

# 声波测井新理论和方法进展<sup>\*</sup>

王克协<sup>†</sup> 崔志文<sup>††</sup>

(吉林大学物理学院 长春 130012)

**摘要** 在对声波测井的应用背景、基础方法的推出和理论发展过程进行综述的基础上,着重介绍了近 10 多年声波测井理论和方法的新进展.结合偶极声波测井技术的兴起和地层各向异性的探测,就相关的基础理论新成果 and 典型新方法的应用分别进行了评述,也对井孔倏逝波机制和声(震)电效应这类更着眼于进一步应用的物理问题做了概述.文章每一部分都对存在的问题和值得开展的工作提出了建议,并提供了较详细的参考文献,供有兴趣的读者方便查阅.

**关键词** 声波测井,偶极弯曲波,地层各向异性,井孔倏逝波,声(震)电效应

## New advances in the theory and method of acoustic logging

WANG Ke-Xie<sup>†</sup> CUI Zhi-Wen<sup>††</sup>

(College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract** We review the background, basic methods, theoretical developments, and applications of acoustic logging, with particular emphasis on recent advances over the past ten years. With the development of dipole acoustic logging technology and surveys of formation anisotropy, new achievements have been made in basic theory and application methods. Various physical problems such as evanescent waves in boreholes and seismoelectric logging, which are relevant to future applications, are also discussed. Current problems and topics worthy of study in each of the above areas are also mentioned. A detailed bibliography is provided.

**Keywords** acoustic logging, dipole acoustic logging, anisotropy, evanescent waves, seismoelectric

## 1 引言

寻找地下石油天然气藏主要经过两个步骤:第一步是地面勘探,主要是采取人工地震的方法,即用地震勘探确定地层的构造和可能存在油、气藏的区域;第二步是在可能存在油、气藏的区域打探井,用电缆向井下送入仪器,主要采用电磁、声学和核物理(放射性)的方法对探井周边岩石物性进行测量,依据含油、气藏对电、声、核物理场影响的规律和特征对油、气储集层范围和性质做出更准确的定量推断和解释,这一技术措施统称为地球物理测井或简称(石油)测井.这与在实验室里测量样品和医学上用 X 射线、B 超、核磁检查病患类似,本质上都是物理

上的反问题,即通过物理场的测量反推场源和介质性质及其时空分布等.不同的是地下更为复杂,未知参数多,特别是测量十分受限,仪器只能在有限个井孔中沿 1 维空间布置和进行测量,不能像样品和病人那样,仪器探测可以在各个方位进行大量采样.也就是说测井总面临空间采样率低的问题,比地面勘探还低;同时地介质各种参数对不同物理场的响应和敏感程度不尽相同.为此,人们发展了多种测量方

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(重点项目批准号:10534040;面上项目批准号:40674059, 40974067)、声场声信息国家重点实验室开放研究基金(批准号:200807)资助项目

2011-01-24 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: kexiewang@yahoo.com.cn

<sup>††</sup> 通讯联系人, Email: zwcuijlu@163.com

法、仪器和处理手段,形成了跨物理与地学的新的交叉领域——井孔(中)地球物理。

声波测井是上世纪 50 年代继电法和核测井之后出现的石油测井技术. 最早的声波测井仪是用一单发双收装置, 依据折射地震原理, 在钻井后充满泥浆的井(裸眼井)中, 通过记录首波时差来获得地层纵波速度, 这称作声速测井. 地层纵波速度可用于解释孔隙度, 至今仍是常规声波测井的基本测量量, 原理如图 1 所示. 几乎与此同时, 以检测下了钢套管并用水泥固定的生产油井(称套管井)固井质量为目的的声幅测井也相继推出, 它以探测(胶)界面响应为特点, 为油井工程服务, 见图 2. 声波测井技术基本上就是受这两方面需要的推动发展起来的, 相应的理论研究也加快了发展速度. 经过近 60 年的发展, 声波测井技术取得巨大进步, 推出多种方法和仪器, 大量的声信息被利用, 形成声波测井系列技术, 成为石油测井 3 种主要方法之一. 声波测井理论也发展成为声学学与地球物理交叉的新领域——井(钻)孔声学(borehole acoustics).

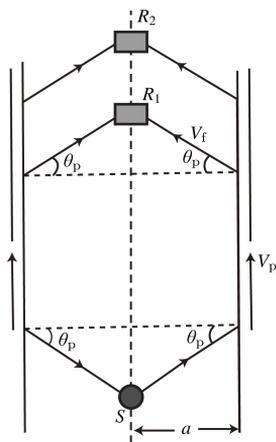


图 1 声速测井原理图

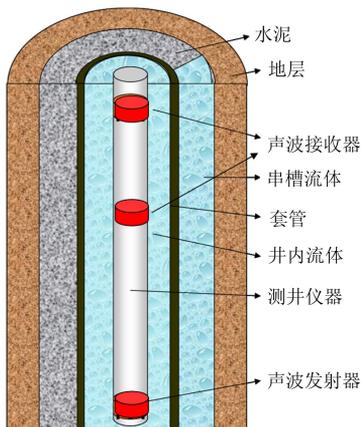


图 2 套管井测井示意图

声波测井依据的理论基础是柱状分层介质中弹性波(也广义地统称为声波)的激发、传播和接收. 由于石油测井的主要目的是寻找油(气)藏, 而油(气)藏只能存在于可渗性孔隙(裂隙)性地层中, 所以, 从理论上研究声测井的规律, 还要顾及孔隙(双相或多相)介质中的声传播, 使充流体双相介质中的声传播也成为声波测井长期研究的课题。

最早对声测井理论作出开拓性贡献的是 Biot 和 White. Biot 于 1952 年首次利用波动理论研究了充流体井孔中导波的频散方程, 获得了导波的相速度和群速度频散曲线<sup>[1]</sup>; White 于 1968 年首次应用计算机算出一条模拟声波测井的, 有首波显示含两个波包的全波曲线<sup>[2]</sup>, 并最早提出用垂直井壁振动的震源激发横振动实现纯横波测量的建议, 后发展为偶极子弯曲波测井技术. J. H. Rosenbeum 则于 1974 年首次给出 Biot 孔隙介质地层下声测井的全波计算. E. W. Peteson 于 1974 年首次用复波数平面上的围道积分研究井孔声场问题, 把全波分解为极点留数和支割积分的贡献, 在计算导波频散的同时, 第一次将井孔首波和横波首波归结为用垂直割线积分的表示. W. L. Roever 等于 1974 年求出点在源偏离井轴时井孔声场的多极展开解, 并首次导出井孔声场的多次射线展开叠加表达式. L. Tsang 等于 1979 年用修改的渐近展开法, 在 Roever 等给出的射线展开式的基础上, 对点源激发的首波的第一条(次)射线进行处理, 得到描述首波波至的解析表达式, 经计算与严格的井孔全波数值模拟中的首波波至(前 1.5 个周期)符合非常好, 相位中的走时正好是波从声源到接收点按临界折射路径的走时. 像在水平分层介质中地震波理论已证明过的类似, Tsang 等用射线理论与波动理论相结合, 协调一致地证明了井孔首波波至的临界折射属性, 这是井孔首波理论的重要进展, 后被广泛引用<sup>[3]</sup>. 我们于 1979 年在国内首次用双重快速傅里叶变换(FFT)算法在当时国内最快的电子计算机(CYBER172, 涿州物探局)上算出两种主频下的裸眼井多道全波声测井曲线, 清晰地显示了首波、横波、斯通莱波和低于斯通莱波速度的波群(即伪瑞利波 Airy 相)<sup>[4]</sup>. 上世纪 80 年代以后, 井孔声学研究明显增多. C. H. Cheng 等于 1981 年更详细地计算了井孔导波的频散和合成全波曲线, 并讨论了测井工具的影响. F. L. Paillet 和 White 等于 1982 年进一步研究了导波的激发特性和与岩性的关系. 我们也相继提出套管井(1983, 1985)<sup>[5]</sup>和 Biot 孔隙地层井孔声场理论

求解和数值模拟结果(1983,1986)<sup>[6]</sup>. F. L. Paillet 等于 1986 年还将 Roever 导出的射线展开式沿垂直割线用数值积分方法计算了前 7 条射线的叠加,得到具有若干共振峰的首波激发谱,这表明多次临界折射波的叠加(相干)可以导致首波的共振激发现象. 1984 年,余寿绵给出首波共振频率的解析公式<sup>[7]</sup>,计算的频率与 Paillet 等算出的共振峰对应的频率基本一致,也与后来用渐近展开分析得出的结果一致,是一项有理论和应用价值的结果,但他对首波传播机制的解释与传统做法和结论都不同. 20 世纪 80 年代末,一系列偶极(多极)声测井的工作被提出,其中 Kurkjian 等(1985,1986)和 Chen 等都多极声测井理论作出了比较重要的贡献. 与此同时,也开展了大量偶极子声测井仪器的研制工作,取得实质性进展,进入工业应用阶段. 计算机技术的快速发展使许多复杂声场的细致数值考察被系统地提出,如 Schmitt(1987,1988,1989)的工作就是 80 年代后期这方面较有代表性的成果. 这期间,我国学者也越来越多地进入这一领域,在理论上作出多项有价值的工作<sup>[8-13]</sup>. 经国内外学者的多年努力,井孔声学理论,特别是在针对均质地层裸眼井方面,取得长足进展,理论日趋完善,井中各类模式声波的激发和传播规律基本上搞清楚,遗留问题不多. 进入 90 年代和新世纪以来,声波测井理论研究主要转向解决复杂储层和水平井、大斜度井以及随钻声波测井中遇到的问题,如非均匀、各向异性和多相介质等问题. 近 10 多年来取得的一些理论和方法新进展有一个特点,就是大多都与偶(四)极声波测井有关. 本文着重对偶极声波测井几方面的主要进展分别作一概括的介绍.

## 2 偶极声波测井与地层各向异性

偶极声波测井技术的出现对声波测井的应用和发展具有里程碑意义. 偶极子声波装置推出的初衷只是为了测低速(软)地层的横波速度,但这种仪器出现后,由于其方位探测功能和大的径向探测深度,使它的应用价值和前景远远超出了最初的预期. 用 2 个相互垂直安装的偶极子声源和 8 个接收器阵列组成的交叉偶极阵列声波测井系统如图 3 所示. 该系统在国外已广泛用于生产,国内近年也迅速推开. 特别是当将单极、偶极和低频斯通莱波激发等功能装置组合在一起,并实现全数字化之后,一次下井采集的地下信息比传统方法采集的信息成数量级的增

加,可以为多重解释目的提供数据资料. 其中除测量(提取)低速地层横波速度外,最重要的应用是探测地层各向异性.

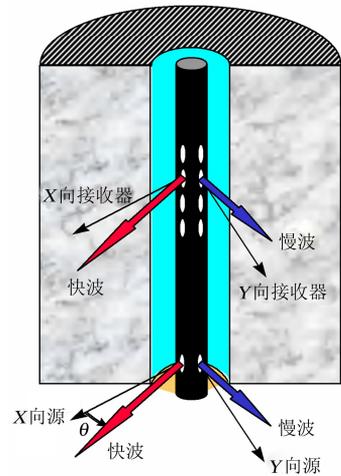


图 3 交叉偶极测井图解(引自文献[14])

传统的地震勘探和声波测井都假定地层是各向同性的. 虽然人们比较早就注意到地下介质的各向异性性质,如英国爱丁堡大学教授 Crampin 曾研究多年,但一直未引起勘探地球物理学家的重视,甚至认为是弱参数影响不大,常规勘探中的问题还解决不了,顾不过来解决这类被认为次要而又复杂的问题. 随着勘探和测井水平与精度的提高,以及大量在复杂储层中开采油气藏,特别是钻水平井、大斜度井的数量巨增,地层的各向异性显现,在某些页岩地层中,声速各向异性能达到 30% 甚至更高. 地层的渗透性也是各向异性的,它们在明显地影响油气的开采和油田生产的安全,储层的各向异性已成为石油勘探和油田工程专家必须面对的问题.

真正在声波测井中开始考虑地层的各向异性还只是近 20 年的事,这与交叉偶极声波测井技术的出现密切相关. 介质的各向异性在晶体学中已经研究得很清楚. 对地介质,由于周期薄层(PTL)沉积作用或裂隙的定向分布(EDA),造成最常见的各向异性介质是横向(观)各向同性(transversely isotropic, TI)介质,即晶体学中的六角晶系. 与各向同性介质只有两个独立的弹性模量不同,横向各向同性介质有 5 个弹性模量( $C_{11}$ ,  $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{66}$ )由于其对称主轴可能沿铅直或水平方向,分别称作 VTI 和 HTI 介质. 无论在地震勘探或声波测井中,大量遇到和研究的主要是这种各向异性介质. 对 HTI 介质水平面内各向异性的研究,需要在充泥浆的竖直井中放入交叉偶极声波测井仪,这时二正交偶极子源激发的不同偏振弯曲波沿井的传

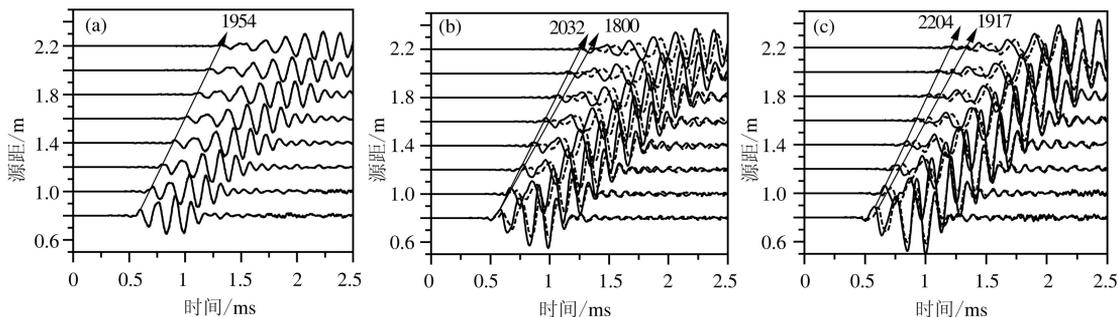


图4 XX分量与YY分量的对比 (a)  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $\alpha=45^\circ$ ; (c)  $\alpha=90^\circ$  (地层快、慢横波速度分别是 2280m/s 和 2000m/s)

播速度不同,产生所谓横波分裂现象(即横波双折射),从而可测出地层是各向异性的,并可根据速度差推断地层各向异性的强弱.这种各向异性的测定对储层油气运移和描述、注水作业以及实施压裂工艺都有重要意义.如果地层是VTI介质,这时介质的对称主轴与井轴一致,无论用单极或偶极测量都不能直接发现地层的各向异性,但目前已发展了一些方法对这种地层是否是VTI介质作出判断<sup>[14]</sup>.一个更一般的情况是,TI介质对称主轴与井轴既不平行也不垂直,这正是大斜度井可能遇到的情况,此时就只能通过有限差分或有限元算法进行数值模拟,这正是声波测井领域当前研究的热点之一.图4是用有限差分方法数值模拟的TI介质对称主轴与(铅直)井轴成任意角度时,交叉偶极声波测量得到的2个不同偏振(如称作XX向偏振和YY向偏振)弯曲波的分裂<sup>[15]</sup>.图4给出从垂直到水平的3个方位的算例,反映了两种偏振横波从速度相同到分裂的过程.图中标定的速度是按多道波形同相轴连线算的,比相关处理的误差略大.这里仅谈到如何判断地层各向异性,进一步求出各向异性参数还面临诸多困难,有待通过开展研究来解决.另一个有趣的问题是求各向异性渗透率,这对石油的产出至关重要,这又是一个值得关注的问题.其实各向异性地层未必只是一种TI介质,如果再考虑其他各向异性介质,又将开拓新的研究空间.可见,即使在这么小的一个领域,对未知的探索也总是无止境的.

围绕偶极声波测井和地层各向异性,也有一些基础理论问题在进一步研究中,并逐渐被人们所认识,其中我国学者做出有益贡献如下:

(1) 关于井孔偶极弯曲波频散曲线的低频截止频率问题:虽然Schmitt(1989)曾引述论文说井孔偶极弯曲波从理论上来说没有截止频率,但缺少有力的论证.长期以来,在测井领域普遍的说法还是认为有截止频率,张海澜、张秀梅<sup>[16]</sup>通过渐进分析和数值计算证明了弯曲波最低阶模式没有截止频率.如图5所

示,从通常认为的截止频率点,即低频极限相速度等于地层横波速度点到零频率是一条平行横轴的直线,这与以往频散曲线到等于地层横波速度就终止了不同.这是一新的理论结果,有利于澄清模糊的概念.但实验上如何验证是值得进一步开展的工作.

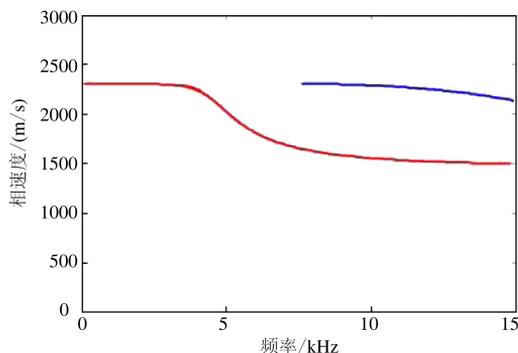


图5 偶极弯曲波频散曲线

(2) VTI介质包围的井孔弯曲波低频速度与地层横波速度的关系问题:用Thomsen引入的5个各向异性参数( $C_{33}, C_{44}, \epsilon, \delta, \gamma$ )表示TI介质,胡恒山、何晓等<sup>[17]</sup>证明了:当 $\delta > (\epsilon + C_{44}/2C_{33})$ 时,弯曲波的低频极限速度会随 $\delta$ 的增大而减小,如图6所示.从频散曲线的低频拐点到零频率也是一条平行横轴的直线,但已不等于地层横波速度,并随 $\delta$ 增大越来越小.作者分析了Thomsen给出的56组参数中有10%左右介质满足这一条件.这就是说,在通常用偶极弯曲波频散曲线的低频极限速度确定地层横波速度时,有可能得到低于真实值的错误结果.作者还深入分析研究了产生这一结果理论上的原因,发现在轴向波数 $k_z$ 的实数轴上, $k_s$ 右侧有一新支点 $k_H > k_s$ ,它是弯曲波频散曲线低频速度上限的终止点,使弯曲波低频极限速度降低.

(3) 套管井中偶极弯曲波频散曲线随地层横波速度降低向高频移动的问题:裸眼井和套管井中偶极弯曲波频散曲线随包括地层参数在内的各几何参数和介质参数的变化被许多作者研究考察过.裸眼井固井后变为套管井,由于流体井孔变细,频散曲线

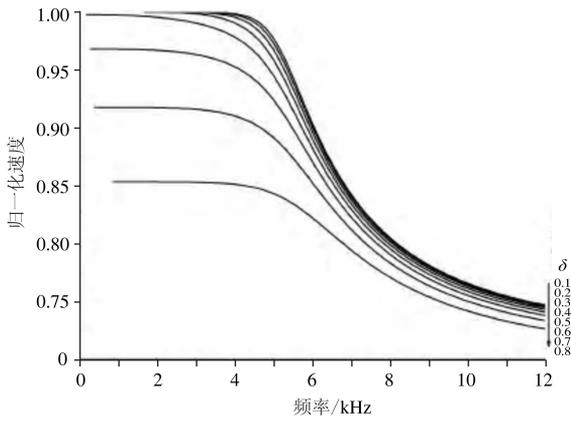


图6 偶极弯曲波频散曲线随  $\delta$  的变化

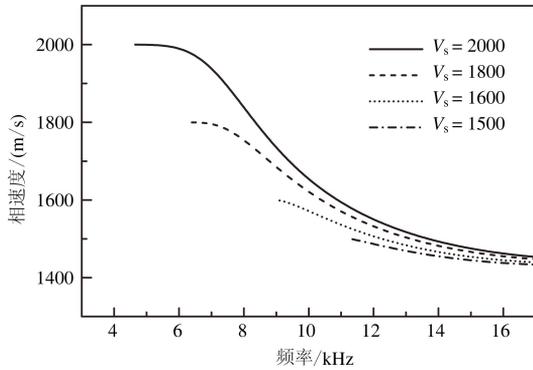


图7 地层横波速度对弯曲波频散曲线的影响

会适当向高频移动,最多在 2kHz 左右,这些已是常识性的共识,不认为这中间还有什么被忽略了的地方. 但李刚等<sup>[18]</sup>在研究套管井地应力问题并系统考察套管井中偶极弯曲波频散曲线随地层参数变化时发现,地层横波速度低于 2000m/s 后再继续下降时,弯曲波频散曲线会急剧地向高频区移动,如图 7 所示. 在地层横波速度接近井孔流体声速甚至更低时,套管井弯曲波频散曲线会移至 10kHz 以上,以至完全超出了现行偶极子声源激发的频带范围. 这是一个令人吃惊的结果,会造成套管井中的偶极声测量记录不到弯曲波,这当然使以记录弯曲波获得地层信息的测量失去了意义,而这种横波声速比较低的地层还是十分常见的. 之后,在现场实测资料中进一步发现了确凿的实例证据,验证了理论的预期,详见下文及参考文献.

### 3 井孔声弹理论与异常地(构造)应力反演

将非线性声学的声弹理论用于井孔异常地(构造)应力预测是偶极声测井技术出现以来声波测井理论与方法最重要的进展.

油井的非正常损坏(常称作套损)给石油生产造成重大损失,特别是实施早期注水开发的油田情况更为突出,每年造成数百口井损毁和数亿元的经济损失. 预防这种损坏的发生一直是石油工程急需解决的重大技术难题. 异常地(构造)应力的出现是造成油井损坏的直接原因. 用无损检测的方法检测到构造应力的异常变化,可以预警破坏的发生,及时采取挽救措施. 实际上,地下处处都处于应力非零状态,这是由于上覆层重力作用所致,而且越深应力越强,受泊松效应影响,水平方向应力也随之增大,但总体处于静平衡状态,即使打了油井地层被钻了深孔,由于采取固井措施,地下仍保持平衡. 只有横向出现应力的异常变化,才会破坏平衡,损坏油井. 这种横向应力异常可能来自地质构造的变动,常称作异常构造(tectonic stress)应力,有的是来自局域因素(如注水),就称作异常地应力,有的也称作预应力,它们的效果是一样的. 我们都知道,在线性理论的范畴,用波动(或振动)方法是测不到介质所处状态的静应力值的. 但如果静应力很大导致静形变是非线性(大)的,则激发的波动即使是线性(小)的,也能通过波动特性的变化测出静应力的大小,因为原介质如果是各向同性的话,这时已等效地变为各向异性介质. 这就是产生于上世纪 60 年代非线性声学的声弹性理论,这一现象也称作声弹效应.

依据非线性声学的声弹性效应,异常构造应力会诱导出地层的各向异性. 而交叉偶极声波测井是通过记录两不同偏振的弯曲波的速度分裂(双折射)来测出地层各向异性,这使得用测井方法检测到原地构造应力成为可能. 由于井孔周围的应力集中效应,传统的声弹理论不能直接用于井孔问题. Norris 和 Sinha 等于 1994 年最早为(裸眼)井孔声弹性奠定了理论和方法基础. 他们用摄动积分方法导出了单轴(或双轴)应力作用下(图 8(a)),考虑了井孔应力集中后井孔斯通莱波或弯曲波相速度频散曲线随地应力变化的计算公式,得出的一个重要理论预测是,不同偏振的偶极弯曲波频散曲线将产生分裂,并随频率增大发生交叉(图 8(b));并且指出分裂的频散曲线的交叉是识别和指示应力诱导的各向异性的判据<sup>[19]</sup>. 这一理论预测于 1998 年被 Winkler 等的实验所证实. Liu 等于 2000 年用有限差分数值计算了单轴应力作用下偶极子声源激发的井孔全波场,通过信号提取得到的弯曲波频散曲线产生的分裂和交叉与摄动理论结果一致. Plona 等于 1999 年和 Sinha 等于 2000 年相继在现场资料处理中观察到弯曲波频散曲线的分裂和交叉现

象。1999年,唐晓明等还唯象地提出了一个由交叉偶极声测井数据计算两个水平主应力差的反演公式<sup>[20]</sup>,其中速度—应力系数要利用实验标定。曹正良等于2002年<sup>[21,22]</sup>研究了更接近实际井孔情况的井孔压力与地层应力集中诱导的偶极弯曲波的分裂;根据模式波位移场的特点,将对角度的积分积掉,使体积分化为对单变量 $r$ 的积分,简化了计算;考虑到井内流体压力的影响,推导出了更接近实际的参考状态下的简化的井孔模式波声弹性方程,并提出了改进的井孔模式波反演模型;通过对合成数据和现场资料的处理,验证了其有效性和实用简捷性。此后,Sinha等和刘金霞等还研究了探井周边介质塑性形变的影响。这些工作都使裸眼井声弹理论和应用方法更加完善。

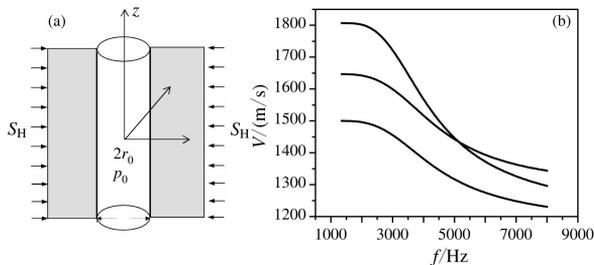


图8 (a)受单轴应力作用的井孔模型;(b)地应力诱导的正交偏振偶极弯曲波(频散曲线)的分裂和交叉( $S_H$ 为水平单轴应力, $2r_0$ 为井孔直径, $p_0$ 为井孔流体压力)

然而,油田中因异常地应力作用损坏的油井都是下了套管的生井,其结构比裸眼探井复杂,已有的理论和方法并不适用于套管井。针对这一实际,我们进一步发展了适应套管井的声弹性理论和应用方法。通过首先求解套管井应力集中的各层应力分布<sup>[23]</sup>,重新采用摄动积分法推导了考虑了套管井应力集中双轴应力作用下的井孔导波声弹方程,进行了相应的数值考察<sup>[24]</sup>。

如图9所示,套管井弯曲波相速度频散曲线的分裂和交叉仍是地应力诱导的各向异性的标志,但分裂的程度减弱。此外,如前面所指出的,软地层频散曲线明显向高频区移动,甚至会超出常规(低频)偶极子声源的激发频带以外(如图9(a)所示),这给反演提出了新的要求。为了检验摄动方法导出声弹公式的可靠性,还用有限差分方法对地应力作用下套管井前、后交叉偶极全波场进行了数值模拟<sup>[25]</sup>。套管井经信号提取得到的两条不同偏振弯曲波的频散曲线,它们的分裂与交叉行为在物理上与图9所示的摄动理论计算结果基本一致。在此基础上,进一步处理了现场实际资料,也得到较好结果。图10是

大庆某井同一深度点套前(裸眼井)和套后(套管井)交叉偶极测量结果提取的频散曲线的比较,除套后的频散曲线向高频移动1.5kHz左右外,总体趋势一致,进一步用实例证实了在套管井用交叉偶极声波测井反演(无损检测)地应力也是可行的。

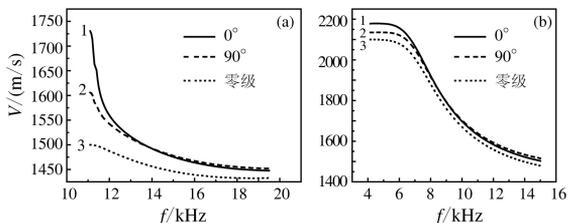


图9 地应力诱导的套管井弯曲波相速度频散曲线的分裂和交叉 (a)软地层;(b)硬地层

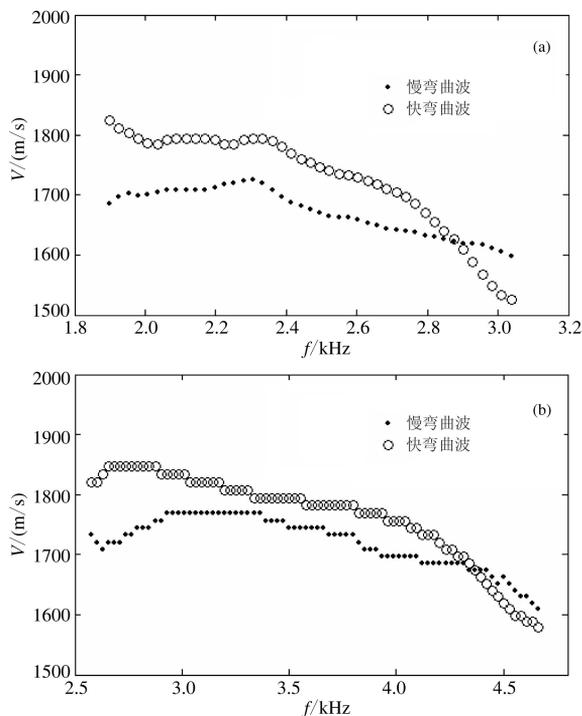


图10 大庆同一口井同一深度点,裸眼井(a)和套管井(b)交叉偶极测量结果提取频散曲线的比较

利用交叉偶极声测井检测地应力是一反演操作,除依赖于井孔声弹理论外还要采取一系列处理措施,如各向异性介质对称主轴和主波系列的求取,频散曲线的提取;而且由于实际问题常常会有一些未知参数,因此这时制定一个合理的反演策略和路线很重要,这个过程同样需要创新。依据声弹理论,利用交叉偶极声测井数据反演异常地应力的全过程,具有一定的典型性,较充分体现了这一软手段也是一项系统工程,每一环节都不能出错。

利用交叉偶极声测井数据反演异常地应力,还是一个发展中的理论和方法,有些方面尚需完善。已提出的声弹理论和方法,都是建立在假设未受地应

力作用之前地层是各向同性介质的基础上,然而地层可能本来就是(本征)各向异性介质,这时再受到异常应力作用将如何?这是一个值得进一步开展研究的课题<sup>[18,26]</sup>.此外,岩石三级弹性模量的测量也应进行专项研究,这些都是将交叉偶极声测井检测异常地应力的方法进一步实用化需要继续开展研究工作的课题.

发展地介质声弹理论和应用方法的另一方向是,依据声弹效应研究地应力对地震波折射和反射的影响.这是一个令人感兴趣的课题,它可能为利用地震波检测构造应力提供一个新的途径,刘金霞等进行了有益的尝试<sup>[26]</sup>.

#### 4 软地层井孔存在临界折射横波到达的倏逝波机制

在声波测井中,通常把地层横波速度( $V_s$ )低于井中泥浆声速( $V_f$ )的地层( $V_s < V_f$ )称作软地层(或低速地层),在国内外石油物探与测井中,常常会遇到这类储层.多年来,在声波测井领域,普遍认为软地层井孔不存在临界折射(滑行)横波到达(no critical refracted shear wave arrivals),这一论断广泛出现在各类专业书刊中<sup>[27,28]</sup>.所做出的解释可简单概述为:对硬地层, $V_f < V_s$ ,依据 Snell 定律,井内声源辐射到井壁上任意方向的声波对边界的入射角总小于透射到井外声波的折射角,以致入射角大到某值(临界角)时,折射角恰好等于  $90^\circ$ ,形成沿井壁界面外侧滑射的临界折射波——滑行波.该波再引起井内响应而被接收器记录,实现对地层波速的测量,这就是图 1 所示传统常规声波测井依据的机理,对地层纵波和横波均适用.对软地层  $V_s < V_f$ ,如图 11(a)所示(图中只画出入射纵波和折射横波),折射角小于入射角,即使入射角为  $90^\circ$ ,即入射波以图中粗线的方向掠射,下介质中也不会出现沿界面滑射的横波,这就是普遍认为软地层不存在临界折射横波的原因.从直观上看这是很容易被接受的,特别是在大量软地层测井全波波中,几乎都看不到横波到达的记录,所以长期以来很少有人对此提出异议,并已成专业共识.这种由来已久的认识,也是提出和产生偶极子声波测井的直接原因,偶极子声测井技术推出的初衷就是为了通过激发一种纯的横振动的波来测软地层的横波速度.

然而,这一论断是不全面的,这里只论及均匀

波,完全忽略了非均匀波(inhomogeneous waves),即光学与电磁波理论中称作倏逝波(evanescent waves)的作用.实际上,如果入射波是非均匀波——倏逝波,如图 11(b)所示,则可以在下介质激发沿界面以地层横波速度传播的均匀波,它们在上介质引起的扰动仍是非均匀波,可以被接收器记录,形成临界“折射”横波到达.那么在声波测井声辐射中有没有非均匀波呢?事实上,在把井中点源(或任何局域源)辐射的球面波展开为平面波叠加时,其中既包括通常的均匀波,也包括非均匀波.如果计算了两部分能量分配随频率的变化,就会发现非均匀波几乎占到一半,低频时所占比例更高,这些非均匀波打到井壁,就会在井外激发临界折射横波,使在软地层情况下,在井内接收到地层横波到达<sup>[29]</sup>.由于非均匀波离开声源和井壁时振幅迅速衰减,使接收信号较弱,常常被强振幅的续至波(如单极斯通莱波或偶极弯曲波)所覆盖,这是在已有的现场观测中看不到软地层横波的原因.但软地层井孔临界折射横波存在还是不存在,物理上却是完全不同的.在一些场合弱,不能排除在另外条件下可能强;既然存在但弱,就不排除研究增强措施,这在物理学应用中是屡见不鲜的.

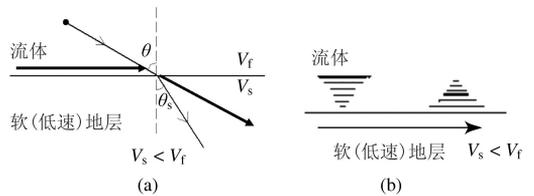


图 11 软(低速)地层流—固界面均匀与非均匀波入射—折射示意图 (a)入射均匀波;(b)入射非均匀波——倏逝波

为了证明软地层井孔临界折射横波到达的存在,我们做了下述计算机仿真实验.计算模型中地层横波速度为  $1400\text{m/s}$ .注意到折射横波是沿地层滑行,而斯通莱波主要沿井孔流体传播,我们增强流体的衰减( $Q^{-1} = 0.1$ ),以压制斯通莱波,并增大接收距.用实轴积分法计算井孔多道全波,如图 12 所示,横波明显出现,提取计算其速度恰好等于地层横波声速.与此同时,再对表示井孔临界折射横波的支割积分进行渐近展开处理,得到了井外以地层横波速度沿井壁传播而井内是非均匀波的、描述井内横波首至的解析公式<sup>[30]</sup>.计算的波形用红线画到图 12 的全波图上(见《物理》网刊彩图),与全波图中横波首至完全重合.理论上证明了软地层井孔存在临界“折射”横波到达,且井内声源辐射和返回井内的扰

动都是倏逝波,倏逝波是软地层井内仍能接收到地层横波到达的关键机制;倏逝波离开声源或返回时离开井壁会很快减弱,但对声波测井,声源和接收器十分靠近井壁( $<0.1\text{m}$ ),井内记录到倏逝波带来的信息是完全可能的。

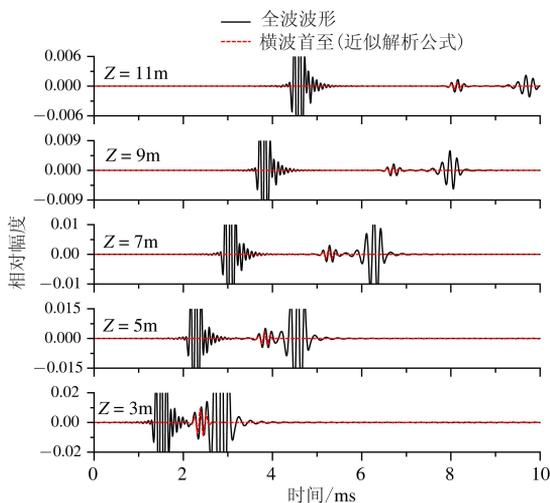


图 12 软地层井孔单极点源激发全波场模拟及与渐近计算的横波首至的比较(图形被等比例放大,见《物理》网刊彩图)

在理论证明的基础上,我们进一步在交叉偶极声测井现场实测数据的处理和分析中,发现了软地层井孔确实存在临界折射横波的证据.图 13(a)和(b)分别是大庆某井同一深度点套前(裸眼井)和套后(套管井)正交偶极声测井实测数据提取的频散曲线.○点线和●点线分别代表偏振方向相互垂直的二弯曲波频散曲线,它们不分裂表明地层是各向同性的.图 13 上显示裸眼井频散曲线在低频区,即 2kHz 附近,速度最大约 1450m/s,是地层横波速度,显然小于井中流体声速( $\geq 1500\text{m/s}$ ),是软地层.随频率的增大弯曲波表现为强频散,这与传统的认识完全一致.图 13 下图是同一深度点下套管后的测量与提取结果.可以看到,在裸眼井强频散的频段内提取到的是速度几乎不频散的一条水平直线,不是强频散的弯曲波,弯曲波明显地移到高频区,在 5kHz 以下看不到频散曲线拐点,在此频率以下弯曲波没得到激发,这与图 7 的理论预测一致,即低速地层套管井偶极弯曲波的频散曲线明显地移到高频区(8kHz 以上).此时,出现在 4kHz 以下的这段不频散的速度只能对应临界折射横波,其速度恰好是由裸眼井已测定的地层横波速度值 $\sim 1450\text{m/s}$ .这是软地层有临界折射横波(滑行波)的一个有力证据。

为了对这一实验观测再作理论印证,我们还对低速地层套管井主频 1.8kHz 的低频偶极子源激发

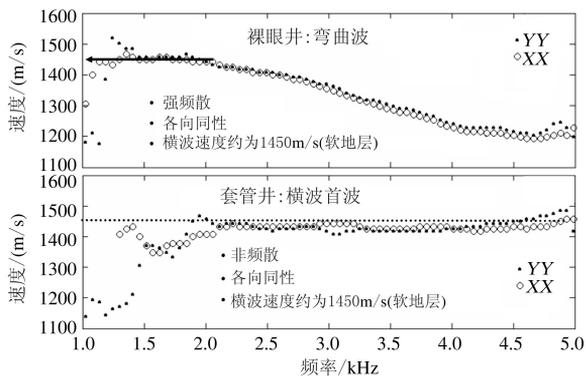


图 13 大庆某井同一深度点套前(裸眼井:上图)与套后(套管井:下图)提取交叉偶极声测井频散曲线的比较

的全波场和分波场分别进行了数值模拟计算,相互比较发现,全波波列只由纵、横波支割积分计算的临界折射波叠加而成,完全无弯曲波的贡献,除很弱的首波外,全波主体几乎完全由横波支割积分描述的横波临界折射波决定,这正好验证了图 13 下图提取到的不频散速度对应的是软地层临界折射横波到达.这不仅再一次证明了软地层临界折射横波的存在,而且有力地说明了它在软地层套管井交叉偶极声测井中起了实质性作用,在提取不到弯曲波的情况下,成为获得地层横波速度的唯一有效途径.显然,软地层井孔存在“折射”横波到达并不只是一个认证概念正误的问题,而是已在实际应用上发挥了作用的有用机制<sup>[29]</sup>。

一个有趣的问题是,在常规声波测井中,能否增强软地层井孔横波的强度,这又回到倏逝波机制上,初步的尝试还是可喜的.我们注意到发光二级管(LED)取得的突破性进展就是采取了倏逝波增强技术,这对软地层声波测井中依据倏逝波机制存在的井孔临界“折射”横波的增强,有很好的借鉴作用,或许会带来更多的机会。

## 5 声(震)电效应测井

孔隙介质中弹性波与电磁场的耦合现象称为声电效应,地球物理领域称震电效应.人们通常所说的孔隙介质中的震电效应可分为两类,即第一类震电效应和第二类震电效应.第一类震电效应是当地震波导致弹性形变时,孔隙体积发生变化,导致地层电导率变化而产生的,这类震电效应与渗流运动无关,这种震电现象也称为 I-效应;第二类震电效应是与孔隙介质渗流特性有关,与孔隙内流体的电化学性质有关,也称 E-效应.自上世纪 30 年代前苏联科学

家发现岩石震电效应以来,人们一直关注这种效应. 20 世纪 80 年代以前,有关震电效应的理论研究不多. 由于可渗孔隙性地层岩石中的流体通常是含有带电离子的液体,当弹性波在孔隙介质中传播时就会诱导电磁场;反之,交变电磁场可引起弹性波. 与晶体的压电效应不同,这是与流体饱和和孔隙介质中的双电层结构有关、与渗流有关的震(声)电效应. 当弹性波的频率在千赫以上时,这种效应也称声电效应. 1994 年,震电效应理论研究取得突破性进展, Pride 从基本弹性动力学和电磁学原理出发,建立了孔隙介质的声电耦合波方程组,并分析了声电耦合波的特性,从理论上预测了两种电磁场存在:一种伴随弹性波传播,另一种是辐射电磁波. Pride 理论为解释震电效应实验现象和数据提供了理论基础和依据. 震电勘探和声电效应测井就是利用岩石的声电效应的例子. 与地面震电勘探相比,声(震)电效应测井(如图 14 所示)的特点是,从发射源到勘探目的层的距离小,从目的层到接收器的距离也小,而且采用千赫兹级频率,可使分辨率提高. 近些年,国内外一些公司和研究机构已将震电应用研究重点转向井中震电,并有了很大的进展.

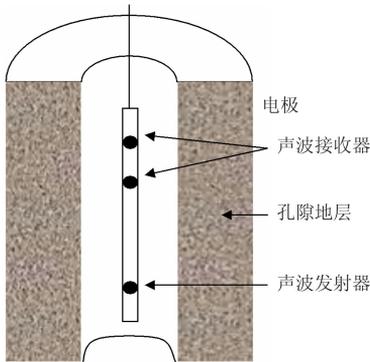


图 14 声(震)电效应测井示意图

美国麻省理工学院的朱正亚等在缩尺的模型井中实验观测到了两种电磁场,进行了一系列的实验室模型井中声电测井实验,他们的报道表明,跨孔震电测井有望成为对井间地层和裂隙进行勘探的新手段<sup>[31]</sup>. Mikhailov 等<sup>[32]</sup>进行了井中低频斯通莱波转换电场的测量,用简化 Pride 理论给出井中转换电场与声压关系的低频近似公式. 胡恒山和王克协<sup>[33]</sup>采用完整的 Pride 方程组,计算了点声源激发时井中转换电磁场全波,并与实验结果进行了比较. 陈本池等<sup>[34]</sup>进行了井中震电勘探模型实验研究. 胡恒山等<sup>[35]</sup>提出先计算声场,然后采用似稳电场模型计算转换电磁场的简化算法. 胡恒山<sup>[36]</sup>采用支割积分描述研究转换波场的特点,证明电磁首波是以地层电

磁波速度沿井壁传播并返回井内的电磁波,伴随声波首波的电场主要是由慢纵波引起的,伴随纵波首波的磁场是横波引起的. 张元中等<sup>[37]</sup>对井孔声电效应进行了数值模拟和实验研究. Pan 等<sup>[38]</sup>用有限元模型模拟了单极声电测井. 崔志文等<sup>[39]</sup>采用完整的 Pride 理论数值模拟了多极声电测井,并进一步探讨声电测井拾取横波速度的可能<sup>[40]</sup>. 关威等<sup>[41]</sup>假设声场不受电场的影响,将 Pride 方程组化为具有电流源的 Maxwell 方程组,突破了低频的限制,采用赫兹势计算了多极电声测井. Zan 等于 2006 年<sup>[42]</sup>在美国 MIT 实验室随钻模型井中测量了震电信号,并采用似稳电场近似的方法对单极和偶极随钻声电测井进行了模拟,并对阵列波形进行了慢度-时间相关处理对比,研究表明,声信号中有钻杆波而电信号中没有钻杆波,初步显示了随钻声电测量的优势. 胡恒山和关威提出了用非耦合的方法进行电声测井模拟<sup>[43]</sup>,之后他们还进行了电声测井的有限差分模拟<sup>[44]</sup>. SH-TE 声电测井和 TE-SH 电声测井模拟研究表明,它们在横波直接拾取上具有潜在可能<sup>[45,46]</sup>. 孔隙介质中平面纵波与井孔的声电相互作用问题研究发现,井孔内的共振激发效应会使井孔震电转换的电磁场增强数倍<sup>[47]</sup>,有利于对低孔低渗储层的探测. 关威和胡恒山<sup>[48]</sup>提出了利用声电测井全波资料提取渗透率的方法. 1997 年,Atlas 测井公司制造出了震电测井的仪器设备,并申请获得美国专利. 2002 年,英国和日本公司联合研制成功动电测井仪,可用来测量渗透率和地层水电阻率. 2006 年, Singer 等<sup>[49]</sup>采用有限元模型模拟单极声电测井,并研制简单的动电测井仪器,进行井眼测试,电信号强度为几十 mV/m,结果表明,确有可能测量渗透率. 实验测量结果显示,声电转换效率的电声比 ( $E/P$ ) 在 nV/(m·Pa) 量级,而井内转换电场强度的大小与声源辐射强度有直接关系. 合理估计实际声源激发强度而计算出的井内转换电场强度可达数十毫伏特/米(mV/m),信号强度适合井下测量. 理论研究和室内及野外实验研究结果都表明,声电测井有很大的潜力和可行性. 通过增加声源的强度,采用大功率声源,可以增加转换电磁场的强度,实现转换电磁信号的测量和利用. 声电(效应)测井正处于研究、试验阶段,其应用还依赖于具有大功率声源测井仪器设备的研发及弱信号检测技术提高和声电测井数据与地层岩石物理参数之间的关系的深入认识. 声电测井技术有望成为实用新技术.

## 6 结束语

声波测井是声学 with 石油勘探紧密结合发展起来的交叉学科,石油勘探与开发的需求是推动这一学科发展的动力.针对生产技术实践中提出重大课题,开展基础理论研究,再回到生产中去,解决技术难题,提高勘探开发水平,是这一学科研究的特点.所以,从事物理和声学研究的專業人员在声波测井领域都有用武之地.

本文在综述声波测井基本技术内容、应用背景和理论发展过程的基础上,着重介绍了近 10 年理论和方法的新进展.力求侧重物理内容比较丰富的方面,而未面面俱到,如信号处理技术与反演方法虽很重要也仅点到为止;同时也使有的内容能较详细地体现从理论、方法到应用的全过程,使读者对声波测井研究有一个总体印象.

还有一些声波测井的重要方面,文中未展开介绍.例如套管井声波测井的研究内容有一个特殊侧重的方面,即研究如何服务于油井工程和安全,这对石油生产也至关重要,并且已发展了一系列方法和技术,其中有的理论问题本文已论及,其他则多属于方法,本文未进行讨论.

偶(四)极声波测井是一个还在发展中的新技术,特别是在大斜度井、水平井和随钻测井中,面临的理论方法问题不断涌现.最近唐晓明<sup>[50]</sup>提出了利用交叉偶极声测井资料实现井外异物(裂隙、砂体或盐丘)的反射波成像.他把波场分离和地震偏移技术用于测井资料处理,把井外转换波的 SV,SH 波都利用起来,并做出实例.这是一个区别于传统声波测井的很有前景的方法,值得开展研究和推广应用.

## 参考文献

- [1] Biot M A. J. Appl. Phys., 1952, 23: 997
- [2] White J E, Zechman R E. Geophysics, 1968, 33: 302
- [3] Tsang L *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1979, 65: 647
- [4] 王克协等. 吉林大学自然科学学报, 1979, 2: 47 [Wang K X *et al.* Jilin Univ. (Natural Science Edition), 1979, 2: 47 (in China)]
- [5] 董庆德, 王克协等. 地球物理学报, 1985, 28(4): 208 [Dong Q D, Wang K X *et al.* Acta Geophysica Sinica, 1985, 28(4): 208 (in China)]
- [6] 王克协, 董庆德. 石油学报, 1986, 7(1): 59 [Wang K X, Dong Q D *et al.* Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 59 (in China)]
- [7] 余寿绵. 地球物理学报, 1984, 29: 94 [Yu S M. Acta Geophysica Sinica, 1984, 29: 94 (in China)]
- [8] 张金钟, 郑传汉. 地球物理学报, 1988, 31: 464 [Zhang J Z, Zheng C H. Acta Geophysica Sinica, 1988, 31: 464 (in China)]
- [9] 朱正亚. 多极子声波在充流井孔中的传播. 同济大学博士学位论文, 1990
- [10] 董庆德, 王克协等. 地球物理学报, 1991, 34: 228 [Dong Q D, Wang K X *et al.* Acta Geophysica Sinica, 1991, 34: 228 (in China)]
- [11] 张碧星. 柱状分层双相介质井孔多极源声测井理论研究. 吉林大学硕士学位论文, 1991
- [12] 王秀明. 地球物理学报, 1992, 35: 510 [Wang X M. Acta Geophysica Sinica, 1992, 35: 510 (in China)]
- [13] 张海澜, 王秀明, 应崇福. 中国科学, 1995, 25(7): 742 [Zhang H L, Wang X M, Ying C F. Science China, 1995, 25(7): 742 (in China)]
- [14] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学. (赵晓敏译), 石油工业出版社, 2004
- [15] 阎守国. 孔隙柱管声系和非轴对称横向各向同性介质地层有限差分模拟. 吉林大学硕士学位论文, 2007
- [16] Zhang H, Zhang X. Numerical studies on the flexural modes excited by sources in a fluid-filled borehole, Presented at the international on ultrasonics. Vienna, April 9-13, 2007, Session R21: Physical Acoustics, Paper # 1197
- [17] He X, Hu H. Geophysics, 2009, 74(4): E149
- [18] 李刚, 套管井正交偶极声测井异常地应力正、反演研究. 吉林大学博士学位论文, 2005
- [19] Sinha B K, Kostek S, Norris A N. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B11): 22375
- [20] Tang X M, Cheng N Y, Cheng C H. Identify and estimating formation stress from borehole monopole and cross dipole acoustic measurements. 1999, 40th Annual Meeting Transactions; Society of Professional Well Log Analysis, QQ
- [21] 曹正良. 交叉偶极声测井检测异常地应力的正、反演研究. 吉林大学博士学位论文, 2002
- [22] 曹正良, 王克协, 李刚等. 地球物理学报, 2003, 46: 712 [Cao Z L, Wang K X, Li G *et al.* Chinese J. Geophys., 2003, 46: 712 (in China)]
- [23] 刘金霞, 王克协等. 地球物理学报, 2005, 48(3): 717 [Liu J X, Wang K X *et al.* Chinese J. Geophys., 2005, 48(3): 717 (in China)]
- [24] 李刚, 王克协, 刘金霞等. 地球物理学报, 2006, 49(1): 295 [Li G, Wang K X, Liu J X *et al.* Chinese J. Geophys., 2006, 49(1): 295 (in China)]
- [25] 马俊, 王克协, 李刚等. 见: 中国地球物理学会年会论文集. 西安, 2004. 504 [Ma J, Wang K X, Li G *et al.* A three-dimension SV-FD Simulation for Acoustic WaveFields in Cased-hole Surrounded by Anitropic Media Induced by Pressure. In: Annual of the Chinese geophysical society, Xi'an, 2004. 504]
- [26] 刘金霞. 弹性波折、反射与横向各向同性(VTI)介质井孔导波声弹效应研究. 吉林大学博士学位论文, 2007
- [27] Ellis D V. Well Logging for Earth Scientists, Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1987. 中译本: Ellis D V 著. 张守谦等译, 北京: 石油工业出版社, 1993. 424
- [28] 刘银斌, 余寿绵. 地球物理学报, 1986, 2(3): 292 [Liu Y B, Yu

S M. *Acta Geophysica Sinica*, 1986, 2(3):292 (in China)]

[29] Wang K X, Numerical simulation and field examples of critically refracted shear arrivals in a borehole in soft formations. 2006, 74th SEG Annual Meeting, extended abstract 344—348

[30] 王克协, 崔志文, 宋若龙等. 软地层声测井横波首至是消逝波的理论证明. 见: 中国地球物理学会年会论文集. 合肥, 2009. 126 [Wang K X, Cui Z W, Song R L *et al.* A Theoretical Derivation of Critically Refracted Shear Wave first Arrival as Evanescent Wave in a Borehole in Slow Formations. In: Annual of the Chinese geophysical society, He Fei, 2009. 126]

[31] Zhu Z, Toksöz. *Geophysics*, 2005, 70: F45

[32] Mikhailov *et al.* *Geophysics*, 2000, 65: 1098

[33] 胡恒山, 王克协. 测井技术, 1999, 23(6): 427; 2000, 24(1): 3 [Hu H S, Wang K X. *Well Logging Technology*, 1999, 23(6): 427; 2000, 24(1): 3 (in China)]

[34] 陈本池, 牟永光, 狄帮让等. 石油物探, 2003, 42(1): 35 [Chen B C, Mu Y G, Di B R *et al.* *Geophys. Prospect. Petrol.*, 2003, 42(1): 35 (in China)]

[35] 胡恒山等. 地球物理学报, 2003, 46(2): 259 [Hu H S *et al.* *Chinese J. Geophys.*, 2003, 46(2): 259 (in China)]

[36] 胡恒山. 物理学报, 2003, 52(8): 1955 [Hu H S. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(8): 1955 (in China)]

[37] 张元中, 肖立志, 楚泽涵等. 地球物理学报, 2005, 48(2): 452 [Zhang Y Z, Xiao L Z, Chu Z H *et al.* *Chinese J. Geophys.*, 2005, 48(2): 452 (in China)]

[38] Pain C C *et al.* *Geophys. J. Int.*, 2005, 160: 592

[39] 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及数值研究(博士论文). 长春: 吉林大学, 2004

[40] Cui Z W *et al.* *Chinese Physics*, 2007, 16(3): 746

[41] 关威, 胡恒山, 储昭坦. 物理学报, 2006, 55(1): 267 [Guan W, Hu H S, Chu Z T. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(1): 267 (in China)]

[42] Zan Xin *et al.* Simulation of the converted electric field during multipole logging while drilling (LWD). SEG 2006 Annual meeting, 466

[43] Hu H S, Guan W, Harris J M. J. *Acoust. Soc. Am.*, 2007, 122: 135

[44] Guan W, Hu H S. *Journal of Computation Physics*, 2008, doi: 10. 1016/j. jcp. 2008. 02. 001

[45] Cui Z W *et al.* SH-TE seismoelectric wave fields in a fluid filled borehole, WESPACX\_0325, 10th Western Pacific Acoustics Conference, 2009

[46] 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(博士论文). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009

[47] Cui Z W *et al.* Borehole Coupling of seismoelectric P waves in a fluid saturated poroelastic solid. 4th Biot Conference on Poromechanics, PORO-MECHANICS IV: 679—684, 2009

[48] 关威, 胡恒山. 声学技术, 2010, 29(6): pt2 [Guan W, Hu H S, Technical Acoustics, 2010, 29(6): pt2 (in China)]

[49] Singer J, Saunders J *et al.* *Petrophysics*, 2006, 47(5): 427

[50] Tang X M, Patterson D J. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCA211



• 物理新闻和动态 •

## 重子物质与反重子暗物质统一的起源

美国和加拿大的物理学家提出一种新粒子可以解决现代物理的两个重要疑难问题: 暗物质是什么以及为什么宇宙中的物质远比反物质多?

预计这种有待发现的粒子主要衰变成正物质, 而其反粒子主要衰变成“隐藏的”反物质. 研究人员声称, 这种粒子在早期宇宙中的存在可以说明为何宇宙中物质比反物质多, 以及暗物质实际上是隐藏的反物质.

暗物质是一种神秘的物质, 占有物质世界的 80%. 尽管暗物质的存在可以由它对正常物质产生的引力推断出来, 但是物理学家还没有直接探测到暗物质, 因此不知道它是由什么组成的. 而反物质则可以在实验室中产生和进行研究. 粒子物理的标准模型不能解释为什么宇宙中暗物质占绝大多数而反物质非常少, 这就是所谓的重子非对称性疑难.

美国 Brookhaven 国家实验室的 Hooman Davoudiasl 和他在 TRIUMF 实验室及 British Columbia 大学的同事提出了一种称为 X 的粒子, 可以解决这两个疑难问题. X 粒子的质量约为 1000GeV, 比质子重约 1000 倍. 这种粒子可以衰变成一个中子或两个难以发现的假设的粒子 Y 和  $\Phi$ . 这两个隐藏的粒子的质量约为 2GeV. X 粒子的反粒子为反 X 粒子, 它衰变成一个反中子或一对反 Y 粒子与反  $\Phi$  粒子.

物理学家们试图用电荷—宇称(CP)对称性破缺来解释重子不对称性. CP 对称性破缺的结果是衰变粒子更容易生成物质而不易生成反物质. 在实验室中已观察到 CP 对称性破缺, 但是由此引起的重子不对称性远不能说明宇宙中物质所占的比例.

X 粒子也以一种方式发生 CP 对称性破缺的衰变, British Columbia 大学的 Kris Sigurdson 把这种衰变方式称为“阴阳”衰变. X 粒子衰变成中子比反 X 粒子衰变成反中子的概率大, 而反 X 粒子衰变成反 Y 粒子和反  $\Phi$  粒子比衰变成 Y 粒子和  $\Phi$  粒子的概率大. 当早期宇宙中几乎所有粒子与其反粒子发生了湮灭时, 这种 CP 对称性破缺导致由余下的大量可看到的物质和更多的暗的反物质组成的宇宙. 有关论文发表在 *Phys. Rev. Lett.* 2010, 105: 211304.

(树华 编译自 *Physics World News*, 29 November 2010)