

可膨胀波纹管水力膨胀力学特性研究

郭强, 张德龙, 黄玉文, 翁炜, 杨鹏, 蒋睿, 徐军军

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:可膨胀波纹管技术主要用于解决复杂深孔井下事故频发、套管层次受限等技术难题。管串水力膨胀是该技术应用的关键环节,为了研究可膨胀波纹管水力膨胀中的力学特性,提高井下事故处理的成功率,本文采用有限元数值模拟与室内试验相结合的方式共同研究波纹管的水力膨胀过程。通过多次波纹管水力膨胀室内试验,对比有限元理论分析结果,得出二者对于波纹管水力膨胀力学特性曲线基本一致。可膨胀波纹管的弹性形变压力为 0~2.5 MPa,管串压力处于 3~9 MPa 时截面关键点位移速率较大,可膨胀波纹管的水力膨胀压力为 14 MPa,膨胀后波纹管截面尺寸外径最大均值 X_{\max} 为 136.98 mm,外径最小均值 X_{\min} 为 104.58 mm,达到了波纹管机械膨胀对截面尺寸的要求,为波纹管野外试验及产业化应用提供了重要的理论依据与技术支撑。

关键词:深孔钻探;复杂地层;可膨胀波纹管;水力膨胀;力学特性;有限元分析

中图分类号:P634;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)12-0050-06

Research on mechanical properties of expandable profile liners under hydraulic expansion

GUO Qiang, ZHANG Delong, HUANG Yuwen, WENG Wei,
YANG Peng, JIANG Rui, XU Junjun

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Expandable profile liner (EPL) technology is mainly used to solve technical problems such as frequent accidents in complex deep boreholes and limitation of casing tiers. Hydraulic Expansion of EPL is a key link in the application. In order to study the mechanical properties of expandable profile liners under hydraulic expansion, and improve the treatment of downhole accidents, the finite element numerical simulation and indoor laboratory tests were combined to study the hydraulic expansion process of expandable profile liners (EPL). Through multiple laboratory tests on hydraulic expansion of EPL, and comparison of the results with those of the finite element theoretical analysis, it was found that both methods obtained basically consistent results. The elastic deformation pressure of EPL is 0 to 2.5 MPa, and the displacement rate of the key points on the cross-section is larger when the pressure of the liner string is 3 to 9 MPa; the hydraulic expansion pressure of EPL is 14 MPa; and the maximum and minimum diameter for the cross-section dimension of EPL after expansion X_{\max} are 136.98 mm and 104.58 mm; which meet the requirement of the cross-section size for mechanical expansion of EPL. It provides important theoretical basis and technical support for field experiment and industrial application of EPL.

Key words: deep-hole drilling; complex formations; expandable profile liner; hydraulic expansion; mechanical properties; finite element analysis

0 引言

在地勘钻探过程中,经常会遇到漏失、坍塌等复

杂地层情况。为确保封堵目标地层后,避免出现井眼直径减小,钻井成本增加,甚至后期无法钻达目的

收稿日期:2019-05-05 DOI:10.12143/j.tkge.2019.12.010

基金项目:国家国际科技合作项目“复杂深孔小口径可膨胀波纹管及应用技术联合研究”(编号:2015DFR71010);国家青年自然科学基金项目“涡轮取心钻进钻具径向振动特征研究”(编号:41802197);中国地质调查局地调公益项目“东南沿海厦门-琼北地区地热资源调查”(编号:DD20179022)

作者简介:郭强,男,汉族,1990年生,工程师,硕士,从事钻探装备与钻井工具的研究工作,北京市海淀区学院路29号地质大学探工楼406,1171136936@qq.com。

引用格式:郭强,张德龙,黄玉文,等.可膨胀波纹管水力膨胀力学特性研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):50-55.

GUO Qiang, ZHANG Delong, HUANG Yuwen, et al. Research on mechanical properties of expandable profile liners under hydraulic expansion[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12):50-55.

层等状况,往往会采用可膨胀波纹管技术来封堵复杂地层^[1-2]。它通过将可膨胀波纹管下放至目标层,通过水力膨胀将其贴紧井壁,再通过机械膨胀将其膨胀至需求尺寸,使其与井壁完全贴合,保证后续钻进正常进行^[3]。

在用可膨胀波纹管封堵地层过程中,膨胀工艺是整个封堵作业中的重要组成部分,而在膨胀工艺中,水力膨胀的优劣直接影响后续相关工序能否正常进行,这对整个封堵结果至关重要^[4-6]。因此,为了更好地完善可膨胀波纹管的膨胀工艺,有必要研究可膨胀波纹管在水力膨胀中的膨胀压力、应力应变、径向位移等相应力学特性。

1 波纹管水力膨胀有限元分析

本项目旨在研究地质勘探用小口径可膨胀波纹管,最大外径 113 mm,壁厚 6 mm,其相关截面参数如图 1 所示。为了系统地研究波纹管在水力膨胀过程中的力学特性,项目组首先对可膨胀波纹管的水力膨胀过程进行有限元分析。

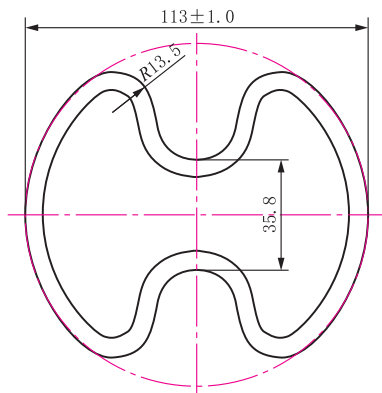


图 1 波纹管截面示意图

Fig.1 Cross-section diagram of EPL

1.1 有限元建模分析

鉴于波纹管截面关于轴对称,故对波纹管膨胀过程进行有限元分析时,采用 plane183 单元类型,对其 1/4 截面进行有限元分析^[7]。可膨胀波纹管在水力膨胀过程中,管体发生大位移塑性形变,由于波纹管材质各向同性,故其切变模量 G 如下^[8]:

$$G = \frac{E}{2(\mu + 1)}$$

式中: E ——弹性模量; μ ——泊松比。

根据波纹管材质力学性能, $E = 2.06 \text{ GPa}$, $\mu = 0.3$ 。

材料参数设定后,采用扫掠方式对其进行网格划分,并添加位移约束。为模拟实际工况,施加在管内的径向载荷随时间线性变化,且以管材截面应力达到抗拉强度作为载荷终止条件,压力增幅设定 0.1 MPa/s ^[9]。

求解后获得波纹管截面等效应力云图如图 2 所示。由图 2(a)可以得出,波纹管截面凹槽(c 点)两侧及凸棱(d 点)内侧在水力膨胀过程中所受应力较大,属于危险截面点,在膨胀过程中应实时监测其应力变化,以防发生管体胀裂^[10]。图 2(b)直观地反映了波纹管膨胀至极限位置时截面形状及整个截面的等效应力分布。

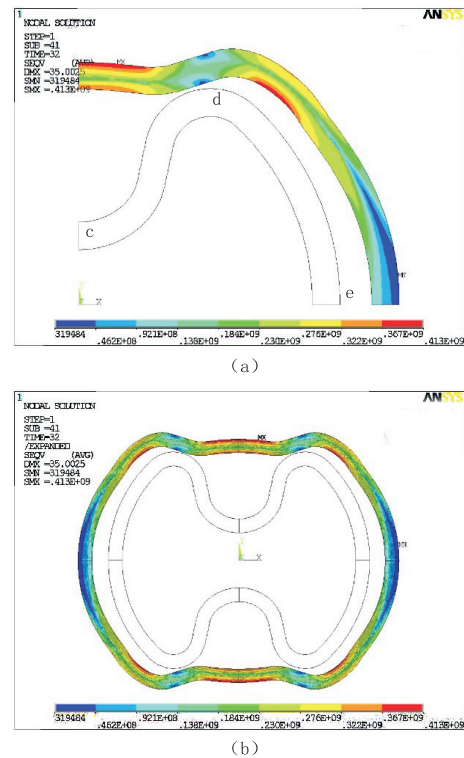


图 2 波纹管截面等效应力云图

Fig.2 Equivalent stress nephogram of EPL cross-section

1.2 有限元结论分析

波纹管水力膨胀过程中,c 点的极限位置关系到波纹管后续机械膨胀的成功率,e 点极限位置决定了管体与井壁之间的贴合度。图 3 体现了波纹管这两个关键点在膨胀过程中膨胀压力与尺寸的对应关系。波纹管的形变过程主要分为弹性形变和塑性形变,即 Q_1 区和 Q_2 区。在弹性形变区(Q_1 区),随着管内压力不断增加,波纹管管体开始发生弹性变形,截面尺寸与管内压力基本呈线性变化。当管内

压力增加到临界点 S_1 时,此时管内压力为 7.8 MPa,波纹管截面应力达到自身屈服极限 σ_s ,开始发生塑性变形^[7]。在塑性变形区(Q_2 区),当波纹管管内压力在 8~12 MPa 时,波纹管变形显著,当管内压力处于 12~16 MPa 时,截面形变量逐渐减小,继续增加管内压力直至其达到临界点 S_2 ,此刻管内压力达到 16.7 MPa,波纹管截面基本不再发生形变,截面应力达到自身抗拉强度 σ_b ,即波纹管已膨胀到极限位置。当管内压力大于 S_2 时,管体发生破裂。

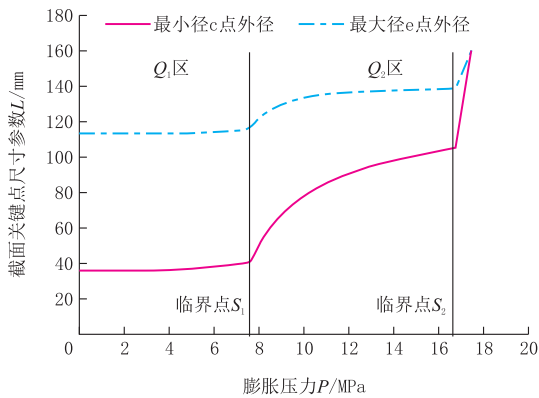


图3 波纹管截面关键点的膨胀压力与尺寸对应关系

Fig.3 Relationship of expansion pressure vs size at key points on EPL cross-section

综上,波纹管的膨胀压力为 16.7 MPa。波纹管膨胀过程中,截面 c 点和 d 点两侧所受应力相对较大,属于危险截面点,在波纹管水力膨胀试验中,这两处最容易发生胀裂^[11]。

2 波纹管水力膨胀试验

基于上述有限元数值模拟结果,为了全面系统地了解波纹管水力膨胀过程中的力学性能,项目组采用了水力膨胀系统对波纹管进行室内水力膨胀试验。

2.1 波纹管水力膨胀系统

为了更好地模拟实际工况,针对波纹管水力膨胀试验的功能需求,设计加工了波纹管室内水力膨胀试验系统。该系统主要包括试验台架、动力模块、采集模块、数据分析模块等^[9],具体工作原理如图 4 所示。

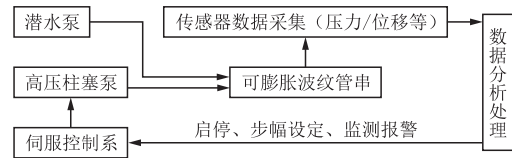


图4 水力膨胀试验系统工作原理图

Fig.4 Working principle diagram of the hydraulic expansion test system

将波纹管通过夹持机构固定于试验台架上,采用动力模块对波纹管进行管内打压,使其逐渐膨胀,通过传感器、应变仪等采集模块进行数据采集,再将其采集的数据通过数据分析模块进行结果分析,获取波纹管水力膨胀过程中的相关力学特性,整个系统能够对波纹管水力膨胀过程实时在线数据监测。此外该系统还配置了安全模块,可以对膨胀过程中管体胀裂、焊缝泄露等故障进行报警^[12-13]。整个水力膨胀系统实物如图 5 所示。



图5 可膨胀波纹管水力膨胀试验系统

Fig.5 Hydraulic expansion test system of EPL

2.2 波纹管水力膨胀试验

波纹管串进行水力膨胀时,先通过夹持装置将其固定于试验台架上,根据管串位置在其两侧布置位移传感器,并进行校零。采用潜水泵将波纹管注

满水后,启动柱塞泵排净高压管线内的空气,把高压管线快速接入波纹管打压接口,重新对各项检测数据进行校零。确保串口通讯正常后,方可进行波纹管串室内水力膨胀试验^[14]。

初始目标压力设为 3 MPa,初始转速设为 100 r/min,压力增幅约 1 MPa/min,保压时间 < 5 min。通过对 20 根波纹管串进行室内水力膨胀试验,每组波纹管串就是由 3 根 1 m 的波纹管焊接组成,每组波纹管串在水力膨胀过程中的压力变化均一致(如图 6 所示)。从图 6 中可以得出,波纹管的最终膨胀压力为 14.8 MPa,各阶段的保压时间均大于 5 min,充分保证了波纹管的形变时间,整个试验过程历时 215 min。由于高压柱塞泵的打压方式,决定了管内压力在升高过程中会产生短期快速增高的现象,即“激动”压力。因此,水力膨胀压力变化曲线会出现锯齿状增长^[15]。

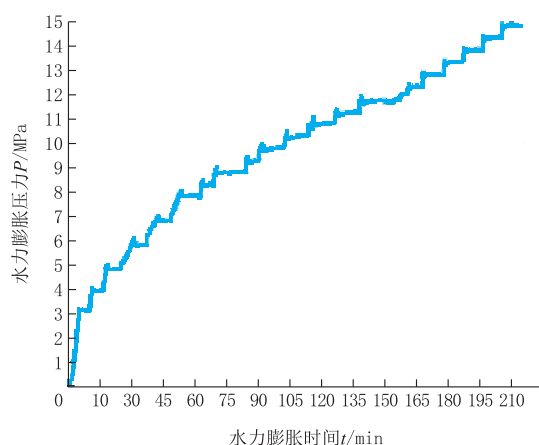


图 6 波纹管水力膨胀过程压力值

Fig.6 Pressure values during the hydraulic expansion process of EPL

当波纹管所受应力超过自身屈服强度,其截面开始发生塑性形变。通过可伸缩接触式位移传感器测量管串截面关键点(图 2 中的 c 点)的位移形变,为更好地反应管串截面关键点的位移变化规律,以一节波纹管的中间部位截面为例,膨胀后的波纹管截面关键点的尺寸变化如图 7 所示。由图 7 可以得出,当压力 > 2 MPa 时,波纹管截面开始发生塑性形变;压力处于 3~9 MPa 时,波纹管截面尺寸增速较大,变化明显;压力 > 9 MPa 时,波纹管截面参数变化趋缓,波纹管在 14 MPa 与 15 MPa 时,截面尺寸未发生变化,说明波纹管的膨胀压力为 14 MPa^[16]。

波纹管在水力膨胀过程中,除管体截面危险点外,管串焊缝处所受应力应变也较大。为保证焊缝强度,降低现场操作要求,波纹管串采用“氩弧焊(打底)+普通手工电弧焊(盖面)”组合的焊接工艺连接。焊接完成后,采用探伤仪对焊缝质量进行检测,

保证焊缝内部无气孔、夹渣等缺陷。上述 20 组波纹管串水力膨胀试验中,均未出现焊缝胀裂现象,说明了波纹管串焊缝强度足够,焊接工艺可行^[17-19]。

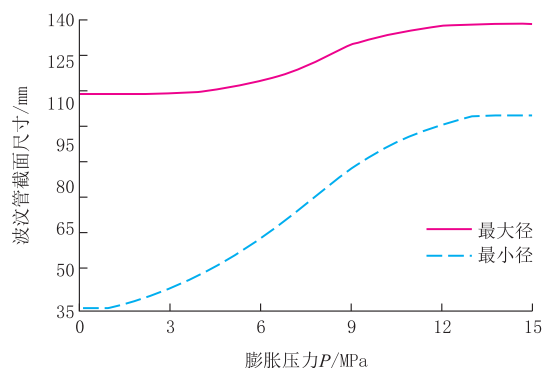


图 7 水力膨胀中波纹管截面关键点尺寸变化

Fig.7 Size change at key points on EPL cross-section during hydraulic expansion

由于每组波纹管串膨胀前后的外形尺寸基本一致,选取每组波纹管串中间节波纹管不同截面处关键点水力膨胀后的外形尺寸进行对比分析,取点位置如图 8 所示。图中,A、E 为焊缝截面,B 截面与焊缝截面 A 相距 20 cm,D 截面与焊缝截面 E 相距 20 cm,C 截面位于波纹管中间截面。

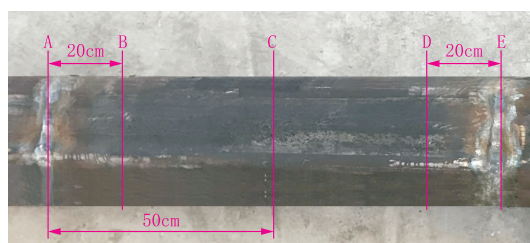


图 8 波纹管串中间节不同截面位置

Fig.8 Different cross-sections along the middle segment of EPL string

波纹管水力膨胀后的截面尺寸如表 1 所示。根据表中实测数据,可以得出波纹管水力膨胀后的截面最大外径均值 X_{\max} 为 136.98 mm,最小外径均值 X_{\min} 为 104.58 mm。波纹管水力膨胀后,要采用“三滚轮胀管器+低摩擦胀管器+球形胀管器”的工具组合进行三级机械膨胀^[20-22]。其中,三滚轮胀管器用作首级机械膨胀,其下端锥面最小尺寸为 90 mm,故要求波纹管串水力膨胀后的最小内径要大于该尺寸,胀管器才能有效工作。从表 1 可以看出波纹管各截面水力膨胀后的最小内径均大于 90 mm,满足管串后续机械膨胀的尺寸要求。

表1 波纹管选取截面外径尺寸

Table 1 Outer diameter of selected cross-sections of EPL

截面位置	最大外径/mm	最小外径/mm	结论
A	136.5	104.1	管串壁厚 6 mm, 经计算所有截面内径均大于 90 mm, 满足机械膨胀要求
B	137.1	104.8	
C	138.2	105.6	
D	136.9	104.5	
E	136.2	103.9	

波纹管水力膨胀前后的实物截面对比如图 9 所示。



图9 水力膨胀前后波纹管截面对比图

Fig.9 Comparison of EPL cross-sections before and after hydraulic expansion

3 结果对比分析

通过将波纹管水力膨胀有限元数值模拟结果与波纹管室内试验结果进行对比分析,可以看出,二者虽然在波纹管各阶段的形变压力区间存在差异,但波纹管整体形变趋势相同。波纹管水力膨胀有限元分析的弹性形变压力区间为 0~6 MPa,塑性变形压力区间为 6~16.5 MPa。室内试验的弹性形变压力区间为 0~2.5 MPa,塑性变形区间为 2.5~14 MPa。造成此差异的原因除了有限元分析时选取的单元类型、边界条件等因素外,管材自身的材质缺陷、热处理方式对管材力学性能的影响、试验条件的设置等外界因素均会对试验结果产生影响。基于二者波纹管整体形变趋势的一致性,进一步表明了波纹管数值模拟方法的可行性与准确性,同时为后续波纹管水力膨胀试验中完善参数设置,改进试验条件等提供了理论支撑^[23-24]。

由上述数值模拟及试验结果可知,波纹管的膨胀压力为 14 MPa,当管内压力 > 2.5 MPa 时,管体开始发生塑性变形;当压力处于 3~9 MPa 时,波纹管的形变速率加快,截面参数变化明显;继续增大压

力至 14 MPa 时,波纹管截面尺寸变化缓慢。当膨胀压力 > 14 MPa 时,管串截面不再发生变化,说明波纹管串的膨胀压力约为 14 MPa,这对钻探现场设备的参数配置提出了初步要求^[25]。

4 结论

(1)基于可膨胀波纹管数值模拟结果与室内试验结果基本一致,说明波纹管有限元分析方法可行,室内水力膨胀试验系统能满足实际需求。

(2)可膨胀波纹管水力膨胀压力为 14 MPa,波纹管水力膨胀后的截面尺寸最大外径均值为 136.98 mm,最小外径均值为 104.58 mm,满足机械膨胀中胀管器对管串的截面尺寸要求。

(3)通过多次可膨胀波纹管水力膨胀试验,确定了波纹管水力膨胀中的力学特性曲线,为可膨胀波纹管野外试验及产业化应用提供理论依据与技术支持。

参考文献(References):

- [1] Monobore expandable liner extension saves well with problematic drilling programme from abandonment[C]. SPE/EAGE Conference & Exhibition, 2011;1-15.
- [2] 于好善,王成彪,杨甘生,等.膨胀套管护壁技术研究现状及其工作原理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):1-4. YU Haoshan, WANG Chengbiao, YANG Gansheng, et al. Study situation of expandable casing technology and the working principle[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(3):1-4.
- [3] Shafagat F. Takhautdinov, Nail G. Ibragimov, Ravil R. Ibatullin. Mitigating drilling hazards with solid expandable profile liners[J]. World Oil, 2009,230(7):39-40.
- [4] 张德龙,翁炜,黄玉文,等.波纹管堵漏技术及其在地质钻探领域的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):28-30. ZHANG Delong, WENG Wei, HUANG Yuwen, et al. Research on bellows sealing technology and the application in geological drilling field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(5):28-30.
- [5] 曹川,任荣权,王宏伟,等.国外膨胀管技术应用新进展[J].石油机械,2013,41(5):29-32. CAO Chuan, REN Rongquan, WANG Hongwei, et al. New progress in application of expandable casing technology abroad[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(5):29-32.
- [6] 陶兴华,马开华,吴波,等.膨胀波纹管技术现场试验综述及存在问题[J].石油钻探技术,2007,35(4):63-66. TAO Xinghua, MA Kaihua, WU Bo, et al. Summary of expandable bellows field test and existing problem analysis[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(4):63-66.
- [7] 郭慧娟,王辉,耿莉,等.可膨胀波纹管有限元分析与现场应用

- [J].石油机械,2008,36(9):99-101.
GUO Huijuan, WANG Hui, GENG Li, et al. Finite element analysis and field use of expandable bellows[J]. China Petroleum machinery, 2008,36(9):99-101.
- [8] 陈晓君,宋刚,孟庆鸿,等.小口径勘探用可膨胀波纹管 ANSYS 模拟与试验分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):37-40,45.
CHEN Xiaojun, SONG Gang, MENG Qinghong, et al. ANSYS simulation of expandable convoluted tubing for small diameter bore prospecting and experimental analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(11):37-40,45.
- [9] 陶兴华,朱宏武,张宏,等.波纹管成型及膨胀过程力学性能分析[J].石油机械,2011,39(3):12-15.
TAO Xinghua, ZHU Hongwu, ZHANG Hong, et al. An analysis of the mechanical properties of the forming and expansion process of the bellows[J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(3):12-15.
- [10] 朱冰冰.膨胀波纹管膨胀规律研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
ZHU Bingbing. Research on the expansion law of expandable profile liners[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2017.
- [11] 杨顺辉.钻井用可膨胀波纹管技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
YANG Shunhui. Research on expandable profile liner technology for drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [12] 涂玉林,杨红歧,胡彦峰,等.膨胀波纹管在小井眼的安全应用工况模拟试验研究[J].石油钻探技术,2018,46(2):69-74.
TU Yulin, YANG Hongqi, HU Yanfeng, et al. Simulation and experimental study on the safe application condition of expandable profile liner in slim holes[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(2):69-74.
- [13] 吴明畏,张伟,刘进余,等.可膨胀波纹管堵漏技术应用[J].石油矿场机械,2013,42(11):72-75.
WU Mingwei, ZHANG Wei, LIU Jinyu, et al. Application of expandable profile liners in borehole sealing[J]. Oil Field Equipment, 2013,42(11):72-75.
- [14] 苏辉,刘宝林,黄玉文,等.小口径可膨胀波纹管水力膨胀过程的数值模拟与试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):28-33.
SU Hui, LIU Baolin, HUANG Yuwen, et al. Numerical simulation and experiment on hydraulic expansion process of expandable liners for small diameter boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):28-33.
- [15] 李虎,段庆全,朱冰冰,等.膨胀波纹管抗外挤强度的影响因素分析[J].焊管,2017,40(3):1-4.
LI Hu, DUAN Qingquan, ZHU Bingbing, et al. Influence factors analysis of expansion bellows collapse resistance strength[J]. Welded Pipe and Tube, 2017,40(3):1-4.
- [16] 杨顺辉,黄永洪,陶兴华,等.可膨胀波纹管技术在韦 15-19 井的应用[J].石油钻探技术,2007,35(3):55-57.
YANG Shunhui, HUANG Yonghong, TAO Xinghua, et al. The application of expandable convoluted tubing technique in Well Wei 15-19[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(3):55-57.
- [17] 刘鹏,夏柏如,陶兴华,等.膨胀波纹管在大牛地气田定向井段的应用[J].石油钻探技术,2017,45(2):61-67.
LIU Peng, XIA Bairu, TAO Xinghua, et al. The application of solid expandable liners in directional well sections of the Daniudi Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017,45(2):61-67.
- [18] 李娟.可膨胀波纹管技术在钻井工程中的应用[J].西部探矿工程,2006,18(11):175-177.
LI Juan. Application of expandable profile liner technology in drilling engineering[J]. West-China Exploration Engineering, 2006,18(11):175-177.

(编辑 王建华)