

# 超声 CT 技术在乾陵石刻风化状况调查中的应用

马宏林

(砖石质文物保护国家文物局重点科研基地(陕西省文物保护研究院), 陕西西安 710075)

**摘要:** 内部裂隙发育是威胁石质艺术珍品长远保存的最具破坏作用的病害类型, 了解石刻的裂隙发育情况, 尤其是其在石刻内部的发育情况, 对研究制订石刻的保护措施有很大的指导意义和参考价值。为此, 本研究应用了近年来在国际上发展起来的一种先进的超声 CT 检测技术, 对乾陵石刻内部裂隙发育进行了检测。本研究先通过实验室标准试块的检测研究: 制作了直径约 50cm 的两个圆形及两个边长约 50cm 的石灰岩试样, 并在试样上分别制作了直径 5cm 的圆孔 5 × 15cm 的方孔, 使用 ZBL-U520 数字化非金属超声检测仪, 用超声 CT 的方法对四个标准试样进行了检测, 基本准确地检测到了缺陷的位置和大小。再利用超声 CT 的方法对乾陵石刻现场进行了检测, 并与内窥镜检测结果对比, 验证了超声 CT 结果的准确性。本研究结果将为乾陵石刻的保护修复提供可靠的依据。

**关键词:** 石刻; 裂隙; 超声; 检测

**中图分类号:** G262      **文献标识码:** A

## 0 引言

乾陵石刻病害调查表明: 经过 1300 多年的自然风化及人为因素的影响, 乾陵石刻已经遭受到了不同程度的侵蚀和破坏。石刻的裂隙风化带的存在(裂缝, 开裂)是危及这批石质艺术珍品长远保存的最具破坏作用的病害类型。

石刻的裂隙基本可以分为浅表性的风化裂隙和发育较深的结构性裂隙两大类(图 1)。这两种不同的裂隙, 其形成的原因、导致的破坏情况也不尽相同。

1) 浅表性裂隙(开裂), 基本位于石刻表层, 这类裂隙开裂深度不大, 很少超过 1.5cm, 且多呈上大下小的“V”字形分布。属于户外环境暴晒、雨激; 周

期性的热胀冷缩变化; 或冬季冰劈、地衣根劈类裂隙发育的初期, 危害较小。裂隙发育情况的调查基本可以由其宽度、长度、深度的测量来评估;

2) 石刻形成的较深裂隙, 这类裂隙在不伴随开裂部分位移、缺失的情况下, 一般裂缝开裂较小, 约在 0.2 ~ 0.5cm 左右, 但随着裂隙的发展, 常常会导致石刻开裂、断裂、破裂, 危害较大。属于外力扰动及岩石自身缺陷(岩脉、薄弱夹杂面的存在)、地基不均匀沉降产生的。

裂隙内部的发育情况非常复杂, 了解石刻的裂隙发育情况, 尤其是其在石刻内部的发育情况, 对研究、制订乾陵石刻的保护措施有很大的指导意义和参考价值经过调查研究。



图 1 唐陵石刻发育的裂隙  
Fig. 1 Cracks on sculptures of Qian Mausoleum

收稿日期: 2014 - 10 - 24; 修回日期: 2015 - 04 - 29

基金项目: 国家文物局文物保护科学和技术研究课题资助(200219)

作者简介: 马宏林(1965—), 西安交通大学生物医学工程与仪器专业毕业, 主要研究方向为砖石质文物保护、无损检测, E-mail: 362203704@qq.com

### 1 石刻风化状况的超声检测原理

由于石材与混凝土在结构和性质方面的相似性,建筑行业混凝土的无损检测原理可直接移植于石刻的无损检测。

在石质文物保护的研究中,利用岩石与超声波波速及首波幅度之间的相关关系,可以非常便利地测量有关自然岩石晶间结合及其整体性能的有关情况,从而获得有关石质风化情况的信息,近年来随着超声断层技术的不断发展和应用,更提供了探查和评估石刻裂隙内部发育情况的手段。

石材风化后,其晶体之间结构的松散和裂隙的存在,会降低超声波在石材内部的传播速度,会使接收波的首波幅度有一定的降低,同时也会使得接收波的波形产生畸变,直接反映就是使接收波的频谱发生离散。利用合理的观测系统,通过对超声波速、首波幅度及接收波频谱的分析,即可对石材的风化程度、内部的裂隙走向和位置进行科学的评估。

国际上常用表 1 给出的被测岩石与同材质新鲜岩石的超声纵波波速比  $V_i/V_0$  做为评价石质文物风化程度的依据,这与《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)中岩石完整性分类表基本一致。

根据超声波速判断整体风化程度,以新鲜岩石的超声波速为  $V_0$ ,实测声速为  $V_i$ ,根据  $V_i/V_0$  的下列对比关系可以判断风化程度。

表 1 石材风化程度评估与  $V_i/V_0$  对照表

Table 1 Standard to evaluate weathering level of stone

风化程度	$V_i/V_0$
未风化	$\geq 0.9$
孔隙度增加	0.75 ~ 0.9
风化的下限	0.75
轻度风化	0.5 ~ 0.75
严重风化	0.25 ~ 0.5
完全风化	$\leq 0.25$

超声波波长计算公式为:波长 = 波速/频率。对于采用的 50kHz 纵波探头,当波速为 2000m/s 时波长为 4cm,波速为 5000m/s 时波长为 10cm。

### 2 超声波 CT 法原理

弹性波 CT(包括超声 CT)是根据医学 CT 原理而来,测试时要求尽可能全方位对被测剖面进行透射测量,才能提高成像精度。超声波 CT 的成像方法原理如图 2 所示,首先通过扇形测试获取大量的首波走时数据( $t_i$ ),然后通过求解大型矩阵方程来获取被测物体内超声波速剖面图像,根据速度剖面图像可以直

观准确地判定隐患大小分布,是目前最为有效最为精确的测试方法之一。 $S_1 \sim S_n$  为超声发射点, $R_{11}$ 、 $R_{12} \dots R_{ni}$ 、 $R_{nj}$  为各发射点对应的接收点。

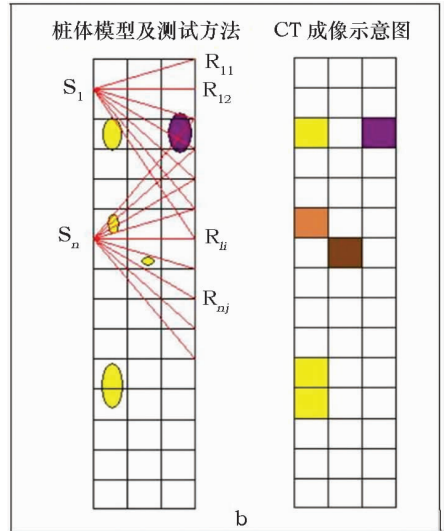


图 2 超声波 CT 成像原理图

Fig. 2 Principle of ultrasonic CT

在超声 CT 检测时,设在成像剖面内共测有 N 条射线,首先根据测试精度把剖面分为 M 个单元(网格)(图 2),以射线理论为基础的成像方法归结为求解如下方程:

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1M} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{N1} & l_{N2} & \dots & l_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix}$$

式中, $l_{ij}$  是第  $i$  条射线在第  $j$  个单元内的路径长度; $S_j = 1/V_j$  是第  $j$  个单元的慢度值; $t_i$  是第  $i$  条射线的走时值。求解这个矩阵方程,即可得出内部每个点的慢度值,其倒数即为对应点的超声波速度。

### 3 实验室标准试块的超声 CT 探测实验

根据检测需要,采用与乾陵石刻材质接近的青石(石灰岩)设计制作了四块实验样块,尺寸分别为:两块边长为 50cm 左右的正方形,两块直径 50cm 左右的圆形试块,并分别制作了直径 4.5cm 的圆孔和 4cm × 15cm 的长方形孔(图 3)。以检测软件及观测系统对不同缺陷的反映程度。由于 50kHz 纵波探头的直径为 4cm,探测中测点间距被限定必须大于或等于 4cm。

对标准试块 1 和 2,分别进行了四侧透射式 CT 检测,圆形试块(标准试块 3、4)按 90 度角划分成 4 个区域,模拟方形试块进行了侧透射式 CT 检测。4 个标准试块检测得成像剖面见图 4 所示。

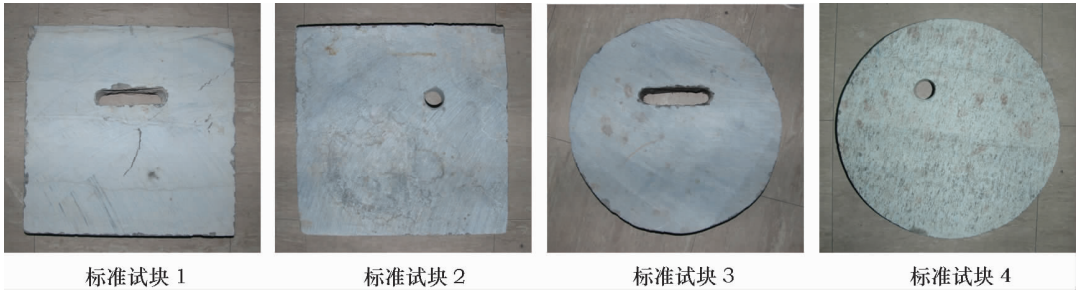
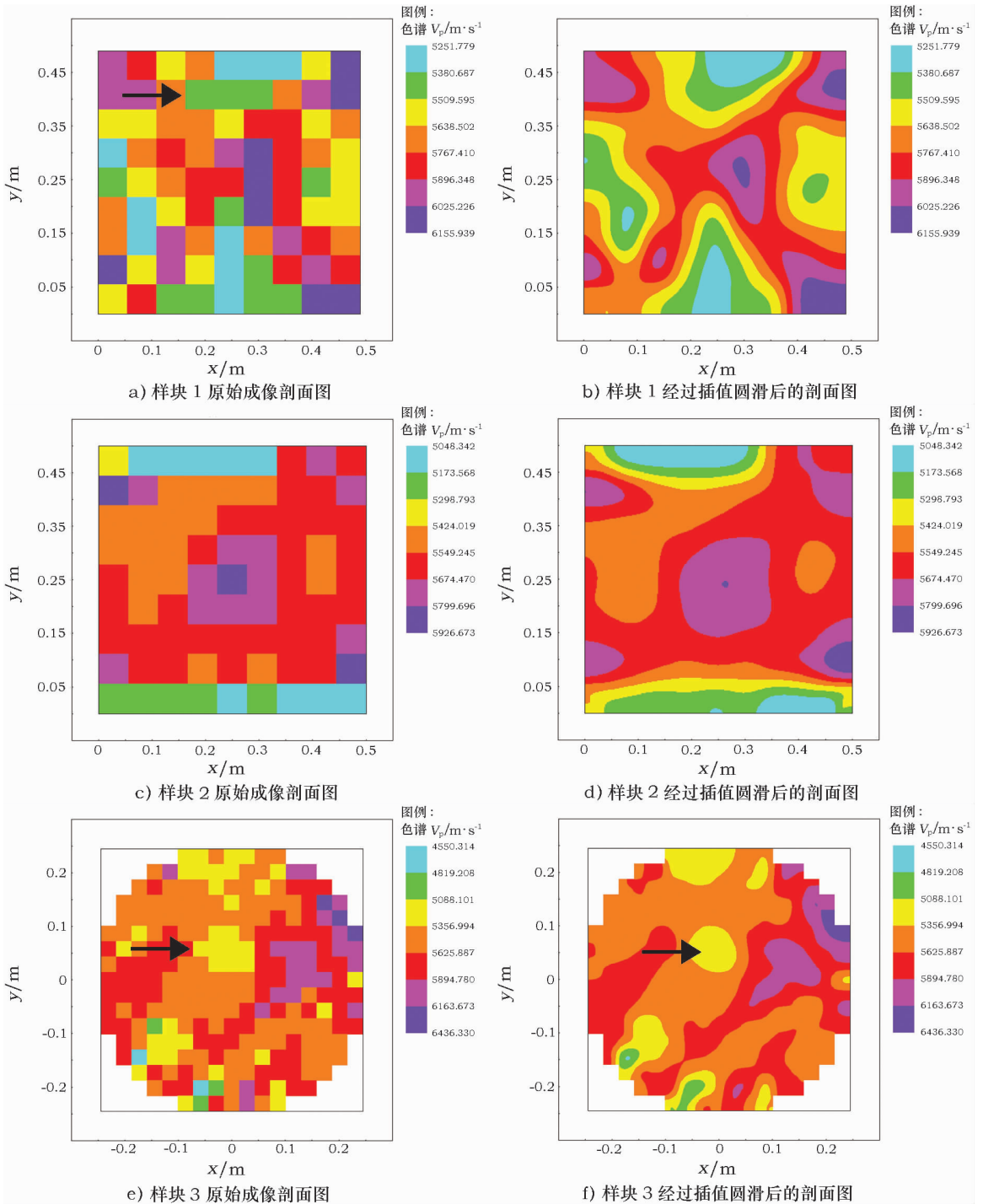


图 3 标准试块

Fig.3 Samples for experiment



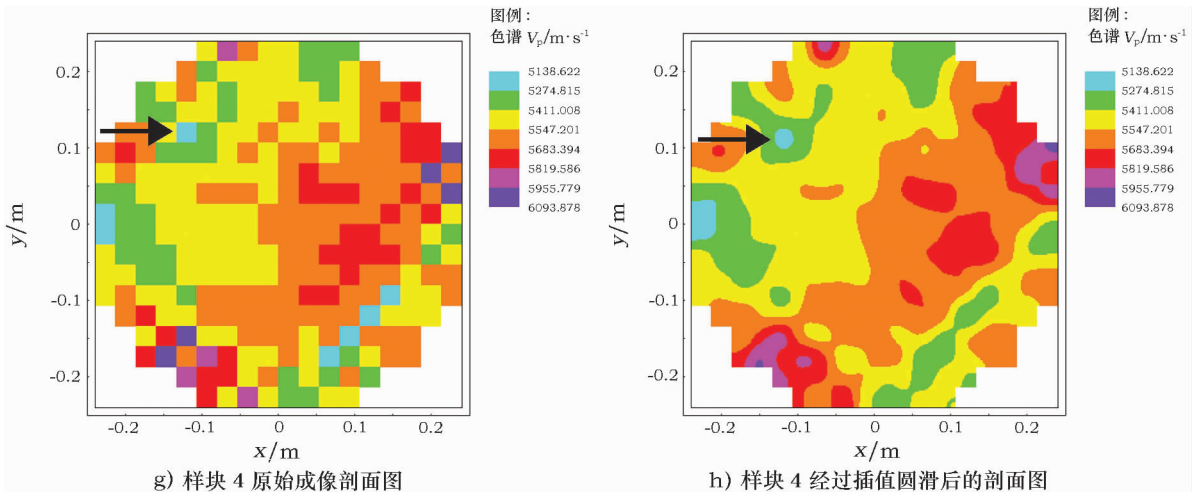


图4 标准样块成像剖面

Fig. 4 Ultrasonic CT results of the samples

样块1原始成像剖面可以直观反映缺陷位置及大小,只是缺陷位置偏高约5cm(图4中绿色部分)。经过插值圆滑后,绿色部分与其上面蓝色部分合并,导致直观图表示部分上移。其他蓝绿色部分为样块层理及边缘不平滑部分的反映。

样块2由原始成像剖面图和平滑后的成像剖面图都无法明确判定缺陷的位置,原因是由于50kHz纵波探头直径为4cm,使得探测点间距无法小于4cm,并且对于50kHz的超声波,在其波速为2000~5000m/s时,波长为4~10cm,而超声学检测的精度直接受到超声波波长的限制,不一定能够显示出小于超声波波长的缺陷。

样块3通过本样块原始成像剖面,可以较准确观察到缺陷的大小和位置(图4中黄色部分),位置和大小略有偏差,超声检测受到超声波长的限制,5cm的检测误差应该在可以接受的范围之内。

样块4通过本样块原始成像剖面,可以较准确观察到缺陷的大小和位置(图4中蓝色部分),位置和大小略有偏差(偏左上角5cm)。超声检测,尤其是超声CT受到检测点密度和超声波长的限制,5cm的检测误差应该在可以接受的范围之内。其他蓝、绿色部分为样块本身的不均匀性造成的。

实验样块超声CT检测结果评估:超声CT图像与试块对比表明分析软件可以较准确地再现被测区域的缺陷特征。但对于小于探测点间距和超声波波长的缺陷,小于4cm直径的缺陷不一定能够反映出来。同时,受到自然岩石质量均匀性的限制,超声图谱中出现了一定的不均匀性干扰。

超声CT现场检测中应该注意,在工作量允许的情况下尽可能地缩小超声布点间距,以增大检测的准确度。同时,缩小探头直径或耦合直径,为缩小布点间距提供可能性。

#### 4 乾陵典型石刻裂隙内部发育情况的超声CT检测研究(以西四翁仲为例)

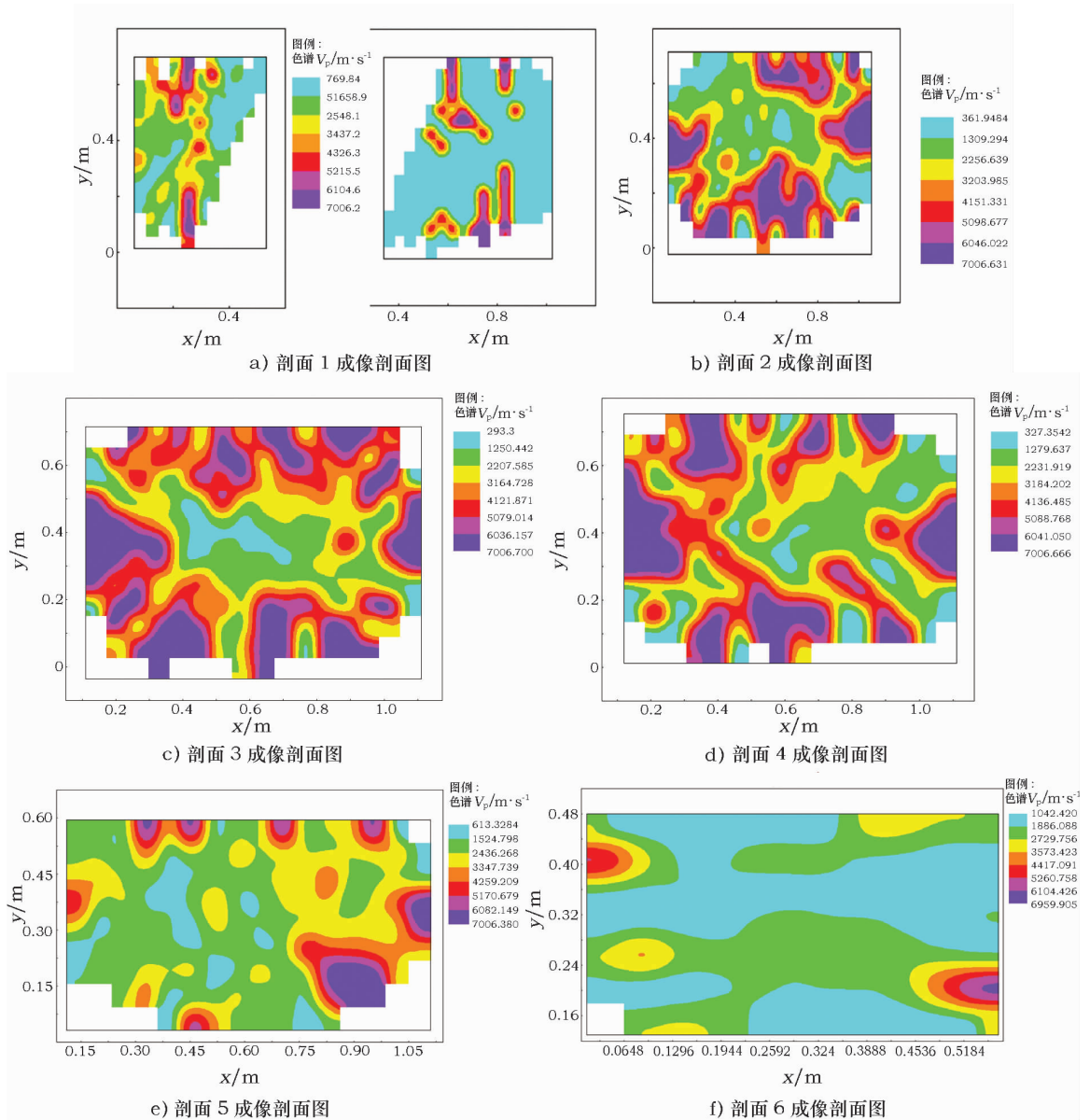
在乾陵挑选了表面裂隙最为严重的五件石刻进行了超声CT检测,包括东侧石狮、东三翁仲及西四翁仲。使用的超声检测仪器为ZBL-U520非金属超声检测仪,超声探头使用50kHz纵波探头,耦合材料为黄土泥。

乾陵司马道西侧第四翁仲高394cm,宽113cm,厚80cm,翁仲全身遍布裂纹,身体前部多纵向裂纹。胸背部位均可观察到一条左上至右下走向裂纹,应为一条石材节理发育成的贯通裂隙。左肩背部位存在一条纵向裂纹,到达腰部。头部及左肩部裂隙尤为严重,呈爆炸状。右腿部位斜向断裂,用铁箍加固,如图5所示。

成像结果分析(图6):剖面1显示,翁仲腿部已严重风化,腿部大部分位置超声波速在1000~2000m/s。剖面2显示,翁仲腿中部存在东北-西南走向的中度风化带(裂隙)。本剖面整体已中度风化。剖面3、4显示翁仲腰部整体强度较好,但同样存在东北-西南走向的风化带。剖面5显示翁仲肩部已严重风化,整体波速在2000m/s左右,在肩部北部存在3000m/s左右的中度风化区。剖面6~8显示,翁仲头部风化严重,绝大部分区域超声波速在2000m/s以下,且存在东北-西南走向的风化裂隙区,裂隙已基本贯通。



图 5 西四翁仲剖面位置  
Fig.5 Sections of West No.4 stone man



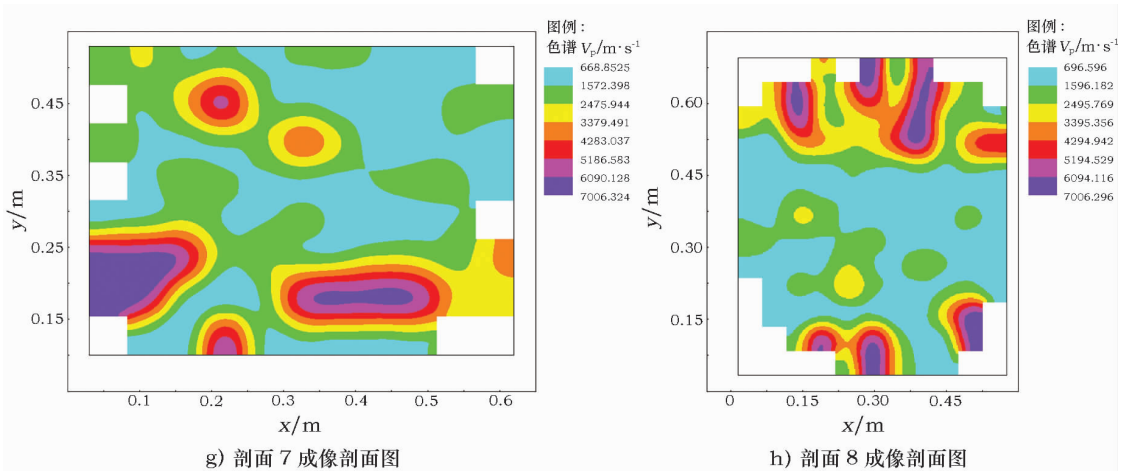


图 6 乾陵西 4 翁仲超声 CT 成像剖面图

Fig. 6 Ultrasonic CT results of West No. 4 stone man

## 5 讨论

乾陵石刻内部裂隙发育的超声图谱的可靠性需要验证。很幸运的是,在乾陵石刻保护工程实施中,需要对西 4 翁仲钻孔以实施锚杆加固,为进行内窥镜探查提供了可能性。内窥镜观察到有多条裂隙已发育到石刻内部,裂隙位置与超声 CT 反映的情况一致,验证了其内部裂隙发育的超声 CT 图谱的可靠性(图 7)。

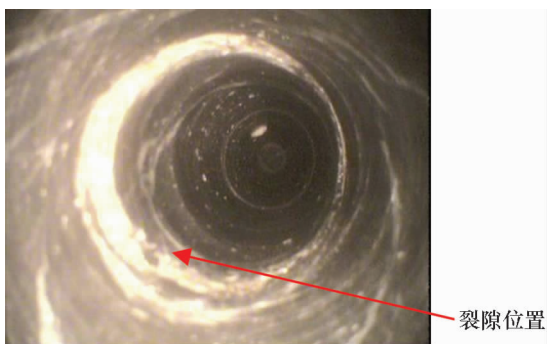


图 7 乾陵翁仲内窥镜探测图

Fig. 7 Crack inside West NO. 4 Stone Man observed by endoscope

## 6 结论

通过超声 CT 方法,对乾陵的五件石刻进行了内部风化状况的超声检测,综合波速、波形、频谱及首波幅度等数据,探测了其内部裂隙发育的程度和裂隙走向,取得了大量的超声检测基础数据,并形成了直观的超声 CT 成像剖面图。说明利用超声方法探测石刻内部裂隙和风化情况的方法有较强的准确性、可靠性和实用性。

超声检测方法可以用于唐陵石刻裂隙内部发育状况的检测,比较直观准确地展示石质文物的内部风化裂隙带分布,是目前最为先进的无损检测方法之一,其结果将会为乾陵石刻的保护修复提供可靠的依据。

## 参考文献:

- [1] 胡建凯,张谦琳. 超声检测原理和方法[M]. 北京:中国科技大学出版社,1993.  
HU Jian-kai, ZHANG Qian-lin. Principle and methods of ultrasonic detection[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1993.
- [2] 马涛,孙渊,Simon S. 乾陵石刻内部裂隙的超声波探测研究[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(2): 9-20.  
MA Tao, SUN Yuan, Simon S. Research on ultrasonic detections for inner cracks of Qianling Mausoleum[J]. Sci Conserv Archaeol, 2002, 14(2): 9-20.
- [3] 陈祥,孙进忠,祁小博. 石质文物风化程度的超声波 CT 检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 1: 4970-4976.  
CHEN Xiang, SUN Jin-zhong, QI Xiao-bo. Ultrasonic CT detection on weathered stone relics[J]. China J Rock Mech Eng, 2005, 1: 4970-4976.
- [4] 何发亮,李苍松,谷明成,等. 声波 CT 技术在泸定桥东桥台内部结构探测中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2001, 13(1): 28-32.  
HE Fa-liang, LI Cang-song, GU Ming-cheng, et al. Detection on the internal structure with sound CT technique[J]. Sci Conserv Archaeol, 2001, 13(1): 28-32.
- [5] 张志国,彭华. 超声波无损探伤检测在现代出土石质文物保护中的应用[J]. 地质力学学报, 2005, 11(3): 278-284.  
ZHANG Zhi-guo, PENG Hua. Application of ultrasonic nondestructive detection on excavated stone relics[J]. J Geomech, 2005, 11(3): 278-284.
- [6] 马宏林,齐扬,周萍. 石灰岩质文物超声检测中耦合剂的筛

选[C]//2005年云冈国际学术研讨会论文集·保护卷.北京:文物出版社,2006:262-266.

MA Hong-lin, QI Yang, ZHOU Ping. Selecting of coupling agent for ultrasonic detecting of limestone[C]//Collected papers of 2005 Yungang International Conference, Beijing; Cultural Relics Press, 2006:262-266.

[7] 顾和宝,高大钊,朱小林. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:8.

GU He-bao, GAO Da-zhao, ZHU Xiao-lin. GB 50021-2001, Code for investigation of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002:8.

## The use of CT scanning to survey the condition of stone sculptures at Qianling Mausoleum

MA Hong-lin

(Key Scientific Research Base of Conservation on Stone and Brick Materials, State Administration Bureau of Cultural Heritage, Shaanxi Provincial Institute for Conservation of Cultural Property, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Since interior cracks are the most important factor imperiling stone sculptures, it is necessary to understand the development of cracks inside such objects to make a conservation plan of action. Ultrasonic CT is a newly developed technique for assessing the weathering condition of stone. This article discusses the application of the ultrasonic CT scanning technique on weathering to assess the condition of stone sculptures at the Qianling Mausoleum. Limestone test sample blocks was prepared in the lab. Two round blocks with diameters of 50cm and two rectangular samples with side lengths of 50cm were made with 5cm diameter round holes and 5cm × 15cm square holes, respectively. A ZBL-U520 digital CT scan was used to identify the holes. The CT scanner was used to test the interior cracks of Qianling Mausoleum sculptures and the results were compared with endoscopy results. The results by CT scan is proved to be accurate.

**Key words:** Stone sculpture; Weathering condition; Ultrasonic CT; Detection

(责任编辑 谢 燕)