

衬管完井水平井新型布酸技术研究与应用 ——以安岳气田磨溪构造龙王庙组气藏为例

王业众¹,段国彬²,桑 宇¹,彭 华³,张 林¹,周长林¹,余良志⁴,陈伟华¹

(1.中国石油西南油气田分公司工程技术研究院,四川 广汉 618300;

2.中国石油西南油气田分公司工程技术处,四川 成都 610051;

3.中国石油西南油气田分公司川中油气矿,四川 遂宁 629000;

4.中国石油西南油气田分公司勘探事业部,四川 成都 610041)

摘要:衬管完井具有泄流面积大、完井成本低等优势,目前成为水平井完井的主要方式之一。衬管完井水平井酸化改造的关键是如何实现水平井段上的均匀布酸,但由于割缝衬管与岩石壁面之间环形空间未真正封隔,常规分段工艺的应用受到限制,致使衬管完井水平井均匀布酸困难。为此,通过理论研究和室内实验评价,形成了衬管完井水平井新型均匀布酸技术:①预测水平井段上初始表皮系数分布剖面,明确不同井段损害分布特征;②建立水平井段上酸液流量数学模型,模拟计算不同井段暂堵转向净压力值;③优化设计不同井段衬管割缝参数,优选转向剂加量,实现井底不同转向净压力;④采用数值刻画方法定量表征酸蚀蚀孔形态,优选适合的酸液体系。在安岳气田现场应用8口井,井均增产倍比达1.95,井均增加测试产量 $67.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相比射孔完井,单井节约完井成本900万元,对同类型气藏衬管完井水平井均匀布酸技术具有借鉴意义。

关键词:衬管完井;水平井;均匀布酸;表皮系数剖面;转向净压力;暂堵转向;酸蚀蚀孔

中图分类号:TE142 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2017)08-1264-05

引用格式:Wang Yezhong, Duan Guobin, Sang Yu, et al. Research and practice of new acid arrangement technology in horizontal well with liner slot completion[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8):1264-1268. [王业众,段国彬,桑宇,等.衬管完井水平井新型布酸技术研究与应用——以安岳气田磨溪构造龙王庙组气藏为例[J].天然气地球科学,2017,28(8):1264-1268.]

0 引言

水平井具有泄流面积大,流动阻力小等特点,已成为加快产能建设、提高采油气效率、增加可采储量的重要技术手段。水平井完井方式主要有3种,即裸眼完井、射孔完井和衬管完井。针对前2种完井方式目前已形成系列分段改造工艺技术,如裸眼封隔器分段、水力喷射分段等。割缝衬管完井由于割缝衬管与岩石壁面之间环形空间未真正封隔,常规分段改造技术的应用受到限制。但是由于水平井施

工井段长,储层具有非均质性、工作液浸泡时间差异大等特点,沿井眼方向上损害往往呈不均匀分布,则需要采取暂堵转向分流技术从而实现酸液均匀置放^[1-7]。通过数值模拟与实验评价相结合,开展沿井眼方向上初始表皮系数分布剖面预测,建立酸液流量数学模型,模拟计算不同井段暂堵转向净压力,依据储层物性差异进行变密度割缝参数设计,通过实验评价优选暂堵转向分流工艺,采用数值刻画方法表征酸蚀蚀孔形态,优选酸液体系,配套形成了衬管完井水平井新型非机械方式均匀布酸技术,在安岳

收稿日期:2016-06-12;修回日期:2016-09-12.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(编号:2014E-3207)资助.

作者简介:王业众(1981-),男,河南周口人,工程师,硕士,主要从事储层改造理论技术研究与应用工作.

E-mail:wangyezhong@petrochina.com.cn.

气田磨溪构造龙王庙组气藏推广应用 8 口井,气井增产改造效果显著,相比射孔完井,单井节约完井成本 900 万元,经济效益显著,为同类型衬管完井水平井均匀布酸提供了借鉴意义。

1 初始表皮系数剖面预测

水平井在钻完井过程中,由于不同井段储层物性存在差异以及工作液对不同位置的浸泡时间不同,造成水平段伤害带呈不均匀分布特征。酸液沿井眼方向上的均匀置放是碳酸盐岩油气藏水平井酸化成功与否的关键,而要实现酸液沿井眼方向上均匀置放,对水平井段上工作液造成的初始表皮系

数分布特征预测是前提。综合考虑钻井液性能、钻井液损害机理、施工井段储层物性及钻进参数等方面因素,假定污染带内的储层孔隙体积全部被钻井液滤液占据,不考虑渗透率各向异性的影响因素,将污染区域考虑为圆柱体状,推导出不同井段的等效侵入半径 $R_{ef}(x)$ 的计算公式[式(1)],建立钻井液等效侵入深度模型,进而可以预测沿井眼方向上初始表皮系数的分布特征(图 1),可以为均匀布酸技术施工参数优化提供基础依据^[8-13]。例如,依据不同井段初始表皮系数大小优化酸液用量,解除整个施工井段上的污染堵塞,充分发挥油气井自然产能。

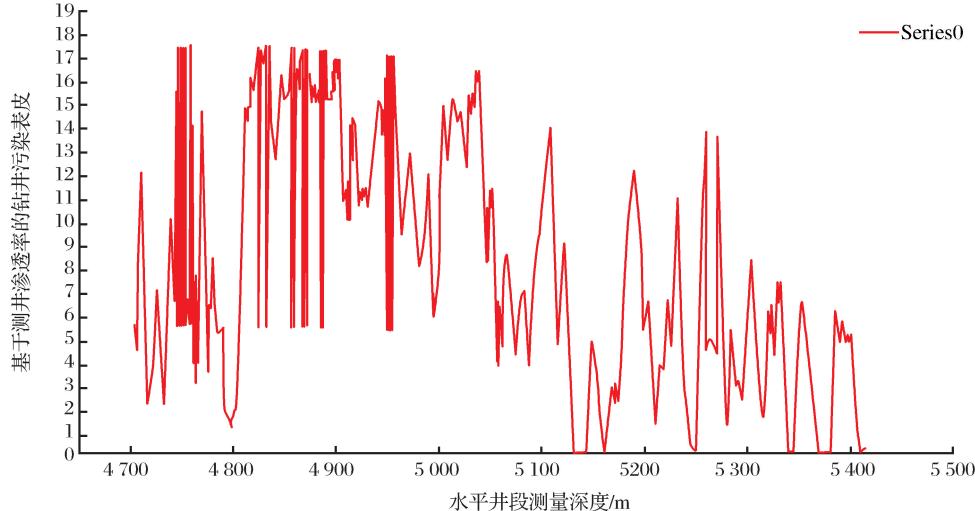


图 1 初始表皮系数剖面预测

Fig.1 Prediction of initial skin factor profile

$$R_{ef}(x) = \left[\frac{V_{x-L_w}}{\pi L(x)\Phi} + R_w^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $R_{ef}(x)$ 为等效侵入半径, cm; V_{x-L_w} 为滤失量, cm^3 ; $L(x)$ 为井段长度, m; Φ 为孔隙度, %; R_w 为井筒半径, m。

2 不同井段吸酸剖面预测

酸液在地层中流动主要受注入排量、流动压差、流动面积及储层物性等因素影响,还存在对流、扩散、传热等多种状态,为方便现场应用,简化酸液流量计算模型,认为酸液线性流过不同产层小段时,符合式(2)计算关系式。实际监测数据显示,计算结果在工程误差要求范围内。由式(2)中可知,改变每一小时段 ΔP 可以影响相应时段的进液量,因此,可以采取暂堵转向分流技术,暂堵高渗透带,减少高渗透带进液量,增加低渗透带进液量,进而改善整个水平

井段上的吸酸剖面分布特征。

$$Q = \frac{K \Delta PA}{\mu L} \times 10 \quad (2)$$

式中: Q 为通过储层小段时的流量, cm^3/s ; K 为储层渗透率, μm^2 ; ΔP 为压差, MPa; A 为渗流面积, cm^2 ; μ 为液体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; L 为进液层段长度, cm。

数值模拟结果显示,改变不同小时段的过流阻力(ΔP),可以改善沿井眼方向上进液剖面分布特征(图 2)。增加高渗透带过流阻力,既增加高渗透带的施工净压力,可以增加酸液流动阻力,进而减少相应时段的进液压差,迫使酸液分流转向进入低渗透带。模拟结果显示,安岳气田磨溪构造龙王庙组气藏衬管完井水平井不同井段净压力差值在 2.0~5.0 MPa 之间,采取暂堵转向分流技术,调整不同层段过流阻力,可以实现整个水平井段上酸液的均匀分布。

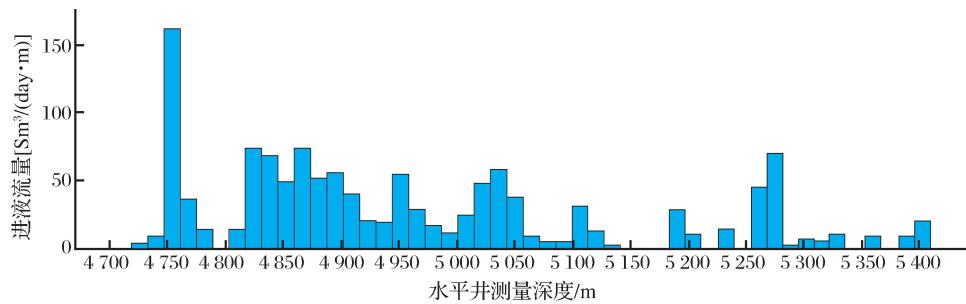


图 2 改变不同井段过流阻力时进液剖面预测

Fig.2 Prediction of incoming profile with alternating friction of different intervals

3 暂堵转向分流配套技术

3.1 暂堵转向工艺优选

目前研制出的暂堵转向剂主要有可降解暂堵球、纤维转向剂和化学转向酸等。可降解暂堵球用于暂堵射孔孔眼,暂堵压力可达40MPa,纤维转向剂用于暂堵裂缝层段,暂堵压力为15~20MPa,化学转向酸用于暂堵孔隙,暂堵压力为3~5MPa,可以集成物理与化学复合转向原理,选择几种转向剂搭配使用。可降解暂堵球用量按照暂堵层段射孔孔眼数乘以1.2倍计算,纤维转向剂用量基于暂堵能力实验评价,一般在1.5%~2.5%之间,转向液用量根据上一级酸化所形成的裂缝体积大小进行设计。但衬管完井割缝的几何形状限制了可降解暂堵球的使用,另外,通过割缝衬管过流试验模拟,纤维转向剂存在堵塞割缝衬管的风险。而化学转向酸可以基本无节流压差的情况下通过衬管,同时,实验评价结果显示,优化化学转向酸配方可以实现不同的转向压力,转向剂加量为4.0%~5.0%时,转向压力可达4.0~4.6MPa(图3),对于安岳气田磨溪构造龙王庙组气藏,依据储层损害分布特征,优选转向剂用量,可以实现酸液的均匀分布。

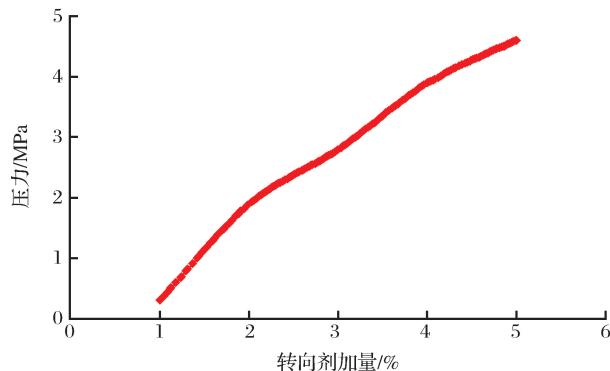


图 3 转向酸转向压力随不同转向剂加量变化关系

Fig.3 Relationship between diversion pressure of diversion acid and varying diversion agent

3.2 基于酸蚀蚯孔数值表征技术优选转向酸液体系

非均质性强碳酸盐岩油气藏,为改造更多储层,需要选择具有自转向性能的酸液体系。引入X-射线透视或者三维激光扫描仪等实验方法,对酸蚀蚯孔形态进行可视化和数值化分析,可以对比不同酸液穿透岩心时形成的酸蚀蚯孔形态,定量评价酸液沟通天然裂缝的能力,进而优选适合于不同储层特征和酸化工艺要求的酸液体系。

采用创新形成的酸蚀蚯孔形态数值化刻画方法,通过不同酸液穿透储层岩心进行实验评价,认为化学转向酸可以依据酸液自身特性,通过储层岩心后形成分支状酸蚀蚯孔,可以沟通更多天然孔隙,改善非均质性强储层的渗流能力(图4)。

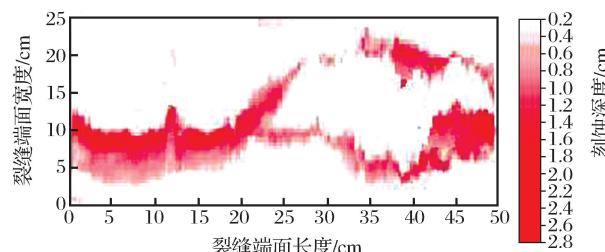


图 4 酸蚀蚯孔形态数值化表征

Fig.4 Numerical characterization of wormhole shape

4 现场试验与效果评价

研究形成的衬管完井水平井均匀布酸技术现场试验8口井,均获得了较好的改造效果,酸化后平均增产倍比为1.95,单井平均增加测试产气量为 $67.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相比射孔完井,单井节约完井成本900万元,经济效益显著。例如,X井水平井段长为736.5m,采用割缝衬管完井,缝宽在1.0~1.2mm之间,缝长为60mm,不同井段依据初始吸酸剖面差异,进行变密度割缝条数。初始表皮系数剖面预测结果显示,沿井眼方向总体上划分为3类区域,进液

剖面预测结果显示,3类区域暂堵压力在2.2~3.8MPa之间,采用4.0%、4.5%和5.0%3种不同转向剂加量的转向酸体系进行均匀布酸。

分析现场酸化施工曲线可知(图5),在稳定的注酸施工排量下,不同转向压力的转向酸进入地层后,施工压力连续起伏在3.0~6.0MPa之间,说明不同转向压力的转向酸接触地层后不断地暂堵高渗

透带,迫使酸液分流转向至相对低渗透,进而改造低渗透带储层,实现了酸液在整个施工井段上的均匀布置。由于未开展产气剖面测试,对酸化后表皮系数进行了数值拟合,结果显示为 $S = -3.6$,该井酸化前初测产气量为 $87.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,酸化后测试产气量为 $182.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,酸化施工有效解除了污染堵塞,增产效果显著。

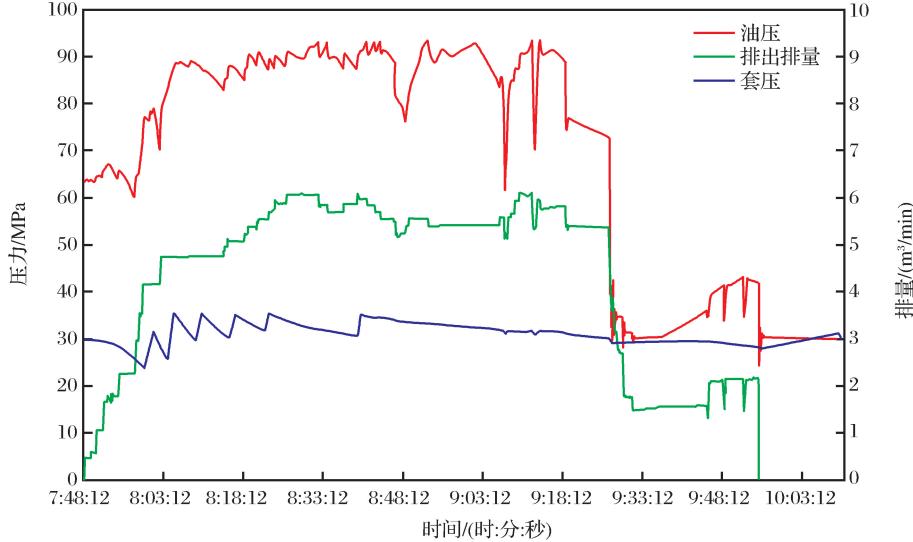


图5 X井酸化现场施工曲线
Fig.5 Field curve of Well X acidizing

5 结论

(1)综合考虑多方面因素,建立钻井液等效侵入深度模型,预测储层初始表皮系数沿井眼方向上的分布特征,可为均匀布酸技术施工参数优化提供基础依据。

(2)通过数值模拟明确不同井段转向净压力值,结合实验评价优选转向工艺,采用数值刻画方法表征酸蚀蚀孔形态,依据储层特征和酸化工艺要求优选酸液体系。

(3)配套形成的衬管完井水平井均匀布酸技术,现场试验取得了显著成效。应加强割缝衬管变参数设计和压后生产测井评价研究,进一步提高碳酸盐岩油气藏衬管完井水平井增产改造效果。

参考文献(References)

- [1] Wan Renpu. Advanced Well Completion Engineering[M]. 3rd Edition. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. [万仁溥.现代完井工程[M].第三版.北京:石油工业出版社,2008.]
- [2] Zhang Lin, Pu Junhong, Zou Lei, et al. Optimization of open intervals of selectively completed horizontal wells[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 370-374. [张林,蒲军宏,邹磊,等.关于水平井合理分段优化研究[J].天然气地球科学,2012,23(2):370-374.]
- [3] Zhang Jianguo, Liu Jinhua, Xu Yundong, et al. A study on horizontal well length optimization in low permeability and thin layer carbonate reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(1): 180-185. [张建国,刘锦华,徐运动,等.低渗透薄层碳酸盐岩气藏水平井长度优化研究[J].天然气地球科学,2015,26(1): 180-185.]
- [4] Li Xianwen, Ling Yun, Ma Xu, et al. New progress in fracturing technologies for low-permeability sandstone gas reservoirs in Changqing Gasfields: A case study of the Sulige Gasfield[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 20-24. [李宪文,凌云,马旭,等.长庆气区低渗透砂岩气藏压裂工艺技术新进展——以苏里格气田为例[J].天然气工业,2011,31(2):20-24.]
- [5] Guo Fufeng, Zhao Lijiang, Liu Pingli, et al. Overview of acidizing technology of horizontal well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(1): 117-120. [郭富凤,赵立强,刘平礼,等.水平井酸化工艺技术综述[J].断块油气田,2008,15(1):117-120.]
- [6] Li Nianyin, Liu Pingli, Zhao Lijiang, et al. Technology on acid distribution in the process of acidification in horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 104-106. [李年银,刘平礼,赵立强,等.水平井酸化过程中的布酸技术[J].天然气工业,2008,28(2):104-106.]

- [7] Ren Xiaoqiang, Liang Dongliang, Zhu Haoyang, et al. Application of transient shutoff acidizing technology in horizontal wells[J]. Well Testing, 2009, 18(1): 64-66. [任小强, 梁东亮, 朱好阳, 等. 暂堵酸化技术在水平井酸化中的应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(1): 64-66.]
- [8] Zhang Jing, Hu Yongle, Ran Qiquan, et al. Comprehensive research on the productivity and pressure loss of horizontal well in gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 157-162. [张晶, 胡永乐, 冉启全, 等. 气藏水平井产能及水平段压力损失综合研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 157-162.]
- [9] Wang Dawei, Li Xiaoping. Effect of well trajectory on production of horizontal well[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 926-930. [王大为, 李晓平. 井眼轨迹对水平井产能的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 926-930.]
- [10] Xiong Jun, He Hanping, Xiong Youming, et al. Production prediction of partially completed horizontal well in gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 286-290. [熊军, 何汉平, 熊友明, 等. 气藏水平井分段完井产能预测[J]. 天然
- 气地球科学, 2014, 25(2): 286-290.]
- [11] Liao Jun, Li Haitao, Wang Yanan, et al. Well completion design of slotted liner for horizontal well in low-permeability gas reservoir[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 12(3): 55-58. [廖军, 李海涛, 王亚南, 等. 低渗透气藏水平井割缝衬管完井设计[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2010, 12(3): 55-58.]
- [12] Wu Xinyuan, Lian Zhanghua, Meng Yingfeng, et al. Seepage field analysis of fractured gas reservoir with different completion methods[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1123-1127. [吴欣袁, 练章华, 孟英峰, 等. 裂缝性气藏不同完井方式渗流场分析[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1123-1127.]
- [13] Guo Yanru, Wei Chenxing, Lian Zhanghua, et al. Finite element analysis of seepage field for slotted liner completion[J]. Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2014, 36(11): 126-130. [郭衍茹, 魏臣兴, 练章华, 等. 割缝衬管完井渗流场的有限元分析[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2014, 36(11): 126-130.]

Research and practice of new acid arrangement technology in horizontal well with liner slot completion

Wang Ye-zhong¹, Duan Guo-bin², Sang Yu¹, Peng Hua³, Zhang Lin¹, Zhou Chang-lin¹,
Yu Liang-zhi⁴, Chen Wei-hua¹

1. Engineering and Technology Research Institute of Southwest Oil & Gas Field Company, CNPC, Guanghan 618300, China;
2. Engineering Technology Department of Southwest Oil & Gas Field Company, CNPC, Chengdu 610051, China;
3. Middle Sichuan Oil & Gas Field of Southwest Oil & Gas Field Company, CNPC, Suining 629000, China;
4. Exploration Business Division of Southwest Oil & Gas Field Company, CNPC, Chengdu 610041, China)

Abstract: Liner slot completion is one of the main horizontal well completion types, which has remarkable advantages, such as huge discharge area, and low cost. Uniform acid arrangement is the key to stimulation of horizontal well with liner slot completion. It is hard to implement acid arrangement in horizontal well with liner slot completion, through the annulus space between liner slot and wellbore is not sealed successfully, routine sectional stimulation technologies are limited. A new acid arrangement technology in horizontal well with liner slot completion was generated, via theoretical and experimental research. It can define formation damage characteristics of different well intervals through predicting initial skin factor profile of horizontal well intervals. Mathematical model of acid flowing in horizontal well was established, and diversion pressure of different intervals was simulated. Optimizing the liner cutting parameters, and different diversion pressures were obtained by changing quantity of diversion dosage. The acid wormhole shape was characterized by numerical method, which is able to optimize acid system. It was applied to 8 wells in Anyue Gasfield. The average of stimulation multiple proportion was 1.95, and the average testing production of individual well increased about $67.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, compared with perforation completion, single well completion saving cost 9 million yuan. Therefore, the economic benefit is remarkable, which serves as a reference for other gas reservoir.

Key words: Liner slot completion; Horizontal well; Acid arrangement; Initial skin factor profile; Diversion pressure; Temporary plugging and diversion; Acid wormhole