

# 乾陵石刻内部裂隙的超声波探测研究

马 涛

(西安文物保护修复中心 西安 710061)

孙 渊

(长安大学物探系物探教研室 西安 710061)

Simon S.

(巴伐利亚文物保护局, Munich 80539, Germany)

**摘要** 利用岩石与超声波波速之间的相关关系,对乾陵不同截面形状的石刻分别进行了网格法、层析法的超声波现场布点探测,通过测定、计算,估测出所测石刻断面内部各点(或区域)的超声波波速分布及变化规律,并辅以反射波法来进一步确定石刻内部结构情况,从而探测出石刻内部的裂隙或风化情况。

**关键词** 超声波, 石刻, 裂隙, 网格法, 层析法, 反射波

**中图分类号** G262 **文献标识码** A

## 1 超声波在石刻风化及裂隙探测中的应用

在石质文物保护中,利用岩石与超声波波速之间的相关关系,使得我们可以非常便利地用超声波来测量有关自然岩石晶间结合及其整体性能的有关情况。例如:通常情况下,新鲜岩石表层与核心部位力学性质一致,而风化岩石(尤其石刻表层)与核心部位甚至不同深度层次的力学性质差异都很大。这样,测量在振动源与接收器之间的超声波(透射)波速,就可以了解岩石的内部结构及强度变化,也即内部风化状况;另外石刻内部因种种原因很可能发育有裂隙、裂缝,超声波仍能“通过”这些裂隙及裂缝,只是传播时间因绕射而延长,强度也得到了不同程度的衰减:微小的裂隙可以使同样速度的超声波明显衰减,较大的裂隙可以使超声波大大的衰减,而裂缝甚至可以使超声波信号消失。因此,利用超声波技术,通过一定的测量方法测定、计算出所研究石刻断面内部各点(或区域)的超声波波速分布及变化规律,从而探测出石刻内部风化与裂隙的发育情况。

在乾陵石刻内部风化状况、裂隙发育程度的研究中,我们从实验的角度分别采用了目前国内外文保界常用的两种超声波探测方法即网格法和层析法,用于石刻内部风化状况、裂隙发育程度的研究,在验证其方法有效性的同时积累经验,为日后大规模保护乾陵石刻提供无损检测手段。

## 2 乾陵石刻裂隙超声探测研究

乾陵石刻以规模宏伟、数量众多而著称于世,堪称“唐代露天石雕艺术博物馆”。现存石雕约100多件,历经1300多年的自然侵蚀及人为破坏,许多精美的石刻都遭到了不同程度的风化侵蚀和破坏。经过我们对乾陵石刻病害的调查研究,除因物理、化学及生物作用造成的石刻表面风化外,遍布石刻的先天性裂隙及后天性裂隙,从文物保护的角度出发,是影响乾陵石刻安全的最大因素。

乾陵石刻材质为石灰岩,力学强度属硬质岩石,但经过“乾陵石质文物风化蚀变的微观特征研究”,石刻表面侵蚀深度最大已达到现石刻表面 350-500 $\mu\text{m}$  深度(不包括已风化掉的表层),在有裂隙的部位,风化侵蚀深度还会更大。我们尝试通过超声网格及层析分析方法来对此问题进行估算,来了解石刻表面可见的裂隙发育深度,以及有裂隙发育石刻内部的质量状况。

### 2.1 无字碑网格法超声探测

无字碑,史称历代群碑之冠的大碑,碑高 6.30m,宽 2.1m,厚 1.49m,碑座尺寸为 3.3m $\times$ 2.9m $\times$ 0.75m,总重量大约 98.8t。在无字碑上部有一条裂隙,这条裂隙主要分布在阳面和碑西侧,这条裂隙进一步的发育是非常危险的,有可能造成裂隙贯穿,使整块碑额沿裂隙塌落;在碑西侧顶部中间有一条裂隙,已经贯穿到碑东侧,且沿垂直方向向下发育;在碑底部的裂隙分布在阳面和西侧,该裂隙的发育会造成碑棱的块状塌落。

根据石碑断面呈长方形的特点,我们采用了网格法。所谓网格法,是在石刻外部可见裂隙的位置沿一定方向布设断面,并将每个断面划分成若干个小格,在每个小格均布设超声波对测点进行透射波的对测,计算通过各小格的波速比  $K$ ,并根据  $K$  值的大小按有关标准先判断每小格内石刻内部的风化情况,然后综合各小格结果,估算出全断面乃至整个石刻内部风化、裂隙发育的状况。

**2.1.1 布点情况** 检测方法分为 2 种,其一为透射波法,共布设 5 条测线,即 S-N 向碑身 2 条(I、II测线),E-W 向碑身两条(III、IV测线),碑身 1.6m 高度平面测线一条;其二为单点零偏反射波法,共布设 2 条测线,即 I、II测线。有关测线、测点详情见图 1 和表 1。无字碑现场超声波波速测试中,实际完成透射波速点 118 个,反射点  $17 \times 2 = 34$  个,总计 152 个点。

表 1 检测测线、测点参数表

Table 1 Parameter of measurement line and point

测线	测线方向	测点方向	测线位置	测点范围/m	测点距离/m
I	N-S	纵	距 E0.4m	6.0-0.2	0.2
II	N-S	纵	距 W0.4m	6.0-0.2	0.2
III	E-W	纵	距 N0.4m	4.2-0.2	0.2
IV	E-W	纵	距 S0.3m	4.2-0.2	0.2
V 1.6	S-N	E-W	1.6m 碑高	0.2-2.0	0.2
	E-W	N-S		0.2-1.2	
I反	N-S	纵	距 E0.4m	3.4-0.2	0.2
II反	N-S	纵	距 W0.4m	3.4-0.2	0.2

**2.1.2 测量方法** 资料采集仪器设备为 SY5 型数字化声波检测仪,探头为两种:其一为 P 波 50kHz 声波探头,其二为 10Hz-5kHz 频宽的加速度探头。具体采用透射波法和反射波法检测。

(1)透射波法。沿碑身纵向布设四条测线,横向一条,纵横向测线点间距均为 0.2m,采样率均为 2 $\mu\text{s}$ ,记录长度 1024 点,滤波档选为带通 10Hz-100kHz。采集结果见表 2-6。

(2)反射波法。利用加速度探头进行单点零偏反射波法检测,锤击震源激发,点距 0.2m,采样率 10 $\mu\text{s}$ ,记录长度 1024 点,滤波档选为带通 10Hz-100kHz。有关测线、测点参数情况见表 1,测线布设参见图 1。采集结果参见图 2-3。

### 2.1.3 测量结果

(1)透射波法。根据各测点透射波的初至时间,计算出波传播的速度,参照国标 1994 发布的《岩土工程勘察规范》中硬质岩风化程度评价标准,利用 P 波速度以及波速比  $K$  对碑身石材

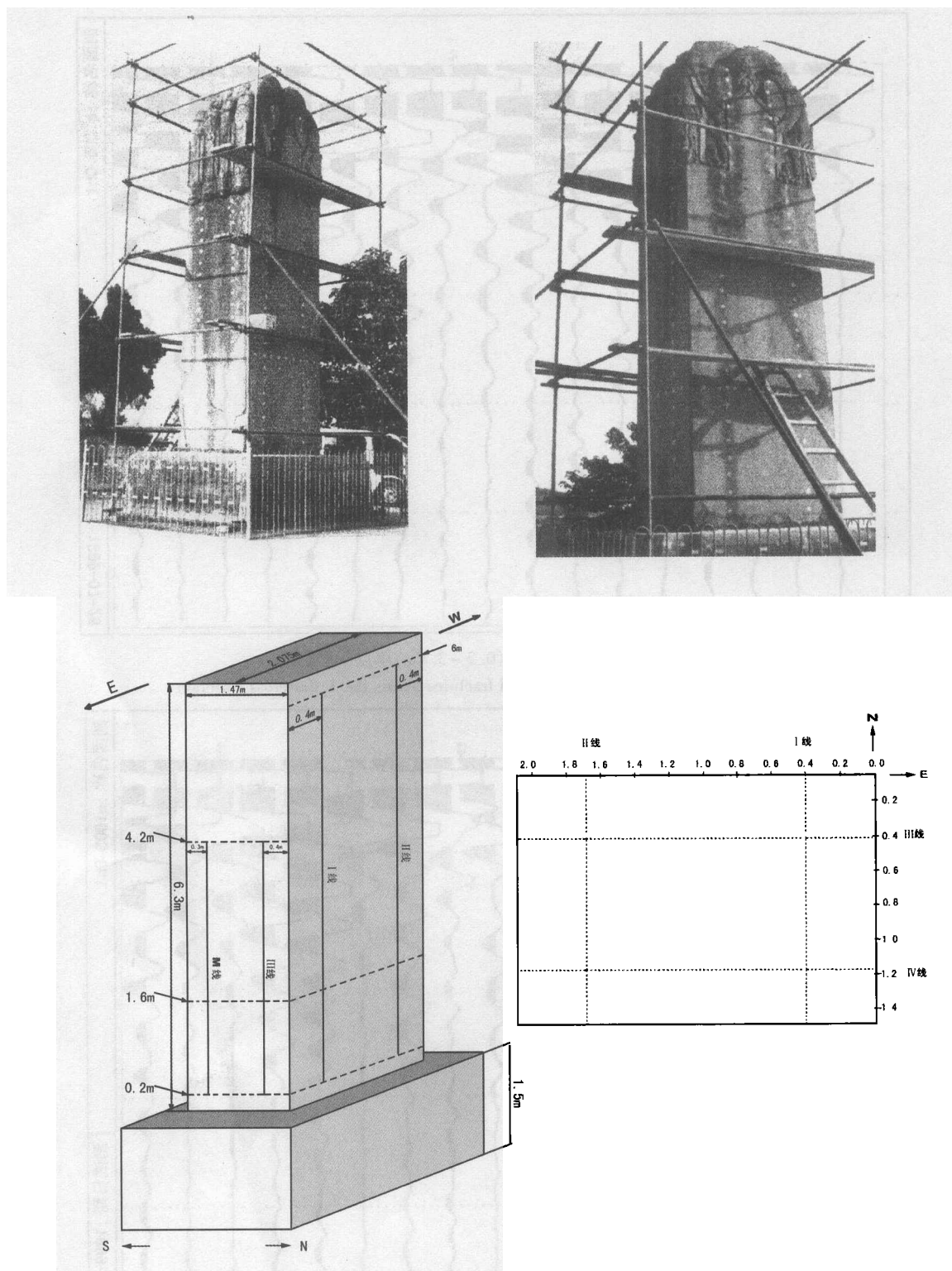


图 1 无字碑声波检测测线及测点布设示意图  
Fig. 1 Netting procedure of the wuzabei stone scripture, Qianling

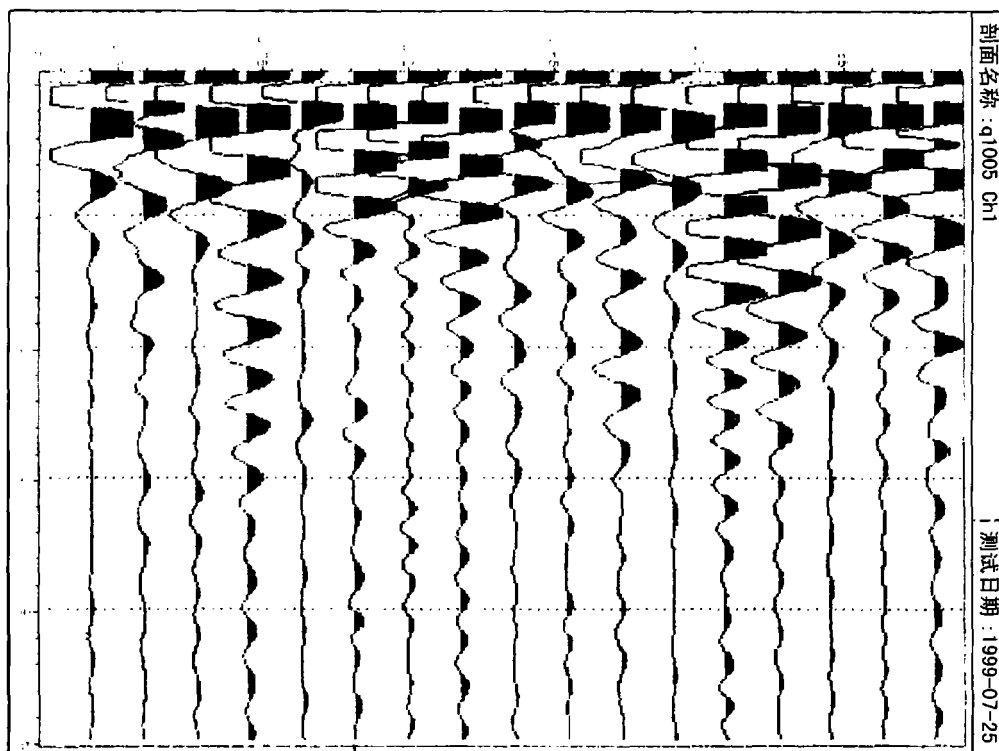


图 2 无字碑 I 测线(0.2 - 3.4m)单点反射剖面

Fig. 2 Evaluation of fissures and fractures across the 1.2m cross - section

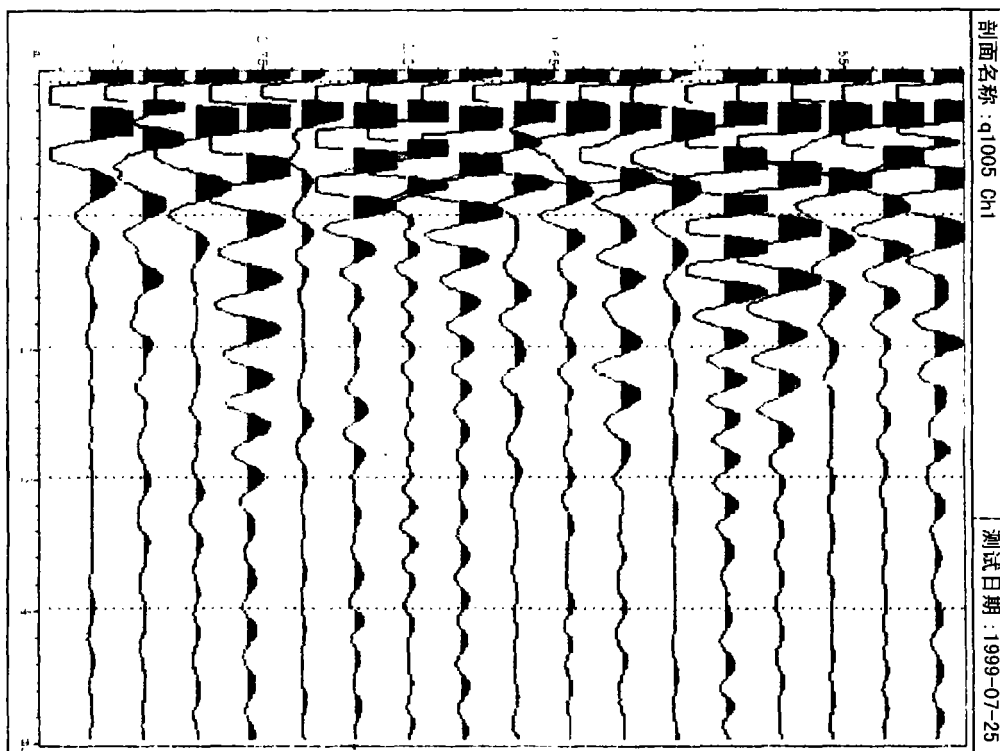


图 3 无字碑 II 测线(0.2 - 3.4m)单点反射剖面

Fig. 3 Evaluation of fissures and fractures across the 0.4m cross - section

表 2 无字碑 N-S 向检测结果  
Table 2 Measurement results of N-S direction on wuzi tablet

线号	点位/m	$T/\mu\text{s}$	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$K(V/V_0)$	风化程度评价
I (N-S)	6.0	720	2042	0.42	强风化, 裂隙很发育
	5.8	750	1960	0.40	
	5.6	708	2076	0.42	
	5.4	804	1828	0.37	
	5.2	525	2800	0.57	强-中风化, 裂隙较发育
	5.0	504	2917	0.60	
	4.8	588	2500	0.51	中风化, 裂隙发育
	4.6	597	2462	0.50	
	4.4	714	2095	0.42	
	4.2	522	2816	0.57	
	4.0	504	2934	0.60	中风化, 有裂隙发育
	3.8	573	2565	0.52	
	3.6	426	3451	0.70	
	3.4	450	3266	0.67	
	3.2	375	3920	0.80	微风化, 有少量裂隙发育
	3.0	416	3534	0.72	
	2.8	342	4300	0.88	
	2.6	350	4200	0.86	
	2.4	364	4061	0.83	中风化, 有裂隙发育
	2.2	366	4016	0.82	
2.0	354	4153	0.85		
1.8	546	2692	0.55		
1.6	407	3608	0.74	中-强风化, 裂隙较发育	
1.4	494	2974	0.61		
1.2	592	2492	0.51	中-强风化, 裂隙很发育	
1.0	506	2905	0.59		
0.8	628	2341	0.48		
0.6	646	2276	0.46		
0.4	590	2494	0.51		
0.2	628	2341	0.48		

注:  $V_0$  - 新鲜岩石 P 波速度 4900m/s,  $dh = 1.47\text{m}$

表 3 无字碑 N-S 向检测结果  
Table 3 Measurement results of N-S direction on wuzi tablet

线点	点位/m	$T/\mu\text{s}$	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$K(V/V_0)$	风化程度评价
II (N-S)	6.0	663	2217	0.45	强风化, 裂隙很发育
	5.8	618	2378	0.49	
	5.6	546	2692	0.55	强-中风化, 有裂隙发育
	5.4	582	2526	0.52	
	5.2	672	2188	0.45	强风化, 裂隙很发育
	5.0	729	2016	0.41	
	4.8	546	2692	0.55	强-中风化, 有裂隙发育
	4.6	549	2678	0.55	
	4.4	564	2606	0.53	
	4.2	492	2988	0.61	
	4.0	501	2934	0.60	

(续表 3)

线点	点位/m	$T/\mu s$	$V/m \cdot s^{-1}$	$K(V/V_0)$	风化程度评价
II (N-S)	3.8	582	2526	0.52	中-强风化, 裂隙较发育
	3.6	720	2042	0.42	
	3.4	498	2952	0.60	
	3.2	519	2832	0.58	强-中风化, 有裂隙发育
	3.0	510	2882	0.59	
	2.8	376	3910	0.80	
	2.6	414	3551	0.72	微-中风化, 有少量裂隙发育
	2.4	408	3603	0.74	
	2.2	394	3731	0.76	
	2.0	508	2894	0.59	强-中风化, 有少量裂隙发育
	1.8	510	2882	0.59	
	1.6	556	2644	0.54	
	1.4	402	3657	0.75	中风化, 有裂隙发育
	1.2	394	3731	0.76	
	1.0	424	3467	0.71	
	0.8	534	2753	0.56	中-强风化, 裂隙较发育
	0.6	582	2526	0.52	
	0.4	648	2269	0.46	
0.2	692	2124	0.43	强风化, 裂隙很发育	

注:  $V_0$  - 新鲜岩石 P 波速度 4900m/s, dh = 1.47m

表 4 无字碑 E-W 向检测结果表

Table 4 Measurement results of E-W direction on wuzi tablet

线号	点位/m	$T/\mu s$	$V/m \cdot s^{-1}$	$K(V/V_0)$	风化程度评价
III (E-W)	4.2	642	3232	0.66	中风化有裂隙发育
	4.0	556	3729	0.76	
	3.8	564	3679	0.75	
	3.6	682	3043	0.62	
	3.4	920	2255	0.46	中-强风化裂隙较发育
	3.2	796	2607	0.53	
	3.0	746	2782	0.57	
	2.8	648	3202	0.65	强-中风化风华有裂隙发育
	2.6	714	2906	0.59	
	2.4	746	2782	0.57	
	2.2	690	3007	0.61	中-强风化裂隙较发育
	2.0	840	2470	0.50	
	1.8	844	2459	0.50	
	1.6	950	2184	0.45	中-强风化裂隙较发育
	1.4	888	2337	0.48	
	1.2	738	2812	0.57	
	1.0	746	2782	0.57	中风化有裂隙发育
	0.8	666	3116	0.64	
0.6	564	3679	0.75		
0.4	506	4101	0.84	微风化有少量裂隙发育	
0.2	460	4510	0.92		

注:  $V_0$  - 新鲜岩石 P 波速度 4900m/s, dh = 2.075m

表 5 无字碑 E - W 向检测结果表  
Table 5 Measurement results of E - W direction on wuzi tablet

线号	点位/m	$T/\mu s$	$V/m \cdot s^{-1}$	$K(V/V_0)$	风化程度评价
IV (E - W)	4.2	664	3125	0.64	中风化有裂隙发育
	4.0	652	3183	0.65	
	3.8	602	3447	0.70	
	3.6	780	2660	0.54	中 - 强风化裂隙很发育
	3.4	862	2407	0.49	
	3.2	670	3097	0.63	中风化有裂隙发育
	3.0	668	3606	0.74	
	2.8	537	3862	0.79	
	2.6	638	3252	0.66	
	2.4	700	2964	0.61	
	2.2	812	2555	0.52	强 - 中风化有裂隙较发育
	2.0	776	2674	0.55	
	1.8	672	3088	0.63	中风化, 有裂隙发育
	1.6	800	2594	0.53	强 - 中风化有裂隙较发育
	1.4	752	2759	0.56	
	1.2	716	2898	0.59	
1.0	574	3615	0.74	中风化有裂隙发育	
0.8	638	3252	0.66		
0.6	461	4503	0.92	微风化有少量裂隙发育	
0.4	472	4395	0.90		
0.2	470	4417	0.90		

注:  $V_0$  - 新鲜岩石 P 波速度 4900m/s, dh = 2.075m

表 6 无字碑 1.6 米高平面检测结果表

Table 6 Measurement results of plane with light 1.6m on wuzi tablet

探头方向	测点	点位/m	$T/\mu s$	$V/m \cdot s^{-1}$	$K(V/V_0)$	风化程度评价
S - N dh = 1.47	E - W	0.2	524	2805	0.57	强 - 中风化、裂隙较发育
		0.4	405	3626	0.74	中风化、有裂隙发育
		0.6	420	3500	0.71	
		0.8	438	3356	0.68	
		1.0	454	3238	0.66	
		1.2	556	2644	0.54	强 - 中风化、有裂隙发育
		1.4	504	2917	0.60	
		1.6	566	2597	0.53	
		1.8	450	3267	0.67	中风化、有裂隙发育
		2.0	386	3808	0.78	
E - W dh = 2.075	N - S	0.2	704	2947	0.60	中风化、有裂隙发育
		0.4	986	2104	0.43	中 - 强风化、裂隙较发育
		0.6	802	2587	0.53	
		0.8	878	2363	0.48	
		1.0	792	2620	0.53	中风化、有裂隙发育
		1.2	602	3447	0.70	

注:  $V_0$  - 新鲜岩石 P 波速度 4900m/s, dh = 1.6m

进行风化程度评价。其中波速比计算方法如下：

$$K = V / V_0$$

式中,  $V_0$  为新鲜岩石的 P 波波速,  $V$  为待测风化石刻的 P 波波速。

根据乾陵废弃柱础内部岩块, 经测定超声波速度为 4800 - 5000m/s, 取中值,  $V_0 = 4900\text{m/s}$ 。计算及评估结果见表 1 - 5。

需要说明的是, 表中强风化的评价与规范略有不同。对于碑身底部引起波速和速度比较低的原因主要是由于裂隙很发育造成的, 而岩体野外特征并未达到强风化程度。

(2) 反射波法。利用声波仪的高精度和加速度探头的宽频带, 进行单点零偏反射波法观测, 主要为了查明碑身岩体内部是否存在具有一定规模的风化面或裂隙面或局部不完整体。对“面”而言, 可能在局部范围形成反射界面; 对“局部不完整体”而言, 可能形成杂乱的反射或绕射。故根据反射或绕射顶点的“时间”, 结合测点处的速度, 可估算出“缺陷”处的深度位置。

根据实测剖面分析可知, I 测线反射在 1.0m 碑身以下, 有杂乱或绕射出现, 波形不规则, 出现时间为 0.5 - 0.8ms; 在 1.0 - 1.8m 段, 有相对连续的反射, 出现时间为 0.7 - 0.8ms, 碑身上部波形主要表现为绕射和杂乱反射; II 测线反射在 1.4m 碑身以下主要表现为连续的反射, 局部有杂乱波形, 出现时间为 0.6 - 0.8ms, 在 1.4 - 2.2m 段, 波形主要表现为绕射波形, 顶点时间为 0.7ms ±, 2.2m 碑身上段, 波形表现为相对较连续的反射, 出现时间为 0.6 - 0.8ms。总体看, 碑身 1.4m 以下, 存在一定差异的结构面, 分析认为主要由裂隙产生, 上部的波形杂乱及绕射, 主要由碑身局部缺陷产生。剖面结果见图 2 - 3。总体评价结果见表 2 - 6 和图 4 - 8。

**2.1.4 网格法评价结果** 综合透射波法和反射波法的检测结果分析认为: 无字碑整体风化程度已达到中风化程度, 其顶部 6.0 - 5.0m 段, 属中 - 强风化, 由于该处岩石力学强度无明显弱化, 超声波速明显衰减的原因只能是裂隙较发育造成的; 底部 S - N 向检测结果表明, E - W 向裂隙较发育, 其中 0.4m - 0.8m 碑身段, 裂隙很发育, 从 0.4m ± 碑高平面风化及裂隙预测图看, 碑身 W - E 向裂隙可能已经贯通, 这一点, 不论从纵向还是横向平面预测结果中均表现明显。由于该碑身段裂隙发育, 造成速度降低, 从风化程度上看, 应属于中 - 强风化; 此外, 在 1.2m ±, 1.6m ±, 2.0m ±, 3.6m ± 等局部碑身段, 均可见到 S - W 侧面裂隙发育的特征。但从规模看, 均尚未贯通, 不如底部发育规模大。可以说: 从风化程度看, 碑身顶部、底部风化程度最大。有关检测综合结果详情见表 1 - 6 和图 2 - 8。

## 2.2 东 1 翁仲的超声层析探测

针对断面形状呈近似圆柱形的翁仲, 我们和德国巴伐利亚州文物保护局的 Stefan Simon 先生合作, 对乾陵石刻东 1 号石翁仲下腰部进行了现场超声层析探测。该翁仲从腰部附近观察, 表面有二条相互交错的裂缝, 我们希望借助超声层析的方法对不能直接观察到的情况如该二条裂隙是否在下层有延伸和交错, 整个石刻断面的状况(强度), 通过对大量超声波速数据的计算进行拟合, 给出可能的解释。

**2.2.1 测量方法** 对东 1 号翁仲, 在离地面 1.2m 处, 我们选了一个与地面平行的近椭圆形剖面, 沿圆周等距离布了 12 个超声波测点(图 9), 用 USG20 型便携式超声波探测仪, 46kHz 的超声波振源和接收器, 以黄土泥为耦合剂(干、湿态都易于去除, 且耦合效果显著), 分别以每点为超声波源点, 在其余 11 个点接收, 共测量了 144 组超声波波速值(见表 7)。

**2.2.2 裂隙深度计算** 裂隙的发育和延伸, 是乾陵石刻保护所要考虑的主要问题, 对其深度的估算因而也显得很重要。通常情况下, 我们用表面法估算:

$$h = 1/2[(t_c/t_s)^2 - 1]^{1/2}$$



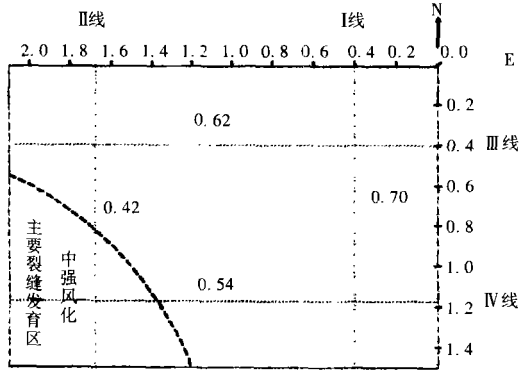


图 4 3.6m 碑高平面风化及裂隙预测图  
Fig. 4 Evaluation of 3.6m high cross section

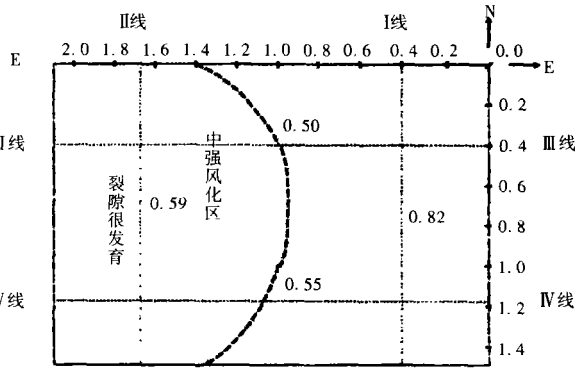


图 5 2.0m 碑高平面风化及裂隙预测图  
Fig. 5 Evaluation of 2.0m high cross section

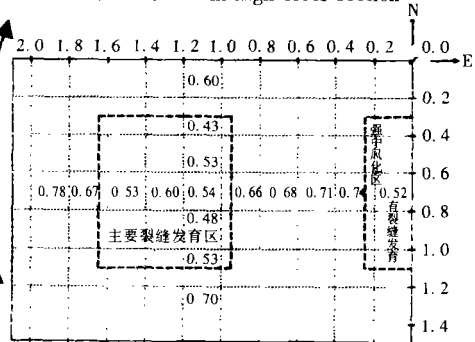
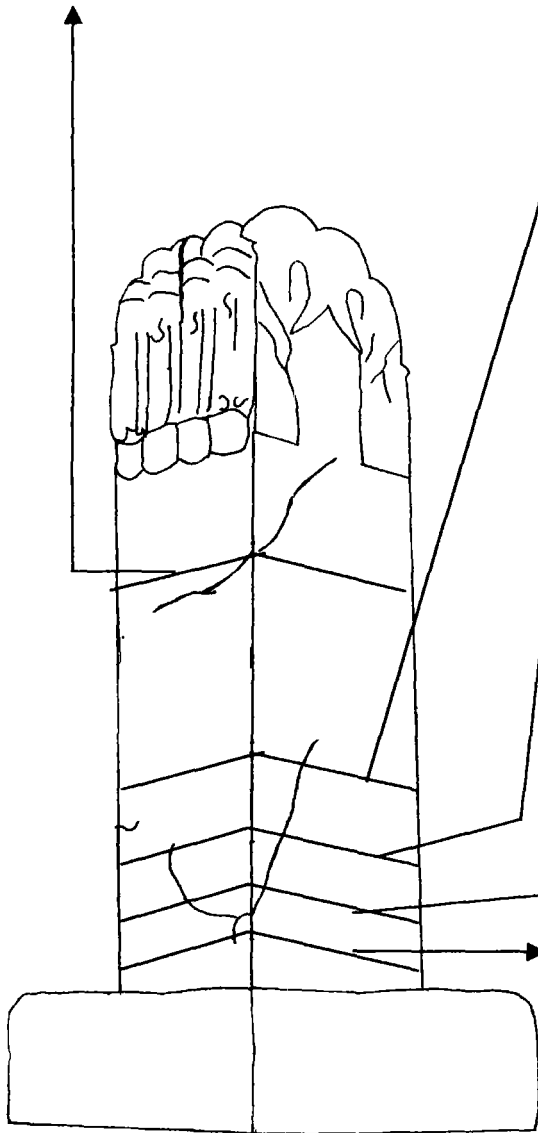


图 6 1.6m 碑高平面风化及裂隙预测图  
Fig. 6 Evaluation of 1.6m high cross section

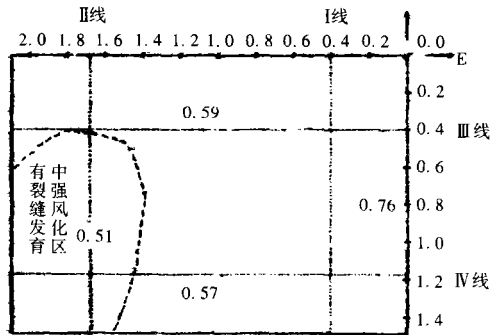


图 7 1.2m 碑高平面风化及裂隙预测图  
Fig. 7 Evaluation of 1.2m high cross section

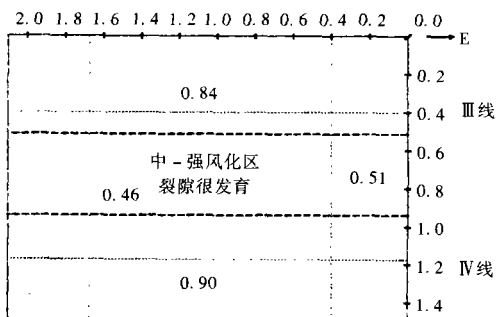


图 8 0.4m 碑高平面风化及裂隙预测图  
Fig. 8 Evaluation of 0.4m high cross section

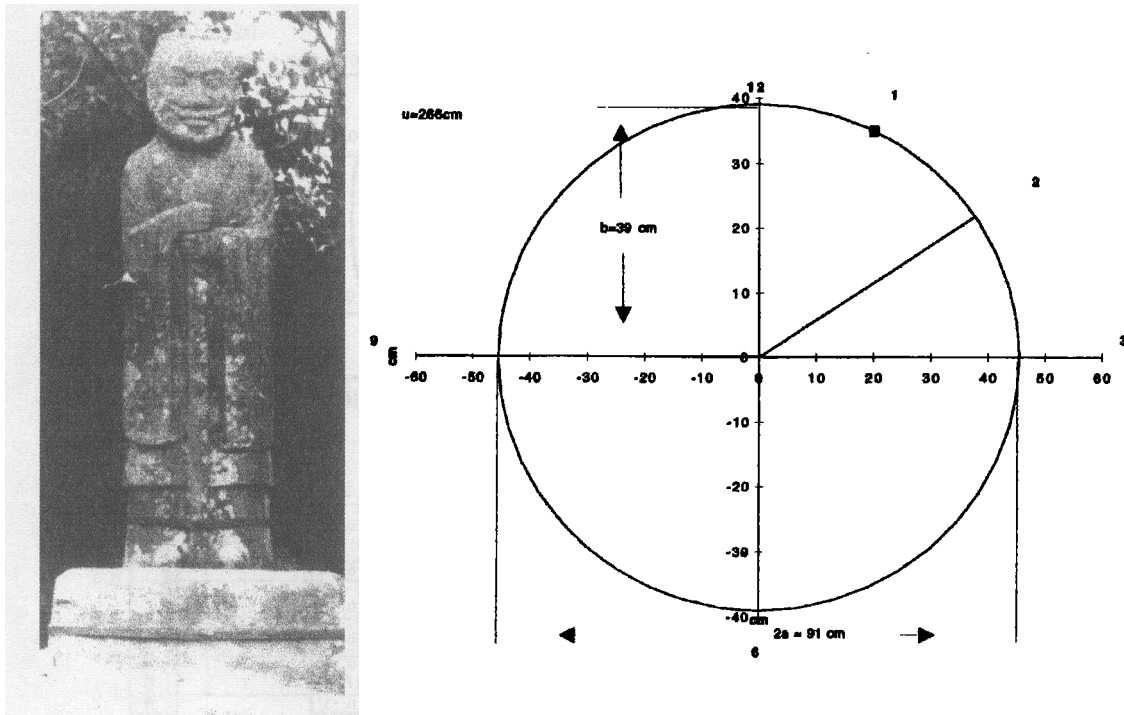


图 9 东 1 号翁仲 1.2m 高水平剖面超声层析检测布点示意图

Fig. 9 The measuring positions for tomography analysis of a stone sculpture

表 7 各点位超声波传播时间

Table 7 Spread time of ultrasonic in point

( $\mu s$ )

点位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2	40.2											
3	105.8	64.2										
4	621.8	381.8	71.8									
5	557.8	525.8	131.8	41.8								
6	685.8	741.8	393.8	89.8	41.8							
7	693.8	813.8	329.8	125.8	786.8	33.4						
8	541.8	641.8	297.8	155.8	114.8	71.4	42.6					
9	321.8	333.8	189.8	181.8	143.8	114.8	93.8	63.8				
10	179.8	333.8	293.8	325.8	361.8	241.8	297.8	187.8	87.8			
11	153.8	321.8	345.8	401.8	357.8	309.8	297.8	217.8	113.8	37.8		
12	60.2	106.8	267.8	433.8	617.8	781.8	389.8	305.8	201.8	93.8	60.2	

式中,  $t_c$  为第一次测量超声波通过裂隙岩的时间;  $t_0$  为第二次测量超声波通过同样长度无裂隙岩的时间;  $l$  为超声波振源与接收器间的距离;  $h$  为裂隙深度。

2.2.3 断面的超声层析 首先进行超声波的发射与接收, 从已知的点位发射超声波, 在相应的点位接受到超声信号后, 计算其传播速度及强度, 借用 Ph. Cote, V. Gautier 等编制的计算机程序推算每束超声波传播的路线及速度分布, 最后将 144 条超声波传播的路径及速度综合(网状循环收敛计算), 即能得到各区域超声波波速分布图也即所谓的整个断面的层析图(见图 10), 石灰岩超声波波速与风化分类标准见表 8。

2.2.4 层析评价结果 乾陵东1号翁仲的超声波层析探测结果表明:

①该石刻内部风化已十分严重,大部分区域的超声波波速小于1.5km/s。而且这些区域超声波波速降低的原因可能主要是裂隙的作用而非岩石晶粒间风化的作用,通常后者多在表层而

表8 石灰岩风化分类与超声波波速关系

Table8 Relations of classify of fractures with ultrasonic velocity

未风化的石灰岩	大于 3.5 km/s
· 孔隙度增加	3.0 - 3.5 km/s
风化的下限	2.5 - 3.0 km/s
风化	小于 2.0 km/s
完全风化	小于 1.5 km/s

VITESSE m/s

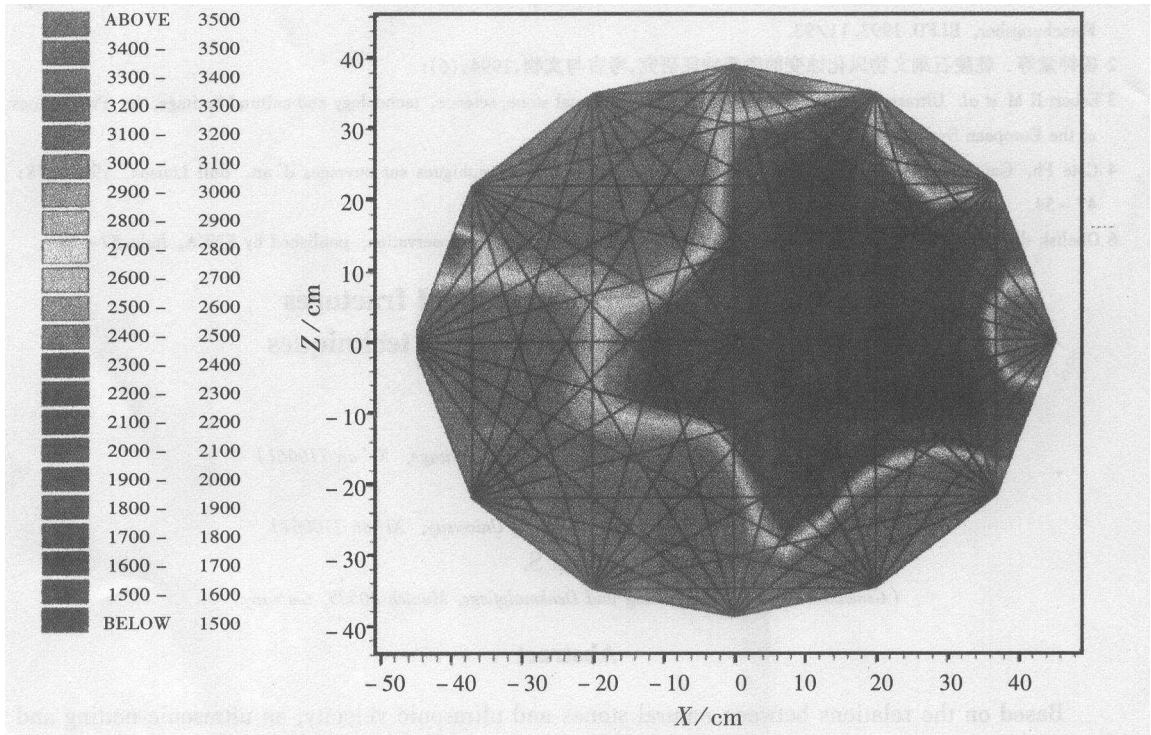


图10 东1号翁仲1.2米高水平剖面超声层析检测示意图

Fig. 10 The result of tomography of a stone sculptrure 1.2m high cross section

非内部生成。②裂隙在有些区域似乎已经接近贯通。裂隙深度估算约为50-70cm。③尽管仍有约一半区域石质的超声波速度> 3.5km/s,还比较稳定、耐久,但是今后裂隙与霜冻的相互作用,将使其进一步发育,从而使整座石刻遭受危险,甚至毁坏。为此建议对其应进行保护处理,对裂隙进行灌浆和封堵,以及憎水处理,以防止雨水及冬季霜冻,积雪等对该石刻的影响。

3 结果与讨论

通过对无字碑及东1翁仲的内部风化及裂隙的发育分布情况的研究,对用超声波探测石刻内部风化特性获得了一定的认识,并积累了现场的探测经验。现总结讨论如下:①作为对石刻裂隙及石刻内部风化状况的探测方法,超声法具有无损、直观及便捷的特点,精度较高、结果可靠,可以为文物保护、修复提供有用的信息。②网格法、层析法都可以用来检测石刻内部的风化

状况,但是相比较而言:网格法对于剖面为长方形及正方形的石刻准确度较高,层析法则对圆或椭圆形状断面的石刻更适宜;网格法通过对测先估算各小格的情况然后综合评价,准确度有一定局限,需辅以反射波来进一步确定内部裂隙面的发育情况;而层析法则通过各测点的连续对测,并对各结果进行收敛计算,精度更高、结果更可靠。当然需要的投入也更多。③超声波探测石刻裂隙主要是以超声波波速为指标,但是有时受制于各种条件,超声波波速的测量精度有待提高,而且至少目前单靠超声波波速的变化还不足以准确判别强风化与多裂隙的区别。

今后还需继续积累经验,逐步完善超声波探测石刻内部风化及裂隙状况的方法,为石刻文物的科学保护和修复提供服务。

### 参 考 文 献

- 1 Kohler W, Simon S. The monument to Gustav II Adolf in Goteborg, ultrasonic investigations. Eurocare - Euromarble, Goteborg, Forschungsber, BLFD. 1993. 11/93.
- 2 杨钟堂等. 乾陵石刻文物风化蚀变的微观特征研究,考古与文物,1994,(6):
- 3 Esbert R M *et al.* Ultrasonic velocity and humidity in monumental stone, science, technology and cultural heritage, In: Proceedings of the European Symposium Bologna, 13 - 16, 06, 1989.
- 4 Cote Ph, Gautier V, Hoove Von. Mise en oeuvre d'auscultations tomographiques sur ouvrages d'art. Bull Liaison, 1992, 178: 47 - 54
- 6 Obelisk di piazza del popolo controlli non distruttivi. Mordern technolgy in conservation, published by ENEA, Italy. 57 - 59

### Studies on internal fissures and fractures of stone sculptures by ultrasonic techniques

MA Tao

(*Xi'an Center for the Conservation of Cultural Heritage, Xi'an 710061*)

SUN Yuan

(*Physical Detection Department Chang An University, Xi'an 710061*)

Simon S.

(*Gemeinschaftslabor Konservierung und Denkmalpflege, Munich 80539, Germany*)

### Abstract

Based on the relations between natural stones and ultrasonic velocity, an ultrasonic netting and tomographic procedure have been applied for the in - situ study of the internal state of deterioration of different cross - section shaped stone sculptures in Qianling Mausoleum. With the data measure and calculated, a distribution diagram of ultrasonic velocity across the whole cross - section could be got, and helped by the reflective ultrasonic method, an evaluation of fissures and fractures extended internal thus could be detected correspondingly.

**Key words** Ultrasonic wave, Stone sculpture, Fissure and fractures, Netting procedure, Tomographic procedare, Reflective ultrasonic

2000 - 04 - 30 收到

2001 - 11 - 02 修回