

· 处理技术 ·

周期层状介质对纵波速度影响的实验研究

魏建新*^{①②③} 狄帮让^{①②③}

(^①油气资源与探测国家重点实验室,北京昌平 102249; ^②CNPC物探重点实验室,北京昌平 102249; ^③中国石油大学(北京)资信学院,北京昌平 102249)

魏建新,狄帮让. 周期层状介质对纵波速度影响的实验研究. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 661~666

摘要 周期层状介质模型是由两种不同的波阻抗材料交替组合而成,其速度除受各层岩性控制外,也与周期层的厚度和探测频率有关。为了更好地了解这些因素的影响,文中通过把一种材料灌注到另一种材料间隔中的方法构建一组不同周期层厚度的周期层状介质模型,并用主频为1.0,0.6,0.2MHz的震源对模型进行透射观测,通过记录波垂直层状介质传播时的波形变化,分析不同周期层厚 d 对波长 λ 和速度 V 的影响,以及 V 与 λ/d 的关系。实验结果表明,当两种材料所占体积基本相同时,在垂直层方向上 V 与 λ/d 有关,即 $\lambda/d < 1$ 时 V 与射线平均速度一致,在 $\lambda/d \in (8, 11)$ 的较窄范围内 V 快速下降, V 的最小值接近周期层状介质的有效介质估算速度; λ/d 值接近1或8时为速度变化的转折点,同时透射波的能量严重衰减。

关键词 周期层状介质 速度 波长与层厚比 实验观测

1 引言

在 seismic 勘探中,常把中浅层的地质结构简化为层状或周期层状介质结构。层状介质中各层厚度是多变的,且表现出非均质性。层状介质的尺度变化和多次反射直接影响波的传播特性和对地震成像的解释^[1~5]。当波垂直于层状介质传播时,由于非均质性会出现速度频散或弥散;当层厚远远小于波长时还会出现各向异性^[6]。因此在储层描述中有必要了解层厚变化对速度的影响。

实际的层状地层很少表现出严格的周期性,但多数研究还是以周期层状介质为基础。已有的数值模拟和实验室观测的研究结果都发现,地震波在周期层状介质中传播时,随着周期层的厚度变化,其传播速度有一个跳跃变化,当地震波波长 λ 和周期层厚度 d 之比值(λ/d)较小时,可用射线理论描述速度,当 λ/d 值较大时,则用有效介质理论描述速度,速度变化的转折点与 λ/d 值有关,然而对于 λ/d 的取值还存在争议。Carcione等^[7]和Marion等^[8]的数值模拟结果表明,当波长远远大于层厚时($\lambda \gg d$

或 $\lambda/d \gg 1$),周期层状介质的特性更加接近于均匀横向各向同性介质,当 $\lambda/d > 5 \sim 8$ 时层状介质的波动现象就可以用有效介质理论来描述。Melia和Carlson^[9]在由玻璃和环氧树脂制作的薄互层模型上观测到,当 $\lambda/d > 10 \sim 100$ 时,周期层状介质的特性更加接近均匀横向各向同性介质。Marion等^[10]和Rio等^[11]从射线理论和有效介质理论的角度,通过实验观测和理论计算研究了波在周期层状介质中传播时的速度频散现象,认为在 λ/d 值约为 $10 \sim 15$ 的很窄区域内,波的速度会发生较大变化。上述研究中采用的波长 λ 是指波在介质中传播后的波长,并非是入射波长。杨晓松等^[12]的实验采用入射波长计算后认为, $\lambda/d < 4$ 时周期层状介质的速度近似等于两种介质的时间平均速度。由此可见,无论是数值模拟还是实验测试,所得结果并不完全一致,有必要通过实验做进一步研究。为此,本文采用把一种材料灌注到另一种材料间隔中的方法构建一组不同周期层厚度的周期层状介质模型,用不同频率的震源对模型进行透射观测,通过记录波垂直层状介质传播时的波形变化,分析不同周期层厚对波长和速度的影响,以及速度与 λ/d 值的关系。

*北京市昌平区中国石油大学资信学院,102249

本文于2009年1月22日收到,修改稿于2010年2月12日收到。

本研究受国家973计划项目(2007CB209601)资助。

2 周期层状介质模型和速度测试方法

2.1 周期层状介质模型制作

周期层状介质模型是由两种不同的波阻抗材料交替组合而成。原则上,只要两种介质的波阻抗不同,便可以组成周期层状介质。实际上,在实验室内让两种不同性质的材料完整组合在一起是有困难的,尤其是当层厚度很小时更是如此。模型制作时先按设计要求的厚度和片数加工各个模型所使用的铝合金材料(铝片);再把每个模型中的铝片以铝片厚度的间隔隔开;然后采用灌注方式把环氧树脂灌注到铝片的间隔之间,环氧树脂把铝片等间隔地整体粘接在一起,形成铝合金与环氧树脂材料层厚度基本相同的周期层模型;最后把各个模型加工成形

态相同的立方块。这种制作方法的优点是能保证铝片层和环氧树脂层之间可以完全充分地结合在一起,从而与实际层状地层间的沉积状态基本一致。文中设计了一组总厚度相同、各层层厚不同的周期层状介质模型(图1)。实验选用波阻抗差异较大的铝合金材料和环氧树脂材料作为周期层状介质的基本层介质,制作了一组9个不同周期层厚(d)的周期层状介质模型,表1、表2分别列出了周期层模拟材料的物理性质和尺度参数。

表1 周期层模拟材料的物理性质

材料	纵波速度 m/s	横波速度 m/s	密度 g/cm ³	纵波阻抗 Pa·s/m	横波阻抗 Pa·s/m
铝合金	6340	3130	2.77	17.56×10^6	8.67×10^6
环氧树脂	2600	1205	1.18	3.07×10^6	1.42×10^6

表2 周期层模型基本尺度参数

模型 编号	周期层数				模型尺寸		铝合金层厚度	环氧树脂层厚度	周期层厚度	铝合金层总厚度/ Z
	N	X mm	Y mm	Z mm	d_1 mm	d_2 mm	d mm	f_1 %		
1	1	72.05	68.47	71.55	36.05	35.50	71.55	50.4		
2	2	72.00	68.44	71.65	18.07	17.76	35.83	50.4		
3	3	71.85	68.15	70.90	11.98	11.65	23.63	50.7		
4	4	71.65	67.95	71.10	9.02	8.76	17.78	50.7		
5	6	71.85	68.10	71.24	5.93	5.94	11.87	49.9		
6	9	71.90	68.00	70.95	4.03	3.85	7.88	51.1		
7	12	71.61	67.90	71.24	3.04	3.06	6.10	51.2		
8	20	71.62	67.86	71.03	1.74	1.81	3.55	49.0		
9	36	71.86	68.04	71.32	0.93	1.05	1.98	46.9		

注:铝合金层厚度数据为各层的平均值(误差小于 ± 0.05 mm);环氧树脂层的厚度由总厚度 Z 平均得到; $f_1 = Nd_1/Z$

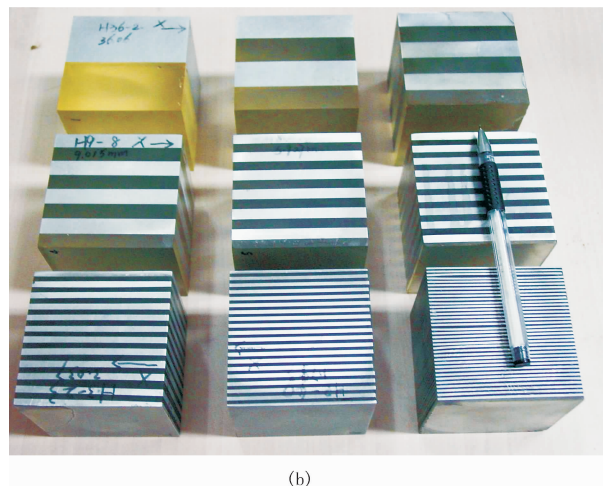
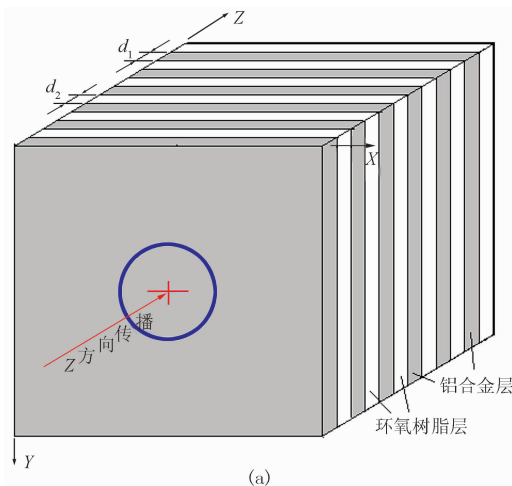


图1 周期层状介质模型示意图(a)和实物(b)

X 、 Y 和 Z 表示模型的三个方向, Z 方向垂直于层面,铝合金层厚和环氧树脂层厚分别用 d_1 和 d_2 表示,则周期层的厚度为 $d = d_1 + d_2$

2.2 速度测试和波长的计算方法

采用声波脉冲透射方法观测波垂直于模型层方向(Z方向)的传播特性。测试时把发射和接收超声换能器放在模型层面的两端(图 1a)。为了研究周期层状介质对速度的影响,分别采用 1.0,0.6,0.2 MHz 的震源(相当于宽带窄脉冲换能器)进行测试,为保证各模型测试波形的可靠性及相互之间的可比性,对每个模型严格按相同的耦合条件和仪器测试参数测试波传播达到时间,并记录其波形。通过测量模型层总厚度(传播距离)除以第一个波至拾取的时间得到模型的超声速度,波长则采用透射波的传播波长(即波在周期层状介质传播后的波长),由周期层状介质的速度乘以透射波的主周期(第一个到达波形的起跳时间到第二个零交叉的时间)确定。采用此方法计算的波长基本上反映了各种周期层厚对透射波波场特征的影响。

3 实验结果

图 2 给出了主频为 1.0,0.6,0.2 MHz 的震源在 9 个周期层状介质模型上测试到的波形记录道,由于每个模型的总厚度基本相同,周期层中两种介质的厚度比例也相近,因此可以直接在图中显示的波形图上比较由于周期层厚的不同而引起的速度和振幅变化。由图中可见,总体上,波的传播时间和振幅变化规律基本相似,即:波的到达时间由快到慢变化,频率由高到低再变高,而振幅则呈从大到小再转大等趋势。在这三种测试频率范围,都能找到波形特征明显变化的一道波形(如第 5 或第 6 道,把此道称为周期层状介质声波特性随周期层厚变化的转折道),对于不同的测试频率,该转折道并不对应于同一周期层厚模型,而与波长和周期层厚有关。

在接收波形的传播时间上,第 1~5(或 6)道的波形起跳时间基本上一致,而第 6~9 道的波形随着周期层厚度的变小而逐渐向后延迟,说明模型的速度变慢。由于各个模型中两种介质的总厚度比例基本相同,因此速度变慢主要是由周期层厚引起的。

在记录波形的振幅上,随周期层厚由大变,振幅由强变弱再变强,三种频率的变化趋势基本相同,但变化的大小和所对应的模型有所不同。在高频震源 1.0 MHz 测试的波形(图 2a)中,第 6 道波形的幅值最小,与其他道用相同的幅值比值显示时,几乎看

不到信号,相邻的第 5、第 7 和第 8 道的幅值也较小(图 2a)。在 0.6 MHz 震源频率测试的波形(图 2b)中,也是第 6 道波形的幅值最小,但第 8 道的幅值明显增大。在 0.2 MHz 震源频率测试的波形(图 2c)

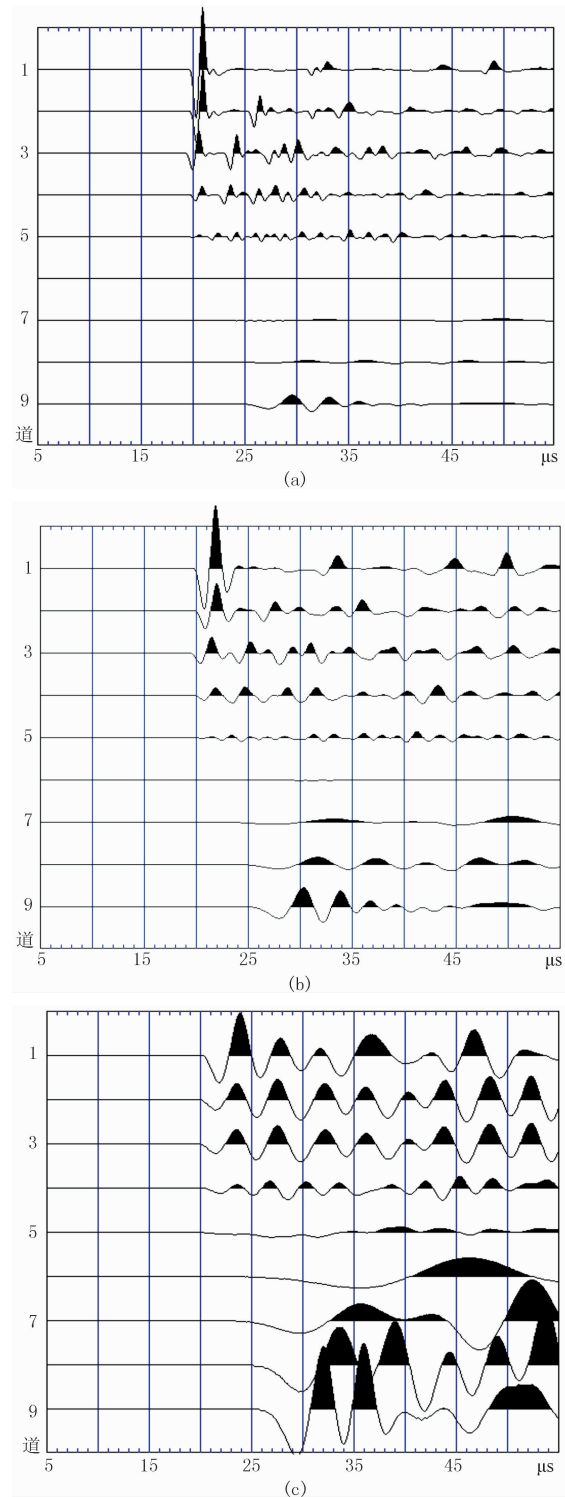


图 2 主频为 1.0(a),0.6(b),0.2 MHz(c)的震源在 9 个周期层状介质模型上测试到的波形记录道

中,第5道的波形幅值最小,而相邻道的幅值变化并不大。综上所述,随着测试频率的降低,波形振幅变化的转折道,向周期层厚大的方向移动,即与 λ/d 值有关。

透射波频率随周期层厚变化的趋势与速度和振幅的变化并不相同,在周期层厚较大时频率变化不大,而从转折道开始,频率成分突然下降很低,然而随周期层厚变小频率再逐步升高,但比转折道前的各道的频率要低得多。

直接读取每个接收波形上第一个波的起跳时间,并被其传播距离除可得到各模型的纵波速度,同时从各道的波形上还可读取第一周期,从而得到透射波长与模型周期层厚之比值 λ/d (表3)。由表3可知, λ/d 小于1时,速度基本不变,而 λ/d 大于8时速度逐渐变小。这种规律不受使用的测试频率影响。

图3为对图2记录中第4~8道用不同振幅值的放大显示,可了解与转折道相邻道波形特征的细节变化。在1.0MHz测试的波形中(图3a)第6道的振幅最小,与相邻第7道相比,振幅至少小5倍,第7道的波形包含了长周期振动与短周期振动波形的叠加,短周期振动的频率与前5道的频率相近,而长周期振动的频率则低得多;在0.6MHz测试的波形中(图3b),波形特征的转变出现在第5和第6道之间,根据振幅值和长短周期振动在同一道出现的特征,可判断出转折道接近第6道,震源频率降低使波形特征的转变向周期层厚度大的方向移动;当用0.2MHz频率测试时(图3c),波形特征转变在第4道和第5道之间,并接近第5道。因此从图3的波形图上可以看到,波从长波长转换为短波长传播时有两个特征,一是第一个周期波形振幅达到最小,二是短波长和长波长的频率特征会出现在同一波形上。

表3 周期层状介质模型的纵波速度和 λ/d 值

模型 编号	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			第一周期/ μs			λ/d		
	1.0MHz	0.6MHz	0.2MHz	1.0MHz	0.6MHz	0.2MHz	1.0MHz	0.6MHz	0.2MHz
1	3688	3688	3651	1.9	2.9	4.7	0.10	0.15	0.24
2	3674	3674	3674	1.8	2.9	4.6	0.18	0.30	0.47
3	3674	3674	3655	1.9	2.9	4.6	0.30	0.45	0.71
4	3665	3646	3628	1.7	2.9	4.0	0.35	0.59	0.82
5	3672	3672	3616	1.7	2.3	3.3/25.4	0.53	0.71	1.01/7.78
6	3676	3512	2981	1.3	24.7	27.8	0.61	11.00	10.51
7	3544	3458	2981	1.0/14.6	15.8	16.7	0.58/8.92	8.96	8.16
8	3115	3048	2887	9.5	10.0	10.4	8.60	8.58	8.46
9	2911	2899	2819	6.2	6.7	7.5	9.11	9.80	10.67

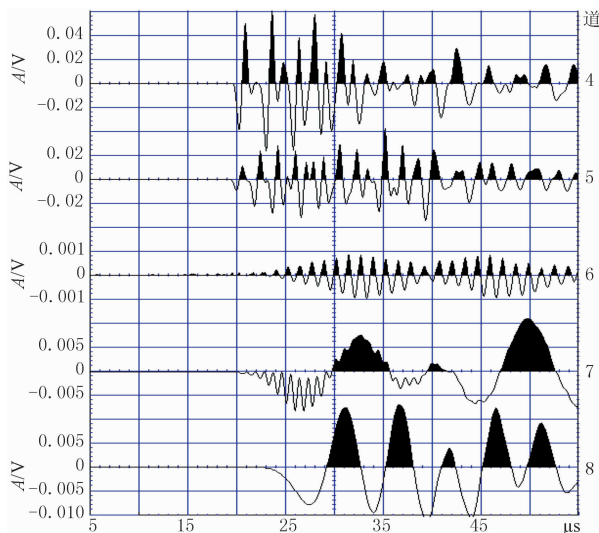


图3a 对图2记录中第4~8道1.0MHz振幅值的放大显示

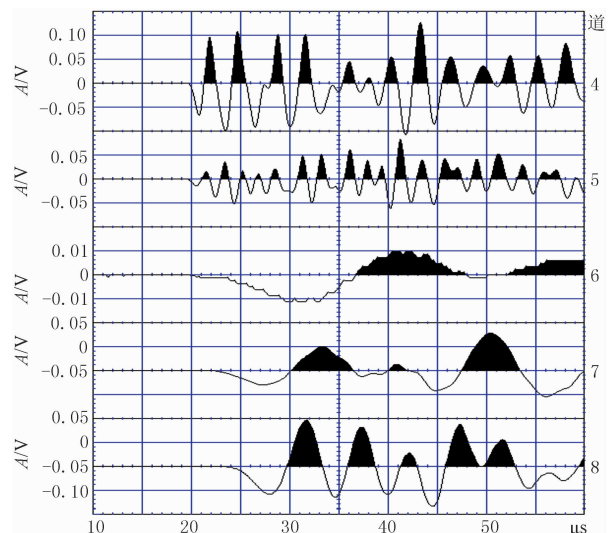


图3b 对图2记录中第4~8道0.6MHz振幅值的放大显示

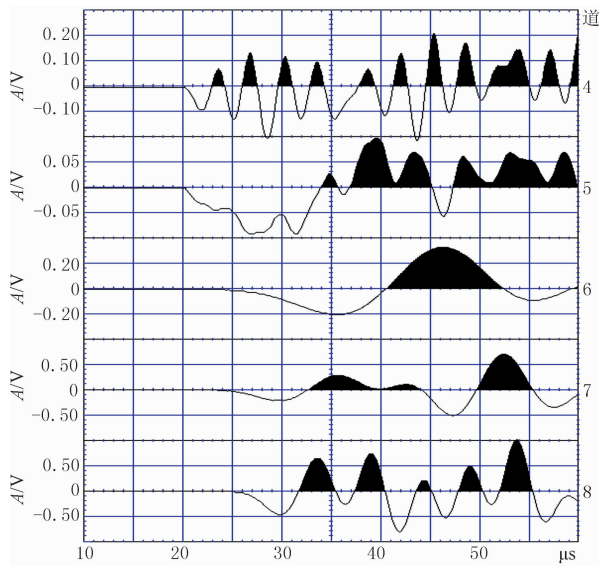


图 3c 对图 2 记录中第 4~8 道 0.2MHz 振幅值的放大显示

4 讨论

上述结果是在一种较特殊的周期层状介质中得到的,但所显示的一些现象和规律还是值得进一步讨论。Mavko 等已对非均质层状介质的传播速度与 λ/d 值的关系作了概括式的总结^[6]。把周期层状介质作为一个非均质体时,周期层厚就是非均质的尺度,当波在这种周期层状介质传播的波长 λ 远小于周期层 d 时,满足射线理论(短波长条件)。此时垂直于周期层状介质传播的总时间为波穿过各层所用时间之和,此时穿过介质的射线平均速度 V_{RT} 有如下关系

$$\frac{1}{V_{RT}} = \sum_k \frac{f_k}{V_k} \quad (1)$$

式中: V_k 为各层介质的速度; f_k 为各层介质厚度与介质总厚度的百分比。

将表 1、表 2 中相应的数据代入式(1)就可估算出当 $\lambda/d < 1$ 时周期层状介质模型的平均速度 $V_{RT} = 3700\text{m/s}$,此数值与表 3 中第 1、第 2 道测试得到的速度值基本一致,表 3 中其他道的速度测试值略小于此值,当波长越接近周期层厚时,速度测试值与此值的差异增大(最大为 2%)。

在长波长条件下, $\lambda/d \gg 1$,把层状介质作为各向同性介质,波垂直于层传播的有效速度 V_{EMT} 为

$$V_{EMT} = \left(\frac{M_{EMT}}{\rho_{ave}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: ρ_{ave} 为层状介质的平均密度; M_{EMT} 为有效模

量。波垂直于层面传播时,有效模量 M_{EMT} 可以用 Reuss 模型确定,即

$$M_{EMT} = \left[\sum_k \frac{f_k}{M_k} \right]^{-1} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)有

$$\frac{1}{\rho_{ave} V_{EMT}^2} = \sum_k \frac{f_k}{\rho_k V_k^2} \quad (4)$$

其中 f_k, M_k, ρ_k, V_k 分别为每层介质的体积因子、密度、弹性模量和速度。对于 P 波, $M_k \approx C_{3333}$, 对于 S 波, $M_k \approx C_{2323}$, 而平均密度 ρ_{ave} 为

$$\rho_{ave} = \sum_k f_k \rho_k \quad (5)$$

同样可用式(4)、式(5)计算当 $\lambda/d > 1$ 时周期层状介质模型的速度,把表 1 和表 2 相关数据代入后得到的周期层状介质模型的等效速度为 2730m/s,此数值接近表 3 中第 9 个模型用 0.2MHz 频率测得的速度,此时周期层状介质的 λ/d 值约为 11。从表 3 可以注意到,当 λ/d 值越大(周期层厚度减小或测试频率降低),其速度就越接近 Reuss 理论估算的等效速度值。

图 4 为依据表 3 数据拟合的 $\lambda/d - V$ 关系曲线,由图中可见:当 $\lambda/d \in (0, 1)$ 时周期层状介质模型的平均速度为 3640m/s,当 $\lambda/d \in (1, 8)$ 时速度出现空白区,当 $\lambda/d \in (8, 11)$ 时进入从短波长向长波长转换的转折区,模型的平均速度明显下降。分析图 3 的记录波形可以解释上述现象。在图 3a 中的第 7 道、图 3b 的第 6 道、图 3c 的第 5 道有一个共同的特点,即在记录上出现了高频和低频的叠加,且振幅达到最小,这是由于周期层厚刚接近于波长时,体现了由短波长向长波长传播转变的一种特征,这种特征与周期层状介质的阻带效应有关,当波在周期层状介质中传播时,随着周期层厚减小会出现调谐效应,两种介质的不同调谐效应使层状介质的作用就像一个滤波器,并伴有严重的散射。图 4 的 $\lambda/d - V$

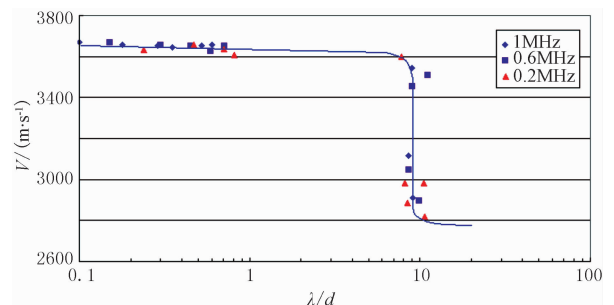


图 4 依据表 3 数据拟合的 $\lambda/d - V$ 关系曲线

关系曲线与 Marion 的实验结果^[8]相似(只是转折区的 λ/d 值范围略小于 Marion 的实验结果,这是由于两者的模型材料和模型构建方法有一些差别所致),由于两者使用的测试和计算波长的方法一致,表明波在周期层状介质中传播时,波的速度与周期层厚度有关。对于不同的测试频率,在一定的周期层厚范围内,可认为层状介质的非均质性很强,使得在有限带宽内的子波对频率有选择性的传播,其他频率的波则被来回地反射。这两种不同的频率调谐效应对接收信号的频率成分改变有贡献,出现了新的频率成分,这个频率比在短波长传播时的频率低得多,而此时的传播速度呈较缓慢降低。因此从波形上可看到高频和低频成分相差很大,计算的波长也不同。如果用高频计算波长,得到的 $\lambda/d < 1$, 而用低频计算波长,则 λ/d 值就跳跃到 8 以上。可以把 λ/d 为 1 或 8 时作为周期层状介质速度变化的转折点,在转折点附近由散射引起的波能量衰减最严重。

5 结论

在实验室通过利用铝合金和环氧树脂材料构建了一组不同周期层厚的周期层状介质模型,通过分析用三种频率(1.0, 0.6, 0.2MHz)的震源对模型进行透射观测,通过记录波垂直于层状介质传播时的波形变化,分析不同周期层厚对波长和速度的影响,以及速度与 λ/d 值的关系,得出以下一些认识:

(1)当周期层厚大于透射波长($\lambda/d < 1$)时,周期层状介质的速度接近于构成周期层状介质的两种材料的平均射线速度,可用射线理论描述波的传播特征;

(2)当透射波长与周期层厚之比 $\lambda/d \in (8, 11)$ 时周期层状介质的速度出现一个下降区,速度由高向低转变,当 $\lambda/d > 11$ 时周期层状介质的速度值可用有效介质中 Reuss 模型估算;

(3)随着周期层厚度的减小,波由短波长开始向长波长转变时,透射波的频率降低,波的衰减最严重,此时的 λ/d 值逐渐接近于 1,或直接跳越到 8 以上,具有明显的转折特征。

上述结论是在两种介质等厚和波阻抗差异较大时得到的,当两种介质的厚度不同或波阻抗差异不大时是否有相同的结果还需作进一步的实验验证。

参考文献

- [1] O'Doherty R F, Anstey N A. Reflections on amplitude. *Geophysical Prospecting*, 1971, 19(3): 430~458
- [2] Shapiro S A, Zien H. The O'Doherty-Anstey formula and localization of seismic waves. *Geophysics*, 1993, 58(2): 736~740
- [3] 李来林,何玉前,陈颖等.层状介质时移时差研究.石油地球物理勘探,2004,39(1):56~59,86
- [4] 云美厚.关于“层状介质时移时差研究”一文的几点笔记.石油地球物理勘探,2004,39(5):624~627
- [5] 丁科,宋守根,范承亮等.层状介质模型的散射波场.中南工业大学学报,2001,32(6):555~558
- [6] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. Cambridge University, 1998
- [7] Carcione J M, Kosloff D, Behle A. Long-wave anisotropy in stratified media. *Geophysics*, 1991, 56(1): 245~254
- [8] Marion D, Mukerji T, Mavko G. Scale effects on velocity dispersion: From ray to effective medium theories in stratified media. *Geophysics*, 1994, 59(4): 1613~1619
- [9] Melia P J, Carlson R L. An experimental test of P-wave anisotropy in stratified media. *Geophysics*, 1984, 49(1): 374~378
- [10] Marion D, Coudin P. From ray to effective medium theories in stratified media: An experimental study. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1992, 11: 1341~1343
- [11] Rio P, Mukerji T, Mavko G, Marion D. Velocity dispersion and upscaling in a laboratory-simulated VSP. *Geophysics*, 1996, 61(2): 584~593
- [12] 杨晓松,马瑾,刘力强.周期性层状介质中超声波传播的实验研究.地震地质,2004,26(3):484~490

(本文编辑:刘勇)