温度对深部裂隙砂岩裂纹扩展规律的影响

王治磊1,2,康志强1,2,冯江江1,2,姚旭龙1,2

(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063200;2.河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山市 063200)

摘要:为研究裂隙砂岩在不同温度条件下的力学特性和裂纹 扩展规律,对不同温度($-20 \ C \ 20 \ C \ 40 \ C$)处理后的裂隙 砂岩进行双轴压缩试验,并采用 PFC2D 模拟了裂隙砂岩在 不同温度作用后的双轴压缩试验,分析了裂隙砂岩在温度作 用后的裂纹演化、破坏模式、扩展速率和扩展形态等参数的 变化规律。研究结果表明,温度对裂隙砂岩的裂纹扩展速率 和形态有着显著影响,高温条件下裂纹扩展速率更快,并且 裂纹形态呈对称"L"形,同时裂纹数量增多;低温条件下裂 纹扩展速率减缓,裂纹形态呈对称平行直线形。此外,温度 对颗粒之间的摩擦力和黏结力也会产生影响,从而影响裂纹 扩展。通过对比温度-应力耦合数值模型与试验结果可知, 两者的相似度高达 95%,可以较好地验证裂隙砂岩裂纹扩 展规律,研究工作可为岩石力学领域的技术创新提供新思路 和新方法。

0 引言

裂隙岩石在自然界中广泛存在,岩石内部结构 和矿物组成、颗粒组成、结构、构造等都具有多样性 和复杂性^[14]。由于岩石具有各向异性,在不同的外 界条件下会产生不同的破坏形式。温度变化是影响 岩石破坏的重要因素之一^[5-7],深入研究岩石在温度 变化条件下的裂纹演化破坏规律具有重要意义。

目前,国内外学者对于温度变化条件下岩石裂 纹扩展规律进行了大量的研究,张永利等^[8]通过观 察不同温度下煤体的裂隙扩展规律,利用声发射试 验方法,得出煤体内部在不同围压下改变温度时,裂 隙的扩展规律。申科等^[9]对膨胀岩土进行 50 ℃、 75 ℃、100 ℃ 3 种环境下的干湿循环试验,发现温 度越高,岩土内部裂隙扩展越快。李春等[10]研究了 花岗岩在不同温度循环作用下的巴西劈裂试验,得 出在低温阶段时,试样沿着巴西圆盘中心线发生破 裂;在中温阶段时,试样沿着直径呈现一定角度的破 裂;在高温阶段时,试样的破裂模式呈现复杂状态, 破碎程度较大。TOSHIYUKI H 等^[11] 通过对比花 岗岩模拟试验和室内试验结果,分析了花岗岩在 600 ℃和 100 MPa 围压下的微裂纹扩展规律。 TAN Q 等^[12]研究了不同岩石温度下的破岩特性, 结果表明随着岩石温度的升高,岩石的硬度、强度等 力学性能均大幅度降低,产生的微裂纹、拉伸裂纹和 剪切裂纹增多:随着裂纹数量的增加,微裂纹迅速扩 展。岩石的压力-应力分布符合 Buzin-Neske 应力 圆规律。上述学者通过对岩石在不同温度条件下进 行力学性质的研究,获得了岩石的破坏特征与裂纹 扩展规律。

而现阶段的研究主要采用室内试验,成本高、周期长,且无法准确反映岩石在不同温度条件下的破坏规律。离散元法作为一种重要的数值模拟方法,可以在模拟裂隙砂岩的裂纹扩展过程中考虑温度的影响^[13-16]。许多学者通过各种试验及数值模拟方法研究了不同条件下裂隙砂岩的裂纹扩展规律,以期更好地了解其力学行为和性能变化机理。KUMARI等^[17]研究了不同温度和围压条件下对Strathbogie 花岗岩的三轴力学特性的影响。ZHANG X H等^[18]利用三维立体定向扫描系统研究岩石的温度、流速、粗糙度以及裂隙表面孔径大小对传热系数的影响,发现岩石的初始温度对其影响较小。JIANG H P 等^[19]研究了黄砂岩进行化学腐蚀和冻融循环的耦合效应,结果表明 FT 循环中的

基金项目:国家自然科学基金项目(52074123).

作者简介:王治磊(1996一),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事矿山岩石力学与工程研究工作,E-mail:546711723@qq.com。 通信作者:康志强(1974一),男,河北唐山人,博士,教授,主要从事矿山边坡稳定性分析的教学和研究工作,E-mail:kzqzsh@163.com。

^{*} 收稿日期:2023-06-07

化学腐蚀和最低温度对黄砂岩的力学性能产生破 坏,黄砂岩的承载力和抗变形能力都有所下降,而塑 性则有所增加。

本文以冀东某矿区的裂隙砂岩为研究对象, 通过双轴压缩试验和 PFC2D 数值模型结合的方 法,分析不同温度条件下裂纹扩展规律、扩展路径 以及扩展速率与力学性质的关系,从而全面掌握 裂隙砂岩在不同温度条件下的裂纹演化规律。并 与宏观试验进行对比验证,揭示温度变化对裂隙 砂岩力学性能的影响,为煤矿工程应用和生产提 供重要参考。

1 双轴压缩试验

1.1 试件制备及仪器

试验岩石选用黄砂岩,取自冀东某矿区,矿物成 分主要包括石英、长石和云母,质量分数分别为 52.4%、33.1%、14.5%,砂岩的密度为2.248 g/cm³。 砂岩为细粒结构,呈棕黄色,无原生节理或裂隙,且 强度不高、易风化。从现场取得新鲜大岩块,运输到 实验室后精细加工成 50 mm×100 mm×150 mm 的长方体板状试样,再采用高压水射流切割机将岩 石加工成倾斜角度为 45°,长度为 50 mm,宽度为 1 mm,距离为 30 mm 的贯通型平行双裂纹,最后采 用磨平机分别将加工完成的试件的各个端面打磨平 整,岩样如图 1 所示。



1.2 试验方案

考虑到煤矿工程中存在不同温度条件,试验设 计温度分别为-20℃(低温)、20℃(室温)和40℃ (高温)共3个不同温度进行对照^[20]。其中,A组采 用CLD全自动低温冻融试验机进行冻融试验,B组 和C组为中高温试验,采用TH1200高低温交变湿 热试验箱。力学试验采用 RLW-3000 型微机控制 电液伺服压力试验机。裂隙砂岩试件在不同温度条 件下进行分组,见表1。

表1 不同温度条件下试件分组

组别	温度/℃	试件个数/个
A-2	-20	3
B-2	20	3
C-2	40	3
A-5	-20	3
B-5	20	3
C-5	40	3
A-10	-20	3
B-10	20	3
C-10	40	3

预加载负荷为 2 kN,侧压分别设为 2 MPa、5 MPa与10 MPa,以 0.12 mm/min 的加载速率同步将轴压、围压升高至预定值,切换成轴向位移控制模式,以 0.1 mm/min 的加载速率进行加载直至裂隙砂岩试件完全破坏。为了增加试验的准确性,每组不同条件的试件分别加载 3 块。在加载的同时搭配工业相机摄影系统检测并记录裂纹的扩展过程和试样最后破坏结果,为后期的结果分析提供了良好的试验数据支撑。

1.3 试验结果

各组裂隙砂岩试件的峰值应力变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,初始压缩时刻为孔隙压密闭合 阶段,岩石中的孔隙被压缩闭合,导致试样体积缩 小。随着荷载的增大进入线弹性阶段,岩石中产生 微裂纹,应力随应变呈线性变化。当应力大于弹性 极限后进入屈服阶段,岩石中微裂纹聚集形成宏观 裂纹,应力随应变呈非线性增大。当应力超过屈服 阶段,微裂纹快速发展直至岩石发生破坏,此时,应 力"跳崖式"跌落至残余强度。

当温度为-20 ℃、20 ℃和 40 ℃时,试样的峰 值应变分别为 0.76%、0.79%与 0.83%。可见,高温 时的峰值应变最大。根据应力-应变曲线的峰值应 力可以得到不同温度条件下试样的峰值强度,将各 组的峰值强度进行曲线拟合,得到峰值应力与温度 的关系曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知,以围压 5 MPa 为例,当温度为 -20 ℃、20 ℃和 40 ℃时,试样的峰值应力分别为 27.29 MPa、26.65 MPa 与 21.38 MPa。说明随着温 度的升高,裂隙砂岩的峰值应力逐渐降低。



图 2 不同温度条件下裂隙砂岩的应力-应变曲线



2 离散元数值模型构建及力学细观参数 确定

采用 PFC2D 模拟不同温度作用下裂隙砂岩,

使用的离散元软件分为3个步骤。

(1)模型生成。此部分用于生成模型并为模型的弹性模量、尺寸和其他参数赋值。

(2)热处理。给出模型粒子的热力学参数,例 如传热系数。通过自定义温度增量为整个模型给出 初始温度和冻融循环。该部分实现了模型中温度的 传递、温度的变化以及由此产生的参数变化,例如孔 隙率。

(3)加载部分。此部分通过将速度应用于模型 顶部和底部的壁来实现模型的加载过程。在加载过 程中,可以实时监测颗粒位移、应力和其他参数的变 化。通过在模型内加载不同部件之间的围压来平衡 颗粒之间的初始重叠,以避免由于粒子在后续运行中 的初始接触力或初始速度而导致最终结果错误。

2.1 裂隙砂岩数值模型构建

首先在 PFC2D 中以 1:1 构建离散元颗粒模型,如图 4 所示。颗粒模型尺寸为 100 mm×150 mm,为满足 PFC 运行的合理性,粒径的设定值大于材料粒径值,颗粒最小半径为 0.5 mm,颗粒半径比为 1.66,共生成10 894个颗粒。生成预制裂隙采用的是在裂隙位置生成 wall,然后删除 wall 内的颗粒的方法。其次,通过 PFC 的热力学模块模拟不同温度条件(-20 ℃、20 ℃和 40 ℃),在该模块中定义颗粒不同成分的热力学参数,设定比热容为 800 (J/(m³ • K))和不同温度热膨胀系数,其中,热膨胀系数主要控制了温度处理后模型力学性能的差异。最后,通过 Fish 函数对上下墙体竖直方向的速度进行控制,运用伺服控制的方式对试样进行加载。



图 4 裂隙砂岩数值模型

2.2 热力耦合原理

PFC 热分析模块包括 PFC 颗粒组成材料的瞬态 热传导和热储存问题。考虑到传热过程和热应力加 载,PFC 中使用了一个内置的热接触器。每个颗粒都 被认为是一个储存热量的储存器。热流通过连接储层 的主动热接触点的传导发生。每个储层都与温度无 关,只有当两个颗粒重叠或存在一个黏结键时,热传导 才会被激活。热力耦合可以通过傅里叶定律来计算。

$$q_i = -\boldsymbol{k}_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \tag{1}$$

式中, q_i 为导热系数; k_{ij} 是热导率张量, $W/(m \cdot C)$;T为温度,C。

由温度变化引起的颗粒热膨胀(ΔR)可计算为:

$$\Delta R = \alpha R \, \Delta T \tag{2}$$

式中,R 为颗粒半径,mm; α 为线性热膨胀系数; ΔT

为温度增量,℃。

基于黏结材料的膨胀是各向同性的假设,可以 计算出颗粒热膨胀引起的法向力的变化为:

 $\Delta \overline{F}_n = -\overline{k}_n A \Delta U_n \overline{F}_n = -\overline{k}_n A (\overline{aL} \Delta T)$ (3) 式中, \overline{k}_n 为黏结的法向刚度, MPa; A 为黏结键横截 面面积, mm²; \overline{a} 为黏结键的线性热膨胀系数(两个 颗粒膨胀系数的平均值); \overline{L} 为两个接触颗粒的中心 之间的距离, mm。

2.3 裂隙砂岩力学细观参数确定

为在 PFC 颗粒流软件中取得正确的模拟效果, 需要选择合适的细观参数。参考相关文献并结合砂 岩的岩性,通过"试错法"^[21-22]与室内物理试验对 照,不断校正力学参数,最终获得本次数值模拟合适 的参数,见表 2。

表 2 裂隙砂岩力学细观参数

颗粒最	颗粒	密度/	颗粒弹	颗粒	摩擦	平行黏	平行黏结 切向强度/	平行黏结 注向强度/	比热容/	热膨胀系数 α/℃ ⁻¹		
小十在/ mm	赵庄	(kg/m^3)	住候里/ GPa	的反比	示奴 <i>μ</i>	之比	的问强度/ MPa	云问强度/ MPa	$(J/(m^3 \cdot K))$	−20 °C	20 °C	40 °C
0.5	1.66	2248	8	2	0.5	1.2	55	68	800	$4.8 imes 10^{-6}$	$5.3 imes 10^{-6}$	5.8×10^{-6}

3 不同温度作用下裂隙砂岩数值模拟分析

3.1 不同温度作用下裂隙砂岩裂纹扩展规律

随着温度的变化,裂隙砂岩的物理性质和力学 细观参数都会发生改变,会进一步影响裂隙砂岩在 不同温度下的裂纹演化规律。裂隙砂岩的比热容、 热膨胀系数和颗粒粒径大小不相同,也会导致颗粒间的热膨胀系数与比热容出现差异,从而使粒子间形成热应力,在裂隙砂岩内部产生微裂纹。由于原生裂纹、预制裂纹和次生裂纹的相互扩展和贯通,最终导致裂隙砂岩破坏。对C组工况下裂纹演化规律进行分析,如图5所示。



图 5 40 ℃裂纹扩展演化规律

由图 5 可知,在高温作用下,裂隙砂岩中的微裂 纹扩展通常经历萌生、发育、扩展和破坏等 4 个阶段。

(1) 萌生阶段。在高温作用下,裂隙砂岩微裂 纹首先出现在岩石内部缺陷、孔洞与现有裂隙的表 面。裂纹先从裂隙尖端产生,且全部为剪切裂纹,见 图 5(a)。

(2)发育阶段。在微裂纹萌生后,沿着裂隙的方向扩展,形成微观断裂带。在这个过程中,微裂纹的长度和宽度逐渐增加,但深度通常保持在岩石表面以下。此外,微裂纹的扩展也会受到应力状态、岩石物理力学性质、裂隙结构和孔隙率等因素的影响。随后,剪切裂纹和张拉裂纹在裂隙两端逐渐生成,见图 5(b)和图 5(c)。

(3)扩展阶段。当微裂纹的长度和宽度增加到 一定程度时,它们会与其他微裂纹相连,形成一个更 大的断裂带。同时,岩石周围的应力会使断裂带进 一步扩展,直到破坏。在这个过程中,断裂带的宽度 和深度会逐渐增加,微裂纹的扩展路径可能会发生 变化,见图 5(d)和图 5(e)。

(4)破坏阶段。在扩展阶段后,断裂带的宽度 和深度都已达到一定程度,岩石的载荷传递过程已 经被破坏。此时,破碎的岩石颗粒开始迅速分离,岩 石失去了强度和稳定性。在这个过程中,岩石会出 现断裂、剪切、压缩等多种形态的破坏,见图 5(f)。

3.2 不同温度作用下裂隙砂岩破坏模式

裂隙砂岩中微裂纹的发育规律和破坏模式是受 温度影响的重要研究方向之一。在不同温度条件 下,裂隙砂岩中微裂纹的发育规律和破坏模式都有 所不同。选取2 MPa 侧向压力下、不同温度条件下 室内试验与数值模拟进行对比分析,如图 6 所示。



图 6 不同温度作用下裂隙砂岩破坏模式对比

由图 6 可知,在高温环境下,裂隙砂岩裂纹形态 呈对称"L"形,微裂纹加速扩展,而且还会出现新的 裂纹。其中,微裂纹扩展的主要模式为剪切裂纹(红 色,颜色标识见电子版)和张拉裂纹(黑色)。剪切裂 纹主要沿着裂隙面的剪切力方向扩展,裂纹呈 45° 扩展;张拉裂纹主要沿着法向方向扩展。在低温环 境下,裂隙砂岩中微裂纹的扩展速率减缓,裂纹的路 径较为简单,形态为平行直线对称型。此时,微裂纹 的扩展模式主要为拉伸裂纹和剪切裂纹。拉伸裂纹 主要以直线形式扩展,剪切裂纹则沿着砂粒间的剪 力方向扩展。在裂隙面内部发生的裂纹以剪切裂纹 为主,在裂隙面之间发生的裂纹则主要以张拉裂纹 为主。

综上所述,具体的微裂纹发育规律和破坏模式 还受到裂隙砂岩的物理性质、结构特征和应力状态 等因素的综合影响。基于试验和数值模拟相结合的 方法,可以更全面、更准确地揭示裂隙砂岩在不同温 度条件下微裂纹的发育规律和破坏模式。

3.3 不同侧压作用下裂隙砂岩微裂纹数目变化 规律

通过模拟不同温度条件下双轴压缩试验,详细 分析了不同侧压作用下裂隙砂岩中裂纹数目的变化 个

规律。对数值模型热传导过程中产生的剪切裂纹和 张拉裂纹以及总裂纹数目进行统计,统计结果见表 3和图 7。由表 3可知,在高温条件下,裂隙砂岩中 的裂纹扩展速率加快;而在低温条件下,裂纹扩展速 率减缓。具体来说,高温条件下裂隙砂岩中剪切裂 纹占主导地位,剪切裂纹扩展速率可以达到 60%以 上;而低温条件下砂岩中裂纹扩展速率减缓到 50% 以下。因此,不同温度作用下和不同侧压作用下,裂 隙砂岩裂纹变形以剪切为主,张拉为辅。

表 3 裂纹数目统计

组别	张拉裂纹个数	剪切裂纹个数	总裂纹个数
A-2	13 314	22 761	36 075
B-2	13 497	22 938	36 435
C-2	13 596	23 471	37 545
A-5	13 698	23 597	37 295
B-5	13 826	23 632	37 600
C-5	13 852	23 774	37 323
A-10	14 125	23 949	37 757
B-10	$14 \ 271$	24 059	38 330
C-10	$14 \ 442$	24 529	38 971



由图 7 可知,不同侧压下裂隙砂岩裂纹数量随 着侧压的增大而增多,这是因为温度影响砂岩中颗 粒之间的摩擦力和黏结力,进而影响裂纹的扩展速 率。在高温环境下,颗粒之间的摩擦力减小,黏结力 增加,导致裂纹扩展更加容易;而在低温环境下,颗 粒之间的摩擦力增加,黏结力减小,裂纹扩展难度增 大。此外,温度和围压的耦合作用也会对裂纹扩展 速率产生叠加效应。

3.4 不同温度作用下裂隙砂岩试验与数值模拟对 比分析

不同温度作用下裂隙砂岩试验所得应力-应变 曲线与离散元模拟结果如图 8 所示。由图 8 可知, 不同温度作用下相同侧压(5 MPa)下裂隙砂岩试验 与数值模拟的应力-应变曲线的变化规律相似度为 95%,但是峰值强度有 2%~4%的差距。



4 结论

离散元法能够有效地描述不同物理过程岩体内 部的相互作用,为探究裂隙砂岩破坏和微裂纹扩展 机理提供了新的技术手段。温度是影响岩石物理性 质和力学特性的重要影响因素之一,尤其是对于高 温和低温环境下的砂岩,微裂纹的扩展行为更容易 受到温度的影响。本文通过离散元法对不同温度条 件下裂隙砂岩微裂纹的扩展进行数值模拟,可以得 出以下结论。

(1)在温度条件下,裂纹扩展通常经历4个阶段:萌生、发育、扩展和破坏。萌生阶段:裂隙砂岩微裂纹首先出现在岩石内部缺陷、孔洞与现有裂隙的表面,裂纹萌生率先从裂隙尖端产生,且全部为剪切裂纹;发育阶段:在微裂纹萌生后,它们将沿着裂隙的方向扩展,形成微观断裂带,剪切裂纹和张拉裂纹在裂隙两端逐渐生成;扩展阶段:微裂纹的长度和宽

度增加到一定程度时,它们会与其他微裂纹相连,形成一个更大的断裂带,微裂纹的扩展路径可能会发 生变化;破坏阶段:岩石失去了强度和稳定性,会出现断裂、剪切、压缩等多种形态的破坏。

(2)不同温度条件下,裂隙砂岩的破坏模式存 在明显差异。高温环境下,裂隙砂岩中微小裂纹的 扩展速度加快,同时扩展路径呈对称"L"形。而在 低温环境下,微小裂纹的扩展速率减缓,裂纹的扩展 路径呈对称平行直线形。微小裂纹主要以剪切裂纹 和拉伸裂纹为主要扩展模式,在裂隙面内部发生的 裂纹以剪切裂纹为主,在裂隙面之间发生的裂纹则 主要以张拉裂纹为主。

(3)在不同的侧压条件下,裂隙砂岩中的裂纹 数量随着侧压的增加而增多。这是因为温度对砂岩 颗粒之间的摩擦和黏结力产生影响,从而影响裂纹 的扩展速率。在高温环境下,颗粒之间的摩擦力减 小、黏结力增加,导致裂纹更容易扩展;而在低温环 境下,颗粒之间的摩擦力增加、黏结力减小,从而增 加裂纹扩展的难度。

(4)不同温度条件下裂隙砂岩的物理力学性能会出现显著差异。通过试验实测数据和数值模拟对比可知,两者的相似度高达95%。此外,离散元法建立的温度-应力耦合数值模型可以真实地反映裂隙砂岩在不同温度和应力条件下的裂纹扩展规律和形态变化。本研究为煤矿安全生产提供了更为可靠的理论支持,并为岩石力学领域的技术创新提供了新的思路和方法。

参考文献(References):

- [1] 宋勇军,程柯岩,孟凡栋.冻融作用下裂隙岩石损伤破坏声发 射特性研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(2):408-419.
- [2] 李金明,李国玉,彭万林,等.不同温度条件下饱水风化花岗 岩强度及变形特性分析[J].冰川冻土,2020,42(2):523-53.
- [3] 杨敏,杨磊,李玮枢,等.循环升温-水冷作用下花岗岩的力 学特征与破坏模式[J].科学技术与工程,2021,21(32): 13828-13836.
- [4] WU J W, GAO J W, FENG Z J, et al. Investigation of fracture process zone properties of mode I fracture in heattreated granite through digital image correlation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235, 107192.
- [5] 陈宇波,王耀,罗昊.不同温度作用下砂岩巴西劈裂试验研究[J].矿业研究与开发,2018,38(8):45-50.
- [6] 刘瑞雪,茅献彪,张连英,等.温度对泥岩力学性能的影响[J].矿业研究与开发,2012,32(4):97-99+118.

- [7] 蒋明镜,张宁,申志福,等.含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机 制离散元分析[J].岩土力学,2015,36(11):3293-3300+ 3314.
- [8] 张永利,曹竹,肖晓春,等.温度作用下煤体裂隙演化规律数 值模拟及声发射特性研究[J].力学与实践,2015,37(3): 350-354.
- [9] 申科,朱潇钰,张英莹.不同温度下膨胀土裂隙演化规律研究 [J].水电能源科学,2017,35(3):116-118.
- [10] 李春,胡耀青,张纯旺,等.不同温度循环冷却作用后花岗岩 巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究[J].岩石力 学与工程学报,2020,39(9):1797-1807.
- [11] TOSHIYUKI H, TORU T. Supercritical water/rock interactions and generation of artificial geothermal reservoirs in deep-seated high temperature rock masses [J]. Geo-Engineering Book Series, 2004, 2:661-666.
- [12] TAN Q, ZHANG G J, XIA Y M, et al. Differentiation and analysis on rock breaking characteristics of TBM disc cutter at different rock temperatures[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4807-4818.
- [13] ZUO J P, LI Y L, ZHANG X Y, et al. The effects of thermal treatments on the subcritical crack growth of Pingdingshan sandstone at elevated high temperatures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51 (11): 3439-3454.
- [14] FENG G, WANG X C, WANG M, et al. Experimental investigation of thermal cycling effect on fracture characteristics of granite in a geothermal-energy reservoir [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235;107180.
- [15] 李晓雪,郤保平,何水鑫,等.热冲击下花岗岩的细观变化规 律[J].矿业研究与开发,2021,41(5):67-73.
- [16] 梁源凯,冯增朝,白骏等.热力耦合作用下花岗岩热破裂特征 的颗粒流分析[J].水电能源科学,2020,38(1):127-130+93.
- [17] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermal energy extraction [J]. Geothermics, 2017, 65:44-59.
- [18] ZHANG X H, WANG Z L, SUN Y H, et al. Numerical Simulation on Heat Transfer Characteristics of Water Flowing through the Fracture of High-Temperature Rock [J]. Geofluids, 2020(4):1-14.
- [19] JIANG H P, JIANG A N, ZHANG F R, et al. Study on mechanical properties and statistical damage constitutive model of red sandstone after heating and water-cooling cycles[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2022, 31(7):975-998.
- [20] 史有瑜,于志明,曹亚杰.唐山 2008—2013 年地温变化特征 [C]//中国气象学会.第 32 届中国气象学会年会 S6 应对气候 变化、低碳发展与生态文明建设.北京:中国气象学会,2015:5.

- [21] LIU N F, LI N, LI G F, et al. Method for evaluating the equivalent thermal conductivity of a freezing rock mass containing systematic fractures [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(12): 7333-7355.
- [22] TIAN W L, YANG S Q, HUANG Y H. Macro and micro mechanics behavior of granite after heat treatment by cluster model in particle flow code[J]. Acta Mechanica Sinica, 2018, 34(1):175-186.

Effect of Temperature on Crack Propagation Law of Deep Fractured Sandstone

WANG Zhilei^{1,2}, KANG Zhiqiang^{1,2}, FENG Jiangjiang^{1,2}, YAO Xulong^{1,2}

(1.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063200, China;2.Green Intelligent Mining Technology Innovation Center of Hebei Province, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and crack propagation law of fractured sandstone under different temperature conditions, biaxial compression tests were carried out on fractured sandstone treated at different temperatures $(-20 \ C, 20 \ C, 40 \ C)$. PFC2D was used to simulate the biaxial compression tests of fractured sandstone at different temperatures. The variation of parameters such as crack evolution, failure mode, propagation rate and propagation morphology of fractured sandstone after temperature action was analyzed. The results show that temperature has a significant effect on the crack propagation rate and morphology of fractured sandstone. The crack propagation rate is faster under high temperature conditions, and the crack morphology is symmetrical "L" shape, and the number of cracks increases. Under the condition of low temperature, the crack propagation rate slows down, and the crack morphology presents symmetrical parallel straight line shape. In addition, temperature also affects the friction and adhesion among particles, thus affecting crack propagation. By comparing the temperature-stress coupling numerical model with the experimental results, it can be seen that the similarity between the two is as high as 90%, which can better verify the crack propagation law of fractured sandstone. The research work can provide new ideas and methods for technological innovation in the field of rock mechanics.

Key words: Fractured sandstone, Temperature, Crack propagation law, Mechanical properties, PFC2D