

气体钻井高效开发致密砂岩气藏^{*}

李 皋¹ 孟英峰¹ 唐洪明¹ 周焕顺² 李永杰¹

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2.中国石油长庆油田公司勘探部)

李皋等. 气体钻井高效开发致密砂岩气藏. 天然气工业, 2007, 27(7): 59-62.

摘 要 致密砂岩气是一类非常重要的非常规油气资源, 但该类气藏岩石致密、孔喉细小、孔渗低、黏土矿物改造作用强、强亲水并且原始水饱和度低。钻井完井过程中该类气藏易受损害并难以解除, 主要的储层损害类型包括固相堵塞、与液相侵入相关的敏感性损害和水锁损害、应力敏感性损害, 其中液相损害的影响要大于固相侵入堵塞。采用常规的过平衡和欠平衡钻井技术由于严重的储层损害而普遍效率低, 难以形成对该类气藏的有效勘探开发。理论和现场试验均表明, 气体钻井技术是一种高效开发致密砂岩气藏的钻井技术, 它不仅从根本上避免了钻井液钻井中由固、液相侵入引起的储层损害, 有效保护了储层; 还极大地提高了钻速, 减少了钻井事故, 缩短了建井周期。

主题词 气体钻井 天然气 二氧化碳 空气 柴油机尾气 致密砂岩 储层损害 钻井液

我国致密砂岩气资源丰富, 在非常规油气资源中占有十分重要的地位, 是缓解我国石油天然气资源供应的紧张形势和保持国民经济可持续发展的重要保证^[1,2]。但该类气藏地质条件复杂, 易受储层损害且难以解除, 采用常规的钻井完井技术由于严重的储层损害而难以满足高效勘探开发的需要^[3,4]。气体钻井技术采用气体作为钻井循环介质, 避免钻井固、液相侵入对储层的损害, 从而达到保护储层的目的。目前, 气体钻井技术已经打开了我国致密砂岩气高效勘探开发的新局面^[5]。笔者通过该类气藏地质特征、损害特征、常规钻井技术开发低效原因等的剖析, 探讨了气体钻井技术在该类气藏高效开发中的机理与应用。

一、致密砂岩气藏地质特征及钻井储层损害特征

1. 致密砂岩气藏地质特征

致密砂岩一般碎屑颗粒粒径较细, 碎屑成分以长石、石英和岩屑为主, 富含黏土和碳酸盐胶结物。成岩作用以压实、胶结、溶蚀和破裂作用发育为特征^[6]。对浅层致密砂岩, 胶结作用起着主要作用; 对深层致密砂岩, 压实成岩作用强烈, 并且破裂作用普

遍较浅层发育。原生粒间孔多被溶蚀和胶结作用改造, 孔隙类型以残余粒间孔、溶蚀孔和晶间孔发育为特征, 喉道类型以片状、弯片状喉道以及束状喉道发育为主。孔隙之间的连通性普遍较差, 导致该类砂岩的孔隙结构普遍较差, 渗透率低。

裂缝普遍发育是该类气藏的重要特征且具有十分重要的意义。但不同的致密砂岩储层类型其裂缝发育特征并不一样。以川西为例, 浅层蓬莱镇组气藏以低角度和水平微缝为主, 而深层须二段气藏则为裂缝—孔隙型双重介质储层, 不仅微裂缝发育, 还发育宏观裂缝, 密度可达 20 条/m。

致密砂岩一般黏土矿物发育且具有极为重要的意义。该类储层常见黏土矿物类型包括伊利石、绿泥石、伊/蒙间层、绿/蒙间层和蒙脱石; 高岭石一般含量较低, 仅在少数致密砂岩储层中发育, 如鄂尔多斯盆地的上古生界气藏。致密砂岩中粒表衬垫和桥接式的黏土矿物对孔隙空间的分割和充填占主要地位。黏土对喉道的分割作用形成大量的微细孔喉在更大程度上导致了岩石致密化。致密砂岩中自生黏土矿物使得骨架颗粒表面粗糙度增加, 润湿接触角减小, 孔隙表面的亲水性增强, 普遍表现为强亲水特征^[7]。同时, 压实成岩致密化和黏土矿物对孔喉空

^{*} 本文受到“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”开放基金项目(编号: PLN0413)资助。本文作者还有“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学的肖春平。

作者简介: 李皋, 1976年生, 博士, 西南石油大学在站博士后, 从事低渗油气藏地质、储层保护、欠平衡钻井和气体钻井研究工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区。电话: (028) 83032806。E-mail: lgewc@263.net

间的分割使得该类气藏的束缚水饱和度较高,一般在50%~70%;成藏过程的各种地质作用以及黏土矿物形成过程对原生孔隙水的消耗则使得该类气藏原始水饱和度较低^[8],一般在30%~40%。强亲水性加上低的原始水饱和度使得气藏在接触外来水相时具有强的毛细管自吸势能。

2. 致密砂岩气藏钻井储层损害特征

致密砂岩气藏的上述特征使得其相比于其他储层在钻井完井过程中其更容易受到储层损害并难以减轻和解除。钻井储层损害主要包括以下方面。

(1) 固相侵入堵塞损害。钻井液固相包括人工钠土、屏蔽暂堵粒子、加重剂等固相添加剂和混入的地层微粒,粒径在小于1 m到几百微米均有分布。致密砂岩基块孔隙的侵入固相粒径往往在5 m以下,且侵入堵塞深度很浅。而裂缝宽度远远大于大部分钻井固相粒径,正压差的作用下固相快速侵入沿裂缝表面形成滤饼,堵塞裂缝及裂缝网络,使裂缝渗流能力大幅降低,甚至完全丧失。因此,裂缝的固相堵塞深度一般较大,极难解除。

(2) 与液相侵入有关的敏感性损害。气藏原始可动孔隙流体为气体,滤液侵入必将引起原始平衡条件的破坏,发生与地层矿物和流体之间的不配伍反应。侵入液可引起黏土矿物强度降低、水化膨胀及分散脱落,诱发水敏、速敏,以及碱敏等多种形式的敏感性损害,严重时可使气藏丧失产能。

(3) 水锁损害。是该类气藏的主要钻井储层损害类型。钻井正压差驱动和毛细管自吸效应可使水基钻井液滤液迅速侵入气层,引起近井区域含水饱和度升高,产生水锁损害。以川西侏罗系蓬莱镇组气藏为例,原始含水饱和度在30%~40%,束缚水饱和度在50%~70%。当含水饱和度大于65%时,气相渗透率接近或等于0,造成强水锁损害^[9]。水锁损害不仅在孔隙性基块发生,还沿裂缝表面形成强水锁损害区域,阻止天然气由基块流向裂缝。

(4) 应力敏感性损害。以裂缝的应力敏感损害为主。在过平衡钻井过程中,正压差使裂缝张开,固、液相得以大量侵入;起下钻引起的压力激动也将引起裂缝内侵入固相的重复压实和堵塞。欠平衡钻井中,裂缝趋于闭合,渗流能力降低。

钻井过程致密砂岩气藏的各种储层损害往往是相互联系、共同作用的,在常规油气藏见效的损害解除措施往往对砂岩气藏储层损害无能为力,且极易诱发二次损害。从一打开储层开始,就必须采取有效的储层保护措施以确保其高效勘探开发。

二、常规钻井液钻井技术勘探开发低效原因剖析

1. 过平衡钻井液钻井

过平衡钻井液钻井井筒液柱压力高于地层孔隙流体压力。在正压差的驱动下,钻井液中的固相和液相均会向地层孔隙和裂缝中侵入,引起损害。但不同性质的钻井液引起的储层损害特征不同。

(1) 常规水基钻井液。常规水基钻井液固相对致密砂岩基块的侵入堵塞深度较浅,但可对裂缝和裂缝网络形成严重堵塞引起近井裂缝网络失去产能,并很难被解除。更重要的是,在钻井正压差和毛细管力的驱动下,可在基块和沿裂缝表面区域形成液相侵入带,产生敏感性损害和严重的水锁损害。相比于固相堵塞,液相侵入更深,侵入速度更快,损害更严重,解除更困难。另外,钻井液中的高分子聚合物还可在孔道壁形成附着层。

(2) 无固相清洁盐水钻井液。采用无固相清洁盐水的目的是为了固相侵入损害和防止黏土膨胀引起的敏感性损害。实际上,钻井地层微粒的混入使得清洁盐水并不“清洁”。在固相堵塞和敏感性损害减轻的情况下,液相可在裂缝面和基块孔隙形成的水锁损害不可避免,甚至更严重。

(3) 油基钻井液。油基钻井液避免了黏土矿物的水化膨胀和自吸毛细管力对液相的驱动作用。但是在正压差的作用下,油基钻井液的固、液相侵入仍不可避免,产生固相堵塞、润湿性反转、乳化堵塞和有机垢堵塞等损害类型。

(4) 屏蔽暂堵钻井液。在常规油气层的过平衡钻井中,经过良好设计的屏蔽暂堵钻井液可有效地减小固相侵入深度和液相滤失量。致密砂岩孔隙结构的非均质性强,孔径分布频带宽,很难利用粒子架桥理论设计出合理的粒子级配实现有效封堵。尤其对裂缝进行屏蔽暂堵非常困难。室内实验表明,对宽度大于100 μm的微缝,现有的屏蔽暂堵技术难以将其封堵,在正压差作用下钻井液会快速侵入裂缝;对较小的微缝,封堵所需时间长(一般在10 min以上),在建立封堵过程中,固液相沿微缝长驱直入,侵入很深,并沿裂缝表面形成水锁损害带,使裂缝成为无供气能力的死缝,很难被解除。

2. 欠平衡钻井液钻井

由于正压差是过平衡钻井液钻井储层损害的最重要诱因,对该类气藏开发低效是该种钻井方式的必然结果。欠平衡钻井液钻井克服了正压差的作

用,钻进过程地层流体可有控制地流入井筒,克服了固相侵入损害和正压差在液相侵入中的驱动作用。如采用油基钻井液的欠平衡钻井,可较为有效地保护致密砂岩气藏。如采用水基钻井液,仍可存在一定程度的逆流自吸效应,引起钻进过程气相渗透率的降低。对于渗透率相对较高的孔隙性砂岩气藏和裂缝性密砂岩气藏,科学设计的水基欠平衡钻井可实现一定程度的产能保护;但对于裂缝欠发育的情况,逆流自吸效应可引起严重的水锁损害,难以实现有效的产能保护。

而非连续欠平衡条件造成的储层损害则是导致常规欠平衡钻井技术在该类气藏开发低效的根本原因。在欠平衡钻进过程中,由于接单根、更换钻头起下钻、局部衰竭效应、摩擦流动效应、静液柱效应、不同压力层系共存、气藏压力预测不准等因素,会导致间歇的过平衡压力波动。另外欠平衡钻井过程中的各种中途测试,以及在后欠平衡钻井过程中采用的各种过平衡作业,如压井、固井等作业也可造成非连续欠平衡条件。由于井壁缺少滤饼的保护,后期间歇或连续的过平衡条件会导致钻井液的严重漏失,造成严重的固液相侵入损害。这种损害甚至超过了常规的、设计良好的过平衡钻井液体体系所造成的损害。

三、气体钻井高效开发致密砂岩气藏的机理及实例

1. 气体钻井技术高效开发的机理

气体钻井技术是在欠平衡钻井技术基础上发展起来的一项钻井技术,其良好的储层保护效果已经引起广泛重视,已经被作为该类高效开发的有力手段而进行大规模实验。气体钻井利用氮气、天然气、二氧化碳、空气和柴油机尾气等多种气体作为钻井循环介质,从根本上避免了常规钻井技术发生储层损害的物质基础。相比于常规钻井液钻井技术,气体钻井避免了固相堵塞和液相侵入引起的敏感性损害,还彻底克服了钻井液滤液侵入引起的水锁损害,有效保护了基块孔隙和裂缝。气体钻井通常采用裸眼完成,避免了固井、射孔完成以及后续增产作业带来的二次损害和昂贵的作业费用。

除了良好的储层保护效果外,气体钻井还能够有效地提高钻速,减少钻井事故,有效缩短建井周期,降低作业成本。气体钻井可以使钻速提高 4~14 倍,钻头寿命延长 2~6 倍,而且越是深井、硬地层,提速效果越显著^[10-19]。其提速机理的定性解释主要

包括:消除了钻井液液柱的“压持效应”;使井底应力状态由“压应力”改变为“拉应力”,井底岩石强度降低 1/2~1/3,岩石更容易被破碎;岩石的脆性增强,研磨性大幅度降低,抗冲击载荷强度降低;井底清洁程度高,减少了井底钻屑的重复破碎和研磨;钻头轴承和牙齿使用寿命延长等。气体钻井不仅克服了压差卡钻和减轻了蹩跳钻引起的钻具损坏事故,还彻底克服了裂缝性地层的井漏事故及其引发的严重储层损害。

无论从储层保护,还是从减少钻井作业成本和钻井事故的角度考虑,气体钻井技术均能够满足高效开发致密砂岩气藏的需要。

2. 气体钻井技术应用实例

(1) BQ111H 井气体钻井实例。BQ111H 井位于川西白马庙构造,目的层是侏罗系蓬莱镇组致密砂岩气藏。2004 年 7 月,BQ111H 井水平段在储层内设计延伸 200 m,采用了柴油机尾气现场制取惰性气体的技术提供注入气体。柴油机尾气钻进水平段 25 m 后,由于临时调用的高压天然气压缩机与低压压缩机之间的参数不匹配,造成高压天然气压缩机工作困难,改用管道天然气完成水平段 200 m 的钻进。机械钻速由常规钻井的不足 3 确 m/h 提高到 9.76 m/h,一只钻头完钻。BQ111H 与 BQ106、BQ108、BQ109H 处于同一井场的丛式井组,其中 BQ111H 井地质条件及井身设计与 BQ108 井极为相近。BQ108 井为大斜度井,最大井斜为 80.4°,目的层与 BQ111H 井均为蓬 IV 主砂体,实钻斜深 977~1308 m,进尺 331 m,采用无固相钻井液钻进,完钻后提高钻井液密度至 1.15 g/cm³ 压井。从表 1 看出,由于较好地保护了储层,采用了天然气钻井结合水平井工艺的 BQ111H 井完井测试产量远高于其他各井产量。

表 1 BQ111H 井与邻井产量对比表

井号	钻井类型	钻井液密度 (g/cm ³)	完井测试产量 (10 ⁴ m ³ /d)	压裂后产量 (10 ⁴ m ³ /d)
BQ106	直井欠平衡	1.05~1.07	0.379	未压裂
BQ108	斜井欠平衡	1.07~1.09	0.831	4.563
BQ109H	水平井过平衡	1.17~1.25	0.302	5.344
BQ111H	水平井气体	0.023~0.029 (ECD)	6.85	未压裂

(2)PL19井气体钻井实例。PL19井是四川盆地平落坝潜伏构造上的一口开发井,目的层为须家河组须二段。该构造由于已有多口井的长期开采,造成储层压力降低,当量密度为 $0.73\sim 0.85\text{ g/cm}^3$,各井初产见表2。为防止储层井漏造成对储层的伤害,决定对该井须二段目的层采用天然气钻井,并采用免电测、不压井完井或原钻具完井的储层保护完井方式。

表2 平落坝构造各井初始产量统计表

井号	气产量 ($10^4\text{ m}^3/\text{d}$)	井号	气产量 ($10^4\text{ m}^3/\text{d}$)
PL1井	12.6687	PL11井	9.3538
PL2井	13.0526	PL12井	22.4756
PL3井	2.778	PL17井	12.6958
PL8井	8.2684	PL18井	12.756
PL10井	8.2478	PL20井	5.2011

2004年5月,以PL2井生产天然气为气源,注气量为 $60\text{ m}^3/\text{min}$,1只 $\varnothing 152.4\text{ mm}$ HA517G钻头完成了 $3696.00\sim 3760.71\text{ m}$ 井段的天然气钻井,平均机械钻速为 7.23 m/h 。经原钻具环空测试,在流动压力为 14.84 MPa 条件下产天然气 $47.27\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,最大关井压力 19.93 MPa ;地层压力为 25.51 MPa ;无阻流量为 $60.04\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,产微水。所获产量远高于同构造其他井的初始产量,达到了良好储层保护和高效开发的效果。

四、结 论

(1)致密砂岩气藏地质特征主要表现为岩石致密,孔渗低,孔喉细小,黏土矿物改造作用强,强亲水且原始含水饱和度低。

(2)钻井过程易受储层损害并难以减轻和解除,主要损害类型包括固相侵入堵塞、与液相侵入有关的敏感性损害、水锁损害和应力敏感性损害。其中液相损害要大于固相损害,对裂缝的损害要强于孔隙性基块。

(3)常规过平衡钻井和欠平衡钻井可引起严重的储层损害,导致其在该类气勘探开发中普遍低效,不能满足高效开发的需要。

(4)气体钻井技术可以高效开发致密砂岩气藏,它不仅可从根本上避免常规钻井液钻井存在的固液相侵入损害,有效保护该类气藏;还能有效提高钻速、减少钻井事故、缩短建井周期和节约钻井成本。

参 考 文 献

- [1] 康竹林.中国深层天然气勘探前景[J].天然气工业,2000,20(5):1-4.
- [2] 马新华.关于21世纪初叶中国天然气勘探方向的初步认识[J].石油勘探与开发,2000,27(3):1-4.
- [3] 顾战宇.制约川西致密砂岩气藏高效开发主要因素探讨——以新场气田浅、中储层特征为例[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(4):510-512.
- [4] 张宁生.低渗天然气气层损害机理探究[J].西安石油学院学报,2002,17(3):16-18.
- [5] 孙宁.气体钻井好戏连台——中油集团钻井科技重大现场试验纪实[J].中国石油企业,2005(8):96-98.
- [6] 李皋.低渗砂岩气藏水锁损害机理、预防及解除技术研究[D].成都:西南石油大学,2005.
- [7] 张曙光.储层岩石表面接触角的不确定性研究[J].矿物岩石,2001,21(1):48-51.
- [8] KATZ D L, LUNDY C L. Absence of connate water in Michigan reef gas reservoirs-an analysis [J]. AAPG Bulletin, January 1982.
- [9] 李皋.川西侏罗系蓬莱镇组浅层低渗气藏水锁损害研究[J].钻采工艺,2004,27(6):47-50.
- [10] 魏武,许期聪,邓虎,等.气体钻井技术在七北101井的应用与研究[J].天然气工业,2005,25(9):48-50.
- [11] 巨满成,林勇,吴学升,等.气体欠平衡钻井工艺技术在长庆气田的研究与应用[J].天然气工业,2005,25(4):61-64.
- [12] 马光长.空气钻井技术及其应用[J].钻采工艺,2004,27(3):4-8.
- [13] 邓小刚,庄立新,范作奇,等.深井高密度盐水钻井液流变性控制技术[J].西南石油学院学报,2006,28(4):63-65.
- [14] 单高军,崔茂荣,张云怡,等.钻井液润湿性对固井I、II界面胶结质量的影响[J].西南石油学院学报,2006,28(1):56-58.
- [15] 严思明,王晓栋,宋芳,等.水泥浆中高分子形态与失水关系的研究[J].西南石油学院学报,2006,28(3):99-102.
- [16] 齐宝权,张树东,王兆年,等.碳酸盐岩储层高电阻率影响因素探讨[J].西南石油大学学报,2007,29(1):26-29.
- [17] 平立秋,汪志明,魏建光.欠平衡钻井多相流模型评价分析[J].西南石油大学学报,2007,29(1):75-78.
- [18] 李成勇,张烈辉,刘启国,等.薄层底水油藏部分打开直井试井解释方法研究[J].西南石油大学学报,2007,29(1):79-81.
- [19] 聂荣国,石晓兵,刘鹏,等.偏轴钻具组合防斜打快的强度分析[J].西南石油大学学报,2007,29(1):82-84.

(收稿日期 2006-12-27 编辑 钟水清)