

# 中国大陆科学钻探先导孔零偏 VSP 资料解释

姜修道<sup>1</sup>, 朱光明<sup>2</sup>, 朱龙生<sup>2</sup>, 张文波<sup>2</sup>, 李桂花<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 用六级三分量检波器在中国大陆科学钻探先导孔中实施了零偏 VSP 测量。数据处理结果表明, 中国大陆科学钻探孔区超高压变质岩石的地震波速度主要介于 4 500 ~ 7 000 m/s 之间, 显著高于一般的沉积岩地区, 而且随深度变化不明显。声波测井速度系统地稍低于 VSP 层速度, 可能是由于井壁处岩石的完整性受到破坏而造成的。地震波速度与岩石密度和岩性存在明确的对应关系, 榴辉岩的密度和地震波速度均显著高于片麻岩类岩石; 由榴辉岩退变生成的斜长角闪岩类岩石, 其密度和地震波速度均呈现出较大的变化, 主要与其退变质程度有关; 超基性岩中的裂隙系统导致其密度和地震波速度大幅度下降。由于榴辉岩与其他岩石类型之间存在一定的波阻抗差异, 因此用零偏 VSP 资料标定该区地震波的地质层位是有效的。关于地震波反射的原因, 通过综合研究地震波(包括反射纵波、上行转换横波、井筒波)的特征、岩石速度和密度分布以及井径变化, 认为主要是岩性分界面、韧性剪切带和断裂(带), 但还有一些因素尚待进一步研究。

[关键词] 中国大陆科学钻探; 零偏 VSP 测量; 地震波速度; 层位标定; 地震反射的原因

[中图分类号] P631.43 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)01-0055-06

[作者简介] 姜修道(1960—), 男, 陕西户县人, 副教授, 博士研究生, 现从事地质和地球物理教学和研究工作。

中国大陆科学钻探是举世瞩目的重大科学工程。江苏省东海县毛北地区以其独特的大地构造位置、大量的超高压变质岩以及丰富的深部信息等优越条件被确定为第一个大陆科学钻探孔区, 以期获得有关大陆会聚边缘和壳幔作用的实际资料。2002年3月完成了先导孔(2 000 m)的钻探任务。同年4月和9月, 先后两次分别在裸眼井和套管井中实施了零偏 VSP 测量。本文所用资料主要是在套管井中取得的, 同时参考了裸眼井中取得的部分资料。

## 1 工区地质概况

工区位于大别-苏鲁超高压变质(UHPM)带中, 地处郯庐断裂东侧的东海县附近。

大别-苏鲁超高压变质带是华北板块与扬子板块碰撞造山作用形成的造山带, 其西起信阳, 经

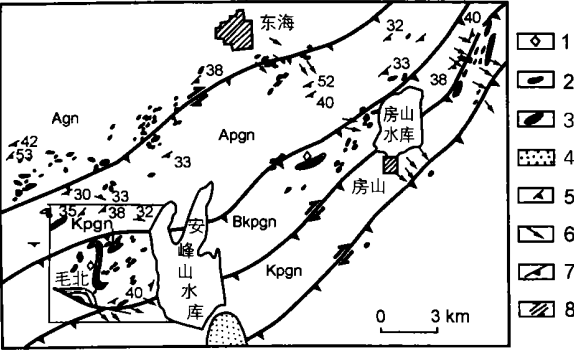
红安、岳西、潜山后被郯庐断裂切断, 北移至苏北新沂和东海, 再经山东日照、胶南一直延伸到山东半岛最东端的荣成和威海, 全长上千千米, 是中国出露面积最大的古老变质地块。由于受郯庐断裂的影响, 其展布方向在该断裂以西为 NW 向, 倾向 SW; 东侧则北移至东海县附近, 并呈 NE 向延伸, 倾向 SE。因此分布于苏北和胶东南部地区的超高压变质带又称为苏鲁超高压变质带。其南以潜山-响水断裂为界, 北以五莲-桃村断裂为界。带内主要岩石类型为东海群的片麻岩、斜长角闪岩、榴辉岩、大理岩及超基性岩类岩石, 其中广泛分布的榴辉岩多呈条带状、透镜状产出, 延伸长度从厘米级到千米级不等, 多成群出现<sup>[1]</sup>, 其直接围岩有基性超基性岩、大理岩及片麻岩等。与此不同的是, 东海县芝麻坊-毛北地区的大片榴辉岩与超基性岩紧密穿插在一起。该带榴辉岩中柯石英、金刚石、硬玉等特征矿物的发现使之成为世界上规模最大、各种 UHPM 矿物出露最为密集的 UHPM 带。

大别-苏鲁地区的韧性剪切带非常发育, 且规模巨大。主剪切带与 UHPM 带走向协调一致

[收稿日期] 2003-06-06

[基金项目] 国家重大科学项目中国大陆科学钻探工程中心项目(CCSD-GEOP-002)

(图 1), 总体走向 NE, 倾向 SE。带内岩石以糜棱岩、构造片岩为主, 拉伸线理、“A”型褶皱、布丁构造等韧性变形特征普遍发育。受剪切作用影响, 榴辉岩体常表现出强烈的塑性流变, 可被拉成透镜状, 沿拉伸线理分布; 或呈不对称雁行状排列; 也可见到榴辉岩作为“似巨斑”的  $\sigma$  型和  $\delta$  型“结晶尾”构造<sup>[1]</sup>。除韧性剪切带外, 后期的脆性变形作用也十分强烈, 主要形成多条走向 NE、倾向 NW 的断层和破碎带。



小方框表示选定的中国大陆科学钻探孔区; 1— 金刚石; 2— 榴辉岩; 3— 橄辉岩; 4— 新生代盆地; 5— 面理; 6— 拉伸线理; 7— 韧性剪切带; 8— 走滑断层; Agn 为 霓辉石片 麻岩; Apgn 为 霓辉斜长片麻岩; Bkpgn 为 黑云二长片麻岩; Kpgn 为 二长片麻岩; 引自许志琴, 1998

图 1 东海毛北—芝麻坊地区地质构造略图  
Fig. 1 Simplified geological map of Maobei Zhimafang region

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

先导孔零偏 VSP 数据采集所用的地震记录仪器是西安石油仪器厂生产的 GQ2240 型地震仪, 井下检波器为西安弘传公司研制的 JDB-30 型六级三分量检波器。先导孔井深 2 028 m, 全井段均有套管。激发井位于先导孔正东 102 m 处, 在地层的下倾方向, 深度为 22 m (已深入基岩)。子波井位于先导孔正东 90 m 处, 井深 27 m。采用激发频谱丰富的炸药震源, 经过试验确定激发药量为 2.5 kg。观测井段 2 010 ~ 120 m, 观测点距 10 m。观测时, 多级检波器紧密推靠至套管壁。

2.2 数据处理

资料处理所采用的软件为长安大学应用地球物理研究所研制的 SWS 系统和加拿大 SIS 公司开发的 VISTA 系统。本区为超高压变质岩区, 地质构造十分复杂。与沉积岩地区相比, 所采集到的地震资料有着明显不同的特点, 主要表现为信噪比不

高, 同相轴延伸不长, 干扰波发育而且类型复杂。因此在资料处理时, 既要考虑到变质岩区地震波传播的特点, 同时又要尽量避免使用处理效果取决于信号能量比的方法及软件。

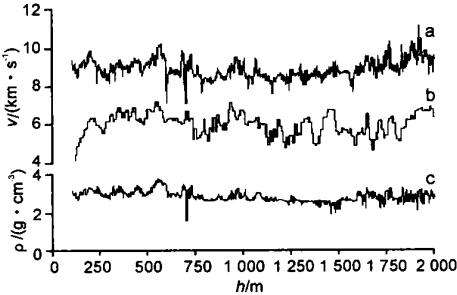
由于采用了三分量检波器, 相应地获得了三个分量的记录。在处理过程中, 把 Z 分量和三分量合成的纵波记录作了对比, 发现在后者中, 上行纵波的面貌没有明显改善, 而下行纵波却显著减弱; 加之三分量合成过程中很可能引起初至的变化, 对纵波的速度分析影响较大。因此, 在纵波处理时, 仍沿用了原始 Z 分量记录。在 (近) 水平地层情况下, 零偏 VSP 资料中一般不会出现转换波, 但由于工区为超高压变质带, 地质构造复杂, 地层倾角较大, 零偏 VSP 记录中出现了明显的上行转换波。对于转换波的处理, 则引用了三分量合成记录。通过常规处理, 分别获得了纵波的下行波场、纵波的速度 (包括层速度和平均速度)、纵波上行波场、走廊叠加剖面 and 转换波上行波场。

3 解释

3.1 地震波速度

地震波速度是地震勘探中最重要的一个参数, 而 VSP 测量是一种比较直接且行之有效的获取地震波速度的方法。

图 2 中给出了 VSP 方法获得的纵波层速度曲线, 可以看出, 该区地震波层速度的变化范围主要介于 4 500 ~ 7 000 m/s 之间, 先导孔 120 ~ 2 010 m 深度范围内层速度的平均值为 6156 m/s, 明显高



a— 声波速度曲线; b— VSP 方法获得的纵波层速度曲线 c— 密度测井曲线; 声波和密度测井资料由中国大陆科学钻探工程中心提供; 在成图时, 声波测井速度值人为地增加了 3 km/s

图 2 VSP 层速度与测井资料综合对比

Fig. 2 Synthetic comparison of VSP interval velocity and log data from the pilot hole

于一般沉积岩地区, 而与余钦范等人<sup>[3]</sup>对该区岩石地震波速度的测量结果相近(表 1)。另外, 与一般沉积岩地区不同, 该区地震波速度随深度增加而增加的趋势并不明显, 这些都反映出苏鲁超高压变质带独特的速度分布特点。

表 1 毛北地区主要岩石纵波速度统计

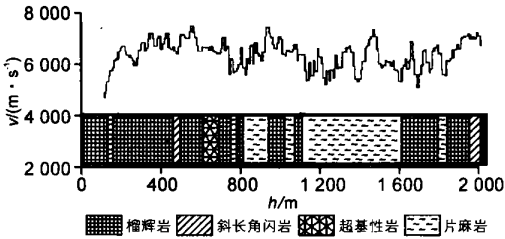
Table 1 Statistic seismic velocities of rocks in CCSD borehole area

采样地点	岩性	样品数	纵波 $V_p/(m \cdot s^{-1})$				
			几何均值	算术均值	标准方差	最小值	最大值
许沟	蛇纹岩	37	5 658.5	5 694.6	635.8	4 406	6 772
驼峰	片麻岩	9	5 544.9	5 586.2	725.4	4 495	6 930
	斜长角闪岩	24	2 958.4	3 432.2	1 628.5	258	5 723
青龙山	角闪石化榴辉岩	10	4 656.9	4 736.3	916.0	3 483	5 983
	榴辉岩	18	7 796.5	7 298.2	1 565.6	708	9 392
毛北	榴辉岩	38	7 076.2	7 133.0	930.8	5 224	9 879

注: 斜长角闪岩为风化状; 引自余钦范等<sup>[3]</sup>

从图 2 中还可以看出, VSP 层速度曲线与密度和声波测井曲线的分布规律和变化趋势颇为相似。高密度值均与高速度值相对应, 但高速度值却不一定对应高密度值, 这说明影响变质岩地震波速度的因素是多种多样的, 除密度外, 还有变质作用的类型和强度、岩性、构造等<sup>[4]</sup>。与声波测井曲线相比, 尽管二者具有类似的变化规律和基本相同的变化范围, 但统计分析表明, 声波速度系统地低于 VSP 层速度。在 120~2 010 m 的井段范围内, 声波速度的平均值为 5 902 m/s(按照 10 m 采样间隔计算), 稍低于相同井段范围内的 VSP 层速度平均值(平均低约 4.3%), 其部分原因可能是由于钻进使井壁处岩石的完整性受到破坏而造成的。这一点与俄罗斯科拉半岛超深钻(KSDB)和德国大陆深钻(KTB)的情况是一致的<sup>[5]</sup>。地震波速度与岩性有着较为明确的对应关系(图 3)。榴辉岩基本上都与高速度值相对应(多在 6 500 m/s 以上), 而片麻岩的速度普遍偏低(通常在 6 200 m/s 以下); 超基性岩的速度居中, 且变化不大, 主要介于 6 000~6 400 m/s 之间; 斜长角闪岩类岩石的 VSP 层速度变化范围较大, 但从整体上看, 低于榴辉岩而高于片麻岩类岩石。这主要是因为斜长角闪岩类岩石是由榴辉岩退变而来的, 由于退变质程度不同, 该类岩石的岩性和物性均有较大变化; 石英岩、伟晶岩的层速度

偏低, 与片麻岩类岩石相似。与表 1 中常温常压下的测量结果相比, 榴辉岩的 VSP 层速度偏低, 而片麻岩的 VSP 层速度偏高。这可能与多种因素有关, 但 VSP 层速度为相邻检波点之间岩石的平均速度无疑是一个重要因素。另据杨文采等<sup>[6]</sup>的统计结果, 该区橄榄岩的平均密度为 3.35 g/cm<sup>3</sup>, 纵波的平均速度为 7 830 m/s, 显著高于超基性岩的测井密度(平均约 2.96 g/cm<sup>3</sup>)和 VSP 层速度。在裸眼井零偏 VSP 测量获得的 Z 分量记录中, 在超基性岩分布的深度范围内, 反射井筒波非常发育, 且此处井径也有显著变化。据此, 推测超基性岩速度降低的原因可能与该类岩石中发育的裂隙有关。由于其厚度较小, 目前尚没有足够的证据证明这些裂隙是在后期脆性变形过程中形成的断层或破碎带, 还是在早期韧性变形期间, 由于超基性岩的能干性而形成的裂隙系统。



岩性资料由中国大陆科学钻探中心提供

图 3 VSP 层速度与岩性柱对比

Fig. 3 Comparison of VSP interval velocities and lithology

另外, 地震波速度还与地质构造有关。研究表明<sup>[4, 5, 7]</sup>, 韧性剪切带(在垂直其糜棱面理方向上)的地震波速度会显著降低。尽管目前无法确定井段内韧性剪切带的数量和位置, 但推测图 2 中相同或相似岩性中速度的剧烈变化(而密度变化不明显)便是由韧性剪切带引起的。构造破碎带的速度则远远低于其两侧的岩石, 这是众所周知的。

3.2 层位分析

VSP 资料是对比地震波地质层位或地质属性的重要依据。在图 4 中, 上边岩心柱状图的坐标刻度是深度; 右边走廊叠加剖面的坐标刻度是双程时间; 中间按双程时排齐的上行波剖面的横坐标刻度是深度, 与岩心柱一致, 纵坐标刻度是双程时间, 与走廊叠加剖面一致。从图 4 中可以看出, 不同岩性的分界面基本上都对应着叠加剖面中的一个同相轴。特别是岩性柱中的榴辉岩层, 由于其与围岩(以片麻岩类岩石为主)存在显著的密度和速度差,

故通常与较强的反射同相轴相对应。而且其上界面的反射同相轴通常为正极性,而下界面多为负极性。如深度 2 000 m 处的斜长角闪岩和榴辉岩的岩性分界面与双程时 642 ms 的同相轴对应,1 600 m 处的长英质片麻岩和角闪石化榴辉岩的分界面与双程时 510 ms 的同相轴对应,1 000 m 处石榴角闪黑云斜长片麻岩和榴辉岩的岩性分界面与双程时 311 ms 的同相轴对应,680 m 及 600 m 处榴辉岩和超基性岩的分界面分别与双程时 204 和 179 ms 的同相轴对应等等。这种对应关系可为地面资料解释提供准确的层位标定依据。

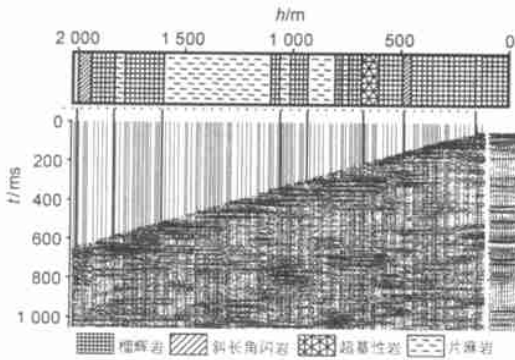


图 4 纵波上行波场与岩性对比

Fig. 4 Comparison of VSP upgoing (reflected) wavefield and lithology

### 3.3 反射同相轴的地质意义

中国大陆科学钻探先导孔的 VSP 测量获得了极其丰富的反射信号(图 4),这些反射信号产生的原因是地质和地球物理界所普遍关注的。

关于结晶基底中地震反射的原因,前人已经作过大量的研究工作,提出了各种各样的假说。如不同岩性分界面<sup>[8~10]</sup>、韧性剪切带<sup>[11~12]</sup>、各向异性<sup>[13]</sup>、流体充填带<sup>[5,14]</sup>、层状基性超基性岩体<sup>[15]</sup>等。根据该区地质特征,并通过对先导孔 VSP 资料的综合研究,笔者认为,中国大陆科学钻探孔区地震反射的原因也是多种多样的。

如前所述,工区主要岩石类型为榴辉岩、斜长角闪岩、超基性岩及片麻岩类岩石,由于不同岩石类型之间,尤其是榴辉岩与片麻岩类岩石之间存在较大的密度和速度差异,因而不同岩性分界面成为重要的地震波反射界面。从图 4 中可以看出,由于不同岩石类型的互层状产出,众多岩性分界面均与走廊叠加剖面中的反射同相轴存在明确的对应关系。除上面提到的榴辉岩与其他岩石类型的分界面外,斜长角闪岩与石英岩(如 1 780 m 处斜长角闪

岩与石英岩的分界面与双程时 574 ms 的同相轴对应)、片麻岩与角闪岩(如 760 m 处绿帘角闪黑云斜长片麻岩与石榴角闪岩的分界面与双程时 230 ms 的同相轴对应)等岩性分界面也都与相应双程时的反射同相轴对应。因此,岩性分界面是该区最重要的地震波反射界面。同时由于相邻岩石类型的物性差异和几何叠置关系不同,该类同相轴在能量强弱和极性上也有所区别。

除了岩性分界面引起的反射外,从图 4 中还可以看出,一些反射同相轴所对应的深度处并无岩性分界面,最明显的就是 1 100~1 600 m 深度范围内,岩心柱状图上显示的岩性单一,均为长英质片麻岩类岩石,且密度变化不明显(见图 3)。而在走廊叠加剖面中,这一深度范围内却出现了数个能量较强的同相轴。在资料处理过程中还发现,这一深度范围内不仅上行纵波发育,上行转换波也很发育,且能量较强(在原始三分量记录中也依稀可见)。那么,这些反射是由什么因素引起的呢?地质调查表明,该区韧性剪切带十分发育。在讨论地震波速度与构造的关系时,笔者曾指出,在垂直糜棱面理方向上,韧性剪切带的地震波速度会显著降低,这就使其与两侧岩石产生了较大的波阻抗差异,从而引起很强的地震波反射(包括转换波)。由于高反射率及其连续性,剪切带曾被认为是地壳中最好的反射界面之一<sup>[9]</sup>。

断层和破碎带也是地震波反射的重要界面。前已述及,该区在韧性变形之后,形成了一组走向 NE、倾向 NW 的断层。综合各种资料处理结果,在 700~900、1 160、1 750 m 等深度处,不仅存在明显的反射纵波(图 4)和转换波,在裸眼井零偏 VSP 测量获得的 Z 分量记录中,这几处的反射并简波也非常发育。从图 2 中可以看出,这些深度处都存在声波速度和 VSP 层速度显著降低的情况,且多伴随密度的下降。加之井径均有不同程度的扩大(最大井径达 34.8 cm),笔者认为这几处的反射是由断层或构造破碎带引起的。

然而,由于变质岩和变质构造的复杂性,结晶基底中地震反射的原因实际上是一个十分复杂的问题。就本区而言,4 个问题有待于进一步深入研究:①变质岩的线理、片理、片麻理所引起的各向异性对地震反射的影响;②韧性剪切带的反射机理;③不同性质反射因素叠加(如多次构造叠加、构造与岩性界面叠加等)时的反射特征;④充填在构造

裂隙(带)中流体的反射特征。

## 4 结论

(1)超高压变质岩的地震波速度显著高于一般的沉积岩地区,而且随深度增加而增加的趋势不明显。在所有岩石类型中,榴辉岩速度最高,片麻岩类岩石速度偏低,斜长角闪岩类岩石介于期间。钻孔中唯一出现的超基性岩因破碎而导致速度降低。

(2)高密度值均与高速度值相对应,但高速度值却不一定对应高密度值,这说明影响变质岩地震波速度的因素是多种多样的。

(3)VSP 层速度系统地高于声波测井速度,这可能是由于钻进使井壁处岩石的完整性受到破坏而造成的。

(4)由于榴辉岩与其他岩石类型之间存在较大的波阻抗差异,岩性界面反射强烈。因此用零偏 VSP 资料标定该区地震波的地质层位是有效的。

(5)引起地震反射的原因主要是不同岩石分界面、韧性剪切带和断层,但有些问题还有待进一步研究。

在资料处理解释过程中得到杜有成工程师、贾欣池高工给予的帮助,特表感谢。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 索书田,钟增球,周汉文,等. 大别—苏鲁超高压变质带内变形分解作用对榴辉岩透镜体群发育的影响[ J ]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 15~22.
- [ 2 ] 许志琴,张建新,徐惠芬,等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[ M ]. 北京:地质出版社,1997.
- [ 3 ] 余钦范,郭友钊,孟小红,等. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质[ J ]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 93~100.
- [ 4 ] 姜修道,朱光明. 变质岩区地震波速度的特点及其影响因素

[ J ]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 331~335.

- [ 5 ] Smithson S B, Wenzel F, Ganchin Y V, et al. Seismic results at Kola and KTB deep scientific borehole: velocities, reflections, fluids, and crustal composition[ J ]. Tectonophysics, 2000, 329: 301~317.
- [ 6 ] 杨文采,张春贺,朱光明. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体[ J ]. 地球物理学报, 2001, 45(3): 370~384.
- [ 7 ] 姜修道,朱光明. 苏鲁超高压变质带的地震响应特征[ A ]. 见: 长安大学地质工程与测绘工程学院编. 地球探测科学与技术新进展[ C ]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [ 8 ] Smithson S B, Shive P N. Seismic velocity, reflections, and structure of the crystalline crust[ J ]. Am. Geophys. Union Geophysics Monographs, 1977, 20: 254~270.
- [ 9 ] Smithson S B, Johnson R A, Hurich C A. Crustal reflections and crustal structure. Reflect[ J ]. Seismol.: the Continental Crust Geodynam. Ser. 1986, 14: 21~32.
- [ 10 ] Hurich C A, Smithson S B. Compositional variation and the origin of deep crustal reflections[ J ]. Earth Planet. Sci. Lett. 1987, 85: 416~426.
- [ 11 ] Smithson S B, Brewer J A, Kaufman S., et al. Structure of the Laramide Wind River uplift, Wyoming from COCORP deep reflection data and gravity data[ J ]. J. Geophys. Res. 1979, 84: 5955~5972.
- [ 12 ] Hurich C A, Smithson S B, Fountain D M, et al. Seismic evidence of mylonite reflectivity and deep structure in the Kettle Dome metamorphic core complex[ J ]. Washington Geology, 1985, 13: 577~580.
- [ 13 ] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view[ J ]. J. Geophys. Res. 1995, 100: 9761~9788.
- [ 14 ] Ewald Lütschen, Kurt Bram, Walter Söller, et al. Nature of seismic reflections and velocities from VSP—experiments and borehole measurements at the KTB deep drilling site in southeast Germany[ J ]. Tectonophysics, 1996, 264: 309~324.
- [ 15 ] Deemer S, Hurich C. Seismic images of the basal portion of the Bjerkreim—Sokndal layered intrusion[ J ]. Geology, 1997, 25: 1107~1110.

## Interpretation of zero-offset VSP profiles from the pilot hole of Chinese continental scientific drilling

JIANG Xiu-dao<sup>1</sup>, ZHU Guang-ming<sup>2</sup>, ZHU Long-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Wen-bo<sup>2</sup>, LI Gui-hua<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A zero-offset VSP observation was carried out with a 6-level 3-component geophone at the pilot hole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD). The results of data processing show that the seismic velocities of the ultrahigh pressure metamorphic rocks in the hole area range mainly from 4500 to 7000m/s, being apparently higher than that of common sedimentary rocks and not varying obviously with their seated depth. Sonic velocities are systematically slightly lower than the VSP interval velocities partly because of the effect of drilling damage around the hole. Seismic velocities of rocks are related evidently to their densities and lithologies. The eclogites are much higher in

density and velocity than gneisses; plagioclase amphibolites vary in velocities and densities in a large range between eclogite and gneisses because they are retrograded from the eclogite and their lithology and physical properties vary synchronously with the degree of retrogressive metamorphism; and velocity and density of ultramafic rock are lowered apparently due to fractures in it. Since large impedance contrasts exist between eclogite and other rocks, it is effective that the VSP profiles are used to calibrate geological horizons of seismic reflections. With regard to the origin of seismic reflections, compositional contrasts, ductile shear zones and fractures are considered as the main cause on the basis of integrated study of the features of seismic waves (including PP reflections, PS converted reflections and tubewaves), distribution of velocities and densities and the caliper conditions, but some other elements involved need to be studied in detail.

**Key words:** CCSD; zero-offset VSP observation; seismic velocity; horizon calibrating; cause of seismic reflections

(英文审定:李庆春)

(上接第 23 页)

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 陈国达. 成矿构造研究法[ M ]. 北京: 地质出版社, 1978.

[ 2 ] 陈国达. 历史—因果论大地构造学谘议[ J ]. 大地构造与成矿学, 1992, 16(1): 1~71

[ 3 ] 刘顺生, 谭凯旋. 开放体系成矿动力学[ M ]. 北京: 地震出版社, 1996.

[ 4 ] 刘淑文, 魏宽义, 许拉平. 云南会泽铅锌矿田控矿构造体系及成矿预测[ J ]. 西北地质, 2002, 35(2): 84~89.

[ 5 ] 韩润生, 陈进, 李元, 等. 云南会泽铅锌矿床构造控矿规律及其隐伏矿预测[ J ]. 矿物学报, 2001, 21(2): 265~269.

[ 6 ] [ 苏] B A. 格里年科, И. H. 格里年科. 硫同位素地球化学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1989.

[ 7 ] 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 等. 云南会泽铅锌矿床构造控矿规律及断裂构造岩稀土元素组成特征[ J ]. 矿物岩石, 2000, 2(4): 11~18.

[ 8 ] 韩润生, 陈进, 李元, 等. 云南会泽铅锌矿床构造地球化学及定位预测[ J ]. 矿物学报, 2001, 21(4): 667~673.

[ 9 ] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 等. 云南会泽铅锌矿床脉石矿物方解石地球化学[ J ]. 矿物学报, 2001, 21(4): 659~666.

[ 10 ] 於崇文, 岑况, 鲍征宇. 热液成矿作用动力学[ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.

[ 11 ] 刘顺生, 谭凯旋. 湖南水口山矿田开放体系构造成矿动力学[ J ]. 大地构造与成矿学, 1996, 20(1): 1~9.

[ 12 ] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[ M ]. 北京: 科学出版社, 1984.

Discussion of structural geology and metallogeny of the Huize Pb-Zn deposit, Yunnan province, China

WEN Mei-lan<sup>1</sup>, WEI Kuan-yi<sup>2</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>

(1. School of Resources management Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;  
2. School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Structural geology, mainly related to compression-shear faulting, was supposed to have been the major control over the regional metallogenesis of the Huize Pb-Zn deposit. The continual open system under which the deposit formed was well recognized in the light of studies of Pb and stable isotopes (H, O, C and S), fracturing and Pb-Zn mineralizing geochemistry. In essence, the fault system developed under the continual open system was the key to the activation and transportation of ore-forming elements, the formation and advection of ore fluids, and the emplacement of ore bodies. It is thus a crucial geological process for the formation of the Huize Pb-Zn deposit.

**Key words:** tectonic ore-forming process; continual open system; the Huize Pb-Zn deposit

(英文审定:周军)