

毛成君, 杨 蕴, 吴剑锋, 等. 岩溶管道结晶堵塞水动力-化学反应耦合模拟对比研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 245-256.
DOI: 10.11932/karst2021y37

岩溶管道结晶堵塞水动力-化学反应耦合模拟对比研究

毛成君¹, 杨 蕴², 吴剑锋¹, 董 平^{1,3}, 吴吉春¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;
3. 南京水联天下海水淡化技术研究院, 江苏 南京 210046)

摘 要: 岩溶隧址区含水层内的高矿化度地下水渗入排水管道中, 由于温压条件的改变, 会导致渗流结晶从而堵塞排水管道。为量化研究隧道排水系统结晶堵塞过程, 本文首次构建了考虑管道水动力场、浓度场和化学反应场耦合的排水管岩溶水结晶堵塞模型, 采用动网格和水平集方法定量刻画隧道排水系统结晶堵塞过程, 开展模拟对比研究, 分析温度、流速和溶液浓度等因素对结晶堵塞的影响程度。结果表明: (1) 两种方法均能实现结晶堵塞过程的模拟预测, 其中动网格方法建模简单, 且求解精度高; 水平集方法可追踪拓扑结构的变化, 模拟管道完全堵塞的过程; (2) 纵管内流速普遍大于横管, 横管内 CaCO_3 晶体浓度高于纵管, 因此结晶堵塞主要发生于横管中; (3) 温度和溶液浓度与结晶速率呈正相关关系, 管内流速与结晶速率呈负相关关系。本文构建的考虑水动力-化学反应耦合的结晶堵塞数值模型可为岩溶隧道堵塞早期识别与安全评价提供技术支撑。

关键词: 岩溶隧道; 结晶堵塞; 数值模拟; 动网格; 水平集

中图分类号: P642.25; U452.11 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 02-0245-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

岩溶系统是涉及固(CaCO_3)、液(H_2O)、气(CO_2)三相的复杂化学动力体系, 三者之间的相互作用是岩溶发育的关键。其中溶解-沉淀(结晶)是岩溶动力系统中最为重要的化学反应过程^[1]。近年来, 我国在岩溶地区修建了大量的隧道工程, 而岩溶地区复杂的水文地质条件导致隧道渗水、涌水灾害频繁, 往往需要配套排水系统以防治水害。矿化度较高的岩溶地下水进入隧道排水管道中, 可溶盐离子的溶解度随着管道外部温压条件的改变而发生变化, 当形成过饱和溶液时, 离子结晶析出, 附着于管道内壁, 便会引起排水管过流面积减小。若不治理, 长此以

往会堵塞排水管道, 导致隧道衬砌水压力的升高, 引发渗漏水、涌水、突泥、衬砌破坏等一系列隧道水害问题, 严重威胁隧道建设及运营的安全。

影响隧道排水系统堵塞的因素众多^[2], 造成堵塞的物质来源也较为复杂: 包括结晶沉淀物、围岩及细小颗粒物、植物根叶及微生物等^[3]。如何定量刻画隧道排水系统结晶堵塞过程, 指导岩溶隧道排水管结垢评价与阻垢控制, 是实现岩溶隧址区排水系统科学设计和安全施工的关键。

排水管内岩溶水结晶是温压条件变化下管道水动力和碳酸盐岩组分溶解-沉淀化学作用的耦合驱动过程, 当前岩溶隧道排水管道结晶堵塞量化研究还较为薄弱。先后有学者提出了结晶动力学的经

资助项目: 国家重点研发计划资助(2019YFC1804300)

第一作者简介: 毛成君(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 水资源管理。E-mail: maocj@smail.nju.edu.cn。

通信作者: 吴剑锋(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水资源优化管理。E-mail: jfwu@nju.edu.cn。

收稿日期: 2021-05-16

验公式和理论模型。经验公式是基于 CaCO_3 溶解-沉淀化学平衡得出的,如宋焕荣等^[4]根据室内试验结果,总结得出了 CaCO_3 结晶速率的经验公式,以此进行 CaCO_3 结晶沉淀预测。经验公式只考虑了水岩接触面积和离子浓度对结晶沉淀的作用,未考虑水动力条件,且参数的选取对经验公式计算结果会有很大程度上的影响,因此其应用具有很大局限性。理论模型方面,Plummer 等^[5]于上世纪 70 年代提出了考虑系统流动性条件的方解石溶解、沉积动力学 PWP (Plummer-Wigley-Parkhurst) 模型;到上世纪 90 年代,Dreybrodt 和 Buhmann^[6]提出了方解石溶解、沉积动力学 DBL(Diffusion Boundary Layer) 理论模型,相较于 PWP 模型,DBL 模型还考虑了溶液中 CO_2 慢速转换的控制;刘再华^[7]基于 DBL 理论模型,利用修改后的计算机程序 LAYER 对桂林尧山外源水及四川黄龙沟溪水中方解石的沉积速率进行预报。相比经验公式,DBL 等理论模型是以流动系统为基础提出的,模型中将溶液被分为均匀溶液区和扩散边界层(DBL 区)。在 DBL 区内,由于水的粘滞阻力,溶液处于静止状态,主要受扩散作用控制;在均匀溶液区内,模型假设溶液浓度分布均匀。因此,DBL 理论模型更适合处理实验室和自然界均质流动体系中的方解石溶解-沉积动力学过程,而隧道排水管内水流多以湍流形式存在,DBL 理论模型并不适用。

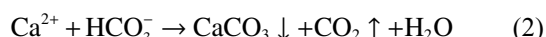
针对经验公式和 DBL 等理论模型未能实现化学场与水动力场的耦合,未考虑流态的影响等问题,文章提出一种以湍流方程为基础的水动力-化学反应耦合的数值模型,采用动网格和水平集模拟技术,定量刻画隧道排水系统水动力场和化学反应场驱动下的结晶堵塞过程。

1 岩溶隧道排水系统结晶堵塞机理与数值模拟方法

1.1 析晶结垢机理

Epstein^[8]按照结垢形成过程将结垢分为析晶结垢、颗粒结垢、化学反应结垢、腐蚀结垢、生物结垢、凝固结垢和混合结垢七大类。根据文献调研及现场采样分析发现,岩溶地区隧道排水系统内堵塞物质中结晶沉淀物占了 90% 以上,主要以 CaCO_3 为主,因此,岩溶隧道排水管内结垢类型主要为析晶结垢,也即在管道水动力作用下 CaCO_3 的溶解-沉淀正逆向平衡。

根据已有隧道排水管内堵塞的理论及室内试验研究成果^[9-12],可将隧道开挖工程影响下的岩溶系统概化为岩溶地下水系统中的渗流溶解过程和隧道排水管道中的沉淀过程。决定可溶碳酸岩盐溶解-沉淀平衡的因素为溶液的过饱和度,当溶液为过饱和状态时才能发生结晶沉淀。在沉淀过程中,存在两种不同的过程,即 CaCO_3 的结晶附着过程和剥蚀过程。如图 1 所示,高浓度岩溶地下水进入隧道排水管内,由于释压及降温,溶液转变为过饱和状态,以 CaCO_3 为主的可溶盐离子结晶析出,形成 CaCO_3 晶核,晶核在流体中运动时会发生相互碰撞,从而聚结成更大的 CaCO_3 晶体,晶体逐渐生长,达到一定程度后开始附着于管壁上而形成管道结晶垢,即为 CaCO_3 的结晶沉淀过程。在该过程中,涉及到的化学反应主要为:



此外,管道内的水流处于持续运动状态,由于边界层粘性剪切力的作用,水流对已沉积的结晶垢有剥除效果,可将该过程概化为 CaCO_3 结晶垢的剥蚀过程。在结晶垢沉积的过程中,存在两个关键的浓度梯度:传质动力(Δc_1 ,也即使得物质运输不断进行的浓度梯度)与析晶动力(Δc_2 ,也即使得表面沉淀反应发生的浓度梯度)(见图 2)。

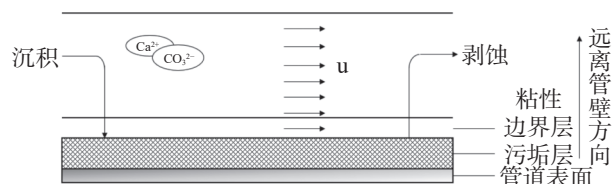


图 1 管道结晶过程概化图(据 Brahim et al., 2003)

Fig. 1 Generalization of pipeline crystallization process (based on Brahim et al., 2003)

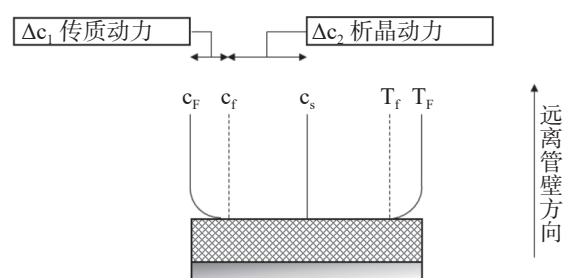


图 2 结垢过程中的传质动力与析晶动力,图中 c_F 、 c_F 、 c_s 分别为主流体浓度、垢层附近浓度及碳酸钙的饱和浓度; T_F 、 T_F 分别为流体温度及垢层温度。(据 Brahim et al., 2003)

Fig. 2 Mass transfer forces and crystallization forces during scaling (based on Brahim et al., 2003)

1.2 数值模拟方法

目前关于析晶结垢数值模型的研究,多集中在换热器及油气输运等领域,对排水管道的结晶研究较少。基于 Hasson^[13]提出的沉积-剥蚀“两步结晶”模型,Bohnet^[14]、Brahim^[15-16]、徐志明^[17-19]、李竑序等^[20-21]、王磊等^[22]先后对换热器内的结晶堵塞过程进行了模拟,探讨了不同流速、浓度、温度、压力、管壁材质等条件下对结晶过程的影响。

排水管道结晶堵塞已有的量化研究中,经验公式局限性大,DBL 等理论模型未能实现化学场与水动力场的耦合,已有研究未考虑流态的影响。针对上述问题,参考换热器等领域的结晶研究,本文采用一种新的数值模拟方法,实现管道水动力场、流体浓度场及化学场之间的耦合,以进行更为精确化的隧道排水系统结晶堵塞量化研究。模型计算流程图见图 3。

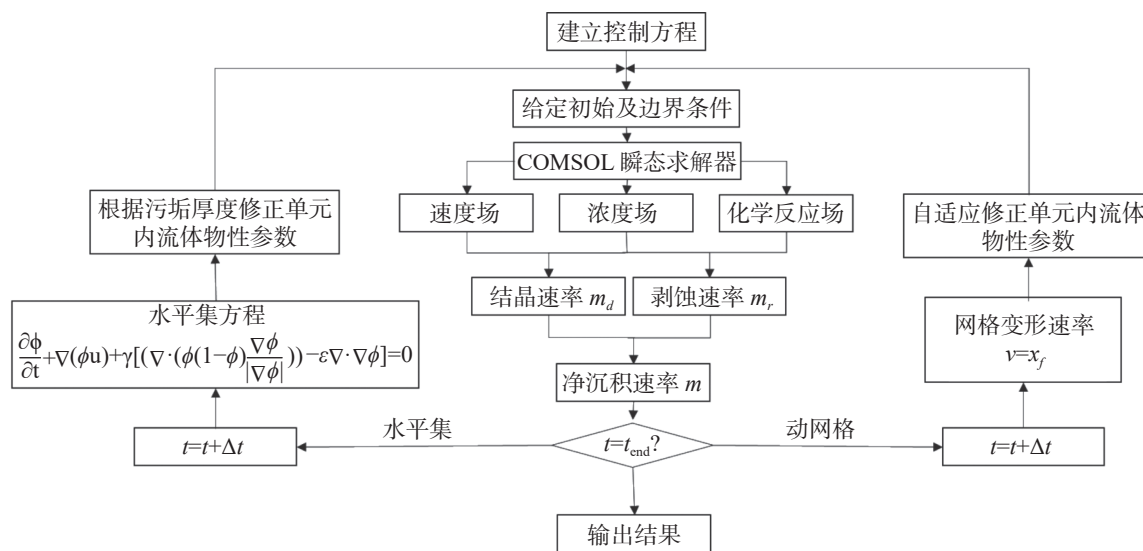


图 3 模型计算流程图

Fig. 3 Flow chart of model calculation

1.2.1 结晶堵塞数学模型

排水管道内的结晶堵塞是一个涉及到流场、浓度场及化学反应场的多物理场过程,其中流场的计算采用湍流方程,所建立的模型如下:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \mathbf{F} \\ \frac{\partial c_j}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_j + \mathbf{u} \cdot \nabla c_j = R_j \\ m = m_d - m_r \end{cases} \quad (3)$$

根据 Hasson 等^[23](1968)提出的“两步结垢”模型,沉积速率可表示为:

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

根据 Bohnet 等^[24]的研究,可将水流对污垢层的剥蚀作用概化为关于温度、流速、密度、黏度等的函数关系式

$$m_r = 0.012 u^{1.46} m_f \times [1 + \beta(T_w - T_f)] \times d_p \times (\rho^2 \mu g)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

根据 Kern 和 Seaton^[25]提出的净沉积率(即沉积速率减去剥蚀速率)模型即可得到 CaCO_3 结晶沉淀的化学反应模型。

$$m = m_d - m_r \quad (6)$$

式中, ρ 为流体密度, $\mathbf{u}$ 为流速, p 为压力, $\mathbf{I}$ 为湍流强度, $\mathbf{K}$ 为黏性应力, $\mathbf{F}$ 为体积力, $\mathbf{J}_j$ 为扩散通量, c_j 为节点 j 处的浓度, R_j 为源汇项, m_d 为沉积率, β 为对流传质系数, k_R 、 k_{R0} 为表面反应速率常数, c_f 、 c_s 分别为管内 CaCO_3 浓度及 CaCO_3 的饱和浓度, E 为活化能, R 为摩尔气体常数, T_F 为垢层表面温度, m_r 为剥蚀率, m_f 为单位面积污垢质量, β 为线膨胀系数, T_w 、 T_f 分别为管壁温度及流体温度, d_p 为晶体粒径。

1.2.2 模拟技术

对结晶堵塞过程的模拟,实际上是对排水管壁上污垢层边界变化的追踪刻画。目前对于自由边界的表示一般有两种方法,即:基于拉格朗日坐标的方法^[26]和基于欧拉坐标的方法^[27]。在流体动力学的

数值模拟中,如何准确地描述和跟踪自由边界的变化是解决问题的关键。

(1) 动网格

动网格(Moving Mesh)方法往往会涉及到计算域的变形问题。变形是涉及将一些几何形状转换为新几何形状的问题,通常这些变换是连续的,不会改变形状的拓扑性质。基于拉格朗日法的动网格模型可以用来模拟流场形状由于边界运动而随时间改变的问题^[28],可以用边界型函数或者 UDF 定义边界的运动方式^[29]。

本文数值模型求解中,选择指定法向网格速度节点来指定边界的法向速度,该节点可用于具有自由位移域的边界上。移动边界平滑选项对规定法向网格速度节点的法向网格速度进行平滑,即:

$$\frac{\partial X}{\partial t} \cdot \mathbf{n} = v_0 + v_{mbs} \quad (7)$$

$$v_{mbs} = \delta_{mbs} |v_0| h H \quad (8)$$

$$H = -0.5 \nabla_T \cdot \mathbf{n} \quad (9)$$

其中 v_0 是指定的法向网格速度, v_{mbs} 是网格平滑速度, δ_{mbs} 为移动边界平滑调整参数, h 为网格单元尺寸(单位:m), H 为平均表面曲率(单位:1/m), ∇_T 为曲面梯度算子。

(2) 水平集

水平集(Level Set)方法是一种用于界面追踪和形状建模的数值技术。水平集方法的优点是可以在笛卡尔网格上对演化中的曲线曲面进行数值计算而不必对曲线曲面参数化,也就是说,水平集方法是基于欧拉法的^[30]。与上文所提到的变形几何及动网格方法相比,水平集方法可以方便地追踪物体的拓扑结构改变。

在二维情况下,水平集方法意味着将平面上的闭曲线 Γ 表示为二维辅助函数 ϕ 的零水平集,然后用过函数 ϕ 隐式地处理曲线 Γ ,这一函数便被叫做水平集函数^[31]。

$$\Gamma = \{(x, y) | \phi(x, y) = 0\} \quad (10)$$

如果零水平集以速度 v 沿着其法线运动,这一运动可以表示为水平集函数的哈密顿-雅可比方程(Hamilton-Jacobi Equation)^[31]:

$$\phi_t = v \cdot |\nabla \phi| \quad (11)$$

式(11)为一个偏微分方程,通过求解该方程即可得到数值解。

本文模型求解中,基于水平集方法,通过式(12)

来捕捉两相流界面的运动:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla(\phi \mathbf{u}) + \gamma \left[\left(\nabla \cdot \left(\phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right) - \varepsilon \nabla \cdot \nabla \phi \right] = 0 \quad (12)$$

式中 ϕ 为水平集变量, $\mathbf{u}$ 为流体速度, γ 为重新初始化参数(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ε 为界面厚度控制参数(单位:m), ∇ 为梯度算子。

对于一般自由表面的建模问题,动网格方法在性能与精确度平衡方面更为出色,但其存在两个缺点:不能处理拓扑变化;默认不分析自由表面的其它相。如果可以预见建模问题本身不会涉及到拓扑变化,则动网格方法是自由表面建模的首选;而如果建模问题涉及到拓扑变化,则必须考虑其它建模方法,如水平集方法。

2 算例设计与模型设置

2.1 现场概述

本文主要针对贵州梁家坡隧道排水管结晶堵塞现象,开展岩溶管道结晶堵塞水动力-化学反应耦合模拟研究。梁家坡2号隧道位于石阡县石固乡梁家坡境内,在实际开挖过程中,发现该段围岩主要为中风化白云岩,节理裂隙发育,岩体破碎,施工过程中局部有掉块现象,地下水较发育。该隧道于2018年12月施作二次衬砌,2019年7月(历时大约7个月)现场检查发现该段隧道横向排水管口与排水暗沟内壁上有大量乳白色结晶体附着现象(图4)。



图4 梁家坡隧道排水管现场结晶情况

Fig. 4 Crystallization of the drainage pipe in the Liangjiapo Tunnel

2.2 概念模型

现场隧道排水系统由环向排水管(环管)、纵(横)向排水管、排水沟、沉沙池等组成,隧道围岩中的岩溶地下水渗出汇流至环管中,流向纵管,并最终通过连接处横管排至排水沟。梁家坡隧道实际排水系统的结构如下图5所示。

现场调查发现,“T”字形纵横管是产生结晶沉

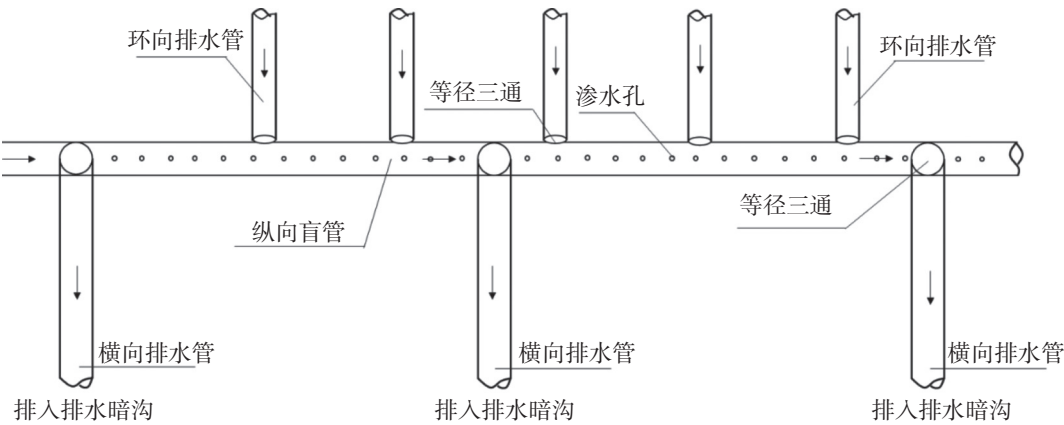


图 5 梁家坡隧道排水系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the drainage system of the Liangjiapo Tunnel

淀物的主要部位,且横管结晶程度最为严重,易发生堵塞。因此,本文选择排水系统最易发生结晶堵塞的“T”字形纵横管为模拟对象,开展数值模拟研究,刻画不同条件下的岩溶结晶堵塞过程。排水管概念模型示意图及边界条件设定如下图 6 及表 1 所示:

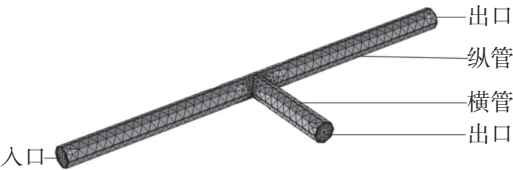


图 6 “T” 字型排水管概念模型及网格剖分图

Fig. 6 Conceptual model and mesh division diagram of T-shaped drainage pipe

表 1 模型边界条件设定

Table 1 Setting of model boundary conditions

边界	物理场类型	
	流场	浓度场
入口	给定流速/流量	给定浓度/通量
出口	自由流出($p=0$)	自由流出($p=0$)
管壁	无滑移	无通量

根据前文所述,利用 COMSOL 建立相应隧道排水管结晶堵塞数值模型,模型参数选取如下表 2 所示。

2.3 模拟工况

为研究不同因素的改变对隧道排水管内结晶堵塞程度的影响,参考翟明^[32]排水管结晶堵塞室内实验的参数设置,改变流速、浓度、温度等设定值后分别求解模型,与初始模拟结果进行对比,详细设定值见表 3 对照组。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

管型	形状	长度/mm	直径/mm
纵管	光滑圆管	300	2
横管	光滑圆管	80	2

表 3 模型模拟工况设定

Table 3 Setting of model simulation conditions

工况	空白组	对照组
压力/atm	1	1
温度/K	293.15	273.15、283.15、303.15
入口浓度(以Ca ²⁺ 计)/mol·m ⁻³	8.5	6.5、7.5、10
入口流速/m·s ⁻¹	0.541	0.3、0.7、0.9

3 模拟结果对比与分析

3.1 动网格模拟结果

动网格方法的优点是随着模型的求解,域内剖分的网格也会相应发生改变,也即是说求解的单元数实时发生变化,这就使得每计算一个时间步,求解器会自动调整网格特征,从而精细刻画出管道内流态的变化。通过求解模型,得到该模型 100 d 内的流场及浓度场分布变化趋势如图 7 及图 8 所示。

由图 7 及图 8 可明显看出,相较于初始时刻,排水管道发生了明显的变形,这是由于 CaCO₃ 不断结晶析出,沉积于管道内壁面上,导致管道内径逐渐减小,在流量不变的情况下,流速便会逐渐增大。此外,分析图 7,发现整个模型中纵管内流速大于横管内,但由图 8 又可以明显看出模型中横管内生成 CaCO₃

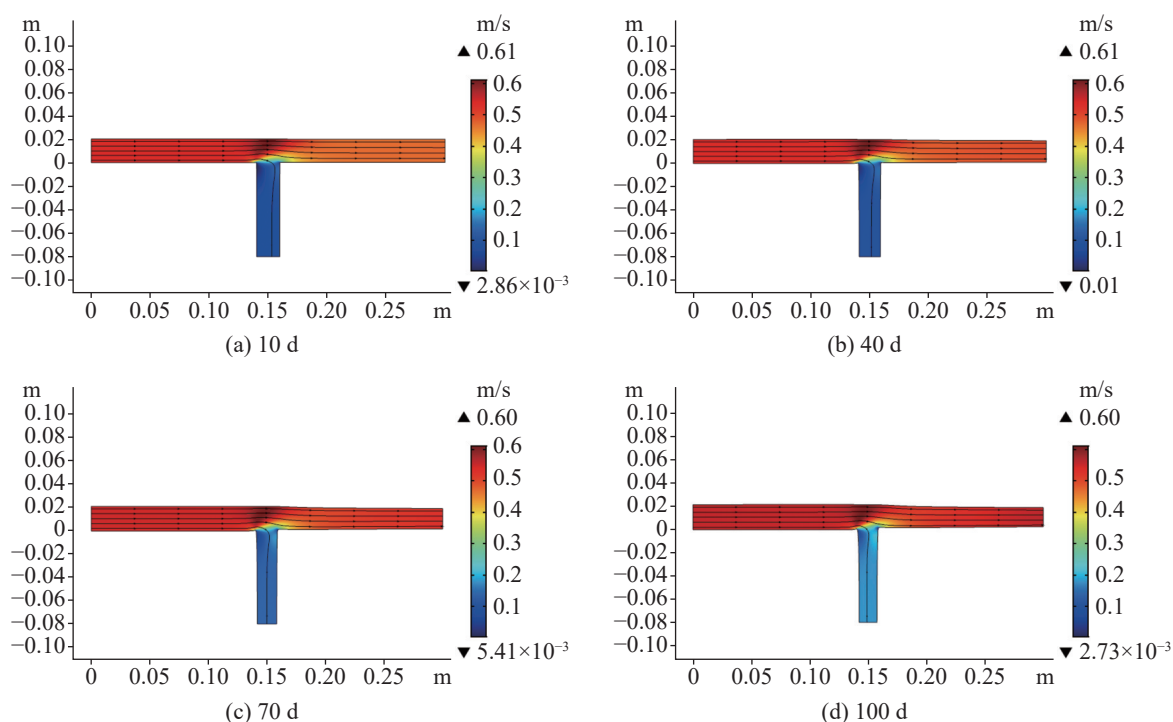
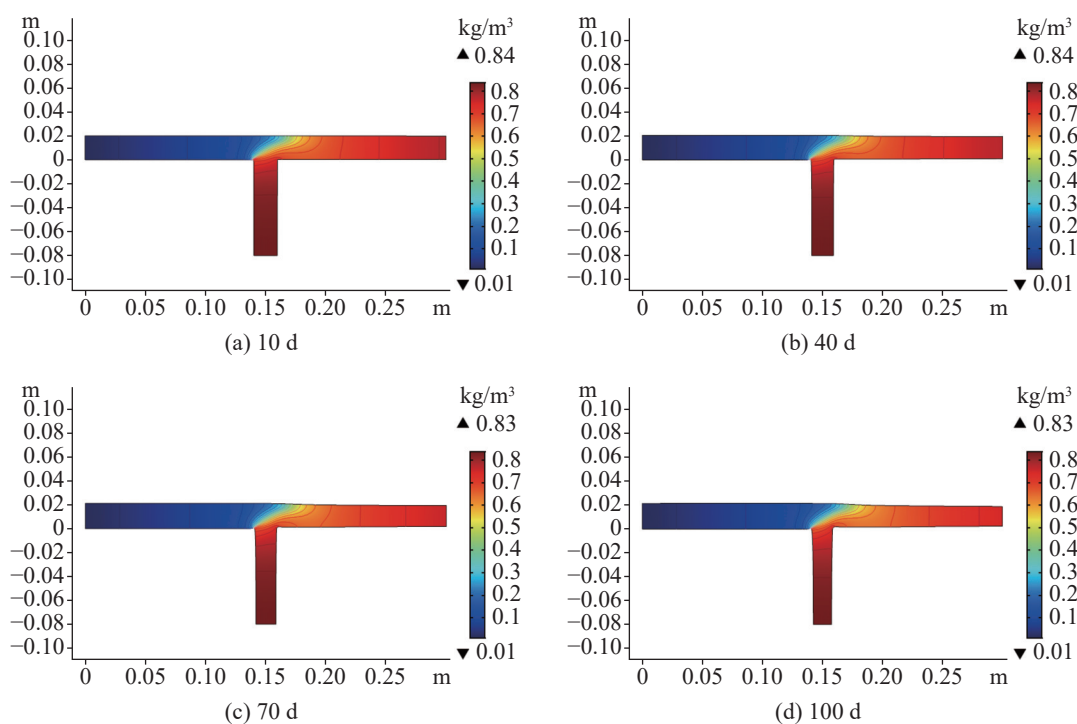


图 7 排水管速度分布剖面图

Fig. 7 Profile of the velocity distribution of the drainage pipe

图 8 排水管 CaCO_3 浓度分布纵剖面图Fig. 8 Longitudinal profile of CaCO_3 concentration distribution in the drainage pipe

晶体的浓度大于纵管内生成 CaCO_3 晶体浓度,再由式(4)~(6)即可知,相较于纵管而言,隧道排水系统的横管更容易发生堵塞。在贵州省梁家坡隧道现场调研发现,堵塞较为严重的大部分都为排水横管,这

也在一定程度上说明了模型模拟结果的合理性。

但当几何拓扑形状发生改变时(即几何形状的变化不连续),该方法就不再适用,因此考虑能够模拟几何拓扑形状改变的另一种方法——水平集。

3.2 水平集模拟结果

水平集方法本质上是一种模拟多相流的相场方法,相比变形几何及动网格方法,其能模拟几何拓扑形状发生改变时的运动。基于同样的数学模型,将水平集函数与控制方程联立,通过求解模型,得到 100d 内排水管内流场的分布及浓度场分布变化如下图 9 及图 10 所示,分析流场及浓度场可知,管壁附近的流速较低,而生成 CaCO_3 晶体的浓度又相对较高,因此管壁处有利于 CaCO_3 晶体的沉积,而该结果与动网格方法所得到的流场及浓度场分布规律近乎是一致的,表明两种方法均可正确模拟排水管结晶堵塞过程。

此外,由图 11 可看出,随着结晶沉淀的不断进

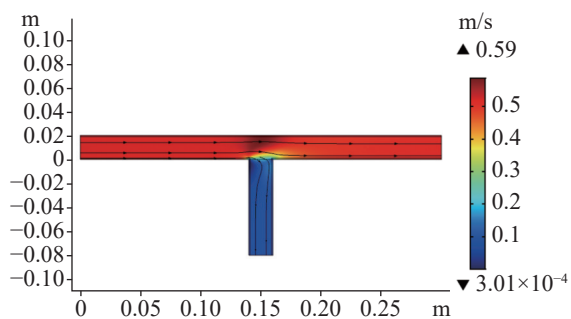


图 9 排水管道速度分布剖面图 (100d)

Fig. 9 Profile of velocity distribution of the drainage pipe (100d)

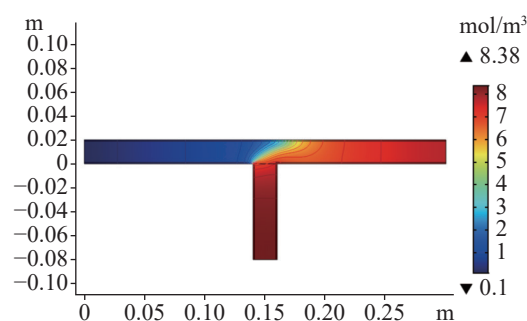


图 10 排水管道 CaCO_3 浓度场分布图 (100d)

Fig. 10 Distribution diagram of CaCO_3 concentration field in the drainage pipe (100d)

行,管壁堵塞程度逐渐加剧,且因为出口段生成 CaCO_3 晶体的浓度相对较高,其更容易发生堵塞。该结果与通过动网格方法模拟所得到的结果也是一致的。

3.3 排水管道完全堵塞情况下两种方法的对比分析

根据前文分析,在给定相同的边界条件及工况下,动网格与水平集方法所得到的模拟结果基本是一致的,出口段结晶堵塞程度相较于入口段更剧烈(见图 7 至图 11)。随着结晶过程的不断进行,如果时间尺度足够长,最终出口段会最先发生完全堵塞。这个过程中会涉及到几何拓扑形状的改变(即完全堵塞),而动网格方法在这方面存在局限性,因此考

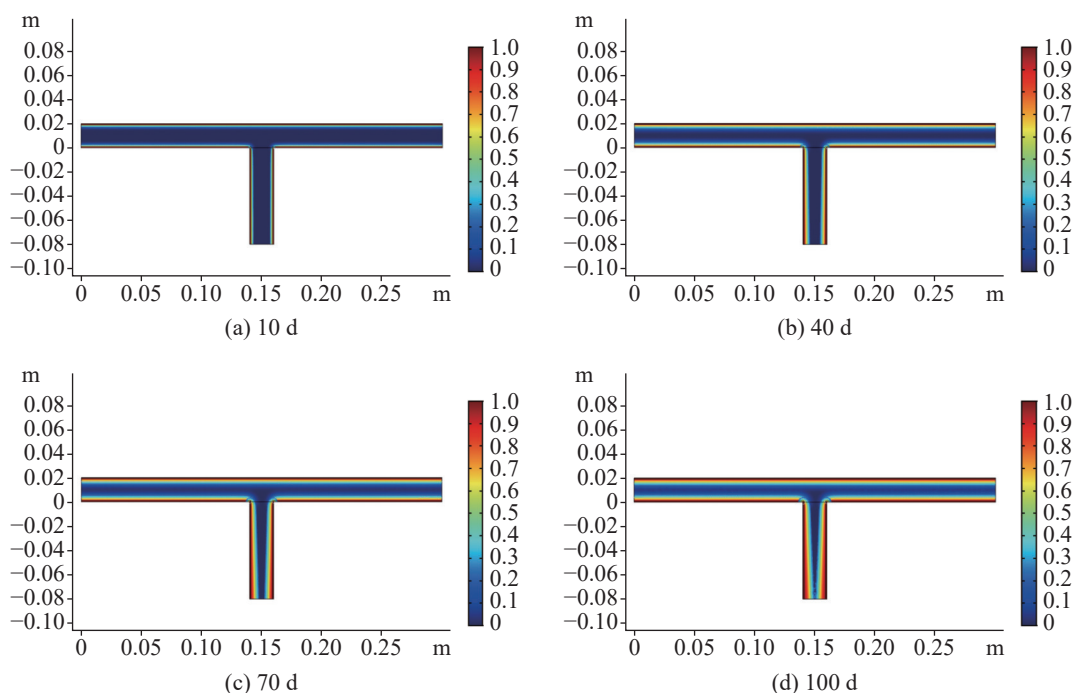


图 11 排水管道内沉积界面分布变化示意图(图中颜色图例表示 CaCO_3 的体积分数)

Fig. 11 Schematic diagram of distribution variation of sediment interface in the drainage pipeline

虑采取另一种可以方便地刻画几何拓扑形状变化的方法——水平集。水平集方法可以将低维几何拓扑形状的改变等效至高维空间内,从而实现能够刻画几何拓扑形状的改变。

如下图 12 所示为模拟完全堵塞情况下两种方法的对比,红色部分表示生成 CaCO_3 晶体的体积分数等于 1,也即该部分全部被 CaCO_3 晶体所占据;其余部分表示 CaCO_3 晶体的体积分数小于 1,其中的 CaCO_3 晶体仍然能随水流进行运动。黑色虚线所包围的区域即为 CaCO_3 结晶沉积层。图(a)为利用水平集方法模拟排水横管完全堵塞时的 CaCO_3 结晶沉

积层的分布示意图,其中 CaCO_3 体积分数为 1 的曲线即可作为沉积界面曲线,可以看到此时出口段已几乎被完全堵塞,水流无法再通过,横管内水流滞缓,若结晶过程继续进行,则转变为静水条件下的结晶堵塞过程。而在图(b)的动网格模拟结果中,计算域(图中蓝色区域,即体积分数小于 1 的部分)的上下边界即为 CaCO_3 的沉积界面曲线,可以看到,随着结晶堵塞的不断进行,出口段管径逐渐减小,若至完全堵塞时,出口将收缩为一个点,此时由于网格变形剧烈,模型不再收敛,因此无法再模拟后续结晶堵塞过程。

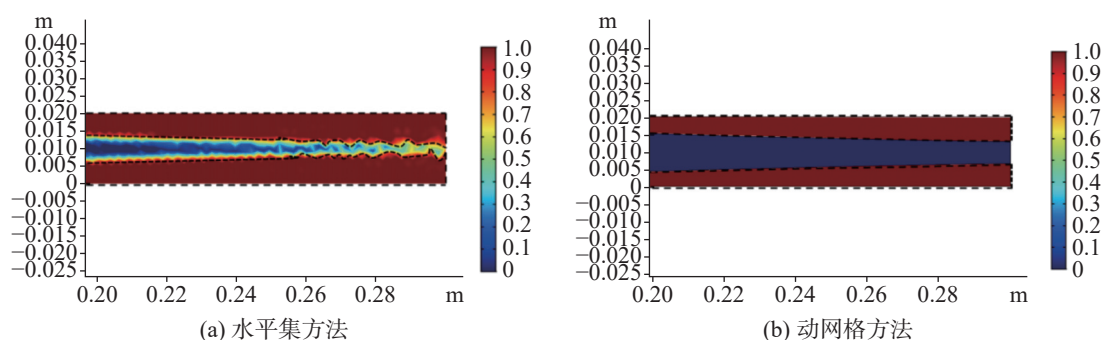


图 12 采用(a)水平集方法与(b)动网格方法模拟完全堵塞的结果对比

(图中颜色图例表示 CaCO_3 晶体的体积分数)

Fig. 12 Comparison of blocking results based on (a) level set method and (b) dynamic mesh method

4 结晶堵塞影响因素分析与讨论

根据 Hasson 的“两步”结垢模型,分别绘制初始模拟条件下沉积速率(m)、剥蚀速率(m_r)、净沉积速率(m_d)随时间的变化曲线如图 13 所示,所得结晶趋

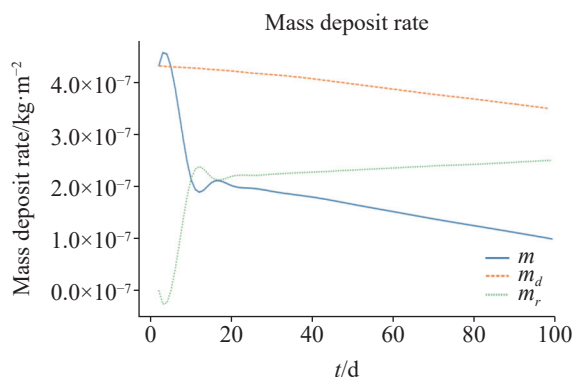


图 13 沉积(m_d)、剥蚀(m_r)及净沉积速率(m)随时间变化曲线图

Fig. 13 Curve of deposition, denudation and net deposition rates over time

势的规律符合前人的结晶堵塞规律理论研究内容,且与 Brahim 等(2003)^[15]所模拟的结晶规律保持一致。

由图 13 可知,在岩溶地下水流入排水管道的初期,由于地下水矿化度极高,且从含水层到排水管,水流压力、温度等条件发生改变,从而产生了较大的过饱和度。在这段时间内,结晶驱动力大, CaCO_3 晶体不断生成并发生沉积,因此在初期阶段, CaCO_3 沉积速率较大。而随着 CaCO_3 晶体生成并附着在管道内壁上沉积下来,有效过流面积逐渐减小,流量不变的情况下,管内流速逐渐增大,剥蚀速率逐渐增大, CaCO_3 晶体净沉积速率逐渐减小。随着时间的增加,若假设管道空间足够大,当沉积速率与剥蚀速率二者趋于一致,即净沉积速率此时为零,则 CaCO_3 晶体不再发生沉积,堵塞程度不再加速,此时即达到污垢生长的“渐进值”。

4.1 浓度对结晶堵塞的影响

离子浓度对结晶堵塞的影响主要是通过影响生成 CaCO_3 的溶解-沉淀平衡来体现的,当溶液中各离

子浓度幂次方的乘积大于 CaCO_3 溶度积常数 K_{sp} 时, CaCO_3 即发生沉淀, 离子浓度越大, 生成的 CaCO_3 晶体越多。由图 14 可以看出, 随着浓度由 $6.5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ 增至 $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, CaCO_3 沉积速率逐渐增大。这是因为随着离子浓度的增大, 溶解-沉淀平衡正向移动, 其他条件不变的情况下, 生成更多的 CaCO_3 晶体, 溶液的过饱和度更大, 也即是说, CaCO_3 的结晶驱动力更大。同时, 由式(4)知, CaCO_3 沉积速率和浓度呈正相关关系。

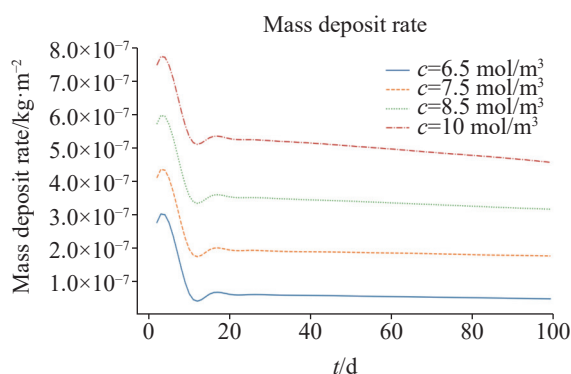


图 14 不同浓度条件下 CaCO_3 净沉积速率 m 随时间变化曲线图

Fig. 14 Curve of net CaCO_3 deposition rate m over time under different concentrations

4.2 温度对结晶堵塞的影响

由图 15 可知, 其它条件不变的情况下, 随着温度由 273.15 K 增至 303.15 K , CaCO_3 净沉积速率也逐渐增大, 且温度越高, 继续增大温度时, CaCO_3 净沉积速率的增幅也越大。此外, 分析图 15 发现当温度为 273.15 K 时, 随着时间的增加, CaCO_3 净沉积速率

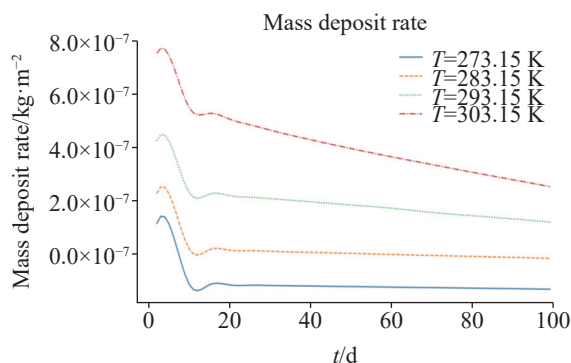


图 15 不同温度条件下 CaCO_3 净沉积速率 m 随时间变化曲线图

Fig. 15 Curve of CaCO_3 net deposition rate m changing with time at different temperatures

出现负值, 也即 CaCO_3 沉积速率 m_d 小于剥蚀速率 m_r , 此时只表现为对已生成污垢的剥蚀作用。在此阶段内, 温度会影响对流传质; 另一方面, CaCO_3 是负溶解度晶体, 随温度升高, 其溶解度逐渐减小。若其他条件不变, 过饱和度增大, 即会有更多 CaCO_3 结晶析出, 堵塞程度加剧。

4.3 流速对结晶堵塞的影响

由图 16 可知, 随着流速由 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, CaCO_3 的净沉积速率 m 逐渐减小, 且流速越大, 继续增大流速时, 净沉积速率的变幅越大。此外, 分析图 16 发现当流速为 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 同样出现了净沉积速率为负值的阶段。流速对结晶堵塞的影响可以分为正反两个方面。一方面, 流速越大, 对流传质越强, 因而 CaCO_3 沉积速率在一定程度上随流速的增大而增大; 另一方面, 分析图 17 可知, 随着流速由 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

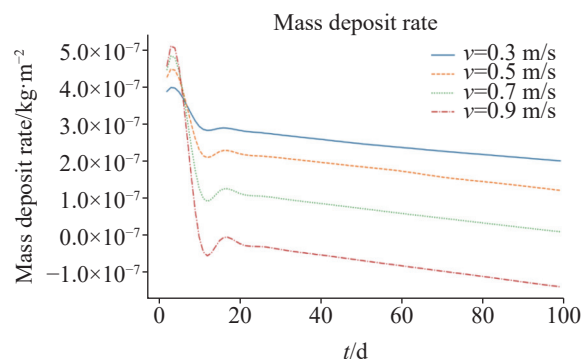


图 16 不同流速条件下净沉积速率 m 随时间变化曲线图

Fig. 16 Curve of net deposition rate m over time at different flow rates

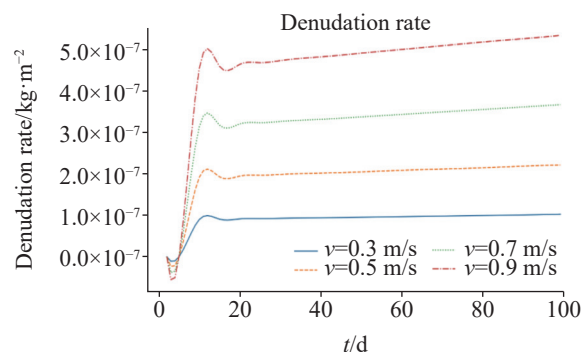


图 17 不同流速条件下剥蚀速率 m_r 随时间变化曲线图

Fig. 17 Curve of denudation rate m_r over time at different flow rates

增至 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, CaCO_3 剥蚀速率逐渐增大, 且由式(5)可知, 剥蚀速率与流速呈正相关关系, 因而流速越大, CaCO_3 污垢的剥蚀速率越大。尽管随着流速的增大, CaCO_3 沉积速率也会增大, 但其增幅小于由流速增大引起的剥蚀速率增大幅度, 因此整体上表现为净沉积速率随流速增大而减小。

5 结 论

本文在对岩溶地区隧道排水管结晶堵塞机理进行研究的基础上, 构建了水动力-化学反应耦合的排水管岩溶水结晶堵塞数学模型, 基于动网格及水平集方法对模型进行求解, 得到以下结论:

(1) 结晶堵塞主要发生于横管中, 横管内生成的结晶沉淀物更多, 其原因是纵管内流速普遍大于横管, 且横管内 CaCO_3 晶体浓度又高于纵管, 也即说明横管内的沉积速率大于纵管, 剥蚀速率又小于纵管, 导致横管内净沉积速率更大;

(2) 动网格及水平集方法均能实现结晶堵塞过程的模拟预测。其中动网格方法建模更加简单, 求解精度相对更高, 且求解器可根据网格变形自适应修正参数; 而水平集方法模拟结果更加直观, 且能实现拓扑形状发生改变(也即完全堵塞)后的进一步沉积模拟;

(3) 温度及可溶盐离子浓度与结晶速率呈正相关关系, 管内流速与结晶速率呈负相关关系;

(4) 上述结论符合已有的结晶堵塞理论性研究^[2,11,32], 且与 Brahim^[15]等得到的结晶规律保持一致, 表明所构建的考虑水动力-化学反应耦合的结晶堵塞数值模型可为岩溶隧道堵塞早期识别与安全评价提供技术支撑。

结晶堵塞定量化计算模型是岩溶隧道堵塞早期识别与安全评价的重要工具, 本文从方法论角度出发, 构建了一种以湍流方程为基础的水动力-化学反应耦合的数值理论模型, 刻画符合实际的岩溶排水系统结晶堵塞过程。基于已建立的数值理论模型, 模型的现场验证是下一阶段的研究重点, 也是本文的重要展望。

参考文献

- [1] 袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.

- YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. Karst Dynamics Theory in China and its practice[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 355-365.
- [2] 周卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理研究及处治建议[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHOU Zhuo. Study on the plug of the tunnel drainage pipe mechanism caused by groundwater seepage crystallization in karst area and the proposal of treatment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [3] 向立辉. 富水隧道排水盲管堵塞效应分析及防治[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- XIANG Lihui. Analysis and prevention of tunnel drainage pipe blockage effect in water rich region[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [4] 宋焕荣, 黄尚瑜. 碳酸盐的结晶沉淀[J]. 中国岩溶, 1990, 9(2): 3-16.
- SONG Huanrong, HUANG Shangyu. Crystallized precipitation of carbonate[J]. *Carsologica Sinica*, 1990, 9(2): 3-16.
- [5] Plummer L, Wigley T, Parkhurst D. The kinetics of calcite dissolution in CO_2 -water systems at 5°C to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO_2 [J]. *American Journal of Science*, 1978, 278(2): 179-216.
- [6] 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.
- [7] 刘再华, Dreybrodt W. DBL理论模型及方解石溶解、沉积速率预报[J]. 中国岩溶, 1998, 12(1): 3-9.
- LIU Zaihua, Dreybrodt W. The DBL model and prediction of calcite dissolution/precipitation rates[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 12(1): 3-9.
- [8] Epstein N. Fouling in heat exchangers[C]. *Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference*, 1986, 6: 235-253.
- [9] 叶飞, 田崇明, 何彪, 赵猛, 王坚, 韩兴博, 宋桂锋. 在建隧道排水系统结晶堵塞试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 159-170.
- YE Fei, TIAN Chongming, HE Biao, ZHAO Meng, Wang Jian, HAN Xingbo, SONG Guifeng. Experimental study on scaling and clogging in drainage system of tunnels under construction[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(3): 159-170.
- [10] 高国红. 富水公路隧道排水系统结晶堵塞典型病害分析与处置[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(3): 250-251.
- GAO Guohong. Analysis and treatment of typical crystallization blocking disease of tunnel drainage system in water rich region of highway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition)*, 2020, 16(3): 250-251.
- [11] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 赵菊梅, 肖华荣. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131-135.
- JIANG Yajun, DU Kun, TAO Lei, ZHAO Jumei, XIAO Huarong. Investigation and discussion on blocking mechanism of drainage system in karst tunnels[J]. *Railway Standard Design*, 2019, 63(7): 131-135.

- [12] 刘士洋, 高峰, 周元辅, 刘强, 吕获印, 王博, 向坤, 肖东杰. 绒毛长度对隧道植绒排水管防除结晶效果试验[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(9): 234-239.
- LIU Shiyang, GAO Feng, ZHOU Yuanfu, LIU Qiang, LYU Huoyin, WANG Bo, XIANG Kun, XIAO Dongjie. Effect of fuzz length on the prevention of crystallization of tunnel flocking drainpipes[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(9): 234-239.
- [13] Hasson D, Avriel M, Resnick W, Rozenman T, Windreich S. Mechanism of calcium carbonate scale deposition on heat-transfer surfaces[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1968, 7(1): 59-65.
- [14] Bohnet M. Fouling of heat transfer surfaces[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 1987, 10(1): 113-125.
- [15] Brahim F, Augustin W, Bohnet M. Numerical simulation of the fouling process[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42(3): 323-334.
- [16] Brahim F, Augustin W, Bohnet M. Numerical simulation of the fouling on structured heat transfer surfaces (fouling)[J]. *Proceedings of Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, 2004: 17.
- [17] 徐志明, 张仲彬, 程浩明. 管内 CaCO_3 污垢形成过程的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(12): 2099-2101.
- XU Zhiming, ZHANG Zhongbin, CHENG Haoming. Numerical simulation of CaCO_3 fouling process in a tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(12): 2099-2101.
- [18] 徐志明, 张进朝, 张仲彬, 白珊. 圆管内 CaSO_4 析晶污垢模型与数值模拟[J]. *化学工程*, 2009, 37(7): 13-16.
- XU Zhiming, ZHANG Jinchao, ZHANG Zhongbin, BAI Shan. Model and numerical simulation of CaSO_4 crystallization fouling in circular tube[J]. *Chemical Engineering*, 2009, 37(7): 13-16.
- [19] 徐志明, 朱宏娟, 张一龙. 直角弯管硫酸钙污垢沉积特性研究[J]. *东北电力大学学报*, 2014(3): 7-13.
- XU Zhiming, ZHU Hongjuan, ZHANG Yilong. Research of CaSO_4 fouling in right-angle pipe bends[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2014(3): 7-13.
- [20] 李竑序. 管壁材质对碳酸钙垢生长的影响及其机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- LI Hongxu. The effect of tube wall material on growth of calcium carbonate fouling and its mechanism[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [21] 李竑序, 艾雄杰, 王良璧, 常立民, 王良成. 管壁材质对碳酸钙垢生长的影响及其机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(12): 2773-2778.
- LI Hongxu, AI Xiongjie, WANG Liangbi, CHANG Limin, WANG Liangcheng. Effect of tube wall material on calcium carbonate scale growth and its mechanism[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(12): 2773-2778.
- [22] 王磊, 赵莹, 徐凤煜. 换热面材质对硫酸钙结垢形态的影响试验研究[J]. *重庆电力高等专科学校学报*, 2019, 24(5): 21-23.
- WANG Lei, ZHAO Ying, XU Fengyu. An experimental study of the influence of the materials of the heating surface on the scaling forms of CaSO_4 [J]. *Journal of Chongqing Electric Power College*, 2019, 24(5): 21-23.
- [23] Hasson D, Avriel M, Resnick W, Rozenman T, Windreich S. Calcium carbonate scale deposition on heat transfer surfaces[J]. *Desalination*, 1968, 5(1): 107-119.
- [24] M Förster, Augustin W, Bohnet M. Influence of the adhesion force crystal/heat exchanger surface on fouling mitigation[J]. *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*, 1999, 38(4-6): 449-461.
- [25] Kern D Q, Seaton R E. A theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. *British Chemical Engineering*, 1959, 4: 258-262.
- [26] 王险峰. 复空间形式中的拉格朗日子流形[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- WANG Xianfeng. Lagrangian submanifolds in complex space forms[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [27] 黄弘, 胡啸峰, 申世飞, 原智宏, 冈林一木, 大场良二. 基于Lagrangian模型与Eulerian模型耦合的建筑物周边气体扩散模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(12): 1870-1876.
- HUANG Hong, HU Xiaofeng, SHEN Shifei, TOMOHIRO Hara, KAZUKI Okabayashi, RYOHI Ohba. Simulation of pollutant diffusion based on Lagrangian/Eulerian hybrid model around buildings[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, 51(12): 1870-1876.
- [28] 江帆, 陈维平, 王一军, 区嘉洁. 基于动网格的离心泵内部流场数值模拟[J]. *流体机械*, 2007, 35(7): 20-24.
- JIANG Fan, CHEN Weiping, WANG Yijun, OU Jiajie. Numerical simulation of flow field inside of centrifugal pump based on dynamics mesh[J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(7): 20-24.
- [29] 童亮, 余罡, 彭政, 余江洪, 肖金生. 基于VOF模型与动网格技术的两相流耦合模拟[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2008(4): 525-528.
- TONG Liang, YU Gang, PENG Zheng, YU Jianghong, XIAO Jinsheng. Coupled Simulation of two phase flow based on VOF model and dynamic mesh technology[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering)*, 2008(4): 525-528.
- [30] Osher S, Sethian James A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1): 12-49.
- [31] Osher S, Fedkiw R, Piechor K. Level set methods and dynamic implicit surfaces[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2004, 57(3): B13-B17.
- [32] 翟明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- ZHAI Ming. Study on the regularity of crystallization and blocking of tunnel drainage system in limestone area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.

Numerical simulation of crystallization blocking in tunnel drainage pipes based on dynamic mesh and level set

MAO Chengjun¹, YANG Yun², WU Jianfeng¹, DONG Ping^{1,3}, WU Jichun¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 3. Nanjing Shuilian Tianxia Seawater Desalination Technology Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract The complex hydrogeological conditions in karst areas lead to frequent water seepage and water gushing disasters in tunnels, which often require supporting drainage systems to prevent and control water hazards. When the karst groundwater with high salinity enters the tunnel drainage pipe, the solubility of soluble salt ions in water changes with the variation of external temperature and pressure conditions, forming saturated solution. Ions crystallize and precipitate, sticking to the inner wall of the drainage pipe, which will contribute to decreasing its flow area. If not treated, in the long run, the drainage pipe will be blocked, resulting in the increase of water pressure in the tunnel lining. Consequently, it is likely to occur a series of tunnel water hazards such as water leakage, water gushing, mud outburst, lining damage, etc., which may seriously threaten the safety of tunnel construction and operation.

For quantitative research on the crystallization blocking process of tunnel drainage system, we constructed the blocking model of karst water crystallization in drainage pipes for the first time, coupling with the pipeline hydrodynamic field, the concentration field and the chemical reaction field. Meanwhile, with methods of dynamic mesh and level set, we quantitatively expounded the crystallization blocking process in the tunnel drainage system. We also carried out a comparative study on different simulation technologies to analyze the influence of such factors as temperature, velocity, solute concentration, etc. on the blocking of crystallization. The results show that: (1) Both of the two methods can simulate and predict the crystallizing process, among which the dynamic mesh method is simpler and its solving accuracy is relatively higher, and the level set method can be used to simulate the further deposition after the topological shape has been changed (i.e., completely blocked). (2) Crystallization blocking mainly occurs in the transverse tube, where more crystalline precipitates are developed, because the flow velocity in the longitudinal tube is generally higher than that in the transverse tube, and the CaCO_3 crystal concentration in the transverse tube is higher than that in the longitudinal tube. (3) Temperatures and solution concentrations are positively correlated with the crystallization rate, while the flow rate is negatively correlated with it. (4) Given the coupling of hydrodynamic reaction with chemical reactions, the numerical model of crystallization blocking can provide technical support for the early identification and safety evaluation of geological hazards of karst tunnels.

Key words karst tunnel, crystallization blocking, numerical simulation, dynamic mesh, level set

(编辑 张玲 杨杨)