法向应力下的裂隙岩体有效导热系数模型研究*

盛建龙[1,2],吴兵[1,2],王楠[3],杨晓亮[1,2],杨一宏[1,2]

(1.武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
2.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.国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要:深部隧道温度场及深部矿产资源开发均涉及岩体导热性能问题。针对法向应力下的裂隙岩体有效导热系数非线性变化规律,基于双弹簧Hooke模型与有效导热系数串并联理论,建立了法向应力作用下裂隙岩体有效导热系数理论模型,分析了模型参数对应力作用下的裂隙岩体有效导热系数的影响,并通过尼格隧道温度场变化的数值模拟结果,验证了该模型工程应用的可靠性。结果表明:理论模型预测结果与试验数据吻合较好;低应力条件下,裂隙岩体有效导热系数主要受软体孔裂隙闭合影响,有效导热系数随应力增大呈非线性增大;高应力条件下,裂隙岩体有效导热系数主要受硬体孔裂隙闭合影响,有效导热系数随应力增加呈近似线性缓慢增大;裂隙面与热传递方向夹角越大,相同应力条件下的岩体有效导热系数越小,随应力变化的非线性程度越高。数值模拟结果与实测数据的对比表明,完整岩体导热系数偏大,与应力无关的有效导热系数模型得到的有效导热系数值偏小,而法向应力与导热系数耦合模型得到的结果更符合实际测量值。

关键词:裂隙岩体;有效导热系数;双弹簧Hooke模型;应力;温度场;数值模拟

中图分类号:P314 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0150-09

Study on the Effective Thermal Conductivity Model of Fractured Rock Mass Under Normal Stress

SHENG Jianlong[1,2], *WU Bing*[1,2], *WANG Nan*[3], *YANG Xiaoliang*[1,2], *YANG Yihong*[1,2]

(1.College of Resources and Environmental Engineering,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;
2.Hubei Key Laboratory of Efficient Utilization and Agglomeration of
Metallurgical Mineral Resources, Wuhan, Hubei 430081, China;
3.Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430077, China)

Abstract: The temperature field of deep tunnels and the development of deep mineral resources involve the thermal conductivity of rock mass. For the nonlinear change rule of effective thermal conductivity of fractured rock mass under normal stress, based on the two-part Hooke's model and effective thermal conductivity series-parallel theory, a theoretical model of effective thermal conductivity of fractured rock mass under normal stress was established, and the influences of model parameters on the effective thermal conductivity of fractured rock mass under stress were analyzed. Through the numerical simulation results of the change of temperature field in Nigel Tunnel, the reliability in engineering application of the model was verified. The results show that, the theoretical model prediction results are in good agreement with the test data. The effective thermal conductivity of the fractured rock mass in the low stress stage is mainly affected by the soft part of the pore-slit closure, and increases nonlinearly with the increase of the stress. While the effective thermal conductivity of the fractured rock mass in the high stress stage is mainly affected by the hard part of the pore-slit closure, and increases slowly in an approximately linear manner with the increase of the stress. The larger the angle between the fracture surface and the direction of heat transfer, the smaller the effective thermal conductivity of the rock at the same stress, and the higher the degree of non-linearity with the stress change. Comparing the numerical simulation results with the measured data, the thermal conductivity of the intact rock mass is on the large side, the effective thermal conductivity obtained by the stress-independent effective thermal conductivity model is on the small side, and the coupling model of normal stress and thermal conductivity is more in line with the actual measured values.

* **收稿日期**:2024-12-24
基金项目:国家自然科学基金面上项目(42077243)
作者简介:盛建龙(1964—),男,湖南湘阴人,博士,二级教授,主要从事岩土工程、采矿工程等领域的研究工作。E-mail:wkdsjl@163.com

Key words: Fractured rock mass, Effective thermal conductivity, Two-part Hooke's model, Stress, Temperature field, Numerical simulation

0 引言

导热系数作为裂隙岩体的重要热力学参数之一,受裂隙岩体孔隙度、密度、含水率、温度等因素影响[1-4],在深部隧道、地下空间以及深部矿产资源开发等工程中,这些因素对岩体热力学状态起决定性作用[5-9]。裂隙岩体含有大量的孔隙与裂隙结构,显著增强了其导热各向异性和非线性[10-11],应力作用会进一步改变裂隙岩体的传热过程。然而,由于工程地质的复杂性,实际工程中测量深部裂隙岩体的导热系数十分困难。因此,构建裂隙岩体导热系数解析模型,对岩体工程热力学分析具有重要意义。

目前,裂隙岩体的有效导热系数模型主要分为两类,一类是并联模型,另一类是串联模型[12]。并联模型假设热传递方向与裂隙面平行,裂隙岩体包含固、液、气 3 种成分,则岩体有效导热系数为:

$$\lambda_e=\omega_s\lambda_s+\omega_w\lambda_w+\omega_g\lambda_g \tag{1}$$

式中:λ_e 为岩体有效导热系数;ω_s、ω_w、ω_g 和 λ_s、λ_w、λ_g 分别为岩石中固、液、气相的体积分数和导热系数。

串联模型假设热传递方向垂直于裂隙面,若裂隙岩体包含固、液、气 3 种成分,则岩体有效导热系数为:

$$\lambda_e=\left[\frac{\omega_s}{\lambda_s}+\frac{\omega_w}{\lambda_w}+\frac{\omega_g}{\lambda_g}\right]^{-1} \tag{2}$$

串、并联模型分别从理论上预测了裂隙岩体导热系数的上、下限[13],试验得到的结果大都处于两者之间。为了获得更准确的岩体有效导热系数,SCHN[14]提出混合使用两种导热模型并增加修正参数,这种方法获得的预测结果更加符合试验数据。然而,深部岩体往往承受较大的应力作用,使内部裂隙结构发生变化[15-16],从而改变裂隙岩体导热特性。因此,准确预测裂隙岩体有效导热系数还需要考虑应力的影响。

不少学者开展了应力作用下岩体导热系数研究,MAQSOODL 等[17]测量了大气压下的多孔固结砂岩的有效导热系数,试样的孔隙率在 8%~17% 之间;ABDULAGATOV 等[18]利用稳态热流法研究了应力变化对不同干燥岩体导热系数的影响,应力控制在 0.1~350 MPa;FU 等[19]研究了 4 种天然花岗岩样品在高压条件下的导热系数,最高应力到达了 1.5 GPa;GÖRGÜLÜ 等[20]通过稳态试验设备进行了岩体导热系数随压力变化的试验,结果表明,岩体导热系数随应力增大而增大。以上研究均根据试验结果提出了相关的非线性模型,用来描述岩体应力和有效导热系数之间的关系。然而,这些模型包含多个经验参数,缺少合理的物理意义,难以揭示裂隙岩体应力与导热系数的耦合机制。

郭平业等[21]认为压力对岩体有效导热系数的影响主要通过改变岩体内部的空隙结构。因此,裂隙岩体应力与导热系数耦合的本质在于合理描述孔裂隙变形与应力之间的关系。一般采用线弹性 Hooke 定律分析岩体应力-应变关系,然而众多研究表明,多数情况下的裂隙岩体应力-应变关系会表现出强烈的非线性行为[22-24]。LIU 等[25]在宏观尺度上提出了能够准确描述多孔及裂隙岩体变形的双弹簧 Hooke 模型(Two Part Hooke's Model,TPHM),该模型将裂隙岩体应变分为真实应变与工程应变两部分,准确描述了裂隙岩体的非线性弹性特征。

针对上述问题,本文基于串并联有效导热系数模型及 TPHM,仅考虑岩体压缩变形,推导干燥裂隙岩体法向应力与有效导热系数耦合的非线性理论模型,并通过现有试验数据验证该模型的准确性,对模型相关参数进行敏感性分析,进一步结合理论模型对 COMSOL 软件进行二次开发,实现深部岩体导热系数与应力场之间的响应,以期为地热开发、核废料深埋及寒区隧道等工程技术领域提供参考依据。

1 双弹簧 Hooke 模型

LIU 等[25]认为裂隙岩体当中一部分对应力敏感度较高,在低应力作用下变形相对较大,该部分称为"软"部分,遵循自然真实应变的胡克定律;而其他部分的弹性应变受应力作用影响小,称为"硬"部分,遵循工程应变的胡克定律,如图 1 所示。

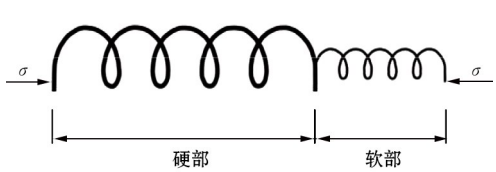


图 1 双弹簧复合系统

Fig.1 Two-part spring composite system

根据 TPHM 假设,可将裂隙岩体内部的孔裂隙总体积分为硬体孔裂隙体积与软体孔裂隙体积:

$$V=V_e+V_t \tag{3}$$

式中:V 为孔裂隙总体积;V_e、V_t 分别为硬体孔裂隙和软体孔裂隙的体积。同样地,本文中各物理量符号的下标 e 和 t 分别代表硬质部分和软质部分。

对于软体孔裂隙,受法向应力作用时,基于真实应变的胡克定律,可表达为:

$$\mathrm{d}\sigma=K_t\mathrm{d}\varepsilon_{v,t}=-K_t\frac{\mathrm{d}V_t}{V_t} \tag{4}$$

式中:K_t、$\varepsilon_{v,t}$ 分别为软体孔裂隙的体积模量和真实体积应变;σ 为孔裂隙所受到的有效法向应力。

对式(4)积分,且初始条件为 $\sigma=0$ 时,$V_t=V_{0,t}$,则,

$$V_t=V_{0,t}\exp\left(-\frac{\sigma}{K_t}\right) \tag{5}$$

式中:$V_{0,t}$ 为非应力状态下软体孔裂隙体积。同样地,本文中物理量符号的下标 0 均代表非应力状态。

对于硬体孔裂隙,受法向应力作用时,基于工程应变的胡克定律,可表达为:

$$\mathrm{d}\sigma=K_e\mathrm{d}\varepsilon_{v,e}=-K_e\frac{\mathrm{d}V_e}{V_0} \tag{6}$$

式中,K_e、$\varepsilon_{v,e}$ 分别为硬体孔裂隙的体积模量和工程体积应变。

对式(6)积分,且初始条件为 $\sigma=0$ 时,$V_e=V_{0,e}$,则,

$$V_e=V_{0,e}\left(1-\frac{\sigma}{K_e}\right) \tag{7}$$

式中:$V_{0,e}$ 为非应力状态下硬体孔裂隙体积。

因此,法向应力作用下的孔裂隙总体积为:

$$V=V_{0,e}\left(1-\frac{\sigma}{K_e}\right)+V_{0,t}\exp\left(-\frac{\sigma}{K_t}\right) \tag{8}$$

裂隙岩体的孔隙度可表示为:

$$\varphi=\frac{V}{V_R}=\frac{V_e+V_t}{V_R}=\varphi_e+\varphi_t \tag{9}$$

$$\varphi_{0,e}=\frac{V_{0,e}}{V_{0,R}} \tag{10}$$

$$\varphi_{0,t}=\frac{V_{0,t}}{V_{0,R}} \tag{11}$$

式中:V_R 为应力作用下岩体总体积;φ 为应力作用下岩体孔隙度;φ_t、φ_e 分别为应力作用下软、硬体孔裂隙对应的孔隙度;$\varphi_{0,t}$、$\varphi_{0,e}$ 分别为非应力状态下软、硬体孔裂隙对应的孔隙度。

计算岩体孔隙度时用非应力下的岩体总体积来近似表征 V_R,将式(5)、式(7)代入式(9),得到法向应力作用下的岩体孔隙度表达式:

$$\varphi_t=\varphi_{0,t}\exp\left(-\frac{\sigma}{K_t}\right) \tag{12}$$

$$\varphi_e=\varphi_{0,e}\left(1-\frac{\sigma}{K_e}\right) \tag{13}$$

$$\varphi=\varphi_{0,e}\left(1-\frac{\sigma}{K_e}\right)+\varphi_{0,t}\exp\left(-\frac{\sigma}{K_t}\right) \tag{14}$$

2 有效导热系数模型

由于裂隙岩体中裂隙带有方向性,仅用串联或并联模型对岩体有效导热系数进行描述并不准确[26]。因此,考虑到裂隙方向性带来的影响,取单一裂隙为例进行分析,如图 2 所示。

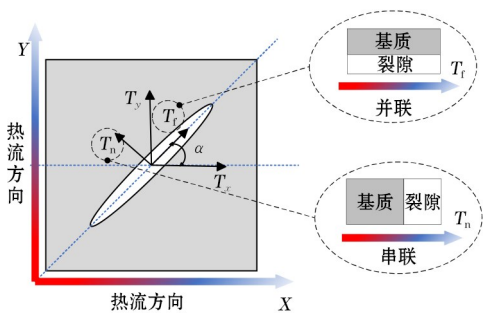


图 2 单一裂隙示意

Fig.2 Schematic diagram of a single crack

图 2 中,T_x、T_y 分别为 X、Y 两个方向上的温度梯度;T_f、T_n 分别为裂隙面方向及其法向方向的温度梯度;α 为裂隙面与 X 方向的夹角。

若 X、Y 方向上温度梯度已知,那么 T_f、T_n 可以表示为:

$$\begin{pmatrix}T_f\\T_n\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha\\-\sin\alpha & \cos\alpha\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T_x\\T_y\end{pmatrix} \tag{15}$$

当热传递方向与裂隙面平行时,采用并联公式(1);当热传递方向与裂隙面垂直时,采用串联公式(2);并考虑干燥条件下裂隙内仅含空气,用孔隙度 φ 表示气体体积分数,则:

$$\lambda_f=(1-\varphi)\lambda_s+\varphi\lambda_g \tag{16}$$

$$\lambda_n=\frac{\lambda_s\lambda_g}{(1-\varphi)\lambda_g+\varphi\lambda_s} \tag{17}$$

式中:λ_f、λ_n 分别为岩石裂隙面方向及其法向方向的有效导热系数;λ_s、λ_g 分别为岩石中固、气相的导热系数。

Fourier 传热定律:

$$q=-\lambda\nabla T \tag{18}$$

式中:q 为热量密度;∇T 为温度梯度。

通过坐标转换,可以得到整体坐标系下的热流量为:

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_f \\ q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_f\cos\alpha & \lambda_n\sin\alpha \\ -\lambda_f\sin\alpha & -\lambda_n\cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} \tag{19}$$

从而得到单一裂隙岩体的有效导热系数模型(effective thermal conductivity model,ETC):

$$[\lambda_{ij}] = \begin{pmatrix} \lambda_f\cos^2\alpha+\lambda_n\sin^2\alpha & (\lambda_f-\lambda_n)\cos\alpha\sin\alpha \\ (\lambda_f-\lambda_n)\cos\alpha\sin\alpha & \lambda_f\sin^2\alpha+\lambda_n\cos^2\alpha \end{pmatrix} \tag{20}$$

联合式(14)与式(20),可以得到基于 TPHM 理论的二维传热单一裂隙岩体法向应力与有效导热系数耦合模型(ETC-TPHM)。对于含多组裂隙的岩体,可以将其均匀化为多组倾角相同的裂隙,倾角则取多组裂隙倾角 α 的算数平均值。

3 模型验证与参数分析

3.1 模型参数获取方法

式(14)和式(20)中各参数的确定方法如下:通过试验样本得到初始材料参数 λ_s、λ_g、φ_0 及 α;其他的模型参数则可以通过简单的拟合程序从岩体应力-孔隙度试验数据中拟合得到。图 3 为 COYNER 通过 Weber 试验得到的不同围压下砂岩孔隙度数据[27]。在较高应力作用下,式(14)右侧第二项的影响可忽略不计,较高应力作用下的岩体孔隙度与应力关系可以近似用直线表示,该直线代表式(14)右侧的第一项,直线斜率及直线与纵轴的交点值分别为 $-\varphi_{0,e}/K_e$ 和 $\varphi_{0,e}$,而 $\varphi_0=\varphi_{0,e}+\varphi_{0,t}$,因此可以通过该方法确认参数 K_e、$\varphi_{0,e}$ 和 $\varphi_{0,t}$,K_t 则可以通过较低应力下的孔隙度数据进行估算。通过以上步骤得到 Weber 试验砂岩模型参数值为 $\varphi_{0,e}=9\%$,$\varphi_{0,t}=0.48\%$,$K_e=3\ 378.38$ MPa,$K_t=10.60$ MPa。从图 3 中可以看出,TPHM 结果与试验数据高度匹配。

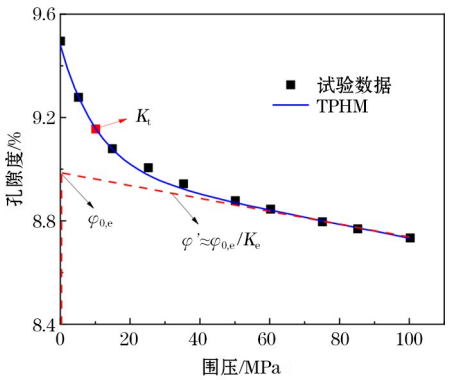


图 3 应力作用下砂岩孔隙度

Fig.3 Porosity of sandstones under stress

3.2 模型验证

Abdulagatova 等[28]使用热平板测量法测量了高达 400 MPa 压力下的干燥砂岩的有效导热系数;Emirov 等[29]通过稳态平法对大气压至 400 MPa 压力范围下的砂岩样品进行了有效导热系数测量;Abdulagatov 等[18]对不同围压下的 5 种干燥岩石有效导热系数进行了试验研究。上述试验均为干燥岩体一维热传递。对式(20)进行简化,仅考虑单一热传递方向可以得到:

$$\lambda_x=\lambda_f\cos^2\alpha+\lambda_n\sin^2\alpha \tag{21}$$

联合式(14),该式可以用来求解法向应力作用下一维传热的裂隙岩体有效导热系数,按 3.1 小节方法获取模型参数。上述文献中若未给出裂隙倾角 α,可通过无应力状态下的岩体导热系数值 $\lambda_x(\varphi_0)$ 得到 α 值;高应力状态下主要受硬体孔裂隙闭合影响,斜率近似为 $(\partial\lambda/\partial\varphi)(\mathrm{d}\varphi_e/\mathrm{d}\sigma)$,且该切线与纵轴交点值为 $\lambda_x(\varphi_{0,e})$,可求解出 K_e、$\varphi_{0,e}$ 和 $\varphi_{0,t}$;通过低应力下的导热系数可得到参数 K_t。上述各试验计算得到的模型参数见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

试验案例来源	岩样	温度/K	α/(°)	$\varphi_{0,t}$	$\varphi_{0,e}$	λ_s/(W·(mK)$^{-1}$)	λ_g/(W·(mK)$^{-1}$)	K_e/MPa	K_t/MPa
Abdulagatova 等[28]	砂岩	373	0	0.117 0	0.013 0	2.88	0.031 4	50 000.00	80
Emirov 等[29]	砂岩	300	25	0.061 0	0.009 0	2.20	0.026 7	854.70	20
Abdulagatov 等[18]	闪长岩	373	37	0.007 5	0.002 5	3.24	0.031 4	584.80	34

图 4 给出了不同应力下岩体有效导热系数理论结果与试验数据对比。可以看出,理论模型预测值与试验数据之间吻合度较高,岩体有效导热系数随着应力增大而增大,这是由于围压增大会降低岩体

孔隙率,使得块体结构更加紧密,热阻变小,有效导热系数增大。

此外,图 4 数据显示,低应力作用下岩体有效导热系数增长较快,随应力增大呈非线性增大;高应力作用下岩体有效导热系数趋于稳定,随应力增大呈线性缓慢增大。原因在于:低应力作用下,软体孔裂隙对应力敏感,孔隙率变化较大,高应力作用下,软体孔裂隙基本闭合,硬体孔裂隙闭合较为缓慢,孔隙率变化较小。

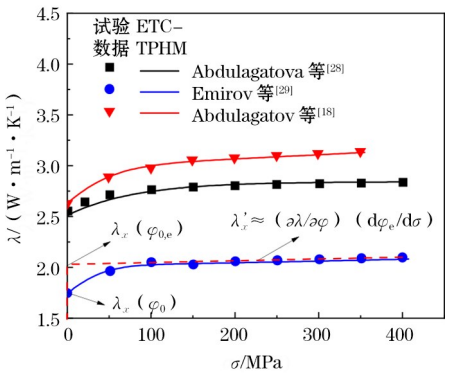


图 4 有效导热系数与应力的关系

Fig.4 The relationship between effective thermal conductivity and stress

3.3 裂隙倾角对有效导热系数的影响

引用文献[18]的数据对模型参数进行敏感性分析。为研究模型参数对裂隙岩体有效导热系数的影响,将式(21)中的 λ 转化成无量纲有效导热系数 λ^+:

$$\lambda_x^+=\frac{\lambda_x}{\lambda_s}=\cos^2\alpha\left(1-\varphi+\varphi\frac{\lambda_g}{\lambda_s}\right)+\frac{\sin^2\alpha}{1-\varphi+\varphi\dfrac{\lambda_s}{\lambda_g}} \tag{22}$$

分别描述硬体孔裂隙与软体孔裂隙对应力作用下岩体有效导热系数的影响程度:

$$\lambda'_e=\frac{\partial\lambda}{\partial\varphi}\frac{\mathrm{d}\varphi_e}{\mathrm{d}\sigma}=\frac{\partial\lambda}{\partial\varphi}\left(-\frac{\varphi_{0,e}}{K_e}\right) \tag{23}$$

$$\lambda'_t=\frac{\partial\lambda}{\partial\varphi}\frac{\mathrm{d}\varphi_t}{\mathrm{d}\sigma}=\frac{\partial\lambda}{\partial\varphi}\left[-\frac{\varphi_{0,t}}{K_t}\exp\left(-\frac{\sigma}{K_t}\right)\right] \tag{24}$$

式中,λ'_e、λ'_t 分别为应力作用下仅考虑硬体孔裂隙或软体孔裂隙时的岩体有效导热系数变化率。

图 5(a)为不同裂隙倾角下的岩体无量纲有效导热系数与应力的关系(曲线颜色标识见电子版,下同)。随裂隙面与温度梯度方向夹角 α 增大,无量纲导热系数值减小,这是由于当夹角 α 增大时,热传递方向上的有效传热面积减小,热阻增大,从而降低了岩体的有效导热系数。

图 5(b)为不同裂隙倾角下的岩体有效导热系数与应力的关系。由图 5(b)可知,裂隙面与热传递方向的夹角 α 越大,岩体有效导热系数随应力变化的增长速率越高,并且低应力作用下由软体裂隙闭合导致的有效导热系数非线性变化程度越高。原因在于,夹角 α 的增大会降低岩体有效导热系数,而在低应力作用下,岩体软体裂隙对应力敏感,闭合较快,因此 α 越大,低应力作用下孔隙闭合使岩体有效导热系数提升程度越大。

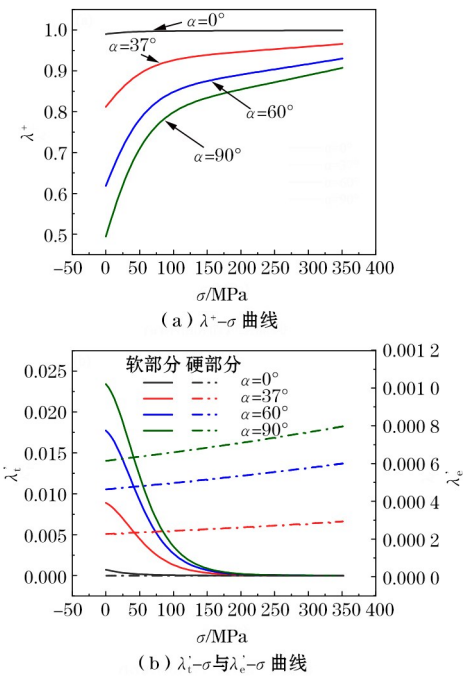


图 5 不同裂隙倾角的有效导热系数与应力的关系

Fig.5 The relationships between effective thermal conductivity and stress under different dips of fracture

3.4 硬体孔裂隙体积模量对有效导热系数的影响

图 6 给出了不同硬体孔裂隙体积模量下的岩体有效导热系数与应力之间的关系。从图 6 中可以看出,低应力作用下,K_e 对岩石无量纲有效导热系数的影响较小,而在高应力作用下,随着 K_e 减小,无量纲有效导热系数增大,并且 λ'_e 的值也随 K_e 的减小而增大。这是因为硬体孔裂隙对应力不敏感,在应力作用下闭合缓慢,因此硬体孔裂隙闭合导致的岩体有效导热系数值增大速率也较为缓慢,并且 K_e 越低,相同应力作用下的岩体硬体孔裂隙闭合程度越高,岩体有效导热系数越大。

由式(14)可知,K_e 仅影响第一项硬体孔隙度部分 $\varphi_{0,e}(1-\sigma/K_e)$,对软体的孔隙度无影响,高应力作用下 $\lambda^+-\sigma$ 曲线的斜率近似为 $-\varphi_{0,e}(\partial\lambda^+/\partial\varphi)/K_e$,

其斜率会随着 K_e 的减小而增大,与图像相符合。

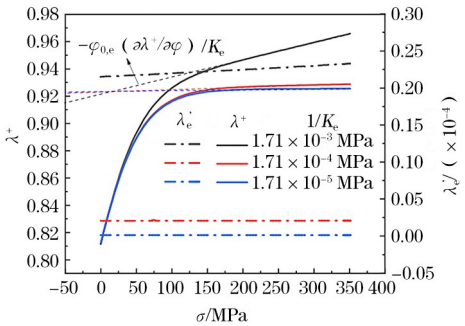


图 6 不同硬体孔裂隙体积模量下的有效导热系数与应力的关系

Fig.6 The relationships between effective thermal conductivity and stress under different pore and fracture bulk moduli of hard body

3.5 软体孔裂隙体积模量对有效导热系数的影响

图 7 显示了不同软体孔裂隙体积模量 K_t 条件下有效导热系数与应力之间的关系。K_t 对有效导热系数的影响主要体现在软体孔裂隙变化上。低应力作用下,软体孔裂隙闭合较快,无量纲有效导热系数增长较快。相同应力作用下,K_t 越大,无量纲有效导热系数增长速率越小;高应力作用下,软体孔裂隙几乎完全闭合,λ'_t 趋近于 0,无量纲有效导热系数不再受软体孔裂隙影响,呈线性增长。

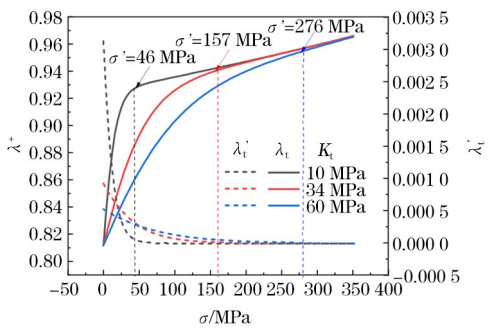


图 7 不同软体孔裂隙体积模量下的有效导热系数与应力的关系

Fig.7 The relationships between effective thermal conductivity and stress under different pore and fracture volume moduli of soft body

由式(14)可知,K_t 主要影响软体孔隙度 $\varphi_{0,t}\exp(-\sigma/K_t)$。若 $\varphi_t/\varphi_{0,t}<0.01$,则认为岩石软体裂隙已经完全闭合,其完全闭合时的应力值记为 σ',显然 $\sigma'=-K_t\ln(0.01)$,那么可以得到应力作用下不同 K_t 的软体裂隙完全闭合点。可以看出,随着 K_t 增大,岩石软体孔裂隙完全闭合所需的应力值也增大,无量纲有效导热系数随应力变化的非线性增长过程也越长。

4 工程实例分析

依据本文裂隙岩体法向应力-有效导热系数理论模型,将岩体导热系数视为应力相关函数,可以实现岩体导热系数与应力场之间的响应。以尼格隧道为研究背景,通过 COMSOL 软件内置函数完成二次开发,对尼格隧道围岩进行应力-导热系数耦合下的传热模拟。

4.1 工程概况

尼格隧道位于云南省红河州,全长3.336 km,最大埋深深度可达到 641 m,施工时采用双向双洞模式,起讫里程 LK44+300～LK47+666,属深埋特长隧道。隧道穿越地层岩性主要为灰岩与花岗岩。灰岩段主要表现为高水温,大量涌水,其涌水量最大可达到 11 L/s;花岗岩段表现为高岩温,岩温最高可达 88 ℃,岩体干燥,围岩完整度高。该隧道是我国目前最高地温的公路隧道。

经研究调查[30],隧道的围岩温度与空气温度会随埋深增大而增大,隧道最大埋深处处于花岗岩段,该处围岩温度可达 88 ℃,隧道洞内风速变化范围为 0～2 m/s,隧道初期支护厚度为 0.1 m,贯通隧道后第 67 天施作 0.05 m 聚氨酯材料的隔热层,第 87 天施作二次衬砌 0.35 m,初支与二次衬砌使用同种混凝土浇筑,围岩及支护结构的相关材料参数见表 2。

表 2 围岩及支护结构的相关参数

Table 2 Related parameters of surrounding rock and supporting structure

材料	密度/(kg·m⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	比热容/(J·kg⁻¹·K⁻¹)	导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)
支护结构	2 130	23	0.22	915	1.47
围岩	2 670	36	0.26	656	1.33

4.2 模型建立及边界条件

根据隧道原型,对尼格隧道 LK45+748 处的断面进行简化,如图 8 所示。模型尺寸为 50 m×50 m,隧道断面为马蹄形,处于模型中央位置,隧道埋深为 570 m,洞口半径为 5.5 m。依据现场测量值,模型当中围岩初始温度取为 355.15 K,洞内空气温度取为 318.15 K,隧道支护结构表面与空气进行强制对流换热,洞内风速平均值为 1 m/s,支护结构与围岩传热方式仅考虑热传导,其他边界均设为热绝缘。模型顶部受上部荷载作用,根据埋深将荷载大小设为 14.3 MPa,底面为竖向方向约束,左右两侧

为水平方向约束,顶面和隧道内部均为自由边界。在 COMSOL 中根据物理场自动划分三角形网格,网格设置为常规大小。

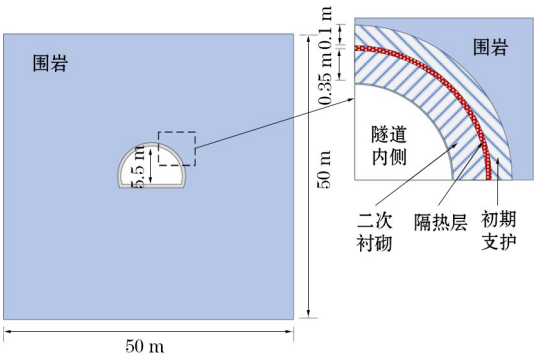


图 8 隧道断面模型

Fig.8 Cross-section model of the tunnel

4.3 分析方法

根据式(14)、式(20),将岩体内部各处的导热系数设定为与其应力状态相关的函数,具体实现步骤如下。

(1) 在全局定义中添加理论模型所需的物理参数作为全局变量,根据式(14)、式(20)构建导热系数与应力之间的关系函数 $\lambda(\sigma)$。内部岩体裂隙走向错综复杂,这里忽略岩体导热各向异性,取 $\alpha=45°$,其他模型参数通过实测数据反演得到,见表 3。

表 3 理论模型反演参数

Table 3 The inversion parameters of theoretical model

K_c/MPa	K_t/MPa	$\varphi_{0,c}$	$\varphi_{0,t}$
580	40	0.001	0.009

(2) 建立隧道平面模型,设置模型初始值及添加力学边界条件,将围岩视为弹性材料,考虑岩石自重,对应力场进行稳态分析,得到隧道围岩的应力场分布。

(3) 选取应力场输出结果中的 solid.pm(压力)变量作为函数 λ 的自变量,得到与应力相关的围岩导热系数 λ(solid.pm)。

(4) 添加固体传热边界条件,对温度场进行瞬态分析,步长设为 10 d,总时长为 100 d,得到隧道围岩的温度场变化情况。

4.4 模拟结果与分析

图 9 给出了第 100 天时 LK45+748 处隧道断面温度场分布云图。隧道围岩温度主要受洞内环境温度影响,由于支护结构与围岩之间设有导热系数较低的隔热层,使得支护结构温度与围岩温度相差较大,隔热层内外侧的温差为 5 K。

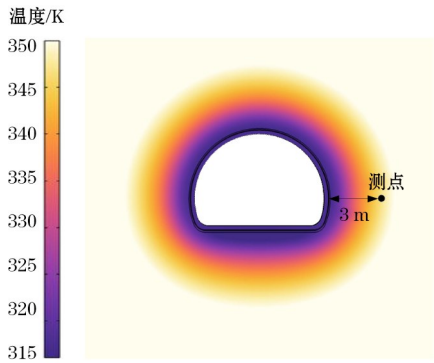


图 9 第 100 天时的温度场分布

Fig.9 Temperature field distribution on 100th day

在隧道侧边深度 3 m 处设置温度测点(见图 9),记录不同导热系数模型下的测点温度变化情况,如图 10 所示。由图 10 可知,采用不考虑缺陷影响的完整岩体导热系数进行数值模拟,其导热系数偏大,温度变化较快,得到的测点温度变化比实际测量值要偏低,第 100 天时测点温度误差为−0.828 K;采用仅考虑缺陷影响的裂隙岩体 ETC 模型进行数值模拟,得到的测点温度变化比实际测量值要偏高,100 d 时测点温度误差为+0.702 K,原因在于地应力的存在导致岩体裂隙被压缩,从而使实际导热系数增大;同时考虑缺陷及应力因素的 ETC-TPHM 模型得到的测点温度变化与实际测量值最为接近,第 100 天时测点温度误差为−0.208 K。

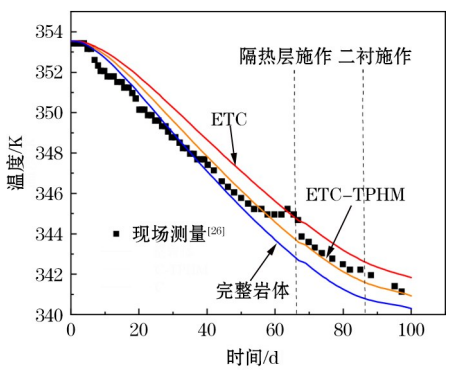


图 10 测点的温度变化情况

Fig.10 Temperature changes at measurement points

图 11 给出了隧道侧面不同深度处的围岩导热系数与应力值。从图 11 可以看出,隧道侧边围岩的应力主要集中在隧道边缘处,随着径向深度增加,围岩所受应力相对减小,导热系数随之降低。若不考虑应力作用影响,即 ETC 模型得到的导热系数为恒定值 1.109 2 W/(m·K),与应力状态无关,而 ETC-TPHM 则考虑了应力作用下围岩裂隙闭合导致的导热系数变化,能够得到不同应力值作用下的

岩体导热系数。两种条件下的隧道围岩导热系数取值之间的误差随应力增大而增大,所受应力超过 15 MPa 时,两种模型得到的围岩导热系数误差值达到 5%。

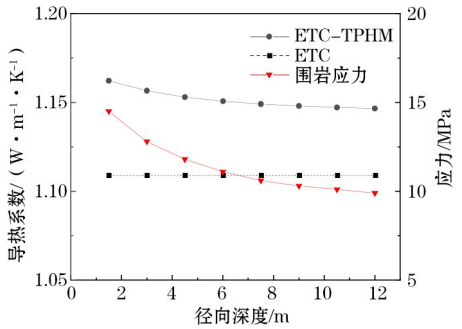


图 11 不同径向深度处的围岩应力与导热系数

Fig.11 Stress and thermal conductivity of the surrounding rock at different radial depths

5 结论

基于双弹簧 Hooke 理论与串并联导热系数模型,建立了干燥裂隙岩体法向应力压缩变形下的有效导热系数模型。通过与现有试验数据相比较,验证了该理论模型的准确性。对模型相关参数进行了敏感性分析,并结合工程实例进行了数值模拟分析,得到以下结论。

(1) ETC-TPHM 模型能够较准确地预测法向应力作用下裂隙岩体的有效导热系数,模型中的物理参数有明确的物理意义。

(2) 在低应力条件下,裂隙岩体的有效导热系数主要受到软体孔裂隙闭合影响,其随应力增加呈非线性增大;而在高应力条件下,软体孔裂隙基本闭合,有效导热系数主要受硬体孔裂隙闭合影响,随应力增加趋于线性缓慢增大。

(3) 裂隙面与热传递方向夹角 α 的增大使裂隙岩体在该热传递方向的有效导热系数减小,但其随应力变化的非线性程度更加显著;硬体孔裂隙体积模量 K_e 越大,高应力作用下岩体有效导热系数增长越慢;软体裂隙体积模量 K_t 越大,低应力作用下岩体有效导热系数增长越慢,非线性过程更长。

(4) 采用完整岩体导热系数时,隧道温度场变化过快;采用与应力无关的 ETC 模型得到的有效导热系数时,隧道温度场变化过慢;而 ETC-TPHM 导热系数模型得到的温度场变化更符合实际测量值。

参考文献(References):

[1] 张延军,于子望,黄芮,等.岩土热导率测量和温度影响研究[J].岩土工程学报,2009,31(2):213-217.
ZHANG Yanjun, YU Ziwang, HUANG Rui, et al. Measurement of thermal conductivity and temperature effect of geotechnical materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(2):213-217.

[2] 李潇,朱传庆,邱楠生,等.松辽盆地北部岩石热导率及其影响因素[J].地球学报,2023,44(1):70-83.
LI Xiao, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. Thermal conductivity of rocks and its influencing factors in northern Songliao Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 70-83.

[3] 熊坤,晋华,桂金鹏,等.温度和含水率对中砂和粗砂导热系数的影响[J].科学技术与工程,2020,20(35):14625-14630.
XIONG Kun, JIN Hua, GUI Jinpeng, et al. Temperature and moisture content effect on thermal conductivity for medium sand and coarse sand[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(35):14625-14630.

[4] RAMAZANOVA A E, EMIROV S N. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of siltstone and dolomite[J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics,2012,76(1):125-127.

[5] 周新,盛建龙,叶祖洋,等.岩体粗糙裂隙几何特征对其 Forchheimer 型渗流特性的影响[J].岩土工程学报,2021,43(11):2075-2083.
ZHOU Xin, SHENG Jianlong, YE Zuyang, et al. Effects of geometrical feature on Forchheimer-flow behavior through rough-walled rock fractures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(11):2075-2083.

[6] 周祥运,孙德安,林宇亮.基于散热的高放废物处置库废物罐间距研究[J].岩土工程学报,2020,42(11):2069-2077.
ZHOU Xiangyun, SUN Dean, LIN Yuliang. Canister spacing in a high level radioactive nuclear waste repository based on heat conduction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(11):2069-2077.

[7] SHENY J, WANG Y Z, ZHAO X D, et al. The influence of temperature and moisture content on sandstone thermal conductivity from a case using the artificial ground freezing (AGF) method[J].Cold Regions Science and Technology, 2018,155:149-160.

[8] SONG L, JUN Y, CHEN X H, et al. Application of mastic asphalt waterproofing layer in high-speed railway track in cold regions[J]. Applied Sciences,2018,8(5):667.

[9] LAZZARIN R, NORO M, RIGHETTI G, et al. Application of hybrid PCM thermal energy storages with and without al foams in solar heating/cooling and ground source absorption heat pump plant:an energy and economic analysis [J].Applied Sciences,2019,9(5):1007.

[10] 刘东东,魏立新,徐国元,等.基于裂隙连续方法的三维裂隙岩体渗流传热数值模拟[J].岩土力学,2023,44(7):2143-2150.
LIU Dongdong, WEI Lixin, XU Guoyuan, et al. Simulation of seepage and heat transfer in 3D fractured rock mass based on fracture continuum method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(7):2143-2150.

[11] 李云波,李宗利,姚希望,等.含孔洞和裂隙混合缺陷的干燥水泥砂浆导热系数相互作用直推预测模型[J].复合材料学报,2022,39(1):361-370.
LI Yunbo, LI Zongli, YAO Xiwang, et al. Interaction direct deduction prediction model of model of thermal conductivity of dry cement mortar with mixed defects of cavities and cracks[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(1): 361-370.

[12] JIA G S, TAO Z Y, MENG X Z, et al. Review of effective thermal conductivity models of rock-soil for geothermal energy applications[J]. Geothermics, 2019, 77: 1-11.

[13] ZIMMERMAN R W. Thermal conductivity of fluid-saturated rocks [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1989, 3(3): 219-227.

[14] SCHN J H. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics[M]. Netherlands: Elsevier, 2015.

[15] 杨超,许轩,王乐华,等.不同特征应力区间单裂隙砂岩与完整岩石蠕变特性的相关关系[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1347-1357.
YANG Chao, XU Xuan, WANG Lehua, et al. Relationship between creep characteristics of intact rock and single-flawed sandstone under different critical stress intervals[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(7): 1347-1357.

[16] 田佳丽,王惠民,刘星星,等. 考虑不同尺度孔隙压缩敏感性的砂岩渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2):405-415.
TIAN Jiali, WANG Huimin, LIU Xingxing, et al. Study on permeability characteristics of sandstone considering pore compression sensitivity at different scales[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2):405-415.

[17] MAQSOOD A, KAMRAN K. Thermophysical properties of porous sandstones: measurements and comparative study of some representative thermal conductivity models [J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26 (5): 1617-1632.

[18] ABDULAGATOV I M, EMIROV S N, ABDULAGATOVA Z Z, et al. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of rocks [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2006, 51(1): 22-33.

[19] FU H F, ZHANG B H, GE J H, et al. Thermal diffusivity and thermal conductivity of granitoids at 283-988 K and 0.3-1.5 GPa[J]. American Mineralogist, 2019, 104(11): 1533-1545.

[20] GÖRGÜLÜ K, DURUTURK Y S, DEMIRCI A, et al. Influences of uniaxial stress and moisture content on the thermal conductivity of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (8): 1439-1445.

[21] 郭平业,卜墨华,李清波,等.岩石有效热导率精准测量及表征模型研究进展[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):1983-2013.
GUO Pingye, BU Mohua, LI Qingbo, et al. Research progress of accurate measurement and characterization model of effective thermal conductivity of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1983-2013.

[22] 李博,叶鹏进,黄林,等.干燥与饱和岩石裂隙受压变形与声发射特性研究[J].岩土工程学报,2021,43(12):2249-2257.
LI Bo, YE Pengjin, HUANG Lin, et al. Deformation and acoustic emission characteristics of dry and saturated rock fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2249-2257.

[23] 唐欣,俞缙,林立华,等.岩石疲劳应力等效化及非线性疲劳变形本构模型[J].岩土工程学报,2021,43(1):102-111.
TANG Xin, YU Jin, LIN Lihua, et al. Equivalent fatigue stress and non-linear constitutive model for fatigue of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (1): 102-111.

[24] 李盛南,肖俊,李玉,等.基于细观裂纹扩展演化的岩石损伤本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3):640-648.
LI Shengnan, XIAO Jun, LI Yu, et al. A new damage constitutive model of rock considering microscopic crack growth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 640-648.

[25] LIU H H, RUTQVIST J, BERRYMAN J G. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(2): 289-296.

[26] 陈则韶,钱军,叶一火.复合材料等效导热系数的理论推算[J].中国科学技术大学学报,1992,22(4):416-424.
CHEN Zeshao, QIAN Jun, YE Yihuo. Predicting theory of effective thermal conductivity of complex material [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1992, 22(4): 416-424.

[27] COYNER K B. Effects of stress, pore pressure, and pore fluids on bulk strain, velocity, and permeability in rocks [D]. Cambrige, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1984.

[28] ABDULAGATOVA Z, ABDULAGATOV I M, EMIROV V N. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(6): 1055-1071.

[29] EMIROV S N, ALIEV R M, ALIVERDIEV A A, et al. Temperature-baric dependence of the effective thermal conductivity of amorphous and polycrystalline rocks [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 66(P3): 866-870.

[30] 杨冬,蒋树屏,黄锋,等.HHP花岗岩高温隧道温度场实测与仿真研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(1):233-244.
YANG Dong, JIANG Shuping, HUANG Feng, et al. Measurement and simulation of temperature field in HHP granite high-temperature tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 233-244.