

## 方波激励红外热像法在墓室壁画上的检测研究

王从嗣<sup>1</sup>, 陶宁<sup>1\*</sup>, 张群喜<sup>2</sup>, 严静<sup>3</sup>, 王黎<sup>1</sup>, 马珍珍<sup>3</sup>, 张存林<sup>1</sup>, 孙建刚<sup>1</sup><sup>1</sup>首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室北京成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048;<sup>2</sup>陕西历史博物馆, 陕西 西安 710061;<sup>3</sup>陕西省考古研究院, 陕西 西安 710043

**摘要** 本文介绍利用方波激励红外热像法对陕西蒲城元代墓室壁画的无损检测评估结果, 为此提出一种重建材料蓄热系数的三维热层析成像定量评估方法, 并与脉冲相位热成像法以及主成分热成像法的后期处理结果进行分析比较。实验结果表明, 三种方法均能够提高缺陷的检测能力, 但三维热层析成像方法可以实现壁画内部病害分布的定量三维评估。最后对其中一整幅壁画进行三维热层析成像, 所提方法可以实现空鼓、裂纹、墙体支撑结构的检测和评估, 可为壁画揭取搬迁、修复保护及壁画研究提供有用的评估手段和参考信息。

**关键词** 成像系统; 方波激励红外热像法; 无损检测; 热层析; 壁画检测; 文物保护

中图分类号 O434.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1611002

Nondestructive Detection of Murals in Tombs by  
Square-Heating ThermographyWang Congsi<sup>1</sup>, Tao Ning<sup>1\*</sup>, Zhang Qunxi<sup>2</sup>, Yan Jing<sup>3</sup>, Wang Li<sup>1</sup>, Ma Zhenzhen<sup>3</sup>,  
Zhang Cunlin<sup>1</sup>, Sun Jiangang<sup>1</sup><sup>1</sup>Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Key Lab of Terahertz Optoelectronics,  
Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;<sup>2</sup>Shaanxi History Museum, Xi'an, Shaanxi 710061, China;<sup>3</sup>Shaanxi Academy of Archaeology, Xi'an, Shaanxi 710043, China

**Abstract** This paper introduces the evaluation results of nondestructive detection of the wall paintings in the Yuan Dynasty tombs in Pucheng, Shaanxi Province using the square-heating thermograph. For this purpose, a three-dimensional thermal tomography quantitative evaluation method for reconstructing the heat storage coefficient of the material is proposed, and the results are compared with the post-processing results of pulse phase thermal imaging and principal component thermal imaging. The experimental results show that the three methods can improve the defect detection ability, but the three-dimensional thermal tomography method can realize the quantitative three-dimensional assessment of the internal disease distribution of the mural. Finally, three-dimensional thermal tomography is performed on one of the entire murals. The proposed method can realize the detection and evaluation of hollow drums, cracks, and wall support structures, and can provide useful evaluation methods and reference information for mural removal, restoration and protection, and mural research.

**Key words** imaging systems; square-heating thermography; nondestructive detection; tomography; mural detection; cultural relics conservation

**OCIS codes** 110.6820; 110.3080; 110.4155; 110.6955

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-02-23; 录用日期: 2021-03-11

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1520100)、国家自然科学基金(52072228)

通信作者: \*ningtao-phy@cnu.edu.cn

## 1 引言

古代壁画是人类文明发展历史进程中重要的文化遗产,具有极高的历史价值、艺术价值及科学价值,但长期受到埋藏环境、地下水、土壤酸碱度、地震和环境温湿度等因素的影响,使得这些珍贵文物出现开裂、空鼓、脱落、酥碱和霉变等多种病害。其中空鼓病害会对壁画现场保护造成较大威胁,这是因为空鼓病害从外观上几乎不可见,但容易造成壁画层的脱落<sup>[1-3]</sup>,因此能够无损和准确地检测出壁画内部结构、确定壁画内部病害情况及其程度对科学设计保护显得尤其重要<sup>[3-4]</sup>。

早期文物修复工作者通过轻轻敲击壁画表面来判断内部空鼓程度,这种方法简单,但是结果不精确,并依赖于修复者的经验和技能,检测效率低<sup>[5-6]</sup>。近年来,修复者利用光学相干层析成像(CT)技术实现对壁画内部微观结构的断层成像,以检测壁画近表面的病害<sup>[7]</sup>。如今 X 射线检测和 CT 技术已经广泛应用于文物的无损检测,如用于分析金属文物的腐蚀机理和分析绘画材料等<sup>[8]</sup>,但对于大型壁画或者墓室壁画等文物,很多情况下由于操作空间受到限制,而且需要特定的防护装置,并不适用于现场检测。红外热成像技术因其具有安全、非接触、快速、大面积检测以及便携性等特点而被应用于许多领域,如航空航天、石油石化、电力和建筑等,逐渐被推广应用到文物保护领域<sup>[9-13]</sup>。国内外学者利用红外热成像技术对文物进行检测已经成果颇丰,但使用主动式红外热波无损检测方法对壁画进行检测还处于研究阶段,对于具体的检测方案、实施方法和数据处理方法等都有待展开研究。Kordatos 等<sup>[14]</sup>使用红外热波成像技术对希腊某修道院内的壁画进行了检测评估,得到不同的激励方法对不同类型缺陷检测的效果。Grinzato 等<sup>[15]</sup>利用红外热成像技术对模拟壁画缺陷的石膏样本进行实验,优化了实验的流程,提出了热信号与缺陷深度的相关特性。国内兰州大学利用红外热成像技术对敦煌莫高窟壁画的空鼓及灌浆加固进行了初步应用<sup>[16]</sup>。故宫博物院和首都师范大学合作利用红外热成像技术对大型壁画《七佛说法图》的病害、修补及支撑结构进行了检测<sup>[17]</sup>。

在壁画的热图数据处理方法上多采用脉冲相位热成像(PPT)法以及主成分热成像(PCT)法进行缺陷特征的提取<sup>[18-19]</sup>,本文提出一种重建材料蓄热系数的三维热层析成像方法,其可以同时提供壁画的结构材料特性和缺陷分布。本文将利用方波激励热

成像方法对陕西蒲城一座元代墓室壁画进行检测,并利用 PPT 法、PCT 法和三维热层析成像法对采集的热图数据进行优化处理,对壁画空鼓、裂纹以及深层次墙体支撑结构等进行检测,为壁画揭取搬迁、修复保护及壁画研究提供可信的科学依据。

## 2 红外热波无损检测原理

红外热波无损检测方法是主动对被检物体施加周期、脉冲等函数形式的可控热激励,利用热像仪监测其表面温度在瞬态加热阶段或(及)冷却阶段的变化过程,通过数据处理与运算提取或增强物体内部缺陷特征以达到无损检测的目的。红外无损检测中使用的主动激励源包括闪光灯、激光器、卤素灯、LED(Light-Emitting Diode)、涡流和超声等,最常用的为闪光灯激励。闪光灯脉冲热像法由于其热源函数简单,较多用于材料的定性及定量测量,然而闪光灯在极短时间内提供的高能量热冲击会对珍贵壁画造成潜在的危害,另外闪光灯中的紫外成分会对壁画的颜料层造成破坏。相比之下,以卤素灯为激励源的阶跃(方波)加热方式提供了一种相对温和的加热过程,可提供可控低能量的持续加热,同时可选择不含紫外波段、色温相对较低的卤素灯作为激励源,且激励装置便携,更适合在野外或狭小空间进行检测。本次对墓室壁画的检测采用了卤素灯方波激励方法,检测原理如图 1 所示,其中 PC 为计算机控制和数据处理系统。

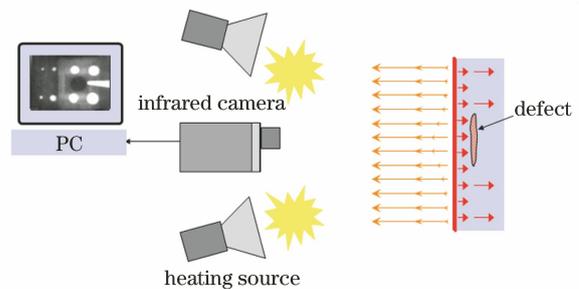


图 1 红外热像法的无损检测原理

Fig. 1 Principle of nondestructive detection by infrared thermography method

在理想的绝热环境中,对于厚度为  $L$  的均匀材料,方波激励的条件下(加热时间为  $\tau$ )物体表面温度分布随时间变化分别在加热阶段及冷却阶段可表示为<sup>[20]</sup>

$$T(t) = \frac{FL}{k} \left[ \frac{\alpha t}{L^2} + \frac{1}{3} - \frac{2}{n^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \right], \quad (0 < t < \tau), \quad (1)$$

$$T(t) = \frac{FL}{k} \left\{ \frac{\alpha t}{L^2} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \cdot \left[ \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) - 1 \right] \right\}, (t > \tau), \quad (2)$$

式中： $F$  为单位面积上施加的热流密度； $k$  为材料热传导率； $\alpha$  为材料热扩散系数； $t$  为时间； $n$  为求和项阶数； $T$  为物体的表面瞬态温度。

### 3 数据处理方法

通常获取的原始热图会通过数据处理来增强缺陷的信噪比以及定量表征与评估缺陷，壁画检测应用中多使用 PPT 法和 PCT 法来提取缺陷信号，并且这些方法无需在数据处理中使用无缺陷参考区域<sup>[18-19]</sup>。本文提出一种热层析成像方法，可以提供壁画材料热物性的三维空间分布<sup>[17,21-22]</sup>，同时也对壁画结构中的缺陷分布进行三维成像。本研究中将分析这三种数据处理方法并进行比较。

#### 3.1 PPT 法

PPT 法利用离散傅里叶变换将热成像数据从时域转换到频域进行分析，可以得到

$$F(f_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} T(t) \exp\left(-\frac{j2\pi f_i t}{N}\right) = \text{Re}(f_i) + j\text{Im}(f_i), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中： $F$  为频域下的温度信号； $f_i = i\Delta f$ ， $\Delta f = 1/N\Delta t$ ， $N$  为数据点的总数， $\Delta t$  为时间步长。振幅和相位可表示为

$$A(f_i) = \sqrt{[\text{Im}(f_i)]^2 + [\text{Re}(f_i)]^2}, \quad (4)$$

$$\Phi(f_i) = \arctan[\text{Im}(f_i)/\text{Re}(f_i)]. \quad (5)$$

对原始热图的所有像素点重复此计算，可以得到振幅图和相位图。PPT 方法结合了脉冲激励红外热像法以及锁相激励红外热像法的优点，其优点主要是相位图相比于原始热图和振幅图，通常对许多非理想成像条件不敏感，如表面发射率变化或非均匀加热<sup>[23-24]</sup>，可以使缺陷特征信号增强，从而提高了缺陷的可检测性。

#### 3.2 PCT 法

PCT 法使用正交基函数(主成分)转换原始热图数据。将表示空间和时间变化的三维热图数据  $T[(x, y), t]$  表示为二维矩阵  $\mathbf{A}(O, P)$ ，其中  $O$  为每幅热图中的像素点数，其代表了空间变化， $P$  为热图幅数，其代表了时间上的变化(通常  $O > P$ )。矩阵  $\mathbf{A}$  通过奇异值分解<sup>[25]</sup> 分解为

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{V}^T, \quad (6)$$

式中： $\mathbf{U}$  为  $O \times P$  大小的正交矩阵； $\mathbf{W}$  为  $P \times P$  大小的对角矩阵； $\mathbf{V}^T$  为  $P \times P$  大小的正交矩阵。主成分图像来自矩阵  $\mathbf{U}$  的列向量。从数学上讲，第一主成分分量对应最大方差的方向，因此显示整个数据集 中的主要特征。后续主成分分量的方差逐渐减小，因此包含较弱的特征或噪声。因此，在热成像数据分析中，只需对少数主要成分进行分析。

#### 3.3 热层析三维成像法

热层析三维成像方法将材料表面任意位置  $(x, y)$  处的表面瞬态温度  $T[(x, y), t]$  转换成材料热属性蓄热系数  $e$  沿深度方向  $z$  的分布  $e(x, y, z)$ ，可表示为

$$e(x, y, z) = \frac{d}{dz} \left[ \frac{Q}{T(x, y, z) \sqrt{\pi}} \right], \quad (7)$$

式中： $Q$  为材料表面吸收的热量。 $z$  与热传导时间  $t$  的关系为

$$z = \sqrt{\pi \alpha t}, \quad (8)$$

式中： $\alpha = k/\rho c$ ，其中  $c$  为材料的比热容。蓄热系数  $e = \sqrt{k\rho c}$  是材料的固有特性。由于壁画结构中许多材料(土坯、砖以及填充裂缝和分层的空气)的  $e$  值可能有很大不同，因此通过观察  $e$  值沿深度方向的分布图像可以确定这些异性材料或结构在表面下特定位置的存在。热层析成像的优点在于其对缺陷识别的高灵敏度，以及可以直接定位缺陷所在深度。该方法尤其适用于分析包含较多的缺陷材料以及复杂的三维材料结构<sup>[22]</sup>。

## 4 实 验

本次实验对象为陕西蒲城元代墓室壁画，该墓于 1998 年由陕西省考古研究所进行了考古发掘，最后对壁画采取了回填性保护。2018 年 5 月，陕西省考古研究所对该墓葬进行了再发掘，主要目的是对壁画墓葬进行考古现场保护后进行整体搬迁。该壁画墓的墓葬形制为八边形穹窿顶砖砌墓，墓葬整体由墓道、砖封墓门、甬道和墓室 4 部分组成，壁上满绘壁画，是陕西省内少见保存完整的一座元代壁画墓，具有较高的历史艺术价值<sup>[26]</sup>。壁画制作结构如图 2 所示，制作工艺为先在砖墙上涂敷掺麻的白灰，抹光打匀后用墨线勾勒起稿，最后着色赋色。墓室边壁画共有 8 面，是该墓葬壁画的主要价值承载者，本文主要针对东墙壁画“醉归乐舞图”的检测结果进行讨论分析，由于墓室内空间有限，现场检测需使用便携设备。

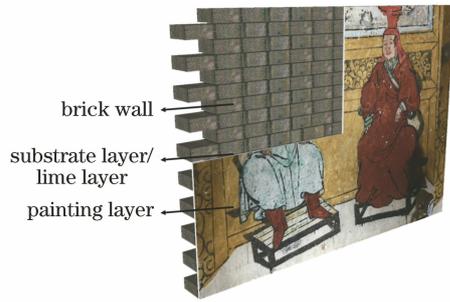


图2 壁画的结构

Fig. 2 Structure of mural

东墙壁画可见光图如图3所示。壁画尺寸约为 $1.30\text{ m}\times 1.82\text{ m}$ ，由于壁画尺寸较大，本次检测采取分区域多次采集，热像仪单次采集视场约为 $35\text{ cm}\times 45\text{ cm}$ ，整面东墙共进行了24次分区采集，后期经过了加热非均匀校正以及图像拼图处理可呈现出壁画完整的检测结果。

壁画现场检测使用的便携设备有两盏功率为



图3 东墙壁画的可见光图

Fig. 3 Photograph of east wall

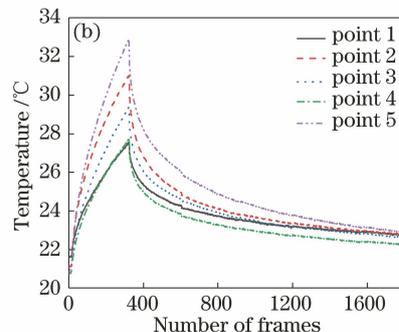
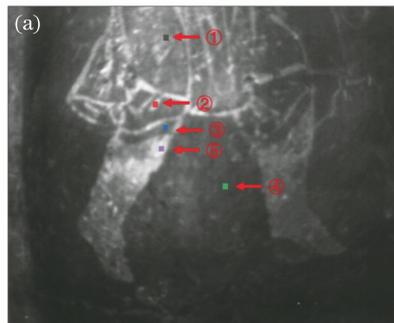


图4 方波激励后的壁画表面温度。(a)东墙局部壁画的原始热图;(b)方波激励后升温情况示意图

Fig. 4 Surface temperature of mural after square wave excitation. (a) Original thermal image of local mural in east wall; (b) temperature rise after square wave excitation

## 5 实验结果讨论与分析

该壁画中有着不同类型的病害,包括空鼓、裂纹、剥落以及地杖层酥碱多孔等,本文利用PPT法、PCT法和热层析三维成像法分别对原始热图进行了处理,不同程度地改善了检测效果,下文将针对各

1000 W的卤钨灯作为方波激励源,采集设备是Infra Tec公司Vario CAM HD head 640系列长波非制冷型热像仪(分辨率为 $640\text{ pixel}\times 480\text{ pixel}$ ,热灵敏度为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),激励源与热像仪集成在遮光罩内,以减少环境热辐射的影响。通常热像法的缺陷检测灵敏度随着激励能量的增加而增加,与缺陷深度成反比,该壁画地杖层的厚度不均( $10\sim 15\text{ mm}$ ),综合考虑壁画文物的安全性和激励效率,设置激励持续时间为30 s,采集时间为180 s(包含升温及降温过程),采集频率为10 Hz。

图4为经过卤钨灯激励后热像仪采集第31 frame某区域壁画表面的原始热图以及在热图上5个点的温度变化曲线,5个点分别对应了蓝、黑、红、白色颜料区域以及疑似病害区域。壁画颜色包括红、黄、黑、粉、蓝及赭红等颜色,由于颜料颜色不同,所以具有不同的可见光吸收率,黑色颜料主要为炭黑,其显著提高了吸收能量,相较于其他区域会产生较高的温度,温度最高可升至 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,疑似病害区域的温度可升至近 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该加热方式并不会使壁画表面产生过大的温升,可以避免热冲击造成的损害。加热过程中,由于温升不同,可以看到清晰的“壁画热图像”,由颜料吸热导致的“热图像”与空鼓、地杖疏松等病害在原始热图中均会形成亮斑,这会影响到病害的判读,因此需要进行相应数据处理来增强缺陷特征以容易识别病害。加热后,由于热量的三维扩散,热图像趋于平滑,最终温度趋于平衡。

方法处理后的构建图像进行分析讨论。

### 5.1 PPT法的实验结果

经过PPT法处理后得到的图像相比于原始热图可增强缺陷信号特征,可提高缺陷的检测能力,且改善了图像中热异常的分辨率。该方法将时域数据转化到频域中,其中不同频率下的相位图与检测深

度有着高度的相关性<sup>[22]</sup>,即较高的频率对应浅层的深度,而较低的频率对应较深的深度。

东墙中下部局部区域经过方波热激励后采集得到的原始热图如图5所示。从图5可以看到,第338 frame的箭头1处有明显的亮斑,疑似空鼓病害,经过PPT处理得到对应帧频分量为0.01 Hz的相位图中可以清晰看到该病害,而且信号特征得到

增强,能够准确地分辨其位置,相比于原始热图,PPT处理后得到的相位图中热异常轮廓更加清晰。另外在相位图中箭头2处有一串圈状(点状)图案,而未在可见光图片中发现,且在原始热图中仅隐约若现,PPT处理有效提高了该缺陷信号的信噪比。图5(c)中虚线箭头所指的一些亮斑区域,相比于可见光照片及现场查勘,疑似是地杖酥碱多孔病害。

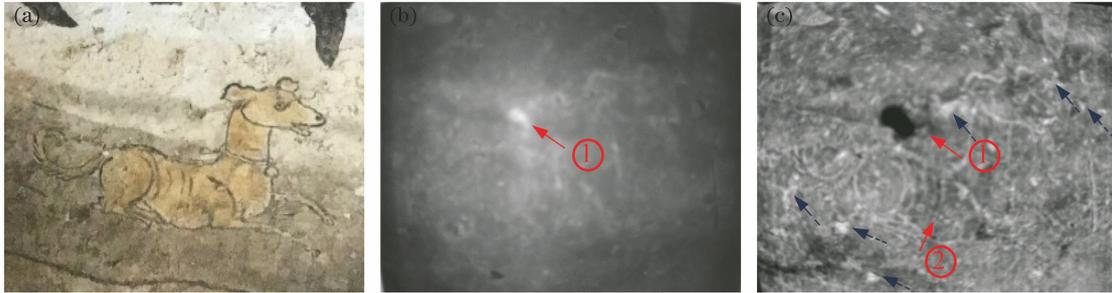


图5 东墙局部图像1。(a)可见光图片;(b)原始热图第338 frame;(c) PPT相位图(频率为0.01 Hz)

Fig. 5 Local image 1 of east wall. (a) Visible photograph; (b) original thermal image 338<sup>th</sup> frame; (c) phase image of PPT(frequency is 0.01 Hz)

东墙另一处的检测结果如图6所示。从图6可以看到,原始热图中有一处较明显的热异常,PPT相位图中该缺陷特征得到了增强;此外箭头2和3所指的亮线均未在可见光图片中发现相应痕迹,经

PPT处理后疑似亮线为病害。PPT相位图在一定程度上保留了壁画表面黑线勾勒的轮廓信息,这有助于更准确地确定缺陷位置,与此同时,也不能忽略其对壁画中细节缺陷判读的干扰影响。

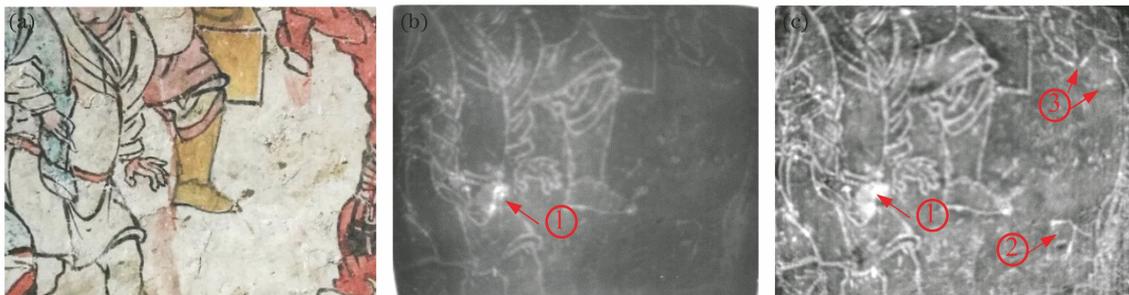


图6 东墙局部图像2。(a)可见光图片;(b)原始热图第32 frame;(c) PPT相位图(频率为0.02 Hz)

Fig. 6 Local image 2 of east wall. (a) Visible photograph; (b) original thermal image 32<sup>th</sup> frame; (c) phase image of PPT(frequency is 0.02 Hz)

以上两处结果均没有发现支撑墙体的结构,表明最低频率分量的相位图还不足以检测出更深层的缺陷。

## 5.2 PCT 法的实验结果

经过PCT处理后得到的图像能够在一定程度上去除噪声影响,与原始数据相比具有较大反差,可以更清晰显示出热异常的位置及形状,对于图6的东墙区域,利用PCT处理之后,主成分分析结果如图7(a)所示。从图7(a)可以看到,第二主成分图像中的噪声被有效抑制,壁画轮廓及黑色热异常区域更加清晰。从图7(b)可以看到,第5主成分图像中

已经没有壁画轮廓,缺陷特征更加明显,有助于更好地观察缺陷形状及尺寸。从图7(c)可以看到,第7主成分图像中可清晰看到另几处疑似病害,如箭头所指所示。

图8为东墙一红衣人物的检测结果。从图8可以看到,第386 frame原始热图中可以看到箭头处存在热异常,由于加热不均匀的影响,壁画中心区域温度高于四周区域,造成热异常并不明显;经过PCT处理后,第二主成分显示出清晰的轮廓,第三主成分图像中可以观察到较深的砖墙缝结构,壁画轮廓仍可见;第5主成分图像中没有壁画轮廓,人物

腰部的黑色区域疑似空鼓或疏松;第6主成分图像中可以看到不规则线状,疑似裂纹病害,如箭头所示。对于处于壁画较深层的砖墙结构,原始热图

中无法直接观察到,经过PCT处理后可以看到部分墙体结构。

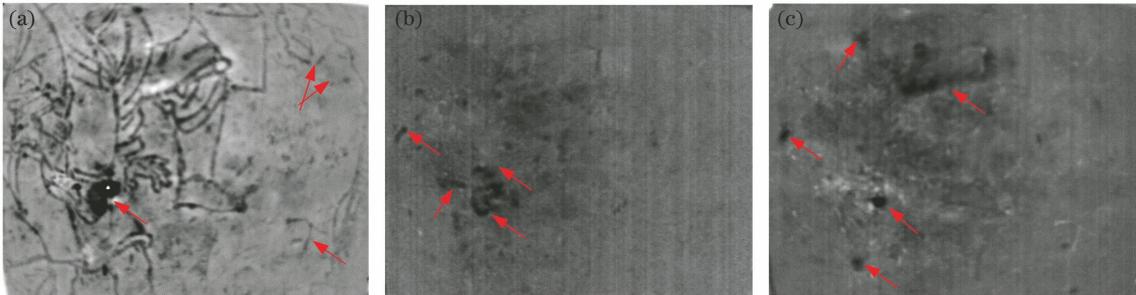


图7 东墙局部壁画的PCT结果。(a) PC2;(b) PC5;(c) PC7

Fig. 7 PCT results of local murals in east wall. (a) PC2; (b) PC5; (c) PC7

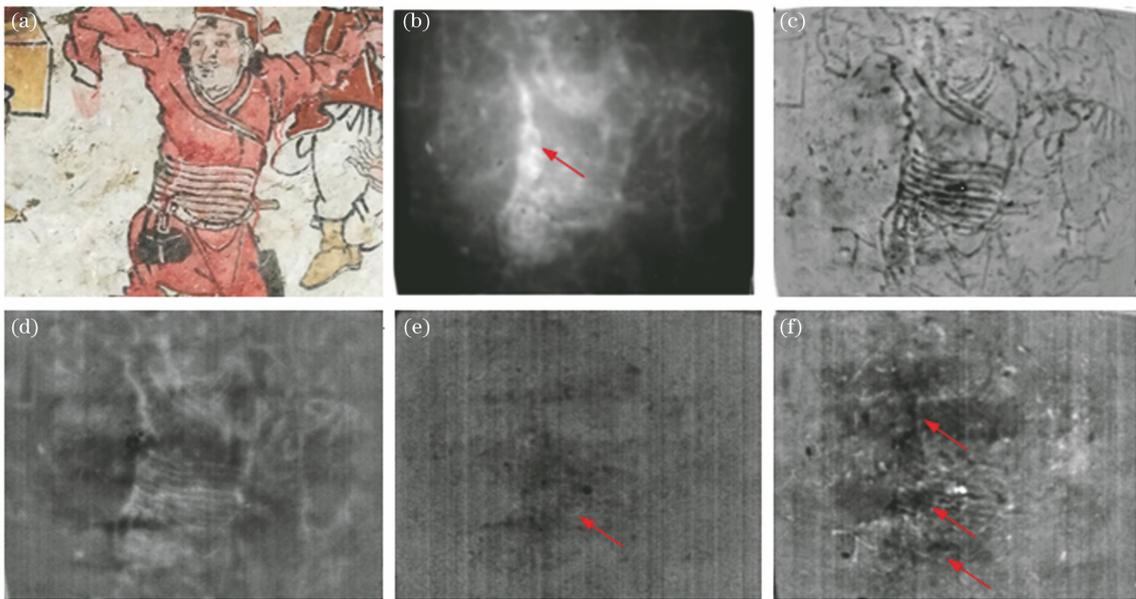


图8 东墙一红衣人物图像的PCT结果。(a)可见光图;(b)原始热图第386 frame;(c) PC2;(d) PC3;(e) PC5;(f) PC6

Fig. 8 PCT results of red figure image on east wall. (a)Visible photograph; (b) original thermal image 386<sup>th</sup> frame;

(c) PC2; (d) PC3; (e) PC5; (f) PC6

相较于PPT处理方法,PCT方法得到的图像受壁画轮廓的影响较小,更多地展现了壁画内部的信息,适用于检测隐藏于表面之下较深的缺陷,但是该方法不能直接提供缺陷深度的相关信息。

### 5.3 三维热层析成像法的实验结果

PPT和PCT方法通常将整个热图集合(本例中选取1200 frame)压缩为包含大部分缺陷信息的少量图像,可通过对每个缺陷进行单独计算以实现缺陷深度的定量测量,但是如果涉及大量样本或损伤的情况下,这两种分析方法是不方便实现的,此外也很难对整幅壁画的健康状况进行全面检测。为了解决这些问题,可以通过热层析成像方法构建材料蓄热系数的三维图像来定量识别和定位各类病害。

最后为实现整幅壁画的精确拼图,数据重建前对原始热图进行了几何畸变及加热不均匀校正的预处理运算,减小由拍摄视角、镜头导致图像畸变以及加热不均匀引起的强度失真对图像结果产生的不利影响。

利用(7)式和(8)式对获得的原始热图数据重建三维热参数蓄热系数沿深度上的分布 $e(x, y, z)$ 。这里材料表面吸收热量 $Q$ 和热扩散率的确定: $Q$ 与表面加热强度及表面发射率有关,通常难以直接得到,本文检测目的主要是通过得到蓄热系数在深度方向上的变化分布来检测缺陷及深度,而非表面下材料蓄热系数的绝对值,因此这里假设壁画表面 $e(x, y, 0) = 2000 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 并通过

(6)式来确定 $Q$ 值;通过透射闪光热像法来测量泥土样品的热扩散率,将地杖层热扩散率近似为 $a = 0.43 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

图9为图8的热层析成像结果,即采用热层析三维成像法处理、加热非均匀校正及图像畸变校正之后的结果,可以分别展示出壁画不同深度下的内部信息。图9(b)~9(f)为不同深度下壁画的表面信息。从图9(b)可以看到,壁画中绘画轮廓随着深度的加深可以观察到更多在表面之下的异常结构,

表面下2.4 mm可见人物腰间 $e$ 值分布与其他区域不同,这里图像灰度与 $e$ 值成比例关系,病害会显示较低的灰度(或较小的 $e$ 值),通常是疑似裂纹、空鼓或疏松结构,其间充满空气, $e$ 值较小。从图9(d)可以看到,表面下8.45 mm可隐约见到砖缝结构,说明此处石灰层较薄。从图9(e)可以看到,表面下10.78 mm已经能明显观察到壁画支撑墙体的结构特征。与PCT方法相比,所提方法可以获取更清晰的支撑墙体结构。

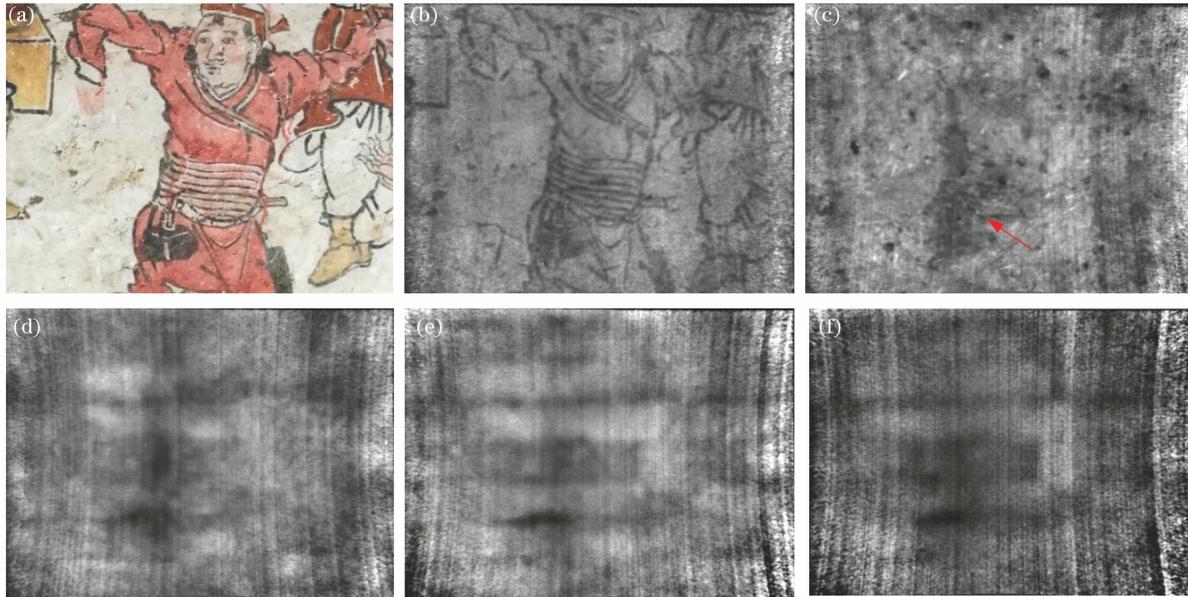


图9 不同深度下东墙一红衣人物图像的热层析成像结果。(a)可见光图;(b)表层;(c) 2.40 mm;(d) 8.45 mm;(e) 10.78 mm;(f) 13.87 mm

Fig. 9 Thermal tomography results of red figure image on east wall at different depths. (a) Visible image; (b) surface; (c) 2.40 mm; (d) 8.45 mm; (e) 10.78 mm; (f) 13.87 mm

针对图6和图7,利用热层析三维成像法处理后的热层析成像结果如图10所示。从图10(c)可以看到,图像中存在与PPT及PCT相似的疑似病害,处于较浅层。从图10(d)可以看到,更深层表面下7.68 mm存在疑似病害。从图10(e)和图10(f)可以看到,图像中有明显的壁画支撑墙体的结构特征,而在PPT和PCT中并未见到,显示出三维热层析法可以得到更深层的内部结构信息。

对东墙所有区域获取的热图像重复进行以上处理之后,经过拼图处理可实现对整幅壁画的健康状况进行全面检测。图11为墓室东墙经过拼图得到的完整热层析图。其中图11(a)为整个壁画区域的吸热图像 $Q(x, y)$ ,由于进行了加热非均匀校正,其强度(灰度)主要与表面发射率有关,图中清晰地显示了壁画轮廓,显示吸收热量更多,这是因为用于勾勒壁画的炭黑染料具有更高的发射率和可见光吸

收率。图11(b)~11(e)分别为1.47, 4.57, 7.68, 10.78 mm深度的平面蓄热系数 $e$ 值分布图。从图11可以看到,在浅层区域布满了细小黑点,疑为近表面存在的病害,可能由表面颜料层脱落或者酥碱多孔导致,通过现场壁画表面状况对比能够基本确定 $e$ 值图中反应的异常区域为真实病害;随着深度的增加,可看到多处较大尺寸的暗斑区域,疑似空鼓或疏松结构,且持续在更深层出现,则病害程度更严重,此外图像中规则的条纹状异常逐渐明显,与该壁画作为支撑结构的砖墙有着高度的相似性,如图11(c)右上区域隐约出现砖纹,表明此处石灰层较薄。从图11(d)可以看到,图像中有更多区域出现砖纹,通过观察砖纹出现的时间早晚来确定壁画石灰层的厚度。从图11(e)可以看到,图像中的砖墙结构已经全部显现,比较各墙面砖纹出现深度可以比较各墙面石灰层的厚度差异。

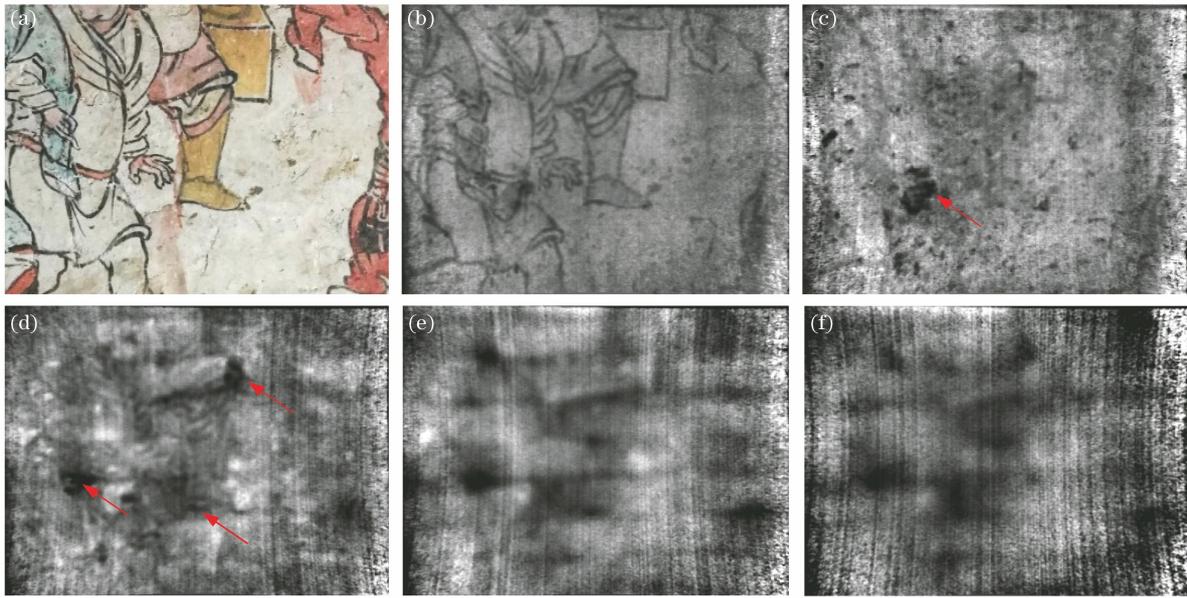


图10 不同深度下东墙局部壁画的热层析成像结果。(a)可见光图;(b)表层;(c) 2.40 mm;  
(d) 8.45 mm;(e) 10.78 mm;(f) 13.87 mm

Fig. 10 Thermal tomography results of local murals on east wall at different depths. (a) Visible image;  
(b) surface; (c) 2.40 mm; (d) 8.45 mm; (e) 10.78 mm; (f) 13.87 mm

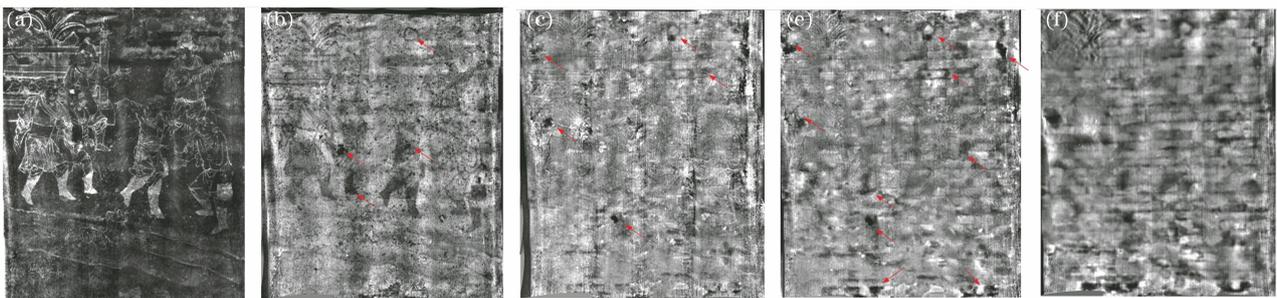


图11 不同深度下热层析三维成像法的完整拼图结果。(a)完整壁画的吸热图;(b) 1.47 mm;  
(c) 4.57 mm;(d) 7.68 mm;(e) 10.78 mm

Fig. 11 Complete mosaic results of three dimensional thermal tomography at different depths. (a) Endothermic  
map of complete mural; (b) 1.47 mm; (c) 4.57 mm; (d) 7.68 mm; (e) 10.78 mm

利用所提方法可以观察到不同深度下的特征信息,在颜料层及较浅层区域可以检测到尺寸较小的病害,如颜料脱落、酥碱多孔等,而在较深层区域可检病害以及要求更大的尺寸,如空鼓、地杖疏松等,且受到横向热扩散的影响更大。对于整幅壁画检测拼图,更方便根据病害所占像素数来估计其尺寸大小。由于每一幅图像中的 $e$ 值与所在深度有很高的相关性,因此可以很大程度上减少表面信息或者其他深度缺陷所产生的干扰,并且测得壁画地杖层材料的热参数后可以估算缺陷所在的深度信息,为病害的准确定位提供数据支持。

## 6 结 论

本文应用方波激励热成像技术对陕西蒲城一座

元代墓室壁画进行无损检测,采用PPT、PCT以及三维热层析成像法三种数据处理方法对古墓中壁画的检测数据进行处理并进行分析比较,检测数据中包含丰富的表面下材料及结构信息。PPT与PCT处理结果可以得到壁画内部的病害结构,但对于其深度的确定需要根据各缺陷进行单独计算测量;三维热层析成像法建立材料蓄热系数的三维分布,能够直接提供病害的深度信息,实现定量识别和定位内部病害。相比于其他两种方法,三维热层析成像法更具有优势,对更深层结构信息的获取也优于其他两种方法。另外,由于采集到的热像数据量较大,传统的单幅图像分析效果较差,通过去除单幅结果的几何失真和加热非均匀可以进行多幅图像拼接,从而得到壁画的完整图像,为此简化数据分析,并且

使得精确的缺陷尺寸测量和定位成为可能,从而可以更加准确且清晰地辨别出病害类型、程度、位置以及地仗层厚度等信息,有助于评价壁画的结构稳定性,有利于壁画的揭取、保护和修复。

## 参 考 文 献

- [1] Wang W F, Ma Z F, Li Z X, et al. Consolidating of detached murals through grouting techniques [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2006, 18 (1): 52-59.  
汪万福, 马赞峰, 李最雄, 等. 空鼓病害壁画灌浆加固技术研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2006, 18 (1): 52-59.
- [2] Li Z X. Current situation and tasks of Dunhuang Grottoes protection [J]. *Dunhuang Research*, 2000 (1): 10-23.  
李最雄. 敦煌石窟的保护现状和面临的任务[J]. *敦煌研究*, 2000(1): 10-23.
- [3] Candoré J C, Bodnar J L, Depasse F, et al. Approach of the characterization of delamination in mural paintings [C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 2-5, 2008, Krakow Poland. Krakow: QIRT Council, 2008: 1-2.
- [4] Wang X D. Exploration and practice of the methodology for wall painting conservation based upon principles for the conservation of heritage sites in China [J]. *Dunhuang Research*, 2011 (6): 1-7, 125.  
王旭东. 基于中国文物古迹保护准则的壁画保护方法论探索与实践[J]. *敦煌研究*, 2011(6): 1-7, 125.
- [5] Bodnar J L, Candoré J C, Nicolas J L, et al. Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings [J]. *NDT & E International*, 2012, 49: 40-46.
- [6] Collini L, Garziera R, Mangiavacca F. Development, experimental validation and tuning of a contact-less technique for the health monitoring of antique frescoes[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(2): 152-157.
- [7] Yang S S, Zhu R, Mi L, et al. Application of optical coherence tomography in the detection of the mural [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511005.  
杨珊珊, 朱锐, 米磊, 等. 光学相干层析成像技术对壁画的检测研究[J]. *光学学报*, 2015, 35 (5): 0511005.
- [8] Sfarra S, Ibarra-Castanedo C, Tortora M, et al. Diagnostics of wall paintings: a smart and reliable approach[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, 18: 229-241.
- [9] Wang X, Jin W P, Zhang C L, et al. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology [J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2004, 26(10): 497-501.  
王迅, 金万平, 张存林, 等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. *无损检测*, 2004, 26(10): 497-501.
- [10] Li X L, Sun J G, Tao N, et al. An effective method to inspect adhesive quality of wind turbine blades using transmission thermography [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 37(2): 1-11.
- [11] Kylili A, Fokaides P A, Christou P, et al. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: a review [J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 531-549.
- [12] Li X L, Tao N, Sun J G, et al. Evaluation of an ancient cast-iron Buddha head by step-heating infrared thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 223-229.
- [13] Shi N C, Wang X, Zhang C L. The application of infrared thermal wave imaging technology in conservation [J]. *Journal of National Museum of China*, 2017(5): 149-157.  
史宁昌, 王迅, 张存林. 红外热波成像技术在文物保护修复中的应用[J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2017 (5): 149-157.
- [14] Kordatos E Z, Exarchos D A, Stavrakos C, et al. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 1261-1265.
- [15] Grinzato E, Bison P, Marinetti S, et al. Nondestructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 1994, 5(4): 257-274.
- [16] Zhang Y J, Wang X D, Guo Q L, et al. Preliminary application of infrared imaging technology in detecting grouting on delaminated wall-painting of cave 98 Mogao Grottoes[J]. *Dunhuang Research*, 2010(6): 82-87.  
张艳杰, 王旭东, 郭青林, 等. 红外热像技术在莫高窟第98窟壁画空鼓灌浆检测中的初步应用[J]. *敦煌研究*, 2010(6): 82-87.
- [17] Tao N, Lei Y, Qu L, et al. Square-heating thermography for quantitative 3D evaluation of large ancient murals [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, 39(1): 1-11.
- [18] Sfarra S, Ibarra-Castanedo C, Ambrosini D, et al. Non-destructive testing techniques to help the restoration of frescoes [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(5): 3461-3480.

- [19] Theodorakeas P, Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, et al. NDT inspection of plastered mosaics by means of transient thermography and holographic interferometry[J]. *NDT & E International*, 2012, 47: 150-156.
- [20] Carslaw H S, Jaeger J C, Morral J E. Conduction of heat in solids, second edition [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1986, 108(4): 378.
- [21] Sun J G. Method for thermal tomography of thermal effusivity from pulsed thermal imaging: US7365330 [P/OL]. 2006-09-18 [2021-01-31]. <https://www.freepatentsonline.com/7365330.html>.
- [22] Sun J G. Quantitative three-dimensional imaging of heterogeneous materials by thermal tomography[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2016, 138(11): 112004.
- [23] Arndt R W. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(4): 246-253.
- [24] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(5): 2694-2698.
- [25] Rajic N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures [J]. *Composite Structures*, 2002, 58(4): 521-528.
- [26] Shaanxi provincial institute of archaeology. A brief report of the Yuan tomb at donger, Pucheng [J]. *Archaeology and Cultural Relics*, 2000(1): 16-21, 48.
- 陕西省考古研究所. 陕西蒲城洞耳村元代壁画墓 [J]. *考古与文物*, 2000(1): 16-21, 48.