

普光气田整体固井工艺技术

李铁成¹ 周仕明²

(1. 中国石化 中原油田普光分公司, 四川 达州 635000; 2. 中国石化 石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 普光气田是国内首个投入开发的海相气田, 具有高温高压高含硫的特点, 同时存在地层复杂、气窜、漏失、长裸眼小间隙、大斜度和水平井以及存在盐膏层等几乎所有固井中可遇到的技术难题, 固井难度国内罕见。通过分析储层特性和单井井况, 优选了防腐防气窜水泥浆体系, 应用分段压稳设计模型进行水泥浆柱结构设计, 同时采取高抗挤低密度水泥浆技术、正注反挤工艺、水平井提高顶替效率等措施, 形成了普光气田高含硫气井固井综合技术。现场应用表明, 固井质量得到了保证, 满足了普光气田开发的要求。

关键词: 普光气田; 气井; 固井; 水泥浆

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)01-0078-05

Overall Cementing Technology for Puguang Gas Field

Li Tiecheng¹ Zhou Shiming²

(1. Puguang Branch of Zhongyuan Oilfield, Sinopec, Dazhou, Sichuan, 635000, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: As the first marine gas field in China, Puguang gas field with characteristics of high temperature and pressure and high sulfur content, has almost all the technical cementing problems such as complicated formation, gas migration, circulation loss, long slim openhole and high angle, horizontal wells, and salt formation. Through analysis of reservoir characteristics and single well condition, an anti-corrosion and anti-gas channeling slurry system was optimized. Stage-cementing model was used to design slurry column to balance the pore pressure. At the same time, by using the low-density slurry with high collapse strength, positive injection and reverse squeezing technology, and measures to improve displacement efficiency, a comprehensive cementing technology in Puguang gas field which contains high H₂S content was developed. Field application shows that cementing qualities are satisfactory and meet the requirement of developing Puguang gas field.

Key words: Puguang gas field; gas well; cementing; cement slurry

普光气田作为国内最大的陆上高含硫天然气田, 具有高温高压高含硫的特点, 同时地层复杂, 喷漏同层, 裸眼长, 间隙小, 固井难度极大。在加强固井技术管理的基础上, 通过技术攻关, 针对普光气田海相产层“三高”的特点, 以及陆相地层喷漏同层并存在盐膏层的地质特点, 进行了高压防腐防气窜水泥浆体系优选、气层压稳设计、综合防漏、高强度低密度水泥浆体系、提高长裸眼小间隙固井顶替效率和水平井大斜度井固井技术方面的研究, 最终形成了普光气田高含硫气井综合固井技术, 保证了普光气田的固井质量, 满足了该气田开发的要求。

1 普光气田地质特征及固井技术难点

1.1 地质特点

普光气田位于宣汉地区黄金口构造带, 侏罗系

收稿日期: 2010-01-25; 改回日期: 2010-12-13

作者简介: 李铁成(1961—), 男, 河南登封人, 1983年毕业于江汉石油学院石油地质专业, 钻井部主任, 主要从事钻井和完井工程管理工作。

联系方式: (0393)4736910

上统地层以棕紫色泥岩、粉砂质泥岩间夹灰紫色粉砂岩及细砂岩为主,地层不稳定,地层压力相对较低,承压能力差;侏罗系中统及下统地层发育有多套含气层,气侵、井涌、井漏等复杂情况时有发生,且地层压力逐渐升高;须家河组陆相地层以砂岩与泥岩互层为主,地层软硬交错,砂岩可钻性差,泥岩易坍塌,地层不稳定。主力产层飞仙关组和长兴组地层,以裂缝性、孔隙性和溶洞性气藏为主,缝间连通性较好。

1.2 固井技术难点

普光气田是比较典型的高压高产气藏,同时存在井涌和井漏等复杂情况,固井难度极大。分析认为主要固井技术难点有:

1) 典型的“三高”气藏,气窜危险性大。普光气田气层具有“三高”特征,即高温、高压、高含硫,同时井深均超过 5 000 m,其中最深井 P106-2H 井钻深达 6 805 m。一般气层压力高于 60 MPa,地层温度 120~130 °C, H₂S 含量高达 15%,气窜危险程度中等偏上。

2) 喷漏同层,漏失和压稳矛盾突出。普光气田海相地层的破裂压力当量密度为 1.70 kg/L,安全窗口较窄,容易发生漏失,水泥浆密度选择困难。水泥浆与钻井液密度差过小,易发生失重,使水泥浆柱不能压稳气层,发生气窜。

3) H₂S 和 CO₂ 腐蚀气体含量高。根据探井测试结果,普光气田储层的 H₂S 含量达 15%,CO₂ 含量达 8%,为典型的酸性腐蚀环境。酸性气体在潮湿环境下会腐蚀水泥环,对水泥环和套管的抗腐蚀性能要求高^[1-2]。由水泥环密封性降低引起的毒性气体泄漏,对气田生产安全和周围人民群众生命财产安全带来极大隐患。

4) 特殊井身结构存在封固段长和间隙窄的难题。为保证气层开发,根据完井方案的要求,普光气田要求采用特殊尺寸井身结构。采用 $\phi 311.1$ 或 $\phi 314.3$ mm 钻头钻进,下入 $\phi 273.1$ mm 技术套管,套管本体环空间隙只有 20 mm,接箍的环空间隙则不到 15 mm。同时由于需要封固陆相地层,套管鞋深度在 3 600~4 600 m,属于典型的窄间隙长封固段固井。在此情况下,易导致顶替效率过低和流动阻力过大。

5) 上部存在多套压力体系,安全密度窗口极窄。陆相地层砂、泥岩互层,地层压力系数大多趋于常压,泥、页岩易坍塌,在一些区块会发生自然漏失。同时陆相地层中的须家河组地层是一套高压低渗的

气层,压力系数 1.50,而其余地层属常压地层,安全密度窗口只有 0.1 kg/L,下套管和固井时极易发生漏失。如 P105-1H 井采用空气钻井技术钻至井深 2 908 m 后转换为钻井液钻进,整个钻进过程中发生 49 次漏失,钻井液漏失量超过 4 000 m³,采取多种堵漏措施处理均无效。

6) 大斜度定向井和水平井固井。普光气田的开发井以定向井和水平井为主,水平位移都在 1 000 m 以上,套管在斜井段和水平段难以居中,影响了水泥浆的顶替效率。

2 综合固井技术

2.1 采用分段压稳模型设计水泥浆柱结构

从固井设计入手,采用新型分段防气窜设计方法^[3],优化水泥浆柱结构,同时利用软件对施工过程进行模拟,保证注替全过程的气层压稳。

新型分段压稳设计模型是通过水泥浆进行分段分析,根据不同段水泥浆的水化状态,来计算静胶凝强度发展的临界值,然后计算各段的静液压力损失,累积后计算水泥浆柱对气层的压稳系数。

2.1.1 领浆最大失重 p_{ls}

设计原则第 3 条中指出了尾浆的静胶凝强度在达到 240 Pa 时,领浆的静胶凝强度要小于 48 Pa,所以计算时按领浆的许可最大值 48 Pa 计算领浆失重压力。故领浆最大失重 p_{ls} 的计算公式为:

$$p_{ls} = \frac{48 \times 4 \times l_{c1}}{D_h - D_p} \times 10^{-3} = \frac{0.192l_{c1}}{D_h - D_p} \quad (1)$$

式中: p_{ls} 为领浆最大失重,MPa; l_{c1} 为领浆段长,m; D_h 为井眼直径,m; D_p 为套管直径,m。

2.1.2 尾浆最大失重 p_{ts}

同上,尾浆静胶凝强度按 240 Pa 计算尾浆失重,故尾浆最大失重的计算公式为:

$$p_{ts} = \frac{240 \times 4 \times l_{c2}}{D_h - D_p} \times 10^{-3} = \frac{0.96l_{c2}}{D_h - D_p} \quad (2)$$

但是,水泥液柱失重后最低的当量液柱压力是静水压力,所以式(2)计算的尾浆失重大于该段水泥浆的最初液柱压力时,尾浆失重以最初的液柱压力与静水压力之差来计算。即:

$$p_{ts} = (\rho_c l_{c2} - 1.0l_{c2})/100 \quad (3)$$

式中: p_{ts} 为尾浆最大失重,MPa; l_{c2} 为尾浆段长度,m; ρ_c 为水泥浆密度,kg/m³。

2.1.3 最终环空液柱压力 p_{fc}

$$p_{fc} = [\rho_c(l_{c1} + l_{c2}) + \rho_m l_m]/100 - (p_{is} + p_{ts})$$

(4)

式中： ρ_m 为钻井液密度， kg/m^3 ； l_m 为钻井液长度， m 。

最终环空液柱压力除以气层压力，如果商大于1则表示压稳，如果小于1则会发生气窜。通过普光气田固井实践验证，该模型实用性强，保证了气层压稳的可靠性。

普光气田的海相地层破裂压力较低(当量密度1.70 kg/L 左右)，而且安全密度窗口较窄，容易发生漏失的生产尾管固井时设计领浆封固至飞仙关组地层以上200~300 m ，以下采用常规密度防气窜尾浆。但需优选水泥浆密度，达到既能压稳防止气窜，又能防止漏失的目的。以P303-2井 $\phi 177.8\text{ mm}$ 尾管固井为例，如果采用密度为1.50 kg/L 的领浆，其压稳系数只有0.94，不能压稳气层。但如果换成密度为1.60 kg/L 的领浆，则压稳系数可达到1.07，可以压稳气层。

2.2 优选防腐防气窜水泥浆体系

防腐防气窜水泥浆体系的优选是普光气田固井的关键环节。通过室内试验，优选出了胶乳防气窜水泥浆体系和胶粒防气窜水泥浆体系。

2.2.1 胶乳防气窜水泥浆体系

胶乳水泥外加剂又称优质非渗透剂^[4]，当应用胶乳水泥浆封闭气层时，随着水泥水化反应的进行，环绕水泥颗粒的水被消耗，胶乳局部体积分数增大，产生颗粒聚集，形成空间网络状非渗透薄膜，完全填充水泥颗粒间的空隙，避免环空窜流发生。其主要优点是：

1) 水泥完全分散，提高了水泥浆的性能，其在凝固前具有良好的流变性能和较好的沉降稳定性；

2) 能有效控制失水(API失水一般可控制在50 mL 以下)，有利于防止气窜；

3) 过渡时间短，稠化曲线呈近“直角”，并能降低水泥石的渗透率，防止环空窜流；

4) 水泥石的弹性及抗拉强度高，耐抗冲击能力强，能桥堵微缝隙，抑制微缝隙的延伸，降低射孔时水泥环的破裂度^[5-6]；

5) 能有效提高水泥环第一和第二界面的胶结强度，有利于层间分隔，水泥石有较强的抗腐蚀能力，有利于延长油气井的寿命。

2.2.2 胶粒防气窜水泥浆体系

胶粒水泥浆体系也是利用充填机理减少水泥石渗透率，达到防止气窜的作用。该水泥浆所形成的水泥石强度高、抗冲击韧性和抗折强度较高、渗透率低。主要有以下特点：

1) 设计水泥浆的SPN值大多数 ≤ 1 ($0 \leq \text{SPN} \leq 3$ 防气窜效果好)；

2) 微观分析可证实胶粒水泥浆形成的水泥石具有低孔特性，而且孔隙中有纤维充填，渗透率低还能使 H_2S 和 CO_2 不易进入水泥石内部，有利于防止 H_2S 和 CO_2 对水泥石的腐蚀；

3) 具有良好的抗射孔破碎能力。

2.3 优选高抗挤低密度水泥浆体系

常规的低密度漂珠在高压下破碎率较高，而普光气田的产层压力高，漂珠破碎率较高，会使水泥浆密度升高，水泥浆增稠，环空摩阻增大，易压漏地层。优选了具有高抗挤能力的空心玻璃微珠作为减轻剂。该玻璃微珠是一种白色中空密闭的正球形、粉末状的超轻质填充材料，真实密度为0.12~0.60 kg/L ，粒径为15~135 μm ，主要成分是碱石灰硼硅酸玻璃，不溶于水，化学性质稳定^[7]。以高抗挤空心玻璃微珠为减轻剂的高抗挤低密度水泥浆体系的综合性能见表1。

表1 高抗挤低密度水泥浆综合性能						
Table 1 The comprehensive properties of low-density slurry with high collapse strength						
密度/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	六速黏度计读数	水泥石抗压强度①/ MPa	析水/ mL	API失水/ mL	120 MPa下密度/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$
1.65	93	243/142/104/58/4/3	22.5	0	36	1.660
1.60	93	176/100/73/40/3/2	14.8	0	32	1.610
1.62	93	288/179/136/82/10/7	17.2	0	31	1.623
1.61	93	265/155/110/57/5/4	18.9	0	26	1.615

注：①为水泥石在110℃温度下、养护24 h的抗压强度。

从表 1 可看出,该低密度水泥浆体系具有较高的承压能力,在 120 MPa 压力下密度基本不变,同时水泥浆综合性能良好。

2.4 提高长裸眼小间隙固井顶替效率

2.4.1 提高套管的居中度

普光气田开发井以定向井、水平井为主,水平位移一般在 1 000 m 左右,套管在斜井段和水平段不易居中,很难达到规范规定的居中度不低于 67% 的要求。国内的直井和定向井下套管大多采用弹性扶正器,而在普光气田由于套管段长、套管重,如果采用弹性扶正器,其扶正力不能够确保套管顺利下入和居中。为此,开展了刚性套管扶正器的优选,并制定了优选原则:

- 1) 其规格尺寸应与普光气田三开井段 $\phi 241.3$ mm 井眼和 $\phi 177.8$ mm 套管匹配;
- 2) 应具有弧形外形和螺旋形翼片,能够产生旋流,提高顶替效率;
- 3) 摩擦因数低,能够降低下套管阻力;
- 4) 重量要轻。

在此基础上优选聚酯螺旋减阻刚性扶正器和铝合金刚性扶正器,这两种扶正器都能够满足上述 4 条要求。普光气田在生产尾管固井中都应用了优选的刚性扶正器,并利用软件计算确定了扶正器安放间距。在实践中可验证刚性扶正器具有以下效果:

- 1) 已完成井的 $\phi 177.8$ mm 尾管到位率 100%,下套管阻力小;
- 2) 套管居中度高,普光气田的 $\phi 177.8$ mm 尾管居中度普遍高于 85%。

2.4.2 使用好前置液和先导浆

采用低黏度或较低密度的先导浆,以及优质的前置液,包括冲洗液和隔离液,冲刷泥饼,降低环空摩阻,提高小间隙井眼的顶替效率。

2.5 防漏技术措施

2.5.1 防漏水泥浆

在水泥浆中优选添加了防漏纤维,有效提高了水泥浆的防漏效果。

采用纤维作为堵漏剂的机理是利用不同尺寸的纤维自身所具有的搭桥成网和不同级配固相颗粒的填充特性。当堵漏纤维与水泥浆进入漏层时可形成“滤网结构”,增大水泥浆的流动阻力,借助于水泥浆

的水化胶凝作用和未水化固相颗粒的填充作用,达到堵漏和提高地层承压能力的目的。选用对表面进行特殊处理的高强有机聚合物单丝短纤维作为堵漏纤维,可以增加水泥浆的防漏效果,同时还可提高水泥浆径向剪切应力,改善水泥环抗冲击韧性,显著提高固井质量。

2.5.2 低密度水泥浆

对于部分地层承压能力非常低的井,采取堵漏承压措施无效时,可以通过调整水泥浆的密度和封固界面来降低全井的井筒压力,防止固井过程中出现漏失。采用低密度和超低密度水泥浆能够有效降低井筒中的当量密度,是最有效的固井防漏技术措施之一。

2.5.3 防漏施工工艺

1) 控制套管下放速度。对套管在上层套管内和进入裸眼段后的下放速度都做了具体的要求,防止由于套管下放速度过快产生激动压力,导致薄弱地层漏失。

2) 变排量顶替,控制井口压力。注替过程中根据泵压的升高情况及时调整替浆排量,将泵压控制在设计要求的范围内,预防漏失的发生。

3) 正注反挤特殊固井工艺。分析普光气田的地质资料和钻井漏失情况发现,陆相地层的主要漏失层位在沙溪庙组,由于采用各种堵漏措施均不能解决该层位的漏失问题,于是固井时采用正注反挤的特殊固井工艺。

正注反挤固井的关键是对漏层的准确判断,其次确定反挤的间隔时间,如果时间太长,进入漏层的水泥浆固化形成强度,反挤水泥不能进入漏层,而会挤入上层套管鞋下部地层或漏层上部的薄弱地层,造成大段裸眼段漏封。

普光气田在技术套管固井时应用了正注反挤特殊固井工艺,取得了良好的效果,不仅确保了技术套管水泥全封,又节省了由长期承压堵漏造成的钻机费用,经济效益巨大。

3 现场应用

从 2006 年初至 2009 年 6 月,普光气田主体工程钻井顺利结束。所钻的 38 口井固井合格率 100%,其中产层优良率达到了 84%,具体固井统计见表 2。目前,普光气田主体一期工程 31 口井已经

顺利通过完井、压裂酸化改造的检验,顺利投产。

表 2 普光气田(主体部分)固井质量统计
Table 2 The cementing quality statistics for the main areas of Puguang Gas Field

年份	井数/口	综合固井合格率, %	产层固井优质率, %	备注
2006	2	100	100	
2007	13	100	77	
2008	18	100	90	水平井 5 口
2009	5	100	80	水平井 1 口

4 结论与建议

1) 新技术、新工艺的推广应用是提高固井质量的基础,在普光气田,应用最新的防气窜压稳设计技术、高温隔离液技术、防气窜水泥浆技术、正注反挤固井技术等为提高固井质量奠定了坚实的基础。

2) 根据普光气田的特点制定的综合配套工艺,有效保证了固井成功率和固井质量。

3) 优选的胶乳和胶粒防气窜水泥浆体系具有良好的防气窜、防 CO₂ 和 H₂S 腐蚀的能力。

4) 进口胶乳水泥浆的敏感性给固井施工带来风险,但胶乳水泥浆的防气窜防腐蚀性性能好,固井质量好。因此,建议加强胶乳水泥浆的研究,降低其敏感性。

参 考 文 献

[1] 黄柏宗,林恩平,吕光明,等. 固井水泥环柱的腐蚀研究[J]. 油田化学,1999,16(4):377-383.

Huang Bozong, Lin Enping, Lü Guangming, et al. Researches on corrosion of cement sheath of oil/gas well casings[J]. Oil-field Chemistry,1999,16(4):377-383.

[2] 郭志勤,赵庆,燕平,等. 固井水泥土抗腐蚀性能的研究[J]. 钻井液与完井液,2004,21(6):37-40.

Guo Zhiqin, Zhao Qing, Yan Ping, et al. Study corrosion resisting of cement slurry[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004,21(6):37-40.

[3] 周仕明. 南海相高压气井防气窜固井技术研究[R]. 山东德州:中国石化石油勘探开发研究院德州石油钻井研究所,2006.

Zhou Shiming. Anti-migration cementing technology of high pressure gas wells of Southern China[R]. Shandong Dezhou: Petroleum Exploration & Production Research Institute, Sinopec, Dezhou Petroleum Drilling Research Institute, 2006.

[4] 李文建,姚晓,王太聪. 国外胶乳水泥固井技术[J]. 石油钻探技术,1997,25(2):34-36.

Li Wenjian, Yao Xiao, Wang Taicong. Foreign latex slurry technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997,25(2):34-36.

[5] 李国,郭小阳,路俊刚,等. 硅藻土改善胶乳水泥性能的室内研究[J]. 西南石油学院学报,2006,28(5):80-82.

Li Guo, Guo Xiaoyang, Lu Jungang, et al. Lab experiment of using the diatomite to improving the latex cement slurry's properties [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006,28(5):80-82.

[6] 李早元,郭小阳,韩林,等. 胶乳对水泥石三轴力学形变能力的作用[J]. 石油学报,2007,28(4):126-129.

Li Zaoyuan, Guo Xiaoyang, Han Lin, et al. Improvement of latex on mechanical deformation capability of cement sheath under triaxial loading condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):126-129.

[7] 罗杨,陈大钧,许桂莉,等. 高强度超低密度水泥浆体系实验研究[J]. 石油钻探技术,2009,37(5):66-71.

Luo Yang, Chen Dajun, Xu Guili, et al. Lab experiment on high-intensity ultra-low-density cement slurry[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009,37(5):66-71.

辽河油田开发出李连型驱油技术

李连型驱油技术,全称“李连型表面活性剂驱油技术”。李连型表面活性剂是一种“双子型”表面活性剂,其结构与传统磺酸盐类助排剂的单链结构不同,具有两个疏水基和两个亲水基,中间由基团连接。该表面活性剂具有极高的表面活性、耐温性和配伍性,同时还具有抗盐性,尤其适合在超稠油中低周期助排生产中应用。该技术在辽河油田杜 212-27-305 井等 4 口超稠油井上进行了试验应用,平稳生产 105 d,累计增油 1 861.89 t。

作 者 致 歉

本人发表在《石油钻探技术》2009 年第 1 期《螺杆钻具瓣形万向轴瓣齿压扭组合强度分析》一文的理论分析部分,抄袭了专著《螺杆钻具研究与应用》和发表在《石油钻采工艺》1999 年第 2 期《万向轴的运动和受力分析及弯壳体内孔偏移量计算》一文中的相关内容,并使用了“笔者首次……”的表述,侵犯了原文作者苏义脑院士之原创性和著作权,造成了不良影响。为此向《石油钻探技术》、原文作者、读者深表歉意。

屈文涛
2011-01-25