

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.04.002

PCDS-I 精细控压钻井系统研制与现场试验

周英操, 杨雄文, 方世良, 刘伟, 纪荣艺

(中国石油钻井工程技术研究院, 北京 100195)

摘要: 精细控压钻井技术能有效解决窄密度窗口钻井涌漏同存的问题, 提高钻井时效, 但国内还没有成熟的精细控压钻井系统。为此, 在对比分析国外 Weatherford、Schlumberger 和 Halliburton 三大公司精细控压钻井系统技术特点的基础上, 根据控压钻井原理研发了具有自主知识产权的、基于井底恒压的 PCDS-I 精细控压钻井系统。介绍了 PCDS-I 精细控压钻井系统的组成及各组成部分的特点和功能, 阐述了该系统实现精细控压钻井的工艺方法, 并在四川蓬莱 9 井进行了精细控压钻井试验。结果表明: PCDS-I 精细控压钻井系统整体运行稳定、无故障, 经受住了现场工况的考验, 实现了恒定井底压力控制和微流量控制, 全工况回压控制精度达到 0.5 MPa, 技术性能指标达到了设计要求。

关键词: 控压钻井 自动节流 井口压力 压力控制 现场试验 蓬莱 9 井

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)04-0007-06

Development and Field Test of PCDS-I Precise Managed Pressure Drilling System

Zhou Yingcao, Yang Xiongwen, Fang Shiliang, Liu Wei, Ji Rongyi

(CNPC Drilling Engineering Research Institute, Beijing, 100195, China)

Abstract: Precise managed pressure drilling system can effectively solve the complex drilling problem of narrow density window with overflow and leakage in the same drilling section and improve the drilling efficiency. But the precise managed pressure drilling system did not form in our country. Therefore, on the basis of comparative analysis of the foreign Weatherford, Schlumberger and Halliburton MPD technical characteristics and according to the MPD theory, the PCDS-I based on constant bottom hole pressure was developed with independent intellectual property rights. This paper introduced PCDS-I system components, their characteristics and functions. The precise control method was explained, and the field test in Well Penglai-9 was introduced. The results showed that PCDS-I precise managed pressure drilling system worked stably without any fault in different types of working conditions in the field, and PCDS-I achieved the target for constant bottom hole pressure control and micro-flow control. The accuracy of back pressure control in all types of working conditions was less than 0.5 MPa. The technical performance meets the requirements of designs.

Key words: managed pressure drilling; auto-choke; back pressure; pressure control; field testing; Well Penglai-9

随着勘探开发向深层、复杂地层的不断发展, 安全密度窗口窄的问题越来越突出, 已经成为造成深井、高温高压井等钻井周期长、井下故障频繁的主要原因^[1-2], 并影响了石油勘探开发的进程。控压钻井是解决窄安全密窗口钻井问题的有效手段之一, 国外自 2007 年工业化应用以来, 已成功应用百余口井, 在北海、亚太地区、墨西哥湾已成为海上勘探开

收稿日期: 2011-06-15; 改回日期: 2011-07-13。

作者简介: 周英操(1962—), 男, 1984 年毕业于大庆石油学院钻井工程专业, 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, 博士生导师, 教授级高级工程师, 长期从事钻井工程方面的科研与管理工作。系本刊编委。

联系方式: (010)52781859, zhoudingcaodri@cncpc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项项目之课题“窄密度窗口钻完井技术与装备”(编号: 2008ZX05021-03)部分研究内容。

发的一种必备技术^[2]。国内塔里木油田引进并应用了精细控压钻井技术,积累了一定的经验,但我国在控压钻井装备研制、工艺实现等方面尚处在起步阶段。为此,中国石油钻井工程技术研究院自主研发了基于井底恒压的 PCDS-I 精细控压钻井系统,提出了几个关键工艺过程的压力控制方法,并进行了现场试验。

1 控压钻井概念与特性

1.1 控压钻井概念

根据 IADC 的定义^[3]:控压钻井是用于精确控制整个井眼压力剖面的自适应钻井程序,其目的在于保持井底压力在设定的范围内。该定义从控制目标、控制策略和实现方法 3 个层次清晰表征了其技术特点:1)控制目标。通过预先设定环空压

力,保持井底压力在设定的范围内。2)控制策略。通过对回压、流体密度、流体流变性、环空液面、循环摩擦力和井眼几何尺寸的综合分析和精确的水力计算,进行精确控制。3)实现方法。通过装备与工艺相结合,合理的逻辑判断,实现环空压力动态、自适应控制。

1.2 控压钻井装备特点

控压钻井的概念清晰表明了装备是关键、工艺是核心的技术理念。目前国际上成功应用于控压钻井的装备主要有 Weatherford 公司的 MFC 系统、Schlumberger 公司的 DAPC 系统和 Halliburton 公司的 MPD 系统^[4-8],其技术特点见表 1。从表 1 可看出,这 3 类控压钻井装备各有侧重,但流量和压力控制都是关键,自动化、快速响应、精确控制都是其技术目标,自适应控制是其发展方向。

表 1 不同控压钻井系统的技术特点

Table 1 Technical characteristics of different types of MPD system

控压钻井系统	控压方式	实现方式	技术特征
Weatherford MFC	微流量控制	通过实时监测进出口钻井液的微小压力、质量流量、当量循环密度、流速等参数,快速改变井口回压以满足钻井工艺要求	强调微流量监测控制,能在小于 80 L 时检测到溢流,并可在 2 min 内控制溢流,使总溢流体积小于 800 L
Schlumberger DAPC	井底恒压	节流管汇、回压泵、水力学模型和综合压力控制器协同工作,提供不间断的精确压力控制,使井底压力控制在允许范围内	强调自动调节回压、动态控制,保持井底压力稳定,追求自适应控制
Halliburton MPD	井底恒压	与 DAPC 的功能类似,并具备微流量监测控制功能	自动化、反应迅速、控制精度高,对井口回压自动控制达到 0.35 MPa 的精度

1.3 控压钻井原理

控压钻井的核心就是对井底压力实现精确控制,保持井底压力在安全密度窗口之内^[9-13]。井底压力等于静液柱压力、环空压力损耗和井口回压三者之和。从图 1 可以清楚地看出控制影响井底压力的因素:静液柱压力主要受钻井液密度影响,通常不能快速改变;环空压力损耗受钻井泵泵冲、排量、井身结构、钻具组合、钻井液性能、岩屑含量和钻具转速等多种因素的综合影响,任何一个因素的变化都会影响到环空压力损耗的动态变化,保持井底压力恒定,必须改变井口回压以补偿环空压力损耗的改变。

控压钻井利用回压来控制井底压力是基于下面的关系式来实现的:

$$p_b = p_m + p_a + p_t \quad (1)$$

式中: p_b 为井底压力,MPa; p_m 为钻井液静液柱压力,MPa; p_a 为环空压耗,MPa; p_t 为井口回压,MPa。

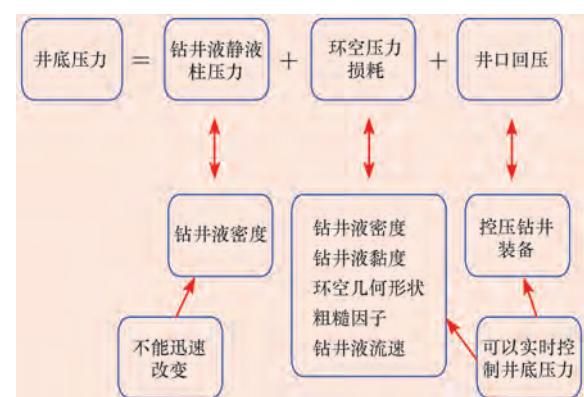


图 1 影响井底压力的因素

Fig. 1 Factors of bottomhole pressure

井口回压的调节主要通过控压钻井装备来实现。在钻井过程中,通过控压钻井装备与工艺的有效结合,依据采集的排量、套压和井底压力等数据,进行精确的水力计算和合理的逻辑判断,实时对比实际井筒压力与目标压力,发出控制节流阀的信号,通过调节节流阀开度改变井口回压,实现控制井筒压力的目标。

2 PCDS-I 控压钻井系统组成与研制

基于自动化、快速响应、精确控制的技术目标,中国石油钻井工程技术研究院开发了以流量和压力

控制为目标的井底恒压 PCDS-I 精细控压钻井系统。该系统主要由自动节流系统、回压泵系统、液气控制系统、自动控制系统和控制中心等部分构成,见图 2。该系统围绕井筒压力控制,实现钻进、起下钻、接单根过程中的压力平稳衔接。

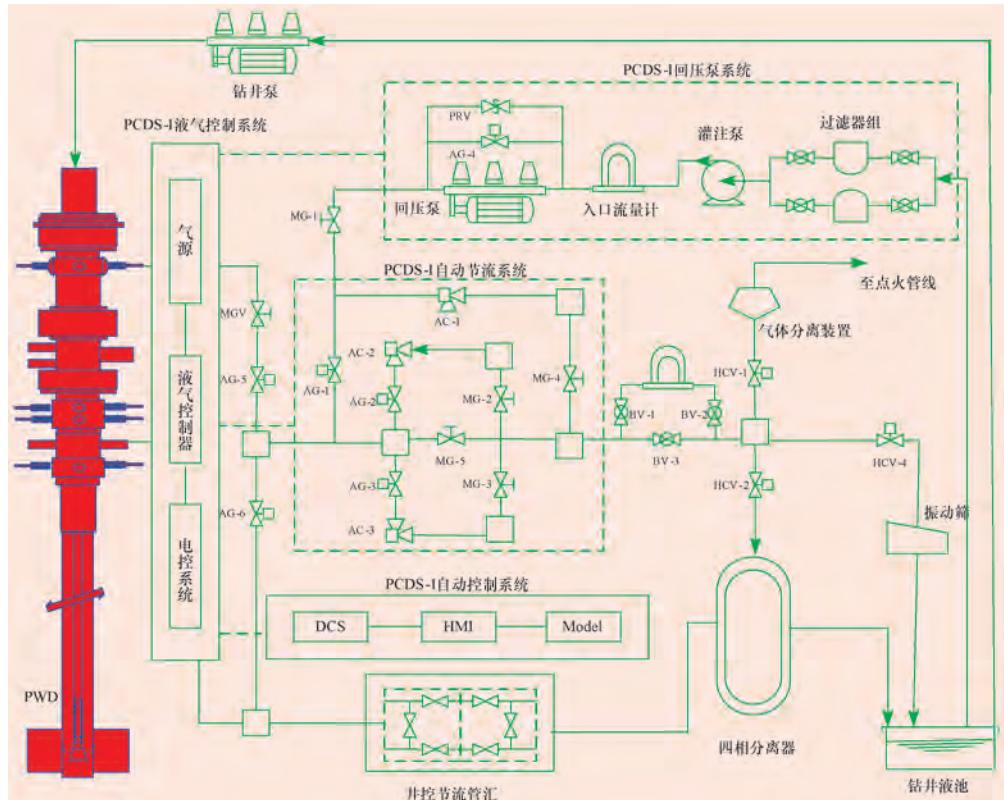


图 2 PCDS-I 精细控压钻井系统组成

Fig. 2 System components of PCDS-I precise managed pressure drilling system

2.1 自动节流系统

自动节流系统由 3 个节流通道组成,具备自动节流、冗余节流切换、安全报警、出口流量监测等功能。其性能指标为:额定压力 35 MPa, 节流压力精度 ± 0.5 MPa, 工作压力 10 MPa。其中,节流阀 A、B 为大通径节流阀,供正常钻井且排量较大时使用。A 为主节流阀,正常钻井时使用,只有在节流阀 A 工作异常或发生堵塞时才自动启动节流阀 B,关闭节流阀 A 的通道。节流阀 C 为辅助节流阀,通径较小,在停止循环时,回压泵启动后通过该阀节流加回压。流量计可以精确计量钻井液出口流量,判断井下溢流和漏失情况,同时为水力模型提供实时数据,及时调整回压。

2.2 回压泵系统

回压泵系统是一个小排量的三缸泵组,由软

启动器控制的交流电机驱动。其性能指标为:额定压力 35 MPa, 额定流量 7.5 L/s。回压泵的主要作用是在循环或停泵的作业过程中进行流量补偿,提供节流阀工作必要的流量。它也能在整个工作期间,排量过小时,对系统进行流量补偿,维持井口节流所需要的流量,其目的是维持节流阀的节流功能。回压泵的循环是地面小循环,不通过井底。

2.3 液气控制系统

液气控制系统是 PCDS-I 精细控压钻井系统的执行系统,接收自动控制系统的工作指令并进行处理,同时向下位机发送指令,来实现对各节流阀和平板阀的自动控制。其动态响应时间 <1 s,能实现地面压力控制装置手/自一体的安全互锁的控制,能实现钻井各工况动态切换的高精度控制,具有较强的可靠性及抗干扰性。

2.4 自动控制系统

自动控制系统由硬件、软件两部分构成。硬件主要由地面压力、温度、泵冲传感器，流量计，PWD 井下仪器，录井传感器等构成。采用现场装置、控制器、上位计算机控制的三层递阶控制结构，测量精度 0.2%，动态响应时间<1 s。软件主要由参数采集与监测、实时水力学计算、远程自动控制软件等构成。

1) 参数采集与监测。实时采集并向钻井参数监测系统发送套管压力、节流管汇出口流量、节流管汇闸板阀工作状态、节流阀开度、回压泵流量、回压泵压力、回压泵工作状态等参数，同时接收工况、目标套压、入口钻井液流量等参数。

2) 实时水力学计算。根据输入的井身结构、下部钻具组合、井眼轨迹、钻井液性能等非实时基础数据以及钻井参数监测系统得到的相关钻井参数，进行实时水力计算，得到压力控制的目标(目标井口回压)，同时将目标井口回压传输给远程自动控制软件。

3) 远程自动控制软件。远程自动控制系统根据井下随钻底压力、钻井参数采集与监测系统、实时水力学计算信息进行合理分析与逻辑判断，实现实时决策的功能。该软件的主要功能是完成与其他系统之间的通讯及数据交互，负责向液气控制系统发出相应的调整指令，并监控指令的执行情况。可以实现阀开关顺序的逻辑控制、节流阀闭环控制、各工序无扰动切换、安全保护系统设计、数据库功能和人机界面操作等功能。

3 控压钻井关键压力控制工艺

控压钻井的核心在于压力控制的实现。尽管钻进、接单根、起下钻、换胶芯等作业流程完全不同，但其实也是开泵、正常循环、停泵和停止循环 4 个单一程序的组合，弄清这 4 个基本程序，对掌握控压钻井的压力控制方法至关重要。各钻井工况切换情况下的压力分析如图 3 所示，红色区域代表井口回压，粉色区域代表环空压力损耗，绿色区域代表静液柱压力。其中，压力控制的关键在于对 t_1 和 t_3 两段的压力控制，即在钻井泵停泵期间迅速升高井口压力，在钻井泵开泵期间迅速降低井口压力，补偿由于环空压力损耗变化造成的影响，维持井底压力恒定。

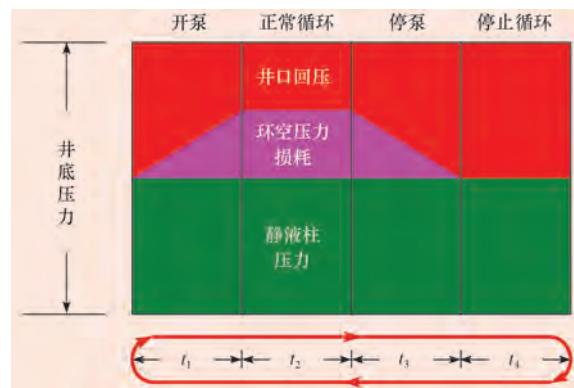


图 3 各钻井工况切换情况下的压力分析

Fig. 3 Pressure analysis of different drilling conditions

循环钻进期间，控压钻井自动控制系统依据采集的排量、套压、井下随钻底压力等数据，实时对比实际井筒压力与目标压力。依据其差值，相应发出控制节流阀的信号，以实现控制井筒压力的目标。

接单根(起下钻)控压工艺其实就是停泵、停止循环和开泵、正常循环的动态切换过程。在准备接单根(起下钻)过程中，控压钻井回压泵系统要提前启动待命，回压泵系统运转正常后可通知司钻停钻井泵，钻井泵停泵过程中，井筒循环摩阻减少，此时要不断提高井口回压来弥补井筒循环阻力的损失；反之，当接单根完成，开泵循环时，井筒循环摩阻增大，此时要不断降低井口回压来保持井底压力恒定。

4 现场试验

为了验证 PCDS-I 精细控压钻井系统的功能、稳定性和可靠性，在四川蓬莱 9 井进行了控压钻井试验，结果表明，该系统的各项功能均能实现，性能稳定、可靠。

蓬莱 9 井的钻具组合为 $\phi 215.9 \text{ mm}$ PDC 钻头 $\times 0.24 \text{ m} + 430 \times 410$ 双母接头 $\times 0.57 \text{ m} + 2$ 个 411×410 回压凡尔 $\times 0.84 \text{ m} + 411 \times 410$ 计量计 $\times 0.54 \text{ m} + 410 \times 410$ LWD $\times 9.44 \text{ m} + \phi 165.1 \text{ mm}$ 钻铤 $\times 8.92 \text{ m} + \phi 212.7 \text{ mm}$ 稳定器 $\times 0.85 \text{ m} + \phi 165.1 \text{ mm}$ 钻铤 $+ \phi 127.0 \text{ mm}$ 斜坡钻杆 $+ 411 \times 410$ 方保接头 $+ 411 \times 410$ 下旋塞 $\times 0.44 \text{ m}$ 。所用钻井液的性能为：密度 $1.13 \sim 1.41 \text{ kg/L}$ ，黏度 $34 \sim 36 \text{ s}$ ， Cl^- 质量浓度 $12250 \sim 12600 \text{ mg/L}$ ，静切力 $0.5 / 1.0 \text{ Pa}$ ，滤失量 3.6 mL ，泥饼 0.5 mm ，pH 值 9，含砂 0.1%。

图4为钻进工况下的压力控制曲线。由图4可知,该井在正常钻进时,井口设定压力为0.50 MPa,当检测到出口流量从28.7 L/s降至23.4 L/s时,PCDS-I系统计算出井口压力要增至0.71 MPa,于是调整节流阀开度,使实际井口压力逼近设定井口压力,直至误差 ≤ 0.2 MPa。

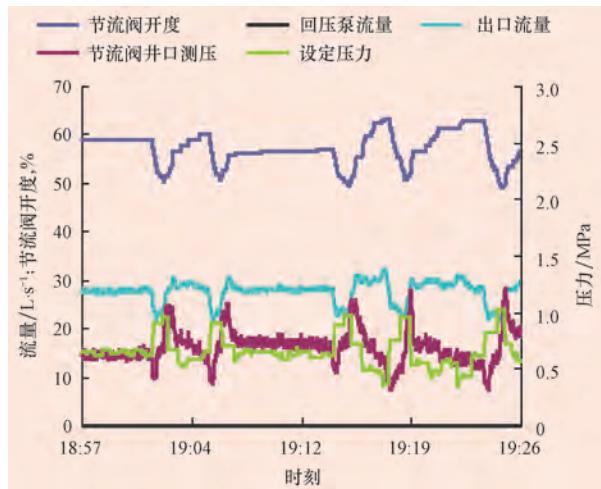


图4 钻进工况下的压力控制实时曲线

Fig. 4 Pressure control curve of drilling condition

图5为接单根工况下的压力控制曲线。由图5可知:在准备接单根时,启动回压泵,此时钻井泵尚未停泵,出口流量增加;当钻井泵停泵后,井内循环停止,出口流量等于回压泵流量,井口压力升至3.07 MPa,弥补环空压力损失1.89 MPa;接单根作业完成后,钻井泵开启,井口压力降至原来的正常钻进压力1.18 MPa,并切换回主节流通道,此时关闭回压泵,退出回压补偿系统,完成接单根。

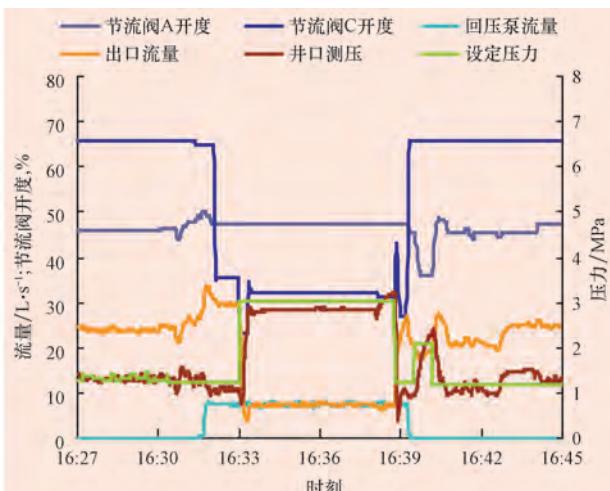


图5 接单根工况下的压力控制实时曲线

Fig. 5 Pressure control curve of connecting condition

图6为起下钻工况下的压力控制曲线。由图6可知:上提钻具时,由于存在抽汲作用,一部分钻井液进入井筒填补上提钻具的体积,出口流量由7.5 L/s降至4.2 L/s左右,节流阀自动调整开度大小,保持井口压力稳定;下放钻具时,由于存在激动作用,一部分钻井液溢出井筒,出口流量增大,井口设定压力自动降低,消除激动压力的影响;整个上提和下放钻具过程中,压力误差控制在 ± 0.5 MPa以内。

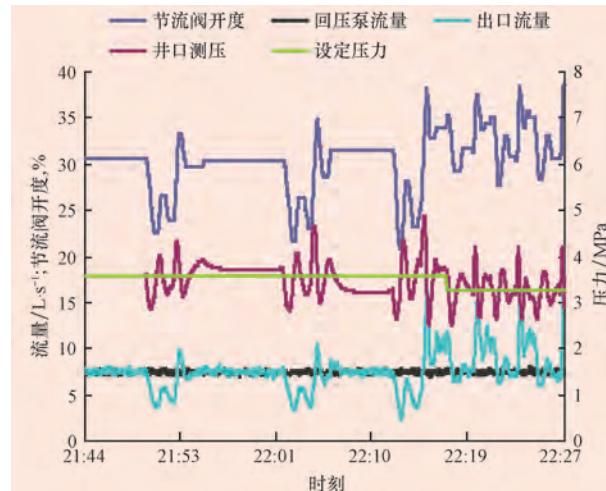


图6 起下钻(短起下)工况下的压力控制实时曲线

Fig. 6 Pressure control curve of tripping conditions

该井在1 920.46~2 023.45 m井段进行了欠平衡控压钻井试验。钻进过程中,PCDS-I系统检测到溢流,套压最高升至7.89 MPa,出口流量比入口流量增加2~3 L/s,钻井液池中的液量增加了1.2 m³,PCDS-I系统通过计算重新设定了井口压力,并对各控压钻井工具进行调整,控制了溢流实现了控压钻进,见图7。后又检测到漏失,PCDS-I系统准确发现了压力平衡点,见图8。该井在2 023.45~2 560.00 m井段进行了涌漏共存的窄密度窗口精细控压钻井试验,当井口回压高于2.2 MPa时,钻井液池液面降低说明钻井液漏失,当井口回压低于1.5 MPa时,钻井液池液面上升,分离器显示有大量气体溢出,多次点火成功,火焰最高超过10 m,点火时间最长超过50 min。该井欠平衡精细控压钻进过程中,发现8层有油气显示,出口气体流量500~2 500 m³/h。

PCDS-I精细控压钻井系统累计工作400 h,钻进过程中回压控制精度达到0.2 MPa,接单根、起下钻过程中回压控制精度达到0.5 MPa,技术性能指标达到了设计要求。

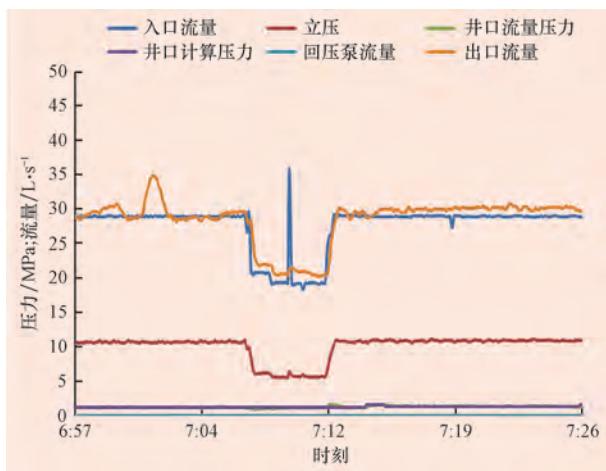


图 7 控压钻进(溢流监测)

Fig. 7 Managed pressure drilling (micro-influx monitoring)

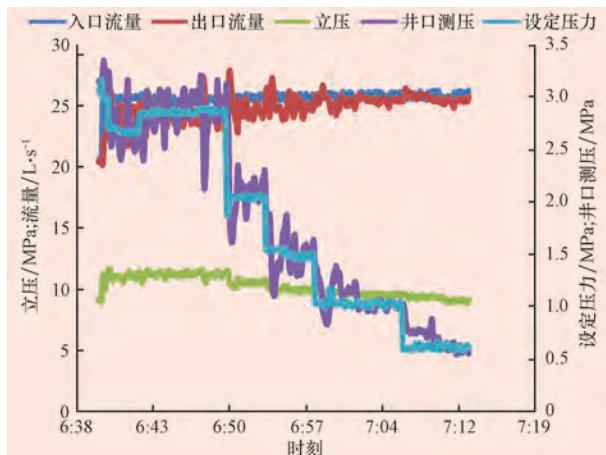


图 8 控压钻进(寻找压力平衡点)

Fig. 8 Managed pressure drilling(searching for pressure balance)

5 结论及建议

- 1) 研制了一套以流量和压力为控制目标的井底恒压 PCDS-I 精细控压钻井系统。
- 2) 利用 PCDS-I 精细控压钻井系统, 可实现开泵、正常循环、停泵和停止循环 4 个单一程序组合的精细控压钻井。
- 3) 现场试验表明, PCDS-I 精细控压钻井系统的关键阀件和控制单元运行稳定、无故障, 实现了恒定井底压力控制和微流量控制。

参 考 文 献

- [1] 周英操, 崔猛, 查永进. 控压钻井技术探讨与展望[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4):1-4.
Zhou Yingcao, Cui Meng, Zha Yongjin. Discussion and prospect of managed pressure drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(4):1-4.

Techniques, 2008, 36(4):1-4.

- [2] 杨雄文, 周英操, 方世良, 等. 国内窄窗口钻井技术应用对策分析与实践[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(8):7-11.
Yang Xiongwen, Zhou Yingcao, Fang Shiliang, et al. Strategy analysis of narrow window drilling technology and practice[J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(8):7-11.
- [3] 王果, 樊洪海, 刘刚, 等. 控制压力钻井技术应用研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(1):34-38.
Wang Guo, Fan Honghai, Liu Gang, et al. Application of managed pressure drilling technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1):34-38.
- [4] 李伟廷, 侯树刚, 蓝凯, 等. 自适应控制压力钻井关键技术及研究现状[J]. 天然气工业, 2009, 29(11):50-52.
Li Weiting, Hou Shugang, Lan Kai, et al. Key technologies and research progress of the adaptive managed pressure drilling[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11):50-52.
- [5] Martin M D. Managed pressure drilling techniques and tools [D]. United States, Bryan: Texas A & M University, 2006.
- [6] Santos H, Catak E, Kinder J. First field applications of microflux control show very positive surprises[R]. IADC/SPE 108333, 2007.
- [7] Saponja J, Adeleye A, Hucik B. Managed pressure drilling (MPD) field trials demonstrate technology value[R]. IADC/SPE 98787, 2006.
- [8] van Riet E J, Reitsma D, Vandecraen B. Development and testing of a fully automated system to accurately control downhole pressure during drilling operations [R]. SPE/IADC 85310, 2003.
- [9] 刘超, 周玉海, 吴红玲, 等. 控制压力钻井技术在衡 6 井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3):34-37.
Liu Chao, Zhou Yuhai, Wu Hongling, et al. Application of MPD technology to Heng 6 Well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3):34-37.
- [10] 张洪杰, 张德友, 刘亚斌. 控制压力钻井在沙特气田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(5):36-39.
Zhang Hongjie, Zhang Deyou, Liu Yabin. The field application of managed pressure drilling in Saudi Arabia Gas Field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5):36-39.
- [11] 秦疆, 杨顺辉, 宋战培, 等. 沙特 B 区块高温高压深气井配套钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(5):51-55.
Qin Jiang, Yang Shunhui, Song Zhanpei, et al. Block B of Saudi Arabia HTHP gas well drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(5):51-55.
- [12] 张桂林. 土库曼斯坦亚苏尔哲别油田控压钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6):37-41.
Zhang Guilin. Application of managed pressure drilling technology in Azorse Area, Turkmenistan [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6):37-41.
- [13] 孙凯, 梁海波, 李黔, 等. 控压钻井泥浆帽设计方法研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(1):36-39.
Sun Kai, Liang Haibo, Li Qian, et al. Research mud on cap design managed pressure drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(1):36-39.