

文章编号:1672-3961(2023)01-0106-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2021.585

# 考虑温度相关性的岩石热破裂数值模拟

王骏林<sup>1</sup>,冯春<sup>2</sup>,张一鸣<sup>1\*</sup>

(1.河北工业大学土木与交通学院,天津 300401;2.中国科学院力学研究所,北京 100190)

**摘要:**为解决岩石热力学参数如比热、热传导系数等会伴随温度变化而影响岩石热破裂的问题,基于连续-非连续元方法,采用显式积分建立一种考虑参数温度关联性的岩石瞬态热-力-破裂耦合数值模型,通过该模型研究不同升温速率对岩石热裂过程的影响。结果表明:考虑参数温度关联时,破裂速率、破裂程度比不考虑参数温度关联小;裂缝最大宽度比不考虑参数温度关联时大、开裂持续时间更长。

**关键词:**岩石热破裂;连续-非连续单元方法;温度相关性;耦合分析;升温速率

**中图分类号:**TU45 **文献标志码:**A

**引用格式:**王骏林,冯春,张一鸣.考虑温度相关性的岩石热破裂数值模拟[J].山东大学学报(工学版),2023,53(1):106-113.

WANG Junlin, FENG Chun, ZHANG Yiming. Numerical simulation of rock thermal fracture considering the temperature dependence[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(1):106-113.

## Numerical simulation of rock thermal fracture considering the temperature dependence

WANG Junlin<sup>1</sup>, FENG Chun<sup>2</sup>, ZHANG Yiming<sup>1\*</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the change of rock thermal and mechanical parameters such as specific heat and thermal conductivity with temperature would affect rock thermal cracking. Based on the continuous-discontinuous element method, this paper presented an explicit integration method to establish a transient thermal-mechanical-fracture coupled numerical model of rock considering the temperature dependence of parameters. This model was used to study the influence of different heating rates on the rock thermal cracking process. The results showed that when considering the temperature dependence, the fracture rate and degree of fracture were smaller than those without the parameter-temperature correlation; while the maximum crack width was larger the cracking lasted longer.

**Keywords:** rock thermal fracture; continuous-discontinuous element method (CDEM); temperature dependence; coupling analysis; heating rate

## 0 引言

岩体热裂指岩体在升/降温过程中,由于内部矿物颗粒热膨胀特性差异引起岩石产生局部热应力,导致矿物颗粒边界出现大量微裂纹而发生破裂的现象<sup>[1]</sup>。在高温岩体地热开发、核废料深部存

储、页岩油气开采等工程中,岩石受热开裂问题普遍存在<sup>[2]</sup>。此外,在中西部昼夜温差和季节温差较大地区工程建设中,同样存在岩土冻融循环作用下的破坏问题<sup>[3]</sup>,影响结构耐久性与安全性,导致经济损失甚至人员伤亡。

岩石热裂研究主要有试验与数值两类方法。文献<sup>[4]</sup>研究了在 300 °C 和 27.6 MPa 条件下石英长

收稿日期:2021-11-29

第一作者简介:王骏林(1997—),男,广东茂名,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail:2623278358@qq.com

\*通信作者简介:张一鸣(1984—),男,上海人,教授,主要研究方向为岩土工程以及土木工程防灾减灾相关研究。

E-mail:yiming.zhang@hebut.edu.cn

石热膨胀系数与温度关系,指出岩石热膨胀会伴随新的微裂纹形成,并推测裂纹导致的空隙率增加会使局部渗透率增加 2~5 倍;文献[5]通过试验研究与调研总结了花岗岩在温度作用下泊松比、抗拉强度、内聚力等热力学参数演化规律;文献[6]研究了不同冷冲击下高温花岗岩温度变化和裂缝扩展;文献[7]研究了不同加载速率下泥岩在不同温度条件下的力学性能,总结了弹性模量和峰值强度随加载速率和温度的变化规律;文献[8]对不同温度处理后的花岗岩进行了半圆三点弯曲试验,发现岩石的抗拉强度随温度升高而下降,并对最大切应力准则进行了修正。试验研究在一定程度上揭示了岩石的温度相关性、热裂形态等规律。但由于试验本身复杂性和观测设备的局限性,试验较难获得岩石内部破裂情况或内部应力场的分布情况,同时所研究的试件尺度较小。

在数值模拟方面,文献[9]提出一种不连续颗粒介质的耦合接触热传导和热开裂模型,该模型基于有限离散元的框架,可以有效模拟连续或非连续介质的热传导及开裂;文献[10]基于不连续变形分析方法,提出一种热力不连续耦合模型,该方法基于能量守恒原则确定温度场,然后计算热应力并与原应力场耦合,用两个失效准则判断单元是否破裂;文献[11]建立 FDEM-TM 法模拟岩石的热裂,该方法先基于热传导方程计算系统的温度分布,再将温度变化引起的热应力叠加在应力场中进行求解;文献[12]利用 TOUGH-FEMM 模拟了岩石受到热应力作用下的三维破裂和混合裂缝的传播过程;文献[13]利用态基近场动力学的热力耦合模型,研究了花岗岩材料在实时温度和后温度处理下的热力特性,并提出一种消除热梯度引起的裂纹影响的方法;文献[14]提出了一种基于黏滞带模型的扩展有限元方法,并用于模拟和研究热处理岩石的混合模式断裂特征。以上方法能较好地模拟岩石材料在受热时的力学行为和破裂过程,且结果与试验现象较为相符。但是上述的数值模拟方法大部分都用于模拟二维的热裂过程,只有少数用于研究复杂的三维岩石热裂。

此外,岩石内部存在大量的断层、节理和矿物颗粒等结构面,是一种各向异性且不连续的材料,因此在进行数值模拟计算时必须考虑这些因素对热传导和破裂的影响,而传统的有限元、离散元等方法并不能精确模拟岩石内部矿物组成的不均匀性和裂隙、节理分布的随机性。文献[15]提出一

种非连续介质中热传导的数值模拟方法,可以准确描述热量在离散块体之间的传导过程,该方法利用刚度因子来表征块体接触界面对热传导的抵抗效应,并指出刚度因子只会影响瞬态的热传导过程而不会影响稳态结果,当刚度因子大于某个值时,该方法可以退化到连续介质模型,但是基于连续-非连续方法研究温度诱发的岩石破裂仍然很少。此外,文献[16-17]的研究指出,岩石材料在温度作用下,尤其是高温作用下的材料非线性性质明显,其部分热力学参数会随着温度变化,并总结了花岗岩从室温到 1000 °C 热力学参数的温度相关性;同时,文献[16]指出,花岗岩的主要矿物质量分数在高温下是不变的,这就意味着在数值模拟时可以不考虑温度导致的化学反应。岩石热力学参数通常会伴随温度变化,对岩石的热传导过程模拟产生影响,使计算获得的温度场与实际不符,并影响应力场计算结果。到目前为止,考虑热力学参数温度相关性的三维岩石热裂数值模拟仍然较少。

本研究建立了一种基于连续-非连续元,采用显式积分考虑热力学参数温度相关性的三维岩石热裂数值模型,通过 GDEM 软件的二次开发功能编制相关算法,并对岩石热裂过程展开了数值研究。

## 1 连续-非连续单元法简介和热力耦合

### 1.1 连续-非连续单元法原理

连续-非连续单元法(continuous-discontinuous element method, CDEM)是一种兼具有限元(finite element method, FEM)和离散元(discrete element method, DEM)优点的数值方法,该方法在块体内部进行有限元计算,在块体边界进行离散元计算,可以模拟地质体从连续体到非连续体的渐进破坏过程。CDEM 模型中包含了块体和界面两类单元,其中,一个离散的块体包含一个或多个 FEM 单元;界面上包含多个法向和切向的弹簧,并通过施加合适的本构关系和断裂准则实现其拉伸、剪切断裂过程,通过块体边界的弹簧断裂来模拟岩石的开裂和渐进破坏过程<sup>[18]</sup>。由于可以准确模拟地质体破坏的过程,CDEM 方法成功用于滑坡、采矿、爆破等方面的研究。

### 1.2 热传导有限体积法计算

在数值计算时,要先求解计算域内的温度分布情况,再根据温度场计算温度导致的应力分布情况。在CDEM中,热计算的信息储存在节点,因此需要先采用有限体积法求解块体内部的热传导过程,再根据块体内部热流情况计算单元各节点热流量,从而求解温度场。根据傅里叶定律,三维情况下热流速矢量合量

$$q_i = -k \left( \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j + \frac{\partial u}{\partial z} k \right), \quad (1)$$

式中: $k$ 为热传导系数, $u$ 为温度函数, $i, j, k$ 为单位方向向量。

设控制体 $\Omega$ ,在控制体内对式(1)进行积分:

$$\int_{\Omega} q_i dV = \int_{\Omega} -k \left( \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j + \frac{\partial u}{\partial z} k \right) dV. \quad (2)$$

根据高斯散度公式,将式(2)右端项的三重积分转化为面积分

$$q_i V_1 = -k \oint_{\Sigma} \left( \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j + \frac{\partial u}{\partial z} k \right) \cdot n ds, \quad (3)$$

式中: $V_1$ 是控制体的体积, $m^3$ ;  $\Sigma$ 为控制体单元所有外表面围成的封闭曲面; $n$ 为 $\Sigma$ 各个面的外法线向量。

式(3)表明,根据控制体各表面沿法线方向流入的热量可以求得单元热流速 $q_i$ ,而根据单元热流速便可以计算流经每个节点热流量,如图1所示,详细推导过程见文献[15]。

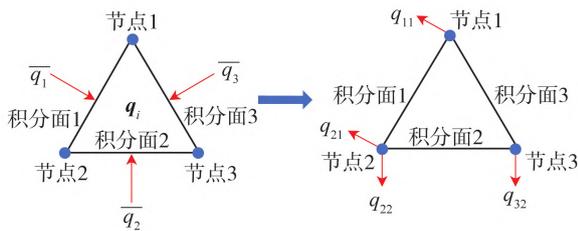


图1 CDEM 三角形单元内部热传导

Fig.1 Internal heat conduction of CDEM triangular element

确定了节点热流量之后,计算节点的温度增量

$$\Delta T = \frac{Q_n \Delta t}{C_{t_n} \rho_n V_n}, \quad (4)$$

$$T(t_{n+1}) = T(t_n) + \Delta T,$$

式中: $Q_n$ 为节点的总热流量; $\Delta t$ 为时间增量, $s$ ;  $C_{t_n}$ 、 $\rho_n$ 分别为 $t_n$ 时刻节点所在单元的比热容和密度; $V_n$ 为节点体积, $m^3$ ,  $T(t_{n+1})$ 、 $T(t_n)$ 分别为下一时步和本时步的温度, $^{\circ}C$ 。

### 1.3 温度相关性的实现

此前的研究大部分是基于试验方法对岩石热

力学参数的温度相关性进行测量并对规律进行归纳总结,文献[16]基于先前的试验结果,总结了花岗岩在 $1000^{\circ}C$ 内各项热力学参数的温度相关性规律,并提出了温度相关性拟合公式。本研究基于文献[16]总结的温度相关性拟合公式,使用GDEM软件的二次开发平台编制算法,在数值模拟中考虑温度相关性影响,对温度诱发的三维岩石热破裂进行研究。

CDEM算法中的力学参数,如弹性模量、泊松比、抗拉强度、黏聚力等,通过单元设置;而热学参数,如温度、比热容、热传导系数、体膨胀系数等则是通过单元节点设置,因此在编制算法时必须要将热学和力学参数的更新分开设置。参数的更新流程为:在 $t_n$ 时刻温度场求解完成后,循环所有块体单元,并获取每个单元中每个节点在当前时刻的温度,根据温度相关性公式求得节点在该温度下的参数值;再以每个单元所有节点在当前时步下的平均温度作为该单元的当前温度,通过温度相关性公式求得单元在当前温度下的参数值;最后将热力学参数更新,根据式(4)以 $t_n$ 时刻下的热力学参数值求解 $t_{n+1}$ 时刻的温度场和应力场,如图2所示。

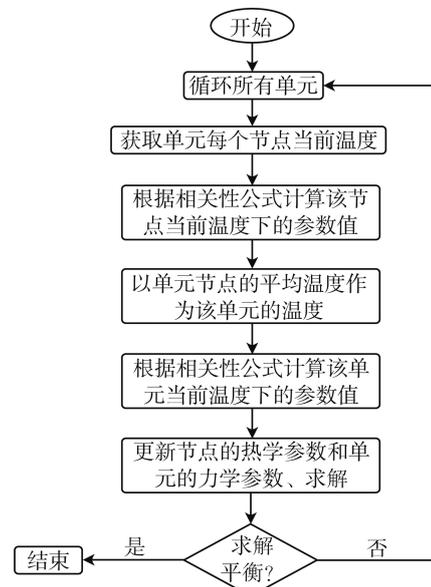


图2 参数更新流程

Fig.2 Process of parameters update

### 1.4 界面接触弹簧的本构

本研究模型的块体单元采用线弹性本构,虚拟界面单元采用脆性断裂Mohr-Coulomb本构,采用位移增量法计算界面接触弹簧在下一时步的法向和切向试探应力,三维情况时界面单元接触弹簧的力

$$\begin{cases} F_n(t_{n+1}) = F_n(t_n) + K_n A_c (-\Delta d_n) \\ F_{\tau_1}(t_{n+1}) = F_{\tau_1}(t_n) + K_{\tau} A_c (-\Delta d_{\tau_1}), \\ F_{\tau_2}(t_{n+1}) = F_{\tau_2}(t_n) + K_{\tau} A_c (-\Delta d_{\tau_2}) \end{cases} \quad (5)$$

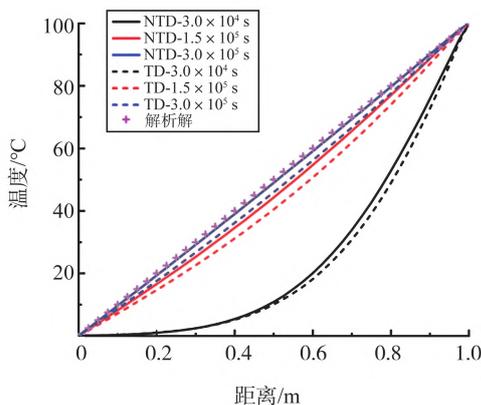
式中: $F_n$ 、 $F_{\tau_1}$ 、 $F_{\tau_2}$ 分别为接触弹簧的法向和两个切向力,N; $K_n$ 为接触弹簧的法向刚度,Pa/m; $K_{\tau}$ 为切向刚度,Pa/m; $A_c$ 为弹簧接触面积,m<sup>2</sup>; $\Delta d_n$ 、 $\Delta d_{\tau_1}$ 、 $\Delta d_{\tau_2}$ 分别为弹簧在  $t_n$  时步的法向和两个切向方向的位移增量,m,负号表示位移与力方向相反。

采用张拉-压剪复合准则来判断接触弹簧是否发生破裂,由于界面接触弹簧的计算参数继承自块体,且受到温度相关性的影响,因此需要以当前时步温度下的参数值判断弹簧的破裂状态,当  $t_n$  时步时弹簧法向力  $-F_n(t_n) > A_c \sigma_{t,t_n}$  时,弹簧张拉破坏,其中  $\sigma_{t,t_n}$  为  $t_n$  时步的抗拉强度,Pa。当  $t_n$  时步时弹簧切向力  $F_{\tau}(t_n) > F_n(t_n) \tan \varphi + A_c c_{t_n}$  时,弹簧剪压破坏,其中  $F_{\tau}(t_n)$  为弹簧在  $t_n$  时步的剪力合力,N; $c_{t_n}$  为  $t_n$  时步的黏聚力,Pa。一旦弹簧发生破坏,即将弹簧的抗拉强度和黏聚力置 0。

## 2 算例

### 2.1 温度相关性对温度场的影响

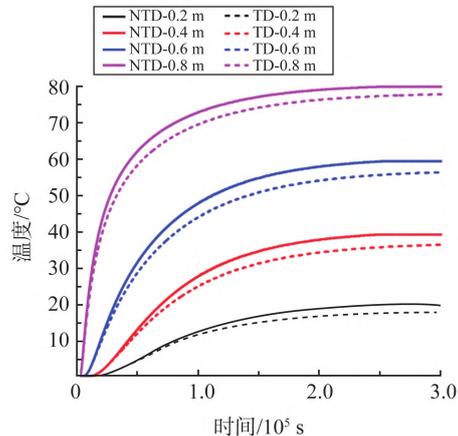
为了研究温度相关性对热传导计算结果的影响,



(a) 温度空间分布

响,本研究建立了尺寸为 1.00 m×0.25 m×0.25 m 的长方体一维热传导模型,参数设置为:密度为 2604 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 27.38 GPa,泊松比为 0.26,热传导系数为 3.65 W/(m·°C),比热容为 706 J/(kg·°C),热膨胀系数为 1.482×10<sup>-5</sup> (1/°C)。采用第一类温度边界条件,设置  $T_{x=0} = 0$  °C,  $T_{x=1.0} = 100/200/300$  °C;热传导透传刚度因子取 4.0,计算时步取 0.1 s,计算时长 250 000 s。

文献[15]给出了一维热传导模型在某一时刻某一位置的温度级数解。分别求解考虑温度相关性模型(temperature dependence model, TD)和不考虑温度相关性模型(non-temperature dependence model, NTD),获得求解平衡后的温度场。模型沿长度方向的温度时空分布如图 3 所示,在考虑温度相关性之后,瞬态和稳态热传导过程的温度都会比不考虑温度相关性的温度低,说明岩石参数随着温度升高而降低的性质不仅会影响瞬态热传导的过程,还会对稳态的温度分布产生影响。模型的温度-时间变化规律如图 3(b)所示,由于模型热传导系数较小,热传导过程较慢,因此距离温度边界越近的测点温度最早趋于稳定。



(b) 温度时间分布

图 3 温度时空分布曲线

Fig.3 Temporal and spatial distribution curves of temperature

同时可以发现,由于温度边界面的作用,距离温度边界越近的测点,NTD 模型与 TD 模型的温度差越小,如图 4(a)所示。可以看到,NTD 模型与 TD 模型的最大温度差会随着计算时间的增加而减小,在热传导计算达到稳定时,最大温度差约为 3.0°C,位于模型的中间;在热传导过程稳定之前,靠近高温边界面的温度差比靠近低温边界面的大,最大温度差靠近高温边界面一侧,随着热

传导不断进行,达到稳态时,最大温度差会往模型中间移动,温度差呈现对称状态。当温度边界面  $T_{x=1.0} = 300$  °C 时,稳态热传导阶段,模型最大温差达到了 30 °C,远高于  $T_{x=1.0} = 100$  °C 的情况,说明温度相关性在高温阶段对岩石的影响更为严重,同时也说明在高温情况下,岩石温度相关性对其性能造成的影响不能忽略。

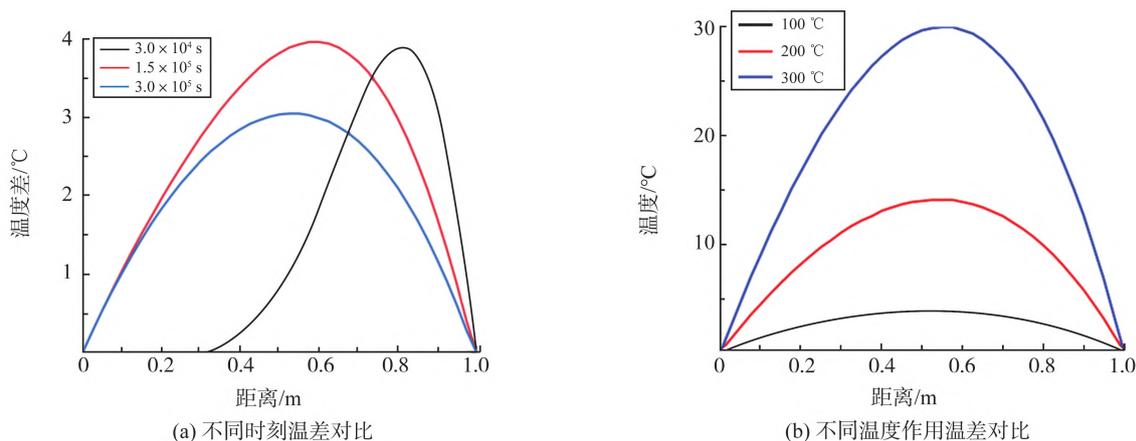


图4 NTD模型与TD模型温差( $T_{NTD}-T_{TD}$ )  
Fig.4 Temperature difference between NTD model and TD model( $T_{NTD}-T_{TD}$ )

2.2 温度相关性对热破裂的影响

此前的研究大部分是对二维岩石热破裂进行研究,或是对热破裂最终形态进行分析,而对三维岩石热破裂的过程研究较少,因此本研究建立三维热破裂模型,分别研究其在不同升温速率情况下NTD模型和TD模型热破裂的过程,分析温度相关性和升温速率对热破裂的影响。

计算模型如图5所示,模型外半径 $R_0=1.0\text{ m}$ ,内半径 $r_0=0.2\text{ m}$ ,高 $h=0.3\text{ m}$ ,网格尺寸为 $0.04\sim 0.05\text{ m}$ ,共43 511个四面体单元。计算参数参考2.1节,由于涉及开裂计算,设置黏聚力 $c=25.5\text{ MPa}$ ,抗拉强度 $\sigma_t=10.0\text{ MPa}$ ,内摩擦角为 $30^\circ$ 。模型初始温度为 $20.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,固定外侧边界温度 $T_{R_0}=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,内侧边界温度采用 $0.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $1.0\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $2.0\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 升温至 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 。

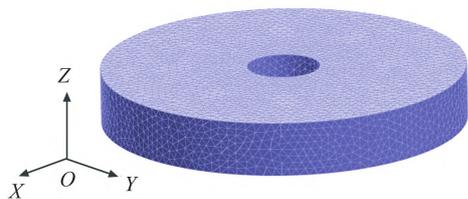


图5 计算模型  
Fig.5 Computational models

2.2.1 破裂过程和应力分析

以往的研究对岩石热破裂的过程描述较少,主要是因为断裂过程在宏观上持续时间非常短,一些裂纹难以监测。此外,参数温度相关性对岩石热破裂过程和破裂形态的影响也鲜有研究。本部分设定升温速率为 $1.0\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,分别研究TD模型和NTD模型在开裂过程中的开裂规律和应力关系。

岩石热破裂过程如图6所示,在出现裂缝之前,模型内侧受压,外侧受拉,应力分布结果与实际相符。监测数据显示,NTD模型在升温结束后约经

过 $1020\text{ s}$ ,在距离模型圆心 $0.6\sim 0.7\text{ m}$ 处最先发生破裂。裂缝尖端出现应力集中现象,而裂缝周围区域应力水平下降。模型最先出现两条相对的主裂缝,且不断向模型的内侧和外侧延伸,将完整的模型分成A和B两部分(见图6, $t=27\ 250\text{ s}$ ),随后这两部分应力不断增加,并最终分别在它们的中心附近出现裂缝。随着热传导的继续,裂缝不断扩展,最先出现的两条主裂缝长度和宽度都在增加,并彻底贯通,应力得以释放,使得A、B两部分中心区域附近的裂缝始终未能全部贯通。热破裂在经过大约 $32\ 500\text{ s}$ 时达到稳定,此时虽然热应力仍然存在,但应力水平较低,模型不能继续发生破裂。

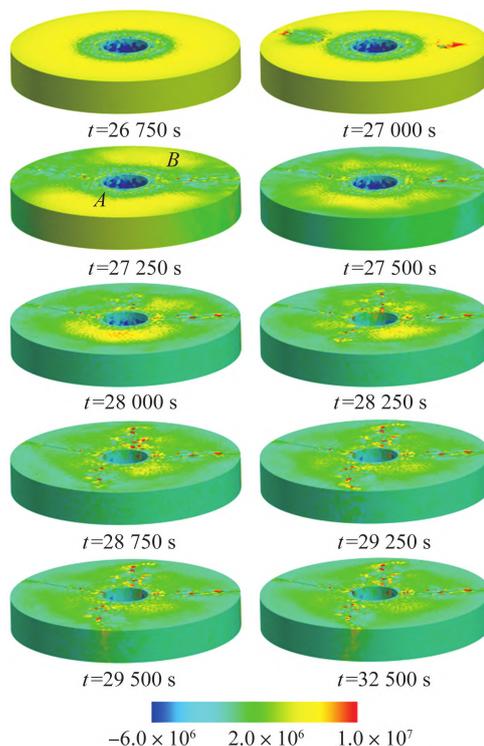


图6 NTD模型破裂过程和最大主应力  
Fig.6 Fracture process and principal maximum stress of NTD model

如图 7 所示,与 NTD 模型相比,TD 模型发生热破裂时,裂缝附近区域的应力分布和演化规律基本相似,但是 TD 模型开裂的时间更晚,在升温结束后经过约 20 510 s 才发生破裂,并且只出现一条主裂缝。主裂缝的长度和宽度都随时间变化而增长,使得在主裂缝相对位置的应力水平增大,最终在该处造成开裂。和 NTD 模型一样,TD 模型只有最先出现的主裂缝完全贯通。

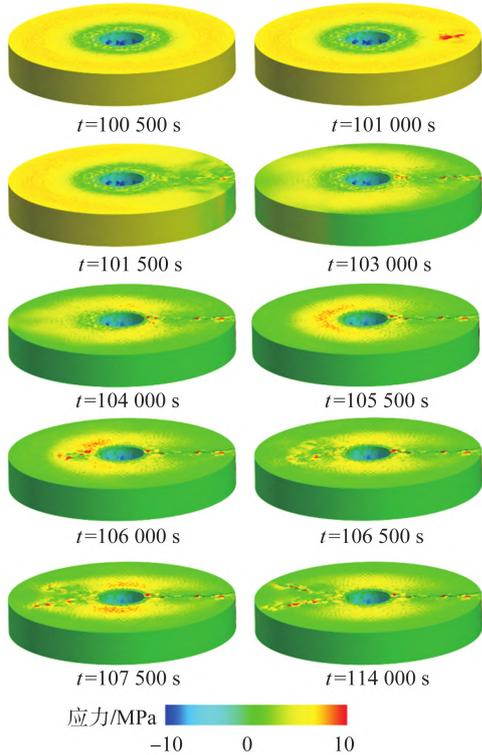


图 7 TD 模型破裂过程和最大主应力  
Fig.7 Fracture process and principal maximum stress of TD model

### 2.2.2 破裂形态对比

研究表明,升温速率对岩石的热破裂有较大影响,不同的升温速率导致岩石内温度梯度不同,影响岩石的破裂形态和破裂程度<sup>[1]</sup>。

图 8 为 NTD 模型和 TD 模型在不同升温速率的最终破裂形态。由图 8 可以看到,升温速率越小,裂缝数量越少,裂缝较长且较为集中;反之,裂缝数量越多,除了主裂缝外还存在许多未贯通的细碎的裂缝,这些细碎的裂缝分布稀疏。同时可以发现,TD 模型的裂缝数量在不同升温速率下均比 NTD 模型少。

图 9 为两组模型在不同升温速率下,计算结束后的最大裂缝宽度统计。当不考虑温度相关性时,最大裂缝宽度并不随升温速率的增加出现较大变化,为 0.003~0.005 m。考虑温度相关性后,升温速率为 0.5~1.0 °C/min 时,裂缝的最大宽度随升温速率增加而增大;升温速率为 1.0~2.0 °C/min 时,裂缝

最大宽度稳定在约 0.008 m。可以看出,温度相关性对裂缝最大宽度的影响非常明显,TD 模型的最大裂缝宽度可达到 NTD 模型的两倍多。

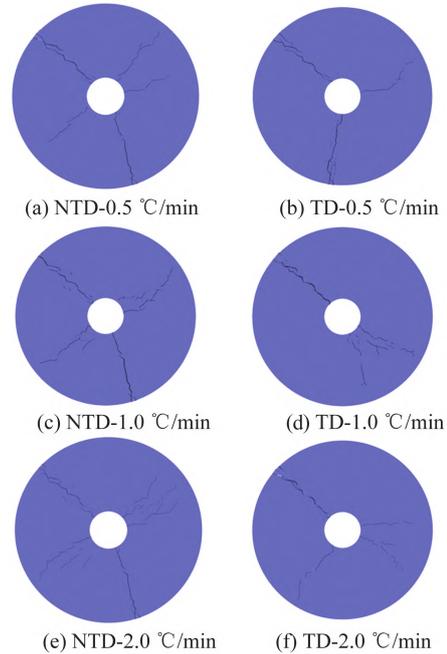


图 8 不同升温速率模型的破裂形态  
Fig.8 Crack morphology of models with different heating rates

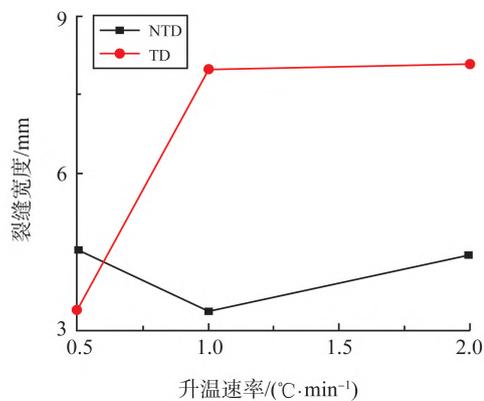


图 9 裂缝最大宽度  
Fig.9 The maximum width of cracks

CDEM 采用界面单元接触弹簧的破坏来表征断裂,根据弹簧破坏的类型可以分为拉伸破坏和剪切破坏。图 10 为不同计算工况下两类模型的裂缝种类对比(0 为未破裂;1.0 为拉伸破裂;2.0 为剪切破裂),从图 10 可以发现,绝大部分的裂缝为拉伸型断裂,仅有小部分为剪切型裂缝。在边界施加温度条件后,单元受热发生膨胀变形,而这部分单元的变形受到外侧相对低温区域单元的约束而处于受压状态;相反,相对低温区域的单元处于受拉状态,由于岩石的抗压强度高于抗拉强度,因此模型最先在相对低温区域发生拉伸破坏,并不断发展延伸。计算结果与实际情况较为吻合。

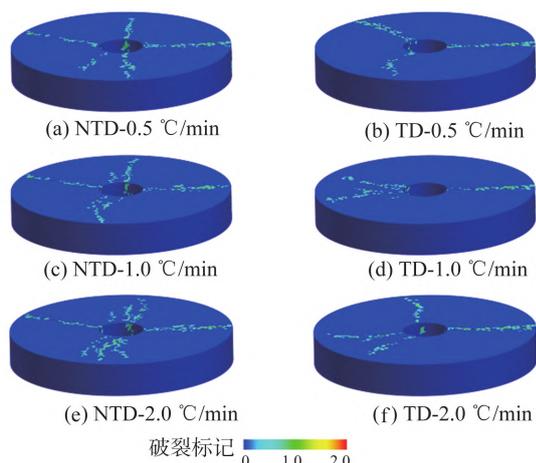


图10 裂缝种类对比

Fig.10 Comparison of crack types

### 2.2.3 破裂度变化

弹簧破裂度定义为破裂接触弹簧特征面积与总弹簧特征面积的比值,是衡量破裂程度的量。

两组模型在不同升温速率下的弹簧破裂度如图11所示。模型从开始出现破裂到破裂达到稳定的时间非常短,在达到稳态热传导之前,热破裂就已经达到稳定。不考虑温度相关性时,升温速率越大,模型最终的弹簧破裂度也就越大,发生破裂的时刻越早;考虑温度相关性之后,模型出现破裂的时步相较NTD模型更晚,最终的弹簧破裂度也不再与升温速率相关。

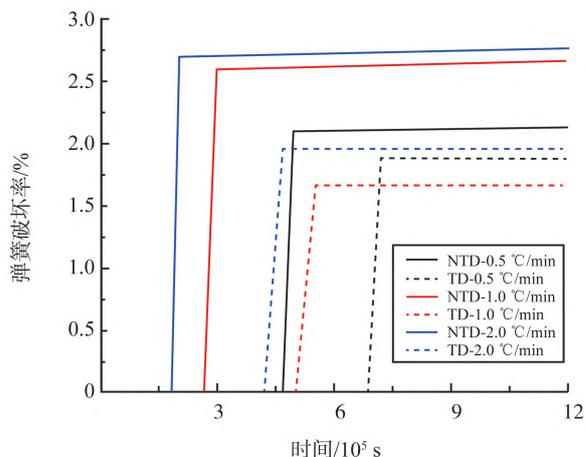


图11 弹簧破裂度与时间曲线

Fig.11 Spring breakage versus time curves

图12为模型破裂阶段,各计算工况的弹簧破裂度变化和破裂度变化率与时间的关系曲线。由图12可以看到,弹簧破裂度变化率存在两个峰值,并且TD模型的弹簧破裂度变化率峰值小于NTD模型。升温速率为0.5、1.0、2.0 °C/min的NTD模型,从开始破裂到破裂达到平衡所需要的时间分别为3300 s、2700 s、2500 s,而TD模型则分别为3000、4500、5000 s。因此温度相关性的存在不仅在一定程度上减小岩石破裂的程度,而且会增加破裂的时间。

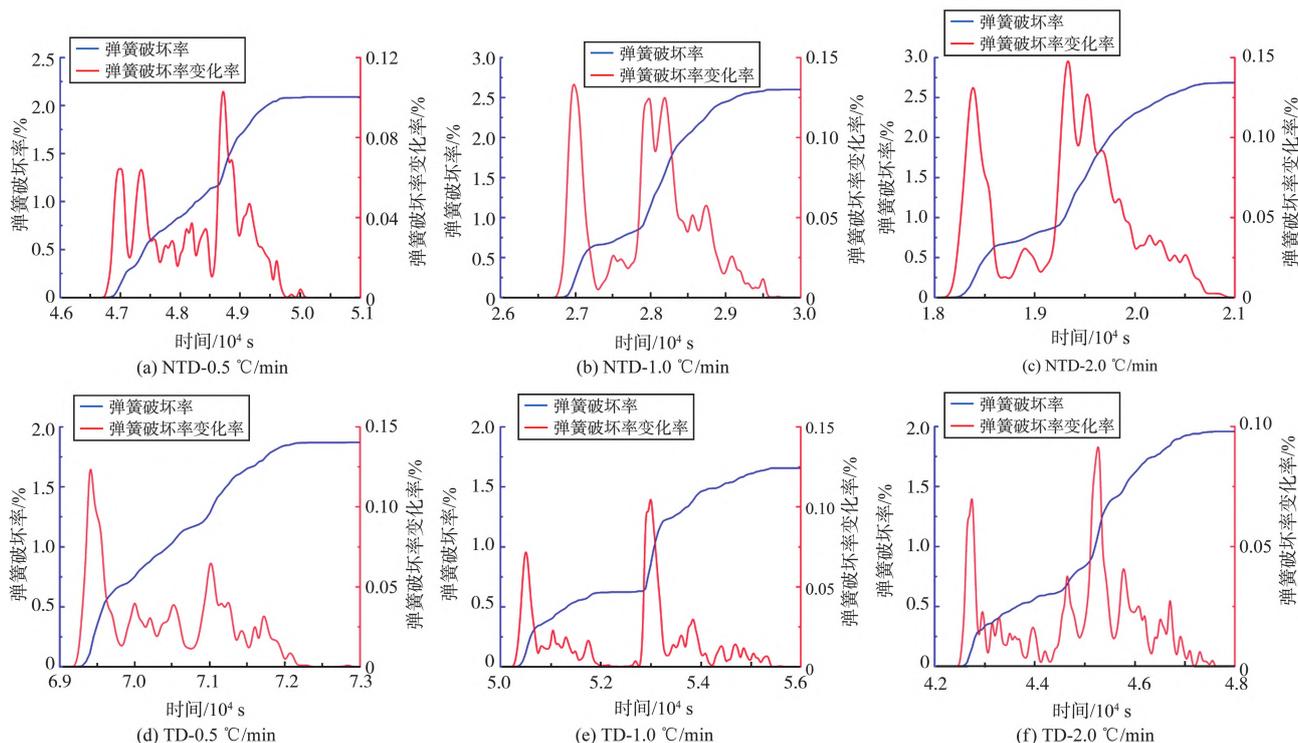


图12 弹簧破裂度/弹簧破裂度变化率与时间关系曲线

Fig.12 Spring breakage/spring breakage rate of change versus time

三维情况下,肉眼难以观察模型内部的裂缝分布情况,通过编写检测脚本,得到计算过程中裂缝的时空分布,其中破裂达到稳定之后,各工况模型的裂缝空间分布如图 13 所示。其中横坐标为 0.25 m 时,代表模型在半径为 0.2~0.3 m 同心圆柱部分。NTD 模型裂缝的数量从内侧面到外侧面逐渐减少,裂缝大量分布在内侧面高温区域;TD 模型裂缝的数量分布较为均匀,模型中间部分的裂缝的占比伴随升温速率变化。

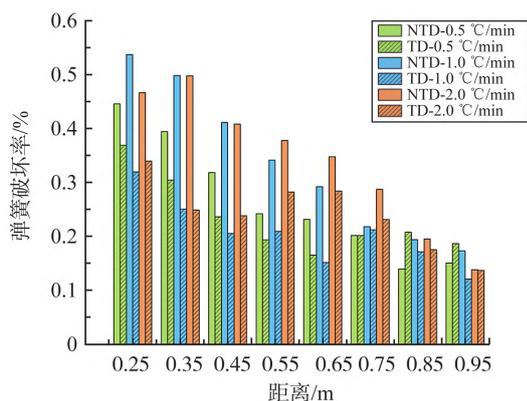


图 13 裂缝的空间分布

Fig.13 Spatial distribution of cracks

### 3 结论

(1)在岩石材料热传导过程中,材料参数的温度相关性不仅会影响瞬态热传导时的温度场,还会影响稳态热传导的温度场,且温度越大,对温度场的影响也越大。在岩石热破裂过程中,材料参数的温度相关性会显著影响裂缝的宽度、分布和形态。

(2)分别研究了升温速率为 1.0 °C/min 的 TD 和 NTD 模型岩石热破裂的过程和裂缝形态,以及它们在开裂过程中的应力分布规律。在相同升温速率下,TD 模型的开裂时间要比 NTD 模型晚,裂缝数量和开裂速度均要比 NTD 模型小。

(3)分别研究了不同升温速率对 TD 模型和 NTD 模型破裂的影响。不考虑温度相关性时,升温速率越大,破裂度越大,破裂越早发生,破裂的速度更大;考虑温度相关性之后,破裂度不再与升温速率相关,破裂速度比不考虑温度相关性时更小,但是破裂的持续时间更长。得到了 TD 模型和 NTD 模型裂缝的时空分布规律,即 NTD 模型裂缝的数量从内侧面到外侧面逐渐减少,而 TD 模型裂缝的数量从内侧面到外侧面分布较为均匀。

#### 参考文献:

[1] 谭启,骆循,李仕雄,等.岩石热破裂研究进展评述[J].

露天采矿技术,2006(6):16-19.

TAN Qi, LUO Xun, LI Shixiong, et al. A review of research progress on rock thermal fracture [J]. *OpenCast Mining Technology*, 2006(6): 16-19.

[2] 韩学辉,楚泽涵,张元中.岩石热开裂及其在工程学上的意义[J].石油实验地质,2005(1):98-100.

HAN Xuehui, CHU Zehan, ZHANG Yuanzhong. Rock thermal cracking and its significance in engineering [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2005(1): 98-100.

[3] 邓红卫,田维刚,周科平,等.2001—2012 年岩石冻融力学研究进展[J].科技导报,2013,31(24):74-79.

DENG Hongwei, TIAN Weigang, ZHOU Keping, et al. Research progress in rock freeze-thaw mechanics from 2001 to 2012 [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(24): 74-79.

[4] HEARDH C. Thermal expansion and inferred permeability of climax quartz monzonite to 300 °C and 27.6 MPa [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(5):289-296.

[5] HEUZEF E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks: a review [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(1): 3-10.

[6] SHEN Yanjun, HOU Xin, YUAN Jiangqiang, et al. Experimental study on temperature change and crack expansion of high temperature granite under different cooling shock treatments [J]. *Energies*, 2019, 12(11):1-17.

[7] MAO Rongrong, MAO Xianbiao, ZHANG Lianying, et al. Effect of loading rates on the characteristics of thermal damage for mudstone under different temperatures [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5):797-801.

[8] PENG Kang, LÜ Hong, YAN Fazhi, et al. Effects of temperature on mechanical properties of granite under different fracture modes [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 226: 106838.

[9] YAN Chengzeng, ZHENG Yuchen, HUANG Duruo, et al. A coupled contact heat transfer and thermal cracking model for discontinuous and granular media [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 375:113587.

[10] JIAO Yuyong, ZHANG Xiuli, ZHANG Huanqiang, et al. A coupled thermo-mechanical discontinuum model for simulating rock cracking induced by temperature stresses [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 67(1): 142-149.

[11] YAN Chengzeng, ZHENG Hong. 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*, 2016, 11(23):170-178.

(下转第 121 页)

- pression from jatropha seeds using a screw press expeller [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(2): 158-166.
- [19] 赵维松. 螺旋挤压固液分离机构优化设计与试验[D]. 南京:中国农业科学院,2017.  
ZHAO Weisong. Organization design and experiments of screw separator[D]. Nanjing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [20] ZHANG H R, ZHANG B. Research on screw-extrusion dehydration technology and equipment in recycling process of urban garbage [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 768: 273-280.
- [21] 张龙龙. 秸秆螺旋挤压脱水机的数值模拟研究[D]. 郑州:郑州大学,2015.  
ZHANG Longlong. Numerical simulation on screw extruder of straw [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.
- [22] 王延刚,常皓,王金帅,等. 一种餐厨垃圾处理装置: 202010659259.2 [P]. 2020-09-25.
- [23] 孙邦雨. 城市餐厨垃圾固液分离技术与装备研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.  
SUN Bangyu. Research on municipal food waste solid-liquid separation and facility development [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [24] CERVON N W, HARPER J M. Viscosity of an intermediate moisture dough [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1978, 2(1):83-95.

(编辑:李骏)

(上接第 113 页)

- [12] TAO Siji, TANG Xuhai, RUTQVIST Jonny, et al. Simulating three dimensional thermal cracking with TOUGH-FEMM [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 124 (11):103654.
- [13] YANG Zhen, YANG Shengqi, TIAN Wenling. Peridynamic simulation of fracture mechanical behaviour of granite specimen under real-time temperature and post-temperature treatments [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138:104573.
- [14] WU You, YIN Tubing, TANG Xiaosong, et al. Determination of the mixed mode I/II fracture characteristics of heat-treated granite specimens based on the extended finite element method [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 252:107818.
- [15] 李腊梅,冯春.一种非连续介质中热传导过程的数值模拟方法[J].*工程力学*,2016,33(1):25-31.
- LI Lamei, FENG Chun. A numerical simulation method of heat conduction process in discontinuous medium [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(1): 25-31.
- [16] WANG Fei, HEINZ Konietzky, MARTIN Herbst. Influence of heterogeneity on thermo-mechanical behaviour of rocks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 116: 103184.
- [17] WANG Fei. Thermo-mechanical properties of granite at elevated temperatures and numerical simulation of thermal cracking [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3737-3755.
- [18] FENG Chun, LI Shihai, LIU Xiaoyu, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(1): 26-35.

(编辑:郭少华)