

# 隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究<sup>\*</sup>

A study of mathematical model on coupling between temperature  
- seepage in fractured rock mass surrounding tunnel

黄 涛 杨立中

(西南交通大学土木工程学院, 成都, 610031)

**文 摘** 随着越来越多特长深埋隧道工程的修建, 围岩体所赋存复杂地质环境(渗流场、温度场与应力场等)之间的相互影响作用已不容忽视。通过隧道裂隙围岩体渗透性能与热物理性能的等效连续化处理, 初步建立了围岩体温度场与渗流场耦合作用数学模型, 并应用于秦岭隧道工程。

**关键词** 等效连续, 温度, 渗流, 耦合, 数学模型

**中图法分类号** TU 452

**作者简介** 黄 涛, 男, 1970 年生, 副教授, 1997 年西南交通大学获工学博士学位, 同年进入西南交通大学力学博士后流动站, 现在西南交通大学土木工程学院任教。主要从事岩体水力学方面的科研和教学工作。

Huang Tao Yang Lizhong

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**Abstract** With the construction of more and more deep-buried tunnels with extremely large length, the mutual action among the complex geological environments in which the surrounding rock mass is situated can not be ignored anymore. In this article, through dealing with permeability and thermal physics of the rock mass surrounding tunnel by equivalent continuum method, a mathematical model on coupling of temperature field with seepage field in surrounding rock mass is established. At last, the model is checked by applying in the practice of Qinling tunnel project.

**Key words** equivalent continuum, temperature, seepage, coupling, mathematical model

## 1 引 言<sup>\*</sup>

隧道裂隙围岩体作为地质历史作用过程的产物, 一方面驻留了地质历史作用所赋予的地质结构特征, 另一方面作为自然界中地质体的组成部分, 又同时存在于一定的地质环境(体现在地质体所处部分的地应力场、温度场与地下水渗流场)当中。一般地质情况较简单时, 以上三场之间的相互影响作用相对比较微弱, 可以忽略它们之间的联系, 而从各自独立的角度去研究地质体存在的地质环境(即地应力场、温度场或地下水渗流场)。随着人类地下工程活动的深入和复杂化, 上述相互影响作用已不容忽略, 甚至起着决定性作用。鉴于此, 对地质体赋存地质环境组成因素之间相互影响作用的研究, 已显得尤为迫切和必要。

根据山区深埋隧道工程的需要, 这里主要对隧道裂隙围岩体温度-渗流耦合作用数学模型的建立进行探讨性研究。

## 2 研究技术路线

隧道裂隙围岩体温度-渗流耦合作用过程是一个相对复杂的研究问题, 主要表现在裂隙围岩体赋存地质环境的各个组成部分, 即温度场与地下水渗流场自

身都随时间、空间发生变化; 与此同时, 以上各组成部分之间的耦合作用处于一种复杂动态变化过程之中; 再者, 裂隙围岩体作为一种离散介质, 尚无类同于连续介质的成熟研究方法可循。为了研究的可行性, 从简化场耦合作用过程及应用成熟研究方法的角度出发, 笔者基于裂隙岩体对应场性能等效的原则, 给出了隧道裂隙围岩体温度-渗流耦合作用研究的技术路线(图 1)。

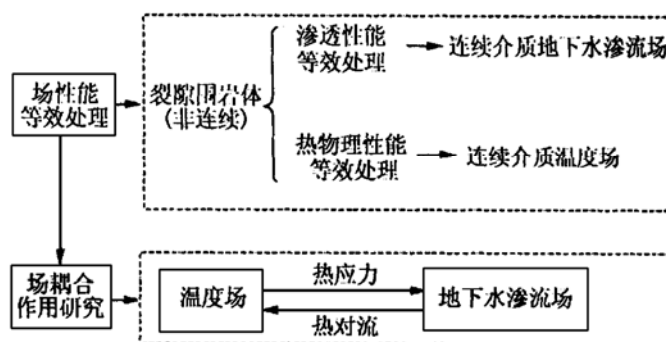


图 1 裂隙围岩体温度-渗流耦合作用研究技术路线

Fig. 1 The technical steps to study the temperature-seepage coupling in fractured rock mass surrounding the tunnel

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(No. 49872082)

### 3 隧道裂隙围岩体渗流场与温度场性能等效处理

隧道围岩体生成于一定地质年代的成岩作用过程中,其后又经历了多次地质构造运动的影响,使得围岩体呈现出复杂的不连续性结构特征,从而决定了渗透性能及热物理性能的复杂性和不确定性。为简化所赋存地质环境(渗流场与温度场)的复杂程度,可以从性能等效原则出发进行连续性简化处理,这就是所谓的场性能等效处理。

#### 3.1 隧道裂隙围岩体渗透性能的等效处理

隧道裂隙围岩体生成及地质作用过程中,受不同的岩性成分及应力环境的影响,导致岩体中裂隙结构面的定向展布、相互交切程度及发育密度有很大的差异性,产生了不同的水力学性质(即渗透性能的非均质各向异性)。

应用渗透性能等效化处理,可将具非连续性结构特征的裂隙围岩体等效为一具相同渗透性能的连续介质,达到简化研究的目的。基于裂隙围岩体中不连续结构面(裂隙面)的可度量性,可以采用渗透张量理论<sup>[1]</sup>确定等效化连续介质的渗透系数,即

$$k = \frac{gb^3\lambda}{12\rho} \times \begin{vmatrix} 1 - \cos\alpha^2 \sin^2\beta & -\sin\alpha \cos\alpha \sin^2\beta & -\cos\alpha \sin\beta \cos\beta \\ -\sin\alpha \cos\alpha \sin^2\beta & 1 - \sin^2\alpha \sin^2\beta & -\sin\alpha \sin\beta \cos\beta \\ -\cos\alpha \sin\beta \cos\beta & -\sin\alpha \sin\beta \cos\beta & 1 - \cos^2\beta \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中  $k$  为裂隙岩体系统渗透张量;  $b$  为不连续结构面(裂隙)的有效隙宽;  $\lambda$  为不连续结构面密度;  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为不连续结构面的倾向和倾角。

#### 3.2 隧道裂隙围岩体热物理性能的等效处理

隧道裂隙围岩体的热物理性能是指岩体的热传导能力,取决于岩性、岩体温度及其结构特征,在前两者一定的情况下,裂隙岩体结构控制了热物理性能。岩体中裂隙面的差异分布及随机交切,导致了岩体结构的不均匀性,从而诱发裂隙岩体热物理性能的不连续。参照 Hubbert(1956), Bear(1972) 及 Freeze 等对地质体渗透均质性问题的研究,可进行不同容积条件下研究区岩体热传导性(热传导系数)测定试验,找到一个岩样容积临界点 REV(representative element volume),在此临界点附近稍微增大或者减小岩样容积,而岩体的热传导性变化微弱。当所研究的裂隙岩体区域  $V$  内岩体的 REV 存在并且远远小于研究区域  $V$  时,就可以将裂隙岩体看作为热物理性能上的等效连续介质。

### 4 隧道裂隙围岩体温度-渗流耦合作用数学模型的研究

#### 4.1 隧道围岩体中地下水渗流场的分布

隧道围岩体中地下水渗流场分布是指围岩体中地下水渗流运动状态(地下水水头)的瞬时总和,它可以通过地下水渗流方程予以反映。根据多孔连续介质理论,可以建立渗透性能等效连续介质化处理后的裂隙岩体中地下水渗流微分方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

式中  $K_{ij}$  为裂隙岩体等效渗透系数张量;  $S_s$  为裂隙岩体储水率。

#### 4.2 隧道围岩体中温度场的分布

通常把人类工程活动所涉及的岩体内的温度分布和热状态称为岩体温度场,岩体温度场分布一方面受制于地壳浅层温度分布和热状态的控制,另一方面受岩体工程和外界条件(包括地下水渗流)的影响。

理论与实验研究表明,热力的传递(即传热)一般有三种方式:传导、对流和辐射。岩石作为一种固体,传导始终是热力传递的主要方式,因而也就决定了定量表述隧道围岩体温度场分布的数学模型以传导型传热方程为基础,包含了因地下水参与引起的对流项及通过地下热源区因辐射增加的内热源项,即

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_{ij}^a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + c\rho(T' - T)q \quad (3)$$

式中  $\lambda_{ij}^a$  为岩体的热动力弥散系数张量;  $x_i, x_j$  为笛卡尔坐标,  $i, j = 1, 2, 3$  并遵循求和约定;  $t$  为时间;  $C_a$  为岩石的热容量;  $c\rho$  为地下水的容量;  $v_i$  为渗透速度;  $q$  为单位体积含水岩体中源汇流量;  $T$  为地下水温度;  $T'$  为源汇项温度。

#### 4.3 隧道裂隙围岩体温度-渗流耦合数学模型的建立

一般情况下,隧道围岩体中的温度场与地下水渗流场处于一种稳定分布状态,且二者之间的相互影响作用构成一动态平衡体系。当人类的隧道工程修筑活动波及到围岩体中相对稳定分布的温度场时,会产生一定程度的影响,尤其是地下水的存在和被隧道工程活动所改变时,这一改变会较前加剧,即产生所谓的地下水渗流场对围岩体温度场分布的影响作用。隧道围岩体中温度场的分布是通过热能的三种转移方式(传导、对流与辐射)得以实现的,其中以传导和对流为主,而对流则是以地下水的渗流运动为基础进行的。具体表现为:一方面地下水的加入,与隧道围岩体产生温度分布差异(地下水温度较隧道围岩体温

度要低,对深埋隧道更甚),导致围岩体与地下水体之间发生热传导的热量交换过程;另一方面,地下水作为隧道围岩体中热量交换的载体,通过地下水本身的渗流运动而产生热对流的热能转移过程。以上两方面的热能转移,为达到地下水体与隧道围岩体二者温度分布的均衡,最终导致隧道围岩体温度场分布的总体衰减,即围岩体温度值的总体降低。与此同时,隧道围岩体中温度场分布的改变,破坏了围岩体中原有地下水渗流场与温度场二者之间的动态平衡作用体系,从而反过来影响地下水渗流场的分布。具体表现为围岩体中温度场分布的差异性改变(包括渗流场影响作用导致围岩体温度场总体衰减而形成与原温度场之间的差异;新形成的稳定温度场内部各部分之间温度分布的差异)。由温差导致的热应力作用于围岩体,通过力学作用改变围岩体的结构特征(主要改变裂隙围岩体中不连续结构面的张开度、粗糙程度及相互延伸交切状况),导致围岩体渗透性能的变化,进而影响到围岩体中地下水渗流场的分布。以上过程如此反复,以致隧道围岩体中二者分布达到新的动态平衡状态为止。因而隧道围岩体中渗流场与温度场的耦合作用表现在以下两个方面:

a) 当岩体中有渗流发生时,地下水的渗流运动促成了岩体内热能以对流的方式发生转移,进而使岩体内温度场得以重新分布。

b) 岩体内温度场的变化,导致地下水赋存环境(温度)的改变及热应力的作用,影响了岩体的渗透性能及地下水的渗流特性,发生渗流场的改变。以上两方面的作用相辅相成而达到动态稳定状态,构成所谓的耦合。

根据以上的耦合机理研究,可以建立下列隧道围岩体内渗流场与温度场耦合作用数学模型<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K_{ij}^* \frac{\partial h^*}{\partial x_j} + \rho_e e_j \right] + q = S_s^* \frac{\partial h^*}{\partial t} + \frac{\varphi}{1 + \rho_e} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (4)$$

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} + c \rho_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_{ij}^a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + c \rho (T' - T) q + c \rho_0 \left[ S_s \frac{\partial h^*}{\partial t} + \varphi \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right] T \quad (5)$$

式中  $h^* = p/(\rho_0 g) + x_3$  为参考水头,  $p$  和  $\rho$  分别为地下水的压强和密度,  $\rho_0$  为地下水的参考密度,  $g$  为重力加速度;  $\rho_e = \rho/\rho_0 - 1$  为地下水的密度差率;  $K_{ij}^*$  和  $S_s^*$  分别为隧道围岩体的参考渗透系数张量和参考储水率;  $\varphi$  为空隙率;  $e_j$  为表示重力方向单位矢量的第  $j$  个分量;  $S_s$  为岩体的储水率。

## 5 应用实例

以上通过隧道围岩体中温度场与地下水渗流场耦合作用机理的研究,建立了相应的数学模型,为定量分析与评价双场耦合作用及应用于隧道工程的实践奠定了理论基础。根据研究可知,裂隙岩体中地下水渗流场与温度场的耦合作用通过下列两个方式得以实现:

a) 当裂隙岩体中有渗流发生时,地下水的渗流运动促成了岩体内热能以对流的方式发生转移,进而使裂隙岩体内温度场得以重新分布。这方面影响反映在热物理性能等效连续化裂隙岩体温度传导方程式(5)中下划线部分。

b) 裂隙岩体内温度场的变化,导致地下水赋存环境(温度)的改变,影响了岩体的渗透性能及地下水的渗流特性,发生渗流场的改变。这一方面影响可用渗透性能等效连续化裂隙岩体中地下水渗流方程反映在式(4)中下划线部分。

为检验数学模型的实用性和有效性,这里选取在建西康铁路秦岭特长越岭隧道类属构造断裂富水区的岭南 DyK77+530—DyK78+400 区段为例进行应用计算。

研究区段位于地貌形态上的中山区,隧道穿越的围岩岩性为混合片麻岩。由于该区段围岩体经历了多期断裂构造作用,使得岩浆侵入、穿插活动十分频繁,且具有一定程度的蚀变现象,再加之较为发育的构造微张节理,导致裂隙岩体结构十分破碎,可以归并为具碎裂结构裂隙岩体。

通过研究区段现场裂隙结构网络的量测(地表及隧道洞身),可以计算得到相应的岩体等效渗透系数张量<sup>[3]</sup>(表1),这样就实现了裂隙围岩体渗透性能的等效连续处理;考虑到围岩体自身类属碎裂结构及研究区域  $V_p$  的范围,这里假定围岩体具平均热传导能力的 REV 远小于  $V_p$ ,这样可以实现围岩体热物理性能的等效连续处理,相应的热物理参数见表2。

基于研究区段隧道围岩体较为复杂的赋存环境及岩体本身结构的等效处理,从不影响研究目标实现性的简化角度出发,可认为所研究区段隧道围岩体温度场与渗流场耦合作用随时间的变化(非稳定性)比较微弱或不予考虑,即在此可将数学模型式(4)、(5)改写为如下处于稳定状态下的隧道围岩体温度场与渗流场耦合作用数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K_{ij}^* \frac{\partial h^*}{\partial x_j} + \rho_e e_j \right] + q = 0 \quad c \rho_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_{ij}^a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + c \rho (T' - T) q \quad (6)$$

式中符号意义同前。

表 1 裂隙岩体渗透张量计算结果

Table 1 The calculated results for seepage tensor of fractured rock masses

| 测点 | 位置         | 主渗透系数<br>$k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$ | 方位( $^{\circ}$ )   |
|----|------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 地表 | 小羊圈        | 0.0793                                    | $152.1\angle 1.5$  |
|    |            | 0.0739                                    | $62.1\angle 0.3$   |
|    |            | 0.0037                                    | $321.1\angle 88.5$ |
|    | Dyk77+ 770 | 0.0400                                    | $252\angle 60$     |
| 隧道 | ~          | 0.0278                                    | $20\angle 19$      |
|    | Dyk77+ 775 | 0.0032                                    | $118\angle 22$     |

表 2 研究区段隧道围岩体热物理参数

Table 2 The thermophysical parameter of rock mass surrounding tunnel in studied site

| 岩性    | 热传导系数<br>$/(W\cdot m^{-2}K^{-1})$ | 热传导系数的各向异性系数 | 热容量<br>$/(J\cdot K^{-1})$ |
|-------|-----------------------------------|--------------|---------------------------|
| 混合片麻岩 | 7.47                              | 1.49         | 0.174                     |

鉴于耦合数学模型式 (6) 自身特点及其研究实际对象的复杂不确定性, 这里可以采用应用比较广泛和成熟的有限单元数值模拟法求解此问题。借助于有限单元数值模拟法的计算原理, 具体的求解过程可以编制程序由计算机来实现。其中所研究区段典型剖面的单元剖分如图 2, 模拟所得研究区段隧道围岩体中地下水渗流区域剖面的温度场与渗流场分布见图 3, 图 4。

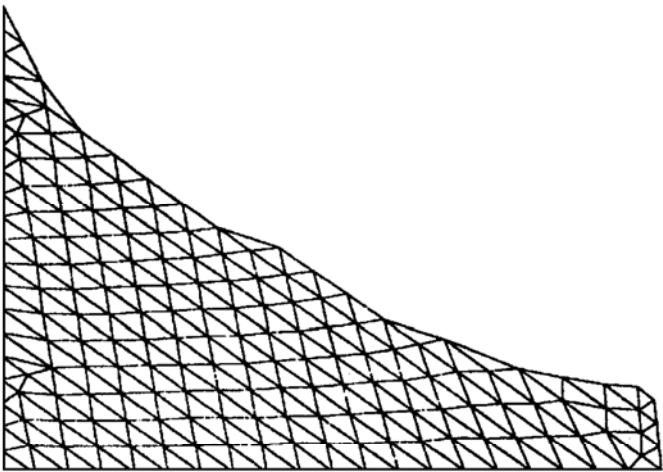


图 2 计算区段含水裂隙岩体地下水渗流区域有限单元剖分示意图

Fig. 2 Finite element mesh patterns of groundwater seepage area in fractured rock mass

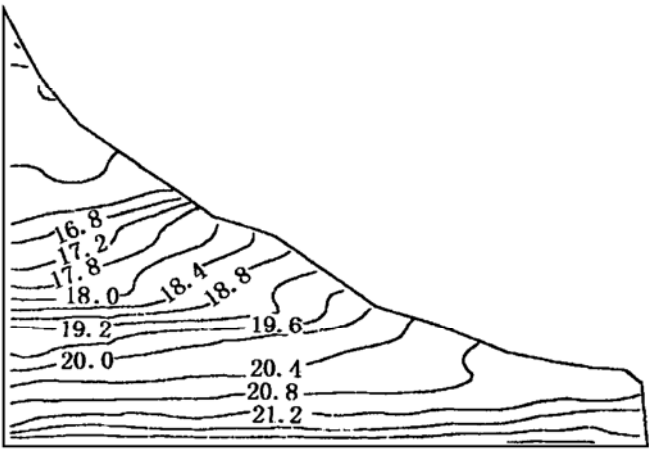


图 3 研究区段含水裂隙岩体温度场分布示意图(地下水渗流区域)

Fig. 3 Distribution map of temperature field in fractured rock mass (groundwater seepage area)

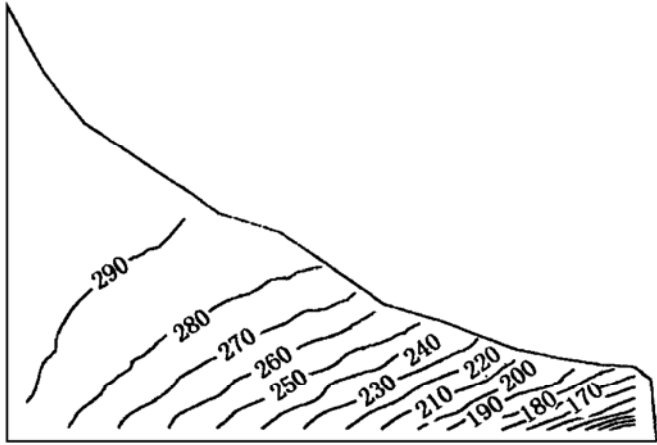


图 4 研究区段含水裂隙岩体渗流场分布示意图(考虑耦合作用)

Fig. 4 Distribution map of groundwater seepage field in fractured rock mass (with coupling)

6 结 论

通过数值模拟结果可以看出, 隧道围岩体温度场与渗流场耦合作用具体表现在:

(1) 地下水在围岩体中渗流运动, 大大降低了围岩体中的温度分布值, 这一点可从温度等值线在地下水水面附近的转折看出。

(2) 地下水在围岩体中渗流速度的大小, 直接控制了围岩体温度的变化幅度, 即在渗流场中水头等值线分布较稀疏的部位, 温度等值线大体上呈相应的稀疏性展布; 与此同时, 由地下水渗流运动参与而诱发的围岩体中热对流的热量转移方式, 使得围岩体中温度场分布变化幅度相应减小(与不考虑地下水渗流运动情况相比)。

(3) 渗流区域温度场的改变过程中, 由围岩体原有

温度场与地下水渗流影响产生的新稳定分布温度场之间的温差及围岩体内部各部分之间温度分布的差异,可以诱发两方面的影响效应:

a) 使得地下水的渗流运动成为由水力梯度引起的强迫运动和垂直向上温度差引起的自然热对流两者迭加的结果, 且对深埋隧道工程围岩体而言, 后者即自然热对流现象明显。这点可从不考虑温度- 渗流耦合作用时隧道围岩体渗流场计算结果( 图 5) 看出, 即考虑耦合作用时的围岩体中水头等值线较不考虑耦合作用时的水头等值线分布平缓一些。

b) 对深埋隧道工程来说, 由于围岩体原有温度场与地下水渗流影响产生的新稳定分布温度场间的温差及围岩体由外向内各部分之间温度分布的差异皆为负向, 因而产生以拉应力为主的热应力作用, 改变裂隙围岩体中不连续结构面的张开度、延伸及相互交切情况, 使之向有利于提高围岩体渗透性能的方向发展( 即裂隙结构面张开度增大、延伸增长及相互交切程度增加)。于是, 地下水渗流过程中沿渗流途径水头损失减小, 可从考虑耦合作用时的围岩体中水头等值线分布( 图 4) 与不考虑耦合作用时的水头等值线分布( 图 5) 比较中看出。

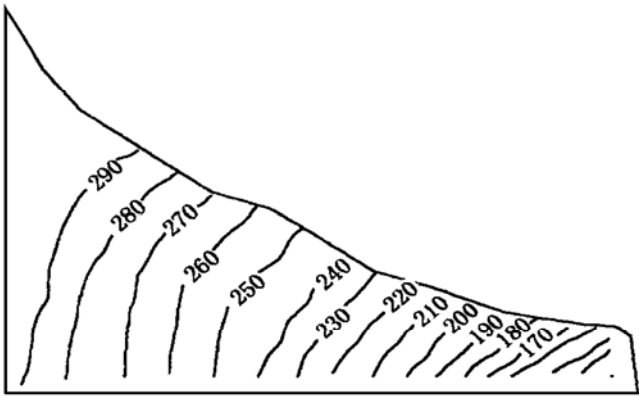


图 5 研究区段含水裂隙岩体渗流场分布示意图( 不考虑耦合作用)

Fig. 5 Distribution map of groundwater seepage field in fractured rock mass (without coupling)

参 考 文 献

- 1 Snow D T. Anisotropic permeability of fractured media. Wat Resour Res, 1969, 5( 6) : 1273~ 1289
- 2 张志辉, 薛禹群, 吴吉春. 地下热水运移中自然对流的研究. 水文地质工程地质, 1995, 22( 4) : 16~ 21
- 3 黄 涛. 渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量预测的研究: [ 博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 1997