

声波测井物理与应用专题

编者按 地球物理测井是一种利用下井仪器,通过测量井壁附近岩石的声、电和核等物理参数,确定油气层的孔隙度、渗透率、含油气饱和度和有效厚度等的地球物理方法,它主要包括声学法、电学法和放射性法三大类。在本期发表的“声波测井物理与应用专题”中,作者们主要对声波测井中的物理问题、理论和方法,特别是对于多极子声波测井的方法原理和资料应用等都进行了较详细的介绍;此外,对相控阵声波测井等方面的技术发展也进行分析和阐述;作者们对随钻声波测井也有不少笔墨,对未来可能的震电测井给了一定的期望,并对其理论进行了评析。总之,我们期望通过这一专题,使读者对声波测井的物理与应用有较全面的了解,并期望以此扩大和宣传声波测井的物理原理、技术和应用,也希望激发读者的研究兴趣。

声波测井中的物理问题^{*}

王秀明[†] 张海澜 何晓 丛健生 张秀梅

(中国科学院声学研究所 声场与声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 文章从声波测井的基本概念入手,介绍了什么是声波测井,其基本原理是什么,声波测井中的主要物理问题是什么,还从几个侧面介绍了声波测井的基本应用和未来的发展趋势,包括传统的电缆测井、目前国外流行的随钻声波测井以及具有应用前景但是尚处于研究阶段的震电测井。文章向从事物理研究的工作者概述了声波测井相关的物理问题和研究的发展现状,为打算涉入声波测井领域研究或者对相关领域研究感兴趣的读者提供了一些基本素材和知识。

关键词 声学物理问题,声波测井,随钻测井,震电测井

Physical problems in acoustic logging

WANG Xiu-Ming[†] ZHANG Hai-Lan HE Xiao CONG Jian-Sheng ZHANG Xiu-Mei

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract We present the basic concepts of acoustic logging and its physical problems in practical acoustic wave logging. Its applications and development are described from several aspects, including general wire-line logging, acoustic logging while drilling, and seismoelectric logging that has potential applications but is still in its infancy. We shall focus on the physical problems and research of acoustic logging, while including some background knowledge.

Keywords acoustic physical problems, acoustic logging, logging while drilling, seismoelectric logging

1 引言

在石油地球物理勘探过程中,当地震勘探确定了区域的地质构造和地质结构以后,人们对地下地质体可能的含油气情况有了大概的了解。但是,要精确知道油层的埋藏深度、油层的厚度、油层中的油气含量、油层的可采量,就需要借助于测井来回答这些问题,这一工作叫做储层测井评价,这里所说的储层,又称储集层,是指能够存储石油、天然气、水或天

然气水合物的地层。由于地下地质体是经过成千上万年的各种各样的过程沉积下来的,所以它们具有层状沉积的特性。

什么是测井?测井是地球物理测井的简称,它是基于声学法、电学法和核物理等物理方法,利用各种井下测量仪器,通过测量反映井壁附近地层的声、电、

^{*} 国家自然科学基金(批准号:40774099,10874202)、国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA06Z205)资助项目

2010-11-03 收到

[†] 通讯联系人,Email:wangxm@mail.ioa.ac.cn

核等物理参数的信息,然后利用计算机和数字信号处理技术,结合该区域的地质信息,估算地层的声学、电磁学和核物理性质,划分地层,确定地层的岩性,计算地层的孔隙度、渗透率,识别地层的孔隙流体的特性,估算地层的含水(含油气)饱和度等,对地层进行描述和定量评价的一系列工作过程.测井专家通过对测井资料进行数字处理,结合地质资料和地区经验,对测井的地层剖面进行油气水特性分析、岩性物性分析、渗透性分析等定量评价,从而确定地层是否含有油气、含油气量的多少、油层厚度以及评估油气可采量.测井是在油气探测和评价中不可或缺的,目前在国际上有斯伦贝谢(Schlumberger)、哈里伯顿(Halliburton)和贝克休斯(Baker Hughes)三大测井公司,它们占据着世界上主要的测井市场,在石油探测和评价中具有举足轻重的作用.我国三大石油公司(中国石油、中国石化和中国海油)也各自设有测井分公司,这些测井公司在石油储层评价中发挥着极其重要的作用.我国国家高技术研究发展计划(简称 863 计划)和油气重大专项中都有测井技术与装备研究的内容.图 1(a)和图 1(b)分别是实际陆上和海上测井现场的拍照图,图中展示了测井作业时的测井仪器车、测井电缆、海上测井平台和井架等.



图 1 (a) 实际陆上测井现场拍照图 ;(b) 实际海上测井现场拍照图

本文主要介绍的声波测井是三大测井方法(声波测井、电法测井和核测井)中的一种,它利用声学方法,通过井下的声学测量仪器,对反映井壁附近地层的声学参数的信息进行采集、传输和记录,并对这些声波测井资料进行一系列数字处理,再配合其他

测井资料,确定地层的波速、孔隙度、渗透率,评价井壁附近的地层裂缝走向及其分布,识别地层孔隙流体的性质,估算地层的应力和孔隙压力,评价固井质量好坏.声波测井仪器根据测量方式和应用的不同,可分为很多种,但其共同点是都能在井内发射和接收声波.图 2 是一个电缆声波测井的简单示意图,仪器是一个细长圆柱体,放置在充满流体(通常是泥浆)的井孔内,仪器上有声源和声波接收器阵列.由声源激发的声波沿井壁传播并到达接收器阵列,根据不同源距(指声源和接收器之间的距离)接收器获取声信号的时间差可以测得声波的速度,而声波的衰减可由相邻接收器获得的声波幅度之比确定.为了减弱声源发射的、经由仪器直接到达接收器的波,在声源和接收器之间的连接部分通常还设计有隔声体.这样,接收器阵列获取的声信号主要是沿井壁传播的部分,这些声波携带着与地层特征相关的信息,包括弹性波速、孔隙度、渗透率等参数沿井孔方向的连续变化情况.下面将介绍一些最常用的声波测井方法和所涉及的基本物理问题以及研究发展现状,除了目前国内最常见的电缆测井以外,同时还将介绍随钻声波测井、震电测井等前沿测井方法.

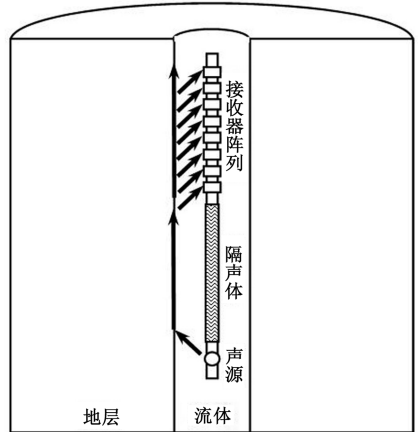


图 2 电缆声波测井示意图

2 电缆声波测井中的物理问题

2.1 单极子和偶极子井孔波场

电缆测井是目前国内最普遍使用的测井方法.测井时,仪器由电缆连接而上下移动,该电缆既被用来牵引仪器运动,同时又是传输电力和数据的媒介.早期测井仪都采用单极子作声源,最初只记录纵波时差随深度的变化曲线,由此起到划分地层、校正地球勘探的测量结果和测量地层孔隙度的作用^[1].随着数字信号处理技术的发展,20 世纪 70 年代末出

现了全波列声波测井,区别于以往只提取首先到达接收器的声波信息的简单测井方法,全波测井可在一次测量中获得完整的数字化声波信号.对于单极子测井仪,换能器在井内激发的声波信号包括临界折射纵波、临界折射横波、伪瑞利波(pseudo-Rayleigh wave)和斯通莱波(Stoneley wave)等,其中伪瑞利波和斯通莱波是具有不同物理机制的两类导波:前者是由声源发出的声信号在井壁处形成的全反射叠加声场;后者是一种能量集中在井壁流体—固体边界的表面波.

从声源的形态上来看,单极子声波测井仪器采用的声波换能器通常是一个井中的圆柱状压力脉冲源,声源辐射轴对称分布的弹性波,在理论模拟时通常把声源等价成放置在井轴上的胀缩小球,见图3(a).由于这种声波测井方法出现得最早,因此在有些文献中又称为传统声波测井.在井中接收器获取的全波列(见图4)中,临界折射纵波沿井壁以地层纵波速度传播,临界折射横波和伪瑞利波被广泛用以测量地层的横波速度.斯通莱波和伪瑞利波都是频散的导波,在图5(a)所示的频散曲线中,斯通莱波的速度小于流体声速(1500m/s),在全频段都能被激发,在低频时,其速度趋近于^[2, 3]

$$V_{ST} = V_f / (1 + \rho_f / V_f^2 / \mu^*)^{1/2} \quad (1)$$

其中 V_f 是井内流体声速, ρ_f 是井内流体密度,而 μ^* 表示斯通莱波的特征模量,在各向同性介质中,它等于地层剪切模量.当频率增大到使得波长远小于井孔尺寸时,斯通莱波相当于在流体—固体半空间平面边界上传播,因而不再频散(此时又称为Scholte波).伪瑞利波频散较强且有多阶模式,各支频散曲线都有一个明确的截止频率,对于各向同性地层,在截止频率处,伪瑞利波的速度恰好等于地层横波速度,随着频率的增大,它的速度趋近于井内流体声速.图5(b)是上述两类导波的激发强度曲线,它表示斯通莱波和伪瑞利波在不同频率下激发强度的相对幅度大小.在零频率附近,斯通莱波的激发强度很大,但随频率增大而迅速减小.由于截止频率的存在,低频(约小于10kHz)时伪瑞利波不能被激发,仅当声源频率超过某一阶伪瑞利波截止频率时,该阶伪瑞利波被激发,激发强度随频率增大到峰值后又随频率而减小.在伪瑞利波能被有效激发的频段内,其激发强度远大于斯通莱波.基于伪瑞利波的频散特征,在单极源测井的时域波形中,伪瑞利波和横波通常相连形成一个波群(见图4),通过提取它的到达时间,人们可以测得地层的横波速度.

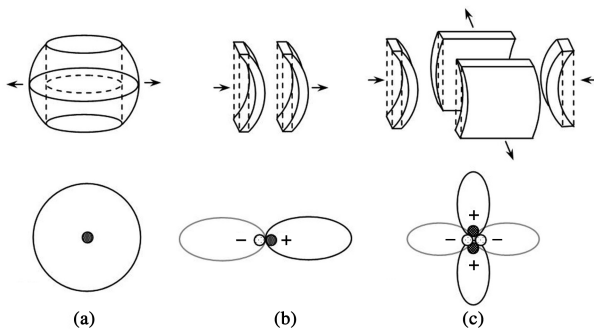


图3 声源示意图 (a) 单极子; (b) 偶极子; (c) 四极子

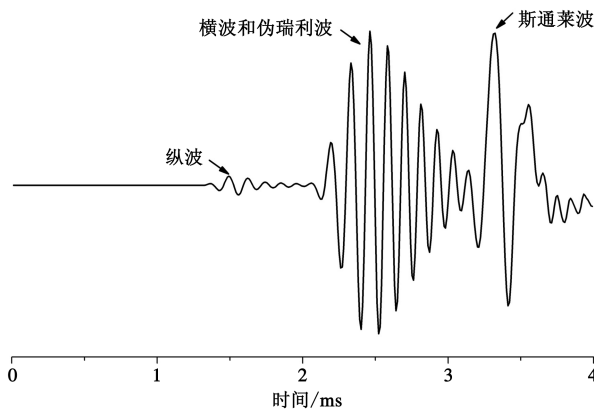


图4 单极源激发的全波信号

然而在实测中人们发现,当地层的横波速度小于井内流体声速时,单极源激发的全波列中只包含临界折射纵波和斯通莱波,并不存在临界折射横波和伪瑞利波信号,因而无法有效拾取地层横波的特征.这在物理上很容易找到解释:如果井内入射声波(速度为 V_f)快于井外地层的横波(速度为 V_s),根据斯涅尔(Snell)定律:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_f}{V_s} \quad (2)$$

不论入射角 α 选取任何实数,折射角 β 都总是小于 $\pi/2$,也就是说,由换能器发射声波的速度在井壁上无法满足产生横波临界折射或纵波全反射的条件,因而井内无法接收到横波响应,也无法形成由全反射波叠加而成的伪瑞利波.基于此现象,在石油勘探中,横波速度大于流体声速的地层通常被称为“快速地层”或“硬地层”;反之,横波速度小于流体声速的地层为“慢速地层”或“软地层”.

慢速地层在实际勘探中并不少见,为了确定这种地层的横波速度,人们发展了偶极横波测井技术,这种声波测井仪的声源由振动片构成,工作时片状结构左右来回振动,当它向左运动时,介质被推向左边流出,而右边的介质流入,总的介质体积变化为零.在理论模拟时,偶极源可等价于两个相距很近的单极子声源组合,这两个胀缩小球表面振动幅度相

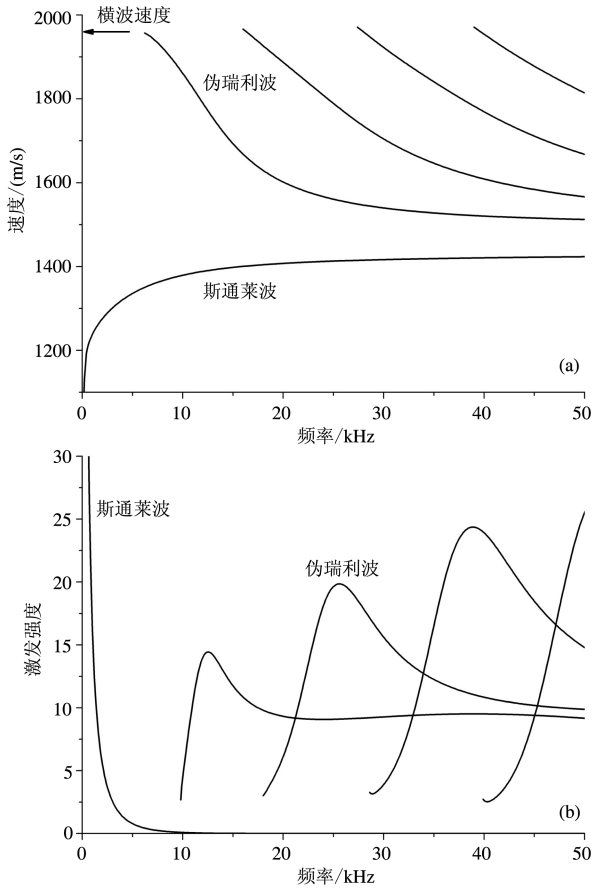


图 5 (a) 快速地层中单极源导波频散曲线; (b) 快速地层中单极源导波激发强度曲线

同但相位相反(见图 3(b)). White 于 1967 年首先提出了利用偶极源激发的弯曲波来获得地层横波速度的构想. 弯曲波也是一种沿流体—固体边界行进的导波, 在绝大多数地层中, 低频弯曲波的速度都趋近于地层横波速度^[4], 这就是利用弯曲波进行横波拾取的理论依据. 基于此, 人们围绕偶极声波测井方法的原理、仪器设计、资料处理等展开了广泛的研究. 在这些研究的基础上, 上世纪 90 年代初, 各大石油公司推出了较为完善的偶极子声波测井仪器, 已经很好地解决了传统声波测井仪在慢速地层中不能获得横波的难题. 图 6(a) 给出了在慢速地层中单极源激发的波场模拟结果. 在时域全波列中, 我们无法观测到临界折射横波信号, 斯通莱波的速度在全频段内都明显小于横波速度(见图 6(b)的频散曲线), 因而不能根据单极源测井方法测得横波速度. 与单极源井孔波场不同, 低频偶极源全波中占主要地位的弯曲波速度与横波速度几乎完全一致(见图 6(c)), 这一点同样表现在图 6(d)中, 弯曲波在低频($<2\text{kHz}$)时不论是相速度还是群速度都趋近于横波速度. 根据以上理论分析结果, 偶极测井方法可以

很好地解决慢速地层横波速度提取的问题.

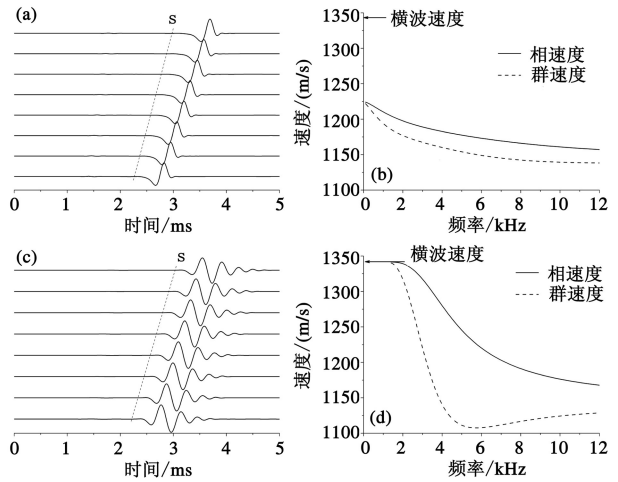


图 6 (a) 慢速地层中单极子井孔全波列(虚线 s 表示横波的理论到达的波至); (b) 单极子斯通莱波频散曲线; (c) 慢速地层中偶极子井孔全波列(虚线 s 表示横波的理论到达的波至); (d) 偶极子弯曲波频散曲线

最初人们设计偶极子测井仪是为了在软地层中直接激发横波, 随着测井技术和仪器开发的不断进步, 偶极声波测井已不仅仅以获得地层横波速度为目的. 图 7 是一个交叉偶极测井仪照片, 这种测井仪中设有两组正交分布的偶极声波换能器. 用这种仪器, 在测井时可以获得两个偏振方向上的地层横波速度^[3], 根据两种横波速度之差估测地层的各向异性大小, 进而获得与各向异性关联的地层评价, 比如储层中层状构造的倾斜方向、定向裂隙的走向以及地应力分布情况等.

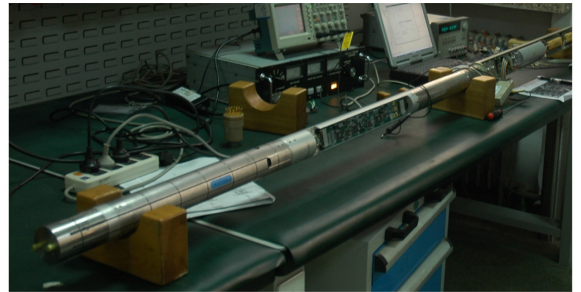


图 7 交叉偶极子测井仪

以上介绍了声源和接收器位于井孔对称轴时的声波测井问题, 然而在实际的测井中还会遇到声源偏离井轴的情况. 一方面, 目前油田中有些声波测井仪本身就带有偏心声源, 这种带偏心声源的仪器通常用于探测井孔的裂纹或者检测套管井的水泥胶结情况; 另一方面, 常规的中心声源测井仪在使用过程中有时也可能出现偏心的情况.

图 8 是某快速地层中由接近井壁的偏心点声源激发的井孔波场在各时刻的剖面快照图, 其中浅灰色

区域表示地层,深灰色区域表示内流体.在0.05ms时刻,点声源朝井孔左侧发射的直达纵波虽然还没有接触到井壁,但在左侧地层中已经可以看到近似球面的纵波阵面,这是声源在右侧产生的纵波在地层中沿井壁绕过去的.从0.1ms时刻开始,地层中纵波和横波开始分离,图中出现了一系列斜直线,它们从纵波或横波的波阵面与井壁的交点出发,与横波或井内反射波的波阵面相切,这种波群分别称为纵波在井孔外产生的横波头波以及纵波和横波在井孔内产生的头波.随着时间的推移,井内的反射声波每次遇到井壁产生新反射波的同时,还产生向井外地层透射的纵波、横波和头波.这个过程不断重复,使整个波场变得越来越复杂,而新产生的反射波一个比一个弱,直至无法检测到.为了更直观全面地展示井孔声场,还可以观察其他界面上的分布情况,比如图9是井壁上声场快照的立体图,从中可以清晰看到,在不同时刻波阵面沿井壁螺旋上升的“爬波”现象.

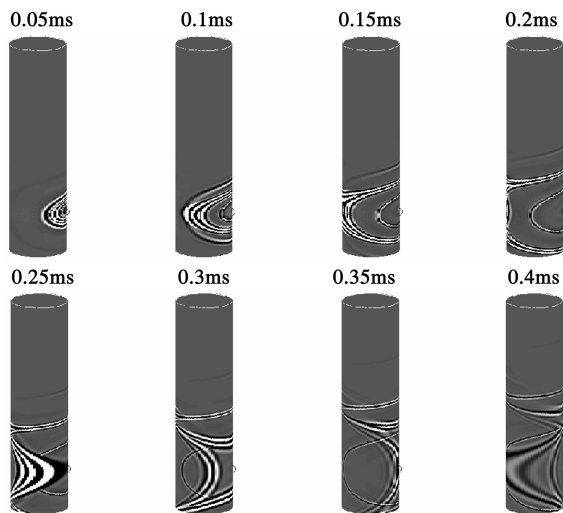


图9 偏心声源激发的声场在井壁处的快照

了单极子声源在井孔中产生的无几何衰减的传播模式,即伪瑞利波和斯通莱波的频散特征.这一成果开创了井孔声场理论研究的先河.之后,很多专家学者也对这两种模式在不同井孔和地层条件下的频散特性及其变化进行了分析,比如考察了井孔测井仪器的存在与否分别对伪瑞利波和斯通莱波频散特性的影响^[6],地层渗透率对井中斯通莱波的相速度和衰减的影响^[3]等.不同于单极源的球面辐射,偶极子声源的辐射声场具有方向性.在井孔这样的声波导中,偶极子声源产生的模式主要是弯曲波,它也是一种频散的导波.过去观点认为,弯曲波模式在低频时截止,很多学者^[7,8]通过研究弯曲波的频散特性指出,偶极源能激发出弯曲波模式,它具有截止频率,而且在截止频率处的相速度趋近于地层的横波速度,因而当偶极源的激发频率在弯曲波模式的截止频率附近时,就能够在时域信号中获取以横波速度传播的弯曲波.张秀梅等^[9]通过对偶极子声源在井孔中的特征方程进行近似展开,并结合部分数值模拟计算,认为弯曲波模式无截止频率.

在井孔波场的理论模拟方面,采用离散波数法^[10]或时域有限差分算法^[11]可以直接计算任意空间点接收到的全波列信号.声源在井孔中激发的全波中包括纵波、横波以及伪瑞利波、斯通莱波等,它们具有各自的物理意义.在实际生产中,人们可以根据这几种波的传播特征识别地层的岩性和物性.为区别于全波,我们将全波中的各种成分称为分波.分波经常在全波中互相叠加,这给实际的测井解释和分析带来了一定的困难,因此将分波从全波中分离出来具有重要的理论和应用价值.自20世纪70年代以来,研究井孔声场各分波的传播机制(包括激发、频散和衰减等

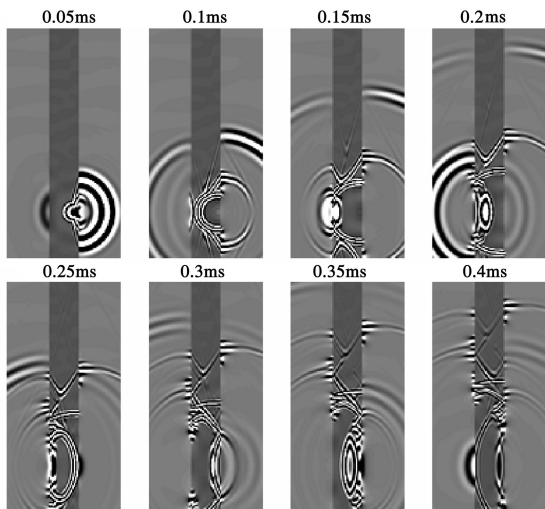


图8 偏心声源激发的井孔声场剖面快照

2.2 声波测井理论发展

声波测井的发展依托于声波传播理论的研究、声波测井仪器的研制以及声波信号的数字化处理,其中理论研究是最基本也是最重要的一个方面.它是研究井内各种波动现象的重要手段,可以帮助人们认识声波在井孔中的传播过程以及发生的一些物理现象,在优化仪器设计、提高测井资料的处理和解释能力等方面起到了重要作用.在过去的几十年中,理论研究和实测应用相互促进,都在快速地发展,逐步形成了井孔声学(borehole acoustics)这门分支学科.

与半空间平面边界上的表面波不同,由于井孔柱面封闭的几何特征,沿井壁和在井内传播的导波有多阶模式.1952年,Biot^[5]首次采用波动理论研究

物理特征)已成为井孔声学的热门问题.国内外学者^[12-14]通过分析井孔声场函数的奇异点(支点和极点)的贡献,在理论模拟中,成功地将单极源激发的临界折射纵、横波从全波列中分离出来.由于偶极子声源大多应用低频声源,因此全波列中较为明显的就是横波部分,人们对于分波提取和模拟很少涉及偶极子井孔声场.但目前新发现的很多油藏是疏松砂岩油藏,其中地层的横波速度远小于井孔中的流体速度,甚至为500—600m/s,从疏松砂岩井孔中获得的偶极子声波测井资料,可以看到幅度明显的纵波信号.张秀梅等^[15]在前人工作的基础上,通过分析偶极子声波测井中各种模式对声场的贡献,得到了有效分离纵、横波分波的方法.对于偶极子声波测井而言,很多人认为声源的频率越低越好,因为此时弯曲波的传播相速度和群速度都趋近于地层的横波速度.然而分波模拟结果表明,这种观点存在两处错误:其一是频率并非越低越好,通过分析偶极子井孔声场中激发谱,可以看到低频时的激发强度几乎接近于零,因此激发的声场波形幅度较小,很容易被噪声湮没;其二是在低频情况下,声场主要是临界折射横波的贡献,而弯曲波的贡献相对很小^[16,17].

以上的总结主要针对模式波传播特性的分析和分波的传播机制研究方面,这些研究都是基于正演模拟结果进行的.井孔声场正演模拟的方法有很多,包括解析方法和数值方法.正演模拟为实际生产提供了理论指导,还在一定程度上拓宽了声波测井除获得地层时差之外的很多实际应用.例如,通过研究地层渗透率对井中斯通莱波的相速度和衰减的影响,人们提出了利用斯通莱波计算地层渗透率的方法^[3];在各向异性地层中,斯通莱波特征模量 μ^* (见(1)式)主要受垂直于井孔平面内的剪切模量影响,因此低频斯通莱波速度还可用于反演地层的各向异性;通过分析声源的频谱对全波列特征的影响,提出了在井下设置频率不同的探头组合,能实现径向不同探测深度处声学性质差异的探测方法;通过研究弯曲波模式的频散特性,将实际仪器测量数据与理论模拟的结果进行对比,可以为偶极子声波测井仪器的设计提供技术支持等.

3 随钻声波测井研究

3.1 什么是随钻测井

随钻测井(LWD),用通俗的话描述就是“一边钻井,一边测井”,它是近些年来迅速发展起来的先

进测井技术.在钻井的过程中,测量地层岩石的物理参数,用遥测系统将测量数据传送到地面;同时根据测井资料的信号处理结果对地层构造和油气层进行实时评价,从而选择有利的钻井方向.这样就从钻井—测井作业中节省了大量成本.除成本优势外,随钻测井较传统的电缆测井还具有以下独特的优点:一方面,电缆测井需要在钻井完成后进行,在此之前,井眼环境的变化以及泥浆滤液的侵入严重影响了常规测井数据的质量,与之相比,随钻测井资料是在泥浆滤液侵入地层之前或侵入很浅时测得的,能更真实地反映原始地层的地质特征;另一方面,在大斜度井、水平井中,电缆测井往往会遇到困难或风险,以致不能进行作业,而在随钻测井中,钻铤(支撑钻头的金属杆)对仪器的支撑保证了勘探作业的正常进行^[18].在某些特殊的地质环境(如松软地层或高压地层)下,随钻测井是唯一可选的测井作业方法^[17].根据国外资料统计,海上钻井作业中使用随钻测井的比例高达95%以上,每年随钻测井服务产值已经占整个测井行业产值的20%以上^[19].目前在国外,随钻测井技术的应用范围已从海上钻井逐步向内陆钻井扩展,并且有逐渐取代电缆测井的趋势^[20].

3.2 随钻声波测井的理论和实验研究

常规电缆声波测井仪的径向尺寸较小,在理论计算和实验研究中通常可忽略仪器的存在.然而,随钻声波测井仪中换能器都附在钻铤表面上,钻铤可视作高模量的弹性充液圆筒,而且径向尺寸较大,占据了井孔大部分的空间(见图10).由于物理模型的显著差异,在进行资料处理和分析时,通常不能将传统电缆测井的研究结论和解释方法直接套用到随钻声波测井上.随钻声波测井声场研究主要集中在理论数值模拟、物理实验模拟以及随钻声波资料处理和解释等几个方面.

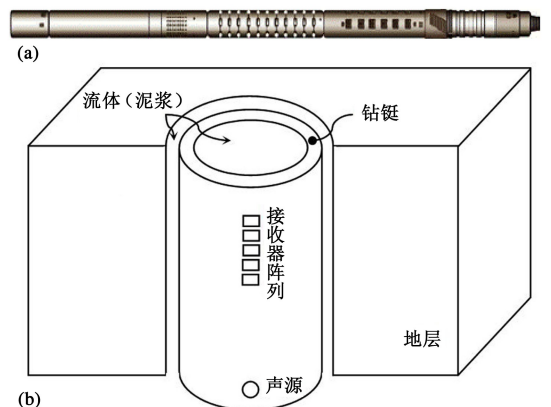


图10 (a) 随钻测井仪器照片;(b) 随钻声波测井模型示意图

在理论数值模拟方面,国内外声波专家在随钻多极子声波测井中,在无限均匀地层情况下进行了大量的数值模拟工作.由于弹性充液钻铤的存在并与地层发生耦合作用,随钻测井波场的特点与传统电缆测井有很大区别.在随钻测井中,声波换能器除了能激发沿井壁传播的导波,还能生成沿钻铤行进的模式,而其中只有前者可以反映地层特征.在随钻声波测井应用早期,工程界对于偶极子横波测井在慢速地层中是否可行曾存在一定的争议.为了验证这一点,学者们^[3,21]对频率范围在0—15kHz之间的偶极子声波的频散特性进行了分析.结果表明:在慢速地层中,除了在频率很低时钻铤弯曲波在地层的横波波速处截止外,地层和钻铤的偶极子振相几乎在整个频率范围内都同时存在;当声源激发频率低于钻铤弯曲波截止频率(大约1kHz)时,地层弯曲波呈现的是钻铤弯曲波的传播特征,其波速随频率而减小,在零频率处趋于零.可见,在随钻测井和电缆测井中,偶极声场的频散特征是全然不同的,采用偶极子作为随钻测井声源有两个缺点:一是接收信号中有很严重的钻铤波干扰,二是地层弯曲波波速与横波波速存在差别.进一步的研究发现,四极子随钻声波测井更适合于地层横波速度的确定.图3(c)是四极子声源示意图,其设计原理与偶极子相似,但有4个振动片状结构分布在圆周上,工作时这些振动片的振幅相等且相邻振动片的相位保持相反,在理论模拟中,四极源可等效于4个单极点源的组合.根据频散分析结果,四极源激发的钻铤波截止频率较高(一般在10kHz左右),在低于截止频率的范围内,只存在地层的四极子螺旋波且以地层的横波速度传播.因此在设计四极子测井系统时,只要选用恰当的声源频率,即可减小或消除接收信号中钻铤波的影响,并确保从地层螺旋波的到达时间提取横波速度.从数值模拟结果中还能发现,在随钻声波测井中,沿井壁的四极源螺旋波的衰减对地层渗透率较为敏感,应用这类导波进行渗透率拾取在理论上是可行的^[22].

在物理模拟方面,随钻声波测井的缩尺模拟实验研究是理论研究和仪器研发之间的一座桥梁.麻省理工学院的学者^[23]展示了关于等比例缩小的随钻声波测井声系设计及其在4种不同模型井中的实验研究成果.结果表明:单极子工作模式在快速地层模型井中能激发纵波和横波,但在慢速地层中不能激发横波;偶极子工作模式在慢速、快速地层模型中均激发频散的偶极模式波,但偶极模式波速度总是低于地层横波速度;四极子工作模式在慢速、快速地层模型井

中激发的四极子模式波的速度非常接近地层横波速度.实验现象与理论分析结果一致,展示了四极子声源在随钻测井方面测量慢速地层横波速度的能力.这些结论为后来的仪器开发奠定了实验基础.

钻铤的复杂运动和恶劣的钻井环境,特别是在大斜度井和水平井中,会使仪器通常不可能保持居中,因此在做测井解释和分析时,必须充分考虑到声源偏心的情况. Haugland^[24]在研究慢速地层随钻声波测井的波场频散特征时,发现偏心声源激发的弯曲波或螺旋波都会发生分裂现象(即同时产生快模式波和慢模式波).然而我们知道,在电缆测井中,井轴上的声源激发的导波一般只在各向异性地层中才会发生分裂现象. Huang等^[25]通过数值模拟研究了单极子、偶极子和四极子声源情况仪器偏心的影响,认为偏心声源产生的多极子模式波会减少预期模式的信噪比,同时四极子接收信号中可以得到很强的斯通莱波. Tang等^[26]比较了随钻测井和电缆阵列声波测井的声速误差,认为随钻声波测井的测量误差主要是由于钻井噪音和钻铤波引起的.这些研究结果都表明,在对测井资料进行处理和解释过程中,随钻测井要比电缆测井复杂得多.

在国外,随钻测井不论是仪器还是方法都已经成熟,各大石油公司都已独立研制出随钻声波测井仪并投入商业使用.虽然国内在随钻声波测井方面的研究起步相对国外较晚,但近几年来已有不少学者和工程人员投入了相关的研究并取得了一系列理论成果,实验研究工作目前也正在开展中,相信具有自主知识产权的国产随钻声波测量探测器系统会在不久的将来面世.

4 震电效应和未来可能的震电测井

在地球物理勘探理论中,震电效应是指在弹性波场作用下,大地电磁场特性发生变化的自然现象,这是地球物理勘探领域中正在研究和开发的一个新方向.以下将介绍震电效应的基本原理以及震电测井的研究发展现状.

4.1 震电效应物理意义

在自然界中,土壤、岩石都可视作孔隙介质,由于其固相骨架能选择性地吸附孔隙内电解质溶液中的某些离子,并且使得原本呈电中性的孔隙流体中出现剩余电荷,这样在骨架—流体界面附近就形成了电荷的不均匀分布(可用双电层模型^[26]表征,见图11).当弹性波在流体饱和孔隙介质中传播时,会

引起孔隙内流体相对骨架的流动,这种携带电荷的流体波动就产生了电场和磁场.相反,当电磁波在孔隙介质中传播时,双电层中的电荷在电场力和磁场力的作用下带动孔隙流体相对骨架的振动,形成弹性波.这种弹性波场和电磁场相互转换的现象称为震电效应.

这种震电效应和常见的压电效应都属于机械运动和电磁场之间的耦合效应,但两者存在着本质区别.压电效应是某些晶体在受到单向外力作用并产生形变时,其内部会引起极化并产生电势差的现象,而震电效应产生的一个基本前提是介质内部必须存在能相对固相骨架运动的电解质流体.

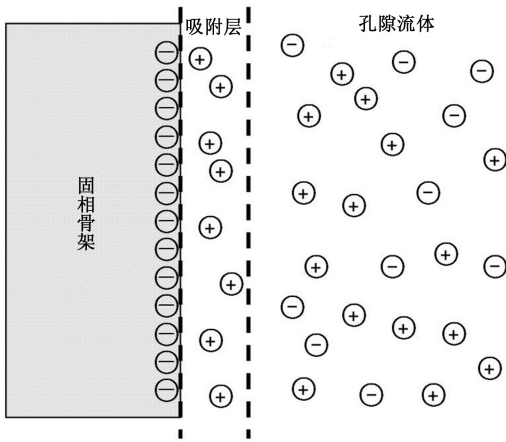


图 11 孔隙介质双电层示意图

4.2 未来可能的震电测井

1939年,前苏联学者 Ivanov 发现了震电效应.在无外加电压的情况下,他观测到由地震波导致的电场信号.同时,他注意到这种现象主要与两个因素有关:地层的孔隙内是否存在液体,以及液体的化学性质.

近十几年来,包括美国、俄罗斯、西欧和中国学者都先后对震电效应进行了理论研究和观测实验,并先后提出了多种震电勘探方法.但是由于电磁波在地层中衰减很快,地面震电勘探法^[27]和垂直震电剖面法^[28]都不利于检测深层的界面(已记录的震电信号一般只能勘测到埋藏深度小于 300m 的层面).相比之下,震电测井是一种更具可行性和有效性的勘探手段.在震电测井中,仪器的声波换能器与电磁接收器的距离通常只有几米.由于勘探目标层面与声源和接收器都很近,这有利于接收来自层面的电磁响应信号,而且声源采用的千赫兹级频率更使层面定位具有较高的分辨率.麻省理工学院的朱正亚等对此进行了大量的实验研究,他们^[29]首先在水槽中利用水平分层介质模型井进行了声-电和电-声转换的震电实验.当井内换能器

激发声波时,检测到的电磁场全波包含两部分的信号:一部分是声波在介质分界面处诱导的独立电磁波,其到时恰好等于声波在到达分界面前的传播时间;另一部分是伴随声波行进的电磁信号,其视速度始终与斯通莱波相同.需要说明的是,这两类电磁信号产生的物理机理并不相同:前者是孔隙流体的压力传递在越过介质分界面时,增压的不平衡引起局部电荷分离,从而产生以光速传播的电磁辐射并瞬间到达接收器;而后者则是弹性波在均质孔隙介质中传播时,因双电层振动而引起的交变电场,但由于总电流为零,在弹性波扰动区域以外不能接收到这种电磁信号.反之,井内放置电流源时,在电-声转换实验中可检测到由电磁波诱导的斯通莱波信号.实验同时也证实了只有在流体饱和和孔隙介质中才能产生震电现象.随后他们^[30]还做了井外孔隙地层在有裂隙情况下的震电测井实验,分析了转换电磁波幅度同裂缝开裂程度之间的关系.此后,Zhan^[31]还提出了多极源随钻震电测井的构想并做了一系列相关实验.结果表明,在随钻震电测井中,接收电磁信号不存在钻铤模式,这就直接解决了上文所提到的随钻声波测井全波中如何剔除钻铤波的难题.在国内,胡恒山^[32]利用江汉油田全直径岩心制作模型井,也重复了声-电和电-声转换的测井实验.这些实验工作都充分验证了震电测井的可行性.

理论和实验研究的最终目标是开发震电测井仪,这方面的研究目前正在摸索和不断尝试中.要将震电效应最终投入石油测井领域,需解决的物理和技术难题之一是,如何对微弱转换电磁信号进行提取.数值模拟结果显示,当换能器表面声压为 10kPa 时,由震电效应引起的伴随电场幅度一般在 $\mu\text{V}/\text{m}$ 量级,而在介质分界面产生的独立电磁波更为弱小,幅度可低至 nV/m 量级^[33].在实际测量环境中,这些微弱震电信号往往会受到大地电磁、供电干扰、地质环境和工业干扰等噪声的影响.此外,由于伴随电磁波幅度远大于来自地层分界面的震电信号,交界面响应有可能会被伴随场所覆盖而难以识别.利用信号处理和滤波技术屏蔽各种形成机制的电磁噪声并对震电信号进行分离提取,是震电测井技术实现实用化、产业化的关键.日本近年研制出了一套震电测井系统 (electrokinetic logging, EKL),并获得了现场测井曲线^[34],为地层水电阻率和渗透率提供了新的测量方案.与核测井仪器等相比,EKL 的结构和电路相对简单,开发成本较低.虽然在解释方法上他们没有考虑井孔对声场和电磁场的影响(这仍有待进一步改进),但 EKL 的研发为震电效应在石油测井领域的应用提供了一定的借鉴意义(比如在减噪声和

抗噪声方面,EKL采用了直流电源供电和频率域信号分离技术等).针对实际测井环境的复杂性,不断发展信号处理技术以及配合数值模拟预测是今后工程界和学术界需要重点研究的课题.

在饱和流体孔隙介质中,声波在介质分界面或裂隙处能产生瞬间到达的独立电磁辐射信号,这非常有利于井孔成像;另一方面,理论研究已证实了声诱导的伴随电磁场幅度与地层渗透率、孔隙度具有一定的关联^[33];此外,震电场对流体离子浓度的敏感性,使得震电测井可在区分油水界面方面具有一定的优势.基于这些特性,随着理论和实验工作的不断深入以及微弱电信号检测技术的提高,震电测井将有望在未来成为又一种新型的测井方法.

5 结束语

本文介绍了声波测井的基本原理以及声波测井中的物理现象和问题,讨论的对象包括目前国内普遍应用的电缆测井方法、近年在国外广泛应用的随钻测井技术以及在未来可能会出现震电测井系统.

过去的几十年中,声波测井技术和理论有了巨大的发展.测井技术从简单的提取纵波首至发展到现在能从全波列中提取地层的各种信息,包括渗透率、弹性波衰减、各向异性和地应力分布等;测井仪器从单极子双接收器系统发展到现在的多极子阵列测井系统和随钻测井系统;理论研究也从理想弹性体中的柱面波频散曲线计算发展到了对多相非均匀复杂储层中的井孔波场进行数值模拟.得益于这些进步,人们可以更好地通过声波测井技术探测地层特征,确定油气储层位置、储量和开发前景等.

目前声波测井依然处在不断的发展过程中,测井技术和理论还存在很多正在完善或有待解决的问题,比如低渗地层渗透率的测量、地层裂隙的探测和定位、倾斜井孔声波测井和数据解释、单井反射波成像以及随钻测井中的各向异性反演等.我们希望本文的介绍能激发各领域的物理学科人员对声波测井的兴趣,让更多人参与到这些课题的研究之中,同时也籍此为打算涉入声波测井领域的学者们提供一些基本的背景知识和素材.

参考文献

[1] 洪有密.测井原理与综合解释.东营:石油大学出版社,1993
 [2] White J E, Tongtao C. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 70: 1147
 [3] Tang X M, Cheng A. Quantitative Borehole Acoustic Methods. Netherlands: Elsevier, 2004

[4] He X, Hu H S. Geophysics, 2009, 74: E149
 [5] Biot M A. J. Appl. Phys., 1952, 23: 997
 [6] Cheng C H, Toksöz M N. Geophysics, 1981, 46: 1042
 [7] Schmitt D P. J. Acoust. Soc. Am., 1988, 84: 2215
 [8] Winbow G A. Geophysics, 1988, 53: 1334
 [9] Zhang X M, Zhang H L, Wang X M. Sci. China Ser. G, 2009, 52: 822
 [10] 王克协,董庆德,王爱莲等.吉林大学学报(理学版),1979,2: 47 [Wang K X, Dong Q D, Wang A L *et al.* Journal of Jilin University (Science Edition), 1979, 2: 47 (in Chinese)]
 [11] Randall C J, Scheibner D J, Wu P T. Geophysics, 1991, 56: 1757
 [12] Peterson E W. J. Appl. Phys., 1974, 45: 3340
 [13] Tsang L, Rader D. Geophysics, 1979, 44: 1706
 [14] Zhang H L, Wang X M, Ying C F. Sci. China Ser. A, 1996, 39: 289
 [15] Zhang X M, Zhang H L, Wang X M. Sci. China Ser. G, 2009, 52: 676
 [16] 王秀明,李占贤,陈益鹏.地球物理学报,1992,35:500 [Wang X M, Li Z X, Chen Y P. Acta Geophysica Sinica, 1992, 35: 500 (in Chinese)]
 [17] 张碧星,王克协.地球物理学报,1995, 38: 178 [Zhang B X, Wang K X. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38: 178 (in Chinese)]
 [18] 张辛耕,王敬农,郭彦军.测井技术,2006,30:10 [Zhang X G, Wang J N, Guo Y J. Well Logging Technology, 2006, 30: 10 (in Chinese)]
 [19] 郭彦均,张辛耕,王敬农.石油仪器,2007,21:1 [Guo Y J, Zhang X G, Wang J N. Petroleum Instruments, 2007, 21: 1 (in Chinese)]
 [20] 时鹏程.测井技术,2002,26:441 [Shi P C. Well Logging Technology, 2002, 26: 441 (in Chinese)]
 [21] Tang X M, Zheng Y B, Dubinsky V. Logging While Drilling Acoustic Measurement in Unconsolidated Slow Formations. SPWLA 46th Annual Logging Symposium. New Orleans, 2004. R: 1
 [22] 崔志文.多孔介质声学模型与多极源声电效应测井和多极随钻声测井的理论与数值研究.吉林大学博士学位论文,2004
 [23] Rao V N R, Zhu Z Y, Burns D R *et al.* Acoustic Logging While Drilling: Experimental Studies with Anisotropic Models. ERL Consortium Reports, 2002
 [24] Haugland S M. Frequency Dispersion Effects on LWD Shear Sonic Measurements in Acoustically Slow Environments. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 2004. 26
 [25] Huang X J, Zheng Y B, Toksöz M N. Effects of Tool Eccentricity on Acoustic Logging While Drilling Measurements. SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting, 2004
 [26] Morgan F D, Williams E R, Madden T R. J. Geophys. Res., 1989, 94B: 12449
 [27] Thompson A, Gist G. The Leading Edge, 1993, 12: 1169
 [28] Haartsen M W. Coupled electromagnetic and acoustic wavefield modeling in poro-elastic media and its applications in geophysical exploration. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995
 [29] Zhu Z, Haartsen M W, Toksöz M N. Geophysics, 1999, 64: 1349
 [30] Zhu Z, Toksöz M N. Geophysics, 2003, 68: 1519
 [31] Zhan X. A Study of Seismoelectric Signals in Measurement While Drilling. Ph. D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2005
 [32] 胡恒山.声电效应测井的理论与数值与实验研究.吉林大学博士学位论文,2000
 [33] 关威.孔隙介质弹性波—电磁场耦合效应测井的波场模拟研究.哈尔滨工业大学博士学位论文,2009
 [34] Kokayashi G, Toshioka T, Tokahashi T *et al.* Development of a Practical EKL (Electrokinetic Logging) System. SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. Oiso, Japan, 2002