



# 基于热红外响应的岩体传热分析与裂隙尺寸识别

吴艺凡<sup>1</sup>, 包 含<sup>1</sup>, 吕洪涛<sup>1</sup>, 兰恒星<sup>2,3</sup>, 李 黎<sup>4</sup>, 陈卫昌<sup>4</sup>, 晏长根<sup>1</sup>

1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;  
3. 中国科学院 地理科学与资源研究所/资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;  
4. 中国文化遗产研究院, 北京 100029

**摘要** 岩体出露裂隙的尺寸是评价岩体稳定性的重要指标。以含出露裂隙岩体为研究对象, 通过室内试验分析裂隙尺寸对岩体温度场的影响, 给出了划分裂隙边界的依据, 基于一维传热理论推导了以岩体温度场、时间与裂隙深度为变量的公式, 通过误差计算确定裂隙深度计算公式的适用范围。结果表明: 通过辐射热激励的方式加热出露裂隙的岩体表面后, 裂隙的隙宽和深度与红外图像中裂隙区域的最低温度相关性显著, 且深度为主要影响因素, 隙宽的影响系数不足深度影响系数的 0.1 倍; 裂隙出露面积的识别误差可以控制在 10% 左右, 随着隙宽的加宽, 识别误差逐渐减小, 最小值仅为 0.2%; 理论公式计算裂隙深度的误差随着加热时间的增加而减少, 30 min 的加热时长可保证深度 40 mm 以内的裂隙深度计算误差小于 20%, 增加加热时长至 60 min 可使 50 mm 深度裂隙的计算误差从 24.8% 降低至 6.8%。综上, 利用红外热成像技术探测出露裂隙的出露面积与深度具有较高的可行性, 对于难以开展接触测量的岩体工程具有重要的应用价值。

**关键词** 岩体裂隙; 裂隙深度; 传热分析; 红外热成像; 无损探测

**中图分类号:** P642.3; TU45 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-02-011

## Heat transfer analysis and fracture size identification of rock mass based on thermal infrared response

WU Yifan<sup>1</sup>, BAO Han<sup>1</sup>, LYU Hongtao<sup>1</sup>, LAN Hengxing<sup>2,3</sup>, LI Li<sup>4</sup>,  
CHEN Weichang<sup>4</sup>, YAN Changgen<sup>1</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. China Academy of Cultural Heritage, Beijing 100029, China

**Abstract** The size of exposed fractures in rock masses are critical indicators for evaluating rock mass stability. This study focuses on rock masses with exposed fractures, analyzing the impact of fracture size on the rock

收稿日期: 2025-12-20 修回日期: 2026-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(42577232); 全国考古人才振兴计划(2024-275); 中国文化遗产研究院开放课题(2025KF04)。

第一作者: 吴艺凡, 男, 硕士研究生, 从事石窟寺结构探测研究, 2144058756@qq.com。

通信作者: 包含, 男, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程与地质工程研究, baohangeo@163.com。

mass temperature field through laboratory experiments. Criteria for defining fracture boundaries are established, and a formula is derived based on one-dimensional heat transfer theory, using rock mass temperature field, time, and fracture depth as variables. The applicability of the fracture depth calculation formula is determined through error analysis. The results indicate that after heating the surface of exposed fractures using radiative thermal excitation, a significant correlation exists between the fracture width, depth, and the minimum temperature of the fracture area in infrared images. Depth is the primary influencing factor, with the influence coefficient of fracture width being less than 0.1 times that of depth. The identification error for the exposed fracture area can be controlled within approximately 10%. As fracture width increases, the identification error gradually decreases, with the minimum error as low as 0.2%. The error in theoretical formula-based fracture depth calculation decreases with prolonged heating time. Heating for 30 minutes ensures a calculation error of less than 20% for fractures with depths within 40 mm. Extending the heating time to 60 minutes reduces the calculation error for 50 mm depth fractures from 24.8% to 6.8%. In summary, using infrared thermal imaging technology to detect the exposed area and depth of fractures shows high feasibility and holds significant application value for rock mass engineering where contact measurements are challenging.

**Keywords** crack of rock mass; fracture depth; heat transfer analysis; infrared thermal imaging; non-destructive detection

石窟是承载历史文化的重要遗产,但由于长期受到自然环境和人为因素的影响,岩体表面发育了多种类型的宏细观裂隙,这种裂隙对石窟岩体的宏观力学性能起着关键控制作用<sup>[1]</sup>。尤其在石窟的顶板部位,交叉的裂隙削弱了岩体的整体力学性能,极易引发岩体开裂、掉块、坍塌等灾害<sup>[2-3]</sup>。因此,有必要对岩石裂隙的几何特征开展识别,为石窟的科学保护与加固提供理论支撑。

由于石窟特殊的文化价值,在开展裂隙调查与检测时应尽量避免人为扰动窟体,因此学者们常使用无损检测手段开展研究,如应用三维激光扫描<sup>[4-5]</sup>、数字摄影<sup>[6-7]</sup>和探地雷达<sup>[8-9]</sup>等方法获取岩体裂隙的倾向、倾角、迹长与分布情况等信息。相较传统方法,无损检测手段在信息获取的全面性、数字化与客观性方面优势明显,已在岩体结构探测领域得到广泛应用<sup>[10]</sup>。但大多裂隙岩体的失稳破坏最终是由岩体裂隙的伸展和收敛引起的<sup>[11]</sup>,以上方法难以获取裂隙的深度信息。

红外热成像技术同样作为一种无损检测手段,因其非接触、高精度、高效率等优点广泛应用于文物保护中<sup>[12]</sup>。当通过热辐射的形式向出露裂隙岩体传输热量时,岩体表面可吸收大部分热量而导致表面温度升高,裂隙吸收的热量值远少于表面吸收的热量,因而在热红外图像中表现出异常低温,这种差异对于大尺度的裂隙会更加显著<sup>[13-14]</sup>,然而这种温度差异与裂隙尺寸的增加并非线性相关。岩体的温度场还受到岩石的热导

率、比热容、表面吸收率与热分散性的影响<sup>[15]</sup>,对于地理位置不同的石窟,这些参数不尽相同,导致其温度场存在差异,影响反演裂隙尺寸的精度,因此依据岩性、孔隙与组分等因素建立更加准确的温度场计算模型是今后重要的研究方向<sup>[16]</sup>。

目前热红外技术在裂隙探测<sup>[17-18]</sup>、空鼓检测<sup>[19-20]</sup>、岩体裂纹扩展分析<sup>[21-22]</sup>与岩体片状剥离检测<sup>[23-24]</sup>等方面已经取得了许多成果,由此可见,红外热成像技术在岩体裂隙尺寸探测方面具有良好的应用价值。但以往大部分的研究工作倾向于对含裂隙岩体的损伤状态进行定性的描述<sup>[25]</sup>,对于单个出露裂隙尺寸的获取方法研究较少,对岩体裂隙传热理论的研究存在不足,且工程探测缺乏与理论的联系,不利于此类技术在工程中的进一步实际应用。

综上所述,现有的非接触探测手段多样,成果较为丰富,但如何获取出露裂隙的尺寸信息仍需开展更多的研究。本文将依据温度划分裂隙边界,分析裂隙的迹长、隙宽与深度变化对捕获的热红外图像的影响,并基于传热理论开展分析,确定边界条件并推导以含裂隙岩体的温度、热激励时间与裂隙深度为变量的理论公式,应用红外热成像技术开展室内试验的结果对边界划分依据与温度场公式进行验证,通过误差计算确定裂隙深度计算公式的适用范围。

# 1 室内模型试验

## 1.1 试样制备

在材料选取时,现有可浇筑成型的岩石类材料各具优缺点,级配良好的混凝土在密度、比热容等方面与砂岩相似,但由于骨料与水泥的导热性质存在差异,极易产生不均匀的热传导,而石膏试样含水率较高,在热传导过程中温度的上升易导致水汽的相变。为真实还原砂岩的传热过程,减少不均匀传热与相变造成的误差,反应裂隙对温度场的影响,本试验采用硅酸盐水泥进行预制裂隙试块的浇筑,虽硅酸盐水泥试块与砂岩在热参数上存在差异,但可以通过修改理论公式中对应的热参数以达到类似温度场的效果。石窟寺风化裂隙如图 1 所示,据石窟现场调研,石窟表层的风化裂隙隙宽约为 1~5 mm,深度约为 1~5 cm,迹长约为 2~10 cm,本试验将以此类风化裂隙作为研究对象开展分析。

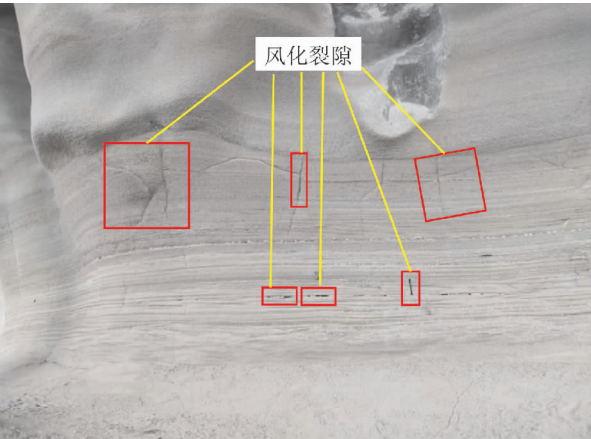


图 1 石窟寺风化裂隙

Fig. 1 Weathered fissures in the cave temple

试块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,水泥强度等级为 32.5,将制作的裂隙片插入未凝固的水泥浆中,并将裂隙片与模具相固定,轻微震动整平水泥浆表面,待其完全凝固后将裂隙片缓慢拔出,拔出后的缝隙用以模拟不同迹长、隙宽、间距的出露型裂隙。试块裂隙的迹长、隙宽和深度分别设置 5 个水平,采用 Box-Behnken 设计对迹长、隙宽、深度 3 个因素与 1、3、5 三个水平和 2、3、4 三个水平分别进行组合,共浇筑带裂隙水泥试块 26 块与完整水泥试块 1 块,试块编号与裂隙尺寸见表 1。

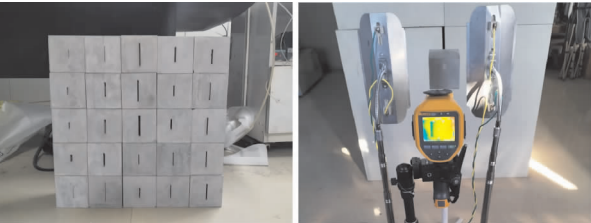
表 1 试块编号与裂隙尺寸

Tab. 1 Specimen identification and fracture dimensions

| 试块<br>编号 | 裂隙迹长(mm)×<br>隙宽(mm)×<br>深度(mm) | 试块<br>编号 | 裂隙迹长(mm)×<br>隙宽(mm)×<br>深度(mm) |
|----------|--------------------------------|----------|--------------------------------|
| 1        | 20×1×30                        | 14       | 30×2×30                        |
| 2        | 20×3×10                        | 15       | 30×3×20                        |
| 3        | 20×3×50                        | 16       | 30×3×40                        |
| 4        | 20×5×30                        | 17       | 30×4×30                        |
| 5        | 40×1×10                        | 18       | 40×2×20                        |
| 6        | 40×1×50                        | 19       | 40×2×40                        |
| 7        | 40×3×30                        | 20       | 40×4×20                        |
| 8        | 40×5×10                        | 21       | 40×4×40                        |
| 9        | 40×5×50                        | 22       | 50×2×30                        |
| 10       | 60×1×30                        | 23       | 50×3×20                        |
| 11       | 60×3×10                        | 24       | 50×3×40                        |
| 12       | 60×3×50                        | 25       | 50×4×30                        |
| 13       | 60×5×30                        | 26       | 60×3×30                        |

## 1.2 试验方法

红外试验系统主要包括多个三脚架、2 个功率为 1 000 W 的碘钨灯、红外热像仪、计算机、含裂隙水泥试块〔见图 2(a)〕等。2 个平行放置的碘钨灯作为辐射热激励源,将试块带有出露裂隙的一面正对碘钨灯进行加热,碘钨灯加热中心点、试块带裂隙表面中心点与热红外仪拍摄中点保持同一水平面上,各部件位置如图 2(b)所示。试块距离 2 个碘钨灯中点距离约为 30 cm,该距离下试样表面的热流密度为 1 300 W·m<sup>-2</sup>,设置加热时长为 30 min。在碘钨灯中间靠后位置架设 Fluke Ti480 Pro 型红外热像仪捕捉岩体出露裂隙面的红外图像,该型号红外热像仪分辨率为 640×480 pixel,当探测温度在 20℃左右时,热灵敏度为 0.05℃。



(a)含裂隙水泥试块 (b)热红外成像探测系统

图 2 试验材料与方法

Fig. 2 Experimental materials and methods

采集含有不同尺寸出露裂隙的试块在 30 min 连续升温条件下的热红外图像,采集间隔设置为 1 min,采集完成后使用 SmartView 图像处理软件提取温度数据。本试验过程中的环境温度范围为 18 ~ 22 ℃,环境湿度约为 35 %。

称量每个试块的质量计算其密度,使用 ISOMET 便携式热特性分析仪与 IPS 1100/0.3-2.0 表面式探头在试块表面多次探测,对获取试块的导热系数、比热容与热扩散率取平均作为试块的热参数,该型号的探测仪误差约为读数的 5%。由于制样过程中的不确定因素,试块裂隙尺寸与设计尺寸存在差异,因此在制样完成后采集了各试块的真实尺寸,裂隙深度真实值与制样深

度约有 1 mm 左右的误差,迹长和隙宽则与设计值相差不大。

1.3 试验数据分析

热激励过程中,试块的热红外图像如图 3 所示。在辐射热激励开始前,红外热像仪捕捉的裂隙与表面完整的温度值基本相同,随着热激励的进行,试块表面完整处快速升温且整体呈现出红白色,裂隙处温度升高较为缓慢,表现出明显的低温并呈现出蓝黑色,在裂隙边界处温度最高呈现出白色,且与裂隙区域温差极大。因此可以利用温度划分裂隙边界,并利用升温速率的不同计算裂隙的深度。试块的热物理参数见表 2。

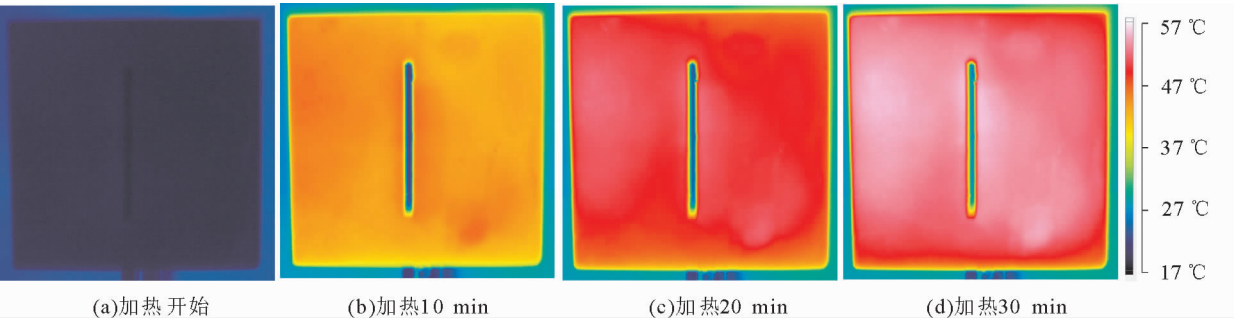


图 3 加热过程中试块热红外探测图像

Fig. 3 Thermal infrared detection image of the test block during heating

表 2 试块物理参数

Tab. 2 Physical parameters of samples

| 材料 | 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 导热系数/[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ] | 比热容/[ $\text{J} \cdot (\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ] | 热扩散率/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 水泥 | 1 710                                  | 0.532 0                                                        | 796. 6                                                         | $3.905 \times 10^{-7}$                    |

为真实反应裂隙尺寸对传热规律的影响,在试块表面划出平行迹长方向与垂直迹长方向且均经过裂隙中点的 2 条测线,提取测线上每个测点的温度值,选取 26 号试块(裂隙迹长、隙宽与深度为 60 mm × 3 mm × 30 mm)所有测点温度作为空白组,选取 7 号试块(不同迹长)、12 号试块(不同深度)与 13 号试块(不同隙宽)所有测点温度作为对照组,对比裂隙迹长、隙宽和深度对测点温度值的影响,结果如图 4 ~ 5 所示。

由图 4 可知,在平行迹长方向上所有测点的温度随着加热时间的增加而不断升高,处于裂隙内部的测点温度较为均匀,且明显低于试块表面处温度。对比图 4(a)与图 4(b) ~ (d),当迹长与隙宽改变时,裂隙内部测点温度变化不大,裂隙迹长的改变主要控制了低温测点的数量,而隙宽越

宽,测线温度越均匀,当裂隙的深度增加时,裂隙内部测点温度显著降低,随着加热时长的增加,测点的温度差不断增大,在经过 30 min 加热后,2 个试块裂隙内部测点温度的差值可达到 5 ℃。

图 5 清楚地显示了不同试块垂直迹长方向测点的温度值,可以发现,测线的温度图呈现出“U”型分布。这是由于红外热像仪在正对裂隙进行拍摄时,捕捉到了裂隙内部侧壁的温度,该测线上的最低温则是可观测到的裂隙最深处的温度。对比图 5(a)与图 5(b) ~ (d),裂隙迹长的改变基本不影响该测线的温度特征,增加隙宽则会增加裂隙底部低温测点与侧壁温度测点的数量,与平行测线相同,裂隙深度的增加会导致裂隙内部测点与岩体表面测点的温差增大。

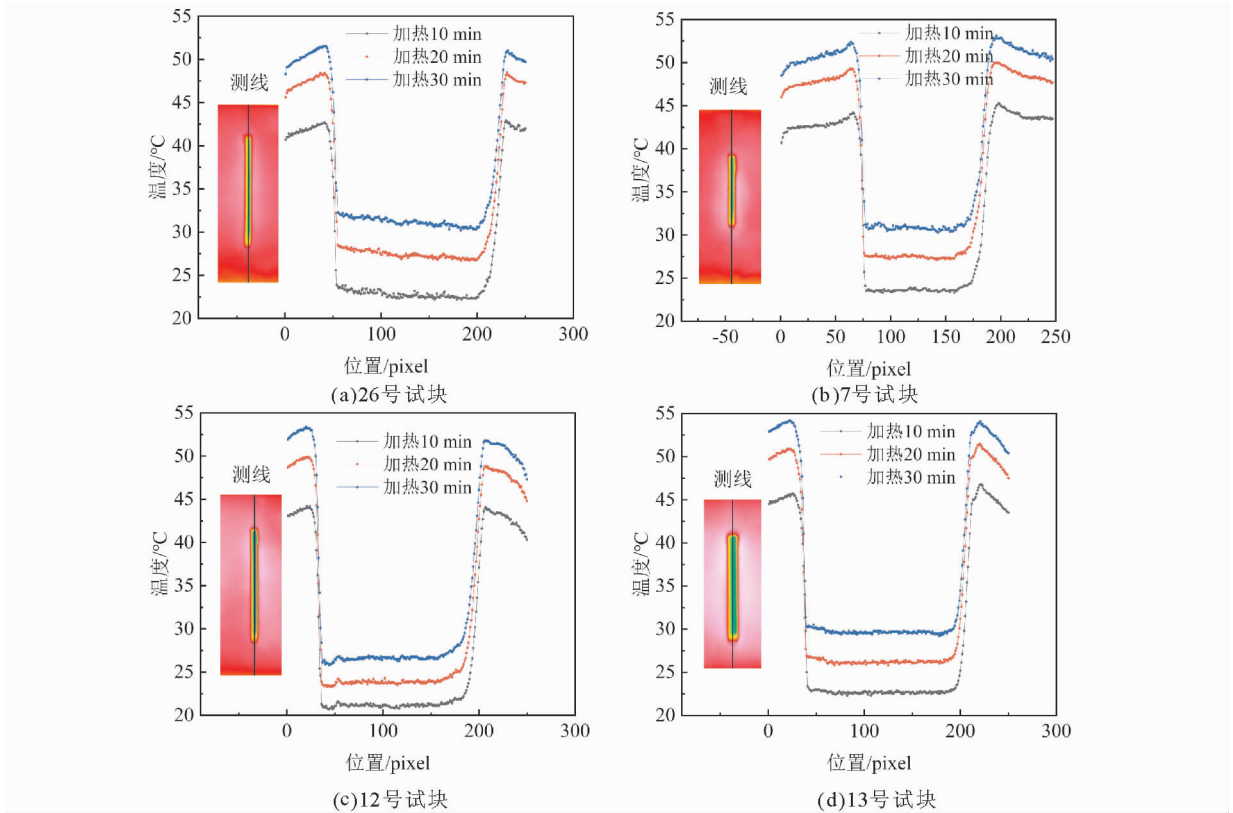


图 4 不同试块平行迹长方向测线温度

Fig. 4 Temperature along measurement lines in the parallel trace length direction of different specimens

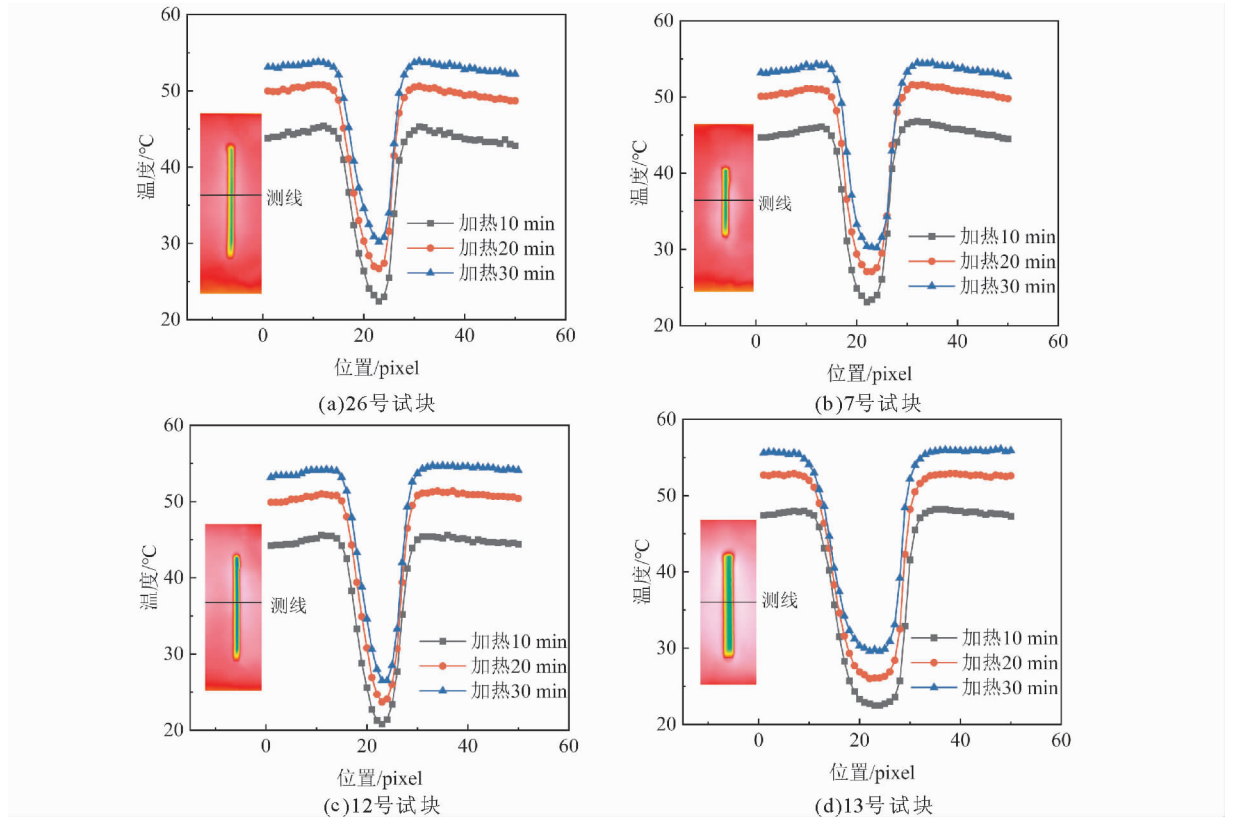


图 5 不同试块垂直迹长方向测线温度

Fig. 5 Temperature along measurement lines in the perpendicular trace length direction of different specimens

在裂隙隙宽等于 1 mm 时,温度特征与以上试块差距较大,这是由于红外热像仪的图片分辨率较小,当试块距离摄像仪镜头 30 cm 时,每个像素块对应试块表面约 0.3 mm×0.3 mm 的面积,在 1 mm 的范围内,热像仪仅能捕获 3 块像素块,且像素块中含有裂隙内表面侧壁的温度信息,获取的裂隙最低温度远高于裂隙底部温度,因此,在后续的分析中去除 1 号、5 号、6 号、10 号试块的数据,以保证分析结果准确。

提取试块每张红外图像中裂隙左右 2 侧距离

裂隙边界约 1 cm 处的 5 mm×5 mm 矩形温度矩阵,将矩阵中所有温度值的平均作为该时刻的岩体表面平均温度,并统计裂隙区域的最低温度作为该时刻的裂隙最低温度,绘制岩体表面平均温度与裂隙最低温度随时间变化的图像(见图 6)。可以观测到在热流密度相差不大的情况下,相同时刻岩体表面平均温度基本相同,裂隙区域最低温度随着裂隙深度的增加呈现出非线性降低的趋势,温度降低的幅度随着深度的增大而减少。

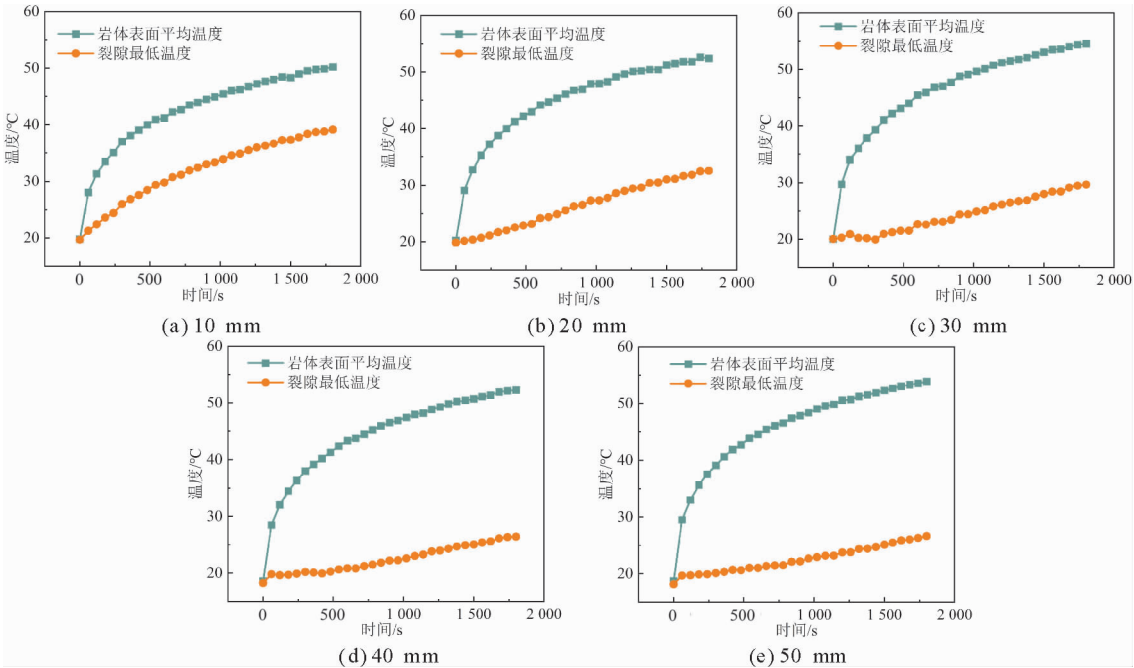


图 6 不同深度裂隙试块升温曲线  
Fig. 6 Heating curves of fractured specimens at different depths

统计热激励 30 min 时各试块的裂隙最低温度,为消除加热各试块时热流密度差异带来的温度误差,将裂隙处最低温度与试块表面的平均温度值的比值作为温度比值,应用响应面法观测迹长、隙宽、深度与最低温比值间的关系,并绘制交互作用对温度比值的影响图(见图 7)。由图 7 可

知,温度比值受到深度的影响最大,在显著性分析中,迹长与温度比值的显著性差异值( $p$  值)大于 0.05,即认为迹长与温度比值的关系不显著,隙宽与深度的  $p$  值分别为 0.029 1 与 0.000 1,线性拟合中隙宽与深度的计算系数分别为 -0.008 与 -0.097。

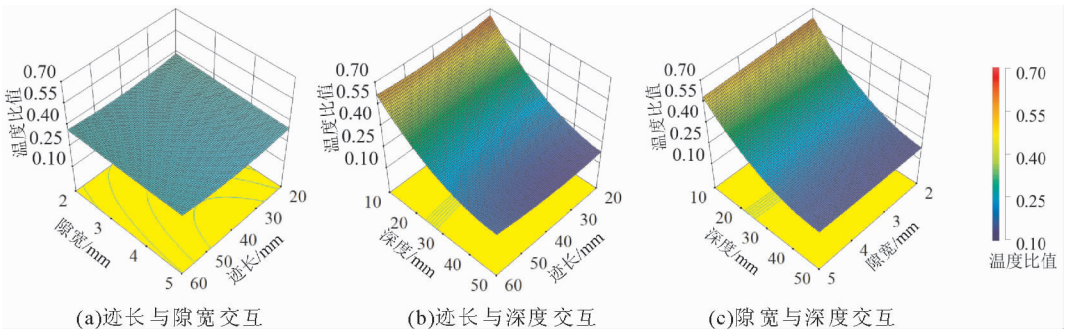


图 7 温度比值影响因素的响应面图  
Fig. 7 Response surface plot of factors influencing temperature ratio

由此可见,裂隙的迹长与隙宽会影响获取图像温度的质量,迹长与隙宽越大,获取的测点温度更为准确,裂隙区域温度值主要受到裂隙的深度与迹长的影响,具体表现为相同加热条件下裂隙处测点的温度会由深度与隙宽的增加而减小,其中,裂隙深度对温度值的影响远大于隙宽,且隙宽的变化范围远小于深度的变化范围。因此,在温度场反演时,可忽略裂隙的迹长、隙宽的影响,以及迹长、隙宽、深度3因素间耦合作用的影响,认为在同等加热条件下由裂隙深度决定裂隙最低温的大小。

## 2 含出露裂隙岩体温度场公式推导

### 2.1 基本假设

因本试验所用试块与砂岩热参数存在差异,为去除材料热参数不同对识别结果的影响,本文以上述试验的裂隙试块作为模型开展理论推导。岩石材料的热物理参数具有各向异性的特征,并且热量在传递过程中会受到空气流动、水汽相变、三维传热效应等多种因素的影响<sup>[26]</sup>。为了便于处理岩石加热过程的边界条件并简化热传导方程的求解,本文依照试验中试块的受热条件与传热特性建立模型并做出以下假设。

1) 岩石是均质的、各向同性的,除预制裂隙外岩石内部致密,且空气等具有常物性,不存在相变情况,忽略物体发射率、吸收率、热扩散率与比热容的变化。

2) 出露裂隙隙宽较小,在热激励过程中忽略由热源照射到裂隙内部表面的热辐射,忽略裂隙内部表面与空气的热对流影响。

3) 忽略矩形裂隙底部平行于加热面的底面横向传热造成的温度损失,认为裂隙表面温度等于同等深度处岩石的温度,采用一维热传导理论。

### 2.2 理论推导

岩体在无热激励的情况下,岩体受到环境的热辐射与空气的热对流,使得岩体温度与大气温度大致相同,当使用热流密度为 $q_0$ 的热辐射对岩体施加热激励时,岩体吸收部分热辐射致使岩体表面温度高于周围环境温度,岩体表面将通过热辐射与热对流的方式向环境散发热量,传递的自然对流散热量 $q_c$ 为

$$q_c = h[t(0, \tau) - t_0] \quad (1)$$

式中: $q_c$ 为岩体的自然对流散热量, $W/m^2$ ;  $h$ 为对

流换热系数,水泥块与静止空气的对流换热系数约为 $8 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\tau$ 为时间,s;  $t(0, \tau)$ 为 $\tau$ 时刻岩体表面温度值, $^\circ C$ ;  $t_0$ 为岩体的初始温度, $^\circ C$ 。

传递的辐射散热量 $q_r$ 为

$$q_r = \varepsilon \sigma \{ [t(0, \tau) + 273.15]^4 - (t_0 + 273.15)^4 \} \quad (2)$$

式中: $q_r$ 为岩体的辐射散热量, $W/m^2$ ;  $\varepsilon$ 为物体的表面发射率,水泥块取 $\varepsilon = 0.92$ ;  $\sigma$ 为黑体辐射常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

热激励源发射的热流密度不变,岩体系统散发的热量则会随岩体表面的温度变化,则任意时刻岩体系统吸收的热量 $q$ 为

$$q = q_0 - q_c - q_r \quad (3)$$

式中: $q$ 为岩体系统吸收的总热量, $W/m^2$ ;  $q_0$ 为热激励源向岩体发射的热流密度, $W/m^2$ 。

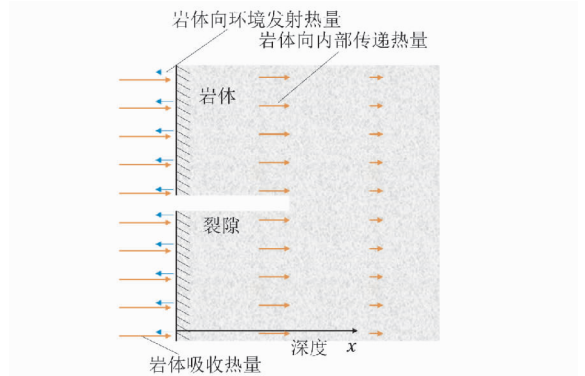


图8 岩体热传导分析模型

Fig. 8 Heat transfer analysis model of rock mass

为便于计算,将试样通过热辐射发射的能量等效为对流换热<sup>[27]</sup>,等效对流换热系数 $h'$ 表达式为

$$h' = \frac{\varepsilon \sigma \{ [t(0, \tau') + 273.15]^4 - (t_0 + 273.15)^4 \}}{t(0, \tau') - t_0} \quad (4)$$

式中: $h'$ 为与辐射散热等效的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\tau'$ 为加热的总时长,s。

联立式(1)、(2)、(3)、(4)得

$$q = q_0 - (h + h') [t(0, \tau) - t_0] \quad (5)$$

当岩体系统通过热辐射吸收热量后,岩体表面快速升温,而岩体深处升温较慢,此时岩体内部产生温度差异,热量将自发地以热传导的方式由高温区向低温区传递热量,深度为 $x$ 处的微元体吸收到的热量 $q_x$ 与温度梯度 $\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x}$ 间的关系符

合傅里叶定律。其表达式为

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \tag{6}$$

式中: $x$  为微元体与岩体表面的距离, m;  $q_x$  为距离岩体表面  $x$  处的微元体吸收的热量, W/m<sup>2</sup>;  $t(x, \tau)$  为  $\tau$  时刻距离岩体表面  $x$  处的微元体的温度, °C;  $\lambda$  为岩体的导热系数, W/(m · K)。

依据半无限大物体传热的假设, 在一维非稳态导热的过程中,  $\tau$  时刻岩体深度为  $x$  处微元体温度梯度的升高会提高该微元体吸收的热量, 微元体温度的上升速度也会随之增加, 微元体处温度随时间的变化率  $\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau}$  与微元体温度梯度  $\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x}$  满足如下微分方程:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \tag{7}$$

式中: $a$  为热扩散率, m<sup>2</sup>/s。

依据以上传热理论整理岩体的边界条件与初始条件。联立式(5)、(6), 可得当  $x = 0$  时, 岩体表面温度场满足

$$q_0 - (h + h') [t(0, \tau) - t_0] = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} \tag{8}$$

当  $x \rightarrow \infty$  时, 岩体深部温度场满足

$$t(\infty, \tau) \rightarrow t_0 \tag{9}$$

当  $\tau = 0$  时

$$t(x, 0) = t_0 \tag{10}$$

联立式(7) ~ (10), 采用分离变量法求解<sup>[28]</sup> 可得

$$\begin{aligned} [t(x, \tau) - t_0] \frac{h + h'}{q_0} = & \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp\left[\frac{(h + h')x}{\lambda} + \right. \\ & \left. \frac{(h + h')^2 a \tau}{\lambda^2}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \right. \\ & \left. \frac{(h + h')\sqrt{a\tau}}{\lambda}\right] \end{aligned} \tag{11}$$

式中: $\operatorname{erfc}(u) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-v^2} dv$  称为余误差函数。

在上述公式中,  $\lambda$ 、 $a$  为与岩体相关的参数, 对于不同热参数的岩体, 计算时需要将这些量先行测出, 可通过热特性分析仪得出;  $q_0$ 、 $t_0$  为加热条件参数, 可通过热流计与温度计获得;  $h$ 、 $h'$  则通过空气流动状态与最终岩体表面温度赋值;  $t(x, \tau)$  为  $\tau$  时刻裂隙处的温度, 可通过红外热像仪或温度传感器得出。

将以上各量代入式(11) 中, 式中仅有  $x$  为变量, 通过迭代法求解该一元微分方程, 计算得出  $x$  的值, 即为裂隙的深度。在岩体探测中, 每个  $t(x, \tau)$  都可计算出一个  $x$  值, 但会产生不同程度的误差, 为确保公式的适用性, 需要开展试验验证。

### 3 裂隙尺寸识别

#### 3.1 出露面积识别

为准确识别裂隙区域的出露面积, 将  $\tau$  时刻的完整区域平均温度记为  $t(0, \tau)$ , 裂隙区域温度梯度会随加热时长的增加而增大, 因此选用加热 30 min 时的热红外图像开展区域划分工作, 在裂隙附近制作温度为  $[t(0, 1\ 800) - 2]$  °C 的一条等温线, 该等温线所围成的区域即为出露裂隙区域, 统计等温线内色块的数量  $n$  与试块表面垂直迹长方向一条测线的色块数量  $n_{10}$ , 裂隙的出露面积  $S$  为

$$S = \frac{100\ n}{n_{10}^2} \tag{12}$$

将各试块的  $n$  与  $n_{10}$  代入式(12), 并计算该值与测量值间的误差, 结果见表 3。裂隙出露面积的误差均在 15% 以内, 对于隙宽较宽的裂隙, 识别的误差百分比值越小, 且其中一部分误差是因人工测量造成的, 该识别精度基本满足工程测量需求。

表 3 裂隙出露面积识别误差

Tab. 3 Error in the identification of fracture exposure area

| 试块编号 | 识别误差/% | 试块编号 | 识别误差/% | 试块编号 | 识别误差/% |
|------|--------|------|--------|------|--------|
| 2    | 13.8   | 13   | 3.8    | 21   | 10.9   |
| 3    | 9.2    | 14   | 8.2    | 22   | 11.3   |
| 4    | 5.4    | 15   | 5.8    | 23   | 0.2    |
| 7    | 8.6    | 16   | 6.9    | 24   | 2.8    |
| 8    | 6.7    | 17   | 4.3    | 25   | 4.7    |
| 9    | 2.1    | 18   | 8.3    | 26   | 3.4    |
| 11   | 0.8    | 19   | 11.4   |      |        |
| 12   | 3.4    | 20   | 14.2   |      |        |

3.2 深度识别

为联系理论与室内试验结果,需要验算裂隙深度计算公式的准确性。将裂隙最低温度记为  $t(x, \tau)$ , 将每个试块每个时间的  $t(x, \tau)$  和试块的热物理参数代入式(11), 使用 Matlab 中的 vpa-solve 函数进行数值计算, 求解出每个试块  $\tau$  时刻的裂隙计算深度  $x$ , 统计不同深度裂隙的 5 个试块不同时刻的  $x$  值, 绘制计算深度随加热时间变化的误差曲线(见图 9)。由图 9 可以看出, 加热时间与裂隙深度对误差值大小的影响较大, 在加热刚开始时计算误差极大, 这是由于热量传入岩

体内部深处需要一定时间, 且裂隙内部受到小部分传入裂隙内表面的热辐射的影响, 随着加热时间的增加, 裂隙深度计算值会逐渐趋近于真实值。由图 9(a) ~ (c) 可知, 在加热时间为 30 min 时, 对于制样深度约为 10、20 和 30 mm 的裂隙, 其深度计算值误差较小, 且在加热时长为 20 min 时, 其误差已小于 10%, 对比图 9(d)、(e) 可以发现, 相同加热时间下计算值与实际值的误差会随着裂隙深度的增加而增加, 在加热时间为 30 min 时, 40 mm 深的裂隙深度计算误差为 7.8%, 50 mm 深的裂隙深度计算误差则达到了 24.8%。

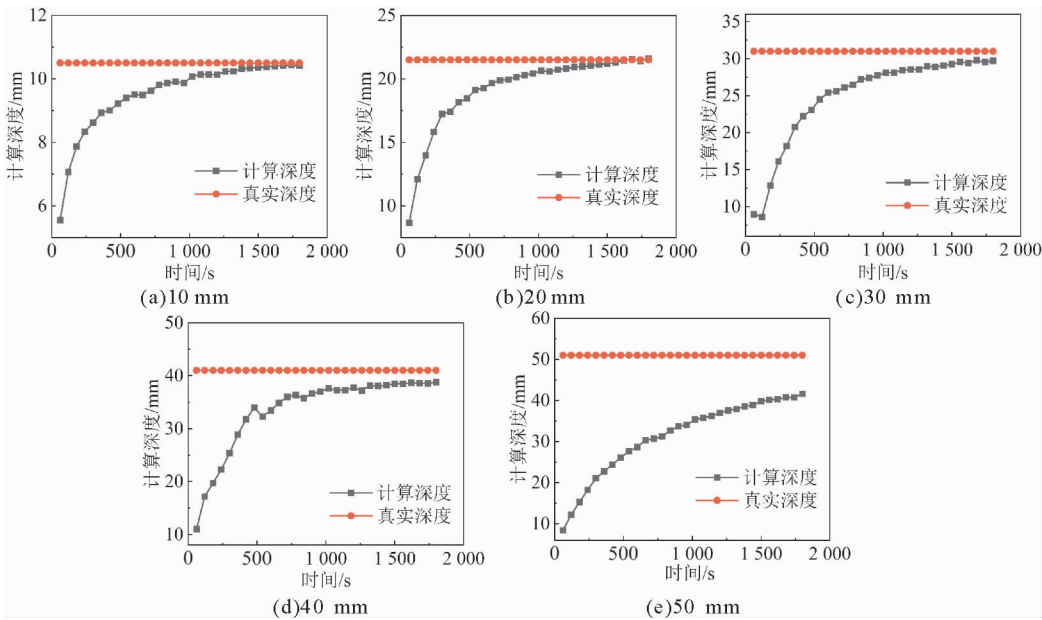


图 9 升温过程不同深度裂隙的深度计算值曲线

Fig. 9 Depth calculation curves of fractures at different depths during the heating process

对于隙宽大于 1 mm 且深度小于 50 mm 裂隙的试块, 将升温过程中最后 3 min 的温度信息代入式(11)进行计算, 将解出的深度值进行平均, 并计算其与真实值间的误差, 统计不同裂隙深度下误差值的大小并绘制统计图(见图 10)。由图 10 可以看出, 随着裂隙深度的增加, 该公式的误差整体呈上升趋势。当裂隙深度约为 10 mm 时, 误差保持在 5% 以内, 深度差小于 0.5 mm; 裂隙深度为 20 mm 与 30 mm 时, 误差约为 10%, 深度差大约为 2 ~ 3 mm; 裂隙深度达到 40 mm 时, 误差最大为 18%。

重新加热裂隙深度为 50 mm 的试块, 设置加热时长为 60 min, 由图 11 可以观测到随着加热时间的增加, 计算误差逐渐减少, 当加热时间到达 60 min 时, 深度计算误差为 6.8%。

由于裂隙计算值存在波动, 为方便分析, 将对

应时刻与先前 2 个时刻的深度计算值取平均, 作为对应时刻的深度计算平均值, 再将相邻 2 个时刻的深度计算平均值作差, 作为深度计算平均差值, 其表达式为

$$\Delta x_{\tau} = \frac{x_{\tau-120} + x_{\tau-60} + x_{\tau}}{3} - \frac{x_{\tau-180} + x_{\tau-120} + x_{\tau-60}}{3} \tag{13}$$

式中:  $\Delta x_{\tau}$  为  $\tau$  时刻的深度计算平均差值;  $x_{\tau}$  为  $\tau$  时刻的深度计算值。

依据图 9 与图 11, 以深度计算误差为 10 % 的时间线为参考线, 绘制加热 10 min 至加热结束时深度计算平均差值随时间变化的曲线(见图 12)。由图 12 可发现, 当深度计算平均差值稳定小于 0.1 mm 时, 误差均小于 10%, 因此可依据该条件判断裂隙深度计算值是否准确, 若不满足该

条件则需要增加加热时长。

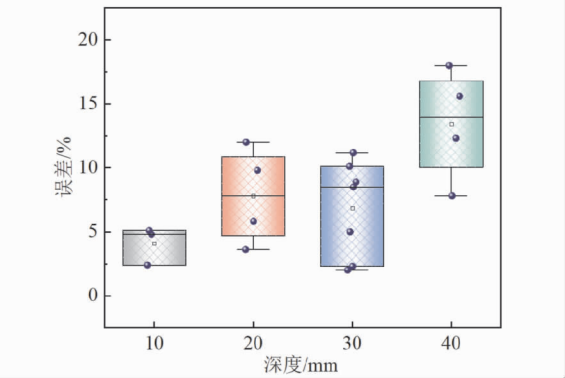


图 10 不同深度裂隙的深度计算值误差统计  
Fig. 10 Error statistics of calculated depth values for fractures at different depths

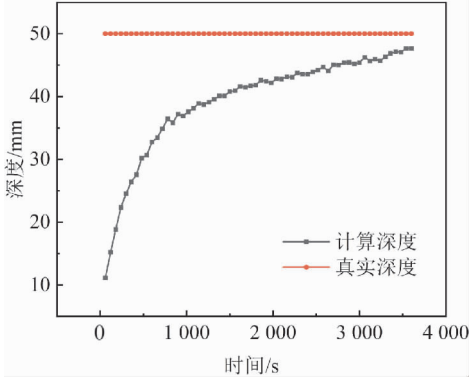


图 11 50 mm 深度裂隙的深度计算值曲线  
Fig. 11 The calculated depth curve for a 50 mm deep fissure

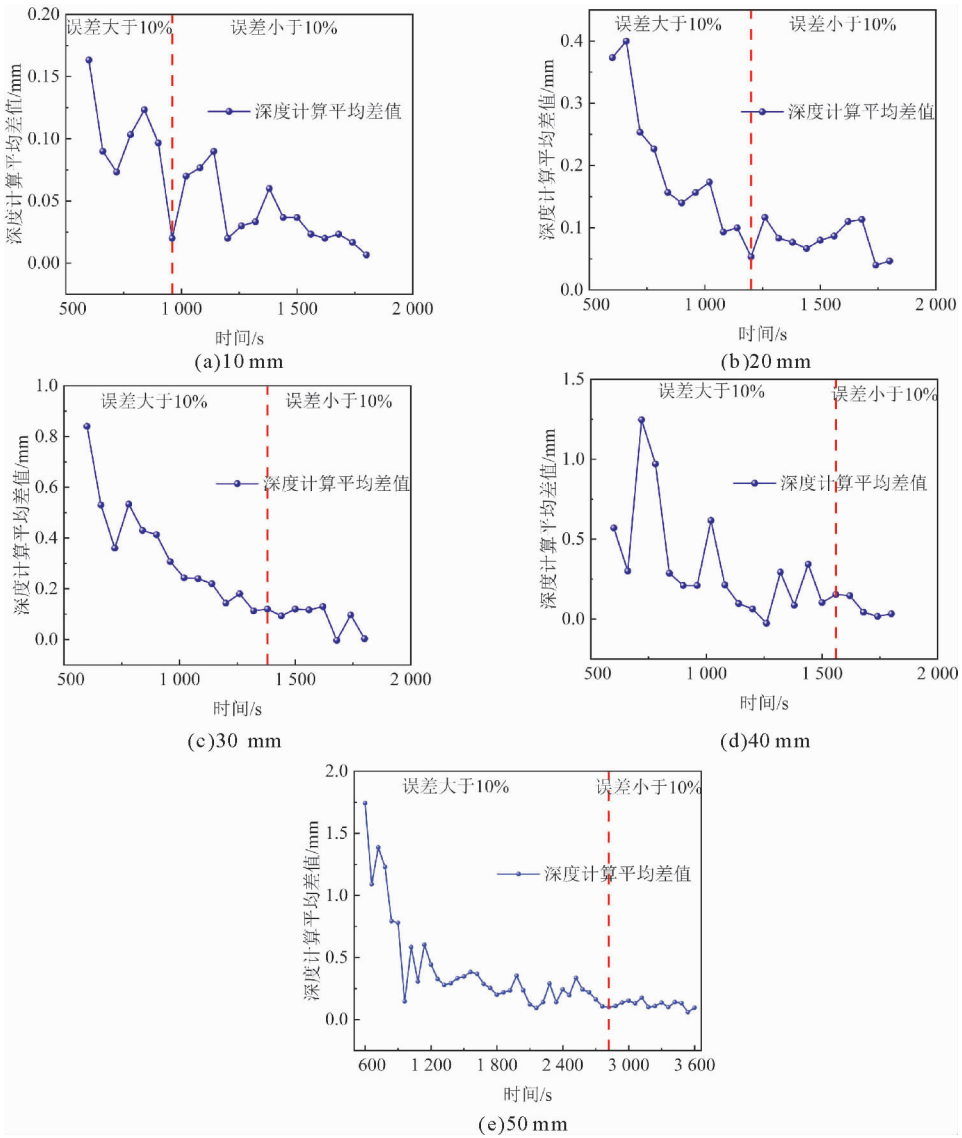


图 12 不同深度裂隙的深度计算平均差值  
Fig. 12 The mean deviation of calculated depths for fractures at different depths

综上所述,依据温度等温线划分裂隙区域结果较为准确,出露面积的识别误差基本满足工程探测需求,裂隙深度计算值的误差会随深度的增加而增加。当裂隙深度小于等于 40 mm 时,30 min 加热时间可以使该公式的计算误差满足工程探测要求;对于深度大于 40 mm 的裂隙,则需要增加加热时长,直至深度计算平均差值稳定小于 0.1 mm。

## 4 讨论

出露裂隙的存在会使得岩体的热红外图像出现低温区域,两者的温差是进行裂隙尺寸计算的基础。从室内试验效果来看,热红外技术在探测岩体表面较浅的出露裂隙方面具有很好的适用性,同时具有无损非接触的特点,可以应用于石质文物保护与页岩气开发等难以人工测量的岩体工程<sup>[29-31]</sup>。

红外探测裂隙尺寸的误差可分为内因和外因 2 类。内因主要为岩体内部的不均匀、裂隙填充物热力学性质多样、裂隙的倾角随裂隙的延伸而改变与裂隙的形态不明等,现阶段对于裂隙的假设较为理想、简单,裂隙的形状大多假设为圆盘状,所建立的反演公式多未对裂隙的填充物、倾角等进行精度修正<sup>[32-33]</sup>。外因为红外热像仪的测温精度、太阳光、环境的温度湿度、测温距离、拍摄角度等,在使用红外热像仪测温时,为减少阳光的影响可选择在夜晚开展探测,应当尽量避免在大风环境或是雨天开展测量<sup>[34]</sup>。内因和外因的综合作用导致探测结果有所偏差。

不同于以往特定岩样的试验结果,本文采用的深度计算公式通过理论推导得出,该公式在岩体热物理性质和热流密度改变后仍具有一定的精确度,可有效提高各类岩体浅表层裂隙深度探测的准确性,在石窟岩体稳定性评价中体现出重要的应用价值<sup>[35]</sup>。

## 5 结论

本文主要讨论了热红外技术在裂隙尺寸定量识别中的应用,基于传热理论与加热条件推导裂隙不同深度处的温度公式,结合室内试验分析了在持续热激励条件下出露裂隙的温度场特征和裂隙深度计算误差,论证了红外热成像技术探测出

露裂隙尺寸的可行性,主要得出了以下结论。

1) 在热激励过程中,隙宽与深度是影响红外图像中裂隙区域温度大小的主要因素,迹长与交互作用对温度大小的影响并不显著,深度对最低温的影响程度远大于隙宽,在线性拟合中,深度对最低温的影响系数约为隙宽的 12 倍。

2) 利用岩体表面温度可有效划分裂隙边界,当隙宽大于 1 mm 时,裂隙出露面积识别误差可以控制在 10% 左右,随裂隙隙宽的增加,误差整体呈现出减小的趋势,隙宽为 5 mm 的裂隙面积识别误差最大值仅为 4.7%,该方法的识别精度基本满足工程测量需求。

3) 出露裂隙深度公式的计算误差随裂隙深度的减少与加热时间的增长而降低,当加热时长为 30 min 时,深度小于 40 mm 的裂隙的计算误差均小于 20%,50 mm 深度裂隙的计算误差达到了 24.8%,增加加热时长至 60 min,可将 50 mm 深度的裂隙的计算误差降低至 6.8%。

## 参考文献

- [1] LAN H X, ZHANG Y X, MACCIOTTA R, et al. The role of discontinuities in the susceptibility, development, and runout of rock avalanches: A review[J]. Landslides, 2022, 19(6): 1391-1404.
- [2] 刘长青, 包鑫, 兰恒星, 等. 石窟寺多尺度岩体结构发育特征与三维精细化建模方法研究——以安岳圆觉洞为例[J]. 工程地质学报, 2024, 32(6): 1904-1915.
- [3] LIU C Q, BAO H, LAN H X, et al. Multi scale rock structures development characteristics and 3D refinement modeling method of grottoes: A case study of Anyue Yuanjue Cave[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(6): 1904-1915.
- [4] 张博, 裴强强, 白玉书, 等. 北石窟寺平顶窟顶板剥落机理及保护技术研究进展[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2023, 2(2): 21-34.
- [5] ZHANG B, PEI Q Q, BAI Y S, et al. Research on the physical mechanisms causing deterioration at the Beisikusi Grottoes[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2023, 2(2): 21-34.
- [6] BAO H, LIU C Q, LAN H X, et al. Time-dependency deterioration of polypropylene fiber reinforced soil and guar gum mixed soil in loess cut-slope protecting[J]. Engineering Geology, 2022, 311: 106895.
- [7] 赵嘉进, 刘家全, 张得煊, 等. 基于三维激光扫描的

- 石窟寺病害可视化研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2022, 1(2): 72-80.
- ZHAO J J, LIU J Q, ZHANG D X, et al. Research on visualization of cave temple diseases based on 3D laser scanning[J]. Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022, 1(2): 72-80.
- [6] HOU D G, ZHENG X Y, ZHOU Y Y, et al. Analysis and application of surrounding rock mechanical parameters of jointed rock tunnel based on digital photogrammetry[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(2): 721-739.
- [7] 徐东, 范文涛. 基于数字摄影测量的岩体结构面信息获取及岩体质量评价[J]. 黄金, 2022, 43(9): 43-48.
- XIU D, FAN W T. Acquisition of rock mass structural plane information and rock mass quality evaluation based on digital photogrammetry[J]. Gold, 2022, 43(9): 43-48.
- [8] 冯晖, 安娅菲, 张益胜, 等. 石窟岩体裂隙渗流网络地球物理地一井一崖差分高精度探测技术研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2023, 2(4): 4-15.
- FENG X, AN Y F, ZHANG Y S, et al. High-precision detection technology for fracture seepage networks in sandstone rock carvings[J]. Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2023, 2(4): 4-15.
- [9] 陈爱云, 方云. 地质雷达在石质文物保护工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(8): 165-166.
- CHEN A Y, FANG Y. Application of georadar in rocky historical relic[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(8): 165-166.
- [10] 李昌波, 包涵, 兰恒星, 等. 基于机器学习的石窟顶板裂隙热红外识别[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(10): 191-204.
- LI C B, BAO H, LAN H X, et al. Machine-learning-based thermal infrared recognition of fractures in grotto roofs[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(10): 191-204.
- [11] 黄丹, 肖子龙, 汤文, 等. 不同开度节理大理岩破裂过程与断裂面形貌特征研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(6): 2239-2249.
- HUANG D, XIAO Z L, TANG W, et al. Study on failure process and fracture surface morphology characteristics of marble with different joint apertures[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(6): 2239-2249.
- [12] 杨文峰, 刘家全, 张得煊, 等. 石质文物表面裂隙的热红外响应研究[J]. 文物保护与考古科学, 2024, 36(5): 151-158.
- YANG W F, LIU J Q, ZHANG D X, et al. Thermal infrared response of apparent cracks in stone relics[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(5): 151-158.
- [13] ZHENG D, TAN S S, LI X X, et al. Research on the infrared thermographic detection of concrete under solar heating[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6692729.
- [14] 戚磊, 郭朝辉. 混凝土内部缺陷红外无损检测多因素影响分析[J]. 公路, 2014, 59(8): 234-240.
- QI L, GUO C H. Analysis of multi-factor impact on infrared thermal wave nondestructive testing of internal defects of concrete[J]. Highway, 2014, 59(8): 234-240.
- [15] BOU JAOUDE I, NOVAKOWSKI K, KUEPER B. Identifying and assessing key parameters controlling heat transport in discrete rock fractures[J]. Geothermics, 2018, 75: 93-104.
- [16] 徐拴海, 沈浩. 岩石导热系数影响因素及预测研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6369-6376.
- XU S H, SHEN H. Review on influencing factors and prediction of rock thermal conductivity[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(16): 6369-6376.
- [17] 谢晋, 周建弟, 曹雪静, 等. 基于红外热成像技术实现陶瓷容器的无损检测[J]. 陶瓷, 2023(10): 127-130.
- XIE J, ZHOU J D, CAO X J, et al. Nondestructive testing of ceramic vessel based on infrared thermal imaging technology[J]. Ceramic, 2023(10): 127-130.
- [18] DI TUCCIO M C, LUDWIG N, GARGANO M, et al. Thermographic inspection of cracks in the mixed materials statue: Rattodella Sabine[J]. Heritage Science, 2015, 3: 10.
- [19] 何静, 周伟强, 朱建锋, 等. 无损原位检测技术在高湿环境下砂岩文物劣化诱因分析中的应用[J]. 四川文物, 2024(2): 111-120.
- [20] 吕洪涛, 包涵, 兰恒星, 等. 基于热红外响应的岩体单裂隙埋藏深度探测方法[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 1048-1065.
- LYU H T, BAO H, LAN H X, et al. Detection method of buried depth of single crack in rock mass based on thermal infrared response[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 1048-1065.
- [21] LIANG Y F, YANG Q W, ZHU L, et al. Study on the acoustic emission and thermal infrared signal charac-

- teristics of granite with freeze-thaw damage in cycle loading process[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 1002888.
- [22] 陈国庆,张岩,李阳,等. 岩石真三轴加载破坏的热-声前兆信息链初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1764-1776.
- CHEN G Q, ZHANG Y, LI Y, et al. Thermal-acoustic precursor information chain of rock failure under true triaxial loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1764-1776.
- [23] GUERIN A, JABOYEDOFF M, COLLINS B D, et al. Remote thermal detection of exfoliation sheet deformation[J]. *Landslides*, 2021, 18(3): 865-879.
- [24] 姚旭龙,杨震,张艳博,等. 基于 FFT 的巷道岩爆红外温度场频域特征实验研究[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(4): 274-279.
- YAO X L, YANG Z, ZHANG Y B, et al. Experimental study on frequency domain characteristics of infrared temperature field of roadway rockburst based on FFT[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2018, 32(4): 274-279.
- [25] MIAO B, WANG X Y, LI H R. Quantitative analysis of infrared thermal images in rock fractures based on multi-fractal theory[J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6543.
- [26] 刘状壮,张有为,季鹏宇,等. 电热型融雪沥青路面传热特性研究[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(2): 523-530.
- LIU Z Z, ZHANG Y W, JI P Y, et al. Study on heat transfer characteristics of electric heating snow melting asphalt pavement[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(2): 523-530.
- [27] 韩建超,张孟非,王斌,等. 钛合金电致塑性本构方程及多物理场耦合分析[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(9): 421-433.
- HAN J C, ZHANG M F, WANG B, et al. Analysis of electroplastic constitutive equation and multi-physical field coupling of titanium alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(9): 421-433.
- [28] 张洪济. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社, 1992:218-220.
- [29] 赵勇,曾昭发,李静,等. 地球物理探测技术在石窟寺裂隙渗流中的应用现状及展望[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(2): 928-937.
- ZHAO Y, ZENG Z F, LI J, et al. Application status and prospect of geophysical detection technology in fracture seepage of grottoes[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(2): 928-937.
- [30] 兰恒星,陈俊辉,伍宇明. 三轴压缩试验前后含气页岩微纳尺度裂隙空间分布特征研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 24-35.
- LAN H X, CHEN J H, WU Y M. Spatial characterization of micro-and nanoscale microcracks in gas shale before and after triaxial compression test[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 24-35.
- [31] LAN H X, TIAN N M, LI L P, et al. Kinematic-based landslide risk management for the Sichuan-Tibet grid interconnection project (STGIP) in China[J]. *Engineering Geology*, 2022, 308: 106823.
- [32] 王明玉,刘庆哲,曲辞晓,等. 基于圆盘裂隙物理模型的岩体单一裂隙渗流规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3523-3530.
- WANG M Y, LIU Q Z, QU C X, et al. Experimental investigation on the seepage flow through a single fracture in rocks based on the disc fracture model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3523-3530.
- [33] 康爽,陈长征,周勃,等. 基于温度阈值风电叶片缺陷识别的红外检测研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 337-341.
- KANG S, CHEN C Z, ZHOU B, et al. Infrared detection research on wind turbine blade defects identification based on temperature threshold[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2020, 41(8): 337-341.
- [34] ZHAO Y X, SUN B, LIU S M, et al. Identification of mining induced ground fissures using UAV and infrared thermal imager: Temperature variation and fissure evolution[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 180: 45-64.
- [35] BAO H, LIU C Q, LIANG N, et al. Analysis of large deformation of deep-buried brittle rock tunnel in strong tectonic active area based on macro and microcrack evolution[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 138: 106351.

(编辑 李静)