

COILED TUBING ENGINEERING TECHNOLOGY
IN HORIZONTAL WELLS

连续管水平井工程技术

袁发勇 马卫国 等 编著



科学出版社

连续管水平井工程技术

袁发勇 马卫国 等 编著

科学出版社

北 京

尊重版权, 请用正版

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

内 容 简 介

本书集连续管及其工程应用基础数据, 连续管工程技术基础理论研究, 连续管工程应用和连续管工程管理于一体, 是在当前国内外连续管工程最新技术的基础上, 对作者长期从事连续管技术研究和工程实践最新成果的陈述。主要内容包括连续管制造、连续管基本特性、连续管设备等基础性数据; 连续管疲劳与寿命、连续管水平井工程力学、连续管作业系统循环压降和流体流动特性等基础理论研究; 连续管水平井修井、压裂、射孔、钻磨、测井等工程应用研究; 连续管水平井工程技术质量、安全、环保, 标准化管理。

本书可供石油工程技术和石油机械领域的大专院校、科研院所、工程研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

连续管水平井工程技术/袁发勇等编著. —北京: 科学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-03-055697-4

I. ①连… II. ①袁… III. ①水平井—工程技术 IV. ①TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 293345 号

责任编辑: 杨光华 何 念/责任校对: 董艳辉

责任印制: 彭 超/封面设计: 苏 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>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16

2018 年 6 月第 一 版 印张: 21 3/4 彩插: 2

2018 年 6 月第一次印刷 字数: 522 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《连续管水平井工程技术》

编 委 会

主 编：袁发勇

副主编：马卫国 张国锋

编 委：赵 勇 周志宏 高云伟 王 汤 管 锋

王伟佳 曲宝龙 何 龙 徐帮才 江 强

孙文常 褚晓丹 曹 颖 熊江勇 程建明

张 寅 胡 光 陈智源 付莹莹 杨 洁

序

石油和天然气是关系国家能源安全和国民经济发展的主要能源,是我国国民经济快速发展的重要资源保障。“十二五”期间,我国油气资源勘探开发保持良好势头,探明储量、产量持续增长;随着我国涪陵、长宁-威远等国家级页岩气示范区的大规模商业开发,页岩气、致密油等非常规油气资源勘探开发取得重大进展,已成为我国油气资源开发新的增长点。裸露油气藏面积大、综合开采成本低、占地面积少的水平井开发成为当今国内外非常规油气资源开发的必然趋势。然而,水平井复杂的井身结构和井眼轨迹,给石油工程技术带来新的挑战。如何最大程度提高采收率、减少储层伤害、高效低成本和最大限度地实现绿色开采也正在驱动着石油工程技术的创新发展。连续管工程技术在水平井中的应用显现出充分的优势,成为解决水平井工程难题的关键技术之一。连续管水平井工程技术已经从最初的气举、排液、冲砂、解堵等,扩展到辅助压裂、射孔、测井、钻磨、修井、钻井等工程领域,伴随着复杂的勘探开发进程该技术在不断发展。我国连续管工程技术起步较晚,整体技术与国外先进水平还存在着一定的差距,在连续管材料、作业设备、井下工具、基础理论研究、工程应用等方面存在诸多亟待解决的问题;在规范标准、工程管理等成套技术体系的建立方面还需要不断完善;工程技术水平还需要不断提高。

中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司和长江大学在涪陵页岩气水平井数百井次连续管工程应用和技术攻关中,攻克了诸多的科学问题和工程难题。目前,连续管水平井工程技术已经在页岩气长距离水平井钻磨等复杂的井下工程作业中占据主导地位。大胆的创新研究与实践,他们在管材、设备、工程技术基础理论、工程应用方面取得了丰硕的成果:①通过对钢、钛合金和复合材料等不同材质连续管的制造工艺、力学性能、表面摩擦性能、弯曲性能的研究,增强了不同的工程适应性;②通过对连续管弯曲状态下的截面剪力、弯矩、内压等载荷作用的分析,揭示了连续管变形形态与机理,了解了连续管焊接热影响区、机械缺陷等因素对疲劳寿命有显著的影响;③通过对连续管井下管柱载荷分析,受力和屈曲计算模型,连续管轴向力衰减规律和影响因素的研究,连续管作业系统流体流动规律及系统压降的分析等,可以较准确地预测连续管的延伸和作业能力,这些

研究成果为连续管水平井工程奠定了理论基础;④通过对连续管技术在水平井修井、压裂、射孔、钻磨、测井等工程方面的应用研究和工程实例分析,展现了最新的工程成果;⑤通过对质量、安全、环保,工程标准化管理研究,建立了成套的连续管工程技术和质量体系。此外,连续管工程技术在页岩气水平井中应用的长足进步,充分体现了质量持续改进的有效性。

该书从连续管及其设备工具基础数据、基础理论、工程应用和工程管理等全面系统地研究连续管水平井工程技术,取得的一系列科学成果和工程应用成果,为推动我国连续管工程技术的发展和工程水平的提升做出贡献。该书的出版对于推动我国连续管工程技术的快速发展具有参考和借鉴性,也将成为我国石油工程和机械领域中大专院校、科研院所和工程应用单位研究人员的良师益友。

我作为一名长期从事石油工程研究、管理的同行,审阅这本书后,颇受感动,也受益颇深,愿意向我国从事石油工程,尤其是致力于连续管工程技术研究的同行、学者、工程人员推荐本书,期待着这本书尽快出版。



2017年10月19日

前 言

常规钻井、修井、生产、储层改造等工程作业所用钻杆、套管、油管、抽油杆等杆管柱，通常都是由 9~10 m 长的螺纹杆管连接成数百米到数千米，再进入井筒作业。连续管突破传统的杆管柱概念，在制造过程中成型为连续状态的管体，连续管管径为 19~100 mm，单根长度可以达到数千米，卷绕在一个滚筒上。自 1962 年美国加利福尼亚石油公司和波纹工具公司首次开发了一套功能完整的连续管作业机，操纵连续管应用于油气井筒冲洗砂桥开始，连续管工程技术在油气井工程服务中的应用发展至今。目前，连续管工程技术已经在我国页岩气长距离水平井工程应用中占据了主导地位。

虽然连续管工程技术在油气井筒作业中，特别是水平井井筒作业中更加具有优势和诱惑力，但是也面临着更大的挑战。我国连续管工程技术起步较晚，工程实践中暴露出连续管设备运行稳定性不好、连续管故障较多、工具配套不完整、质量不稳定，关键工具甚至依赖进口，工程设计规范、标准不完善，工程管理规范性不好，作业效率偏低，成本偏高等问题，总体表现为技术成熟度不高，整体技术与国外先进的连续管工程技术还存在着一定的差距。因此，针对连续管工程技术在大位移水平井的应用存在的问题，重点着手于连续管管材制造、设备使用、工程基础理论、连续管工程应用、作业规范、标准、工程管理等开展研究攻关，建立成套的连续管工程技术体系，推动我国连续管工程技术的发展有着十分重要的意义。

本书是我们长期从事连续管工程技术研究和工程实践最新成果的梳理与展示。全书共分为 11 章，集连续管水平井工程技术基础数据、基础理论、工程应用、工程管理等于一体。

第 1~2 章为基础数据部分。第 1 章连续管作业设备，详细介绍国内目前普遍使用的连续管作业设备、井控设备、作业数据管理系统、连续管井下工具等的结构、原理和适应性研究成果；以及当前国外复合式连续管钻修设备的结构型式和工程应用。第 2 章连续管的制造与性能，重点介绍普遍使用的钢制连续管焊接、热处理制造工艺技术，分析钢制连续管斜接焊缝热影响区的形成原因，分析当前最先进的钛合金连续管和复合材料连续管的制造与性能，为连续管的工程应用提供参考。

第3~5章为本书的基础理论研究部分。第3章连续管疲劳与寿命,研究连续管的直径变化和截面椭圆化等塑性变形机理,结合连续管疲劳损伤理论,建立有限元分析模型,重点分析连续管斜接焊接接头的热影响区对连续管疲劳寿命的影响,缺陷对连续管寿命的影响,结合工程实际提出了延长连续管寿命的措施。第4章连续管水平井管柱力学基础,重点分析连续管水平井作业的载荷,建立连续管管柱力学模型和受力计算,结合实验室研究分析连续管的屈曲行为和锁死条件;结合工程施工数据进行连续管水平井工程管柱力学实例计算,分析连续管管柱轴向力衰减规律、连续管延伸能力等关键性能,提出增加连续管作业能力的措施;介绍连续管常用工程计算方法。第5章连续管作业系统流体流动分析,详细讨论连续管作业系统流体流动理论模型,分析多层盘管、偏心环空、颗粒以及减阻剂对连续管流动摩阻的影响;基于相似理论建立的实验台架的实验研究结果,建立连续管作业系统循环压降计算模型;应用有限元方法分析了连续管盘管内的流体流动、井内螺旋屈曲对管内流和环空流的影响,建立水平井筒最低携岩流量计算模型。

第6~10章为连续管水平井工程应用部分。第6章连续管水平井修井,重点介绍连续管水平井冲砂洗井、连续管水平井落物打捞、连续管水平井管柱切割三大工艺及其关键工具的研究和应用成果,分析各项工艺的工程难点、施工设计等,介绍相关工艺的典型案例。第7章连续管水平井酸化压裂,介绍连续管水平井酸化、连续管水平井喷砂射孔压裂、连续管辅助开关滑套分段压裂三种工艺及其关键工具;应用有限元方法研究连续管水力喷射喷嘴的结构、喷距等参数对喷射性能的影响,研究工艺施工参数设计,结合典型案例提出各工艺的実施和防治措施。第8章连续管水平井射孔,重点介绍连续管传输压力起爆射孔、连续管电缆传输射孔两种射孔工艺,分析两种工艺的各种起爆装置和起爆方式,两种工艺的作業程序与施工设计,以及关键控制措施。第9章连续管水平井钻磨桥塞,重点对复合桥塞的可钻性进行实验研究,对桥塞、磨鞋的材料、结构型式、磨铣性能等进行综合评价,对钻磨液体系优选及性能维护和改进等进行了实验和应用研究;对连续管水平井钻磨桥塞管柱及井下工具组合、施工工艺进行设计和实践探索,介绍连续管钻磨桥塞典型工程应用案例。第10章连续管水平井测井,重点介绍连续管水平井输送工艺、连续管测井信号传输、连续管穿缆技术,分析连续管常用测井工具、关键工艺技术,结合典型测井技术,介绍带电缆连续管井下电视、带光纤连续管产气剖面测试测井技术。

第11章为连续管作业工程管理。总结长期的连续管工程实践和管理的创新经验,建立一套行之有效的连续管作业工程组织管理模式、工程质量管理、工程安全与环保管理、标准规范等技术体系,结合连续管水平井工程典案例进行分析,表明有效的工程管理能够持续改进连续管工程技术,促进工程技术的进步和发展。

本书编写由中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司和长江大学共同完成,参与编写、统稿的人员有中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司袁发勇、张国锋、赵勇、高云伟、王汤、王伟佳、何龙、徐帮才、江强、孙文常、褚晓丹、曹颖、熊江

勇、程建明、张寅、胡光、陈智源、付莹莹、杨洁等,长江大学马卫国、周志宏、管锋、曲宝龙等。

本书编写得到中石化石油工程技术有限公司大力支持,得到中石化股份有限公司江汉油田分公司、中石化石油机械股份有限公司、中国石油集团钻井工程研究院江汉机械研究所、山东烟台杰瑞公司等单位大力协助,饱含着中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司工程技术人员和长江大学的老师、研究生的心血和辛勤汗水,在此对他们的支持、关心和帮助给予诚挚的感谢。

由于参与编写人员的基础理论研究和工程实践存有局限性,书中难免存在疏漏之处,衷心希望读者批评指正。

作 者

2017年7月30日于武汉

目 录

序

前言

第 1 章 连续管作业设备	1
1.1 连续管设备结构与工作原理	2
1.1.1 注入头	2
1.1.2 鹅颈导向器	6
1.1.3 滚筒	7
1.1.4 控制室	9
1.1.5 动力系统	10
1.2 连续管井控设备	11
1.2.1 防喷盒	11
1.2.2 防喷器	12
1.3 连续管作业数据管理系统	12
1.3.1 数据采集系统	12
1.3.2 模拟分析系统	13
1.4 连续管钻修设备	14
1.4.1 复合式连续管钻修设备	14
1.4.2 旋转连续管钻机	16
1.4.3 连续管钻机的发展趋势	17
1.5 连续管井下工具	17
1.5.1 连接器	17
1.5.2 单流阀	18
1.5.3 丢手工具	18
1.5.4 循环阀	18
参考文献	19

第2章 连续管的制造与性能	20
2.1 钢连续管的制造与性能	21
2.1.1 连续管钢	21
2.1.2 钢焊接相变与热处理	23
2.1.3 钢连续管的制造工艺	26
2.1.4 连续管的质量与新进展	31
2.1.5 钢连续管的性能与参数	37
2.2 钛合金连续管的制造与性能	39
2.2.1 钛合金连续管材料的力学性能	39
2.2.2 钛合金的制造性能	40
2.2.3 钛合金连续管的抗腐蚀性能	41
2.2.4 钛合金连续管的疲劳性能	42
2.2.5 钛合金连续管的水平井延伸性能	42
2.3 复合材料连续管的制造与性能	42
2.3.1 复合材料连续管的材料	43
2.3.2 复合材料连续管的制造	44
2.3.3 复合材料连续管的强度	45
2.3.4 复合材料连续管的疲劳	45
2.3.5 复合材料连续管水平井的延伸性能	46
2.4 适应性分析	46
参考文献	47
第3章 连续管疲劳与寿命	48
3.1 连续管寿命主要影响因素分析	49
3.1.1 连续管类型的影响	49
3.1.2 滚筒的影响	49
3.1.3 鹅颈导向器的影响	50
3.2 连续管作业及其载荷	51
3.2.1 连续管载荷工况	51
3.2.2 连续管截面剪力与弯矩分析	52
3.2.3 连续管内流体压力	53
3.2.4 连续管的应力	53
3.2.5 连续管截面危险点	53

3.3 连续管应力应变分析	54
3.3.1 连续管材料的应力应变模型	54
3.3.2 二维塑性流动分析	55
3.3.3 连续管变形及原因分析	56
3.3.4 连续管卷绕拉直的有限元应力应变分析	65
3.4 连续管疲劳寿命的预测理论与试验	67
3.4.1 连续管寿命的预测理论	68
3.4.2 连续管疲劳寿命试验	70
3.4.3 连续管缺陷对疲劳寿命的影响	72
3.5 连续管完整性在线检测	77
3.5.1 连续管漏磁检测原理	77
3.5.2 连续管电磁涡流检测原理	77
3.5.3 连续管完整性在线检测系统	78
3.6 连续管寿命预测与延长寿命的措施	80
3.6.1 连续管剩余寿命预测	80
3.6.2 如何延长连续管使用寿命	83
参考文献	84
第4章 连续管水平井管柱力学基础	87
4.1 连续管载荷分析与轴向力计算	88
4.1.1 连续管载荷分析	88
4.1.2 连续管力学模型	90
4.1.3 连续管轴向力计算方法	93
4.1.4 连续管水平井钻塞作业受力计算	97
4.2 连续管屈曲与锁死	101
4.2.1 连续管屈曲分析	102
4.2.2 连续管的锁死判别	104
4.2.3 连续管在水平井筒中的屈曲行为试验	107
4.3 连续管强度计算	112
4.3.1 连续管工作应力计算	112
4.3.2 连续管抗内压强度	114
4.3.3 连续管抗挤毁强度	114
4.3.4 复杂应力作用下的连续管极限强度	115

4.4 连续管常用工程计算	116
4.4.1 伸长量计算	117
4.4.2 卡点计算	118
4.4.3 底部最大输出压力计算	118
4.4.4 最大下入深度计算	119
4.5 提高连续管作业能力措施	120
4.5.1 增加连续管最大可钻深度措施	120
4.5.2 避免或减小螺旋屈曲措施	120
4.5.3 连续管锁死判别准则	120
参考文献	120
第5章 连续管作业系统流体流动分析	123
5.1 管中流体流动理论	124
5.1.1 直管流动	124
5.1.2 弯管流动	129
5.2 连续管作业系统循环压降计算	131
5.2.1 地面管汇压力降计算	131
5.2.2 连续管内流摩阻计算	131
5.2.3 井下工具组合压力降计算	139
5.2.4 环空段摩阻压降计算	140
5.2.5 基于试验的循环压降计算	144
5.3 连续管内流体流动数值分析	154
5.3.1 盘管内流体流动数值分析	154
5.3.2 螺旋管内流体流动数值分析	156
5.4 井筒内环空流体流动分析	158
5.4.1 颗粒沉降速度计算	158
5.4.2 最低携岩流量计算	162
5.5 连续管作业系统水力参数计算	163
5.5.1 作业系统水力参数计算模型	163
5.5.2 实例计算	164
参考文献	165

第 6 章 连续管水平井修井	168
6.1 连续管水平井冲砂洗井	169
6.1.1 水平井冲砂洗井砂粒运移状态	169
6.1.2 连续管冲砂洗井液	171
6.1.3 连续管冲砂工具	172
6.1.4 连续管冲砂工艺	175
6.1.5 工程应用	178
6.2 连续管水平井落物打捞	180
6.2.1 套管水平井常见落鱼	180
6.2.2 连续管水平井打捞工具	183
6.2.3 连续管水平井打捞	190
6.2.4 工程应用	195
6.3 连续管水平井管柱切割	199
6.3.1 连续管机械切割工具	199
6.3.2 连续管水平井机械切割工艺	200
参考文献	202
第 7 章 连续管水平井酸化压裂	203
7.1 连续管水平井酸化	204
7.1.1 拖动酸化	204
7.1.2 定点喷射酸化	207
7.1.3 酸液腐蚀与防治	208
7.2 连续管水平井喷砂射孔压裂	211
7.2.1 喷砂射孔管柱	211
7.2.2 喷砂射孔技术	214
7.2.3 作业程序与要求	218
7.2.4 冲蚀与防治	219
7.3 连续管辅助开关滑套分段压裂	221
7.3.1 固井滑套管柱与连续管开关滑套工具	222
7.3.2 连续管开关滑套压裂工艺	224
7.3.3 压裂超压与预防	226
7.3.4 工程应用	227
参考文献	230

第 8 章 连续管水平井射孔	231
8.1 连续管传输压力起爆射孔	232
8.1.1 起爆装置	232
8.1.2 压力起爆射孔工艺设计与操作	234
8.1.3 关键技术	237
8.2 连续管电缆传输射孔	239
8.2.1 连续管电缆传输射孔工具	239
8.2.2 电缆传输射孔工艺设计与操作	242
8.2.3 关键技术	243
参考文献	245
第 9 章 连续管水平井钻磨桥塞	246
9.1 桥塞	247
9.1.1 可钻式桥塞结构	247
9.1.2 复合材料	248
9.2 钻磨工具	249
9.2.1 磨鞋	249
9.2.2 螺杆钻具	253
9.2.3 水力振荡器	255
9.3 钻磨液	257
9.3.1 减阻水与胶液	257
9.3.2 金属减摩剂	260
9.4 钻磨桥塞工艺	263
9.4.1 钻磨管柱结构	263
9.4.2 作业参数模拟	264
9.4.3 钻磨桥塞地面设备及流程	264
9.4.4 钻磨桥塞施工参数设计	266
9.4.5 天然气水合物预防	268
9.5 工程应用	270
参考文献	275

第 10 章 连续管水平井测井	276
10.1 连续管水平井输送工艺	277
10.1.1 井筒清理	277
10.1.2 仪器输送	278
10.1.3 深度测量	280
10.2 连续管输送测井的信号传输	282
10.2.1 存储式信号传输	282
10.2.2 电信号传输	283
10.2.3 光信号传输	286
10.3 连续管穿缆技术	288
10.3.1 连续管泵送穿缆方法	288
10.3.2 连续管穿缆装置	289
10.3.3 关键工艺与措施	292
10.4 典型测井技术	294
10.4.1 带电缆连续管井下电视技术	294
10.4.2 带光缆连续管产气剖面测试技术	297
参考文献	298
第 11 章 连续管作业工程管理	299
11.1 工程组织管理模式	300
11.1.1 组织机构	300
11.1.2 管理职责	300
11.2 工程质量管理	303
11.2.1 工程质量管理措施	303
11.2.2 工程环节控制	305
11.2.3 资源管理	308
11.2.4 培训	311
11.2.5 持续改进	313
11.3 工程安全与环保管理	315
11.3.1 作业风险识别	315
11.3.2 安全措施	317

11.3.3	环保措施	322
11.3.4	应急处理预案	324
11.4	标准规范的建立	325
11.4.1	连续管工程技术标准规范的制定	325
11.4.2	连续管管理标准规范的制定	326
11.5	连续管工程管理经典案例分析	327
11.5.1	作业过程中发生的连续管开裂	327
11.5.2	连续管滑溜下落	329
	参考文献	330