

# 地球物理勘探方法在云冈石窟保护中的应用

黄继忠<sup>1,2</sup>,任建光<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学,水资源与环境学院,北京 100083; 2. 云冈石窟研究院,山西大同 037007)

**摘要:** 地球物理勘探方法是一种有效的地质探测技术,它可依据岩体不同构造、岩石的地球物理性质不同产生的不同物理场来了解岩体地质特征。而石窟寺的风化与其所处的岩体的性质有着密切的关系,所以,在石窟保护中应用地球物理勘探方法了解石窟赋存岩体的地质特征具有重要意义。本研究系统介绍了在石窟保护中常用的各种地球物理勘探方法的原理,回顾了电法勘探、探地雷达、地震勘探、井中物探等技术在世界文化遗产云冈石窟保护中的应用情况,同时指出了已有工作中存在的问题。

**关键词:** 地球物理勘探;云冈石窟;保护;世界遗产

**中图分类号:** K879.2 **文献标识码:** A

## 0 引言

云冈石窟位于山西大同市城西约16千米处,开凿于北魏王朝(公元460年),东西绵延1千米,现存主要洞窟45个,大小窟龕252个,造像51000余尊,为中国规模最大的古代石窟群之一。1961年国务院公布云冈石窟为全国重点文物保护单位。2001年云冈石窟被列入《世界遗产名录》。

云冈石窟地形属高台地构造剥蚀低山丘陵区,出露中侏罗统上部和第四系中上部地层,石窟雕像开凿于云冈组(J<sub>2</sub>y)砂岩透镜体上。千百年来,由于自然和人为因素的影响,云冈石窟风化十分严重,有的已威胁到文物本身的安全。其环境地质病害类型主要有:①裂隙,云冈石窟岩体中普遍发育卸荷裂隙、构造裂隙、风化裂隙和层间裂隙,这些裂隙互相切割导致石窟边坡岩体崩塌或成为良好的渗水通道;②水害,雨水冲刷、岩体渗水、洞窟内积水以及凝结水在云冈石窟是最常见的,也是危害最大的病害;③风化,云冈石窟雕刻以物理风化和化学风化作用为主,物理风化使岩面产生大量的风化裂隙,造成石雕呈薄片状或鳞片状剥落;化学风化使石雕的结构构造遭到破坏,在石雕表面产生一层白色粉末或絮状风化产物<sup>[1-4]</sup>。

为探究石质文物风化机理,更好地制定科学的保护措施,多年来,国内外学者曾使用不同的地球物理探测方法对石质文物内部情况进行了研究,解决

了一些直观上难以解决的问题<sup>[5-6]</sup>。而云冈石窟作为我国最为重要的石窟寺之一,也是我国最早开始石质文物科学保护研究地之一,从20世纪60年代开始,文物保护工作者和地质工作者应用地球物理勘探技术对云冈石窟的地质环境进行大量的勘查和探测。尤其是近年来,建设综合勘查研究设计院在云冈石窟防水保护工程勘察设计中,较全面地使用了多种地球物理勘探方法;同时中国地质大学(武汉)应用探地雷达对洞窟岩壁厚度进行了探测,给石窟保护提供了科学的依据。

## 1 云冈石窟不同岩性的地球物理特征

云冈石窟区出露的不同岩石的岩性地球物理特征各不相同,这为应用地球物理勘探方法调查石窟岩石埋深及厚度、裂隙发育、破碎情况及含水情况、覆盖层厚度和基岩风化程度等提供了基本条件。

### 1.1 弹性波特征

岩石的弹性波速与岩性、岩石矿物成分、密度、裂隙发育程度、含水率等有关。野外现场试验表明:云冈石窟砂岩较泥岩波速高,密度高的岩石较密度低的岩石波速高,裂隙不发育的岩石较裂隙发育的岩石波速高,含水率高的岩石较含水率低的岩石波速高。

### 1.2 电阻率特征

云冈石窟顶部轻亚粘或亚粘土的电阻率较低,约40~150Ω·m,砂砾石的电阻率约120~180Ω·m,未风化砂岩电阻率200~300Ω·m,风化砂岩电阻率约

收稿日期:2008-10-29;修回日期:2010-11-31

作者简介:黄继忠(1965—),男,1988年毕业于长春地质学院,1996年毕业于复旦大学,2005年毕业于中国地质科学院,工学博士,研究员,至今一直从事石质文物保护研究工作,现为山西省文物局总工程师,E-mail:hjizhong@yahoo.com.cn

100Ω·m,这些特征是应用电法勘探方法调查裂隙带或破碎带、含水区及泥岩夹层的地球物理前提。

### 1.3 电磁波特征

由于发育破碎带与裂隙的地层相对松散,易充填其它物质(如空气、水或其它充填物),使得破碎带、裂隙与周围地层的电性参数( $\epsilon$ )产生较大差异。这些特征为地质雷达勘探云冈石窟顶部岩体破碎带和裂隙提供了良好的地球物理条件。

## 2 各种适用的地球物理方法原理

地球物理方法是一种有效的地质探测技术,依据地下不同构造、岩石的地球物理性质不同,从而产生不同的物理场,在地表使用仪器将它测量并记录下来,然后进行分析研究,做出解释,从而了解地下地质特征。依据云冈石窟区不同岩石的物性和探测目的,在云冈石窟保护中采取了不同的勘探方法。多年来,先后在云冈石窟保护中应用的地球物理勘探方法有:电法勘探、探地雷达、地震勘探、井下电视等方法。

### 2.1 电法勘探原理

电法勘探是以专门仪器探测地壳表层各种地质体的电场,从而判定各种地质现象的一种勘探方法。包括电阻率测深法、电剖面法、高密度电法和自然电场法等。其中电阻率法经常用于岩石表层裂隙的调查;应用联合剖面法可以确定断裂带的位置;高密度电法集中了常规的电测深和电剖面法的优点,能够揭示基岩沿测线地下各断面的垂向电性差异和横向电性差异;自然电场法是通过观测和研究自然电场的分布来解决地质问题的一种勘探方法。

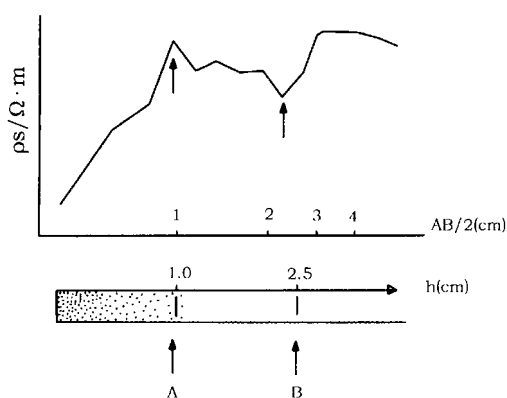


图 1 云冈石窟实测石雕风化深度与实际观察资料对比

A. 含盐富集层下界, B. 强风化层下界

Fig. 1 Comparison of the measured depth of stone statue with the observation data

A. lower limit of the rich salt bed. B. lower limit of highly weathered layer.

### 2.2 探地雷达探测原理

探地雷达是利用高频电磁脉冲波的反射来探测目的体,它通过发射天线向目的体发射高频宽带短脉冲电磁波,经过地下地层或目的体反射后返回地面,为接收天线所接收,数据处理后形成雷达探测图像,来推测地下介质或目的体的结构、构造及埋藏深度等。

### 2.3 地震勘探原理

地震勘探是通过对岩石弹性性质的研究来解决地质问题,通过人工激发所产生的地震波在地壳内传播,当遇到弹性性质不同的分界面时可以产生反射和折射等物理现象,利用安置在地表的地震仪将反射和折射波接收并记录下来,经过研究和分析,了解地下构造、岩性和地质特征。

## 3 地球物理勘探方法在云冈石窟保护中的应用

### 3.1 电法勘探在云冈石窟保护中的应用

电法勘探在云冈石窟保护中是使用最早和使用次数最多的一种方法,可以用来探测石雕的风化深度、岩体的裂隙发育以及含水岩层分布等情况。

#### 3.1.1 应用电法探测石雕的风化层厚度 用两种方法探测。

1) 微电极测深。2001年钟世航、黄克忠等首次采用电测 C-1 微测深仪在云冈石窟探测了岩面风化深度。实测结果如图 1、2 所示,现场“ $\rho_s$ —深度曲线”的纵、横坐标轴都采用对数坐标,分别表示视电阻率  $\rho_s$  值和  $AB/2$ , 曲线上的转折点所对应的  $AB/2$  的值就是风化深度值<sup>[7]</sup>。

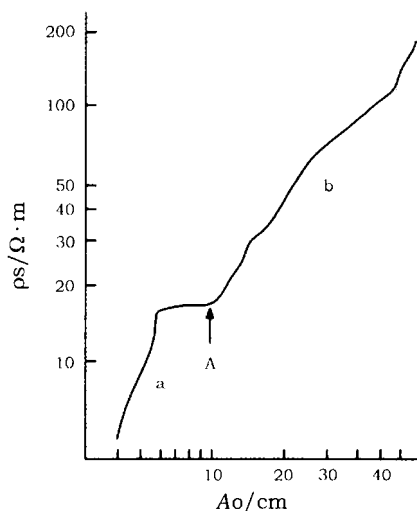


图 2 云冈石窟实测石雕风化深度电测深曲线

a 为强风化岩段, b 为较致密岩段, A 所指处的 AO 值指示界线的深度

Fig. 2 Sounding curve for the weathering depth

a. Highly weathered rock bed, b. Tight section the AO value labelled with A indicates the depth.

2) 垂向电测深法。1964年原北京地质学院方玉禹等利用垂向电测深法研究云冈石窟第9、10窟列柱岩石风化厚度,结果如图3所示,强风化层

厚度为25~30cm,有的甚至达到40cm,总风化厚度65~130cm;风化较轻岩面,风化厚度达20cm左右<sup>[8]</sup>。

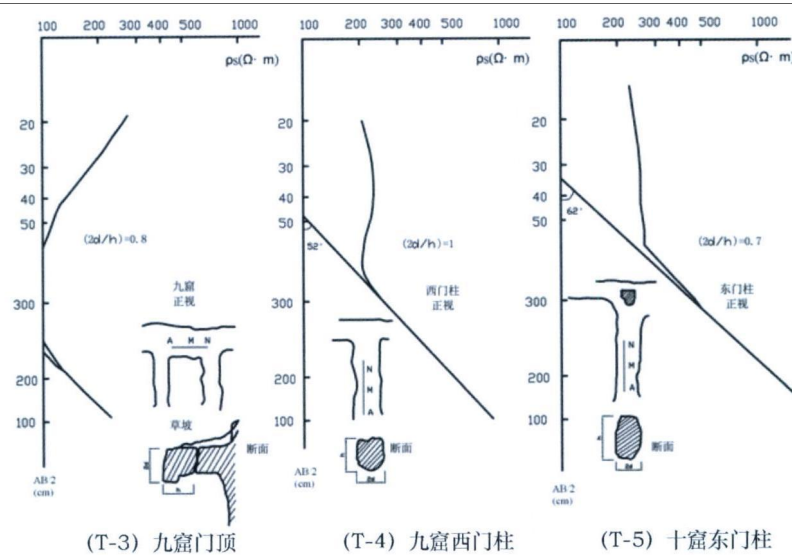


图3 云冈石窟第9、第10窟列柱电测深曲线

Fig. 3 Sounding curves for Cave 9 and 10

**3.1.2 应用电法探测云冈石窟岩体裂隙** 岩体裂隙是影响洞窟稳定性的最主要因素,它一方面直接造成石窟坍塌和石雕破坏;另一方面为上层滞水的入渗提供了输水通道。几十年以来,多家地质单位曾应用电剖面法、高密度电法等方法探测云冈石窟顶部岩体裂隙发育情况。

1963年和1964年北京地质学院贾苓希等应用电剖面法研究了云冈石窟岩体裂隙问题。探测结果表明:16窟和17窟立壁上有一条风化裂隙,以45~50°角向西倾斜;而贯穿9、10窟顶板的裂隙走向近东西向,基本上直立,从窟顶将9、10窟前后室切开,使前室有崩塌的危险<sup>[8,9]</sup>。1988年煤炭科学院西安分院物探研究所采用高密度电法勘探,结果证实在18、19窟顶部可能有三条主要裂隙发育带,走向北西西,其次是位于碧霞洞后上方和第五窟东北侧45米处有两条裂隙<sup>[10]</sup>;1993年山西省216地质队电法探测结果认为全区内有11条规模较小的裂隙带,其中5、6、7、8号4个异常带距石窟较远,对石窟影响不大,而1、2、3、4、9、10、11号7个异常带距石窟较近,可能成为地表水垂直渗入洞窟的通道,危害比较大<sup>[11]</sup>。

**3.1.3 采用高密度电法划分破碎含水区和泥岩滞水区** 石窟顶部破碎含水区和泥岩滞水区对石窟内部渗水起着控制作用,是雨季时可能渗入洞窟内部的水源的重点区域。为了探测云冈石窟顶部

破碎含水区和泥岩滞水区,建设综合勘查研究设计院于2003年至2004年采用二维高密度电法和三维高密度电法,使用DUK-2型高密度电法仪对石窟顶部进行了大规模的勘探。本次勘探在云冈石窟顶部共布置44条测线,其中东西向27条,南北向17条。

根据野外采集的数据,经Zoddy方法反演,得到地下真电阻率分布。结果说明石窟顶部砂岩破碎或裂隙、层理发育,裂隙多被地表渗水或泥质、铁质物质充填后,其电阻率相对围岩电阻率显然较低,形成低阻异常,泥岩电阻率与砂岩相比亦明显为低阻。通过分析研究这些低阻异常,即可达到发现与追溯滞水区、泥岩夹层和水的通道的目的,成果见图4<sup>[12]</sup>。

**3.1.4 利用自然电场法探测云冈石窟2窟泉水源** 云冈石窟2窟俗称“寒泉洞”,是因为洞窟内部有一泉经久不衰,“石鼓寒泉”曾经是明代大同八景之一。由于大同地区近年来降雨量偏少,从20世纪60年代至今2窟泉流量已降低60%。了解2窟泉的形成和水的流向与补给情况对于研究石窟顶部治水具有重要意义。建设综合勘查研究设计院于2003年至2004年应用自然电场法实施了这一调查。自然电场法布置在云冈石窟第2窟泉北部,共布置3个测点,工作中采用环形观测法,然后将观测结果绘成电位差方位图(图5)。

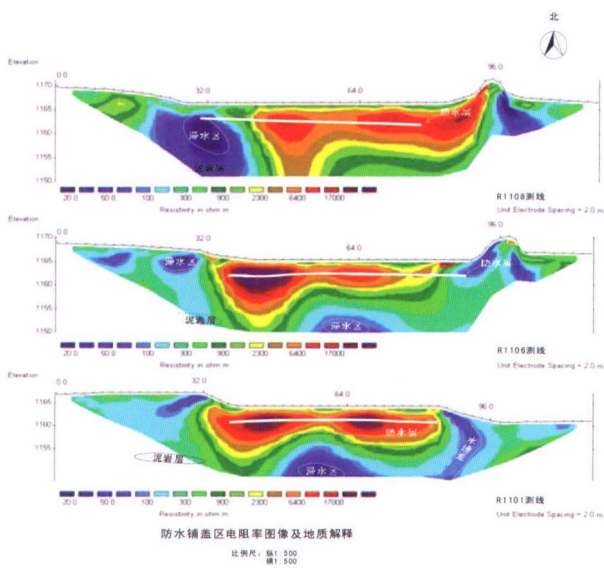


图 4 第 40 窟顶上高密度电法探测结果

图中蓝色部分为低阻异常带、橘黄色部分为高阻带,中间色为过渡带  
Fig.4 Result obtained by multi-electrode resistivity method  
The blue colour represents the low-resistance belts; the orange represents the high-resistance belts, intermediate color is the transition zone

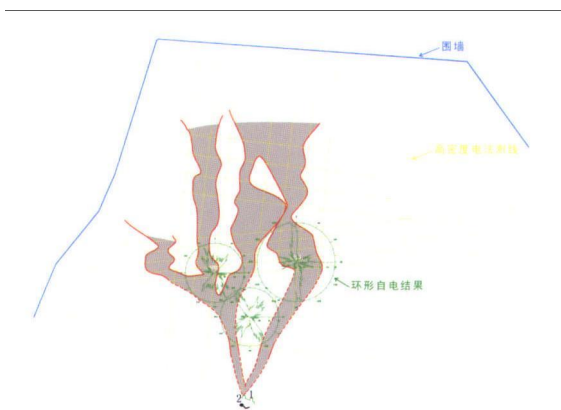


图 5 二窟泉水来源通道图

Fig.5 Path of the source of the spring water in Cave 2

由图 5 可以看出:第 2 窟泉水来自于北部区域。自然电位显示水流优势方向主要为北西方向,次之为北东方向,局部显示正北方向。这说明泉水主要由北西方向流来,第 2 窟西北部有大片较厚的第四系、岩石风化层和泥岩层分布,为该区大气降雨赋存提供了条件,赋存的水随网状通道,汇集到第 2 窟泉流出<sup>[12]</sup>。

### 3.2 探地雷达在云冈石窟保护中的应用

3.2.1 探测第 5、6 窟之间的岩壁厚度 第 5、6 窟是云冈石窟的精华洞窟,二者之间的岩壁上雕有精美雕刻,但其中部最薄处已经相通,一旦坍塌将造成毁灭性破坏。为了解整个岩壁的厚度分布情况,从而计算其稳定性,2005 年中国地质大学(武汉)利用

探地雷达技术对云冈第 5、6 两窟之间岩壁的厚度进行了测定。本次探测采用 EKKO1000 型高频探地雷达系统,测线布置于第 6 窟东壁。

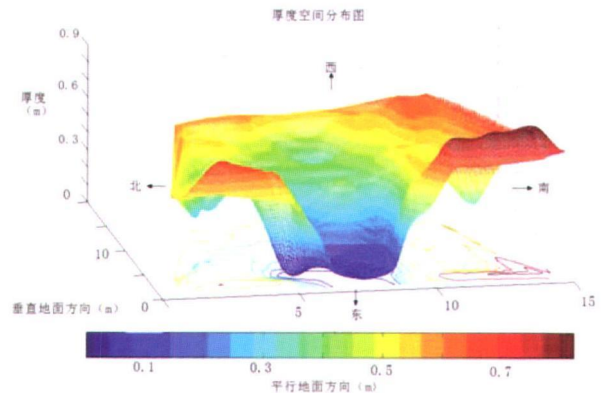


图 6 第 5、6 窟之间岩墙三维厚度

Fig.6 Three-dimensional thickness of the walls between Cave 5 and 6

图 6 说明:在检测范围内,该墙体厚度为 0.6 ~ 0.8m。水平方向上,由中间向南北两侧厚度逐渐增大。垂直方向上,由中部朝上下厚度逐渐增大。仅在几个大的龛窟部位,墙体厚度明显减薄<sup>[13]</sup>。

### 3.2.2 利用探地雷达探测浅部破碎区裂隙密集带

利用探地雷达还可用于石窟顶部裂隙发育区的调查,2003 年至 2004 年,建设综合勘查研究设计院在云冈石窟防水保护勘察中应用探地雷达结合地震勘探对石窟顶部裂隙发育情况进行了调查。

图 7 是探地雷达与地震折射结果对比,图中雷达信号在强反射位置振幅增强、频率降低与折射图中相应位置表现为低速带相对应,推测为裂隙发育区,在图中弱反射异常区,雷达信号振幅减小与折射图中相应的低速区相对应,推测为裂隙发育区<sup>[13]</sup>。

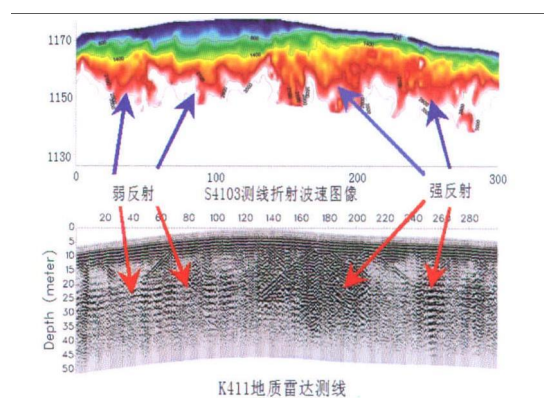


图 7 探地雷达异常与折射结果对比

Fig.7 Comparison between the geological radar abnormally and refraction



### 3.3 地震探测方法在云冈石窟保护中的应用

**3.3.1 利用浅层地震反射波法探测沿保护区界线地下情况** 云冈石窟周围煤矿众多,采煤巷道及煤矿采空区是否延伸至云冈重点保护区内,从而给石窟安全造成隐患。2003 年云冈石窟研究所与北京勘查公司利用浅层地震反射波法探测沿保护区界线地下 100 ~ 150m 深度范围内是否存在采煤巷道及采空区,并圈定其空间位置,从而为监督煤矿开采,保护文物安全提供可靠的依据。

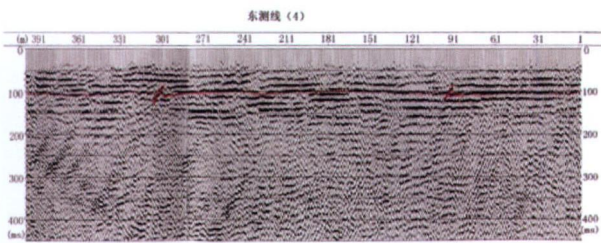


图 8 云冈石窟浅层地震时间剖面图  
Fig.8 Time profile for shallow earthquake

探测结果表明:石窟北保安煤柱测线(1)56、

305、545、585 处,石窟南保安煤柱测线(3)692 处,石窟东保安煤柱测线(4)95、308 处有断层存在,但断距很小,说明在云冈石窟保安煤柱范围内没有大的采空区,对保护区安全影响不大<sup>[14]</sup>。

**3.3.2 利用浅层地震折射波法探测保护区山顶覆盖层厚度和基岩风化程度** 为了解石窟保护区山顶覆盖层厚度和基岩风化程度,2003 年至 2004 年建设综合勘查研究设计院采用美国 Geometrics 公司的 StrataView R24 型高分辨数字地震仪对石窟顶部进行了系统的勘探。本次勘探采用 CDJ - 60Hz 检波器,震源激发采用 12 磅 ~ 24 磅长柄大锤激发,测区内共布置折射测线 44 条。

探测结果表明,可根据折射得到的地层纵波速度,对覆盖层厚度和基岩风化程度进行划分。对于破碎带和裂隙发育程度的判定,主要依据横向波速的差异。如图 9 所示,高速层中的低速带,判断为裂隙发育。因此,向未风化层里延伸的微风化层,特别是向微风化层里延伸的中风化层,均反映了不同程度的裂隙发育<sup>[12]</sup>。

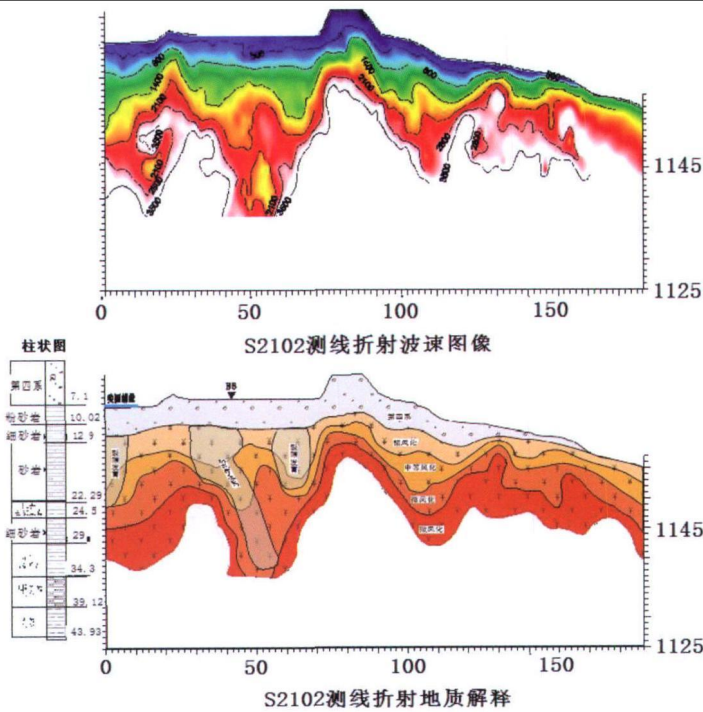


图 9 依据折射速度剖面划分风化带、破碎带和裂隙发育情况

Fig.9 Weathering zone, crushed zone and fracture development zone are classified based on the refraction velocity

**3.3.3 利用瞬态多道面波探测石窟顶部第四纪覆盖层厚度** 多道面波法可以对石窟顶部第四纪覆盖层厚度进行调查并分层,2003 年、2004 年建设综合勘查研究设计院使用 StrataView R24 型高分辨数字地震仪, SST - 4.5Hz 低频检波器对石窟顶部第四

纪覆盖层进行了勘探。依据勘探结果中的剪切波速度,对第四系进行了分层。瞬态面波勘探结果与钻孔记录相比较(图 10),面波的分层结果要比钻探更为详细,只要有弹性波差异的界面,均有相应的频散曲线“拐点”反映<sup>[12]</sup>。

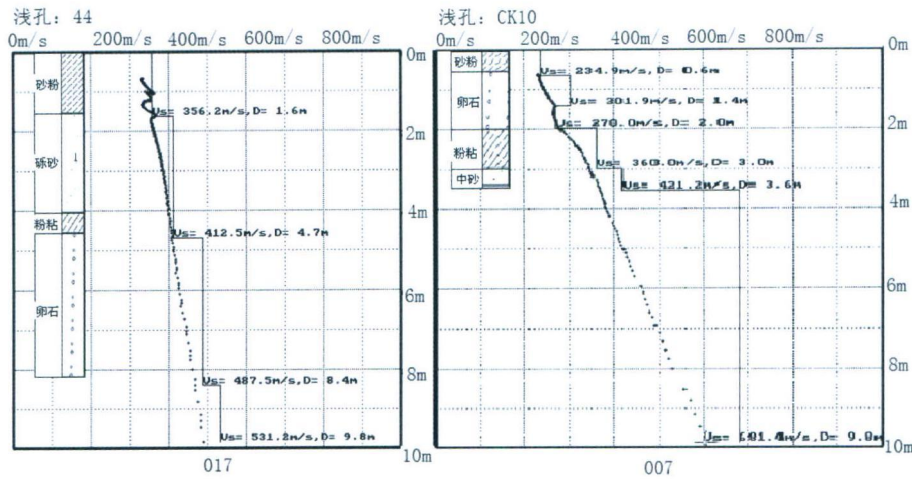


图 10 瞬态面波结果与钻孔资料对比

Fig. 10 The instant surface wave testing compared with borehole data

3.4 井中物探技术在云冈石窟保护中的应用

解决云冈石窟窟顶渗水问题的难点是难以查清大气降水的渗漏通道。2002 ~ 2004 年,云冈石窟研究院和建设综合勘察研究设计院合作利用物探技术查明防水保护治理范围。除了采用地面物探技术外,为了分析钻孔周围的地质情况,探测钻孔周围目的层、破碎带的走向及空间展布,还大量使用了井中物探方法,包括井中地震 CT、井地电法和井下电视法。结合少量钻探等地质资料,揭示了云冈石窟地表水下渗聚积区和基岩中的破碎渗

透区,为窟顶防渗的分区治理提供了重要的科学依据<sup>[12]</sup>。

3.4.1 井中地震 CT 井中地震 CT 法勘探采用 StrataView R24 数字地震仪,观测系统布置如图 11 (左)。井中地震 CT 在石窟顶部 B1 和 B7 两个钻孔中进行。结果如图 11(右)所示,地震波射线正交性和射线密度分布显示,钻孔底部和地面远端地震波射线密度小,射线正交性差,井中地震 CT 的结果需结合其它资料进行综合分析才能得到较为准确的探测结果<sup>[12]</sup>。

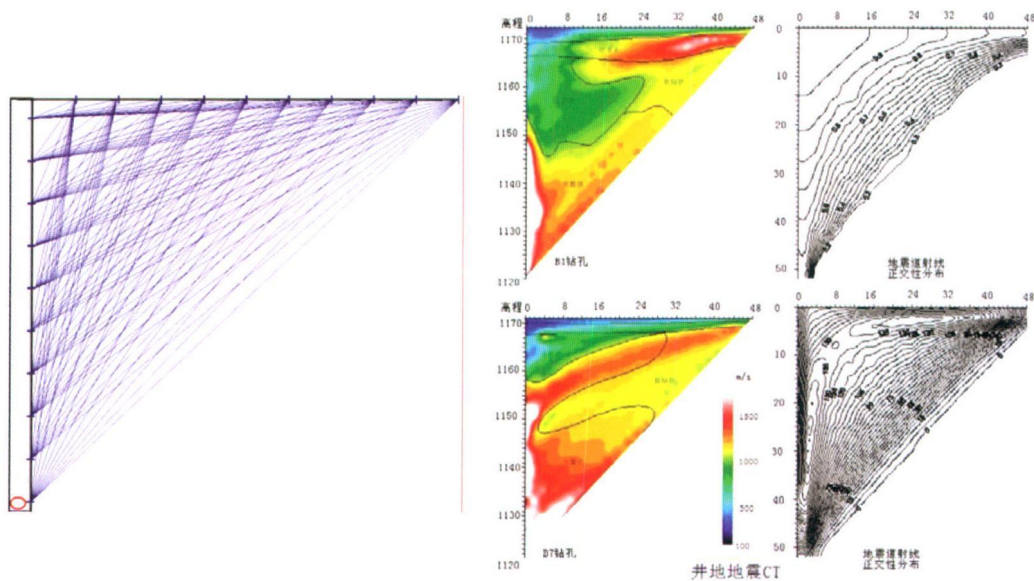


图 11 井中地震 CT 观测布置示意图(左)和 CT 成果图(右)

Fig. 11 Well - ground seismic CT installation(left)and result of well - ground seismic CT measurement(right)

3.4.2 井地电法 井地电法是把地面高密度电法引入井中,采用二极装置,井中供电,地表测量,观测系统布置如图 12(左)。在井中布置供电一个电极,

自井底向上提升逐点供电。在地表布置地面测量电极,记录地表测得的电压数据  $V$ ,这样就得到了井 - 地视电阻率剖面,根据该剖面分析可得到井孔周围的



地质和地下水的分布情况。本次工作在 B1、B3、B4、 B7、B10、B11 共 6 个钻孔开展。结果见图 12(右)<sup>[12]</sup>。

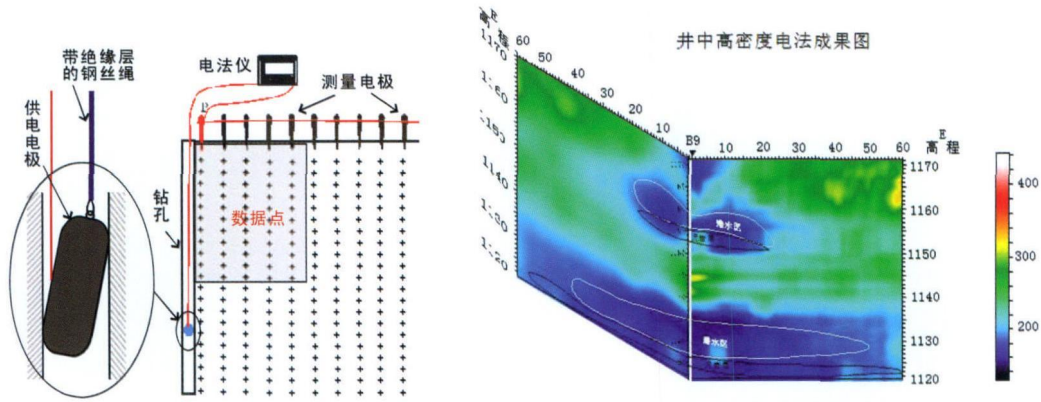


图 12 井地电法观测布置示意(左)和井地电法成果图(右)

Fig. 12 The sites of the borehole – to – surface electrical method(left)and the result of the borehole – to – surface electrical method(right)

3.4.3 井下电视 井下电视方法可用于探测井中不同深度岩层的裂隙和破碎带,而使用全景式井下彩色电视可以探测钻孔孔壁四周及下部的全景图像,同

时对远近景物无须调焦均呈清晰图像。本次工作在云冈石窟顶部 12 个深孔中开展,并且对部分钻孔进行二次测试,检查了水流情况,结果见图 13<sup>[12]</sup>。

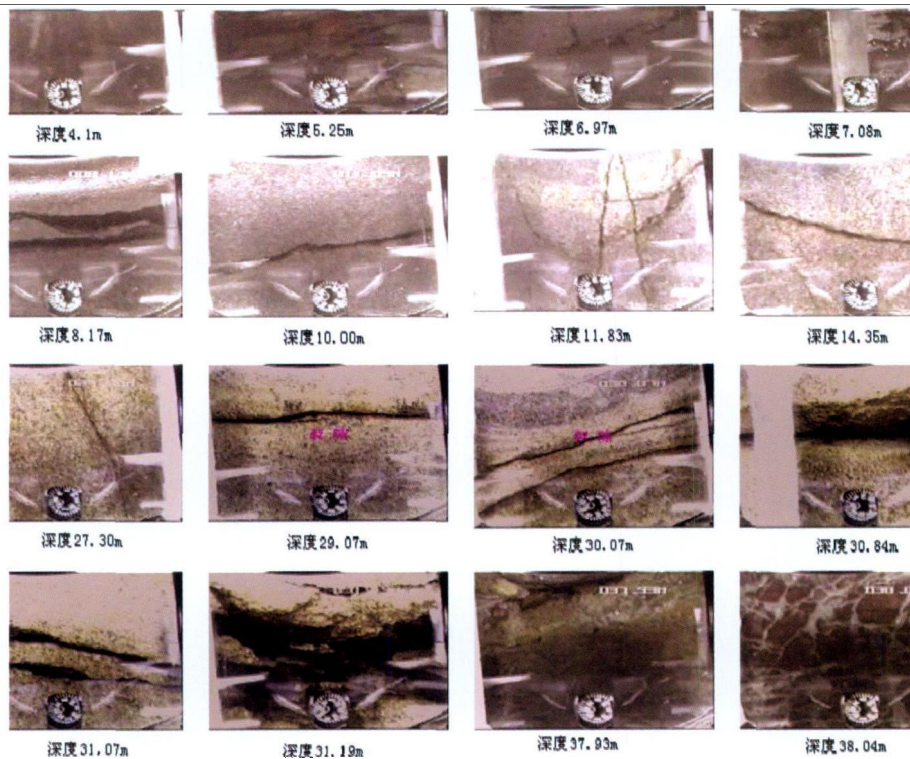


图 13 井下电视结果图

Fig. 13 Result from borehole televiewer(BHTV)

### 4 存在问题及发展趋势展望

地球物理勘探方法作为一种成熟的现代科学技术,由于其快速、简便等特性,是探测石窟病害分布、发育情况和了解石窟环境地质特征的十分重要的手段。而云冈石窟区不同岩石的地球物理特性有着明

显的差异,为应用地球物理方法调查云冈石窟顶部基岩埋深、裂隙发育、破碎情况、含水情况以及覆盖层厚度和基岩风化程度等提供了基本条件。

几十年来,许多单位的科技工作者先后应用微电极测深和垂向电测深法探测了云冈石窟石雕的风化深度和岩体的裂隙发育情况;采用高密度电法划

分了石窟顶部破碎含水区和泥岩滞水区;利用自然电场法探测了云冈石窟第2窟泉水源;采用探地雷达探测了第5、6窟之间的岩壁厚度和石窟顶部浅部破碎区裂隙密集带;利用浅层地震反射波法探测了沿保护区界线地下采煤巷道及煤矿采空区情况;利用浅层地震折射波法探测了石窟顶部覆盖层厚度和基岩风化程度;利用瞬态多道面波探测了石窟顶部第四纪覆盖层厚度;使用井中地震CT、井地电法和井下电视法等井中物探方法探测了钻孔周围目的层、破碎带的走向及空间展布情况,揭示了云冈石窟地表水下渗聚积区和基岩中的破碎渗透区。地球物理勘探方法在云冈石窟保护中的成功应用,解决了多年来石窟保护、石窟防水中的一系列水文地质、工程地质等问题,为窟顶防渗排水以及保护研究提供了科学依据。但任何技术手段都有其局限性,地球物理勘探方法在石窟保护中的应用仍然存在许多问题:

1) 一般常规物探方法都有一定的局限性,如探测精度不够、物探数据具有多解性等,所以宜采用多种物探手段相互验证;在一些重点区域必要的情况下,还要与其他勘探手段相结合,以便取得更为客观、准确的信息。

2) 由于测区内地球物理条件多变,对物探探测成果的解释有不同程度的干扰。

3) 由于局部地段有沟壑分布,石窟顶部还有明城墙及“八字墙”等,有些区域靠近石窟崖壁,这些因素都可能对物探勘探结果带来干扰或者产生假异常。

4) 由于测区周围为矿区,工业干扰对电法勘探带来了一定的干扰信号。

鉴于上述问题,所以在今后的勘探调查时应尽量避免干扰因素,加密点、线距,以解决更细微的问题;采用多种物探方法,以增强结果的可靠性和准确性。随着浅层地球物理探测仪器设备精度的进一步提高和新的物探技术和手段的出现,对探测对象没有损伤的地球物理探测技术将会在石窟保护领域有更广的应用<sup>[15]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 黄继忠. 云冈石窟地质特征研究[J]. 东南文化, 2003, (5): 91-93.  
HUANG Ji-zhong. The geological characteristics research of Yungang Grottoes [J]. Southeast Cult, 2003, (5): 91-93.
- [2] 黄继忠. 云冈石窟主要病害及治理[J]. 雁北师范学院学报, 2003, (10): 57-59.  
HUANG Ji-zhong. Main damages and preservation of the Yungang Grottoes[J]. J Yanbei Normal University, 2003, (10): 57-59.
- [3] 赵不忆, 林茂炳. 大同云冈石窟岩石风化调查报告[Z]. 1964.  
ZHAO Bu-yi, LIN Mao-bing. The report on the weathering of Yungang Grottoes, Datong, Shanxi [Z]. 1964.
- [4] 黄继忠. 水岩作用与云冈石窟风化病害机理研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2005.  
HUANG Ji-zhong. The water-rock [D]. PhD thesis, China Geological Academy, 2005.
- [5] 钟世航, 黄克忠. 物探技术探查乐山大佛内部状况[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(3): 226-230.  
ZHONG Shi-hang, HUANG Ke-zhong. Using geophysical technology to explore great stone statue Buddha in Leshan [J]. Chin J Eng Geophys, 2004, 1(3): 226-230.
- [6] 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, 4(2): 9-20.  
MA Tao, SUN Yuan, Simon S. Studies on internal fissures and fractures of stone sculptures by ultrasonic techniques [J]. Sci Conserv Archaeol 2002, 4(2): 9-20.
- [7] 黄克忠, 钟世航. 云冈石窟石雕风化的微测深试验[J]. 文物保护和考古研究, 1989, 1(1): 28-33.  
HUANG Ke-zhong, ZHONG Shi-hang. The microsounding experiment in the weathering of Yungang Grottoes [J]. Sci Conserv Archaeol, 1989, 1(1): 28-33.
- [8] 方玉禹, 夏鸿, 欧宗豪, 等. 地球物理勘探方法在云冈石窟的应用[Z]. 1965: 1.  
FANG Yu-yu, XIA Hong, OU Zhun-hao, et al. Geophysical survey techniques used in Yungang Grottoes [Z]. 1965: 1.
- [9] 贾冬希. 应用地球物理勘探方法研究云冈石窟围岩裂隙分布与风化厚度[Z]. 1963: 12.  
JIA Dong-xi. Geophysical prospecting method applied in the study of fracture distribution and weathering degree of Yungang Grottoes [Z]. 1963: 12.
- [10] 西安煤炭科学院地勘分院物探研究所. 用地球物理法探测云冈岩石裂隙的技术报告[R]. 1988: 11.  
Geophysical Institute of Xi'an Branch of Coal Sciences Academy. The report of geophysical prospecting method used to investigate the cracks of Yungang Grottoes [R]. 1988: 11.
- [11] 山西省地矿局216勘察处工程队. 云冈石窟顶部电法勘察报告[R]. 1993: 9.  
No. 216 Geological Team of Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Report of the electrical prospecting on the top of Yungang Grottoes [R]. 1993: 9.
- [12] 中国建设综合勘察研究设计院. 地球物理勘察报告[R]. 2004: 3.  
China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying. Report of geophysical prospecting method [R]. 2004: 3.
- [13] 方云, 黄继忠, 晏鄂川, 等. 云冈石窟第9、10、12窟洞窟稳定性三维有限分析研究报告[R]. 2006: 12.  
FANG Yun, HUANG Ji-zhong, et al. Three-dimensional analysis of the stability in Cave 5 and 6 of Yungang Grottoes [R]. 2006: 12.
- [14] 北京勘察技术工程公司. 山西大同云冈石窟浅层地震反射波法勘察报告[R]. 2002: 12.  
Beijing Reconnaissance Technology Engineering Company. Survey



report of Yungang Grottoes by Shallow earthquake reflection wave [R]. 2002;12.

- [15] 任建光,黄继忠,李海.无损检测技术在石质文物保护中的应用[J].雁北师范学院学报,2006,(10):58-62.

REN Jian-guang, HUANG Ji-zhong, LI Hai. The application of NDT in the conservation of stone relics[J]. J Yanbei Normal Univ, 2006,(10):58-62.

## Geophysical prospecting method applied in the preservation of Yungang Grottoes

HUANG Ji-zhong<sup>1,2</sup>, REN Jian-guang<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Yungang Grottoes Academy, Datong 037007, China)

**Abstract:** Geophysical prospecting is an effective technique used in geophysical survey. It can determine the geological characteristics of rock mass based on measurements of its structural and geophysical properties. The weathering of stone statues is closely related to the properties of the rock it is made from. Therefore, the geophysical prospecting method is of great importance in stone statue protection. This research details the theory of the geophysical prospecting method and summarizes the applications of electrical prospecting, geological radar, seismic prospecting and borehole geophysics to stone statue conservation. Unsolved problems are also discussed.

**Key words:** Geophysical exploration; Yungang Grottoes; Conservation; World Heritage

· 通 讯 ·

### 《文物保护与考古科学》征订启事

《文物保护与考古科学》期刊创刊于1989年。1989年至2002年为半年刊,2003年起为季刊。另于2002、2008、2009出版3册增刊。

1. 邮局征订:

国内读者可到当地邮局订阅,邮发代号为4-699,全国各地邮局均可办理订阅手续(定价8元/期)。

2. 编辑部征订:

凡未赶上邮局订阅者,可向编辑部邮购当年期刊。

另有《文物保护与考古科学》期刊1989~2010年的余刊,可供整套或零散订阅。需订阅者请通过邮局汇款(地址:上海市延安西路1357号(汇中商务楼一楼),邮编200050)。请在汇款说明中注明所要订购期刊卷、期数和数量。

邮购定价:10元/期,增刊价格另计为:2002增刊50元/册,2008增刊40元/册,2009增刊10元/册(已含平邮邮资)。

如有疑问可联系编辑部,电话:021-54362886