

测井和地震联合解释 CCSD 先导孔反射体

潘和平^{1,2}, 牛一雄², 王文先², 朱留芳³, 许东辉³, 李双林³

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国大陆科学钻探工程中心, 北京 100035

3. 中石化胜利测井公司, 山东东营 257001

摘要: 利用声波、密度、自然伽玛等测井曲线资料, 配合录井资料划分 CCSD 先导孔变质岩岩性, 然后, 用声波、密度计算波阻抗, 与井旁 VSP 资料对比, 分析 CCSD 先导孔孔区反射体. 分析结果表明: (1) 岩性间波阻抗差异产生反射波, 如榴辉岩与副片麻岩之间波阻抗差异; 榴辉岩与超基性蛇纹岩之间的波阻抗差异等; (2) 破碎特别是韧性剪切带产生反射波, 而如果断层破碎带尺度很小(在 1 m 以下), 也不一定产生强反射波. 这些研究结果对标定地壳中的反射地震信号具有重要意义.

关键词: 中国大陆科学钻探; 地球物理测井; 地震; 联合解释; 波阻抗; 反射体.

中图分类号: P631.8

文章编号: 1000-2383(2006)04-0569-06

收稿日期: 2005-11-12

Joint Interpretation of Reflectors via Well Logging and Seismic Data in the Pilot Hole of CCSD

PAN He ping^{1,2}, NIU Yi xiong², WANG Wen xian², ZHU Liu fang³, XU Dong hui³, LI Shuang lin³

1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. CCSD Engineering Center, Beijing 100035, China

3. Shengli Well Logging Company, Dongying 257001, China

Abstract: The main aim of this paper is to analyze reflectors in the pilot hole of CCSD (China Continental Scientific Drilling). The lithology of the metamorphite in the CCSD pilot hole can be identified by logging curves and geo logging data. The wave impedance can be calculated by using acoustic (AC) and density log (DEN) curves. By comparing the acoustic wave impedance with the VSP (vertical seismic profile), the reflectors of the CCSD pilot hole have been analyzed. The results indicate that reflected waves are primarily produced by the wave impedance properties of the lithology (such as the wave impedance difference between eclogite and paragneiss or between eclogite and ultrabasic serpentinite, etc) and the fracture. The fractures are mainly the ductile shear zones. If the fracture thickness is less than 1 m, reflectors cannot be produced. The study provides significant data concerning the interpretation of seismic reflection signals in the earth's crust.

Key words: CCSD; geophysics well logging; seismology; joint interpretation; wave impedance; reflector.

0 引言

CCSD(中国大陆科学钻探)先导孔孔区在江苏省北部连云港市东海县西南部的毛北地区. 从大地构造位置上说, 该区位于中国东部的秦岭-大别-苏鲁造山带的东段、苏鲁地区的南部. 该造山带是北

中国板块(中朝板块)与南中国板块(扬子板块)俯冲-碰撞作用的产物, 是划分中国南北的重要地质、地理、气候、环境和人文的界线, 同时也是重要的成矿带(张永康, 1998; 李传武等, 2002). 杨文采等(1999a, 199b, 2002)在中国大陆科学钻探孔区进行了系统的地球物理调查, 包括二维地震测网和专

基金项目: 中国大陆科学钻探项目.

作者简介: 潘和平(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球物理测井资料解释、数据处理及信息技术方向的教学和研究工作.

E-mail: Panninge@163.com

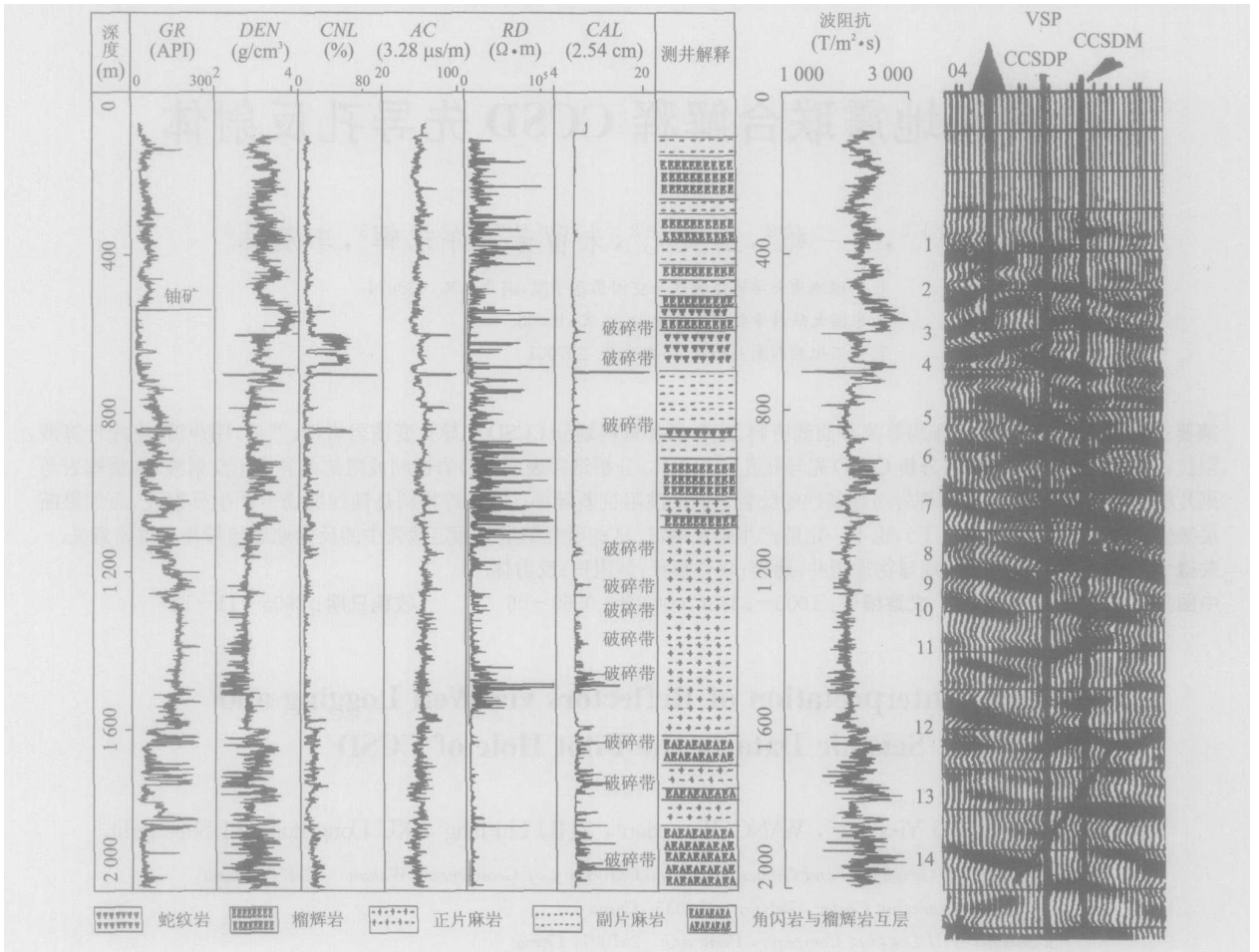


图 1 先导孔测井解释岩性剖面与 VSP 对比图

Fig. 1 Comparing the acoustic wave impedance with the VSP (vertical seismic profile) in CCSDP pilot hole
图 1 左半部分是测井曲线图和测井解释岩性剖面, GR、DEN、CNL、AC、RD、CAL 分别为自然伽玛、密度、中子孔隙度、声波时差、电阻率、井径; 图 1 右半部分是波阻抗、声波测井计算的波阻抗和先导孔旁 VSP, CCSDP 是中国大陆科学钻探先导孔(因钻探井斜控制较好, 现在为主孔); CCSDM 是原设计的中国大陆科学钻探主孔

门的地震剖面、大地电磁法和位场方法等。地震调查表明, 在超高压变质岩出露区上地壳充满了反射体, 包括倾斜反射体与上拱的反射弧, 并在此基础上, 利用大陆科学钻探预先导孔的岩心、井旁 VSP 等资料对反射体进行一定程度的标定, 这些研究结果对标定地壳中的反射地震信号具有一定意义。地层速度、密度、自然伽玛等物性与岩性变化密切相关, 地球物理测井(简称测井)利用各种先进仪器在钻孔中连续观测, 可获得钻孔物性剖面、几何等各种信息, 利用测井曲线等资料可以划分岩性(Pan *et al.*, 2002; 潘和平等, 2004)。利用声波、密度测井资料可以计算波阻抗, 并转换成反射系数序列, 再与一个理论子波褶积, 即可得到一张合成地震记录(冯^①等, 2001; 张卫红, 2002)。因此, 合成地震记录的核心资料是波阻

抗。本文的目的是, 利用测井曲线得到的岩性、波阻抗, 与井旁 VSP 资料对比, 分析反射体。

1 CCSDP 先导孔岩性及测井曲线特征

先导孔 100.0 ~ 2000.0 m 岩心编录出现的岩层有片麻岩、角闪岩、榴辉岩、蛇纹岩等, 下面概述本井各岩性测井曲线响应特征:

(1) 榴辉岩: 密度(DEN)大, 平均值为 3.15 g/cm³, 当榴辉岩中富集密度更大的矿物时, 其密度变大, 如含有金红石时, 密度高达 3.7 ~ 3.9 g/cm³; 又如含有钛铁矿或铬铁矿时, 密度可以超过 4.0 g/cm³; 榴辉岩退变质时密度降低。声波时差(AC)小(速度大), 平均值为 48.81145 × 3.28 μs/m。放射性

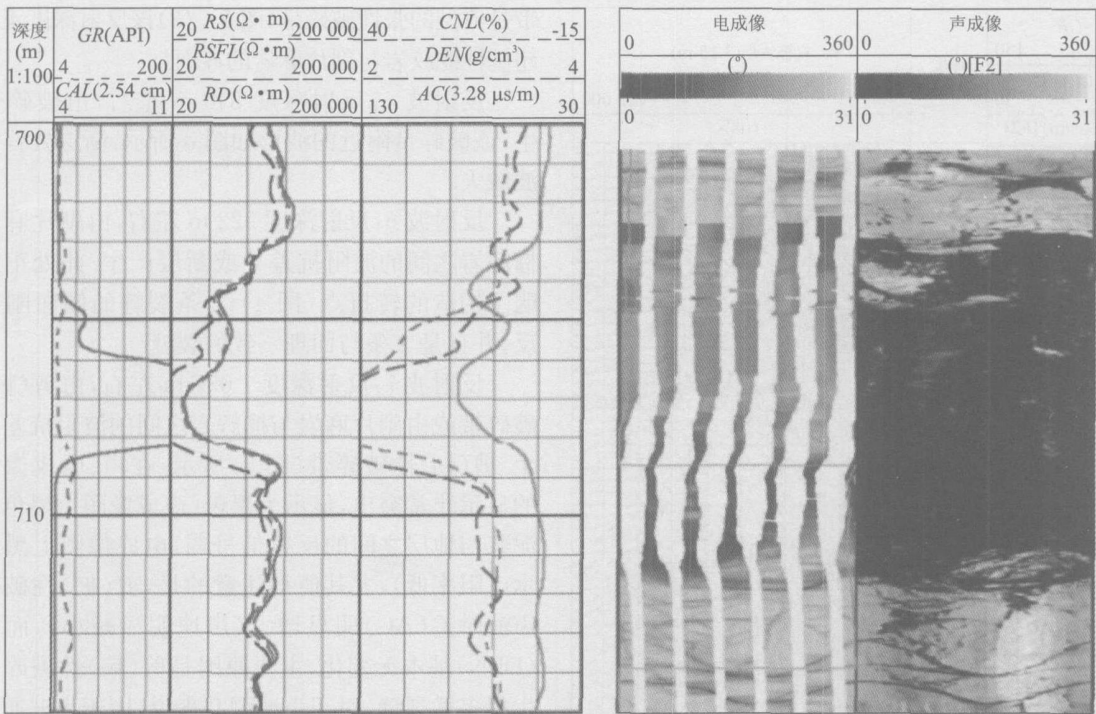


图 2 典型张性破碎带

Fig. 2 Typical tensile fracture

强度小, 平均值为 29.486 API, Th、U、K 的平均值分别为 2.311×10^{-6} 、 0.575×10^{-6} 、 1.795% 。当发生退变质(角闪石化)时, 放射性强度稍有增加。中子孔隙度测井值(CNL)小; 榴辉岩的主要矿物含氢量小, 中子孔隙度测井值小, 平均值为 5.611%, 但发生退变质(角闪石化)时, 含氢量增大, 中子孔隙度测井值增大。

(2) 片麻岩: 密度小, 正片麻岩、副片麻岩的平均值分别为 2.605 g/cm^3 、 2.746 g/cm^3 。自然伽玛大。正片麻岩的放射性强度大于副片麻岩, 主要原因是正片麻岩中正长石的含量大于副片麻岩。本井正片麻岩、副正片麻岩的自然伽玛平均值分别为 148.166 API、77.478 API。中子孔隙度小, 正、副片麻岩的中子孔隙度都小, 正片麻岩中子孔隙度平均为 0.661%; 副片麻岩中子孔隙度平均为 2.746%。

(3) 超基性蛇纹岩: 中子孔隙度大, 本井蛇纹岩中子孔隙度平均为 32.56%; 自然伽玛小, 本井蛇纹岩的自然伽玛平均值为 18.478 API; 电阻率低, 蛇纹岩含有磁铁矿、钛铁矿等金属矿物, 电阻率平均值为 $1211.566 \Omega \cdot \text{m}$ 。

(4) 角闪岩: 自然伽玛值介于榴辉岩和片麻岩之间, 本井角闪岩的自然伽玛、Th、U、K 的平均值分

别为: 49.206 API、 2.863×10^{-6} 、 0.726×10^{-6} 、 2.231% 。密度介于榴辉岩和片麻岩之间, 本井角闪岩的密度平均值为 2.888 g/cm^3 。由于角闪石的中子孔隙度测井理论响应值为 3.2%~9.1%, 在角闪岩的中子孔隙度曲线上常有 5%~10% 的显示。本井中子孔隙度平均值为 10.245%, 解释时为了区分角闪岩与退变质榴辉岩, 当中子孔隙度 $> 5\%$ 才定为角闪岩, 否则为退变质榴辉岩。

(5) 构造碎裂岩: 测井曲线被歪曲, 表现出井径明显扩大、中子孔隙度增大、电阻率减小、密度明显降低、声波时差大幅度增高等特征。

2 CCSD 先导孔孔区反射体解释

如图 1 所示, 说明如下: (1) 比较波阻抗与密度曲线, 发现波阻抗与密度曲线非常相似(几乎相同), 相当于密度曲线乘一个系数便是波阻抗, 产生此情况的原因是: 在本井声波时差(速度的倒数)分辨岩性的能力差, 除破碎带时差大、榴辉岩较小以外, 全井基本上差不多。(2) 为了便于解释反射体的岩性, 将 VSP 上的反射波进行编号, 计 13 个反射波, 反射波深度是反射波与先导孔相交处。(3) 测井曲线的深

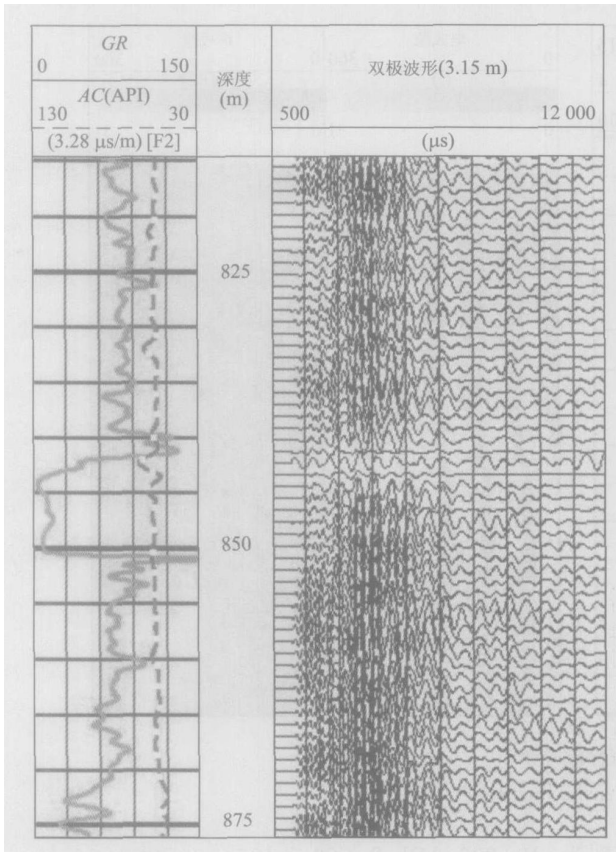


图 3 阵列声波测井波形图

Fig. 3 Waveform of array sonic log

度是经过与钻探深度对比、校正过的。

经对比分析, 14 个反射波的深度、产生的原因解释如下:

反射波 1: 反射深度 371 ~ 374 m 左右, 由于榴辉岩与副片麻岩之间的波阻抗差异产生或破碎带产生。

反射波 2: 反射深度 470 m 左右, 由榴辉岩与副片麻岩之间的波阻抗差异产生。

反射波 3: 反射深度 603 ~ 606 m 左右, 由榴辉岩与超基性蛇纹岩之间的波阻抗差异产生或张性断裂带产生。图 1 表明, 榴辉岩的厚度大约 80 m, 在榴辉岩中夹一蛇纹岩薄层, 榴辉岩与蛇纹岩薄层之间中子孔隙度差异明显, 密度和声波曲线上有一定的差异, 从波阻抗也有一定的差异, 但主要是榴辉岩与其下蛇纹岩的波阻抗差异引起的强反射波。

反射波 4: 反射深度 702 m 左右, 由破碎带产生: (1) 破碎带的密度 2.0 g/cm^3 , 声波时差接近 $90 \mu\text{s}/\text{ft}$ (相当于 $295.2 \mu\text{s}/\text{m}$), 波阻抗 $1300 \text{ T}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而破碎带之上岩石 (蛇纹岩) 的波阻抗 $2700 \text{ T}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 因此, 产生强烈的反射波, 该破碎

带是典型的张性破碎带(图 2)。(2) 该反射深度正好是超基性蛇纹岩与副片麻岩的界面。

反射波 5: 反射深度 840 m 左右, 由破碎带产生, 该破碎带附近的波形如图 3 所示, 断层处首波等波缺失。

反射波 6: 反射深度 922 m 左右, 由副片麻岩与榴辉岩之间的波阻抗差异或断层产生。此处正好说明了构造的转折点(图 4), 2 条裂缝的倾向刚好相反, 并且是 2 条与面理一致的裂缝。

反射波 7: 反射深度 1055 m 左右, 由剪(韧)性破碎带或由副片麻岩与榴辉岩之间的波阻抗差异产生。剪(韧)性破碎带(图 5)所示。在声、电成像图上的显示非常突出, 显示为黑色(声成像图上黑色表示泥浆与地层之间的反射信号弱, 电成像图上黑色表示电阻率低), 尤其值得注意的是, 剪(韧)性破碎带声波时差(AC)明显增大(声速明显减小), 而密度(DEN)基本无变化, 主要原因是剪(韧)性破碎带产生很多微裂缝, 对于声波测井来说, 由于声波通过微裂缝或绕过微裂缝传播, 使声波时差增大(声速增大), 而密度测井反映的是密度的平均效应(单位体积中的密度), 虽然密度有所减小, 但不明显。

反射波 8: 反射深度 1157 ~ 1161 m 左右, 由破碎带产生。

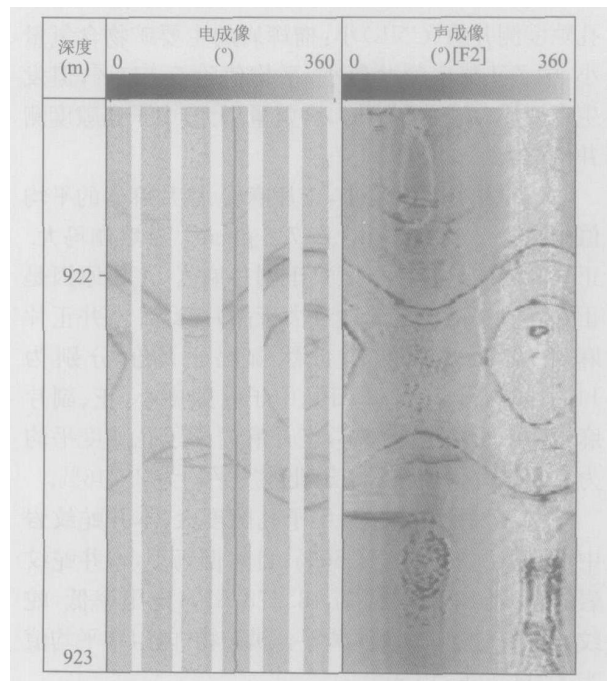


图 4 构造的转折点

Fig. 4 Turning point of construct

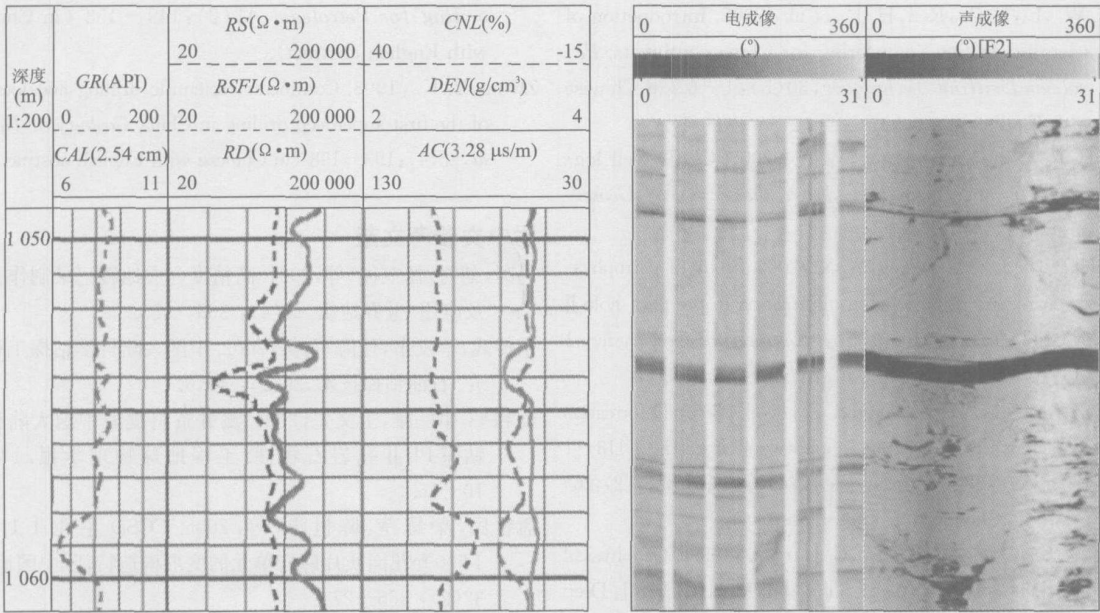


图 5 典型剪(韧)性破碎带

Fig. 5 Typical ductile shear fracture

RD、RS、RSFL 分别为深侧向、浅侧向、微球聚焦电阻率, RD 和 RS 几乎重合

反射波 9: 反射深度 1 240 m 左右, 由破碎带产生.

反射波 10: 反射深度 1 305 ~ 1 310 m 左右, 由破碎带产生.

反射波 11: 反射深度 1 402 ~ 1 409 m 左右, 由破碎带产生.

反射波 12: 反射深度 1 600 m 左右, 由韧性剪切带或片麻岩与榴辉岩和角闪岩互层之间的波阻抗差异产生.

反射波 13: 反射深度 1 700 m 左右, 由破碎带产生或正片麻岩与榴辉岩和角闪岩互层之间的波阻抗差异产生.

反射波 14: 反射深度 1 960 m 左右, 由破碎带产生.

需要说明的是: (1) 在 2 000 m 以上 CCSD 主孔发育了 2 组大型韧性剪切带, 上部韧性剪切带为 1 055 m 左右, 对应于地表的毛北韧性剪切带(为折返阶段的产物), 伴随角闪岩相 → 绿帘角闪岩相 → 绿片岩相退变质作用, 经历了先由 SE 到 NW 方向的(逆冲)剪切应变, 后由 NW 到 SE 方向的(正滑)剪切应变, 下部韧性剪切(1 600 m 左右), 对应于地表的阿湖 - 驼峰韧性剪切带, 该剪切带发育糜棱岩化退变榴辉岩(唐哲民等, 2005). 这 2 组韧性剪切带主要以糜棱岩化的构造岩为识别标志, 有强反射地震波对应. (2) 虽然以上列举了一些其他的断层破碎带, 这些断层破碎带如果尺度很小, 在 1 m 以下, 也不一定

产生强反射波, 例如 1 200 m 以下, 1 550 m 以上有一组较小的破碎带, 虽然在波阻抗上有反映, 但在 VSP 剖面上反映不明显, 这正是地震波波长的原因, 导致尺度很小的破碎带不一定能产生强反射波.

3 结语

通过测井与录井等资料划分岩性、密度、声资料计算波阻抗, 将 VSP 资料与已划分的岩性对比, 结果表明, 中国大陆科学钻探先导孔区的主要反射波的产生原因是: (1) 榴辉岩与片麻岩的波阻抗差异; 榴辉岩与超基性蛇纹岩的波阻抗差异; 片麻岩与超基性蛇纹岩的波阻抗差异等, 即岩性间的波阻抗差异产生; (2) 破碎带, 主要是韧性剪切带产生波阻抗. 这些研究结果对标定地壳中的反射地震信号具有重要意义.

致谢: 杨文采院士提供宝贵的地震资料, 在此表示衷心的感谢!

References

Feng X., Liu, C., Yang, B. J., et al., 2001. The producing method and the application of synthetic seismogram of high precision. *World Geology*, 20(4): 389 - 395 (in Chinese with English abstract).

- Li, C. W., Li, F. D., Ren, H. J., et al., 2002. Introduction of scientific drilling engineering for China continents. *Petroleum Drilling Techniques*, 30(5): 4 – 6 (in Chinese with English abstract).
- Pan, H. P., Niu, Y. X., Wang, W. X., 2002. CCSD well logging program. *Journal of China University of Geosciences*, 13(1): 91 – 94.
- Pan, H. P., Niu, Y. X., Wang, W. X., 2004. Study of petrophysics characters using logging information in pre pilot hole II of CCSD. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 1(1): 10 – 16 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. M., Chai, Y. C., Chen, S. Z., et al., 2005. Deformation characteristics of the granitic gneiss unit from the 1113 – 1160 m core of CCSD main hole. *Geology in China*, 32(2): 265 – 274 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Chen, Z. Y., Chen, G. J., et al., 1999a. Geophysical investigations in northern Sulu UHPM belt, Part I: Deep seismic reflection. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(1): 41 – 50 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Fang, H., Chen, Z. Y., et al., 1999b. Geophysical investigation of northern Sulu UHPM terrane in geophysical investigation of northern Sulu UHPM terrane in east China (II): Non seismic methods. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(4): 508 – 517 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Zhang, C. H., Zhu, G. M., et al., 2002. Calibration of seismic reflectors in Chinese continental drilling area. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(3): 370 – 384 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. H., 2002. Joint application of VSP and sonic logging data in lithologic interpretation. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 41(2): 149 – 153 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. K., 1998. Continental scientific drilling and location of the first superdeep drilling in China. *Geology in Jiangsu*, 22(4): 193 – 198 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯, 刘财, 杨宝俊, 等, 2001. 高精度合成地震记录制作方法及应用. *世界地质*, 20(4): 389 – 395.
- 李传武, 李发东, 任海军, 等, 2002. 中国大陆科学钻探工程简介. *石油钻探技术*, 30(5): 4 – 6.
- 潘和平, 牛一雄, 王文先, 2004. 测井资料提取中国大陆科学钻探 PP II 孔岩石物性. *工程地球物理学报*, 1(1): 10 – 16.
- 唐哲民, 柴耀楚, 陈世忠, 等, 2005. CCSD 主孔 1113 ~ 1160 m 花岗质片麻岩单元的变形构造特征. *中国地质*, 32(2): 265 – 274.
- 杨文采, 程振炎, 陈国九, 等, 1999a. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查 (I) —— 深反射地震. *地球物理学报*, 42(1): 41 – 50.
- 杨文采, 方慧, 程振炎, 等, 1999b. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查 (II) —— 非地震方法. *地球物理学报*, 42(4): 508 – 517.
- 杨文采, 张春贺, 朱光明, 2002. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体. *地球物理学报*, 45(3): 370 – 384.
- 张卫红, 2002. VSP 和声波测井资料在岩性解释中的联合应用. *石油物探*, 41(2): 149 – 153.
- 张永康, 1998. 大陆科学钻探与中国第一口科学钻选址. *江苏地质*, 22(4): 193 – 198.