

## 油气压裂高压管汇连接由壬力学性能分析与结构改进

何 跃<sup>1</sup> 陈 博<sup>1</sup> 谭世武<sup>1</sup> 陈 彤<sup>2</sup> 王美玲<sup>2</sup>

(1. 中国石油集团西部钻探工程有限公司 井下作业公司, 克拉玛依 834000)

(2. 西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

**摘要:**【目的】针对1502型油气压裂高压管汇连接由壬在现场高内压与强振动符合载荷下频繁发生疲劳断裂和刺漏失效、严重危害作业安全的问题,开展高内压与安装预紧力复合作用下的由壬力学性能仿真研究,以明确其结构薄弱部位,并提出新的结构优化改进方案。【方法】首先,以FIG.1502型连接由壬为对象,利用转矩法反求确定了其装配目标预紧力(200 kN),结合现场最大实际作业内压(90 MPa)与高强钢40CrNi2Mo材料参数,建立了考虑非线性滑动摩擦接触、忽略螺纹升角的二维轴对称有限元精细化力学仿真模型,运用双时间步长增量求解器模拟了装配预紧与高压作业的连续受力全过程;然后,基于危险截面应力错位分布原则,设计了螺纹与密封错位的新结构,通过将密封槽内径由101.5 mm缩减至90.3 mm以增强壁厚、有效螺纹牙数由6扣增至7扣、优化母由壬端部斜面角度至125°,实现了多参数结构改进;最后,开展了全尺寸有限元力学性能对比与新疆吉木萨尔油田现场工业试验验证。【结果】仿真结果表明,原结构连接由壬的第1扣螺纹槽根部存在严重的应力集中,最大等效应力达559.5 MPa,接近材料屈服极限,应力集中系数高达5.181,此为现场螺纹发生疲劳断裂的主导因素;密封槽圆角处最大应力为244.08 MPa。新设计的螺纹与密封错位结构成功将最大应力从螺纹根部转移至增厚后的密封槽圆角处,使得由壬整体最大等效应力大幅减小至175.94 MPa(减小68.6%),整体应力集中系数减小至2.199(减小了57.6%);螺纹局部最大应力显著减小至165 MPa(减小了63.4%),各螺纹牙承载分布表现出高度的均匀性。现场试验结果表明,新型结构连接由壬在90 MPa最大压裂作业压力下连续稳定运行寿命突破460 h,比原来失效的旧由壬在相同工况下的疲劳寿命延长了近35%。

**关键词:** 高压管汇; 连接由壬; 力学性能分析; 结构改进; 压裂作业**中图分类号:** TG31 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.06.016

## 0 引言

连接由壬在压裂作用中,用于连接压裂泵和高压管汇,其主要由公由壬、母由壬、翼形螺母、密封圈组成,如图1所示。压裂泵由于其工作压力高、振动大以及管路中存在液流脉动等特点,常常会加剧高压管汇的振动,使高压管汇承受多变高载荷。因此,在连接由壬的工作过程中,会承受压裂泵产生的高压作用,压裂液的脉动作用,以及在安装连接由壬时预紧力的作用。在这些外力的复合作用下,极易导致连接由壬的断裂、泄漏、刺漏等失效形式的发生,并由于高压可能导致的零件飞溅,造成人员伤亡等重大的安全事故。

常用分析连接由壬螺纹处力学性能的方法是有有限元仿真分析。蒋合艳等<sup>[1]</sup>在现场工作中发现,锤击

由壬约有90%未达到预期设计寿命而提前损坏,更换频繁,因此,基于有限元分析,提出一种用由壬整体模型的1/4对由壬紧帽、由壬公接头、由壬母接头之间的应力和应变分布状态进行模拟计算分析的方法。段巍等<sup>[2]</sup>针对钢拉杆在螺纹联接处的应力状态及应力分布规律,设计了一种模型处理方法,其忽略螺纹升角的影响,将力学模型作为轴对称问题处理,来分析并比较不同载荷及不同旋合扣数下螺纹牙的应力特征。李维俊等<sup>[3]</sup>为了分析螺杆连接的铸件内螺纹的螺纹应力与旋合深度之间的关系,分析螺纹牙应力分布状况,构建了一种将螺纹牙根最大应力作为优化目标的简化模型计算方法。杨强等<sup>[4][5]</sup>为改善螺纹牙不合理的载荷分布以及应力集中现象,分别针对螺纹进行轴向切削和径向切削,以改善螺纹的应力分布,使得螺纹牙承载更加均匀。

收稿日期: 2024-10-18 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974272)

作者简介: 何跃,男,1983年生,四川南充人,高级工程师;主要研究方向为石油钻采设备无损检测和井下工具产品质量检验等; E-mail: heyue@cnpc.com.cn。

陈彤(通信作者),男,2001年生,四川广安人,在读硕士研究生;主要研究方向为压裂泵及其出口高压管汇等; E-mail: 1261620202@qq.com。

引用格式: 何跃,陈博,谭世武,等. 油气压裂高压管汇连接由壬力学性能分析与结构改进[J]. 机械强度, 2026, 48(6): 150-158.

HE Yue, CHEN Bo, TAN Shiwu, et al. Mechanical performance analysis and structural improvement of connection unions for high-pressure manifolds in oil and gas fracturing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(6): 150-158.



免费获取

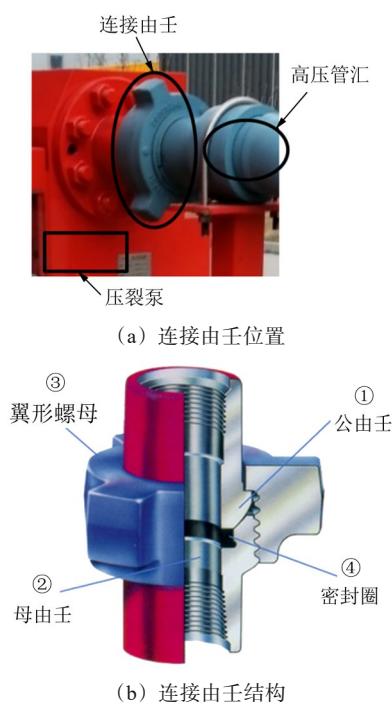


图 1 现场压裂泵出口连接由壬的安装位置与组件结构简图

Fig. 1 Field installation position and detailed structural components of connection union

目前,国内外的研究主要集中在对大型井下的连接,对连接由壬的研究较少,特别是在高内压、高预紧力的共同作用下;针对连接由壬失效分析及密封的设计比较多。谭爱芳等<sup>[6]</sup>对高压管汇公由壬端进行了失效分析并进行了材料优选;冯志成<sup>[7]</sup>探究了密封圈硬度、压缩量、圆角半径对高压由壬密封的影响。而螺纹部分作为连接由壬的关键部位之一,其针对性的研究相对有限。

因此,针对 FIG1502 型连接由壬现场断裂的问题,开展在高内压、高预紧力共同作用下,连接由壬的力学性能分析,找出薄弱部位。在此基础上,开展连接由壬结构改进设计,进一步提高压裂泵出口连接由壬的安全性,确保压裂作业的安全顺利实施。

## 1 连接由壬的失效统计分析

根据新疆克拉玛依油田现场统计分析发现,压裂泵出口高、低压管汇故障部位,主要分布在压裂泵液力端出口、高、低压管汇和弯头弯管处等,包括压裂泵出口液力端和高、低压管汇处连接由壬的断裂失效、刺漏失效,以及压裂泵出口弯管的冲蚀失效、软管的断裂失效。其 2024 年 7 月、8 月详细失效部位统计如表 1 所示。

在各种失效形式中,压裂泵液力端以及高低压管汇处,由壬母螺纹发生断裂、刺漏,现场失效统计分别占比 37%、43%,占总失效数的 80%,可见由壬是压裂作业的薄弱环节。现场液力端母由壬螺纹的断裂、刺漏情况如图 2 所示。

表 1 高压管汇关键部件失效形式与数量统计

Tab. 1 Statistical distribution of typical failure forms and locations in high-pressure manifolds

| 失效部位      | 主要失效形式 | 失效数量 | 占比/% |
|-----------|--------|------|------|
| 压裂泵液力端出口  | 断裂     | 7    | 37   |
| 连接由壬      |        |      |      |
| 弯头        | 刺漏     | 2    | 10   |
| 软管        | 断裂     | 2    | 10   |
| 单向阀出口由壬   | 刺漏     | 3    | 16   |
| 旋塞阀出口由壬   | 刺漏     | 3    | 16   |
| 高低压管汇侧翼由壬 | 刺漏     | 2    | 11   |



(a) 母由壬螺纹断裂



(b) 母由壬螺纹刺漏

图 2 母由壬失效图

Fig. 2 Failure diagram of female union

由壬螺纹的刺漏和断裂,一方面影响压裂作业的正常实施,导致设备故障,缩短其使用寿命。另一方面也带来严重的安全问题,引发设备事故,危及人员生命安全,甚至引发机毁人亡事故。

连接由壬的失效与其工作时的受力状态有关,工作时设备的振动与高压流体的脉动,不可避免地引起连接由壬的疲劳破坏,导致连接由壬发生刺漏和断裂。根据现场的失效情况,连接由壬的薄弱部位为螺纹与密封。据此,开展 1502 型连接由壬在高内压与高预紧力共同作用下工作时的力学性能分析,并在此基础上,开展连接由壬结构改进设计,减小其最大应力,改善应力分布情况,增强连接由壬抵抗疲劳破坏的能力,延长其使用寿命。

## 2 连接由壬力学性能仿真模型建立

### 2.1 几何模型的建立与工作原理

以 FIG1502 型连接由壬建立力学仿真模型,其主要由翼形螺母、母由壬、公由壬组成。母由壬按 API Spec 7 标准<sup>[8]</sup>执行,其牙型为 53/8 ACME-3G,牙型角

为 $29^\circ$ ,翼形螺母和由壬公头进行简化处理,整体连接由壬如图3所示。

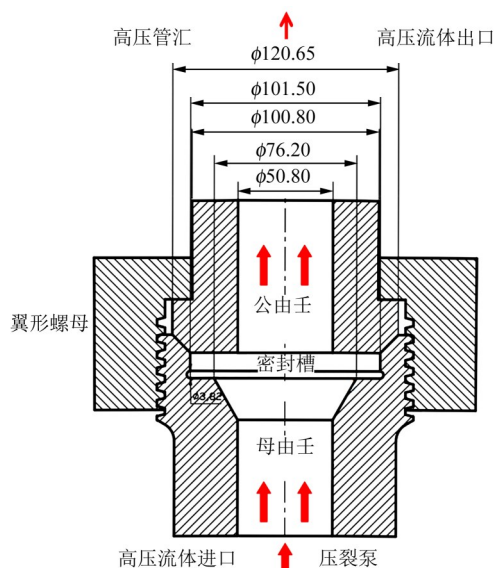


图3 连接由壬几何模型及尺寸

Fig. 3 Geometric model and dimensions of the connecting union

连接由壬通过其螺纹连接与密封机制,实现管道的快速连接和拆卸,同时保证了连接的强度和密封性,完成压裂泵往高压管汇输送高压流体的功能。

## 2.2 力学仿真模型参数确定

### 2.2.1 预紧力 $F$ 的确定

出口法兰连接由壬工作的主要参数有连接由壬预紧力 $F$ 和作业内压 $P$ 。本文通过转矩法<sup>[9]</sup>确定连接由壬的预紧力 $F$ 。

转矩-预紧力对应关系为

$$T = KFD \quad (1)$$

式中, $T$ 为拧紧转矩; $K$ 为转矩系数; $F$ 为预紧力; $D$ 为螺栓公称直径。

总转矩 $T$ 的表达式为

$$T = T_p + T_t + T_b \quad (2)$$

式中, $T_p$ 为作用于螺纹牙上的转矩; $T_t$ 为螺纹间摩擦转矩; $T_b$ 为支撑端面摩擦转矩。

德标 VDI 2230 中的转矩表达式为

$$T = F(0.16P_d + 0.58\mu_t d_2 + 0.5\mu_b d_u) \quad (3)$$

式中, $P_d$ 为螺距; $\mu_t$ 为螺纹摩擦因数; $d_2$ 为螺纹中径; $\mu_b$ 为支撑面摩擦因数; $d_u$ 为支撑端面摩擦转矩的等效直径。

提出摩擦因数的简化计算式。假定螺纹摩擦因数 $\mu_t$ 与支撑面摩擦因数 $\mu_b$ 一致,通过总摩擦因数 $\mu_m$ 评估螺栓螺母在拧紧时总体的摩擦行为,其表达式为

$$T = F(0.16P_d + 0.58\mu_m d_2 + 0.5\mu_m d_u) \quad (4)$$

通过查阅《由壬使用说明书》,FIG1502型连接由壬的额定安装拧紧转矩范围为2 400~3 000 N·m。根

据连接由壬规格及标准《APISPEC7HU2》,获得其螺距 $P_d = 8.47$  mm、螺纹中径 $d_2 = 134$  mm、总摩擦因数 $\mu_m = 0.3$ ,代入式(4)逆向求得连接由壬的额定安装预紧力 $F = 200$  kN。

### 2.2.2 内压 $P$ 的确定

目前吉木萨尔油田压裂作业现场作用压力 $P$ 主要在80~90 MPa,取最大内压 $P = 90$  MPa时进行计算。

### 2.2.3 材料参数的确定

连接由壬材料为40CrNi2Mo,其力学性能参数:弹性模量为210 GPa;泊松比为0.29;屈服强度为980 MPa;伸长率、端面收缩率分别为12%、55%。

### 2.2.4 连接由壬应力集中系数 $K$ 的确定

连接由壬应力集中系数的计算式为

$$K = \sigma_c / S_n \quad (5)$$

式中, $\sigma_c$ 为齿根处的最大 von-Mises 应力; $S_n$ 为均匀载荷下的远场应力。

## 2.3 边界条件与求解

计算中考虑连接由壬工作中受到的预紧力 $F$ 、内压力 $P$ 与固定约束,模型预紧力 $F$ 的施加方法是把标准转矩转化为模型的轴向压应力<sup>[5][118-121]</sup>,施加在翼形螺母的端部,管道内侧施加均匀内压力 $P$ ,母由壬底部固定约束。

在翼形螺母与母由壬的螺纹啮合处、由壬母头与公头的接头处、翼形螺母与由壬公头凸台处建立滑动摩擦接触对,螺纹啮合处摩擦因数为0.3,其余均为0.1。

连接由壬仿真求解器设置为2个时间步,第1时间步为预紧力 $F$ 的施加过程,第2时间步为内压力施加过程。当达到设定预紧力 $F$ 后,即开始第2时间步内压力 $P$ 施加过程,直到达到设定的内压强 $P$ 的大小。此时的情况与现场连接由壬安装和工作受力情况一致。

## 2.4 网格划分与网格独立性验证

连接螺纹升角一般约为 $3^\circ$ ,该角度较小时,对计算结果影响很小,因此可简化处理,在建模时忽略升角的影响。当不考虑螺纹升角时,内、外螺纹的啮合模型可以近似处理为轴对称结构,采用8节点四边形单元对2D模型进行自由网格划分;整体采用1 mm的六面体网格,为了更加准确地计算螺纹处应力情况,并在螺纹部分对单元进行局部细分,对内、外螺纹啮合部分采用单元边长为0.05~0.1 mm的网格,其网格划分及载荷分布如图4所示。

对连接由壬模型施加200 kN的预紧力 $F$ 与90 MPa内压力 $P$ ,此时连接由壬最大应力为559.5 MPa,网格数为53 972。在不改变边界条件时,改变网格尺寸,依旧采用8节点四边形单元对2D模型进行自由网格划分,结果如图5所示,在连接由壬力学仿真模型网

格数在 50 000~70 000 时,其最大应力模拟结果差异小于 5%,说明在此网格数之间,网格独立性较好。

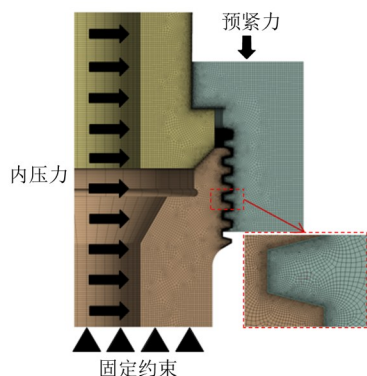


图 4 有限元网格及载荷分布

Fig. 4 Finite element mesh and load distribution

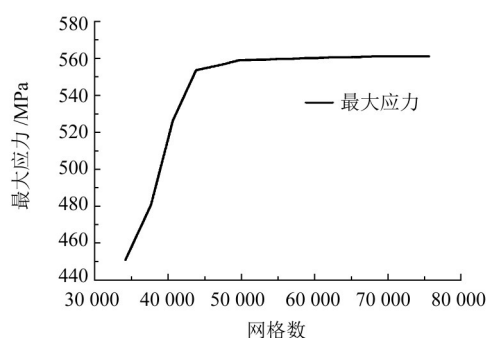


图 5 网格独立性验证

Fig. 5 Mesh independence verification

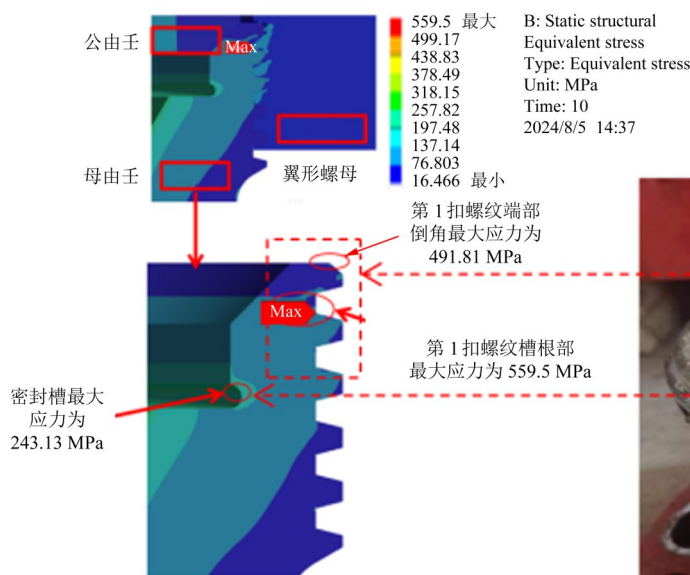


图 6 原结构连接由壬在复合载荷下的有限元等效 von-Mises 应力云图与实物断裂形貌对比

Fig. 6 Comparison between finite element equivalent von-Mises stress contour plot of original structural connecting union under combined loads and physical fracture morphology

### 3.2 连接由壬螺纹处受力分析

当内压强  $P = 90$  MPa, 预紧力  $F = 200$  kN 时, 后处理中, 选取沿母由壬螺纹边缘线段部分, 设置应力云图路径 1→2, 并提取出数据整理, 探究其应力变化、分布规律, 结果分析如图 7 所示。母由壬前 3 扣螺纹牙应力水平偏高<sup>[11]</sup>, 应力集中明显, 承受了较大的

## 3 连接由壬力学性能分析

### 3.1 连接由壬受力位置与疲劳破坏分析

在内压强为 90 MPa、预紧力为 200 kN 时, 连接由壬在密封槽附近及螺纹牙的前 3 扣上应力较大, 承受了较大的力, 最大等效应力出现在第 1 扣螺纹槽根部,  $\sigma_{\max} = 559.5$  MPa, 接近材料的屈服强度, 在振动的作用下易发生疲劳破坏, 通过计算得到此时连接由壬应力集中系数  $K = 5.508$ , 次大应力出现在第 1 扣螺纹端部倒角,  $\sigma_{\max} = 491.81$  MPa, 与最大应力较为接近, 密封槽处最大应力  $\sigma_{\max} = 243.13$  MPa。虽然相较螺纹部位应力较小, 但对于连接由壬其他部位, 应力水平仍较高。

仿真结果表明, 连接由壬的薄弱部位主要为螺纹部位以及密封槽部位, 其应力水平远远高于其他部位, 仿真预测与连接由壬现场情况一致, 连接由壬疲劳破坏的部位恰好为仿真结果中应力较大的部位, 如图 6 所示。由于母由壬螺纹牙应力过大, 导致应力集中, 在设备的振动与高压流体的脉动下发生疲劳破坏, 使得螺纹连接不能保证其连接的强度<sup>[10]</sup>, 密封槽处承受巨大的应力, 从而在密封槽最薄弱的圆角处出现裂纹, 发生断裂。

力。最大应力出现在第 1 扣螺纹牙上, 最大应力  $\sigma_{\max} = 450.49$  MPa, 此时应力集中系数  $K = 4.171$ 。第 4、5、6 扣螺纹牙上应力水平较小, 其中第 6 扣应力仅为 70.64 MPa, 螺纹牙上最大应力起伏较大, 应力分布不均。说明在该结构下, 整个连接由壬的螺纹承载十分不均匀。

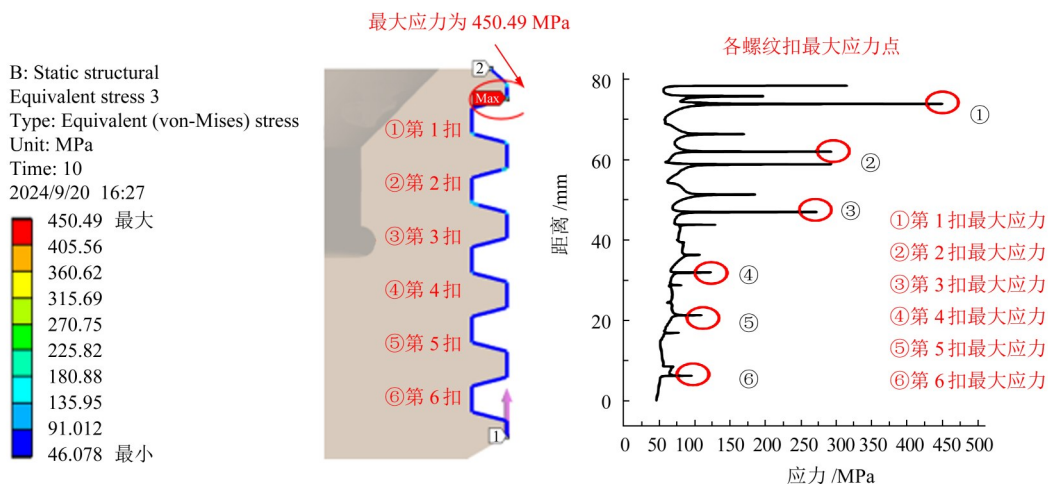


图7 原结构母由壬沿各扣螺纹网格路径的等效 von-Mises 应力分布曲线

Fig. 7 Von-Mises equivalent stress distribution curves of original female sub along threaded path

### 3.3 连接由壬密封槽受力分析

当内压强  $P = 90$  MPa, 预紧力  $F = 200$  kN 时, 在后处理中, 选取沿母由壬密封边缘线段部分, 设置应力云图路径 1→2, 并提取出数据整理, 探究其应力变化、分布规律, 结果分析如图 8 所示。密封槽圆角处其应力水平激增, 并且出现多个应力集中点, 最大应力出现在圆角的上半部, 应力值  $\sigma_{\max} = 244.08$  MPa, 此时应力集中系数  $K = 2.555$ 。密封槽圆角处多个点承受了较大的力, 易出现应力集中现象<sup>[12]</sup>, 如果螺纹先失效, 此处将会承受更大的力, 在振动的作用下很容易发生疲劳断裂。

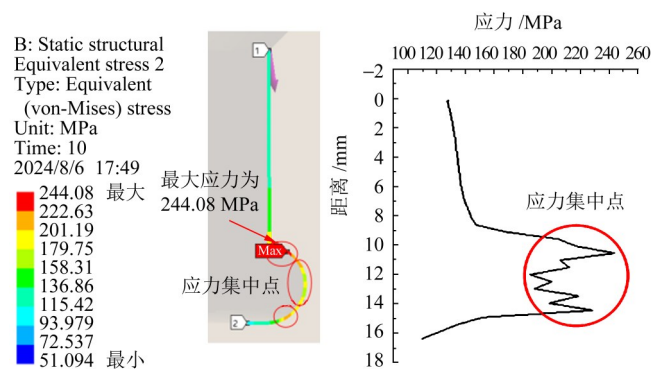


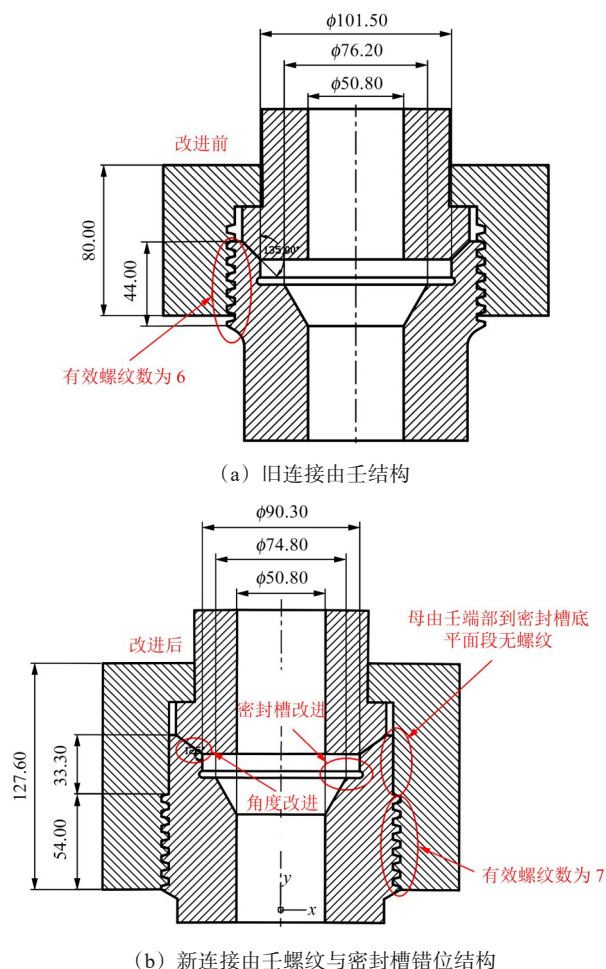
图8 连接由壬密封槽路径应力分布图

Fig. 8 Stress distribution diagram of the connecting joint along the sealing groove path

### 4 新连接由壬错位结构设计

新连接由壬螺纹与密封槽错位结构改进前、后对比, 其结构尺寸如图 9 所示。该结构旨在让由壬 2 个薄弱部位 (密封槽、螺纹部分) 不在同一个径向方向上, 即不在密封槽所对应的母由壬处设计外螺纹, 而在密封槽以下设计螺纹, 避免 2 个危险部位应力集中点同时出现在母由壬最薄弱处的径向方向上<sup>[13]</sup>。在此基础上, 将密封槽内径由 101.5 mm 减小至 90.3 mm, 从

而显著增加密封槽处的局部管壁厚度, 增强其抵抗应力集中的能力; 螺纹牙数由 6 扣增加到 7 扣, 让更多的螺纹牙承载; 调整母由壬端部斜面角度为  $125^\circ$ , 改善公由壬与母由壬之间的受力状况, 并解决母由壬连接端过长的问题, 其改进后参数如表 2 所示。



(b) 新连接由壬螺纹与密封槽错位结构

图9 改进前、后连接由壬的几何拓扑结构与错位改型尺寸对比简图  
Fig. 9 Schematic comparison of geometric topology and misalignment modification dimensions of connecting unions before and after improvement

表 2 螺纹部分主要的改进结构参数

Tab. 2 Main improved structural parameters for the threaded

| section |              |       |
|---------|--------------|-------|
| 零件      | 主要部位         | 改进尺寸  |
| 母由壬     | 螺纹长度/mm      | 54    |
|         | 端部斜面角度/(°)   | 125   |
|         | 密封槽内径/mm     | 90.3  |
|         | 无螺纹处直线段长度/mm | 33.3  |
|         | 有效螺纹扣数       | 7     |
|         | 管壁厚度/mm      | 16    |
| 翼形螺母    | 轴向长度/mm      | 127.6 |

## 5 新连接由壬力学性能分析

### 5.1 连接由壬受力位置与疲劳破坏分析

新连接由壬在内压强  $P = 90$  MPa, 预紧力  $F = 200$  kN 时, 应力云图如图 10 所示。由图 10 可知, 新连接由壬母由壬外螺纹直线段与密封槽处应力较大<sup>[14]</sup>, 螺纹部分在根部存在应力集中区域, 最大应力出现在密封槽圆角处, 应力值  $\sigma_{\max} = 175.94$  MPa, 次大应力在第 1 扣螺纹牙上, 应力值  $\sigma_{\max} = 165$  MPa。通过计算得到新连接由壬应力集中系数  $K = 2.19$ 。

结果表明, 新连接由壬密封槽的圆角处应力水平最高, 为主要受力位置, 螺纹根部最大应力略低于密封槽部位, 因此预测新连接由壬不会由于螺纹过早的疲劳破坏而失效, 进而避免了密封槽因承受过大载荷

而发生疲劳断裂<sup>[15]</sup>的连锁反应, 有效提升了连接由壬抵抗疲劳破坏的能力, 并且密封槽管壁的增厚, 也加强了其抵抗应力集中的能力。

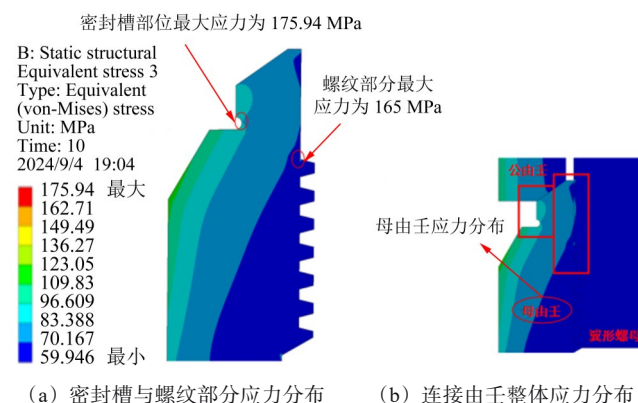


图 10 新连接由壬应力云图

Fig. 10 Stress contour plot of the newly connected joint

### 5.2 连接由壬螺纹处受力分析

在内压强  $P = 90$  MPa, 预紧力  $F = 200$  kN 时, 沿母由壬螺纹部分设置路径 1→2, 探究其应力变化、分布规律, 结果分析如图 11 所示。由图 11 可知, 新连接由壬螺纹部分最大应力出现在螺纹牙起始根部, 最大应力  $\sigma_{\max} = 165$  MPa, 应力集中系数  $K = 2.06$ 。新连接由壬直线段上均匀承载, 应力没有发生太大变化, 其 7 扣螺纹牙均承载, 且最大应力相差不大, 只有第 1 扣螺纹牙应力水平略高于其他螺纹牙, 母螺纹应力分布更加均匀<sup>[16]</sup>。结果表明, 新连接由壬的错位结构能够有效改善其螺纹受力状况, 承载更加均匀。

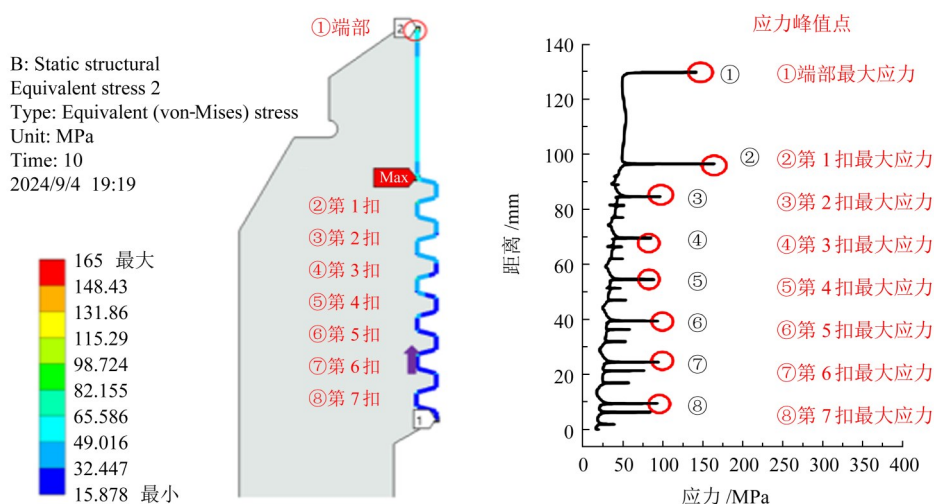


图 11 新连接由壬螺纹处应力分布对比

Fig. 11 Comparison of stress distribution at the joint thread of the new connection

### 5.3 连接由壬密封槽受力分析

在内压强  $P = 90$  MPa, 预紧力  $F = 200$  kN 时, 沿母由壬密封槽部分设置路径 1→2, 探究其应力变化、分布规律, 结果分析如图 12 所示。由图 12 可知, 由于新连接

由壬密封槽所对应的外部没有开设螺纹, 工作中密封槽圆角处受力位置发生改变, 最大应力出现在密封槽圆角的下半部, 密封槽处最大应力  $\sigma_{\max} = 175.94$  MPa, 应力集中系数  $K = 2.20$ , 密封槽直线段应力几乎不发生改变,

维持在 110 MPa 左右,到达圆角后应力发生波动,呈先变小再变大的规律,并出现多个应力集中点。

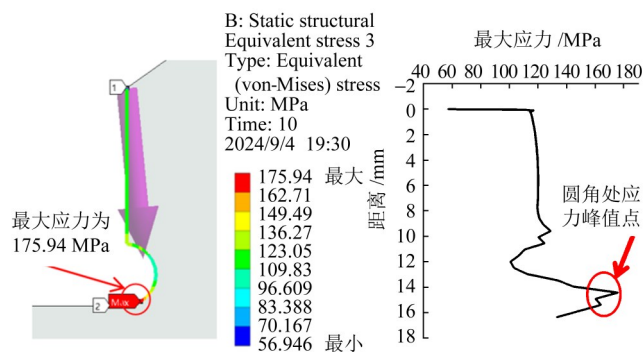


图 12 新、旧连接由壬密封槽处应力分布对比

Fig. 12 Comparison of stress distribution at the joint sealing groove of the new and old connection union

## 6 新、旧连接由壬力学性能对比

### 6.1 整体应力特征对比

旧连接由壬最大应力出现在第 1 扣螺纹槽根部,新连接由壬最大应力从螺纹部位转移到了密封槽部位,说明新连接由壬对于螺纹部位最大应力的减小具有显著的效果<sup>[17]</sup>。

新、旧连接由壬整体应力特征对比如表 3 所示。由表 3 可知,新连接由壬最大应力明显减小,由改进前的最大应力  $\sigma_{\max}$  为 559.5 MPa,减小至 175.94 MPa,减小了 68.6%;应力集中系数  $K$  也由 5.181 减小至 2.199,减小了 57.6%。这表明,新连接由壬的螺纹与密封槽错位结构能够减小最大应力、降低应力集中程度。

表 3 新、旧连接由壬整体应力特征对比

Tab. 3 Comparison of overall stress characteristics of new and old connection unions

|                           | 原结构        | 螺纹与密封槽错位设计结构 |
|---------------------------|------------|--------------|
| 最大应力 $\sigma_{\max}$ /MPa | 559.5      | 175.94       |
| 远场应力 $S_n$ /MPa           | 108        | 80           |
| 应力集中系数 $K$                | 5.181      | 2.199        |
| 最大应力部位                    | 第 1 扣螺纹槽根部 | 密封槽圆角处       |

### 6.2 螺纹部位应力特征对比

新、旧连接由壬螺纹部位应力特征对比如表 4 所示。由表 4 可知,旧连接由壬螺纹部分最大应力出现在第 1 扣螺纹槽根部,最大应力  $\sigma_{\max} = 450.78$  MPa,新连接由壬螺纹部分最大应力出现在螺纹牙起始根部,最大应力  $\sigma_{\max} = 165$  MPa,减小了 63.4%;应力集中系数  $K$  从 4.174 减小至 2.06,减小了 50.6%。

对比新、旧连接由壬螺纹牙上应力分布情况,旧连接由壬前 3 扣母螺纹应力水平远大于其余螺纹扣,承载不均匀。新连接由壬每一扣螺纹牙平均承载,第 1 扣应

力水平略高于其他螺纹扣应力水平,但每一扣最大应力水平相较旧由壬都有所降低,螺纹牙应力分布更加均匀。

表 4 结构改进前、后连接由壬螺纹关键啮合区的应力特征参数对比

Tab. 4 Comparison of stress characteristic parameters in key meshing thread zones of connecting unions before and after structural improvement

|                           | 原结构        | 螺纹与密封槽错位设计结构 |
|---------------------------|------------|--------------|
| 最大应力 $\sigma_{\max}$ /MPa | 450.78     | 165          |
| 远场应力 $S_n$ /MPa           | 108        | 80           |
| 应力集中系数 $K$                | 4.174      | 2.06         |
| 最大应力部位                    | 第 1 扣螺纹槽根部 | 螺纹牙起始根部      |

### 6.3 密封槽部位应力特征对比

新、旧连接由壬密封槽部位应力特征对比如表 5 所示。由表 5 可知,新、旧连接由壬密封槽处最大应力分别出现在圆角的下半部和上半部,旧连接由壬密封槽处最大应力  $\sigma_{\max} = 244.08$  MPa,新连接由壬密封槽处最大应力  $\sigma_{\max} = 175.94$  MPa,减小了 27.9%;应力集中系数  $K$  从 2.26 减小至 2.20。

表 5 结构改进前、后连接由壬密封槽关键圆角区的应力特征参数对比

Tab. 5 Comparison of stress characteristic parameters at key fillet regions of sealing grooves for connecting unions before and after structural improvement

|                           | 原结构    | 螺纹与密封槽错位设计结构 |
|---------------------------|--------|--------------|
| 最大应力 $\sigma_{\max}$ /MPa | 244.08 | 175.94       |
| 远场应力 $S_n$ /MPa           | 108    | 80           |
| 应力集中系数 $K$                | 2.26   | 2.20         |
| 最大应力部位                    | 密封槽圆角处 | 密封槽圆角处       |

对比新、旧连接由壬密封槽上应力分布情况,旧连接由壬在密封槽圆角部位出现多个应力集中点,易导致密封槽圆角处应力集中,在振动的作用下滋生裂纹,而新连接由壬不但最大应力有所减小,而且密封槽处应力分布更加平滑,在圆角处应力集中点也有所减少。

## 7 现场试验

新疆吉木萨尔油田的连接由壬在改进前,平均寿命约为 340 h。连接由壬改进后,对新连接由壬在新疆吉木萨尔油田展开了现场试验(图 13),新连接由壬预紧力正常施加,在压裂作用最大压强  $P$  为 90 MPa 下连续运行了 460 h,比原来失效的连接由壬在相同工况下的使用寿命延长了 35%。试验表明,新结构提高了连接由壬的抗疲劳能力,增强了连接由壬的可靠性。



图13 现场试验

Fig. 13 Field test

## 8 结论

针对1502型连接由壬现场失效问题,运用数值模拟与试验的方法,建立了连接由壬力学性能仿真模型;开展了在高内压与高预紧力共同作用下,连接由壬的力学性能研究,并找到了连接由壬的薄弱部位。在此基础上,对连接由壬的结构进行了改进设计,与旧连接由壬结构进行了对比分析,得出以下主要结论:

1)连接由壬主要失效形式为疲劳断裂与刺漏,薄弱部位主要为螺纹部位以及密封槽部位,仿真结果与现场失效部位一致。该数值模拟方法能够有效预测连接由壬的失效部位。

2)创新设计的错位结构,其螺纹设计在密封槽靠下位置,密封槽内径减小,螺纹牙数增加,并且调整了母由壬端部斜面角度。新连接由壬经过现场试验,其使用寿命延长了35%。

3)新连接由壬的错位结构设计,可以减小应力,改善受力,有效避免应力集中同时出现在径向方向。整体最大应力 $\sigma_{\max}$ 减小了68.6%,应力集中系数 $K$ 减小了57.6%。螺纹部位最大应力减小了63.4%,受力更加均匀。密封槽处应力集中程度得到降低,最大应力 $\sigma_{\max}$ 减小了27.9%。

## 参考文献(References)

- [1] 蒋合艳,金鑫,杜文龙,等. 高压管汇连接由壬的接触分析[J]. 机械工程师,2018(7):136-138.  
JIANG Heyan, JIN Xin, DU Wenlong, et al. Contact analysis of high pressure manifold coupling union[J]. Mechanical Engineer, 2018(7):136-138. (In Chinese)
- [2] 段巍,温新林,唐贵基,等. 不同旋合扣数下钢拉杆螺纹联接强度试验及有限元应力分析[J]. 机械强度,2008,30(5):823-828.  
DUAN Wei, WEN Xinlin, TANG Guiji, et al. Strength test and FEM-based stress analysis of threaded connection for steel tie rod under different connection rounds [J]. Journal of Mechanical Strength,2008,30(5):823-828. (In Chinese)
- [3] 李维俊,汪小芳. 基于有限元分析的螺纹应力与旋合深度的研究

[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2022,23(2):56-60.

- LI Weijun, WANG Xiaofang. Research on thread stress and screwing depth based on finite element analysis [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2022, 23 (2):56-60. (In Chinese)
- [4] 杨强,苗德华,王艳丽,等. 螺母牙形及旋合长度对螺栓牙根部应力的影响[J]. 天津工程师范学院学报,2007,17(3):29-32.  
YANG Qiang, MIAO Dehua, WANG Yanli, et al. Influence of nut thread shape and screwing length on bolt root stress [J]. Journal of Tianjin University of Technology and Education, 2007, 17 (3): 29-32. (In Chinese)
- [5] 李明,严仁田,鲜奇飏,等. 钻具接头螺纹应力分析与结构优化 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):118-121.  
LI Ming, YAN Rentian, XIAN Qibiao, et al. Stress analysis and structure optimization of drilling connection [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2012, 14(5):118-121. (In Chinese)
- [6] 谭爱芳,冯玲. 高压管汇公由壬端的失效分析与改进措施[J]. 金属加工(热加工),2021(8):78-81.  
TAN Aifang, FENG Ling. Failure analysis and improvement measures of high-pressure piping system [J]. MW Metal Forming, 2021 (8):78-81. (In Chinese)
- [7] 冯志成. 高压管汇由壬连接密封设计及力学分析[D]. 荆州:长江大学,2020:5-30.  
FENG Zhicheng. Sealing design and mechanical analysis of union connection of high-pressure manifold [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020:5-30. (In Chinese)
- [8] American Petroleum Institute. Specification for rotary drill stem elements: API Spec 7[S]. 40th ed. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2001:98-120.
- [9] 黄稳,杜伟,凡志磊,等. 复合材料结构中螺栓拧紧的有限元仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(6):127-131.  
HUANG Wen, DU Wei, FAN Zhilei, et al. Finite element simulation research on bolt tightening of CFRP [J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(6):127-131. (In Chinese)
- [10] 张震,刘庆龙,易先中,等. 弯曲井段钻杆接头螺纹力学性能分析及结构优化[J]. 塑性工程学报,2023,30(4):209-222.  
ZHANG Zhen, LIU Qinglong, YI Xianzhong, et al. Mechanical property analysis and structure optimization of drill pipe joint thread in curved section [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(4):209-222. (In Chinese)
- [11] CHEN S J, LI Q, ZHANG Y, et al. Finite element analysis of tooth load distribution on P-110S conic threaded connections [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2011, 88(2/3):88-93.
- [12] GABRIEL C. The design of tubing and casing premium connections for HTHP wells [C]//Proceedings of the 2005 SPE High Pressure/High Temperature Sour Well Design Applied Technology Workshop. New York:IEEE,2005:17-19.
- [13] 王璇. 套管钻井连接螺纹工作力学分析和疲劳寿命预测[D]. 大庆:东北石油大学,2020:5-6.  
WANG Xuan. Mechanics analysis and fatigue life prediction of casing drilling connection thread joint [D]. Daqing: Northeast

- Petroleum University, 2020: 5-6. (In Chinese)
- [14] 张佳浩. 特殊螺纹接头密封性能和连接强度研究及设计参数优化[D]. 西安:西安石油大学, 2021: 10-20.
- ZHANG Jiahao. Study on sealing performance and connection strength of premium connection and design parameter optimization [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021: 10-20. (In Chinese)
- [15] 王声平, 熊晓东, 石祥密, 等. 金属疲劳极限与常规性能的相关性研究[C]//第三届全国机械工程材料青年学术年会论文集. 北京:冶金工业出版社, 1998: 152-157.
- WANG Shengping, XIONG Xiaodong, SHI Xiangmi, et al. Study on the correlation between metal fatigue limit and conventional performance [C]//Proceedings of the 3rd National Youth Academic Annual Conference on Mechanical Engineering Materials. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 152-157. (In Chinese)
- [16] 侯红玲, 陈鑫, 常向龙, 等. 冷挤压内螺纹力学性能试验研究[J]. 机械设计与制造, 2024(2): 105-110.
- HOU Hongling, CHEN Xin, CHANG Xianglong, et al. Experimental research on mechanical properties of cold extruding internal thread[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(2): 105-110. (In Chinese)
- [17] 李书博, 刘茜, 景国玺, 等. 宽幅温度和应力范围内蠕墨铸铁的蠕变试验及本构模型对比研究[J]. 机械强度, 2024, 46(1): 70-76.
- LI Shubo, LIU Qian, JING Guoxi, et al. Research on creep test and constitutive model comparison of compacted graphite cast iron under wide temperature and stress range[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(1): 70-76. (In Chinese)

## Mechanical performance analysis and structural improvement of connection unions for high-pressure manifolds in oil and gas fracturing

HE Yue<sup>1</sup> CHEN Bo<sup>1</sup> TAN Shiwu<sup>1</sup> CHEN Tong<sup>2</sup> WANG Meiling<sup>2</sup>

(1. Downhole Operation Company, CNPC Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Kelamayi 834000, China)

(2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** [Objective] To address the frequent fatigue fracture and corrosive leakage failures of 1502-type connection unions under coupled high internal pressure and intense vibration profiles during hydraulic fracturing operations, a high-fidelity mechanical simulation model was developed to extract the precise structural vulnerabilities and formulate an optimal geometric modifications. [Methods] Firstly, guided by a torque-to-preload conversion formulation, an initial structural preload of 200 kN was implemented in tandem with a maximum field operational internal pressure of 90 MPa. A two-dimensional axisymmetric non-linear finite element model incorporating multi-body sliding friction behaviors was constructed for the FIG.1502 union fabricated from high-strength 40CrNi2Mo steel, wherein a dual-time-step incremental solver was executed to fully replicate the physical sequence of assembly fastening followed by intense fluid loading. Then, based on the structural design philosophy of critical stress relocation, an innovative thread-to-seal misaligned configuration was developed to disengage the co-axial spatial path of the sealing groove and external threads. This design was tightly integrated with an inner diameter reduction from 101.5 mm to 90.3 mm for localized wall reinforcement, an expansion of effective thread counts to 7, and a customized 125° transition slope profile. Finally, full-scale comparative stress simulations and empirical industrial operation trials within the Jimsar oilfield were carried out for engineering validation. [Results] Numerical diagnostics indicate that the peak equivalent von-Mises stress of the original union aggregates at the root of the first thread groove, reaching 559.5 MPa with an extreme stress concentration factor of 5.181, which is the dominant factor leading to fatigue fracture of on-site threads, while the sealing fillet sustains a stress of 244.08 MPa. Implementing the thread-to-seal misalignment configuration effectively shifts the maximum loading burden to the reinforced sealing fillet, cutting the peak global stress down to 175.94 MPa (a 68.6% mitigation) and dropping the global stress concentration factor to 2.199 (a 57.6% reduction). Concurrently, the localized maximum thread stress drops to 165 MPa, yielding a highly uniform load distribution across all engaged thread teeth. Field deployment proofs confirm that the optimized connection union operates continuously for over 460 h under a peak pressure of 90 MPa without degradation, demonstrating a 35% improvement in fatigue life compared with the original failed old union.

**Key words:** High pressure manifold; Connection union; Mechanical performance analysis; Structural improvement; Fracturing operation

Corresponding author: CHEN Tong, E-mail: 1261620202@qq.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (51974272)

Received: 2024-10-18 Revised: 2024-11-07

(编辑: 李立)