



气动混流固化疏浚泥混合均匀性 影响因素数值模拟研究

胡君龙^{1,2,3}, 李金祥^{1,2,3}, 谢尧^{1,2}, 刘志军^{1,2,3}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 气动混流方法可广泛应用于大规模疏浚泥的异位固化与资源化利用, 但长期以来其关键工艺参数与结构参数对混合均匀性的影响缺乏量化研究, 结构设计与施工依赖工程经验。采用多相流数值模拟方法, 研究传统扩大管结构及其改进结构在泥浆、固化剂、空气入口流速和扩大管管径影响下的固化剂空间分布特征与混合均匀性变化规律。结果表明, 扩大管管径为 200 mm、泥浆入口流速 ≥ 4 m/s 的条件下, 改进结构出口处不均匀系数较常规结构可降低 50%~58%; 对于改进结构, 泥浆、固化剂、空气入口流速每提高 1 m/s, 出口处不均匀系数平均下降分别为 0.26、0.70 和 0.26, 同时混合均匀性随扩大管管径的提高而提高, 扩大管管径由 200 mm 提高至 500 mm, 出口处不均匀系数可降低约 40%。

关键词: 疏浚泥; 气动混流方法; 工艺参数; 混合管结构; 静态混合器; 混合均匀性; 数值模拟

中图分类号: U616+.1; TU472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0057-10

Numerical simulation of factors influencing mixing uniformity for dredged mud solidified by pneumatic flow mixing method

HU Junlong^{1,2,3}, LI Jinxiang^{1,2,3}, XIE Yao^{1,2}, LIU Zhijun^{1,2,3}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Pneumatic flow mixing method can be widely applied to the ex-situ solidification and resource utilization of large-scale dredged mud. However, there has been a lack of quantitative research on the impact of key process and structural parameters on mixing uniformity, leading to a reliance on engineering experience for structural design and construction. Utilizing multiphase flow numerical simulation methods, this study investigates the spatial distribution characteristics of curing agent and the variation laws of mixing uniformity under the influence of mud, curing agent, and air inlet velocity, as well as the expanded pipe diameter for both conventional and improved structures. The results indicate that under conditions that the expanded pipe diameter is 200 mm and the mud inlet velocity is equal to or larger than 4 m/s, the uniformity coefficient at the outlet of the improved structure can be reduced by 50%–58% compared to the conventional structure. For the improved structure, every 1 m/s increase in the inlet velocity of mud, curing agent, and air results in an average reduction in the uniformity coefficient at the outlet of 0.26, 0.70, and 0.26, respectively. Additionally, mixing uniformity improves with the increase of the extended pipe diameter and when the diameter is increased from 200 mm to 500 mm, the uniformity coefficient at the outlet can be reduced by approximately 40%.

Keywords: dredged mud; pneumatic flow mixing method; process parameters; mixed pipeline structure; static mixer; mixing uniformity; numerical simulation

收稿日期: 2024-10-28

作者简介: 胡君龙 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为工程弃土资源化利用技术。

沿江涉海工程项目建设 and 港口航道等基础设施维护性疏浚每年产生巨量规模疏浚泥, 据统计, 我国每年的疏浚泥量已超过 10 亿 m^3 ^[1]。目前, 我国疏浚泥的处置及资源化利用途径相对单一, 主要以海洋倾倒和吹填造陆为主^[2-3]。自严控围填海政策颁布以来^[4], 海洋倾倒量大幅攀升, 现有的海上倾倒区容量难以满足日益增长的倾倒需求, 亟待针对疏浚泥大规模资源化利用研发高效处置新技术。

疏浚泥通常具有高含水率、高压缩性、低强度等特点^[5-7], 处置目的是降低其含水率, 改善其强度及可压缩性等工程特性。目前常用的处置方法包括排水固结法^[8-9]、机械脱水法^[10-11]、胶结法^[12]等。排水固结法适用于对吹填后的场地进行原位加固, 具有单次处理规模大、经济性高等优点, 但处理过程耗时较长。机械脱水法适用于对疏浚泥快速脱水后异位处置, 其脱水、减量效果较好, 但处理效率较低。胶结法利用水泥等固化材料与疏浚泥掺混, 再通过化学反应快速形成强度, 其处理周期较短, 处理后的土体可达到较高的强度, 但处理成本较高, 通常被用于强度与变形要求高、工期紧的各类工程项目。根据处理工艺的不同, 胶结法可用于疏浚泥的原位处理, 如深层搅拌工艺、就地搅拌固化工艺等, 也可用于疏浚泥的异位处理, 如流态固化土工艺、气动混流固化工艺等。其中, 气动混流固化工艺也称管中混合固化工艺, 其利用空气对疏浚泥浆进行管道压送或助送, 并在泥浆输送过程中注入固化剂, 利用空气与管壁摩擦形成的扰动使泥浆与固化剂充分混合。气动混流固化疏浚土具有较高的强度, 可在部分场景下代替砂石料进行建材化利用, 有助于减少砂石料的开采。同时, 由于引入了空气的作用, 可大幅降低泥浆的输送阻力, 具有极高的处理工效, 目前最大处理效率可达 1 000 m^3/h , 在大面积超软弱场地工作垫层、人工岛护岸结构等场景下具有广泛应用前景^[13]。

气动混流固化工艺涉及泥浆、固化剂、空气在管道内的复杂多相流过程, 泥浆与固化剂的混合效果既受工艺参数的影响也受管道结构的影响。

该技术最早由日本开发, 并在其发展历程中通过大量工程实践总结提出空气注入压力、最小输送距离等关键工艺参数^[13-15], 同时发展出扩大管、W 管、斜管、蛇形管等多种结构形式^[16]。该技术在国内的研究较晚, 目前仍处于起步阶段。高若沉等^[17]通过计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟方法研究揭示了空气入口角度、空气入口位置、固化剂入口角度、扩大管管径等结构参数对管内固化剂空间分布的影响规律。白兴兰^[18]、周上博等^[19]通过 CFD 数值模拟确定了扩大管的最优长径比, 并通过模型试验方法验证了结构的处理效果, 结果表明传统扩大管结构可以有效混合疏浚泥浆与固化剂。已有研究缺乏关于泥浆、固化剂在管内的混合效果及其影响因素的量化研究, 目前在装备的研发改进、工艺参数的调控等方面仍依赖工程经验。

本研究通过多相流数值模拟, 研究泥浆入口流速、固化剂入口流速、空气入口流速、扩大管管径等主要因素对固化剂空间分布特征与混合均匀性的影响, 对比分析常规扩大管及其改进结构的混合效果, 以期气动混流固化装备改进与关键工艺参数取值提供参考。

1 多相流数值模拟

1.1 数学模型

气动混流固化涉及泥浆、固化剂浆液、空气介质的管内流动, 各介质的化学组成、物理化学性质各不相同, 其流动属于气-液-液三相流。由于泥浆在流动区域内占主要部分, 因此将其作为主相, 其体积分数设为 α_1 , 而将固化剂浆液和空气设为次相, 其体积分数分别为 α_2 、 α_3 。假定各相在管内流动过程中互不相溶, 各相之间不存在能量交换与传热, 则管内的三相流过程可用流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型描述, 符合连续性方程与动量方程。

第 q 相的体积分数连续性方程为:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{v}_q) = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (1)$$

式中: t 为时间; α_q 为第 q 相的体积分数; ρ_q 为

第 q 相密度; v_q 为第 q 相速度; S_{α_q} 为质量源项。

各相体积分数由各相的体积分数之和为 1 的约束条件求解, 如下式所示:

$$\sum_{q=1}^3 \alpha_q = 1 \quad (2)$$

动量方程通过物性参数密度、黏度与体积分数联系, 计算公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v v) = -\Delta P + \nabla \cdot [\mu(\nabla v + v^T)] + \rho g + F \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; μ 为黏度; v 为速度; v^T 为速度转置矩阵; g 为重力加速度; F 为体积力; ΔP 为压力差。

在整个计算域内, 求解同一动量方程, 所得到的速度场被所有相所共用。

1.2 物性参数与边界条件

数值模拟中泥浆、固化剂、空气的物理参数如表 1 所示。其中, 泥浆的密度和黏度由广东江门某地疏浚泥实测得到, 为使其满足输送的流动性要求, 将其含水率调整至 110%; 固化剂的密度和黏度由自研水泥基固化剂实测得到。

表 1 泥浆、固化剂、空气的物理参数
Tab. 1 Physical parameters of mud, curing agent and air

介质类型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
泥浆	1 424	10.2
固化剂	1 516	4.2
空气	1.225	1.79×10^{-5}

在气动混流固化施工工艺中, 固化剂在泥浆中的掺入比是通过调控泥浆与固化剂的流量实现的, 并符合下式关系:

$$\alpha = \frac{v_2 S_2 \rho_2}{(1 + \beta_2) v_1 S_1 \rho_1} \quad (4)$$

式中: α 为固化剂掺入比, 为固化剂干重与泥浆湿重之比; v_1 、 v_2 分别为泥浆和固化剂入口的流速; S_1 、 S_2 分别为泥浆和固化剂入口的横截面积; ρ_1 、 ρ_2 分别为泥浆和固化剂的密度; β_2 为固化剂的水灰比。

式(4)表明, 其他条件一定的情况下, 固化剂在泥浆中的掺入比与两者的流速之比有关。为了

使数值模拟与实际工艺相符, 需要控制各入口的流速处于合理的范围内, 因此, 泥浆、固化剂、空气入口设为流速入口边界条件, 出口则采用压力边界条件, 出口压力为一个标准大气压。

1.3 几何模型与网格划分

管道结构形式是影响流体运动状态并继而影响混合效果的重要因素, 数值计算的几何模型考虑 2 种管道结构。结构 1 为常规扩大管结构, 其主体结构由左至右分别为泥浆输入管、扩大管、输出管, 泥浆输入管连接空气输送支管, 其夹角为 45° , 空气经由该支管斜向注入主管内, 扩大管内设有固化剂喷口, 固化剂通过该喷口沿径向注入主管内, 如图 1a) 所示。

结构 2 是在结构 1 基础上的改进结构, 其在扩大管中增设了 SL 型静态混合器。静态混合器是一类设置在管道中的静止结构, 利用其内部构件对流体的切割、旋转等作用增强混合效果^[20]。SL 型静态混合器中中间位置交叉的 2 片半椭圆板构成一个单元, 多个单元串联构成完整的静态混合器结构, 如图 1b) 所示。

结构 1、2 中的泥浆输入管、输出管管径均为 100 mm, 空气输送支管管径为 40 mm, 泥浆输入管与扩大管的长度为 2 m, 输出管的长度为 4 m, 固化剂喷口为直径 20 mm、长 5 mm 的圆柱体, 结构 2 中静态混合器单元数量为 4。

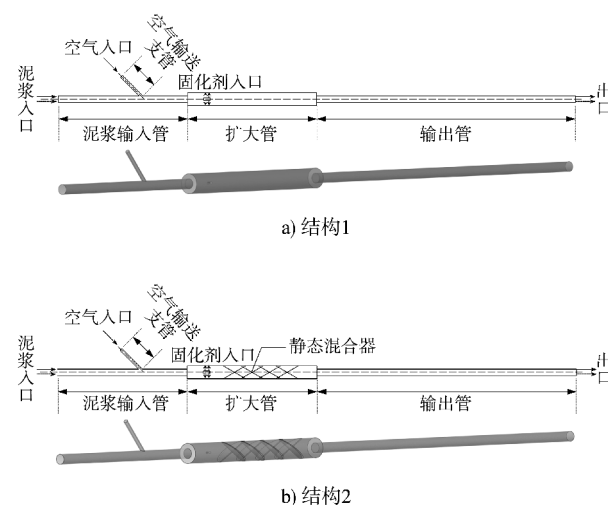


图 1 气动混流固化管道结构几何模型

Fig. 1 Geometric model of pipeline structure of pneumatic flow mixing method

由于几何结构不规则,流体域网格划分采用四面体与六面体混合网格,并在近壁面处设置5层边界层,增长比率为1.2,以提高壁面函数的求解表现。网格数量的确定需要综合考虑计算精度与计算效率,为确定合理的网格数量,对上述2种几何模型划分不同的网格数量并分析各入口总压随网格数量的变化规律,如图2所示。结果表明,对于结构1、2,当网格数量分别超过19.44万和28.38万个后,各入口总压达到稳定。基于网格无关性分析结果,分别以19.44万和28.38万个作为结构1、2后续计算中的网格数量,两者最终的网格划分如图3所示。

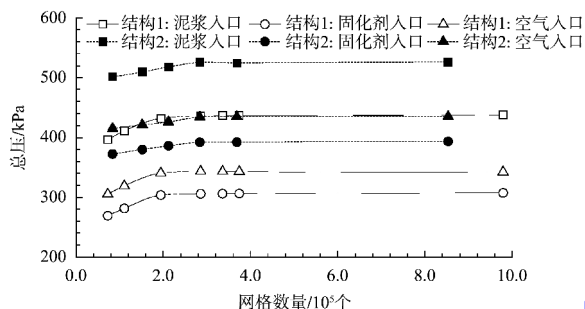


图2 入口压力随网格数量变化曲线
Fig.2 Curve of inlet pressure changing with number of grids

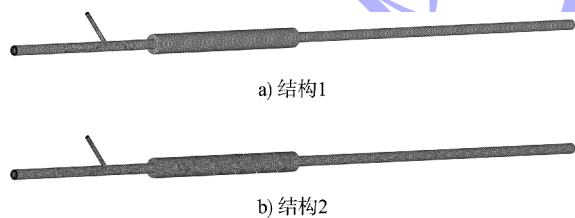


图3 几何结构网格划分
Fig.3 Mesh subdivision of geometric structure

1.4 计算工况

影响气动混流固化混合效果的因素主要有两类,一类是工艺参数,如泥浆、固化剂、空气的入口流速;一类是结构参数,如扩大管管径等。为全面分析各因素对混合效果的影响规律,共设计13个工况,如表2所示。

根据分析因素的不同,表2中工况可分为4组:1)工况1~4,固化剂与空气的掺入比例保持不变,研究泥浆入口流速的影响;2)工况1、5~7,

研究固化剂入口流速的影响;3)工况1、8~10,研究空气入口流速的影响;4)工况1、11~13,研究扩大管管径的影响。

表2 数值模拟工况
Tab.2 Numerical simulation conditions

工况	泥浆入口流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	固化剂入口流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	空气入口流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	扩大管 管径/mm
1	2	1.25	1.250	200
2	4	2.50	2.500	200
3	6	3.75	3.750	200
4	8	5.00	5.000	200
5	2	1.50	1.250	200
6	2	1.00	1.250	200
7	2	0.75	1.250	200
8	2	1.25	1.875	200
9	2	1.25	2.500	200
10	2	1.25	3.125	200
11	2	1.25	1.250	300
12	2	1.25	1.250	400
13	2	1.25	1.250	500

1.5 混合均匀性评价指标

工程中通常采用不均匀系数来定量评价多相体系的混合均匀性,其定义为研究对象体积分数的标准差与平均值之比^[20-23]。参考其定义,在各工况管路出口处设置一监测断面,该位置固化剂体积分数的不均匀系数定义为:

$$\varphi = \frac{\sigma}{\bar{\phi}} \quad (5)$$

其中:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^2} \quad (6)$$

式中: φ 为固化剂体积分数的不均匀系数; $\bar{\phi}$ 为该位置处所有节点固化剂体积分数的算数平均值; σ 为固化剂的体积分数的总体标准差; N 为该位置处的节点总数; ϕ_i 为第 i 个节点上固化剂的体积分数。

由于气动混流固化还涉及空气的影响,而空气不参与泥浆和固化剂之间混合后的化学反应,因此在计算固化剂体积分数时还需排除空气的影响,仅计算每个节点上固化剂体积与泥浆、固化剂体积和之比。

不均匀系数无量纲, 从其定义可以看出, 其反映固化剂体积分数在其平均值附近的波动程度, 不均匀系数越低, 则混合均匀性越高。

1.6 模型验证

为了评估上述计算模型的可靠性, 开展现场

试验, 试验装置如图 4 所示。天然疏浚泥在搅拌罐中完成加水制浆, 然后通过泥浆泵输送至管路系统中, 泥浆在管道内输送的过程中同步注入空气与固化剂, 并依次通过扩大管和输出管输送至集料仓内。

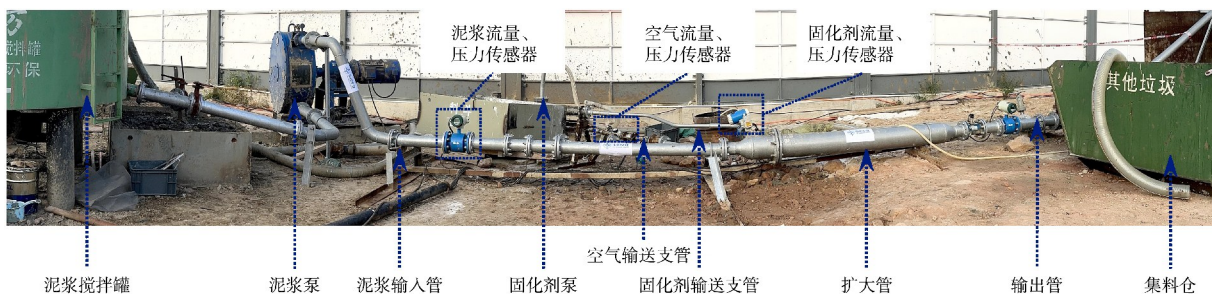


图 4 试验装置
Fig. 4 Testing apparatus

试验装置通过布置在泥浆输入管、空气输送支管、固化剂输送支管上的流量计对各相的入口流量进行实时监测, 并通过对泥浆泵、固化剂泵电机频率、空压机频率和管路泄压阀的调控实现各相流量的调控, 从而保证各相之间保持固定的混合比例。

试验装置与数值模拟中的几何模型具有相同的几何尺寸, 试验中泥浆、固化剂、空气的物理力学参数与数值模拟中的一致 (表 1)。试验工况为表 2 中的工况 1, 并同时采用 2 种不同结构开展试验。

流体的流量或流速是数值模拟与现场试验中的控制参数, 而管路中的压力响应为未知量, 因此在试验装置的各相入口均布置有压力传感器, 从而可以通过压力实测值与计算值的对比, 检验数值模拟的计算精度, 结果如表 3 所示, 数值模型计算结果与实测结果具有较高的吻合度, 各入口压力计算值较实测值的相对误差均 $<10\%$ 。同时, 由于数值计算中忽略了管路中各接头造成的压力损失以及泥浆、固化剂混合后相变效应造成的黏度提高, 入口压力计算值较实测值偏低 $4.5\% \sim 9.3\%$ 。

表 3 入口压力实测值与计算值对比
Tab. 3 Comparison of inlet pressure between measured and calculated values

位置	结构 1		结构 2	
	实测值/kPa	计算值/kPa	实测值/kPa	计算值/kPa
泥浆入口	469.5	439.4	562.1	521.7
空气入口	371.5	343.7	469.9	426.4
固化剂入口	329.8	306.4	405.2	386.9

2 数值模拟结果与分析

2.1 泥浆入口流速对混合效果的影响

泥浆入口不同流速条件下, 出口处固化剂体积分数的分布云图如图 5 所示。对于结构 1, 不同泥浆流速条件下, 管路出口处的固化剂体积分数均呈现“单中心”的分布模式, 即固化剂由某一集中分布区域向四周扩散, 在此过程中, 其体积分数逐渐降低, 同时可以看出, 固化剂分布区域的中心在整个出口断面上处于偏下方的位置, 造成该现象的主要原因是固化剂在向出口运动过程中受到向下的重力作用。

对于结构 2, 不同的泥浆流速下, 管路出口处的固化剂体积分数分布模式呈现较大的差异。当泥浆流速为 2 m/s 时, 呈现“单中心”分布模式, 当泥浆流速 $\geq 4 \text{ m/s}$ 时, 呈现“多中心”分布模式, 即固化剂由多个集中分布区域向四周扩散, 同时可以看出, 其分布中心的位置相比结构 1 更

接近管壁。

上述结果表明, 扩大管中增设 SL 型静态混合器后, 尽管其具有分流作用, 但在较低的泥浆流速下, 这种分流作用可能是不显著的, 而随着泥浆流速的提高, 静态混合器的分流作用逐渐显著。固化剂在通过静态混合器后被分成多股流体, 产生了显著的切向速度分量, 同时其径向运动速率有所提高, 因此固化剂在空间尺度上的整体分布相比结构 1 更为分散。

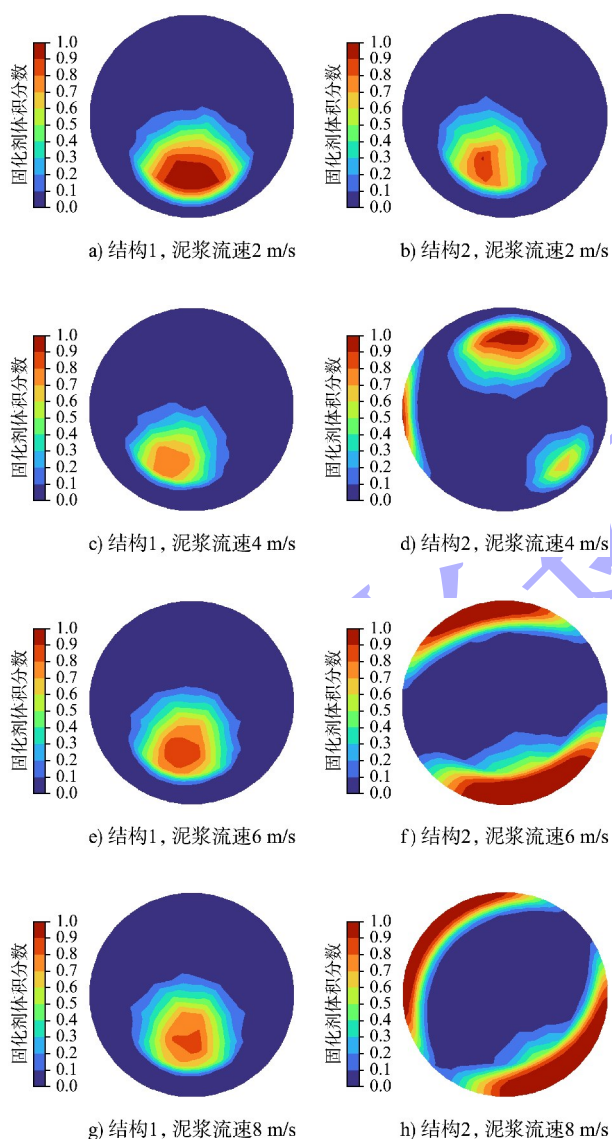


图 5 不同泥浆流速条件下出口断面固化剂体积分数云图
Fig. 5 Volume fraction nephogram of curing agent at outlet section under different slurry velocity conditions

为进一步分析固化剂与泥浆混合均匀性随泥浆流速的变化规律, 计算得到出口断面处固化剂

体积分数不均匀系数随泥浆入口流速的变化曲线, 如图 6 所示。可以看出, 对于结构 1, 随泥浆流速的增加, 出口断面不均匀系数呈现先增加后降低的规律。泥浆流速由 2 m/s 增加至 4 m/s 时, 不均匀系数提高 0.66; 泥浆流速由 4 m/s 增加至 8 m/s 时, 不均匀系数降低 0.51。造成该现象的原因可能与后文所述的固化剂流速和空气流速对混合均匀性的相反作用有关, 由于在各计算工况下固化剂和空气的掺入比例保持不变, 因此随着泥浆流速增加, 需要匹配较高的固化剂和空气流速, 在两者的综合作用影响下, 混合均匀性随泥浆流速最终呈现出非单调的变化特征。

对于结构 2, 其出口断面处的不均匀系数随着泥浆流速的增加而降低, 但曲线的斜率逐渐减小。泥浆流速由 2 m/s 增加至 8 m/s 时, 出口断面处的不均匀系数降低 1.58。结果表明, 对于结构 2, 增加泥浆流速有助于提升混合均匀性, 但提升效果会随着泥浆流速的增加而逐渐弱化。

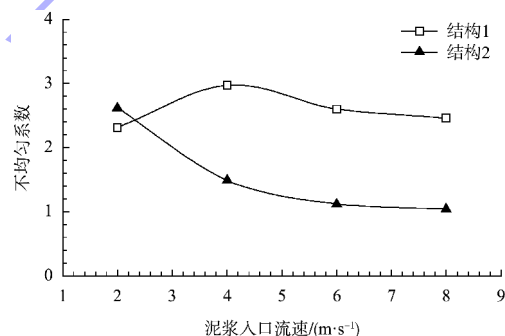


图 6 不同泥浆流速条件下出口断面的不均匀系数
Fig. 6 Uniformity coefficients at outlet section under different slurry velocity conditions

对比结构 1、2, 仅在泥浆流速为 2 m/s 时, 结构 1 出口断面处的不均匀系数低于结构 2, 两者相差约 0.31。随着泥浆流速增加, 结构 2 出口断面处的不均匀系数逐渐降低并低于结构 1, 前者较后者降低 1.42 ~ 1.48, 其混合均匀性显著提高, 表明静态混合器可有效改善混合均匀性。

2.2 固化剂入口流速对混合效果的影响

不同固化剂入口流速条件下, 出口处固化剂体积分数的分布云图如图 7 所示。可以看出, 由于计算工况中泥浆流速较低, 因此结构 1、2 出口

断面处的固化剂体积分数分布均呈现“单中心”的分布模式。总体上来看, 随着固化剂流速的增加, 2 种结构出口断面处的固化剂空间分布范围均有所扩大。这是由于固化剂沿径向喷射, 固化剂入口处流速增加, 径向的最大运动距离随之增加。

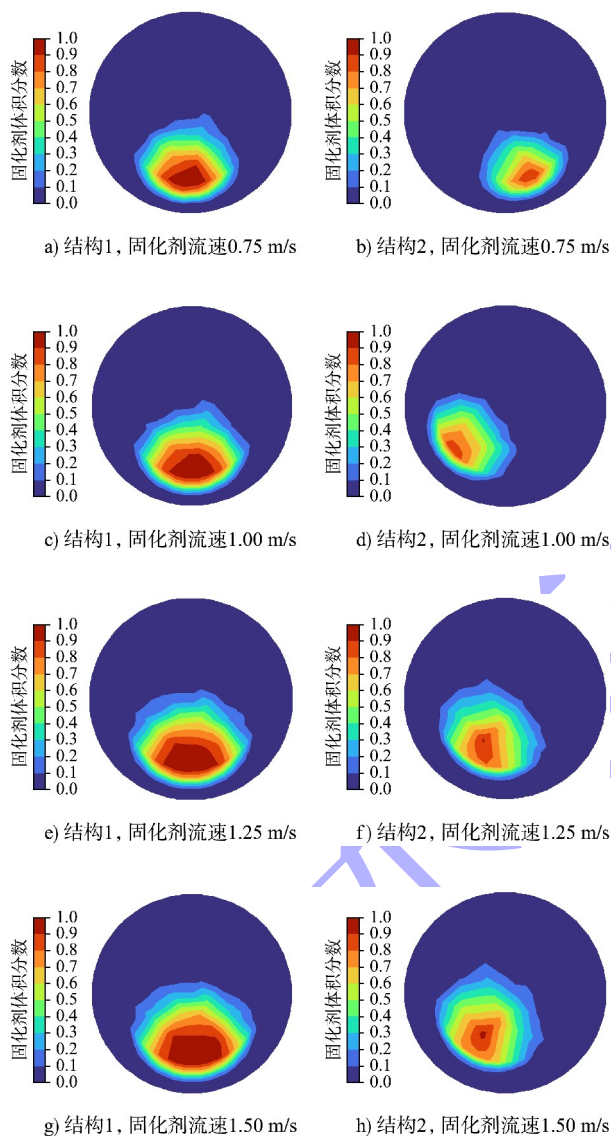


图 7 不同固化剂流速条件下出口断面固化剂体积分数云图
Fig. 7 Volume fraction nephogram of curing agent at outlet section under different curing agent velocity conditions

计算得到出口断面处固化剂体积分数不均匀系数随固化剂入口流速的变化曲线, 如图 8 所示。可以看出, 2 种结构出口断面处的不均匀系数均随固化剂流速的增加而降低。固化剂流速由 0.75 m/s 增加至 1.5 m/s, 结构 1 的不均匀系数降低 0.25, 而结构 2 则降低 0.35。结果表明, 固化剂流速的

增加有助于提高混合均匀性。由于固化剂的流速与其掺入比成正比关系, 因此当其他条件不变时, 固化剂掺入比的增加将有助于提高混合均匀性, 而当固化剂掺入比一定的情况下, 可通过减小固化剂喷口开孔尺寸的方法增加固化剂入口的流速, 从而提升混合均匀性。

此外, 在所计算的固化剂流速范围内, 结构 1 的不均匀系数较结构 2 低 0.31~0.49, 表明结构 1 的混合均匀性优于结构 2。主要是由于在较低的固化剂流速下, 结构 1 能达到更好的混合效果。

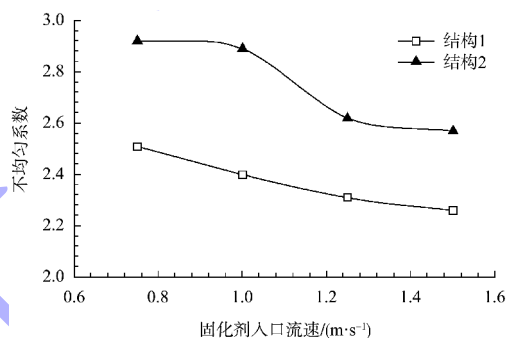


图 8 不同固化剂流速条件下出口断面的不均匀系数
Fig. 8 Uniformity coefficient at outlet section under different curing agent velocity conditions

2.3 空气入口流速对混合效果的影响

不同空气入口流速条件下, 出口处固化剂体积分数的分布云图如图 9 所示。由于泥浆流速较低, 2 种结构出口断面处的固化剂体积分数分布仍呈“单中心”的分布模式, 且随着空气流速的增加, 固化剂的分布范围没有明显的变化。

计算得到出口断面处固化剂体积分数不均匀系数随空气流速的变化曲线, 如图 10 所示。可以看出, 空气流速对 2 种结构呈现相反的影响规律。对于结构 1, 不均匀系数随着空气流速的增加而增加; 对于结构 2, 不均匀系数随空气流速的提高而降低。空气流速由 1.25 m/s 增加至 3.125 m/s, 结构 1、2 出口处的不均匀系数分别增加 0.12 和降低 0.23。

造成空气流速对 2 种结构混合均匀性影响规律差异的原因可能与不同结构中空气的不同运动模式有关。对于结构 1, 空气在管内基本为层流状态, 空气流速增加导致空气掺入比例及扩散范围

的提高,从而导致少部分区域内固化剂混合比例的降低,并最终导致混合均匀性的降低;而对于结构2,受静态混合器的作用,空气与泥浆、固化剂一同做螺旋交替式运动,空气流速的增加有助于提升管内的湍流水平,从而促进混合均匀性的改善。

由于空气流速对2种结构混合均匀性的影响规律相反,因此两者混合均匀性的优劣与空气流速有关。从图10可以看出,当空气流速 $<2.1\text{ m/s}$ 时,结构1的混合均匀性优于结构2;当空气流速 $>2.1\text{ m/s}$ 时,结构2的混合均匀性优于结构1。

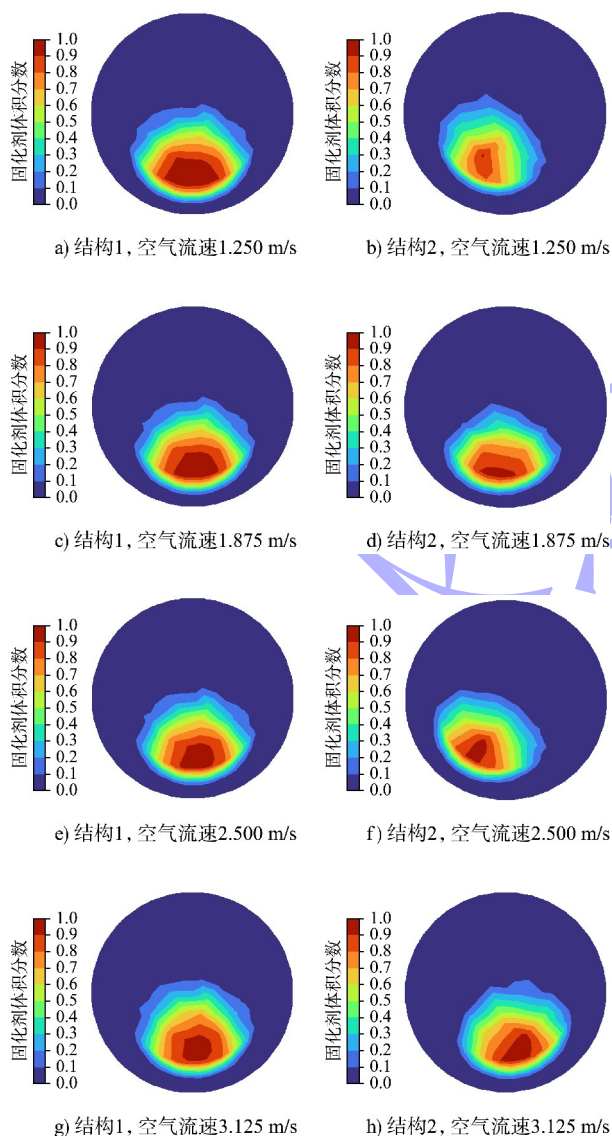


图9 不同空气流速条件下出口断面固化剂体积分数云图
Fig. 9 Volume fraction nephogram of curing agent at outlet section under different air velocity conditions

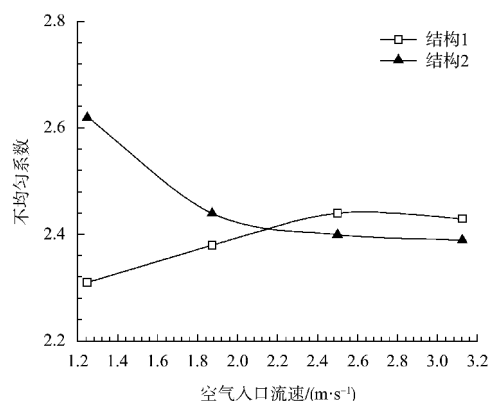


图10 不同空气流速条件下出口断面的不均匀系数
Fig. 10 Uniformity coefficients at outlet section under different air velocity conditions

2.4 扩大管管径对混合效果的影响

扩大管管径是影响混合效果的重要结构因素之一,不同扩大管管径条件下,出口处固化剂体积分数的分布云图如图11所示。可以看出,对于结构1,不同扩大管管径条件下,固化剂体积分数分布均呈“单中心”分布模式,但随着扩大管管径的提高,其分布模式出现了较大变化。扩大管管径为200 mm时,泥浆围绕固化剂所处的核心区域作环状流,在固化剂与下方管壁之间有一层泥浆薄膜。而随着扩大管管径提高至300 mm,环流状态难以继续保持,在重力和浮力的作用下,固化剂逐渐下沉至管壁附近,并沿管壁向前运动,最终表现出如图11c)、11d)所示的沿管壁呈带状分布的模式。随着扩大管管径的进一步提高,固化剂仍保持紧贴管壁的运动模式,但受上部泥浆和空气的挤压作用更加明显,其分布区域的面积被进一步压缩。

对于结构2,随着扩大管管径的提高,固化剂的体积分数分布模式逐渐由“单中心”模式转变为“多中心”模式。扩大管管径为200 mm时,流体经过静态混合器的分流作用后,固化剂在输出管内形成了合流。而随着扩大管管径的增加,固化剂在静态混合器作用下切向和径向速率变大,在输出管内难以再次形成合流,最终在出口处表现为“多中心”的分布模式。

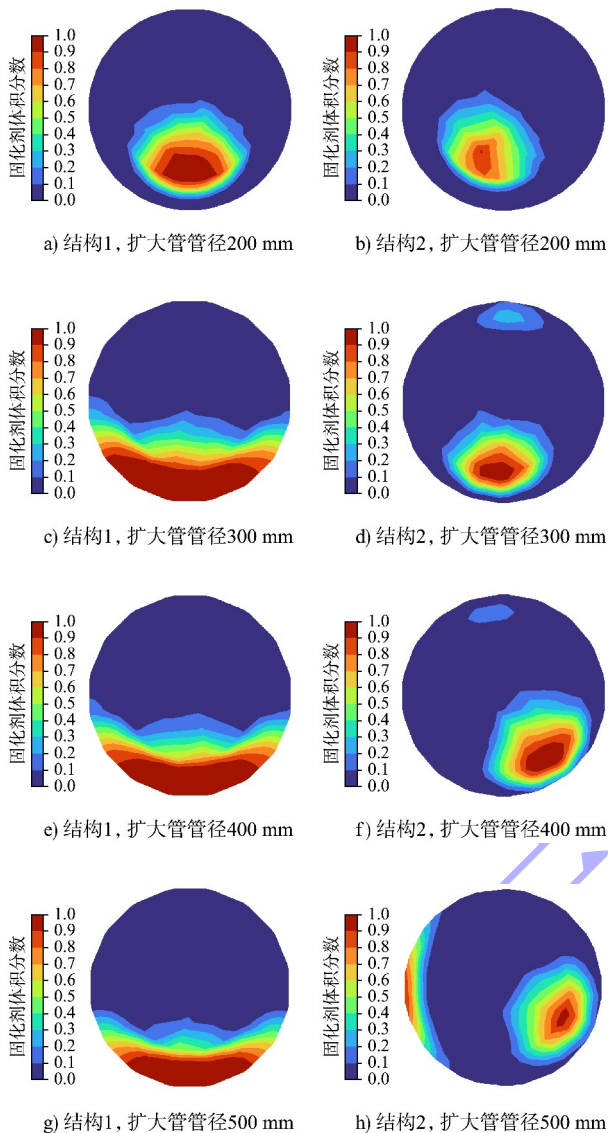


图 11 不同扩大管管径条件下出口断面固化剂体积分分数云图

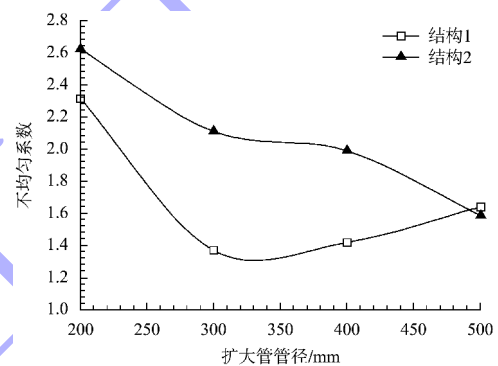
Fig. 11 Volume fraction nephogram of curing agent at outlet section under different expanded pipe diameter conditions

计算得到出口断面处固化剂体积分分数不均匀系数随扩大管管径的变化曲线, 如图 12 所示。可以看出, 对于结构 1, 出口断面处的不均匀系数随着扩大管管径的提高呈现先降低后增大的变化规律。扩大管管径由 200 mm 提高至 300 mm 时, 由于环状流状态受到破坏, 固化剂的分布面积较管径 200 mm 时有显著的增加, 其在泥浆中的扩散程度提高, 不均匀系数降低了 0.94, 混合均匀性显著改善。而扩大管管径由 300 mm 提高至 500 mm 时, 固化剂在泥浆中的扩散程度降低, 不均匀系数提高了 0.27, 混合均匀性有所降低。不均匀系

数在扩大管管径为 300 mm 时取得最小值, 表明此时混合均匀性最高。

对于结构 2, 出口断面处的不均匀系数随着扩大管管径的增大而降低, 扩大管管径由 200 mm 增大至 500 mm 时, 不均匀系数降低 1.03, 表明扩大管管径的增大有利于提升混合均匀性。

对比结构 1、2, 由于计算工况中泥浆流速为 2 m/s 的较低流速, 因此大部分工况中结构 2 的混合均匀性低于结构 1, 但从不均匀系数随扩大管管径的发展趋势来看, 当扩大管管径大于 500 mm 时, 结构 2 的混合均匀性可能优于结构 1。

图 12 不同扩大管管径条件下出口断面的不均匀系数
Fig. 12 Uniformity coefficient at outlet section under different expanded pipe diameter conditions

3 结论

1) 扩大管管径为 200 mm 时, 当泥浆入口流速 ≥ 4 m/s, 增设静态混合器的改进结构出口处的不均匀系数较常规扩大管结构降低 50%~58%, 改进结构的混合均匀性优于常规结构。

2) 对于改进结构, 提高泥浆、固化剂、空气的入口流速均可改善混合均匀性, 在所计算工况范围内, 泥浆、固化剂、空气入口流速每提高 1 m/s, 出口处不均匀系数平均下降分别为 0.26、0.70 和 0.26, 提升固化剂入口流速对混合均匀性的改善效果较为显著。

3) 对于改进结构, 混合均匀性随扩大管管径的增大而提高, 扩大管管径由 200 mm 提高至 500 mm, 出口处不均匀系数可降低约 40%。

感谢国家超级计算广州中心对本文数值仿真研究工作的支持。

参考文献:

- [1] 黄英豪, 戴济群. 我国疏浚淤泥处置与利用研究进展[J]. 中国水利, 2024(3): 25-28.
HUANG Y H, DAI J Q. Research progress on disposal and utilization of dredged sediment in China[J]. China water resources, 2024(3): 25-28.
- [2] 邢瑜, 杨天件, 廖岩, 等. 海洋疏浚物资源化利用的思考与建议[J]. 环境保护, 2022, 50(13): 50-53.
XING Y, YANG T J, LIAO Y, et al. Thoughts and suggestions on resource utilization of ocean dredged materials [J]. Environmental protection, 2022, 50(13): 50-53.
- [3] 邓琪丰, 刘卫东, 韩云婷. 河湖疏浚底泥资源化利用研究进展[J]. 中国水运, 2022, 22(2): 138-140.
DENG Q F, LIU W D, HAN Y T. Research progress on resource utilization of dredged sediment in rivers and lakes[J]. China Water Transport, 2022, 22(2): 138-140.
- [4] 国务院. 国务院关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知[EB/OL]. (2018-07-14) [2024-06-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5313946.htm.
The State Council. Notice of the State Council on strengthening the protection of coastal wetlands and strictly controlling reclamation [EB/OL]. (2018-07-14) [2024-06-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5313946.htm.
- [5] 周睿博, 黄伟豪. 新吹填超软土工程特性研究进展综述[J]. 路基工程, 2014(6): 7-10.
ZHOU R B, HUANG W H. On research progress in engineering characteristics of fresh dredger filled super soft soil[J]. Subgrade engineering, 2014(6): 7-10.
- [6] 邬德宇, 曲贝贝, 李金峰, 等. 内河疏浚土抗剪强度随含水率变化规律的试验研究[J]. 水运工程, 2022(S2): 22-28.
WU D Y, QU B B, LI J F, et al. Experimental study on variation law of shear strength of river dredged silt with water content[J]. Port & waterway engineering, 2022(S2): 22-28.
- [7] 陈明, 房宇航. 疏浚土物理力学指标的相关性分析[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(6): 27-30.
CHEN M, FANG Y H. Correlation analysis of physical and mechanical indexes of dredged soil [J]. China harbour engineering, 2021, 41(6): 27-30.
- [8] 鲍树峰, 董志良, 娄炎, 等. 高黏粒含量新近吹填淤泥加固新技术室内研发 II [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(9): 1707-1715.
BAO S F, DONG Z L, LOU Y, et al. Laboratory research on new improvement technology of newly hydraulic reclamation mud with high clay content II [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2015, 49(9): 1707-1715.
- [9] 张吕华, 张浩. 真空预压法处理浅层吹填疏浚土效果分析与研究[J]. 珠江水运, 2021(24): 93-96.
ZHANG L, ZHANG H. Analysis and study on the effect of vacuum preloading method in treating shallow dredged soil[J]. Pearl River water transport, 2021(24): 93-96.
- [10] 赵朕, 葛利炎. 疏浚底泥脱水技术发展与应用[J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(S1): 72-76.
ZHAO Z, GE L Y. Development and application of dewatering technology for dredged sediment [J]. Port engineering technology, 2024, 61(S1): 72-76.
- [11] 魏元. 水利疏浚结合机械脱水一体化底泥处理工艺研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(1): 15-17.
WEI Y. Research on integrated sediment treatment process of hydraulic dredging combined with mechanical dehydration[J]. Engineering and technological research, 2024, 9(1): 15-17.
- [12] 王铎鑫, 江朝华, 孙逸琳, 等. 低碳地聚合物固化处理疏浚淤泥力学性能试验研究[J]. 水运工程, 2022(8): 40-44, 57.
WANG X X, JIANG C H, SUN Y L, et al. Experimental study on mechanical property of dredged silt treated by low carbon geopolymer[J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 40-44, 57.
- [13] KITAZUME M. The pneumatic flow mixing method[M]. London: CRC Press, 2017.
- [14] KITAZUME M, SATOH T. Development of a pneumatic flow mixing method and its application to Central Japan International Airport construction[J]. Ground improvement, 2003, 7(3): 139-148.
- [15] 渡邊 雅哉. 羽田再拡張事業 D 滑走路における管中混合固化処理船団[J]. 建設の施工企画, 2010(2): 58-62.
WATANABE M. The fleet for in-pipe mixed curing treatment in the D taxiway of the Haneda Airport expansion project [J]. Construction project planning, 2010(2): 58-62.

(下转第 145 页)