速度过快，引起气泡间的碰撞聚并加剧，从而合并成了较大粒径的气泡[18]。

2.4　响应面法参数优化

在单因素实验中，充气压力，流量和压差对微气泡生成的影响具有复杂性，并随因素水平的变化而变化。因此，采用响应面法(RSM)对这三种因素

的共同作用进行优化，考察三种因素对气泡密度的影响。本实验使用Box-Behnken设计方法，该方法在因素数量相同的情况下，相较于复合设计(CCD)具有较低的成本和较少的实验数量[27][28]。基于单因素实验的结果，选取充气压力(I_p)为1.1、1.2、1.3 MPa，流量(q)为860、940、1020 L/h，以及压差(ΔP)为0.22、0.24、0.26 MPa进行响应面实验，在此范围内，气泡粒径主要集中在20-60 μm之间。表3所示，以气泡数密度(Y)为响应值，以充气压力(A)、流量(B)和压差(C)作为影响因素，设计了3因素3水平的响应面实验，以探究气浮旋流分离系统的最佳工况，响应面实验设计和结果见(表4)。

表3 因素与水平

Table 3 Factors and Levels

因素	水平-1	水平0	水平1
充气压力	1.1	1.2	1.3
流量	860	940	1020
压差	0.22	0.24	0.26

表4 响应面实验设计和结果

Table 4 Experimental design and results of response surface

实验序号	A(充气压力)	B(流量)	C(压差)	Y:气泡密度实验值(n/mm²)	Y:气泡密度 预测值(n/mm²)
1	-1	-1	0	16.55	16.63
2	1	-1	0	10.96	10.95
3	-1	1	0	12.59	12.59
4	1	1	0	12.26	12.19
5	-1	0	-1	13.53	13.63
6	1	0	-1	12.33	12.51
7	-1	0	1	16.27	16.09
8	1	0	1	11.23	11.13
9	0	-1	-1	15.06	14.89
10	0	1	-1	12.36	12.23
11	0	-1	1	14.06	14.17
12	0	1	1	13.86	14.03
13	0	0	0	19.27	18.90
14	0	0	0	18.63	18.90
15	0	0	0	18.68	18.90
16	0	0	0	19.03	18.90
17	0	0	0	18.90	18.90

利用二阶多项式模型建立目标响应气泡密度关于设计变量的预测模型，利用最小二乘法对数据进行回归分析，得到气泡数密度与各设计变量的响应面函数关系为：

$$Y = 18.90 - 1.52A - 0.70B + 0.27C + 1.32AB - 0.96AC + 0.63BC - 3.15A^2 - 2.66B^2 - 2.41C^2 \quad (3)$$

模型的实验值与预测值的对比如图6所示，预测值分布在实际直线上或两侧，一致性较好。

如表5所示，二次多项式回归模型的F值为241.76，P值< 0.0001，表明模型极显著，具有很高的可信度[29]。模型的拟合效果理想，能够准确描述气泡数密度随充气压力、流量和压差的变化规律。充气压力(A)影响最为显著(P < 0.0001，F=282.78)，且其二次项(A^2)的F值高达764.57，说明压力对气泡数密度存在明显的非线性效应。流量(B)影响也很显著(P=0.0001)，二次项(B^2)同样非常显著(F=501.13)。压差(C)影响相对较弱但仍显著(P=0.0211)，二次项(C^2)极显著(F= 373.69)[30]。中心点(A=0, B=0, C=0，即压力1.2 MPa、流量940 L/h、压差0.24 MPa)处响应值最高(均值为18.90 n/mm²)，且该组实验(第13~17号)实际测得的气泡密度均在18.6~19.3 n/mm²之间，验证了中心点附近为较优工况(图7)。

3 结论

(1)在空气-水体系中，充气压力、液体流量和减压压差均会影响溶气减压微气泡的生成特性。在本文考察范围内，气泡数量面密度随各因素变化呈明显非线性规律。

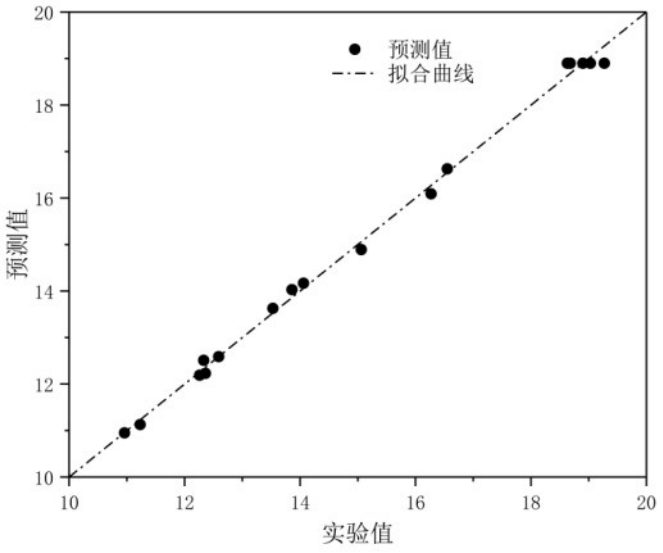


图 6　实际值与预测值比较

Fig.6　Graph comparing actual and predicted values.

表 5　气泡数密度方差分析结果

Table 5　Variance analysis results of bubble number density

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	142.22	9	15.802	241.76	< 0.0001
A	18.48	1	18.48	282.78	< 0.0001
B	3.86	1	3.86	59.12	0.0001
C	0.57	1	0.57	8.76	0.0211
AB	6.92	1	6.92	105.83	< 0.0001
AC	3.69	1	3.69	56.40	0.0001
BC	1.56	1	1.56	23.91	0.0018
A^2	49.97	1	49.97	764.57	< 0.0001
B^2	32.75	1	32.75	501.13	< 0.0001
C^2	24.42	1	24.42	373.69	< 0.0001
Residual	0.46	7	0.065		
Lack of fit	0.182	3	0.0608	0.88	0.521
Pure error	0.275	4	0.0688		
Cor total	142.696	16			

（2）Box-Behnken响应面分析表明，充气压力对气泡数量面密度的影响最为明显，液体流量次之，减压压差的影响相对较弱，各因素之间存在显著交互作用。

（3）在I_p=1.2 MPa、ΔP=0.24 MPa、q=940 L/h的条件下，气泡粒径主要集中在20-60 μm之间，气泡密度均值为18.90 n/mm²，该工况下溶气减压技术微气泡生成效果较优，中心点附近表现出较高的气泡面密度。

符 号 说 明

B_d——气泡数密度，n/mm²

I_p——充气压力，MPa

I_t——充气时长 s

N_b——拍摄面积可视微气泡数量，n

ΔP——变压阀压差，Pa

q——液体流量，L/h

R_{min}——微气泡理论最小半径，μm

S——拍摄面积，mm²

Δt——充气间隔 s

σ——液体表面张力系数，N/m

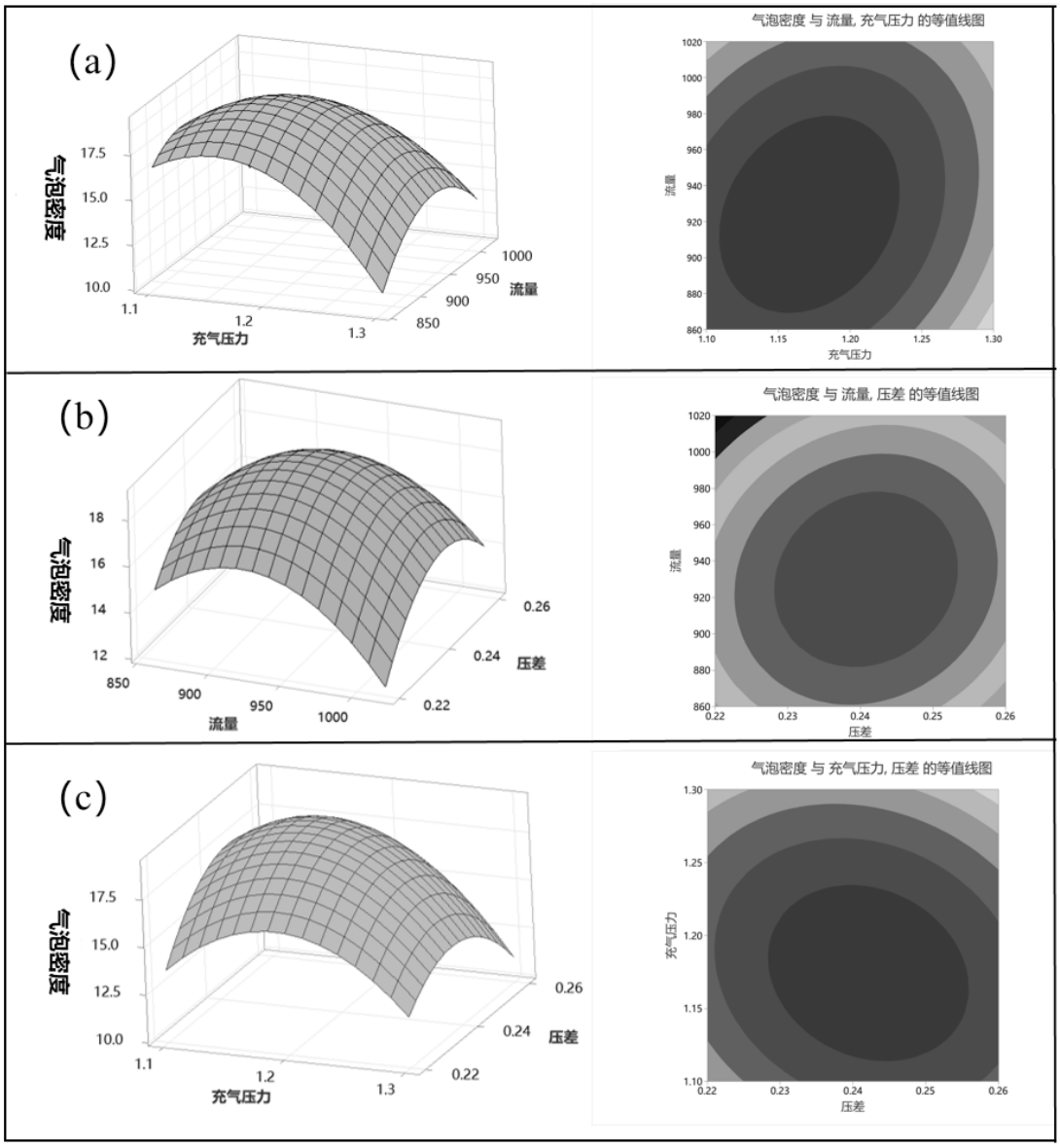


图 7　响应曲面图:(a)气泡密度与流量,充气压力的曲面图,(b)气泡密度与压差,流量的曲面图,(c)气泡密度与压差,充气压力的曲面图

Figure 7　Response surface plots: (a) Response surface plot of bubble density versus flow rate and aeration pressure, (b) Response surface plot of bubble density versus pressure drop and flow rate, (c) Response surface plot of bubble density versus pressure drop and aeration pressure

参考文献

[1] 王永磊, 刘威, 田立平, 等. 气浮工艺中微纳米气泡应用特性与检测技术研究[J]. 工业水处理, 2020, **40**(4): 18-23.
Wang Y L, Liu W, Tian L P, et al. Research progress on micro-nano bubble characteristics detection method and its application in air floatation process[J]. Industrial Water Treatment, 2020, **40**(4): 18-23.

[2] Khuntia S, Majumder S K, Ghosh P. Microbubble-aided water and wastewater purification: a review[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2012, **28**(4/5/6): 191-221.

[3] Shen W H, Mukherjee D, Koirala N, et al. Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: a review[J]. Environmental Reviews, 2022, **30**(3): 359-379.

[4] Suwartha N, Syamzida D, Priadi C R, et al. Effect of size variation on microbubble mass transfer coefficient in flotation and aeration processes[J]. Heliyon, 2020, **6**(4): e03748.

[5] 杨晓, 陶东平, 邵怀志, 等. 纳米气泡浮选技术研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2024,**45**(5): 123-132.
Yang X, Tao D P, Shao H Z, et al. Research progress of nanobubble flotation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, **45**(5):123-132.

[6] Sari E N, Fiveriati A, Rusti N, et al. Visual and Pressure Signal Investigations on Bubble Produced by Ejector Bubble Generator [C]// E3S Web of Conferences, 2024: 3020.

[7] Zhang J, He Y T, Liu S, et al. Oil-water separation in a cylindrical cyclone with vortex finder[J]. Physics of Fluids, 2022, **34**(3): 033314.

[8] Li Q, Ming D Z, Lei M, et al. Numerical investigation on the coupled mechanisms of bubble breakup in a venturi-type bubble generator[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2022, **16**(1): 229-247.

[9] Azevedo A, Oliveira H, Rubio J. Bulk microbubbles generation and its application in flotation: a review[J]. Minerals Engineering, 2022, **176**: 107338.

[10] Chu H, Cao Y, Dong B, et al. A review of microbubble and nanobubble technologies: Generation, properties, and applications [J]. Chemosphere, 2021, **280**: 130731.

[11] Mawarni D I, Juwana W E, Yuana K A, et al. Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using the swirl flow type of microbubble generator[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, **48**: 102846.

[12] Wang L, Liu Y, Ma X, et al. Progress and prospects of micro/ nanobubble technology in oily wastewater treatment[J]. Chemosphere, 2021, **280**: 130704.

[13] Muñoz-Alegría J A, Muñoz-España E, Flórez-Marulanda J F. Dissolved air flotation: a review from the perspective of system parameters and uses in wastewater treatment[J]. TecnoLógicas, 2021, **24**(52): e2111.

[14] Chen Q, Wang X, Zhang J, et al. Experimental and numerical investigation of bubble breakup behavior and microbubble generation in a Venturi-type generator[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **370**: 866-880.

[15] Temesgen T, Bui T T, Han M, et al. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, **246**: 40-51.

[16] Li X, Wang Y, Zhang J. Effects of operating parameters on microbubble size and size distribution in dissolved air flotation[J]. Separation and Purification Technology, 2022, **280**: 120078.

[17] Su Z Y, Sun J, Zhang J W, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of single bubble near wall in shear flow[J]. Physics of Fluids, 2024, **36**(3): 033323.

[18] Chen A Q, Yang W S, Geng S J, et al. Modeling of microbubble flow and coalescence behavior in the contact zone of a dissolved air flotation tank using a computational fluid dynamics – population balance model[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, **58**(36): 16989-17000.

[19] Zhang H, Liu Y, Zhao B. Interfacial instability and bubble breakup dynamics in a high-speed shear flow[J]. Physics of Fluids, 2021, **33**(4): 042105.

[20] Wang S, Yin X, Zhu H, et al. Mechanism of microbubble formation based on gas-liquid two-phase turbulent shear and depressurization[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, **149**: 103984.

[21] Zhang H, Liu Z, Wang X, et al. Hydrodynamic characteristics and bubble size distribution in a dissolved air flotation (DAF) system under varying flow rates[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, **40**: 101978.

[22] Chen F, Yang C, Li D. Microbubble generation *via* depressurization of dissolved gas: Multi-parameter coupling mechanisms and macroscopic operating parameters[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **452**: 139158.

[23] Wang L, Zhao S, Chen M, et al. Influence of pressure drop and turbulent kinetic energy on bubble nucleation and coalescence in dissolved air flotation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, **682**: 132879.

[24] Kim S J, Choi J, Jeon Y T, et al. Microbubble-inducing characteristics depending on various nozzle and pressure in dissolved air flotation process[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, **19**(3): 558-563.

[25] Edzwald J K. Dissolved air flotation and me[J]. Water Research, 2010, **44**(7): 2077-2106.

[26] Blander M, Katz J L. Bubble nucleation in liquids[J]. AIChE Journal, 1975, **21**(5): 833-848.

[27] Song T, Yao Y, Ni L. Response surface method to study the effect of conical surface and vortex-finder lengths on de-foulant hydrocyclone with reflux ejector[J]. Separation and Purification Technology, 2020, **253**: 117511.

[28] Jensen W A. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments 4th edition[J]. Journal of Quality Technology, 2017, **49**(2): 186-188.

[29] Montgomery D C. Design and Analysis of Experiments[M]. 10th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.

[30] Myers R H, Montgomery D C, Anderson-Cook C M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments[M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.