

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0022

He Weiwei, Sheng Yu. Numerical analyses of thermal effect of ventilation on the surrounding rock of shaft in permafrost regions (II): Surrounding rock temperature varying of an intake shaft [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 186-192. [何维维, 盛煜. 矿井通风对多年冻土井筒围岩热影响的数值分析 (II): 多年冻土井筒围岩温度的变化规律[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 186-192.]

# 矿井通风对多年冻土井筒围岩热影响的数值分析 (II): 多年冻土井筒围岩温度的变化规律

何维维<sup>1, 2</sup>, 盛煜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘 要:** 在多年冻土区进行煤矿地下开采, 通风作用改变了井筒围岩的热平衡条件, 从而引起了多年冻土上限及其井筒周围冻土季节融化层的变化, 有可能影响到井筒支护结构的稳定性. 因此, 研究在矿井通风作用下, 多年冻土温度场分布及随季节的变化趋势是有意义的. 基于 ANSYS 有限元分析软件, 针对多年冻土区某煤矿的赋存条件、试验采场位置以及通风作用对冻土的影响范围, 建立了二维数值计算模型, 利用焓式有限元方法对多年冻土井筒围岩的温度特性进行了数值模拟, 分析了矿井通风对多年冻土井筒围岩的热影响程度, 其计算方法和结果为下一步多年冻土煤矿地下开采井筒支护设计提供参考依据.

**关键词:** 矿井通风; 数值模拟; 井筒围岩; 热影响

**中图分类号:** P642.14 **文献标识码:** A

## 0 引言

多年冻土对工程的影响主要表现在冻胀和融沉两个方面, 而这两个方面的作用均发生在有冻融变化的岩土体中<sup>[1]</sup>, 而冻土的一切物理、力学、水力性质以及土壤冻结和融化过程伴生的各种现象都取决于冻土体的温度变化过程, 这也是冻土区别于其他介质最重要的标志<sup>[2]</sup>. 当采用地下开采时, 井巷周围原岩应力的平衡状态遭到破坏, 引起了应力场的重新分布, 产生围岩压力; 而且还会破坏多年冻土区原有的稳定热力场, 形成新的热交换系统, 在巷道围岩形成一个新的冻融圈, 随着温度变化, 冻融交替, 冻融范围内的围岩产生反复的冻胀力, 引起对井巷支护结构的破坏, 使井巷失去稳定<sup>[3]</sup>. 因此, 多年冻土中井巷围岩热稳定性与其温度变化密切相关<sup>[4-6]</sup>. 只有掌握地下开采过程中围岩温度变

化规律, 才能研究由此所产生的冻胀力对井巷支护结构的破坏程度, 从而采取相应的防护措施. 围岩融化圈的变化是其温度变化的直接反应, 准确地预测冻土的融化深度决定着如何选择矿井支护类型及荷载<sup>[7]</sup>. 国内外对多年冻土区煤矿地下开采巷道围岩融化圈厚度的计算研究较多<sup>[8-9]</sup>, 对井筒围岩融化圈的变化规律研究较少, 且上述方法以解析解为主. 然而, 在多年冻土区, 无论是天然条件下的浅层岩土还是人工开挖具有通风作用的井巷围岩每年均要发生冻结和融化, 所以此问题应该是具有相变的传热问题. 对于冻土研究中遇到的大多数有相变的热传导问题只能求近似解和数值解, 对于二维甚至高维的问题, 即使用近似方法也很难给出解析解, 尽管个别问题可以用近似方法使问题简化, 但最终结果的获得还需要应用数值方法. 所以, 数值方法便成为求解有相变热传导问题的非常重要的方

收稿日期: 2012-08-11; 修订日期: 2012-10-02

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(40821001)资助

作者简介: 何维维(1984—), 男, 湖北随州人, 助理工程师, 2011 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 现主要从事岩土工程数值模拟研究. E-mail: heweiwei08@lzb.ac.cn

法<sup>[10]</sup>. 就目前的研究现状而言, 还不能满足工程实际的需要.

多年冻土区煤矿地下开采, 通风作用会对冻土的热状况产生很大的影响. 在文献<sup>[11]</sup>中, 已经对矿井入风井筒风温的变化规律进行了量化分析, 本文从拟建的江仓矿区一井田的工程建设应用实际出发, 通过现场实测资料分析以及该文论述的矿井通风与冻土的对流换热边界条件(入风井筒风温的拟合方程), 根据传热学与有限元理论给出的带相变温度场计算的控制微分方程<sup>[12]</sup>, 利用 ANSYS 软件对多年冻土区煤矿地下开采时井筒与周围冻土的热状况进行了数值计算分析, 并预测未来 30 a 内矿井通风对多年冻土井筒围岩热状况的影响, 为今后的设计和施工提供参考依据.

## 1 数值计算模型的建立

### 1.1 模型计算区域及基本假设

综合考虑矿区的地质特征及实测数据, 根据热传导理论, 采用有限元方法对木里煤田江仓矿区一井田矿井通风对井筒围岩热稳定性的影响进行计算分析.

(1) 模型计算区域. 图 1 为江仓矿区一井田计算模型示意图. 根据青海省奥凯煤业发展有限责任公司开发江仓一号井田矿井建设的相关资料, 江仓矿区一井田副井深度为 342 m, 根据江仓 65 m 深孔土体年平均温度梯度外推方法, 可以确定该区多

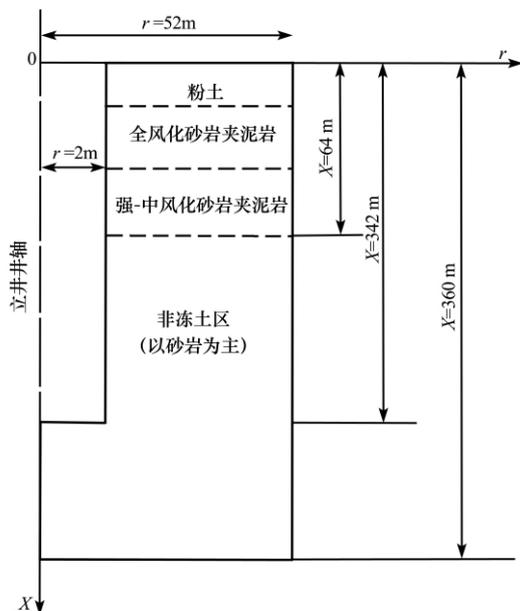


图 1 江仓矿区一井田副井计算模型示意图

Fig. 1 The computation model of an auxiliary shaft in Jiangcang coalfield

年冻土的下限约为 62 m, 为计算方便, 取冻土的研究范围取 64 m. 井深为 342 m, 本模型的研究范围为 360 m. 该计算区域  $\Omega$  由  $S_1, S_2, S_3, S_4$  四层均匀介质组成, 各土层的深度从上到下分别为: 4 m, 8 m, 64 m, 342 m, 360 m. 问题研究的对象为圆柱形井筒, 从几何形状上来讲满足轴对称条件, 井筒壁受到相同的温度荷载及边界条件, 即荷载与边界条件也是轴对称的. 因此, 该问题可以按照轴对称问题进行求解, 取井筒纵截面的一半, 建立相应的几何模型进行分析求解. 坐标原点取在井筒顶部中心, 垂直井筒向右为  $r$  轴方向, 沿井筒中心线向上为  $x$  轴正方向. 井筒半径 2 m, 土体计算宽度取 50 m,  $x$  方向:  $-360.0 \sim 0.0$  m, 该矿井开采时间为 30 a, 故计算时间取 30 a.

(2) 基本假设: 1) 假定土体土质及岩层分层均匀、各向同性; 2) 水汽蒸发的耗热量可以忽略不计, 不考虑其他化学势及场的作用, 如盐分的排析作用; 3) 考虑热传导, 不考虑质量迁移; 4) 风流仅与井壁间发生热湿交换, 无其他热源.

### 1.2 有限元控制微分方程

岩土体满足以下带相变瞬态温度场的热传导方程:

在融土区内有:

$$C_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_u}{r} \frac{\partial T_u}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial x} \right) \quad (0 < t < D, (x, r) \in \Omega_u) \quad (1)$$

在冻土区内有:

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_f}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \quad (0 < t < D, (x, r) \in \Omega_f) \quad (2)$$

在移动边界  $S(t)$  上, 必须满足连续条件和能量守恒条件, 如下所示:

$$T_u(S(t), t) = T_f(S(t), t) = T_m \quad (3)$$

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} - \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial n} = L \frac{ds}{dt} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数 ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $C$  为容积热容量 ( $J \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $\Omega = \Omega_f + \Omega_u$  表示计算区域; 下标  $f, u$  分别表示冻结、融化状态;  $T$  为温度 ( $^\circ C$ );  $t$  为时间 (s);  $S(t)$  为固液两相交界面;  $r$  为距井筒中心线的水平距离 (m);  $x$  为距地表的深度 (m);  $T_m$  为土体冻结的临界温度 ( $^\circ C$ );  $L$  为含水岩土的可变潜热 ( $J \cdot m^{-3}$ );  $n$  为移动边的方向矢量.

## 2 相变的模拟

相变问题与其他分析问题的不同之处是存在相

界面,并且随着时间而移动.相变非线性分析则是在计算过程中需要考虑相变过程中界面上吸收或释放的潜热,所以在数学上是一个强非线性的问题,不能使用解的叠加原理,使计算发生困难.对于含有相变的热传导问题来说,由于相变界面上温度随时间的变化曲线是间断的,所以在计算中引入了一个新的变量焓( $H$ ),把焓和温度同时作为待求函数,而且焓随时间的变化  $H \sim t$  是连续的.因此,用数值方法求解焓分布时,不需要跟踪两相界面,从而使液相区和固相区统一处理成为可能.焓场求出后,温度场即可容易地解得<sup>[13]</sup>.焓是密度与定压比热的乘积对温度的积分,单位为  $J \cdot m^{-3}$ ,可由下式求得:

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为材料密度( $kg \cdot m^{-3}$ );  $c(T)$  为土的比热对温度的函数( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ).

当  $T_1 = -30 \text{ } ^\circ C$  时:

$$H_1 = 0 \quad (6)$$

当  $T_2 = -0.5 \text{ } ^\circ C$  时:

$$H_2 = \rho_d C_f (T_2 - T_1) \quad (7)$$

当  $T_3 = 0 \text{ } ^\circ C$  时:

$$H_3 = H_2 + Q \quad (8)$$

当  $T_4 = 20 \text{ } ^\circ C$  时:

$$H_4 = H_3 + \rho_d C_u (T_4 - T_3) \quad (9)$$

式中:  $T$  为温度( $^\circ C$ );  $H$  为热焓( $J \cdot m^{-3}$ );  $C_f$ ,  $C_u$  分别为冻土和融土的比热( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $\rho_d$  为岩土体的干密度( $kg \cdot m^{-3}$ );  $Q$  为相变热,即单位体积土中由于水的相态改变所放出或吸收的热量( $J \cdot m^{-3}$ ),可以按下式计算:

$$Q = L \rho_w (W - W_u) \quad (10)$$

式中:  $W$  及  $W_u$  分别为岩土体的含水量和未冻水含量,以小数计;  $L$  为水的结晶和融化潜热,一般工程热工计算中取  $334.56 \text{ } kJ \cdot kg^{-1}$ .

### 3 边界及初始条件

#### 3.1 模型边界条件

本文选取 2008 年 1—12 月江仓气象站气温观测资料,共 365 d. 每日气温测 48 次,整点前后半小时进行观测,即每日 00:00—23:30. 将各对应时间的温度分别输入表格,然后求算术平均值得出日平均温度.统计表明,虽然大气温度的日变化分布是随机的,但总体来看大气温度遵循一定的统计规律,可用正弦函数近似表示江仓矿区的气象资料,

地表的温度变化可表示为三角函数形式<sup>[14]</sup>.通过对大气温度数据整理,可以看出矿区气温能够拟合成比较标准的三角函数正弦曲线,相关系数  $R = 90.36\%$ ,见图 2.

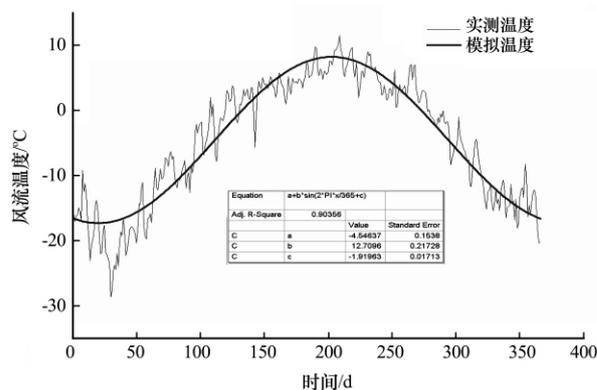


图 2 矿区日平均气温随时间的变化规律

Fig. 2 Variation of daily average temperature with time in Jiangcang coalfield

拟合的三角函数正弦曲线方程为:

$$T_n = -0.8 + 12.7 \times \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} - \frac{3}{5}\pi\right) \quad (11)$$

由该区的钻孔资料,得到天然地表以下 64 m 处的温度变化梯度为  $0.0196 \text{ } ^\circ C \cdot m^{-1}$ ,则模型下边界及右边界为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0.0196 \text{ } ^\circ C \cdot m^{-1} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

立井的井轴为绝热边界条件,左侧边界条件为矿井入风井筒风流与围岩发生对流换热,属于第三类边界条件.根据混凝土受迫对流换热系数的实验结果<sup>[15]</sup>,立井内混凝土表面的对流换热系数可取:

$$h = 3.06v + 4.11 \quad (14)$$

式中:  $h$  为对流换热系数( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $v$  为风速( $m \cdot s^{-1}$ ).

取工况  $G = 30 \text{ } kg \cdot s^{-1}$ ,可得对流换热系数  $h = 13.91 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ,风流与矿井围岩对流换热边界条件中风流温度是一个拟合函数,其计算方法及计算结果已经在文献<sup>[11]</sup>中进行了详细论述.即:

$$T = 0.025x - 3.3 + [12.7 \exp(-x/69.45) + 2.8 \times 10^{-5}] \times \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} - \frac{3\pi}{5}\right) \quad (15)$$

同理取工况  $G = 10 \text{ } kg \cdot s^{-1}$ ,可得对流换热系数  $h = 7.38 \text{ } W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ,风流与矿井围岩对流换热边界条件中风流温度是一个拟合函数,即:

表 1 多年冻土区江仓矿区初始地温值

Table 1 The initial ground temperature profile in Jiangcang coalfield

深度/m	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
温度/°C	1.80	0.99	0.66	0.01	-0.31	-0.49	-0.59	-0.68	-0.65	-0.77
深度/m	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
温度/°C	-0.81	-0.83	-0.86	-0.85	-0.86	-0.86	-0.87	-0.89	-0.88	-0.91
深度/m	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
温度/°C	-0.91	-0.90	-0.90	-0.86	-0.88	-0.84	-0.82	-0.81	-0.78	-0.67
深度/m	32.0	34.0	36.0	38.0	40.0	45	50	55	60	65
温度/°C	-0.70	-0.69	-0.65	-0.59	-0.54	-0.42	-0.31	-0.21	-0.07	0.12

$$T = 0.022x - 1.92 + [12.7\exp(-x/26.57) + 1.85 \times 10^{-5}] \times \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} - \frac{3\pi}{5}\right) \quad (16)$$

### 3.2 初始条件

本文模拟新建矿井围岩温度场的变化特征, 故初始时刻取矿井建成之日(假定为 10 月 16 日): 多年冻土区江仓矿区初始地温按 2009 年 10 月 16 日的实测温度(表 1)取值。

## 4 数值分析结果

### 4.1 井筒围岩的最大融化深度的确定

本文的研究区域侧重于多年冻土区, 研究目的是分析通风作用对井壁内冻土(岩)温度场的影响, 故对非冻土区温度变化规律不做详细研究。

矿井在开采的过程中, 由于矿井通风的影响, 井筒围岩受通风对流影响而形成季节性活动层(风温受地面温度季节性周期变化的影响), 其最大融化深度的变化对于研究矿井通风对多年冻土区井筒围岩的热影响是非常重要的, 也是多年冻土区煤矿地下开采设计的主要数据之一<sup>[16]</sup>。以  $G = 10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  工况为例, 图 3 和图 4 为矿井开采后第 1 年地温分布图。根据青海省奥凯煤业发展有限责任公司江仓一号井田矿井建设的相关资料, 含水量较高多年冻土层分布于井深 2~10 m。在这个范围, 从 0 °C 等温线与井筒之间的距离可以看出, 矿井开采后第 1 年 9 月 15 日冻土最大融化深度为 5.0 m (井深为 10 m 的位置), 10 月 15 日冻土最大融化深度为 4.6 m (井深为 10 m 的位置)。因此, 在本文中取每年 9 月 15 日作为井筒围岩的最大融化深度发生日期。

### 4.2 通风对井筒围岩温度的影响

根据井筒围岩的最大融化深度发生日期大约在当年的 9 月 15 日, 可利用 ANSYS 软件模拟矿井通

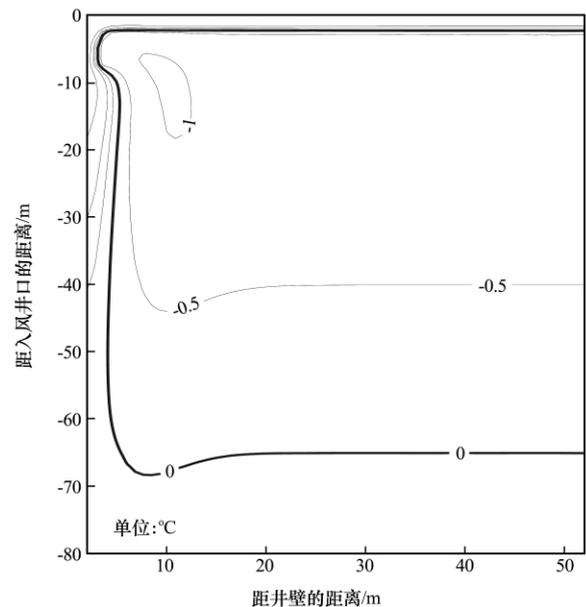


图 3 矿井开采后第 1 年 9 月 15 日地温分布  
Fig. 3 Permafrost temperature distribution in the 1st mining year (Sep. 15th)

风第 1~30 年的 9 月 15 日地温分布图。图 5、图 6、图 7、图 8 分别为矿井通风第 2 年和第 30 年时  $G = 10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  及  $G = 30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  时井筒围岩地温分布图。

以  $G = 10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  为例, 如图 5 和图 6 所示, 0 °C 等温线底部距地表的距离由第 2 年的 71.1 m 下移到第 30 年的 78.2 m; 同时风速越快, -1 °C 及 0 °C 等温线随着时间的变化沿着井筒壁下移的速度越快, 离地表的距离也越大。由此可见, 矿井通风对远离井筒壁(约 25 m)外冻土有一定的保护作用。

由图 5~图 8 对比可知, 在  $G = 10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 0.5 °C、1 °C 及 2 °C 等温线末端距地表的距离由第 1 年至第 30 年沿着井筒壁上移大约 1 m, 而在  $G = 30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 1 °C 及 2 °C 等温线末端距地表的距离由第 1 年至第 30 年沿着井筒壁分别上移大约 6 m 及 1 m, 0.5 °C 等温线底部随着时间的变化沿着井壁

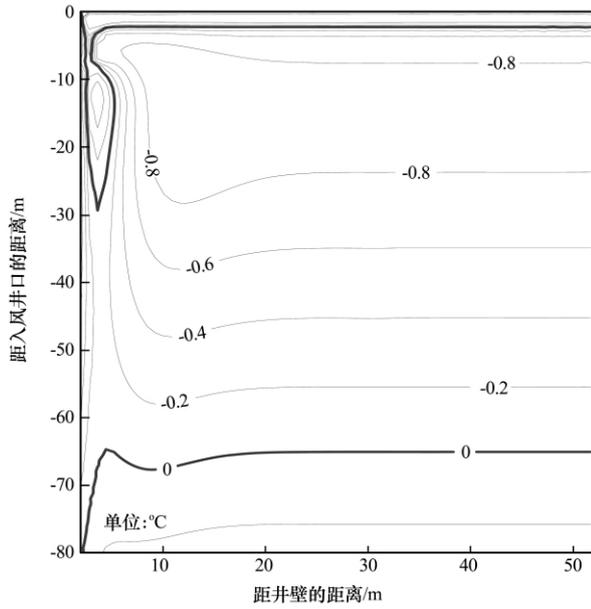


图 4 矿井开采后第 1 年 10 月 15 日地温分布  
 Fig. 4 Permafrost temperature distribution in the 1st mining year (Oct. 15th)

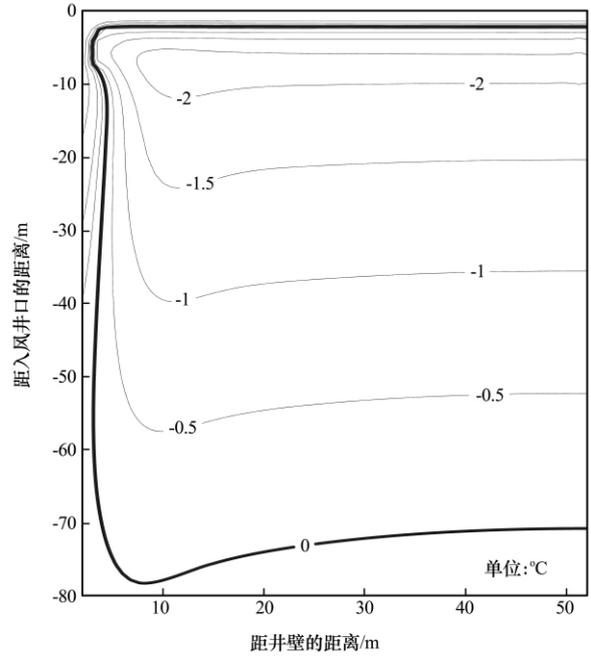


图 6 矿井开采后第 30 年地温分布图( $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 Fig. 6 Permafrost temperature distribution in the 30th mining year( $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

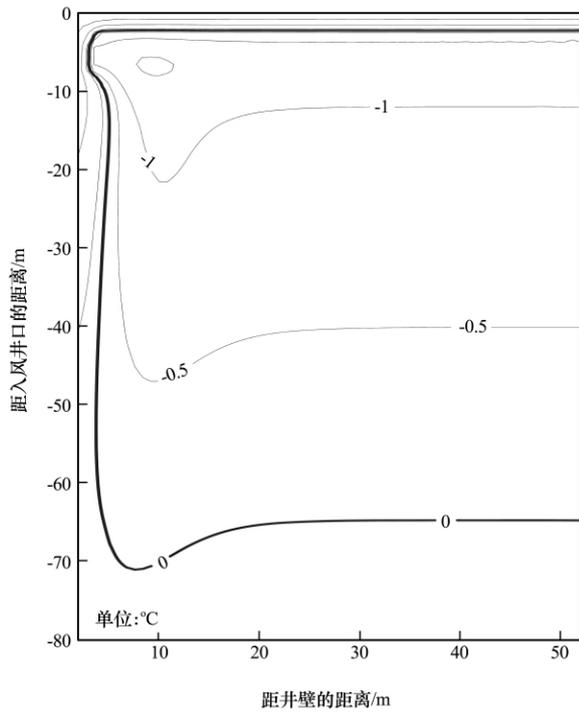


图 5 矿井开采后第 2 年地温分布图( $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 Fig. 5 Permafrost temperature distribution in the 2nd mining year( $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

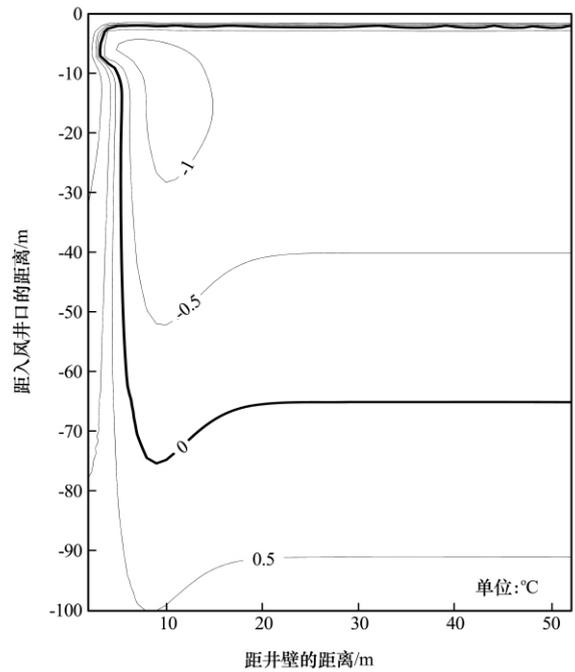


图 7 矿井开采后第 2 年地温分布图( $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 Fig. 7 Permafrost temperature distribution in the 1st mining year( $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

逐渐下移. 由此可见, 随着风速的增加, 在一定深度处, 地温梯度是影响地温变化的主要因素.

以  $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  工况为例, 如图 3 所示, 对矿井开采通风的第 1 年 9 月 15 日, 井深 0~4 m 处最大融化深度为 3.25 m, 井深 4~8 m 处最大融化

深度为 3.65 m, 井深 8~64 m 最大融化深度为 5.3 m. 相对应的土的类型为粉土、全风化砂岩夹泥岩及强-中风化砂岩夹泥岩, 含水量分别为 29.1%、16.3% 及 3%, 导热系数由小到大, 说明井筒围岩最大融化深度随着含水量的减少及导热系数的增大而增加.

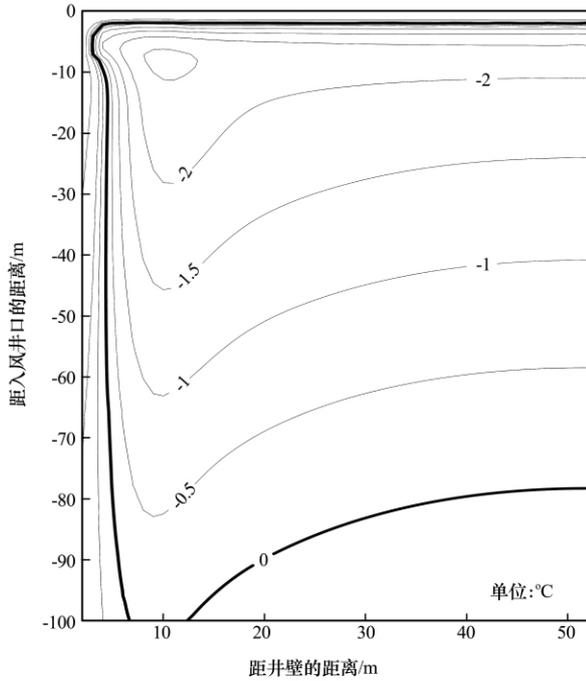


图 8 矿井开采后第 30 年地温分布图( $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 Fig. 8 Permafrost temperature distribution in the 30th mining year( $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

4.3 通风时间对井筒围岩最大融化深度的影响

季节融化层发育在暖季，即在气温和地面温度转为正温后开始。因此，季节融化过程线(0 °C等值线)内土层温度均高于其外的温度(图 5~图 8)，并结合冻土温度场分布情况，可得出通风时间对井筒围岩最大融化深度的影响程度(图 9 和图 10)。

由图 9 和图 10 对比可知，在矿井开采运营前 3 a，随着时间的增加，井壁后冻土最大融化深度减小，井深 8~64 m 岩性为强-中风化砂岩夹泥岩，导热系数大，含水量小。因此，在矿井开采运营前 3 a，井壁后冻土最大融化深度减小的幅度较前两层冻土要快一些。

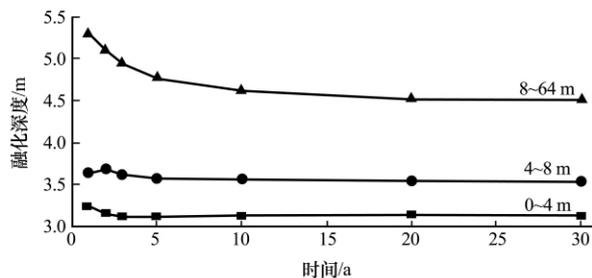


图 9  $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时井筒围岩在不同井深处最大融化深度随时间的变化  
 Fig. 9 The maximum thawing range of surrounding rock changing with time for different well depths ( $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

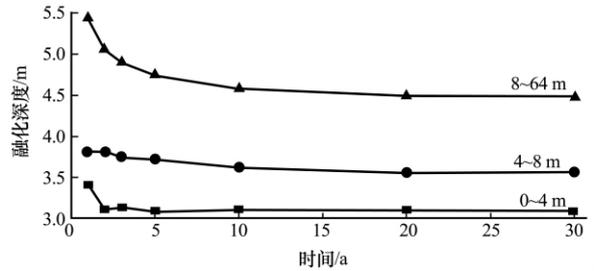


图 10  $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时井筒围岩在不同井深处最大融化深度随时间的变化  
 Fig. 10 The maximum thawing range of surrounding rock changing with time for different well depths ( $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

5 结论

(1) 矿井通风使远离井筒壁的围岩温度随着时间的增加逐渐降低。-1 °C 及 0 °C 等温线随着时间的变化沿着井壁逐渐下移，随着通风时间的增加，地表下的低温区面积逐渐增大，矿井通风对远离井筒壁(约 25 m)外的冻土有一定的保护作用。

(2) 矿井通风使靠近井筒壁的围岩温度随着时间的增加逐渐降低，而随着风速的增加，在一定深度处，地温梯度是影响地温变化的主要因素。

(3) 井筒围岩季节活动层的厚度与岩性和含水量密切相关，井筒围岩最大融化深度随着含水量的减少及导热系数的增大而增加。

(4) 井壁后冻土的最大融化深度与矿井开采运营时间有一定的关系，并在 3 a 后趋于稳定。

参考文献 (References):

[1] Cheng Guodong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6): 521-531. [程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 521-531.]

[2] Song Cunniu. A review on the theory and models about coupled heat-moisture stress interaction during soil freezing and thawing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 982-988. [宋存牛. 冻融过程中土体水热力耦合作用理论和模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 982-988.]

[3] He Weiwei, Sheng Yu, Zhou Fei, et al. Mining in permafrost regions: Status and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 388-396. [何维维, 盛煜, 周飞, 等. 多年冻土区矿山开采研究现状及展望[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 388-396.]

[4] Li Shude, Guo Dongxin. Thermal state and stability of tunnel in Tumengela coalmine, Xizang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1980, 2(3): 46-50. [李树德, 郭东信. 西藏土门格拉煤矿井巷热状态及其稳定性[J]. 冰川冻土, 1980, 2(3): 46-50.]

- [5] Chaban P D, Gol'dtman V G. Effect of geocryological conditions on the productivity of mining operations in the north-eastern USSR[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Permafrost. Washington: National Academy of Sciences, 1978: 587—590.
- [6] Elchaninov E A, Shor A I, Rozenbaum M A. The stability of underground workings in permafrost[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost (Part II). Ottawa: National Research Council of Canada, 1980: 321—337.
- [7] Mal'kov Yu K. Prediction of the size of the thawing aureoles around mine workings in permafrost under thawing conditions of mines in the northeastern USSR[J]. Journal of Mining Science, 1991, 27(3): 180—187.
- [8] Izakson V Yu, Petrov E E. Engineering method for predicting and controlling the size of than aureoles around mine workings in a permafrost region [J]. Journal of Mining Science (Soviet Mining), 1985, 21(5): 400—405.
- [9] Izakson V Yu, Petrov E E. Dynamics of thawing permafrost rocks for mining excavations [J]. Journal of Mining Science (Soviet Mining), 1987, 23(2): 105—110.
- [10] Lai Yuanming, Liu Songyu, Wu Ziwang, *et al.* Approximate analytical solution for temperature fields in cold regions circular tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(1): 43—49.
- [11] He Weiwei, Sheng Yu. Numerical analyses of thermal effect of ventilation on the surrounding rock of shaft in permafrost regions ( I ): Airflow temperature varying in an intake shaft [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 177—185. [何维维, 盛煜. 矿井通风对多年冻土井筒围岩热影响的数值分析( I ):入风井筒风温的变化规律[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 177—185.]
- [12] Jia Xiaoyun, Zhu Yongquan, Li Wenjiang. Study of the temperature field of the surrounding rock during the tunnel construction in permafrost regions[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2003, 1(4): 42—45. [贾晓云, 朱永全, 李文江. 多年冻土区隧道施工过程中围岩温度场研究[J]. 国防交通工程与技术, 2003, 1(4): 42—45.]
- [13] Ding Min. Distribution of Temperature Field and Analysis of Coupled Problem with Stress Field in the Seasonally Frozen Soil Tunnel [D]. Master Thesis, Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. [丁敏. 季节性冻土隧道温度场分布及与应力场耦合问题研究[D]. 硕士学位论文, 重庆: 重庆交通大学, 2008.]
- [14] Lü Lanzhi, Jin Huijun, Chang Xiaoli, *et al.* Interannual variations of the air temperature, surface temperature and shallow ground temperature along the China-Russia crude oil pipeline [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 794—802. [吕兰芝, 金会军, 常晓丽, 等. 中俄原油管道工程(漠河大庆段)沿线气温、地表和浅层地温年际变化特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 794—802.]
- [15] Zhang Jianrong, Liu Zhaoqiu. A study on the convective heat transfer coefficient of concrete in wind tunnel experiment [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 39—42, 61. [张建荣, 刘照球. 混凝土对流换热系数的风洞实验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 39—42, 61.]
- [16] Li Enying, Dai Jingbo. Determination of maximum seasonal thawing depth of the permafrost in northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(4): 39—43. [李恩英, 戴竞波. 东北多年冻土最大季节融化深度的确定[J]. 冰川冻土, 1981, 3(4): 39—43.]

## Numerical Analyses of Thermal Effect of Ventilation on the Surrounding Rock of Shaft in Permafrost Regions ( II ):

### Surrounding Rock Temperature Varying of an Intake Shaft

HE Wei-wei<sup>1, 2</sup>, SHENG Yu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd, Shanghai 20032, China)

**Abstract:** Mining in permafrost regions with ventilation will change the heat balance of the surrounding rock of shaft, the upper limit of permafrost and the seasonal-thawing depth of permafrost around the shaft. The stability of shaft lining structure will be affected by the heat balance change. So it is necessary to study the permafrost temperature field changing with mining ventilation. Based on finite element analysis software ANSYS, a two-dimensional calculation model has been established in terms of mining conditions, position of test stope

as well as mining ventilation effect range of a coalfield located in permafrost region. The temperature characteristics of the surrounding rock of shaft in permafrost have been numerically analyzed using the enthalpy-based finite element method. The thermal effect of mining ventilation on the surrounding rock is analyzed. The calculation methods and results are valuable for the following shaft support design of underground mining in permafrost regions.

**Key words:** mining ventilation; numerical simulation; surrounding rock of shaft; thermal influence