

偶极子声源在径向厚度有限的模拟地层 井孔中激发的声场*

李梦琪^{1,2†} 陈德华² 林春丹¹ 张秀梅²

(1 中国石油大学(北京)理学院物理系 北京 102249)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 利用实轴积分法对偶极子声源在径向厚度有限的模拟地层井孔中激发的声场进行了数值模拟,考察了不同声源、源距、模拟地层半径和最外层吸声介质对井内声场的影响。数值计算结果表明:对于偶极子声源,如果模拟地层为声速较低的泥岩,无论最外层吸声介质为流体还是固体,在源距为 3.0~4.064 m 时,模拟地层半径为 1.2 m 就能保证刻度井中的“初至波”不受模拟地层外边界的影响;若要使声波全波列的主要部分不受该界面的影响,则模拟地层的半径需要更大;如果模拟地层为声速很高的白云岩,最外层吸声材料宜使用声阻抗合适的固体介质,即使这样,模拟地层半径还需达到 2.6 m。这些结果可为模块地层声速刻度井的构建提供理论参考。

关键词 偶极子声源, 模拟地层, 初至波, 刻度井

中图分类号: P631 O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2013)01-0045-06

Acoustic wavefields excited by a dipole source in a simulated borehole with finite radial thickness formations

LI Mengqi^{1,2} CHEN Dehua² LIN Chundan¹ ZHANG Xiumei²

(1 China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The acoustic fields in a borehole embedded in simulated formations with a finite radial thickness excited by dipole sources are numerically studied by using the real axis integral method, and the effects of the source, the offset between the source and the receiver, the radius of the simulated formation, and the outmost absorption material on the acoustic field are investigated. Numerical results show that for dipole sources, the radius of the simulated formation with low shear-wave velocity, such as shale, should be greater than 1.2 m to guarantee the “first arrival” not be affected by the outmost boundary of the formation whether with fluid or solid absorption material, provided the offsets ranging from 3.0 to 4.064 m. Much larger simulated formations are needed to ensure the main part of the full wavetrain not be affected by this outmost boundary. However, for the simulated formation with high shear-wave velocity, such as dolomite, this radius should be greater than 2.6 m even with solid absorption material. These results may provide theoretical references to the construction of the scaling pit relating to acoustic velocity.

Key words Dipole source, Simulated formation, First arrival, Scaling pit

2012-05-25 收稿; 2012-09-07 定稿

*国家自然科学基金(批准号: 11274341, 40774099, 11134011)

作者简介: 李梦琪 (1987-), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 研究方向: 声波测井理论。

陈德华 (1973-), 男, 博士, 副研究员。林春丹 (1968-), 女, 副教授, 硕士生导师。张秀梅 (1980-), 女, 博士, 副研究员。

†通讯作者: 李梦琪, E-mail: meiganlee@sohu.com

1 引言

偶极子声波测井是油气生产中常用的一种测井技术,在测量地层岩性参数(纵横波速度、弹性模量等)和储层参数(孔隙度、渗透率等)等方面应用十分广泛,特别是在测量软地层中的横波波速方面显示了其独特的优势。为保证声波测井的准确性,需要在仪器下井前对其测量性能进行标定,实现这一目的需要建立刻度井并制定相应的刻度技术规范。目前,多家国内油田自主研发了新的声波测井仪器,并已逐渐建立了对单极子声波测井仪器进行性能标定的刻度井和技术规范,而对于偶极子声波测井仪,由于国内起步较晚等原因,在这方面还需进一步完善。开展偶极子声源在径向厚度有限的模拟地层井孔中的声场传播规律研究是建立偶极子声波测井仪器刻度井的基础。

关于偶极子源在井孔中激发产生的声场问题,自1967年White^[1]首先提出用偶极子声源激发弯曲波来实现直接横波测井以来,很多学者都进行了这方面的研究,包括以Roever等^[2]、Winbow^[3-4]和Kurkjian^[5]等人的工作在内的理论研究,以及Kitsunzakh^[6]以及Chen^[7-8]等的实验室小样模拟井中的实验工作等。但这些工作都假设地层在径向上为无限大的情况,而刻度井中的地层是径向厚度有限的,只要满足来自外反射界面的波不影响井内声场的有效信号即可。已有的径向厚度有限的地层井孔中的声传播研究多集中在单极子仪器的刻度井建立方面。如王秀明、陈德华等^[9-10]研究了不同胶结情况、地层性质、吸声材料等情况下,外层地层的尺寸选择对套管刻度井内声场的影响;乔文孝等^[11]从声学理论的不同角度分析了模块外径对套管刻度井声波测井的影响;李山生等^[12]从实验角度讨论了模型井外径对声波波形的影响。近年来,王晶等通过研究单极子声源在外表面应力自由的充液有限壁厚井孔中激发的模式的频散曲线特性及其随管材参数的变化,以及模式分布与接收波列的传播速度之间的关系,提出了利用壁厚较小的管建立单极子声波测井仪器刻度井的新思路^[13-14]。

鉴于此,本文的研究主要针对偶极子声源在径向厚度有限的模拟地层井孔中激发的声场。着重讨论了地层性质、地层的径向厚度,以及最外层的吸声材料对井内声场的影响,最后给出了建立偶极子

声波测井仪器性能标定的刻度井的建议。

2 基本理论

刻度井的物理模型可以看成轴向上无限大的径向多层圆柱结构,本文使用的模型如图1所示。假设有一半半径为 R 的井孔,井孔中充满纵波速度为 v_f 、密度为 ρ_f 的非粘滞性流体,井外存在地层介质和最外层吸声介质。建立 $r\theta z$ 柱坐标系,其中声源位于井轴上,与坐标系原点 O 的距离为 a , z 轴与井轴重合,接收器置于井轴上。

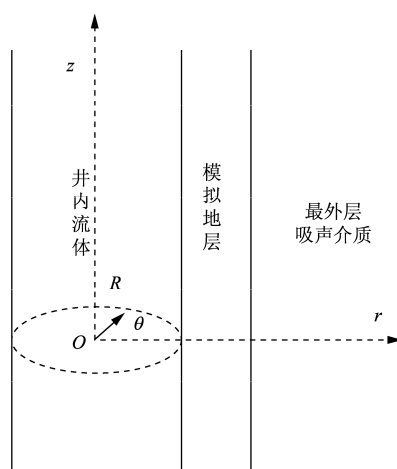


图1 刻度井物理模型

井内流体中的纵波势函数^[3-5,15-17]

$$\varphi_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [C_n + A_n(k) I_n(\mu_f r)] \times e^{in\theta} \right\} \times e^{i(kz - \omega t)} dk, \quad (1)$$

其中,

$$C_n = \begin{cases} K_n(\mu_f r) I_n(\mu_f a), & r \geq a \\ K_n(\mu_f a) I_n(\mu_f r), & r \leq a \end{cases} \quad (2)$$

I_n 、 K_n 分别为 n 阶第一类和第二类虚宗量 Bessel 函数; k 为 z 方向上的波数; u_f 为井内流体的径向波数,可表示为 $u_f = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{v_f^2}}$ 。上式中当 $n=0$ 时,

对应单极子声源; $n=1$ 时,为偶极子声源; $n=2$ 时,为四极子声源。 $A_n(k)$ 为关于波数的待定系数,表征来自井壁的反射波系数,利用声波传播时介质分界面上的边界条件可求出,对于文中描述的问题,主要考虑模块地层内外两个边界。其中内边界指的

是井孔和模拟地层的分界面，这一界面上满足径向位移和正应力连续，切应力为零的条件；外边界的边界条件与吸声材料性质有关，可分为三种，当吸声材料为空气时，模拟地层外边界上满足切应力为零的条件；为流体时，外边界上满足的边界条件与内边界相同；当吸声材料为固体时，外边界上须满足位移和应力都连续的条件。有关位移和应力的表达式，以及应用以上的几种边界条件求解井孔内待定系数的方程可参见文献[9,10,13,17]，本文中不再叙述。利用傅里叶变换，可求得井内的声压表示式

$$P(r,\theta,z,t)=\text{Re}\left\{\int_{-\infty}^{+\infty}S(\omega)e^{-i\omega t}d\omega\right.\\ \left.\times\int_{-\infty}^{+\infty}\left[C_n+A_n(k)I_n(\mu_fr)\right]e^{i(kz+n\theta)}dk\right\}.$$

(3)

3 数值模拟与结果分析

由于刻度井中模拟地层的半径是有限大的，因此在模拟地层与最外层吸声介质之间会产生一个人为界面，这个界面对井内声场会产生一定的影响。下面计算源距、模拟地层和最外层吸声介质发生变化时的井内声场时域波形，主要参数如表 1 所示。

表 1 主要计算参数

介质	v_p $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	v_s $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	ρ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	备注
井眼	1500	—	1000	
泥岩	1800	950	2450	井孔半径为 0.1 m
白云岩 (致密)	7900	4400	2870	

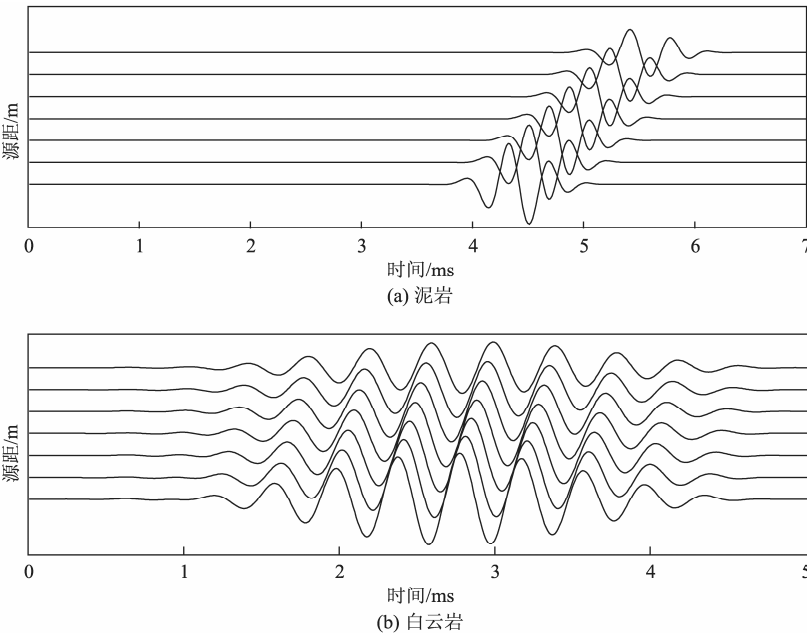


图 2 实际井的全波波形

根据实际偶极子声波仪器的参数指标，声源中心频率选择 2.5 kHz，共 8 个接收器，第 1 个接收器的源距为 3.0 m，相邻两个间距为 0.152 m。由几何声学理论可知，仪器的源距越大，其探测深度越深，径向厚度有限的模拟地层外边界对仪器测量信号的特征影响越大，所以文中只讨论源距为 4.064 m 的第 8 道接收器的单道时域波形。针对测井作业中可能遇到的井下地层，本文选择常见岩石中较有代表性的泥岩和白云岩进行模拟计算。

图 2 是声源中心频率为 2.5 kHz 时偶极子声源激发的泥岩和白云岩的声波全波列。从图中可以看出，由于低频(<3 kHz)的偶极子声源有效压制了纵波并激发较强的横波，因此其“初至波”是以接近地层横波速度传播的，波形中存在较明显的频散现象。

先讨论模拟地层为泥岩的情况。图 3 是最外层吸声介质为水时不同模拟地层半径的声波全波列；其中，实线表示刻度井中的全波波形，虚线表示

实际井（井外只存在无限大的模拟地层）中的全波波形。

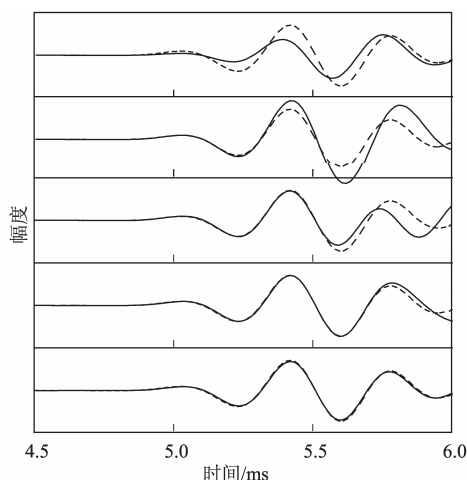


图3 最外层吸声介质为水时泥岩不同模拟半径的全波波形
(模拟半径由上至下分别为 0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m 和 1.6 m)

从图中可知，在模拟地层半径为 1.2 m 时，刻度井和实际井的“初至波”有一个周期是吻合的；而模拟地层半径小于 1.2 m 时，人为界面对井内声场的影响是不能被忽略的。原因在于，随着模拟地层半径的增加，声波的几何扩散增大，到达人为界面的能量越少，这样界面反射回井中的能量就减少，井内声场受到的影响也减小，使得实线与虚线吻合得越好。当模拟地层半径增加至 1.6 m 时，刻度井的主要波列几乎不受到人为界面的影响。

如果最外层吸声介质为空气，结果如图 4 所示，计算所用的空气中的声速为 331 m/s，密度为

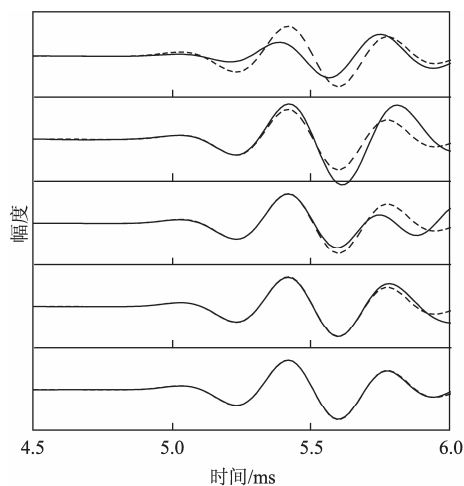


图4 最外层吸声介质为空气时泥岩不同模拟半径的全波波形

(模拟半径由上至下分别为 0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m 和 1.6 m)

1.29 kg/m^3 。与图 3 对比后发现，由于水和空气都属于流体，计算中人为界面上使用的边界条件均为固体-流体边界条件，所以两种情况下的井内声场的变化是相似的。同样地，模拟地层半径大于 1.2 m 时，波列的“初至波”基本不受人作为边界的影响；模拟地层半径大于 1.6 m 时，波列的主要部分不受人作为边界的影响。

若最外层吸声介质采用纵波波速为 4000 m/s，横波波速为 2100 m/s，密度为 2400 kg/m^3 的固体介质，假设模拟地层与最外层吸声介质之间胶结良好，图 5 为数值模拟结果。从图中可以看出，模拟地层半径为 1.2 m 时，实线和虚线的“初至波”部分相吻合；当模拟地层半径达到 1.6 m 时，波列的主要部分是吻合的，此时外边界的影响基本可以忽略。但对比图 3 和图 4 中的结果，采用固体吸声材料时，人为边界的影响相比流体要小一些；可以预见，如果最外层固体吸声材料的声阻抗与泥岩的声阻抗更接近，刻度井的模拟地层半径可以设置得更小些。

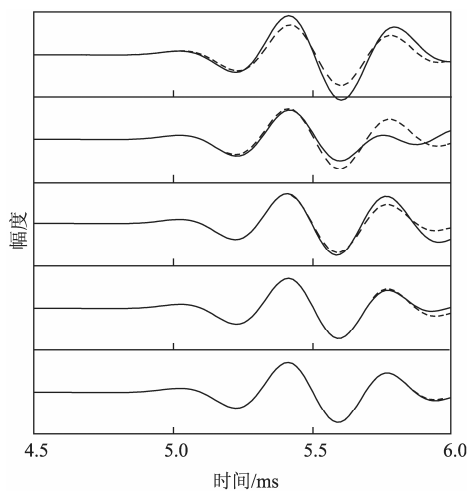


图5 最外层吸声介质为固体时泥岩不同模拟半径的全波波形

(模拟半径由上至下分别为 0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m 和 1.6 m)

对于白云岩的情况，分别讨论最外层吸声介质为流体和固体时不同模拟地层半径对井内声场的影响。

图 6 是最外层吸声介质为水时不同模拟地层半径的声波全波列。显然，即使模拟地层半径达到 3.0 m，也只有刻度井和实际井的“初至波”是吻合的，也就是说这时波列的主要部分仍然受到人为界面的影响。若想减小或消除界面的影响，还要再增大模拟地层半径。

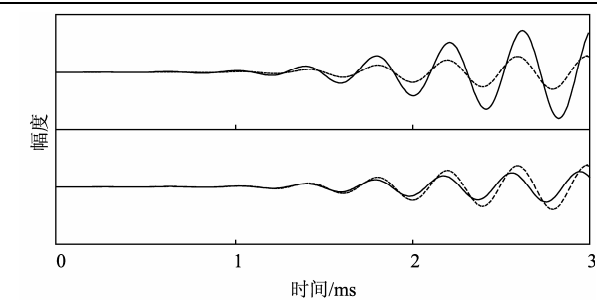


图 6 最外层吸声介质为水时白云岩不同模拟半径的全波波形
(模拟半径由上至下分别为 2.5 m 和 3.0 m)

为了降低构造刻度井的难度，考虑最外层吸声介质为固体。仍然假设模拟地层与最外层吸声介质之间胶结良好，模拟所用的固体吸声介质与图 4 中的相同。图 7 是最外层吸声介质为固体时，模拟半径为 2.6 m、2.8 m、3.0 m、3.5 m 和 4.0 m 的全波波形。从图中发现，当模拟地层半径为 2.6 m 时，刻度井和实际井的“初至波”相吻合，这时人为界面对井内声场的影响较小。对比图 6 和图 7 可知，固体与模拟地层的声能量耦合的比流体好，因此声波传到界面再反射回井内的能量减小，井内声场受到的影响也减小；当模拟地层半径增至 4.0 m 时，实线与虚线几乎吻合，说明此时波列的主要部分不受外边界的影响。

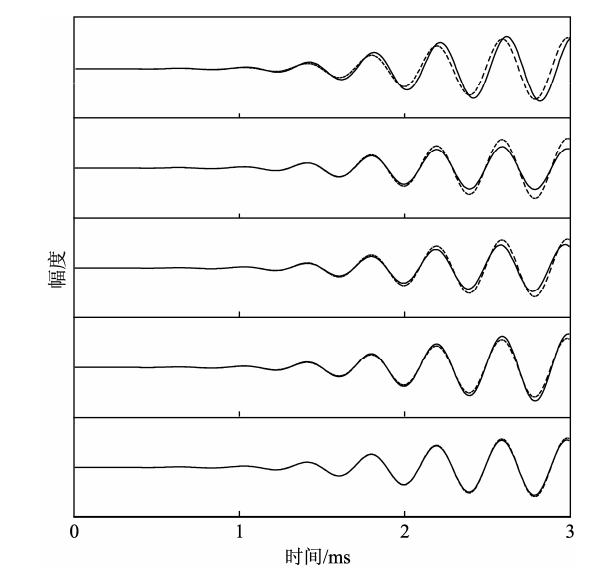


图 7 最外层吸声介质为固体时白云岩不同模拟半径的全波波形
(模拟半径由上至下分别为 2.6 m、2.8 m、3.0 m、3.5 m 和 4.0 m)

对于四极子声源，由于其井孔声场螺旋波的最低阶模式的截止频率比偶极子弯曲模式波的最低阶截止频率高^[17]，也就是说其激发频率相比偶极子

声源高，相同介质情况下其声场波长更短，因此，要达到相同的刻度效果，所需的刻度井模拟地层的半径可以设计得更小，限于篇幅，相关模拟结果在此不再给出。

4 结论

本文利用实轴积分法对低频偶极子声源（<3 kHz）在径向厚度有限的模拟地层井孔中激发的声场进行了数值模拟，结果表明：

对于横波波速较低的地层（如泥岩）来说，无论最外层吸声介质是流体还是固体，模拟地层半径只需 1.2 m 即可使波列的“初至波”不受人为界面的影响；对于横波波速较高的地层（如白云岩）来说，若最外层吸声介质是流体，模拟地层半径至少为 3.0 m 才能保证人为界面不影响“初至波”；若最外层吸声介质是固体，则模拟地层半径须达到 2.6 m。由于白云岩的声速基本上为声波测井中遇到的实际地层的最大声速，因此在实际建造刻度井且应用文中列出的固体吸声材料时，地层的径向厚度可小于等于 2.6 m。

本文的研究成果为建造偶极子声波测井仪器的刻度井提供了参考，尤其是针对不同的地层情况，对模块地层的径向尺寸的选择、与吸声材料的组合关系提供了针对性的建议。

参 考 文 献

[1] WHITE J E. The hula log: A proposed acoustic tool[M]. Paper I, in 8th Annual Logging Symposium Transactions: Society of professional Well Log Analysts, 1967.

[2] ROEVER W, ROSENBAUM J, VINING T. Acoustic waves from an impulsive source in a fluid-field borehole[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1974, 55: 1144-1157.

[3] WINBOW G A. Compressional and shear arrivals in multipole sonic log[J]. Geophysics, 1985, 50: 1119-1126.

[4] WINBOW G A. A theoretical study of acoustic S-wave and P-wave velocity logging with conventional and dipole source in soft formation[J]. Geophysics, 1988, 54: 1334-1342.

[5] KURKJIAN A L. Acoustic multipole source in a fluid-filled borehole[J]. Geophysics, 1986, 51(1): 148-163.

[6] KITSUNEZAK C. A new method for shear wave logging[J]. Geophysics, 1980, 45: 1489-1506.

[7] CHEN S T. Shear-wave logging with dipole sources[J]. Geophysics, 1988, 53: 659-667.

[8] CHEN S T. Shear-wave logging with quadrupole sources[J]. Geophysics, 1989, 54(5): 590-597.

[9] WANG X M, DODDS K. Effects of the outermost boundary on acoustic waves in an artificial cased borehole[J]. Exploration Geophysics, 2002, 33: 146-152.

储层声学 with 声波测井 2012 年度学术研讨会在北京成功召开

“储层声学 with 声波测井 2012 年度学术研讨会”于 11 月 15 日至 16 日在北京成功召开。本次研讨会由中国声学学会主办、中科院声学所声波测井重点项目组承办。会议以国家自然科学基金重点项目“各向异性孔隙地层非轴对称井孔中的声场”为依托,面向储层声学 with 声波测井面临的主要问题和未来的发展方向,对相关的研究热点进行了深入细致的研讨。

本次会议参会单位和与会人数众多,吸引了来自中国石油大学(北京)、吉林大学、中国石油大学(华东)、哈尔滨工业大学、中油测井、大庆钻探、中海油服、中石化勘探院等多家科研机构和石油企业共计近 90 名代表参会。

会议于 15 日上午开幕,由检测声学分会副主任、声学所学术委员会主任王秀明研究员主持,中科院声学所副所长李凤华致开幕辞,中国声学学会副理事长宗健讲话,国家自然科学基金委物理一处的张守著主任应邀参加了此次会议并讲话。

会议邀请了中国石油大学(华东)“千人计划”教授唐晓明博士、中国石油大学(北京)“千人计划”教授孙赞东博士、哈尔滨工业大学胡恒山教授、声学所前任学术委员会主任、资深研究员张海澜博士、吉林大学王克协教授、中国石油大学(北京)乔文孝教授做特邀报告。

在特邀报告中,唐晓明教授从石油和天然气勘探与开发的现状和趋势、油气勘探和开发对测井技术发展的要求、以及我国未来测井方面思考等方面讲解了非常规油气储层岩石物理与测井技术;孙赞东教授介绍了岩石物理模型对储层和流体预测的影响,对比了不同岩石物理模型在不同孔隙结构和岩性的岩石中的应用效果,总结了不同岩石物理模型的适用性,以及相关的关键技术等;胡恒山教授分别做了“拉梅常数的意义及纵波速度与剪切模量有关的原因”和“微裂隙流体压强欠松弛对排水体积模量与衰减系数的影响”的主题报告,解释了力学和声学中常用的拉梅常数的物理意义,分析了孔隙介质排水体积模量的频散和排水体积模量与剪切模量的高频极限等问题;张海澜研究员题为“凋落波和井

孔声场”的报告介绍了一种重要的波动现象—凋落波,同时,他还初步探讨了柱坐标系和各向异性介质中的凋落波问题;王克协教授报告的题目为“套管井高频挠曲波探测瞬态声场数值模拟与机制分析”,展示了对斯伦贝谢公司推出的套管水泥胶结检测先进仪器声波响应的数值模拟结果;乔文孝教授结合实例指出声波测井目前所面临的挑战包括径向探测深度、井周不均匀性地层的方位评价等,并展示了相控声波测井在水平指向性和垂直指向性方面的测试结果。

作为本次会议的发起者,王秀明主任在会上介绍了岩石声学理论与实验研究、复杂地层井孔声场以及声信息反演方法研究等研究内容,汇报了相关领域的工作进展,提出了未来的工作计划。在会上,他感谢声学所、声学学会及基金委的领导对本次研讨会的大力支持,感谢各位特邀嘉宾和来自石油生产一线的领导和专家的积极响应,感谢与会全体代表的共同参与。他指出,科研要做到理论结合实际,应用基础研究的导向是否正确要由实践检验,要看是否在学科领域的发展中做出贡献,是否解决了实际中的科技难题。他认为形成科研联盟很重要,研讨会争取做到凝聚人才,集中力量,解决现场急需解决的问题,或者提供解决问题的思路和方法。他期望石油企业能够充分利用科研院所的力量,解决更多的实际需求问题。

另外,会议还安排了 15 个青年科研人员做了报告,他们的报告立意新颖,内容丰富,从不同的侧面展现了储层声学和声波测井的相关研究成果。

在学术自由、平等开放的会议气氛下,与会的代表展开了热烈、严谨而有益的交流和讨论,广泛探讨了目前国内外声波测井技术的发展以及石油企业对声波测井技术的需求。本次会议的特点是规模小而专、内容深而细、交流深入、与会代表觉得收获多、感悟深、效果好。16 日下午,会议在友好而热烈的气氛中落下帷幕。

(中国科学院声学研究所 何晓 张秀梅)

- [10] 陈德华,王秀明,于甦,等. 套管刻度井中模拟地层及吸声材料对井内声场的影响[J]. 测井技术, 2000, 24(1):20-26.
- [11] 乔文孝,刁顺,杜光升,等. 模块外径对套管刻度井声波测井的影响[J]. 测井技术, 2003, 27(6): 456-458, 473.
- [12] 李山生,沈建国. 声波测井模型井实验研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 9(2):187-190, 197.
- [13] 王晶,陈德华,张海澜,等. 外表面应力自由的冲也有有限壁厚井孔中的声场及其频散曲线的平台特征[J]. 声学学报, 2012, 37(3):232-236.

- [14] WANG J, CHEN D H, ZHANG H L, et al. Studies on phase and group velocities from acoustic logging[J]. Applied Geophysics, 2012, 9(1):108-113.
- [15] 张金钟,郑传汉. 裸眼井中弹性波传播的非对称模式的数值研究[J]. 地球物理学报, 1988, 31:464-469.
- [16] 王秀明,李占诚,杨建绥,等. 裸眼井中软地层多极子源激发的弹性波的传播[J]. 地球物理学报, 1992, 35(4): 510-520.
- [17] 张海澜,王秀明,张碧星. 井孔的声场和波[M]. 北京:科学出版社, 2004.