

YOUQITIAN FEIJUNYUN DIYINGLI ZUOYONG XIAD
CHUSHA JILI JI
TAOGUAN KEKAOXING YANJIU

油气田非均匀地应力作用下的 出砂机理及套管可靠性 研究

王金龙 著

中国环境出版社

中石化中原油田分公司博士后基金 (2012217) 联合资助
河南省博士后科研项目基金 (78)

油气田非均匀地应力作用下的 出砂机理及套管可靠性研究

王金龙 著



中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

油气田非均匀地应力作用下的出砂机理及套管可靠性
研究/王金龙著. —北京: 中国环境出版社, 2013.10
ISBN 978-7-5111-1580-5

I. ①油… II. ①王… III. ①砂岩油气田—出砂—研
究②套管损坏—研究 IV. ①TE358②TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 231177 号

出 版 人 王新程
责任编辑 孔 锦 郭媛媛
助理编辑 李雅思
责任校对 唐丽虹
封面设计 金 喆

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67187041 (学术著作图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 10 月第 1 版
印 次 2013 年 10 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 10
字 数 152 千字
定 价 48.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序

20 世纪 70 年代以来,我国油气田套管损坏十分严重,套管的损坏严重妨碍了油气田的正常生产,已成为目前国内外石油天然气开采中急需解决的重要问题之一。油田开采到中后期,疏松砂岩构造油藏的出砂问题愈来愈突出,油井出砂以及出砂导致的套管损坏已成为困扰该类油藏开发中的一大难题。研究疏松砂岩构造油藏的出砂与套管损坏机理及其预防措施,延长油水井套管的使用寿命,对于油田稳产和提高经济效益具有十分重要的现实意义。可靠性技术是近几十年发展最为迅猛的学科之一,该技术的推广应用是提高产品竞争能力,增强国家综合实力的关键因素。在套管的设计、使用、预测和管理中采用可靠性技术是必然趋势。可靠性在套管中的成功应用将提高套管的整体质量,延长套管的使用寿命,降低石油天然气开采成本。

作者在弹性力学及弹塑性力学的基础上,用复变函数理论对疏松砂岩油藏的出砂机理及套管损坏进行了系统的分析研究,用可靠性和有限元分析理论对疏松砂岩油藏套管进行了可靠性分析和动态特性的数值模拟,明确了套管产生破坏的因素及预防措施。相信该书的出版必将给人们以启迪,它对套损机理的研究及对疏松砂岩油藏的深入认识具有重大的促进作用。

2013 年 9 月

前 言

通过对中原油田明一西区块的全面调查,在获取大量地质、开发等生产资料的基础上,对油水井出砂及套管损坏规律和影响因素进行了比较全面的分析研究。统计结果表明该区块出砂层位与大部分套管损坏层位基本一致,这说明由于疏松砂岩地层出砂,改变了套管的受力状态,将导致套管更易于发生变形破坏或失稳破坏。

在上述分析的基础上,建立了疏松砂岩地层裸眼完井和射孔完井出砂预测模型,从理论上对疏松砂岩地层的出砂机理进行了分析;建立了疏松砂岩地层套管受力的多层筒模型,对出砂前与出砂后的套管受力情况进行了分析,在前述理论模型的基础上,编制了相关的分析软件。通过对中原油田 M167 井的分析,建立了裸眼完井出砂的有限元模型和油层出砂前后套管受力的三维仿真模型,对裸眼完井的出砂机理和油层出砂前后套管受力情况进行了三维仿真分析。将概率可靠性设计方法引入到了套管的可靠性设计中,建立了疏松砂岩地层套管受力的三维可靠性分析模型,对疏松砂岩地层套管进行可靠性分析。

本书是作者科研成果的总结,本书在写作过程中得到了中国石油大学(华东)闫相祯教授的大力支持与帮助,同时感谢李茂生、钮瑞艳、李柏栋、高进伟、丁鹏等提供的帮助和支持。本书获得中石化中原油田分公司博士后基金(2012217)、河南省博士后科研项目基金(78)资助。

限于作者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

2013 年 9 月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 地应力研究现状	2
1.2.2 油层出砂机理研究现状	3
1.2.3 套管损坏研究现状	5
1.2.4 随机有限元法及可靠度研究现状	7
1.3 研究的基本思路和技术路线	11
1.3.1 研究的基本思路	11
1.3.2 研究的技术路线	12
第 2 章 非均匀地应力引起的油水井套管损坏规律研究	13
2.1 地应力的测量与计算	13
2.1.1 地应力的测量	13
2.1.2 地应力计算方法	15
2.2 油田开发引起地应力变化与断层滑动	16
2.3 油田注水后的应力变化	17
2.4 注水引起断层面摩擦系数和抗剪强度的降低	18
2.5 注水开发引起地应力变化对套管的影响	20
2.6 本章小结	26

第3章 疏松砂岩地层出砂机理及力学模型的建立	28
3.1 出砂对套管损坏的影响	28
3.2 出砂判别准则	29
3.3 裸眼完井井眼的稳定性分析及出砂判断	30
3.3.1 弹性阶段	31
3.3.2 弹塑性阶段	53
3.4 射孔孔眼的稳定性分析	59
3.5 理论解与有限元解对比分析	63
3.6 出砂预测软件的编制及应用实例	64
3.6.1 功能介绍	64
3.6.2 应用实例	65
3.7 本章小结	67
第4章 疏松砂岩地层套管受力分析	69
4.1 外部受非均匀压力和内部受均匀压力的多层筒受力分析	70
4.1.1 力学模型	70
4.1.2 系统在非均匀外压和非均匀切向力作用下的受力分析	71
4.1.3 系统在均匀外压和均匀内压作用下的受力分析	75
4.2 出砂前套管受力分析	78
4.3 出砂后套管受力分析	79
4.4 套管—水泥环—地层应力分析软件的编制及应用实例	81
4.4.1 软件编制	81
4.4.2 软件应用实例	83
4.5 本章小结	89

第 5 章 出砂及套管损坏有限元数值模拟.....	90
5.1 裸眼完井出砂有限元数值模拟.....	90
5.1.1 力学模型的建立.....	90
5.1.2 出砂预测准则——有效塑性应变准则.....	91
5.1.3 井壁附近出砂预测分析.....	92
5.2 出砂引起的套管应力变化三维仿真.....	97
5.2.1 有限元模型的建立.....	98
5.2.2 计算结果分析.....	101
5.3 本章小结.....	106
第 6 章 疏松砂岩地层套管可靠性研究.....	107
6.1 问题的提出.....	107
6.1.1 套管所受主要载荷.....	107
6.1.2 套管的失效形式.....	108
6.1.3 失效原因.....	109
6.2 套管可靠性设计的概率方法.....	111
6.2.1 概率可靠性的设计原理.....	112
6.2.2 套管强度、应力的分布规律.....	114
6.2.3 套管强度、应力的可靠度计算.....	115
6.2.4 算例分析.....	116
6.2.5 套管老化过程的可靠度分析.....	117
6.3 套管可靠性的数值模拟.....	119
6.3.1 套管可靠性模型的建立.....	119
6.3.2 套管可靠性函数的求解方法.....	121
6.3.3 套管可靠性数值的模拟方法.....	122

6.3.4 应用实例.....	124
6.4 套管失效的预防与预测研究.....	135
6.5 本章小结.....	135
第 7 章 结论	137
参考文献	139
附录	146

第1章 引言

1.1 研究的目的是和意义

油气勘探开发的工作对象是地层的岩石和流体。储层的岩石和流体所承受的地应力是研究有关地质和工程问题时的外载，因此，从某种意义上讲，油气勘探开发的许多问题都涉及地应力范畴。目前，人们已经初步认识到地应力对油气勘探开发的影响和作用。20世纪70年代以来，我国油气田套管损坏十分严重，套管的损坏严重妨碍了油气田的正常生产，已成为目前国内外石油天然气开采中急需解决的重要问题之一。油田开采到中后期，疏松砂岩构造油藏的出砂问题愈来愈突出，油井出砂以及出砂导致的套管损坏已成为困扰该类油藏开发中的一大难题。研究疏松砂岩构造油藏的出砂与套损机理及其预防措施，延长油水井套管的使用寿命，对于油田稳产和提高经济效益具有十分重要的现实意义。可靠性技术是近几十年发展最为迅猛的学科之一。可靠性技术的推广应用是提高产品竞争能力，增强国家综合实力的关键因素。在套管的设计、使用、预测和管理中采用可靠性技术是必然趋势。可靠性在套管中的成功应用将提高套管的整体质量，延长套管的使用寿命，降低石油天然气开采成本。本书分析了地应力非均匀性对套管损坏的影响；在弹性力学及弹塑性力学的基础上，用复变函数理论对疏松砂岩油藏的出砂机理及套管损坏进行了研究；用可靠性和

有限元分析理论对疏松砂岩油藏套管进行了可靠性分析和动态特性的数值模拟,明确了套管产生破坏的因素及预防措施。通过这些研究,力求为出砂引起的套管损害提供一种新的研究思路,从而有效避免疏松砂岩油藏因出砂造成的套管损坏,降低油田的生产和使用成本。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地应力研究现状

在油气勘探开发中,地应力场的研究具有重要的意义。为了得到应力场的全貌,需要通过物理实验或数学模拟进行反演。数学模拟法应用较为广泛,发展也较迅速。用数学力学方法进行应力场的计算,早期的工作有19世纪后期的达尔文、开尔文,20世纪初期的勒夫、列宾逊等,他们都做了全球自转、极移等应力场分析。近年来由于观测技术的提高,资料的迅速积累,加上计算机的迅猛发展与应用,有限元方法的发展,应力场的反演工作有了很大进展。

由于反演问题本质上是一个不确定问题,20世纪90年代以来,运用系统论、信息论以及模型识别技术发展了随机反分析、模糊反分析、神经网络分析法等。此外为了简化非线性和非均质问题的反演过程,加快反演收敛速度,摄动方法被引入反分析计算中,形成一种有特色的摄动反分析法。集前人之成就,高玮^[1]等采用人工智能集成的方法,提出了反分析集成智能研究。易达^[2]等采用人工神经网络与有限元相结合的方法求解岩体初始应力场。这些理论方法在岩土工程中,尤其是位移反分析中,得到迅速发展,并成熟地应用于工程之中。但是在应力反分析中,特别是在油气勘探开发工程中,这些方法的应用研究见之于报道的极少,其应用较为成熟和广泛的依然是反演回归法。但我们有望借助于一些岩土工程领域中的一些理论研究成果,应用于油田开发中。现今,一些大型有限元软件的推

广应用，必将使应力场的反演计算有较大的突破。

1.2.2 油层出砂机理研究现状

油层出砂是一个出现范围很广的自然现象。通过研究表明，油层出砂可分为充填砂和骨架砂。当流体的流速达到一定值时，首先使得充填于油层孔道中的未胶结砂粒发生移动，油井开始出砂；随着流速的增加，油井受力发生变化，油井出砂量增加；当流体的流速达到某一个值时，油井发生剪切破坏，造成岩石结构损坏，使骨架砂变成自由砂，被流体带着移动，引起油井大量出砂。

李宾元^[3]针对人们定性地认识到油层出砂与水动力、黏度、砂粒直径有关，但缺少定量的实质分析这一问题，从砂粒的受力分析出发对出砂油层的出砂机理进行了系统、定量的研究，讨论了重力、范氏力和双电层斥力对出砂的影响，提出了油层出砂的门限流速的概念。认为油层中的充填砂在流体的冲击下，当流速达到某一值时，砂粒起动并随流体运移，此时的表观速度为砂粒起动的门限流速，它表征了油井开始出砂的特征值。

出砂预测模型的发展历史较短。国外从 20 世纪 80 年代开始以 N. Stein、T. K. Perkins 和 R. Jselby 等为代表，从理论和实验两方面开始了油井出砂影响因素和油井出砂预测的研究^[4-8]。

Stein 首先引入了第一个重要的技术概念，它将地层的剪切强度与油井出砂机理联系起来，利用声波测井及密度测井的数据来建立出砂井与分析井生产状态之间的联系。此法的局限性在于油井必须进行完井与试验，并假定不存在油层损害，故其结果只能反映评价当前生产中的瞬时问题而无法预测将来的情况。Tixier 等采用类似于 Stein 的方法，利用测井资料分析评价当前生产状态下的油井出砂，此法的主要缺陷是不能给出定量结果，只能判断油井是否出砂，故无法计算最大的无砂产油速率。后来 Coates 等提出了“砂岩强度”测井模型，与前面模型不同，它是利用莫尔圆应力分析的方法描述了出砂的可能性与井眼应力状态间的关系，

可用于产水量不大的油井出砂预测。

通过量纲分析孔眼稳定性的一组方程, 将影响出砂的主要因素表达为:

$$f(\Delta P_w, H, \Delta \sigma_H, \Delta \sigma_v, L, D, F, S_p, D_p, I, P_{cap}, C_h) = 0 \quad (1-1)$$

式中符号分别反映了井内压力、孔眼表面的压力梯度、原始地应力、岩石的加载、变形与破坏特性、射孔形状及密度、井斜角、毛管压力及化学反应对岩石的弱化作用等。N. Morita 等利用拟三维有限元模型分析了该方程中前两项参数对射孔孔眼破坏出砂的影响, 由不稳定流动模型计算获得射孔周围的孔隙压力分布, 并输入地层—流体耦合模型计算应力、变形, 然后根据描述岩石破坏特性的准则, 评价射孔的稳定性, 由此认识到油井出砂的许多物理现象。因为分析工作的简化, 故其结论只能提供定性的说明。Vaziri 从考虑油层流体与地层特性之间的耦合作用出发, 建立分析油层射孔孔眼在流体、地应力、油层压力以及射孔损害等影响下的有限元分析模型, 结果表明存在一极限压力梯度, 超过该值将导致井眼坍塌。

而国内关于研究和预测油井出砂的工作则起步于 20 世纪 90 年代初, 并在防砂工艺研究方面取得了较大成绩。

张建国^[9]等通过分析裸眼井周围的应力分布, 利用 Drucker-Prager 强度准则, 建立了裸眼完井出砂预测模型, 提出了地层稳定性指数的概念。他还建立了砂拱稳定的力学模型^[10], 并根据莫尔-库仑准则、达西定律和平衡方程推导出保持砂拱稳定的数学模型。王德新^[11]等采用岩石力学的理论和方法, 同时考虑垂直井眼围岩应力场对射孔孔道稳定性的影响, 并将反映储层岩石材料胶结程度强弱的抗压强度作为岩石破坏的强度准则, 建立了一种新的射孔完井临界出砂模型。李兆敏^[12]等以岩石破坏准则为基础, 运用岩石力学理论和分析方法, 考虑到射孔孔眼周围岩石应力场对孔道稳定性的影响, 建立了射孔完井临界出砂预测模型。

总之, 油层出砂机理非常复杂, 从目前的文献分析发现, 现有的出砂预测方

法中只考虑了极少的因素,更全面地、系统地分析这些因素建立模型应当是进一步发展的方向。

1.2.3 套管损坏研究现状

套管是为了防止地层坍塌而下入井中的金属管柱^[13],其分为表层套管、技术套管和油层套管。20世纪70年代以来,我国油气田套管损坏十分严重。据不完全统计,截至2002年,全国主要油田油气井套管损坏数已将近2万口;而2003年再次统计,套损井增加数量超过10%~20%。套管的损坏严重妨碍了油气田的正常生产,已成为目前国内外石油天然气开采中急需解决的问题之一。

在套管损坏机理和防治技术研究方面,国内外已经做了大量的研究工作,揭示了造成套管损坏的地质因素和工程因素,提出了一些行之有效的防治方法。

目前,套损机理主要分为以下几种:①不合理注水,造成地层位移导致套损;②注蒸汽热采井的高温热应力导致套损;③出砂引起地应力改变导致套损;④腐蚀导致套损;⑤射孔开裂导致套损;⑥盐岩、泥岩蠕变引起非均匀外在导致套损。

实际上,由于套管处于复杂的地下环境中,上述情况可能交互作用,给研究工作带来了许多阻碍和困难。对大多数套损情况,目前仍处于探索、定性分析阶段。

前苏联的МДa T O B. X等学者根据他们的理论研究,先后发表了《套管柱的变形原因及防治办法》《复杂情况下不稳定岩层膨胀造成的不均匀负载》《防止油层套管在含盐地层变形》等论文,并提出了采用组合套管或厚壁套管防止套管变形的技术措施。美国的SHEL、BXXON、ARMOCO,英国的MAROTHON,荷兰的SIPM,日本的新日铁、住友金属等公司,曾花巨资对套管进行全尺寸实物评价实验,这些研究和试验成果在提高套管制造质量、增大套管强度、延长套管使用寿命等方面发挥了重要作用。

我国从 20 世纪 80 年代开始对某些地质状况下的套管损坏形态、损坏机理进行研究,并取得了一些相应的研究成果^[14-19]。对油田具体区块套管损坏进行了针对性研究,提出过高压注水引起有效应力降低,从而诱发套损的理论;泥岩膨胀与软化诱发套损的理论;化学腐蚀与应力腐蚀诱发套损的理论以及生产压差导致套损的理论^[20, 21]等。从现有关于套管损坏的研究工作和文献资料中可以看出,套损的主要原因可归纳为四个方面的因素:

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。

② 井身因素:主要包括套管的设计制造不当造成的损坏、不合理生产工艺及方法以及油层出砂等。

③ 生产因素:主要有下套管时损坏套管、作业磨损、重复酸化、高压作业、试油掏空过大和射孔等。

④ 腐蚀因素:主要有高矿化的地层水、硫酸氢根、硫酸还原菌、硫化氢和电化学等腐蚀。

在上述因素影响下,将产生各种类型的套管损坏,如变形弯曲、破裂、穿孔、错断等。

对于疏松砂岩油层套管损坏情况,胜利、大港等油田都有统计资料报道。孟祥玉等以胜利油田套管损坏井的统计资料为依据,从 10 个方面对该油田套管损坏的规律及原因进行初步分析。马双才通过对大港港西油田套管损坏原因进行分析,提出断层、注水、出砂等是疏松砂岩地层套管损坏的可能因素。王仲茂^[22]等通过对各油田的套管损坏资料和文献的分析与归纳整理,在此基础上分析了各种地质因素情况下套管损坏的原因,文中指出疏松砂岩地层套管损坏是因地层出砂严重,造成地下亏空,致使套管发生变形而损坏。

这些研究很大程度上减少了套损井出现的总量,降低了套损的危害。尽管如此,但各油田套损井还是经常出现,有时甚至成片发生。提出新的能反映油田目

前实际情况的套损发生机制及预测理论已成为这些油田迫切需要解决的问题。

虽然套损的防治工作已经取得了一些进展,但总体来说,防治效果不显著,主要存在以下问题:

① 技术方面:对套损机理认识还不够清楚,增大了油田套损防治的难度;钻井设计中没有充分考虑对套损的预防,已有的套损预防研究成果在管柱设计和套管选用方面推广不够;对套管的质量控制和性能缺乏深入了解;钻采过程中缺乏对套管进行保护的技术和手段;相互间缺乏信息沟通。

② 管理方面:一些有效技术由于管理问题得不到推广应用;套损是一项系统工程,相互之间缺乏必要的合作;套损防治的力量过于分散。

③ 体制方面:套损防治工作,在油田和相关企业之间沟通不够;由于考虑成本,造成采购渠道的多样化;套损的防治工作大多停留在事后的处理上。

1.2.4 随机有限元法及可靠度研究现状

(1) 套管可靠度研究中的不确定因素

从数学角度来分类,不确定因素可以分为三种^[23]:随机性(Random)、模糊性(Fuzzy)以及未确知性(Unascertainty)。前两类不确定性早已为人们所认识,未确知性是指由于信息、数据的不全面、不完整而导致的不确定性。目前工程中接触较多、研究相对成熟的是工程随机性问题,工程随机力学也是对工程随机性问题进行力学分析。随机因素进一步又可分为随机变量、随机场(Random Field)^[24]、随机过程以及随机场和随机过程的结合。

考虑套管可靠性研究中的不确定因素,对套管进行随机力学分析和可靠度评估具有十分重要的意义。

从实际工程背景来分类,影响套管的不确定因素体现在以下几方面^[25, 26]:

① 载荷的不确定性:对于疏松砂岩地层套管问题,载荷主要考虑的是地应力。初始地应力场一般是根据几个测孔的量测值通过回归的方法近似地获得,其不确

定性主要来源于地应力场空间量测数据的离散性、实际地应力场与实测地应力场的数据间的误差以及回归分析计算模型的不确定性^[27]。

② 材料参数的不确定性：材料参数包括材料热学参数和力学参数。材料的力学参数包括变形模量、泊松比以及抗压强度、抗拉强度和 f 、 c 等强度参数。

③ 几何尺寸的不确定性：在同样的条件下，具有不同尺寸的结构，结构的响应（包括应力、位移等）也不相同。而对于套管来说，水泥环和套管的壁厚的不确定性，会对套管的可靠性产生直接影响。由于几何不确定性问题有限元计算的复杂性，至今国内外在此方面的研究成果还很少^[28, 29]。

④ 初始条件和边界条件的不确定性：无论是应力场、渗流场还是温度场的计算，都离不开边界条件的影响。模拟实际工程所建立的几何模型，需兼顾仿真和简便两大原则，边界条件往往需作一定程度的简化。地层中套管边界条件的不确定性来源于实际问题的复杂性、边界条件变化的不可预知性、人类认识的局限性以及对结构边界处的简化等。

⑤ 计算模型的不确定性：由于油水井套管系统的复杂性，一般情况下，可根据室内试验、地质资料甚至实际经验初步确定材料模型的类别，但复合选模原则的最佳模型应该只有一个，这正是模型识别理论的工程背景^[30]。计算模型的不确定性在国际上已受到高度重视，然而，至今只见到针对一些简单问题的零星报道^[31, 32]。

综上所述，实际工程中不确定因素在各个方面都不可避免地存在着。

（2）随机有限元法及其工程应用研究现状

在充分认识到实际工程中的不确定因素后，人们自然会针对这些不确定因素设法采用一些有效的方法，从结构的设计、施工和运行的多个方面进行相应的研究。工程中不确定问题的概率分析包括以下三大方面：① 工程随机力学；② 工程的风险评估和可靠度分析；③ 基于可靠度理论的规范设计方法。在工程随机力学方面，又大致上包括四方面的内容：随机过程和随机场数字模拟、随机振动、随