

文章编号: 0253-9993(2007)01-0024-05

渗流地层人工冻结温度场和渗流场之数值研究

周晓敏¹, 肖龙阁^{2,3}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071
3. 中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009)

摘要: 提出了地层冻结过程的渗流场和温度场的耦合机理和渗透系数的耦合作用, 建立了冻土和融土统一的微分方程数学模型, 对冻、融土的热参数渗流系数进行了光滑的曲线回归, 解决了非线性耦合有限元数值计算难题, 实现了渗流地层人工冻结过程的数值仿真技术, 数字可视化地研究了在渗流作用下的井筒冻结温度场和渗流场分布和发展规律。

关键词: 渗流地层; 温度场; 耦合场; 有限元

中图分类号: TD265.34 TU445 **文献标识码:** A

Numerical research on the temperature and seepage fields of artificial seepage ground freezing

ZHOU Xiaomin¹, XIAO Longge^{2,3}

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy Science, Wuhan 430071, China; 3. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, China)

Abstract Put forwards the mechanics of coupled fields of seepage and temperature field, proposed the coupling function of the variable of seepage coefficient, set up united differential equations for frozen and unfrozen soil. With the thermal and seepage parameters of frozen or unfrozen soil smoothly regressed, the non-linear and coupled finite element methods (FEM) problem were successfully solved, and the FEM simulation technology was actually realized, thus the distribution and development of temperature and seepage field and the formation progress of shaft ice-wall in the seepage ground were studied visually and numerally.

Key words seepage ground; temperature field; coupled fields; finite element methods (FEM)

冻结法是目前矿山凿井广泛应用的特殊凿井工艺, 用于解决流砂、淤泥等松软表土地层的加固, 传统的冻结壁温度场分析主要以纯相变导热方程为基础, 没有考虑水渗流作用的影响^[1,2], 在自然的水流梯度条件下, 地下水流速度一般不会超过 4 m/d ^[1], 不考虑水流影响的温度场计算基本能满足工程的需要。但近几十年以来, 人类生产活动的强度加大, 使得矿井建设的水文地质条件日趋复杂, 例如 2004 年, 内蒙古建昌营矿 2 号主井由于周边露天煤矿的持续降水, 井筒积极冻结法 128 d 尚未能交圈, 后采取地层灌浆降低水流速度和双排加密冻结孔才得到解决。

在 20 世纪 70 年代, 日本学者高志勤就曾考虑用水渗流作用研究地层冻结的解析理论^[3], 由于渗流场和温度场耦合作用的复杂性, 研究进展缓慢。现代数值计算技术的发展, 为多场非线性耦合的渗流地层冻

收稿日期: 2006-08-15 责任编辑: 柴海涛

作者简介: 周晓敏 (1963-), 男, 江苏金坛人, 教授, 博士。Tel: 010-62334098 E-mail: zhouxiaomin_cn@yahoo.com

结理论问题提供了研究手段。

1 渗流地层人工冻结的基本理论

人工地层冻结涉及到温度场、应力场和渗流场的 3 场耦合问题，但这里主要研究温度场和渗流场。

1.1 渗流微分方程

渗流场一般以达西定律为基础，对于二维非稳态渗流问题有

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(T) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(T) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = \mu_s \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad v_x = -K(T) \frac{\partial H}{\partial x}, \quad v_y = -K(T) \frac{\partial H}{\partial y}$$

式中， T 为温度场量； H 为水头场函数； $K(T)$ 为渗透系数； μ_s 为承压含水层的释水率，其物理意义是：水头变化 1 个单位时，单位体积含水层因水体积膨胀和骨架压缩而释放的水的体积， $\mu_s = (\alpha + \phi\beta) \rho_w$ ，其中 α 、 β 分别为土颗粒和水的压缩系数， ϕ 为孔隙率； x 、 y 为平面位置坐标， τ 为时间坐标； v_x 、 v_y 为渗流速度。

1.2 传热能量微分方程

和其他多孔介质的传热传质过程一样，对于地下水渗流下的二维的传热过程，用以下能量方程描述^[4]，即

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} [\rho_s C_s(T)] = \lambda_s(T) \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - \rho_w C_{wp} \left[v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right]$$

式中， ρ_w 、 C_{wp} 分别是水的密度和比热； ρ_s 、 $C_s(T)$ 、 $\lambda_s(T)$ 分别为饱和土的视密度、比热和导热系数。

1.3 耦合分析

在进行上述方程的数值计算时，必须考虑温度、渗流、应力三者之间的影响，即耦合作用关系，并讨论其方程的适用条件，研究上述方程的数值计算时，可以发现以下难点：

- (1) 达西定律是移动边界，不满足固液界面换热的边界条件；
- (2) 传热方程由于冻土和非冻土的差异而形成区域的移动边界，对数值计算很不方便；
- (3) 相变潜热和耦合数值计算是复杂的非线性耦合问题，数值计算难以收敛。

为此采取以下解决方法：

(1) 应力场对温度场的影响忽略不计，有关研究表明^[5]，应力场仅仅影响到冻结温度，但变化量不大，而温度场受到渗流场的影响较大，因此可仅仅考虑渗流对温度场的作用；

(2) 渗流场对温度场和应力场均有较大的影响。温度的改变影响水的黏度，应力场的改变将影响到土体孔隙率的改变，从而影响到地层的渗流特性。因此渗透系数能综合体现温度场和应力场对渗流的耦合作用。

在融土常温区，地层的渗流速度可假设近乎常渗流速度，即所谓的势流。在降温区和冻土峰面附近，

由于渗透系数的降低，渗流近乎边界层内的黏性流动，表现出接近冻土时渗透系数急剧降低，到冻土区渗透系数接近零。渗透系数在冻土峰面附近随温度的函数关系和边界层理论一致^[6,7]。如图 1 所示，渗透系数可简化为温度的函数，为确保数值计算的收敛性，渗透系数和温度的关系用指数光滑曲线 $K(T)$ 来拟合： $K(T) = K_u / (1 + e^{-\frac{T-A}{B}})$ ，其中 A 、 B 为回归参数； K_u 为融土区渗透系数，实验及参数回归参见文献 [6] 第 4 章。

(3) 冻土和融土的热物理参数和渗透系数用统一的自然指数函数来拟合，从而实现从冻土区到融土区方程的统一。从融土到冻土，土的密度 ρ_s 、比热 $C_s(T)$ 、导热

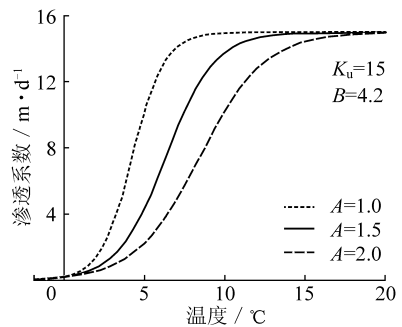


图 1 渗透系数随温度变化的回归指数曲线

Fig. 1 Regression exponential curve of seepage coefficient with change of temperature

系数 $\lambda_s(T)$ 分别用下列函数逼近, 即

$$\begin{aligned} \text{土视密度: } \rho_s &= \begin{cases} \rho_s & (T \leq T_s), \\ \rho_f + (\rho_u - \rho_f) \text{smooth}(T, \delta T) & (T_s \leq T \leq T_1), \\ \rho_l & (T \geq T_1), \end{cases} \\ \text{导热系数: } \lambda_s &= \begin{cases} \lambda_s & (T \leq T_s), \\ \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) \text{smooth}(T, \delta T) & (T_s \leq T \leq T_1), \\ \lambda_l & (T \geq T_1), \end{cases} \\ \text{比热参数: } C_s &= \begin{cases} C_s & (T \leq T_s), \\ C_{pf} + (C_{pu} - C_{pf}) \text{smooth}(T, \delta T) + L_m \text{Deta}(T) & (T_s \leq T \leq T_1), \\ C_l & (T \geq T_1), \end{cases} \end{aligned}$$

式中, $T_s = T_f - \delta T/2$, $T_1 = T_f + \delta T/2$, T_f 为冻结温度; δT 为冻结缘的温度区间长度; ρ , λ , C 分别为密度、导热系数和比热; 下标 u 和 f 分别指常温饱和融土和冻土; L_m 为每立方冻土中水的潜热, kJ/kg

$$\text{smooth}(T, \delta T) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{T}{\delta T} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{T}{\delta T}} e^{-x^2} dx \right], \text{Deta}(T, \delta T) = \frac{1}{\sqrt{\delta T^2 \pi}} e^{-\frac{x^2}{\delta T^2}}$$

和 $\text{Deta}(T, \delta T)$ 曲线特征如图 2 所示.

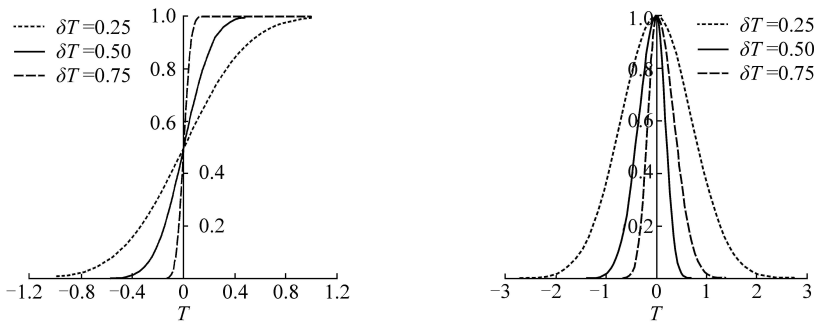


图 2 误差函数与正态分布函数

Fig 2 Error function and normal distribution function curves

2 仿真模型设计和定解条件的确定

进行渗流地层的冻结过程仿真求解, 首先确定仿真区域的几何尺寸. 这是个多连通区域, 由外边界和内边界组成. 内边界取冻结管的外径, 外边界取大于冻结器降温作用所能波及到的地层温度变化和水渗流变化的最大范围.

初始条件: 地层的初始温度场为该工程地区的平均地温 T_∞ , 初始渗流速度取实际平均地下水渗流速度 v_∞ : $T(x, y, \tau=0) = T_\infty$; $v(x, y, \tau=0) = v_\infty$. 边界条件: 温度场一般给定第 1 类边界条件: $T_\Gamma = T_\infty$; 渗流场上下游边界上, 设置第 1 类边界条件, 即实际水头 H_1 和 H_2 : $H(0, y_1, \tau) |_{\Gamma_1} = H_1$; $H(0, y_2, \tau) |_{\Gamma_1} = H_2$. 在平行渗流场流线边界 Γ_2 上设定第 2 类边界条件: $v_n(x_1, 0, \tau) |_{\Gamma_2} = 0$; $v_n(x_2, 0, \tau) |_{\Gamma_2} = 0$

3 仿真实例分析

某立井井筒净直径为 5 m, 冻结法施工, 含水层为中砂, 冻结孔布置圈径为 10 m, 冻结孔数为 20 个, 冻结孔平均孔间距 1.57 m, 地下水平均渗流速度为 3.74 m/d, 冻结管外径 146 mm, 管壁温度为 -26°C , 分析其冻结壁形成时的温度场和渗流场.

以井筒中心为原点, 地下水流方向为 Y 轴的负方向, 模型的几何尺寸, 以 Y 轴 ($X=0$) 为对称轴, $X=$

25 为右侧边界，上游 $Y=25\text{ m}$ ，下游 $Y=-35\text{ m}$ 。井筒冻结 30 60 d 的冻结壁和渗流场耦合计算仿真如图 3 所示。

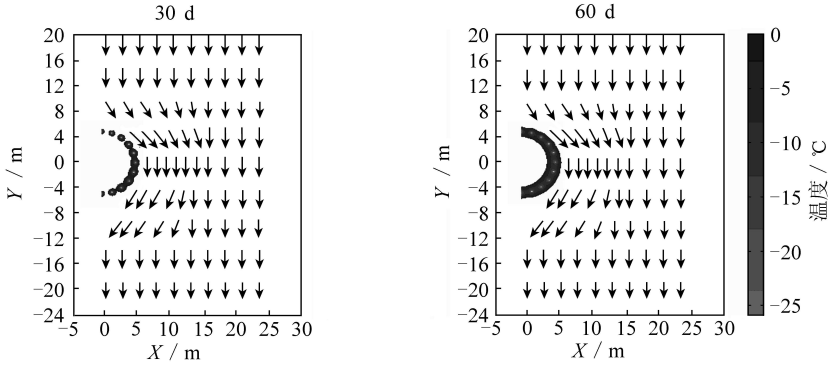


图 3 井筒冻结 30 和 60 d 的冻结壁温度场和渗流场

Fig. 3 Frozen - soil in seepage ground of shaft in 30 and 60 days freezing

图面云图表示温度 箭头表示速度场；最高温度为 0 最低温度为 $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.1 冻结壁交圈时间

在渗流场的作用下，均布冻结孔不再同时交圈，首先交圈的是中游，22.24 d 其次是下游，38.10 d 最后是上游，41.64 d 这些界点的温度下降速度如图 4 所示。

3.2 冻结壁温度场

分别取井筒的上游、中部和下游的主面，分析冻结壁的温度场分布情况（图 5）。可以看出和无水流影响的冻结壁温度场不同，温度分布和所处在渗流场中的位置有关。在上游，布置圈的内外侧的冻结壁厚度发展很不均等，外侧的温度梯度大，冻结壁厚度增加缓慢，融土区的温度几乎不随时间变化（图 5（a））；中游主面的温度分布规律和上游比较接近，只是外侧冻结壁增长速度较上游快，而融土区的温度也几乎不随时间而降低（图 5（b））。在下游，冻结初期的内外侧厚度较接近，但随着冻结时间增加，内侧厚度增加较外侧快，外侧的冻土和融土的温度梯度都能随时间的变化而变化，接近无渗流地层的冻结的温度分布（图 5（c））。

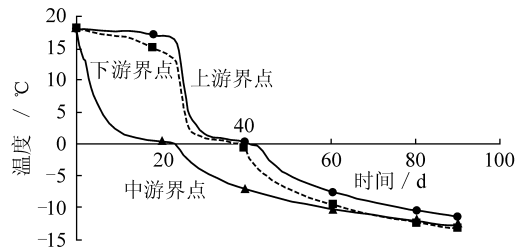


图 4 上、中、下游界点的降温过程

Fig. 4 Temperature dropping process at different key points

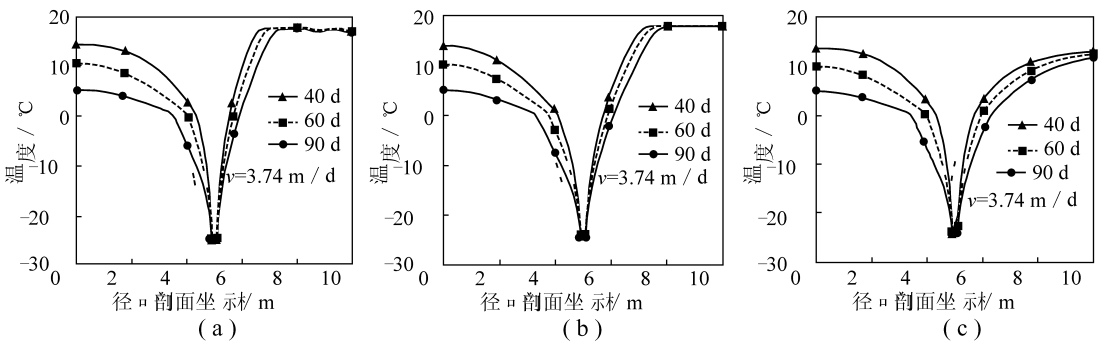


图 5 上、中、下游主面地层温度场曲线

Fig. 5 Temperatur curves in upeward middle and backward main section

3.3 冻结过程中的渗流场分布

图 6 为在井筒 X 轴线上，冻结过程中地层渗流速度分布及随冻结时间的变化。没有异常时，在冻结

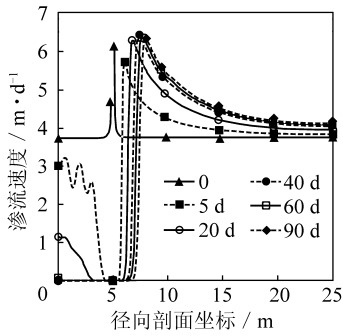


图 6 井筒冻结过程中渗流场的变化 ($Y=0$ 剖面)

Fig. 6 Change of seepage field during shaft ground freezing ($Y=0$ section)

孔布置圈径内, 井内水渗流速度下降很快, 但越接近井筒中心, 流速降低的时间越长. 在冻结孔布置圈径外, 冻结壁峰面位置附近的地层流速急剧增高. 随着冻结壁的向外扩展, 冻土峰面速度的增加幅度逐渐增大.

4 结 论

渗流地层的人工冻结过程是一个很强的非线性的多场耦合过程, 传统的温度场理论不能解决地下水对冻结壁形成的危害问题. 在渗流地层人工冻结过程的数值计算中, 将渗透系数作为一个耦合参量, 能综合解决温度场和应力场对渗流场的耦合作用, 对土的渗透系数、热特性参数采用自然指数形式进行光滑拟合, 不仅解决了

固液边界对流换热问题, 而且将冻土和融土整合在统一的温度场和渗流温度场控制方程中, 成功解决耦合问题和非线性收敛问题. 渗流场和温度场的两场耦合数学模型能较好地解决地层冻结过程数值仿真, 这对于研究地下水对冻结壁发展的影响和防止冻结壁不交圈事故提供了最新的信息化手段.

参考文献:

- [1] 特鲁巴克. 冻结法凿井 [M]. 北京矿业学院井巷教研组, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1958
- [2] 张 燕. 预报冻结壁形成及其温度分布的有限元方法 [J]. 煤炭学报, 1979 4 (2): 30~37.
- [3] 高志勤. 凍結管列の凍結結合に対する地下水流の影響について [A]. 地盤凍結工法 1論文報告編 [C]. 日本, 大阪: 精研株式会社, 1969
- [4] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [5] 崔广心, 李 毅. 含水土结冰温度的初步研究 [J]. 冰川冻土, 1993 15 (2): 317~321.
- [6] 周晓敏. 渗流地层人工冻结壁形成规律的模型试验和耦合场有限元仿真研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2005
- [7] 陈卓如, 金朝铭, 王洪杰, 等. 工程流体力学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004

重要启事

近几年, 《煤炭学报》收到的论文越来越多, 为了刊出更多的优秀论文, 缩短出版周期, 2007年, 《煤炭学报》将由双月刊 (136页) 改为月刊 (112页); 《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版) 由半年刊改为季刊, 欢迎大家踊跃投稿.

本刊编辑部