

油气工程测井 理论与应用

THEORY AND APPLICATION OF OIL AND
GAS ENGINEERING LOGGING



刘向君 梁利喜◎著



科学出版社

油气工程测井理论与应用

刘向君 梁利喜 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从油气工业发展对工程技术的要求及测井自身的特点出发,较全面系统地阐述了工程测井发展的必然性、特点和内涵,岩石强度、地应力、地层孔隙压力等地质力学特征和参数的测井岩石物理响应机理、响应特征和测井预测方法,以及工程测井在促进复杂地层/油气藏安全、高效钻井、完井、压裂等工程技术发展和在实现复杂油气藏地质-工程钻前一体化优化设计的重要应用。工程测井的研究与发展需要复合型的专业人才,石油天然气工业的发展也需要具有复合型专业知识结构的人才,希望本书体现的地质-工程一体化研究思路,能够对大家有所帮助,能够推动测井技术更好地为石油天然气工程技术发展服务,能够更好地促进复杂油气资源、非常规油气资源的科学、高效、安全开发。

本书可供油气地球物理、开发、钻完井等领域的工程技术人员和研究人员参考,也可供相关专业领域的研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

油气工程测井理论与应用 / 刘向君, 梁利喜著. —北京: 科学出版社, 2015.8

ISBN 978-7-03-042926-1

I. ①油… II. ①刘… ②梁… III. ①油气测井-研究
IV. ①P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 309699 号

责任编辑: 杨 岭 罗 莉 / 责任校对: 陈 靖

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015年8月第一次印刷 印张: 16

字数: 370千字

定价: 118.00元

前 言

根据在油气工业勘探开发上游领域不同阶段发挥的作用,测井形成了勘探测井和生产测井两个重要分支。勘探测井是指井眼形成后,应用地球物理方法沿钻井剖面对地层所进行的观测,其主要目的在于发现和评价油气层的储集性质及生产能力。生产测井则指油气井完井及其后整个生产过程中,应用地球物理方法对井下流体流动状态、井身结构技术状况和油层性质变化情况所进行的观测,其主要目的是监视和分析油气层的生产状况及开发动态。根据测量对象和应用范围不同,生产测井方法主要分为流动剖面测井、储层动态监测测井、工程测井三类。其中,流动剖面测井的测量对象是井内流体,目的在于了解生产井的产出剖面以及注入井的注入剖面,评价油气井的生产状况和油气层的生产动态;储层动态监测测井的测量对象是油气层,目的在于监测含油性、渗透性、油水界面以及地层压力的变化情况,评价油气层的生产动态;工程测井的测量对象主要是井下管柱和水泥环,目的在于检测井内机械完好性,评价酸化、压裂、封堵等井下工程作业的效果。综观勘探测井和生产测井,油气工程技术最关键的环节之一“钻井工程”在现有的测井分支中均未包含,而随着我国油气资源越来越多地转向深层、复杂地层,对钻井地层工程地质特征,尤其工程地质力学特征的认识程度已越来越成为制约钻井安全、高效实施的关键基础和保障,新井轨迹设计与优化、钻井方式的选择与优化、钻井提速措施的制定、井控、井身结构设计与优化等钻井的各个环节,都强烈地依赖于地层的岩石强度性质、地应力、孔隙流体压力及由这些参数衍生得到的地层的坍塌压力和破裂压力。获取地层岩石强度、地应力、孔隙流体压力的方法主要有实测和测井预测的方式,实测方法获得的数据直接、可靠性高,但数据离散、数据有限,对满足有限厚度储层和均质地层的勘探评价和工程需要是可行的,但对指导大跨度、全井段地层钻井工程技术的实施具有很大的局限性和不适应性,而测井技术则具有其他方法不可比拟的巨大优越性。此外,现有的生产测井体系中也仅包含了对压裂、完井等井下作业完成后的效果的评价,而缺少对作业实施方案的指导,而这些作业实施方案的制定也都必须取决于岩石强度、地应力、孔隙压力、地层坍塌压力和破裂压力,尤其页岩气、煤层气、致密砂岩油气等非常规油气资源的开发更是强烈地依赖于对地层岩石强度、地应力等参数的认识和掌握程度。因此,测井学科现有的勘探测井、生产测井的研究内涵已远不能满足和适应油气工业对测井技术的需求,必须加大研究,拓展其内涵。为此,本书作者及其研究团队于1993年开始着手组织开展通过测井解决和指导钻井工程技术实施的系统基础及应用研究,历经20余年的不懈努力,以测井技术为核心,综合应用地震、地质,以及钻井、压裂等油气工程资料,逐步形成和

建立了以支撑安全高效开发油气的钻完井、压裂等工程技术实施为目标,以岩石强度、地应力、地层孔隙流体压力等地质力学参数预测为基础,井眼稳定性分析为核心,单井评价到区域预测,集实施前优化设计和实施后效果评价于一体的多学科交叉融合的工程测井全新理论、方法及应用技术体系。与固井质量评价、套管完好性检测,以及压裂等井下作业效果评价等传统工程测井领域一起构成了系统完善的工程测井理论、方法及技术体系。

在原有勘探测井、生产测井的基础上,根据学科发展和赋予了新的内涵的工程测井,可将测井学科重新梳理划分成勘探测井(储层评价测井)、工程测井、生产测井三个既相互独立、又相互关联的学科分支。



勘探测井即传统的储层评价测井(既包含新区找油找气,也涵盖开发期已动用油气藏的含油气性评价,理论基础相同),以地质学和岩石物理学为基础,以找油找气和油气层生产能力评价为目标,岩电关系是储层评价测井的重要基础研究内容,这是目前测井工作者最熟悉的领域;工程测井包括固井质量评价、套管完好性检测,以及压裂等井下作业效果评价等测井工作者熟知的传统工程测井领域,以及本团队所构建的以支撑安全高效开发油气的钻完井、压裂等工程技术实施为目标的工程测井全新理论、方法及技术体系,该体系以地质学、岩石力学、岩石物理学和石油工程为基础,岩石力学、岩石超声波传播特性是其重要基础研究内容,这是一个全新的多学科交叉领域。重新梳理后的生产测井包括流动剖面测井和储层动态监测测井两类。与勘探测井、生产测井相比,工程测井是目前发展最弱、最缓慢的学科分支领域,但油气工业需求快速增长,需加大力度开展研究。长期以来,测井界对工程测井的研究主要集中在固井质量评价测井、套管检测测井等方面,但即使固井质量评价测井这一传统工程测井领域,也由于深井窄间隙固井,以及越来越多的复杂、特殊固井水泥声学特性的相关基础研究不足和评价标准的严重缺乏,也已不能很好满足固井质量评价的需求。工程测井涉及内容广泛,本书将仅围绕团队所构建的以保证安全高效钻完井(井眼稳定性为核心)、提高钻速为核心和基础的技术方法体系展开。根据所构建的工程测井的理论、方法与应用领域的特点,全书共分为10章。本书以地质力学参数的预测模型及预测方法研究为基础,以井眼稳定性评价作为应用切入点,围绕工程测井的研究内容与定位(第1章)、复杂地层岩石强度与岩石物理特性(第2章)、水化对泥页岩地层岩石物理及力学性质的影响(第3章)、复杂地层孔隙流体压力测井预测(第4章)、地应力对井周岩石物理性质的影响及地应力测井预测(第5章)、井眼稳定性测井评价(第6章)、工程测井在推进复杂油气藏的科学完井中的应用(第7章)、工程测井与传统储层评价测井相结合实现钻井方式科学优化(第8章)、工程测井在促进复杂地层复杂井开发钻

完井钻前一体化优化设计中的应用(第9章)和岩石的塑性系数、研磨性等强度参数的测井评价(第10章)等研究内容展开系统的阐述。上述新的工程测井研究领域根植于传统储层评价测井之上,又不同于传统储层评价测井,将测井与岩石力学相结合,开展测井岩石力学响应机理及规律研究,获取区域地质力学特征,解决油气工程技术问题,是其最显著的特点,这是一个全新的多学科交叉研究领域。工程测井的研究与发展需要复合型的专业人才,石油天然气工业的发展也需要具有复合型专业知识结构的人才,希望本团队的研究工作,能够对大家有所帮助,能够推动测井技术更好地为石油天然气工程技术发展服务,能够更好地促进复杂油气资源、非常规油气资源的科学、高效、安全开发。关于测井预测地层矿物组成、含水状况等的内容在本团队的其他书籍中已有阐述,本书不再重复。

1993年以来,在理论方法研究不断取得突破的基础上,团队先后出版了《石油测井与井壁稳定》(石油工业出版社,1999年)、《岩石力学与石油工程》(石油工业出版社,2004年)两本专著,并将部分研究成果编入了《测井原理与应用》教材(石油工业出版社,2006年),先后研发了井眼稳定性测井评价、出砂预测与完井优化、岩石强度预测、地应力预测和孔隙压力预测等应用软件,目前,本团队所研究形成并建立的理论、方法和软件技术正在通过“十二五”国家油气重大科技攻关项目“工程测井软件包研发”(2011ZX05020-007-005)集成到CIFlog软件平台(软件界面见附录),希望能够逐步推广,被更多的人接受和应用。

由于致密油气、页岩油气和煤层气等非常规油气资源赋存岩体岩性、物性及岩石力学性质等的复杂性、特殊性,本书所建立的从单点(单点岩石物理和岩石力学参数测试)到单井(测井评价)再到区域(融合地震岩石物理信息与区域化地质力学参数场预测)的工程测井理论及方法,体现的以地质为先导,测井、物探及工程多资料相融合,“储层物性参数场”与“地质力学参数场”两场合一、地质-工程一体化实现复杂地层环境下油气资源地质-工程一体化高效安全开发的开发思路与理念,对致密油气、页岩油气及煤层气等非常规油气资源将具有重要意义。鉴于工程测井研究及应用领域的特殊性,不同频率、不同径向探测深度的声波测井的发展和应用将成为未来推动工程测井快速发展的重要仪器技术支撑。随着复杂油气资源的大量开发,地质-工程一体化技术需求的快速增长,对复杂地层中声波传播特性、衰减特性的研究需求日益提高,对声波测井技术的需求也必将日益增高。

本书的研究成果是由第一作者刘向君教授带领的研究团队共同完成的,是团队20多年来持之以恒专注研究与传承的结果。本书第一作者很有幸在完成了测井专业的本科(1990年)阶段学习后即进入石油天然气工程学科系统学习并取得博士学位(1995年)。在油气井钻井工程领域20余年的研究磨练,复合的专业知识结构使我能够站在石油工程师的角度去应用测井、挖掘测井中的各种信息,同样,测井的专业背景也使我能够站在“地层需要什么样的工程技术”的角度去分析和思考相关的工程技术问题。在此,要特别感谢我的导师罗平亚院士,是他20多年前把我领进了这一崭新而广阔的

研究领域。

另外,还要特别感谢梁利喜、熊健、刘洪、陈乔等我的历届硕、博士研究生。是他们的辛勤劳动和不懈努力共同成就了这个研究领域及这本书。梁利喜博士是他们中的杰出代表,从攻读硕士学位到成为西南石油大学的一名教师,他一直持之以恒地耕耘在工程测井领域,书中每一点成果的取得都浸透着他的辛勤付出与努力,尤其是在测井与地震相结合,实现从单井到区域地质力学参数场,钻后到钻前钻完井一体化设计方面做出了重要贡献。

在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

由于作者水平和知识面的限制,书中如有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

刘向君

2015年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 工程测井研究背景	1
1.2 工程测井的研究内容	2
第2章 复杂地层岩石强度与岩石物理特性	6
2.1 岩石的强度参数及实验室获取方法	6
2.1.1 岩石的抗压强度	6
2.1.2 岩石的抗张强度	8
2.1.3 岩石的抗剪强度	8
2.1.4 岩石的弹性参数	9
2.2 岩石强度参数经验预测模型	12
2.3 岩石强度参数预测模型建立的实验方法及应用	14
2.3.1 岩石强度参数预测模型建立的实验方法	14
2.3.2 致密砂岩地层岩石强度参数预测模型建立与应用	15
2.3.3 碳酸盐岩地层岩石强度参数测井预测模型建立与应用	19
2.4 缝洞碳酸盐岩地层岩石强度参数测井预测模型建立的相关基础研究	24
2.4.1 缝洞碳酸盐岩地层超声波传播特性研究	25
2.4.2 缝洞地层岩石超声波衰减特性与岩石孔隙度的相关性	29
2.4.3 缝洞地层岩石超声波衰减特性与岩石强度的相关性	31
2.5 岩石脆性的实验评价及测井预测	38
2.5.1 岩石脆性的室内评价方法现状	38
2.5.2 岩石脆性的矿场预测方法现状	42
2.5.3 页岩脆性指数评价方法及应用	43
第3章 水化对泥页岩地层岩石物理及力学性质的影响	45
3.1 泥页岩组成及理化性质	45
3.1.1 泥页岩的组成	45
3.1.2 泥页岩的理化性质及水化机理	47
3.2 泥页岩水化过程与岩石物理参数的动态变化	49
3.2.1 实验方法	49
3.2.2 水化过程中电阻率的动态变化	49
3.2.3 水化过程中声波纵波速度的变化	51
3.2.4 吸水量随时间的变化	54

3.3 泥页岩水化过程中地层岩石强度及声波时差的动态特性	55
3.3.1 浸泡时间对泥页岩地层的影响	55
3.3.2 浸泡流体类型对泥页岩地层声波时差及强度特性的影响	62
3.4 水化对硬脆性泥页岩地层的影响	65
3.4.1 硬脆性泥页岩的矿物组成	65
3.4.2 硬脆性泥页岩的岩石声波特性	65
3.4.3 水化对硬脆性泥页岩结构及力学行为的影响	69
3.4.4 水溶液对硬脆性泥页岩岩石强度的影响	72
第 4 章 复杂地层孔隙流体压力测井预测	81
4.1 基于泥页岩压实理论的地层孔隙流体压力预测方法	81
4.1.1 正常压实泥页岩地层的岩石物理响应特征	81
4.1.2 等效深度法的基本原理	83
4.1.3 Eaton 法的基本原理	83
4.1.4 等效深度法和 Eaton 法预测砂泥岩剖面地层孔隙压力应用实例	84
4.2 碳酸盐岩地层孔隙压力多参数直接预测方法	90
4.2.1 孔隙压力多参数直接预测的方法基础	90
4.2.2 综合应用测井多参数直接预测碳酸盐岩地层孔隙压力应用实例	91
第 5 章 地应力对井周岩石物理性质的影响及地应力测井预测	96
5.1 测井资料获取地应力的理论及方法基础	96
5.1.1 直井井壁地层应力破坏特征	96
5.1.2 井壁地层应力非均质及应力释放特征	97
5.2 水平向地应力的方位确定	97
5.2.1 井壁钻井诱导裂缝的成像测井显示特征	97
5.2.2 井壁应力垮塌的测井显示特征	103
5.2.3 地应力各向异性的 DSI 测井指示特征	108
5.3 地应力值的测井预测	110
5.3.1 基于岩心 Kaiser 效应的地应力室内测试方法	111
5.3.2 基于水力压裂资料反演地应力	114
5.3.3 地应力大小测井预测	115
第 6 章 井眼稳定性测井评价	121
6.1 常规地层的坍塌压力和破裂压力预测	121
6.1.1 坍塌压力和破裂压力预测的基本原理	121
6.1.2 井周应力分布	121
6.1.3 强度判别准则	124
6.2 水化膨胀性泥页岩地层的坍塌压力测井评价	125
6.3 硬脆性泥页岩地层的坍塌压力测井评价	136
6.3.1 Hoek-Brown 强度准则	137
6.3.2 基于岩体 GSI 的 Hoek-Brown 强度准则参数的确定方法	137
6.3.3 地层坍塌压力剖面	139

第7章 工程测井在推进复杂油气藏科学完井中的应用	144
7.1 基于工程测井的低渗砂岩油气藏水平井完井方式的优选	144
7.1.1 影响低渗气藏水平井完井方式优选的因素	144
7.1.2 基于工程测井的水平井完井方式优选	145
7.2 基于工程测井的复杂地层复杂井压裂的科学优化	165
7.2.1 压裂缝高预测理论	165
7.2.2 工程测井与传统测井相结合指导非均质储层压裂优化设计实例	167
7.3 基于工程测井的疏松砂岩油气藏出砂趋势判别及防砂完井优化	167
7.3.1 疏松砂岩油气藏出砂趋势测井经验判别	170
7.3.2 油气井出砂预测与完井优化的岩石力学量化分析	172
第8章 工程测井与传统储层评价测井相结合实现钻井方式科学优化	176
8.1 目标区水层发育状况及可能的气体钻井选层	176
8.2 备选地层的出水状况	177
8.2.1 水层孔隙压力预测	178
8.2.2 水层渗透率测井解释	178
8.2.3 目标区块重点层位产水量的评价	182
8.3 气体钻井可行性分析	182
8.3.1 根据水层分布开展气体钻井可行性分析	182
8.3.2 综合井壁稳定性开展气体钻井可行性分析	182
第9章 工程测井在促进复杂地层复杂井钻完井钻前一体化优化设计中的应用	186
9.1 地质力学参数场构建及描述	186
9.1.1 岩石力学参数区域化理论及技术	186
9.1.2 地应力参数场构建理论及技术	189
9.2 基于地质力学参数场的井眼轨迹钻前优化	193
9.2.1 井眼轨迹对井壁坍塌失稳的影响	193
9.2.2 井眼轨迹对井周压裂缝形成及压裂缝产状的影响	193
9.2.3 基于地质力学参数场的安全钻井液密度钻前预测	195
9.3 缝洞碳酸盐岩油气藏水平井钻完井钻前地质-工程一体化优化	197
9.3.1 缝洞分布对水平井钻井稳定性及压裂缝的影响	197
9.3.2 井筒与溶洞距离对稳定性和人工压裂缝形成的影响	204
9.3.3 水平井轨迹优化实例	207
9.4 基于地质力学参数场实现分支井钻完井钻前一体化优化	210
9.4.1 分支与主井筒夹角对分支井井眼系统稳定性及临界生产压差的影响	211
9.4.2 分支间距对临界生产压差的影响	211
9.4.3 分支井造斜率对分支井系统稳定性及临界生产压差的影响	212
9.4.4 蠕变对分支井临界生产压差及井壁长期稳定性的影响	214

第 10 章 岩石的其他强度参数测井评价 219

 10.1 岩石的硬度及塑性系数测井评价 219

 10.1.1 岩石的塑性系数 219

 10.1.2 岩石的硬度及塑性系数测井预测 220

 10.2 岩石的可钻性测井评价 221

 10.2.1 实验原理及实验设备 221

 10.2.2 岩石可钻性预测模型研究 221

 10.3 砂泥岩地层研磨性测井评价 223

 10.3.1 岩石研磨性研究现状 225

 10.3.2 油气钻井条件下的岩石研磨性测井评价 226

主要参考文献 229

附录 软件界面图 242

索引 245

第1章 绪 论

1.1 工程测井研究背景

测井对油气工业的核心价值在于为油气工业上游领域提供了认识和研究地层的重要资料。传统裸眼井测井,从通过井下仪器获得电阻率、声波和自然伽马等直接的井周岩石物理信息,到利用各种解释方法、解释技术获得流体分布、岩性特征、孔、渗、饱等间接性地层资料,受国际测井技术发展的影响与制约,测井技术的研究体系、技术体系都是紧紧围绕“提供储层信息”这一中心任务而展开。长期以来,测井解释方法、解释技术研究的主要关注点都停留在储层(尤其是目的层)评价上,而对占整个钻井剖面 90% 以上的非目的层的资料(尤其是泥页岩地层测井资料)的处理与解释几乎空白。裸眼井测井资料长期只应用于储层评价的状况,不仅被动地造成了测井资料的大量浪费,而且也使测井自身的地位和作用在工业界受到极大的影响。随着致密油气、页岩油气和煤层气等非常规油气资源,以及缝洞碳酸盐岩等复杂油气资源的勘探开发,油气的勘探与开发、地质与工程的界限逐渐模糊,并逐渐成为一个有机的整体,测井作为关键的桥梁和工具,也迫使其必须拓展研究领域。

我国油气资源开发必将逐渐转向深层、复杂地层和非常规地层,油气开发的难度也必将越来越大,安全风险越来越高。在准确评价油气储层的同时,能否准确认识地层的各种工程地质特性,以地质评价为先导,地质-工程一体化,对安全、经济、快速开发油气资源至关重要。测井技术的特点决定了其在勘探开发、地质-工程一体化进程中的责任和不可替代的核心地位与桥梁作用。油气工业对测井技术的定位和测井自身的发展需求,都决定了必须充分挖掘、利用测井资料所蕴含的工程地质信息为安全、高效开发油气资源服务。但将裸眼井测井技术与油气工程活动相结合,为油气工程技术,尤其为钻井、完井、压裂技术建立服务,首先必须突破传统储层评价测井(或油气勘探测井)已形成的固有思维,突破储层评价、含油气性评价,以及孔、渗、饱等研究过程中形成的固有框架,系统分析研究以下内容:

(1) 石油与天然气工程技术的各个环节(钻井完井工程、采油气工程和油气藏工程)需要什么信息或参数?

(2) 测井能为石油与天然气工程技术建立提供什么信息和参数? 测井在提供这些信息和参数中存在什么问题?

(3) 如何从测井响应中提取这些参数(提取方法、提取模型)?

勘探测井或储层评价测井与油气藏工程面向的地层对象一致,所提供的关于油气藏的孔隙度、渗透率、含油气饱和度和地层厚度等各种信息,实际上都已在油气藏工程研究中获得了广泛应用,成为了储量评价和编制油气藏开发方案的重要依据。为此,

本书面向钻完井和压裂工程领域。作者所在研究团队于 1993 年开始逐步组织并系统开展上述研究工作, 历经 20 余年的全面系统研究, 终于有所突破, 逐步形成和建立了系统完善的油气工程测井理论、方法及应用技术体系, 并在四川、塔里木、吐哈、延长、渤海等油气田的钻井完井及压裂中进行了广泛应用。

1.2 工程测井的研究内容

自 1927 年 Schlumberger 兄弟创立测井技术以来, 经过近 90 年的发展, 测井已形成了其博大精深的学科体系和固有的学科内涵。那就是, 长期以来, 测井一直与地质学相结合, 在地质学的基础上及地质学的框架体系的指导下, 形成和建立了一套完整、系统的储层识别、流体识别及定量化评价的理论、方法和技术体系, 但这些理论、方法和技术体系都以储层识别与定量化描述为目标。

与传统储层评价测井相比较, 工程测井的研究定位为:

- (1) 以全井剖面地层为研究对象。
- (2) 服务石油与天然气工程活动的各个环节, 尤其是钻井完井。
- (3) 以确保安全、高效开发油气资源为目标。

工程测井与传统储层评价测井的目标定位不同, 决定其研究内容和面临的基础问题、重点问题也就必然不同。

剖析钻井完井工程、采油气工程和油气藏工程的主要环节: 综观油气藏开发方案 → 钻井(钻井方式选择、钻井井眼轨迹优化、井身结构优化、钻井液密度确定及体系优化、钻头选型和钻井/随钻地质导向钻井等) → 固井(固井水泥浆、固井设计和固井质量评价等) → 完井(裸眼完井、射孔完井、分段完井和防砂完井等完井方式的优选, 以及完井工程技术建立与实施) → 复杂地层的压裂优化 → 采油气 → 油气井(藏)动态监测与调整的全过程, 在油气藏开发方案编制、油气井(藏)动态监测与调整这些与储层评价密切相关的领域, 测井资料正在发挥重要作用, 钻井、完井和复杂地层的压裂优化等工程领域将是当前和未来工程测井发展的重要方向和主攻领域。与油气藏工程、采油气工程只关注油气层不同, 钻完井工程以全井地层为对象, 而测井资料则是目前石油天然气工业中种类最全、精度最高和连续性最好的研究钻井剖面地层的资料。因此, 在钻井完井工程的各个环节, 测井都必将有着无穷的魅力。从钻井方式选择开始, 测井就必将扮演重要的角色:

(1) 地层孔隙流体压力剖面是安全钻井所需的重要基础资料, 是确定安全钻井液密度和制定井控措施的重要依据。对高压、高产、高含硫化氢天然气地层的安全钻井尤为重要。高含硫化氢天然气对钻井管柱、金属材料具有强烈的腐蚀性, 对人的生命安全具有很大的威胁, 因此, 能否准确预测该类气层及其地层压力对安全钻井至关重要。从常规砂泥岩地层剖面孔隙压力预测的已有方法看, 测井资料也必将是当前乃至今后复杂地层剖面孔隙压力预测的重要基础资料。

(2) 测井资料是开展井眼稳定性研究, 获取钻井剖面地层三压力(坍塌压力、破裂压力和孔隙流体压力)参数, 乃至裂缝性地层剖面四压力(坍塌压力、破裂压力、孔隙流

体压力和承压能力)参数的重要基础资料。地层坍塌压力决定了钻井液密度可使用的下限及可采用的钻井方式。对坍塌压力当量钻井液密度低于0的地层,理论上可以采用气体钻井;但若剖面上发育有水层且水层渗透性较好,则在当前气体钻井条件下不能采用气体钻井。坍塌压力剖面的建立、水层的识别都必须依赖测井资料,判断能否产出水、产水量预测除与地层渗透性有关外,还与地层的流体压力、厚度有关,而这些信息也都来源于测井资料。水层识别对测井驾轻就熟,只是传统储层评价测井的关注点在目的层而已。

地层破裂压力决定了钻井液密度可使用的上限。裸眼完井的地层,破裂压力、坍塌压力参数实际也是压裂改造过程中地面泵压设计、确定裸眼投产临界生产压差的重要依据。

裂缝性地层的承压能力决定了裂缝性地层钻井、固井等工程作业过程中,保证井周地层裂缝不被开启的井筒最高液柱压力,与井周地层裂缝的发育、分布、产状及地层岩石的强度、应力状态等密切相关。

在地层坍塌压力、破裂压力和承压能力的预测过程中,井剖面地层的岩性、结构、岩石的强度以及应力状态等都是必须的基础信息和基础参数,但也是目前无法利用相关技术直接测量的参数,因此,能否通过测井所提供的井周岩石物理信息提取得到这些参数,就成为了工程测井的重要基础性工作。

(3) 坍塌压力、破裂压力、孔隙压力及地层的岩性、流体性质同时也是井身结构设计的重要基础资料、控制固井质量的关键和水泥浆设计与选择的基础。

(4) 地层的岩性、矿物组成以及岩石的硬度、塑性系数、弹性系数和可钻性等岩石强度特性及岩石破碎力学性质是钻头选型的基础和依据。不同的岩石类型、硬度和塑性,对钻头齿型及材料的要求也不同;不同组分(尤其石英含量),对钻头的磨损能力也不同。井下取心通过室内实验可以获得不同地层的上述参数,但取心数量有限,不可能建立整个钻井地层的上述参数剖面。

(5) 固井质量评价是工程测井的传统领域,声波声幅类测井资料在其中发挥了主导作用。但目前特殊水泥浆固井质量评价(如韧性水泥石、漂珠水泥石等),以及深井小间隙/窄间隙等的固井质量测井评价则面临着巨大的挑战。

(6) 基于测井岩石强度及地应力预测基础上的裸眼井临界生产压差剖面、渗透性、裂缝及油气水层分布预测结果是完井方式选择与优化、水力压裂缝高及缝宽优化与控制等的重要基础,尤其是复杂结构井。

(7) 钻井剖面地层岩性、组分、理化特性及地质力学特点决定了钻井液体系的选择与优化方向。油气钻井的大量时间都耗费在泥页岩地层,80%以上的井下复杂发生在该类地层。泥页岩地层钻井过程中最大的问题就是泥页岩地层与水基钻井液接触后,泥页岩水化作用导致岩石强度降低、稳定性减弱。钻井液对泥页岩地层的水化作用在不同探测深度的电阻率曲线、时间推移声波测井曲线上都能得到反映,同时地球化学测井、伽马能谱测井和电阻率测井等的综合应用还能够提供黏土矿物类型及含量、阳离子交换容量、地层水矿化度等地层信息,为抑制性防塌钻井液体系的优化提供基础资料。上述是测井传统研究领域的自然延伸。

综上,测井在石油天然气工程技术各个环节中的潜在应用还有很多。与传统储层评价测井相比,测井的上述研究领域具有以下特点:

(1) 在地层岩性上,泥页岩地层必将是工程测井研究的重点之一。

(2) 在研究内容上,以钻井剖面地层岩性、矿物组成及流体性质研究为基础,钻井剖面地层的岩石强度参数、孔隙流体压力和地应力必将是工程测井的重要研究内容。

(3) 在研究的基础问题上,对岩石物理,尤其是岩石的声学性质、岩石力学性质及相互关系,以及在钻井过程中的动态变化的研究共同构成了工程测井的重要基础。

此外,随着缝洞碳酸盐岩油气藏、页岩油气藏和致密砂岩油气藏等复杂油气资源、非常规油气资源的勘探开发,基于地质力学参数场和油藏参数场“两场合一”的复杂油气资源开发模式必将逐渐成为主流和必然选择。在对油气藏清晰的地质认识指导下,开展各种工程技术活动也必将成为未来复杂油气资源高效、低成本、安全开发技术发展的必然趋势,而其中,传统储层评价测井与油气工程测井的重要作用也必将更加凸显。例如,以随钻测井(logging while drilling, LWD)为基础,随钻地质导向钻井和随钻工程测井导向钻井相结合必将成为复杂油气资源、非常规油气资源安全、高效开发的重要技术支撑。

综上,总结和形成了油气工程测井的重点研究领域:

(1) 复杂地层岩石强度、地应力、地层孔隙流体压力等地质力学特性及参数的测井岩石物理响应研究。重点研究复杂、非均质、层状岩石/介质的测井岩石物理响应(尤其声学响应)、力学性质及相互关系和在钻完井过程中的动态变化。

(2) 复杂地层/复杂地质环境地层的区域地质力学参数预测方法研究。井-震-工程多学科、多信息融合,重点研究致密砂岩、缝洞碳酸盐岩、层理发育页岩、砾岩、火成岩等非均质、复杂地层或复杂地质环境地层的岩石强度、孔隙流体压力、地应力等地质力学参数的空间分布预测方法,为地质-工程一体化钻前优化设计奠定基础。

(3) 工程测井软硬件技术研发及应用研究。重点开展工程测井应用软件以及特殊仪器技术的开发,实现工程测井技术的有形化,推动工程测井在油气工程领域的应用,为实现复杂油气资源的地质-工程一体化安全有效开发提供必要的支撑技术。

上述重点研究领域的前两点是基础,而第一点又是基础中的基础。油气工程测井从字面上与油气勘探测井仅有两字之差,而且现阶段两者还有着基本相同的仪器技术基础,但与勘探测井相比,工程测井有着其独有的、差异很大的学科内涵。它根植于传统储层评价之上,又不同于传统测井,以解决油气钻井、完井、采油气等工程活动过程中的关键技术难题、瓶颈为目标导向,在岩石力学、地质学和石油工程的基本理论、方法指导下,开展地层的信息挖掘、解释理论、方法及技术研究,是一个全新的多学科交叉的研究领域,以高效、安全、快速开发油气资源为目标。将裸眼井测井与岩石力学相结合,获取区域地质力学特征,解决石油工程技术问题,是工程测井最显著的特点。对岩石物理、岩石力学性质及其在钻井过程中的变化研究共同构成了油气工程测井的重要基础。油气工程测井是前所未有的多学科交叉领域,正因为如此,地应力及岩石强度、井眼稳定性和地质导向钻井这些研究领域在钻完井工程领域也是非常重要的研究领域,备受关注。各个学科在这个领域都表现出了其特有的研究优势,测井的研究优

势尤其突出。但实际情况却并非如此,这与国内相关高校长期以来未拓展测井内涵,知识结构中缺乏对石油天然气工程较为系统的认识 and 了解,人才培养未及时与国内日益快速发展的非常规、复杂油气勘探开发对人才知识结构、能力结构的需求相适应有很大的关系。

测井是什么?仁者见仁,智者见智。测井作为一种地下岩石物理性质信息的直接来源,为地质家和工程技术人员提供了大量的认识和分析地层的信息。不论石油天然气工业上游领域的哪个环节,其最终都是为了找到更多的油气资源,更加高效安全地开发油气资源,而这些目标的实现都是建立在对地下地层的充分认识基础上的。坦白地说,在未来的石油天然气上游工业,对地层的了解程度必将成为油气开发开采水平的核心竞争力。而在目前的石油天然气开发开采的工程技术中,测井是最重要、最直接、分辨率最高的一种资料,无疑对石油天然气工业将具有十分重要的意义和作用。

随着中国油气工业从以勘探为主转向为以油气开发为主,从简单地层到复杂地层、从浅层到深层,工程测井、生产测井的重要作用和作用将日渐凸显。为适应油气工业的发展,石油高校测井专业技术人才培养的知识结构必须重新梳理,地质学、岩石物理学、岩石力学、油气渗流力学及井筒多相流体力学应是未来测井专业技术人才知识结构的重要组成部分。

第2章 复杂地层岩石强度与岩石物理特性

表征地层岩石强度的参数很多,主要有抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、内聚力、内摩擦角、弹性模量以及脆性、硬度和断裂韧性等。这些参数是钻井、完井和压裂等油气井诸多工程环节必需的重要基础参数,因此,对井剖面地层岩石各种强度参数进行科学合理的连续预测是工程测井的重要基础性工作,其核心和关键则是建立岩石的强度参数与井剖面可测量物理参数间的关系。

在油气工程领域,获取岩石强度参数的方法主要有两类:取心室内实测和测井预测。岩石力学实验是确定岩石强度参数最基本、最直接的方法,但受取心成本、取心时效、取心深度和取心地层等的影响和制约,岩心实验数据有限且离散,不能反映钻井剖面地层岩石强度的特征及变化趋势,尤其是大量的非目的层往往无法取心或无高质量的岩心可用。相对于取心室内实测的不足,测井预测岩石强度参数的方法就显得经济高效,并且可以得到全井地层岩石强度的连续数据。测井资料作为一种原位测试资料,能够更好地反映出地下高温高压等环境以及岩石自身复杂结构对其强度的影响,但利用测井资料计算岩石的强度参数必须具备相应的测井计算模型。长期以来,国内外学者围绕岩石的强度参数与其他物性参数的关系开展了大量研究,并建立了大量模型。但这些经验模型一般都是以特定地区、特定地质年代的特定岩石类型为基础而得到的,若要将其应用于不同地区的不同地层时,就必须利用室内和矿场资料进行严格评价。同时,受地层岩石多样性及结构复杂性的影响,这些模型也已远远不能满足油气工业发展的需要。无论是全新模型的建立,还是对已有经验模型进行评价或以已有经验模型为基础进行模型修正等,都必须依赖于科学的实验方法,为此,本章从岩石物理与岩石力学特性研究的基础实验方法着手,重点围绕岩石抗压强度、抗张强度、抗剪强度(内聚力、内摩擦角)、弹性模量、泊松比和岩石脆性等参数的预测模型开展系统研究。

2.1 岩石的强度参数及实验室获取方法

岩石的抗压强度、抗张强度和抗剪强度等各种强度参数,弹性模量、泊松比等弹性参数及其实验室测量方法在岩石力学的相关书籍中,均有详细阐述,本节仅作简要概述。

2.1.1 岩石的抗压强度

岩石的抗压强度指岩石能承受的最大轴向压应力。根据实验过程中是否给岩石试件施加围压,岩石抗压强度又分为单轴抗压强度和三轴抗压强度。

如图 2.1(a)所示,将岩石试件置于压力机承压板之间,轴向加荷,岩石试件被破坏