

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2022008

引用格式: 王建军, 陶兴华, 邹勇, 等. 膨胀波纹管焊接工艺及焊缝膨胀性能分析 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 61-65.

WANG Jianjun, TAO Xinghua, ZOU Yong, et al. Analysis of welding technology and weld expansion performance on expandable profile liner [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 61-65.

膨胀波纹管焊接工艺及焊缝膨胀性能分析

王建军¹, 陶兴华^{2,3}, 邹勇⁴, 薛龙⁴

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃兰州 730050; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206; 4. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617)

摘 要: 膨胀波纹管通过焊接连接在一起, 焊缝的膨胀性能直接决定膨胀波纹管整体的膨胀性能。为了解焊缝的膨胀性能, 在介绍手工焊和自动焊 2 类膨胀波纹管焊接工艺的基础上, 利用弹塑性力学及有限元法模拟了 $\phi 149.2$ mm 8 字形膨胀波纹管焊缝的膨胀过程, 分析了焊缝的膨胀性能, 并通过膨胀波纹管的试验井试验和现场试验进行了验证。由模拟分析及试验可知: 膨胀波纹管膨胀过程中焊缝应力和应变最大点在波谷处的管壁外侧; 焊缝和膨胀波纹管本体的应力和应变随内压变化的规律相同, 焊缝的应力和应变始终大于膨胀波纹管本体, 加压至 30 MPa 时 $\phi 149.2$ mm 8 字形膨胀波纹管及焊缝依然在安全范围内; $\phi 149.2$ mm 8 字形膨胀波纹管采用液压膨胀方式加压至 18 MPa 即满足机械膨胀要求。研究结果表明, 采用现有焊接工艺获得的焊缝满足现场膨胀需求, 通过模拟获得的膨胀过程中膨胀波纹管焊缝应力和应变的变化规律与试验结果基本吻合, 这对现场应用膨胀波纹管具有一定的指导作用。

关键词: 膨胀波纹管; 焊接; 焊缝; 应力; 应变

中图分类号: TE931[†].2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)03-0061-05

Analysis of Welding Technology and Weld Expansion Performance on Expandable Profile Liner

WANG Jianjun¹, TAO Xinghua^{2,3}, ZOU Yong⁴, XUE Long⁴

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu, 730050, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China; 4. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing, 102617, China)

Abstract: Because expandable profile liners (EPLs) are connected by welding, their overall expansion performance is a function of weld expansion performance. To understand the weld expansion performance, two kinds of EPL welding technologies, namely, manual welding and automatic welding, were outlined. The weld expansion process of an 8-shaped EPL with a diameter of $\phi 149.2$ mm was simulated by the finite-element method in light of elastic-plastic mechanics. The weld expansion performance was then analyzed and verified by EPL test well and field tests. The following results were obtained from simulation analyses and tests. The points of maximum weld stress and strain during EPL expansion occurred on the EPL outer wall. It was noted that variation laws of weld stress and strain with internal pressure were similar to those of EPL body stress and strain, although the weld stress and strain were higher than EPL body stress and strain during the whole process. The 8-shaped EPL with a diameter of $\phi 149.2$ mm and the weld were still in the safe range when the EPL was pressurized to 30 MPa. The mechanical expansion requirements were satisfied when the EPL was pressurized to 18 MPa by hydraulic expansion. The results showed that welds obtained by existing welding technologies could meet the field expansion requirements. The variation laws of weld stress and strain of EPL obtained by simulation were consistent with the test results. This research can guide the field application of EPLs.

Key words: expandable profile liner(EPL); welding; weld; stress; strain

收稿日期: 2021-10-20; 改回日期: 2022-01-05。

作者简介: 王建军 (1971—), 男, 甘肃兰州人, 1993 年毕业于甘肃工业大学流体机械专业, 正高级工程师, 主要从事石油化工工程及项目管理。E-mail: wangjj.swuj@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目“强辐射条件下拆解机器人系统设计集成与试验验证”(编号: 2019YFB1310805)资助。

膨胀波纹管是一种在制造时采用机械方式将圆管缩径成为月牙形、8字形、4波峰或6波峰等不同截面形状的异形管。在现场应用时,根据需要将多根膨胀波纹管在地面连接成长管,下至井下设计位置后,利用液压和机械膨胀工具恢复为圆管,主要用于封隔复杂地层^[1-3]。膨胀波纹管的管体之间主要采用焊接方式实现连接^[4-8],膨胀波纹管膨胀过程中焊缝和膨胀波纹管本体同时产生较大形变,焊缝质量直接决定膨胀波纹管整体的承压能力,如果膨胀波纹管的整体承压能力达不到要求,会严重影响后续作业,甚至使井眼报废。

截至目前,国内已开展了膨胀波纹管焊接及膨胀性能的系列研究工作,取得了一些研究成果,并进行了应用。陶兴华等人^[4-6]研究了膨胀波纹管的自动焊接装备和方法,分析了自动焊接执行机构的运动,并进行了运动仿真,研制出可提高焊接质量的波纹管端头整形装置。刘鹏等人^[7-8]引入X射线数字化成像技术,建立了检测波纹管焊缝缺陷的方法,分析了影响波纹管膨胀性能的因素。膨胀性能方面的研究主要有膨胀波纹管膨胀过程力学特性研究、热处理和振动时效工艺对消除膨胀波纹管残余应力的效果分析、膨胀波纹管抗外挤强度的影响因素分析和提高膨胀波纹管挤毁强度的方法等^[9-11]。此外,还研究了弯曲井段下的波纹管膨胀性能,分析了壁厚、井眼直径等对波纹管膨胀性能的影响规律,采用数值模拟与试验方法研究了小口径膨胀波纹管和小井眼下膨胀波纹管的膨胀过程^[12-13]。调研分析认为,已有的研究主要针对焊接装备、焊缝检测、膨胀特性或应用仿真,但未见到有关膨胀波纹管焊缝膨胀性能方面的研究。因此,笔者聚焦焊缝膨胀性能分析,介绍了2类膨胀波纹管常用焊接工艺方法,并针对 $\phi 149.2$ mm 8字形膨胀波纹管,运用弹塑性力学及有限元分析方法,模拟了井下焊缝的膨胀过程,分析了焊缝膨胀性能,评价了焊缝的安全状况,并进行了试验井试验和现场试验验证。

1 膨胀波纹管焊接工艺

膨胀波纹管通过焊接连接,焊接是膨胀波纹管工程应用的关键环节。目前,膨胀波纹管的焊接工艺有手工焊和自动焊2类。无论采用哪种焊接工艺,焊接后均需对焊缝进行保温,以消氢软化淬硬部分,达到改变焊缝组织和性能的目的。保温时间

不少于30 min,待焊缝温度降至100℃以下,方可入井,进行后续操作。

1.1 手工焊

手工焊是膨胀波纹管传统的焊接工艺,可用钨极氩弧焊(tungsten inert gas, TIG)或焊条电弧焊(shielded metal arc welding, SMAW)^[7]。进行手工焊时,膨胀波纹管采用V形坡口,钝边宽为1~2 mm,坡口角度在60°左右,坡口间隙为2~3 mm。

采用TIG焊时,焊丝直径2.5 mm,钨极直径2.4 mm,钨极伸出喷嘴长度6~8 mm,焊枪角度30°左右。焊机采用直流正接方式,焊接电流120~145 A,焊接速度6~8 cm/min,氩气流量约为9 L/min。焊接时不摆动,实施多层多道焊接。

采用SMAW焊时,焊机采用直流反接方式,焊条直径3.2 mm,焊接电流120~145 A,电弧电压22~25 V,焊接速度8~15 cm/min。焊接时不摆动,实施多层多道焊接。

1.2 自动焊

中国石化石油工程技术研究院与北京石油化工学院、兰州理工大学石油化工学院联合开发了一种膨胀波纹管焊接机器人^[4-6],其自动焊接机构如图1所示,使用齿条式轨道固定在波纹管上,焊接小车沿着轨道绕波纹管运动,通过四轴运动机构夹持微型焊枪,自动焊接膨胀波纹管。

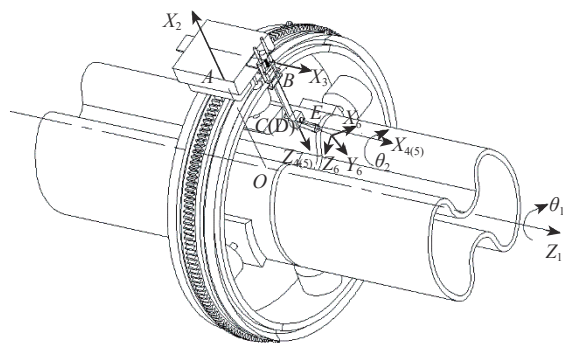


图1 自动焊接机构

Fig.1 Automatic welding mechanism

进行自动焊时,可采用V形坡口或单V形坡口。V形坡口角度在50°左右,钝边宽为0.5~1.0 mm,坡口间隙为1.0~1.5 mm。单V形坡口角度在40°左右。

自动焊采用V形坡口时,采用熔化极活性气体保护焊(metal active gas arc welding, MAG焊),焊丝为 $\phi 1.0$ mm JM-56型实芯焊丝,保护气体为Ar气与

CO₂ 按体积比 4:1 混合的气体。采用二层三道的焊接程序, 其中根焊 1 道, 盖面焊 2 道, 自动焊的工艺参数见表 1。

表 1 自动焊的工艺参数

Table 1 Technical parameters of automatic welding

焊道 顺序	焊层	焊接电流/ A	焊接电压/ V	焊接速度/ (mm·min ⁻¹)	保护气流量/ (L·min ⁻¹)
1	根焊	115~125	19.6~20.5	240~280	18~20
2	盖面焊	130~138	20.8~21.5	250~300	18~20
3	盖面焊	135~145	21.3~22.2	250~300	18~20

2 波纹管膨胀过程中的焊缝性能分析

笔者针对 $\phi 149.2$ mm 8 字形膨胀波纹管(其截面尺寸如图 2 所示), 运用弹塑性力学及有限元分析方法, 在 ABAQUS 软件中建立井眼中的膨胀波纹管模拟模型, 模拟 $\phi 149.2$ mm 膨胀波纹管在井眼中的膨胀过程, 对比分析焊缝与膨胀波纹管本体的应力、应变情况, 评价焊缝的安全状况。

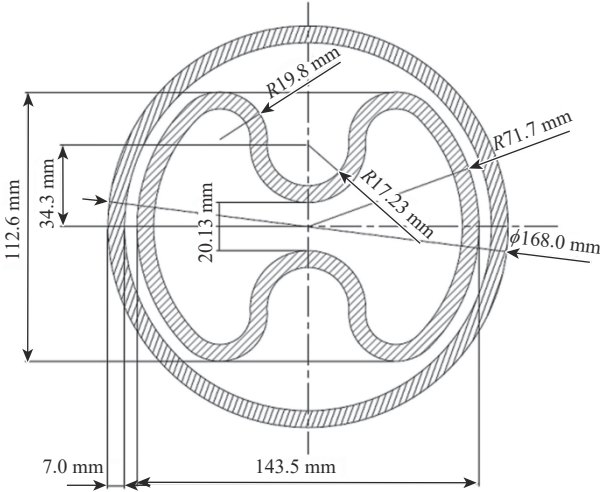


图 2 膨胀波纹管截面结构

Fig.2 Section structure of EPL

2.1 井下膨胀波纹管数值模型

不考虑方位角变化的情况下, 膨胀波纹管平面弯曲时, 井眼直径分别为 165.1 mm/168.0 mm, 井眼曲率为 10°/30m, 建立井眼和膨胀波纹管的数值模型, 如图 3 所示。

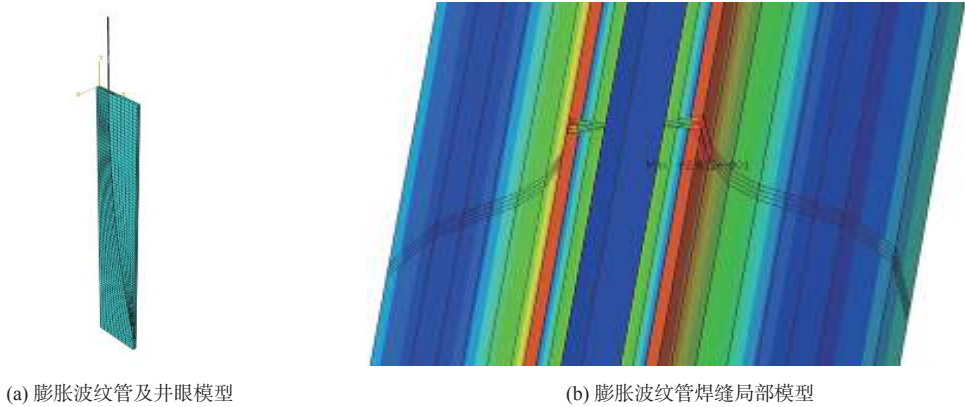


图 3 井眼和膨胀波纹管的数值模型

Fig.3 Numerical model of the wellbore and EPL

膨胀波纹管由 $\phi 168.0$ mm $\times$ 7.5 mm 基管制成, 将 5 根长 10 m 的膨胀波纹管焊接在一起。膨胀波纹管的屈服强度为 348 MPa, 抗拉强度为 476 MPa, 延伸率为 33.5%。焊缝的屈服强度为 434 MPa, 抗拉强度为 510 MPa。岩石的弹性模量取 40 GPa, 泊松比为 0.3。

2.2 膨胀过程中焊缝应力、应变分析

模拟膨胀波纹管在曲率 10°/30m 的 $\phi 165.1$ mm 井眼中加压至 30 MPa 时的膨胀, 膨胀结束后焊缝等效应力和应变云图见图 4。从图 4 可以看出, 膨胀后焊缝的最大应力和应变在波谷处的管壁外侧。

模拟膨胀波纹管在曲率 10°/30m 的 $\phi 168.0$ mm

井眼中逐渐加压至 30 MPa 时的膨胀, 膨胀波纹管本体及焊缝的等效应力和等效塑性应变随内压变化的曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出: 内压升至 5 MPa 过程中, 膨胀波纹管本体和焊缝的等效应力随内压升高而快速增大, 膨胀波纹管本体和焊缝的等效塑性应变基本不变; 内压由 5 MPa 升至 10 MPa 过程中, 膨胀波纹管本体和焊缝的等效应力随内压升高而缓慢增大, 等效塑性应变随内压增大而快速增大; 内压升至 10 MPa 后, 膨胀波纹管本体和焊缝的等效应力和等效塑性应变随内压升高变化缓慢。

由以上分析可知, 焊缝的应力、应变随内压变

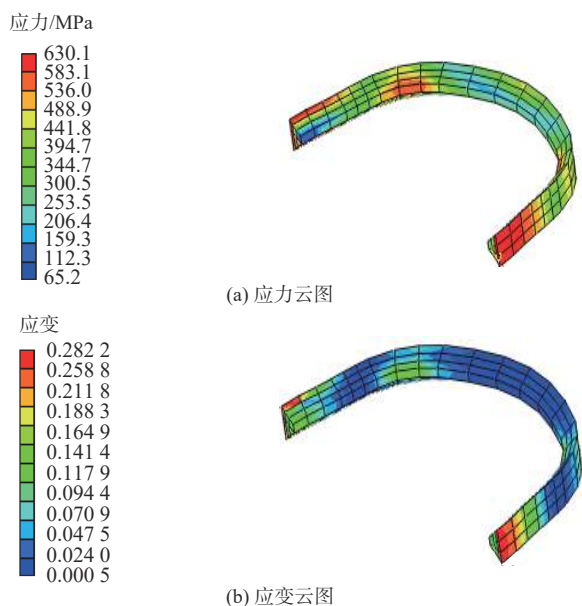


图4 膨胀后焊缝的等效应力和应变云图

Fig.4 Equivalent stress and strain nephogram of the weld after expansion

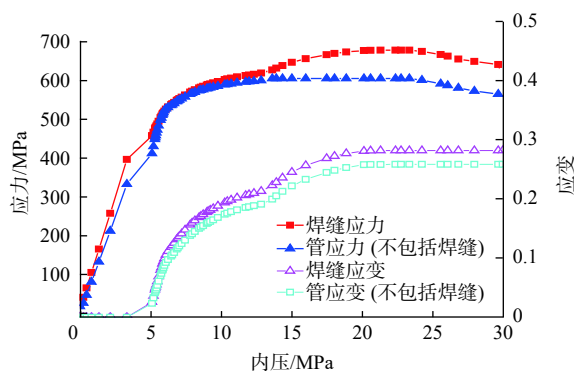


图5 膨胀波纹管本体及焊缝的等效应力和等效塑性应随内压变化的曲线

Fig.5 Variation curves of equivalent stress and equivalent plastic strain of the EPL body and weld with internal pressure

化的规律与膨胀波纹管本体完全相同,只是由于膨胀波纹管本体材料的特性与焊缝不同,焊缝的应力始终大于膨胀波纹管本体,其应变也大于膨胀波纹管本体,但其伸长率小于膨胀波纹管本体(0.335),由此可以判定焊缝是安全的。

3 膨胀波纹管膨胀试验

3.1 试验井试验

用焊接好的膨胀波纹管下入试验井进行膨胀试验。膨胀波纹管由3段膨胀波纹管焊接而成,含2条焊缝,两端焊接堵板,一侧堵板上预留进水口和

出水口的封头(见图6)。在两端设置限位圈和限位管,以减少膨胀过程中堵板的变形,降低膨胀过程中堵板破裂失效的风险。

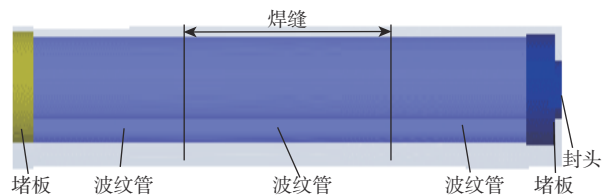


图6 膨胀波纹管试样

Fig.6 EPL sample

膨胀试验步骤:

1)按图6所示焊接膨胀波纹管试样,焊缝在400~500℃下保温30min。

2)封头连接试压泵,将膨胀管波纹管试样下入试验井,按照液压试验要求加压。

3)试验期间,试验人员要离开试验区,通过监控设备观察膨胀波纹管试样外观变化,观察到其明显膨胀后泄压,测量焊缝附近某一位置的大小径;然后重新下入试验井,压力每升高10MPa后泄压,测量同一位置的大小径,直至堵板刺漏,终止试验。

试验过程中,当压力升至4.60MPa时,观察到膨胀波纹管试样开始明显膨胀,压力升至40.67MPa时,堵板刺漏,终止试验。表2为焊缝附近同一位置升至不同压力下的测量结果。从表2可以看出,随着压力升高,大小径偏差值越来越小,当压力升至40.67MPa时,大小径相对偏差已接近1.0%,即膨胀波纹管已膨胀至近正圆状态(见图7)。

表2 膨胀波纹管膨胀过程中的形状参数

Table 2 Shape parameters of the EPL during expansion

序号	压力/MPa	大径/mm	小径/mm	绝对偏差/mm	相对偏差, %
1	10.00	167.0	150.0	17.0	10.18
2	20.00	168.0	151.0	17.0	10.12
3	30.00	169.0	161.0	8.0	4.73
4	40.67	175.5	173.6	1.9	1.08



图7 膨胀波纹管试样膨胀后的外观

Fig.7 Appearance of the EPL sample after expansion

3.2 现场试验

为解决PG22井煤层和炭质泥岩互层的坍塌问

题,在该井2 877.00~2 986.00 m井段下入 $\phi 149.2$ mm 8字形膨胀波纹管,封隔易坍塌的煤层和炭质泥岩互层。下入的膨胀波纹管长109.10 m,有13道焊缝,其中地面焊接9道焊缝,井口焊接4道焊缝。现场检测13道焊缝,其中12道焊缝无缺陷,另外一道焊缝检测有出气孔,重新焊接后再次检测无缺陷。膨胀波纹管下至井深2 986.00 m,先采用液压方式加压至18 MPa膨胀,再采用机械方式将其膨胀至通径149.2 mm。该井后续钻井中,该井段未发生井下故障,表明膨胀波纹管本体及焊缝的性能满足钻井要求。

4 结 论

1)膨胀波纹管焊缝膨胀模拟结果表明,膨胀后焊缝应力和应变的最大点都在波谷处管壁外侧;焊缝应力、应变随内压变化的规律与膨胀波纹管本体相同。

2)膨胀波纹管膨胀过程中,焊缝的应力和应变始终大于膨胀波纹管本体,加压至30 MPa时,焊缝和膨胀波纹管本体的应变依然在安全范围内;膨胀试验加压至30 MPa时,膨胀波纹管无泄露,与模拟结果一致。

3)试验井试验结果表明,内压加至40 MPa时,膨胀波纹管已膨胀至近正圆状态。现场试验表明,采用液压方式加压至18 MPa,膨胀波纹管已膨胀至满足机械膨胀要求。

参 考 文 献

References

- [1] 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.
- [2] 马汝涛,罗淮东,徐丙贵,等.可膨胀波纹管截面设计计算与评估方法[J].石油机械,2019,47(3):14-18.
MA Rutao, LUO Huaidong, XU Binggui, et al. Cross-section design and evaluation methods for expansion bellows[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 14-18.
- [3] 张辉,王锦昌,王翔,等.膨胀波纹管技术在大斜度井易垮塌地层的应用[J].断块油气田,2015,22(3):394-397.
ZHANG Hui, WANG Jinchang, WANG Xiang, et al. Application of expandable convoluted tubing technique in easy collapsed formation of highly deviated well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3): 394-397.
- [4] 陶兴华,朱宏武,曾义金,等.膨胀波纹管焊接机器人的研制及其机构运动分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(4):119-122.
TAO Xinghua, ZHU Hongwu, ZENG Yijin, et al. Development and mechanism motion analysis of welding robot for expandable profile liner[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 119-122.
- [5] 徐立力,薛龙,陶兴华,等.异型断面管道自动焊接执行机构设计及运动仿真[J].电焊机,2011,41(5):5-9.
XU Lili, XUE Long, TAO Xinghua, et al. Design and motion simulation of automatic welding actuator for special-shaped pipeline welding robot[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(5): 5-9.
- [6] 刘鹏,陶兴华,胡彦峰,等.提高膨胀波纹管在弯曲井眼中应用可靠性研究[J].石油钻采工艺,2019,41(2):170-177.
LIU Peng, TAO Xinghua, HU Yanfeng, et al. Research on reliability improving of expandable bellow application in crooked holes[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(2): 170-177.
- [7] 刘鹏,陶兴华,王立双.可膨胀异型管焊接技术研究[J].焊接,2019(6):34-37.
LIU Peng, TAO Xinghua, WANG Lishuang. Welding technology of expandable special section tube[J]. Welding & Joining, 2019(6): 34-37.
- [8] 刘鹏,夏柏如,陶兴华,等.膨胀波纹管焊缝缺陷的检测及影响评价分析[J].科学技术与工程,2016,16(32):22-27,79.
LIU Peng, XIA Bairu, TAO Xinghua, et al. Weld defects detection and weld's performance evaluation of solid expandable profile liner technology[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(32): 22-27, 79.
- [9] 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.
- [10] 刘晓丹,陶兴华,韩振强.振动时效工艺在消除膨胀波纹管残余应力中的应用[J].振动与冲击,2015,34(4):171-174.
LIU Xiaodan, TAO Xinghua, HAN Zhenqiang. Application of vibratory stress relief in relaxation of residual stress for expandable corrugated liners[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4): 171-174.
- [11] 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.
- [12] 张会会,段庆全,朱冰冰,等.弯曲井段下波纹管膨胀性能分析[J].石油机械,2017,45(7):78-82.
ZHANG Huihui, DUAN Qingquan, ZHU Bingbing, et al. Analysis of bellows expansion performance in curved well section[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(7): 78-82.
- [13] 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.