

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2019087

## 海上油田爆燃压裂技术研究在现场试验

孙 林, 杨万有, 李旭光, 熊培祺

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

**摘 要:** 为了解决海上油田应用爆燃压裂技术的安全性问题和压裂后高效增产的技术难点, 研发了耐高温、低火药力和低燃速火药, 建立了爆燃压裂模拟模型, 采用安全管柱组件并进行安全校核, 形成了海上油田井口泄压方法, 并采取强化软件模拟和与酸化技术联作等措施增强技术安全性、提高压裂后的增产效果, 形成了海上油田爆燃压裂技术。该技术在海上油田 8 口井进行了现场试验, 试验井峰值压力为 22.4~71.3 MPa, 管柱均无安全问题, 平均单井增油量 43.1 m<sup>3</sup>/d。研究表明, 爆燃压裂技术在海上油田具有较好的适应性, 适用于多种井况条件, 形成的海上油田爆燃压裂安全控制和高效增产配套技术具有安全、高效的优点, 能够提高爆燃压裂的安全性和压裂后的增产效果。

**关键词:** 爆燃压裂; 推进剂; 数值模拟; 压裂管柱; 海上油田

**中图分类号:** TE357.1<sup>+</sup>4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-0890(2019)05-0091-06

## Research and Field Test of Deflagration Fracturing Technology in Offshore Oilfields

SUN Lin, YANG Wanyou, LI Xuguang, XIONG Peiqi

(CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300452, China)

**Abstract:** There are technical challenges in the safety and high-efficiency stimulation by blasting fracturing in offshore oilfields, and in response a high temperature, low firepower and low burning rate propellant has been developed, and in addition, we have established a deflagration fracturing simulation model. By utilizing safety string components and conducting safety calibration, a wellhead pressure relief method for the offshore oilfields has been formed. Through the enhanced software simulation and combined acidizing operation, it can improve the technical safety and enhance the stimulation effect, so as to form the deflagration fracturing technology for offshore oilfields. This technology has been tested in 8 wells in offshore oilfields. In those offshore fields, the peak pressure of the test well was 22.4–71.3 MPa. There was no safety problem in the string, and the average daily oil increment per well was up to 43.1 m<sup>3</sup>/d. The research showed that this deflagration fracturing technology had good adaptability in offshore oilfields, which is suitable for a variety of well conditions, with the advantages of safety control and high-efficiency stimulation technology in deflagration fracturing in offshore oilfield, it can improve the application safety and optimize the results from stimulation.

**Key words:** deflagration fracture; propellant; numerical simulation; fracturing string; offshore oilfield

我国海上油田低渗透油气储量大, 动用程度低, 大部分储层还具有层薄、近水等特点, 技术措施实施费用高、风险大, 水力压裂等常用增产技术的应用受到限制<sup>[1-3]</sup>, 挖潜技术手段有限。爆燃压裂技术是一项成本低、适用性广和特别适用于近水储层改造的气体压裂技术, 我国已经研究应用 30 余年, 实施井达上万井次。其中, 该技术应用最多的陆地油田是长庆油田, 年施工达 2 000 余口井。西安石油大学、中国石油大学(华东)等院校均对该技术进行了科研攻关, 研究重点包括火药发生器、中深井峰值压力及裂缝形态模拟及监测、电缆施工工艺、室内模拟试验和井筒安全等方面<sup>[4]</sup>。

截至目前, 我国尚未进行海上油田爆燃压裂技术适应性研究。若直接应用陆地油田爆燃压裂相关技术, 存在较大安全隐患; 同时, 海上油田要求达到比陆地油田更显著的增产效果。为了解决海上油田爆燃压裂技术应用的安全性问题, 笔者研制了耐高温、低火药力推进剂火药, 建立了高精度爆燃压裂

收稿日期: 2018-11-05; 改回日期: 2019-09-02。

**作者简介:** 孙林(1983—), 男, 四川南充人, 2006年毕业于西南石油大学石油工程专业, 高级工程师, 主要从事海上油气田酸化压裂方面研究工作。E-mail: sunlin3@cnooc.com.cn。

**基金项目:** 中国海油科技攻关项目“爆燃压裂酸化储层改造技术研究与应用”(编号: CNOOC-KJ 135KJXM NFGJ2017-04)资助。

模拟模型,进行了筛管地面打靶实验,采用安全管柱组件并进行安全校核,研究了海上油田井口泄压方法;为了解决压裂后的高效增产难题,采用低燃速推进剂火药,强化软件模拟,并与酸化技术进行了联作,形成了海上油田爆燃压裂技术,并在8口井进行了现场试验,管柱均无安全问题,且取得了较好的增产效果,单井平均增产倍比提高至17.3倍,平均单井增油量43.1 m<sup>3</sup>/d。

## 1 海上油田爆燃压裂的主要难点

爆燃压裂技术也称高能气体压裂技术,是利用火药在储层部位燃烧产生高温高压气体压出多条径向裂缝的增产改造技术。燃烧产生的气体主要包括CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和HCl等,可以在1 s内达到几十甚至上百兆帕的压力,一般为地层破裂压力的1.1~2.0倍,

从而在储层中产生3~8条不受地应力控制的径向微裂缝,裂缝缝长最长可达15 m,且裂缝不闭合;同时,高温燃气还具有降黏和有机解堵等作用。该技术在陆地油田应用较为成熟,主要用于近水低渗透储层改造。

海上油田迫切需要利用爆燃压裂技术的优势,对近水低渗透储层进行挖潜增产,但由于海上油田开采方式和产量需求有别于陆地,需要重点解决该技术在海上油田应用的安全性和压裂后高效增产2方面的技术难点。

1)爆燃压裂技术在海上油田应用的安全性。海上油田若直接应用陆地油田爆燃压裂技术,则可能出现火药产生的高峰值压力造成完井管柱破坏、井下落物<sup>[4-7]</sup>、火药不耐高温和海上平台井控安全<sup>[8-12]</sup>等诸多问题。陆地油田(以长庆油田为例)和海上油田爆燃压裂技术应用条件对比如表1所示。

表1 陆地和海上油田爆燃压裂技术应用条件对比

Table 1 Comparison of the application conditions of deflagration fracturing technology with onshore and offshore oilfields

| 类别   | 长庆油田                    | 海上油田                                              | 存在问题                                               |
|------|-------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 井况   | 多为2 000 m直井,采用电缆作业      | 井深2 000~5 500 m,多为水平井或大斜度井,需采用管柱作业                | 海上油田峰值压力更高,存在作业管柱穿孔、扭曲变形、工具井下落物及卡钻等风险;需要更耐温的爆燃压裂火药 |
| 完井方式 | 以 $\phi 139.7$ mm套管射孔为主 | 以 $\phi 244.5$ mm和 $\phi 177.8$ mm套管射孔为主,还有防砂筛管完井 | 海上油田完井管柱耐压普遍低于陆地油田                                 |
| 井口处理 | 不坐井口采油树,井口液柱喷溅          | 海上平台,多层甲板,安全要求更高                                  | 易造成井场油垢喷溅污染,并存在井喷及硫化氢泄露等安全隐患                       |

2)爆燃压裂技术在海上油田具有更显著的增产效果。海上油田开发具有高投入、高收益的特点,钻井及工程费用一般是陆地油田的16~65倍,因此单井产油量也需要达到陆地油田的十余倍,才能实现经济开发。目前陆地油田爆燃压裂技术单井增产倍比为2.0~2.5倍,而海上油田需要增产倍比达5.0倍以上,才能满足基本要求。

## 2 爆燃压裂关键技术研究

基于海上油田爆燃压裂要求,研究了推进剂火药、精准模拟技术、地面打靶试验、安全管柱组件及安全校核和井口泄压方法等关键技术,形成了海上油田爆燃压裂安全控制技术和高效增产技术。

### 2.1 海上油田爆燃压裂安全控制技术

#### 2.1.1 耐高温、低火药力推进剂火药

目前爆燃压裂火药主要采用军工双基药和航天

推进剂火药2类,军工双基药耐温不超过120℃,而常规航天推进剂火药耐温为120~160℃。因此,针对海上油田的需求,开发了以高氯酸钾、耐高温环氧树脂和橡胶等成分为主的耐高温推进剂火药,经测试该火药耐温可达200℃,基本满足目前海上油田作业需求。

同时,由于海上油田的 $\phi 244.5$  mm套管和筛管抗压强度更低,对火药性能也提出了新的要求,因为爆燃压裂的高峰值压力是主要的不安全因素。前人的研究结果表明<sup>[12-15]</sup>,火药力越小,火药用量相同的情况下越容易产生低峰值压力,也相对安全。因此,要求火药具有低火药力。

密闭爆发器试验测定结果显示,耐高温推进剂火药的火药力为670 kJ/kg,而陆地油田常用火药的火药力为960 kJ/kg。

#### 2.1.2 高精度爆燃压裂模拟模型

高精度爆燃压裂模拟可提供更为准确的峰值压力计算,提前进行安全控制工作,目前国内对于

爆燃压裂压力模型研究主要分为简易模型和复杂模型<sup>[12-15]</sup>2 类, 海上油田在研发复杂模型基础上, 进一步优化了爆燃压裂理论体系, 修正了部分模型存在的单位不统一、物理意义模糊和模拟功能范围窄等问题, 同时建立了应用范围更广的压挡液运动模型<sup>[16]</sup>, 采用微分方程显式离散求解规则进行求解, 并用隐式迭代方法来提高计算精度和数据收敛性, 基于该成果编制了海上油田爆燃压裂软件<sup>[17]</sup>。修正的复杂模型计算公式为:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left(f - \frac{p}{\rho_n}\right)m \frac{d\psi}{dt} - (\gamma - 1)Q_r - p\left(Sv + \frac{dV_l}{dt}\right) - p_{Tg} \frac{dV_{Tg}}{dt}}{V_\psi + xS + V_T + \frac{p_{Tg}}{P} V_{Tg}} \quad (1)$$

式中:  $p$  为气体燃烧腔室压力, Pa;  $f$  为火药力, J/kg;  $\rho_n$  为火药密度, kg/m<sup>3</sup>;  $m$  为火药总质量, kg;  $\psi$  为火药燃烧比;  $\gamma$  为绝热系数;  $Q_r$  为传热量, J;  $S$  为井筒横截面积, m<sup>2</sup>;  $v$  为液柱运动速度, m/s;  $V_l$  为液体进入裂缝的体积, m<sup>3</sup>;  $p_{Tg}$  为套管外部气体压力, Pa;  $V_{Tg}$  为进入裂缝的气体体积, m<sup>3</sup>;  $V_\psi$  为火药柱燃烧掉的体积, m<sup>3</sup>;  $x$  为液柱向上运动的距离, m。

利用式(1)可以求解不同参数的火药在特定的井筒条件中、不同时间下峰值压力的变化情况, 从而可以提前优选火药参数, 进行压力安全控制。采用海上油田 HZ19-2-7Sa 井的相关数据, 分别用吴晋军等人<sup>[15]</sup>采用的井筒压力与装药量简易模型和修正的复杂模型进行计算。简易模型的峰值压力模拟值为 110.4 MPa, 实测井下峰值压力达 132.2 MPa, 模拟精度为 83.5%; 修正的复杂模型峰值压力模拟值为 127.8 MPa, 模拟精度达 96.6%。

### 2.1.3 筛管地面打靶试验

为了验证海上油田筛管完井后爆燃压裂的可行性, 进行了前瞻性的筛管地面打靶试验研究<sup>[18-19]</sup>。10 余组打靶试验结果表明, 复合筛管在合适火药类型及用量情况下可进行爆燃压裂作业, 为国内外首次在采用复合筛管完井的油气井(HZ26-1-20Sb 井)进行爆燃压裂作业提供了参考<sup>[18]</sup>。

### 2.1.4 安全管柱组件及安全校核

#### 1) 安全管柱组件。

安全管柱组件包括钻杆、加厚变扣、纵向减振器、丢手装置、启动单元、压裂枪和空压裂枪, 以上工具需要根据井筒尺寸和施工模拟峰值压力合理优选。其中, 纵向减振器主要是为了防止管柱上窜,

减小纵向位移, 基于现场作业经验, 建议在起爆器上和距离起爆器 30 m 左右位置, 至少各放置一个; 丢手装置主要是为了防止在大斜度井或水平井作业时可能出现的卡枪而设置的; 空压裂枪是为了避免火药用量过于集中、瞬时压力过高而设置的; 压裂枪则根据井筒直径可选择  $\phi 50.8 \sim \phi 177.8$  mm 等不同外径, 但为了降低卡枪风险, 压裂枪直径宜比作业井段最小内径小 16.0 mm 以上。

此外, 传统爆燃压裂采用导爆索起爆方法, 导爆索属于高速燃烧的炸药, 产生的瞬时高压会对管柱产生较大影响, 因此, 采用比容小于 90 mL/g、爆热大于 6 242 J/g 的复合火药作为启动单元替换导爆索, 基本原理为“采用低威力、高热量的复合火药来点燃推进剂火药”, 即由火药启动单元的燃烧引燃推进剂火药, 避免了运输风险和爆轰高压。HZ26-1-20Sb 井在爆燃压裂作业过程中采用了这种创新模式。

#### 2) 管柱安全校核。

爆燃压裂会产生瞬时高峰值压力, 根据材料力学的薄壁应力计算公式判断施工管柱安全:

$$\sigma = \frac{p_{\max} D}{2h} \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为管柱应力, Pa;  $p_{\max}$  为峰值压力, Pa;  $D$  为管柱外径, mm;  $h$  为管柱壁厚, mm。

将海上油田试验井数据代入式(2)进行计算, 结果见表 2。HZ19-2-7Sa 井和 BZ34-2-B6 井这 2 口应用陆地油田爆燃压裂技术进行验证对比的井设计峰值压力较大, 且作业管柱设计采用屈服强度相对偏小的油管, 计算的管柱应力均大于管柱的最大屈服强度, 管柱存在安全风险; 其他 8 口试验井的峰值压力偏小, 且作业管柱设计采用屈服强度相对偏大的钻杆, 计算的管柱应力均小于管柱的最小屈服强度, 管柱安全。由此可见, 除了控制峰值压力以外, 海上油田的中深井、深井建议采用屈服强度高的钻杆作为施工管柱。

### 2.1.5 井口泄压方法

针对目前井口不坐封采油树可能存在的问题, 优化了井口泄压方法, 以防止井口喷溅带来的风险。目前, 海上油田井口泄压安全设计步骤为:

1) 拆除生产甲板井口采油树, 安装立管、压井管汇和节流管汇构成的管汇组件和井口防喷器组, 起生产管柱, 刮井作业后进行洗井, 将井筒内液体替换成一定密度的压井液, 起钻。

表2 海上油田试验井管柱校核数据

Table 2 Results of pipe string check in the test well of offshore oilfield

| 井号          | 作业管柱 |       |       | 管柱屈服强度/MPa |       | 爆燃压裂峰值压力/<br>MPa | 管柱应力/<br>MPa |
|-------------|------|-------|-------|------------|-------|------------------|--------------|
|             | 类型   | 外径/mm | 壁厚/mm | 最小         | 最大    |                  |              |
| HZ19-2-7Sa  | 油管   | 73.0  | 5.51  | 552        | 758   | 132.2            | 876          |
| BZ34-2-B6   | 油管   | 73.0  | 7.01  | 552        | 655   | 142.0            | 739          |
| LF13-1-26H  | 钻杆   | 88.9  | 9.35  | 930        | 1 137 | 60.0             | 285          |
| LF13-1-6    | 钻杆   | 88.9  | 9.35  | 930        | 1 137 | 50.2             | 239          |
| LF13-1-19H  | 钻杆   | 88.9  | 9.35  | 930        | 1 137 | 58.0             | 276          |
| HZ26-1-20Sb | 钻杆   | 73.0  | 9.18  | 930        | 1 137 | 43.2             | 172          |
| LH11-1-D5P1 | 钻杆   | 88.9  | 9.35  | 930        | 1 137 | 22.4             | 106          |
| WZ6-9-A6    | 钻杆   | 88.9  | 9.35  | 930        | 1 137 | 68.9             | 328          |
| QK18-2-P2   | 钻杆   | 88.9  | 17.46 | 930        | 1 137 | 71.3             | 182          |
| PY10-8-A3   | 钻杆   | 88.9  | 9.35  | 930        | 1 137 | 39.9             | 188          |

2) 下入爆燃压裂作业管柱。

3) 采用钻杆吊卡作为爆燃压裂作业时的悬挂工具, 双吊环上端连接顶驱下的吊环连接器压住钻杆, 以防止管柱上窜; 作业管柱上端通过高压软管和三通连接作业泵, 三通另一端口连接钻井液池。

4) 打开压井管汇和节流管汇的阀门, 将油套环空喷溅的液体导向钻井液池, 关闭万能防喷器。

5) 作业泵打压点火, 延时起爆的同时打开三通阀门, 将作业管柱内喷溅的液体泄压至钻井液池。

6) 泄压完成后, 起出作业管柱。

海上油田爆燃压裂施工工具如图1所示。海上油田井口泄压方法不采用封隔器、气体或充填物构建覆盖层密封油套环空, 套管压力可以正常释放, 解决了井口喷溅、管柱上窜等方面的问题, 能够防止井下管柱由于高压而导致的扭曲变形或封隔器解封困难等问题。

## 2.2 海上油田爆燃压裂高效增产技术

1) 低燃速推进剂火药。前人的研究结果表明<sup>[12-15]</sup>, 火药用量一定时, 燃烧速度越慢, 作用时间越长, 越容易形成更长的裂缝, 增产效果越显著。因此, 研制的新火药不仅具有耐高温、火药力低的特性, 还有燃速低的特点。密闭爆发器试验测定结果表明, 研制的新火药在压力为6 MPa时的燃速为4.4 mm/s, 而陆地油田常规火药在压力为6 MPa时的燃速大于6.0 mm/s。

2) 强化软件模拟。进行海上油田单井爆燃压裂设计时, 基于不同储层和井筒等条件变化, 结合新

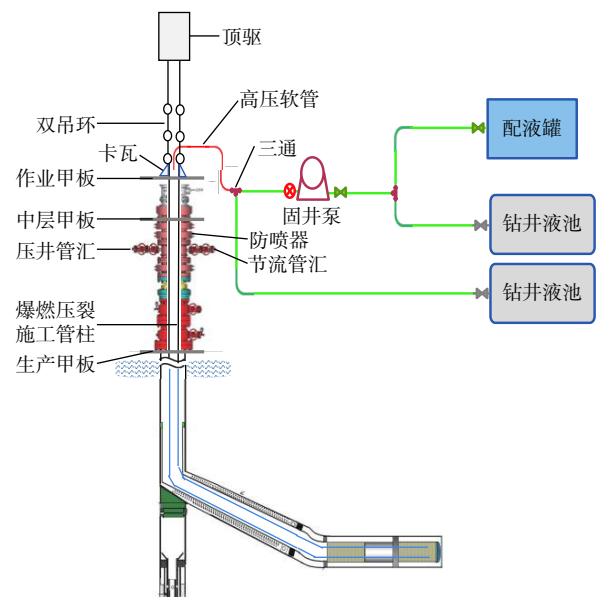


图1 海上油田爆燃压裂施工管柱示意

Fig. 1 Schematic diagram of deflagration fracturing string in offshore oilfields

火药的参数以及不同用量, 再采用海上油田爆燃压裂软件, 分别计算爆燃压裂峰值压力和裂缝情况, 考虑增产效果和管柱安全性2方面因素, 选择合适的火药用量。由于海上油田井深、井筒等与陆地油田存在差异, 峰值压力一般控制在地层破裂压力的1.1~1.5倍, 并进行管柱安全校核, 在不破坏管柱的限制压力下, 尽可能获得更好的增产效果。

3) 与酸化技术联作。酸化能够对爆燃压裂形成的裂缝进一步溶蚀扩缝, 并能解除近井堵塞、沟通渗流通道, 进一步提高增产效果。

3 现场试验

截至 2019 年 8 月底,海上油田爆燃压裂及其配

套技术在海上油田 8 口井进行了现场试验。8 口井完井方式包括套管完井和筛管完井,储层类型包括砂岩和灰岩。为了说明其效果,与采用陆地油田爆燃压裂技术的 2 口井进行了对比,结果见表 3。

表 3 海上油田爆燃压裂技术现场试验结果  
Table 3 Field test results of blasting fracturing in offshore oilfields

| 井号          | 酸化联作 | 火药 | 峰值压力/<br>MPa | 产液量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |       | 产油量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |       | 累计增产<br>油量/m <sup>3</sup> | 增产倍比 | 作业后管柱<br>情况 |
|-------------|------|----|--------------|----------------------------------------|-------|----------------------------------------|-------|---------------------------|------|-------------|
|             |      |    |              | 作业前                                    | 作业后   | 作业前                                    | 作业后   |                           |      |             |
| HZ19-2-7Sa  | 否    | 陆地 | 132.2        | 70.6                                   | 250.9 | 28.3                                   | 59.0  | 16 658                    | 3.6  | 变形、破损       |
| BZ34-2-B6   | 否    | 陆地 | 142.0        | 32.7                                   | 83.8  | 22.8                                   | 26.8  | 2 023                     | 2.2  | 变形、破损       |
| LF13-1-26H  | 是    | 新  | 60.0         | 0                                      | 129.7 | 0                                      | 10.7  | 1 579                     | ∞    | 完好          |
| LF13-1-6    | 是    | 新  | 50.2         | 124.0                                  | 295.5 | 65.0                                   | 177.2 | 15 498                    | 2.4  | 完好          |
| LF13-1-19H  | 是    | 新  | 58.0         | 0                                      | 725.2 | 0                                      | 38.4  | 5 411                     | ∞    | 完好          |
| HZ26-1-20Sb | 是    | 新  | 43.2         | 0                                      | 338.5 | 0                                      | 32.4  | 21 845                    | ∞    | 完好          |
| LH11-1-D5P1 | 否    | 新  | 22.4         | 0                                      |       | 0                                      |       |                           |      | 完好          |
| QK18-2-P2   | 否    | 新  | 71.3         | 10.1                                   | 60.4  | 0.5                                    | 22.5  | 3 127                     | 6.0  | 完好          |
| PY10-8-A3   | 否    | 新  | 39.9         | 0                                      | 767.0 | 0                                      | 42.9  | 2 812                     | ∞    | 完好          |

8 口试验井应用爆燃压裂技术后恢复生产,7 口油井累计增油 68 953 m<sup>3</sup>;LH11-1-D5P1 井作业后因故关井,产量无法统计,但漏失量从作业前 0.19 m<sup>3</sup>/h 增加到作业后 0.48 m<sup>3</sup>/h。另外,WZ6-9-A6 井为水井,作业前压力 19.0 MPa 下无法注入,作业后压力 19.0 MPa 下稳定注水量为 40 m<sup>3</sup>/d,已累计增注水量 18 720 m<sup>3</sup>,经济效益显著。

由 8 口试验井与 2 口应用陆地油田爆燃压裂技术的对比井的压裂效果可知,海上油田爆燃压裂技术具有更安全、更高效的特点。试验井采用耐高温、低火药力、低燃速的推进剂火药并强化软件模拟,产生的峰值压力为 22.4~71.3 MPa,管柱均无安全问题;且平均增产倍比为 17.3 倍,平均单井增油 43.1 m<sup>3</sup>/d,单井增注水量 40 m<sup>3</sup>/d。而对比井产生的峰值压力高达 132.2~142.0 MPa,管柱在近火药段均发生严重变形及爆裂,裂口长 12.0 cm,宽 4.0 cm;平均增产倍比为 3.2 倍,平均单井增油 17.4 m<sup>3</sup>/d。对比井采用简易模型计算的峰值压力预测偏低,同时采用屈服强度偏低的油管作为施工管柱,管柱校核存在安全风险,也是管柱发生问题的重要原因。

此外,试验井中有 4 口油井和 1 口水井采用压裂酸化联作的方法,均观察到试注或井筒漏失速度不断增大的现象。LF13-1-6 井爆燃压裂前试注压力为 10.3 MPa 时排量为 0.1 m<sup>3</sup>/min,爆燃压裂后试

注压力为 10.3 MPa 时排量为 0.3 m<sup>3</sup>/min,酸化后试注压力为 12.8 MPa 时排量为 0.9 m<sup>3</sup>/min,说明压裂酸化联作的增产效果不断提升。HZ26-1-20Sb 井爆燃压裂前修井液漏失速度为 0.6 m<sup>3</sup>/h,爆燃压裂后漏失速度为 0.8 m<sup>3</sup>/h,酸化后漏失速度达 5.2 m<sup>3</sup>/h,修井液漏失速度不断增大,也说明爆燃压裂酸化联作具有更理想的增产效果。同时,酸化泵注压力从 13.6 MPa 降至 10.3 MPa,实施后产液量为 338.5 m<sup>3</sup>/d,产油量为 32.4 m<sup>3</sup>/d。截至目前,油井仍正常生产,且产出液中不含砂,累计增油量 21 845 m<sup>3</sup>,经济效益明显。

4 结论与建议

1)对海上油田爆燃压裂技术进行了攻关研究和现场试验,验证了该技术在海上油田具有较好的适应性,可应用于较多井况条件,并具有较好的增产效果。

2)针对于海上油田特殊开采方式和产量需求,采用耐高温、低火药力、低燃速火药和高精度爆燃压裂模拟模型,采用安全管柱组件并进行安全校核,采用已形成的海上油田井口泄压方法,强化软件模拟并与酸化技术联作,能增强技术安全性,提高增产效果。

3) 需要考虑井斜、完井方式等因素的影响, 进一步优化爆燃压裂模型, 提高模拟精度; 为了提高对不同井况的适应性, 还需要进行筛管井下打靶、裸眼地面打靶和裸眼井下打靶等试验。

4) 建议进一步研究爆燃压裂火药、模型、管柱安全和泄压方式, 扩大该技术的应用范围, 增强技术安全性, 提高压裂后的增产效果。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 路保平, 丁士东. 中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 1-9.  
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-9.
- [2] 赵光宇. 页岩气藏压裂动用程度及气体流动模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 96-103.  
ZHAO Guangyu. Study of a simulation of degree of fracturing production and resulting gas flow in shale gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 96-103.
- [3] 金军, 王冉. 超临界 CO<sub>2</sub> 注入与页岩气储层相互作用的研究进展[J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 363-366.  
JIN Jun, WANG Ran. Research progress of supercritical CO<sub>2</sub> injection and its interaction with shale gas reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(3): 363-366.
- [4] 秦发动, 吴晋军. 我院高能气体压裂技术十年发展综述[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1997, 12(3): 14-17, 52.  
QIN Fadong, WU Jinjun. Development of high energy gas fracturing (HEGF) in the past ten years[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute(Natural Science Edition), 1997, 12(3): 14-17, 52.
- [5] 刘发喜, 秦发动. 高能气体压裂施工工艺及其发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 1993, 15(2): 63-69, 75.  
LIU Faxi, QING Fadong. Construction technology and development tendency of high energy gas fracturing technique[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993, 15(2): 63-69, 75.
- [6] 蒲春生, 周少伟. 高能气体压裂最佳火药量理论计算[J]. 断块油气田, 2008, 15(1): 55-57.  
PU Chunsheng, ZHOU Shaowei. Effective range of gunpowder amount in high energy gas fracture[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(1): 55-57.
- [7] 邵重斌, 樊学忠, 吴淑新. 高能气体压裂技术和油层物性关系的研究[J]. 火炸药学报, 2002, 25(2): 69-70, 13.  
SHAO Chongbin, FAN Xuezhong, WU Shuxin. Study on the relationship between the high energy gas-fracture and the physical properties of oil layer[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(2): 69-70, 13.
- [8] 张发展, 高志光. 双级高能气体压裂技术及应用效果分析[J]. 钻采工艺, 2005, 28(5): 54-56.  
ZHANG Fazhan, GAO Zhiguang. Analysis of applied effects for two stage high energy gas fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(5): 54-56.
- [9] 孙林, 宋爱莉, 易飞, 等. 爆压酸化技术在中国海上低渗油田适应性分析[J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 60-62.  
SUN Lin, SONG Aili, YI Fei, et al. Analysis of deflagrate fracturing technology adaptability in China offshore low permeability of oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1): 60-62.
- [10] 蒲春生, 秦文龙, 邹鸿江, 等. 高能气体压裂增产措施中一氧化碳气体生成机制[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 100-102.  
PU Chunsheng, QIN Wenlong, ZOU Hongjiang, et al. Formation mechanism of carbon monoxide in high-energy gas fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 100-102.
- [11] 秦文龙, 蒲春生, 肖曾利, 等. 高能气体压裂中 CO 气生成及井口聚散规律研究[J]. 油田化学, 2007, 24(2): 127-130, 142.  
QIN Wenlong, PU Chunsheng, XIAO Zengli, et al. Formation and accumulation/disappearance of carbon monoxide around wellhead in course of high energy gas fracturing[J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(2): 127-130, 142.
- [12] 秦文龙, 蒲春生. 高能气体压裂中 CO 气体生成富集规律[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(3): 42-44.  
QIN Wenlong, PU Chunsheng. CO gas generation and accumulation laws in high-energy gas fracturing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(3): 42-44.
- [13] 吴飞鹏, 蒲春生, 陈德春, 等. 高能气体压裂合理装药量的设计与应用[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(1): 80-22.  
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun, et al. Design and application of a reasonable charge of high-energy gas fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1): 80-22.
- [14] 王爱华, 李瑩, 赵锋洛, 等. 用高能气体压裂模型研究裂缝条数[J]. 断块油气田, 2000, 7(5): 56-59.  
WANG Aihua, LI Dang, ZHAO Fengluo, et al. The study of number of fractures using high energy gas fracturing model[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2000, 7(5): 56-59.
- [15] 吴晋军, 廖红伟, 张杰. 水平井液体药高能气体压裂技术试验应用研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(1): 51-53.  
WU Jinjun, LIAO Hongwei, ZHANG Jie. Study and application of liquid power high energy gas fracturing technology in horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(1): 51-53.
- [16] 孙林, 黄波, 熊培祺. 爆燃压裂起裂模型常见问题分析与修正[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 133-138.  
SUN Lin, HUANG Bo, XIONG Peiqi. Common problems analysis and correction of deflagration fracturing crack initiation model[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1): 133-138.
- [17] 黄波, 熊培祺, 孙林. 海上砂岩油藏爆燃压裂数值模拟技术研究[J]. 中国科技论文, 2018, 13(11): 1317-1324.  
HUANG Bo, XIONG Peiqi, SUN Lin. Numerical simulation technology of deflagration fracturing in offshore sandstone reservoir[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(11): 1317-1324.
- [18] 孙林, 杨万有, 易飞, 等. 筛管完井爆燃压裂技术可行性研究[J]. 特种油气藏, 2017, 24(4): 161-165.  
SUN Lin, YANG Wanyou, YI Fei, et al. Feasibility research on liner-completion deflagration fracturing technique[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(4): 161-165.
- [19] 张杰, 黄利平, 周际永, 等. 筛管完井高能气体压裂模拟实验研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 66-68.  
ZHANG Jie, HUANG Liping, ZHOU Jiyong, et al. Simulation study on high energy gas fracturing in screen completed wells[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 66-68.

[编辑 滕春鸣]