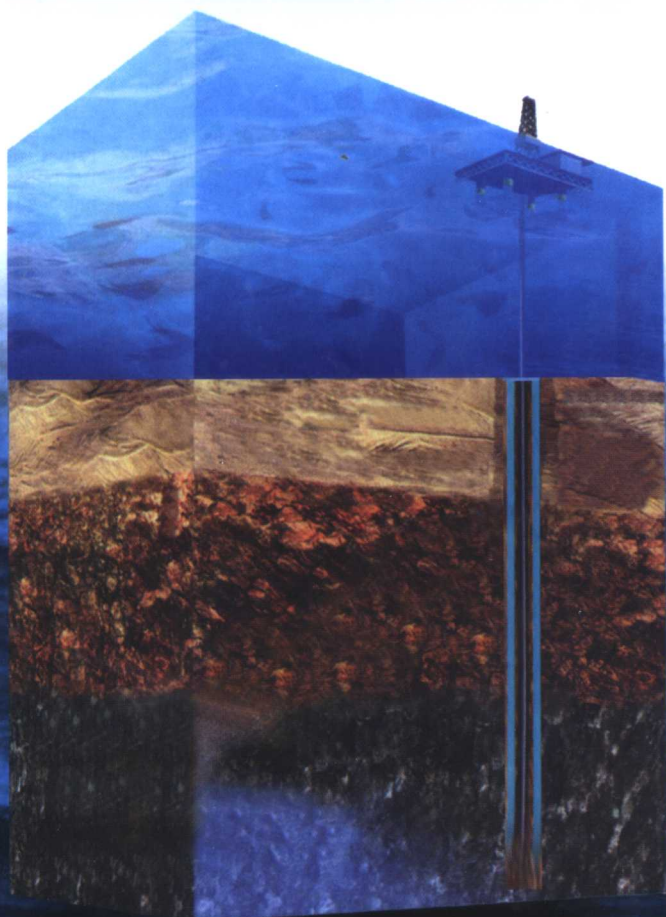


国家高技术研究发展计划成果

莺琼盆地高温高压地层 钻井压力预监测技术研究

王振峰 罗晓容 等著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

国家高技术研究发展计划成果

莺琼盆地高温高压地层 钻井压力预监测技术研究

王振峰 罗晓容 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是对“863”国家高技术研究发展计划成果的全面总结。本书在解决莺琼盆地高温高压条件下的钻井压力预测、监测问题时自觉遵循基础研究和应用技术间的依存关系,建立了“他源高压”形成机理的新模式,并研究了钻前预测和随钻监测多种方法配合、多次递进迭代的综合预测工作方法和流程,提高了预测精度。

本书可作为钻井工作者及石油院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

莺琼盆地高温高压地层钻井压力预监测技术研究/
王振峰等著. —北京:石油工业出版社, 2004. 3
ISBN 7-5021-4496-X
I. 莺…
II. 王…
III. 南海-含油气盆地-油气钻井-油层压力-监测-研究
IV. TE271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 111064 号

莺琼盆地高温高压地层钻井压力预监测技术研究
王振峰 罗晓容 等著

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
总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392
经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷
787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.5 插页:4
字数:268 千字 印数:1—1500 册

定价:35.00 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

序

地层孔隙压力和破裂压力是钻井设计和在施工中动态控制井下情况变化的关键参数。传统的压力预测、监测方法建立在由于地层压实作用引起的孔隙流体异常高压与泥岩欠压实程度对应的机理上,通过观察岩石密度、地层声波时差等参数值相对于正常趋势的变化来估算压力。基于这个原理和方法,数十年来人们依靠钻井、录井、测井和地震资料形成了一套地层压力预测和监测技术,解决了部分泥岩、页岩、砂岩地层钻井工程问题,但这些方法并没有解决石灰岩储层压力的预测、监测问题。在超高压地区,应用传统的压力预测、监测方法容易产生失误,导致井下事故发生,给钻井工程带来困难和风险。随着研究工作的深入,人们认识到泥质页岩的压实作用不是异常地层压力产生的惟一原因。而由于第一性资料录取技术的误差往往造成所求得的压力值误差很大,达不到工程要求。因此,适合不同地质条件的准确的地层压力预测、监测方法和技术一向为各国科学家所普遍关注。

南中国海是近代地球上构造活动最为剧烈的地区之一。莺琼盆地所处的南中国海北部,新生代以来地壳多次强烈拉张,盆地沉降快,沉积厚度大,地壳厚度薄,是著名的高温高压盆地。在莺歌海盆地中央,地温梯度高达 $42^{\circ}\text{C}/\text{km}$,地层压力系数最高可达 2.35。勘探家们曾多次力图在这里钻开超高压地层,探索盆地深层赋存的天然气藏,但几乎所有的尝试都因无法保证高温地层条件下的钻井液稳定性和正常测试,未能解决超高压地层的预测和监测等问题而失败。

在这种背景下,中国海洋石油总公司南海西部公司求助于国家“863”高科技计划,成功申请了“海洋探查与资源开发技术”(820)为主题的研究项目,并将“高温超压地层钻井技术”(820—07)作为其中一个重要的专题。而“精确的地层压力预测和监测技术”则是该专题中的一个重要组成部分,重点研究莺琼盆地地层压力的分布特征和预测、监测方法。

本书作者们在解决莺琼盆地高温高压条件下的压力预测和监测问题时自觉地遵循基础研究和应用技术间的依存关系,通过合理的管理,组织国内多学科的科研人员进行地质、地球物理及石油工程等各方面的综合研究,在对莺琼盆地超常异常压力形成机制研究的基础上,进行预测、监测关键技术的联合攻关,另辟蹊径,提出了一系列创新的方法和技术,并最终为成功钻探 DF1-1-11 井提供了准确的压力预测、监测信息。

作者们在研究过程中发现,莺琼盆地除沉积地层快速压实、有机质裂解等作用形成的高压外,深层高压流体通过近代活跃的断裂运移到浅部地层,也可形成高压。由此,他们提出了“他源高压”的概念,并系统地探讨了这种高压形成的机理及演化的模式。为了解决裂隙发育、地层普遍含气、他源高压等复杂条件下的资料录取问题,他们针对钻前预测和随钻监测各种方法在资料处理、参数选择和实际使用等环节存在的问题,应用最新的技术方法,对地震、测井资料进行处理,大大提高了基础资料的精度。他们还推出在原理和测试数据方面与传统方法极为不同的岩石强度新方法,并在国内首次应用垂直地震测井资料(VSP)和随钻地震测井资料(SWD)测试手段,提出随钻压力预测的新概念,并建立了钻前预测、随钻压力预测和随钻监测多种方法迭代使用、相互印证、递进预测的工作方法和流程,从而提高了预测的准确度。

本书是作者们在完成“863”国家高技术项目任务后对其工作的全面总结，也包含了他们多年来在相关方面研究的积累。书中所介绍的适合莺琼盆地地质特征的“他源高压”的理论，复杂地质条件下的资料处理、压力预测、监测及随钻预测的新方法和新技术，这些理论和方法在 DF1-1-11 井和 YC21-1-4 井的压力预测、监测中的应用及由此获得的成果和认识为油气勘探研究及油气工程实施提供了理论与实践相结合的范例，值得向广大油气勘探工程技术人员推荐。

孙振纯

2003 年 11 月 28 日

前 言

异常流体压力是沉积盆地中一种极其普遍的地质现象 (Dickinson, 1953; Fertl, 1976; Mouchet 和 Michell, 1987; Belonin 和 Slavin, 1998)。在钻井中遇到异常高地层压力的历史可以追溯到 120 年以前, 但直至 20 世纪 50 年代初人们才开始系统地研究这种现象 (Fertl, 1976; Magara, 1978)。在过去的数十年中, 人们围绕如何建立准确可靠的钻前预测与随钻监测技术获得准确的地层压力和地层层位, 利用各种方法来测量和估计沉积盆地异常流体压力的分布状态, 分析其演化过程, 提出了几十种成因机制。这些研究成果广泛地应用于钻井前的压力预测、钻井过程中的压力监测和钻井之后的压力检测, 建立起较为准确的地层压力剖面, 为科学确定钻井液, 合理设计井身结构和完井方法提供了重要依据, 成为实现优质、安全、快速钻井以及保护油气层、有效测试和压裂增产的重要措施。此外, 对于认识和了解地下异常高地层压力以及地下岩石力学性质和各种相关构造现象 (Gretener, 1980), 追索地下物质的迁移和沉积岩石的成岩过程 (Hunt, 1990), 分析石油天然气的运移和聚集过程 (Magara, 1978) 等具有实际地质意义。

在世界范围内, 随着油气勘探工作的不断发展, 在越来越多的具有丰富油气资源的沉积盆地内都遇到异常程度很高 (压力系数大于 1.8) 的超高压地层 (Belonin 和 Slavin, 1998)。在北海盆地、墨西哥湾盆地、西西伯利亚盆地以及我国西北地区和华北地区等都曾钻遇超高压地层。这些地区超高压地层的压力分布往往十分复杂, 现有预测和监测方法不能满足钻井工程的要求。莺琼盆地 (即莺歌海盆地和琼东南盆地的合称) 也是这样的一个超高压盆地。

莺琼盆地异常流体压力分布广泛, 异常带的起始深度参差不齐, 如在 CA30-1-1 井中为 3000m, 而在盆地中央的 CA14-1-1 井只有 1500m。在盆地中央很浅的异常压力带顶界对应着很高的压力系数, 在个别地方甚至达到 2.0~2.3, 接近上覆地层静压力 (龚再升等, 1997)。在这些部位, 过渡带不明显, 异常压力系数增加突然, 通常的压力估算方法不大适用。前人通过大量的实际工作总结出该盆地超压分布的特征 (龚再升等, 1997): 盆地边缘异常压力较小, 异常带顶界较深, 可达 4000m; 向盆地中央超压逐渐增加, 异常带顶界变浅; 在底辟构造上方异常压力分布特殊, 普遍很高, 异常带形态复杂, 最浅处小于 1500m。这种复杂的压力分布给压力预测带来了相当大的困难, 严重制约了莺琼盆地的油气勘探进程。在对具有巨大天然气潜力的中深层的勘探中, 常规的地下地层压力预测和监测方法很难满足要求。直至本研究工作开始之前, 国内外多次对此盆地中深层超高压区的钻井尝试均未获成功, 究其原因, 无一不与对地下异常压力认识不清有关。

近 20 多年来, 各国科学家一直在努力探索能够准确预测和监测地下流体压力分布和绝对数值的可靠方法。直至目前, 人们对超高地层压力的分布特征和形成机制认识仍很不深入, 真正经得起实际资料和定量分析检验的并不多 (Bethke, 1986; Shi 和 Wang, 1986; Luo 和 Vasseur, 1992)。目前对于极高的地层压力还没有成熟的预测、监测方法, 可借鉴的资料也很少, 因而有必要在定量分析的基础上深入认识异常高压形成的本质, 重新评价现有

机制的有效性 (Or 和 Swich, 1997), 提出新的更具实际意义的机制。

正是由于认识到在超高地层压力的地区开展准确的地下流体压力预测和监测的必要性和迫切性以及开展这类研究所具有的较高的学术价值和重要经济价值, 国家“863”高科技计划在海洋领域“海洋探查与资源开发技术”(820)主题的“高温超压地层钻井技术”(820—07)专题中专门设置“精确的地层压力预测和监测技术”(820—07—02)课题。该课题自1998年7月正式开始实施, 历时两年, 于2000年6月完成并通过验收。

该课题的研究主要围绕以下四个方面重点展开。

1. 莺琼盆地异常地层压力预测地质模型研究

莺琼盆地普遍存在异常高压, 其区域超压面深度一般在3000m左右。由于盆地地质条件的特殊性, 常使局部超压面深度变化很大, 如泥底辟、断层、砂体、先前钻井等使深部超压与浅层窜通, 有可能在浅层形成超压(超压面深度最浅1450m), 这种他源超压往往不符合压实规律, 很难用地震速度准确预测。因此, 要解决地层压力预测精度问题, 必须弄清他源超压的形成机理和分布特征, 建立适合于莺琼盆地特殊分布特征的地层压力地质模型, 以指导地层压力的精确预测, 分析研究区内异常高流体压力产生的机制, 建立适合各种地质条件的压力预测模型。

2. 提高地层压力钻前预测精度研究

由于地震资料求取地层速度本身精度的局限性, 加上他源超压等复杂地质情况, 钻前地层压力预测结果仍然存在误差。因此, 在钻井过程中开展地层压力随钻监测和预测工作, 作为钻前地层压力预测的重要补充。在钻井过程中利用常规中途测井资料检测地层压力、修正钻前预测的地层压力结果是提高压力预测准确度的有效手段。考虑到钻井过程中可以利用的数据的获得往往过于滞后, 特别在压力增长较快的关键部位往往难以实时获得, 因此我们利用中途垂直地震剖面(VSP)和随钻地震(SWD)等手段测量下行波, 研究适用的处理方法, 以获得准确的速度资料。

针对研究区内声波速度所受影响, 研究地质因素对速度资料的影响和干扰, 寻找校正声波速度的办法; 通过不同的速度处理方法的组合、筛选和集成, 获得准确的速度数据; 选择适用的压力预测模型和合理的参数, 预测地下流体压力。

3. 地层压力测井参数监测和预测技术研究

常规钻井和录井参数法是随钻监测地层压力的实用方法, 但仍存在诸多缺陷, 需继续完善。在充分利用常规钻井和录井参数法随钻监测地层压力的基础上, 考虑到研究区他源超压机制特征, 研制并完善岩石强度法和岩石力学参数法, 与引进的ALS—2商业软件提供的多种地层压力监测方法配套使用, 以进一步提高地层压力监测精度。

综合各种测井方法, 获得反映地层孔隙度和其他物性的方法组合, 确定地层压力与地层物性间的关系, 提高地层压力检测方法的可靠性和准确度, 并尝试利用测井资料建立外推方法, 进行随钻压力预测。

4. 地层压力钻井、录井参数随钻监测和预测技术研究

综合各种录井方法, 获得反映地层孔隙度和其他物性的方法组合, 采取对已有方法的改进、新方法的研制等措施, 力图提高地层压力监测方法和技术的可靠性和准确度。

由于目前地质科学的发展水平和地震、测井、录井及钻井等技术水平的限制, 各种方法

单独使用往往难以达到钻井的实际要求。因而我们尝试对研究的内容和可用的方法加以综合和集成。不仅在预测或监测各个过程中应用多种方法,相互补充和标定,根据实际情况筛选出实用、合理、可靠的方法组合和技术系列,而且利用压力预测和监测各个环节的特点,提出一套循环预测、精度递进的综合方法。

在本课题的研究过程中,中国海洋石油总公司南海西部公司分别在琼东南盆地 YC21-1 和莺歌海盆地 DF1-1 两构造设计钻探了 YC21-1-4 井和 DF1-1-11 井,使研究者得以应用本课题的研究成果,成功地对这两口井进行了压力预测和监测工作。结果表明预测和监测的精度很高,在生产中见到显著效果。

“精确的地层压力预测和监测技术”(820—07—02)课题由中海石油(中国)有限公司湛江分公司(原中国海洋石油总公司南海西部公司)承担,参加的研究单位有中国科学院地质与地球物理研究所、中海石油研究中心南海西部研究院(原中国海洋石油总公司南海西部公司研究院)、石油大学(北京)石油工程系、中法渤海地质服务有限公司、成都理工大学地勘系、中国海洋石油测井公司、中国石化新星公司石油钻井研究所、湛江特普高科技有限公司、西北大学地质系、西安工程学院应用地球物理研究所等。参与本项研究的人员主要有:王振峰、罗晓容、徐发、杨计海、骆宗强、肖慈珣、高德利、廖茂林、贾爱贵、邱细斌、曾义金、吴洪深、温伟民、李建周、陈华、王震亮、欧本田、杨进、杨斌、段青山、张传进、刘劲、杨红军、张发强、陈殿远、韦远发、彭真明、朱光明、陈志文、李学军、鲍洪志等。

本书是在该课题研究工作的基础上综合研究者多年来对压力预测、检测、监测及相关理论和方法的研究成果编撰而成。按照研究内容的系统性和逻辑关系,本书共分为八章。第一章系统而简要地给出相关的概念和定义,总结当前国内外在压力机制和压力预测等方面的研究历史和现状;第二章归纳莺琼盆地异常地层压力的形成和分布特征,介绍对压力形成机制的研究和认识;第三章介绍在研究莺琼盆地地质因素影响声波速度的基础上对已有声波测井和地震资料进行各种处理的技术;第四章叙述针对莺琼盆地地层压力分布特征和成因机制而进行的压力预测方法研究;第五章叙述新提出的岩石强度压力监测方法及国外引进的软件和方法在研究区的适应性研究;第六章阐明利用中途垂直地震剖面资料和随钻地震资料进行随钻压力预测的方法;第七章综合适合研究区的各种压力预测、监测和检测方法,提出完整的压力预测系统,并介绍研究成果在 YC21-1-4 和 DF1-1-11 两口井的压力预测和监测过程中的应用情况;第八章归纳了认识和结论。

本书前言由王振峰、罗晓容执笔,第一、二章由罗晓容、杨计海执笔,第三章由杨计海、骆宗强、肖慈珣、王震亮等执笔,第四章由罗晓容、杨计海、欧本田、陈殿远、张传进等执笔,第五章由高德利、徐发、李建周、杨进、贾爱贵、廖茂林等执笔,第六章由肖慈珣、吴洪深、段青山、杨斌等执笔,第七章由王振峰、杨计海、廖茂林、罗晓容等执笔,第八章由王振峰、罗晓容、杨计海执笔。全书由罗晓容统稿,王振峰审核。

在本项研究立项论证及执行期间,“820”主题专家组苏纪兰院士、陈邦彦教授、孙振纯总工程师、陈元顿教授、龚再升总地质师和郑天愉教授等对研究的进展、成果及应用等给予了热诚的关心、帮助和悉心的指导;海洋领域办公室王志雄主任、“820”主题办公室高平主任、孙春岩教授等在课题进行、检验、评估和经费管理等方面提供了热情的指导和帮助;中

海石油（中国）有限公司湛江分公司总经理祁保蕃、副总经理董伟良、副总工程师陈锡泉、副总地球物理师谢玉洪，中海石油研究中心总工程师何汉漪、总地质师张国华、科技办主任王伟元和金芸明，南海西部研究院院长李绪宣等各级领导自始至终密切关注本项研究的进展，并从各方面给予了大力支持。在本专著编撰的过程中，戴永定、岳伏生提出了许多建设性的建议；孙振纯总工程师在百忙中审阅本书，并予作序。借此机会，谨向上述人员和单位表示衷心的感谢！也对那些曾间接地参与本项工作的人员，以及关心、支持和帮助过本项研究的人员和单位表示衷心的感谢。

王振峰 罗晓容

2003 年 7 月

目 录

第一章 地层压力预测与监测技术现状	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 地下超压的成因机制及影响因素	(2)
一、基本认识	(2)
二、低渗透性地层中超压的形成机制及分类	(3)
三、渗透性地层中超压的形成机制及分类	(5)
第三节 地层压力预测和监测技术发展简史	(7)
第四节 现有的地层压力预测和监测的主要方法	(10)
一、用于压力预测和监测的主要资料	(10)
二、地层压力预测和监测的主要方法	(12)
三、地层破裂压力检测法	(14)
第二章 莺琼盆地异常地层压力形成机制	(17)
第一节 异常压力形成的地质背景	(17)
一、相对松弛的应力场背景	(17)
二、快速的沉积沉降	(17)
三、压实速率较低	(19)
四、盆地内发育的垂向水动力通道	(21)
第二节 地层压力的分布特征	(22)
第三节 超压形成机制模拟分析	(23)
一、盆地建模及其数值模拟方法	(24)
二、模拟结果及分析	(25)
三、其他可能的机制	(27)
第四节 超压系统的划分	(29)
一、他源高压的表现形式	(30)
二、背景超压带	(32)
三、超压系统的划分	(32)
第五节 他源超压预测特征	(33)
一、相邻砂泥岩层间的压力平衡	(33)
二、压力系数随深度的变化	(33)
三、浅部地层极高流体压力的产生	(34)
四、钻开高压层后高压的持续时间	(34)
五、对钻井过程的危害程度	(34)
六、可预测性	(34)
第三章 声波速度处理技术	(36)
第一节 影响声波速度的主要地质因素	(36)

一、成岩（胶结）作用对声波时差的影响	(36)
二、天然气和裂缝对声波时差的影响	(38)
三、地层岩性对声波时差的影响	(38)
四、速度稳定段的成因分析	(40)
第二节 岩石力学参数的测量	(43)
第三节 提高地震层速度准确度的方法	(46)
一、地震资料的精细处理	(46)
二、DIX 公式	(48)
三、叠前反演方法求取层速度	(48)
四、叠后反演方法	(50)
五、速度处理方法的综合应用	(53)
第四节 井底以下地震层速度反演研究	(53)
一、基本原理	(54)
二、算法步骤和流程	(56)
三、对 L43528 地震测线的 BCI 处理与分析	(58)
第四章 莺琼盆地地层孔隙压力预测方法	(60)
第一节 非压实因素消除方法	(60)
第二节 地层压力预测基础研究	(63)
一、正常压实趋势线的建立	(63)
二、静水压力梯度和上覆岩层地静压力梯度计算	(65)
三、坍塌压力的计算	(66)
四、地层破裂压力的计算	(66)
第三节 压力预测地质模型研究	(66)
一、压力预测地质模型的设想及基础	(67)
二、他源高压模型	(67)
三、他源高压模型参数研究	(69)
第四节 压力预测方法适用性的尝试	(70)
一、平衡深度法	(70)
二、经验关系法及其参数确定	(70)
三、岩石力学参数法及其参数确定	(72)
四、伊顿法	(73)
第五节 压力预测模型组合方法探索	(74)
第五章 随钻地层压力监测方法研究	(80)
第一节 随钻地层压力监测新方法——岩石强度法	(80)
一、岩石强度模型	(80)
二、地层压力与岩石强度关系模型	(82)
三、地层压力计算模型	(82)
四、岩石强度法室内模拟实验	(82)
五、现场资料反演	(84)
六、实用效果分析	(86)

第二节 ALS—2 压力监测软件的引进和适应性研究	(90)
一、现场资料的收集处理	(90)
二、特征参数的筛选	(91)
三、计算方法的优选	(92)
四、经验系数分析	(93)
第六章 钻井过程中地层压力预测技术研究	(97)
第一节 钻头以下精细地震速度反演研究	(97)
一、中途垂直地震剖面、随钻地震技术概述	(97)
二、利用中途垂直地震剖面资料反演未钻地层速度的工作流程	(100)
第二节 神经网络法中途测井资料压力预测	(105)
一、地震特征参数提取	(105)
二、K—L 变换	(112)
三、井底以上神经网络建模	(114)
四、井底以下测井曲线外推及地层压力预测	(114)
第三节 井底以下地层压力预测方法适应性分析	(114)
一、声波时差外推	(114)
二、垂直地震剖面阻抗—速度关系	(115)
三、垂直地震剖面波阻抗反演应用分析	(117)
四、刻度声速测井和深—时转换	(118)
第七章 预测、监测、检测技术综合应用实例	(121)
第一节 提高压力预测准确度的思路	(121)
第二节 钻前压力预测和随钻监测技术在 YC21—1—4 井的应用	(123)
一、以地震速度处理为基础的钻前压力预测	(123)
二、YC21—1—4 井随钻地层压力监测	(125)
三、YC21—1—4 井随钻地层压力检测	(128)
四、YC21—1—4 井地层压力预测精度分析	(128)
第三节 压力预测、监测技术在 DF1—1—11 井的应用	(131)
一、DF1—1—11 井钻前孔隙压力预测	(131)
二、DF1—1—11 井随钻地层压力监测	(134)
三、DF1—1—11 井随钻地层压力预测	(138)
四、钻井预测地层压力精度分析	(142)
第八章 认识和结论	(145)
一、影响地层压力预测的地质条件	(145)
二、异常压力形成机制的研究	(145)
三、层速度反演方法	(146)
四、压力预测方法	(146)
五、地层压力监测	(147)
六、井底以下地层压力预测	(147)
参考文献	(149)

第一章 地层压力预测与监测技术现状

地层压力预测和监测技术主要包括钻前的预测技术、施工中对已钻井段预测结果的检测技术和对正钻井段的监测技术。它们的相互补充、配套使用是实现平衡压力钻井、现代井控技术和保护油气储层的重要内容。在这些技术中所面对的都是地层内的异常压力，其判定和估算压力的机理和方法大同小异，因而有必要对地下地层压力的概念、成因机制、分布特征以及现有压力预测和监测方法的基本原理、方法、手段以及存在的问题和发展的方向等加以简要而系统的总结。

第一节 基本概念

地层压力 (Formation pressure): 通常是指地层孔隙中流体的压力。压力的法定计量单位为 Pa。对于一般地质问题，单位 Pa 太小，因而 MPa (10^6 Pa) 更为常用。目前一些非法定计量单位仍然在使用，特别是一些西方石油公司，常用磅力每平方英寸 (lbf/in²) 或标准大气压 (atm) 作为压力的单位。对于淡水，其换算关系为： $1\text{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} = 14.70\text{lbf/in}^2$ (Jerrard 和 McNeill, 1980)。

静水压力 (Hydrostatic pressure): 是指良好渗透性地层孔隙流体与地表水系在水动力连通条件下的地层压力。静水压力 (也称正常地层压力) 不受地层及其上覆地层或流体连通通道形状的影响，其值可由下式确定：

$$p_h = \int_0^{z_0} \rho(z) g dz \quad (1-1)$$

式中 p_h 为静水压力， z 为深度， z_0 为观察点的深度， $\rho(z)$ 为孔隙流体密度。在钻井工程中，地层水密度随深度的变化往往忽略不计，故常用：

$$p_h = \rho g z \quad (1-2)$$

式中 ρ 为孔隙水的平均密度。

注意，在钻井中测得的深度是从钻盘方钻杆补心算起的，实际观察点的深度应减去补心高度。

对于钻井工程，压力梯度的概念更为多用，其定义为观察点的压力与从地表到观察点的距离的比值 (Pa/m 或 MPa/m)。在淡水条件下的静水压力梯度为 1.013×10^{-4} MPa/m。地层流体的矿化度越高，静水压力梯度就越大。由于地层流体的密度在各个盆地内有所不同，有时变化较大，因而在实际应用中，压力系数的概念更为方便，即观察点的地层压力与该点处的静水压力的比值。压力系数为一无量纲数，地层压力为静水压力时其值为 1.0。

异常地层压力 (Abnormal pressure): 当地层中的流体因某种地质条件的作用而高于或低于静水压力时便称为异常压力。高于静水压力者称为异常高压 (Overpressure)，或高压、超压，而低于静水压力者则称为低压 (Underpressure)。

在钻井工程中，考虑到压力测量的误差，常给出一定的正常压力范围。在莺琼盆地，当

压力系数大于 1.2 时, 地层压力方被认为是异常压力 (刘福宁等, 1994)。

静岩压力 (Lithostatic pressure): 也称为上覆负荷压力 (Overburden pressure), 系观察点以上全部地层及沉积水体所造成的压力。其准确的表达式为:

$$p_l = \int_0^{z_0} \rho_b(z) g dz + \int_0^d \rho(z) g dz \quad (1-3)$$

式中 p_l 为静岩压力, z_0 为观察点的深度 (从沉积界面起算), d 为沉积水体深度, $\rho_b(z)$ 为地层密度。静岩压力可粗略地用下式估算:

$$p_l = \rho_b g z + \rho g d \quad (1-4)$$

式中 ρ_b 和 ρ 分别为上覆地层和沉积水体的平均密度。

有效应力 (Effective stress): 作用在地层岩石骨架颗粒上的应力。研究发现 (Terzaghi, 1925; Hubbert 和 Rubby, 1959), 地层中任一点的上覆负荷都是由地层的颗粒和孔隙中的流体共同承担:

$$p_l = p + \sigma \quad (1-5)$$

式中 p 为地层压力, σ 为有效应力。

亦即有效应力和地层压力互为消长 (Magara, 1978), 异常高的地层压力必然对应着低的有效应力, 从而对岩石的力学性质和状态产生影响 (Jeager 和 Cook, 1979; Gretener, 1981)。在钻井工程中, 有效应力的变化将改变井壁的稳定性的, 甚至在地层中产生破裂。

破裂压力 (Fracture pressure): 在观察点处, 井内钻井液柱所产生的压力升高到足以使原有裂缝张开、延伸或形成新的裂缝时的井内流体压力, 称为破裂压力。地层之所以发生破裂, 是因为当钻井液压力增加导致地层压力的增加, 从而降低了地层的有效应力。当地层最小主应力方向上的有效应力由压性变为张性时, 地层将发生破裂。因而破裂压力 p_f 应该等于或大于地层压力与最小主有效应力之和:

$$p_f = p + \sigma_{\min} = p + k \cdot \sigma_{\max} \quad (1-6)$$

式中 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为最大和最小有效应力, 前者往往垂直而后者水平, k 为最大和最小有效应力间的比例系数, 其随地区、地层岩性、深度等变化。Fertl (1976) 及 Mouchet 和 Mitchell (1987) 等曾系统地总结了钻井过程中产生破裂的机理和前人提出的预测破裂压力的方法。这些方法的主要差别在于选择合适的 k 值。

地层压力的预测 (Pressure prediction): 利用欲钻井位处的地震资料及附近已钻井的钻井、录井、测井和测试等方面的资料, 在钻井前对欲钻井位地表以下地层压力的估算。

地层压力的监测 (Pressure detection): 在钻井过程中, 利用直接测量正在破碎的地层内与压力有关的参数, 实时地估算地层压力, 其主要作用在于监视钻头附近地层压力的变化情况, 实时地检验和修正压力预测的结果。

地层压力的检测 (Pressure checking): 在钻井之后或钻井过程中, 利用已钻阶段的各种资料估算地层压力, 与已有的压力预测结果进行对比称为地层压力的检测。压力检测的结果既可用于对欲钻井地下压力分布的预测, 也可用于正钻井尚未钻开地层的压力预测。

第二节 地下超压的成因机制及影响因素

一、基本认识

在沉积盆地的地质环境中, 异常流体压力产生的机制有很多种 (Osborne 和 Swarbrick,

1997)。目前大多数人认为比较重要的有泥质沉积岩的压实作用、构造应力的挤压作用、有机质裂解所产生的孔隙流体体积的剧烈膨胀以及由于开启断裂所造成的不同压力系统的地层之间的水动力连通 (Smith, 1971; Magara, 1978; Bethke, 1986; Luo 和 Vasseur, 1996; 罗晓容, 1999)。定量的分析结果表明 (Bethke, 1986; Shi 和 Wang, 1986; Luo 和 Vasseur, 1992; Luo, 1994), 一些原先认为比较重要的增压机制, 如水热增压作用、粘土矿物的脱水转换以及其他一些含水矿物的重结晶作用等, 在大多数沉积盆地的历史条件下的增压效率微乎其微, 大都可忽略不计。

就地层内异常流体压力产生的机制而言, 地层孔隙内流体体积的相对增加和地层具有一定程度的封闭能力是必不可少的条件。压实作用是沉积物自沉积以后开始, 并且在其埋藏过程中始终发生的一种成岩作用 (Athy, 1930; Magara, 1978)。随压实作用的进行, 地层在流体体积的相对增加和地层封闭能力两方面愈来愈有利于超压的形成和维持 (Bethke, 1986; Luo 和 Vasseur, 1992)。盆地内的实际观察结果也表明, 在大多数情况下, 异常高压的形成及分布与地层的压实作用密切相关。

在碎屑岩层中, 泥质岩类由于其初始孔隙度大, 渗透率相对较小, 因缺乏与外界流体的交换而不易发生化学成岩作用。在不断增加的上覆负荷的作用下, 岩石颗粒因转动、滑动、破碎等机械成岩作用而不断压实, 颗粒间的支撑能力增加以抵抗上覆负荷。与之对应, 地层孔隙度减小, 渗透率降低。当地层的渗透率降低到一定程度, 相对于上覆负荷的增加, 孔隙内的流体不能及时排出, 岩石颗粒不能相互靠近, 粒间的支撑能力便不足以承担新增加的上覆负荷, 这一部分上覆负荷将由孔隙流体承担——孔隙流体压力增加, 异常高压产生, 地层处于欠压实状态。这在泥质岩的压实曲线上表现为孔隙度偏离正常的随深度的降低趋势。以后只要各种地质因素不断造成孔隙内流体体积相对于正常体积的增加, 地层内的异常压力便可能不断增加。

砂岩层内颗粒多为近等轴状的石英、长石及已成岩的母岩碎屑, 比较坚硬、抗压。在上覆负荷的作用下, 砂岩颗粒间通过位移、变形、碎裂等发生的机械压实作用远较泥质岩微弱, 但因其孔渗性较高而易于发生化学成岩作用。胶结作用的发生使得颗粒间的支撑能量大大增强, 这更加降低了机械压实作用效率, 因而砂岩本身依靠压实和排水不平衡而产生超压的可能性较小 (Smith, 1971; Magara, 1978)。

因此, 人们普遍认为, 在砂泥岩互层的碎屑岩地层中, 超压首先由于泥质岩内压实与排水间的不平衡而产生 (Fertl, 1976), 然后在两者间过剩压差的作用下一部分流体从泥质岩排到邻近的砂岩中使得其中的压力增加。在这种情况下, 泥岩层不仅是砂岩层超压产生的流体源, 而且是砂岩层超压的封闭层。如果时间足够长, 两者间的压力应趋于达到平衡、保持一致。但近年来的研究发现, 在很多盆地内, 砂岩层内的压力往往与互层泥岩层内的压力截然不同, 可能小于泥岩层, 也可能大于泥岩层 (罗晓容等, 2000; Luo 等, 2003)。

二、低渗透性地层中超压的形成机制及分类

在以碎屑岩为主的沉积盆地内, 主要的低渗透性地层有泥质岩、盐岩和膏岩, 在条件合适的情况下, 胶结良好的砂岩也可能成为低渗透岩石。但从地层内异常压力产生的角度, 只有泥质岩层才能产生异常流体压力, 而其他地层只能对可产生或已产生异常压力的地层起到水动力封闭作用。

1. 压实作用

在沉积盆地中, 压实作用是沉积物埋藏过程中始终发生、对异常流体压力的产生和维持

起重要作用的地质应力。Athy (1930) 很早就提出了一个反映泥质岩石孔隙度随深度变化的指数关系:

$$\phi = \phi_0 e^{-\alpha z} \quad (1-7)$$

式中 ϕ 和 ϕ_0 分别为深度 z 和地表的孔隙度 (Fertl, 1976; Magara, 1978; Mouchet 和 Mitchell, 1987)。

Hubbert 和 Ruley (1959) 将土力学的一些认识引入地质学的研究, 沉积地层的压实作用实际上不依赖于深度而取决于其所经受的有效应力。此后, 有效应力的概念在地质界广泛应用。在以后的流体压力模型中沉积物压实作用就成为一个不能不考虑的内容 (Smith, 1971; Sharp 和 Dominicy, 1976; Sharp, 1983; Neuzil 和 Polloet, 1983; Walder 和 Nur, 1985)。

Audet 和 McConnell (1992) 曾经提出过一个无量纲数 λ 来判断压实作用产生异常压力的效应:

$$\lambda = \frac{K^*}{V_0} \left(\frac{\rho_b}{\rho} - 1 \right) \quad (1-8)$$

式中 K^* 是岩层的水动力传导系数, V_0 是在沉积界面上平均的沉积速度, ρ_b 和 ρ 分别为上覆地层的平均密度和孔隙水的密度。当 $\lambda > 10$ 时, 地层内的流体压力接近于静水压力; 当 λ 接近 1 时, 地层内的流体压力介于静水压力和静岩压力之间; 而当 $\lambda < 0.1$ 时, 地层内的压力基本接近于静岩压力。

Bredehoeft 和 Hamshaw (1968) 曾经计算了一足够厚沉积地层剖面的水动力演化过程。在模型中他们假设了各种水传导率条件, 认为只有地层的水传导率非常低而地层的厚度较大时才有可能产生和保持较高的异常流体动力。

为了计算泥质沉积物中的流体压力演化, Smith (1971) 提出了一个一维的压实模型, 其中有效应力由水动力学方程计算获得。结果表明, 在沉积物中, 异常流体压力产生的可能性时时存在, 但如果沉积物的渗透率足够高而沉积速度又是不够的快, 异常孔隙流体压力就很容易随沉积物中流体的释放而降低。

Sharp 等人 (Sharp 和 Dominico, 1976; Sharp, 1983) 曾试图建立沉积物压实过程、异常流体压力的演化与地层中温度传导的关系。

Neuzil 和 Pollock (1983) 曾定量地讨论了剥蚀作用条件下流体压力的演化。他们的计算结果表明, 如果剥蚀量较大, 而剥蚀速度又很快, 沉积物中的孔隙流体压力将会低于静水压力 (异常低压)。

2. 水热增压作用

Bethke (1986) 提出在不同地质条件下产生异常流体压力所需要的最低渗透率, 其结果表明, 地层厚度、沉积速度、地温梯度以及粘土矿物脱水作用都可能改变这个最低渗透率值。

Domemico 和 Palciauskas (1979) 曾试图评估热力作用对于异常流体压力演化的作用, Sharp (1983) 用数学模型也计算了水热增压作用。他们的结论是只有当地层渗透率非常小时, 这种机制才可能起作用。他们的结果还表明在美国湾岸地区, 这种机制所起的作用比 Barker (1972) 和 Manara (1975) 所定性估计的要小得多。

Shi 和 Wang (1986) 对比了压实作用和水热增压作用对异常流体压力的影响, 他们发现, 沉积物的膨胀率比孔隙水的膨胀率要高, 因而水热增压作用似乎不应该成为异常高压产

生的原因。Luo 和 Vasseur (1992, 1993) 进一步模拟了在各种地质条件下水热增压作用的效率, 他们的结论是在沉积盆地中的绝大多数地质条件下, 水热增压作用与压实作用相比, 其产生异常流体压力的效应可以忽略不计。

3. 有机质的热演化

考虑到沉积物中干酪根向油气转化时引起的孔隙流体体积增加, Mudford 和 Best (1989) 定量地模拟了有机质成熟作用在异常压力演化中的作用。他们的模型极为简单, 没有考虑多相共存时有效渗透率的降低。他们的结果表明, 有机质从固态变为液态时所增加的孔隙流体体积对异常压力的作用微乎其微。Luo 和 Vasseur (1996) 的定量模拟结果表明, 当沉积物中有机质含量少于 0.05mg/mg 时, 仅仅由固态干酪根转变为液态烃类, 这种机制的作用十分微小; 但若有机质裂解成气, 则较少的有机质含量 (小于 0.05mg/mg) 也可能造成明显的异常压力, 但合适的环境条件也是十分重要的。

4. 粘土矿物的脱水作用

Harrison 和 Summa (1991) 模拟了蒙脱石向伊利石转化时所伴随的脱水作用对异常压力产生的影响, 他们的计算结果表明, 在美国湾岸地区这种作用大约只能造成现有异常高压的 1%。Audet (1995) 也进行了类似的计算但却得到了相反的结论, 认为在湾岸地区这种异常压力产生机制至少可以起到 10% 的作用。Audet (1995) 的模型虽然较为复杂而全面, 但仔细考虑, 其所选择的蒙脱石层间吸附水的密度大于 2.00g/cm³, 这个值比在实验室测得和估算的值 (1.15~1.40g/cm³, Burst, 1969; Magara, 1978) 要大得多。

5. 构造应力

构造作用力是异常压力产生的一种重要机制 (Finch, 1969; Berry, 1976), 其机制相当于地层的压实作用, 但最大主应力轴作用方向基本水平, 且作用时间较短。其对超压产生的效率与压实作用相似, 也受岩性等因素的影响 (Luo, 1994)。

三、渗透性地层中超压的形成机制及分类

研究发现, 渗透性地层中压力的产生不仅来自相邻的高压泥岩, 实际上已提出的砂岩地层内超压产生的机制有数十种之多 (Fertl, 1976; Barker, 1988, 1990; Osborne 和 Swarbrick, 1997), 其中重要的大约有十来种。

通过总结前人的工作和我们的实践, 我们认为砂岩中流体压力产生机制可归结为三类。

1. 自源高压

由于渗透性地层内部所发生的地质、物理和化学作用而在该地层中形成的异常流体压力。这类压力成因包括与水密度差较大的油或气藏, 气泡在渗透性地层中的浮升, 含油储层原油的热裂解, 砂岩的压实/压溶/压裂, 外来的溶解于水的气的溶解等等。

1) 含油气层内油气柱的密度差值

这是一种很早就为人们注意, 并在油气井的开发中充分加以利用的异常压力形式。由于石油和天然气与水之间存在着密度上的差异, 当一处于静水压力状态的圈闭中有油气聚集, 在油气柱中的任一点的油气除了要承受孔隙水在该点产生的静水压力之外, 还要承受该点以下油气柱在水中所产生的浮力 (Dickinson, 1953)。因而该点的流体压力为:

$$p = (\rho - \rho_h)gh + \rho_g z \quad (1-9)$$

式中 ρ_h 为油或气的密度, z 为观察点的深度, h 为观察点以下油气柱的高度。油气的密度与水密度相差越多, 油气柱高度 h 越大, 这种增压作用产生的异常压力也就越大。