

# 安岳气田高温酸性气藏完井技术

邓乐<sup>1</sup>, 黄船<sup>2</sup>, 潘登<sup>2</sup>

- 1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司工程技术处 四川成都 610000
- 2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院 四川广汉 618300

通讯作者:Email:pandeng\_sc@cnpc.com.cn

项目支持:国家重大科技专项“大型油气田及煤层气开发”项目子课题“随钻地震波测量技术及高温随钻测量装备”(2016ZX05020-005)、中国石油集团科技项目“高温高压高酸性介质油气井完井技术集成与应用”(2016D-4202)

引用:邓乐,黄船,潘登. 安岳气田高温酸性气藏完井技术[J]. 油气井测试,2019,28(1):52-59.

Cite: DENG Le, HUANG Chuan, PAN Deng. Completion technology for high temperature sour gas reservoir in Anyue gas field [J]. Well Testing, 2019, 28(1):52-59.

**摘要** 安岳气田的龙王庙、灯影组等气藏具有埋藏深、高温、产量大、含 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 等酸性气体且地质条件复杂的特点,给完井作业的工具选材、井筒完整性、施工方案优化、完井液选择等带来了挑战。为确保开发井井筒完整性和长时间安全开采,设计合理完井管柱和工艺,优选材料,优化完井液以及井筒防腐措施,引入试油完井一体化开发理念,建立贯穿油气井整个服役周期的安全井筒屏障,形成高温酸性气藏完井技术,保证了油气井安全。该技术在安岳气田上百口开发井成功应用,累计测试产气量超过 5 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,为保障西南油气田分公司打造百亿气区提供了强力技术保障。整套完井技术对“三高”井具有普遍的适用性。

**关键词** 安岳气田; 高温高压; 酸性气藏; 试油; 完井; 井筒完整性; 完井液; 力学分析

中图分类号:TE257 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.01.009

## Completion technology for high temperature sour gas reservoir in Anyue gas field

DENG Le<sup>1</sup>, HUANG Chuan<sup>2</sup>, PAN Deng<sup>2</sup>

- 1. Engineering Technology Department, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China
- 2. Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, China

**Abstract:** The gas reservoirs such as Longwangmiao Formation and Dengying Formation in the Anyue gas field are characterized by complex geological conditions, deep burial, high temperature, high yield, and presence of sour gases such as H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub>, which bring challenges to the completion tool selection, wellbore integrity, optimization of operation scheme, and selection of completion fluid. In order to ensure the wellbore integrity and durable operation of development wells, a completion technology for high temperature sour gas reservoir was developed, including the reasonable design of completion pipe string and process, optimization of materials, completion fluid and wellbore anti-corrosion measures, introduction of the concept of integrated oil testing and completion, and establishment of a safe and effective wellbore barrier throughout the service life of wells. This technology has been successfully applied in hundreds of development wells in the Anyue gas field, with the cumulative test gas production exceeding 5 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d. Obviously, it provides a strong technical guarantee for building the Southwest Oil and Gas Field into a 10-billion-m<sup>3</sup> level gas region. This completion technology is applicable to wells with high yield, high pressure and high content of H<sub>2</sub>S.

**Keywords:** Anyue gas field; high temperature and high pressure (HTHP); sour gas reservoir; oil test; completion; wellbore integrity; completion fluid; mechanical analysis

安岳气田是川渝地区常规气的重大发现,也是西南油气田油气增储上产的重要战略接替区域,具有储层埋藏深、温度高、地层压力高、酸性气体含量高特点。其中龙王庙和灯影组气藏同属高温、高

压、大产量酸性气藏,腐蚀机理复杂。龙王庙组气藏 H<sub>2</sub>S 含量为 5.70~11.19 g/m<sup>3</sup>,CO<sub>2</sub> 含量为 28.87~48.83 g/m<sup>3</sup>;灯影组气藏 H<sub>2</sub>S 含量约为 17.9 g/m<sup>3</sup>,CO<sub>2</sub> 含量为 80.73~160.29 g/m<sup>3</sup>。同时,气藏

溶洞发育,普遍存在井漏,最高单层漏失超过 3 000 m<sup>3</sup>。高温酸性气藏在实施完井过程中,井控安全要求极高,对完井过程中井筒完整性建设和生产长时间安全开采提出了严峻挑战<sup>[1-3]</sup>。

张朝举等<sup>[4]</sup>、陶俊亦等<sup>[5]</sup>提出元坝气田长兴组气藏具有埋藏超深、高温、高含硫、高产的特征,决定了其勘探开发的高风险性,同时具有强非均质性、气水关系复杂的特点,导致在井筒处理、完井试气、储层改造及安全保障等方面面临诸多技术难题。安岳气田完井与元坝气田完井具有较多的相似共性,因此在研究此类气藏完井技术思路上具有一定的借鉴意义。李玉飞等<sup>[6]</sup>针对具有一定共性的龙王庙组气田、元坝气田做出了一系列的攻关研究及实践,包括完井管柱优化设计、元坝超深小井眼井筒处理、微牙痕上扣及气密封检测、完井施工质量控制等。刘猛等<sup>[7]</sup>针对水平井完井提出了水平井完井基本原则,介绍了 Halliburton、Baker Hughes 等国外知名油服公司的水平井完井管柱系列。结合安岳气田自身特点,对灯影组气藏完井管柱进行了优化设计,形成了大漏失、长水平段、高产量完井投产管柱,并对施工方案进行了优化。陈锋等<sup>[8]</sup>通过对射孔瞬间的射孔冲击载荷的形成分析,应用专用的射孔工程模拟软件和高速压力记录仪获取井下射孔的真实数据,根据数值分析总结出了一套适用于缓解射孔管柱射孔冲击载荷冲击的指导方法,用于指导射孔—测试—酸化三联作工艺技术。通过该方法,设计出模拟软件,针对安岳气田射孔—测试—完井工艺,校核了对完井封隔器和管柱的冲击载荷,对保证井筒完井性提出了建设性设计指导意见。在工具选材方面,何生厚<sup>[9]</sup>针对普光气田高含 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 特点,提出了开发过程中应重点关注的方向。冯星安等<sup>[10]</sup>针对罗家寨气藏做了材料腐蚀分析和防腐设计方法指导,结合安岳气田实际情况,总体依照 NACE-MR0175 和 ISO-15156 标准,通过模拟现场条件的 SSC、SCC、晶间腐蚀及电化学腐蚀试验评价进行精准的管柱选材。在应对安岳气田大量漏失井筒条件下完井难点方面,潘登等<sup>[11]</sup>提出试油完井一体化概念,创新性的将测试和完井结合起来。通过管柱设计和工具研制,最终形成一套完整的试油完井一体化工艺技术,一趟管柱具备测试、封堵、完井多种功能,降低了施工期间的井控风险,提高了井筒完整性。

在借鉴和参考元坝、龙王庙组等相似气藏的完

井技术基础上,本文针对安岳气田温度压力高、产量大、酸性气体含量高、埋藏深、施工压力高、储层裂缝发育等特点,通过完井管柱优化、完井施工方案优化、管柱力学及射孔冲击载荷校核、油管及工具选材、高温完井液体体系研制、井筒防腐蚀措施等,建立安全有效的井筒屏障,有效减少因地层流体泄漏而产生危害,发展了适用于安岳气田高温酸性气藏的完井技术,在完井成本控制、井筒完整性、勘探试油完井一体化、井控安全等方面取得了长足的发展。

## 1 龙王庙和灯影组气藏完井工艺

龙王庙和灯影组气藏完井工艺主要包含完井管柱优化、完井施工方案优化、油管及工具选材、完井液体体系研制,以及井筒防腐蚀措施等内容。

### 1.1 完井管柱优化

对龙王庙气藏、灯影组气藏完井方案进行优化选择。

#### 1.1.1 龙王庙气藏完井方案优化

龙王庙气藏井口关井压力在 62.0~64.0 MPa,采用 WOM 公司 PX-HH 级 70 MPa 完井采气树。开发初期,采用射孔-酸化-完井联作工艺,但存在以下问题:(1)射孔联作无法检测到射孔弹起爆率,对储层打开及后期酸化增产效果无法进一步精确评价;(2)部分井口袋不够,无法在射孔后丢枪,导致整个完井管柱流通通道不畅通,后期无法利用电缆实施动态测井;(3)当地层压力充足时,在井筒为清水的条件下,一旦打开产层,基准压力高达 30 MPa,受井口采气树额定工作压力 70 MPa 限制,坐封后球座没有丢手空间;(4)射孔对封隔器的冲击效应大,容易导致封隔器提前坐封和封隔器失效的复杂情况。

根据以上情况,对龙王庙气藏完井方案进行了优化:(1)先射孔,起出射孔枪后检查射孔弹发射率,确认完全起爆后,再在压井条件下下入完井管柱;(2)球座下端内外倒圆,提高仪器通过性,有助于后期电缆测井仪器通过和回收;(3)射孔和坐封分两趟管柱实施,彻底避免了相互影响;(4)在油管内预留部分压井液,降低坐封和丢手的基准压力,确保在 70 MPa 采气井口条件下安全施工。

优化后的完井管柱设计为:油管挂+油管+井下安全阀+油管+永久式液压封隔器+坐落短节+坐封球座(图 1)。其管柱具有以下特点:①结构简单,满

足长期安全生产的要求;②井下安全阀在紧急情况下能截断井下气源,确保地面设备及人员安全;③使用封隔器隔断油套,避免套管内部和油管外壁接触酸性气体,保证井筒长期的完整性;④满足酸化、测试和生产等作业的需要,后期可使用钢丝投捞起下坐放工具。

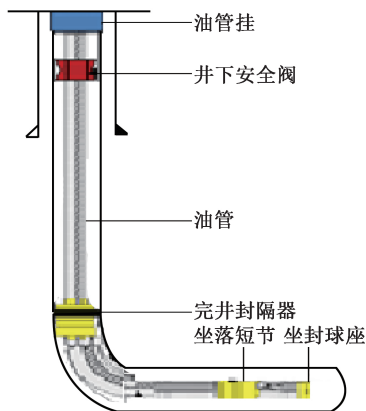


图1 龙王庙组完井管柱结构示意图  
Fig.1 Structure of completion string in Longwangmiao Formation

#### 1.1.2 灯影组气藏完井方案优化

灯影组气藏产层段长,最长跨距达到1 055.81 m,井筒均属于大斜度井甚至水平井,龙王庙的完井方案不适合此类井筒条件。此外,由于灯影组压力系数低,泥浆漏失严重,而且储层非均质性强,为减少多次测试和完井对储层的伤害,增加对储层改造的精准性,确保作业期间井控安全,灯影组完井方案采用裸眼封隔器+滑套(投球+压差)分段酸化工艺对目的层裸眼井段进行分段酸化改造<sup>[12]</sup>。在裸眼封隔器上部的悬挂封隔器上增加完井封隔器,通过下入井下安全阀+完井封隔器的回插管柱进行回插完井,改造后投入生产。

完井管柱设计立足裸眼分层改造的需要,要求技术可靠、经济可行<sup>[13]</sup>。管柱结构为:油管挂+井下安全阀+油管+永久式液压封隔器+油管+悬挂封隔器+油管+压差滑套+油管+裸眼封隔器+油管+压差滑套+油管+裸眼封隔器+油管+定压凡尔(图2)。

其管柱具有以下特点:①可根据需要对储层进行多级分层酸化,最大限度减小非均质性对储层的影响;②井下安全阀在紧急情况下能截断井下气源,确保地面设备及人员安全;③使用封隔器隔断油套,避免套管内部和油管外壁接触酸性气体,保证井筒长期的完整性;④满足酸化、测试和生产等作业的需要。

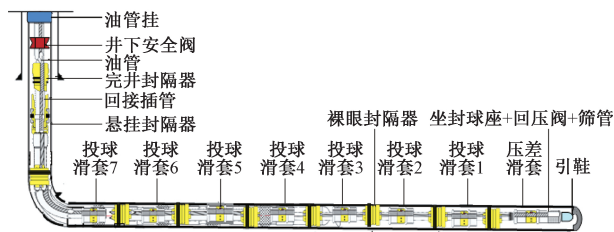


图2 灯影组完井管柱结构示意图  
Fig.2 Structure of completion string in Dengying Formation

龙王庙组、灯影组完井管柱确保了井筒形成两道屏障:①一级屏障由采气树1号主阀+油管+井下安全阀+油管+完井封隔器+完井封隔器以下套管和水泥环(悬挂封隔器+裸眼封隔器)组成;②二级屏障由完井封隔器以上油层套管+油层套管固井水泥环+套管头+采气树翼阀及4号总阀组成。

#### 1.2 完井施工方案优化

在整个完井作业过程中,对于油管及井下工具的丝扣连接,采取严格的保障措施:①油管采用无牙痕油管钳按推荐扭矩紧扣,入井工具、短节、油管挂双公等不规则部件一律采用卧式无牙痕油管钳在基地按扭矩值上扣,确保所有入井气密封丝扣上扣扭矩达到最佳;②采用氦气气密封检测技术,对所有油管丝扣进行气密封检测。对完井封隔器及井下安全阀,也根据其内径尺寸设计专用的气密封检测工具,确保所有丝扣均不漏检,检测压力以高于气井最高关井压力为原则。

根据灯影组气藏特点增加了以下几点措施:(1)对裸眼段下部完井液预先在地面做高温沉降试验,确保在170℃条件下静止15 d不沉淀;(2)增加完井管柱预回插工序,检验回插密封的合格性,避免重复换装井口;(3)回插封隔器坐封完成后,立即打开压差滑套进行排液,减少泥浆静止时间;(4)针对裸眼产层段长、气井产能差异大的情况,不能进行整段改造,必须进行分段改造。为了提升改造作业的有效性,采用了物理和化学分层酸化工艺,并推广了暂堵球分层技术;(5)采用BG110SS油管,降低完井成本,同时在管柱加入化学注入阀,提高生产后期井筒及管柱耐腐蚀能力。

这些措施的实施,有助于完井管柱的顺利下钻到位,避免了因泥浆沉淀造成的施工复杂<sup>[14-15]</sup>,优化了整个完井工序,保障了后期长时间、大产量开发的井筒安全和完整性<sup>[16-17]</sup>。

#### 1.3 管柱力学及射孔冲击载荷校核

龙王庙组和灯影组气藏部分井依然采用射孔

酸化测试联作技术,但对 APR 工具+完井封隔器的试油完井一体化管柱进行了力学校核<sup>[18]</sup>。包括:封隔器坐封、酸压、液氮掏空和生产等作业过程中管柱的抗内压、抗外挤、抗拉和三轴安全系数,坐封、酸化、测试对管柱的拉伸吨位,并根据校核结果对泵压、环空平衡压力 and 不同生产参数下环空控制压力等参数进行优化设计,从而保障完井管柱在复杂工况条件下的安全。

同时,对使用试油完井一体化管柱的井,建立了射孔冲击载荷工程计算方法(经验公式)和理论计算方法<sup>[19]</sup>,编制了射孔冲击载荷下试油完井一体化管柱力学性能分析软件。借助计算分析软件,根据所确定的射孔施工方案和井况条件,可较为快速的计算出射孔瞬间所形成的一次入射冲击波峰值压力和一次反射冲击波压力,从而确定出作用在试油完井一体化管柱末端的最大射孔冲击载荷。

借助于所编制的计算分析软件,可以根据所设

计的射孔作业方案和井况条件,预测出射孔工况条件下单枚射孔弹的当量炸药质量、射孔瞬间所形成一次冲击峰值压力、一次反射冲击压力,确定出作用在试油完井一体化管柱末端的最大射孔冲击载荷;在此基础上,对管柱的力学性能进行计算分析,判定在此射孔工况下,管柱是否发生螺旋屈曲和永久塑性变形,为射孔冲击载荷下试油完井一体化管柱的安全可靠性提供前期预测和分析。同时,借助于该计算分析软件,在确定的井况条件和管柱结构条件下,有效预测射孔施工作业所能使用的最大炸药装药的射孔弹和最小的人工井底“口袋”,为射孔方案优化设计提供重要参考。

以 MX39 井、MX41 井、GS102 井和 MX103 井的射孔施工作业为例,即当确定的井况条件和试油完井一体化管柱结构条件下,为了有效保证封隔器以下试油完井一体化管柱安全与可靠,管柱所能承受的最大冲击载荷、射孔弹的最大炸药装药量等临界射孔工况见表 1。

表 1 管柱发生塑性弯曲变形的临界射孔工况  
Table 1 Yield comparison before and after the acidizing transformation of some wells

井号	临界射孔弹主装 炸药质量/g	临界当量 炸药质量/g	临界冲击 压力/MPa	临界冲击 载荷/kN	弹性屈曲 临界载荷/kN	是否发生 弹性屈曲	管柱临界 应力/MPa	管柱屈服 应力/MPa
MX39	49.26	19.97	261.52	1 021.33	94.08	是	564	564
MX41	46.43	18.59	255.03	1 019.35	94.08	是	564	564
G102	38.35	34.87	256.00	1 019.61	94.08	是	564	564
M103	46.30	18.52	255.01	1 019.31	94.08	是	564	564

1.4 油管及工具选材

龙王庙组气藏气产量大、流速高,冲蚀作用强,加之腐蚀环境为 H<sub>2</sub>S 中度至高度腐蚀区,因此在根据推荐油管选材模版的基础上,选择相应高防腐级别的镍基合金材质油管,配套 718 材质井下安全阀及完井封隔器,满足气井材质防腐要求;灯影组气藏腐蚀环境为 H<sub>2</sub>S 中度至高度腐蚀区,通过模拟其腐蚀环境,开展抗硫材质油管动态条件下,气相和液相中的抗腐蚀室内评价试验<sup>[20-21]</sup>。

某实验井模拟地层压力 35 MPa,地层水中 H<sub>2</sub>S 分压 0.6 MPa,CO<sub>2</sub> 分压 8 MPa,pH 值 5.4;动态流速 3 m/s;实验周期 72 h。其实验结果见表 2。

表 2 BG95SS 油管缓蚀剂防腐评价试验  
Table 2 Anti-corrosion test of corrosion inhibitor  
for BG95SS tubing

温度/℃	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )			
	气相		液相	
	未加缓蚀剂	加缓蚀剂	未加缓蚀剂	加缓蚀剂
150	1.3545	0.0665	3.2208	0.0419

由表 2 可见,加入缓蚀剂后腐蚀速率处于轻微腐蚀范围。因此,采用高抗硫油管+缓蚀剂,可满足开采要求。配套 9Cr1Mo 完井封隔器和 925 以上材质安全阀,在满足防腐要求的同时,有效降低气藏完井成本。

1.5 高温完井液体系研制

龙王庙气藏分射孔和完井两趟管柱下入,射孔后地层易漏难堵,极易造成井下管柱卡埋,并造成严重储层污染;灯影组气藏前期悬挂器+裸眼封隔器串管柱与后期回插的完井管柱也是分两趟下入,加上静止观察、换装井口、流程恢复、酸化准备等工序,整个作业周期较长。在高温下,完井液长时间静止,极易沉淀,轻则导致管柱下不到位,严重者可能沉淀堵塞油管和环空通道,引起井下复杂,影响替液、坐封等后期关键工序实施<sup>[22]</sup>。

因此,通过开展储层专用防漏、堵漏、防沉淀体系研究,进行粒度分析、酸溶性评价实验,优选出了与完井试油管柱匹配,同时满足承压堵漏要求的



同粒径、可酸溶的储层专用堵漏材料,其最高承压能力可达 5 MPa,泥饼酸溶率大于 85%。而高温防沉淀专用完井液的应用,确保完井液在 170 ℃ 下静止 15 d 后,性能稳定、均匀、无沉淀,静切力低,流动性好。完井液性能的提升,为整个工艺的顺利实施奠定了基础<sup>[23]</sup>。

## 1.6 井筒防腐措施

气藏的酸性介质易造成油管、套管电化学腐蚀严重。以往采用在油管内增加防腐涂层的方式防腐,但从实际应用效果表明,由于管柱内流体冲蚀,防腐涂层破坏较快,易造成沉淀堵塞管柱,且油管外壁和套管无法防腐。针对这一现象,在下完完井管柱后,用清水控压代替泥浆,将环空保护液浓缩液按环空容积的 10%~15% 比例替至环空中部让其自由扩散,达到防腐效果。同时,在部分生产井中下入化学剂注入阀,定期向油管内加注保护液。

采用铁离子浓度分析、缓蚀剂残余浓度分析和目视检测的方法,对安岳气田生产井腐蚀情况分析。结果显示,目前的井下腐蚀防控措施效果良好。结合 MIT24 多臂井径仪及 MID-K 电磁探伤测井资料表明,油管没有发现破损、严重变形及断裂等明显的损伤现象,无腐蚀损伤现象。安全阀、化学剂注入阀、封隔器等井下工具位置及油管变径位置清晰,无异常现象,缓蚀剂防腐效果较好。

## 2 试油完井一体化技术

安岳气田为碳酸盐岩地层,具有大裂缝、溶洞型的地质特征,测试后地层往往会产生一定程度的井漏,造成压井困难,压井堵漏时间较长,堵漏将产生沉淀卡埋测试管柱,引发复杂的井下事故。即便压住了储层,压井液对地层带来的伤害也是不可避免的,导致地层产量下降,不得不投入资金和人力对地层重新改造<sup>[24]</sup>。

为获取地层测试资料,探井测试要先完成压井再起出测试管柱,才能读取井下压力计数据,将在堵漏压井施工环节上浪费大量时间。传统分层试油—完井从下钻至二次完井累计耗时约 30~40 d,其中压井过程中面临井漏、压井困难、井筒复杂等风险;桥塞或水泥塞封堵过程中面临封堵不严等风险;钻塞、通井过程中套管磨损等风险<sup>[25]</sup>。应用适用于超深井水平井的测试完井—封堵一体化管柱,在测试结束后,直接利用测试管柱实现完井生产,或利用测试管柱中的井下工具实现产层封堵,为二

次完井提供安全的井筒环境和管柱回插通道,从而避免压井堵漏带来的一系列难题和风险,同时取消后续坐桥塞或打水泥塞等工序,将大大提高试油完井效率,节约试油完井时间和成本<sup>[26]</sup>。

为此,在安岳气田试油完井一体化作业中设计的两种管柱如图 3 所示。

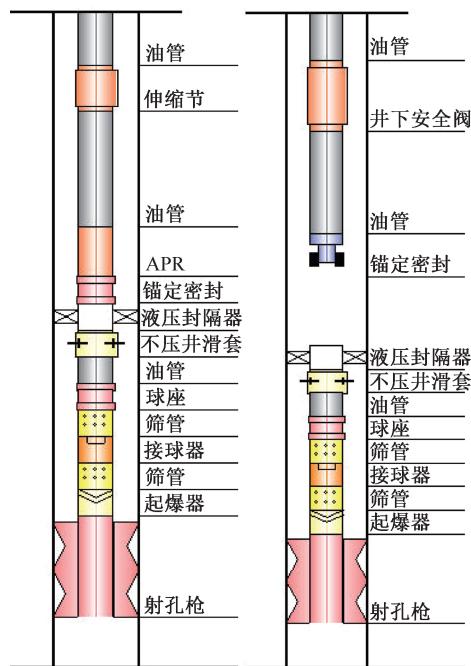


图 3 超深井/水平井测试—完井一体化管柱示意图  
Fig.3 Diagram of integrated testing-completion string in ultra-deep/horizontal wells

该管柱通过 APR 工具实现了试油测试的基本功能,同时也为后期完井预留了手段。其具有以下优点:①封隔器坐封不受井斜影响,永久封隔,密封可靠,可丢手起出封隔器上部管柱;②对易漏地层具有很强的针对性,丢手同时通过不压井滑套或类似功能的暂堵球座封堵地层,安全高效,省去了压井堵漏过程;③丢手后封隔器可永久封隔,为重新回插二次完井管柱提供通道。

## 3 现场应用

完井工艺在 MX008-H21 井、GS110 井、MX109 井等重点井得到了良好应用。

### 3.1 MX008-H21 井现场应用

MX008-H21 井是磨溪龙王庙构造上一口重要的开发井,采用先射孔,后下完井管柱酸化改造、测试、生产工艺。该井于 2016 年转入试油作业,钻杆传输射孔成功;起出射孔枪后,下入 88.9 mm 井下安全阀+88.9 mm 镍基合金油管+177.8 mm 完井封隔器+坐落短接+坐封球座的完井生产管柱,用环空

保护液反替出井内压井液,随后坐封封隔器,验封成功。经酸化改造后,稳产、高产至今。在开采过程中,管柱密封性良好,井下安全阀工作正常。

3.2 GS110 井现场应用

GS110 井是高石梯构造上的一口重点开发井,裸眼水平段长达 1 055.81 m,共分 8 层改造。该井采用裸眼分段酸化、测试、完井生产工艺。第一趟钻使用钻杆+悬挂封隔器+裸眼封隔器(投球滑套)+压差滑套的管柱结构,管柱下放到位后坐封裸眼封隔器及悬挂封隔器。验封合格后,从悬挂封隔器上部丢手,起出丢手接头以上管柱;第二趟钻使用 88.9 mm 井下安全阀+177.8 mm 完井封隔器+回插接头的管柱结构,管柱下放到位后,先用环空保护液反替出井内压井液,再憋压坐封封隔器。验封合格后,打开压差滑套,随后酸化改造、排液、投产。该井成功的创造了灯影组构造水平段最长,分段级数最多的记录,且投产后管柱密封性良好,井筒安全可靠,裸眼分段改造成功,并获百万方高产气流。

2017 年,在上述工艺的基础上,部分井基于储层品质,不断细化酸化改造方案,实现大斜度井/水平井储层精细分层、分段,有效连通缝洞体,提高单井产量(表 3、图 4)。

表 3 部分井酸化前后产量对比表  
Table 3 Production of some wells before and after acidification

井号	酸化规模/ m <sup>3</sup>	初测产量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)	测试产量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)	增产倍比
GS001-X5	960	—	56.84	—
GS001-X6	800	30.00(估)	102.48	3.41
GS001-X7	880	68.00(估)	101.50	1.49
GS001-X8	980	5.17	69.02	13.35
MX022-X1	820	34.25	69.78	2.03
MX022-X3	880	18.55	44.21	2.38
合计	5 320	155.97	443.83	—

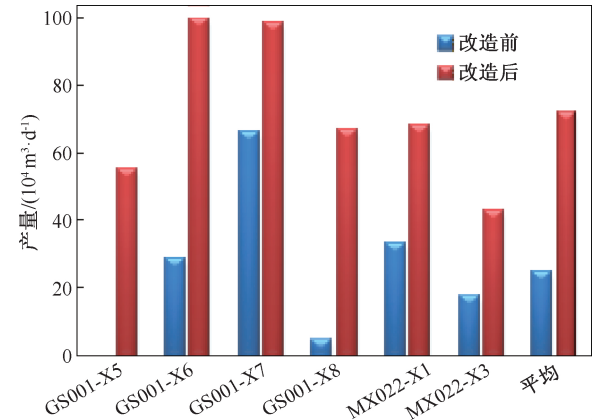


图 4 部分井酸化改造前后产量效果对比图  
Fig.4 Yield comparison before and after acidizing transformation of some wells

灯影组开发井平均测试产量由 25.99×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d 大幅提升至 73.97×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d,平均增产倍比达到 2.85,增产效果良好。

3.3 MX109 井现场应用

MX109 井灯影组构造钻井漏失超过千方,采用欠平衡精细控压技术完钻后,测试获气上百万方,在后续二次完井过程中面临的井控风险极大。该井应用了试油完井一体化技术,通过 APR 工具+完井封隔器+双级暂堵球座的管柱组合,实现了测试后投球封堵漏失地层,一次性倒出永久封隔器锚定密封。在井筒安全可控的条件下,将二次完井管柱完全回插到位,重新打开生产通道,实现完井生产。

试油完井一体化工艺在 MX48、MX39、MX41、GS102、MX103、NC1 井也得到了成功应用(表 4)。

表 4 采用试油完井一体化工艺后时效及漏失泥浆数据  
Table 4 Data of timeliness and mud loss after the integrated testing-completion technology is used

井名	一体化工艺	完井作业 时间/d	漏失泥浆/ m <sup>3</sup>
MX48	测试-暂堵-生产完井	2.5	0.5
MX39	测试-暂堵-生产完井	3.0	2.0
MX41	测试-暂堵-生产完井	3.0	2.8
GS102	双封+测试-暂堵-生产完井	5.0	16.0
MX103	双封+测试-暂堵-生产完井	3.5	4.0
NC1	测试+封堵-生产完井	5.0	12.0

由表 4 可见,试油完井一体化工艺技术从压井到工具起出期间,泥浆漏失量最大为 16.0 m<sup>3</sup>,最长作业时间仅为 5 d,说明该技术在极大降低井筒漏失的情况下,节约了完井时间,减少了下入完井管柱的井控风险。

4 结论

- (1)2013 年至今,试油完井一体化技术完成试油近百口井,累计获气超过 5 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,生产运行平稳,安全受控。
- (2)该技术在磨溪龙王庙构造高产井应用效果表明,管柱结构简单可靠,具有酸化、排液、生产等多项功能,对套管具有很好的保护作用。
- (3)裸眼分段完井管柱具有分段改造,排液、生产等功能,特别是针对高石梯灯影组非均质性强的地层,具有储层改造效果明显、能最大限度提高产能的特点,值得推广。
- (4)针对磨溪龙王庙构造、高石梯构造地层特点,持续开展井筒工作液的高温稳定性和与地层流体配伍性研究,可大幅度减少工程事故的发生,提

高作业成功率。

(5)管柱中配置化学剂注入阀以及环空保护液的使用等防腐手段,对酸性气藏管柱及套管缓蚀、防腐短期内有效,但后期生产期间进行长期监测,需要最终评价效果。

(6)结合气田实际生产情况,调整化学注入阀下入深度和注入压力的预设,通过收集井下安全阀在输气开采期间的故障排除案例,开展井筒内解除水合物对井下安全阀开关影响的专项研究,可确保气井开采中后期的井筒完整性。

致谢:感谢本论文完成过程中川中油气矿工监处伍林、陆晓峰两位同仁提供的指导和帮助。

## 参考文献

- [1] 徐鹏海,张莎,杨双宝,等. 高压裸眼油气井钻采一体化井口大四通装置[J]. 油气井测试,2018,27(6):33-38.  
XU Penghai, ZHANG Sha, YANG Shuangbao, et al. Large four-way device of drilling and production integrated wellhead for high-pressure open-hole oil and gas well [J]. Well Testing, 2018,27(6):33-38.
- [2] 李玉明.高含  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  井测试工艺技术应用[J]. 油气井测试,2017,26(5):51-52  
LI Yuming. Application of well test technology for well high content of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  [J]. Well Testing, 2017,26(5):51-52.
- [3] 陈华良,张洋.塔中高含  $\text{H}_2\text{S}$  凝析气井地面测试技术[J]. 油气井测试,2017,26(4):63-65,69  
CHEN Hualiang, ZHANG Yang. Surface testing technology of Tazhong condensate gas wells with high content of  $\text{H}_2\text{S}$  [J]. Well Testing, 2017,26(4):63-65,69.
- [4] 张朝举,铁忠银,曹学军,等. 元坝气田超深酸性气藏完井投产关键技术[J]. 天然气工业,2016,36(9):61-68.  
ZHANG Chaoju, TIE Zhongyin, CAO Xuejun, et al. Key technologies for well completion and commissioning of ultra-deep sour gas reservoirs in the Yuanba gasfield, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(9):61-68.
- [5] 陶俊亦,龚浩,吴军. 高产酸性气井环空安全评价分析[J]. 油气井测试,2016,25(6):19-22.  
TAO Junyi, GONG Hao, WU Jun. Evaluation and analysis of annular safety for high production acidic gas well [J]. Well Testing, 2016,25(6):19-22.
- [6] 李玉飞,余朝毅,刘念念,等. 龙王庙组气藏高温高压酸性大产量气井完井难点及其对策[J]. 天然气工业,2016,36(4):60-64.  
LI Yufei, SHE Chaoyi, LIU Niannian, et al. Completion difficulties of HPHT and high-flowrate sour gas wells in the Longwangmiao Fm gas reservoir, Sichuan Basin, and corre-

sponding countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(4):60-64.

- [7] 刘猛,董本京,张友义. 水平井分段完井技术及完井管柱方案[J]. 石油矿场机械,2011,40(1):28-32.  
LIU Meng, DONG Benjing, ZHANG Youyi. Segregated completion technology and completion string for horizontal well [J]. Oil Field Equipment, 2011,40(1):28-32.
- [8] 陈锋,陈华彬,唐凯,等. 射孔冲击载荷对作业管柱的影响及对策[J]. 天然气工业,2010,30(5):61-65.  
CHEN Feng, CHEN Huabin, TANG Kai, et al. Influence of perforating impact load on the operating string and the countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(5):61-65.
- [9] 何生厚. 普光高含  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$  气田开发技术难题及对策[J]. 天然气工业,2008,28(4):82-85.  
HE Shenghou. Technical problems and countermeasures of developing the Puguang gas field with high  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{CO}_2$  content [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(4):82-85.
- [10] 冯星安,黄柏宗,高光第. 对四川罗家寨气田高含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀的分析及防腐设计初探[J]. 石油工程建设,2004,30(1):10-14.  
FENG Xing'an, HUANG Baizong, GAO Guangdi. Analysis of corrosion and primary anti-corrosion design for high contents of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  in Luoiazhai Gas Field in Sichuan [J]. Petroleum Engineering Construction, 2004,30(1):10-14.
- [11] 潘登,徐茂荣,黄船,等. 射孔-酸化-测试-封堵及完井一体化工艺技术[J]. 钻采工艺,2014,37(1):8-10.  
PAN Deng, XU Maorong, HUANG Chuan, et al. Integrated operation technology of perforation-acidizing-testing-plugging & completion [J]. Drilling & Production Technology, 2014,37(1):8-10.
- [12] 乔智国,高德利,戚斌,等. 含硫气井酸压管柱受力及敏感性因素分析[J]. 钻采工艺,2017,40(5):59-62.  
QIAO Zhiguo, GAO Deli, QI Bin, et al. Loads on acid frac string used in sulfur-containing gas wells and analysis on sensitive factors [J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(5):59-62.
- [13] 罗宇锋. 抗高温高密度饱和盐水钻井液在川西地区的应用[J]. 钻采工艺,2017,40(5):98-101.  
LUO Yufeng. Application of high-temperature high-density saturated-brine drilling fluid system at West Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(5):98-101.
- [14] 陈海力,邓淑芬,王琳,等. 蜀南地区储层分段改造技术新进展及应用[J]. 钻采工艺,2015,38(5):52-54.  
CHEN Haili, DENG Shufen, WANG Lin, et al. Progress and application of staged fracturing techniques in Sichuan Shunan Gas Field [J]. Drilling & Production Technology, 2015,38(5):52-54.

- [15] 何龙. 元坝气田钻井工程井筒完整性设计与管理[J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 6-8.  
HE Long. Wellbore integrity design and management during the developing of Yuanba sour gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2): 6-8.
- [16] 张国红. 低压气藏水平井完井复杂情况分析与管理[J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 96-98.  
ZHANG Guohong. Complex problems during horizontal well completion and measures proposed [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2): 96-98.
- [17] 汪建国, 夏天果, 何思龙, 等. 碳酸盐岩超深水平井分段改造完井并眼准备技术[J]. 钻采工艺, 2015, 38(5): 96-98.  
WANG Jianguo, XIA Tianguo, HE Silong, et al. Segmented transformation completion well preparation technology of ultra-deep horizontal [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(5): 96-98.
- [18] 孙海芳, 刘飞, 王志敏. 高温高压气井试油完井一体化工艺技术[J]. 钻采工艺, 2017, 40(4): 36-39.  
SUN Haifang, LIU Fei, WANG Zhimin, et al. Integrated well testing-completion operation technology in HPHT gas wells [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(4): 36-39.
- [19] 张本健, 李旭成, 王兴志, 等. 超高压气井试采工艺研究与应用——以川北地区 ST1 井为例[J]. 钻采工艺, 2017, 40(4): 59-61, 86.  
ZHANG Benjian, LI Xucheng, WANG Xingzhi, et al. Application of test production technology on superhigh-pressure gas wells——A case on Well ST1 [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(4): 59-61, 86.
- [20] 杨海涛, 张军杰, 李翔, 等. 顺南区块高温高压腐蚀机理及选材研究[J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 47-49.  
YANG Haitao, ZHANG Junjie, LI Xiang, et al. Research on tubing corrosion mechanism and tubing material selection under HTHP in Shunnan Block [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2): 47-49.
- [21] 肖潇, 宋勇, 李海, 等. 对黄龙 009-H2 井完井试油复杂情况的认识[J]. 钻采工艺, 2017, 40(4): 62-64.  
XIAO Xiao, SONG Yong, LI Hai, et al. Some thinking about the completion and test production events on Well HL009-H2 [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(4): 62-64.
- [22] 相恒富, 孙宝江, 李鹏飞. 智能完井技术标准探析[J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 52-55.  
XIANG Hengfu, SUN Baojiang, LI Pengfei. Discussion on standards for intelligent well completion [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2): 52-55.
- [23] 徐茂荣, 梁先贵, 曾洪均. 磨溪-高石梯构造 APR 测试联作管柱堵漏压井技术浅析[J]. 钻采工艺, 2017, 40(6): 103-105.  
XU Maorong, LIANG Xiangui, ZENG Hongjun. Some discussion on well killing and plugging using APR testing string at Moxi-Gaoshiti Structure [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(6): 103-105.
- [24] 刘东明, 王瑞莲, 胡嘉佩. 暂堵工艺在川东地区低压井修井作业中的应用[J]. 钻采工艺, 2013, 36(5): 122-124.  
LIU Dongming, WANG Ruilian, HU Jiabei. Application and temporary plugging technology in low-pressure gas well workover in Chuandong Basin [J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(5): 122-124.
- [25] 卢齐, 林轶斌, 赵益秋. 永久式封隔器完井技术在龙王庙气藏开发井中的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 39-42.  
LU Qi, LIN Yibin, ZHAO Yiqiu, et al. Application of permanent packer completion technology in Sichuan Longwangmiao Gas Reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2): 39-42.
- [26] 温杰文, 徐茂荣, 宋军正. 基于井筒完整性的试油完井一体化工艺技术[J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 80-82.  
WEN Jiewen, XU Maorong, SONG Junzheng. Integrated operation technology of well testing and completion based on well integrity [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2): 80-82.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 邓乐, 男, 1965 年出生, 高级工程师, 1999 年 11 月毕业于西南石油大学油气勘探专业, 长期从事油气井完井及试油技术及管理。电话: 028-86011710; Email: dle\_sc@cnpc.com.cn。通信地址: 四川省成都市府青路川庆钻探工程有限公司工程技术处, 邮政编码: 610000。