

DOI: 10.11779/CJGE20230576

# 高温热冲击下花岗岩内一维热传导规律试验研究

李晓科<sup>1</sup>, 郇保平<sup>\*1,2</sup>, 蔡佳豪<sup>1</sup>, 解瑾<sup>1</sup>, 贾鹏<sup>1</sup>, 马骁<sup>3</sup>

(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;

3. 大连交通大学土木工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 热对岩石物理力学性质的劣化作用受岩石的结构、矿物组成及分布等多方面因素共同决定。为解决工程中存在的半无限大物体经历高温热冲击时其内部的一维热传导问题, 通过设置高温热冲击试验, 对热冲击过程中的温度场、升温速率、温度梯度场进行分析, 并引入热冲击因子来定量表征高温热冲击过程中热对岩石的破坏程度, 探讨热源温度及介质对花岗岩传热的影响, 研究表明: 不同冲击温度下花岗岩内温度变化均分为 3 个阶段: 快速升温阶段、缓慢升温阶段、稳定阶段; 由于花岗岩的非均质性, 高温热冲击下花岗岩内温度场和温度梯度场分布均具有紊乱性, 且温度梯度场紊乱程度高于温度场; 高温热冲击过程中热冲击因子在花岗岩内的分布具有明显的非均质性, 且其波峰具有动态移动的性质; 100℃时, 水相对硅油具有更大的对流换热系数, 此状态下花岗岩内温度、升温速率、温度梯度均具有更大的峰值且更早进入稳定阶段。

**关键词:** 花岗岩; 热冲击; 温度场; 温度梯度场; 热冲击因子

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2192-10

**作者简介:** 李晓科(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事高温岩石力学与工程方面研究工作。E-mail: li.xiaoke@qq.com。

## Experimental study on internal one-dimensional heat conduction law of granite under high-temperature thermal shock

LI Xiaoke<sup>1</sup>, XI Baoping<sup>\*1,2</sup>, CAI Jiahao<sup>1</sup>, XIE Jin<sup>1</sup>, JIA Peng<sup>1</sup>, MA Xiao<sup>3</sup>

(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; 3. School of Civil Engineering,

Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** The deteriorating effects of heat on physical and mechanical properties of rock are determined by the combination of the factors such as the structure, mineral composition and mineral distribution of the rock. The high-temperature thermal shock tests are conducted to address the one-dimensional heat conduction problem of semi-infinite objects experiencing high-temperature thermal shock in engineering. The changes rules of temperature field, heating rate and temperature gradient field during thermal shock are analyzed, the thermal shock factor is introduced to quantitatively characterize the degree of heat damage to the rock in the process of high-temperature thermal shock, and the influence of heat source temperature and medium on the heat transfer of granite are discussed. The test results show that the temperature changes within the granite at different thermal shock temperatures are divided identically into three stages: rapid heating, slow heating and temperature stabilization. Influenced by the non-homogeneity of granite, the distribution of the temperature field and temperature gradient field in granite under high-temperature thermal shock are disordered, and the degree of disorder of the temperature gradient field is higher than that of the temperature field. During high-temperature thermal shock, the distribution of thermal shock factors of granite is significantly non-homogeneous, and its peaks are dynamically moving. At 100℃, since water has a greater convective heat transfer coefficient than silicone oil, the temperature, rate of warming and temperature gradient within the granite have greater peaks and enter the stabilization phase earlier when using water instead of silicone oil as the heat source medium.

**Key words:** granite; thermal shock; temperature field; temperature gradient field; thermal shock factor

## 0 引言

岩石热冲击现象由于其可以明显劣化岩石的物理

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874207); 山西省自然科学基金项目(202303021211042, 202303011222006)

收稿日期: 2023-06-25

\*通信作者(E-mail: xibaoping@163.com)

力学性质<sup>[1]</sup>而被广泛应用于地热开采<sup>[2]</sup>、核废料深地处置<sup>[3]</sup>、热力协同破岩<sup>[4]</sup>、高地温隧道施工<sup>[5]</sup>等各种工程之中。岩石在热冲击过程中, 由于热量在换热介质与岩石表面发生迅速传递, 致使岩石内部温度在短时间内发生剧烈变化, 导致岩石快速膨胀或收缩, 产生新的裂隙并使原有的裂隙迅速拓展、连通<sup>[6-8]</sup>, 增加岩石内部的裂隙密度甚至形成明显的裂纹, 从而使岩石宏观力学强度大幅降低甚至发生热冲击破坏。

岩石在热冲击过程中热量的传递主要分为两个部分: 岩石表面与换热介质之间的热对流以及岩石内部的热传导<sup>[9]</sup>。任一部分存在区别均会使得岩体内部存在不同的温度变化过程, 而温度对岩石的破坏作用主要取决于热冲击过程中岩石内部热应力的分布和大小<sup>[10]</sup>, 而对于同一种材料, 热应力的分布主要取决于材料内部的温度梯度大小<sup>[11]</sup>, 同时温度的变化还会导致花岗岩热物理参数发生变化<sup>[12-13]</sup>, 因此掌握传热过程中岩石内部的温度场及温度梯度场分布及变化过程对探明温度对岩石物理力学的劣化机理具有重要意义。郇保平等<sup>[14]</sup>通过对花岗岩进行对流加热, 探明了热源温度在 100℃ 以内时花岗岩内温度场的分布及变化规律, 并提出热冲击因子作为定量表征岩石热破坏程度的物理量。何水鑫等<sup>[15]</sup>通过对花岗岩进行热冲击前后的传热规律分析, 表明热冲击破裂产生的裂纹位置与温度、温度梯度的分布具有高度的相关性。曹钰等<sup>[16]</sup>对不同岩石分别进行液氮深冷冲击, 发现不同岩性岩石在深冷冲击过程中的温度和温度梯度分布存在差异但演变规律大致相同。Zhao 等<sup>[17]</sup>研究了花岗岩在快速冷却过程中的传热规律, 发现冷却速率和温度梯度最大值总是出现在固液换热界面区域。

综上所述, 目前对岩石传热规律的研究主要集中在低温对流加热和冷冲击过程之中, 而对高温热冲击过程中岩石内部的热量传递规律研究较少, 但工程中广泛存在诸如核废料放热、静态破碎剂破岩、石油开采火烧增产技术等半无限大物体经受高温热冲击时岩石内部的一维热传导问题。因此通过设置高温热冲击试验, 采用多通道数据记录仪对不同温度热冲击下花岗岩内各测点的温度进行测定, 得到花岗岩内部温度、升温速率、温度梯度、热冲击因子的变化规律, 对高温热冲击下花岗岩内部一维热传导规律进行总结, 进一步丰富岩石热物理学理论, 为工程提供借鉴和指导意义。

# 1 试验概况

## 1.1 岩样与试件制备

试验所选用花岗岩取自青海省共和县龙才沟盆地

印支晚期地层, 是共和盆地印支晚期花岗岩体在东部的出露, 试样完整无明显裂隙, 经 XDR 分析, 获得花岗岩主要成分如表 1。经前期试验测定, 所选用花岗岩宏观力学参数及物理参数如表 2。

表 1 花岗岩主要矿物成分

Table 1 Main mineral compositions of granite					
XRF 全岩分析		XRD 定量分析		矿物薄片分析	
氧化物	含量/%	矿物	含量/%	矿物	含量/%
SiO <sub>2</sub>	64.578	石英	25	石英	25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.294	斜长石	31	长石	40~45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.120	正长石	11	角闪石	10~15
MgO	2.669	黑云母	13	黑云母	10~15
CaO	6.046	透闪石	11	其他	1
Na <sub>2</sub> O	3.220	方解石	6		
K <sub>2</sub> O	4.739	绿泥石	1		
TiO <sub>2</sub>	0.549	石膏	1		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.265	其他	1		
其他	1.520				
合计	100	合计	100	合计	100

表 2 花岗岩主要力学参数及物理参数

Table 2 Main mechanical parameters and physical parameters of granite			
granite			
力学参数	平均值	物理参数	平均值
抗压强度	132.15 MPa	孔隙率	0.65%
弹性模量	14.79 GPa	密度	2.66 g/cm <sup>3</sup>
抗拉强度	10.68 MPa	比热容	1.08 kJ/(kg·K)
剪切强度	65.49 MPa	热导率	2.93 W/(m·K)
内摩擦角	27.50°		

将岩样初步制备成 200 mm×200 mm×100 mm 的立方体试块, 将试块表面打磨平整, 确保试样表面无明显缺陷。为了获得更多测点温度数据, 采用直径为 6 mm 空心玻璃钻头, 在试样两侧面按照图 1 所示打孔方案, 在 AB 两面各钻取 36 个深度为 30 mm 的测温孔, 两面测温孔在水平和垂直方向均错位分布, 并确保测温孔垂直于试件表面。

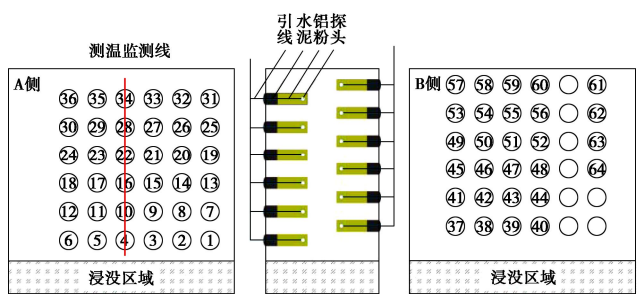


图 1 钻孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of boreholes

## 1.2 试验设备

热源设备采用 HH-S 数显恒温油浴锅 (如图 2), 可提供室温至 300℃ 的恒温热源。

换热介质采用耐高温硅油, 具有良好的化学稳定性, 闪点高, 可保证试验过程中安全、稳定。

测温设备采用 TOPRIE-TP9000 型数据记录仪(如图 2), 搭配 K 型热电偶使用, 该设备可实现 64 路测温数据同步记录并可灵活设置测温间隔, 测温精度可达 0.1℃。



图 2 数显恒温油浴锅(左)与数据记录仪(右)

Fig. 2 Digital constant temperature oil bath (left) and data recorder (right)

1.3 试验方法与步骤

针对完成钻孔的试块, 将热电偶依次连接温度记录仪并置入 64 个测试孔位中, 采用铝粉填充孔洞并捣实, 减小在测定的传热方向上因钻孔导致的试验误差, 填充完成后在表面使用耐高温水泥进行封孔处理。

在恒温油浴锅中加热适量的硅油, 设定目标试验温度, 待油温稳定后将试样放入高温硅油中, 确保硅油刚好完全浸没预设区域, 对试件进行热冲击; 同时开启温度记录仪以 1 s 间隔记录各测点在不同时刻的温度值至各测点温度稳定为止。

针对目标研究的工程问题, 根据目标温度分为 100℃, 150℃, 200℃的 3 组试验, 每组试验各采用 3 块共计 9 块不同试样进行试验, 对所得试验结果进行平均处理。其中 100℃对应核废料深地处置放热问题, 150℃及 200℃则对应静态破碎剂破岩放热及石油开采火烧油层中低温氧化问题。

2 试验结果及分析

对得到的试验数据, 以非浸没区左下角为坐标原点进行云图绘制, 选取试件中线上的#4, #10, #16, #22, #28, #34 6 个监测点进行曲线绘制。针对温度、升温速率、温度梯度, 并引入热冲击因子, 从 4 个方面对高温热冲击下花岗岩内部一维热传导过程中的传热规律进行分析。3 组试验温度下具有一致的传热规律, 故后续分析以 200℃时为例进行讨论分析。

2.1 高温热冲击过程中花岗岩内温度演变规律

图 3 为 200℃时各监测点温度变化曲线, 观察曲线可以发现花岗岩内各监测点温度变化均呈现先快速上升后缓慢增大直至稳定的现象, 结合升温速率可将整个传热过程大致分为 3 个阶段: ①快速升温阶段, 该阶段耗时最短但升温幅度最大, 整体升温速率大于 20℃/h, 局部最大升温速率可达 360℃/h, 持续时间约 1.5 h, 结束时各测点温度达到其稳定温度的 75%~

90%, 呈现明显的非稳态导热特点; ②缓慢升温阶段, 该阶段耗时较长但升温幅度较小, 升温速率为 3℃/h~20℃/h, 持续时间约 2.5 h, 由非稳态导热状态逐渐过渡到稳态导热状态; ③稳定阶段, 该阶段各测点温度基本保持不变, 进入稳态导热状态。

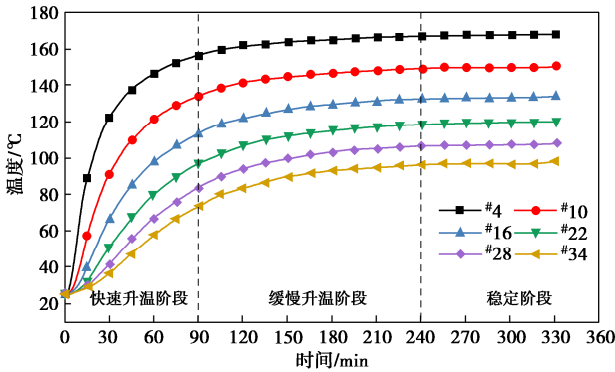


图 3 200℃热冲击过程中花岗岩内测点温度变化曲线

Fig. 3 Change curves of temperature at monitoring points in granite during thermal shock at 200℃

定义监测点到热源的垂直距离为热距离, 绘制图 4 所示不同热源温度下稳定温度随测点位置变化的曲线图, 可以发现, 在不同的冲击温度下花岗岩内的稳定温度均与热距离成反比, 且呈现良好的线性关系, 同时曲线斜率随热源温度升高而增大, 热源温度为 200℃时, 从#4 测点到#34 测点稳定温度下降约 69.9℃; 150℃时, 下降约 46.2℃; 100℃时, 下降约 23.5℃。这是由于在稳定阶段时花岗岩内部属于稳态导热状态, 由传热学<sup>[9]</sup>可知, 导热率为常数、一类边界条件下的一维稳态导热问题的解析解为式(1)所示, 各位置稳定温度与热距离成线性关系, 同时大小与两端的边界温度大小及差值有关。而试验结果严格符合此理论解析解, 也证明了试验的可行性。

$$t = \frac{t_2 - t_1}{\delta} x + t_1 \quad (1)$$

式中:  $t$  为对应  $x$  位置的温度;  $t_1$ ,  $t_2$  分别为两端的边界温度;  $\delta$  为导热面的长度。

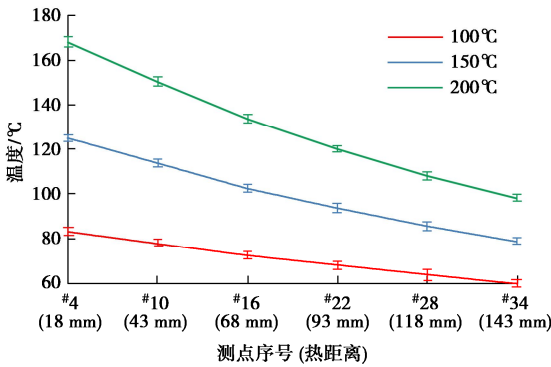


图 4 不同冲击温度下花岗岩内稳定温度随测点位置变化曲线

Fig. 4 Curves of stable temperature in granite with position of monitoring point under different heat shock temperatures



热冲击过程中空间上温度场的分布演变规律可以清晰地揭示花岗岩内部由非稳态导热向稳态导热转变过程中的热量传递规律, 在不同阶段选择典型时刻绘制图 5 所示温度分布云图, 观察云图变化可以发现, 在快速升温阶段 (0~90 min), 热量从热源处逐渐蔓延至整个试件, 等温线间的间距及数值均迅速增大; 在缓慢升温阶段 (90~240 min), 温度云图形状基本不变, 但整体呈现数值上的同步缓慢升高; 升温至稳定阶段后 (> 240 min), 温度云图形状、数值均基本保持不变。同时加热过程中花岗岩的温度分布具有整体方向性和局部紊乱性的特点, 具体表现为等温线大致分层但并不平行。整体的方向性由加热方式及花岗岩的宏观性质共同决定, 本试验采用试件底部均等对流加热的方法来模拟半无限大物体受热冲击的过程, 故热流方向整体为垂直方向, 同时在岩石尺度下花岗岩可近似看作均匀介质<sup>[18]</sup>, 所以在垂直方向上温度呈阶梯分布, 这也符合一维传热的本质; 对于局部的紊乱性, 相同的热距离的位置其温度表现并不完全相同, 且存在一定的波动, 甚至在某些位置出现尖点, 这是由于青海共和盆地花岗岩虽整体结构均匀, 但其本质上是由长石、石英、云母等晶体构成的多晶复合结构, 仍具有很强的非均质性, 在不同的位置所分布的颗粒类型及颗粒的大小形状、黏结情况也各不相同, 这便使得花岗岩内部各个位置的综合导热率呈现一个范围内的随机分布, 使其在整体呈现方向性的情况下又具有局部紊乱性的特点。

## 2.2 高温热冲击过程中花岗岩内升温速率演变规律

温度曲线对时间求导可得花岗岩在高温热冲击下的升温速率, 升温速率可以更直观地反映花岗岩内部热量传播的快慢, 可表达为

$$v = \frac{dT}{d\tau} \quad (2)$$

式中:  $v$  为升温速率;  $T$  为某时刻的温度;  $\tau$  为时间。

图 6 为热源温度为 200℃ 时各监测点升温速率随时间变化曲线。从图 6 中可以直观地看出, 无论监测点热距离大小, 其升温速率都呈现出先迅速增大后缓慢减小至稳定为零的过程。热冲击过程中花岗岩内部升温速率的变化是一个受各种因素影响的复杂过程, 其与花岗岩的热容量、热导率、热源的温度、对流传热速率均有一定的关系<sup>[9]</sup>, 同时岩石的热容量<sup>[18]</sup>、热导率<sup>[13]</sup>及与热源之间的对流传热速率<sup>[9]</sup>并不是一个恒定的值, 它会随着花岗岩内部温度的变化而动态改变。在初期, 花岗岩内部温度较低, 此时花岗岩内热容较低而热导率较大, 即热扩散率较大, 使得其可以在相同的温度梯度下可以传递较多的热量而升高单位温度需要的热量较少, 且热源之间温差较大, 具有更大的对流传热速率, 从而使得在热冲击初期花岗岩内升温速率快速增大并很快到达峰值。之后随着花岗岩内部温度的逐渐增高, 其热容量增大而热导率降低导致热扩散率逐渐减小, 同时其与热源温差的减小也导致对流传热速率逐渐降低, 所以升温速率到达峰值后便开

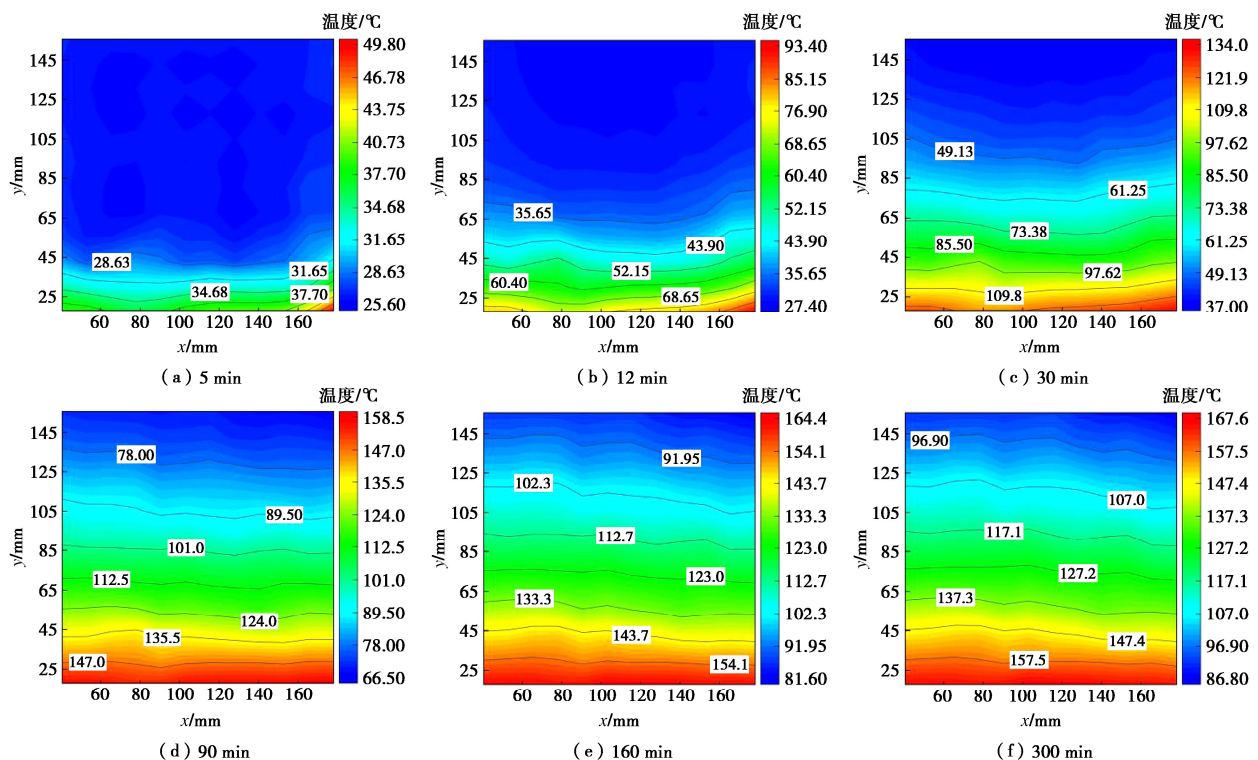


图 5 200℃热冲击过程中花岗岩内不同时刻温度分布

Fig. 5 Distribution of temperature in granite at different time during thermal shock at 200 °C

始逐渐减小最终稳定至零, 进入稳态导热状态。

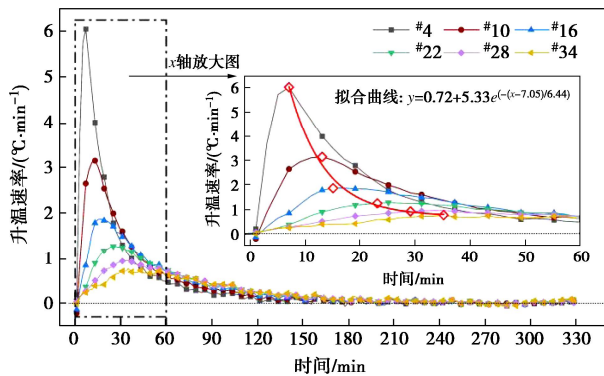


图 6 200℃热冲击过程中花岗岩内测点升温速率随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of heating rate at measuring points in granite with time during thermal shock at 200℃

图 7 表示不同热源温度下峰值升温速率及其出现时间与监测点位置之间的关系。由图 7 可知, 在不同温度热冲击下, 随着热距离增大, 峰值升温速率均呈现指数型下降规律; 同时, 当热源温度升高时, 峰值升温速率曲线更陡, 近热源点与远热源点具有更大的差值, #4 和 #34 之间的峰值升温速率差值在热源温度为 200℃时可以达到 5.28℃/min, 在 150℃时为 3.45℃/min, 而在 100℃仅为 1.68℃/min。此外, 针对不同的监测点, 随着监测点热距离增大, 相同监测点不同热源温度下的峰值升温速率差值也逐渐减小, 甚至逐渐趋向于 0, #4 监测点在热源温度为 200℃和 100℃时的差值为 4.06℃/min, 而#34 监测点在 200℃和 100℃时差值仅为 0.46℃/min。由此可见, 随着监测点热距离增大, 峰值升温速率的大小对热源温度的敏感程度逐渐降低。而不同于峰值升温速率与热源温度之间的关系, 其出现时间在不同热源温度下值大致相同, 呈现出与热源温度无关的性质, 且出现时间与热距离表现出良好的线性关系。

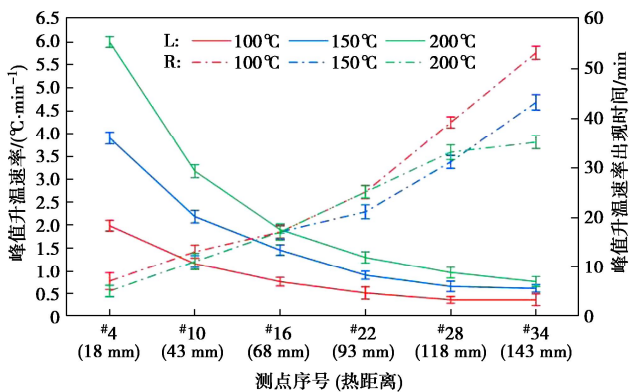


图 7 不同冲击温度下花岗岩内峰值升温速率及其出现时间随测点位置变化曲线

Fig. 7 Variation curves of peak heating rate and its occurrence time with position of the measuring point in granite under different shock temperatures

## 2.3 高温热冲击过程中花岗岩内温度梯度演变规律

由传热学<sup>[9]</sup>可知, 具有连续温度场分布的物体内部, 其单位距离内温度的变化率称作温度梯度, 是评估岩石内部温度差异的重要参数。

$$t_{\text{grad}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

式中:  $t_{\text{grad}}$  为温度梯度;  $\Delta T$  为某时刻相邻位置的温度差;  $\Delta x$  为某时刻相邻位置之间的距离。

热冲击过程中岩石的力学行为和热响应均与温度梯度有关, 由式 (4) <sup>[19]</sup>可知, 在材料一定的情况下, 温度梯度的大小可以反应岩石内热应力的大小, 因此探究温度梯度的分布对于深入理解岩石的热力学行为以及预测岩石在热冲击条件下的变形和破坏具有重要意义。

$$p = \frac{1}{2} \alpha E \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

式中:  $p$  为热应力;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $E$  为弹性模量;  $dT/dx$  为温度梯度。

选择与图 5 对应时刻绘制温度梯度云图如图 8, 温度梯度作为与空间相关的参数, 矿物成分及黏结情况的变化会导致传热效率发生改变从而使得温度梯度存在较大的差异, 因此对比图 5 可以发现, 温度梯度的分布具有更大的波动性。在前 30 min, 温度梯度整体成水平分布, 并向上发展, 仅在局部存在一定波动; 在 30 min 时花岗岩内部温度梯度差值达到最大, 最大值 1485℃/m, 最小值 105℃/m, 差值达 1380℃/m, 此时花岗岩内热应力差值最大因此更容易产生热破坏; 在 30 min 之后, 温度梯度分布开始变得紊乱, 波动性提高, 云图中出现大量尖点, 甚至在右下角出现明显的集中区域, 说明该区域花岗岩热量传播困难从而在较小的区域内产生了较大的温差, 表明在此区域可能已经发生了热破裂, 同时花岗岩内部温度梯度差值也逐步减小至稳定, 300 min 时最大值 842℃/m, 最小值 326℃/m, 差值 516℃/m, 仅为 30 min 时的 37.39%。此外, 观察各等值线的形态变化过程还可以发现, 在 0~90 min 内, 云图中等值线从聚集在试件底部逐渐蔓延至整个试件, 等值线间的距离也不断增大, 同时右下角的集中区也逐渐扩大直至稳定; 而在 90 min 后, 云图等值线形态基本不变, 仅发生一些数值上的变化直至稳定。这与 2.1 节中对快速升温阶段 (0~1.5 h) 即缓慢升温阶段 (1.5~4 h) 的划分基本吻合。

由云图可以发现, 热距离不同的区域其温度梯度变化具有一定的差异性, 且变化主要集中在 0~4 h 的快速升温 and 缓慢升温阶段, 因此对监测线上各点绘制前 4 h 温度梯度随时间变化曲线如图 9 所示。观察曲



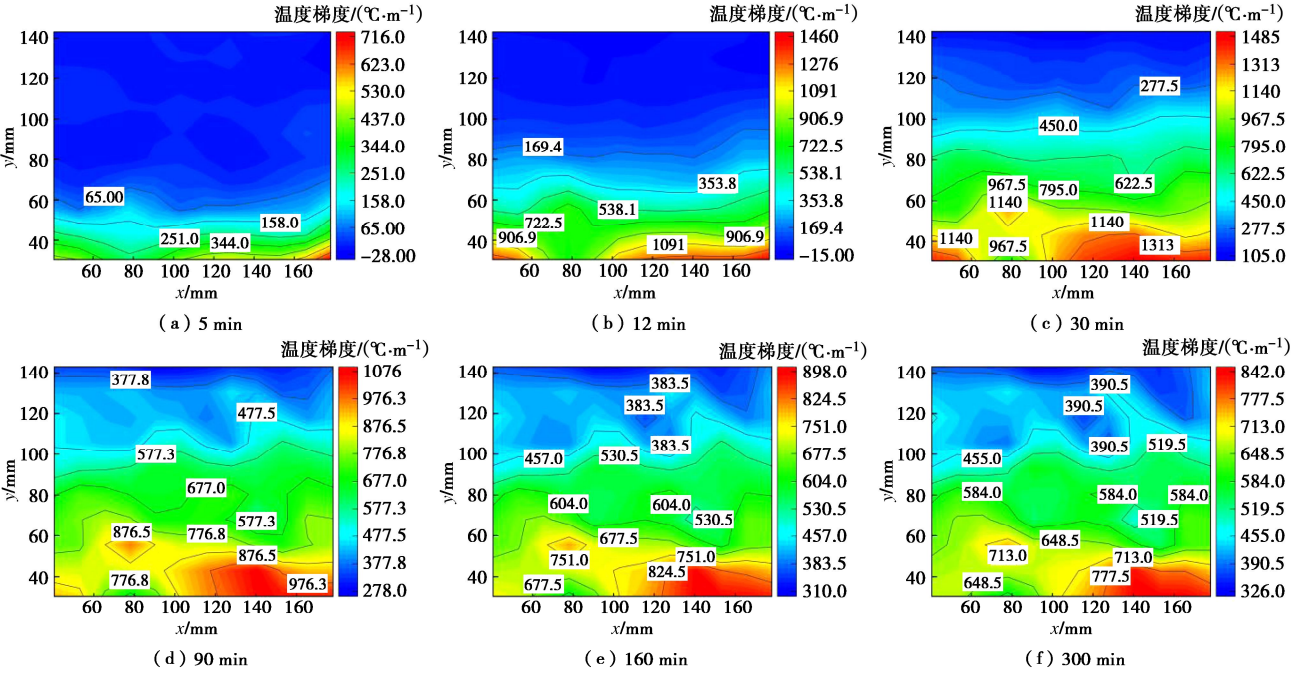


图 8 200℃热冲击下花岗岩内不同时刻温度梯度分布

Fig. 8 Distribution of temperature gradient in granite at different time during thermal shock at 200℃

线可知, 温度梯度随时间的变化整体呈现先快速增大至峰值而后逐渐减小至稳定的过程, 同时随着热距离逐渐增大, 峰值逐渐减小, 与对应稳定值的差值也逐渐减小, 甚至于热距离最大的#28 监测点已经失去了缓慢减小的过程而直接增大至稳定值。对比图 3 还可以发现, 温度梯度的快速变化过程保持在 1.5 h 以内而到达稳定的时间为 4 h 左右, 这同样与根据图 2.1 所划分的快速升温阶段(0~1.5 h)和缓慢升温阶段(1.5~4 h)基本吻合。此外, 温度梯度的变化不仅与位置有关, 不同位置温度梯度峰值出现的时间也各不相同, 热距离越大的区域其温度梯度峰值出现的时间也越晚, 这反映了温度梯度的形成不仅与区域位置有关, 同时还与时间有很大关系, 即单位时间内的温度梯度变化率不同。

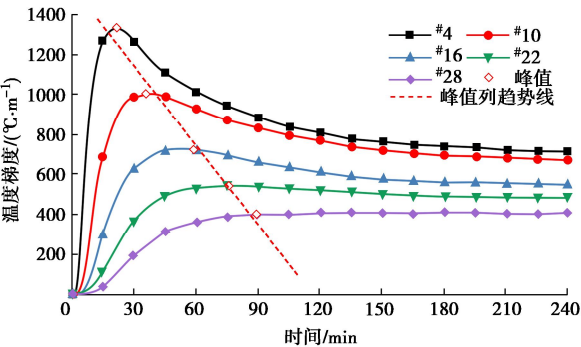


图 9 200℃热冲击过程中花岗岩内测点温度梯度随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of temperature gradient at monitoring points in granite with time during thermal shock at 200℃

2.4 高温热冲击过程中花岗岩内热冲击因子演变规律

热冲击过程中不均匀的热应力是导致岩石热破坏的重要原因, 不同的应力变化速率也会对岩石造成不同程度的热破坏。式(4)所示热应力的计算方法没有考虑时间因素, 然而热破坏往往发生在非稳态导热过程中, 与时间密切相关。研究也表明<sup>[1]</sup>, 当相同高温状态花岗岩经历不同冷却温度的热冲击时, 时间也是影响岩石破坏程度的重要因素。因此引入热冲击因子的概念<sup>[14]</sup>, 表示单位时间内任意位置温度梯度的变化率:

$$\omega = \frac{d^2T}{dx d\tau} \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为热冲击因子;  $dT/dx$  为温度梯度;  $\tau$  为时间。

通过对基于温度梯度的热应力表达式(4)进行修正, 可以得到基于热冲击因子表征的动态热应力<sup>[14]</sup>, 其物理意义为岩石内部任意一点在某一具体时刻下的动态热应力, 表达式为

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{2} \alpha E \omega \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{\tau}$  为动态热应力;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $E$  为弹性模量;  $\omega$  为热冲击因子。

由于引入了时间的影响, 热冲击因子对整个传热过程中对各个因素变化非常敏感, 外部环境或者岩体结构的微小变化均会引起热冲击因子数值的变化, 进而导致动态热应力的变化。因此研究传热过程中热冲

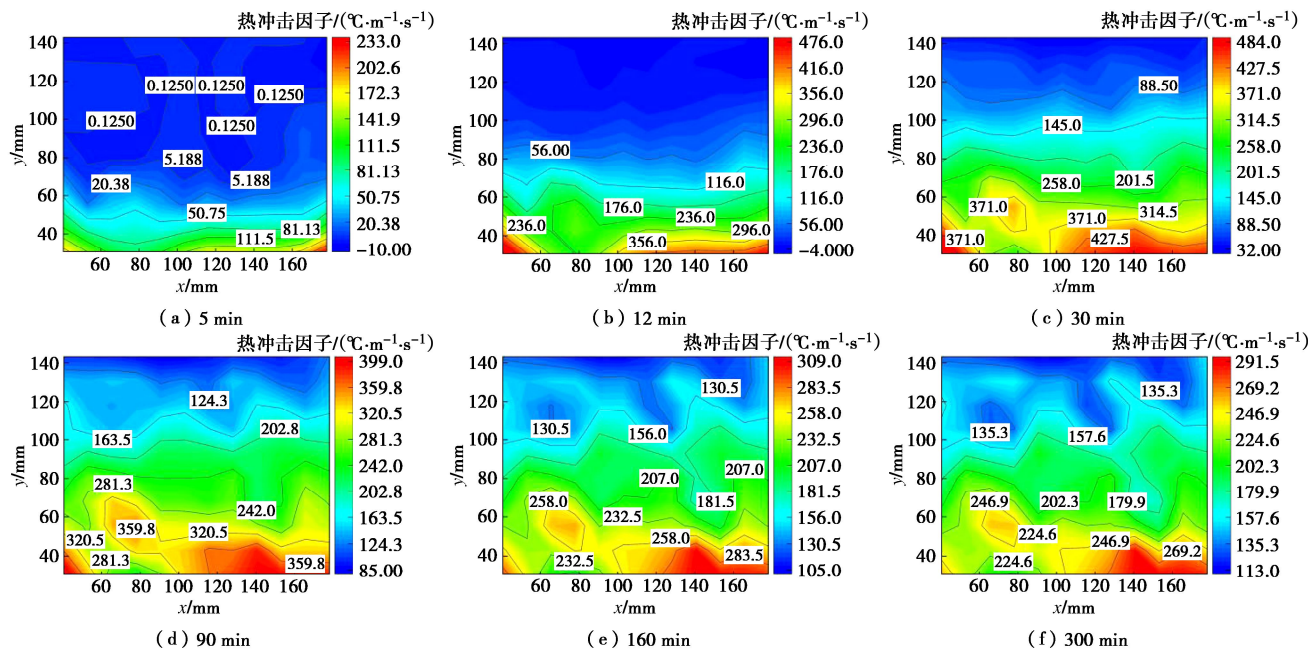


图 10 200℃热冲击下花岗岩内不同时刻热冲击因子分布

Fig. 10 Distribution of thermal shock factor in granite at different time during thermal shock at 200℃

击因子的变化对判断热在不同时刻不同位置对岩石物理力学性质的劣化作用具有重要意义。

图 10 为不同时刻花岗岩内部热冲击因子分布云图。观察云图可以发现，热冲击因子等值线在各个时刻均表现得曲折多变，存在大量尖点与交织区域，使热冲击因子分布呈现明显的非均质性特征。这是因为热冲击因子是在温度基础上考虑了时间与空间复合影响的综合参数，可以很敏感地分辨出岩石内部颗粒分布及胶结情况不同所导致的热量传递差异性。由于考虑了时间的影响，热冲击因子的变化主要表现在非稳态导热过程中，该过程中其数值与分布均发生了较大的变化；而进入稳态导热阶段后，由于温度梯度基本不再发生变化，所以其数值及分布均变化较小。此外，热冲击因子的剧烈变化也反映了动态热应力的剧烈变化，在 30 min 时，热冲击因子在花岗岩内部的分布差值达到了 452℃/(m·s)，说明此刻花岗岩内部动态热应力的分布存在巨大差异，最有可能发生热破裂。

对监测线上各测点绘制热冲击因子随时间变化曲线如图 11。观察曲线可以发现，不同位置热冲击因子变化均呈现先快速增大后缓慢减小的规律。同时观察在非稳态导热过程中各位置波峰的大小及出现位置可以发现由热冲击因子形成的波峰具有动态移动的特性：热距离越小其峰值越大出现也越早，而热距离越大其峰值越小出现也越晚，即#4 测点的波峰向#28 测点动态移动。

3 讨 论

郜保平等<sup>[14]</sup>、何水鑫等<sup>[15]</sup>研究了在 100℃以内以

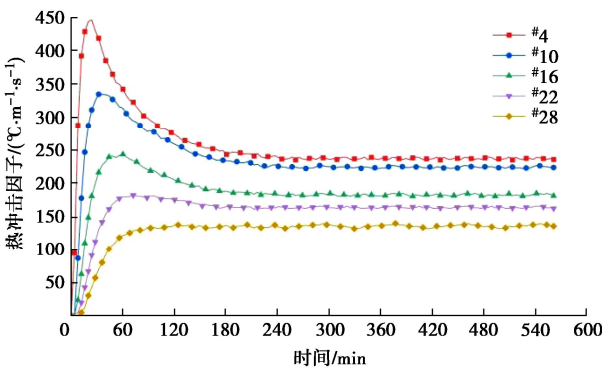


图 11 200℃热冲击过程中花岗岩内测点热冲击因子随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of thermal shock factor at monitoring points in granite with time during thermal shock at 200℃

水作为热源介质时对花岗岩进行热冲击下的一维传热规律，由于水在 100℃时会沸腾，运动状态改变的同时会产生大量水蒸气，且由传热学<sup>[9]</sup>可知，水在沸腾状态时其相变潜热的释放以及气泡的形成与剥离过程均会对传热过程产生较大的影响。而硅油的沸点通常在 300℃以上，因此在 100℃时仍非常稳定，没有沸腾也没有烟气产生。因此对比花岗岩试件在 100℃水和硅油中的传热规律，可以揭示相同温度下流体相态变化对热冲击过程的影响。

高温热冲击过程中，热量从高温热源传递到花岗岩表面，其换热量可由牛顿冷却公式<sup>[9]</sup>计算得到

$$Q = hSt(T_s - T_w) \quad (7)$$

式中： $Q$ 为对流换热的热量； $h$ 为对流换热系数； $S$ 为接触面积； $T_s$ 为热源介质温度； $T_w$ 为花岗岩与热源接触部分温度。



图 12 为花岗岩在两种不同热源介质热冲击过程中监测点的升温曲线。明显可以发现, 当热源介质为  $100^{\circ}\text{C}$  水时, 各监测点会更早进入稳定阶段, 同时各监测点所能达到的稳定温度也更高, 而且整个过程中几乎没有缓慢升温阶段, 从快速升温阶段很快便过渡到稳定阶段。结合图 13 分析, 热源介质为水时, 相同位置的监测点具有更大的升温速率, 峰值状态下的升温速率可达硅油作为热源介质时的两倍, 而峰值升温速率出现的时间却基本一致, 因此在  $100^{\circ}\text{C}$  水作为热源介质时各监测点可以更早进入稳定阶段。由式 (7) 可知, 在对流换热中, 当换热面积、换热时间及温差均相同时, 对流换热系数是影响换热量的主导因素; 而水在沸腾状态下时由于其相变潜热的释放以及运动程度的增加, 使得其对流换热系数可达  $2500\sim 35000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 而油类的自然对流换热系数仅为  $50\sim 1500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; 因此在温度相同的情况下, 沸水相对于硅油在相同接触面积下可以为花岗岩提供更多的热量; 同时由于水沸腾会产生大量的水蒸气, 而蒸汽相对于液态水和硅油更容易因为花岗岩内部的毛细压力而沿着孔隙向上攀升, 从而在花岗岩内部构建更加高效的

导热通道。因此在沸水作为热源介质时, 花岗岩内部稳定温度更高且更早地到达稳定状态。图 14 为花岗岩在两种不同热源介质热冲击过程中内部监测点温度梯度变化曲线。可以发现, 沸水相对于硅油作为热源时, 相同位置温度梯度在非稳态导热阶段具有更大峰值及更早的出现时间, 而在稳态导热阶段值则较小。温度梯度的大小可以反映岩石内部温度分布的不均匀程度, 因此, 在非稳态导热阶段, 沸水作为热源时花岗岩内部温度分布更不均匀, 而到达稳态导热阶段时, 其内部温度却相对更加均匀, 说明在稳定阶段花岗岩内部各点温度要更加接近, 试件整体所能达到的温度更高。

热源介质不同而温度相同时,  $100^{\circ}\text{C}$  水与硅油热冲击下的花岗岩内部, 无论是温度曲线、升温速率曲线还是温度梯度曲线均呈现出了整体相同变化趋势, 而各节点值的不同反映了不同介质之间的差异。同时, 由于水在沸腾状态下高温气泡出现位置的随机性所导致的对流换热的不稳定性, 使得沸水在作为热源介质时, 各参数曲线在到达稳定阶段时, 并不能保持相对光滑的形态, 而是呈现一个整体稳定而局部波动的形态。

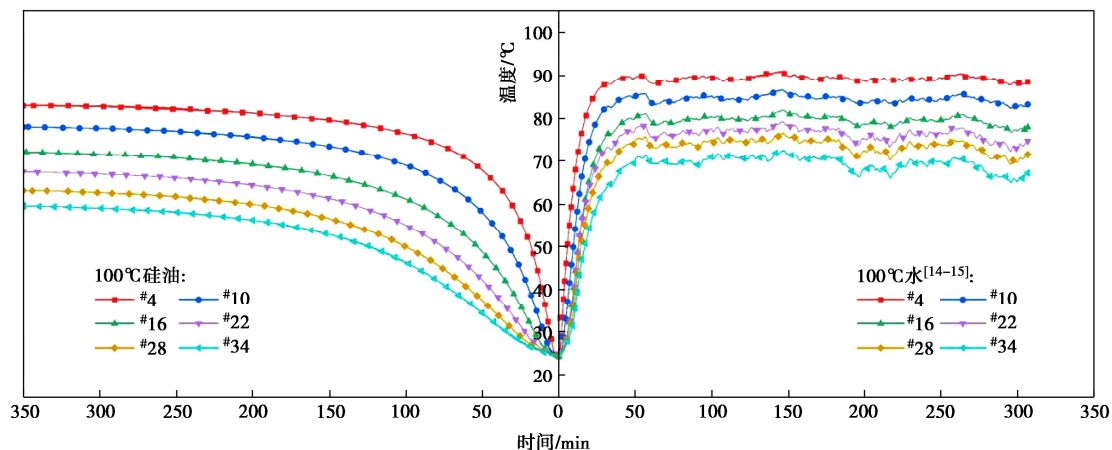


图 12  $100^{\circ}\text{C}$  时不同介质热冲击过程中花岗岩内测点温度变化曲线

Fig. 12 Change curves of temperature at monitoring points in granite during thermal shock of different media at  $100^{\circ}\text{C}$

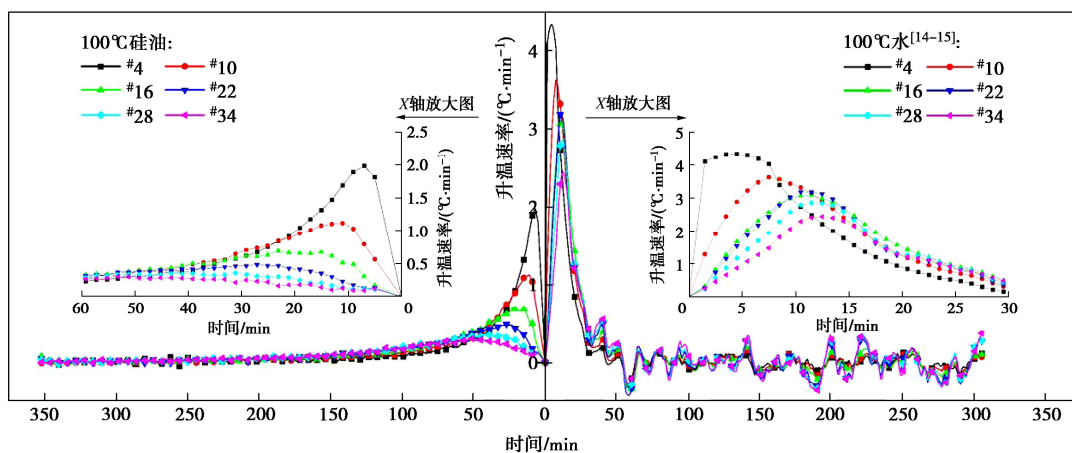


图 13  $100^{\circ}\text{C}$  时不同介质热冲击过程中花岗岩内测点升温速率变化曲线

Fig. 13 Curves of heating rate at monitoring points in granite during thermal shock of different media at  $100^{\circ}\text{C}$



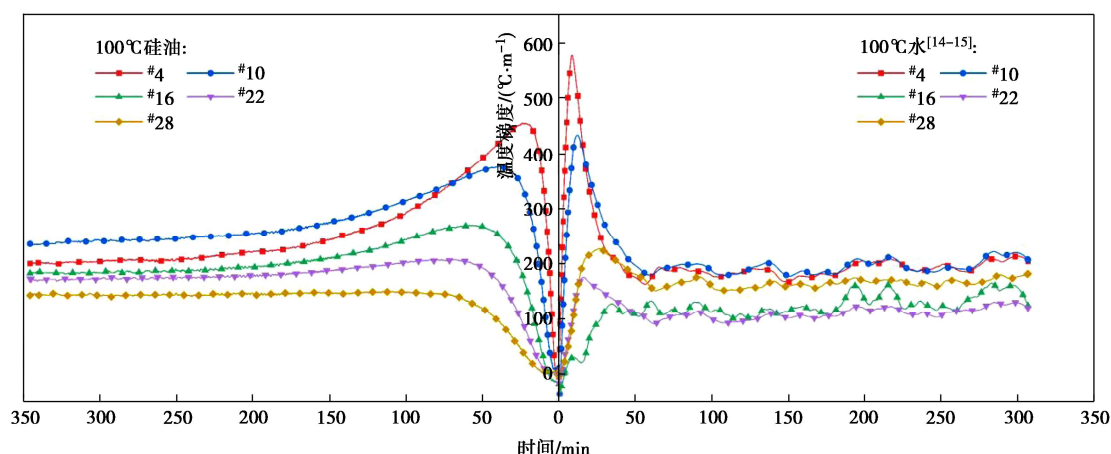


图 14 100℃时不同介质热冲击过程中花岗岩内测点温度梯度变化曲线

Fig. 14 Curves of temperature gradient at monitoring points in granite during thermal shock of different media at 100℃

4 结 论

通过对花岗岩进行高温热冲击试验，分析其内部一维热传导规律，主要得到以下 5 点结论。

(1) 花岗岩在高温热冲击过程中内部温度变化大致可分为快速升温阶段、缓慢升温阶段和稳定阶段。传热过程中花岗岩内部温度场呈现整体的方向性和局部紊乱性。

(2) 高温热冲击下花岗岩内各测点升温速率呈现先快速增大后缓慢减小至零的规律，同时峰值升温速率随监测点与热源之间的距离逐渐增大而呈指数型下降规律。

(3) 根据岩石内热应力形成的机理及各组分的随机性，温度梯度一定程度上可以反映热应力的大小和各向异性的程度。热冲击过程中温度梯度分布具有更大的紊乱性。

(4) 热冲击因子可以定量表征热对岩石的破坏强度。高温热冲击过程中花岗岩内部热冲击因子呈现很强的非均质性，同时监测点波峰具有动态移动性。

(5) 100℃下水相对于硅油对花岗岩进行热冲击时具有更高的换热效率，同时花岗岩内部的温度、升温速率、温度梯度均具有更大的峰值且更早进入稳定阶段，但其随时间的变化趋势与硅油作为热源介质时具有相似性。

参考文献：

[1] 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 Baoping, WU Yangchun, ZHAO Yangsheng. 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))

[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 Yangsheng, WAN Zhijun, KANG Jianrong. Introduction to Geothermal Development of High Temperature Rock Mass[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))

[3] 周祥运, 孙德安, 罗汀. 核废料处置库近场温度半解析研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(增刊 1): 246-254. (ZHOU Xiangyun, SUN Dean, LUO Ting. Semi-analytical solution of near-field temperature in nuclear waste disposal repository[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(S1): 246-254. (in Chinese))

[4] 胡晓东. 高温射流作用下花岗岩破碎机制与参数研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019. (HU Xiaodong. Investigation on Mechanism and Parameters of Granite Breakage with Hydrothermal Jet[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019. (in Chinese))

[5] 胡政, 郭维祥, 王平易, 等. 高地温隧道地温特征及预测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, **17**(6): 1906-1915. (HU Zheng, GUO Weixiang, WANG Pingyi, et al. Study on ground temperature characteristics and prediction of high ground temperature tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, **17**(6): 1906-1915. (in Chinese))

[6] 董赞盛, 邵保平, 何水鑫, 等. 石灰岩热冲击破裂二维分形参数演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(增刊 1): 2823-2833. (DONG Yunsheng, XI Baoping, HE Shuixin, et al. Study on evolution law of two-dimensional fractal parameters of thermal shock fracture of limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022,

- 41(S1): 2823-2833. (in Chinese))
- [7] 黄中伟, 温海涛, 武晓光, 等. 液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, **43**(2): 68-76. (HUANG Zhongwei, WEN Haitao, WU Xiaoguang, et al. Experimental study on cracking of high temperature granite using liquid nitrogen[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, **43**(2): 68-76. (in Chinese))
- [8] LI Z W, ZHANG Y J, GONG Y H, et al. Influences of mechanical damage and water saturation on the distributed thermal conductivity of granite[J]. Geothermics, 2020, **83**: 101736: 1-14.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [10] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(3): 303-315.
- [11] LI D Y, WANG R Z, WANG X R, et al. Simulation of the thermal shock cracking behaviors of ceramics under water quenching for 3-dimension conditions[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2020, **84**: 104080.
- [12] SUN Q, ZHANG W Q, ZHU Y M, et al. Effect of high temperatures on the thermal properties of granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**(8): 2691-2699.
- [13] 郭 政, 赵星光, 李鹏飞, 等. 热处理北山花岗岩热传导特性研究[J]. 长江科学院院报, 2018, **35**(3): 45-51, 58. (GUO Zheng, ZHAO Xingguang, LI Pengfei, et al. Thermal conductivity characteristics of Beishan granite after thermal treatment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, **35**(3): 45-51, 58. (in Chinese))
- [14] 邵保平, 何水鑫, 成泽鹏, 等. 传导加热下花岗岩中热冲击因子试验测定与演变规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(7): 1356-1368. (XI Baoping, HE Shuixin, CHENG Zepeng, et al. Thermal shock factor measurement and its evolution in granite under conduction heating[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(7): 1356-1368. (in Chinese))
- [15] 何水鑫, 邵保平, 成泽鹏, 等. 花岗岩热冲击前后导热性能与特征对比试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, **41**(5): 87-95. (HE Shuixin, XI Baoping, CHENG Zepeng, et al. Comparative experimental study on thermal conductivity and characteristics of granite before and after thermal shock[J]. Mining Research and Development, 2021, **41**(5): 87-95. (in Chinese))
- [16] 曹 钰, 邵保平, 赵璐敏, 等. 液氮深冷冲击作用下岩石传热规律试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2022, **53**(6): 1014-1023. (CAO Yu, XI Baoping, ZHAO Lumin, et al. Experimental study on rock heat transfer under cryogenic impact of liquid nitrogen[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, **53**(6): 1014-1023. (in Chinese))
- [17] ZHAO Z R, HU Y Q, JIN P H, et al. Experimental study on the physico-mechanical properties and temperature field evolution of granite subjected to different heating-cooling treatments[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, **80**(11): 8745-8763.
- [18] 陈 颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. (CHEN Yongyu, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock Physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. (in Chinese))
- [19] 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: 1-15.