



高等院校石油天然气类规划教材

井控技术

龙芝辉 于文平 © 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

井 控 技 术

龙芝辉 于文平 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以成熟的井控基本理论和工艺技术为基础,遵循理论与工程实际相结合、突出工程应用的原则,从井下各种压力与初级井控、井控防喷器及操作控制、节流与压井管汇、设备安装试压与井控辅助设备、溢流发生及关井、压井工艺、井下作业井控、井控案例分析等方面,系统地阐述了井控技术知识。本书体系完整,层次清晰,图文并茂,深度、广度适宜,便于自学。

本书可作为普通高等院校石油工程专业的教学用书和石油天然气行业人员井控技术培训用书,也可作为从事石油工程及相关专业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

井控技术 / 龙芝辉, 于文平编著.
北京: 石油工业出版社, 2013.6
高等院校石油天然气类规划教材
ISBN 978-7-5021-9518-2

I . 井…
II . ①龙…②于…
III . 井控 - 高等学校 - 教材
IV . TE28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 040019 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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部: (010) 64523612 发行部: (010) 64523620

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

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.5

字数: 320 千字

定价: 24.00 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

井控工作在石油与天然气勘探开发工程中十分重要。井控技术是安全实施油气勘探开发工作的重要保证，具有工程应用性强、专业性强等特点，并具有完整的油气井井控技术体系。行业要求从业人员必须定期参加井控技术培训。

《井控技术》是根据油气田井控管理相关标准与规定、井控技术知识体系和行业人员井控技术培训要求组织编写，由长期从事井控技术课程教学的教师与油公司钻井工程和井控工作的专家，在教学讲稿的基础上，经过整理、修改和完善而成。本书在内容编排上注重井控技术知识体系和实际工艺过程，考虑到人们对问题的认知规律和工程实际应用，基本符合循序渐进的原则，有利于课堂讲解和学员自学。同时，对要求掌握的设计与计算问题编有学习例题，每章后编有复习与思考题供学习者练习。

本书由重庆科技学院石油工程系的部分教师、川庆钻采院井控中心教师、中国石油和中国石化长期从事井控工作的专家、川庆川西钻探钻具井控公司专家参与集体编写完成。其中，第一章、第二章、第六章、第七章由重庆科技学院龙芝辉编写，刘继林、肖建波参与了部分内容的编写工作；第三章、第四章、第五章由川庆川西钻探钻具井控公司舒建军、川庆钻采院井控中心余超编写；第八章、第九章由中国石化石油工程管理部于文平、中石油工程技术公司李国顺编写。全书由龙芝辉、于文平统稿，由李国顺审稿。

在本书编写过程中，参考了国内外相关书籍，在此对书籍作者表示感谢。同时感谢中国石油和中国石化相关部门对本书编写、出版的支持和帮助。

由于编者的水平所限，加之时间仓促，其中不免有不当和错误之处，恳请使用本书的学员和广大读者批评指正。

编 者

2012年12月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 井下各种压力与初级井控	9
第一节 井下各种压力及相互关系	9
第二节 地层压力的检测	16
第三节 地层破裂压力的预测与实测	26
第四节 井底动压力分析	31
第五节 初级井控	43
第三章 井控防喷器及操作控制	47
第一节 井控设备概述	47
第二节 防喷器结构及应用	55
第三节 钻具内防喷工具	70
第四节 旋转防喷器	74
第五节 防喷器的操作控制	77
第四章 节流与压井管汇	83
第一节 节流管汇	83
第二节 压井管汇	95
第五章 井控设备安装、试压与井控辅助设备	98
第一节 井控设备安装与试压	98
第二节 井控辅助设备	102
第六章 溢流发生及关井	108
第一节 溢流的发生及发现	108
第二节 溢流发生后的关井	111
第三节 天然气溢流对井内压力的影响	118
第四节 溢流关井后的井口压力	126
第七章 压井工艺	130
第一节 溢流关井后的井内压力状况与处理办法	130
第二节 压井基本数据计算	133
第三节 常规压井方法实施	142
第四节 特殊工况下的压井方法	154
第八章 井下作业井控	158
第一节 井下作业设计中的井控内容	158
第二节 井下作业过程中的井控措施	161

第三节 井下作业井控压井	166
第九章 井控案例分析	172
第一节 钻进过程中的井控案例	172
第二节 其他作业过程的井控案例	185
附录 天然气压缩性系数 (Z 系数) 查取	190
参考文献	193

第一章 绪 论

油气资源开发是典型的高技术、高投入、高风险的行业。油气田开发必须通过油气井钻探以形成油气层到达地面的通道，一口油气井钻探要钻过许多地层，能储存油气资源的地层常称“储层”。地层经过漫长的形成过程，在地质构造、结构、组成、力学等方面具有各自的特征和表现。在钻进进入某一地层之前，地层中的各种力保持着自身的平衡状态。在钻进进入地层的过程中，不断地破坏地层中各种压力的平衡关系，形成地层压力、地层破裂压力、地层坍塌压力与井筒压力的新压力关系。当井筒压力小于地层压力时，地层中的流体会进入井筒；当井筒压力小于地层坍塌压力时，井壁岩石会发生坍塌；当井筒压力大于地层破裂压力时，井筒中的流体会进入地层。钻井工程中对井内压力实施控制（通称“井控”）的主要任务有两个方面，一方面，通过控制钻井液密度使钻井作业在合适的井底压力与地层压力关系状态下进行；另一方面，在地层流体侵入井筒超过一定量后，通过井口装置的控制及调整井内钻井液密度，将井内侵入的地层流体安全排出，并建立起新的合适的井底压力与地层压力的关系，确保钻进安全。

在油气井钻进过程中，井底压力与地层压力的关系一直是人们关注的焦点。在早期的钻井中，为了钻井作业的安全，采用了井底压力大于地层压力的过平衡钻井作业，以不出现井漏为准。人们在钻井实践中发现，降低井底压力与地层压力的差值有助于提高钻进的机械钻速，于是提出了近平衡钻井（或平衡钻井）的思想，即采用井底压力略大于地层压力的钻井作业。实现近平衡钻井的同时，降低了钻井作业的安全性，为此，发展了井控技术，井控技术是安全实施近平衡钻井作业的重要保证。

20 世纪 50 年代，油气勘探主要在陆上进行，海上钻探才刚刚开始，钻井过程中对井内压力的控制具有较大的盲目性，甚至把“井喷”作为发现油气资源的重要途径，结果是钻井过程中发生了不少的井喷事故。

60 到 70 年代，由于世界石油、天然气勘探开发活动的日益活跃，勘探领域从陆地到海上、从浅部地层到深部地层，从老区到新区的迅速扩展，钻遇异常高压地层的机会越来越多，凭经验来处理井内压力控制问题显得无能为力，由井喷和井喷失控造成的巨大损失无法避免和减少。因此，国外一些主要石油公司和研究机构把“井控技术”列为油气井工程的重要研究和发展方向，他们从探讨异常高压地层形成的原因着手，提出用地震资料、钻井参数、录井资料和测井资料等定量检测和预报地层压力异常的方法；对井控工艺和装备进行研究，开发了以电、液、气为动力控制的具有不同功能的各种井控装置，提出了平衡钻井的概念，提出以稳定的井底压力排除溢流的各种压井方法及相应的施工工艺技术，大大地增强了钻井队监测、控制和处理溢流的能力。美国人发表的《井控机理及其控制》和《钻井时如何监测异常高压》等论文奠定了井控技术的理论基础，这期间美国还出版了《防喷手册》和《防喷指南》，专业的井控技术培训学校开始出现。井控技术的基础理论与方法、专用设备、技术规定、操作程序和专业技术培训自成体系，一套完整的油气井井控技术体系基本形成，主要包括井控理论与方法、井控设备系统、井控操作与控制程序、地层压力检测技术、油气井井控的相关规定、井控技术培训中心与培训制度建立。

70年代以来,电子技术被引入井控过程,借助电子技术进行地层压力检测,应用计算机技术采集和处理钻井过程参数、测井数据,借助计算机进行井控过程分析等,极大地促进了井控技术的推广,使井控技术的应用更加科学。

我国自80年代初开始,在总结油气田井控工作经验教训的同时,统一和提高了对油气田井喷危害的认识,对提高和发展井控技术给予了高度重视,在工艺技术和装备配套方面开展了科学研究,“六五”期间把平衡钻井和井控技术列为国家科研项目,研究取得了可喜的成果;开始设立井控培训中心,各油气田的井控设备和井控技术得到了提高和普及,从根本上改变了油气田井喷控制的被动局面,减少了井喷事故的发生,取得了明显的经济效益和社会效益。

“井控技术”具有较强的专业性、针对性和工程应用特征,参加井控技术学习的人员,应对油气井钻井现场条件、钻井工艺过程、现场井控设备系统等有感性认识。

一、井控设备系统概况

经过不断的改进和完善,井控设备系统组成基本稳定,包括实施油气井压力控制技术的所有设备、专用工具、仪器仪表及管汇等,是发生溢流后关井和井口控制的物质基础,井控设备系统可分为井口装置及控制系统、井控管汇、钻柱内防喷工具、井控仪器仪表、钻井液净化及灌注装置、特殊的专用设备及工具等六个部分,其装置配套示意图如图1-1所示。

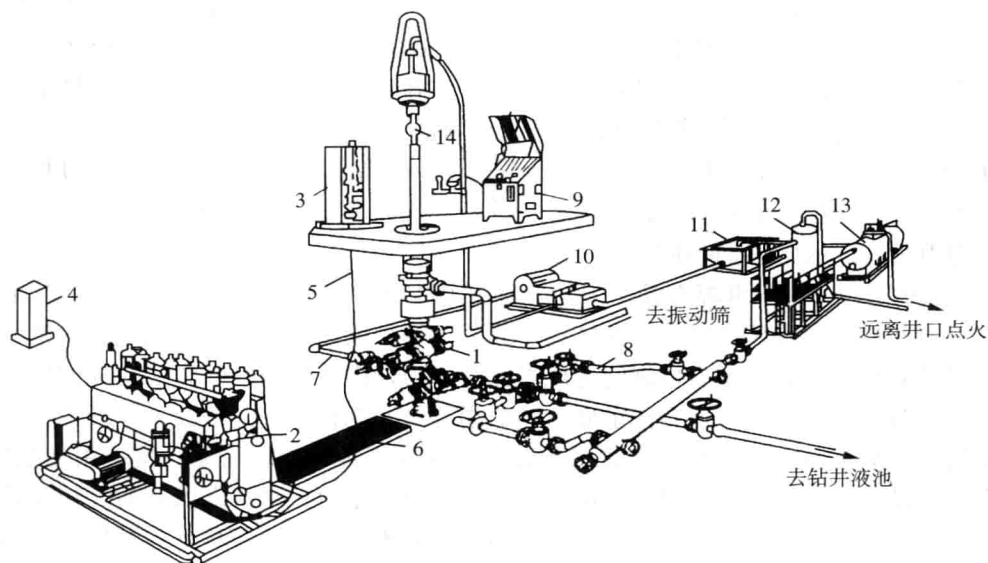


图 1-1 地面井控装置配套示意图

- 1—井口防喷器组; 2—储能器装置; 3—司钻控制台; 4—辅助远程控制台; 5—气管束;
6—液控管排架; 7—压井管汇; 8—节流管汇; 9—节流管汇控制箱; 10—钻井泵;
11—钻井液罐; 12—气液分离器; 13—真空除气器; 14—方钻杆上球阀

在钻井生产中,井控装置在正常钻进、起下钻或其他停钻过程中,可对溢流及井涌进行及时准确的监测和预报;发生溢流、井涌时,能快速有效控制井口,节制井筒内流体

(钻井液、油、气、水)的释放；必要时及时泵入性能合适的高密度钻井液，以恢复和重建井内压力平衡关系；发生井喷、井喷失控乃至着火时，具备有效处理事故的基本条件；能在不压井或关井情况下，进行下入管柱、固井、堵漏等特殊作业，从而防止井喷事故发生。

二、井控分级

井控技术是指对油气井压力实施控制的相关技术的总合，其知识体系常分为“井控工艺”和“井控设备”两个方面，是安全实施近平衡钻井作业的重要保证。

井控的目的主要是防止井喷事故发生，在钻井过程中，维护好井底液压力与地层压力的安全平衡关系，在井底液压力与地层压力的安全平衡关系失去平衡后，重新建立（或恢复）井底液压力与地层压力的安全平衡关系，还应考虑保护油气储层、防止地层资源破坏、防止环境污染。在油气井钻井过程中，常依据井控的难易程度把对井内的压力控制分为三级。

(1) 初级井控：在钻井设计和施工过程中，考虑保持井内钻井液静液柱压力略大于地层压力工况进行钻井施工，防止地层流体侵入井内的控制措施。

(2) 二级井控：由于某种原因使油气井发生溢流，在已有一定数量的异常高压地层流体侵入井内时，能及时发现并关闭井口防喷设备；采用合理的压井方法将侵入井内的地层流体排除到地面或压回地层，通过采用加重的钻井液循环，向井内注入重浆，重新建立井内的压力平衡关系，恢复正常钻进循环的施工过程。二级井控是在初级井控失败后对油气井压力实施的再次控制措施。

(3) 三级井控：油气井发生溢流并失控，造成井喷事故，需要通过抢险，才能重建或恢复对井内压力控制的施工作业。三级井控是在二级井控失败后对油气井压力实施的控制措施。

三、主要专业术语

描述井控技术的专门问题，常用到一些专业术语，在井控技术知识的论述中有专门的含义。

(1) 静液柱压力：由流体自身重量产生的压力，其大小取决于流体密度和静液柱垂直高度。

(2) 井筒压力：液压力沿井筒的压力分布。

(3) 井底压力：井底处液压力的大小，是井口压力与井内液柱压力（含井内液柱动压力）之和。

(4) 地层压力：地层孔隙内流体（油、气、水）所具有的液压力，也称地层孔隙压力。

(5) 地层破裂压力：地层抵抗液体挤入的液压力，属于地层的强度指标之一。

(6) 地层坍塌压力：保持井壁稳定的最小井内液压力。

(7) 井底压差：井底压力与地层压力的差值。

(8) 近平衡钻井（平衡钻井）：采用井内钻井液静液柱压力平衡地层压力（井内钻井液静液柱压力略大于或等于地层压力的状态）进行的钻井作业。

(9) 井漏：钻井循环返出液体体积小于泵注入液体体积的现象。

(10) 井侵：钻井工程中地层流体（油、气、水）进入井筒的现象。

(11) 溢流：钻井循环返出液体体积大于泵注入液体体积的现象。

(12) 井涌：较为严重程度的溢流状态，是轻微井喷的一种表现形式，指井内钻井液涌出喇叭口或至转盘面以上的情形。

(13) 井喷：井内钻井液及地层流体（油、气、水）无控制地喷出井口的情形，是严重程度的溢流现象；通常也指井内流体喷至转盘面以上一定高度或通过放喷管线放喷的情形；在井下，地层流体从高压地层无控制地流入低压地层的现象被称为“地下井喷”。井喷失去控制是钻井工程中非常危险的事故。

(14) 关井：关闭井口防喷器设备，阻止井内流体流出井口的操作过程。

(15) 关井立压：关闭井口待井内压力稳定后，立管压力表的读数。

(16) 关井套压：关闭井口待井内压力稳定后，套管压力表的读数。

(17) 压井：增加原钻井液密度，将加重后的钻井液泵入井内，排出井内原有全部钻井液，恢复（或重建）井内压力平衡关系的作业过程。

四、井喷的危害

世界上公开报道的第一例井喷事故发生在 1901 年 1 月 10 日，在美国得克萨斯州东南部的博蒙特，一口油井在起钻过程中发生井喷，井内钻具被冲出井口，喷出油气柱高达 100ft，最终喷出原油 $50 \times 10^4 \text{bbl}$ （bbl 是计量单位“桶”），并引发着火。

新中国成立初期发生的比较严重的天然气井井喷失控是在 1957 年 2 月 2 日，重庆巴 9 井，起钻未灌钻井液引发强烈井喷，井内 216m 钻具全部冲出，与井架撞击着火，火焰高达 120 余米，先后经过 3 次空中爆炸才将大火扑灭。

1979 年 6 月 3 日，墨西哥石油公司在墨西哥湾南坎佩切湾尤卡坦半岛附近海域的伊斯托克 1 号平台钻机打入水下 3625m 深的海底油层时，突然发生严重井喷，平台陷入熊熊火海之中，原油以每天 4080t 的流量向海面喷射。后来在伊斯托克井 800m 以外海域抢打两眼引油副井，分别于 9 月中、10 月初钻成，减轻了主井压力，喷势才稍减。直到 1980 年 3 月 24 日井喷才完全停止，历时 296 天，其流失原油 $45.36 \times 10^4 \text{t}$ ，以世界海上最大井喷事故载入史册。这次井喷造成 10mm 厚的原油顺潮北流，涌向墨西哥和美国海岸。黑油带长 480km，宽 40km，覆盖 $1.9 \times 10^4 \text{km}^2$ 的海面，使这一带的海洋环境受到严重污染。

2003 年 12 月 23 日，重庆开县罗家 16H 井，在起钻过程中突然发生井喷，富含硫化氢的气体从钻柱内水眼喷出高达 30m，预计无阻流量为 $(400 \sim 1000) \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，失控的含硫化氢天然气在空气中迅速扩散，在短时间内导致大面积灾害，人民群众的生命财产遭受了巨大的损失，事故周围的 4 个乡镇数万人疏散，两百多人遇难，是钻井史上罕见的一次特大井喷事故。事发后中央和国务院高度重视和关切，由国务院有关部门领导、专家，组成国务院“12·23”事故调查小组赶赴事故现场，对事故发生原因展开全面调查。

钻井作业中发生井喷，虽然会带来油气储层信息，但它造成的危害却是巨大的。井喷极易导致失控着火，危及钻井人员的安全，毁坏钻机设备，大量耗费油气资源，使油气井报废，是钻井工程中性质严重的事件，其危害主要有以下几个方面。

1. 造成人员伤亡、钻井设备和资金损失

据不完全统计，1950—1988 年我国累计发生井喷失控井 230 口，其中井喷着火井 78 口，毁坏钻机 59 台；在 1978—1988 年的 11 年间发生井喷失控井 133 口，导致人员死亡 5 人，伤 41 人；1994—2011 年发生井喷失控井 24 口。

井喷事故处理难度大、费用高，如灭火、压井、钻救援井等要投入大量的人力、物力、财力。当井喷失控到了无法处理的时候，不得不采用非常规的方法把井报废。

2. 油气井失控造成井下复杂，压井对产层造成损害

发生井喷后，尤其是井筒钻井液喷空后，油气产层的能量会因油气的大量喷失而下降，在井筒周围形成所谓压降漏斗，储层井壁处于负压状态，高压地层流体进入井筒使井筒处于高压，上部破裂压力较小的地层会由于侵入井筒下部高压流体而出现压漏，发生上部地层井漏，呈现下喷上漏的复杂情况。

在处理井喷的压井施工过程中，为尽快在井筒内形成能平衡地层压力的液柱，使用加重压井液循环压井。在施工过程中，压井液必然会沿储层裂缝渗入地层，加重压井液中的材料等固相物质会堵塞油气通道，造成“泥侵”；同时加重压井液中的水渗入储层会进一步引起“水侵”。这对后续的油气采出会带来许多的不利和麻烦。若产层裂缝欠发育，特别是孔隙型油气储层，完井后必须采用增产措施，收效也难料定。

有人认为，用略大于地层压力的钻井液柱进行平衡钻井会造成油气产层的污染。事实上，在平衡钻井中因产层保持着原始能量，产层油气流在裂缝或孔隙中稍被压缩就足以平衡钻井液液柱压力。钻井液对产层的污染，即对油气通道的堵塞仅局限于井筒周围的所谓“表皮”，这种堵塞远不及井喷后压井所产生的污染那样严重。

发生井喷后，大量资源喷出流失，对储量有限的储层造成损失。如四川长桓坝气田长1井，钻进到嘉陵江气藏发生井喷，喷出气量超过 $1000 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，损失天然气达 $4.61 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占该气藏总储量的62%，致使该气藏几乎失去了开采价值。

无控制的井喷不仅喷出大量的油气，且造成油气藏能量下降，对后续开采的损失难以估计。

3. 环境污染和社会影响

油气井发生井喷过程中，喷出井口的钻井液和油气流在空气中扩散，尤其是含硫化氢的油气流，对井场及周边环境造成严重污染，直接危害到周围居民的生命安全，污染水质，影响农田、渔场、牧场、林木生长等。特别是硫化氢有剧毒，危害面会更大。在我国发生的井喷事故中造成环境污染和社会影响较大的几次井喷事件如下所述。

1986年8月，中原油田卫146井起钻过程诱发井喷失控，由局领导主要成员亲临前线指挥，组织抢险工作。兄弟油田、地方政府和本油田兄弟单位先后前来支援，组织了八百多人参加的抢险队伍。井喷起火当场烧死一人，重伤一人（后因抢救无效牺牲），13人不同程度烧伤，为扑灭大火，先后动用消防车30余辆，受污染的良好面积达3000余亩。

20世纪70年代，川渝油气田合4井因地层压力预报不准，钻进发生井喷失控着火，国务院、原燃化部和省委领导密切注视和关心整个抢险过程。抢险工作得到川渝、上海、天津、武汉、宝鸡等六省十六县市的消防系统、科研部门、厂矿企业和各兄弟油田五十七个单位的全力支持。动用3298、3213、32516、32532、1812等井队，组成了一支2000多人的抢险队伍，动用消防车26台，运输车 and 特种车200多台，各种设备100多台，各种物资14000多吨，抢接供水管线21条，共计14600多米，历时36天才将大火扑灭并控制住井口。

1970年7月，大港油田港75井在循环钻井液过程中发生严重井喷，随即起火，由于

钻台处设备的阻挡，喷出气流四散，整个井场一片火海。原石油部军管会、天津市委、天津驻军和油田领导为扑灭大火亲临现场，组织抢险灭火工作。油田驻军也投入了抢险，参加抢险人员先后达上万人次。但由于火势太猛，人员无法接近井口实施作业，最后调来天津驻军的炮兵，用炮轰钻台位置，使喷出物及火柱出井口后引导向上，方可接近井口对井喷实施控制。

2003年12月23日的重庆开县罗家16H井井喷事故，是最近一次造成环境污染和社会影响较大的井喷事件。

井喷失控、着火会打乱正常的生产秩序，放慢油气勘探的进程。一口井发生井喷，尤其是失控着火，其影响不仅波及整个油气田和其他相关单位，也会惊动省、市地方政府、公安、消防、环保部门，甚至惊动国务院。处理一口失控着火井往往要动员足够的人力、物力以保证抢险工作的需要。各级生产指挥系统抢险期间，其工作重点都转移到失控着火井。仅抢险人员少则数百人，多则数千人，且大多会成建制地抽调其他井队人员和后勤、机修、水电、运输、生活服务、消防、公安等人员组成抢险队伍。

井喷失控或着火是油气勘探开发中性质最为恶劣、损失难以估计的灾难性事故。

五、井控工作特点

1. 地层压力预报的不确定性

大量的钻井实践表明，异常高压地层的存在具有普遍性，油气储层常常具有异常高压特征。从地质环境看，在异常压力层与正常压力层之间，必然存在不传递压力的“围栏”或“封闭圈”，将异常压力层中的地层流体封闭起来。所以，异常压力层（区域）是一个“封闭”的系统，也称“压力圈闭”系统。圈闭层的作用是阻隔其内部地层流体与外界的连通，使其内流体的能量得不到释放而保持高的压力状态。压力圈闭垂直方向的岩层叫“盖层”，通常是致密页岩、盐岩、硬石膏、石膏、白云岩等地层。地层异常高压主要是自然形成，成因是多方面的，主要有以下几种：

（1）地层的被压实作用。沉积层在形成过程中，随着地层埋藏深度的增加和地温的增加，孔隙流体膨胀，而地层的孔隙空间随地层载荷的增加而被压缩。在地层具有足够的渗透性通道情况下，地层中流体会迅速排出，保持正常的地层压力；由于地层被压实，若地层中流体的排出通道被堵塞或严重受阻，随地层埋藏深度增加而增大的上覆岩层压力将引起孔隙压力增大，地层孔隙度也将大于相同深度的正常值，这一压实作用是沉积地层产生异常高压的主要原因。

（2）黏土成岩作用。在泥质岩的成岩过程中，不仅产生机械的压实作用，同时黏土本身的矿物成分也会发生变化，主要表现为蒙脱石的脱水和向伊利石的转化作用。蒙脱石在压实和地温的共同作用下，黏土结构晶格开始破裂，蒙脱石的层间水（束缚水）变成自由水，致使岩石孔隙中的自由水体积大量增加，会引起异常高的地层压力。

（3）密度差的作用。在钻进构造斜度较大的气层，圈闭底部由底水封闭时，储层的底水与圈闭外的水系统连通，圈闭中的气藏压力则由底水压力传递引起，在圈闭中孔隙流体的密度比本地区地层水密度小时，由于密度差的作用，在圈闭构造的上部会形成异常高压。

（4）构造运动。构造运动会引起各地层之间相对位置的变化，如深部的正常压力地层上升处于埋深较原来位置较浅的深度时，相对于较浅深度位置的地层来说则处于高压状态。

还有断层、横向滑动、褶皱或侵入等构造运动挤压圈闭，会引起圈闭内地层流体压力增大。

(5) 流体运移作用。具有高压状态流体运移进入正常压力储层，可能是自然运移也可能是人为向低压层注水（注气）。从深层油藏向上部浅层运移的流体可能导致浅层变成异常压力层，人为向低压层注入流体其目的就是提高储层压力。

这些仅是定性的讨论，还有一些引起地层异常高压的其他原因，要据此分析确定出异常高压地层的压力值是很有难度的工作。

地层压力是地层的属性之一，我们只能认识它，希望准确地知道其值大小，以便于钻井过程中能实施有效地控制。可是，在钻达异常高压地层之前，要准确地预知地层压力值，不是件容易的事。钻进前的地层压力检测方法主要是利用地震资料分析的方法和参考邻近井资料的方法，利用地震资料分析预测地层压力，是借用地面测取的地震资料来推出地下数千米深处的地层参数，结果误差是可想而知的。参考邻近井资料来预测本井地层压力，在一定条件下比利用地震资料分析会更可信些，但参考邻近井资料毕竟不同于本井，地层的地质条件会对预测产生影响，有时还会很大。如对裂缝性地层，钻到裂缝和没钻到裂缝遇到的地层压力会有很大的不同。钻进过程中的地层压力检测方法都是基于在钻进进入储层过程中的钻井参数分析、循环出口钻井液的“显示”分析、返出岩屑分析等录井资料与数据的分析处理。对正在钻进的地层压力进行预测，用好了这些方法有助于及时发现地层异常高压。但每一种方法都有一定的适用条件或适用地层，都会由于某一因素的影响而出现误报和影响地层压力值的预测。

此外，由于施工井底压力波动使井底压差发生变化，其量值是很难准确把握的。在钻井过程中，井底压力的大小除与钻井液密度密切相关，还与钻井作业状态有关。通常在起钻过程井底压力最低；下钻或钻进过程，井底压力相对较高；井漏过程的井底压力变化与环空液面下降高度有关。在井底压力不能准确把握的情况下就更不能准确地把握地层压力了。

2. 油气井压力控制有规定

长期的钻井实践使石油工作者认识到，实施近平衡压力钻井和采用科学的井控技术是发现油气层、保护油气资源、实现安全钻井的正确途径。对油气井压力控制要求采用近平衡压力钻井，即井底压力略大于地层压力的钻井作业方式，设计合理的钻井液密度对所钻地层实施初次井控。若钻井过程中一次井控未能有效控制住地层流体侵入，发生溢流现象，应及时发现，并允许通过井控装置及时实施关井操作，允许采用合适的压井方法实施压井作业，使井筒恢复到初次井控状态，即能够实施二次井控。具体要求应遵循《中国石油天然气集团公司石油与天然气钻井井控管理规定》、《钻井井控技术规程》（SY/T 6426—2005）、《钻井井控装置组合配套安装调试与维护》（SY/T 5964—2006）等相关规定与标准。

油气田做好井控工作，必须做到五个环节：思想重视、措施正确、技术培训、严格管理、装备配套。

3. 从业人员培训有行业要求

行业要求从业人员必须定期参加井控技术培训，通过井控技术培训，使参加培训的学员理解井下各种压力的概念及相互之间的关系；掌握井控设备的基本组成、结构、工作原理、安装、调试、使用、维护保养、检测、故障判断和排除，及含硫化氢地区井控设备的

安装和材质的选用要求；掌握溢流产生的基本原因，能够及时发现溢流并迅速地关井；掌握各种工况下的关井程序和岗位职责；关井后能准确获取立管压力、套管压力、钻井液密度和溢流量等数据；了解天然气溢流的特点；掌握压井基本参数计算及压井方法；了解特殊工况下的关井程序和处理方法；掌握石油与天然气钻井井控、井下作业井控方面的相关规定、标准、要求与做法，了解井控实施细则以及应急预案、硫化氢的防护知识；掌握欠平衡钻井井控的有关知识；部分参加培训的学员会组织防喷演习并能对防喷演习进行讲评。

培训对象可能有钻井队大班、司钻、副司钻、井架工、大班司机、大班泥浆等现场操作人员，有工程技术人员、工程监督监理、钻井队队长、钻井安全监督，有主管钻井生产、技术、安全的领导以及钻井生产管理人员，有井控车间的技术人员和设备维修的现场服务人员，有地质设计、地质监督、测井监督以及欠平衡钻井、固井及井下作业、综合录井、钻井液、取心、打捞、定向井等专业服务公司的相关技术人员。不同人员对井控技术学习，要求其应在全面了解井控技术知识的基本上有所侧重。

复习与思考题

1. 完整的油气井井控技术体系主要内容包括什么？
2. 依据井内压力控制的难易程度常把井控分为哪三级？试简述之。
3. 试列举十个“井控技术”的专业术语，并解释其含意。
4. 试说明井喷事故的危害。
5. 简述井控工作的特点。

第二章 井下各种压力与初级井控

在钻进过程中, 井下各种压力及相互关系是钻井工作者必须十分关注的问题。地层压力和地层破裂压力是钻井工程设计和施工的重要依据之一, 井底压力大小与钻井作业状态有关, 只有准确地掌握地层压力和地层破裂压力, 才能做到合理的钻井工程设计, 有效地进行油气井压力控制, 实现安全、快速钻进。

经过多年的探索, 已形成利用地震资料、测井资料或钻进参数等预测或检测地层压力的方法, 形成通过理论分析、液压试验预测或检测地层破裂压力的方法, 这些方法的运用对钻井技术的发展起到了重要作用。

本章主要讨论井下各种压力、地层压力及地层破裂压力预测与检测, 对井底动压力进行分析, 并论述初级井控应考虑的问题。

第一节 井下各种压力及相互关系

井下各种压力主要指钻进地层后, 井内呈现出的地层压力、地层静液柱压力、地层破裂压力、上覆岩层压力和基岩应力等。

一、地层压力

地层的主体是岩石, 岩石是由矿物颗粒胶结而成, 存在孔隙空间。通常把岩石中的固体部分称为“基岩”, 用“孔隙度”的概念描述地层孔隙空间的多少, 不同地层的孔隙空间多少有所不同。在岩石孔隙空间内会储存有某些流体(液体或气体), 这些地层流体具有一定的液压力, 称为“地层孔隙压力”或“地层压力”, 即地层压力就是指地层孔隙内流体所具有的液压力, 常用 p_p 表示。

1. 地层孔隙压力计算

若从埋藏垂深为 H 的地层到地面各地层孔隙是连通的, 那么, H 垂深处的地层孔隙压力, 就是由 H 以上地层中流体的静液柱重力产生。

如图 2-1(b)所示情形, 据“流体力学”原理, 在此情况下可计算出 H 处地层孔隙压力为

$$p_p = \sum_{i=1}^n \rho_{hi} g H_i \quad (2-1)$$

式中 p_p ——地层孔隙压力, kPa;

ρ_{hi} ——计算深度以上 H_i 地层孔隙中流体的平均密度, g/cm³;

H_i ——计算地层厚度, m;

n ——计算深度以上的地层数;

g ——重力加速度, $g=9.8\text{m/s}^2$ 。

对图 2-1(a)所示情形,可计算出地层孔隙压力为

$$p_p = \rho_h g H$$

对图 2-1(c)所示情形,可计算出地层孔隙压力为

$$p_p = \sum_{i=1}^n \rho_{hi} g H_i - \rho_{hl} g h$$

对图 2-1(d)所示情形,有存在于盖层下的气藏,气藏顶压力为

$$p_p = \sum_{i=1}^n \rho_{hi} g H_i - \rho_g g h$$

当计算深度以上各地层孔隙中流体的平均密度为 ρ_h 时,如图 2-1(a)、图 2-1(b)所示情形,可写出

$$p_p = p_h = \rho_h g H \quad (2-2)$$

此时 $p_p = p_h$, 也称“静液柱压力”,常用 p_h 表示。

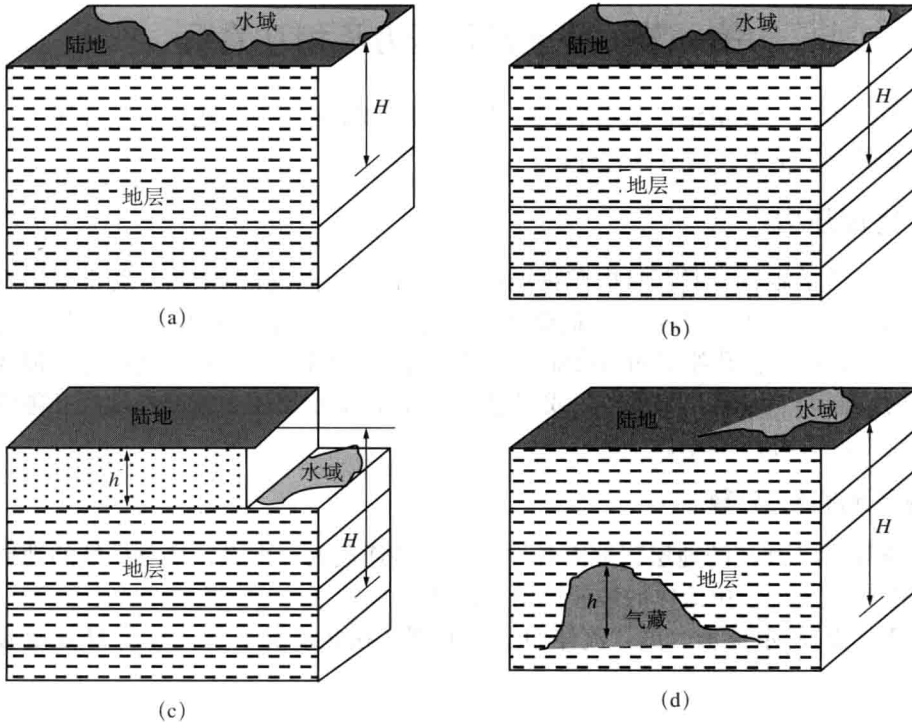


图 2-1 地层压力计算

影响地层孔隙中流体密度大小的所有因素(如溶解在液体中的盐类,气体的浓度、温度等)都会影响到静液柱压力大小。

人们常把单位垂深压力的增加值称为“压力梯度”,习惯记为 G ,常用单位为 kPa/m 或 MPa/100m。地层静液柱压力梯度为

$$G_h = \frac{p_h}{H} = \rho_h g \quad (2-3)$$

通常, 钻井工程中所钻遇到的有代表性的地层静液压力梯度主要有两类: 一类是淡水地质盆地, 平均 $G_h=9.8\text{kPa/m}$; 另一类是盐水地质盆地, 平均 $G_h=10.5\text{kPa/m}$ 。

2. 三类压力地层

钻探实践告诉我们, 各地层的地层孔隙压力并不总是等于静液柱压力, 经常会遇到地层孔隙压力异常现象, 实际地层孔隙压力可能大于或小于正常地层静液柱压力。在钻井工程中, 把地层压力等于正常地层静液柱压力的地层称为“正常压力地层”, 把地层压力大于正常地层静液柱压力的地层称为“异常高压地层”, 把地层压力小于正常地层静液柱压力的地层称为“异常低压地层”, 由此把钻进地层分为三类, 如图 2-2 所示。

地层压力的一般表达采用静液柱压力表达式为

$$p_p = \rho_p g H$$

式中 ρ_p ——地层孔隙压力当量钻井液密度, 简称“地层压力当量密度”。

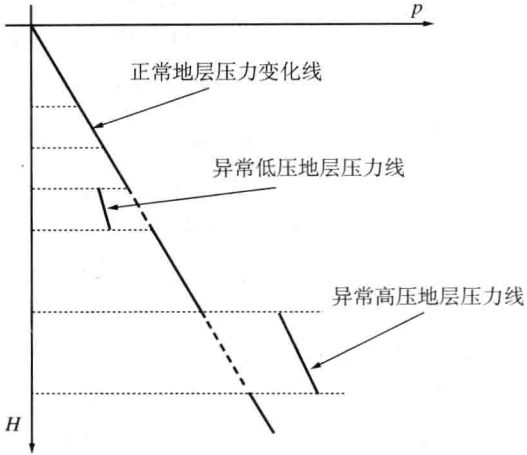


图 2-2 三类压力地层

如图 2-3 所示, 若已知 H 深度处的地层压力为 p_p , 则设想地层压力 p_p 相当于密度为 ρ_p 、高为 H 的液柱产生的压力, 这个密度 ρ_p 就叫压力 p_p 的当量密度, 即

$$\rho_p = \frac{p_p}{gH} \quad (2-4)$$

同理, 也常用地层压力梯度来表达地层压力, 即

$$G_p = \frac{p_p}{H} = \rho_p g \quad (2-5)$$

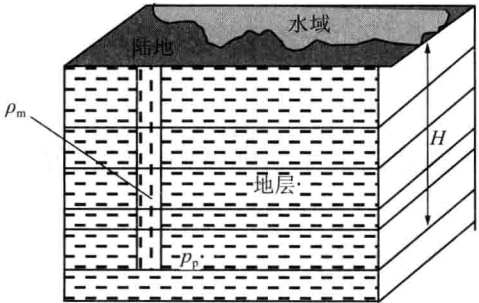


图 2-3 压力当量密度计算

正常压力地层具有正常的流体压力体系, 可以看成是一个水力学的“开启”系统, 即可渗透流体可以流通的地层, 它允许建立或重新建立静液压力条件。与此相反, 异常高压地层的压力系统基本上是“封闭”的, 异常高压和正常压力之间有一个封闭层, 它阻止了或至少大大地限制了流体的流通。从地质环境来看, 在正常压力地层与异常压力地层之间, 必然有不传递液压力的“封闭圈”, 将异常压力地层中的流体封闭起来, 所以异常压力地层(区域)是一个“封闭”的系统, 也称“压力圈闭”系统。

异常高压地层形成后, 随着沉积厚度的增加, 上覆岩层压力和热水增压等作用会增大, 使地层压力也随之增大。这样异常高压地层和正常压力地层之间的压差就增大, 高压层的压力就要向相邻的正常压力地层扩散或泄漏。如果封闭条件良好异常高压就会保持下来, 如果封闭层由于地质构造运动、断层移动等作用发生破裂, 异常高压层的压力就会沿断裂泄漏。此外, 即使异常高压层的封闭是良好的, 但封闭层总是具有一定的渗透性, 轻微的