

地震记录中的转换波

李庆忠 顾汉章

摘 要

在一些隆起区的水平叠加时间剖面上,常常出现倾斜短同相轴,呈条带分布;而在单炮记录的远炮检距位置上,于正常反射波之后,出现视速度较低的同相轴。经计算确认,这些是转换波。转换波的存在,严重地降低了记录的信噪比。消除这类转换波的措施有:1.资料采集时要有足够的排列长度和覆盖次数;2.处理时运用叠后二维滤波和多次波消去法。文中给出的实际资料,充分地证明了这样做是行之有效的。

ABSTRACT

Some oblique short events often appear in narrow zones on CDP time section crossing structurally domed area, and some low velocity events follow the normal reflections on the far traces of single cover records. Identified by computations, all such events are considered as converted waves, which severely decrease S/N ratio of seismic records. The measure for eliminating converted waves is to use proper long spread and sufficient folds of multiple coverage in data acquisition, and to adopt 2D filtering after stacking and the method for eliminating multiples in data processing. This measure proved highly effective.

在通常的纵波反射记录上,是否有转换波存在?它在何种条件下变强?有什么样的特点?在资料采集和资料处理时,采取什么措施压制它?这些问题便是本文想说明的问题。

转换波的发现

在塔里木盆地的巴楚隆起的水平叠加时间剖面上,常常出现许多倾斜状短同相轴,呈条带状排列。在同一条剖面上,这种条带按照一定的关系出现多次(图1)。在单炮记录上,它们按一定规律分布在大炮检距位置上(图2)。这种波在本区分布极广,几乎

条条测线都可以见到，它严重地干扰了有效反射波。在其他地区，也发现过这类波（图3）。经计算证实，这类波属于转换波类型。因此，在记录上正确地识别转换波，在处理中有效地压制转换波是有实际意义的。

经过计算分析，这类转换波主要是PS、PSSP（包括PSPS、PPSS波）和PSSSP等。本文仅对野外地震记录中的转换波产生的条件、表现特征及其识别方法进行讨论。

工区内古生界地层埋藏较浅（400—700米），界面产状比较平缓，在该界面的上面，覆盖着一套新生界松软的砂泥岩地层。界面上下地层的层速度差异较大，构成一个很强的波阻抗界面，其反射系数可达0.3—0.4。

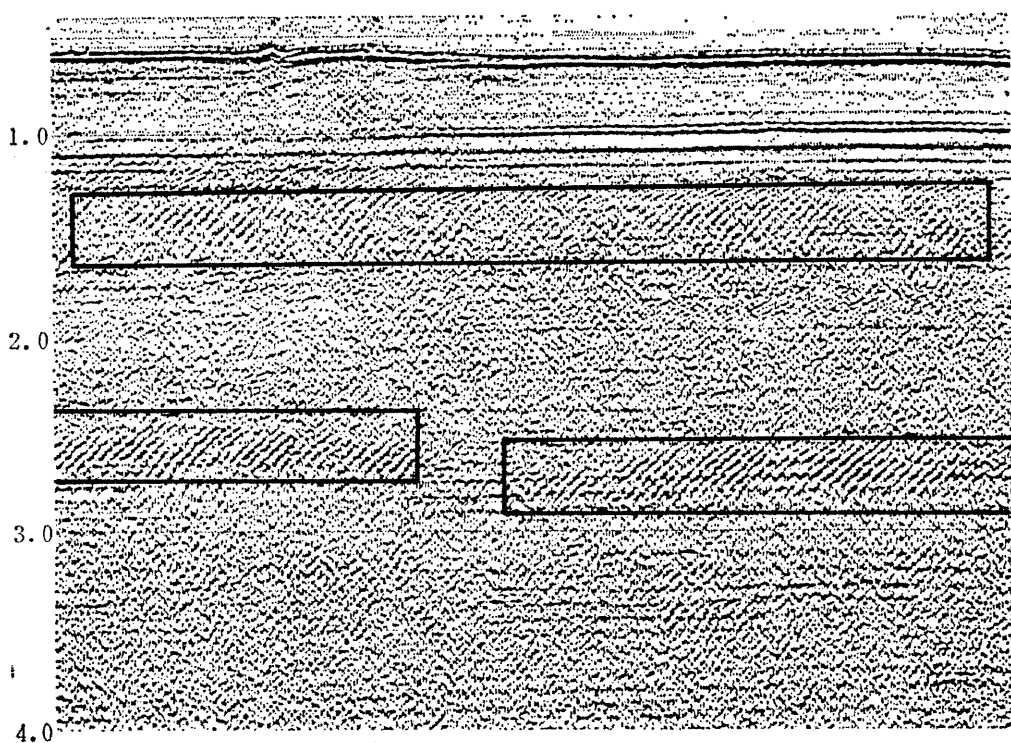


图 1 P8C—6 测线水平叠加时间剖面

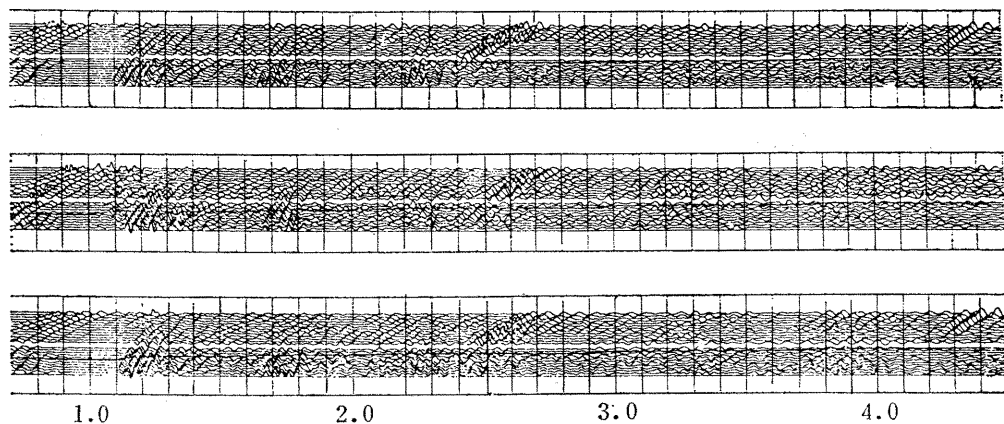


图 2 单炮记录上的转换波

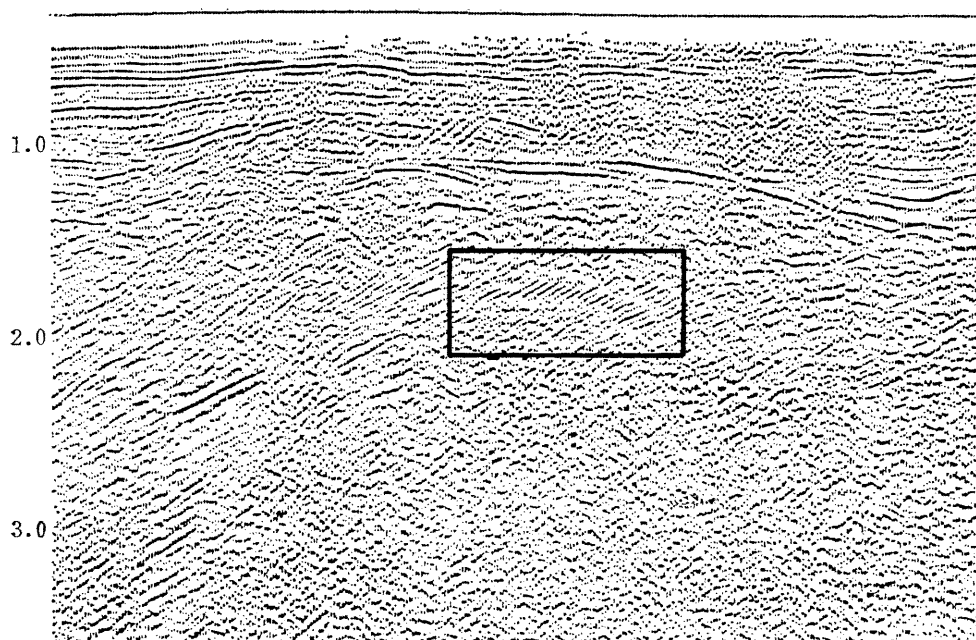


图 3 二连盆地EH14测线水平叠加时间剖面

从本区记录上转换波表现的特点看，主要可分为五种（图4）。

1. PS 转换波 在一般单炮记录上，能量表现很弱，很难分辨，但在水平叠加时间剖面上能量有所加强。

2. PSSP转换波（包括PSPS和PPSS波）这种转换波无论在单炮记录上，还是在水平叠加时间剖面上，其能量都比较强。

3. PSSSSP 转换波 在单炮记录上和水平叠加时间剖面上，都有明显的能量显示。

4. PSSS 转换波 在单炮记录上能量很弱，它出现在 PSSP 波和 PSSSSP 波之间。

5. PPPS 转换波 在单炮记录上能量显得也很弱，它出现在 PS 波和 PSSP 波之间。

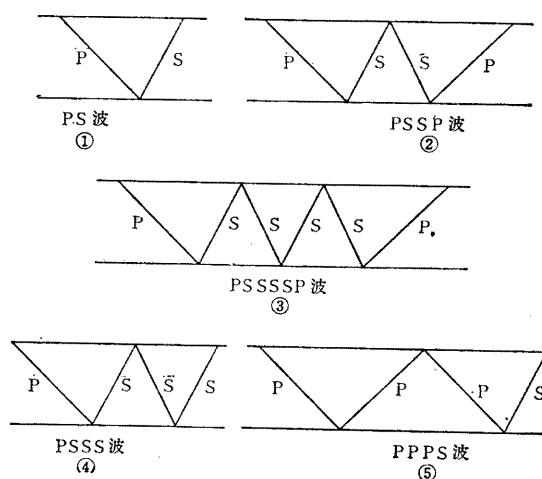


图 4 转换波的类型

本区上述五种转换波，总的来讲，前三种较强，它们在时间剖面上构成很强的干扰，后两种转换波较弱。

图 2 记录的最大炮检距为 1,350 米，道间距为 50 米。从该图可以看出，各种转换波出现的时间虽然不同，但都和炮点有一定的距离。转换波的频率比有效波低。转换波的视速度低于同 t_0 时刻的有效波和多次波的视速度。叠加速度也较低，一般为 1,000 米/秒至 1,300 米/秒（第三系地层覆盖在老地层上时）。

在采用有效波叠加速度做出的水平叠加时间剖面上, 转换波为一簇倾斜轴组成的条带。其倾斜轴的倾斜方向与发炮方向一致。在采用转换波自身的叠加速度进行动校叠加时, 转换波可以成像。

转换波的特征

转换波的时距曲线

设地下反射界面是水平的, PS 转换波的旅行时间 t_{PS} 可用下式表示 (图 5)

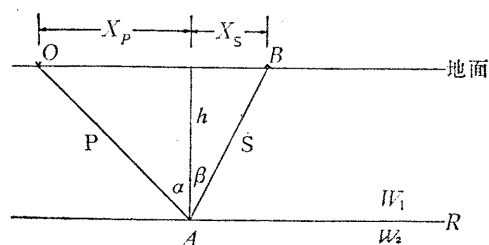


图 5

$$t_{PS} = \frac{1}{v_P} \sqrt{X_P^2 + h^2} + \frac{1}{v_S} \sqrt{X_S^2 + h^2} \quad (1)$$

它的参数方程为

$$X_P = h \tan \alpha \quad X_S = h \tan \beta \quad \sin \beta = \frac{v_S}{v_P} \sin \alpha$$

式中 v_P 为 W_1 介质中纵波 P 的传播速度;
 v_S 为 W_1 介质中横波 S 的传播速度; α 为 P 波的入射角; β 为 S 波的反射角; h 为界面 R 的埋藏深度。

埋藏深度。

当 $\alpha = \beta = 0$ 时, 即 PS 转换波的 t_0 时可表示为

$$t_{0PS} = h \left(\frac{1}{v_P} + \frac{1}{v_S} \right) \quad (2)$$

式 (1) 为 PS 转换波时距曲线方程式。一般来讲, 转换波的时距曲线也是一条双曲线。

PSSP 波的旅行时间 t_{PSSP} 应是 PS 波的二倍, 可表示为

$$t_{PSSP} = 2 \left(\frac{1}{v_P} \sqrt{X_P^2 + h^2} + \frac{1}{v_S} \sqrt{X_S^2 + h^2} \right) \quad (3)$$

这种波与 PSPS、PPSS 波的旅行路径和时间是相同的, 所以很难把它们区别开。如果这三种波同时存在, 它们将互相叠合在一起, 不可能也不需要把它们分开。但是, 由于 PSPS 和 PPSS 波最后都是以 S 波传播到地面, 目前生产中采用的检波器是不容易接收到的, 所以这种波一般为 PSSP 波的可能性较大。当然, 当入射角增大到一定范围时, 检波器也是可以接收到 S 波的。

图 6 是根据本工区的转换波的诸参数, 按公式 (1)、(3) 分别计算出来的时距曲线和相应的转换波时距曲线。不难看出, 它们之间是相当符合的。

转换波的速度

转换波的速度由两部分组成, 即纵波速度 v_P 和横波速度 v_S 。以 PS 波为例, 在反射界面为水平时, 反射界面的埋藏深度可根据 v_P 和 t_{0P} 求出。在同一介质里横波传播的速度 v_S 可近似表示成

$$v_S = \frac{h}{t_{0S}}$$

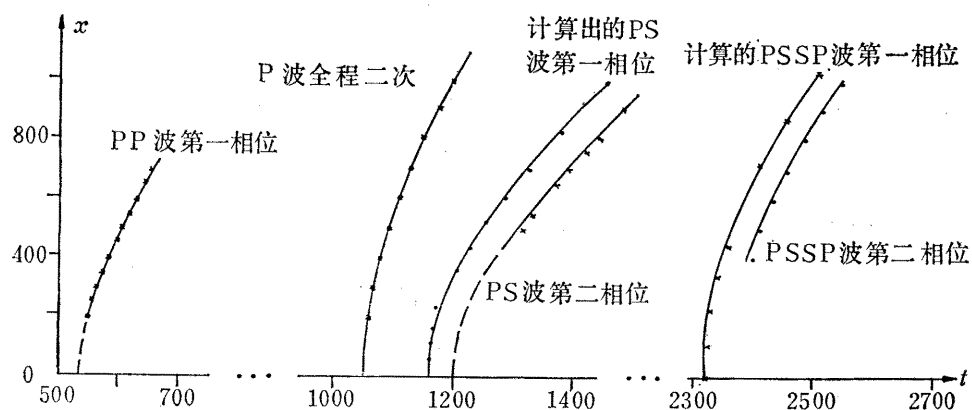


图 6 实际的转换波和计算的转换波时距曲线

式中 $t_{0S} = t_{0PS} - \frac{1}{2}t_{0P}$ 。 t_{0PS} 是一个近似值, 它可以根据转换波速度谱(图 7) 和单炮记录近似求得。

PSSP 波是 PS 波的全程二次波, 所以两者的均方根速度是相等的。

如果把 P 波和 S 波在同一介质里各自往返一次旅行的情况, 当做一种波在两层速度不同的介质里传播的情况(图 8a、b), 那么转换波的叠加速度可按均方根速度求出

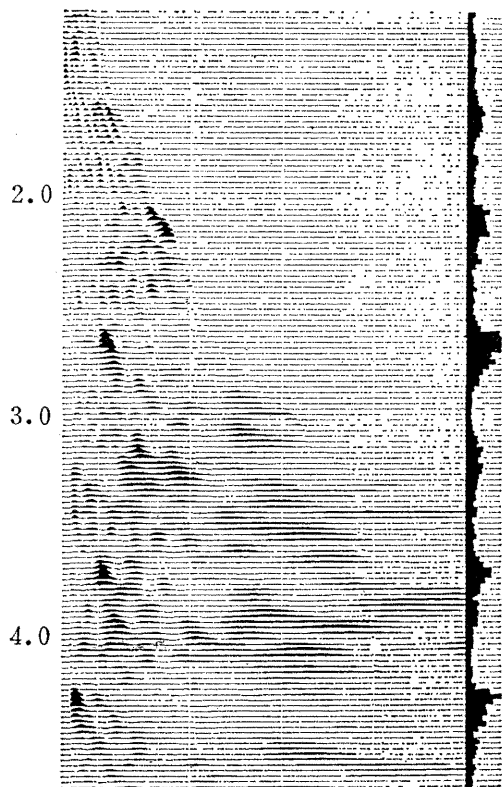


图 7 转换波速度谱

$$v_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} = \sqrt{\frac{v_p^2 \frac{2h}{v_p} + v_s^2 \frac{2h}{v_s}}{2h(v_p + v_s)}} = \sqrt{v_p v_s} \quad (5)$$

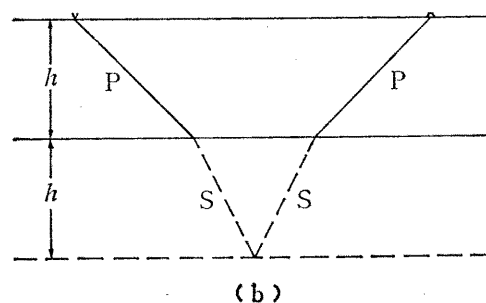
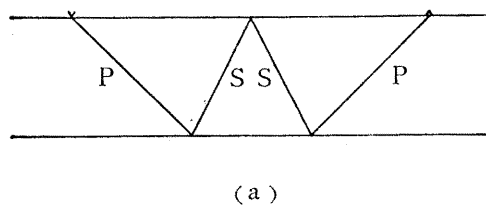


图 8 同层 P 波和 S 波的等价传播

根据式 (5) 计算本区 PS 波的均方根速度为 1,008 米/秒, 而本区 PS 转换波的叠加速度为 1,050 米/秒, 两者比较接近。

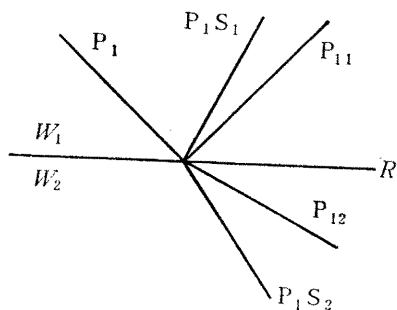


图 9

转换波的能量分布及出现的位置

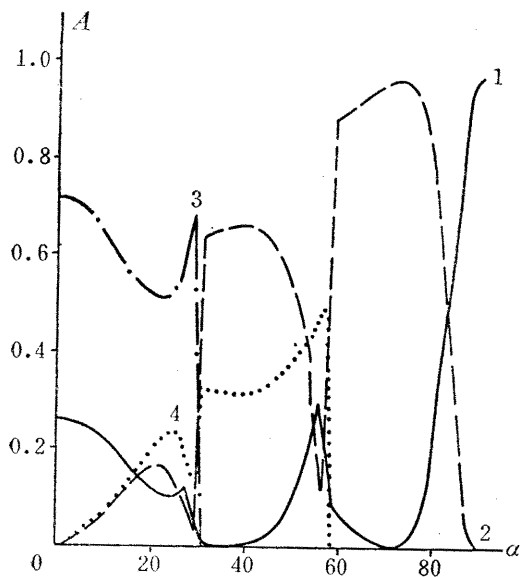
当地震纵波 P_1 以 α 角入射传到反射界面 R 后, 产生反射纵波 P_{11} 、反射横波 P_1S_1 (即 PS 波)、透射横波 P_1S_2 和透射纵波 P_{12} 等 (图 9)。这几种波的强度与反射系数和透射系数有关系。

反射系数和透射系数能够反映弹性分界面上各种波的相对强度, 也能够确定它们之间的能量分配关系。反射系数除了与岩石密度比 (ρ_2/ρ_1)、速度比 (v_2/v_1) 有关外, 还与入射角 α 的大小有关。也就是说, 改变入射角 α 会引起反射系数的变化, 这样, 也就改变了能量的分配。这里, 仅对转换波的能量分配进行一些讨论。

图10是以纵波入射, 由波阻抗小的疏松介质向波阻抗大的致密介质传播的能量分配曲线。这组曲线是根据工区内实际参数计算出来的。图中曲线 1 为 P_{11} 波, 曲线 2 为 P_1S_1 波, 曲线 3 为 P_{12} 波, 曲线 4 为 P_1S_2 波。

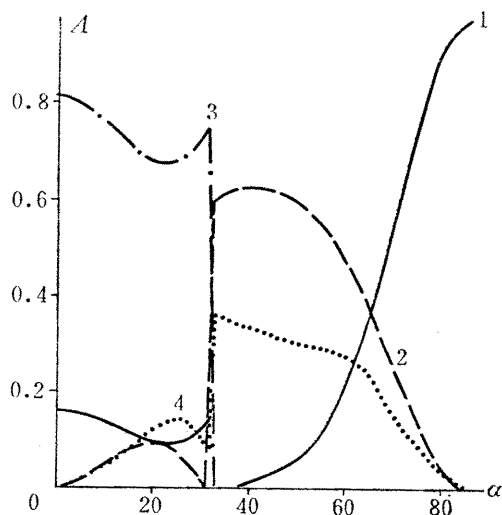
从图上可以看出, 转换波的相对能量远远大于其他几种波的能量, 当入射角 α 大于 30° 以后, 其他几种波的能量几乎接近于零, 而转换波的能量却很强, 占了绝对优势。

在这里有两点需要指出: 其一, 在本工区条件下, 当入射角 α 达到第二峰值区以后 (即为 30° 以后), 各种转换波的能量才有显示; 其二, 在入射角达到某一角度之后, 才有转换波产生。纵波垂直入射时, 无转换波。将图 10 和图 2 对照来分析, 不难看出, 它们是相当符合的。不言而喻, 转换波出现的位置与波阻抗界面埋藏深度有关。在反射



(a)

$\rho_2/\rho_1=1.08$; $v_{P_{12}}/v_{P_{11}}=2.05$; $A=0.38$



(b)

$\rho_2/\rho_1=1.04$; $v_{P_{12}}/v_{P_{11}}=1.6$; $A=0.25$

图 10a、b 转换波的强度和入射角的关系

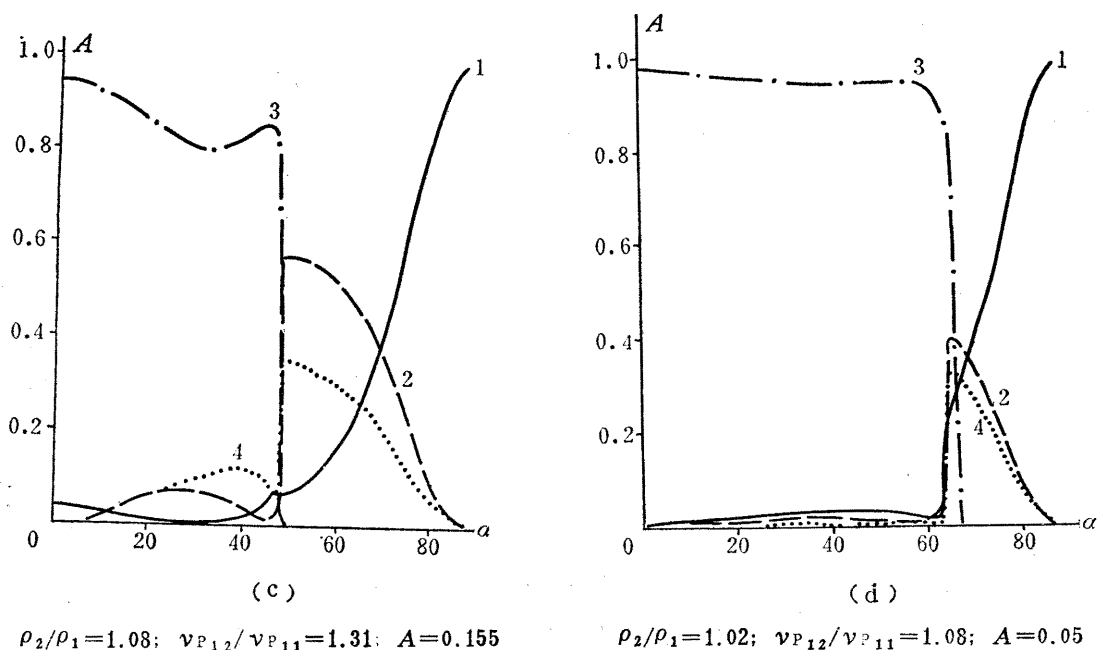


图 10c、d 转换波的强度和入射角的关系

系数固定的情况下，波阻抗界面埋藏越深，转换波出现的位置离炮点越远。

一般来讲，转换波凡以 S 波形式反射到地面时，均不易被接收到，即使出现了，在单炮记录上能量也表现得很弱。这是由于目前野外施工中采用的检波器均为垂向灵敏的检波器，它适宜接收大致垂直入射的波动，这对于 P 波是合适的。但是，当界面埋藏深度一定时，并且有足够的排列长度，只要入射角增大到一定范围以后，以 S 波传播到地面的转换波仍能够在单炮记录上出现。图 11 说明，当入射角 α 增大，S 波的反射角 β 也将增大，那么 S 波的能量在 z 轴上的分量也将增大，其大小为 $A_z = A \sin \beta$ 。

反射系数的大小对转换波的影响

波阻抗界面的反射系数的大小对转换波的影响极大，一般来讲，只要存在波阻抗界面，就有转换波存在，只不过存在强弱不同而已。从图 10 可以看出，反射系数越大，转换波越强，反之越弱。当反射系数为 0.38 时，转换波的相对能量占总能量的 47.99%，当反射系数为 0.05 时，转换波的能量只占总能量的 5.68%。本工区古生界顶面的反射系数一般在 0.30—0.45，此时转换波能量占绝对优势。从图 10 中还可以看出，当反射系数小于 0.20 时，转换波的能量很快减弱，出现的范围变窄，且更加远离炮点。根据工区内实际资料计算发现，采用现在使用的纵波检波器，当反射系数小于 0.15 时，在生产记录上，就很难看到转换波了。

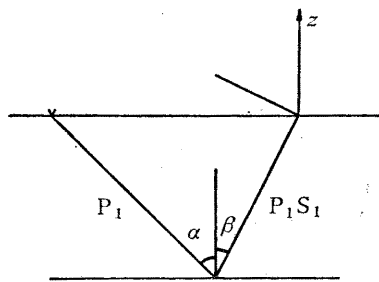


图 11

由于反射系数不同，转换波强能量峰值出现的位置也不同。如当反射系数为 0.38 时（图 10a），转换波较强的能量峰值出现在 $\alpha = 30^\circ$ 的位置。当反射系数减小时，转换波

的强能量峰值也逐渐向大入射角方向偏移。如当反射系数为 0.05 时, 转换波的能量峰值出现在 α 为 67° 处 (图 10d)。所以, 反射系数越大, PS 转换波所出现的位置离炮点越近, 反之越远。

t_0 时间的比较

PS 波的 t_0 时为

$$t_{0PS} = h \left(\frac{1}{v_P} + \frac{1}{v_S} \right) \quad (6)$$

PSSP 波的 t_0 时为

$$t_{0PSSP} = 2t_{0PS} = 2h \left(\frac{1}{v_P} + \frac{1}{v_S} \right) \quad (7)$$

一次反射纵波的 t_0 时为

$$t_{0PP} = h \left(\frac{1}{v_P} + \frac{1}{v_P} \right) \quad (8)$$

比较式 (6) 和 (8) 可以看出, PP 波和 PS 波的 t_0 时间差异主要决定于 v_P 和 v_S 的差值。当这个差值越大, t_{0PS} 就越大于 t_{0PP} 。根据式 (7) 可以看出, 在地层水平时, PSSP 波的 t_0 时是 PS 波的二倍。其他类型的转换波, t_0 值的大小与 P 波和 S 波各自在地层中传播的次数有关。一般来讲, 来自同一层的转换波, 所出现的时间顺序是: PS 波 → PPPS 波 → PSSP 波 → PSSS 波 → PSSSP 波。

R_T 值的计算

目前国内外在横波勘探的研究中, 常常利用横波速度与纵波速度的比值 $R_T(v_S/v_P)$ 来分析地层岩性。在研究转换波时, 如果能够较合理地确定纵、横波速度, 计算出 R_T 值及泊松比 σ , 将为确定地层的岩性提供有益的资料。本工区的 R_T 值为 0.3 左右; 泊松比 σ 值为 0.45, 这些反映本区第三系地层为一套松软的砂泥岩交互的沉积。

转换波的消除

在作纵波解释时, 是将转换波作为一种干扰波来对待的。如前所述 (图 1), 转换波严重地干扰了有效波, 使剖面变得无法解释。要消除这些转换波, 在野外应从观测系统考虑。分析图 11 可以看出, 在产生转换波的界面埋藏深度为一定的条件下, 不管其反射系数的强弱, 只要在较大的入射角时, 转换波的相对能量才是增强的。换言之, 排列越长, 在单炮记录上, 越容易出现转换波。但是, 从多次覆盖的叠加效应考虑, 应使排列有足够的长度, 从而造成 P_{11} 波在动校正后, 使其转换波存在着恰当的剩余时差, 通过叠加将其消除。另外由于本区的转换波的种类繁多且强, 增加覆盖次数也是应考虑的办法。在数字处理时, 采用下述两种办法也是行之有效的:

1) 叠后二维滤波;

2) 多次波消去法。由于转换波的叠加速度远远低于同 t_0 时刻的有效波的叠加速度, 所以, 只要求出转换波的叠加速度, 采用多次波消去法便可取得效果。图 12 是采用消去法消去转换波后的水平叠加时间剖面, 和图 1 相比较, 显然是有改进的。

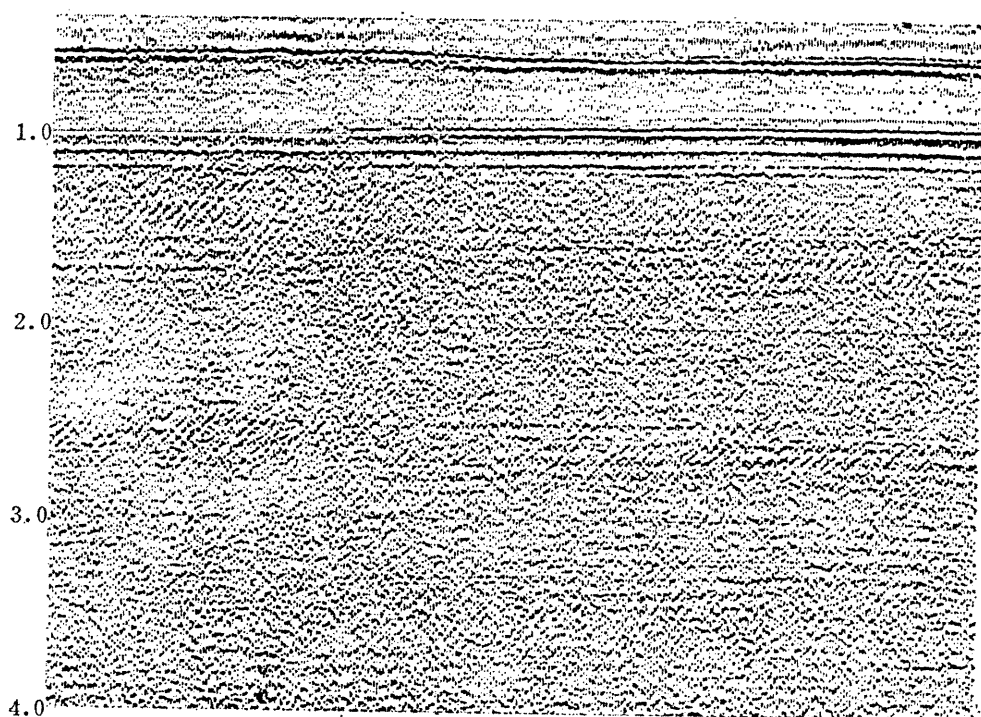


图 12 P80—6 测线采用消去法消除转换波的水平叠加剖面

如文中所述，野外地震中的转换波，其所以如此发育，主要是由于工区内存在着很强的波阻抗界面，即软硬地层的交界面，这是一个基本因素。一般在古生界地层埋藏不太深，上覆地层若是比较松软的新生界地层，那么在一般的纵波地震记录上就可能出现各种类型的转换波。目前，在类似于上述地质条件的其他地区，也发现过转换波。

参 考 文 献

- [1] 长春地质学院、成都地质学院、武汉地质学院合编，《地震勘探(原理和方法)》，P. 16—22, 42—49, 地质出版社, 1980
- [2] H. H. 普泽列夫著，林中洋等译，《反射波法地震勘探资料解释》，P. 75—76, 中国工业出版社, 1963

《石油钻采工艺》征订启事

《石油钻采工艺》为双月刊，创办于 1979 年，博得了广大读者的喜爱和支持，现经国家科委批准，《石油钻采工艺》杂志从 1985 年起，由限国内发行改为公开发行。本刊公开发行后，仍将遵循以往的办刊方针，认真贯彻国家有关技术方针政策，交流经验，促进钻采技术进步，推动生产、科研和教学的发展。本刊以中级工程技术人员为主要读者对象，热情欢迎广大读者到当地邮局订阅《石油钻采工艺》杂志，刊号：18-44。

《石油钻采工艺》编辑部