

文章编号: 0253-2697(2011)02-0350-05

欠平衡钻水平井附加套管注气方式及关键技术

杨 虎¹ 王利国² 王 峥¹ 王 磊³

(1. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院 新疆克拉玛依 834000; 2. 重庆科技学院 重庆 401331;
3. 中国石油新疆油田公司石油工程监督中心 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 充气欠平衡钻井技术应用于水平井或大斜度井,将是拓展欠平衡钻井应用领域的重要方向之一。目前注气方式主要是钻柱注气和环空注气。采用钻柱注气方式,常规井下动力钻具和泥浆脉冲随钻测量工具无法正常工作,而现有的环空注气方式(如寄生套管、双层套管),由于成本高,技术问题多,应用不够广泛。由此,结合欠平衡钻井和水平井的理论和实践,提出了附加套管环空注气方式,并针对其关键技术进行理论分析和论证。该注气技术克服了钻柱注气的特殊问题,形成一套实用的环空注气欠平衡钻水平井技术。

关键词: 欠平衡钻井;水平井;注气方式;套管;新型套管头

中图分类号: TE24 文献标识码: A

Gas-injection measure and the key technique using additive casing in underbalanced horizontal drilling

YANG Hu¹ WANG Ligu² WANG Zheng¹ WANG Lei³

(1. *Exploration & Development Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China;*
2. *Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China;*
3. *Petroleum Engineering Supervision Centre, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China*)

Abstract: The use of the gas-injection underbalanced drilling(UBD) in horizontal wells or high-angle deviated wells is one of the significant aspects to broaden the UBD application. Currently, gas-injection measures include mainly the drill-string gas injection and annular gas injection. When the drill-string gas-injection measure is used, the conventional downhole dynadrill and mud-pulse measurement-while-drilling(MWD) tools usually can not work normally, while existing annular gas-injection measures, such as parasitic casing and dial casing, are not applied widely due to higher cost and many technical problems. Therefore, combined with the theory and practice of underbalanced drilling and horizontal wells, the present paper proposed a new annular gas-injection measure with attached casing, and its key techniques, including the design of advanced gas-injection casing head, the proper size design of casing and bit series, and the depth calculation of the annular gas-injection point, were theoretically analyzed and verified. This gas-injection measure solved some special problems in drill-string gas injection, constituting a set of feasible annular gas-injection underbalanced drilling techniques for horizontal wells.

Key words: underbalanced drilling(UBD); horizontal well; gas-injection measure; casing; advanced casing head

目前,由于测量技术和设备配套等方面的限制,国内外气基流体欠平衡钻井技术主要集中应用于直井和小井斜定向井。为了更好地实现储层保护、提高单井产量,将气基流体欠平衡钻井技术应用于水平井段或大斜度井段,将是未来拓展欠平衡钻井应用领域的重要方向之一,也是欠平衡钻井技术的研究方向^[1-4]。

国内外电磁随钻测量仪器(EM-MWD)正处于研发阶段,而环空注气的寄生套管和双层套管由于成本

较高,固井问题较多,应用不够广泛。中国欠平衡钻水平井技术的研究处于起步阶段,相关的测量仪器和管具尚未开发。笔者结合多年欠平衡钻井和水平井钻井技术研究和实践,研究了附加套管式环空注气方案及其关键技术。

1 欠平衡钻水平井注气技术现状

目前,国内外欠平衡钻井注气技术主要可分为钻柱注气和环空注气^[5],如图 1 所示。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z239)和中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目(2009A-1605)联合资助。

第一作者及通讯作者: 杨 虎,男,1974 年 12 月生,2007 年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油新疆油田公司高级工程师,主要从事深井提速、欠平衡钻井、水平井、地应力与岩石力学方面的研究工作。E-mail: yanghu@petrochina.com.cn

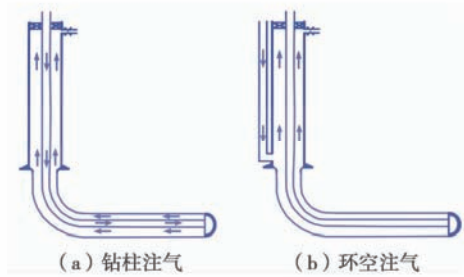


图 1 充气液钻井的注气方式

Fig. 1 The gas-injection measures of aerated fluid drilling

1.1 钻柱注气方式

常规定向随钻测量仪在不同钻井流体中的适用性分析(表 1)和钻井实践表明:当水平井钻井流体气液比超过 15%~18%时,可压缩相(气泡)使得泥浆脉冲压力波信号迅速衰减^[4,6]。因此,在钻柱注气欠平衡钻水平井时,常规井下动力钻具和泥浆脉冲型定向随钻测量工具将无法正常工作。

表 1 定向随钻测量仪在不同钻井流体中的适用情况

Table 1 The suitability of each directional surveying techniques in different drilling fluid

流体类型	单点测斜仪	多点测斜仪	陀螺测斜仪	有线随钻测斜仪	泥浆脉冲随钻测斜仪	电磁随钻测斜仪
单相液体	是	是	是	是	是	是
单相气体	是	是	否	否	否	否
气液两相	是	是	否	否	否	否

国内外几家公司(如 Baker Hughes, Scientific Drilling International 等)研发的电磁随钻测量工具(EM-MWD),有些已投入到工程服务中^[6-7]。该工具克服了常规泥浆脉冲 MWD 不适用于气液两相流的缺陷,其工作原理为:井下电磁波发生器产生的电磁信号经地层和钻柱传输到地面,由地面安装的接收天线和信号转换装置显示实时井眼轨迹参数,并可实现双向传输。但由于正处于试验阶段,信号传输深度受限,且费用较高,该技术还未推广使用。

1.2 环空注气方式

国外某些公司对套管进行特殊改造,研制出一些特殊的钻井管具^[8-10],包括寄生套管和同心套管等,并在多口井成功应用。这些特殊管具的环空注气原理见图 2。

环空注气时,管柱内为单相液流,常规泥浆脉冲 MWD 系统和动力钻具运转有效。接单根或起下钻时,可连续充气保持井底欠平衡状态。通常,环空注气压力较低,压缩气体为空气时,只有部分管柱受到冲刷。然而,这些特殊管具入井后必须固井,无法重复利用,成本较高。另外,寄生管要求环空间隙较大,下套

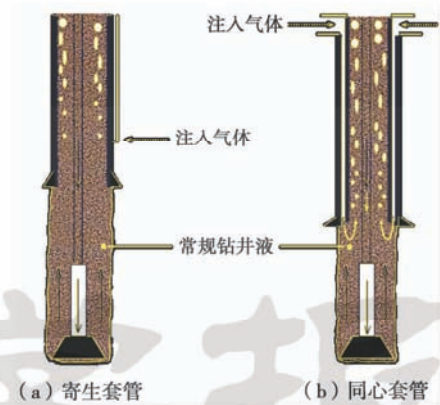


图 2 特殊管具的环空注气原理

Fig. 2 Principle of annular gas-injection through special string

管和固井存在一定风险^[5,11]。

2 附加套管式环空注气方案

设计原理如下:在开始钻水平井段之前,技术套管与钻杆之间附加套管,由钻杆内注入液体,由技术套管与附加套管之间的环空注入气体;气体与上返的液体在气体注入点处混合,由钻杆环空返至井口,携带岩屑,既降低井底压力,又保证了钻井液脉冲测量仪和井下动力钻具能够正常工作^[11]。与寄生管相比,注气点位置更深,更利于控制井底压力。另外,附加的部分套管可完钻后起出,重复利用。该方案包括表层套管加深方案和加宽套管程序方案。

2.1 表层套管加深

该方案适用于油气储层较浅的水平井,主要特点是要求加深一开完钻井深。将表层套管下至气体注入点以下约 100~150 m,技术套管下至水平井的靶点 A 处,可利用技术套管与表层套管之间的环空形成注气通道。该方案井身结构见图 3。

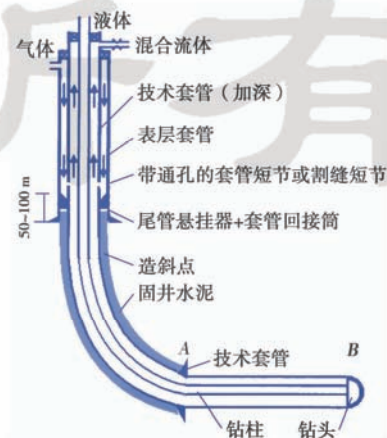


图 3 表层套管加深方案的井身结构

Fig. 3 Wellbore structure of deepening surface casing

技术套管采用常规尾管,下至水平井的靶点 A;采用尾管悬挂固井技术,但需注意尾管悬挂装置和套管回接筒应低于气体注入点 30~50 m。利用二开裸眼井径测井数据,准确计算水泥浆用量,固井套管重叠段约为 50~100 m。按照行业标准 SY/T 5083—91,进行尾管悬挂器坐封,悬挂表层套管,按照行业标准 SY/T 5412—2005和 SY/T 5467—2007,进行尾管固井作业。该尾管串程序为:引鞋(浮鞋)+1根套管+浮箍+1根套管+座落接箍+套管(扶正器、泥饼刷等)+尾管悬挂器+套管回接筒+送入钻具。固井后,倒扣钻具,提出钻具,在套管回接筒之上回接与尾管相同尺寸的普通套管,该套管柱下端装配带通孔的短节,由此在附加套管内外建立气体循环通道。采用常规套管井口悬挂装置,实现两层套管的环空气体注入。

2.2 加宽套管程序

该方案适用于油气储层较深或垂直井段较长的水平井,主要特点是要求在二开技术套管(下至造斜点)固井中完后,三开定向钻至靶点 A,附加一层技术套管,在两层技术套管间实现环空注气。因此,需要加宽全井的井身结构和套管程序。该方案井身结构见图 4。

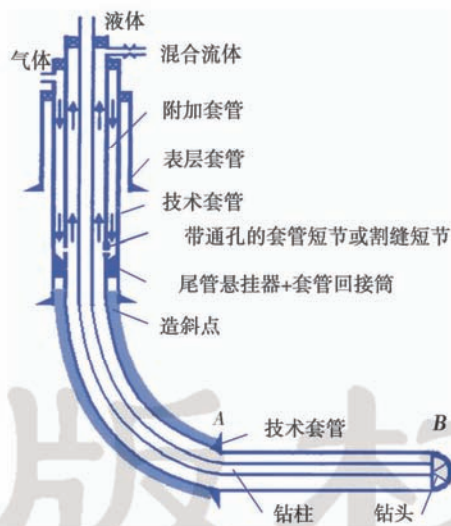


图 4 加宽套管程序方案的井身结构

Fig. 4 Wellbore structure of widening casing program

在技术套管内悬挂一层技术尾管至靶点 A,其悬挂深度要求大于气体注入点深度 30~50 m。随后,悬挂器坐封在技术套管内。固井后,倒扣并提出钻具,在套管回接筒之上回接与尾管相同尺寸的普通套管,该套管柱下端配有带通孔的短节,由此在技术套管内外建立气体循环通道。采用特殊的套管井口悬挂装置,实现环空气体注入。

表层套管加深方案施工简单,但由于气体注入点深度有限,降低流体当量密度的范围较小。加宽套管程序方案虽然工艺复杂,主要集中在管内尾管悬挂坐封和特殊双层注气套管头的设计,存在一定的附加成本和风险,但该方案可灵活调节注入点位置。因此,更适用于水平井段垂深较大、地层孔隙压力系数在 0.5~1.1 的情况。

3 附加套管环空注气关键技术

3.1 新型双层注气套管头

该套管头是实现注气欠平衡钻水平井技术的关键装置,可实现附加套管的悬挂与固定,连通注气通道,解决由于钻机底座高度有限而不能增加套管头高度的问题。为此,笔者设计了一种新型双层注气套管头,如图 5 所示。

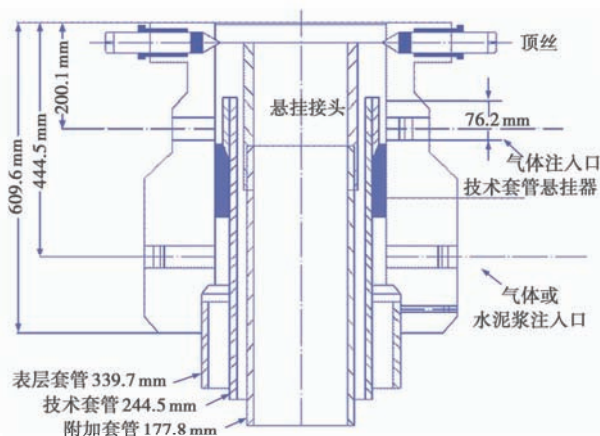


图 5 新型双层注气套管头结构

Fig. 5 New casing head setup for double casing string gas-injection

以 $\phi 244.5$ mm 技术套管配合 $\phi 177.8$ mm 附加套管为例,与常规套管头比较,其主要特征为:改造常规技术套管头,加高技术套管悬挂器以上部分。附加套管下入后,在其上端口装有带法兰盘的悬挂接头,该接头内外径与附加套管相同,法兰盘外径等于套管头通径。在加厚的套管头连接法兰上开有螺纹孔,可用顶丝固定附加套管,悬挂后接头法兰不能高出套管头连接法兰端面,在套管头外壳体与技术套管悬挂器上开一个贯通孔,可实现技术套管与附加套管的环空向井内注气。欠平衡钻进完成后,可下钻柱与 177.8 mm 套管悬挂器连接,上提悬挂器使其与 244.5 mm 套管悬挂器脱离,完成附加套管的回收。

3.2 合理的井身结构设计

结合套管和钻头的 API 标准,提出以下两种套管和钻头尺寸系列方案,如表 2 所示。

表 2 附加套管注气技术的井身结构常规系列
Table 2 Conventional wellbore structure programs for additional casing gas-injection

类 型	井身结构	导管/mm	表层套管/mm	技术套管/mm	附加套管/mm	生产套管/mm
浅 井	套管程序	762.0	508.0	339.7	244.5	177.8
	井眼尺寸	914.4	660.4	444.5	—	215.9/212.7
深 井	套管程序	762.0	508.0	339.7/244.5	177.8	127.0
	井眼尺寸	914.4	660.4	444.5/311.2	—	152.4/149.2

该方案采用减少一级技术套管(浅井)或减少水平井段井眼直径的方法来满足附加套管注气技术的要求。在深井情况下水平井段可采用 $\phi 127$ mm 井眼,且国内外的钻井实践证明是可行的。

3.3 注气点深度设计图版

在确定选择何种附加套管式环空注气方案之前,首先应进行环空注气点深度的准确设计。必须依据水平井段地层孔隙压力和地面注气、液设备的具体性能指标和井底负压差的合理范围计算出环空注气点深度。

根据钻井环空水力学原理,气体注入点以下环空均为单相钻井液,环空注气后产生的井底压降应等于气体注入点位置环空压降,即

$$\Delta p_b = \rho_{lc} gH - p_p + \Delta p_n = (\rho_{lc} - \rho_{mc}) gH_{in} = \Delta p_{in} \quad (1)$$

式中: p_b 为井底压力, kPa; p_p 为地层孔隙压力, kPa; p_n 为气体注入点环空压力, kPa; p_n 为井底负压差, kPa; H 为井垂深, m; H_{in} 为气体注入点深度, m; ρ_{lc} 为钻井液当

量密度, g/cm^3 ; ρ_{mc} 为混合流体当量密度, g/cm^3 。

由式(1)可知,只要计算出 ρ_{mc} ,就可得出环空注气点的计算深度。为确保工程安全,应留有一定的安全余量。利用井筒气液两相流动模型,结合井身结构数据,已知液体的各项参数,计算出不同气体流量和气体注入点深度时,注入点环空压力值及井底压降值(表 3),并绘制出相应井身结构的设计图版(图 6),可供钻井施工和设计使用。其他钻井参数为:井深不超过 3000 m,钻杆外径为 88.9 mm,附加套管外径为 244.5 mm,内径为 220.5 mm,流量为 $0.96 m^3/min$,黏度为 $3 mPa \cdot s$,密度为 $1.05 g/cm^3$,平均钻速为 2 m/h,岩屑平均直径为 4 mm,岩屑密度为 $2.6 g/cm^3$,井口回压为 100 kPa。

在确定最大井段压降和注气设备额定排量后,图版中两线的交点纵坐标即为气体注入点深度。图版曲线密集区中气体排量对井底压降的贡献较小。为节约成本,建议设计时在稀疏区选择气体注入点深度和排量的最优组合。

表 3 环空气体注入点深度、气体注入量与井底压降之间的关系
Table 3 The change of gas volume inflowing rate with bottom hole pressure drop under different annular gas-injection point depth

注入点 深度 /m	注入点压力和井底压力降/MPa																						
	0°		5°		10°		15°		20°		25°		30°		35°		40°		45°		50°		
	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	p_{in}	Δp_b	
300	3.12	1.78	1.34	1.38	1.74	1.14	1.98	1.00	2.12	0.91	2.21	0.84	2.28	0.79	2.33	0.76	2.36	0.74	2.38	0.72	2.40		
600	6.23	4.21	2.02	3.45	2.78	2.96	3.27	2.61	3.62	2.35	3.88	2.15	4.08	2.00	4.23	1.87	4.36	1.78	4.45	1.70	4.53		
900	9.35	6.90	2.45	5.87	3.48	5.15	4.20	4.64	4.71	4.24	5.11	3.90	5.45	3.63	5.72	3.40	5.95	3.21	6.14	3.06	6.29		
1200	12.47	9.70	2.77	8.51	3.96	7.61	4.86	6.93	5.54	6.40	6.07	5.96	6.51	5.58	6.89	5.25	7.22	4.98	7.49	4.74	7.73		
1500	15.58	12.56	3.02	11.28	4.30	10.26	5.32	9.46	6.12	8.79	6.79	8.24	7.34	7.77	7.81	7.36	8.22	7.01	8.57	6.69	8.89		
1800	18.70	15.45	3.25	14.10	4.60	13.01	5.69	12.12	6.58	11.37	7.33	10.72	7.98	10.15	8.55	9.66	9.04	9.25	9.45	8.87	9.83		
2100	21.82	18.34	3.48	16.94	4.88	15.80	6.02	14.85	6.97	14.03	7.79	13.31	8.51	12.68	9.14	12.12	9.70	11.63	10.19	11.20	10.62		
2400	24.93	21.25	3.68	19.80	5.13	18.61	6.32	17.61	7.32	16.74	8.19	15.97	8.96	15.28	9.65	14.66	10.27	14.12	10.81	13.63	13.30		
2700	28.05	24.16	3.89	22.67	5.38	21.43	6.62	20.39	7.66	19.48	8.57	18.66	9.39	17.93	10.12	17.26	10.79	16.67	11.38	16.14	11.91		
3000	31.17	27.07	4.10	25.54	5.63	24.27	6.90	23.19	7.98	22.24	8.93	21.38	9.79	20.60	10.57	19.90	11.27	19.26	11.91	18.69	12.48		

注:带 * 的数字为气体流量, m^3/min 。

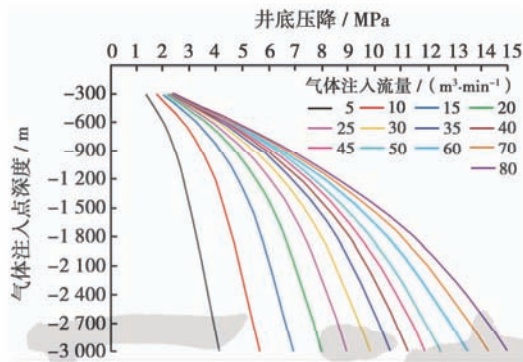


图6 环空气体注入点深度设计图版

Fig. 6 The design of annular gas influx point depth

4 结论

(1) 在多年欠平衡钻井和水平井钻井技术研究和实践的基础上,提出了附加套管式环空注气方案,包括表层套管加深方案和加宽套管程序方案。与寄生管相比,注气点位置更深,更利于控制井底压力的变化。另外,附加的部分套管可完钻后起出,重复利用。

(2) 为实现附加套管的悬挂与固定,连通注气通道,设计了一种新型双层注气套管头;结合套管和钻头API标准,提出适用的套管和钻头尺寸系列。利用井筒气液两相流动模型,结合井身结构数据,绘制出相应井身结构的气体注入点深度设计图版,可供钻井施工和设计使用。

参考文献

- [1] 周英操,高德利,刘永贵. 欠平衡钻井环空多相流井底压力计算模型[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 96-99.
Zhou Yingcao, Gao Deli, Liu Yonggui. New model for calculating bottom hole pressure of multiphase flow in annulus of underbalanced straight well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 96-99.
- [2] 李相方,刚涛,隋秀香,等. 欠平衡钻井期间地层流体流入规律研

究[J]. 石油学报, 2002, 23(2): 48-52.

Li Xiangfang, Gang Tao, Sui Xiuxiang, et al. The research of feature of formation fluid influx during underbalanced drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 48-52.

- [3] 范军,陈光,呆长良,等. 欠平衡钻井理论模型及应用[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 75-79.
Fan Jun, Chen Guang, Gao Changliang, et al. An underbalanced drilling theoretical model and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 75-79.
- [4] 杨虎,江勇,胡军,等. 牛102井欠平衡泡沫水平井钻井技术[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 88-93.
Yang Hu, Jiang Yong, Hu Jun, et al. The application of underbalanced drilling technique in horizontal section of Well Niu-102 [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(1): 88-93.
- [5] 杨虎,王利国. 欠平衡钻井基础理论与实践 [M]. 北京:石油工业出版社, 2009: 267-286.
Yang Hu, Wang Ligu. Basic theory and practice of underbalanced drilling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 267-286.
- [6] Weisbeck D, Blackwell G, Park D. Case history of first use of extended range EM-MWD in offshore underbalanced drilling [R]. SPE 74461, 2002.
- [7] Jan W, Denis W, Martin C, et al. Successful integration of electromagnetic MWD-LWD technology extends UBD operation envelope into severely depleted fields [R]. SPE 92617, 2005.
- [8] Culen M S, Harthi S, Hashimi H. A direct comparison between conventional and underbalanced drilling techniques in the Saih Rawl Field, Oaun [R]. SPE 81629, 2003.
- [9] Mykytiw C G, Davcidson I A, Frink P J. Design and operational considerations to maintain underbalanced conditions with concentric casing injection [R]. SPE 81631, 2003.
- [10] Westermarck R V. Drilling with a parasite aerating string in the disturbed belt, Gallatin county, Montana [R]. SPE 14734, 1986.
- [11] D ivine R. Planning is critical for underbalanced applications with under-experienced operators [R]. SPE 81627, 2003.

(收稿日期 2010-07-31 改回日期 2010-10-18 编辑 仇学艳)

版权所有