doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 08. 020

超大型浮选机下部循环区的构建及其特性研究

韩登峰[1,2],史帅星[1,2],孙伟成[1,2],张 明[1,2],李恒欠[1,2]
(1. 北矿机电科技有限责任公司,北京 100160;
2. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628)

摘 要:随着浮选机容积由300 m³向600 m³级别乃至更大规模跨越,传统四动力学分区模型下矿化气泡上浮距离显著增加,粗颗粒及贫连生体脱附概率升高,浮选效率下降。为解决这一难题,本文提出在浮选槽下部构建独立的“循环区”,将原有四分区重构为五动力学分区。系统阐述了循环区的功能需求、构建原理及关键结构的设计准则。通过循环量测试、气含率分布模拟及固相悬浮试验,定量研究了循环区内的矿浆循环特性、充气特性及颗粒悬浮特性。结果表明:循环区可有效抬升并压缩运输区与分离区,实现相对浅槽化浮选,同时强化槽内矿浆循环,避免沉槽与短路;导流筒内循环量与叶轮转速呈线性正相关,受充气量影响较小;假底与导流筒可抑制气体进入下部循环区,保障循环效率。研究为超大型浮选机的动力学放大设计与性能优化提供了系统的理论依据。

关键词:超大型浮选机;下部循环区;五动力学分区;循环量;相对浅槽化浮选
中图分类号:TD456 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)08-0221-13

Study on the Construction and Characteristics of the Lower Circulation Zone of Ultra-large Flotation Machine

Han Dengfeng[1,2], Shi Shuaixing[1,2], Sun Weicheng[1,2], Zhang Ming[1,2], Li Hengqian[1,2]
(1. BGRIMM Machinery and Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China;
2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: As the volume of flotation machines scaled up from the 300 m³ class to the 600 m³ class and even larger sizes, the rising distance of mineralized bubbles increased significantly under the traditional four-zone dynamic model, leading to a higher desorption probability of coarse particles and lean locked particles and a decline in flotation efficiency. To address this problem, this paper proposed constructing an independent “circulation zone” in the lower part of the flotation cell and reconstructing the original four zones into five dynamic zones. It systematically elaborated on the functional requirements, construction principles and design criteria of key structures for the circulation zone. Through pulp circulation rate tests, gas holdup distribution simulations and solid suspension experiments, this study quantitatively investigated the pulp circulation characteristics, aeration characteristics and particle suspension characteristics in the circulation zone. The results showed that the circulation zone could effectively elevate and compress the transport zone and separation zone to realize relatively shallow-cell flotation, and simultaneously strengthen the pulp circulation inside the cell to avoid sedimentation and short-circuiting. The circulation rate in the draft tube was linearly and positively correlated with the impeller speed and was less affected by the aeration rate. The false bottom and draft tube could suppress gas from entering the lower circulation zone and ensure the circulation efficiency. This research provided a systematic theoretical basis for the dynamic scale-up design and performance optimization of ultra-large flotation machines.

Key words: ultra-large flotation cell; lower circulation zone; five kinetic zones; circulation flow rate; relatively shallow-tank flotation

---

收稿日期:2026-05-25
基金项目:云南省重点研发计划项目(202402AB080010)
作者简介:韩登峰(1984—),男,陕西蒲城人,工学博士,正高级工程师,主要从事选矿装备的开发及产业化推广应用工作。

0 引言

浮选机作为矿物分选的核心装备，其槽内流体动力学环境直接影响分选效率与回收率[1-3]。传统大型浮选机槽内通常被划分为叶轮搅拌区、运输区、分离区和泡沫区四个动力学分区[4]。然而，随着浮选机容积从300 m^3跨越到600 m^3级别，各动力学区域在高度尺寸上的显著增大，使得矿物颗粒的有效上浮空间受到限制，矿化气泡在较长上浮距离中易发生颗粒脱落，粗颗粒及贫连生体的回收率难以保障[5-10]。

针对上述矛盾，如何在超大型浮选机几何尺寸增加的同时保障各动力学区域的性能不发生明显变化，成为浮选装备大型化进程中亟需解决的关键问题[11]。考虑到矿化气泡的上浮特性，降低高径比可在一定程度上缩短上浮距离，但受结构约束，高径比不可能无限降低。因此，缩短运输区和分离区的高度、实现超大型浮选机的相对浅槽化成为切实可行的技术路径[12]。

所谓“相对浅槽化”，即降低矿化气泡的上浮距离，使超大型浮选机拥有与小型浮选机相近的上浮距离。此处包含两个“相对”含义：其一，颗粒越粗越易从矿化气泡上脱落，较长上浮距离必然造成较大脱落概率，常规粒级颗粒在面对较长上浮距离时亦表现出与粗颗粒、贫连生体相似的不稳定性；其二，尽管超大型浮选机高径比有所减小，其实际槽深仍远大于小规格浮选机，在常规小浮选机中容易选别的矿物在超大型浮选机中则显得难以上浮[13]。

此外，大型及超大型浮选机在保障浮选时间的前提下设备台数减少，甚至出现单台单作业的流程配置，对内部循环特性提出了更高要求，必须通过强化单台浮选机的内部流场循环能力来降低短路概率[14]。

基于上述分析，本文在浮选槽下部引入一个新的动力学区域——循环区，将传统四动力学分区重构为五动力学分区，并围绕新的循环区的构建方法、结构设计及自身特性开展系统研究。

1 下部循环区构架提出与功能需求分析

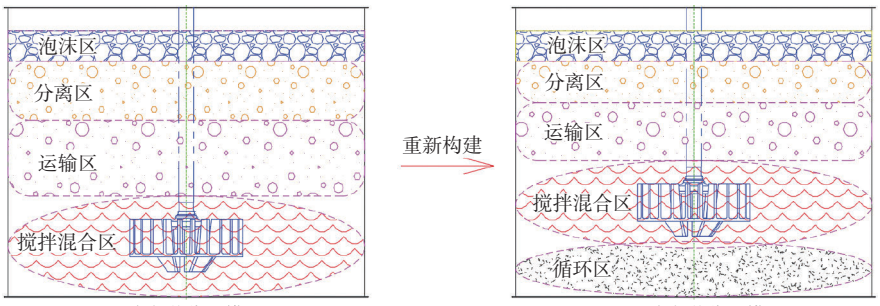
1.1 下部循环区构架提出

传统大型浮选机槽内被划分为四个动力学分区：叶轮搅拌区、运输区、分离区和泡沫区。当浮选机容积由300 m^3跨越到600 m^3时，各区域在高度方向上的尺寸显著增大，矿物颗粒的有效上浮受到空间尺度的限制。单纯依靠减小高径比已无法满足要求，必须对动力学分区进行重构。

本文提出的五动力学分区模型，自下而上依次为：循环区、叶轮搅拌区、运输区、分离区、泡沫区(图1)。循环区处于槽体最下部，对上部四个分区形成托举之态，有效解决了超大型浮选机容积增大与颗粒上浮之间的矛盾。其工作原理：浮选机叶轮位置向上提升，在槽体下部设置循环通道和假底联合作用体。矿浆进入浮选机后，在叶轮的搅拌带动下，在槽体下部区域形成大循环。被叶轮转动甩出的矿浆一部分向下，经过假底和导流筒重新回到叶轮区；另一部分向上裹挟矿化气泡，经运输区到达分离区，目的矿物与非目的矿物在此发生主体分离，随后气泡携带目的矿物进入泡沫区完成进一步富集，最终泡沫产品由溢流堰溢出。

循环区的引入带来以下优势：第一，原有四个分区被整体抬升，矿化气泡上浮距离大幅缩短，粗颗粒与贫连生体的脱落概率显著降低；第二，槽内矿浆循环能力得到强化，避免了叶轮位置抬高可能引发的沉槽风险；第三，有效降低浮选机内部的短路概率，尤其对于单台单作业流程的大型浮选机意义重大。

为实现上述功能，循环区必须满足五点需求：1)对原有四个动力学区域进行抬升和压缩；2)参与浮选机的大循环，避免矿浆短路；3)在原有叶轮搅拌条



(a) 四动力学分区模型　　(b) 五动力学分区模型

图1 由四动力学分区到五动力学分区的模型演变

Fig. 1 Evolution from four-zone to five-zone kinetic model

件下具有足够流速，防止沉槽；4）不造成功耗过度增加；5）不影响空气的分散。其中，核心是强化矿浆的循环流动并对其他区域形成调节作用。

1.2　下部循环区的功能需求分析

叶轮物理尺寸受浮选槽规格制约，导致能量分布不均匀，无法充分满足超大容积槽体的矿浆悬浮需求。尤其在粗颗粒悬浮场景下，传统叶轮的搅拌范围有限，易形成局部湍流过强而整体循环不足的现象。而在浮选机尺度不断增大的情况下，这一影响也逐渐向常规粒级矿物偏移，导致浮选效率下降。

由图2可知，随着浮选机几何容积的不断扩大，叶轮无论纵向还是横向，其辐射面积的占比都在不断地减小。相对变小的叶轮需要足够的循环能力来使浮选槽内部矿浆有效循环，既要保障矿浆的悬浮，又要满足空气的分散。这就需要更高的叶轮搅拌速度来维持，而传统开放式的浮选槽内矿浆自由流动，能量耗散梯度大，不利于矿物颗粒与气泡的碰撞黏附。

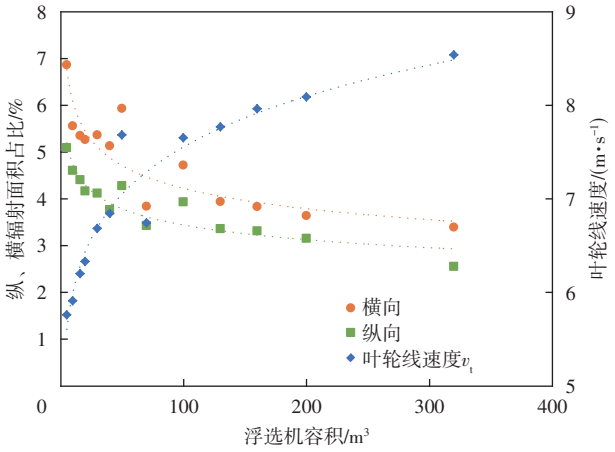


图2　叶轮纵、横辐射面积随浮选机容积的变化

Fig. 2　Variation of impeller radiation areas in radial and axial directions versus flotation cell volume

2　下部循环区构建与浮选槽结构设计

要使浮选机的动力学区域得到提升，仅仅提升叶轮的搅拌位置还不能满足浮选机的性能要求。要实现下部矿浆大循环，浮选机的导流筒和假底是两个关键部件，对浮选槽内的流体动力学结构，特别是循环区的构建和优化有着重要作用。这两个部件的合理设计和布局有助于提高浮选机的搅拌效率和矿浆与气泡的相互作用效果，从而提升浮选效率。

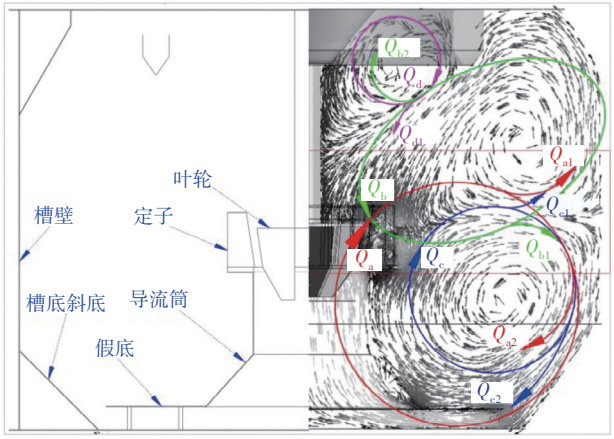
2.1　循环区内的矿浆循环特性设计

循环区的作用之一是通过浮选槽内矿浆的循环运动，使得矿浆在浮选槽内均匀分布。循环区内的矿浆流动能够产生大量的湍流，使矿浆颗粒悬浮、分散，避免了矿粒在槽底的沉积。这种湍流有助于矿浆在槽内各个区域的混合，为矿化过程创造了有利条件。

循环区能够保障矿浆在垂向和水平分布的均匀性，这对于浮选过程至关重要。在循环区，湍流动能通过循环作用将较大的矿粒悬浮到矿浆中上部，使得浮选过程能够有效地处理较宽的粒度分布。悬浮的稳定性增强不仅有利于提高矿化泡沫的质量，也能够使浮选的回收率和精矿品位得到优化。

浮选机循环区内的矿浆循环特性主要包括流动方向、流动强度、湍流程度，以及循环流的尺度等几个方面。这些特性直接影响矿浆在浮选机内的悬浮、颗粒的分散以及矿浆流的交换与停留。

五动力学分区浮选机的循环流动由叶轮驱动、定子分散和导流筒与假底的导流，以及槽体的配合共同实现(图3)，其中导流筒和假底的结构特征对循环区的建立有决定作用。



注：Q_a、Q_b、Q_c、Q_d为浮选槽内的四个主要内循环流。

图3　浮选机下部区域的构成

Fig. 3　Composition of the lower region of the flotation cell

对于搅拌悬浮，常用Zwietering悬浮公式计算临界转速，其公式表达见式(1)[15]：

$$N_{js}=s\left(\frac{g\left(\rho_p-\rho_l\right)d_p}{\rho_l}\right)^{0.45}\frac{v^{0.1}X^{0.13}}{d_p^{0.25}D^{0.85}} \tag{1}$$

式中，N_{js}为临界转速，r/min；s为几何因子；D为浮选机叶轮直径，m；d_p为矿物颗粒直径(此处指矿浆中最大颗粒)，mm；X为浮选机内矿浆中固体质量与液体质量的比值；v为矿浆的运动黏度，mPa·s；g为重力加速度，m/s²；ρ_p为固体颗粒的密度，kg/m³；ρ_l为液体密度，kg/m³。

Zwietering公式中的浓度一般只适用于2%的固体浓度，要使其适应更高的浓度，X的指数就需要调整为0.23或0.32，适应浓度可达35%(或者X=54)。同时，公式中的S与槽体尺寸、叶轮尺寸、离底高度、叶轮结构等几何尺寸相关，要想获得准确的离底悬浮转速，就必须确定合适的S值。

以上是不充气条件下的临界悬浮转速计算，当作为浮选机进行充气时，其临界转速将发生变化。即充气条件下，临界悬浮叶轮转速按式(2)[16]计算。

$$N_{jsg}=N_{js}+K_aQ_{GV} \tag{2}$$

式中，N_{jsg}为临界转速，r/min；K_a为浮选机充气影响系数；Q_{GV}为浮选槽特定空气补给率，min^{-1}。

$$Q_{GV}=J_g/z \tag{3}$$

式中，J_g为充气速率，$m^3/(m^2\cdot min)$；z为浮选槽中液位高度，m。

2.2 导流筒与假底对循环区形成的作用

1)导流筒的设计与功能

导流筒能够约束矿浆的运动方向，减少紊流并提高流场稳定性。在充气式浮选机中，导流筒同时还具有支撑定子的作用。导流筒的设计参数主要包括形状、高度和直径等。

从图4可以看出，叶轮搅拌矿浆在定子中部位置甩出，形成向上和向下的循环流，其中向下的循环流被导流筒、假底分割出内外流动，假底和导流筒的构造原则是保持内外流通中有足够的流速，防止沉槽发生，同时又要避免对流场流线的过分阻碍，降低功耗并保持流场稳定。

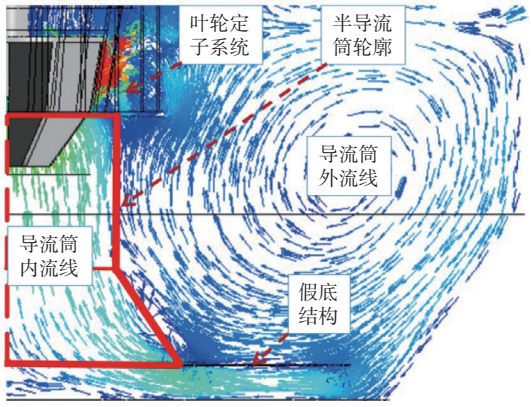


图4 浮选机导流筒结构

Fig. 4 Draft tube structural configuration in flotation machine

图5展示了下部循环区构建中的槽底结构关系，可以获得以下数学关系式：

$$H_b+H_t+H_s/2=D_w \tag{4}$$

$$H_t=H_l+H_u \tag{5}$$

$$\tan\alpha=\frac{R_l-R_u}{H_l} \tag{6}$$

式中，30°≤α≤50°，具体数值结合流场流线角度确定。

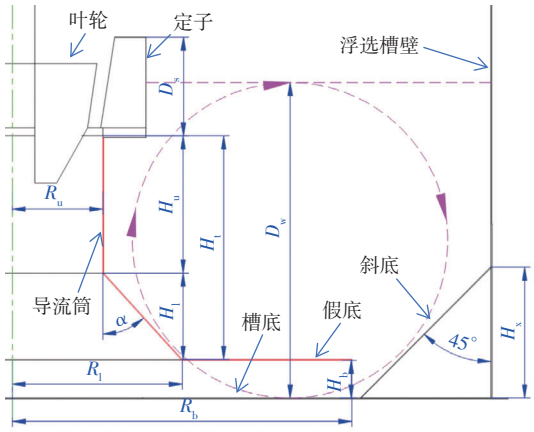


图5 下部循环区构建中槽底结构关系

Fig. 5 Structural relationship of the tank bottom in the construction of the lower circulation zone

在浮选机运行过程中，要保障矿物悬浮，矿粒在假底下方和导流筒内的速度应大于最小速度要求。假底下方的临界流速可参照有压水平管道输送速度，导流筒内则需根据干涉沉降速度进行设计核算。

设假底下方临界流速为v_h，导流筒内临界沉降速度为v_z，则满足：

$$S_l\cdot v_z=S_{fb}\cdot v_h \tag{7}$$

式中，$S_l=2\pi R_l$，$S_{fb}=2\pi R_b$。由此可计算出导流筒和假底的基本外形尺寸，为后续设计提供参数基础。

2)浮选机假底结构的设计与功能

假底位于槽体底下部，并与槽体底地面保持一定距离(图6)。传统浮选机大型化过程中槽底常因流体动力学问题导致颗粒沉积，假底结构的设计能够通过引导浆体流动减少槽底死区，使矿物颗粒保持均匀悬浮。假底通过优化流场分布，还能进一步增强浆体循环效率。

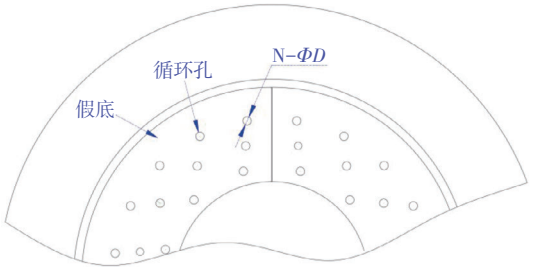


图6 假底结构与循环孔

Fig. 6 False bottom structure and circulation hole

浮选机中，假底和导流筒常常同时存在并协同工作。假底改善了槽底流态，为导流筒提供了良好的吸浆条件，防止了导流筒下部区域的颗粒淤积；而导流筒则强化了矿浆的整体循环，使得假底区域的矿浆能被有效卷吸参与浮选过程。二者的合理匹配，共同致力于优化浮选槽内的流体动力学环境，为实现高效矿物分离创造条件。假底关键结构参数相互关系如图7所示。对于具有假底和导流筒的五动力学分区结构浮选机，在循环区设计中的核心要素之一就是保持循环区内矿浆的有效悬浮与分散。图8展示了矿物颗粒在浮选槽内的悬浮分布情况。

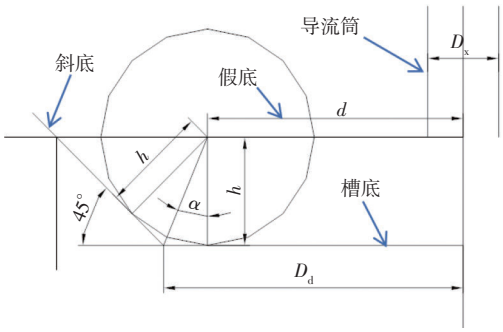


图7　槽底关键结构参数相互关系

Fig. 7　Interrelationship among the key structural parameters of the tank bottom

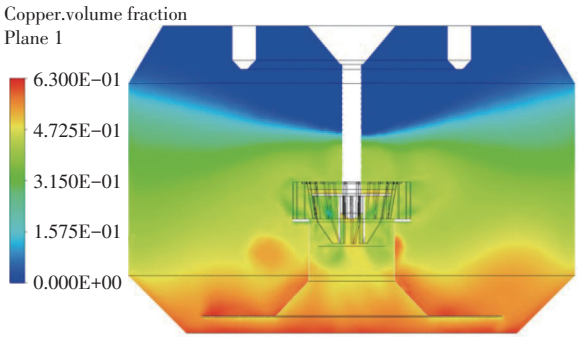


图8　固相矿物颗粒在槽内的分布

Fig. 8　Distribution of solid mineral particles in the flotation machine

要满足矿物颗粒在假底与槽体底板间的通道内不沉积，需要综合考虑导流筒截面积与循环孔总面积，以及假底循环孔总面积与假底下方过流面积的比例关系。结合工程经验，假底高度和直径存在下列关系：

$$D_x^2=1.38\,dh$$

$$4hD_d-8h^2\tan\left(\frac{a}{2}\right)-D_x^2=0 \tag{8}$$

式中，D_x为导流筒直径，m；D_d为槽底直径，m；d为假底直径，m；h为假底距槽底高度，m；a为假底边缘到槽底边缘与垂线的夹角，(°)。

3　循环区自身流体动力学特性研究

3.1　循环区几何区域的确定

HIF型浮选机流场在纵截面上呈现a、b、c、d四个涡旋区域，其中涡旋b和c由涡旋a驱动，涡旋d由涡旋b驱动。这四个涡旋区彼此在交界处都存在质量交换(图9)。根据物质流守恒原则，进入循环量和排出循环量相等，则存在：

$$Q=Q_a+Q_b+Q_c \tag{9}$$

$$Q_{d1}=Q_{b2} \tag{10}$$

$$Q_{b1}=Q_{a1}+Q_{c1} \tag{11}$$

$$Q_{a2}=Q_{c2} \tag{12}$$

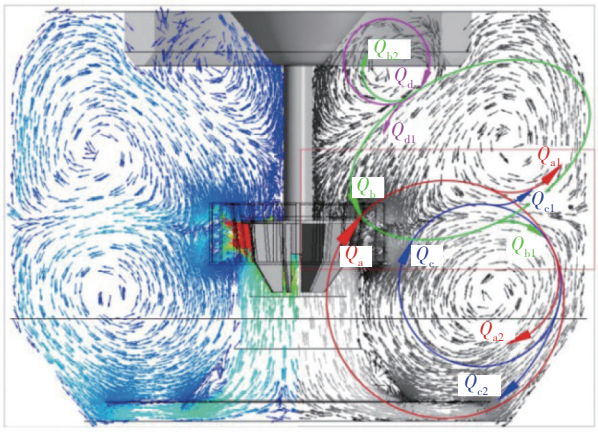


图9　浮选槽内循环矿浆流分布

Fig. 9　Distribution of circulating slurry flow in flotation tank

式中，Q为进入叶轮区的总循环量；Q_a、Q_b、Q_c为不同涡旋的循环分量；Q_{a1}、Q_{a2}、Q_{b1}、Q_{b2}、Q_{c1}、Q_{c2}、Q_{d1}分别表示对应循环分量的二次分量。

各动力学区域在纵截面上没有严格的区分界限，本文按照高度的不同进行概略划分(图10)。叶轮下沿向下的区域规定为循环区。循环区位于叶轮、定子所在位置的下方，此区域仅有少量空气卷入，可以认为不发生气泡与颗粒的碰撞黏附过程，其主要功能是实现矿浆循环。循环区对整个浮选槽下部形成托举之态，相对抬高和压缩了其他区域在高度上的分布。

各动力学区域的纵向空间分布计算方法分别为：

泡沫区：

$$H_p=50\sim300\ \text{mm} \tag{13}$$

分离区：

$$H_f=H_c-1/2H_i-H_y=1/4(H-H_p-H_{d'})-1/2H_i \tag{14}$$

运输区：

$$H_y=3/4H_c=3/4(H-H_p-H_{d'}) \tag{15}$$

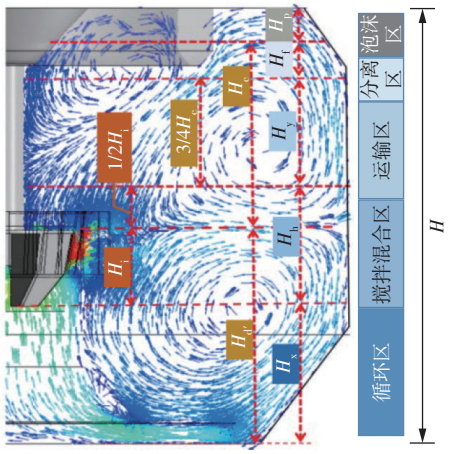


图 10 中置叶轮结构浮选槽内的动力学区域在纵向上的概略划分

Fig. 10 Conceptual longitudinal segmentation of kinetic regions in center-impeller flotation cell

搅拌混合区：

$$H_h=H_i+1/2H_i=3/2H_i \tag{16}$$

循环区：

$$H_x=H_{d'}-H_i \tag{17}$$

由上述公式可知，只需确定叶轮的离底高度，即可由式(13)～(17)确定五个动力学区域的纵向空间分布。

3.2 循环区的矿浆循环特性

图 11 和图 12 展示了中置叶轮浮选机的中心截面速度分布与速度矢量。与底置叶轮相比，中置结构的下循环作用范围显著增大，导流筒内部流速高，形成闭式循环系统。整体上循环区域提高，粗粒运输高度缩短。

为定量检测循环区导流筒内的循环量，建立了循环量测试系统，采用双流速传感器对测试结果进行校

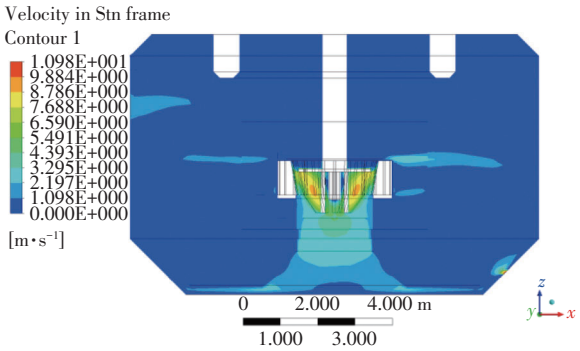


图 11 中心截面速度云图

Fig. 11 Velocity cloud of central section

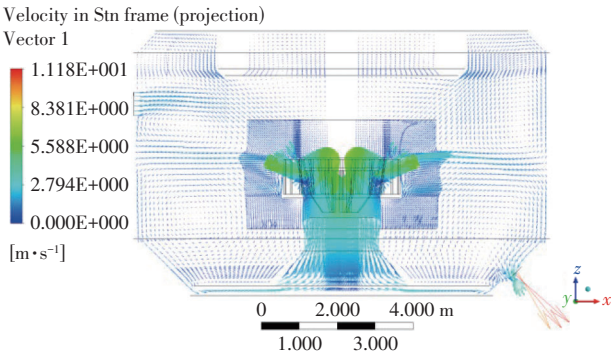


图 12 中心截面速度矢量图

Fig. 12 Velocity vector field at central cross-section

正。每个传感器所在测点位置对流速所代表的面积进行划分，便于计算综合循环量(图 13、表 1)。

1) 不充气条件下循环区的循环性能测试

首先是在不充气条件下进行循环量测量，调整浮选机转速，以获得不同搅拌强度下的循环能力。

由图 14 可知，两个传感器进行流速测量，在同一搅拌强度(运转频率)下，各个测点的流速总体变化不大，中心位置的流速略高于周边速度。而随着搅拌强

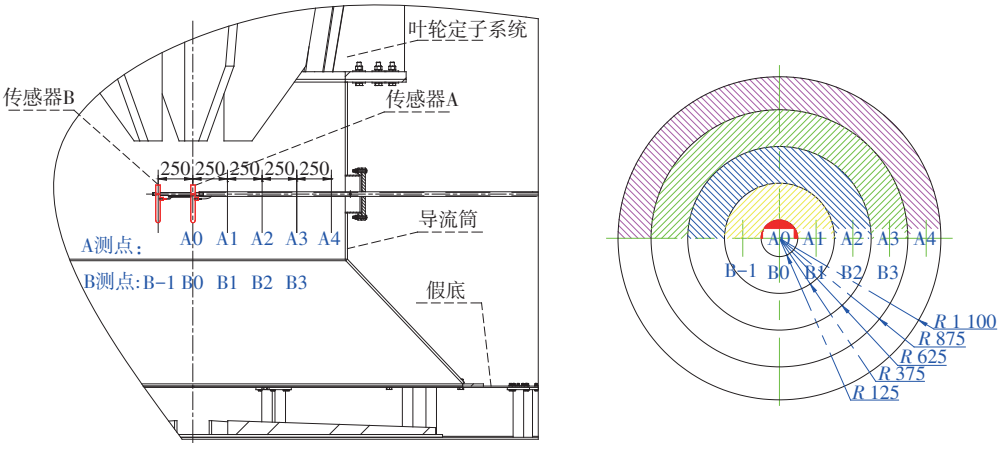


图 13 循环流速测量点位和传感器布置(单位：mm)

Fig. 13 Measurement positions and sensor layout for circulation flow characterization(unit: mm)

表 1　传感器各测点对应辐射面积

Table 1　Radiation areas corresponding to sensor measurement positions　/m^2

测点	−1	0	1	2	3	4
传感器 A		0.05	0.39	0.79	1.18	1.40
传感器 B	0.39*	0.05	0.39	0.79	2.57	

注：*传感器 B 的测点 −1 和 1 对应的环形辐射面积重复，计算循环量时只计算一次。

度的增强(频率增大)，整体流速呈上升趋势，搅拌频率由 30 Hz 增加到 46 Hz，流速约增加 50%。

根据搅拌强度、流速及其对应的辐射面积，可以转换成转速与循环量的对应关系，如图 15 所示。

从图 15 可以看出，五动力学分区构架下，导流筒内的循环量与叶轮转速呈线性正相关，由此可以确定不同工况下浮选机的转速设定。

2) 充气条件下的循环性能测试

浮选机工作过程中，鼓入的气体由叶轮中心扩散至整个浮选槽截面，气量大小影响着叶轮的循环能力，因此在不同充气量条件下，对导流筒内的循环量进行测定。不同充气条件下转速与循环量关系如图 16 所示。

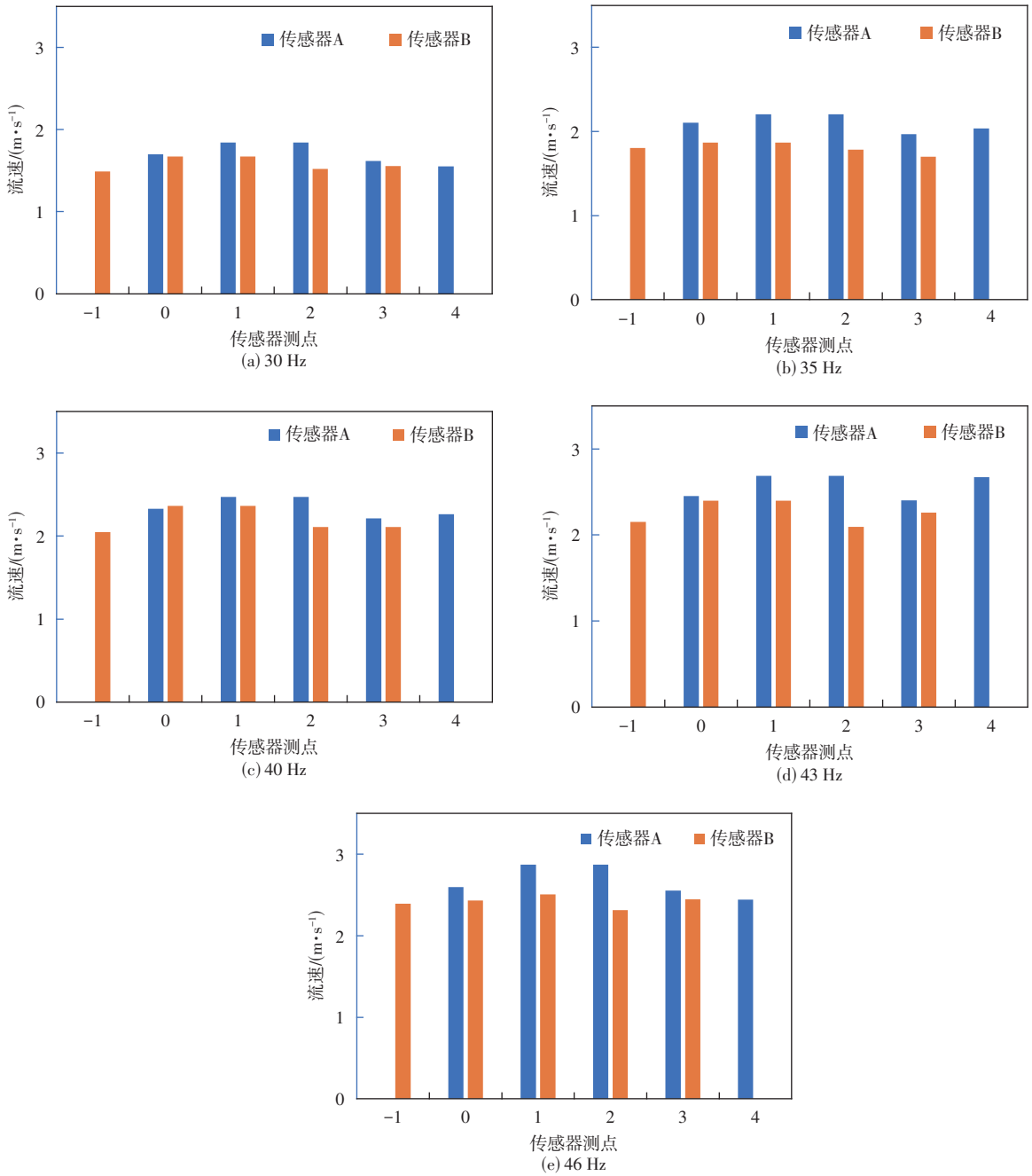


图 14　不同搅拌强度下传感器流速测量

Fig. 14　Velocity profiles measured by sensors at varying agitation intensities

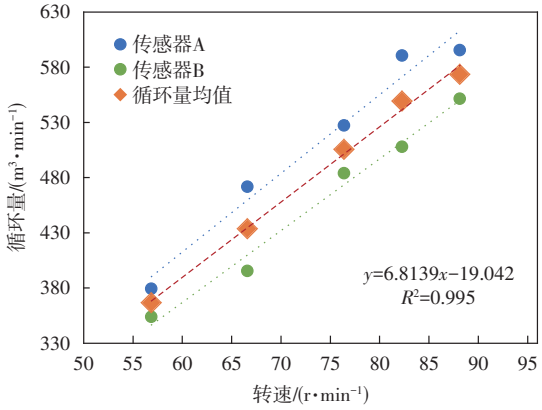


图 15 不充气条件下转速与循环量关系

Fig. 15 The relationship between rotational speed and circulation under non-inflated condition

从图 16 可以看出，随着转速的增大，循环量依然呈现增大的趋势，但在高搅拌强度下，循环量的波动性显著。由图 17 可知，充气速率增加，浮选机在导流筒内的循环量呈下降趋势。在低搅拌转速下，当充气量增加到 1 $m^3/(m^2 \cdot min)$ 以上时，循环量又会有少量的增加。

通过以上测试分析可知，五动力学构架下的浮选机在导流筒内的循环量与叶轮转速和充气量大小相关，且转速对循环量的影响要显著于充气量的影响。

3.3 循环区的充气特性

循环区主要用于矿浆的循环和悬浮，气体在循环区的混入会影响矿浆的循环效率。基于导流筒和假底的动力学分区特征，对循环区及充气性能进行分析。

由图 18 可以看出，在不同充气速率条件下，浮选

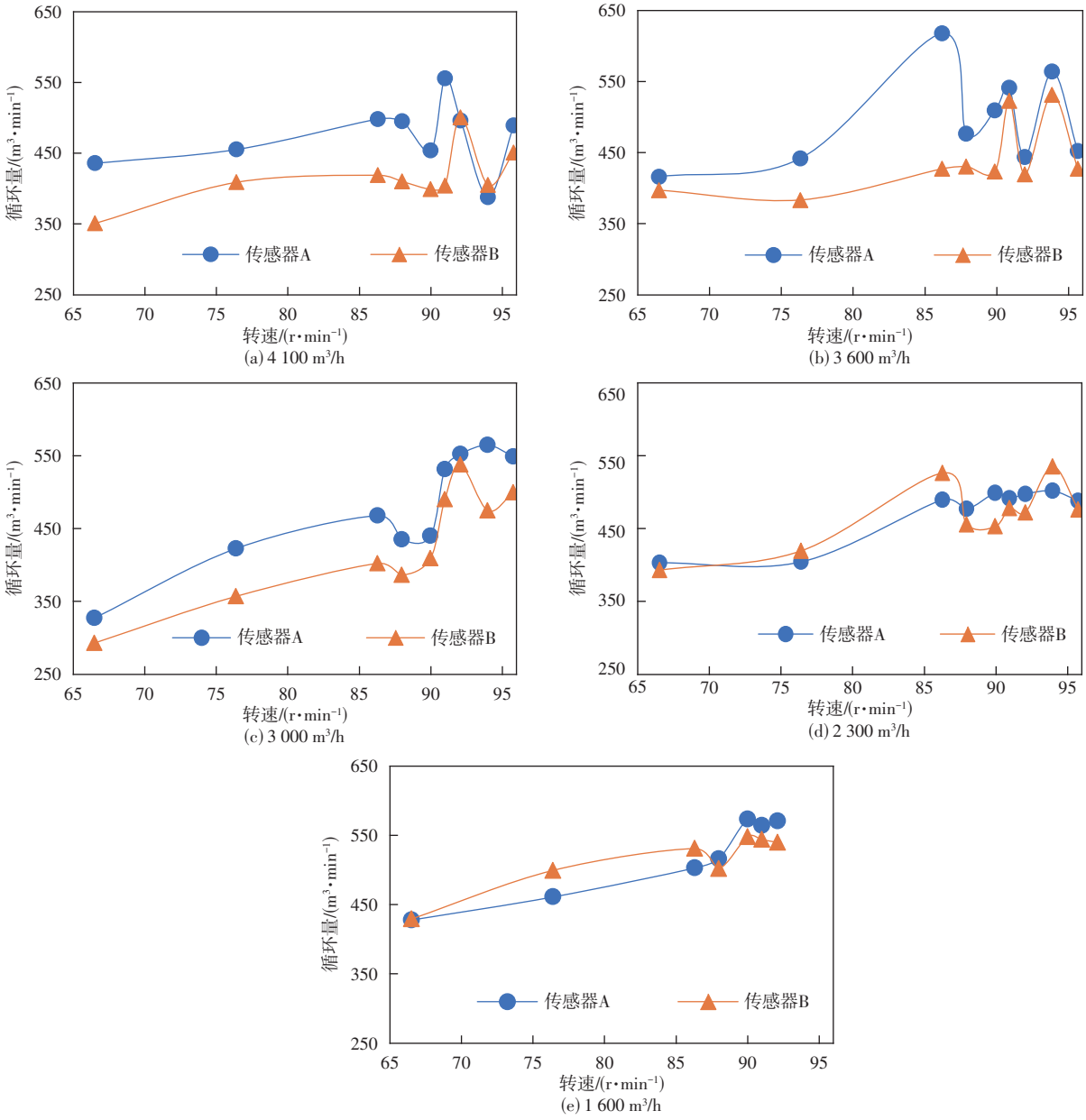


图 16 不同充气条件下转速与循环量关系

Fig. 16 The relationship between rotational speed and circulation volume under different inflation conditions

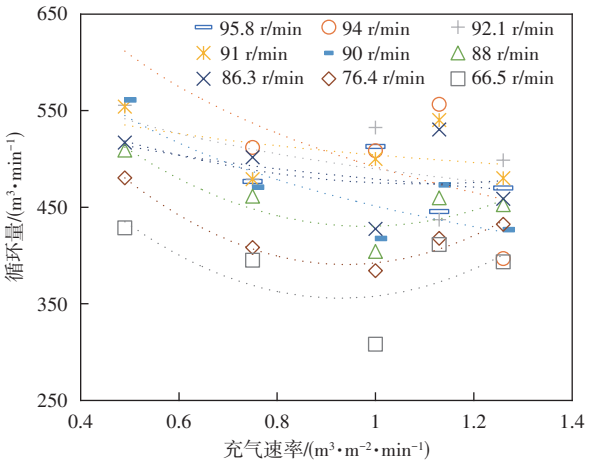


图 17　充气速率变化与循环量关系

Fig. 17　The relationship between inflation rate and circulation volume

槽内气含率均表现出明显的空间非均匀分布特征，整体呈现出“上部高、中部过渡、下部低”的分布规律。随着充气速率由 0.25 $m^3/(m^2 \cdot min)$ 逐渐增加至 1.0 $m^3/(m^2 \cdot min)$，槽内中上部区域的气含率持续提高，高气含率区域逐渐扩大，说明充入空气能够在叶轮剪切作用下充分分散，并沿主循环区向上输运，增强了浮选槽中上部区域的气液分散程度。

值得注意的是，无论充气速率如何变化，假底下方、导流筒内部以及叶轮下部循环区始终保持较低气含率。从云图可以明显看出，该区域始终以蓝色为主，其气含率远低于矿化区和泡沫层区域。这说明新增下部循环区具有较强的排气能力，能够有效阻止大量空气进入槽底循环区域，使该区域始终保持以液相循环为主的流动状态。

从图 19 可以看出，在距槽底 3.5 m 以下的区间，液相中的气含率非常低。采样线 Line 1 在 3.5 m 处存在一个较高点，可以看出它是叶轮空气出口位置。导流筒和假底的存在使得气体不易被卷入叶轮下部参与再循环，这为循环能力的保障提供了支撑。

同时从图 19 中也可以看出，空气由叶轮腔甩出后，在浮力的作用下向上上浮，但由于浮选槽下部循环区的强劲循环，流体力克服了气泡的浮力，使部分气体被卷入到了叶轮下部的区域。

下部循环区不仅强化了矿浆循环，而且改变了气泡的输运模式，使部分细小气泡突破传统“单向上浮”规律，形成“循环再利用”机制，从而实现了气液两相在空间和时间上的双重强化，为后续颗粒悬浮均匀化和浮选动力学强化提供了有利条件。

3.4　循环区的颗粒悬浮特性

通过具体试验对具有循环区的浮选槽的悬浮特性进行测试分析。矿样采用江西某铜矿，经过浮选后的尾矿样，−0.074 mm 粒级含量约占 60%，矿浆浓度为 45%，矿石密度 2.7 g/cm^3。给定不同的充气量，

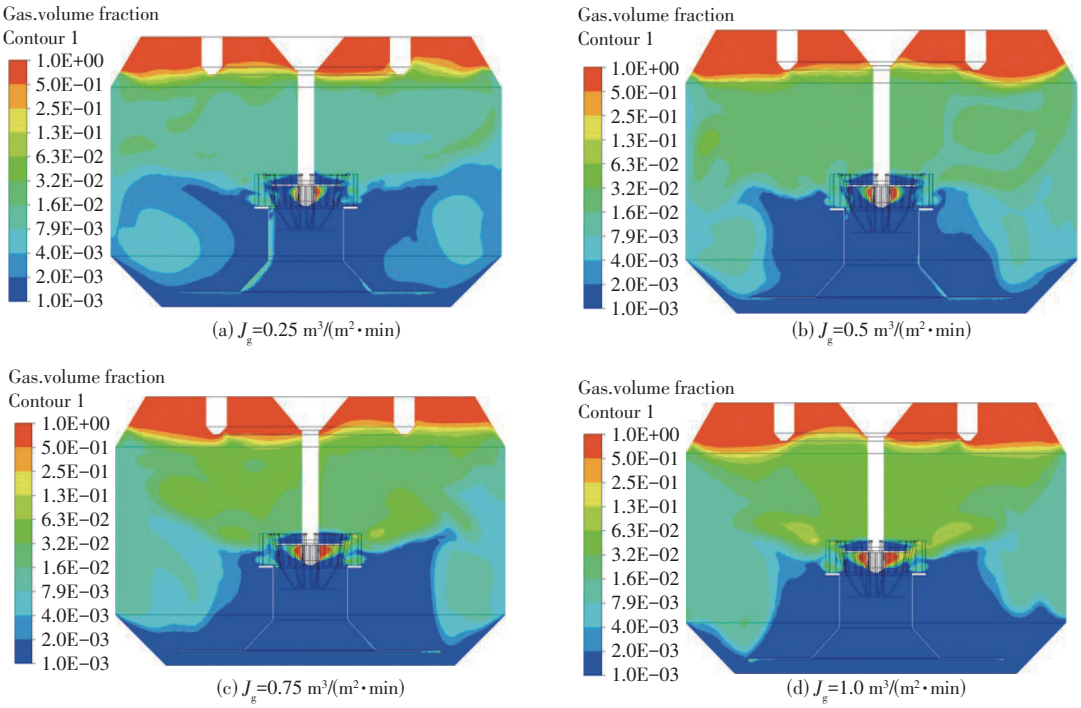


图 18　不同充气速率下的气含率分布

Fig. 18　Gas volume fraction distribution across different aeration rates

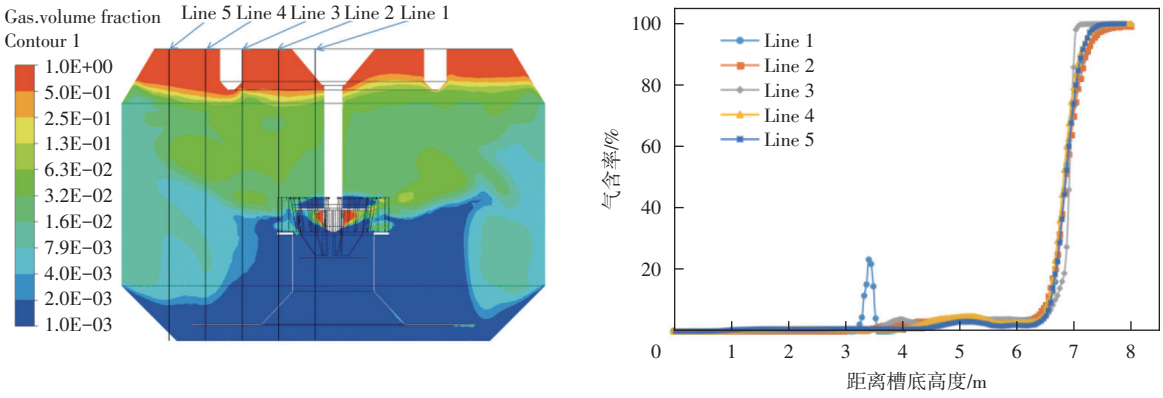


图 19 五动力学分区下的气含率分布

Fig. 19 Gas holdup distribution under five dynamic partitions

对浮选机在实现离底悬浮时的转速和功率进行记录分析(图 20)。

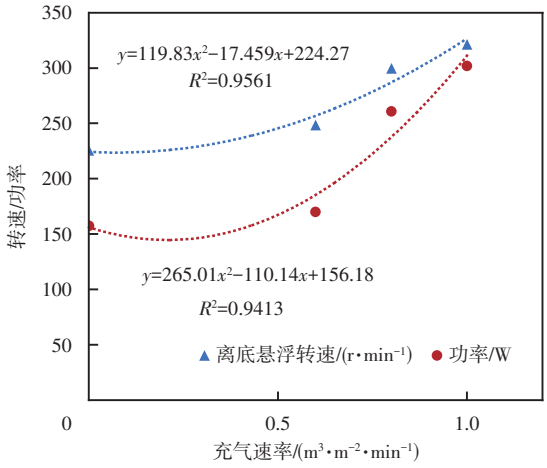


图 20 不同充气条件下的临界悬浮转速测试

Fig. 20 Critical suspension speed tests under varied aeration conditions

由图 20 可知,随着充气速率的提高,实现矿粒离底悬浮所需的临界悬浮转速和对应的叶轮功率均呈明显增加趋势,且两者均能够采用二次多项式进行较好拟合,相关系数分别达到 0.956 1 和 0.941 3,说明充气速率与悬浮特性之间具有较强的非线性关系。也可以看出低充气条件下空气进入叶轮区后,对矿浆循环能力的削弱作用尚不明显,叶轮产生的轴向循环流仍能够维持颗粒稳定悬浮。而高充气条件下,为维持相同的颗粒悬浮状态,需要投入更多的机械能量。

综合来看,充气过程对颗粒悬浮具有明显的不利影响,其本质是叶轮循环能力下降与气液两相耦合作用增强共同作用的结果。随着充气速率增加,系统必须提高叶轮转速以恢复矿浆循环能力,因此离底悬浮临界转速持续提高;与此同时,由于功率与转速之间近似满足三次方关系,功率增长速率明显快于转速增长速率,这也是高充气条件下浮选机单位能耗快速增加的重要原因。

离底悬浮测试在实验室 200 L 浮选机上开展,而对于超大型浮选机的矿浆悬浮特性,本文采用 CFD 仿真方法进行分析。仿真条件:浮选机容积为 680 m^3,固体颗粒粒度为 1 mm,颗粒密度为 2 700 kg/m^3,浓度为 30%。在偏离轴线不同位置设置量化采样竖线,对不同高度的固含率分布进行取值分析,采样位置如图 21 所示。

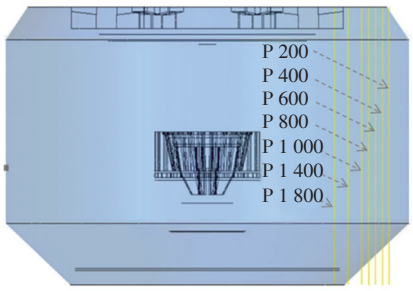


图 21 不同转速条件下的固相悬浮采样位置

Fig. 21 Solid-phase suspension sampling positions at different rotational speeds

从图 22 可以看出,在不同叶轮转速条件下,浮选槽内固相体积分数沿槽深方向均呈现由底部到溢流堰逐渐降低的分布规律,但不同转速下颗粒悬浮均匀程度存在明显差异。当叶轮转速为 50 r/min(图 22(a))时,各径向位置的固相体积分数虽然基本重合,但沿槽深方向存在明显梯度。当转速提高至 70 r/min(图 22(e))和 75 r/min(图 22(f))后,整个槽体绝大部分区域固相体积分数均稳定保持在约 0.19 左右,各径向测线几乎完全重合,仅在接近液面的局部区域由于自由液面效应及颗粒沉降距离缩短导致浓度快速

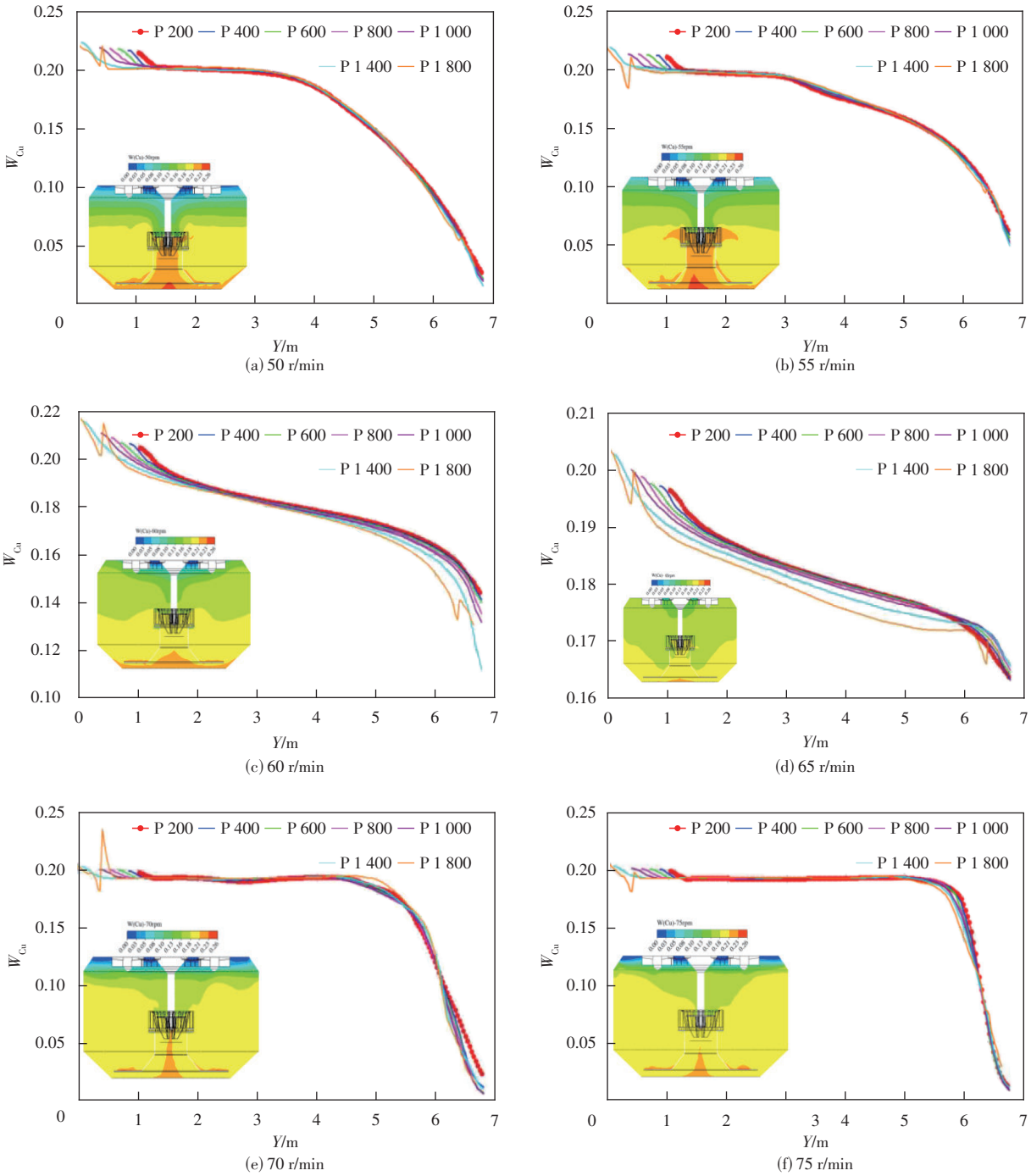


图 22　不同转速条件下的固相悬浮特性分析

Fig. 22　Solid suspension characteristics under varying impeller speeds

下降。此时槽内轴向浓度梯度基本消失，颗粒在整个有效工作区域内均保持均匀分布，说明浮选槽已经达到充分悬浮状态。

综合来看，叶轮转速是决定超大型浮选机颗粒悬浮状态的重要控制参数。随着转速提高，叶轮排浆能力和槽内循环流速不断增强，矿浆湍流强度提高，颗粒所受曳力和湍流扩散作用逐渐超过颗粒沉降速度，轴向浓度梯度不断减小，固相分布由明显分层逐步过渡至均匀悬浮。当转速达到 70 r/min 以上时，整个浮选槽基本实现完全悬浮，各位置颗粒浓度趋于一致，为后续矿粒与气泡充分碰撞、附着及稳定输运创造了良好的流体动力学条件。

4　结论

浮选机设计过程中不能无限制地降低高径比来满足矿化气泡的上浮需求，既要保障浮选动力学环境

相似，又要缩短矿化气泡上浮的距离，而循环区的引入则很好地解决了这一矛盾。通过以上研究，可得出如下结论：

1)要实现超大型浮选槽内的相对浅槽化，就必须将现有的矿浆相中的四个动力学区域进行抬升，减小各分区在纵向上的距离。需要在浮选机的下部引入一个新的动力学区域，以支持原有动力学区域的抬升。新引入的循环区处于槽体下部，对前面四个动力学分区形成托举之态，有效解决了浮选机超大型过程与颗粒上浮之间的矛盾，并兼顾强化槽体内部矿浆循环的功能。

2)通过对五动力学分区架构的浮选机在各区域纵截面上分布进行定义和建模计算，实现了五个动力学区域的明确划分。并指出了循环区的循环流动由叶轮驱动、定子分散和导流筒与假底的导流，以及槽体的配合共同实现，其中导流筒和假底的结构特征对循环区的建立有决定作用。

3)五动力学分区构架下的浮选机在导流筒内的循环量与叶轮转速和充气量大小相关，且转速对循环量的影响要显著于充气量的影响。同时，导流筒和假底的存在，使得气体不易被卷入叶轮下部参与再循环，这为循环能力的保障提供了支撑。

4)循环区的构建改变了原有浮选机的动力学分区架构，对其他动力学分区产生了连带性的影响，进而影响到整个浮选机性能。该特性为超大型浮选机的设计提供了指导，并为其性能保障奠定了理论基础。

参考文献

[1] 沈政昌，史帅星，陈东，等. 浮选设备研究与应用[M]. 北京：冶金工业出版社，2017.
Shen Zhengchang, Shi Shuaixing, Chen Dong, et al. Research and application of flotation equipment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.

[2] Wills B A, Finch J A. Wills′ mineral processing technology[M]. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

[3] Finch J A, Tan Yuehua. On limits to flotation cell size[J]. Minerals, 2023, 13(3): 411. DOI: 10.3390/min13030411.

[4] Fuerstenau M C, Jameson G J, Yoon R H. Froth flotation: a century of innovation[M]. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2007.

[5] Mesa D, Brito-Parada P R. Scale-up in froth flotation: a state-of-the-art review[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 950-962.

[6] Yianatos J, Vallejos P, Rodriguez M, et al. A scale-up approach for industrial flotation cells based on particle size and liberation data[J]. Minerals Engineering, 2022, 184: 107635. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107635.

[7] Shen Zhengchang, Chen Jianhua, Zhang Chenhu, et al. Computational fluid dynamics simulation of gas-liquid two phases flow in 320 m^3 air-blowing mechanical flotation cell using different turbulence models[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(6): 2385-2392.

[8] Jung M U, Kim Y C, Bournival G, et al. Industrial application of microbubble generation methods for recovering fine particles through froth flotation: a review of the state-of-the-art and perspectives[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2023, 322: 103047. DOI: 10.1016/j.cis.2023.103047.

[9] Vallejos P, Yianatos J, Grau R, et al. The impact of froth launders design in an industrial flotation bank using novel metallurgical and hydrodynamic models[J]. Minerals, 2023, 13(2): 169. DOI: 10.3390/min13020169.

[10] 沈政昌，杨义红，韩登峰，等. 680 m^3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 Zhengchang, Yang Yihong, Han Dengfeng, et al. The key technical features and industry application of the 680 m^3 forced-air flotation cell[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(1): 105-112.

[11] 孙传尧，史帅星，韩登峰，等. 充气机械搅拌式浮选机内浮选动力学过程分区模型[J]. 中国矿业大学学报，2022, 51(3): 411-418.
Sun Chuanyao, Shi Shuaixing, Han Dengfeng, et al. Zoning model of flotation kinetics process in air-forced mechanical agitator flotation machine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(3): 411-418.

[12] 史帅星. 粗颗粒矿物浮选运动特性及大型浮选机结构参数优化[D]. 北京：北京科技大学，2020.
Shi Shuaixing. Flotation motion characteristics of coarse-grained minerals and optimization of structural parameters of large flotation machine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

[13] Yianatos J, Vallejos P. Limiting conditions in large flotation cells: froth recovery and bubble loading[J]. Minerals Engineering, 2022, 185: 107695. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107695.

[14] Yianatos J, Vallejos P. Challenges in flotation scale-up: the impact of flotation kinetics and froth transport[J].

Minerals Engineering, 2024, 207: 108541. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108541.

[15] Ayranci I, Kresta S M. Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(3): 413-422.

[16] Westhuizen A V D, Deglon D A. Solids suspension in a pilot-scale mechanical flotation cell: a critical impeller speed correlation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(8): 621-629.

（本文编辑 汪东芳）

【缅怀寄语】

初入北矿院读研时，我便听闻孙传尧先生的事迹。卸下院长重任的他，始终心系学子，数十年坚守在育人一线，这份对学子的赤诚与重视，让我心生敬佩。

2018年，我有幸成为孙老师的博士生。先生常与我们探讨攻读博士的意义与初心，教导我们求学修行，当秉持三分立身、三分尽责、三分报国的信念。他曾感慨，早年国际学术交流中我方人员学历差距明显，每每谈及都心生窘迫与不甘。正因这份家国担当，他毕生深耕人才培养，只为让我国矿冶科技立足世界。

先生一生温润纯粹，满怀赤诚情怀。拜读他的著作《足迹与情怀》，我得以窥见他深耕科研、躬身育人的漫漫岁月，读懂了他扎根行业、初心不改的坚守。我与先生同为东北大学校友，2023年母校百年校庆，他与我谈及对四大学馆的守护与过往回忆，我亦将所拍百年之际的学馆风貌分享于他，简单几句赞许，藏着老先生对母校深沉的眷恋。

2025年6月2日的课题汇报，成了我与先生的最后一面。他细心敲定我的预答辩安排，期许满满。可当我8月17日将论文初稿发予他时，却得知先生病重入院。终是抱憾难承师训。

书卷犹在，教诲长存。先生以德立身、以学育人、以行报国的风骨，深深烙印在我心底。往后我必携先生教诲砥砺前行，不负初心。先生之风，山高水长，永世感念，终生铭记。

——韩登峰