北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测

王皓宇 彭林 张厚江 雷智勋 王辉 张典 唐家英 管成

Material deficiency test of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings based on infrared thermal imaging

Wang Haoyu, Peng Lin, Zhang Houjiang, Lei Zhixun, Wang Hui, Zhang Dian, Tang Jiaying, Guan Cheng

引用本文:
王皓宇, 彭林, 张厚江, 雷智勋, 王辉, 张典, 唐家英, 管成. 基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3):132–144. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230307
Wang Haoyu, Peng Lin, Zhang Houjiang, Lei Zhixun, Wang Hui, Zhang Dian, Tang Jiaying, Guan Cheng. Material deficiency test of fully–concealed wood column in walls of ancient buildings based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3):132–144. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230307

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230307

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

故宫养心殿墙体木柱缺陷状况无损检测研究
Nondestructive testing of defect condition of wall wood columns in Yangxin Hall of the Palace Museum, Beijing
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 127–139. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210028

古建筑七架梁缺陷安全性影响数值模拟研究
Numerical simulation of the safety influence of defects on Qijia–beams of ancient timber building
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 142–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190328

马尾松木材空洞开裂残损的雷达检测成像初探
Preliminary study on radar detection and imaging of cavities and cracks of *Pinus massoniana*
北京林业大学学报, 2017, 39(3): 112–118. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160313

基于速度误差校正的林木应力波无损检测断层成像算法
Tomography imaging algorithm based on velocity error correction for stress wave nondestructive evaluation of wood
北京林业大学学报, 2018, 40(1): 108–119. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170384

基于应力波传播速度模型的原木缺陷定量检测
Quantitative detection of log defects based on stress wave propagation velocity model
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 143–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190420

足尺人造板力学性能无损检测研究进展
Literature review of mechanical properties of full–size wood composite panels using nondestructive testing technique
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 164–172. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180379

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230307

基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测

王皓宇[1,2] 彭 林[1,2] 张厚江[1,2] 雷智勋[1,2] 王 辉[3]
张 典[3] 唐家英[3] 管 成[1,2]
（1. 北京林业大学工学院，北京 100083；2. 北京林业大学木材无损检测国际联合研究所，北京 100083；3. 故宫博物院，北京 100001）

摘要:【目的】墙内暗柱是木结构古建筑的重要承重构件之一，因其处于潮湿和缺乏通风的环境，故多存在腐朽及由严重腐朽导致的材料缺失等缺陷，容易失去原有的承载能力和稳定性。墙内暗柱自身构造导致现有的检测手段受限，易造成不可逆的损坏。故本研究基于红外热成像原理开展墙内暗柱材料缺失缺陷检测理论与试验研究，以期为基于红外热成像的墙内暗柱缺陷状况无损检查方法的建立奠定部分前期基础。**【方法】**首先，从理论角度探讨古建筑墙内暗柱传热过程，推导稳态下木柱区域与纯墙体区域的温度公式，分析影响木柱材料缺失缺陷区域温度变化的因素；然后，建立试验模型，进行墙内暗柱缺陷红外检查试验，采集红外图像；最后，通过分析所获得的红外热图，探讨墙内暗柱材料缺失缺陷大小与墙体表面温度分布之间的关系。**【结果】**(1)理论研究表明：由于木材的横向导热系数远小于墙体导热系数，加热面加热温度相同的情况下，木柱墙体外表面所对应的温度偏低；墙内暗柱的检测效果主要受到缺陷尺寸，即缺陷高度、缺陷深度的影响。(2)试验结果表明：在稳态热传导下，木柱处的墙体外表面温度要低于纯墙体，即木柱处红外图像的颜色更浅；木柱缺陷的存在会使缺陷处墙体表面温度变高，红外图像颜色变深；木柱缺陷高度越大，缺陷导致的高温范围越大；木柱缺陷深度越大，缺陷区域温度值越高。(3)在非稳态热传导下，木柱中线温差分别与木柱缺陷高度($R^2 \geqslant 0.964$)、深度($R^2 \geqslant 0.951$)呈极强的正相关。(4)在木柱缺陷较小的情况下，墙体表面温度不因缺陷的存在而发生明显改变。**【结论】**木柱的缺陷高度与深度是影响缺陷红外热成像检测效果的主要因素，红外热成像法应用于古建筑墙内暗柱材料缺失缺陷的筛查与评估是可行的。

关键词：古建筑；墙内暗柱；缺陷；红外热成像；无损检测
中图分类号：TU366.2；TN29 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)03−0132−13
引文格式：王皓宇，彭林，张厚江，等. 基于红外热成像的古建筑墙内暗柱材料缺失检测［J］. 北京林业大学学报，2024，46(3)：132−144. Wang Haoyu, Peng Lin, Zhang Houjiang, et al. Material deficiency test of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 132−144.

Material deficiency test of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings based on infrared thermal imaging

Wang Haoyu[1,2] Peng Lin[1,2] Zhang Houjiang[1,2] Lei Zhixun[1,2] Wang Hui[3]
Zhang Dian[3] Tang Jiaying[3] Guan Cheng[1,2]
(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Joint International Research Institute of Wood Nondestructive Testing and Evaluation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. The Palace Museum, Beijing 100001, China)

Abstract:［**Objective**］Fully-concealed wood column is one of the important load-bearing components of ancient wood buildings. Due to its humidity and lack of ventilation, it often has defects such as decay and material deficiency caused by serious decay, and it is easy to lose the original carrying capacity and stability. The structure of fully-concealed wood column in walls makes the existing detection methods limited and

收稿日期：2023−11−06 **修回日期：**2024−01−04
基金项目：故宫博物院科研项目(201909012)。
第一作者：王皓宇。主要研究方向：木材无损检测。Email：2769724627@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学工学院。
责任作者：张厚江，教授，博士生导师。主要研究方向：木材无损检测。Email：hjzhang6@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址：http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

easy to cause irreversible damage. Therefore, based on the principle of infrared thermal imaging, this study carried out theoretical and experimental research on the detection of material deficiency of fully-concealed wood column in walls, in order to lay a part of the preliminary foundation for the final establishment of the non-destructive inspection method of fully-concealed wood column defects in walls based on infrared thermal imaging. [**Method**] Firstly, the heat transfer process of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings was discussed from the theoretical point of view, and the temperature formula of the wood column area and the pure wall area under steady state was deduced, and the factors affecting the temperature change in the material deficiency defect area of the wood column were analyzed. Then, the test model was established, and the infrared inspection test of fully-concealed wood column in walls was carried out to collect the infrared image. Finally, by analyzing the infrared heat map, we discussed the relationship between the material deficiency defect size of fully-concealed wood column in walls and the temperature distribution of the wall surface. [**Result**] (1) The theoretical research showed that the transverse thermal conductivity of wood was much smaller than that of the wall, and the temperature corresponding to the outer surface of the wood column wall was lower given the same heating temperature on the surface. The detection effect of the fully-concealed wood columns in the detection wall was mainly affected by the defect size, i.e., the defect height and the defect depth. (2) The test results showed that under the condition of steady heat conduction, the external surface temperature of the wall at the wood column was lower than that of the pure wall, i.e, the color of the infrared image at the former was lighter. The surface temperature of the wall became higher and the color of the infrared image became darker. The higher the defect height was, the greater the range of high temperature caused by defects was. The higher the defect depth was, the higher the temperature in the defect area was. (3) In the case of unsteady heat conduction, the temperature difference in the middle line of the wood column showed a strong positive correlation with the height ($R^2 \geqslant 0.964$) and depth ($R^2 \geqslant 0.951$) of wood column defects. (4) In the case of small wood column defects, the surface temperature of the wall didn't change significantly due to the existence of defects. [**Conclusion**] The height and depth of defects of fully-concealed wood column are the main factors affecting the detection effect of defects by infrared thermal imaging. It is possible to use infrared thermal imaging method to screen and evaluate the material deficiency defect of fully-concealed wood column in walls of ancient buildings.

Key words: ancient architecture; fully-concealed wood column in walls; defect; infrared thermal imaging; nondestructive testing

中国木结构古建筑是人类文明长河中最悠久持续的传统建筑之一，其体系的完备和规范无与伦比，堪称中华文化瑰宝中的璀璨明珠[1]。木柱是木结构古建筑的关键承重构件之一，支撑着建筑顶部的全部重量。古建筑木柱根据其与墙体间的位置关系，可分为露明柱、半露明柱和墙内暗柱 3 类[2]。其中，墙内暗柱是指完全被墙体包裹的木柱，因其根部处于易潮湿和缺乏通风的环境，易产生腐朽及由严重腐朽导致的材料缺失等缺陷。这些缺陷会使木柱丧失原有的承重能力，给整个古建筑的安全带来隐患。

为了检测古建筑木柱内部以及被墙体遮挡处的缺陷，往往需要采用无损检测技术，这类非破坏式检测可在尽量保持材料和结构完整的前提下，利用现代物理手段和仪器对其缺陷情况以及物理力学性能进行检测与分析[3−4]。根据 T/CECS714—2020《古建筑木结构检测标准》[5]和 DB11/T1190.1—2015《古建筑结构安全性鉴定技术规范第一部分》[6]，目前用于检测古建筑木柱缺陷的方法主要有微钻阻力法和应力波法等。陈勇平等[7]通过分析微钻阻力曲线的轮廓和走势，实现了对瓜棱柱露明柱内部结构的精确探测，从而推断出早期和后期瓜棱柱维修的差异。段新芳等[8]采用应力波测定仪 FAKOPP 对塔尔寺大金瓦殿部分木构件中的木柱进行了检测，结果表明应力波技术可以判断和测量木构件内部的缺陷情况和力学强度。张典等[2]、于永柱等[9]对故宫养心殿墙体木柱(半露明柱和墙内暗柱)缺陷状况进行了无损检测研究，对半露明柱的检查充分利用了木柱外露表面提供的仪器操作空间，而墙内暗柱利用透风墙体的通风口拆除部分砖块形成的拆口，作为仪器操作空间进行检查，并利用有限元进行了安全性分析。Kandemir-Yucel 等[10]利用超声波速测量技术与其他技术结合对土耳其清真寺中的木结构进行无损

检测，评估包括木柱在内的结构木构件的保存状态、潮湿情况与修复情况。

到目前为止，古建筑木柱无损检查研究和应用多针对的是露明柱和半露明柱，而对墙内暗柱缺陷状况检测相对很少，且往往需要利用墙内暗柱透风口并拆除部分砖块形成的拆口进行检测。这种墙内暗柱检查方式在一定程度上会破坏古建筑原有结构与形貌，且由于仪器无法全面铺开，存在检测死角，检测效果并不理想。因此，亟需一种不破坏古建筑结构的墙内暗柱无损检查方法。

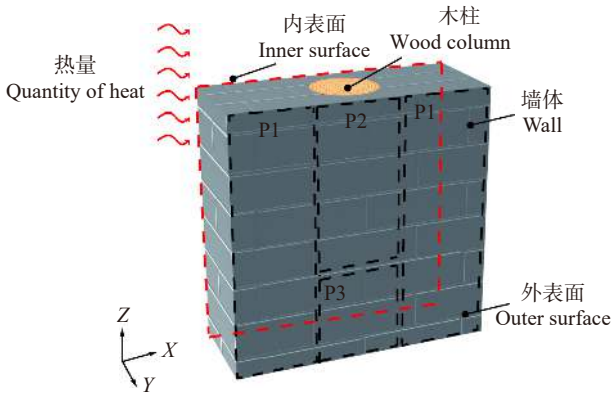
红外热成像技术利用物体会按照温度辐射不同波长电磁波的原理，将检测物体发出的红外辐射转换为可视化温度场，实现对物体的缺陷测量[11]。有研究者将红外热成像技术应用到墙壁外保温层的热工缺陷、表面开裂和墙面间空鼓等的检测中。Grinzato 等[12]通过热像仪记录温度的空间分布与时间演变过程，基于最合适的局部热参数对数据进行处理，以检测出墙体的缺陷分布，但无法检测具有较低热信号特征的缺陷。Tavukçuoğlu 等[13]将红外热成像技术与超声波相结合，有效地检测了历史砌体的裂缝，并区分裂缝深度，但需要对区域进行连续热监测，以升温速率判断深度。Afshani 等[14]基于被动热成像检测损伤的混凝土结构中的缺陷，解释了由于传导、对流和辐射机制引起的混凝土管片、隧道空气和空隙内部空气中的热量传递，并分析了空洞类型、温差和空洞深度对检测精度的影响。Martínez 等[15]利用被动红外热成像技术评估西班牙马德里木质屋顶建筑的缺陷情况，证明该技术可以检测热变化的缺陷，但环境因素与检测时间会影响热检测的效果，且没有进行主动热成像的缺陷检测研究。

本研究团队针对古建筑墙内暗柱缺陷状况检测困难的问题，基于红外热成像无损检测技术开展了相关研究。首先，从理论上分析墙体与木柱传热机理，以及缺陷参数对热传导的影响；然后，建立试验模型，进行墙内暗柱材料缺失红外检查试验，采集红外图像；最后，通过分析获得的红外热图，探讨墙内暗柱缺陷大小与墙体表面温度分布之间的关系。以期为基于红外热成像的墙内暗柱缺陷状况的材料缺失无损检测方法的建立，奠定部分前期基础。

1 热成像检测理论基础

1.1 红外热成像检测原理

因为墙内暗柱根部最易腐朽，所以按照外表面垂直剖面介质的不同，将古建筑墙内暗柱观测面分为 3 个部分：纯墙体区域 P1、完整木柱区域 P2、缺陷木柱区域 P3（图 1）。本研究模拟冬季暖气等加热设备加热室内墙体的环境，近似认为加热设备给墙面施加均匀稳定的热。此时室内的墙体表面靠近热源，被定义为内表面，远离热源的室外墙体表面被定义为外表面。当 P3 区域木柱出现缺陷缺失时，热量辐射到墙壁内表面并传热至观测面（外表面），导致观测面上 P1、P2、P3 区域的温度存在一定差异，从而产生不同的红外表征，红外热像仪利用这种辐射差异，在形成的红外热图上出现其相对应的“热区”和“冷区”。因此，可以通过红外热像图红外表征分析古建筑墙内暗柱缺陷情况。



P1. 纯墙体区域 Pure wall area; P2. 完整木柱区域 Complete wood column area; P3. 缺陷木柱区域 Defective wood column area

图 1 墙内暗柱观测区域划分

Fig. 1 Division of observation area of fully-concealed wood column in walls

1.2 传热机理

1.2.1 墙体与木柱传热机理

以 *Y-Z* 平面为剖面剖切墙体，图 2a 为 P1 区域单层砖墙体导热[16]示意图，其两个表面分别维持在均匀且恒定的温度 T_0、T_1 中，图 2b 为 P2 区域 3 层导热示意图，第一层和第三层为砖墙体，第二层为木柱，两个表面分别维持在均匀且恒定的温度 T_0、T_3 中。该导热问题的数学描述为

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2}=0 \tag{1}$$

式中：T 为温度，℃；x 为表示长度的横坐标，m。

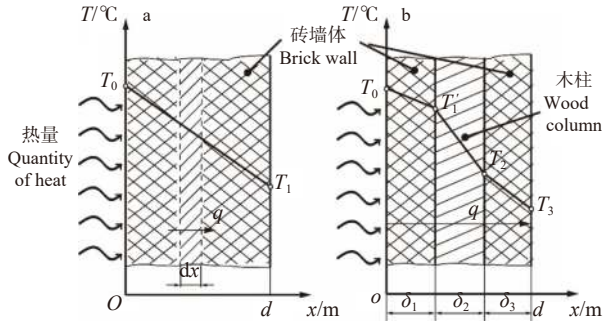
将式(1)连续积分两次，并将边界条件 $x=0$，$T=T_0$ 和 $x=d$（墙体厚度），$T=T_1$ 分别代入其中，可得出温度分布。

$$T=\frac{T_1-T_0}{\delta}x+T_0 \tag{2}$$

因为 δ、T_0、T_1 为定值，所以温度呈线性分布，即温度分布曲线的斜率是常数。

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}=\frac{T_1-T_0}{\delta} \tag{3}$$

对于表面积为 A（m^2），两侧表面各自维持均匀温度的墙壁，将式(3)代入傅里叶定律的表达式可得



T_0. 加热温度 Heating temperature; T_1. 单层墙外表面温度 Single-layer wall exterior surface temperature; T_1'. 3 层墙第一、二层之间温度 Temperature between the first and second layers of the three-layer wall; T_2. 3 层墙第二、三层之间温度 Temperature between the second and third layers of the three-layer wall; T_3. 3 层墙外表面温度 Three-layer wall exterior surface temperature; d. 墙体厚度 Wall thickness; δ_1. 第一层墙厚度 First layer wall thickness; δ_2. 第二层墙厚度/木柱直径 Second layer wall thickness/wood column diameter; δ_2. 第三层墙厚度 Third layer wall thickness; q. 热流密度 Heat flux

图 2　墙体一维热传导

Fig. 2　One-dimensional heat conduction of wall

$$q=\frac{\Phi}{A}=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{4}$$

式中：q 为热流密度，W/m^2；Φ 为热流量，W；λ 为导热系数，W/(m·℃)。

R 为单位面积热阻，m^2·℃/W，它表示热量传递过程中的阻力，热阻越小则单位面积热流量越大。

$$R=\frac{\Delta T_x}{q}=\frac{\delta}{\lambda} \tag{5}$$

式中：δ 为墙体沿 x 轴方向的厚度，m；ΔT_x 为平壁两侧的温差，℃。由式(5)可知热传导中热阻与材料厚度和导热系数有关。

将 P2 区域的稳态导热过程简化为 3 层平壁导热，理想状况下假设墙壁与木柱界面无接触热阻，则热流密度的计算式为

$$q=\frac{T_0-T_3}{\dfrac{\delta_1}{\lambda_\mathrm{w}}+\dfrac{\delta_2}{\lambda_\mathrm{t}}+\dfrac{\delta_3}{\lambda_\mathrm{w}}} \tag{6}$$

式中：λ_w、λ_t 分别为墙体和木柱横向导热系数，W/(m·℃)。

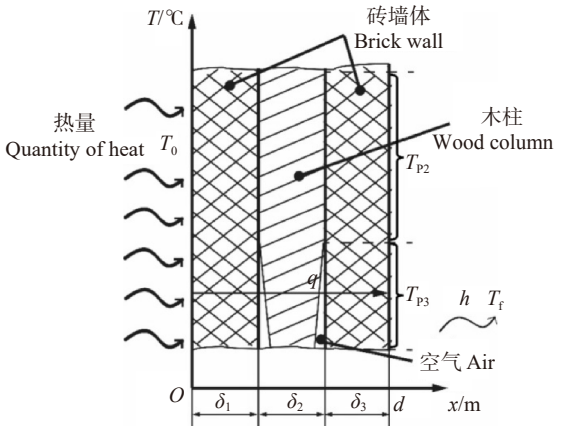
木材细胞中空，内部空气是热电不良导体，故木材是一种天然的、隔热性能较好的材料。落叶松的横向导热系数远小于墙体导热系数，即 $\lambda_\mathrm{w}>\lambda_\mathrm{t}$。根据式(5)可知墙体单位面积热阻 R_w < 木柱单位面积热阻 R_t，根据式(6)可知纯墙体区域热流密度 q_P1 > 完整木柱区域热流密度 q_P2。故相比于 P1 区域，P2 区域的单位热阻较大，传导能力较弱。加热面加热温度相同的情况下，P2 区域所对应的温度偏低，故可以通过区域的温度差异实现墙内暗柱位置的判断。

1.2.2　缺陷处传热原理

为了简化计算我们将木柱看成墙体结构中连续的一部分(图 3)，无接触热阻。由于古建筑墙体木柱的墙壁面积与厚度之比很大，将其近似为一个无限大平壁，符合如下条件[17]。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{7}$$

式中：ρ 为墙体的密度，kg/m^3；c 为墙体的比热容，J/(kg·℃)；T_f 为对流换热的流体温度，℃；h 为表面换热系数，W/(m^2·℃)。当时间 $t=0$ 时，$T=T_0$；当 $x=0$ 时，$\partial T/\partial x=0$；当 $x=d$ 时，$\partial T/\partial x=h(T-T_\mathrm{f})$。



T_0. 加热温度 Heating temperature; δ_1. 第一层墙厚度 First layer wall thickness; δ_2. 第二层墙厚度/木柱直径 Second layer wall thickness/wood column diameter; δ_2. 第三层墙厚度 Third layer wall thickness; q. 热流密度 Heat flux; h. 传热系数 Heat transfer coefficient; T_f. 流体温度 Fluid temperature; T_P2. P2 区域温度 P2 area temperature; T_P3. P3 区域温度 P3 area temperature

图 3　墙内暗柱热传导示意图

Fig. 3　Heat conduction diagram of fully-concealed wood column in walls

对于无缺陷的墙体传热，引入过余温度 $\theta=T-T_\mathrm{f}$，则导热微分方程可表示为

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} \tag{8}$$

式中：当 $t=0$ 时，$\theta=\theta_0=T-T_\mathrm{f}$；$T_\mathrm{f}$ 为环境流体温度，℃；α 为热扩散率，$\alpha=\lambda/\rho c$。将数据进行无量纲化，$F=\theta/\theta_0$ 作为替代后的无量纲温度变量，$X=x/d$ 作为替代后的无量纲坐标变量，从而得到

$$\frac{\partial F}{\partial(\alpha t/d^2)}=\frac{\partial^2 F}{\partial X^2} \tag{9}$$

当 $t=0$ 时，$F=F_0=1$；当 $X=0$ 时，$\partial F/\partial X=0$；当 $X=1$ 时，$\partial F/\partial X=hd\cdot F/\lambda$。

本研究涉及流体，傅里叶数为 $Fo=\alpha t/d^2$，表示墙体热传导过程替代后的时间变量；毕渥数为 $Bi=hd/\lambda$，表示墙体内部单位面积的热阻与表面处外部热阻之比，其中 d 为墙体厚度(特征长度)。从而得到无量纲化的温度变量 F，F 是傅里叶数 Fo、毕渥数 Bi 和无量纲化后的坐标变量 X 的函数，可写为

$$F=g(Fo,Bi,X) \tag{10}$$

假设木柱缺陷部位的墙体外表面温度为 T_{P3}，木柱无缺陷部位的墙体外表面温度为 T_{P2}，那么可以得到有木柱缺陷和无木柱缺陷部位墙体外表面的温度之差，即

$$\Delta T = T_{P2} - T_{P3} \tag{11}$$

考虑到木柱环形套筒式缺陷和尺寸，即缺陷高度 l、缺陷深度 w 与木柱直径 δ_2 的作用，ΔT 可以表示为

$$\Delta T = g(\theta_0, t, \alpha, d, \lambda, h, l, w, \delta_2) \tag{12}$$

式中：θ_0 为初始时刻的过余温度，℃；t 为时间，s；α 为热扩散率，m^2/s；d 为墙体厚度，m；λ 为导热系数，W/(m·℃)或 J/(m·℃·s)；h 为传热系数，J/(m^2·℃·s)；l 为缺陷高度，m；w 为缺陷深度，m；δ_2 为木柱直径，m。则基本量纲为 s、℃、m、J。

依据量纲分析法基本原理—π 定理，选择 ΔT、t、λ 和 d 这 4 个有量纲的物理量，则剩余物理量在所参与物理过程中的函数关系可表示为

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{\theta_0}{\Delta T^{\alpha 1} t^{y1} \lambda^{z1} d^{w1}}, \pi_2 = \frac{\alpha}{\Delta T^{\alpha 2} t^{y2} \lambda^{z2} d^{w2}}, \\ \pi_3 &= \frac{h}{\Delta T^{\alpha 3} t^{y3} \lambda^{z3} d^{w3}}, \pi_4 = \frac{\alpha}{\Delta T^{\alpha 4} t^{y4} \lambda^{z4} d^{w4}}, \\ \pi_5 &= \frac{w}{\Delta T^{\alpha 5} t^{y5} \lambda^{z5} d^{w5}}, \pi_6 = \frac{w}{\Delta T^{\alpha 6} t^{y6} \lambda^{z6} d^{w6}} \end{aligned} \tag{13}$$

应用量纲和谐原理，各 π 项的指数为

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\theta_0}{\Delta T}, \quad A_2 = \frac{\alpha t}{d^2}, \quad A_3 = \frac{hd}{\lambda}, \\ A_4 &= \frac{l}{d}, \quad A_5 = \frac{w}{d}, \quad A_6 = \frac{\delta_2}{d} \end{aligned} \tag{14}$$

则得到无量纲方程

$$\Delta T = f\left(\frac{\alpha t}{d^2}, \frac{hd}{\lambda}, \frac{l}{d}, \frac{w}{d}, \frac{\delta_2}{d}\right) \cdot \theta_0 \tag{15}$$

式中：傅里叶数 $\alpha t/d^2$、毕渥数 hd/λ 为热力学参量，其大小跟温度环境与材料自身性质有关；θ_0 表示初始时刻的过余温度，与温度环境有关；直径 δ_2 为定值。故缺陷高度 l、缺陷深度 w 与为主要研究变量。利用热成像技术检测墙内暗柱的检测效果主要受到缺陷尺寸(即缺陷高度 l、缺陷深度 w)的影响。本理论分析将为后续试验组的设置和试验结果的分析提供依据。

2 材料与方法

2.1 材 料

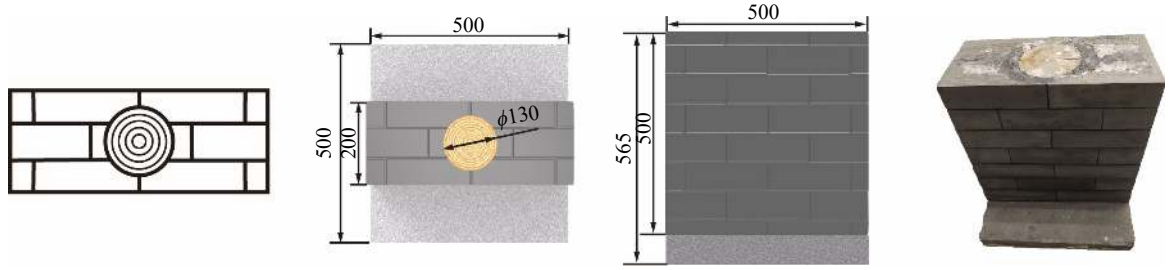
2.1.1 墙体模型

图 4 为试验用墙体模型及其尺寸。古建筑各部位和构件之间的比例关系构成了古建筑设计和施工的固定法则，《清式营造则例》[18]规定 “隔断墙，在柱之里外，每面加厚，按柱径四分之一，故墙厚合一柱径半”，即墙厚度为柱厚度的 1.5 倍。因为实际模型尺寸与质量较大，很难在实验室环境下加工放置与全面加热，故按清式带斗拱建筑檐柱尺寸中九等材的三分之一建造，木柱直径为 130 mm，墙壁厚度为 200 mm。

根据实地检测，发现墙体与木柱间有很小的空隙，几十至几百年间空隙中积累的碎土、灰尘等导致墙体与木柱间大部分相接触。故在墙体模型设计与建造中，在中心位置设置一个直径 130 mm、高度 500 mm 的圆柱空洞，每次试验开始前将不同的木柱试件放入其中，木柱试件与墙体的配合状态为接触性过渡配合。

另外，古建筑墙体木柱往往设有“透风”，即通风口，起到空气交换、循环的作用。但长年累月的碎土、灰尘沉积使通风口空气流通受到很大的限制，通风口几乎失去作用，故设计试验模型时忽略了通风口因素。墙内暗柱模型尺寸如图 4b 所示。

在古建筑建造过程中，工匠将木柱底部与建造于地面上的柱础相接，以防木柱受潮腐蚀。为了最大程度地模拟实际情况，本研究在制造模型时，于底部构造了台基与墙体相连，此台基尺寸为 500 mm(长) × 500 mm(宽) × 65 mm(厚)，试验墙体模型如图 4c 所示。



a 墙内暗柱
Fully-concealed wood column in walls

b 墙体和木柱尺寸
Wall and wood column dimensions
单位 Unit: mm

c 试验墙体模型
Test wall model

图 4 试验墙体模型及其尺寸

Fig. 4 Model and size of wall for test

2.1.2　木柱试件

结合参考文献与课题组现场检测经验，古建筑墙内暗柱缺陷主要发生在其下部，根部最严重，往上逐渐减轻。缺陷形式主要是木柱与墙壁接触表面的腐朽，以及由腐朽严重后形成的材料缺失，形状为三角形截面的环形套筒（图 5a、b）。为便于试验开展，本研究选用北京古建筑木构件常见树种落叶松（*Larix gmelinii*）木材加工木柱试件，且用去除部分木材的形式模拟木柱缺陷，后文中提到的缺陷均为材料缺失缺陷。

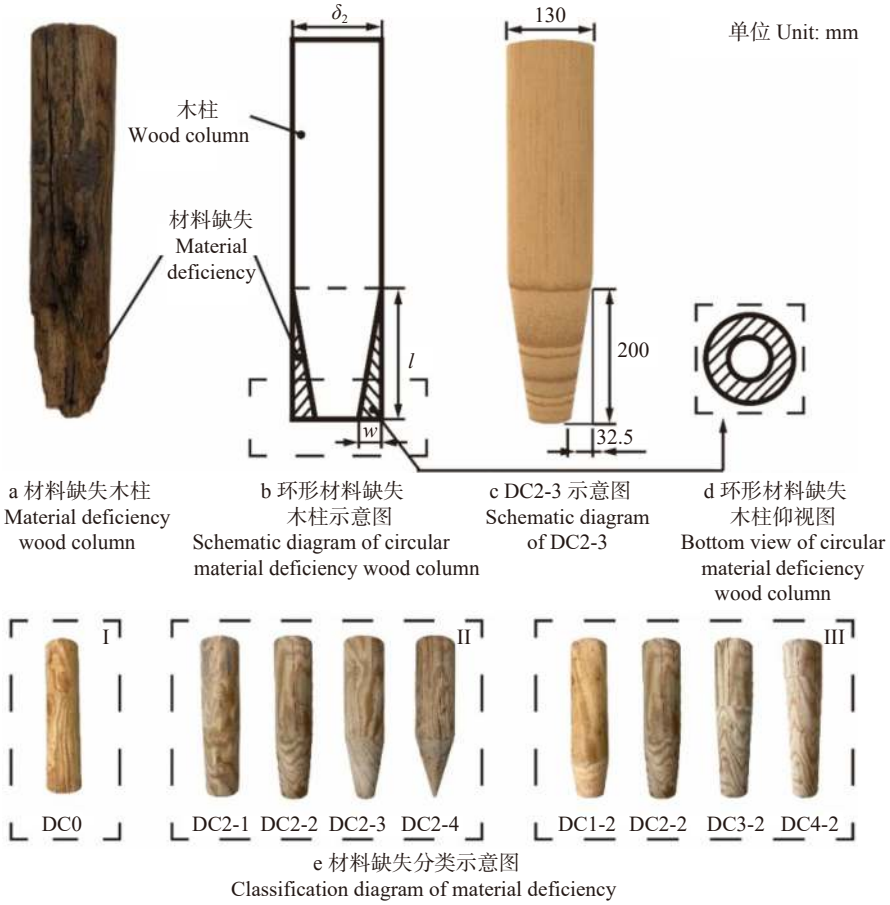
将落叶松木材自然风干，使用 YM-50A 含水率测试仪测得试件平均含水率约为 8%。参照 GB/T 18000—1999《木材缺陷图谱》[19]，沿顺纹方向对木材试件进行车削从而获得落叶松缺陷木柱。

为探究木柱材料缺失的缺陷尺寸对红外热成像检测效果的影响趋势，采用控制变量法，对不同缺陷高度 l 与缺陷深度 w 进行组合。缺陷木柱试件编号以 DC*l*-*w* 表示，l 表示为缺陷高度编号，w 表示为缺陷深度编号（图 5e）。例如 DC2-3 表示缺陷高度 200 mm、缺陷深度 32.5 mm 的缺陷木柱试件（图 5c）。无缺陷木柱试件编号为 DC0；缺陷木柱试件编号从 DC1-1 到 DC4-4，共 16 组（表 1）。

2.2　红外热成像检测方法

搭建墙体木柱缺陷红外热成像检测系统，主要构成如图 6a 所示。试验控制在室温（20 ± 0.5）℃ 的环境下进行，试验前将墙体和检测系统提前 48 h 放置在室温为（20 ± 0.5）℃ 的室内静置。实验室环境光线会影响结果的准确性，为了减少光照对本试验的影响，本试验在暗室内进行，并使用遮光布完全遮盖住检测系统。为保证加热的均匀性，基于 GB/T 10295—2008《绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法》[20]设计均匀热激振装置。该装置通过恒定温度接触式电加热层发热，接触式电加热层外侧填充保温隔热材料，通过紧贴的铝板将热激振均匀传导到墙体加热面。

采用 Fluke Ti55 红外热成像仪拍摄红外热图，热像仪探测类型为 320 × 240 像素的焦平面阵列，带有 25 μm 间距的 Vanadium Oxide 非制冷微量热型探测器，其捕获光谱带为 8 ~ 14 μm，温度测量量程为−20 ~ 350 ℃，能满足实验所需精度。拍摄时将红外热像仪放置于距离墙体模型 2 m 处，设置电加热装置温度为 70 ℃，加热时间为 24 h，墙体表面发射



l. 缺陷高度 Defect height; *w*. 缺陷深度 Defect depth; δ_2. 木柱直径 Wood column diameter

图 5　木柱试件材料缺失缺陷及其分类示意图

Fig. 5　Material deficiency defects and classification schematic diagram of wood column specimens

表 1 木柱试件几何参数表

Tab. 1 Geometric parameters of defective wood column specimen

模型编号 Model No.	缺陷高度 Defect height (l)/mm	缺陷深度 Defect depth (w)/mm
DC0	0	0
DC1-1	100	9.0
DC1-2	100	19.0
DC1-3	100	32.5
DC1-4	100	65.0
DC2-1	200	9.0
DC2-2	200	19.0
DC2-3	200	32.5
DC2-4	200	65.0
DC3-1	300	9.0
DC3-2	300	19.0
DC3-3	300	32.5
DC3-4	300	65.0
DC4-1	400	9.0
DC4-2	400	19.0
DC4-3	400	32.5
DC4-4	400	65.0

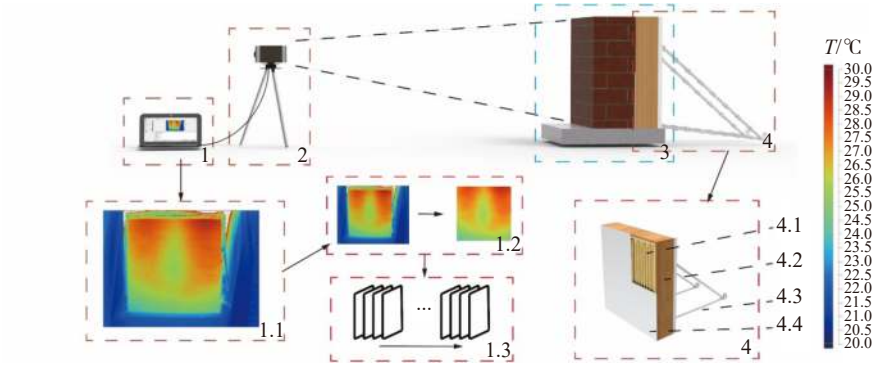
率为 0.9，采集观测表面红外热图的频率为每小时一张，使用 Elitech BT-3 型温度计进行室温的检测并记录。

选择拍摄墙内暗柱墙壁的 4 个直角点进行透视变换，获得的正视图的热图序列混有随机噪声与图像信息，采用中值滤波的方法去除（图 6a 的 1.2）。然后将红外热图按照时间顺序排列（图 6a 的 1.3），获得连续热图序列（以试件 DC2-3 为例，图 6b）。最后，对采集到的非稳态、稳态温度数据进行数据分析。

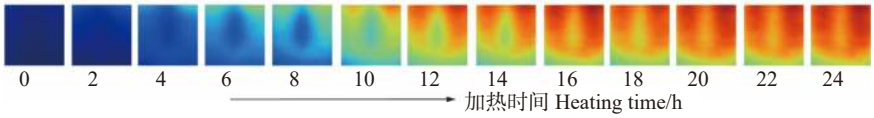
3 结果与分析

以图 6b 所示的木柱试件 DC2-3 试验红外热图为例，自加热第 6 小时起，纯墙体区域 P1 与木柱区域 P2、P3 的温度存在显著差异，纯墙体区域温度高于木柱区域表面，即木柱区域颜色更浅。这是因为在传热方向上木柱的传热系数远小于墙体，相比纯墙体，包含木柱的墙体热阻更大，传热能力更弱。在其他木柱试件的红外热图上，均有相似的现象。另外，由图 6b 还可观察到墙体底部存在一个热流相对密集、温度较低的热桥[21]区域，这是由台基吸热造成的。

从图 6b 中同时可以发现：完整木柱区域 P2 与缺陷木柱区域 P3 的温度在加热过程中也存在差异，自加热第 4 小时开始，P3 区域的温度大于 P2 区域的温度，即缺陷木柱区域颜色比完整木柱区域更深。从热传导的角度，这种现象可以解释为：在加热初期，由于墙体较厚，传导、辐射、对流所传递的热



a 墙内暗柱缺陷检测系统示意图
Schematic diagram of fully-concealed wood column defect detection system in walls



b DC2-3 连续红外热图
Continuous infrared heat map of DC2-3

1. 电脑（1.1 Smartview4.3 所得红外热成像图像，1.2 透视变换、中值滤波，1.3 时序排列）Computer（1.1 Infrared thermal imaging images obtained by Smartview4.3, 1.2 Perspective transformation, median filtering, 1.3 Timing arrangement）；2. 红外热像仪 Infrared thermal imager；3. 墙内暗柱模型 Fully-concealed wood column in walls；4. 均匀热激励装置（4.1 自热式工业电加热装置，4.2 保温后盖，4.3 支撑桁架，4.4 铝板）Uniform thermal excitation device（4.1 Thermal industrial electric heating device, 4.2 Thermal insulation back cover, 4.3 Support truss, 4.4 Aluminum plate）

图 6 红外热成像检测系统和结果示意图

Fig. 6 Infrared thermal imaging detection system and result diagram

量无法在观测面上体现出来，此时各区域温度一致；加热中后期，P3 区域木柱缺陷处存在的热辐射与热对流现象，增强了热量对墙体的穿透力，造成缺陷木柱区域 P3 墙体外表面温度高于非缺陷区域 P2。由此可以得出，红外热成像检测技术可以对墙内暗柱材料缺失缺陷进行检测。

图 7 为 DC2-3 不同区域的中点位置温度变化图。当墙体加热 20～24 h 时，墙体表面的温度增长率不足 5%，并长期维持稳定。此时墙体内部的物理量在一段时间内保持稳定，或者变化缓慢，因此可以认为此时墙体已经达到稳态热传导。而 0～20 h 时，其内部物理量在持续变化，因此被认为是墙体的非稳态热传导阶段。

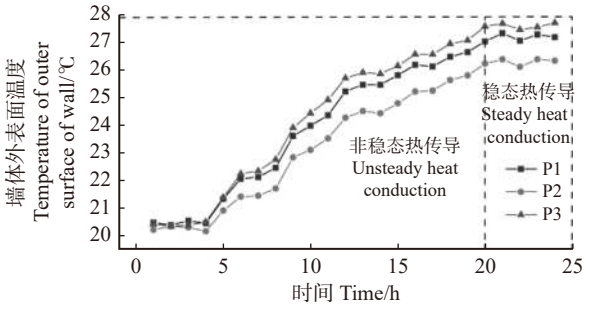


图 7　DC2-3 不同区域的中点位置温度变化图

Fig. 7　Temperature change diagram of midpoint in different regions of DC2-3

加热 20～24 h 的 P3 温度大于 P2 温度，验证了 1.2.1 节的理论分析。式(5)、(6)所体现的理论结果也可用于无透风口情况下墙内暗柱位置的判断。

3.1　稳态下红外热图分析

3.1.1　缺陷高度对热成像影响

图 8 分别为稳态下木柱试件 DC0、DC1-4、DC2-4、DC3-4、DC4-4 的红外热图。结果为固定变量重复验证试验所得，结果显示：DC0 木柱区域 P2 的温度由上至下逐渐减少，DC1-4 缺陷区域 P3 的温度与完整木柱区域 P2 温度基本一致，DC2-4、DC3-4、DC4-4 上的缺陷区域 P3 颜色比非缺陷区域 P2 颜色更深，即温度更高。随着木柱缺陷高度 l 的增加，温度分布形状由原先的“1 1”型逐渐转变为“U”型，而且底部缺陷高温区域随着缺陷高度 l 的增加而逐渐增大。这意味着随着缺陷高度的增加，缺陷的温度影响范围扩大了，根据热成像所得的缺陷温度影响范围判断墙内暗柱内的缺陷高度 l 是可能的。

3.1.2　缺陷深度对热成像影响

图 9 分别为稳态下木柱试件 DC0、DC3-1、DC3-2、DC3-3、DC3-4 的红外热图。结果为固定变量重复验证试验所得，结果显示：DC0 木柱区域 P2 的温度由上至下逐渐减少，DC3-1 缺陷区域 P3 的温度与完整木柱区域 P2 的温度近乎一致，DC3-2、DC3-3、DC3-4 的 P3 区域温度高于 P2 区域温度。随着缺陷深度 w 的增加，温度分布形状由原先的“1 1”型逐渐转变为“U”型，且缺陷区域 P3 的颜色逐渐变深，温度变高，但缺陷的影响范围几乎没有变化。这表明根据热成像所得的缺陷温度值判断墙体木柱的缺陷深度 w 也是可能的。

综合试验结果看，当缺陷深度小于等于 9 mm，缺陷高度小于等于 100 mm 时，无法观测到木柱缺陷所导致的观测面温度变化。这可能是因为：(1)缺陷尺寸小，缺陷内部空气量少，存在的热辐射和热对流现象弱；(2)墙体模型底部台基吸收了缺陷处所堆积的热量。

通过试验结果可以发现：不同缺陷尺寸模型下

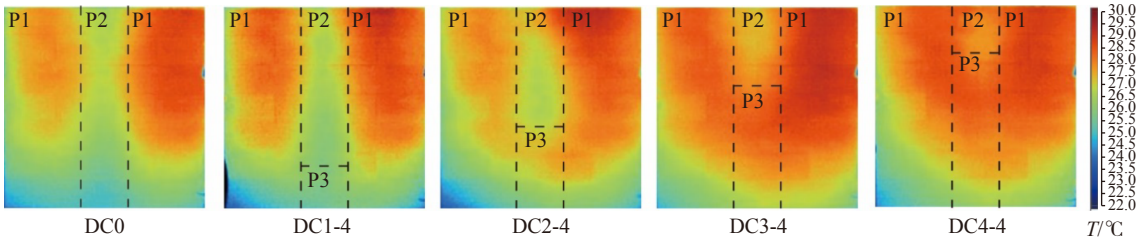


图 8　缺陷高度对热成像影响

Fig. 8　Effects of defect height on thermal imaging

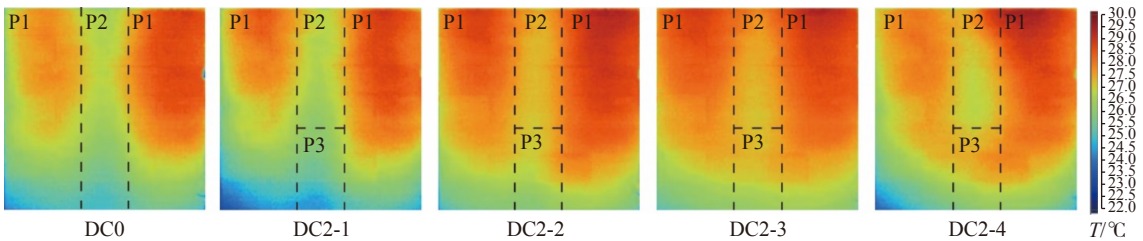


图 9　缺陷深度对热成像影响

Fig. 9　Effects of defect depth on thermal imaging

的试验现象差异主要体现在完整木柱区域与缺陷木柱区域的温度差异，缺陷高度 l、缺陷深度 w 可以影响热成像的检测结果。这也验证了 1.2.2 节的理论分析。

3.2 稳态下温度对比度分析

基于上述结论，提出稳态下墙壁区域与木柱区域之间温度对比度[22]这一概念，以此进一步分析缺陷高度与深度。从上至下提取木柱中线上温度，标记为 T_m；从上至下提取中线两侧距离 125 mm 处的温度，左侧的温度线标记为 M_1，右侧的温度线标记为 M_2。根据式(16)将同一高度下的 M_1 与 M_2 平均，并与 T_m 作差，得到温度对比度 ΔC。

$$\Delta C = \frac{M_1 + M_2}{2} - T_m \tag{16}$$

3.2.1 缺陷高度对温度对比度的影响

图 10 为不同缺陷深度 w 下，缺陷高度 l 对温度对比度的影响。图 10a 展示了缺陷深度为 9 mm 时，通过改变缺陷高度所得的温度对比度折线图。从图中可以看出：在区间范围内，折线趋势基本趋于一致。证明在这一较小缺陷深度下缺陷高度对温度对比度的影响不明显，这与 3.1.1 结论一致。从图 10b、c、d 的虚线位置可以看出：温度对比度分别在缺陷高度约为 100、200、300、400 mm 时迅速降低至同一位置，并且随着缺陷深度的增大这种情况越发的明显。木柱高度尺度上的缺失缺陷只能改变其温度对比度变化的相应位置，但无法改变其底部区域所对应的温度对比度的值。

3.2.2 缺陷深度对温度对比度的影响

图 11 为处理所得的温度对比度，固定缺陷的高度改变缺陷深度进行分组的结果。图 11a 为缺陷高度 100 mm 时，改变缺陷深度所得的温度对比度折线图。从图中可以看出：在 0 ~ 500 mm 范围内，其折线趋势基本趋于一致。可以得到结论：过小的缺陷深度并不能改变其温度对比度的大致趋势，这与 3.1.2 结论一致。图 11b、c、d 分别为缺陷高度 200、300、400 mm 时，改变缺陷深度所得的温度对比度折线图，在缺陷区间 P3 内，随着缺陷深度的逐渐增加，其温度对比度下降趋势由缓变快，在非缺陷区域 P2 内，温度对比度的变化趋势趋于一致。缺陷深度的改变无法影响温度对比度降低时的位置，但可以改变温度对比度的最低温度。

综上所述，木柱高度尺度上的缺陷只能改变其温度变化的相应位置，深度尺度上的缺陷可以改变温度对比度的最低值。同时，研究结果表明红外热成像在检测缺陷时存在一定的限制，即无法有效检测缺陷高度与缺陷深度过小的墙内暗柱缺陷。

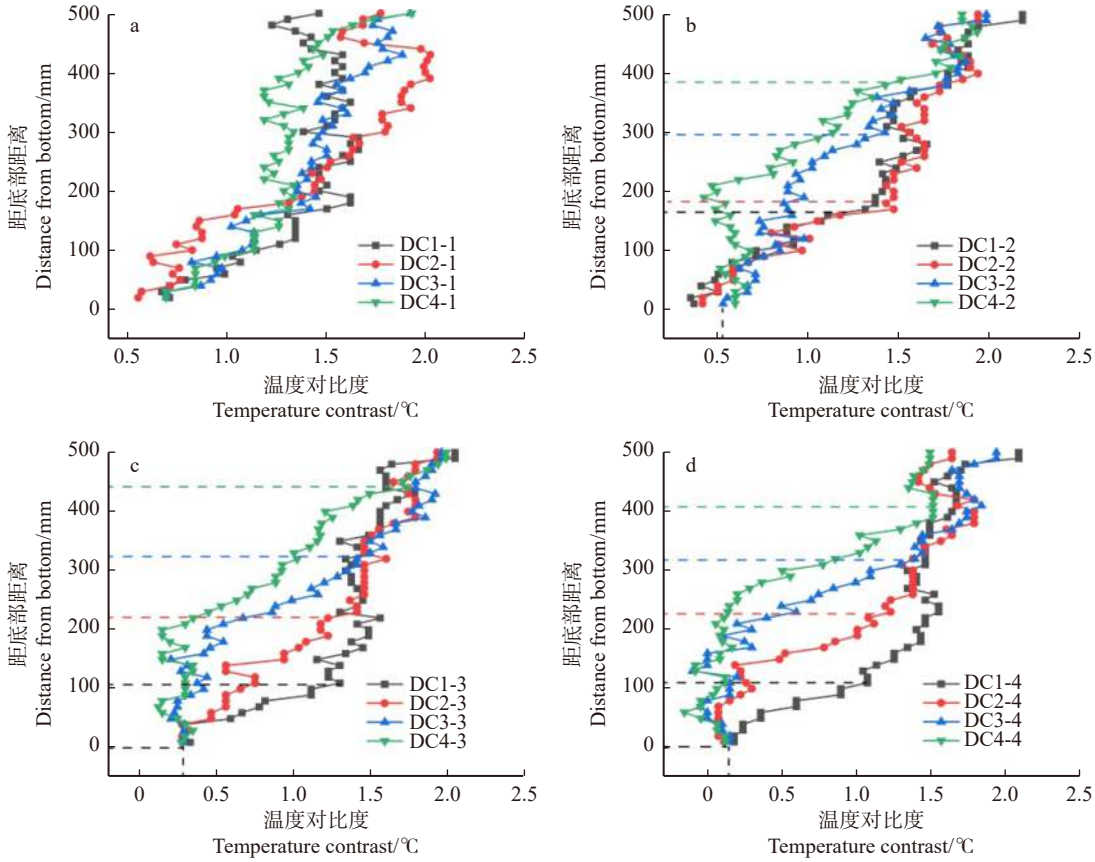


图 10 缺陷高度对温度对比度的影响

Fig. 10 Effects of defect height on temperature contrast

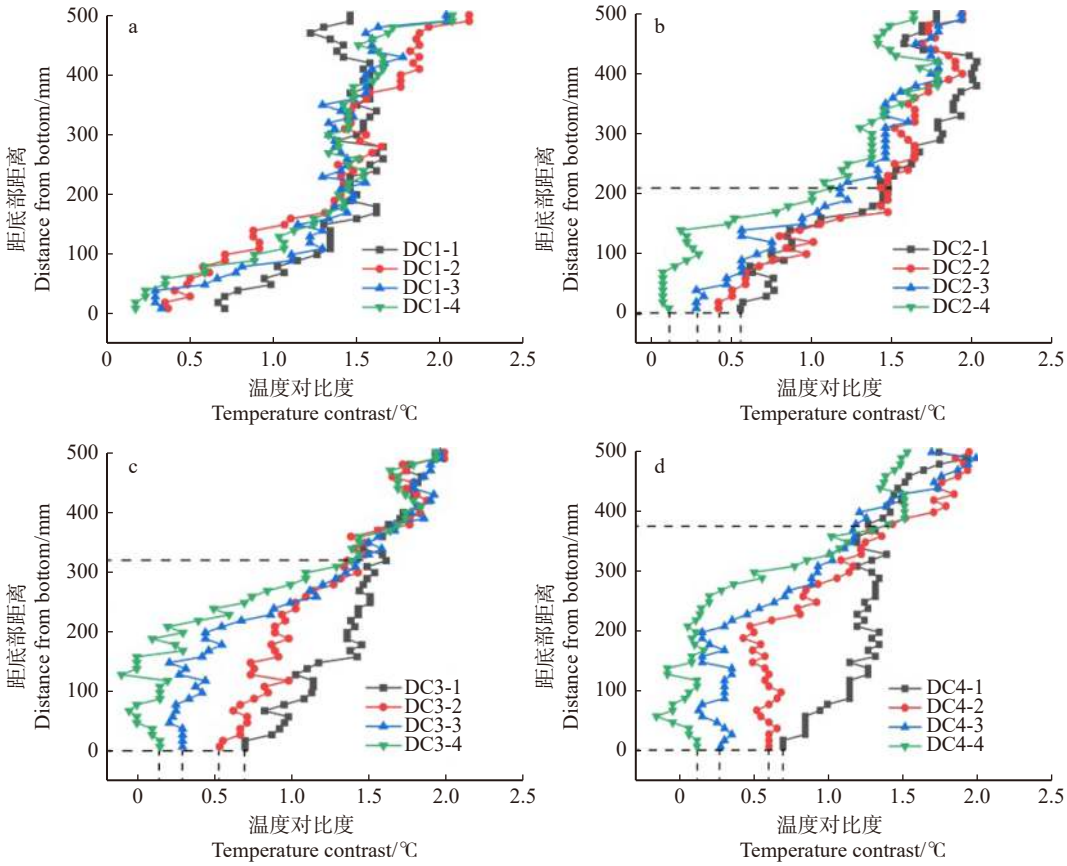


图 11　缺陷深度对温度对比度的影响

Fig. 11　Effects of defect depth on temperature contrast

为了更具体地说明单一变量对温度对比度的影响，通过计算温度对比度的积分值，可以得出一个量化的结果，用于描述整体的温度变化情况。在本研究中，木柱的缺陷程度越大，其温度对比度的下降趋势越明显，积分值越小。使用离散点积分公式，对温度对比度进行积分（式 18），得到的温度对比度积分如表 2 所示。

$$S=\int_{x_1}^{x_n} f(x)\,\mathrm{d}x \approx \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}(x_{i+1}-x_i)[f(x_{i+1})+f(x_i)] \tag{17}$$

图 12 显示了单一变量与温度对比度积分间的关联性，缺陷高度 l 或深度 w 越大，其温度对比度积分值越小。由上文可知，温度对比度对过小的缺陷高度和缺陷深度都不敏感，因此去除缺陷深度 9 mm、缺陷高度 100 mm 的情况，得到较大的缺陷高度、深度与温度对比度积分值之间呈较高的负相关性。其中，当 $l \geqslant 200$ mm 时，缺陷高度与温度对比度积分的决定系数 > 0.826；当 $w \geqslant 19$ mm 时，缺陷深度与温度对比度积分的决定系数 > 0.993。

3.3　非稳态下红外热图分析

根据红外热图所观测到的墙壁表面温度场分布情况，从上至下提取木柱中线上的温度，标记为 T_m（图 13）。试验无法实现理想中的一维传热，故在 260 ~ 500 mm 范围内会产生温度的降低；降至低值时，由于材料缺失缺陷导致热量滞留在底部，故在 150 ~ 260 mm 范围内会产生温度的抬升；最后因为底部台基传热的影响，在 0 ~ 150 mm 范围内温度急剧降低。规定距底部距离 0 ~ 500 mm 的第一次温度最低值为 T_{min}，最高值为 T_{max}，T_{max} 与 T_{min} 作差得到温差 ΔT[23]。

表 2　各缺陷尺寸的温度对比度积分

Tab. 2　Temperature contrast integral for each defect size

缺陷高度 Defect height/mm	缺陷深度 Defect depth/mm			
	9.0	19.0	32.5	65.0
100	676.44	652.41	636.22	621.68
200	696.33	666.96	596.57	495.85
300	685.92	582.95	502.53	404.21
400	615.91	500.73	385.24	287.24

3.3.1　最佳观测时间分析

以 DC2-2 为例，根据其中线温度得到非稳态温度差 ΔT（表 3），可以观察到温差 ΔT 在加热 4 ~ 6 h 达到最大值；随着加热时间增加，ΔT 的值先增大后减小。这可能是由于在加热初期，由于墙体较厚，传导、辐射、对流所传递的热量无法在观测面上体现出

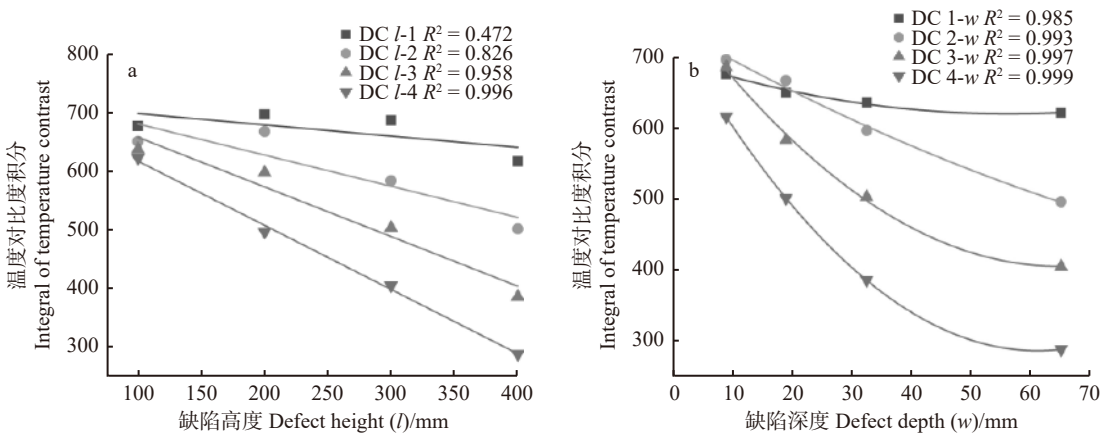


图 12 单一变量与温度对比度积分间的关联性

Fig. 12 Correlation between single variable and temperature contrast integral

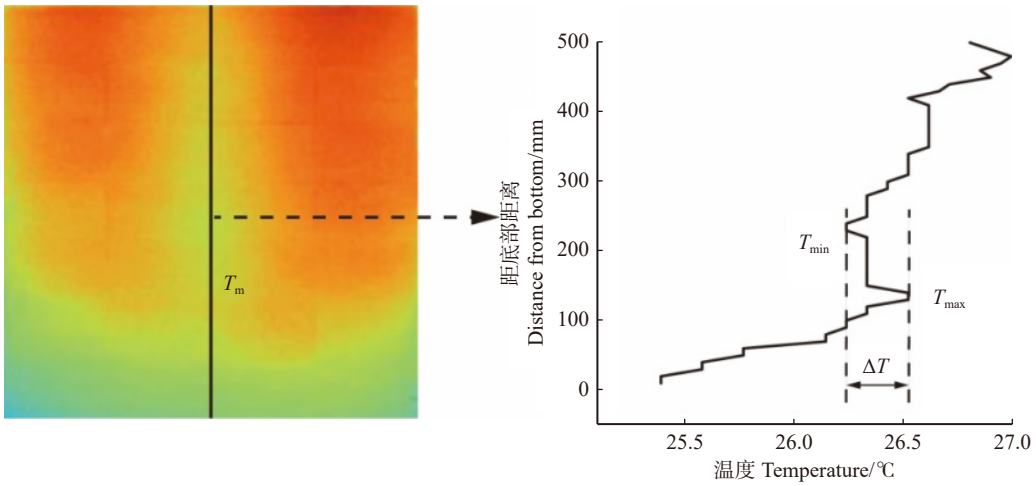


图 13 T_m 温差示意图

Fig. 13 Schematic diagram of T_m temperature difference

表 3 DC2-2 各时刻非稳态温度差（ΔT）

Tab. 3 Unsteady temperature difference（ΔT）of DC2-2 at each time

加热时间 Heating time/h	ΔT/℃	加热时间 Heating time/h	ΔT/℃
0 ~ 2	0 ~ 0.049	12 ~ 14	0.069 ~ 0.257
2 ~ 4	0.049 ~ 0.445	14 ~ 16	0.069 ~ 0.074
4 ~ 6	0.445 ~ 0.544	16 ~ 18	0
6 ~ 8	0.381 ~ 0.544	18 ~ 20	0
8 ~ 10	0.356 ~ 0.381	20 ~ 22	0
10 ~ 12	0.257 ~ 0.356	22 ~ 24	0

来，此时各区域温度一致，ΔT 接近 0；加热中期，P3 区域存在的热辐射与热对流能量大于 P2 区域热传导的能量，因此这一阶段内 P3 的表面温度高于非缺陷区域 P2 的表面温度，ΔT 增大；加热后期，热辐射所传递的热量要小于固体传热的热量，故 ΔT 为 0。结合本研究实际条件，墙体温度随着室外光照、空气温度的变化而做周期性变化，检测时间越短，影响结果的程度越小。故选择最佳检测时刻[24]为加热第 4 小时。

3.3.2 缺陷尺寸与加热第 4 小时温差间的定量关系

表 4 为各缺陷尺寸的非稳态温度差 ΔT 对照表，由该表数据可得到不同缺陷尺寸与非稳态温度差 ΔT 之间的关系。不同缺陷深度的工况下，木柱缺陷高度与表面温差最大值的关系曲线如图 14a 所示，从中可以看出：每个缺陷深度下，缺陷高度不断增加，表面最大温差均不断增大，两者间呈现极强的正相关性（$R^2 \geqslant 0.964$，排除掉 DC l-1 情况），且当高度增大时，这种正相关性表现得越明显即斜率绝对值增大。在不同缺陷高度的工况下，缺陷深度与表面

表 4 加热第 4 小时各缺陷尺寸的非稳态温度差对照表

Tab. 4 Comparison table of unsteady temperature difference for each defect size at the 4th h of heating ℃

缺陷高度 Defect height/mm	缺陷深度 Defect depth/mm			
	9	19	32.5	65
100	0	0.178	0.219	0.374
200	0	0.356	0.470	0.594
300	0	0.471	0.831	0.861
400	0.277	0.625	0.938	1.170

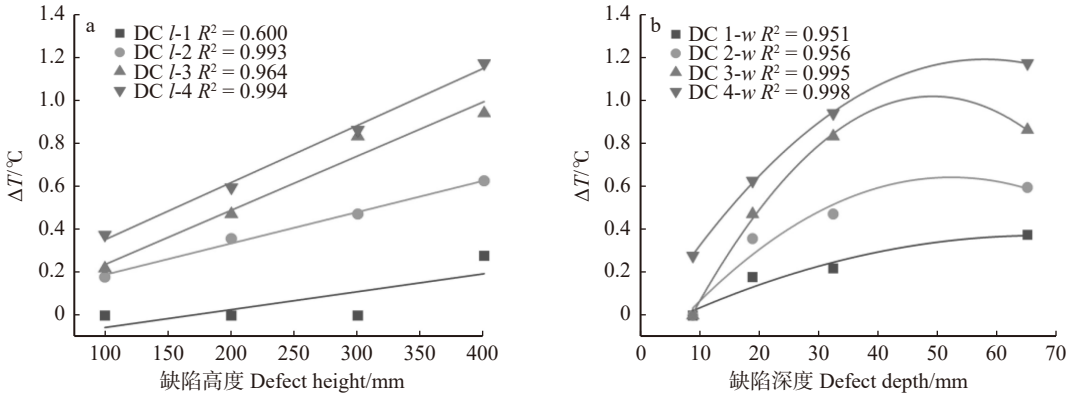


图 14　单一变量与非稳态温差 (Δ*T*) 间的关联性

Fig. 14　Correlations between single variable and unsteady temperature difference (Δ*T*)

温差最大值的关系曲线如图 14b 所示，图中可以看出：相同缺陷高度下，随缺陷深度增加，表面最大温差先迅速增加后缓慢增加，符合二次函数曲线分布，两者间呈现极强的正相关性（$R^2 \geqslant 0.951$），当缺陷高度增大时，这种正相关性表现的愈发明显，即斜率的绝对值增大。缺陷尺寸与加热第 4 小时温差间极强的正相关性，也是对 1.2.2 理论分析的一个验证。

当缺陷高度为 100、200、300 mm，缺陷深度为 9 mm 时，最大表面温差为 0 ℃ 。经研究，最大表面温差为 0 ℃ 的原因为缺失缺陷处深度较小，该区域接受到的热辐射总量有限，热辐射在传递的过程中损耗严重；缺陷内部存在的空气介质较少，影响对流传热的程度；底部热桥热传导性能明显高于周围正常部位，影响温度正常传递，因此产生的温度差异并不明显。

绘制不同缺失缺陷尺寸下的非稳态温差热力图，图 15 为不同缺陷高度与缺陷深度所对应的温差热力图，图中可以看出温差随着缺陷高度与缺陷深度的增加而增大。在缺陷深度为 9 mm 处，温差温度为 0 ~ 0.234 ℃，很难被检测到；在缺陷深度为 65 mm 处，温差温度为 0.234 ~ 1.170 ℃，可以被检测到。因此红外热成像技术可以用于墙内暗柱较大缺陷的温差温度检测。利用热力图可以判断加热第 4 小时非稳态温差 Δ*T* 所对应的缺陷尺寸，实现缺陷的预估。

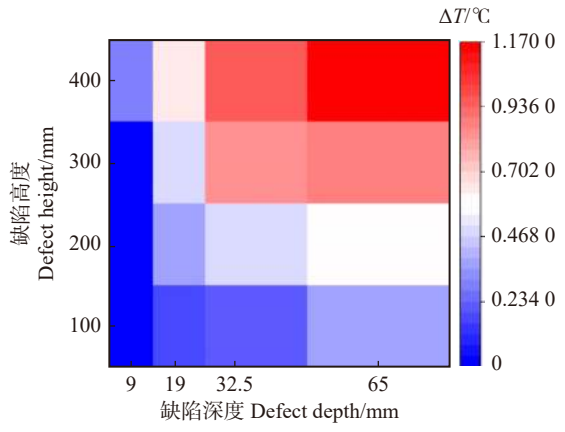


图 15　缺陷程度的非稳态温差热图

Fig. 15　Heat map of unsteady temperature difference of defect degree

4　结　　论

材料缺失是古建筑墙内暗柱因严重腐朽导致的一种常见缺陷形式，本研究在从理论角度探讨红外检测墙内暗柱材料缺失状况机理的基础上，试验研究了木柱试件不同尺寸的材料缺失缺陷对墙体热传导和红外图像的影响，得到以下主要结论。

（1）理论研究表明：由于木材的横向导热系数远小于墙体导热系数，加热面加热温度相同的情况下，木柱墙体外表面所对应的温度偏低；墙内暗柱的检测效果主要受到材料缺失缺陷尺寸，即缺陷高度、缺陷深度的影响。

（2）试验结果表明：在墙体内外热传导稳态状态下，内含木柱处的墙体表面温度要低于不含木柱的墙体表面温度，即前者的红外图像颜色更浅；木柱材料缺失缺陷的存在会使缺陷处墙体外表面温度变高，红外图像颜色变深；木柱缺陷高度越大，缺陷导致的高温范围越大；木柱缺陷深度越大，缺陷区域温度值越高。

（3）在墙体内外热传导非稳态状态下，选择木柱中线温差 Δ*T* 最大的时刻，可知木柱中线温差 Δ*T* 与木柱缺陷高度（$R^2 \geqslant 0.964$）、深度（$R^2 \geqslant 0.951$）呈现极强的正相关性。

（4）在木柱试件缺陷高度不大于 100 mm，深度不大于 9 mm 等较小缺陷情况下，墙体表面红外图像和温度不因缺陷的存在而发生明显改变，所以红外热成像可以用于古建筑墙内暗柱较大缺陷的筛查与大致评估，不能进行墙内暗柱缺陷的精确检查。

本研究成果显示了基于红外热成像无损筛查古建筑墙面暗柱缺陷这一新思路的可能性，但距离实际应用还有许多研究工作需要去做。下一步会将检测对象由材料缺失扩展到木柱一般性腐朽缺陷，以及研究实际检测环境与实验室环境差别的影响等。

参 考 文 献

[1] 梁思成. 中国建筑史 [M]. 天津: 百花文艺出版社, 2005.
Liang S C. History of Chinese architecture[M]. Tianjin: Baihua Literature and Art Publishing House, 2005.

[2] 张典, 于永柱, 管成, 等. 故宫养心殿墙体木柱缺陷状况无损检测研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 127−139.
Zhang D, Yu Y Z, Guan C, et al. Nondestructive testing of defect condition of wall wood columns in Yangxin Hall of the Palace Museum, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 127−139.

[3] 彭林, 周浩宇, 张厚江, 等. 金中都水关遗址木结构无损检测与评估 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(11): 140−151.
Peng L, Zhou H Y, Zhang H J, et al. Nondestructive testing and condition assessment of the wooden structures of Jinzhongdu Watergate Site[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(11): 140−151.

[4] 朱磊, 张厚江, 孙燕良, 等. 古建筑木构件无损检测技术国内外研究现状 [J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(3): 24−27.
Zhu L, Zhang H J, Sun Y L, et al. Research status of non-destructive testing technology for wooden components of ancient architectures[J]. Forestry Machinery & Working Equipment, 2011, 39(3): 24−27.

[5] 中国工程建设标准化协会. 古建筑木结构检测技术标准: T/CECS 714—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical standard for inspection of ancient timber buildings: T/CECS 714−2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[6] 北京市文物局. 古建筑结构安全性鉴定技术规范第 1 部分木结构: DB11/T 1190.1—2015[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2015.
Beijing Municipal Administration of Cultural Heritage. Technical code for appraiser of structural safety of ancient buildings part 1 timber structure: DB11/T 1190.1−2015[S]. Beijing: Beijing Quality Technology Control Office, 2015.

[7] 陈勇平, 王天龙, 李华, 等. 宁波保国寺大殿瓜棱柱内部构造初探 [J]. 林业科学, 2011, 47(4): 135−140.
Chen Y P, Wang T L, Li H, et al. Preliminary study on the melon-shaped column structure in the Grand Hall of Ningbo Baoguo Temple[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(4): 135−140.

[8] 段新芳, 王平, 周冠武, 等. 应力波技术在古建筑木构件腐朽探测中的应用 [J]. 木材工业, 2007, 21(2): 10−12.
Duan X F, Wang P, Zhou G W, et al. Detection of decay and insect attacked ancient wood members with stress wave methods[J]. China Wood Industry, 2007, 21(2): 10−12.

[9] 于永柱, 管成, 张厚江, 等. 古建筑墙体木柱缺陷对其安全性影响数值模拟研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 132−145.
Yu Y Z, Guan C, Zhang H J, et al. Numerical simulation on the influence of wall wood column defects on the safety of ancient building[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 132−145.

[10] Kandemir-Yucel A, Tavukcuoglu A, Caner-Saltik E N. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 49(3): 243−248.

[11] Khodayar F, Sojasi S, Maldague X. Infrared thermography and NDT: 2050 horizon[J]. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2016, 13(2): 210−231.

[12] Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. Quantitative infrared thermography in buildings[J]. Energy and Buildings, 1998, 29(1): 1−9.

[13] Tavukçuoğlu A, Akevren S, Grinzato E. In situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing[J]. Journal of Modern Optics, 2010, 57(18): 1779−1789.

[14] Afshani A, Kawakami K, Konishi S, et al. Study of infrared thermal application for detecting defects within tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 186−197.

[15] Martínez I, Martínez E. Qualitative timber structure assessment with passive IR thermography: case study of sources of common errors[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00789.

[16] 陶文铨. 传热学 [M]. 第五版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
Tao W Q. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.

[17] 王嘉怡, 段中兴. 建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 74−81.
Wang J Y, Duan Z X. Infrared thermal imaging detection of surface cracks in external insulation layer of building exterior wall[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 74−81.

[18] 梁思成. 清式营造则例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1934.
Liang S C. Qing dynasty structural regulations[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1934.

[19] 中国木材标准化技术委员会. 木材缺陷图谱: GB/T 18000—1999[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 1999.
China Wood Standardization Technical Committee. Illustrative plats of defects in wood: GB/T 18000−1999[S]. Beijing: State Bureau of Quality and Technical Supervision, 1999.

[20] 中国国家标准化管理委员会. 绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法: GB/T 13475—2008[S] 北京: 中国标准出版社, 2008.
China National Standardization Administration. Determination, calibration and protective hot box method of adiabatic steady-state heat transfer properties: GB/T 13475−2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[21] 孙大明, 周海珠, 田慧峰. 建筑热桥研究现状与展望 [J]. 建筑科学, 2010, 26(2): 128−134.
Sun D M, Zhou H Z, Tian H F. Research status and prospect of building thermal bridge[J]. Building Science, 2010, 26(2): 128−134.

[22] Bauer E, Pavón E, Barreira E, et al. Analysis of building facade defects using infrared thermography: laboratory studies[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 6: 93−104.

[23] Peng L, Wang H Y, Zhang H J, et al. Study of the effect of hole defects on wood heat transfer based on infrared thermography[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 191: 108295.

[24] 柳苏洋, 辛振波, 张厚江, 等. 基于红外热成像的古建筑望板腐朽状况无损检测研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 139−152.
Liu S Y, Xin Z B, Zhang H J, et al. Nondestructive testing of the decay condition of ancient building roof boarding based on infrared thermal imaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 139−152.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 李文彬）