

桨叶复合结构对充填料浆均质化的影响研究*

石勇^{1,2}, 郑伯坤^{1,2}, 段弘宇^{1,2}, 黄腾龙^{1,2}, 彭亮^{1,2}, 赖伟^{1,2}, 廖舟³

- 1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012;
- 2.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410012;
- 3.湖南有色金属控股集团有限公司, 湖南长沙 410015)

摘要:为实现料浆均质化制备,借助三维建模软件建立涡轮式搅拌机模型,运用流体软件开展了不同桨叶结构对充填料浆制备的影响研究,揭示了料浆在不同桨叶结构扰动下的运动状态及分布情况,分析了不同桨叶结构下料浆的搅拌效果。结果表明:不同角度单桨叶搅拌桶内都会产生单个涡流,对形成均质化料浆有一定的扰动作用;与45°和90°桨叶相比,60°桨叶兼顾径向搅拌能力和轴向输送能力,不仅能有效促进团聚体的分离,还能促进料浆整体循环流动;上下正反斜60°复合搅拌叶片在搅拌过程中形成了独有的上下双涡流,有极强的剪切和轴向输送能力,相比于60°单桨叶,其搅拌效果显著增强,加快了料浆的均质化;虽然60°复合桨叶正常工作所需的功率是60°单桨叶的两倍,但其整体的搅拌效果明显更优。

关键词:桨叶复合结构;高效活化搅拌;搅拌特性;料浆均质化;数值模拟

中图分类号:TD803

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)06-0149-07

0 引言

目前,随着国民经济的快速发展,矿山开发与环境保护之间的矛盾日益尖锐,矿产资源的开发面临着越来越严苛的要求,充填采矿法因其绿色、高效、安全等特点广泛应用于矿山开采中,且占比正逐年增加。膏体充填技术相较于普通胶结充填具有不泌水、不分层、不离析、强度高和尾砂利用率高等特点,在地下矿山开采中备受青睐^[1]。在全尾砂膏体充填工艺中,主要技术包括尾砂浓密、搅拌、管道输送,目前大多数研究都着眼于尾砂浓密效果以及输送管道的磨损^[2]。但搅拌作为充填工艺的中间环节,搅拌效果的优劣直接影响料浆的输送性能^[3-4]以及井下充填体的力学性能^[5],且搅拌过程是极其复杂且不可控的,不同尺度、不同种类的颗粒在桨叶的搅动下

相互碰撞、对流、挤压,发生一系列水化反应。桨叶作为搅拌设备中主要部件起到向料浆提供能量的作用,是颗粒分布均匀化以及物料混合均质化的“推进器”,加速料浆流动、颗粒分布以及物料之间水化反应,对搅拌过程及效果优劣有着决定性的导向^[6]。

随着流体计算软件的飞速发展,国内外已有不少学者通过CFD流体计算软件探究桨叶结构对搅拌效果的影响^[7-9]。时全等^[10]开展了不同转速、长度和数量的桨叶对立式混合机内部流场的影响研究。寇云鹏等^[11]对3种常见搅拌机的桨叶搅拌作用进行数值模拟分析,确定了在最佳转速90 r/min下,推进式桨叶的搅拌效果最佳。赵顺等^[12]通过加载试验来研究梯形搅拌桨叶与对中型搅拌桨叶两种卧式搅拌桨叶的承载能力和搅拌效果,结果显示梯形搅拌桨叶产生的阻力更小,搅拌效果更好。张晓雨等^[13]基于数值模拟开展了不同桨叶的固液流动特性研究。上述学者的研究都局限于单叶片作用下搅拌效果变量优化,而对于组合式桨叶搅拌作用下多尺度物料搅拌效果及流变特性的研究较少。本文借助三维建模软件建立涡轮式搅拌机模型,运用流体软件开展不同桨叶结构对充填料浆制备的影响研究,揭示了复合桨叶型搅拌桶料浆均质化成型机理效果,并使用示踪粒子追踪技术进行了验证,同时提出了挡板对于搅拌槽的影响^[14],多层桨叶在搅拌槽内的混合效果^[15-17]及搅拌类型对固液流动特性影响的数值分析^[18]。

1 搅拌桶模型与参数设定

1.1 搅拌装置物理结构

计算采用工业混凝土搅拌桶模型结构,模型尺

* 收稿日期:2024-04-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904003,2023YFC2907203);湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4057)。

作者简介:石勇(1996—),男,江西南昌人,硕士,助理工程师,主要从事矿山技术研究工作,E-mail:stone3511_csu@126.com。

寸与实际尺寸比例为 1 : 1, 搅拌桶内径为 $\Phi 3000$ mm, 高度为 3000 mm, 桶壁安装 4 块相同尺寸的挡流板, 其高度为 2400 mm, 宽度为 300 mm, 离桶底高 300 mm, 内部料浆液位高度为 2400 mm。

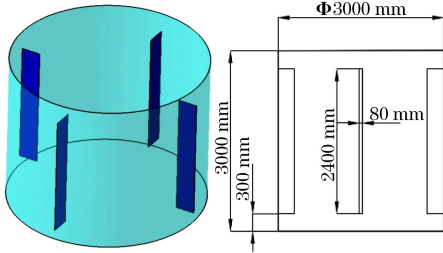


图 1 搅拌机结构
Fig.1 Mixer structure

桨叶采用涡轮叶轮式, 转动轴直径为 75 mm, 桨叶直径为 600 mm, 呈扇形, 转速为 300 r/min。为了探究桨叶不同安装角度的搅拌效果, 桨叶安装倾角分别为 45° 、 60° 和 90° , 如图 2 所示。

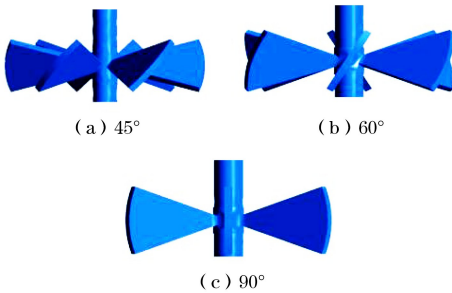


图 2 不同角度的桨叶模型
Fig.2 Bolade model at different angles

1.2 数学模型

流体计算求解包含控制过程, 并符合质量、功率、动量 3 个基本守恒定律。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为微元流体的密度; u 、 v 、 w 分别为速度矢量 u 在直角坐标系 x 、 y 、 z 方向上的分量。当流体介质不可压缩时, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ 。

N-S 方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v u) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w u) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yy} 、 τ_{zy} 、 τ_{zz} 为黏性应力; F_x 、 F_y 、 F_z 为微单元上的力。

1.3 网格处理

搅拌桶采用非结构化网格进行划分, 同时结合桨叶结构特点对桨叶周围旋转区域采用较低增长率网格划分来提高周围流域计算精度, 对外部流场扩散区域采用较高增长率网格划分来提高计算精度。整体网格划分结果如图 3 所示。

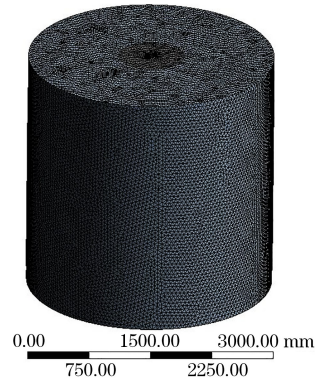


图 3 模型网格
Fig.3 Model mesh

2 不同安装角度结果对比分析

2.1 速度矢量分析

搅拌混合过程主要是电机带动搅拌轴和搅拌桨叶, 通过桨叶带动周围物料运动, 增加颗粒间碰撞、对流次数, 形成有一定规律的流场。速度矢量作为表征流场特征的方式之一, 可以用来直观展示流场的速度分布情况。通过 z 轴选取垂直于 xy 面的平面作为速度矢量的观察面, 如图 4 所示。图 4(a) 为单个 45° 正斜桨叶扰动效果, 在搅拌桶中部形成了单涡流模式(箭头所指), 在搅拌桶上部(方框区域)出现了低扰动区。图 4(b) 为 60° 桨叶扰动效果, 与 45° 桨叶扰动效果相似, 出现了单涡流模式以及上部低扰动区。图 4(c) 为 90° 桨叶扰动效果, 在搅拌桶内底部形成了单涡流模式, 低扰动区出现在桨叶下部。

通过对截面上的速度矢量分析发现, 不同角度的桨叶有着非常明显的径向排液能力, 且在搅拌桶内部都会形成一个涡流。通过对比图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 的流场情况发现, 在 45° 和 60° 桨叶搅动下, 靠近桨叶上部出现料浆加速情况; 而在 90° 桨叶搅动下, 靠近桨叶下部处出现料浆加速情况, 不利于内部料浆轴向输送, 整体循环流动减弱。同时, 对比

三者形成的涡流大小、形状及位置可知,相较于 45° 和 60° 桨叶搅动形成的涡流, 90° 桨叶搅动形成的涡流大小远小于前两者,且涡流位置靠近搅拌桶底部,使得搅拌桶内料浆形成上下断层,不利于物料的均质性、流态化。

对比图4(a)和图4(b)发现,在 45° 桨叶搅拌桶内,上部料浆流动速度以及流动情况都低于 60° 桨叶。桨叶的角度越大,径向排液能力越强,桨叶的剪切破坏能力也有所提高,有利于打散胶凝材料颗粒的团聚体^[19],增加颗粒间碰撞次数,加速内部料浆的均质化。

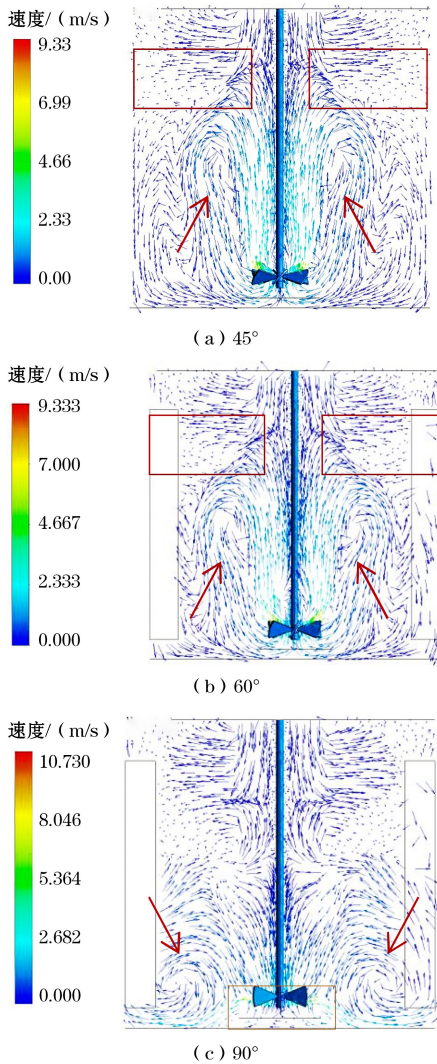


图4 不同桨叶角度下截面速度矢量

Fig.4 Sectional velocity vectors under different blade angles

2.2 浓度场分析

浓度场作为获取流场信息的方法之一,有助于更好地了解搅拌过程中介质的分布情况。图5为不同桨叶角度下搅拌桶内质量浓度分布情况。结合速

度矢量图发现, 45° 桨叶搅动所形成的涡流与 60° 桨叶形成的涡流大小、形状以及位置都相似,造成内部料浆循环流动情况相同,靠近桶壁附近料浆自下而上呈阶梯分布。但由于 60° 桨叶的角度较大,其径向扰动能力强,加速了料浆的径向流动,更有利于径向扩散分布,避免出现图5(a)中桨叶上下料浆的浓度差。

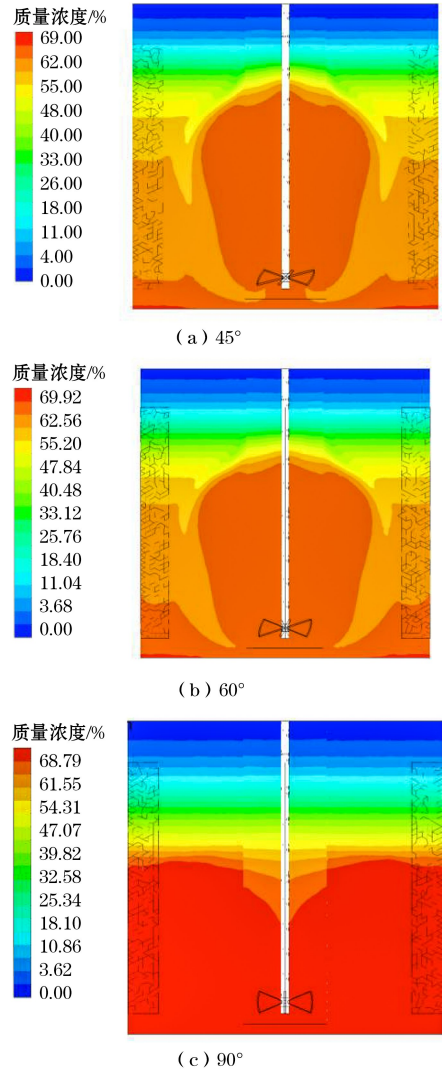


图5 不同桨叶角度下截面质量浓度分布

Fig.5 Cross-section mass concentration distribution under different blade angles

与前二者浓度场相反, 90° 桨叶搅拌桶内料浆浓度在搅拌轴中上部呈阶梯分布,相比于 45° 和 60° 桨叶, 90° 桨叶有着极强的径向排液能力和极弱的轴向输送能力,桨叶无法推动料浆流体向上加速运动,导致料浆循环只存在于搅拌桶的中下部,不利于料浆的整体循环流动以及料浆间运动的传递。

2.3 功率对比

搅拌功率是评价设备优劣的重要参数之一,主要用于搅拌设备的选型以及设计,通常要小于实际消耗的功率,通过 Fluent 软件得到搅拌过程中不同桨叶角度正常工作需要的功率,如图 6 所示。

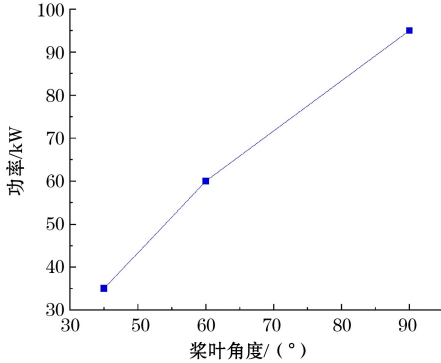


图 6 不同桨叶角度的搅拌功率

Fig.6 Stirring power of different blade angles

由图 6 可知,同一桨叶转速下,45°、60°、90°桨叶正常运行的功率分别为 35 kW、60 kW、95 kW。搅拌功率的大小与桨叶角度成正比,随着桨叶角度的增大,桨叶与料浆接触的有效面积增大,受到的剪切力增加,桨叶单位面积上排放量增加,导致搅拌功率上升。

2.4 小结

在搅拌混合过程中,尽管 90°桨叶径向扰动能力大,剪切破膜能力强,有利于团聚体的打散,但其轴向输送能力弱,导致料浆循环只发生在设备底部,且对流体轴向加速作用较弱,造成上下料浆运动出现断层,在桨叶下部出现“死区”,设备整体搅拌效果较差。同时,在相同搅拌转速下,90°桨叶与料浆有效接触面积最大,消耗的功率也最大,因此不推荐使用 90°桨叶。对比 45°和 60°桨叶,60°桨叶虽然消耗的功率较大,但其产生的流动以径向流为主导,使得在径向上浓度分布均匀,有助于料浆的均质化,且较大的剪切作用力使得流向桶壁的料浆无法接触桶壁后返回,而是向底层或上层分流,有利于设备内部料浆的整体循环,加速颗粒间相互运动、碰撞,加速水化反应,使得料浆更加均质化,提高搅拌效率。综合搅拌效果和功率消耗,选择 60°作为复合桨叶的角度。

3 单桨叶和复合桨叶对比

3.1 速度矢量对比

经对比分析,在相同的条件下,桨叶角度为 60°

时搅拌效果最佳。基于此,将桨叶角度设定为 60°,设计了复合搅拌叶片,复合桨叶采取上桨叶为六叶反斜桨叶,下桨叶为六叶正斜桨叶,复合桨叶速度矢量分布如图 7 所示。

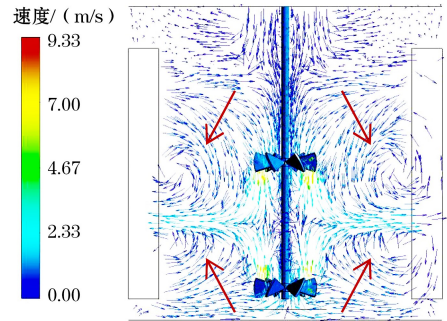


图 7 复合桨叶速度矢量分布

Fig.7 Velocity vectors distribution of composite blade

由图 7 可知,在复合桨叶的扰动下,搅拌桶内形成了上下双涡流模式(箭头所指),在涡流交界处,料浆速度沿涡流切线方向明显加快。结合图 4(b)分析发现,60°单桨叶由于仅有一个桨叶,轴向流动较为简单,无明显的上压或下压效应,没有复杂的高速循环区域且存在更多的低效搅拌区,缺乏对料浆的多向扰动。60°复合桨叶的复合结构使得轴向流动更为激烈和复杂,经上桨叶旋转产生的吸引力促使料浆向下运动,同时下桨叶的旋转对上下来料浆进行加速,使得浆料运动更加激烈^[19]。在桨叶间形成的高速循环区域产生两个涡流,增加了料浆间相互干扰及交互作用,让浆料运动、碰撞得更激烈。

60°复合桨叶和 60°单桨叶在流场动力学上存在显著差异,复合桨叶提供更高的混合效率和更复杂的流动模式,尤其是在需要高效搅拌的应用中。而单桨叶搅动下料浆流动极其简单,不利于料浆的混合。

3.2 浓度场对比

图 8 为 60°单桨叶和 60°复合桨叶搅拌桶内质量浓度分布对比结果,其中黑色虚线框中是低混合效率区。60°单桨叶简单的扰动作用意味着存在明显的“死区”或低混合效率区,如图 8(a)中黑色虚线框区域,在长期搅拌过程中,由于该区域受到的扰动作用弱,料浆在此处堆积,随着搅拌桶内料浆不断运动,堆积现象越发明显,最终出现板结现象。而相较于单桨叶扰动形成的单料浆循环模式,在复合桨叶搅拌桶中,由于桨叶复杂的扰动作用,靠近桶壁处质量浓度没有出现自上而下阶梯式的浓度差变化,且

内部料浆质量浓度差变化较小,在搅拌桶底出现的搅拌“死区”较少。

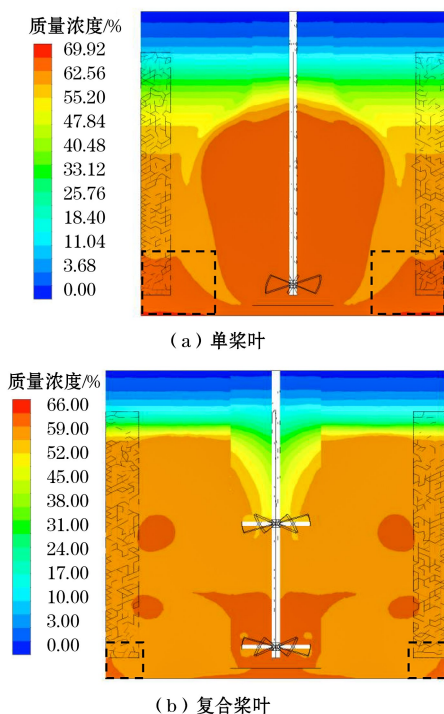


图8 单桨叶和复合桨叶的质量浓度分布

Fig.8 Comparison of mass concentration distribution between single blade and composite blade

60°复合桨叶具有相对复杂的结构,产生更多的流动模式,物料在复合桨叶下会经历多个流动路径,从而更好地分散物料,提高混合均匀性。此外,复合桨叶能在较短的时间内达到所需的混合效果。综上所述,相较于单桨叶,复合桨叶混合效果更佳。

单桨叶和复合桨叶的功率对比如图9所示。由图9可知,复合桨叶正常工作所需的功率是单桨叶的两倍,但实际生产与计算机模拟不同,二者功率的优劣评判要综合实际工况^[20]。在实际生产过程中,60°单桨叶桶内形成的“死区”随着时间的增加而堆积,逐步形成难剪切的板结区,从而增加桨叶运行的阻力,导致桨叶处于非正常运行范围内,提高运行功率。60°复合桨叶由于其复杂的结构,引入了更高的流体阻力,从而需要更高的功率,但实现了双涡流循环,增加了料浆运动的无序性,减少了“死区”的范围,降低了搅拌桶底板结的可能性,避免了非正常工况。

因此,复合桨叶有着较强的剪切效果以及扰动能力,同时能避免非正常工况,综合混合效果和经济性,在实际生产中,60°复合桨叶要优于60°单桨叶。

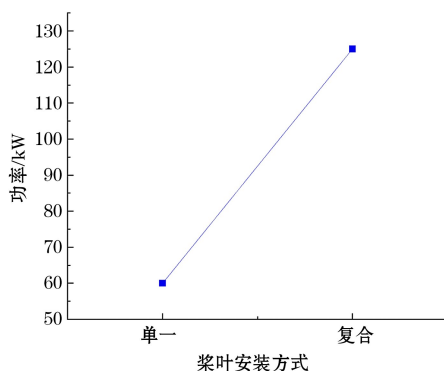


图9 单桨叶和复合桨叶的功率对比

Fig.9 Power comparison of single blade and composite blade

4 示踪粒子分布

在混合流体动态研究中,示踪粒子追踪技术常被视为一个关键工具,其作用主要用于探讨复合桨叶搅拌中示踪粒子的运动行为及其对混合效果的影响。图10为不同搅拌时间下复合桨叶搅拌桶内部料浆颗粒的分布情况。

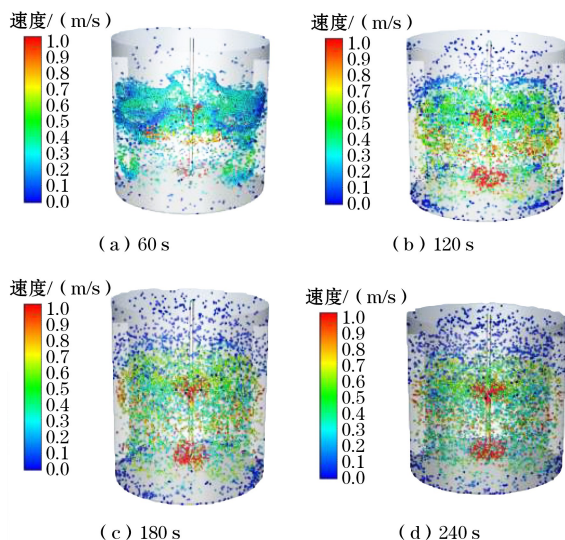


图10 不同搅拌时间下料浆颗粒分布情况

Fig.10 Condition of slurry particles distribution under different stirring time

由图10(a)可知,在混合初始阶段,示踪粒子在设备的特定区域存在明显的局部集中。然而,这种分布在复合桨叶的干预下迅速发生变化,复合桨叶产生的复杂流动模式导致粒子从一个区域迅速转移到另一个区域。在靠近桨叶附近,粒子表现出一种吸入并随后被迅速排出的动态,这种特定的流动现象产生了明显的涡流模式,尤其在桨叶、桶壁及上下桨叶间,这种模式更为明显。

此外,示踪粒子也显示了复合浆叶在轴向上产生的流动,这种轴向流动归因于浆叶的上下压力效应,其确保了容器内部流体的均匀混合,且当混合过程达到一定时间后,示踪粒子在容器内呈现出均匀分布,这与复合浆叶速度矢量分布及质量浓度分布结果高度一致。

5 结论

不同的搅拌浆叶角度及浆叶层数对搅拌的混合效果不同,为了实现料浆均质化制备,通过建立不同浆叶结构的搅拌模型,开展单浆叶和复合浆叶搅拌效果研究,得到如下结论。

(1) 在不同角度的浆叶扰动下,搅拌桶内形成涡轮模式,相比于底部涡流,处于中部的涡流更有利于料浆的整体循环。

(2) 随着浆叶角度的增加,浆叶的剪切能力增强,而轴向导流能力减弱。相较于 45° 和 90° 浆叶, 60° 浆叶兼顾良好的径向剪切能力及轴向导流能力,不仅能有效促进团聚体的分离,还能加速料浆的轴向流动,促进整体循环流动。

(3) 相比于单浆叶搅拌桶,复合浆叶搅拌桶内形成的双循环涡流使搅拌桶内料浆流动得到了明显的提高,同时降低了搅拌桶底部边缘地区产生“死区”的可能性。

(4) 60° 复合浆叶正常工作所需的功率是 60° 单浆叶的两倍,但其整体的搅拌效果明显更优。

参考文献(References):

- [1] 杨柳华,王洪江,吴爱祥,等.全尾砂膏体搅拌技术现状及发展趋势[J].金属矿山,2016(7):34-41.
YANG Lihua, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Status and development tendency of the full-tailings paste mixing technology[J]. Metal Mine, 2016(7):34-41.
- [2] 王小林,王洪江,吴爱祥,等.全尾砂膏体管道输送壁面滑移减阻模型[J].中国有色金属学报,2020,30(9):2201-2205.
WANG Xiaolin, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Wall slip drag reduction model of full tailings paste in pipeline transportation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020,30(9):2201-2205.
- [3] 刘晓辉.膏体流变行为及其管流阻力特性研究[D].北京:北京科技大学,2015.
LIU Xiaohui. Study on rheological behavior and pipe flow resistance of paste backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [4] 巴蕾.粗骨料充填料浆输送管道磨损机理以及耐磨材料研究[D].北京:北京科技大学,2023.

- BA Lei. Research on wear mechanism and wear resistant material of coarse aggregate filling slurry in pipeline transportation [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [5] 瞿亮,陈得信,杨晓炳,等.金川矿山废石-铜渣尾砂混合骨料充填特性试验研究[J].化工矿物与加工,2018,47(3):51-54.
QU Liang, CHEN Dexin, YANG Xiaobing, et al. Test on filling characteristics of mixed aggregate of waste rock and copper slag tailings in Jinchuan Mine[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018,47(3):51-54.
- [6] 杨柳华.膏体搅拌过程流变特性及剪切作用机制研究[D].北京:北京科技大学,2020.
YANG Lihua. Research on the rheological characteristics and the mechanism of shear action during paste mixing[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [7] 罗松,周启兴,陈紫微,等.六折叶浆搅拌槽流场特性分析[J].南方农机,2021,52(16):23-25.
LUO Song, ZHOU Qixing, CHEN Ziwei, et al. Analysis of flow field characteristics in stirred tank with 6-pitched-blade turbine impeller [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021,52(16):23-25.
- [8] 孙欢欢,石勇,赖伟,等.全尾砂高效活化搅拌技术及均质化膏体充填特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):45-50.
SUN Huanhuan, SHI Yong, LAI Wei, et al. Study on efficient activation stirring technology of full tailings and filling characteristics of homogenized paste [J]. Mining Research and Development, 2023,43(8):45-50.
- [9] CHEN S J, CEN S D, LIU R L, et al. Microwave reactor with combined rigid and flexible stirring paddles for improving fluid heating uniformity in soft manganese ore leaching processes [J]. ACS Omega, 2023, 8 (45): 42367-42378.
- [10] 时全,吴璇,申琳,等.不同搅拌桨设计对立式饲料混合机内流场的影响[J].南方农机,2023,54(15):1-5.
SHI Quan, WU Xuan, SHEN Lin, et al. The influence of different impeller designs on the flow field inside a vertical feed mixer [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023,54(15):1-5.
- [11] 寇云鹏,郑伯坤,栾黎明,等.充填料浆搅拌机的浆叶研究[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.
- [12] 赵顺,吴学前,陈旭锋,等.不同搅拌叶片对搅拌阻力影响的试验研究[J].装备制造技术,2018(1):44-47.
ZHAO Shun, WU Xueqian, CHEN Xufeng, et al. The reverse design of impeller based on reverse engineering [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(1):44-47.
- [13] 张晓雨,龙梅,孔德旭,等.浆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.
- [14] LIU P K, DIAO Z L, YANG X L, et al, Study on the mass transfer characteristics of gas and liquid phases in a three-layer combined paddle fermenter [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6):108791.
- [15] 罗璇,冯羽生,逢启寿.桨叶层数对导流筒搅拌槽内搅拌影响的数值模拟[J].*有色金属科学与工程*, 2023, 14(5):728-733.
- LUO Xuan, FENG Yusheng, PANG Qishou. Numerical simulation of the influence of blade layer number on the stirring characteristics in draft tube stirred tank [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2023, 14(5):728-733.
- [16] 梁瑛娜,高殿荣,拜亮.双层桨搅拌槽内层流流场与混合时间的数值模拟[J].*机械工程学报*, 2015, 51(16):185-195.
- LIANG Yingna, GAO Dianrong, Bai Liang. Numerical simulation of the laminar flow field and mixing time in stirred tank with double layer impeller [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(16):185-195.
- [17] TAKATA K, ITO H, KIKUCHI M, et al. Flow and mixing characteristics in a stirred tank with dual wide paddles. [J]. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 1999, 25(2):253-258.
- [18] 陈美辰.搅拌釜内液固非催化反应体系的动力学测定及颗粒悬浮的CFD模拟[D].上海:华东理工大学,2021.
- CHEN Meichen. Kinetics Determination of noncatalytic liquid-solid reaction system in stirred tank and CFD simulation of particle suspension[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021.
- [19] 赵悟,王博,赵利军,等.改善搅拌过程提高混凝土强度[J].*长安大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(1):148-153.
- ZHAO Wu, WANG Bo, ZHAO Lijun, et al. Improvion concrete strength based on the mixing process[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2015, 35(1):148-153.
- [20] 宣颖.粉体机械搅拌过程数值模拟及搅拌特性研究[D].常州:常州大学,2022.
- XUAN Ying. Numerical simulation and stirring characteristics of powder mechanical stirring process [D]. Changzhou:Changzhou University, 2022.

Effect of Blade Composite Structure on the Homogeneous of Filling Slurry

SHI Yong^{1,2}, ZHENG Bokun^{1,2}, DUAN Hongyu^{1,2}, HUANG Tenglong^{1,2}, PENG Liang^{1,2}, LAI Wei^{1,2}, LIAO Zhou³

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;

2.Hunan Provincial Engineering Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China;

3.Hunan Nonferrous Metals Holding Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410015, China)

Abstract: In order to realize the homogeneous preparation of slurry, a turbine mixer model was established with the help of three-dimensional modeling software. The influence of different blade structures on the preparation of filling slurry was studied by using fluid software. The motion state and distribution of slurry under the disturbance of different blade structures were revealed, and the stirring effect of slurry under different blade structures was analyzed. The results show that a single vortex will be generated in the mixing barrel of single blade at different angles, which has a certain disturbance effect on the formation of homogeneous slurry. Compared with 45° and 90° blades, the 60° blade has both radial stirring capacity and axial conveying capacity, which can not only effectively promote the separation of aggregates, but also promote the overall circulation flow of slurry. In the process of mixing, the up and down positive and negative oblique 60° composite blade formed a unique up and down double vortex, which had strong shear and axial conveying capacity. Compared with the 60° single blade, the stirring effect of 60° composite blade is significantly enhanced, and the homogenization of the slurry is accelerated. Although the power required for the normal operation of the 60° composite blade is twice that of the 60° single blade, its overall stirring effect is significantly better.

Key words: Blade composite structure, Efficient activation stirring, Stirring characteristics, Homogeneous of slurry, Numerical simulation