卧螺离心机螺旋叶片倾角对煤泥水分离特性 影响研究

周 栋,丛佩超*,李文彬

广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西 柳州

收稿日期: 2024年12月26日; 录用日期: 2025年1月18日; 发布日期: 2025年1月28日

摘要

煤炭是我国能源结构中的重要组成部分,在"绿色、智慧矿山"发展背景下,高效处理井下煤泥水已成 为矿山环保与资源利用的关键课题。卧螺离心机因其高效的固液分离性能被广泛应用于煤泥水处理领域。 为进一步提高分离效率,以矿用LW450型卧螺离心机为研究对象,重点探讨螺旋叶片倾角对分离性能的 影响。通过建立三维几何模型,采用CFD数值模拟结合实验验证的方法,系统分析不同螺旋叶片倾角(0°、 2°、4°、6°、8°)对固相回收率、动压分布和固相体积分布的作用规律。研究表明,螺旋叶片倾角(0°、 2°、4°、6°、8°)对固相回收率、动压分布和固相体积分布的作用规律。研究表明,螺旋叶片倾角对固相 回收率具有显著影响,呈现先上升后下降的趋势。倾角变化对转鼓柱段的动压分布影响较小,但对出渣 口动压分布的影响较大。当倾角为4°时,固相回收率达到最大值,同时在转鼓锥段形成较厚的固相沉积 层,且动压分布更加平稳,从而显著提升了分离性能。本研究为优化卧螺离心机的结构设计及煤泥水高 效处理提供了重要的理论依据和技术支持,对推动绿色矿山建设及资源可持续利用具有重要意义。

关键词

卧螺离心机,螺旋叶片倾角,煤泥水,固液分离

Study on Influence of Tilt Angle of Screw Blade of Decanter Centrifuge on Separation Characteristics of Slime Water

Dong Zhou, Peichao Cong*, Wenbin Li

College of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

Received: Dec. 26th, 2024; accepted: Jan. 18th, 2025; published: Jan. 28th, 2025

*通讯作者。

文章引用:周栋,丛佩超,李文彬. 卧螺离心机螺旋叶片倾角对煤泥水分离特性影响研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1146-1155. DOI: 10.12677/mos.2025.141104

Abstract

Coal is an important part of our country's energy structure. Under the background of "green and intelligent mine" development, efficient treatment of underground slime water has become a key issue of mine environmental protection and resource utilization. Decanter centrifuge is widely used in the field of slime water treatment because of its highly efficient solid-liquid separation performance. In order to further improve the separation efficiency, taking the mine LW450 decanter centrifuge as the research object, the influence of the inclination Angle of the spiral blade on the separation performance was mainly discussed. By establishing a three-dimensional geometric model. CFD numerical simulation combined with experimental verification method was used to systematically analyze the effect of different screw blade inclination angles $(0^{\circ}, 2^{\circ}, 4^{\circ}, 6^{\circ}, 8^{\circ})$ on solid recovery, dynamic pressure distribution and solid volume distribution. The results show that the tilt Angle of the spiral blade has a significant effect on the recovery of solid phase, showing a trend of first increasing and then decreasing. The change of inclination Angle has little influence on the dynamic pressure distribution of the drum column section, but has a great influence on the dynamic pressure distribution of the slag outlet. When the dip Angle is 4°, the recovery of solid phase reaches the maximum value, and a thicker solid phase deposition layer is formed in the drum cone section, and the dynamic pressure distribution is more stable, which significantly improves the separation performance. This study provides an important theoretical basis and technical support for the optimization of the structure design of the decanter centrifuge and the efficient treatment of slime water. which is of great significance for promoting green mine construction and sustainable utilization of resources.

Keywords

Decanter Centrifuge, Spiral Blade Inclination, Slime Water, Solid Liquid Separation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

煤炭作为我国能源领域的支柱性资源,尽管其消费占比逐年下降,仍在能源结构中占据主导地位。 在"绿色、智慧矿山"发展的时代背景下,煤矿开采技术与装备正经历新一轮升级。其中,井下煤泥污水 的高效治理已成为矿山环保与资源利用的关键难题[1]。采用卧螺离心机对煤泥水进行实时处理,可实现 固液分离与水资源的循环利用,不仅显著节约水资源,还有效减少了环境污染。因此,提升卧螺离心机 的分离性能,对于推动绿色矿山建设与实现可持续发展具有重要意义[2] [3]。

卧螺离心机是一种高效的固液分离设备,广泛应用于污泥脱水、粒度分级和液相澄清等领域[4],已 成为煤泥水处理的重要技术手段。其在煤泥水处理中的优势尤为显著,不仅能够高效实现固液分离、降 低煤泥含水率,还能有效回收清水资源。处理后的煤泥可进一步作为热能资源利用,而清水则可循环使 用,从而显著减少资源浪费和环境污染。近年来,针对卧螺离心机的研究逐渐增多,成为学术界关注的 热点之一。朱桂华通过仿真与实验分析了转鼓转速对盐泥固液分离性能及颗粒粒径分布的影响[5]。 Hakkinen 等人采用全因子实验设计,研究了进料固体浓度、悬浮液进料速率以及转鼓与螺旋输送器差速 对细粒子悬浮液分离性能的影响[6]。姜毓圣利用多种数学模型计算离心机内部流场,分析了颗粒直径、 固相密度及液相黏度等参数对流场与固相体积分布的影响[7]。为进一步优化卧螺离心机的分离性能,学者们围绕结构参数的影响展开了深入研究。张建中利用 FLUENT 软件仿真分析转鼓锥角变化对固液分离性能的影响[8]。Menesklou 等人提出基于材料函数的物理预测模型,探讨转鼓锥段几何参数对流体流动与分离效果的作用[9]。刘丽艳等通过模拟与实验优化卧螺离心机进料分布器结构,显著降低了壁面磨损并提升设备寿命[10]。Fu 等研究了节能弯管的结构参数对离心机性能的影响,指出管道优化设计对分离效率提升的重要性[11]。Yuan 等通过 CFD 模拟发现,增加转鼓液池深度可提高固相含量,但可能略微降低固相回收率[12]。孔令捷基于 CFD 数值模拟分析了螺距变化对原油砂分离性能的影响[13]。以上研究表明,采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟方法,不仅能够深入揭示卧螺离心机内部流场的特性,还能为优化设计提供科学依据,为提升设备的分离效率提供重要技术参考。

现有研究主要集中于转鼓参数、液池深度和螺距等结构优化方面,而对螺旋叶片倾角对卧螺离心机 分离性能的影响关注较少,尤其是在煤泥水处理领域的研究仍显不足。因此,本文以煤泥水分离为应用 背景,结合 CFD 数值模拟与实验的方法,系统探讨不同螺旋叶片倾角对分离性能的影响。本研究不仅有 助于提升煤泥水的分离效率,还为卧螺离心机螺旋输送器的结构优化设计提供重要的理论依据和技术参 考。

2. 卧螺离心机工作原理



Figure 1. Decanter centrifuge structure diagram 图 1. 卧螺离心机结构示意图

图 1 是卧螺离心机结构示意图。卧螺离心机以其简单的结构设计、便捷的操作方式以及高效的分离 性能广泛应用于固液分离领域。其能够实现连续出渣和液体排放,同时通过灵活调整转速以及转鼓与螺 旋推料器之间的差速,以适应多种物料的分离需求[14]。与传统的旋流分离器和沉降池相比,卧螺离心机 在固液分离中具有更快的沉淀速度和更高的分离效率。与带式压滤机相比,卧螺离心机更容易拆卸和清 洁,且维护成本和人员需求较低。在利用卧螺离心机处理煤泥水的过程中,煤泥水通过泥浆泵经进料管 垂直进入高速旋转的螺旋布料腔,在离心力作用下,通过螺旋进料孔被甩入转鼓内壁,并随螺旋同步旋 转。在离心力的驱动下,煤泥水中的固相颗粒迅速沉降至转鼓壁面,而液相则被挤向转鼓中心区域,随 着煤泥水的不断输入,转鼓内柱形压环的液面逐渐升高,当液面高度超过溢流板时,液体便通过溢流板 的出浆口排出[15]。由于螺旋输送器与转鼓之间存在一定的转速差,产生了有效的输送作用,使沉积在转 鼓壁上的固相颗粒沿轴向被逐步推进至转鼓的锥形段进行进一步脱水。最终,脱水后的固体颗粒通过转 鼓锥底端的排渣口排出,完成整个分离过程。

3. 数值模拟与实验验证

3.1. 几何模型建立及网格划分

本文以矿用 LW450 型卧螺离心机为研究对象,基于其实际结构构建用于流场模拟的三维模型,其主 要结构参数详见表 1。在建模过程中,对进料和排渣装置进行合理简化,以确保其对物料分离过程的影响 可以忽略不计,采用 SolidWorks 软件对卧螺离心机进行建模,三维模型如图 2 所示。在研究中,为保证 研究的科学性和可靠性,实验条件下矿用 LW450 型卧螺离心机的转鼓总长度及其他关键参数保持恒定。 通过调整多个螺旋叶片倾角参数,进行流场特性的数值模拟分析,系统探讨螺旋叶片倾角对卧螺离心机 分离煤泥水性能的影响,为优化卧螺离心机的分离效率提供理论依据。

结构名称	参数
转鼓外径(mm)	450
液池深度(mm)	60
转鼓柱段长度(mm)	1100
转鼓锥段长度(mm)	610
转鼓半锥角(°)	8
固相出口(mm)	46
液相出口(mm)	46
进料口直径(mm)	60
螺距(mm)	130
螺旋叶片倾角(°)	0
螺旋叶片厚度(mm)	8

 Table 1. LW450 decanter centrifuge structure parameters

 表 1. LW450 卧螺离心机结构参数



Figure 2. 3D model of decanter centrifuge 图 2. 卧螺离心机三维模型

网格质量对 CFD 计算的精度和效率至关重要。由于卧螺离心机内部螺旋采用高阶 NURBS 表面,常规的六面体网格划分方法难以精确贴合这类复杂几何形状,尤其是在处理螺旋尖端、过渡区域及与其他部件连接处的高阶曲线时,容易出现网格畸变和疏密不均等问题,从而影响计算精度。为更好地适应离心机内部螺旋结构的复杂几何特征,本文采用 Workbench 中的 Mesh 工具生成非结构化四面体网格,如图 3 所示,力求在网格质量与计算效率之间找到平衡。图 4 可以看出,当网格数量超过 175 万个时,固

相回收率变化趋于平稳,然而,过多的网格数量会显著增加计算资源的占用。综合考虑网格质量检查与 效率评估,最终将网格数量确定为175万个,以确保计算精度并优化计算资源的利用效率。



Figure 3. Global grid of decanter centrifuges 图 3. 卧螺离心机全局网格



Figure 4. Relationship between the number of grids and the recovery of the solid phase 图 4. 网格数与固相回收率的关系

3.2. 边界条件

以瓦斯抽放钻机工作过程中产生的煤泥水为研究对象,其主要物性参数详见表 2。入口边界条件设置 为速度入口,根据入口流量和直径计算得出入口速度为 1.18 m/s,物料垂直进入转鼓,入口湍流强度设定 为 5%。为增强模型对实际工况的适应性,出渣口和溢流口均设置为自由出流边界条件,假设出口处流动 完全发展[16]。壁面边界条件设定为无滑移条件,同时通过移动坐标系实现转鼓与螺旋输送器之间的差速 旋转。结合物料特性和卧螺离心机分离性能要求,转鼓旋转速度设置为 2600 rpm,转鼓与螺旋输送器的 旋转速度差设置为 20 rpm。该设置旨在尽可能贴近实际运行工况,为流场模拟和分离性能分析提供可靠 的数据支持。

表 2. 主要物性参数		
序号	项目	参数
1	液相密度/kg·m ⁻³	1000
2	液相粘度/pa·s	0.0026
3	固相密度/kg·m ⁻³	1345
4	固相颗粒粒径/mm	0.05
5	固相体积分数/%	17

3.3. 求解方法

Table 2. Main physical parameters

本研究采用压力基求解器进行数值计算,设置流动类型为瞬态流动,并选用绝对速度形式的速度公式。假设环境处于标准大气压条件,并引入重力加速度(9.8 m/s²),同时忽略热量交换对流场的影响。卧 螺离心机内部流体域表现为高速强旋流,处于湍流状态,为了更精确地模拟和描述湍流特性,本研究选 择了 RNG *k* - *ε* 湍流模型。该模型在标准 *k* - *ε* 模型的基础上引入了附加的生成项,能够更有效地捕捉瞬 态流动和流线弯曲效应,特别适用于复杂湍流流场的仿真。在近壁区域,采用标准壁函数法进行处理, 以确保能够有效捕捉到壁面附近的湍流特性。近壁区域采用标准壁函数法进行处理,计算中使用隐式方 法和 SIMPLE 算法,离散格式采用二阶迎风格式。最终,当残差曲线趋于稳定且出口监测点的数值不再 变化时,认为卧螺离心机内部流场已达到稳定状态。

3.4. 数值模拟验证

本研究基于校企合作项目搭建卧螺离心机实验系统,如图 5 所示。该实验系统主要包括卧螺离心机 及其配套设备组成,煤泥水通过泥浆泵输送至卧螺离心机实现进料。实验过程中,在相同的工况条件下, 分别在不同转速条件下运行卧螺离心机,并记录每个转速下卧螺离心机分离煤泥水的固相回收率。具体 实验方案如下:首先,对煤泥水的固体含量和粒径分布进行表征,以确保实验过程中使用的煤泥水成分 一致,从而保证实验数据的可比性。实验中,煤泥水的进料速度保持恒定,所有实验均在常温常压下进 行,以排除温度和压力的变化对实验结果产生影响。此外,基于实验数据采用数值模拟方法预测不同转 速下的分离效果。仿真模型以卧螺离心机的工作原理为基础,构建相应的物理模型并结合流体力学和沉 降动力学等因素,模拟计算不同转速条件下的固相回收率。



Figure 5. Experimental system diagram 图 5. 实验系统图

图 6 显示,固相回收率的数值模拟值略高于实验值,产生差异的原因主要包括以下几个方面:首先, 仿真中采用的平均粒径模型忽略了实际颗粒的粒径分布及颗粒间的多样性;其次,仿真未考虑颗粒团聚 效应,实际中固体颗粒可能发生团聚,影响分离效果;此外,仿真忽略了离心机内部的传热效应,而实 际操作中温度和摩擦等因素也会对分离效率产生影响;最后,由于计算资源的限制,仿真中的三维模型 进行了简化,网格划分精度、边界条件的设定等因素也可能导致计算结果与实验值之间的差异。尽管存 在这些影响因素,仿真与实验之间的误差均在 10%以内,符合工程应用标准,表明该仿真方法在分析卧 螺离心机分离性能时具有较高的可靠性,为后续研究提供了有效的理论依据和数据支持。



Figure 6. Comparison of experimental and simulated values of solid recovery of slime at different rotational speeds 图 6. 不同转速下煤泥固相回收率的实验值与模拟值的比较

4. 结果与分析

4.1. 螺旋叶片倾角对固相回收率的影响

在卧螺离心机的实际生产中,螺旋叶片倾角是机械性能和分离性能的综合体现。为探究螺旋叶片倾 角对煤泥分离效率的影响,本研究在保持其他结构参数和工艺参数恒定的条件下,选取螺旋叶片倾角分 别为 0°、2°、4°、6°和 8°进行数值模拟实验。揭示螺旋叶片倾角对卧螺离心机分离煤泥水性能的作用规 律,为优化叶片结构设计提供理论依据和技术支持。

图 7 所示,随着螺旋叶片倾角的逐步增大,固相回收率呈现出先上升后下降的趋势。这种变化规律 表明,螺旋叶片倾角不仅影响输送推力和离心力的平衡,还直接决定了固相颗粒在转鼓内的沉降路径与 效率。当倾角较小时,螺旋叶片提供的输送推力不足,固相颗粒难以有效克服物料的黏性阻力,导致沉 降时间缩短,颗粒在转鼓内壁的聚集效率较低,固相分离效果因此较差。随着倾角逐渐增大,螺旋叶片 能够提供更强的输送推力和更均衡的离心力,使固相颗粒的沉降更加充分,从而显著提高分离效率。在 适中的倾角条件下,螺旋叶片的作用达到最佳平衡,既可保证物料沿螺旋路径稳定输送,又能确保固相 颗粒在离心力作用下迅速沉降,固相回收率因此达到最高值。然而,倾角过大可能导致离心机内部流场 的不稳定性。一方面,过大的倾角削弱了离心力对颗粒的作用,部分固相颗粒可能未完全沉降即被排出; 另一方面,倾角过大会导致输送路径过于陡峭,缩短物料的沉降区域,从而降低分离效果,并可能影响 设备运行的稳定性。



Figure 7. Effect of tilt Angle of spiral blade on solid recovery 图 7. 螺旋叶片倾角对固相回收率的影响

4.2. 螺旋叶片倾角对动压分布的影响



Figure 8. Dynamic pressure distribution of decubitus centrifuge with different tilt angles of spiral blades 图 8. 卧螺离心机不同螺旋叶片倾角下的动压分布

卧螺离心机干燥段的压力越大,意味着转鼓与螺旋推料器对煤泥的挤压作用越强。在卧螺离心机轴向的两个位置分别监测径向动压的变化。图 8 展示了不同螺旋叶片倾角下在不同轴向位置的动压分布随

径向位置的变化情况。图 8(a)可见,在转鼓柱段位置,动压随径向位置的增加呈稳定上升趋势,各倾角的动压曲线几乎重合。这表明,在柱段位置,动压分布主要受离心机旋转速度和离心力的影响,而螺旋叶片倾角的影响较小。图 8(b)显示,在靠近出渣口的位置,动压随径向位置的增加整体呈现先增大后减小的趋势。特别是在倾角为 4°时,动压峰值较高且分布更加平缓,既能提供足够的动力驱动固相颗粒向外迁移,又能有效减少紊流影响。综上所述,螺旋叶片倾角对柱段位置的动压分布影响较小,但在靠近出渣口处的影响较为显著。合理设计螺旋叶片倾角可在维持较高动压的同时降低过度紊动,从而优化煤泥水的分离性能。

4.3. 螺旋叶片倾角对固相体积分布的影响

图 9 中可以看出,不同螺旋叶片倾角对转鼓锥形部分各轴向点的固相体积分布具有显著影响。总体 来看,固相体积分数沿锥段轴向位置逐渐增加。对于较小的倾角对物料的分离作用较弱,固相体积分数 增长平缓且数值较低;中等倾角下,固相体积分数在整个轴向范围内均表现出较高的分布,尤其在出渣 口处达到最高值,表明此时分离效果最佳。然而,当倾角进一步增大到 6°和 8°时,固相体积分数的提升 幅度减小,甚至在部分位置出现下降,可能是由于过大的倾角导致物料过快移动,影响分离效果。此外, 不同倾角对固相体积分布的影响在锥形段前段差异较小,而在靠近出渣口则更加明显。综合分析表明,θ =4°的倾角为较优选择,在分离效率和固相体积分数分布上均表现出最佳性能,经过优化后的设计将有助 于提高设备性能,为实际应用提供更具参考价值的指导。



Figure 9. Variation of solid phase volume fraction with axial position of cone segment at different dip angles 图 9. 不同倾角下固相体积分数随锥段轴向位置的变化

5. 结论

本文以 LW450 型矿用卧螺离心机为研究对象,通过 CFD 数值模拟与实验研究,系统分析了螺旋叶 片倾角对煤泥水分离性能的影响,得出以下主要结论:

1) 随着螺旋叶片倾角的增加,固相回收率呈现先上升后下降的趋势。当螺旋叶片倾角为4°时,固相

回收率达到最高值。此时,固相颗粒在转鼓内壁沉积充分,分离效率最优。

2) 在转鼓柱段区域,动压分布主要受离心机转速和离心力影响,螺旋叶片倾角对其影响较小;但在 接近出渣口的位置,螺旋叶片倾角显著影响动压分布。当倾角为 4°时,动压峰值较高且分布更加平缓, 有助于提高固相颗粒的迁移效率并减少紊流干扰。

3) 在转鼓锥段区域,固相体积分布显著受到螺旋叶片倾角的影响。当倾角为中等值(4°)时,固相体积 分布最均匀,沉积层厚度最大,分离性能和系统稳定性达到最佳状态。较小的倾角会导致固相颗粒的沉 降时间不足,沉积层厚度不足,分离效率偏低;而过大的倾角则会缩短物料的输送路径,致使物料未能 充分沉降,从而降低分离效果。

参考文献

- [1] 王鹏. 煤矿井下气动型煤泥水快速分离装置的研制与应用[J]. 能源与节能, 2024(7): 256-258, 263.
- [2] 程琳. 离心分离机在煤泥水分离中的应用研究[J]. 自动化应用, 2020(8): 120-121.
- [3] 袁惠新. 分离过程与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 38-42.
- [4] Tan, W., Qiao, L., Sha, E., Tao, Y. and Liu, L. (2012) Optimal Design of the Accelerator Disk in a Two-Stage Piston Pusher Centrifuge Using Numerical Simulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 4632-4642. <u>https://doi.org/10.1021/ie201331x</u>
- [5] 朱桂华, 张傲林, 彭南辉, 等. 卧螺离心机用于盐泥固液分离时转鼓转速对流场特性的影响[J]. 化工进展, 2019, 38(6): 2590-2599.
- [6] Kinnarinen, T. and Häkkinen, A. (2013) Experimental Study on the Influence of Selected Process Variables on the Separation of a Fine Particle Suspension with a Pilot Scale Decanter Centrifuge. *Particulate Science and Technology*, **31**, 603-611. <u>https://doi.org/10.1080/02726351.2013.811708</u>
- [7] 姜毓圣, 袁惠新, 付双成. 物性参数对卧螺离心机分离性能影响的研究[J]. 石油机械, 2016, 44(7): 36-41.
- [8] 张建中,李峰,胡化增,等. 矿用 LW800 卧螺离心机转鼓锥角结构优化[J]. 流体机械, 2019, 47(7): 11-14, 38.
- [9] Menesklou, P., Nirschl, H. and Gleiss, M. (2020) Dewatering of Finely Dispersed Calcium Carbonate-Water Slurries in Decanter Centrifuges: About Modelling of a Dynamic Simulation Tool. Separation and Purification Technology, 251, Article ID: 117287. <u>https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117287</u>
- [10] 刘丽艳, 刘小康, 樊东东, 等. 卧螺离心机进料分布器的流场模拟与结构优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(1): 35-41.
- [11] Fu, S., Li, K., Zhou, F., Yuan, H. and Shen, S. (2023) Study on the Structure of Energy-saving Bend Pipes in a Decanter Centrifuge. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 19, e2982. <u>https://doi.org/10.1002/apj.2982</u>
- [12] Yuan, H., Zhang, Y., Fu, S. and Jiang, Y. (2018) Influence of the Length-Diameter Ratio and the Depth of Liquid Pool in a Bowl on Separation Performance of a Decanter Centrifuge. In: Wang, K., Wang, Y., Strandhagen, J. and Yu, T., Eds., *Advanced Manufacturing and Automation VIII. IWAMA* 2018, Springer, 78-85. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2375-1_12
- [13] 孔令捷. 卧螺离心机螺旋结构对油砂分离性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [14] 刘尚铭. 卧螺离心机处理污水污泥的运行管理探析[J]. 设备管理与维修, 2022(10): 28-29.
- [15] 谭蔚, 钟伟良, 闫浩, 刘丽艳, 朱国瑞. 卧式螺旋卸料离心机研究的回顾与展望[J]. 化工进展, 2016, 35(S2): 46-50.
- [16] Baust, H.K., Hammerich, S., König, H., Nirschl, H. and Gleiß, M. (2023) Resolved Simulation of the Clarification and Dewatering in Decanter Centrifuges. *Processes*, 12, Article 9. <u>https://doi.org/10.3390/pr12010009</u>