

郝俊芳 主编

平衡钻井与井控

高等学校教学用书

石油工业出版社

TE2/24

064714



高等学校教学用书

平衡钻井与井控

郝俊芳 主编



200430499

571/29



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书以“六五”和“七五”期间,在平衡钻井及井控技术方面的国家重点科研项目所取得的成果为基础,并结合80年代国内、外在这个领域的理论新进展与技术新成就编写而成。主要包括:地层压力检测方法、井内波动压力计算、合理泥浆密度与许用起下钻速度的确定、陆上及海上压井计算、溢流与关井方法、防止地下井喷、失控井喷处理、空井压井设计、井控模拟器等。

本书可用作石油钻井、探矿工程等专业的研究生教材与本科生选修课教材,也可作为石油钻井与地质勘探系统的科研人员、院校师生及现场工程技术人员的参考书。

高等学校教学用书

平衡钻井与井控

郝俊芳 主编

*

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云印刷厂排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 14¹/₂印张 362千字 印1—4,000

1992年8月北京第1版 1992年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0673-1/TE·640 (课)

定价: 3.75元

前 言

平衡钻井与井控技术是“六五”期间国家重点科研项目(1983~1985年),由四川石油管理局与西南石油学院及中原石油勘探局与石油大学共同承担。在理论研究和实际应用方面都有重要进展,所取得的成果达到80年代初国际水平。

1986年以来西南石油学院井控教研组又继续与四川石油管理局承担了“微机在平衡钻井与井控技术中的应用”、“超重泥浆压井方法”等科研任务,同时还与中原石油勘探局共同进行“井内瞬态波动压力”的理论研究与现场测试工作。这些都是“七五”期间国家重点科研项目的子课题,在1989年底均已基本完成。在此期间井控教研组还对非常规井控技术的理论作了系统研究。

本书是以井控教研组近十年来承担平衡钻井与井控技术科研任务所取得的成果、公开发表的论文以及我所指导的研究生的学位论文(部分内容)并参照我出国访问及参加国内外学术会议所获得的信息为基础而写成。平衡钻井与井控是一项实用性技术,它所涉及的范围相当广泛。本书在内容选取上尽量避免与国内已出版的同类书籍重复,所以本书未包括地层破裂压力预测、井身结构设计、防喷设备的结构与选用、试压方法、压井工艺技术与操作规程等内容,而主要以讲述平衡钻井与井控的理论及计算方法为主。

本书是在大学本科教材《钻井工艺原理》的基础上编写的。其中第二至第七章曾作为《钻井压力控制原理》课程内容为我院研究生讲授多次。因篇幅所限,另一研究生课程《非常规井控技术》则只有空井压井设计等少量内容编入本书。在使用本教材时可根据学员对象及学时总数有选择地讲授,有些章节可让学生自学及参考。

本书由井控教研组成员共同编写,具体分工是,刘凯:第五章及第八章;唐林:第二章;周开吉:第三章第一、二、四节;钟兵:第三章第三节;张昌元:第六章第三、四节及第七章第四节;崔之健:第九章第三节;袁其骥:第十章;其余章节均由我本人编写。全书章节内容由我组织安排并最后统一定稿。符号术语的统一及公式图表的编号等由张昌元协助完成。

本书选用了少量国内外公开出版物的内容。其中第九章失控井喷主要是四川石油管理局多年来宝贵经验的总结。在此向这些论文的 authors 表示感谢!

石油大学沈忠厚教授审阅本书,并提出了许多宝贵意见,对此我们深致谢意!

由于作者的水平有限,对书中存在的缺点和错误欢迎给予批评指正。

郝俊芳

1990年元月于西南石油学院

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 地层压力监测技术	(8)
第一节 d_o 指数法	(8)
第二节 d_{co} 指数法	(17)
第三节 多元回归分析法	(19)
第四节 西格玛法	(22)
第五节 c 指数法	(25)
第六节 声波时差法监测地层压力	(28)
第三章 井内波动压力	(33)
第一节 井内波动压力研究状况	(33)
第二节 井内稳态波动压力分析	(37)
第三节 井内瞬态波动压力分析	(52)
第四节 井内波动压力实验	(81)
第四章 平衡钻井合理泥浆密度与许用起下钻速度	(90)
第一节 平衡钻井合理泥浆密度	(90)
第二节 许用起下钻速度计算	(96)
第五章 溢流关井与压井方法的选择	(103)
第一节 溢流和关井过程的数学处理	(103)
第二节 关井方法	(110)
第三节 井涌余量	(111)
第四节 临界泥浆增量	(115)
第五节 两种判断准则的关系	(118)
第六章 司钻法与工程师法压井计算	(123)
第一节 司钻法压井计算	(123)
第二节 工程师法压井计算	(130)
第三节 海洋工程师法压井计算	(138)
第四节 影响压井套压变化的因素	(147)
第七章 地下井喷的预防和处理	(153)
第一节 地下井喷的特点	(153)
第二节 防止地下井喷的方法	(154)
第三节 地下井喷的处理	(157)
第四节 超重泥浆压井方法	(159)
第八章 空井压井设计	(172)
第一节 第一次井底压力等于地层压力的空井压井设计	(172)

第二节	第 N 次井底压力等于地层压力的空井压井设计	(178)
第三节	几种特殊空井压井设计方法	(184)
第九章	井喷失控	(188)
第一节	井喷失控处理的基本做法	(188)
第二节	井喷失控井的处理实例	(194)
第三节	动力压井法(Dynamic Kill)	(201)
第十章	井控模拟	(216)
第一节	绪论	(216)
第二节	井控模拟装置	(217)
第三节	微型井控模拟器	(220)
符号说明		(225)

第一章 绪 论

平衡压力钻井是19世纪60年代发展起来的一项重大的钻井技术,它对提高钻井速度、降低钻井成本、保护生产层和延长油井寿命起着重要作用。而地层压力监测技术的发展、地层破裂压力的计算和测定以及井控技术的普及,又给平衡压力钻井技术的应用提供了有利的条件。这项技术已越来越受到国内外钻井界的重视。

一、平衡压力钻井发展概况^①

钻井人员很早就发现清水钻井比用泥浆钻速快,体会到增加泥浆的密度和粘度会降低钻速,但对密度提高会引起钻速下降的科学理论的发现还是50年代以后的事。

1955年默里(Murray)和坎宁汉(Cunningham)在实验室进行微型钻头钻井试验发现,钻速随泥浆静液柱压力增加而下降,钻速下降幅度随岩石性质和施加钻压不同而变化,但泥浆静液柱压力在6860千帕(1000磅/英寸²)以内钻速下降幅度最大。

1958年伊哥尔(Eckel)在室内用微型钻头研究了压力对岩石可钻性的作用,得出钻速随压力差的增加而下降,试验表明当孔隙压力与静液柱压力相等时钻速最高,最优钻井条件是平衡压力条件,在超平衡条件下钻速将下降。

1959年坎宁汉和依因克(Eenink)在实验室用微型钻头研究了上覆岩层压力、地层孔隙压力和液柱压力对渗透性地层钻速的影响,实验指出,上覆岩层压力实际上不影响钻速,而泥浆液柱压力与地层孔隙压力之差对钻速有显著的影响,钻速随压差增加而下降,压差由0增至6860千帕(70公斤/厘米²),钻速下降60~70%。他们将钻速降低归为两个原因:首先是由于压差作用使岩屑压持在井底;其次是由于压差作用使岩石强度增加。同年加尼尔(Garnier)和范林琴(Van Lingen)用刮刀钻头、金刚石钻头和全尺寸牙轮钻头在岩石上进行试验得出,压差对岩石强度和钻屑的压持都有影响,钻速降低是由于压差增加使岩石强度增加和钻屑压持效应的结果。

1965年宾汉(Bingham)指出钻速和压差之间的关系在现场条件下比较复杂,压差增加会影响岩石的强度和岩屑的压持作用,而钻头的水力作用等会降低这种影响。

1968年维德莱因(Vidrine)和本尼特(Benit)根据现场试验数据进一步证实了压差对钻速的影响,得出了南路易斯安那地区压差对钻速的影响曲线,曲线表明当动泥浆压力(泥浆静液柱压力和环空压降)大于地层孔隙压力时,钻速随正压力差的增加而下降,但当地层孔隙压力大于动泥浆压力时,钻速随负压差的增加而增加。这种现象和室内试验不一致。根据Bingham的研究,在实际钻井条件下,井内动压力是由四部分组成的,即

$$p_{DYN} = p_m + p_{AN} + p_i + p_R$$

式中 p_{DYN} ——井底泥浆动压力;

p_m ——泥浆静液压力;

① 郝俊芳、徐云英:“平衡压力钻井和井控技术”,《钻井工艺专辑》,石油钻采工艺科技情报协作组,1985年。

p_{AN} ——环空压降;

p_I ——钻头喷嘴射流对井底的冲击压力;

p_R ——钻头旋转时对井底产生的水力冲击压力。

现场实际钻井数据如果用上式进行调整和处理, 所得规律和实验室结果完全一致。

1969年宾汉对地层孔隙压力大于动泥浆压力时, 钻速随负压差增加而增加的规律作了进一步研究, 指出在实际钻井条件下, 施加于井底的泥浆动压力除了静泥浆柱压力和环空压降外, 还应包括钻头喷嘴射流对井底的冲击压力和牙轮钻头旋转时对井底产生的水力冲击压力。而冲击压力波有助于钻屑的运移。

1975年帕伦狄斯 (Prentice) 在南得克萨斯Wilcox地区根据现场钻井数据经过处理, 作出了压差对钻速的影响规律, 进一步证实了压差从0增至6860千帕 (70公斤/厘米²), 钻速降低60~70%。

根据以上研究得出:

- ① 钻速随压差增加而下降, 下降幅度随岩石性质和施加钻压不同而变化。
- ② 压力差在6860千帕 (70公斤/厘米²) 以内时, 钻速随压差增加而大幅度下降, 愈靠近0时差, 钻速下降幅度愈大。
- ③ 在平衡压力条件下钻井钻速最高, 超平衡条件下钻速下降。

二、预测和监测地层压力的方法

压差对钻速影响的研究, 为提高深井钻井速度、降低成本找到了一条重要的途径, 并逐渐发展了平衡钻井技术。

要实现平衡压力钻井, 首先就要取得所钻地层的压力数据, 特别是地层孔隙压力和地层破裂压力。目前世界上已经有了各种探测和监测地层压力的方法和装置, 发展了各种数学模式和用计算机进行计算和分析, 且已大量使用于现场。

多年来已经发展了各种预测和监测异常地层压力的技术, 有地球物理方法, 如地震、测井; 有钻井参数监测; 钻井泥浆参数监测; 页岩钻屑参数监测等。但是单独使用任何一种方法都难以获得准确结果。实践表明, 通过几种测量地层压力的方法进行综合研究是避免造成错误判断的最好办法。

目前用于预测、探测和监测高压层的各种方法有:

- (1) 地球物理方法: 地震、重力、磁力、电法;
- (2) 钻井参数法: 钻速、 d -指数、修正 d -指数、标准化钻速及随钻测井 (MWD) 等;
- (3) 泥浆参数法 (钻井过程中, 要考虑泥浆上返需要的滞后时间): 泥浆密度、泥浆中天然气含量、温度、排量、井内灌泥浆情况、泥浆池液面高及泥浆总液量、矿化度 (电阻率、氯离子等)、溢流 (井涌)、压力波动;
- (4) 页岩岩屑法: 密度、形状、大小、颜色、震动筛筛出量和含水量、“岩性分析”图、钻屑的页岩指数;
- (5) 测井法 (钻井后): 电测 (电阻率、页岩地层因子、含盐度变化)、声波测井、传播间隔时间 (时差测井)、波列显示 (变密度测井、特征测井等)、体积密度测井、密度测井、氢指数、热中子俘获截面 (脉冲中子测井)、核磁共振测井、 γ 射线能谱测井;
- (6) 地层测试法 (停钻测量): 钻杆测试 (DST)、绳索式地层测试亦称重复地层测试

(RFT)。

三、地层破裂压力的预测

地层破裂压力的确定是地层压力预测的一个重要组成部分，它对钻井、完井、油气井压裂增产措施都很重要。就钻井来说，准确地掌握地层破裂压力梯度可以预防井漏、井喷、井塌、卡钻等事故，也是制定泥浆和套管程序的重要依据。

地层破裂压力（或梯度）可以通过井内实际测试来确定，即做地层破裂试验（或称渗漏试验）。在钻井之前也可利用各种模式来计算地层破裂压力，目前已有许多种计算模式，但都不很完善。

1973年安德森（Anderson）等探索从电测资料中获得足以确定地层破裂压力的系数，考虑到井壁上应力集中的影响，通过毕奥特（Bot）的弹性多孔介质的应力/应变关系式导出破裂压力模式为

$$p_f = \eta p_r + \frac{2\mu}{1-\mu}(s - \eta p_r)$$

式中 η ——与岩石的压缩性有关的系数；

s ——上覆岩层压力。

特查希（Terzadhi）根据试验结果，认为多数对沉积岩可取 $\eta = 1$ ，于是上式可简化为

$$p_f = p_r + \frac{2\mu}{1-\mu}(s - p_r)$$

1980年美国斯蒂芬（Stephen）提出了在预测破裂压力的模式中考虑构造应力的问题，同时又做了均匀水平方向构造应力的假设，得出破裂压力计算模式：

$$p_f = p_r + \left(\frac{\mu}{1-\mu} + \xi \right) (s - p_r)$$

式中 ξ ——构造应力系数，可由测试破裂压力推算。

上式虽然考虑了构造应力的影响，但忽视了水平方向两个主应力常常是不相等的这一情况。

1984年华东石油学院钻井教研室也提出了新的预测地层破裂压力的模式：

$$p_f = p_r + \left(\frac{2\mu}{1-\mu} + K \right) (s - p_r) + s_t$$

式中 α, β, k ——地层构造应力系数， $K = \alpha - 3\beta$ ， s_t ——地层的抗拉强度。

以上所述各种预测地层破裂压力的模式，都没有能全面考虑影响地层破裂压力的各种因素，因此只适用于特定条件，还有许多不完善的地方，应作进一步的研究。

四、平衡钻井泥浆密度与井内波动压力

平衡压力钻井的核心问题是选择合理的泥浆密度，有了各层段的地层压力数据，就可以确定最小泥浆密度。最小泥浆密度确定的原则是泥浆静液柱压力加环空压力降等于地层孔隙压力，实际使用时还要根据井的具体情况有一定密度附加值。此外波动压力计算对防止井喷

和井漏也有很密切的关系。早在30年代, 钻井工作者们对此已有认识。在50年代有人企图建立波动压力计算式, 但直到1960年由J. A. Burkhardt所给出的公式才得到了公认, 并沿用至今。这种方法系根据管柱提升或下放引起环空泥浆流动所产生的流动阻力来计算波动压力。由于它以钻柱移动速度最大时的环空流速进行计算, 所以可称为稳态波动压力算法。

1977年A. 鲁宾斯基根据流体力学瞬态(不稳定)压力波传播理论提出了瞬态波动压力算法。这种方法除了考虑以声速传播的瞬态压力波外, 还考虑了管柱和井壁膨胀以及井内流体压缩性的影响。他把导出的瞬态波动压力计算式编成了计算机程序, 对不同井内条件进行了计算并与稳态波动压力计算结果对比, 得出了以下结论:

① 稳态波动压力算法与瞬态法计算结果的误差可达一倍。该误差随井深及管柱长度增加而加大。

② 最大起下钻速度对瞬态波动压力影响最大。在一个计算实例中如把起下钻速度从2.13米/秒减至1.52米/秒, 则可使最高瞬态波动压力减少到原来的1/2。

③ 瞬态波动压力还随管柱长度、钻铤外径, 泥浆的密度、粘度和动切力的增加而加大, 随井径减小而迅速加大, 但管柱加速度对它的影响较小。

④ 管柱底端以下的井眼长度大时要减小瞬态波动压力。

经过数年努力, 美国AMOCO公司进一步完善了瞬态波动压力计算方法。以前鲁宾斯基把单根的压力降集中到一点以简化计算, 而AMOCO公司则把它视作均布的, 这样更符合实际情况。AMOCO公司的计算程序除波动压力外, 还能计算井内各点的当量泥浆密度及许用最大起下钻速度。

计算结果还表明, 当钻头喷嘴直径较大时, 钻头有效环空上返面积减少到50%时, 波动压力值增加并不多, 因底部泥浆可由钻柱内上返。如因钻头泥包, 环空有效上返面积超过50%以后, 波动压力增加就相当快。某一计算得出, 当环空上返面积为正常值的5%时, 波动压力由347磅/英寸²增至662磅/英寸² (三个钻头喷嘴均为22/32英寸), 如喷嘴尺寸小, 这种影响将更为严重。

从1984年起西南石油学院与中原石油管理局共同进行了瞬态波动压力的理论研究, 并在中原全尺寸试验井内完成了试验, 使我国在这个领域的研究工作已接近国外水平。

五、井控技术发展的三个阶段^[1]

从有关资料介绍和我们对井控技术发展的了解, 认为井控技术在世界范围内已经经历了两个阶段, 现正进入第三个阶段。

第一个阶段为经验阶段, 时间大约为50年代及其以前的整个时期。这个时期由于勘探领域一般限于陆地, 海洋勘探刚开始, 客观环境对井控技术要求还不高, 因此, 井控技术没有形成系统的理论, 行动上带有较大的盲目性, 甚至把井喷作为暴露油气层的重要途径, 结果使不少井喷失控。

第二阶段为理论化阶段, 时间从60年代初到70年代初。海上石油勘探和开发已正式开始, 特别是近海石油勘探开发工作发展很快。自1970年以来, 钻井船平均每年以9.8%的速度增加, 另外, 深部油气藏的勘探开发已成为油气产量和储量增加的重要方向, 并打成功了一批深井和超深井。以上形势对井控技术提出了迫切要求。这个时期, 井控技术的文章大量出现, 井控理论也逐渐系统, 其中以美国W. C. 高因斯和T. B. 奥布赖恩写的“井控机理及其

控制”一文为代表。这个时期还出版了《防喷手册》、《防喷指南》和发表“钻井时如何监测异常高压”等文章，使井控技术在实践和室内模拟的基础上，达到理论化和系统化。用这套理论指导实践，收到了明显的效果。如美国壳牌公司，1973年以前，平均每年失控2.5井次。采用这套井控技术后，1973~1983年只有2口浅井井喷。在这个时期，井控学校大量出现，井控技术的培训已走上正轨。

第三个阶段为现代化阶段，时间从70年代中期到现在。这个阶段的主要标志是电子技术用于井控作业上，特别用于预测和监测地层压力。近十年来发展起来的“DATA”和“ADT”等装置，通过电子计算机控制，可以测量在钻井过程中应取得的一系列参数，作到快速准确的发现地层压力的变化，并可预测钻头以下50~80米地层的压力，实现了平衡地层压力钻井，防止了井漏和井喷事故发生，还可以提高钻井速度2~3倍，大大减少了卡钻事故。使世界公认为高风险的石油勘探开发工作的可靠性增加了。

六、井控技术的主要内容

钻井过程中控制地层压力的方法可分为三个阶段：

(1) 初次控制 保持泥浆液柱压力略大于地层压力并配合以合理的操作技术，使地层高压流体不致于进入井内，而维持正常钻进。

(2) 二次控制 当地层-井眼系统压力失去平衡时，就要利用井控技术重新形成压力平衡，使井得到控制。目前国外井控的基本原理是保持井底压力不变，在压井时也要遵循这一原理。

井涌压井时，一是要把井内溢流排出井口，二是需要向井内注入大量的压井泥浆来平衡地层压力。为了保持井底压力不变，在循环压井期间，应该始终通过调节井口阻流器施加一定的回压，把井底总压力（静液柱压力和回压等）保持在等于或略高于地层压力。这样，既可避免地层流体再次进入井内，又可减少把地层压裂的危险。

根据以上原理来进行压井时，一个重要的问题是应该根据立管压力来控制井底压力不变，因为只有立管压力才能真正反映井底压力。要根据立管压力来控制井底压力不变，就必须：①保持循环速度（泵速）不变；②使用可调式阻流器。司钻法（又名两步循环法）和工程师法（又名一步循环法，或等候加重法），就是利用这种原理已被广泛使用的压井方法，这些方法也统称为常规井控技术。

(3) 三次控制 当地层压力很大，溢流发现较晚，进入井内的高压油气数量过多，无法用保持井底压力不变的方法排除高压油气溢流时往往就要采取紧急处理方法，如打重晶石塞或水泥塞等紧急措施，防止出现地下井喷等复杂情况或者使井完全失去控制，采用这些措施时常会造成井部分的或全部的报废。

当发生严重溢流甚至井内泥浆喷空的情况下，不能采用常规井控方法，但在井口设备良好条件下还可以采用非常规井控技术。近几年国内已研究了低套压法、空井等非常规井控技术压井法和防止地下井喷的理论，并取得了一些现场实践经验，在处理多种类型失控井喷事故中，也积累了许多宝贵经验。

七、井控装备^[1]

井控装备是实现油气井压力控制的有效手段和保证。井控装置应由6个主要方面和近

20套装置组成。这6个主要方面是：

- ① 以液压防喷器为主体，包括套管头，旋转防喷器在内的井口装置；
- ② 以节流、压井管汇为主体，包括现行的防喷管汇、注冷却水管汇、反循环管汇和灭火管汇在内的井控管汇以及点火装置；
- ③ 以钻具回压凡尔或钻具投入式止回阀为主体，包括方钻杆上、下旋塞在内的钻具内防喷工具；
- ④ 以监测和预报地层压力的设备为主体，包括安全报警装置在内的井控仪器仪表；
- ⑤ 以起钻自动灌泥浆装置为主体，包括泥浆自动加重和泥浆除气器在内的装置；
- ⑥ 以液动不压井加压装置和快速灭火装置为主体，包括注冷却水装置、井口拆装装置、水力喷砂切割装置、钻具带压密封钻进装置、注封堵材料装置及钻救险井全套装置在内的井喷失控直至着火后，处理事故的专用工具和装置。

八、井控操作规程与井控技术培训^[1]

为防止井喷和井喷失控，世界上各主要从事石油和天然气勘探开发的国家，不仅制定了井控技术各个环节的详细操作规程，而且为保证这些规程的认真执行，不少国家还将防止井喷的重大技术政策和措施，以国家法律形式固定下来。并随着技术水平的提高和新情况的发生，不断修订。例如美国国家地质调查局1980年的近海大陆架第2号法令规定：水下环形防喷器的地面承压能力不得大于额定工作压力的70%等若干规定。该局的T-1号法令还特别规定了公司代表、总监、司钻和井架各人应负的责任。英国政府和工业界1980年还颁布了井控章程，明确规定了各级人员在井控技术上应掌握的关键技术和责任制，违者要受法律追究。

为使有关人员掌握好井控技术，主要从事油气勘探开发的国家，都十分重视井控技术培训和考核，办有正规的井控学校，对技术人员和工人进行定期的严格培训。美国国家地质调查局就规定，无论公司代表、总监、司钻或井架工，每年都必须到井控学校参加学习，并接受考试。每四年还要到井控学校基础班轮训一次和接受考试。只有持井控学校的毕业证书才准出海打井。又如英国政府和工业界颁布的井控章程就明确规定公司总监和司钻在井控技术上应掌握：①溢流发生的原因分析及其预防；②溢流的征兆和监测；③在闭合泥浆循环系统中正确监测溢流的方法；④钻井总监还要能进行必要的井控技术的计算，并能监督和指挥压井作业。据1978年介绍，美国就有13所注册的井控学校。总之，对钻井人员在井控技术上的审查，就象我国对汽车司机在驾驶技术上实行年审那样严格，并且定期进行演习。

九、对发展我国平衡钻井和井控技术的意见和建议

① 地层压力监测目前国内外使用最多的是 d 指数法，有时是若干方法共同配合使用，但 these 方法都是以页岩层的压实程度为基础的，只能适用于以砂页岩为主的地区，目前石灰岩地层的压力检测仍是一个未解决的问题，随钻测量的发展和完善是地层压力监测的一种强有力的手段；但其成本或使用费用目前高只能在海上或少数重要深井使用，所以对加强和改善一般地层压力监测的方法和手段仍应给予足够的注意。

目前国内只在套管鞋井段及生产层有较多的地层破裂压力数据，应设法取得一个地区各不同井段的这种数据，以建立完整的地层破裂压力曲线，作为井身结构设计的依据。

② 理论研究和试验都已表明目前通用的稳态波动压力算法误差相当大，瞬态波动压力

的研究工作虽已进行了十多年,但目前仍在不断完善和发展,国内应继续这项研究工作,因它是确定合理泥浆密度与许用起下钻速度的基础。

③ 对常规井控与非常规井控的理论研究,国内已取得不少进展,今后应继续加强深化和扩展。其主要内容有考虑气体滑脱速度及多相流动的动态井控计算,混气溢流井控,修井井控,复杂条件下的井控处理理论、工艺与装备(不压井起下钻及强行起下钻)等,还要注意从实践和理论两方面总结国内处理复杂井控和井喷的经验。

④ 要切实加强平衡钻井与井控理论及井控操作技术的教学和培训,要让工程师以上的人员除掌握平衡钻井和井控的基本原理外,还要定期学习新理论和新技术。对现场钻井工人要分期分批进行井控技术培训,除基本原理外,还要用井控模拟装置或微型井控模拟器进行井控模拟操作训练。更有效的方法是在全尺寸井控试验培训井,人工造成井底溢流,工人用真实的阻流管汇和控制进行实际训练,这种真刀真枪的培训效果是室内用电子计算机组装起的井控模拟器所无法比拟的。四川石油管理局和中原石油勘探局都已专门建成了这种井控培训实验井,应充分发挥其培训作用。其它油田也可以利用已报废的井,适当配备旧防喷设备与控制系统筹建井控培训井。对深井、高压井及重点探井等,要严格执行未获得井控培训合格证书不能上岗工作的规定。

在快进入高压层之前,要每班在井场进行井控操作演习。经常进行模拟发现溢流及关闭防喷器演习,可使正确操作成为习惯性动作,使钻井队新成员得到训练并使司钻具有以极快的速度发现井溢流的能力。发出演习信号事先并不告诉井队班组,从发出信号到司钻采取适宜动作及班组成员进入正式演习状态称为反应时间(要用秒表计时),每次完成全部防喷演习时间称为总时间,这些都要记入班报表内。要严格执行石油与天然气总公司制定的《石油与天然气井控技术规定》。

⑤ 要组织专门灭火及处理失控井喷的专业组,由有经验的技术专家和工人组成,配备有效的专用设备以应付紧急情况。美国Joe R. Bowden所组织的喷井控制公司就是如此。他们在全世界承包灭火与压井任务。国内定向井公司要有擅长在多种复杂情况下,快速有效钻成救援井的专家组,面向全国。

⑥ 加强研制与改善设备及溢流监测仪表。国外已研制成功能消除压力传递时间滞后的阻流器控制系统、改进的防喷器液压控制系统以及一整套相当完善可靠的井涌溢流的检测仪表。国内要加速引进和研制防喷设备和井控仪表。对高压井及重点探井要按规定配备齐全防喷器、除气器、泥浆加重设备、泥浆池液面监测仪表和起钻灌泥浆设备以及标准化压井管汇及其它辅助井控设备。

⑦ 建立平衡钻井和井控数据库,这种数据库可是独立的也可以作为钻井工程数据库的一部分,所存储的这些基础数据越真实越充分就越能有助于更好地推行平衡钻井技术。例如,合理泥浆密度的选用除尽可能建立完善的理论计算模式外,还必须参照已钻井的实际资料。美国德克萨斯石油研究委员会通过使用井喷数据库,对墨西哥沿岸从1960年到1985年间425口井喷原因分析,而得出了该地区发生井喷的原因与规律以及应注意采取的防喷措施^[2]。

参 考 文 献

[1] 曾时田:“对现代井控技术的认识”,《天然气工业》,1983年第2期。

[2] SPE/IADC, 16127.

第二章 地层压力监测技术

地层压力监测，对于钻井工程具有重要作用。对此，国内外不少科技工作者进行了许多研究。

在本章中，我们重点介绍国内外采用较多的钻井参数法和测井资料分析法。其中有的已在国内广泛采用，有的则是在国外采用，而国内即将开展。此外，对近年来国内外的一些最新研究，也给予简要说明。

第一节 d_c 指数法

一、 d_c 指数法监测地层压力的基本原理

1965年宾汉 (Bingham) 通过室内钻井模拟实验，提出了如下钻速模式：^[1]

$$v_n = K_n N^e \left(\frac{P}{D} \right)^d \quad (2-1)$$

式中 v_n ——机械钻速；
 K_n ——岩石可钻性系数；
 N ——转速；
 e ——转速指数；
 P ——钻压；
 D ——钻头直径；
 d ——钻压指数；

这一模式的建立，为后来的 d_c 指数法监测地层压力奠定了基础。

1966年，焦登和雪里 (J.R. Jorden & O.J. Shirley) 把宾汉钻速方程作了简化推导，提出了 d 指数概念，并用于监测地层压力。他们在推导时作了如下假设：

假设钻井条件和岩性不变， $K_n = 1$ ；机械钻速与转速成正比， $e = 1$ ，于是有

$$v_n = N \left(\frac{P}{D} \right)^d$$

两边取对数整理

$$d = \frac{\log \left(\frac{v_n}{N} \right)}{\log \frac{P}{D}} \quad (2-2)$$

代入英制单位得

$$d = \frac{\log\left(\frac{v_n}{60N}\right)}{\log\left(\frac{12P}{10^6 D}\right)} \quad (2-3)$$

式中 v_n ——英尺/小时； N ——转/分；
 P ——磅； D ——英寸。

焦登和雪里通过单位调整，巧妙地把“ d ”指数调定在0.5~3之间，便于运用。
 当采用公制单位时，则

$$d = \frac{\log\left(\frac{0.0547v_n}{N}\right)}{\log(0.0684P/D)} \quad (2-4)$$

式中 v_n ——米/小时； N ——转/分；
 P ——千牛； D ——毫米。

实际上，现场常记录钻时来表示机械钻速，将钻时 T 值代入公式可得：

$$d = \frac{\log\left(\frac{3.282l}{NT_l}\right)}{\log\left(\frac{0.0684P}{D}\right)} \quad (2-5)$$

式中 l —— T_l 时间内进尺，米；
 T_l ——钻 l 米所用时间，分。

1971年，雷姆和麦克伦登 (Rehm & McClendon) 发现，在钻进过程中，当地层压力增加时，往往要增加泥浆密度。结果掩盖了 d 指数的变化，相应地也不能很好地反映出地层压力的变化，于是提出了对 d 指数的修正方法——即 d_c 指数法：

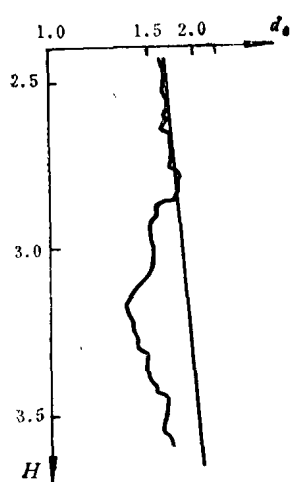
$$d_c = \frac{\rho_n}{\rho_m} d$$

即

$$d_c = \frac{\rho_n}{\rho_m} \frac{\log\left(\frac{3.282l}{N}\right)}{\log\left(\frac{0.0684P}{D}\right)} \quad (2-6)$$

式中 ρ_n ——正常地层压力当量泥浆密度，克/厘米³；
 ρ_m ——实际实用的泥浆密度，克/厘米³。

由(2-6)式可以看出， $(0.0547v_n/N)$ 总是小于1的。所以 $\log(3.282v_n/N)$ 的绝对值与 v_n 成反比，即 v_n 越大 d 越小； v_n 越小， d 值越大。当钻压、转速、泥浆性能、钻头直径、岩性、水力参数等钻井参数不变时，影响机械钻速的主要因素有两方面：一方面是岩石孔隙度，即压实程度；二是井底压差。我们知道，随着埋藏深度的增加，上覆岩压力增大，泥页岩孔隙度减小，岩石变得致密，可钻性变差，因而机械钻速逐渐减小， d 指数逐渐增大。当出现异常高压时，岩石孔隙度增大，机械钻速增大， d 指数下降。另一方面，地层压力增高时，井底压差减小，机械钻速增加，相应地 d 指数下降。因此，将 d 指数同相应测点井深绘成 d_c - H 录井图，就可以直接从图上看岀地层压力变化情况。在正常压力井段，泥页岩的 d 指数



是随井深成线性增加的, 将这种关系回归成一条直线, 我们称为正常趋势线, 如图2-1所示。当 d_e 指数值减小时, 即向左明显偏移, 就说明地层压力出现了异常高压。偏离程度越大, 说明地层压力越高。这样, 我们根据 d_e - H 录井曲线, 应用一定的数学手段, 便可求得地层压力。

二、 d_e - H 录井图绘制

d_e - H 录井曲线的制作, 可分这样几个步骤: 采集数据、计算 d_e 指数值、坐标选取及描点、作正常趋势线。

(1) 数据采集 按一定深度取点, 通常可在1.5~30米范围内取点, 对于压力过渡带, 数据采集点应加密, 可按每米取一个点。

图2-1 d_e 指数录井图 必须准确采集钻时、钻压、转速、钻头直径、井深、地层水密度、实际使用泥浆密度, 并详细记录所取点的钻井条件, 以便分析处理, 按表列数据进行采集。

井 深	钻 时	钻 压	转 速	钻头直径	地层水密度	泥浆密度

d_e	地 层	岩 性	钻头类型	换钻头位置	泵 压	排 量	备 注

注意取全取准每米的平均钻压、转速、钻时、泥浆密度、地层水密度、钻头直径等6个参数, 把不符合的数据去掉, 即: 盐膏层、井底不干净、纠斜吊打、磨进取心、钻头跑合期和磨损后期、钻遇断层、裂缝等不整合面、水力因素变化大等情况下的数据, 不能用来计算 d_e 值。为了保证监测精度, 所采用的钻进参数应尽量保持一致或变化不大。

(2) d_e 值计算 为了便于计算, 可用每米钻时代入(2-6)式, 并用井底当量泥浆密度来代替 ρ_m , 因为 ρ_m 不能真正反映井底压力。于是, 可得以下更为精确的计算式:

$$d_e = \frac{\rho_s}{ECD} \frac{\log\left(\frac{3.282}{NT}\right)}{\log\left(\frac{0.0684P}{D}\right)} \quad (2-7)$$

式中 ρ_s ——地层水密度, 1.0~1.07克/厘米;

ECD ——井底当量泥浆密度, 克/厘米。

按每米井深所收集的钻压、钻时、泥浆密度、钻头直径、地层水密度、 ECD 等参数代入(2-7)式, 按10米间隔计算出 d_e 指数平均值。

对于正常压力地层, 如果钻压、转速、钻头直径、泥浆密度相同, 则可直接用下式来计算平均值: [2]

$$d_o = \frac{\rho_s}{ECD} \frac{\log\left(\frac{3.282}{N \cdot T_1 T_2 \dots T_n}\right)}{\log\left(\frac{0.0684P}{D}\right)} \quad (2-8)$$

式中 d_o ——10米间隔内泥页岩的平均 d_o 值；

T_i ——10米间隔内第 i 记录点的钻时，分/米；

n ——10米间隔内记录点的总数。

(3) d_o - H 录井曲线绘制 按每10米一点的平均 d_o 指数值与其所对应的平均井深，描到所选坐标上，绘成 d_o - H 录井图， d_o 指数录井图坐标及比例可以任选。为了便于作透量板，一般推荐采用半对数坐标。横坐标表示 d_o ，用对数坐标；纵坐标表示井深 H ，用线性坐标。根据大量实践证明，横轴周期长12.7厘米，采用两个对数周期，纵轴1:500。这样比较合理，便于制作使用透量板。

如果采用直角坐标，横坐标表示 d_o 指数，1厘米代表0.1；纵坐标表示井深，1厘米代表10米。按照这样的比例， d_o 指数值与对应井深描在坐标上。

三、建立正常趋势线

建立正常趋势线及其方程，是 d_o 指数法监测地层压力的重要环节，它直接影响着计算压力的准确程度。所以，应尽量作准，要能真正代表该井或该地区泥页岩的压实规律。为了使趋势线作得更准确一些，正常趋势线应选在压力异常段之上，并接近压力过渡带。根据现场统计资料表明，建立正常趋势线的井段应大于300米，且不受局部地质因素的影响，数据要准确可靠。确定出正常压力井段后，便可对井段内的点进行线性回归。建立单井趋势线方程，可用下列形式来回归统计，建立趋势线方程：

$$d_{on} = 10(aH + b)$$

或

$$D_{on} = aH + b$$

式中 d_{on} ——正常压力下的 d_o 指数值；

a ——正常趋势线方程斜率；

b ——正常趋势线方程截距。

现场应用表明， d_o 指数正常趋势线方程可选上述中的任何一种，根据分析表明直线方程和指数方程的相关系数值以及检验值均很接近。说明 d_o 指数正常趋势线方程既可用对数方程来表示，也可用直线方程来表示。为了便于制作透量板，推荐用指数方程；若采用直角坐标，用线性方程。

美国AMCO公司在大量实践的基础上提出：对于不同地区、不同地质年代， d_o 指数正常趋势线的斜率变化不大。即 d_o 指数正常趋势线在半对数坐标纸上是一组截距不同而斜率相近的直线，该直线的方程为：

$$d_o = b \times 10^{0.55328 \times 10^{-4} H} \quad (2-9)$$

我国的一些油田的实践也证实，此结论与实际情况比较符合。在无大量数据建立地区正常趋势线方程之前，尤其是新探区，可以借鉴这一方程。

下面分别对直线式和指数式趋势线方程，用数学回归法讨论各系数的确定方法：