

搅拌强度对浮选机内液-固两相流场特性影响

王学涛, 魏德洲, 高淑玲, 崔宝玉

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和流体颗粒模型对容积为 20 L 的 KYF 浮选机内液-固两相流场特性进行了数值模拟。研究结果表明:浮选机内流场呈上下两循环分布,混合、上升区流速高于分离区;在混合及上升区,颗粒运动速度与其粒度呈反比关系,在分离区则呈正比关系;定子、转子表面高压区均位于叶片迎风面,其表面绝对压力与搅拌强度呈正比关系;搅拌强度增加,混合、上升区的矿物颗粒体积分数降低,分离区体积分数增加;混合、上升区固相体积分数与其粒径呈正比关系,分离区呈反比关系;转子转速为 600 r/min 的搅拌强度更有利于提高该浮选机工作性能。

关 键 词: KYF 浮选机;搅拌强度;液-固两相流;流场特性;数值模拟

中图分类号: TD 91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)09-1337-06

Effects of Stirring Intensity on the Flow Field Characteristics for Liquid-Solid Two Phases in Flotation Machine

WANG Xue-tao, WEI De-zhou, GAO Shu-ling, CUI Bao-yu

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WEI De-zhou, E-mail: dzwei@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The internal flow field characteristics of KYF flotation machine of 20 L for liquid-solid two phases were numerically simulated using standard $k-\varepsilon$ turbulence model and particle model. The study results show that the flow field in the flotation machine distributes into two cycles up and down, the flow velocity of the mixing and rising zones is higher than that of separating zone. The velocity of mineral particles in mixing and rising zones is inversely proportional to particle size, while the velocity in the separating zone is proportional to particle size. The higher pressure distribution zone is located at the windward of the stator or impeller respectively. Besides, the absolute pressure is proportional to the stirring intensity. The volume fraction of particles is proportional to the particles size in mixing and rising zones and it decreases with the increasing of stirring intensity, which is contrary to the separating zone. Therefore, the rotational impeller speed of 600 r/min is more advantageous to improve the working performance of the flotation machine.

Key words: KYF flotation machine; stirring intensity; liquid-solid two phases flow; flow field characteristics; numerical simulation

矿物浮选过程中,浮选机内部矿浆是由矿物颗粒、水、气泡、药剂等组成的复杂多相三维混合流场,其流场特性分布直接影响浮选技术指标^[1-3]。在选矿生产实践中,浮选机转子搅拌强度对浮选机内部流场分布特性有直接影响,合理的搅拌强度有助于矿物颗粒的充分分散和气泡的弥

散,在增强气泡和矿物颗粒接触碰撞概率的同时而不对已经形成的稳定的矿化气泡造成二次破坏。由于浮选过程中矿浆流可视性差、流体特性分布不易监测,所以对于浮选过程中流体特性分布的研究一直是矿物浮选分离研究重点之一^[4-5]。

目前浮选机内部流场特性研究一般以计算流

体力学 (CFD) 模拟结合单一液相试验测定方法为主,Meng 等^[6]对浮选过程湍流检测技术进行了论述,为浮选机内复杂三维流场特性测定提供了指导;文献[7-8]采用 PIV 测试方法验证了 CFD 数值模拟方法对浮选机内单一液相流场特性预测的可靠性;文献[3,9]通过建立多相耦合模型对浮选机内多相流体特性进行了分析,为浮选机内多相流研究提供了参考;沈政昌等^[10]通过 CFX 数值模拟和试验研究对大型 KYF 浮选机流场特性进行了研究,促使 KYF 系列浮选机在现场得到了广泛应用;牛福生等^[11]采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和离散相流体颗粒模型初步探究了颗粒粒径对 KYF 浮选机液-固两相流场特性的影响;尽管国内外对浮选机内复杂多相流场分布特性研究取得一定成果,但是目前仍无完整统一描述。

基于 CFD 的浮选机数值模拟研究能科学地阐述矿物浮选过程中的流场特性,实现流场特征的可视化. 本文应用流体计算软件 ANSYS/CFX, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和离散颗粒模型对容积为 20 L 的收缩槽式 KYF 实验室型浮选机内部流场特性进行了系统研究. 作为矿物浮选过程中液-固-气三相流体特征的部分基础性研究, 本文探讨了搅拌强度对浮选机内液-固两相流场分布特征的影响,对优化浮选机结构、浮选工艺参数,提高浮选分离效率具有一定指导意义。

1 计算模型的建立

1.1 计算模型的建立

研究所用浮选机为广泛应用于有色金属、黑色金属和非金属矿浮选的 KYF 充气机械搅拌式浮选机,几何参数如表 1 所示,其几何模型如图 1 所示. 本文采用适应性较强的四面体网格划分方法对浮选机内部流场域进行网格划分,为提高数值计算精度对转子叶片和定子叶片处网格进行局部加密. 经无关性验证,计算域网格总数取 1.51×10^6 ,其中网格质量平均值达 0.83。

表 1 浮选机几何参数					
Table 1 Geometric parameters of flotation machine					
容积 L	槽体直 径/mm	槽体高 mm	收缩角 (°)	转子直 径/mm	定子直 径/mm
20	360	300	45	120	200

1.2 边界条件与求解控制设定

计算采用 ANSYS/CFX 仿真软件,其基于守恒型有限元的有限体积计算方法能够对浮选机内

部复杂流场域进行精确捕捉,计算稳定可靠. 忽略药剂和温度对浮选过程的影响,浮选机内流场数值计算满足 Euler 型连续方程和动量方程。

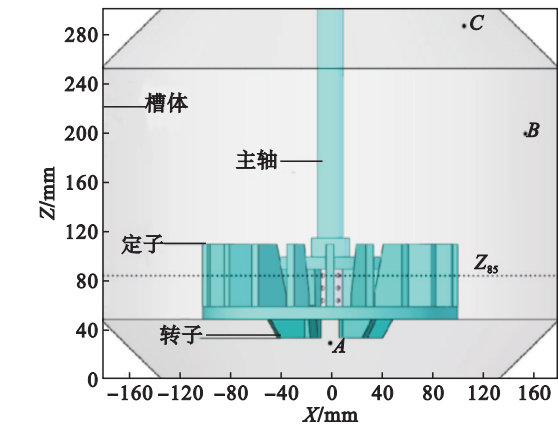


图 1 KYF 浮选机几何模型
Fig. 1 Geometric model of KYF flotation machine

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,该模型通过求解偏微分方程来确定脉动特征速度与平均速度梯度的关系,对浮选机内复杂流动特性具有较好的预测性^[12]. 矿物颗粒采用离散颗粒模型,设定矿物颗粒密度为 $4.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,动力黏度为 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,假定矿物颗粒为球形. 混合矿物颗粒粒度分别为 37,74,100,125 μm ,各离散相体积分数均为 1%. 考虑连续相和离散相间作用力,选择 Schiller Naumann 曳力模型. 动、静计算域采用多重参考坐标系下的冻结转子交界模型,该模型为计算转子和机体、流体之间的干扰提供了有效手段. 壁面模型采用标准壁面函数、无滑移模型. 求解计算采用高阶差分求解格式,残差收敛精度为 10^{-4} 。

2 搅拌强度对流场分布特性影响

2.1 速度分布特性影响

为研究转子搅拌强度对浮选机内部速度、压力、固相体积分数等流场分布特性的影响,分别在转子转速为 500,550,600,650,700,750 r/min 的条件下对浮选机内液-固两相流场进行模拟. 转子转速为 600 r/min 时,粒径为 74 μm 的中等粒度矿物颗粒速度分布特征如图 2 所示。

由图 2 可知,当叶轮高速旋转时,离散相矿物颗粒在黏性力和惯性力作用下,随连续液相流体高速运动,在定子叶片的导流作用下,旋转域流体以较高速度沿定子叶片间隙向外径向运动,当流体接触到浮选槽内壁时,在剪切力的作用下流体发生扩散,一部分流体沿槽体内壁向上运动,一部

分流体向下运动,形成以转子端盖为分界面的上下两循环速度分布,且沿主轴呈对称式分布,其中上循环区域为矿浆上升和分离区,下循环区域为矿浆混合搅拌区. 作为起混合搅拌作用的下循环区,较高的运动速度有助于矿物颗粒在矿浆中的充分分散,增大矿物颗粒与浮选药剂和气泡的接触面积,从而实现气泡的有效矿化. 上升、分离区作为矿化气泡输运和分离区域,流体运动速度相对较低,可保证矿化气泡在上浮过程中有较强的稳定性. 由图 2c 可知,定子导流作用较强,速度沿径向向外逐渐减小. 同时,后倾式转子叶片背面由于转子高速旋转形成局部回流,颗粒运动速度较高,该速度峰值区域的存在增强了混合搅拌区域的搅拌强度.

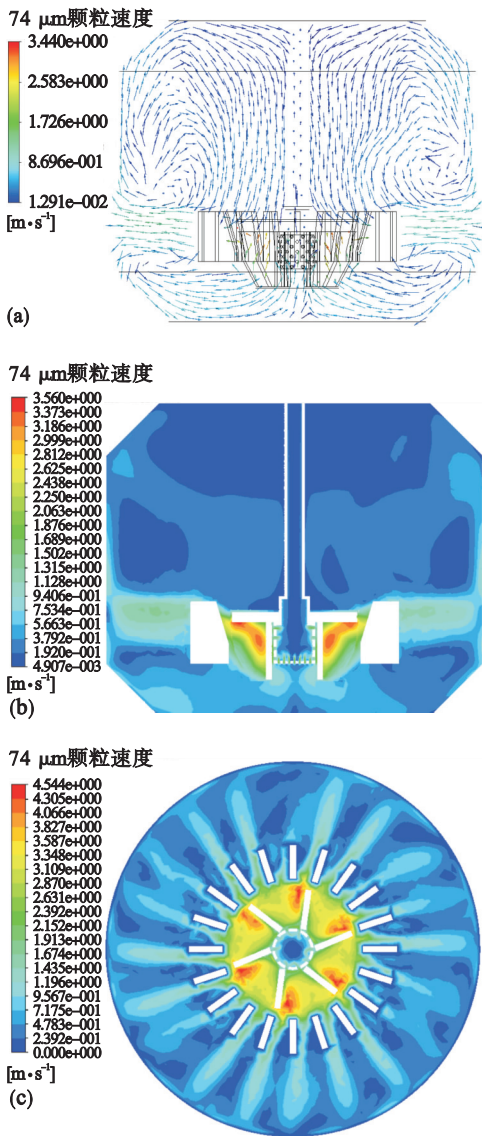


图 2 74 μm 固相速度分布特征

Fig. 2 Particles velocity characteristics of 74 μm

(a)— $Y=0$ 截面速度矢量; (b)— $Y=0$ 截面速度云图;
(c)— $Z=85$ mm 截面速度云图.

为研究搅拌强度对混合区、上升区和分离区速度分布特性的影响,定义点 $A(0,0,30)$ 、点 $B(150,0,200)$ 、点 $C(100,0,280)$ 分别为混合区、上升区和分离区的速度特征考察点,点 A,B,C 分别如图 1 中位置所示. 搅拌强度对混合区、上升区、分离区速度分布影响分别如图 3 所示.

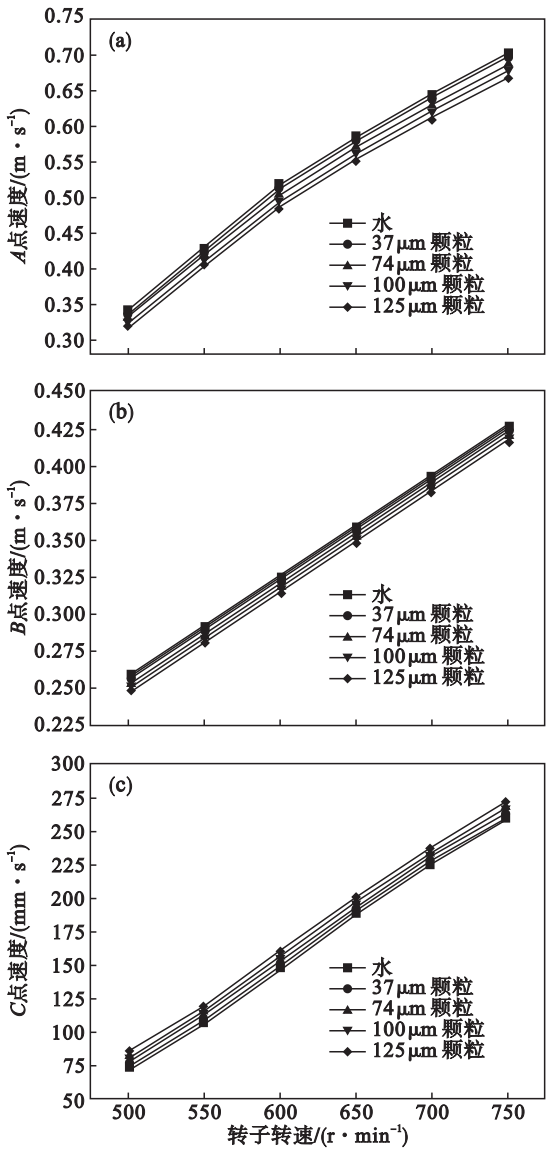


图 3 搅拌强度对流场速度分布影响

Fig. 3 Effects of stirring intensity on the flow velocity
(a)—混合区; (b)—上升区; (c)—分离区.

由图 3 可知,转子转速在 $500 \sim 750$ r/min 范围时,随着搅拌强度的增加,混合区、上升区和分离区的各相流体运动速度均逐渐增加,转子转速每增加 50 r/min,各区流体运动速度分别增加大约 $0.08, 0.04, 0.03$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着高度的增加颗粒运动速度增量逐渐减小. 在同一搅拌强度下,混合区和上升区的固相矿物颗粒在黏性力作用下,运动速度低于连续相水的运动速度,且随着矿物颗粒粒度的增加,颗粒在竖直方向所受到的向下的

重力增大,黏性阻力增大,矿物颗粒运动速度进而减小.在浮选机混合搅拌区,较细矿物颗粒相对于粗粒矿物颗粒具有较高的运动速度,因而更容易分散于矿浆中.

矿物颗粒运动速度因在上升过程中动能减少,因此相对于混合、上升区,浮选分离区流体运动速度相对较低,与混合区和上升区相反的是:相同搅拌强度条件下,矿物颗粒运动速度与其颗粒粒度呈正比关系.在浮选工艺中,浮选分离区粒度相对较大的矿物颗粒形成的矿化气泡由于其运动速度相对较高,矿化气泡相互碰撞概率增大,易导致矿化气泡间相互碰撞破裂,而造成大颗粒浮选分离效果差的问题.针对搅拌强度对混合区、上升区和分离区速度分布特征的影响,并考虑增加搅拌强度对功耗的影响,初步确定 600 r/min 的中等搅拌强度形成的流场特性有利于该浮选机性能的提高.

2.2 压力分布特性影响

转子转速为 600 r/min 时,浮选机内部压力分布特征模拟结果如图 4 ~ 图 6 所示,其中图 4 为 $Y=0$ 截面压力分布,图 5,图 6 分别为转子、定子表面绝对压力分布.

由图 4 可知,浮选槽内流体压力沿中轴线基本呈对称式分布,由于转轴的高速旋转,空心主轴内部和空气分配器区域流体做高速离心运动,形成较强负压区域,为浮选机充气提供了有利条件.图 5,图 6 表明,转子、定子叶片迎风面所受绝对压力较高,且在转子叶片迎风面外边缘出现局部高压区(图 5 中红色区域 S_1),定子叶片迎风面中部出现局部高压区(图 6 中红、黄色区域 S_2),这与现场实践中转子和定子的易磨损区域一致.

在相同转速下,转子表面由于受搅动流体阻力影响,表面绝对压力大约高于定子 300 Pa. 转子转速每增加 50 r/min, S_1 和 S_2 区绝对压力大约增加 500 Pa. 增加搅拌强度对浮选机易磨损部件的磨损速率也随之增加,因此在选矿工艺实践中,在满足气泡矿化且又不对矿化气泡造成破坏的同时,尽量减少对浮选机零部件的磨损,可选择 600 r/min 中等转速的搅拌强度.

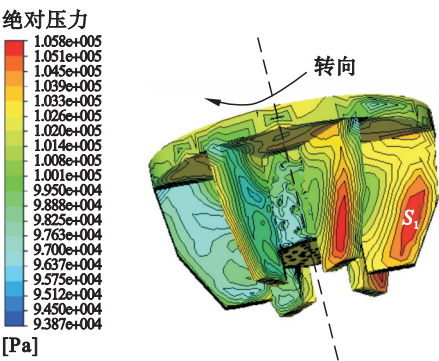


图 5 转子绝对压力分布特征
Fig. 5 Absolute pressure distribution of impeller

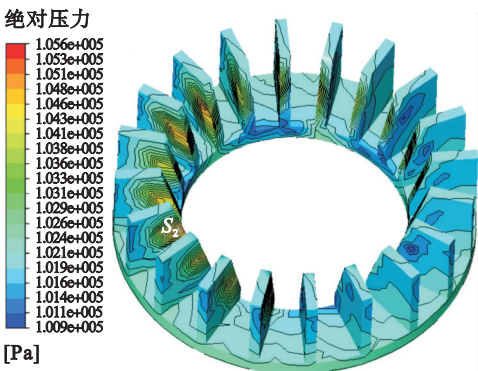


图 6 定子绝对压力分布特征
Fig. 6 Absolute pressure distribution of stator

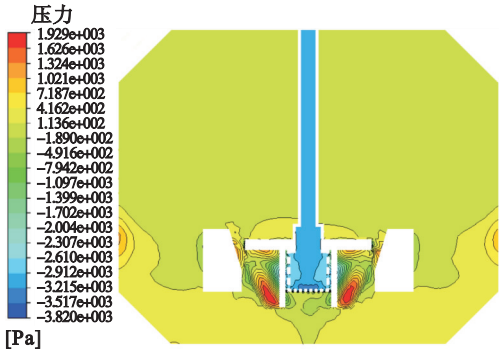


图 4 $Y=0$ 压力分布特征

Fig. 4 Pressure distribution of $Y=0$

搅拌强度分别对转子和定子 S_1 和 S_2 区绝对压力的影响如图 7 所示. 图 7 表明,随着搅拌强度的增加,转子和定子高压区的绝对压力逐渐增加,

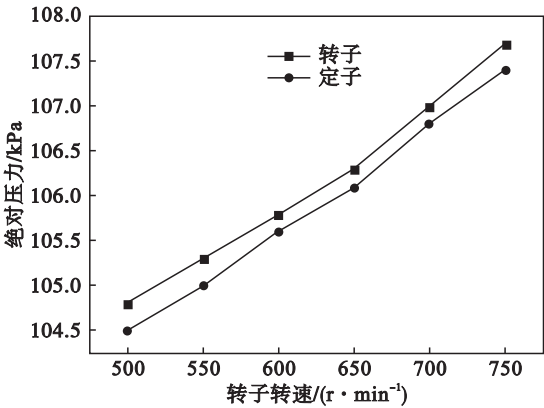


图 7 搅拌强度对转子和定子绝对压力分布影响
Fig. 7 Effects of stirring intensity on absolute pressure of impeller and stator

2.3 固相体积分数分布特性影响

浮选机内部不同区域的各相体积分数指标影响着浮选机工作性能和浮选技术指标,在转子转速为 600 r/min 时,中等粒度 74 μm 固相颗粒体积分数分布特性模拟结果如图 8 所示. 同时为研究搅拌强度对浮选机内部各相体积分数分布特性的影响,同样选取图 1 中的点 A、B、C 分别为浮选机内混合区、上升区和分离区的固相体积分数分布特征考察点,模拟结果如图 9 所示.

由图 8 可知,粒径为 74 μm 的中等粒度矿物颗粒在转子搅拌和黏性力作用下体积分数分布沿主轴呈对称式分布,在转子下方的混合区、上下循环分界处、上循环回流区体积分数相对较高,浮选槽敞口处体积分数相对较低.

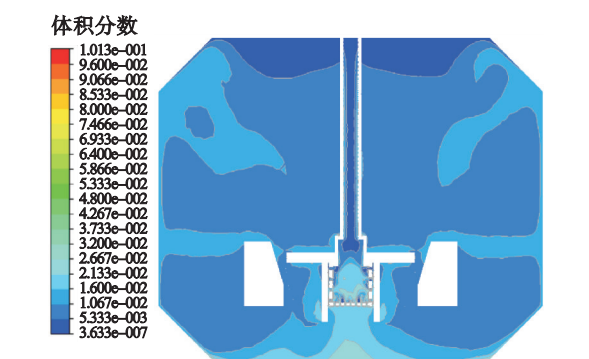


图 8 74 μm 颗粒相体积分数分布特征
Fig. 8 Particles volume fraction distribution of 74 μm

由图 9 可知,随着搅拌强度的增加,混合区和上升区的固相体积分数整体呈逐渐降低趋势,分离区的固相体积分数呈上升趋势,且粒度越小受搅拌强度影响越小. 相同搅拌强度条件下,混合区和上升区各相体积分数与其粒径呈正相关性,而分离区恰恰相反. 在一定范围内,粒径越大,矿物颗粒在浮选机内部分散相对越不均匀,不利于矿物颗粒和气泡的有效接触碰撞. 对比所研究区域颗粒浓度变化趋势可知,搅拌强度对混合区和分离区影响较大,当转子转速高于 600 r/min 时,增加搅拌强度,混合区固相体积分数降低幅度缓慢,浓度基本趋于平稳,分离区较大颗粒的体积分数增加幅度变大. 在选矿工艺中,可针对矿物粒径分布、浮选作业浓度和浮选分离指标等多因素综合确定浮选机搅拌强度. 当浮选作业浓度较高、矿物颗粒粒径相对较大时可适当增大搅拌强度,有利于矿物颗粒在矿浆中的有效分散,增大矿物颗粒和气泡的接触碰撞概率,进而提高浮选技术指标.

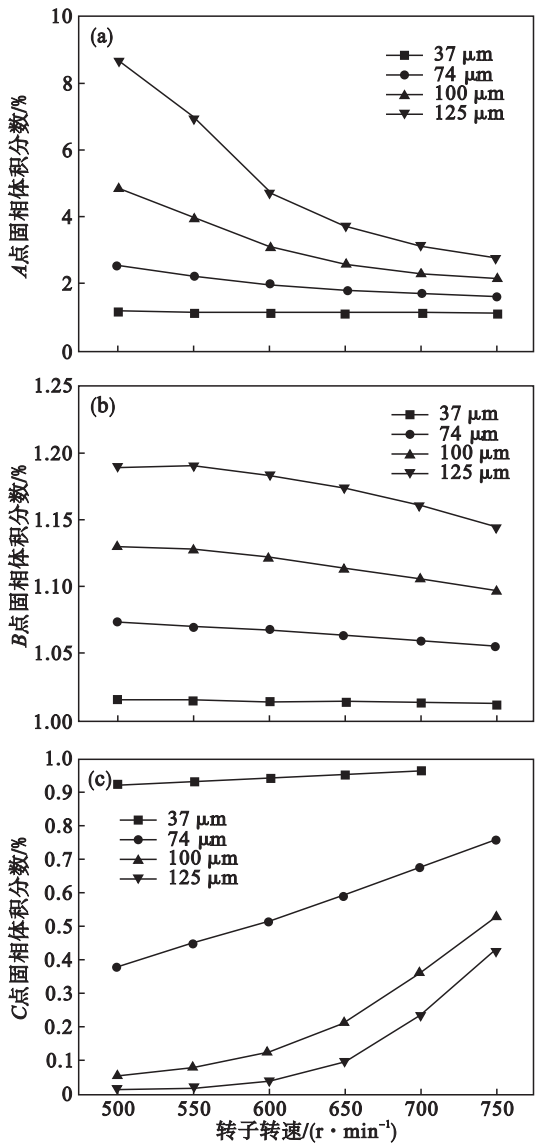


图 9 搅拌强度对分离区固相体积分数影响
Fig. 9 Effects of stirring intensity on solid volume fraction

(a)—混合区; (b)—上升区; (c)—分离区.

3 结 论

- 1) 浮选机内液-固两相流场以转子端盖下界面为分界线呈上下两循环分布,混合区和上升区流体运动速度高于分离区;随着搅拌强度的增加,流体运动速度增加;相同搅拌强度条件下,混合区和上升区矿物颗粒运动速度与其粒度呈反比关系,分离区矿物颗粒运动速度与其粒度呈正比关系.
- 2) 转子、定子表面所受压力在叶片迎风面最高;随着搅拌强度的增加,转子和定子表面受压增强,相同搅拌强度下,转子表面压力高于定子.

(下转第 1347 页)