柔性导向复合桨叶对多性态物料连续均化搅拌的影响研究*

李创起[1],赖伟[2,3],李平[4],袁子淇[2],段弘宇[2]

(1.平顶山工业职业技术学院, 河南 平顶山市 467001;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
4.云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600)

摘要:为实现充填料浆高效、稳定的连续制备,运用计算流体力学数值模拟方法,对比分析了传统刚性桨叶与柔性导向复合桨叶在连续搅拌过程中对多性态物料流场结构、速度分布及混合特性的影响规律。重点探究了柔性导向复合桨叶对料浆混合均匀性、混合时间及能耗的作用机制,结合室内试验验证其在多性态物料均化搅拌中的技术优越性,并进行工业应用。结果表明:柔性导向复合桨叶通过弹性变形和刚柔耦合作用,显著扩展了料浆湍动能分布范围,形成了轴向导流-径向扩散的搅拌流场,实现了多性态物料的广域弥散,与传统刚性桨叶相比,柔性导向复合桨叶下颗粒分散效率提升了51.8%;在等效混合效果下,柔性导向复合桨叶的功率降低了15.3%;在等效功率下,其搅拌效果显著优于传统刚性桨叶。目前,柔性导向复合桨叶已成功应用于矿山生产,其搅拌后的料浆均化效果优良,料浆质量浓度稳定于70%,且波动范围≤1%。研究结果为细粒级料浆制备提供了新方法。

关键词:充填料浆;柔性导向;复合桨叶;多性态物料;颗粒分散效率;均质化搅拌;湍动能
中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0117-09

Research on the Effect of Flexible-Guide Composite Paddles on Continuous Homogenization Stirring of Multi-State Materials

LI Chuangqi[1], *LAI Wei*[2,3], *LI Ping*[4], *YUAN Ziqi*[2], *DUAN Hongyu*[2]

(1.Pingdingshan Polytenchnic College, Pingdingshan, Henan 467001, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Yunnan Phosphate Chemical Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650600, China)

Abstract: In order to achieve efficient and stable continuous preparation of filling slurry, the computational fluid dynamics numerical simulation method was used to compare and analyze the influences of traditional rigid paddle and flexible-guide composite paddles on the flow field structure, velocity distribution and mixing characteristics of multi-state materials during continuous stirring. The action mechanism of the flexible-guide composite paddles on the mixing uniformity, mixing time and energy consumption of the slurry was explored. The technical superiority of the flexible-guide composite paddles in the homogenization stirring of multi-state materials was verified by laboratory tests and industrial applications were carried out. The results show that the flexible-guide composite paddles significantly expand the turbulent kinetic energy distribution range of the slurry through elastic deformation and rigid-flexible coupling, form an axial flow-radial diffusion stirring flow field, and realize the wide-area dispersion of multi-state materials. Compared with the traditional rigid paddles, the particle dispersion efficiency under the flexible-guide composite paddles is increased by 51.8%. Under the equivalent mixing effect, the power of the flexible-guide composite paddles is reduced by 15.3%. Under the equivalent power, the stirring effect of the flexible-guide composite paddles is significantly better than that of the traditional rigid paddles. At present, the flexible-guide composite paddles has been successfully applied to mine production, and the slurry homogenization effect after stirring is excellent. The mass concentration of slurry is stable at 70%, and the fluctuation range is less than 1%. The research can provide a new

* **收稿日期**:2025-01-13
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904003)
作者简介:李创起(1984—),男,河南襄城人,硕士,副教授,主要从事矿山绿色充填等相关教学与科研工作。E-mail:0510010123@163.com

method for the preparation of fine-grained slurry.

Key words: Filling slurry, Flexible-guide, Composite paddles, Multi-state materials, Particle dispersion efficiency, Homogenization stirring, Turbulent kinetic energy

0 引言

采矿业作为资源供给的重要产业,在推动经济发展的同时也对生态环境带来了严峻挑战[1]。充填采矿法通过提升资源回收率、减少矿山灾害及降低环境污染,成为平衡矿山资源开发与环境保护的有效手段[2-4]。搅拌是全尾砂膏体充填工艺流程的关键环节,其混合效果直接决定着充填料浆输送性能与充填体力学特性,并影响充填系统的稳定性与可靠性[5]。卢贤俊等[6]的研究表明,搅拌桨叶的结构会显著影响桶内流体的动力学行为,是决定充填料浆混合效果的关键因素[6]。因此,通过优化桨叶结构来提升充填料浆的制备质量,对完善充填工艺具有重要意义。

随着计算流体力学的发展,学者们广泛采用CFD方法探究桨叶搅拌机理[7-8]。寇云鹏等[9]对3种常见桨叶的搅拌流场进行数值模拟,确定了推进式叶片转速为90 r/min时,料浆搅拌效果更好。石勇等[10]对不同角度单桨叶和复合桨叶的搅拌流场进行数值模拟,结果表明,60°复合桨叶更有利于料浆的均质化。张晓雨等[11]对不同类型桨叶的挡板搅拌槽进行了数值模拟研究,发现hushton涡轮的搅拌性能优于六斜叶开启涡轮和六直叶开启涡轮。加万里等[12]研究了下层桨叶结构对搅拌反应器内部流场的影响,结果表明,在叶片数为6个、叶片倾角为45°时,流体介质的搅拌效果更好。

刚性桨叶搅拌流体时,桨叶边界和尾涡区域会损失约70%的能量,导致近壁流体混合不足[13-14],而柔性桨叶则是通过其弹性变形达到弯曲极限后释放势能,从而增强对流体的扰动作用,促进混合效果,提高流体均匀性[15]。刘作华等[16]结合可视化技术,对比分析了刚性桨叶与柔性桨叶之间混合性能的差异,发现柔性桨叶使流体的混合时间降低了28%左右。

现有研究多集中于刚性单一结构桨叶,对刚柔复合桨叶的协同强化机制研究仍较为匮乏。此外,现有研究多基于物料初始静止状态,对连续进料与排料动态条件下多性态物料混合行为的分析不足。为此,本文研究提出柔性导向复合桨叶结构,通过CFD模拟与试验验证相结合的方法,系统揭示这种桨叶结构在连续搅拌过程中对流场特性与混合效率的影响机制,更贴近工业生产的料浆制备过程,对制备充填料浆的搅拌桶的设计优化具有参考意义。

1 数值模型构建与参数设定

1.1 数值模型

如图1所示,按1∶1的比例构建搅拌桶仿真模型,搅拌桶内径为2 000 mm,高度为2 000 mm、尾砂进料口直径为300 mm,水泥进料口直径为150 mm,出料口宽度为300 mm,高度为150 mm。搅拌装置采用柔性导向复合桨叶,为三层结构,层间距为230 mm,其中上下层为反向复合扇形桨叶,直径为800 mm,厚度为20 mm,安装倾角为60°;中层为柔性链式叶片。随着转轴转速的增加,中层柔性链式叶片所受到的离心力逐渐增大,当达到临界转速时,柔性链式叶片内部的张力分布趋于均匀,其形态由初始的柔性悬垂状态转变为径向拉伸的直线状态,此时柔性链式叶片的动力学行为近似于刚性杆件,能够有效传递扭矩并参与搅拌过程。柔性链式叶片展开直径为1 100 mm,具体模型如图2所示。

与传统刚性桨叶相比,柔性导向复合桨叶具有显著优势:其结构采用刚柔复合设计,中层链式叶片可随搅拌过程动态调整形态,针对高黏性物料表现出更好的搅拌适应性。为验证柔性导向复合桨叶的性能优势,本研究基于数值模拟手段开展了与传统刚性叶片的对比分析研究。

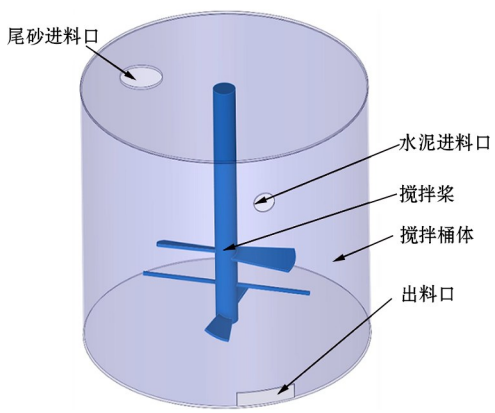
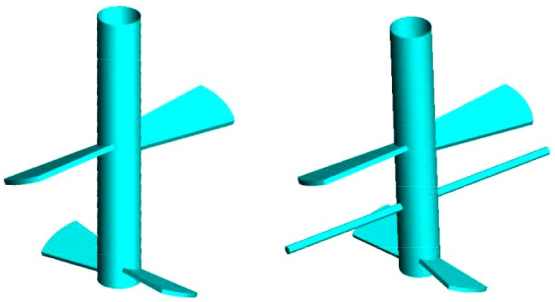


图1 搅拌桶模型

Fig.1 Stirring bucket model



(a) 刚性桨叶 (b) 柔性导向复合桨叶

图 2 桨叶模型

Fig.2 Paddle models

该模拟环境中转子与桶壁的相对作用较弱,故旋转模型采用 MRF 多重参考系模型,对流体划分内外域,以便在子域界面上交换流场信息。搅拌混合过程满足连续性方程和动量守恒方程。连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho u)=0 \tag{1}$$

式中:ρ 为流体密度,kg/m^3;u 为绝对速度,m/s;t 为时间,s。对于不可压缩流体,$\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$。

基于 MRF 模型,流体内、外域的动量守恒方程分别为:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\cdot\nabla u\right)=-\nabla p+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}+f \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u'}{\partial t}+u'\cdot\nabla u'+2\omega\times u'+\omega\times(\omega\times \boldsymbol{r})\right)=-\nabla p+\nabla\boldsymbol{\tau}+f+F \tag{3}$$

式中:u'为相对于旋转参考系的速度,m/s;ω 为旋转角速度,rad/s;$\boldsymbol{r}$ 为位置矢量;p 为压力,Pa;$\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量,N/m^2;f 为单位质量力,m/s^2;F 为内、外流域通过交界面传递的力,N。

选择对复杂流场收敛性较好的标准 k-ε 模型模拟搅拌桶内湍流流动[17-18],湍流能量方程和湍流耗散率方程分别如式(4)和式(5)所示。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\nabla(\rho k u)=\nabla\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)+G_k+G_b-Y_M+S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\nabla(\rho\varepsilon u)=\nabla\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{5}$$

式中:k 为湍流动能,m^2/s^2;ε 为湍流耗散率,m^2/s^3;μ_t为湍流黏度,Pa·s;μ 为动力黏度,Pa·s;G_k为平均速度梯度产生的湍动能,m^2/s^2;G_b为浮力引起的湍动能,m^2/s^2;Y_M为波动膨胀对湍流耗散率的影响;σ_k、σ_ε分别为湍流动能和湍流耗散率的普朗特数;S_k、S_ε为源项;$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$为模型常数,分别取 $C_{1\varepsilon}=1.44$、$C_{2\varepsilon}=1.92$;$C_{3\varepsilon}$为可压流计算中与浮力相关的系数,当主流与重力方向平行时,$C_{3\varepsilon}=1.0$,当主流与重力方向垂直时,$\sigma_{3\varepsilon}=0$。

离散项主要考虑曳力的影响,使用 spherical 模型,颗粒受到的曳力为:

$$F_D=\frac{1}{8}C_D\pi d_p^2\rho(\mu_1-u_p)^2 \tag{6}$$

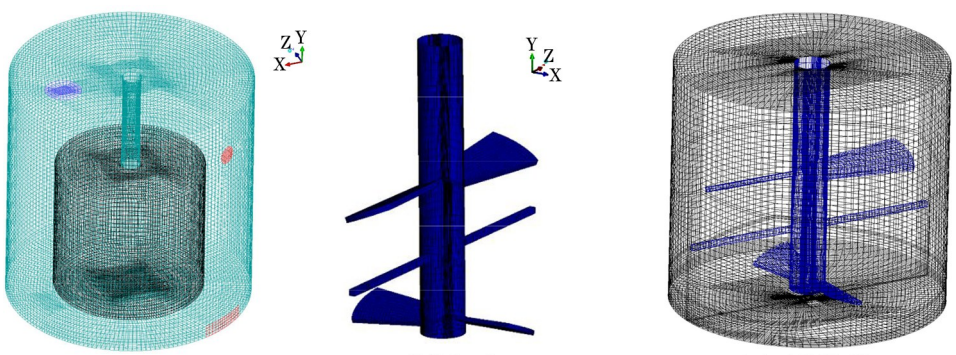
$$C_D=a_1+\frac{a_2}{Re_p}+\frac{a_3}{Re_p^2} \tag{7}$$

$$Re_p=\frac{\rho d_p|\mu_1-u_p|}{\mu} \tag{8}$$

式中:F_D为颗粒的曳力,N;C_D为曳力系数;d_p为颗粒直径,mm;μ_1 为流体相速度,m/s;u_p为颗粒速度,m/s;Re_p为颗粒雷诺数;a_1、a_2、a_3 为模型常数。

1.2 网格划分

采用 ICEM 软件对搅拌桶模型进行网格划分,网格划分结果如图 3 所示。



(a) 外流域网络 (b) 搅拌桨网格 (c) 内流域网格

图 3 搅拌桶网格划分

Fig.3 Grid division of the stirring bucket

根据 LUO 等[19]的研究结果,内域直径大小与筒体直径之比 $d_{in}/D=0.62$ 时,数值模拟结果最接近真实情况。因此,将搅拌桶模型分为内外 2 个流动区域,内流域覆盖转子,取内流域直径 $d_{in}=1\ 240$ mm,轴向高度 $h_{in}=1\ 109$ mm。为确保计算结果不受网格数量影响,进行了网格独立性验证,结果如图 4 所示,当网格数量大于 110×10^4 时,流体轴向速度变化幅度小于 5%,说明网格具有独立性,据此设定最大网格全局高度为 30 mm。为满足计算精度,在内、外流域间设置交界面,并对交界面处的网格进行加密处理,同时保证界面两侧网格尺寸接近,以降低计算偏差[20]。模型采用六面体非结构化网格,最终网格数量约为 119 万,单元网格质量均大于 0.4。

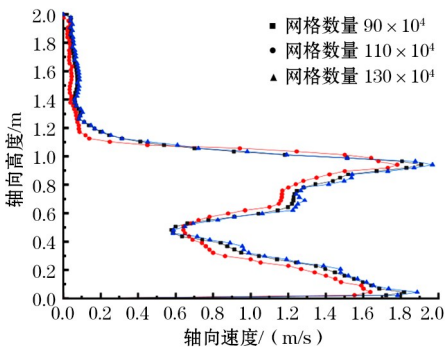


图 4 网格独立性验证

Fig.4 Grid independence verification

1.3 边界条件

根据实际生产条件,搅拌桶内三相介质及参数设定如下:液相为砂浆,密度为 2 500 kg/m³,黏度为 0.8 Pa·s;固相为水泥颗粒,密度为 1 500 kg/m³;气相为空气。边界条件设置:进料口采用速度入口边界条件,进口流速为 1.4 m/s;出口为压力出口。内流域旋转速度为 120 r/min。模拟采用瞬态计算方法,控制方程通过二阶迎风公式离散,残差收敛标准设定为 10^{-4},时间步长取 0.005 s。

2 数值模拟结果与分析

2.1 柔性搅拌结构对流场分布的影响

连续搅拌混合是指通过桨叶旋转动力作用,产生湍流和对流,形成搅拌流场,平衡物料的浓度差异,分散悬浮颗粒,形成具有均一性的混合体系,以保障物料充分混合并稳定出流。在充填料浆连续搅拌过程中,高黏性物料由于黏度较大,容易出现团聚现象,需要较强的剪切力和对流作用来避免团聚。固态颗粒需要多尺度的涡流以及具有良好导向作用的流场,以实现料浆的快速均匀分散。而尾砂浆与胶结剂之间的水化反应会生成固结结构,此时需要轴向循环好、分布广泛的流场以减小搅拌“死区”,使料浆浓度均匀,避免料浆板结。因此,需通过分析流场中的动力学表现,评估柔性搅拌结构对流场分布的影响,进而评判搅拌桨叶结构的优劣。

2.1.1 高黏性物料流场特性

流场速度矢量图可直观表征流场速度分布情况,是判断搅拌效果的重要依据。图 5 为不同类型搅拌桨叶下 $y=0$ 截面的速度矢量云图。

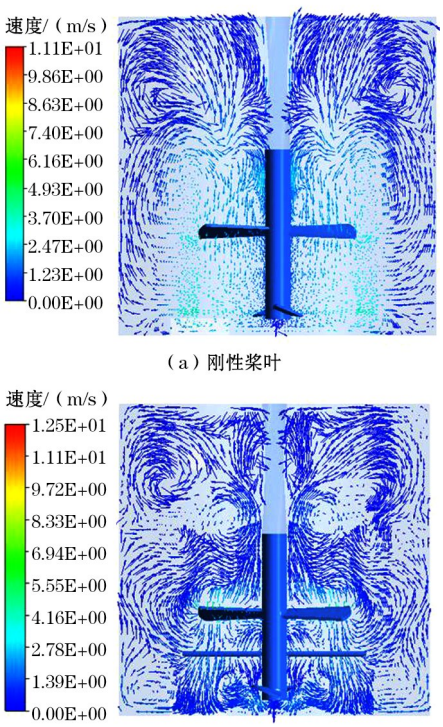


图 5 不同类型搅拌桨叶下 $y=0$ 截面的速度矢量云图

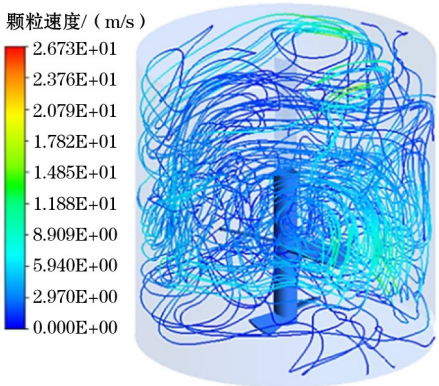
Fig.5 Velocity vector cloud diagrams of $y=0$ section under different types of stirring paddles

由图 5(a)可知,刚性桨叶流场速度集中分布于下部,轴向扩散能力较弱,料浆在桨叶附近循环流动,难以在搅拌桶内形成强大的循环流场,导致远离桨叶的区域流动较弱,剪切效果不明显,进而出现局部物料团聚和搅拌不均匀的问题。由图 5(b)可知,桨叶的柔性结构使得速度分布更为广泛,高速区域集中在桨叶周围,并沿径向大范围扩散,能产生更强的搅拌动力,显著提升桶内流场的活化效果。此外,相较于普通刚性桨叶,柔性导向复合桨叶凭借自身的弹性和形变特性,在旋转过程中产生额外的扰动和局部加速,显著增强了剪切作用,提高了高黏性物料在搅拌桶内的均匀性。

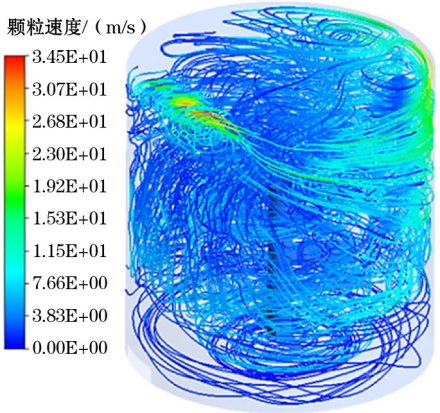
2.1.2 桨叶结构对固态粉状材料的影响

(1) 固态颗粒轨迹对比分析。

图 6 为不同搅拌桨叶条件下流场中固体颗粒的迹线分布云图。由图 6(a)可以看出,在刚性桨叶下的搅拌桶内流场中,固态颗粒主要集中在桨叶附近,形成密集迹线,而在远离桨叶的区域(如搅拌桶底部和桶壁附近),颗粒流动迹线稀疏,说明这些区域的湍动不足,颗粒分布不均匀,存在颗粒滞留现象。此外,颗粒循环路径单一,存在明显的局部流动趋势,大部分颗粒沿着桨叶附近的循环路径运动,导致桶内整体循环效果较差,固态颗粒难以均匀分布。由图 6(b)可以看出,采用柔性导向复合桨叶后,颗粒分布更广泛,桶底和桶顶部的流动循环有所增强,使颗粒迹线覆盖到整个搅拌桶,形成了轴向导向作用,颗粒流动路径变得复杂,表明柔性导向复合桨叶能产生多尺度的涡流,颗粒能够较快地被卷入主流区域,从而显著增强颗粒的扩散与分散能力。



(a) 刚性桨叶



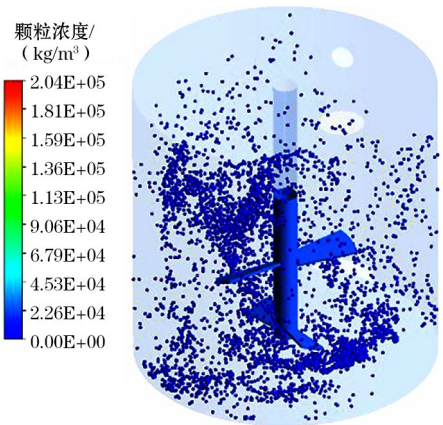
(b) 柔性导向复合桨叶

图 6 不同类型搅拌桨叶下流场中固态颗粒迹线分布云图

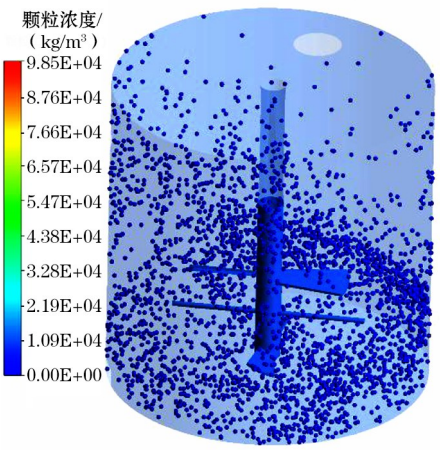
Fig.6 Trace distribution cloud diagrams of solid particles in the flow field under different types of stirring paddles

(2) 固态颗粒分散程度对比分析。

离散相浓度(Discrete Phase Model concentration,DPM concentration)是指基于粒子沉降效果,在离散相与流场双向耦合作用下确定粒子实际运动轨迹后,计算得出的单元体积内的粒子质量浓度。同一段追踪时间内,捕获到的离散相浓度越小,表示颗粒分散性越好。搅拌桶运行稳定时段内离散相浓度分布情况如图 7 所示。在追踪时间内,刚性桨叶下流场中离散相浓度最高可达到 2.04×10^5 kg/m^3,柔性导向复合桨叶结构下流动中的离散相浓度最高为 9.85×10^4 kg/m^3,说明颗粒分布均匀,团聚现象较少。由图 7(a)可以看出,刚性桨叶搅拌稳定时搅拌桶内离散相浓度为 2.26×10^4 kg/m^3,颗粒整体呈现绕桨叶末端流动的状态,轴向分散效果差。由图 7(b)可以看出,柔性导向复合桨叶结构下,搅拌稳定时搅拌桶内离散相浓度降低为 1.09×10^4 kg/m^3,颗粒的分散程度提高了 51.8%,且颗粒分布均匀、分布范围广,分散效果好。这是因为柔性导向复合桨叶在搅拌过程中引导了物料的运动轨迹,使固态物料充分分散。



(a) 刚性桨叶



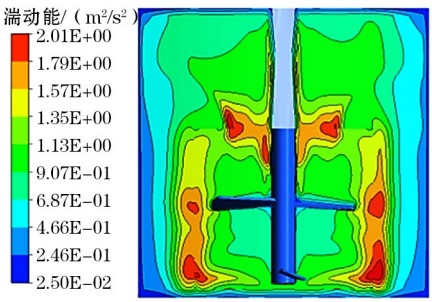
(b) 柔性导向复合桨叶

图 7 搅拌桶运行稳定时段内离散相浓度分布

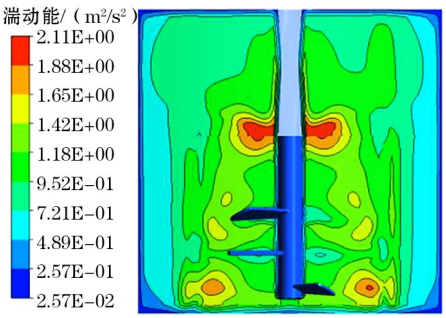
Fig.7 DPM Concentration distribution in the stable period of stirring paddles operation

2.1.3 桨叶结构对物料整体流场的影响

湍动能表示流体中湍流强度的大小,反映了流体湍动产生的能量,湍动能越高,表明搅拌过程中产生的涡流越强,更有助于浆液均匀混合。此外,湍动能图可以直观地展示搅拌桶内不同区域的湍流强度分布,并揭示物料混合效率。图 8 为不同类型搅拌桨叶下 $y=0$ 截面的湍动能云图。



(a) 刚性桨叶



(b) 柔性导向复合桨叶

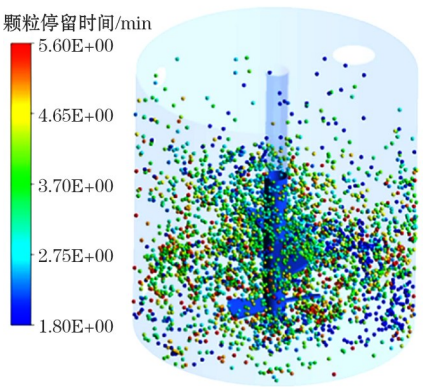
图 8 不同类型搅拌桨叶下 $y=0$ 截面湍动能云图

Fig.8 Turbulent kinetic energy cloud diagrams of $y=0$ section under different types of stirring paddles

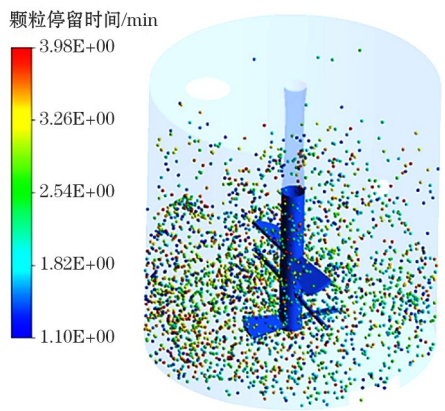
由图 8(a)可以看出,刚性桨叶的搅拌桶流场中,高湍动能区域主要集中在桨叶附近(特别是叶片末端区域),显示出较强的局部剪切力。桨叶上下的湍动能分布不对称,桶内垂直方向上物料交换较弱。桶壁和桶底区域湍动能较低(蓝色区域,颜色标识见电子版),可能存在混合"死区",物料难以均匀分布。由图 8(b)可以看出,柔性导向复合桨叶的湍动能分布范围更加广泛,从桨叶区域扩展到了搅拌桶的大部分区域,桶壁和桶底的湍动能相较于普通桨叶均有所提升(浅绿色和黄色区域),表明柔性导向复合桨叶能有效减少搅拌"死区"。桨叶上下区域的湍动能分布更加对称,表明物料在垂直方向上的循环效果更强。因此,柔性导向复合桨叶能够拓宽流场,减少搅拌"死区",加强轴向循环,有效避免料浆板结,从而维持连续稳定的出流状态。

2.2 柔性搅拌结构对混合时间的影响

图 9 表示不同桨叶搅拌桶内颗粒停留时间,颗粒停留时间能够反映颗粒在搅拌容器内的运动行为和分布情况。若颗粒在某区域内的停留时间较短,表明颗粒受力更充分,可频繁运动到其他区域,从而能够快速与其他物料混合,搅拌效率更高。



(a) 刚性桨叶



(b) 柔性导向复合桨叶

图 9 不同桨叶搅拌桶内颗粒停留时间

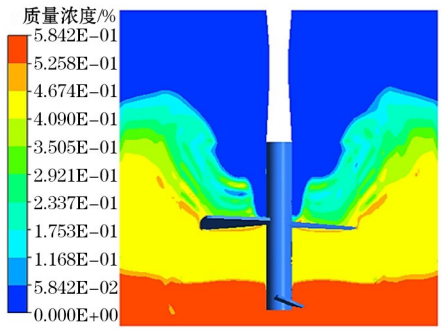
Fig.9 Particle residence time in stirring bucket with different paddles

由图 9(a)可以看出,在刚性桨叶搅拌桶流场中,颗粒停留时间分布不均匀,停留时间较长的颗粒集中在搅拌桶的中间和底部附近,表明这些区域的颗粒运动受限,存在较明显的"死区"现象。在搅拌桶的边缘区域,颗粒分布较稀疏,说明搅拌桨叶对边缘的覆盖较弱,无法充分推动颗粒运动。基于以上分析可知,普通桨叶的搅拌作用主要集中在靠近叶片的区域,而远离桨叶区域的混合效率较低。由图 9(b)可以看出,在柔性导向复合桨叶的边缘和底部区域,颗粒运动明显增多,颗粒停留时间分布的范围更窄,颗粒在整个搅拌桶内实现了更加充分和均匀的混合。这是因为柔性导向复合桨叶自身具有柔性

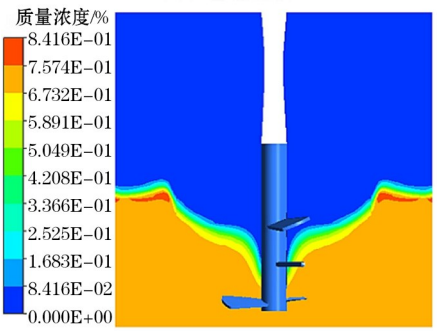
结构特性,能产生更加复杂的流场,以驱动更多颗粒参与混合,从而增强了固液相之间的动量交换,实现了多性态物料的广域弥散,有效扩展了搅拌的覆盖范围,显著提升了搅拌效率和均匀性。

2.3 柔性搅拌结构对料浆混合均匀性的影响

图 10 为不同类型搅拌桨叶下 $y=0$ 截面上在同一时刻的质量浓度分布云图,可反映空间中不同位置的浆液质量浓度分布状态。



(a) 刚性桨叶



(b) 柔性导向复合桨叶

图 10 不同类型搅拌桨叶下 $y=0$ 截面的质量浓度分布

Fig.10 Distribution cloud diagrams mass concentration in $y=0$ cross section under different types of stirring paddles

由图 10(a)可以看出,刚性桨叶下的质量浓度分布不均,其径向排液能力较强,而轴向混合能力较差。料浆出现分层,且颗粒沉降或堆积后难以再次重新分散,经过长时间搅拌容易出现板结,影响搅拌连续性。由图 10(b)可以看出,相较于刚性桨叶,柔性导向复合桨叶有效减少了高浓度与低浓度区域之间的差异,特别是在边缘和底部区域,料浆的混合效果明显提升。分析认为,柔性导向复合活化流场能够动态适应物料的黏度变化,充分发挥固态、液态及胶状物料之间的耦合作用,实现多性态物料的均质化搅拌。

3 物理试验与工业应用

为验证柔性导向复合桨叶的搅拌性能,开展了其与传统刚性桨叶在不同转速下的对比试验。试验材料选用湖南有色黄沙坪铅锌矿的尾砂。该尾砂-200目(<74 μm)颗粒占比约 75%,-400 目占比约 53%,尾砂粒径偏细。本次试验分 2 组进行,试验料浆质量浓度均为 74%、灰砂比为 1∶6。第一组为传统刚性桨叶,设置转速分别为 150 r/min 和 210 r/min;第二组为柔性导向复合桨叶,设置转速分别为 120 r/min 和 150 r/min。

传统刚性桨叶与柔性导向复合桨叶搅拌桶功率 P 与转速 n 之间的关系曲线如图 11 所示。由图 11 可知,传统刚性桨叶在转速为 150 r/min 时,料浆均匀性较差,存在较多团块未搅匀;转速提高至 210 r/min 时,功率为 52.2 kW,料浆均匀性有所改善,但仍存在较明显的团块。柔性导向复合桨叶在转速为 120 r/min 时,功率为 44.2 kW,料浆整体均质性较好,不存在较大团块,搅拌效果优于传统刚性桨叶在转速 150 r/min 下的搅拌效果;在转速提高至 150 r/min 时,功率为 50.3 kW,料浆均匀性大幅提升,无明显团块。因此,对比传统刚性桨叶与柔性导向复合桨叶,在搅拌效果相似的条件下,柔性导向复合桨叶的功率下降了 15.3%;在相似功率条件下(刚性桨叶转速 210 r/min,柔性导向复合桨叶转速 150 r/min),柔性导向复合桨叶的搅拌效果明显优于传统刚性桨叶。

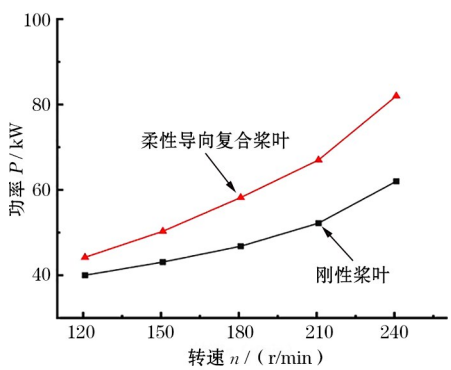


图 11 搅拌桶功率与转速的关系

Fig.11 Relationship between power and speed of stirring bucket

为验证柔性导向复合桨叶对多性态物料连续均质化搅拌的效果,在湖南有色黄沙坪铅锌矿开展了现场工业试验。试验现场灰砂比为 1∶8,充填料浆质量浓度 70%,采用柔性导向复合桨叶搅拌桶,搅拌后料浆整体均质化程度高,料浆质量浓度波动≤1%。该搅拌技术保障了充填体的质量与稳定性,为

后续细粒级料浆制备提供了新的解决方案。

4 结论

本研究通过数值模拟与工业试验相结合的方法,系统揭示了柔性导向复合桨叶在多性态物料连续均化搅拌中的流场调控机制与性能优势,得出以下主要结论。

(1) 基于 CFD 仿真分析发现,柔性导向复合桨叶凭借其自身的弹性和形变特性,在旋转过程中产生额外的扰动和局部加速,显著提高了高黏性物料在搅拌桶内的均匀性;形成轴向导流-径向扩散的复合流场,有效提升了高黏性物料的剪切分散能力与固态颗粒的广域弥散效率。

(2) 通过离散相浓度分析固态颗粒分散程度,结果表明,柔性导向复合桨叶搅拌结构稳定运行时,搅拌桶内离散相浓度为 1.09×10^4 kg/m^3,与传统刚性桨叶相比,颗粒分散效率提升 51.8%,颗粒分布均匀、分布范围广,分散效果好。

(3) 湍动能分析表明,刚性桨叶搅拌桶流场中,湍动能分布不均匀,高湍动能区域主要集中在桨叶附近,桶壁和桶底区域湍动能较低,而在柔性导向复合桨叶搅拌桶流场中,湍动能分布更加对称,物料在垂直方向上循环效果更强。此外,柔性导向复合桨叶边缘和底部区域的颗粒运动频率明显增多,停留时间分布范围更窄,且有效减少了高浓度与低浓度区域之间的差异,实现了更优的混合均匀性与稳定性。

(4) 在等效混合效果下,柔性导向复合桨叶功率相比于刚性桨叶降低 15.3%;而在等效功率下,其混合效果显著优于刚性桨叶。工业应用表明,柔性导向复合桨叶可实现料浆质量浓度为 70%±1%的稳定均化,为细粒级料浆制备提供了新方案。未来研究可进一步探讨柔性导向复合桨叶的长期耐久性、不同物性参数的适应性优化及其在复杂工况下的动态响应特性,以推动刚柔复合搅拌技术的深度应用。

参考文献(References):

[1] 柳小波,丛峰武,张宝金,等.我国金属矿山智慧化转型实践与展望[J/OL].金属矿山:1-20[2025-01-08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20241218.1556.002.html.
LIU Xiaobo, CONG Fengwu, ZHANG Baojin, et al. Practice and prospect of intelligent transformation of metal mines in China[J/OL]. Metal Mine: 1-20[2025-01-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20241218.1556.002.html.

[2] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
WANG Yong, WU Aixiang, YANG Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1281-1292.

[3] 阮竹恩,吴爱祥,焦华喆,等.我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J].中国有色金属学报,2022,32(1):286-301.
RUAN Zhuen, WU Aixiang, JIAO Huazhe, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 286-301.

[4] 李公成,王洪江,吴爱祥,等.基于动态沉降压密实验的深锥浓密机关键参数确定[J].中国有色金属学报,2017,27(8):1693-1700.
LI Gongcheng, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Key parameters determination of deep cone thickener based on dynamical settling and compaction experiments[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(8): 1693-1700.

[5] 温震江,杨晓炳,李立涛,等.基于 RSM-BBD 的全尾砂浆絮凝沉降参数选择及优化[J].中国有色金属学报,2020,30(6):1437-1445.
WEN Zhenjiang, YANG Xiaobing, LI Litao, et al. Selection and optimization of flocculation sedimentation parameters of unclassified tailings slurry based on RSM-BBD[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1437

[6] 卢贤俊,许家宝,徐子强,等.双层折流板三弧叶桨釜内流场的特性研究[J/OL].湿法冶金:1-12[2025-01-08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3012.TF.20241226.1542.002.html.
LU Xianjun, XU Jiabao, XU Ziqiang, et al. Characteristics of flow field in a double-layer three-arc blade propeller kettle with baffle[J/OL]. Hydrometallurgy of China: 1-12[2025-01-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3012.TF.20241226.1542.002.html.

[7] 张超,陈涛,周中林,等.基于 CFD 仿真的高黏发酵反应物降黏研究[J].轻工机械,2024,42(5):44-50.
ZHANG Chao, CHEN Tao, ZHOU Zhonglin, et al. Research on viscosity reduction of high-viscosity fermentation reactants based on CFD simulation[J]. Light Industry Machinery, 2024, 42(5): 44-50.

[8] 梁晓锋,杨文琼,刘小棒,等.浓缩接受釜内固液悬浮过程 CFD 模拟[J].辽宁化工,2024,53(9):1465-1468+1472.
LIANG Xiaofeng, YANG Wenqiong, LIU Xiaobang, et al. CFD simulation of solid-liquid suspension in concentrate received stirred tank[J]. Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(9): 1465-1468+1472.

[9] 寇云鹏,郑伯坤,栾黎明,等.充填料浆搅拌机的桨叶研究[J].矿业研究与开发,2021,41(1):179-184.

KOU Yunpeng, ZHENG Bokun, LUAN Liming, et al. Research on blades of filling slurry mixer[J]. Mining Research and Development,2021,41(1):179-184.

[10] 石勇,郑伯坤,段弘宇,等.桨叶复合结构对充填料浆均质化的影响研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):149-155.
SHI Yong, ZHENG Bokun, DUAN Hongyu, et al. Effect of blade composite structure on the homogeneous of filling slurry[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):149-155.

[11] 张晓雨,龙梅,孔德旭,等.桨叶类型对搅拌槽固液流动特性影响的数值模拟研究[J].化学工程师,2020,34(6):18-21+33.
ZHANG Xiaoyu, LONG Mei, KONG Dexu, et al. Numerical analysis on effect of impeller types on liquid-solid flow characteristics in a stirred tank[J]. Chemical Engineer, 2020,34(6):18-21+33.

[12] 加万里,王勇,高勇.下层桨叶结构对搅拌反应器内部流场的影响[J].化工科技,2024,32(2):12-17.
JIA Wanli, WANG Yong, GAO Yong. Influence of lower impeller structure on flow field in stirred reactor[J]. Science & Technology in Chemical Industry,2024,32(2):12-17.

[13] STEFANIEB, DIRK W B. CFD analysis of interphase mass transfer and energy dissipation in a milliliter-scale stirred-tank reactor for filamentous microorganisms[J]. Chemical Engineering Research and Design,2014,92(2):240-248.

[14] 杨锋苓,张翠勋,苏腾龙.柔性 Rushton 搅拌桨的功耗与流场特性研究[J].化工学报,2020,71(2):614-625.
YANG Fengling, ZHANG Cuixun, SU Tenglong. Power and flow characteristics of flexible-blade Rushton impeller [J]. ClESC Joumnal,2020,71(2):614-625.

[15] LIANG Yangyang, SHI Daien, XU Bohang, et al. Turbulent flow field in a stirred vessel agitated by an impeller with flexible blades[J]. AIChE Journal, 2018, 64(11):4148-4161.

[16] 刘作华,曾启琴,王运东,等.柔性桨强化搅拌槽中高黏度流体层流混合的研究[J].中国科技论文,2012,7(3):185-189.
LIU Zuohua, ZENG Qiqin, WANG Yundong, et al. Laminar mixing enhanced by flexible impeller in high-viscosity fluid stirred tank[J]. China Sciencepaper, 2012, 7(3):185-189.

[17] 李海涛,姜壮威.导管螺旋桨水动力性能试验及数值研究[J].舰船科学技术,2024,46(2):1-7.
LI Haitao, JIANG Zhuangwei. Hydrodynamic performance test and numerical simulation of ducted propeller[J]. Ship Science and Technology,2024,46(2):1-7.

[18] 林纬,邱心缘,汪威,等.底流口直径对管柱式气液分离器流动与分离特性影响研究[J].武汉工程大学学报,2024, 46(6):681-686.
LIN Wei, QIU Xinyuan, WANG Wei, et al. Influence of the bottom outlet diameter of gas-liquid cylindrical cyclone on its separation performance[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2024,46(6):681-686.

[19] LUO J Y, GOSMAN A D, ISSA R I, et al. Full flow field computation of mixing in baffled stirred vessels[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1993, 71: 342-344.

[20] TAMBURINI A, BRUCATO A, CIOFALO M, et al. CFD simulations of early to fully-turbulent conditions in unbaffled and baffled vessels stirred by a Rushton[J]. Chemical Engineering turbine Research and Design,2021,171:36-47.