DOI: 10. 19650/j.cnki.cjsi.J1905071

# 多尺度气泡尺寸分布数字图像测量方法研究\*

潘志成1,赵陆海波2,张 彪1,唐志永2,许传龙1

(1. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室 南京 210096;

2. 中国科学院上海高等研究院低碳转化与工程重点实验室 上海 201210)

摘 要: 鼓泡塔是一种广泛应用于能源和环境领域的多相流反应器, 鼓泡塔中气泡的大小和浓度对于研究鼓泡塔中"三传一 反"过程具有重要意义。采用高速摄像法和数字图像处理技术开展了鼓泡塔中内多尺度气泡尺寸分布测量研究, 针对气泡识 别过程中密集气泡易发生重叠的问题, 提出基于曲率计算的凹点匹配与圆周拟合的重叠气泡分割与轮廓重构算法。搭建了鼓 泡塔反应器实验装置, 针对星型、均匀和方形 3 种不同进气孔形态的气泡分布器开展了实验研究, 分析了不同尺度气泡的尺寸 分布规律。试验结果表明:该算法不仅能够有效地从图像中提取轮廓清晰完整的气泡, 而且能够对图像粘连重叠的气泡进行准 确分割, 从而可精确地获得多尺度气泡尺寸分布。随着气体流量的增加, 小气泡的数量急剧增加, 同时产生更大的气泡; 气泡的 最大直径和 Sauter 平均直径均随气体流量的增加而增大, 且两者的比值基本保持不变, 即分布器形式对气泡尺寸分布均匀性有 影响, 方形分布器产生气泡最均匀, 气含率相对其他两种分布器更高。实验结果证明了图像分割与轮廓重构方法在气液两相流 中气泡参数在线测量的可行性。

# Multi-scale bubble size distribution measurement by digital imaging technique

Pan Zhicheng<sup>1</sup>, Zhao Luhaibo<sup>2</sup>, Zhang Biao<sup>1</sup>, Tang Zhiyong<sup>2</sup>, Xu Chuanlong<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.CAS Key Laboratory of Low-Carbon Conversion Science and

Engineering, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: The bubble column is a multiphase flow reactor, which has been widely used in energy and environmental field. The size and concentration of bubbles are of great significance for studying the heat and mass transfer process in the bubble column. A digital image processing technique is proposed to measure the bubble size distribution in the bubble column. However, the dense bubbles are easy to overlap during the bubble recognition process. To solve this problem, the overlapping bubble matching and the circumferential fitting based on the curvature calculation are presented. The segmentation and contour reconstruction algorithm are further used to determine the size distribution of bubbles. Experiments are implemented in a bubble column. Experimental results show that the proposed algorithm can not only extract the clear and complete bubbles from the image, but also accurately segment the overlapping bubbles of the image. The multi-scale bubble size distribution can be accurately obtained accordingly. As the gas flow rate increasing, the number of small bubbles increases sharply. At the same time, larger bubbles are also generated. The maximum diameter of the bubble and the average diameter of Sauter increase with the increase of the gas flow rate. But, their ratio remains basically the same. The configuration of the distributor has an influence on the uniformity of the bubble size distributors. These results verify the feasibility of the image segmentation and contour reconstruction method for the measurement of bubble parameters in gas-liquid two-phase flow.

Keywords: bubble column; image processing; bubble size distribution; segmentation; contour reconstruction

收稿日期:2019-04-29 Received Date:2019-04-29

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(51676044)、江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2018705)、中国科学院低碳转化科学与工程重点实验室 开放课题(KLLCCSE-201703,SARI, CAS)资助项目

## 0 引 言

鼓泡塔反应器是作为分散相的气体以气泡的形式进 入连续的液相中的一种反应器,具有结构简单、混合性能 佳、传质传热性能好等优点<sup>[1]</sup>。在石油化工过程中,气液 鼓泡塔反应器得到了广泛应用,例如残油的加氢与裂解、 气体吸收、废气废水处理、脱硫等<sup>[2]</sup>。在鼓泡床反应器 中,气液两相流的加入,有利于加快装置中反应物的混合 速度,并且增强反应装置中热量的传递与交换,有利于加 快化学反应速度,提高反应效率。在鼓泡塔反应器中,气 液两相之间的接触状况直接决定了反应效果,气含率和 气泡尺寸等参数决定了反应器的体积、流型、气液相接触 面积以及相间传质传热,进而影响整个反应的速率。因 此,对鼓泡塔反应器内气泡尺寸参数的测量及分布规律 研究显得尤为重要<sup>[34]</sup>。

在气泡尺寸参数测量领域,近年来提出了多种基于 数字图像处理方法的参数测量方法[5-7],然而鼓泡塔内气 液两相流图像中,相互粘连重叠的气泡往往会呈现出复 杂形态,精确合理地分割出气泡十分困难<sup>[8]</sup>。因此,研究 有效可行的图像分割算法对于实现气泡尺寸分布的精确 检测极为重要。许多学者对粘连颗粒图像分割问题进行 了研究,主流的重叠对象分割方法有形态学算法、分水岭 算法和基于凹点匹配的算法。形态学算法将原图与背景 作差得到中心亮点,然后对亮点进行重复加厚得到气泡 的分割图像,该算法对于粘连颗粒体积相差很大的情况 不能准确地进行分割。分水岭算法通过对不同区域设置 标记,循环标记的最终结果形成分水岭,进行分割和提 取纹理信息,该方法能够较好地保持气泡的形状特征,处 理速度快,但是存在过度分割的情况,结果有较大误 差<sup>[9]</sup>。凹点匹配算法通过寻找边缘凹陷信息的凹点并进 行匹配连接,对复杂的重叠目标分离效果较理想<sup>[10]</sup>。傅 蓉等[11]将凹点匹配算法应用于医学细胞检测分析,提出 了基于凹点搜索的细胞图像分割算法,确定细胞的数目 与重叠类型。行鸿彦等<sup>[12]</sup>运用凹点匹配提出了一种新 型的雨滴微观特征提取方法,获取雨滴的微观特征量。 林雪华等[13]将凹点匹配算法运用于农业上,采用链码跟 踪提取轮廓,计算曲率搜索凹点,对大米图像进行分割, 为大米等级评价、分类处理提供了便利。但现有的凹点 匹配算法也存在一些问题:1)基于轮廓曲率变换算法得 到的凹点群对轮廓曲线的局部变化和噪声影响敏感,易 将噪声识别为假凹点。2)重叠情况比较复杂的情况下, 气泡轮廓上的凹点往往会出现错误匹配。3)现有的气泡 轮廓算法重构一般通过将凹点简单两两相连得到气泡分 割线,分割的气泡并不能反映气泡重叠部分的轮廓 信息<sup>[14-15]</sup>。

本文针对基于凹点匹配的气泡图像重叠分割算法存 在的问题,提出一种从曲率信息中提取特征凹点,从而完 成重叠气泡分割的新方法,实现重叠气泡的分割,进一步 应用圆周拟合重构气泡轮廓,提高了分割的精度。搭建 了鼓泡塔实验装置,以鼓泡过程中大小不一的气泡群为 对象,通过高速摄影仪拍摄气泡群图像,获得了多尺度气 泡尺寸分布。在此基础上分析了气泡 Sauter 平均直径、 最大直径、气含率与气体流量的关系。

# 1 重叠气泡分割与轮廓重构算法

#### 1.1 气泡图像预处理与轮廓提取

待处理原始图像如图 1 所示。从图 1 可以看出,图 像中部分气泡出现了重叠。首先对图像进行预处理, 包括图像灰度化、差影法去除背景、图像二值化、孔洞 填充以及基于 Canny 算子边缘检测,处理结果如图 2 所示。



图 1 气泡原始图像 Fig.1 Raw bubble image



(a) 灰度图像 (a) Gray image



(b) 差影法去除背景(b) Background removal



(c) Binarization



(d) 孔洞填充 (d) Hole filling



(e) Canny边缘检测结果 (e) Canny edge detection results

图 2 气泡图像预处理和轮廓提取



#### 1.2 重叠气泡凹点搜寻与图像分割

在气泡图像轮廓边界上,计算出每个目标联通区域 的边界曲率,确定拐点(即气泡轮廓曲线上曲率的极大值 点)。轮廓上的拐点分为凹点和凸点两类,筛选出所有凹 点,将找出的凹点进行两两匹配并连接,即可得到初步分 割的图像。

数字曲线由于其离散特性,不能直接由数学上的定 义计算曲率值,一般采用离散曲率计算出曲线上个点的 曲率大小。本文采用 K 余弦曲率算法<sup>[16]</sup>计算气泡轮廓 各点曲率,从而找出拐点位置。该算法的实现过程为:假 设曲线上存在一点  $P_i(x_1, y_1)$ ,该点为边界轮廓序列的 第 i 个点,如图3 所示。第 i-m 个边界点和第 i+m 个边界 点是  $P_i$  点等间距的前继点和后继点,坐标分别是  $P_i$ -m  $(x_0, y_0)$ 和  $P_{i+m}(x_2, y_2)$ ,其中 m 为间距。令  $P_i$  与  $P_i$ -m、  $P_{i+m}$ 形成的向量  $\alpha_i(m)$   $\beta_i(m) 分别为:$ 

$$\boldsymbol{\alpha}_{i}(m) = (x_{1} - x_{0}, y_{1} - y_{0})$$
(1)

$$\boldsymbol{\beta}_{i}(m) = (x_{1} - x_{0}, y_{1} - y_{2})$$
(2)

两向量形成的夹角余弦值  $C_i(m)$  为:

$$C_{i}(m) = \cos\theta_{i} = \frac{\boldsymbol{\alpha}_{i}(m)\boldsymbol{\beta}_{i}(m)}{\mid \boldsymbol{\alpha}_{i}(m) \mid \mid \boldsymbol{\beta}_{1}(m) \mid}$$
(3)

遍历边界轮廓上所有的边界点以及与前继点后继点 形成夹角的余弦值,遍历信息同时被保存,包括边界点 *P*<sub>i</sub> 的位置、两向量形成的夹角余弦值 *C*<sub>i</sub>(*m*)。



图 3 前继点、后继点与余弦曲率 Fig.3 Predecessor point, successor point and cosine curvature

边界曲率的极大值点处的余弦值也为极大值点,设 定余弦值的阈值 CT,余弦值 C<sub>i</sub>(m)大于 CT 的点,即曲率 的极大值点,即轮廓曲线上的拐点,记为 Q<sub>i</sub>。对选取的 拐点进行进一步分析,若相邻几个点均被选中,那么就 在此拐点及被选中的相邻点中选取曲率最大的那一点, 而将其余点舍弃。

轮廓拐点分为凹点与凸点两类,利用辛普森面积法 判断拐点的类型,筛选出边界上的凹点。根据拐点  $Q_i(x_1, y_1)$ 与前继点 $Q_i - m(x_0, y_0)$ 和后继点 $Q_{i+m}(x_2, y_2)$ 围成一个矢量三角形,此三角形的面积 $S_i$ 为:

$$S_{i} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_{0} & y_{0} & 1 \\ x_{1} & y_{1} & 1 \\ x_{2} & y_{2} & 1 \end{vmatrix}$$
(4)

本文中的轮廓点坐标按逆时针存储,若拐点 $Q_i$ 与前继点、后继点围成的三角形面积 $S_i$ <0,如图 4(a)所示,那 么该点为凹点;若拐点 $Q_i$ 与前继点、后继点围成的三角 形面积 $S_i$ >0 如图 4(b)所示,那么该点为凸点。遍历搜 寻得到的所有拐点,提取所有的凹点并按序存放到数组 集之中。

凹点检测结束之后,需要对凹点进行匹配并选择分 割路径,本文设置3个匹配准则。

1)分割线长度最短准则:凹点与匹配的凹点之间的 距离最短;

2)凹点不同区域准则:同一组凹点不能从属于相同 的区域;

3)优弧选取准则:保证一组凹点划分的目标轮廓线 是优弧,两个凹点之间的距离(即弦长)为d,目标周长为 p,选取的分割线需要满足 d<p/π。</p>



根据上述3条分割准则,可完成了粘连气泡的拐点的搜寻和凹点匹配,如图5所示。以分割线长度最短准则为基础,令任一凹点为起点,按照逆时针方向与匹配的凹点相连接,重叠气泡能够粗略地分割出来,如图6所示。从图6可以看出分割后的气泡边缘连续而且轮廓清晰,重叠的部分明显地被分离开,为后续轮廓的重建提供了基础。





图 6 气泡分割结果 Fig.6 Bubble segmentation result

#### 1.3 基于最小二乘圆周拟合法气泡轮廓重构

分割后得到的气泡并不是完整的气泡,为了补偿重 叠部分的面积,实现气泡轮廓的重构,利用基于最小二乘 法的圆周插值拟合算法进行圆周轮廓重构。最小二乘圆 拟合方法是一种基于统计的检测方法,即使在图像中圆 形目标受光照强度不均等因素的影响而产生边缘缺失, 也不会影响圆心的定位和半径的检测,若边缘定位精确 轮廓清晰,最小二乘法可实现亚像素级别的精确拟合定 位。拟合圆曲线原理如图 7 所示。





令拟合的圆周曲线方程为:  

$$R^{2} = (x - A)^{2} + (y - B)^{2}$$
 (5)  
式中: R 为圆周半径; A, B 为圆心横纵坐标。  
方程展开得到:  
 $R^{2} = x^{2} - 2Ax + A^{2} + y^{2} - 2By + B^{2}$  (6)  
令  $a = - 2A, b = -2B, c = A^{2} + B^{2} - R^{2},$ 可得圆周曲  
线方程的另一种形式:  
 $x^{2} + y^{2} + ax + by + c = 0$  (7)  
求出参数  $a, b, c,$ 可以求得圆心坐标与半径的参数:  
 $A = -\frac{a}{2}, B = -\frac{b}{2}, R = \frac{1}{2}\sqrt{a^{2} + b^{2} - 4c}$  (8)  
如图 7 所示, 假设轮廓曲线上存在一个点  $D(x_{i}, y_{i}),$   
这个点到圆心的距离为  $d_{i},$ 则:  
 $d_{i}^{2} = (x_{i} - A)^{2} + (y_{i} - B)^{2}$  (9)  
 $点 D$ 到圆心的距离与半径的平方差为:  
 $\delta_{i} = d_{i}^{2} - R^{2} = (x_{i} - A)^{2} + (y_{i} - B)^{2} =$   
 $x_{i}^{2} + y_{i}^{2} + ax_{i} + by_{i} + c$  (10)  
 令  $Q(a, b, c) 为 \delta_{i}$  的平方和,则  
 $Q(a, b, c) = \sum \delta_{i}^{2} = \sum (x_{i}^{2} + y_{i}^{2} + ax_{i} + by_{i} + c)^{2}$ 

求出参数a,b,c,使得Q(a, b, c)最小。

对于图 6 中的气泡分割图像,根据分割区域的中心 坐标顺时针排序,利用最小二乘法分别对单个气泡进行 圆周拟合,分别计算出每个气泡的圆心坐标与半径,计算 结果如图 8(a) 所示。以计算的单个气泡的圆心为原点, 以 R 为半径进行圆周拟合进行运算,得到曲线轮廓,得到 重叠气泡的重构轮廓曲线。气泡轮廓重构的最终结果如 图 8(b) 所示,气泡轮廓得到了较好地重构。



### 2 试验装置

鼓泡塔实验及测量装置如图 9 所示,包括摄像系统 和流体控制系统两部分。试验中以空气作为气相注入水 (液相)中。流体控制系统由气泵、转子流量计以及定制 测试管道组成。压缩空气经过转子流量计进入透明测试 管道。其中,气体流量由 LZB-6WB 玻璃转子流量计进行 控制。试验测试管道为高 1.8 m,直径 25 cm 的圆柱体有 机玻璃容器,其中底部壁面厚度和侧壁面厚度均为 8 mm。摄像系统采用 Phantom Miro M310 高速摄像机, 分辨率最高可以达到 1 280×800,实验时相机帧率设定为 1 000 Hz,镜头采用 TOKINA AT-X M100 AF PRO 微距镜 头,放大倍率为 1。高速相机(CCD)固定在测试装置前, 摄像的范围覆盖整个装置。照明光源采用 LED 平面光 源,光源固定在装置的后面,为了能好地捕捉气泡的轮廓 和质心采用背光照射法。



为了验证本文提出的图像处理算法的可行性以及不同试验工况下, 鼓泡床内气泡直径的分布规律, 在 3 种不

同进气孔形态的气泡分布器的试验装置进行了实验研究。气泡分布器多孔结构,开孔个数为41,直径为10 mm,开孔率为11.36%,分布类型分别为星型分布,均匀分布和方形分布,如图10 所示。气流量分别设置为3,5 和 10 L/min。



Fig.10 Structures of three distributors

由于气泡图像的基本单位是像素,而实际测量中要 求气泡测量参数是几何长度单位,所以需要对图像的像 素进行标定。试验之前对图像进行标定,选择透明标定 物,如透明直尺或其他已知几何尺寸的物体作为测量对 象。采用的方法是在保持高速相机拍摄参数不变的前提 下,将透明直尺置于测试管道中拍摄图片。实验得到 8.6 cm的标定长度对应的图像像素为1024 pixel,标定 的比例是 0.084 mm/pixel。

## 3 试验结果及讨论

试验中获得了气泡直径分布,并统计了最大气泡直 径  $d_{max}$ 、气泡 Sauter 平均直径  $d_s$ 、Sauter 平均直径  $d_s$  与最 大气泡直径  $d_{max}$ 的比值 C。Sauter 平均直径是表征气液 界面传质过程的重要参数<sup>[17]</sup>,其值为具有相同总体积和 总表面积比值的气泡的平均直径。Sauter 平均直径计算 公式如下:

$$d_{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N} d_{i}^{3}}{\sum_{i=1}^{N} d_{i}^{2}}$$
(12)

式中: $d_s$ 为 Sauter 平均直径; $d_i$ 为每个独立气泡的直径; N为气泡的总个数。

不同工况下,不同气泡分布器中的气泡直径分布测量结果如图 11~13 所示。从图 11~13 可以看出,在同一分布器的条件下,气泡尺寸的整体分布情况基本变化不大,均匀分布分布器和方形分布器中,气泡直径分布大致呈正态分布。在气体流量为 3 L/min 时,鼓泡塔中的气泡小而且较分散,多数呈近似圆形,随着气体流量的增加直至 10 L/min,气泡尺寸变大且多为长条形或呈现出不规则形状,气泡的数量随之增大,其中小气泡的数量急剧增加,大气泡的个数也随之增加,星型分布器中气泡尺寸的范围由 0~2 mm 变为 0~4 mm,均匀分布器中气泡尺寸

的范围由 0~3.5 mm 变为 0~4.5 mm, 方形分布器中气泡 尺寸的范围由 0~3.5 mm 变为 0~5 mm。气体流量较小 时,大尺寸气泡数量较少, 当流量增大至 5 L/min 后会开 始出现个别大尺寸气泡, 这是因为气泡在低流量的情况 下,上升速度较快, 在此时气泡运动主要呈沉降态, 运动 有序, 气泡发生碰撞合并的几率较小, 随着气体流量的不 断增加,上升气泡与器壁发生碰撞,同时气泡间的聚并作 用也更剧烈,使得气泡尺寸增大。当气体流量为3~ 5 L/min时,此时气泡数密度较小,重叠的现象不严重,气 泡以单个气泡的形式存在,最大直径的大小主要取决于 气泡的形变,随着气体流量的增大,气泡发生聚并破碎, 此时最大直径取决于气泡的聚并融合过程。





Fig.11 Results of bubble diameter in star distributor with different air flow rates





Fig.12 Measurement results of bubble diameter in uniform distributor at different air flowrates

不同的气泡分布器中,气泡尺寸的分布集中峰值出现位置不同,星型分布的试验台气泡分布较陡,小气泡出现频率更高,峰值位置在 0.5 mm 左右,均匀分布器和方形分布器开孔均匀程度更高,不同直径气泡占比分布变平缓,大粒径气泡占比减少,说明气体径向扩散与碰撞随

开孔均匀增大而减小<sup>[18]</sup>。

获得气泡尺寸数据后,可以统计最大气泡直径 d<sub>max</sub>、 气泡 Sauter 平均直径 d<sub>s</sub>、最大气泡直径 d<sub>max</sub>的比值 C 与 含气率等气泡特性参数如表 1 所示。从表 1 可看出,不 同类型的分布器下,鼓泡塔内 Sauter 平均气泡直径均随



图 13 方形分布试验装置不同进气量下, 气泡直径分布测量结果 Fig.13 Measurement results of bubble diameter in square distributor at different air flowrates

表1	3种分布器,在不同流量下气泡尺寸特性	
Fable 1	The bubble size characteristics under different	

gas now rates at three distributors								
试验台 序号	气体流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	Sauter 平均 直径/mm	最大直径/ mm	С	气含率/ %			
星型分布	3	1.83	3. 48	0. 526	14. 3			
星型分布	5	1.97	3. 72	0. 530	19.8			
星型分布	10	2.39	4. 50	0. 531	29.3			
均匀分布	3	1.08	1. 98	0. 547	15.2			
均匀分布	5	1.64	2. 98	0. 551	21.1			
均匀分布	10	2. 21	3. 98	0. 555	30			
方形分布	3	2. 31	3. 34	0. 672	15.6			
方形分布	5	2.78	4. 41	0. 630	23.2			
方形分布	10	3.05	4. 74	0. 643	31.6			

气体流量增加呈现上升的趋势。 气泡平均直径最大直径、比值 C 和气含率与气流量 的关系,如图 14~17 所示。由图 14、15 可知,Sauter 平均 直径与最大直径均随着气体流量的增加而增大。在不同 气泡分布器的试验条件下,Sauter 平均直径与最大直径 的比值 C 值分别稳定在 0.53、0.55、0.64 左右。由此推 断,在气泡进气稳定时,Sauter 平均直径与最大直径比值 基本保持不变,可通过提取最大直径来估算 Sauter 平均 直径的大小,分布器形式决定了 C 值,C 值越大表明气泡 尺寸分布越均匀,即方形气泡分布器中气泡分布最均匀。 从图 17 中可以看出,不同的分布器中,气含率基本一致, 随着气体流量的增加,气含率也随之增加,说明分布器对 整体的气含率影响较小<sup>[19]</sup>。本文中方型分布器产生气 含率更高。







Fig.15 The maximum diameter of air bubbles at different air flowrates q



图 16 不同气流量 q 下,平均直径与最大直径的比值 C Fig.16 The ratio of the average diameter to the maximum diameter at different air flowrates q



图 17 不同气流量 q 下, 气含率



# 4 结 论

本文提出了一种基于图像处理技术的鼓泡塔中气液 两相流中气泡尺寸分布测量方法。针对气泡识别过程中 密集气泡易发生重叠的问题,提出基于曲率计算的凹点 匹配与圆周拟合的重叠气泡分割与轮廓重构算法,该算 法不仅能够有效地从图像中提取轮廓清晰完整的气泡, 而且能够对图像粘连重叠的气泡进行准确分割。搭建了 相关实验系统,开展了气泡的尺度分布研究。实验结果 表明:随着气体流量的增加,小气泡的数量急剧增加,同 时产生更大的气泡;气泡的最大直径和 Sauter 平均直径 都随着气体流量的增加而增大。实验结果证明了气泡尺 寸分布图像测量方法的有效性。

#### 参考文献

- [1] SADATOMI M, SATO Y, SARUWATARI S. Two-phase flow in vertical noncircular channels [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(6): 641-655.
- [2] DELNOIJ E, KUIPERS J A M, SWAAIJ V W P M. A three-dimensional CFD model for gas-liquid bubble columns [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(13-14): 2217-2226.
- [3] 张同旺,何广湘,靳海波,等.浆态床鼓泡反应器流体力 学的研究进展[J].北京石油化工学院学报,2001, 9(2):47-53.
  ZHANG T W, HE G X, JIN H B, et al. Progress of hydrodynamics in slurry bubble column reactor [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2001,9(2):47-53.
- [4] GRAU R A, HEISKANEN K. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(7): 507-513.
- [5] SCHÄFER R, MERTEN C, EIGENBERGER G. Bubble size distributions in a bubble column reactor under industrial conditions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6-7): 595-604.
- [6] JAHEDSARAVANI A, MASSINAEI M, MARHABAN M
   H. An image segmentation algorithm for measurement of flotation froth bubble size distributions
   [J]. Measurement, 2017, 111: 29-37.
- [7] HASANEN A, ORIVUORI P, AITTAMAA J. Measurements of local bubble size distributions from various flexible membrane diffusers [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006, 45(4): 291-302.
- [8] 韦冬冬,赵豫红.基于凹点匹配的重叠图像分割算 法[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(1): 99-102.

WEI D D, ZHAO Y H. An image segment algorithm for overlapped particles based on concave points matching[J]. Computers and Applied Chemistry, 2010, 27(1): 99-102.

[9] 刘荣,彭艳敏,唐粲,等.基于分水岭与图割的自动 分割方法[J].北京航空航天大学学报,2012,38(5): 636-640,647.

> LIU R, PENG Y M, TANG C, et al. Object autosegmentation based on watershed and graph cut [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(5): 636-640, 647.

- [10] 施丽莲,叶军,沈红卫. 气液两相流气泡图像的形态 学分割方法[J]. 自动化仪表, 2012, 33(10): 20-23.
  SHI L L, YE J, SHEN H W. Morphological segmentation method for bubbles image in gas-liquid two-phase flow[J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(10): 20-23.
- [11] 傅蓉,申洪,陈浩.基于凹点搜寻的重叠细胞图像自动 分离的算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(17): 21-23, 28.

FU R, SHEN H, CHEN H. Research of automatically separating algorithm for overlap cell based on searching concave spot [ J ]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(17): 21-23, 28.

- [12] 行鸿彦,张兰,郭敏.一种新型的雨滴微观特征提取方法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(6): 1883-1886.
  XING H Y, ZHANG L, GUO M. Study on new method for extracting microscopic features of raindrops [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(6): 1883-1886.
- [13] 林雪华,陈雁冰.凹点匹配算法在大米图像分割中的应用[J].曲靖师范学院学报,2018,37(3):36-39.
  LIN X H, CHEN Y B. An application of concave point matching algorithm in rice image segmentation [J].
  Journal of Qujing Normal University, 2018, 37(3): 36-39.
- [14] MICALLEF K, FANG G, DINHAM M. Automatic seam detection and path planning in robotic welding [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2011, 88: 23-32.
- [15] 刘小燕,吴鑫,孙炜,等.基于形态学重建和 GMM 的球团颗粒图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 230-238.

LIU X Y, WU X, SUN W, et al. Image segmentation of pellet particles based on morphological reconstruction and GMM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 230-238.

[16] 余成波,秦华峰,张莲.基于 B 样条函数的图像分割分

水岭算法研究[J]. 压电与声光, 2008, 30(3): 356-358.

YU CH B, QIN H F, ZHANG L. Watershed algorithm research of image segmentation based on B-spline function [ J ]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(3): 356-358.

- [17] 陈日健,闫红杰,刘柳,等.底吹过程中基于图像处理技术的气泡直径分布特性[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(6):1541-1547.
  CHEN R J, YAN H J, LIU L, et al. Bubble size distribution in bottom blowing process based on image processing technology [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(6): 1541-1547.
- [18] 赵陆海波,廖波,王小泉,等.不同分布器对鼓泡塔气液 两相流影响的 CFD 模拟[J].现代化工,2012,32(11): 101-104.

ZHAO L H B, LIAO B, WANG X Q, et al. CFD simulation of gas-liquid flow in bubble columns with different distributors [J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(11): 101-104.

[19] ZHAO L H B, LYU M, TANG ZH Y, et al. Enhanced photo bio-reaction by multiscale bubbles [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 354: 304-313.

## 作者简介



**潘志成**,2016年于东南大学获得学士学 位,现为东南大学硕士研究生,主要研究方 向为多相流测试技术。

E-mail: 220160457@ seu.edu.cn

Pan Zhicheng received his B. Sc. degree

from Southeast University in 2016. He is currently a graduate student at Southeast University. His main research interest is multiphase flow testing technology.



**许传龙**(通信作者),分别于 2001 年获 得东北电力大学学士学位和 2006 年东南大 学博士学位,现为东南大学教授,博士生导 师,东南大学能源与环境学院副院长,主要 研究方向为热物理测量、多相流测试、燃烧 诊断技术等。

E-mail: chuanlongxu@ seu.edu.cn

**Xu Chuanlong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeastern Electric Power University in 2001 and his Ph. D. degree from Southeast University in 2006. He is currently a professor, a doctoral tutor, and a vice dean of the School of Energy and Environment at Southeast University. His main research interests include thermal physics measurement, multiphase flow test, combustion diagnostic technology, etc.