

地应力与

套管损坏机理

练章华 著

石油工业出版社

地应力与套管损坏机理

练章华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了地应力与套管损坏机理研究的基本思路和方法,论述了非均匀地应力对套管强度的影响以及盐岩层粘弹性蠕变反演理论,为预防套管损坏提供理论依据;同时,本书还论述了射孔孔眼对套管抗挤强度的影响、磨损对套管失效的机理、套管接头泄漏及滑脱失效机理、地应力与套管损坏机理、注水开发对地应力与套管的影响以及盐岩塑性流动地层套管变形预防措施等,是作者所在课题组近20年来在套管损坏机理研究方面的最新成果总结。

本书适合于油气田开发工程、油气井工程以及从事管材研究的人员和射孔工作的人员参考,也可以作为石油院校相关专业高年级本科生、研究生及教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地应力与套管损坏机理/练章华著.

北京:石油工业出版社,2009.4

ISBN 978-7-5021-7089-9

I. 地…

II. 练…

III. 油层套管-损伤-研究

IV. TE925

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第047037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

编辑部: (010) 64523544

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 12.75

字数: 325千字

定价: 48.00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

前 言

截至 2007 年底，全国统计的 132628 口油气井中，发生套管损坏的井数已达 25958 口，全国套管损坏井约占总井数的 19.57%。套管损坏井主要分布在大庆、胜利、中原、辽河、吉林和大港等全国十多个油田，严重影响了我国油气的生产，造成了重大的经济损失。国外同样也存在套管损坏的情况，如原苏联的西西伯利亚油田、北高加索油气田、土库曼地区等。而美国得克萨斯油田、墨西哥湾油田、苏伊士湾油田等，都存在严重的套管损坏问题。研究复杂地层套管错断、弯曲及径向变形破坏机理，寻求相应的预防及补救措施，延长套管使用寿命等，是目前世界各油田迫切需要解决的课题之一。如果能找到有效预防套管损坏的措施或方法，与打新井及修井比较，将会产生巨大的经济效益和社会效益。

套管周围的“复杂力学系统”是构成套管周围的现代地应力场，套管损坏实际上就是套管受周围地应力场的作用而发生破坏，因此，要研究套管损坏机理首先要研究套管周围的地应力。而地应力的研究是当前国际上的一个前沿课题，也是国际石油工程界急需解决的一个重大理论及实际问题。同时，该研究将促进地应力理论的发展，并为预防套管损坏及已破坏井套管修复提供理论依据。复杂地层套管损坏的研究，涉及复杂构造地质学、地球动力学、岩石力学、材料力学、弹塑性力学及流变学等问题，比较复杂，用单纯解析法不可能彻底解决。而用实体模型实验虽然可以得出有用的结果，但成本高，实验条件比较苛刻，所以单纯用实验法也难以完全解决问题。在此情况下，计算机数值模拟技术就显示了其优越性。以物理实验和油田现场测试结果、现场资料为基础，采用计算机数值模拟技术为主要研究手段，是研究地应力与套管损坏机理的重要发展方向。

本书是笔者所在课题组近 20 年来在套管损坏机理研究方面的成果总结，论述了非均匀地应力对套管强度的影响以及盐岩层粘弹性蠕变反演理论，重点放在基于数值模拟的地应力与套管损坏机理研究，为预防套管损坏提供理论依据；同时与油田现场实际相结合，重点研究了射孔孔眼对套管抗挤强度的影响、磨损对套管失效的机理、套管接头泄漏及滑脱失效机理、地应力与套管损坏机理、注水开发对地应力与套管的影响以及盐岩塑性流动地层套管变形预防措施等。

本书由“油气藏地质及开发工程国家重点实验室（西南石油大学）”、国家自然科学基金项目“基于数值模拟的复杂地层套管破坏机理研究”（编号：50074025）以及国家自然科学基金项目“基于数值模拟的复杂地层地应力场反演研究”（编号：50774063）资助完成。

本书在编写过程中，得到了国家自然科学基金项目“基于数值模拟的复杂地层地应力场反演研究”的主要研究人员韩建增、唐波、杨龙、曾久长、李渊、董事尔、康毅力、林元华和刘向君等领导和专家的帮助。此外，本书在研究成果以及油田现场资料等方面，还得到了华北油田董范副总经理和青海油田黄生远高级地质师的大力支持和帮助，笔者在此表示衷心地感谢！

由于笔者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 地应力测量及反演在岩土工程中的应用与发展	(1)
1.2 地应力反演在油气井工程中的应用与发展	(2)
1.3 国内外套管损坏情况	(4)
1.4 国内外研究现状	(5)
1.5 国内外套管柱设计现状	(6)
1.6 套管失效案例分析	(11)
1.7 套管破坏机理及其原因	(17)
第2章 岩石力学及套管钢材实验	(21)
2.1 套管损坏段地层岩石物理力学性质实验	(21)
2.2 泥岩、膏泥页岩、盐岩地层岩石物理力学性质实验	(28)
2.3 固井水泥力学性能实验	(29)
2.4 套管钢材拉伸实验	(29)
2.5 油田测试结果分析	(31)
第3章 非均匀地应力对套管强度的影响	(39)
3.1 理想圆管模型的建立与求解	(39)
3.2 考虑套管制造缺陷的修正	(41)
3.3 与实验数据的对比	(41)
3.4 同心圆环嵌套力学第一基本问题	(42)
3.5 孔板力学第一基本问题	(49)
3.6 地层—水泥环—套管组合体理论研究	(53)
3.7 非均匀地应力与套管变形的关系	(60)
3.8 研究总结	(64)
第4章 盐岩层粘弹性蠕变反演	(65)
4.1 盐岩层粘弹性反演的原理	(65)
4.2 常见粘弹性模型的参数反演	(67)
4.3 粘弹性参数反演解的唯一性	(74)
4.4 工程应用实例	(75)
4.5 盐岩塑性流动地层地应力反演	(77)
4.6 研究总结	(79)
第5章 射孔孔眼对套管抗挤强度的影响	(80)
5.1 射孔孔眼对套管抗挤强度影响理论分析	(80)
5.2 射孔孔眼对套管应力集中系数研究	(85)
5.3 讨论与总结	(89)

5.4	射孔套管抗挤强度综合因素有限元分析	(90)
第6章	磨损对套管失效的机理	(101)
6.1	概述	(101)
6.2	套管磨损后的挤毁强度计算理论公式	(102)
6.3	套管内壁磨损对其抗内压性能的影响	(104)
6.4	磨损对套管接头的拉伸与内压强度的影响	(113)
6.5	结论	(122)
第7章	套管接头泄漏及滑脱失效机理	(124)
7.1	套管接头泄漏和滑脱机理	(124)
7.2	套管偏梯形螺纹接头泄漏机理的有限元分析	(133)
7.3	结论	(139)
第8章	地应力对套管损坏的影响	(141)
8.1	概述	(141)
8.2	计算机仿真模拟技术	(141)
8.3	地层岩石帽盖数学模型	(143)
8.4	荆丘油田沙二段地应力反演研究	(149)
8.5	跃进二号油田东高点地应力反演研究	(151)
第9章	注水开发对地应力及套管的影响	(161)
9.1	概述	(161)
9.2	注水开发有限元模型的建立	(162)
9.3	结果分析	(168)
9.4	总结	(171)
第10章	岩盐塑性流动地层套管变形预防措施	(173)
10.1	平面问题的地应力反演有限元模型	(174)
10.2	加厚套管仿真分析	(177)
10.3	焊加强筋套管的仿真分析	(178)
10.4	双层组合套管计算机仿真模拟分析	(178)
10.5	液体介质的组合套管力学及计算机仿真分析	(185)
参考文献		(193)

第1章 绪 论

复杂力学系统^[1]是构成空间研究区块地应力场的力学系统,由地质构造应力、岩石粘弹塑性流动应力、岩石蠕变应力、地层孔隙压力、上覆岩层重力及水平地应力等所产生。该力学系统所处的地层称为“复杂力学系统地层”,本书简称为“复杂地层”。

地应力的研究是当前国际上的一个前沿课题,也是国际石油界的一个重大理论和实际问题,是直接影响油气勘探开发的一个新理论、新思维、新概念及新趋势^[2]。在开发过程中油田地下应力场的变化直接影响着油气田的开发和开采。油气藏开发工程是地下岩层中渗流场、应力场、温度场等的耦合问题,其中地应力的作用占有重要地位。在油气田开发过程中,地应力对采注井网的布置、水力压裂的设计、水压裂缝的延伸扩展规律、开采过程中的出砂、钻井套管的变形以及井壁的稳定等方面都有重要影响。地应力作用形成地层裂缝、断层等构造,是油气运移、聚集的通道和场所。现代应力场影响和控制着油气田在开发过程中油、气、水的动态变化,油气开采过程中,岩石和裂缝孔隙压力降低,岩体收缩,导致岩石中应力变化。如果能够准确模拟出开发区块的地应力场分布大小,划分出整个区块的张应力区和压应力区,则对油气的勘探开发起到很大的帮助。因为张应力可以使地层岩石产生拉断形成裂缝,而油气的运移和聚集经常发生在裂缝发育区,那么根据张应力区,就可以确定出裂缝发育区,为油气勘探开发及确定井位提供准确的定位。在生产井中,如果能实时动态模拟出注入和采出过程中开发层段区块内的地应力场,那么调整开发区块的注采参数,改善地应力场的合理分布,将对油气田开发的整体效益、安全和环保起着至关重要的作用,同时对复杂地层预防套管损坏提供理论依据。因此,开发区块地应力场的研究以及地应力场反演研究在油气勘探开发中具有重要的现实意义。

1.1 地应力测量及反演在岩土工程中的应用与发展

目前测量地应力的方法很多^[2-6],如震源机制解法、原地应力测量法、跨断层位移测量法、井壁崩落法、水压致裂法、地面电测法、波速各向异性法、天然地震反演法等等。研究区块只能进行有限地测量,不可能将整个区块的地应力都进行详细测量,要获得整个研究区块的地应力场分布,最有效的办法就是用有限元数值模拟的方法来研究整个连续介质区块的应力分布大小。在石油勘探开发中,由于研究区块较大,而测量的参数信息量少,直接用有限元数值模拟所得的结果往往与实际情况有较大的偏差,这就成为地应力理论分析和数值模拟的“瓶颈”,而反演分析是解决这一难题的最有效的途径之一^[6]。为此,本书提出将岩土工程反演理论引入油气勘探开发的“深部”复杂地层地应力研究。反演理论在“浅部”地层的岩土工程中研究地应力方面日趋成熟且应用较多^[7-12]。而该理论在石油行业中的“深部”复杂地层地应力与套管损坏机理研究方面的报道几乎没有^[13-14]。近年来,随着计算机软硬件技术的高速发展,大型通用有限元仿真软件也得到迅速发展,反演方法与有限元数值

模拟相结合成为深部复杂地层地应力场研究的有效手段。

从 1915 年哈斯特测定初始地应力开始,开创了通过现场量测信息反演确定初始地应力的历史。20 世纪中叶,国内外在结合矿山开采及重大工程建设的地质勘察工作中,发展了钻孔应变反演分析地应力计算法^[15]。20 世纪 60 年代末,Backus 和 Glibert 以求取最佳分辨率为出发点,发展了一套反演方法,称之为 BG 方法^[7],随后出现了试错法、网格搜索法、单纯形替换法、样板搜索法、蒙特卡罗法、模拟退火非线性反演算法、遗传算法反演方法等。由正演方法无法预测和计算出原因,到通过已知结果可以反演(反分析或反算)出其未知的原因。20 世纪 70 年代初,Kavanagh 和 Clough 提出反演弹性固体的弹性模量的有限元法^[16],之后,在 1976 年的约翰内斯堡岩土工程勘测研讨会上,Kirsten 提出了量测变形反分析法^[17],随后,Sakurai (1983)提出了反算隧洞围岩地应力及岩体弹性模量的逆解法。到 1991 年,在二维、三维的弹性、弹塑性、粘弹性及粘弹塑性的反演计算和初始地应力的均匀分布、线性分布、函数分布以及均质、非均质材料的反分析等方面取得了显著进展^[18]。近 20 年来反演理论得到不断地发展^[15],日本的樱井春辅提出了位移—应变反演确定初始地应力与地层参数值的有限单元法;杨林德(1990)用边界元反演硐室围岩初始地应力及粘弹性模型参数;徐日庆(1994)在研究土的应力路径非线性行为时采用正反分析方法确定了模型参数。到 20 世纪 90 年代后期^[15],反演分析的研究由初始地应力的研究,逐步发展为求解各种地质参数的全面的理论和数值的方法。随着计算机技术的发展,数值方法的研究成为反演分析的重点。有限元、边界元方法的计算机计算程序已经基本完善,成为反演分析的有力工具。

岩土工程反演是岩石力学和地质力学新近出现的一种工程方法,反演方法可按在现场量测信息和待求参数之间建立基本关系式的途径分为解析法和数值法^[8]。对于几何形状简单、相应的正演分析具有解析解的工程问题,解析法有理论推演严谨、计算过程较简单等优点,但在工程实践中普遍适用性较差。目前已经建立的弹塑性问题的位移反演分析计算法多属于数值法,并可分为边界单元法和有限元法两类。有限元数值模拟反演可考虑材料自动选用任意形式的屈服准则和流动法则,包括对硬化、软化、理想弹塑性模型及横观各向同性材料性态的模拟等。近几年^[9-12],反演方法已经在岩土工程中的拱坝坝体、地基、隧道围岩稳定性以及边坡泥板岩体等岩石力学参数反演中得到了广泛应用。

1.2 地应力反演在油气井工程中的应用与发展

反演方法在油气井工程中“深部”地层应力与套管损坏研究方面以及在勘探开发过程中利用张应力区定井位方面的研究还没有文献公开报道。2003 年,有学者^[19,20]提出并引入用“反演方法”结合有限元数值模拟来研究油气井工程中现代地应力分布与套管损坏机理研究的新方法,取得了理论突破和成功地应用。

在油气田开采中,有关地应力与套管损坏机理方面,国内外过去的研究方法为:20 世纪 80 年代中期,F. Khalf 等比较详细地进行了深部粘塑性盐岩层塑性流动破坏套管的机理研究^[21],但这仅仅是空间复杂力学系统的一种特例,因此具有其局限性。20 世纪 20 年代初,美国研制了一套套管性能实验机,原中国石油天然气总公司管材研究中心(西安)于 1993 年引进了该设备,但它也不能模拟复杂地层所有非均匀地应力。20 世纪到 90 年代初期,原

苏联 Н. И. ягубов 等^[22], 建立了一套模拟套管外壁受岩石粘弹性流动挤压套管的实验装置, 并给出了管壁应力随不同时刻岩石发生粘弹性膨胀而变化的曲线。其实验结果对复杂地质条件下, 套管破坏机理研究具有重要的意义。但实验装置的局限性是不能模拟整个地层结构复杂力学系统套管破坏过程, 其研究仅处于简化的实验水平, 没有从现代地应力变化的角度来研究套管损坏机理。

20 世纪 90 年代末, 美国学者 B. S. Aadony 根据地层裂缝数据^[13], 用反演方法研究了近井眼附近地应力预测, 没有研究整个区块的地应力场分布。2001 年, 美国休斯敦大学和哈里伯顿能源研究中心, Sathish Sankaran 等^[14]开始用有限元数值模拟反演方法对井眼远场地应力进行了评估研究。其研究的出发点都是近井眼的稳定性问题, 没有涉及固井后套管长期服役环境的现代地应力变化问题。近年来, 反演方法在油气井测井工程和地震资料研究中得到了广泛的应用, 但反演方法在复杂地层地应力与套管损坏机理研究中, 还没有见到公开报道。

国内外学者^[3, 4, 9, 23, 24]广泛采用有限元数值模拟软件研究地应力与套管的破坏过程, 这是研究手段发展的大趋势。这些学者用有限元法建立了在地应力作用下套管破坏的力学模型, 在某一地层力学条件下, 详细地研究了套管的失效过程, 为预防套管损坏提供了理论依据。这些模型的出发点主要是为解决工程中的实际应用问题, 因此在模型的建立过程中做了大量简化, 没有建立地应力与套管破坏的反演分析数学—力学模型。

除原苏联和美国外, 原联邦德国克劳塞尔 (Clanstal) 技术大学石油工程研究所 M. Burkowsky 和日本住友金属工业公司 (Sumitomo) 中心研究实验室的 K. Nishika 等人对套管损坏机理进行了大量的试验研究工作, 但仅局限于地层均匀载荷实验, 主要还是基于原苏联和美国的研究基础。加拿大滑铁卢大学 M. B. Dusseault 教授, 也仅仅对地层剪应力、地层错动及油藏应力等对套管损坏进行了初步定性的分析^[25]。

我国于 20 世纪 70 年代末才对套管破坏机理进行研究, 虽然起步较晚, 但在这方面所进行的理论探索十分活跃。20 世纪 80 年代中后期, 国内学者运用岩石流变学理论对套管变形机理进行了定量的理论研究, 并得到了一些有益的启示。由于当时的研究条件和软硬件的限制, 未能全面考虑和研究复杂地层力学系统地应力反演问题以及随油气井注入和采出过程中地应力场的重新分布问题。近年来, 随着计算机和非线性粘弹塑性有限元理论的发展, 采用计算机仿真技术, 用计算机仿真模拟地应力分布与套管变形、错断和弯曲等破坏过程, 为研究套管损坏机理提供了可靠的手段。

近 40 年来, 尽管不少国内外专家在有关地应力与套管损坏机理的研究方面, 进行了大量的研究工作, 但这些研究均基于常规的研究方法, 在理论和方法上没有取得突破。将岩土工程中的反演理论与有限元数值模拟的方法引入“深部”地层油气井工程和油气田开采工程中的现代地应力分布研究, 将在该领域突破理论和方法上的“瓶颈”。因此, 2008 年 1 月, 笔者获得了国家自然科学基金项目“基于数值模拟的复杂地层地应力场反演研究”(编号: 50774063), 是地应力场反演理论在油气井工程“深部”地层中的应用与发展方向。

1.3 国内外套管损坏情况

1.3.1 国内套管损坏情况

通过大量的资料收集可知，20 世纪 70 年代以来，油田套管损坏十分严重，据全国统计的 132628 口井中，到 2007 年底，全国套管损坏数已达 25958 口（表 1-1），约占总井数的 19.57%，套管损坏井主要分布在大庆、胜利、中原、辽河、吉林和大港等全国十多个油田，严重影响了我国原油的生产，造成了重大的经济损失，因此必须寻求其预防和补救措施。

表 1-1 我国油田套管损坏统计

序号	油田	统计井数 (口)	套损井数 (口)	套损井所占比例 (%)	截止时间
1	大庆油田	56700	10300	18.17	2007
2	长庆油田	2802	740	26.41	2005
3	辽河油田	15975	2126	13.31	2007
4	胜利油田	27000	5400	20	2003
5	中原油田	5257	1221	23.23	2007
6	吐哈油田	444	203	45.72	2005
7	江苏油田	1561	140	8.97	2005
8	克拉玛依百重油田	636	70	11.01	2002
9	塔里木油田	731	117	16.01	2002
10	冀东油田	760	230	30.26	2007
11	大港油田	3333	1000	30	2002
12	江汉油田	520	348	66.92	2001
13	玉门老君庙油田	1158	579	50	1989
14	青海油田	485	95	19.59	2002
15	吉林油田	8983	2569	28.6	2007
16	华北油田	6283	820	13.05	2007
合计		132628	25958	19.57	

1.3.2 国外套管损坏情况

国外存在同样情况，在泥岩、膏泥岩、盐岩等地层中由于地层的塑性流动使套管损坏。例如，罗马尼亚的坦勒斯委油田，开发 22 年后有 20% 左右的油井套管损坏。原苏联的班长达勒威油田有 30% 的井因套管损坏严重而停产。拉马宁油田 1937—1982 年，由于地应力场变化而造成的套管损坏井达 3200 余口；西西伯利亚油田由于地层蠕变流动，使套管损坏增多，已有 10% 的油井停产；到 1991 年，北高加索的气田和凝析油田已有 600 多口井的套管柱遭到了破坏；土库曼地区有很厚的盐层，套管损坏更加严重。

美国威明顿油田由于地震引起断层活动, 1947—1950 年的 3 年间套管损坏井达到 3000 口, 该油田从 1962—1986 年间, 由于地下液体大量采出, 出现亏空, 引起该地区较强的构造运动, 油田中心地区地面下沉 9m, 水平位移 3m, 造成油水井套管成片错断, 损失严重; 得克萨斯油田、墨西哥湾油田、苏伊士湾油田等, 都存在严重的套管损坏问题。

根据 40 年来国内外的文献研究和近 10 年来的动态跟踪研究, 套管损坏是国内外几十年来长期存在的问题, 而且一直没有得到解决。因此, 对套管损坏机理进行研究是当前急需解决的课题之一, 其目的在于为特殊类型井油层套管柱设计提供理论依据。

1.4 国内外研究现状

1.4.1 国外研究概述

原苏联: 1930 年, 布尔卡柯夫 (булгаков) 首次考虑到套管本身存在椭圆度这一问题, 随后 (1933 年) 铁木辛哥 (Timoshenko) 从另外的途径也得到了与前者相同的问题。

20 世纪 40 年代, 原苏联国家石油研究所将布尔卡柯夫公式作为套管抗挤强度的计算公式。50 年代开始, 原苏联国家标准采用了萨尔奇索夫 (Г. М. Саркисов)^[26,27] 公式作为抗挤强度的计算依据。萨氏公式不但考虑了套管椭圆度的影响, 同时考虑了壁厚不均匀的影响。随着套管抗挤毁理论的发展, 人们对套管抗静水外压的理论有了许多新的认识, 曾经在原苏联流行了 20 多年并作为国家标准的基础理论的萨尔索夫公式, 终于遇到了耶内敏柯 (Т. Е. Ереценко)^[28,29] 等人的挑战。60 年代初期, 萨氏与耶氏在原苏联《石油业》和《石油与天然气》等杂志上进行过长期公开的争论。耶内敏柯通过大量的实验, 证明萨尔奇索夫公式的计算与实际有很大的出入, 最大误差达 60%, 耶内敏柯公式把套管抗挤计算引入到了弹塑性领域, 把强度计算的概念修正为弹塑性稳定计算。耶内敏柯所做的实验结果也证明了这种修正的正确性。

70 年代初期, 原苏联依辛科 (Ищенко)^[30,31] 通过级数叠加的方法, 对套管外壁受非均匀载荷作用进行了理论研究, 70 年代末期依辛科 (Ищенко) 和 А. П. 谢利瓦休克 (Селеващук) 也进行了试验研究。随后, 80 年代初期依辛科又重新建立了套管外壁受非均匀载荷作用的力学模型, 通过应力叠加的办法得到了套管内部的应力变化理论公式。在当时计算机不发达的情况下, 他的研究也受到了一些局限性, 使得力学模型尽量简化, 出现结果失真的情况。到 90 年代初期, Ягубов, Н. И 等^[32] 建立了一套模拟套管外壁受岩石粘弹性流动挤压套管的实验装置, 并给出了管壁应力随不同时刻岩石发生粘弹性膨胀而变化的曲线。其实验结果对复杂地质条件下, 套管破坏机理研究具有重要的意义, 但实验装置的局限性是不能模拟整个地层结构复杂力学系统套管破坏过程。

美国及其他国家: 20 世纪 70 年代中期以后, 美国以及许多国家 (包括中国) 是以 API (American Petroleum Institute) 规范作为套管的抗挤强度计算标准, API 的套管挤压计算已处于相对稳定状态, 但是研究工作仍然未停止。受阿莫科公司 (AMOCO) 委托的 N. C. Hang 等^[33] 应用塑性增量理论对套管的抗挤能力进行了理论研究。德国的 C. Krug 和 C. Marx 等^[34] 曾对 API 公式作过一些批判性讨论。

20 世纪 80 年代初期, 阿莫科公司的 Pattilo 和 Pankin 在苏伊士湾^[35] 应用双层组合套管

结构,成功地防止了深部盐岩层的径向超高外压的破坏作用,提供了许多成功的经验。80年代中期,F. Khalf^[21]比较详细地实验研究了深部粘塑性盐岩层塑性流动破坏套管的机理,但这仅仅是空间复杂力学系统的一种特例,因此具有其局限性。90年代初,美国研制了一套套管性能实验机,中国石油天然气集团总公司管材研究中心(西安)1993年引进了该设备,但它也不能模拟复杂地层所有非均匀载荷的作用。除原苏联和美国外,原联邦德国克劳塞尔技术大学石油工程研究所 M. Burkowsky^[36]和日本住友金属工业公司中心研究实验室的 K. Nishika 等^[37,38]对套管损坏机理进行了大量的实验研究工作,但仅局限于地层均匀载荷实验,主要还是基于原苏联和美国的研究基础。

近年来,SPE 文献提到用各种大型商用有限元软件(如 ANSYS、MARC、ABAQUS、FLAC3D 和 SAND3D 等)^[38-46]来研究套管的破坏过程,这是研究手段发展的大趋势。由于地层结构非常复杂,使得套管的破坏形式也复杂化,用常规的室内实验来研究套管的破坏过程成本较高,而且可能还得不到满意的结果。目前,随着计算机软硬件的发展,在各行各业,包括石油行业,计算机仿真模拟研究已经逐步取代某些实验研究,而且可靠性较高。

1.4.2 国内研究情况

在我国,20世纪70年代末才对套管损坏机理进行研究,虽然起步较晚,但在这方面所进行的理论探索十分活跃^[47-50]。80年代中后期,西安石油学院窦益华等^[51]、大庆石油学院李子丰^[52]等学者及石油大学黄荣樽、周祖辉、邓金根等学者^[53-56]运用岩石流变学理论对套管变形机理进行了定量的理论研究,并得到了一些有益的启示。其中石油大学黄荣樽教授等对盐岩、泥岩等地层流变损坏套管机理进行模拟实验研究,通过大量的试验结果,建立了泥页岩、盐岩的蠕变模式,对盐岩塑性流动地层套管损坏机理研究有较大的参考价值。

鉴于以上对国内外套管损坏机理的动态跟踪和大量的文献分析,1991年,原西南石油学院(现西南石油大学)和华北油田采油五厂专门成立了油田套管损坏机理研究课题组^[1,57-69],借助于前人的研究基础和成果,同时借助计算机和非线性粘弹塑性有限元理论,采用计算机仿真技术,建立了套管复杂力学系统模型,并将该模型输入计算机,让计算机仿真模拟套管变形、错断和弯曲等破坏过程,取得了创新性的成果^[1,57-69]。1995年,创新性的思想^[66-69]“填充液体的双层组合套管能将复杂地层平面问题非均匀地应力转化为均匀地应力”获得了原中国石油天然气总公司石油科技中青年创新基金项目资助,该成果于1995—1999年9月已成功地在华北油田采油五厂应用了35口井,取得了较大的经济效益和社会效益。2001年和2008年,西南石油大学练章华教授获得了两项国家自然科学基金项目资助,分别为“基于数值模拟的复杂地层套管破坏机理研究”(编号:50074025)和“基于数值模拟的复杂地层地应力场反演研究”(编号:50774063),本书也是在该国家自然科学基金项目资助下完成的研究成果。

1.5 国内外套管柱设计现状

套管抗静水外压的挤毁能力是套管柱设计中一项非常重要的指标,套管挤毁能力的研究是1970年以来十分活跃的课题之一。原因是人们早已认识到由于探井和油井的套管耗资巨大,任何设计计算上的疏忽均会造成重大的经济损失。过分保守的理论将会浪费大量的金属

材料，而过高的估计套管抗挤毁能力，则可能造成油井中后期套管严重变形，甚至破裂的后果。

从世界范围来看，当今已成为规范或标准的套管设计只有两种计算方法，一种是美国石油学会（API）标准，另一种是原苏联国家标准（ГОСТ）。

1.5.1 API 挤毁压力计算公式

API 根据不同的直径与壁厚比（ D/t ），将套管的挤毁压力分为屈服强度挤毁压力、塑性挤毁压力、塑弹性挤毁压力和弹性挤毁压力四种类型。它们的条件是无轴向力和内压力。

1.5.1.1 抗挤强度计算

（1）屈服挤毁强度。

在套管内壁上产生的最小屈服应力的外压力值。

$$\text{当 } \frac{D_c}{\delta} \leq \left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{yp} \text{ 时}$$

$$P_{co} = 2Y_p \left[\frac{\left(\frac{D_c}{\delta} \right) - 1}{\left(\frac{D_c}{\delta} \right)^2} \right] \quad (1.1)$$

其中

$$\left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{yp} = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8 \left(B + 0.0068947 \frac{C}{Y_p} \right)} + A - 2}{2 \left(B + 0.0068947 \frac{C}{Y_p} \right)}$$

$$A = 2.8762 + 1.5485 \times 10^{-4} Y_p + 4.47 \times 10^{-7} Y_p^2 - 1.62 \times 10^{-10} Y_p^3$$

$$B = 0.026233 + 7.34 \times 10^{-5} Y_p$$

$$C = -465.93 + 4.475715 Y_p - 2.2 \times 10^{-4} Y_p^2 + 1.12 \times 10^{-7} Y_p^3$$

式中， D_c 为套管管体名义外径，mm； δ 为套管管体名义壁厚，mm； $\left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{yp}$ 为屈服与塑性挤毁分界点的径厚比； $\left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{pl}$ 为塑性与塑弹性挤毁分界点的径厚比； $\left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{le}$ 为塑弹性与弹性挤毁分界点的径厚比； Y_p 为管材屈服强度，MPa； P_{co} 为抗挤强度，MPa。

（2）塑性挤毁强度。

套管在塑性挤毁范围内的最小挤毁压力值。

$$\text{当 } \left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{yp} \leq \left(\frac{D_c}{\delta} \right) \leq \left(\frac{D_c}{\delta} \right)_{pl} \text{ 时:}$$

$$P_{co} = Y_p \left[\frac{A}{\left(\frac{D_c}{\delta} \right)} - B \right] - 0.0068947 C \quad (1.2)$$

其中

$$\left(\frac{D_c}{\delta}\right)_{pt} = \frac{Y_p (A - F)}{0.0068947C + Y_p (B - G)}$$

$$F = \frac{3.238 \times 10^5 \left(\frac{\frac{3B}{A}}{2 + \frac{B}{A}}\right)^3}{Y_p \left(\frac{\frac{3B}{A}}{2 + \frac{B}{A}} - \frac{B}{A}\right) \left(1 - \frac{\frac{3B}{A}}{2 + \frac{B}{A}}\right)^2} \quad G = \frac{FB}{A}$$

(3) 过渡挤毁强度。

套管从塑性到弹性过渡区的最小挤毁压力值。

当 $\left(\frac{D_c}{\delta}\right)_{pt} \leq \frac{D_c}{\delta} \leq \left(\frac{D_c}{\delta}\right)_{te}$ 时:

$$P_{co} = Y_p \left[\frac{F}{\frac{D_c}{\delta}} - G \right] \quad (1.3)$$

其中

$$\left(\frac{D_c}{\delta}\right)_{te} = \frac{2 + \frac{B}{A}}{\frac{3B}{A}}$$

(4) 弹性挤毁强度。

套管在弹性挤毁范围内的最小挤毁压力值。

当 $\frac{D_c}{\delta} \geq \left(\frac{D_c}{\delta}\right)_{te}$ 时:

$$P_{co} = \frac{3.238 \times 10^5}{\left(\frac{D_c}{\delta}\right) \left(\frac{D_c}{\delta} - 1\right)^2} \quad (1.4)$$

1.5.1.2 管体屈服强度

使管体产生屈服所需要的轴向载荷值。

$$T_y = 7.85 \times 10^{-4} (D_c^2 - D_{ci}^2) Y_p \quad (1.5)$$

1.5.1.3 抗内压强度

$$P_{bo} = 0.875 \left[\frac{2Y_p \delta}{D_c} \right] \quad (1.6)$$

1.5.1.4 抗拉强度

(1) 圆螺纹连接。

丝扣断裂强度:

$$T_o = 9.5 \times 10^{-4} A_{jp} U_p \quad (1.7)$$

丝扣滑脱强度:

$$T_o = 9.5 \times 10^{-4} A_{jp} L_j \left[\frac{4.99 D_c^{-0.59} U_p}{0.5 L_j + 0.14 D_c} + \frac{Y_p}{L_j + 0.14 D_c} \right] \quad (1.8)$$

其中 $A_{jp} = 0.785 [(D_c - 3.6195)^2 - D_{ci}^2]$

式中, D_{ci} 为套管内径, mm; L_j 为丝扣配合长度, mm; U_p 为管材最小极限强度, MPa; A_{jp} 为最末一扣管壁截面积, mm²。

(2) 梯形螺纹连接。

管体丝扣强度:

$$T_a = 9.5 \times 10^{-4} A_p U_p \left[25.623 - 1.007 \left(1.083 - \frac{Y_p}{U_p} \right) D_c \right] \quad (1.9)$$

接箍丝扣强度:

$$T_v = 9.5 \times 10^{-4} A_c U_c \quad (1.10)$$

其中

$$A_p = 0.785 (D_c^2 - D_{ci}^2) \quad A_c = 0.785 (D_c^2 - D_{cj}^2)$$

式中, D_{cj} 为接箍内径, mm; U_c 为接箍最小极限强度, MPa; A_p 为管端截面积, mm²; A_c 为接箍截面积, mm²。

1.5.1.5 三轴应力强度

套管在内外压力及轴向载荷联合作用时的套管强度。

三轴抗挤强度:

$$P_{ca} = P_{co} \left[\sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_a + P_i}{Y_p} \right)^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a + P_i}{Y_p} \right) \right] \quad (1.11)$$

三轴抗内压强度:

$$P_{ba} = P_{bo} \left[\frac{r_i^2}{\sqrt{3r_o^4 + r_i^4}} \left(\frac{\sigma_a + P_o}{Y_p} \right) + \sqrt{1 - \frac{3r_o^4}{3r_o^4 + r_i^4} \left(\frac{\sigma_a + P_o}{Y_p} \right)^2} \right] \quad (1.12)$$

三轴抗拉强度:

$$T_a = 10^{-3} \pi (P_i r_i^2 - P_o r_o^2) + \sqrt{T_o^2 - 3 \times 10^{-6} \pi^2 (P_i - P_o)^2 r_o^4} \quad (1.13)$$

式中, σ_a 为轴向应力, MPa; P_i 为管内液柱压力, MPa; P_o 为管外液柱压力, MPa; r_i 为套管内半径, mm; r_o 为套管外半径, mm。

1.5.1.6 管材屈服强度

$$Y_p = \frac{10^3 T_y}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} \quad (1.14)$$

或用钢级代号 (如 N-80 代号为 80) 乘以 1000 除以 145 得管材屈服强度 (MPa)。

式中, T_y 为管体屈服强度, kN。

1.5.2 原苏联挤毁压力公式 (ГОСТ)

1930 年, 布尔卡柯夫 (буЛгаков) 首次考虑到套管本身存在椭圆度这一问题, 得到套管抗挤强度计算公式, 随后 (1933 年) 铁木辛哥 (Timoshenko) 从另外的途径也得到了与前者相同的公式, 即布一铁公式:

$$P_c = K \left\{ \delta_y + \frac{EK^2}{1-\mu^2} \left(1 - \frac{3e}{2k}\right) - \sqrt{\delta_y + \left[\frac{EK^2}{1-\mu^2} \left(1 + \frac{3e}{2k}\right) \right]^2 - \frac{4EK^2\delta_y}{1-\mu}} \right\} \quad (1.15)$$

式中, e 为管壳椭圆度, $e = 4u_0/D$ (u_0 为套管初始最大挠度, D 为名义外径)。

布氏通过实验证明, 最终式 (1.15) 简化为:

$$P_c = 1.24K \left\{ \delta_y + EK^2 \left(1 + \frac{3e}{2k}\right) - \sqrt{\delta_y + \left[EK^2 \left(1 + \frac{3e}{2k}\right) \right]^2 - 4EK^2\delta_y} \right\} \quad (1.16)$$

式 (1.16) 为 20 世纪 40 年代原苏联国家石油研究所作为套管抗挤强度的计算公式。从 50 年代开始, 原苏联国家标准采用了萨尔奇索夫 (Г. М. Саркисов) 公式作为抗挤强度的计算^[26,27] 依据。萨氏公式不但考虑了套管椭圆度的影响, 而且同时考虑了壁厚不均匀的影响。

萨氏老公式:

$$P_c = 1.1K_{\min} \left\{ \sigma_y + EK_0^2\rho \left(1 + \frac{3e}{4\rho^2 K_{\min}}\right) - \sqrt{\left[\sigma_y + EK_0^2\rho \left(1 + \frac{3e}{4\rho^2 K_{\min}}\right) \right]^2 - 4K_0^2\rho\sigma_y} \right\} \quad (1.17)$$

萨氏新公式:

$$P_c = 1.1K_{\min} \left\{ \sigma_p + EK_0^2\rho \left(1 + \frac{3e}{2\rho^2 K_{\min}}\right) - \sqrt{\left[\sigma_p + EK_0^2\rho \left(1 + \frac{3e}{2\rho^2 K_{\min}}\right) \right]^2 - 4K_0^2\rho\sigma_p} \right\} \quad (1.18)$$

耶内敏柯公式^[28]:

$$P_{kp} = 1.1K (A - \sqrt{A^2 - B^2}) \quad (1.19)$$

$$A = \sigma_y - EK^2 \left[1 - 3\lambda\beta^2 + \lambda\beta^3 + \frac{3e}{2K} (1 - 2\beta + \lambda\beta^2) \right] \quad (1.20)$$

$$B = 4EK^2\sigma_y [1 - 3\lambda\beta^2 + \lambda\beta^3]$$

$$\beta = c/\delta$$

20 世纪 70 年代中期以前, 我国石油套管是按 ГОСТ 标准式 (1.17) 进行的。80 年代以来我国已经基本上采用了 API 标准。

1.5.3 我国套管柱设计

在我国, 关于套管抗挤毁能力的研究, 虽然起步较晚, 但在这方面所进行的理论探索十分活跃。但是, 我国套管柱的设计还存在许多问题, 国外套管柱设计方法不断改进, 提出不少新方法。例如美国除 API 方法外, 还有 Charled M. Prentice 法、W. C. Goin 以及阿莫科公司的方法; 原苏联改进的套管柱设计方法原联邦德国 BEB 公司的套管柱设计方法等。目前我国有关套管柱设计方面也与国外的设计同步发展, 除国内自己开发套管设计软件外, 也引进国外的设计软件, 针对不同井身结构, 不同地层进行套管柱优化设计。

当然, 由于井下情况复杂多变, 不可能找到一种通用的设计方案, 适合所有地区, 所有油井的设计, 在一定程度上还依赖于经验数据, 依赖于对井下情况的了解, 依赖于对不同地区的不同岩性、井身结构和油气井生产工艺的周密考虑。因此, 需要组织一批科研人员开展这方面的课题研究, 如套管挤压理论及试验研究、不同岩性研究、非均匀载荷下套管的抗挤毁压力研究、延长套管使用寿命研究等。

1.6 套管失效案例分析

大量的数据表明,不论在套管钻井、完井及测试的失效事故中,还是在后期生产开发的套管损坏中,套管本身的质量和操作性能都是很重要的影响因素,甚至是主要的原因。本书列举了多起套管失效的案例^[71],并根据套管使用和设计因素的研究,提出了套管选材与设计应注意的几个问题,以便为防止套管早期失效事故提供参考。

1.6.1 套管破裂或断裂

案例1:1988年6月9日,大庆石油管理局物资供应处检验科试压车间进行套管水压试验。一根套管接箍爆裂,压力16MPa,有9mm宽纵向裂纹。分析认为,外表面存在1~4mm深贯穿接箍全长的原始折叠裂纹,接箍有明显的过热,材料呈脆性状态,内部存在条带状密集分布夹杂物(图1.1)。

案例2:中原油田文13-345井完井,3521.57m。射孔后压力下降很快,压裂时泵压至54MPa时,采油树崩断四根绷绳,带着一根套管飞向空中,全部油管落井,后发现套管接箍纵向开裂(图1.2)。分析认为,套管存在原始折叠缺陷。



图 1.1 裂纹沿夹杂物扩展 (100 倍)

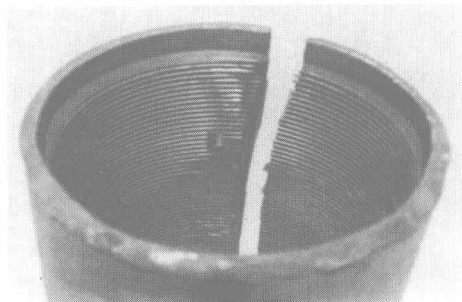


图 1.2 5 1/2 in P110 接箍纵向开裂形貌

案例3:长庆石油勘探局在A34井下 $\phi 139.7\text{mm} \times 7.72\text{mm}$ J55 国产套管遇阻,接方钻杆进行循环处理,第四次上提784kN时,套管落井,后发现183号套管在距接箍4.62m处断裂,在横向断裂时又有300mm长分层撕裂(图1.3)。分析认为,套管外表面存在严重折叠裂纹和管体存在大面积分层缺陷(图1.4)。

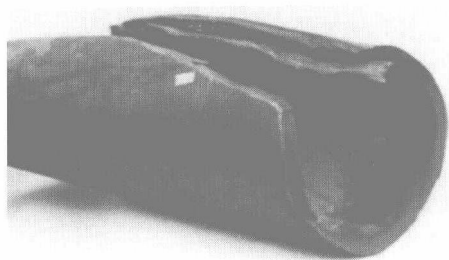


图 1.3 J55 套管断裂与撕裂形貌

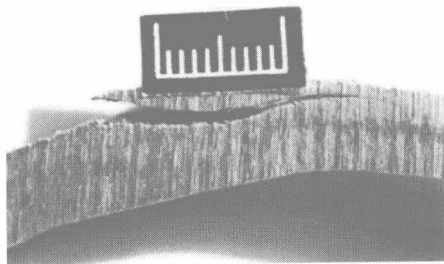


图 1.4 表面折叠缺陷