

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.008

# 石窟寺表面泛盐病害热学响应的离散元模拟

钟华锹<sup>1</sup>, 赵嘉进<sup>1</sup>, 姚传芹<sup>1</sup>, 张得煊<sup>1</sup>, 李希<sup>2</sup>

(1. 上海师范大学建筑工程学院, 上海 201418; 2. 长沙理工大学交通运输工程学院, 长沙 411000)

**摘要:**石窟寺长期遭受自然与人为因素破坏, 往往会出现多种类型病害。其中, 盐害是一种破坏性较大的病害, 在表面泛盐阶段对其开展病害程度的量化评估对石窟寺保护利用工作具有重要意义。以甘肃省庆阳市北石窟寺为研究对象, 使用 PFC 2D 软件建立表面泛盐病害模型。采用主动式热红外检测技术并施加外部热源, 获取不同泛盐厚度处的升温曲线。结果表明, 在相同热激励条件下砂岩表面的温度低于泛盐表面的温度, 且泛盐越厚其表面温度越高。归一化后的温度-时间曲线可以使用幂函数拟合, 且幂函数指数与泛盐厚度呈现明显的负相关线性关系; 可以将其作为升温指数, 实现泛盐病害程度的定量化评估。

**关键词:**石窟寺; 离散元; 红外成像; 表面泛盐; 温度分布; 升温指数

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)10-110-10

## Assessment of the thermal response to efflorescence damage on the surface of grotto temples using the discrete element method

ZHONG Huaqiao<sup>1</sup>, ZHAO Jiajing<sup>1</sup>, YAO Chuanqin<sup>1</sup>, ZHANG Dexuan<sup>1</sup>, LI Xi<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, P. R. China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

**Abstract:** Grotto temples face extensive damage from natural factors and human activities and salt erosion is a critical issue. Quantifying the damage extent in surface salt efflorescence stage is crucial for subsequent preservation efforts. This study investigates salt efflorescence in the North Grotto Temple in Qingyang City, Gansu Province, employing PFC 2D software to simulate surface salt formation. Active thermal infrared detection is used to examine the relationship between temperature changes and efflorescence thickness. Results indicate that when subjected to identical stimuli, the temperature of sandstone surface is lower than that of saltated surfaces and surface temperature increases as salt efflorescence thickness increases. A power function fitting the normalized temperature-time curves reveals a notable negative linear relationship between the exponent and salt efflorescence thickness. This exponent can serve as a warming index, realizing the quantitative assessment of salt efflorescence damage.

**Keywords:** grotto temple; discrete element; infrared imaging; salt efflorescence; temperature distribution; warming index

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1520600); 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(21YF1432700)。

Supported by National Key R&D Program of China(2019YFC1520600) and Shanghai Sailing Program (21YF1432700).

作者简介: 钟华锹(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方向的研究, (E-mail)1000525982@smail.shnu.edu.cn。

通信作者: 姚传芹, 女, 主要从事热化学效应对岩土体物理力学性质的影响方向的研究, (E-mail)cqyao@shnu.edu.cn。

石窟寺是中华优秀传统文化的重要载体,以其分布广泛、规模宏大、体系完整的特点,集中体现了建筑、雕塑、壁画、书法等多种艺术的完美融合,深刻见证了中华民族的历史背景与文化内涵<sup>[1-2]</sup>。石窟寺大多依山而建,在使用和保存过程中长期遭受自然与人为因素的破坏,出现了各种不同类型的病害<sup>[3]</sup>。其中,盐害是一种破坏性较大的病害,不仅可对石质文物造成直接损害,还可能进一步诱发其他病害<sup>[4]</sup>。盐害主要是由于盐溶液在岩石孔隙中的迁移与沉淀,随着水分蒸发而析出晶体,从而对石窟寺岩体造成机械及化学性损伤<sup>[5]</sup>。盐害的演化一般分为 4 个阶段,表面泛盐<sup>[6]</sup>是盐害发育的第一阶段(见图 1),若不及时治理,当其发育到一定程度后,可使岩体进一步诱发粉化<sup>[7]</sup>、空鼓<sup>[8]</sup>、剥蚀<sup>[9]</sup>等病害,直至最终破坏<sup>[10]</sup>。

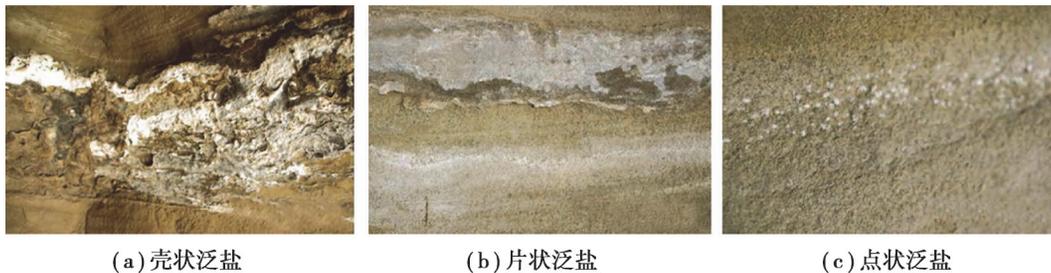


图 1 石窟寺表面泛盐病害<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Salt efflorescence of grotto temple

目前,无损检测技术(如红外热成像检测技术<sup>[11]</sup>、近景摄影<sup>[12-13]</sup>、探地雷达<sup>[14]</sup>、三维激光扫描<sup>[15-16]</sup>等)已被广泛应用于文物保护工作中<sup>[17]</sup>。其中,红外热成像检测技术获取被测物体内部、外部温度信息,具有检测速度快、范围广、安全性高等特点<sup>[18]</sup>,可较好地适应石窟寺特殊的内部环境。Ruiz Valero 等<sup>[19]</sup>利用红外热成像检测技术检测了教堂壁画的潮湿现象,并根据所获热成像结果确定了壁画表面的潮湿程度。Bisegna 等<sup>[20]</sup>使用被动红外热成像检测技术检测了教堂内壁,论证了红外检测技术在文物保护工作中的有效性。杨文峰<sup>[21]</sup>使用主动式红外热成像检测技术对庆阳某石窟寺开展了全面检测,针对自然冷却过程提出了降温指数,并成功将该指数应用于石窟寺剥落病害的定量评估中。上述成功案例已充分证明了红外热成像检测技术在石窟寺保护工作中的可行性。针对盐害,国内外学者已开展了较为丰富的试验研究与理论分析。Martínez-Martínez 等<sup>[22]</sup>发现盐类结晶是圣母玛利亚大教堂中石质文物发生风化的重要诱因,从而提出了以预防盐类结晶为首要任务的保护策略。Hu 等<sup>[23]</sup>通过对莫高窟中收集的颗粒样品进行微观分析,揭示了盐分随毛细现象而向上迁移的机理。Zhao 等<sup>[24]</sup>使用低场核磁共振、X 射线断层扫描等技术明确了氯化钠溶液在多孔二氧化硅和多孔硅酸盐材料中的时空演化规律,进而提出盐溶液对硅酸盐材料的破坏机理。Mchette 等<sup>[25]</sup>对已受盐害影响的莱盖特石样品进行了不同环境条件下的加速老化试验,并指出不同盐结晶可能会导致不同的盐害特征。张虎元等<sup>[26]</sup>进行了不同湿度条件下的硫酸钠溶液毛细上升试验,建立了岩石表面蒸发速率与盐害特征的内在联系。在石窟寺保护工作中,表面泛盐阶段的量化评估是至关重要的,不仅是制定修复方案的重要基础,更是控制病害进一步发育的重要节点。上述研究成果尽管厘清了盐害的发生机理与破坏模式,却未能充分结合现有检测技术提出指导工程实践的定量化评估指标。

针对上述瓶颈,以庆阳北石窟寺为例开展离散元模拟研究,在充分考虑岩体与析出晶体颗粒特性的前提下构建表面泛盐的热学模型,并进一步结合主动式红外热成像检测技术获取析出晶体与岩体在不同病害程度下的热学响应,以此提出表面泛盐的量化评估指标。

## 1 主动红外热成像检测技术

红外热成像检测技术主要包括主动式和被动式红外热成像检测方法。被动式方法依赖接收被测物体辐射出的红外线进行检测;而主动式方法则利用热激励装置施加外部热源(见图 2),强迫被测物体发生温度变化从而完成检测。对于内部环境较为封闭的石窟寺而言,其窟内自然环境的温度变化较小,被动式方法往往难以使盐害区域与周围岩体出现差异明显的热学响应特征。因此,采用主动式方法,通过施加外部热源打破析出晶体与岩体的热平衡状态,从而获取两者的升温曲线,完成表面泛盐厚度的定量化评估。

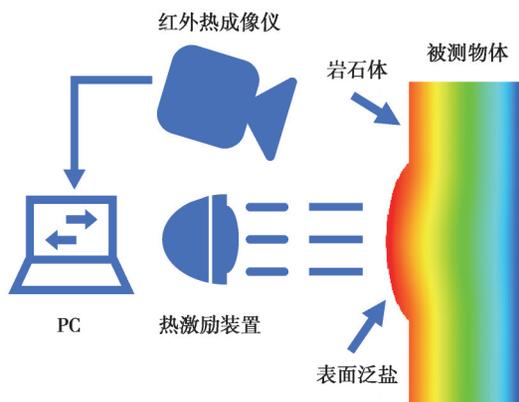


图2 主动式红外热成像检测方法示意图

Fig. 2 The schematic diagram of active infrared thermal imaging detection method

## 2 离散元热学模型

### 2.1 热学计算原理

研究对象主要由粗、细颗粒组成,故采用离散元方法获取颗粒尺度上泛盐病害与周围岩体的不同热学响应特征。颗粒程序(particle flow code, PFC)是一款支持并行运算的离散元模拟软件<sup>[27]</sup>,可准确模拟颗粒尺度上岩土体的非线性力学行为,已在岩土工程领域得到了广泛应用<sup>[28-29]</sup>,其热学计算原理如下。

对于连续体而言,假设应变变化对温度的影响忽略不计,其热传导方程为

$$-\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: $q_i$ 为热流密度; $q_v$ 为功率密度; $\rho$ 为密度; $C$ 为比热; $T$ 为温度。

对于热流密度 $q_i$ ,通过傅里叶定律可知

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (2)$$

式中: $k_{ij}$ 为导热系数。

在PFC中,研究对象被分割为由颗粒和接触构成的离散网络,热流通过网络中的接触进行传导,对于单个颗粒而言,其热传导方程为

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N Q^p, \quad (3)$$

式中: $Q^p$ 为从颗粒 $p$ 的流出功率; $V$ 为总体积。

将式(3)代入式(1)可得

$$-\sum_{p=1}^N Q^p + Vq_v = mC \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4)$$

假定每单位长度的热阻为 $\eta$ ,则每个接触的功率为

$$Q = -\frac{\Delta T}{\eta L}, \quad (5)$$

式中: $\Delta T$ 为接触两端颗粒的温差; $L$ 为接触长度。

对式(4)采用正向有限差分格式,可得到颗粒温度的显式计算公式,

$$T_{t+\Delta t} = T_t + \frac{\Delta t}{mC} \left[ -\sum_{p=1}^N Q^p + Vq_v \right], \quad (6)$$

式中: $\Delta t$ 为计算时间步长。

PFC进行热学计算时,需要设置4种参数,即密度 $\rho$ 、热阻 $\eta$ 、比热 $C$ 、线膨胀系数 $\alpha$ 。实际上,材料的热阻与其形状、尺寸等因素有关,在PFC 2D中,采用如下的热阻计算公式。

$$\eta = \frac{1}{2k} \left( \frac{1-n}{\sum_{N_b} V^b} \right) \sum_{N_p} l^p, \quad (7)$$

式中: $k$ 为材料的导热系数; $V^b$ 为颗粒 $b$ 的体积; $l^p$ 为接触 $p$ 的长度; $n$ 为孔隙率。

## 2.2 研究方案

采用 PFC 2D 软件建立简化的二维表面泛盐热学模型。在使用主动热激励装置以前,石窟寺内岩壁及表面泛盐病害处于热平衡状态,因此,模型整体的初始温度按现场实测温度设置(26.7 °C)。考虑到主动激励辐照面积较小,故模型边界温度均设置为 26.7 °C,用于模拟岩体无穷远处的温度。根据泛盐程度选定 5 个特定区域记录其温度变化曲线,具体位置及泛盐厚度如图 3 所示。为实现主动热激励功能,在监测区域左侧均匀布置具有一定热功率的颗粒。在实际检测中,热激励装置与岩壁间有一定间隔,实际传输到岩壁的热流有一定损失,因此,需根据实测的砂岩升温曲线反演热源总功率。

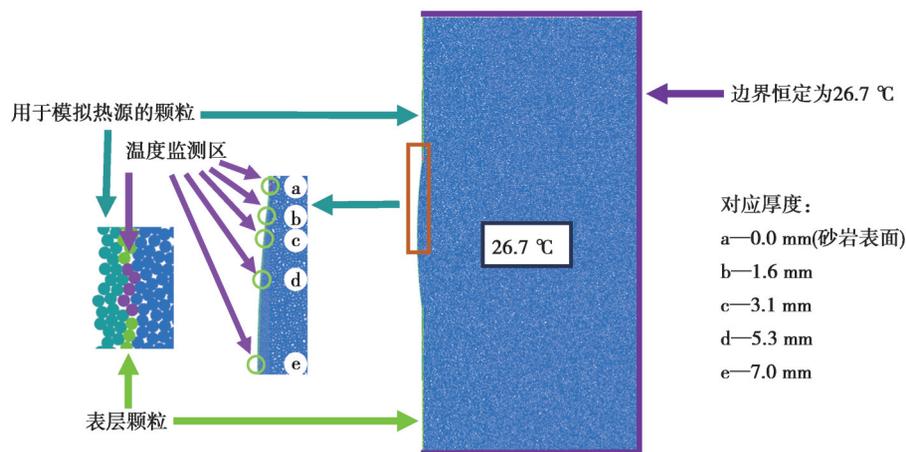


图 3 温度监测位置示意图

Fig. 3 The position diagram of temperature monitoring

## 2.3 模型参数的选取

对于具有一定连续性的砂岩岩体,采用平行胶结模型<sup>[30]</sup>,模型细观力学参数参考了叶永芃<sup>[31]</sup>的研究成果,其余参数则通过现场试验直接测定<sup>[21]</sup>。根据曹张喆等<sup>[4]</sup>的研究,北石窟寺中盐害的主要成为硫酸盐,硫酸盐晶体的模型参数参考罗崇亮等<sup>[32]</sup>的研究成果。在 PFC 2D 中建立表面泛盐病害模型主要包括 2 个步骤:

1) 砂岩模型。试样宽为 320 mm,试样高为 640 mm,砂岩颗粒最大半径和最小半径分别为 1.2 mm 和 0.8 mm,满足均匀分布,最大最小粒径比为 3:2。试样按照孔隙率 0.01% 生成密实样,包含约  $6.39 \times 10^4$  个颗粒。

2) 泛盐病害。使用硫酸盐颗粒在砂岩表面形成 1 个弓形区域,模拟实际的表面泛盐病害(见图 4)。为减少边界效应影响,弓形区域高度为砂岩试样高度的 1/3,其最大厚度设置为 7 mm。硫酸盐颗粒半径按照砂岩颗粒半径的 1/6 设置,孔隙率按照 0.001% 设置,包含约  $1.26 \times 10^4$  个颗粒。

因主要探究表面泛盐厚度与温度响应间的关系,只需进行热学计算,不考虑由热应变导致的力学响应,2 种颗粒的线膨胀系数均设为  $0 \text{ K}^{-1}$ 。具体模型参数如表 1~2 所示。

图 5 展示了实测<sup>[21]</sup>与模拟的升温曲线,可以看出两者的变化规律基本吻合且数值差距较小。当升温结束时,实测砂岩表面的温度为 31.3 °C,数值模拟的温度为 31.6 °C,两者的温度仅相差 0.3 °C,同时  $R^2$  为 0.996。以上说明采用的计算原理与模型参数能基本再现实测结果,此时热源的总功率为 115 W。

模拟结果和实测结果出现误差的原因可能有 2 点:1) 岩体内部的温度可能低于 26.7 °C,而数值模拟中所有颗粒的初始温度均统一设为 26.7 °C;2) 北石窟寺的岩体是非均质的,主要由石英、长石等矿物构成<sup>[33]</sup>,而数值模拟中的简化模型将颗粒处理为均质砂岩。

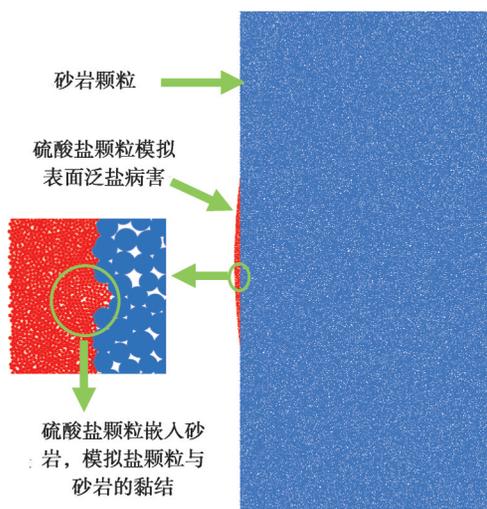


图4 表面泛盐病害数值模型

Fig. 4 The disease numerical model of salt efflorescence

表1 砂岩与硫酸盐细观力学参数

Table 1 Microscale mechanical parameters of sandstone and sulfate

物质	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	平行黏结模量/GPa	平行黏结刚度比	摩擦系数	法向强度/MPa	切向强度/MPa
砂岩	1 855	2.0	1.2	0.84	7	3.5
硫酸盐	1 460	2.0	1.2	0.84	7	3.5

注:由于关于使用颗粒流模拟硫酸盐力学响应的研究较少,且本研究主要研究温度与表面泛盐厚度的关系,故硫酸盐的相关细观力学参数按照砂岩的参数设置。

表2 砂岩与硫酸盐热学参数

Table 2 Thermal parameters of sandstone and sulfate

物质	比热容/( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	导热系数/( $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	线膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$
砂岩	904.58	0.995	0
硫酸盐	1 090.00	0.140	0

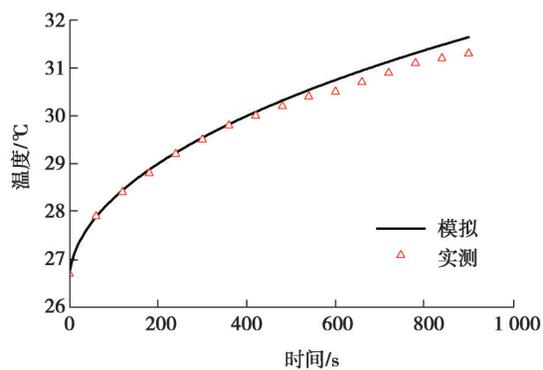


图5 砂岩模拟与实测温度曲线

Fig. 5 Simulation and measured temperature curve of sandstone

### 3 结果与分析

#### 3.1 数值模拟结果分析

图 6 是不同加热时间下的温度云图,在初始状态时,所有颗粒的温度是一致的,均为石窟寺内部实测环境温度。从图 6(a)~(g)中的云图变化可以看出,在升温 900 s 的过程中,热量逐渐向没有直接接触热源的上下两侧及内部传导。在同一水平位置,泛盐病害后侧的砂岩温度普遍较低,说明在泛盐病害影响下的砂岩升温速度较慢。图 6(h)为升温 900 s 后表面泛盐位置的局部温度云图,不难发现表面泛盐病害的表面温度远高于砂岩表面,这说明泛盐使热量在表面形成堆积并阻碍热量进一步向内传播。

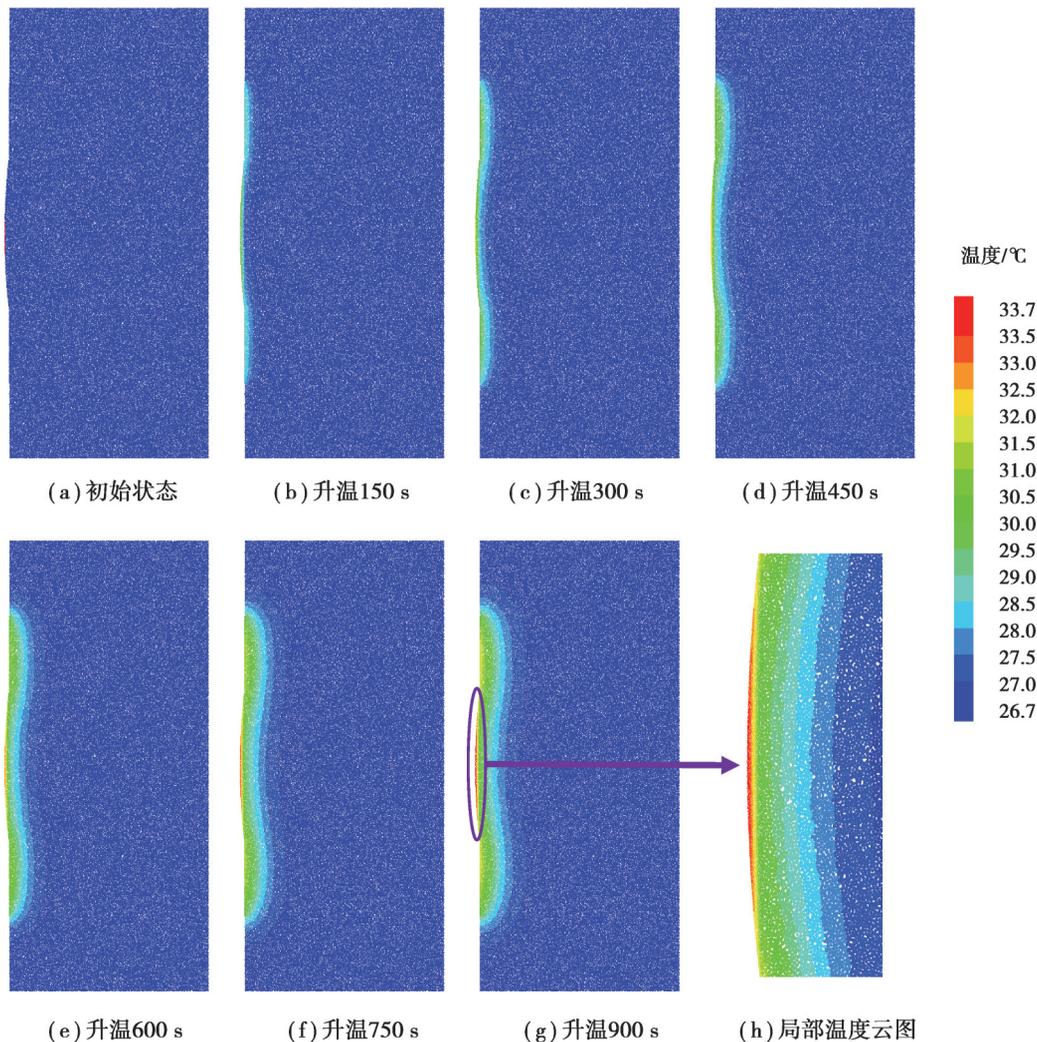


图 6 升温过程温度云图

Fig. 6 Temperature cloud map of heating process

图 7 为砂岩表面(测点 a)及不同泛盐厚度(测点 b、c、d、e)处的温度变化曲线。升温 900 s 后,具有泛盐病害的 4 个位置的最终温度依次为 31.8、32.3、33.0、33.7 °C,比砂岩表面温度分别高了 0.2、0.7、1.4、2.1 °C。这表明在相同时间内,泛盐厚度与最终温度呈现明显正相关性,同时泛盐越厚温度上升越快。

当砂岩表面的盐害物质与其热学特性不一致时,热量从盐害处进入砂岩内部,与直接从砂岩表面进入其内部的过程相比,会表现出不同的热学响应特征。在本文中,盐颗粒的导热系数为 0.140 W/(m·°C),砂岩的导热系数为 0.995 W/(m·°C),盐颗粒较小的导热系数使其产生比砂岩更好的隔热性能,在相同热激励条件下,热量难以通过表面泛盐向内传递,从而体现出较高的热学响应。对于泛盐中心位置和边缘位置,中心位置的泛盐厚度比两侧边缘更大;同时,边缘位置的局部热阻受到泛盐和砂岩 2 种材料的影响会比泛盐中间位置的局

部热阻低。因此,在相同时间内,泛盐病害边缘传递的热量比泛盐病害中间传递的热量更多,导致病害边缘表面的温度会比病害中心处的温度低。由此可以推断,泛盐越厚的位置,表面温度也越高。

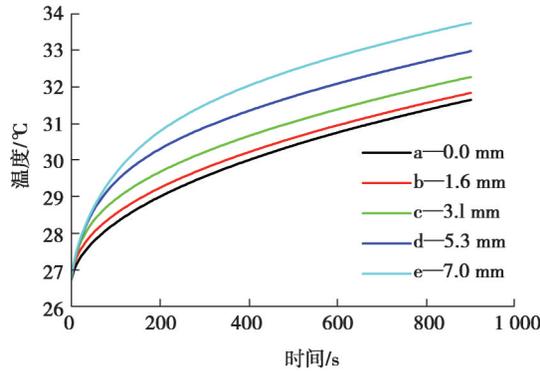


图7 不同泛盐厚度的温度变化曲线

Fig. 7 Temperature variation curves of different salt efflorescence thickness

### 3.2 升温指数

为消除时间和温度的不同量纲影响,使时间和温度处于同一数量级,将时间和温度按照式(8)进行归一化处理,即进行最大最小标准化处理。

$$\begin{cases} t_n = \frac{t - t_i}{t_f - t_i}, \\ T_n = \frac{T - T_i}{T_f - T_i}, \end{cases} \quad (8)$$

式中: $t_n$ 与 $T_n$ 分别是时间和温度采用最大最小标准化进行归一化处理后的数据。 $t_i$ 为初始时刻,通常为0; $T_i$ 为初始时刻目标表面的温度; $t_f$ 为结束时刻; $T_f$ 为结束时刻目标表面的温度; $t$ 为时间; $T$ 为 $t$ 时刻下目标表面的温度。

以时间归一化后的值 $t_n$ 为横坐标,温度归一化后的值 $T_n$ 为纵坐标,建立 $T_n$ 与 $t_n$ 的关系,如图8所示。

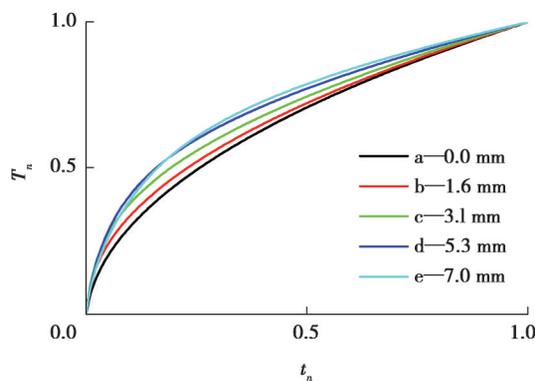


图8 归一化后的温度-时间曲线

Fig. 8 The normalized temperature-time curve

从图8可以看出,在恒定热功率的情况下, $T_n$ 和 $t_n$ 呈现出明显的非线性关系,其形状与幂函数相似。故采用Allometricl函数( $y=Ax^B$ )进行拟合,使用Levenberg-Marquardt优化算法进行迭代。由于对数据进行了归一化处理,则函数必过(0,0)和(1,1)这2点,则控制拟合函数的系数 $A$ 值为1.0,拟合结果如表3所示。

每条曲线的拟合的 $R^2$ 均为0.989以上,说明拟合效果良好。从拟合结果可以看出,泛盐厚度与指数 $B$ 存在着明显的负相关关系。以 $B$ 为横坐标,泛盐厚度 $H$ 为纵坐标进行拟合,得到图9的结果。可见,指数 $B$ 与泛盐厚度 $H$ 具有良好的线性关系。

表 3 拟合结果  
Table 3 Fitting result

泛盐厚度 $H/\text{mm}$	$B$	$R^2$
7.0	0.378	0.989
5.3	0.383	0.997
3.1	0.423	0.999
1.6	0.469	0.999
0.0(砂岩表面)	0.509	0.999

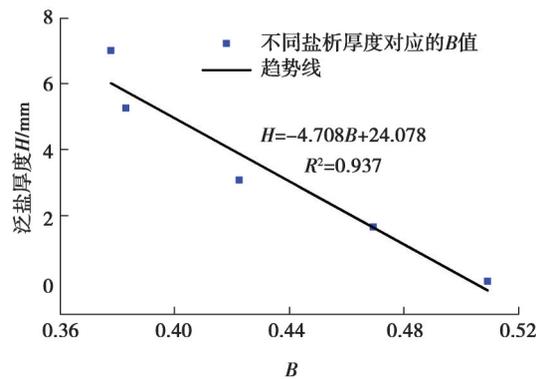


图 9 指数  $B$  与泛盐厚度  $H$  的关系

Fig. 9 The relationship between exponent and salt efflorescence thickness

为实现定量化分析的目的,提出升温指数  $B_w$  (warming index, WI) 这一概念,

$$B_w = \log_{t_n} T_n \quad (9)$$

根据升温指数的定义可知,升温指数  $B_w$  即为表 3 中拟合曲线的指数  $B$ 。通过图 9 可以发现在数值模拟中,随着泛盐厚度的增加,升温指数逐渐变小,两者呈明显的线性负相关关系。由此可见,通过记录主动式红外检测的升温过程,使用升温指数即可实现表面泛盐病害厚度的定量化评估。

## 4 结 论

基于离散元数值模拟方法,构建了表面泛盐病害模型,并采用主动式红外热成像检测技术原理,获取了表面泛盐不同病害位置的热学响应。研究结论如下:

- 1) 因盐颗粒的低热导系数使其成为天然隔热层,故在升温过程中泛盐病害处表现出更高的热学响应。
- 2) 对时间和温度进行归一化处理,两者呈现幂函数关系。拟合结果显示,泛盐厚度与幂函数指数呈负相关线性关系,因此将幂函数指数作为升温指数,用以定量化评估泛盐病害发育程度。

## 参考文献

- [1] 龙红,王玲娟.论中国石窟艺术的设计意匠[J].重庆大学学报(社会科学版),2006,12(4):99-109.  
Long H, Wang L J. Designing intentions of Chinese grotto arts[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2006, 12(4): 99-109. (in Chinese)
- [2] 王海涛,王婧.宋代石窟舞蹈形象研究:大足石刻的典型性舞蹈造像[J].重庆大学学报(社会科学版),2013,19(5):160-165.  
Wang H T, Wang J. Research on dance images in grottoes in Song Dynasty and the classic dance images in Dazu Rock Carvings[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2013, 19(5): 160-165. (in Chinese)
- [3] 刘家全,朱哲皓.基于有序点云的石窟寺顶板裂隙特征提取[J].上海师范大学学报(自然科学版),2023,52(3):360-371.  
Liu J Q, Zhu Z H. Feature extraction of layered fractures in grotto temple based on ordered point clouds[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2023, 52(3): 360-371. (in Chinese)

- [ 4 ] 曹张喆, 孙满利, 沈云霞, 等. 庆阳北石窟寺盐害发育特征研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2023, 2(2): 35-48.  
Cao Z Z, Sun M L, Shen Y X, et al. A study on the characteristics of salt-related damage in the Beishikusi Grottoes at Qingyang[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2023, 2(2): 35-48. (in Chinese)
- [ 5 ] 鱼汶. 盐结晶对石质文物的破坏及控制研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.  
Yu W. Damage and control of salt crystallization on the stone relics[D]. Kunming: Yunnan University, 2016. (in Chinese)
- [ 6 ] 王金华, 陈嘉琦, 王乐乐, 等. 我国石窟寺病害及其类型研究[J]. 东南文化, 2022(4): 25-32.  
Wang J H, Chen J Q, Wang L L, et al. Deterioration patterns of grotto temples in China[J]. Southeast Culture, 2022(4): 25-32. (in Chinese)
- [ 7 ] Jia Q Q, Chen W W, Tong Y M, et al. Experimental study on capillary migration of water and salt in wall painting plaster: a case study at Mogao Grottoes, China[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2022, 16(5): 705-716.
- [ 8 ] 孟田华, 卢玉和, 任建光, 等. 具有预测功能的云冈石窟空鼓病害太赫兹无损检测研究[J]. 云冈研究, 2021, 1(2): 87-93.  
Meng T H, Lu Y H, Ren J G, et al. Terahertz non-destructive testing technology for the hollowing deterioration of Yungang Grottoes with predictive function[J]. Yungang Research, 2021, 1(2): 87-93. (in Chinese)
- [ 9 ] 杨雯, 王晨仰, 刘军民, 等. 无机纳米材料在文物修复与保护中的应用研究[J]. 无机化学学报, 2021, 37(8): 1345-1352.  
Yang W, Wang C Y, Liu J M, et al. Studies on inorganic nanomaterials for restoration and protection of cultural heritages[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2021, 37(8): 1345-1352. (in Chinese)
- [ 10 ] 曲瑾, 蒋璐蔓, 刘珂, 等. 金沙土遗址盐害分布与演化特征[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(1): 28-37.  
Qu J, Jiang L M, Liu K, et al. Distribution and evolution of the salt damage at Jinsha Earthen Site[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2023, 35(1): 28-37. (in Chinese)
- [ 11 ] Wang F, Sheng J, Sfarra S, et al. Multimode infrared thermal-wave imaging in non-destructive testing and evaluation (NDT&E): physical principles, modulated waveform, and excitation heat source[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 135: 104993.
- [ 12 ] Napolitano R, Glisic B. Methodology for diagnosing crack patterns in masonry structures using photogrammetry and distinct element modeling[J]. Engineering Structures, 2019, 181: 519-528.
- [ 13 ] Randazzo L, Collina M, Ricca M, et al. Damage indices and photogrammetry for decay assessment of stone-built cultural heritage: the case study of the San Domenico Church main entrance portal (South Calabria, Italy)[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 5198.
- [ 14 ] Sánchez-Aparicio L J, Bautista-de Castro Á, Conde B, et al. Non-destructive means and methods for structural diagnosis of masonry arch bridges[J]. Automation in Construction, 2019, 104: 360-382.
- [ 15 ] Guo Z Q, Qi Q, Zhang S, et al. Study on the characterization of differential weathering feature based on surface roughness theory and 3D laser scanning: a case study of the Suoyang Ancient City[J]. Journal of Cultural Heritage, 2023, 62: 449-459.
- [ 16 ] 赵嘉进, 刘家全, 张得焯, 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. (in Chinese)
- [ 17 ] 吴宜峰, 赵金鑫, 乔云飞, 等. 砖石质不可移动文物本体监测/检测技术研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 623-637.  
Wu Y F, Zhao J X, Qiao Y F, et al. A review of monitoring/detecting technology for immovable brick and stone cultural relics[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 623-637. (in Chinese)
- [ 18 ] 魏嘉呈, 刘俊岩, 何林, 等. 红外热成像无损检测技术研究发展现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(2): 64-72.  
Wei J C, Liu J Y, He L, et al. Recent progress in infrared thermal imaging nondestructive testing technology[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(2): 64-72. (in Chinese)
- [ 19 ] Ruiz Valero L, Flores Sasso V, Prieto Vicioso E. In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques[J]. Case Studies in Construction Materials, 2019, 10: e00228.
- [ 20 ] Bisegna F, Ambrosini D, Paoletti D, et al. A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography: a case study[J]. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15(2): 199-202.
- [ 21 ] 杨文峰. 石质文物病害的热红外检测及量化评估研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.

- Yang W F. Study on thermal infrared detection and quantitative evaluation of stone cultural relics diseases[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2023. (in Chinese)
- [22] Martínez-Martínez J, Torrero E, Sanz D, et al. Salt crystallization dynamics in indoor environments: stone weathering in the Muñoz Chapel of the Cathedral of Santa María (Cuenca, Central Spain)[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2021, 47: 123-132.
- [23] Hu T F, Brimblecombe P, Zhang Z M, et al. Capillary rise induced salt deterioration on ancient wall paintings at the Mogao Grottoes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163476.
- [24] Zhao J, Luo H J. Transport and crystallization of NaCl solution in porous silicate materials[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2019, 519: 25-34.
- [25] Michette M, Viles H, Vlachou C, et al. Do environmental conditions determine whether salt driven decay leads to powdering or flaking in historic Reigate Stone Masonry at the Tower of London?[J]. *Engineering Geology*, 2022, 303: 106641.
- [26] 张虎元, 杨盛清, 孙博, 等. 石质文物盐害类型与蒸发速率的关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S2): 3284-3294.  
Zhang H Y, Yang S Q, Sun B, et al. Research on the relationship between salt damage types and evaporation rate of stone relics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S2): 3284-3294. (in Chinese)
- [27] Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(3): 283-353.
- [28] Song L, Chai S B, Li J, et al. Numerical study on compressive mechanical characteristics of filled jointed rock under confining pressure based on PFC[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1283479.
- [29] Zhang Y Y, Shao Z S, Wei W, et al. PFC simulation of crack evolution and energy conversion during basalt failure process[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2019, 16(3): 639-651.
- [30] Zhao Z H, Liu Z N, Pu H, et al. Effect of thermal treatment on Brazilian tensile strength of granites with different grain size distributions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(4): 1293-1303.
- [31] 叶永芑. 红砂岩冻融循环三轴力学特性试验及颗粒流模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.  
Ye Y P. Triaxial mechanical properties test and particle flow simulation study of freeze-thaw cycle of red sandstone[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese)
- [32] 罗崇亮, 余云燕, 张璟, 等. 硫酸盐渍土热-质迁移试验与耦合模型[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(2): 470-478.  
Luo C L, Yu Y Y, Zhang J, et al. Heat-mass transfer test and coupling model of sulfate saline soil[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58(2): 470-478. (in Chinese)
- [33] Liu D K, Ren D Z, Du K, et al. Impacts of mineral composition and pore structure on spontaneous imbibition in tight sandstone[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108397.

(编辑 郑洁)