

准噶尔盆地复杂火成岩地层防漏堵漏控压钻井技术

樊朝斌 先齐 杨世军

中国石化西南石油局司重庆钻井公司

樊朝斌等.准噶尔盆地复杂火成岩地层防漏堵漏控压钻井技术.天然气工业,2011,31(9):88-92.

摘要 以准噶尔盆地石炭系火成岩为目的层的油气勘探开发已开展近20年,实钻中井漏问题十分突出,虽经过多年研究,但问题一直没有得到很好地解决。近年来,伴随着国内外成熟的钻、完井技术不断整合配套,基于大量的地质资料分析、基础理论研究成果及现场参数统计和室内实验与模拟结果,在上述地区开展了控压钻井(MPD)技术实践并获得成功。实践证明:MPD在该区的成功应用不但解决了长期困扰人们的井漏问题,而且还以其自身优势解决了诸如产层保护、井身结构优化、二叠系和石炭系地层机械钻速难以提高、井壁失稳和长裸眼段穿越多套压力系统共存的窄密度窗口等一系列相关难题。通过多项技术攻关和现场试验,提高了机械钻速、延长了钻头寿命,为该地区裂缝性火山岩气藏的勘探开发提供了技术保障。

关键词 准噶尔盆地 石炭系 火成岩地层 井漏 防漏堵漏 控压钻井 窄密度窗口 机械钻速 产层保护

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.09.018

目前世界火成岩气田主要集中在澳大利亚、美国、巴西、刚果、印度尼西亚及东欧的一些国家^[1-2]。近年来,我国先后在准噶尔、三塘湖、松辽、海塔、二连、渤海湾等盆地发现了火成岩油气田,显示了火成岩油气勘探开发的巨大潜力。火成岩油气藏已经成为我国重要的油气勘探开发领域^[3-4]。

以准噶尔盆地石炭系火成岩为目的层的油气勘探开发已开展近20年,实钻中井漏问题十分突出,虽经过多年研究,但问题一直没有得到很好地解决。控压钻井(MPD)在解决地层漏失、地层孔隙压力以及地层破裂梯度间压力窗口狭窄造成涌、漏等问题方面具有较大的技术优势,它同时还具备费用低、设备相对简单、井控风险较小、能在一定程度上提高机械钻速等优点^[5-7],因此值得在该区进行试验研究。

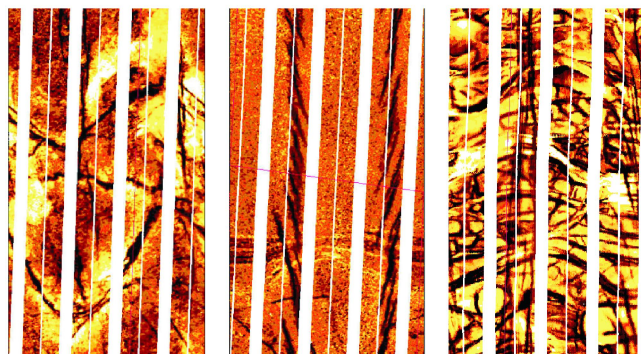
1 勘探开发难点

1.1 全井裸眼段井漏频繁

研究表明,准噶尔盆地中下部地层,地层孔隙极为发育,砂岩孔隙度大、连通性好、渗透率高,加之地层变化大,极易发生井漏且漏失量大,存在同一漏层多次漏失的现象,造成重复堵漏及漏失层位不易判断的难题,

用常规堵漏材料堵漏难度大、堵漏成功率低、承压难度大。二叠系压力系数又较高,易造成第二次开钻井段下部坍塌,提密度后又可能造成上部井漏等复杂情况。石炭系顶部存在风化壳、破碎带,裂缝发育,同样易发生漏失。钻井过程中,由于施工操作不当以及钻具碰撞等因素,易形成诱导性裂缝或使地层原有的微裂缝连通性更好,从而导致井漏升级。

该区地层裂缝发育,漏失压力低且漏失严重,井壁稳定性差。火成岩地层裂缝较发育,主要以网状缝(约占28%)、斜交缝(约占50%)、诱导缝为主(图1),裂



(a) 斜交缝

(b) 诱导缝

(c) 网状斜交缝

图1 研究区石炭系地层裂缝产状图

缝不仅是油气运移成藏的主要通道,也是钻进中造成钻井液漏失的重要原因;加之地层层系多、变动大,不整合接触,断裂系统发育,物源充足,沉积快速,欠压实,孔隙度高,裂缝发育,主产层石炭系顶部存在风化壳、破碎带,裂缝发育等因素的共同作用,使得漏失更易发生。钻井过程中,由于各种因素造成井内压力波动,易形成诱导性裂缝,或使地层原有的微裂缝贯通,导致井漏升级,井漏问题突出。高频漏失、恶性漏失已成为制约该区勘探开发步伐的最大障碍。

据该区已实钻的25口井的漏失资料统计,钻井中漏失普遍,平均每口井漏失8.6次,平均单次漏失量 $100\sim 200\text{ m}^3$,恶性漏失7次,最大漏失量达 933.35 m^3 ,单次最长堵漏时间为568.05 h(合23.67 d),防漏堵漏就成为该区钻井作业中的主要课题。

1.2 多套压力系统共存,常钻遇窄密度窗口

白垩系、侏罗系地层承压能力低(地层承压试验达不到 2 MPa),固井过程中易发生失返型漏失,石炭系裂缝性地层承压能力有限,邻井用 1.28 g/cm^3 泥浆做固井承压试验只做到 5 MPa 。同时测井资料也表明,该区井径极不规则,钻井过程中返屑常伴大量岩块;起下钻过程中易出现下钻不到底的情况,划眼时伴随大量岩块返出井内,2009年该区有2口井(占该区当年所钻井20%)出现埋钻,最终导致侧钻的严重井内事故。地应力研究结果表明,井区井壁坍塌压力较高,井壁稳定问题较为突出,属于典型的窄密度窗口区域,常规钻井情况下井内压力难以控制是造成该井区易出现井漏及井塌的根本原因,如图2所示。

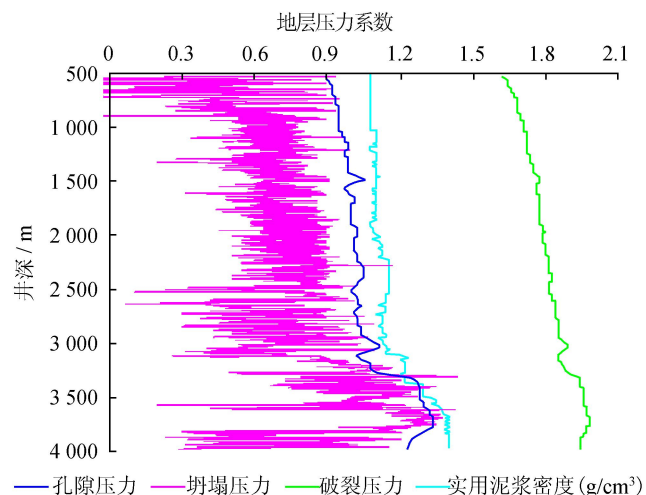


图2 研究区第二次开钻、第三次开钻地层压力分布图

1.3 地层研磨性强,抗压强度高,机械钻速低

前期从钻头选型和钻井方式上曾做过一些研究,

但效果并不理想,主要问题是牙轮钻头的使用寿命很低,复合钻常导致钻具磨损易造成井内事故,PDC钻头使用寿命不长,机械钻速与牙轮钻头相比毫无优势可言等。原因归纳起来主要是该区二叠系和石炭系岩石强度高,研磨性强,可钻性差,钻速慢。前期统计数据表明,二叠系和石炭系的机械钻速仅为 $0.48\sim 2.59\text{ m/h}$ 。室内岩心强度试验数据表明,区内石炭系火成岩的单轴抗压强度超过 100 MPa 。

1.4 井身结构限制

在前期勘探中,中国石油新疆油田公司(以下简称新疆油田)在井身结构设计上曾做了大量的研究,很早就确立了以裸眼完井方式为主的完井工艺。从原来的四开四完井身结构改成目前普遍使用的三开三完井身结构,四开的井身结构优势在于:能在一定程度上避免多套压力系统共存问题,也能在一定程度上减少漏失。但在钻井中无法避免在火成岩地层使用小井眼钻进,这使得机械钻速较低,而且井内事故较多,小井眼井下工具受限事故处理也多为不便,更为重要的是它使产量受限——后期采油工艺的实施受到其很大的制约。而三开三完的井身结构则具有前者所不具备的优势。如上所述,如何克服多套压力系统共存、固井质量不佳等所带来的一系列复杂问题是关乎三开三完井身结构成败成功应用的关键。

1.5 火成岩储层保护

前期取心分析化验资料及试油结果表明,该井区石炭系火成岩储层岩性以凝灰质砂砾岩、玄武岩、凝灰岩、凝灰质角砾岩和酸性花岗斑岩等为主,储层裂缝较发育,具有水敏、酸敏、水锁、无机物沉淀、应力敏感等伤害特征,火山岩储层保护的重点是控制钻井液和水泥浆滤液的抑制性、高矿化度、低滤失量和高裂缝封堵能力,传统的过平衡钻井会严重伤害储层。

2 控压钻井技术的应用研究

为高效开发克拉美丽气田,新疆油田开展了一系列研究、论证、实验工作,包括:井身结构的优化、欠平衡相关研究、控压钻井的相关研究、井壁稳定性研究、火成岩地层水平井产能影响因素分析、油基钻井液应用分析、低压易漏地层固井工艺研究,并针对火成岩地层特点开展了钻头选型与结构改进、强化钻井参数等研究,为后续制订一套行之有效的开发方案提供了大量的研究成果和经验。

2.1 控压钻井的核心

MPD的意图是控制钻井液环空的压力剖面,防止和处理由于井内当量液柱压力过大或过小产生的井内

复杂情况^[8]。目前 MPD 现场应用主要是针对通过对回压、流体密度、流体流变性、环空液位、水力摩阻和井眼几何形态的综合控制,使整个井筒的压力剖面维持在地层孔隙压力和破裂压力之间,进行平衡或近平衡钻井,有效控制地层流体侵入井眼,减少井涌、井漏、卡钻等多种钻井复杂情况。该技术被认为是目前能最有效解决窄密度窗口钻井难题的技术之一。

2.2 MPD 针对火成岩地层的技术优势

1)通过精确控制井底及剖面压力,使钻井液井眼环空的当量密度压力在不高于地层漏失压力的情况下能最大限度地防止漏失,即使在钻井过程中发生漏失也能及时调节节流阀的大小或降低排量。要注意的是,弄清漏失类型和关键因素此时就显得十分必要,如果漏失地层不是压力敏感型的漏失,则 MPD 就不一定能在防漏堵漏中起到关键性作用。

2)上述研究表明,该区为典型的窄密度窗口地层,井漏与井塌现象时常发生,对付这类地层目前 MPD 技术是最有效的办法之一。对于井漏的处理上已述及,而对于破裂压力的控制,主要在于对地层破裂做好预测,当量密度沿孔隙压力和漏失压力下限取值。但是对于地层破裂压力的预测和钻井液当量密度的计算需要做大量的统计研究工作才能得到准确的数据,现场才不会因为计算预测数据的不准确而导致井内事故。

3)有针对性地解决地层研磨性强、抗压强度高、机械钻速低的问题。本区火成岩地层为中孔中渗、中小孔喉的火山碎屑岩储集层,渗透性地层井底液柱压力从平衡变为欠平衡状态,机械钻速可以大大提高,有效解决火成岩机械钻速低的普遍问题,即渗透性地层的机械钻速可在井底压力与地层压差减小时大大提高。

4)通过较为精确的人为控制,能使井内钻井液压力剖面处于一个合理的区间范围内,能有效穿越大部分的多压力系统在地层,并保证其井内安全,保证井内不喷、不漏、不塌。避免了多下一层套管和最终用小井眼钻井的不利局面。

5)本区裂缝型火成岩储层损害以钻井液的水敏、水锁、无机物沉淀和应力敏感为主,所以减少钻井液进入产层就是保护主产层的关键。为此就得从两方面入手:①钻井液类型如油基泥浆和尽可能地降低其钻井液本身的滤失量;②钻井工艺上尽量减小地层压力与钻井液的当量密度压力差,避免钻井液大量进入地层。从减小压差保护储层的意义上来说,控压钻井能有效控制压力剖面保证压力差在可控的范围内,虽然保护力度不及欠平衡钻井,但从实际意义上来说它具有更能减少井内事故的风险、迅速处理井内复杂情况等欠

平衡钻井所不具备的优点^[9-10]。

2.3 控压钻井配套技术研究

克拉美丽气田控压钻井配套技术主要包括以下研究内容:

1)研究、分析已钻井情况,总结出实钻井中引起复杂、事故的地质条件,建立一套较逼真的地质模型,为钻井方案的选取提供地质依据。开展地层特性研究,分析已钻井的工程、地质、测井、测试等资料,建立钻井岩石力学特性剖面及地层压力剖面;进而建立针对克拉美丽气田的井漏计算模型,对防漏堵漏具有指导意义。

2)针对本区易出现的漏失问题,对控压钻井对防漏效果进行可行性分析、论证。总结实钻井的漏失地层特性、漏失规律,提出控压防漏、地层破裂压力的预测模型及控压防漏配套技术。

3)开展对本区地层的地应力和井眼稳定性评价研究和钻井完井方式优化研究,结合已钻井的井身结构,提出合理、经济、安全的适合控压钻井的井身结构。

4)针对二叠系火成岩地层机械钻速慢的问题,主要开展了钻头选型、钻井工艺技术研究比如配套的控压钻井技术研究和欠平衡钻井技术研究,欠平衡主要研究方向在泡沫钻井和充气钻井方向,由于地层容易失稳,目前的空气钻井工艺技术条件还不具备未开展。

5)油气层保护方面,研究主要从储层伤害机理研究入手,钻井工艺在欠平衡控压钻井工艺技术的应用研究外,从使用的无固相有机盐钻井液体系的降失水方面的研究和油基钻井液体系的研究应用。在这些方面新疆油田已取得了一些成果,实际效果也很好。

3 控压钻井技术的现场应用

根据前期勘探开发资料和后期数据处理计算结果,对试验井进行了相关技术参数设计。

3.1 控压钻井液密度设计

3.1.1 地层坍塌压力预测

经计算试验井(以下简称 X 井)第二次开钻至第三次开钻井段坍塌压力系数区间值为 $0.50 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$,易造成第二次开钻段下部坍塌,提密度后又会造成上部井漏的复杂情况(如图 2 所示)。可从图 2 中得知中上部地层(500~3 000 m)坍塌压力系数在 $0.5 \sim 0.75$ 之间,这说明在 500~3 000 m 控压钻井的当量密度可采用低限值,加大与地层压力的差值,改善提速效果,甚至在条件具备的情况下可用欠压平衡钻井;下部地层至主产层(3 000~4 000 m)坍塌压力系数在 $0.9 \sim 1.15$ 之间,此段的坍塌压力值较高,采用欠平衡

钻井易造成井壁不稳,近平衡钻井也井壁稳定性也不高。因此目标井井深 3 000~4 000 m 井段是控压的关键层和难点层段。实钻资料统计表明:为了防止该大段泥岩坍塌,提高密度带来上部地层的漏失的情况经常发生。

3.1.2 地层孔隙压力预测

与坍塌压力的趋势基本一致,可从图 2 可知中上部地层(500~3 000 m)地层孔隙压力系数在 0.9~1.0之间;下部地层至主产层(3 000~4 000 m)地层孔隙压力系数在 1.0~1.3 之间。本段地层最高压力系数出现在 3 200~3 700 m 之间,在这一段钻井中主要的矛盾在于产层保护和此井段的地层坍塌压力也相应较高。3 200~3 700 m 对于控压钻井来说是在重点和难点井段,此段的主要任务是防塌、防漏和储层保护。

3.1.3 地层破裂压力预测

根据邻井的地质资料计算,本井的地层破裂压力系数在 1.62~1.95 之间,从大区域实钻资料上来看,该区域的地层破裂压力梯度最高 2.94,最低 1.38 表现火成岩的破裂压力极不规律,统计数据表明该区由

于钻具激动压力致使井漏的次数占总漏失次数的 10%,因此设计钻井液密度时应当考虑的是地层破裂压力可能会偏低,从而造成井漏的影响。

3.1.4 钻井液密度设计

控压钻井的钻井液密度值设计主要依据 3 项压力预测结果而设计,主要考虑的在于 500~3 000 m 井段,地层中会钻遇数个小气层,为井控安全起见,井底压差会稍大,钻井液密度设计区间为 1.07~1.15 之间;下部地层主要考虑防漏和储层保护以及提高机械钻速的要求,加上地层坍塌压力较高的不利因素,主要思路:主产层之外的地层用过平衡的方式,在安全前提下减小井底压差提高钻井速度;而在产层中钻进时,用微过平衡、平衡甚至在条件允许情况下采用适当欠平衡钻井。

3.2 井身结构设计

井身结构原则,前述由于本井为控压钻井能在可控的范围内避免井内复杂情况的出现,而采用三开三完井身结构,为提速和后期采油工艺的实施打下良好基础。井身结构设计数据如表 1 所示。

表 1 X 井水平井井身结构设计数据表

开钻次序	井深/m	钻头直径/mm	套管直径/mm	套管下深/m	水泥返高/m
第一次开钻	500	444.5	339.7	500	地面
第二次开钻	3 100	311.2	244.5	3 100	1 800
第三次开钻	4 000	215.9	裸眼完井		

3.3 井底压力数据计算校正

前述井深 500~3 000 m 平均孔隙压力系数为 0.95,坍塌压力系数介于 0.5~0.75,初步选定井底动压差为 2.0~3.5 MPa。井深为 3 000~4 000 m,平均孔隙压力系数为 1.15,坍塌压力系数在 0.9~1.15 之间初步选定井底动压差为 0.7~1.4 MPa。考虑其存在的风险和地层压力系数的不确定性,分别模拟不同钻井液密度条件下,井底静态和动态欠压差设计。石炭系地层孔隙压力梯度当量密度系数一般在 0.899~1.301 之间变化,波动范围较大,该层位地层孔隙压力异常,如果实钻中与预测不符可适当调整回压值或泥浆密度。

由表 2 可知按控压钻井设计 500~3 000 m 钻井液密度应介于 1.07~1.09 g/cm³,3 000~4 000 m 井段钻井液密度介于 1.15~1.20 g/cm³ 之间比较合适。

3.4 现场应用

X 井第三次开钻全段采用控压钻井方式,开始钻井密度为 1.16 g/cm³ 的钻井液,井口回压为 1 MPa,

表 2 X 井不同钻井液密度井底压差设计表

设计项目	工况	钻井液密度/g·cm ⁻³		
		1.00	1.12	1.20
井底压差/MPa (井深 500~3000 m)	静止	1.50	5.10	7.50
	钻进	1.87	5.48	7.90
井底压差/MPa (井深 3 000~4 000 m)	静止	-6.00	-1.20	2.00
	钻进	-5.49	-0.68	2.50

计算井底压力为 46 MPa,当循环密度为 1.19 g/cm³ 时井底预测压力为 47.60 MPa,井底压差值为 1.6 MPa,实际钻井过程中,钻过主产层后的停泵作业后的后效气测值较高,需要专门循环除气,正常钻井气测值则又回落至正常值,基本实现产层压差的原则。

X 井自第二次开钻、第三次开钻井段只有一次漏失现象发生,现场及时打开节流阀、减小循环排量,降低井底压力,井漏问题得以迅速解决,比邻井 8.6 次的漏失,控压钻井防漏堵漏效果明显。第三次开钻 3 100 m 钻至井深 4 000 m 完钻火成岩井段,共进尺 900 m,平均机械钻速 0.87 m/h。单只钻头最高平均机械钻

速达到 2.36 m/h,比先前同层位开发的直井平均机械提高 40%,由于本井为水平井,控制方位和井斜在整个钻井过程中,大大降低了机械钻速;牙轮钻头的平均使用时间 95.8 h 且钻头出井评价钻头磨损量均未超过 20%,使用时间是同等地层条件下邻直井钻头使用时间的 2 倍以上,同时也减少了起下钻的次数和时间,保证了钻井纯钻时间,提高了钻井效率,钻井周期缩短 24~43 d;井深 3 800 m 左右井内返屑中发现岩块并且数量有上升趋势,调整泥浆密度至 1.21 g/cm³ 掉块现象消失,但后效气测值有气下降。最终试气结果表明,X 井采用 9 mm 油嘴日产气量达到 20.20×10⁴ m³。

4 应用效果评价及建议

1)控压钻井对复杂多压力系统共存的井段钻井,有明显的防漏堵漏优势。

2)目前虽然在火成岩地层的井壁稳定性评价方面做了大量的工作,但是由于火成岩地层的变化差异较大,邻井资料可借鉴意义有限,如何提高其预测精度成为难点,其技术领域有待提高。

3)配套工艺不完善时压力差值不易过大,如在实验井中常停泵,井内气侵严重,需要花一定的时间除气,在此推荐钻井液连续循环装置来弥补其不足。

4)压差的减小对牙轮钻头的提速有很大意义,建议在坍塌压力、孔隙压力及漏失压力允许的条件下进一步缩小其差值以提高机械钻速,延长钻头寿命。

参 考 文 献

- [1] 江怀友,郭建平,郭士尉,等.世界火成岩气藏勘探开发现状与展望[J].天然气技术,2010,4(2):8-10.
- [2] 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.
- [3] 张玉广.中国火山岩油气资源现状及前景预测[J].资源与产业,2009,11(3):23-25.
- [4] 李伟廷,侯树刚,兰凯,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.
- [5] 于水杰,李根生,罗洪斌,等.MPD 技术及 UBD 技术在钻井工程中的应用分析[J].西部探矿工程,2009,21(7):89-92.
- [6] 杨明合,夏宏南,蒋宏伟,等.火山岩地层优快钻井技术[J].石油钻探技术,2009,37(6):44-47.
- [7] 严新新,陈永明,燕修良.MPD 技术及其在钻井中的应用[J].天然气勘探与开发,2007,30(2):62-66.
- [8] 石希天,刘斌,徐金凤.中古 8 控压钻井实践与认识[J].钻采工艺,2009,32(2):77-78.
- [9] MEDLEY GEORGE H, REYNOLDS PATRICK B B. Distinctive variations of managed pressure drilling exhibit application potential[J].World Oil,2006,(3).
- [10] HANNEGAN D M. Managed pressure drilling in marine environments — case studies[C]//paper 92600-MS presented at the SPE/IADC Drilling Conference,23-25 February 2005, Amsterdam, Netherlands. New York: SPE/IADC,2005.

(修改回稿日期 2011-07-13 编辑 居维清
特约编辑 杨 斌)