



顺北油气田超深井分段完井技术

丁士东 庞伟 周 杨德锴 何同

Staged Completion Technology for Ultra-Deep Wells in Shunbei Oil and Gas Field

DING Shidong, PANG Wei, ZHOU Jun, YANG dekai, HE Tong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高温深层碳酸盐岩裸眼酸压完井封隔器研制与现场试验

The Development and Field Testing of a High-Temperature Deep-Layer Open Hole Packer for Acid Fracturing Completion in Deep Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2020, 48(6): 76–81 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020044>

顺北油田超深井优快钻井技术

Optimization of Fast Drilling Technology for Ultra-Deep Wells in the Shunbei Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(6): 8–13 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201706002>

顺北一区超深井窄间隙小尾管固井技术研究

Slim Liner Cementing Technology for Ultra-Deep Wells with a Narrow Annulus in No.1 District of Shunbei Block

石油钻探技术. 2019, 47(6): 60–66 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019114>

顺北油气田超深碳酸盐岩储层深穿透酸压技术

Deep Penetration Acid-Fracturing Technology for Ultra-Deep Carbonate Oil & Gas Reservoirs in the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2019, 47(3): 140–147 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019058>

顺北油气田一区超深井三开长封固段固井技术

Anti-Leakage Cementing Technology for the Long Well Section below Technical Casing of Ultra-Deep Wells in the No.1 Area of Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(6): 33–39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020110>

顺北油气田火成岩侵入体覆盖区超深井优快钻井技术

Ultra-Deep Well Drilling Technology in the Igneous Invasion Coverage Area of the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 1–5 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020004>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024046

引用格式: 丁士东, 庞伟, 周珺, 等. 顺北油气田超深井分段完井技术 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 66-71.

DING Shidong, PANG Wei, ZHOU Jun, et al. Staged completion technology for ultra-deep wells in Shunbei Oil and Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 66-71.

顺北油气田超深井分段完井技术

丁士东^{1,2}, 庞伟^{1,2}, 周珺^{1,2}, 杨德锴^{1,2}, 何同^{1,2}

(1. 中石化固井与完井重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 顺北油气田储层发育多条断裂, 每个断裂内有一条或多条栅状储集体, 储集体间分隔性强, 需要通过分段改造动用多个断面储集体, 提高油气井产能。为此, 通过优化橡胶材料的配方、硫化工艺和完井工具的机械结构, 研发了耐高温高压的大扩张比裸眼封隔器、投球分级滑套、压差滑套、完井封隔器等分段完井用关键工具。基于两性离子酸用稠化剂和有机-无机抗高温双重交联剂, 研制了抗高温交联缓速酸; 利用压裂液和酸液的黏度及密度差异, 形成了远距离沟通深部酸压工艺。在研发关键完井工具、高温酸液、酸压工艺的基础上, 基于地质工程一体化理念, 研究形成了顺北油气田超深井分段改造完井技术。顺北油气田 12 口井应用了该技术, 应用结果表明: 裸眼封隔器、投球分级滑套和压差滑套耐温 180 °C、耐压 90 MPa, 分段级数可达 5 级; 交联缓速酸耐温 180 °C, 黏度提高 2 倍以上, 酸岩反应速率降低 20% 以上, 酸液穿透距离由 100 m 提高至 120 m; 现场应用分段级数最高达到 4 级, 封隔器下深达 8 833 m, 应用温度最高达 182 °C; 压后折算产量同比邻井平均提高 20%, SHB4-5H 井等 3 口井达到日产油量超过千吨, 实现了少井高产。

关键词: 顺北油气田; 超深井; 分段完井; 地质工程一体化; 裸眼封隔器; 滑套; 高温交联酸

中图分类号: TE311

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)02-0066-06

Staged Completion Technology for Ultra-Deep Wells in Shunbei Oil and Gas Field

DING Shidong^{1,2}, PANG Wei^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2}, YANG dekai^{1,2}, HE Tong^{1,2}

(1. Sinopec Key Laboratory for Cementing and Completion, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: The reservoirs in Shunbei Oil and Gas Field have developed multiple fractures, each with one or more grating-like reserves. Such highly separated reserves require the stimulation of multiple fractured reserves through staged completion to enhance well productivity. By optimizing the formulation of rubber materials, vulcanization technology, and mechanical structure of completion tools, key tools for staged completion such as high-temperature and high-pressure resistant open hole packers with large expansion ratios, ball-throwing grading sliding sleeves, differential pressure sliding sleeves, and completion packers were developed. A high-temperature resistant crosslinking retarded acid was developed based on the developed amphoteric acid thickening agents and organic-inorganic high-temperature resistant double crosslinking agents. By using the differences in viscosity and density of fracturing fluids and acid liquids, a deep acid fracturing technology for remote connection was formed. Based on the research and development of key completion tools, high-temperature acid liquids, and acid fracturing processes, a staged completion technology for ultra-deep wells in the Shunbei Oil and Gas Field was formed following the concept of geology and engineering integration, which had been applied in 12 wells in Shunbei Oil and Gas Field. The results show that the open hole packers, ball-throwing grading sliding sleeves, and differential pressure sliding sleeves can withstand the temperature of 180 °C and pressure of 90 MPa, with stage levels up to 5. The crosslinking retarded acid system can withstand the temperature of 180 °C, with viscosity increased by more than two times and acid rock reaction rate reduced by more

收稿日期: 2024-02-01; 改回日期: 2024-03-02。

作者简介: 丁士东 (1967—), 男, 江苏金湖人, 1990 年毕业于石油大学 (华东) 钻井工程专业, 2007 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 国家“百千万人才工程”入选者, 国家有突出贡献中青年专家, 主要从事石油工程技术研究和相关管理工作。系本刊编委。E-mail: dingsd.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“复杂环境下水泥环全生命周期密封理论与控制方法” (编号: U22B6003)、中国石化科技攻关项目“特深层完井测试与储层改造技术” (编号: P21081-3) 联合资助。

than 20%. The penetration distance of acid liquids was increased from 100 m to 120 m. The maximum stage level applied on site has reached 4, with packers down to 8833 m in depth with highest temperature of 182 °C. After fracturing, the production rate was increased by 20% compared to adjacent wells on average. Three wells including SHB4-5H reached a daily production of 1 000 tons, and the goal of high production within few wells was achieved.

Key words: Shunbei Oil and Gas Field; ultra-deep well; segmented completion; geology and engineering integration; open-hole packer; sliding sleeve; high-temperature crosslinking acid

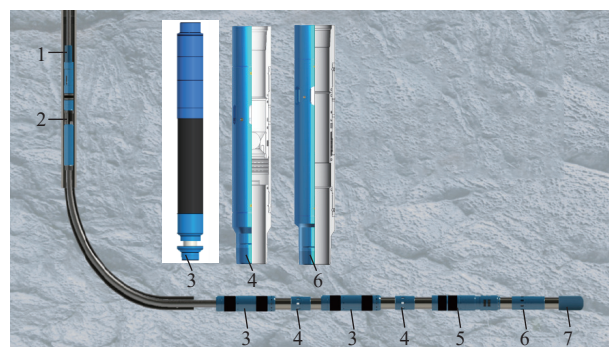
顺北碳酸盐岩油气藏储层埋藏深、井底温度高、压力高,且受多期构造运动影响,发生多期断层活动,地层叠加改造后形成了早期南强北弱、晚期北强南弱的走滑断裂体系^[1-2]。顺北地区走滑断裂带平面上为典型的三段式结构:拉分段、挤压段和平移段,滑移距小,多在千米尺度,油区断裂带滑移距小,气区断裂带滑移距大。纵向上分为下伏陡直走滑段与上覆雁列正断层,形成纵向分层结构。储层发育多条断裂,储集体间分隔性强,单段改造难以动用多个断面储集体产能,需要进行分段改造,实现少井高产。现场应用的自生酸、交联酸等酸液体系耐温 140~160 °C^[3-5],适用于碳酸盐岩的裸眼分段压裂工具耐温 150 °C,耐压 50 MPa,暂堵酸压、大规模体积酸压等技术在深层-超深层油气田也取得了较好的应用效果^[6-10]。随着顺北油气田的开发,温度从 160 °C 进一步升高到 180 °C,且富含 H₂S、CO₂ 等酸性气体,对完井工具的耐温、耐压和密封性能提出了更高要求。高温下酸液体系酸岩反应快、酸蚀作用距离短、导流能力不足,需研发超高温酸液体系,提高酸液作用范围。顺北储层受挤压作用控制,储集空间纵、横向连通性差,多储集体动用难度增大,需要高性能分段工具和深穿透高导流酸压技术,提高单井产量。

为此,通过优化橡胶材料配方和硫化工艺及完井工具的机械结构,研制高温高压分段完井关键工具,研发抗高温稠化剂和交联剂构建耐高温交联缓速酸,形成了适应顺北断控碳酸盐岩油气藏储层特点的取得很好的效分段完井技术,并在顺北油气田进行了应用,产量大幅提高,达到了少井高产的目的。

1 超深井分段完井关键工具研制

为满足裸眼分段压裂工艺要求,结合顺北油气田超深碳酸盐岩储层井温高、地层破裂压力高、井径扩大率大等特点,研发了适用于 $\phi 149.2$ 和 $\phi 165.1$ mm 井眼的耐高温高压裸眼分段压裂完井管柱,如图 1 所示,该管柱主要包括回接插头、完井封隔器、裸眼封隔器、投球分级滑套、锚定封隔器、压差滑套和底部循环总成+浮鞋。

部循环总成+浮鞋。该管柱耐温 180 °C,耐压 90 MPa。



1. 回接插头; 2. 完井封隔器; 3. 裸眼封隔器; 4. 投球分级滑套;
5. 锚定封隔器; 6. 压差滑套; 7. 底部循环总成+浮鞋

图 1 裸眼分段压裂完井管柱

Fig.1 Open-hole and staged fracturing completion string

1.1 裸眼封隔器

实现小外径封隔大井径的同时,需要保障超深井的安全下入和对不规则高扩大率裸眼的高压密封。由于顺北油气田酸压时温度、排量和压力高,作业过程中温度变化幅度大,为保证对不规则高扩大率裸眼的高压封隔,研制了耐高温高压封隔器胶筒,如图 2 所示。通过优化橡胶材料配方和硫化工艺,提高橡胶材料高温强度与断裂伸长率,以提升胶筒耐温耐压性能,通过强化封隔器胶筒骨架等方式,满足了顺北高温高压环境下分段酸压要求;设计了永久关闭式注液胀封机构,封隔器注液胀封后进液阀永久关闭,可有效降低酸压大温变造成的影响,保证密封效果;设计了双浮动式双向高压承载机构,改变承高压时封隔器胶筒骨架的受力方式,将胶筒承压时所受轴向拉伸载荷转换成轴向压缩载荷,利用胶筒骨架强度的支撑来提高高压下的承载能力,进而提高高压下的承压性能。



图 2 耐温 180 °C、耐压 90 MPa 扩张式裸眼封隔器

Fig.2 Expansion open hole packer withstanding temperature of 180 °C and pressure of 90 MPa

为验证裸眼封隔器在高温高压下的承压性能,

利用 $\phi 168.3$ 和 $\phi 182.0$ mm套管模拟井眼扩大率10%~12%的裸眼进行测试,结果表明,裸眼封隔器在200℃温度下的承压能力达到90 MPa以上,可满足顺北分段酸压要求。

1.2 投球分级滑套及压差滑套

投球分级滑套主要由上接头、外筒、球座内筒和下接头等组成(见图3)。外筒上设有分级滑套打开孔,球座内筒上有球座,用于与开口球配合;开口球投放于球座后,在管内压力作用下球座内筒下行打开滑套侧孔,进行压裂;球座内筒上的防退锁环打开后与外筒锁定,可防止压裂及生产时球座上移。配套开发了高强度耐酸可溶憋压球,在6.35 mm级差下高温承压能力达到70 MPa以上,酸压后其在地层水中的溶解速度可控。

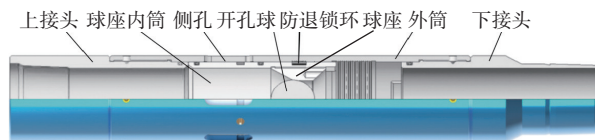


图3 投球分级滑套

Fig.3 Ball-throwing grading sliding sleeve

压差滑套安装在管柱的最底部,用于分段压裂首段压裂,主要由上接头、下接头、外筒和压差内筒等组成(见图4)。管柱内进行整体憋压,压差内筒在压力作用下下行,打开滑套侧孔,进行压裂。球座内筒上设计有防退锁环,打开后与外筒锁定,防止压裂及生产时内筒上移关闭滑套。

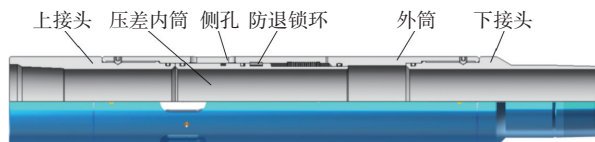


图4 压差滑套

Fig.4 Differential pressure sliding sleeve

耐高温高压裸眼封隔器与投球分级滑套、压差滑套组成超深井裸眼分段压裂系统,采用“段间封隔器封隔,段内暂堵转向”的工艺,实现了8 000 m以深5级分段压裂作业。

1.3 高温高压完井封隔器

超深井高温高压完井工具可靠性不足^[11-13],结合永久封隔器与可取式封隔器密封可靠、咬合力良好的特点,研制了适用于 $\phi 193.7$ mm套管的高温高压液压完井封隔器,其结构如图5所示。

封隔器下到预定位置后,通过油管加压,压力达到预定压力后剪切销钉被剪断,活塞移动,使双向筒状卡瓦锚定,胶筒被压缩坐封,棘轮锁环的锁

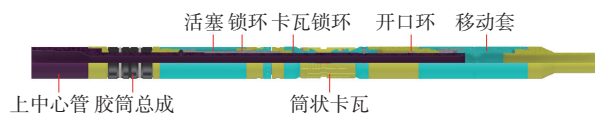


图5 高温高压完井封隔器的结构

Fig.5 Structure of high-temperature high-pressure completion packer

定结构维持胶筒密封性和稳定性。解封时,投球或下入专用解封工具,锚定于封隔器上方,上提管柱,释放解封锁环,继续上提解封封隔器。

为确保高温高压液压完井封隔器设计的可靠性,开展了卡瓦、锁定机构、解封结构等关键部件有限元分析;优选增强型FKM胶筒组合,采用硫化钢网及拉簧强化端部支撑;通过关键结构单元试验,确保封隔器在204℃、105 MPa下工作的可靠性。

依据API 11D1标准^[14],进行 $\phi 193.7$ mm套管用高温高压封隔器耐温204℃、耐压105 MPa的V3等级测试,结果表明,该封隔器能够在100~204℃循环温度下正常工作,可满足超深井分段完井酸压、生产等工况要求。

封隔器上部可回接锚定密封插管,耐温204℃,耐压105 MPa。下插管柱时,锚定密封插管插入封隔器上部的密封筒中,实现高温高压密封;同时,弹性棘爪螺纹和与密封筒上部螺纹啮合锚定,正旋管柱可单独提出锚定插管。

2 高温高压酸液体系

2.1 抗高温酸用稠化剂

稠化剂分子主链结构以C—C直链为主,支链少而短,以丙烯酰胺、丙烯酸作为主要聚合单体,同时引入其他单体对其进行改性。为提高酸用稠化剂的溶解性,引入季铵盐和季磷盐阳离子单体官能团,利用磷原子存在3d空轨道形成高价化合物,接受外界提供的未成键电子而形成d- π 键,增大了流体力学体积,提升了增黏效果。同时,季磷盐的热稳定性也比季铵盐要高100℃。综合考虑增黏能力和热稳定性,优选对乙烯苄基三苯基氯化磷和烯丙基三苯基溴化磷作为阳离子单体,提高酸溶性能与耐温性能。优选叔胺和氯丙烯合成的烷基烯丙基氯化铵作为疏水单体,与丙烯酰胺共聚得到疏水缔合聚合物,提高稠化剂的耐剪切和增稠性能。

引入疏水缔合和羧基官能团单体使酸用稠化剂具有可交联性。由于疏水作用,疏水基团在水溶液中易发生聚集,使大分子链产生分子内和分子间缔

合,当浓度高于临界值时,大分子链通过疏水缔合作用而聚集,形成以分子间缔合为主的动态物理交联网络,流体力学体积增大,溶液黏度显著升高;在稀溶液中,大分子主要以分子内缔合的形式存在,大分子链发生卷曲,流体力学半径减小,特性黏数降低。为保持聚丙烯酰胺酸液的黏度不降低,使用甲基丙烯酸十六烷基酯和甲基丙烯酸十八烷基酯作为疏水性单体,利用“单引发-弱碱性-控温聚合”方法,实现交叉均匀共聚,弱水解产生交联基团,通过调整单体浓度和比例、引发剂用量、引发温度、聚合时间等参数,不断优化稠化剂合成工艺。单体加量为 30%,引发剂 1 和引发剂 2 总加量为 0.038%,引发剂 3 加量为 0.033%,链转移剂加量为 0.020%,低温反应 4 h,合成相对分子质量 $1.0 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^7$ 的两性酸用稠化剂(见图 6)。

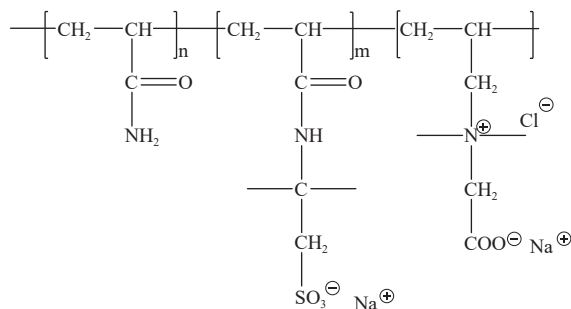


图 6 两性酸用稠化剂的分子结构

Fig.6 Molecular structure of amphoteric acid thickening agents

2.2 抗高温交联剂

为了确保酸液在高速剪切的状态下进入高温地层时仍具有较高黏度,需要在稠化剂中加入交联剂。现场酸压施工时,为了降低酸液在井筒内的摩阻,要求酸液在地面管线中流动时不发生交联或只产生部分交联。因此,采用无机交联剂和有机交联剂复合的方式进行双重交联(见图 7),提高交联密度并延时交联时间。测试醋酸锆、乳酸与乙二醇在不同配比下合成交联剂的交联时间、挑挂性和耐温性,发现醋酸锆、乙二醇与乳酸的摩尔比为 2:8:16 时,反应温度 $70 \sim 80^\circ\text{C}$,反应时间 $5 \sim 6\text{ h}$,有机-无机双重交联剂与酸用稠化剂反应形成的交联冻胶挑挂状态良好,耐温性较好。

2.3 抗高温交联缓速酸体系

基于研发的抗高温稠化剂和交联剂,构建耐高温交联缓速酸体系,其流变性能如图 8 所示。通过酸岩反应试验获得交联酸酸岩反应动力学参数,高温下岩石表面溶解较少,酸蚀作用速度较慢。测试

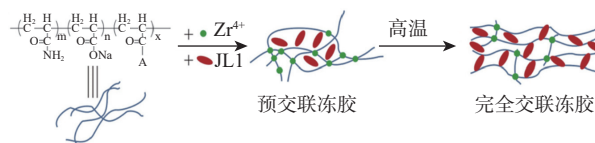


图 7 双重交联机理

Fig.7 Double crosslinking mechanism

不同反应浓度下的酸蚀速率,求得交联酸反应级数 m 为 0.5749、反应速率常数 K 为 1.701×10^{-6} ,表明该交联酸液体系高温下的酸岩反应速率比低温下的稠化酸更低,具有优越的耐温性能和缓速性能。

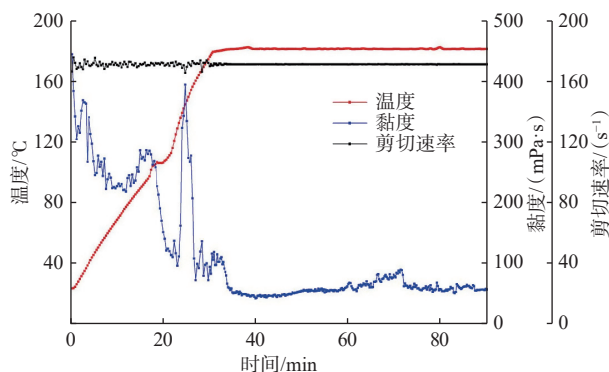


图 8 耐高温交联缓速酸流变性测试结果

Fig.8 Rheological test result of high-temperature resistant crosslinking retarded acid

3 超深井分段完井方案及应用

3.1 地质工程一体化分段完井方案

长井段合理部署酸压裂缝是裸眼水平井/大斜度井分段酸压的关键技术难点之一,是立体酸压技术重要内涵^[15]。长井段水力裂缝的位置及数量对酸压后的产能影响大,若分段不合理,难以实现全井段储层立体动用。顺北裸眼水平井/大斜度井酸压裂缝的合理部署面临两大难点:一是储层断裂带发育,如何有效沟通断裂,提高油气产量;二是酸压裂缝的起裂位置不容易控制,长裸眼井段的应力分布不均,酸压裂缝的起裂位置不容易确定,直接影响分段酸压效果。

目前,水平井分段的方式主要为等间距分段,对于顺北断缝体储层,此方式既难以控制裂缝延伸轨迹,又无法最大化沟通储集体。因此,以地质刻画的储集体为依据,采用“缝储对应”的分段模式,根据栅状储集体发育特点(图 9)及工具能力设计工具硬分段数,结合暂堵分段或缝内暂堵转向等方式,提高酸蚀裂缝沟通储集体的范围。

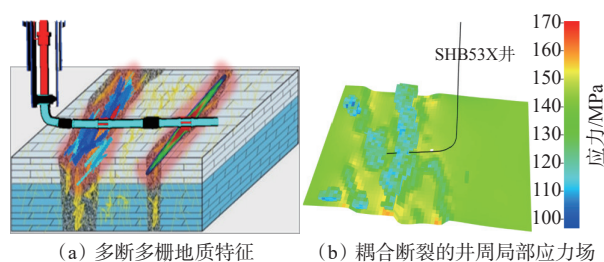


图9 多断多栅地质特征和局部应力场模拟

Fig.9 Multi-fault and multi-grating geological characteristics and local stress field simulation

针对顺北断裂带存在整体分层-分段构造的地质特征,建立顺北多断裂耦合的局部应力场模型,详细刻画水平井段的精细应力特征,为分段位置及酸压改造方式优选提供计算依据。在工具可下入的情况下,结合井径、应力剖面确定压差滑套的位置,确保充分改造储集体。

3.2 酸压工艺

为了增大酸液在高温下的穿透能力,提高高闭合应力条件下酸蚀裂缝导流能力的稳定性,实现酸液对裂缝壁面中部的较深刻蚀,提出了远距离沟通酸压溶蚀方式。该溶蚀方式既可以保证酸液的裂缝壁面的有效溶蚀,又可保证高闭合应力条件下的有效支撑^[16-18]。通过在酸压裂缝中流动通道注入密度和黏度等性质差异的流体控制酸液体系,使酸液在裂缝中部流动,该区域的岩石可以被酸液大量溶蚀,从而在中部形成较深的刻蚀沟槽,出现整体剥蚀特征,而周围被非反应性前置液充填的区域未发生酸岩反应,或有部分酸液混入发生少量刻蚀,形成面状突起,在地层高闭合应力下,依靠高强度岩石面支撑,利用面状支撑的特点,极大地分散闭合应力。

远距离沟通酸压技术的关键是控制酸液的铺置方式,使酸液尽可能地分布在裂缝中部,形成较深的刻蚀裂缝。不同密度液体在裂缝中的分布如图10所示,利用重力分异原理,可以实现远距离沟通高导流酸压工艺设想,红色区域为中密度(1.06~1.15 kg/L)酸液波及范围、绿色区域为高密度(1.16~1.30 kg/L)压裂液波及范围、蓝色区域为低密度(1.00~1.05 kg/L)压裂液波及范围。3种液体之间的密度差、黏度差、排量、液量等变化均会对酸液的铺置位置及形态产生影响,其中密度差异是控制酸液铺置位置的主控因素;黏度差异主要控制酸液的流动形态;排量、液量也会对铺置位置及酸液流动形态产生影响。在注入低密度低黏压裂液和高密度

高黏压裂液后,中密度中黏酸液集中刻蚀裂缝中部,密度居中的酸液会趋于沿着裂缝中部流动。但是密度差异不能太大,若密度差异过大,酸液会趋于沿着裂缝底部流动。该注入方式酸液穿透距离可提高21%,高闭合应力条件下导流能力提高24%。

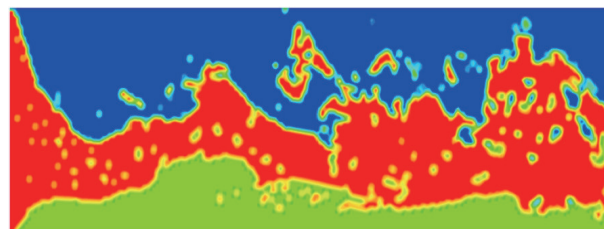


图10 远距离沟通酸压工艺中酸液流动形态

Fig.10 Acid flow patterns in acid fracturing process for remote communication

3.3 现场应用

超深井分段改造完井技术在顺北应用12井次,分段级数最高达4级,封隔器下深达8 833 m,应用温度最高达182 ℃,提升了超深井酸压效果,压后折算产量同比邻井平均提高20%,SHB4-5H井等3口井日产量超过千吨,实现了少井高产。其中,SHB4-5H井针对3个储集体,分4段酸压,1、2号体采用远距离沟通、3号体采用宽带酸压改造,压后产能为相同生产制度下顺北44X井的1.3倍,已累计产原油 8.9×10^4 t、气 1.3×10^8 m³。超深井分段改造完井技术增产效果明显,达到了“少井高产”的目的。

4 结论与建议

1)通过提高完井关键工具的耐温性和耐压性和抗高温交联缓速酸体系的耐温性能,形成了顺北油气田超深井分段酸压完井技术。现场应用表明,应用该技术可明显提升油气井产量,实现少井高产。

2)基于地质工程一体化,建立了水平段精细三维应力场模型,采用“缝储对应”的分段模式,提升了顺北油气田超深井分段酸压效果。

3)建议进一步开展耐温200 ℃酸液体系的研究,优化复合分段工艺,提高分段段数,为万米深层的高效勘探开发提供技术支撑。

参考文献

References

- [1] 云露,邓尚.塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征:以顺北油气田为例[J].石油学报,2022,43(6):770-787.
YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in

- Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: a case study of Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 770–787.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 1–17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 1–17.
- [3] 冯新根, 方俊伟, 方裕燕, 等. 抗高温隔离膜缓速酸液体系研制与性能评价 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(6): 99–105.
- FENG Xingen, FANG Junwei, FANG Yuyan, et al. Development and performance evaluation of a high temperature-resistant isolation membrane retarded acid solution system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(6): 99–105.
- [4] 李小刚, 秦杨, 朱静怡, 等. 自生酸液体系研究进展及展望 [J]. *特种油气藏*, 2022, 29(6): 1–10.
- LI Xiaogang, QIN Yang, ZHU Jingyi, et al. Research progress and prospect of autogenic acid system[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 1–10.
- [5] 刘芳慧, 张世昆, 曹耐. 强渗透缓速酸液体系研究与评价 [J]. *钻井液与完井液*, 2022, 39(3): 365–372.
- LIU Fanghui, ZHANG Shikun, CAO Nai. Study and evaluation of highly permeable retarded acids[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(3): 365–372.
- [6] 李新勇, 李骁, 赵兵, 等. 顺北油田 S 井超深超高温碳酸盐岩断溶体油藏大型酸压关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(2): 92–98.
- LI Xinyong, LI Xiao, ZHAO Bing, et al. Key technologies for large-scale acid fracturing of ultra-deep fault-karst carbonate reservoirs with ultra-high temperature for Well S in Shunbei Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 92–98.
- [7] 李新勇, 李春月, 申鑫, 等. 塔河油田水平井三层暂堵酸压工艺设计 [J]. *钻采工艺*, 2021, 44(3): 52–55.
- LI Xinyong, LI Chunyue, SHEN Xin, et al. Research of acid fracturing with multistage temporary plugging technology in Tahe Oilfield horizontal wells[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(3): 52–55.
- [8] 刘洪涛, 刘举, 刘会锋, 等. 塔里木盆地超深层油气藏试油与储层改造技术进展及发展方向 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(11): 76–88.
- LIU Hongtao, LIU Ju, LIU Huifeng, et al. Progress and development direction of production test and reservoir stimulation technologies for ultra-deep oil and gas reservoirs in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(11): 76–88.
- [9] 刘阳. 高温深层碳酸盐岩裸眼酸压完井封隔器研制与现场试验 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(6): 76–81.
- LIU Yang. The development and field testing of a high-temperature deep-layer open hole packer for acid fracturing completion in deep carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6): 76–81.
- [10] 吴晋霞. 水平井分段压裂裸眼封隔器的研制与应用 [J]. *石油矿场机械*, 2018, 47(2): 54–58.
- WU Jinxia. Research and application of open hole packer[J]. *Oil Field Equipment*, 2018, 47(2): 54–58.
- [11] 周生福, 崔龙兵, 刘练, 等. 顺北油田三高油气井完井测试封隔器影响因素及对策 [J]. *油气井测试*, 2019, 28(3): 37–41.
- ZHOU Shengfu, CUI Longbing, LIU Lian, et al. Influencing factors of completion test packer and countermeasure for 3-high oil and gas well in Shunbei Oilfield[J]. *Well Testing*, 2019, 28(3): 37–41.
- [12] 李林涛, 万小勇, 黄传艳, 等. 双向卡瓦可回收高温高压封隔器的研制与应用 [J]. *石油机械*, 2019, 47(3): 81–86.
- LI Lintao, WAN Xiaoyong, HUANG Chuanyan, et al. Development and application of bidirectional slip HTHP retrievable packer[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(3): 81–86.
- [13] 毛军, 郭肖, 庞伟. 高温高压气密封测试封隔器研发及现场试验 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(6): 71–76.
- MAO Jun, GUO Xiao, PANG Wei. Development and application of HTHP gas seal test packer[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(6): 71–76.
- [14] API SPEC 11D1: 2021 Packers and bridge plugs [S].
- [15] 郭建春, 管晨呈, 李骁, 等. 四川盆地深层含硫碳酸盐岩储层立体酸压核心理念与关键技术 [J]. *天然气工业*, 2023, 43(9): 14–24.
- GUO Jianchun, GUAN Chencheng, LI Xiao, et al. Core concept and key technology of three-dimensional acid-fracturing technology for deep carbonate reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(9): 14–24.
- [16] 苟申延, 王世彬, 郭凌晓, 等. 交替注入工艺对深层海相碳酸盐岩酸蚀裂缝导流能力的影响研究 [J]. *钻采工艺*, 2023, 46(2): 94–99.
- GOU Shenyan, WANG Shibin, GUO Lingyao, et al. Influence of alternate injection process on conductivity of acid-etched fractures in deep marine carbonate rocks[J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(2): 94–99.
- [17] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1466–1480.
- ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1466–1480.
- [18] 蒋廷学, 周珺, 贾文峰, 等. 顺北油气田超深碳酸盐岩储层深穿透酸压技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 140–147.
- JIANG Tingxue, ZHOU Jun, JIA Wenfeng, et al. Deep penetration acid-fracturing technology for ultra-deep carbonate oil & gas reservoirs in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 140–147.

[编辑 曹耐]