

考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的 温度场有限元数值分析

许增光¹, 杨荣¹, 柴军瑞^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 裂隙岩体的温度场是岩体多场耦合中重要的研究内容之一,也是国内外研究的热点和难点问题之一。基于热传导方程的基础上,建立考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的温度场数学模型,采用有限单元法进行了数值求解。研究表明:当岩块温度与水流温度存在温度差值时,二者之间会有一定的热量传递,并最终稳定于二者之间的某一温度。所建立的裂隙岩体温度场数学模型为裂隙岩体多场耦合分析奠定了一定的基础。

关键词: 岩体; 裂隙水流; 温度场; 数值计算

中图分类号: O242.21

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0069-04

Numerical analysis of finite element on temperature field in effect of heat exchange of rock and fissure water

XU Zengguang¹, YANG Rong¹, CHAI Junrui^{1,2}

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China.)

Abstract: The temperature field of fractured rock mass is one of the important researches in the multi-field couplings. It is also one of the hot and difficult problems at home and abroad. Based on the heat conduction equation, considering the heat exchange of rock and fissure water, the paper built the mathematical model of temperature field and used finite element method to conduct numerical solution. The result shows that when there is temperature difference between rock and water, there exists heat transmission, and the temperature will keep a value between them. Finally, the model can settle certain foundation for multi-field couplings of fractured rock mass.

Key words: rock; crack fissure water; temperature field; numerical calculation

1 研究背景

在构造、风化、卸荷等的作用下,天然岩体中产生了大量的裂隙,这种以裂隙为主要空隙结构的岩体被称为裂隙型岩体。自20世纪80年代以来,由于新能源技术的快速发展,人们相继在裂隙介质传热领域开辟出了很多新的研究领域,而这些领域都具有非常重要的应用背景,例如:地热的开发、石油的热采、核废料在地下的安全贮存以及核反应堆安全性的分析等。由于部分建有大型水利工程的河流峡谷区经常出现地下水温度异常的现象,查明其具

体产生原因对工程的安全具有极其重要的意义。近年来,随着以上工程领域的深入和发展,进行裂隙型岩体多场耦合的研究已成为国内外研究的热点和难点问题。其中裂隙岩体的温度场是多场耦合中重要的研究内容之一。

自然界热量传递的方式有3种:热传导、对流和辐射。热传导作用主要在固体物质中通过分子间的作用而进行。对流是指可以变形的、依靠受热体部分发生相对位移而传热的介质运动。辐射主要发生在物体的表面,是以电磁波的方式来辐射热量,不需要任何媒介就可以进行^[1-5]。热量传递的载体是多

收稿日期:2014-02-25; 修回日期:2014-03-06

基金项目:陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015);陕西省自然科学基金项目(2013JQ7010);中国博士后科学基金项目(2013M540765);中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101);西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地自主研究基金项目(2013ZZKT-3)

作者简介:许增光(1982-),男,陕西富平人,博士,讲师,主要从事水工岩土渗流方面的研究。

种多样的,裂隙介质及其中的流体就是一类。研究裂隙介质中的热量传递是传热学的一个分支。

目前,人们主要采用等效连续介质模型和离散裂隙网络介质模型对裂隙岩体温度场数学模型进行研究。当岩体中的裂隙表征单元体相对较小、分布相对较密集时,可以将这类岩体看成等效连续介质,也就是认为岩石骨架和岩体中的地下水同时存在于整个岩体空间,这种简化使得人们可以应用热传导理论建立等效连续介质的热量运移数学模型^[6]。当岩体中的裂隙分布相对较稀疏,且渗流主要发生在大的断裂面时,则可以采用裂隙网络系统,也就是认为裂隙岩体这种介质中含有流体,其中岩块部分属于固体骨架,除固体骨架以外的部分叫做裂隙空间,裂隙空间的许多裂隙应当是相互联通的^[7-8]。裂隙介质中的流体能以液相或气相存在于裂隙空间中,这便需要建立基于裂隙网络介质模型之上的温度场数学模型。

由于裂隙介质本身是非常复杂的,因此裂隙介质地下水的热量运移也是一个非常复杂的过程。假如在热运动区域的内部选取一个无限小的平行六面体,则在微小实际段内引发单元体内部温度变化的作用因素主要有:热量输运过程中所包含的机械弥散;热量随着水质点发生运移时的对流作用;通过固相和液相两种介质运输的热量传导作用等。除此之外,还可能受到因温度分布不均而引发的热量对流与水-岩间热量交换作用等因素的影响。Buscheck等(1983)^[9]在考虑自然热量对流情况下建立了含水层二维模型。Molson等(1992)^[10]在考虑自然热量对流情况下建立了潜水含水层模型,且给出了密度随温度发生变化的水流方程。张志辉等(1996)^[11]严格推导了考虑自然热量对流作用的热量传递方程和水流方程,同时建立了相应的非线性模型。Huyakorn等(1984)^[12]通过室内试验测定了在不同粒径下介质热量交换的平衡时间。张志辉等(1997)^[13]介绍到地下水的热量运移过程中,伴随着自然热量对流和水-岩热量交换作用,并经过计算和分析得到了较为满意的结果。赵延林等^[14]通过建立双重温度场-渗流场-应力场耦合的控制微分方程,并根据有限单元法模拟地下高温岩体地热开发系统的算例发现,主干裂隙对温度场的整体分布有显著的影响。强晟等(2008)^[15]采用复合单元模型对不连续岩体的温度场进行了分析。刘泉声等(2010)^[16]采用数值流形法对裂隙岩体温度场进行了分析。高娟等(2013)^[17]进行了考虑渗流作用下

裂隙岩体温度场分布规律的研究。刘泉声等(2013)^[18]采用数值流行方法对裂隙岩体温度场进行了分析。徐维生(2014)等^[19]分析了裂隙水温变化对水体流动的影响。

本文针对裂隙岩体中岩体与裂隙中水流的热量交换问题进行研究,建立考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的温度场数学模型,采用有限单元法进行数值求解,并将其应用于一个裂隙岩体温度场数值计算算例中。

2 数学模型的建立

为了建立考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的温度场数学模型,需要分别建立裂隙水流的热量运移方程和固体骨架(岩块)的热量运移方程,然后通过二者在接触面上的热量交换来完成。

无论岩块温度场还是水流温度场,其基本热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: T 为介质的温度,℃; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为介质在三个方向上的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$; Q 为热量的源(汇)项; c, ρ 分别为介质的比热和密度, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, kg/m^3 。

当裂隙岩体中的岩块温度和水流温度之间存在温度差时,则会在接触表面上产生热量交换,如图1所示。假定接触表面上的岩块温度为 T_r ,裂隙水流的温度为 T_w 。通过岩块表面附近的热流密度和岩温(与水流交接面附近的岩块温度)与水温之差成正比,即 $-\beta(T_r - T_w)$,其中 β 为热交换系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。同理,通过水流表面的热流密度表示为 $-\beta(T_w - T_r)$ 。当 $T_w < T_r$ 时,热量从岩块进入到裂隙水流,当 $T_w > T_r$ 时,热量从裂隙水流进入到岩块。

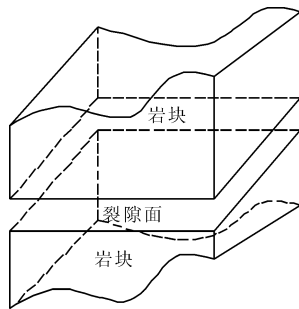


图1 裂隙岩体分布示意图

根据热量守恒定律,结合式(1)可以得到:

水流温度场

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{wx}\frac{\partial T_w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{wy}\frac{\partial T_w}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{wz}\frac{\partial T_w}{\partial z}\right)+\beta(T_r-T_w)+Q_w=c_w\rho_w\frac{\partial T_w}{\partial t}$$

岩块温度场(与水流接触单元)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{rx}\frac{\partial T_r}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{ry}\frac{\partial T_r}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{rz}\frac{\partial T_r}{\partial z}\right)-\beta(T_r-T_w)+Q_r=c_r\rho_r\frac{\partial T_r}{\partial t}\tag{2}$$

岩块温度场(岩体内部)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{rx}\frac{\partial T_r}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{ry}\frac{\partial T_r}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{rz}\frac{\partial T_r}{\partial z}\right)+Q_r=c_r\rho_r\frac{\partial T_r}{\partial t}$$

式(2)为岩块的温度场和水流温度场的耦合方程,两者是通过接触表面上因温度差的存在而引发的热量交换来相互作用的,其仅存在于岩体与裂隙水流的接触面上。

采用有限单元法来求解式(2),由于岩块温度场所研究的区域是被裂隙所分割开的岩块,故采用六面体单元;而对于水流温度场而言,其研究的区域是由裂隙面组成的裂隙网络系统,因此采用裂隙面单元。根据变分原理, $\beta(T_r-T_w)$ 作为源汇项处理,式(2)可化简为泛函的极值问题,推导出二者的求解矩阵表达式,结合定解条件,采用迭代法便可得出耦合的岩块温度场和水流温度场的分布。

3 实例分析

3.1 计算模型、网格剖分和定解条件

选取某裂隙岩体 5 m×20 m×20 m 作为研究区域,如图 2 所示。假设存在两个互相垂直的裂隙面(图 2 黑色粗体线所围成的面)将研究区域划分成了 4 个子区域。岩块为不透水介质,裂隙里面充满水。在进行有限元计算时,每个子区域被剖分为 4 个正六面体单元,故岩块区域共划分为 50 个节点,16 个六面体单元。为了与岩块有限元计算相匹配,两个裂隙面被剖分为 8 个裂隙面单元。假设研究区域各面为绝热边界,岩块内部初始温度为 20℃,裂隙水流的初始温度为 10℃。计算过程中用到的参数见表 1。

3.2 计算结果及分析

运用所编写程序同时计算岩块温度与水流温度分布,其中水流温度场计算结果见表 2,岩块温度场计算结果见图 3~6。

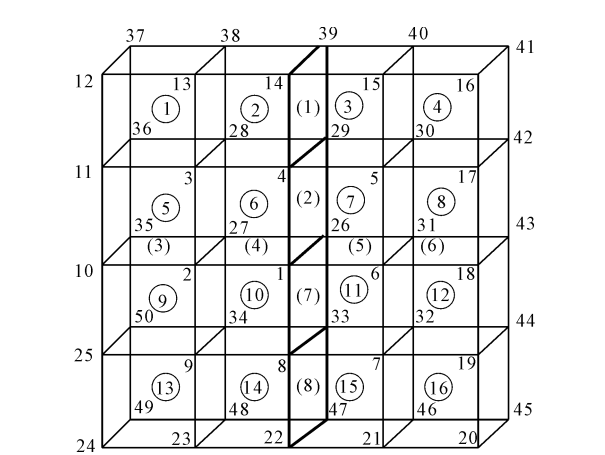


图 2 裂隙岩体示意图

表 1 计算参数

kJ/(kg·℃), kg/m ³ , kJ/(m·s·℃), kJ/(m ² ·s·℃)			
参数名称	取值	参数名称	取值
水的比热	4.1868	岩体比热	0.9672
水的密度	1000	岩体密度	3000
水的导热系数	0.0005	岩体导热系数	0.0020
岩体裂隙表面热交换系数 0.01163			

表 2 不同历时耦合作用的水流温度场计算结果						h, ℃
节点	10	100	1000	5000	10000	
1	11.92	16.80	18.07	18.64	18.79	
2	11.52	16.51	17.85	18.75	18.82	
4	11.52	16.60	17.88	18.74	18.78	
6	11.52	16.60	17.89	18.75	18.74	
8	11.52	16.69	17.92	18.73	18.78	
10	11.28	16.25	18.09	18.81	18.83	
14	11.28	16.19	18.10	18.79	18.80	
18	11.28	16.19	18.09	18.83	18.82	
22	11.27	16.14	18.10	18.83	18.77	
26	10.80	16.31	17.73	18.64	18.79	
27	10.77	15.59	17.48	18.67	18.81	
29	10.77	15.62	17.52	18.68	18.79	
31	10.77	15.62	17.52	18.67	18.79	
33	10.77	15.65	17.55	18.66	18.78	
35	10.73	15.25	17.70	18.65	18.78	
39	10.73	15.22	17.70	18.66	18.81	
43	10.73	15.22	17.70	18.65	18.78	
47	10.73	15.19	17.70	18.65	18.79	

通过耦合对水流温度与岩块温度进行分析,可以看出:

(1)由表 2 可知,由于初始时刻水流温度与岩块温度的差值比较大(10℃),热量迅速由岩块进入水流,水流温度升高较快,100 h 后水流温度接近 16℃,随着时间的推移,裂隙水流温度逐渐稳定在 18~19℃之间。

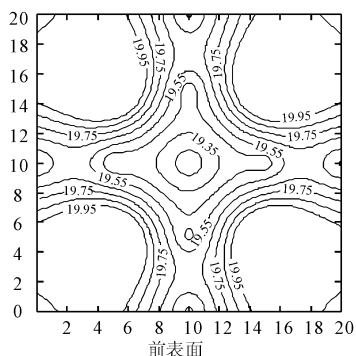


图3 10 h 时耦合的岩块温度场分布(单位:℃)

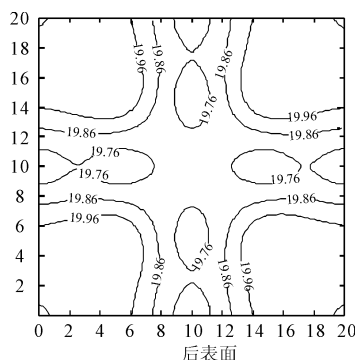


图4 10 h 时耦合的岩块温度场分布(单位:℃)

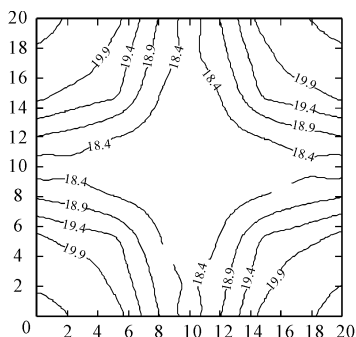


图5 1000 h 时耦合的岩块温度场分布(单位:℃)

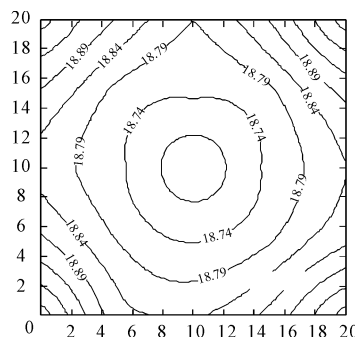


图6 5000 h 时耦合的岩块温度场分布(单位:℃)

(2)由图3、5和6对比看出,由于刚开始水流温度比较低,故与裂隙接触的岩块迅速把热量传给水,岩块温度逐渐下降,进而离裂隙较远的岩体又把自身的热量传递给离裂隙较近的岩体,最终整个岩体区域温度下降,也稳定在18~19℃之间。

(3)由图3和4对比分析可得,由于所给研究区域前后两表面对称,所以同一时刻两表面上的温度等值线图基本一致。

4 结 语

基于热传导方程建立了考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的温度场数学模型,采用有限单元法进行了数值求解,并将其应用于某裂隙岩体的温度场数值计算过程中。结果表明,当岩块温度与水流温度存在温度差值时,二者之间会有一定的热量传递,并最终稳定于二者之间的某一温度;由于岩体区域所含总的热量远远超过裂隙水流所含热量,因此岩块温度达到稳定需要的时间比水流温度达到稳定所需时间要短得多。所建立的裂隙岩体温度场数学模型为裂隙岩体多场耦合分析奠定了一定的基础。

参考文献:

[1] 戴锅生. 传热学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版

社,1999:8-9.

- [2] 卓宁,孙家庆. 工程对流换热[M]. 北京:机械工业出版社,1982:79-86.
- [3] J. A. 亚当斯, D. F. 罗杰斯. 章靖武, 蒋章焰译. 传热学计算机分析[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [4] 陶文铨,何雅玲,等. 对流换热及其强化的理论与实验研究最新进展[M]. 北京:高等教育出版社,2005:34-41.
- [5] 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,1999:101-110.
- [6] 董羽蕙,屈俊童. 大体积混凝土温度场的仿真分析[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2004,29(5):87-91.
- [7] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:105-115.
- [8] 周志芳,顾长存. 裂隙水研究进展[J]. 河海科技进展,1994,14(1):50-55.
- [9] Buscheck T A, Doughty C, Sang C F T. Prediction and analysis of a field experiment on multilayered aquifer thermal energy storage system with strong buoyancy flow[J]. Water Resources Research, 1983,19(5):1307-1315.
- [10] Molson J W, Frind E O, Palmer C D. Thermal energy storage in an unconfined aquifer, 2. Model development, validation and application[J]. Water Resources Research, 1992, 28(10):2857-2867.

(下转第78页)

为明显,且均存在 2 a 组短期波动,表明 2009 年以来的径流偏枯期将持续 13 a 左右,即 2012 – 2021 年径流仍将处于偏枯期,松华坝水库入库水量和可供水量将受到影响。

(4)径流 1998 年为突变时段,回归非突变时段后,于 2011 年开始发生突变;输沙 1994 – 1999 年为突变时段,回归非突变时段后,于 2010 年开始发生突变。

(5)径流的未来趋势与过去一致,即仍将延续波动下降的趋势,但趋势性不强;输沙基本上是一个随机过程,未来变化趋势具有极高的不确定性。径流与输沙年内分配集中度的未来趋势与过去一致,即径流年内分配集中度仍将延续波动下降的趋势,而输沙年内分配集中度仍将延续波动上升的趋势,且输沙年内分配未来变化的趋势性更强。

由于水土流失及输沙量除了与降水、径流密切相关外,还与下垫面状况有关。各时段人类活动导致的下垫面变化可能是引起输沙变化趋势与径流在保持基本一致的基础上又存在一定差异的原因。

参考文献:

[1] 夏 军,左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展,2006,21(3):256 – 261.

[2] 国家发展和改革委员会、水利部、建设部、环保总局、卫生部. 关于印发全国城市饮用水安全保障规划的通知(发改地区[2007]2798 号)[Z],2007.

[3] 李云驹,潘剑君,许建初,等. 气候和土地利用变化对松华坝流域水资源的相对作用研究[J]. 南京农业大学学报,2012,35(1):80 – 86.

[4] 许成娟,梁 川. 昆明市松华坝水源保护区水资源安全综合评价[J]. 安全与环境学报,2012,12(1):161 – 165.

[5] 邱学礼,付 斌,夏体渊,等. 松华坝水库入库河流牧羊河水质时空变异特征[J]. 水土保持学报,2012,26(1):255 – 258.

[6] 李宗逊. 水源保护区保护的概念框架 – 以昆明市松华坝水源保护区为例[J]. 生态经济,2007(6):137 – 139.

[7] 陈加莉,尹 浩. 松华坝水库源区旱地生态修复研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(24):11696 – 11698.

[8] 牛芳兵,朱克西. 昆明市松华坝水源区人口容量分析[J]. 云南农业大学学报(社会科学版),2010,4(2):1 – 4.

[9] 赵 晶,王乃昂. 近 50 年来兰州市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理,2002,25(1):90 – 95.

[10] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学,2010,25(1):39 – 44 + 63.

[11] 刘新有,黄英,袁树堂. 昆明松华坝水源区降水特征及小波分析[J]. 水文,2013,33(2):59 – 63.

(上接第 72 页)

[11] 张志辉,薛禹群,谢春红,等. 含水层热量运移中自然热对流作用的数值模拟[J]. 水科学进展,1996,7(2):99 – 104.

[12] Huyakorn P S, Thomas S D, Thompson B M. Techniques for making finite elements competitive in modeling flow in variably saturated porous media[J]. Water Resources Research, 1984, 20(8):1099 – 1115.

[13] 张志辉,吴吉春,薛禹群,等. 含水层热量输运中自然热对流和水 – 岩热交换作用的研究[J]. 工程地质学报,1997,5(3):269 – 275.

[14] 赵延林,曹 平,赵阳升,等. 双重介质温度场 – 渗流场 – 应力场耦合模型及三维数值研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S2):4024 – 4031.

[15] 强 晟,赵 燕,张 杨. 不连续岩体温度场的复合单元模型初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2094 – 2100.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 徐维生,周创兵. 岩体裂隙网络渗流变水温影响分析[J]. 岩土力学,2014,35(1):204 – 210.