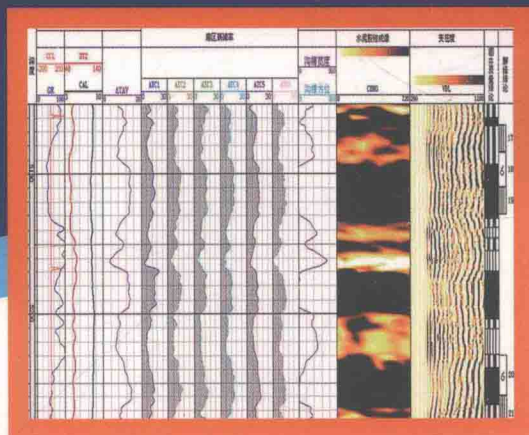


固井质量测井评价

李维彦 章成广 著

 科学出版社

固井质量测井评价

李维彦 章成广 著

长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室 资助

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

随着石油勘探开发的深入,固井质量的好坏关系油气的开采成本,利用测井资料评价固井质量是最经济有效的手段。本书基于套管井中声波全波列波形特征,全面详细地介绍了现场固井质量测井 CBL/VDL、SBT/RIB、IBC/CAST-V 及 MAK-II/SGDT 工作原理和评价固井质量的方法和评价标准。根据现阶段固井作业新技术和固井质量测井评价面临的难题,针对 CBL/VDL、SBT/RIB、IBC/CAST-V 及 MAK-II/SGDT 资料特点,通过现场大量实例解释,总结提出了低密度水泥、小井眼、多层套管以及储气库等不同固井情况固井质量测井评价的解决思路。

本书为现场解释人员客观评价固井质量提供理论依据,可供从事油气勘探开发工作的地质、测井、固井工作者及大专院校相关专业师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

固井质量测井评价/李维彦,章成广著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050501-9

I. ① 固… II. ① 李… ② 章… III. ① 油气井—固井—测井
IV. ① TE26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 267820 号

责任编辑:闫 陶 何 念/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏一波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016 年 11 月第 一 版 印张:9 3/4

2016 年 11 月第一次印刷 字数:225 000

定价:76.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

固井质量的正确检测不仅关系到对固井作业的客观评价,更关系到井下验窜、封窜作业的决策和试油资料的分析以及油气的开采成本。固井质量测井评价以 20 世纪 30 年代中期国外开始使用井温测井技术来评价固井质量为标志,20 世纪 30 年代末期使用放射性示踪法,20 世纪 60 年代早期开始利用声幅或水泥胶结测井(CBL)评价固井质量后,利用声波测井资料评价固井质量成为主要手段。为了克服 CBL 对第 II 界面的胶结状况无能为力这一缺点,20 世纪 70 年代改进和增加了声波变密度测井(VDL),20 世纪 80 年代脉冲超声扫描测井(CAST-V)开始引入固井质量评价。20 世纪 90 年代俄罗斯开始利用声波-伽马密度套管壁厚测井(MAK-II/SGDT)的方法全面评价水泥胶结质量,与此同时,固井质量评价技术开始从如声幅测井等单一轴向(深度方向)评价逐渐向轴向、周相(圆周方向)多维评价等新技术发展。1990 年,美国阿特拉斯公司首家推出扇区胶结测井仪(SBT);1996 年,哈里伯顿公司推出新 CAST-V;斯伦贝谢推出最新一代用于套管及固井质量评价的仪器套后成像测井仪(IBC)。

随着固井技术的发展和工程要求,固井质量测井评价的内容和方法也在不断变化和发展。最初固井质量测井评价只能笼统地判断第 I 胶结面的胶结情况,进一步要求解释第 I 及第 II 胶结面的胶结情况,现在最先进的水泥固井质量评价测井仪器不再是简单的单一项工程测井,还包含了对套管探伤、水泥环情况判断、分析管外窜槽等复杂井下问题的测量、分析与解释。而现代固井作业新技术的应用,测井工作者面临诸如小井眼、多层套管、低密度水泥、储气库以及快速地层等复杂情况固井质量评价难题。因此新形势下测井方面如何根据具体的井眼和钻井、固井状况采用不同的测井资料、相应的固井质量评价方法和评价标准当前面临的重大挑战和紧迫任务。

本书基于套管井中声波传播理论和实验模拟,首先分析各种胶结情况下的声波波形特征,总结了各组分波特征与水泥胶结的关系,深入研究了套管或仪器偏心、低密度水泥、多层套管、快速地层、大套管或小井眼和微环隙、薄水泥环等因素对套管井波形的影响以及进一步对固井质量评价造成的困难。针对我国油田现场固井质量测井现状,详细介绍

了 CBL/VDL、SBT/RIB、IBC/CAST-V 及 MAK-II/SGDT 工作原理以及利用这些资料评价固井质量的方法和评价标准,并通过大量实际资料的处理和应用解释,总结提出复杂状况固井质量评价方法,以期油田测井解释人员评价固井质量提供理论依据和解释思路,减少错误判断提高解释精度,为油田的勘探开发做出更大贡献。

本书由李维彦负责章节设计、调研组织、统稿、定稿。章成广负责编写第 2 章和第 6 章部分内容,硕士生杨绍东、李雅丽和丁小磊负责本书图件和稿件修改、排版工作。

特别感谢中国石油集团测井有限公司华北事业部、长庆事业部以及塔里木油田分公司勘探开发研究院测井中心、长城钻探工程有限公司测井公司、西部钻探工程有限公司测井公司以及中国石化集团工程技术研究院。在本书的编写过程中,中国石油集团测井有限公司罗安银,中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司肖承文、范文同,中国石油集团长城钻探工程有限公司测井公司汪浩、王天雨等同志给予了宝贵的建议及指导,使本书免除不少疏漏;王建功、宁卫东、张宁、李念泽、袁仕俊、傅永强、李进福、董红、郭秀丽、郭喜纯、王宇、徐叶青、田东江、李科、吴大成等在本书相关内容研究方面提供鼎力协助,为本书积累和增添了丰富的素材;同时杨绍东、李雅丽、丁小磊等在文字和图形的编写和排版等方面做了大量工作,使本书内容紧凑、脉络分明。作者在此表示衷心的感谢。

我们希望竭尽所能,用实际数据为大家呈现一个客观的固井质量测井评价。需要说明的是,对于引用部分,本书只列出了主要参考文献,列出不全,敬请谅解。当然,由于时间及水平所限,书中不当之处,统祈学术界同仁及广大读者赐正。

李维彦

2016 年 3 月 26 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固井质量测井评价背景及意义	1
1.2 固井质量测井仪器的发展	2
1.3 本书主要内容	4
第 2 章 套管井声波测井波形特征分析	6
2.1 套管井声场数值模拟方法	6
2.1.1 轴对称套管井声场	6
2.1.2 非轴对称套管井声场	8
2.2 各种水泥胶结情况下的套管全波列特征	14
2.2.1 自由套管	15
2.2.2 完全胶结	17
2.2.3 I 界面问题	17
2.2.4 II 界面问题	20
2.3 套管井各波成分与水泥胶结关系	22
2.3.1 套管波与水泥胶结的关系	22
2.3.2 地层波与水泥胶结的关系	27
2.3.3 导波与水泥胶结的关系	28
2.4 低密度水泥时波形与固井质量的关系	30
2.4.1 I 界面波形与水泥胶结质量关系	31
2.4.2 II 界面波形与水泥胶结质量分析	34
2.5 快速地层各种胶结情况下的合成波形及其特征	36
2.5.1 自由套管波形	36

2.5.2	完全胶结波形	37
2.5.3	I界面情形波形特征分析	37
2.5.4	II界面情形波形特征分析	40
2.6	岩性对地层波影响研究及校正	42
2.6.1	波形特性分析	43
2.6.2	地层波幅度与水泥浆和地层特性关系分析	44
第3章	CBL/VDL 资料处理与固井质量评价	46
3.1	CBL/VDL 固井质量评价方法	46
3.1.1	I界面胶结指数确定方法	46
3.1.2	II界面胶结指数确定方法	47
3.1.3	环空水泥胶结率确定方法	48
3.1.4	伪瑞利波特征值的确定方法	49
3.2	CBL/VDL 资料评价固井质量的标准	49
3.2.1	CBL/VDL 资料影响因素分析	49
3.2.2	固井质量测井评价标准	66
3.3	实际 CBL/VDL 资料处理与结果分析	71
3.3.1	套管井波形频谱特征	71
3.3.2	CBL/VDL 固井质量评价软件及实例分析	74
3.4	特殊固井段固井质量评价面临问题及解决思路	83
3.4.1	双层及多层套管固井质量评价	83
3.4.2	储气库井固井质量评价	85
3.4.3	小井眼井固井质量评价	87
第4章	SBT/RIB 资料分析及其评价方法	89
4.1	SBT/RIB 仪器及资料分析	89
4.1.1	仪器结构	89
4.1.2	SBT/RIB 探测能力	90
4.1.3	SBT/RIB 测量资料	91
4.2	SBT/RIB 固井质量定量评价技术	91
4.2.1	水泥环衰减率确定	91
4.2.2	消除套管接箍信号影响	92
4.2.3	水泥环胶结率确定	92
4.3	水泥环抗压强度确定	92
4.4	水泥环沟槽宽度和方位确定	93

4.4.1	水泥环沟槽宽度和方位确定	93
4.4.2	层间水泥封隔性能分析	94
4.4.3	SBT/RIB 资料评价第 II 界面胶结状况	95
4.5	SBT/RIB 固井质量评价分析及实例分析	95
4.5.1	SBT/RIB 固井质量评价分析软件介绍	95
4.5.2	SBT/RIB 固井质量评价分析软件实例分析	99
第 5 章	IBC/CAST-V 资料分析及其评价方法	102
5.1	IBC/CAST-V 仪器构造	102
5.1.1	IBC 仪器构造	102
5.1.2	CAST-V 仪器构造	103
5.2	IBC/CAST-V 资料及分析	104
5.3	IBC 资料评价固井质量的方法与评价标准	105
5.4	IBC 资料评价固井质量软件及实例分析	108
5.4.1	评价方法与评价依据	108
5.4.2	IBC 资料评价固井质量实例分析	108
第 6 章	MAK-II/SGDT 资料分析及其评价方法	112
6.1	MAK-II/SGDT 测量原理	113
6.1.1	MAK-II 声波测井仪	113
6.1.2	SGDT 伽马密度仪	115
6.2	MAK-II/SGDT 固井质量评价方法	117
6.2.1	水泥抗压强度与声波幅度的关系	117
6.2.2	水泥密度以及套管厚度的计算和校正	122
6.2.3	水泥强度公式建立	126
6.3	MAK-II/SGDT 固井质量评价标准	127
6.4	MAK-II/SGDT 固井质量评价软件及实例分析	129
6.4.1	MAK-II/SGDT 固井质量评价软件	129
6.4.2	实例分析	131
参考文献		137

第 1 章 绪 论

1.1 固井质量测井评价背景及意义

固井质量测井始于 20 世纪 30 年代初,于 20 世纪 70 年代引入了大量的新技术,包括声幅或水泥胶结测井(CBL),声幅-变密度测井(CBL/VDL)、扇区水泥胶结测井(SBT/RIB)、套后成像测井(IBC/CAST-V)、声波-伽马密度套管壁厚测井(MAK-II/SGDT)等(李博博等,2015;唐军等,2011;高义兵等,2010;白丽等,2005),这对我国的测井技术发展起到了推动作用。但随着国家对石油资源需求的增长,石油勘探难度越来越大,特别是对薄层、低孔低渗及裂缝性复杂地层勘探的不断加强,由此对新技术的亟须度也越高。再者,随着石油勘探在海外市场的开发,勘探先进技术受到国外公司的严格限制,这严重地阻碍了我国石油工业的发展。因此,除增加硬件装备研发,还必须加强理论、解释方法和软件开发方面的研究。

固井是石油勘探和开发的重要环节之一,固井质量检查主要是评价水泥环胶结质量,即评价套管与水泥环(第 I 界面)、水泥环与地层(第 II 界面)的胶结情况。随着油田开发的不断深入,固井质量的好坏直接影响着油气井寿命与产能,决定着勘探开发的总体效益。固井质量的正确检测不仅关系到对固井作业的客观评价,更关系到井下验窜、封窜作业的决策和试油资料的分析。多年来,国内外主要使用声幅测井(CBL)和声波变密度测井(VDL)来评价固井质量,并形成了定性评价方法,现在虽然有多人研究利用声波测井资料定量评价固井质量的方法,但还没有形成统一评价方法和评价标准。

随着测井技术发展,已经发展出了多种固井质量测井仪器和评价技术,其中有的应用已经很成熟,有的技术仍在不断进步。从以前的 CBL 发展到 CBL/VDL,在一些重点生产井上应用了 SBT/RIB、IBC/CAST-V、俄罗斯 MAK-II/SGDT 技术等,使固井质量评价的科学性、真实性得到了很大的提高。

面临诸如小井眼、低密度水泥、储气库、多层套管等复杂情况,目前固井质量测井评价方法还有一些问题需要解决。因此,开展此项工作研究的目的是通过多种测井仪器及测井评价方法研究,以及全波列测井信息处理方法研究,提高信息提取参数的精确度,从而进行分析评价方法研究,建立有效的评价标准,为石油勘探开发服务。

1.2 固井质量测井仪器的发展

1. 固井质量测井仪器初级阶段

固井质量测井评价的发展以 20 世纪 30 年代中期国外开始使用的井温测井技术来评价固井质量为标志。该技术的原理是水泥在溶水过程中,水化作用会放出热量,水泥温度升高,水温测井就是通过记录这种温度变化来判断固井水泥返高的。该技术的缺点是温度的扩散界面不是很清楚,而且还受时间限制。

到 20 世纪 30 年代末期开始利用放射性示踪法来评价固井质量,即利用人工放射性同位素作为示踪剂研究和观察管外水泥状况,从而确定固井水泥返高。

20 世纪 60 年代早期开始利用 CBL 来评价固井质量,从此声波法评价固井质量成为主要手段,该方法的工作原理是利用单发单收声系,用固定门检测套管波首幅,根据声波的衰减情况来判断水泥的固结情况。利用 CBL 曲线判断第 I 界面的胶结情况比较可靠,但是对第 II 界面的胶结状况却无能为力。

2. 固井质量测井仪器中级阶段

为了克服 CBL 对第 II 界面的胶结状况无能为力这一缺点,20 世纪 70 年代后期各个油田开始重视固井第 II 界面的胶结质量,CBL 得到了飞速的发展,主要表现在解释方法的改进和增加了 VDL,但是因为当时测井技术手段的落后,所以 CBL/VDL 技术在各大油田没有得到广泛应用。

到 20 世纪 80 年代中期,国内各油田测井公司开始购买 VDL 生产测井系统,其中 CBL/VDL 方法一直被应用于中后期生产井的固井质量检测。

20 世纪 80 年代末期,伴随着全波列记录技术发展成熟(Tang et al.,1998;Chen et al.,1989,1988,1982,1981;Block et al.,1986;Steven et al.,1986;Bake et al.,1985;Everhart et al.,1985;Aron et al.,1978;White et al.,1968,1967),利用 VDL 检测第 II 界面的胶结情况重新被重视起来。VDL 是一种利用声波全波列初至波成分及幅度大小来评价水泥胶结情况的声波测井技术,它可以反映第 I、II 界面的固井水泥胶结信息。相对 CBL 而言,通过信号处理技术,测井服务公司可以从 VDL 波形中获取更多有关固井质量的重要信息,特别是水泥环与地层的胶结情况。与之一起的还有早期的脉冲井周声波扫描成像测井(CAST-V)。

3. 固井质量测井仪器高级阶段

20 世纪 90 年代俄罗斯开始利用 MAK-II/SGDT 的方法全面评价水泥胶结质量。MAK-II 声波测井接收的同样是全波列,在评价固井第 I、II 界面的水泥胶结质量时,所基于的基本原理与 VDL 非常相似,但 MAK-II 声波测井是研究被接收到的声波首波幅度的衰减及时间特性的,而 VDL 主要研究初至波首幅的绝对幅度的变化情况。1984 年斯伦贝谢公司开发出的 CET(cement evaluation tool)是超声波水泥评价测井仪,在水泥胶结分析中增加了方位信息。

20 世纪 90 年代末,固井质量评价技术开始从 CBL 向 CBL/VDL 等单一轴向评价再向 SBT 轴向和周向等新技术发展。传统检测固井质量的方法如 CBL/VDL,提供的测量都是沿套管周边平均的结果,这类测量使它难于区分围绕套管的低抗压强度的水泥,以及套管周围水泥胶结好但周长中有一小区域水力隔离差这两种情况,如图 1.1 所示。

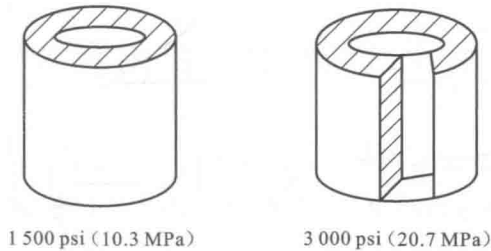


图 1.1 常规水泥胶结测井测量的多解性

为此,在 1990 年美国阿特拉斯公司首家推出扇区水泥胶结测井仪(SBT, segment bond tool),第二代径向固井评价仪,吸收了数电、计算机、微电路、换能器等的最新发展技术,改进了固井评价方法,克服了早期测井仪在提供套管周围垂、径向水泥胶结质量定量评价方面的许多局限。SBT 从纵向和横向(沿套管周围)两个方向测量水泥胶结质量,利用装在六个极板上的 12 个高频定向换能器的声系来测量套管周围六个 60° 区块。SBT 也提供改进的全波测量和鉴别井眼底侧的仪器方位测量,两个井下加速度计用来确定下井仪相对于井眼底侧的相对方位角,可用于确定水泥窜槽的方位。SBT 技术的最大优点是不受仪器是否居中的影响,在测量过程中,通过补偿测量原理,不管地层性质如何变化,套管井中流体性质如何迥异,该技术都可以最大限度地消除各种因素影响。

目前国内所使用的扇区水泥胶结测井仪有阿特拉斯公司的 SBT(segment bond tool)、美国 Tek-co 公司的 RIB(radius incremented bond)以及康普乐公司的 SBT(secidr bond tool)。中国石油化工集团公司(简称中石化)胜利测井公司等公司研究制造出具有国际先进水平的分区水泥胶结测井仪器 SL6424 SBT,该仪器在孤古 8 等试验井中已经取得了合格的资料,但进行大面积的应用推广目前还需要做各方面的工作,如仪器进一步成熟、操作人员的培训、市场宣传和推广、解释评价技术加强等。

1996 年哈里伯顿公司推出了 CAST-V, 是用于水泥胶结评价检测的一种仪器。它提供 360 全方位井周成像, 可用于裸眼井地层评价及套管井水泥评价, 用垂直入射的高频声脉冲激发套管产生套管谐振, 谐振幅度衰减速度与套管外介质的声阻抗的大小成正比, 通过测量谐振波的衰减速度, 进行处理就可以得到套管外介质的声阻抗, 即固井质量评价结果。优点是可以套管探伤(壁厚与直径)、水泥成像(声阻抗成像, 抗压图像)、裸眼井壁成像裂缝探测、与全波列声波测井仪组合。但易受高密度流体、井下仪器居中性的影响。

IBC(套后成像仪)是斯伦贝谢最新一代用于套管及固井质量评价的仪器, 它通过结合两种声波技术: 经典的脉冲回波技术和最新的挠曲波成像, 可以准确评价任何水泥类型, 包括从传统水泥浆和重水泥浆到最新的轻质水泥浆和泡沫水泥。这种新方法可以在比常规技术更广泛的适用条件下提供实时的固井质量评价服务, 还包含对套管探伤、水泥环情况判断、分析管外窜槽等复杂井下问题的测量、分析与解释。

1.3 本书主要内容

本书介绍了国内外主要固井质量测井仪器的基本原理、测井响应影响因素和测井资料解释方法、水泥胶结评价和水泥环层间封隔评价的最新研究成果及固井质量测井评价标准。为了适应固井质量综合评价的需要, 针对油田实际资料, 研究了声波全波列测井的 CBL/VDL 资料处理与固井质量评价方法、SBT/RIB 资料分析及其评价方法、IBC/CAST-V 资料分析及其评价方法以及 MAK-II/SGDT 资料分析及其评价方法, 着重讨论了水泥环抗压强度、水泥环沟槽宽度和方位、水泥密度以及套管厚度、水泥强度、I、II 界面胶结质量等方面关系及应用方法, 并且对固井质量评价处理解释软件进行了详细描述、对实例作了仔细分析, 为固井质量测井评价推广应用提供了理论基础和应用解释。

本书可供从事油气勘探开发工作的地质、测井、固井工作者及大专院校相关专业师生参考使用。

本书主要内容包括以下几个方面:

(1) 通过数值模拟, 研究分析套管井中不同频率、不同胶结情况、不同源距及不同井眼尺寸和管径的声波全波列特性, 总结声波全波波形中各成分波(套管波、地层波等)的特征与固井质量的关系; 研究不同水泥密度固井的套管波刻度校正方法及地层波受地层岩性的影响规律和校正方法。

(2) 分析 CBL/VDL 固井质量评价的影响因素(仪器偏心、套管的性质、井径和地层岩性), 根据理论、实验的结论和实际记录波形的特点, 研究并提出一种在套管井中处理全波波形, 并利用与固井质量有关波形特征值进行固井质量评价的方法以及评价标准。

(3) 提出了 CBL/VDL 固井质量评价中特殊固井段(双层及多层套管、储气库井、小

井眼井)固井质量评价面临的问题及解决思路。

(4) SBT/RIB 资料分析及其评价方法。通过对 SBT/RIB 仪器及资料进行分析,确定水泥环抗压强度以及确定水泥环沟槽宽度和方位,评价第二界面胶结状况。

(5) 研究 IBC 资料评价固井质量的方法与评价标准。以 IBC/CASTV 仪器构造和资料分析为基础,建立固井质量评价方法及标准。

(6) 研究 MAK-II/SGDT 固井质量评价标准,包括研究水泥抗压强度与声波幅度的关系,计算和校正水泥密度、套管厚度以及建立水泥强度公式。

(7) 介绍利用 CBL/VDL、SBT/RIB、IBC/CASTV 及 MAK-II/SGDT 资料评价固井质量测井评价方法以及相应软件。

第 2 章 套管井声波测井波形特征分析

CBL/VDL 是现场最常用的固井质量检测方法,主要利用套管波的幅度和全波波形的变化特性来评价固井质量(周吟秋等,2007;李强等,2004;官波等,2002;刘继生等,2000;胡文祥等,1997),但大都还只是作定性或半定量解释,特别是 II 界面问题也是测井评价的难点。本章通过对短源距声波测井(源距 3 ft^① 和 5 ft)所进行的数值模拟,研究声波在套管井中的传播特性,考察了套管波、水泥环波和地层波的频率幅度和波形特征与第 I、第 II 界面流体环隙宽度的关系,考察了水泥密度、地层特性对声波波形的影响,探讨低密度水泥固井和高速地层(碳酸盐岩地层)中固井质量评价方法,研究地层岩性影响的校正方法,并为资料数字处理和解释提供理论依据。

2.1 套管井声场数值模拟方法

套管井是一种实际的生产型井,由在钻井形成的圆柱形井孔中下钢管(套管),并再用水泥黏结套管和地层间的环状空隙(固井)形成。一般情况下,黏接良好的套管井可以认为是沿井轴对称的,可视为径向可分的多层介质圆柱形开放声波导,有解析解。为研究黏结缺陷带来的非轴对称井孔声场,我们首先应了解黏接完好的轴对称套管井声场及其研究方法。下面就以轴对称套管和非轴对称套管为模型,讨论一下它们各自的算法及声场。

2.1.1 轴对称套管井声场

1. 物理模型及通解

如图 2.1 所示为轴对称套管井模型,令 Z 轴与井轴重合,声源位于坐标系的原点。

^① 1 ft = 3.048×10^{-1} m。

r_0, r_1, r_2, r_3 代表各层界面到井轴的距离。第 n 层波动方程为

$$\nabla^2 \Phi_i = \frac{1}{V_{Ci}^2} \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 \Psi_i = \frac{1}{V_{Si}^2} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

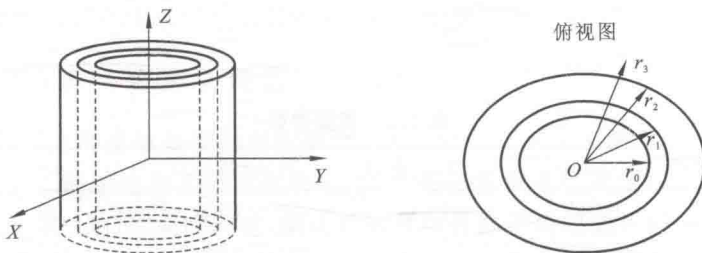


图 2.1 轴对称套管井模型

这里 V_{Ci} 和 V_{Si} 分别是纵波和横波速度, Φ_i 是标势函数, Ψ_i 是矢势函数(仅有 Z 分量)。势函数通解为

$$\Phi_i = [A_i K_0(\mu_{Ci} r) + A'_i I_0(\mu_{Ci} r)] e^{i(kZ - \omega t)} \quad (2.3)$$

$$\Psi_i = [B_i K_1(\mu_{Si} r) + B'_i I_1(\mu_{Si} r)] e^{i(kZ - \omega t)} \quad (2.4)$$

这里, I_i 和 K_i 是第一类 i 阶虚宗量贝塞尔函数; Z 是源距; k 是轴向波数; A_i, A'_i, B_i, B'_i 是由边界条件确定的常数; μ_{Ci} 和 μ_{Si} 是纵波和横波波数的径向分量。第 n 层的 Thomson-Haskell 位移应力传输矩阵(u_i 是位移、应力矩阵, 在固体界面位移、应力连续)为

$$u_i(r_i) = E_i(r_i, r_{i-1}) u_i(r_{i-1}) \quad (2.5)$$

$$u_i(r_{i-1}) = E_{i-1}(r_{i-1}, r_{i-2}) E_{i-2}(r_{i-2}, r_{i-3}) \cdots E_2(r_{2-i}, r_1) u_2(r_1) \quad (2.6)$$

$$G(A_i, A'_i, B_i, B'_i)^{-1} = u_2(r_1) \quad (2.7)$$

2. 井内压力场积分表示

在最外层, 辐射条件要求 $A'_N = B'_N = 0$, 在 $r = r_1$ (套管内径) 流体-固体界面, 仅径向位移和应力连续, 切向应力为零。另外, 在井轴上径向位移保持有限要求 $A = B = 0$, 在流体中, 没有横波势, 这样有

$$\begin{bmatrix} \mu_{C1} I_1(\mu_{C1} r) & -G_{11} & -G_{13} \\ -\mu_{C1} k^2 C^2 I_0(\mu_{C1} r) & -G_{31} & -G_{33} \\ 0 & G_{41} & -G_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_1 \\ A^N \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mu_{C1} K_1(\mu_{C1} r) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

井内压力为

$$P(r, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{-i\omega t} \int_{-\infty}^{+\infty} A'_1 I_0(\mu_{C1} r) e^{ikz} d\omega dk \quad (2.9)$$

其中, $P(r, z, t)$ 是压力响应; z 为源接收源距; t 是时间; 式(2.8)中 C 为相速度; μ_{C1} 为井中流体波数的径向分量; $X(\omega)$ 为源频谱; 反射系数 A'_1 是式(2.8)的解。对不同套管井情况,

可由式(2.9)数值计算合成波形图。

3. 声场计算实例

选取套管井的模型为:井眼直径为 8.5 in^①(21.59 cm),套管外径为 5 in(13.97 cm),套管厚度为 0.3 in(0.762 cm),选用声源为瑞克子波,中心频率为 18 kHz,延迟时间为 6.5 ms,源距 5 ft(1.524 m),频率范围为 0~35 kHz,套管井中各层参数如表 2.1 所示。其在时域的全波列波形见图 2.2。

表 2.1 模型参数

介质	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho/(kg/m^3)$	Q_p	Q_s
井内泥浆	1 600	—	1 100	30	—
套管	5 400	3 000	7 800	1 000	1 000
水泥	2 400	1 500	1 300	40	40
地层	4 900	2 970	2 200	100	100

注:表中 V_c, V_s 分别为介质中的纵、横波速度; ρ 为介质的密度; Q_p, Q_s 分别为纵、横波的品质因子

表中品质因子 Q 是考虑介质黏滞衰减而引入的。在数值计算中,介质的黏滞衰减通过引入复速度表现出来的,其复速度表达式为

$$V(\omega) = V(\omega_0) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - \frac{i}{2Q} \right] \quad (2.10)$$

式中, ω, ω_0 分别为计算和参考角频率; i 为虚数单位。

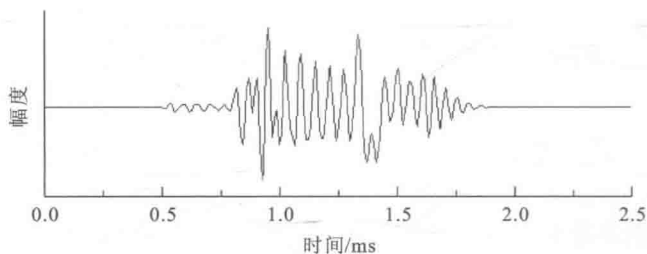


图 2.2 套管井声波全波列图(5 ft)

2.1.2 非轴对称套管井声场

求解非对称井孔声场问题实质上是求一个特定边界条件的波动方程,而这个波动方程是一个二阶偏微分方程,有限差分方法则是求解偏微分方程定解问题的主要数值方法之一。由于计算机能力的限制,Leslie 等(1991)在研究非轴对称井孔声场问题时,发现如

^① 1 in=2.54 cm,非法定单位,下同。

果井孔和地层参数只在二维(X-Y)平面上变化,而沿并轴(Z轴)均匀不变的话,就允许将三维差分方程沿Z轴作空间傅里叶变换,从而只需在X-Y二维平面网格上进行一系列二维有限差分计算,再反变换回去就能得到三维的结果,这种方法被称为2.5维方法。2.5维方法最大的优势在于它能大大降低对计算机存储量的要求,使得在当前微型机上计算某些实际的井孔声场问题成为可能。我们在研究带窜槽的套管井声场时将主要采用2.5维有限差分方法。

1. 非轴对称声场的物理模型

非轴对称套管井即在与井轴垂直的平面(XOY面)内,某层不关于轴心对称。对应的油田生产实际,即水泥胶结在某层段出现缺失,并在套管和地层间形成扇形裂缝,这被称为窜槽(模型图见图2.3)。如前所述,解决非轴对称井孔声场问题我们主要是采用了2.5维的数值模拟算法。因为2.5维有限差分的公式可从差分公式中简捷推导得到,并且两者存在很多共同性,我们首先介绍三维有限差分算法。

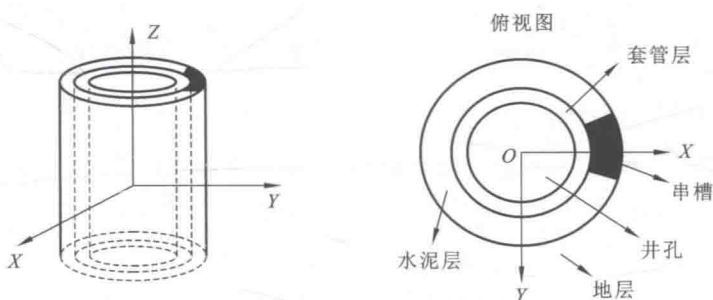


图 2.3 非轴对称套管井模型

2. 三维有限差分算法

对于一个非均匀的各向同性弹性介质,在笛卡儿坐标下,我们定义其密度和拉姆常数为 $\rho=\rho(x,y,z)$, $\lambda=\lambda(x,y,z)$, $\mu=\mu(x,y,z)$ 。属于二阶双曲型偏微分方程的波动方程可以分解为如下速度和应力的一阶偏微分方程组。

$$\rho \frac{\partial V_x}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x \quad (2.11)$$

$$\rho \frac{\partial V_y}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + f_y \quad (2.12)$$

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + f_z \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} + g_{xx} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial V_y}{\partial y} + g_{yy} \quad (2.15)$$