

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022009

# 应力波对木构件内部空洞的检测

常丽红<sup>1</sup>, 钱威<sup>2</sup>, 常浩<sup>3</sup>, 李鑫<sup>4</sup>, 戴俭<sup>2</sup>, 常晓红<sup>5</sup>

(1. 北京农学院文法与城乡发展学院, 北京 102206; 2. 北京工业大学建筑与城市规划学院, 北京 100124; 3. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西西安 710048; 4. 北方工业大学建筑与艺术学院, 北京 100041; 5. 北京物资学院会计学院, 北京 101149)



**摘要:** 以冷杉为研究对象, 利用应力波无损检测技术研究其在不同面积的空洞下应力波图像、波速衰减的变化规律, 提出马氏距离用于检测空洞等级。结果表明: 根据应力波图像可对木构件内部不同大小的空洞位置进行分析; 但对内部空洞面积检测存在误差。提出内部不同空洞面积下, 采用5条路径分析应力波波速衰减规律, 利用马氏距离建立用于判别木构件内部空洞等级的模型, 不仅可以判别小面积空洞, 对大面积内部空洞检测也起判别的作用。该方法可以提高对木构件内部空洞位置、面积的判别, 为木结构预防性保护及空洞检测提供依据。

**关键词:** 应力波; 波速; 木构件; 冷杉; 空洞

中图分类号: S781; TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 04-0070-07

## Detection of Internal Voids in Wooden Components by Stress Waves

CHANG Li-hong<sup>1</sup>, QIAN Wei<sup>2</sup>, CHANG Hao<sup>3</sup>, LI Xin<sup>4</sup>, DAI Jian<sup>2</sup>, CHANG Xiao-hong<sup>5</sup>

(1. College of Humanities and Urban-Rural Development, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shanxi, China; 4. North China University of Technology, School of Architecture and the Arts, Beijing 100041, China; 5. School of Accountancy, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

**Abstract:** To evaluate the interior voids in wood components, the stress wave, a nondestructive testing technology was used to assess fir wood. The stress wave images were analyzed. The attenuation of the stress wave propagate through different voids areas were measured. In order to reduce the prediction error of discrimination, the Mahalanobis distance was proposed to detect the degree of voids. The results showed that the location of interior voids was detected through the stress wave images. According to the concept of Mahalanobis distance, five paths were used to analyze the attenuation law of the stress wave through different interior voids areas. A discrimination model was established to evaluate the degree of the interior voids in the wood components. The stress wave not only detected the voids of small area voids, but also assessed the large area interior voids. The method improves the measurement precision of the location and the area of the interior voids in the wood components, as well as provides a basis for the prevention

收稿日期: 2022-01-25; 修改日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金“基于预防性保护的北方乡土古建筑木构残损耦合判别方法与适宜技术研究”(51808038); 北京市社会科学基金“北京传统村落木构古建筑健康识别与保护传承研究”(18LSC006); 北京市教育委员会社科计划一般项目“京郊传统村落乡土建筑及环境肌理保护研究”(SM201910020001); 北京社会科学基金“北京市文化创意产业发展模式与经济效益研究”(16YJC054)。

作者简介: 常丽红(1984—), 女, 副教授。Email: changlihong@126.com

通讯作者: 钱威, 男, 副教授。Email: qianweilaos@sina.com

and detection of the interior voids in the wood structures.

**Key words:** stress wave; wave velocity; wood components; fir; voids

我国古建筑历史悠久，在建筑材料中木材便于取材和加工<sup>[1]</sup>，同时还具有良好的力学性能<sup>[2]</sup>，故木构件体系得到广泛推广和应用。古建筑的木构件在长期使用中受自然环境、人为破坏等因素的影响，易产生开裂、空洞、腐朽等缺陷<sup>[3-4]</sup>，其中内部空洞对建筑整体结构安全影响较大，但内部健康状况无法通过外部观察得知，通过拆解方法进行检修严重破坏建筑的原真性。因此，采用无损检测（Non-Destructive Testing, NDT）方法分析木构件内部健康状况对提高古建筑预防性保护具有重要意义。

无损检测是利用电子、光学和计算机相关技术，针对被检测体的材质，可在保护古建筑原真性的前提下进行检测，方法有超声波<sup>[5]</sup>、皮罗钉、阻抗仪<sup>[6]</sup>、应力波等<sup>[7]</sup>。其中应力波具有抗干扰性强、传播距离远、设备轻便、无需耦合物等多种优点，在古建筑木构件或木材检测中应用较多。在木构件上布设传感器，通过检测锤对传感器的发射端敲击，木构件内部产生应力波传播到接收端<sup>[8]</sup>。当木构件内部为健康材时，应力波的传播轨迹为直线；当内部出现空洞时，应力波因空洞的影响会绕行，故应力波在空洞材中的传播时间长。对内部存在空洞的木构件，通过对比健康材的波速可明确应力波检测结果中的临界值；但应力波检测结果存在一定模糊区域，影响对木构件内部残损的判定<sup>[9]</sup>。

古建筑木构件内部常见残损包含空洞、腐朽、虫蛀等，为提高应力波对古建筑木构件内部健康状况判别的准确性，本研究以木构件内部常见的空洞为分析类型，提取相关波速，对比分析不同空洞面积下平面检测图以及线性检测图，同时结合马氏距离对木构件内部健康等级进行判别，建立木构件的应力波波速分级，用实地古建筑木构件的检测数据进行验证，旨在古建筑木构件的安全判定提供数据支持，同时也为古建筑木结构的预防性保护提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

我国古建筑木构件在材料选择中需要考虑材

料自身的硬度、耐腐蚀性、抗压性等因素。冷杉（*Abies* spp.）具有较好的抗压、抗震性能，同时不易被虫蛀，多应用于南方古建筑的柱子、望板、椽条等。本试验选择冷杉为试验材料（取自安徽），直径44.58 cm，为保证试件齐平，在材料两端先各锯解50 mm找平，从中段分别锯解高为10 cm的圆盘，依次编号为C-1~C-7，共计7件试件（图1）。

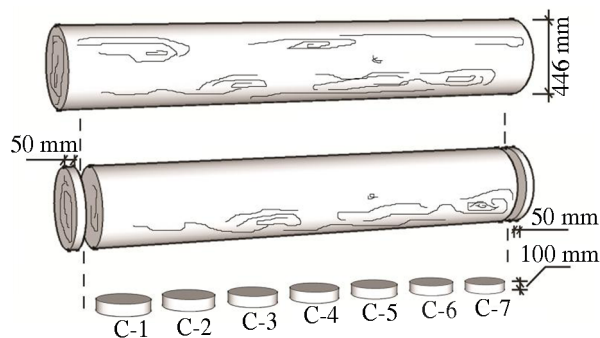


图1 冷杉试件锯解方法

Fig.1 Sawing method for specimens

利用探针式含水率仪检测试件含水率 $>30\%$ ，将试件放置在温度为 $20^{\circ}\text{C}$ ，空气相对湿度为 $65\%$ 的环境中养护3个月，至含水率为 $12\%$ ，使试件与古建筑木构件实际含水率相近。

### 1.2 试验设备

多探头应力波测试仪（FAKOPP），含有接收器、检测探针传感器、检测锤以及数据线。经过检测可收集各路径下检测探针传感器的传播时间，经矩阵计算和重构转化为二维检测图。

### 1.3 试验方法

在木构件上布设传感器，通过检测锤对传感器的发射端敲击，木构件内部产生应力波传播到接收端。通过计算机进行网格分布处理形成检测图谱。通过波速对比，对木构件内部空洞等级进行分析。马氏距离是利用向量间的协方差矩阵表示距离，可以有效地针对一个样本和一个样本集“重心”的最近距离，亦或者可以有效计算出两个未知检测样本集的相似度<sup>[10-11]</sup>。在古建筑木构件的应力波无损检测过程中，通过传感器可收集多个样本，将具有判定等级的应力波已知样本数据作为依据，根据数据间的波动区间建立判别等级，分析观测

样本与已知样本之间的距离。应力波检测数据集中,当检测数据的马氏距离越短,说明该检测波速与应力波数据集均值越接近。利用马氏距离分析应力波传感器之间的波速,适用于判别木构件内部的空洞等级。

### 1.3.1 空洞试件制备

将试件中间进行不同直径的空洞模拟(图2)。



图2 冷杉试件内部空洞制备

Fig.2 Fabrication of interior voids in test pieces

以试件髓心为中心,设无内部空洞时试件检测截面面积为 $S$ ,内部空洞面积分别为试件截面面积的 $1/32$ 、 $1/16$ 、 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ ,对不同程度空洞的试件材料进行加工。

### 1.3.2 应力波检测探针传感器布设

应力波检测探针传感器设在试件高度的中间位置( $h=5\text{ cm}$ ),每个试件平面布设10个传感器,沿纵向各测点编号保持一致,如图3所示。确保传感器距离相等,避免波速计算的误差及内部空洞信息采集不完整,同时降低传感器之间的相互影响。

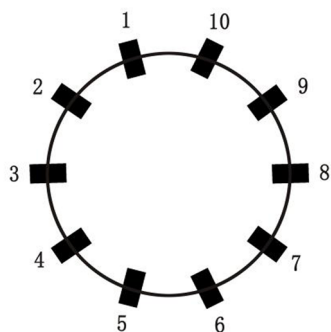


图3 应力波传感器布设示意图

Fig.3 Layout diagram of stress wave sensors

### 1.3.3 图像与波速分析

采集试件的应力波二维平面图以及波速路径图,针对 $0$ 、 $1/32S$ 、 $1/16S$ 、 $1/8S$ 、 $1/4S$ 、 $1/2S$ 内部

空洞的试件进行图像和波速分析,判别空洞面积以及位置;以及通过衰减规律判别空洞等级。

试件平面布设10个传感器,对每条路径进行分析,即设 $V_1$ 为相邻传感器波速路径(传感器1-2; 2-3, ..., 10-1); $V_2$ 为相隔一个传感器波速路径(传感器1-3; 2-4, ..., 10-2); $V_3$ 为相隔两个传感器波速路径(传感器1-4; 2-5, ..., 10-3); $V_4$ 为相隔三个传感器波速路径(传感器1-5; 2-6, ..., 10-4), $V_5$ 为相隔四个传感器波速路径(传感器1-6; 2-7, ..., 5-10),如图4所示。其中 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 各含有10条子路径, $V_5$ 含有5条子路径。

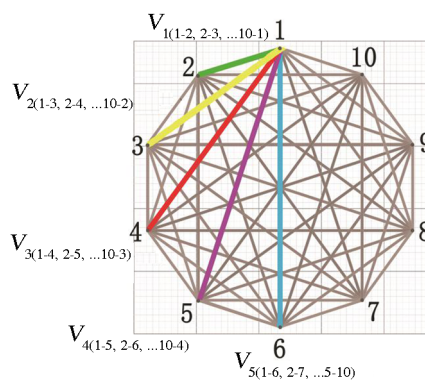


图4 应力波路径示意图

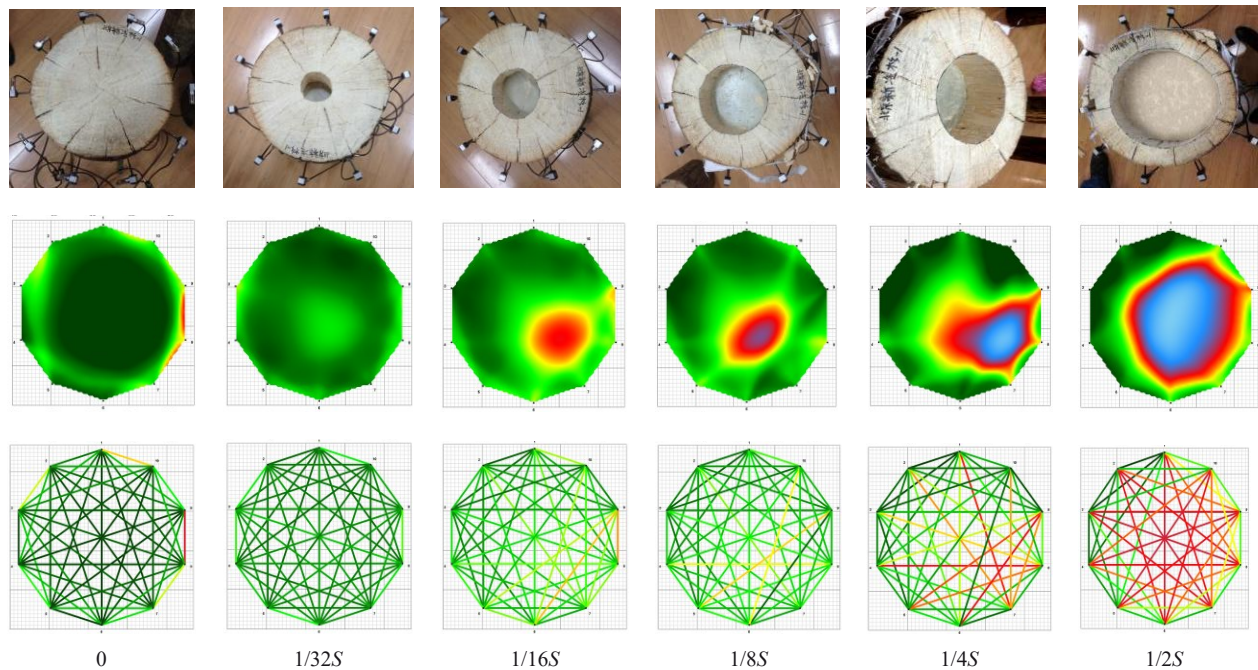
Fig.4 Schematic diagram of stress wave paths

每个试件分别从无空洞采集数据记录,逐渐以空洞整体检测截面的 $1/32$ 、 $1/16$ 、 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ 分别进行内部空洞数据采集。通过检测锤逐个敲击传感器后,检测声波速度和振动波谱的方法来进行内部空洞检测,共收集42组截面试件数据,1890条应力波波速值。将无裂化状态下 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 和 $V_5$ 的平均波速作为初始值,对比分析不同空洞下应力波波速值的衰减规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 内部空洞位置判别

将试件分别进行不同程度的( $0$ 、 $1/32S$ 、 $1/16S$ 、 $1/8S$ 、 $1/4S$ 、 $1/2S$ )内部空洞,通FAKOPP-ArborSonic 3D软件,将树种设置与试件同一参数后进行检测。应力波检测锤对不同空洞条件下的各传感器进行敲击,可获取二维平面检测图。对比实物试件的空洞位置、大小,观察应力波所得的二维平面图以及波速路径图,如图5所示。



注:绿色为健康区域;红色为衰退区域;蓝色为空洞区域。

图5 C-1 应力波检测及图像判别

Fig.5 Stress wave detection and image discrimination of C-1 samples

以试件C-1为例,当试件内部无空洞时,除试件边部自然开裂外,应力波平面图及线形图基本均为绿色,可以判定内部材质为健康状态;当试件内部空洞面积为 $1/32S$ 时,所得应力波检测图中部有轻微空洞,可知由于空洞面积较小应力波对其判断具有不灵敏性,与实际试件空洞大小判断产生差异。随着试件内部空洞面积的不断扩大,应力波对内部空洞的大小和位置显示得越来越准确;观察各传感器间的线形检测图,因试件边部存在自然开裂,检测图边部形成部分颜色不一的红色和黄色,与实际相对符合。

根据以上分析可知,应力波可准确地反映木构件内部空洞的位置、大小,且平面检测图与线形图在空洞位置上趋于一致,但当内部空洞面积较小时( $1/32S$ ),应力波检测在传播路径上不敏感,检测结果存在误差,同时还要求检测者具有一定的检测经验,故应力波图像分析法可针对内部空洞位置进行初步筛查,但空洞等级判定还需进行波速分析。

## 2.2 波速的空洞分析

应用FAKOPP-Arbor Sonic 3D软件,选定冷杉树种参数后,软件可计算出应力波对内部空洞的

面积及测点路径波速的数据,提取应力波波速及计算衰减率。

$$K_x = \frac{v_{x0} - v_{xt}}{v_{x0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $K_x$ 为应力波波速的衰减率,%; $v_{x0}$ ( $x=1, 2, 3, 4, 5$ )为无空洞条件下5条波速传播路径下波速平均值,m/s; $v_{xt}$ ( $t=1/32; 1/16; 1/8; 1/4; 1/2$ )为当内部空洞面积占整体检测截面的 $1/32$ 、 $1/16$ 、 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ 时5条路径下的波速平均值,m/s。

应力波通过FAKOPP-ArborSonic 3D软件不仅可以得到二维平面检测图和波速,还可对内部空洞面积进行识别,获得应力波检测的空洞面积。以试件C-1的数据采集为例,具体见表1。

表1显示,空洞实际面积 $S_{\text{实际}}$ 与应力波检测面积 $S_{\text{检测}}$ 之间均存在误差( $G$ )。当内部空洞面积 $S_{\text{实际}} \leq 1/32$ 时,FAKOPP-ArborSonic 3D软件虽能获取空洞数据,但因对空洞边界识别模糊,造成检测出的空洞面积小于实际空洞面积,存在较大误差。随着内部空洞面积的不断扩大,最小误差率可达4%,说明应力波对内部较小的空洞面积并不敏感。

采集无空洞的波速为初始值,试件边部均存在不规则的自然小裂缝,故在无空洞条件下,各

表 1 冷杉空洞面积与应力波波速

Tab.1 Fir voids area and stress wave velocity

| 空洞<br>比例 | $S_{\text{实际}}/\text{cm}^2$ | $S_{\text{检测}}/\text{cm}^2$ | 面积误<br>差 $G/\%$ | 传播<br>路径 | 最高波速<br>$H/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 最低波速<br>$L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 波速衰减<br>值 $K/\%$ |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|----------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|
| 0        | 0                           | 0                           | 0               | $V_1$    | 1 987                                    | 941                                      | 0                |
|          |                             |                             |                 | $V_2$    | 1 285                                    | 1 183                                    | 0                |
|          |                             |                             |                 | $V_3$    | 1 515                                    | 1 310                                    | 0                |
|          |                             |                             |                 | $V_4$    | 1 622                                    | 1 441                                    | 0                |
|          |                             |                             |                 | $V_5$    | 1 634                                    | 1 468                                    | 0                |
| 1/32     | 48.75                       | 31.20                       | 36.00           | $V_1$    | 1 380                                    | 906                                      | 18.23            |
|          |                             |                             |                 | $V_2$    | 1 276                                    | 1 172                                    | 0.97             |
|          |                             |                             |                 | $V_3$    | 1 349                                    | 1 193                                    | 9.76             |
|          |                             |                             |                 | $V_4$    | 1 365                                    | 1 157                                    | 20.51            |
|          |                             |                             |                 | $V_5$    | 1 290                                    | 1 084                                    | 20.14            |
| 1/16     | 97.51                       | 124.01                      | 27.18           | $V_1$    | 1 501                                    | 795                                      | 15.43            |
|          |                             |                             |                 | $V_2$    | 1 439                                    | 940                                      | 3.23             |
|          |                             |                             |                 | $V_3$    | 1 408                                    | 821                                      | 17.91            |
|          |                             |                             |                 | $V_4$    | 1 269                                    | 921                                      | 30.03            |
|          |                             |                             |                 | $V_5$    | 1 162                                    | 947                                      | 33.59            |
| 1/8      | 195.01                      | 202.81                      | 4.00            | $V_1$    | 1 417                                    | 937                                      | 10.78            |
|          |                             |                             |                 | $V_2$    | 1 502                                    | 1 098                                    | 11.15            |
|          |                             |                             |                 | $V_3$    | 1 486                                    | 1 013                                    | 12.82            |
|          |                             |                             |                 | $V_4$    | 1 278                                    | 833                                      | 32.35            |
|          |                             |                             |                 | $V_5$    | 1 074                                    | 943                                      | 38.80            |
| 1/4      | 390.02                      | 452.43                      | 16.00           | $V_1$    | 1 470                                    | 805                                      | 14.51            |
|          |                             |                             |                 | $V_2$    | 1 458                                    | 659                                      | 13.57            |
|          |                             |                             |                 | $V_3$    | 1 240                                    | 635                                      | 37.28            |
|          |                             |                             |                 | $V_4$    | 1 196                                    | 562                                      | 47.07            |
|          |                             |                             |                 | $V_5$    | 1 058                                    | 659                                      | 50.72            |
| 1/2      | 780.05                      | 889.25                      | 14.00           | $V_1$    | 1 081                                    | 660                                      | 38.87            |
|          |                             |                             |                 | $V_2$    | 1 180                                    | 603                                      | 40.79            |
|          |                             |                             |                 | $V_3$    | 879                                      | 552                                      | 55.96            |
|          |                             |                             |                 | $V_4$    | 684                                      | 517                                      | 65.47            |
|          |                             |                             |                 | $V_5$    | 505                                      | 505                                      | 68.18            |

路径的波速也存在一定差异性，检测最高波速为 1 987 m/s，最低波速为 941 m/s。针对不同空洞面积下的波速分析，发现空洞下的  $V_1\sim V_5$  路径均存在波速衰减，因为具有空洞的材质会阻碍应力波直线传播，继而形成路径绕行增加测点间的距离，造成波速衰减。观察不同空洞面积下的衰减值  $K$  发现，当路径通过空洞时波速的传播路径变大，波速值衰减，其中最高衰减峰值均为  $V_5$  路径；当应力波路径为  $V_1$ 、 $V_2$  时，各路径的波速影响较小，故波速衰减较低的路径出现在  $V_1$ 、 $V_2$ 。同时也说明裂纹波速衰减小于空洞波速衰减。此外试件边部裂纹使局部材质形成断裂，影响波速的直线传播路径。由此可知波速不仅可以反映空洞面积，还可佐证空洞位置。

2.3 马氏距离判别空洞等级

马氏距离是在数据集的基础上，保持各特征之间的尺度和相关性不变，通过测量观测样本与已知样本集间的距离，将多条应力波检测路径进行融合，构建能够反映冷杉内部材质退化的等级指标。

通过以上数据可知，应力波传播路径的距离与木材内部空洞之间具有一定的相关性。依据 C-1 试件的检测结果，参照影响内部空洞路径最大的  $V_5$  路径可知，当  $K\geq 20\%$  时判定内部存在空洞。

根据波速衰减程度建立不同空洞面积与空洞等级的关系，采用逆向试验的方法，将 C-1 试件中部按不同残损面积（0、1/32S、1/16S、1/8S、1/4S、1/2S）进行空洞模拟。

设  $L_0$  为木材内部无空洞——健康材；  
当木材内部存在  $S_{\text{实际}}\leq 1/32 S$  空洞时等级为  $L_1$ ；  
当木材内部存在  $S_{\text{实际}}\leq 1/16 S$  空洞时等级为  $L_2$ ；  
当木材内部存在  $S_{\text{实际}}\leq 1/8 S$  空洞时等级为  $L_3$ ；  
当木材内部存在  $S_{\text{实际}}\leq 1/4 S$  空洞时等级为  $L_4$ ；  
当木材内部存在  $1/4 S < S_{\text{实际}}\leq 1/2 S$  空洞时等级为  $L_5$ 。

$V_1\sim V_5$  各路径波速衰减率与木材内部空洞面积、等级具有一定的规律性，具体见表 2。

表 2  $V_1\sim V_5$  应力波各路径波速衰减与内部空洞面积关系

Tab.2 Relationship between attenuation of stress wave through each path of  $V_1\sim V_5$  and interior voids areas

| 空洞面积  | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ | $K_5$ | 空洞等级  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0     | -     | -     | -     | -     | -     | $L_0$ |
| 1/32S | -     | -     | -     | +     | +     | $L_1$ |
| 1/16S | -     | -     | -     | +     | ++    | $L_2$ |
| 1/8S  | -     | -     | -     | ++    | ++    | $L_3$ |
| 1/4S  | -     | -     | ++    | +++   | +++   | $L_4$ |
| 1/2S  | ++    | ++    | ++++  | ++++  | ++++  | $L_5$ |

“-”表示  $K\leq 20\%$ ；“+”表示  $20\%\leq K\leq 30\%$ ；“++”表示  $30\%\leq K\leq 45\%$ ；“+++”表示  $45\%\leq K\leq 55\%$ ；“++++”表示  $55\%\leq K\leq 70\%$ 。

设一均值为  $k=(k_1, k_2, k_3, \dots, k_i)$ ，且  $n>i$ ，协方差矩阵为  $\Sigma$  的数据集：

$$E=(E_1, E_2, E_3, \dots, E_i)^T \tag{3}$$

式中： $n$  为应力波波速样本数据的数量； $i$  为应力波波速样本数据维度；单一应力波波速表示为：

$$e=(e_1, e_2, e_3, \dots, e_i)^T \tag{4}$$

根据式 3、4 可知马氏距离模型为：

$$D_M(e) = \sqrt{(e - k)^T \sum^{-1} (e - k)}$$

式中： $\sum^{-1}$  为  $\sum$  的逆矩阵。

根据试件在应力波传感器之间的路径，模型中共选取5个判别因子组合形式用于判定内部空洞，参数定义为 $V_1 \sim V_5$ 各路径波速衰减率，即对 $K_1 \sim K_5$ 进行马氏距离判别，构建判断因子 $K_1 \sim K_5$ 与空洞等级的映射关系，从而验证根据判别因子 $K_1 \sim K_5$ 预判空洞等级。

采集C-2至C-7试件在不同空洞下(1/32S、1/16S、1/8S、1/4S、1/2S)应力波传感器 $V_1 \sim V_5$ 路径的传播速度。将试件C-1、C-2、C-3、C-4、C-5、C-6的 $V_1 \sim V_5$ 路径传播速度作为冷杉内部空洞判别模型的学习样本，将试件C-7作为测试样本对其进行验证，结果见表3。

应力波波速衰减K值反映冷杉内部空洞等级，K值越小表明内部材质越接近健康，K值越大则表明内部空洞较为严重，同时内部残损面积也越大。从表3中可知，运用马氏距离模型预测冷杉内部空洞等级和实际试件内部空洞的面积等级一致。说明可以将应力波各测点的路径衰减率用距离判别模型对内部空洞面积进行分级判定。

### 3  古建木构件空洞检测实例

该古建筑建于清朝中期，主体结构材料为木结构，整体建筑风格呈徽派，如马头墙、清瓦等。建筑面阔五间，进深四间，木柱、木梁为冷杉。木构件上部雕刻十分细致，但随着使用年限延长、环境变化、人为破坏等使得木构件材料出现老化、虫蛀、开裂、霉变等现象，具体如图6所示。

以该建筑的西部檐柱为例，柱体经测量周长为113 cm，含水率为14%。在木构件外部空洞观察的基础上，对木构件内部进行应力波检测，空洞测点为距柱础177 cm处进行数据采集。应力波图像判别为内部存在空洞现象，空洞类型为内部材质空洞，空洞位置位于柱体西侧，最长残损直径为21 cm，空洞面积占检测截面的66%； $V_5$ 路径（传感器4-9）波速为524 m/s，形成最低值，具体如图7所示。

通过采集 $V_1 \sim V_5$ 路径下的波速衰减值，根据马氏距离判别空洞等级为 $L_5$ ， $1/4S < S_{\text{实际}} \leq 1/2S$ 。依据GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技

表3  冷杉内部空洞马氏距离判别

Tab.3  Application of Mahalanobis distance to evaluate interior voids

| 试件<br>编号 | 判别因子及参数 |       |       |       |       | $S_{\text{实际}}$ | 空洞<br>等级 |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-----------------|----------|
|          | $K_1$   | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ | $K_5$ |                 |          |
| C-1      | 18.23   | 0.97  | 9.76  | 20.51 | 25.14 | $\leq 1/32S$    | $L_1$    |
| C-2      | 15.57   | 2.00  | 10.86 | 21.37 | 25.86 |                 |          |
| C-3      | 1.37    | 1.37  | 10.27 | 20.86 | 25.53 |                 |          |
| C-4      | 5.01    | 6.00  | 18.49 | 27.21 | 28.87 |                 |          |
| C-5      | 0.18    | 4.72  | 17.23 | 26.15 | 27.63 |                 |          |
| C-6      | 1.68    | 5.01  | 17.50 | 26.42 | 28.07 |                 |          |
| C-7      | 14.72   | 0.94  | 9.76  | 20.49 | 25.11 |                 |          |
| C-1      | 15.44   | 3.23  | 17.91 | 30.03 | 33.59 | $\leq 1/16S$    | $L_2$    |
| C-2      | 11.92   | 3.26  | 17.78 | 29.83 | 33.62 |                 |          |
| C-3      | 8.03    | 1.47  | 16.37 | 28.34 | 32.53 |                 |          |
| C-4      | 3.40    | 8.97  | 24.57 | 35.35 | 37.47 |                 |          |
| C-5      | 2.05    | 8.46  | 24.28 | 35.12 | 37.15 |                 |          |
| C-6      | 2.70    | 8.78  | 24.60 | 35.37 | 37.46 |                 |          |
| C-7      | 11.83   | 3.27  | 17.91 | 30.05 | 33.59 |                 |          |
| C-1      | 10.40   | 11.15 | 12.82 | 32.35 | 35.79 | $\leq 1/8S$     | $L_3$    |
| C-2      | 8.16    | 0.82  | 16.18 | 32.22 | 35.29 |                 |          |
| C-3      | 13.34   | 1.80  | 15.12 | 31.45 | 34.82 |                 |          |
| C-4      | 0.75    | 11.90 | 31.74 | 41.89 | 44.60 |                 |          |
| C-5      | 4.34    | 9.47  | 30.13 | 43.91 | 45.37 |                 |          |
| C-6      | 4.76    | 9.82  | 30.16 | 44.05 | 45.57 |                 |          |
| C-7      | 6.54    | 0.32  | 12.81 | 32.32 | 35.81 |                 |          |
| C-1      | 14.51   | 13.57 | 37.28 | 47.07 | 50.73 | $\leq 1/4S$     | $L_4$    |
| C-2      | 11.47   | 14.13 | 37.25 | 47.92 | 90.21 |                 |          |
| C-3      | 12.62   | 8.32  | 29.06 | 45.68 | 46.30 |                 |          |
| C-4      | 2.86    | 14.08 | 34.31 | 49.35 | 53.64 |                 |          |
| C-5      | 2.47    | 14.12 | 34.34 | 48.97 | 53.35 |                 |          |
| C-6      | 3.38    | 14.26 | 34.89 | 49.11 | 53.48 |                 |          |
| C-7      | 10.83   | 13.55 | 37.30 | 47.07 | 50.75 |                 |          |
| C-1      | 38.87   | 40.79 | 55.96 | 65.47 | 68.18 | $\leq 1/2S$     | $L_5$    |
| C-2      | 36.11   | 40.61 | 55.95 | 65.37 | 67.93 |                 |          |
| C-3      | 21.58   | 39.30 | 55.35 | 65.02 | 67.73 |                 |          |
| C-4      | 0.98    | 13.15 | 35.29 | 51.27 | 59.61 |                 |          |
| C-5      | 0.58    | 13.58 | 36.04 | 51.40 | 59.38 |                 |          |
| C-6      | 3.36    | 14.00 | 35.78 | 50.80 | 58.99 |                 |          |
| C-7      | 36.11   | 40.61 | 55.95 | 65.37 | 67.93 |                 |          |

术标准》中对木柱残损点判定，可知柱的材质存在空洞，需对其进行保护及修复。

古建筑木构件拆解验证会破坏其原真性。马氏距离空洞判别模型可修正应力波检测结果的误差，不仅可以判别小面积空洞，对大面积内部空洞也可起到验证的作用，可为古建筑木构件内部空洞提供判别依据以及为古建筑安全性鉴定、修复提供判定参考。

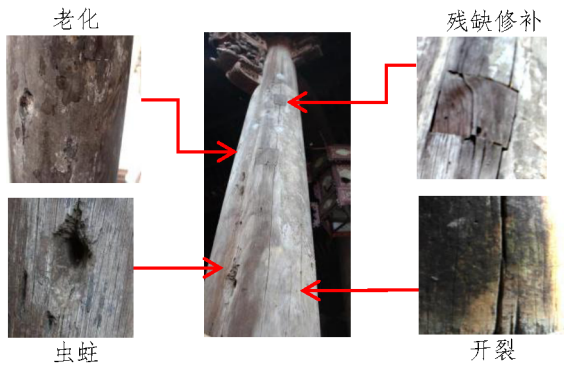


图6 木构件空洞现状

Fig.6 Voids status in wood components

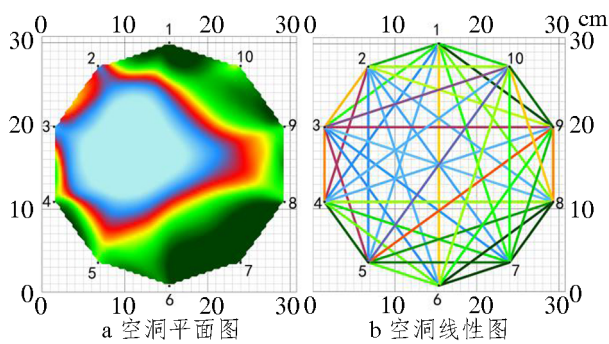


图7 古建筑木构件应力波空洞数据采集

Fig.7 Data acquisition of stress wave in timber components of ancient buildings

#### 4 结语

1) 应力波无损检测方法可通过图形判别木构件空洞位置以及量化空洞面积,但从试验结果可知,当内部空洞面积较小或较大时,应力波反映不敏感或受其他传感器路径的影响,内部空洞结果最高存在36%的误差。

2) 应力波各路径的波速衰减率与空洞位置、空洞面积存在相关性。当内部存在空洞,面积越大波速衰减率越大,通过分析应力波波速线性图发现衰减峰值均为 $V_3$ 路径,是空洞判别的重要参考路径,同时还可进一步验证应力波图形判别的空洞位置。此外试件边部的自然开裂形成表面裂纹也可影响 $V_1$ 、 $V_2$ 波速的衰减,后续可针对芯材内部空洞以及边材裂缝的复合型空洞进行深入研究。

3) 通过对不同内部空洞面积试件的测点波速进行样本训练,建立冷杉应力波传播速度衰减率对其内部空洞面积判别的马氏距离模型,该模型不仅可以判别小面积空洞,对大面积内部空洞也可起到验证的作用,为木构件内部材质检测、修

复方案的设计提供判别依据。

#### 参考文献:

- [1] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 中国古建筑木结构力学研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 644-654.  
CHEN Z Y, ZHU E C, PAN J L. A review on structural mechanics of Chinese ancient wood structures[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 644-654.
- [2] 潘毅, 陈建, 安仁兵, 等. 山地古建筑木结构抗震性能研究评述[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 10-21.  
PAN Y, CHEN J, AN R B, et al. A review on seismic performance of ancient timber structures on sloped lands[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 10-21.
- [3] 阿斯哈, 周长东. 复合加固圆形木柱轴心受压承载力计算[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(5): 146-154.  
A S H, ZHOU C D. Calculation of axial compressive bearing capacity of composite strengthened circular timber column[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(5): 146-154.
- [4] 赵柔, 邱洪兴, 陈孔阳. 木构件腐朽程度的试验研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2018, 31(2): 34-39.  
ZHAO R, QIU H X, CHEN K Y. Experimental research on decay of timber components[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2018, 31(2): 34-39.
- [5] 刘义凡, 李哲瑞, 张晓兰, 等. 超声波无损检测技术在古建筑检测中的应用——以少林寺初祖庵大殿阑额为例[J]. 工业建筑, 2021, 51(5): 37-43.  
LIU Y F, LI Z R, ZHANG X L, et al. Applications of ultrasonic nondestructive testing technique in ancient building testing: take the lintels of the main hall of ancestor's monastery of the Shaolin temple as an example[J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 37-43.
- [6] 袁霄, 陈勇平, 郭文静, 等. 古建筑木构件隐蔽式残损适宜性检测技术[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(6): 9-15.  
YUAN X, CHEN Y P, GUO W J, et al. Suitability testing technology of invisible damage in wooden components of ancient timber structures[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(6): 9-15.
- [7] 徐佳鹤, 王超, 张斌. 我国古建筑木构件及木质文物保护技术发展历程与展望[J]. 木材工业, 2020, 34(6): 39-43, 47.  
XU J H, WANG C, ZHANG B. Review and prospect analysis of conservation techniques in heritage timber structures in China[J]. China Wood Industry, 2020, 34(6): 39-43, 47.
- [8] 廖春晖, 张厚江, 黎冬青, 等. 面向古建筑木构件内部缺陷勘测的应力波临界速度确定[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 158-161.
- [9] 程丽婷, 戴俭, 彭乐鑫. 含水率对落叶松木材材性检测指标的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(36): 15050-15058.  
CHENG L T, DAI J, PENG L X. Effect of moisture content on wood properties detection index of larch[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(36): 15050-15058.
- [10] 齐留洋, 王德胜, 刘占全, 等. 改进加权距离判别分析模型的边坡爆破稳定性判别[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1989-1996.  
QI L Y, WANG D S, LIU Z Q, et al. Improved distance discriminant analysis model for slope blasting stability discrimination[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1989-1996.
- [11] 张红飞, 夏霜, 程志友, 等. 基于改进马氏距离的空压机健康状态评估[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 32-36, 93.  
ZHANG H F, XIA S, CHENG Z Y, et al. A health assessment method of compressor based on improved Mahalanobis distance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 32-36, 93.

(本文编校 孟凡丹)