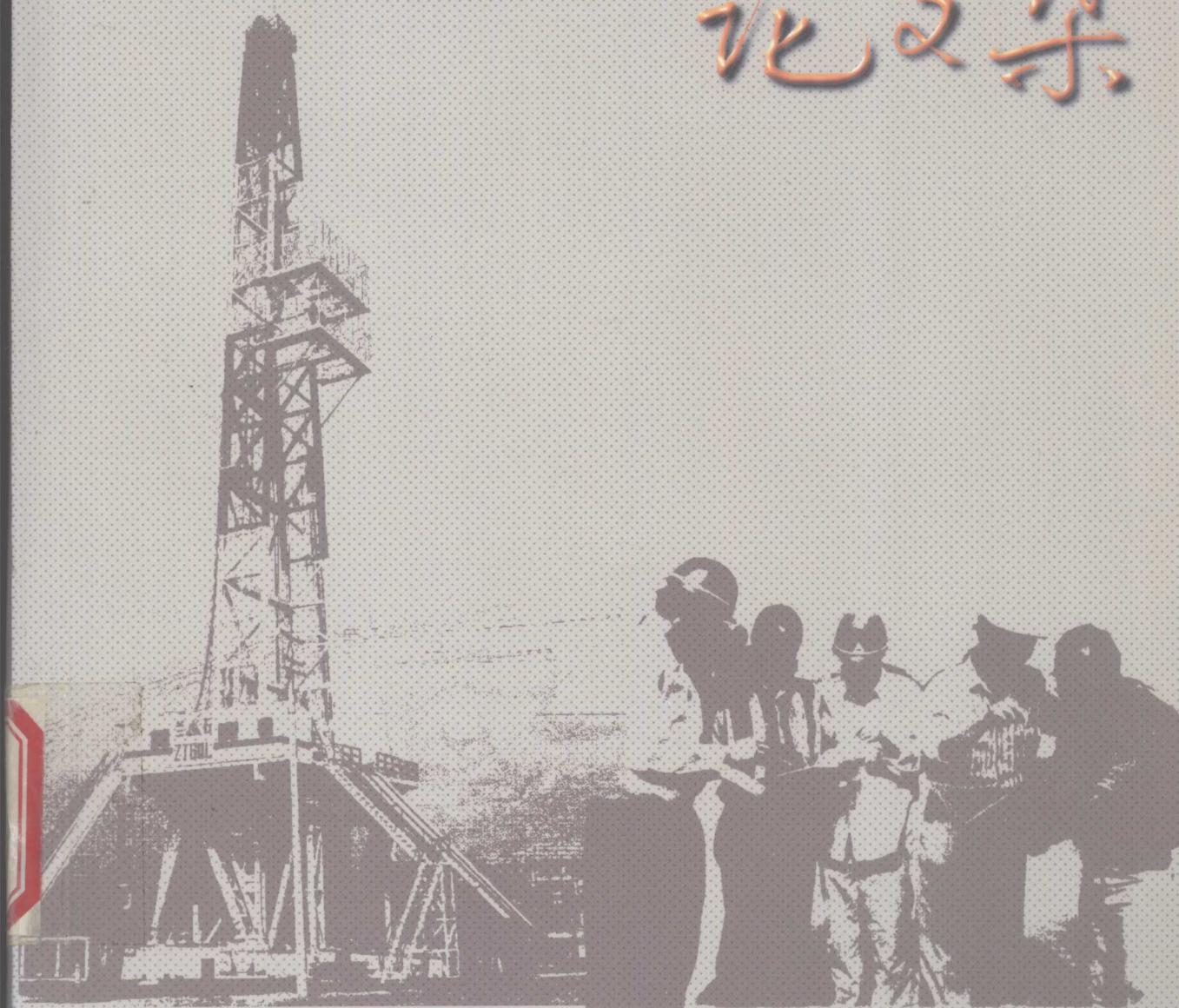


《第四届石油钻井院所长会议论文集》编委会 编



第四届石油钻井院所长会议

论文集



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

图书在版编目 (CIP) 数据

第四届石油钻井院所长会议论文集/《第四届石油钻井院所长会议论文集》编委会编. —北京: 石油工业出版社, 2004. 12

ISBN 7-5021-4834-5

I. 第…

II. 第…

III. 油气钻井-学术会议-文集

IV. TE2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 122947 号

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.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 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 30

字数: 768 千字 印数: 1—1200 册

定价: 88.00 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

《第四届石油钻井院所长会议论文集》

编 委 会

主 任：孙 宁

副主任：于洪金 罗平亚 沈忠厚 林鹤林 苏义脑

成 员：（按姓氏笔画顺序）

弓玉杰	马宗金	丰全会	申瑞臣	孙星云	刘乃震
刘硕琼	刘延平	刘广华	许树谦	杨 龙	杨智光
陈 光	李作宾	李雪辉	周英操	欧阳坚	张嵇南
张彦平	张 镇	林 建	屈建省	郑新权	胡世杰
赵 林	高向前	高德利	阎 铁	韩来聚	曾义金
潘卫国	魏淋生				

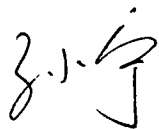
序 言

从 2003 年开始,我国已经取代日本,成为继美国之后世界第二大石油进口国。能源特别是石油,已经成为制约我国国民经济发展的主要瓶颈,国家石油安全战略已经启动。到 2020 年,我国国民经济要实现翻两番的目标,这比以往任何时候都需要能源,尤其是油气能源的支撑。目前无论世界范围,还是我国,石油勘探开发都进入了复杂地貌、复杂地质条件、目的层位更深、水深更深的区域,因此,石油工业的发展也比以往任何时候都需要钻井技术的支持。在石油天然气勘探开发生产中,40%~60%的投资都用在钻井作业上。对于油公司来说,提高投资效益的关键,就是如何利用钻井作业更有效地开发油气藏、提高单井产量、降低吨油成本。对作业公司来说,利用先进的技术,提高钻井效率,降低钻井成本,是提高市场竞争力最重要的途径。50 多年来,特别是进入市场经济的竞争环境后,钻井技术发展对石油勘探开发的贡献证明了这一点,这也是大家的共识。

当前我们油田的勘探开发主要面对 4 个难题:一是深探井周期长、钻速慢、成本高;二是低渗油气田单井产量低,需要进一步降低钻井成本;三是井漏、井斜等复杂问题仍然制约着一些地区的钻井速度;四是储层保护还不尽完善。针对上述问题,近几年来,在钻井方面,我们着重开展了 6 项技术的研究开发。这 6 项技术分别是:欠平衡钻井配套技术、气体钻井完井配套技术、小井眼钻井完井配套技术、水平井和分支井钻井技术、大位移钻井完井配套技术,以及保护油层钻井完井配套技术。另外,我们还在探索四项前沿技术,包括地质导向钻井技术、膨胀管钻井技术、套管钻井完井技术和井下增压超高压喷射钻井技术。

目前,钻井技术的发展对勘探开发所起的作用和意义已经大大超出了以往人们的想象,形成了新技术引导市场、创造新市场的局面。以降低吨油成本为目标的新技术层出不穷,不断改变着石油科技工作者的理念和思路。同时,由于经济全球化的趋势,我国的钻井技术从单纯学习、引进国外技术,向走出国门、输出自主技术的方向发展。钻井装备的出口、钻井专业队伍在国外的辉煌成就,以及越来越多的具有自主知识产权的专利和专有技术的成功应用,就体现了这一点。

谈行业的发展不能离开对全行业技术了解和交流,因此,在“十五”即将结束,规划“十一五”发展蓝图的时机,加强行业的沟通 and 了解,就显得十分迫切。通过石油工程学会这个载体,召开由中石油、中石化、中海油三大公司所属石油钻井院所长会议,是探索三大公司进行行业技术交流的有益尝试,得到了三大公司所属钻井院所的热情呼应和支持。本次会议提交的 50 多篇论文基本上反映了我国近几年石油钻井方面的科研成果,为了更好地发挥这些论文作用,对这些论文进行少量修改后由石油工业出版社正式出版。



2004 年 2 月

目 录

大庆油田欠平衡钻井技术·····	(1)
四川欠平衡钻井技术·····	(16)
欠平衡钻水平井技术对策及应用 ·····	(21)
空气、泡沫钻井技术在大尺寸复杂井眼中的应用 ·····	(32)
全过程欠平衡钻井技术在夏 72 井的应用 ·····	(39)
充氮气欠平衡钻井技术研究与应用·····	(46)
隆 9 井空气、雾化、泡沫钻井技术·····	(51)
利用水平井及侧钻井技术提高低渗透油田开发效果·····	(62)
深层短半径水平井钻井工艺技术·····	(67)
冀东油田水平井、大位移井钻井技术·····	(76)
大港油田定向井水平井技术·····	(89)
江苏油田小断块油藏水平井钻井技术的应用·····	(103)
侧钻井技术在辽河油田的应用·····	(113)
辽河油田水平井技术研究与应用·····	(122)
辽河油田多分支井技术发展与应用·····	(130)
胜利油田水平井大位移井技术·····	(140)
鄂西渝东海相及江汉膏盐地层水平井井眼轨迹控制技术·····	(147)
空气随钻震击器的研制·····	(161)
低密度水泥浆技术·····	(166)
国内外固井技术发展状况·····	(181)
小井眼井固井水泥浆技术·····	(193)
大庆油田调整井固井技术·····	(210)
超高密度水泥浆固井技术·····	(220)
胶乳对水泥浆性能影响的实验研究·····	(236)
适合于深井、复杂井的新型固井工具的研制与应用·····	(240)
新星公司主要探区提高固井质量技术研究·····	(250)
辽河油田稠油热采井钻完井技术·····	(262)
井壁失稳准则研究及其在苏里格气田的应用·····	(270)
库西地区气藏伤害因素、机理及保护技术研究·····	(277)
塔北复合盐岩层和高压盐水层钻井液技术·····	(285)
大庆油田钻井液技术·····	(296)
深部盐膏层蠕变压力研究与应用·····	(308)
大庆油田保压取心及岩心分析技术·····	(315)
辽河钻井取心技术·····	(322)
松散地层取心技术·····	(328)

套管钻井技术研究及试验..... (333)

可膨胀管技术..... (338)

套管钻井技术..... (343)

长庆特色钻井技术..... (348)

积木式涡轮钻具配合钻头综合选型应用技术..... (356)

反循环钻井技术..... (362)

复杂油气井工程理论和方法研究进展..... (367)

国外钻井完井技术新进展..... (378)

打造国际劲旅，努力开创国际钻井市场新局面..... (392)

大位移井钻井新技术及新进展..... (402)

大位移井钻柱的“粘滞—滑动”规律分析..... (418)

小拐油田提高开发效益钻井技术探讨..... (423)

钻机井架底座的现状与发展..... (430)

川石牌钻头的创新与成果..... (439)

地下储气库工程技术..... (443)

双向开窗径向水平井钻井技术研究..... (457)

油井管工程的现状、发展及其展望..... (461)

大庆油田欠平衡钻井技术

周英操 王广新 翟洪军 耿晓光 鹿志文 和传健

(大庆石油管理局钻井工程技术研究院)

摘 要 大庆油田在室内研究及现场实践的基础上形成了一套适合大庆长垣东部火山岩储层地质特点的欠平衡钻井完井配套工艺技术。本文较详细地总结了大庆油田欠平衡钻井设备的配置状况, 欠平衡钻井工艺技术, 欠平衡水包油钻井液体系, 欠平衡完井工艺技术, 并通过探井欠平衡钻井实例, 详细说明了大庆油田应用欠平衡钻井技术所取得的技术经济效果。

针对大庆油田深层勘探的需要,大庆石油管理局钻井工程技术研究院开展了欠平衡钻井工艺及配套技术研究,引进了两套欠平衡钻井设备,并于 2000—2003 年在大庆长垣东部完成了宋深 101 井等 8 口欠平衡深层气探井的钻井现场施工(见表 1),形成了一套适合于大庆油田的欠平衡钻井技术,取得了较好的勘探效果。

表 1 8 口欠平衡井基础数据

[illegible]

续表

钻井液 相对密度	0.91~ 0.94	0.91~ 0.94	0.91~ 0.92	0.91~ 0.94	0.92~ 0.94	0.92	0.90	0.93~ 0.96
完井方法	尾管固井				生产套管固井		尾管固井	

一、大庆油田长垣东部实施欠平衡钻井的地质分析

大庆长垣东部目前的重点是勘探深层气，主要目的层为：泉二段、泉一段、登四段、登三段、登二段、侏罗系。在井深方面，泉头组顶界 1808~1837m，登娄库组顶界 2658~2702m，侏罗系顶界 2909~2967m，总体上比较稳定。泉头组岩性以泥岩、油页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩为主；登娄库组岩性以泥岩、油页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、粗砂岩为主；侏罗系岩性大致可分为两套，上部主要为凝灰岩、流纹岩、安山岩等酸性喷发岩，下部为砂砾岩，以砾石为主，砾石成分复杂，包括泥岩、砂岩、火山岩等，砾径一般为 10mm×20mm×30mm。目的层登四、登三、登二段及泉二段、泉一段有效孔隙度在 7%~20%之间，泥质含量一般在 0~20%之间，渗透率 $(0.01\sim10)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，最大单层厚度 3.4~11.4m。侏罗系的火山岩、砂砾岩孔隙度 2.5%~11%，渗透率 $(0.11\sim9.23)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，从取心可见侏罗系地层裂缝比较发育，以纵向裂缝为主，缝宽 0.5~1.0mm，缝长 5~10cm，一般为泥质充填，部分未被充填，属低孔渗裂缝性气藏，东部储气层纵向孔隙压力系数从低于 1.0 到 1.25 均有分布，侏罗系破裂压力在 57.2~75.0MPa 之间。

针对大庆长垣东部储层的特点，用常规钻井方法打开储层，不但钻速低、经常发生漏失和卡钻等事故，更容易造成严重的储层伤害，勘探成功率低。因此，为了减少损害、增大产能、提高钻井效率，开展欠平衡钻井是一种理想的解决方案。而侏罗系等储气层主要成分为甲烷，单层厚度大，且地层较为稳定，可以采用低密度流钻欠平衡钻井方式。

二、大庆油田欠平衡钻井工艺技术研究与应用

1. 欠平衡钻井装备的选型

欠平衡钻井特殊设备，除常规井控设备外，还包括旋转防喷器、节流管汇、液气分离器、油水分离器（或撇油罐）以及点火装置等。

1) 旋转防喷器（PCWD）

通过对美国的 Williams 公司和 Shaffer 公司的旋转防喷器的技术对比分析，结合大庆油田实施欠平衡钻井区块的地质特点，引进了两套 Shaffer 公司的主动式旋转防喷器。其主要技术参数见表 2。

表 2 Shaffer 旋转防喷器主要技术参数

重 量 kg	最大高度 mm	最大静压力 MPa	最大动压力 MPa	通 径 mm
5625	1320	35	21	280

旋转防喷器的胶心使用寿命是欠平衡钻井的关键，在所钻的 8 口井中，卫深 5 井、肇深

11 井和汪深 1 井显示较好，在欠平衡井段旋转防喷器始终处于工作状态，其胶心使用数据统计见表 3。

表 3 旋转防喷器胶心使用数据表

井 号	单只使用时间（受压），h	正常钻进时间 h	进尺 m	通过钻具长度 m	过接头数 个
卫深 5 井	190	91. 6	297	1001	160
	170	94. 55	190	673	152
肇深 11 井	178	125. 25	240	960	196
汪深 1 井	376	305	598	1196	256

其中汪深 1 井胶心进尺和使用寿命创造了最高纪录。

2) 欠平衡钻井主要设备和工具的配套

在欠平衡钻井设备和工具选型研究的基础上，进行了欠平衡钻井设备和工具配套研究，单井配套见表 4。

表 4 欠平衡钻井主要设备

类型	名 称	型 号	数量	类型	名 称	型 号	数量
井口装置	单闸板	FZ28 - 70	1	地面处理设备	液气分离器		2
	四通	FS28 - 70	1		压井液储备罐	150m ³ 以上	
	双闸板	2FZ28 - 70	1		替浆罐		>150m ³
	环形防喷器	FH28 - 35	1		柴油储备罐		60m ³
	旋转防喷器	PCWD			撇油罐	DQF - 40	1 个
钻具内防喷器	投入式止回阀	φ159mm	1	其他	过渡罐	DQG - 30	1 个
	箭型回压阀	φ159mm	2		储油罐	DQC - 20	1 个
	旁通阀	φ159mm	1		自动点火装置		1 套
	方钻杆上旋塞	φ165mm	1		防回火装置		1 套
	方钻杆下旋塞	φ165mm	1		立式砂泵	XSP - 100	3 台
	IBOP (使用顶驱时自带)		1		振动筛	YNS - D	2
控制系统	远程控制台		1		5¼"六方方钻杆		1 根
	节流管汇控制箱		1		六方滚轮方补心		1 套
	PCWD 控制箱		1		顶驱	TDS - 11SA	1 套
井口管汇	节流管汇	DQJ - I - 35	2		鼓风机		3 台
	压井管汇	YG - 70	1		CO ₂ /H ₂ S 报警仪		各 1 套
	放喷管线	5"钻杆	200m		液面报警仪		1
	燃烧管线	9%"套管	100m		天然气报警仪		1
					防毒面具		10 套
					"U" 形管		1 套

2. 井身结构

大庆欠平衡深层探井多采用三层套管井身结构, 即 $\phi 444.5\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 339.7\text{mm}$ 表层套管 + $\phi 311\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 244.5\text{mm}$ 技术套管 + $\phi 215.9\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 139.7\text{mm}$ 尾管 (或生产套管)。

3. 钻具组合及钻头选型

在 8 口井欠平衡井段采用的是满眼钻具组合, 除第一口宋深 101 井使用顶驱外, 其他井都使用六方方钻杆完成, 该组合提高了钻具组合刚度, 井斜均符合设计要求, 未出现钻具失效现象, 具体如下:

$\phi 215.9\text{mm}$ 钻头 $\times 0.3\text{m}$ + $\phi 214.0\text{mm}$ 稳定器 $\times 1.5\text{m}$ + $\phi 177.8\text{mm}$ 钻铤 $\times 1.5\text{m}$ + $\phi 214.0\text{mm}$ 稳定器 $\times 1.5\text{m}$ + $\phi 177.8\text{mm}$ 钻铤 $\times 9.0\text{m}$ + $\phi 214.0\text{mm}$ 稳定器 $\times 1.5\text{m}$ + $\phi 159.0\text{mm}$ 双向减震器 $\times 5.2\text{m}$ + $\phi 159.0\text{mm}$ 箭形回压阀 $\times 0.8\text{m}$ + $\phi 159.0\text{mm}$ 钻铤 $\times 9.0\text{m}$ + $\phi 159.0\text{mm}$ 旁通阀 $\times 0.4\text{m}$ + $\phi 159.0\text{mm}$ 钻铤 $\times 207.0\text{m}$ + $\phi 159.0\text{mm}$ 投入式止回阀 $\times 0.4\text{m}$ + $\phi 127.0\text{mm}$ 18° 斜坡钻杆 + 165mm 方钻杆下旋塞 $\times 0.5\text{m}$ + 133mm 六方钻杆 $\times 12\text{m}$ (或顶驱)。

经过对大庆长垣东部深层岩石力学性质的立项研究, 对欠平衡井段所用钻头进行优选, 选择了江汉钻头厂生产的 HJT617~637 系列钻头, 使用效果见表 5。

表 5 欠平衡井段时效统计对比表

井 号	井 段 m	进 尺 m	钻 时 h	平均机械钻速 m/h
宋深 101 井	2969~3880	911	306.73	2.97
卫深 5 井	3089~3576	487	198.22	2.46
卫深 501 井	3098~3457	359	138	2.60
肇深 11 井	3170~3410	240	125.25	1.92
汪深 1 井	2930~3528	598	305	1.96
杏深 1 井	2665~4167	1502	802	1.87
达深 2 井	3065~4050	985	363.3	2.71
徐深 2 井	3620~4447	827	456.9	1.81

其中, 达深 2 井单只钻头进尺 544.5m ($3064.5\sim 3609\text{m}$), 时效 4.14m/h , 创造了欠平衡钻井钻头寿命和时效最高纪录。卫深 501 井和肇深 11 井均用一支钻头完成欠平衡段。

4. 钻井参数

8 口欠平衡井段钻井参数见表 6。

表 6 欠平衡井段钻井参数表

井号	欠平衡井段 m	进 尺 m	钻头	转 速 r/min	钻 压 kN	钻井液密度 g/cm ³	排量 L/s
宋深 101 井	2969~3880	911	HJX617GH	40~70	160	0.91~0.94	24~30
卫深 5 井	3089~3576	487	HJT617GDG	50~80	150~180	0.91~0.94	28~32
卫深 501 井	3098~3457	359	HJT617 GDG	50~80	150~180	0.91~0.92	27~32

续表

井号	欠平衡井段 m	进 尺 m	钻头	转 速 r/min	钻 压 kN	钻井液密度 g/cm ³	排量 L/s
肇深 11 井	3170~3410	240	HJT617 GDG	50~80	150~180	0.91~0.94	27~32
汪深 1 井	2930~3528	598	HJT617GDG	50~80	150~180	0.92~0.94	27~32
杏深 1 井	2665~4167	1502	HJT617 GDG	50~80	150~180	0.92	27~32
达深 2 井	3065~4050	985	HJT617 GDG	50~80	150~180	0.90	27~32
徐深 2 井	3620~4447	827	HJT617 GDG	50~80	150~180	0.93~0.96	27~32

1) 钻压的确定原则

设计钻压是根据邻井同井段常规钻井钻压值和所用钻头最优钻压范围确定的,在使用六方钻杆时,应考虑胶心对钻具摩阻的影响,根据摩阻的大小及时调整钻压。图 1 为旋转防喷器主动加压时的压差与胶心对钻柱摩阻试验曲线。

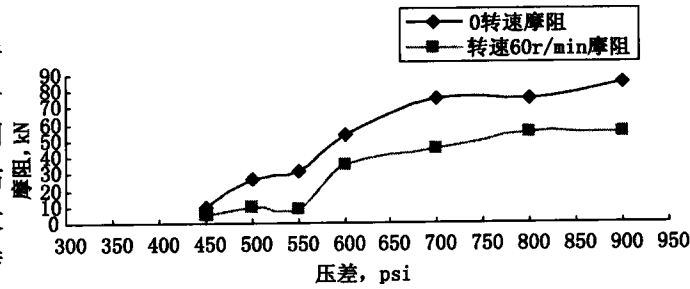


图 1 压差摩阻关系曲线

从图 1 中可以看出:

(1) 随着压差的增加,胶心的摩阻随之增大,在转速 60r/min、压差 600psi 时,摩阻达到 35kN,井底实际钻压较小,因此机械钻速慢。

(2) 在转速 60r/min 条件下,压差在 450~550psi 范围内,摩阻较小,因此在使用中控制压差在 450~550psi 范围内,钻压调整到上限 180kN,机械钻速明显加快。

2) 转速确定原则

设计转速主要考虑钻头和旋转防喷器胶心两个因素,一般低于 100r/min。

5. 流钻欠平衡井底负压值的研究与应用

1) 流钻欠平衡井底负压值及钻井液密度窗口的设计

流钻欠平衡钻井过程中,井内压力关系如下:

$$p_F = p_p - p_b; p_b = p_{HK} + p_t; p_{HK} = p_m + p_a$$

式中 p_F ——井底负压值, MPa;

p_b ——井底压力, MPa;

p_{HK} ——环空循环压力, MPa;

p_p ——地层压力, MPa;

p_m ——环空气液柱压力, MPa;

p_a ——环空压耗, MPa;

p_t ——井口回压, MPa。

流钻欠平衡井底负压值的设计考虑因素有:(1) 单位负压值下的产油、气量(可由已生产井求得);(2) 设计的随钻产油、气量;(3) 负压井段不同压力体系的地层压力;(4) 井口设备的除气、液能力;(5) 井口防喷设备的额定工作压力;(6) 井眼稳定性。

根据地质设计给出的地层压力系数, 根据邻井相同层位产气量, 考虑井口设备和井壁稳定性等因素, 用软件计算得出设计值, 进而得出钻井液密度窗口, 8 口井的井底负压值和钻井液密度窗口设计值见表 7。

表 7 欠平衡井负压值及钻井液密度窗口设计表

井 号	井深 m	地层压力 系数	钻井液密度 g/cm ³	静负压值 MPa	动负压值 MPa	当量循环密度 g/cm ³
宋深 101 井	2974~3480	1.02~1.06	0.94~0.98	-1.7~-2.33	-0.55~-1.33	0.974
卫深 5 井	3095~3620	1.03	0.93~0.97	-1.92~-3.58	-0.50~-1.74	0.975~1.00
卫深 501 井	3155~3470	1.03	0.92~0.94	-3.06~-3.41	-0.92~-1.66	0.99
肇深 11 井	3180~3800	0.995~1.08	0.94~0.98	-1.72~-3.73	-0.616~-2.43	0.976~1.015
汪深 1 井	2945~3900	1.084~1.094	0.92~0.99	-3.29~-6.66	-1.90~-4.87	0.97~1.038
杏深 1 井	2660~3460	1.00	0.90~0.94	-1.57~-3.40	-0.06~-1.31	0.962~1.003
达深 2 井	2900~3515	1.08	0.90~1.00	-3.33~-6.45	-1.89~-4.08	0.97~1.04
徐深 2 井	3500~4350	1.10~1.15	0.95~1.10	-2.35~-5.66	-0.78~-2.36	1.01~1.06

以上井底负压值和钻井液密度设计时考虑的边界条件与实钻井眼的多相流状态有一定差距, 尤其是地层流体(油、气、水)侵入井筒产生的多相流循环压降、密度分布、压力分布的变化。为了得到井底实际负压值, 开展了欠平衡钻井参数现场监测分析系统和欠平衡井底压力采集接头两方面的研究。

2) 欠平衡钻井数据监测分析系统的研究与应用

在流钻欠平衡钻井过程中, 井筒中的多相流在流动时其流态是变化的, 通常典型的直井流态可分为泡状流、段塞流、过渡流和环状流四大类, 如图 2 所示。

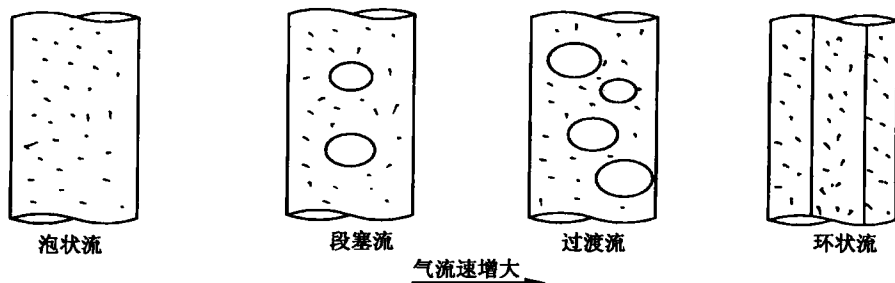


图 2 典型的直井流态

欠平衡钻井数据监测分析系统采用网络侦听技术实时截取或采集欠平衡钻井过程中的工程参数和有关地质录井数据, 并且在所建立水动力学模型基础上, 编制计算机软件, 利用采集数据计算判别井内多相流的相互转变状态, 得出实时井底负压值, 实时分析掌握井下欠平衡状况, 提前预防井下发生的异常情况, 又能够为事后分析提供基础资料, 指导欠平衡钻井施工, 其系统流程图见图 3。

监测分析系统分为 10 个功能模块: (1) 数据包侦听模块; (2) 数据包分析模块; (3) 手工录入数据模块; (4) 数据计算分析模块; (5) 数据实时显示模块; (6) 曲线实时选择显

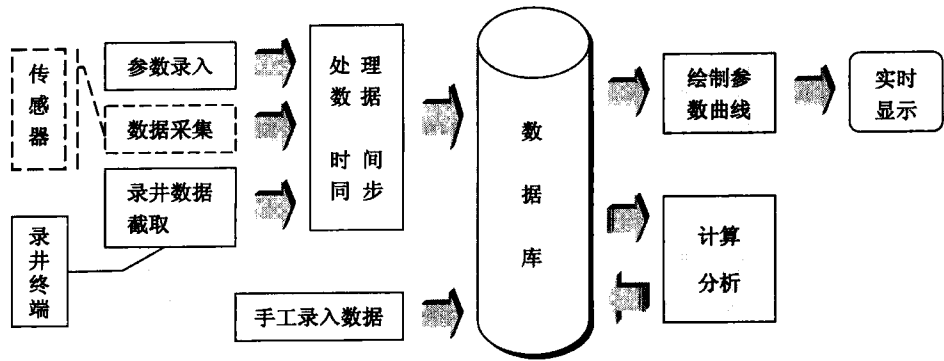


图3 欠平衡钻井数据监测及分析系统流程图

示模块；(7) 数据存储模块；(8) 数据随机查询打印模块；(9) 井下及地面工况实时动态模拟模块；(10) 数据曲线回放模块。

计算分析结果数据包括：切力、泡沫质量、流型指数、稠度系数、钻铤处返速、钻杆处返速、环空密度分布、环空压力分布、井底负压值（水力参数计算）、井底负压值（地面气体流量），气体上窜时间、起下钻允许速度、d 指数、dc 指数、地层压力系数、当量密度等 19 项数据。

该系统在卫深 501 井等 6 口井上进行了应用，在提高欠平衡钻井自动控制水平和勘探的精度方面起到了一定作用。但是，多相流的流态除了主要受各相速度、密度等参数的影响外，多相流流动的形成过程、少量杂质的存在等可能对流态有一定的影响，因此该系统在计算地层压力和井底压力等参数时存在一定误差。实践证明，该系统对于井底负压值设计较高的井实用性较好，虽然有误差，但可保证井底处于欠平衡状态；但对于井底负压值设计较小的井，由于误差可能会导致过平衡，因此开发研制了欠平衡井底压力采集接头作为补充完善手段以提高井底负压值的控制精度。

3) 欠平衡井底压力测量工具的研制与应用

(1) 结构与原理：

该工具本体是自行研制的 $\phi 214\text{mm}$ 短节，近钻头安放，不影响钻具组合结构。通过传感器适时测量并存储井下测量点的井筒压力、温度。结合监测分析数据进行综合分析、处理解释，得出实际地层压力、环空压力、密度分布和井底负压值，根据设计进行调整，指导下步欠平衡钻井施工。该工具结构图见图 4，性能指标见表 8。

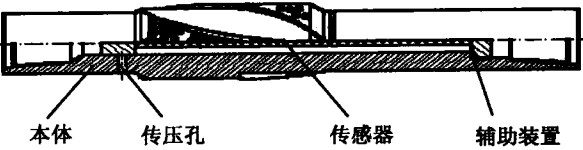


图4 欠平衡井底压力测量工具结构图

表 8 井底压力采集接头性能指标

压力 量程 MPa	压力 准确度	压力 分辨率	温度量程 ℃	温度 精度 ℃	温度 分辨率 ℃	储存容量 (点)	额定工 作时间 d	AA 型锂电 工作电压 (AH)	采样 速率 s
0~70	0.05%	0.02%	0~150	±0.5%	0.01	696000	250	6.5	1~18

该工具 2003 年应用于达深 2 井三开欠平衡井段（3064~3609m），工况包括起下钻、钻水泥塞、钻进、循环钻井液、静止、活动钻具和关井求压等几个过程。

（2）数据分析：

通过回放数据曲线和软件分析数据，可以很清晰地看出各种工况时的温度、压力变化情况，见图 5（井深为 3064~3609m）。

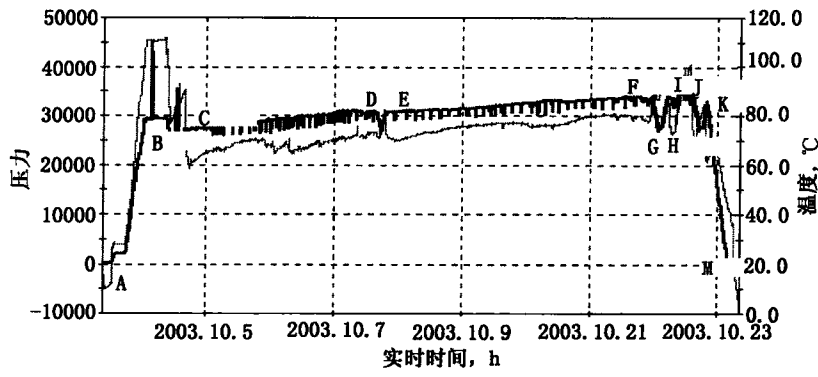


图 5 测压采集回放数据曲线分析图

图中：粗实线代表实测压力曲线，细实线代表实测井下温度曲线；AB 段表示下钻到 3064m；BC 段表示钻水泥塞；CD 段表示钻进井深 3064~3323m；DE 段表示短起下钻；EF 段表示钻进井深 3323~3609m；FG 段表示起钻至 3105m；GH 段表示第一次静止测量；HI 段表示下钻至井底；IJ 段表示在井底关井求压；JK 段表示重复 FGH 过程；KM 段表示起钻至井口。

①关井求压时实测与理论计算地层压力系数值的比较见表 9。

表 9 关井求压时实测与理论计算地层压力系数对比表

井 深 m	实测地层压力系数	根据关井最大套压 计算地层压力系数	根据关井最大立压 计算地层压力系数	误差 %
3064	0.92	0.903	—	2.3
3092	1.017	0.97	—	3.1
3098	1.019	0.988	—	5.6
3105	1.001	—	0.992	0.8
3202	0.993	—	0.98	1.3
3210	0.961	—	0.93	3.4
3600	0.961	—	0.932	3.1

由表 9 可见，在气井关井求压过程中，由于井内气柱持续上升，套压、立压很难稳定，因此关井求压得到的地层压力系数偏低，最大误差接近 6%。

②通过实测数据计算钻进和静止过程中实际井底负压值。

由同井深的实测地层压力数据与钻进和静止时井底压力数据计算出井底负压值，具体数据见表 10 和表 11。

表 10 不同井深钻进时井底动负压力对比表

井 段 m	实测 地层压力 MPa	最大实测 井底动压力 MPa	井底 动负压力 MPa	当量 钻井液密度 g/cm ³	环空 循环压力 MPa
3065	27.72	28.23	+0.51	0.92	27.32
3090	27.95	28.5	+0.55	0.92	27.63
3092	30.81	28.61	-2.2	0.93	27.65
3098	30.94	28.82	-2.12	0.93	27.78
3105	30.46	28.69	-1.77	0.92	27.87
3202	31.16	29.92	-1.24	0.93	29.05
3210	30.23	30.24	+0.01	0.94	29.11
3600	33.9	33.87	-0.03	0.94	33.19

表 11 不同井深静止时井底静负压力对比表

井 段 m	实测 地层压力 MPa	最大实测 井底静压力 MPa	井底 静负压力 MPa	环空 钻井液密度 g/cm ³	环空 气液柱压力 MPa
3065	27.72	26.37	-1.35	0.86	26.16
3090	27.95	26.63	-1.32	0.86	26.46
3092	30.81	26.70	-4.11	0.86	26.47
3098	30.94	26.77	-4.17	0.86	26.6
3105	30.46	26.94	-3.52	0.87	26.68
3202	31.16	28.14	-3.02	0.88	27.84
3210	30.23	28.15	-2.08	0.88	27.9
3600	33.9	32.23	-1.67	0.90	31.9

从表 10、表 11 计算结果看，在 3065~3600m 井段，静止时井底都处于欠平衡状态，但在 3065~3090m、3210~3600m 井段钻进时处于平衡状态，在 3092~3202m 井段井底态、静态均处于欠平衡状态，井底动负压力值基本上在 -1.24~-2.2MPa 之间。

③通过实测数据计算在钻进过程中不同井深的环空摩阻。

通过对表 10 和表 11 数据进行对比计算，可以得出钻进过程中不同井深的环空摩阻，具体见表 12。

表 12 不同井深环空摩阻计算表

井 段 m	环空循环压力 MPa	环空气液柱压力 MPa	环空摩阻 MPa
3065	27.32	26.16	1.16
3090	27.63	26.46	1.17
3092	27.65	26.47	1.18

续表

井 段 m	环空循环压力 MPa	环空气液柱压力 MPa	环空摩阻 MPa
3098	27.78	26.6	1.18
3105	27.87	26.68	1.19
3202	29.05	27.84	1.21
3210	29.11	27.9	1.21
3600	33.19	31.9	1.29

由表 12 可以看出,在水包油钻井液密度为 0.90g/cm^3 的深层气藏欠平衡钻井条件下,3000~3600m 井深时环空摩阻基本上在 $1\sim 1.3\text{MPa}$ 之间,随井深而增加,一般环空循环摩阻每 100m 大约增加 $0.01\sim 0.02\text{MPa}$,但这与随钻产气量和节流阀开启度等因素有关。

④通过实测数据计算环空钻井液的平均密度由表 10 和表 11 可知,在钻进过程中,环空钻井液当量密度在 $0.92\sim 0.94\text{g/cm}^3$ 之间,静止时环空多相流密度在 $0.86\sim 0.90\text{g/cm}^3$ 之间(井口回压很小,可忽略),可见根据入口钻井液密度计算井底负压值误差很大。由于该井随钻产气量很小,井口测得返液密度为 0.87g/cm^3 ,与井下实际相符,但有待于高产气井的验证。

因此,在实钻过程中,尽量以配浆密度低限作为第一循环周,然后根据现场测量地层压力、井底压力值和井口回压大小计算实际井底负压值,调整钻井液密度。

6. 流钻欠平衡井控技术

1) 欠平衡井口装置

套管头 + FZ28 - 70 + 四通 + 2FZ28 - 70 + FH28 - 35 + PCWD 旋转防喷器。

2) 井底压力控制技术措施

现场施工时可能造成井底压力波动的因素有:(1)随钻产气、液量;(2)钻井液性能;(3)泵排量;(4)节流阀开度等。由于地面对返出钻井液中的油气进行了充分的分离,因此,可以排除因素(2)对井底压力波动的影响。在井底压力发生变化前节流阀开度一般保持不变,一般都采用调节节流阀开度的方法控制井底压力,所以,因素(4)不是引起井底压力波动的初始原因。所以因素(1)、(3)是主要影响因素,它们的变化反应在泵压、套压的变化上。

通过对欠平衡井底压力关系的研究,得出了井底负压值与泵压间的关系、井底负压值与井口压力及排量的关系,建立了立管压力控制法,即通过钻井液循环系统在地面将多相流充分分离,保持入口钻井液性能稳定,采用控制井口回压保持立压不变的方法来保证设计的负压值与实际负压值相符,同时研究了节流阀开度调节操作措施。

3) 节流阀现场应用效果

(1) 节流阀开启度与套压、立压关系试验:

从图 6 中可以看出:

①在节流阀开启度逐渐增大的开始阶段,套压和立压下降幅度较大,在开启度 75%以后趋于平缓。说明正常钻进阶段,节流阀开启度保持在 75%以上较为理想;而要保持立压不变,通过调节节流阀来控制井底负压值,应该在节流阀开启度小于 75%的情况下进行操作较为理想。

②在排量一定的情况下，套压和立压的变化趋势基本相同，从而说明，随钻产气量一定时，套压和立压对于井底欠负压值的影响规律基本相同。

(2) 泵冲与套压关系试验。

在节流阀开启度不变的情况下，从图 7 中可以看出：

① 套压和立压随泵冲（排量）的增加而升高，且趋势基本相同。

②随着泵冲（排量）增加，套压（井口压力）增加，环空循环压力也增加，相应井底负压值下降。

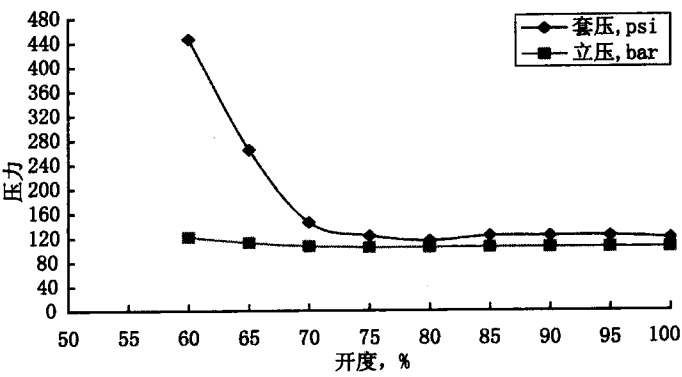


图 6 泵冲 85min⁻¹时套压、立压随节流阀开度变化曲线

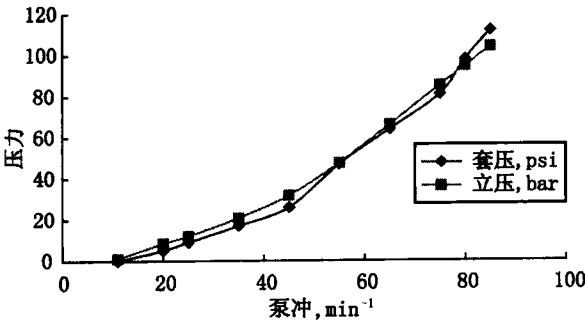


图 7 节流阀开度 100%时泵冲与套压关系试验

4) 最大关井套压确定

最大关井套压的确定主要考虑井口设备承压能力、套管抗内压强度或套管鞋处地层破裂压力三方面因素，关井最大允许套压取三者中最小值，一口设计正确的井中，地层通常是最薄弱的，而井口防喷设备是最强的。但在欠平衡井中，还要考虑液气分离器的处理能力，如果负压值设计或控制不当，随钻产油气量过大，超过液气分离器的处理能力，分离效果不好，恶性循环，设计关井套压过高，不及时采取

措施，后果是很严重的。

三、配套技术研究

1. 流钻欠平衡钻井液的研制与应用

为了实现低密度流钻欠平衡钻井，在室内研究评价的基础上，优选了水包油钻井液体系作为大庆探区深层气藏欠平衡钻井液体系。自 2000 年以来，水包油钻井液已经在大庆成功使用了 12 口井，其中近平衡 4 口、欠平衡 8 口，施工均很顺利。

1) 水包油钻井液室内研制性能
见表 13。

表 13 水包油钻井液（油：水=60：40）性能表

密度 g/cm ³	温 度 ℃	φ600/ φ300	φ200/ φ100	φ6/ φ3	初切/终切 Pa/Pa	PV mPa·s	YP Pa	分层情况
0.92	室温	100/60	45/27	6/5	3.0/3.5	40	10	不分层
0.92	160℃，16h 老化后	90/63	51/36	10/8	5.0/5.0	37	13	不分层
0.92	160℃，96h 老化后	138/91	73/42	9/7	3.0/5.0	47	22	不分层