



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

超深井自动控制压井室内物理模拟试验及结果分析

李军 杨宏伟 陈旺 龙震宇 张更

Physical Simulation Experiment and Result Analysis of Automatically Controlled Killing in Ultra-Deep Well

LI Jun, YANG Hongwei, CHEN Wang, LONG Zhenyu, ZHANG Geng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

塔里木博孜区块超深井自动垂直钻井难点与技术对策

Difficulties and Technical Countermeasures for Automatic Vertical Drilling in Ultra-Deep Wells in the Bozi Block of the Tarim Basin

石油钻探技术. 2021, 49(1): 11–15 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020113>

从典型井喷案例谈一次循环法压井工艺

Discussion on the Engineer's Well Killing Method in Typical Blowout Cases

石油钻探技术. 2018, 46(6): 33–38 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018131>

“三超”油气井井控技术难点及对策

Technological Challenges and Countermeasures in Well Control of Ultra-Deep, Ultra-High Temperature and Ultra-High Pressure Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2017, 45(4): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704001>

塔里木油田库车山前超高压盐水层精细控压钻井技术

Precise Managed Pressure Drilling Technology for Ultra-High Pressure Brine Layer in the Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 23–28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020034>

裂缝性地层溢流侵入动态规律研究

The Dynamic Laws of Overflow Intrusion in Fractured Formations

石油钻探技术. 2018, 46(6): 26–32 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018137>

顺北一区超深井窄间隙小尾管固井技术研究

Slim Liner Cementing Technology for Ultra-Deep Wells with a Narrow Annulus in No.1 District of Shunbei Block

石油钻探技术. 2019, 47(6): 60–66 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019114>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024049

引用格式: 李军, 杨宏伟, 陈旺, 等. 超深井自动控制压井室内物理模拟试验及结果分析 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 31-37.

LI Jun, YANG Hongwei, CHEN Wang, et al. Physical simulation experiment and result analysis of automatically controlled killing in ultra-deep well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 31-37.

超深井自动控制压井室内物理模拟试验及结果分析

李 军^{1,2}, 杨宏伟¹, 陈 旺¹, 龙震宇¹, 张 更¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 现有超深井溢流压井技术依靠手动控制节流管汇, 响应速度慢, 井筒压力波动大, 容易引发二次溢流、漏失等复杂情况, 而自动控制压井技术可实现钻井时溢流压井作业稳定控制。为此, 设计了比例-积分-微分 (PID) 与位移双层协同反馈的自动控制方法, 开发了超深井自动控制压井系统, 建立了自动控制压井物理模拟试验装置, 开展了恒定目标压力、连续变化目标压力、压力突变干扰等条件下的自动控制压井试验。试验结果表明, 自动控制压井系统能够在 30 s 左右完成节流阀开度的调节, 节流压力波动范围小于 0.02 MPa, 与手动控制压井相比, 自动控制压井系统具有良好的稳定性、准确性、反应速度和抗干扰能力。研究结果为超深井复杂地层安全压井提供了理论依据。

关键词: 超深井; 溢流; PID 控制; 自动控制压井; 物理模拟

中图分类号: TE21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2024)02-0031-07

Physical Simulation Experiment and Result Analysis of Automatically Controlled Killing in Ultra-Deep Well

LI Jun^{1,2}, YANG Hongwei¹, CHEN Wang¹, LONG Zhenyu¹, ZHANG Geng¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 2. China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: Existing ultra-deep well overflow killing relies on manual control of the choke manifold, which suffers from a slow response and large wellbore pressure fluctuation, likely resulting in complex situations such as secondary overflow and leakage. In contrast, automatically controlled killing can achieve the stable control of overflow killing operations during drilling. Therefore, the automatic control method integrating “proportional, integral, and differential (PID) + displacement” double-layer synergic feedback was designed. The automatically controlled killing system for ultra-deep wells was developed, and the physical simulation experiment device for automatically controlled killing was established. The automatically controlled killing experiment was carried out under the conditions of constant target pressure, continuously changing target pressure, and sudden pressure interference. The experiment results show that the automatically controlled killing system can adjust the choke valve opening within about 30 s, and the range of choke pressure fluctuation is less than 0.02 MPa. Compared with manually controlled killing, the automatically controlled killing system possesses good stability, accuracy, response speed, and anti-interference ability. The results of the study provide theoretical basis for the safe killing for complex formations in ultra-deep wells.

Key words: ultra-deep well; overflow; PID control; automatically controlled killing; physical simulation

收稿日期: 2024-01-22; 改回日期: 2024-03-08。

作者简介: 李军 (1971—), 男, 河北沧州人, 1994 年毕业于石油大学 (华东) 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, 教授, 博士生导师, 主要从事钻完井新技术、井筒压力安全控制和井筒完整性等方面的研究。E-mail: lijun446@vip.163.com。

通信作者: 杨宏伟, zerotone@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“深井复杂地层智能井控井筒压力预测模型与优化控制方法”(编号: 52104012)、中国石油大学(北京)科研基金项目“万米特深井控动态压井模型与自动调控方法”(编号: 2462023BJRC008)联合资助。

近年来,深部地层已成为我国油气勘探开发的重要领域,先后在塔里木盆地、四川盆地、准噶尔盆地等地取得一系列重大发现^[1-3]。超深层、特深层的超高温超高压、窄安全密度窗口、复杂压力系统等极端环境给井筒压力安全控制带来极大挑战,频繁出现溢流、漏失等复杂事故^[4-9]。目前,现场压井作业仍然是依靠工程师手动控制节流阀开度来调节节流压力,从而实现对井底压力的控制^[10-11]。但手动控制压井具有一定的盲目性和主观性,对工程师的经验要求很高,如果出现操作不当,会使井下情况进一步恶化,出现二次溢流或漏失等情况。

随着自动化和人工智能的发展,超深层窄安全密度窗口条件下钻井过程中的溢流压井技术逐步向自动化方向发展^[12-13]。自动控制压井算法方面,PID 控制器结构简单、维护成本低,是目前应用最广泛的节流阀控制算法^[14];但是节流阀压力-开度呈非线性关系,为了提高 PID 控制器的控制速度、稳定性和鲁棒性,相继提出了粒子群优化^[15]、专家系统^[16]、神经网络^[17]、模糊算法^[18]等优化 PID 参数的方法。自动控制压井硬件方面,隋秀香等人^[19-20]基于气液两相流理论,建立了溢流压井施工过程中的压力实时监测模板,并结合节流阀控制系统形成了压井开环控制系统。王德玉等人^[21]建立了电液比例控制系统的数学模型,采用 PID 控制和专家控制相结合的方法,研制了井口回压监测和实时控制的机、电、液一体化的井控系统。金业权等人^[22]基于现有的节流压力液动控制系统,提出了电动节流压力建议控制系统设计。李铁明等人^[23]利用自动化压井系统开展了压井试验,验证了自动化压井系统的可行性,但该系统节流阀开度调节时间大于 3 min,

节流压力波动大于 0.4 MPa。李军等人^[24]建立了节流阀自动控制系统,结合AMESim 仿真软件对自动控制系统进行了仿真计算和稳定性分析。

综上所述,目前对于自动控制压井技术的研究主要集中于自动控制算法,单纯采用 PID 控制方式对节流阀控制时,节流阀开度调节过慢,导致井口压力调节时间过长,或由于固定 PID 控制参数计算误差大导致节流阀开度常出现超调情况,因此导致已有自动控制压井系统的控制效果与现场要求相差较大。针对上述问题,笔者根据节流阀的非线性压降特性曲线,设计了“PID+位移”双层协同反馈的自动控制方法,在保证节流阀开度调节的速度基础上,又保证了节流阀开度控制的准确性和稳定性;并建立了自动控制压井试验装置,研究了自动控制压井系统的控制效果,可有效提高超深层钻井溢流压井作业效率,以期为超深井智能井控技术的发展提供新方法。

1 自动控制压井物理模拟试验系统

1.1 自动控制压井系统设计

自动控制压井系统作为实现压井过程中井筒压力自动控制的核心系统,主要由数据采集模块、控制决策模块和执行模块组成,设计原理如图 1 所示。数据采集模块用于获取立管压力、套管压力、节流阀开度等信号;控制决策模块为自动控制系统的中心,通过对比实际压力与目标压力,获得节流阀位移输出信号并传递给执行模块;执行模块由电磁换向阀与液动节流阀组成,电磁换向阀根据接收的控制信号控制液动节流阀开度与开度调节速度。

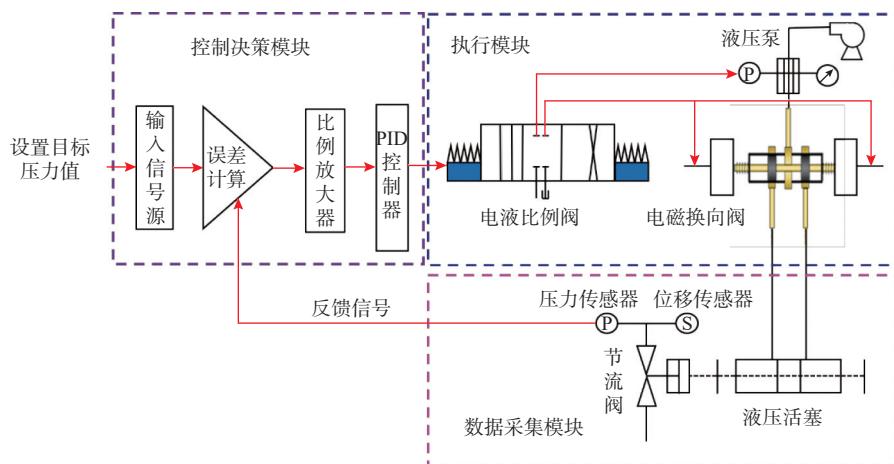


图 1 自动控制压井系统设计原理

Fig.1 Design principle of automatically controlled killing system

自动控制压井过程中, 节流阀开度的控制精度及响应速度决定了对目标压力的跟踪效果, 因此选择合适的控制逻辑非常重要。根据节流阀的非线性压降特性曲线, 设计了“PID+位移”双层协同反馈的自动控制方法(见图2)。首先, 根据节流阀压降特性曲线, 利用实际压力与目标压力之差, 预估目标节流阀开度, 当节流阀实际开度与目标开度的差值大于设定的阈值时, 控制决策系统会直接跳过PID控制器向执行机构发出控制信号, 让节流阀开度以固定的大范围位移接近目标开度, 进行节流阀开度的快速粗调; 当实际节流阀开度与目标开度的差值小于设定的阈值时, 开始执行PID自动控制, 实现节流阀开度的稳定、精准控制。通过双层协同反馈, 既保证了节流阀开度调节的速度, 又保证了节流阀开度控制的准确性和稳定性。

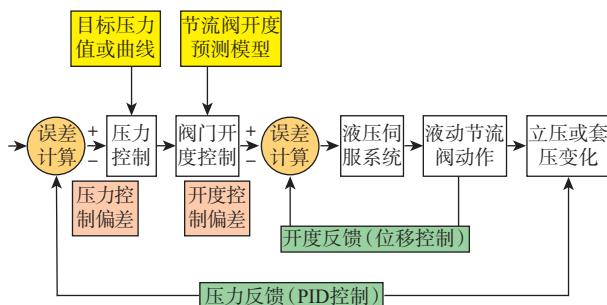


图2 “PID+位移”双层协同反馈的自动控制方法

Fig.2 Automatic control method integrating “PID + displacement” two-layer synergic feedback

节流阀开度预测模型为:

$$q_c = \frac{C_v z}{\sqrt{\rho_L}} \sqrt{p_c - p_s} \quad (1)$$

式中: q_c 为流体流量, m^3/s ; C_v 为节流阀流量系数; z 为节流阀开度; ρ_L 为流体密度, kg/m^3 ; p_c 为节流阀前端压力, MPa; p_s 为节流阀后端压力, MPa。

PID 自动控制算法可以表示为^[25]:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 为 t 时刻 PID 控制输出变量; t 为时间, s; K_p 为比例系数; $e(t)$ 为控制偏差; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

由式(2)可知, 由于存在积分项, PID 控制算法会产生控制误差的累计, 导致节流阀开度调节的误差增大, 因此采用增量式 PID 控制算法对积分项误差进行消除:

$$\Delta u(t) = K_p \Delta e(t) + T_i e(t) + T_d [\Delta e(t) - \Delta e(t-1)] \quad (3)$$

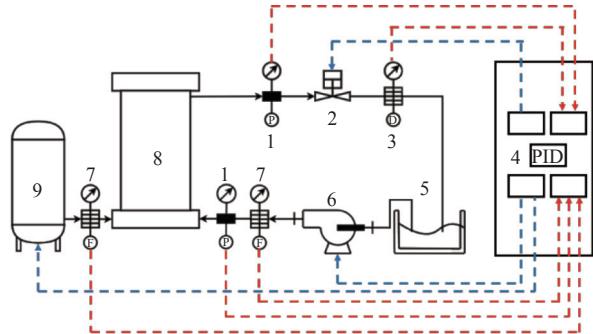
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4)$$

式中: $r(t)$ 为控制目标压力, MPa; $y(t)$ 为实际测量压力, MPa。

由式(3)和(4)可知, 当确定 PID 控制算法的比例项、积分项、微分项的系数后, 根据当前控制周期及前 2 次控制周期的偏差, 可得到当前节流阀开度的控制增量。实际使用过程中, 不同节流阀阀芯的开度-流量-压力特性曲线不同, 因此首次使用自动控制压井系统前, 可采用现场试算法进行 PID 控制参数整定, 从而得到较为理想的控制效果。

1.2 自动控制压井试验装置构建

为模拟自动控制压井过程, 并验证自动控制压井系统的控制效果, 以钻井现场常用的针式节流阀作为对象, 搭建了自动控制压井试验装置(见图3)。



1.压力传感器；2.针式节流阀；3.位移传感器；4.自动控制压井系统；5.储液罐；6.柱塞泵；7.流量传感器；8.模拟井筒；9.气体注入系统

图3 自动控制压井试验装置示意

Fig.3 Experiment system for automatically controlled killing

自动控制压井试验装置包括自动控制压井系统、模拟井筒、针式节流阀、气/液循环系统和数据采集系统等。自动控制压井系统实现了手动与自动一体化, 使用过程中可以进行手动与自动实时稳定切换。模拟井筒由长度 2 m、内径 133 mm 的不锈钢管制成, 井筒顶部通过针式节流阀连接储液罐, 井筒底部与气/液循环系统连接, 试验压力控制范围为 0~0.6 MPa。节流阀采用钻井过程中常用的针式节流阀, 通过调节节流阀开度可以控制节流压力和立管压力, 节流阀阀芯行程 0~44 mm, 位移控制阈值 5 mm。气/液循环系统分别由储气罐、空气压缩机、柱塞泵组成, 注气与注液速率能够实时控制, 模拟压井过程中井筒内不同的气液比及气液比动态变化, 液相排量 0~20 m^3/h , 气相排量 0~18 m^3/h 。数据采集系统包括压力传感器、流量传感器、节流阀开度传感器, 压力测量精度 0.001 MPa, 节流阀开度

测量精度 0.1 mm。

2 自动控制压井室内试验

为了测试自动控制压井系统对不同目标压力的跟踪准确性、稳定性、快速反应能力及抗干扰能力,设计如下试验方案:1)固定目标压力不同含气率条件下,自动控制压井试验;2)以工程师法压井过程中节流压力曲线作为目标压力,开展连续目标压力变化条件下自动控制压井试验;3)保持目标压力不变,模拟压井排量变化引起压力突变,自动控制压井系统的抗干扰能力试验。

2.1 固定目标压力试验

为了对比手动控制压井与自动控制压井的效果,开展了不同含气率条件下的固定目标压力试验。

固定目标压力下手动控制压井试验结果如图 4 和表 1 所示,设液相排量为 $14 \text{ m}^3/\text{h}$,气相排量为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$,模拟井筒含气率为 30%,目标压力调节范围为 $0.1 \sim 0.4 \text{ MPa}$ 。手动控制跟踪不同目标压力时,节流阀开度的调节时间在 $50 \sim 90 \text{ s}$ 之间;当目标压力不变时,节流压力波动范围为 $\pm 0.030 \text{ MPa}$,超调压力作为实测压力值对目标压力值的偏移量,试验过程中多次出现大于 0.10 MPa 的压力超调情况,且最大超调压力达 0.44 MPa 。

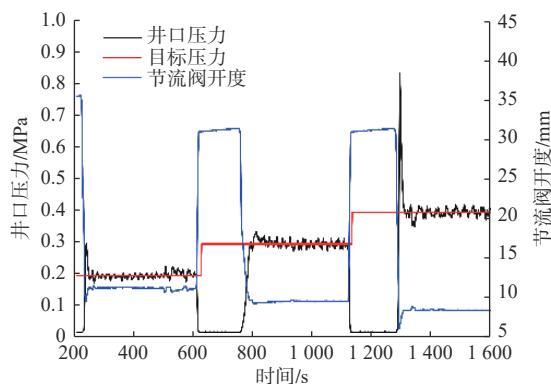


图 4 30% 含气率和固定目标压力下手动控制压井试验中的压力变化曲线

Fig.4 Pressure variation curve in manual control killing tests with fixed target pressure at 30% gas content

固定目标压力下自动控制压井试验结果如图 5 和表 2 所示,试验条件与手动控制压井条件相同。在设定目标压力后,自动控制压井系统迅速做出反应,准确并稳定调节节流阀开度。对于不同目标压力,自动控制系统的调节时间在 $20 \sim 40 \text{ s}$ 之间,大部分情况下小于 30 s ,最大超调压力小于 0.01 MPa 。

表 1 30% 含气率下和固定目标压力下手动控制压井试验中的调节时间及压力波动

Table 1 Adjustment time and pressure fluctuation in manual control killing test with fixed target pressure at 30% gas content

目标压力/MPa	调节时间/s	最大超调压力/MPa	压力波动范围/MPa
0.2	65	0.10	± 0.030
0.3	90	0.05	± 0.025
0.4	88	0.44	± 0.024

目标压力不变时,节流压力基本保持稳定,压力波动范围为 $\pm 0.01 \text{ MPa}$,且在整个过程中节流压力保持平稳,未出现压力超调现象。相对于手动调节,自动控制压井系统的稳定性更好、反应速度更快。

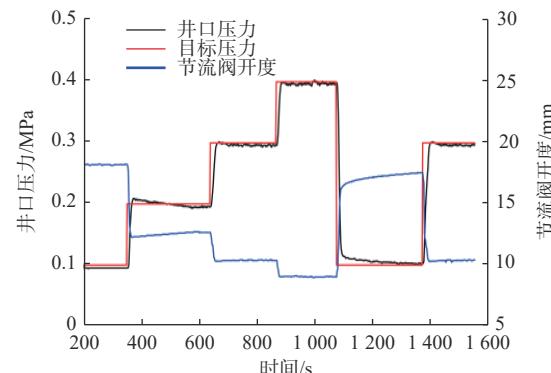


图 5 30% 含气率和固定目标压力下自动控制压井试验中的压力曲线

Fig.5 Pressure curve in automatic control killing test with fixed target pressure at 30% gas content

表 2 30% 含气率和固定目标压力下自动控制压井试验中的调节时间及压力波动

Table 2 Adjustment time and pressure fluctuation in automatic control killing test with fixed target pressure at 30% gas content

目标压力/MPa	调节时间/s	最大超调压力/MPa	压力波动范围/MPa
0.2	20	0.010	± 0.01
0.3	24	0.005	± 0.01
0.4	20	0.005	± 0.01
0.1	34	0.005	± 0.01

固定目标压力、井筒含气率为 50% 条件下的自动控制压井试验结果如图 6 和表 3 所示。设置液相排量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$,气相排量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$,目标压力调节范围为 $0.1 \sim 0.4 \text{ MPa}$,自动控制系统调节时间在 $20 \sim 40 \text{ s}$ 之间,节流压力波动范围为 $\pm 0.01 \text{ MPa}$,自动控制压井系统同样可以准确、稳定、迅速地调节节流

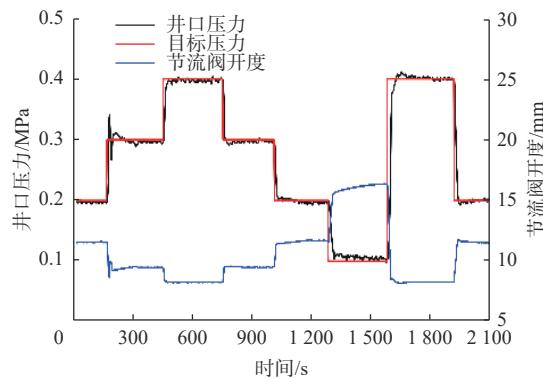


图 6 50% 含气率和固定目标压力下自动控制压井试验中的压力曲线

Fig.6 Pressure curve in automatic control killing test with fixed target pressure at 50% gas content

阀开度。目标压力为 0.3 MPa 时, 节流压力出现了一次超调情况, 但控制系统及时调节节流阀开度, 使得超调压力小于 0.05 MPa, 且调节时间小于 40 s。

综合手动控制压井及自动控制压井试验结果(见表 4)可以看出, 对比手动控制压井, 自动控制压井系统的节流阀调节时间更短, 能够缩短调节时间 60% 左右, 并且很少出现压力超调情况; 在稳定跟

表 3 50% 含气率和固定目标压力下自动控制压井试验中的调节时间及压力波动

Table 3 Adjustment time and pressure fluctuation in automatic control killing test with fixed target pressure at 50% gas content

目标压力/MPa	调节时间/s	最大超调压力/MPa	压力波动范围/MPa
0.3	38	0.040	±0.012
0.4	28	0.005	±0.010
0.3	20	0.015	±0.010
0.2	22	0.005	±0.010
0.1	32	0.010	±0.015
0.4	40	0.012	±0.015
0.2	22	0.010	±0.005

踪压力期间, 自动控制压井系统的压力波动范围仅为手动控制压井的 30% 左右, 能更好地保证井筒安全。由试验结果可知, 基于“PID+位移”双层协同反馈所建立的自动控制压井系统在压井过程中可以根据目标压力进行迅速反应, 快速准确地调节节流阀开度, 使节流压力满足目标压力要求, 提高压井效率并保证井筒安全。

表 4 手动控制压井与自动控制压井试验结果对比

Table 4 Comparison of experimental results between manually controlled killing and automatically controlled killing systems

控制系统	含气率, %	调节时间/s	超调情况	压力波动范围/MPa
手动控制压井	30	50~90	最大超调压力大于 0.10 MPa	±0.030
自动控制压井系统	30	20~34	未出现压力大于 0.05 MPa 的超调情况	±0.010
自动控制压井系统	50	20~40	未出现压力大于 0.05 MPa 的超调情况	±0.015

2.2 连续目标压力曲线试验

压井过程中随着气体的运移、排出, 井筒含气率与节流压力会持续发生变化, 设计压井施工参数时可以根据关井立/套压、溢流情况对压井过程中的压力曲线进行计算。自动控制压井系统也可以通过导入目标压力与时间曲线, 实现对连续目标压力曲线的自动跟踪。

将模拟的工程师法压井的节流压力曲线导入系统中, 其中液相排量固定为 $16 \text{ m}^3/\text{h}$, 节流压力在 0~0.4 MPa 间连续变化, 气相排量在 0~250 L/min 间连续变化, 连续目标压力曲线跟踪试验结果如图 7 所示, 其中目标压力曲线为案例井实际压井过程中的压力变化曲线根据比例换算得到, 能够基本复现现场实际压井过程中的节流压力变化过程。

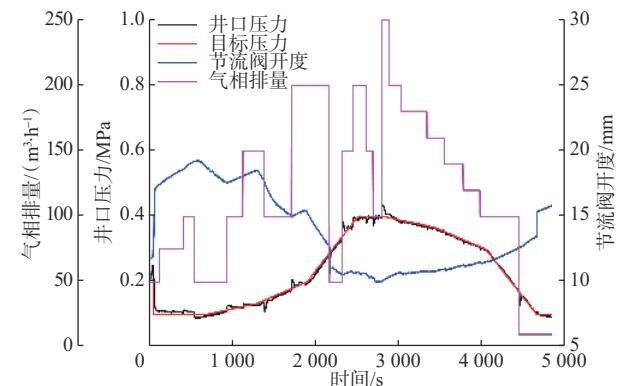


图 7 连续目标压力跟踪自动控制系统试验压力曲线

Fig.7 Test pressure curve of automatic control system with continuous target pressure tracking

自动控制系统在 150 s 时导入目标压力曲线,

开始对目标压力曲线进行跟踪。根据实际压井时井筒内的气体运移情况及目标压力变化,可以将试验过程分为 150~2 600 s 和 2 600~4 700 s 2 个阶段。

1) 150~2 600 s, 井筒中气体向上运移、膨胀, 目标压力逐渐增大, 试验过程中通过多次调节气相注入速率模拟含气率变化。在此阶段, 自动控制压井系统能够自动调节节流阀开度, 持续、稳定地跟踪目标压力曲线, 并且对于调节气相注入速率引起的压力波动, 能够在 15~30 s 内将节流压力恢复至目标压力附近, 目标压力跟踪过程中的压力波动范围为 ± 0.01 MPa。

2) 2 600~4 700 s, 节流压力达到最大值时, 逐渐降低气相注入速率模拟气体排出。此阶段目标压力缓慢下降, 自动控制压井系统仍然能够准确、稳定地跟踪目标压力曲线。

2.3 自动控制压井系统抗干扰试验

现场压井过程中存在压井排量变化或气体返出导致节流压力发生突变的情况。为分析自动控制压井系统在出现压力波动后的控制效果和抗干扰能力, 保持气相排量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 不变, 开展了固定目标压力的变液相排量试验, 试验结果如图 8 所示。

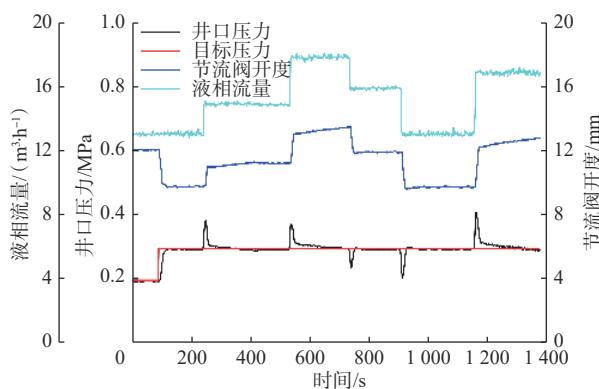


图 8 固定目标压力和变液相排量下自动控制压井试验的压力曲线

Fig.8 Pressure curve of automatic control killing test with fixed target pressure and variable liquid phase displacement

液相排量改变后, 节流压力会突增或突降。当节流压力与目标压力间的差值大于压力控制精度时, 自动控制压井系统迅速反应, 调节节流压力以较快速度恢复至目标压力范围内, 并快速趋于稳定。节流阀调节时间及压力波动情况见表 5, 其中节流阀调节时间在 20~30 s 之间; 液相排量、节流压力保持稳定后, 节流阀开度基本不发生变化, 压力波动范围为 ± 0.01 MPa; 且节流阀调节过程中节

流压力控制准确, 没有出现压力超调现象。

表 5 固定目标压力和变液相排量下自动控制压井系统的调节时间及压力波动

Table 5 Adjustment time and pressure fluctuation of automatic control killing system with fixed target pressure and variable liquid phase displacement

液相流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	调节时间/s	超调情况	压力波动范围/MPa
15	22		± 0.01
18	26		± 0.01
16	20	均未出现	± 0.01
13	24		± 0.01
17	26		± 0.01

3 结论与建议

1) 针对手动控制压井调节时间长、节流压力波动大等问题, 提出一种“PID+位移”双层协同反馈的自动控制方法, 建立了自动控制压井系统。

2) 物理模拟试验表明, 建立的自动控制压井系统具有良好的准确性、鲁棒性和抗干扰能力。压井过程中, 自动控制压井系统的节流阀开度调节时间、节流压力波动范围、控制稳定性均优于手动控制压井, 可以进一步提高压井效率。

3) 由于现有物理模拟试验系统的测试压力范围与现场压井时的实际压力相差较大, 后续需要进一步开展现场自动控制压井测试。

参 考 文 献

References

- [1] 何登发, 贾承造, 赵文智, 等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1162~1172.
HE Dengfa, JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, et al. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1162~1172.
- [2] 汪如军, 冯建伟, 李世银, 等. 塔北-塔中隆起奥陶系富油气三角带断裂特征及控藏分析 [J]. 特种油气藏, 2023, 30(2): 26~35.
WANG Rujun, FENG Jianwei, LI Shiyin, et al. Analysis on fault characteristics and reservoir control of Ordovician hydrocarbon-rich triangle zone in Tabei-Tazhong uplift[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(2): 26~35.
- [3] 连志刚, 常智勇, 李路路, 等. 玛东地区二叠系火山岩成藏特征及勘探潜力 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 57~65.
LIAN Zhigang, CHANG Zhiyong, LI Lulu, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration potential of Permian volcanic rocks in Madong area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 57~65.
- [4] 邓虎, 唐贵, 张林. 超深井高温高压井筒复杂流动压力演变规律

- 研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 111–120.
- DENG Hu, TANG Gui, ZHANG Lin. A study on evolution law of complex flow pressure in ultra-deep wells with high temperature and high pressure[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2023, 45(4): 111–120.
- [5] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 82–94.
- DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: current status, challenges and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 82–94.
- [6] 李文拓, 罗鸣, 黄洪林, 等. 高温高压小井眼水平井环空 ECD 综合计算模型 [J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(3): 259–268.
- LI Wentuo, LUO Ming, HUANG Honglin, et al. Comprehensive calculation model of annular ECD for high-temperature high-pressure slim-hole horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(3): 259–268.
- [7] 何立成, 唐波. 准噶尔盆地超深井钻井技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 1–8.
- HE Licheng, TANG Bo. The up to date technologies of ultra-deep well drilling in Junggar Basin and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 1–8.
- [8] 王建云, 韩涛, 赵宽心, 等. 塔深 5 井超深层钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 27–33.
- WANG Jianyun, HAN Tao, ZHAO Kuanxin, et al. Key drilling technologies for the ultra-deep Well Tashen 5[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 27–33.
- [9] 刘湘华, 杜欢, 刘彪, 等. 顺北Ⅳ号条带超深高温定向井钻井关键技术 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(6): 665–670.
- LIU Xianghua, DU Huan, LIU Biao, et al. Key technology of directional drilling in the ultra-deep high-temperature Ⅳ belt, the Shunbei Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 665–670.
- [10] 伍贤柱, 胡旭光, 韩烈祥, 等. 井控技术研究进展与展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 133–142.
- WU Xianzhu, HU Xuguang, HAN Liexiang, et al. Research progress and prospect of well control technology[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 133–142.
- [11] 王建云, 杨晓波, 王鹏, 等. 顺北碳酸盐岩裂缝性气藏安全钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 8–15.
- WANG Jianyun, YANG Xiaobo, WANG Peng, et al. Key technologies for the safe drilling of fractured carbonate gas reservoirs in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 8–15.
- [12] NADERI LORDEJANI S, BESSELINK B, SCHILDERS W H A, et al. Model complexity reduction and controller design for managed pressure drilling automation[J]. Journal of Process Control, 2023, 122: 69–83.
- [13] 刘彪, 潘丽娟, 王沫. 顺北油气田二区断控体油气藏井身结构设计及配套技术 [J]. 断块油气田, 2023, 30(4): 692–697.
- LIU Biao, PAN Lijuan, WANG Mo. Well structure design and supporting technology of fault-controlled reservoir of No.2 Block in Shunbei oil-gas field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(4): 692–697.
- [14] FENG Hao, YIN Chenbo, WENG Wenwen, et al. Robotic excavator or trajectory control using an improved GA based PID controller[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105: 153–168.
- [15] WANG Yunjing, HE Hongyun, QU Zhengwei. PSO-PID based temperature control method for Bifilar Helix Calculable Resistor[C]//2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2015: 722–725.
- [16] SHENASSA M H, KHAPOUR K. Knowledge base expert system for tuning PID controllers using wireless technology[C]//2008 International Conference on Computer and Communication Engineering. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2008: 310–313.
- [17] LIU Yanjie, XU Hao, ZHANG Yangguang. Burner-electrode position control of calcium carbide furnace based on BP-PID controller[C]//2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2017: 810–815.
- [18] LIANG Haibo, ZOU Jialing, ZUO Kai, et al. An improved genetic algorithm optimization fuzzy controller applied to the wellhead back pressure control system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106708.
- [19] 隋秀香, 李相方, 孙晓峰, 等. 高含硫气井计算机优化压井闭环控制系统 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 26–28.
- SUI Xiuxiang, LI Xiangfang, SUN Xiaofeng, et al. Closed-loop well control system with computer optimization for high sulfur gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 26–28.
- [20] 尹邦堂, 李相方, 隋秀香, 等. 计算机优化压井开环控制软件系统研究及应用 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(1): 110–114.
- YIN Bangtang, LI Xiangfang, SUI Xiuxiang, et al. Research and application of computer optimization open-loop well killing software system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(1): 110–114.
- [21] 王德玉, 刘绘新, 孟英峰, 等. 多级节流智能控制装置的研制 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(5): 82–84.
- WANG Deyu, LIU Huixin, MENG Yingfeng, et al. Development of multistage throttle intelligent control device[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(5): 82–84.
- [22] 金业权, 孙泽秋, 刘刚. 控压钻井液动节流压力控制系统仿真分析与试验研究 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 109–113.
- JIN Yeqian, SUN Zeqiu, LIU Gang. Simulation analysis and experimental study of managed pressure drilling hydraulic throttle pressure control system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 109–113.
- [23] 李轶明, 夏威, 罗方伟, 等. 司钻法自动化压井系统试验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 30–36.
- LI Yiming, XIA Wei, LUO Fangwei, et al. Experimental study on automatic well killing system of driller's method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(3): 30–36.
- [24] 张锐尧, 李军, 柳贡慧, 等. 基于 AMESim 的节流阀自动控制系统 [J]. 石油机械, 2021, 49(4): 35–43.
- ZHANG Ruiyao, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Automatic throttle control system based on AMESim[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(4): 35–43.
- [25] 金晶, 梁宗辉, 路登明. PID 算法在电液执行机构中的应用研究 [J]. 液压气动与密封, 2023, 43(10): 50–54.
- JIN Jing, LIANG Zonghui, LU Dengming. Study on application of PID algorithm in electro-hydraulic actuator[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(10): 50–54.