

·综述与进展·

# 深部矿产勘查的地震学方法:问题与前景 ——铜陵矿集区的应用实例

吕庆田<sup>1</sup>, 史大年<sup>1</sup>, 赵金花<sup>1</sup>, 严加永<sup>1</sup>, 徐明才<sup>2</sup>

LÜ Qingtian<sup>1</sup>, SHI Danian<sup>1</sup>, ZHAO Jinhua<sup>1</sup>, YAN Jiayong<sup>1</sup>, XU Mingcai<sup>2</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, 065000, Hebei, China*

**摘要:**深部资源是未来资源勘查的重要方向,地震技术在深部资源勘查中具有不可替代的优势。为试验该方法在探测深部“层控”矿床和浅表容矿构造方面的有效性,进一步完善金属矿地震勘查技术,在铜陵矿集区进行了反射地震和首波地震层析方法试验。结果显示,反射地震技术可以精确确定研究区的主要容矿层位石炭系黄龙组与泥盆系五通组接触面的空间分布,并能清晰反映地表5 km深度内的大尺度结构、构造;首波地震层析技术可以揭示浅表岩体形态。试验结果表明,该技术对在中国东部“第二富集带”寻找深部“层控”矿床具有潜在的应用价值,预示着广阔的应用前景。

**关键词:**深部资源勘查;反射地震;层析成像;容矿构造

中图分类号:P631.4 文献标识码:A 文章编号:1671-2552(2005)03-0211-08

Lü Q T, Shi D N, Zhao J H, Yan J Y, Xu M C. Seismic method for deeper mineral exploration: Problems and prospects—A case study of the Tongling ore district. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(3): 211-218

**Abstract:** The search for deeper mineral resources is an important direction in the future exploration, and the seismic technique has great advantages in deeper mineral exploration that other methods cannot compete with. In order to test its effectiveness in detecting deep “stratabound” deposits and shallow ore-hosting structure and perfect the seismic exploration technique for metallic mineral deposits, the authors carried out seismic reflection and head-wave tomographic imaging experiments in the Tongling ore district. The results show that the method can accurately determine the distribution of the ore-bearing horizon, the contact zone between the Devonian Wutong Formation and Carboniferous Huanglong Formation, and also the large-scale structure within 5 km below the surface. The head-wave tomographic imaging may reveal the morphology of the shallow-surface rock bodies. The methods show potential value for searching for “stratabound” mineral deposits in the deep “second ore-concentration belts” in eastern China and show broad prospects for their application.

**Key words:** deeper mineral exploration; seismic reflection; tomographic imaging; ore-hosting structure

资源与环境问题是21世纪人类社会面临的首要问题,实现资源的可持续利用是地球科学家的主要任务。向深部要资源、向海洋要资源是实现资源接替的战略选择,但二者都取决于技术的进步。相对于海洋资源来说,地球深部资源

对人类来说更为现实,技术难度相对较小。目前,世界上开采深度最深的矿床是位于南非西兰德的Western Deep Levels金矿<sup>[1]</sup>,已经开采到4800 m,不久可望达到5000 m。对中国来说,深部资源勘查更为重要,因为中国绝大部分地区的勘查深度

收稿日期:2004-12-02;修订日期:2005-01-04

科技项目:国土资源部“百人计划”项目和专项研究计划项目《大型矿集区深部精细结构与含矿信息》(编号:20010103)联合资助。

作者简介:吕庆田(1964-),男,博士,研究员,从事深部探测和金属矿勘查技术方法研究。E-mail:lqt@cags.net.cn

很浅,不足500 m,在500~5000 m之间仍具有巨大的找矿空间。然而,传统的金属矿勘查技术还不能满足深部资源勘查的要求。重、磁勘探方法垂向分辨率较低,且位场强度随距离平方反比衰减,在探测深部金属矿体方面存在严重缺陷;直流电法勘探深度太浅;电磁法深部分辨率通常又很低。因此,发展大探测深度( $\geq 500$  m)的地球物理技术是中国未来矿产资源勘查技术发展的重点。

地震技术,包括地震反射技术和层析成像技术,是深部探测最具有前景的技术之一,已广泛用于油气勘探和深部地质研究。该技术理论成熟、分辨率高,且探测深度大,在深部探测方面具有明显的优势。然而,由于技术和投入的原因,该技术在金属矿勘查的研究和应用方面受到限制。与石油地震勘探对比,金属矿地震勘探在数据采集和处理方面存在诸多困难:①地质构造复杂,一般不能很好地满足反射地震的基本条件;②地形条件复杂,金属矿多产出在山区,野外施工非常困难;③探测目标小,很多矿体甚至小于地震波波长,理论上决定不可能有效分辨;④矿区通常背景干扰严重,信噪比(S/N)低,不易获得好的反射数据;⑤现有工作方法、数据处理方法和解释思路还满足不了复杂金属矿区的要求。

近10年来,随着地震技术的巨大进步和找矿思路的改变,勘探学家已尝试将地震技术应用在金属矿勘查中<sup>[4]</sup>,并取得了初步效果。为进一步试验地震技术在金属矿勘探中的有

效性,笔者在铜陵矿集区的狮子山矿田开展了高分辨率反射地震<sup>[5]</sup>和层析成像<sup>[6]</sup>试验研究,通过3条互相平行的地震剖面,试验该技术在探测主要赋矿、控矿地层空间分布和浅层精细结构方面的能力。本文首先介绍反射地震在金属矿应用方面的主要问题和层析成像的基本原理,然后结合铜陵矿集区地震试验结果,讨论该技术存在的问题和应用前景。

### 1 金属矿反射地震应用的理论基础

建立在层状介质基础上的反射地震勘探理论已十分成熟,其数据采集、数据处理和近年发展的新技术,如3-D地震勘探技术、叠前深度偏移成像技术等,都可以直接用于金属矿深部勘查。鉴于篇幅所限,这里不做详细介绍。对于金属矿反射地震勘探用于直接找矿,笔者关心2个问题:①结晶岩地区矿石与围岩之间是否存在能引起反射的波阻抗差异?该问题是开展金属矿反射地震探测的理论基础。②多大的金属矿体用地震反射方法可以有效分辨或探测?该问题是金属矿地震反射探测的应用基础。

最近,Salisbury等<sup>[7]</sup>的研究回答了第1个问题。在对大量块状硫化物矿石和围岩的速度、密度实验室测量的基础上,他们发现矿石的 $v_p$ - $\rho$ 关系与普通硅酸盐岩石所遵循的Nafé-Drake曲线关系极为不同(图1)。普通硫化物的速度变化很大,从方铅矿的3.7 km/s,磁黄铁矿的4.7 km/s,闪锌矿、黄铜

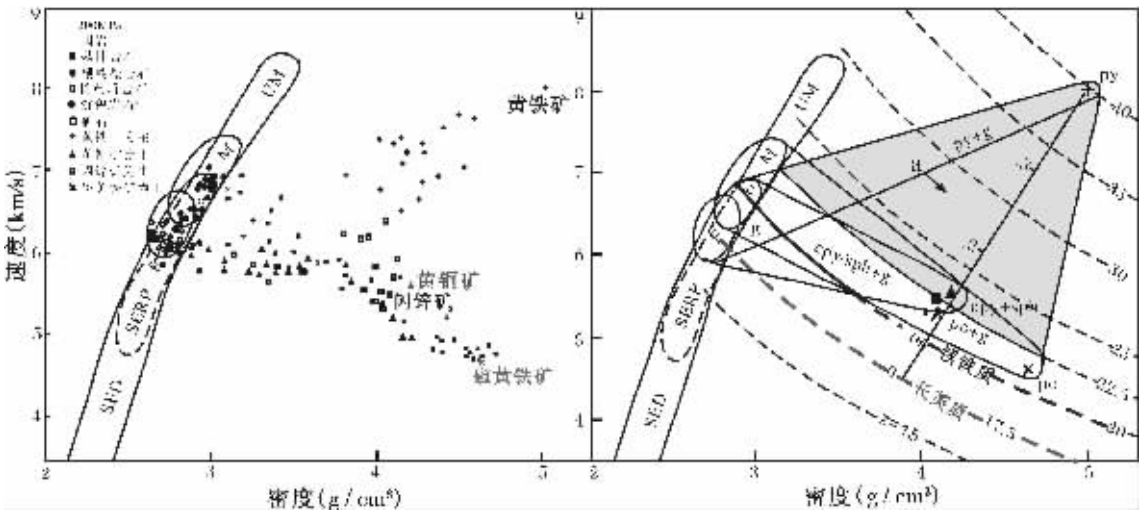


图1 硫化物矿石及围岩在围压为200 MPa时P波速度与密度之间的关系(左)

和波阻抗(Z)曲线叠加在硫化物矿石及硅酸盐岩石速度-密度关系曲线上(右),同时显示矿石相对于长英质岩石的反射系数,以及能产生反射的最小反射系数(0.06)

Fig.1 Left: Compressional wave velocity versus densities for sulfide ores and host rocks at a confining pressure of 200 MPa. Right: Lines of constant impedance (Z) superimposed on the velocity-density fields for silicate rocks and sulfide ores, and also shown the reflection coefficient for ores versus felsic rocks and the minimum reflection coefficient (0.06) required to produce a strong reflector  
右图中“a”对应矿石含50%黄铁矿和50%长英质脉石;矿石以主要硫化物来表示:cpy—黄铜矿,po—磁黄铁矿,py—黄铁矿,sph—闪锌矿,粗体符号表示端元值(如100%黄铁矿);F—长英质,M—镁铁质,SED—沉积岩(包括碳酸盐岩c),SERP—蛇纹岩,UM—超镁铁质岩(据参考文献[5])

矿的5.6 km/s,到黄铁矿的8.0 km/s。但是它们的密度都很高(分别为7.6、4.6、4.1~4.2、5.0 g/cm<sup>3</sup>),致使一般的矿石具有很高的波阻抗,通常都高于大多数长英质、镁铁质围岩的波阻抗。结果说明,在一般地质背景下,理论上块状硫化物矿体可以成为强的反射体,因此,使用高分辨率地震反射有可能直接对金属矿体进行定位。

多大的矿体能够用地震反射发现取决于地震的分辨率。分辨率是指能够分辨的2个点之间的最小距离。分辨率分垂向分辨率和水平分辨率,垂向分辨率取决于信号频率( $f$ ),而水平分辨率取决于菲涅耳带宽。菲涅耳带宽由反射体深度( $z$ )、反射体之上的平均速度( $v$ )和信号主频共同控制。垂向分辨的最小厚度通常由1/4波长来估计<sup>[6]</sup>:

$$h_{\min} = \lambda/4 = v/(4f) \quad (1)$$

很明显,提高分辨率或探测小目标的能力可以通过增加地震信号的频率来实现。地震信号的频率受地表地质条件、处理质量和采集参数控制。

水平分辨率由菲涅耳带宽决定,最小可分辨的水平尺寸由下式估计<sup>[6]</sup>:

$$d_f = (zv/2f)^{1/2} \quad (2)$$

从上述公式关系可以看出,水平分辨率随深度增加而明显降低。假设地震信号的主频为50 Hz、地层平均速度为6 km/s、目标深度为240 m时,理论上可以探测到厚30 m、宽120 m的矿体。如果目标深度为1 km,只有当目标体水平宽度 $d_f \geq 245$  m时才能被探测到(将 $z=1000$  m,  $v=6$  km/s,  $f=50$  Hz代入式(2)即得)。大型层控金属矿体通常大于此规模,因此,可以得出结论:大型金属矿体在1~2 km深度范围内是有可能被探测到的,金属矿地震可用于直接发现大型矿体,或有一定规模的容矿构造。

## 2 首波层析成像原理和模型试验

### 2.1 基本原理

首波层析成像技术是利用地震波初至的走时数据来反演地下速度结构的,所用的震相包括直达波和过临界点后的折射波。地震射线走时 $t$ 可以表示为慢度 $s(t)$ 沿路径 $l$ 的线积分:

$$t = \int_l s(t) dl \quad (3)$$

假定穿过地下介质有 $m$ 个地震波走时数据 $t_1, t_2, \dots, t_m$ ,将地下介质划分为 $n$ 个大小一样的网格,假定介质模型每个格子的慢度为 $S_j$ ,将(3)式写为离散形式:

$$t_i = \sum_{j=1}^n l_{ij} S_j, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中 $l_{ij}$ 为第 $i$ 条射线穿过第 $j$ 个模型网格的长度。对任意射线 $i$ ,  $l_{ij}$ 大多数为零,因为给定射线仅穿过模型很少部分网格。将(4)式写为矩阵形式,并定义慢度向量 $\mathbf{s}$ 、走时向量 $\mathbf{t}$ 和系数矩阵 $\mathbf{m}$ 如下:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & l_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4)式的矩阵形式为:

$$\mathbf{ms} = \mathbf{t} \quad (6)$$

(6)式为层析成像的基本方程组。方程组为大型稀疏方程组,一般情况是强超定的,即 $m \gg n$ ,而且是欠定的,即 $\mathbf{m}$ 的秩 $\text{Rang}(\mathbf{m}) < n$ ,因此,方程组通常不存在严格意义上的解。实际应用中通常采取非线性叠代法求解方程组(6),叠代过程包括正演(正问题)和线性反演(反问题)2个重要步骤。正问题的求解(已知模型慢度 $\mathbf{s}$ 和 $\mathbf{m}$ ,求射线走时 $\mathbf{t}$ )有多种方法:如打靶法、弯曲射线法、解波动方程法等。线性反问题求解(已知射线走时 $\mathbf{t}$ 和 $\mathbf{m}$ ,求模型慢度 $\mathbf{s}$ )也有很多方法,如代数重建法、迭代矩阵法、共轭方向/梯度法、神经网络法等。鉴于篇幅所限,本文不做详细描述。

### 2.2 模型试验

为了解该技术的实际应用条件,设计有效的数据采集观测系统和确定采集参数,笔者进行了系统的二维模型试验<sup>①</sup>。试验包括激发炮数、方位试验,低速夹层模型试验,速度完全反转情况下的模型试验,检波距与异常体尺寸关系试验和组合模型试验(图2)。试验结果给出该技术应用的基本条件和取得良好效果的观测系统设计、参数选择:①研究区地下速度总体上应随深度呈正梯度变化( $dv/dh > 0$ )。②沿剖面应均匀激发,尽可能使射线交叉。穿过模型射线越多,交叉越充分,模型分辨越好。③检波距(台站间距)决定实际分辨率。当检波距(台站间距)小于模型宽度的1/2时,可以取得满意的反演结果,但检波距太密,效果不是最好,主要原因是射线太多,增加方程组个数和叠代次数,造成一些噪音干扰。当检波距大于模型体宽度的4/5时,反演结果开始畸变,大于2倍的模型宽度,反演产生严重畸变。④当存在低速层且速度模型正好位于低速体内时,反演结果发生强烈畸变。畸变的原因是在模型中心部位无射线穿过(射线阴影区)。⑤当地下速度完全反转时,得不到任何地下速度分布,但这种情况一般很少见。

## 3 铜陵金属矿地震探测试验

### 3.1 成矿地质背景

研究区构造上位于扬子板块的前陆带,区域地层由古生代—早中生代浅海—深海相砂岩、碳酸盐岩和早中生代—新生代陆相碎屑岩、火山沉积岩组成<sup>[7]</sup>。研究区发育广泛的褶皱变形、断裂作用和岩浆活动。褶皱由若干背斜、向斜和复向斜组成,由北西到南东依此为:铜官山背斜、青山背斜、朱村向斜。区内断裂主要有3组:NE向、NW向、近EW向。EW向断裂为基底隐伏断裂,控制区内岩浆岩的分布。NE向断裂主要形

① 吕庆田,等.地震首波层析技术在大型矿集区深部三维构造研究中的应用.国土资源部“百人计划”项目研究报告,2004.

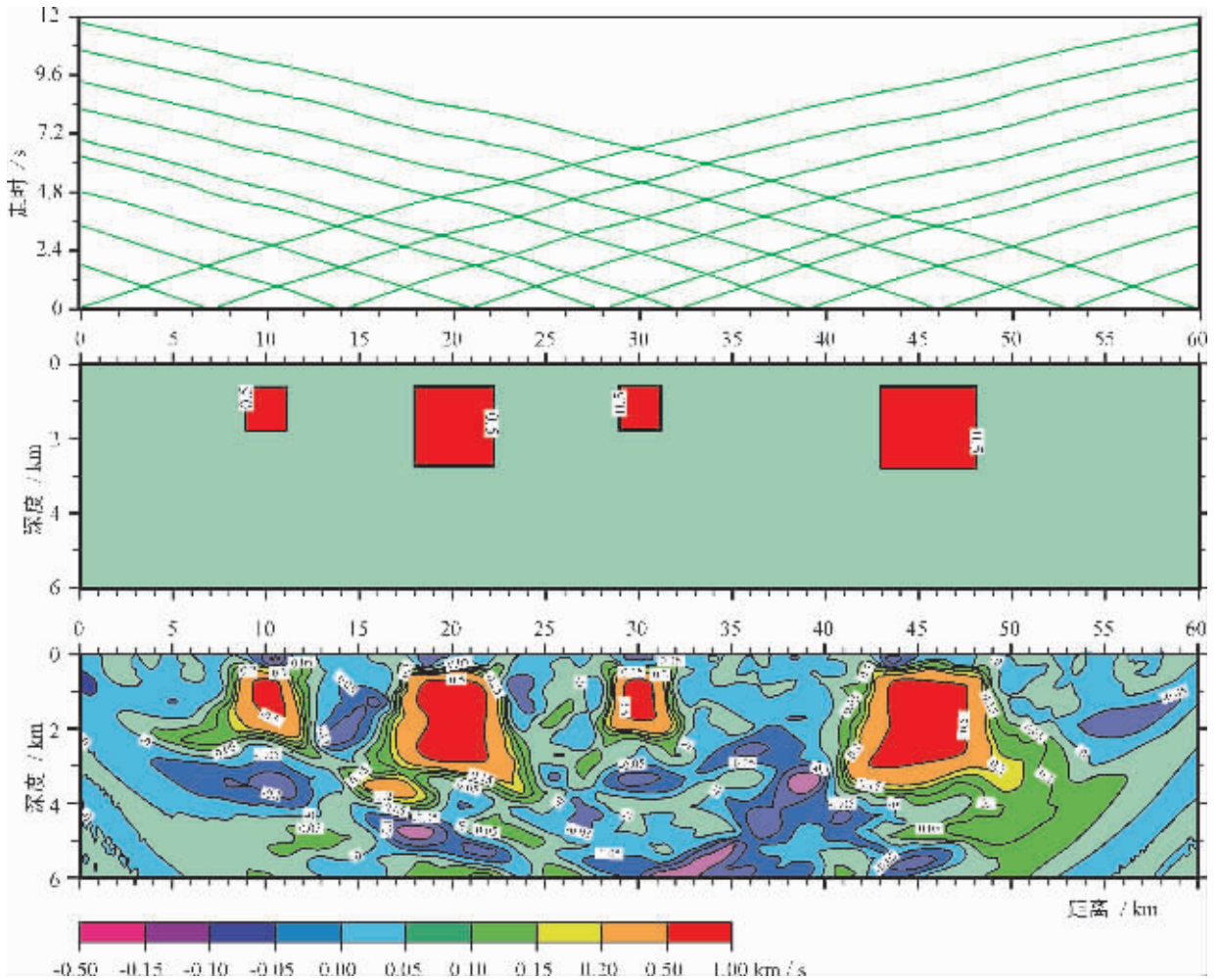


图2 组合模型情况下的走时曲线(上)、组合模型相对速度理论值(中)和组合模型反演结果(下)

Fig.2 Upper: the travel time curve of the multi-model; middle: the theoretical velocity of the multi-model relative to the background; lower: the inversion results of the multi-model

成于印支期,为一组与褶皱同期形成的压剪性断裂。NW向断裂以挤压破碎带为特征,常错断地层,规模一般较小。岩浆活动开始于晚三叠世,侏罗纪和白垩纪活动强烈。大多数岩体沿背斜和向斜褶皱轴侵入,侵入体岩性主要为辉石闪长岩、石英闪长岩和闪长岩(图3)。

研究区矿床类型主要有2类:矽卡岩型铜矿床和海底喷流沉积型铜多金属矿床,前者受岩体与围岩接触带控制;后者受石炭系黄龙组底部灰岩控制,但明显具有燕山期岩浆热液叠加改造的特点<sup>[8,9]</sup>。该层内已有冬瓜山、新桥、寺门口等多个大中型矿床产出,矿体一般呈透镜状和似层状。区域物性测量结果显示<sup>[10]</sup>,黄龙组灰岩地震P波平均速度为5.5 km/s,而其下的五通组砂岩平均P波速度为4.5 km/s,两者之间构成一强波阻抗界面。产出于该层位的冬瓜山矿床矿体规模巨大,已勘探的矿体范围长超过2 km,宽达1 km以上,且尚未尖灭,厚度一般在35~45 m之间,最厚达80~90 m,埋深在700~

1000 m之间。这种规模的矿体,采用地震反射法,理论上应该探测得到。因此,无论是容矿层物性特征,还是矿体本身的空间尺寸,都为在本地区开展地震成像试验创造了必要的前提条件。

### 3.2 地震数据采集与处理

采集参数:地震剖面呈北西—南东向穿过成矿密集的青山背斜,位于冬瓜山大型矿床的南侧边缘(图3)。共实施3条地震剖面试验,每条剖面长8 km,剖面间距400 m。数据采集使用ARIES 24位数字地震仪和REFTEK-125便携式地震仪。为兼顾2种地震探测方法对数据的不同要求,施工时采取灵活的观测系统和激发参数。具体如下:同时在3条剖面上布设860道检波器,间距依次为30 m、20 m、40 m,炮间距依次为120 m、80 m、160 m。采用爆炸震源激发,激发深度6~12 m,药量4~8 kg不等,取决于钻井条件。地震反射记录长度为14 s,采样间隔1 ms。为保证层析数据质量和射线穿透深度,

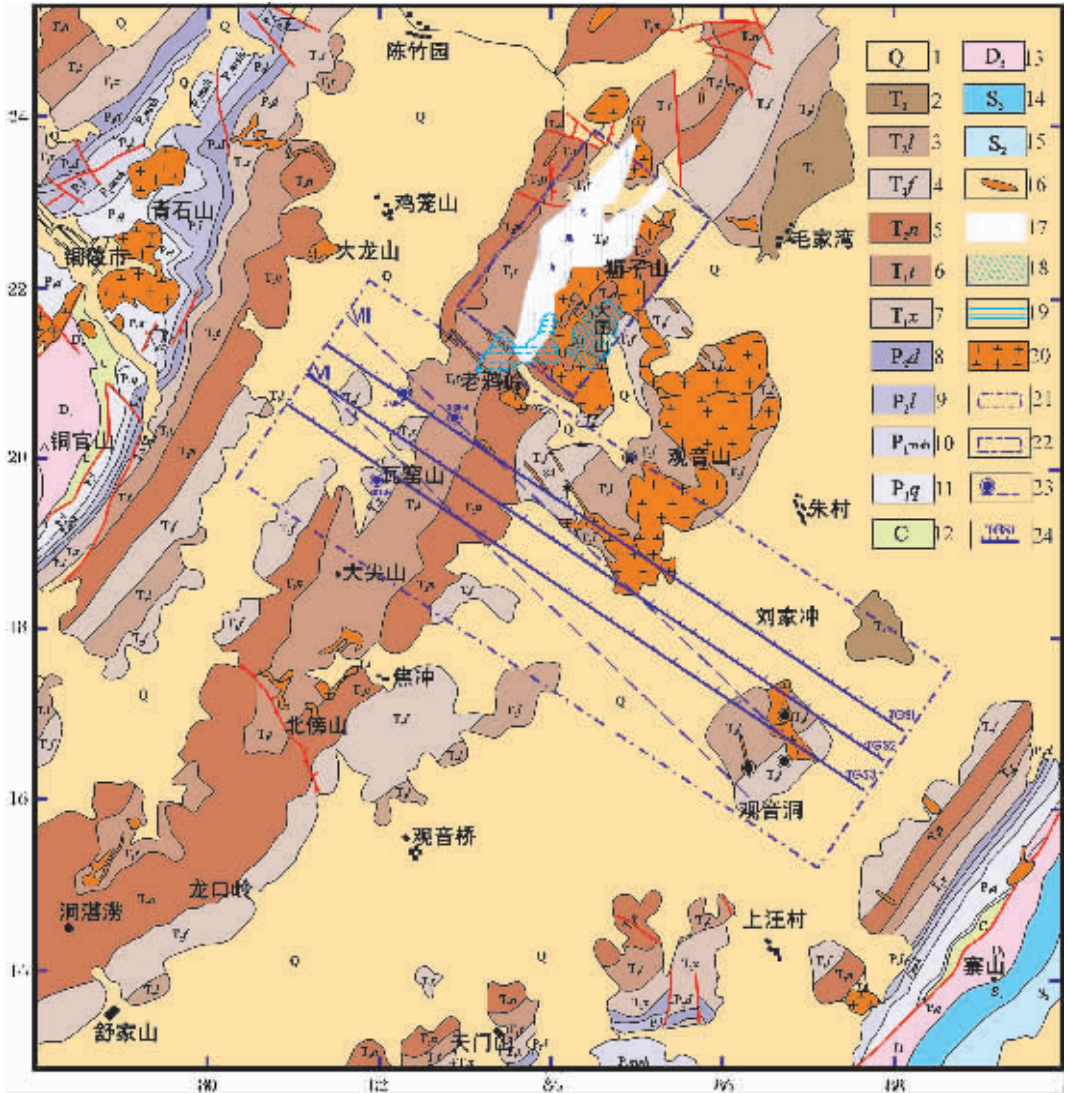


图3 铜陵狮子山矿田地质简图及地震反射测线位置  
(据1:20万地质图简化,1974)

Fig.3 Simplified geological map of the Shizishan ore field, Tongling, showing the location of seismic lines

- 1—第四系;2—上三叠统黄马青组;3—中三叠统龙头山组;4—中三叠统分水岭组;5—中三叠统南岭湖组;
- 6—下三叠统塔山组;7—下三叠统小凉亭组;8—上二叠统大龙组;9—上二叠统龙潭组;10—下二叠统茅口组;
- 11—下二叠统栖霞组;12—下石炭统黄龙组;13—上泥盆统五通组;14—上志留统茅山组;
- 15—中志留统坟头组;16—岩脉或铁帽;17—冬瓜山矿床;18—大团山矿床;19—老鸦岭矿床;
- 20—中酸性岩体;21—图4A范围;22—图5A范围;23—勘探线及钻孔;24—地震测线及编号

在剖面内每隔1 km、剖面两端延长线上每隔2 km放一大炮,激发药量大于24 kg。同时在剖面两端延长线上每隔2 km布设TEFTEK-125地震仪1台,接收大偏移距地震信号,以增加射线穿透深度。

反射地震数据处理:金属矿区地形复杂,地表速度变化大,信噪比(S/N)低,能否获得深部有用信息,高精度静校和去噪是资料处理的关键。笔者使用了一系列新技术进行高精

度静校正和去噪,以提高地震资料的信噪比和处理质量。资料处理在SUN工作站上完成,处理流程包括高程静校正、折射静校正、叠前去噪、地表一致性、反褶积、速度分析、动校(NMO)、层析静较、叠加、叠后去噪、叠加偏移等<sup>[4]</sup>。

层析成像数据处理:处理过程主要包括4步,即首波走时提取、模型参数化、叠代反演和可靠性测试。走时提取采用了手工与自动相结合的方式,共计从253炮中提取了

118281个走时数据。正演模型体由50 m×50 m×50 m三维网格单元组成,正演走时采用三维有限差分方法<sup>[11]</sup>计算。反演模型体由100 m×400 m×100 m三维网格单元组成,反演采用共轭梯度叠代反演方法。模型Y坐标与正北方向夹角为34°,X坐标基本垂直于地表构造方向。反演过程中采用了9次叠代,反演结果使得走时残差(均方根)从初始模型的97.0 ms降为结果模型的8.1 ms,数据改善率达91.6%。采用了“棋盘格”测试方法<sup>[12]</sup>测试层析成像反演结果的分辨情况。首先在结果模型中附加幅度为0.2 km/s正负相间、边长为300 m的“棋盘格”状速度异常,计算与野外观测系统完全一致的正演走时数据,然后再以结果模型为初始模型进行反演。理论上讲,如果“棋盘

格”形的速度异常得以恢复,可以认为反演结果中相应的部分是可靠的。反之,可靠性较差<sup>[14]</sup>。

3.3 主要成像特征及地质解释

反射地震特征及地质解释:以中心叠加剖面(TGS2)为例(图4-C),1 s的叠加剖面有2组反射清晰可见<sup>[15]</sup>,由浅到深依此为R1、R2。R1反射出现在剖面右侧,对应位置在4.6~7 km之间,形态呈向下凸出的弧形,深度在0.5 s(TWT)左右,约1.0 km(假定平均速度为4.0 km/s)。该反射对应地表的朱村向斜,为第四系沉积和古近系砂砾岩。根据区域地层分布和岩性特征,把R1解释为向斜底部的中三叠统龙头山组灰岩。R2反射出现在剖面中部大部分地段,对应位置在1.2~7 km之

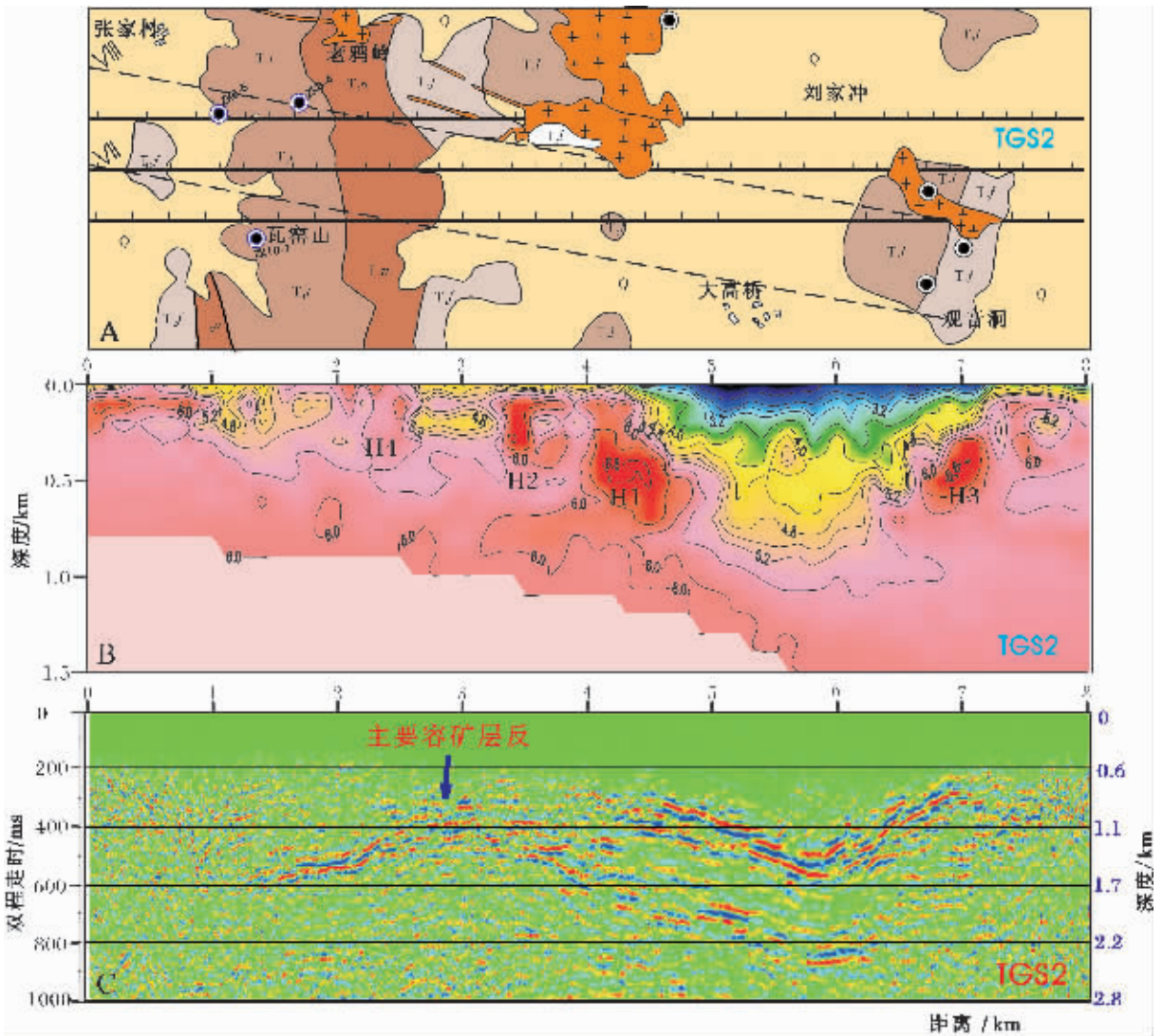


图4 地震剖面位置及地质简图(A)(位置见图3,图例同图3)、层析中心(TGS2)剖面(B)和中心剖面(TGS2)叠加剖面(C)  
 Fig.4 A: Simplified geological map showing the seismic lines (symbols as in Fig. 3); B: the central slice (TGS2) of the tomographic inversion; C: stacked section of the central profile (TGS2)

① 安徽省地矿局321地质队.安徽狮子山矿田勘查报告.1995.

间,是叠加剖面上连续性最好的反射。空间形态类似正弦曲线,深度变化在0.4~0.9 s(TWT)之间,约1.1~2.5 km(假设平均速度为5.5 km/s)。根据已有勘探线钻孔资料<sup>①</sup>,主要容矿层(石炭纪黄龙组灰岩底部)的深度从冬瓜山主矿体的近700 m向南逐渐变深,最南端钻孔控制的矿体顶深已达913 m,按照这种变化趋势推测,中心剖面经过位置容矿层的深度最浅也应在1000 m左右。R2反射的深度与推测容矿层的深度基本一致。因此,笔者把R2反射解释为狮子山矿田的容矿层,即黄龙组灰岩与五通组砂岩之间的界面(不排除是矿体的可能性)。R2连续反射层在局部出现错位或不连续,可能为岩体侵入或断层引起的,它们破坏了原反射层的连续性。层析成像特征及地质解释:以中心层析切片(TGS2)为例(图4-B),显示以下速度特征。在剖面4.4~7km之间存在一明显的“盆状”低速体,以速度5.5 km/s(相当于灰岩平均速度)为界,低速体深度在0.9~1.0 km之间,与R1反射的深度基本相同,解释为朱村向斜。在低速体两侧各有一高速异常体(H1、H2),速度大于6.0 km/s。地表地质图显示,在两高速异常附近都有岩体出露,因此,笔者将此高速异常解释为隐伏岩体。在剖面左侧0~4 km之间,除了出现局部高速体(H3,大于6.0 km/s)和低速体(小于4.5 km/s)外,大多数地方的速度在5.0~6.0 km/s之间,与灰岩速度吻合,因此解释为三叠系灰岩。局部高速体解释为岩株,局部低速体解释为断层破碎带。这一解释与地表地质情况吻合。

#### 4 应用效果、存在问题和应用前景

冬瓜山矿床总体位于700 m以下,是目前中国已开采的典型的深部矿床。该矿床的发现对中国东部深部“第二富集带”的找矿勘查有重要意义,为解决危机矿山接替资源问题指明了勘查方向。

本次金属矿地震试验剖面虽然没有直接穿过冬瓜山矿体的中心部位,但剖面离矿体最南端仅1 km左右,而且冬瓜山矿体本身向南并没有封闭,因此,反射地震发现的R2反射极有可能是冬瓜山矿床的南部延伸。这一推论还可以从R2的形态、深度和冬瓜山矿体顶面的形态、深度得到佐证(图5)。仔细观察R2反射波组,不难发现反射同相轴不连续,而且有一定宽度,难于精确确定R2的深度。引起这种现象的原因可能是由于静校正不彻底或地下构造复杂。虽然存在一些问题,但该技术还是可以有效确定大型“层控”矿体或容矿层的大致形态和深度的。首波层析成像可以反映近地表速度的分布,地质效果较好,但有效探测深度太浅。总之,反射地震技术和首波层析成像技术在深部金属矿勘探中还存在诸多技术问题,但随着技术的进步,笔者确信该技术未来具有广阔的应用前景。具体问题和前景分析如下。

(1)对金属矿区进行反射地震勘探,在探测深度和分辨率上有不可替代的优势,但同时也存在较大的技术和经济上的问题,主要表现在金属矿区地表速度变化大、地形起伏大,静校正难于彻底;信噪比低,弱信息提取困难;使用现有大

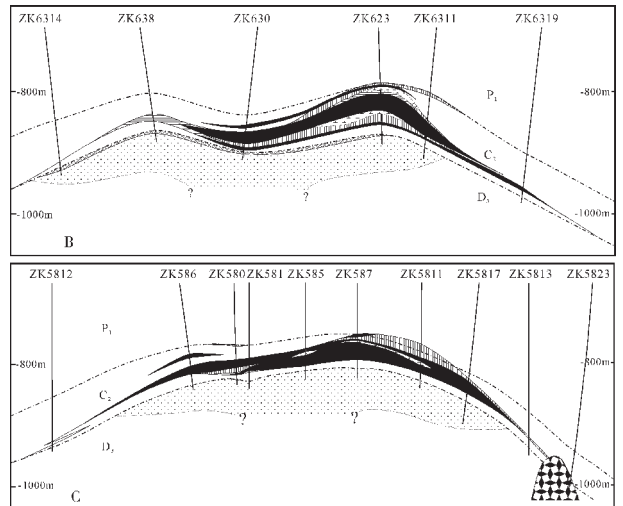
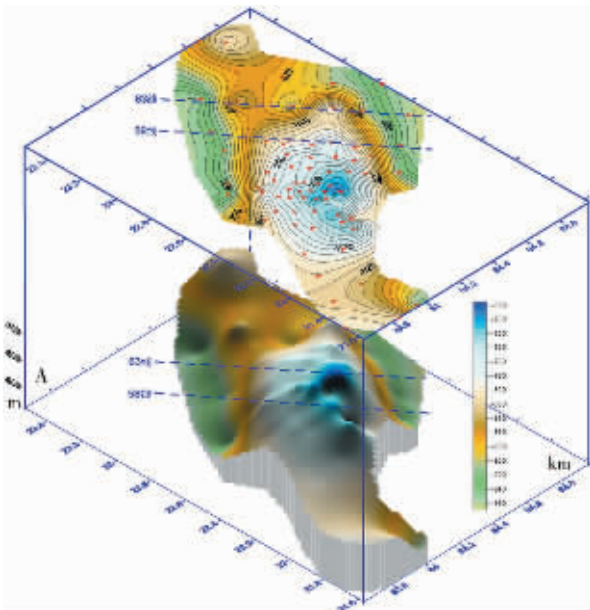


图5 冬瓜山矿床矿体顶面深度立体阴影图(A,位置见图3)、63线勘探剖面显示的矿体形态(B)和58线勘探剖面显示的矿体形态(C)<sup>①</sup>

Fig.5 A: 3D color image showing the depth variation of the top of the orebody of the Dongguashan ore deposit; B: exploration profile No. 63 showing the shape of the orebody; C: exploration profile No. 58 showing the shape of the orebody

① 安徽省地矿局321地质队.安徽铜陵狮子山矿区冬瓜山南段勘探报告.1995.

型地震设备施工比较困难,成本相对较高。此外,正如第1节分析的那样,反射地震只适应于深部大型矿体或容矿构造的探测,对小型矿体,由于地震信号的主频决定不可能探测得到。但随着分布式地震仪逐渐向小型化、高精度方向的不断发展,野外数据采集成本会大幅度减低;数据处理新技术不断出现,可控震源的发展使震源信号频率不断提高,相信在不久的将来反射地震技术在金属矿勘探中会有较好的应用前景。

(2)首波层析成像可以揭示浅层速度分布,直观地反映岩体、构造的形态。但探测深度受炮检距和地下速度分布影响较大。金属矿区一般很难满足速度随深度呈正梯度变化的基本条件。解决途径之一是增加炮检距和激发能量,另一途径是利用直达波走时和反射波走时同时进行成像反演。随着分布式小型地震仪(如REFTEK-125)的发展,方法成本较低,在金属矿区施工简单易行,可作为下一步研究的主要方向。

(3)在资源日趋紧张的今天,向深部要资源是必然的选择,地震探测技术无疑是未来深部勘查的重要手段。铜陵矿集区的地震探测试验已经验证了该技术在探测浅层地壳结构和主要赋矿层位(黄龙组与五通组的接触面)方面的有效性,探测结果为在长江中下游地区寻找深部隐伏矿提供了依据,对区域找矿方向有重要指导意义,同时也显示出该技术的应用潜力。

致谢:项目执行期间自始至终得到了国土资源部国际合作与科技司黄宗理司长、崔岩副司长、高平处长等的支持和关心,刘士毅、于占元、唐文榜、吴宣志、高锐等专家参与了多次研究方案讨论和具体指导。野外数据采集由江苏油田安徽勘探处完成。劳雷工业公司北京代表处刘国庆、程大祥高级工程师协助从Geometrics公司租借RefTek-125和StrataVisor™NZ地震仪,并参加了部分野外工作。杨竹森、蒙义峰博士参加了野外数据采集工作。项目专家委员会各位专家对项

目给予了悉心指导和大力支持,并提出许多建设性的意见和建议。刘士毅研究员审阅了全文,并提出了宝贵意见。在此一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1][http://www.southafrica.info/plan\\_trip/holiday/culture\\_heritage/goldreef.htm](http://www.southafrica.info/plan_trip/holiday/culture_heritage/goldreef.htm).
- [2]Milkereit B, Eaton D, Wu J, et al. Seismic imaging of massive sulfide deposits: part II. reflection seismic profiling[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 829-834.
- [3]吕庆田,侯增谦,史大年,等.铜陵狮子山金属矿地震探测结果及对区域找矿的意义[J]. *矿床地质*, 2004, 23(3): 390-398.
- [4]史大年,吕庆田,徐明才,等.铜陵矿集区浅部地壳结构的地震层析研究[J]. *矿床地质*, 2004, 22(3): 383-389.
- [5]Salisbury M H, Milkereit B, Bleeker W. Seismic imaging of massive sulfide deposits: part I. rock properties[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 821-828.
- [6]Yilmaz Ö. Seismic data processing[A]. In: Doherty S M ed. *Series: Investigation in geophysics, volume 2*[C]. Society of Exploration Geophysicists, USA, 1987.
- [7]常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游铁铜成矿带[M].北京:地质出版社, 1998. 1-379.
- [8]唐永成,吴言昌,储国正.安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M].北京:地质出版社, 1991. 1-351.
- [9]杨竹森,侯增谦,蒙义峰,等.安徽铜陵矿集区海西期喷流—沉积流体系统时空结构[J]. *矿床地质*, 2004, 23(3): 281-297.
- [10]陈沪生,张永鸿,徐师文,等.下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价[M].北京:地质出版社, 1999. 1-287.
- [11]Vidale J E. Finite-difference calculation of travel times in three dimensions[J]. *Geophysics*, 1990, 55: 521-526.
- [12]Hearn T M, J F Ni. Pn velocities beneath continental collision zones: The Turkish-Iranian Plateau[J]. *Geophys. J. Int.*, 1994, 117: 273-283.