

队将仍然使用模拟测井仪器。因此，实现我国煤田测井数字化的关键，就在于如何使这些仍然使用模拟测井仪器的测井队实现数字化。

实现我国煤田测井数字化，决不是说要使我国所有的煤田测井队都使用数字测井站。在“八五”期间，应当分批、分层次地完成我国煤田测井的数字化，即是说，少数测井队装配以大型车载计算机的数字测井站，较多的测井队配以轻便数字测井站，而余下的多数测井队则配以具有刻度的各类模拟测井仪及测井微机数字处理系统。这种测井微机处理系统必须带有数字化仪输入设备，以便将指定井段的模拟曲线数字化并将离散的测井数据送入微机进行分析和处理。

值得指出的是，江西省煤田地质科研所在研制模拟测井微机处理系统方面已经取得了可喜的成果。中国地质大学（北京）在这方面也已取得了令人鼓舞的进展。实践证明，测井微机处理系统具有以下优点：

1) 价格低廉，适应性好，工作性能稳

定，对环境条件无严格要求。同时，操作也很简单，易于野外生产人员掌握使用。

2) 在配置适当的外部设备后，这种微机处理系统既可以处理模拟测井资料，也可以处理数字测井资料；既可以进行单井分析，也可以进行多井分析。

3) 这种测井微机处理系统十分便利与研制和开发煤及其共生矿产测井分析的专用软件。

4) 可以使用汉字系统，从而使全部输入、输出实现汉字化。

5) 这种微机系统很容易实现与其他袖珍机（如PC—1500机，HX-20机）的联接，因此可将这种系统作为JBS-1型轻便数字测井站的室内处理系统来使用。

完全可以相信，只要我们按照改革、开拓、创新的精神，正确处理和解决体制改革、新仪器、新方法的制造和研制，以及本文所提出的五个方面的问题，我国煤田测井必将开创出一个新局面，必将以崭新的面貌出现在世界地球物理测井的舞台上。

济宁煤田TK区VSP的采集、处理和应用

山东煤田地质勘探公司

王述亭

VSP技术以高分辨率、高信噪比的优势及独特的解释方法越来越受到人们的信赖。近年来，垂直地震剖面（VSP）法在我国竞相发展，煤田裸孔VSP也相继展开。

山东济宁煤田TK区是中日合作勘探项目，我们利用日本三菱咨询公司提供的VSP设备，对该区数个孔进行了零井源距、非零井源距VSP观测，所获原始资料质量较高，在帮助常规地震剖面处理、解释及提取物性参数方面取得了一些成果。

一、野外采集

VSP野外工作方法是影响VSP资料质量的重要因素之一。野外采集参数的选择既要考虑是否能满足VSP质量要求，也应核算野外施工效率，从而设计最佳施工方法。

（一）VSP野外采集仪器系统

我们所用采集系统可分为下井检波器、地面绞车及电缆、记录仪、推靠控制箱体及数据存储系统五个部分（图1）。

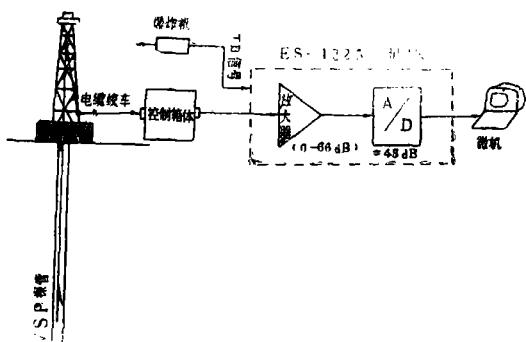


图1 VSP测井系统连接图

记录仪使用ES-1225，下井检波器为x、y、z三分量检波器，并带有丝杆传动的推靠臂。

(二) 震源及其一致性

震源的选择主要考虑激发输出振幅、频带宽度、震源子波重复性、炮井壁维护及信噪比等综合因素。

我们在TK区选择陆用电火花(LDZ150/15)、硝铵、TNT药炸三种震源做了对比试验。实践表明，炸药震源有较强的输出能量、激发频带较宽，高频成分相对丰富、记录信噪比较高，但子波再现性差，不利于炮井壁维护。我们所具备的陆用电火花震源输出能量偏弱，与炸药震源结论相反。

TK区零井源距VSP炮井用12m浅井，炮井的上部约10m用套管(直径127mm)固定井壁，在套管下部用炸药先形成一个空洞，空洞内以及上部套管内充满水，每放一炮都检查炮井中的水位，如炮井未充满水，则人工灌水，使水位保持一致。实践表明，这种方法激发的子波波形具有较好的重复性，且简便易行、施工效率高。

为监测每炮激发一致性，专门设置了近场子波监视检波器、远场子波监视检波器。

药量的选择要在确保VSP记录有一定信噪比前提下尽量减小，以便于维护井壁、保持子波一致性，且有利于激发高频。一般0.1~0.3kg硝铵炸药就可以满足能量要求。我

们在T7-2、T11-3孔用0.15kg药量，T13-9、T19-1孔用0.3kg药量，都获得了高质量的VSP记录。

(三) 井源距的选择

零井源距VSP选择原则是：在不致破坏观测孔井壁、又能有效地避开井筒波干扰的前提下，尽量减少井源距。因为井源距越大，求取速度精度越差。我们选用了30~50m，效果较好。

对于非零井源距VSP，井源距大小要考虑预追踪的地下反射体与观测井的相对位置(图2)，VSP实际观测能力等因素。

设井源距为L，预追踪的地下反射体深度为H，接收点深度为Z，则VSP能追踪的地下反射体水平距离

$$X = \left[1 - H / (2H - Z) \right] \cdot L$$

当Z=0时， $X_{max} = \frac{1}{2} \cdot L$

我们在TK区根据预追踪的地质体的不同情况，分别设计了井源距为330m、500m及双边非零源距(每边各500m)VSP，所获资料都达到了预期目的。

(四) 时间采样间隔的选择

根据采样定理： $\Delta t \leq \frac{1}{2} f_{max}$ ，结合TK区的实际地震地质条件，取 $f_{max} = 150\text{Hz}$ ，则算得理论上 $\Delta t \leq 3.3\text{ms}$ ，为了精确地研

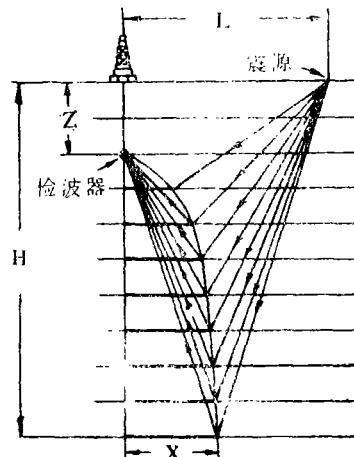


图2 井源距与地下反射点关系图

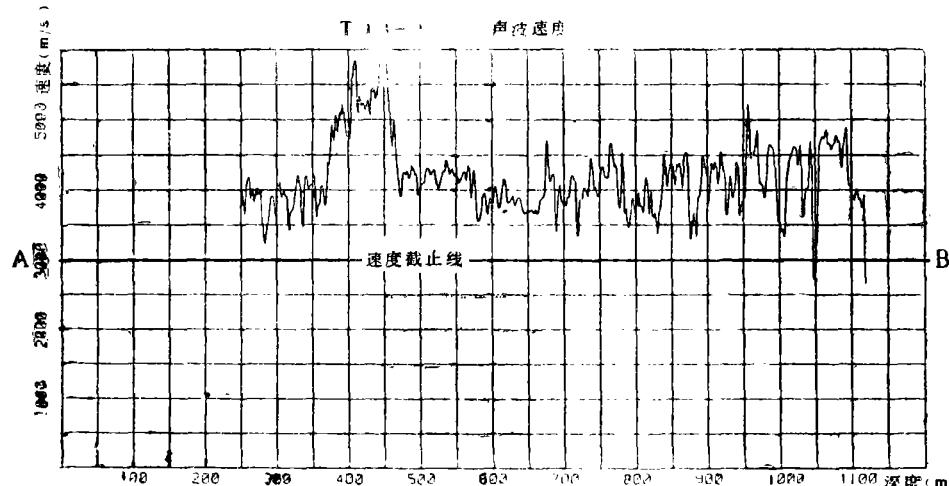


图3 ΔZ 与空间假频关系图

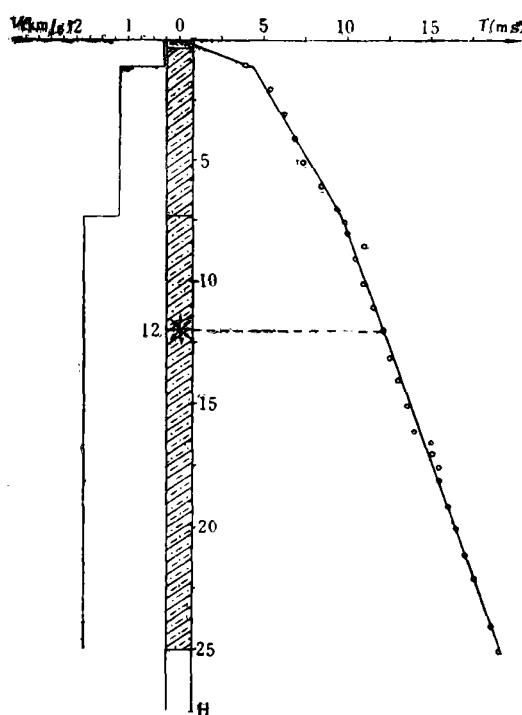


图4 T13-9孔微地震测井曲线图

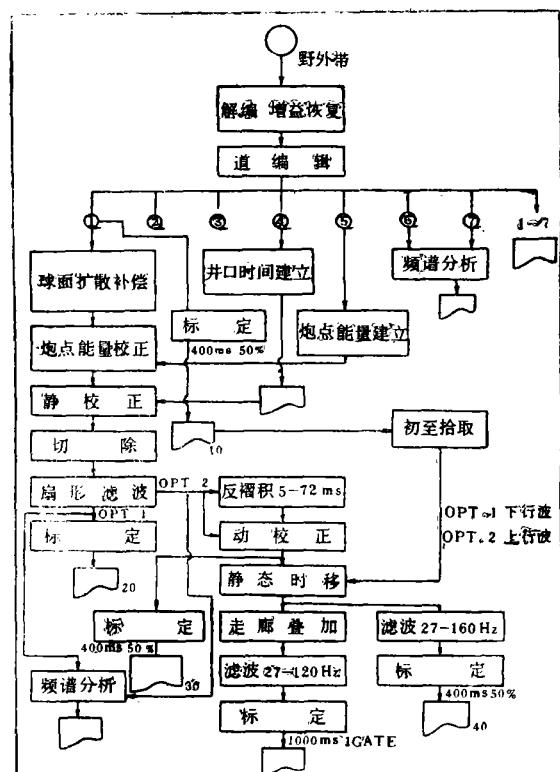


图5 T11-3孔ZVSP处理流程(日本、东京)

1—Z分量, 2—X分量, 3—Y分量, 4—小井口100Hz
检波器, 5—大井口100Hz检波器, 6—浅井中100Hz检波器,
7—浅井中水听器

究子波，小采样间隔总要比大采样间隔效果好，故我们取 $\Delta t = 1 \text{ ms}$ 。

(五) 深度采样间隔的选择

VSP不仅要求时间采样覆盖所有频率成分，而且要求空间采样覆盖所有空间波长，以避免空间假频。

深度采样间隔应保证在最短波长内至少有两个采样点，即：

$$\Delta Z \leq V_{\min} / 2 \cdot f_{\max}$$

式中， V_{\min} 为地层最小波速； f_{\max} 为子波最高效率。若取 $V_{\min} = 2500 \text{ m/s}$ ， $f_{\max} = 150 \text{ Hz}$ ，由上式可算得 $\Delta Z \leq 8.33 \text{ m}$ ，考虑到施工上的方便，我们选 $\Delta Z = 10 \text{ m}$ 。图3给出了TK区T13-9孔 ΔZ 空间假频关系图。速度截止线(AB)用 $V_{\text{截}} = 2 \cdot f_{\max} \cdot \Delta Z$ 式来表示，可得到 $V_{\text{截}} = 3000 \text{ m/s}$ （参数 $\Delta Z = 10 \text{ m}$ ， $f_{\max} = 150 \text{ Hz}$ ）。从图3看到，深部地层都在AB线以上，不会在处理中造

成空间假频干扰；而上部地层(220 m以浅)速度在 $1500 \sim 2500 \text{ m/s}$ 之间，可能会出现空间假频干扰。事实上，我们取 $\Delta Z = 10 \text{ m}$ 采集的VSP数据并没引起过多的空间假频，这可以从我们所得到的较高质量的VSP资料予以证明，说明我们设计的深度采样间隔是可行的。

(六) 激发层位的选择

合理的选择激发岩性是很重要的，它不仅影响震源子波频谱、震源子波一致性，有时决定着一井多炮方法的成败。一般认为粘土层、砂质粘土层中激发较好，砂层、流砂层易使井壁塌落，应使炮点距其远些。炮点应避开低速带且位于潜水位下 $4 \sim 5 \text{ m}$ 。图4表明，我们选定激发井深 t 为 12 m 是合理的。

(七) 接收条件的影响

煤田钻孔多为裸孔，其井壁不甚光滑，

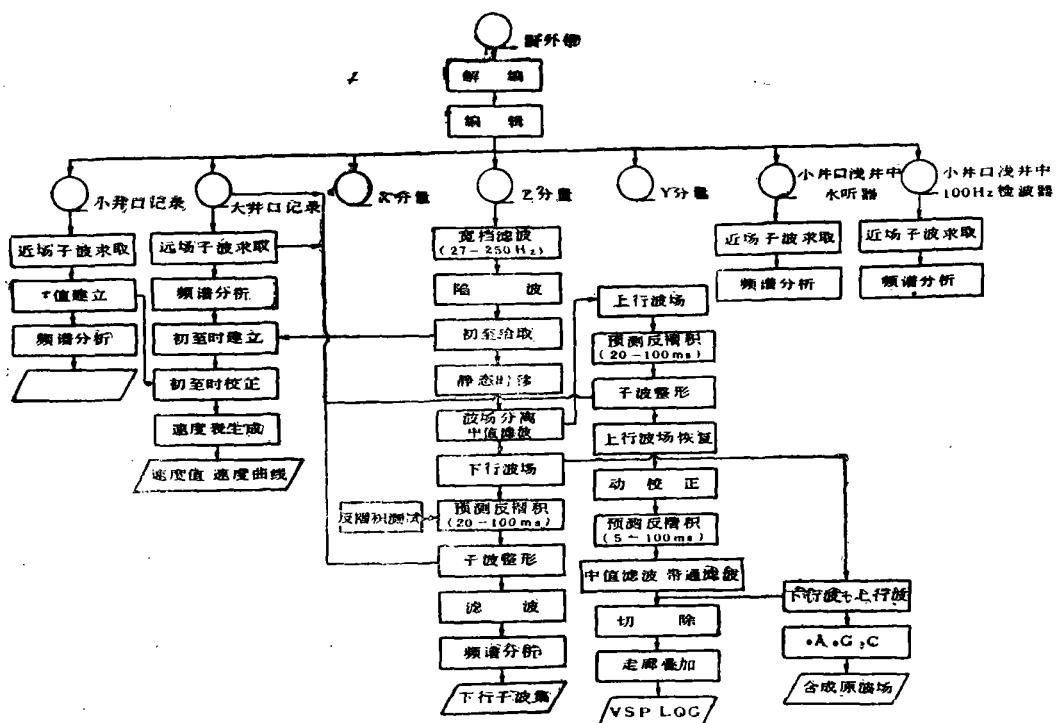


图6 T13-9孔Z VSP处理流程 (胜利油田)

要使VSP探管与井壁良好接触是困难的。这是裸孔VSP先天不足。推靠不紧、检波器偏斜等直接影响VSP资料质量。TK区新生界安放了固井套管(没固结)，在套管内记录的地震波信噪比很低，完全掩盖了上行波，波形畸变严重。所以，要在新生界中取得好的VSP资料，必须将套管与井壁良好固结，改善井下检波器与地层的耦合条件。推靠不好时，地面各种噪声源会借助电缆传给井下检波器，这种干扰常出现在初至前以至整道。所以，检波器推靠住后，应将电缆向下放松30~50cm，这要求推靠力应足够大——以电缆放松后检波器不沿井壁向下

蠕动为宜。

二、资料处理

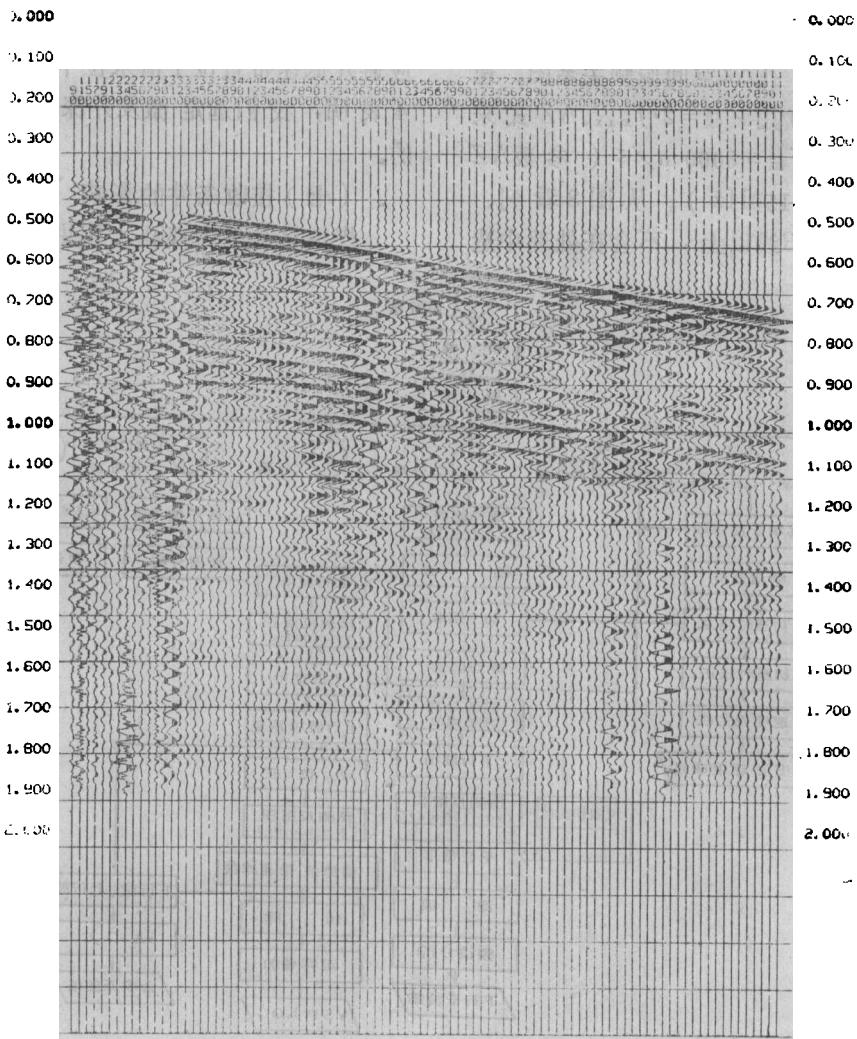
TK区VSP资料的处理是在日本CDC公司CYBER-176机和胜利油田VAX-11/782、IBM3083机上进行的。

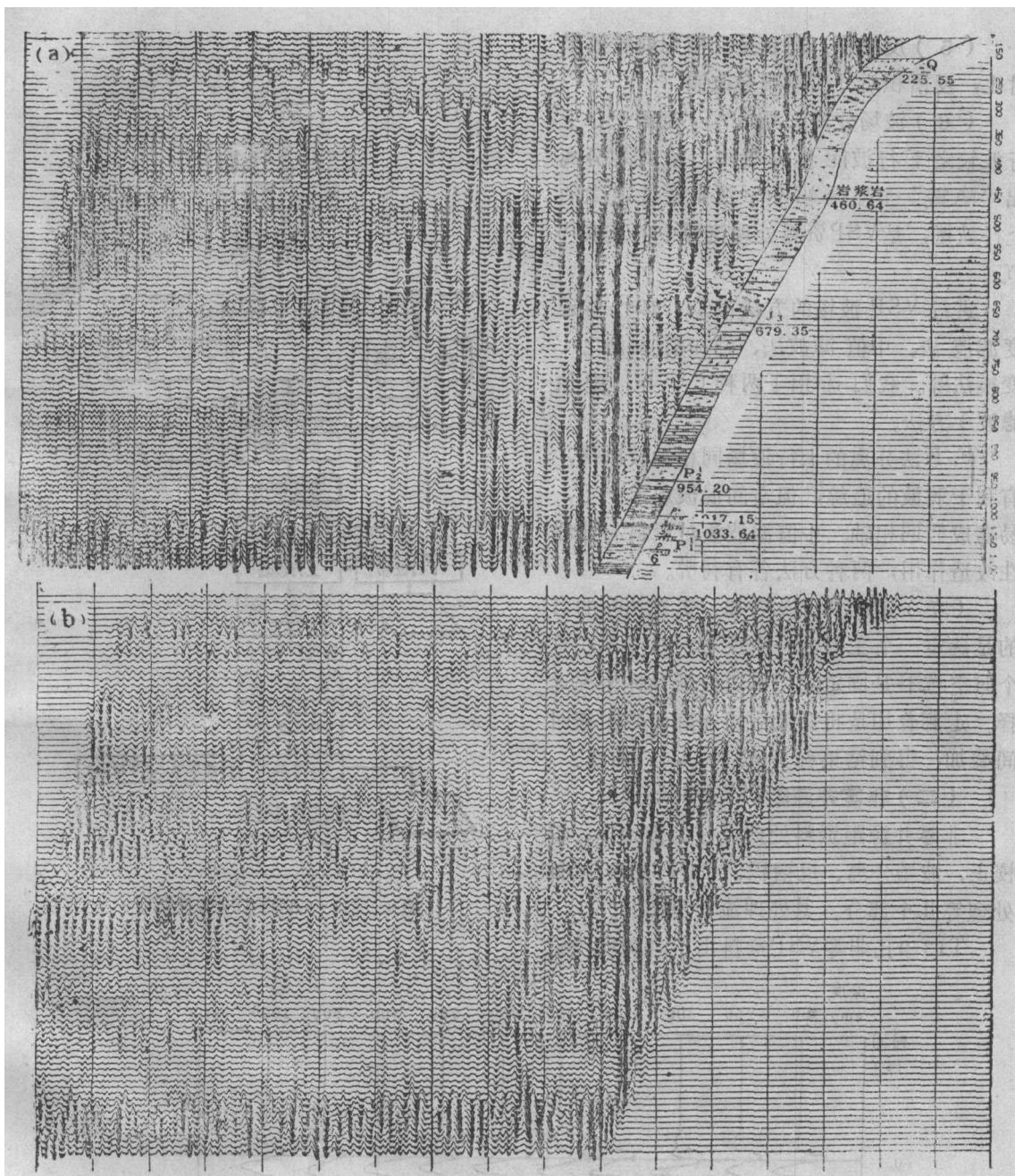
(一) 零井源距VSP资料的处理

处理流程见图5和图6。

(1) 预处理：包括解编、增益恢复、道编辑、球面扩散补偿、炮点能量校正、炮点静校正、切除等。

(2) 静态时移即上、下行波拉平：上、下行波拉平是分别进行的。下行波拉平是





以初至时相等为标准即减去初至时间；上行波拉平是以初至时加倍为标准的。

(3) 动校正：消除偏移距的影响，将各道校成自激自收时间。

(4) 震源子波整形：借助专门记录的

近场或远场子波，设计各炮记录的子波整形滤波器，用以改善震源子波一致性（图7）。近场子波受炮井干扰大，波形不太稳定，我们是用近场子波来设计震源子波整形滤波器的。

(5) 反褶积：图8是反褶积前后效果对比，反褶积后分辨率明显改善。

(6) 波场分离：原始VSP剖面上，上行波较之下行波能量弱得多。精细地分离出“隐藏”于强振幅下行波中能量甚微的上行波场，是VSP资料处理流程中的重要环节。

进行VSP波场的方法很多，如F-K速度滤波法、中值滤波法、叠加消除法 τ -P变换法等。我们选用了两种(F-K、中值滤波)方法。

F-K法分离的上行波场同相轴较圆滑，有利于弱波的追综，但空间混波现象严重，易造成假同相轴。中值滤波法对资料有非线性改造作用，两种方法各有利弊。

(7) 走廊切除及叠加：走廊切除的目的是选定一个主要含一次反射的时空域，这个时空域不是固定的，可以根据具体情况选择。走廊叠加是将切除后的走廊内数据按时间叠加，得到结果称为VSP-LOG曲线。

(二) 非零井源距VSP资料处理

非零井源距资料处理可分为预处理、静校正、波场分离、反褶积、CDP变换、修饰处理等几个部分。其处理流程见图9。

T13-9孔非零VSP资料由于各深度段记

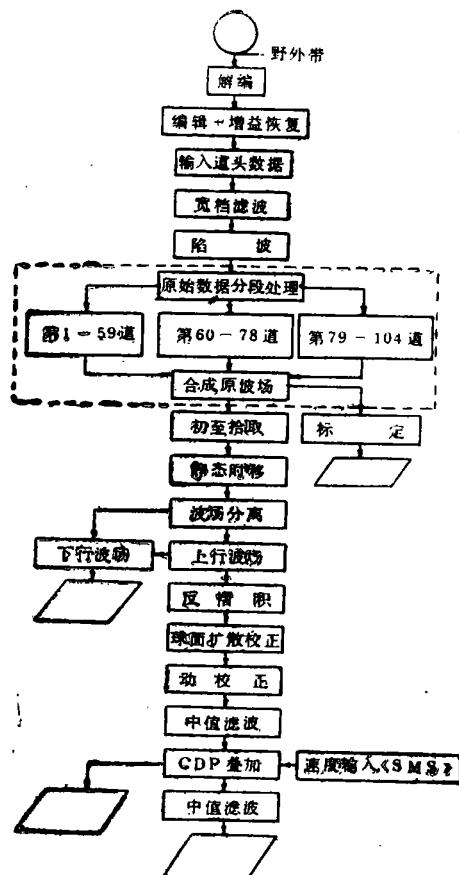


图9 T13-9孔VSP处理流程图

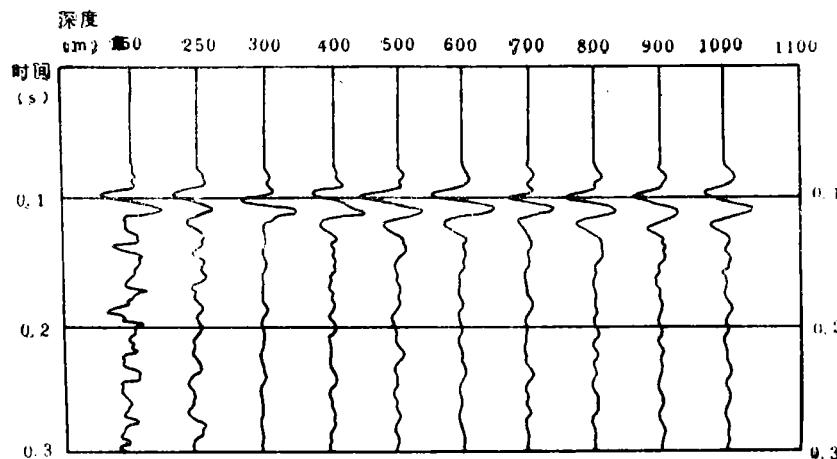


图10 T13-9孔VSP获得的各深度地震子波

录道频率、振幅、波形特征都有明显差异，放在预处理时，我们将其分段处理后重新合成原波场，使整个剖面变得面貌一致。波场分离做了F-K、中值滤波两种方法的对比。F-K法分离的上行波较中值滤波法同相轴清晰， S/N 较高。中值滤波法得到的上行波场中残存有下行转换波能量。我们认为，F-K法分离波场的方法较理想。

三、VSP资料应用

(一) 利用VSP初至时，获取精细的速度参数

VSP深度采样点密，利用其下行初至时可获得精细的速度资料，用于常规地震剖面时深转换和速度分析，代替地震测井。

(二) 提取各深度点地震子波

VSP检波器可放到钻孔中任意地层附近，因而可直接记录任一点的地震子波。利用分离出的下行波场来提取各测点下行子波（图10）。

(三) 利用VSP资料识别反射层

VSP剖面具有波形—时间的对应关系，

同时具有波形—深度的对应关系。因此，借助于VSP资料可将时间、岩性有机地结合在一起，准确地确定每一反射波组来自哪一反射层或反射层序（图11）。

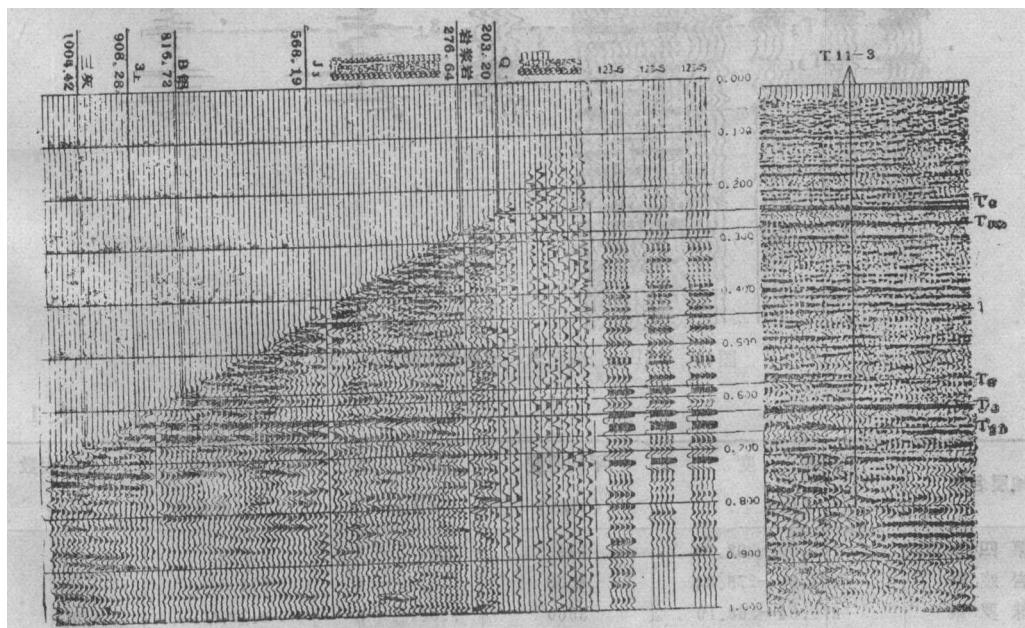
TK区发育的主要波组有 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_{3L} ，它们分别对应于第四系底界、火成岩顶底界、3煤层和三灰。从图11中可看到，VSP—LOG与地面地震剖面有良好的对应关系。

VSP有利于识别弱波。对应于侏罗系底界的 T_1 波和对应于B层铝土岩的 T_3 波在地面地震剖面上能量弱，不易追踪，而在VSP曲线上有清晰的同相轴，可帮助地面地震进行横向对比。

(四) VSP与人工合成地震记录的对比

在帮助过井地震剖面做出地质解释方面，合成地震记录与VSP一样，发挥着很大的作用，但VSP记录将更准确、更有效（图12）。

VSP—LOG与过井地震剖面从浅至深波形、相位吻合得很好，比人工合成地震记录更接近于过井地震剖面。



(五) 利用VSP下行子波谱计算吸收系数

VSP在井中不同深度的地层中，直接记录了地震子波信息，为我们提供了一个有价值的研究地震波吸收衰减规律的基础资料，所获衰减吸收参数为常规地震的吸收衰减补偿处理提供了依据。

我们用频谱比法计算了该区衰减吸收系数 α 、品质因数 Q ，见表1：

(六) 横向追踪钻孔附近地质构造

VSP具有比地面地震更高的信噪比和分辨率，利用VSP—CDP叠加剖面（图13）可研究钻孔附近的地质构造横向变化细节，特别是对较复杂的地质构造尤为重要。

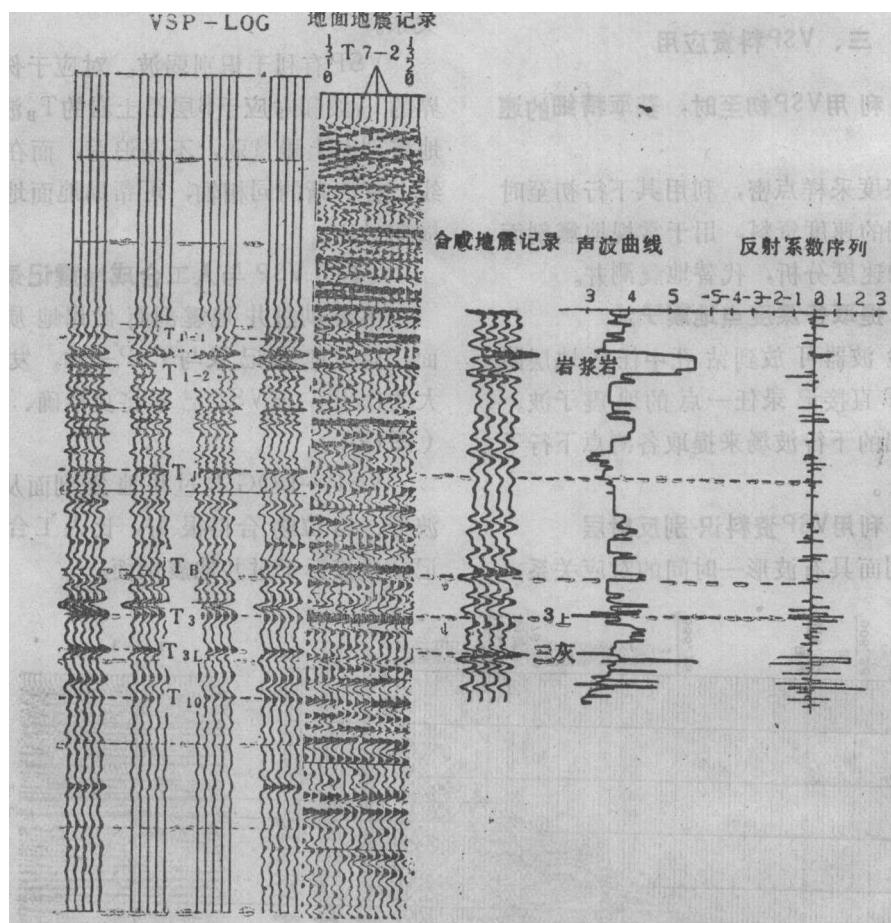
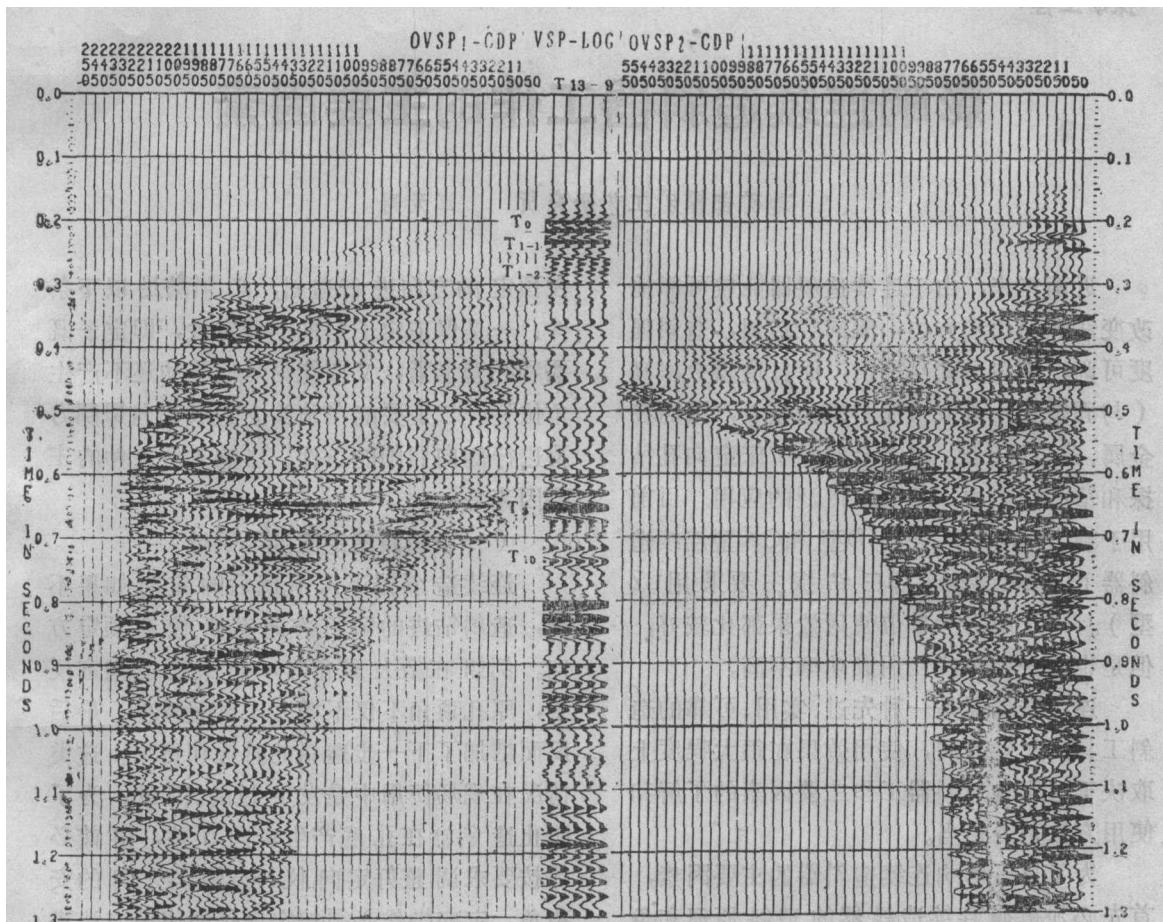


表1

地层名称	深 度 (m)	平均速度 (m/s)	单位衰减 (dB·m/s)	单位衰减 (dB/波长)	品质因数 (Q)
第四系	100.00—203.20	1490	2.041E-4	0.3041	90
岩浆岩	203.20—276.64	4000	1.008E-4	0.4032	68
侏罗系	276.64—568.19	3560	7.981E-5	0.2841	96
二叠系	568.19—1109.63	3920	5.709E-5	0.2238	121



结语

山东煤田物测队自1987年开始进行VSP试验，至今已完成四口井的VSP观测，包括零井源距、单边非零井源距和双边非零井源距VSP。针对煤田VSP多为裸孔之特点，在野外施工方法、采集参数选择及资料处理