

奇异的波至现象

於文辉¹, 张丽琴¹, 王家映¹, 周玉琦²

(1. 中国地质大学地球物理系, 湖北武汉 430074; 2. 中国新星石油公司, 北京 100083)

摘要: 1997年, 笔者在水力压裂后的砂岩产油井中进行高分辨率VSP工作时, 除观测到常规纵波及转换波外, 还观测到来自产油层的几种奇异的慢速波至。由于该慢速波至的性质不明, 按视速度从高到低分别命名为 W_1, W_2, W_3, \dots (W 为wave的第1个字母)。在顺5井裂隙优势方向, 1210 m深度上观测到5种反射波: 反射纵波、反射转换波、 W_1, W_2, W_3 波; 在裂隙非优势方向上, W_2, W_3 波没有出现。在顺4井1532 m深度上观测到4种反射波: 反射纵波、反射转换波, 还有2种慢速波至, 为了区别于顺5井中观测到的慢速波至, 将其命名为 W_4, W_5 波。结合该区钻井、测井、地面地震、井间地震等资料对观测到的慢速波至进行了详细分析, 分析结果表明: 该慢速波至既不属于不均匀介质产生的绕射波、侧界面产生的反射波、槽波、管波、斯通利波, 也与Biot慢纵波动力学特征相悖。现有波动理论不能解释这种慢速波至现象, 这意味着地球内部介质中存在人类还未认识的弹性波传播规律。

关键词: 砂岩; 产油井; VSP; 慢速波至。

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)05-0651-08

作者简介: 於文辉(1957-), 男, 高级工程师, 从事多组分复合不均匀介质中地震波传播理论研究。

0 引言

Biot^[1]从1956年开始, 陆续发表了一系列的有关双相介质理论方面的论文, 奠定了双相介质中弹性波传播的理论基础; 预测由于流相与固相的相对运动, 双相介质中存在高耗散的慢纵波。以Biot理论为核心, 人们进行了大量的理论及实验研究。在理论研究方面, 一些作者应用平均定理推导了微观结构孔隙弹性方程^[2~6]; Geerits^[5]使用平均技术推导了宏观结构孔隙弹性方程; Carcione^[6]从流变学角度, 详细论述了粘弹性介质与孔隙弹性介质在弹性动力学方面的特点; 有些中外科学家^[7~24]对Biot理论进行了广泛的理论外延及参数量化研究; 在超声波实验室的研究中, Plona^[25]利用水饱和和人工烧结玻璃首次证明慢纵波的存在; Klementos等^[26]利用砂胶结成的人工岩样观测到慢纵波; Nagy等^[27]在充气砂岩中观测到慢纵波; Boyle等^[28]在水饱和未固结砂中观测到慢纵波; Kelder等^[29]利用水饱和天然砂岩证明了慢纵波的存在。

前人以Biot理论为基础开展的研究说明地球介质中存在3种体波: 纵波、横波及Biot慢纵波。Biot慢纵波需要特殊的外部条件(岩石组分结构与环境)及观测技术(实验室超声波观测)才能观测到。Biot理论只是准静态理论, 没有考虑粘性流体与固相介质的扭转作用。Liu等^[30]理论上证明充流多孔介质中存在第2类旋转波, 冯德益等^[31]理论上证明四重旋转对称介质中存在6类体波, 牟永光^[32]在双相多孔介质物理模型试验中, 也观测到慢横波的存在。他们的研究成果说明地球内部介质中的体波不止3种。

本文首次公布笔者于1997年进行的高分辨率VSP原始数据, 该数据说明地球内部介质中弹性波的传播规律是十分复杂的, 人类对复杂介质力学本质的认识还很有限, 寻找复杂介质中弹性波传播规律仍很艰巨。经过几年的潜心研究, 我们对顺宁油田高分辨率VSP数据中慢速波至所反映的力学本质有了一点肤浅认识, 并将在后续文献中陆续发表其理论研究成果。

1 高分辨率 VSP 资料采集区地质概况

1.1 区域地质背景

高分辨率 VSP 是在陕北山区顺宁油田进行的, 该油田隶属中国新星石油公司华北石油局. 该区位于高原洛河支流——周河流域的上游, 地面海拔 1 350~1 460 m, 黄土高原特征发育, 黄土层厚度 0~120 m 不等, 地表沟壑交错, 梁卯纵横, 沟谷狭窄切入基岩. 山高坡陡地形复杂, 深部地震地质条件较好, 第四系以下即为中生界白垩纪地层. 顺宁油田处于鄂尔多斯盆地区域西倾大单斜——依狭斜坡上, 内部构造平缓简单, 仅局部发育一些低幅度圈闭构造或鼻隆. 受此区域构造控制, 区内地层坡降每 km 不超过 10 m, 在此基础上局部显示一定的构造起伏. 沿山沟自然走向的地震剖面上, 未见断层显示. 从录井及测井资料来看, 地层厚度 120~140 m, 砂岩发育, 累计厚度 75~80 m, 单层砂岩厚度一般 5~15 m, 最厚可达 20 余 m.

古生代末直至中生代侏罗纪, 鄂尔多斯盆地一直处于内陆河湖盆地发育阶段. 中生代晚三叠纪延长期是内陆湖盆地发育的全盛时期, 形成了最大的内陆湖盆, 其代表性沉积以延长组第 2 段长 7 油层组张家滩页岩为标志, 随后延长期湖盆开始收缩, 来自北部及北东部的不断加强的河流作用下, 于湖盆北翼形成了一系列大型及较大型三角洲建造. 顺宁油田是吴旗三角洲向东延展的一部分, 河口坝砂体发育且复合叠加较高, 累计砂体厚度 60~90 m. 顺宁油田主要产油层是长 2 及长 6, 是分流河道砂控制下的地层岩性圈闭形成的低渗致密砂岩油藏.

1.2 勘探开发程度及井况

该区已完成探井 16 口, 井深一般 1 300~2 000 m, 其中顺 4 井、顺 6 井、顺 8 井兼探了长 6 油层, 其它探井仅钻至长 2 油层. 长 2 油层控制了 2 km² 的含油面积. 顺 3 井、顺 5 井位于油田构造的中央, 顺 4 井位于分流河道砂的来源方向, 顺 6 井位于油田地质结构的边缘. 顺 4 井、顺 6 井也是油田的地理边缘, 外部数十 km 范围内无钻井.

由于物性差, 横向变化大, 单井日产量低; 为提高产量, 顺 3 井处打了 3 口定向井, 顺 5 井处打了 6 口定向井. 每口井都进行了压裂改造. 由于对裂缝的空间分布特征不了解, 暂未注水驱油, 仍以弹性及重

力驱油方式开采. 开采方式为开 2 h 停 3 h. 顺 4 井、顺 6 井开采长 6 油层, 顺 3 井、顺 5 井开采长 2 油层. 至高分辨率 VSP 施工时, 该区油层开采时间已在 1 a 以上, 生产井处的油层为负压地层, 井旁形成一定范围的地层应力漏斗. 顺 6 井已停产几个月, 液面升至井口, 基本上为清水.

2 高分辨率 VSP 资料采集方式

2.1 采集方案选择

由于该区地理环境非常恶劣, 地表条件较差, 我们只能采用炸药震源, 在基岩裸露的山沟中激发. 前人研究表明, 炸药激发产生地震波的优势频率及频带宽度与激发介质的纵波速度成正比^[33]. 根据地理特点及现场试验结果, 决定采用图 1 所示的野外采集方案.

2.2 通过伪测井选择激发井深

在高速介质中爆炸激发, 产生地震波的优势频率高, 频谱宽. 浅层岩性界面对爆炸激发产生地震波的影响较大^[34]. 要取得最佳激发子波, 又避免浅层岩性界面的影响, 必须选择最佳激发环境. 我们选择无第四系覆盖、白垩系砂岩与泥岩呈水平状裸露的 S₅ 激发点处进行伪测井. 选择井深 30 m, 偏移距 4 m, 深度点间隔 2 m, 20 g 爆炸索的药量, 从 29~2 m 激发. 层速度曲线反映该激发点处有 3 个高速层, 深度在 12~20 m 的高速层较厚, 另外 2 个高速层的厚度为 1~2 m. 图 2 是伪测井初至波频谱分析曲线, 图中曲线序号代表从深到浅的激发顺序. 该图说明

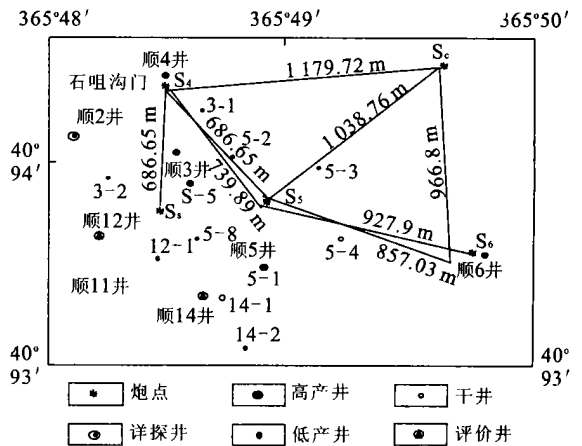


图 1 顺宁油田高分辨率 VSP 野外采集方案

Fig. 1 Field acquisition strategy of high resolution VSP in Shunning oil field

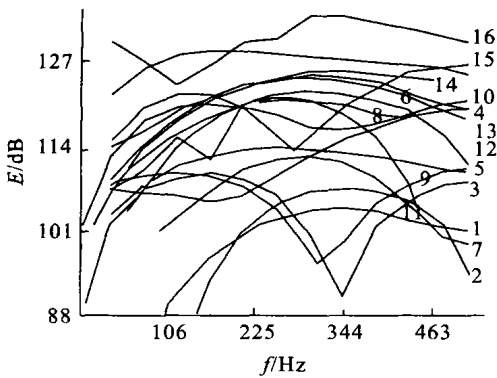


图2 伪测井初至波频谱分析曲线

Fig.2 Curve of spectrum analysis about the pseudolog first break

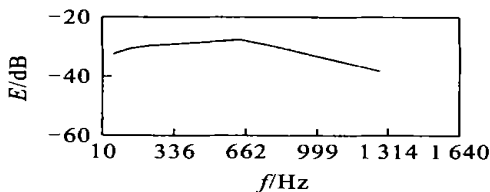


图3 地震子波频谱曲线

Fig.3 Curve of frequency spectrum of seismic wavelet

12~20 m 深度段激发产生的地震子波比较稳定, 频谱较宽, 曲线比较理想, 是该处最佳激发层段, 其他激发点参照 S₅ 激发点处岩性结构, 通过钻井取心分析确定激发深度.

2.3 激发方式

选择激发方式的主要目的是提高爆炸能量转换为弹性能量的转换系数. 经反复试验, 采用 500 g 震源药柱点源激发, 可以获得频谱宽度达 1 300 Hz 以上的地震子波(图 3).

3 高分辨率 VSP 资料采集结果与初步分析

3.1 高分辨率 VSP 资料采集结果

该区零偏 VSP(图 4)的干扰波主要是管波, 该波频散现象严重, 可能受套管接头的影响, 在 880 m 附近产生反射. 除管波外, 零偏 VSP 的波场比较纯净, 只有下行初至波与上行纵波. 有偏 VSP(图 5~7)的干扰波主要是地面虚反射产生的下行转换波, 该干扰波能量较强, 与初至波产生的地层岩性下行转换波趋于平行. 所以, 有偏 VSP 剖面上有直达初至波、地层转换下行波、虚反射下行转换波等 3 种下

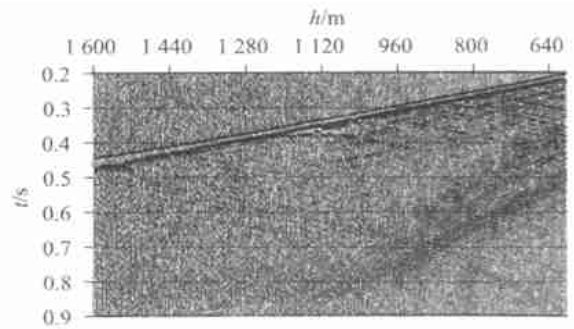


图4 顺6井零偏高分辨率VSP原始Z分量剖面(炮点S₆)

Fig.4 Raw Z-component of the zero-offset high resolution VSP in Shun 6 Well (Source S₆)

偏移距 83.6 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms

行波.

顺5井VSP(炮点S_c)原始Z分量剖面(图5a), 上行转换波的能量大于上行纵波的能量. 剖面上1 210 m深度处, 除反射纵波、反射转换波外, 还存在3个慢速波至, 视速度分别为1 050, 720, 340 m/s. 按视速度从高到低命名为W₁波、W₂波、W₃波. 图5a显示的上行波中, W₁波能量最强; 在剖面上表现为2个周期, 从1 210 m追踪至930 m处突然消失. 与W₁波平行, 滞后100 ms还存在1个波至, 剖面显示是1 250 m以下岩层的反映. 图8是W₁波与1 210 m处直达纵波频谱对比曲线. 该图表明纵波的优势频率在低频方向, W₁波的优势频率向高频方向漂移; W₁波的频带宽度大于直达纵波的频带宽度. W₂波在剖面上的能量最弱, 只有1个周期; 因受虚反射下行转换波的影响, 从1 210 m追踪至990 m处突然消失. W₃波的能量低于W₁波的能量, 但高于W₂波的能量, 在剖面上表现为1个周期; W₃波的抗干扰能力较强, 在虚反射产生的强干扰之后继续清晰出现, 从1 210 m追踪至930 m处突然消失. VSP横波分裂表明, 顺5井水压裂隙的优势方向位于NE37°, 与图5剖面方向相差11°.

图5b是顺5井有偏VSP(炮点S₆)原始Z分量剖面. 剖面上除反射纵波、反射转换波等上行波外, 在1 210 m处W₁波继续出现, 连续性较好, 能量较强; 频谱特征与图8基本一致; 但视速度发生了变化, 为1 190 m/s; 追踪范围至930 m处, W₂波、W₃波没有出现. 顺5井有偏VSP(炮点S₄)原始Z分量剖面上(图5c), W₁波的视速度为1 210 m/s, 其他剖面特征与图5b相近.

在炮点S_c激发, 顺4井观测时, 受外部环境的

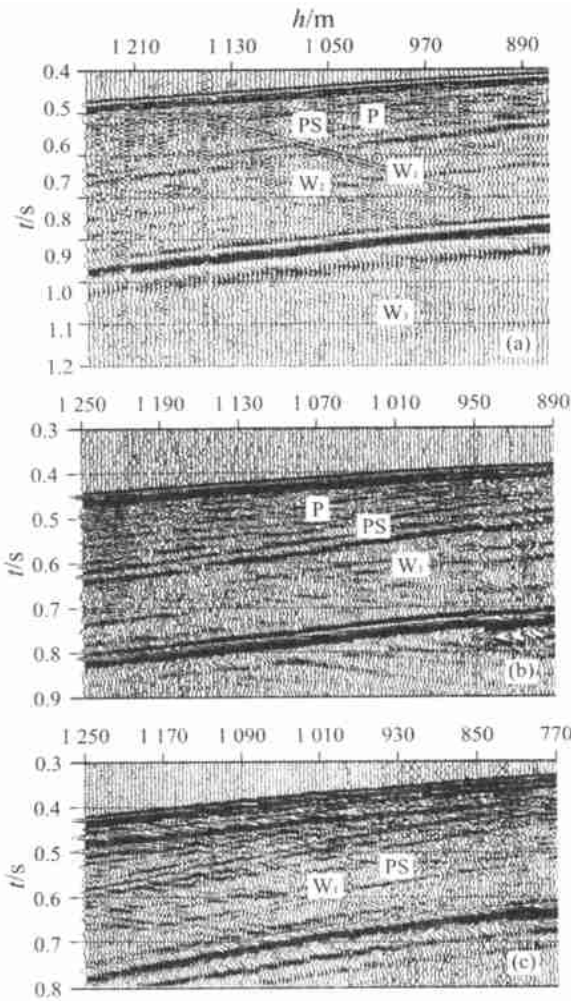


图 5 顺 5 井有偏高分辨率 VSP 原始 Z 分量剖面
Fig.5 Raw Z-component of the offset high resolution VSP in Shun 5 Well

a. 炮点 S_c: 偏移距 1038.7 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms; b. 炮点 S₆: 偏移距 927.9 m, 深度点距 3 m, 采样间隔 0.25 ms; c. 炮点 S₄: 偏移距 740 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms

影响(农民在井场旁开山放炮), 致使有偏 VSP 资料(图 6a)的品质较差, 该剖面上行转换波的能量较强.

图 6b 是顺 4 井有偏 VSP(炮点 S₅)原始 Z 分量剖面. 由左方可以看出, 该剖面上的上行纵波能量大于上行转换波能量; 在 1 532 m 深度处, 又出现 2 个慢速波至, 为了区别于顺 5 井 VSP 剖面上的慢速波至, 将其称为 W₄ 波、W₅ 波. W₄ 波的视速度达 1 400 m/s, 能量仅次于反射纵波; 在剖面上表现为 1 个周期, 追踪范围至 1 100 m 左右. 滞后 130 ms 有一平行于 W₄ 波的波组, 空间分布及形态与 W₄ 波一致, 只是能量稍弱; 该波与 W₅ 波在 1 262 m, 0.8 ms 处相交. W₅ 波的视速度为 900 m/s, 能量较 W₄ 波为弱.

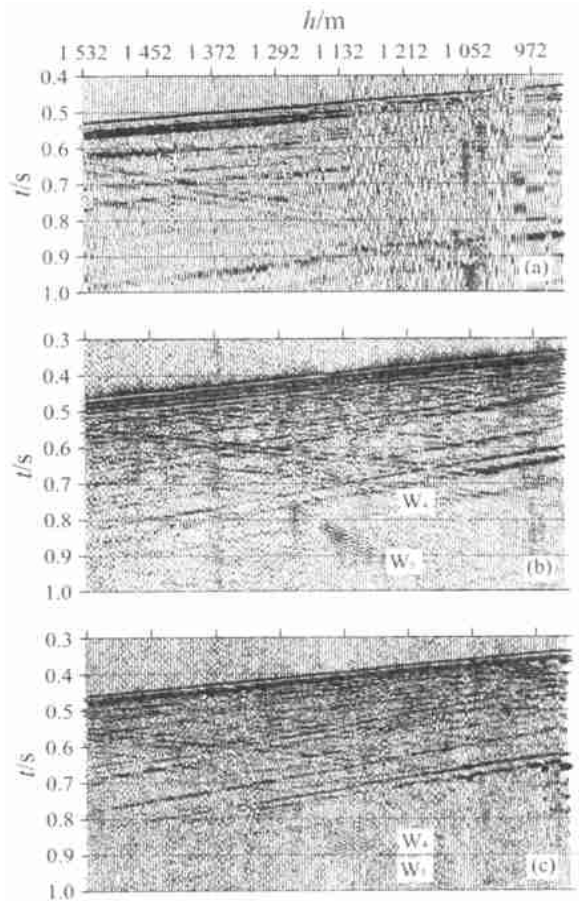


图 6 顺 4 井有偏高分辨率 VSP 原始 Z 分量剖面
Fig.6 Raw Z-component of the offset high resolution VSP in Shun 4 Well

a. 炮点 S_c: 偏移距 1179 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms; b. 炮点 S₄: 偏移距 586.6 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms; c. 炮点 S₅: 偏移距 686.6 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms

空间分布范围与 W₄ 波一致. 顺 4 井有偏 VSP(炮点 S₅)原始 Z 分量剖面(图 6c)与图 6b 的方位夹角仅为 40°, 所以, 图 6c 与图 6b 的形态比较接近, W 波的动力学特征也基本相近.

图 7a, 7b 分别是 S_c 炮点、S₅ 炮点激发, 顺 6 井接收的有偏 VSP 剖面. 这 2 张剖面上除反射纵波、反射转换波外, 未见其他类型的上行波至出现.

3.2 W 波初步分析

(1) W 波是非均匀介质产生的绕射波吗? W 波若属于非均匀介质产生的绕射波, 则不均匀介质产生的绕射点应在套管壁处. 绕射波的能量随传播距离的增大逐渐衰减, 直至消失. 在剖面上的表现形态应是明显的双曲线. 时间上应在反射波之前; 若以套管钢的纵波速度传播, 则比以地层纵波速度传播的时间更短. 若是在套管中的液体内传播, 矿化水与原

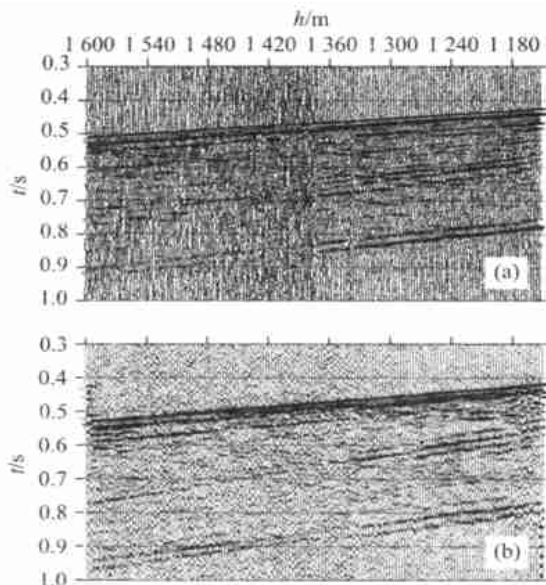


图 7 顺 6 井有偏高分辨率 VSP 原始 Z 分量剖面
Fig. 7 Raw Z-component of the offset high resolution VSP in Shun 6 Well

a. 炮点 S_c: 偏移距 966.8 m, 深度点距 4 m, 采样间隔 0.25 ms; b. 炮点 S_s: 偏移距 857 m, 深度点距 3 m, 采样间隔 0.25 ms

油混合物的速度至少等于 1 460 m/s, 在时间剖面上与下行波的夹角要小于 W 波与下行波的夹角. 此外, 绕射波的频率与反射波的频率基本上接近, 频带宽度一般不会大于入射波的频带宽度. 从物理地震学的角度来看^[35]: ①几何的点或线不能产生绕射波, 实际上能被记录到具有一定能量的绕射波是由具有一定面积的界面产生; ②短反射段(反射段长度为 2α , 地震波长为 λ , 反射层埋深为 H , 三者之间满足 $0.1 < \frac{2\alpha}{\lambda H} < 0.5$ 的反射段称为短反射段)的反射波相当于点绕射波.

VSP 反射波主频为 80 多 Hz, 产油层上部地层的平均纵波速度为 3 500 m/s, 从剖面反映来看, 短反射的定义在此无法成立. 所以, 无论从几何地震学还是物理地震学来看, W 波都不是非均匀地质体产生的绕射波.

(2)W 波是槽波吗? 当纵波以一定角度入射到高速介质中所夹的低速渗透带时, 形成沿渗透带传播的槽波, 槽波进入钻井后, 以井中流体的速度向井的上部与下部传播, 进入钻井后的槽波也叫做管波, 槽波频散严重. 顺 3 井—顺 4 井、顺 3 井—顺 5 井的井间地震原始三分量剖面表明该区槽波表现为埃里相特征(图 9). 图 4 中管波速度为 1 460 m/s, 主频为 110 Hz 左右, 频散严重, 最高达 1 000 多 Hz, W₁ 波

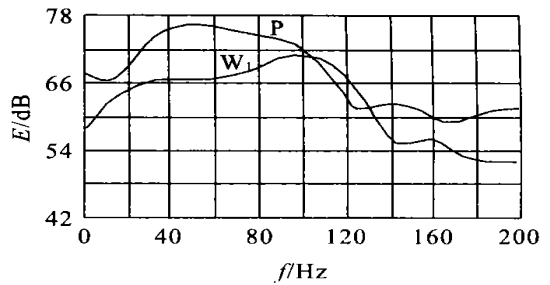


图 8 W₁ 波与 1 210 m 处直达纵波频谱对比曲线
Fig. 8 Comparison of frequency spectrum between W₁ and direct wave at the depth of 1 210 m

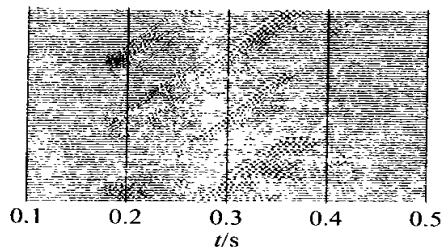


图 9 顺宁油田井间地震原始记录
Fig. 9 Raw cross-hole seismogram in Shunning oil field

的视速度为 1 050 m/s, 主频为 105 Hz 左右, 无频散效应. 所以 W 波也不属于槽波的范畴. 此外, 该区构造平缓, 未见断层显示, 无明显的形成侧向反射地震波的地质条件, 所以, W 波也不属于侧面波的范畴.

(3)W 波是 Stoneley 波吗? 从层状介质理论考虑, 属于面波范畴的 Stoneley 波是低速低频波. 改造后的长 2 油层属饱和多孔裂隙介质, 从饱和多孔介质的双相特性考虑, Stoneley 波是频散的^[36]. 因此, W 波既不属于层状介质中的 Stoneley 波, 也不属于饱和和多孔隙介质中的 Stoneley 波.

(4)W 波是 Biot 慢纵波吗? 大量的理论研究证明 Biot 慢纵波是高耗散的, 衰减严重; 天然岩石中的泥质含量严重制约慢纵波的观测. 尽管 W 波的视速度与 Biot 慢纵波的理论预测值接近^[31], 但 W 波的能量衰减缓慢(图 10), 与 Biot 慢纵波快速衰减特征相悖, 因此, W 波不能定性为 Biot 慢纵波.

上述分析表明, W 波不属于非均匀波、侧面反射波、槽波、Stoneley 波, 也不能定性为 Biot 慢纵波.

4 结论

顺宁油田高分辨率 VSP 原始数据中出现了应用现有理论不能解释的奇异慢速波至现象, 这种现

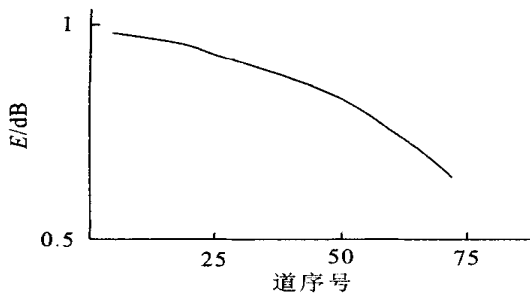


图 10 W_1 波能量随距离变化曲线(道间隔 4 m)

Fig. 10 W_1 energy curve versus distance

象意味着地球内部介质中存在人类还未认识的弹性波传播规律。

此项研究是笔者在原地矿部石油物探研究所工作时完成的,笔者衷心感谢该所给予的支持;感谢美国 Houston 大学 R·E·Sheriff 教授,同济大学马在田院士,南京大学王耀俊教授,中国地质大学许云教授、黄延祜教授、詹正彬教授,石油大学牟永光教授,江苏省地震局李清河研究员等专家的指点与帮助。

参考文献:

[1] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated solid. I. Low frequency range; II. Higher frequency range [J]. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 168—178, 179—191.

[2] Burrige R, Keller J B. Poroelasticity equations derived from microstructure [J]. *J Acoust Soc Am*, 1981, 70: 1140—1146.

[3] Whitaker S. Flow in porous media. I. A technical derivation of Darcy's law; II. The governing equations for immiscible, two-phase flow; III. Deformable media [J]. *Transport in Porous Media*, 1986, 1: 3—25, 105—125, 127—154.

[4] Pride S R, Gangi A F, Morgan F D. Deriving the equations of motion for porous isotropic media [J]. *J Acoust Soc Am*, 1992, 92: 3278—3290.

[5] Geerits T W. Acoustic wave propagation through porous media, revisited [J]. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100: 2949—2959.

[6] Carcione J M. Viscoelastic effective rheologies for modeling wave propagation in porous media [J]. *Geophysical Prospecting*, 1998, 46: 249—270.

[7] Johnson D L, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media [J]. *J Fluid Mech*, 1987, 176: 379—402.

[8] Johnson D L, Thomas J P, Haruo K. Probing porous me-

dia with first and second sound. II. Acoustic properties of water-saturated porous media [J]. *J Appl Phys*, 1994, 76: 115—125.

[9] Berryman J G. Confirmation of Biot's theory [J]. *Appl Phys Lett*, 1980, 37: 382—384.

[10] Berryman J G. Long-wavelength propagation in composite elastic media (I, II): spherical inclusions [J]. *J Acoust Soc Am*, 1980, 68: 1809—1819, 1820—1831.

[11] Kelder O, Smeulders D M J. Measurement of ultrasonic bulk properties of water saturated porous media [A]. 58th EAGE Mtg. Extended Abstracts, C025 [C]. [s.l.]: [s.n.], 1996.

[12] Pride S R, Tromeur E, Berryman J G. Biot slow-wave effects in stratified rock [EB/OL]. *Geophysics*, 2001.

[13] White J E, Mikhaylova N G, Lyakhovitsky F M. Low-frequency seismic waves in fluid-saturated layered rocks [J]. *Izvestija Academy of Sciences USSR, Phys Solid Earth*, 1975, 11: 654—659.

[14] 王少江. 饱和粘滞可压缩流体的多孔弹性介质中的地震波[J]. *西北地震学报*, 1987, 9: 1—10.

WANG S J. The seismic waves in viscous compressible fluid-saturated, porous elastic media [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1987, 9: 1—10.

[15] 龚钢延. 孔隙压力扩散与水库诱发地震活动性的初步研究[J]. *西北地震学报*, 1988, 10: 52—59.

GONG G Y. Primary research on pore pressure diffusion with reservoir-induced seismicity [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1988, 10: 52—59.

[16] 李清河. 双相介质理论在油藏模拟中的应用[R]. 兰州: 兰州地震研究所, 1990.

LI Q H. Application of the two-phase medium theory to reservoir modeling [R]. Lanzhou: Lanzhou Seismological Institute, 1990.

[17] 刘银斌, 李幼铭, 吴如山. 横向各向同性多孔介质中的地震波传播[J]. *地球物理学报*, 1994, 37: 499—513.

LIU Y B, LI Y M, WU R S. Seismic wave propagation in transversely isotropic porous media [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37: 499—513.

[18] 杨峻, 吴世明. 地震波在饱和土层界面的反射与透射[J]. *地震学报*, 1997, 19: 29—35.

YANG J, WU S M. Reflection and transmission of seismic wave at a saturated soil interface [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, 19: 29—35.

[19] 胡亚元, 王立忠, 陈云敏, 等. 弹性波在横向各向同性弹性土和饱和土界面上的反射与透射[J]. *地震学报*, 1998, 20: 598—606.

HU Y Y, WANG L Z, CHEN Y M, et al. Reflection and

- transmission of elastic wave at an elastic and saturated soil interface in transversely isotropic media [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1998, 20; 598—606.
- [20] 王尚旭. 双相介质中弹性波问题数值解和 AVO 问题 [D]. 北京: 石油大学, 1990.
- WANG S X. Numerical solution and AVO of elastic wave in two-phase medium [D]. Beijing: University of Petroleum, 1990.
- [21] 乔文孝, 王宁, 严焯培. 声波在两种多孔介质界面上的反射和透射[J]. *地球物理学报*, 1992, 35; 242—248.
- QIAO W X, WANG N, YAN Z P. Reflection and transmission of acoustic wave at two porous media interface [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1992, 35; 242—248.
- [22] 刘克安, 刘宏伟. 双相介质二维波动方程三参数同时反演时卷则迭代法[J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32; 615—622.
- LIU K A, LIU H W. Time-convolution regularization iteration for simultaneous inversion of three parameters of 2-D wave equation in two-phase medium [J]. *Oil Geophysical Prospect*, 1997, 32; 615—622.
- [23] 席道瑛, 易良坤. 砂岩中孔隙流体的黏粘性与衰减、模量和速度色散[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34; 420—425.
- XI D Y, YI L K. Viscosity and attenuation, module and velocity scattering of porous fluid in sand rocks [J]. *Oil Geophysical Prospect*, 1999, 34; 420—425.
- [24] 杨顶辉, 张中杰. Biot 和喷流耦合作用对各向异性弹性波的影响[J]. *科学通报*, 2000, 45; 1333—1340.
- YANG D H, ZHANG Z J. Effects of the Biot and the squirt-flow coupling interaction on anisotropic elastic waves [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45; 1333—1340.
- [25] Plona T J. Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies [J]. *Appl Phys Lett*, 1980, 36; 259—261.
- [26] Klimentos T, McCann C. Why is the Biot slow compressional wave not observed in real rocks? [J]. *Geophysics*, 1988, 53; 1605—1609.
- [27] Nagy P B, Adler L, Bonner B P. Slow wave propagation in air-filled porous materials and natural rocks [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 56; 2504—2506.
- [28] Boyle F A, Chotiros H P. Experimental detection of a slow acoustic wave in sediment at shallow grazing angles [J]. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91; 2615—2619.
- [29] Kelder O, Smeulders D M J. Observation of the Biot slow wave in water-saturated Nivelsteiner sandstone [J]. *Geophysics*, 1997, 62; 1794—1796.
- [30] Liu Q R, Noriko K. The discovery of a second kind of rotational wave in a fluid-filled porous material [J]. *J Acoust Soc Am*, 1990, 88; 1045—1053.
- [31] 冯德益, 聂永安. 含裂隙双相各向异性介质中的地震波传播[J]. *西北地震学报*, 1998, 20; 1—7.
- FENG D Y, NIE Y A. Propagation of seismic wave in two-phases anisotropy medium with fracture [J]. *North-western Seismological Journal*, 1998, 20; 1—7.
- [32] 牟永光. 储层地球物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- MOU Y G. Reservoir geophysics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [33] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- WANG L L. Stress wave basis [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985.
- [34] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- LI Q Z. The way to obtain a better resolution in seismic prospecting [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [35] 谢里夫 R E, 吉尔达特 L P. 勘探地震学[M]. 初英, 李承楚, 王宏伟, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- Sheriff R E, Geldart L P. Exploration seismology [M]. Translated by CHU Y, LI C C, WANG H W, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [36] 布尔贝 T (法), 库索 O, 甄斯纳 B, 等. 孔隙介质声学[M]. 许云, 译. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- Bourbie T, Coussy O, Zinszner B, et al. Acoustics of porous media [M]. Translated by XU Y. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.

Strange Phenomena of Wave Arrival

YU Wen-hui¹, ZHANG Li-qin¹, WANG Jia-ying¹, ZHOU Yu-qi²

(1. *Department of Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *China New Star Petroleum Company, Beijing 100083, China*)

Abstract: The authors worked in 1997 on the high-resolution VSP in the hydraulic-fractured sandstone oil well. The authors observed not only the normal compressional waves and converted waves, but also several strange slow-speed waves from the oil-producing layer. Since the nature of this slow-speed wave arrival was not distinct, these slow-speed waves were named as W_1 , W_2 and W_3 respectively (where W stands for wave), according to their apparent velocities ranging from high to low. Five reflected waves which are reflected compressional wave, reflected converted wave, W_1 , W_2 and W_3 were observed at the depth of 1 210 m in the fracture-dominating direction in Shun 5 Well. W_2 and W_3 did not occur in the fracture non-dominating direction. Four reflected waves which are reflected compressional wave, reflected converted wave and two slow-speed waves named as W_4 and W_5 for the distinction from the slow-speed waves in Shun 5 Well, were observed. The data on well boring, well logging, surface seism and inter-well borehole seism are employed in this research to make a detailed analysis of the slow-speed waves thus observed. The analytical results show that these slow waves are not diffracted waves from heterogeneous medium and that the reflected waves from the lateral interface, channel waves, tube waves and stoneley waves are also not in agreement with the dynamic feature of the Biot slow-speed compressional waves. Existing wave theory does not interpret this kind of slow-speed wave arrivals, indicating that some laws of elastic wave propagation in the inner medium of the earth are still not recognized by the scientists concerned.

Key words: sandstone; oil-producing well; VSP; slow-speed wave arrival.