

DOI: 10.11779/CJGE201807005

FDEM-TM 方法模拟岩石热破裂

严成增

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 岩石热破裂研究在地热开采、核废料处置、石油开采中具有重要的工程应用价值和理论价值。基于 FDEM (finite discrete element method) 方法, 用建立的 FDEM-TM (finite discrete element method with thermo-mechanical coupling) 方法对一个圆筒试样在两种不同温度边界条件下的热破裂进行了分析。研究表明, 当内边界温度保持不变, 外边界温度不断增大时 ($T_{i0} < T_{r0}$), 起裂前, 圆盘外侧处于受压状态, 而圆盘内侧处于拉伸状态; 当拉应力超过材料的抗拉强度时, 从圆盘内边界起裂, 从内向外扩展, 形成发散裂纹。当外边界温度保持不变, 内边界温度不断增大时 ($T_{i0} > T_{r0}$), 起裂前, 圆盘内侧处于受压状态, 而圆盘外侧处于拉伸状态; 当拉应力超过材料的抗拉强度时, 从圆盘外边界起裂, 从外向内扩展, 形成从外向内扩展的径向裂纹。模拟结果和已有文献结果保持较好的一致性, 验证了 FDEM-TM 方法模拟岩石热破裂的有效性。

关键词: FEMDEM; FDEM-TM; 热力耦合; 热应力; 热破裂; 岩体破裂

中图分类号: TU458, O319.56 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)07-1198-07

作者简介: 严成增(1986-), 男, 特任教授, 主要从事离散元有限元耦合、离散元、颗粒物质物理与力学、多物理场耦合、页岩气开采水力压裂技术、高性能并行计算及软件工程方面的研究工作。E-mail: yancz@cug.edu.cn。

Simulating thermal cracking of rock using FDEM-TM method

YAN Cheng-zeng

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The studies on thermal cracking of rock are of important theoretical and engineering application value in geothermal exploration, underground disposal of nuclear waste and oil exploitation. Based on the FDEM-TM method for simulating the thermal cracking of rock, the thermal cracking of a cylindrical specimen under two different temperature boundary conditions is analyzed. The results show that when the inner boundary temperature remains constant and the outer boundary temperature increases ($T_{i0} < T_{r0}$), the outer side of the disc is in the compressed state and the inside of the disc is in the tension state before crack initiation. When the tensile stress exceeds the tensile strength of the material, crack initiates from the inner boundary of the disc and extends to the outside, forming divergent cracks finally. When the outer boundary temperature remains constant and the inner boundary temperature increases ($T_{i0} > T_{r0}$), the inside of the disc is in the compressed state and the outer side of the disc is in the tension state before crack initiation. When the tensile stress exceeds the tensile strength, crack initiates from the outer boundary of the disc and extends to the inside, forming radial cracks from the outside to the inside finally. The simulated results are in good agreement with those of the existing literatures, which further validates the effectiveness of the FDEM-TM method to simulate the thermal cracking of rock.

Key words: FEMDEM; FDEM-TM; thermal-mechanical coupling; thermal stress; thermal cracking; rock fracture

0 引言

地热能开发、石油三次开采、核废料存储、地壳演变、地震等均与岩石在高温下力学特性及其热破裂相关^[1-2]。研究岩石热破裂具有重要的工程应用价值和理论价值。国内外许多学者对岩石热破裂及温度作用下的岩石力学特性进行了研究。例如, 在试验研究方面, 张宁等^[3]、赵阳升等^[4]研究了三维应力下热破裂对花岗岩渗透性的影响, 指出花岗岩的渗透率随温度

的升高而呈指数增大, 热破裂初期, 渗透率随温度增加缓慢, 热破裂后期, 花岗岩渗透率随温度升高急剧增大并趋于渗透率峰值。张燕博等^[5]研究了岩石加载过程中热辐射温度场的变化, 结果表明压应力区升温, 拉应力区降温, 应力场与红外辐射温度场之间呈现很

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (11602006); 北京市自然科学基金 (1174012); 朝阳区博士后工作经费 (2016ZZ-01-08); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (CUG170657)

收稿日期: 2017-04-04

好的对应关系, 试验结果揭示可利用热成像技术可以监测岩石的应力与灾变现象。郇宝平等^[6]研究了热力耦合作用下花岗岩流变模型, 指出热力耦合作用下岩石微观结构的变化(热导致的微破裂)使宏观力学参数成为温度的函数。武晋文等^[7]对花岗岩热破裂声发射特征进行了试验研究, 指出花岗岩存在一个发生热破裂的门槛值。

在数值模拟方面, 唐世斌等^[8-9]利用热传导和热-力耦合理论, 并结合材料细观尺度上的损伤规律提出了一种考虑损伤的热力耦合模型, 并在 RFPA 基础上建立了脆性材料热破裂过程分析的数值模拟方法。李连崇等^[10-12]初步建立细观热-应力-损伤(TMD)耦合数值模型及岩体热-渗流-应力-损伤(THMD)耦合数值模型, 探讨了多场耦合作用下岩石材料的细观结构损伤及其诱发的材料力学性能演化机制。康健等^[13]建立了随机非均匀介质的热弹性力学模型, 给出了一般意义下的有限元分析方法。于庆磊等^[14]利用数字图像技术表征岩石内部矿物颗粒的真实的细观结构, 结合细观损伤力学和热弹性理论, 建立更切合实际的热-力耦合作用下岩石破裂的数值模型。包春燕等^[15]利用 RFPA 研究了温缩等间距表面裂纹的扩展过程及机制。Jiao 等^[16]基于非连续变形分析(DDA)提出了一个热力耦合模型, 可以模拟热应力引发的岩石破裂。Wanne 等^[17]基于颗粒流(PFC)中的 BPM 模型对岩石热破裂进行了数值模拟, 并和室内试验进行了对比, 结果表明数值模型展现出和试验类似的破裂行为。Xia 等^[18]基于颗粒流方法提出了一种新的热力耦合模型, 用于模拟热应力导致的岩石损伤。

为了模拟连续体到非连续体的转换, Munjiza 等^[19-21]提出了 FDEM 方法, 该方法非常适合对岩体破裂进行模拟, 并于近年来在岩体破裂、水力压裂^[22-24]模拟方面获得了迅速的发展和广泛的应用。本文以提出的 FDEM-TM 方法^[24]对岩石热破裂的问题进行了研究。

1 FDEM-TM 方法基本原理

FDEM-TM 方法是在 FDEM 方法的基础上实现的。FDEM 方法的基本思想是, 在连续体内部划分三角形单元的有限元网格, 并在相邻三角形单元的公共边上插入起黏结作用的初始无厚度节理单元。通过节理单元的断裂来模拟连续体内裂纹的萌生、扩展和交汇(有关节理单元黏结作用力计算及开裂准则可参见文献^[25, 26], 由于裂纹扩展沿着单元边界, 裂纹扩展具有一定网格依赖性, 不过这种依赖性随着网格尺寸的变小而逐渐变小^[27]), 通过未断裂节理单元的黏

结作用及常应变三角形单元来模拟连续体的变形。该方法非常适合对岩体破裂进行模拟。由于其采用有限元计算单元的应力、应变, 连续介质力学中应力-应变的概念很好地保留。而采用离散元处理接触^[28-29], 则可以方便处理各种非连续面。另外, 因为采用显式算法求解, 使得该方法非常适合大规模岩体破裂问题的求解。不过该方法最初并不能对热力驱动下的岩体破裂问题进行求解, 为此提出了模拟岩石热破裂的 FDEM-TM 模型, 该热力耦合模型的基本思想是: ①首先根据热传导方程分析系统的温度分布; ②然后将温度引起的热应力施加到系统方程, 进行力学破裂计算。根据以上两个步骤循环, 即可对热力耦合驱动下的岩体破裂问题进行建模和分析, 模型示意图见图 1。计算流程见图 2 所示。

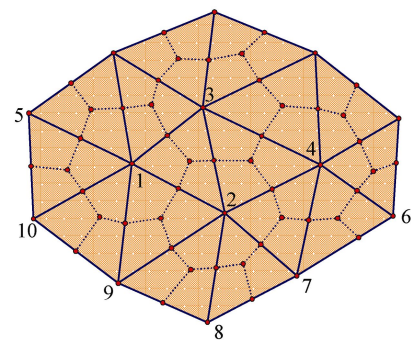


图1 FDEM-TM 中热传导表征模型

Fig. 1 Heat transfer representation model in FDEM-TM method

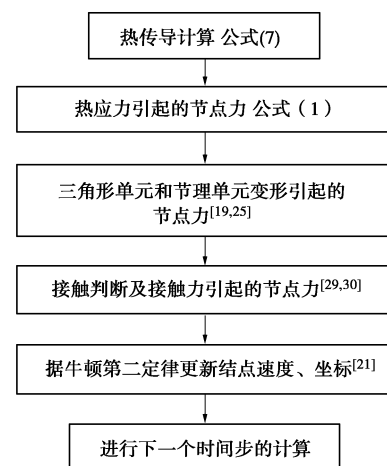


图2 FDEM-TM 方法的计算流程

Fig. 2 Calculation process in FDEM-TM method

第②部分, 温度变化引起的热应力非常简单, 为

$$\Delta\sigma_y = -\delta_y 3K^* \alpha \Delta T \quad (1)$$

式中, $\Delta\sigma_y$ 为热应力增量, 对于平面应力问题 $K^* = 6KG/(3K + 4G)$, 而 K 为体积模量和 G 为剪切模量, α 为热膨胀系数。

下面简要介绍温度场的求解, 根据传热学中的傅

里叶定律, 在 i 方向上单位截面积的热流速可表示为

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (2)$$

式中, q_i 为 i 方向的热流速, k_{ij} 为热传导系数张量, T 为温度。

对于任意给定的质量 M , 温度的改变可以写为^[30]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{\text{total}}}{C_p M}, \quad (3)$$

式中, Q_{total} 为单位时间流入质量 M 的净热量, C_p 为热容, M 为质量。

以图 1 中的节点 2 为例, 由于与节点 2 直接相连的节点的温度可能与节点 2 的温度不同, 因此在这些区域可能会发生热传导。以与节点 2 相连的其中一个三角形单元 $\Delta 231$ 为例。假设三角形单元内温度场分布服从线性分布, 那么同一三角形单元内任意一点的温度梯度为常量, 可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{A} \int_A \frac{\partial T}{\partial x_i} dA. \quad (4)$$

由高斯散度定理, 式 (4) 可写为

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{A} \int_s T n_i ds = \frac{1}{A} \sum_{m=1}^3 \bar{T}^m \epsilon_{ij} \Delta x_j^m, \quad (5)$$

式中, A 为三角形单元的面积, n_i 为外法向向量, \bar{T}^m 为 m 边的平均温度, Δx_j^m 为 m 边的两顶点的坐标分量之差, ϵ_{ij} 是二维置换张量, $\epsilon = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

这样, 将式 (5) 代入式 (2), 即可得沿 x, y 方向的热流速, 设为 q_x, q_y 。于是, 单位时间内, 流入节点 2 的热流量可通过下式计算:

$$Q = Q_x + Q_y = A_x q_x + A_y q_y, \quad (6)$$

式中, A_x, A_y 分别为过节点 2 的两条边中点的坐标分量之差。

这样便求得了三角形单元 $\Delta 231$ 中流入节点 2 的热流量 $Q_{\Delta 231}$ 。与上类似, 可求得其他与节点 2 直接相连的三角形单元流入节点 2 的热流量。这样单位时间内, 流入节点 2 的总的热流量可表示为 Q_{total} 也就求出来了。

于是根据式 (3), 在下个时间步 Δt 内, 节点 2 的温度为

$$T_2^{t+\Delta t} = T_2^t + \frac{Q_{\text{total}}}{C_p M} \Delta t. \quad (7)$$

以上便更新节点 2 在下一个时间步的温度, 其余离散节点温度的更新可根据上述方法类似求得。据此, 便可获得整个求解域温度场的演化。

由于本文的热传导计算采用的是显式算法, 因此时间步长需要小于临界时间步以保证数值计算的稳定

性。临界时间步长由下式给出:

$$\Delta t_c = \frac{(\Delta x)^2}{4\kappa \left[1 + \frac{h\Delta x}{2k} \right]}, \quad (8)$$

式中, Δx 为最小单元的尺寸, h 为对流热传导系数, κ 热扩散系数, (当 $k_x = k_y$ 时, 其为 $k / \rho C_p$)。

获得求解域的温度场后, 根据热应力公式即可求得已知温度场改变下的热应力, 将其作为体荷载施加到三角形单元上, 然后结合 FDEM 力学断裂计算, 便可对热应力驱动下的岩体破裂问题进行模拟。计算流程如图 2 所示。

2 热力耦合验证

一无限长的圆筒, 内径 R_0 和外径 r_0 分别为 20, 150 mm, 圆筒的初始温度为 0°C 。然后, 将圆盘内周界的温度固定为 $T_{r0}=100^\circ\text{C}$, 外周界的温度固定为 $T_{R0}=0^\circ\text{C}$ 。达到热稳定状态后, 圆盘内的温度分布及应力分布均有解析解, 采用本文方法计算该算例并将其与解析解进行比较。所采用的计算参数: 密度 ρ 为 2700 kg/m^3 , 热容为 $800.0 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, 热传导系数 k 为 $2 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, 热膨胀系数 α 为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 弹性模量 E 为 20 GPa , 泊松比 ν 为 0.2。

如图 3 所示, 可见数值解与解析解吻合得很好, 验证了本文模型处理热力耦合问题的正确性。

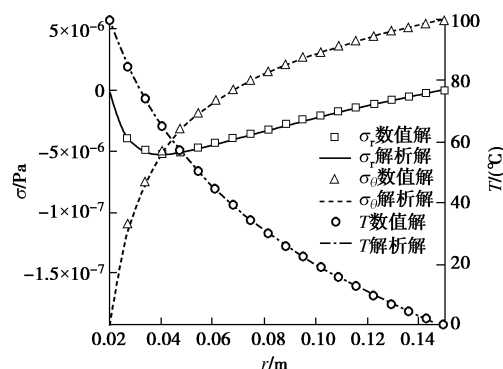


图 3 圆筒内应力和温度分布数值解与解析解

Fig. 3 Numerical and analytical solutions of stress and temperature distribution in cylinder

3 热破裂算例

如图 4 所示, 模型为一圆盘组成, 圆盘的内径 R_0 和外径 r_0 分别为 20, 150 mm。设模型的初始温度为 25°C 。考虑两种情形: ①圆盘内侧边界温度 T_{r0} 保持不变, 外侧边界温度 T_{R0} 不断升高 (即 $T_{r0} < T_{R0}$); ②圆盘外侧边界温度 T_{R0} 保持不变, 内侧边界温度 T_{r0} 不断升高 (即 $T_{r0} > T_{R0}$)。利用本文的方法研究模型在

这两种温度边界条件下的热破裂形态, 并与已有文献的研究结果进行对比。计算所采用的力学参数为, 弹性模量 E 为 20 GPa, 泊松比 ν 为 0.2, 抗拉强度 f_t 为 10 MPa, c 为 20 MPa, ϕ 为 30° 。采用的热力学相关参数为: 比热容 $C_p=800$ J/(kg· $^\circ$ C), 热传导系数 k 为 2 W/(m· $^\circ$ C), 热膨胀系数 α 为 $1.0 \times 10^{-5}/^\circ$ C。模拟结果如图 4 所示。

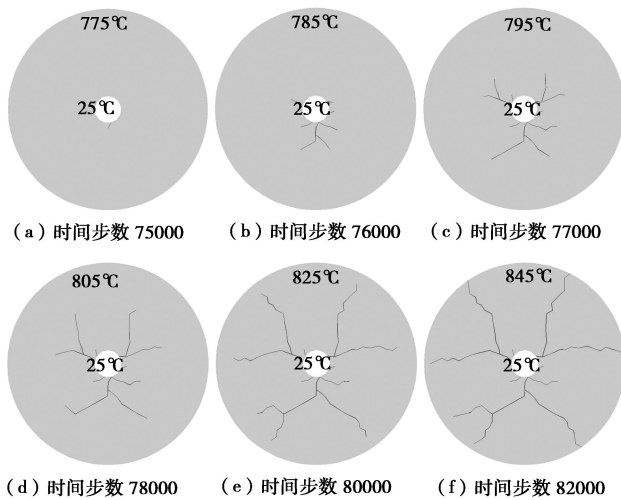


图 4 $T_0 < T_{R0}$ 时的热破裂形态

Fig. 4 Form of thermal cracking ($T_0 < T_{R0}$)

如图 4 所示, 当圆盘内侧边界温度 T_0 保持不变, 而圆盘外侧边界温度 T_{R0} 随时间步不断增大时, 最先在圆盘内侧产生裂纹 (见图中 75000 步所示)。随着时间步的增大, 裂纹不断从内侧向外侧扩展, 形成近似放射状裂纹。由于裂纹只能沿着单元边界扩展及网格划分的原因, 裂纹并未径直朝外侧扩展, 而是出现了分叉和转折。但从内侧边界起裂, 由内向外扩展的现象是十分明显的。裂纹扩展过程中的温度分布见图 5。

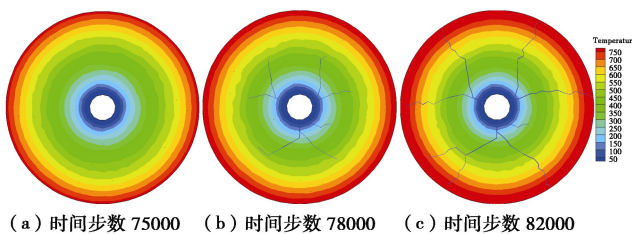


图 5 $T_0 < T_{R0}$ 时的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution ($T_0 < T_{R0}$)

如图 6 所示, 圆盘起裂前, 圆盘内侧处于拉应力状态, 而圆盘外侧处于压应力状态。例如 30000~70000 步, 圆盘内侧为红色, 表示处于拉应力状态, 外盘外侧为蓝色, 表示处于压应力状态。这是因为圆盘外侧温度比内侧温度高, 圆盘外侧的膨胀变形要比

内侧的变形大, 圆盘外侧的变形受到内侧材料的约束, 圆盘外侧处于压应力状态, 而外盘内边界因为受到外侧单元膨胀变形的挤压, 而处于拉应力状态。同时, 随着时间步的增大, 圆盘内侧的拉应力不断增大。当圆盘内侧的拉应力超过材料的抗拉强度时, 即在圆盘内侧起裂, 如图 75000 步所示, 起裂点所在位置及附近的拉应力集中区消失, 即出现拉应力释放, 但圆盘内侧上仍然存在拉应力集中, 随后在这些拉应力集中区又有拉裂纹产生, 见图 7600~77000 步所示。这时, 圆盘内侧边界的上拉应力集中区消失, 拉应力完全释放, 圆盘内侧不再有新的裂纹生成。与此同时, 在新生裂隙的端部产生拉应力集中, 拉应力集中区随着裂纹的向外扩展而向外移动。另外, 还可见, 起裂后最大主应力的最大值不断减小, 如图中 78000~82000 步所示。这是因为裂纹的扩展使得拉应力不断释放所致。

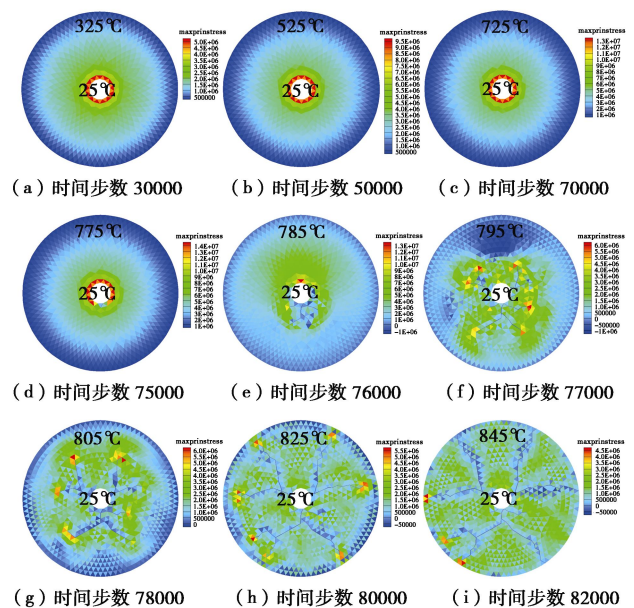
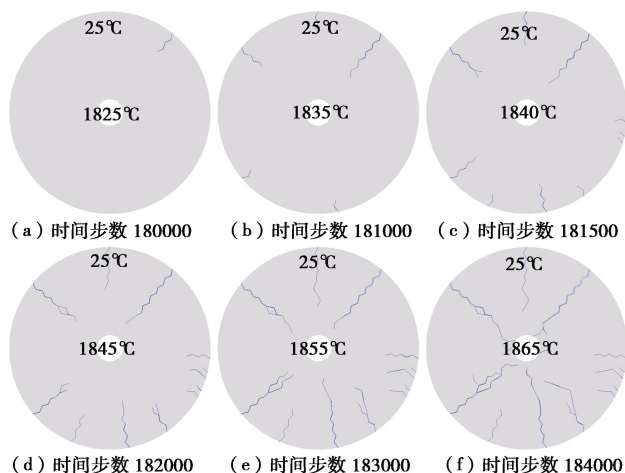
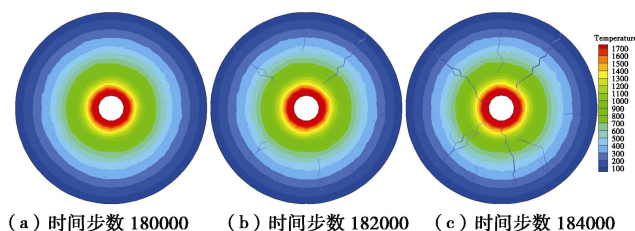


图 6 $T_0 < T_{R0}$ 时, 热破裂过程中的最大主应力的分布(Pa, 拉应力为正)

Fig. 6 Distribution of maximum principal stress in the process of thermal cracking ($T_0 < T_{R0}$)

如图 7 所示, 当圆盘外侧边界温度保持不变, 而圆盘内侧边界温度随时间步不断增大时 ($T_0 > T_{R0}$), 最先在圆盘外侧产生裂纹 (见图 7 (a))。随着时间步的增大, 裂纹不断从外侧向内侧扩展, 形成由外向内扩展的放射状裂纹。由于裂纹只能沿着单元边界扩展, 因为网格划分的原因, 使得裂纹扩展并未径直朝外侧扩展, 而是出现了分叉和转折。但从外侧的起裂, 由外向内扩展的现象是十分明显的。裂纹扩展过程中的温度分布见图 8。

图 7 $T_0 > T_{R0}$ 时的热破裂形态Fig. 7 Thermal cracking form ($T_0 > T_{R0}$)图 8 $T_0 > T_{R0}$ 时的温度分布Fig. 8 Temperature distribution ($T_0 > T_{R0}$)

如图 9 所示, 圆盘起裂前, 圆盘外侧处于拉应力状态, 盘内侧处于压应力状态。例如 90000~170000 步, 圆盘外侧为红色, 表示处于拉应力状态, 圆盘内侧为蓝色, 表示处于压应力状态。这是因为圆盘内侧温度比外侧温度高 ($T_0 > T_{R0}$), 圆盘内侧的膨胀变形要比外侧的膨胀变形大, 圆盘内侧的变形收到外侧材料的约束, 圆盘内侧处于压应力状态, 而圆盘外侧边界因为受到内侧单元膨胀变形的挤压, 而处于拉应力状态。同时, 随着时间步的增大, 圆盘外侧的拉应力不断增大。当圆盘外侧的拉应力超过材料的抗拉强度时, 即在圆盘外侧起裂, 如图 9 (d) 所示。起裂点所在位置及附近的拉应力集中区消失, 即出现拉应力释放, 但圆盘外侧上仍然存在拉应力集中, 随后在这些拉应力集中区又有拉裂纹产生, 见图 9 (f) ~ (h) 所示。这时, 圆盘外侧边界的上的拉应力集中区消失, 拉应力完全释放, 圆盘内侧不再有新的裂纹生成。同时在新生裂隙的端部产生拉应力集中, 拉应力集中区随着裂纹的向外扩展而向外移动。另外, 还可见, 起裂后最大主应力的最大值不断减小, 如图 9 (f) ~ (i) 步所示。这是因为裂纹的扩展使得拉应力不断释放所致。

如图 10 所示, 为破裂前 20000 步时圆盘内的温度分布, 当 $T_0 < T_{R0}$ 时, 圆盘的温度从外向内逐渐减小;

$T_0 > T_{R0}$ 时, 圆盘的温度从外向内逐渐增大, 温度分布的趋势与理论分析一致。综合以上两种情形的计算结果可知, $T_0 < T_{R0}$ 时, 起裂前, 圆盘外侧处于受压状态, 而圆盘内侧处于拉伸状态; 当拉应力超过材料的抗拉强度时, 从圆盘内边界起裂, 从内向外扩展。当 $T_0 > T_{R0}$ 时, 起裂前, 圆盘内侧处于受压状态, 而圆盘外侧处于拉伸状态; 当拉应力超过材料的抗拉强度时, 从圆盘外边界起裂, 从外向内扩展, 形成从外向内扩展的径向裂纹。这两种不同温度边界条件下所体现的裂纹扩展的方向性与文献[31]的结果是一致的, 验证了本文方法处理岩石热破裂问题的正确性。

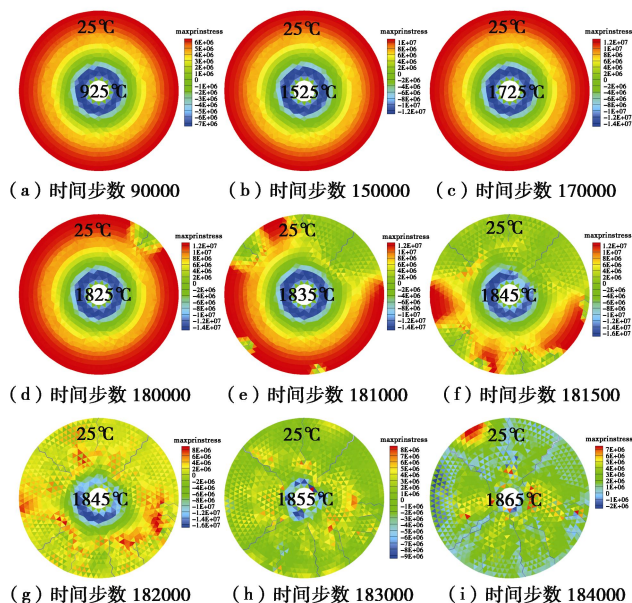
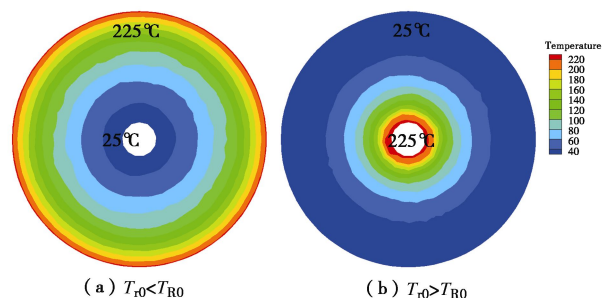
图 9 $T_0 > T_{R0}$ 时, 热破裂过程中的最大主应力的分布 (Pa, 拉应力为正)Fig. 9 Distribution of maximum principal stress in the process of thermal cracking ($T_0 > T_{R0}$)

图 10 20000 步时的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution at step 20000

4 结 语

本文基于 FDEM-TM 方法对岩石热破裂问题进行研究。给出了一个热破裂算例, 并将其与已有文献的结果对比, 验证了 FDEM-TM 方法处理热破裂问题的

正确性。未来可考虑将该方法用到地热开采、核废料存储等实际工程问题的求解。

参考文献:

- [1] 魏柏林. 孕震的热—破裂模式[J]. 华南地震, 1983, 3(正刊): 23 - 33. (WEI Bo-lin. Seismogenic heat-rupture pattern[J]. South China Journal of Seismology, 1983, 3: 23 - 33. (in Chinese))
- [2] 张 渊, 张 贤, 赵阳升. 砂岩的热破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 656 - 659. (ZHANG Yuan, ZHANG Xian, ZHAO Yang-sheng. Process of sandstone thermal cracking[J]. Chinese J Geophys, 2005, 48(3): 656 - 659. (in Chinese))
- [3] 张 宁, 赵阳升, 万志军, 等. 三维应力下热破裂对花岗岩渗流规律影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 118 - 123. (ZHANG Ning, ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, et al. Experimental research on seepage laws of granite under thermal cracking action with 3D stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 118 - 123. (in Chinese))
- [4] 赵阳升, 万志军, 张 渊, 等. 岩石热破裂与渗透性相关规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1970 - 1976. (ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, ZHANG Yuan, et al. Experimental study of related laws of rock thermal cracking and permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1970 - 1976. (in Chinese))
- [5] 张艳博, 刘善军. 含孔岩石加载过程的热辐射温度场变化特征[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1013 - 1017. (ZHANG Yan-bo, LIU Shan-jun. Thermal radiation temperature field variation of hole rock in loading process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1013 - 1017. (in Chinese))
- [6] 邵保平, 赵阳升, 万志军, 等. 热力耦合作用下花岗岩流变模型的本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 956 - 967. (XI Bao-ping, ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, et al. Study of constitutive equation of granite rheological model with thermo-mechanical coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 956 - 967. (in Chinese))
- [7] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 中高温三轴应力下鲁灰花岗岩热破裂声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学, 2009, 30(11): 3331 - 3336. (WU Jin-wen, ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of granite thermal cracking under middle-high temperature and triaxial stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3331 - 3336. (in Chinese))
- [8] 唐世斌, 唐春安, 李连崇, 等. 脆性材料热-力耦合模型及热破裂数值分析方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(2): 172 - 179. (TANG Shi-bin, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. Numerical approach on the thermo-mechanical coupling of brittle material[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(2): 172 - 179. (in Chinese))
- [9] 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2071 - 2078. (TANG Shi-bin, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Numerical investigation on rock failure process induced by thermal stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2071 - 2078. (in Chinese))
- [10] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石破裂过程 TMD 耦合数值模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1727 - 1732. (LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chuan-an, et al. Study on coupled thermal-mechanical-damage model in rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1727 - 1732. (in Chinese))
- [11] 李连崇, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程 THMD 耦合数值模型研究[J]. 计算力学学报, 2008, 25(6): 764 - 769. Investigation on coupled thermo-hydro-mechanical-damage (THMD) model for rock failure process[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(6): 764 - 769. (in Chinese))
- [12] 李连崇, 唐春安, 唐世斌, 等. 含损伤演化的 TM 耦合数值模型及其应用研究[J]. 力学学报, 2006, 38(4): 514 - 521. (LI Lian-chong, TANG Chun-an, TANG Shi-bin, et al. The damage coupled thermo-mechanical(TM) model for rock failure process and applications[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(4): 514 - 521. (in Chinese))
- [13] 康 健, 赵明鹏, 赵阳升. 随机非均质热弹性力学模型与岩石热破裂门槛值的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2331 - 2335. (KANG Jian, ZHAO Ming-peng, ZHANG Yang-sheng. Random non-homogeneous thermal elastic mechanics model and numerical tests on thermal cracking threshold of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2331 - 2335. (in Chinese))
- [14] 于庆磊, 郑 超, 杨天鸿, 等. 基于细观结构表征的岩石破裂热-力耦合模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 42 - 51. (YU Qing-lei, ZHENG Chao, YANG

- Tian-hong, et al. Meso-structure characterization based on coupled thermal-mechanical model for rock failure process and applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 42 - 51. (in Chinese))
- [15] 包春燕, 唐春安, 唐世斌, 等. 温缩等间距表面裂纹扩展的数值模拟及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(3): 549 - 557. (BAO Chun-yan, TANG Chun-an, TANG Shi-bin, et al. Numerical simulation and mechanism research of surface fracture equal-spacing subjected to cooling shrinking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(3): 549 - 557. (in Chinese))
- [16] JIAO Y Y, ZHANG X L, ZHANG H Q, et al. A coupled thermo-mechanical discontinuum model for simulating rock cracking induced by temperature stresses[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **67**: 142 - 149.
- [17] WANNE T S, YOUNG R P. Bonded-particle modeling of thermally fractured granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(5): 789 - 799.
- [18] XIA M. Thermo-mechanical coupled particle model for rock[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, **25**(7): 2367 - 2379.
- [19] MUNJIZA A, OWEN D R J, BICANIC N. A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids[J]. Engineering Computations 1995, **12**: 145 - 174.
- [20] MUNJIZA A, LATHAM J P, ANDREWS K R F. Challenges of a coupled combined finite-discrete element approach to explosive induced rock fragmentation[J]. Fragblast, 1999(3): 237 - 250.
- [21] MUNJIZA A. The combined finite-discrete element method[M]. London: John Wiley & Sons Ltd, 2004: 29 - 32.
- [22] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等. 模拟水压致裂的二维 FDEM-flow 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 67 - 75. (YAN Cheng-zeng, ZHENG Hong, SUN Guan-hua, et al. Simulation of hydraulic fracturing by 2D FDEM-flow method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 67 - 75. (in Chinese))
- [23] 严成增, 孙冠华, 郑宏, 等. 爆炸气体驱动下的岩体破裂的有限元—离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, **36**(8): 2419 - 2425. (YAN Cheng-zeng, SUN Guan-hua, ZHENG Hong, et al. Simulation of explosive gas-driven rock fracture by FEM/DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **36**(8): 2419 - 2425. (in Chinese))
- [24] YAN C, ZHENG H. A coupled thermo-mechanical model based on the combined finite-discrete element method for simulating thermal cracking of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, **91**: 170 - 178.
- [25] MUNJIZA A, ANDREWS K R F, WHITE J K, et al. Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element analysis[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, **44**(1): 41 - 57.
- [26] LISJAK A, LIU Q, ZHAO Q, et al. Numerical simulation of acoustic emission in brittle rocks by two-dimensional finite-discrete element analysis[J]. Geophysical Journal International, 2013, **195**(1): 423 - 443.
- [27] MUNJIZA A, JOHN N W M. Mesh size sensitivity of the combined FEM/DEM fracture and fragmentation algorithms[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, **69**(2): 281 - 295.
- [28] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. NBS contact detection algorithm for bodies of similar size[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1998, **43**(1): 131 - 149.
- [29] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. Penalty function method for combined finite-discrete element systems comprising large number of separate bodies[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, **49**(11): 1377 - 1396.
- [30] Itasca Consulting Group Ltd. User manual of UDEC code[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Ltd, 2011.
- [31] 唐世斌. 岩石热破裂过程的数值模型及其应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005. (TANG Shi-bin. Numerical model for thermal cracking process of rock and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005. (in Chinese))