

油气井井筒强化 关键技术及工业化应用

YOUQIJING JINGTONG QIANGHUA
GUANJIAN JISHU JI GONGYEHUA YINGYONG

曾义金 陈 勉 林永学 著

石油工业出版社

油气井井筒强化 关键技术及工业化应用

曾义金 陈 勉 林永学 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了井筒强化的基本概念,描述了井壁稳定、盐膏层蠕动及防漏堵漏室内模拟评价方法,建立了井壁围岩力学失稳模型及盐膏层蠕变的本构关系和蠕动压力计算模型,提出了泥页岩井壁稳定钻井液技术及控制工艺方法、深层盐膏层钻井密度设计方法、深层盐膏层套管外载分析及套管强度设计技术,论述了防漏堵漏材料与体系以及防漏堵漏推荐做法、井筒强化技术现场使用方法和使用效果。

本书可供从事岩石力学、石油钻井工程、钻井液、油田化学及相关专业的科研和现场专业技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气井筒强化关键技术及工业化应用 / 曾义金, 陈勉, 林永学著.
北京: 石油工业出版社, 2015.8

ISBN 978-7-5183-0656-5

I. 油…

II. ①曾…②陈…③林…

III. 油气井 - 井筒

IV. TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 028088 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

编辑部: (010) 64523537 图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 22

字数: 558 千字

定价: 88.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

序

井壁失稳及井筒漏失是目前困扰石油行业的重大工程技术难题之一。由于失稳和漏失机理复杂,要求控制的技术方法严格,解决的难度大,一直以来是石油工程科技工作者的重点研究对象。随着油气资源的勘探与开发步入到深层复杂地层领域,特别近年来盐下油气藏、海相油气藏、山前构造带等复杂油气藏和页岩油气藏的勘探开发,井壁失稳和井漏问题尤其突出,增加了钻井工程的风险和工程成本。因此,攻克盐膏层蠕变、泥页岩坍塌、破碎性地层和缝洞型地层漏失难题,形成巨厚盐膏层穿盐、泥页岩稳定和大型恶性漏失堵漏等井筒强化技术是非常重要的。

中国塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地及周缘和我国收并购的部分海外区块等地质条件复杂,是石油钻井中井壁失稳和井漏的重点发生地。要解决这些地区井壁失稳和井漏难题,必须解决三个核心问题:一是如何实验分析失稳和漏失特性,了解其内在的规律和机理;二是如何通过数学模型量化其变化规律,预测和识别井下可能或已经出现的复杂情况;三是如何控制井壁失稳与井漏,包括研制新材料新体系新方法,形成新技术等,制定系统的技术对策,达到解决上述问题的目的。本书作者以上述三个问题为核心,重点针对盐膏层失稳、泥页岩失稳和缝洞型地层漏失,开展了大量的、卓有成效的潜心研究,取得了丰硕的成果:建立了盐膏层蠕变、泥页岩失稳和缝洞型地层实验室模拟分析方法,揭示了盐膏层蠕动规律、泥页岩失稳机理和缝洞型地层漏失机理,研制了盐膏层和泥页岩钻井新型钻井液和堵漏液材料与配方,形成了针对性的解决工艺配套技术,成果得到规模化应用,较好解决了井壁失稳和大型恶性漏失难题。

本书发展了井壁失稳和井筒漏失理论,提出了井筒强化的基本概念,形成了相应的技术系列,具有较高的理论水平和实际应用价值,研究成果在中国石化塔河油田等油田进行了规模化应用,为勘探开发作出了重要贡献,也为我国此类型难题的解决提供了理论指导和成功借鉴,必将促进我国石油工程技术的进步。

罗年业

2014年12月

前 言

井筒强化技术主要包括井壁稳定技术和防漏堵漏技术两部分，是指钻井过程中将井壁失稳和井漏控制在行业、企业质量标准范围内的相关工艺技术方法。这个技术术语在国外是近几年才提出的，主要目的是提高地层承压能力。本书将井壁稳定与防漏堵漏合并在一起，提出以拓展钻井液密度窗口为目标的井筒强化技术术语，在国内外是第一次提出。因井壁坍塌、变形和钻井液漏失导致井下压力控制失去平衡是形成钻井过程中窄密度窗口诱因，从而引发井下复杂技术难题。如单一从一个问题出发提出钻井液体系解决方案，不能有效解决井壁失稳和井漏对钻井液密度要求这对矛盾，因此，提出井筒强化这个术语有利于全面掌握地层失稳和井筒漏失问题并采取综合的治理措施。

长期以来，井壁失稳和井漏问题是困扰石油行业的重大工程技术难题之一。随着油气资源的勘探与开发逐渐步入到深层复杂地层领域，特别是盐下油气藏、海相油气藏、山前构造带等复杂油气藏的勘探开发，钻井过程中所面临的地层条件也越来越复杂，井壁失稳和井漏问题尤为突出。复杂的地层条件增加了钻井工程的风险，极易导致井下复杂事故的发生。“十一五”以来，通过国家重大专项的支持和中国石化科技部的支持，加大了井筒强化技术的攻关力度，并取得了卓有成效的研究成果。揭示了盐膏层蠕变规律、泥页岩失稳机理和缝洞型地层漏失机理，建立了实验室分析实验方法，研制了新型钻井液和堵漏液材料与配方，形成了不同的工艺技术方法，成果得到工业化应用，较好地解决了井壁失稳和井漏问题，特别是大型恶性漏失得到很好的解决，为勘探开发提供了关键技术。

本书重点介绍了泥页岩失稳机理、盐膏层失稳机理、井漏机理及相关的控制技术，目的是提供一种相应的模拟评价方法、分析计算模型和控制技术以及相关施工工艺技术。为了更好地反映技术的先进性，笔者在近几年研究成果的基础上，编著时力求突出重点和特色，做到先进、系统和实用。

本书分5章。第1章主要说明了井筒强化的基本概念，井漏与井壁失稳特征以及井筒强化技术的现状；第2章从泥页岩组成及理化特性分析方法入手，描述了井壁稳定室内评价方法，揭示了泥页岩井壁稳定力学机理和硬脆性地层井壁围岩失稳机理，建立了泥页岩非线性力学模型和硬脆性地层井壁围岩力学化学耦合失稳模型，提出了泥页岩井壁稳定钻井液技术及控制工艺方法；第3章重点论述了盐膏层特别是深层盐膏层特性、实验分析方法和盐膏层失稳机理，建立了盐膏层蠕变的本构关系及蠕变计算模型，介绍了钻井液体系、

钻井液密度设计方法，提出了深层盐膏层套管外载分析及非均匀载荷套管强度设计技术，介绍了盐膏层钻井安全控制技术；第4章系统分析了漏失的类型与特征、不同地层特别是裂缝性地层漏失机理与诊断技术、防漏堵漏室内评价方法、防漏堵漏材料与体系以及防漏堵漏推荐做法；第5章系统总结了井筒强化技术现场使用方法以及在新疆塔河、川东北等不同地区使用效果。

本书得到了金衍、刘四海、高书阳、陈曾伟等的大力帮助和支持，特别是罗平亚院士为本书作序，在此一并表示衷心的感谢。

受笔者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请专家、读者提出宝贵意见和建议，以便修订时补充完善。

目 录

1 绪论	1
1.1 井筒强化的概念	1
1.2 井壁失稳和井漏特征	2
1.2.1 井壁失稳特征	2
1.2.2 井漏特征	5
1.3 井筒强化技术现状	8
1.3.1 泥页岩井壁失稳技术现状	8
1.3.2 盐膏岩蠕动研究技术现状	10
1.3.3 堵漏技术研究现状	12
2 泥页岩井壁失稳机理与控制技术	15
2.1 泥页岩及理化特性分析方法	15
2.1.1 泥页岩组成及水化作用机理	15
2.1.2 泥页岩理化特性分析方法	19
2.2 井壁稳定室内模拟评价方法及适用性分析	27
2.2.1 常用井壁稳定室内模拟评价方法	27
2.2.2 井壁稳定室内评价方法适用性分析	35
2.3 泥页岩失稳的力学机理	37
2.3.1 水化泥页岩的井壁稳定力学机理	37
2.3.2 硬脆性地层井壁围岩失稳机理研究	68
2.4 泥页岩井壁稳定钻井液技术	103
2.4.1 油基钻井液	103
2.4.2 聚胺钻井液	113
2.4.3 KCl—聚合物钻井液	120
2.4.4 正电性钻井液	128
2.5 泥页岩井壁稳定工艺技术	132
2.5.1 确定合理的钻井液密度窗口	132
2.5.2 优化井眼轨迹	133
2.5.3 控制钻井液流变性能	134
2.5.4 提高钻井液的抑制性	135
2.5.5 强化封堵	136
2.5.6 活度平衡	137
3 盐膏岩井壁稳定机理与控制技术	138
3.1 盐膏层岩石组分与工程特性	138
3.1.1 盐膏层岩石组分	138

3.1.2	盐膏层岩石工程特性	139
3.2	深层盐膏岩层蠕变规律	142
3.2.1	盐膏岩蠕变试验方法	142
3.2.2	蠕变试验结果分析方法	149
3.2.3	盐膏层蠕变的本构关系及模型	153
3.2.4	盐膏层蠕变损伤机理和本构关系	158
3.3	深层盐膏层蠕变压力三维计算	161
3.3.1	计算模型与参数确定	161
3.3.2	深层盐膏层蠕变压力数值模拟	162
3.4	盐膏层井壁失稳控制技术	165
3.4.1	盐膏层井壁失稳分析	165
3.4.2	盐膏层井壁失稳机理	167
3.4.3	盐膏岩溶解实验技术	169
3.4.4	钻井液密度谱的绘制和应用方法	175
3.4.5	现场钻井液密度设计方法	176
3.5	深层盐膏层钻井液体系与控制技术	177
3.5.1	欠饱和盐水钻井液体系	178
3.5.2	饱和盐水钻井液技术	184
3.5.3	钻井液配制与维护处理技术	190
3.6	深层盐膏层套管外载分析及强度设计技术	191
3.6.1	深层盐膏层套管外载计算	191
3.6.2	套管强度特性的理论分析	196
3.6.3	盐膏层套管强度设计	200
3.7	盐膏层钻井工艺技术	202
3.7.1	盐膏层井身结构设计技术	202
3.7.2	盐膏层扩孔技术	203
3.7.3	盐膏层施工工艺技术措施	204
4	井筒漏失机理与控制技术	206
4.1	漏失的类型与特征	206
4.1.1	漏失通道特征	206
4.1.2	漏失严重程度	208
4.1.3	其他方法分类	209
4.2	漏失机理与诊断	209
4.2.1	漏失发生机理	210
4.2.2	裂缝性地层漏失速率特征	220
4.2.3	漏失监测与诊断	224
4.3	防漏堵漏室内评价方法	241
4.3.1	随钻防漏堵漏评价方法	241
4.3.2	裂缝性漏失封堵评价方法	242

4.4 防漏堵漏材料与体系	249
4.4.1 国内外钻井堵漏材料现状	249
4.4.2 非渗透随钻防漏堵漏材料与体系	256
4.4.3 交联成膜堵漏材料与体系	257
4.4.4 化学固结堵漏材料与体系	261
4.4.5 化学触变堵漏材料与体系	265
4.4.6 堵漏推荐作法	269
4.5 防漏堵漏工艺技术	270
4.5.1 随钻防漏堵漏施工工艺	270
4.5.2 间歇式憋压堵漏施工工艺	271
4.5.3 近平衡堵漏施工工艺	271
4.5.4 双液触变堵漏施工工艺	272
4.5.5 逐次泵注堵漏施工工艺	272
5 井筒强化的工业化应用	274
5.1 塔里木地区的工业化应用	274
5.1.1 塔河地区	274
5.1.2 塔中地区	289
5.1.3 巴麦地区	296
5.2 川东北地区的工业化应用	305
5.2.1 地质概况及井筒强化技术难点	305
5.2.2 川东北地区井筒强化技术应用	308
5.3 页岩气井中的工业化应用	311
5.3.1 彭水地区	311
5.3.2 焦石坝地区	318
5.4 海外区块的工业化应用	322
5.4.1 缅甸 D 区块	322
5.4.2 伊朗 YD 油田	328
参考文献	334

1 绪 论

1.1 井筒强化的概念

井筒强化技术是指钻井过程中能有效控制井壁失稳和井漏的相关工艺技术方法。井筒强化可以拓宽钻井液安全密度作业窗口，提高作业的效率与安全保障能力。

井筒强化技术主要包括两部分内容，一是井壁稳定技术，二是防漏堵漏技术。由于地层压力、地层坍塌压力和地层漏失压力三者的影响，钻井作业中，为了保持井筒稳定，通常需提高钻井液密度和降低钻井液对地层物理化学作用程度来保持井壁稳定，而另一方面需降低钻井液密度和增加钻井（堵漏）液对地层的物理化学作用以避免漏失。治理漏失问题和井壁稳定问题在技术手段上本身存在矛盾，钻井中应尽可能杜绝这个矛盾的发生或激化，避免井下复杂事件的出现，因此，在钻井工程设计中，要充分考虑三个压力的平衡，设计者力求使上述两个问题不同时出现在同一个作业井段。如果一旦出现这个问题，就会出现因安全作业密度窗口窄而引发的工程施工难题。

井壁稳定技术包括井壁失稳机理分析与评价方法，防塌、防缩径工艺技术等。主要目的是降低坍塌压力增量，即在维持井壁稳定和保持钻井施工安全的基础上，可以使用较低钻井液密度，即使用钻井液密度下限，来达到解放钻井速度、保护油气层、防止漏失等目的。防漏堵漏技术包括漏层或弱承压层识别方法、漏失机理与分析方法、防漏堵漏工艺技术等。主要目的是增加地层承压能力，即在维持井筒不漏失和保持钻井施工安全的基础上，可以使用更高的钻井液密度，换言之即提高钻井液密度使用上限，来达到井控安全、提高固井质量等目的，如图 1.1 所示。

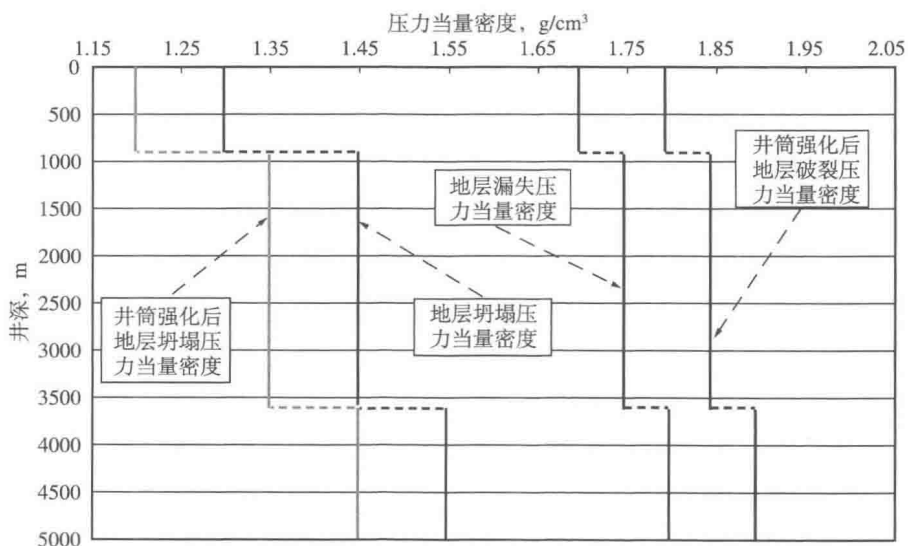


图 1.1 井筒强化技术拓宽钻井液安全密度窗口示意图

1.2 井壁失稳和井漏特征

1.2.1 井壁失稳特征

井壁失稳是指钻井过程中井壁坍塌、井眼缩径和地层破裂，主要出现在泥页岩和盐膏岩井眼中。从力学上看，其主要失稳机理为井壁围岩张性破裂和剪切破坏。主要表现为水敏性泥页岩的水化膨胀失稳、硬脆性泥页岩结构弱面失稳、盐膏岩蠕变缩径等，如图 1.2 所示。

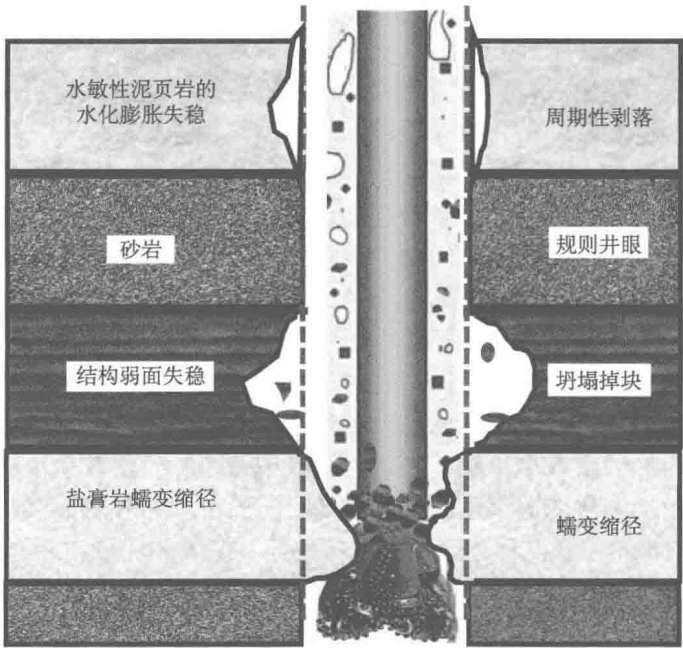


图 1.2 井壁失稳示意图

井壁失稳问题的原因可分为天然和人为因素两个方面：

天然因素方面：地质构造类型和原地应力，地层的岩性和产状，含黏土矿物的类型，弱面的存在及其倾角，层面的胶结情况，地层强度，裂隙节理的发育，孔隙度，渗透率及孔隙中流体压力等。

人为因素方面：钻井液的性能（失水、黏度、密度），钻井液和泥页岩的化学作用的强弱（水化膨胀），井眼周围钻井液侵入带的深度和范围，井眼裸露的时间，钻井液的环空返速对井壁的冲刷作用，循环波动压力和起下钻的抽吸压力，井眼轨迹的形状，钻柱对井壁的摩擦和碰撞等。

由于钻井过程中的井壁失稳是一个世界性难题，因此受到科研人员的高度重视。长期以来，研究的重点多集中于化学防塌技术，钻井液工作者进行了大量行之有效的研究工作，从化学的角度出发研制抑制泥页岩水化、膨胀和实现离子活度平衡的钻井液处理剂和配方，使井壁失稳现象大为减少，井壁稳定技术取得很大进展，但是仍然解决不了水化程度弱、强度低的泥页岩、砂泥岩地层、强地应力条件的山前构造、弱面地层和井斜及井斜方位引

起的井壁稳定问题。随着认识的提高,在传统研究的基础上,强化了岩石力学的研究。井壁稳定力学研究主要从三个方面入手:岩石力学特性、地应力和井壁稳定力学模型研究。岩石力学参数是基础,地应力是井壁失稳的根本诱因,合理的井壁稳定力学模型是解决井壁稳定的有效途径。结合三个方面研究,掌握地应力状态和地层力学参数,采用合理的力学模型,得出能控制井壁失稳的钻井液密度范围,再配合使用优质钻井液,才可能使得井壁失稳问题得到最大限度的降低。

1.2.1.1 泥页岩失稳

泥页岩是泥岩和页岩的总称,是一种主要以黏土矿物为主的固结程度较高的沉积岩。其中层理不明显,呈现块状的称为泥岩,而具有微层理的称为页岩。泥页岩主要由黏土矿物、陆源碎屑矿物和自生非黏土矿物组成,其中黏土矿物是影响泥页岩物理化学性质的关键因素。泥页岩在地层中分布广泛,约占沉积岩总体积的 55%。在钻井过程中,各种平衡状态被破坏,加之泥页岩本身的水化特性,常常引发各种井筒复杂情况。据统计在各种不同岩性地层钻井中,泥页岩失稳约占 90% 左右,因此有研究者将钻井中的“井壁稳定问题”称为“泥页岩稳定问题”。若在钻井过程中遇到了泥页岩失稳问题,轻则造成钻井时间的延误和钻井费用的增加,重则造成钻井失败、井眼报废。根据泥页岩特性及国内外资料统计分析发现,泥页岩井壁失稳主要表现为硬脆性泥页岩剥落掉块和塑性泥页岩的井眼缩径,具体表现为:

(1) 遇到裂缝发育且吸水性又强的泥页岩,在短期内就会形成大规模的坍塌,裸露一层,剥蚀一层,连续不断,发生周期性坍塌,易于造成坍塌卡钻的严重事故。

(2) 水敏性泥页岩地层与钻井液接触后,易于吸水膨胀,泥页岩发生水化引起井眼缩小,造成卡钻的发生。

(3) 当钻井液密度较低或地层在高应力差的作用下,会产生不同程度的塑性变形,造成缩径。

(4) 在低强度脆性地层,在钻井液冲刷作用下,发生坍塌、崩落掉块,造成井径扩大,对钻井、测井、固井等作业极其不利。

(5) 在钻井液的浸泡作用下,滤液可随岩石微裂隙侵入到硬脆性泥页岩内部,产生水化作用,造成强度降低而发生坍塌掉块。

(6) 深层泥页岩、碳质页岩与夹层煤岩层理、割理、裂隙发育,岩石脆性大、强度低,在地层应力作用或其他外界因素影响下很不稳定,易剥落掉块,导致井壁失稳。

北美 Marcellus 页岩气区 2010—2012 年钻井复杂情况显示,从该区域采用水基钻井液钻进的 10 口井的统计来看,所遇到的主要问题为缩径(发生率为 90%)、卡钻(发生率为 60%)、井底落鱼(发生率为 50%)和井涌(发生率为 50%),其次为井漏(发生率为 20%)和岩屑床(发生率为 20%),如图 1.3 所示。说明在使用水基钻井液时,由于长时间页岩与水之间的相互作用导致的井壁失稳问题最易于发生,进而给钻井施工带来困难,导致非钻进时间增加。

泥页岩失稳问题是困扰石油业的一个大问题,每年给我国石油工业造成了巨大损失。通过对 2012—2013 年间新疆玉北地区 18 口井的统计发现,属于井筒强化的钻井复杂事件占总 75% (图 1.4),其中因二叠系、石炭系等地层的泥页岩井壁失稳而发生的掉块卡钻的事故发生率达到 38%,造成较大的经济损失,其中 YB6A、YB10、YZ1 等多口井被迫由水基钻井液改为油基钻井液体系进行钻进。

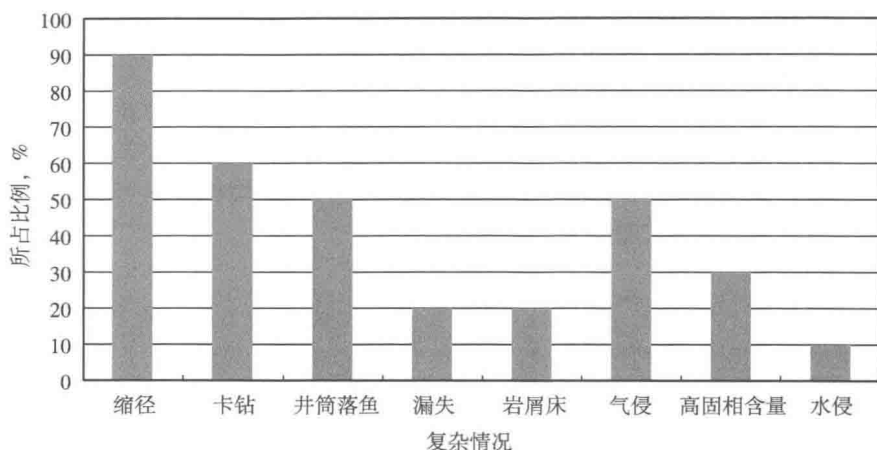


图 1.3 Marcellus 地区复杂情况统计

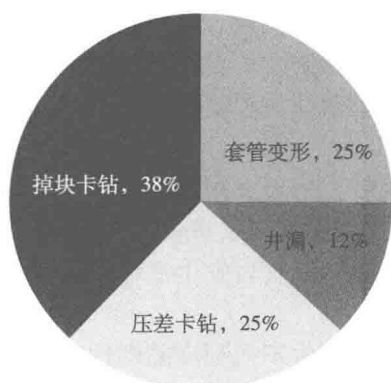


图 1.4 2012—2013 年新疆玉北地区 18 口井复杂情况统计

新疆塔河区块三叠系、石炭系的硬脆性泥页岩层理、微裂隙发育，钻井液的滤液易沿微裂隙进入泥岩内部，产生“楔劈”作用破坏岩石强度；泥岩内部的水敏性矿物在水化作用下产生较高的膨胀压导致了岩石强度的破坏。对已钻井的井径数据加以分析，发现塔河油田三叠系、石炭系地层存在严重的扩径问题，具有普遍性（图 1.5）。

在页岩油气钻井方面，目前国内页岩油气水平井水平段全部使用油基钻井液体系。为减少油基钻井液体系带来的环保问题，国内第一口页岩油 MYHF-1 井和页岩气 XYHF-1 井在造斜段使用水基钻井液体系，但井壁失稳现象突出，其中 MYHF-1 井损失时间达 40d。

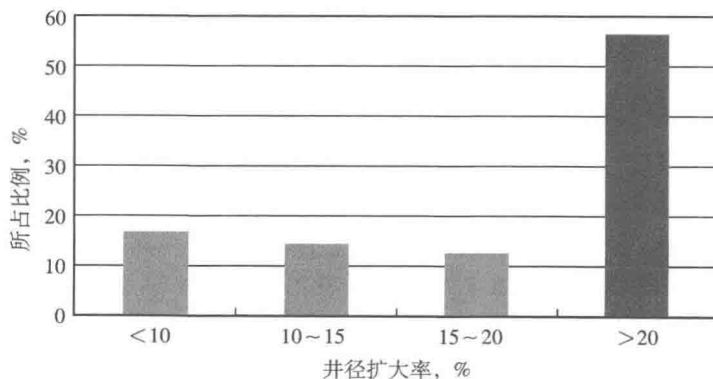


图 1.5 塔河油田三叠系、石炭系井径扩大率情况

1.2.1.2 盐膏岩失稳

盐膏层钻井，特别是深井盐膏层钻井，属于钻井技术难题。根据国内外资料介绍和塔里木盐膏层实际钻井情况分析，盐膏层钻井时会产生以下复杂情况：

(1) 深部盐膏层会呈现蠕动性质，盐膏岩的蠕变变形导致井径缩小。

(2) 以泥岩为胎体，在其微观、宏观裂隙中充填了盐膏的含盐膏泥岩，自由水在沉积过程中未完全运移出去，以“软泥”的形式深埋于地层中，蠕变速率极高。美国安秋子牧场油田曾测得这种“软泥”的初始蠕变速率约 2.54cm/h。具有这类岩性的泥岩称为“软泥岩”。

(3) 以盐为胎体或胶结物的泥页岩、粉砂岩或硬石膏团块，遇矿化度低的水会溶解。盐溶的结果导致泥页岩、粉砂岩、硬石膏团块失去支撑而坍塌。

(4) 夹在盐岩层间的薄层泥页岩、粉砂岩，盐溶后上下失去承托，在机械碰撞作用下掉块、坍塌。

(5) 山前构造带会因为多次构造运动所形成的构造应力加速复合盐层的蠕变和井壁失稳。

(6) 无水石膏等吸水膨胀、垮塌。无水石膏吸水后变成二水石膏体积会增大 26% 左右，其他盐类如硫酸钠、氯化镁、氯化钙等也具有类似性质。

(7) 盐层段非均匀载荷引起套管挤毁变形。

(8) 当井内钻井液液柱压力不能平衡地层本身的横向应力时，石膏或含石膏的泥岩会向井内运移垮塌。

比较典型的复合盐层存在于中原油田的文东地区沙三²、沙三⁴地层中，自 1976 年勘探和开发以来，套管损坏井 1300 多口，与盐膏层有关的套管损坏井占 60% 以上；新疆塔河地区石炭系、库车凹陷新近—古近系、巴麦地区寒武系、震旦系等盐膏层埋藏较深，上覆地层压力大，且膏质含量高，蠕变快，给钻井过程造成较大的问题。如在巴麦地区玉北区块复杂情况统计显示，因盐膏岩蠕变造成的套管挤毁变形比例达到了 25%，YB6 因为套管挤毁而不得不迁移井位。为有效地控制盐膏岩钻井蠕变引起复杂事件，必须研究适合特定地区的盐膏层蠕变模型蠕变，控制蠕变速度，确定合理的钻井液密度，图 1.6 为新疆巴麦地区玉北区块盐膏层蠕变预测图版。

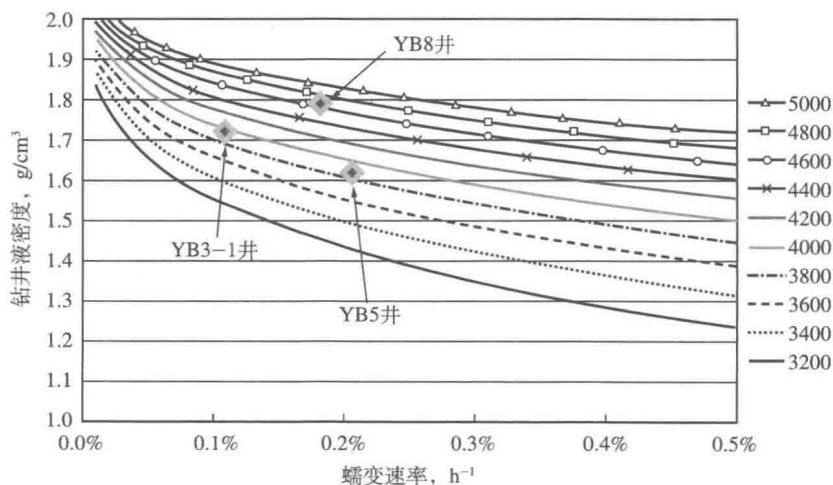


图 1.6 玉北区块盐膏层蠕变预测图版

1.2.2 井漏特征

井漏是指钻井过程中钻井液通过漏失通道流进地层中的现象，是钻井工程中最常见的

一种井下复杂情况。通常，井漏多发生在孔隙、裂缝较为发育的地层。因此根据漏失地层的特点和井漏发生的原因，可将井漏分为渗透性漏失、溶洞性漏失和裂缝性漏失三类（图 1.7）。根据统计，裂缝性地层中的漏失问题占到了井漏的 90% 以上。

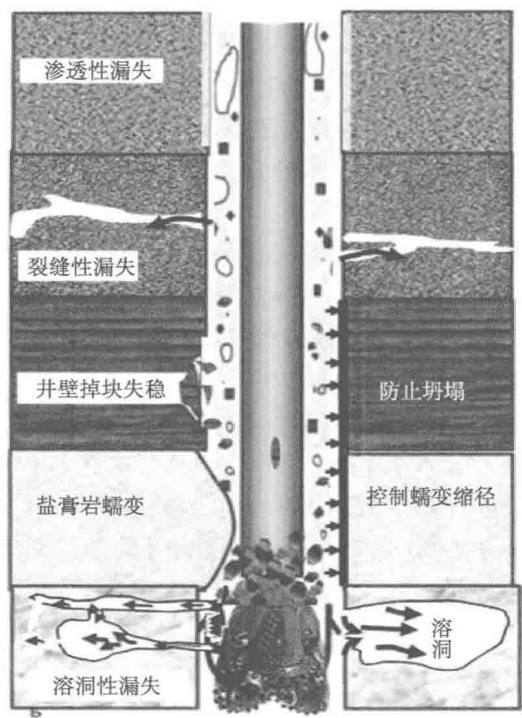


图 1.7 井漏类型示意图

井漏发生后，通过在钻井液中添加具有一定粒径级配的堵漏材料封堵漏层，控制钻井液的漏失。但是，如果缺乏对钻井液漏失规律、堵漏机理和漏失地层特征的系统认识，往往会造成堵漏作业失败。

井漏是钻井、固井过程中常见的井下复杂情况之一。它不仅会增加非生产作业钻井时间、损失钻井液、伤害油气层、干扰地质录井工作，而且还可能引起遇阻、卡钻、井喷、井塌等一系列井下复杂情况与事故，甚至导致井眼报废，既造成重大的经济损失，也影响勘探开发进程，是石油、天然气井钻井过程中需要引起重视的井下复杂情况之一。发生钻井液漏失的地层，须具备下列条件：（1）地层中有孔隙、裂缝或溶洞，使钻井液有通行的条件；（2）地层孔隙中的流体压力小于钻井液液柱压力，在正压差的作用下，发生漏失；（3）地层破裂压力小于钻井液液柱压力和环空压耗或激动压力之和，把地层压裂，产生漏失。

漏失通道是沉积过程、地下水溶蚀或构造活动形成的。按通道类型可分为两种类型：（1）渗透性漏失。这种漏失多发生在粗颗粒未胶结或胶结很差的地层，如粗砂岩、砾岩、含砾砂岩等地层。只要渗透率超过 14mD，或者平均粒径大于钻井液中数量最多的大颗粒粒径的 3 倍时，在钻井液液柱压力大于地层孔隙压力时，就会发生漏失。（2）天然裂缝、溶洞漏失。如石灰岩、白云岩的裂缝、溶洞及不整合侵蚀面、断层、地应力破碎带、火成岩侵入体等都有大量的裂缝和孔洞，在钻井液液柱压力大于地层压力时会发生漏失，而且漏失量大，漏失速度快。

通过对 2010 年来百余口超深井复杂情况统计表明，在超深井（大于 6000m）钻井中，由于井壁失稳和井漏引起的钻井复杂事件占 70% 左右，其中井漏占复杂事件的 31.6%，如图 1.8 所示。井漏的处理过程非常复杂，所需处理时间长，如图 1.9 所示，因此，防漏堵漏是石油钻井中一项重要的技术。

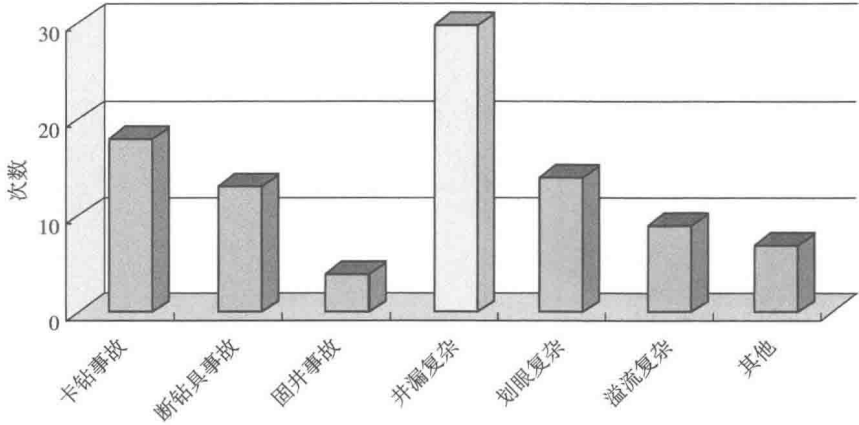


图 1.8 深井复杂和事故发生次数

如在新疆塔里木地区的钻井过程中，井漏成为制约安全钻进的主要影响因素之一。2010—2013 年，在塔河托普台 50 口井中有 32 口井发生了严重的漏失，漏失概率达 64%，平均单井堵漏时间达 14.12d。在塔中顺托果勒区块 11 口井中有 6 口发生漏失，平均单井堵漏时间 20.5d，其中顺西 2 井堵漏 13 次，耗时 80d。巴麦玉北、玛北区块的 13 口井中 10 口发生井漏，平均单井堵漏时间 19.9d，见表 1.1。

表 1.1 塔里木油田井漏情况统计

漏失较严重区块	漏失情况	漏失概率 %	堵漏用时 d	典型漏失井
塔河托普台	50 口井漏 32 口	64	14.12	TP205X、TP209 堵漏时间分别达 51.5d 和 41d
塔中顺托果勒	11 口井漏 6 口	54.5	20.5	顺西 2 井堵漏 13 次，耗时 80d
巴麦玉北、玛北	13 口井漏 10 口	58.8	19.9	YB4 井二开堵漏 8 次，耗时 46d

又如，对 2009—2011 年元坝地区所钻井复杂情况统计发现，因井筒问题发生的复杂情况占绝大多数。井壁失稳及井漏引起的钻井复杂占 61% 左右（图 1.10），其中井漏占总体复杂情况的 40.9%。因此，着力解决井漏难题，可有效地降低复杂情况发生的数量和程度，提高钻井效率。

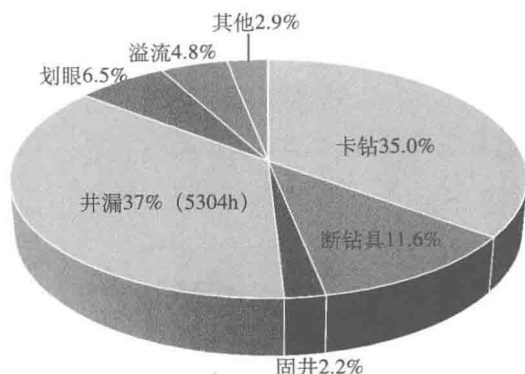


图 1.9 深井复杂和事故处理时间

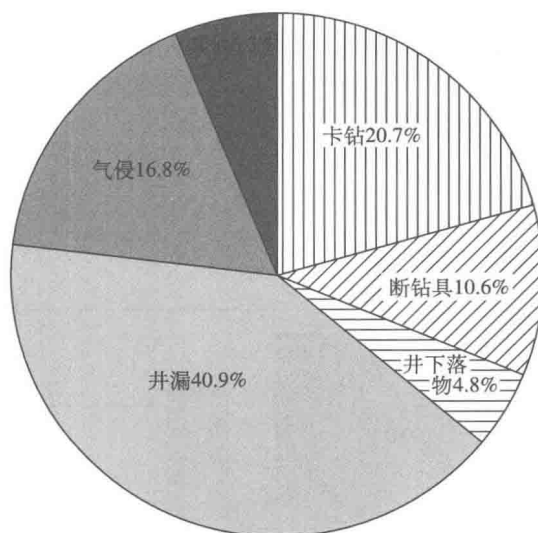


图 1.10 元坝地区所钻井复杂情况统计

1.3 井筒强化技术现状

1.3.1 泥页岩井壁失稳技术现状

地下原始状态下的泥页岩处于物理、化学、力学、热力学的各种平衡状态。而地层一旦被钻开，这些平衡状态就遭到了破坏，泥页岩中便开始有多种物质和能量同时传递和输送。这些输入现象引起了各种物质和能量的空间强度分布变化，这些变化最终导致了各种化学、物理、力学状态的变化，导致泥页岩失稳问题。Yew C H 和 Chenevert M E 在 1989 年发表了第一篇关于将力学与化学相耦合进行定量分析的文献，该理论的基本出发点是将泥页岩的力学性质相关于泥页岩的总含水量（总吸附水量），并由实验方法确定相关系数，又称为“总吸附水量相关法”。Hale 和 Mody 在 1992 年首次明确提出泥页岩中水的总渗透量是由于压力梯度作用下的渗流流量和化学势作用下的渗流流量之和。Barlland 对水在泥页岩中传输进行了研究，后来又对水在泥页岩中传输受聚合物的影响进行了研究，但 Van Oort E, Hale 和 Mody 在 1994 年发表的研究结果是比较全面的研究，他们首次从非平衡态热力学角度提出泥页岩中物质传输与能量传输的唯象模型构架，提出在泥页岩中传输的物质与能量有自由水、化学离子、热量与电流，而这些传输的驱动力有压力势、化学势、电势和热势，但并未深入研究。

泥页岩井壁稳定研究取得一定成效，但由于问题的高度复杂性，当前主要存在以下几个方面的问题：（1）对泥页岩井壁水化失稳的机理和本质认识还不够深入和完善。（2）水化泥页岩力学测试方法不完善，真实动态模拟实际井下的实验还比较少。（3）泥页岩水化研究主要集中于水在页岩中的传输机理，泥页岩水化的力学研究普遍采用线弹性应力应变关系，将水化膨胀实验中得到的水化膨胀关系线性叠加到线弹性本构关系，这种简单用线弹性关系来描述井壁围岩水化膨胀引起的应力非线性增加是不符合实际情况的。由此可见，需要通过模拟实际井下条件的泥页岩水化膨胀实验，实时测试泥页岩水化过程的应力、变