

# 油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封 浸入泄漏数值分析

孙鹏宇, 岳欠杯, 徐亭亭, 白景锐, 聂曦曛, 赵志伟

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:**在油管柱多级压裂技术中,封隔器胶筒的密封浸入泄漏直接影响水力压裂效果。考虑扩张式压裂封隔器胶筒的几何、材料非线性,以及接触和流体浸入边界的多重非线性,采用数值分析方法,建立油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封浸入泄漏非线性数值模型,推导胶筒密封面泄漏过程浸入流体的计算公式,采用迭代算法求解封隔器胶筒的动力学方程。结果表明:数值分析计算的浸入泄漏长度与实验测试结果对比,符合率在 11.1% 内,证明所建数值模型和计算方法的正确性。上、下封隔器浸入泄漏规律相同,在动压作用下,胶筒与套管之间反复出现的坐封与浸入泄漏转化,是导致封隔器密封泄漏的主要因素。该结果为优化油管柱压裂封隔器设计、提高胶筒密封性能提供指导。

**关键词:**封隔器胶筒;浸入泄漏;数值分析;密封;非线性;油管柱压裂

**中图分类号:**TE93 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)04-0098-11

## 0 引言

随常规油气资源的逐渐减少,非常规油气资源成为油气田增产的主体,支撑特殊油气层开采的核心是多级水力压裂技术。封隔器是水力压裂技术的关键部件,封隔器胶筒的密封泄漏直接影响水力压裂效果<sup>[1]</sup>。因此,开展油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封泄漏的数值分析,对提高封隔器的密封泄漏性能研究具有指导意义。

人们开展封隔器胶筒密封泄漏方面研究。根据不同膨胀阶段的橡胶材料特性,PERVEZ T 等<sup>[4]</sup>对弹性体密封性能进行数值分析。根据渗流理论和弹性体接触理论,BOTTIGLIONE F 等<sup>[5]</sup>给出基于矩形密封条的密封元件泄漏预测模型,未提及环境对泄漏量的影响。ZHANG F Y 等<sup>[7]</sup>建立封隔器胶筒的数学模型,得到胶筒非线性变形的解析解,分析接触非线性对封隔器密封性能的影响。为预测管道连接器的密封性能,LI Z Y 等<sup>[8]</sup>提出一种半解析方法,给出泄漏率公式,分析几何参数对管道连接器密封性的影响并进行实验测试,结果表明计算的准确性。基于渗流理论,ZHENG W 等<sup>[9]</sup>计算机械密封在常规不同液体介质下工作的面接触压力范围,分析不同工况对面接触压力范围变化的影响。LI S Y 等<sup>[10]</sup>提出一种密封泄漏率的半解析模型,利用接触模型和渗流理论评估静态密封的泄漏率,利用弹塑性接触模型计算静密封件表面的粗糙变形、孔隙率和渗透率。基于对橡胶材料超弹特性的研究,LIU Y 等<sup>[11]</sup>在凝固阶段利用有限元软件,进行压缩封隔器的密封性能分析,随时间的增加,胶筒的接触变形逐渐加速。程心平<sup>[12]</sup>研究封隔器胶筒结构有限元分析方法,封隔器胶筒橡胶的应力—应变呈非线性关系,随温度的升高,橡胶材料强度变弱。练章华等<sup>[13]</sup>利用 VB 编程语言开发封隔器胶筒的计算力学模型,分析胶筒的力学性能,为封隔器结构优化设计提供依据。尹飞等<sup>[14]</sup>采用数值模拟方法,分析封隔器坐封后的应力分布及接触状态,得到胶筒与套管接触压力的分布规律,给出线性拟合坐封力与接触压力的关系式。窦益华等<sup>[15]</sup>建立封隔器胶筒三维有限元模型并进行应力分析,得到影响封隔器胶筒最大应力变化的主要几何因素是胶筒外径和套管内径。毛军<sup>[16]</sup>、孙永涛等<sup>[17]</sup>、段风海等<sup>[18]</sup>对封隔器进行实验,研究橡胶材料和胶筒结构对封隔器胶筒密封性能的影响。考虑封隔器胶筒密封几何参数,伍开松等<sup>[19]</sup>、王向东等<sup>[20]</sup>、刘鸣等<sup>[21]</sup>分析接触应力

收稿日期:2024-04-29;编辑:陆雅玲

基金项目:国家自然科学基金项目(52374034);黑龙江省自然科学基金项目(LH2022E018)

作者简介:孙鹏宇(1992—),男,博士,讲师,主要从事多级压裂封隔器数值模拟方面的研究。

通信作者:岳欠杯,E-mail:zlgbb529@126.com

随胶筒高度、厚度和倒角等参数的变化规律。张付英等<sup>[22]</sup>建立胶筒在自由变形时的数学模型,求解变形位移方程,得到胶筒变形的隐式解析解,分析基本结构参数对密封性能的影响。林付利<sup>[23]</sup>利用有限元软件模拟胶筒坐封变形4个阶段的变形特征。黄亮等<sup>[24]</sup>设计一种新型封隔器密封结构,采用有限元法对常规的封隔器密封结构和新型封隔器进行力学分析,对密封性能和胶筒承压进行实验,新型封隔器密封效果稳定,胶套回弹性好。考虑腐蚀及胶筒橡胶老化等影响因素,岳欠杯等<sup>[25-27]</sup>利用实验测试封隔器胶筒的力学性能,给出胶筒受腐蚀的性能变化规律,对扩张式封隔器胶筒进行数值分析,研究影响密封性能的主要因素。

人们对封隔器的研究大多集中在静压作用下封隔器胶筒的密封性能,对于动压作用下封隔器胶筒密封面流体浸入泄漏的研究较少。密封浸入泄漏过程是流体浸入的动力学过程,涉及胶筒材料和几何非线性、密封面接触和浸入流体域的边界非线性。笔者采用数值分析方法,进行油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封泄漏的数值分析,为压裂封隔器设计、密封失效分析和控制提供一种数值分析方法。

## 1 数值模型

扩张式封隔器工作原理是将封隔器下到设计深度,从油管内加压,高压液体通过封隔器内部的传压孔隙作用于胶筒内腔,胶筒在节流压差作用下发生膨胀,封隔油套环空,将井眼分隔,实现多级分段压裂作业,其中胶筒的密封能力是决定压裂封隔器密封性能的关键。油管柱多级压裂封隔器的一级封隔器具有结构对称性,取上封隔器结构并放大(见图1)。封隔器卡距 $L_0=30\text{ m}$ ,胶筒内半径 $R_1=37.5\text{ mm}$ ,胶筒外半径 $R_2=56.5\text{ mm}$ ,胶筒总长度 $L_1=500\text{ mm}$ ,胶筒接触长度 $L_2=320\text{ mm}$ (包括上、下胶筒肩部),胶筒材料为丁腈橡胶,弹性模量 $E_1=17.5\text{ MPa}$ ,泊松比 $\mu_1=0.49$ ,邵氏硬度 $H_r=90$ <sup>[28]</sup>。套管内半径 $R_3=62.0\text{ mm}$ ,中心管内半径 $r_1=28.5\text{ mm}$ ,套管和中心管材料为结构钢,弹性模量 $E_2=210\text{ GPa}$ ,泊松比 $\mu_2=0.30$ ,胶筒和套管、中心管的摩擦系数为0.3。

取某一级上、下封隔器、油管柱和套管为研究对象,根据胶筒结构的对称性和实际工作状态中承受载荷的轴对称性,简化为轴对称模型,位移边界条件为约束胶筒座上、下端竖向位移,中心管两端约束,套管固定约束。油管柱封隔器加载曲线见图2,其中, $p_1$ 为胶筒与中心管的内压; $p_2$ 为坐封层内环空流体压力。

油管柱多级压裂封隔器力学模型见图3,其中, $p_3$ 为上封隔器层外环空压力; $p_4$ 为下封隔器层外环空压力。在实际工况中, $p_3$ 和 $p_4$ 压力相对较小,若 $p_3=p_4=0\text{ MPa}$ ,则环空层内外压差最大,情况最为危险,文中主要分析流体浸入泄漏问题。

将胶筒、中心管和套管离散为轴对称单元,其中胶筒单元选择强非线性特征单元,模拟胶筒在流体浸入泄漏时的形貌急剧变化;在胶筒几何突变位置、密封面的接触和浸入泄漏边界的转换处,进行离散网格细化,确保较高的计算精度。油管柱封隔器胶筒密封泄漏数值模型见图4。

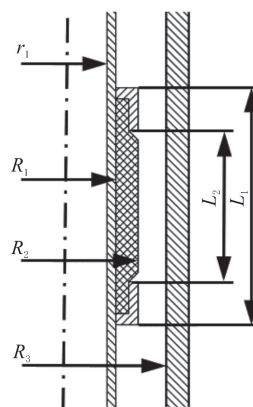


图1 油管柱多级封压裂封隔器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of multistage fracturing packer for tubing string

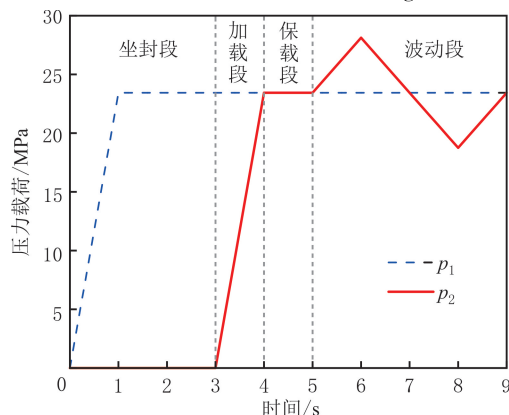


图2 油管柱封隔器加载曲线

Fig. 2 Loading curve of tubing string packer

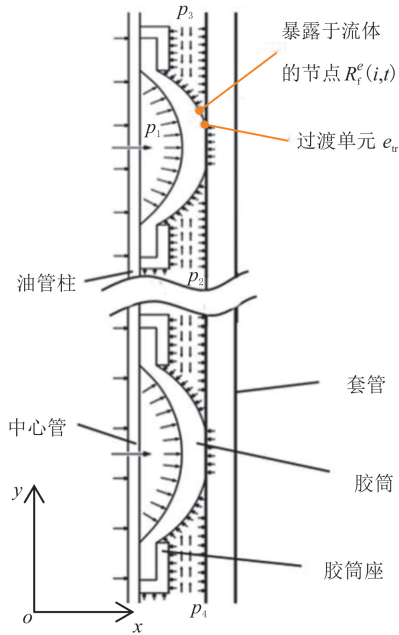


图 3 油管柱封隔器力学模型  
Fig. 3 Mechanical model of tubing string packer

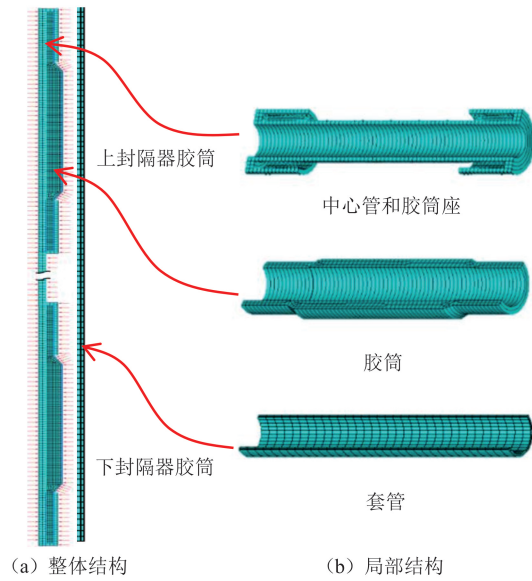


图 4 油管柱封隔器胶筒密封泄漏数值模型  
Fig. 4 Numerical model of sealing leakage of tubing string packer rubber cylinder

## 2 数值计算方法

### 2.1 动力学方程

考虑胶筒橡胶材料的非线性,选取两参数 Mooney-Rivlin 超弹性材料模型<sup>[29]</sup>模拟封隔器胶筒的本构关系。对于套管内坐封的油管柱封隔器,在流体动压作用下,胶筒与套管形成的密封面出现接触和浸入泄漏的边界转化,导致出现不确定性边界非线性问题。对于多重非线性耦合,采用载荷增量方法,求解封隔器胶筒的流体浸入泄漏过程,是一个耗时的反复迭代计算过程。为提高计算效率,在分析流体浸入泄漏问题时采用假定:(1)胶筒密封面几何上是连续的圆柱面;(2)胶筒与套管壁间滑动接触时的密封面摩擦作用服从库仑定律;(3)用离散节点参量描述密封面的力和位移边界条件。

在流体浸入泄漏过程中,封隔器胶筒密封面和套管的接触界面区域大小是变化的,在对封隔器胶筒和套管进行有限元离散后,密封交界面上的单元和节点的相互位置也是变化的。对局部坐标系下单元刚度方程坐标转化和单元拼装,得到油管柱封隔器胶筒动力学方程:

$$M\delta'' + C\delta' + K\delta = F + \tilde{F} + R_f, \quad (1)$$

式中: $M$ 为质量矩阵; $C$ 为阻尼矩阵; $K$ 为刚度矩阵, $K = K_0 + K_L + K_g + K_G$ , $K_0$ 为线性刚度矩阵, $K_L$ 为大位移刚度矩阵, $K_g$ 为几何刚度矩阵, $K_G$ 为接触刚度矩阵; $\delta$ 为节点位移矢量; $\delta'$ 为节点位移速度矢量; $\delta''$ 为节点加速度矢量; $F$ 为等效节点力矢量; $\tilde{F}$ 为等效节点接触力矢量; $R_f$ 为等效节点流体压力矢量。

油管柱封隔器胶筒的浸入泄漏发生在胶筒与套管的密封面,在每一个时间步内分别对胶筒和套管进行求解,由于无法确定初始边界条件,未知量的个数大于独立的平衡方程的个数,无法直接进行求解,因此建立相应接触点对的定解条件,不同的浸入泄漏状态的定解条件不同。边界条件非线性问题有限元方程的常见求解方法有显式和隐式解法,采用 Newmark 法<sup>[30]</sup>和 Newton-Raphson 迭代法<sup>[31]</sup>相结合,求解胶筒与套管间的浸入泄漏问题。

### 2.2 浸入泄漏边界迭代计算

油管柱封隔器胶筒变形可分为两个阶段,第一个阶段为封隔器胶筒的坐封过程,涉及接触非线性问题,采用罚函数法进行分析;第二个阶段为流体轴向浸入胶筒与套管密封面过程,流体压力浸入载荷具有

路径依赖性。穿透路径可以传播和变化,是迭代确定的。在每次迭代开始时,检测暴露在流体压力下的单元,将处于密封交界面并与流体最近的单元作为过渡单元  $e_{tr}$ ,对暴露于流体的单元节点施加流体节点力  $R_i^e(i,t)$ (见图3)。

流体浸入后,胶筒密封面产生形貌变化,原本发生接触的单元逐渐脱离接触状态,胶筒网格泄漏变形示意图见图5。流体节点力  $R_i^e(i,t)$  随密封面形貌变化而产生非线性变化,将流体节点力  $R_i^e(i,t)$  表示为时间和位置的函数,施加流体压力后对模型进行有限元求解。

当过渡单元  $e_{tr}$  满足浸入泄漏状态的力和位移条件时,单元承受流体压力  $p_i^e(i,t)$ ,  $p_i^e(i,t) = p_2$ ; 当过渡单元  $e_{tr}$  满足黏结或滑动状态的力和位移条件时,单元承受接触压力  $p_i^c(i,t)$ , 表达式为

$$p_i^c(i,t) = p_i^c(i,t-1) + \left[ \frac{\partial p_i^c(i,t)}{\partial x} \right]_i \Delta x_i, \quad (2)$$

$$\Delta x_i = (x_{i-1} + u_{i-1}) - (x_i + u_i), \quad (3)$$

式中:  $i$  为过渡单元  $e_{tr}$  上的节点;  $p_i^c(i,t)$ 、 $p_i^c(i,t-1)$  分别为  $t$  和  $t-1$  时刻过渡单元的接触压力;  $\Delta x_i$  为节点  $i$  在  $x$  方向的位移增量;  $x_i$ 、 $u_i$  分别为节点  $i$  在  $x$  方向的坐标及位移;  $x_{i-1}$ 、 $u_{i-1}$  分别为节点  $i-1$  在  $x$  方向的坐标及位移。

胶筒产生变形的节点力由单元接触压力计算:

$$R_i^e(i,t) = \int_A \mathbf{N}^T p_i^c(i,t) dA, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{N}$  为单元的形函数矩阵;  $A$  为单元接触面的面积。

已知施加的流体节点力后,对油管柱封隔器胶筒动力学方程式(1)进行求解,流体从过渡单元开始渗透,逐渐渗透到套管和胶筒之间的界面,当套管和胶筒之间的接触压力大于流体压力时,套管与胶筒之间的接触重新建立,流体的渗透被终止。设  $s$  为当前时间步,  $s_{\max}$  为总计算时间,  $j_k$  为当前时间步内的耦合迭代步数,迭代计算过程:

- (1) 提取前一时间步封隔器胶筒坐封下的计算结果;
- (2) 根据环空流体的作用位置,定义过渡单元的编号  $e_{tr}$ ;
- (3) 根据式(4),对暴露于流体的节点和过渡节点施加作用力  $R_i^e(i,t)$ ;
- (4) 对式(1)进行求解,得到密封面的位移和载荷;
- (5) 判断过渡单元的位移  $d^{e_{tr}}$  是否满足浸入泄漏状态的力和位移边界条件;
- (6) 若过渡单元满足泄漏条件,则进入子步循环迭代,直到解稳定,然后将过渡单元  $e_{tr}$  节点施加  $R_i^e(i,t)$ ,将邻近单元作为过渡单元,返回步骤(3);
- (7) 若过渡单元不满足泄漏条件,则判断是否满足收敛准则;
- (8) 若满足收敛准则,则判断是否满足  $s \geq s_{\max}$ ,若满足,则迭代结束;
- (9) 若不满足收敛准则,则  $j_k = j_{k+1}$ ,返回步骤(1)。

### 2.3 浸入泄漏量计算

为描述不同时刻封隔器胶筒密封面的泄漏情况,计算胶筒的浸入泄漏量,假设某一时刻胶筒产生浸入泄漏现象,浸入泄漏长度为  $L$ ,选取胶筒密封面上产生泄漏的一个单元  $e_i$ ,单元  $e_i$  的泄漏间隙  $t_1^{e_i}(x)$ 、 $t_2^{e_i}(x)$  和变形后的单元长度  $L^{e_i}(x)$ ,由于单元的尺寸很小,可将单元的泄漏面积  $A^{e_i}$  近似看做矩形,得到单元  $e_i$  的浸入泄漏量  $V^{e_i}$  的表达式

$$V^{e_i} = \{ \pi R_3^2 - \pi [R_3 - t^{e_i}(x)]^2 \} L^{e_i}(x) = \pi L^{e_i}(x) t^{e_i}(x) [2R_3 - t^{e_i}(x)], \quad (5)$$

式中:  $t^{e_i}(x) = \frac{t_1^{e_i}(x) + t_2^{e_i}(x)}{2}$ 。

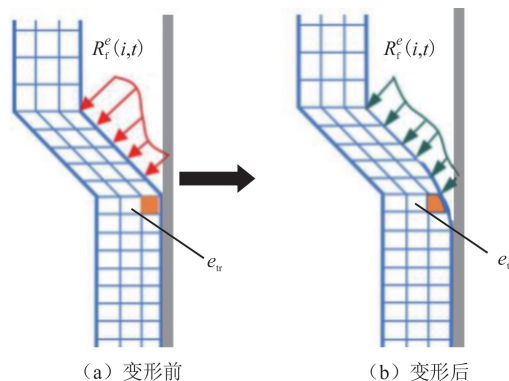


图5 油管柱封隔器胶筒网格泄漏变形示意  
Fig. 5 Deformation diagram of rubber cylinder mesh leakage

对所有产生泄漏的单元长度进行积分,得到总浸入泄漏量  $V$ :

$$V = \pi \int_0^L L^{e_i}(x) t^{e_i}(x) [2R_3 - t^{e_i}(x)] dx. \quad (6)$$

### 3 验证

#### 3.1 实验测试

实验装置及胶筒见图 6。采用 HDP500-A 压力变送器测量环空压力,同时连接 JM5930 动态信号测试分析系统并进行信号数据采集。实验胶筒内半径  $R'_1=17.0$  mm,胶筒外半径  $R'_2=25.5$  mm,胶筒固定端外半径  $R'_0=21.0$  mm,胶筒总长度  $L'_1=200$  mm,胶筒接触长度  $L'_2=100$  mm。胶筒材料为丁腈橡胶。

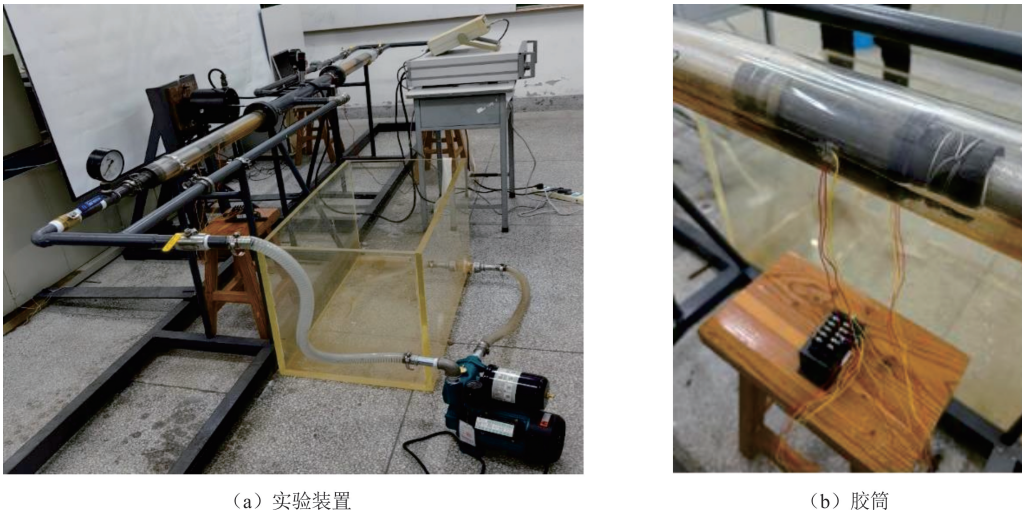


图 6 油管柱封隔器实验装置及胶筒

Fig. 6 Experimental device of simulated tubing string packer and rubber cylinder

中心管内半径  $r'_1=28.5$  mm,中心管是合金钢管,套管内半径  $R'_3=27.5$  mm,为便于观察胶筒浸入泄漏现象,套管材料采用透明有机玻璃管。实验加载曲线见图 7。在不考虑坐封层内外初始压力情况下,计算中心管压力  $p'_1$  和环空流体压力  $p'_2$ ,通过 3 组相同的实验观察胶筒浸入泄漏现象,测量不同胶筒状态(不同环空流体压力)的胶筒浸入泄漏长度。

#### 3.2 数值分析

选取封隔器、中心管及套管为研究对象,弹性模量  $E'_1=5.994$  MPa,泊松比  $\mu'_1=0.49$ ,邵氏硬度  $H'_r=75$ ,两参数 Mooney-Rivlin 模型的参数  $C_{10}=0.805, C_{01}=0.194$ ;中心管材料为合金钢管,弹性模量  $E'_2=206$  GPa,泊松比  $\mu'_2=0.3$ ;套管材料采用透明有机玻璃管,弹性模量  $E'_3=3.30$  GPa,泊松比  $\mu'_3=0.37$ 。胶筒、套管和中心管的摩擦系数为 0.3。

采用轴对称单元进行结构离散。位移边界条件为约束胶筒座上、下两端竖向位移,中心管两端约束和套管固定约束;载荷边界条件为胶筒内部承受中心管压力为  $p'_1$ ,外部承受波动的环空流体压力为  $p'_2$ 。建立实验封隔器胶筒密封泄漏数值模型,与油管柱封隔器胶筒密封泄漏数值模型相同(见图 4)。取实验 1 工况下  $t=176$  s 的实验胶筒变形图(见图 8)进行分析,将胶筒浸入泄漏长度与实验结果进行对比(见表 1),得到胶筒变形及接触泄漏规律。

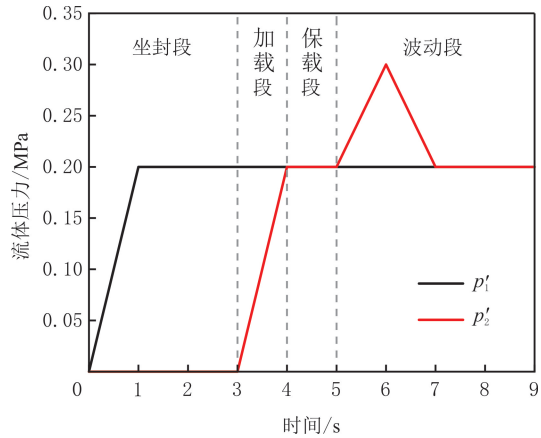


图 7 油管柱封隔器实验加载曲线

Fig. 7 Experimental loading curve of simulated tubing string packer

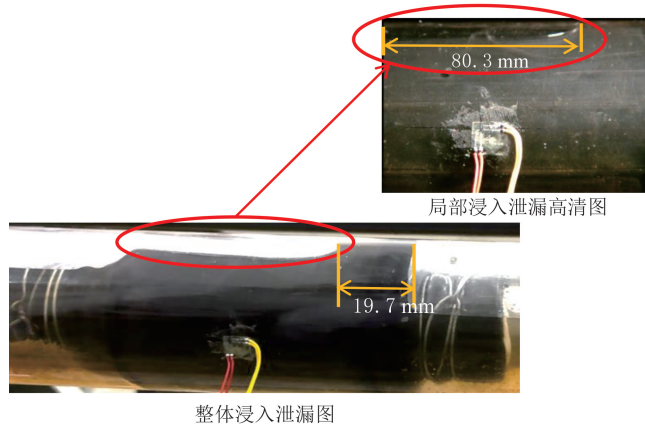
图 8 实验 1 工况下胶筒变形图( $t=176$  s)Fig. 8 Deformation diagram of rubber cylinder under the experiment 1 condition( $t=176$  s)

表 1 不同胶筒状态浸入泄漏长度

Table 1 Leakage length of different rubber cylinder states

时间/s	胶筒状态	环空流体压力/ MPa	浸入泄漏长度/mm					误差/%
			实验 1	实验 2	实验 3	实验平均	有限元分析	
31	完全坐封	0.200	0	0	0	0	0	0
170	开始浸入泄漏	0.291	4.0	4.9	4.7	4.5	5.0	11.1
174	浸入泄漏加剧	0.277	24.0	30.9	37.7	30.9	28.0	9.4
175	浸入泄漏加剧	0.276	60.1	54.0	59.8	57.9	56.0	3.4
176	浸入泄漏加剧	0.276	80.3	78.3	86.3	81.5	88.0	7.8
187	完全泄漏	0.288	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0

由图 8 和表 1 可知,当实验中心管中流体压力达到 0.200 MPa 时,实验封隔器胶筒鼓胀坐封;随环空流体压力不断波动,在 170 s 时出现浸入泄漏现象,在 176 s 时浸入泄漏现象最为明显,胶筒与外部套接触长度为 19.7 mm,浸入泄漏长度为 80.3 mm,此时环空压力为 0.276 MPa;实验胶筒与管壁之间的接触区域不断减小,直至流体穿透胶筒与管壁之间的区域而完全泄漏,最终封隔器胶筒与管壁之间无接触压力,胶筒与管壁完全分离。

由表 1 可知,有限元分析的胶筒浸入泄漏长度与实验胶筒浸入泄漏长度的变化规律一致,在开始浸入泄漏点状态时存在最大误差,为 11.1%。最大误差是由初始浸入泄漏长度非常小、测量的微小误差导致计算结果误差较大。其他测量点在实验拍摄时存在延时误差,显示的浸入泄漏长度存在一定误差。有限元分析和实验结果基本吻合,验证油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封泄漏数值模型和计算方法的正确性。

#### 4 数值分析过程

采用油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封浸入泄漏非线性数值模型和计算方法,对油管柱压裂封隔器胶筒进行密封泄漏非线性数值分析,得到不同时刻上、下封隔器胶筒泄漏形貌变化(见图 9)。由图 9 可知,上、下封隔器胶筒形貌变化规律基本相同,在流体动压作用下,上、下封隔器胶筒出现明显的浸入泄漏现象,在 7.0 s(环空流体压力为 25 MPa) 时,浸入泄漏现象最为明显,在流体动压持续作用下,浸入泄漏长度显著降低;在 8.0 s(环空流体压力为 15 MPa) 时,出现二次坐封;在 8.8 s(环空流体压力为 23 MPa) 时,出现二次浸入泄漏;在 9.0 s(环空流体压力为 25 MPa) 时,浸入泄漏现象显著。上、下封隔器胶筒的浸入泄漏长度变化呈先增大后减小再增大的趋势。

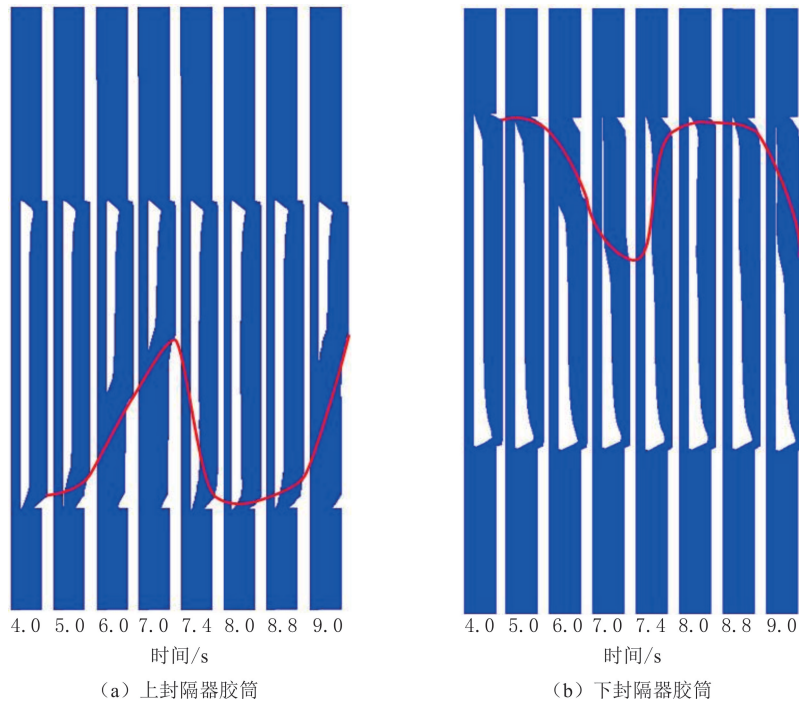


图 9 封隔器胶筒形貌变化  
Fig. 9 Morphology change of packer rubber cylinder

不同时间条件下封隔器胶筒的轴向长度与接触压力变化曲线见图 10,图 10(a)的原点为上封隔器胶筒与下胶筒座接触点,图 10(b)的原点为下封隔器胶筒与上胶筒座接触点。由图 10 可知,上、下封隔器胶筒接触压力变化规律基本相同,在 4.0 s(环空流体压力为 25 MPa)时,上、下封隔器胶筒与套管之间的轴向长度大于 290 mm,胶筒完全坐封,不产生浸入泄漏。在 5.0~6.0 s(环空流体压力由 25 MPa 增加到 35 MPa)时,轴向长度逐渐减小,浸入点逐渐向坐封层内推移,上、下封隔器胶筒发生浸入泄漏。在 6.0~7.0 s(环空流体压力由 35 MPa 降低到 25 MPa)时,上封隔器胶筒下部、下封隔器胶筒上部与套管壁之间的最大接触压力逐渐减小,上、下封隔器胶筒轴向长度减小,在 7.0 s 时,下封隔器胶筒轴向长度最小,最大减小 142.57 mm。在 7.0~8.0 s(环空流体压力由 25 MPa 降低到 15 MPa)时,上封隔器胶筒下部与下封隔器胶筒上部接触压力逐渐增大,轴向长度逐渐增加,在 8.0 s 时,上、下封隔器胶筒出现二次坐封。在 8.0~9.0 s(环空流体压力由 15 MPa 增加到 25 MPa)时,上封隔器胶筒下部接触压力和下封隔器胶筒上部接触压力逐渐减小,轴向长度逐渐减小,在 8.8 s(环空流体压力为 23 MPa)时,发生二次浸入泄漏现象;

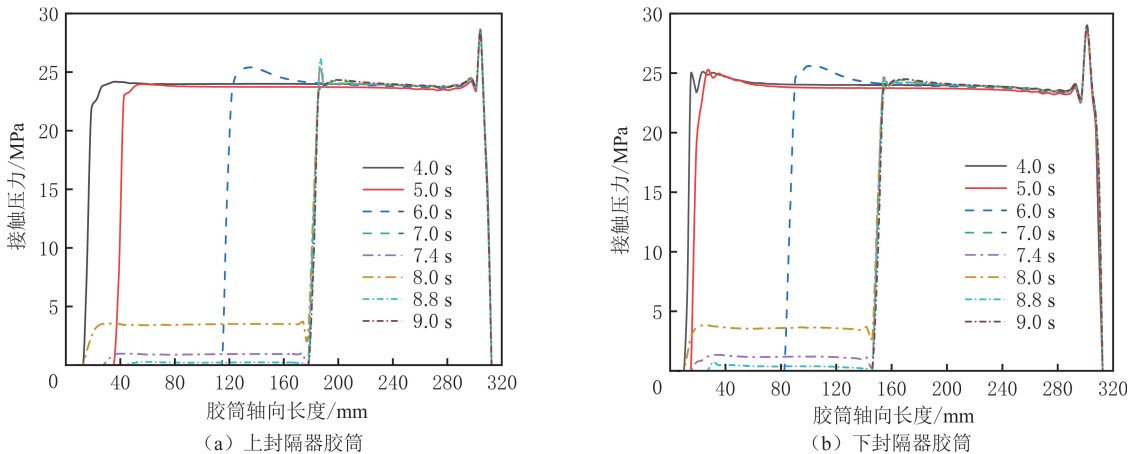


图 10 不同时间条件下封隔器胶筒轴向长度和接触压力变化曲线  
Fig. 10 The axial length and contact pressure curve of packer rubber under different time conditions

在 9.0 s(环空流体压力为 25 MPa)时,上封隔器下部接触压力近似为 0 MPa。

根据胶筒形貌变化和接触压力分布,在 7.0、9.0 s 时,环空流体压力为 25 MPa,胶筒轴向长度最小,7.0、9.0 s 时的上、下封隔器胶筒剪切应力变化云图见图 11。由图 11(a-b)可知,在 7.0 s(环空流体压力为 25 MPa)时,上、下封隔器胶筒接触面处的最大剪切应力  $\tau$ (5.08 MPa)发生在下封隔器胶筒接触面,主要是由于胶筒发生浸入泄漏时,胶筒产生形变,浸入泄漏点处产生剪切应力极值。上、下封隔器胶筒的最大剪切应力(16.50 MPa)发生在下封隔器胶筒下端的内侧,主要是由于封隔器胶筒在内压作用下坐封,胶筒向外扩张,胶筒内侧产生较大的剪切应力。由图 11(c-d)可知,9.0 s 的剪切应力规律与 7.0 s 时的相同,上、下封隔器胶筒接触面处的最大剪切应力(1.43 MPa)发生在下封隔器胶筒接触面,上、下封隔器胶筒的最大剪切应力(16.90 MPa)发生在下封隔器胶筒下端的内侧。

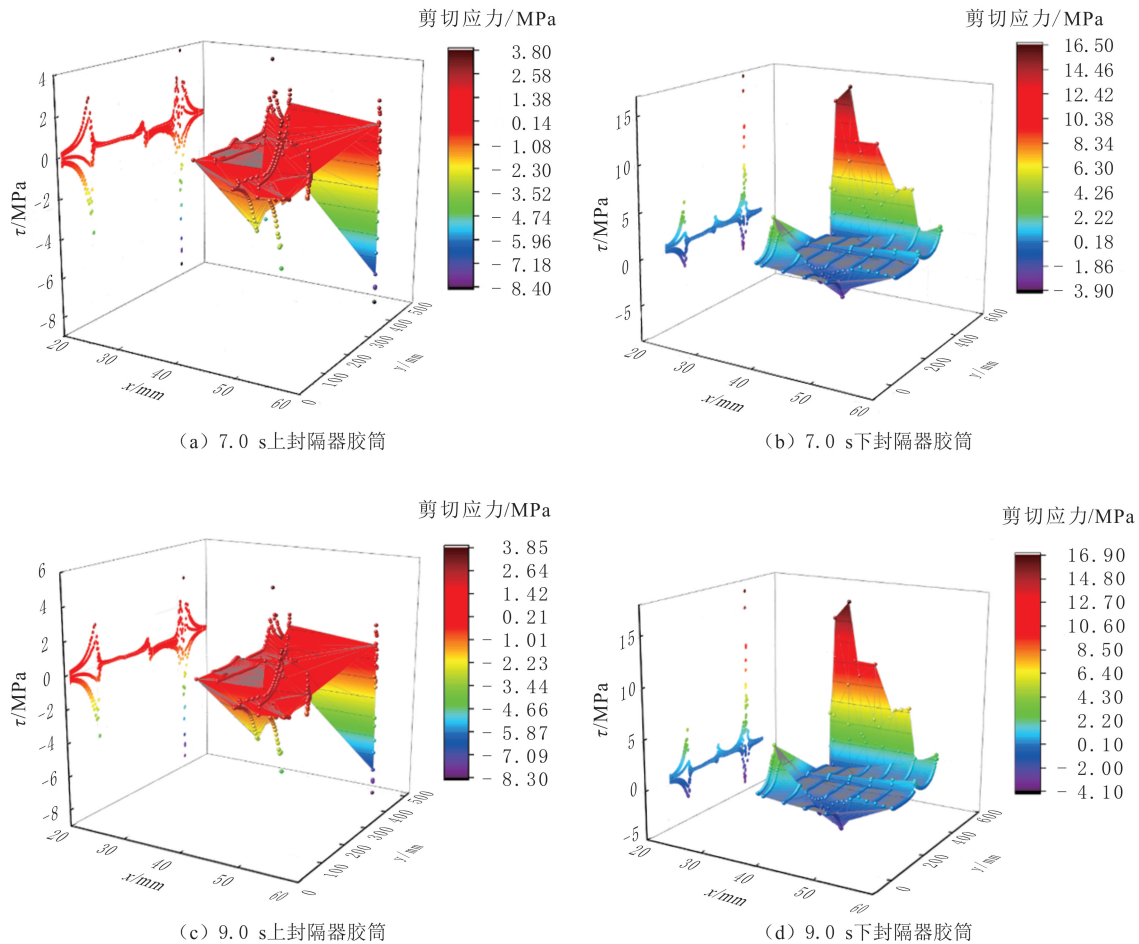


图 11 7.0 和 9.0 s 时封隔器胶筒剪切应力云图

Fig. 11 The shear stress nephogram of packer rubber under the condition of 7.0 and 9.0 s

在流体动压作用下,上、下封隔器胶筒的浸入泄漏结果见表 2。由表 2 可知,在 4.0 s(环空流体压力为 25 MPa)时,胶筒完全坐封,未发生浸入泄漏现象。在 4.0~5.0 s(环空流体压力稳定为 25 MPa)时,开始浸入泄漏,浸入泄漏长度较小,浸入泄漏量很小。在 5.0~7.0 s(环空流体压力大于 25 MPa)时,浸入泄漏长度和浸入泄漏量变大。在 6.0 s(环空流体压力为 35 MPa)时,下封隔器胶筒浸入泄漏量达到最大,为 180.32 cm<sup>3</sup>。上、下封隔器胶筒在 7.0 s(环空流体压力为 25 MPa)时,浸入泄漏长度最大,分别为 166.85、139.04 mm,上封隔器胶筒浸入泄漏量达到最大,为 272.47 cm<sup>3</sup>。在 8.0 s(环空流体压力为 15 MPa)时,上、下封隔器胶筒二次坐封,浸入泄漏长度为 0 mm,浸入泄漏量为 0 cm<sup>3</sup>。随着时间的增加和流体压力的变化,在 8.8 s(环空流体压力为 23 MPa)时,胶筒出现二次浸入泄漏现象;在 9.0 s(环空流体压力为 25 MPa)时,上、下封隔器胶筒浸入泄漏长度再次达到最大。

由图 10-11 和表 2 可知,考虑 7.0、9.0 s 时上、下封隔器胶筒接触压力,剪切应力分布和浸入泄漏情况,上封隔器胶筒比下封隔器胶筒的有效接触压力区域小,浸入泄漏长度大,剪切压力小,易于被流体浸入。上封隔器胶筒比下封隔器胶筒浸入泄漏量大,上封隔器胶筒更易失效。流体动压使油管柱封隔器胶筒产生二次浸入泄漏现象,流体浸入导致胶筒与套管的密封接触区域变小,导致封隔器胶筒的密封性能急剧减弱,可以控制环空中流体压力波动,降低封隔器密封泄漏失效。

表 2 上、下封隔器胶筒浸入泄漏长度和泄漏量

Table 2 Immersion leakage results of upper and lower packer rubbers

时间/s	压力/MPa	浸入泄漏长度/mm		浸入泄漏量/cm <sup>3</sup>	
		上封隔器胶筒	下封隔器胶筒	上封隔器胶筒	下封隔器胶筒
4.0	25	0	0	0	0
5.0	25	23.00	0	23.90	0
6.0	35	95.00	75.48	186.35	180.32
7.0	25	166.85	139.04	272.47	175.93
7.4	21	11.92	7.95	3.46	2.31
8.0	15	0	0	0	0
8.8	23	154.93	139.00	103.84	65.90
9.0	25	166.85	139.04	191.39	124.57

## 5 结论

(1)建立油管柱压裂封隔器动压作用下胶筒密封浸入泄漏非线性数值模型,推导胶筒密封面泄漏过程浸入流体的计算公式,采用迭代算法求解封隔器胶筒动力学方程并将数值模拟计算的浸入泄漏长度与实验测试结果对比,验证非线性数值模型和计算方法的正确性。

(2)动压作用下,上、下封隔器胶筒和套管出现反复坐封—浸入泄漏现象,上封隔器胶筒比下封隔器胶筒接触区域剪切压力小,易于被流体浸入。上封隔器胶筒比下封隔器胶筒浸入泄漏量大,更易产生密封泄漏现象。

(3)封隔器胶筒密封浸入泄漏非线性数值模型和计算方法,可实现复杂边界条件下胶筒密封面浸入渗透演化过程的数值模拟,为封隔器胶筒设计、密封失效分析提供依据。

## 参考文献(References):

- [1] 王溯,陈勉,吕嘉昕,等.水平井水力压裂裂缝扩展诱发垂直邻井光纤应变演化特征[J].东北石油大学学报,2024,48(4):100-110.  
WANG Su, CHEN Mian, LYU Jiaxin, et al. Characteristics of fiber-optic strain evolution in vertical adjacent well induced by hydraulic fracture propagation in horizontal well[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(4):100-110.
- [2] 郑臣,汪道兵,秦浩,等.粗糙裂缝压裂暂堵剂运移规律数值模拟[J].东北石油大学学报,2022,46(1):88-103.  
ZHENG Chen, WANG Daobing, QIN Hao, et al. Numerical simulation of temporary plugging agent transport in rough fracture[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(1):88-103.
- [3] 张峻,阴川生,刘全国,等.K344型注水封隔器封层性能优化研究[J].石油机械,2008,36(7):63-65.  
ZHANG Jun, YIN Chuansheng, LIU Quanguo, et al. Optimization of sealing performance of K344 type water injection packer[J]. Petroleum Machinery, 2008,36(7):63-65.
- [4] PERVEZ T, QAMAR S Z, VELDEN M. Comparison between fresh and exposed swelling elastomer[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2012,44(3):237-250.
- [5] BOTTIGLIONE F, CARBONE G, MANTRIOTA G. Fluid leakage in seals: an approach based on percolation theory[J]. Tribology International, 2009,42:731-737.
- [6] BOTTIGLIONE F, CARBONE G, MANGIALARDI L. Leakage mechanism in flat seals[J]. Journal of Applied Physics, 2009,106(10):1-7.
- [7] ZHANG F Y, LI T T, ZHANG Y F. Analysis was on free deformation characteristics of packer rubber surface under the initial seal-

- ing load[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019,40(4):419-432.
- [8] LI Z Y, WANG G, YAO S M, et al. A semi-analytical method for the sealing performance prediction of subsea pipeline compression connector[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023,11(4):854.
- [9] ZHENG W, SUN J J, MA C B, et al. The theoretical basis of face contact pressure design of the zero-leakage mechanical seal[J]. *Coatings*, 2022,12(4):536.
- [10] 李顺洋, 万力, 桂南, 等. 基于弹塑性接触和渗流模型的静密封泄漏计算[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023,63(8):1264-1272.  
LI Shunyang, WAN Li, GUI Nan, et al. Evaluation of leakage rates of static seals based on elastic-plastic contact theories and seepage theories[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2023,63(8):1264-1272.
- [11] LIU Y, QIAN L Q, ZOU J Y, et al. Study on failure mechanism and sealing performance optimization of compression packer[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022,136:106176.
- [12] 程心平. 扩张式封隔器胶筒力学性能分析[J]. *石油机械*, 2014,42(6):72-76.  
CHENG Xinping. Mechanical properties analysis of expandable packer rubber[J]. *China Petroleum Machinery*, 2014,42(6):72-76.
- [13] 练章华, 乐彬, 宋周成, 等. 封隔器坐封过程有限元模拟分析[J]. *石油机械*, 2007,35(9):19-21.  
LIAN Zhanghua, LE Bin, SONG Zhoucheng, et al. Finite element simulation analysis of packer setting process[J]. *China Petroleum Machinery*, 2007,35(9):19-21.
- [14] 尹飞, 高宝奎, 金磊. 压缩式封隔器坐封力学有限元分析[J]. *石油机械*, 2012,40(2):39-41.  
YIN Fei, GAO Baokui, JIN Lei. Finite element analysis of compression packer mechanics[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012,40(2):39-41.
- [15] 窦益华, 杨浩, 李明飞, 等. 水力扩张式封隔器胶筒力学性能有限元分析[J]. *油气井测试*, 2016,25(2):10-13.  
DOU Yihua, YANG Hao, LI Mingfei, et al. Mechanical characteristics analysis of hydraulic expandable packer rubber with finite element method[J]. *Well Testing*, 2016,25(2):10-13.
- [16] 毛军. 高温高压测试封隔器胶筒的研制[J]. *石油钻采工艺*, 2023,45(5):638-643.  
MAO Jun. Development of rubber barrel for HTHP test packers[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023,45(5):638-643.
- [17] 孙永涛, 魏安超, 陈宗琦, 等. 高温高压封隔器胶筒密封结构设计[J]. *润滑与密封*, 2023,48(9):140-145.  
SUN Yongtao, WEI Anchao, CHEN Zongqi, et al. Sealing structure design of rubber cylinder for high temperature and high pressure packer[J]. *Lubrication Engineering*, 2023,48(9):140-145.
- [18] 段凤海, 李振, 侯承勋, 等. 耐高温高压封隔器胶筒性能研究[J]. *石油矿场机械*, 2020,49(2):66-70.  
DUAN Fenghai, LI Zhen, HOU Chengxun, et al. Study on the properties of high temperature and high pressure packer cartridge [J]. *Oil Field Equipment*, 2020,49(2):66-70.
- [19] 伍开松, 翟志茂, 古剑飞, 等. 封隔器胶筒几何参数优选[J]. *石油矿场机械*, 2008,37(10):68-71.  
WU Kaisong, ZHAI Zhimao, GU Jianfei, et al. Optimization of packer rubber's geometrical parameters[J]. *Oil Field Equipment*, 2008,37(10):68-71.
- [20] 王向东, 朱骏蒙. 扩张式封隔器密封性能评价及影响因素分析[J]. *内蒙古石油化工*, 2023,49(9):47-51.  
WANG Xiangdong, ZHU Junmeng. Evaluation of the sealing performance on expansion type packers and its effective factors analysis [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2023,49(9):47-51.
- [21] 刘鸣, 蒋文杰, 郑庭, 等. 扩张式封隔器胶筒密封性能影响因素分析[J]. *四川轻化工大学学报(自然科学版)*, 2022,35(1):67-73.  
LIU Ming, JIANG Wenjie, ZHENG Ting, et al. Analysis of influencing factors on sealing performance of rubber cylinder of expandable packer[J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition)*, 2022,35(1):67-73
- [22] 张付英, 李天天, 张玉飞. 初封载荷下封隔器胶筒表面自由变形特性分析[J]. *应用数学和力学*, 2019,40(4):419-432.  
ZHANG Fuying, LI Tiantian, ZHANG Yufei. Analysis on free deformation characteristics of packer rubber surface under the initial sealing load[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019,40(4):419-432.
- [23] 林付利. 基于有限元数值模拟的封隔器胶筒力学特征分析[J]. *石油和化工设备*, 2022,25(10):24-27.  
LIN Fuli. Mechanical characteristics analysis of packer rubber barrel based on finite element numerical simulation[J]. *Petro & Chemical Equipment*, 2022,25(10):24-27.
- [24] 黄亮, 郭知龙, 王喜乐, 等. 封隔器密封胶筒挤压失效分析与改进设计[J]. *液压与气动*, 2023,47(7):177-182.  
HUANG Liang, GUO Zhilong, WANG Xile, et al. Extrusion failure analysis and improved design of sealing structure of packer[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023,47(7):177-182.
- [25] YUE Q B, WANG X X, LIU Y Q, et al. Failure evaluations for packers in multistage fracturing technology with immobile strings [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021,206:109039.
- [26] 岳欠杯, 孙鹏宇, 王岗, 等. 尼龙66帘线扩张式封隔器胶筒复合界面力学性能[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023,47(2):136-144.

- YUE Qianbei, SUN Pengyu, WANG Gang, et al. Mechanical properties of composite interface for rubber cylinder in expansion packer with nylon 66 cords[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023,47(2):136-144.
- [27] 岳欠杯,王岗,刘巨保,等. 高温高压下扩张式封隔器胶筒非线性流动仿真计算[J]. *计算机力学学报*, 2023,40(3):411-423.
- YUE Qianbei, WANG Gang, LIU Jubao, et al. Simulation calculation of nonlinear flow for expansion packer rubber under temperature and pressure environment well[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023,40(3):411-423.
- [28] 王岗. 高温高压环境下扩张式封隔器非线性仿真计算[D]. 大庆:东北石油大学, 2022:9-11.
- WANG Gang. Nonlinear simulation of expander packer under high temperature and high pressure environment[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022:9-11.
- [29] RIVLIN R S. Large elastic deformations of isotropic materials. IV. further developments of the general theory[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 1948,241:379-397.
- [30] BADIR A. Elastic buckling loads of fixed frames by the newmark method[J]. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2020,20(1):1-5
- [31] HARTMANN S. A remark on the application of the Newton-Raphson method in non-linear finite element analysis[J]. *Computational Mechanics*, 2005,36:100-116.

.....

(上接第79页)

- [36] 谢才铸,傅恒,朱梦琦,等. 塔河桑塔木地区石炭系卡拉沙依组层序地层及砂体发育特征[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(4):1-11.
- XIE Caizhu, FU Heng, ZHU Mengqi, et al. Development characteristics of Carboniferous Kalashayi Formation stratigraphy and sand body in the Sangtamu Area of Tahe[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(4):1-11.
- [37] 田兵,段志强,赵俊梅,等. 辫状河心滩储层构型精细解剖:以苏里格气田为例[J]. *非常规油气*, 2023,10(2):9-17.
- TIAN Bing, DUAN Zhiqiang, ZHAO Junmei, et al. Fine anatomy of the reservoir configuration of braided river bank: a case study of Sulige Gas Field[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023,10(2):9-17.
- [38] VAIL P R, AUDEILLARD F, BOWMAN S A. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: cycles and events in stratigraphy[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1991,11(3):617-659.
- [39] 王文博,傅恒,闫廖然,等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系碳酸盐岩层序模式及其意义[J]. *沉积学报*, 2021,39(6):1451-1465.
- WANG Wenbo, FU Heng, LYU— Liaoran, et al. Sequence model of Ordovician carbonate strata in Shunbei Area Tarim Basin, and its significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,39(6):1451-1465.
- [40] 彭丽,伍轶鸣,练章贵,等. 陆相断陷湖盆高频层序特征及其沉积演化:以渤海湾盆地济阳坳陷沙三下亚段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019,40(4):789-798.
- PENG Li, WU Yiming, LIAN Zhanggui, et al. Features and sedimentary evolution of high-frequency sequence in continental lacustrine rift basin: example of the Lower Shahejie Member 3 in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019,40(4):789-798.