

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2021.01.015

天然源面波法在西藏扎西康矿区采空区 勘察中的应用

杨涛,肖扬,周慰,吴小勇,邹华敏

(四川省冶金地质勘查院,成都 610051)

摘要: 天然源面波勘探是从自然界的各种微小振动中提取出瑞雷面波,经过面波频散曲线的反演得到岩层速度结构,达到推测地下岩层和构造分布状况的目的。该方法克服了人工源激发困难的问题,对场地适应性强,有效探测深度较大,探测结果具有分辨率高、抗干扰能力强等特点。文章以扎西康矿区采空区勘察中的应用为例,介绍了天然源面波法特点、优势及应用效果。

关键词: 扎西康矿区;天然源面波测量;瑞雷面波;采空区塌陷;西藏

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

0 引言

采空区塌陷是矿山多见的地质灾害现象,不仅影响矿山经济的发展,而且直接危害当地人民生命和财产的安全,破坏了周边生态和自然环境^[1-2]。采空区的地面塌陷主要是由地下采场活动形成的采空区引起的,当采空区上部岩石的抗拉-抗剪强度不足以承载上覆岩体的重力时,岩体会发生变形或整体垮塌,岩体的坍塌范围不断向上扩大,逐渐与地表形成联通,从而造成地表岩土的塌陷^[3]。

对于采空区塌陷的地球物理勘查,多采用综合物探方法(包括高密度电阻率法、瞬变电磁法和天然源面波法等)进行勘测^[4-5]。高密度电阻率法对浅部的地质体差异有较强的分辨能力,但是地形会影响分辨的效果^[6];瞬变电磁法的探测深度较大,对于良导体有较好的响应,但易出现浅部的探测盲区并受外部电磁场的影响^[7]。天然源面波法利用检波器收集大自然的各类微小振动,可从其中提取瑞雷面波,通过分析瑞雷面波的频散特性、提取频散曲线,以获取地下介质横波的速度结构^[8-10]。由于矿山采空区

与围岩之间存在较大的波速差异,利用弹性波法探测采空区具有天然的优势,并且天然源面波信号为各类背景噪声,能适应各种复杂的环境^[11-14]。

本次工作区位于西藏山南地区扎西康矿集区,由于开采矿区的地质条件复杂,井下采空区的范围较大,采空区规模形态、形成原因以及发展趋势尚不明确,给该区的矿山环境恢复治理工作带来困难。为了调查地表塌陷和采空区的分布范围、规模形态,分析地面塌陷的形成机制,本次工作根据地质体的电性和弹性波波速差异,采用综合物探方法(高密度电阻率法、瞬变电磁法、天然源面波法)对地表塌陷范围、塌陷形态及塌陷深度等进行探测,并对比天然源面波法与高密度电阻法、瞬变电磁法的探测效果。

1 天然源面波勘探

天然源面波勘探也称微动勘探,该方法利用检波器采集自然界存在的各种微小振动,并从中提取出瑞雷面波,通过分析瑞雷面波的频散特性提取频散曲线,最后通过对剖面上各点频散曲线进行反演得到地层的速度结构,进而推测出地下岩层及地质

收稿日期: 2020-04-11; 责任编辑: 余和勇

基金项目: 四川省冶金地质勘查局风险勘查项目“无人机低空地勘综合系统应用实验”(川冶勘[2016]279号)资助。

作者简介: 杨涛(1992—),男,助理工程师,硕士研究生,主要从事工程物探及矿产物探方面的研究工作。通信地址:成都市成华区地勘路6号,四川省冶金地质勘查院;邮政编码:610051;E-mail:837706357@qq.com

构造的分布状况。由于该方法是从背景噪声中提取面波,克服了人工源激发困难的问题,对场地的适应性更强,具有较大的有效探测深度,同时该方法还具有分辨率高、抗干扰能力强等特点,近年来逐渐被业内人士认可,应用范围也越来越广泛。

(1) 数据采集

一般情况下,天然源面波对地震仪的技术指标要求与人工源面波类似,但要求地震仪具有较长的连续采样功能,如单次记录的采样长度为30~120 s。为探测深部地层结构,要求大尺度采集排列,如果限于常规地震仪的道间距长度,可采用具有单道独立记录功能的地震仪;理论上台阵设计可呈任意形状,但为了后期数据处理的便捷及结果更接近客观实际,要求台阵形状尽量规则;台阵的布设通常分为一维排列和二维排列,由于天然源面波的震源位置未知,为准确地提取面波的频散信息,一般采用二维采集排列,如嵌套的三角形、L形、圆形或十字形(图1),为便于现场布设,通常采用前2种排列。

(2) 数据处理

在工程勘察工作中,主要利用的是面波的频散特性(即在均匀水平分层介质中,不同周期的面波以不同的传播速度传播)。周期越长,其传播速度受到越深的介质属性影响,通过测量不同周期的面波速度(频散曲线)就可以通过一定的反演方法来推断不同深度介质的属性,从而达到探测目的。理论上,面波的传播速度受密度、纵波速度、横波速度的影响;对面波速度影响最大的为剪切波速度,因此获得面波剪切波速度结构是面波勘探的主要目的。天然源面波勘探是从环境噪声信号中提取面波频散曲线,经反演得到观测系统排列下方的横波速度结构。

与人工源面波法类似,天然源面波法的主要任务是如何从地震记录中提取频散曲线。目前,面波频散分析方法主要有空间自相关法(SPAC法)和频率-波数法(F-K法)。

率-波数法(F-K法)^[11]。

(1) 空间自相关法(SPAC法)。空间自相关法计算的前提是假设天然振动信号在空间和时间上是平稳随机分布的,在此假设下对相距 r 的任意2个振动点运用零阶贝塞尔函数进行计算

$$\rho(r, f) = J_0(X_i)$$

式中, ρ 为自相关系数; r 为振动间距; f 为频率; J_0 为零阶贝塞尔函数; X_i 为零阶贝塞尔函数的变量

$$X_i = 2\pi f_i r_0 / v_R(f_i)$$

求出瑞雷波的相速度 $v_R(f_i)$, 不同的 f_i 对应不同的 $v_R(f_i)$, 就可绘制出频散曲线。

(2) 频率-波数法(F-K法)。对于时间空间域的二维地震信号 $d(x, t)$, 对时间轴和空间轴进行二维傅里叶变换

$$U(\omega, t) = \int d(\omega, t) e^{-i\omega t} e^{-ikx} dx dt$$

就可以得到频率波数域二维信号。由于相速度和频率计波数的关系为

$$v = \omega/k = 2\pi f/k$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 为角频率; k 为波数矢量。从频率波数域信号经公式变换就可以得到频率速度域 $U(f, v)$ 。

2 应用实例

2.1 工区概况

扎西康矿区地质构造复杂,岩浆多次侵入,岩石裂隙较发育,地表风化层厚度较大。矿体主要赋存在断裂破碎带中,矿体的围岩主要为钙质板岩、变质砂岩、页岩和凝灰岩,属于较硬岩组,透水性较差,矿体顶板岩层富水性较弱,底板为不含水层。

扎西康矿区自开始采矿以来,共形成3号—

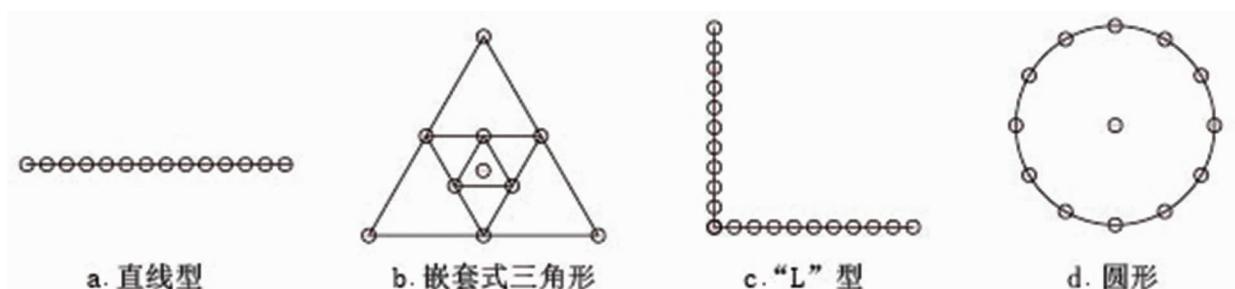


图1 天然源面波法台阵布设示意图

Fig. 1 Layout of natural source surface wave platform

9号平硐，采用平硐开拓、斜井开拓及竖井开拓的联合开拓方式。矿山一直未对采空区进行有效处置，由于地压应力重新分配以求再次平衡，上部的采空区陆续垮塌。随着开采深度的增加，采空区的垮塌已经沟通至地表，形成呈串珠状的、与开采巷道走向一致的塌陷区。

为了能够查清地下采空区规模和分布以及采空塌陷区在浅地表的影响范围，布置了7条物探测线，其中1号测线与7号测线为综合物探测线（高密度电法、瞬变电磁法和天然源面波法），其余5条只进行了瞬变电磁法测量（图2）。

2.2 成果分析

图3为1号和7号测线的综合物探剖面成果图。对比3种物探方法可知，高密度电法在距地表100 m的深度范围内有较高的分辨率，其成果与天然源面波基本吻合，受排列长度的影响，若要探测深部地质体的地电信息，需要加大排列长度，该方法在地形条件较差地区的施工难度较大；瞬变电磁法与天然源面波法均具有相对较大的探测深度，对采空区都有一定的反映，这2种方法的探测结果基本吻合，但由于瞬变电磁法在地表存在一定范围的盲区，导致浅部的信息部分缺失，需要结合高密度电法等方法进行综合解释。

在图3中，1号测线在平距250~450 m，标高4625 m以下部位出现相对带状高阻区，产状近直立，与之对应，天然源面波法剖面显示该区域出现明显团状低速区，面波速度 <500 m/s，低于周围岩体

面波速度最小值，根据测量及地质资料，推测该区域为采矿巷道及采空区范围；埋深4625 m以浅，瞬变电磁法剖面出现横向带状相对高阻区，天然源面波法剖面呈现漏斗状相对低速区且波速横向变化较大，同时浅部与高密度电法低阻异常区对应；结合实际地质资料及现场踏勘情况，推测该区域为采空区的影响区域。7号测线在平距110~250 m，标高4500 m以下部位出现大范围低阻区，同时，天然源面波法剖面在该段出现明显团状低速区，面波速度 <500 m/s，低于一般岩体面波速度最小值，2种方法推测异常区域高度吻合，根据已有采矿硐室资料及现场硐室踏勘情况，推测该低速区为采矿巷道及采空区范围；标高4500 m以浅，电阻率呈中低阻条带状，天然源面波法剖面呈现漏斗状相对低速区且波速横向变化较大，推测该区域地层结构不稳定。结合实际地质资料并进行现场踏勘后认为，该区段为采空区影响部位，此区段的采空区埋藏较深，矿体上方岩层较为松散破碎，且采空区的影响范围较大，地表出现大面积塌陷，塌陷区周边岩石中裂隙发育，再次塌陷的风险较大。

为进一步验证物探结果的可靠性，将物探结果与已有的井下采矿巷道分布图和地面无人机航拍影像图进行对比分析（图4）。从对比结果来看，天然源面波探测结果推测的采空区影响范围横向位置与地表塌陷区位置高度吻合，其推测的采空区位置与井下采矿巷道也较为吻合，进一步说明天然源面波法的有效性与探测结果的可靠性。

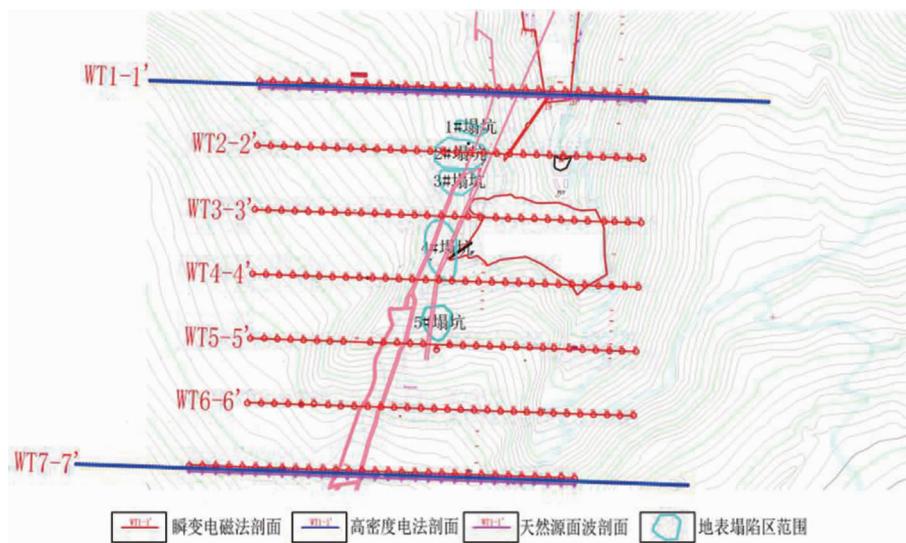


图2 测线布设示意图

Fig. 2 Schematic layout of survey lines

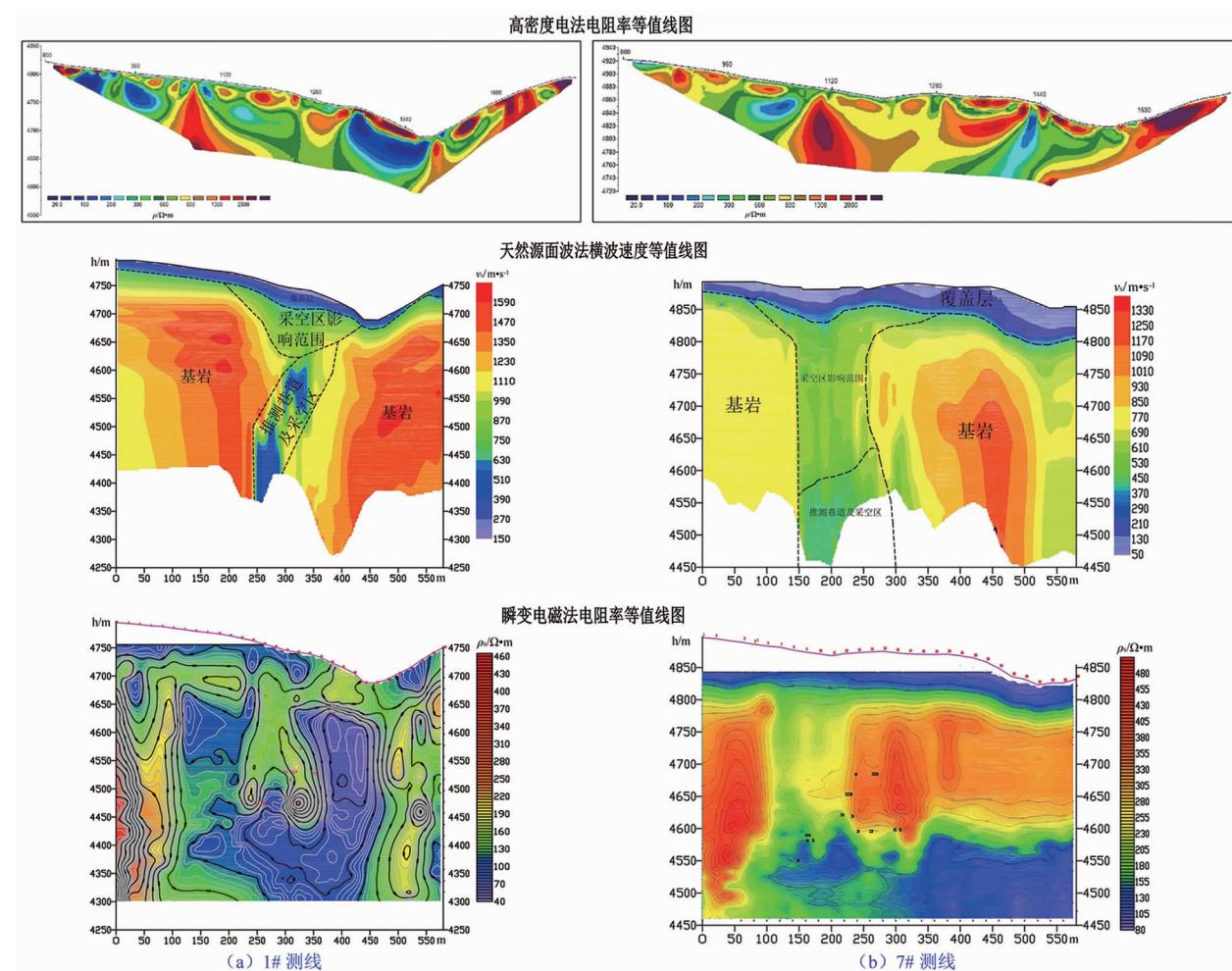


图3 综合物探剖面成果图

Fig. 3 Integrated geophysical profiling results

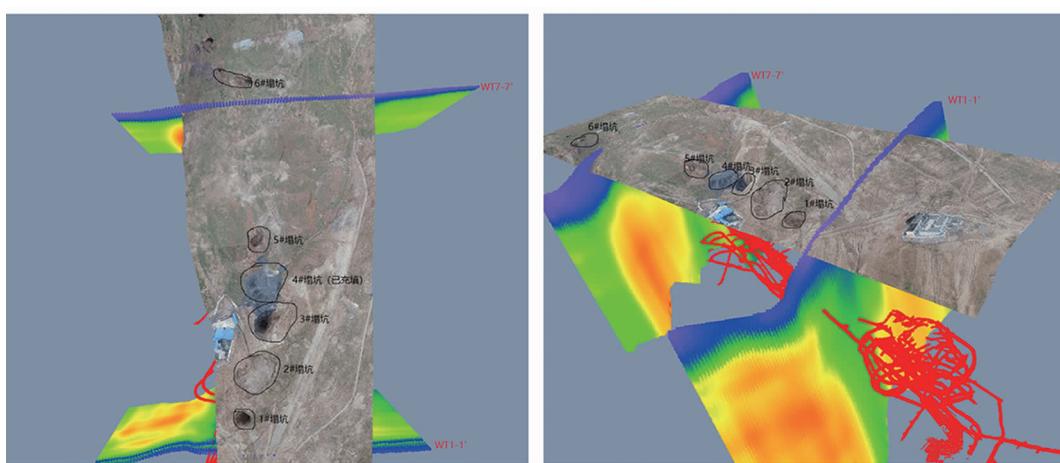


图4 天然源面波探测结果与塌陷区位置的三维对比图

Fig. 4 Three-dimensional comparison of natural source surface wave results and actual collapse areas

3 结论

天然源面波法在西藏扎西康矿区采空塌陷区勘查中的应用效果。该方法与高密度电法、瞬变电磁法进行对比结果表明,天然源面波法在采空塌陷区勘查中比传统的高密度电法具有探测深度优势,又可避免瞬变电磁法的地表盲区,该方法受环境干扰较小,无需人工源,操作简便,效率高。如要获得更大的探测深度,则需增加台阵半径,加大数据采集时间和精准采集各台站的位置信息。

参考文献:

- [1] 程力, 刘焕新, 朱明德, 等. 金属矿山地下采空区问题研究现状与展望[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(1):70–81.
- [2] 陈兰兰, 肖海平. 金属矿山采空区稳定性研究现状分析[J]. 中国钨业, 2017(3):17–21.
- [3] 周春梅, 李沛, 虞钰, 等. 金属矿山地下开采引起地面塌陷的规律[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(1):61–64.
- [4] 彭青阳. 综合物探方法在地面塌陷勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(1):31–36.
- [5] 刘永生, 刘仁义, 马瑞光. 综合物探方法在地面塌陷场地勘查中的应用[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(3):155–158.
- [6] 王建军, 强建科, 李成香, 等. 高密度电法在地面塌陷勘察中的应用[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(S4):99–101.
- [7] 康鸿文, 柴新朝. 瞬变电磁法及高密度电法在采空区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(2):167–170.
- [8] 王振东. 面波勘探技术要点与最新进展[J]. 物探与化探, 2006, 30(1):1–6.
- [9] 孙勇军, 徐佩芬, 凌甦群. 微动勘查方法及其研究进展[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1):326–334.
- [10] 张维, 何正勤, 胡刚, 等. 用人工源和天然源面波联合探测浅层速度结构[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(1):26–36.
- [11] 史伟. 天然源面波勘探在市政工程中的分析与应用[J]. 中外建筑, 2008(8):244–246.
- [12] 朱鑫. 面波勘探在工程勘察中的应用[J]. 世界有色金属, 2020(2):208–209.
- [13] 陈承申. 天然源面波法及地震映像法在采空区勘察中的综合应用[J]. 铁道勘察, 2017(5):32–35.
- [14] 左国青, 方华. 微动与地震映像在采空区勘察中的应用[J]. 水力发电, 2017, 43(11):75–77.

The application of natural source surface wave method to mined-out area survey in Zhaxikang mining area, Tibet

Yang Tao, Xiao Yang, Zhou Wei, Wu Xiaoyong, Zou Huamin

(Sichuan Institute of Metallurgical geological Bureau, Chengdu 610051, China)

Abstract: The natural source surface wave exploration uses the detector to collect all kinds of natural weak vibrations from which Rayleigh surface wave is extracted. Inversion of the frequency dispersion curves is made to obtain velocity structure of rocks and postulate distribution of the strata and structure underground. The technique overcomes difficulties of the artificial source excitation and limit of the working site. The effective detection gets to deeper with high resolution and strong anti-interference. Taking the mined-out area in Zhaxikang mining area as an example, this paper analyzes application characteristics, advantage and effect of the natural source surface wave method.

Key Words: Zhaxikang mining area; natural source surface wave method; Rayleigh surface wave; collapse of mined-out area; Tibet