

文章编号: 1000-7598-(2006)10-1727-06

岩石破裂过程 TMD 耦合数值模型研究

李连崇^{1,2}, 杨天鸿^{1,2}, 唐春安², 黄小兰¹, 李夕兵³

(1. 中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071; 2. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006;
3. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 从岩石的细观结构层次出发, 应用损伤力学和热弹性理论, 对热力耦合作用下岩石破裂过程中热-应力-损伤相互作用关系进行了分析。初步建立了细观热-应力-损伤 (TMD model, thermal-mechanical-damage) 耦合数值模型, 并在岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D} 中加实现。运用该数值模型计算模拟均匀与非均匀材料试样在热力耦合作用下的应力分布及破坏形态, 通过与理论及试验结果对比, 证明了该数值模型的合理性和有效性。

关 键 词: 岩石破裂; 非均匀性; 损伤; 热传导率; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study on coupled thermal-mechanical-damage model in rock failure process

LI Lian-chong^{1,2}, YANG Tian-hong^{1,2}, TANG Chun-an², HUANG Xiao-lan¹, LI Xi-bin³

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Centre for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the heterogeneous characteristics of rock at mesoscopic level, the thermal-stress-damage coupled action during the failure process of rock subjected to thermal stress is described with elastic damage mechanics and thermal-elastic theory. A mesoscopic thermal-mechanical-damage coupling model, implemented in rock failure process system, RFPA^{2D}, is proposed. The RFPA^{2D} is used to simulate the stress distribution and failure patterns in homogeneous and heterogeneous specimen subjected to thermal loading. The numerical results coincide well with the corresponding mathematic resolution and experimental results; so it is proved that the proposed model as well as the numerical system (RFPA^{2D}) are reasonable and effective in investigating the failure of heterogeneous materials under thermal stress.

Key words: rock failure; heterogeneity; damages; thermal conductivity; numerical simulation

1 引 言

岩石热应力、热损伤理论研究在核废料的安全处置、深埋隧道工程的建设、煤与油页岩的现场气化、三次采油、地热能的开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用等工程领域中具有重要的应用价值, 又因其热力 (TM) 耦合作用研究涉及岩体力学、工程热力学学科之间相互交叉和渗透, 具有重要的理论意义, 因此多年来一直是岩体力学的热点和前沿问题之一^[1~8]。

近年来基于质量、能量和动量守恒原理建立的热-力耦合数值模型和计算机程序得到不断的开发

和应用^[3~10], 尤其是自 1992 年以来瑞典、美国、日本等 7 个国家的 14 个研究机构联合进行了 DECOVALEX 的国际合作项目, 对岩体的热、水、力交叉耦合过程进行了理论和实验研究, 取得了许多有意义的研究成果^[10]。但在目前热力耦合作用的研究中, 由于热力耦合问题的特殊性 (高温、高压)、复杂性 (多场耦合), 缺少更为有效的试验设备和试验手段, 所建立的数值模型中对受载过程中岩石介质细观损伤演化在热力耦合作用中发挥的作用考虑的不够, 而绝大多数岩石在一定程度上都属含孔隙材料, 广泛分布有原始的细观、微观缺陷, 当受热或承受一定载荷后不可避免地会在其中产生大量细

收稿日期: 2004-12-15

修改稿收到日期: 2005-09-27

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (No. 50490274); 中国科学院岩土力学重点实验室开放基金资助 (No. Z110404)。

作者简介: 李连崇, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学多场耦合方面的数值模拟研究工作。E-mail: li-lianchong@163.com

观裂纹,并随着温度的升高或载荷的增大而逐渐扩展,逐渐形成宏观裂隙,载荷、介质的热力学特性都将不同的力学机制影响裂隙的扩展、贯通,而裂隙的扩展、贯通又将影响热的传导及对流特性。应力诱发材料受力性能的劣化对温度场分布变化的影响确实存在,文[11~14]的研究表明了材料热力学特性随温度的显著变化,不考虑热应力诱发的损伤对岩石热力学特性影响的数值模型是不可靠的。所以,建立一种描述岩石损伤演化过程的热力耦合模型对于揭示多场耦合作用下岩石宏观破坏行为具有科学价值。

本文从细观角度建立了具有脆性特征的岩石热-应力-损伤耦合模型(TMD model),初步进行了岩石破裂过程热-应力-损伤耦合机制分析。

2 热-应力-损伤耦合模型

天然岩石在地质史演变过程中,由于各种组成矿物成分力学性质上的差异决定了其作为一种非均匀材料,无论从宏观、细观,还是微观的角度来考察,岩石中都存在着各种的缺陷、裂隙、空洞、层理或节理,这些缺陷无疑会对岩石的力学性能产生或多或少的影。为了深入了解岩石的断裂特征,人们通过大量的试验观测了岩石中裂纹的萌生、扩展与贯通过程,发现岩石的断裂和破坏过程实际上就是其内部裂纹萌生、扩展和贯通的整个过程。

本文在利用数值方法研究岩石材料在热力耦合作用下的破坏过程时,为了反映岩石材料性质的细观非均匀性,首先要用把岩石材料看作是由大小相同的四边形单元组成,假定其材料性质满足 Weibull 分布^[15,16],同时将这些组成材料的单元也作为有限元分析的单元,在考虑材料力学性质非均匀性的前提下,用细观上简单的本构模型研究复杂的材料破坏过程,也正是细观力学研究的一个重要的观点^[16],有关材料性质的 Weibull 分布赋值问题及细观单元本构关系,文[16]中作了详细地介绍。

本文提出的热-应力-损伤耦合模型基于如下基本假设:(1)岩石材料是非均匀的,组成岩石的细观单元体的损伤参量满足一定的概率(Weibull)分布;(2)岩石中热传导过程遵循 Fourier 导热定律;(3)岩石中细观单元体为弹脆性的并具有残余强度,它的力学行为用弹性损伤理论描述,最大拉应变准则和 Mohr-Coulomb 准则作为损伤的阈值条件;(4)细观单元体弹性状态下热力学特性保持不变,损伤破裂后热传导率及比热发生突变。下面给出基于细观单元的热-应力-损伤耦合关系方程。

2.1 热-应力耦合基本方程(TM model)

岩石中热传导过程遵循 Fourier 导热定律:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T \quad (1)$$

式中, ρ 为体力密度(kg/m^3); λ 为热传导系数($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$); c 为比热值($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)。

温度变化引起膨胀(收缩)应力为

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} - (2\mu + 3\lambda) \beta \delta_{ij} T \quad (2)$$

式中, D_{ijkl} 为弹性张量; β 为热膨胀系数($1/^\circ\text{C}$); T 为温度变化($^\circ$); μ 和 λ 为拉梅常数; δ_{ij} 为 Kronecker 常数。

2.2 热-损伤耦合方程(TD model)

当单元的应力状态或者应变状态将满足某个给定的损伤阈值时单元开始损伤,损伤单元的弹性模量表达为

$$E = (1 - D) E_0 \quad (3)$$

式中, D 为损伤变量; E 和 E_0 分别为损伤单元和无损单元的弹性模量。假定这些参数都是标量。

单元损伤前,热传导系数 λ 为一常数,单元损伤后 λ 是温度和损伤变量的函数,这样既可以描述单元热传导系数 λ 在弹性状态下随应力应变的变化规律,又可以反映单元热传导系数 λ 在破裂损伤后继续随着温度、应力应变的作用而变化。下面以单轴压缩为例,介绍单元的热-损伤耦合方程。

当单元达到抗拉强度 f_t ,以最大拉应力(变)准则作为细观单元损伤判据:

$$\sigma_3 \leq -f_t \quad (4)$$

损伤变量按下式表达:

$$D = \begin{cases} 0 & , \quad \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon \\ 1 - \frac{f_{tr}}{E_0 \varepsilon} & , \quad \varepsilon_m \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \\ 1 & , \quad \varepsilon \leq \varepsilon_m \end{cases} \quad (5)$$

式中 f_{tr} 为受拉破坏后的残余强度,其余参数见图 1。单元热传导系数的描述按下式:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_0 & , \quad D = 0 \\ 1 + \frac{\lambda_0}{0.99 + T(a - b/\lambda_0)} & , \quad 0 < D < 1 \\ \xi_1 \lambda_0 & , \quad D = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 a 、 b 为经验参数。对于结晶岩、沉积岩等岩性, 文[13]给出了试验结果。这里 ξ_1 ($\xi_1 < 1$) 是损伤引起的单元热传导系数突变系数。

当单元的剪应力达到 Mohr-Coulomb 损伤阈值时,

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \geq f_c \quad (7)$$

式中, ϕ 为摩擦角; f_c 为单轴抗压强度。按式(8)按下式表达:

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon < \varepsilon_{c0} \\ 1 - \frac{f_{cr}}{E_0 \varepsilon}, & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

式中 f_{cr} 为压剪破坏后的残余强度, 其余参数见图 1。单元热传导系数的描述按下式:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_0, & D = 0 \\ \frac{\lambda_0}{0.99 + T(a - b/\lambda_0)}, & D > 0 \end{cases} \quad (9)$$

无论是拉伸破坏, 还是压剪破坏, 当细观单元达到损伤阈值时其储热能力发生变化^[13], 在模型中细观单元比热按如下方程演化:

$$c = \begin{cases} c_0, & D = 0 \\ c_0 T^\omega, & 0 < D < 1 \\ \xi_2 c_0, & D = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, ω ($0 < \omega < 1$) 为经验系数; ξ_2 ($\xi_2 < 1$) 为损伤引起的细观单元比热值突变系数。

当把式(5)、式(8)拓展到三维应力状态下时, 用最大拉应变 ε_3 方程替代式(5)中的应变 ε , 或者用最大压应变 ε_1 替代方程式(8)中的压应变 ε 。根据广义虎克定律, ε_3 和 ε_1 分别反映了其他应力的作用, 单元强度按比例相应提高。

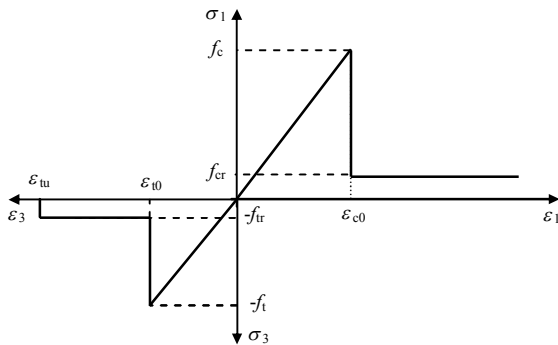


图 1 单轴拉伸和压缩下细观单元本构模型

Fig.1 Elastic damage constitutive law for element under uniaxial compressive stress and tensile stress

3 热-应力-损伤耦合模型的数值方法设计

本文提出的热-应力-损伤耦合模数值型在岩石破裂过程分析系统 RFPA^[15, 16]中予以实现, 计算流程如下: ①进行热传导计算, 求解单元温度分布; ②按有效应力原理进行应力分析; ③进行单元损伤演化计算; ④按热-损伤耦合方程求解损伤后热传导系数及比热的变化值; ⑤比较前后两步数值的迭代误差, 直到满足给定的精度为止; ⑥重新回到第①步计算, 进入下一个载荷步。

RFPA^{2D} 系统中是应用有限元技术进行热传导和应力计算, 针对介质的非均匀性, 把模型离散为不同参数分布的细观单元。仿真计算过程是准静态的, 对于每一个加载步, 模型计算出一个热-应力-损伤耦合迭代结果, 并按最大拉应变准则和 Mohr-Coulomb 准则对单元进行损伤判断, 对损伤单元的力学行为用弹性损伤方程描述, 之后进入下一个加载步的计算, 最后统计模型整体的应力应变、热力学特性再分布结果。

4 数值模拟算例

由于热力耦合问题的特殊性、复杂性 (多场耦合), 且缺少更为有效的试验设备和试验手段, 很难直观扑捉到岩石试件破裂过程应力场和温度场演化的动态演化图像。数值模拟方法是获取这些信息的有力工具, 能帮助人们认识岩石破裂演化过程的复杂机制。

4.1 模拟算例——均匀热应力场验证

数值模型采用二维平面应力薄板模型。设薄板为均匀材料, 弹性模量为 50 GPa, 热膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$, 板高 50 mm, 宽 100 mm, 共有 $50 \times 100 = 5000$ 个单元。薄板两端约束, 上下边界自由, 同时, 下边界施加 100°C 的高温, 上边界保持 0°C , 左右边界绝热。模型如图 2 所示, 薄板内应力分布理论解为 $\sigma_x = E\alpha T_l$, $\sigma_y = 0$, 其中 a 为热膨胀系数; T_l 为沿 Y 向 1 处的温度。图 3 为数值计算所得到的 X 方向应力分布与理论解的对比, 所取值是从原点沿 Y 轴向下的应力值, 模拟结果与理论解基本吻合。再看模拟结果图 4, 温度场从薄板顶端到底部呈现出均匀的梯度分布, 与理论解表现出了较好的一致性。

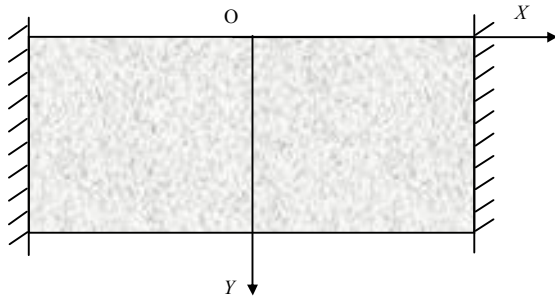


图 2 数值模拟试验的结构布置图
Fig.2 Configuration for numerical test

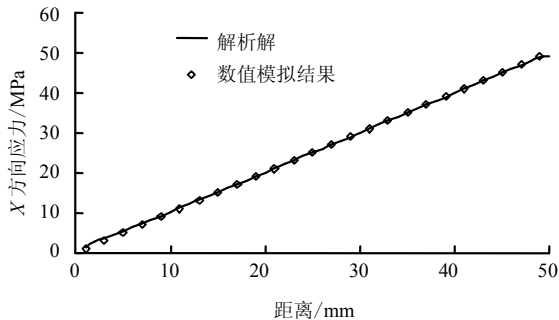


图 3 解析解与数值模拟应力分布对比结果
Fig.3 Comparison of stress distribution with mathematic resolution and simulation result (RFPA^{2D} simulated)

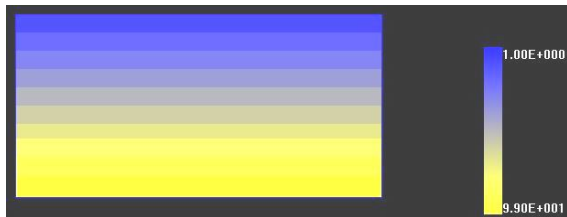


图 4 薄板中的温度场（数值模拟结果）
Fig.4 Numerically obtained thermal field in the board (RFPA^{2D} simulated)

4.2 模拟算例-热应力诱发非均匀材料破坏模式分析

4.2.1 模型设置

为模拟非均匀材料在热应力作用下的破坏过程，本文设计了如图 5 所示的数值试样，试样的基质和中央的硬颗粒同时受热（增量为每步 10 °C），共划分 40 000 个细观单元。在 RFPA 数值模拟中，为了考虑材料的非均匀性对试样裂纹扩展及断裂过程的影响，组成试样单元的物理力学参数（包括弹性模量、强度等）按照 Weibull 分布来赋值，见式 (11)，式中的 s 分别代表 E_0 、 f_c 、 λ 等； s_0 代表与之相对应的平均值； m 为用来描述试样均匀性的均质度系数，这里试样基质和硬颗粒的均质度都取 $m=3$ 来进行模拟研究。均质度系数高的代表试样材料更加均匀，材料参数按表 1 中的数值选取。

$$\varphi = \frac{m}{s_0} \left(\frac{s}{s_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{s}{s_0} \right)^m \right] \quad (11)$$

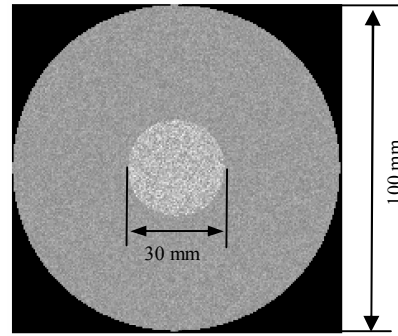


图 5 带有颗粒的圆形试样
Fig.5 Numerical circular specimens with inclusion

表 1 材料力学参数（平均值）

Table 1 Input material mechanical properties-mean values

力学参数	赋值	
	基质	颗粒
弹性模量 E_0 /GPa	50	80
泊松比 ν	0.25	0.26
内摩擦角 φ /(°)	30	35
单轴抗压强度 f_c /MPa	160	300
抗拉强度 f_t /MPa	16	30
热膨胀系数 α /°C ⁻¹	1.0×10^{-5}	1.1×10^{-5}
热传导系数 λ /W·(m·°C) ⁻¹	1.2	1.1
比热 C /J·(kg·°C) ⁻¹	900	900

4.2.2 模拟结果分析

图 6 显示了由不断增大的热应力所造成的试样的损伤演化和破坏过程。由于基质和颗粒具有不同的热传导系数和热膨胀系数，因此在基质和颗粒的界面上造成了变形的不协调，继而在颗粒周围产生了明显的应力集中现象。中央的硬颗粒完全受压应力控制，而基质受拉、压应力的共同控制。当温度达到 300 °C 的时，在试样基质中靠近颗粒的区域有离散的微裂纹及损伤、破坏单元出现；当温度达到 430 °C 的时，一条宏观裂纹在靠近颗粒的右下方形成了，与此同时一些小的微裂纹也不断地在颗粒周边形成；当温度进一步升高后，微裂纹又扩展成几条离散的宏观裂纹，相应地在裂纹尖端形成了明显的拉应力集中区域。同时亦可看到，由于材料的非均匀特性，裂纹总是同时在不同的地方萌生，多数集中在颗粒附近，也有的远离中央颗粒，在裂纹之间有岩桥出现^[17]。随着温度的升高，微裂纹的萌生、宏观裂纹的形成、岩桥的出现总在不断往复。由模拟结果图也可以看到，裂纹在扩展过程中在拉应力的作用下总选择具有最小阻抗力的不规则路径扩展，裂纹面粗糙，同时不断有分叉现象出现。宏观裂纹基本上是以硬颗粒为中心，放射状向外扩展，这与文[18]的试验现象是一致的。

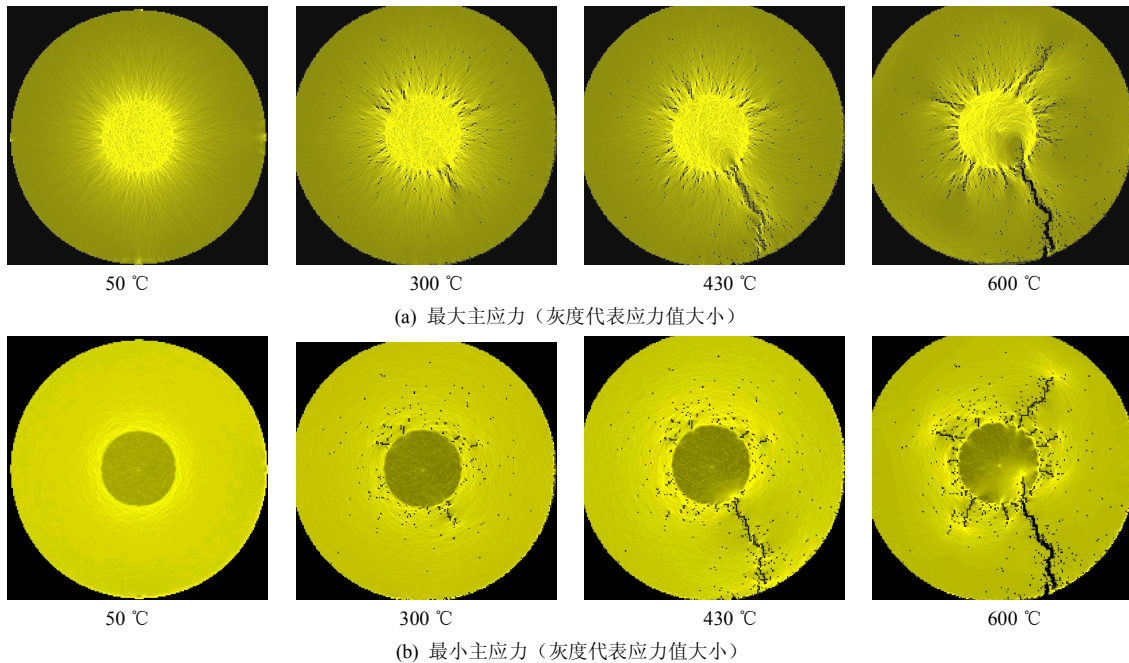


图 6 试样在热应力作用下的破坏过程

Fig.6 Numerically obtained fracturing process of sample with thermal stress (RFPA^{2D} simulated)

图 7 分别给出了在 50 °C 和 500 °C 时试样中部的应力分布情况。虽然 50 °C 时由于材料性质的非均匀性,造成了应力分布的微弱波动,但应力分布总体上较为平缓,只有在基质与颗粒的交界处,由于变形的不协调,有较大的应力起伏。但是,500 °C 时应力分布状况有了明显的不同,颗粒内部出现了明显的应力跳动,在颗粒与基质交界区域呈现出明显的应力起伏,个别损伤、破坏单元处有明显的应力集中现象。

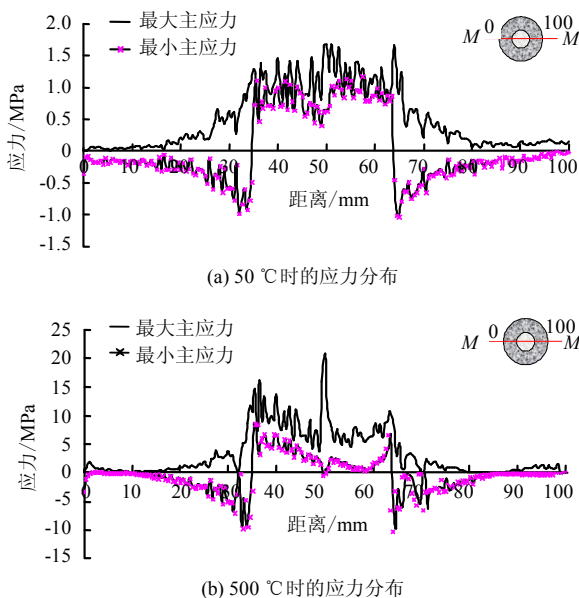


图 7 横贯试样中部的应力分布情况

Fig.7 Numerically obtained stress distribution along mid-section M-M in the specimen (RFPA^{2D} simulated)

限于篇幅,本文只列举了 2 个算例,初步研究了热应力引起的应力分布和材料的破坏机制,有关热损伤破坏的耦合进一步分析,将在另文详细论述。

5 结 语

本文从岩石的细观结构层次出发,应用损伤力学和热弹性理论,对热力耦合作用下岩石破裂过程中热-应力-损伤相互作用关系进行了分析,初步建立了描述细观热-应力-损伤耦合作用的数值模型,并在岩石破裂过程分析系统中加以实现。

以二维平面薄板模型为算例,求得了热力耦合作用下薄板中的应力分布,并与理论解进行了对比分析,数值计算结果与理论解表现出了较好的一致性。运用该数值模型模拟非均匀材料试样在热力耦合作用下的热传导特征和破坏形态,通过数值试验,很好地描述了非均匀在热应力作用下的破坏机制,再现了微裂纹萌生、宏观裂纹形成、岩桥出现的演化过程,以及非均匀性所造成的应力分布、损伤破坏过程的复杂性。通过与理论及试验结果对比,证明了该数值模型的合理性和有效性,且该数值模型为研究复杂环境下的热力耦合作用机制提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] 孙培德, 鲜学福. 核废料深埋处理安全性分析的热-水力耦合模型新进展[J]. 环境科学进展, 1997, 5(4): 68

- 81.
- SUN Pei-de, XIAN Xue-fu. New advance in mathematical models of coupled thermo-hydro-mechanical processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. **Anvances in Encironmental Science**, 1997, 5(4): 68—81.
- [2] 杨立中, 黄涛. 初论环境地质中裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 8(2): 33—35.
- YANG Li-zhong, HUANG Tao. Research format about the coupling among seepage, stress and temperature in fractured rock mass located geological environment[J]. **Hydrology and Engineering Geology**, 2000, 8(2): 33—35.
- [3] 刘亚晨. 核废料贮存裂隙岩体水热耦合迁移及其与应力的耦合分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [4] 许锡昌. 温度作用下三峡花岗岩力学性质及损伤特性初步研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [5] 柴军瑞. 岩体渗流-应力-温度三场耦合的连续介质模型[J]. 红水河, 2003, 22(2): 18—20.
- CHAI Jun-rui. Continuum model for coupled seepage, stress and temperature fields in rock mass[J]. **Red River**, 2003, 22(2): 18—20.
- [6] Lanru Jing, Chin-Fu Tsang. coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media-mathematical and experimental studies[M]. ISBN: 0-444-82545-2. Elsevier Science B.V.All Rights reserved, 1996.
- [7] Tsang C F. Coupled Thermomchanical Hydrochemical Processes in Rock Fractures[M]. [s.l.]: Review of Geophysics, 1991.
- [8] Rutqvist J, Borgesson L, Chijimatsu M, Kobayashi A, Jing L, Nguyen T S, Noorishad J, Tsang C F. Thermohydromechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 105—127.
- [9] Tsang C F, Stephansson O. A discussion of thermo-hydro-mechanical (THM) processes associated with nuclear waste repositories [J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37: 397—402.
- [10] Jing Lanru, DECOVALEX-An International co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(5): 389—398.
- [11] Seipold U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks-a general law[J]. **Technology Physics**, 1998, 291: 161—171.
- [12] Sibbitt W L, Dodson J G, Tester J W. Thermal conductivity of crystalline rocks associated with energy extraction from hot dry rock geothermal systems[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1979, 84: 1 117—1 124.
- [13] Hans-Dieter Vosteen, Rudiger Schellschmidt, Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2003, 28: 499—509.
- [14] Nitin P Padture, Paul G Klemens. Low thermal conductivity in garnets[J]. **Communications of the American Ceramic Society**, 1997, 80(4): 1 018—1 020
- [15] Tang C A. Numerical simulation on progressive failure leading to collapse and associated seismicity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, 1997, 34 (2): 249—261.
- [16] Zhu W C, Tang C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2004, 37(1): 25—56.
- [17] Van Mier JGM. Mode I fracture of concrete: discontinuous crack growth and crack interface grain bridging[J]. **Cement Concrete Research**, 1991, 21: 1—15.
- [18] Zhou YC, Song SG, Duan ZP, Hashida T. Thermal damage in particular—reinforced metal matrix composites[J]. **Journal of Engineering Material Technology**, 2001, 123: 251—60.