

含油污泥减量化处理数值模拟研究

李 哲¹ 张樱珞²

1. 锦州港股份有限公司, 辽宁 锦州 121007;
2. 辽宁石化职业技术学院机械工程学院, 辽宁 锦州 121000

摘 要: 为了提升含油污泥减量化处理效果并优化运行参数, 基于含油污泥组成特点和现场试验流程, 研究了现场试验样品检测方法。通过计算流体动力学软件对卧螺离心机的内流场和处理效果进行数值模拟, 依据数值模拟结果分析了相体积分数和速度分布特点, 并采用正交试验进行方案设计。结果表明: 适当增加卧螺离心机转鼓柱段长度、降低进料量可有效提升含油污泥减量化处理效果; 通过正交试验方案设计, 确定最优运行参数为转速 2 339 r/min、差速 10 r/min、进泥量 7 m³/h, 处理后含油污泥含水率由 95.3% 降至 52.7%。研究结果对含油污泥减量化处理运行和降低处理成本具有指导意义。

关键词: 含油污泥; 减量化处理; 现场试验; 计算流体动力学; 正交试验

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2025.02.017

Numerical simulation study on oily sludge reduction treatment

LI Zhe¹, ZHANG Yingluo²

1. Jinzhou Port Co., Ltd., Jinzhou, Liaoning, 121007, China;
2. School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical College, Jinzhou, Liaoning, 121000, China

Abstract: In order to improve the effectiveness of oily sludge reduction treatment, the operating parameters are optimised. Based on the characteristics of oily sludge composition and field trial process, the field trial sample testing method was studied. Using computational fluid dynamics software, the internal flow field and processing effect of the decanter centrifuge is simulated. Based on the simulation results, the characteristics of phase volume fraction and velocity distribution were analyzed and the orthogonal test method was used for process system design. The results show that by appropriately increasing the column length of the decanter centrifuge and reducing the feed rate, we can effectively improve the treatment effect. Through the design of the orthogonal test scheme design, the optimal operating parameter is determined to be the rotating speed of 2 339 r/min, the differential speed of 10 r/min, and the oily sludge feed rate of 7 m³/h. After treatment, the water content of oily sludge is reduced from 95.3% to 52.7%. This study provides guidance for the operation of oily sludge reduction treatment and the subsequent reduction of treatment costs.

Keywords: Oily sludge; Reduction treatment; Field trial; Computational fluid dynamics; Orthogonal test

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目“密炼机聚合物混合反应机理与宏观反应特性研究”(JYTQN2023276)

作者简介: 李 哲 (1989-), 男 (满族), 辽宁锦州人, 工程师, 硕士, 主要从事危险化学品储运安全管理工作。E-mail: lx_zdhaen@163.com

0 前言

在油田开发、储运、炼制过程中,原油中的泥沙在乳化剂作用下,形成了稳定性强、密度大的含油污泥^[1]。含油污泥会降低传热效率,增加设备、设施的腐蚀风险。卧螺离心机作为含油污泥处理的核心设备,国内外研究者针对其开展了大量的理论研究和现场试验。张伟健等人^[2]采用计算流体动力学软件 FLUENT 三相流 Mixture 模型,对卧螺离心机分离性能进行了研究,并增设导油孔,可减少油相在挡板处的堆积。朱明军等人^[3]采用计算流体动力学 FLUENT 软件 Euler 多相流模型,对三相卧螺离心机流场及分离性能进行数值模拟,研究了转速、处理量等对分离性能的影响规律。刘丽艳等人^[4]采用数值模拟方法,研究了进料分布器的速度矢量、流线变化及剪切力特性,对分布器进行了结构优化设计。刘磊等人^[5]结合江汉油田含油污泥特点,研究了最佳掺煤量、腐蚀性等对含油污泥处理效果。贾文龙等人^[6]利用超临界二氧化碳提取和回收油基成分,实现无害化处理。高立斌等人^[7]对气田含油污泥采用“反应分离+固液分离+液液分离”减量化处理方法,实现含油污泥无害化处理。

本文针对含油污泥乳化严重、含水率高^[8]的特点,研究了含油污泥成分检定方法,并验证数值模拟结果的可靠性。通过计算流体动力学软件的数值模拟研究,为卧螺离心机运行参数调整、结构改进提供研究依据。解决了以往含油污泥减量化处理效果评价误差大、现场试验参数调整、化验分析工作量巨大的难题。

1 卧螺离心机主要结构及工作原理

卧螺离心机主要结构见图 1,其工作原理是在转鼓高速旋转下产生离心力,含油污泥进行沉降,密度较小的水相漂浮在污泥上方。螺旋输送器通过差速器低于转鼓转速旋转,将沉降的污泥脱水干燥后推出离心机。此外,在卧螺离心机尾部设置溢流堰板,确定水相溢流高度。由于卧螺离心机堆料的原因导致过载,保护装置能自动断开主机电源,防止事故发生^[9-10]。

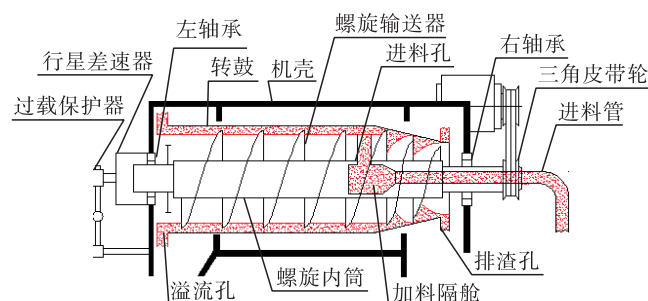


图 1 卧螺离心机主要结构图

Fig. 1 The main structural diagram of the decanter centrifuge

2 含油污泥减量化处理现场试验

2.1 现场试验工艺流程

调质—离心处理技术^[11]作为含油污泥减量化处理的核心,是多种含油污泥处理技术的基础。为评价含油污泥减量化处理效果,设计了一套含油污泥减量化处理现场试验,工艺流程^[12]见图 2。

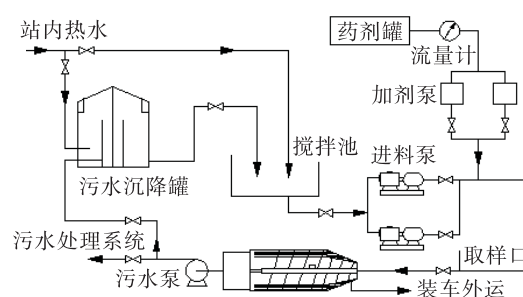


图 2 含油污泥减量化处理现场试验工艺流程图

Fig. 2 Process flow diagram of oily sludge reduction treatment

目前,含油污泥减量化处理的基本方法是通过热水射流装置,对储罐内部含油污泥进行剥离,由搅拌池充分搅拌、加药后输送至卧螺离心机进行离心处理。处理后含油污泥装车外运,含油污水进入污水处理系统或由污水罐储存。

2.2 样品检测方法

2.2.1 泥样检测方法

卧螺离心机泥样检测装置^[11-14]见图 3。

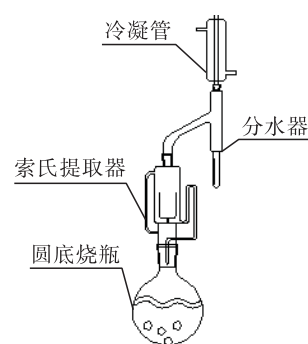


图 3 泥样检测装置图

Fig. 3 Detection device diagram of mud sample

现场试验采取的泥样,经包装称重后放入索式提取器,包装物同样进行称重。选取甲苯作为萃取剂,由于甲苯沸点为 110℃,密度小于水密度且不溶于水。将甲苯加入圆底烧瓶后放入沸石,加热甲苯汽化后甲苯气体由索式提取器进入冷凝管液化回流至索式提取器,萃取样品中原油。当原油与甲苯溶液在索式提取器中达到指定高度后回流至圆底烧瓶。经不断循环往复,可将泥样中原油萃取完全,样品中只剩泥沙,经称重并减去包装物重量后,得到泥沙重量。由于甲苯沸点高于水,可

以将泥样中的水蒸发汽化,水蒸汽冷凝回流至分水器,可在分水器中读取泥样中水的体积,进而换算为重量,实验分析结果可靠、精度高。

2.2.2 水样检测方法

水样中含油量检测方法通过配置标准浓度溶液,绘制标准曲线,采用分光光度法^[15]测量样品含油率。水样含水量检测将图3中索式提取器拆除,将分水器 and 圆底烧瓶直接相连,由分水器测得水样的含水率^[16]。

3 数值模拟研究

3.1 几何模型建立

本文研究对象为 LW430DE 卧螺离心机,技术参数见表1。

表1 LW430DE 卧螺离心机技术参数表

Tab.1 Technical parameters table of LW430DE decanter centrifuge

参数	数值
转速 /($r \cdot \min^{-1}$)	3 200
转鼓直径 /mm	430
转鼓圆柱段长度 /mm	1 120
转鼓锥段长度 /mm	471
差速 /($r \cdot \min^{-1}$)	2 ~ 32
螺距 /mm	200
进料孔直径 /mm	25
螺旋内筒直径 /mm	230

采用 SolidWorks 软件建立螺旋结构和整体结构,通过组合功能做螺旋结构和整体结构的布尔运算,最终得到卧螺离心机内流场几何模型。依托 ICEM 软件,由几何模型拓扑结构建立 curve 和 point 关联,通过 ICEM 划分内流场结构化网格,见图4。几何模型网格数量约 368.8×10^4 ,质量指标 Quality 和正交质量指标 Orthogonal Quality 值均超过 0.45,且由于几何模型部分计算区域曲率变化大,采用歪斜度 Skew 相关两指标对网格歪斜度进行评价,评价结果整体超过 0.5,网格质量满足计算要求。

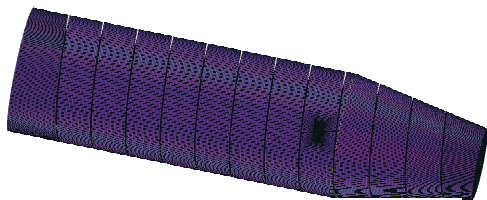


图4 卧螺离心机内流场结构化网格图

Fig.4 Structured grid diagram of the flow field in the decanter centrifuge

3.2 数学模型选取

基本控制方程选用不可压缩、牛顿流体,质量力只有重力的动量守恒方程和质量守恒方程;湍流模型采用对高应变率处理效果较好的 RNG k- ϵ 模型;多相流模型采用 Euler 模型;转动模型采用滑移网格模型。

3.3 卧螺离心机内流场分析

3.3.1 建立观测面

为便于发现卧螺离心机内流动规律和相间分布特性,建立了5个观测面,见图5。

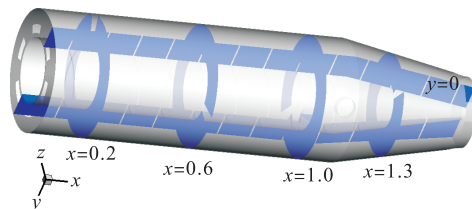


图5 内流场观测面图

Fig.5 Observation surface diagram of internal flow field

3.3.2 相体积分数分析

相体积分数分布云图能够直观观察到卧螺离心机内两相分布特征,以卧螺离心机转速 2 431 r/min、差速 10 r/min、堰板高度 110 mm、入口含水率 94.37%、进泥量 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例,研究不同截面处相体积分布。

3.3.2.1 $y=0$ 平面泥相分布

$y=0$ 平面泥相分布云图见图6。

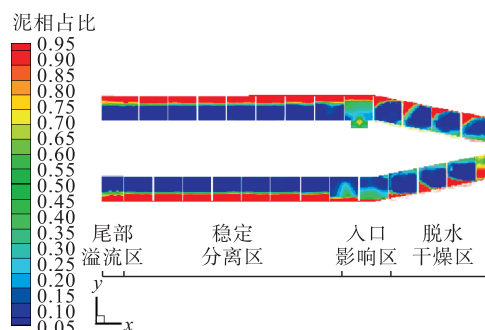


图6 $y=0$ 平面泥相分布云图

Fig.6 Muddy facies distribution map in the $y=0$ plane

由图6可知, $y=0$ 平面泥相在转鼓圆柱段分离效果较好,尾部受溢流影响,泥相分布受到轻微扰动。在卧螺离心机入口处,受入口进泥量扰动,泥相分布所受扰动最大。在卧螺离心机泥相出口处,泥相受挤压明显。基于上述泥相分布规律,为便于研究说明定义4个区域,分别为尾部溢流区、稳定分离区、入口影响区、脱水干燥区。稳定分离区作为泥相稳定分离的集中区域,故在满足机械设计强度下,适当增加转鼓圆柱段长度^[17-18],可显著提升分离效果。

3.3.2.2 卧螺离心机各截面处泥相分布

由图6可知,根据卧螺离心机内泥相分布特点,4个

区域内代表性的 4 个截面处泥相体积分数分布, $x = (0.2, 0.6, 1.0, 1.3)$ 截面泥相分布云图见图 7~10。

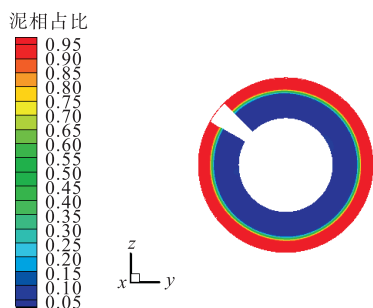


图 7 $x=0.2$ 截面泥相分布云图

Fig. 7 Contour plot of mud phase distribution at $x=0.2$ cross-section

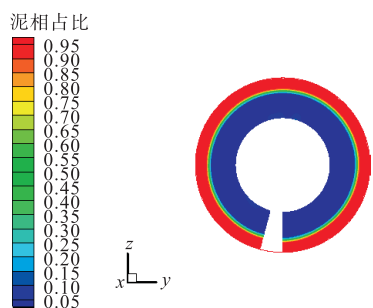


图 8 $x=0.6$ 截面泥相分布云图

Fig. 8 Contour plot of mud phase distribution at $x=0.6$ cross-section

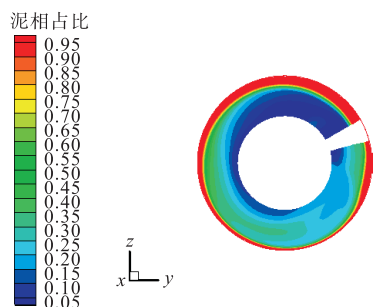


图 9 $x=1.0$ 截面泥相分布云图

Fig. 9 Contour plot of mud phase distribution at $x=1.0$ cross-section

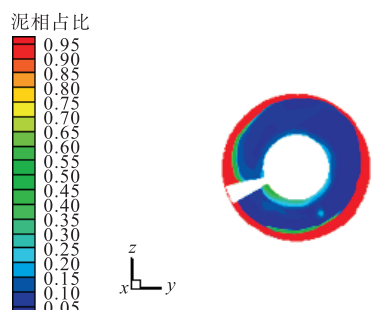


图 10 $x=1.3$ 截面泥相分布云图

Fig. 10 Contour plot of mud phase distribution at $x=1.3$ cross-section

由图 7~8 可知,在卧螺离心机稳定分离区,由于泥相密度最大,沉积在转鼓壁面处,体积分数约为 95% 且在螺旋输送器作用下未发生相间扰动。由图 9 可知,卧螺离心机入口影响区,泥相体积分数波动范围较大、出现斡旋,其原因为此区域受进泥量影响,进泥量越大其入口影响区越大,对于分离效果影响越大。由图 10 可知,脱水干燥区受螺旋输送器影响,泥相被挤压进一步脱水,而后排出离心机外。

3.3.3 速度场分析

卧螺离心机轴向转速是影响处理量的重要参数之一,增加转速可以获得更大的离心力,提升处理效果。

3.3.3.1 $y=0$ 平面速度场分布

$y=0$ 平面速度分布云图见图 11。

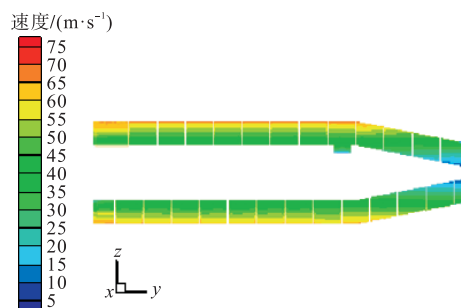


图 11 $y=0$ 平面速度分布云图

Fig. 8 Velocity distribution in the plane of $y=0$

由图 11 可知,含油污泥进入卧螺离心机后,在离心力作用下速度剧增,靠近转鼓壁面处达到最大,约 58 m/s。转鼓壁面附近转速相对于上层流体转速增加明显,是因为在离心力作用下,泥相发生沉积;而由于水相密度较小,分布于泥相上方。从图 11 可以看出,卧螺离心机内形成了稳定的分离场。

3.3.3.2 滞后流动分析

卧螺离心机高速旋转,流体层间存在速度滑移。定义流动滞后系数为转鼓转速与自由液面转速之比,见式(1)。

$$\varphi = \omega_0 / \omega \quad (1)$$

式中: ω 为转鼓转速, r/min; ω_0 为自由液面转速, r/min; φ 为滞后系数。

4 个截面处自由液面转速和滞后系数见图 12。

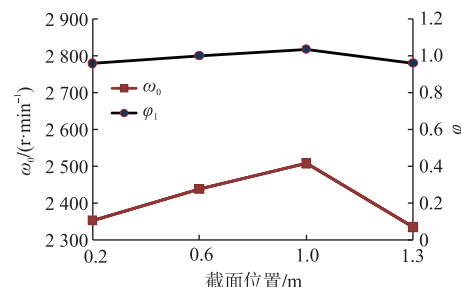


图 12 X 轴方向各截面处自由液面转速和滞后系数图

Fig. 12 Free surface rotational speed and hysteresis coefficient diagram at various cross-sections along the x -axis

由图 12 可知, $x=1.0\text{ m}$ 截面处速度场受到卧螺离心机入口进泥量的冲击, 含油污泥转速整体与转鼓转速保持一致。4 个截面处滞后系数处于 0.9~1.0 之间, 说明含油污泥在卧螺离心机内转动存在滞后现象。滞后系数越大, 流体剪切作用^[19]越明显, 处理效果越差, 解释了转速为 2 431 r/min 时, 处理后污泥含水率不降反升的原因。

3.3.4 数值模拟结果验证

为了验证数值模拟结果^[20], 通过现场试验设定卧

螺离心机差速 9.5 r/min、含水率 98.25%、进泥量 8 m³/h、溢流堰板高度 110 mm、加药量 200 g/m³ 的稳定工况, 现场试验调整转鼓转速, 并在调整转速 20 min 后现场取泥样 3 个, 化验分析结果见表 2。通过数值模拟计算, 模拟了现场试验的稳定工况, 并调整转速, 得到排渣口含油污泥含水率指标平均值。对比数值模拟结果和现场试验结果, 转速对脱水处理效果影响示意图见图 13。

表 2 泥样化验分析结果表

Tab.2 Test analysis results table of mud samples

转速 / (r·min ⁻¹)	样重 /g	水重 /g	干泥质量 /g	含水率	含固率	含油率
2 073	15.861 7	12.294 4	3.440 4	71.07%	25.69%	3.24%
	15.922 4	11.669 6	3.746 4	73.29%	23.53%	3.18%
	17.024 1	12.812 5	3.665 1	75.26%	21.53%	3.21%
2 194	14.947 3	10.886 1	3.514 1	66.64%	29.70%	3.66%
	16.338 4	10.968 5	4.773 6	67.13%	29.22%	3.65%
	18.223 1	12.862 1	4.708 6	70.58%	25.84%	3.58%
2 281	15.396 5	10.792 9	3.836 8	63.93%	31.09%	4.98%
	15.779 4	10.321 1	4.681 9	65.41%	29.67%	4.92%
	17.857 2	11.768 2	5.219 4	65.90%	29.23%	4.87%
2 339	17.192 2	11.914 2	4.428 7	58.67%	36.39%	4.94%
	17.855 7	10.434 6	6.533 7	58.44%	36.59%	4.97%
	16.279 9	9.230 6	6.243 4	56.70%	38.35%	4.95%
2 431	16.312 7	11.624 4	3.911 8	65.66%	29.58%	4.76%
	15.583 1	10.499 8	4.343 1	67.38%	27.87%	4.75%
	16.791 3	11.644 7	4.345 6	69.35%	25.88%	4.77%

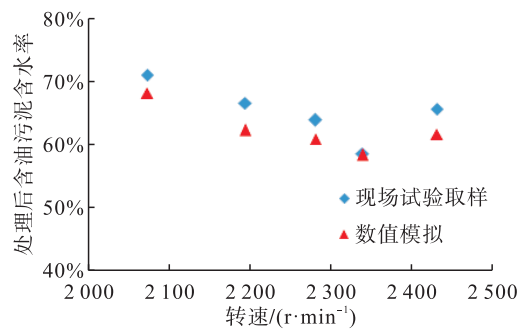


图 13 转速对脱水处理效果影响示意图

Fig.13 Schematic diagram of the effect of rotational speed on sludge moisture content

以处理后含油污泥含水率指标对比现场试验和数值模拟结果, 由图 13 可知, 转速小于 2 431 r/min 时, 现场试验结果和数值模拟结果处理后含油污泥含水率均逐渐降低, 且两者误差在 10% 以内, 说明数值模拟计算采用的数学模型、多相流模型真实可靠。

3.4 工艺方案优化

卧螺离心机处理效果受到多因素作用, 各因素组合后进行全面试验, 会造成大量计算资源浪费, 故采用正交试验方法^[21]对运行方案进行优化。考虑到含油污泥减量化处理大多为储罐含油污泥, 由于含油污泥含水率波动较小, 且卧螺离心机堰板高度只作为溢流参数, 对试验结果影响较小, 故方案设计只考虑对试验结果影响较大的 3 个工艺因素, 即转速、差速和进泥量。因素水平见表 3, 试验方案及数值模拟结果见表 4, 极差分析见表 5。

表 3 因素水平表

Tab.3 Factor and levels table

水平	因素 A 转速 / (r·min ⁻¹)	因素 B 差速 / (r·min ⁻¹)	因素 C 进泥量 / (m ³ ·h ⁻¹)
1	2 194	9.5	6.0
2	2 281	10.0	7.0
3	2 339	10.5	8.0

表 4 试验方案及数值模拟结果表

Tab. 4 Test plan and numerical simulation results table

试验号	水平			空列	污泥含水率
	因素 A (转速)	因素 B (差速)	因素 C (进泥量)		
1	1	1	1	1	60.44%
2	1	2	2	2	55.79%
3	1	3	3	3	62.50%
4	2	1	2	3	68.72%
5	2	2	3	1	64.76%
6	2	3	1	2	65.50%
7	3	1	3	2	58.94%
8	3	2	1	3	52.80%
9	3	3	2	1	53.71%

表 5 极差分析表

Tab. 5 Range analysis table

项	水平	因素 A (转速)	因素 B (差速)	因素 C (进泥量)
k	1	59.58	62.70	59.58
	2	66.33	57.78	59.41
	3	55.15	60.57	62.07
极差 R	—	11.18	4.92	2.66

由表 3~5 可知,极差大小顺序为 $R_A > R_B > R_C$,所以卧螺离心机转速是影响含油污泥减量化处理效果的主要因素,差速和进泥量次之。考虑到转速作为影响处理效果的主要因素且基于转速为 2 431 r/min 时现场试验结果和数值模拟结果误差较大的情况,在设定因素水平表时只考虑转速 2 194~2 339 r/min 工况,未考虑 2 431 r/min 转速工况。此外,由 $k_{A3} < k_{A1} < k_{A2}$ 可知,转速 2 339 r/min 为转速的优水平。同理可知,差速 10 r/min、进泥量 7 m³/h,分别为差速和进泥量的优水平,所以试验方案的最优运行参数为转速 2 339 r/min、差速 10 r/min、进泥量 7 m³/h。经数值模拟结果可知,最优运行参数条件下,处理后含油污泥含水率由 95.3% 降低至 52.7%,达到了含油污泥减量化处理效果。

4 结论

1) 针对目前储罐含油污泥含水率高、乳化严重等特点,设计了一套以调质—离心处理技术为核心的现场试验工艺流程,并依据甲苯沸点高于水、不溶于水且甲苯对样品原油的萃取作用,改进索式提取法,可有效对现场试验泥样和水样进行化验分析,精准评价含油污泥

减量化处理效果。

2) 根据相体积分分布云图,卧螺离心机内流场分为 4 个区域,即尾部溢流区、稳定分离区、入口影响区和脱水干燥区,说明适当增加转鼓圆柱端长度,可有效增加稳定分离区长度,提升处理效果。

3) 根据速度分布云图,滞后系数维持在 0.9~1.0 之间,说明流体间存在滞后流动而影响处理效果,滞后系数越大,流体间剪切作用力越大,进而影响处理效果。解释了现场试验在转速 2 431 r/min 时,处理后含油污泥含水率不降反升的情况。

4) 结合数值模拟结果,采用正交试验,确定了最佳运行参数,即最优运行参数为转速 2 339 r/min、差速 10 r/min、进泥量 7 m³/h。采用最优运行参数,处理后含油污泥含水率由 95.3% 降至 52.7%,达到了含油污泥减量化处理效果。

参考文献:

- [1] 武 昆. 含油污泥特点及处理方法[J]. 化工管理, 2021 (8): 48-49.
WU Kun. Characteristics and treatment methods of oily sludge [J]. Chemical Enterprise Management, 2021 (8): 48-49.
- [2] 张伟健, 胡大鹏. 三相卧螺离心机性能分析及结构改进[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(1): 25-31.
ZHANG Weijian, HU Dapeng. Performance analysis and structural improvement of three-phase decanter centrifuge [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63 (1): 25-31.
- [3] 朱明军, 胡大鹏. 操作参数对三相卧螺离心机油水砂分离性能影响模拟及实验分析[J]. 化工进展, 2022, 41 (10): 5188-5199.
ZHU Mingjun, HU Dapeng. Simulation and experimental analysis of the influence of operating parameters on oil-water-sand separation performance of three-phase decanter centrifuge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41 (10): 5188-5199.
- [4] 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.
LIU Liyan, LIU Xiaokang, FAN Dongdong, et al. Numerical Simulation of flow field in decanter centrifuge feed distributor and structural optimization [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology) 2021, 54 (1): 35-41.
- [5] 刘 磊, 罗 跃, 刘清云, 等. 江汉油田含油污泥焚烧处理技术研究[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(2): 200-203.
LIU Lei, LUO Yue, LIU Qingyun, et al. Research on oily sludge incineration treatment technology in Jiangnan Oilfield

- [J]. Chemicals Engineering of Oil & Gas, 2014, 43 (2): 200-203.
- [6] 贾文龙,宋硕硕,李长俊,等.超临界 CO₂ 萃取含油污泥研究现状与进展[J].化工进展,2022,41(12):6573-6585.
JIA Wenlong, SONG Shuoshuo, LI Changjun, et al. Research status and progress of supercritical CO₂ extraction of oily sludge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41 (12): 6573-6585.
- [7] 高立斌,苏容,周肃,等.气田含油污泥减量化工艺对比评价及无害化处理评估[J].能源与环保,2023,45(5):173-180.
GAO Libin, SU Rong, ZHOU Su, et al. Comparative evaluation of processes for oily sludge reduction in gas fields and evaluation of harmless treatment [J]. Energy and Environmental Protection, 2023, 45(5): 173-180.
- [8] 韩国勇.含油污泥减量化工艺试验及对比[J].油气田环境保护,2017,27(2):24-26.
HAN Guoyong. Test and comparison of oily sludge reduction process [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2017, 27 (2): 24-26.
- [9] 索柯罗夫.离心分离理论及设备[M].北京:机械工业出版社,1986.
SOKOROV. Centrifugal separation theory and equipment [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [10] 孙启才.离心机原理结构与设计计算[M].北京:机械工业出版社,1987.
SUN Qicai. Centrifuge principle, structure and design calculation [M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [11] 何洪林,张昌锋.调质—机械分离工艺在含油污泥处理工程中的应用[J].化学工程与装备,2014(5):191-192.
HE Honglin, ZHANG Changfeng. Application of quality-regulating and mechanical separation technology in the oil-content sludge treatment project [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2014 (5): 191-192.
- [12] 王志华,刘扬,钟会影,等.一种含油污泥减量化处理方法及其装置:CN201510147096.9[P].2016-08-17.
WANG Zhihua, LIU Yang, ZHONG Huiying, et al. Oily sludge reduction treatment method and device thereof: CN201510147096.9 [P]. 2016-08-17.
- [13] 魏华,王朝勇,李贵,等.一种快速式索式提取装置:CN201510012353.8[P].2015-04-22.
WEI Hua, WANG Chaoyong, LI Gui, et al. A kind of rapid cable extraction device: CN201510012353.8 [P]. 2015-04-22.
- [14] 彭志远,周鹏,荷叶,等.快速式索式提取装置:CN201410144913.0[P].2014-06-18.
PENG Zhiyuan, ZHOU Peng, HE Ye, et al. Rapid cable extraction device: CN201410144913.0 [P]. 2014-06-18.
- [15] 石油工业采油采气专业标准化技术委员会.油田采出水中含油量测定方法 分光光度法:SY/T 0530—2011[S].北京:石油工业出版社,2011.
Petroleum Industry Oil and Gas Production Professional Standardization Technical Committee. Determination of oil content in oilfield produced water—Spectrophotometry method: SY/T 0530—2011 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [16] 全国石油天然气标准化技术委员会.原油水含量的测定 蒸馏法 GB/T 8929—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
TC355. Crude petroleum—Determination of water—Distillation method: GB/T 8929—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [17] 周知进,傅彩明.卧式螺旋离心机转鼓参数变化对其模态影响的仿真[J].中南大学学报(自然科学版),2007,38(2):309-313.
ZHOU Zhijin, FU Caiming. Model analysis after modification of parameters for rotary drum of horizontal helical centrifuge [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 38 (2): 309-313.
- [18] 黄志新.卧螺离心机螺旋输送机结构、强度及其转鼓内的流场研究[D].北京:北京化工大学,2007.
HUANG Zhixin. Study of structure and strength of screw conveyor and flow field in bowl of decanter centrifuge [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007.
- [19] 张劲军,黄启玉,严大凡.管输剪切模拟搅拌槽中流体平均剪切率的计算[J].石油学报,2003,24(2):94-96.
ZHANG Jinjun, HUANG Qiyu, YAN Dafan. Estimation of average shear rate in stirred vessels for pipelining shear simulation [J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2003, 24 (2): 94-96.
- [20] 郑胜飞.卧螺离心机流场数值模拟及试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
ZHENG Shengfei. Numerical simulation and experimental research on flow field of spiral centrifuge [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [21] 滕素珍.数理统计学[M].大连:大连理工大学出版社,2009.
TENG Suzhen. Mathematical statistics [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009.