

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.03.006

引用格式:刘新荣,张馨元,周小涵,等.热-水-力耦合作用下裂隙砂岩渗流和破坏特性研究[J].重庆大学学报, 2025,48(3): 66-80.



# 热-水-力耦合作用下裂隙砂岩渗流和破坏特性研究

刘新荣<sup>a,b</sup>,张馨元<sup>a,b</sup>,周小涵<sup>a,b</sup>,张吉禄<sup>a,b</sup>,王 葵<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**研究热-水-力耦合作用下粗糙裂隙岩体渗流和破坏特性对探究水热型高地温隧道施工期温度场分布具有重要意义。通过室内热-水-力耦合三轴加荷试验和多物理场耦合数值模拟,分析不同初始岩温(25、50、75 °C)和裂隙粗糙度(JRC)影响下砂岩的破坏模式及渗流传热特征。结果表明,1)在热-水-力耦合作用下,完整和裂隙砂岩的应力-应变曲线变化规律和破坏模式基本相同,应力-应变曲线经历初始压密阶段、弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹迅速扩展阶段以及峰后应力 5 个阶段,且渗透率-应变曲线变化规律与应力-应变曲线规律相呼应。2)预制裂隙的存在使砂岩的峰值强度降低了约 7%,峰后应力阶段随 JRC 值的增加而减小,岩样由延性破坏转变为脆性破坏,而破裂面角度随 JRC 值的增加而增加,且粗糙裂隙试样从正弦曲线极值点产生剪切破坏。3)裂隙试样的渗透率在加载初期先降低到最小值,经历 2 阶段增长后渗透率达到最大值,前增长阶段主要渗流路径为岩石基质及预制裂隙,后增长阶段预制裂隙及衍生的细-宏观裂纹进一步拓宽了渗流通道,后阶段渗透率增速是前阶段的 3 倍。4)在此温况下,温度升高对渗透率初始值和最小值影响显著,对试样强度特性影响较小。

**关键词:**热-水-力耦合;裂隙粗糙度;单裂隙砂岩;渗透率;破坏特征

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)03-066-15

## Seepage and failure characteristics of fractured sandstone under thermal-hydro-mechanical coupling

LIU Xinrong<sup>a,b</sup>, ZHANG Xinyuan<sup>a,b</sup>, ZHOU Xiaohan<sup>a,b</sup>, ZHANG Jilu<sup>a,b</sup>, WANG Yan<sup>a,b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Understanding the seepage and failure characteristics of rough fractured rock masses under thermal-hydro-mechanical (THM) coupling is crucial for exploring temperature field distribution in hydrothermal high ground temperature tunnels during construction. This study investigates the failure modes and seepage-heat transfer characteristics of sandstone through laboratory THM triaxial loading tests and multi-physical field coupling numerical simulation, considering various initial rock temperatures (25 °C, 50 °C and 75 °C) and fracture roughness coefficients (JRC). The main findings are as follows: 1) Under THM coupling, the stress-strain

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374079); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52104076)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52374079), and the National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation Project (52104076).

作者简介: 刘新荣(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) liuxrong@126.com。

通信作者: 周小涵, 男, 博士, 硕士生导师, 副研究员, (E-mail) zhouxh2008@126.com。

curves and failure modes of intact and fractured sandstones are basically consistent. The stress-strain curves exhibit 5 distinct stages: initial compaction stage, elastic deformation stage, stable crack propagation stage, rapid crack propagation stage, and post-peak stress stage. The variation pattern of permeability strain curves correspond to those of stress-strain curves. 2) Prefabricated fractures reduce the sandstone's peak strength by about 7%. The duration of the post-peak stage decreases with the increase of JRC value, shifting failure behavior from ductile to brittle. The fracture surface angle increases with JRC, and rougher fractures are more prone to shear failure originating from the extreme points of sine curve. 3) The permeability of the fractured specimen first decreases to its minimum value during the initial loading stage, and after 2 growth stages, the permeability reaches its maximum value. In the early stage, seepage primarily occurs through the rock matrix and prefabricated fractures, while in the later stage, the expansion of prefabricated and newly developed cracks significantly broadens seepage channels, with permeability growth rates approximately 3 times higher than that of the early stage. 4) Temperature elevation significantly affects the initial and minimum permeability values but has a limited effect on the strength characteristics of the sample.

**Keywords:** thermal-hydro-mechanical coupling; fracture roughness; single fracture sandstone; permeability; characteristics

我国西南地区地形地貌多变,地质条件复杂,地热资源丰富,隧道建设面临诸多问题,其中,由于隧道高温、水温造成的隧道温度过高是隧道施工期面临的难点之一<sup>[1-3]</sup>。隧道施工扰动引发岩体破坏,裂隙网络扩张发育后,作为高温水的主要渗流通道,地下水渗流过程通过热对流促使岩体内热能发生转移,从而引起隧道温度场的变化<sup>[4-5]</sup>。因此,分析裂隙岩体的热-水-力耦合特征,对进一步研究高地温隧道裂隙岩体的渗流场具有重要意义。

针对裂隙岩体在渗流作用下的破坏特征和渗流机制研究,已有较多报道。彭苏萍等<sup>[6]</sup>和Li等<sup>[7]</sup>采用三轴岩石力学试验,系统分析了储层砂岩在全应力-应变过程中渗透率的变化规律,结果表明,砂岩的渗透率在弹性变形阶段变化不大,在弹塑性阶段先缓慢增加后急剧增大,在峰值应力前达到极大值。Ahrens等<sup>[8]</sup>采用超声波技术对低孔隙度的砂岩的水力特性进行试验,从微观角度阐明弹性变形和非弹性变形的结构演变,发现渗透率和水力扩散系数在与膨胀相关的脆性变形过程中普遍增加,含流体岩石原位破裂一般具有自稳性。傅翔等<sup>[9]</sup>开展了带初始损伤砂岩不同高恒定孔隙水压三轴压缩试验,发现孔隙水压不同,砂岩内部劣化范围和劣化效果差异显著,表现为砂岩试件破裂面形式多样等。Kou等<sup>[10]</sup>对预制单裂隙岩石试件进行了渗流-应力耦合试验,分析了水压和围压对岩石试样峰值强度的影响,表明预裂岩石试件的峰值强度随渗透压力的增加而减小,随围压的增加而增加。

近年来,随着多场耦合试验仪器的研发,对岩石在温度-渗流-应力耦合特性方面也开展了大量研究。陈卫忠等<sup>[11]</sup>建立了黏土岩热-水-力耦合蠕变模型。Rattez等<sup>[12]</sup>用数值模拟的方法建立温度-渗流-应力的强耦合模型,探讨了热孔隙流体加压和微观结构特征对岩石内部局部应变的影响,对渗透率的作用进行了参数化研究,突出了扩散过程对应变局部化现象的主要作用。张培森等<sup>[13]</sup>通过室内试验对100℃以下的红砂岩展开了温度-渗流-应力耦合研究,发现在高温高压作用下渗透率随围压的等梯度增长近似呈线性降低趋势,渗透压差对渗透率影响并不明显。Zhang等<sup>[14]</sup>利用自主研发的温度-渗流-应力耦合试验系统,对裂隙岩体三轴压缩后的花岗岩和板岩试件进行了不同围压下的渗流试验。此外,于洪丹等<sup>[15]</sup>通过高精度渗流应力耦合三轴试验系统,对含裂隙砂岩和粉砂岩加载作用下的渗流特性进行试验,发现加载过程中的渗透率与有效围压呈现负指数关系。甘磊等<sup>[16-17]</sup>结合扫描雕刻技术和自主研发试验设备,开展了不同单裂隙粗糙度下围岩和渗透作用下石灰岩渗流特性试验,提出了渗透压加卸载后的裂隙渗流量预测模型。

综上所述,国内外学者开展了不少裂隙岩石在热-水-力耦合下的力学特征及渗流规律研究。然而,不同裂隙粗糙度的岩石破坏模式、传热渗流特征以及对试验过程渗流-传热演化规律分析较少。因此,文中对预

制裂隙砂岩在不同岩温条件( $T=25、50、75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),考虑裂隙粗糙度( $JRC=0、10、20$ ),开展热-水-力耦合三轴试验,探究三轴荷载下不同岩温和不同裂隙粗糙度对试样破坏-渗流特征的影响,同时基于弹塑性损伤力学在 COMSOL Multiphysics 软件中进一步明确不同裂隙粗糙度砂岩的损伤-渗流-传热演化机制。

# 1 热-水-力耦合试验方案设计

## 1.1 试样制备

杜时贵等<sup>[18]</sup>分别从宏观角度的几何轮廓、表面起伏形态和微观角度的粗糙度描述裂隙粗糙度,其中表面的起伏形态是决定性因素,裂隙表面形态多种多样。岩体中裂隙具有表面形态各异、起伏高低等特征,按照表面起伏形态分为平直状、锯齿状和正弦状。为更好地描述粗糙度,Mandelbrot<sup>[19]</sup>首次提出分形维数  $D$  的概念,对于曲线裂隙分形维数,选择用小方块覆盖来计算,公式为

$$D=-\lim_{r\rightarrow 0}\left[\log N(r)/\log(r)\right],\tag{1}$$

式中: $D$  为分维数; $r$  为小方块的边长; $N(r)$  为小方块的数目。绘制  $\log N(r)-\log r$  双对数图,可得到 1 条负斜率的直线,其斜率的绝对值便是分形维数  $D$ 。

张鑫<sup>[20]</sup>结合分形维数的盒子计数法,对 Barton 的 10 条 JRC 标准曲线特征数据点进行提取,最终计算的分形维数  $D$  与 JRC 的关系与谢和平<sup>[21]</sup>计算的结果相近,可采用谢和平<sup>[21]</sup>提出的 JRC 与  $D$  的关系式:

$$JRC=85.2671\times(D-1)^{0.5697},\tag{2}$$

试验设置裂隙的起伏高度均为 2 mm,投影长度  $L_0$  均为 100 mm,裂隙的起伏角设置为  $0^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$  和  $20^{\circ}$ 。在试验中,可以采用盒子计数法结合 JRC 与  $D$  的关系式对不同起伏角度裂隙的粗糙度进行计算,得到的分形维数代入式(2)中,得到各个裂隙的 JRC 值,如表 1 所示。

表 1 不同起伏角度分维数计算过程

Table 1 The calculation process of fractal dimension of different undulating angles

角度/ ( $^{\circ}$ )	$r_1$ / mm	$N_1(r)$	$r_2$ / mm	$N_2(r)$	$r_3$ / mm	$N_3(r)$	$D$	JRC	JRC 取整
0		100		200		400	1.000 0	0	0
10	1.00	112	0.50	229	0.25	468	1.025 1	10.45	10
20		123		258		541	1.069 5	18.67	20

岩石试样取自四川自贡的致密储层砂岩,砂岩外观灰白色,平均容重  $2\,390\text{ kg/m}^3$ 。XRD 衍射测试结果如图 1 所示。可以看出,砂岩试样主要由石英、斜长石、黏土等组成,详细矿物组成如表 2 所示。

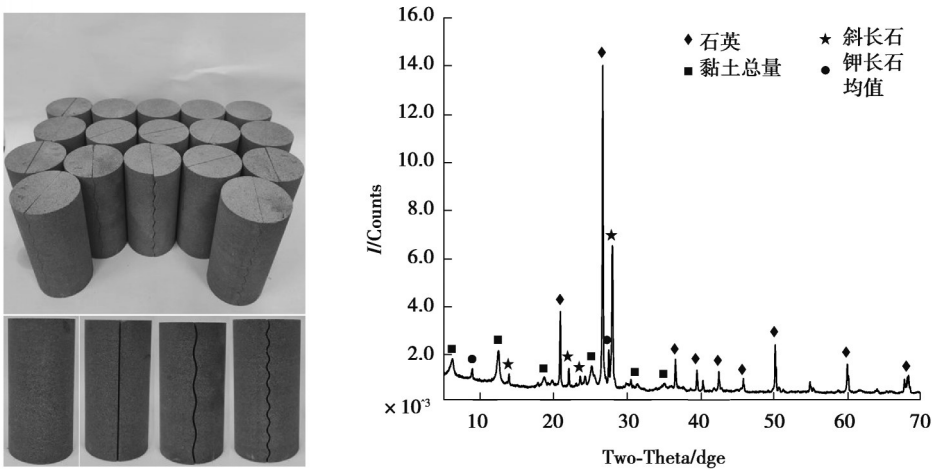


图 1 砂岩试样及岩样衍射分析图

Fig. 1 Rock sample diffraction analysis

根据国际岩石力学学会建议的标准<sup>[22]</sup>,将砂岩钻孔、切割并抛光成  $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的圆柱体。为了便于比较不同裂隙粗糙度(JRC)下,砂岩的渗流特性,试样制备中采用线切割的方式将加工好的标样切割成设定好的裂隙形态,起伏角度分别为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$  及  $20^\circ$ ,砂岩切割试样如图 2 所示,对切割后的裂隙试样起伏高度进行测量并与设计值对比发现,误差小于 2%,与切割前的直径进行对比,平均损耗厚度在 0.03 mm,整体上满足试验要求。

表 2 砂岩试样矿物成分				
Table 2 Mineral composition of sandstone samples				%
矿物名	石英 Qtz	钾长石 Kfs	斜长石 Ab	黏土总量 Clays
样品-1	32.9	6.9	32.9	27.2
样品-2	34.0	6.1	30.8	29.1
样品-3	37.9	5.3	30.4	26.4
均值	34.9	6.1	31.4	27.6

1.2 试验设备

试验采用法国 TOP-INDUSTRIE 公司制造的 Rock 600-50 HTPLUS 三轴多场耦合试验系统。此装置由围压、轴压、水压及温控系统组成,最大轴向荷载为 1 000 kN,围压为 60 MPa,渗透压可达 60 MPa,温度可设置为  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,最大轴向应变为 20 mm,径向应变为 5 mm,可用于岩石等地质材料的温度-流体-力学-化学等多场耦合试验<sup>[23-24]</sup>,试验系统如图 2 所示。

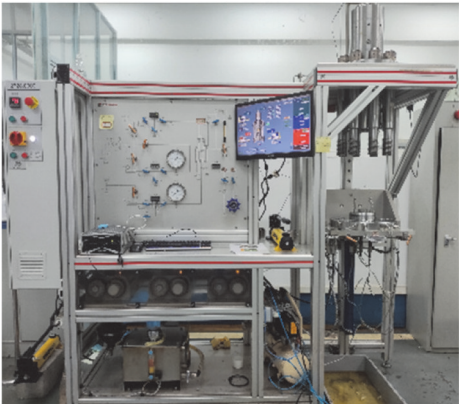


图 2 三轴多场耦合试验系统  
Fig. 2 Triaxial multi-field coupling test system

1.3 加载方案

- 1)试验前,将饱和裂隙试样套入橡胶套并放入三轴应力室,安装轴向位移传感器和环向应变传感器。确保橡胶套和围压室都密封的情况下,再向围压室充满高温液压油。
- 2)采用应力控制模式,以  $1\text{ MPa/min}$  施加围压至预定值  $10\text{ MPa}$ 。对于高温工况,需要先将温度调整到预定值再加围压。
- 3)待温度和围压稳定后,打开渗透压阀门,以  $0.5\text{ MPa/min}$  的速率施加水压至  $3\text{ MPa}$ ,保持水压稳定一段时间后再进行下一步操作。
- 4)使用位移控制模式,以  $0.1\text{ mm/min}$  施加轴向荷载直至试样破坏失效。
- 5)停止轴向加载和围压伺服控制,依次卸载轴向荷载、水压和围压,最后排油卸样。
- 砂岩渗透率的测试,先将试样进行真空饱水处理。渗透率大于  $10^{-3}\text{ mD}(0.987\times 10^{-18}\text{ m}^2)$  的岩石,可以使用



稳态法测量渗透率,基于达西定律<sup>[25]</sup>,测量在单位时间内恒定渗透压下通过样品的流体体积的计算公式为

$$K=Q\mu L/(\Delta P_w A),$$

(3)

式中: $A$ 为试样的横截面, $\text{m}^2$ ; $Q$ 为单位时间内水通过试样横截面积 $A$ 的流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $L$ 为试样长度, $\text{m}$ ; $\mu$ 为流体的黏度(水在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\mu=0.8937\times10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\mu=0.3799\times10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;在 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\mu=0.3165\times10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ); $d$ 为试样直径, $\text{m}$ ; $\Delta P$ 为试样两端的渗透压差, $\text{Pa}$ 。

对不同温况下的裂隙砂岩进行热-水-力耦合三轴压缩试验,分析不同粗糙度下砂岩的渗透率演化规律和损伤破坏特征,对试样进行声波检测并计算各个试件基本物理参数,得到试样的平均密度为 $2.387\text{ g}/\text{cm}^3$ ,平均纵波波速为 $2.242\text{ km}/\text{s}$ ,具体参数和加载工况如表3所示。

表 3 砂岩物理特性参数

Table 3 Physical characteristic parameters of sandstone

试样编号 JRC/温况	起伏角 JRC/ ( $^\circ$ )	天然质量/ g	天然密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	纵波波速/ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	工况温度/ $^\circ\text{C}$
标样- $25\text{ }^\circ\text{C}$	—	471.0	2.389	2.216	25
标样- $50\text{ }^\circ\text{C}$		472.5	2.376	2.162	50
标样- $75\text{ }^\circ\text{C}$		470.5	2.398	2.202	75
JRC= 20- $25\text{ }^\circ\text{C}$	20	469.5	2.387	2.334	25
JRC= 20- $50\text{ }^\circ\text{C}$		469.0	2.385	2.208	50
JRC= 20- $75\text{ }^\circ\text{C}$		465.0	2.391	2.176	75
JRC= 10- $25\text{ }^\circ\text{C}$	10	471.0	2.375	2.253	25
JRC= 10- $50\text{ }^\circ\text{C}$		466.5	2.389	2.216	50
JRC= 10- $75\text{ }^\circ\text{C}$		471.0	2.367	2.315	75
JRC= 0- $25\text{ }^\circ\text{C}$	0	469.5	2.399	2.461	25
JRC= 0- $50\text{ }^\circ\text{C}$		470.0	2.397	2.165	50
JRC= 0- $75\text{ }^\circ\text{C}$		468.5	2.394	2.198	75

2 热-水-力耦合试验结果分析

由图5渗透率-应力-应变曲线可知,不同温度和裂隙粗糙的砂岩应力-应变曲线变化规律同样满足5个阶段变化特征,即初始压密阶段( $OA$ )、弹性变形阶段( $AB$ )、裂纹稳定扩展阶段( $BC$ )、裂纹快速扩展阶段( $CD$ )以及峰后破坏阶段( $DE$ ),其中,弹性变形阶段持续变形最长,压密阶段和峰后破坏阶段较短,裂纹稳定扩展阶段和裂纹快速扩展阶段都为塑性变形阶段;渗透率-应变曲线变化规律完整岩样、裂隙岩样以及裂隙粗糙度岩样有较大不同,但整体规律依然和应力-应变曲线5个阶段的变形规律相呼应。

2.1 裂隙粗糙度对试样渗透率的影响特性

渗透率与裂隙粗糙度(JRC)密切相关。渗透率随JRC值的增大而降低,且不同JRC试样表现出的渗透率-应变曲线不尽相同,裂隙粗糙度明显对渗流通道有一定的抑制作用,特别是在渗透率-应变曲线的密实和弹性变形阶段。所有裂隙试样的渗透率-应变曲线都满足如下变化趋势:

- 1)在初始压密阶段( $OA$ ),因预制裂隙和微孔隙在高围压和偏应力的作用下,裂隙两侧试样紧密贴合,微孔隙和微裂隙被闭合,导致初始渗透率出现降低。
- 2)在弹性变形阶段( $AB$ ),偏应力较小,宏观裂隙还未形成,但预制裂隙附近的微裂隙还在发展,渗透率有所上升,此时渗流通道以预制裂隙和岩石基质为主,渗透率处于缓慢增长阶段。
- 3)在裂纹稳定扩展阶段( $BC$ ),预制裂隙及其衍生的细-宏观裂纹进一步拓宽了渗流通道,渗透率进入第二阶段增长,此时粗糙裂隙试样由于裂隙两侧的错动,形成渗透率小峰值,并在峰值过后。

4)在裂隙迅速扩展阶段(CD),渗透率进入第三阶段增长并在应力达到峰值后,渗透率达到最大值,渗透率有滞后现象,此阶段渗流通道以预制裂隙及其衍生的细-宏观裂纹为主。

5)峰后应力阶段(DE),在达到峰值强度点之后,试样在剪切面上已经产生了部分变形,由于裂隙试样处在高应力状态下,且偏应力-应变曲线趋于平稳,导致裂隙发育趋于稳定,引起渗透率增速放缓,此时渗透率达到最大值,直至试样完全破坏,渗透率趋于稳定。

如图3所示,不同JRC值下的饱和裂隙砂岩,整体变化规律趋于一致,表现为初始渗透率 $k_0$ 先降低到最小值 $k_{\min}$ ,再经历缓慢增长阶段,在裂纹稳定扩展阶段和快速扩展阶段渗透率快速增长后,达到最大值 $k_{\max}$ ,在峰后应力阶段偏应力趋于稳定,贯通裂纹增速降低,渗透率趋于稳定。从图3整体变化规律来看,渗透率由大到小为, $JRC = 0 > JRC = 10 > JRC = 20 >$ 完整试样,JRC值越大,渗流通道愈发曲折,渗透率表现越低。其中,JRC = 0试样和完整试样的趋势表现一致,而带有起伏度的裂隙试样JRC = 10和JRC = 20在裂隙稳定扩展阶段(BC)存在猛增回落的过渡段M。

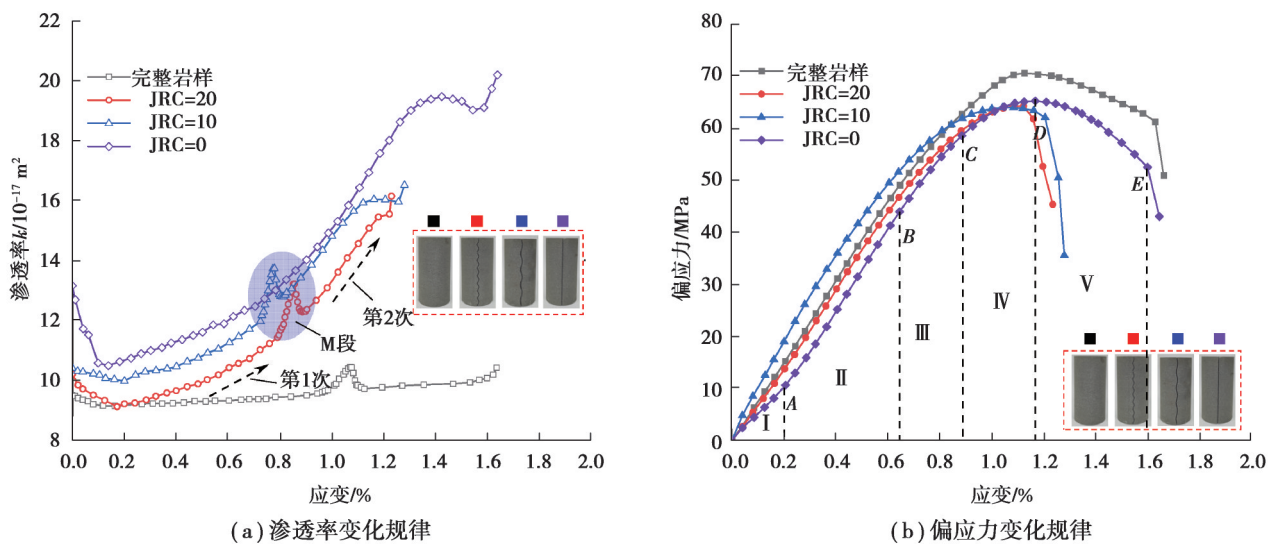


图3 25 °C时裂隙砂岩应力-渗流-应变曲线

Fig. 3 The stress-seepage-strain curve of fractured sandstone at 25 °C

以JRC = 10试样为例,在裂隙稳定扩展阶段的M部分,前后渗透率增速分别为 $3.841 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\%$ 和 $11.55 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\%$ ,M段后渗透率的增是第1次的3倍多,这是因为2个阶段的渗流通道发生变化,前者的渗流通道主要是岩石基质和预制裂隙,后者的渗流通道主要是预制裂隙及其衍生的细-宏观裂纹。图3(a)中,在裂隙稳定扩展阶段中的过渡段M,主要是由于试样裂隙扩展产生的塑性变形,导致预制裂隙及其衍生的细-宏观裂纹的发展,使偏应力对裂隙两侧试样的影响增大,裂隙两侧试样本身微孔隙和裂隙发育不均和本身裂隙具有一定的起伏度,使得裂隙两侧试样出现了瞬时错动,最终引起预制裂隙渗流通道打开和扩张产生渗透率猛增回落达到渗透率快速增长阶段。

其次,对比JRC = 20的试样,过渡段M产生的位置较JRC = 10的试样靠后,在于裂隙越粗糙,渗流通道越曲折,渗透率增长趋势越小,渗透率增速放缓。此外,粗糙裂隙两侧的试样的齿合作用也非常明显,导致相较于JRC = 10的试样,JRC = 20的试样此阶段比较靠后。当JRC = 0时,渗透率-应变曲线的变化规律依然遵循5个阶段,相较于粗糙裂隙,在裂隙稳定扩展阶段没有过渡段M,但在此阶段依然有渗透率增速增大的趋势,其主要的渗流通道为预制裂隙及其衍生的细-宏观裂纹。比较不同JRC下试样的渗流-应变曲线可知,JRC越大,对渗透率的抑制作用就越大。初始渗透率 $k_0$ ,最小渗透率 $k_{\min}$ 、M处渗透率 $k_M$ 以及最大渗透率 $k_{\max}$ 都表现出JRC越小渗透率越大的变化特征。因此,比较贯通裂隙的渗透率-应变曲线可知,裂隙粗糙度对渗流-应变曲线和渗流路径有着重要影响。

## 2.2 温度对裂隙试样渗透率的影响特性

由于试验仪器的限制,只能对岩样进行加温,而对水流无法加温,入口水温是定值为常温25 °C。温度对

砂岩渗透率的影响在三方面,一是温度通过影响岩体的渗透系数而影响渗流场;二是温度梯度本身也影响水流的运动,且温度梯度越大,对渗流场的影响也越大;三是常温水流在裂隙中与岩石的对流换热影响到岩体的温度场从而导致岩石的导热系数和热膨胀系数发生变化,从而影响了渗流场。对裂隙岩体而言,根据立方定律可知裂隙渗透系数与水流运动黏滞系数成反比,而水流运动黏滞系数又是温度的函数,在裂隙宽度不变的情况下,渗流率是温度的函数,且与其成正比,即公式(4)~(6)所示<sup>[26]</sup>:

$$\lambda = 0.01775 / (1 + 0.033T_w + 0.000221T_w^2), \quad (4)$$

$$K = (gb^2) / 12\mu, \quad (5)$$

$$k = (gb^2(1 + 0.033T_w + 0.000221T_w^2)) / 0.213, \quad (6)$$

式中: $\lambda$ 为水的运动黏滞系数, $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $T_w$ 为水温, $^{\circ}\text{C}$ ;  $k$ 为渗透系数, $\text{m/s}$ ;  $\mu$ 为水的动力黏滞系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $b$ 为裂隙宽度, $\text{m}$ ;  $g$ 为重力加速度, $\text{m/s}^2$ 。

如图4所示,温度的升高对渗透率具有明显的促进作用,当温度从25 $^{\circ}\text{C}$ 到75 $^{\circ}\text{C}$ 时,渗流-应变曲线呈上升的趋势,以JRC=0裂隙砂岩为例,初始渗透率 $k_0$ 从 $13.15 \times 10^{-17} \text{m}^2$ 增加到 $16.34 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,增幅达24%,最小渗透率 $k_{\min}$ 增幅30%,最大渗透率 $k_{\max}$ 增幅为7%。不同工况下渗透率结果如表4所示,将其绘制成散点图,如图5所示。由图可知,温度对初始渗透率 $k_0$ 和最小渗透率 $k_{\min}$ 影响显著,对表4中所有试样在不同阶段的渗透率进行均值计算,温度从25~75 $^{\circ}\text{C}$ ,平均渗透率增幅分别为: $k_0 = 21\%$ ,  $k_{\min} = 22\%$ ,  $k_{\max} = 12\%$ ,表明温度升高对最小渗透率 $k_{\min}$ 和初始渗透率 $k_0$ 的促进作用最为明显。

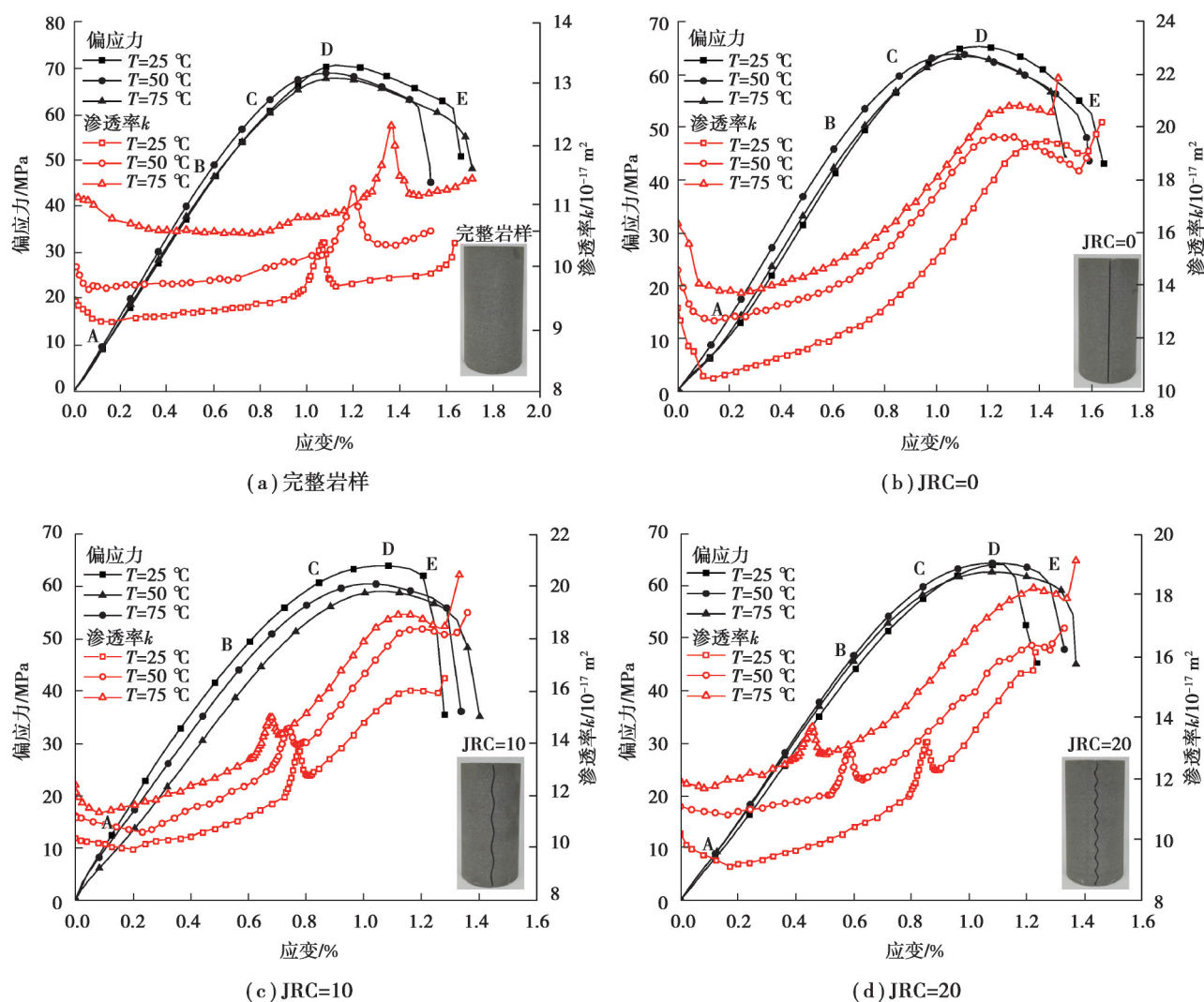


图4 不同温度下砂岩偏应力、渗透率与轴向应变的关系

Fig. 4 The relationship between deviatoric stress, permeability and axial strain of sandstone under different temperatures

为了便于分析温度对不同阶段渗透率的影响,对  $JRC = 0$  的裂隙砂岩温度-渗透率数据进行拟合处理,如图 5 所示,在  $25 \sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  温况范围内,温度对砂岩试样初始渗透率  $k_0$  和最小渗透率  $k_{\min}$  影响显著。在围压和渗透压相同的条件下,温度的升高一定程度促使了微孔隙的膨胀和增加了水分子的活跃,水更易流动。对于  $JRC = 10$  和  $JRC = 20$  试样,温度的升高使  $M$  过渡段提前,且表现出  $JRC$  值越大,温度对  $M$  过渡段提前出现的现象影响越显著,究其原因,在于温度的升高一方面提升了水分子的运动频率,另一方面,试样受高温影响下颗粒膨胀微裂隙发育更早,导致  $M$  段渗透率曲线出现猛增回落的现象提前发生。

表 4 不同温况下试样渗透率参数结果			
Table 4 The results of permeability parameters of samples under different temperature conditions			
试样编号 JRC/温况	初始渗透率 $k_0$ /( $10^{-17}\text{ m}^2$ )	最小渗透率 $k_{\min}$ /( $10^{-17}\text{ m}^2$ )	最大渗透率 $k_{\max}$ /( $10^{-17}\text{ m}^2$ )
标样~ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	9.23	8.93	10.43
标样~ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$	10.01	9.65	11.29
标样~ $75\text{ }^{\circ}\text{C}$	11.17	10.55	13.31
JRC= 20~ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	10.20	9.11	15.54
JRC= 20~ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$	11.08	10.80	16.36
JRC= 20~ $75\text{ }^{\circ}\text{C}$	11.93	11.67	18.24
JRC= 10~ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	10.40	9.96	16.03
JRC= 10~ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$	11.24	10.60	18.38
JRC= 10~ $75\text{ }^{\circ}\text{C}$	12.42	11.36	18.93
JRC= 0~ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	13.15	10.48	19.45
JRC= 0~ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$	14.57	12.64	19.81
JRC= 0~ $75\text{ }^{\circ}\text{C}$	16.34	13.69	20.79

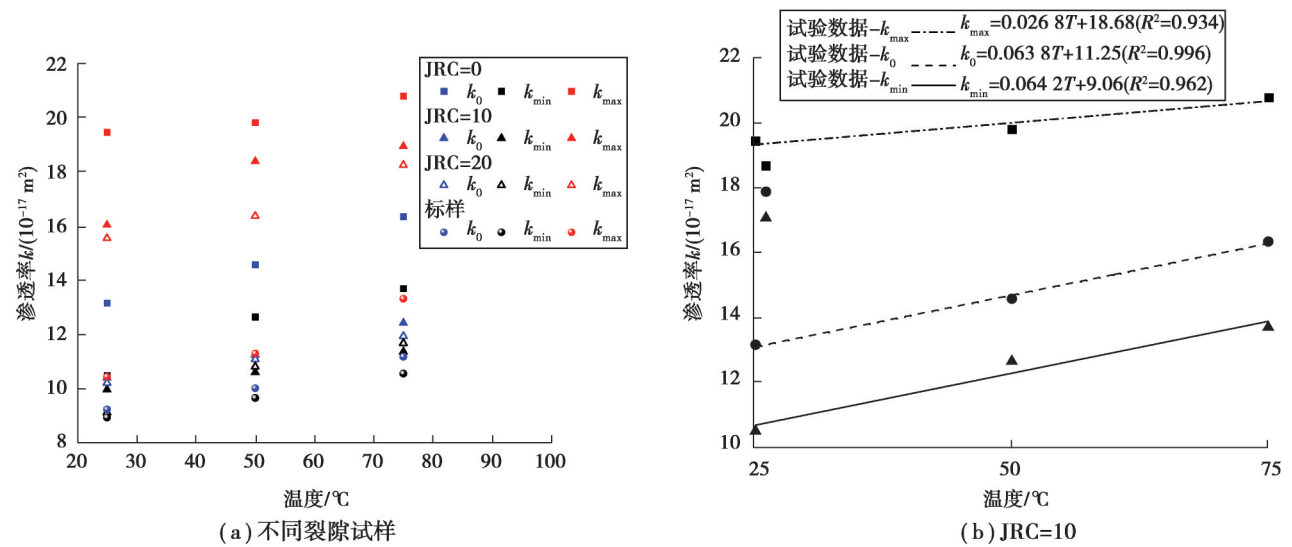


图 5 不同温况下试样的渗透率变化规律

Fig. 5 The permeability variation of samples at different temperatures

2.3 裂隙粗糙度及温度对试样破坏模式影响特征

在围压  $10\text{ MPa}$  和水压  $3\text{ MPa}$  热-水-力耦合作用下,不同  $JRC$  值的饱和单裂隙砂岩三轴压缩试验的破坏模式如图 6 所示,所有试样破坏模式为整体剪切破坏,形成了宏观剪切裂隙。由图 4 可知,贯通裂隙的存在并没有改变砂岩应力-应变曲线的变化规律,裂隙样和完整试样表现出一致的 5 个阶段,即初始压密阶段( $OA$ )、弹性变形阶段( $AB$ )、裂隙稳定扩展阶段( $BC$ )、裂隙快速扩展阶段( $CD$ )以及峰后应力阶段( $DE$ )。



裂隙的存在导致试样完整性和强度降低从图3(b)可以看出,在同等温度、围压及渗透压作用下,不同JRC值下的裂隙样峰值强度趋于一致为64.5 MPa,JRC值的大小对试样的强度几乎没有影响,而完整试样的峰值强度为70.64 MPa,贯通裂隙的存在使峰值强度下降了8.7%,并且伴随裂隙粗糙度的增加,峰后应力阶段持续变形减小,从完整岩样的言行变形特征,转变为脆性变形特征,裂隙越粗糙,应力集中的部位越多,损伤发育较快,在较小的应变条件下试件就能产生完全破坏。

对比不同JRC下砂岩的破裂面角度,可以发现破裂面角度并不相同,JRC = 20时,不同温度下的破裂面角度为60°;JRC = 10时,为57°;JRC = 0时,为55°,完整试样的为50°,根据破裂面与大主应力作用面的夹角 $\alpha_f = 45^\circ + \varphi/2$ 可得,裂隙粗糙度的增加,有效提高了岩石的内摩擦角,这也是粗糙裂隙齿合作用的结果。破裂面角度排序为:完整试样 < JRC = 0 < JRC = 10 < JRC = 20。试样的破坏形态表现为整体剪切破坏,破坏面往往从最薄弱面开始形成。

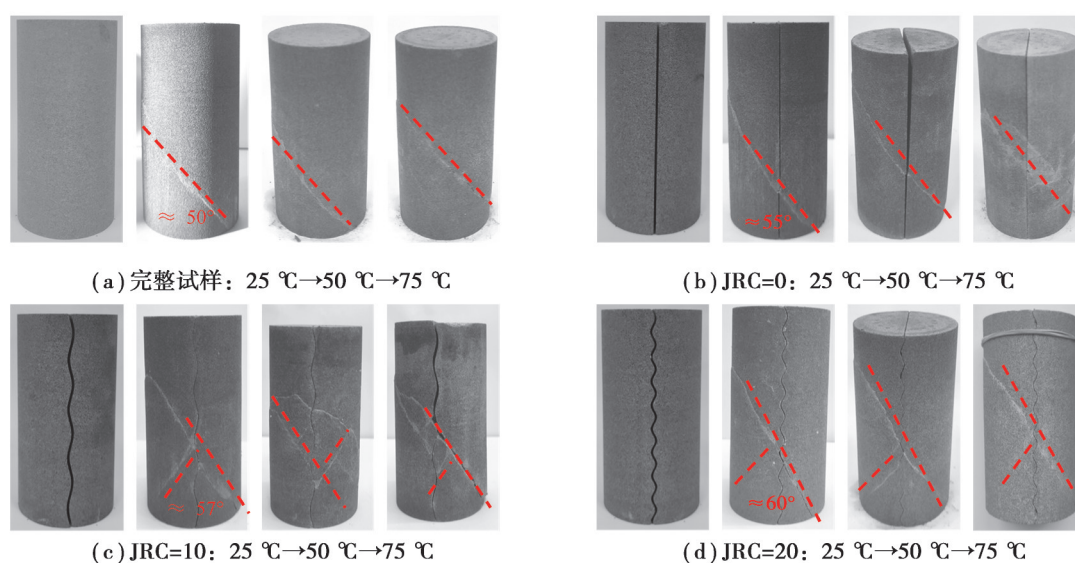


图6 不同温度和裂隙粗糙度下砂岩破坏特征

Fig. 6 The failure characteristics of sandstone under different temperatures and fracture roughnesses

在高围压作用下,JRC = 20和JRC = 10裂隙样破坏面较为特殊。如图7所示,在偏应力作用下带有起伏裂隙样的破坏面往往都从正弦曲线的极值点处产生,此现象为高围压和粗糙裂隙的齿合效果共同作用导致的破坏特征。

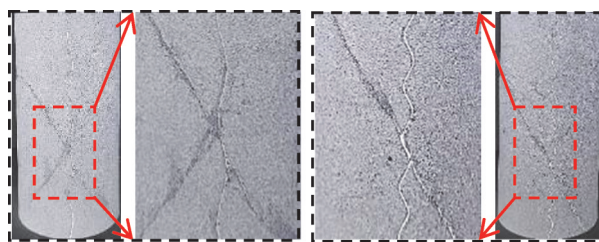


图7 不同粗糙度裂隙试样破坏特点

Fig. 7 Failure modes of fracture samples with different roughnesses

在考虑试样差异化条件下,25~75 °C温况时,温度对砂岩的峰值强度几乎没有影响。表5为砂岩力学特性参数,温度升高会略微降低砂岩的峰值强度和弹性模量,但影响较小。对于完整试样,温度从25 °C升到75 °C峰值强度从70.64 MPa降低到67.71 MPa,弹性模量从8.36 GPa降低至7.98 GPa,分别降低了4.0 %和4.5 %。岩石内部存在微小裂隙和孔隙,在热应力和围压的共同作用下,矿物晶粒和闭合孔隙的膨胀,使试样的抗压强度略微降低。故在此温况范围内,温度对饱和砂岩强度带来的影响是有限的,这和砂岩内部矿物成分及裂隙结构密切相关。

表 5 砂岩力学特性参数结果  
Table 5 Mechanical property parameters of sandstone

试样编号 JRC/温况	破裂角/ (°)	峰值应力/ MPa	峰值应变/%	弹性模量/ GPa
标样~25 °C	50	70.64	1.126	8.36
标样~50 °C		68.92	1.083	7.99
标样~75 °C		67.71	1.080	7.98
JRC= 20~25 °C	60	64.44	1.124	7.68
JRC= 20~50 °C		64.53	1.124	7.77
JRC= 20~75 °C		62.79	1.081	7.67
JRC= 10~25 °C	57	64.00	1.084	7.58
JRC= 10~50 °C		60.51	1.000	7.45
JRC= 10~75 °C		59.12	1.083	7.25
JRC= 0~25 °C	55	65.26	1.167	8.20
JRC= 0~50 °C		63.78	1.060	8.18
JRC= 0~75 °C		63.30	1.126	8.05

### 3 裂隙砂岩热-水-力耦合渗流-传热演化过程

#### 3.1 热-水-力耦合数学模型

根据弹塑性损伤理论和有效应力原理等,分析岩石在热-水-力耦合作用下的破坏过程、渗透率演化规律以及温度场分布特征。数值模型中采用的部分方程如下:

##### 1) 应力场控制方程

根据三场耦合机理,弹性模量  $E$  和岩体骨架的线膨胀系数  $\beta_s$  会受到温度的改变,结合静力平衡方程、有效应力原理和胡克定律可得温度和渗流影响下的应力场控制方程

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu} u_{j,ji} - \alpha_T K T_{,i} - \alpha P_{w,i} + f_{,i} = 0, \quad (7)$$

式中:  $G$  是岩石的剪切模量;  $u_i$  是位移分量;  $\nu$  是泊松比;  $\alpha_T$  是热膨胀系数;  $K$  是岩石的剪切模量;  $T$  表示温度;  $\alpha$  为比奥系数;  $P_w$  为流体压力;  $f_i$  为体积量分力,其中  $-\alpha P_{w,i}$  体现了流体渗流对岩体变形的影响;  $-\alpha_T K T_{,i}$  表征温度变化对岩体变形的影响。

##### 2) 渗流场控制方程

岩体基质和裂隙的渗流共同组成裂隙岩体的渗流,岩体中基质的渗流满足达西定律:

$$\frac{\partial \rho_w \phi}{\partial t} - \nabla \cdot \left( \frac{k}{u} \rho_w \nabla P_w \right) = Q_m, \quad (8)$$

式中:  $\rho_w$  是流体密度;  $u$  是流体速度;  $Q_m$  为质量源;  $k$  是渗透率;  $\partial \rho_w \phi / \partial t$  是耦合项,岩石孔隙率  $\phi$  是 1 个关于温度和应力的函数<sup>[27]</sup>。

##### 3) 损伤控制方程

假设,压应力(应变)为正,岩石的本构模型如图所示,当岩石达到最大拉伸强度时,发生拉伸损伤 ( $F_1 \geq 0$ ),当  $F_2 \geq 0$ ,满足摩尔库伦破坏准则,发生剪切破坏。式中:  $F_1$  和  $F_2$  是拉应力和剪应力状态的函数;  $f_{t0}$  和  $f_{c0}$  分别是岩石的单轴拉伸和压缩强度,损伤变量的表达式如下<sup>[28]</sup>:

$$F_1 = -\sigma_3 - f_{t0}, \quad (9)$$

$$F_2 = \sigma_1 - \sigma_3 \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) - f_{c0}, \quad (10)$$

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0, \quad F_2 > 0; \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_3} \right|^n & F_1 = 0, \quad dF_1 < 0; \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_1} \right|^n & F_2 = 0, \quad dF_2 > 0; \end{cases} \quad (11)$$

根据弹塑性损伤理论,弹性模量的变化可表示为 $E = (1 - D)E_0$ ,其中, $E$ 为损伤后的弹性模量; $E_0$ 表示初始弹性模量。损伤对岩石基质渗透率的影响可表示为

$$k = k_0 \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \exp(\alpha_s D), \quad (12)$$

式中: $k$ 为岩石的渗透率, $k_0$ 为岩石在零应力下的初始渗透率; $\phi_0$ 和 $\phi$ ,分别表示岩石的初始孔隙率和受损伤后的孔隙率; $\alpha_s$ 为代表损伤对渗透率影响系数。

### 3.2 数值模型建立

在 COMSOL Multiphysics 软件中选用固体力学、达西定律、多孔介质传热 3 个物理场以及采用域常微分和微分代数方程接口,将上述耦合方程及损伤判定条件植入 COMSOL 多物理场数值模拟软件中,并在多物理场中加入多孔弹性和热膨胀接口,以此进行三场耦合数值问题的求解。

在软件中,岩石的三轴压缩实验可以在准静态过程中实现,在研究中设置辅助扫描,以位移控制进行轴压的加载,在辅助扫描期间,每一步都可采用上一个解进行计算,直至试样损伤破坏。图 8 为非均质弹性模量在砂岩中的实现以及热-水-力耦合下试样的边界条件示意图,左右设置温度边界并施加围压,上部施加轴向位移,底部采用辊支撑进行约束并施加渗透压力。

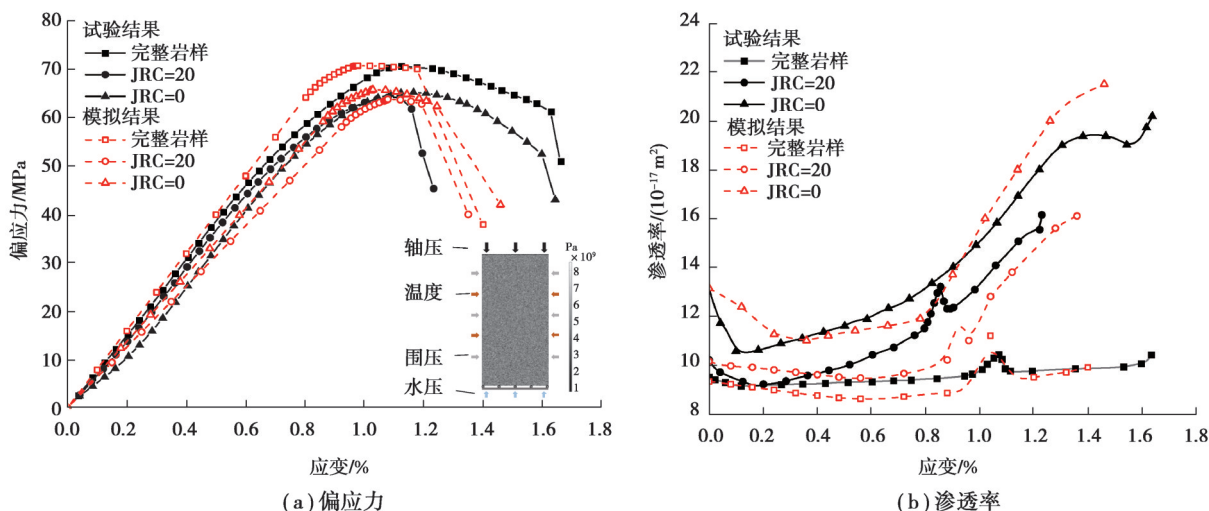


图 8 数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of the numerical simulation results with the experimental results

为了验证数值模型的准确性,采用 COMSOL 有限元软件进行 10 MPa 围压和 3 MPa 渗透压下不同温度和裂隙形态的三轴压缩试验,数值模拟中砂岩的力学参数如表 6 所示。不同工况下应力-应变曲线的模拟与试验结果如图 8 所示。由于有限元的缺陷无法完全表征岩石的初始压密阶段,因此在分析中将其视为弹性阶段,因为计算模型中不同矿物成分和含量对损伤的响应不同,数值模拟结果和试验结果峰值应力后的发育阶段略微不同,但整体来说,数值模型与试验结果吻合性较好。

表 6 数值模拟中砂岩的力学参数

Table 6 The calculation process of fractal dimension of different undulating angles

参数	值	参数	值
平均弹性模量 $E$	8 GPa	损伤系数 $n$	1
天然密度 $\rho$	2.390 g/cm <sup>3</sup>	比奥系数 $\alpha$	0.8
单轴抗压强度 $f_{c0}$	40 MPa	孔隙率 $\phi_0$	0.152
单轴抗拉强度 $f_{t0}$	5 MPa	砂岩导热系数 $\lambda_s$	2.131 W/(m·K)
内摩擦角 $\varphi$	33°	砂岩热膨胀系数 $\alpha_T$	8.2E-6 K <sup>-1</sup>
泊松比 $\mu$	0.30		



### 3.3 不同 JRC 下砂岩损伤破坏过程

试验结果表明,在热-水-力耦合作用下,温度对饱和砂岩的变形和强度影响较小,选取温况为 25 °C 下标准样和裂隙样在 10 MPa 围压和 3 MPa 水压条件下的数值计算结果进行破坏过程的分析。

图 9 为不同裂隙粗糙度下砂岩的损伤破坏过程,试样经历了弹性变形阶段、塑性变形阶段及峰值应变阶段后产生贯通的剪切破裂面,岩石内部的单元在剪应力和拉应力的作用下发生破坏。当进入塑性变形阶段时,试样在偏应力的作用下细-宏观损伤开始发展。当进入峰后变形阶段时,损伤持续集中在破裂面附近,损伤继续发展,破裂面附近的弹性模量持续降低,裂纹迅速扩展形成宏观剪切断裂,这与试验结果表现一致。

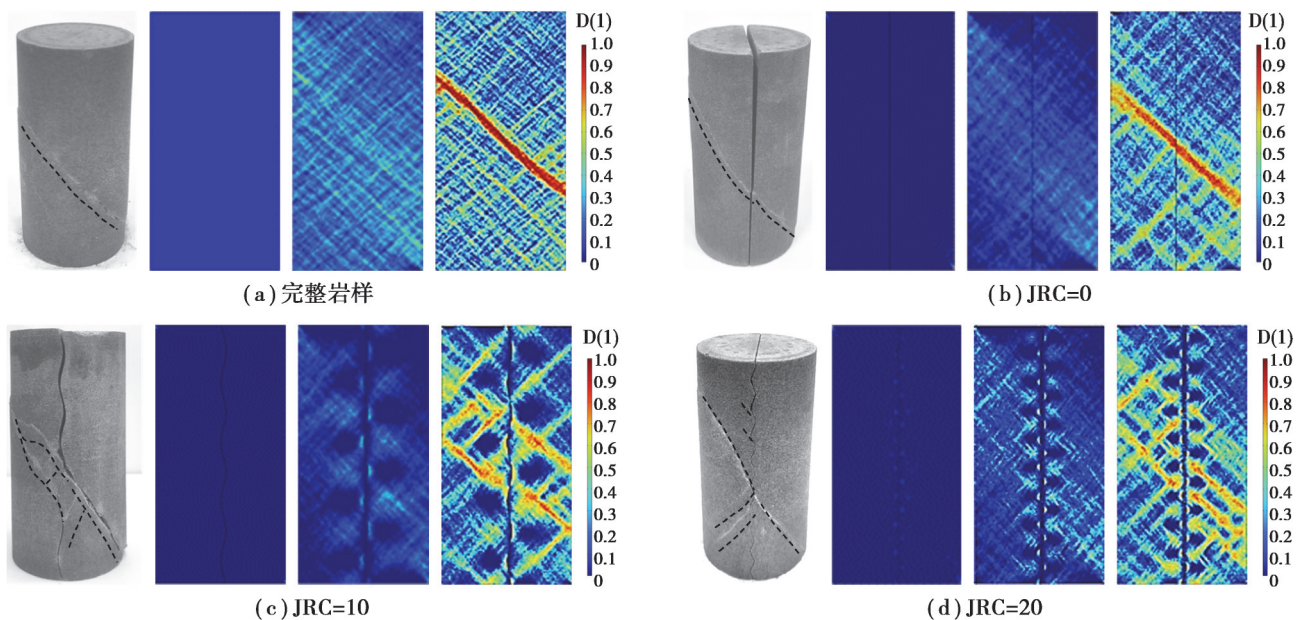


图 9  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_c = 10\text{ MPa}$ ,  $P_w = 3\text{ MPa}$  砂岩破坏过程

Fig. 9 The failure process of sandstone under  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_c = 10\text{ MPa}$ ,  $P_w = 3\text{ MPa}$

图 9(b) ~ (d) 为不同 JRC 下试样的破坏过程,不同的裂隙粗糙度下,试样的破坏形态表现不一,但都是以整体剪切破坏为主。在  $JRC = 0$  时,试样损伤演化和完整试样一致。当  $JRC = 10$  时,试样损伤过程与完整试样有所区别,塑性变形开始阶段,在正弦裂隙曲线的极值点处出现损伤单元,在偏应力作用下,试样发生不均匀形变,在正弦裂隙曲线极小值点处易造成应力集中,造成此处最先开始损伤。随后的阶段,伴随偏应力达到最大值,极小值点损伤的扩大和裂隙的贯通发育,形成多条贯通剪切裂隙。当  $JRC = 20$  时,正弦裂隙曲线在极小值点处的应力集中也表现得更加严重,在塑性变形开始阶段的损伤点位更多,继而在峰值后伴随更多的损伤点位和裂隙形成整体剪切破坏,相比  $JRC = 10$  时,试样破坏得更早,表明裂隙粗糙度对试样的损伤具有促进作用。

### 3.4 不同 JRC 下砂岩渗透压演化过程

在热-水-力耦合作用下,试样在破坏过程中的温度场和渗流场无法直观表征的问题是室内试验的弊端。为了探求在热-水-力耦合作用下,试样渗流场的变化,选取试样在 25 °C, 10 MPa 围压和 3 MPa 水压下的渗透压数值模拟结果进行分析。

结果表明,在热-水-力耦合作用下,砂岩的损伤发生在弹性变形阶段之后,损伤的产生会改变渗透压的分布。图 10 为不同裂隙粗糙度下饱和砂岩损伤过程中渗透压演化过程。可以看出,在初始阶段,渗透压呈现线性分布。塑性变形阶段,渗透压等值线在预制裂隙两侧附近产生不均匀现象,伴随 JRC 值的增大,预制裂隙两侧渗透压等值线分布更加不均匀,预制裂隙和衍生的细-宏观裂隙在此时为主要的渗流通道。当处于峰后应力阶段时,渗流通道在伴随细-宏观裂隙的继续发育再次发生变化,渗透压的分布随之改变,  $JRC = 0$



时,渗透压表现出关于裂隙对称分布特征,且在同一断面处,离裂隙距离越近渗透压越高的现象。 $JRC = 10$ 和 $20$ 时,由于裂隙具有一定的起伏度,抑制了水的渗流过程,渗透压在预制裂隙两侧分布表现出不连续的现象。

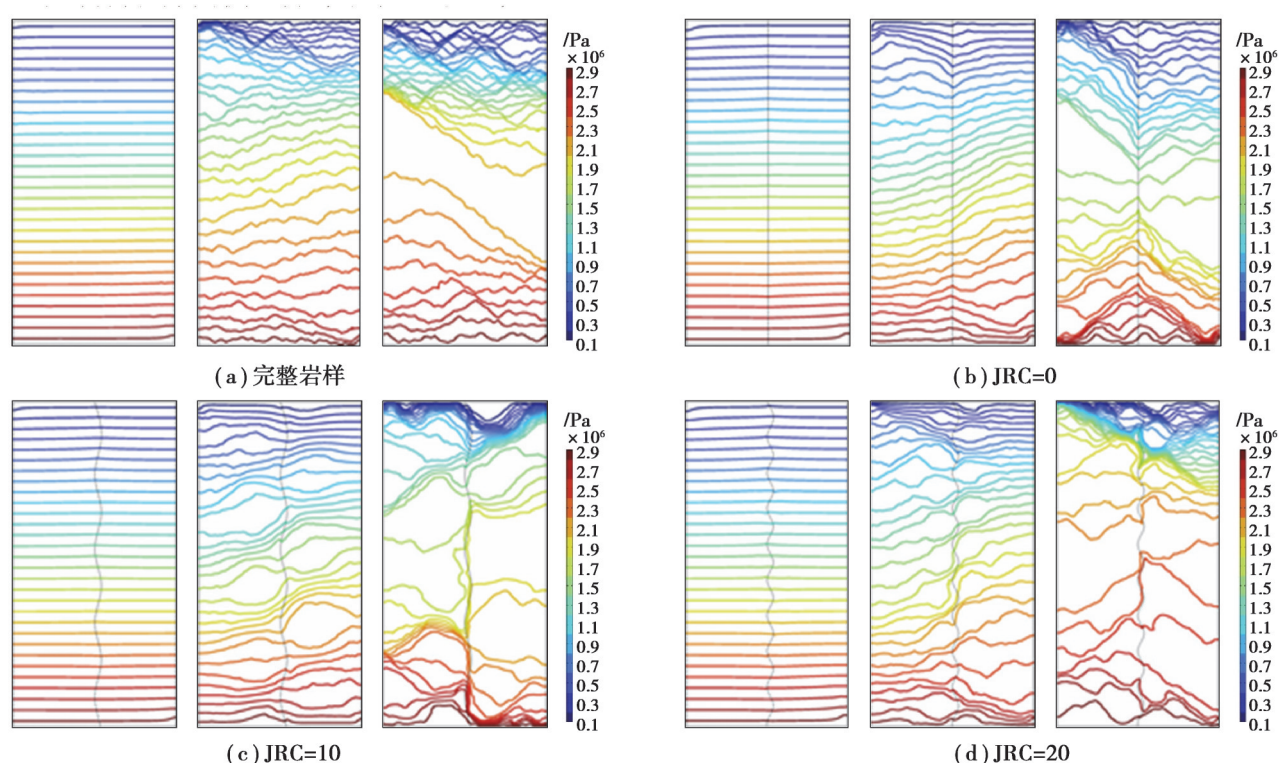


图 10 裂隙试样渗流场演化特征(岩温  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 10 Evolution characteristics of seepage field of fractured samples ( rock temperature  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  )

渗透压的改变往往伴随着温度场的变化,图 11 为完整试样和裂隙试样在  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  岩温条件下温度场演化过程,在初始状态完整试样和裂隙样温度场分布特征不同,完整试样的温度场呈现抛物线式轴对称分布,裂隙试样呈现出近似三角型分布。在峰值应力状态下,温度场的分布特征和图 9 中损伤特征表现一致,在剪切面附近形成了 1 条温度分界线,间接验证了温度场的分布和损伤场和渗流场密切相关。

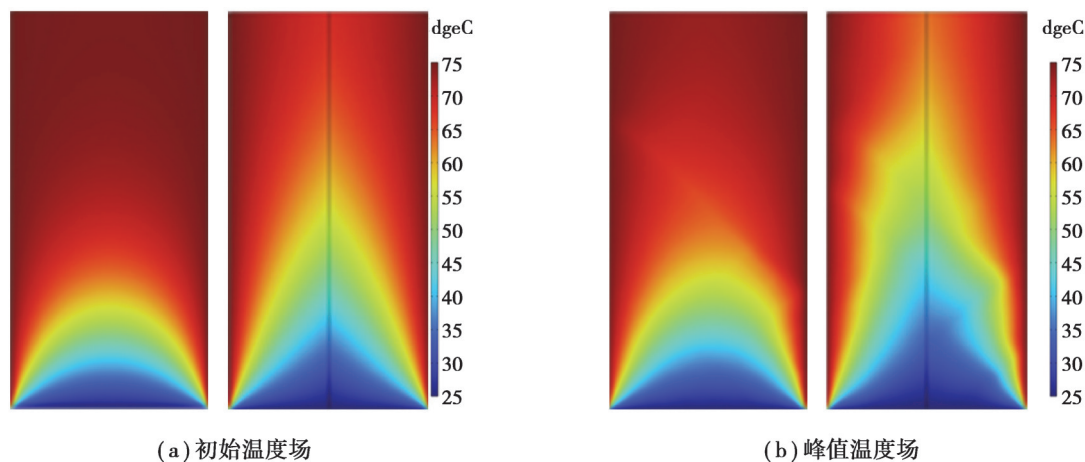


图 11 岩温  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  裂隙试样温度场演化特征

Fig. 11 Evolution characteristics of temperature field of fractured specimen with rock temperature of  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 4 结 论

通过热-水-力耦合三轴试验,分析不同裂隙粗糙度(JRC = 0、10、20)砂岩在不同岩温(25、50、75 °C)的破坏特征及渗透特性(固定围压 10 MPa 和水压 3 MPa)。基于 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件和弹塑性损伤等理论,再现了不同粗糙度裂隙砂岩的损伤及渗流-传热的演化过程。主要得出以下结论:

1)在热-水-力耦合作用下,完整砂岩和裂隙砂岩的应力-应变曲线变化规律和破坏模式基本相同,应力-应变曲线经历初始压缩阶段、弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹迅速扩展阶段以及峰后应力 5 个阶段,且渗透率-应变曲线变化规律与应力-应变曲线规律相呼应。

2)预制裂隙的存在使砂岩的峰值强度降低了 7%,峰后应力阶段随 JRC 值的增加而减小,岩样由延性破坏转变为脆性破坏,而破裂面角度随 JRC 值的增加而增加,粗糙裂隙试样易从正弦曲线极值点产生剪切破坏。

3)裂隙砂岩的渗透率伴随偏应力的增加,先降低到最小值后经历 2 阶段增长渗透率达到最大值,前增长阶段是岩石基质及预制裂隙作为主要渗流路径,后增长阶段是预制裂隙及衍生的细-宏观裂纹拓宽了渗流通道。完整试样渗透率最小,无粗糙度试样(JRC = 0)渗透率最大。

4)砂岩的渗透率随温度的升高而增大,且温度的升高对初始渗透率和最小渗透率的促进作用最为明显;在此温况下,温度对砂岩的力学特性影响较小,峰值强度和弹性模量随温度升高略微降低。

## 参考文献

- [1] Wang Y, Zhou X H, Liu X R, et al. Ambient temperature prediction model and cooling requirement analyze in the high-altitude construction tunnel passing through the abnormally high geothermal region[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 141: 105360.
- [2] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 877-889.  
Guo C B, Zhang Y S, Jiang L W, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 877-889. (in Chinese)
- [3] 黄润秋, 王贤能, 唐胜传, 等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 50-68.  
Huang R Q, Wang X N, Tang S C, et al. Research on the main geological hazards of deeplying long tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(1): 50-68. (in Chinese)
- [4] 姚志勇. 中尼铁路高地温分布特征及地质选线探析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(8): 21-26.  
Yao Z Y. Analysis of the characteristics of high ground temperature distribution and geological alignment of China-Nepal railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(8): 21-26. (in Chinese)
- [5] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
Miao X X, Liu W Q, Chen Z Q. Seepage theory of mining rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 彭苏萍, 孟召平, 王虎, 等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 742-746.  
Peng S P, Meng Z P, Wang H, et al. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 742-746. (in Chinese)
- [7] Li M, Liu X S. Experimental and numerical investigation of the failure mechanism and permeability evolution of sandstone based on hydro-mechanical coupling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 104240.
- [8] Ahrens B, Duda M, Renner J. Relations between hydraulic properties and ultrasonic velocities during brittle failure of a low-porosity sandstone in laboratory experiments[J]. Geophysical Journal International, 2018, 212(1): 627-645.
- [9] 傅翔, 黄平, 谢强, 等. 不同高孔隙水压砂岩三轴压缩力学特性及多向破裂机制[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2611-2618.  
Fu X, Huang P, Xie Q, et al. Triaxial compression mechanical properties and multidirectional fracture mechanism of sandstone under different pore water pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2611-2618. (in Chinese)
- [10] Kou M M, Liu X R, Tang S D, et al. 3-D X-ray computed tomography on failure characteristics of rock-like materials under coupled hydro-mechanical loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 104: 102396.
- [11] 陈卫忠, 李翻翻, 雷江, 等. 热-水-力耦合条件下黏土岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 379-388.  
Chen W Z, Li F F, Lei J, et al. Study on creep characteristics of claystone under thermo-hydro-mechanical coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 379-388. (in Chinese)

- [12] Rattez H, Stefanou I, Sulem J, et al. Numerical analysis of strain localization in rocks with thermo-hydro-mechanical couplings using cosserat continuum[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(10): 3295-3311.
- [13] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1117-1128.
- Zhang P S, Zhao C Y, Hou J Q, et al. Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under high temperature and different hydraulic pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1117-1128. (in Chinese)
- [14] Zhang X B, Chen H H, Yao C, et al. Seepage characteristics of triaxial compression-induced fractured rocks under varying confining pressures[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(9): 04020160.
- [15] 于洪丹, 陈飞飞, 陈卫忠, 等. 含裂隙岩石渗流力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S1): 2788-2795.
- Yu H D, Chen F F, Chen W Z, et al. Research on permeability of fractured rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 2788-2795. (in Chinese)
- [16] 甘磊, 金洪杰, 沈振中, 等. 不同粗糙度和充填隙宽下石灰岩裂隙渗流特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S1): 3415-3424.
- Gan L, Jin H J, Shen Z Z, et al. Experimental investigation on seepage characteristics of limestone fractures with different roughness and filling gap width[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S1): 3415-3424. (in Chinese)
- [17] 甘磊, 金洪杰, 沈振中, 等. 围压和渗压加卸载作用下石灰岩裂隙渗流特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(10): 2062-2071.
- Gan L, Jin H J, Shen Z Z, et al. Experimental study on seepage characteristics of rough fracture of limestone under loading-unloading of confining and osmotic pressures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(10): 2062-2071. (in Chinese)
- [18] 杜时贵, 陈禹, 樊良本. JRC修正直边法的数学表达[J]. *工程地质学报*, 1996, 4(2): 36-43.
- Du S G, Chen Y, Fan L B. Mathematical expression of JRC modified straight edge[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(2): 36-43. (in Chinese)
- [19] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature*[M]. San Francisco: W.H. Freeman, 1982.
- [20] 张鑫. 粗糙单裂隙渗流与岩体应力特性分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- Zhang X. Analysis of seepage flow in rough single fracture and stress characteristics of rock mass[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [21] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- Xie H P. Introduction to fractals in rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [22] Fairhurst C E, Hudson J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(3): 281-289.
- [23] Zhao Y, Wang C L, Bi J. Analysis of fractured rock permeability evolution under unloading conditions by the model of elastoplastic contact between rough surfaces[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5795-5808.
- [24] 王军保, 刘新荣, 刘俊, 等. 砂岩力学特性及其改进Duncan-Chang模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2388-2397.
- Wang J B, Liu X R, Liu J, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2388-2397. (in Chinese)
- [25] Xiao W J, Zhang D M, Wang X J. Experimental study on progressive failure process and permeability characteristics of red sandstone under seepage pressure[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105406.
- [26] 张树光, 李永靖. 裂隙岩体的流固耦合传热机理及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.
- Zhang S G, Li Y J. Heat-transfer mechanism and application of fractured rock in fluid-solid coupling[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2014. (in Chinese)
- [27] 王翌龙. 裂隙岩体热流固耦合模型研究及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- Wang Z L. Study on the coupled thermal-hydrologic-mechanical model in fractured rock mass and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)
- [28] Zhang W, Guo T K, Qu Z Q, et al. Research of fracture initiation and propagation in HDR fracturing under thermal stress from meso-damage perspective[J]. *Energy*, 2019, 178: 508-521.

(编辑 陈移峰)