

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0721

# 低温裂隙岩体水-热耦合模型研究及数值分析

黄诗冰<sup>1,2</sup>, 刘泉声<sup>3</sup>, 程爱平<sup>1,2</sup>, 刘艳章<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 裂隙渗流会引起裂隙周围岩体中的温度场变化, 在低温岩体中其影响更为明显; 此外, 裂隙水与周围低温岩石介质发生热交换会引起裂隙中的水冰相变过程发生, 而裂隙水冻结将阻碍裂隙渗流, 引起裂隙渗流场的变化。因此, 低温下的裂隙岩体水-热相互作用是一个强耦合过程。考虑裂隙中的水冰相变过程和渗流作用, 建立了低温冻结条件下裂隙岩体水-热耦合模型; 以冻结法施工为例, 考察了低温冻结过程中裂隙水渗流对裂隙冻结交圈的影响。研究表明: 由于裂隙渗流的存在, 距裂隙较远处岩石先冻结, 裂隙冻结所需时间远大于周围岩石; 裂隙宽度和裂隙水压力差都会影响冻结交圈时间, 裂隙越宽、水压力差越大, 裂隙冻结需要时间越长; 随着冻结时间的推进, 裂隙水渗流速度逐渐降低, 当裂隙冻结后裂隙渗流停止。最后通过构建随机裂隙网络模型, 利用所建立的水-热耦合模型考察了裂隙网络渗流对冻结交圈的影响, 说明了在冻结法施工中考虑裂隙的重要性。

**关 键 词:** 低温裂隙岩体; 水-热耦合; 裂隙渗流; 水冰相变; 冻结法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)02-0735-10

## A coupled hydro-thermal model of fractured rock mass under low temperature and its numerical analysis

HUANG Shi-bing<sup>1,2</sup>, LIU Quan-sheng<sup>3</sup>, CHENG Ai-ping<sup>1,2</sup>, LIU Yan-zhang<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Fracture seepage can result in a change of temperature fields of rock around cracks, which is more apparent in particular under low temperature. In addition, heat exchange between fracture water and the cold rock medium may induce water/ice phase transition in fractures. The generation of solid ice prevents water from flowing in fractures, which leads to a change of the seepage field of fractured rock mass. Thus, this hydro-thermal coupling action of fractured rock mass under low temperature is extreme. By considering water/ice phase transition and fracture seepage, a coupled hydro-thermal model is developed for fractured rock mass under low temperature. To illustrate the influence of fracture flow on the freezing process, an example of the artificial freezing method is investigated. The results show that the rock medium far from fractures is frozen earlier for fracture flow and the completed freezing time of seepage fractures are more than that of rock medium. Both the fracture width and delivery head of fracture water affect completed freezing time. The completed freezing time increases with the increase of fracture width and delivery head of fracture water. The seepage velocity in fracture gradually decreases along with freezing time, and the fracture seepage stops after fracture water is frozen. Finally, by building a stochastic fracture network model, the impact of seepage in fracture network on the freezing process is studied using the proposed coupled hydro-thermal model. The calculated results indicate the significance of considering fracture seepage during artificial ground freezing.

**Keywords:** fractured rock mass under low temperature; hydro-thermal coupling; fracture seepage; water/ice phase transition; artificial freezing method

## 1 引 言

实际工程岩体中都存在着大量的裂隙, 裂隙岩体

传热-渗流耦合问题也一直是当前的研究热点<sup>[1-3]</sup>。

显然, 裂隙水迁移对岩石基质中的温度场会产生较大影响, 对于寒区低温裂隙岩体而言, 由于在降温

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 41702291, No. 51604195); 湖北省自然科学基金项目 (No. 2015CFA142)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41702291, 51604195) and the Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA142).

第一作者简介: 黄诗冰, 男, 1989年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学与矿业工程方面的教学与研究工作。E-mail: huang1989.9@163.com

冻结过程中裂隙水相变会释放出大量的潜热,导致裂隙周围的温度下降相对较慢。在冻结法施工中,裂隙水渗流会引起冻结交圈困难,严重的还可能引起淹井事故<sup>[4]</sup>。此外,液化气低温地下储存,也会面临裂隙渗流的不利影响。裂隙渗流不仅对储存硐室低温冻结成环不利,还可能导致液化气泄漏<sup>[5-6]</sup>。因此,准确描述低温裂隙岩体水-热耦合过程对指导冻结法施工参数优化设计以及保障液化气储藏硐室稳定与安全至关重要。

然而现有低温水-热耦合过程的研究主要针对无裂隙下的完整岩土体。其中,谭贤君等<sup>[7-8]</sup>建立了低温孔隙介质水-热耦合模型并成功地应用于寒区隧道防冻层设计;白青波等<sup>[9]</sup>考虑冻土中水分迁移与温度的相互影响,利用非饱和土渗流和热传导理论,建立了冻土水-热耦合模型;Vitel等<sup>[10]</sup>为研究地下水渗流速度对冻结交圈的影响,建立了岩土介质低温冻结条件下的水-热耦合模型;刘泉声等<sup>[11]</sup>曾尝试采用双孔介质模型建立了低温裂隙岩体THM耦合模型,暂时没有考虑裂隙渗流对冻结温度分布的影响;申艳军等<sup>[12]</sup>考虑裂隙中的水冰相变过程对地表中的裂隙岩体温度场和冻胀过程进行了数值分析,也暂时没有考虑裂隙渗流的作用。

可见,现有关于低温水-热耦合过程的研究很少考虑裂隙渗流与裂隙水冰相变的作用。为了探究裂隙对低温水-热耦合过程的影响,本文首先充分考虑裂隙的渗透性和裂隙水冰相变特性,建立了裂隙岩体低温水-热耦合模型,由于是初步的研究工作,所以本文研究主要针对二维水-热耦合问题展开,并考虑了低温下水分冻结引起的裂隙岩体渗透性变化以及裂隙渗流对岩体温度场的影响。最后以冻结法施工为例,考察了单裂隙围岩中裂隙宽度以及水头压力差等对围岩温度场和裂隙冻结时间的作用规律;进而利用MATLAB编制随机裂隙网络生成程序,构建裂隙网络模型,计算了裂隙网络对岩体冻结交圈过程的影响。本文研究可为指导人工冻结法施工、低温液化天然气(LNG)地下储存以及寒区裂隙岩体冻融圈大小等低温工程建设提供指导。

## 2 水-热耦合模型的建立

### 2.1 基本假定

基于一定的事实本文做如下假定:

(1) 由于实际裂隙宽度一般较小,因此,忽略裂隙宽度方向的温度梯度和压力梯度。

(2) 基质和裂隙中的渗流分别满足达西定律和立方定律。

(3) 基质和裂隙中的传热均满足傅里叶定律,基质与裂隙间的热交换满足牛顿冷却定律。

### 2.2 渗流场方程

相对于完整岩石而言,裂隙具有高渗透性和低热传导性的特征。未冻结部分的裂隙渗透性远远高于岩石部分,而当裂隙中的液态水冻结后,该段裂隙的渗透性迅速降低,由于裂隙冰完全填充,冻结后的裂隙渗透性降为0。因此,对于完整岩石和裂隙中的渗流场方程应该分别予以考虑。

在岩石内部没有源和汇的条件下,参考体内水冰质量变化等于流入(流出)参考体的未冻水质量:

$$f_s + f_{w+i} = 0 \quad (1)$$

$$f_{w+i} = \int_{\Omega} \frac{\partial(\rho_l w_u n)}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial[\rho_i(1-w_u)n]}{\partial t} d\Omega \quad (2)$$

$$f_s = \int_A \rho_l \mathbf{v}_l \cdot \mathbf{n} ds = \int_{\Omega} \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) d\Omega \quad (3)$$

式中:  $f_s$  为单位时间流入(出)液态水含量,可由散度定理得出;  $f_{w+i}$  为单位时间水冰质量变化;  $n$  为岩石孔隙率;  $\rho_l$  和  $\rho_i$  分别为水和冰的密度;  $w_u$  为岩石中未冻水体积含量;  $t$  为时间;  $\Omega$  和  $A$  分别为参考体体积和外表面积;  $\mathbf{v}_l$  为孔隙水渗流速度矢量;  $\mathbf{n}$  为参考体表面外法线矢量;  $s$  为参考体外表面。

将式(2)、(3)代入式(1)中,考虑到参考体的选择具有任意性,故积分函数为0,从而可得基质的连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho_l w_u n)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho_i(1-w_u)n]}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) = 0 \quad (4)$$

孔隙介质渗流采用达西定律描述,考虑分凝势的作用,孔隙水渗流速度矢量可表示为

$$\mathbf{v}_l = -\frac{k_r}{\mu_l} \mathbf{k}(\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}) - SP_0 \nabla T_r \quad (5)$$

式中:  $k_r$  为相对渗透率;  $\mu_l$  为水的黏度系数;  $\mathbf{k}$  为饱和岩石的渗透矩阵;  $p_l$  为孔隙水压力;  $\mathbf{g}$  为重力加速度矢量;  $T_r$  为岩石基质温度;  $SP_0$  为分凝势,在冻结点以上为0,在分凝区间  $-3 \sim 0$  °C 内取为  $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / (\text{C} \cdot \text{s})$ <sup>[13]</sup>。

将式(5)代入式(4),得岩石中渗流方程为

$$\frac{\partial(\rho_l w_u n)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho_i(1-w_u)n]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ -\rho_l \frac{k_r}{\mu_l} \mathbf{k}(\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}) - \rho_l SP_0 \nabla T_r \right] = 0 \quad (6)$$

对于低温裂隙渗流,冻结前裂隙中为液态水,而在冻结区间内为水冰混合物。由裂隙中水冰介质

质量守恒，同样可得到裂隙中的渗流方程为

$$\frac{\partial[\rho_1 w_u^c + \rho_i(1-w_u^c)]}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 v_1^c) = 0 \quad (7)$$

式中： $w_u^c$  为裂隙中的未冻水含量； $v_1^c$  为裂隙中的水分迁移矢量。

在已冻结段，裂隙水渗流停止，在未冻结段裂隙水渗流通量用立方定律描述为

$$Q = \frac{g}{\eta} \frac{w d_f^3}{12} J \quad (8)$$

式中： $Q$  为渗流量； $g$  为重力加速度大小； $\eta$  为运动黏度系数； $w$  为裂隙水流动区域的厚度； $d_f$  为裂隙宽度； $J$  为量纲为 1 的水力梯度。

显然渗流量与渗流速度存在以下关系：

$$Q = v_1^c \cdot w d_f \quad (9)$$

由式 (8)、(9) 可知，渗流速度可表示为裂隙中水力梯度的函数

$$v_1^c = \frac{g}{\eta} \frac{d_f^2}{12} J \quad (10)$$

水力梯度可用裂隙中水压力表示为

$$J = -\frac{1}{\rho_1 g} (\nabla p_c - \rho_1 g) \quad (11)$$

此外，运动黏度系数与动力黏度系数存在以下转换：

$$\mu = \rho_1 \eta \quad (12)$$

将式 (11)、(12) 代入式 (10) 中，裂隙水的渗流速度最终可表示为

$$v_1^c = -\frac{k_c}{\mu} (\nabla p_c - \rho_1 g) \quad (13)$$

式中：非冻结裂隙中的渗透率  $k_c = d_f^2 / 12$ 。

将式 (13) 代入式 (7) 中可得裂隙中渗流方程最终可表示为

$$\frac{\partial\{\rho_1 w_u^c + \rho_i(1-w_u^c)\}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ -\rho_1 \frac{k_c}{\mu} (\nabla p_c - \rho_1 g) \right] = 0 \quad (14)$$

### 2.3 温度场方程

在岩石内取一个参考体，参考体记为  $\Omega$ ，由参考体内能量守恒可知在无内部热源情况下：

$$Q_m + Q_{ph} = \bar{Q}_s + \bar{Q}_w \quad (15)$$

式中： $Q_m$ 、 $Q_{ph}$  为流入参考体和参考体内部相变产

生的热量； $\bar{Q}_s$ 、 $\bar{Q}_w$  为固体和液体介质温度升高需要消耗的能量。

由散度定理知单位时间内流入控制体热量为

$$Q_m = \int_A -q \cdot nds = \int_{\Omega} -\nabla \cdot q d\Omega \quad (16)$$

式中： $q$  为岩石内的热流密度矢量。

岩石内部水冰相变产生的热量为

$$Q_{ph} = -\int_{\Omega} \rho_1 \ell \frac{\partial w_u}{\partial t} nd\Omega \quad (17)$$

式中： $\ell$  为水冰相变潜热。

单位时间固体部分温度升高需要的热量为

$$\bar{Q}_s = \int_{\Omega} \left[ (1-n) \frac{d(\rho_s c_s T_r)}{dt} + n(1-w_u) \frac{d(\rho_i c_i T_r)}{dt} \right] d\Omega \quad (18)$$

不考虑固体介质流动，由连续介质力学中物质导数与局部导数的基本关系可得

$$\bar{Q}_s = \int_{\Omega} [(1-n)\rho_s c_s + n(1-w_u)\rho_i c_i] \frac{\partial T_r}{\partial t} d\Omega \quad (19)$$

同理可得单位时间液体部分温度升高需要的热量为

$$\bar{Q}_w = \int_{\Omega} n w_u \frac{d(\rho_l c_l T_r)}{dt} d\Omega = \int_{\Omega} \left[ n w_u \rho_l c_l \frac{\partial T_r}{\partial t} + (v_l \cdot \nabla)(n w_u \rho_l c_l T_r) \right] d\Omega \quad (20)$$

将式 (16)、(17)、(19)、(20) 代入式 (15) 中得岩石中温度场方程为

$$C_v \frac{\partial T_r}{\partial t} + \rho_l c_l v_l \cdot (\nabla T_r) + \nabla \cdot q = 0 \quad (21)$$

式中： $C_v$  为孔隙介质的等效热容； $c$  为比热容，下标 s、l、i 分别代表岩石、液态水以及固体冰介质。

根据傅里叶定律，热流密度与温度梯度成正比：

$$q = -\lambda_c \nabla T_r \quad (22)$$

式中： $\lambda_c$  为岩石部分等效热传导系数。

将式 (22) 代入式 (21) 中可得岩石部分的温度场方程为

$$C_v \frac{\partial T_r}{\partial t} + \rho_l c_l v_l \cdot (\nabla T_r) + \nabla \cdot (-\lambda_c \nabla T_r) = 0 \quad (23)$$

考虑裂隙水与岩石间的热交换，根据能量守恒定律，同样可得裂隙中的温度场方程为

$$d_f \left[ C_v^c \frac{\partial T_c}{\partial t} + \rho_l c_l v_1^c \cdot (\nabla T_c) + \nabla \cdot (-\lambda_c^c \nabla T_c) \right] = q_f \quad (24)$$

式中:  $C_v^c$  为裂隙中水冰介质等效体积热容;  $\lambda_c^c$  和  $T_c$  分别为裂隙中水冰介质等效热传导系数和温度;  $q_f$  为从裂隙上下表面岩石传入裂隙水冰介质中热量。

裂隙与岩石间以对流换热为主, 满足牛顿冷却定律, 陈必光等<sup>[14]</sup>指出对于天然裂隙厚度小于 1 cm 的裂隙, 可认为裂隙中介质温度与裂隙上下表面的岩石温度相等, 且裂隙与岩石之间的热传导由岩石中的温度梯度决定。因此, 对流换热方程可表示为

$$q_f = h(T_{rc} - T_{wi}) = \lambda_c \frac{\partial T_r}{\partial n_c} \quad (25)$$

式中:  $h$  为对流换热系数;  $T_{rc}$  为裂隙表面基质部分的温度;  $T_{wi}$  为裂隙中水冰介质的温度;  $n_c$  为裂隙面的外方向。

## 2.4 相关物理与热力学参数描述

### (1) 基本物理参数

液态水的黏滞系数是温度的函数, 可表示为

$$\mu = 2.1 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{1808.5}{T}\right) \quad (26)$$

水的密度是压力和温度的函数, 可表示为

$$\rho_l = \rho_{l0} [1 + \alpha_T(T - T_0) + \beta_p(p_l - p_0)] \quad (27)$$

式中:  $\rho_{l0}$  对应于压力为  $p_0$ 、温度为  $T_0$  时的水密度;  $T$  为温度;  $\alpha_T$  为水的热膨胀系数;  $\beta_p$  为水的压缩系数。

如果参考压强为标准大气压, 参考温度为 293.15 K (即  $p_0 = 101$  kPa,  $T_0 = 293.15$  K), 则水的热膨胀系数和压缩系数为  $\alpha_T = [-9(T - 273.15) - 80] \times 10^{-6}$ ,  $\beta_p = 5 \times 10^{-6}$ 。

### (2) 未冻水含量

无论是在岩体孔隙还是裂隙中未冻水含量都与冻结温度有关, 在低温下, 孔隙中的未冻水含量可表示为冻结温度的指数形式<sup>[15]</sup>

$$w_u = e^{M(T - T_f)} \quad (28)$$

式中:  $M$  为与孔隙半径分布有关的参数;  $T_f$  为体积水的冻结点, 且有  $T_f = 273.15$  K。

在裂隙中, 充分反映主要矛盾的前提下不妨假定裂隙水在冻结区间内逐渐均匀冻结。事实上, 裂隙中的水冰相变温度区间很小, 所以在进行裂隙冻胀模拟和计算时往往可不考虑裂隙水冻结过程的影响, 此时采用全区间等效热膨胀系数模拟方法是可行的<sup>[16]</sup>; 但如果研究不同降温时间下的水-热耦合过程, 则应该考虑裂隙水的冻结历时过程。因此, 为更加客观地模拟裂隙岩体的冻结过程以及避免温

度场和渗流场发生过于激烈的突变而导致计算不收敛, 本文将裂隙中的水冰相变限制在  $0 \sim -3$  °C 区间内, 冻结终了时有  $w_u^c = 0$ <sup>[17]</sup>。那么裂隙水的未冻水含量方程可表示为

$$w_u^c = \begin{cases} 1, & T > 273.15 \text{ K} \\ \frac{T - 270.15}{3}, & 270.15 \text{ K} \leq T \leq 273.15 \text{ K} \\ 0, & T < 270.15 \text{ K} \end{cases} \quad (29)$$

### (3) 渗透系数

对于低温岩土介质而言, 冻结区和未冻区的渗透系数相差较大, 由于冻结区的渗透性很小, 在以往文献中冻结区的水分迁移通常不考虑。但事实上, 对于温度低于水冰相变点的已冻结区域, 岩石中也可能存在着大量的未冻水, 所以已冻区并不能总是当作非渗透区处理。Nishimura 等<sup>[18]</sup>认为, 低温岩土介质的相对渗透率是饱和度的函数可表示为

$$k_r = \sqrt{S_1} [1 - (1 - S_1^{1/\kappa})^\kappa]^2 \quad (30)$$

式中:  $\kappa$  为与岩石性质有关的参数, 取  $\kappa = 0.5$ ;  $S_1$  为岩石的饱和度。

因此, 对于未冻结岩土体  $S_1 = 100\%$ , 得到相对渗透率为  $k_r = 1$ 。而当岩土体完全冻结, 没有未冻水存在时  $S_1 = 0$ , 得到相对渗透率为  $k_r = 0$ 。因此, 对于冻结区的岩土体由于孔隙被冰体填充, 可不考虑其渗透性。

在冻结温度下的岩石饱和度即是在该温度下的岩石中未冻水体积含量:

$$S_1 = w_u \quad (31)$$

将式 (28)、(31) 代入式 (30) 中可得孔隙介质部分的相对渗透率与冻结温度的函数关系为

$$k_r = \sqrt{e^{M(T - T_f)}} [1 - (1 - e^{M(T - T_f)/\kappa})^\kappa]^2 \quad (32)$$

对于裂隙而言, 只考虑贯通裂隙渗流过程, 当一条贯通裂隙中任意位置发生冻结时, 该裂隙从贯通状态转化为封闭状态, 认为此时裂隙中的渗透性降为 0; 裂隙渗透率可表示为冻结温度的函数, 用阶跃函数表示为

$$k_c = \begin{cases} d_f^2 / 12, & T_{c \min} \geq 273.15 \text{ K} \\ 0, & T_{c \min} < 273.15 \text{ K} \end{cases} \quad (33)$$

式中:  $T_{c \min}$  为该裂隙中的温度最小值。

### (4) 等效热传导系数

根据混合物理理论, 可采用指数加权模型描述低温岩石的等效热传导系数随冻结温度的变化规律为

$$\lambda_e = \lambda_s^{1-n} \lambda_1^{ne^{-MAT}} \lambda_i^{n(1-e^{-MAT})} \quad (34)$$

式中： $\lambda_s$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_i$  分别为岩石基质、水以及冰的热传导系数。

裂隙中水冰介质等效热传导系数可表示为

$$\lambda_e^c = \lambda_1^{1-w_u^c} \lambda_i^{w_u^c} \quad (35)$$

(5) 有效体积热容

对于已冻区和未冻区的热平衡方程的差别主要体现在相变项上，相变潜热在等效热容中予以考虑。孔隙岩石部分的等效体积热容可表示为

$$C_v = (1-n)\rho_s c_s + n(1-w_u)\rho_i c_i + nw_u\rho_l c_l + n\rho_l \ell \frac{\partial w_u}{\partial T} \quad (36)$$

裂隙中只有水冰介质，没有岩体基质项，因此，裂隙中的等效体积热容为

$$C_v^c = (1-w_u^c)\rho_i c_i + w_u^c\rho_l c_l + \rho_l \ell \frac{\partial w_u^c}{\partial T} \quad (37)$$

### 3 裂隙渗流-传热耦合过程分析

#### 3.1 单裂隙渗流

冻结法是目前矿山凿井中常用的特殊工艺，而地下水渗流对冻结过程中的温度场有着重要影响<sup>[19]</sup>。以往冻结法基本上应用在松散的连续岩土体中，所以关于冻结参数设计以及冷冻液与周围岩土体的热交换过程研究较多，但考虑裂隙渗流条件下的冻结过程以及裂隙对冻结参数的影响研究相对较少<sup>[20-21]</sup>。然而，对于裂隙水流速过快导致浆液凝固困难的矿井，冻结法却是惟一切实可行的工法<sup>[22]</sup>。因此，研究裂隙渗流与传热耦合下裂隙岩体冻结过程至关重要。周晓敏等<sup>[23]</sup>指出，随着人类生产活动强度加大，矿井建设中的水文地质条件更加复杂，当地下水较为发育或是冻结深度较大时，出现了冻结 128 d 都未能实现交圈的情况。高娟等<sup>[4]</sup>考虑了单裂隙渗流对冻结温度场分布的影响，认为裂隙的存在会对采用冻结法施工成井过程中的温度场和渗流场分布造成重要影响。

为了定量研究裂隙对岩体多场耦合过程的影响，在高娟等<sup>[4]</sup>的研究基础之上，充分考虑裂隙中的水冰相变作用，先以单裂隙为例，考察裂隙中水分渗流与冻结温度场之间的相互影响。

(1) 单裂隙冻结模型的建立

假定有两个冻结孔，半径皆为 0.15 m、间距为 1.57 m，有一条裂隙竖直从两个冻结孔中间穿过，研究冻结温度和裂隙渗流对两孔冻结交圈时间的影

响，计算区域选取为 10 m×10 m，结合以上水-热耦合模型，用 COMSOL 进行求解，基质部分在多孔介质渗流与传热模块实现，裂隙通过对线单元指定相应的偏微分方程实现。

温度与渗流边界条件为：计算区域初始温度 293.15 K，冻结过程中管壁温度一直保持为 248.15 K，左、右边界绝热封闭。上、下表面存在水头差 6 m，初始渗流水头取为 0。

单裂隙数值计算模型如图 1 所示，计算过程中岩石的物理力学参数取值如表 1 所示，水冰介质计算参数取值见表 2。

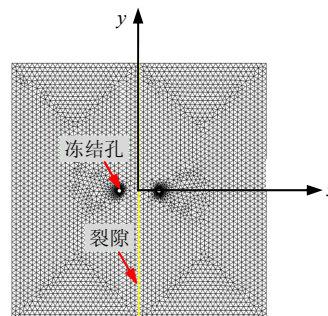


图 1 单裂隙岩体水-热耦合计算模型示意图

Fig.1 Schematic of calculation model of TH coupling process in rock mass with a single fracture

表 1 常温下围岩热力参数取值

Table 1 Values of physical and mechanical parameters of surrounding rock at room temperature

$n$	$\rho_s$	$\lambda_s$	$c_s$	$k_s$	$SP_0$	$M$
	/(kg/m <sup>3</sup> )	/(W/(m·K))	/(J/(kg·K))	/(m/s)	/(m <sup>2</sup> /(K·s))	/K
0.1	1 800	3	816	$7 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-9}$	0.36

表 2 常温水冰介质计算参数取值

Table 2 Values of calculation parameters of water/ice at room temperature

$\ell$	$\rho_l$	$c_l$	$c_i$	$\lambda_i$	$\lambda_1$
/(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	/(kg/m <sup>3</sup> )	/(J/(kg·K))	/(J/(kg·K))	/(W/(m·K))	/(W/(m·K))
$334.88 \times 10^3$	917	4 200	2 100	2.2	0.6

(2) 计算结果与分析

计算得到的不同隙宽中裂隙水渗流速度随冻结温度和冻结时间的变化关系如图 2、3 所示， $H$  为水头差。为比较不同隙宽下裂隙渗流速度变化规律，图 2、3 中纵坐标为裂隙渗流速度与隙宽平方的比值，为简便起见，本文称之为单宽流速，反映了单位宽度裂隙的渗流速度。由图可以看出，对不同宽度的裂隙而言，在同一冻结温度下其单宽流速相等，因此，单宽流速是与裂隙宽度无关的物理量。从图 2 中可以看出，在体积水冻节点 273.15 K 以上，裂

隙水单宽流速随着冻结温度的降低而逐渐减小，这主要是由于冻结温度降低导致水的动黏滞系数增大所致。随着冻结温度的进一步降低，达到冻结点以下时，裂隙水的单宽流速迅速降低为 0，主要是由于裂隙渗透率突变为 0，即裂隙水流动停止。从裂隙水单宽流速随冻结时间变化的关系图（见图 3）中同样可以看出，裂隙水渗流速度随着降温过程的进行先是逐渐减小，达到冻结点以下时急剧降低为 0，说明此时裂隙发生了冻结，冻结完成后裂隙水几乎不流动，但裂隙越宽，渗流速度越大，冻结所需时间越长。

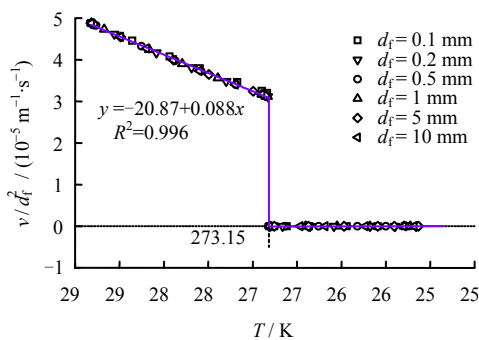


图2 裂隙水渗流速度随冻结温度变化 (H=6 m)  
Fig.2 Variation of seepage velocity in fracture with freezing temperature (H=6 m)

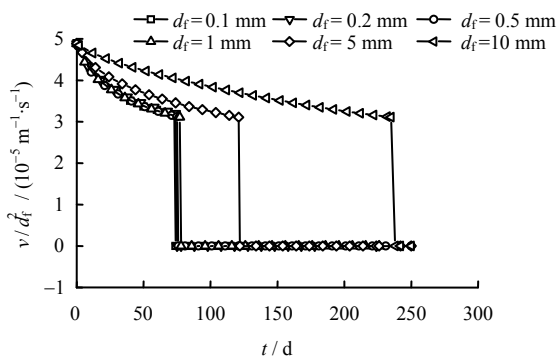


图3 裂隙水渗流速度随冻结时间变化 (H=6 m)  
Fig.3 Variation of seepage velocity in fracture with freezing time (H=6 m)

为了研究隙宽和水头压力对两孔冻结过程的影响，取不同宽度裂隙和不同水头差进行低温渗流-传热数值试验，试验结果分别如图 4~6 所示。从图 4 可以看出，裂隙中 (0, 0) 处的冻结温度随冻结时间的变化规律：在冻结点以上，裂隙中的温度逐渐降低，当裂隙温度达到冻结点后突然迅速下降，结合图 2、3 可知，这主要是由于在冻结点以下裂隙渗流过程停止所致。两孔冻结相交时间和裂隙初始渗流速度随隙宽的变化规律如图 5 所示，在水头差

为 6 m、隙宽在 0.1~3 mm 之间，随着隙宽增加，冻结交圈时间增加较慢，从 74~90 d，当隙宽大于 3 mm 时，冻结交圈时间随隙宽增加上升速率加快，裂隙初始速度也呈现加速增大趋势。从图 6 可以看出，当裂隙宽度为 1 mm、水头在 0.1~50 m 范围内时，水头差对冻结交圈时间的影响并不大，冻结交圈时间在 75~81 d；但对于水头为 0、0.1 m 两种情况，冻结交圈所需时间从 7 d 增加到 75 d，说明只要存在裂隙渗流过程，冻结交圈时间较长。可见，

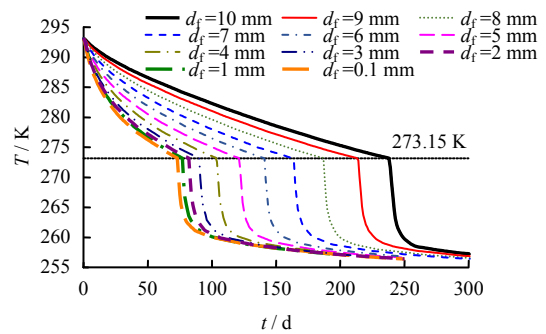


图4 不同隙宽中 (0, 0) 处温度随冻结时间变化 (H=6 m)  
Fig.4 Variation of temperature with freezing time at the point (0, 0) for fracture with different widths (H=6 m)

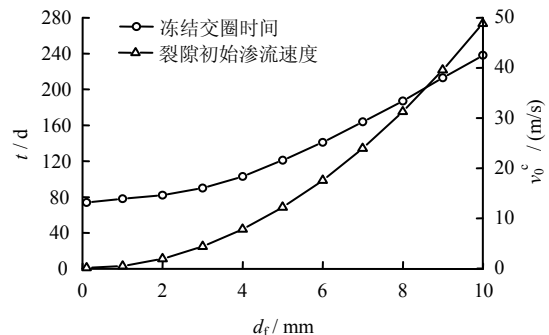


图5 裂隙宽度对冻结相交时间的影响 (H=6 m)  
Fig.5 Influence of fracture width on completed freezing time (H=6 m)

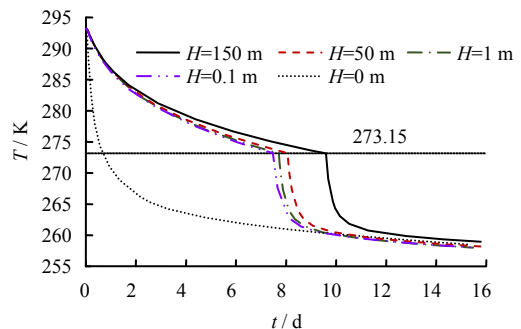


图6 不同压力水头下裂隙中 (0, 0) 处温度随冻结时间变化规律 (d=1 mm)  
Fig.6 Variation of temperature with freezing time at the point (0, 0) in fracture under different head pressures (d=1 mm)



图 2、3 和图 4~6 之间相互印证, 说明无论是裂隙宽度还是水头压力改变, 最终都表现为裂隙渗流速度的变化, 随着裂隙水冻结、渗流停止, 裂隙中的冻结温度会迅速降低, 而裂隙水冻结前由于渗流存在, 冻结相交过程较慢。

此外, 裂隙水冻结中会释放大相变潜热, 也会影响冻结交圈。图 7 为考虑裂隙水相变潜热对裂隙冻结过程的影响。通过对比可以看出, 考虑水冰相变潜热情况下裂隙冻结完成时间增加了 7 d, 可见相变潜热的释放会延长冻结所需时间, 但相对而言, 裂隙渗流速度影响较大, 对于隙宽为 0, 即没有裂隙渗流的情况, 冻结交圈时间为 7 d, 而相同条件下, 如果存在 1 mm 宽的裂隙冻结交圈时间增加至 77 d。因此, 冻结法施工中应特别注意裂隙渗流的作用。

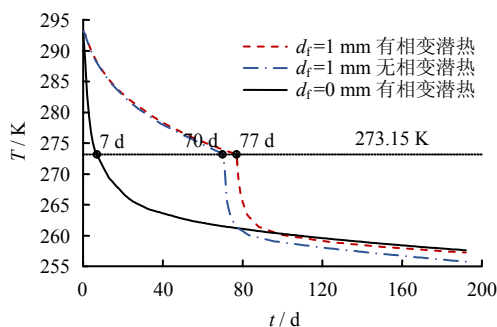


图 7 裂隙中相变潜热对裂隙冻结过程的影响 ( $H=6\text{ m}$ )

Fig.7 Influence of latent heat on freezing process in cracks ( $H=6\text{ m}$ )

为了反映冻结过程中冻结孔附近渗流场与温度场的变化规律, 分别绘制  $y=0$  处岩体中渗流速度与温度随冻结时间变化的关系曲线, 分别如图 8、9 所示。由于裂隙渗流速度远大于岩石, 因此, 图 8 中没有绘制裂隙处的渗流速度。可以看出, 随着冻结时间的进行, 冻结孔周围温度逐渐降低, 由于冻结孔周围温度降低引起孔隙水渗流速度急剧下降; 渗流终止区域不断增大代表冻结圈不停生长, 从图 9 中可以看出, 冻结 78 d 左右基本上发生了冻结交圈, 裂隙中温度低于 273.15 K。

### 3.2 裂隙网络渗流对冻结交圈的影响

得到单裂隙对岩体低温冻结过程中温度场和渗流场影响的一般规律后, 可进一步研究裂隙网络对低温岩体水-热耦合过程的影响。因此, 首先需建立裂隙网络化岩体多孔冻结数值计算模型, 进而利用本文提出的水-热耦合模型来定量计算裂隙网络对围岩冻结交圈过程的影响, 从而说明本文建立的裂隙岩体水-热耦合模型可靠性和实用性。

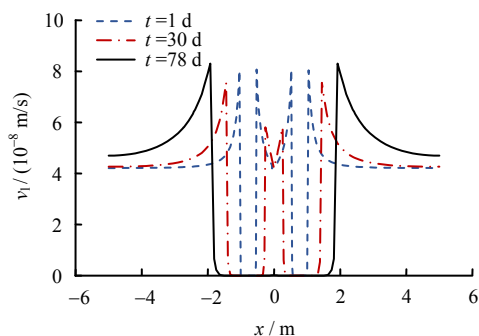


图 8 岩石中  $y=0$  处渗流速度分布 ( $d_f=1\text{ mm}$ ,  $H=6\text{ m}$ )

Fig.8 Distribution of seepage velocity in rock along  $y=0$  ( $d_f=1\text{ mm}$ ,  $H=6\text{ m}$ )

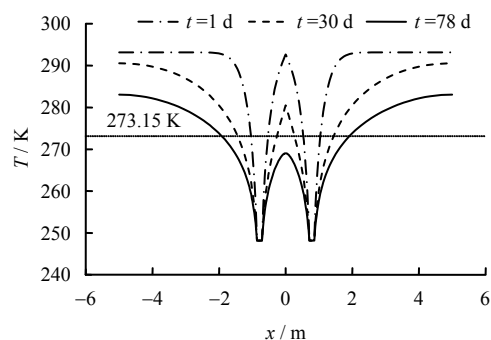


图 9 岩石中  $y=0$  处冻结温度分布 ( $d_f=1\text{ mm}$ ,  $H=6\text{ m}$ )

Fig.9 Distribution of freezing temperature in rock along  $y=0$  ( $d_f=1\text{ mm}$ ,  $H=6\text{ m}$ )

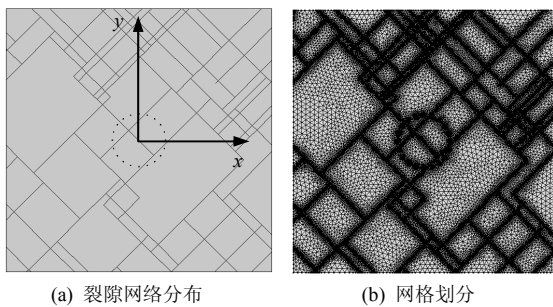
#### (1) 裂隙网络数值模型的建立

某立井井筒直径为 5 m, 布置 20 个冻结孔。其中冻结孔半径为 0.15 m, 冻结孔布置圈直径为 10 m, 平均间距为 1.57 m, 冻结管壁温度为  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算区域取  $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ , 上、下表面存在水头差 20 m, 左、右边界为绝热封闭条件。优势节理为两组正交裂隙, 倾角分别是  $45^{\circ}$  和  $135^{\circ}$ , 裂隙的宽度皆为 0.1 mm。裂隙网络建立思路如下: 首先利用 MATLAB 编制裂隙网络生成程序, 然后导入 AUTOCAD 中生成实体裂隙网络, 最后将形成的裂隙网络模型导入 COMSOL 中进行计算。其中裂隙中心点位置随机生成, 裂隙长度服从对数正态分布规律, 单位面积内的裂隙密度设置为  $0.01\text{ 条}/\text{m}^2$ ; 为避免边界的影响, 先生成  $80\text{ m}\times 80\text{ m}$  区域裂隙网络, 再截取  $50\text{ m}\times 50\text{ m}$  的裂隙网络区域进行计算分析; 考虑到孤立非贯通裂隙对计算结果影响较小, 在数值计算中删除此类裂隙。最终生成的裂隙网络以及网格划分情况如图 10 所示。裂隙统计分布结果见表 3。

#### (2) 计算结果分析

计算结果如图 11~13 所示。图 11 为裂隙岩体中  $y=0$  上的冻结温度分布, 可以看出, 由于裂隙渗

流的存在, 冻结温度沿横向分布并不光滑, 在与裂隙相交处冻结温度均发生了突变, 尤其在冻结圈内, 由于裂隙渗流的存在, 裂隙附近温度明显较高, 对于交点  $A$ 、 $B$  和  $C$  所在的裂隙  $L_A$ 、 $L_B$  和  $L_C$ , 冻结完成所需时间为  $t(L_A) > t(L_B) > t(L_C)$ , 这主要是由于裂隙  $L_A$  中的渗流速度较裂隙  $L_B$  和  $L_C$  大 (见图 12)。从图 12 还可以看出, 裂隙间的渗流过程会相互影响, 其中裂隙  $L_C$  首先冻结渗流停止, 同时引起相邻裂隙  $L_B$  渗流过程加快, 随后裂隙  $L_B$  冻结又会引起相邻裂隙  $L_A$  流速增加, 说明随着冻结过程的进行, 裂隙渗流场处于不断调整与动态平衡之中。



(a) 裂隙网络分布 (b) 网格划分  
图 10 裂隙网络模型数值计算示意图

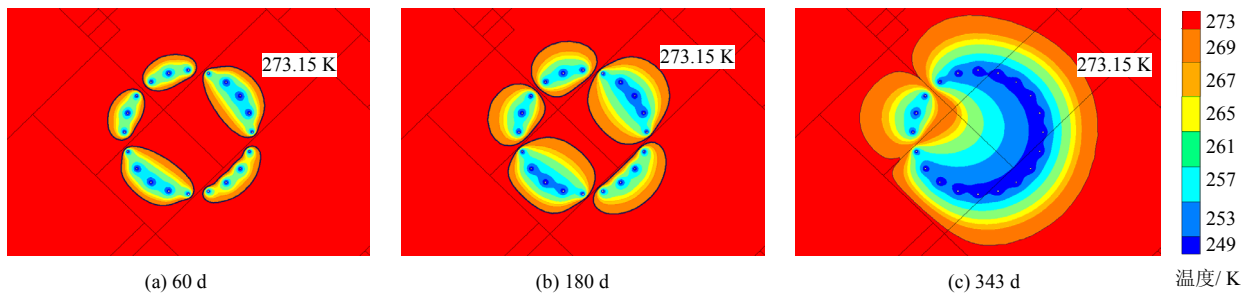
Fig.10 Schematic of numerical calculation of fracture network model

表 3 裂隙统计分布结果

Table 3 Statistical distribution results of cracks

裂隙组	走向		长度		密度 / $m^{-2}$	开度 / mm
	均值 / ( $^\circ$ )	方差	均值 / m	方差		
1	45	0	30	5	0.01	0.1
2	135	0	25	5	0.01	0.1

不同冻结时间下裂隙岩体温度场分布如图 13 所示, 受裂隙水渗流影响, 冻结孔降温 343 d 后才形成完整交圈。在岩体非裂隙区域冻结范围很大, 裂隙冻结相对较难。究其原因主要是: ①裂隙水冰相变会释放出大量潜热; ②此外更重要的是裂隙水渗流也会带来大量热量从而导致裂隙周围岩石难以



(a) 60 d

(b) 180 d

(c) 343 d

温度 / K

图 13 裂隙岩体冻结孔附近温度场分布云图

Fig.13 Nephograms of temperature distribution around freezing pipes in fractured rock mass

冻结, 破坏了冻结圈的形成。说明裂隙对冻结施工有着不可忽略的不利影响, 当围岩中裂隙较为发育时应考虑裂隙中水冰相变及裂隙水渗流的作用。

为了与裂隙网络化岩体冻结过程进行对比, 考察相同条件下完整岩石的低温冻结过程, 计算结果如图 14 所示。可以看出, 当围岩为不存在裂隙的完整岩石时, 在 7 d 左右基本上发生了冻结交圈, 可见裂隙网络渗流和水冰相变对冻结交圈的影响之大。因此, 对于裂隙围岩而言, 若不考虑裂隙水冰相变和裂隙渗流的影响可能导致冻结参数设计失败, 甚至引发淹井事故。

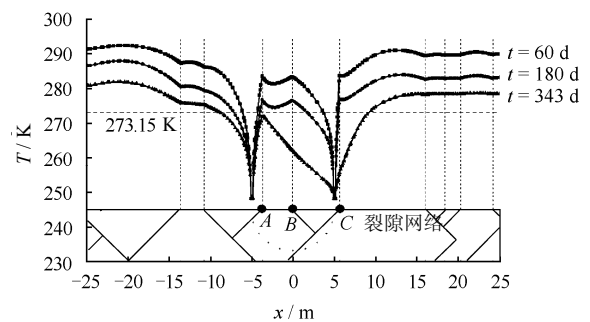


图 11 裂隙岩体中  $y=0$  处裂隙渗流对冻结过程的影响

Fig.11 Influence of fracture seepage on freezing process along  $y=0$  in fractured rock mass

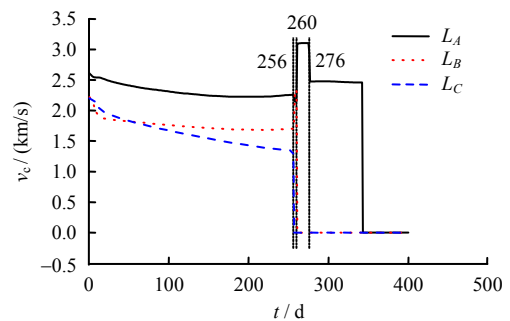


图 12 裂隙  $L_A$ 、 $L_B$  和  $L_C$  中渗流速度演化过程

Fig.12 Evolution process of fracture seepage for cracks  $L_A$ ,  $L_B$  and  $L_C$



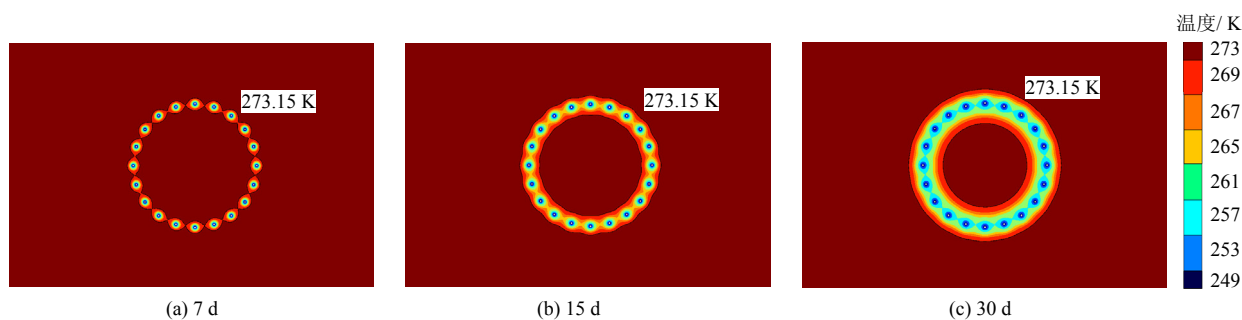


图 14 岩石温度场分布云图

Fig.14 Nephograms of temperature distribution in rock

## 4 结 论

(1) 考虑水冰相变与裂隙渗流，建立了低温裂隙岩体水-热耦合模型，该模型可较好地应用于低温裂隙渗流与冻结过程分析，并且能够定量计算裂隙岩体冻结交圈时间。

(2) 冻结温度场与裂隙渗流速度场之间的影响是一个强耦合作用过程，裂隙水冻结后渗流过程停止，裂隙渗流停止后降温速率迅速加快。

(3) 冻结法施工过程中，裂隙宽度和水头压力都会引起冻结交圈时间延长，但归根到底是渗流速度的影响，而裂隙中水冰相变释放潜热的影响相对较小。

## 参 考 文 献

- [1] 薛雯雯. 裂隙岩体渗流-传热耦合的复合单元模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 263-268.  
XUE Luan-luan. A composite element model for coupled seepage-heat[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 263-268.
- [2] 张勇, 项彦勇. 饱和稀疏裂隙岩体三维水流-传热过程中位移和应力的一种半解析计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3481-3490.  
ZHANG Yong, XIANG Yan-yong. A semi-analytical method for calculation of displacement and stress in processes of 3D water flow and heat transfer in a saturated sparsely fractured rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3481-3490.
- [3] 张玉军, 张维庆. 考虑双重孔隙-裂隙岩体中强度异向性的 THM 耦合有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2759-2766.  
ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. FEM analyses for THM coupling in dual-pore-fracture rock mass considering strength anisotropy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Supp.1): 2759-2766.
- [4] 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 Mei-mei, YANG Wei-hao. 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.
- [5] PARK E S, JUNG Y B, SONG W K, et al. Pilot study on the underground lined rock cavern for LNG storage[J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(1): 44-52.
- [6] 徐彬, 李宁, 李仲奎, 等. 低温液化石油气和液化天然气储库及相关岩石力学研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 2977-2993.  
XU Bin, LI Ning, LI Zhong-kui, et al. Low-temperature LPG storage caverns and related research review of rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Supp. 2): 2977-2993.
- [7] 谭贤君, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 含相变低温岩体水-热耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1455-1461.  
TAN Xian-jun, CHEN Wei-zhong, JIA Shan-po, et al. A coupled hydro-thermal model for low temperature rock including phase change[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1455-1461.
- [8] 谭贤君, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 考虑通风影响的寒区隧道围岩温度场及防寒保温材料敷设长度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1400-1409.  
TAN Xian-jun, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, et al. Study of temperature field of tunnel surrounding rock in cold regions considering effect of ventilation and length design of insulation material[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1400-1409.
- [9] 白青波, 李旭, 田亚护, 等. 冻土水-热耦合方程及数值

- 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 131—136.
- BAI Qing-bo, LI Xu, TIAN Ya-hu, et al. Equation and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(Supp.2): 131—136.
- [10] VITEL M, ROUABHI A, 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.
- [11] 刘泉声, 康永水, 刘滨, 等. 裂隙岩体水-冰相变及低温温度场-渗流场-应力场耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2181—2188.
- LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, LIU Bin, et al. Water-ice phase transition and thermo-hydro-mechanical coupling at low temperature in fractured rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(11): 2181—2188.
- [12] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 低温环境下含表面裂隙硬岩温度场及冻胀演化过程分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 521—529.
- SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, RONG Teng-long, et al. Analysis of evolution of temperature field and frost heaving in hard rock with surface cracks under low temperature environment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 521—529.
- [13] DUCA S, ALONSO E E, SCAVIA C. A permafrost test on intact gneiss rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 77: 142—151.
- [14] 陈必光, 宋二祥, 程晓辉. 二维裂隙岩体渗流传热的离散裂隙网络模型数值计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 33(1): 43—51.
- CHEN Bi-guang, SONG Er-xiang, CHENG Xiao-hui. A numerical method for discrete fracture network model for flow and heat transfer in two-dimensional fractured rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 33(1): 43—51.
- [15] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2000—2012.
- LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(10): 2000—2012.
- [16] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1572—1580.
- LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Numerical and theoretical studies on frost heaving pressure in a single fracture of frozen rock mass under low temperature[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(9): 1572—1580.
- [17] AROSIO D, LONGONI L, MAZZA F, et al. Freeze-thaw cycle and rockfall monitoring[M]//Landslide Science and Practice. Heidelberg, Berlin: Springer, 2013: 385—390.
- [18] NISHIMURA S, GENS A, OLIVELLA S, et al. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: Formulation and application[J]. **Geotechnique**, 2009, 59(3): 159—171.
- [19] MARWAN A, ZHOU M M, ABDELREHIM M Z, et al. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 75: 112—125.
- [20] 杨更社, 奚家米. 煤矿立井冻结设计理论的研究现状与展望分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 627—635.
- YANG Geng-she, XI Jia-mi. Review and prospects of research on freezing design theory of coal mine shaft[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(3): 627—635.
- [21] PIMENTEL E, PAPAKONSTANTINOUS, ANAGNOSTOU G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2012, 28: 57—69.
- [22] 张驰, 杨维好, 齐家根, 等. 基岩冻结新型单层井壁施工技术分析与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 337—346.
- ZHANG Chi, YANG Wei-hao, QI Jia-gen, et al. Construction technology and monitoring analysis of a new single-layer shaft lining in deep aqueous bedrock during freezing sinking[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 337—346.
- [23] 周晓敏, 肖龙阁. 渗流地层人工冻结温度场和渗流场之数值研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 24—28.
- ZHOU Xiao-min, XIAO Long-ge. Numerical research on the temperature and seepage fields of artificial seepage ground freezing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(1): 24—28.