

吕建兵, 陈祖儒, 李佳, 等. 波纹排水管结晶沉积机理及应用研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 24-37.

DOI: 10.11932/karst20250101

波纹排水管结晶沉积机理及应用研究

吕建兵¹, 陈祖儒¹, 李佳², 冯力¹, 董勤喜³, 王辉³, 张国才⁴

(1. 广东工业大学, 广东 广州 510006; 2. 江门银洲湖高速公路有限公司, 广东 江门 529100;

3. 海南大学, 海南 海口 570228; 4. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 石灰岩地区的隧道经常面临排水管淤堵问题, 采用模型模拟分析排水管淤堵形成过程和影响因素较为重要。为得到能够贴合现实工况的预测模型, 考虑流场与化学反应耦合, 同时结合物质传递过程, 构建起对波纹管类型的曲线边界的计算与模拟模型。采用相场法与动网格结合的手段得到在自由液面情况下, 结晶生成同时影响诱发流场变化的过程。结果表明: 该模型对内壁摩擦系数为0.2~0.3的情况有较好的准确度, 摩擦系数低于0.2时, 模拟则出现较大误差, 原因可能是低摩擦壁面需要调整壁面函数, 同时对沉积公式进行系数修正。内壁摩擦系数高于0.3的情况则因为等效砂砾粗糙度过高, 失去边界层, 模拟效果较差, 模型不再适用。根据上述结果, 将对粤北某隧道排水管的应用进行模拟, 并根据模型预测的淤堵时间来进行处治, 将有效预防排水管的淤堵。

关键词: 隧道排水管结晶; 相场法; 动网格; 多场耦合

创新点: (1) 相场法与动网格结合: 采用相场法与动网格技术, 模拟自由液面下结晶生成对流场的影响, 该技术能更贴合实际; (2) 摩擦系数适用范围优化: 明确了模型在摩擦系数0.2~0.3范围内的适用性, 为实际工程应用提供了可靠依据。

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2025)01-0024-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

石灰岩地区的隧道经常面临排水管淤堵问题, 而淤堵的形成是多方面的。在灰岩地区, 其山体岩溶水包含较多的钙离子和少部分的镁离子和其他离子, 容易产生碳酸钙和硫酸镁等结晶, 其中以碳酸钙结晶为主, 进而导致隧道排水系统淤堵^[1-2]。针对这种结晶生成的淤堵问题, 国内外均有学者对其主要的钙离子来源做了研究。研究发现, 碳酸钙结晶既有来源于隧道衬砌的混凝土^[3-4], 也有来自于周边可溶性灰岩溶解的碳酸钙^[5], 同时碳酸钙溶解度与pH值定义的溶解度密切相关, 表明EC和pH都可以用

作周围土壤/孔隙水中碳酸钙溶解的指标^[6]。此外, 也有学者指出水中钙离子与空气中的CO₂反应形成碳酸钙结晶。研究表明, 洞穴内CO₂浓度对碳酸钙沉淀过程有显著影响, CO₂浓度上升可以使水溶液中钙离子饱和度增加, 减少滴水中的CO₂释放, 进而阻碍方解石生成, 影响结晶速度和质量^[7]。

对于影响排水系统内结晶生成的影响因素, 在众多研究也较为关注, 例如在非岩溶地区研究发现, 隧道初期衬砌会被地下水带出大量钙离子, 同时空气中部分CO₂溶解进入地下水形成碳酸根离子, 其与从隧道初期衬砌被地下水带出大量钙离子结合形成碳酸钙沉淀^[8]。而在不同碱性环境下, 结晶产物

基金项目: 国家自然科学基金-青年科学基金项目(42002249); 广东省重点领域研发计划项目(2019B110207001); 国家重点研发计划资助(“海洋环境安全保障与岛礁可持续发展”重点专项 2023-3.1)

第一作者简介: 吕建兵(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事路桥工程研究。E-mail: ljb@gdut.edu.cn.

收稿日期: 2024-01-14

均主要是方解石型的碳酸钙。溶液的 pH 主要影响结晶体的堆积方式、晶型和晶体大小, pH 增加会导致晶体更紧密堆积, 晶粒更小且均匀。同时, 结晶效率随 pH 增加而提高^[9-10]。在一些现场调研与室内实验中, 均可以发现生物对结晶生成影响, 即微生物活动改变了排水管内 pH, 使得管内环境更适宜碳酸钙沉积^[5, 11-13]。Wei 等^[14]通过研究电场作用, 基于离子电荷属性, 进行了隧道晶体轴向分布的实验。研究发现, 在无电场作用的管道中, 半流动状态下沉积物沿轴线分布, 并在管道后部趋于均匀。而在电场作用下, 结晶量早期波动后稳定, 波动区结晶量较多, 均匀区较少, 且均匀区长度较普通管道长。

为了评价隧道在投入运营后排水系统结晶的风险状态, 学者们结合上述室内实验提出了隧道排水系统结晶风险的模糊评价模型。这种模型可以通过不断地改进和发展来解决相关问题^[15], 但对水动力与沉积之间的相互耦合影响的作用并未明确给出影响判断。

关于描述水动力与沉积之间的相互耦合影响的模型, 在 20 世纪 70 至 90 年代, 已有学者提出方解石溶解、沉积动力 PWP 模型^[16]与沉积动力学 DBL 模型^[17], 尽管这些早期模型的结果是可行的, 但它们仍存在问题。随着计算能力和软件技术的提升, 近年来, 一些学者开发出了更贴近实际情况的计算机模型。例如毛成君等^[18]通过利用 N-S 方程与菲克第一定律结合, 同时考虑化学反应, 基于动网格和水平集方法对模型求解, 成功模拟了隧道排水系统横管与纵管的淤堵情况。尽管如此, 毛成君的模型在满管流动情况下表现出色, 但在实际工程应用中, 管道流动往往涉及到气液交界面的自由液面问题。因此, 本文提出了一种基于毛成君模型的改进版, 该改进模型能够实现自由液面下的水动力-化学反应耦合, 并且能够模拟边界为曲线的波纹管。

1 模型建立及工况设置

本文在前人实验基础上^[19], 基于 DBL 理论, 利用 Comsol 计算流场流动情况与生成物的物质传递, 得到进一步贴合工程实际运营状态的模型。

1.1 基本方程

该模型是关于流场与化学场的耦合, 同时伴随

边界移动对流场影响。对于流场, 采用 N-S 方程描述流场。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 为流速, ρ 为流体密度, \mathbf{I} 为湍流强度, \mathbf{F} 为体积力, \mathbf{K} 为黏性应力。

采用菲克定律描述反应生成的碳酸钙结晶在流体中的传质过程。

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_i + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_i = -D_i \cdot \nabla c_i \quad (2a)$$

式中: \mathbf{J}_i 为扩散通量, c_i 为节点 i 处某种化学物质浓度, R_i 作为引起场变化的源汇项, D_i 为对应物质的扩散系数。

对于化学场, 通过阿伦尼乌斯公式计算出其化学反应速率 K_r , 用来表征各种反应生成速率。对于边界移动, 通过沉积厚度方程与侵蚀率方程的相结合, 从而得出净沉积速率, 再由动网格表征。

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (3)$$

式中: k 为温度 T 时的反应速度常数, A 指前因子, 也称为阿伦尼乌斯常数, 单位与 k 相同, E 为实验活化能, 一般可视为与温度无关的常数, T 为绝对温度(单位 K), R 摩尔气体常数。

计算沉积速率通过以下公式:

$$m = m_d - m_r \quad (4)$$

$$m_d = \beta \cdot \left\{ \frac{1}{2} \frac{\beta}{k_R} + \Delta c - \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\beta}{k_R} \right)^2 + \frac{\beta}{k_R} \cdot \Delta c \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5)$$

$$m_r = 0.012 u^{1.46} m_f \times [1 + \beta_2 (T_w - T_f)] \times d_p \times (\rho^2 \mu g)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: m 为净沉积厚度, m_d 为在 c 浓度下的静水沉积厚度, m_r 为在流速 u 情况下的冲刷率, β 为对流传质系数, k_R 为表面反应速率常数, m_f 为单位面积沉积量, β_2 为线胀系数, T_w 和 T_f 分别为管壁温度和流体内部温度, d_p 为晶体粒径^[20]。

上述各方程相互耦合情况如图 1, 侵蚀率方程通过流速 u 与 N-S 方程耦合, 传质方程作为中间桥梁。通过流速 u 与反应物浓度 c , 将流场与化学场耦合。沉积厚度方程通过浓度 c 与传质方程耦合, 同时沉积厚度方程还通过流速 u 与 N-S 方程耦合。

1.2 模拟方法

模型采用相场法模拟气液界面移动, 动网格模

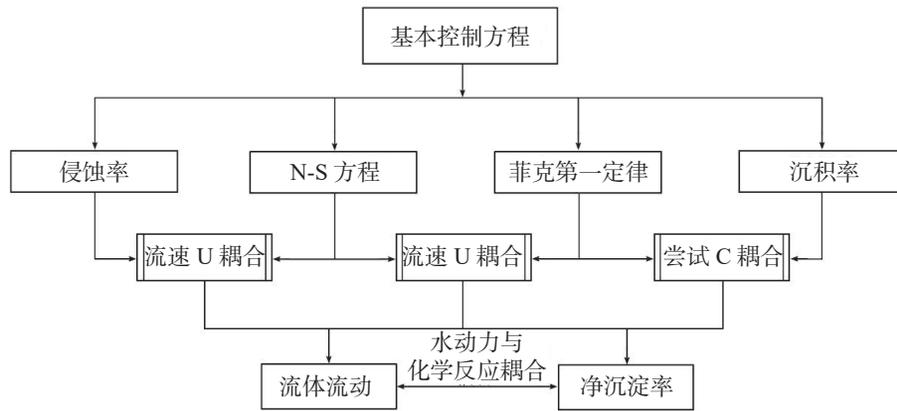


图 1 基本方程关系图

Fig. 1 Diagram of fundamental equation relationships

拟沉积边界收缩,实现对自由液面流动模拟(图 2)。动边界影响,二者不是完全孤立状态。其中相场模拟的气液界面移动是受动网格生成的移

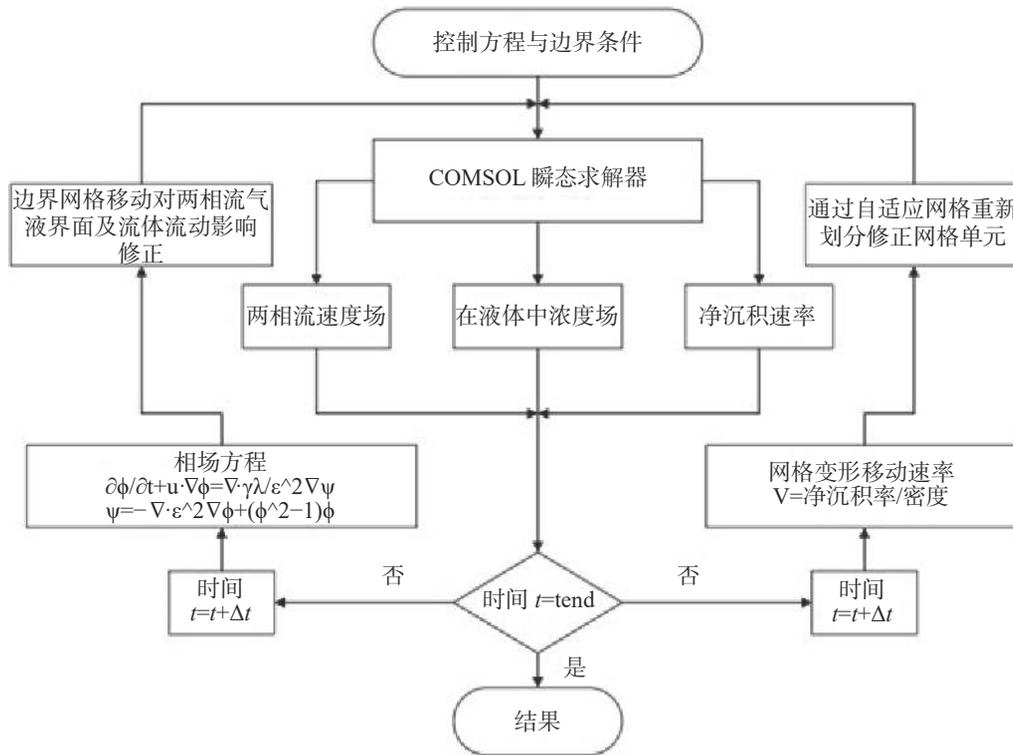


图 2 技术流程图

Fig. 2 Technical flowchart

相场法,通过定义序函数,建立起方程来描述不同相之间的相互扩散,以及各个相的相变过程,经典的 Cahn-Hilliard(C-H)非线性扩散模型就是其中一种^[21]。

$$\frac{\partial c_i(\mathbf{r},t)}{\partial t} = \nabla \cdot M_{ij} \cdot \nabla \cdot \frac{\partial F}{\partial c_i(\mathbf{r},t)} + \xi_{c_i}(\mathbf{r},t) \quad (7)$$

$$M_{ij} = \sum_k (\delta_{ik} - c_i)(\delta_{jk} - c_j)c_k M_k \quad (8)$$

$$M_k = \frac{D_k^\phi}{RT} \quad (9)$$

$$D_i^\phi = D_i^{0,\phi} \exp\left(\frac{-Q_i^{0,\phi}}{RT}\right) \quad (10)$$

式中: $c_i(\mathbf{r},t)$ 表示的各物质浓度的位置时间函数; M_{ij} 代表某元素的化学迁移率; F 为对于物质所具有

的化学能、界面能、电能等等能量之和; D_i^ϕ 是其中一相在另一相的扩散系数; $Q_i^{0,\phi}$ 是对应元素的扩散活化; R 是理想气体常数, T 是热力学温度。

在 Comsol 模型中, 将 C-H 非线性扩散模型作了一个变换, 其描述的对象为气相与液相, 同时在模型中暂不考虑温度影响, 所以热噪声项可消除。

同时, 因为描述对象为流体流动, 方程左边的浓度函数用 N-S 方程代替描述。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon} \nabla \psi \quad (11)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1) \phi + \left(\frac{\varepsilon^2}{\lambda} \right) \frac{\partial f_{\text{ext}}}{\partial \phi} \quad (12)$$

式中: 迁移率由 λ 混合能密度、 ε 毛细宽度、 γ 迁移率表征, ψ 为相场辅助变量, ϕ 为相场变量, 用于区分气相与液相。

动网格计算方法即在不发生拓扑变化的情况下, 将指定计算域内的网格通过采取移动、拉伸、压缩等手段来达成计算域变形的目的。但面对较大位移量的变化, 需要结合网格重画分来对网格重塑, 否则会造成网格失真, 甚至出现错误。

在本模型中, 沉积物对流场的压缩抬升的影响就通过动网格实现, 通过指定边界移动速率(该速率是由沉积厚度方程与侵蚀率方程共同计算得出, 具备与流场同步更新的实时计算能力), 结合网格重划分, 从而达到模拟沉积物对流场影响的目的。同时, 为了使网格移动平滑, 设置了网格平滑移动条件, 并在进口出口设置了函数使移动速率从无位移向指定速度过渡。

1.3 模拟工况

原室内实验采用 HDPE DN/ID110 双壁波纹管, 本文通过 SolidWorks 建模后, 截取内表面得出管材内表面特征, 而管材摩擦系数等信息按照其室内实验工况确定。同时, 原室内实验的溶液配置为 Ca^{2+} 浓度 $1.635 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, HCO_3^- 浓度 $3.801 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 测定溶液温度为 $19.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 管内壁直径 9.7 cm 。

模型中自由液面空气部分, 设置上部允许空气自由出入的开放边界, 对于液体(水)的部分, 边界条件与实验相同(表 1)。

考虑本模型采用湍流模型, 表 1 中的内壁摩擦系数需通过尼古拉斯公式转换为内壁等效砂砾粗糙高度, 借助等效砂砾粗糙高度来表现模型不同的内壁情况。其中, 内壁摩擦系数为 λ , Δ 为等效砂砾粗

表 1 各个模拟工况数据

Table 1 Data for various simulation conditions

管道编号 (工况)	液面高度/mm	管道坡度/%	初始流速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	内壁摩擦系数
1	7.1	3	41.36	0.26
2	6.9	4	43.73	0.21
3	7.2	5	41.28	0.23
4	10.2	5	41.83	0.27
5	13.3	5	39.86	0.24
6	6.9	5	43.36	0.12
7	7.1	5	42.11	0.53
8	6.8	5	40.41	0.65
9	7.0	5	43.78	0.69
10	7.3	5	39.19	0.83

糙高度^[22]。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3.7d}{\Delta} \quad (13)$$

同时, 由于本模型为波纹管, 需对于尼古拉斯公式进行进一步调整, 从能量守恒的角度考虑, 波纹管凹槽对水流动的能量损失分为两部分, 一是对在槽内静止水体施加转动的能量耗散。二是和圆管一样, 由管壁摩擦造成的能量损失, 该部分能量和边壁长度有关, 在本模型中, 波纹管等效圆管长度为同长度的圆管的 1.2 倍。综合考虑能量耗散, 并结合一定次数的试算, 将以 10 为底的对数调整为以 11.3 为底的对数函数。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log_{11.3} \frac{3.7d}{\Delta} \quad (14)$$

转换结果如表 2。由此可见, 对于工况 7、8、9、10, 其等效砂砾高度已经远大于边界层存在的厚度 $4 \mu\text{m}$, 说明此时工况 7、8、9、10 已然不适用 DBL 理论, 所以本模型不对其进行模拟。

2 模拟结果

图 3 为模型初期, 由于液体流入导致暂时的气液界面波动。模拟初期由于入口进水导致液面不停变化。该模型红色相表示空气, 蓝色相表示水, 模型中液面和流速能够随流量变化而随变化, 模拟能力出色, 能够较好地视为自由液面, 与实际较为贴切。各个工况的计算结果如图 4—图 9。

对比工况 1、2、3 不难发现, 该模型在长时间运行时, 水流整体较为平稳, 空气流动会有一定波动, 流速较快的区域为水流中部。同时, 工况 1 与工况

表 2 转换后数据
Table 2 Transformed data

管道编号	内壁摩擦系数	等效砂砾粗糙高度/ μm
1	0.26	3.78
2	0.21	2.89
3	0.23	3.25
4	0.27	2.71
5	0.24	3.43
6	0.12	1.23
7	0.53	7.70
8	0.65	9.05
9	0.69	9.46
10	0.83	10.76

3 对比, 可以看到随着坡度增大, 流速是会有明显提升, 这点也与常理相符, 而工况 2 对比工况 1、3, 由于其初始流速更大, 边壁摩擦更小, 所以流速相对工况 1、3 更快。而边界随着时间逐渐收缩, 导致流道逐渐抬升, 沉积干扰流场。

对比工况 3、4、5、6, 不同液面高度的情况下, 大体的水与空气的流动模式基本一致, 改变的是其中碳酸钙浓度, 最终影响就是沉积速率。

从整体来看, 观察体积分数图, 对比刚进水时的液面波动, 在长时间运行过程中水流是相对平稳的, 而在流速图里, 不难发现, 在凹槽内的水体整体流速较慢, 只发生旋转, 这点与大众认知相符合, 空气流

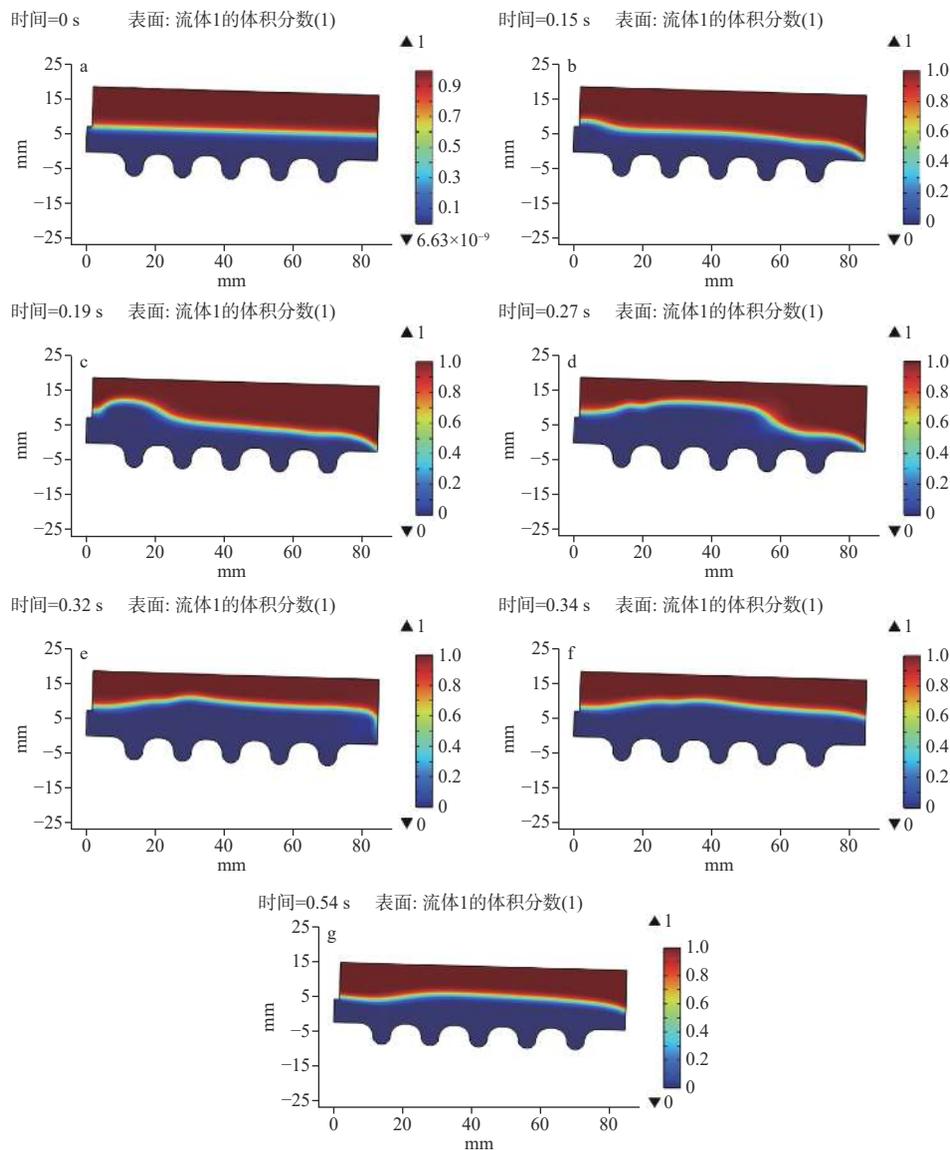


图 3 管内初期液体流动情况

a-g 分别表现 0-0.54s 内某时刻管内液体流动情况

Fig. 3 Initial liquid flow conditions inside the pipe

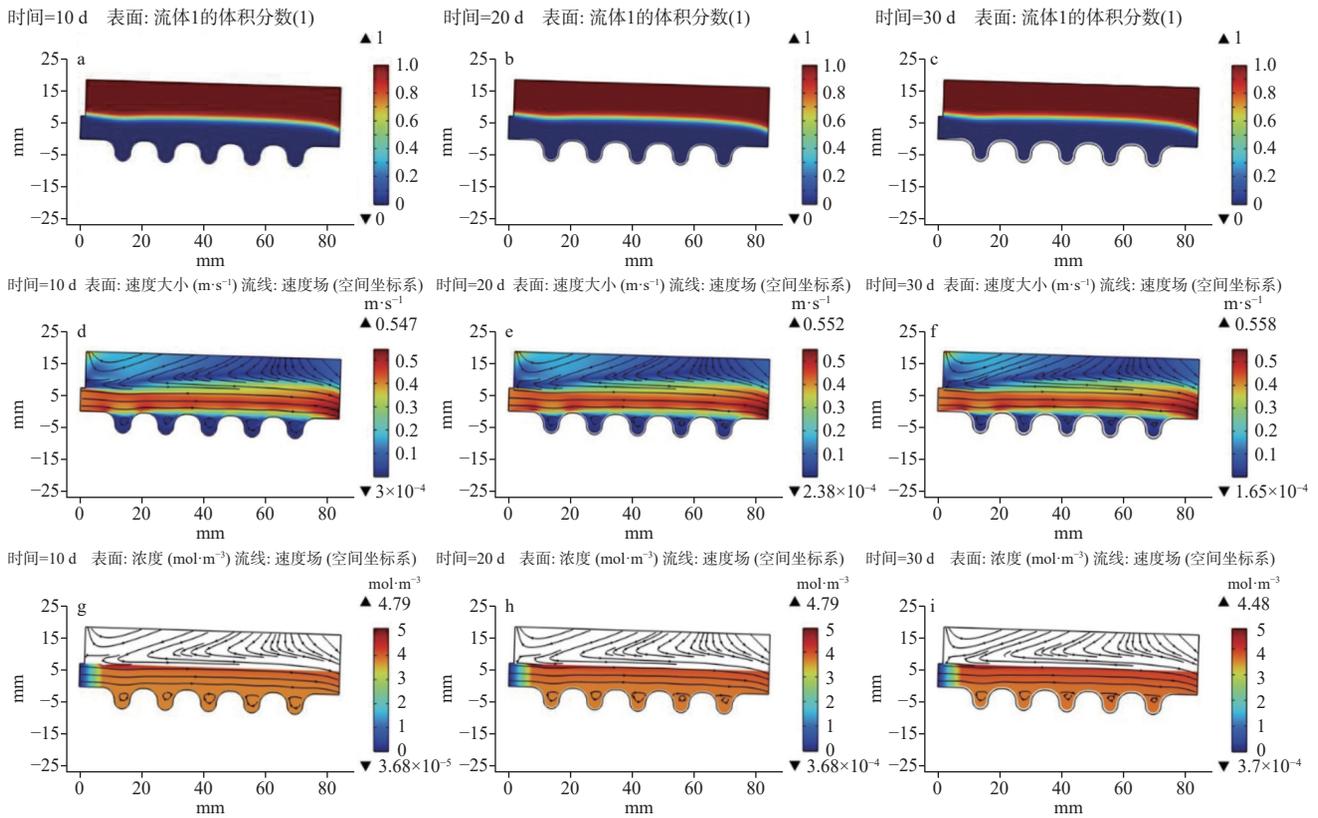


图 4 工况 1

a—c 为 10d、20d、30d 水流动情况 d—f 为 10d、20d、30d 流速云图 g—i 为 10d、20d、30d 碳酸钙浓度分布图

Fig. 4 Condition 1

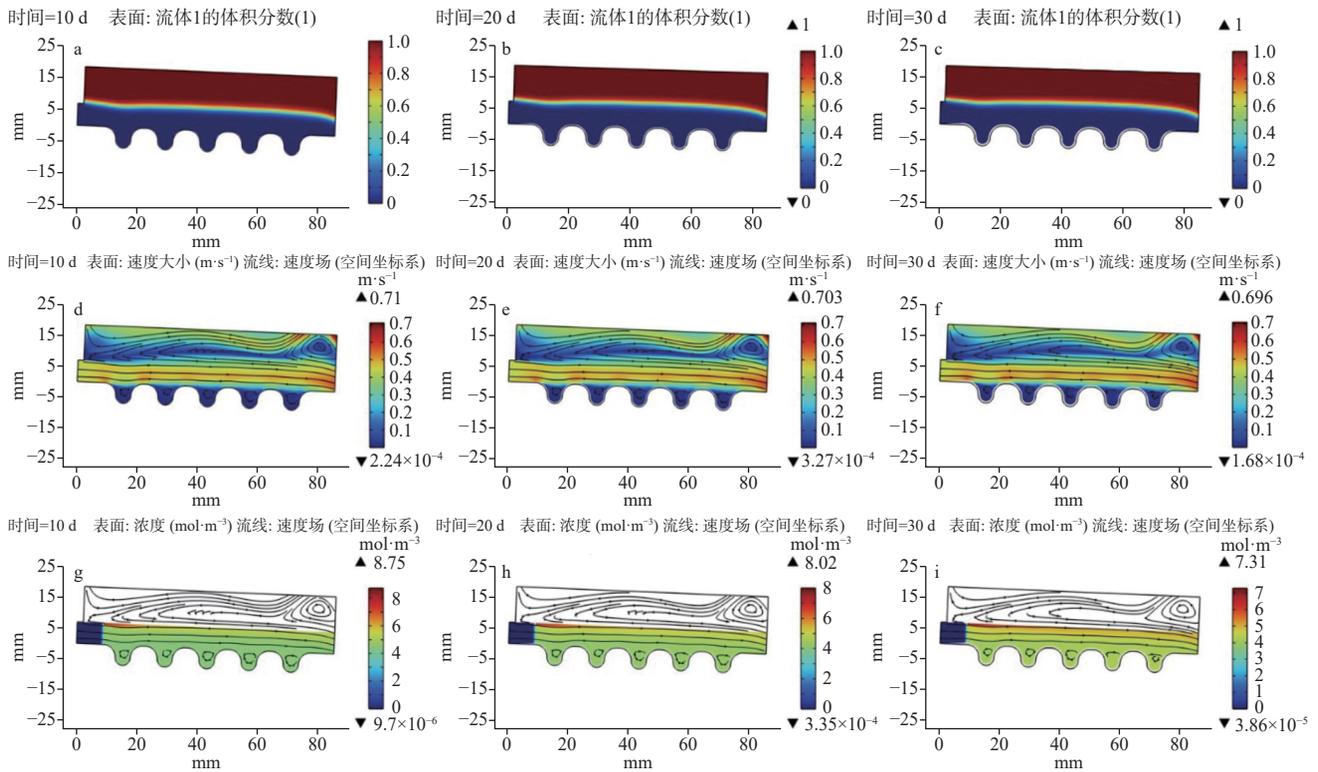


图 5 工况 2

a—c 为 10d、20d、30d 水流动情况 d—f 为 10d、20d、30d 流速云图 g—i 为 10d、20d、30d 碳酸钙浓度分布图

Fig. 5 Condition 2

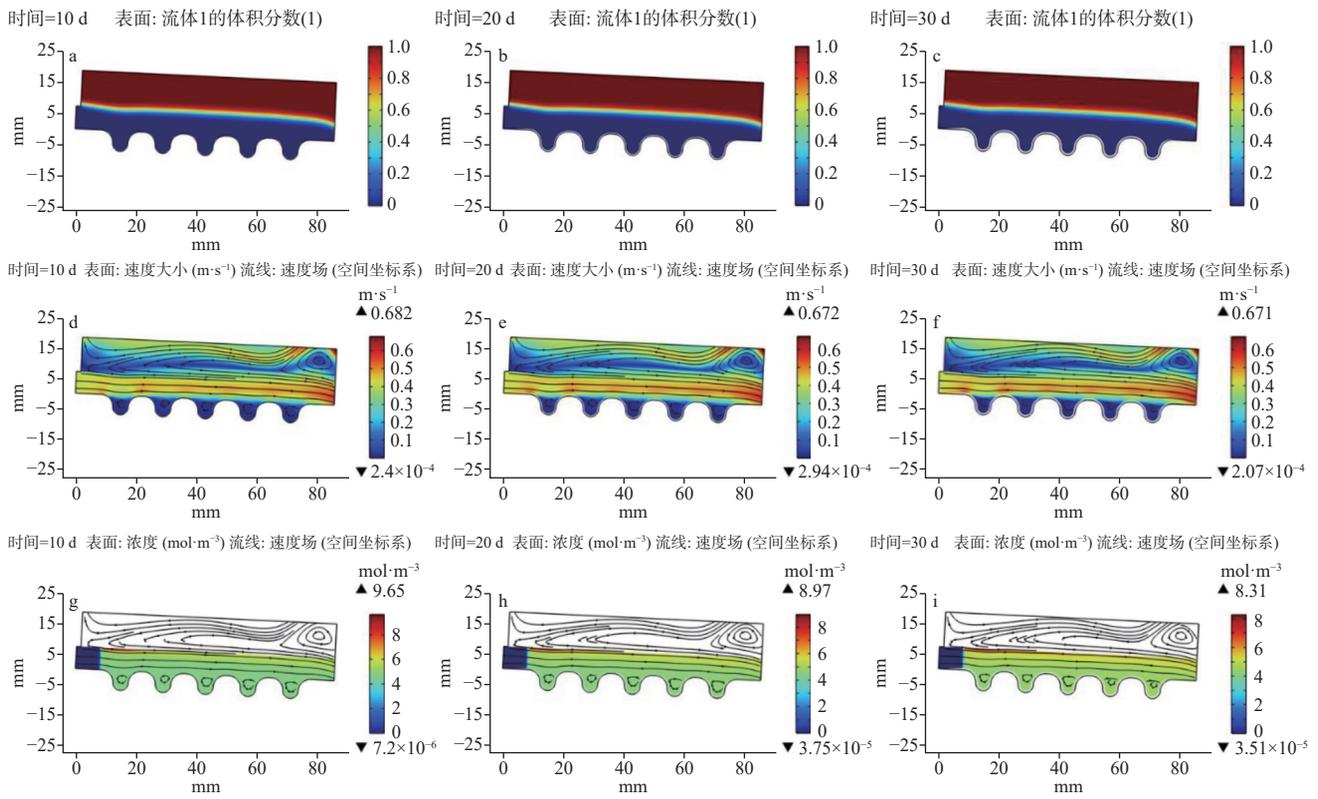


图 6 工况 3

a—c 为 10d、20d、30d 水流动情况 d—f 为 10d、20d、30d 流速云图 g—i 为 10d、20d、30d 碳酸钙浓度分布图

Fig. 6 Condition 3

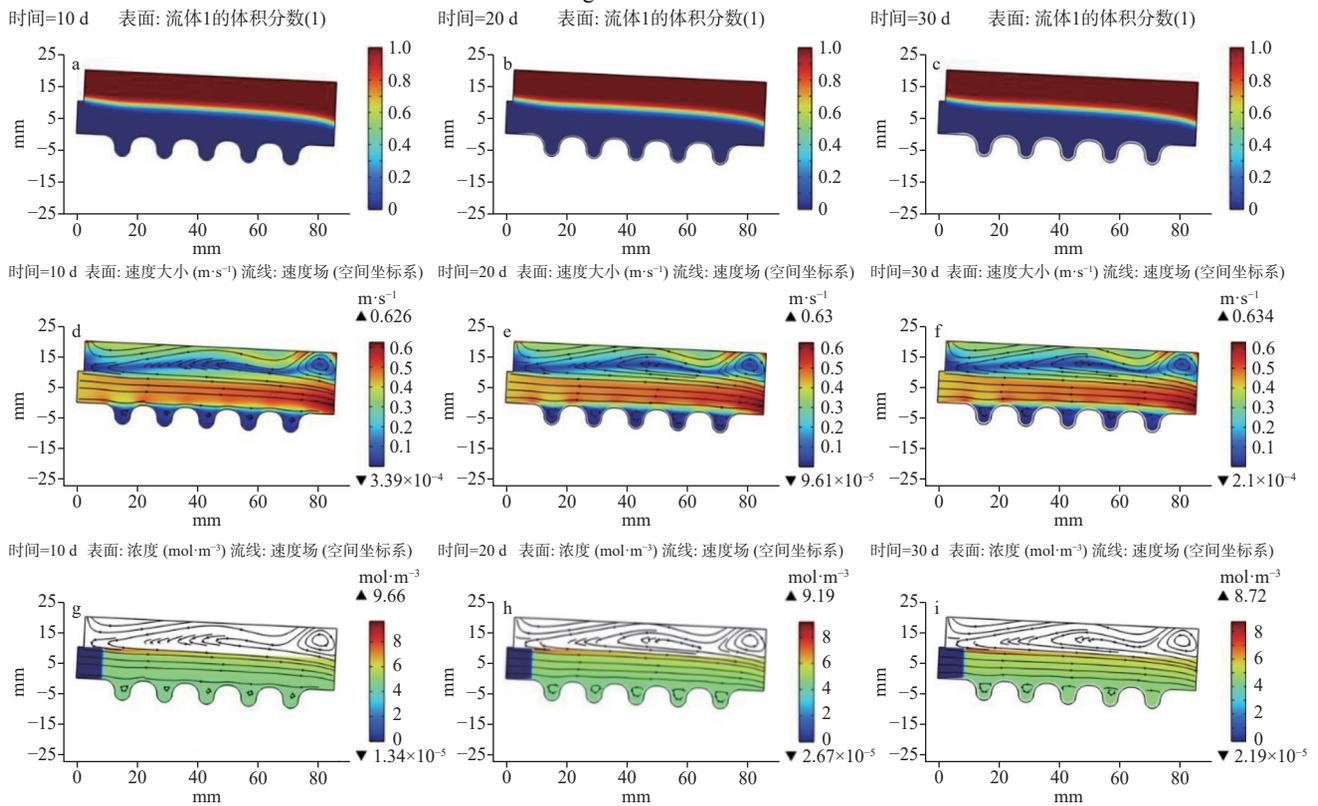


图 7 工况 4

a—c 为 10d、20d、30d 水流动情况 d—f 为 10d、20d、30d 流速云图 g—i 为 10d、20d、30d 碳酸钙浓度分布图

Fig. 7 Condition 4

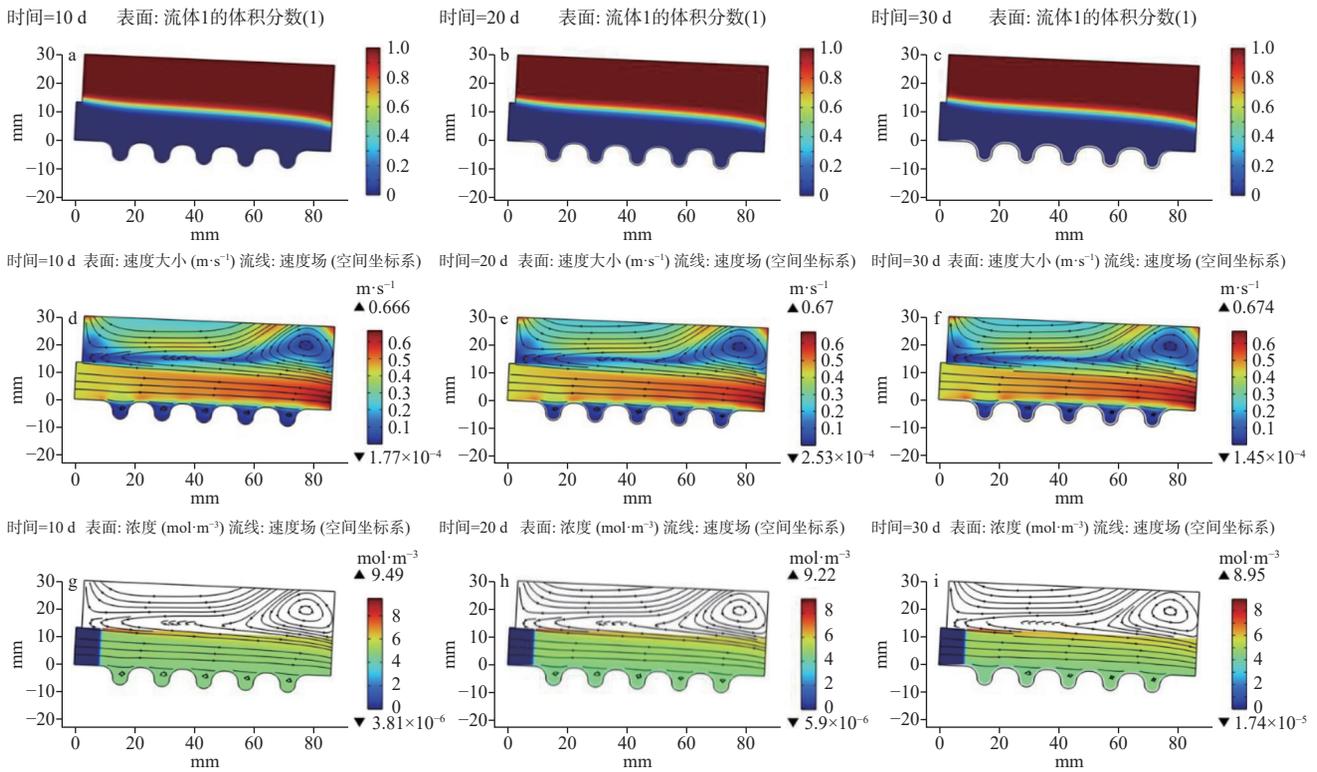


图 8 工况 5

a—c 为 10d、20d、30d 水流动情况 d—f 为 10d、20d、30d 流速云图 g—i 为 10d、20d、30d 碳酸钙浓度分布图

Fig. 8 Condition 5

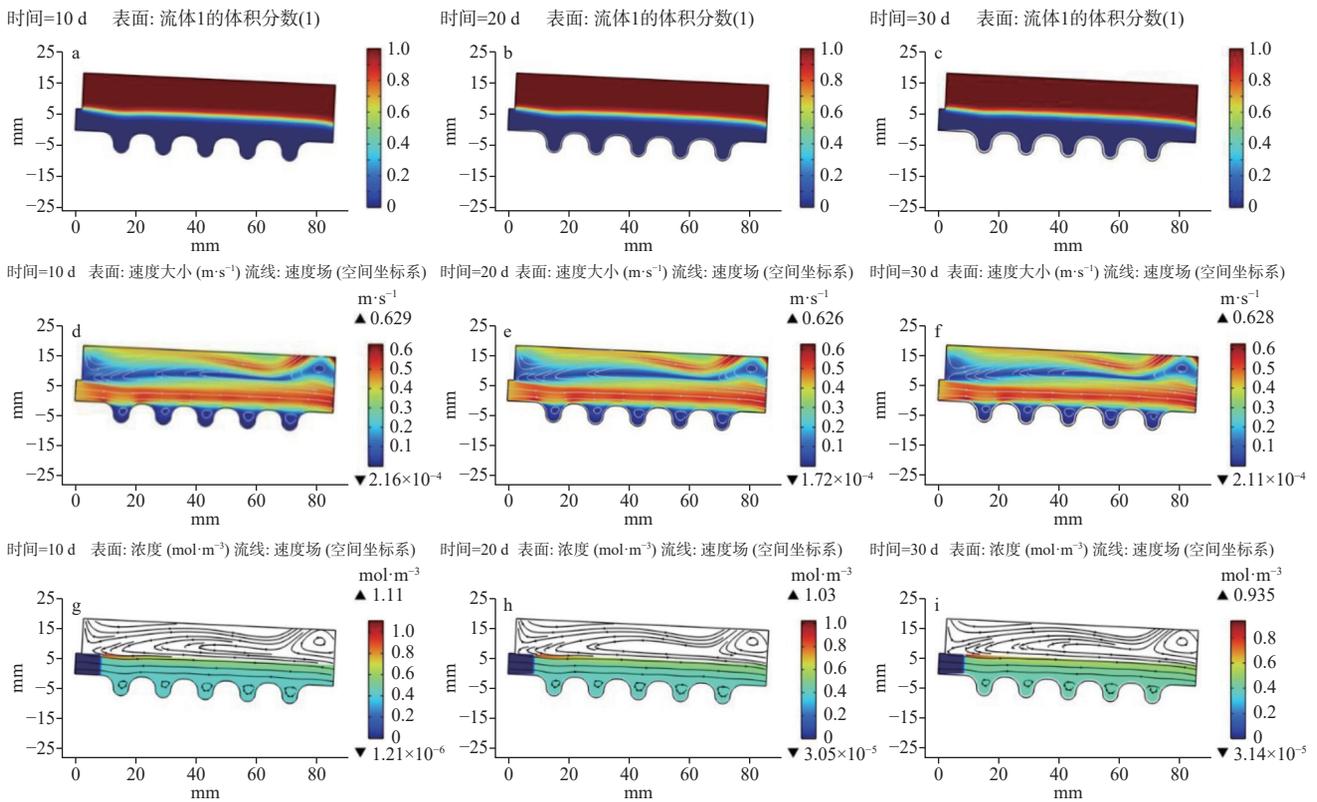


图 9 工况 6

a—c 为 10d、20d、30d 水流动情况 d—f 为 10d、20d、30d 流速云图 g—i 为 10d、20d、30d 碳酸钙浓度分布图

Fig. 9 Condition 6

动则较为无序,这是由于边界设置为开放边界,空气可以自由进出运算域导致的。对于碳酸钙传递过程,整体传递过程较为均匀,凹槽内含量相对流体流速快的区域要高,同时在液面上部浓度也相对较高,这一点与这篇文章^[5]中描述液面表层会出现一片碳酸钙结晶板伐相吻合,即上表面也会相较于中间大流速的区间碳酸钙传递浓度较大。

3 结果对比

在原室内实验中^[19],其工况 1、2、3 实验条件是

以 3%、4%、5% 的坡度运行 30 d,结果为结晶平均厚度分别为 $0.0260 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.0230 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.0207 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,30 d 总体结晶趋势如图 10a 示。而工况 3、4、5 实验条件是以液面高度 7.2 mm、10.2 mm、13.3 mm 的运行 30 d,结果为结晶平均厚度分别为 $0.0207 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.0210 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.0177 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,30 d 总体结晶趋势如图 10b 示。工况 6 则以 5% 坡度,6.9 mm 的液面高度实验低摩擦系数运行 30 d,结果为结晶平均厚度为 $0.0160 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,30 d 总体结晶趋势如图 10c 示。后续工况因不满足 DBL 理论不进行模拟,原因在文中 1.3 节已进行说明。

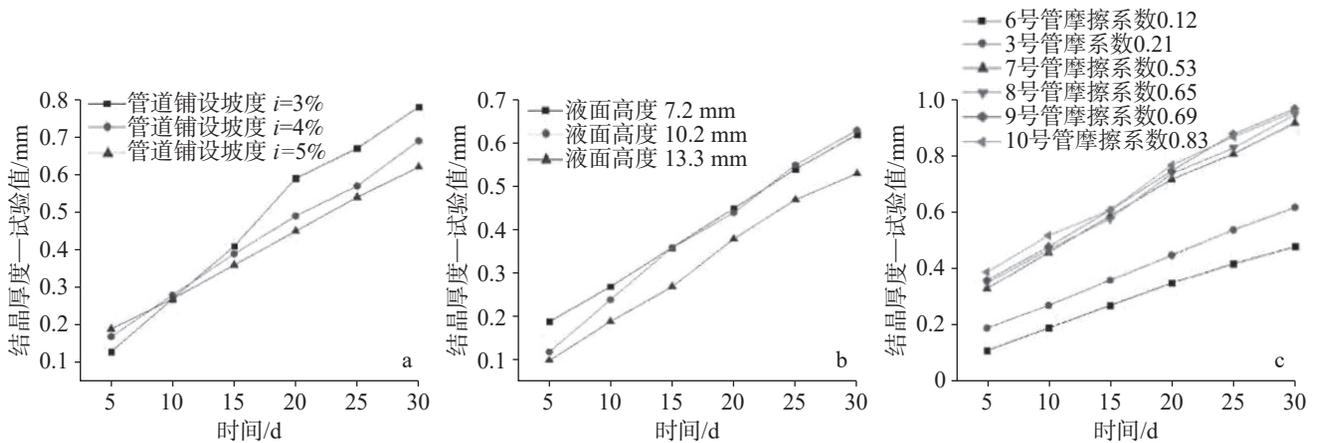


图 10 实验结果图

Fig. 10 Diagram of experimental results

将上述各工况计算结果分别与对应实验结果对比,研究分析误差(图 11)。

其平均沉积厚度如表 3 所示:

表 3 平均沉积厚度对比

Table 3 Comparison of average sedimentary thickness

模拟工况	实验沉积厚度/ $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	模拟沉积厚度/ $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	相对误差/ %
1	0.0260	0.0236	9.23
2	0.0230	0.0225	2.17
3	0.0207	0.0207	0
4	0.0210	0.0209	0.5
5	0.0177	0.0212	19.77
6	0.0160	0.0206	28.75

结合图表可知,模拟工况 1—4 和现实实验有较好的准确性,相对误差均小于 10%,同时增长趋势也与实际实验相符,而对于工况 5、6 相适性较差,工况 5 的误差率在 20% 左右,原因可能是现实实验后

续沉积率在逐步下降,导致误差逐步增大累积;而工况 6 较为光滑的壁面会导致边界层过渡情况发生变化,导致模型相适性差,相对误差达到了 28.75%。

4 现场应用

上述结果表明,模型具备一定的预测能力,将该模型投入对粤北某隧道内波纹排水管运行工况进行模拟,通过现场测得流速与离子浓度(表 4),同时,隧道现场波纹管为 HDPE DN/ID110 双壁波纹管作为边界条件输入模型中计算。HDPE DN/ID110 双壁波纹管摩擦系数计算公式如下:

$$i = \lambda \frac{1}{d_j} \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

式中: i 为水力坡降, λ 为摩阻系数, d_j 为管计算直径, v 为流速, g 为重力加速度。计算结果内壁摩擦系数为约 0.21。

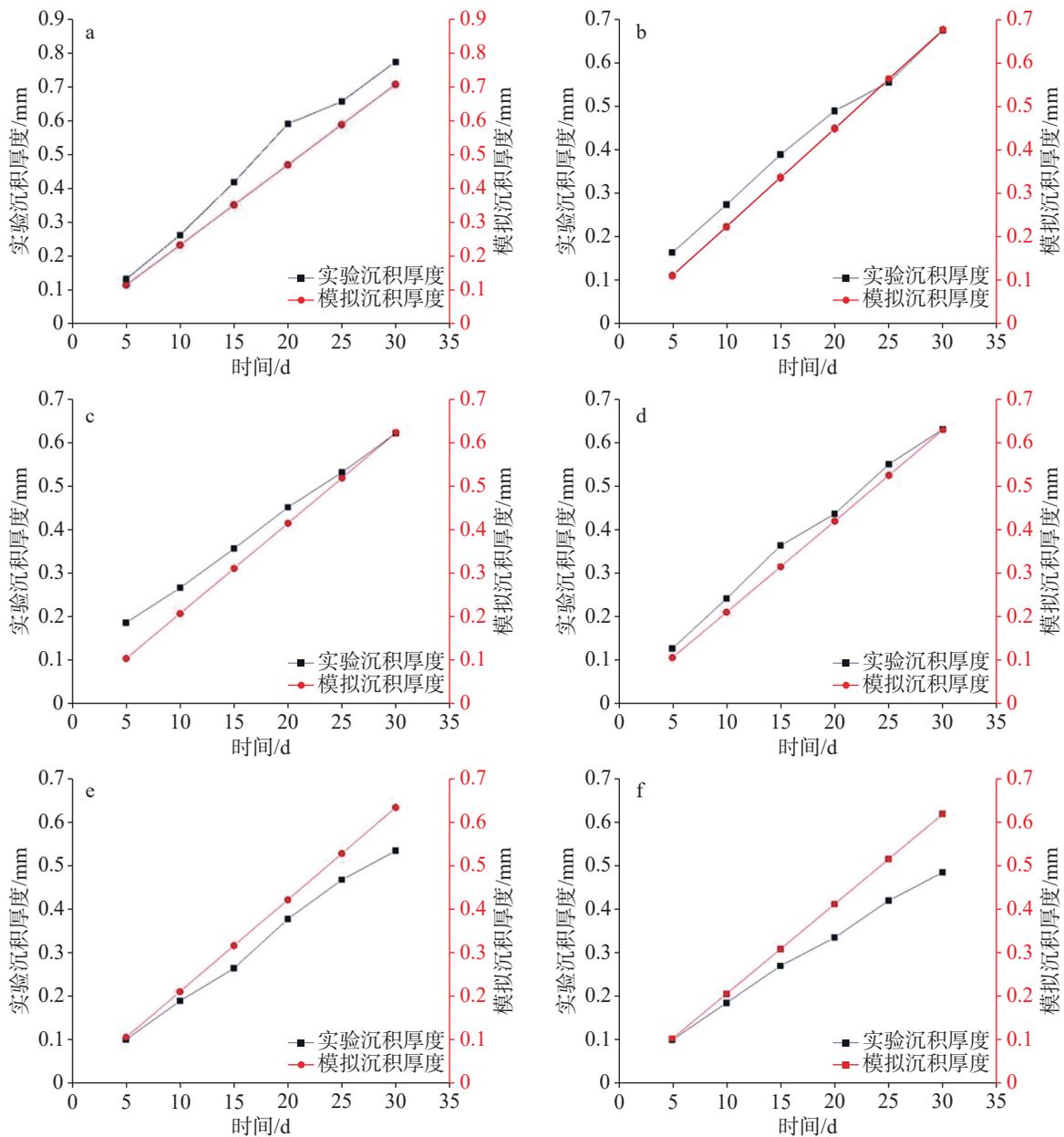


图 11 实验结果与模拟结果对比图

11a-工况 1 的实验结果与模拟对比 11b-工况 1 的实验结果与模拟对比 11c-工况 1 的实验结果与模拟对比 11d-工况 1 的实验结果与模拟对比 11e-工况 1 的实验结果与模拟对比 11f-工况 1 的实验结果与模拟对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulation results

计算结果如图 12。

隧道运营方一般按照 2.5—3 年进行一次大规模清淤处置,但时间较为模糊,缺少具体记录和描述,故尚不清楚最适合的清淤时间,因此有可能导致大面积隧道排水管淤堵。本模型解决这一问题,将清淤时间由经验值转为更为可靠的理论值。按照模型计算得出的淤堵时间进行处治,可以有效预防排水管堵死,保持排水管道正常通畅,延长排水管的寿命。作为对照组,未按照模型预测时间进行处理的

管道则在此期间后失去了正常排水的能力(图 13)。

5 讨论

模拟结果对比实验发现,该模型适用对波纹管曲线边界移动模拟,结合相场法可以实现进水量变化导致的液面高度变化,对现实工况有一定的指导作用。同时,该模型模拟工况 1~4,工况 1~4 的内壁摩擦系数为 0.2~0.3,在该情况下,模拟结果有较好的

表 4 现场测试流速与离子浓度数据

Table 4 On-site sampling data(On-site testing of flow rate and ion concentration data)

试样编号	钙离子浓度/mg·L ⁻¹	钠离子浓度/mg·L ⁻¹	镁离子浓度/mg·L ⁻¹	钡离子浓度/mg·L ⁻¹	流速/m·s ⁻¹
1-1	66.6316	1.0865	9.3366	0.1119	0.055
1-2	64.3725	0.7503	9.3031	0.1061	0.059

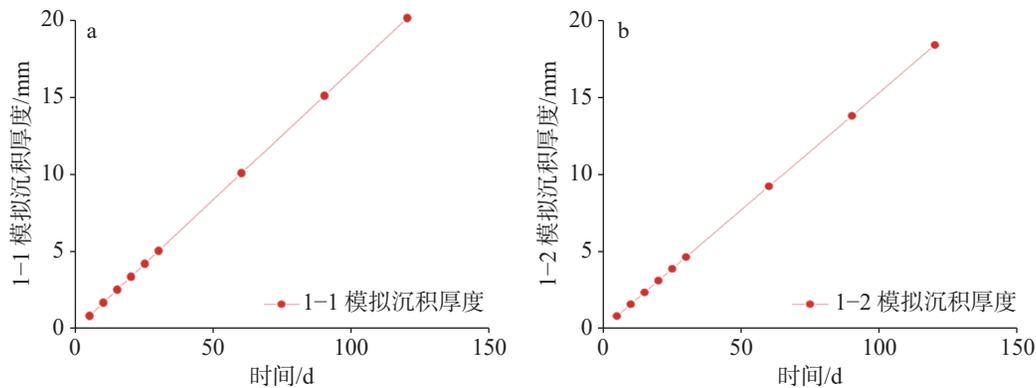


图 12 对隧道现场排水管预测

作图节点为 5d、10d、15d、20d、25d、30d、60d、90d、120d 图 12a 为 1-1 预测图, 1-1 沉积厚度为 $0.168 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 预计堵塞管道时间为 655d; 图 12b 为 1-2 预测图, 1-2 沉积厚度为 $0.153 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 预计堵塞管道时间为 712d

Fig. 12 Prediction of on-site drainage pipes in the tunnel



图 13 现场排水试验处治对比图

Fig. 13 Comparison of on-site drainage experiment treatments

准确度。工况 5、6 模拟表现较差, 工况 6 的内壁摩擦系数低于 0.20, 这可能与其边界条件有关。工况 5、6 壁面较为光滑, 使得沉积更为困难, 导致边界层过渡情况发生变化, 应更换壁面函数, 对沉积方程予以修正。对于工况 7、8、9、10, 其等效砂砾高度已经远大于边界层存在的厚度 $4 \mu\text{m}$, 说明此时工况 7、8、9、10 已然不适用 DBL 理论, 所以本模型不对上述工况进行模拟。针对本次模拟的情况, 今后可以考虑对光滑管壁与粗糙管壁的壁函数开发以及修正相对应的沉积方程。

6 结论

(1) 基于 DBL 理论, 结合相场法和动网格移动边

界, 可以模拟波纹管的沉积情况及其中流场变化, 但受 DBL 理论限制, 对特别粗糙表面模型计算结果与现实相差较大, 故此工况不宜采用该模型计算。

(2) 该模型对内壁摩擦系数为 0.2~0.3 的情况有较好的准确度, 可以应用规范实际工况预测。

(3) 通过模型数值计算, 可以取得适宜的清淤时间节点, 对清淤工作有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 钱振宇, 彭海华, 吕建兵, 陈贡发. 华南地区灰岩隧道排水管化学结晶淤堵试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 143-9. QIAN Zhenyu, PENG Haihua, LV Jianbing, CHEN Gongfa. Experimental Study on Chemical Crystallization and Siltation in Drainage Pipe of Limestone Tunnels in South China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(S1): 143-149.

- [2] 卢冠楠, 王鹏, 杨蕴, 毛成君, 吴咏敬, 吴剑锋, 董平, 吴吉春. 岩溶区隧道排水系统地下水渗流结晶堵塞机理及阻垢技术研究综述[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 11-20.
LU Guannan, WANG Peng, YANG Yun, MAO Chengjun, WU Yongjing, WU Jianfeng, DONG Ping, WU Jichun. Review of Researches on Groundwater Seepage Induced Crystallization and Blockage Mechanism and Scale Inhibition Technology in the Tunnel Drainage System in Karst Areas[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(6): 11-20.
- [3] CUI Yu Jun, Francisco Lamas-Lopez, Viet-Nam Trinh, Nicolas Calon, Sofia Costa D'Aguiar, Jean-Claude Dupla, Alain Robinet. Investigation of interlayer soil behaviour by field monitoring[J]. *Transportation Geotechnics*, 2014, 1(3): 91-105.
- [4] JIA N, TASSIN B, CALON N, et al. Scaling in railway infrastructural drainage devices: site study[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2016, 1(1): 42.
- [5] WEDENIG M, EICHINGER S, BOCH R, et al. Understanding of tunnel drainage scale formation by in-situ monitoring[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104853.
- [6] WU Zilong, CUI Yujun, DENG Yongfeng. Role of surrounding soils and pore water in calcium carbonate precipitation in railway tunnel drainage system[J]. *Transportation Geotechnics*, 2019, 21: 100257.
- [7] 汤云涛, 周忠发, 汪炎林, 张结, 田衷琿, 薛冰清. 岩溶洞穴滴水 CO₂ 季节变化特征及来源分析: 以大风洞为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 521-530.
TANG Yuntao, ZHOU Zhongfa, WANG Yanlin, ZHANG Jie, TIAN Zhonghui, XUE Bingqing. Seasonal variations and sources of dripping CO₂ in karst caves: A case study of the Dafeng cave Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 521-530.
- [8] 缪仑, 周裕, 任辉. 非岩溶隧道排水系统结晶机理及防治措施研究[J]. *中国市政工程*, 2022(5): 66-69, 124.
MIAO Lun, ZHOU Yu, REN Hui. Study on Crystallization Mechanism & Prevention Measures of Non-Karst Tunnel Drainage System[J]. *China Municipal Engineering*, 2022(05): 66-69, 124.
- [9] 向坤, 周杰, 张学富, 黄超, 宋琳, 刘士洋. 碱性环境隧道排水管结晶规律室内试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 207-212.
XIANG Kun, ZHOU Jie, ZHANG Xuefu, HUANG Chao, SU Lin, LIU Shiyang. Experimental Study on Crystallization Rule of Tunnel Drainpipe in Alkaline Environment[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(S2): 207-212.
- [10] 聂崇欣, 饶军应, 刘建浩, 李元, 王石光, 谢财进. 隧道排水管道结晶体成分及结晶机理研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 196-202.
NIE Chongxin, RAO Junying, LIU Jianhao, LI Yuan, WANG Shiguang, XIE Chaijin. Study on the crystal composition and mechanism of tunnel drainage system[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2022, 41(6): 196-202.
- [11] EICHINGER S, BOCH R, LEIS A, et al. Scale deposits in tunnel drainage systems – A study on fabrics and formation mechanisms[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 718: 137140.
- [12] 董发勤, 陈禹衡, 代群威, 郑飞, 刘明学, 蒋忠诚, 张强, 李博文, Alper Baba, Mike O'Driscoll, Anelka Plenkovic-Moraj. 钙华体次生有机体系的界面结晶作用研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(1): 34-43.
DONG Faqin, CHEN Yuheng, DAI Qunwei, ZHENG Fei, ZHENG Fei, LIU Mingxue, JIANG Zhongcheng, ZHANG Qiang, LI Bowen, Alper Baba, Mike O'Driscoll, Anelka Plenkovic-Moraj. Research progress on interfacial crystallization of travertine in secondary organic system[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 34-43.
- [13] 董发勤, 郑飞, 代群威, 李琼芳, 陈禹衡, 刘明学, 蒋忠诚, 张强, 李博文, Alper BaBa, Anelka Plenkovic-Moraj. 钙华非经典沉积的纳米生长过程与调控机制初探: 以九寨沟—黄龙钙华形成为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(1): 55-67.
DONG Faqin, ZHENG Fei, DAI Qunwei, LI Qiongfang, LI Qiongfang, CHEN Yuheng, LIU Mingxue, JIANG Zhongcheng, ZHANG Qiang, LI Bowen, Alper BaBa, Anelka Plenkovic-Moraj. Research progress on interfacial crystallization of travertine in secondary organic system[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 55-67.
- [14] WEI Liangwen, GUO Jingyi, ZHANG Xuefu, LI Yunqi, HUANG Peng. Study of Electric Field Impact on Crystallization in Tunnel Drainage Pipes in Hard Water Area[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 5584229.
- [15] 聂崇欣, 饶军应. 隧道排水系统结晶堵塞风险模糊评价模型研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(3): 30-32.
Nie Chongxin, Rao Junying. Research on Fuzzy Evaluation Model for Crystal Blockage Risk in Tunnel Drainage System[J]. *China Water Transport*, 2021, 21(3): 30-32.
- [16] Plummer L N, Wigley T M L, Parkhurst D L. The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 degrees to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 atm CO₂[J]. *American journal of science*, 1978, 278(2): 179-216.
- [17] Dreybrodt W, Buhmann D. A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion[J]. *Chemical Geology*, 1991, 90(1-2): 107-122.
- [18] 毛成君, 杨蕴, 吴剑锋, 董平, 吴吉春. 岩溶管道结晶堵塞水力-化学反应耦合模拟对比研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 245-256.
MAO Chengjun, YANG Yun, WU Jianfeng, DONG Ping, WU Jichun. Numerical simulation of crystal blockage in tunnel drainage pipe based on dynamic grid and level set[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 245-256.
- [19] 周伟, 王永东, 李元飞, 王玲, 贾向波. 岩溶区隧道排水管道结晶沉淀水力影响因素试验研究[J]. 公路, 2021, 66(3): 347-

352.
ZHOU Wei, WANG Yongdong, LI Yuanfei, WANG Ling, JIA Xiangbo. Research on the Influence Factors of Crystallization and Sedimentation of Tunnel Drainage Pipeline in Karst Area[J]. Highway, 2021, 66(3): 347-352.
- [20] BRAHIM F, AUGUSTIN W, BOHNET M. Numerical simulation of the fouling process[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42(3): 323-34.
- [21] 王凯乐, 杨文奎, 史新成, 侯华, 赵宇宏. 相场法研究 $Al_xCuMnNiFe$ 高熵合金富 Cu 相析出机理[J]. 物理学报, 2023, 72(7): 319-333.
- WANG Kaile, YANG Wenkui, SHI Xincheng, HOU Hua, ZHAO Yuhong. Phase-field-method-studied mechanism of Cu-rich phase precipitation in $Al_xCuMnNiFe$ high-entropy alloy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(7): 319-333.
- [22] 姚雪蕾, 袁成清, 付宜风, 白秀琴. 管道内壁粗糙度对沿程阻力影响的 FLUENT 数值模拟分析[J]. 航海工程, 2015, 44(6): 101-106, 110.
- YAO Xuelei, YUAN Chengqing, FU Yifeng, BAI Xiuqin. Numerical Simulation of Effect of Wall Roughness on the On-way Resistance Based on FLUENT[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2015, 44(6): 101-106, 110.

Research on the mechanism and application of crystal deposition in corrugated drainage pipes

LYU Jianbing¹, CHEN Zuru¹, LI Jia², FENG LI¹, DONG Qinxi³, WANG Hui³, ZHANG Guocai⁴

(1. *Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*; 2. *Jiangmen Yinzhouhu Expressway Co., Ltd, Jiangmen, Guangdong 529100, China*; 3. *Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China*; 4. *CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510230, China*)

Abstract The frequent clogging of drainage pipes of tunnel engineering in the limestone regions has significantly impacted the long-term operation and maintenance of tunnels. To better solve this problem, in this study, a multi-field coupled numerical model was constructed to thoroughly analyze the formation mechanisms and key influencing factors of drainage pipe clogging.

In recent days, fluid simulation has become an important tool for solving such problems, thanks to the rapid development of computational power. At present, numerous simulation models have been developed to simulate pipeline scaling; however, the conditions they simulate are often far cry from the actual working conditions of tunnel drainage pipes. To be specific, most simulations of pipeline scaling are conducted under full-pipe flow conditions, while the actual tunnel drainage pipes are rarely operated under full-pipe conditions. Considering this situation, this study integrated Fick's law of mass transfer with the Navier-Stokes equations, thereby coupling fluid dynamics with chemical reaction kinetics through flow velocity. This coupling was achieved by incorporating mass transfer processes, which allowed for the determination of flow velocity and the distribution of calcium carbonate content within the pipe. Subsequently, a computational and simulation model was established for the curved boundaries of corrugated pipe by integrating an equation for calculating deposition thickness. To further enhance the model's accuracy, a combination of the phase-field method and dynamic mesh technology was employed. The phase-field method simulated the movement of the gas-liquid interface, while dynamic mesh technology simulated flow channel contraction changes due to deposition. Moreover, changes in flow channel contraction may alter the flow velocity and the distribution of calcium carbonate content within the pipe, which in turn affected the contraction of the flow channel. Additionally, to ensure smooth mesh movement, mesh smoothing conditions were set, and functions were applied at the inlet and outlet to transition the movement rate from zero displacement to a specified velocity. In terms of boundary conditions, this model adopted a turbulence model. The inner wall friction coefficient of the pipe was calculated by formulas from hydraulic design manuals. Subsequently, the inner wall friction coefficient obtained from experiments was converted into an equivalent sand-grain roughness height using the Nikuradse formula, which was then used to represent various wall conditions in the model. Given that the model involves corrugated pipes, further adjustments to the Nikuradse formula are required. From the perspective of energy conservation, the energy loss caused by corrugated pipe grooves in water flow can be divided into two parts: firstly, the energy dissipation caused by imparting rotation to the stagnant

water within the grooves; secondly, similar to a smooth pipe, energy loss caused by friction along the pipe wall. This portion of energy loss is related to the length of the wall. In this model, the equivalent length of the corrugated pipe is 1.2 times that of a smooth pipe with the same length. In condition of energy dissipation, and based on a series of trial calculations, the logarithmic function with base 10 was adjusted to a logarithmic function with base 11.3. The dynamic impact of crystal formation on flow field changes under free surface conditions was successfully simulated using this method.

Simulation results indicate that the model developed in this study exhibits high predictive accuracy when the inner wall friction coefficient is within the range of 0.2 to 0.3, with an overall deviation between 10% and 20%. However, when the friction coefficient is below 0.2, significant deviations occur in the simulation results, which are higher than the actual deposition results. This may be due to the need for further optimization of the coefficients in the wall functions and deposition formulas under low-friction wall conditions. Moreover, when the friction coefficient exceeds 0.3, this model becomes inapplicable due to the failure of the boundary layer, which is caused by excessively high height of equivalent sand-grain roughness.

In conclusion, based on the above research findings, this study has further applied the model to simulate the actual working conditions of drainage pipes in a tunnel in northern Guangdong. By predicting the clogging time and formulating corresponding treatment plans, this study provides scientific basis and technical support for the optimal design and clogging prevention of tunnel drainage systems.

Key words crystallization of tunnel drainage pipes, phase field method, dynamic mesh, multi-field coupling

(编辑 张玲)

我国自然资源概况

据 2024 年中国自然资源公报, 发布了 2024 年国土资源初步统计数据。

土地资源: 2023 年度全国国土变更调查成果显示, 全国共有耕地 12 860.88 万 hm^2 、园地 1 961.09 万 hm^2 、林地 28 369.57 万 hm^2 、草地 26 321.57 万 hm^2 、湿地 2 351.98 万 hm^2 、城镇村及工矿用地 3 610.37 万 hm^2 、交通运输用地 1 042.91 万 hm^2 、水域及水利设施用地 3 626.48 万 hm^2 。

森林资源: 2023 年度全国国土变更调查成果显示, 全国共有林地 28 369.57 万 hm^2 。其中, 乔木林地 19 660.49 万 hm^2 、竹林地 697.79 万 hm^2 、灌木林地 5 899.77 万 hm^2 、其他林地 2 111.52 万 hm^2 。全国森林面积 2.47 亿 hm^2 , 人工林保存面积达 9 240.87 万

hm^2 , 居全球首位, 森林覆盖率超 25%, 森林蓄积量 206.76 亿 m^3 。

草原资源: 2023 年度全国国土变更调查成果显示, 全国共有草地 26 321.57 万 hm^2 。其中, 天然牧草地 21 255.03 万 hm^2 、人工牧草地 58.82 万 hm^2 、其他草地 5 007.73 万 hm^2 。全国草原综合植被盖度稳定在 50% 以上。

湿地资源: 2023 年度全国国土变更调查成果显示, 全国共有湿地 2 351.98 万 hm^2 。其中, 红树林地 3.03 万 hm^2 、森林沼泽 220.65 万 hm^2 、灌丛沼泽 75.00 万 hm^2 、沼泽草地 1 111.36 万 hm^2 、沿海滩涂 149.21 万 hm^2 、内陆滩涂 599.68 万 hm^2 、沼泽地 193.05 万 hm^2 。