

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.03.06

引用格式: 鲁杏, 崔先文, 汤正江, 等. 天然源面波勘探方法在安徽小包庄铁矿区的應用研究[J]. 中国地质调查, 2023, 10(3): 54–59. (Lu X, Cui X W, Tang Z J, et al. Application of natural – source surface wave exploration in Xiaobaozhuang iron deposit of Anhui Province [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(3): 54–59.)

天然源面波勘探方法在安徽小包庄 铁矿区的應用研究

鲁杏^{1,2}, 崔先文^{1,2}, 汤正江^{1,2}, 高昌生³

(1. 安徽省勘查技术院, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽省电法勘探重点实验室, 安徽 合肥 230031;
3. 安徽省地质矿产勘查局 327 地质队, 安徽 合肥 230011)

摘要: 为研究天然源面波勘探方法在固体矿产勘查尤其是在深部找矿中的应用效果, 选择小包庄铁矿区已知勘探线进行方法试验。在前期研究的基础上, 采用线性排列的方式部署了天然源面波测点, 共完成了 32 个测点、总长度 3 100 m 的数据采集工作; 采用扩展空间自相关法获取了每个测点的频散曲线, 并对频散曲线进行反演并通过插值计算, 获得了整条剖面的横波速度结构; 根据地质和钻孔资料, 划分了岩性层和断裂。通过与已知资料对比分析, 认为该方法取得了较好的勘查效果, 表明天然源面波勘探方法在深部找矿中具有较好的应用前景, 该区深部具有较大的找矿潜力。

关键词: 小包庄铁矿; 天然源面波; 横波速度结构; 深部找矿

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2023)03–0054–06

0 引言

小包庄铁矿是近年来在庐枞矿集区发现的大型玢岩型铁矿床, 矿体主要赋存于火山岩与次火山岩接触带附近, 埋深 1 350 ~ 1800 m。以往物探找矿工作以重磁法和可控源音频大地电磁测深法为主, 且主要针对浅部找矿, 深部找矿很少涉及^[1–3]。

随着社会经济的发展, 研究区内存在较强的人文电磁干扰, 在深部找矿工作中, 以可控源音频大地电磁测深法为代表的电磁法应用难度越来越大, 亟需抗干扰能力强、勘探深度大的物探方法。天然源面波勘探方法, 又称微动勘探法, 以平稳随机过程理论为依据, 从微动信号中提取面波频散曲线, 通过对频散曲线的反演得到地下介质的横波速度, 从而进行岩性分层及构造分析。该方法无需人工震源, 具有抗干扰能力强、勘探深度大、经济环保等优点^[4–5], 近年来在地热勘查、隐伏构造勘查、采空

区勘查等能源、矿产、工程多个领域得到了广泛应用, 并取得了良好的应用效果^[6–11]。

本研究选择小包庄铁矿区 III 号勘探线进行方法试验。通过数据采集、资料处理和反演, 建立 III 号勘探线的横波速度结构, 并结合地质和钻孔资料, 划分岩性层和断裂, 旨在研究天然源面波勘探方法在深部找矿中的应用效果。

1 研究区概况

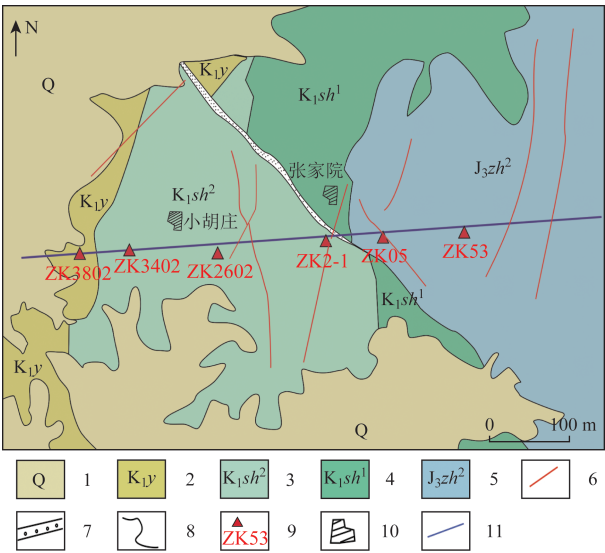
长江中下游成矿带是我国重要的铁、铜、金多金属成矿带, 分布了一系列中生代大、中型陆相火山岩铁、铜、金多金属矿床, 其中位于安徽的庐枞矿集区是重要的陆相火山岩型铁矿床矿集区之一^[12–13]。罗河铁矿床是 20 世纪 70 年代在庐枞矿集区中探明的大型隐伏铁矿床。2013 年, 安徽省地质矿产勘查局 327 地质队在罗河铁矿床已有找矿成果的基础上, 通过对重磁异常进一步解释, 发现

收稿日期: 2020–09–15; 修订日期: 2021–01–15。

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目“基于人工源电磁法的页岩气绿色勘查新技术研究(编号: 2022107020010)”资助。

第一作者简介: 鲁杏(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查生产与科研工作。Email: lu.xing@163.com。

了位于罗河铁矿床深部的小包庄铁矿床。该矿床是近年来发现的一大型玢岩型铁矿床,矿体主要赋存于火山岩与次火山岩接触带附近。空间上,小包庄铁矿(埋深1 350~1 800 m)位于罗河铁矿(埋深400~800 m)的下部。小包庄铁矿床的发现表明,庐枞矿集区深部仍有较大的找矿潜力^[14-17]。小包庄铁矿地质简图见图1。



1. 第四系; 2. 白垩系杨湾组; 3. 白垩系双庙组上段; 4. 白垩系双庙组下段; 5. 侏罗系砖桥组上段; 6. 断裂; 7. 破碎带; 8. 地质界线; 9. 钻孔及编号; 10. 村庄; 11. 测线

图1 研究区地质简图及钻孔位置

Fig.1 Geological sketch and borehole position of the study area

研究认为,小包庄铁矿与罗河铁矿之间不存在相互演化的关系,它们属于两个独立的玢岩型铁矿床,既不是由同一闪长玢岩侵入引起的同一玢岩铁矿成矿系统,也不是由一个闪长玢岩通过脉动式喷发作用形成的,而是由两个闪长玢岩侵入体形成的^[18]。闪长质岩浆可能源自于同一岩浆房,岩浆在上升过程中可能混染了三叠系东马鞍山组膏岩层,小包庄铁矿和罗河铁矿在空间上叠覆,是闪长质岩浆侵入深度不同造成的。

2 研究区地质特征

2.1 火山岩盖层

研究区火山岩盖层主要由白垩系杨湾组和第四系组成(图1)。杨湾组分布于研究区西北缘,呈角度不整合覆盖在火山岩之上,由砖红色和紫红色砂砾

岩、砂岩、粉砂岩组成。第四系主要分布于耕作区,由黄褐色黏土、亚黏土夹少量砂石、砾石组成。

2.2 构造

研究区地表地层产状平缓,褶皱不发育,构造以断裂为主。研究区紧靠庐庐断裂带,主要有NE向、NNE向、NW向、NNW向、NS向和NEE向断裂。这些断裂多发生在成矿以后,且存在多次活动和反复改造现象,延伸不大,除少数大型断裂切割矿体外,大部分消失于砖桥组下部凝灰岩之上。

2.3 岩浆岩

(1)火山岩。研究区主要火山岩有砖桥组火山碎屑岩和火山熔岩,双庙组火山碎屑岩和火山熔岩,浮山组粗面火山碎屑岩和黑云母粗面岩等。

(2)侵入岩。研究区岩浆活动主要发生在燕山期,具有多期次活动的特点,侵入岩主要为闪长玢岩、正长岩,还有少量正长斑岩、细晶正长岩、安山玢岩、辉绿玢岩等脉岩。闪长玢岩是研究区的成矿母岩,主要侵位于砖桥组下段粗安岩中,岩石呈灰绿色、浅红褐色,以斑状结构为主,基质为细粒结构,块状构造。由于受强烈蚀变及矿化作用影响,原岩成分多被强烈改造,形成钠长石岩、钠长石化闪长玢岩、磁铁矿化膏辉岩化闪长玢岩、磁铁矿化膏辉岩等。正长岩主要由正长石组成,其次为黑云母,主要呈较大岩体侵入,部分呈岩枝状或岩脉状侵入双庙组与砖桥组火山岩中。

3 物性特征

速度是地震勘探中的基本参数,决定地震波传播速度的主要因素为岩石的矿物成分、结构、密度、孔隙度以及空隙中流体的物理性质和饱和度,一般岩石波速特征见表1。不同的岩石具有不同的波速,这与岩石的成分和结构有关,一般侵入岩的波速较高,喷发岩(如多孔隙的凝灰岩)的波速较低。

表1 一般岩石波速特征^[19]
Tab.1 Wave velocities of general rocks^[19]

岩石名称	纵波速度 $V_p/(km \cdot s^{-1})$	横波速度 $V_s/(km \cdot s^{-1})$
泥质灰岩	2.0~3.5	1.2~2.4
砂岩	2.1~4.5	0.9~2.4
片麻岩	3.5~7.5	3.5~4.0
大理岩	3.7~7.0	3.5~4.7
花岗岩	4.7~6.0	2.3~3.8
闪长岩	4.6~4.9	2.8~3.8
凝灰岩	2.8~3.6	1.6~2.6

4 技术路线和数据处理

4.1 技术路线

天然源面波勘探的野外工作布置有三角型台阵、圆型台阵、十字型台阵、L 型台阵、直线型台阵等,可根据实际工作中地形、环境等情况灵活布设台阵。常用的提取面波频散曲线的方法有频率-波数法(frequency wavenumber method, F-K)和空间自相关法(spatial autocorrelation method, SPAC)。

采用 SPAC 提取频散曲线对三角型台阵或圆型台阵效果较好。但在实际工作过程中,往往受到地形、地物的约束,没有足够的空间来布置这些台阵。为解决这一问题,在 SPAC 的基础上进行了进一步改进,得到了扩展空间自相关法(extended spatial autocorrelation method, ESPAC)。与 SPAC 相比,ESPAC 的优势在于它对布阵方式没有约束,在复杂条件下的场地,可以根据实际情况布置成 L 型、十字型或直线型台阵^[20]。

本研究中天然源面波勘探采用直线型台阵,道间距为 100 m,采样间隔 100 Hz,采集时长约 2.5 h。采用的仪器设备具有 4G 远程实时数据传输、实时监控、实时智能分析等功能,工作效率高。频带分布范围宽(20S ~ 320 Hz)。仪器采用完全节点式的数字检波器,采用特殊的外壳设计,解决了传统模拟检波器传输过程中易被其他电磁信号干扰以及道间串扰等问题。

4.2 数据处理

天然源面波频散曲线的提取方法采用 ESPAC。数据处理包括数据预处理、空间自相关系数计算和残差计算等。数据预处理包括去趋势、去均值、切割和时间域归一化,切割是为了分窗口计算,以便叠加,提高信噪比,时间域归一化目的是去除大地的影响;空间自相关系数计算包括各窗口自相关系数计算和叠加;残差计算是用所有检波器两两之间的空间自相关系数与理论贝塞尔函数拟合,计算出残差,从而获得残差图上连续的、数值小的趋势,即面波频散曲线。

对天然源面波频散曲线进行反演,可获得该测点地下各层的横波速度以及层厚度等地层信息。通过插值计算,最终获得整条剖面的横波速度-深度剖面图。具体数据处理流程见图 2。

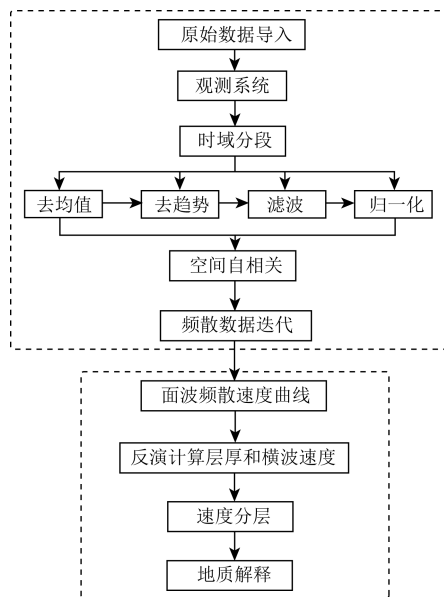


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Flowing chart of data processing

5 已知钻孔对比解释

本文天然源面波勘探的解释参数主要是频散曲线反演的横波速度。依据已知的钻孔资料,秉承从已知到未知的原则,在测线上收集了 6 个已知钻孔的资料,图 3 和图 4 分别为 ZK3402 和 ZK2602 的天然源面波频散曲线解释及钻孔岩性图。

(1) ZK3402 位于 1 500 号测点,钻孔控制深度为 1 525.83 m。主要分为 4 层:浅地表 0 ~ 100 m 为“勘探盲区”;深度 100 ~ 1 000 m,频散点分布密集,反演的横波速度为 2 000 ~ 2 500 m/s,主要为以粗安岩为代表的双庙组火山岩;深度 1 000 ~ 1 300 m,频散点分布相对稀疏,反演的横波速度为 2 500 ~ 3 500 m/s,推断为砖桥组火山岩;深度 1 300 ~ 2 500 m,频散点分布稀疏,反演的横波速度为 3 500 m/s 左右,为三叠系灰岩(图 3)。

(2) ZK2602 位于 1 800 号测点,钻孔控制深度为 1 800.02 m。主要分为 4 层:浅地表 0 ~ 100 m 为“勘探盲区”;深度 100 ~ 1 000 m,频散点分布密集,反演的横波速度为 2 000 m/s 左右,主要为以粗安岩为代表的双庙组火山岩;深度 1 000 ~ 1 200 m,频散点分布相对稀疏,反演的横波速度为 2 500 ~ 3 500 m/s,推断为砖桥组火山岩;深度 1 200 ~ 2 500 m,频散点分布稀疏,反演的横波速度为 3 500 m/s 左右,为基底三叠系硬石膏(图 4)。

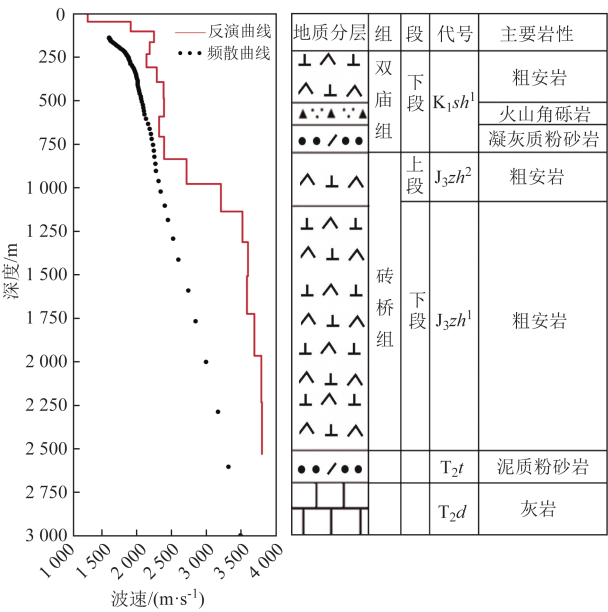


图 3 ZK3402 天然源面波频散曲线 (左) 及钻孔岩性 (右)
Fig.3 Natural – source surface wave dispersion curve (left) and borehole histogram (right) of ZK3402

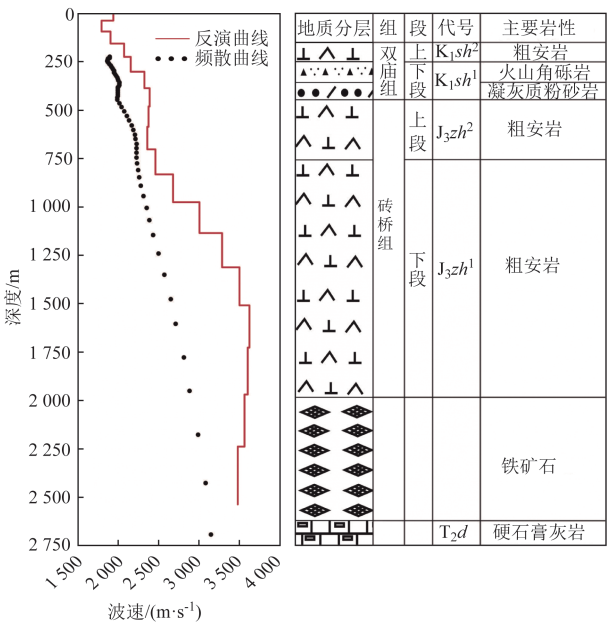


图 4 ZK2602 天然源面波频散曲线 (左) 及钻孔岩性 (右)
Fig.4 Natural – source surface wave dispersion curve (left) and borehole histogram (right) of ZK2602

6 剖面解释

对每个测点的天然源面波频散曲线反演后,得到横波速度,再通过内插的方式得到整条剖面的横波速度 – 深度剖面图 (图 5)。

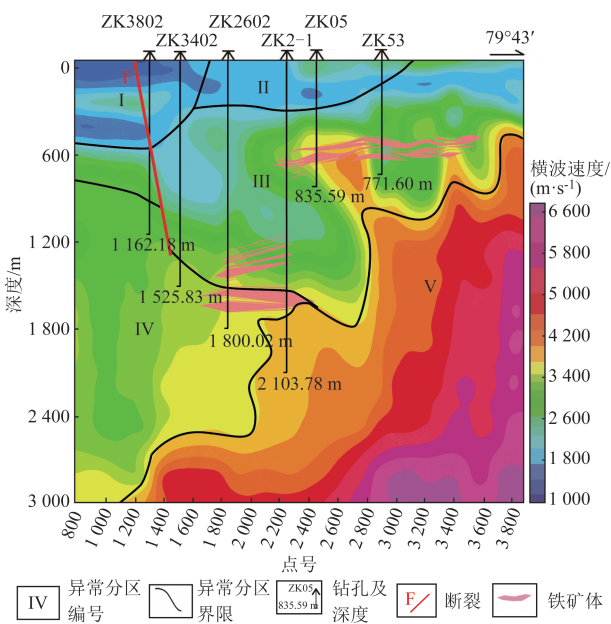


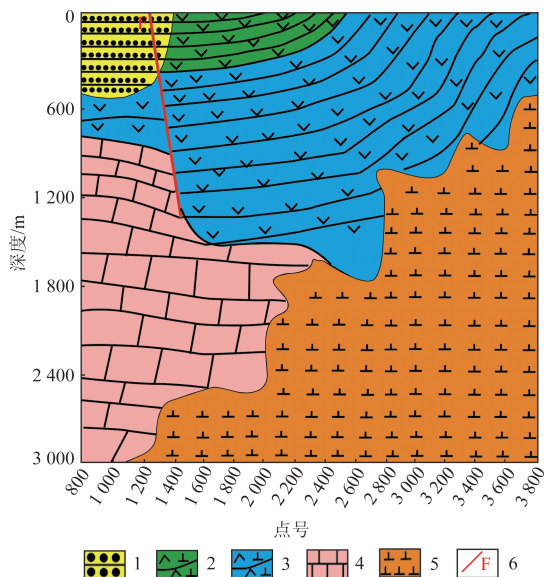
图 5 横波速度 – 深度剖面
Fig.5 The profile of shear wave velocity – depth

由图 5 可知,总体来讲,剖面左上部分速度值相对较低,右下部分速度值相对较高。在 ZK3402 至 ZK2602 之间,横波速度结构在横向上存在明显差异,推测为罗河断裂。结合已知地质和钻孔资料,可分为 5 个区进行解释。

- (1) I 区。位于剖面左上角,横波速度较低,为 1 000 ~ 2 500 m/s,主要是白垩系杨湾组砂岩的反映。
- (2) II 区。位于 ZK3402 至 ZK05 之间,最大厚度约 400 m,向剖面右侧厚度逐渐降低,横波速度为 1 700 ~ 2 500 m/s,推测主要是双庙组火山岩 (以粗安岩为主) 的反映。
- (3) III 区。位于剖面中上部,厚度较大,ZK05 向右,地表出露。在 ZK3402 至 ZK05 之间,厚度可达 1 600 m,横波速度为 2 000 ~ 3 200 m/s。结合地质和钻孔资料,推测主要是砖桥组火山岩 (以粗安岩为主) 的反映。
- (4) IV 区。位于剖面左中部,横波速度为 2 500 ~ 3 800 m/s。结合地质和钻孔资料,断裂左侧推断为三叠系灰岩,断裂右侧推断为三叠系膏岩。
- (5) V 区。位于剖面右下部,整体呈左深右浅的趋势,横波速度较高,可达 3 800 ~ 6 500 m/s。结合地质和钻孔资料,推测主要是闪长玢岩的反映。

根据上述推断解释,可得到该勘探线的地质结构推断图 (图 6)。浅部矿体主要赋存在闪长玢岩体与火山岩下底的接触带附近;深部矿体主要赋存在

闪长玢岩与三叠系东马鞍山组膏岩接触带附近。



1. 杨湾组砂岩; 2. 双庙组粗安岩; 3. 钟桥组粗安岩; 4. 三叠系灰岩; 5. 闪长玢岩; 6. 断裂

图 6 地质结构推断

Fig. 6 The inferential map of geological structure

7 结论

(1) 根据采集的天然源面波的时域信息, 通过数据处理, 可提取频散曲线, 通过反演可得到横波速度。本文通过应用试验, 获得了小包庄铁矿某一条勘探剖面的横波速度结构, 在已知地质和钻孔资料的基础上, 基本探明了火山岩地层的厚度以及三叠系灰岩和闪长玢岩的深部结构。

(2) 由于天然源面波勘探方法具有抗干扰能力强、勘探深度大、经济环保等优点, 通过天然源面波勘探方法在小包庄铁矿区的应用试验, 表明该方法在存在较强电磁干扰地区的深部找矿工作中具有良好的应用前景。

参考文献 (References):

[1] 程培生, 王芝水. 庐枞火山岩盆地南部拔茅山铜矿深部找矿潜力分析[J]. 中国地质调查, 2018, 5(6): 18-23.
Cheng P S, Wang Z S. Deep ore prospecting potential analysis of Bamaoshan copper deposit in southern Luzong volcanic basin[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(6): 18-23.

[2] 何柳昌, 郑光文, 牛强强. 庐枞矿集区中东部七家山—马口地区深部找矿潜力分析[J]. 中国地质调查, 2018, 5(5): 21-28.
He L C, Zheng G W, Niu Q Q. Analysis on deep mineral prospec-

ting potential of Qijiashan - Makou area in central and eastern Luzong ore - concentrated area[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(5): 21-28.

[3] 许强平, 付光明, 周乾, 等. 庐枞盆地东北部马鞍山—黄屯—鹤毛河地区地球物理特征及找矿预测[J]. 华东地质, 2020, 41(2): 151-158.
Xu Q P, Fu G M, Zhou Q, et al. Geophysical characteristics and prospecting prediction of the Mabianshan - Huangtun - Hemaohe area in the northeastern Luzong basin[J]. East China Geology, 2020, 41(2): 151-158.

[4] 孙勇军, 徐佩芬, 凌魁群, 等. 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.
Sun Y J, Xu P F, Ling S Q, et al. Microtremor survey method and its progress[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 326-334.

[5] 赵东. 被动源面波勘探方法与应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 759-764.
Zhao D. Passive surface waves; methods and applications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 759-764.

[6] 徐义贤, 罗银河. 噪声地震学方法及其应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2618-2636.
Xu Y X, Luo Y H. Methods of ambient noise - based seismology and their applications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2618-2636.

[7] 何正勤, 丁志峰, 贾辉, 等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 492-498.
He Z Q, Ding Z F, Jia H, et al. To determine the velocity structure of shallow crust with surface wave information in Microtremors[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 492-498.

[8] 徐佩芬, 李传金, 凌魁群, 等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1923-1930.
Xu P F, Li C J, Ling S Q, et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1923-1930.

[9] 陈实, 李延清, 李同贺, 等. 天然源面波技术在乌鲁木齐城市地质调查中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1389-1398.
Chen S, Li Y Q, Li T H, et al. The application of natural source surface wave technology to urban geological survey of Urumqi[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1389-1398.

[10] 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, 12.
Wang Z D. Essentials and recent advances of the surface wave exploration technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(1): 1-6, 12.

[11] 张建清, 徐磊, 李鹏, 等. 综合物探技术在大坝渗漏探测中的试验研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 432-440.
Zhang J Q, Xu L, Li P, et al. Experimental study on comprehensive geophysical prospecting technology in dam leakage detection[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 432-440.

[12] 陈志洪, 赵玲, 李亚楠. 庐枞盆地隐伏正长花岗岩的锆石 U - Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 矿物岩石, 2016, 36(2): 55 -

61.
Chen Z H, Zhao L, Li Y N. Zircon U – Pb dating and Hf isotopic study on the buried Moyite in the Luzong basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2016, 36(2): 55 – 61.
- [13] 杜建国, 马晓红. 长江中下游成矿带陆相火山岩型铁矿成矿规律[J]. 安徽地质, 2011, 21(2): 131 – 137.
Du J G, Ma X H. Metallogeny of terrestrial volcanic ore deposits in ore belt along the Mid – Lower Yangtze River Reach [J]. Geology of Anhui, 2011, 21(2): 131 – 137.
- [14] 范裕, 邱宏, 张乐骏. 安徽庐枞盆地南部花岗岩的成岩时代及其意义[J]. 地质科学, 2014, 49(2): 631 – 650.
Fan Y, Qiu H, Zhang L J. Diagenetic age of the intrusions in southern part of the Lu – Zong Basin and its significance [J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(2): 631 – 650.
- [15] 毛景文, 段超, 刘佳林, 等. 陆相火山 – 侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 1 – 14.
Mao J W, Duan C, Liu J L, et al. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic – intrusive rocks – related polymetallic iron deposits in Middle – Lower Yangtze River Valley [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 1 – 14.
- [16] 何德锋, 高昌生, 张矿, 等. 安徽省庐江县小包庄铁矿矿床围岩蚀变分带特征[J]. 安徽地质, 2014, 24(2): 86 – 90.
He D F, Gao C S, Zhang K, et al. Zoning features of wall rock alteration of the Xiaobaozhuang iron ore deposit in Lujiang County, Anhui Province [J]. Geology of Anhui, 2014, 24(2): 86 – 90.
- [17] 刘一男, 范裕, 高昌生, 等. 长江中下游成矿带庐枞盆地小包庄铁矿床地质特征研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 319 – 333.
Liu Y N, Fan Y, Gao C S, et al. Geological characteristics of Xiaobaozhuang iron deposit in the Lu – Zong volcanic basin, the Middle – Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(2): 319 – 333.
- [18] 温冰冰, 张招崇, 谢秋红, 等. 安徽庐枞盆地小包庄铁矿的矿床地质特征和成矿机制以及与罗河铁矿的关系[J]. 地质学报, 2018, 92(7): 1474 – 1492.
Wen B B, Zhang Z C, Xie Q H, et al. Geological Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Xiaobaozhuang iron deposit and their genetic relationship with the Luohe iron deposit in the Lujian – Zongyang basin, Anhui Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(7): 1474 – 1492.
- [19] 单娜琳, 程志平, 刘云祯. 工程地震勘探 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 42 – 43.
Shan N L, Cheng Z P, Liu Y Z. Engineering Seismic Exploration [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 42 – 43.
- [20] 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2906 – 2922.
Liu Q H, Lu L Y, Wang K M. Review on the active and passive surface wave exploration method for the near – surface structure [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2906 – 2922.

Application of natural – source surface wave exploration in Xiaobaozhuang iron deposit of Anhui Province

LU Xing^{1,2}, CUI Xianwen^{1,2}, TANG Zhengjiang^{1,2}, GAO Changsheng³

(1. Geological Exploration Technologies Institute of Anhui Province, Anhui Hefei 230031, China; 2. Key Laboratory of Electrical Exploration of Anhui Province, Anhui Hefei 230031, China; 3. No. 327 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, Anhui Hefei 230011, China)

Abstract: In order to study the application effect of the natural – source surface wave exploration method in solid mineral exploration, especially in deep mineral exploration, the authors in this paper carried out study on the known exploration line of Xiaobaozhuang iron mine. The natural – source surface wave survey points were deployed in the linear way based on previous research, and a total of 32 survey points with a total length of 3 100 m were completed. The extended space autocorrelation method was used to obtain the dispersion curve of each measurement point, and shear wave velocity structure of the whole section was obtained by the inversion of dispersion curve and interpolation calculation. The stratigraphic structure and faults were divided according to the geological and borehole data. These exploration results were proven to be good, compared with the known data, indicating that the natural – source surface wave exploration method has a good application prospect, and the deep part of the study area has great prospecting potential.

Keywords: Xiaobaozhuang iron deposit; natural – source surface wave; shear wave velocity structure; deep mineral exploration

(责任编辑: 刘丹)