

精细控压多级并联节流管汇系统研究

张 涛¹, 柳贡慧^{1,2}, 李 军¹, 蒋记伟¹, 张 磊¹, 刘 伟³

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 北京信息科技大学, 北京 100192; 3. 中国石油大港油田公司石油工程研究院, 天津 300280)

摘要: 现代精细控压钻井中, 由于节流阀的压力调节特性与节流阀开度之间存在较强的非线性关系, 现有的节流管汇很难通过单个节流阀实现全开度范围内的精确调节。为了能使普通节流阀满足回压控制精度的要求, 提出了利用并联节流管汇实现回压精细控制的思路, 并对并联管路的流动特性进行了研究, 模拟了四支路并联节流管汇精确控制井口回压的工作过程, 分析了并联节流管汇的压力调节特性。与传统节流管汇相比, 并联节流管汇具有压力调节特性曲线线性度良好、调节区间大、调节精度高、对节流阀精度要求低、使用寿命长等优点, 能获得显著的经济效益, 具有较大的工程应用价值, 为进一步研究精细控压钻井及其地面控制系统提供了一定的技术参考。

关键词: 控压钻井 节流阀 压力特性 并联管路 井口回压

中图分类号: TE21 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2012)02-0098-06

Research on Multi-Level Parallel Choke Manifold System

Zhang Tao¹, Liu Gonghui^{1,2}, Li Jun¹, Jiang Jiwei¹, Zhang Lei¹, Liu Wei³

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Beijing Information Science and Technology University, Beijing, 100192, China; 3. Petroleum Engineering Research Institute, Dagang Oilfield Company, Tianjin, 300280, China)

Abstract: Modern precise managed pressure drilling technology proposes higher requirements on control accuracy of wellhead back pressure, but because of intense nonlinear relationship between pressure regulation characteristic and opening presented on throttle valve, it is difficult to achieve accurate regulation through single throttle valve within the scope of full opening for the current choke manifold. In the purpose of meeting the requirements of control accuracy of back pressure with traditional throttle valves, based on the research of flowing characteristic of parallel pipelines, this paper put forwards a thinking of realizing fine back pressure control by means of parallel choke manifold, and the pressure regulation characteristic of parallel choke manifold was analyzed by simulating the working process of parallel choke manifold with four branches that accurately control wellhead back pressure. Compared with the traditional choke manifold, parallel choke manifold has good linearity of characteristic curve on pressure regulation, larger regulation range, higher regulation accuracy, lower accuracy demand and longer service life of throttle valves and other obvious advantages, which have significant engineering meaning and economic benefit. This provides some technical references for further study on fine managed pressure drilling and ground control system.

Key words: managed pressure drilling; throttle valve; pressure characteristic; parallel pipelines; wellhead back pressure

现代控压钻井技术对井口回压控制的要求越来越高, 地面节流不再是以处理高压差(50, 70 MPa)为首要目标, 而是要求提高井口回压的控制精度(井口回压控制精度要求在 0.3 MPa 以内)^[1-5]。控压钻井过程中, 通过自动节流管汇控制井口回压, 从而间接控制井底压力^[6-11]。目前使用的节流管汇, 通常是将一个节流阀或者将多个节流阀串联在一起^[12-17]。对于只有一个节流阀的节流管

收稿日期: 2011-09-30; 改回日期: 2012-02-16。

作者简介: 张涛(1983—), 男, 河北河间人, 2007 年毕业于中国石油大学(华东)自动化专业, 在读博士研究生, 主要从事压力管理钻井理论、控压钻井节流管汇、随钻测量工具方面的研究。

联系方式: (010)89731225, chonpdy@163.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层钻井压力系统模型与规律”(编号: 2010CB226704), 国家科技重大专项项目子课题“窄密度窗口安全钻井技术与配套装备”(编号: 2011ZX05021-003)和国家自然科学基金项目“气体循环钻井动态流动理论及携岩能力研究”(编号: 50974021)资助。

汇,由于节流阀压力调节特性具有很强的非线性,对井口回压的控制精度有限,而且较高的压差作用于节流阀两端,大大缩短了节流阀的使用寿命。使用多个节流阀串联组成的节流管汇,由多个节流阀共同承担井口回压,每个节流阀两端的压差降低,可大幅度提高节流能力,解决了超高压地层控井时压井能力差、可靠性低的缺点,提高了节流压井的可靠性。但是串联管路中通过每个节流阀的钻井液流量相同,节流阀在小开度区间时钻井液流速较高,对节流阀冲蚀严重,影响了节流阀的寿命^[18-19]。针对目前节流管汇控制精度低,节流阀易损等问题,提出通过并联多个节流阀的方式实现井口回压精细控制。

1 节流管汇水力特性分析

1.1 传统节流管汇压力调节特性

传统的节流管汇只使用一个节流阀来调节压力,该节流阀前后管路通径相等。根据伯努利方程,得到节流阀两端的压差计算公式为^[20-23]:

$$\Delta p = \zeta_v \frac{Q^2 \rho}{2 A^2} \quad (1)$$

式中: Δp 为节流阀两端压差, Pa; Q 为管路中流体流量, m^3/s ; ζ_v 为节流阀局部阻力系数, 是关于节流阀开度 $\frac{l}{L}$ 的函数, 严格意义上讲还与流体雷诺数有关, 但节流管汇中流体一般为紊流状态, 可认为节流阀局部阻力系数与雷诺数无关; l 为节流阀阀杆位移, m; L 为节流阀阀杆可移动的最大位移, m; A 为节流阀后某点所在截面的流通面积, m^2 ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

在不影响定性分析节流阀压力调节特性的前提下, 式(1)忽略了节流管汇的沿程阻力及节流阀外的其他局部水头损失。根据节流阀流量特性公式, 可以推导出节流阀任意位置阻力系数与开度的关系:

$$\frac{\zeta_v}{\zeta_{100}} = \frac{1}{f^2 \left(\frac{l}{L} \right)} \quad (2)$$

式中: ζ_{100} 为节流阀在 100% 开度时的阻力系数; 函数 $f \left(\frac{l}{L} \right)$ 由阀芯和阀座形状决定, 实际工程中一般分为快开特性、直线特性、抛物线特性和等百分比特性。

将式(2)代入式(1)得:

$$\Delta p = \frac{\zeta_{100}}{f^2 \left(\frac{l}{L} \right)} \frac{Q^2 \rho}{2 A^2} \quad (3)$$

由式(3)可知, 当流量一定时, 可以通过改变节流阀开度改变阀前压力大小。根据节流阀开度与阀前压力绘制节流阀压力调节特性曲线。流量改变时, 不同的流量对应的压力调节特性曲线不同。

设定 ζ_{100} 为 1, 管路内径为 38 mm, 流体介质为水, 阀门为等百分比特性, 利用式(3)计算流量分别为 50, 100 和 200 m^3/h 时节流阀的压力调节特性曲线, 结果如图 1 所示。

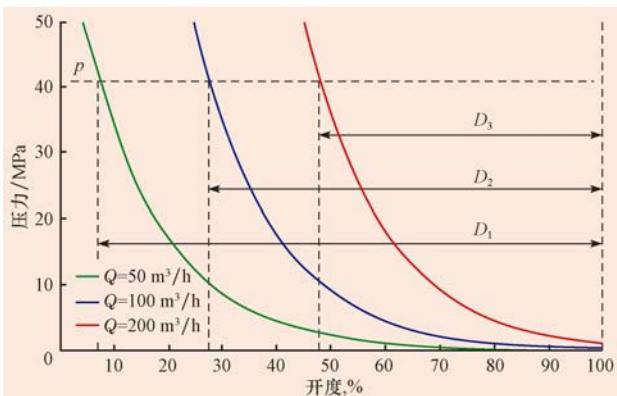


图 1 不同流量下的节流阀压力特性曲线

Fig. 1 Pressure characteristics curve of throttle pressure at different flow rates

从图 1 可以看出: 1) 流量一定时, 阀前压力与开度呈非线性关系, 在自动控制系统中大开度区间调节精度高, 但调节不灵敏, 小开度区间调节灵敏, 但精度低, 容易超调; 2) 不同流量下节流阀的压力调节特性曲线不同, 调节节流阀从最小压力开始至一定的压力 p , 在不同流量时所需节流阀的开度不同, 因而节流阀阀芯的动作行程也不相同。在图 1 中, D_1 , D_2 , D_3 是流量分别为 50, 100, 200 m^3/h 时节流阀从最小压力调节至压力 p 时所需的行程。假如 p 为控压钻井作业中所需控制的最高压力, 则节流阀工作范围被限定在一定开度区间内。

在传统节流管汇中增加一个节流阀, 与原节流阀组成串联管路, 即串联节流管汇。串联节流管汇将回压分为 2 部分, 分别由 2 个节流阀控制, 每个节流阀压力特性曲线与单个节流阀相同。利用节流阀在大开度区间调节精度高的特点, 使每一个节流阀尽量在大开度区间工作, 以保证控制精度。

1.2 并联节流管汇压力调节特性

并联节流管汇是由 2 个或 2 个以上节流阀并联

组成的节流管汇。以4条支路并联的节流管汇为例,节流管汇由一条主调节支路和3条副调节支路组成。其中,主调节支路节流阀为 F_1 ,副调节支路节流阀分别为 F_2, F_3, F_4 (如图2所示)。

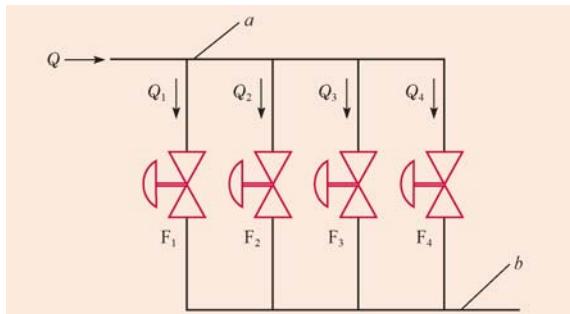


图2 并联节流管汇示意

Fig. 2 Schematic diagram of parallel choke manifolds

多级并联节流管汇中各个管路较短,水力学计算中可以忽略沿程摩阻,只考虑局部水头损失,并且在不影响定性分析的情况下,只考虑节流阀处的局部水头损失,因此并联节流管汇中各条支路的阀前压力及阀后压力均相等。由于管内流体远小于音速,视为不可压缩流体,则每条支路中局部水头损失为:

$$h_{fi} = \zeta_{Vi} \frac{v_i^2}{2g} \quad (4)$$

式中: h_{fi} 为第*i*条支路的节流阀局部水头损失,m; ζ_{Vi} 为第*i*条支路的节流阀局部阻力系数; v_i 为第*i*条支路管路中节流阀后的流体速度,m/s。

根据并联管路的2个特点:

$$h_{f1} = \dots = h_{fi} = \dots = h_{fn} \quad (5)$$

$$Q = Q_1 + \dots + Q_i + \dots + Q_n \quad (6)$$

结合伯努利方程可得:

$$Q_i = \frac{Q}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{\zeta_{Vj}}{\zeta_{Vi}}}} \quad (7)$$

式中: Q_i 为并联管路中第*i*条支路的流量,m³/s; ζ_{Vi}, ζ_{Vj} 分别为并联管路中第*i, j*条支路节流阀的阻力系数;*n*为并联管路的总支路数量。

在四支路并联节流管汇中,根据式(3)可以计算阀前压力:

$$\Delta p = \frac{\zeta_{100}}{f^2 \left[\frac{l_1}{L} \right]} \frac{Q^2}{\left[\sum_{j=1}^4 \frac{f(l_j/L)}{f(l_1/L)} \right]^2} \frac{\rho}{2A^2} \quad (8)$$

由式(8)可知,当通过并联节流管汇的总流量固定时,通过主调节支路的流量不仅与主节流阀 F_1 的开度有关,还与副节流阀 F_2, F_3, F_4 的开度有关。因

此,虽然通过并联节流管汇的总流量不变,但在节流阀 F_1 的开度减小过程中,通过主调节支路的流量也在减小。另外,由图1可知,流量不同时,节流阀的压力调节曲线不同,因此并联节流管汇压力特性曲线随节流阀 F_1 的开度变化,会穿过不同流量下的节流阀压力曲线(见图3)。

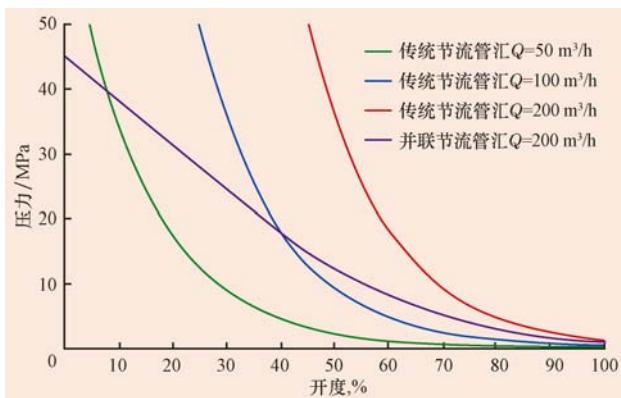


图3 并联节流管汇压力调节特性曲线

Fig. 3 Curve on pressure regulation characteristic of parallel choke manifolds

由图3可知,与大流量($Q=200 \text{ m}^3/\text{h}$)下的压力特性曲线相比,并联节流管汇节流阀压力特性曲线扩大了可调范围;与小流量($Q=50 \text{ m}^3/\text{h}$)下节流阀压力特性曲线相比,并联节流管汇节流阀压力特征曲线优化了线性度。

副调节支路节流阀 F_2, F_3, F_4 的开度同样影响主调节支路中流体流量,因此也会对并联节流管汇压力特性曲线产生影响。

并联节流管汇中,主调节支路与副调节支路的作用不同。主调节支路作为精细调节支路,工作时节流阀 F_1 的开度可以任意调节。副调节支路作为分流支路,在节流管汇工作之前,为副调节支路节流阀 F_2, F_3, F_4 设定一个合适开度并固定其值。节流管汇工作时,节流阀 F_2, F_3, F_4 只处于“开、关”状态。“开”状态指节流阀打开,开度为之前设定的“合适开度”;“关”指节流阀全部关闭。节流阀 F_2, F_3, F_4 的开度对并联节流管汇压力特性曲线影响表现在可控的最大值不同。图4描述了节流阀 F_3, F_4 关闭时,节流阀 F_2 的不同开度对压力特性曲线的影响。

从图4可以看出,副调节支路节流阀 F_2 的不同开度对节流管汇压力特性有较大影响。 F_2 全部关闭时(相当于单节流阀工作),压力特性曲线非线性程度最强,可控最高压力最高; F_2 开度依次变为30%,50%,70%时,曲线的最高可控压力逐渐降低,

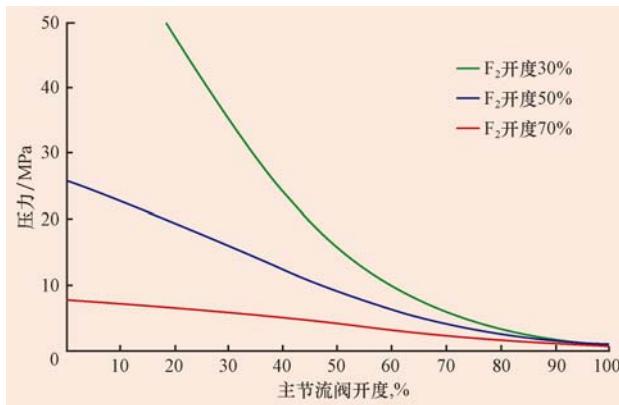


图4 副支路对压力特性的影响

Fig. 4 Effect of side branch on pressure characteristic

非线性程度逐渐减弱。由此可见,调节副调节支路节流阀开度的大小,可以控制节流管汇压力特性曲线的线性度和最高可控压力。

表1 并联节流管汇工作状态

Table 1 Working state of parallel choke manifolds

工作状态	主节流阀 F ₁	副节流阀			工作区间	压力区间
		F ₂	F ₃	F ₄		
状态 1	开	开	开	开	线段 1'	Δp ₁
状态 2	开	开	开	关	线段 2'	Δp ₂
状态 3	开	开	关	关	线段 3'	Δp ₃
状态 4	开	关	关	关		

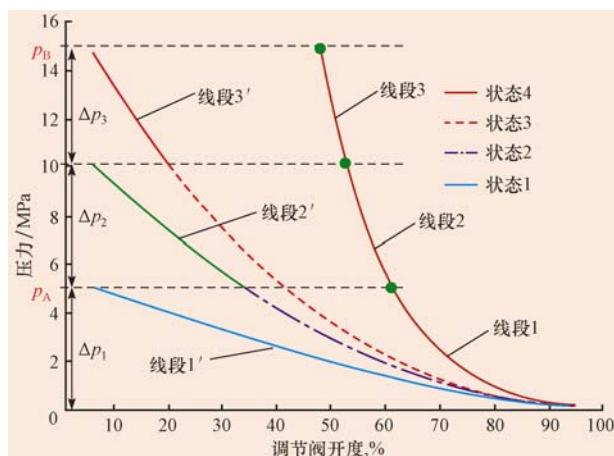


图5 并联节流管汇工作方式对比

Fig. 5 Comparison of working modes on parallel choke manifolds

定,正常工况时井口回压在 $0 \sim p_A$ 以内,并联节流管汇工作在状态 1,副节流阀 F₂,F₃,F₄ 全部处于“开”状态,管汇压力特性曲线为线段 1',而相同压力区间内普通节流管汇压力特性曲线为线段 1。对比分析,线段 1' 中节流阀开度范围明显大于线段 1,同时线段 1' 线性度明显优于线段 1,对井口回压的控制精度得到提高。状态 1 为自动并联节流管汇的主要工作状态,在钻井液排量较大、井口回压要求较

2 并联节流管汇工作方式

在实际控压钻井作业中,所需要的井口回压要求控制在一定范围内。根据 3 个副支路节流阀的开关状态,将并联节流管汇划分为 4 个工作状态(见表 1),不同的工作状态对应不同的最高可控压力(如图 5 所示)。为副调节支路节流阀 F₂,F₃ 和 F₄ 设定合适的开度,使压力区间 Δp_1 , Δp_2 和 Δp_3 大致相等。

图 5 中,副调节支路节流阀的开关组合不同,并联节流管汇有不同的压力特性曲线,状态 4 时并联节流管汇中只有主节流阀 F₁ 工作,此时与传统单节流阀节流管汇压力特性相同。

假设钻井作业过程中,钻井液流量 Q 维持恒

低时,并联节流管汇具有明显的优势。

当需要控制井口回压在 $p_A \sim p_B$ 之间时,并联节流管汇依次关闭 F₄,F₃,节流管汇工作在状态 2 和状态 3。对比线段 2' 与线段 2、线段 3' 与线段 3,井口回压在 $p_A \sim p_B$ 区间时,使用普通节流管汇,节流阀动作行程短,控制精度低。并联节流管汇有效扩大了节流阀调节行程,优化了压力特性曲线的线性度,因此控制效果明显优于普通节流管汇。

当需要更高的井口回压时,关闭 F₂,F₃,F₄,并联节流管汇工作在状态 4。F₁ 处于小开度范围内,主要控制井口钻井液流量。此时并联节流管汇工作效果与普通节流管汇工作效果一样。

3 并联节流管汇室内试验

为了更好地对并联节流管汇压力调节特性进行分析,利用研制的 4 支路多级并联节流管汇进行室内试验。

试验中使用柱塞泵,排量为 $56 \text{ m}^3/\text{h}$,保证流体流量稳定,流体介质为水。测控系统可以测量节流管汇前后及每条支路节流阀前后的压力、流体温度和流量等参数,可以控制节流管汇中每条支路的节

流阀开度。

进行并联节流管汇自动控制试验时,由于4条支路组合方案过多,因此试验中关闭副支路节流阀 F_3, F_4 ,只选择 F_1, F_2 支路进行试验分析。试验

分为A—F 6个部分,压力控制范围设定为0~1 MPa,其中A,B部分为手动控制状态,C—F为自动控状态。具体试验内容及试验结果如图6所示。

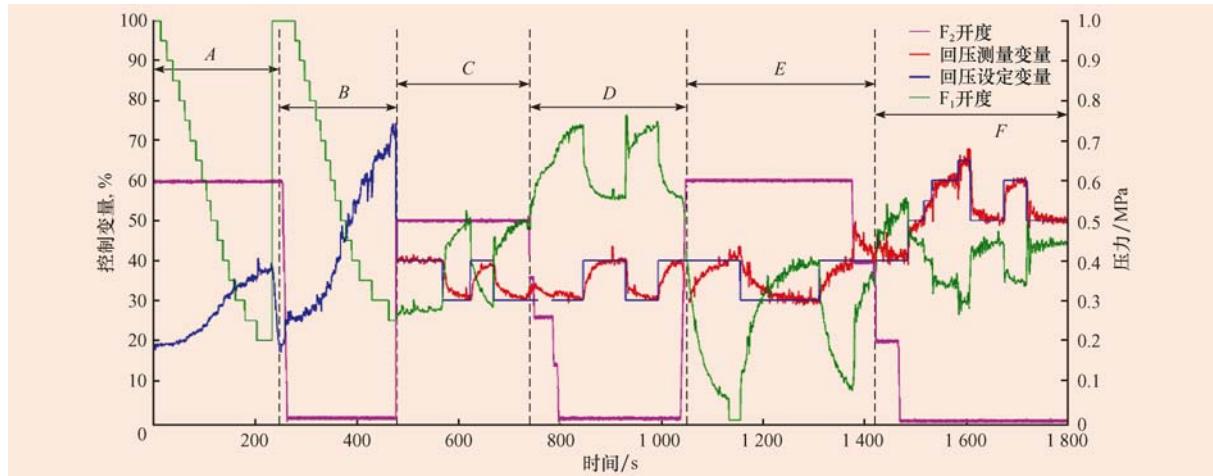


图6 并联节流管汇自动控制试验

Fig. 6 Automatic control experiment of parallel choke manifolds

A:当副节流阀 F_2 开度为60%时,逐渐减小主节流阀 F_1 的开度,回压测量变量逐渐升高,但压力变化幅度有限;

B:当副节流阀 F_2 关闭时,逐渐减小主节流阀 F_1 的开度,压力测量变量逐渐升高;与A部分相比,压力变化幅度大幅增加;

C,D:改变回压设定变量,控制系统通过调节主节流阀 F_1 的开度控制回压测量变量达到回压设定变量; F_2 的开关状态不同时, F_1 的开度也不同;

E:当 F_2 开度为60%,回压设定变量为40%时,为了控制回压测量变量达到回压设定变量,需要 F_1 开度接近0;即 F_2 打开(60%)时,并联节流管汇的最高控制压力为40%(0.4 MPa);

F:关闭 F_2 ,可提高压力控制范围,但控制精度降低。

由以上试验结果可知,并联节流管汇的主节流阀可以在0~100%的开度区间内工作,以保证节流管汇工作安全。改变副节流阀的开度,可以控制节流管汇的最高控制压力,得到最优的控制精度,降低对节流阀质量的要求。

4 结 论

1) 理论分析与试验对比表明,在相同流量情况下,对于相同的控制压力范围,使用相同的节流阀,与传统节流管汇相比,并联节流管汇节流阀动作行

程得到延长,压力调节特性曲线的线性度得到提高,且回压控制精度可达到0.1 MPa。

2) 由于并联节流管汇存在多条支路,通过节流管汇的总钻井液流量被多个支路分流,与传统节流管汇相比支路流量减少,减弱了钻井液对节流阀的冲击磨损,延长了节流阀使用寿命,降低了节流阀的精度要求。

3) 将钻井作业工况进行分级,针对每种工况制定相应的工作状态,对井口回压进行针对性地控制,提高控制效率和控制精度。

4) 与传统节流管汇相比,并联节流管汇结构复杂,影响其数学模型的因素较多,对控制系统及控制算法提出了更高的要求。

参 考 文 献

References

- [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.
- [2] 聂兴平,陈一健,孟英峰,等.控制压力钻井技术现状和发展策略[J].钻采工艺,2010,33(2):38-39.
Nie Xingping, Chen Yijian, Meng Yingfeng, et al. Status quo and development of managed pressure drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(2): 38-39.
- [3] 陶谦,柳贡慧,邹军,等.泥浆帽钻井关键技术研究[J].钻采工艺,2010,33(2):1-4.

- Tao Qian, Liu Gonghui, Zou Jun, et al. Study on the key technology of mud cap drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(2): 1-4.
- [4] 周英操, 杨雄文, 方世良, 等. 窄窗口钻井难点分析与技术对策[J]. 石油机械, 2010, 38(4): 1-7.
- Zhou Yingcao, Yang Xiongwen, Fang Shiliang, et al. An analysis of the difficulties in narrow window drilling and technical solutions[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(4): 1-7.
- [5] SY/T 5323—2004 节流和压井系统[S].
SY/T 5323—2004 Throttle and kill system[S].
- [6] Santos H, Reid P, Jones J, et al. Developing the micro-flux control method: part 1: system development, field test preparation, and results[R]. SPE 97025, 2005.
- [7] Santos Helio, Catak Erdem, Kinder Joe, et al. Kick detection and control in oil-based mud: real well-test results using microflux control equipment[R]. SPE 105454, 2010.
- [8] Santos H, Leuchtenberg C, Reid P, et al. Opening new exploration frontiers with the micro-flux control method for well design[R]. SPE 16622, 2004.
- [9] Finley Doug, Shayegi Sara, Ansah Joe, et al. Reservoir knowledge and drilling-benefits comparison for underbalanced and managed pressure drilling operations[R]. SPE 104465, 2006.
- [10] Santos Helio, Muir Ken, Sonnemann Paul. Optimizing and automating pressurized mud cap drilling with the micro-flux control method[R]. SPE 116492, 2008.
- [11] Calderoni Angelo, Girola Giorgio, Maestrami Michele. Microflux control and E-CD continuous circulation valves allow operator to reach HPHT reservoirs for the first time[R]. SPE 122270, 2009.
- [12] 朱丽华, 向雪琳, 邓玉涵, 等. 控制压力钻井设备概述[J]. 钻采工艺, 2010, 33(3): 43-47.
- Zhu Lihua, Xiang Xuelin, Deng Yuhuan, et al. Summarization of managed pressure drilling equipment[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(3): 43-47.
- [13] 赵庆, 王凯, 郭庆丰, 等. 用于控压钻井的新型节流管汇: 中国, 200920246846.8[P]. 2010-08-11.
- Zhao Qing, Wang Kai, Guo Qingfeng, et al. New choke manifold for controlled pressure drilling: China, 200920246846.8 [P]. 2010-08-11.
- [14] 周英操, 蒋宏伟, 王凯, 等. 一种钻井环空压力精细控制系统: 中国, 201020108986.1[P]. 2010-09-29.
- Zhou Yingcao, Jiang Hongwei, Wang Kai, et al. One kind of precise control system for annular pressure: China, 201020108986.1[P]. 2010-09-29.
- [15] 方世良, 杨雄文, 王凯, 等. 一种具有双级节流功能的控压钻井节流装置: 中国, 201020270446.3[P]. 2011-03-30.
- Fang Shiliang, Yang Xiongwen, Wang Kai, et al. A kind of throttle device with two-stage throttling function for control pressure drilling: China, 201020270446.3[P]. 2011-03-30.
- [16] 刘绘新, 孟英峰, 唐继平, 等. 油气井多级节流压井系统研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 63-65.
- Liu Huixin, Meng Yingfeng, Tang Jiping, et al. Research on multi-stage choking & killing system of oil and gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(8): 63-65.
- [17] 丁振龙. 新型多级节流压力控制系统研究[D]. 成都: 西南石油大学石油工程学院, 2006.
- Ding Zhenlong. Study of new multi-stage choke pressure control system[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, College of Petroleum Engineering 2006.
- [18] 张祥来. 固定节流阀特性研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 63-65.
- Zhang Xianglai. Study on features of fixed throttle valve[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 63-65.
- [19] 陈惠玲. 节流管汇存在的问题及改进措施[J]. 天然气工业, 1998, 18(4): 91-92.
- Chen Huiling. Problems and improvement measures of choke manifold[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(4): 91-92.
- [20] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 52-125.
- Yuan Enxi. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 52-125.
- [21] Lyons J L. 阀门技术手册[M]. 袁玉求, 译. 北京: 机械工业出版社, 1991: 52-71.
- Lyons J L. Lyons valve designer's handbook[M]. Translater: Yuan Yuqiu. Beijing: China Machine Press, 1991: 52-71.
- [22] 杨纪伟, 张丽荣. 调节阀阻力特性分析[J]. 阀门, 2001(2): 22-24.
- Yang Jiwei, Zhang Lirong. Analysis on characteristics of flowing resistance of reguator[J]. Valve, 2001(2): 22-24.
- [23] 杨纪伟. 管路流量的阀调节特性分析[J]. 水道港口, 1994(3): 29-34.
- Yang Jiwei. Analysis on regulation characteristics of regulator of pipe flow[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1994(3): 29-34.