

# 超深含硫探井多封隔器分段改造技术

刘啸峰,刘殷韬,董海峰,夏彪

中石化西南油气分公司石油工程技术研究院 四川德阳 618000

通讯作者:Email:liuyintao\_xnyq@sinopec.com

项目支持:中国石化科技部项目“超深气井测试投产关键工具研发及一体化工艺研究”(P21068)

引用:刘啸峰,刘殷韬,董海峰,等. 超深含硫探井多封隔器分段改造技术[J]. 油气井测试,2023,32(4):17-21.

Cite: LIU Xiaofeng, LIU Yintao, DONG Haifeng, et al. Multi-packer stage reconstruction technology of ultra-deep sulfur exploration well[J]. Well Testing,2023,32(4):17-21.

**摘要** 川西海相雷口坡为埋藏深、高温、高压、高含酸性腐蚀气体的碳酸岩储层,其纵向上Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类储层交叉叠置,储层非均质性强,笼统酸化改造无法达到产能评价目的;多趟管柱逐层测试作业时间长、成本高,无法满足降本增效的要求。为了实现一趟管柱分段改造,兼顾资料求取的目的,针对储层类型特征,通过封隔器及配套工具优选、多封隔器管柱受力分析、超高压施工参数优化设计等手段,形成了一套以“国产机械式+液压式封隔器组合实现分段、APR测试工具实现资料求取”的分段测试管柱及作业技术。该技术在PZ103井经受了155℃高温、112 MPa高压、长达13 h作业,成功实现了储层的有效分段改造,录取到了完整的产能数据,为超深含硫气井分段测试提供了新的思路。

**关键词** 超深井;高含硫井;探井;酸化改造;RTTS封隔器;Y241封隔器;分段改造;参数优化

中图分类号:TE353 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.04.003

## Multi-packer stage reconstruction technology of ultra-deep sulfur exploration well

LIU Xiaofeng, LIU Yintao, DONG Haifeng, XIA Biao

Petroleum Engineering Technology Research Institute of Sinopec Southwest Oil & Gas Branch,deyang, Sichuan 618000, China

**Abstract:** The Leikoupo formation in the western Sichuan basin is a carbonate rock reservoir with deep burial, high temperature, high pressure, and high content of acidic corrosive gases. Vertically, Class I, II, and III reservoirs intersect and overlap, resulting in strong heterogeneity of the reservoir. General acidification transformation cannot achieve the purpose of productivity evaluation; The multi-layer testing of multiple pipe columns takes a long time and costs high, which cannot meet the requirements of cost reduction and efficiency improvement. In order to achieve a segmented transformation of the tubing string and take into account the purpose of data acquisition, a set of segmented testing tubing and operation techniques using a combination of domestic mechanical and hydraulic packers to achieve segmentation, and APR testing tools to achieve data acquisition, have been formed based on the characteristics of reservoir types, through methods such as selecting packers and supporting tools, analyzing the stress of multiple packers on the tubing string, and optimizing the design of ultra-high pressure construction parameters. This technology has undergone 155℃ high temperature, 112 MPa high pressure, and 13 hours of operation in PZ103 well, successfully achieving effective segmented transformation of the reservoir, and obtaining complete production capacity data, providing a new idea for segmented testing of ultra deep sour gas wells.

**Keywords:** ultra deep wells; high sulfur well; exploration well; acidification transformation; RTTS packer; Y241 packer; segmental renovation; parameter optimization

川西海相雷口坡属于超深、高温、高压、高含酸性腐蚀气体的碳酸岩气藏,其目的层雷口坡四段发育上、下两套主产层,产层内Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类储层交叉叠置,非均质性极强,前期实践证明酸化改造是获产的重要手段,但单一储层的评价不能有效的达到建产的目的。对于此类储层,传统做法是依靠单封隔器管柱逐层测试的方式,陈琛等<sup>[1]</sup>针

对含硫气井的测试,提出采用完井管柱测试投产一体化的管柱方法。苏鏢等<sup>[2]</sup>提出含硫气井测试管柱受力、超高压施工参数设计等优化方法。何春明等<sup>[3]</sup>提出了超深碳酸盐水平井的分段酸压技术。李相芳等<sup>[4]</sup>针对高温高压气井测试,提出了测试工艺、测试方式和测试管柱等研究方法。沈琛等<sup>[5-7]</sup>针对川东北和塔里木地区超深高酸性气

田勘探开发一体化技术进行了分析。李玉飞等<sup>[8-9]</sup>对四川龙王庙气藏油管设计难点和方法进行了研究。许小强等<sup>[10-12]</sup>对开展了四川盆地超深井测试管柱和测试工艺研究,最终形成了单层APR 测试评价工艺技术。但由于传统单封隔器逐层测试评价工艺作业时间长、成本高,不满足油气田降本增效的要求<sup>[13-15]</sup>。

本文根据川西海相勘探评价的实际需要,为实现一趟管柱分段改造、资料求取、安全可取的目标,通过封隔器及配套工具的评价优选、多封隔器管柱的受力分析、超高压施工参数的优化设计,优化形成了一套以“国产机械式+液压式封隔器组合实现分段、APR 测试工具实现资料求取”的分段测试管柱及作业技术,并在 PZ103 井取得了成功应用,为超深含硫气井分段测试作业提供了重要的指导意义。

## 1 川西海相测试面临的难点

(1)层系多、单层厚度薄、非均质性强,多套层系的充分有效动用难度大

川西海相雷口坡四段下储层段夹层发育(6~15 层),单层厚度薄(平均 1.8~2.39 m),Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类储层交叉叠置(见图 1),非均质性强,由于各类储层应力差异大,依靠传统 APR 测试+暂堵酸化工艺,无法实现Ⅱ、Ⅲ类储层的有效动用,APR 逐层测试作业时间长、成本高,纵向上多层系的动用难度大。

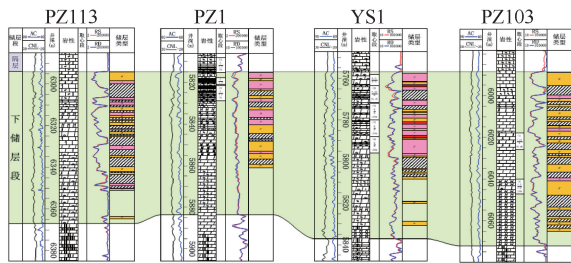


图 1 储层分布情况  
Fig. 1 reservoir distribution

(2)储层破裂压力高,Ⅱ、Ⅲ类储层压裂难度大  
前期实施井情况表明,川西海相雷口坡储层破裂压力异常高,非反应液体基本难以压开地层,即使酸液接触到地层后,依然存在试挤难度大的问题,需要一定的酸量进入地层才能建立稳定排量(见图 2)。

(3)超高温条件下酸液对管材腐蚀严重,连接失效和封隔器漏失威胁气井安全

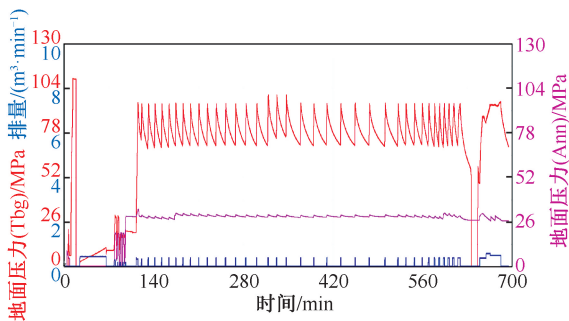


图 2 PZ113 试挤施工曲线  
Fig. 2 PZ113 trial extrusion construction curve

高温条件下酸液对油管及工具腐蚀严重,由于储层压开难度大,酸液在井筒内滞留时间长(PZ113 井长达 17 h),对管柱及工具将造成严重的腐蚀伤害(见图 3),影响气井的安全。



图 3 腐蚀断裂形貌  
Fig. 3 corrosion fracture morphology

## 2 超深含硫气井多封隔器分层改造工艺技术

在防腐材质选择标准上,配套多封隔器一体化测试管柱及分段测试改造工艺,提出超深含硫气井多封隔器分层改造工艺。

### 2.1 材质选择

探井在酸性气井短期测试过程中,材质选择的关键是控制硫化氢的氢脆腐蚀,应选择满足抗抗硫化物应力开裂(SSC)要求的材质,同时评价酸液体系对管材抗应力腐蚀破裂的影响。通过计算,测试油管选择 110SS 材质,测试工具选择 P110SS 材质,基本能满足超深含硫气井中抗 SSC 及酸液腐蚀要求。

### 2.2 管柱结构

针对川西海相雷口坡气藏多层系、破裂压力高等难点,在对测试工具及测试工艺充分调研的基础上,根据地质目标、分段改造、资料求取、安全可取的需要,优化配套了超深含硫气井多封隔器分层测试管柱结构(自上而下):自由式伸缩节+OMNI 阀+RDS 阀+压力计托筒+RD 阀+震击器+液压旁通+上

安全接头+RTTS封隔器+下安全接头+销钉式伸缩节+压裂滑套+安全接头+水力锚+Y241封隔器+球座(见图4)。

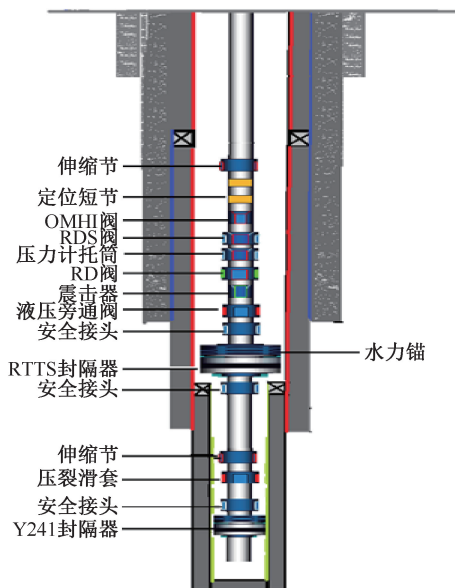


图4 多封隔器分层测试管柱结构图

Fig. 4 structure diagram of multi-separator layered test string

(1)考虑层间改造时施工压力高(95 MPa以上),选择下部带卡瓦的封隔器,利用上部的水力锚和下部卡瓦实现双向锁定,避免改造过程中管柱移动<sup>[16-17]</sup>。

(2)上部采用APR测试工具系列,在超深含硫气井中应用相对可靠,同时可满足资料求取,井下关井等要求。

(3)在两个封隔器上部均设计安全接头,倒扣方式有差异,一旦封隔器起出遇阻,可提供备用处理手段。

(4)根据管柱力学计算结果,采用 $\Phi 88.9$  mm 110SS 钢级 9.52/6.45 mm +  $\Phi 73$  mm 110SS 钢级 5.51 mm 气密扣油管组合,在井口限压 120 MPa 的情况下,RTTS封隔器上部管柱安全系数 $\geq 1.25$ ,封隔器之间的管柱安全系数 $\geq 1.33$ ,满足施工要求<sup>[18]</sup>。

### 2.3 测试工艺技术

#### (1)替酸及坐封工艺

川西海相雷口坡气藏面临高破裂压力的难题,酸液提前接触产层后可利于后期的酸压改造,管柱作业工艺中需考虑替酸降破的问题。

由于川西地区 I、II、III类储层破裂压力变化大,同时机械、液压式封隔器座封方式不同,设计先在

防喷器的状态下坐封 RTTS 封隔器,换装井口后根据储层类型进行 OMNI 阀替酸及连续油管替酸等方式。替酸到位后控制排量试挤酸液进地层,待可建立连续排量后投球坐封 Y241 封隔器进行后续作业。

#### (2)压力控制技术

压力控制技术是超深井作业的关键,关系到施工安全、油层套管、试气管柱的安全可靠<sup>[19]</sup>。改管柱组合与传统 APR 测试工具类似,以环空套管承压能力为基础,基于井内流体、井下工具耐压能力、油管和套管强度,通过不同工况下的测试工具的压力控制(见图5),保障管柱的安全。

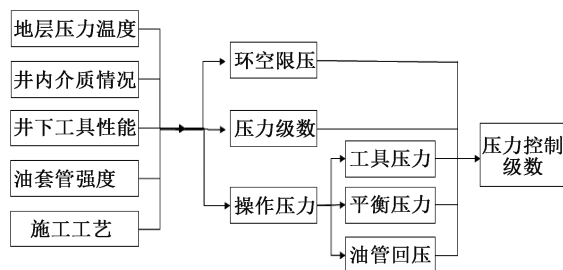


图5 压力参数优化控制流程

Fig. 5 pressure parameter optimization control flow

由于配合超高压施工,所选工具耐压差均为 70 MPa,故需根据 Y241 封隔器的坐封前后状态,合理的控制不同排量下的试挤压力,避免两个封隔器之间管柱及工具失效。

#### (3)井控工艺技术

①采用 105/140 MPaEE 级采气树,并采用金属与橡胶密封相结合的复合密封方式。防喷器组合采用的方式为:半封闸板++剪切闸板+全封闸板+半封闸板;

②采用 105+70 MPa 二级地面流程,同时考虑双向放喷、分离计量、保温、正反压井循环、自动点火等功能。

### 2.4 酸化工艺技术

#### (1)酸化工艺

川西海相雷口坡储层非均质性强,为达到评价储层和取得地层参数的目的,需针对下储层进行分段酸压改造,实现储层长井段充分改造,同时单段内采取大规模“多种酸+非反应液交替注入酸压工艺”,实现解除近井带污染和深度改造<sup>[20]</sup>。

#### (2)酸化防腐措施

试挤阶段降破酸采用新型高效缓蚀剂,经实验表明在 160 ℃、14 h 条件下中使用,可有效减缓酸液对 110SS 管材的腐蚀(见表1),确保施工过程中的管柱安全。



表 1 施工井改造试挤情况

Table 1 test extrusion of construction well

实验条件	相态	失重/ g	腐蚀速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )	平均腐蚀速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )
160 ℃	液相	0.085 83	5.778 77	6.045
14 h		0.094 77	6.255 51	
		0.092 53	6.100 59	

3 现场应用

PZ103 井是四川盆地川西坳陷鸭子河构造的一

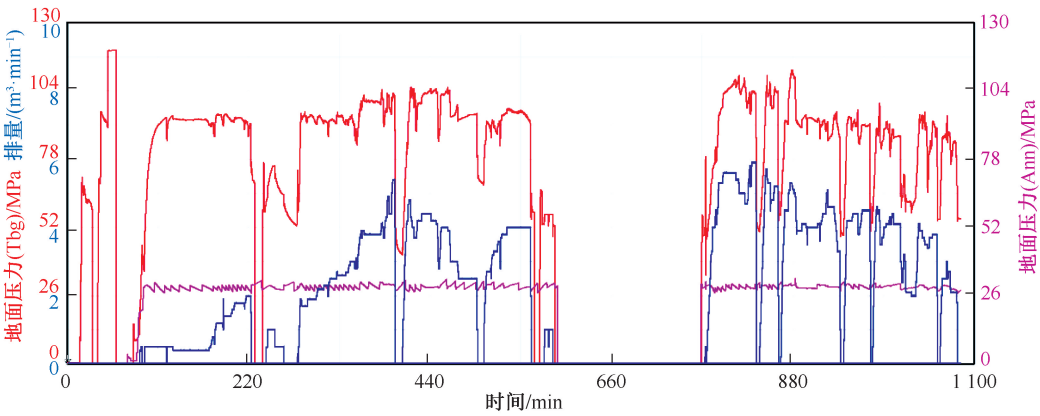


图 6 PZ103 井酸化改造施工压力曲线

Fig. 6 pz103 well acidizing reconstruction pressure curve

应用的 RTTS、国产 Y241 封隔器等配套工具成功经受了 155 ℃ 高温、长达 13 h、最高压力 112 MPa 的恶劣作业工况,酸化后求产,在油压 14.2 MPa 下计算天然气产量  $12.6553 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水产量  $276 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该井压井后成功取出井内管柱,满足了分层改造、合层测试、资料求取、可取的技术要求。该管柱组合在国内超深含硫气井中属首次应用,为下步川西海相分段测试评价提供了新的思路。

4 结论

- (1)超深含硫气井多封隔器分层改造管柱经受了 155 ℃ 高温、112 MPa 高压、长达 13 h 的恶劣工况作业,满足了分层酸化、资料求取、安全可取的要求,在改造、求产及关井期间,油套压变化正常,证实了管柱的可靠性;
- (2)封隔器机械分段酸化工艺可成功解决长井段非均质储层充分改造的难题,保证不同类型储层的有效改造;
- (3)实践证明了高产液压封隔器在超深含硫气井中的可靠性,为后续含硫油气藏开发国产工具的推广奠定了基础。

口评价井,井型为直井,采用套管射孔完井,完钻井深 6148 m,井筒为 193.7 mm 套管悬挂 139.7 mm 尾管。  
该井雷口坡四段下储层长度 83 m,多套层系交错,设计采用 140 MPa 井口、RTTS+Y241 封隔器管柱分 2 段进行储层改造,平均单层入地液量规模  $1100 \text{ m}^3$ ,总入地规模  $2200 \text{ m}^3$ ,最高泵压 112 MPa,最高排量  $5.9 \text{ m}^3/\text{min}$ ,分层效果明显(见图 6)。

**致谢:**衷心感谢中石化西南油气分公司石油工程技术研究院与中石化西南油气分公司彭州(海相)项目部的领导及同事在论文编写过程中提供的帮助。

参考文献

[1] 陈琛,曹阳.元坝气田超深高含硫水平井测试投产一体化技术[J].特种油气藏,2013,20(1):129-131,138.  
CHEN Chen, CAO Yang. Integral string technology of test and production for horizontal wells in super deep reservoirs with high content of Yuanba gas field [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013,20(1): 129-131,138.

[2] 苏镖,赵祚培,杨永华.高温高压高含硫气井完井试气工艺技术与应用[J].天然气工业,2010,30(12):53-56.  
SU Biao, ZHAO Zuopei, YANG Yonghua. Completion and well testing technology in HTHP and high-H<sub>2</sub>S gas wells of the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12):53-56.

[3] 何春明,胡峰,刘哲.深层海相碳酸盐岩储层水平井分段酸压技术研究[J].油气井测试,2013,22(5):5-9.  
HE Chunming, HU Feng, LIU Zhe. Research on acid fracturing technology of horizontal section of the deep marine carbonate reservoir[J]. Well testing, 2013,22(5): 5-9.

[4] 李相芳.高温高压井测试技术[M].北京:石油工业出版社,2007:122-157.

[5] 沈琛.川东北超深高酸性气田勘探开发工程技术[J].中

- 国工程科学,2010,12(10):29-34.
- SHEN Chen. The exploration and development engineering technology for ultra deep and high acid gas fields in Northeast Sichuan [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12 (10): 29-34.
- [6] 米强波,伊向义,罗攀登,等.塔中超深致密砂岩油藏水平井分段压裂技术[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(2):114-118.
- MI Qiangbo, YI Xiangyi, LUO Pandeng, et al. Horizontal well staged fracturing technology of tight sandstone reservoirs with super depth in Tazhong area [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37 (2): 114-118.
- [7] 廖成锐.普光气田高含硫超深水平井投产配套技术[J].钻采工艺,2010,33(4):56-58.
- LIAO Chengrui. Production and technology used in high sulfur ultra deep horizontal well of puguang gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33 (4): 56-58.
- [8] 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-flow rate sour gas wells in the Longwangmiao Fm gas reservoir, Sichuan Basin, and corresponding countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36 (4): 60-64.
- [9] 郭建华,马发明.四川盆地高含硫气井油管螺纹气密封性能评价与应用-以龙岗气田为例[J].天然气工业,2013,33(1):128-131.
- GUO Jianhua, MA Faming. Air tightness performance assessment of screw threads of oil tubing in high-sulfur gas wells in the longgang gas field, Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33 (1): 128-131.
- [10] 许小强,陈琛,戚斌,等.川东北高温高压含硫超深气井测试技术实践[J].钻采工艺,2009,32(3):53-55.
- XU Xiaoqiang, CHEN Chen, QI Bin, et al. Well testing technology on high temperature and high pressure sulfurous ultra-deep reservoirs in northeast Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(3): 53-55.
- [11] 何生厚.复杂气藏勘探开发技术难题及对策思考[J].天然气工业,2007,27(1):85-87.
- HE Shenghou. Technical difficulties and countermeasures in complex gas reservoirs exploration and development [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (1): 85-87.
- [12] 伍贤柱,万夫磊,陈作,等.四川盆地深层碳酸盐岩钻完井技术实践与展望[J].天然气工业,2020,40(2):97-105.
- WU Xianzhu, WAN Fulei, CHEN Zuo, et al. Drilling and completion technologies for deep carbonate rocks in the Sichuan Basin: Practices and prospects [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (2): 97-105
- [13] 王福国,袁贵德,靳周,等.英中地区高温高压高含硫SX58井试油测试工艺技术[J].油气井测试,2021,30(2):7-12.
- WANG Fuguo, YUAN Guide, JIN Zhou, et al. Production test technology of Well SX58 with high temperature, high pressure and high sulfur content in Yingzhong area [J]. Well Testing, 2021, 30(2): 7-12.
- [14] 唐瑞江,李文锦,王勇军,等.元坝气田超深高含硫气井测试及储层改造关键技术[J].天然气工业,2011,31(10):32-35,116.
- TANG Ruijiang, LI Wenjin, WANG Yongjun, et al. Key technologies in well testing and reservoir stimulation for ultra-deep sour gas wells in the Yuanba gas field [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 32-35, 116.
- [15] 叶军.川西海相天然气勘探难点及对策[J].天然气工业,2008,28(2):17-22.
- YE Jun. Challenges and solutions of marine gas exploration in west Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28 (2): 17-22.
- [16] 纪淑玲,魏晓霞,陈景红.柴达木盆地高温高压井试油管柱力学分析与应用[J].石油知识,2021,22(1):45-47.
- JI Shuling, WEI Xiaoxia, CHEN Jinghong. Mechanical analysis and application of tubing string for high temperature and high pressure wells in Qaidam basin [J]. Petroleum Knowledge, 2021, 22(1): 45-47.
- [17] 丁龙.低渗层试油井下管柱力学分析及工艺研究[J].石化技术,2018,25(11):51.
- DING Long. Mechanical analysis and process research of downhole string for low permeability testing oil [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(11): 51.
- [18] 周泽宇.高温高产超深井多管柱力学研究[D].成都:西南石油大学,2018.
- ZHOU Zeyu. Study on multi-column mechanics in high temperature and yield ultra-deep well [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018
- [19] 蒋辉.超深井试气施工难点及应对措施[J].化工管理,2019,(11):165.
- JIANG Hui. Difficulties and countermeasures of gas testing in ultra deep wells [J]. Chemical Engineering Management, 2019, (11): 165.
- [20] 董海峰,杨顺艳,盛伟.元坝超深含硫气井产能测试工艺技术[J].油气井测试,2010,21(1):42-44.
- DONG Haifeng, YANG Shunyan, SHENG Wei. Deliverability test technology for Yuanba super deep sour gas well [J]. Well Testing, 2010, 21(1): 42-44.

编辑 穆立婷

第一作者简介:刘啸峰,男,1981年出生,高级工程师,2003年毕业于西南石油大学石油工程专业,现主要从事低渗透、超深、高含硫油气井测试及投产工作。电话:19827880309, Email:4814404@qq.com,通信地址:四川省德阳市龙泉山北路298号石油工程技术研究院,邮政编码:618000。