doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2020.09.014

固相密度对浮选机内固-液两相流悬浮均匀性的影响

郭传州,匡敬忠,周原彬
(江西理工大学 资源与环境工程学院,江西 赣州 341000)

摘 要:借助计算流体动力学(CFD)方法,采用欧拉-欧拉模型研究了WEMCO浮选机内固-液两相流的流动规律,探讨了湍流模型、固相密度及转速对固液流场特性、固体分散均匀性和功耗的影响。结果表明,Shear Stress Transport(SST)湍流模型能更好地预测固液流场流动及固体分散性,流体在叶轮作用下形成上下两个循环流并呈中心轴对称结构。随着叶轮转速的增加,固体悬浮分散性显著提高,功耗呈指数增加。当固体密度增加时,固体悬浮均匀度ξ值与叶轮转速呈线性变化,固相密度越高越不利于悬浮分散。

关键词:均匀性;自吸式浮选机;固相密度;叶轮转速;数值模拟
中图分类号:TD456 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1744(2020)09-0088-10

Effect of Solid-phase Density on Suspension Homogeneity of Solid-Liquid Two-phase Flow in Flotation Machine

GUO Chuanzhou, KUANG Jingzhong, ZHOU Yuanbin
(Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: By means of computational fluid dynamics (CFD), the solid-liquid two phase flow regularity in WEMCO flotation machine was studied by Euler-Euler model. The influence of turbulence model, solid-phase density and impeller speeds on solid-liquid flow field characteristics, solid homogeneity and power consumption were discussed. Results show that the Shear Stress Transport (SST) turbulence model can better predict the solid-liquid flow field flow and solid dispersion, and the fluid under the action of the impeller forms a central axisymmetrical structure of the upper and lower circulatory flows. With the increase of impeller speed, the dispersion of solid suspension increases obviously, and the power consumption increases exponentially. With the increase of solid density, the uniformity of solid suspension changes linearly with the rotating speed of the impeller.

Key words: homogeneity; self-priming flotation; solid density; impeller speed; numerical simulation

浮选[1]作为矿物分选的重要方法之一,在分选过程中存在固-液-气三相的作用,其中固相颗粒的悬浮问题引起了很多学者的广泛关注[2]。要获得良好的固相颗粒悬浮质量,最常用的方法是加大叶轮搅拌速度,然而过度搅拌可能导致轴扭矩超过硬件能力,同时固体颗粒的悬浮和分布在很大程度上也

收稿日期:2020-03-16
基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ150613)
Fund: Supported by Jiangxi Provincial Department of Education Science and Technology Project (GJJ150613)
作者简介:郭传州(1993—)男,主要从事自吸式浮选机多相流数值模拟方面的研究。
通信作者:匡敬忠(1971—),男,教授,主要从事矿物材料、矿物分选理论与工艺和二次资源综合利用方面的研究。
引用格式:郭传州,匡敬忠,周原彬. 固相密度对浮选机内固-液两相流悬浮均匀性的影响[J]. 有色金属工程,2020,10(9):88-97.
GUO Chuanzhou, KUANG Jingzhong, ZHOU Yuanbin. Effect of Solid-Phase Density on Suspension Homogeneity of Solid-Liquid Two-Phase Flow in Flotation Machine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(9): 88-97.

取决于颗粒本身(粒度、密度、比重)的性质[3-4],因此在固-液混合过程中对固体颗粒密度的研究也相当的重要。

固-液混合特性受流体动力学的控制,了解浮选机内的流体动力学将为提高固体颗粒的悬浮性提供思路。计算流体动力学(CFD)已被证明是分析固-液两相混合过程流动特性的有效工具和关键技术手段之一[5-6]。TITINEN[7]等利用 CFD 技术分析了 Outokumpu Tank Cell 型浮选机在单相流中的流动状态与浮选机结构参数间的关系,得到各种设计参数对浮选机的影响。沈政昌[8-9]等研究了 KYF 型浮选机内两相流及三相流的 CFD 模拟,利用 PIV 在线测试技术验证了 CFD 仿真的流场结构。并采用 CFD 仿真技术对内部流场特征进行数值分析,这对于浮选机结构优化、大型化的开发与设计具有重要的理论价值和指导意义。

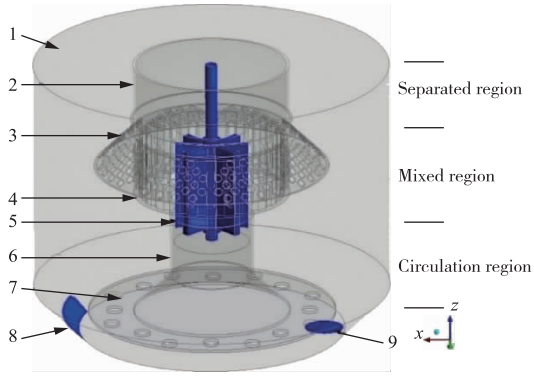
固-液混合特性的流体动力学数值模拟研究中,国内外相关领域研究者做了许多开创性的研究工作。KLENOV[10]应用 CFD 模拟方法研究了固相粒度和固相注入位置对固相分散的影响。TAMBURINI[11]采用 CFD 模拟描述了标准 Rushton 涡轮叶轮搅拌槽中叶轮从启动到稳定的动态演化过程。HOSSEINI[12]通过 CFD 模拟研究了叶轮类型、叶轮离底间隙、叶轮转速、粒径、颗粒比重对固液混合质量的影响,结果表明,CFD 模拟对优化叶轮结构和运行参数有一定的参考价值。ZHANG[13]研究了固体颗粒对浆体流体动力学、泡沫相内气泡聚结强度以及存在固体颗粒时的水溢流率的影响。WADNERKAR 和 LIU[14-15]等人均对粒子-粒子相互作用、阻力模型、湍流弥散模型和湍流模型等关键因素进行了详细的研究。

固-液两相流的相关模拟研究一般是以搅拌桶为对象,对于自吸式浮选机固-液两相流中固体颗粒密度的影响鲜有报道,本文采用 CFD 技术研究了自吸式浮选槽内固-液两相流的流体动力学,讨论了叶轮转速、固体颗粒密度等因素对固液混合均匀度和功耗的影响。

1　浮选机结构及模拟方法

1.1　几何模型与网格划分

WEMCO 浮选机由转子-叶轮、定子分散器、锥型罩、假底、尾流管和竖管等组成,几何模型如图 1 所示。流动区域可分为循环区、混合区和分离区。采用 ANSYS CFX 18.2 对模型进行数值计算,并使用 Mesh 软件生成非结构网格,对结构相对较复杂转子-定子系统的流体域,采用多重网格技术生成非结构四面体网格,并对叶轮旋转区域网格采用加密处理,共计划分大约 65 万个网格。



1—slot body;2—vertical pipe;3—conical cover;
4—stator (disperser);5—rotor;6—wake pipe;
7—false bottom;8—pulp inlet;9—pulp outlet

图 1　WEMCO 浮选机物理模型

Fig. 1　Physical model of WEMCO flotation cell

1.2　模型选择与边界条件设定

固-液两相流模拟的一种方法是欧拉-欧拉方法,其中两相均采用 Volume-averaged 方程[16]来建模。两个连续相的运动由 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)方程描述:

$$\text{连续性方程:}\ \frac{\partial(\alpha_i\rho_i)}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha_i\rho_i\vec{V}_i)=0 \quad (1)$$

$$\text{动能方程:}\ \frac{\partial(\alpha_i\rho_i\vec{V}_i)}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha_i\rho_i\vec{V}_i\vec{V}_i)=-\alpha_i\nabla P+\nabla[\mu_{i,\text{eff}}(\nabla\vec{V}_i+(\nabla\vec{V}_i)^T]+S_i+M_i \quad (2)$$

式中:$i=1$ 表示水相,$i=2$ 表示颗粒相;∇P 是修改后的压力,包含重力影响;S_i 表示其他外部动力源;M_i 表示固-液两相间的相间作用力。在浮选机高剪切速率区域中,固相颗粒作为不可变形的流体颗粒,利用 Schiller-Naumann 阻力模型对颗粒进行阻力估算。槽体面均设为壁面条件,液相和固相分别设置了 No slip 和 Free slip 边界条件,出口处设为常压。

入口流速设为 0.1 kg/s,固相颗粒粒度 $D=0.074$ mm,固相颗粒体积分数 10%,液相采用清水($\rho=1\ 000\ \text{kg/m}^3$)条件下,研究 3 种不同密度矿物(表 1)在不同叶轮转速下对于流场循环、固相分散性和功耗的影响。

对于所有的案例采用稳态模拟求解,将时间步长设为 0.001 s,数值计算终止基于均方根残差 1×10^{-5} 的可靠收敛准则。

表 1 固相密度分布表

Table 1 Solid density distribution table

Serial number	Mineral	Density/(kg·m^{-3})	Volume fraction/%
1	Quartz	2 650	10
2	Fluorite	3 180	10
3	Copper pyrites	4 400	10

1.3 固相悬浮性和均匀性分析

评价固相在槽体中悬浮均匀性程度的两个指标是固相悬浮性 α 和悬浮均匀度 ζ [17]，即在浮选机槽体内的 $r/R=0.45$ 位置轴向(Z 轴，下文同)方向上(图 2)均匀取 80 个点的固相浓度来计算固体悬浮性 α 和悬浮均匀度 ζ，计算公式如下：

$$\alpha = \frac{C_h}{C_{avg}} \tag{3}$$

$$\zeta = 1 - \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{n=1}^{n}\left(\frac{C_h}{C_{avg}} - 1\right)^2} \tag{4}$$

式中：n 为采样点数，C_h 为在 $r/R=0.45$ 轴向上各取样点上固相浓度，C_{avg} 为在 $r/R=0.45$ 轴向取样点上平均固相浓度。其中当 C_h/C_{avg} 和 ζ 越接近于 1，说明固相分散均匀性越好。

浮选机浮选效率的另一个评价指标是叶轮功耗，叶轮功耗是指叶轮工作时的实际功率消耗，受到叶轮结构、转速等影响，是表征浮选机性能的关键参数之一。叶轮的功耗可以由式(5)表示：

$$P = M \cdot \omega \tag{5}$$

式中：M 表示作用在叶轮上的转矩(N·m)，ω 表示转子叶轮旋转的角速度(rad/s)，转速越大，功耗越大。

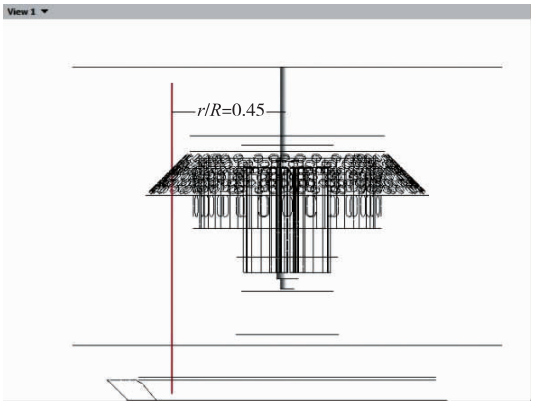


图 2 浮选机中轴面

Fig. 2 The center longitudinal section of flotation machine

2 结果与讨论

2.1 湍流模型选择

在目前的固-液两相流模拟中，主要的湍流模型有 κ-ε、κ-ω、BSL、Shear Stress Transport (SST)等 4 种湍流模型。κ-ε 湍流模型为典型常用湍流模型，此模型已经被证实是可靠的且具有很好的预测能力；κ-ω 湍流模型是经 κ-ε 湍流模型修改后得到的，该模型已证明对反压梯度边界层的计算更准确，有利于在近壁区的模拟，它的弊端是对边界外和剪切层的自由流数值具有高度敏感性，它对于数值的指定要求很高。雷诺应力模型(RSM)是研究旋流系统最合适的模型，然而雷诺应力模型(RSM)需要大量的计算资源，由于矿物浮选机的几何和流动物理结构复杂，因此使用 RSM 湍流模型是不可行的，其中 BSL 湍流模型就是雷诺应力模型中的一种。Shear Stress Transport (SST)湍流模型综合了 κ-ε 在远场计算和 κ-ω 在近壁区计算的优点，同时可解决在停滞区形成湍流问题。

为确定适宜湍流模型，对 κ-ε、κ-ω、Shear Stress Transport (SST)共 3 种常用湍流模型进行模拟分析。图 3、图 4 分别为不同湍流模型下 $Y=0$ m 纵截面固体速度矢量图和体积分数分布云图。由图 3 和图 4 可知，三种湍流模型下流场结构和固体分散均匀性很相似，流体经叶轮旋转产生的激烈搅拌-剪切运动和离心力使流体沿叶片切向射出，经定子沿径向甩向壁面，流体产生强烈旋涡运动，在叶轮带动和流体惯性作用下均形成上下两个主要的循环涡流且流场呈中轴对称结构，在转子-定子区域流体速率最大，固体主要分布在循环区和混合区，在尾流管上方表面和浮选机底部中心处有固相沉积，对比三种湍流模型发现 SST 湍流模型下固体分散更均匀且分离区液面波动更小，更利于泡沫产品在此富集分离，且与实际浮选现象更为接近。同时因 Shear Stress Transport 综合了 κ-ε 在远场计算和 κ-ω 在近壁区计算的优点，结合 MENTER[18] 和 RZEHAK[19] 的研究结果，本论文后续计算均采用 Shear Stress Transport (SST)湍流模型。

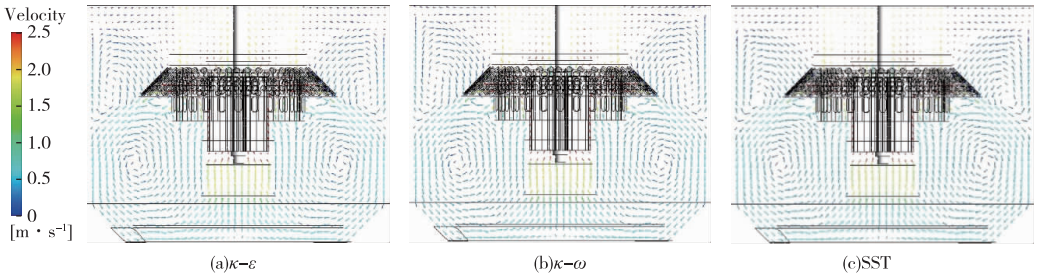


图 3　不同湍流模型下固相速度矢量图 (a)κ-ε　(b)κ-ω　(c)SST

Fig. 3　Velocity vectors of solid for different turbulence model (a)κ-ε　(b) κ-ω　(c) SST

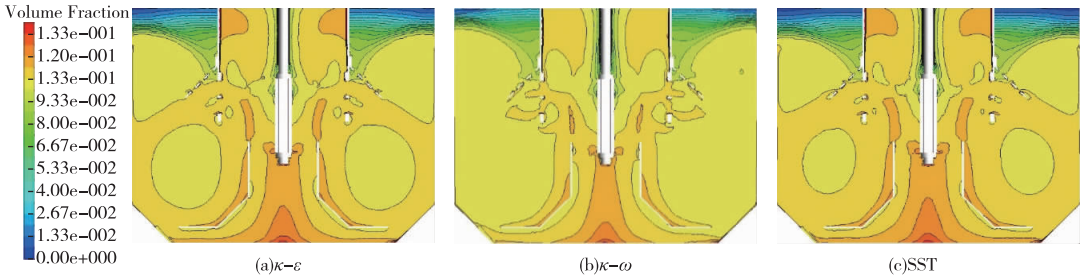


图 4　不同湍流模型下的固相浓度等值线图 (a)κ-ε　(b)κ-ω　(c)SST

Fig. 4　Contour plots of solid concentration for different turbulence model (a)κ-ε　(b)κ-ω　(c)SST

2.2　叶轮转速对石英悬浮分散和均匀性的影响

为分析叶轮转速对固相悬浮分散性的影响,本节对 6 种不同叶轮转速下槽体内流场进行数值模拟分析。图 5、图 6 分别为不同叶轮转速下 Y=0 m 纵截面石英固体速度矢量图和体积分数云图。由图可知,在低转速下因叶轮搅拌-剪切力和离心力过小导致溶液动能不足而流场未形成上下两大循环流,流体处于紊乱流动,槽体底部及假底上方有大量固体沉积,存在流动死区,不利于固体悬浮分散,且固体易直接在底部区域从出口处流出而造成短路现象。在转速 N>273 r/min 时槽体内开始形成上下两个大循环流场结构,随转速的增加槽体中流体速度逐渐增大,大量固体开始聚集混合区和分离区,底部及假底上方沉积固体减少,这将增加固体悬浮分散和固体与气泡间接触碰撞的概率。当转速 N>365 r/min 时,上循环流离上液面的距离极小从而分离区流体波动较大,不利于泡沫产品在分离区富集分离。

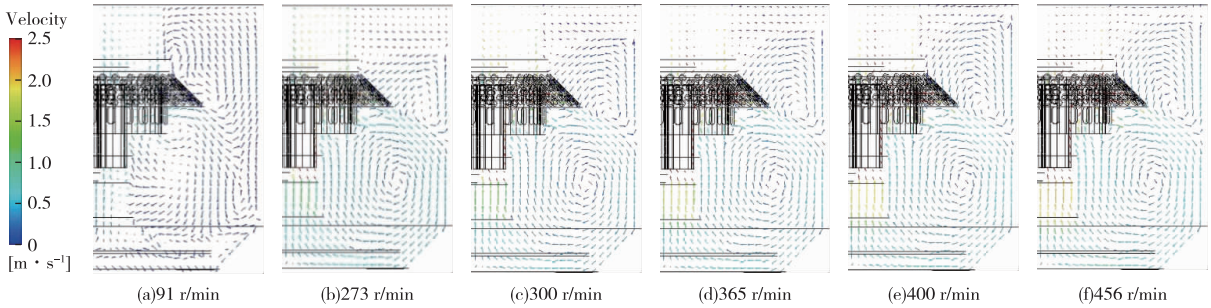


图 5　不同叶轮转速下固相速度矢量图

Fig. 5　Velocity vectors of solid for different impeller speed

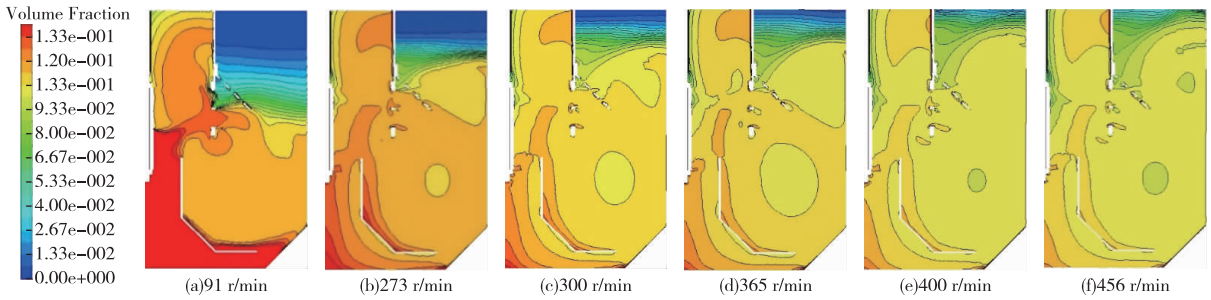


图 6 不同叶轮转速下固相浓度等值线图

Fig. 6 Contour plots of solid concentration for different impeller speed

图 7 为叶轮转速对 $r/R=0.45$ 轴向上固相浓度 $C=0.10$ 时等值面云图，图 8(a)、(b)分别为叶轮转速对 $r/R=0.45$ 轴向固相悬浮性(C_h/C_{avg})和固相悬浮均匀度(ζ)的影响曲线。随叶轮转速增加，大量固体颗粒悬浮在液相中，图 7 中看出固体体积分数 $C=0.10$ 的含量越多，图 8(a)中反映槽体上部的 C_h/C_{avg} 值增大，C_h/C_{avg} 和 ζ 值越接近于 1，说明固相分散均匀性越好。从图 8(b)中可知，ζ 值随转速增加而增加，当转速大于 330 r/min 时，ζ 值均大于 80%，此时分散性较好；在转速 36 r/min 时，ζ 值为 85.4%，固相颗粒在底部及假底上方沉积较少，图 7 也反映了此时固体体积分数 $C=0.10$ 的情况，即固相颗粒基本达到完全悬浮状态，且转速小于 400 r/min时 ζ 值随转速增加呈线性增加趋势。当转速增加至 400 r/min 时 ζ 值达到 92%，此后再增加转速 ζ 值不变，说明固体已经达到悬浮最大值，再增加转速将不能增加固体悬浮均匀性，从图 7 中可知固体体积分数为 $C=0.10$ 时均匀分布于整个槽体中。图 9 为叶轮功耗对固相悬浮均匀性(ζ)的影响。由图 9 可知固相悬浮均匀性随功耗增加呈先增加至 91%左右后趋于平稳的趋势。在转速 365 r/min 时，P 为 3.64 kW，此时 ζ 为 85.4%；当转速为 400 r/min时，P 急剧增加到 4.84 kW，此时 ζ 为 91.8%，分离区波动较大，即在实际操作中需选择合适的转速。在考虑功耗、固相分散均匀性等因素下，即转速为 365 r/min 左右时，此时 ζ 为 85.4%，固体颗粒悬浮性和分散性较好，分离区液面平稳，有利于泡沫产品在分离区富集分离。

2.3 叶轮转速对萤石悬浮分散和均匀性的影响

为进一步了解密度对固相分散悬浮性的影响，本节对萤石($\rho=3\ 180\ kg/m^3$)进行研究。图 10 为不同叶轮转速对萤石 $Y=0$ m 纵截面下固相体积分数云图，图 11(a)、(b)分别为叶轮转速对萤石($\rho=3\ 180\ kg/m^3$)在 $r/R=0.45$ 轴向上固相悬浮性(C_h/C_{avg})和固相悬浮均匀度(ζ)的影响曲线。由图 10 和图 11 可知，在转速 300 r/min 时，固体主要分布在浮选机的循环区且上循环区固相含量较小，槽体底部及假底上方有大量固体沉积；随转速增加上循环流中心区逐渐上移，固体颗粒从循环区流向分离区，槽体中上部的 C_h/C_{avg} 值增大且越趋近 1。当转速大于 400 r/min 时，ζ 值均大于 80%，在转速 456 r/min时，ζ 值为 89.9%，固体基本达到完全悬浮分散，少量沉积在槽体底部及假底上。综上分析，对不同转速下固相均匀性(ζ)进行线性拟合可知，当处理 $\rho=3\ 180\ kg/m^3$ 的萤石固体时需增加转速至 426 r/min 左右才能使 ζ 值达到 85%，此时固相颗粒悬浮性和分散性较好，分离区液面平稳，有利于泡沫产品在分离区富集分离。

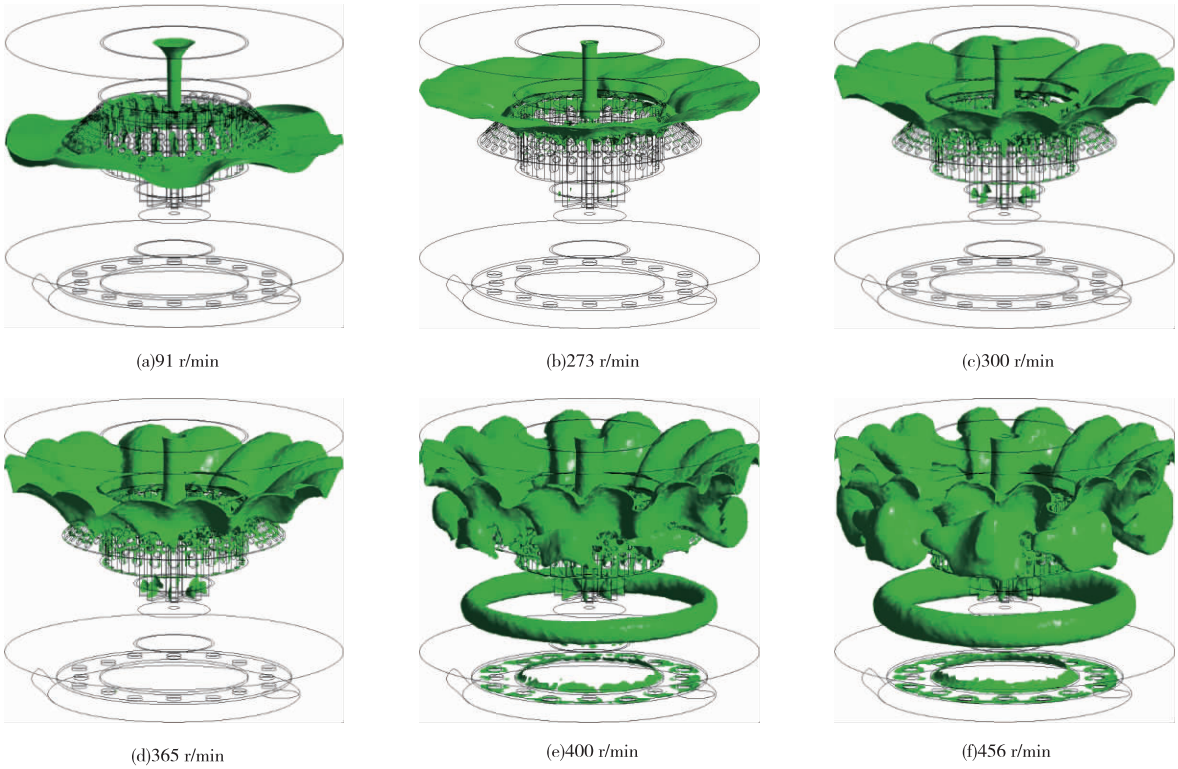


图 7　不同叶轮转速下 $C=0.10$ 时等值面图

Fig. 7　Cloud height plots via iso-surface with $C=0.10$ at different impeller speeds

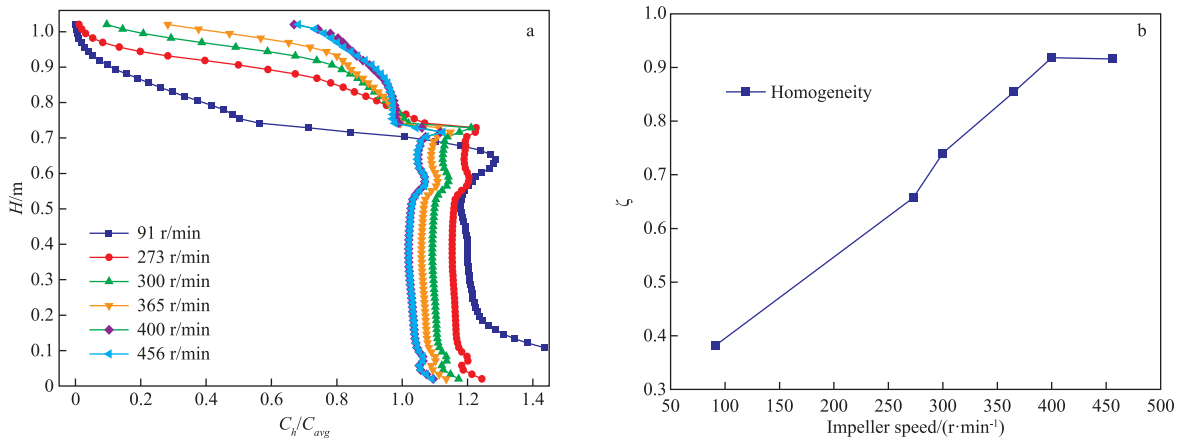


图 8　(a)叶轮转速对 $r/R=0.45$ 轴向上固相浓度分布的影响

(b)叶轮转速对 $r/R=0.45$ 轴向上固相悬浮均匀性的影响

Fig. 8　(a) Effect of impeller speed on $r/R=0.45$ solid concentration profile

(b) Effect of impeller speed on $r/R=0.45$ solid suspension homogeneity

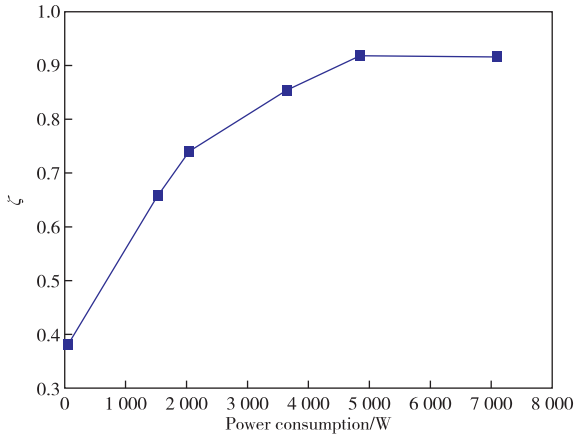


图 9 不同功耗条件下固相悬浮均匀性变化曲线

Fig. 9 Comparison of suspension homogeneity at different power consumption

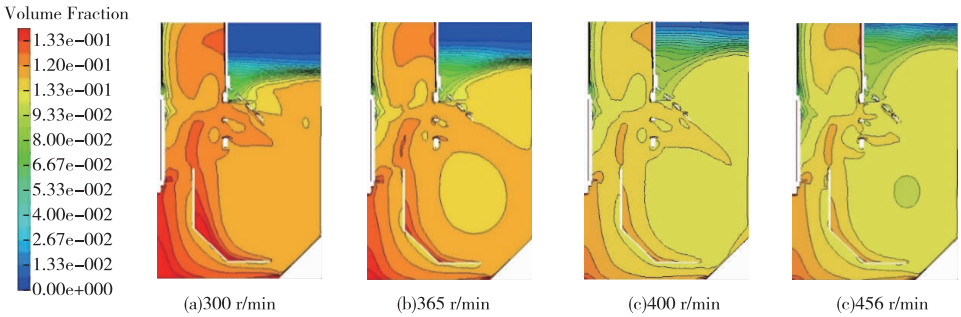


图 10 不同叶轮转速下固相浓度等值线图

Fig. 10 Contour plots of solid concentration for different impeller speed

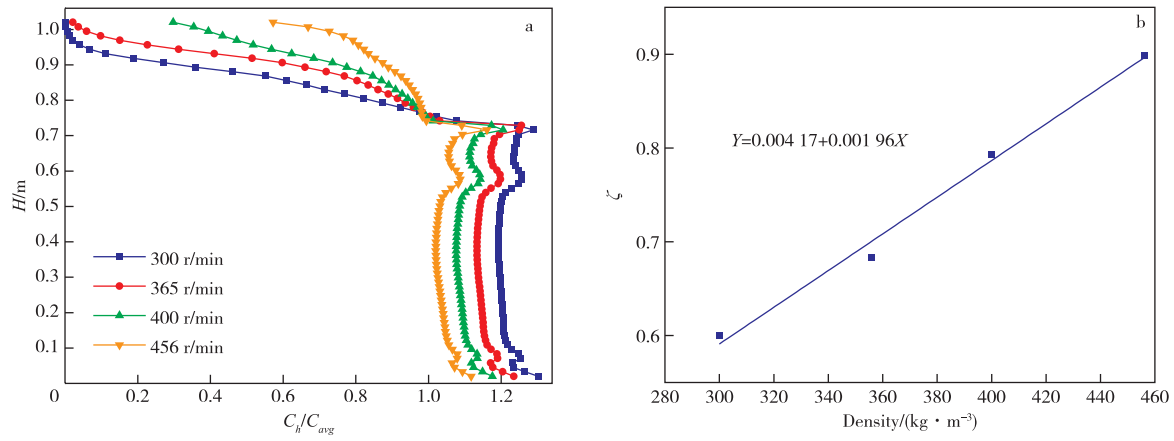


图 11 (a)叶轮转速对 $r/R=0.45$ 轴向上固相浓度分布的影响

(b)叶轮转速对 $r/R=0.45$ 轴向上固相悬浮均匀性的影响

Fig. 11 (a)Effect of impeller speed on $r/R=0.45$ solid concentration profile

(b)Effect of impeller speed on $r/R=0.45$ solid homogeneity

2.4　叶轮转速对黄铜矿悬浮分散和均匀性的影响

由于高密度固体对固相分散悬浮性有较大的影响,因此本节对黄铜矿(ρ=4 400 kg/m^3)进行研究。图 12 为不同叶轮转速对黄铜矿 Y=0 m 纵截面下固相体积分数云图。图 13(a)、(b)分别为叶轮转速对黄铜矿在 r/R=0.45 轴向固相悬浮性(C_h/C_{avg})和固相悬浮均匀度(ζ)的影响曲线。由图 12 和图 13 可知,低转速下,由于固相密度高,固体很难悬浮分散,在达到高转速 456 r/min 时上循环流仍较小,固相在分离区的悬浮均匀性差,且 ζ 值仅为 73.3%,槽体底部及假底上方有大量固体沉积。当继续增加转速至 540 r/min,此时已超过叶轮最大的负荷值,ζ 值增加到 86.32%,固体基本达到完全悬浮均匀分散,少量固相沉积在槽体底部及假底上。综上分析,对不同转速下固相悬浮均匀性(ζ)进行线性拟合可知,当处理 ρ=4 400 kg/m^3 固体时需增加转速至 530 r/min 左右才能使 ζ 值达到 85%,因此,对于高密度固体,增加转速才能提高固相悬浮均匀分散性。但浮选机的功率是有限的,因此要想提高固相悬浮分散和均匀性必须考虑其他方法和工艺参数。

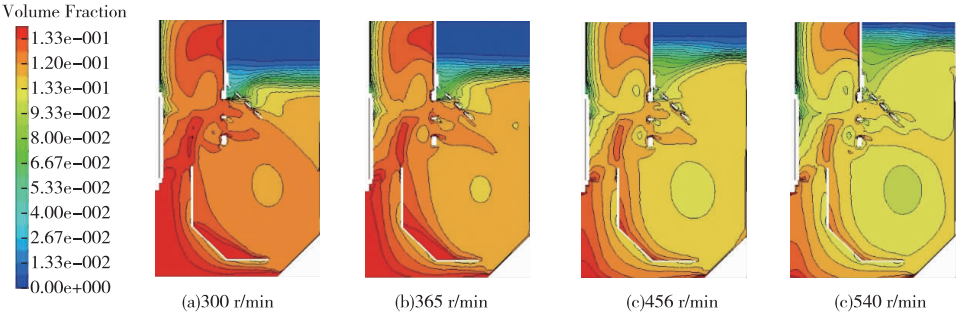


图 12　不同叶轮转速下固相浓度等值线图

Fig. 12　Contour plots of solid concentration for different impeller speed

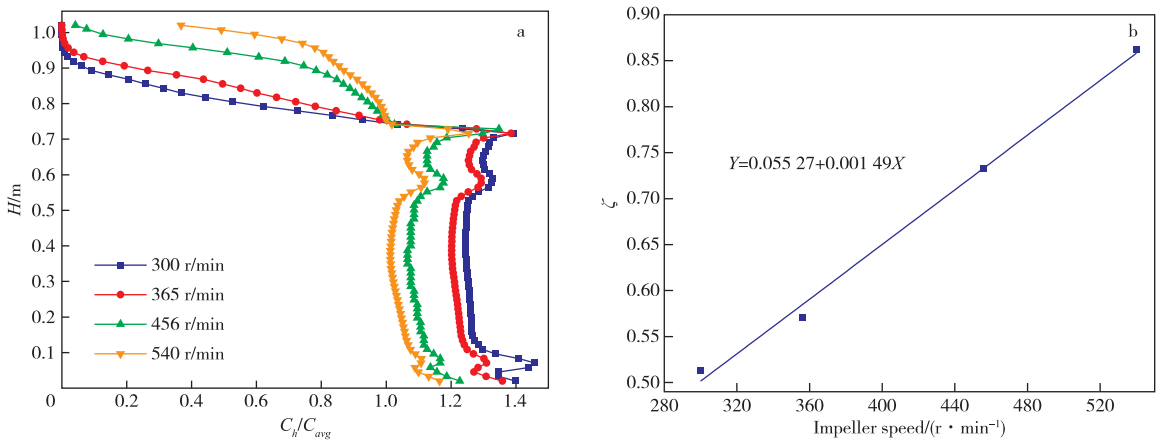


图 13　(a)叶轮转速对 r/R=0.45 轴向固相浓度分布的影响

(b)叶轮转速对 r/R=0.45 轴向固相悬浮均匀性的影响

Fig. 13　(a) Effect of impeller speed on r/R=0.45 solid concentration profile

(b) Effect of impeller speed on r/R=0.45 solid homogeneity

2.5　不同密度的固体悬浮分散性与叶轮功耗的关系

由前几节分析发现,固体密度对于固相在液相中的悬浮分散性影响显著,不同密度的固相达到完全悬浮分散时所需转速不同,即功耗也不相同。图 14 为不同密度的固体对功耗的影响(ζ=85%时)。将数据进行拟合得拟合方程为:Y =− 9 366.5 + 4.93X (R^2=0.999 5),发现随固体密度增加固体达到完全悬浮分散所需叶轮功耗呈线性增加,高密度固体需要高叶轮转速,但过高的转速将增加叶轮的磨损和功耗,且超过叶轮的极限转速,即在固体悬浮性不变情况下须辅助其他方法降低叶轮转速,同时对于槽体底部及假底上方有大量固体沉积造成的死区现象也可通过优化设计进行改善。

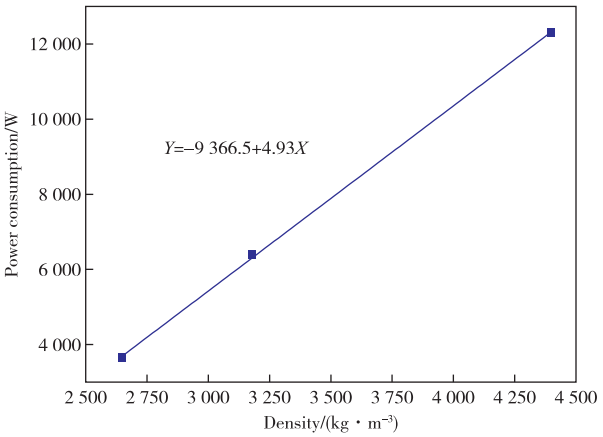


图 14 不同密度的固体对功耗的影响(ζ=85%)

Fig. 14 Effect of power consumption for different solid density (ζ=85%)

3 结论

1)采用 Shear Stress Transport (SST)湍流模型能较准确地模拟自吸式浮选机内固液两相流场流动及固体悬浮分散情况。流体在叶轮作用下形成上下两个循环流并呈中心轴对称结构,固体主要分布在循环区和混合区,在尾流管上方表面和槽体底部中心处有沉积,说明该部分存在死区现象。

2)叶轮转速对不同密度固相的悬浮分散和均匀性产生显著影响。低叶轮转速下固体在槽体底部大量沉积,易造成短路现象。随转速的增加固体悬浮分散和均匀性明显提高,同时固相悬浮均匀性 ζ 随转速的增加而增加后趋于平稳;但转速过大,上循环流中心区逐渐上移使分离区流体波动较大,不利于泡沫产品的稳定与分离。

3)固体密度对于固相悬浮分散影响较大。对于低密度固体,提高转速可以使固体得到较好的悬浮分散性。高密度固体在保证相同的固相悬浮均匀性 ζ 值时,需提高叶轮转速,在保证相同的固相悬浮均匀性 ζ 为 85%时,功耗随固相密度呈线性增加。

参考文献:

[1] WANG L, PENG L, RUNGE K, et al. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation[J]. Minerals Engineering, 2015, 70:77-91.

[2] DERKSEN J J. Simulations of dense agitated solid-liquid suspensions—Effects of the distribution of particle sizes[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 189:56-64.

[3] SCULLY J FRAWLEY P. Computational fluid dynamics analysis of the suspension of nonspherical particles in a stirred tank[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(4):2331-2342.

[4] AYRANCI I, KRESTA S M. Design rules for suspending concentrated mixtures of solids in stirred tanks[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2011, 89(10):1961-1971.

[5] LJUNGQVIST M, RASMUSON A. Numerical simulation of the two-phase flow in an axially stirred vessel[J]. Institution of Chemical Engineering, 2001, 79:533-546.

[6] XIE L, LUO Z H. Modeling and simulation of the influences of particle-particle interactions on dense solid-liquid suspensions in stirred vessels[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 176:439-453.

[7] TIITINEN J, KOSKINEN K, RONKAINEN S. Numerical modelling of rate outokumpu flotation cell[J]. Centenary of Flotation Sym Posium, 2005, 7: 271-275.

[8] 沈政昌,卢世杰,史帅星,等. 基于 CFD 的 KYF 浮选机气-液两相流分析与探讨—KYF 浮选机流场测试与仿真研究(四)[J]. 有色金属(选矿部分),2013(4):64-68.
SHEN Zhengchang, LU Shijie, SHI Shuaixing, et al. Analysis and discussion of gas-liquid two phase flow field of KYF flotation machine based on CFD—flow field measurement and simulation research on KYF flotation machine (Ⅳ)[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(4):64-68.

[9] 沈政昌,卢世杰,史帅星,等. KYF 型浮选机三相流仿真研究初探—KYF 浮选机流场测试与仿真研究(六)[J]. 有色金属(选矿部分),2013(6):67-72.
SHEN Zhengchang, LU Shijie, SHI Shuaixing, et al. Investigate of three phase flow simulation in KYF flotation cell—flow field measurement and simulation research on KYF flotation machine (Ⅵ)[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(6):67-72.

[10] KLENOW O P, NOSKOV A S. Solid dispersion in the slurry reactor with multiple impellers[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 176-177:75-82.

[11] TAMBURINI A, CIPOLLINA A, MICALE G, et al. CFD simulation of dense solid-liquid suspensions in baffled stirred tank: Predictions of solid particle distribution[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 178:324-341.

[12] HOSSEINI S, PATEL D, EIN-MOZAFFARI F, et al. Study of solid-liquid mixing in agitated tanks through computational fluid dynamics modeling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(9):4426-4435.

[13] ZHANG W,FINCH J A. Effect of solids on pulp and froth properties in flotation[J]. Journal of Central South University,2014,21:1461-1469.

[14] WADERKAR D TAFE M O PAREEK V K et al. CFD simulation of solid-liquid stirred tanks for low to dense solid loading systems[J]. Particuology, 2016, 29(6): 16-33.

[15] LIU L,BDARGOU M. Numerical modelling of velocity field and phase distribution in dense monodisperse solid-liquid suspensions under different regimes of agitation: CFD and PEPT experiments[J]. Chemical Engineering Science,2013,101:837-850.

[16] ANDREA P,GRERAR T. Computational methods for multiphase flow[M]. Cambridge University Press,2009.

[17] GU D, Liu Z, QIU F, et al. Design of impeller blades for efficient homogeneity of solid-liquid suspension in a stirred tank reactor[J]. Advanced Powder Technology, 2017,28(10):2514-2523.

[18] MENTER, FLORIAN R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics,2009,23(4):305-316.

[19] RZEHAK R, KREPPER E. Bubbly flows with fixed polydispersity: Validation of a baseline closure model[J]. Nuclear Engineering and Design,2015,287: 108-118.

(上接第 78 页,Continued from P78)

[18] 李俊旺. 会泽铅锌硫化矿浮选过程分流分速的动力学研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.
LI Junwang. Kinetics study on differential flotability and floating rate in flotation of Huize lead-zinc sulphide ores[D]. Shenyang: Northeastern University,2012.

[19] 于洋,李俊旺,孙传尧,等. 黑钨矿、白钨矿及萤石异步浮选动力学研究[J]. 有色金属(选矿部分),2012(4):16-22.
YU Yang,LI Junwang,SUN Chuanyao,et al. Study on asynchronous flotation kinetics for wolframite,scheelite and fluorite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2012(4):16-22.

[20] 陈子鸣. 浮选动力学研究之二—浮选速率常数分布密度函数的复原[J]. 有色金属(选冶部分),1978(11): 27-33.
CHEN Ziming. Research on flotation kinetics Ⅱ-restoration of flotation velocity constant distribution density function[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing & Extractive MetallurgySection),1978(11):27-33.