

河流相储层油田

开发工程灾害机理与防治

束青林 徐守余 张本华 毛卫荣 付继彤 著



石油工业出版社

河流相储层油田 开发工程灾害机理与防治

束青林 徐守余 张本华 毛卫荣 付继彤 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以河流相储层油田开发产生的灾害地质事件或现象为研究对象,应用计算机技术和手段,对套管损坏、油层出砂等油田开发工程灾害进行了深入、系统论述,建立了油水井套管损坏、油层出砂的灾害体模型,阐述了油田开发工程灾害的社会属性,论述了油水井套管损坏、油层出砂等油田开发工程灾害的形成机制和控制因素。

本书可供油田开发工作者、科研院所及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

河流相储层油田开发工程灾害机理与防治/束青林等著.
北京:石油工业出版社,2006.11

ISBN 7-5021-5798-0

I. 河…

II. 束…

III. 河流相-储集层-油田开发-石油工程-灾害-防治

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 131672 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.25

字数: 332 千字 印数: 1—1000 册

定价: 38.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序 一

环境与灾害日益成为人们关注的问题。进入 21 世纪以来,随着世界油气资源日趋紧张、油气勘探开发程度和强度日益加大,油气田开发工程灾害成为油气勘探开发必须面对和必须解决的问题,加大油气勘探开发力度的同时,加强油气地质环境与灾害研究,确保油气勘探开发高效、安全是石油科技工作者的头等任务。

油田开发工程灾害是指因油气田开发所引发的灾害性现象或事件。油田开发工程灾害学是伴随油田勘探开发形成、发展和演化的,它是地质灾害学的分支学科。油气田开发工程灾害是地质灾害中的一种特殊类型,是当今国际地质灾害学的前沿难题。

因油田开发的利润较高,且一般油田开发灾害的危害程度相对较低,同时因油气田深埋在地下,研究和认识油田开发灾害的难度很大,因此,长期以来针对这方面研究很少,投资少、成果也很少。从国内外近 10 年文献来看,目前国内外对地表地质灾害十分重视,广泛投资进行各种综合研究,但还尚未有人对地下油田开发工程灾害进行深入系统的研究。

《河流相储层油田开发工程灾害机理与防治》一书是作者长期从事油田生产实践和科研实践的结晶,该书以孤岛油田馆陶组河流相储集体为例,从套管损坏、油层出砂及环境矿物等方面对油田开发工程灾害进行了系统论述,阐述了开发工程灾害形成机理和控制因素,并提出了灾害防治措施。

该书系统阐述了河流相储层开发工程灾害的内涵、研究内容及发展趋势,论述了河流相储层开发工程灾害研究的最新理论、技术和方法,阐述了河流相储层开发工程灾害体模型和开发工程灾害的社会属性,阐述了河流相储层油井套管损坏的特征和分布规律,论述了套管损坏的动力学原理,进行了套管承载能力和强度的研究,建立了套管损坏的力学模型。研究了河流相疏松砂岩出砂机理,并对油层出砂进行了物理模拟,论述了防砂原理和方法技术。阐述了环境矿物学研究内容及其在储层粘土矿物改性中的应用。

本书基础资料扎实,内容丰富,书中介绍的理论、方法和技术先进,深化和发展了灾害地质学研究的理论和方法技术。相信该书的出版将有助于石油科技工作者掌握开发工程灾害学的新理论、新方法、新技术,推动我国油气勘探开发安全发展。

原孤岛采油厂总地质师、教授级高工、全国劳动模范:

毕研鹏

序 二

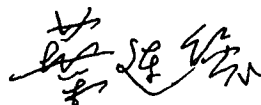
21 世纪是油气资源的世纪, 无论经济发展、政治交往、日常生活无不与油气资源息息相关, 在目前油气资源日趋紧张的背景下, 对油气勘探开发安全提出了更高、更严格的要求。油气地质环境与灾害研究成为摆在石油科技工作者面前的重要课题, 因油气田深埋在地, 研究和认识油田开发灾害的难度很大。

油田开发工程灾害是指油气田在注水开发过程中地下储层、泥质岩、膏盐岩等转化为地质灾体所引起的地质灾害性现象或灾害性事件。地下灾源体特征、形成机制和分布规律主要受灾体地质结构、灾体成因类型、灾体空间分布、灾体非均质性控制。受灾体区域应力场、局部应力场和应力势变化控制, 受油田注水开发历程、开采方式、增产措施、油田化学场、物理场、生物场等各种因素综合控制, 因此, 研究油田开发工程灾害、评价油田开发工程灾害、预测油田开发工程灾害和治理油田开发工程灾害难度很大, 同样也是地质灾害研究的边缘难题和热点。因此, 石油科技工作者身边迫切需要一本系统论述油田开发工程灾害原理和方法的论著, 《河流相储层油田开发工程灾害机理与防治》一书填补了这一空白。

《河流相储层油田开发工程灾害机理与防治》一书资料丰富, 内容充实, 理论和方法技术先进, 是作者长期从事油田勘探开发生产与科研实践的结晶和升华。该书充分吸收和消化了国内外先进的灾害地质学研究的理论以及油田勘探开发技术, 以作者长期从事生产和科研实践的丰富积累及自身扎实的专业理论为基础, 综合应用地质灾害学、灾害动力学、油田开发地质学、环境矿物学、储层地质学、测井地质学、钻井地质学、数学地质、计算机等多学科理论和方法技术, 进行跨学科综合研究。研究油田开发工程灾害类型、特征、分布、形成机制和演化规律, 建立了河流相储层油田开发过程中地下深处地质灾害体模型, 揭示了孤岛油田开发中形成的河流相储层油田地质灾害灾源体的特征、空间分布、非均质性及演化规律, 对不同开发阶段灾源体预测和防治有重要指导作用。

《河流相储层油田开发工程灾害机理与防治》一书的出版, 不仅系统论述了油田开发工程灾害学, 也为今后进一步开展油田地质灾害研究起到了铺路石的作用。相信该书的出版必将能指导油田勘探开发工作, 推动油气勘探开发事业的可持续发展。

中国科学院院士:



前 言

油田开发过程中可能会诱发产生灾害性的地质事件或现象,如油水井套管损坏、油层出砂、断层活化、地表变形等,但因油田开发的利润较高,且因油气田深埋在地下,研究和认识油田开发灾害的难度很大,因此,长期以来针对这方面研究很少,投资少、成果也很少,是当今国际油田地质灾害学的学科前沿难题。但随着科学技术的进步、油气资源的紧缺等诸多原因,迫使我们必须进行油田开发工程灾害研究,从而高效安全地开发油气资源,为我国石油工业可持续发展做出更大贡献。

《河流相储层油田开发工程灾害机理与防治》是笔者在多年从事油田生产及科研实践工作的基础上,以孤岛油田馆陶组河流相疏松砂岩为研究对象,对油田开发工程灾害研究原理和方法技术进行深入系统归纳和提炼而成,籍此推动油田开发工程灾害研究的深化和发展。

全书共十章,第一章系统阐述了油田开发工程灾害的内涵、主要研究内容和任务、研究现状。第二章简要阐述孤岛油田开发工程灾害的控制因素和分布规律,阐述了油田开发工程灾害体模型,论述了油田开发工程灾害的社会属性及分布规律。第三章阐述了套管损坏的动力学机制及研究方法和原理,建立了套管损坏的动力学模型及数学模型,并进行了数值模拟,讨论了套管损坏的演化规律。第四章从多个侧面论述了套管的承载能力和强度。第五章建立了套管损坏的力学模型。第六章阐述了油层出砂机理。第七章对油层出砂进行了物理模拟研究。第八章论述了多种防砂方法的原理和技术。第九章论述了孤岛油田防砂措施的效果。第十章阐述了孤岛油田开发工程灾害环境矿物学研究的主要内容。

本书编写过程中得到孤岛采油厂及中国石油大学的有关领导和专家的支持和帮助,刘泽容教授审阅了全书并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。

本书尝试从灾害学角度对油田开发工程灾害研究的原理和方法进行系统论述,抛砖引玉,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2006年7月

目 录

第一章 绪论	(1)
一、油田开发工程灾害的概念.....	(1)
二、油田开发工程灾害国内外研究现状.....	(2)
三、油田开发灾害主要研究内容和难点.....	(7)
四、特色和创新点.....	(7)
第二章 孤岛油田开发工程灾害控制因素及分布规律	(9)
一、孤岛油田地质概述.....	(9)
二、油田开发工程灾害体模型.....	(17)
三、河流相储层开发工程灾害的社会属性.....	(25)
四、套管损坏特征和分布规律.....	(33)
第三章 套管损坏的动力学原理和方法技术	(42)
一、套管损坏的动力学机制探讨.....	(42)
二、套管损坏的动力学研究方法和原理.....	(44)
三、套管损坏动力学的数学模型.....	(49)
四、套管损坏动力学的数值模拟.....	(51)
五、套管损坏动力学与套管损坏演化规律.....	(55)
第四章 射孔套管承载能力和强度研究	(57)
一、射孔套管承载能力分析试件和装置.....	(57)
二、射孔套管承载能力试验方法.....	(58)
三、射孔套管承载能力试验成果.....	(58)
四、射孔套管强度降低原因.....	(60)
五、螺旋布孔套管承载能力分析的原理和方法技术.....	(61)
六、套管应力集中分析.....	(73)
七、套管挤压破坏分析.....	(74)
八、套管承载能力的控制因素.....	(78)
第五章 河流相储层套管损坏力学模型	(80)
一、油层压实作用下套管损坏力学模型.....	(80)
二、油层出砂形成空洞时套管损坏力学模型.....	(81)
三、油层上覆岩层坍塌时套管损坏力学模型.....	(82)
四、油层出砂岩石骨架失去支撑时套管损坏力学模型.....	(83)
五、套管弯曲变形的力学模型.....	(86)
六、套管双向挤扁的力学模型.....	(91)
七、套管单向挤扁的力学模型.....	(97)
八、套管损坏模拟的非均匀载荷机理.....	(103)

第六章 河流相储层油层出砂机理和预测	(106)
一、油层出砂研究的意义.....	(106)
二、油层出砂研究的原理和方法.....	(106)
三、油层出砂方式和出砂标准.....	(112)
四、油层出砂机理.....	(113)
五、油层出砂物理模拟.....	(124)
第七章 防砂机理物理模拟	(127)
一、砂砾层防砂机理物理模拟.....	(127)
二、滤砂管防砂机理物理模拟.....	(130)
三、绕丝管防砂机理物理模拟.....	(132)
第八章 防砂原理和方法技术	(134)
一、筛管砾石充填防砂原理和方法技术.....	(134)
二、滤砂管防砂原理和方法技术.....	(148)
三、化学防砂原理和方法技术.....	(152)
四、复合防砂原理和方法技术.....	(155)
五、热采防砂原理和方法技术.....	(156)
六、孤岛油田防砂工艺分析.....	(159)
第九章 油层防砂效果预测和评价	(164)
一、防砂有效期预测.....	(164)
二、防砂井产能预测.....	(168)
三、防砂井产能变化规律预测.....	(174)
第十章 孤岛油田开发工程灾害环境矿物学研究	(176)
一、环境矿物学的内涵.....	(176)
二、防治油田开发工程灾害的环境矿物学研究理论和方法.....	(176)
三、孤岛油田馆上段的储层矿物扫描电镜.....	(181)
四、孤岛油田馆上段储层矿物含量测定.....	(185)
五、降低膨润土水敏性改性实验.....	(186)
六、孤岛油田馆上段储层岩心样品水敏性改性实验.....	(189)
七、孤岛油田馆上段储层粘土矿物改性的成果和认识.....	(195)
参考文献	(198)

第一章 绪 论

一、油田开发工程灾害的概念

油田开发工程灾害一般是指因油气田开发所引发的灾害性现象或事件。油田开发工程灾害学是伴随油田勘探开发形成、发展和演化的,它是地质灾害学的分支学科。油气田开发工程灾害是地质灾害中的一种特殊类型,其特殊性是这种地质灾体是由深埋地下的灾源体和地表的诱发灾体两部分组成。因灾源体深埋地下数千米,看不见、摸不着,识别和研究地下灾源体的直接资料信息极少,仅有间接的地震、测井和油田工程等资料和信息,故揭示和研究油田地质灾源体的难度很大,是当今地质灾害学的学科前沿难题。

油田开发工程灾害是指油气田在注水开发过程地下储层、泥质岩、膏盐岩等转化为地质致灾体所引起的灾害性现象或灾害性事件。地下灾源体特征、形成机制和分布规律主要受致灾体地质结构、致灾体成因类型、致灾体空间分布、致灾体非均质性控制。受灾体区域应力场、局部应力场和应力势变化控制,受油田注水开发历程、开采方式、增产措施、油田化学场、物理场、生物场等各种因素综合控制,因此,研究油田开发工程灾害、评价油田开发工程灾害、预测油田开发工程灾害和治理油田开发工程灾害难度很大,同样也是地质灾害研究的边缘难题和热点。

我国油气田主要分布在各种成因的沉积盆地内:西部油气田主要分布在挤压盆地内,受挤压、走滑应力场形成、演化控制,东部和海域的油气田多分布在伸展、走滑盆地内,油气田形成、演化、破坏和治灾主要受伸展走滑应力场控制,故研究油田开发工程灾害应先研究和揭示油区、油田、油井不同级序的的动力学环境、动力学演化过程、动力系统、治灾机理,才能有效地实现油田开发工程灾害预警和防治。研究和揭示油田内不同级序的地质灾害动力学是油田开发工程灾害研究的前缘和难点,只有揭示不同开采方式、不同开采历程、不同增产措施,油田、油井及周缘区域局部动力学特征、分布、演化过程,才能实现油田油井防灾、减灾、灭灾的目的,才能成功地防治油田开发中的各种地质灾害。

因油田开发的利润较高,且一般油田开发灾害的危害程度较低,同时因油气田深埋地下,研究和认识油田开发灾害的难度很大,因此,长期以来针对这方面的研究很少,投资少、成果也很少。常见的油田开发工程灾害有油水井套管损坏、油层出砂、断层活化、岩层蠕变等多种类型。从查阅的国内外近10年文献来看,目前国内外对地表地质灾害十分重视,广泛投资进行各种综合研究,但还尚未有人对地下油田开发工程灾害进行深入系统的研究。如针对油井套管损坏问题,前人已经做了大量的工作,取得了一系列研究成果,但研究内容以往多从套管质量、套管结构、钢材强度、钻井措施等方面研究较多,发表的论文、专著等成果不少,而对套管损坏所处的地质结构、油田地质环境,灾体区域、局部动力学背景、动力学演化体系研究相对较少,因此不能从根本上避免和减少油井套管损坏、防治油井套损和油井防砂问题。

二、油田开发工程灾害国内外研究现状

长期以来,国内外从事油田地质灾害方面的研究甚少,20世纪80年代和90年代初国内曾有人从事过油水井异常与天然地震的关系、油水井套管损坏等方面的研究,但近年来鲜有人问津。与其他学科的研究相比,该领域研究的成果少,发表的论文论著少,因此可供借鉴的资料和文献较少,给深化研究工作带来了不少困难。这里对油水井套管损坏、油层出砂等方面的国内外研究现状进行阐述。

1. 油井套管损坏国内外研究现状

油田投入开发后,套管损坏一直是影响油田正常生产的重要干扰因素。国内外有大量的关于套管损坏与油田生产的报道,一般认为,套管损坏的动力学机制是多方面的,很多学者提出了自己的看法和意见。

国内的油、气井套管损坏,最早是在玉门油田发现的。20世纪80年代前期,大庆、吉林、江汉等油田先后出现了不同程度的大范围套管损坏。80年代后期,华北、中原、胜利、青海、长庆、辽河、大港、四川等油田也出现了不同程度的套管损坏。90年代以来,上述大部分油田套管损坏呈直线上升趋势。而且,我国西部的吐哈、塔里木等新开发油田也出现了套管变形。可见,我国多数油田都出现了严重的套管损坏,给油气生产带来了严重的损失,特别是长期注水老油田套管损坏甚为严重。大庆油田截至2002年6月就有各类套管损坏井8400余口,占总井数的17.6%;吉林的扶余油田截至1989年底的各类套管变形井占全投产井的一半左右;胜利的孤岛油田截至2002年底,累计发现套损井已达1052口,约占孤岛油田总井数的30.4%。大港油田和中原油田都曾进行套管损坏的研究。

国内外许多油田经过一个时期开发,均出现过大批油水井套管损坏现象。如罗马尼亚的坦勒斯娄油田,开发22年后有20%的油水井套管损坏;前苏联的班长达勒威油田有30%的油水井因为套管损坏而停产;美国的威明顿油田从1926年到1986年的60年间有近50%的油水井出现损坏。据不完全统计,1983年底我国10个油田套损井为3688口;1985年底全国14个油田套损井超过6711口;90年代以来,大部分老油田套管损坏呈直线上升趋势。我国西部的吐哈、塔里木等新开发油田也出现了套管变形的现象。套管损坏已成为困扰油田增产、稳产的主要技术难题之一。

根据国内外学者研究成果,套管损坏的原因主要为两大类:一类是与储层地质条件有关的因素,主要涉及储层埋深、储层岩石类型、储层构造应力、储层层间滑动与蠕变和蚀变、储层塑性流变、储层地应力重新分布和断层活动等方面的影响。另一类是与生产、操作条件有关的因素,主要涉及钻井与完井过程中造成的井筒结构不完善;开采方式对储层的激动引起出砂、储层岩石溶蚀、生产管柱匹配不合理及流体腐蚀等的影响。

在上述矛盾中,地质条件因素是套管损坏的内因;生产、操作条件因素是套管损坏的外因。储层结构变异、地应力场变化是套管损坏的内在机制,套管损坏是储层演化和套管强度变化的表现。因此,研究储层结构变异、应力场变化与生产、操作环境的关系,是探讨油层套管损坏作用机理的基础。

疏松砂岩储层的地质条件较差,油层埋藏浅、泥质含量高、胶结疏松、成岩性差,储层构造应力、储层层间滑动与蠕变和蚀变、储层塑性流变等受钻井与完井过程、开采方式、生产操作条件等影响显著,是套管损坏严重且具有代表性的地层。据胜利地质院廖运涛等统

计, 孤岛油田近年来因套管损坏原因每年平均关闭油水井 30~40 口, 年影响产油量 $5 \times 10^4 \text{ t}$ 以上。套管损坏关井破坏了注采对应关系, 导致开发效果变差, 为此每年要补钻相应的更新井, 耗资 5000×10^4 元以上。由此可见, 研究疏松砂岩储层的油水井套管损坏机理和探索套管损坏防治技术, 对油田稳产和提高经济效益具有重要的现实意义。

国外于 1938 年在美国的威明顿油田开始系统研究油水井套管损坏问题。该油田因大量采液, 出现地层亏空, 引起该地区较强的构造运动。至 1966 年, 油田中心区域地面下沉接近 9m, 水平最大位移 3m, 造成油水井套管成片错断, 该现象引起了国际石油界的关注。针对威明顿油田出现的套管损坏的典型现象, 美国石油学会 (SPE) 于 1946 年成立专业技术委员会进行套管损坏机理研究和相关技术交流, 随后建立了 API 套管强度标准和计算方法。

俄罗斯、罗马尼亚、加拿大等国也先后出现了套管损坏影响油田生产的情况。在 20 世纪 60—80 年代对套管损坏进入系统化研究, 建立了类似于 API 套管强度标准和计算方法, 称为 ГОСТ 标准。

20 世纪 70—90 年代, 中国的大庆油田、胜利油田、吉林油田和长庆油田等油田相继出现套管损坏问题, 各油田对套管损坏问题也做了专题研究。从目前研究来看, 国内油井套管损坏的基本类型如下:

(1) 高压注水因注水压力超过了注水层地层压力, 并且导致泥岩遇水膨胀, 产生位移性载荷造成了套管非正常损坏, 以大庆油田、吉林油田为代表;

(2) 油层胶结疏松, 出砂量较大, 引起地层亏空和砂体蠕动, 导致套管受力失衡并发生弯曲, 以胜利孤岛油田、孤东油田为代表;

(3) 储层层间滑动和储层塑性流变, 剪切套管, 引起套管损坏, 以中原油田岩盐地层为代表。

对井下油层套管损坏问题, 国内外不少学者进行了多方面研究, 观点各异, 归纳起来如下。

(1) 地质因素: 主要包括构造应力、层间滑动、蠕变、地层塑性流变、注水后引起地应力发生变化和断层活动等。

①泥岩吸水蠕变造成套管损坏。泥岩吸水蠕变造成套管损坏的研究开始于 20 世纪 80 年代, 提出了标准层泥页岩浸水并形成一定范围的浸水域, 改变了泥岩的力学性质和应力状态, 使泥岩产生位移和形变, 挤压导致套损的新概念、新理论。后来, 研究者提出了非均匀地应力情况下泥岩含水蠕变对套管产生的外挤力的分布随时间变化的规律。目前常用的岩石蠕变模型有四种, 用得最多的是伯格物质模型, 它的蠕变曲线包括瞬态、暂态和稳态等岩石变形的分量, 选择适当的模型参数就可以拟合大多数工程中遇到的问题。石油大学 (华东) 通过用三轴蠕变试验建立了大庆井筒周围泥石的蠕变本构方程, 并在室内开展了一系列泥岩蠕变损坏套管机理的物模试验和分析。

②地层滑动引起套管损坏。岩体失稳的决定因素在于岩体结构面, 地层中有软弱结构面 (泥页岩或泥化夹层) 是地层滑动的内在条件, 高压注水是地层滑动的外部条件。这是因为泥页岩吸水后具有较强的塑性变形能力、吸水软化泥化降低了岩石内聚力及岩石内摩擦角。高压注水促使岩层滑移, 一般有两种类型: 一种是重力作用滑动类型, 另一种是注采压差推动类型。

地层重力作用使岩层滑移: 根据 Byerlee 岩石层面摩擦滑动定律, 当地层倾角大于岩石内摩擦角时才会出现滑动, 当下滑产生的剪切力大于滑动地层中套管的抗剪强度时, 套管即

被剪切损坏。

孔隙压差推动地层滑动：对低渗透或受堵塞油层，注水时会产生从注水井指向油井的较大孔隙压差（ $\Delta p = p_{\text{注}} - p_{\text{流}}$ ），一旦孔隙压差对岩石骨架的作用力大于岩石剪切强度时，局部的地层将在孔隙压差力的推动下从注水井（或高压区块）向着油井（或低压）方向滑动，处于滑动地层中的那部分套管将被推挤损坏。

注水开发油田使地层失稳可归纳如下：长期注水采油使油田的原始应力状态受到扰动，打破了原有平衡状态，在高压注水作用下，上覆层受到裂隙水压的“浮托”作用，加之注水沿裂缝进入非油层（泥页岩夹层），导致其有效正应力与抗剪强度明显降低。由于孔隙压力不平衡形成的开发区块间地层压力差的载荷作用，推动局部地层产生失稳滑移、蠕动，从而造成油水井套管损坏。

③油田开发过程中断层复活造成套管损坏。高压注水引起岩体力学性质和地应力改变，使原有平衡的断层会被诱发复活，引起套管损坏，其损坏位置和断层深度基本一致。

断层形成与地应力关系：安德生（E. M. Anderson）从最简单的情况出发，分析了形成断层的三种不同的应力状态，作为产生正断层、逆断层、平移断层的力学条件，相应地也给出了这三种断层的方位，即一对反向陡倾（约 60° ）的正断层方位，一对反向缓倾（约 30° ）的逆断层和一对交叉的直立的平移断层。M. D. 佐巴等认为不同类型断层运动与其他地应力状态有相对应关系，其中包括：正断层活动、逆断层活动和走向滑动断层活动。

注水在断层复活中的作用：一是高压注水使地层孔隙压力增加并改变了原始地应力，引起地应力不平衡或使区块间孔隙压差增大；二是使裂缝扩展，水沿裂缝进入不封闭断层接触面，降低了其接触面抗剪切应力，在压差（或重力）作用下推动断层滑移。

高压注水引起地应力增加：由于储层岩石存在孔隙，孔隙中存在流体。高压注水引起流体压力增加和岩石膨胀，必然导致地层水平应力增加，并加速断层滑移作用。

④盐岩造成套管损坏。含油气储层中有大段盐层，巨厚盐岩地层通过蠕变、坍塌和塑性流动造成套管损坏。

盐岩蠕变造成套管损坏：盐岩是一种晶体，是一种蠕变性很高的岩石。盐岩蠕变性质与差压力和温度有密切关系。盐岩蠕变将形成非均匀地应力作用在套管上。

盐层坍塌造成套管损坏：液体对盐岩层的冲刷和溶解作用造成盐岩层的井壁坍塌或形成不规则井眼。坍塌盐块强烈地撞击套管，形成点冲击载荷，这种载荷作用在套管上是非常危险的，只需很小冲击力就可以使套管损坏。同时，盐岩塑性流动形成的也是一种非均匀载荷，易使套管变形。

（2）注水、出砂因素：油田注水使砂岩油层的泥质胶结物水化膨胀，进而造成油层大量出砂形成空洞，导致上部盖层下塌。

疏松砂岩构造油藏，由于埋藏浅、成岩作用差、胶结疏松，加上流体粘度高，在大生产压差生产时极易造成出砂，造成套管外的地层空穴甚至突发性的地层坍塌。套管受坍塌地层砂岩团块的撞击和地层应力变化的作用，受力失去平衡而产生变形或损坏。

油层出砂原因：地层应力超过地层强度就有可能出砂。在不考虑水对结构的破坏情况下，地层的出砂力学原因为：油流机械力先将油层局部结构破坏成无胶结散砂，油流将散砂携带走，先是在炮孔附近形成空洞和空洞形成后，造成局部应力集中，对油层结构进一步破坏。

地层出砂导致套管损坏原因：目前尚未见到系统地、定量地分析地层出砂造成套管损坏

的理论。部分学者认为,地层出砂使套管失去径向支撑后,地层沉降增加造成的套管轴向力,使套管失稳;水泥环不均匀破坏和泥岩膨胀为加速套管挠性失稳提供径向力。

(3) 腐蚀因素:化学因素对套管的作用主要表现为地层流体的腐蚀性和外来流体的腐蚀性,主要腐蚀源有高矿化度的地层水、硫酸氢根、硫酸还原菌、硫化氢和电化学等。在上述因素影响下,套管可能产生多种类型损坏,如严重电化学腐蚀使套管穿孔,较轻电化学腐蚀、细菌腐蚀和化学腐蚀降低了套管的强度,硫化氢容易使套管发生氢脆。

(4) 注蒸汽因素:注蒸汽热力采油井套管的工况条件极为恶劣,稠油热采井套管损坏机理已有许多研究,普遍认为热采井套管损坏是因轴向热胀应力过高可能使套管产生弯曲变形或断裂。

注汽热采井套管损坏机理研究的方法包括:温度场计算、井筒受力分析及应力计算。

(5) 钻井、完井及生产过程中的因素:钻井因素主要包括钻井井眼质量、套管层次与壁厚组合、管材选取和管体质量、下入套管时的损坏及固井质量等钻井设计和施工因素。尤其是固井质量差的井,套管上下两端固死后,由于套管自身重力产生的压缩应力很容易使套管柱发生螺旋状弯曲,并引起套管损坏。

完井因素主要指对油层段射孔,射孔时(特别是无枪身射孔)十几发甚至几十发射孔弹在一瞬间爆炸,产生巨大的冲击波作用在套管上,射孔段套管会发生剧烈变形,应力集中造成套管抗挤压强度大大降低,同时也使水泥固井的第一胶结面遭到破坏。

生产过程中的因素主要有早期试油掏空过大、压裂酸化改造油层、频繁防砂及检泵作业对套管的磨损、不合理的配产配注设计和不稳定生产操作等。

2. 油层出砂国内外研究现状

在油田开发过程中,特别是疏松砂岩油藏,在内外因的作用下,容易破坏砂岩的胶结状态,从而使砂岩变为砂子,引起出砂,所出的砂子不仅是充填砂,也可能是骨架砂。疏松砂岩油藏由于胶结疏松,开采过程中很容易造成地层微粒运移进而出现地层出砂或者堵塞,给油田开发带来极大困难。

1) 油层出砂机理研究现状

油层出砂是一个非常复杂的过程,受地层、流体、毛细管力、工艺等诸多内外因素的影响,其机理至今还没有一个系统明确的结论。一般认为,地层对油层出砂的影响主要表现在应力状态、胶结程度、渗透率、孔隙结构、润湿性等方面;流体对油层出砂的作用主要体现在溶解、冲刷、摩擦、拖拽、悬浮等方面,与流体的渗流速度、粘度、矿化度等有关。

Kooijman A. P. 叙述了大型室内出砂试验的结果及其解释。在实验中,应用具体油田岩心材料模拟具有多个炮眼的真实井。研究的目的是研究有效应力的增大和减小对于产砂状况的影响,并且考虑到套管及水泥的存在的影响。另外的目的是研究含水率对于产砂的影响。如同所预计的,在每次砂产量达到最大值后,随着砂的清除而使井的产能增大。转用盐水作为孔隙液体时将会导致砂的突发崩塌,但这种影响会很快地停止,可以认为两相流导致产砂问题而不是盐水本身所造成。在每次有效应力增加以后,井的产能产生短时间下降,这种影响可能集中在炮眼壁附近各向不均一应力区,在较高应力位置可以导致较高的拖曳力,从而使出砂情况严重。在生产过程中所有炮眼均是干净的,套管与岩层之间的水泥环在试验后仍然保持完整,表明水泥能够支撑炮眼。

2) 油层出砂预测研究现状

在油层出砂机理研究的基础上,油田工作者对出砂的模拟和预测问题进行了大量广泛深

人的研究。出砂预测是多学科的综合，出砂预测方法的研究走过了漫长的发展道路，开始人们是通过岩心、初始动态生产资料预测是否出砂，此即为出砂预测方法发展的第一阶段。经过对岩石性质如弹性模量、剪切模量等的认识，找出了一个地区不出砂的岩石特性临界值来预测出砂，这是出砂预测方法发展的第二个阶段。该阶段较为著名的方法就是组合模量法和斯伦贝谢法。进入 20 世纪 80 年代以后，出砂预测向实验室模拟研究和数值计算方向发展，从前两个阶段的定性研究转向定量的研究，可以得出油气井不出砂的产量或生产压差临界值。这一阶段为第三阶段，指出了当今石油工业油气田出砂预测方法的主要发展方向。

朱德武综述了目前国外发展的几种出砂预测方法：①经验公式及经验图表法，包括出砂指数（又称组合模量法）、斯伦贝谢法、声波时差法、双参数法、多参数法和用生产压差与岩石的抗压强度的比值来预测出砂；②实验室试验法，包括厚壁圆柱筒（TWC）简化模型、小型模拟出砂试验、大型模拟出砂试验；③理论分析模型，是以炮眼和孔洞的稳定性理论模拟为基础，使用砂粒破坏机理的数学公式，主要分析压缩破坏、拉伸破坏和滑移次生的破坏引起的出砂。

3) 油层出砂防治研究现状

油层出砂防治方法按原理可分为机械防砂、化学防砂、复合防砂三类。

所谓机械防砂就是把机械过滤装置下入油井，阻挡地层砂运动，而地层流体可以通过这些装置流入井筒，达到即产油又防砂的目的。其基本原理是利用机械装置阻挡地层砂粒进入油井，粗颗粒将在机械装置外形成砂桥，粗颗粒进一步阻挡细颗粒，从而达到防砂的目的。如滤砂管、砾石充填等。

化学防砂是将化学原料按一定比例注入地层，将疏松的地层砂粒胶结起来，形成一个具有一定强度和渗透性的挡砂屏障，而油流可通过屏障渗入到油井，达到防砂又产油的目的。如溶液防砂、人工井壁等。

复合防砂是利用机械和化学防砂各自的优点来补充相互的缺点，利用化学防砂在近井地带形成一个较好的人工挡砂屏障，再利用机械防砂工具在井筒内形成第二层挡砂屏障，能起到较好的防砂效果。如干灰砂滤砂管、涂料砂滤砂管、涂料砂绕丝管等。

3. 地面沉降国内外研究现状

20 世纪以来，因自然因素的影响及人类工程的不断加剧，环境问题已日益增多，且趋于严重。其中，地面沉降、岩溶地面塌陷及地面裂缝（地裂）等灾害已成为国际上普遍关注的不可忽视的重要问题。据统计，目前，世界上已有 50 多个国家（地区）先后不同程度地发生了地面沉降灾害。如墨西哥的墨西哥城；美国的圣华金谷地、长滩、休斯敦；日本的东京、大阪；泰国的曼谷；意大利的波河三角洲；英国的柴群；新西兰的怀拉基；澳大利亚的拉特罗布谷地等。一般最大沉降量可达数米，个别地区（如墨西哥）已超过 10m。形成地面沉降灾害的主要原因是长期超量抽取地下水。地下热水（温泉）、石油、天然气等引起土层释水压密、固结，导致地面沉降灾害。

产生地面沉降的幅度及范围，与研究区地下水水位的变化动态、土层的物理—力学性质、土层的空间结构变化等因素密切相关。

（1）美国休斯敦大学开发了休斯敦地区新的地下水流和地面沉降模型。模型使用了区域变化理论估算没有数据的地方的初始条件。并利用辐射流类比法估算休斯敦地区的流量边界条件。所用的方法，可用于类似的地区。根据 1983 年和 1984 年的模拟结果，在有数据的地区，地下水流和地面沉降模型运行得很好，预测的水位变化和沉降量变化是一致的。

(2) 墨西哥城含水层——弱透水层系统的地下水径流和地面沉降总量的非线性模拟。1980年,由于墨西哥城超量抽取地下水,其抽水量超过了地下水的天然补给量的260%以上,致使地下水位下降。造成弱透水层的细小颗粒受到压缩。结果在这一时期该城市中心区的地面沉降总量达6.5m。

上述的数学模型,模拟了多含水层系统的地下水水流和总沉降量。利用地下水流动方程和通过德泽基有效应力概念与弱透水层—维固结方程结合,同时进行数字解的方法,模拟计算了多层系统的非线性固结和总沉降量。

(3) 意大利拉温万纳工业区的地面沉降是从第四系开采地下水和从古近—新近系深部开采天然气引起的。多年累计沉降量最大值为1.30m(含自然地质沉降量2mm/a)。运用有限差分、有限元和迭代方程完成了三维数字分析,表明区域地面沉降主因是过量开采地下水造成的,开采天然气的影响有限,但也不是无足轻重。

三、油田开发灾害主要研究内容和难点

油田开发灾害是一个全新的研究领域,其主要研究内容可概括如下:

(1) 油田开发工程灾害类型及分布研究。油田开发灾害的类型多样,建立油田开发工程灾害的概念,研究和揭示地下油田开发工程灾害的形成机理、控制因素和分布规律,研究地下油田开发工程灾害对油田环境的影响和破坏作用,研究地下油田开发工程灾害与油气开发强度、开发方式、油气采收率等的关系。

(2) 油田开发工程灾害形成机理和控制因素研究。应用多学科理论和方法技术,研究油气勘探开发过程中,油气地质环境演化与地面油田开发工程灾害的关系,探讨和揭示地面及地下油田开发工程灾害的形成机制、控制因素和分布规律,对油田开发工程灾害的影响和危害程度进行定性、定量评价。

(3) 油田开发工程灾害动力学机理研究。应用地球动力学、岩石力学等学科的理论和方法技术,以物理模拟与数学模拟相结合,研究油田开发工程灾害的形成机制。

(4) 油田开发工程灾害预警系统研究。对油田开发工程灾害进行定性定量评估和预测,建立油田开发工程灾害预测预警系统。

四、特色和创新点

(1) 首次综合应用地质灾害学、灾害动力学、油田开发地质学、环境矿物学、储层地质学、测井地质学、钻井地质学、数学地质、计算机等多学科理论和方法技术,进行跨学科综合研究。研究油田开发工程灾害类型、特征、分布、形成机制和演化规律,建立了河流相储层油田开发过程中地下深处地质灾害体模型,揭示河流相储层开发中形成的油田开发工程灾害灾源体的特征、空间分布、非均质性及演化规律,对不同开发阶段灾源体预测和防治有重要指导作用。

(2) 以孤岛油田为例阐述了河流相储层地下开发地质灾源体的社会属性及其变化,受油田数十年来注水开发工程中不同时期的开发方式控制、油田开发历程控制及各时期、各地区、各层系增产措施的因素控制,还受油田地下储层物理场、化学场、生物场、应力场、流体场和渗流场等多因素复合作用、联合作用的演化规律控制。

(3) 论述河流相储层油田不同开发时期套损的主要类型及特征,以孤岛油田为例,套损多分布在主力层系射孔井的上部,套损多发期为 12 年,还与油藏流场灾变相一致,表明受油藏流场控制。建立了河流相储层油田开发套损动力学系统和方法技术,开展油井套管承载能力和强度研究,建立了油井套管在七种复杂局部应力状态下的套损力学模型,为减少套损和治理套损提供了科学依据。

(4) 应用配套理论和方法技术,深入研究了河流相储层在注水开发过程油井出砂机理,进行河流相储层防砂物理模拟,包括含砂砾层防砂机理物理模拟、滤砂管防砂机理物理模拟和绕丝管机理物理模拟等,建立了河流相储层油田开发过程中机械防砂、化学防砂、复杂方式和热采防砂的配套体系和方法技术,并进行了油田开发过程防砂有效期预测、产能预测和产能变化规律预测,取得了显著的经济效益和社会效益,表明该配套理论和方法技术的推广前景和应用价值。

(5) 应用国际最先进理论和方法技术,开发了功能强、应用效率高的河流相储层油田开发中综合防砂决策软件,在孤岛油田其他层系和地区及其他油田中推广应用取得显著经济效益和社会效益。

(6) 深化和发展了油田开发工程灾害学的理论和方法技术,有极大推广价值。

第二章 孤岛油田开发工程灾害控制因素及分布规律

油田开发工程灾害是一门正在兴起发展的地质灾害学的分支学科,前人在这个领域的研究较少,可供借鉴的资料和研究成果较少,通过长期的勘探开发实践和近年来对油田开发工程灾害的研究,根据灾害发生的动力学环境、灾害的特征、灾害的危害及灾害体的分布规律,将河流相储层主要类型的油田开发工程灾害分为:油水井套管损坏、油藏流场演变、地表变形、地裂冒砂喷水油等。这些油田开发工程灾害有各自的特征、形成和分布规律。

一、孤岛油田地质概述

孤岛油田所处的沾化凹陷是在前古近系基底背景上发育起来的古近一新近系凹陷。地层发育较全,从太古宇的片麻岩到古生界的碳酸盐岩、页岩、薄煤层、砂泥岩互层,中生界的火成岩、砂、泥岩互层,新生界的砂、泥岩互层(表2-1)。孤岛油田是前古近系古潜山发育的披覆背斜构造,馆上段河流相砂岩是主要储层,为披覆背斜油藏,该油田自1969年10月试采,1971年11月总体规划开采。至今已开采了30余年,进入了油田开发致灾期,下面分别论述油藏的特征。

1. 孤岛油田地层层序

孤岛油田所处的沾化凹陷的前震旦系始于30~40亿年之前,寒武系不整合于前震旦系之上。下寒武统以紫红色、灰绿色页岩为主,上部夹少量鲕状灰岩,下部为页岩,与石灰岩呈不等厚互层,底部夹多层白云岩;中寒武统以鲕状灰岩和竹叶状灰岩为主,属潮间沉积;上寒武统以白云岩为主,间夹少量竹叶状白云岩,下部白云岩较少,主要为棕灰色灰岩夹黄绿色页岩、鲕状灰岩。

奥陶系整合于寒武系之上,下奥陶统为潮上带沉积,为一套次生白云岩;中奥陶统为浅灰、深灰及棕红色灰岩、白云岩、白云质灰岩、泥质白云岩等。中、下奥陶统之间为平行不整合接触。

从早古生代晚期至晚古生代中期,受加里东运动的影响,华北地区一直处于隆起剥蚀状态,时间长达一亿多年,致使上古生界中石炭统平行不整合于下古生界中奥陶统之上。

中、上石炭统为海陆交互相沉积,以黑色泥岩、灰色页岩与白云质砂岩互层为特征,夹酸性侵入岩、深灰—灰黄色隐晶—显微晶灰岩及少量煤层。

二叠系为典型的陆相沉积,以黑色泥岩与含硅质粉砂岩、杂砂岩互层为特征。

三叠系本区遭受剥蚀,侏罗系不整合于二叠系之上。侏罗系以灰色泥岩和杂色砾岩为特征,可见灰绿色含绿泥石细粒杂砂岩、浅灰色砂岩,夹较厚的煤层。

白垩系主要为中酸性喷出岩,如灰绿色安山岩等。

孤岛地区新生界不整合于中生界或古生界之上,厚度一般在1500~6000m左右,包括古近系和新近系。

古近系分为孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),其中,孔店组为灰白色、棕红色砂岩,杂色砂岩。沙河街组分四段(自下而上为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段),