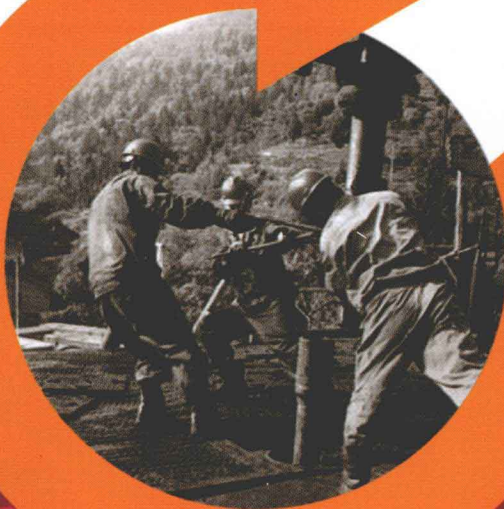


钻井井控 风险分析与控制

刘 刚 金业权 著



石油工业出版社

钻井井控风险分析与控制

刘 刚 金业权 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以油气井井控工艺和装备相关理论为基础,采用风险评估理论与现场数据统计相结合的方法,阐述了高压油气井对井控装备和人员的要求,分析了井控风险的诱因及其权重,建立了井控风险评估体系,提出了井控风险的应对措施。

本书可作为油气井工程专业研究生的教材,也可作为石油勘探、开发、钻井等领域工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钻井井控风险分析与控制/刘刚,金业权著.

北京:石油工业出版社,2011.12

ISBN 978-7-5021-8154-3

I. 钻…

II. ①刘… ②金…

III. ①油气钻井-井控-风险分析

②油气钻井-井控-风险管理

IV. TE28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 194346 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) 64523579 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.25

字数:304 千字

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

前 言

当今社会,风险控制及安全管理正受到社会各界越来越广泛的关注和重视。在石油行业,随着钻井向深井、复杂地层拓展,油气勘探开发风险日益增大。在钻井风险中,井控风险尤为突出,井侵、溢流、井涌、井喷、井喷失控等反映了井筒压力系统失去平衡以后井下和井口所出现的各种问题及故障发展的严重程度。井喷失控是钻井过程中性质最严重的事故,严重的井喷失控事故不仅可能造成资源的损害、设备及财产的损失、大量的人力及物力投入,而且还可能造成人员的伤亡、环境的破坏乃至严重的社会影响。因此钻井井控风险分析与控制日益受到业内重视,如何规避钻井井控风险,减少和杜绝事故的发生,始终是钻井同仁主要的任务。

随着各种新技术、新装备、新方法、新工艺的应用和管理水平的提高,钻井井控事故在总体上呈下降的趋势,但是杜绝井喷事故仍有许多难题尚未解决:

第一,随着勘探程度不断深化,钻井工程向更深、更难和更边远的领域发展,地质条件更加复杂和苛刻,出现了许多新的钻井井控问题。

第二,由于对井控风险产生的原因和后果等缺乏足够的了解,尚没有切实有效的措施和手段去回避或减轻风险,造成很多不必要的损失。

第三,钻井井控风险评价本身就是一个复杂的工作,它是若干个学科的融会和交叉。钻井井控风险控制就更加复杂,受到许多主观、客观因素的制约,涉及技术经济学、管理学、系统工程、钻井工程理论等多个领域,因而难度更大。

开展钻井井控安全风险评价方法的研究,就是想从设备、人员、管理等方面分析钻井安全作业可能存在的风险。通过钻井井控风险评价,从地层、工艺、装备、人员和管理等方面找出引发井控风险的主观、客观因素,有针对性地开展的工作,提出解决方案,降低钻井井控风险,提高钻井的安全性。

钻井井控风险管理及安全施工问题的解决,对于当前及今后时期深井、高压油气井的井控及钻井安全具有十分重要的意义,同时也为今后研究高温高压、超高温超高压油气井的安全施工问题积累了经验,具有明显的理论意义、技术效果、经济效益和社会效益,应用前景十分广阔。

本书具有以下特点:

(1) 将最新的风险评价理论应用于井控风险评估。尝试将专家调查法、层次分析法和模糊综合评价法用于钻井井控风险分析,将事故树分析法应用在井控装备系统可靠性分析中,得出了一些有益的结论。

(2) 通过对大量现场资料的统计,分析了国内井控事故的主要诱因及概率,

对规避风险有一定的指导意义。

书中收集整理了 1994—2008 年 15 年间涉及井控的专家文章、谈话、评论；统计分析某油田 74 口钻井井史，对井漏、溢流、井涌、井喷四类事故发生层位、故障井深、发生原因、现场措施、故障后果进行了归纳；对某油田 13 个井控季度检查报告和 32 个井队在井控工作中经常出现的问题进行了分析总结；对国内 13 个油气田几十年来发生过的井喷案例进行整理分析，从钻进、起下钻、测井、完井、井下作业五个方面统计分析事故原因、处理方法及经验教训，对引发井喷事故的各种因素进行了排序。

(3) 理论与实际相结合，提出了一些降低井控风险的应对措施。

钻井井控风险分析的目的是风险的控制。本书在大量的理论分析和现场资料统计的基础上，提出了一些降低风险的措施，并给出了钻开油气层前的风险评估方法、内容及井喷事故应急预案框架建议。

(4) 强调以人为本，分析了人员在钻井井控风险控制中的重要作用。

井控工作包括井控设计、井控装备、钻开油气层前的准备工作、钻开油气层时的井控作业、防火防爆防硫化氢安全措施、井喷失控的处理、井控技术培训、井控管理制度和应急抢险等多个方面。以人为本，做好人的工作，体现井控工作预防为主、防控结合的关键所在。

本书仅想为钻井同仁提供一些参考意见和建议，以期为降低井控风险做一些有益的工作。由于作者水平和知识面的限制，书中错误和不当之处在所难免，敬请批评和指正。

著者

2011 年 6 月

目 录

第一章 油气井压力及其控制	1
第一节 油气井压力控制的基本概念	1
第二节 井筒压力系统平衡关系	7
第三节 地层压力预测及监测	10
第四节 溢流	22
第五节 关井	30
第六节 压井工艺技术	37
第二章 风险分析方法	51
第一节 风险管理	51
第二节 井控风险评估方法	57
第三章 高压油气井对井控装备的需求分析	61
第一节 井控设备组成及其功能描述	61
第二节 系统可靠性分析概述	63
第三节 典型复杂系统可靠性模型分析	67
第四节 井控设备可靠性分析	70
第五节 井控装备关键设备事故树分析	75
第六节 井控设备维修策略分析	88
第七节 装置使用及维护要求	93
第四章 井控安全中的人为因素分析	96
第一节 井控人员	96
第二节 人员在井控工作中的职责	97
第三节 人为因素与井控安全	100
第四节 井控中的人为失误	106
第五节 人为因素风险预防及控制	110
第六节 井控过程中各岗位操作分析	114
第五章 井控风险诱因统计	124
第一节 井控风险诱因统计分析	124
第二节 西部某油田井控风险诱因统计分析	128
第三节 国内井喷事故统计分析	130

第六章 井控风险诱因权重计算..... 139

 第一节 层次分析法..... 139

 第二节 专家调查权重计算..... 141

 第三节 案例统计权重计算..... 151

第七章 井控风险评估体系..... 165

 第一节 评估体系框架..... 165

 第二节 评估内容及分值..... 167

第八章 井控风险及应对措施..... 175

 第一节 井控风险..... 175

 第二节 井控风险应对措施..... 177

参考文献..... 189

第一章 油气井压力及其控制

当钻遇油气层时，如果井底压力低于地层压力，地层流体就会进入井眼。大量地层流体进入井眼后，就有可能产生井涌、井喷，甚至着火等，酿成重大事故。因此，在钻井过程中，采取有效措施进行油气井压力控制是保证钻井安全的一个极其重要的环节。

概括起来，油气井压力控制（通称井控）的任务主要表现在两个方面：一方面，通过控制钻井液密度，使钻井在合适的井底压力与地层压力差下进行；另一方面，在地层流体侵入井眼过量后，通过更换合理的钻井液密度及控制井口装置，将环空内过量的地层流体安全排出，并建立新的井底压力与地层压力差。

常规井控技术遵循的一般原则是，保持钻井液液柱压力接近或略高于地层压力，以保证钻井施工的顺利进行。先进的井控理念则是，根据油井安全、顺利、快速钻进和发现、保护油气层的需要，采用工艺和装备的有机配合，在钻井液液柱压力小于、等于或高于地层压力的不同情形下，维持钻完井施工安全顺利进行的井控工艺、方法、装备的综合应用。

井控技术的实施，不仅要考虑到油气井施工的安全、减少或避免钻井故障、顺利钻达目的层、提高钻速、降低钻井成本的要求，还应考虑到发现油气田、保护油气层、提高采收率的要求。因此，现代井控技术已经对传统井控技术理论和功能进行了拓展，形成了包括除传统井控理论、技术、装备外，还涵盖了与气体钻井、欠平衡钻井、控制压力钻井相联系的井筒压力控制理论、技术和装备。先进的井控技术说的井筒压力系统平衡也不再是以往的压稳、压住，而是“压而不死、活而不喷”，井筒压力系统的平衡关系可以是欠平衡，也可以是近平衡，或者是过平衡。其根本目标是，力保钻完井施工过程中的井筒压力系统的可控，为顺利钻达目的层，发现和保护油气层，提高钻井速度，减少钻井故障，提高油气勘探开发综合经济效益服务。

第一节 油气井压力控制的基本概念

一、相关术语及定义

1. 井控

1) 井控的定义

井控（well control），即油气井压力控制，是指采取一定的方法和装备控制钻井流体当量密度和井口压力，使井筒压力维持一定的系统平衡关系，保证钻完井施工顺利进行的工艺技术。

定义中所说的“一定”包括以下几个方面的内容：

(1) 一定的技术手段，如准确的地层压力检测技术、合理的井身结构设计技术、有效的井筒压力控制技术；

(2) 一定的井控装备，如足够强度的套管柱、合乎要求的井口防喷器系统和地面管汇、先进的地面压力控制系统；

(3) 一定的压力系统平衡关系，如欠平衡、近平衡、过平衡；

(4) 一定的井控管理，包括具有相应资质或技能的井控设计、人员、设备维修、培训等。

2) 井控的分级

根据井筒压力系统的失衡程度、井涌的规模和采取的控制方法，井控作业分为三级，又称为三次，即一级（次）井控、二级（次）井控和三级（次）井控。

(1) 一级井控（primary well control），在正常钻进和钻进高压油气层时，利用井内钻井液液柱压力来控制井内地层压力的方法。

采用合理的钻井液密度和技术手段，使钻井液液柱压力与地层压力维持在一定、可控的且能确保钻完井工作顺利实施的平衡关系上。

一级井控的核心是确定一个合理的钻井液密度和一套与井筒压力系统平衡关系相适应的地面装备。一级井控提供的钻井液液柱压力和井控装备应能为安全钻井提供有效保障。常规井控工艺条件下，确定钻井液当量密度的原则是，液柱压力能平衡或大于地层压力，井口敞开条件下能安全施工。特殊工艺条件下，如欠平衡钻井、气体钻井、泡沫钻井、控制压力钻井等，确定井筒压力系统平衡关系的原则是，根据工艺需要，选择钻井流体类型和与之相配套的地面装备，使井筒压力平衡关系维持在能保证钻完井施工顺利和安全的范围内。

(2) 二级井控（secondary well control），出现溢流后，采取井控工艺、设备恢复对地层压力控制的工艺技术。

由于某些原因造成井底压力小于地层压力，发生了非主观希望的溢流，但可以利用地面设备和适当的井控技术来控制溢流，并能重建压力平衡，使井筒压力系统的平衡关系重新达到一级井控状态。

实施二级井控技术的关键是，具有合理的井身结构设计，有满足要求的井控装备，具备正确的关井、压井工艺和方法。

(3) 三级井控（tertiary well control），井喷失控后的井控抢险。

三级井控是指二级井控失败，井身结构、地面装备、薄弱地层或是井控人员的技术和能力无法满足对井涌控制的需要，发生了地面或地下井喷，甚至出现着火、塌陷等恶劣状况。此类情况发生后，需要专门的技术、专门的设备，调动专门的人员乃至紧急配置的特殊装备及人员。通常需要一定乃至大量的人力、物力、财力投入，才能重新恢复对井筒压力系统的控制，达到一级井控状态。有时需要通过抢险、灭火、打救援井等特殊的手段来制服井喷。三级井控往往需要的人力、财力、物力巨大，有时甚至会对环境及社会造成一定的影响，偶尔也出现虽然制服了地面井喷，但却造成了井眼报废和对油气资源的严重损害。

因此，搞好井控工作的原则是：立足一级井控，搞好二级井控，杜绝三级井控。应努力使所钻井处于一级井控状态，同时做好一切应急准备，一旦发生井侵，能迅速、有效地作出

反应，及时加以控制和处理，快速有效地重建井筒压力系统的平衡。要尽力避免因为失察、推诿、懈怠、失职、无知、误操作等人为因素造成的将井涌变成井喷，以致井喷失控，甚至着火等恶性事故。

2. 井侵 (influx)

当地层孔隙压力大于井底压力时，地层流体（油、气、水）侵入井内的现象称为井侵。

3. 溢流 (overflow)

因地层流体侵入井内引起井口返出的钻井液量比泵入量大，或停泵后井口钻井液自动外溢的现象称为溢流。

4. 井涌 (well kick)

溢流进一步发展到钻井液涌出防溢管口的现象称为井涌。

5. 井喷 (well blowout)

地层流体（油、气或水）流入井内并引起井内流体喷出钻台面的现象称为井喷。

6. 地下井喷 (bottom blowout)

溢流关井后，将某一薄弱层压破，高压层流体大量流入被压裂地层的现象称为地下井喷。

7. 钻柱井喷 (drill string blowout)

流体从钻柱内涌出的井喷称为钻柱井喷。

8. 井喷失控 (out of control for blowout)

发生井喷后，无法用井口防喷装置进行有效控制而出现敞喷的现象称为井喷失控。

井喷发展到了一定程度，井身结构、井控装备、薄弱地层或井控人员的技术和能力等无法有效阻止高压地层流体进入井筒，或喷出井口或窜入其他层位，称为井喷失控。

9. 井喷着火

井喷后失去控制的地层可燃流体在地面着火的现象，称为井喷着火。

井喷着火分为两种情况，一种是喷出可燃地层流体，达到了燃爆条件，意外失火；另一种是喷出地层流体含有毒、有害气体，特别是喷出地层的流体中含有大量的 H_2S ，在井口不能得到及时、有效控制，危机到周边的居民生命和环境安全时，为降低对社会和环境的伤害，人为点燃喷口。

井喷失控、井喷着火往往是钻完井施工中最恶性的事故，如果不能得到及时、有效的处理，会对资源、环境、装备、人员乃至社会造成重大危害。

井侵、溢流、井涌、井喷、井喷失控反映了地层压力与井底压力失去平衡以后井下和井口所出现的各种现象及事件发展变化的严重程度，

目前，钻井界的同仁对溢流、井涌、井喷和井喷失控的界定仍然不够明确，也有使用喷出高度作为判断依据的，比如喷出井口 2m，或喷到二层台等；井喷作为事故的界定也不明确，许多人认为只要报了井喷就是事故。但笔者认为能否按以下规则界定：

(1) 将停泵后钻井液在出口管处形成长时间的滴状出流，或是形成连续的线状出流，称

为溢流；

(2) 将停泵后钻井液涌出喇叭口称为井涌；

(3) 将停泵后钻井液喷出喇叭口并达到一定的高度，称为井喷；

(4) 由于人们对于自然界认识的局限性和地下情况的不可预见性，现阶段钻井过程中遭遇未知地层压力异常在所难免。因此，特殊情况下出现井喷可能也在所难免。世界钻井技术发达国家同样也会出现井喷问题，但是如果通过技术和设备的配合，控制住了井口出流，重建了压力平衡，未对环境和资源造成大的影响，未造成人员的伤害和财产损失，就应该作为技术故障对待。至于由人为失误、疏于管理、麻痹大意、违反规程等造成的井喷乃至重大损失，则另当别论。

二、井喷失控原因及危害

1. 井喷失控原因

综观国内外各油气田、油气井发生井喷失控的实例，分析井喷失控的直接原因或间接原因，大体可归纳为地层因素、设备因素、井控技术、人为因素等几个方面。

1) 地层因素

地层因素，是指人们对所钻地层的压力及所含流体性质认识不足，导致钻井液密度设计不合理，造成地层压力大于液柱压力。地层原因造成井喷的条件：

(1) 地层内含有流体（油、气、水）；

(2) 地层中流体的压力大于液柱压力；

(3) 地层流体具有较大的能量（地层有较大的储、产能）；

(4) 地层与井筒间存在连接通道（空隙、裂缝）。

经验表明，高压、高产地层发生井喷的概率和危害远远高于低压低渗透地层。钻井中遭遇未知高压层，地层流体在压差的作用下流入井眼，低密度地层流体会引起液柱压力的进一步降低，导致负压差增大，造成地层流体涌入井筒的体积增大，引起井喷，这是造成井喷的关键因素之一。

异常低压、严重漏失，造成钻井液柱高度降低，无法平衡地层压力，加上疏于观察，未能及时发现和采取有效的补救措施，也是造成井喷另一个因素。

地层压力是在地质发展过程中不断形成的。正常条件下，地层孔隙压力梯度等于地层水静液压力梯度。很多情况下，地层压力受多种因素影响会发生异常，或高于正常压力，或低于正常压力。世界大部分沉积盆地与我国大部分油田都有异常高压发生。沉积盆地异常压力形成的机理有欠压实作用、构造运动、成岩作用、密度差作用、流体运移作用等。

2) 设备原因

井控设备是对油气井实施压力控制，对故障进行预防、监测、控制、处理的关键设备，是实现安全钻井的可靠保证，是钻井设备中必不可少的装备。但由于全国各油气田的井控技术发展不平衡，拥有的设备能力不同，维修、保养和使用的水平不同，井队所配备的井控设备的完好率和可靠性也不尽相同，引发溢流或井喷后无法关井（没有合适的防喷器），或不能关井（防喷器不能完成动作），或不会关井（不会正确使用防喷器），这也是导致井喷失控的一个重要因素。

(1) 设备相对陈旧,无法满足地层的高压要求。

目前,井队的井控设备是按生产技术需要以及设备的供应能力所配置,陆上钻井所用防喷器及其控制装置多为国内生产。有些井队使用的设备比较陈旧、落后,各部件阀门出现的问题很多,有的打不开,有的关不上,有的刺漏;防喷器不安装手动操纵杆;防喷器与井口装置配备不到位,手动开关费力,关井耗时多、关不严;防喷器橡胶件老化,不能承受额定压力,控制系统储能器至防喷器的液压油管线老化,漏油等。一旦出现井涌或井喷事故,这些设备形同虚设。

(2) 井口不装防喷器或应付了事。

井口不安装防喷器或随便安装一个防喷器应付了事,这种情况的出现主要是由于认识上的片面性:其一,实行井口大承包后,个别井队片面追求节省钻井成本,想尽量减少钻井设备投入,少占用设备折旧;其二,认为地层压力系数低,不会发生井喷,用不着安装防喷器;其三,井控装备配套数量不足,配有的防喷器只能保证重点探井和特殊工艺井;其四,认为几百米的浅井几天就打完了,用不着安装防喷器。

(3) 设备的选型、设计或制造不符合要求。

这主要是指由于井控设备没有按照相关要求设计或制造而导致井喷事故的发生。例如,对地层压力认识不清,选择防喷设备压力等级偏低,遭遇超高压地层时,防喷设备力不从心;设备的功能设计存在缺陷,关键时刻无法实施有效的动作和功能;含硫油气田井控设备抗硫性能未达到规定要求;设备制造不合要求,无法承受规定的压力;防喷器胶芯性能差、磨损快,关键时刻不能封井;连接管线、管汇、阀门等性能、尺寸、壁厚和钢级达不到要求,造成承压能力不足,关键时刻关不上、打不开等。

(4) 设备的维护、保养和使用不当。

维护、保养和使用好井控设备是防喷设备在关键时刻能否发挥有效作用的关键因素。有了好的设备,还需要细心的维护、精心的操作和认真负责的管理,如果井控设备安装、维护、使用不当,那么这些设备就可能实现不了其应有的功能。常言道,养兵千日,用在一时,防喷设备属于长期搁置不用,关键时刻又是关系“井命”和“人命”的特殊设备,平时的管理、维修、保养、演习又是十分繁琐以及耗费精力和财力的事情。如果平时疏于管理、维修、保养、培训,关键时刻就可能要出现失误或失效。多年来,由于对井控设备的安装、维护、使用不当而导致的大小故障仍时有发生。

(5) 设备配套不能满足特殊井关井要求。

防喷器组合不合理,剪切闸板剪断能力低,设备数量和能力没有富余,关键时刻难以替换、维修易损构件,特殊情况下不能剪断钻杆封闭井口,造成危害扩大,是造成特殊井强烈井喷和抢险工作难以实施的关键。

3) 井控技术

(1) 起下钻时发生抽汲现象。起下钻过程中,钻柱在井内的运动造成压力波动在所难免,如果处理不当,特别是在窄压力窗口井段,可能诱发井漏、井喷。

(2) 井身结构设计不合理。对于深井、复杂层段、多压力层系,对井深结构中的套管层数、下深提出了较高的要求,受到井眼尺寸、钻井成本的影响,常常会出现套管下深不够、层次不足、强度偏低等情况,也会出现长裸眼、多压力层系等问题。

(3) 窄压力窗口。同一裸眼层段存在着高压和易漏地层，钻井液的密度窗口很窄，施工过程中不是井涌就是井漏。

(4) 三高井钻井。高压、超高压气层，高产油、气、水层，含酸性气体地层的井控理论和井控实践薄弱。

(5) 对于深井、超深井，地层压力高，钻柱在某套管段的工作时间长，钻井液添加剂对套管的磨砺性强，导致套管磨损严重，抗内压强度降低，使得井控手段和措施的实施受限。

(6) 对地层层位、压力、流体性质未确知，加上发现和保护油气层与钻井液密度附加值之间的矛盾，施工设计预案不足，钻井施工过程中与高压、高产、高含硫地层的遭遇战常常会引发较大的井控风险。

(7) 相邻注水井不停注或未减压。这种情况多发生在老油田、老油区打调整井时。由于油田经过多年的开发注水，地层压力已不是原始的地层压力，尤其是遇到高压封闭区块，它的压力往往大大高于原始的地层压力。如果采油厂考虑原油产量，不愿意停掉相邻的注水井，或是停注但不泄压，往往造成钻井复杂情况的发生。

4) 人为因素

管理不到位、认识不足、缺乏培训、工作责任心低、心理素质差、侥幸心理、社会治安问题等是造成井喷的几种人为因素，主要表现在以下几方面：

(1) 起钻不灌钻井液，或钻井液没有灌足。过去我们常说没有灌满，其实问题的关键不仅是要灌，而且要灌满，还要灌足，灌进去的钻井液体积和起出的钻具体积一样多。

(2) 坐岗人员缺位、不负责任，缺乏培训，溢流检测属于维护失效等，没能及时地发现溢流。

(3) 发现溢流后，因技术原因、心理因素、操作失误等，造成处理措施不当，贻误了控制溢流、井喷的最佳时机。

(4) 空井时间过长，又无人观察井口。空井时间过长一般都是由于起完钻后修理设备或是等措施。由于长时间空井不能循环钻井液，造成气体有足够的时间向上滑脱运移，造成井喷。

(5) 钻遇漏失层段发生井漏，未能及时发现或处理措施不当。发生井漏以后，钻井液液柱压力降低，当液柱压力低于地层孔隙压力时，就会发生井侵、井涌乃至井喷。

(6) 钻井液中混入油过量或混油不均匀，造成液柱压力低于地层孔隙压力。这种情况多发生在深井、探井、复杂井，出于减小摩阻、改善钻井液性能、稳定井壁、钻井工艺的需要，往往要在钻井液中混入一定比例的原油。但在混油过程中，加量过猛导致不均匀，或是总量过多，都会造成井筒压力失去平衡。

(7) 卡钻发生后，由于需要泡油解卡，破坏了井筒内的压力平衡。泡油会降低液柱压力，如果不注意井控，可能会造成井涌、井喷。

(8) 思想麻痹，违章操作。由于思想麻痹、违章操作而导致的井喷失控在这类事故中占有一定的比例，解决这个问题主要要从严格管理和技术培训两个方面入手，做好基础工作。

(9) 疏于人员培训，致使关键时候不能完成正确的井控动作。由于井队人员的流动和素质差异，导致培训工作跟不上要求，或是培训工作流于形式，造成关键时刻相关岗位不能按时准确地实施动作，乃至操作失误，导致贻误战机。

(10) 工作责任心差，做事敷衍。例如，在设备维修、保养、维护过程中不负责任，导致设备关键时候不能有效工作。

(11) 人员的心理素质差。出现溢流后，或者是井喷初期，看到钻井液涌出井口惊慌失措，有的逃之夭夭，有的手忙脚乱，导致井喷失控。

(12) 周边治安状况差。个别人为了一点蝇头小利实施盗窃，例如，盗油，盗走井口阀门、螺栓等造成井喷失控。

2. 井喷失控的危害

大量实例说明，井喷失控是钻井过程中性质最为严重、损失最为巨大的灾难性事故。这种事故有些是由于技术原因，钻遇了当前或当时技术条件下难以控制的油、气、水层；有些是与人为因素有关，但归根到底，大多数井喷或多或少地与人为因素有关，原因在于许多大的失误都是由于许多的小错误的累积。但是，一旦出现井喷失控，其危害常常是惨痛的。

(1) 可能打乱全面的正常生产秩序，影响全局生产；

(2) 可能伤害油气层，破坏地下油气资源；

(3) 使钻井故障复杂化；

(4) 可能造成设备毁坏、人员伤亡，带来巨大的经济损失；

(5) 可能造成油气井报废，浪费巨额的国家财产；

(6) 可能造成极其严重的环境污染，影响农田水利、渔场、牧场、林场等基础设施建设；

(7) 可能造成负面社会影响。如果危害了环境，影响了周边居民的正常生活，导致了人员的伤亡，势必对业主和作业者的声誉造成负面影响，甚至可能会危及业主和作业者的命运。

第二节 井筒压力系统平衡关系

一、静液压力

静液压力 p_m 是由井内静液柱的重量产生的压力，其大小只取决于液体密度和液柱垂直高度。在钻井中，钻井液环空上返速度较低的情况下，动压力可忽略不计，而按静液压力计算钻井液环空液柱压力。

静液压力 p_m 的计算公式为：

$$p_m = 0.0098 \rho_m H_m \quad (1-1)$$

式中 p_m ——静液压力，MPa；

ρ_m ——钻井液密度，g/cm³；

H_m ——液柱垂直高度，m。

静液压力梯度 G_m 的计算公式为：

$$G_m = p_m / H_m = 0.0098 \rho_m \quad (1-2)$$

式中 G_m ——静液压力梯度，MPa/m。

二、地层压力

地层压力 p_p 是指作用在地层孔隙中流体上的压力，也称地层孔隙压力。

地层压力 p_p 的计算公式为：

$$p_p = 0.0098\rho_p H_m \quad (1-3)$$

式中 p_p ——地层压力，MPa；

ρ_p ——地层压力当量密度，g/cm³。

地层压力梯度 G_p 的计算公式为：

$$G_p = p_p/H_p = 0.0098\rho_p \quad (1-4)$$

式中 G_p ——地层压力梯度，MPa/m；

H_p ——地层垂直高度，m。

地层压力当量密度 ρ_p 的计算公式为：

$$\rho_p = p_p/0.0098H_m = 102G_p \quad (1-5)$$

在钻井过程中遇到的地层压力可分为正常地层压力、异常高压和异常低压三类。

(1) 正常地层压力： $\rho_p=1.0\sim1.07\text{g/cm}^3$ ；

(2) 异常高压： $\rho_p>1.07\text{g/cm}^3$ ；

(3) 异常低压： $\rho_p<1.0\text{g/cm}^3$ 。

三、地层破裂压力

地层破裂压力 p_f 是指某一深度处地层抵抗水力压裂的能力。当达到地层破裂压力时，地层原有的裂缝扩大延伸或无裂缝的地层产生裂缝。从钻井安全方面讲，地层破裂压力越大，地层抗破裂强度就越大，越不容易被压漏，钻井越安全。一般情况下，地层破裂压力随着井深的增加而增大，所以上部地层（套管鞋处）的强度最低，易于压漏，最不安全，因此，在设计时应保证下入足够深度的套管，以提高裸眼井段上部的地层破裂压力。

四、波动压力

1. 波动压力的定义

波动压力是指由于井内钻具或流体上下运动而引起井底压力增大或减小的压力值。它是激动压力和抽汲压力的总称。激动压力是指当钻柱向下运动时，井内钻井液向上流动，使井底压力增大，由此而增大的压力值称为激动压力。抽汲压力是指当钻柱向上运动时，井内钻井液向下流动，使井底压力减小，由此而减小的压力值称为抽汲压力。

2. 波动压力对钻井安全的影响

由于钻井液具有一定的粘度和切力，当快速提升钻柱（尤其是出现缩径、钻头泥包）时，都将引起过大的抽汲压力。当抽汲压力达到一定值时，就会引起井喷和井眼垮塌，因此应引起足够重视。当下钻速度过快时，同样会引起过大的激动压力，造成井漏，影响井眼安全。

3. 引起波动压力的主要原因

(1) 钻井液静切力：钻井液静止时间越长，其网状结构强度越大，静切力就越大，钻井液从静止状态到流动状态所克服的流动阻力就越大，此时，井内钻柱上下运动就会造成过大的波动压力。

(2) 起下钻速度：起钻时，钻具底部产生负压，使井底压力减小；下钻时，钻具底部排挤钻井液向上流动，使井底压力增大。

(3) 惯性力：在起下钻具或接单根等作业中，钻柱的运动有加速和减速的过程，由此而产生惯性力，使井内压力产生波动。惯性力越大，波动压力就越大。

4. 减小波动压力的措施

(1) 严格控制起下钻速度，防止过快，尤其是裸眼段起下钻或钻头在井底附近时，更应高度重视。

(2) 起下钻具时，严禁猛提猛刹，防止产生过大的惯性力和波动压力。

(3) 起钻前充分循环井内钻井液，使其性能均匀，进出口密度差小于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。同时调整好钻井液性能，防止因切力、粘度过大而产生较大的波动压力。

(4) 应保持井眼畅通，防止缩径、泥包等引起严重抽汲。

五、井底压力

井底压力 p_b 是指作用在井底上的各种压力总和。不同钻井作业工况中的井底压力如下：

(1) 井内钻井液处于静止时的井底压力。

$$p_b = p_m = 0.0098\rho_m H_m \quad (1-6)$$

式中 p_b ——井底压力，MPa；

p_m ——钻井液静液柱压力，MPa。

钻井液静液柱压力是构成井底压力和维持井内平衡的最主要部分，是实施一级井控的唯一保证。

(2) 钻进时的井底压力。

$$p_b = p_m + p_{bp} = 0.0098\rho_m H_m + p_{bp} \quad (1-7)$$

式中 p_{bp} ——循环时的环空流动阻力，MPa。

环空流动阻力使井底压力增大，有利于抑制地层流体向井内的侵入。其数值一般在 $0.7\sim 1.5\text{MPa}$ 之间。

(3) 起钻时的井底压力。

$$p_b = p_m - p_{sb} - p_{dp} \quad (1-8)$$

式中 p_{sb} ——抽汲压力，MPa；

p_{dp} ——未及时灌满井口而产生的静液压力减少值，MPa。

安全提示：

(1) 起钻时应及时灌满钻井液，现场每起 $3\sim 5$ 柱钻杆或 1 柱钻铤就应灌满 1 次。目前国外已配备自动灌浆监测报警系统，在起钻时能实时监测校核起出量与泵入量，发生异常及时报警。

(2) 只有起钻作业时井底压力才会小于静液柱压力，所以起钻时应格外谨慎，以防抽汲。在近平衡中，规定的安全余量就考虑了 p_{sb} 和 p_{dp} 的影响。在设计钻井液密度时，应以起钻工况时的井底压力为准。

(4) 下钻时的井底压力。

$$p_b = p_m + p_{sw} \quad (1-9)$$

式中 p_{sw} ——激动压力，MPa。

(5) 划眼时的井底压力。

$$p_b = p_m + p_{sw} + p_{bp} \quad (1-10)$$

六、井底压差

井底压差 Δp 是井底压力与地层压力之差。

$$\Delta p = p_b - p_p \quad (1-11)$$

式中 Δp ——井底压差，MPa。

当 $p_b \gg p_p$ 时， $\Delta p \gg 0$ ，井底为过平衡；

当 p_b 稍大于 p_p 时， Δp 稍大于 0，井底为近平衡；

当 $p_b = p_p$ 时， $\Delta p = 0$ ，井底压力与地层压力相平衡；

当 $p_b < p_p$ 时， $\Delta p < 0$ ，井底为欠平衡，出现负压差。

七、钻井液密度

在平衡压力钻井中，以地层孔隙压力当量钻井液密度为基数，再增加一个安全附加值来确定钻井液的密度。具体设计时，根据全井压力剖面（地层压力剖面、地层破裂压力剖面和坍塌压力剖面）及浅气层资料，分段设计确定钻井液密度，附加值可由下列两种方法之一确定：

(1) 密度附加值，油水井为 $0.05 \sim 0.10 \text{ g/cm}^3$ ，气井为 $0.07 \sim 0.15 \text{ g/cm}^3$ ；

(2) 压力附加值，油水井为 $1.5 \sim 3.5 \text{ MPa}$ ，气井为 $3.0 \sim 5.0 \text{ MPa}$ 。

具体选择附加值时，应综合考虑地层孔隙压力预测精度、油气水层的埋藏深度、地层油气水中 H_2S 的含量、地应力、地层破裂压力和井控装备配套等因素。浅气井一般采用 $3.0 \sim 5.0 \text{ MPa}$ 的压力附加值。

第三节 地层压力预测及监测

地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力是油气井钻井井身结构设计、套管强度计算、钻井液密度设计等钻井工程设计所需的关键参数。地层孔隙压力、破裂压力、坍塌压力的准确预测对钻井工程意义重大。

长期的陆上和海上油气田勘探的实践证明，异常地层压力的存在具有普遍性，而高压层较低压层更为多见，并且异常地层压力的变化范围较大，极大地影响着油气井施工作业的安全。在钻井施工作业中，如果能够监测到可能钻遇的异常高压，将会提醒我们及早采取相应