

# 塔河油田 T1-5H 井泵送桥塞分段加砂压裂工艺

谢进<sup>1</sup>, 刘述忍<sup>2</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 王龙海<sup>2</sup>, 权吉忠<sup>1</sup>, 王明意<sup>1</sup>

1. 中国石化西北油田分公司完井测试管理中心 新疆库尔勒 841600

2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: xiej. xbsj@sinopet. com

引用: 谢进, 刘述忍, 刘凯, 等. 塔河油田 T1-5H 井泵送桥塞分段加砂压裂工艺[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 53-59.

Cite: XIE Jin, LIU Shuren, LIU Kai, et al. Staged sand fracturing with pumped bridge plugs for well T1-5H in Tahe oilfield[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 53-59.

**摘要** 针对塔河油田泵送桥塞分段加砂压裂施工过程中存在泵送桥塞工具串易遇阻遇卡, 缺乏相配的井下工具, 含硫化氢、井控风险较高等问题, 以 T1-5H 井为例, 提出了井下工具泵送模拟技术, 提高工具串在复合套管中的通过性; 形成了人工井底地质深度回归结合连续油管探底的高精度校深方法, 保证首段射孔位置精确; 采用大口径全封堵桥塞, 解决高压气井组下生产管柱的难题。应用表明, T1-5H 井泵送桥塞分段加砂压裂完井工艺 4 段 5 簇, 注入地层总液量 3 210.7 m<sup>3</sup>, 累计产能提高 2 401.6 t, 有效提高了储层动用程度。该工艺为西北工区砂泥岩薄互储层改造提供经验借鉴, 为实现超深石炭系储层大规模开发奠定了技术基础。

**关键词** 石炭系; 泵送桥塞; 分段加砂压裂; 砂泥岩薄互储层; 连续油管; 封隔器; 可溶桥塞

中图分类号: TE357

文献标识码: B

DOI: 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2024. 03. 009

## Staged sand fracturing with pumped bridge plugs for well T1-5H in Tahe oilfield

XIE Jin<sup>1</sup>, LIU Shuren<sup>2</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, WANG Longhai<sup>2</sup>, QUAN Jizhong<sup>1</sup>, WANG Mingyi<sup>1</sup>

1. Completion Test Management Centre, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841600, China

2. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling Company, Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** The staged sand fracturing process with pumped bridge plugs in well T1-5H in the Tahe oilfield encounters some challenges, such as the tool string sticking/blocking, unavailability of compatible downhole tools, high H<sub>2</sub>S content, and high well control risks. This paper presents a downhole tool pumping simulation technology for well T1-5H to enhance the passability of the tool string in composite casing. A high-precision depth calibration method combining artificial bottomhole geological depth regression and coiled tubing bottom detection was developed to ensure the accuracy of the first perforation position. Large-diameter full-sealing bridge plugs were employed to address the challenges of running production tubing in high-pressure gas well groups. Field application shows that the staged sand fracturing completion technology for well T1-5H, comprising four stages and five clusters, achieved a total fluid injection volume of 3 210.7 m<sup>3</sup> and enhanced the cumulative production per well by 2 401.6 tons. This effectively enhances reservoir recovery. The proposed technology offers valuable insights for the stimulation of thin interbedded sandstone-mudstone reservoirs in the northwest region and lays a technical foundation for the large-scale development of ultra-deep Carboniferous reservoirs.

**Keywords:** Carboniferous; pumped bridge plug; staged sand fracturing; thin interbedded sandstone-mudstone reservoir; coiled tubing; packer; soluble bridge plug

塔河油田石炭系为海陆交互的碎屑岩沉积体系, 油气充注和成藏规律复杂, 具有纵向砂泥岩互层严重, 横向分布不稳定且连通性差的特点, 储层深(5 200 m)、薄(3~10 m)、小(0.5~2 km<sup>2</sup>)、散, 平均孔隙度 9.9%, 平均渗透率 34 mD, 属低孔低渗储层<sup>[1-2]</sup>。单井产能普遍较低, 主要表现为能量衰减较快、能量供给不足导致产量下降快。随着非常规

油气田勘探与开发技术不断升级迭代, 针对页岩气、页岩油、致密油等非常规致密储层的水平井泵送桥塞分簇射孔工艺取得了广泛应用<sup>[3-6]</sup>, 为石炭系的开发提供了新的手段。该工艺主要通过水力泵送的方式把电缆传输的全可溶桥塞和多级射孔枪输送到指定位置, 在桥塞完成坐封后, 上提射孔枪到射孔位置进行多次射孔, 最后提出射孔枪进行

水力压裂,多次重复此操作直到完成全井段的射孔压裂<sup>[7]</sup>。该工艺具有分段压裂级数不受限制、裂缝部位准确等优势。2022年卢刚<sup>[8]</sup>总结了西南地区页岩气水平井中采用该工艺实施200多井次,其中泸X井测试日产量 $137.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,成为国内首口单井测试日产量超百万立方米的页岩气井。曹学军等<sup>[9]</sup>报道了川西地区威荣深层页岩气井采用“水平井+泵送桥塞+射孔联作+分段压裂”工艺作业效率高、施工成本低、改造效果好。

本文分析了西北油田工区水平井引进泵送桥塞分段加砂压裂工艺存在的问题,从井筒准备、连续油管精确校深、临时封堵、多级射孔起爆、水力泵送、国产化封隔器等方面研究制定针对性解决方案,在塔河油田T1-5H井成功应用,有效提高了单井产能。

## 1 T1-5H井施工难点

T1-5H井位于塔河东部石炭系构造高部位,完钻井深5 931.5 m(斜)/5 195.92 m(垂),造斜点4 810 m,水平段钻遇1号砂体厚度100 m,气测显示53 m;2号砂体36 m,气测显示24 m;3号砂体尖灭;0号砂体油气层斜厚9 m/垂厚1.23 m;1号砂体油气层斜厚51 m/垂厚4.9 m,2号砂体差油气层斜厚3.5 m/垂厚0.22 m(见图1)。

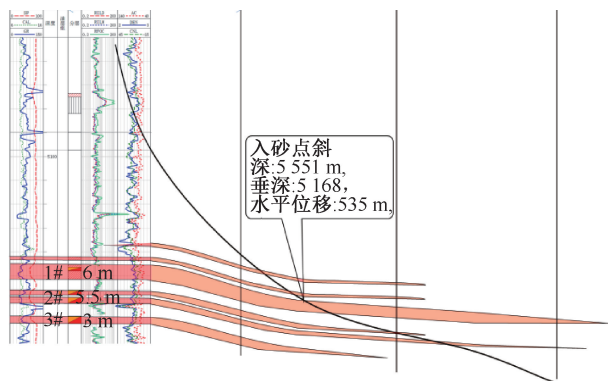


图1 T1-5H井井眼轨迹示意图

Fig.1 Schematic of the well T1-5H track

该井采用泵送桥塞分段加砂压裂工艺存在以下难点:

(1)泵送桥塞分段加砂压裂工艺难以适应139.7 mm套管未回接大井筒。该井生产套管使用复合套管,即177.8 mm套管(0~4 762.95 m)+139.7 mm套管(4 762.95~5 990.28 m),连接方式采用变扣连接,该连接处位于造斜点4 810 m处以上位置,139.7 mm套管底部扣型为偏梯扣,国内外

无此井筒类型可参考的水力泵送参数,存在井筒难清洁以及泵送桥塞工具串易遇阻卡问题。

(2)泵送桥塞分段加砂压裂工艺在塔河油田应用缺乏相配的井下工具。邻井石炭T1-1H、T1-2H等4口井的温度梯度约为 $2.32 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ,计算该井储层温度约为 $120.69 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而现有桥塞泵送桥塞分段加砂压裂工艺常用的可溶桥塞耐温仅 $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,难以满足该井的储层施工要求;储层打开后需组下生产管柱,缺乏临时封堵工具;可溶桥塞溶解不充分时需要下连续油管钻磨桥塞,缺乏允许钻磨工具通过的大通径、高性能生产封隔器。

(3)分段加砂压裂后不满足高压气井生产的井控要求。塔河油田石炭系预计井口关井压力超过35 MPa,为高压气井,邻井含硫化氢,组合套管不防硫,难以满足生产需求,下生产管柱时井控风险较高。

为解决泵送桥塞分段加砂压裂工艺难以适应西北工区施工井况的问题,亟需进行系列配套技术和井下工具的研究。

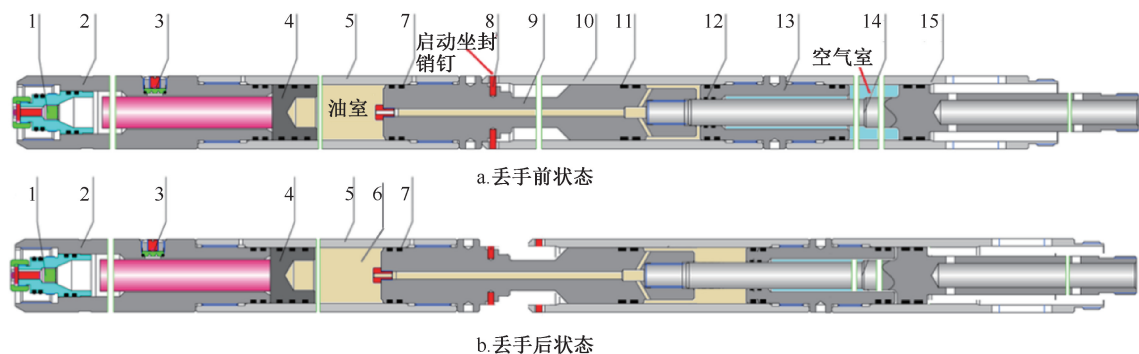
## 2 T1-5H井泵送桥塞分段压裂施工解决方案

泵送桥塞分段压裂完井工艺是页岩气实现规模开采的成熟技术,包含两个关键技术,即全可溶桥塞技术和水平井井下工具水力泵送技术。

### 2.1 全可溶桥塞技术

为了适应T1-5H井的储层条件,全可溶桥塞技术主要是优选桥塞坐封工具和可溶桥塞。优选带空气室桥塞坐封工具,其坐封推力不受液柱压力影响,以满足4 000 m以下井深使用,结构示意图如图2所示。主要组成部分包括点火组件、药筒外壳、泄压组件、上活塞、上活塞筒、启动坐封销钉、中间接头、下活塞筒、承托环、下活塞、活塞杆、上推力筒。这款桥塞坐封工具具有空气室,且带有坐封销钉,坐封部分与环空及上部液柱隔离开来,因此液柱压力不影响桥塞坐封压力,并很大程度上简化了操作步骤。

根据塔河油田埋藏深,地层温度、压力较高以及地层水矿化度较高的特点,在可溶桥塞材质配方、表面处理和结构三方面进行优化,使其耐温提升至 $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且在高矿化度环境下满足前期24 h内承压,后期又达到快速、完全溶解(5~8 d)的要求,图3是全可溶桥塞示意简图。在材料配方层面,合



1、点火组件;2、药筒外壳;3、泄压组件;4、上活塞;5、上活塞筒;6、油室;7、O型圈;8、启动坐封销钉;9、中间接头;10、下活塞筒;11、承托环;12、O型圈;13、下活塞;14 活塞杆;15、上推力筒

图2 带空气室桥塞坐封工具结构示意图

Fig.2 Constructional drawing of a bridge plug setting tool with air cavity

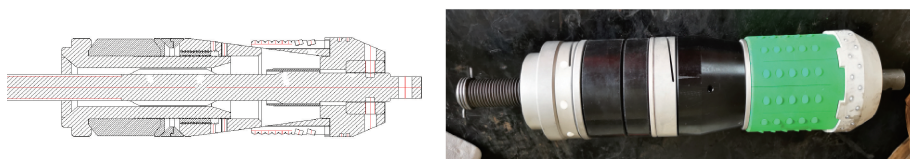


图3 全可溶桥塞示意简图

Fig.3 Constructional drawing of fully soluble bridge plug

金成分中活性因子(镁)的含量被降低,辅助以超声清洗、微弧氧化、电镀涂层、表面氢化等技术,应用环境矿化度提升30%,耐温性能由原来的120℃提高至170℃,耐压性能提高至70 MPa。金属、胶筒分别能在30~150℃水溶液中溶解,实现在复杂井筒环境中承压及施工后5~8 d全部溶解。卡瓦采用较小的陶瓷粒子(8×5 mm颗粒),可在P110、BG125V、140V钢级套管锚定,溶解完留在井内的不溶物小于0.1%。一旦无法完全溶解,亦可采用连续油管钻磨作业。

桥塞坐封工具和可溶桥塞相适配,具体操作步骤为:

(1)电打火,引燃药柱,产生高压气体推动上活塞下行,挤压油室的液压油;

(2)液压油产生的液压由中间接头内部传至下活塞,活塞杆与中间接头丝扣连接,下活塞相对活塞杆下行,挤压底部空气室;

(3)剪断启动坐封销钉,下活塞带动下活塞筒和上推力筒一起下行;

(4)上推力筒推动桥塞压缩胶筒、撑开卡瓦,完成坐封;

(5)液压达到底部丢手销钉剪切值剪断销钉,实现丢手。

## 2.2 井下工具泵送技术

为了解决复合套管水力泵送井下工具缺少参

考参数的的问题,采用软件模拟通井工艺,根据电缆弱点拉断力和井眼轨迹利用软件模拟计算出允许的最小排量和最大排量。

泵送管柱组合:转换接头(外径:89 mm、长度:0.09 m)、容线仓(外径:89 mm、长度:0.16 m)、加重杆(外径:89 mm、长度:1.64 m)、射孔枪(外径:89 mm、长度:1.39 m)、多级装置(外径:89 mm、长度:0.21 m)、桥塞点火头(外径:89 mm、长度:0.35 m)、桥塞送进工具(外径:97 mm、长度:1.70 m)、推筒(外径:100 mm、长度:0.50 m)、桥塞(外径:100 mm、长度:0.4 m),本井应用一桥两簇和一桥一簇两种结构,如图4所示。

采用Cerberus连续油管仿真模拟软件<sup>[10-11]</sup>分别模拟两种管柱入井情况。在泵送软件中输入仪器规格、井斜、方位角、井口压力、井眼曲率(狗腿度)等数据,模拟计算出不同井深电缆头的受力情况,如图5所示。电缆头受力随着井深增加不断减小,且电缆在仪器串进入水平段后未泵送时受到的拉力只有自身的重力,其安全余量远比电缆头处大,故施工时需根据不同井深制作不同拉断力的电缆头弱点,电缆头的弱点即电缆头的安全余量<sup>[12-14]</sup>。T1-5H井弱点拉断力设为1.8 t。

图6为电缆泵送桥塞模拟曲线,纵坐标为深度,横坐标为泵送排量,可以根据该图得到工艺所允许的最大与最小排量。



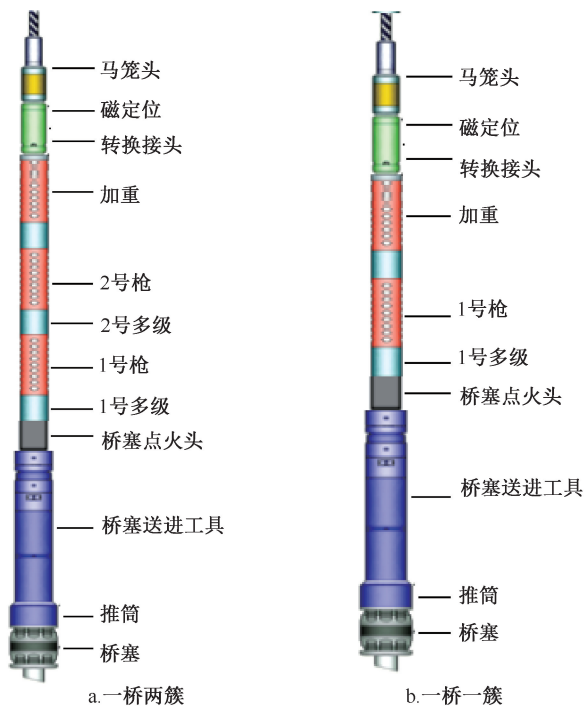


图4 泵送管柱结构

Fig. 4 String structure of pumping pipe

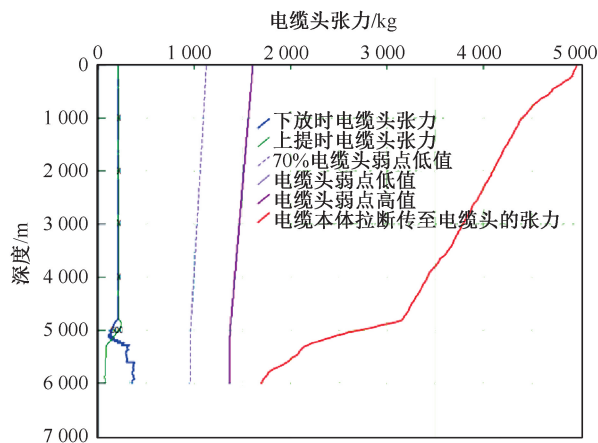


图5 T1-5H井电缆头弱点计算图

Fig. 5 Cablehead weakness calculation of the well T1-5H

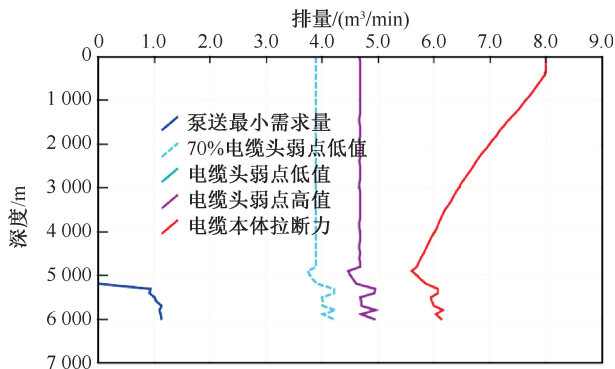


图6 电缆泵送桥塞模拟曲线

Fig. 6 Simulation of pump-down conveyance for plugs using wireline

由图6可以看出,一桥两簇泵送管串长 $9.39\text{ m}\pm$ (每簇 $1\text{ m}$ ),静重 $274\text{ kg}\pm$ ,模拟结果显示,最小泵送排量 $0.4\text{ m}^3/\text{min}$ ,考虑泵送电缆70%的安全余量,允许最大泵送排量 $2.0\text{ m}^3/\text{min}$ 。一桥一簇泵送管串长 $7.79\text{ m}\pm$ (每簇 $1\text{ m}$ ),静重 $240\text{ kg}\pm$ ,模拟结果显示,最小泵送排量 $0.4\text{ m}^3/\text{min}$ ,考虑泵送电缆70%的安全余量,允许最大泵送排量 $2.0\text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 3 高精度连续油管探底校深方法

泵送桥塞分段加砂压裂工艺首段射孔采用连续油管传输射孔,但常规连续油管传输射孔无法进行校深作业,而穿电缆连续油管传输射孔配套的马笼头丝扣强度太低,水平段阻卡后易折断,加护套后又无法实现内防喷。

针对塔河油田石炭系储层薄且射孔精度要求高的特点,需要提高校深精度以保证射孔精准性。利用声幅测井仪器串地质深度和零长首次计算出人工井底地质深度,进而得到人工井底和射孔段底端之间的距离;再通过连续油管带射孔模拟工具串探底后上提至射孔位置地面做好标记;最后连续油管带射孔工具串至标记位置进行打压射孔作业,从而建立了人工井底地质深度回归结合连续油管探底高精度校深方法,根据后期生产情况判断该方法的精度误差可控制在 $1\text{ m}$ 以内,保证了石炭系薄砂体首段射孔位置精确。

### 4 完井技术

预测 T1-5H 井的最高油压为 $45.57\text{ MPa}$ ,目的层段硫化氢浓度范围在 $510\text{ mg}/\text{m}^3$ ,硫化氢分压 $0.01439\text{ MPa}$ ,按照油气井管柱选择技术规范规定,引发硫化物应力腐蚀破裂的最低硫化氢分压为 $0.000345\text{ MPa}$ ,现有复合套管不防硫,因此需下入防硫完井管柱满足后期开采要求。T1-5H 井的完井技术主要包括压后的暂堵技术和完井管柱技术。

#### 4.1 暂堵技术

由于压裂后需要下入防硫完井管柱,为了井控安全对储层进行暂时封堵,因此研制了全封堵桥塞,实现下放生产管柱期间的井筒封堵,同时具备击落堵头后建立生产通道。全封堵桥塞主要由中心管、上销钉、上锥体、锁环套、上卡瓦、胶筒、下卡瓦、下锥体、下销钉、堵头等部分组成,该桥塞同样需要配合坐封工具。原理是投球打压,剪断坐封工具销钉,关闭循环孔;继续打压剪断销钉,内套继续

下行;液压推动两级活塞下行,进而推动桥塞连接示意图中的坐封套下行,剪断桥塞结构图中的销钉,中心管保持静止下,推动锁环套、上卡瓦下行、上卡瓦撑开并推动上锥体下行,剪断销钉,推动压缩胶筒、下锥体下行撑开下卡瓦;继续打压,压缩胶筒膨胀,同时上、下卡瓦镶嵌在套管内壁上锚定套管,完成坐封;继续打压剪断销钉,完成丢手;后期通过打压方式打掉桥塞内堵头。

该井预测打压 50 MPa,外加液柱压力预计堵头处 4 804.88 m 承受压力为 98 MPa,套管抗内压强度为 117.3 MPa,安全系数约为 1.2。该工具体外径 108 mm,击落堵头后内径 70.3 mm,完全满足 89 mm 油管的内径生产需求。

4.2 完井管柱封隔器

完井管柱结构如图 7 所示。采用 P110S 材质油管,气密扣,完井工具选择防硫材质,后期及时监测井下管柱腐蚀情况,根据监测结果定期更换完井管柱。

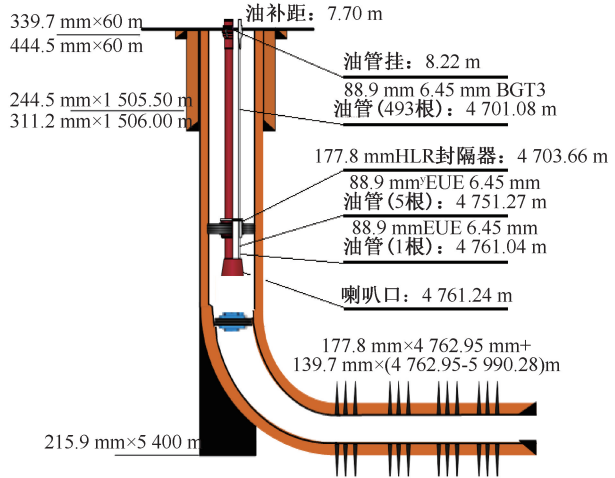


图 7 完井管柱结构图  
Fig. 7 Completion pipe string structure

液压套管封隔器为国产化 WJ-HLR 封隔器,采用上提解封结构,主要由防沙环、上下卡瓦、密封系统、坐封活塞及分级解封系统组成,已通过国际标准 V3 实验等级认证。为保障封隔器可靠的解封性能,WJ-HLR 封隔器采用了分级解封机构。同时,封隔器上部采用易钻的铸铁材质,卡瓦上有防转处理装置,出现异常时容易钻磨,效率高<sup>[15-16]</sup>;防沉环上有阵列分布的导孔,有利于防尘环上下压力传动。胶筒组件,由两枚端胶筒、四枚聚四氟背圈,和一枚中间 AFLAS 胶筒组合而成,在 204 ℃ 条件下,承压 105 MPa 仍性能稳定。

WJ-HLR 封隔器的锚定卡瓦上还设有防砂机构,解决了以往坐封过程中,固相物质或杂质沉淀

堆积在卡瓦上导致难以解封的生产难题;采用高压油枪,在坐封活塞、缸套型腔等关键部位注满油脂,解决了以往大颗粒物及泥浆进入,造成坐封异常的难题。

5 现场应用效果分析

T1-5H 井泵送桥塞分段加砂压裂完井工艺根据储层改造簇间干扰模拟计算,结合储层物性,以打开“优势储集体”为射孔原则,共分 4 段 5 簇,第 1 段(1 簇):5 860~5 863 m;第 2 段(1 簇):5 610~5 611 m;第 3 段(2 簇):5 566~5 567 m、5 530~5 531 m;第 4 段(1 簇):5 455~5 456 m。

全桥塞位置:1#桥塞封堵井段 5 860~5 863 m,坐封位置 5 623 m;2#桥塞封堵井段 5 610~5 611 m,坐封位置 5 590 m;3#桥塞封堵井段 5 530~5 567 m,坐封位置 5 466 m。

根据邻井储层改造认识分析,T1-5H 井目的层延伸压力梯度按 2.1 MPa/100 m 计算,预计 8 m<sup>3</sup>/min 排量压裂最高泵压 65 MPa,压裂井口选择 105 MPa、通径  $\phi$ 130 mm,井底最大压力 96 MPa,远低于 139.7 mm 套管抗内压强度 117.3 MPa,满足泵送和加砂压裂需求。

T1-5H 井压裂注入地层总液量 3 210.7 m<sup>3</sup>,2022 年 7 月 24 日用 6 mm 油嘴开井,累计返排率 0.6% 见气,累计返排 3.0% 见油。图 8 表示 T1-5H 井示踪剂监测的分段产气贡献率。由图可以看出,采用该压裂工艺后,产气贡献的分段效果明显,初期第一段为主要产气贡献层,后期第三、二、四段贡献率逐渐上升。

将 T1-5H 井的生产情况与邻井进行对比,分别见表 1 和图 9,该井在压裂后自喷周期和单井提高产量明显提高,且与邻井相比,单位厚度累产油最高。

表 1 T1-5H 井与邻井生产情况比较  
Table 1 Comparison of production data between well T1-5H and adjacent wells

井号	自喷期/d	累产/t	目前情况
T1-5H	107/预计 198	4 284/6 730	4.08 MPa/27.1 t
T1-1H	472	13 881.5	压落零关井
T1-2H	6	275.3	油压落零关井
T1-3H	460	6 465.2	2.88 MPa/4.4 t
T1-4H	459	10 512.1	6.88 MPa/15.5 t
T1-6H	48	962.0	油压落零关井
T1-7H	0	1 334.5	机抽日产 0.2 t
T1-8H	45	3 064.2	机抽日产 25.3 t

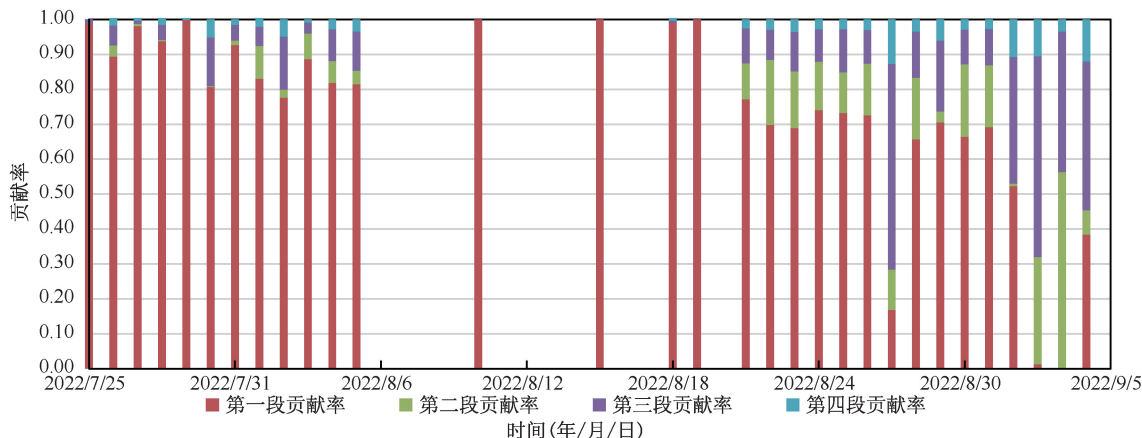


图8 T1-5H井产气分段贡献率(2022/7/25至2022/9/4)

Fig. 8 Contribution rate of segmented gas production in well T1-5H (2022/7/25 to 2022/9/4)

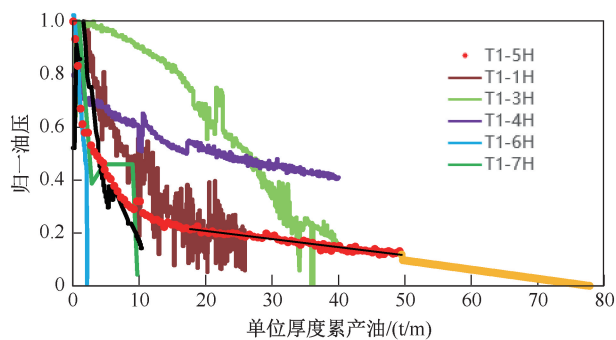


图9 各生产井归一油压与单位厚度累产油关系图

Fig. 9 The correlation between normalized oil pressure and cumulative oil production per meter of each well

T1-5H井泵送桥塞分段加砂压裂完井工艺的成功应用,有效提高了储层动用程度,单井累计产能提高2 401.6 t。

## 6 结论

(1)针对塔河油田T1-5H井储层温度较高的难题,设计形成耐温170℃、承压70 MPa的可溶桥塞,满足了分段压裂需求;

(2)针对塔河油田T1-5H井生产套管为复合套管且连接方式采用变扣连接,139.7 mm套管底部扣型为偏梯扣,采用Cerberus连续油管仿真模拟软件计算出两种管柱结构允许的最小排量 $0.4\text{ m}^3/\text{min}$ ,最大排量 $2.0\text{ m}^3/\text{min}$ ,为现场施工提供科学数据。

(3)针对塔河油田石炭系储层薄且射孔精度要求高的特点,建立了人工井底地质深度回归结合连续油管探底高精度校深方法,精度误差控制在1 m以内,保证了石炭系薄砂体首段射孔位置精确。

(4)针对T1-5H井高压且含有硫化氢,优化了压后暂堵技术和防硫完井管柱技术,保障了该井压后长期开采。

(5)塔河油田T1-5H井泵送桥塞分段加砂压裂工艺的成功实施,为西北工区薄层砂泥岩互层储层改造提供了重要依据和宝贵经验,为超深石炭系砂岩储层大规模开发奠定了坚实的基础。

致谢:感谢中石化西北油田分公司完井测试管理中心同意本文公开发表,感谢四机塞瓦公司提供的工具支持。

## 参考文献

- [1] 张冬丽,先伟.塔里木盆地塔河地区石炭系烃源岩特征及展布[J].成都理工大学学报(自然科学版),2023,50(6):673-689,705.  
ZHANG Dongli,XIAN Wei. Distribution and characteristics of the carboniferous source rock in Tahe oilfield, Tarim basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(6): 673-689,705.
- [2] 骆福嵩,韩博.塔河油田石炭系卡拉沙依组圈闭类型及预测方法[J].工程地球物理学报,2017,14(3):359-363.  
LUO Fusong, HAN Bo. The trap types of carboniferous Kalashayi formation in Tahe Oilfield and its prediction methods[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017,14(3):359-363.
- [3] 孙海成,汤达祯,蒋廷学,等.页岩气储层压裂改造技术[J].油气地质与采收率,2011,18(4):90-93.  
SUN Haicheng, TANG Dazhen, JIANG Tingxue, et al. Fracturing and stimulation techniques of shale gas reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4):90-93.
- [4] 侯景龙,王传庆,李玉东,等.连续管密切割压裂工艺技术及其应用[J].钻探工程,2021,48(11):43-49.  
HOU Jinglong,WANG Chuanqing,LI Yudong,et al. Intensive cut coiled tubing fracturing technology and its application [J]. Drilling Engineering, 2021,48(11):43-49.

- [5] 徐浩,袁菁华,胡康存. 页岩储层层间暂堵转向工艺技术研究[J]. 钻探工程,2023,50(4):127-134.  
XU Hao, YUAN Jinghua, HU Kangcun. Research on inter-layer temporary plugging steering process technology for shale reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 127-134.
- [6] 胡光. 层理性页岩力学参数对水力压裂裂缝形态的影响分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 97-103.  
HU Guang. Influences of anisotropic mechanical properties in the hydraulic fracturing design in shale reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 97-103.
- [7] 张俊,宋杰. 多级分簇射孔桥塞联作技术在新疆油田应用与异常处理方法[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 57-59.  
ZHANG Jun, SONG Jie. Application of multi-stage clustered perforation segmented bridge plug and its abnormal treatment methods in Xinjiang Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(4): 57-59.
- [8] 卢刚. 页岩气水平井分段压裂作业中全可溶桥塞的应用[J]. 油气井测试, 2022, 31(5): 38-42.  
LU Gang. Application of fully soluble bridge plug in staged fracturing of shale gas horizontal well [J]. Well Testing, 2022, 31(5): 38-42.
- [9] 曹学军,傅伟,李小波,等. 威荣深层页岩气连续油管高压扫塞通井技术[J]. 钻采工艺, 2022, 45(5): 80-84.  
CAO Xuejun, FU Wei, LI Xiaobo, et al. Plug mill and drift technology in high pressure with coiled tubing for Weirong deep shale gas [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(5): 80-84.
- [10] 明瑞卿,贺会群,唐纯静,等. 国内外连续管软件研究分析[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 771-780, 794.  
MING Ruiqing, HE Huiqun, TANG Chunjing, et al. Study and analysis on domestic and foreign software related with coiled tubing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 771-780, 794.
- [11] 刘研言. 页岩油水平井连续管底封拖动压裂难点与对策[J]. 钻采工艺, 2024, 47(1): 102-107.  
LIU Yanyan. Difficulties and countermeasures of coiled-tubing drag fracturing for horizontal shale oil wells [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(1): 102-107.
- [12] 柳军,黄祥,杨登波,等. 电缆泵送分簇射孔管串井筒通过能力分析新模型[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 217-225.  
LIU Jun, HUANG Xiang, YANG Dengbo, et al. A new analysis model of passing ability of cable pumping cluster perforating string through well core [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 217-225.
- [13] 肖勇军,宋毅,陆应辉,等. 川南页岩气套管变形井分簇射孔管串泵送工艺分析[J]. 石油矿场机械, 2021, 50(5): 66-72.  
XIAO Yongjun, SONG Yi, LU Yinghui, et al. Analysis on pumping operation of multistage perforating string through shale gas casing deformation wells in South Sichuan [J]. Oil Field Equipment, 2021, 50(5): 66-72.
- [14] 朱秀星,薛世峰,全兴华,等. 非常规水平井多簇射孔与分段压裂联作管串泵入控制模型[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 572-578.  
ZHU Xiuxing, XUE Shifeng, TONG Xinghua, et al. The control model for pumping down tool string composed of tussocky perforation guns and frac plug in unconventional horizontal well [J]. Well Logging, 2013, 37(5): 572-578.
- [15] 张锦宏,张波,曹明,等. 中国石化“深地工程”油气测试关键技术及展望[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 48-57.  
ZHANG Jinhong, ZHANG Bo, CAO Ming, et al. Key process technologies and prospects for oil and gas testing in Sinopec's deep geological engineering [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 48-57.
- [16] 李荷婷,代俊清,李真祥. 四川盆地及周缘超深-特深探井酸压改造的实践与认识[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 202-210.  
LI Heting, DAI Junqing, LI Zhenxiang. Practices and understandings of acid fracturing of ultra deep exploratory wells in Sichuan basin and its periphery [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 202-210.

编辑 方志慧

第一作者简介:谢进,男,1985年出生,本科,工程师,2009年毕业于西南石油大学石油工程专业,现从事完井试油及井下工具研制工作。电话:0996-4687087, Email: xiej. xbsj@ sinopec. com。通信地址:新疆巴州轮台县轮南镇采油三队完井测试管理中心,邮政编码:841600。