

文章编号:0258-7106(2004)03-0390-09

铜陵狮子山金属矿地震反射结果及对区域找矿的意义*

吕庆田¹ 侯增谦¹ 史大年¹ 赵金花¹ 徐明才² 柴铭涛²

(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)

摘要 “层控”砂卡岩型矿床在长江中下游成矿带占有重要的地位,绝大多数受控于泥盆系五通组与石炭系黄龙组的接触面。因此,长期以来“五通组砂岩+岩体”已成为寻找此类矿床的主要找矿模型。为了探测黄龙组灰岩与五通组砂岩的接触面在铜陵矿集区的深度和展布,为隐伏矿预测提供依据,完善金属矿区地震反射技术,笔者在铜陵矿集区测试了3条地震反射剖面。结果显示:地震反射可以精确确定五通组顶面的分布,该控矿层深度在1~2 km之间变化,大致呈复背斜形状,与地表的青山背斜相吻合,该层之下还存在2个明显的岩性界面,推测分别为奥陶系灰岩顶面和基底面,其形态表现为更紧密的背斜,而且与五通组顶板反射面形态不耦合,反映了非耦合变形过程。这种变形有利于产生层间滑脱,为成矿流体迁移创造了有利条件。本次试验结果表明,在地表到2 km范围内,按照“岩体+赋矿层位”的找矿模型在铜陵矿集区进行深部找矿仍有巨大潜力。

关键词 地球物理 地震反射 分辨率 成矿系统 五通组砂岩 控矿构造

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

长期以来,金属矿勘探主要依靠传统的电法、重力和磁法来确定矿体的位置,由于方法的局限,它们的有效勘探深度一般在几百米。然而,金属矿的开采深度已经超过3 km以上。随着地表矿产的勘查程度越来越高,发现新矿床的概率越来越小,向深部要资源逐渐成为实现资源可持续发展的重要途径。因此,发展大探测深度(≥ 1 km)的地球物理技术是未来矿产资源勘查技术发展的重点,具有重要的现实意义。

广泛用于石油勘探的反射地震技术是深部探测最具有前景的技术,然而,由于技术和经费的原因,金属矿的地震勘探技术没有得到足够的重视和发展。与石油地震勘探相比,金属矿地震勘探有其自身的技术困难:①地质构造复杂,金属矿区往往经过强烈的构造变动和岩浆活动,矿体成层性差,一般不能满足基于层状介质建立起来的反射地震方法和原理;②地形条件复杂,金属矿多产出在地形条件复杂的造山带,野外施工非常困难;③探测目标小,金属矿体在空间规模上要远远小于油气藏,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,不易获得好的反射记录。

近十年来,随着地震技术的巨大进步及对成矿系统研究的深入,勘探学家已广泛将此技术应用在金属矿勘查中及成矿动力学的理论研究上,并逐渐形成了3个新的应用技术,取得了显著效果。一是成矿带深地壳反射技术,它提供成矿带的区域构造框架和成矿系统的具体信息,如穿过西澳Mt. Isa金矿省的深地震反射剖面清楚地揭示出地壳内成矿流体的运移路径(Drummond et al., 1993; 1997; 2000);二是高分辨率地震反射技术,直接用于金属矿勘探,尤其对探测容矿构造和矿体周围的蚀变带效果更好(Spencer et al., 1993; Verpaelst et al., 1995; Milkereit et al., 1996);三是地震层析成像技术,可以直接给出矿体和容矿构造的空间形态(Goultly, 1993)。

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和层析成像探测(史大年等,2004)研究,通过3条互相平行的地震剖面,试验高分辨率反射地震在探测该矿区主要赋矿地层(五通组与黄龙组不连续接触面)、小岩体和层控矿体等方面的能力。

* 本文由国土资源部专项研究计划(编号:20010103),国家自然科学基金重点基金(编号:40234051)和国土资源部“百人计划”资助
第一作者简介 吕庆田,男,1964年生,博士,研究员,长期从事深部探测和金属矿勘查技术方法研究。
收稿日期 2004-01-18; 改回日期 2004-06-08。张绮玲编辑。

预期达到以下目标:揭示该地区主要赋矿层的空间分布,为隐伏矿的预测提供依据;完善金属矿反射地震数据采集和处理技术。本文介绍此次反射地震试验的初步结果,并对其区域找矿意义进行了讨论。

1 区域地质与成矿特征

研究区构造上位于扬子板块的前陆带,铜马断隆的南端铜陵隆起内(图1),区域地层主要由古生代

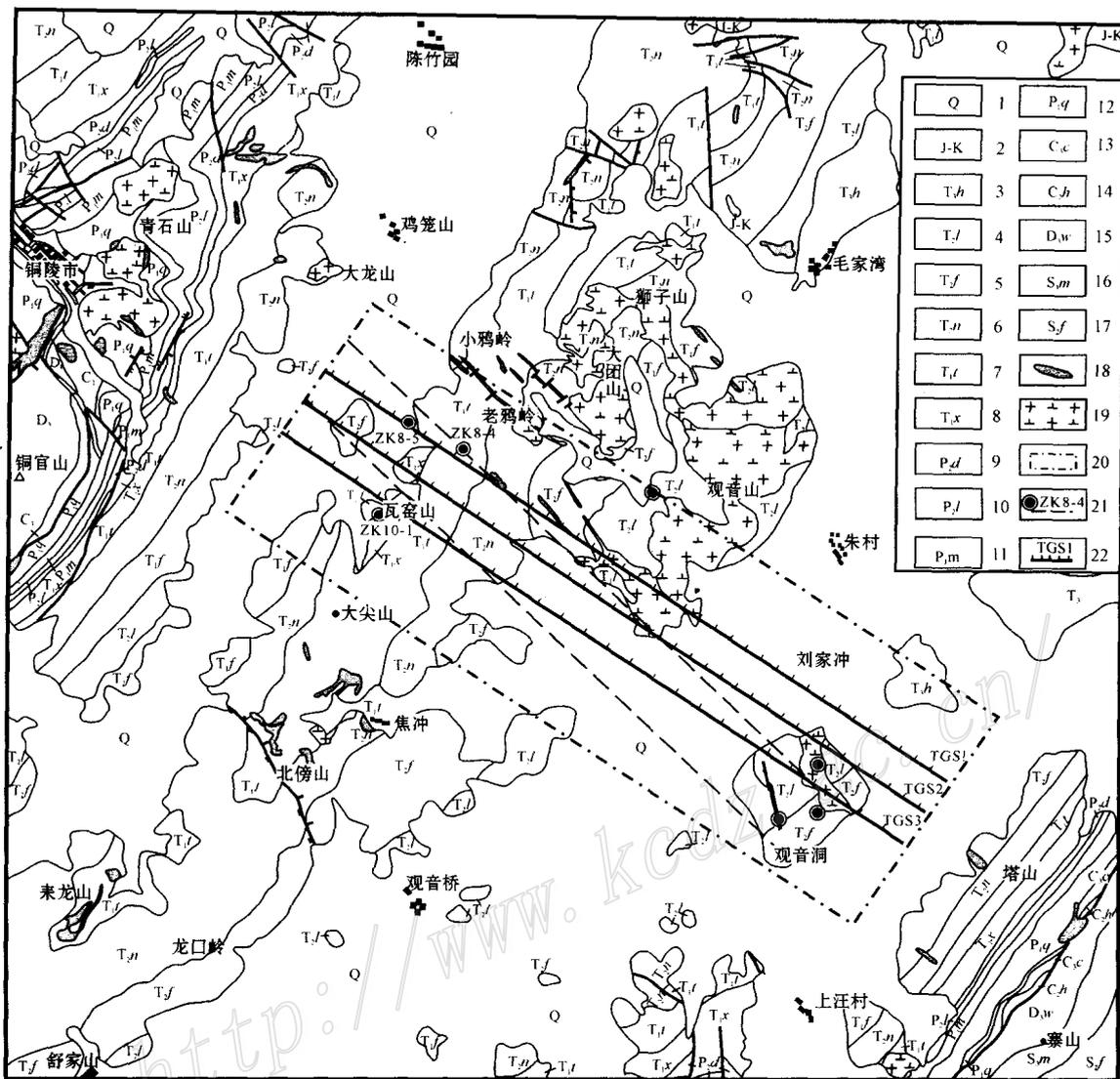


图 1 铜陵狮子山矿田地地质简图及地震反射测线位置(据 1:20 万地质图简化)

1—第四系; 2—侏罗系、白垩系; 3—上三叠统黄马青组; 4—中三叠统龙头山组; 5—中三叠统分水岭组; 6—中三叠统南岭湖组; 7—下三叠统塔山组; 8—下三叠统小凉亭组; 9—上二叠统大龙组; 10—上二叠统龙潭组; 11—下二叠统茅口组; 12—下二叠统栖霞组; 13—上石炭统船山组; 14—中石炭统黄龙组; 15—上泥盆统五通组; 16—上志留统茅山组; 17—中志留统坟头组; 18—岩脉和铁帽; 19—中酸性岩体; 20—图 3A 范围; 21—勘探线及钻孔; 22—地震测线及编号

Fig.1 Simplified geological map of the Shizishan orefield in Tongling, showing the location of seismic lines (after 1:200 000 geological map by Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources)

1—Quaternary; 2—Jurassic and Cretaceous; 3—Upper Triassic Huangmaqing Formation; 4—Middle Triassic Longtoushan Formation; 5—Middle Triassic Fenshuiling Formation; 6—Middle Triassic Nanlinghu Formation; 7—Lower Triassic Tashan Formation; 8—Lower Triassic Xiaoliangting Formation; 9—Upper Permian Dalong Formation; 10—Upper Permian Longtan Formation; 11—Lower Permian Maokou Formation; 12—Lower Permian Qixia Formation; 13—Upper Carboniferous Chuanshan Formation; 14—Middle Carboniferous Huanglong Formation; 15—Upper Devonian Wutong Formation; 16—Upper Silurian Maoshan Formation; 17—Lower Silurian Fentou Formation; 18—Vein and gossan; 19—Intermediate-acid granite; 20—Limits of Fig.3A; 21—Exploration lines and drill hole; 22—Seismic line and serial number

● 安徽省地矿局. 1969. 铜陵幅区域地质矿产调查报告(1:20 万).

—早中生代浅海-深海相砂岩及碳酸盐岩和早中生代—新生代陆相碎屑岩及火山沉积岩组成(常印佛等,1991;唐永成等,1998)。区内出露的地层有:志留系浅海-深海相粉砂岩和页岩互层;泥盆系陆相和湖泊相沉积的砂岩和细砂岩互层;石炭系浅海-海陆交互相碳酸盐岩及砂页岩;二叠系深海相硅质页岩,硅质岩夹海陆交互相页岩及砂岩;三叠系浅海-半深海相碳酸盐岩及页岩、泥岩、砂岩;第三系、第四系砂砾岩和粘土^①。

受华南板块与华北板块早中生代碰撞的影响,区域上发生了广泛的褶皱变形、断裂作用和岩浆活动(常印佛等,1991;Okay et al., 1993)。褶皱以轴向 NE、NNE 向的宽缓背斜、向斜为特征。研究区及附近由若干背斜、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。其中地震剖面穿过的青山背斜呈不对称状,北西翼较陡,南东翼较缓,浅部尤其明显,向深部逐渐舒缓开阔;背斜轴呈北东向“S”形展布,轴部挤压强烈。区内断裂主要有 4 组: NNE 向, NNW 向, 近 EW 向和 NEE 向。EW 向断裂为基底隐伏断裂,控制区内岩浆岩的分布(常印佛等,1991;刘文灿等,1996)。NNE 向断裂主要形成于印支期,为一组与褶皱同期形成的压剪性断裂。NNW 向断裂以挤压破碎带为特征,常错断地层,规模一般较小。这些断裂和层间滑脱在空间上构成纵横交错的网络状构造格架,岩浆岩沿此网络格架侵入,形成岩墙状侵入体及岩脉、岩枝群,在不同水平上互相沟通,组成长达 3 km、宽约 1 km 的浅成、超浅成相大型网络状岩墙、岩枝系。岩浆岩为辉石闪长岩、含石英闪长岩和闪长岩,从早到晚,岩浆具有由中偏基性向中偏酸性、富钾方向演化的趋势。K-Ar 法同位素年龄为 147~160 Ma(常印佛等,1991),主体属燕山早期,具同熔岩浆的某些特征。

研究区矿床以“层状”矽卡岩型矿床为主,具有沉积-热液叠加复合成矿的特点,即在海西期喷流沉积成矿的基础上,经燕山期岩浆热液叠加改造成矿(唐永成等,1998;杨竹森等,2004)。区内有冬瓜山、狮子山、老鸭岭、花树坡和大团山等大中型矿床。主要矿体均分布于上述构造-岩浆岩网络格架上,矿体以似层状为主。似层状矿体赋存层位(界面)主要是石炭系黄龙组(C_2h)底部及其与上泥盆统五通组

(D_3w)之间的界面,已经在该层位发现的大型矿床有铜官山、冬瓜山和新桥等。虽然该层位以上还存在若干容矿层,即具有“多层楼”的容矿结构,但能形成大型矿床的只有黄龙组底部这个层位。区域物性测量结果显示(陈沪生等,1999),黄龙组灰岩地震 P 波平均速度为 5.5 km/s,而五通组砂岩平均 P 波速度为 4.5 km/s,两者之间构成一强波组抗界面。另外,在该层位上已发现的冬瓜山矿体规模巨大,长达千余米以上,宽达数百米尚未尖灭,厚度一般在 35~45 m,最厚达 80~90 m,埋深在 650~1 000 m 间。这种尺度的矿床,理论上用地震反射法完全可以探测得到(见第三节分析)。因此,无论是容矿层的物性特征,还是矿体本身的空间尺寸,都为在本地区开展地震反射法试验提供了必要的前提条件。

2 地震反射数据采集和处理

2.1 地震剖面及采集参数

高分辨率反射地震剖面呈北西-南东向穿过成矿富集的青山背斜,并跨过朱村向斜(图 1),位于狮子山、冬瓜山、老鸭岭等大型矿床的南侧。共实测 3 条高分辨率反射地震剖面,每条剖面长 8 km,剖面间距 400 m。为了便于野外施工,同时获得更多的信息,一次性在 3 条剖面上布设 840 道检波器,形成接近三维地震勘探的观测系统。野外数据采集使用加拿大 ARIES 24 位数字地震仪器,由江苏油田安徽勘探处于 2002 年 11~12 月完成。施工时采取逐线放炮的方法,炮线与检波线重合。具体观测系统参数如下:3 条剖面由南西到北东道间距依次为:30 m、20 m、40 m,用 9 个检波器组合检波;炮间距依次为:120 m、80 m、160 m,采用爆炸震源,端点或中间放炮,药量 4~8 kg 不等,井深 6~12 m;复盖次数 15 次以上,记录长度为 14 s,采样间隔 1 ms。

2.2 数据处理及结果

金属矿区地形复杂,地表速度变化很大,工业和人文干扰严重,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。为此,笔者使用一系列方法进行了试验,如基于综合全局寻优的高精度静校正研究、矢量分解法去噪方法研究等,并将研究成果应用到实际资料处理中,改善地震资料的信噪比

① 安徽省地矿局,1969. 铜陵幅区域地质矿产调查报告(1:20万)。

和分辨率^①。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、单道预测反褶积、速度分析、动校(NMO)、剩余静校、综合全局寻优静校、叠加及叠后去噪、叠加偏移等。

(1) 叠前去噪试验:原始资料中包括明显的规则干扰和随机干扰,对于规则干扰在振幅补偿前进行去规则干扰处理,取得明显效果。对于随机干扰,由于干扰十分严重,除部分炮集远偏移距在浅层有反射波显示外,无法识别有效波同相轴。因此,叠前去随机干扰十分困难,也看不到效果,而水平叠加是公认的压噪手段,所以去随机干扰在叠后进行。

(2) 静校正试验:静校正问题是处理好资料的关键,笔者采用了常规静校正方法和全局寻优静校正方法相结合来解决此问题。① 常规静校正方法:采用了高程静校正,折射波静校正和反射波自动剩余静校正,取得了较好的效果;② 全局寻优方法:常规静校正方法虽然取得了一定效果,但并不十分理想,因此,在常规方法基础上,试验了综合最大能量

法、模拟退火法和遗传算法的优势算法——综合全局寻优静校正方法,并取得了明显的效果。

(3) 叠前反褶积试验:叠前反褶积是提高资料分辨率的主要处理手段。解决静校正问题之后,笔者作了大量的反褶积试验,包括:① 地表一致性反褶积,进行了预测步长为 16 ms、20 ms、24 ms、32 ms 和 40 ms 的试验,考虑到此反褶积目的是以整形为主,以提高分辨率为其次,因此,采用了预测步长为 32 ms 的地表一致性反褶积;② 单道预测反褶积,为进一步提高分辨率,在地表一致性反褶积的基础上,笔者又串联了单道预测反褶积,通过试验,采用了 3 个时窗,预测步长分别为 8 ms、16 ms 和 24 ms,通过地表一致性反褶积和串联单道预测反褶积,在保证信噪比的同时,有效提高了分辨率。

(4) 精细速度分析:正确的叠加速度是提高叠加效果和压制噪音的保障。通过速度扫描,精细速度分析和剩余静校正迭代,提供了合理的叠加速度。

(5) 叠后去噪:通过上述处理,使资料的信噪比有了很大的提高,在剖面上已经有了比较连续的同

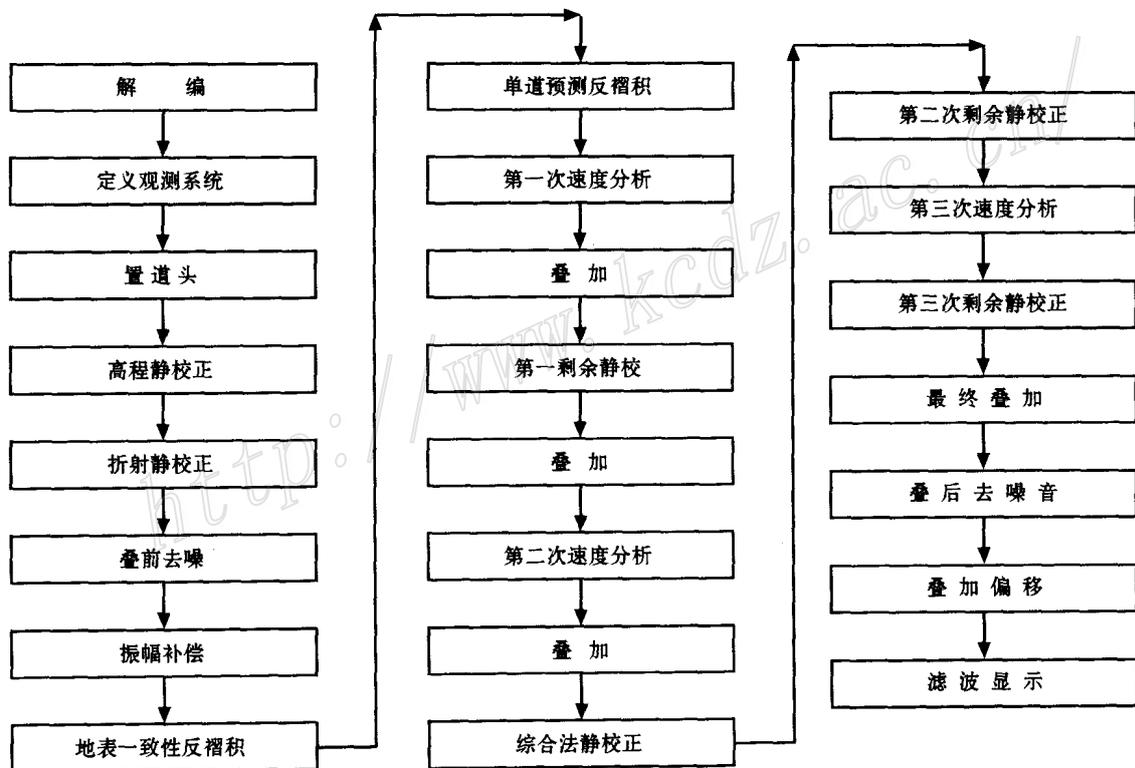


图 2 地震反射数据处理流程图

Fig.2 Flow chart of seismic data processing

① 常印佛, 裴荣富, 侯增谦, 等. 2003. “大型矿集区深部精细结构与含矿信息”阶段研究报告.

相轴,为继续去噪提供了条件。笔者又采用了矢量分解去噪法,使资料的信噪比有了进一步的提高。

(6) 效果分析:由于试验采用了特殊观测系统和激发方案,处理结果得到了3条纵线叠加剖面 and 3条非纵线叠加剖面^①。基于原始资料的实际情况,通过对处理图件的分析,笔者认为静校正问题基本得以解决,处理效果好,为地质解释提供了优质剖面。

3 地质解释及对隐伏矿勘查的意义

3.1 地震反射的分辨率

矿体能否成为有效的反射体主要取决于两个因素,一是矿体与围岩的波阻抗差异,二是矿体大小、形状、倾角以及数据采集观测系统等。对于第一个因素,Salisbury等(1996)在对大量块状硫化物矿石实验室测量其速度、密度的基础上,发现矿石的 v_p - ρ 关系与普通硅酸盐岩石所遵循的Nafe-Drake线性关系(Ludwig et al., 1971)极为不同。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 g/cm³, 4.6 g/cm³, 4.1~4.2, 5.0 g/cm³),致使一般的矿石(中间品位)具有很高的波阻抗。这表明块状硫化物矿体与大多数围岩之间存在较大的波阻抗差。对于第二个因素,在矿体近似水平的情况下,矿体能否被分辨取决于由地震波的波长决定的菲涅耳带宽。尽管不存在简单的关系来控制地震反射的探测能力,但是地震反射的分辨率却与探测目标的直径(d),厚度(h),埋深(z),地层速度(v)和使用地震波频率(f)有关。在实际工作中,既要考虑垂向分辨率,又要考虑水平分辨率。对垂向分辨率,地震反射能够分辨的最小厚度可以由1/4波长来估计:

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

然而,对水平分辨率,模拟研究(Berryhill, 1977)显示,要分辨最小水平尺寸的目标(d_{\min}),至少需要一个波长才可以避免严重的反射震幅衰减。

$$d_{\min} = v / f$$

实际上,对任意深度(z)的目标体,能够分辨的最小水平尺寸由菲涅耳带宽决定:

$$d_F > (2zv / f)^{1/2}$$

从上述关系可以看出分辨率随深度增加而明显降低,地震信号的主频率决定了可分辨目标的理论最小尺寸。例如,地震信号的主频为50 Hz,假定地层平均速度为6 km/s,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 ≥ 490 m时,才能作为反射体被探测到。由于大型的有色金属矿体通常具有此规模,因此,可以得出结论:大型有色金属矿床在实际勘探深度范围内是可以探测得到的。由于可分辨的尺寸随深度增加而逐渐加大,金属矿地震技术只能发现深部的大矿体或有一定规模的容矿构造。

3.2 主要反射特征

以中心叠加剖面(TGS2)为例,将主要反射特征归纳如下(图3-B):

纵观整个叠加剖面,有4组反射清晰可见,由浅到深依次为R1、R2、R3、R4。R1出现在剖面右测,对应CDP(共深度点)点1205~1505之间,形态呈向下凸出的弧形。“弧顶”深约0.5 s(TWT:双程走时/s),假定平均速度3.5 km/s,对应深度约0.88 km。该反射波组对应于地表的朱村向斜,主要为第四系沉积和老第三系砂砾岩。推测该反射由中三叠统龙头山组灰岩引起。

R2反射波组在TGS2叠加剖面(图3B)上,出现在剖面中部大部分地段,对应CDP点在905~1445之间,空间连续性最好。在非纵叠加剖面上(TGS1线放炮,TGS3接收;TGS3线放炮,TGS1接收形成的CDP剖面,位置对应TGS2),该反射波组断续延至剖面左端点。空间上呈“波浪”起伏状,“波谷”深度在0.8 s(TWT),转换深度约2 km(平均速度按5 km/s);“波峰”深度在0.4 s(TWT),转换深度约1 km(平均速度按5 km/s)。根据已有勘探线钻孔资料^②,最接近地震测线位置的3个钻孔(ZK8-4, ZK8-5和ZK10-1),在1 km深度左右见到泥盆系五通组(图3A)。因此,可以将该反射波组解释为泥盆系五通组的顶面。

R3反射波组在剖面中部清晰可见,以CDP点1145为界,南东侧相对平缓,深度在1~1.2 s(TWT),约2~2.5 km;北西相对陡倾,最深处在1.5 s(TWT)。

R4反射波组在CDP点965~1265之间较为清

① 常印佛,裴荣富,侯增谦,等. 2003. “大型矿集区深部精细结构与含矿信息”阶段研究报告.

② 安徽狮子山矿田勘查报告. 1995. 安徽省地矿局321地质队.

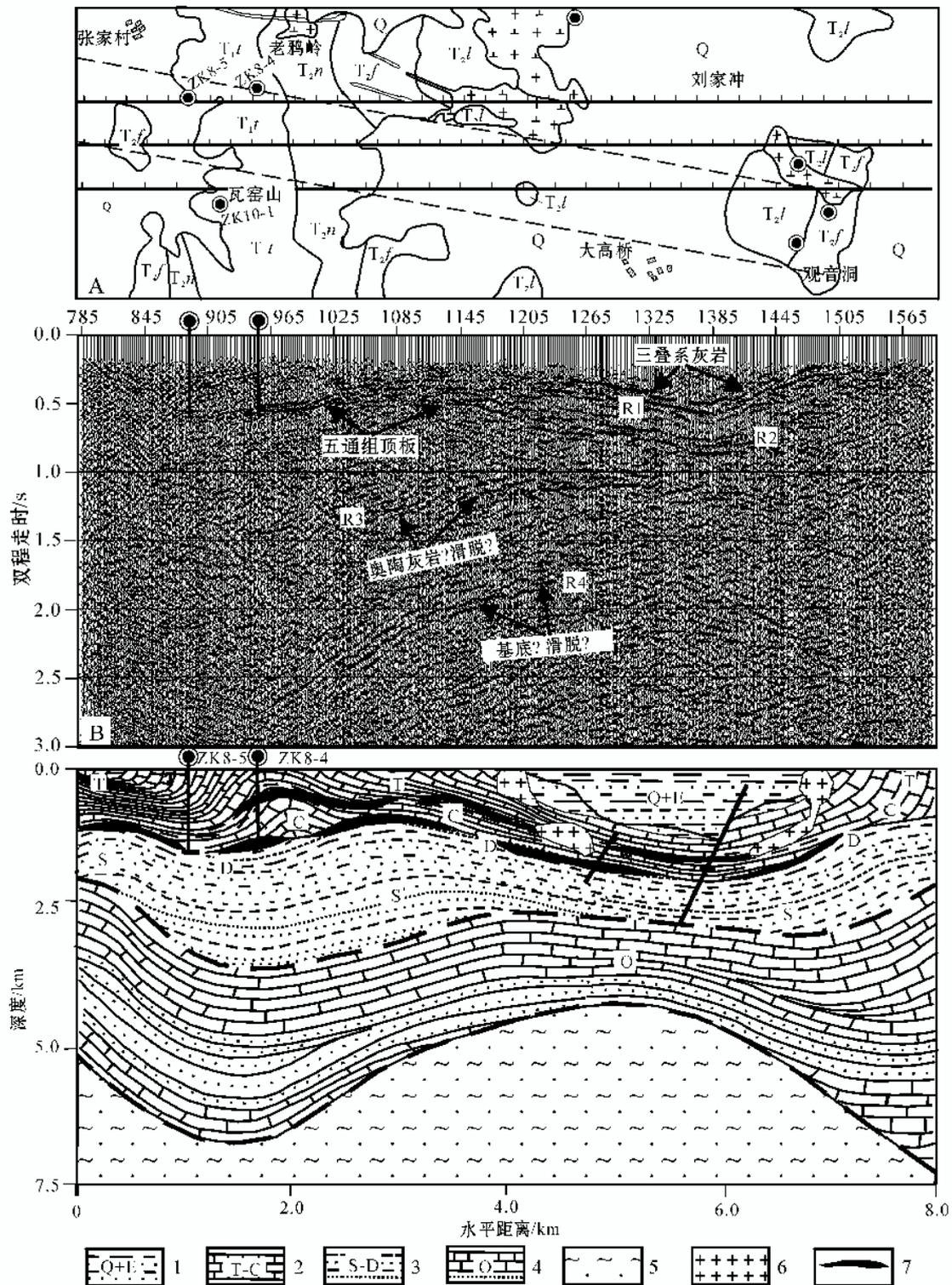


图 3 A:高分辨率地震剖面位置及地质简图(图例同图 1); B:中心剖面(TGS2)叠加剖面;C:对应 TGS2 叠加剖面的地质解释
 1—第四系、老第三系;2—三叠系、二叠系和石炭系;3—志留系、泥盆系;4—奥陶系;5—基底;6—推测花岗岩体;7—推测的容矿层

Fig. 3 A: Simplified geological map showing the high resolution seismic reflection profiles (Symbols as for Fig. 1);
 B: Stacked section of the central profile (TGS2); C: Corresponding geological interpretation
 1—Quaternary and Palaeogene; 2—Triassic, Permian and Carboniferous; 3—Silurian and Devonian; 4—Ordovician; 5—Base ment;
 6—Inferred granite; 7—Inferred ore-bearing bed

晰,向南东逐渐模糊,还仍可辨认。总体上呈向上凸起的弧形,两翼较陡,深度范围较大,从1.8 s(TWT)到2.8 s(TWT)。

3.3 地质解释及对区域找矿的意义

叠加剖面的反射特征清晰地反应了浅部盖层结构的特征,尤其是地层层序和构造变形特征。研究区的地质物性研究(陈沪生等,1999)和钻探资料表明:不同时代的地层存在明显的速度和密度差异,可以形成良好的波阻抗差。有明显波阻抗差异的地层为:三叠系上统的黄马青组(砂页岩,平均速度3.5 km/s)与中统的龙头山组(灰岩,平均速度5.5 km/s);二叠上统的龙潭组(砂页岩,平均速度4.5 km/s)与其上面的大隆组和下面的孤峰组(硅质灰岩,平均速度5.5 km/s);泥盆系五通组(石英砂岩、页岩,平均速度4.5 km/s)与石炭系黄龙组(灰岩,平均速度5.5 km/s);奥陶系灰岩与志留系砂页岩。此外,前寒武系基底与盖层之间也可能存在波阻抗界面。由于本区二叠系龙潭组很薄(20~70 m),而有效地震信号主频在50 Hz左右,理论上可分辨的最小层厚为30 m(按式 $v/4f$ 计算, v 取6.0 km/s)。因此,该层不能形成有效反射。除此以外,近层状的侵入岩和区域滑脱带、剪切带也可以形成反射界面。根据各地层之间速度分布,结合本区的钻探资料,对反射地震叠加剖面的地质解释结果如图3C。解释认为:叠加剖面出现的各反射波组是由地层速度差异引起的,从浅到深出现的4组明显反射波组分别对应于不同时代的地层界面,它们分别是:R1为中三叠统龙头组灰岩与其上的上三叠统黄马青组砂页岩之间的界面;R2为泥盆系五通组顶面;R3为奥陶系灰岩顶面;R4为前寒武系基底顶面。这些层面的层间滑动和热液流体作用会加强反射的形成(Jones et al., 1984)。连续反射层局部出现错位或缺失(如:R2反射局部出现的缺失)可能为岩体侵入或断层引起,它们破坏了原地层的连续性,局部的反射空白区是由于岩体内部速度均匀所致。4组反射在空间形态上的不一致,反映了由浅到深不同地层在变形过程中的非耦合性质,这种变形特点容易导致刚性强度不同的地层之间产生滑动、破碎和裂隙,形成一些规模大、连续性好的通道,为后期岩浆热液流体的运移创造有利条件,这可能是铜陵和长江中下游地区层状“砂卡岩”型矿床能形成大矿的重要原因。

高分辨率反射地震探测结果不仅对铜陵矿集区,而且对整个长江中下游隐伏矿的勘查具有重要的现实意义。长江中下游地区的平均勘查深度在500 m左右,很多专家预测长江中下游成矿带之下存在“第二个长江中下游”(常印佛等,1991)。冬瓜山超大型矿床(深1 km左右)的发现,从某种意义上验证了这一预测。本次地震反射结果更进一步表明,在0~2 km范围内,按照“岩体+赋矿层位(五通组)”的找矿模型,有可能在更深的深度发现这种类型的矿床。本次地震反射试验为在长江中下游地区寻找深部“第二富集带”提供了理论依据和技术方法。

4 结 论

综上所述,得出以下结论:

(1) 在铜陵狮子山矿田利用地震反射技术成功探测到了该地区的主要赋矿层位——黄龙组和五通组的接触面,该层位的深度变化在0~2 km以内。已经发现的冬瓜山、铜官山、新桥等大型矿床都在该层位上,且深度在1 km以内,表明在1~2 km深度仍有很大的找矿空间。试验结果为在长江中下游地区寻找深部隐伏矿提供了理论依据,对区域找矿具有重要意义。

(2) 铜陵地区盖层中的不同地层在变形过程中表现为非耦合变形性质,这种变形特征导致地层之间形成滑脱、破碎和裂隙,为低粘度岩浆和含矿气、液流体提供了重要的运移通道。这是该地区“层控砂卡岩”型矿床形成的重要条件。

(3) 地震反射技术可有效地用于金属矿勘探,如果事先对目标体有充分的了解和估计,并根据目标体的空间产状合理设计地震施工方案,则能够取得更好的效果。该试验结果为隐伏矿预测提供了新的技术手段。

致 谢 野外数据采集由江苏油田安徽勘探处完成。数据处理得到林依华博士、边春雪高工的帮助和指导。劳雷工业公司北京代表处刘国庆高工、程大祥高工协助从 Geometrics 公司租借 Ref Tek-125 和 Strata Visor T^M NZ 地震仪,并参加了部分野外工作。项目执行期间得到部科技司黄宗理司长、

● 安徽省地矿局321地质队,1995.安徽狮子山矿田勘查报告.

高平处长等领导的关心、支持及野外指导、检查工作。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。在此,谨向上述各位领导、专家和热心提供帮助的同行表示衷心的感谢。

References

- Berryhill J R. 1977. Diffraction response for non-zero separation of source and receiver[J]. *Geophysics*, 42:1158 ~ 1176.
- Chang Y F, Liu X P, Wu Y C. 1991. The Copper-Iron belt of the lower and middle reaches of the Changjiang river[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 379 (in Chinese with English abstract).
- Chen H S, Zhang Y M, Xu S W, et al. 1999. The lithospheric textural and structural features as well as oil and gas evaluation in the lower Yangtze area and its adjacent region, China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 287 (in Chinese with English abstract).
- Drummond B J and Goleby B R. 1993. Seismic reflection images of major ore-controlling structures in the Eastern Goldfields, Western Australia [J]. *Expl. Geophys.*, 24: 473 ~ 478.
- Drummond B J, Goleby B R, Goncharov A G, et al. 1997. Crustal-scale structures in the Proterozoic Mount Isa inlier of north Australia: Their seismic response and influence on mineralisation [J]. *Tectonophysics*, 288: 43 ~ 56.
- Drummond B J, Goleby B R, Owen A J, et al. 2000. Seismic reflection imaging of mineral systems: Three case histories [J]. *Geophysics*, 65:1852 ~ 1861.
- Gouly N. 1993. Controlled-source tomography for mining and engineering application[A]. In: Iyer H M and Hirahara K, eds. *Seismic tomography: Theory and practice*[C]. London: Chapman and Hall. 797 ~ 813.
- Jones T and Nur A. 1984. The nature of seismic reflections from deep crustal fault zones[J]. *J. Geophys. Res.*, 89: 3153 ~ 3171.
- Liu W C, Gao D Z, Chu G Z, et al. 1996. The structural analysis and metallogenesis predication in Tongling area, Anhui[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig J, Nafe J and Drake C. 1971. Seismic refraction[A]. In: Maxwell A E, ed. *The Sea*[M]. New York: Wiley. 4: 53 ~ 84.
- Milkereit B, Eaton D, Wu J, et al. 1996. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part II. Reflection seismic profiling[J]. *Econ. Geol.*, 91: 829 ~ 834.
- Okay A I, Sengör A M C and Satir M. 1993. Tectonics of an ultra-high pressure metamorphic terrane: the Dabieshan/ Tongbaishan orogen, China[J]. *Tectonic*, 12: 1320 ~ 1334.
- Salisbury M H, Milkereit B, and Bleeker W. 1996. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part I. Rock properties[J]. *Econ. Geol.*, 91: 821 ~ 828.
- Shi D N, Lu Q T, Xu M C, et al. 2004. A tomographic study of shallow structures in Tongling metallogenic province [J]. *Mineral Deposits*, 23(3): 383 ~ 389 (in Chinese with English abstract).
- Spencer C, Thurlow G, Wright J, et al. 1993. A vibroseis reflection survey at the Buchans mine in central Newfoundland [J]. *Geophysics*, 58: 154 ~ 166.
- Tang Y C, Wu Y C, Chu G Z, et al. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang are of Anhui provinces [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 351 (in Chinese with English abstract).
- Verpaelt P, Peloquin A S, Adam E, et al. 1995. Seismic reflection profiling across the " Mine Series" in the Noranda camp of the Abitibi belt, eastern Canada [J]. *Can. J. Earth Sciences*, 32: 167 ~ 176.
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng Y F, et al. 2004. The spatial and time structure of Hercynian volcanic-sedimentary fluid system in Tongling ore district, Anhui province[J]. *Mineral Deposits*, 23(3): 281 ~ 297 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 379.
- 陈沪生, 张永鸿, 徐师文, 等. 1999. 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. 1 ~ 287.
- 刘文灿, 高德臻, 储国正, 等. 1996. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 131.
- 史大年, 吕庆田, 徐明才, 等. 2004. 铜陵矿集区地壳浅表结构的地震层析研究[J]. *矿床地质*, 23(3): 383 ~ 389.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 351.
- 杨竹森, 侯增谦, 蒙义峰, 等. 2004. 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*, 23(3): 281 ~ 297.

Tentative Seismic Reflection Study of Shizishan Orefield in Tongling and Its Significance in Regional Exploration

Lü Qingtian¹, Hou Zengqian¹, Shi Danian¹, Zhao Jinhua¹, Xu Mingcai² and Chai Mingtao²

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract

With the growing difficulty in surface mineral exploration, the prospecting for deep-seated mineral deposits has become the major strategy for exploration in the new century, and the development of deep probe techniques is crucial for deep exploration. The seismic reflection method is of great superiority in both exploration depth and exploration precision. However, due to the complexity of the orefield structure and the orebody shape as well as the small effective reflection area compared with the seismic wavelength, the development of mineral seismic exploration has been limited to some extent. In recent decades, the seismic reflection technique has made great progress, the strategy for exploration has also changed greatly, and the exploration of ore-related or ore-bearing structures has gradually become the major object. This strategy makes full use of the features of seismic reflection, and has acquired wide application. The results obtained have proved its effectiveness.

"Stratabound" skarn type mineral deposits constitute the major type of deposits in the middle and lower Yangtze metallogenic belt. They are mainly controlled by the contact zone between Devonian Wutong Formation and Carboniferous Huanglong Formation. Therefore, "Wutong Formation sandstone + granite" has served as the dominant exploration model in search for this kind of mineral deposits. In order to detect the spatial distribution and the depth of the Wutong-Huanglong contact zone in the Tongling ore district, provide the theoretical basis for mineral prediction, and perfect the seismic reflection technique, the authors made tests along 3 seismic reflection profiles in the Tongling ore district. The results show that the seismic reflection could accurately determine the distribution of the contact zone between Wutong Formation and Huanglong Formation. The depth of this ore control layer varies in the range of 1 ~ 2 km, approximately showing an anticline shape which corresponds to the surface Qingshan anticline. Below this layer, there are two clear reflections, caused probably by Ordovician limestone and the basement. They have the shape of more closed anticlines, which are decoupled with the upper reflection of Wutong Formation, thus reflecting a decoupling deformation process. This kind of deformations is favorable to the production of decollement between the strata, which makes up a favorable condition for migration of metallogenic fluids. This seismic reflection experiment in Tongling ore district further proves that there are still great potential in looking for mineral deposits within the depth range of 2 km according to the "ore-bearing strata + granite" model.

Key word: geophysics, seismic reflection, resolution, mineral system, Wutong Formation sandstone, ore-control structure.