

◀ 南方海相专题 ▶

编者按 南方海相领域具有十分丰富的油气前景,有利勘探面积约 $90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 天然气资源总量 $14 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 勘探前景广阔。目前, 南方油气勘探工作已实现了勘探突破有大发现、勘探准备有进展、老区勘探有成效的目标, 进入了一个新的历史阶段, 为中国石化增储上产创造了条件, 为国民经济的持续健康协调发展做出巨大贡献。为了总结南方海相地区钻井完井实践的经验与教训, 分析存在的问题并探讨技术对策, 从而进一步提高该地区钻井速度, 促进南方油气资源的早日突破, 实现中国石化的资源战略目标, 《石油钻探技术》期刊以“南方海相专题”的形式, 组织刊发了 10 篇关于南方海相地区钻井完井技术的论文, 从钻井、固井、钻井液、工具研制与优选、井眼稳定等方面较全面地介绍了中国石化在川东北地区的钻井完井实践, 并希望能进一步促进该地区钻井技术的进步和提高。

普光气田钻井技术发展与展望

张金成^{1,2}

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2. 中原石油勘探局 钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 详细总结了普光气田钻井技术的发展历程, 并将该气田钻井技术的发展分为探索、发展和气体钻井 3 个阶段。在探索阶段重点介绍了普光气田所遇到的钻井难题, 在发展阶段重点总结了采用的主要钻井技术, 在气体钻井阶段重点阐明了采用气体钻井技术所取得的巨大成就。普光气田钻井勘探开发的历史虽然只有 6 a 多的时间, 但机械钻速由探索阶段的 0.99 m/h 提高到发展阶段的 1.70 m/h, 再提高到气体钻井阶段的 3.26 m/h, 钻井技术的不断进步有力地保障了该气田的开发建设。最后指出了普光气田钻井技术下一步的攻关方向。

关键词: 气体钻井; 钻井速度; 现状; 发展趋势; 普光气田

中图分类号: TE242.6 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-0890(2008)03-0005-05

1 普光气田概况

普光气田位于四川省东北部大巴山南麓, 为双石庙—普光北东向构造带上一个鼻状构造。1986 年开始在该地区进行勘探, 2003 年 5 月普光 1 井勘探取得重大突破, 获得高产工业气流。随即中国石化进行了重点勘探, 不断取得突破。截至 2006 年底, 普光气田探明含气面积约 28 km^2 , 可采储量 $2.511 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。普光气田气井主要钻遇中生界和上古生界地层, 自上至下依次钻遇遂宁组、上下沙溪庙组、千佛崖组、自流井组、须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组、长兴组和龙潭组。目前主要目的层为飞仙关组。该气田地层为陆相、海陆相交互和海相沉积, 其中须家河组及其以上地层属陆相地层, 雷口坡组及其以下地层为海相地层。

从 2001 年下半年开始, 普光气田进入勘探开发阶段, 至今虽然只有 6 a 多的时间, 但普光气田的钻井速度却得到了很大的提高, 有力地保障了普光气田的开发建设。

2 普光气田钻井技术的发展^[1]

普光气田钻井技术发展历程可分为 3 个阶段^[2-3]: 2001 年 9 月至 2003 年 6 月为探索阶段, 2003 年 7 月至 2005 年 12 月为发展阶段, 2006 年 1 月到现在为气体钻井阶段。

2.1 探索阶段

2.1.1 钻井概况

探索阶段只打了 1 口井, 即普光 1 井(记为 P1)

收稿日期: 2007-09-17; 改回日期: 2008-02-04

基金项目: 中国石油化工股份有限公司十条龙攻关项目“南方复杂深井钻井关键技术研究”(编号: P06065)部分内容

作者简介: 张金成(1963—), 男, 1985 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 1988 年获石油大学(北京)油气田开发专业硕士学位, 中科院力学研究所在读博士研究生, 首席专家兼科技办公室主任, 高级工程师, 主要从事钻井工程技术研究与管理工作。

联系电话: (0393) 4899640

井)。该井是普光气田第一口探井,为大位移定向井,原设计井深 5 509 m,水平位移 1 289 m,于 2001 年 11 月 3 日开钻,2003 年 4 月 27 日完钻,完钻井深 5 700 m,钻井周期 540.23 d,平均机械钻速 0.99 m/h,取心进尺 24.54 m,心长 24.28 m,岩心收获率 98.9%。该井共使用了 124 只钻头。通过该井的钻探,对普光气田的地质状况有了初步的了解,认识到了存在的主要钻井难题,获得了大量的第一手资料,为该气田的勘探开发提供了必要的基础数据。

2.1.2 存在的钻井难题^[4]

1)上部地层硬度大、研磨性强、可钻性差。须家河组石英砂岩硬度达 8 级,上部陆相地层可钻性级值平均为 6.03,一般在 5~8 之间,再加上当时的钻头等钻进工具对普光地层的适应性较差,致使机械钻速很低。

2)高陡构造,井斜问题突出。普光构造属于褶皱构造,地层倾角一般在 30°~80°之间,地层具有很强的自然造斜能力,极易发生井斜。

3)井壁失稳严重。该地区部分地层为裂隙性地层,极易发生井漏,部分地层漏失非常严重。该井在 89~154 m 井段出现 5 次井漏,共漏失钻井液 164 m³,平均漏速 2.73 m³/h;由于地层遭到钻井液的浸泡,强度降低,再加上由于漏失,井眼内钻井液柱静液压力降低,导致出现恶性井塌。

4)岩性多变,岩石坚硬,跳钻严重,断钻具事故频繁发生。2001 年 12 月 1 日,该井钻至井深 919.94 m 时断钻具,耽误时间 1 d;2002 年 2 月 19 日,钻至井深 2 355.11 m 时断钻具,耽误时间 19 d。

5)上部须家河组地层稳定,但可钻性差,研磨性强,钻头寿命短。

6)定向井套管及钻具磨损严重。

7)部分地段高含 H₂S 等有毒气体,对钻井设备

和作业人员的安全带来很大隐患。

8)由于地层压力预测不准,井身结构设计不合理,井下频繁出现复杂情况。

2.1.3 采用的钻井技术

1)钻头优选技术 下沙溪庙组和千佛崖组地层,选用 SH33 系列钻头较 HJ537 系列钻头的钻速有明显提高;在自流井组和须家河组地层,改变原 HJ537 系列钻头的齿型与布齿结构,平均机械钻速由原来的 0.48 m/h 提高到 0.98 m/h;与川石、百施特合作开发了适应该地区三开地层特点的 PDC 钻头,在雷口坡组和嘉陵江组地层使用,综合效益提高 150%。

2)防斜打快技术 采用了“偏轴+单稳定器”钻具组合和“PDC 钻头+井下动力钻具”复合驱动的钻井方式。

3)套管防磨技术 应用 FM 系列钻柱式防磨减扭接头,有效保护了技术套管。

4)钻井液技术 针对钻井过程中出现的井漏, H₂S、CO₃²⁻ 及 HCO₃⁻ 含量超标和钻井液密度低等问题,经多方调研,对该区块地层进行了全面分析后,将钻井液转化为聚合醇聚磺钻井液体系,同时采取了一些有力措施来提高钻井液的携砂和防塌能力、高温稳定性、润滑性,以及消除 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 对钻井液性能的影响。

2.2 发展阶段

2.2.1 钻井概况

发展阶段主要是在探索阶段的基础上,认真总结了 P1 井的经验和教训,通过推广应用钻头优选、双驱复合钻井技术等提高钻井速度,因此该阶段也可称为提速阶段。在该阶段分 3 个钻井轮次先后钻了 P2 井、P3 井和 P4 井等 9 口井(各井具体指标见表 1)。

表 1 普光气田发展阶段已完钻探井的基本情况

井 号	开钻日期	完钻井深/m	钻井周期/d	机械钻速/m·h ⁻¹	钻头用量/只	钻井轮次
P2	2003-09-26	5 353	225.73	2.31	78	第二轮
P3	2003-11-11	6 110	421.67	1.29	78	
P4	2003-12-27	6 122	361.07	1.56	80	
P5	2005-02-01	6 090	296.50	1.68	56	第三轮
P6	2005-01-23	5 510	209.18	1.91	52	
P7	2004-12-08	5 936	316.80	1.67	59	
P8	2005-10-03	5 930	274.00	1.56	64	第四轮
P9	2005-09-08	6 389	262.00	1.77	55	
P11	2005-10-26	6 163	328.66	1.57	64	
平 均		5 956	299.51	1.70	65	

由表 1 可看出,通过发展阶段钻井技术的进步,钻井周期由探索阶段的 540.23 d 缩短到 299.51 d,缩短了 44.56%;机械钻速由探索阶段的 0.99 m/h 提高到 1.70 m/h,提高了 71.72%;钻头用量由 124 只减少到 65 只,减少了 47.58%。

2.2.2 采用的主要钻井技术

1) 钻头优选技术 雷口坡组的白云岩地层硬度大,研磨性强,使用 M1375 钻头其肩部主力切削齿先期磨损速度较快,影响钻头使用寿命,推荐使用 M1385 钻头;嘉陵江组及飞仙关组,推荐使用 M1375 钻头;长兴、龙潭组地层硬度相对较大,极少数的井段含有燧石结核,但大段岩性均质,燧石结核对金刚石钻头冲击破坏性大,使用金刚石钻头时需密切注意钻时变化,可在不含燧石结核的井段使用 PDC 钻头。P5 井、P6 井、P7 井、P8 井和 P9 井牙轮钻头的平均机械钻速为 1.41 m/h, PDC 钻头的平均机械钻速为 2.74 m/h, PDC 钻头平均机械钻速较牙轮钻头提高了 94.33%。

2) 双驱复合钻井技术 在雷口坡组、嘉陵江组和飞仙关组尝试应用了“PDC 钻头+螺杆”复合钻进技术。应用结果表明,钻井速度明显提高,最高机械钻速超过了 10 m/h,创造了 PDC 钻头的最高指标。

3) 防斜打快及垂直钻井系统 采用了偏轴接头钻具组合、PDC 钻头+直螺杆钻具组合、柔性钟摆钻具组合和小钟摆钻具组合等控制井斜,并取得了一定的效果。尤其在 P7 井引进试验了 Power V 垂直钻井系统,最低机械钻速 1.32 m/h,最高机械钻速 2.32 m/h,机械钻速有所提高。试验井段最大井斜角 2.89°,绝大部分井段的井斜角控制在 2°以下,防斜效果较好。但由于费用高,限制了推广使用。

4) 防漏堵漏技术 通过分析普光气田漏失性质和漏失机理,防漏和堵漏时采取了以下措施:a. 确定合理的钻井液密度;b. 在易漏井段,尽可能降低钻井液的密度和液柱压力波动范围,尽量采用欠平衡或近平衡钻井;c. 严格控制钻井液的流变性,降低环空摩阻。

针对普光气田裸眼段长、缝洞孔吼尺寸难确定、存在张开性裂缝和岩石骨架承压能力低等特点,在桥塞堵漏的基础上,引入凝胶聚合物和胶结剂,研究形成了凝胶堵漏新技术。

凝胶聚合物具有良好的韧性和变形性,提高了堵漏剂对漏失通道的匹配能力,能挤入不同的漏失通道内。胶结剂将凝胶聚合物、骨架材料、填充材料和地层很好地胶结成一个整体,承压能力强,达到了

整体堵漏的效果。该技术的现场适应性好,可直接加入钻井液中,能用于循环堵漏和挤注堵漏。

凝胶堵漏技术在 PA-2 井、PB-2 井、P4-2 井和 P6-4 井等井的成功应用表明,该技术能满足川东北地区陆相、海相复杂地层堵漏,以及漏层不定的长裸眼段承压堵漏的要求,对不同裂缝、孔隙适应性强,提高地层承压能力大于 15 MPa,施工成功率大于 95%。

2.3 气体钻井阶段

2005 年 12 月 28 日,以第一口开发井 PD-1 井的开钻为标志,普光气田钻井进入大提速钻井阶段,即气体钻井阶段。

2.3.1 气体钻井技术在 PD-1 井的首次试验^[5]

为了大幅度提高机械钻速,在 PD-1 井的上沙溪庙组、千佛崖组和自流井组第一次进行了气体钻井的尝试,气体钻井井段为 564~3 002 m,占全井设计井深的 44.3%。该井段只使用了 5 只钻头,平均机械钻速为 8.5 m/h,最高机械钻速达到了 11.31 m/h,为常规钻井液机械钻速的 3~8 倍。采用气体钻井技术不但大大提高了钻井速度,而且也彻底解决了井漏问题,另外,井斜问题也得到了较满意的解决。气体钻井技术在 PD-1 井的成功应用拉开了普光气田推广应用气体钻井技术的序幕。

2.3.2 气体钻井技术在普光气田的较大范围应用

2006 年,气体钻井技术陆续在 PD-1 井、P2-2 井和 P4-2 井等 10 口井进行了应用(具体情况见表 2)。

从表 2 可以看出,在 10 口井中,有 3 口井(P2-2 井、P4-2 井和 P5-2 井)从一开就开始实施气体钻井,一开用时 5~6 d,平均机械钻速达到 8 m/h 左右,1 只空气锤钻头即可完成施工。有 5 口井(P2-2 井、P4-2 井、P5-2 井、PB-2 井和 PD-3 井)应用了空气锤,一开平均机械钻速达到 8.0 m/h,二开平均机械钻速达到 12.5 m/h。有 5 口井(PD-1 井、PA-2 井、P6-3 井、P10 井和 P101 井)从二开应用了牙轮钻头,二开平均机械钻速达到 6.4 m/h,较之使用空气锤钻井速度慢了 1/2。钻进最深的井为 P101 井,达到 3 554 m;钻进最浅的井为 P5-2 井,只钻至井深 2 111 m;总进尺最多的井为 P4-2 井,达到 3 000 m;机械钻速最快的井为 P4-2 井,二开平均机械钻速达到 13.9 m/h。

从 10 口井的气体钻井实践来看,气体钻井与常规钻井液钻井相比,机械钻速同比提高 4~8 倍,钻

表 2 2006 年普光气田气体钻井技术的应用情况

井号	井径/mm	钻进井段/m	进尺/m	机械钻速/m·h ⁻¹	钻进时间/d	钻头/只	复杂情况或事故
P2-2	444.5	31.5~601.0	569.5	8.5	5.0	1	雾化(35 m)
	311.1	601.0~2 907.0	2 306.0	12.6	19.0	8	无
P4-2	444.5	32.0~602.0	570.0	7.7	6.0	1	雾化(130 m)
	314.1	602.0~3 032.0	2 430.0	13.9	16.0	2	无
P5-2	444.5	40.5~561.5	521.0	7.2	5.0	1	500 m 出水转换
	314.1	701.0~2 291.0	1 590.0	12.0	11.0	2	泡沫转化塌卡
PD-3	314.1	701.0~2 980.0	2 279.0	12.9	12.0	2	无
PB-2	314.1	500.0~3 156.0	2 656.0	11.9	21.0	6	无
PD-1	314.1	564.0~3 002.0	2 438.0	8.5	20.0	5	断钻具 2 次
PA-2	314.1	649.0~3 036.0	2 387.0	4.5	35.0	10	断钻具 3 次
P6-3	314.1	703.0~3 350.0	2 647.0	6.4	24.0	5	断钻具 1 次
P10	314.1	880.0~3 003.0	2 123.0	7.9	20.0	2	
P101	314.1	638.0~3 554.0	2 916.0	4.8	58.0	12	多次钻具损伤

并周期缩短 60~90 d; 井斜控制良好; 避免了因地层吸水膨胀引起的井眼复杂情况; 有效避免了井漏的发生; 提高了单只钻头进尺, 减少了钻头用量; 节省了钻井液费用, 有利于环境保护。因此, 气体钻井技术已经成为加快普光气田上部陆相地层钻井速度最重要、最实用的钻井新技术。

2.3.3 气体钻井技术在普光气田的全面推广应用

2007 年, 在普光气田全面推广应用了气体钻井技术, 并在 P301-4 井、P202-1 井和 P102-3 井 3 口井的须家河组地层开展了氮气钻进先导性试验, 成功钻穿了须家河组地层, 完全解决了制约普光气田陆相地层的最后一个提速障碍, 大大加快了普光气田的开发速度。采用氮气钻井技术穿越须家河组地层, 机械钻速同比提高 5~7 倍, 钻井周期缩短 30 d 以上, 见表 3。

表 3 普光气田须家河组地层不同钻进方式机械钻速对比

井号	进尺/m	机械钻速/m·h ⁻¹	钻进方式
P301-3	248.53	0.87	钻井液钻井
P301-4	371.73	4.89	
P202-1	650.58	4.53	氮气钻井
P102-3	730.02	5.75	

2007 年, 普光气田又在 18 口井推广应用了气体钻井技术。到目前为止, 采用气体钻井技术已经完钻的井共有 11 口。统计分析这 11 口井的数据可知, 钻井周期由发展阶段的 299.51 d 缩短到 204.19 d, 缩短了 31.82%; 机械钻速由发展阶段的 1.70 m/h 提高到 3.26 m/h, 提高了 91.76%; 钻头用量由 65 只减少到 33 只, 减少了 49.23%。

在这 11 口井中, 最后完钻的 3 口井(P301-4 井、P202-1 井和 P102-3 井)平均钻井周期仅 114.41 d,

平均机械钻速为 5 m/h, 平均钻头用量 23 只, 标志着普光气田的钻井配套技术更趋成熟。

通过 1 a 多的气体钻井实践与研究, 摸索出了一套适合普光气田的空气钻井、雾化钻井、泡沫钻井、氮气钻井、牙轮钻头气体钻井、PDC 钻头气体钻井和空气锤气体钻井等气体钻井综合配套技术。但是, 在使用气体钻井技术实现钻井提速的过程中, 也发生了多起钻具失效问题和气液转化中的井壁失稳问题, 直到现在有些问题还没有得到彻底解决。如在普光气田最早实施气体钻井的 10 口井中, 有 4 口井发生了断钻具事件, 而且有的井发生过不止一次, 另有 2 口井的钻具受损严重。钻具失效不仅给气体钻井井下安全带来了隐患, 增加了钻具投入费用, 更重要的是增加了打捞和起下钻时间, 部分抵消了气体钻井的提速效果^[6]。为此, 开展了气体钻井钻具失效分析及钻具优化技术研究, 根据普光气田钻具失效的形式和产生原因, 提出了一些钻具失效预防措施, 通过这些预防措施的实施, 气体钻井钻具失效问题得到了初步解决。针对川东北地区气体钻井后钻井液转换过程中易出现井壁坍塌的问题, 研究形成了井壁预处理技术和井壁稳定技术, 在 P103-4 井、P102-1 井和双庙 102 井进行了现场试验, 钻井液转换施工正常, 未出现井漏和划眼等井下复杂情况, 下钻一次到底, 转换过程中未发生事故。

3 普光气田钻井技术展望

根据普光气田的开发方案, 共钻 50 口开发井(直井 14 口, 定向井 24 口, 水平井 12 口), 目前已完钻 13 口, 在钻 15 口, 待钻 22 口。在待钻的 22 口开

发井中都是定向井和水平井,因此钻深水平井和丛式井防碰问题是主要挑战。根据近几年对普光气田的钻井探索与实践,笔者认为下一步应围绕以下几个方面进行钻井技术的攻关研究:

1)进一步深化气体、雾化和泡沫钻井工艺配套技术研究 包括气体钻井地层适应性研究,气体钻井优化设计研究,雾化泡沫钻井技术应用研究,气体钻井钻具失效机理与预防技术以及气体、雾化和泡沫钻井装备配套等。

2)气体钻井复杂情况与事故预防技术研究 包括地层出气、出水、出油识别技术及现场征兆判断技术研究,地层井壁稳定性技术研究及防治对策,钻柱振动参数检测技术及动力学研究,钻柱冲蚀损坏规律及预防技术研究等。

3)开展定向井、水平井和丛式井钻井工艺配套技术研究 包括地层自然造斜规律应用研究、深井水平井钻井技术、丛式井轨迹控制及防碰技术、定向井工具与测量仪器配套、减阻技术等。

4)开展防漏堵漏技术系列化研究 包括新型防漏堵漏材料研制、新型堵漏评价装置研制、找漏和堵漏工具的研制、防漏堵漏工艺研究、承压堵漏技术研究和防漏堵漏技术系列化研究。

4 结 论

1)普光气田钻井勘探开发历史已有 6 a 多的时间,钻井技术经历了探索、发展和气体钻井 3 个阶段,钻井周期由探索阶段的 540.23 d 缩短到发展阶段的 299.51 d,再缩短到气体钻井阶段的 204.19 d;

机械钻速由探索阶段的 0.99 m/h 提高到发展阶段的 1.70 m/h,再提高到气体钻井阶段的 3.26 m/h;钻头用量由探索阶段的 124 只减少到发展阶段的 65 只,再减少到气体钻井阶段的 33 只。钻井技术的不断进步有力地保障了普光气田的开发建设。

2)气体钻井技术在普光气田上部陆相地层得到成功应用,已经成为加快普光气田上部陆相地层钻井速度最重要、最实用的钻井新技术。

3)普光气田钻井技术下一步的研究重点是深水平井钻井技术研究、雾化泡沫钻井技术应用研究和防漏堵漏技术系列化研究。

4)普光气田钻井综合配套技术对川东北地区其它气田的钻井具有重要的指导意义,应加大普光气田钻井综合配套技术在川东北地区的完善和推广应用力度。

参 考 文 献

- [1] 汪海阁,郑新权. 中石油深井钻井技术现状与面临的挑战[J]. 石油钻采工艺,2005,27(2):4-8.
- [2] 曾义金,刘建立. 深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J]. 石油钻探技术,2005,33(5):1-5.
- [3] 沈忠厚. 现代钻井技术发展趋势[J]. 石油勘探与开发,2005,32(1):89-91.
- [4] 熊有全. 川东地区普光气田深井钻井技术[J]. 当代石油石化, 2006,14(8):11-15.
- [5] 孙继明,侯树刚,李铁成. 空气钻井技术在普光 D-1 井的应用[J]. 石油钻探技术,2006,34(4):24-26.
- [6] 侯树刚,舒尚文,李铁成,等. 空气钻井安全钻进特性分析[J]. 石油钻探技术,2007,35(6):50-53.

[审稿 侯绪田]

Drilling Technology Overview of Puguang Gas Field

Zhang Jincheng^{1,2}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China; 2. Drilling Engineering Technology Research Institute, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: The three stages of drilling technology development in Puguang Gas Field, the exploratory, development, and gas drilling were summarized. The challenges met in exploratory stage, the main drilling technology used during development stage, and the main achievement of using gas drilling during gas drilling stage were introduced. Though the history of drilling exploration in Puguang Gas Field is only 6 years, the penetration rate is increased from 0.99 m/h at exploratory stage to 1.70 m/h in development stage and reached 3.26 m/h at the gas drilling stage. The future development in drilling technology is pointed out in this paper.

Key words: gas drilling;drilling speed;status quo;developing trend;Puguang Gas Field