

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1107

YANG Qing, RONG Chuanxin. Distribution of the freezing temperature field and formation law of the frost heaving force of a deep expansive clay layer[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):878-888. [杨青, 荣传新. 深部膨胀性黏土层冻结温度场的分布与冻胀力形成规律[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):878-888.]

# 深部膨胀性黏土层冻结温度场的分布 与冻胀力形成规律

杨 青<sup>1</sup>, 荣传新<sup>2</sup>

(1. 滁州学院 土木与建筑工程学院, 安徽 滁州 239000; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 防止冻结管断裂是深部膨胀性黏土层在冻结壁形成过程中的一项亟待解决的课题。针对淮南矿区某矿副井深部膨胀性黏土层, 通过热力耦合计算分析, 研究了其冻结温度场分布与冻胀力形成规律。结果表明: 冻结 152 天、236 天时, 黏土层冻结壁平均温度分别为  $-14.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-16.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 细砂层冻结壁平均温度分别为  $-15.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-17.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 黏土层冻结壁平均温度比同时期细砂层高  $1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。黏土层冻结壁平均厚度分别为  $8.92\text{ m}$ 、 $10.25\text{ m}$ , 细砂层冻结壁平均厚度分别为  $9.54\text{ m}$ 、 $10.77\text{ m}$ , 黏土层冻结壁平均厚度比同时期细砂层小  $0.62\text{ m}$ 、 $0.56\text{ m}$ 。细砂较膨胀性黏土易于冻结。冻结 90 天时, 黏土层外、中、内圈三圈冻结管平均冻胀力约为同时期细砂层的 1.1 倍。冻结 151 天时, 黏土层三圈冻结管围成的冻结壁内平均冻胀力均达到初始地应力的 81.1%, 是同时期细砂层的 1.16 倍。冻结 236 天时, 细砂层内圈管的冻胀力为  $3.91\text{ MPa}$ , 比中圈管  $3.72\text{ MPa}$  大了 5.11%, 而黏土层内圈管的冻胀力为  $4.81\text{ MPa}$ , 比中圈管  $4.74\text{ MPa}$  大了 1.48%。黏土层三圈冻结管围成的冻结壁内平均冻胀力均达到初始地应力的 88.6%, 是同时期细砂层的 1.28 倍。深部膨胀性黏土层及与细砂层界面处冻胀力均存在显著的不均匀性, 最大冻胀力的主要位置与实际工程中掘进时的断管处基本对应, 不均匀冻胀力是造成冻结管断裂的重要原因。

**关键词:** 膨胀性黏土; 热力耦合; 温度场; 冻胀力

**中图分类号:** TU443; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0878-11

## 0 引言

近二十年来, 浅层煤炭资源开采已成为历史, 我国中东部地区主要矿区凿井已向深处进发。人工冻结法凿井是深厚冲积层、富水软岩层中立井井筒施工的常用且较为成熟的方法之一。冻结法是在井筒开凿之前, 在即将用钢筋混凝土浇筑的双层井筒周围, 布置不同圈径和不同间距冻结管, 用冷冻方式使得井筒周围的岩土层冻结成封闭且具有设计强度和稳定性的厚壁结构物, 以保障井筒掘砌顺利进行的一种特殊的凿井方法<sup>[1]</sup>。新建千米矿井

具有冲积层深厚、地压大、含水层次多、地下水水量丰富等特点, 尤其是深层冻土与浅层冻土在地压环境和土性特征方面有重大不同, 研究深层冻结壁在形成过程中相关因素影响规律的途径和方法至关重要。

国外学者多集中于冻胀机理和模型研究。Harlan<sup>[2]</sup>提出了土体冻结过程中水热迁移耦合数学模型; Wettlaufer 等<sup>[3]</sup>在假设未冻结水是牛顿流体的基础上, 建立了冻胀数学模型, 其计算结果与 Wilen 等<sup>[4]</sup>的试验结果有很好的 consistency; O'Neill 等<sup>[5]</sup>提出了有关冻结锋面的数学模型, 得出冻结锋面冰晶体

收稿日期: 2019-05-15; 修订日期: 2019-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374010; 51878005); 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心 2020 年度基金项目(JYB-GCZX2020209)资助

作者简介: 杨青(1990-), 女, 安徽滁州人, 助教, 2015 年在安徽理工大学获硕士学位, 从事土木工程结构研究。  
E-mail: 1302511392@qq.com

通信作者: 荣传新, 教授, 从事岩土工程与结构工程方面的教学与科研工作。E-mail: chxrong@aust.edu.cn

产生的准则。Christopher<sup>[6]</sup>建立了二次冻胀模型; Rempel等<sup>[7]</sup>进一步完善了冻胀模型,并详细地论述了冻胀发生的机理; Diehl等<sup>[8]</sup>、von Blohn等<sup>[9]</sup>在土体的冻胀特性试验研究和数学模型方面做了大量的工作,取得了很大的进展。国内,张庆武<sup>[10]</sup>研究了巨厚流细砂层地质条件下井筒冻结壁的形成规律;戴华东等<sup>[11]</sup>通过对原状土进行力学试验分析了深厚表土层的冻土蠕变性质,得出土的含水率和采样深度对冻结壁设计的影响不可忽略;王彬等<sup>[12]</sup>将冻结壁的温度场等效成抛物线形,运用黏弹性理论推导出应力场与位移场的解析表达式,分析了均质与非均质冻结壁的承载力与位移之间的关系;荣传新等<sup>[13]</sup>、程桦等<sup>[14]</sup>自行研制了一套试验装置,利用相似比理论,模拟大流速地下水环境下冻结壁温度场的形成规律,指出应用“群管效应”可以有效减弱大流速地下水对冻结壁的“冲击”作用;吉植强等<sup>[15]</sup>运用相似理论设计了不同的渗流速度和冻结管间距下砂土冻结物理模拟试验,研究了不同试验条件下渗流方向温度分布规律、冻结过程中冻结管间距变化引起温度场分布特征及砂土冻结壁厚度的变化;伏圣岗等<sup>[16]</sup>研究了开挖后的冻结壁外及其未冻围岩区的应力场和位移场与线膨胀应变的关系,指出合理安放冻结管的位置可避免冻结管断裂问题;马茂艳等<sup>[17]</sup>研究指出,为防止深厚钙质黏土层冻结管变形甚至断管事故发生,要从施工信息化角度对现场冻结壁的井帮温度和位移进行有效控制;薛利兵等<sup>[18]</sup>、侯海杰等<sup>[19]</sup>通过实测冻结壁内外冻胀力的变化规律,控制或避免了施工过程中冻胀力的积聚与释放对冻结管的威胁。汪仁和<sup>[20]</sup>根据傅里叶定律,就立井冻结的平面轴对称问题,建立冻结区、降温区、冻结锋面温度场的数学模型,得到了控制微分方程。业界学者对冻结壁温度场与冻胀力做出有力探索。

在我国多圈管冻结凿井工程实践中,冻结管断裂和外层井壁破裂事故时有发生,产生这些现象的主要原因是深厚黏土层冻结壁随时间发生较大的蠕变变形。在冻胀力作用下,冻结管发生较大弯曲变形而导致断裂。土体温度降至负温时,孔隙中部分水冻结成冰,打破了原有的热学平衡状态。在温度梯度的影响下,未冻区域水向冻结锋面迁移,遇冷成冰,冻结锋面附近的各相成分发生变化,其受力状况也相应变化。土骨架因受拉而分离,水分聚集成冰透镜体。冻胀是在温度降低时,冻结锋面推进以及水分不断迁移与聚集、土体体积增大情况下

发生的现象。温度场的分布直接影响着冻胀力的大小,冻胀力也是温度场效应的表征。目前,在深井冻结法凿井中,膨胀性黏土层因其土粒微观结构<sup>[21]</sup>的亲水性易产生膨胀、冻胀双重作用,深部膨胀性黏土层冻胀力的形成、分布特征及对冻结壁的影响和对冻结管的作用尚未探明。为此,本文结合安徽淮南某矿工程实际案例,开展深部膨胀性黏土层冻结温度场分布与冻胀力形成规律分析,可为类似冻结工程设计以及保障冻结施工安全提供指导。

## 1 计算模型及参数

### 1.1 工程背景

安徽淮南矿区某矿副井位于淮南煤田西部,井筒表层土厚 681.05 m,井筒深度为 1 001.90 m。井检孔岩层柱状资料表明,536.50 m 深度以上为第四系黏土层,536.50~681.05 m 为第三系黏土层,681.05~714.05 m 为基岩风化带;在 378.20~398.90 m 和 407.30~445.35 m 深度有厚 20.70 m 和 38.05 m 的特厚膨胀性黏土层。该矿副井地质条件复杂,冻结深度达到 725 m,是我国近期冻结深度最大的矿井之一。

冻结管布置参数如表 1 所示,其设计冻结壁厚度为 10.6 m,冻结壁平均温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用四排管冻结方式,冻结管布置见图 1。其中,防片帮管主要起到防片帮、降低井帮温度、减少冻土位移量的作用;外排管、中排管、内排管主要起到降低冻结壁平均温度、增强冻结壁稳定性的作用,在基岩段起到封水作用。

表 1 副井井筒冻结管布置参数表

Table 1 Parametric table of arrangement of freezing pipes in the auxiliary shaft

冻结管类型	圈径/m	管数	间距/m
外排	29.1	56	1.63
中排	22.4	26/26	1.35
内排	17.4	25	2.18
防片帮	12.9/14.5	10/10	3.99/4.48

表 1 中的中排管个数 26/26 代表长短腿差异冻结,其作用是加强冲积层冻结壁的强度和厚度,在基岩中达到封水的目的。内防片帮冻结孔 10 个,间距 3.99 m、圈径 12.9 m,外防片帮冻结孔 10 个,间距 4.48 m、圈径 14.5 m,为差异、插花冻结方式,其作用是尽可能实现井筒提早开挖,防止井筒掘进时片帮。

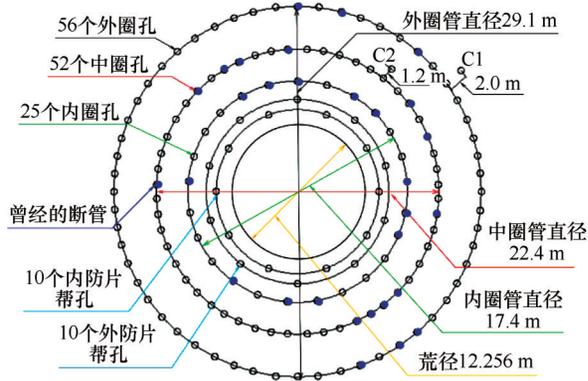


图1 冻结管平面布置图  
Fig. 1 Plane layout of freezing pipes

井筒表土段的最大掘进荒径为12.256 m。设计冻结盐水温度为-31 ~ -33 ℃，冻结控制层位为440 m深度的第四系黏土层。

本工程冻结过程监测的盐水温度变化曲线如图2所示，后续计算时根据实测盐水温度施加温度荷载求解温度场。

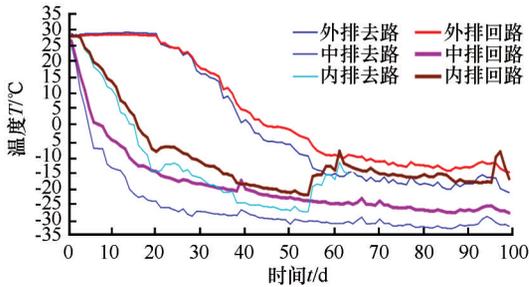


图2 副井盐水温度变化曲线  
Fig. 2 Temperature change curves of brine in the auxiliary shaft

根据工程中冻结孔实际成孔情况，采用数值分析软件ANSYS进行建模计算，数值分析模型见图3。选用PLANE55单元划分二维模型，共划分单元48 032个。

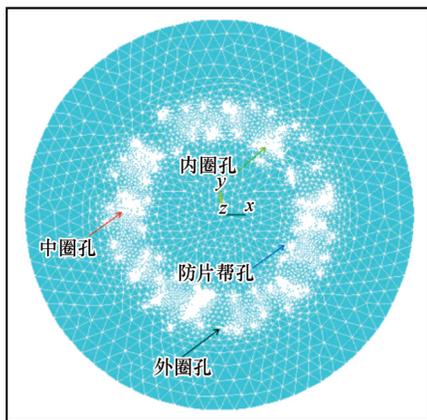


图3 数值分析模型  
Fig. 3 Numerical analysis model

### 1.2 冻结温度场控制方程及计算参数

冻结温度场中冰、水存在相变且冻结锋面不断迁移，位置未知。温度场控制方程<sup>[20]</sup>为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{c\gamma} \quad (1)$$

式中： $T$ 为微元体原点温度(℃)； $t$ 为时间(h)； $\alpha$ 为导热系数( $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ )， $\alpha = \lambda / c\gamma$ ； $\lambda$ 为导热系数( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$ )； $\gamma$ 为土体密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )； $c$ 为比热( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$ )； $r$ 为冻结半径(m)； $Q'$ 为内热源( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )。冻结区、降温区、冻结锋面的温度场分布数学模型见图4，温度场控制方程定解条件如表2所示。

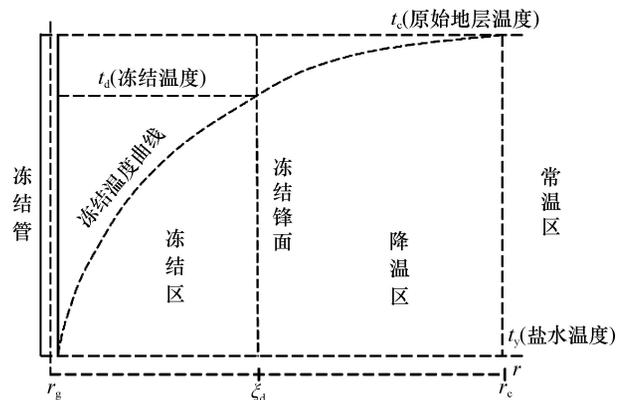


图4 温度场分布数学模型  
Fig. 4 Mathematical model of temperature field distribution

冻结温度场计算所需的热物理参数如表3所示，此参数表由室内实验<sup>[22]</sup>得到。实验显示，砂土与膨胀性黏土的冻结温度不同，一般情况下砂土冻结温度高于膨胀性黏土。冰的导热系数是水的4倍<sup>[23]</sup>，土体冻结后的导热系数大于未冻结时的导热系数。在初始含水量相同的情况下，膨胀性黏土的导热系数小于砂土的导热系数。

### 1.3 冻胀力计算参数及方法

深井冻结壁的形成因冻结管布置方式不同(多圈管或差异冻结)，原始地应力和地下水状态不同，其发展的时程明显不同。到目前为止，尚未见深厚膨胀性黏土层冻胀力具体有效的理论计算公式，数值模拟是研究冻结壁内部冻胀力形成规律分析的主要有效工具。土的冻胀效应影响因素众多，进行冻胀力的数值分析时，需作以下基本假设<sup>[24]</sup>：  
①按平面应变问题进行计算；②以厚层膨胀性黏土层和细砂层为模拟对象，单一土层为各向均匀弹性体；③土体颗粒和冰晶不考虑压融效应；④以冻土的线膨胀系数模拟土的冻胀；⑤冻胀影响半径为最大冻结管圈径的4倍左右。

表 2 温度场控制方程定解条件

Table 2 Definite solution conditions for temperature field control equation

定解条件	冻结区	降温区	冻结锋面
求解域	$r_g \leq r \leq \xi_d$	$\xi_d \leq r \leq r_c$	$r = \xi_d$
初始条件	$t=0: T=t_c$	$t=0: T=t_c$	
边界条件	$t>0: r=\xi_d$ 时, $T=t_d$ ; $r=r_g$ 时,	$t>0: r=\xi_d$ 时, $T=t_d$ ; $r=r_c$ 时, $T=t_c$	$r=\xi_d$ 时, $T_f=T_u=t_d$
能量守恒方程			$\lambda_f \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \Big _{r=\xi_d} - \lambda_u \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \Big _{r=\xi_d} = L \frac{\partial \xi}{\partial t}$

注: 上述式中  $r_g$  为冻结管外半径;  $r$  为冻结半径;  $r_c$  为常温区到冻结管的水平距离;  $\xi_d$  为冻结锋面;  $f$ 、 $u$  分别代表冻结区和未冻区 (降温区);  $T_f$ 、 $T_u$  分别为冻结区和降温区温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\lambda_f$ 、 $\lambda_u$  分别为冻结区和降温区土体的导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $L$  为单位土体中的水结冰时释放的潜热 ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $t_c$  为原始地层温度;  $t_d$  为冻结温度。

表 3 冻土热物理参数

Table 3 Thermo-physical parameters of frozen soil

土性	深度 $H/\text{m}$	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$				比热 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$		冻结温度 $T/^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
		$0^{\circ}\text{C}$	$-5^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	$-5^{\circ}\text{C}$		
细砂	400	2.39	2.65	3.22	3.85	1 270	886	-0.5	2 137
黏土	440	1.51	1.71	1.82	2.03	1 390	1 470	-2.9	1 940

首先建立热模型、加载, 求解热模型并进行瞬态分析, 后处理得到节点上的温度。然后采用与温度场相同的数学模型进行结构分析, 来研究冻胀力的分布规律。改变工作文件名并在模型的外边界约束径向位移、删除热边界条件, 定义结构材料特性<sup>[22]</sup>, 包括弹性模量、泊松比、热膨胀系数(冻胀率  $\eta$  取 2.9%, 线膨胀系数近似取  $\alpha_f = \eta/T$ )。模拟考虑热到结构的耦合, 忽略结构到热的耦合(小的应变不对初始的热分析结果产生影响)。由于间接耦合分析使用的是单场单元, 不用进行多次迭代计算, 故采用间接耦合解法比直接耦合更方便。将热模型(单元 PLANE55)转变为结构模型(单元

PLANE42), 从热分析结果文件读出温度并施加到结构模型上, 由温度求解得到的节点温度在结构分析中用作体载荷。定义结构分析类型, 制定分析选项、荷载步选项, 制定参考温度并施加其他结构荷载, 存储模型并求解当前荷载步, 最后进行后处理。

结构分析计算按平面应变问题进行求解, 黏土层在 440 m 深度, 细砂层在 400 m 深度。永久水平地压  $P=0.012H$ <sup>[18]</sup>, 模型初始应力砂土为 4.8 MPa, 黏土为 5.2 MPa。冻土力学性能参数主要包括冻土的弹性模量、泊松比、线膨胀系数等, 具体参数如图 5 所示。

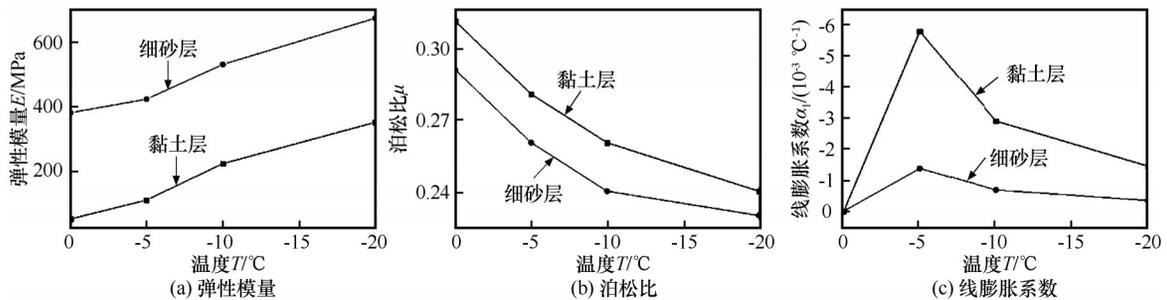


图 5 不同温度下黏土层、细砂层冻土的力学性能参数

Fig. 5 Mechanical properties of frozen clay and frozen fine sand at different temperatures

图 5 表明, 在负温度条件下, 细砂层弹性模量比黏土层弹性模量大, 且温度越低, 两者的弹性模量越大, 呈线性增加趋势; 泊松比也呈下降趋势。两种土的负温线膨胀系数在冻结开始阶段

呈线性增加, 表明土中的水在开始结冰时产生的冻胀比较明显, 但随着温度的降低, 线膨胀系数的图线进入下降段, 并且黏土的冻胀变形比砂土大。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冻结温度场计算结果验证

C1孔位于外圈管以外2 m, C2孔位于中圈管和外圈管之间(距离中圈管1.2 m, 中圈管和外圈管之

间为3.35 m), 如图6所示。调取计算模型中测温孔位置的温度计算结果, 与2个测温孔实测温度对比, 由图可知, 两者温度差约1℃, 吻合较好, 表明冻结温度场计算结果是可靠的。由测温孔实测结果与模拟结果对比可知, 数值计算获得了较好的精度。

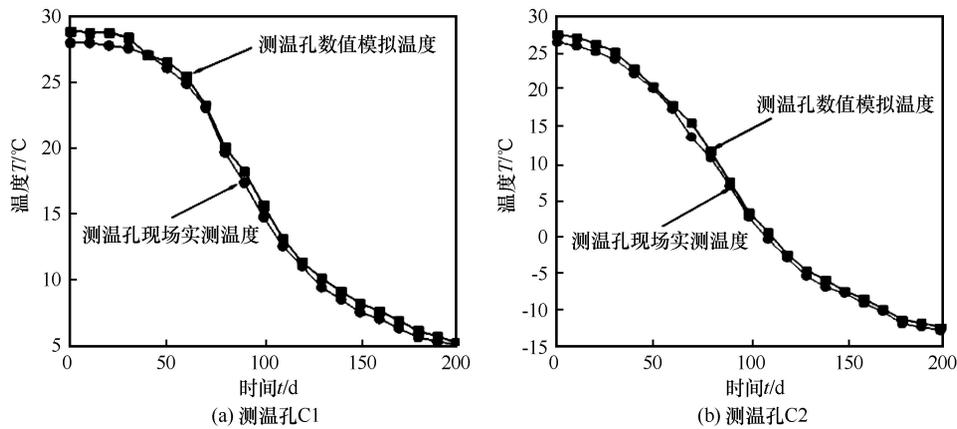


图6 440 m深度黏土层测温孔模拟和实测温度对比

Fig. 6 Comparison between simulated and measured temperatures of temperature measuring holes in clay layer at 440-m depth

### 2.2 冻结温度场

在土的冻结过程中, 任意特定时空内各点的温度分布称为冻土的温度场, 其分布通常为瞬态。该矿副井440 m深度黏土层、400 m深度细砂层冻结152天与236天的温度场计算云图见图7。

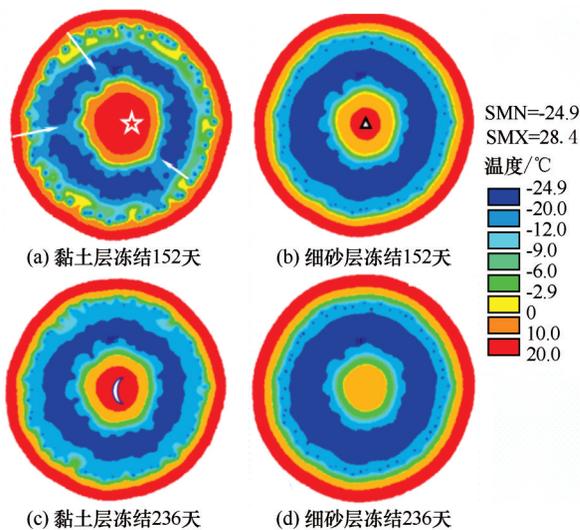


图7 冻结温度场云图

Fig. 7 Cloud chart of the freezing temperature field

从图7可以清楚地看出, 随着时间的增长, 模型中冻土的温度越来越低, 冻结236天的黏土层[图7(c)最内侧红色圆形, 用月牙形表示]比冻结152天的黏土层[图7(a)最内侧红色圆形, 用五角星表示]面积要小, 说明冻土温度降低的范围在不断扩大。

冻结152天的黏土层(箭头处)深蓝部分断断续续, 说明冻结壁尚未形成。可见冻结152天时, 膨胀性黏土仍表现出难冻结且温度扩展速度缓慢, 图7(a)白色箭头所指部位冻结壁出现断续现象便是证明。冻结152天的细砂层中心[图7(b)中最内侧红色圆形, 用三角形表示]温度较高, 而冻结236天的细砂层[图7(d)]中心温度红色已经消失了, 图7(b)、7(d)分别与图7(a)、图7(c)比较, 说明冻结天数相同情况下砂土较黏土易冻结。图7(b)与图7(d)相比, 温度极低区域变化却不大; 而黏性土[图7(a)、图7(c)]温度极低区域范围变化较为明显, 说明随着冻结时间增长, 黏性土的冻胀力还可以继续增大。

### 2.3 冻结壁平均温度和厚度

采用温度场来确定冻结壁厚度、位置及相关参数。

#### (1) 冻结壁的平均厚度

膨胀性黏土以 $-2.9^{\circ}\text{C}$ 、细砂以 $-0.5^{\circ}\text{C}$ 作为冻结温度, 提取冻结温度以下的冻结壁区域数据, 以井筒圆心为中心, 按冻结壁外边缘[图8(a)~图8(d)中外圈红色部分]距离减去内边缘[图8(a)~图8(d)中内圈红色部分]距离来计算环形冻结壁的厚度。如果有入荒径的存在, 即冻结壁区域侵入开挖荒径以内, 则要以冻结壁外边缘距离减去开挖荒径来计算冻结壁厚度。4个方向厚度的平均值作为冻结壁的平均厚度。

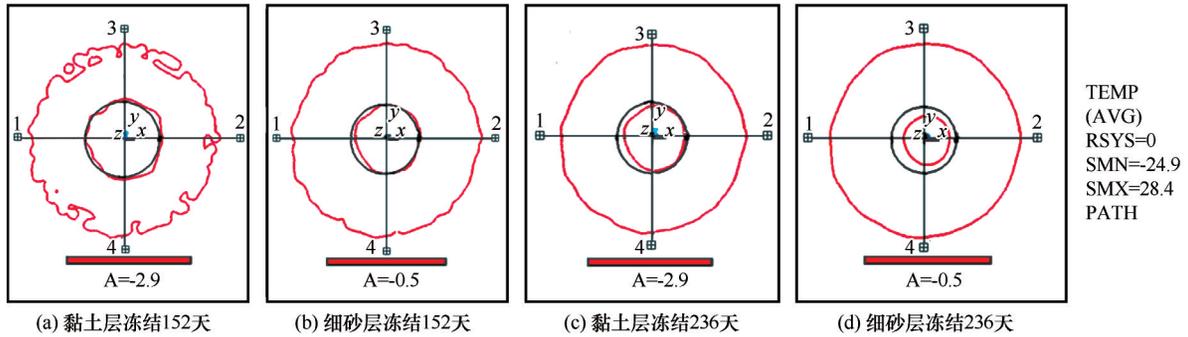


图 8 冻结温度场负温区域

Fig. 8 Negative temperature zone of the freezing temperature field

(2) 冻结壁的平均温度

冻结壁区域的温度按区域面积进行加权平均来计算。

(3) 井帮温度

以井筒中心(图 8 中纵横轴交点)为圆心按照开挖径画一个圆, 提取圆周上的温度值。

图 8 为该冻结温度场负温区域(冻结壁)计算结果。可见, 膨胀性黏土层冻结 152 天时形成的冻结壁呈现锯齿状, 并未形成理想化圆形, 进一步证明黏土难以冻结的特性。而同为冻结 152 天的细砂层负温区域却是另外一番表现, 如图 8(b) 所示, 细砂层冻结壁外边缘虽然不是很规则的圆形, 但已有逐渐发展成圆形的趋势。冻结壁内边缘左侧已呈现出侵入荒径的趋势。黏土层冻结 236 天时, 冻结壁外边缘接近圆形, 内边缘为侵入开挖荒径的类似圆形。细砂层冻结 236 天时, 冻结壁内边缘比黏土层冻结 236 天时的内边缘更向井筒圆心靠拢, 说明细砂层比黏土层冻结壁厚度大。

冻结温度场和冻结壁平均厚度计算结果见图 9。

可见, 冻结 152 天、236 天时, 黏土层井帮平均温度分别为  $-1.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-8.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 细砂层井帮平均温度分别为  $-2.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 黏土层井帮平均温度比同时期细砂层高  $1.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结 152 天、236 天时, 黏土层冻结壁平均温度分别为  $-14.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-16.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 细砂层冻结壁平均温度分别为  $-15.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-17.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 黏土层冻结壁平均温度比同时期细砂层高  $1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结 152 天、236 天时, 黏土层冻结壁平均厚度分别为  $8.92\text{ m}$ 、 $10.25\text{ m}$ , 细砂层冻结壁平均厚度分别为  $9.54\text{ m}$ 、 $10.77\text{ m}$ , 黏土层冻结壁平均厚度比同时期细砂层小  $0.62\text{ m}$ 、 $0.56\text{ m}$ 。究其原因膨胀性黏土层饱和含水量一般在  $40\% \sim 70\%$ , 且大都是薄膜水<sup>[25-26]</sup>, 所以膨胀性黏土层冻结温度较低。另外膨胀性黏土层颗粒细、总表面积大, 含有大量薄膜水和少量吸附水(吸附水一般不冻结), 其冻结速度慢, 冻土强度低。相反, 细砂层等粗颗粒土的结合水含量很少, 形成冻土后几乎无未冻水, 冻土强度高, 冻结速度快。

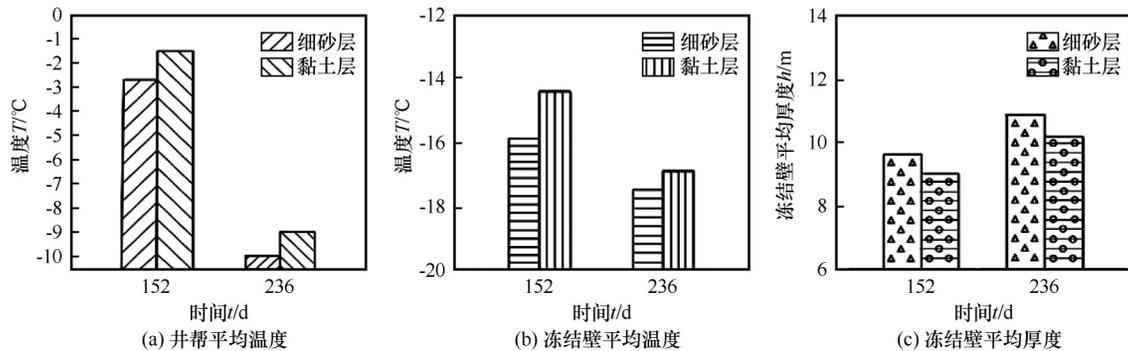


图 9 冻结温度场特征参数

Fig. 9 Characteristic parameter of the freezing temperature field

2.4 冻胀力

(1) 冻胀力的产生和发展

温度降低时, 由于水分迁移和原位水的冻结

而产生体积膨胀, 进而发生冻胀变形, 当冻胀变形受到约束时便会产生冻胀力<sup>[27-31]</sup>。已有研究表明<sup>[32]</sup>, 冻结壁冻胀力与冻胀变形基本呈线性正比

关系,且增长率随温度降低而增大。膨胀性黏土处于漫长的不断结冰、不断冻胀的过程。另一方面,膨胀性黏土层中的水结冰膨胀,推动土颗粒重新排列,增大了土中的孔隙。土中的水量越大,水结冰膨胀的体积也越大,土体的冻胀量也越大<sup>[33]</sup>。

(2) 细砂层与黏土层冻胀特征对比

将节点应力计算结果减去初始地应力,即冻土

温降后引起的冻胀力,因此冻胀力与节点应力的变化规律一致。分别读取440 m深度黏土层和400 m深度细砂层距该矿副井井筒中心半径  $r=6.128$  m (井帮)、 $r=8.7$  m(内圈)、 $r=11.2$  m(中圈)冻结锋面上的节点应力,绘制不同时期的应力分布如图10所示。取冻结管黏土层、细砂层内圈在南、南偏西30°、北偏西30°、北偏西6°、北偏东30°和中圈在东南方位上的冻胀力,绘制表格如表4所示。

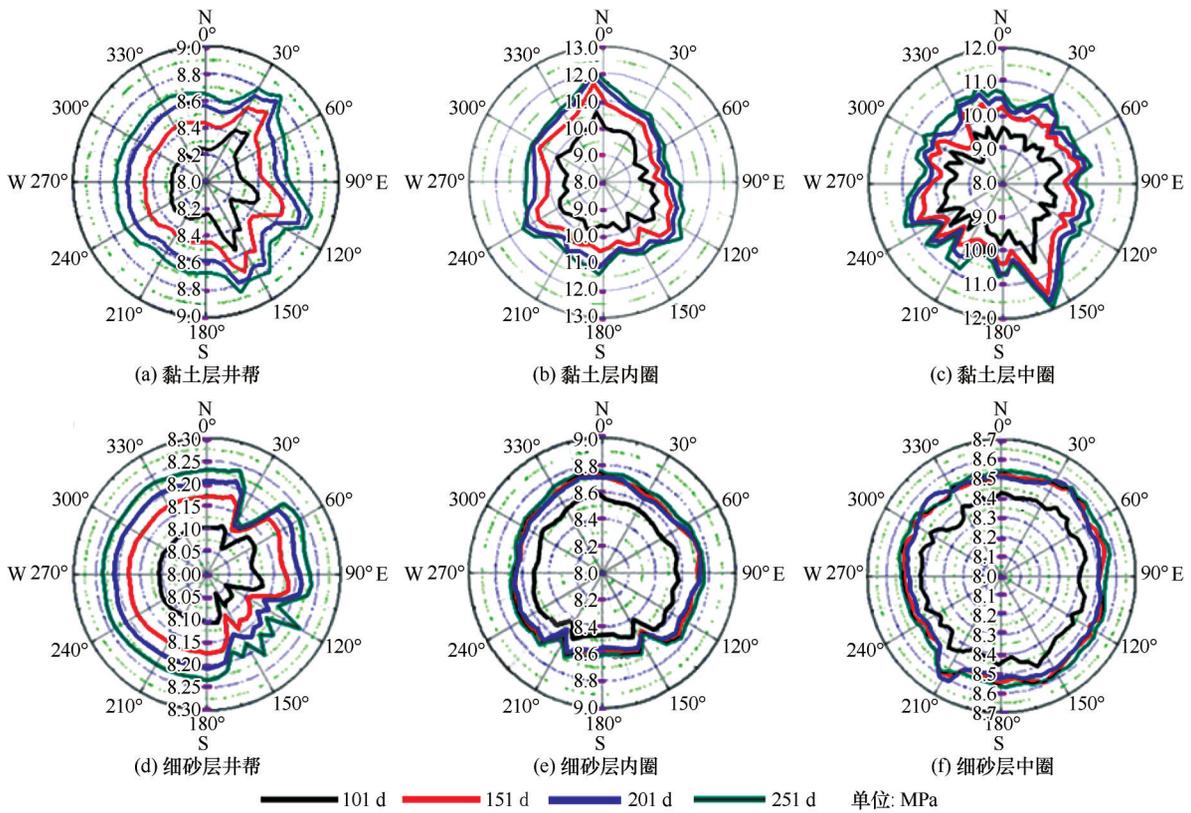


图10 节点的径向应力分布

Fig. 10 Radial stress distribution of the joints

表4 几处典型冻结管黏土层与细砂层的冻胀力差值(冻结151天)

Table 4 Difference of frost heaving force between clay layer and fine sand layer of several typical freezing pipes (frozen for 151 days)

冻结管位置	方位	黏土层冻胀力与地应力之和 $P_1$ /MPa	细砂层冻胀力与地应力之和 $P_2$ /MPa	冻胀力差值 $\Delta P$ /MPa
内圈	南	10.40	8.55	1.85
	南偏西30°	10.40	8.55	1.85
	北偏西30°	10.50	8.70	1.80
	北偏西6°	11.80	8.80	3.00
	北偏东30°	10.50	8.70	1.80
中圈	东南	11.50	8.60	2.90

由图10可知:

①由于冻结孔在实际成孔的过程中存在偏斜,冻结管在某一平面内不可能像设计图那样均匀分布,因而在440 m深度膨胀黏土层位冻胀后的受力

存在显著的不均匀性,最大冻胀力中圈主要位于东南侧,内圈主要位于北侧、南侧、东南侧和西南侧。

②膨胀性黏土层冻结151天时,距井筒中心6.128 m(井帮)、8.7 m(内圈)、11.2 m(中圈)冻结

锋面上应力最大值与最小值相差分别为 0.40 MPa、1.90 MPa、2.00 MPa; 表明内圈管和中圈管附近的部分位置冻结壁处于 2 MPa 左右的不均匀压力作用下, 这是造成冻结管断裂的重要原因。由表 4 知, 冻结 151 天时黏土层与细砂层内圈管在南、南偏西 30°、北偏西 30°、北偏西 6°、北偏东 30° 方向上冻结管的冻胀力差值为 1.85 MPa、1.85 MPa、1.80 MPa、3.00 MPa、1.80 MPa。黏土层与细砂层中圈管在东南侧方向上冻胀力差值为 2.90 MPa。实际工程中在中圈东南处, 内圈、中圈均有部分断管(断管如图 1 蓝色小圆圈所示), 与计算出的显著不均匀冻结位置基本对应。

③冻结 251 天时, 细砂层在井帮、内圈、中圈冻结锋面上的冻结应力最大值和最小值之差分别为 0.12 MPa、0.20 MPa、0.05 MPa, 黏土层在井帮、内圈、中圈冻结锋面上的冻结应力最大值和最

小值之差分别为 0.22 MPa、1.60 MPa、1.80 MPa, 可见细砂层的冻胀效应和不均匀性均小于黏土层。冻结 151 天时, 黏土层冻结壁的中圈管附近冻胀力达 4.00~6.30 MPa, 占初始地应力的 76.9%~121.1%; 冻结 251 天时, 黏土层中圈、内圈冻结管围成的冻结壁内冻胀力均大于 5 MPa, 是同时期细砂层的 1.5 倍。

### (3) 副井断管原因分析

该矿副井冻结掘砌过程中的部分信息见表 5。2013 年 1 月 1 日之前, 一直处于正常施工状态。刚进入膨胀性黏土层与细砂层结合处, 发生了 15 根断管(井帮位移及底鼓量均超标), 停止掘进。及时采取井内设置工字钢和混凝土封底措施, 断管的冻结孔采取下置套管, 断管孔恢复运转后增加管道泵, 并在断管孔周围的冻结孔增设管道泵加大盐水流

表 5 副井部分施工信息

Table 5 Some construction information of the auxiliary shaft

序号	施工时间节点	施工状态	备注
1	2012 年 4 月 8 日	开机冻结	
2	2012 年 8 月 8 日	井筒试挖	冻结 122 天
3	2012 年 8 月 8 日至 2013 年 1 月 1 日	井壁施工正常	段高 4.2 m, 井筒掘进 412.95 m
4	2013 年 1 月 1 日至 2013 年 1 月 4 日	冻结管断裂 15 根	冻结 271 天, 刚进入深厚黏土层
5	2013 年 1 月 4 日至 2013 年 1 月 21 日	恢复冻结管 11 根	停止掘砌
6	2013 年 1 月 21 日至 2013 年 7 月 20 日	加强冻结	继续冻结
7	2013 年 7 月 20 日至 2013 年 8 月 20 日	井筒恢复掘砌	段高 2.2 m, 顺利通过膨胀性黏土层
8	2013 年 10 月 7 日	掘砌至井深 499.6 m	冻结 548 天

经过长达 197 天低温冻结(-32~-34 ℃)后恢复掘砌, 安全顺利通过膨胀性黏土层。这一事实直接说明, 断管正是膨胀性黏土层的冻结速度慢, 蠕变变形大(特别是遭遇掘进, 冻结壁冻胀力释放), 在与细砂层结合处出现明显差异冻胀力, 导致冻结管弯曲应力超越材料极限抗拉强度而致。后期加强冻结, 实际上是增强冻结壁强度(包括处理未修复的冻结管和受到泄漏盐水浸泡的冻结壁), 减小了膨胀性黏土的蠕变性。

### (4) 不同位置冻胀力发展规律

取计算结果中井帮和内、中、外圈冻结管(图 1)附近的节点径向应力值, 绘制其与时间的对应关系。

由图 11 可知:

①无论是细砂层还是黏土层, 均为内圈管和中圈管直接形成冻结壁, 冻胀力较大, 外圈管冻胀力

次之, 井帮冻胀力最小。深层黏性土较为突出。

②在冻结 0~90 天内, 细砂层和黏土层的冻胀力近似线性快速增长。冻结 90 天时, 黏土层井帮冻胀力为 2.97 MPa, 外、中、内圈三圈冻结管平均冻胀力为 3.76 MPa, 最大冻胀力为 3.81 MPa; 此时细砂层井帮冻胀力为 3.08 MPa, 外、中、内圈三圈冻结管平均冻胀力为 3.41 MPa, 最大冻胀力为 3.61 MPa。冻结 90 天之后, 细砂层的冻胀力增长基本趋于稳定, 而黏土层中圈孔和内圈孔的冻胀力仍然持续增大。

③冻结 120 天时, 内圈管和中圈管的节点径向应力开始与外圈管明显不同, 外圈管增长曲线较为平缓。冻结 151 天时, 黏土层井帮冻胀力为 3.17 MPa, 外、中、内圈三圈冻结管平均冻胀力为 4.28 MPa, 最大冻胀力为 4.43 MPa; 此时细砂层井帮冻胀力为 3.37 MPa, 外、中、内圈三圈冻结管平

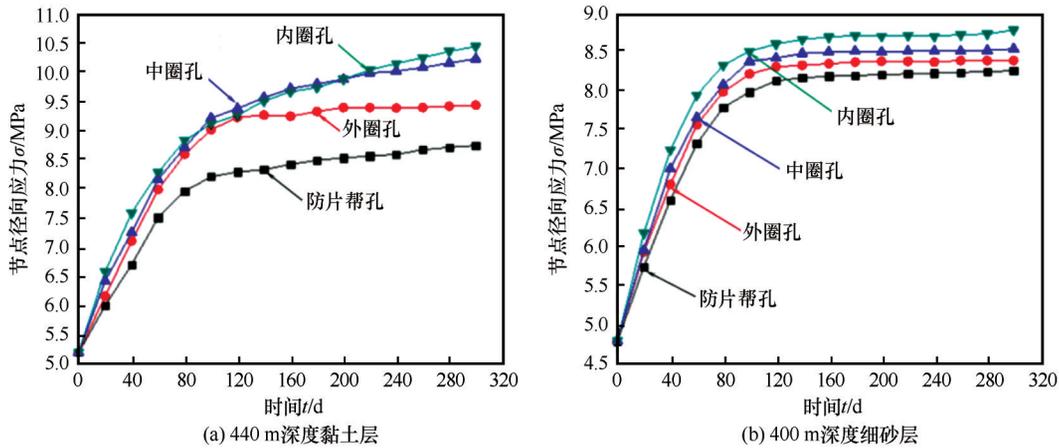


图 11 节点径向应力随时间变化曲线(平均)

Fig. 11 Curves of radial stress of the joints changing with time (averaged)

均冻胀力为 3.69 MPa, 最大冻胀力为 3.87 MPa。冻结 236 天时, 细砂层内圈管的冻胀力为 3.91 MPa, 比中圈管 3.72 MPa 大了 5.11%, 而黏土层内圈管的冻胀力为 4.81 MPa, 比中圈管 4.74 MPa 大了 1.48%。

### 3 结论

对取样于淮南矿区某副井 400 m 深度细砂层、440 m 深度膨胀性黏土层进行了 ANSYS 数值模拟温度场分布及冻胀力发展分析, 得出如下结论:

(1) 冻结 152 天时, 深层黏土层井帮平均温度比同时期细砂层高 1.20 °C。黏土层冻结壁平均温度比同时期细砂层高 1.44 °C, 黏土层冻结壁平均厚度比同时期细砂层小 0.62 m。冻结 236 天时, 黏土层井帮平均温度比同时期细砂层高 1.03 °C, 黏土层冻结壁平均温度比同时期细砂层高 0.74 °C, 黏土层冻结壁平均厚度比同时期细砂层小 0.56 m。

(2) 在冻结 90 天时, 深层黏土层外、中、内圈三圈冻结管平均冻胀力约为同时期细砂层的 1.10 倍。冻结 151 天时, 黏土层三圈冻结管围成的冻结壁内平均冻胀力均达到初始地应力的 81.1%, 是同时期细砂层的 1.16 倍。冻结 236 天时, 细砂层内圈管的冻胀力为 3.91 MPa, 比中圈管 3.72 MPa 大了 5.11%, 而黏土层内圈管的冻胀力为 4.81 MPa, 比中圈管 4.74 MPa 大了 1.48%。黏土层三圈冻结管围成的冻结壁内平均冻胀力均达到初始地应力的 88.6%, 是同时期细砂层的 1.28 倍。

(3) 深部膨胀性黏土层冻胀后的受力存在显著的不均匀性, 内圈、中圈管冻结锋面上的不均匀受力显著大于其他位置。这种深层位不同土性的

冻胀力差异是造成冻结管断裂的主要原因之一。

今后可以从不同深度土层进一步考虑地压等因素对土性参数的影响, 探讨不同深度、不同工况下温度场分布与冻胀力的形成规律, 为优化冻结方案、实施冻结壁蠕变预控、谨防冻结管断裂提供参考。

### 参考文献 (References):

- [1] Cui Guangxin, Yang Weihao, Lü Henglin. Freezing wall and shaft wall in deep topsoil[M]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 1998. [崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.]
- [2] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314 - 1323.
- [3] Wettlaufer J S, Worster M G. Dynamics of premelted films: frost heave in a capillary[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4679 - 4689.
- [4] Wilen L A, Dash J G. Frost heave dynamics at a single crystal interface[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(25): 5076 - 5079.
- [5] O'Neil K, Miller R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 281 - 296.
- [6] Christopher N. Secondary frost heave in freezing soils[D]. Oxford, UK: Oxford University, 1996.
- [7] Rempel A W, Wettlaufer J S, Worster M G. Premelting dynamics in a continuum model of frost heave[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 498: 227 - 244.
- [8] Diehl K, Matthias-Maser S, Mitra S K, et al. Laboratory studies on the ice nucleating ability of biological aerosol particles in condensation freezing, immersion freezing, and contact freezing modes[J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31: 70 - 71.
- [9] von Blohn N, Mitra S K, Diehl K, et al. The ice nucleating ability of pollen: part III: new laboratory studies in immersion and contact freezing modes including more pollen types[J]. Atmospheric Research, 2005, 78(3/4): 182 - 189.
- [10] Zhang Qingwu. The formation and genetic analysis of the frozen wall of the wellbore in the thick and thick fluid[J]. Low

- Temperature Architecture Technology, 2018, 40(6): 112 - 114. [张庆武. 巨厚流细砂层井筒冻结壁形成及成因分析[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(6): 112 - 114.]
- [11] Dai Huadong, Wang Qingcheng. Experimental study on mechanical properties of frozen soil in deep soil of Wanfu Coal Mine [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(2): 120 - 126. [戴华东, 王青成. 万福煤矿深厚表土层冻土力学性质试验研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(2): 120 - 126.]
- [12] Wang Bin, Rong Chuanxin, Shi Xin. Analysis of frozen wall viscoelasticity based on parabolic temperature field[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 38(3): 59 - 63. [王彬, 荣传新, 施鑫. 基于抛物线形温度场的冻结壁粘弹性分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 59 - 63.]
- [13] Rong Chuanxin, Zhang Xiang, Cheng Hua, et al. Experimental study on influence of groundwater velocity on freezing temperature field[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(2): 656 - 664. [荣传新, 张翔, 程桦, 等. 地下水流速对冻结温度场影响的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 656 - 664.]
- [14] Cheng Hua, Lin Jian, Wang Bin, et al. Mathematical model and test verification of seepage freezing in saturated sand layer [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(12): 38 - 44. [程桦, 林健, 王彬, 等. 饱和细砂层渗流冻结水热耦合模型与试验验证[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 38 - 44.]
- [15] Ji Zhiqiang, Lao Liyan, Li Haipeng, et al. The effects of seepage velocity on the formation of frozen sandy soil wall[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 130 - 138. [吉植强, 劳丽燕, 李海鹏, 等. 渗流速度对砂土人工冻结壁的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 130 - 138.]
- [16] Fu Shenggang, Feng Qiang, Wang Chengxiang. Elasto-plastic analysis of frozen wall considering frost heave[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 300 - 308. [伏圣岗, 冯强, 王成祥. 考虑冻胀效应的冻结壁弹塑性分析[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 300 - 308.]
- [17] Ma Maoyan, Cheng Hua, Rong Chuanxin. Freezing construction technology for main shaft of Yangcun Coal Mine in deep and thick calcareous clay layer[J]. Coal Engineering, 2017, 49(9): 14 - 18. [马茂艳, 程桦, 荣传新. 杨村煤矿主井深厚钙质黏土层冻结施工技术[J]. 煤炭工程, 2017, 49(9): 14 - 18.]
- [18] Xue Libing, Huang Xinggen, Wang Yansen. Engineering site measurement of froze swelling force in mine shaft freezing wall during mine freezing shaft sinking in Yuncheng Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(9): 34 - 37. [薛利兵, 黄兴根, 王衍森. 鄂城煤矿冻结法凿井的井壁冻胀力工程实测[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(9): 34 - 37.]
- [19] Hou Haijie, Lin Bin. Measurement and analysis of freezing pressure in deep clay layer [J]. Coal Technology, 2018, 37(9): 84 - 86. [侯海杰, 林斌. 深厚黏土层冻结压力实测与分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 84 - 86.]
- [20] Wang Renhe. Hydro-thermal coupling study of artificial multi-tube frozen formation and calculation of frozen wall [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005. [汪仁和. 人工多圈管冻结地层的水热力耦合研究及其冻结壁计算[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.]
- [21] Technical code for buildings in expansive soil regions: GB 50112-2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013. [膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.]
- [22] Ma Maoyan. Study on freezing pressure of deep shaft in thick alluvium [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2015. [马茂艳. 深厚冲积层立井井筒冻结压力分布规律研究[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2015.]
- [23] Xiao Henglin, Wu Xuejie, Zhou Jinhua. Study on the calculation of thermal conductivity of rock and soil material[J]. Subgrade Engineering, 2007(3): 54 - 56. [肖衡林, 吴雪洁, 周锦华. 岩土材料导热系数计算研究[J]. 路基工程, 2007(3): 54 - 56.]
- [24] Rong Chuanxin. Study on mechanical properties of frozen soil wall and shaft lining as well as their interaction mechanism in deep alluvium [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. [荣传新. 深厚冲积层冻结壁与井壁的力学特性及其共同作用机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.]
- [25] Li Ping, Xu Xuezu, Chen Fengfeng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 90 - 95. [李萍, 徐学祖, 陈峰峰. 冻结缘和冻胀模型的研究现状和进展[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 90 - 95.]
- [26] Liu Bin. Special construction of underground engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. [刘斌. 地下工程特殊施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.]
- [27] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [28] Wang Renhe, Zhang Rui, Li Dongwei. Formation and thawing processes of a multi-coil pipe's frozen wall [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 538 - 542. [汪仁和, 张瑞, 李栋伟. 多圈管冻结壁形成和融化过程冻胀力实测研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 538 - 542.]
- [29] Sun Jiaxue, Liu Bin. Analysis and calculating method of using primary heave pressure to freeze shaft wall [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 1995, 16(3): 243 - 247. [孙家学, 刘斌. 冻结壁原始冻胀力的分析与计算方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1995, 16(3): 243 - 247.]
- [30] Kinoshita S. Physics of frozen soil [M]. Wang Yi, Zhang Zhiquan, trans. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 1985. [木下诚一. 冻土物理学[M]. 王异, 张志权, 译. 长春: 吉林科学技术出版社, 1985.]
- [31] Tsytoich N A. The mechanics of frozen ground [M]. Zhang Changqing, Zhu Yuanlin, trans. Beijing: Science Press, 1985. [崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [32] Huang Jianhua. Simulation analysis and experimental test on frost deformation of freezing waterproof curtain in deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2554 - 2560. [黄建华. 深基坑冻结止水帷幕冻胀变形模拟分析与试验测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2554 - 2560.]
- [33] Zhang Shiyin, Wang Renhe. Experimental study on frost heaving characteristics of soil [J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 7(2): 72 - 73. [张世银, 汪仁和. 土壤冻胀特性的试验研究[J]. 岩土工程界, 2004, 7(2): 72 - 73.]

## Distribution of the freezing temperature field and formation law of the frost heaving force of a deep expansive clay layer

YANG Qing<sup>1</sup>, RONG Chuanxin<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, Anhui, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** To prevent the fracture of freezing pipe is an urgent problem in the formation of frozen wall in deep expansive clay layer. According to the soil properties of the deep thick expansive clay layer of a mine auxiliary shaft in Huainan mining area, distribution of the freezing temperature field and formation law of the frost heaving force are studied through the thermo-mechanical coupling calculation. When frozen for 152 days and 236 days, the average temperature of clay layer is  $-14.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-16.58\text{ }^{\circ}\text{C}$  and fine sand layer is  $-15.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-17.32\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively. The average temperature of clay layer is  $1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$  higher than that of fine sand layer in the same period. The average thickness of the frozen wall in clay layer is  $8.92\text{ m}$  and  $10.25\text{ m}$  respectively, and that in fine sand layer is  $9.54\text{ m}$  and  $10.77\text{ m}$  respectively. The average thickness of the frozen wall in clay layer is  $0.62\text{ m}$  and  $0.56\text{ m}$  smaller than that in fine sand layer in the same period. Sand is easier to freeze and faster than clay. When frozen for 90 days, the average frost heaving force of the outer, middle and inner circles of the deep clay layer is about 1.1 times of that of fine sand layer in the same period. When the clay layer was frozen for 151 days, the average frost heaving force in the frozen wall surrounded by three circles of freezing pipes reached 81.1% of the initial ground stress, which was 1.16 times of the fine sand layer in the same period. When frozen for 236 days, the frost heaving force of inner circle of fine sand layer is  $3.91\text{ MPa}$ , which is about 5.11% bigger compared with that of middle circle of  $3.72\text{ MPa}$ , while that of inner circle of clay layer is  $4.81\text{ MPa}$ , which is about 1.48% bigger compared with that of middle circle of  $4.74\text{ MPa}$ . The average frost heaving force in the frozen wall surrounded by three circles of freezing pipes in clay layer is 88.6% of the initial ground stress, which is 1.28 times of that of fine sand layer in the same period. There is a significant non-uniformity in the frost heaving force at the deep expansive clay layer and the interface with the fine sand layer. The main position of the maximum frost heaving force is basically corresponding to the pipe break in the actual project excavation. It highlights that the non-uniform frost heaving force is the important reason for fracture of freezing pipes, which provides a reference for the design of similar frozen projects in the future.

**Key words:** expansive clay; thermo-mechanical coupling; temperature field; frost heaving force

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)