

苏桥储气库酸化解堵工艺研究与应用

李伟杰^{1*}, 孔维中¹, 丁建东¹, 潘众¹, 廖清志², 刘团辉³, 吴世全¹

¹华北油田公司工程技术研究院, 河北 任丘

²华北油田公司第一采油厂, 河北 任丘

³华北油田公司勘探开发研究院, 河北 任丘

收稿日期: 2021年11月30日; 录用日期: 2022年2月9日; 发布日期: 2022年2月16日

摘要

苏桥储气库钻井和修井作业中的压井液会对储层造成污染, 导致储层渗透率下降, 储气库注采井注采能力降低。为了解决储气库井筒周边污染造成的注采能力降低的情况, 通过采用基质酸化技术对苏桥储气库注采井井筒周边污染进行酸化解堵, 并根据苏桥储气库碳酸盐岩储层高温、高压、埋藏深等特征, 进行室内试验, 优选出酸化配方和酸化体系, 通过实际酸化施工曲线可以看出, 该酸化体系具有良好的解堵功能, 能有效清除井筒附近固相颗粒物和矿物颗粒等污染物, 对地层污染小, 有效解决了苏桥储气库注采井近井污染的难题。该酸化体系具有优良提升储层裂缝通道的导流能力和改善岩心渗透率的能力, 在碳酸盐岩地层储气库注采井的解堵作业中具有广阔的推广应用前景。

关键词

储气库, 暂堵技术, 酸化解堵, 储层伤害, 碳酸盐岩

Research and Application of Acidizing and Blocking Removal Technology for Suqiao Gas Storage

Weijie Li^{1*}, Weizhong Kong¹, Jiandong Ding¹, Zhong Pan¹, Qingzhi Liao², Tuanhui Liu³, Shitong Wu¹

¹Engineering Technology Research Institute of Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei

²The First Exploration Factory of Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei

³Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei

Received: Nov. 30th, 2021; accepted: Feb. 9th, 2022; published: Feb. 16th, 2022

*第一作者。

Abstract

The killing fluid in the drilling and work over operations of the Suqiao Gas Storage will pollute the reservoir, resulting in a decrease in reservoir permeability and a reduction in the injection-production capacity of the gas storage's injection-production well. In order to solve the situation of reduced injection and production capacity caused by pollution around the wellbore of the gas storage, the matrix acidification technology is used to acidify and remove the pollution around the wellbore of the injection and production well of the Suqiao Gas Storage, and according to the carbonate rock of the Suqiao Gas Storage Reservoir features such as high temperature, high pressure, and depth of burial have been tested in-house, and the acidification formula and acidification system are optimized. According to the actual acidification construction curve, it can be seen that the acidification system has a good plugging removal function and can effectively remove solid particles near the wellbore. Pollutants such as mineral particles and other pollutants have little pollution to the formation, effectively solving the problem of near-well pollution of the injection and production wells of Suqiao Gas Storage. The acidification system has excellent ability to enhance the conductivity of reservoir fracture channels and improve core permeability, and has broad application prospects in the removal of plugging operations of gas reservoirs in carbonate formations.

Keywords

Gas Storage, Temporary Blocking Technology, Acidification and Unblocking, Reservoir Damage, Carbonate

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

苏桥储气库是由枯竭油气藏改建的储气库，是西气东输的配套工程，有效解决了天然气的长距离输送以及城市民用气的峰谷变化所引起的供气的不稳定性与安全平稳供气要求之间的矛盾。苏桥储气库位于河北省廊坊市，由苏 1、苏 20、苏 4、苏 49、顾辛庄 5 个储气库组成，完井方式多采用裸眼完井，井深平均达到 5500 m，井底温度可达 157℃，是目前世界上公认的井深最深、施工复杂程度最大的储气库[1]。

苏桥储气库储层具有高温、高压、漏失的特点，储气库建库初期钻完井作业时不得不灌入大量压井液保证井控安全，不可避免的造成储层污染，有的井至今无法完全恢复产能。而苏桥储气库生产中的注采井，由于注采交替、固井质量和完井工具密封失效等因素影响，出现了不同程度的环空带压现象，有的环空带压是封隔器、气密封油管等井下工具失封造成的，只需要重新更换完井管柱就可治理，但在注采平衡期施工时，地层压力较大，必须进行压井作业，才能保障井控安全。完井方式和压井液的性能都造成了注采井近井地带存在污染，使储层渗透率降低，影响了储气库单井的注采能力。

目前华北油田苏桥储气库压井液采用无固相暂堵高分子聚合物压井液，具有低滤失、快速封堵、易降解等特点，但苏桥储气库的地层压力高，温度大等原因，造成暂堵压井液不能及时降解反排，对储气库注采井筒附近地层造成污染，为了清除压井液污染的近井地带，降低储层损害，提高储层裂缝通道的导流能力和岩心渗透率[2] [3]，本文采用基质酸酸化方法，应用清洁酸 + 转向酸酸化体系对污染储层

进行解堵,取得了较好的效果。

2. 地质储层特征

苏桥储气库的储集岩为灰岩和白云岩,储集空间以构造裂缝、晶间孔和溶蚀孔洞为主,大缝大洞不发育,储集类型为微裂缝孔隙型,储层孔隙连通较为复杂。储层原始天然气相对密度平均为 0.7175,属于凝析气藏,地面原油密度、粘度和凝固点都较低。地层水 Cl^- 含量 4386.9 mg/l,总矿化度为 9682.5 mg/l,为 NaHCO_3 型。其中,苏 49 潜山原始地层压力为 48.92 MPa,压力系数 1.06,地层温度为 154℃,具有统一的温度和压力系统,属于不带油环的高含凝析油低或特低渗碳酸盐岩块状弱底水凝析气藏。

3. 改造重点及技术措施

苏桥储气库注采井酸化改造难度在国内外储气库中都是一项极大的挑战。主要表现在

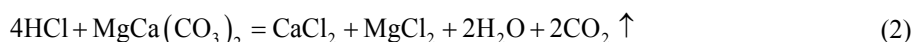
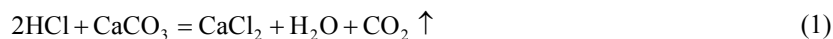
1) 储层深度大,平均 5500 米,因此施工过程管柱摩阻大,提高排量较困难。2) 温度高,平均温度约 140℃,因此造成酸液反应速度快,虫孔距离短。3) 井筒结构复杂,普遍为四开完井,且井下工具管串多,采用裸眼完井,裸眼段距离长,均匀布酸困难[4]。综上,苏桥储层改造的关键是提高排量增加酸反应距离和强度,选择合适酸液体系降低摩阻,提升裂缝和储集空间的沟通。

苏桥储气库碳酸盐岩储层埋藏 5000 m 以上,地层温度大于 120℃,压力系数低,岩性以灰岩、白云岩为主,储集空间以微细裂缝为主,因此选择采用基质酸化技术进行储层改造,清除近井地带污染,沟通裂缝储集空间。同时,在酸液体系中加入缓速酸,增加酸化有效作用距离。应用清洁酸层内转向 + 转向酸层间转向技术,不仅可增加反排速度,降低储层伤害,而且可以均匀酸化,提高酸化效果。

主要技术措施为:首先应用前置预处理酸,解除近井地带的污染,然后应用清洁自转向酸体系 + 缓蚀剂 + 铁稳剂等添加剂,延长酸液反应时间,增加酸穿透作用距离,随着反应的进行,可在高渗透层段形成凝胶,使酸液引入低渗透层段,使纵向、平面上储层渗透率得到较充分改善,实现均匀布酸,提高储层整体酸化效果,酸液泵注阶段同时伴注液氮,增加残酸返排能量[5]。

4. 组合酸液体系的配置

苏桥储气库储层为碳酸盐岩,一般采用盐酸为主的解堵的工艺技术,酸化解堵机理是:当盐酸到达裸眼储层部位时,首先与钻完井过程中形成的泥饼、堵塞物接触,经浸泡,盐酸溶解其中可溶性成份,使堵塞物疏松,并在井内流体冲刷下脱落,即解除了污染。其次,盐酸液通过疏松的泥饼深入岩石裂缝、孔、洞,与其表面反应,扩大裂缝、孔、洞[6]。主要化学反应式为:



形成的 CaCl_2 和 MgCl_2 可溶物留在残酸中,与脱落的泥饼等一起在排酸过程中排出地面。原有的裂缝表面解除了堵塞,又受蚀扩大裂缝,提高了渗透率,达到解除污染、提升注采能力的目的。

4.1. 清洁酸

清洁酸是在盐酸中添加粘弹性表面活性剂 VES 和适量的添加剂配置成的酸液体系,见图 1、图 2。VES 低分子粘弹性表面活性剂,具有无残渣,易破胶反排,污染小等特性,可自动改变粘度,将活性酸分流给低渗透储层,实现非均质储层的均匀布酸。该酸液体系具有良好的缓速性能,可形成高粘凝胶,能大幅度增加酸蚀裂缝长度,且水平井和直井都可以应用。摩阻为水的 30%~40%,在井深较大时也能够大排量施工。



Figure 1. 20% HCL clean acid and fresh acid

图 1. 20% HCl 清洁酸鲜酸



Figure 2. 8% HCL clean acid and fresh acid

图 2. 8% HCl 清洁酸鲜酸

清洁酸中的粘弹性表面活性剂分子在酸液中可产生蠕虫状胶束，形成新型网络结构，可有效提高酸液体系的粘度。在盐酸浓度 11%~20%时，初始状态下清洁酸体系粘度较低，随着与地层反应后盐酸浓度降低，反应生成 Ca^{2+} ，使得残酸粘度升高，形成凝胶，反应结束时，可自动破胶。清洁酸在排量为 3 方/分时摩阻只为清水的 35%，具有优良的降摩阻性能。液体不分层，不出现沉淀残渣，破胶液对储层岩心的伤害小，见表 1。

Table 1. Experimental results of damage caused by gel breaking fluid to reservoir cores

表 1. 破胶液对储层岩心的伤害实验结果

岩心编号	温度/°C	伤害前渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	破胶类型	伤害时间/h	压力/MPa	伤害后渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	伤害率/%
1	30	51.47	清洁酸	2	8	51.09	0.73
2	30	38.98	清洁酸	2	8	38.37	1.57
3	30	27.42	清洁酸	2	8	26.65	2.82

Continued

4	30	0.147	清洁酸	2	8	0.138	6.1
5	30	0.253	清洁酸	2	8	0.24	5.1
6	30	0.245	稠化酸	2	8	0.206	15.9
7	30	0.271	稠化酸	2	8	0.236	13
8	30	0.301	胍胶压裂液	2	8	0.211	30
9	30	0.196	胍胶压裂液	2	8	0.127	35.2

清洁酸中的粘弹性表面活性剂分子在地层反应后，可以在岩石较大的孔道表面形成凝胶和岩石表面形成吸附膜，减缓 H^+ 的运移速度和与岩石面的接触面积，同时反应生成的二氧化碳还起到物理隔膜的作用。

4.2. 转向酸

转向酸是盐酸 + 表面活性剂构成的酸液体系，在该体系中，表面活性剂分子带正电，鲜酸粘度低，随着酸液不断注入，体系的 H^+ 浓度不断降低，pH 值增大，表面活性剂分子带电性为电中性状态。随酸岩反应的进行，体系中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度不断升高，表面活性剂分子逐渐变成高粘度冻胶，暂堵塞渗透层，使酸液在地层内部分流酸化，达到均匀酸化的一种酸液体系[7]。转向酸比常规酸形成的蚓孔分支更少、蚓孔更长，酸液滤失较少[8]，通过投产或返排液的稀释作用可自动破胶，无残渣，易于配制，对地层伤害小，酸化效果明显。

4.3. 配方优选

在 90℃ 条件下，采用 5%~25% 盐酸对苏 50 井 5118~5168 m 岩屑浸泡 2 小时，10% 浓度盐酸能够达到溶蚀率 98%，确定清洁酸浓度 12%，转向酸浓度 20%，见图 3。

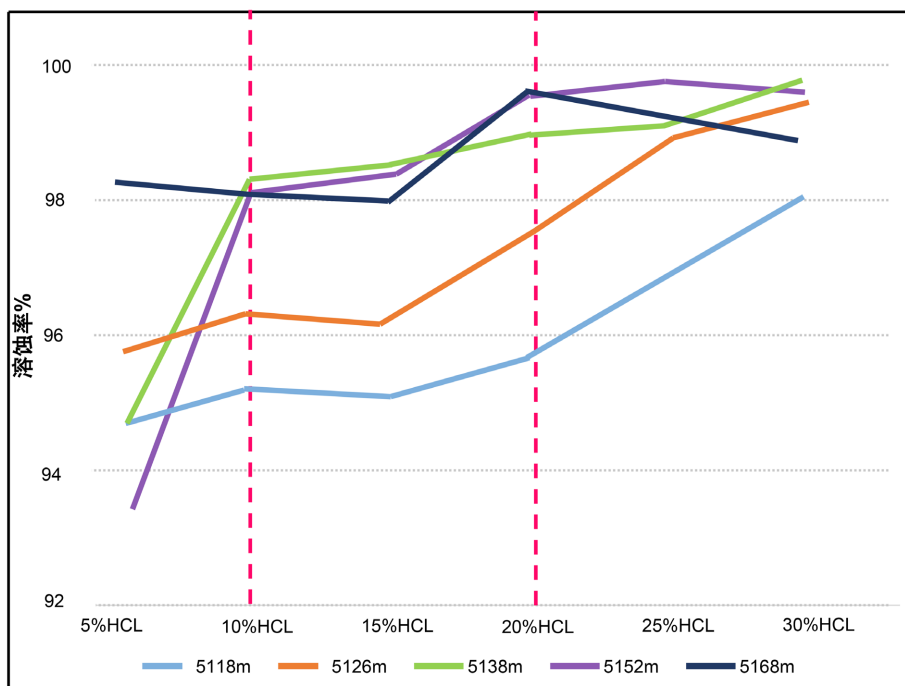


Figure 3. Core dissolution rate at different depths

图 3. 不同深度岩心溶蚀率

Table 2. Comparison of reaction speed of different acid systems
表 2. 不同酸液体系反应速度对比

酸类型	酸浓度	反应温度/℃	转速	反应时间/min	反应速率(mol/s·cm ²)
普通酸	20%	130	510	2	7.473×10^{-6}
转向酸	20%	130	510	2	9.813×10^{-6}
胶凝酸	20%	130	510	2	6.454×10^{-6}
清洁酸	12%	130	510	2	1.291×10^{-7}

由表 2 可以看出, 清洁酸反应速度最低, 主体酸以清洁酸为主, 辅助转向酸均匀布酸。

通过对酸蚀裂缝导流能力进行实验, 可以看出清洁酸和转向酸均可有效提高酸后岩板导流能力, 但清洁酸提高幅度更大, 见图 4。

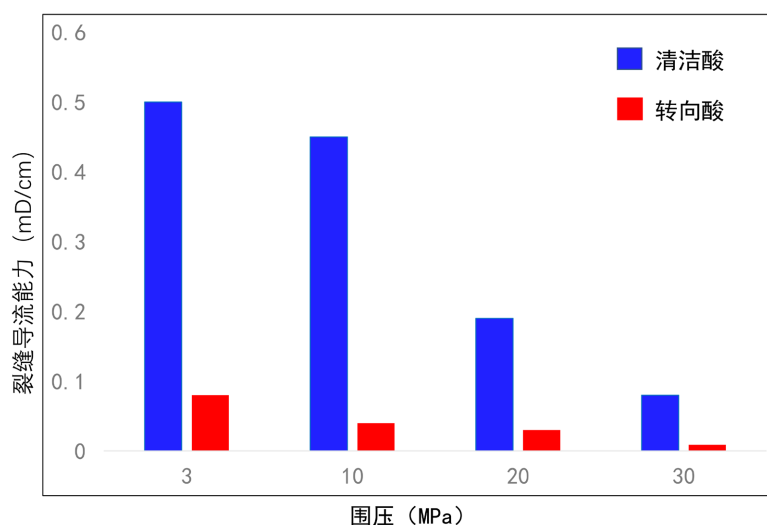


Figure 4. Comparison chart of conductivity after acidification

图 4. 酸化后导流能力对比图

4.4. 添加剂的优选

在酸化施工作业中, 酸工作液会对金属产生腐蚀, 导致井下管串和地面设备损坏, 造成作业事故和人员伤亡, 而且因腐蚀产生的大量铁离子在一定条件下会形成氢氧化铁沉淀, 直接影响酸化作业效果。添加缓蚀剂是目前解决酸化作业腐蚀的最有效方法, 可最大限度降低酸对设备的腐蚀, 延长管串的使用寿命, 保证酸化施工顺利进行[9]。

Table 3. Corrosion inhibitor selection
表 3. 缓蚀剂选择

配方	表面积 /cm ²	温度 /℃	试验时间/h	蚀前量/g	蚀后量/g	失量/g	蚀速 g/m ² h
20% HCL + 4% LHH	11.5039	150	4	11.9595	11.8913	0.0682	14.82
20% HCL + 6% LHH + 5% HS-1	11.5649	150	4	12.0311	12.0118	0.0193	4.17
20% HCL + 3% ZXD-3A + 1% ZXD-3B + 2% LHH	11.6662	120	4	12.0676	12.0295	0.0381	8.16

通过实验看出, 150℃, 4 小时条件下, 缓蚀剂 LHH 在 20% HCL 中腐蚀速度为 14.82 g/m²h, 见表 3。

酸化全过程中, 酸液难免会在渗流通道中产生水锁反应(在亲水岩石中)和贾敏效应(在亲油岩石中), 导致储层渗透率降低, 对储层改造产生不利的影响[10]。在酸化时通常会加入适当的表面活性剂可有效地降低酸液流体的表面张力, 减小渗流阻力, 提升酸液对地层的润湿性, 防止残酸形成乳化液, 提升返排速度, 提高酸化施工效果。

Table 4. Surfactant selection

表 4. 表面活性剂选择

名称	用量/%	表面张力 mN/m	界面张力 mN/m	破乳率/%
PZ-7	0.2	25.1	0.4	100
ZA-5	0.2	26	0.4	80
OP 杨	0.2	30	0.6	100
D-50	0.2	25.6	0.4	90

通过实验看出, 活性剂的优选: PZ-7 表界面张力最低, 表面张力为 25.1 mN/m, 界面张力为 0.4 mN/m, 见表 4。

Table 5. Selection of iron ion stabilizer

表 5. 铁离子稳定剂选择

名称	络合铁离子能力 mg/ml	备注
RST-05	87.2	液体
抗坏血酸	62.5	固体
LHT	87.5	液体

在酸化过程中, 酸液不可避免的与施工设备、井下管柱和储层含铁的岩石矿物发生化学反应, 产生铁离子, 并在一定条件下可生成的氢氧化铁沉淀。随着酸化过程的进行, 酸液不断与地层矿物作用, 随着酸液浓度的降低和 pH 值的上升, 三价铁离子在 pH 升至 2.2 时开始大量沉淀, 从而导致地层孔隙及油气渗流通道被堵塞, 造成储层渗透率下降, 对储层造成伤害[9]。因此, 酸液中必须加入铁离子稳定剂, 防止由于酸液的 pH 值上升导致产生氢氧化铁沉淀堵塞地层孔隙。通过表格看出, LHT 对铁离子络合能力最好, 每毫升可络合 87.5 毫克铁离子, 见表 5, 因此采用 LHT 作为苏桥储气库苏 49K-P1 井酸化施工的铁离子稳定剂。

5. 现场应用及评价

苏 49K-P1 井构造上位于冀中坳陷文安斜坡苏桥 - 信安镇潜山带苏 49 潜山, 生产井段为 5126.975 m~5261 米, 储层中深地层压力系数为 0.62。由于钻完井过程中钻井液固相颗粒堵塞, 产层渗透性差异较大, 存在污染, 影响储气库整体注采比, 为了提高渗透性能, 提升单井注采能力, 采用油管注入笼统酸化方式, 应用清结酸 + 转向酸组合体系, 见表 6, 酸化裸眼井段: 5126.975 m~5261 m, 改善地层渗流能力。

从图 5 施工曲线可以看出: 在前置预处理阶段, 压力有小幅上下波动, 表明对井筒附近进行解堵, 随着酸岩反应的进行, 裂缝沟通明显, 降低了表皮伤害。继续交替注入清洁酸和转向酸, 压力大幅下降, 表明沟通储层的天然裂缝, 取得了一定程度的解堵效果。该井施工后, 日注气量由作业前 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 上

升到 $23 \times 10^4 \text{ m}^3$, 该井施工取得了成功。通过此次施工, 证明了预处理酸 + 12%清洁酸 + 20%转向酸组合酸液体系, 对苏桥储气库储层可实现纵向上均匀改造、横向深度改造的效果, 达到提高储层渗透率, 有利沟通储层裂缝, 提升注采能力的目的。

Table 6. Acid formula

表 6. 酸液配方表

名称	互溶剂	处理液	转向液	隔离液 + 顶替液	合计
	10 m ³	60 m ³	30 m ³	50 m ³	
乙二醇丁醚	1000 Kg				1000 Kg
31% HCl		21 m ³	18.5 m ³		39.5 m ³
VES 清洁压裂液(VES-III)		1800 Kg			1800 Kg
铁离子稳定剂 LHT- II		1000 Kg	600 Kg		1600 Kg
高温酸化缓蚀剂 LHH- II		2800 Kg	1400 Kg		4200 Kg
KCL				1000 Kg	1000 Kg
ZXD-3A			1000 Kg		1000 Kg
ZXD-3B			600 Kg		600 Kg
RSZ-06			200 Kg		200 Kg
清水	9 m ³	33.4 m ³	7.7 m ³	50 m ³	100.1 m ³

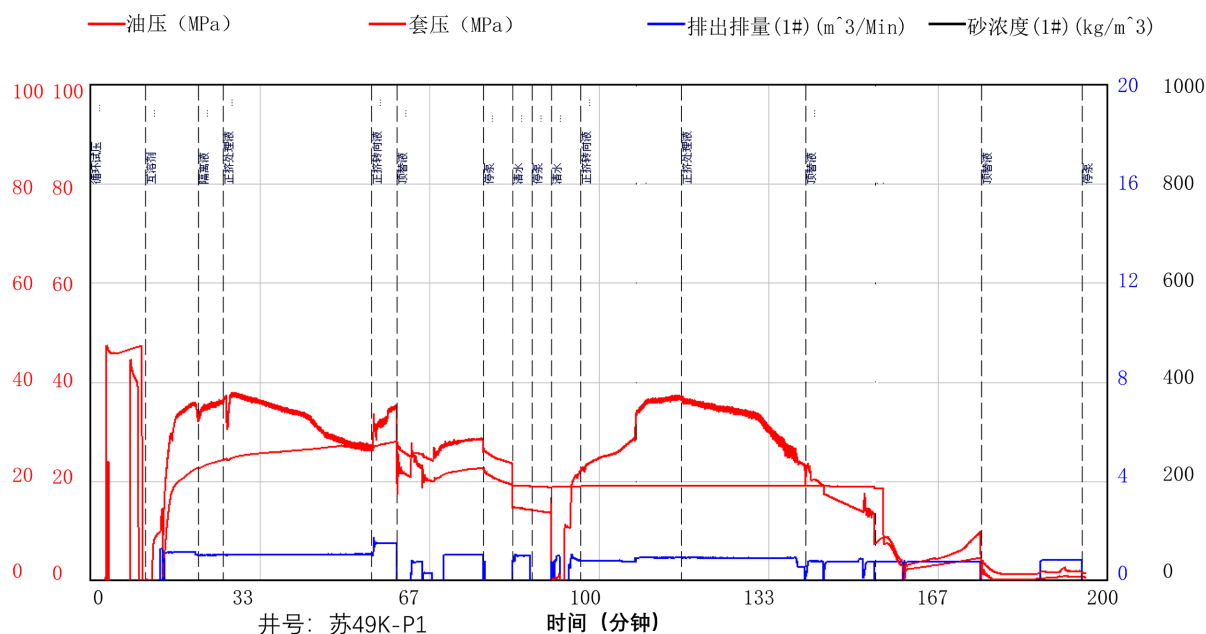


Figure 5. SU49-P1 well acidification construction curve

图 5. 苏 49K-P1 井酸化施工曲线

6. 结论

1) 通过优选, 采用预处理酸 + 12%清洁酸 + 20%转向酸组合酸液体系对苏 49K-P1 井进行酸化解堵, 取得了较为成功的改造效果, 解除了决近井地带污染, 提高了单井注采气能力。

2) 苏桥储气库注采井埋深大且裸眼完井, 高温高压的井下环境要求施工过程控制好排量和井口压力, 做好承压、受力及摩阻分析, 确保井筒完整性评价达到要求下再进行施工。

参考文献

- [1] 李磊, 王蓉川, 张佳, 等. 苏桥储气库井下作业质量体系的构建与实施[J]. 石油工业技术监督, 2017, 33(11): 50-52.
- [2] 游利军, 孟森, 高新平, 等. 碳酸盐岩储气库储层微粒运移对酸化的响应[J]. 断块油气田, 2020, 27(5): 676-680.
- [3] 谢俊, 梁会珍, 郭睿, 等. 碳酸盐岩储气库多轮次强注强采流体互驱机理研究现状[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 88-95.
- [4] 陈鹏. 华北油田冀中探区牛东1井碳酸盐岩储层改造技术研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- [5] 余芳. 华北永22储气库酸化工艺技术的应用[J]. 科技风, 2010(13): 232.
- [6] 韩振华, 赵强. 碳酸盐岩基质酸化工艺技术和华北油田的应用[J]. 油气井测试, 1998, 7(3): 65-70+78.
- [7] 王守军. 粘弹性表面活性剂自转向酸酸化工艺及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- [8] 张雪萍. 转向酸分流酸化模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [9] 孙权. 古潜山油藏高效解堵剂研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- [10] 江安. 渤海油田注水井深部缓速解堵增注技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2014.