

文章编号: 1009-3087(2013)增刊 2-0077-07

裂隙岩体温度 - 渗流耦合数值流形方法

刘学伟¹, 刘泉声^{1,2}, 黄诗冰¹, 董启朋¹

(1. 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;
2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在建立岩体裂隙岩体温度 - 渗流耦合微分控制方程的基础上, 基于裂隙网络渗流理论和数值流形理论, 通过分析考虑裂隙作用的温度场和流形覆盖与裂隙网络的关系, 以裂隙网络节点水头、覆盖温度函数为求解量, 提出裂隙岩体温度 - 渗流耦合的数值流形方法。该方法利用数值流形理论中网格、覆盖及流形单元的关系, 可以在同一数学网格下实现对温度 - 渗流耦合场的迭代求解。由于渗流裂隙网络必定会与材料边界相交, 所以数学网格不受边界及裂隙限制, 能够有效地避免常规方法中裂隙处网格划分问题, 该方法特别适合于模拟裂隙岩体的耦合问题。运用该模型对部分算例进行了计算, 验证了方法的正确性。

关键词: 岩石力学; 裂隙岩体; 温度渗流耦合; 数值流形方法(NMM)

中图分类号: TU452

文献标志码: A

Study on Numerical Manifold Method of Coupled Thermo-hydraulic of Fractured Rock Masses

LIU Xue-wei¹, LIU Quan-sheng^{1,2}, HUANG Shi-bing¹, DONG Qi-peng¹

(1. State Key Lab. of Geotechnical Eng. Inst. of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Key Lab. of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Eng. of Ministry of Education, Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

Abstract: Base on the differential control equations of the coupled thermo-hydraulic (TH) processes of fractured rock masses, with the fracture network seepage method and numerical manifold method (NMM), the temperature field which considered fractures and the relationship between covers and fracture network were analyzed. Then, with the values of node water heads and cover temperature functions, the NMM for coupled TH of fractured rock masses was presented. The proposed method used the relationships between meshes, covers and manifold elements of NMM, which can solve coupled TH under the same mathematical meshes. Because the fracture network of seepage intersects with material boundaries undoubtedly, the mathematical meshes are free in any situations, which can avoid the problem of divide meshes in fractures. The proposed method is especially applicable to simulate the coupled problem in fractured rock masses. At last, some examples were calculated to illuminate the valid of this method.

Key words: rock mechanics; fractured rock masses; thermo-hydraulic coupling; numerical manifold method(NMM)

裂隙岩体的多场耦合研究具有重要的理论意义, 并且在高放废物深地质处置、高温干热岩体地热开发、深部开采及大坝建设中具有广泛的实际应用背景。基于此目的, 近年来, 国内外学者对耦合问题从理论到数值模拟方面开展了大量的工作^[1-2], 建立了一些基于不同模型的控制微分方程^[3-7]。

针对裂隙岩体多场耦合问题在求解模型的选择上, 目前较成熟的求解模型主要为连续介质、裂隙网

络和双重介质模型 3 类。Millard 等^[8] 通过采用离散元和有限元 2 种数值求解方法, 对比分析了离散和等效连续介质模型在多场耦合的研究结果, 认为 2 种方法会在渗流场模拟中产生较大的差别; 王恩志^[9] 也认为, 尽管现阶段连续介质理论较为成熟, 但是它难以描述裂隙岩体固有的水力特征。另外, 在数学模型建立之后, 目前大多数学者采用有限元软件或者自行编制的有限元程序进行求解, 在涉及到裂隙岩体耦合问题时, 传统方法还存在一些缺点: 1) 裂隙被限制在网格线上, 必须将裂隙面设置为单元的边、裂隙交点必须为单元的节点; 2) 提高计算精度时导致计算及存储量的增加; 3) 当裂隙发生变化时, 必须重新划分网格。

收稿日期: 2012-12-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41130742); 中国科学院重点部署资助项目(KZZD-EW-05-03)

作者简介: 刘学伟(1987—), 男, 博士生, 研究方向: 裂隙岩体多场耦合建模及模拟。E-mail: liuxw87@126.com

石根华^[10]提出的数值流形方法(numerical manifold method, NMM)是利用现代数学和流形的有限覆盖技术建立起来的1种数值计算方法,它统一解决了连续与非连续变形问题。该方法基于数学覆盖和物理覆盖,通过权函数联结在一起形成问题域上的总体函数,能够有效解决裂隙网格划分及相关的非连续求解问题。该方法自提出以来,正逐步发展为岩土力学领域的主要计算方法之一。在将其应用到岩体温度场和渗流场的求解时,魏高峰等^[11]构造了非协调流形单元来改善流形单元的计算精度和计算效率,推导了势问题的非协调数值流形方法,并将其应用于热传导问题;李树忱等^[12]从加权残数法出发建立了拉普拉斯方程的数值流形方法的求解格式,并对稳定温度场进行模拟分析;高洪芬^[13]建立了瞬态热传导问题复变量无网格数值流形方法,并推导了相应的离散方程;Jiang等^[14]提出了求解3维无压渗流自由面的数值流形方法,并建立了求解格式。然而,上述研究均是针对连续介质模型,求解的温度、渗流场较少的考虑裂隙作用,采用数值流形方法求解裂隙网络渗流及温度-渗流耦合模拟研究亦比较少见。

作者在借鉴前人研究的基础上,基于岩体裂隙网络模型,首先讨论了考虑裂隙对温度场影响的数值流形方法,同时分析了渗流场裂隙网络与流形覆盖之间的关系,并充分利用数值流形在处理裂隙方面的优势,提出了裂隙岩体温度-渗流耦合的数值流形方法。该方法在耦合分析求解过程中,对裂隙岩体区域可以采用任意数学覆盖来形成网络节点、线元及流形单元,从而使耦合数值模拟变得简单和方便,期待能为数值流形在多场耦合中的应用研究提供一个参考。

1 用 NMM 法进行温度场分析

采用数值流形方法进行温度场分析,归根结底就是对温度场函数偏微分方程进行求解,一般地,NMM法求解瞬态温度场的计算格式为:

$$\left(K + \frac{H}{\Delta t}\right)D_{n+1} = F + \frac{H}{\Delta t}D_n \quad (1)$$

式中, K 为总体温度刚度矩阵, H 为总体热容矩阵, Δt 为计算时间步, D_n 为第 n 步时的温度覆盖函数系数矩阵, F 为总体温度荷载矩阵。其中,总体矩阵是根据式(2)~(4)求出流形单元矩阵后叠加而成。

$$K^e = \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial N_e}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial N_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_e}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial N_e}{\partial y} \right) \right] d\Omega + \int_{S_3} N_e h N_e ds \quad (2)$$

$$H^e = \int_{\Omega} N_e N_e \rho c d\Omega \quad (3)$$

$$F^e = \int_{\Omega} N_e W d\Omega + \int_{S_2} N_e p ds + \int_{S_3} N_e h T_a ds \quad (4)$$

式(2)~(4)中: N_e 为流形单元 e 的插值函数, k_x 和 k_y 分别为 x 、 y 方向的热传导系数, ρ 为材料密度, c 为比热, t 为时间, W 为材料内热源密度, p 为第二类边界条件上的热流密度, h 和 T_a 为第三类边界条件的表面放热系数和温度。

上述计算格式是针对连续问题而言,但现有研究表明,对应不同的问题,裂隙对岩块热传导会产生一定阻滞或裂隙与岩块之间存在换热作用。通过最近研究发现^[15],当采用数值流形方法求解温度场时,裂隙两侧之间的不连续性可以得到很自然的表达,并且对应于上述2种条件,当裂隙为阻滞作用时,裂隙会参与区域内的热传导,而当其为换热作用时,裂隙则变成一种边界条件。通过引入罚方法对温度场边界条件进行处理,进而将裂隙的作用形成对整体控制方程的影响,最后可以实现裂隙岩体温度场的求解。

2 用 NMM 法进行裂隙网络渗流分析

2.1 裂隙网络渗流分析原理

在裂隙网络模型中,裂隙起导水通道作用,由裂隙切割成的岩块所组成的岩体渗透性很微弱,岩体渗流实质上是裂隙网络渗流。假设裂隙网络中有 N 个节点(交叉点), M 个线元。取裂隙网络的1个节点 i 进行分析,若与节点 i 相连的有 k 个节点,相连线元长度 l_{ij} (图1),则按水流均衡原理,可得节点 i 处水流方程为:

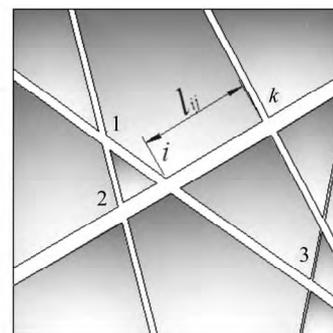


图1 裂隙网络渗流模型

Fig. 1 Seepage model of fracture network

$$\left(\sum_{j=1}^k q_{ij} \right)_i + Q_i = 0 \quad (5)$$

式中, q_{ij} 表示与节点 i 相连的第 j 线元上的流量, Q_i 表示节点 i 处的源汇项, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

当渗流区域有 N 个节点时,则式(5) 变成 N 个方程组,写成矩阵形式为:

$$Aq + Q = 0 \quad (6)$$

式中: $q = [q_1 \ q_2 \ ; \dots \ q_M]^T$ q_i 表示根据单裂隙渗流立方定律求得的第 i 条线元上的流量; $Q = [Q_1 \ Q_2 \ ; \dots \ Q_N]^T$; $A = [a_{ij}]_{M \times N}$ 称为裂隙网络的衔接矩阵,描述了裂隙网络系统中节点和线元的关系。

q_i 具体表达式为:

$$q_i = \frac{gb_i^3}{12\nu(T)l_i} (\Delta H)_i \quad (7)$$

其中: b_i 为线元 i 的裂隙隙宽; l_i 为线元 i 长度, $(\Delta H)_i$ 为线元两端水头差; $\nu(T)$ 为水的运动黏滞系数,为温度函数:

$$\nu(T) = 0.1775 / (1 + 0.033T + 0.000221T) \quad (8)$$

2.2 裂隙网络与覆盖的关系

数值流形方法中数学覆盖是能覆盖全部求解区域的单元网格,材料的边界和裂缝所形成的不连续界面为物理网格,物理覆盖定义为数学覆盖与物理网格的交集,流形单元则是物理覆盖的交集所形成的区域。

在进行裂隙网络渗流场及耦合分析时,传统数值方法单元网格取决于裂隙网络的存在形式,渗流场则由原始裂隙形成的裂隙网络线元和节点决定,这在一定程度上限制了求解效率及精度。与之不同的是,在数值流形方法生成物理覆盖以及流形单元的过程中,覆盖与裂隙网络之间会产生相应的对应关系。

图 2 为由 4 条裂隙形成的含有 3 个节点、7 个线元的裂隙网络。

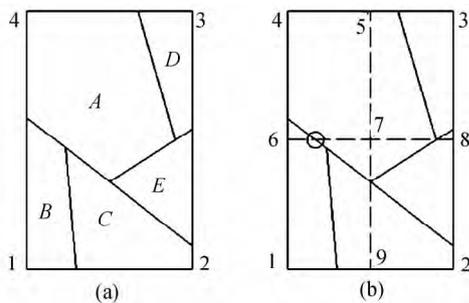


图 2 裂隙网络和覆盖的相互关系

Fig.2 Relation between covers and fracture network

图 2 (a) 中生成 1 个覆盖求解区域的四边形数学网格 1234,由于裂隙的剖分作用,最终形成 A - E5 个流形单元,由此可以采用流形单元进行温度场或力学场的计算,而线元和节点与传统求解方法相同,作为流形单元的边界。图 2 (b) 中采用 4 个四边形数学网格(虚线所示)形成 9 个数学覆盖,由于裂隙作用生

成 31 个物理覆盖和 11 个流形单元。另外,在网格线 6 - 8 剖分作用下,原始裂隙网络增加了 1 个节点(圆圈所示)和 1 条线元,也就是说,由于裂隙和网格在形成覆盖及单元过程中的相互作用,裂隙网络会被细分成更多的线元和节点,这等于对裂隙网络单元进行细化,有助于提高渗流分析的精度。

考虑到数学网格与物理网格、数学覆盖与物理覆盖之间的相互独立关系,数学网格的形式并不会影响原始的裂隙网络,即图 2 (a) 的原始网络形式。而裂隙网络会对数学覆盖再剖分以形成物理覆盖,此时在前处理的过程中会记录裂隙与数学覆盖的交点,交点与交点之间的线元则形成为物理覆盖的外边界,即部分流形单元的边界。

3 温度 - 渗流耦合的数值流形方法

3.1 裂隙岩体温度渗流耦合微分方程

研究基于岩体的裂隙网络模型^[16],在该模型中,渗流只在裂隙中进行,温度场包含岩块温度场和裂隙水流温度场,由于裂隙水的渗流,温度场和渗流场之间发生耦合作用。温度 - 渗流耦合主要表现在温度对裂隙水运动黏滞系数的影响、水流温度场和岩块温度场在裂隙处进行的温度交换等。在此只讨论温度场和渗流场的稳态问题,并且忽略源汇项。根据^[4-5,16-18]的研究成果,可建立如下温度 - 渗流耦合微分方程:

1) 裂隙网络渗流控制方程

$$A \cdot q = 0 \quad (9)$$

2) 岩块温度场控制方程

岩块热量的传递主要有热传导、热对流和热辐射,而后两者作用相对较小,只考虑热传导,因此岩块温度场控制方程为:

$$\nabla^2 T_r = 0 \quad (10)$$

式中, T_r 为岩块温度。

3) 裂隙水流温度场控制方程

$$\lambda_w \nabla^2 T_w - \rho_w c_w \nabla(VT_w) = 0 \quad (11)$$

式中, λ_w 为水的热传导系数, T_w 为水温, ρ_w 为水的密度, c_w 为水的比热, V 为水的流速。

4) 耦合关系式

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial n_{\Gamma_3}} = \frac{\lambda_r}{\delta} (T_{rb} - T_r) \quad (12)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n_{\Gamma_3}} = \frac{\lambda_w}{\delta} (T_{rb} - T_w) \quad (13)$$

式(12)、(13)为岩块与渗透水流之间温度场耦合关系,其中, T_{rb} 为裂隙壁温度, δ 为裂隙隙宽的一半,

式(8)为裂隙水流温度场与渗流场的耦合关系式,联立式(8)~(13),得到裂隙岩体温度渗流耦合控制微分方程,结合相应的边界条件和初始条件,即可对模型进行求解。

3.2 温度-渗流耦合的数值流形求解步骤

在采用数值流形方法来计算温度-渗流耦合前,首先需要生成覆盖整个求解区域的有限覆盖数学网格,然后分别记录物理网格、物理覆盖、物理网格与数学覆盖各交点及流形元的相关信息。然后根据3.1节所述方法可以分别对裂隙网络渗流场、温度场进行计算,耦合求解步骤与有限元方法类似^[4],具体如下:

1) 根据已知渗流边界条件、达西定律和立方定律,基于流形单元形成的节点和线元,按照公式,求解出初始渗流水头分布 $H_0(x, y)$ 和速度分布 $V_0(x, y)$ 。

2) 根据式(10)~(13),代入求出的渗流速度 $V_0(x, y)$,按照数值流形方法求出岩块和裂隙水流温度分布 $T_{r0}(x, y)$, $T_{w0}(x, y)$ 。

3) 根据式(7)~(9),代入求出的水流温度 $T_{w0}(x, y)$,裂隙网络渗流原理求出渗流水头分布 $H_1(x, y)$ 和速度分布 $V_1(x, y)$ 。

4) 重复步骤2)、3)。

5) 当渗流水头分布场和温度分布场满足一定的收敛条件后,计算结束,输出最后一次的温度分布情况及渗流水头分布情况。

该方法的主要特点是,通过采用同一套数学网格,在前处理过程中实现了裂隙网络渗流节点、线元的细化及流形单元的生成,并可以实现渗流和温度场分布的求解,体现了数值流形方法在解决不连续介质裂隙岩体的优势。同时,由于渗流裂隙网络必定会与材料边界相交,不会出现裂隙尖灭在数学覆盖单元内部的情况,因此数学网格的生成就具有较大的随意性,在不改变数学网格密度的情况下,可以简单地通过提高覆盖温度函数阶数来提高计算精度。

4 算例

4.1 矩形棱柱体温度场算例

算例来自文献[19],考虑无限长的矩形棱柱体,横断面为矩形,断面尺寸 $10\text{ m} \times 4\text{ m}$,初始温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, AD 、 BC 两面为绝热边界, AB 、 CD 给定温度 $10\text{ }^\circ\text{C}$,导温系数为 $0.1\text{ m}^2/\text{d}$,流形元计算网格如图3所示,计算区域不稳定温度场,图4为第20天温度分布理论解与数值解对比图,由图4可知计算点温度基本全部落在理论界曲线上。

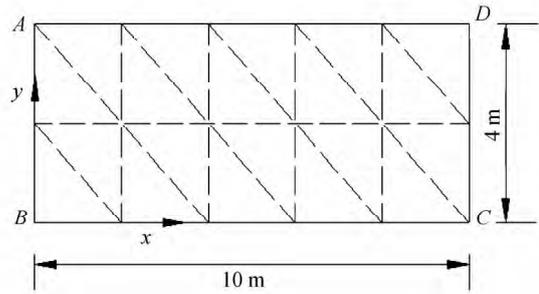


图3 数值流形计算网格

Fig. 3 Meshes of NMM

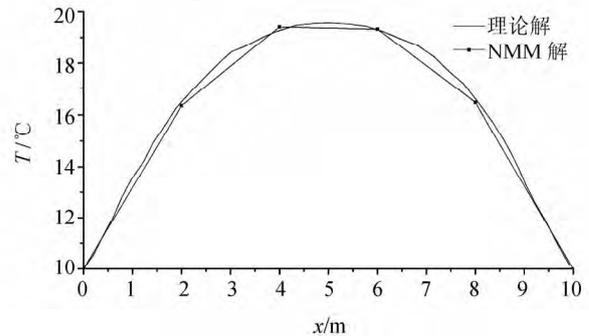


图4 数值解和理论界对比图

Fig. 4 Comparison of the temperature results from NMM and analytical solutions

4.2 裂隙网络渗流算例

数值计算所选用的网格与匈牙利学者 Öllös 的方形网格试验模型^[20]相同,如图5所示。

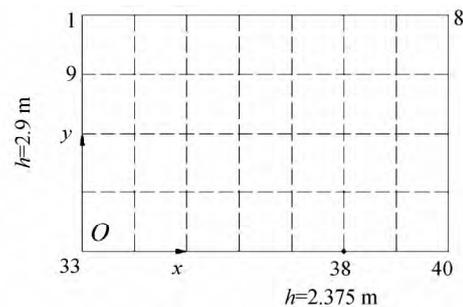


图5 试验模型

Fig. 5 Model of öllös test

区域尺寸 $1.4\text{ m} \times 0.8\text{ m}$,计算边界条件与试验边界条件相同,正交裂隙网络的左侧为定水头边界,其水头值为 2.9 m ,其余为隔水边界,底部有一出水口(38号节点),定水头值为 2.375 cm ,裂隙间距均为 20 cm ,隙宽 0.4 mm ,虚线表示裂隙。采用数值流形计算渗流场时,生成1个4边形数学网格 $1-33-40-8$ 。试验和数值模拟得到的渗流场等值线见图6。

由图6可知,选用1个数值流形数学网格所计算得到的渗流场水头等值线图 and 试验结果具有较好的一致性,数值计算结果比试验结果曲线更加光滑,这是由于数值计算比较理论化而造成的,同时,试验

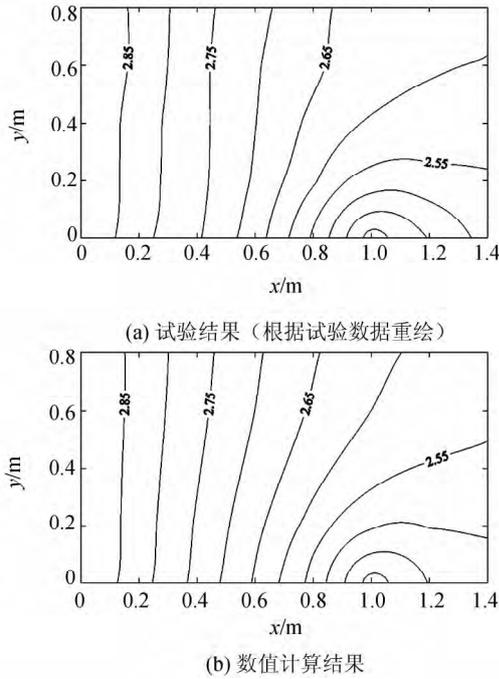


图 6 试验及数值模拟水头等值线图

Fig. 6 Contour map of water head of test and numerical simulation

结果较模拟结果在出口处水力坡降更大,这是由于模拟时没有考虑到裂隙之间的粗糙度,因此按照立方定律来计算得到的渗透系数较试验大,在定流量的条件下相应的水力坡降会降低。

4.3 温度 - 渗流耦合算例

基于作者所提出的温度 - 渗流耦合的数值流形方法,采用 MATLAB 软件编制数值流形温度 - 渗流耦合计算程序,模拟某大坝建成后坝基裂隙岩体渗流场与温度场分布情况。

大坝坝高 80 m,坝底宽 60 m,蓄水深度 70 m,下游水头 10 m。坝上游水库水深 60 m 以下保持 10 °C 不变,下游水位较浅,水底平均温度 20 °C。坝基岩体为坚硬沉积岩,计算区域 ABCD 尺寸为 160 m × 60 m。区域内主要发育有 2 组裂隙,裂隙参数见表 1。采用蒙特 - 卡罗法生成计算区域裂隙网络,数值计算采用规则三角形单元作为数值流形的数学网格,具体见图 7,其中,粗线部分为计算区域及裂隙网络,虚线为数值流形的数学网格。

表 1 裂隙参数表
Tab. 1 Parameters of fractures

| 分布情况 | 倾角 | | 迹长 | | 隙宽 |
|-------|--------|--------|-------|--|----|
| | 正态分布 | | 负指数分布 | | |
| | 均值/(°) | 方差/(°) | 均值/m | | |
| 第 1 组 | 60 | 7 | 20 | | 15 |
| 第 2 组 | 125 | 5 | 15 | | 15 |

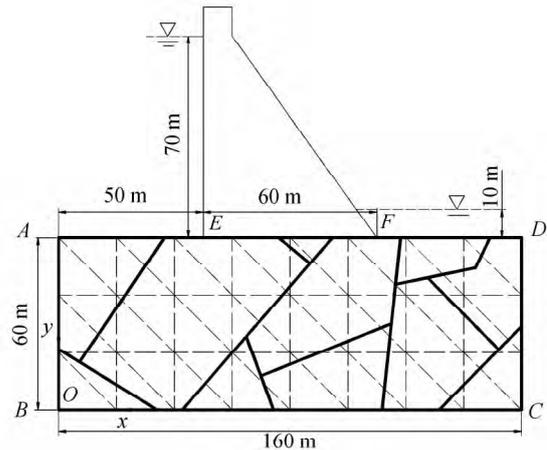


图 7 大坝计算模型及数值流形数学覆盖

Fig. 7 Calculating model of rock dam and mathematical covers of NMM

计算边界条件为: AE 边为定水头 70 m,定温度 10 °C,DF 边为定水头 10 m,定温度 20 °C,其余均为绝渗和绝热边界,模型主要计算参数见表 2。

表 2 模型温度 - 渗流参数值

Tab. 2 Thermo-hydraulic parameters of model

| 介质 | 密度/ (g · cm ⁻³) | 比热/ (J · (g · °C) ⁻¹) | 热传导系数/ (W · (m · °C) ⁻¹) |
|----|--------------------------------|--------------------------------------|---|
| 岩石 | 2.70 | 0.86 | 2.3 |
| 水 | 1.0 | 4.18 | 0.6 |

通过计算,可以获得坝基裂隙岩体在温度 - 渗流耦合作用下的渗流水头分布和温度分布(图 8、9)。

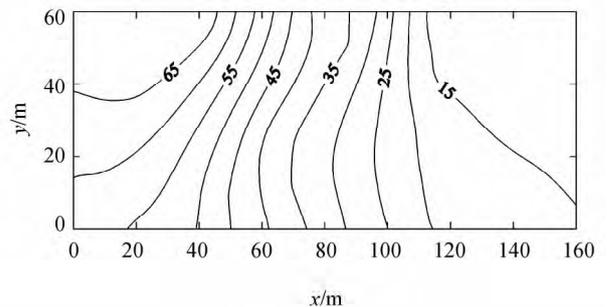


图 8 温度 - 渗流耦合作用下渗流水头等值线图

对于渗流场,由于没有考虑到应力场的作用,裂隙隙宽在耦合过程中不发生变化,温度场主要通过影响水运动黏滞系数来改变渗透系数进而影响渗流场。温度上升使得黏滞系数增大,从而降低了渗透系数,在恒定水头流量下水力坡降会有增大趋势,由图 8 可知,裂隙岩体渗流水头等值线图在温度的作用下朝上游有一个偏转。对于温度场来说,岩块温度主要受裂隙水流交换热的影响,使得裂隙水在渗

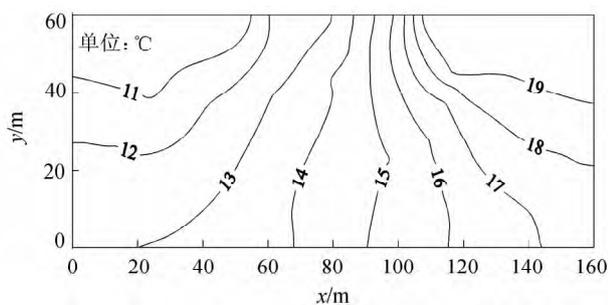


图9 温度-渗流耦合作用下温度等值线图

Fig.9 Temperature contours in coupled thermo-hydraulic flow过程中带走部分岩块热量进而改变温度场,由图9可看出,温度场在裂隙附近会朝下游发生部分偏转,这也显示出了温度场-渗流场耦合作用的存在。

5 结论

数值流形理论是一种可以统一处理连续及非连续问题的数值方法,基于裂隙网络模型,提出了针对裂隙岩体温度-渗流耦合的数值流形方法。

通过分析裂隙对温度场的影响形式及裂隙网络与流形覆盖的关系,提出了考虑裂隙影响条件下的温度场和渗流场的数值流形分析方法。在温度-渗流耦合分析时,采用同一套数学网格,通过物理覆盖和流形单元的生成,以节点水头和温度覆盖函数为求解未知量,实现了以流形覆盖中节点和线元进行渗流计算,流形单元进行温度计算的耦合计算过程。最后编制 MATLAB 程序,通过温度场、渗流场及坝基裂隙岩体温度-渗流耦合分析算例说明了方法的合理性。

温度-渗流耦合及温度场-渗流场-应力场 (THM) 耦合目前研究较多,基于前人在耦合模型及控制方程上的研究成果,提出了裂隙岩体温度-渗流耦合模拟的数值流形方法,在耦合计算时,可以保持网格不变,通过提高覆盖函数阶数来改善计算精度。鉴于数值流形在处理裂隙问题上的优势,对于后续研究耦合作用下岩体裂隙扩展及工程结构的破坏模拟都是较为有用的。

参考文献:

[1] Tsang C F, Stephansson O, Jing Lanru, et al. DECOVALEX project: From 1992 to 2007 [J]. Environmental Geology, 2009, 57: 1221 - 1237.
 [2] Tsang C F, Jing Lanru, Stephansson O, et al. The DECOVALEX III project: A summary of activities and lessons learned [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42: 593 - 610.

[3] Liu Ming, Zhang Qiu, Liu Zhongqiu, et al. Study on thermo-hydro coupling model of underground structure with permeability coefficient changes [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(2): 183 - 188. [刘明, 章秋, 刘仲秋, 等. 考虑渗透系数变化的地下结构温度-渗流耦合分析 [J]. 力学季刊, 2011, 32(2): 183 - 188.]
 [4] Chai Junrui. On mathematical model for coupled seepage and temperature field in concrete dam [J]. Journal of Hydro Electric Engineering, 2000(1): 27 - 35. [柴军瑞. 混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型 [J]. 水力发电学报, 2000(1): 27 - 35.]
 [5] Zhao Yanlin. Dual media model for thermo-hydro-mechanical coupling and 3D numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4024 - 4031. [赵延林. 双重介质温度场-渗流场-应力场耦合模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4024 - 4031.]
 [6] Zhang Yujun. Coupled thermo hydro-mechanical model and finite element analyses of dual-porosity fractured medium for ubiquitous-joint rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 947 - 955. [张玉军. 遍有节理岩体的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型及有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 947 - 955.]
 [7] Zhao Yangsheng, Wang Ruifeng, Hu Yaoqing, et al. 3D numerical simulation for coupled THM of rock matrix-fractured media in heat extraction in HDR [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1751 - 1755. [赵阳升, 王瑞凤, 胡耀青, 等. 高温岩体地热开发的块裂介质固流热耦合三维数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1751 - 1755.]
 [8] Millard A, Durint M, Stietel A, et al. Discrete and continuum approaches to simulate the thermo-hydro-mechanical couplings in a large fractured rock mass [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Abstract, 1995, 32(5): 409 - 434.
 [9] Wang Enzhi, Wang Hongtao, Sun Yi. Study on seepage flow model in double fracture systems [J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering ,1998 ,17(4) : 400 - 406.
- [王恩志,王洪涛,孙役. 双重裂隙系统渗流模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报 ,1998 ,17(4) : 400 - 406.]
- [10]石根华. 数值流形方法与非连续变形数值分析新方法 [M]. 裴觉民,译. 北京:清华大学出版社,1997.
- [11]Wei Gaofeng ,Feng Wei. Incompatible numerical manifold method based on heat exchange problem [J]. Chinese Quarterly of Mechanics ,2005 ,26(3) : 451 - 454. [魏高峰,冯伟. 热传导问题的非协调数值流形方法 [J]. 力学季刊 , 2005 ,26(3) : 451 - 454.]
- [12]Li Shuchen ,Li Shucai ,Zhang Jingwei. Numerical manifold method for the potential problem [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2006 ,28(12) : 2092 - 2097. [李树忱,李术才,张京伟. 势问题的数值流形方法 [J]. 岩土工程学报 ,2006 ,28(12) : 2092 - 2097.]
- [13]高洪芬. 复变量无网格流形方法研究 [D]. 上海:上海大学,2010.
- [14]Jiang Qinghui ,Deng Shushen ,Zhou Chuangbing ,et al. Modeling unconfined seepage flow using three-dimensional numerical manifold method [J]. Journal of Hydrodynamics , 2010 ,22(4) : 554 - 561.
- [15]Liu Quansheng ,Liu Xuewei. Preliminary research on numerical manifold method for temperature field of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2013 ,35(4) : 635 - 642. [刘泉声,刘学伟. 裂隙岩体温度场数值流形方法初步研究 [J]. 岩土工程学报 ,2013 , 35(4) : 635 - 642.]
- [16]Wu Yanqing. The basis of rock mass hydraulics(5) —fracture network model of coupled HM [J]. Hydrogeology & Engineering Geology ,1997 ,24(5) : 41 - 45. [仵彦卿. 岩体水力学基础(五) —岩体渗流场与应力场耦合的裂隙网络模型 [J]. 水文地质与工程地质 ,1997 ,24(5) : 41 - 45.]
- [17]仵彦卿. 岩土水力学 [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [18]Zhang Qihua ,Wu Aiqing. Three-dimensional arbitrary fracture network seepage model and its solution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2010 ,29(4) : 720 - 730. [张奇华,邬爱清. 三维任意裂隙网络渗流模型及其解法 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2010 ,29(4) : 720 - 730.]
- [19]朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [20]郑春梅. 基于 DDA 的裂隙岩体水力耦合研究 [D]. 济南:山东大学,2010.

(编辑 陈晓红)