

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

基于VOF-DPM方法的硬质合金搅拌槽混合过程模拟与参数优化

钟赢^{1,2}, 姬敬博^{1,2}, 余立新³, 鲍立强³, 赖炫江³, 谭援强⁴, 安希忠^{1,2}, 张浩^{1,2}

(¹ 东北大学低碳钢铁前沿技术教育部工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819; ² 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; ³ 武汉新锐合金工具有限公司, 湖北 武汉 430100; ⁴ 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对硬质合金料浆混合过程中均匀性不足、混合效率较低的问题, 采用流体体积法-离散相模型 (VOF-DPM) 耦合方法, 对搅拌槽内气液固三相流动进行了数值模拟研究, 并结合工厂试验对优化结果进行了验证。重点研究了桨叶转速、双桨间距、上桨直径及下桨倾角对混合过程的影响。结果表明, 当桨叶转速设定为 210 r/min、双桨间距 180 mm、上桨直径 300 mm、下桨倾角 60° 时, 槽内可形成稳定且连续的螺旋上升流场, 传统搅拌中常见的流动死区被有效消除, 颗粒分布均匀度显著提高。工厂试验结果表明, 采用优化参数后, 料浆密度波动幅度显著减小, 过程稳定性提高。本研究结合数值模拟与实验验证, 为复杂料浆的搅拌混合工艺优化提供了扎实的理论支撑与可行的工程参考。

关键词: 硬质合金; 计算流体力学; VOF-DPM; 搅拌槽; 混合过程

中图分类号: TQ027.2

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-08

Numerical simulation and parameter optimization of mixing process in cemented carbide stirred tank based on VOF-DPM method

ZHONG Ying^{1,2}, JI Jingbo^{1,2}, YU Lixin³, BAO Liqiang³, LAI Xuanjiang³, TAN Yuanqiang⁴, AN Xizhong^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}

(¹ Engineering Research Center of Low-Carbon Iron and Steel Frontier Technology Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; ² School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; ³ Wuhan Sharp Alloy Tools Co., Ltd., Wuhan 430100, Hubei, China; ⁴ College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: To address the issues of insufficient uniformity and low mixing efficiency during the preparation of cemented carbide slurries, a coupled Volume of Fluid-Discrete Phase Model (VOF-DPM) numerical simulation approach is employed to investigate the gas-liquid-solid three-phase flow within a stirred tank. The optimized results are further validated through industrial experiments. The effects of key operational and structural parameters, including impeller speed, dual-impeller spacing, upper impeller diameter, and lower impeller inclination angle, on the mixing process are systematically examined. The results indicate that under the optimal conditions of an impeller speed of 210 r/min, an impeller spacing of 180 mm, an upper impeller diameter of 300 mm, and a lower impeller inclination angle of 60°, a stable and continuous spiral upward flow field is established in

收稿日期: 2026-03-24 修回日期: 2026-08-03

通信作者: 张浩(1984—), 男, 博士, 教授, zhangh@mail.neu.edu.cn

第一作者: 钟赢(2000—), 男, 硕士研究生, 1591772106@qq.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(N25YJS003)

引用本文: 钟赢, 姬敬博, 余立新, 鲍立强, 赖炫江, 谭援强, 安希忠, 张浩. 基于VOF-DPM方法的硬质合金搅拌槽混合过程模拟与参数优化[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–8

Citation: ZHONG Ying, JI Jingbo, YU Lixin, BAO Liqiang, LAI Xuanjiang, TAN Yuanqiang, AN Xizhong, ZHANG Hao. Numerical simulation and parameter optimization of mixing process in cemented carbide stirred tank based on VOF-DPM method[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–8

the tank. This flow pattern effectively eliminates the stagnant regions commonly observed in conventional stirring processes and significantly improves the uniformity of particle distribution. Industrial experiments further confirm that under the optimized parameters, the fluctuation range of slurry density is substantially reduced, and process stability is enhanced. By integrating numerical simulation with experimental validation, this study provides a solid theoretical basis and practical engineering guidance for the optimization of complex slurry mixing processes.

Keywords: cemented carbide; computational fluid dynamics; VOF-DPM; stirred tank; mixing

引 言

硬质合金因其优异的硬度、耐磨性和高温稳定性,广泛应用于切削工具、模具及耐磨部件等领域^[1-2]。其制备通常采用粉末冶金工艺^[3-4],其中料浆混合均匀性对粉末、黏结剂等组分的分散状态具有决定性影响,并进一步影响产品的微观组织与力学性能^[5]。传统实验方法难以准确捕捉流场结构、局部剪切及颗粒分布等关键信息^[6]。由搅拌不充分引起的粉末颗粒与黏结剂分散不均等问题,会在后续喷雾、成型与烧结过程中进一步积累和放大^[7],进而诱发组织缺陷,严重影响产品性能^[8]。

在搅拌工艺研究领域,计算流体力学(CFD)模拟已成为分析流动行为并优化工艺参数的重要方法^[9]。现有研究围绕搅拌基础理论、槽体几何形状对混合效果的影响,以及桨叶结构优化等方面开展了大量工作。例如,挡板设置、椭圆底^[10-11]设计等槽体结构改进可显著改变流场分布;Rushton 涡轮开槽、斜叶涡轮及自吸式射流桨叶等新型桨叶结构也被证明能够有效强化混合过程^[12-13]。在多相搅拌模拟方面,流体体积法(VOF)、离散相模型(DPM)及其耦合方法已经广泛用于气液界面演化和颗粒运动行为的数值模拟^[14-15]。对于高浓度颗粒体系,计算流体力学-离散元法(CFD-DEM)耦合方法也被广泛应用^[16-17]。尽管上述研究为理解搅拌混合提供了重要基础,但多数工作主要针对通用化工体系或理想化条件展开。然而,硬质合金搅拌过程中的流场组织及颗粒输送规律具有特殊性,且搅拌槽结构和操作条件更贴近工业实际,导致其流动与分散行为更加复杂^[18-19]。针对该类体系的系统研究仍较为匮乏,难以满足实际生产对混合质量与一致性的要求。

需要指出的是,本文建立的是针对工业搅拌槽参数优化的工程等效模型。考虑到实际高固含率料浆体系中存在复杂流变行为和颗粒间强相互作用,本文采用代表性离散颗粒追踪方法描述宏观颗

粒输送趋势。CFD-DEM 能够解析颗粒间碰撞等微观动力学行为,但计算成本较高,难以满足工业尺度多工况优化需求。相比之下,VOF-DPM 可在较低计算成本下描述自由液面及颗粒宏观输运行为。因此,本文采用 VOF-DPM 方法研究桨叶转速、双桨间距、上桨直径和下桨倾角对混合性能的影响,并结合工厂试验验证优化方案。

1 控制方程

本文所研究的硬质合金混合料浆为黏度恒定的不可压缩、等温的湍流固液混合物^[20]。采用牛顿流体模型忽略剪切变稀和屈服应力等非牛顿特性,流体流动的质量守恒和动量守恒方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{eff}(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

其中, ρ 是流体密度, t 是时间, $\mathbf{U}$ 是时间平均流体速度矢量。 p 是压力, $\mathbf{g}$ 是重力加速度矢量, $\mathbf{F}$ 是其他体积力矢量, μ_{eff} 是有效动态黏度。采用标准 k- ε 模型来描述湍流流动,湍流动能 k 的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

k 表征了动能强度, P_k 是平均速度梯度产生的湍流, σ_k 是普朗特数^[21]。湍流动能耗散率 ε 由下式给出:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中 σ_k 、 $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 是经验常数。

将硬质合金颗粒简化为具有等效平均粒径和真实密度的球形颗粒,液相黏度为 0.207 Pa·s,液相密度为 2680 kg/m³,颗粒密度为 15630 kg/m³,粒径服从 Rosin-Rammler 分布。DPM 用于表征颗粒宏观输运特征,而非高固含率颗粒动力学,料浆中碳化钨颗粒的平移由以下方程控制:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_d + F_L + F_{pg} + F_{vm} + m_p g \quad (5)$$

m_p 是颗粒质量, u_p 是颗粒速度矢量。 F_d 是阻力, F_L 是横向作用力。 F_{pg} 是压力梯度力, F_{vm} 是虚拟质量力, $m_p g$ 是重力项。曳力模型基于Schiller-Naumann公式,升力采用Saffman-Mei理论^[22]。

VOF模型用于追踪料浆与空气之间的界面,体积分输运方程定义如下:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0 \quad (6)$$

其中 α 是料浆的体积分, $\alpha = 1$ 代表纯料浆, $\alpha = 0$ 代表纯空气。

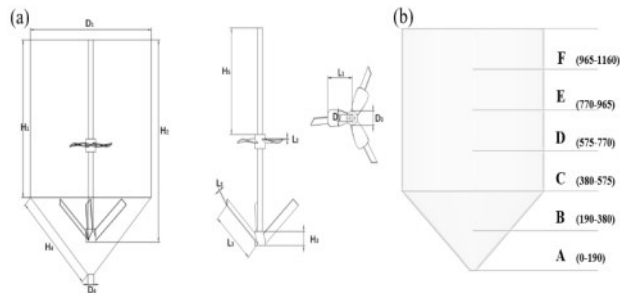
2 验证

2.1 网格无关性验证

本研究中带锥底的立式圆柱形搅拌槽的几何结构如图1(a)所示,主要结构参数见表1。计算区域分为旋转区域和静止区域,旋转区域包含桨叶组件,静止区域为搅拌槽壁面及内部流体区域。为验证网格分辨率对数值模拟结果的影响,分别选取网格数为644538、726394和804331的三组模型进行计算。图1(b)将搅拌槽自下而上划分为A-F的6个区域。结果表明,当网格数为726394和804331时, A-F区间内颗粒体积分数的轴向分布基本一致,差异可忽略不计,表明网格数为726394已可满足计算精度要求。因此,综合考虑计算精度和效率,后续模拟采用726394个网格进行计算。

表1 搅拌槽的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the stirred tank



参数符号	对应区域	尺寸(mm)
H1	搅拌槽上部垂直高度	780
H2	搅拌轴总长度	1000
H3	轴毂连接处	65
H4	搅拌槽锥段斜高	537.4
H5	顶部到上桨叶的距离	480
L1	上桨直径	150
L2	桨叶厚度	4
L3	下桨叶片长度	260
D1	搅拌槽直径	800
D2	搅拌轴直径	32
D3	轴毂连接处直径	65
D4	底部出口直径	40

图1 搅拌槽及其桨叶结构平面示意图:(a)搅拌槽结构;(b)搅拌槽区间划分

(a) stirred tank; (b) computational zones

2.2 模型验证

本研究复现了Kang等^[23]采用VOF-DEM方法对无挡板搅拌槽的研究。在固定搅拌转速200 r/min下,模拟了近球形颗粒在槽内的悬浮与分布过程。

表1 搅拌槽的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the stirred tank

参数符号	对应区域	尺寸(mm)
H1	搅拌槽上部垂直高度	780
H2	搅拌轴总长度	1000
H3	轴毂连接处	65
H4	搅拌槽锥段斜高	537.4
H5	顶部到上桨叶的距离	480
L1	上桨直径	150
L2	桨叶厚度	4
L3	下桨叶片长度	260
D1	搅拌槽直径	800
D2	搅拌轴直径	32
D3	轴毂连接处直径	65
D4	底部出口直径	40

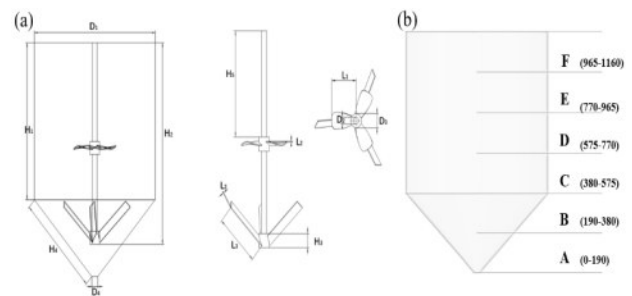


图2(a)表明,当前结果准确再现了实验中不同瞬态时刻(0.85 s、1.50 s、2.0 s和5.0 s)自由表面涡的变化以及颗粒悬浮状态的动态特征。图2(b)进一步表明,在 $x/T = 0.45$ 位置处,模拟所得颗粒含率分布与实验吻合较好。上述结果表明,当前VOF-DPM模型能够准确计算液-固两相流中颗粒的悬浮和运输趋势。

以上验证结果表明,当前数值模型可以准确地计算硬质合金料浆搅拌过程中的流动与颗粒分散行为。

3 结果与讨论

本文分多个阶段进行了数值模拟研究,首先,将料浆等效为连续液相体系,对气液两相自由表面流动行为进行研究,采用示踪剂浓度与混匀时间作为混合效率的定量评价指标。其次,引入碳化钨颗粒构建气液固三相体系,以考察颗粒的分布及悬浮行为。最后,将最优参数组合进行工厂试验验证。

3.1 桨叶转速对气液两相搅拌效果的影响

本节对桨叶转速90 r/min、120 r/min、150 r/min和210 r/min条件下的搅拌过程进行数值模拟。图3

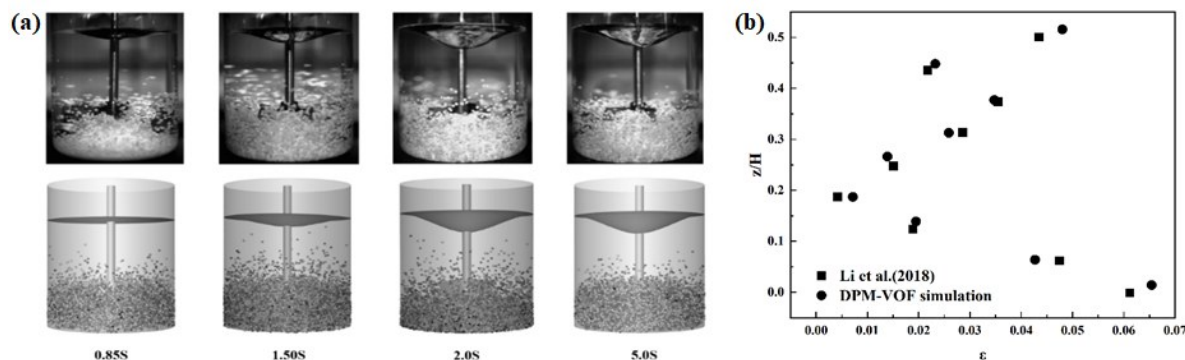


图2 (a)桨叶转速 200 r/min 时,不同时刻实验与模拟的自由表面涡和颗粒分布对比;(b) $x/T = 0.45$ 时颗粒固含率分布
Fig. 2 (a) Comparison of Experimental and Simulated Free Surface Vortex and Particle Distribution at Different Moments with Impeller Speed of 200 r/min; (b) Distribution of Local Solids Holdup at $x/T = 0.45$

(a)展示了不同转速下气液界面变化。当转速为 90 r/min 时,液面接近水平,输入能量较低,未出现明显自由表面变形;随着转速提高至 120 r/min 和 150 r/min,界面中心逐渐形成凹陷。这表明转速增加增强了离心作用和径向流动,使中心液体向外迁移并形成自由表面涡结构。槽内液面表现为中心区域

高度降低、近壁区域升高的变化趋势^[24],与 Deshpande 等^[25]研究结果一致。图 3(b)进一步表明,随着转速升高,桨叶附近涡量增强,高涡量区域由桨叶附近逐渐向外扩展,说明桨叶对流体的剪切和扰动作用不断增强。

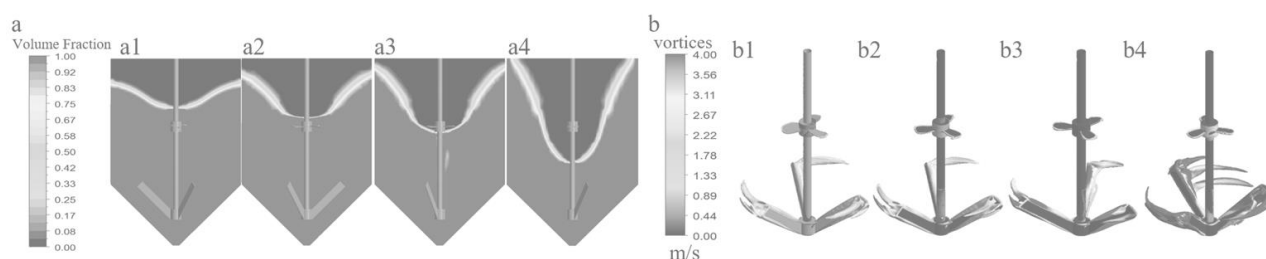


图3 搅拌槽内不同转速下气液界面分布与桨叶附近涡量分布:(a)气液相界面分布;(b)桨叶附近涡量分布

Fig. 3 Distribution of the gas - liquid interface and vorticity field near the impeller under different rotational speeds in the stirred tank, (a) gas - liquid interface distribution; (b) vorticity distribution around the impeller region.

本文采用示踪剂浓度变化评价搅拌槽混合过程,并以示踪剂浓度达到稳定状态所需时间定义混匀时间。在槽内选取 6 个代表性监测点,包括桨叶区、近壁区、液面附近及主体循环区。当各点浓度变化率小于 5% 且保持稳定时,认为达到混匀状态。图 4(a)展示了不同转速下示踪剂浓度变化。当转速为 90 r/min 时,浓度上升缓慢,混匀时间较长;随着转速提高至 120 r/min 和 150 r/min,浓度变化速率明显加快,表明示踪剂传递与扩散能力增强。这是由于转速增加提高了桨叶动量输入,促进流场循环形成,加快示踪剂扩散混合。图 5(b)表明,混匀时间随转速增加逐渐缩短,二者呈负相关关系,其中 210 r/min 工况下混匀时间最短,说明提高转速可有效强化混合过程。

3.2 桨叶结构对气液两相搅拌效果的影响

为考察桨叶结构对混合性能的影响,对不同桨叶结构下的混合过程进行定量评估。图 5 给出了不同结构参数下示踪剂浓度随搅拌时间的变化曲线及对应的混匀时间统计结果。由图(a)可以看出,当双桨间距为 180 mm 时,示踪剂浓度上升最快,达到稳定状态所需时间明显小于其他间距条件,表明该间距下体系混合效率最高。对于上桨直径,300 mm 与 400 mm 工况下的示踪剂浓度变化曲线基本重合,均表现出快速趋稳的特征,而 200 mm 工况下浓度上升相对滞后,说明过小的桨叶直径不利于混合过程强化,而直径增大到 300 mm 后,强化效果趋于饱和。下桨倾角对混合性能的影响同样显著,其中 60° 工况下示踪剂浓度曲线上升速率最高,混匀过程最快达到稳定状态。图 5(b)所示的混匀时间统计结果

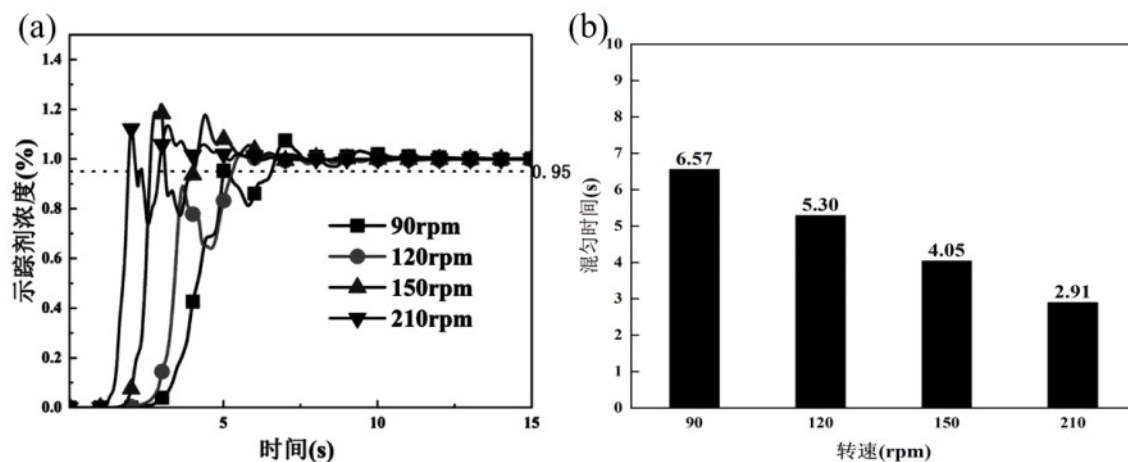


图4 不同桨叶转速下示踪剂浓度随搅拌时间的变化及混匀时间:(a)不同桨叶转速下示踪剂浓度随搅拌时间的变化;(b)不同桨叶转速下示踪剂的混匀时间

Fig. 4 Tracer Concentration Curves and Mixing Times at Different Impeller Speeds: (a) Tracer Concentration vs. Mixing Time at Different Impeller Speeds, (b) Mixing Time at Different Impeller Speeds

进一步验证了上述规律。当双桨间距为180 mm时,混匀时间最短,为5.93 s。当上桨直径300 mm和400 mm时,混匀时间差异较小。综合考虑混合性能

与能耗因素,300 mm为上桨叶的最优直径。对于下桨倾角,60°工况下的混匀时间仅为4.45 s,表明该结构参数在促进混合方面具有更明显的优势。

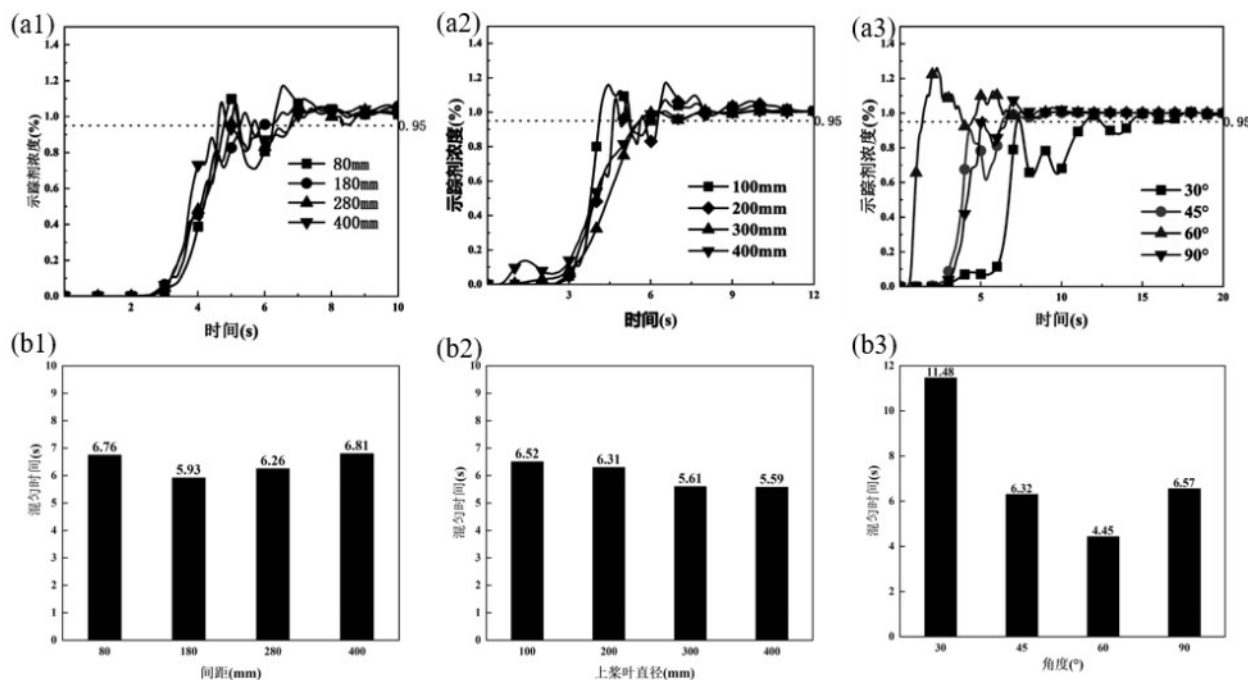


图5 不同工况对示踪剂混匀时间的影响:(a)浓度时间曲线;(b)混匀时间

Fig. 5 Influence of Different Operating Conditions on Tracer Mixing Time: (a) Concentration-Time Curve, (b) Mixing Time

3.3 最优参数组合的确定与验证

基于单因素分析结果,采用多参数协同优化对操作参数与桨叶结构进行优化,获得最优参数组合:桨叶转速210 r/min、双桨间距180 mm、上桨直径300 mm、下桨倾角60°。图6展示了该参数组合下的示踪剂浓度变化及混匀时间。结果表明,该优化

方案混匀效率更高,混匀时间仅为2.58 s,低于单因素优化结果。进一步分析发现,最优参数组合通过桨叶转速、双桨间距、上桨直径和下桨倾角的协同作用形成稳定螺旋上升流场。其中,较高转速增强了动量输入,提高循环强度和湍动扩散能力,表明多参数协同优化比单因素优化更有利于提升混合

性能。

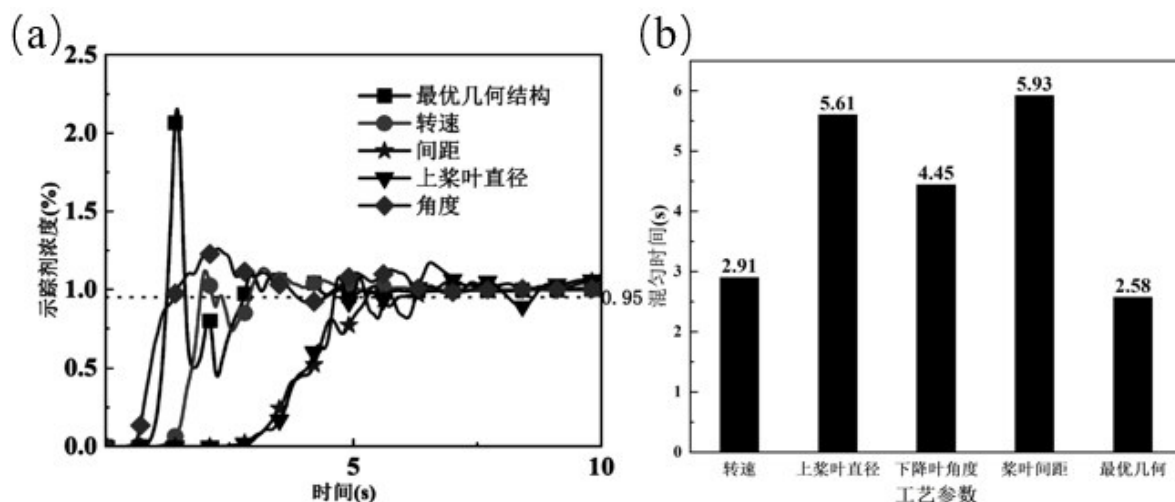


图6 多参数协同优化与单因素优化的混合性能对比:(a)浓度-时间曲线;(b)混合时间

Fig. 6 Comparison of Mixing Performance between Multi-Parameter Synergistic Optimization and Single-Factor Optimization: (a) Concentration-Time Curve, (b) Mixing Time

3.4 气液固三相搅拌的研究

本研究采用VOF-DPM耦合模型对硬质合金料浆颗粒输运过程进行工程等效模拟,分析颗粒分布特征与流场结构的关系。如图7(a)所示,优化结构下颗粒体积分数沿槽高分布更加均匀,轴向浓度梯度降低,表明该结构有利于颗粒整体悬浮。相比之

下,非优化工况下颗粒在底部明显富集,顶部浓度较低,表现出一定沉降和分布不均现象。该结果与纯液相模拟预测的局部低速区和混合不足区域相对应,说明优化结构在抑制颗粒沉积和促进均匀悬浮方面具有优势。

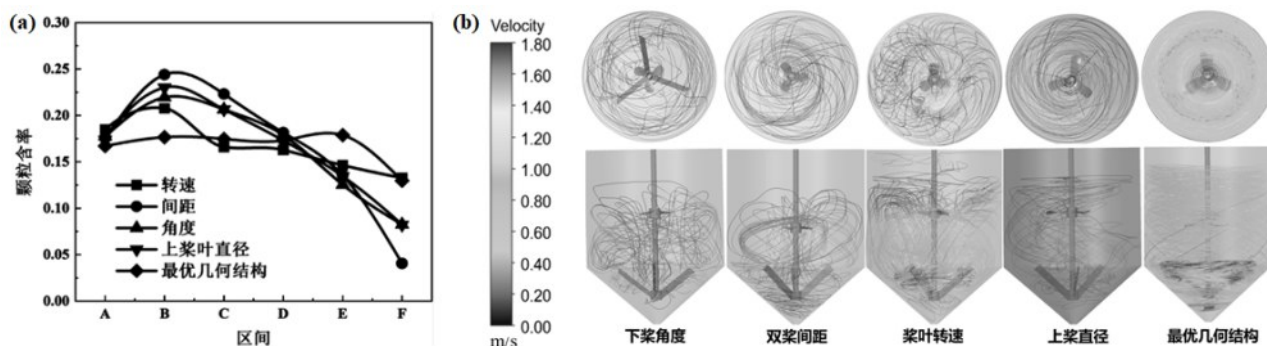


图7(a) 不同工况下颗粒在各区间的占比;(b)单个最优参数和整体最优参数下的流线云图

Fig. 7 (a) Particle Proportion in Each Zone under Different Operating Conditions; (b) Streamline Contours under Individually Optimized Parameters and Globally Optimized Parameters

图7(b)所示流线分布进一步揭示了不同参数下的流动差异。非优化工况下,流线存在局部回流和分布紊乱现象,表明流场组织性较差、能量传递效率较低。相比之下,优化结构下形成连续稳定的螺旋上升流动,可引导颗粒由槽底向液面输运,并沿壁面回流至底部,形成高效循环。该流场结构能够促进颗粒悬浮和流体循环,削弱底部沉积区、近壁低速区及桨叶间循环不足区域,从而提高颗粒分

布均匀性和混合效率。该结果与Ge等^[26]关于双层桨叶增强流体循环、降低颗粒沉积的研究结论一致。

3.5 最优参数试验验证

本研究在工业现场开展新旧搅拌工艺对比试验,搅拌装置如图8(a)和(b)所示。选取两种不同牌号混合料浆A和B进行验证试验。优化前工艺参数为上桨叶直径200 mm、下桨倾角90°、双桨间距

500 mm、转速 90 r/min;优化后调整为 300 mm、60°、180 mm 和 210 r/min。搅拌过程中每隔 20 min 从出口取样,测定料浆密度,通过密度变化评价优化方案对混合均匀性的改善效果。图 8(c)和(d)表明,原工艺下料浆密度波动较大并呈下降趋势,存在颗

粒沉降和分布不均现象;优化工艺下料浆密度保持稳定,波动幅度减小,且更接近目标值。结果表明,基于数值模拟的优化方案能够提高料浆混合均匀性和稳定性,与模拟结果规律一致,验证了该方法在工业料浆混合过程优化中的适用性。

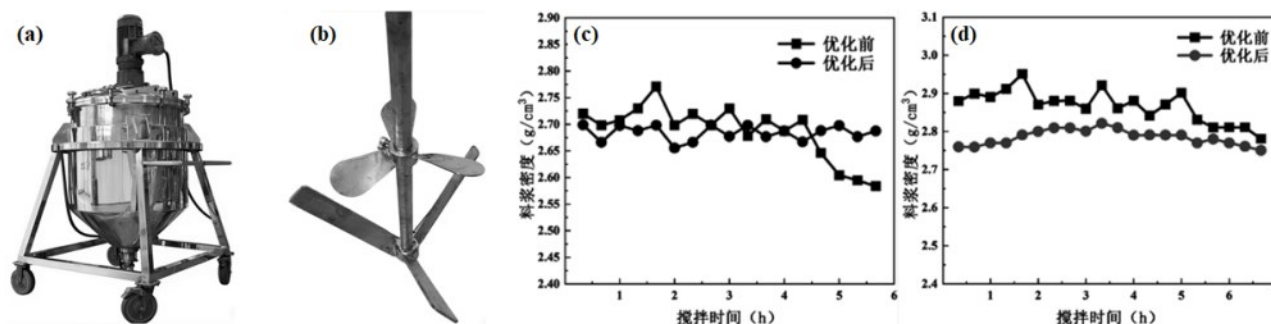


图8 (a)搅拌槽;(b)搅拌桨叶;(c)-(d)优化前后料浆A和B的密度随时间的变化

Fig. 8 (a) Stirred tank; (b) Mixing impeller; (c), (d) Density variation with time for slurry A and slurry B before and after optimization

4 结论

本研究基于VOF-DPM耦合数值模拟方法,对硬质合金料浆搅拌过程的多相流动与混合机制进行了系统研究,并通过工厂试验对模拟优化结果进行了验证。本研究适用于工程参数优化,主要研究结论如下:

(1)在纯液相体系下,通过正交实验与单因素分析确定了最优参数组合:桨叶转速 210 r/min、双桨间距 180 mm、上桨直径 300 mm、下桨倾角 60°。该组合在搅拌槽内产生了稳定连贯的螺旋上升流场,有效消除了流动死区,显著缩短了混匀时间,为后续多相流研究提供了优化的流场基础。

(2)在最优几何结构基础上引入固相颗粒开展气液固三相模拟,结果表明,该最优参数组合能够促进颗粒在湍流场中的持续稳定悬浮,形成了自底部至顶部的有效循环流动,相比单一参数优化工况,多参数协同优化下颗粒空间分布表现出更好的均匀性。这说明多参数协同作用能够在宏观循环与微观扩散之间形成最优匹配,有效抑制颗粒沉降,有助于颗粒保持均匀悬浮状态。

(3)将数值模拟确定的优化方案应用于实际工业生产,开展了多批次料浆的现场对比实验。结果表明,优化后的搅拌参数使料浆密度波动幅度显著降低,批次稳定性明显提升,工厂试验结果与模拟预测趋势一致。这验证了VOF-DPM耦合模型在指导复杂工业混合问题中的可靠性与工程适用性,为

硬质合金料浆搅拌工艺的科学设计与精准调控提供了有效技术支撑。

参考文献

- [1] Wachowicz J, Bałaga Z, Podziewski P. Wear characteristics of WC-Co cutting tools obtained by the U-FAST method during particleboard milling[J]. Materials, 2025, **18**(16): 3907.
- [2] Geng Z J, Liu F, Wang Y P. Wear resistance of WC-10Co-4Cr cemented carbide coatings prepared by atmospheric plasma spraying and laser cladding[J]. Metals, 2025, **15**(3): 309.
- [3] Manohar G, Dey A, Pandey M K, et al. Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review[J]. AIP Conference Proceedings, 2018, **1952**(1): 020041.
- [4] Norgren S, García J, Blomqvist A, et al. Trends in the P/M hard metal industry[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, **48**: 31-45.
- [5] Seeker U, Exner H E. Exaggerated grain growth in cemented carbides due to inhomogeneous milling[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1987, **70**(2): C31-C32.
- [6] Zhao Z, Ni X, Hu Z, et al. A short review of advancements in additive manufacturing of cemented carbides[J]. Crystals, 2025, **15**(2): 146.
- [7] Pellán M, Lay S, Missiaen JM, et al. Effect of binder composition on WC grain growth in cemented carbides[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, **98**(11): 3596-3601.
- [8] Jafari R, Tanguy P A, Chaouki J. Experimental investigation on solid dispersion, power consumption and scale-up in moderate to dense solid - liquid suspensions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, **90**(2): 201-212.
- [9] Joshi JB, Nere N K, Rane C V, et al. CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I: Radial flow impellers[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2011, **89**(1): 23-37.
- [10] Soares L L, Biserni C, da Rosa Costa R, et al. Numerical study

- and geometric investigation of the influence of rectangular baffles over the mixture of turbulent flows into stirred tanks[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(10): 4827.
- [11] Belhanafi A, Baki T. Numerical study of bottom shape effect on the mixing for stirred tank[J]. Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering, 2023, **15**: 86–97.
- [12] Yao Y, Liu Z, Zheng G, et al. Intensification of solid – liquid suspension performance in an elliptical uncovered unbaffled stirred tank[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, **62**(12): 5315–5325.
- [13] Zhang J, Li H, Yuan J, et al. Hydrodynamic characteristics of a stirred tank with self-priming jet impeller[J]. Chemical Engineering & Technology, 2023, **46**(4): 776–784.
- [14] Tamburini A, Brucato A, Ciofalo M, et al. CFD simulations of early-to full turbulent conditions in unbaffled and baffled vessel stirred by a Rushton turbine[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, **171**: 36–47.
- [15] Ge W, Chang Q, Li C, et al. Multiscale structures in particle–fluid systems: Characterization, modeling, and simulation[J]. Chemical Engineering Science, 2019, **198**: 198–223.
- [16] Rosseburg A, Fitschen J, Wutz J, et al. Hydrodynamic inhomogeneities in large scale stirred tanks – Influence on mixing time[J]. Chemical Engineering Science, 2018, **188**: 208–220.
- [17] Li M, Zhang L, Li C, et al. Discrete element method–volume of fluid simulation of drawdown and dispersion for floating particles in stirred tanks: influences of impeller parameters[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, **63**(23): 10353–10372.
- [18] Adachi N, Hashiba M, Sakurada O. Rheological properties of slurries prepared using a planetary mixer[J]. Ceramics International, 2004, **30**(6): 1055–1058.
- [19] Raihanuzzaman R M, Xie Z, Hong S J, et al. Powder refinement, consolidation and mechanical properties of cemented carbides–An overview[J]. Powder Technology, 2014, **261**: 1–13.
- [20] Zhao S M, Stoevesandt B, Peinke J. On an explicit method for pre-estimate flux for incompressible flow simulation[J]. Computers & Fluids, 2024, **285**: 106458.
- [21] Di Venuta I, Boghi A, Angelino M, et al. Passive scalar diffusion in three-dimensional turbulent rectangular free jets with numerical evaluation of turbulent Prandtl/Schmidt number[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, **95**: 106–115.
- [22] Chen H T, Li Y, Xiong Y D, et al. Effect of particle holdup on bubble formation in suspension medium by VOF–DPM simulation [J]. Granular Matter, 2022, **24**(4): 120.
- [23] Kang Q Q, He D P, Zhao N, et al. Hydrodynamics in unbaffled liquid–solid stirred tanks with free surface studied by DEM–VOF method[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **386**: 122846.
- [24] Busciglio A, Caputo G, Scargiali F. Free-surface shape in unbaffled stirred vessels: Experimental study *via* digital image analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2013, **104**: 868–880.
- [25] Deshpande S S, Kar K K, Walker J, et al. An experimental and computational investigation of vortex formation in an unbaffled stirred tank[J]. Chemical Engineering Science, 2017, **168**: 495–506.
- [26] Ge M, Zheng G A. Fluid – solid mixing transfer mechanism and flow patterns of the double-layered impeller stirring tank by the CFD–DEM method[J]. Energies, 2024, **17**(7): 1513.