

## Research status of hydrodynamic characteristic parameters of flotation equipment

Jikang HAN<sup>1</sup>, Weizhi WANG<sup>1\*</sup>, Wei ZHANG<sup>2</sup>, Zhiwei SHAN<sup>1</sup>, Dong WANG<sup>1</sup>

1. College of Mine Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China

2. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract:** Flotation equipment is an important gas-liquid reaction device in the field of mineral processing engineering. Flotation equipment has been used for one hundred years. With the rapid development of society, flotation equipment has gradually developed towards automation and large-scale. In recent years, more and more researches and analysis of hydrodynamic characteristic parameters in flotation equipment have been carried out, which has further promoted the reasonable enlargement and optimization of equipment. This work briefly introduced the current development and application status of flotation equipment, then summarized in detail the detection methods, principles and the current research status of three important hydrodynamics characteristic parameters in flotation equipment: bubble size, gas holdup and bubble velocity. According to the current development direction of mineral processing equipment, it was pointed out that how to accurately detect the parameters of the flotation bubble and improved the adaptability of the detection device, and widely applied in the industry to improve the flotation index are still a key issue that researchers faced at present. Image processing technology which can detect multiple characteristic parameters in the flotation equipment had been widely used, but bubble image processing methods which the majority of research scholars had put forward at present have limitations, and failed to involve many complicated details and the actual environment of concentrator, leading to the poor stability and low accuracy of bubbles when bubbles feature was extracted. Therefore, it was necessary to develop machine vision technology that was used in a variety of complex environments and had a strong ability to sort complex problems. At the same time, some sophisticated intrusion detection equipment such as conductivity probes still had certain defects in complex flotation environments. How to design and develop intrusive devices that are more conducive to complex flotation environments was one of the current research direction.

### Key learning points:

- (1) The development status of domestic flotation column and flotation machine was briefly described.
- (2) The detection methods and research status of three important hydrodynamics characteristic parameters of bubble size, gas holdup and bubble velocity in flotation equipment were summarized.
- (3) The problems of hydrodynamics characteristic parameter detection in mineral processing and its development direction in the future were put forward.

**Key words:** mineral processing engineering; flotation machine; flotation column; bubble size; bubble velocity; gas holdup

收稿: 2020-04-26, 修回: 2020-05-26, 网络发表: 2020-06-19, Received: 2020-04-26, Revised: 2020-05-26, Published online: 2020-06-19

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(编号: E2017209214)

作者简介: 韩继康(1993-), 男, 新疆省乌鲁木齐市人, 硕士, 矿业工程专业, E-mail: jikanghan@163.com; 王伟之, 通讯联系人, E-mail: wweizhi@126.com.

**引用格式:** 韩继康, 王伟之, 张伟, 等. 浮选设备流体力学特征参数研究现状. 过程工程学报, 2020, 20(10): 1121-1133.

Han J K, Wang W Z, Zhang W, et al. Research status of hydrodynamic characteristic parameters of flotation equipment (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(10): 1121-1133, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220139.

# 浮选设备流体力学特征参数研究现状

韩继康<sup>1</sup>, 王伟之<sup>1\*</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 单志伟<sup>1</sup>, 王东<sup>1</sup>

1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210

2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

**摘要:** 浮选设备是矿物加工工程领域一种重要的气液反应装置, 主要包括浮选机和浮选柱。浮选设备应用已有百年历史, 随着选矿技术水平的提高, 浮选设备逐渐向自动化、大型化的方向发展。近年来对浮选设备内流体力学特征参数的研究解析越来越多, 进一步促进了设备的合理放大和优化。本工作在简要介绍目前浮选设备的发展和应用现状后, 总结了国内外学者对浮选设备内气泡尺寸、气含率和气泡速度 3 个重要流体力学特征参数的检测方法和研究现状, 提出了在今后研究中, 开发以机器视觉为核心的检测技术和强化侵入式检测装置的适用性是流体力学特征参数检测手段的发展方向之一。

**要 点:**

- (1) 简述了国内浮选机及浮选柱的发展和使用现状。
- (2) 重点总结了目前浮选设备内气泡尺寸、气含率和气泡速度 3 个重要流体力学特征参数的检测方法和研究现状。
- (3) 提出了流体力学特征参数检测方法在矿物加工领域存在的问题及其未来在该领域的发展方向。

**关键词:** 矿物加工工程; 浮选机; 浮选柱; 气泡尺寸; 气泡速度; 气含率

**中图分类号:** TD923      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2020)10-1121-13

## 1 前 言

中国是世界上最大的矿产品生产国, 煤炭和钢铁产量超过世界总产量的一半。截至 2018 年 11 月, 国内煤炭、铁矿、铜矿、铅精矿、锌精矿产量分别为 32.1 亿、6.9 亿、141.7 万、118.7 万、256.7 万吨<sup>[1]</sup>。同时我国也是矿产资源消费大国, 据有关部门统计, 截至 2018 年初, 我国煤、钢铁、精铜等一些重要有色金属矿产品消费总量在全球的占比超过 40%, 其中钢铁、黄金、锂的消费量在全球的占比分别为 55%、27.1%和 37.2%<sup>[2]</sup>。随着矿产资源的大量消耗, 富矿少、贫矿多是我国现阶段面临的主要问题, 矿石呈现的“贫、细、杂”是我国矿物加工领域面临的难点问题<sup>[3]</sup>。在处理微细粒矿物方面, 浮游选矿是目前使用最广泛的一种方法, 自 20 世纪初浮游选矿技术兴起以来, 浮选设备也得到快速发展, 目前浮选设备主要包括浮选机和浮选柱, 我国分别在二十世纪 60 和 80 年代开始自主研制浮选机和浮选柱。如今, 浮选技术趋于成熟, 浮选设备规格显著增大, 据文献[4]记载, 机械搅拌式浮选机的最大容积可达 680 m<sup>3</sup>, 浮选柱最大容积超过 250 m<sup>3</sup>。

## 2 浮选设备发展简述

### 2.1 浮选机设备发展

浮选机是浮选领域最常用的一种分选设备, 常用的机械搅拌式浮选机工作时, 矿浆由进浆管给到盖板的中心处, 叶轮旋转产生的离心力将矿浆甩出, 在叶轮和盖板间形成负压, 外界空气由进气管自动吸入并弥散形成气泡。靠叶轮的强烈搅拌与抛射作用, 空气气泡与矿浆充分混合, 矿粒与气泡接触碰撞成矿化气泡上浮到矿浆面形成泡沫层, 由刮板刮出得泡沫产品<sup>[5]</sup>。

随着浮选理论不断完善及 CFD(计算流体力学)技术的广泛应用, 浮选机的发展趋势逐步转向大型化。二十世纪 90 年代, 芬兰奥泰图公司设计开发出单槽容积为 160 m<sup>3</sup>的浮选机; 1996~2005 年十年间, 我国成功研制出容积 100, 130 和 160 m<sup>3</sup>的单槽浮选机, 其中北京矿冶科技有限公司将设计生产的单槽容积 100 和 130 m<sup>3</sup>浮选机成功应用于贵州某金矿和内蒙古某铜钼矿<sup>[6]</sup>。2010 年以来, 浮选机规格不断扩大, 奥泰图公司成功研发出单槽容积 630 m<sup>3</sup>的大型浮选机; 2014 年, 丹麦史密斯公司研发出单槽容积 660 m<sup>3</sup>的浮选机。与此同时, 我国也成功研发出超大型浮选机, 2018 年北京矿冶科技有限公司设计研发出单槽容积 680 m<sup>3</sup>的大型浮选机(图 1), 并应用于江西某铜选厂的尾矿再选回收, 生产运行 1 个月后, 铜的综合回收率提高了 1.48%, 指标达到国

际领先水平<sup>[7]</sup>。

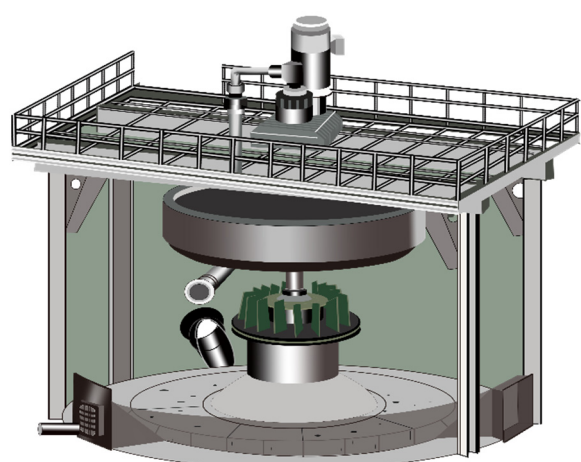


图 1 680 m<sup>3</sup> 浮选机示意图<sup>[7]</sup>  
Fig.1 Schematic diagram of 680 m<sup>3</sup> flotation machine<sup>[7]</sup>

2.2 浮选柱设备发展

相比于浮选机，浮选柱的发展起步较晚，虽然早在 1920 年就有浮选柱的相关报道，但由于浮选柱发泡装置技术问题并没有大规模投入工业使用。直到 1960 年浮选柱才陆续投入到工业使用。图 2 为 1960~2010 年浮选柱在世界各地安装使用情况<sup>[8]</sup>，1960 年，浮选柱在澳洲使用最广泛，主要用于有色金属和煤的选别。1980 年以来，随着各国对浮选柱研究深入，解决了一系列技术难题后浮选柱在世界各地得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。

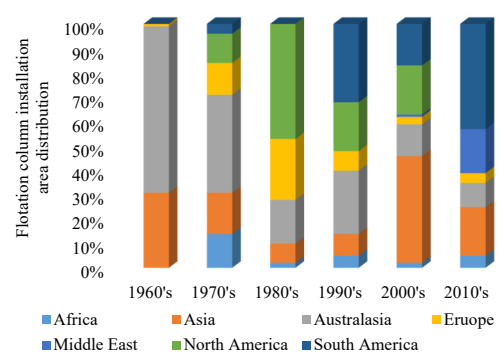


图 2 浮选柱每十年安装区域分布<sup>[8]</sup>  
Fig.2 Flotation column installation area distribution in every decade<sup>[8]</sup>

与浮选机工作原理不同，浮选柱一般采用逆流浮选。经过预处理的矿浆由柱顶的给矿口给入，压缩空气经柱体底部的气泡发生器充入柱内，形成大量分布均匀的微气泡，矿浆受到重力作用缓慢下降，气泡由下往上运动，与矿浆中(所要选取的有用矿物)的目的矿物在柱中不断发生碰撞，并将目的矿物吸附在其表面携带上升至柱顶形成泡沫层<sup>[9]</sup>。在 2010~2019 年十年间，浮选柱大型化、多样化成为主要发展趋势，柱式浮选短流程得到了广泛应用。由中国矿业大学自主研发的旋流-静态微泡浮选柱(简称 FCSMC 浮选柱)和北京矿冶科技有限公司(BGRIMM)设计研发的 BGRIMM 浮选柱是国内最具代表性的浮选柱，表 1 给出了这两种浮选柱的工作原理和特点<sup>[10]</sup>。

表 1 FCSMC 浮选柱与 BGRIMM 浮选柱工作原理及特点对比 <sup>[10]</sup>		
Table 1 Comparison of the working principles and characteristics of FCSMC and BGRIMM flotation columns <sup>[10]</sup>		
Flotation column name	Working principle	Characteristic
FCSMC	The column consists of three parts: a column separation device, a cyclone separation device and a tube flow mineralization device. The slurry is fed from the upper middle part of the column separation section, interacts with bubbles which enter the flotation column tangentially, and is mineralized and sorted in the cyclonic force field.	Flotation and cyclone force field are used together with stable operation, good sorting selectivity, high efficiency, large processing capacity, low energy consumption and strong adaptability.
BGRIMM	With counter-current flotation, the ore pulp is evenly dispersed through the reflective disk and enters the flotation column. It acts in the collection area with micro-bubbles generated by the bubble generator below by gravity. Hydrophobic minerals float with the bubbles and are washed by flushing water, forming concentrates and tailings being discharged from the bottom.	1. The bubbles in the column are of suitable size and evenly distributed. The chance of them colliding with ore particles increases. 2. Flotation processes including aeration, dosing, water replenishment and liquid level adjustment have been automated.

其中 BGRIMM 浮选柱工业应用最广泛，在全国 30 多家矿山企业得到生产应用，浮选柱直径为 400~5600 mm 不等，其中最大规格的 KYZ-B 浮选柱直径最大，达

5600 mm<sup>[11]</sup>。FCSMC 浮选柱在 1994 年进行商业推广并应用于工业生产，并于 1999 年获得专利，起初在选煤厂应用，之后浮选柱规格不断扩大，最大直径超过 5000

mm，应用范围不再局限于煤炭的选别，目前已广泛应用于有色金属矿、黑色金属矿和非金属矿的选别。相较于传统浮选柱，FCSMC 浮选柱结合了重选和浮选分选机理，在微细粒矿物分选方面具有独特的分选优势。付国龙等<sup>[12]</sup>成功将 FCSMC 浮选柱应用于辽宁南芬选厂进行微细粒赤铁矿的分选，这是我国首次将浮选柱成功用于赤铁矿的工业应用，具有重要意义。表 2 总结了 FCSMC 浮选柱在国内的使用情况<sup>[13]</sup>。

表 2 FCSMC 浮选柱国内选厂应用<sup>[13]</sup>  
Table 2 Application of FCSMC flotation column in domestic dressing plant<sup>[13]</sup>

Enterprise name and scale	Flotation process	Type and number of flotation column	Production index of flotation column
Guangdong Cloud Pyrite Iron Ore Enterprise Group Co. Ltd.	Two roughing—one concentrating—one scavenging	FCSMC type: $\Phi 5200$ mm $\times$ 8000 mm, 1 set	Sulfur-containing grade: 46%, recovery rate: 94.05%
Zhongzhou branch of Aluminum corporation of China	One roughing—one scavenging	Cyclonic static microbubble flotation column	Alumina recovery rate increased by 2.58% compared with flotation machine
Jinduicheng Molybdenum Industry Co. Ltd.	Rough stage: one roughing—one scavenging Concentrate stage: three concentrating—one scavenging	Cyclonic static microbubble flotation column	Molybdenum grade: 34.32%, recovery rate: 73.97%; copper recovery rate: 16.83%, recovery rate: 67.48%
Sanshandao Gold Mine 8000~10000/d	One roughing—one concentrating	FCSMC type: $\Phi 5200$ mm $\times$ 8000 mm, 3 set $\Phi 4000$ mm $\times$ 7000 mm, 2 set	Flotation index is stable
Shizhuyuan Nonferrous Metal Mining <sup>#</sup>	One roughing—two concentrating	Rough stage: $\Phi 400$ mm $\times$ 4000 mm Concentrate stage 1: $\Phi 250$ mm $\times$ 4000 mm Concentrate stage 2: $\Phi 200$ mm $\times$ 4000 mm	Tungsten concentrate grade increased by 11.45%, recovery rate increased by 3.52%
Shizhuyuan Chaishan Lead–Zinc Mine <sup>#</sup>	Flotation lead by one roughing—one scavenging, then flotation zinc by one roughing—one scavenging	Swirl-static microbubble flotation column	Lead grade: 62.79%, recovery rate: 89.81%; zinc grade: 52.24%, recovery rate: 90.46%
Benxi Iron and Steel (Group) Co. Ltd. Nanfen Concentrator	Reverse flotation process with one roughing—one scavenging	FCSMC type: $\Phi 75$ mm $\times$ 2000 mm, 1 set	The anti-flotation iron concentrate grade: over 65%, the tailing grade: below 16%

Note: <sup>#</sup> represents semi-industrial experiment.

表 3 气泡尺寸测量方法实例  
Table 3 Examples of bubble size measurement method

Researcher	Measuring method	Bubble sampling feature	Bubble generation method	Bubble diameter range/ $\mu\text{m}$
Unno et al <sup>[21]</sup>	Image analysis	Viewing box	Orifice plate	300~2000
Rijk et al <sup>[22]</sup>		Cuvette cell	DAF	10~300
Chen et al <sup>[23]</sup>		Bubble viewer	IAF	350~1750
Zhou et al <sup>[24]</sup>		Viewing chamber	IAF	1500~3600 <sup>#</sup>
Tucker et al <sup>[25]</sup>	Porous plate	Drawing bubbles into a capillary tube	IAF	390~2230 <sup>#</sup>
Biswal et al <sup>[26]</sup>	Optical (optical sensor)	Drawing bubbles into a capillary tube	Synthetic filter cloth	300~2000
Saberi et al <sup>[27]</sup>		Optical fibre	Perforated plate	3700~4100 <sup>#</sup>
Han et al <sup>[28]</sup>	Drift flux analysis	Particle counters (laser)	DAF	15~85
Yoon <sup>[29]</sup>		Calculated by measuring gas	Porous tube	320~770 <sup>#</sup>
Filippov et al <sup>[30]</sup>		velocity and gas holdup	Ventury static mixer	350~1100 <sup>#</sup>
Dobby et al <sup>[31]</sup>			Ventury static mixer	420~900 <sup>#</sup>

Note: <sup>#</sup> represents the average bubble diameter.

### 3 浮选设备流体力学特征参数测量

浮选理论研究的深入是浮选设备在近 20 年得到快

速发展的一个重要原因。以往对于浮选设备的设计过多依靠经验，对设备内流体力学性质缺乏认识，尤其是缺乏气泡运动行为的剖析与总结，导致对发泡装置的设计

优化、气泡的调节暴露出一系列问题，在工业生产中常出现气泡参数不稳定、浮选指标不达标等问题。气泡作为浮选的核心因素，对浮选具有重要影响，其特征直接影响其与矿粒发生碰撞、吸附与脱附等的概率<sup>[14]</sup>。因此近些年，对浮选设备流体力学特征参数检测分析成为浮选理论研究的重要内容。下文总结了国内外学者针对浮选柱及浮选机，使用不同检测手段对其内部主要流体力学特征参数气泡尺寸、气含率、气泡速度进行检测及解析的研究现状。

### 3.1 气泡尺寸

气泡尺寸是浮选设备性能状态的一个重要表征。气

泡作为浮选过程中矿粒的主要载体，其尺寸大小直接影响其对目的矿物选择性和携带能力<sup>[15]</sup>。矿物浮选分为吸气浮选法(IAF)和空气析出法(DAF)，IAF 类设备生成的气泡尺寸较大，而 DAF 类设备产生的气泡尺寸较小，微泡数量占比大<sup>[16]</sup>。影响浮选气泡尺寸的因素主要有发泡装置性能、起泡剂性能、液体黏度及操作参数等<sup>[17]</sup>。测量气泡大小的方法有多种，有拍照法、声学法、光学法、光散射法、倒漏斗法、相位多普勒风速仪法(PDA)、贝叶斯磁共振法、漂移通量分析法等<sup>[18-20]</sup>，表 3 总结了几种浮选领域常用的气泡尺寸测试方法。

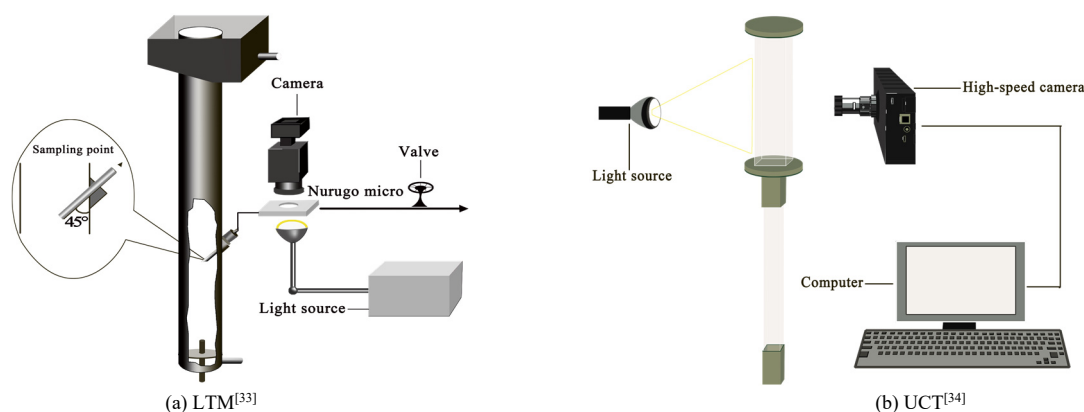


图 3 拍照法气泡尺寸分析装置

Fig.3 Bubble size analysis device of photographing method

#### 3.1.1 拍照法

拍照法是计算气泡尺寸常用的方法之一。拍照法分为非侵入式照相法和侵入式照相法<sup>[32]</sup>。非侵入式照相法可以细分为取样照相法和摄像法。取样照相法是取样法和显微照相技术的结合，对于稳定微气泡的测定，通常选用取样照相法，测量结果误差小，图 3(a)为巴西南大河联邦大学设计开发的 LTM 气泡尺寸分析装置<sup>[33]</sup>。而大气泡的机械性能差、不稳定，取样过程中往往导致气泡兼并，如此造成测量值具有较大误差，因此，大气泡不适用于取样照相法。摄像法可直接分析测量位置的气泡图像，常作为标准来评判其他方式的准确性。使用该方法时，首先要保证柱体、壁面和液体的透明，在柱体周围(壁面)安置合适的光源，利用高速摄像记录仪拍摄气泡，将拍摄的气泡图像导入计算机，用图像分析软件进行分析后得出气泡尺寸。图 3(b)为南非开普敦大学设计的 UCT 气泡尺寸分析装置，比较具备代表性<sup>[34]</sup>。

朱宏政等<sup>[35]</sup>使用拍照法研究了机械搅拌式浮选机中的气泡直径分布规律，通过实验得出气泡直径随叶轮转速增大呈线性减小趋势，随吸气量增大呈线性增加，

随取样高度增大呈增大趋势。邓小伟等<sup>[36]</sup>利用 CCD 相机对一种旋流浮选柱内的气泡直径进行了检测，研究了不同循环量( $Q$ )下气泡直径的分布规律。结果表明， $Q$  由 3.12 L/min 增至 5.83 L/min 时，微气泡占比增加，气泡分布范围由宽变窄。 $Q=4.83$  L/min 时，气泡直径分布范围较宽，且微气泡占比充足，比较利于微细粒矿物的回收。韩继康等<sup>[37]</sup>使用拍照法在自行设计的浮选柱模拟系统中，对赤铁矿阳离子柱式浮选工艺中应用的微泡逆流接触式浮选柱的气泡特性进行系统研究，结果表明，随药剂浓度增加，气泡直径分布发生明显变化，小气泡占比增大，大气泡占比显著减小，超过临界浓度时，气泡直径分布概率密度峰宽度不再发生显著变化。张敏等<sup>[38]</sup>根据气泡发生器的工作原理，设计了新的浮选柱混合气泡发生器，依据浮选柱运行参数计算了气-液两相流气泡理论尺寸，最后使用图像法系统地研究分析了混合气泡发生器产生的气泡尺寸并对理论值进行计算验证，发现这种混合气泡发生器引射气体量及所产生气泡的分布状况均较好。颜攀等<sup>[39]</sup>使用拍照法研究了充气量和液体量对文丘里气泡发生器生成气泡的影响，研究发现，



液量一定时, 气泡 Sauter 直径与充气量呈正相关; 充气量保持不变时, 气泡 Sauter 直径与液量呈负相关。

侵入式拍照是一种基于光纤内窥镜的侵入式照相方法<sup>[40]</sup>, 侵入式相机直接进入设备内部拍摄获取局部气泡图像, 将采集的气泡图像经过计算机软件处理, 实现在线测量气泡尺寸。陈方圆等<sup>[41]</sup>用侵入式相机对3种不同的气泡发生器产生的气泡进行拍照、特征提取、统计、分析后得知, 侵入式照相法在测量尺寸分布较宽的气泡群上具有较高的准确性, 与此同时, 该方法也可用于验证其他测量方法的准确性, 实验装置如图4所示。

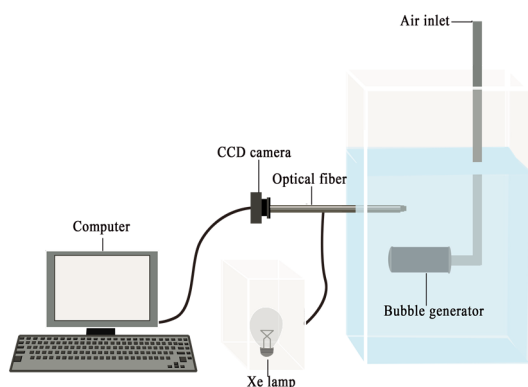


图4 侵入式照相法实验装置图<sup>[41]</sup>

Fig.4 Invasive photography experimental device diagram<sup>[41]</sup>

### 3.1.2 声学法

声学法是一种利用声波的过度衰减或散射及声速的变化测量气泡尺寸的方法。Minnaert<sup>[42]</sup>介绍了一种声学方法, 并用该方法研究了气泡产生的声音, 最终以此为基础在气泡尺寸与其固有振动频率之间建立了方程。声波的共振频率<sup>[43]</sup>如式(1)所示:

$$\nu = \frac{1}{\pi d_b} \sqrt{\frac{3\gamma_{rg} p'}{\rho_l}} \quad (1)$$

式中,  $\nu$  为 Minnaert 频率(Hz),  $d_b$  为气泡直径(mm),  $\gamma_{rg}$  为气体比热比,  $\rho_l$  为液体密度(kg/m<sup>3</sup>),  $p'$  为绝对液体压强(Pa)。

这种方法的原理是生成的气泡经过声扰动, 同时经谐波振荡器记录和分析响应, 记录的小振幅气泡体积振动可用于计算气泡尺寸。该装置由一个水听器和无线麦克风组成, 水听器本质是一种麦克风, 可以在水下录音或监测水声, 其工作原理基于压电传感器, 是一种在压力变化时产生电能的设备。在测试过程中, 水听器放置要与气泡发生器保持足够的距离, 使其不影响气泡大小, 水听器连接无线麦克风, 将电信号放大并转换为声信号。声学技术也可用于研究气泡尺寸和气-液-固三相

中的气泡兼并等<sup>[44]</sup>。Kracht 等<sup>[45]</sup>使用声学技术研究了浮选柱中气泡的大小并得出结论, 声学技术能在两相和三相系统中测量直径为 0.75~3.00 mm 范围内的气泡, 足以覆盖浮选中目标气泡的直径范围。

### 3.1.3 光散射法

光散射法的原理是基于米氏散射理论<sup>[46]</sup>。散射光的强度与气泡的半径有关, 如式(2)所示<sup>[47]</sup>:

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r_b^2 |S_2|^2 \cos^2 \phi} \quad (2)$$

式中,  $I_\theta$  为散射光强度(cd),  $\lambda$  为波长(m),  $r_b$  为气泡半径(mm),  $\phi$  为方位角(°),  $S_2$  为色散函数。

从公式中可看出, 气泡半径与色散光强成反比。Takahashi 等<sup>[48]</sup>利用光散射技术研究了悬浮液中的微泡尺寸和悬浮液浓度后发现, 如果已知颗粒形状, 则基于米氏散射理论的动态光散射技术比激光衍射技术更适合于测量各种粒子。Couto 等<sup>[49]</sup>使用激光衍射技术研究了浮选槽中产生的微气泡的大小分布, 通过实验可见, 使用该方法测得的气泡直径结果可靠, 且操作简单, 研究成果为浮选气泡直径的测定提供了一种快速、简便的方法。

### 3.2 气含率

气含率是指气体占浮选柱(机)中两相或三相总体积的百分比<sup>[50]</sup>。以浮选柱为例, 气含率是评价浮选柱性能的重要指标之一, 其大小直接决定气泡携带上浮矿物的数量, 进而决定了精矿的产率和回收率。影响浮选柱气含率的因素有起泡剂浓度、气泡发生器的性能、表观气速(充气量)、液面高度、颗粒大小及柱内充填介质等。

关于气含率测定的相关报道在矿物加工领域很多, 其中主要测试方法有液位上移法、压差法、探针法、电阻层析成像法、光学法等<sup>[51,52]</sup>, 以下对几种常用方法进行介绍。

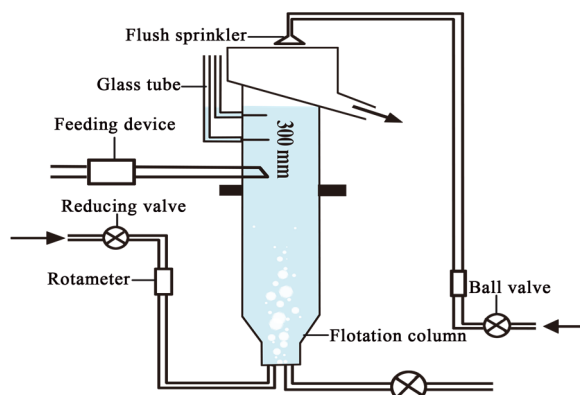


图5 液位上升测量法<sup>[52]</sup>

Fig.5 Liquid level rise measurement method<sup>[52]</sup>

### 3.2.1 液位上升法

该方法是通过测量充气前液面与充气后气-液混合液面高度差进而得到气含率。图 5 为液位上升法典型测量装置示意图<sup>[52]</sup>, 测量上部气含率的两个玻璃管安装间隔为 300 mm, 且均为两端开口, 呈 90°角, 气体由压缩机注入柱底的气泡发生器, 由减压阀控制充气量和气压, 空气流量计调节充气量大小, 底流阀调节尾矿流速。

用液位上升法具有操作简单、成本低等特点, 能较准确、直观地测出浮选柱的气含率。该方法测定的浮选柱气含率为全柱整体的平均气含率, 计算公式如下:

$$\varepsilon_g = \frac{(h_m - h_1)}{h_m} \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_g$  为整体气含率,  $h_m$  为充气后柱中液面高度差,  $h_1$  为充气前柱中液面高度。

### 3.2.2 压差法

压差法又称压降法<sup>[53]</sup>, 是工业上测量气含率应用较广泛的一种方法。采用压差法测量局部气含率, 其测定原理是利用压力传感器读取柱体上任意两相邻测试点的压力值  $p_a$  和  $p_b$  ( $a$  点位于  $b$  点之上), 如图 6 所示。



图 6 压力实测值示例

Fig.6 Example of measured pressure

$$p_a = \rho_l g h_a (1 - \varepsilon_a) \quad (4)$$

$$p_b = \rho_l g h_b (1 - \varepsilon_b) \quad (5)$$

式中,  $\rho_l$  为液相密度,  $h_a$ ,  $h_b$  分别为  $a$ ,  $b$  点到液面的高度,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  分别为  $a$ ,  $b$  点的气含率,  $h_a(1-\varepsilon_a)$ ,  $h_b(1-\varepsilon_b)$  分别为  $a$  与  $b$  点处气液混合物中水的高度。则  $a$ ,  $b$  两点之间的压强差  $\Delta p$  为

$$\Delta p = \rho_l \Delta h (1 - \varepsilon_g) \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon_g$  为  $a$  和  $b$  点之间的平均气含率,  $\Delta h$  为  $a$ ,  $b$  点高

度差, 则气含率可表达为

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\Delta p}{\rho_l g \Delta h} \quad (7)$$

压差法是使用最广泛的一种测试方法, 相关报道较多。Finch 等<sup>[54]</sup>研究了不同类型浮选柱在不同操作条件下的气泡表面积通量与气含率之间的线性关系。Vazirizadeh 等<sup>[55]</sup>通过实验得出气含率与液面高度呈线性相关, 随液面高度增加, 气含率呈增大的趋势。黄光耀<sup>[56]</sup>针对一种水平充填介质浮选柱展开研究后得出, 气含率的大小与表观气速成正比, 且比较符合经验方程。廖寅飞等<sup>[57]</sup>研究发现浮选柱内气含率与起泡剂浓度的大小呈正相关, 浓度达到临界兼并浓度时, 气含率增速减缓。Araya 等<sup>[58]</sup>研究了詹姆森浮选柱气液两相环境中, 起泡剂 MIBC 对气含率的影响, 得出气泡尺寸与气含率之间存在较强的相关性。Massinaei 等<sup>[59]</sup>研究了浮选速率常数与工业浮选柱气含率之间的线性相关性。Tavera 等<sup>[60]</sup>研究了浮选柱中安装垂直隔板时的径向气含率与空柱时径向气含率的差别发现, 由于柱中安装了垂直隔板, 能够使柱中气泡均匀分布并抑制了气泡的兼并, 使气含率沿轴向分布较均匀, 最后得知气含率的径向差异是由于气泡分布不均匀造成的。

### 3.2.3 探针法

探针法分为电导探针和光纤探针<sup>[61]</sup>。电导探针的原理是基于气液两相的导电能力不同而进行测量的。探针处于气相时, 电极间阻抗增大, 电压信号为高压信号, 而在液相时电极间阻抗减小, 信号为低压信号。电导探针在化工、石油、环境等领域有着广泛的应用, 但是目前成型的商品却很少, 对探针数据的处理方法并不完全相同。近几年, 中国科学院过程工程研究所开发的一种 BVW-2 型电导探针气泡参数测量仪(图 7)是一种比较成熟的成型商品, 可用于在线测量浮选设备内气含率的大小<sup>[62]</sup>。与电导探针不同, 光纤探针利用的是气液两相对光线的折射率不同。

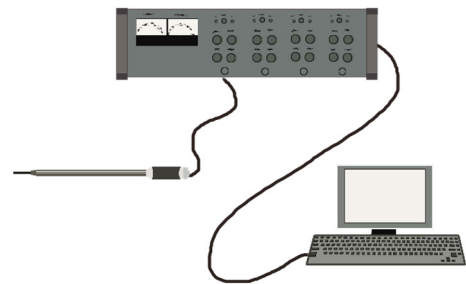


图 7 BVW-2 型气泡参数测量仪<sup>[62]</sup>

Fig.7 BVW-2 bubble parameter measuring instrument<sup>[62]</sup>

图 8 为光纤探针中光路示意图<sup>[63]</sup>。光纤探针的前端经过相应的处理,在不同的介质中,反射出不同的光强,将光信号转变为电信号,再经 A/D 变换后进行数据采集得到信号时间序列。

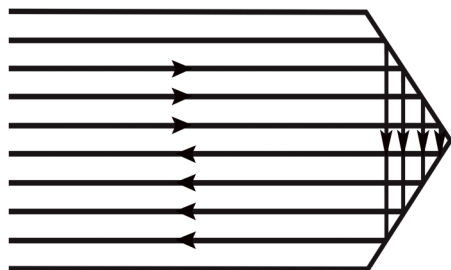


图 8 光纤探针光路示意图<sup>[63]</sup>

Fig.8 Schematic diagram of optical path of fiber optic probe<sup>[63]</sup>

探针法是一种侵入式测量技术,探针体积小,对设备内流场干扰小,准确性较高。漆坤煜等<sup>[64]</sup>利用探针法对一种水平充填介质浮选柱气含率进行了研究,通过实验得出,在不添加介质的情况下,浮选柱局部气含率分布沿柱体轴向从低到高逐步增大,呈一定的线性规律;在测量分析浮选柱表观气速、气含率后得知,浮选柱整体气含率、局部气含率与表观气速的大小呈正相关。刘

利群等<sup>[65]</sup>使用光纤探针以内径 100 mm 的流化床为研究对象,在气液固三相体系中研究了气含率和固含率的分布规律,通过实验得出,在一定的表观气速、表观液速范围内,局部气含率沿硫化床径向的分布在中心处分布较均匀,在靠近壁面处的气含率低于中心处气含率,且局部气含率大小与表观液速成反比,与表观气速成正比;局部固含率的大小与表观液速成正相关,与表观气速大小无关,局部固含率在不同高度沿径向分布类似。

### 3.2.4 电阻层析成像技术

电阻层析成像技术简称 ERT 技术,是 1980 年以后兴起的一种在线实时监测技术,具有响应速度快、测试成本低、传感器简单、非侵入性和在线可视化等特点,可以应用于化工、环境、石油等领域以监测多相流系统中的液体流态和气含率特性<sup>[66]</sup>。ERT 系统由 4 部分组成,包括电极、数据采集系统处理单元、图像重建单元和计算机系统。ERT 作为一种基于电学敏感原理的过程层析成像技术,能提供不同于传统 PT 单点、局部的检测方式,可实现截面分布式的多点测量,可重建反应器、管道或容器内气含率沿径向分布图像,充分获取有关流场的信息<sup>[67]</sup>,工作原理如图 9 所示。

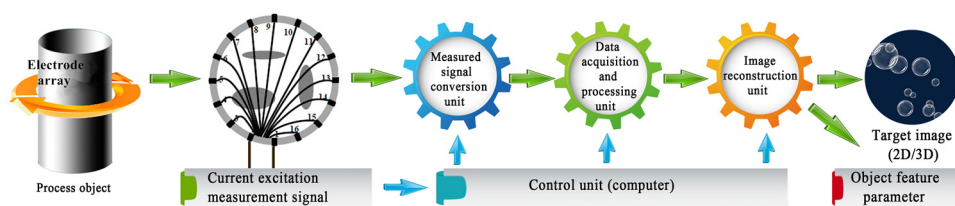


图 9 ERT 系统工作原理<sup>[67]</sup>

Fig.9 Working principle of ERT test system<sup>[67]</sup>

目前 ERT 技术已成功用于测量浮选柱和浮选机内两相或三相流中气含率的分布。Vadlakonda 等<sup>[61]</sup>利用 ERT 技术估算了操作变量、表面活性剂浓度和气泡发生器孔隙率对浮选柱气含率的影响。结果表明,气含率与表观气速、气泡发生器孔隙分布、进料流量和初始液面高度呈正比。Kourunen 等<sup>[68]</sup>用三维电阻层析成像测量浮选机中气含率的空间分布。结果表明,ERT 技术可估算浮选机在不同条件下的气含率分布,除此之外,可根据所使用的转子-定子结构检测气含率分布的差异。

### 3.2.5 图像法

图像法测气含率是一种比较新颖的技术方法。Vinnett 等<sup>[69]</sup>研究了一种测定浮选柱捕集区局部气含率的间接方法。该方法是基于二元图像中气泡所占面积百

分比与表面气速的函数模型结构,使用数码相机拍摄气泡图像,并对 250 多张图像进行分析,以获得适当的面积百分比近似值。该模型能测量实验室浮选柱气含率的范围为 2.5%~15%,测量工业浮选柱气含率的范围为 6%~21%。

### 3.3 气泡速度

通过浮选过程发现,气泡上浮的快慢是影响浮选效率的关键参数,以浮选柱为例,气泡在浮选柱中缓慢上升时,气泡在柱中停留时间过长,增大了气泡破裂和兼并的可能性,直接影响浮选速率和质量;气泡上升速度加快时,气泡与矿物颗粒的有效碰撞几率降低,接触不完全,使颗粒不能稳定地黏附在气泡上,容易发生脱落。综上,气泡上升速度控制优化对浮选非常重要。关于浮



选气泡速度的测量,常用的方法有 PIV 法、高速摄像法和电导探针法<sup>[70,71]</sup>。

### 3.3.1 PIV 法

PIV 技术又称粒子图像测速法,可通过加入其他示踪粒子无扰动测量流场的二维或三维速度分量<sup>[72]</sup>。从图 10 可以看出,在流体中散播一些适当的示踪粒子,一般选用足够小尺度(1~5 μm)、比重尽可能与实验流体相一致且高的光散射率的示踪剂颗粒作为示踪粒子,确保其具有足够高的流动跟随性,从而可以通过测量示踪粒子的速度来代替流场中对应位置质点的速度。示踪粒子均匀散播在浮选柱(机)内部后,用激光器发射光束经透镜散射形成的厚度为 1 mm 的脉冲激光片光照射所测流场的切面区域,通过成像记录系统摄取两次曝光的粒子图像,确定其在流场中的空间坐标,形成 PIV 实验图像,再利用图像互相关方法分析 PIV 图像,经处理得到每一

小区域中粒子图像的平均位移,由此确定流场切面上整个区域的速度矢量分布。

PIV 技术目前已成功用于测量浮选过程中宏观和微观流态。刘煜等<sup>[72]</sup>将 PIV 技术用于测量 FCSMC 浮选柱中速度场的分布,通过该技术得到了在低充气速率下柱中速度场的截面特征和气泡速度矢量图。通过分析浮选柱内的流场特征,准确发现该浮选设备的流场缺陷,为设备的改进优化提供了优化方法。刘小芳<sup>[73]</sup>利用自行搭建的 PIV 测试平台,对一种射流气泡发生器产生的气泡进行了相关参数的测量,通过分析得到了生成气泡在垂直方向和水平方向的运动速度分别为 1.56 和 0.02 m/s,为该气泡发生器的优化和改进提供了一定的理论依据。焦斌亮等<sup>[74]</sup>对实验室条件下拍摄到的高密度气泡图像进行图像处理,利用 PIV 技术测量了高密度气泡群的速度,计算结果较精确。

### 3.3.2 高速摄像法

高速摄像法是基于图像技术与图像处理算法的结合,测量浮选柱(机)中气液两相中的速度场<sup>[75]</sup>。使用该方法时,首先要注意光源的摆放与壁面的透明以确保高速相机获取清晰的气泡轮廓;利用 MATLAB 软件对拍摄的原图像进行预处理,通常需要通过灰度值变换、原图像裁剪、滤波处理、二值化处理、孔洞填充、标识矩阵等步骤。图 11 为典型气泡速度测量实验装置图。

气泡速度分析的核心是采用几何中心法对浮选气泡进行定位,将原图像经过处理得到二值化图像后计算属于同一气泡的所有像素点的坐标值,将计算的平均值记为该气泡的位置,通用算法如下:

$$x_c = \sum_{i,j \in \Omega} \frac{j}{N}, \quad y_c = \sum_{i,j \in \Omega} \frac{i}{N} \quad (8)$$

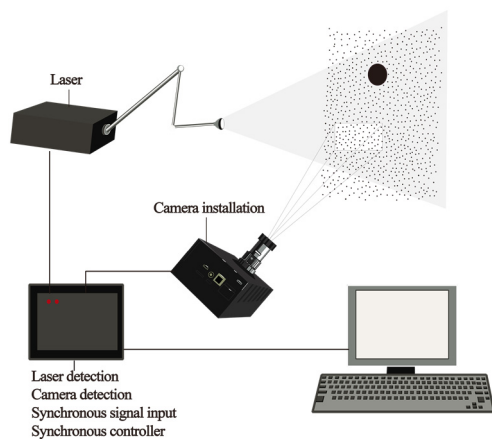


图 10 PIV 技术原理<sup>[72]</sup>

Fig.10 Principles of PIV technology<sup>[72]</sup>

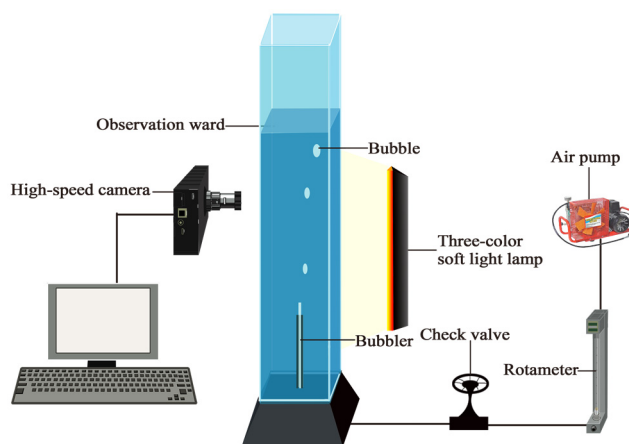


图 11 气泡速度测量实验装置图<sup>[75]</sup>

Fig.11 Diagram of experimental device for measuring bubble velocity<sup>[75]</sup>

式中,  $(i, j)$  为像素的坐标,  $\Omega$  为属于同一气泡的像素的集合,  $(x_c, y_c)$  为像素中心坐标。高速摄像记录仪所拍摄的图像为连续帧数, 任取相连续的两帧图像之间的时间间隔  $\Delta t (0.002 \text{ s})$ , 由中心位置计算气泡的位移  $\Delta s$ , 可得速度  $v$ , 公式如下:

$$v_x = \frac{x_{c2} - x_{c1}}{\Delta t}, \quad v_y = \frac{y_{c2} - y_{c1}}{\Delta t} \quad (9)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (10)$$

式中,  $v_x, v_y$  分别表示气泡在水平方向和垂直方向的速度分量,  $v$  表示合速度,  $(x_{c1}, y_{c1})$  和  $(x_{c2}, y_{c2})$  分别表示连续的两幅图像中气泡的中心坐标。

高速摄像法用于测量气泡速度在石油、化工等领域较广泛, 近些年在浮选领域也有相关的报告。Tan 等<sup>[76]</sup>使用高速摄像法研究了不同表面活性剂对气泡速度的影响, 通过实验得出结论气泡最小速度分布与表面活性剂种类不相关, 气泡上升末速度符合 Karamanev 模型。王军超等<sup>[77]</sup>使用自行设计的单气泡运动状态测试系统研究了起泡剂对气泡速度的影响。通过分析得出气泡上升的最大速度与起泡剂表面活性的强度呈负相关, 随起泡剂浓度增大, 气泡上升最大速度越小; 气泡在一定时间内所得到的最大上升速度与起泡剂的种类相关。Sam 等<sup>[78]</sup>通过对比清水环境与起泡剂环境中单气泡的运动状态, 发现清水环境中的气泡在上升过程中经历加速与减速两个变化过程; 在起泡剂环境下, 气泡上升过程中可达运动末速的第三个过程, 且上升末速度与起泡剂种类无关。

## 4 结语与展望

随着我国经济的高速发展, 矿产资源的消耗量日益增大, 社会对矿业开发提出了更高的要求, 为此需要更加高效化、自动化、大型化的浮选设备。如何准确检测浮选气泡参数及提高检测装置的适应性, 将其广泛应用于工业中, 提升浮选指标, 依然是目前科研人员面临的重点问题, 仍需深入探讨。

(1) 开发以机器视觉为核心的检测技术。图像处理技术可以测量浮选气泡的多个特征参数, 使用较广泛, 然而现阶段多数科学学者提出的气泡图像处理方法具有局限性, 未考虑众多复杂的细节和选矿厂的实际环境, 进而导致在提取气泡特征时出现精度低、稳定性差等问题, 而机器视觉技术可适用于多种复杂的环境, 并且具有极强的分选复杂问题的能力, 对推进浮选监控自动化有着重要现实意义。

(2) 提高强化侵入式检测装置的适用性。在目前实

验室应用的侵入式检测方法中, 电导探针法测量气含率是一种简单可靠的方法, 但这类设备属于精密设备, 电导探针其探针头与套管间的绝缘情况、针尖间距、针尖的形状与长度对信号的输出有直接影响; 在实际浮选中, 矿浆对探针会有一定的化学腐蚀, 对测量稳定性影响也很大; 浮选柱相比于浮选机, 其中一个优点是能产生利于微细粒矿物浮选的小气泡, 而电导探针对于小气泡较多的多相流测量存在较大误差, 如何设计开发出更适用于复杂浮选环境下的探针设备是未来研究的重要方向。

## 参考文献

- [1] 苏铁娜. 2018 年矿产资源形势分析与展望 [J]. 矿产保护与利用, 2018, 5: 79–85, 93.  
Su Y N. Analysis and prospect of mineral resources situation in 2018 [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018, 5: 79–85, 93.
- [2] 苏铁娜. 我国重要矿产资源供需形势研究 [J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(7): 46–51.  
Su Y N. Study on supply and demand situation of important mineral resources in China [J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(7): 46–51.
- [3] 宋子翔, 韩继康, 王伟之, 等. 浮选柱技术发展与应用现状 [J]. 金属矿山, 2019, 6: 20–26.  
Song Z X, Han J K, Wang W Z, et al. Development and application status of flotation column technology [J]. Metal Mine, 2019, 6: 20–26.
- [4] 梁殿印, 史帅星, 冉红想. 大型浮选及磁选设备新进展 [J]. 矿业装备, 2015, 4: 41–43.  
Liang D Y, Shi S X, Ran H X. New development of large-scale flotation and magnetic separation equipment [J]. Mining Equipment, 2015, 4: 41–43.
- [5] 沈政昌. 浮选机发展历史及发展趋势 [J]. 有色金属(选矿部分), 2011, S1: 34–46.  
Shen Z C. Development history and trend of flotation cell [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011, S1: 34–46.
- [6] 沈政昌, 杨义红, 韩登峰, 等. 680 m<sup>3</sup> 充气式机械搅拌浮选机关键技术特点及其工业应用 [J]. 有色金属(选矿部分), 2020, 1: 105–112.  
Shen Z C, Yang Y H, Han D F, et al. The key technical features and industry application of the 680 m<sup>3</sup> forced-air flotation cell [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020, 1: 105–112.
- [7] 王诚华. 680 m<sup>3</sup> 超大型浮选机工业实验的流程考查分析 [J]. 铜业工程, 2019, 4: 60–62, 90.  
Wang C H. Examination and analysis of the flotation flowsheet in industry test of 680 m<sup>3</sup> super-large floatation machine [J]. Copper Engineering, 2019, 4: 60–62, 90.
- [8] Harbort G, Danica C. Fluctuations in the popularity and usage of flotation columns an overview [J]. Minerals Engineering, 2017, 100: 17–30.
- [9] 程敢, 曹亦俊, 徐宏祥, 等. 浮选柱技术及设备的发展 [J]. 选煤技术, 2011, 1: 66–69.  
Cheng G, Cao Y J, Xu H X, et al. Development of flotation column

- technology and equipment [J]. Coal Preparation Technology, 2011, 1: 66–69.
- [10] 马智敏, 张辉, 陈兴华. 浮选柱技术的应用现状及发展方向 [J]. 现代矿业, 2015, 31(10): 66–70.
- Ma Z M, Zhang H, Chen X H. Application status and development direction of flotation column technology [J]. Modern Mining, 2015, 31(10): 66–70.
- [11] 沈政昌, 史帅星. BGRIMM 浮选装备体系的建立与实践 [C]//中国矿业科技文汇. 第五届中国矿业科技大会. 2014: 17–21, 43.
- Shen Z C, Shi S X. Establishment and practice of BGRIMM flotation equipment system [C]//The 5th China Mining Technology Conference. 2014: 17–21, 43.
- [12] 付国龙, 范兆玲, 李庚辉, 等. FCSMC 浮选柱在南芬选矿厂赤铁矿分选工艺中的应用 [J]. 现代矿业, 2015, 4: 74–75, 77.
- Fu G L, Fan Z L, Li G H, et al. Application of FCSMC flotation column in hematite separation process of Nanfen concentrator [J]. Modern Mining, 2015, 4: 74–75, 77.
- [13] 赵敏捷, 方建军, 李国栋, 等. 旋流-静态微泡浮选柱的应用及研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2016, 4: 6–10.
- Zhao M J, Fang J J, Li G D, et al. State and application of cyclonic static microbubble flotation column [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016, 4: 6–10.
- [14] 张世杰, 刘文礼, 赵树凯, 等. 浮选气泡粒度分布规律 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 445–449.
- Zhang S J, Liu W L, Zhao S K, et al. Bubble size distribution rules in flotation cell [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 445–449.
- [15] Wang W Z, Han J K. Study on bubble characteristics of flotation column in hematite reverse cationic flotation process [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2020, 56(1): 65–76.
- [16] 廖寅飞. 浮选气体弥散及其调控研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 5–8.
- Liao Y F. Study on the flotation gas dispersion and regulation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 5–8.
- [17] 韩有理, 朱金波, 费之奎, 等. 双余弦自吸气淹没喷嘴气泡粒径分布规律 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3219–3225.
- Han Y L, Zhu J B, Fei Z K, et al. Bubble size distribution in double cosine self-suction submerged nozzle [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3219–3225.
- [18] Liu T S, Li Y F, He S R, et al. Optimization of gas parameters in a three-phase fluidized bed flotation column [J]. Powder Technology, 2020, 373: 242–253.
- [19] Besagni G, Inzoli F. Bubble size distributions and shapes in annular gap bubble column [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 74: 27–48.
- [20] Meng J, Tabosa E, Xie W, et al. A review of turbulence measurement techniques for flotation [J]. Minerals Engineering, 2016, 95: 79–95.
- [21] Unno H, Inoue I. Size reduction of bubbles by orifice mixer [J]. Chemical Engineering Science, 1979, 35: 1571–1579.
- [22] Rijk S E D, Der J H J M A, Blanken G J G D. Bubble size in flotation thickening [J]. Water Research, 1994, 28: 465–473.
- [23] Chen F, Gomez C O, Finch J A. Bubble size measurement in flotation machines [J]. Minerals Engineering, 2001, 14: 427–432.
- [24] Zhou Z A, Egiebor N O, Plitt L R. Frother effects on bubble size estimation in a flotation column [J]. Minerals Engineering, 1993, 6: 55–67.
- [25] Tucker J P, Deglon D A, Franzidis J P, et al. An evaluation of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell [J]. Minerals Engineering, 1994, 7: 667–680.
- [26] Biswal S K, Reddy P S R, Bhaumik S K. Bubble size distribution in a flotation column [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1994, 72: 148–152.
- [27] Saberi S, Shakourzadeh K, Bastoul D, et al. Bubble size and velocity measurement in gas-liquid systems: application of fibre optic technique to pilot plant scale [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995, 73: 253–257.
- [28] Han M Y, Park Y H, Yu T J. Development of a new method of measuring bubble size [J]. Water Supply, 2002, 2: 77–83.
- [29] Yoon R H. Microbubble flotation [J]. Minerals Engineering, 1993, 6: 619–630.
- [30] Filippov L O, Joussement R, Houot R. Bubble spargers in column flotation: adaptation to precipitate flotation [J]. Minerals Engineering, 2000, 13: 37–51.
- [31] Dobby G S, Yianatos J B, Finch J A. Estimation of bubble diameter in flotation columns from drift flux analysis [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1988, 27: 85–90.
- [32] Honkanen M, Eloranta H, Saarenrinne P. Digital imaging measurement of dense multiphase flows in industrial processes [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(1): 25–32.
- [33] Matiole E, Testa F, Yianatos J, et al. On the gas dispersion measurements in the collection zone of flotation columns [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 99(1): 78–83.
- [34] Zhu H Z, Valdivieso A L, Zhu J B, et al. Effect of dodecylamine-frother blend on bubble rising characteristics [J]. Powder Technology, 2018, 338: 586–590.
- [35] 朱宏政, 王海艳, 王海楠, 等. 机械搅拌式浮选装置中气泡粒径分布规律 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1140–1145.
- Zhu H Z, Wang H Y, Wang H N, et al. Bubble size distribution in a mechanical flotation device [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1140–1145.
- [36] 邓小伟, 刘炯天, 王永田, 等. 基于底部旋流的浮选柱内气泡尺寸分布规律 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 1092–1097.
- Deng X W, Liu J T, Wang Y T, et al. Bubble size distribution in flotation column based on the bottom cyclone [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 1092–1097.
- [37] 韩继康, 王伟之. 基于图像处理技术的新型阳离子捕收剂起泡特性研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2020, 3: 126–131.
- Han J K, Wang W Z. Study on foaming characteristics of new cationic collector based on image processing technology [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020, 3: 126–131.
- [38] 张敏, 刘焕彬, 朱小林, 等. 浮选柱混合气泡发生器的初步设计和性能分析 [J]. 中国造纸, 2009, 28(2): 10–12.
- Zhang M, Liu H B, Zhu X L, et al. Design of mixing bubble generator in deinking flotation process [J]. China Pulp & Paper, 2009, 28(2): 10–12.
- [39] 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.
- Yan P, Huang Z L, Wang J D, et al. Bubble size and its distribution for Venturi bubble generator [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(10): 2070–2076.
- [40] 李向阳, 王浩亮, 冯鑫, 等. 多相反应器的非均相特性测量技术进展 [J]. 化工进展, 2019, 38(1): 45–71.
- Li X Y, Wang H L, Feng X, et al. Progresses in measurement

- technologies of heterogeneous characteristics in multiphase reactors [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(1): 45–71.
- [41] 陈方圆, 李平平, 李向阳, 等. 侵入式光纤照相法测量气泡尺寸分布 [J]. *过程工程学报*, 2016, 16(3): 361–366.
- Chen F Y, Li P P, Li X Y, et al. An immersed fibre-optic photoimaging method for measurement of bubble size [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2016, 16(3): 361–366.
- [42] Minnaert M. On musical air-bubbles and sounds of running water [J]. *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1933, 16: 235–248.
- [43] Zhang W, Spencer S J, Coghill P. An acoustic technique for measurement of bubble solids mass loading—(a) fundamental study of single bubble [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 36/37/38: 45–52.
- [44] Zhang M, Guiraud P. Surface-modified microbubbles (colloidal gas aphrons) for nanoparticle removal in a continuous bubble generation-flotation separation system [J]. *Water Research*, 2017, 126: 399–410.
- [45] Kracht W, Moraga C. Acoustic measurement of the bubble Sauter mean diameter  $d_{32}$  [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 98: 122–126.
- [46] 张艳春, 刘缠牢, 赵丁. 基于米氏散射理论的粒度测试算法研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2009, 28(11): 24–25, 29.
- Zhang Y C, Liu C L, Zhao D. Research of granulometric analysis algorithm based on mie scatter theory [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2009, 28(11): 24–25, 29.
- [47] Hansen G M. Mie scattering as a technique for the sizing of air bubbles [J]. *Applied Optics*, 1985, 24: 3214–3220.
- [48] Takahashi K, Ohuchi S, Saito K, et al. Simultaneous determination of the size and concentration of fine bubbles in water by laser-light scattering [J]. *Applied Optics*, 2018, 57: 225–229.
- [49] Couto H J B, Nunes D G, Neumann R, et al. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22: 330–335.
- [50] 曾培, 张汉彪, 李宋江, 等. 浮选柱气含率的影响因素研究进展 [J]. *现代矿业*, 2018, 34(4): 82–85, 94.
- Zeng P, Zhang H B, Li S J, et al. Research progress of influence factors on gas holdup of flotation column [J]. *Modern Mining*, 2018, 34(4): 82–85, 94.
- [51] Prakash R, Subrata K M, Singh A. Flotation technique: its mechanisms and design parameters [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2018, 127: 249–270.
- [52] 胡卫新. 浮选柱气含率的影响机制与调控研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 6–13.
- Hu W X. Study on influence mechanism and regulation of flotation column gas hold-up [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010: 6–13.
- [53] 李延锋, 张敏, 刘炯天. 浮选柱筛板充填的气含率研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 2: 255–258.
- Li Y F, Zhang M, Liu J T. Study of gas content in a sieve packing flotation column [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 2: 255–258.
- [54] Finch J, Xiao J, Hardie C, et al. Gas dispersion properties: bubble surface area flux and gas holdup [J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13: 365–372.
- [55] Vazirizadeh A, Bouchard J, Del V R. The effect of gas dispersion properties on water recovery in a laboratory flotation column [C]// Conference: International Minerals Processing Council, 2014: 1–11.
- [56] 黄光耀. 水平充填介质浮选柱的理论与应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009: 73–78.
- Huang G Y. Research on theory and application of horizontally packed medium flotation column [D]. Changsha: Central South University, 2009: 73–78.
- [57] 廖寅飞, 刘炯天, 李树磊. 煤泥柱浮选的承载能力与气含率轴向分布 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1443–1447.
- Liao Y F, Liu J T, Li S L. Carrying capacity and axial distribution of gas holdup in coal column flotation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1443–1447.
- [58] Araya R, Gomez C, Finch J, et al. Characterization of frother effects on gas dispersion in a Jameson cell [C]//XXVII International Mineral Processing Congress, 2014: 1–11.
- [59] Massinaei M, Kolahdoozan M, Noaparast M, et al. Hydrodynamic and kinetic characterization of industrial columns in rougher circuit [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22: 357–365.
- [60] Tavera F J, Escudero R, Finch J A. Gas holdup in flotation columns: laboratory measurements [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2001, 61: 23–40.
- [61] Vadlakonda B, Mangadoddy N. Hydrodynamic study of two-phase flow of column flotation using electrical resistance tomography and pressure probe techniques [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 184: 168–187.
- [62] 秦岭, 靳海波, 杨索和, 等. 多级气液鼓泡塔中筛板结构对气垫层高度及局部气含率的影响 [J]. *过程工程学报*, 2011, 11(1): 9–14.
- Qin L, Jin H B, Yang S H, et al. Effect of sieve plate structure on gas cap height and local gas holdup in a multistage bubble column reactor [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2011, 11(1): 9–14.
- [63] 何广湘, 郭晓燕, 杨索和, 等. 气液鼓泡床反应器中气泡行为光纤探针测量方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(2): 253–259.
- He G X, Guo X Y, Yang S H, et al. Measurement method of bubble behavior by optical probe in gas-liquid bubble column reactor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(2): 253–259.
- [64] 漆坤煜, 欧乐明, 冯其明, 等. 一种电导法测量浮选柱气含率的可行性探究 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2016, 3: 83–86.
- Qi K Y, Ou L M, Feng Q M, et al. Feasibility study of gas holdup measurement of flotation column by using conductivity method [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2016, 3: 83–86.
- [65] 刘利群, 孙勤, 杨阿三, 等. 气液固三相流化床局部相含率 [J]. *化学工程*, 2015, 43(10): 45–49.
- Liu L Q, Sun Q, Yang A S, et al. Local phase holdups in gas-liquid-solid fluidized beds [J]. *Chemical Engineering*, 2015, 43(10): 45–49.
- [66] 靳海波, 连以诚, 刘鑫, 等. 基于电阻层析成像技术的气升式内循环鼓泡反应器流体力学研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(11): 3935–3939.
- Jin H B, Lian Y C, Liu X, et al. Hydrodynamic parameters in an airlift inner-loop column using electrical resistance tomography [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(11): 3935–3939.
- [67] 陶芳芳, 宁尚雷, 靳海波. 电阻层析成像技术在气液(固)多相流动体系中的应用进展 [J]. *过程工程学报*, 2020, 20(4): 371–381.
- Tao F F, Ning S L, Jin H B. Application progress of electrical resistance tomography in gas-liquid (solid) multiphase flow system



- [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(4): 371–381.
- [68] Kourunen J, Niitti T, Heikkinen L M. Application of three-dimensional electrical resistance tomography to characterize gas holdup distribution in laboratory flotation cell [J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 1677–1686.
- [69] Vinnett L, Ledezma T, Alvarez-silva M, et al. Gas holdup estimation in flotation machines using image techniques and superficial gas velocity [J]. Minerals Engineering, 2016, 96: 26–32.
- [70] Han J K, Wang W Z, Li R, et al. Study on gas holdup characteristics of micro-bubble countercurrent contacting flotation column [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2020, 56(4): 665–675.
- [71] Lee J, Choi W, Lee J. A study of the bubble properties in the column flotation system [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2003, 20: 942–949.
- [72] 刘煜, 闫小康, 王利军, 等. 现代光学测量技术在矿物浮选中的应用及展望 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 1–6.
- Liu Y, Yan X K, Wang L J, et al. Application and forecast of modern optical measurement technologies in mineral flotation [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 1–6.
- [73] 刘小芳. 射流曝气微细气泡的 PIV 测量 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2012, 29(2): 167–170.
- Liu X F. PIV Measurement of jet aeration micro-bubble [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2012, 29(2): 167–170.
- [74] 焦斌亮, 秦晓慧. 基于数字图像处理的水中微气泡参数的测量 [J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 114–117.
- Jiao B L, Qin X H. Parameter measurement of micro-bubbles in water based on digital image processing [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(1): 114–117.
- [75] 王红一, 董峰. 气液两相流中上升气泡体积的计算方法 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2444–2449.
- Wang H Y, Dong F. Calculation method for bubble volume in gas–liquid two-phase flow [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2444–2449.
- [76] Tan Y H, Rafiei A A, Elmahdy A, et al. Bubble size, gas holdup and bubble velocity profile of some alcohols and commercial frothers [J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 119: 1–5.
- [77] 王军超, 李国胜, 韩加展, 等. 起泡剂对溶液中气泡形状和速度的影响研究 [J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 142–145.
- Wang J C, Li G S, Han J Z, et al. Study on bubble shape and velocity in different frother solutions [J]. Coal Engineering, 2016, 48(9): 142–145.
- [78] Sam A, Gomez C O, Finch J A. Axial velocity profiles of single bubbles in water/frother solutions [J]. International Journal of Mineral Processing, 1996, 47(3): 177–196.