



耙腔流场分析与结构优化

陈浩^{1,2}, 孙守胜^{1,2}, 李章超^{1,2}, 王晓萌³, 张路生^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461;

2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457; 3. 中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300450)

摘要: 针对耙吸挖泥船的耙头在挖掘黏土时, 其内部流场情况不清晰的问题, 本文对耙腔内部流场进行了仿真计算、分析及优化。采用计算流体动力学(CFD)值模拟计算技术, 分析新老耙头的总压差、静压差及截面流速的变化情况。得出设置反弧形导流板后, 腔体内部漩涡区域减少, 能量损失降低, 清水流动性能提高。结果表明: 新耙头内部设置流线型腔体, 可使流动平顺, 输送阻力降低, 截面流速趋于合理。其各项性能均优于老耙头。

关键词: 耙头; 耙腔; 流场; 导流板

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0043-06

Flow field analysis and structure optimization of drag cavity

CHEN Hao^{1,2}, SUN Shou-sheng^{1,2}, LI Zhang-chao^{1,2}, WANG Xiao-meng³, ZHANG Lu-sheng^{1,2}

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China;

3. China Communications(Tianjin) Dredging Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Regarding the problem that the internal flow field of the draghead of the rake suction dredger is not clear when excavating clay, the flow field in the drag cavity is simulated, analyzed and optimized. The change of total pressure difference, static pressure difference and cross section velocity of the new and old dragheads are analyzed by using Computational Fluid Dynamics(CFD) value simulation calculation technique. The results show that the vortex area in the drag cavity is reduced, the energy loss is reduced, and the flow performance of clean water is improved. The conclusions are that the streamlined internal cavity of the new draghead makes the internal flow smooth, the transport resistance is reduced, and the cross section velocity tends to be reasonable. Its performance is better than the old draghead.

Keywords: draghead; drag cavity; flow field; guide plate

1 黏土耙头计算模型

中交天津航道局有限公司独立自主设计了两款黏土耙头, 建立了符合计算要求的耙腔仿真模型。为降低模型计算量, 一些细节做了简化处理, 耙腔流场计算简化模型见图1, 假设耙头吸口与泥土接触, 耐磨块压在泥土上, 流体仅从耙齿后方的空隙进入耙腔^[1]。在耙腔进口区域的外部水体设置一个较大的自由出流边界见图1 A 区域, 模

拟耙腔外部水体; B 区域为耙腔中活动罩内部腔体, 按实际结构尺寸进行建模, 部分内部结构简化处理; C 区域为反弧板区域, 同时增加了内部封闭腔体, 此处可以作为格栅防堵喷嘴的水箱使用; D 区域为耙腔固定体内部腔体, 按实际结构尺寸进行建模; E 区域为耙腔出口延长区域, 保证流体出流时的稳定流态^[2]。

收稿日期: 2022-07-11

作者简介: 陈浩(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚相关技术及设备的研究。

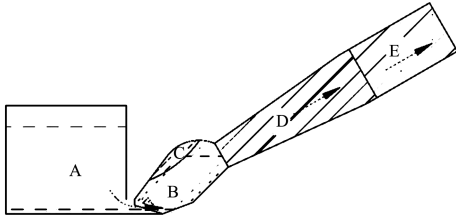


图1 黏土耙头流场仿真示意

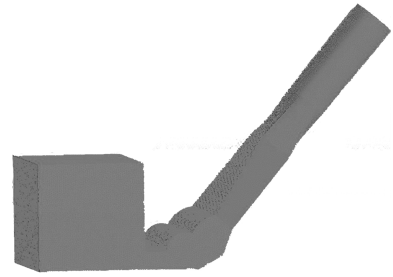
2 三维建模与网格划分

2.1 三维建模

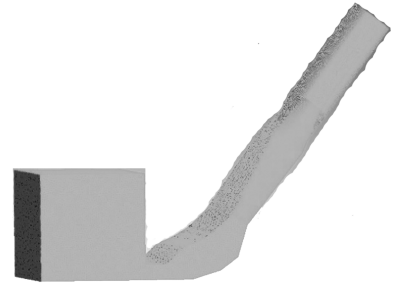
建立耙腔外部水体和耙腔三维模型，真实模拟耙腔内流体，从腔体外部进入耙腔到流出的整个过程，并对部分结构进行简化处理，外部水体区域为 2 500 mm×2 500 mm，耙头出口外流场区域做加长处理以减小数值模拟误差，长度为 500 mm^[3]。

2.2 网格划分

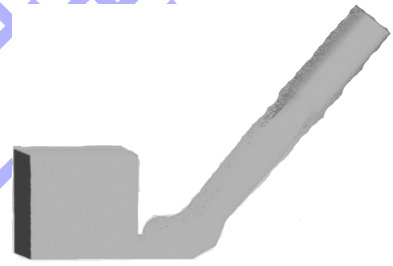
通过流体仿真计算软件，对耙腔内部流场三维模型进行非结构网格划分，生成老耙头的网格总数量为 519.29 万个，新耙头网格总数量为 463.25 万个，加装导流板的三维模型划分网格后，老耙头网格总数为 508.32 万个，新耙头网格总数为 457.61 万个，见图 2。



b) 新耙头未加装导流板



c) 老耙头加装导流板



d) 新耙头加装导流板

图2 耙头腔体内的流体网格划分

2.3 数值模拟计算

任何流体问题都要满足质量守恒方程，即连续性方程，在直角坐标系中的微分形式如下：

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

同样任何流体系统必须满足动量守恒方程，在直角坐标系中的微分形式，即 N-S 方程如下：

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] = 0 \\ \rho \frac{dv}{dt} = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] = 0 \\ \rho \frac{dw}{dt} = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： t 为时间变量； ρ 为流体的密度； F_x 、 F_y 、 F_z 为质量力； p 为法向应力(压力)； u 、 v 、 w 为速度分量； x 、 y 、 z 为空间坐标； μ 为湍流系数， ε 为耗散率。由于该计算中不涉及热传导的问题，

所以不涉及热导方程。N-S 方程是描述流体运动的方程，它和流体的连续性方程一起构成流体流动的基本控制方程。

$k-\xi$ 模型是一种湍流模型，是工程流体计算中

的主要工具, 是实验现象中的半经验公式, 由于该经验公式在计算强湍流、弯曲壁面或弯曲流线流动时, 会产生一定的失真。为此, 提出了修正方案, 本模型中采用的是 RNG $k-\xi$ 模型如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压缩湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; S_k 和 S_ε 为用户定义的源项。对于耙头, 数值解法采用 SIMPLEC 解法, 由于采用诸多假设和简化, 所以二阶精度足以满足计算要求, 各离散项均采用二阶精度^[4]。

3 老耙头计算结果与分析

3.1 边界条件及计算模型

整个流场的介质为水, 压力为 101 kPa, 湍流模型为 k-Epsilon 模型, 入口设置为自由出流, 给定的压强值为基于速度垂直方向分量的总压。耙头固定体出口处的圆形端面设定为速度边界, 出口设置为标准速度出口, 速度设置为 6 m/s, 管径

为 DN1000 mm, 流量约 1.69 万 m³/h。其它壁面全部设定为墙面, 为无滑移壁面。

耙腔内流动的介质设定为单一介质清水。通过清水流场即可反映耙腔内部结构线型的优劣, 在不考虑泥土影响的情况下, 该流体属于不可压缩流体, 即密度不随时间变化而变化。另外, 耙头清水流场模拟计算属于大空间的模拟计算, 重点在非边界层的区域, 所以边界层可以忽略^[5]。

求解格式设置为高级求解模式 (high resolution), 最大迭代设置 1 000 步, 收敛最大残差值设置为 10⁻⁴。计算到相应步数时收敛, 计算结束。选取典型截面分析计算结果, 见图 3。

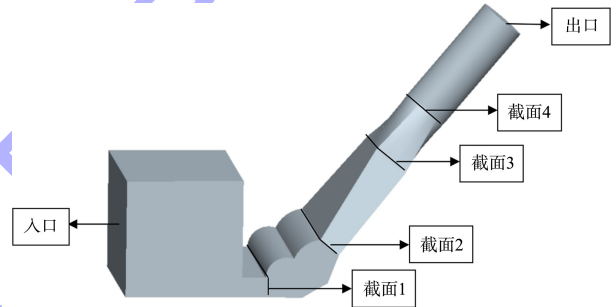


图 3 典型截面选取

3.2 老耙头加装导流板前后计算结果

由表 1 可知, 从耙头进口处到出口处, 其进口和出口对应截面 1 和 4, 老耙头总压力差 $\Delta P_1 = 2.980$ kPa。老耙头加装导流板后, 总压力差 $\Delta P_2 = 2.798$ kPa, 总压力损失降低了 6.1%。

表 1 老耙头加装导流板前后各截面总压力

名称	总压力/kPa					
	进口	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	出口
老耙头未加导流板	101.325	100.514	98.709	98.007	97.534	96.721
老耙头加装导流板	101.325	100.536	98.910	98.223	97.738	96.928

由表 2 可知, 从耙头进口处到出口处, 其进口和出口对应截面 1 和 4, 老耙头静压力差

$\Delta P_3 = 14.053$ kPa, 老耙头加装导流板后静压力差 $\Delta P_4 = 13.809$ kPa, 静压力损失降低了 1.74%。

表 2 老耙头加装导流板前后各截面静压力

名称	静压力/kPa					
	进口	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	出口
老耙头未加导流板	101.234	92.150	91.165	93.825	78.097	78.496
老耙头加装导流板	101.235	92.200	91.915	94.132	78.391	78.746

由表 3 可知, 从耙头进口处到出口处, 其进口和出口对应截面 1 和 4, 老耙头加装导流板后

各个截面的速度略有降低, 但不影响介质的输送。

表 3 老耙头加装导流板前后各截面速度

名称	速度/(m·s ⁻¹)					
	进口	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	出口
老耙头未加导流板	0.423	4.065	3.730	2.865	6.184	6.046
老耙头加装导流板	0.423	4.064	3.568	2.841	6.173	6.039

3.3 老耙头加装导流板前后流场对比

选取 2 个基准剖面进行老耙头加装导流板前后的流场特性对比, 得出加装导流板对耙腔整体流动性能更加有利, 基准剖面见图 4。

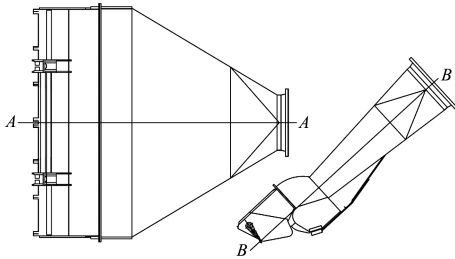
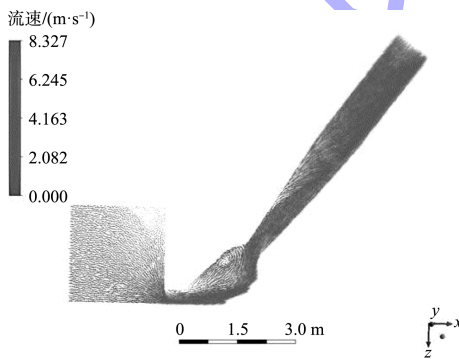
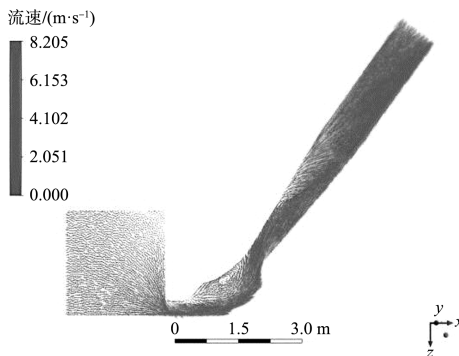


图 4 耙头 A-A 和 B-B 剖面

通过图 5 可知, 不加反弧形导流板时, 活动罩圆弧板处存在漩涡区, 且漩涡区后存在大量约 1.5 m/s 左右的低速区域流速。加装反弧形导流板后, 漩涡区域基本消失, 耙腔内流动平顺, 固定体内流速较均匀。



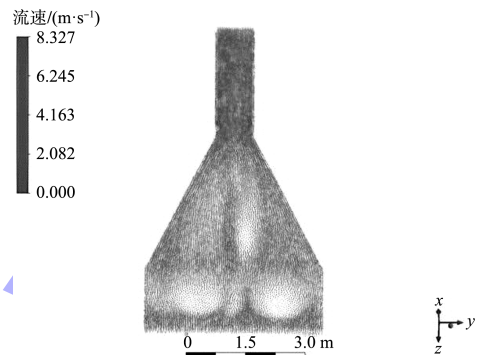
a) 加装导流板前流场



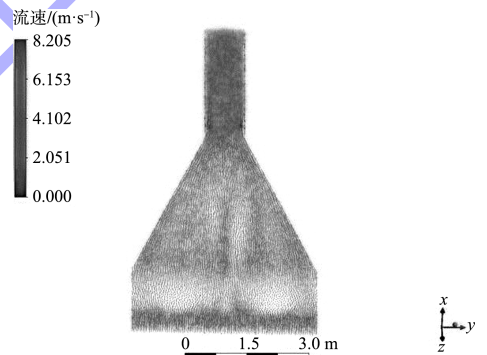
b) 加装导流板后流场

图 5 A-A 剖面速度向量

通过图 6 可知, 加反弧形导流板前, 活动罩圆弧板处存在 2 个漩涡区域。加装反弧形导流板后, 漩涡区域消失, 耙腔流动平顺。



a) 加装导流板前流场



b) 加装导流板后流场

图 6 B-B 剖面速度向量

通过典型截面的速度向量图对比, 发现集中在活动罩圆弧板处的耙腔内有漩涡区。由于漩涡区内流体互相碰撞, 进而加大了能量损失, 增加耙腔内部输送阻力, 影响内部流动介质的高效输送。因此, 当进行耙头设计时, 在活动罩圆弧板处加装反弧形导流板可以改善耙腔内部介质的流动状态, 降低能量损失, 提高输送效率。

4 新耙头计算结果及分析

4.1 边界条件及计算模型

流场内介质为水, 压力为 101 kPa, 湍流模型为 k-Epsilon 模型, 入口设置为自由出流, 给定的

压强值为基于速度垂直方向分量的总压力。在耙头固定体出口处的圆形端面设定为速度边界, 出口设置为标准速度出口。其它无滑移壁面设定为墙面。

迭代设置 1 000 步, 收敛最大残差值设置为 10^{-4} 。计算到 356 步时收敛, 计算结束。加装导流板之后, 计算到 516 步时收敛, 计算结束。

表 4 新耙头加装导流板前后各截面总压力

名称	总压力/kPa					
	进口	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	出口
新耙头未加导流板	101.325	100.727	99.925	99.275	98.910	98.162
新耙头加装导流板	101.325	100.741	99.921	99.290	98.905	98.145

由表 5 可知, 从耙头进口到出口处, 新耙头静压力差 $\Delta P_7 = 13.368$ kPa, 新耙头加装导流板后

表 5 新耙头加装导流板前后各截面静压力

名称	静压力/kPa					
	进口	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	出口
新耙头未加导流板	101.221	93.661	92.889	93.513	80.293	80.061
新耙头加装导流板	101.221	93.605	92.853	93.447	80.209	80.055

由表 6 可知, 从耙头进口到出口处, 新耙头加装导流板后截面 1 和 3 速度略有增加, 截面 2 和 4 速度

表 6 新耙头加装导流板前后各截面速度

名称	速度/($m \cdot s^{-1}$)					
	进口	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	出口
新耙头未加导流板	0.454	3.749	3.651	3.369	6.076	6.025
新耙头加装导流板	0.454	3.764	3.650	3.389	6.086	6.024

4.3 新耙头加装导流板前后流场对比

由图 7 可知, 不加反弧形导流板前, 漩涡区域很大, 且漩涡区后存在大量 1.5 m/s 左右低速区域。加装反弧形导流板后, 漩涡区域基本消失, 耙腔内流动平顺, 固定体内流速较均匀。

4.2 新耙头加装导流板前后计算结果

由表 4 可知, 从耙头进口到出口处, 新耙头总压力差 $\Delta P_5 = 1.817$ kPa。新耙头加装导流板后, 总压力差 $\Delta P_6 = 1.836$ kPa, 此处总压差的略微提高是由于加装导流板后, 该区域局部流速提高, 导致一些能量的损失, 但总体影响不大。且与老耙头相比新耙头总压力差均有所下降。

静压力差 $\Delta P_8 = 13.396$ kPa, 静压力损失略微提高, 但对耙头整体流动性无较大影响。

略有降低, 但相对耙头整体流速来说, 相同截面的流速变化较小, 对于介质的流动影响可以忽略不计。

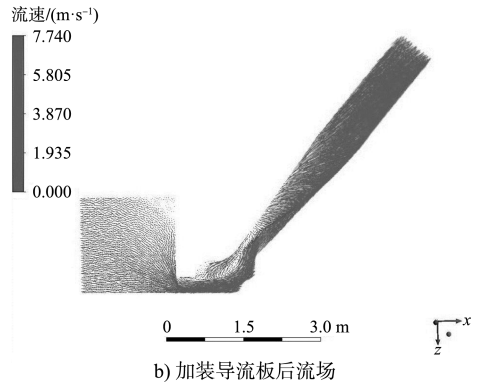
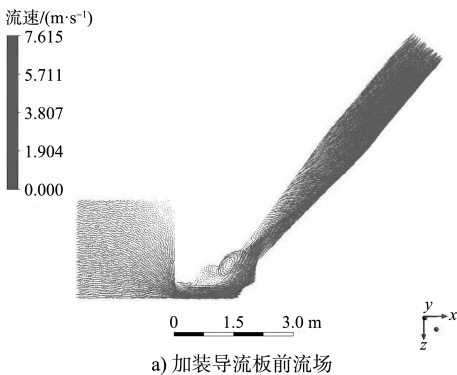


图 7 A-A 剖面速度向量

由图 8 可知, 加反弧形导流板后, 漩涡区域在 B-B 截面略有增加, 但基于计算结果, 漩涡区的略微增加并未带来更多能量损失, 主要原因为

A-A 截面的漩涡区域在增加导流板后基本消失，因此设置导流板是极有必要的。

围减小；固定体内部流动性更趋于平稳。

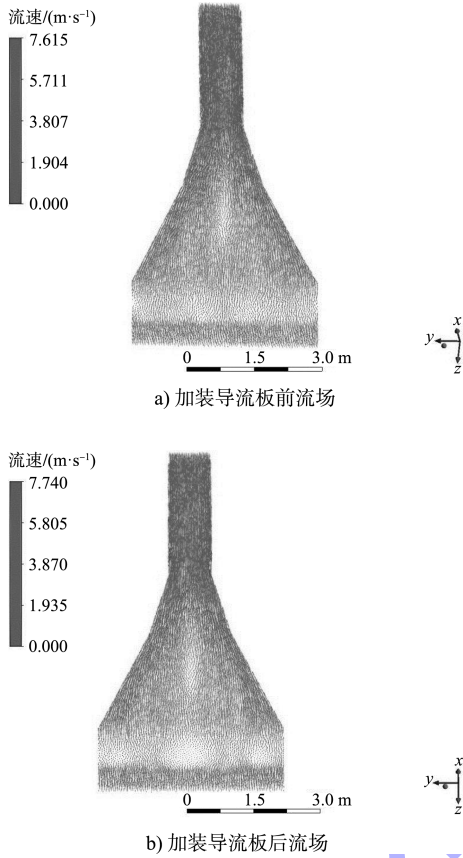


图 8 B-B 剖面速度向量

通过新、老耙头对比发现，在加装导流板后，新耙头流场的各项性能均优于老耙头，相较于老耙头，新耙头总的压力损失降低幅度明显；静压差略有降低；各截面流速趋于合理，流速波动范

5 结论

1) 耙腔内设置为流线型腔体，新耙头各项性能均优于老耙头，有利于降低耙头输送阻力，提高挖掘效率。

2) 耙腔内活动罩的圆弧板处设置反弧形导流板，可以明显改善泥浆在此处的流动状态，减少漩涡区的产生，降低能量损失，提高泥浆的输送效率。

3) 采用流场仿真软件可以优化耙腔内部线型，提高耙头设计效率。

参考文献：

[1] 孙守胜, 肖博, 林森, 等. 大型耙吸挖泥船系列化耙头研发与应用[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(1): 64-67.

[2] 郑金龙, 倪崇本, 何炎平. 耙吸挖泥船耙头内流场分析与优化[J]. 水运工程, 2017(5): 168-172.

[3] 陈浩, 孙守胜, 郭志勇. 耙头高压冲水喷嘴流场数值模拟及分析[J]. 水运工程, 2022(2): 202-208.

[4] 李章超, 孙守胜, 杨建华, 等. 基于 CFD 方法的新型密实砂耙头内固液两相流动特性研究[C] // 中国交通建设股份有限公司 2014 年现场技术交流论文集, 北京: 中国交通建设股份有限公司, 2014: 311-314.

[5] 洪国军, 王健, 林凤. 自航耙吸挖泥船耙头模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2008(4): 19-22, 86.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 27 页)

[7] 包晓东. 浅谈混凝土薄膜养护工艺[J]. 青年文学家, 2009(24): 166.

[8] YOUNG J F, BERGER R L, BREESE J. Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1974, 57(9): 394-397.

[9] GOODBRAKE C J, YOUNG J F, BERGER R L. Reaction of beta dicalcium silicate and tricalcium silicate with carbon dioxide and water vapor[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1979, 62(3/4): 168-171.

[10] 缪昌文. 丹麦预制构件成型工艺及养护工艺介绍[J]. 混凝土与水泥制品, 1987(6): 57-59.

[11] MONKMAN S, SHAO Y X. Assessing the carbonation behavior of cementitious materials[J]. Journal of materials in civil engineering, 2006, 18(6): 768-776.

[12] 荣艳群. 蒸汽养护技术在严寒地区混凝土预制构件生产中的应用[J]. 福建水力发电, 2020(1): 48-51.

[13] 罗卫华, 邹团结, 陈康军, 等. 混凝土智能蒸汽养护系统在桥梁预制构件中的应用研究[J]. 公路工程, 2015, 40(4): 158-162.

(本文编辑 王聰)