

DOI: 10.11779/CJGE202210019

砂岩热冲击破裂特征及其孔隙连通性分析

杨欣欣¹, 郜保平^{1, 2}, 何水鑫¹, 董赞盛¹, 辛国旭¹

(1. 太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 为研究高温砂岩在水中热冲击冷却后的破裂特征及损伤规律, 利用显微 CT 技术, 对 600℃ 的高温砂岩在不同温度水中热冲击冷却后孔隙的细观结构特征进行了分析。对冷却介质温度与孔隙发育特征之间关系进行分析, 并对孔隙分形维数的变化趋势进行研究, 研究表明: 高温砂岩热冲击处理后, 萌生大量孔、裂隙, 孔隙间较脆弱的地方产生喉道, 并逐渐发育扩展, 同时孔隙发育扩大, 最终大量孔隙连通形成连通团。随着冷却介质温度的降低, 生成的连通团体积增大, 砂岩渗透率增大, 破坏程度增强。砂岩孔隙体积分数与分形维数线性正相关, 孔隙体积分数越大, 分形维数越大, 砂岩损伤越严重, 分形维数可用于表征其损伤程度。600℃ 高温花岗岩、石灰岩、砂岩在水中热冲击冷却后的孔隙、裂隙发育特征具有较大差异。花岗岩表现为明显的脆性断裂, 砂岩孔隙发育明显, 石灰岩萌生孔隙的同时有裂隙发育。

关键词: 砂岩; 热冲击; CT 扫描; 孔隙连通团; 分形维数; 渗透性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)10-1925-10

作者简介: 杨欣欣(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事高温岩石力学与工程、地热开发利用方面的研究工作。E-mail: 13485347840@163.com。

Fracture characteristics and pore connectivity of sandstone under thermal shock

YANG Xin-xin¹, XI Bao-ping^{1, 2}, HE Shui-xin¹, DONG Yun-sheng¹, XIN Guo-xu¹

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Insitu Property

Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To study the fracture characteristics and damage laws of high-temperature sandstone under thermal shock in water after cooling, the micro-CT technique is used to analyze the meso-pore cracks of sandstone at 600℃ under thermal shock after cooling in water at different temperatures. The relationship between the temperature of cooling medium and the pore development is analyzed, and the developing trend of fractal dimension of the pores is investigated. The results show that after the thermal shock treatment of high-temperature sandstone, a large number of new pores sprout, and the throat is generated in the fragile place between the pores and gradually develops and expands. Eventually, a large number of pores are connected to form pore clusters. With the decrease of the temperature of the cooling medium, the volume of the connected clusters increases, the permeability increases, and the damage degree increases. The volume fraction of the pores of sandstone is linearly and positively correlated with the fractal dimension. The larger the volume fraction of the pores, the larger the fractal dimension, and the more severe the damage of sandstone. The fractal dimension can be used to characterize the damage degree of sandstone. The pores and fracture characteristics of granite, limestone and sandstone at 600℃ are quite different under thermal shock after cooling in water. The granite is characterized by obvious brittle fracture, for the sandstone, the pore development is obvious, and for the limestone, there are pores and fractures.

Key words: sandstone; thermal shock; CT scanning; pore-connected cluster; fractal dimension; permeability

0 引言

岩石在急剧升温或降温过程中会产生热冲击现象, 该现象广泛存在于地热开发过程中的储层改造、钻井过程中井筒围岩稳定性控制、地下煤体汽化开采、核废料的储存等工程中, 且热冲击作用对岩石物理力

学性质及细观结构造成的破坏与常规高温破坏不同, 因此对高温岩石热冲击后损伤规律进行宏、细观的研

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51874207, 11772213); 山西省自然科学基金项目 (201701D121131)

收稿日期: 2021-08-23

***通信作者** (E-mail: xibaoping@163.com)

究对完善高温岩石力学的相关理论并指导施工有重要意义^[1-2]。砂岩作为一种典型沉积岩,上述一系列工程活动不可避免地会涉及砂岩地层,在中国西北、华南等地区分布尤为广泛,因此针对砂岩进行热冲击后损伤特征进行研究具有极大的工程意义。

针对岩石热冲击问题,众多学者从宏观、细观层面做了大量研究,但对不同温度冷却介质下岩石热冲击问题的研究较少,邵保平等^[3-6]对花岗岩热冲击后的力学特性、渗透性、热冲击速度进行了研究。贺玉龙等^[7]发现砂岩的孔隙度和渗透率随有效应力的增加而减小,渗透率和孔隙度随温度升高而减小,且渗透率对温度的敏感性更高。周青青^[8]进行了常规状态下、温度及孔隙水压力条件下砂岩的三轴试验,揭示了不同条件下砂岩的力学性质。苏承东等^[9]通过X衍射、电镜扫描及单轴压缩试验,分析了不同高温状态砂岩矿物成分、结构特征及力学参数与温度的相关性。力学试验可从宏观层面揭示岩石的热冲击损伤规律,但是难以从机理上对岩石物理力学性质的变化进行解释。

砂岩热冲击损伤在细观层面表现为孔、裂隙特征的变化,研究热冲击作用后砂岩孔隙变化特征对揭示宏观物理力学性质演变规律具有重要意义。近年来,大量学者运用扫描电镜、声发射等手段对岩石细观结构进行研究。但扫描电镜仅可得到孔径大于5 nm的微孔二维平面图像,无法获取孔喉的三维分布及连通情况^[10-11]。声发射只能在特定荷载条件下进行检测。而显微CT技术可对岩样进行全方位、大范围的快速无损扫描,并利用扫描图像数值重构孔喉三维结构特征^[12-13]。赵阳升等^[14]通过显微CT观察了花岗岩热破裂后的细观破裂规律。Liu等^[15]利用CT图像增强技术对冻融循环后砂岩的细观结构损伤进行了研究。戎虎仁等^[16]对不同温度后红砂岩的孔隙结构变化、微裂纹产生规律及劣化微观机制作了初步探讨。Jin等^[17]通过扫描电镜、液相色谱和核磁共振研究了热处理后砂岩不同孔径孔隙类型和分布特征随温度的变化趋势,并分析了温度对中孔和大孔裂隙连通性的影响。金爱兵等^[18]对两种冷却方式热处理下砂岩的强度、孔隙率、孔径分布以及对微观结构的影响进行了分析。张渊等^[19-20]通过显微光度计和XRD分析从细观揭示了砂岩热处理后发生热破裂的原因。于艳梅等^[21]应用CT技术对瘦煤在不同温度下孔隙变化特征进行了研究。

上述研究中对不同温度冷却介质热冲击后砂岩孔隙连通性的变化规律还有待补充。以广东省白垩纪地层砂岩为研究对象,通过显微CT技术对不同温度冷却介质热冲击处理下,砂岩的破裂特征,孔隙体积分数,孔隙连通特性,渗透性,分形维数等进行分析,

探究其热冲击破裂形式及孔隙连通性的变化特征。对高温岩石热冲击效应的研究进行了扩充。

1 试验概况

1.1 岩样与试件制备

试验用岩样均取自广东东莞,属于白垩纪地层砂岩,岩样质地均匀,无明显缺陷,可较好地代表当地地热能储层的岩石状态。样品砂岩的主要成分为石英、长石、方解石等,呈浅灰色,粒径约为0.10~0.25 mm,密度为2.3 g/cm³。将从现场获得的岩样加工成尺寸为 $\phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆柱形试样。在研磨机上将两个端面打磨平整,整个加工过程中严格控制打磨速度,确保不对砂岩试件造成损伤,加工完成的砂岩试件如图1所示。



图1 试验用砂岩试件

Fig. 1 Sandstone specimens

1.2 试验设备及原理

本试验采用控温精度可达 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的SX2-12-12A型自带编程控温加热的马弗炉对砂岩试件进行加热。试件降温采用岩石热冲击破裂试验台,试验台有效容积尺寸为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 550\text{ mm}$,可容纳大于试件体积1000倍的冷却介质。试验台内置循环泵,确保试件能够冷却到预定温度,且避免了热量局部集中。

CT扫描采用Nano Voxel 4000型高精度显微CT试验系统。其主要原理为:利用X射线对岩芯作断面扫描,由探测器接收穿过岩芯的衰减X射线信息,根据该断面各点的X射线吸收系数值,通过电子计算机的计算处理把不同的数据以不同的灰度等级通过图像显示出来,即可在监视器上清晰地观察该断面的孔隙结构。该CT系统可分辨500 nm像素细节,空间分辨率可达2 μm 。最大样品检测尺寸可达直径600 mm,高度550 mm。如图2,3所示^[17]。

1.3 试验步骤及方案

具体试验步骤如下:

(1) 砂岩的热冲击处理

本试验选取9块表面平整的 $\phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 砂岩试件,进行热处理前对每个试件进行烘干处理。随后将试件置于马弗炉中加热至 600°C ,控制升温速率



图 2 Nano Voxel 4000 型高精度显微 CT 试验系统

Fig.2 Nano Voxel 4000 high-precision micro-CT test system

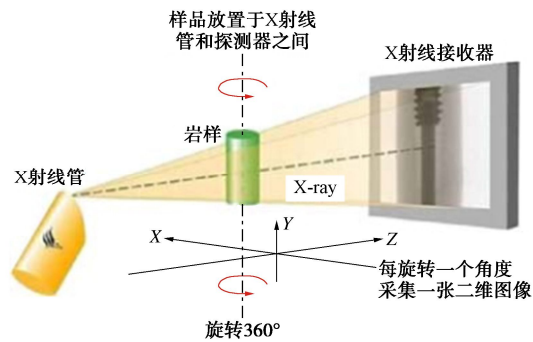


图 3 CT 扫描原理图

Fig. 3 Principle of CT scan

为 3~5℃/h, 达到预设温度后保温 6 h, 使试件内部受热均匀, 避免升温过程中因温度梯度而产生热损伤。同时打开岩石热冲击破裂试验台, 将冷却介质加热到目标温度(20, 60, 100℃)并打开循环泵。将试件从马弗炉中取出并迅速没入冷却介质, 待试件温度与冷却介质温度完全一致后取出, 先置于空气中自然风干, 后置于干燥箱内烘干。重复试验过程完成全部试件的热冲击处理。

(2) CT 扫描

经高温处理后砂岩表面呈现红棕色, 图 4 为 600℃ 高温砂岩在水中冷却后的砂岩试件。将干燥后的试件置于扫描平台中心, 对热冲击处理后试件纵向中部 25 mm 区域进行 CT 扫描。根据试验情况, 调整工作电压为 160 kV, 电流为 140 μA, 最小可分辨像素尺寸为 10 μm, 对试件进行 360 度扫描, 共扫描 900 帧, 得到原始 CT 数据。并借助配套分析软件对其破裂特征进行描述。对热冲击破裂后试件的 CT 扫描结果进行处理, 通过得到的数据对试件破坏程度进行精细表征。

2 热冲击作用下砂岩微观特征分析

2.1 砂岩热冲击破裂现象

图 5 为 600℃ 高温状态砂岩在 20, 60, 100℃ 恒温水中热冲击破裂后, CT 扫描重建获得的灰度图。图中黑色部分为孔隙, 灰色部分为岩体基质, 白色部分



图 4 用于 CT 扫描的热冲击破裂砂岩圆柱体

Fig. 4 Sandstone cylinder fractured by thermal shock for CT scanning

为石英等高密度组分(像素点的灰度值代表密度, 越黑代表密度越低, 越白代表密度越高)。分析图 5(a)~(c) 可知, 600℃ 高温状态砂岩在 20, 60, 100℃ 恒温水中产生热冲击破裂, 破裂形式以孔隙数量增加为主, 没有产生明显的裂隙。破裂以硬质矿物颗粒为中心, 在矿物颗粒胶结处出现分离, 颗粒与颗粒的分离产生大量孔隙, 孔隙间彼此连通, 随着热冲击破裂程度的加剧, 孔隙体积逐渐增大, 破裂过程中未发现“穿晶”破裂现象。

基于 CT 扫描图像建立数字岩芯, 对重建后的数字岩芯进行切割, 分别在试件同一高度处选取尺寸为 500×500×500 像素的立方体为特征单元体进行研究, 其实际尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm, 选取合适的阈值, 对数字岩芯进行二值化处理, 得到孔隙立体网络结构, 结合分形维数对孔隙、喉道、孔隙连通团的演变规律进行分析。对孔隙类型、孔径分布、孔隙连通性、有效孔隙度和孔隙空间配置做进一步研究。

分别计算每组 3 个试件的孔隙体积分数并求其平均值, 如表 1, 观察孔隙体积分数随冷却介质温度的变化规律, 发现随冷却介质温度的降低, 砂岩孔隙体积分数均呈增大趋势。选取每组中破裂特征及明显的试件进行详细分析。

由图 5 可知, 砂岩热冲击破裂形式与花岗岩、石灰岩不同, 为了更进一步说明砂岩热冲击破裂时孔隙的变化情况, 考察沿砂岩试件 CT 扫描方向每层孔隙体积分数, 如图 6 所示。

图 6 中为第 50 层二值化处理切片图, 图中蓝色部分为孔隙, 图 6(d) 为 3 个特征单元体每层孔隙体积分数分布情况图。随冷却介质温度从 20℃ 到 100℃ 所对应的总孔隙体积分数依次为 11.18%, 9.17%, 8.30%, 对应第 50 层孔隙体积分数依次为 12.79%, 8.62%, 7.40%, 与通过孔隙体积与特征单元体体积计算得到的孔隙率一致, 且每一层孔隙体积分数波动不超过 1%。

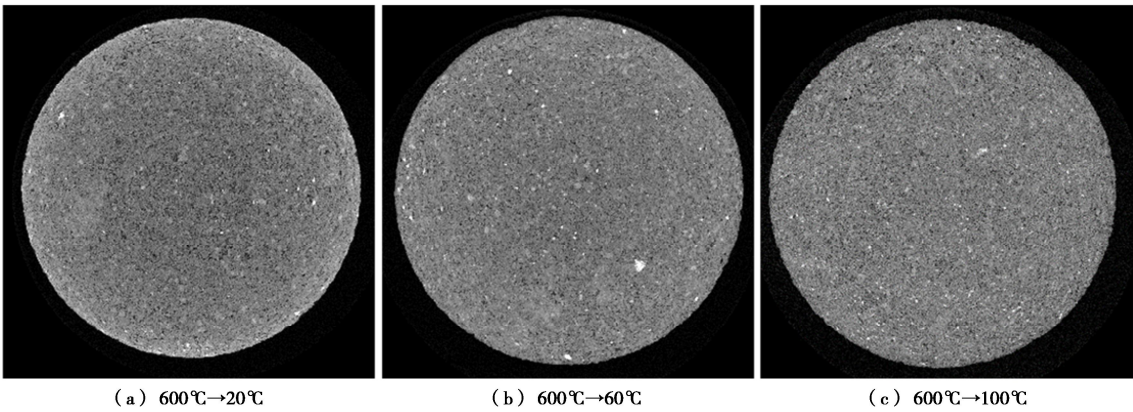


图 5 600℃砂岩在 20, 60, 100℃恒温水中热冲击破裂的 CT 扫描灰度图

Fig. 5 CT scanning grayscale images of sandstone fractured by thermal shock at 600℃ in water at 20℃, 60℃ and 100℃

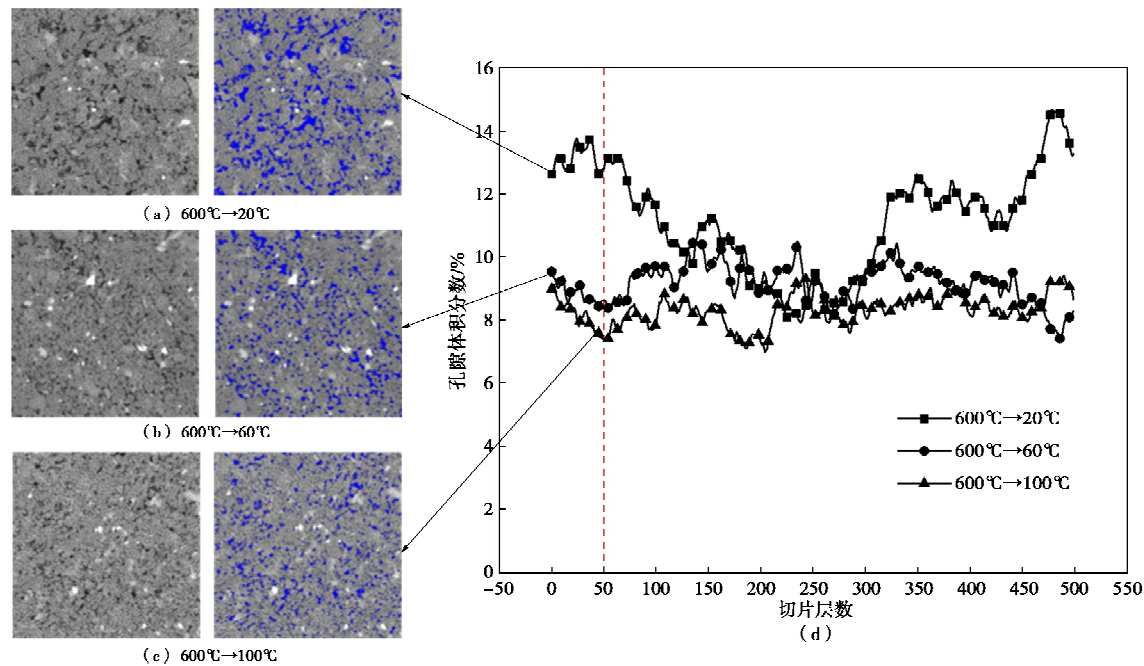


图 6 沿试件扫描方面每层孔隙体积分数分布曲线图

Fig. 6 Distribution curves of volume fraction pores of each layer along scanning aspect of specimens

表 1 600℃砂岩不同温度热冲击后孔隙体积分数

Table1 Volume fractions of pores sandstone at 600℃ after thermal shock at different temperatures

处理条件	1 号	2 号	3 号	平均值
600℃→20℃	0.111806	0.126868	0.114548	0.117741
600℃→60℃	0.091731	0.095136	0.096932	0.094600
600℃→100℃	0.083030	0.090752	0.079320	0.084367

由图 6 可知，600℃高温砂岩在 20℃恒温水中热冲击破裂后，大部分切层孔隙体积分数值大于 60℃的，同时也大于 100℃的，即 600℃高温砂岩在 20℃恒温水中热冲击破裂后孔隙体积分数值最大，然后按照 60℃、100℃的顺序依次减小。由此可见，600℃高温砂岩在 20℃恒温水中热冲击破裂程度最强，600℃高温砂岩在 100℃恒温水中热冲击破裂程度最弱。随着热冲击破裂程度的加剧，砂岩中孔隙体积逐渐增大。

图 6 (c) 中孔隙分布随机，无明显规律性，仅存在少量较大孔隙，其余孔隙数量多且面积较小，孔隙间存在大量细小的喉道，孔隙与喉道张开度较小，最大孔隙长度达 358.05 μm，宽度达 291.497 μm；图 6 (b) 中孔隙分布较为均匀，喉道更加发育，形状呈细长状，最大孔隙长度达 446.282 μm，宽度达 180.76 μm，但与图 6 (a) 相比，大面积孔隙数量较少且面积较小。图 6 (a) 中分布有大量较大面积的孔隙，小孔隙大多近似呈圆形，形状较为规则，大孔隙大多呈长条状，形状较为复杂。孔隙间相互连接产生喉道且发育较好，喉道宽度接近孔隙直径。最大孔隙长度达 669.407 μm，宽度达 346 μm。可见随冷却介质温度的降低，孔隙间较脆弱的地方产生喉道，并逐渐发育扩展，同时孔隙逐渐发育，最终表现为多个孔隙连通合并为单个大孔隙，即联通团。综上所述，随冷却介质温度的降低，

孔隙发育程度增强, 砂岩岩样热损伤程度加剧。

2.2 600℃高温状态砂岩经不同温度冷却介质热冲击破裂后孔隙的特征分析

二维 CT 图像仅反映特定截面的结构特征, 缺乏对岩石内部空间结构的直观评估, 因此, 有必要建立三维孔隙结构模型对岩石孔隙结构进行进一步分析。

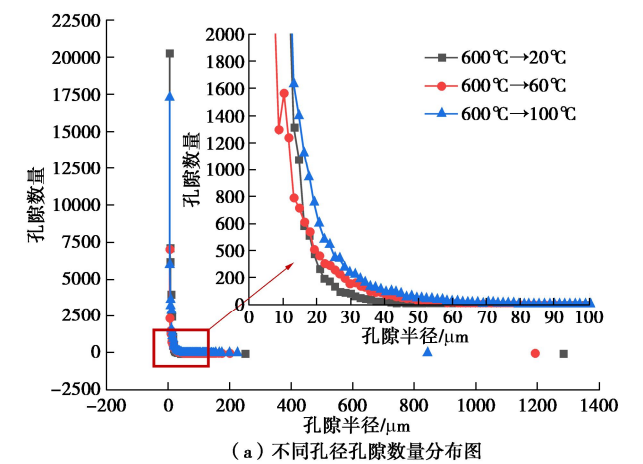
根据孔隙等效半径 r_{eq} 对三维孔隙进行划分, 将等效半径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的孔定义为小孔, 等效半径介于 $10\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 的孔定义为中孔, 等效半径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的孔 (不包括最大孔隙连通团) 定义为大孔, 将所有孔隙中连通程度最大、即体积最大的联通孔隙称为最大孔隙连通团。通过软件分别计算每个孔隙的体积分数及等效半径。其中体积最大的孔隙体积分数即为最大孔隙连通团的孔隙体积分数。如表 2 所示。分析不同孔径孔隙数量及体积占比如图 7。

表 2 不同冷却温度下不同孔径孔隙体积占比

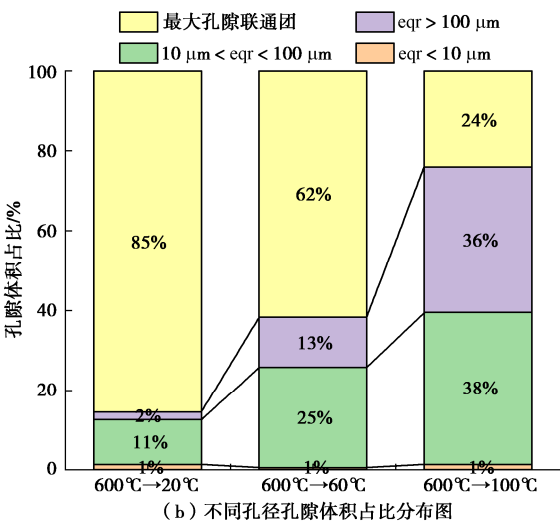
Table 2 Percentages of pore volume with different pore diameters at different cooling temperatures

热冲击破裂条件	$(r_{eq}<10\text{ }\mu\text{m})$ 小孔/%	$(10\text{ }\mu\text{m}<r_{eq}<100\text{ }\mu\text{m})$ 中孔/%	$(r_{eq}>100\text{ }\mu\text{m})$ 大孔/%	最大连通团体积分数	总孔隙率/%
$600^{\circ}\text{C}\rightarrow20^{\circ}\text{C}$	0.15	1.26	0.22	9.55	11.18
$600^{\circ}\text{C}\rightarrow60^{\circ}\text{C}$	0.05	2.33	1.15	5.65	9.17
$600^{\circ}\text{C}\rightarrow100^{\circ}\text{C}$	0.11	3.18	3.02	2.00	8.30

由图 7 可见, 随着冷却介质温度的降低, 总孔隙体积分数增加, 最大孔隙连通团体积明显增大, 除最大孔隙连通团外, 孤立的中孔 ($10\text{ }\mu\text{m}<r_{eq}<100\text{ }\mu\text{m}$)、大孔 ($r_{eq}>100\text{ }\mu\text{m}$) 数量与体积均呈减少趋势。由此可见随着冷却介质温度的降低, 更多的孤立孔会转化为连通团的一部分, 导致连通团体积与总孔隙体积增大, 孤立孔体积呈减小的现象。



(a) 不同孔径孔隙数量分布图



(b) 不同孔径孔隙体积占比分布图

图 7 不同孔径孔隙数量及体积占比分布图

Fig. 7 Number and volume of pores with different sizes

2.3 孔隙体积分数与分形维数的关系

砂岩为多孔介质, 孔隙等效半径数值分布于几微米到几千微米, 范围较大。根据等效球体半径可对孔隙尺寸的分布特点进行定性分析, 但无法定量表征其孔隙结构复杂性, 而分形几何学为描述砂岩中孔隙的复杂性提供了新思路, 将形态不规则的几何体集合当作分形几何体, 对分形几何空间中分布特征参数进行求解得到分形维数。由于孔隙半径表示孔隙团的大小及连通性, 数量代表孔隙分布的密度, 通过孔隙的等效半径和数量的分布特征可表达砂岩孔隙的分布规律, 因此以孔隙的等效半径和数量为基本参数。统计等效半径 $\geq L$ 的孔隙数量 $M(L)$, 则等效半径长度与数量服从 $M(L)\propto L^{-D}$, 将其写为如下式所示^[21]:

$$M(L)=A_0L^{-D}\quad ,\quad (1)$$

对式 (1) 两端取对数得到

$$\ln M(L)=-D\ln L+\ln A_0\quad .\quad (2)$$

在双对数坐标图中以 $\ln L$ 为横轴, $\ln M(L)$ 为纵轴作图, 图中直线的斜率就为煤样孔隙的分形维数 D 分形维数 D 是表征孔隙结构复杂程度的重要参数, 可定量描述几何体分布的不规则度^[22]。孔隙的分形维数越大, 则表示孔隙结构越复杂, 形状规则度越差, 对流体在孔隙中传输的影响越大。

根据软件中的分形维数计算命令分别计算得到特征单元体的 3D 分形维数和每一层二维图像的 2D 分形维数, 2D 分形维数是一个大于 1 且严格小于 2 的数, 通过分析曲线对平面的填充方式计算得到。曲线越不平滑, 2D 分形维数越大。3D 分形维数是大于 2 且严格小于 3 的数字, 是测量和比较表面粗糙度和空间的复杂性的一个非常有效的指标。将特征单元体每一层的分形维数和孔隙体积分数的关系进行分析, 得到图 8 (a) ~ (c), 将不同温度冷却后特征单元体的 3D

分形维数与总孔隙体积分数的关系绘制得到图 8(d)。

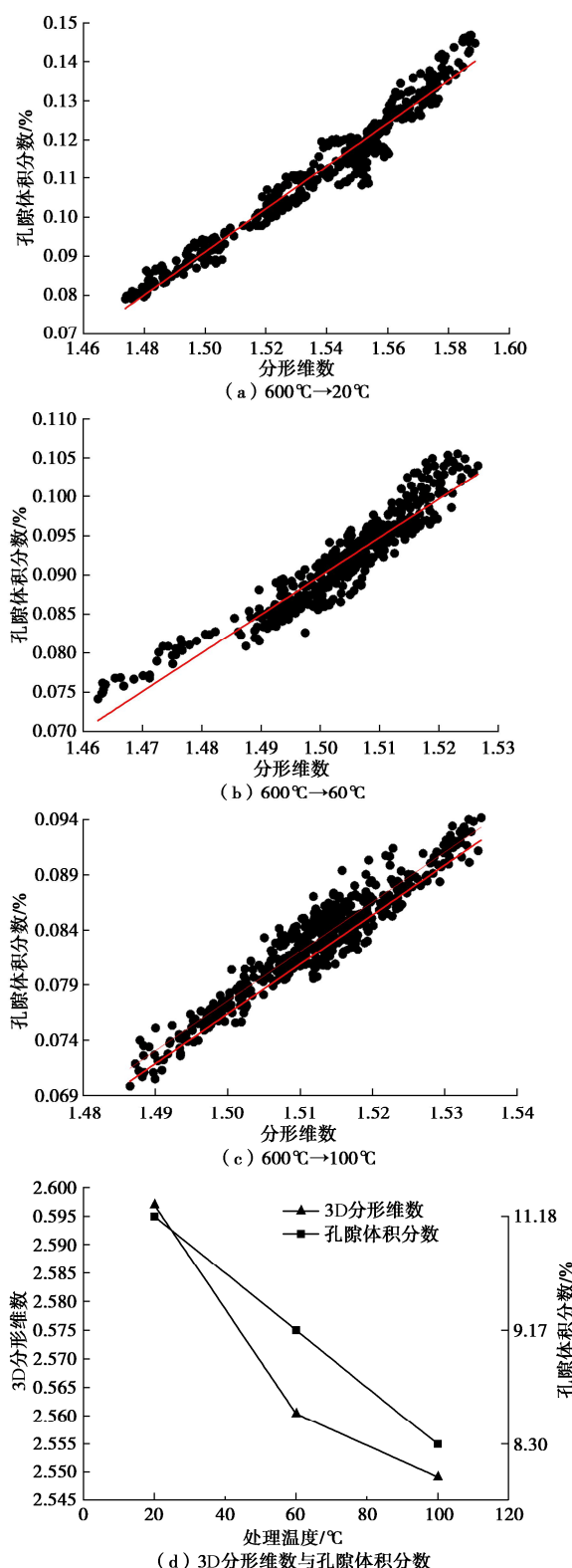


图 8 孔隙体积分数与分形维数的关系

Fig. 8 Relationship between volume fraction of pores and fractal dimension

分析图 8 可知:

(1) 图 8(a) 中试样的分形维数在 1.474~1.589 波动, 图 8(b) 中试样的分形维数在 1.462~1.527 波

动, 图 8(c) 中试样的分形维数在 1.487~1.535 波动。可见同一试件不同位置孔隙的不规则度存在差异, 即砂岩内部孔隙分布不均匀, 且无规律, 因此试验中选取试件的不同会对试验结果有一定的影响。同时说明可借助砂岩内部缺陷对储层进行增渗改造。

(2) 图 8(a)~(c) 中, 不同温度冷却介质热冲击破裂后, 特征单元体均呈现孔隙体积分数越大, 分形维数也越大, 即孔隙复杂程度越高的现象。可见分形维数和孔隙体积分数呈正相关的变化趋势, 对二者进行线性拟合, 发现拟合度较高。根据岩石的热损伤机理可知, 细观孔裂隙的产生、分布、扩展及最大连通团的结构与贯通作用是脆性岩石损伤的根源。岩石损伤过程中, 细观裂纹所占体积比——“细观裂纹(体积)密度” Q_d 单调增加, 且岩石损伤率与 Q_d 成正比。因此, 可用分形维数表征岩石的损伤程度^[23]。

(3) 图 8(d) 中, 600°C 砂岩经不同温度冷却介质热冲击处理后, 随冷却介质温度降低, 总孔隙体积分数与 3D 分形维数呈增大趋势, 即冷却介质温度越低, 分形维数越大, 孔隙结构越复杂, 砂岩内部损伤越严重。

3 不同热冲击破裂下砂岩孔隙连通性与渗透性

3.1 不同热冲击强度下砂岩孔隙连通性

分析图 9 可知, 随着冷却介质温度的降低, 热冲击破裂程度增强, 试件内部产生大量新生孔隙。同时原生孔隙之间较为脆弱的部分产生微小裂隙并发育扩展, 形成孔隙间的喉道, 将孤立孔连通, 形成等效直径较大的孔隙。另外部分孔隙发育扩展后与最大孔隙团产生连通, 使最大连通孔规模迅速扩大, 几乎遍布了模型整体。冷却介质温度从 60°C 到 20°C 与从 100°C 到 60°C 总孔隙度仅增大不到 2%, 最大连通团体积分数增大了 4% 左右, 可见随破坏程度的增强, 对孔隙的贯通效果比产生新生孔隙效果更明显。

最大连通团的等效直径由 100°C 时的 1682.68 μm 上升到了 60°C 时的 2380.97 μm 和 20°C 时的 2566.38 μm 。最大连通团占总体积之比明显增大, 由 100°C 时的 2.00% (占总孔隙 24.04%) 上升到了 60°C 时的 5.65% (占总孔隙 61.64%) 和 20°C 时的 9.55% (占总孔隙 85.44%)。如图 9 所示, 最大孔隙连通团呈网络状分布, 100°C 水中冷却后最大连通团仅分布在立方体的一角, 60°C 时向四周扩展延伸, 占据了立方体的大部分体积, 20°C 时最大连通团扩展到几乎遍布整个数字岩芯, 且分布均匀, 形成了贯穿岩芯的孔隙网络, 孔隙

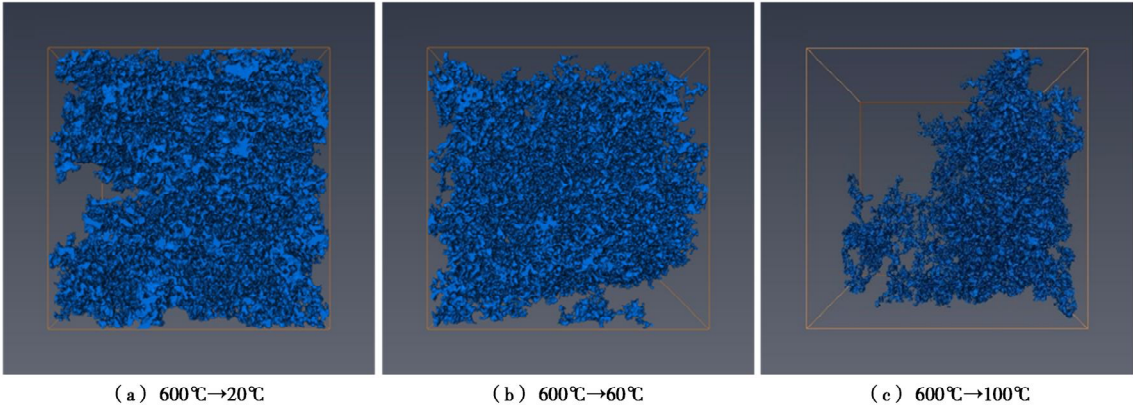


图 9 基于 CT 扫描重建数字岩芯提取的最大孔隙连通团 (数字岩芯实际尺寸: 5 mm×5 mm×5 mm)

Fig. 9 Reconstruction of maximum pore interconnection clusters extracted from digital core based on CT scanning (actual size of digital core: 5 mm×5 mm×5 mm)

连通性激增, 对试件渗透性产生了巨大影响。

当前普遍认为产生岩石热破裂的原因主要有两个: ①岩石在加热过程中, 不同颗粒间热膨胀系数不同, 产生的热应变呈现非均匀性, 进而产生热应力。当热应力超过颗粒间的结合力时便会发生热破裂; ②冷却过程中试件内部温度分布不均匀, 形成热冲击温度梯度, 冷却过程中温度梯度频繁变化, 从而产生破裂损伤。

对高温砂岩在不同温度冷却介质中进行热冲击冷却, 并对处理后试件孔隙体积和数量以及孔隙连通形式进行分析, 发现温差越大, 热冲击后会产生的新生孔隙越多, 同时孤立孔间产生更多喉道使其连通, 使岩石内形成更大的贯通试件的孔隙连通团。从而使岩石的损伤程度增加, 渗透性增强, 完整性下降, 力学性能劣化。

3.2 不同热冲击破裂下砂岩渗透率随冷却介质温度变化规律

为进一步研究砂岩热冲击破裂对渗透率的影响, 利用 avizo 软件中的绝对渗透率试验模拟模块对孔隙团进行绝对渗透率试验模拟, 其原理为: 在平行主流方向的外表面上添加固相平面将样品与外界隔离, 在垂直于主流方向的平面上建立压力准静态的稳定区, 使流体可以在样品输入面上自由扩散且不会流出系统外。调用 Absolute Permeability Experiment Simulation 命令, 设置流体黏度系数为 0.001Poise, 入口处 (左端) 施加 1 MPa 的输入压力, 出口处 (右端) 施加 0.75 MPa 的输出压力, 进行渗透性模拟。通过达西定律计算得到渗透率, 如图 10 所示, 同时生成流线图, 见图 11。用颜色表征流速, 红色代表快速, 蓝色代表慢速, 观察发现, 在试件边缘处流速较快, 中心处流速较慢。流线分布与连通团体积对应, 孔隙更多的地方流线分布密度更高, 孔隙较少的地方流线分布较少。由于孔

隙分布的不均匀性, 生成的流线复杂而曲折。通过流线的分布及流动方向, 可更直观的体现出孔隙的连通形式。选择不同的方向作为主流方向进行渗透性模拟, 发现渗透性无明显差别, 可见砂岩试件受热冲击处理后渗透率无各向异性特征。

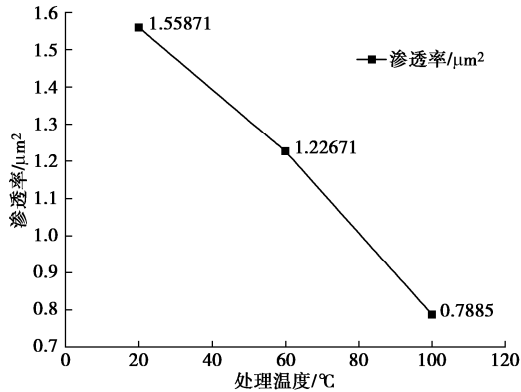


图 10 不同温度冷却后砂岩渗透率

Fig. 10 Permeabilities of sandstone after cooling at different temperatures

流体只能在孔隙连通团中流动, 无法进入孤立孔, 孤立孔不作用于砂岩的渗流过程。因此孔隙连通团的体积分数及分布情况对渗透率的大小起决定性作用。随着孔隙连通团体积分数的增大, 砂岩渗透率明显增大, 流线数量显著增加。随着冷却介质温度的降低, 渗透率从 100℃时的 0.7885 μm² 依次增加到了 60℃时的 1.2267 μm² 与 20℃时的 1.5587 μm²。分别增大了 0.438 μm² 和 0.332 μm², 增长率分别为 55.6%和 27.1%。

4 讨 论

不同岩石在热冲击作用下呈现不同的细观破裂特征, 决定了宏观层面对应物理力学特性的差异。掌握其热冲击破裂特征及孔裂隙发育规律对于合理开采相应储层的地热资源具有重要意义。因此在不同类型的地热储层的开发过程中, 要根据其特定的细观破裂规

律，合理地采用针对性方法进行储层改造。

对于不同种类的岩石，由于其成因、组分、矿物颗粒结合方式各有差异，所以受热冲击作用后其破裂方式及特征不同，孔裂隙的萌生、发育、扩展形式也不同。将花岗岩试件和石灰岩试件以同样试验方法，分别加热到 600℃后在 20℃水中冷却，对处理后试件进行 CT 扫描分析。对比图 12, 13 中 600℃高温砂岩、石灰岩、花岗岩 3 种岩石在水中热冲击冷却后的孔隙、裂隙形态发现：如图 12 (a)，13 (a) 所示，花岗岩致密低渗，矿物颗粒之间结合非常紧密，天然花岗岩内部基本不存在孔隙。不同矿物团之间的胶结力小于同种矿物团内部同种颗粒之间的结合力，只有热冲击

应力大到一定程度才能破坏同种矿物内部同种颗粒之间的结合力。因此在热冲击过程中，裂纹先沿着不同矿物团的胶结边界起裂扩展，随着热冲击的加剧，产生贯穿同种矿物团内部的裂纹。花岗岩颗粒之间的结合力很强，因此往往表现为显著的脆性破裂，在热冲击应力达到胶结力的破裂阈值后，发生能量的瞬间释放，产生断裂，形成较为笔直的裂纹。反映在裂隙结构上，明显发现热冲击破裂产生的裂隙体比较薄，破坏形式只表现为断裂，不表现为孔裂隙的数量变化。

从图 12 (c)，13 (c) 中发现，高温砂岩热冲击处理后无大裂纹产生，主要表现为：萌生新生孔隙、

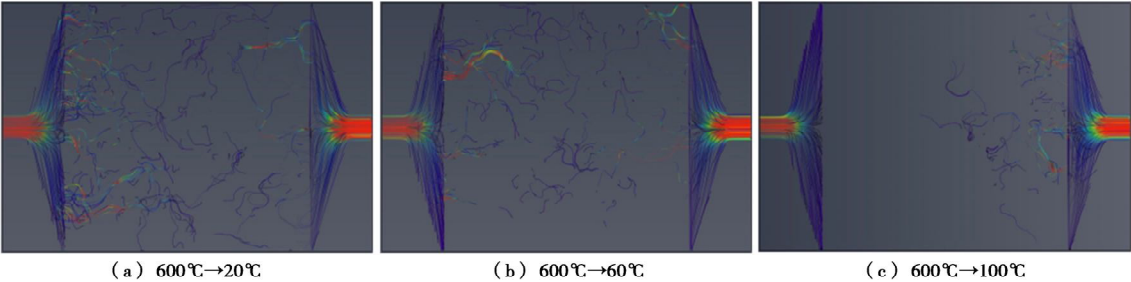


图 11 孔隙连通团渗透模拟流线图

Fig. 11 Flow diagram of permeability of pore interconnection clusters

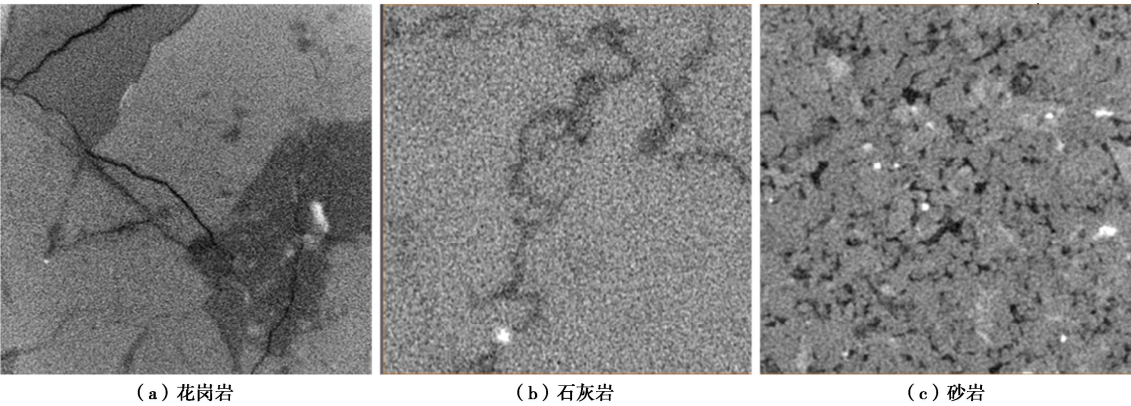


图 12 3 种岩石 600℃高温热冲击后孔裂隙形态 CT 剖面图

Fig. 12 CT section of pore and fissure morphology of three kinds of rocks after thermal shock at 600℃

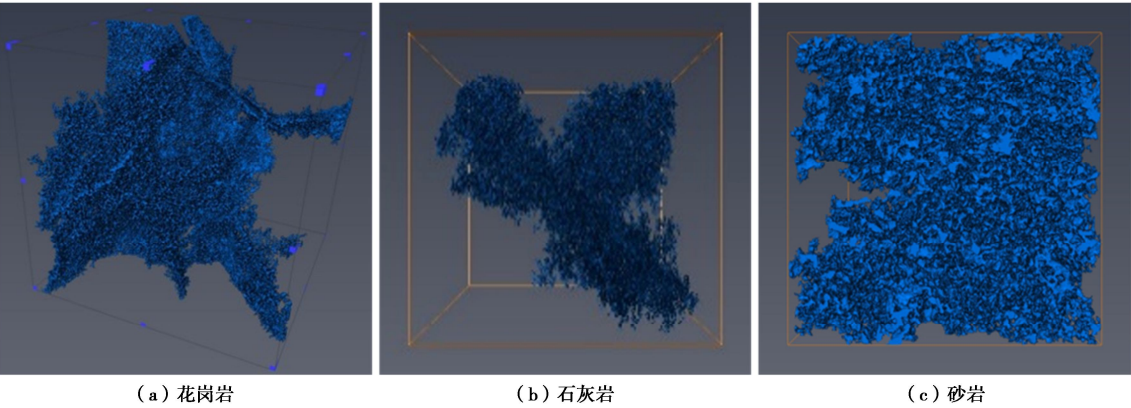


图 13 3 种岩石 600℃高温热冲击后孔裂隙网络结构图

Fig. 13 Structure of pores and fracture network of three kinds of rocks after thermal shock at 600℃

原有孔隙的增大以及孔隙间的连通。与花岗岩相比, 砂岩为沉积岩, 主要由各种砂粒胶结而成, 天然多孔, 颗粒间的胶结力小。在热冲击作用下, 热冲击应力率先破坏孔隙之间的连通部分, 使原本的小孔连通成为大孔, 原本大孔进一步与周围的孤立孔连通形成连通团。反映在孔隙网络结构上, 连通团网络遍布整个试件内部, 分布均匀, 且无裂隙体产生。

从图 12 (b), 13 (b) 中发现, 高温石灰岩热冲击处理后, 试件内部孔隙和裂隙的发育均较为明显, 孔隙多分布在裂隙周围, 裂隙形态曲折。石灰岩内部存在部分天然孔隙, 强度介于砂岩及花岗岩之间, 矿物颗粒之间的结合力也介于砂岩与花岗岩之间。岩石内部颗粒结合力越强, 整体脆性越强, 越容易出现瞬间的能量释放造成脆性断裂产生裂纹, 相反颗粒之间结合力越弱, 整体脆性越弱, 能量在释放过程中, 颗粒之间的结合处不断被破坏, 不会出现瞬间的能量释放, 也就不会产生脆断裂纹。强度介于两者中间的岩石, 颗粒之间的结合处不断的被破坏, 同时由于强度较高, 天然孔隙较少, 在能量释放时, 会沿着部分连通团逐渐连通形成连续的裂纹, 受孔隙的不均匀分布与发育的影响, 导致裂纹延伸方向不断变化而形成形状曲折的裂纹。反映在图 13 (b) 中孔隙裂隙网络结构图上, 表现为连通孔的聚集和裂纹的曲折分布。

5 结 论

通过对高温砂岩热冲击处理后的 CT 扫描图像进行分析, 得到了高温砂岩在不同温度水中热冲击冷却后的破裂特征及孔隙连通特性的相关规律。

(1) 高温砂岩热冲击处理后, 萌生大量新生孔隙, 孔隙间较脆弱的地方产生喉道, 并逐渐发育扩展, 同时孔隙逐渐发育扩大, 最终连通合并为连通团。

(2) 冷却介质温度对热冲击作用下砂岩细观孔隙结构影响显著。相同高温处理后, 随着冷却介质温度的降低, 砂岩内部损伤程度增强, 总孔隙体积分数与连通团体积分数均增大, 渗透率增大, 同时分形维数增大, 试件内部孔隙结构复杂程度增大。

(3) 砂岩孔隙体积分数与分形维数线性拟合度较高, 孔隙体积分数越高, 分形维数越大, 表明分形维数可用于表征其热损伤情况。

(4) 600℃高温花岗岩、石灰岩、砂岩 3 种岩石在水中热冲击冷却后的孔隙、裂隙发育具有较大差异, 花岗岩表现出明显的脆性断裂特征形成裂纹, 砂岩孔隙发育与连通现象明显, 石灰岩萌生的微孔裂隙扩展搭接形成裂隙。

参考文献:

- [1] LIDMAN W G, BOBROWSKY A R. Correlation of physical properties of ceramic materials with resistance to fracture by thermal shock[C]// Proceedings of the National Advisory Committee for Aeronautics, NACA research memorandum and Lewis Flight Propulsion Laboratory. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1949: 1.
- [2] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, KANG Jian-rong. Introduction to Geothermal Extraction in Hot Dry Rock[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 邵保平, 吴阳春, 王 帅, 等. 热冲击作用下花岗岩力学特性及其随冷却温度演变规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 83 - 94. (XI Bao-ping, WU Yang-chun, WANG Shuai, et al. Evolution of mechanical properties of granite under thermal shock in water with different cooling temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 83 - 94. (in Chinese))
- [4] 邵保平, 吴阳春, 赵阳升, 等. 不同冷却模式下花岗岩强度对比与热破坏能力表征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 286 - 300. (XI Bao-ping, WU Yang-chun, ZHAO Yang-sheng, et al. Experimental investigations of compressive strength and thermal damage capacity characterization of granite under different cooling modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 286 - 300. (in Chinese))
- [5] 邵保平, 吴阳春, 王 帅, 等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 69 - 83. (XI Bao-ping, WU Yang-chun, WANG Shuai, et al. Experimental study on mechanical properties of granite taken from Gonghe Basin, Qinghai Province after high temperature thermal damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 69 - 83. (in Chinese))
- [6] 邵保平, 吴阳春, 赵阳升. 热冲击作用下花岗岩宏观力学参量与热冲击速度相关规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2194 - 2207. (XI Bao-ping, WU Yang-chun, ZHAO Yang-sheng. Experimental study on the relationship between macroscopic mechanical parameters of granite and thermal shock velocity under thermal shock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2194 - 2207. (in Chinese))
- [7] 贺玉龙, 杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机

- 理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(14): 2420 - 2427. (HE Yu-long, YANG Li-zhong. Mechanism of effects of temperature and effective stress on permeability of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(14): 2420 - 2427. (in Chinese))
- [8] 周青春. 温度、孔隙水和应力作用下砂岩的力学特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. (ZHOU Qing-chun. Study on the Mechanical Property of A Sandstone under Geothermal-Mechanical and Hydraulic-Mechanical Coupling[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [9] 苏承东, 付义胜. 红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3164 - 3169. (SU Cheng-dong, FU Yi-sheng. Experimental study of triaxial compression deformation and strength characteristics of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3164 - 3169. (in Chinese))
- [10] LOWELL S, SHIELDS J E, THOMAS M A, et al. Other Surface Area Methods[M]// Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004: 82 - 93.
- [11] BAKKE S, ØREN P E. 3-D pore-scale modelling of sandstones and flow simulations in the pore networks[J]. SPE Journal, 1997, **2**(2): 136 - 149.
- [12] ATTWOOD D. Nanotomography comes of age[J]. Nature, 2006, **442**(7103): 642 - 643.
- [13] SAKDINAWAT A, ATTWOOD D. Nanoscale X-ray imaging[J]. Nature Photonics, 2010, **4**(12): 840 - 848.
- [14] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微CT试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 28 - 34. (ZHAO Yang-sheng, MENG Qiao-rong, KANG Tian-he, et al. Micro-ct experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 28 - 34. (in Chinese))
- [15] LIU H, YANG G S, YUN Y H, et al. Investigation of sandstone mesostructure damage caused by freeze-thaw cycles via CT image enhancement technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, **2020**: 8875814.
- [16] 戎虎仁, 白海波, 王占盛. 不同温度后红砂岩力学性质及微观结构变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(2): 463 - 469. (RONG Hu-ren, BAI Hai-bo, WANG Zhan-sheng. Experimental research on mechanical properties and microstructure change law of red sandstone after different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(2): 463 - 469. (in Chinese))
- [17] JIN P H, HU Y Q, SHAO J X, et al. Influence of temperature on the structure of pore-fracture of sandstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(1): 1 - 12.
- [18] 金爱兵, 王树亮, 魏余栋, 等. 不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3531 - 3539, 3603. (JIN Ai-bing, WANG Shu-liang, WEI Yu-dong, et al. Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3531 - 3539, 3603. (in Chinese))
- [19] 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 Journal of Geophysics, 2005, **48**(3): 656 - 659. (in Chinese))
- [20] 张 渊, 万志军, 赵阳升. 细砂岩热破裂规律的细观实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, **26**(4): 529 - 531. (ZHANG Yuan, WAN Zhi-jun, ZHAO Yang-sheng. Meso-experiment of fine sandstone thermal crack laws[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, **26**(4): 529 - 531. (in Chinese))
- [21] 于艳梅, 胡耀青, 梁卫国, 等. 应用CT技术研究瘦煤在不同温度下孔隙变化特征[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(2): 637 - 644. (YU Yan-mei, HU Yao-qing, LIANG Wei-guo, et al. Study on pore characteristics of lean coal at different temperature by CT technology[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, **55**(2): 637 - 644. (in Chinese))
- [22] 王登科, 张 平, 浦 海, 等. 温度冲击下煤体裂隙结构演化的显微CT实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(10): 2243 - 2252. (WANG Deng-ke, ZHANG Ping, PU Hai, et al. Experimental research on cracking process of coal under temperature variation with industrial micro-CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(10): 2243 - 2252. (in Chinese))
- [23] 杨更社, 刘 慧. 基于CT图像处理的冻结岩石细观结构及损伤力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (YANG Geng-she, LIU Hui. Microstructure and Damage Mechanical Characteristics of Frozen Rock Based on CT Image Processing[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))