

◀教授专家专栏▶

控压钻井技术探讨与展望

周英操 崔猛 查永进

(中国石油 钻井工程技术研究院,北京 100097)

摘要:所有的现代油气井钻井技术均包含控压钻井技术,明确这一概念,对组织实施和研究发展这一技术至关重要。指出控压钻井技术的应用范围应包括过平衡钻井、近平衡钻井、欠平衡钻井、精细控压钻井及自动(闭环)控压钻井。其中精细控压钻井技术是指在钻井过程中,能够精确控制井筒环空压力剖面、有效实现安全钻井的钻井技术。对不同控压钻井方式的定义分别进行了明确的阐述,分析了控压钻井技术的现状。从用途出发,将控压钻井技术分成了5级,这将有利于钻井施工的安全评估。对控压钻井技术下一步发展方向提出了建议,并指出未来控压钻井技术发展的目标是在钻井过程中,能够自动随钻监测环空压力剖面,反馈至地面后能自动调整流量和回压等控制参数,实现环空压力的闭环监测与控制。

关键词:压力控制;控压钻井;欠平衡钻井;平衡压力钻井

中图分类号:TE249 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0890(2008)04-0001-04

CPD (controlled pressure drilling) 和 MPD (managed pressure drilling) 概念的提出,对促进钻井技术进步和提高钻井速度非常有益。在国内也形成了继欠平衡钻井技术之后,控压钻井技术的研究热潮。但是国内许多技术人员把 CPD 和 MPD 均直译为“控压钻井”,个别人把 MPD 又直译为“管理压力钻井”,造成了概念上的混淆,不利于控压钻井技术的组织实施和研究发展。为此,笔者对控压钻井技术进行了探讨,以明确概念,并使之有利于在技术、装备、人员和施工管理等各方面配套和发展。

1 控压钻井技术的定义

控压钻井技术可定义为:在油气井钻井过程中,能有效控制井筒液柱压力剖面,达到安全、高效钻井的钻井技术,简称 CPDT (controlled pressure drilling technology)。

应用控压钻井技术时必须考虑包括常规钻井所涉及的井控技术、钻井液技术和完井技术等,这涉及到常规钻井装备与工具、计算分析及软件,以及为实施控压钻井配备的特殊配套装备、工具和软件等。过平衡钻井、近平衡钻井、欠平衡钻井、精细控压钻井和自动(闭环)控压钻井中均包含控压钻井技术。

1.1 过平衡钻井技术的定义^[1]

过平衡钻井技术可定义为:在油气井钻井过程中,井筒液柱压力大于地层孔隙压力,能有效实施安

全钻井的钻井技术,简称 OBDT (overbalanced drilling technology)。

过平衡钻井钻井液密度的确定一般以裸眼井段最高的地层孔隙压力梯度为基准,再增加一个附加值。按井控规定,附加值按以下原则确定:油水井为 0.05~0.10 kg/L,或井底正压差 1.5~3.5 MPa;气井为 0.07~0.15 kg/L,或井底正压差 3.0~5.0 MPa。

钻井过程中,井筒液柱压力、环空循环压耗(钻井液循环时的环空流动阻力)、井口回压、循环过程中产生的压力波动(如激动压力、抽吸压力、侵入井内地层流体引起的压力波动)的总和为井底压力,即:

$$p_L = p_m + p_a + p_t + p_{af} \quad (1)$$

式中, p_L 为井底压力, MPa; p_m 为环空液柱压力, MPa; p_a 为环空循环压耗, MPa; p_t 为井口压力(套压), MPa; p_{af} 为环空循环压力波动, MPa。

如果井底压力大于地层孔隙压力,其压差为正,

收稿日期:2008-01-22;改回日期:2008-03-31

作者简介:周英操(1962—),男,黑龙江佳木斯人,1984 年毕业于大庆石油学院钻井工程专业,2000 年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,2005 年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,副总工程师,中国石油天然气集团公司钻井专业高级技术专家,教授级高级工程师,主要从事钻井工艺技术研究工作。系本刊编委。

联系电话:(010)52781820

为过平衡钻井状态。如果井底压力小于地层孔隙压力,其压差为负,为欠平衡钻井状态。负压差在欠平衡钻井中又称欠压值或井底负压值。

1.2 近平衡钻井技术的定义

近平衡钻井技术是指,在油气井钻井过程中,井筒液柱压力接近地层孔隙压力(有时甚至低于地层孔隙压力),正常钻进情况下,井底压差范围从0(包含0)至过平衡规定正压差的下限,并能有效实施安全钻井的钻井技术,简称 NBDT(nearbalanced drilling technology)。按此定义,钻井液当量密度的附加值为:油水井为 $0\sim0.05\text{ kg/L}$,井底压差 $0\sim1.5\text{ MPa}$;气井为 $0\sim0.07\text{ kg/L}$,井底压差 $0\sim3.0\text{ MPa}$ 。

近平衡钻井时,考虑至起钻时的抽吸压力,井筒液柱压力可能会低于地层孔隙压力。但是,在近平衡钻井概念上,井底压差应始终为正压差。

1.3 欠平衡钻井技术的定义

欠平衡钻井技术可定义为:井筒环空中循环介质的井底压力低于地层孔隙压力,允许地层流体有控制地进入井筒,并将其循环到地面进行有效处理的钻井技术,简称 UBDT(underbalanced drilling technology)^[2-9]。

按钻井工艺及循环介质的不同,可将欠平衡钻井分为气相欠平衡钻井、气液两相欠平衡钻井、液相欠平衡钻井、全过程欠平衡钻井4大类。

国内部分技术人员延用了国外习惯,把欠平衡钻井划分并理解为只是包含液相欠平衡钻井而不包含气相欠平衡钻井,同时常常把气液两相欠平衡钻井随意划分,比如把泡沫钻井划分到气相欠平衡钻井中,这是不科学不合理的。

全过程欠平衡钻井技术是指,从欠平衡钻井井段开始至钻井完井结束前,施工过程中钻进、起下钻、取心、中途测井和完井(如欠平衡下筛管、下油管等)均在井底欠平衡状态下完成^[10]。

欠平衡钻井的完井方式目前主要有裸眼完井、筛管完井和固井射孔完井。前两种方式目前从技术上均可以实现,并已有现场成功的案例。但是,要实现固井射孔欠平衡完井,就要使用低密度水泥浆,即水泥浆液柱压力小于地层孔隙压力(严格讲水泥浆井底压力小于地层孔隙压力)时才能称为欠平衡固井。由于水泥浆有候凝、失重过程,同时地层流体始终处于激活状态,如不能有效压稳(即固井前依靠加

重钻井液压稳),储层中的油、气、水会侵入水泥浆中,加剧水泥浆失重,影响水泥石的胶结,致使候凝至胶结过程中产生各种微间隙,造成固井质量不合格,危害后期储层改造作业,在保证固井质量的“压稳、居中、替净、密封”八字方针中,“压稳”是关键,而压稳又势必造成过平衡状态。因此,目前固井射孔欠平衡完井从技术上不能完全实现。目前解决此问题的方法主要有3种:一是采用裸眼完井或筛管完井(采用非透式筛管);二是采用特殊封隔器;三是研究“类似冻胶技术”,使冻胶隔层起到封隔防窜的目的(但储层的固井质量仍会存在问题)。

1.4 精细控压钻井技术的定义^[11-13]

为了回避 MPD 直译造成概念混淆,笔者依据 MPD 含义提出了精细控压钻井概念,并将其定义为:在钻井过程中,能够精确控制井筒环空压力剖面,有效实现安全钻井的技术,简称为 DCPDT(delicately controlled pressure drilling technology)。

精细控压钻井可以用于过平衡钻井、近平衡钻井,也可以用于欠平衡钻井。它的核心技术除旋转防喷器、井口连续循环装置、地面压力控制装置和多相密闭分离装置等专用硬件设备与工具以外,还包括随钻井底环空压力测量(APWD)、地面流体流量和回压等关键控制参数的精确测量与控制、环空多相流动规律的研究与建模等。进行精细控压钻井井底压差控制范围可大可小,但控制精度必须很高,能精确、有效控制起下钻、开泵等环节的压力,使井底压力始终接近地层压力。

精细控压钻井主要用来解决当量循环密度(ECD)引发的钻井问题,特别是窄安全密度窗口,即喷漏同层的问题。但在窄安全密度窗口下,如不进行随钻井底环空压力测量,在多相流情况下,以目前多相流流动规律研究现状,难以实现真正的精细压力控制。

1.5 自动(闭环)控压钻井技术的定义

笔者提出自动(闭环)控压钻井技术概念,并将其定义为:在钻井过程中,自动随钻监测环空压力剖面、反馈至地面自动调整流量和回压等控制系数,实现环空压力的闭环监测与控制的控压钻井技术,简称为 ACCPDT(auto close-loop controlled pressure drilling technology)。

自动(闭环)控压钻井是精细控压钻井技术发展的最终目标,要实现这一目标,除专用设备和工具要

过关外,最关键的是研制 APWD、研究多相流流动规律。APWD 能随钻监测井筒环空压力剖面(多点测压),从而实现井筒环空压力剖面的随钻控制。随着随钻检测技术、环空水力学技术、钻井仪器仪表、高压力级别旋转防喷器设备研制等方面的发展和进步,一定能实现自动(闭环)控压钻井技术。

1.6 控压钻井技术的分级

笔者从用途出发把控压钻井技术分成 5 级:

1 级:钻井作业安全,无喷、漏、塌等异常情况,一般指常规的过平衡钻井。

2 级:钻井作业安全,无喷、漏、塌等异常情况,为提高钻井速度而采用的近平衡钻井。

3 级:最大关井压力低于旋转防喷器额定工作压力下进行的欠平衡钻井作业或精细控压钻井作业,设备失效后只能产生有限的直接后果,发生异常情况可以启动应急预案,采用常规的压井方法能有效制止。

4 级:最大关井压力低于旋转防喷器额定工作压力下进行的欠平衡钻井作业或精细控压钻井作业,但是设备失效后可能会产生直接的严重后果,启动预先设计的应急预案无把握,有风险的钻井作业。

5 级:井下情况不清楚,即使采用应急预案,也可能发生较大风险的欠平衡钻井作业或精细控压钻井作业。

一般不建议实施 5 级控压钻井,实施 4 级控压钻井前应进行充分的风险评估。

2 控压钻井技术现状分析

过平衡、近平衡常规控压钻井技术已经成熟配套。欠平衡钻井技术在国外经过几十年的发展已基本成熟配套,国内近几年发展迅速,也已步入世界先进水平行列。

精细控压钻井技术,国内与国外相比还有一定差距。自动(闭环)控压钻井技术国内外均有待于在多相流理论、配套装备、工具、仪表仪器和软件开发等方面研究和发展。

就目前的技术现状而言,精细控压钻井技术、欠平衡钻井技术与下述技术的结合,必然会达到更好的钻井施工效果。为促进钻井技术的发展,有必要结合试验研究,寻求钻井技术突破。

1) 随钻井底环空压力测量(APWD) 为适应欠平衡钻井监测的需要,哈里伯顿公司研制出了随

钻井底环空压力测量仪(annular pressure measurement while drilling,简称 APWD),在随钻过程中可以实时测量井底环空压力数据,通过 MWD 或 EM-MWD 实时将数据传送至地面,指导欠平衡钻井作业。斯伦贝谢、威德福等公司也研制出了 APWD 类似工具。

2) 无风险钻井系统(NDS) NDS(no drilling surprise)由斯伦贝谢公司研发,它是一个综合的服务包,通过风险管理,对油气井进行设计和实时处理,从而使井身结构最优。NDS 可以及早发现井下复杂情况与事故发生的预兆,及时采取措施,预防井下复杂情况与事故的发生。NDS 可以实现井眼稳定性控制、地层孔隙压力预测、漏失控制和井眼摩阻控制等。

3) 井下随钻诊断系统(DWD) 美国开发的井下随钻诊断系统(diagnostics while drilling,简称 DWD),能随钻测量井下温度、压力、钻头钻压、钻头扭矩、井斜角、方位角和地层参数等;其随钻测量工具、高速数据传输系统、钻井分析软件等将井下地层、钻井状况与地面数据实时联系起来,优化指导钻井作业,以达到提高钻速,获取最佳钻井效果的目的。

4) 随钻地层测试技术(FTWD) 随钻地层测试技术(formation testing while drilling,简称 FTWD)是在钻井过程中对储层实施实时测量的一种新技术。其最大好处是节省钻机时间,特别适合海上钻井平台,能降低钻井成本。斯伦贝谢公司将 MDT 技术与 LWD 有机结合,研制出了 Stethoscope 随钻地层压力测试仪,于 2005 年 1 月开始商业化服务,截至 2006 年 9 月 25 日,共使用 130 井次,取得良好效果。

5) 电磁波传输式随钻测量技术(EM-MWD) 近年来为适应气体钻井、泡沫钻井和控压钻井等新技术快速发展的需要,电磁波传输随钻测量技术(electromagnetic MWD tools,简称 EM-MWD)研究与应用已有很大进展^[14-17]。壳牌公司已在北海南部成功将电磁波 EM-MWD 用于测量井深 4 420 m 处的各种参数,创下新的记录。

6) 地层压力、破裂压力和坍塌压力预测及随钻监测技术 实现地层压力、破裂压力和坍塌压力随钻监测既可以直接指导钻井现场施工作业,又可以准确验证理论模型的可靠性与准确性,对实现精细控压钻井技术、欠平衡钻井技术的推广和未来的自动控压钻井技术的发展具有重要意义。

3 控压钻井技术发展方向与建议

笔者认为控压钻井技术的发展方向重点在以下 4 个方面：

1)设备研制,特别是研制高压力级别的旋转防喷器、井口连续循环装置、地面压力控制装置和多相密闭分离装置等。

2)研制自动测量仪器仪表,重点包括 APWD、地面自动流量计、地面自动测压计、随钻测斜仪和气
体钻井条件下地层出水/出气定量判断仪器等。

3)研究多相流流动规律,进而进行理论建模与实用软件开发。

4)研发控制机构及支持系统,为实现自动(闭环)控压钻井做技术储备。

发展控压钻井技术,首先要提高对该技术重要作用和意义的认识;其次走科研一中试一现场试验一理论升级一再试验的路,加强前期研究,重视技术储备;三是要培养一批高精尖的技术人才队伍,为该技术研究和推广创造必备条件;四是要注重多学科合作,配套发展;五是要明确和深刻理解控压钻井技术的概念,统一认识,才能从人员、队伍、装备、技术和管理等各方面进行专业化配套和发展。

4 结论与认识

1)明确控压钻井技术的相关概念,对该技术的发展、组织和实施至关重要。

2)过平衡钻井技术、近平衡钻井技术已成熟配套,欠平衡钻井技术已基本成熟。

Discussion and Prospect of Managed Pressure Drilling Technology

Zhou Yingcao Cui Meng Zha Yongjin

(Drilling Technology Research Institute, CNPC, Beijing, 100097, China)

Abstract: Managed pressure drilling technology (MPD) exists in all modern oil and gas wells' drilling technology. Knowing this idea is very important to carry out and conduct research in this technology. Delicate Managed Pressure Drilling (DMPD) and Auto Close-loop Managed Pressure Drilling were proposed in this paper. MPD may be used in Overbalanced Drilling, Near-balanced Drilling, Underbalanced Drilling, DMPD and Auto Close-loop MPD, etc. The DMPD refers to accurately control the pressure profile in annulus during drilling process and thus achieve safely drilling. Definitions and developments of various MPD technologies are presented. The MPD is divided into 5 grades in terms of usage, which is helpful for the purpose of evaluating drilling safety. The paper suggests the future development of MPD and its objective, which is automatic measurement of annular pressure profile while drilling and provides feedback to the surface to automatically adjusting factors of flow out and trapped pressure so that the close-loop measurement and control are achieved.

Key words: pressure control; controlled pressure drilling; balanced pressure drilling; under balanced drilling

3)精细控压钻井技术、自动(闭环)控压钻井技术是控压钻井技术的重要发展方向,经过攻关和努力,一定能够实这一目标现,也必将促进钻井技术的进步,提高钻井施工作业的安全与质量、效率与效益。

参 考 文 献

- [1] 孙振纯,夏月泉,徐明辉. 井控技术[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
- [2] 周英操,翟洪军. 欠平衡钻井技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [3] 曾义金. 塔北地区碳酸盐岩储层欠平衡压力钻井技术[J]. 石油钻探技术,2001,29(2):7-9.
- [4] 崔传良. 欠平衡钻井工艺及装备在漏失井钻井中的应用[J]. 石油钻探技术,2003,31(1):1-3.
- [5] 庄湘琦,李相方,刚涛,等. 欠平衡钻井口回压控制理论与方法[J]. 石油钻探技术,2002,30(6):12-14.
- [6] 姚德辉,李建成,燕修良. 充气钻井液技术在云参 1 井的应用[J]. 石油钻探技术,2002,30(4):34-35.
- [7] 赵金洲,孙荣华,燕修良. 欠平衡钻井技术在低渗透油藏开发中的应用[J]. 石油钻探技术,2002,30(1):21-22.
- [8] 杨虎,鄢捷年,陈涛,等. 欠平衡钻井随钻预测储层压力的理论与实用方法研究[J]. 石油钻探技术,2005,33(3):9-12.
- [9] 侯绪田. 欠平衡钻井井底压力自动控制技术[J]. 石油钻探技术,2004,32(2):25-26.
- [10] 陈永明. 全过程欠平衡钻井中的不压井作业[J]. 石油钻探技术,2006,34(2):22-25.
- [11] John Kozic. Managed-pressure drilling-recent experience, potential efficiency gains, and future opportunity[R]: IADC/SPE103753, 2006.
- [12] Hannegan D. Case studies-offshore managed pressure drilling [R]. SPE101855 2006.
- [13] Brainard R R. A process used in evaluation of managed-pressure drilling candidates and probabilistic cost-benefit analysis: offshore technology conference, Houston, Texas, USA, May 1-4, 2006[C].
- [14] 石崇东,张绍槐. 智能钻柱设计方案及其应用[J]. 石油钻探技术,2004,32(6):7-10.
- [15] 黄明泉. 电磁波电阻率(EWR)在井眼轨迹控制中的应用[J]. 石油钻探技术,2003,31(3):16-18.
- [16] 刘修善,侯绪田,涂玉林,等. 电磁随钻测量技术现状与发展[J]. 石油钻探技术,2006,34(5):4-9.
- [17] 马哲. 无线随钻测量技术的应用现状与发展趋势[J]. 石油钻探技术,2007,35(6):112-115.