

# 渗流作用下富水砂层双排管冻结壁形成规律 模型试验研究

李方政<sup>1, 2, 3</sup>, 丁航<sup>2, 3</sup>, 张绪忠<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 建井研究分院, 北京 100013; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013; 3. 天地科技股份有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 针对渗流地层中冻结壁长时间不交圈的难题, 根据多孔介质传热理论与达西定律建立渗流场与冻结温度场耦合控制方程, 得出两者相互作用机制; 基于相似理论, 建立渗流作用下梅花型布置双排管冻结模型试验系统, 对渗流地层中冻结壁形成的主要影响因素进行正交试验研究, 并在相同条件下进行单排管冻结对比试验。研究结果表明: 双排管冻结时, 地下水流速是影响上游冻结壁厚度的首要因素; 孔间距是影响冻结壁交圈时间的首要因素; 盐水温度是影响下游冻结壁厚度与冻结壁平均温度的首要因素; 在本试验条件下, 地下水流速 5~25 m/d 时, 双排管冻结时上、下游冻结壁较单排管冻结时分别增厚 62.6%~151.8%, 3.7%~33.8%; 交圈时间缩短 7.1%~91%, 冻结壁平均温度降低了 12.1%~103.9%; 并对冻结壁交圈时间与地下水流速之间进行非线性回归, 得出冻结壁在不同条件下能交圈的极限流速; 最后提出渗流作用下冻结工程对策, 为类似冻结工程设计施工提供参考。

**关键词:** 土力学; 渗流; 富水砂层; 双排管冻结; 冻结壁; 模型试验

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)02 - 0386 - 10

## Model test research of formation law of double-row-pipe freezing wall in water rich sand layer under seepage

LI Fangzheng<sup>1, 2, 3</sup>, DING Hang<sup>2, 3</sup>, ZHANG Xuzhong<sup>2</sup>

(1. Branch Institute of Mine Construction, CCRJ, Beijing 100013, China; 2. Beijing Coal Mine Construction Company Ltd., Beijing 100013, China; 3. Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of unclosed freezing wall in seepage fields, a coupled control equation of seepage field and freezing temperature field was established based on the heat transfer theory of porous media and Darcy's law, and the interaction mechanism between the two fields was discussed. According to the similarity theory, a model test system for the frozen double-row-pipe with plum blossom arrangement under percolation was built, with which a orthogonal test aiming at main factors affecting the formation of frozen wall in high velocity percolation layers was conducted. For comparison, another test with frozen single-rowed pipe was carried out subsequently. The results show that, for double-rowed pipe freezing, the groundwater velocity, the hole spacing and the salt water temperature are, respectively, the primary factors affecting the thickness of the upstream frozen wall, the frozen wall intersecting time, and the downstream frozen wall thickness and average temperature. It is also indicated that, when groundwater velocity ranges from 5 m/d to 25 m/d, the thicknesses of upstream and downstream frozen walls of double-rowed pipe freezing are respectively larger than those of single-rowed pipe

**收稿日期:** 2018 - 08 - 13; **修回日期:** 2018 - 09 - 27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51774183); 国家重点研发计划(2016YFC0600904)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 5177040737) and National Research Program(Grant No. 2016YFC0600904)

**作者简介:** 李方政(1972 -), 男, 2005 年于东南大学道路与铁道工程专业获博士学位, 现任研究员, 主要从事市政冻结工程等方面的研究工作。E-mail: 1291441700@qq.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0944

freezing by 62.6% - 151.8% and 3.7% - 33.8%, and at the same time, the intersecting time and the average temperature of the frozen wall decrease by 7.1% - 91% and 12.1% - 103.9% respectively. The limit velocity of the frozen wall intersecting under different conditions was obtained based on the nonlinear regression between the frozen wall intersecting time and the groundwater velocity. Finally, effective countermeasures for frozen engineering under seepage were put forward, which provides a significant reference for the design and construction of similar frozen engineering.

**Key words:** soil mechanics; seepage; water rich sand layer; double-row-pipe freezing; freezing wall; model test

## 1 引言

矿山井筒、市政地铁隧道建设中常面临富水、软弱、破碎、流沙等不稳定性地层, 传统的水泥系注浆加固法难以保证施工安全, 因此常采用冻结法对不良土层进行加固<sup>[1-4]</sup>。在冻结工程中, 受自然原因与人工因素影响导致地下水流速过大, 导致工程冻结壁长时间不交圈, 甚至引发工程事故<sup>[5]</sup>。

国内外学者针对动水条件下冻结壁形成规律开展了一系列研究与实践工作, 杨平和皮爱如<sup>[5]</sup>建立了渗流饱和砂层中单孔冻结锋面发展数学模型, 并分析了冻结过程中温度场与渗流场变化规律; Y. M. Lai 等<sup>[6]</sup>提出了含相变的渗流场 - 温度场耦合数学模型, 并采用伽辽金法导出了有限元计算公式, 并给出了寒区隧道及大坝等工程的算例; 周晓敏等<sup>[7]</sup>基于相似准则建立了渗流地层两管模型试验台, 并得出水流速是影响上游冻结壁厚度的主要因素; E. Pimentel 等<sup>[8]</sup>基于水热耦合方程, 通过有限元软件模拟了渗流条件下冻结壁不交圈的潜在原因; 高娟等<sup>[9-10]</sup>建立了渗流作用下裂隙岩体双孔冻结的数值计算模型, 得出不同渗流速度下对应的冻结温度场分布规律; M. Vitel 等<sup>[11-12]</sup>通过渗流条件下三维冻结实验, 为与多孔介质相变相关的水热耦合研究提供了关键参数依据; 李方政等<sup>[13]</sup>针对北京地铁 6 号线冻结壁不交圈进行了深入分析并提出了相应的检测方法, 得出大流速是影响冻结壁交圈的直接原因。

以上研究都是针对低流速地层中单管、两管冻结壁发展规律, 没有考虑冻结管的“群管效应”, 而对高流速(地下水流速大于 5 m/d)地层多排管盐水冻结时冻结壁形成规律的试验研究, 国内外鲜有报道。本文结合理论分析, 建立了渗流地层双排管冻结物理模型试验系统, 采用正交试验设计方法, 对高流速地层中冻结壁形成的主要影响因素进行了试验研究, 研究结果为解决渗流作用下冻结工程设计施工提供依据。

## 2 渗流场与温度场耦合机制分析

### 2.1 基本假定

渗流地层中冻结壁的形成是包含内热源、相变、移动边界和复杂边界条件的热物理过程<sup>[14-15]</sup>, 由于问题的复杂性, 为便于建立耦合方程, 作出以下假设:

土体是连续、均匀、各向同性的饱和孔隙介质, 孔隙间相互连通; 且仅在  $[T_m, 0]$  区间内发生水冰相变,  $T_m$  为土体结冰点温度, 忽略温度对密度的影响; 对冻结过程中产生的质量迁移不作考虑;

土体物理参数如导热系数、比热容、渗透系数、未冻水含量等是有关温度、应力、冻结时间的函数, 其中温度是主要影响因素, 因此假设各参数是仅与温度相关的函数<sup>[15]</sup>;

地下水在土体中流动符合达西定律, 不考虑地下水在土体孔隙中流动的微观过程, 只研究水在宏观上表现出来的平均情况; 土体骨架与周围流动水在同一时刻具有相同温度;

冻结管壁温度等于盐水温度, 忽略盐水与冻结管之间的对流换热。

### 2.2 渗流场与温度场耦合控制方程

三维渗流、温度耦合微分方程简写为

$$C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda_{eq} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho_w C_w \theta_w v \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = Q_m \quad (1)$$

$$S_s \frac{\partial H_p}{\partial t} -$$

$$K \left[ \frac{\partial^2 (H_p + D)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (H_p + D)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (H_p + D)}{\partial z^2} \right] = Q_s \quad (2)$$

式中:  $C_{eq}$  为等效体积热容( $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ),  $T$  为土体温度( $^\circ\text{C}$ ),  $t$  为时间(s),  $\lambda_{eq}$  为等效导热系数( $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ),  $\rho_w$  为水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\theta_w$  为水在土

体中所占体积分数,  $C_w$  为水的比热容(kJ/(kg·°C)),  $v$  为地下水流速(m/d),  $q$  为土体的结冰潜热(kJ/m<sup>3</sup>),  $Q_m$  为热源汇;  $S_s$  为饱和含水层释水率,  $H_p$  为水头(m),  $K$  为渗透系数(m/d),  $D$  为重力势梯度张量(m),  $Q_s$  为渗流场源汇项。

式(1), (2)中:

$$C_{eq} = \theta_s \rho_s C_s + \theta_w \rho_w C_w + \theta_i \rho_i C_i \quad (3)$$

$$\lambda_{eq} = \theta_s \lambda_s + \theta_w \lambda_w + \theta_i \lambda_i \quad (4)$$

$$K = K_f + (K_u - K_f)H(T) \quad (5)$$

式中:  $\theta_s$  为土体骨架在整体中所占体积分数;  $\rho_s$  为土体密度(kg/m<sup>3</sup>);  $C_s$  为土体比热容(kJ/(kg·°C));  $\theta_i$  为冰在整体中所占体积分数;  $\rho_i$  冰密度(kg/m<sup>3</sup>);  $C_i$  为冰比热容(kJ/(kg·°C));  $\lambda_s, \lambda_w, \lambda_i$  分别为土体骨架、水、冰的导热系数(kJ/(m·s·°C));  $K_f, K_u$  分别为冻结区与未冻区的渗透系数(m/d);  $H(T)$  为海维赛德函数, 其表达式为  $flc2hs(T - T_m, \Delta T)$ ,  $\Delta T$  为相变区间。

冻结过程中发生水冰相变, 水与冰在土体中所占体积分数为

$$\theta_w = n_0[(1 - \theta_{rw})H(T) + \theta_{rw}] \quad (6)$$

$$\theta_i = n_0[(1 - \theta_{rw})(1 - H(T))] \quad (7)$$

式中:  $n_0$  为初始孔隙率,  $\theta_{rw}$  为土体中未冻水含量。

人工冻结温度场中热源汇  $Q_m$  为冻结管的供冷量,  $Q_m$  可表示<sup>[1]</sup>为

$$Q_m = \frac{2N\pi\lambda_{eq}(T_m - T_b)}{\ln \frac{s}{\pi d} + \frac{E}{2s}} \quad (8)$$

式中:  $N$  为冻结管数目,  $T_m$  为地层结冰温度(°C),  $T_b$  为冷媒(盐水)温度(°C),  $s$  为冻结孔间距(m),  $d$  为冻结管径(m),  $E$  为冻结壁厚度(m)。

由式(1), (2)可知渗流场与温度场耦合作用机制主要表现为: 渗流场主要通过影响地下水流速即影响对流换热来影响温度场; 温度场主要通过影响渗透系数来影响渗流场。

考虑渗流作用下冻结壁形成特点, 根据渗流场与温度场耦合方程计算参数, 提出影响耦合方程的因素有: 地层热容、地层导热系数、地层密度、地层初始温度、地下水流速、饱和含水层释水率、渗透系数、初始水头、渗流路径、盐水温度、冻结管数目、冻结孔间距、冻结管径、冻结时间等共 13 个影响因素。地下水流速与渗透系数、初始水头、渗流路径有关, 故将这 4 个因数综合考虑; 针对某

一具体工程而言, 地层热容、地层导热系数、饱和含水层释水率等地层参数是难以改变的; 因此本文主要结合模型试验考虑地下水流速、孔间距、盐水温度、冻结管径对冻结壁形成规律的影响及显著性。

### 3 相似准则与相似缩比确定

渗流地层中冻结壁的形成是渗流场与温度场耦合作用的结果, 在进行模型试验设计之前, 对耦合方程中的影响因素进行量纲分析, 求得模型试验的相似准则<sup>[16-17]</sup>。

(1) 温度场相似准则为

$$\varphi(R, F, T_n, K_t) = 0 \quad (9)$$

式中:  $R$  为几何准则,  $R = s/d$ ,  $s$  为冻结孔间距,  $d$  为冻结管管径;  $F$  为温度场傅立叶准则,  $F = \alpha t / S^2$ ,  $\alpha$  为等效导热系数,  $t$  为时间;  $T_n$  为温度参数, 且有  $T_n = T / T_y = T / T_0 = T / T_b$ ,  $T_y, T_0, T_b$  分别为地层温度、地层初始地温、冻结管壁温度;  $K_t$  为科索维奇准则,  $K_t = q / C_{eq} T_y$ 。

由式(8)可知, 根据矩阵因次法分析, 可得准则:

$$\varphi(T_b / T_m, E/d, E/s) = 0 \quad (10)$$

(2) 渗流场准则

根据式(1), (4), 地层渗流场主要涉及的影响因素, 可推导出:

$$\varphi\left(R_e, \frac{vt}{s}\right) = 0 \quad (11)$$

式中:  $R_e$  为雷诺数,  $R_e = \rho_w v \Delta L / \eta_w$ ,  $\Delta L$  为地下水渗流路径,  $\eta_w$  为水的动力黏度。

考虑模型试验条件、冻结管加工工艺等要求; 模型试验几何缩比  $C_l$  确定为 1 : 6.35, 由(9)~(11)式可得, 时间相似缩比  $C_t = C_l^2$ , 即为 1 : 40.3; 温度相似缩比  $C_T = 1$ ; 地下水流速  $C_v = 1 / C_l$ , 即模型试验中地下水流速  $v_m$  是实际工程中地下水流速  $v$  的 6.35 倍。

### 4 模型试验方案

#### 4.1 正交试验设计

本试验选取孔间距、地下水流速、盐水温度、冻结管径四因素进行试验, 每个因素选取三水平, 各影响因素水平取值见表 1。采用正交试验表  $L_9(3^4)$  共进行 9 组试验, 每组试验包括单排管冻结对比试

表 1 因素及水平

Table 1 Factors and levels

因素	孔间距/m		地下水流速/(m·d <sup>-1</sup> )		盐水温度/°C		冻结管直径/m	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型
水平	s	s <sub>m</sub>	v	v <sub>m</sub>	T <sub>b</sub>	T <sub>b</sub>	d	d <sub>m</sub>
1	0.8	0.126	5	32	-20	-20	0.089	0.014
2	1.1	0.173	15	95	-25	-25	0.108	0.018
3	1.4	0.220	25	159	-30	-30	0.127	0.020

验，共计 18 次试验。

### 4.2 模型试验系统组成

模型试验系统由试验箱体、地层渗流系统、冻结制冷系统、测温系统组成，模型系统剖面如图 1 所示。

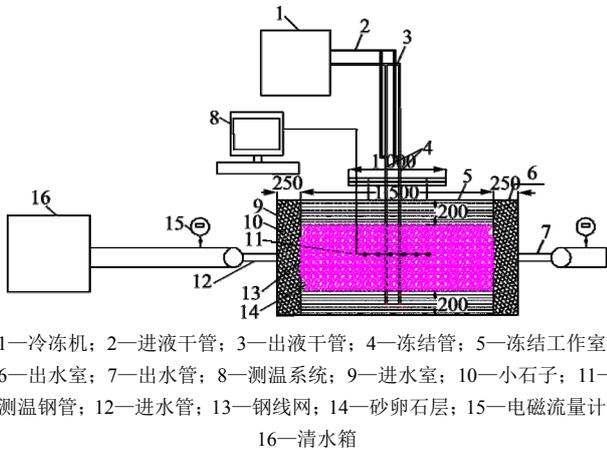


图 1 模型试验系统(单位: mm)

Fig.1 Schematic diagram of the test equipment(unit: mm)

#### (1) 试验箱体

结合几何缩比，确定模型试验箱体尺寸为 2 m×1.5 m×0.7 m(长×宽×高)；箱子从左至右沿长度方向按用途分为进水室、冻结工作室、出水室。冻结工作室自下而上共填充 3 层土体，分别为 0.2 m 黏土、0.3 m 砂土、0.2 m 黏土；黏土层主要起保温、隔水的作用。冻结工作室与进、出水室由开窗口的钢板分割，窗口设置在砂层，并悬挂 3 层不同目数的过滤钢丝网以阻挡砂层流动。进、出水室长为 0.25 m，分别与直径 φ 40 mm 的 4 根进、出水管相连；进水室内充满粒径大于 20 mm 均匀的石子，以缓冲水流对砂层的直接冲刷，并获得均匀的水流以及抵抗砂层侧压力；出水室同样填充相同粒径的石子，以维持砂层的静力平衡避免形成流砂。

#### (2) 地层渗流系统

渗流系统由恒温清水箱、变频动力泵、电磁流量计、阀门、进出水管路等构成；模型试验中渗流

速度与地下水流速以及单位时间内地层截面面积的水流量关系如下式：

$$\left. \begin{aligned} u_m &= v_m n \\ Q &= u_m A \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： $Q$  为水流量(m<sup>3</sup>)， $u_m$  为模型试验中渗流速度(m/d)， $A$  为模型地层过水截面面积(m<sup>2</sup>)， $n$  为孔隙率。因此通过变频动力泵、电磁流量计、阀门控制试验箱体过水断面流量来实现不同地下水流速模拟。

#### (3) 冻结制冷系统

冻结制冷系统主要由冷冻机、进液干管、出液干管、冻结管组成。按几何缩比进行设计，本试验中采用 φ14 mm×2 mm，φ18 mm×2 mm，φ20 mm×2 mm 的无缝钢管，模拟工程中直径 φ89 mm×8 mm，φ108 mm×8 mm，φ127 mm×8 mm 的无缝钢管；冻结管共 9 根，采用双排梅花型布置，如图 2 所示。试验箱上预留 φ1 000 mm 法兰盘开口，通过螺栓与盖板法兰盘连接，设置 3 种冻结孔间距的开孔法兰盘，以实现 9 种工况试验。

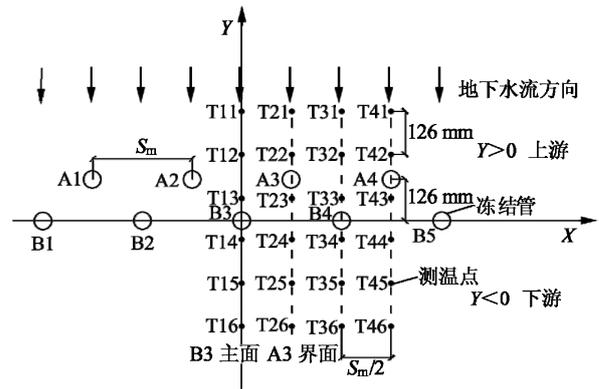


图 2 测温点平面布置图  
Fig.2 Layout of temperature measuring points

#### (4) 测温系统

模型土体的温度采用 CW500 远距离测温系统监测，测温点布置满足测试冻结管之间主面、界面、轴面处砂层温度变化规律的要求。整个模型试验中共有 3 种孔间距，因此设置 3 套测温点，每套测温点布置成 6 排 13 列，排距取定值 0.126 m(对应实际工程中 0.8 m)，共计 58 个，如图 2 所示。图中 A，B 系列标号表示冻结管，T 系列标号表示测温点。进行双排管冻结试验时同时开启 A，B 两排冻结管；单排管冻结试验时仅开启 B 排冻结管。共进行 18 次试验。

### 4.3 试验实施程序

本试验为完全模拟冻结施工过程中的原材料模

型试验, 试验实施程序为: (1) 按几何缩比购置试验材料, 进行准备工作; (2) 试验箱体加工, 并对试验箱体、管路系统的耐压值和密封性进行试漏试验; (3) 将试验所用砂及黏土层进行配置, 分层填筑; 然后进行各系统之间的管路连接与保温; (4) 开启地层渗流系统, 按照试验组设计地下水流速调节通过砂层的清水流量, 形成地层渗流模拟; (5) 启动盐水制冷系统, 按照试验组设计温度、冻结时间进行试验, 试验过程中对温度数据进行实时采集; (6) 按照正交试验表, 依次进行试验, 双排管冻结试验结束后停止供冷, 利用清水冲刷进行解冻, 监测点温度达到地温时再进行单排管冻结对比试验。

## 5 试验结果与分析

上下游冻结壁厚度、交圈时间、平均温度是判断冻结壁发展规律的重要指标, 考虑试验模型以及温度场的对称性, 双、单排管冻结时都选取 B3 主面、A3 界面上下游冻结壁厚度作为分析对象。在本试验条件下, 第 6 组、第 9 组单排管冻结试验都因地下水流速过大出现冻结壁不交圈现象, 为方便方差分析, 这 2 组试验冻结壁交圈时间统一取 100 d, 冻结壁平均温度取初始地温。具体试验结果见表 2。

由第 6, 9 组试验结果可知, 当地下水流速与孔间距较大的情况下, 单排管冻结时冻结壁已不能交圈, 而采取双排管冻结时上游冻结壁交圈后仍能保持一定厚度; 其他试验组内, 渗流地层中双排管冻结较单排管冻结时: 上游冻结壁增厚 62.6%~151.8%, 下游冻结壁增厚 3.7%~33.8%, 冻结壁交圈时间缩短 7.1%~91%, 冻结壁平均温度降低

12.1%~103.9%, 且地下水流速越大, 效果越明显。

### 5.1 温度场分析

利用 Original 绘制第 7 组试验双、单排管冻结 10, 20, 30, 40 d 时的温度场云图, 如图 3 所示。可以看出, 渗流作用下, 双、单排管冻结时都表现为上游降温区域范围明显小于下游, 降温区域整体形状趋向卵石形; 但随冻结时间增长, 双、单排管冻结壁平均温差逐渐增大; 冻结 10 d 时, 两者冻结壁对应最低平均温度分别为  $-8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温差为  $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 冻结 40 d 时, 两者冻结壁对应最低平均温度分别为  $-18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温差达  $10.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 证明随冻结时间增长, 双排管冻结优势明显。

由温度场云图可知, 以 B3 冻结管为中心左右两侧降温范围基本对称, 因此选取 B3 冻结管右侧 T24, T44 测温点作为分析对象, 双、单排管冻结时两测温点处的降温曲线如图 4 所示。双、单排管冻结时砂层整体降温规律基本一致, 冻结初期, 砂层降温趋势明显; 相变阶段后降温速度明显减缓, 最终趋于稳定; 但 T44 测温点处温度降至冰点时间略滞后于 T24 测温点处, 推测这是由于冻结过程中冻结壁逐渐交圈, 土体中渗流通道逐渐减少, 地下水在冻结体边界处的发生绕流, 外侧冻结管冷量散失较快, 导致交圈时间延长。双、单排管冻结时, T24 测温点处温度降至冰点时间分别为 9.5, 13.4 d, 采用双排管冻结时冻结壁交圈时间要比单排管冻结时缩短 41.1%。

B3 主面、A3 界面温度分布曲线如图 5 所示。双排管冻结时主面、界面温度分布规律相似, 都呈马鞍状; 而单排管冻结时主面、界面温度分布规律差别较大; 双排管冻结时 B3 主面、A3 界面冻结壁总厚度分别为 554.1, 530.1 mm; 而单排管冻结时

表 2 双(单)排管正交模型试验结果

Table 2 Orthogonal model test results of double(single)-row-pipe

试验编号	主面上游/mm	主面下游/mm	界面上游/mm	界面下游/mm	交圈时间/d	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	267.1(134.7)	179.8(173.3)	263.1(109.3)	178.35(167.5)	3.9(4.2)	-11(-9.8)
2	270.2(133.2)	213.8(199.6)	266.9(120.9)	211.39(192.2)	3.6(4.5)	-13.3(-9.2)
3	267.6(132.5)	228.2(202.1)	265.7(118.8)	226.5(198.2)	3(4.5)	-15.9(-7.8)
4	301.3(167)	207.1(200)	301.4(153.1)	210.29(198.5)	5.1(6.6)	-13.6(-6.7)
5	293.4(153.2)	242.4(220)	291.9(143.3)	233.09(206.5)	5.4(12)	-15.5(-8.2)
6	236.9(18.3)	190.5(27)	232.7(0)	191.78(0)	9(100)	-10.9(12)
7	300.8(185)	252.45(206.9)	297(180.1)	247.81(203.1)	8.4(11.4)	-15.3(-9.5)
8	256.8(98)	198.7(152)	251.8(100)	199.52(149.1)	12(24)	-10.63(-5)
9	253.7(22.6)	214.5(36.5)	246.3(0)	204.95(0)	18(100)	-10.85(12)

注: 括号内为单排管冻结试验数据。

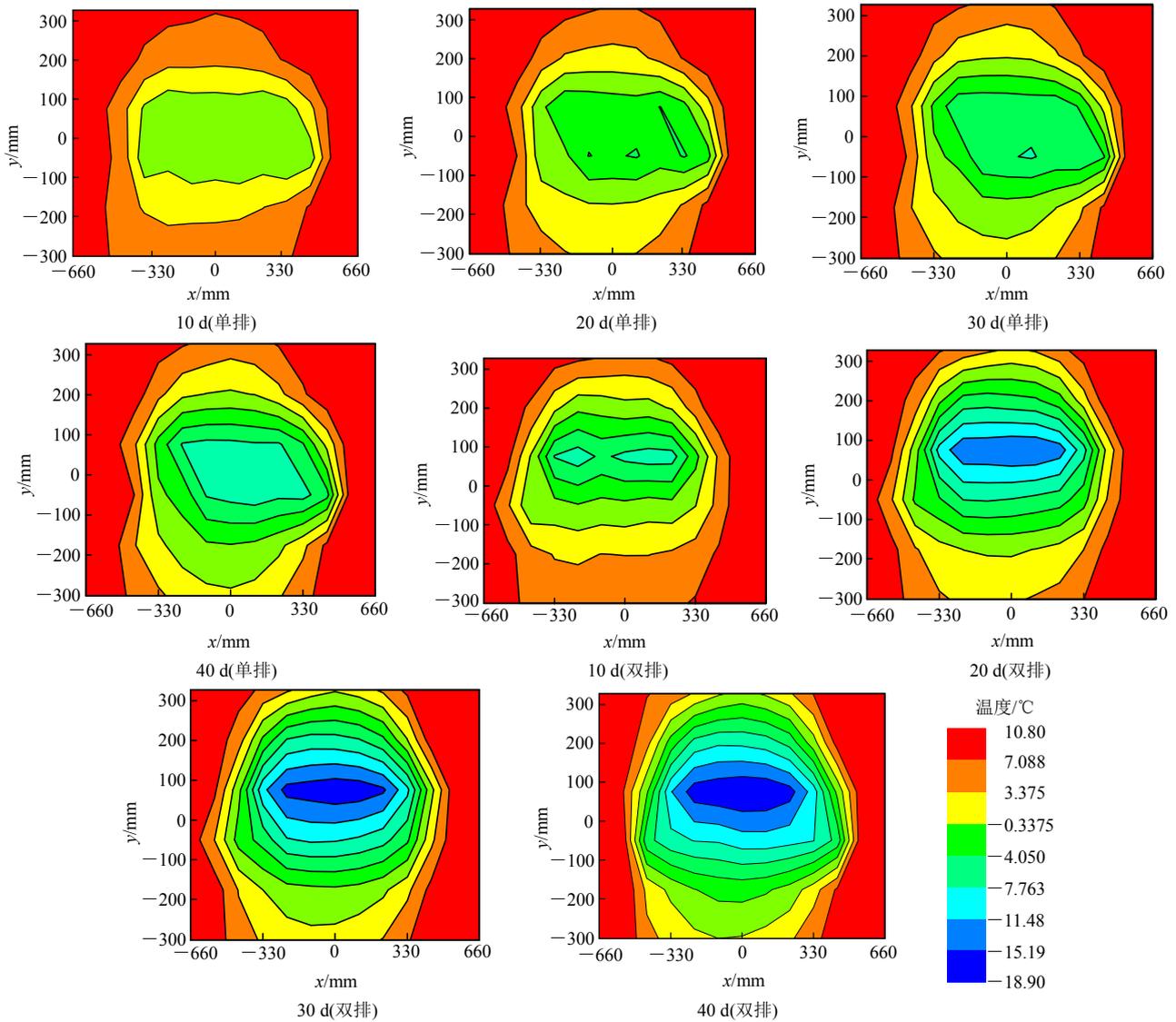


图 3 第 7 组试验温度场云图

Fig.3 Temperature nephograms of the seventh test

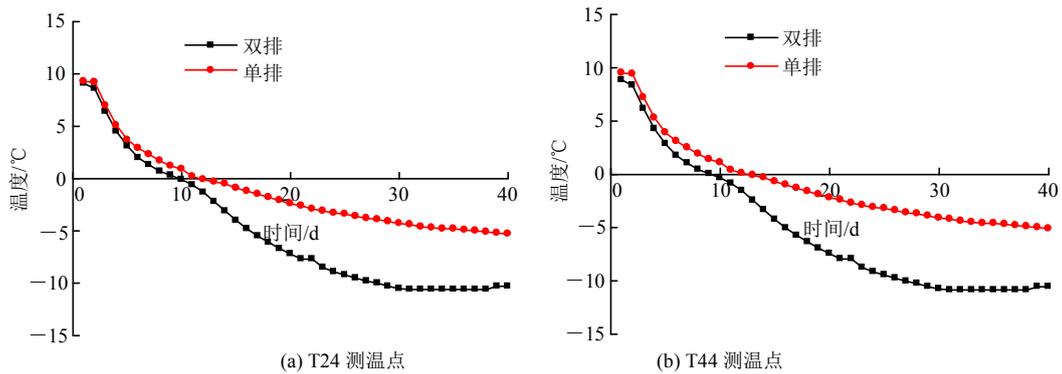


图 4 测温点降温曲线

Fig.4 Temperature curves of measuring points

冻结壁总厚度分别为 360, 345.9 mm; 双排管冻结壁总厚度约为单排管冻结的 1.5 倍。双排管冻结时 B3 主面、A3 界面处平均温度分别为  $-10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 单排管冻结时平均温度分别为  $-7.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-5.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 双排管冻结时冻结壁平均温度明显降低。

## 5.2 各因素对冻结壁形成规律显著性分析

### 5.2.1 各因素对上游冻结壁厚度影响分析

图 6 为各因素对上游冻结壁厚度的影响规律。根据极差分析可知, 各因素对双、单排管冻结上游冻结壁厚度的影响规律都表现为: 地下水流速  $>$  盐

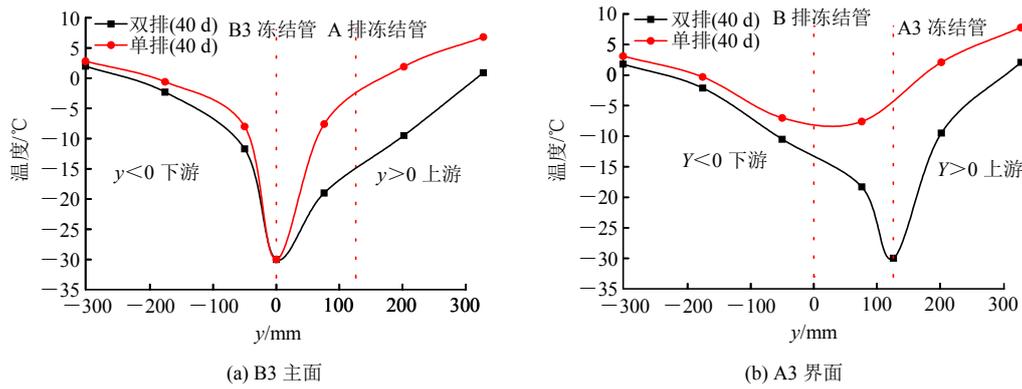


图5 主(界)面温度分布曲线

Fig.5 Temperature curves in main(interface) sections

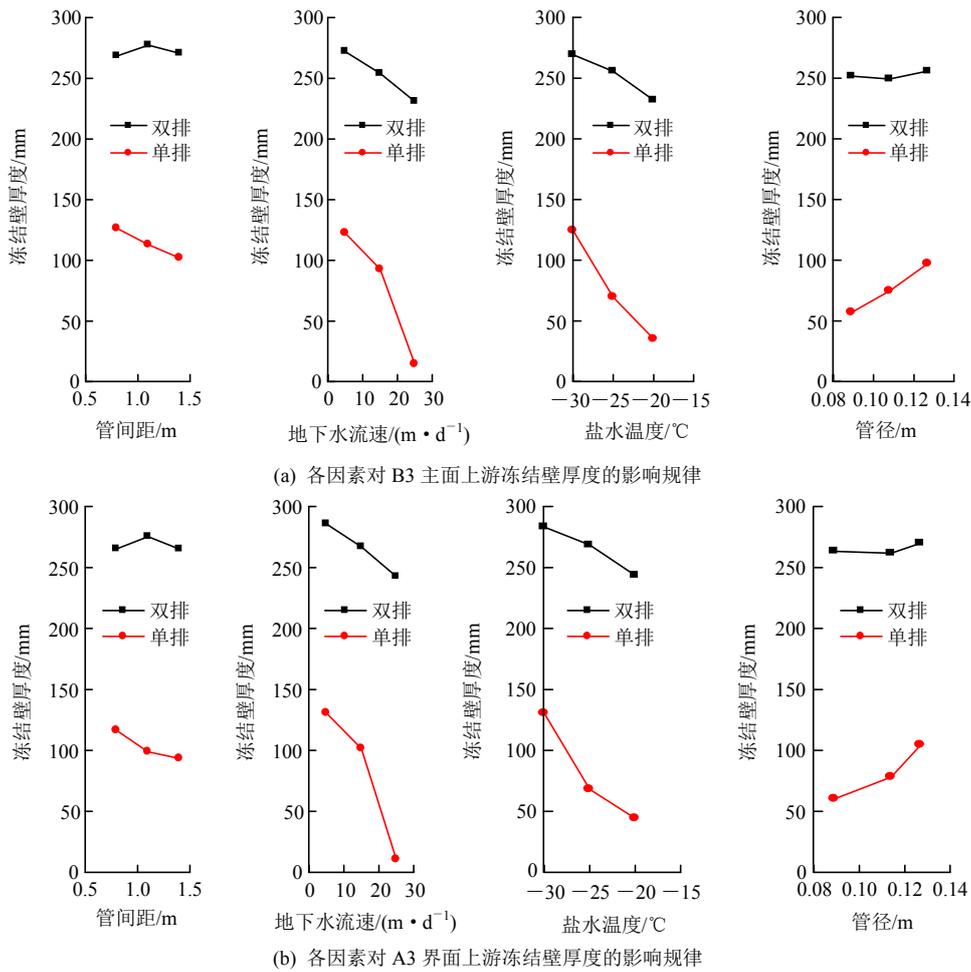


图6 各因素对上游冻结壁厚度影响规律

Fig.6 Influences of impact factors on the upper freezing wall

水温度>孔间距>冻结管径；即地下水流速是影响上游冻结壁厚度的首要因素。

双排管冻结时地下水流速与上游冻结壁厚度之间呈线性关系，变化较为平缓。单排管冻结时，地下水流速与上游冻结壁厚度之间呈指数关系，水流速在5~15 m/d 范围内对上游冻结壁厚度影响较小，15~25 m/d 范围内对上游冻结壁厚度影响显著，可认为地下水流速 15 m/d 接近单排管冻结壁能交圈

的上限，所以超过 15 m/d 时上游冻结壁厚度存在突变现象。

### 5.2.2 各因素对下游冻结壁厚度影响分析

图7为各因素对下游冻结壁厚度的影响曲线。根据极差分析可知，各因素对双排管冻结时下游冻结壁厚度的影响规律表现为：盐水温度>孔间距>冻结管径，而各因素对单排管冻结时下游冻结壁厚度影响规律表现为：地下水流速>盐

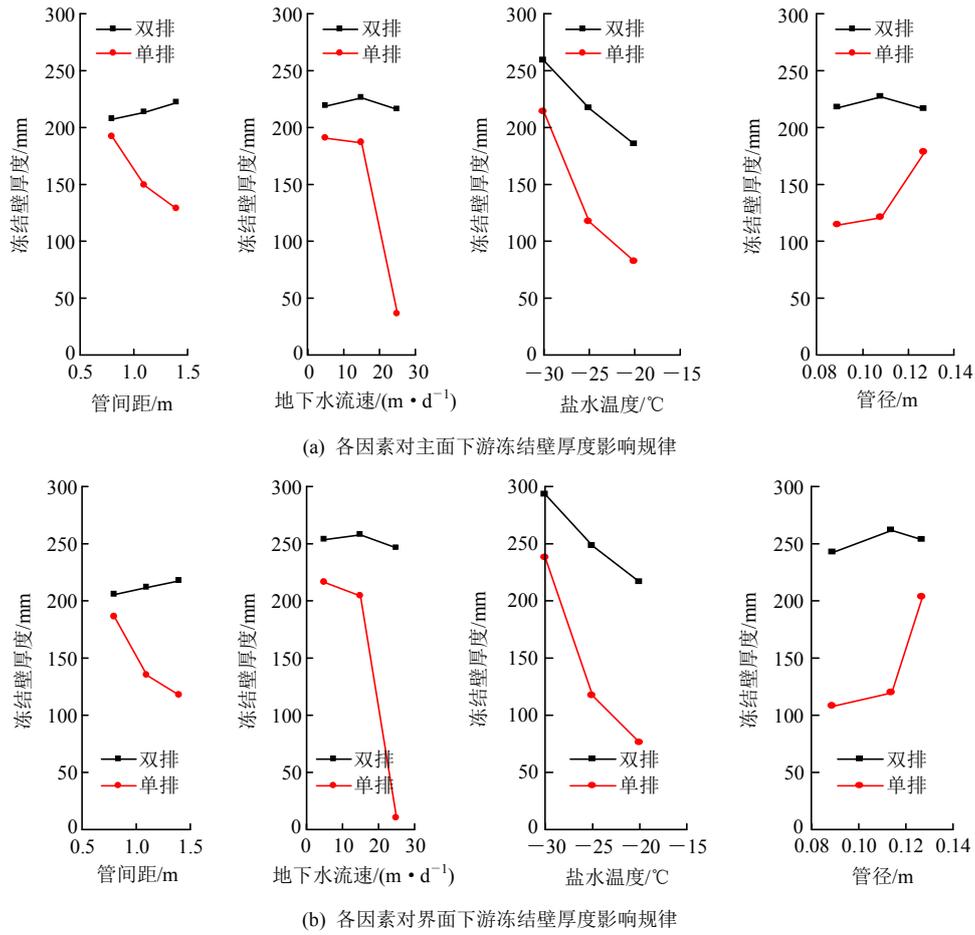


图 7 各因素对下游冻结壁厚度影响规律  
Fig.7 Influences of impact factors on the lower freezing wall

水温度 > 孔间距 > 冻结管径；影响双、单排管下游冻结壁厚度的首要因素分别为盐水温度、地下水流速。

双排管冻结时，地下水流速之间与下游冻结壁厚度也呈线性关系，变化较为平缓；单排管冻结时，地下水流速与上游冻结壁厚度之间呈指数关系，当地下水流速 15 m/d 时，下游冻结壁厚度也存在突变现象，原因与上游冻结壁类似。

### 5.2.3 各因素对冻结交圈时间统计分析

图 8 为各因素对冻结壁交圈时间的影响曲线。根据极差分析可知，各因素对双、单排管冻结时冻结壁交圈时间的影响规律表现为：孔间距 > 地下水流速 > 盐水温度 > 冻结管径、地下水流速 > 孔间距 > 盐水温度 > 冻结管径；可知地下水流速、孔间距对冻结壁交圈时间有显著影响。对地下水流速与冻结壁交圈时间平均值变化曲线进行拟合，得出对应的规律公式和相应的确定系数，如下所示：

双排管：

$$\tau = 0.009v^2 - 0.06v + 5.875 \quad (r^2 = 1) \quad (13)$$

单排管：

$$\tau = 3.5847e^{0.111v} \quad (r^2 = 0.9345) \quad (14)$$

式中： $\tau$ 为冻结壁交圈时间， $r^2$ 为相关系数。

工程实践中一般认为冻结壁交圈时间超过 40 d 时，即可认定冻结壁不交圈；因此将 40 d 代入所得回归公式，可反推出双排管极限流速水平均值为 39.8 m/d，单排管极限流速水平均值为 21.6 m/d。

### 5.2.4 各因素对冻结壁平均温度影响规律

图 9 为各因素对冻结壁平均温度的影响规律。根据极差分析可知，各因素对双、单排管冻结时冻结壁平均温度影响显著性大小表现为：盐水温度 > 孔间距 > 冻结管径 > 地下水流速、地下水流速 > 孔间距 > 盐水温度 > 冻结管径。双排管冻结时，盐水温度、孔间距对冻结壁平均温度有显著影响，且两者与冻结壁平均温度之间呈线性关系；而单排管冻结时，地下水流速是影响冻结壁平均温度的首要因素，且两者之间呈指数关系，当地下水流速超过 15 m/d 时，平均温度将迅速升高。

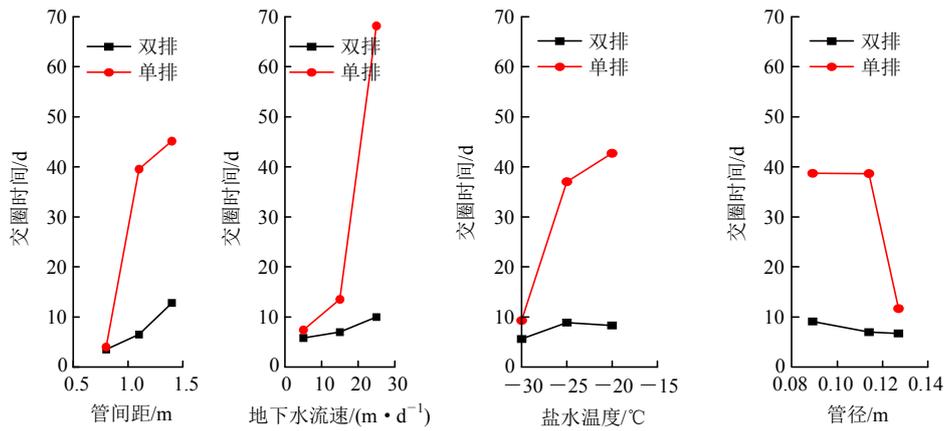


图 8 各因素对冻结壁交圈时间的影响规律

Fig.8 Influences of impact factors on the turning time of freezing wall

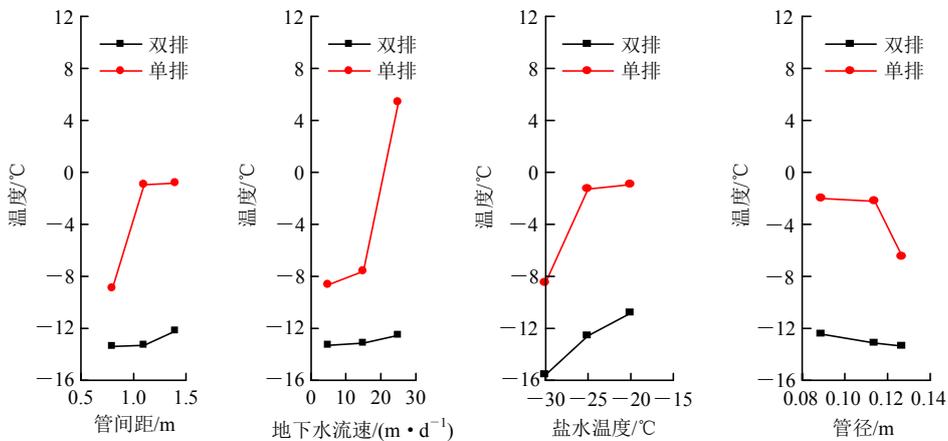


图 9 各因素对冻结壁平均温度影响规律

Fig.9 Influences of impact factors on the average temperature of freezing wall

### 6 工程对策

在富水、软弱等不稳定地层进行冻结施工，应先进行地下水流速测试，以提前做好应对措施：

当地下水流速过大时，结合渗流场与温度场耦合作用机制可知，应预先向地层中注入水泥浆，改良土体性质，降低地层渗透性，以减小地下水流速对冻结壁发育的影响；

由各因素对冻结壁交圈时间显著性分析可知，渗流地层中促进冻结壁交圈，首要措施是缩小孔间距，增大冻结管径，降低盐水温度可作为辅助措施进行处理；

渗流地层中可在冻结壁薄弱部位，采取梅花型布置补打冻结孔，由冻结壁交圈时间所回归出的双、单排管冻结壁能交圈的极限流速对比可知，冻结补孔可促进薄弱冻结壁交圈。

### 7 结论

本文基于理论分析与物理模型试验，系统研究了渗流地层中双排管冻结时冻结壁形成机制与变化规律，分析了各影响因素对冻结壁各项指标的影响规律及显著性，得到结论如下：

(1) 渗流地层中，单、双排管冻结时上下游降温区域都不再呈对称发展，降温区域整体形状趋向卵石形。当地下水流速大于 15 m/d 时，采取单排管冻结时冻结壁交圈困难，而双排管冻结时冻结壁仍能在较短时间内交圈并保持一定厚度；双排管冻结时上、下游冻结壁较单排管冻结时分别增厚 62.6%~151.8%，3.7%~33.8%；交圈时间缩短 7.1%~91%，平均温度降低了 12.1%~103.9%。

(2) 渗流地层中双排管冻结时，地下水流速、孔间距分别是影响上游冻结壁厚度、冻结壁交圈时

间的首要因素, 盐水温度是影响下游冻结壁厚度与平均温度的首要因素; 单排管冻结时, 地下水流速是影响冻结壁各项指标的首要因素; 利用单、双排管冻结壁交圈时间与地下水流速之间的回归方程, 得出两者的极限流速分别为 21.6, 39.8 m/d。

(3) 综合分析可知, 工程实践中存在流水扰动冻结壁时, 冻结设计前应先开展地下水流速流向测试, 若地下水流速大于 5 m/d, 建议开展地层注浆等措施降低地下水流速, 并采用双排管或多排管冻结, 以快速形成冻结壁; 降低盐水温度、增大冻结管径可作为辅助措施来增加上、下游冻结壁厚度和降低冻结壁平均温度, 以提高冻结壁强度。

### 参考文献(References):

- [1] 李方政, 夏明萍. 基于指数积分函数的人工冻土温度场解析研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(4): 469 - 473.(LI Fangzheng, XIA Mingping. Study on analytical solution of temperature field of artificial frozen soil by exponent 2 integral function[J]. Journal of south east university: Natural Science, 2004, 34(4): 469 - 473.(in Chinese))
- [2] 程桦, 姚直书, 张经双, 等. 人工水平冻结法施工隧道冻胀与融沉效应模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 80 - 85.(CHENG Hua, YAO Zhishu, ZHANG Jingshuang, et al. A model test study on the effect of freeze heaving and thaw subsidence for tunnel construction with artificial horizontal groundfreezing[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 80 - 85.(in Chinese))
- [3] 李方政, 楼根达, 余志松, 等. 基于蠕变效应的穿越隧道冻结帷幕开挖与支护三维数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 121 - 125.(LI Fangzheng, LOU Genda, YU Zhisong, et al. 3D creep numerical simulation of excavation and support in frozen soil curtain wall of crossing tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.): 121 - 125.(in Chinese))
- [4] 李方政. 市政冻结技术的应用与展望[J]. 建井技术, 2017, 38(4): 55 - 60.(LI Fangzheng. Application and prospect of freezing technology in municipal engineering[J]. Mine Construction Technology, 2017, 38(4): 55 - 60.(in Chinese))
- [5] 杨平, 皮爱如. 高流速地下水流地层冻结壁形成的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 167 - 171.(YANG Ping, PU Airu. Study on the effects of large ground water flow velocity on the formation of frozen wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 167 - 171.(in Chinese))
- [6] LAI Y M, LIU S Y, WU Z W, et al. Numerical simulation for the coupled problem of temperature and seepage fields in dams located in cold area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(8): 26 - 31.
- [7] 周晓敏, 王梦恕, 张绪忠. 渗流作用下地层冻结壁形成的模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 196 - 201.(ZHOU Xiaomin, WANG Mengshu, ZHANG Xuzhong. Model test research on the formation of freezing wall in seepage ground[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 196 - 201.(in Chinese))
- [8] PIMENTEL E, PAPAKONSTANTINO S, ANAGNOSTOU G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2012, 28(1): 57 - 69.
- [9] 高娟, 冯梅梅, 杨维好. 渗流作用下裂隙岩体冻结温度场分布规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 68 - 73.(GAO Juan, FENG Meimei, YANG Weihao. Research on distribution law of frozen temperature field of fractured rock mass with groundwater seepage[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(1): 68 - 73.(in Chinese))
- [10] 冯梅梅, 杨维好, 高娟. 含裂隙构造渗流地层人工冻结壁发育及影响因素分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 976 - 981.(FENG Meimei, YANG Weihao, GAO Juan. An analysis of the development of artificial freezing wall in seepage strata with fractured structure and its influencing factors[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(6): 976 - 981.(in Chinese))
- [11] VITEL M, ROUABHIA, TIJANI M, et al. Modeling heat and mass transfer during ground freezing subjected to high seepage velocities[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 73: 1 - 15.
- [12] VITEL M, ROUABHIA, TIJANI M, et al. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 99 - 111.
- [13] 李方政, 罗富荣, 韩玉福, 等. 复杂条件下地铁联络通道冻结壁不交圈原因的分析及治理[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 187 - 190.(LI Fangzheng, LUO Furong, HAN Yufu, et al. Cause analysis and counter measure research for unclosed freezing wall of subway contact passage under complex conditions[J]. Industrial Construction, 2015, 45(11): 187 - 190.(in Chinese))
- [14] 周家作, 李东庆, 房建宏. 开放系统下饱和正冻土热质迁移的数值分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 791 - 795.(ZHOU Jiazuo, LI Dongqing, FANG Jianhong, et al. Numerical analysis of heat and mass transfer in saturated freezing soil in an open system[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 791 - 795.(in Chinese))
- [15] 刘建刚, 刘泉, 周冬冬, 等. 地下水横向水平流速对人工水平冻结壁形成的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 258 - 265.(LIU Jiangan, LIU Quan, ZHOU Dongdong, et al. Influence of groundwater transverse horizontal flow velocity on the formation of artificial horizontal freezing wall[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(2): 258 - 265.(in Chinese))
- [16] 王朝晖, 朱向荣, 曾国熙, 等. 动水条件下土层液氮冻结模型试验的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 1998, 32(5): 534 - 540.(WANG Zhaohui, ZHU Xiangrong, ZENG Guoxi, et al. The experimental researches on the ground freezing with liquid nitrogen under water flowing[J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1998, 32(5): 534 - 540.(in Chinese))
- [17] 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.(CUI Guangxin. Similarity theory and model test[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.(in Chinese))