

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

苏 辉^{1,2}, 刘宝林^{1,2}, 黄玉文³, 张德龙³, 郭 强³, 翁 炜³

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.国土资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083;
3.北京探矿工程研究所,北京 100083)

摘要:为了确保可膨胀波纹管在 $\varnothing 120$ mm 地质钻井中实现封隔漏失地层的功能,在合理设计 8 字形波纹管截面形状的基础上,采用有限元理论模拟了不同壁厚和材料的波纹管水力膨胀成形过程,并进行了室内水力膨胀试验。结果表明:波纹管壁厚越薄,膨胀效果越好,但壁厚必须满足抗外挤强度和抗内压强度条件;适用于 $\varnothing 120$ mm 井眼的 8 字形波纹管,其材质应符合如下条件。屈服比 ≤ 0.6 ;延伸率 $\geq 25\%$;抗拉强度 $\sigma_b \geq 410$ MPa;试制的波纹管膨胀后最小外径能够满足后续机械膨胀要求,最大膨胀压力为 13.6 MPa,符合钻探现场使用条件。研究结果为波纹管野外试验提供了技术支持。

关键词: 8 字形可膨胀波纹管;地质钻探;有限元分析;水力膨胀试验

中图分类号: P634;TE28⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)01-0028-06

Numerical simulation and experiment on hydraulic expansion process of expandable liners for small diameter boreholes

SU Hui^{1,2}, LIU Baolin^{1,2}, HUANG Yuwen³, ZHANG Delong³, GUO Qiang³, WENG Wei³

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2.Key Laboratory for Deep Geological Drilling Technology, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China;
3.Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to ensure the sealing function of expandable liners in $\varnothing 120$ mm boreholes, based on the proper design of an "8" shape section corrugated pipe, the hydrodynamic expansion forming process of the corrugated pipe with different wall thickness and materials is simulated by using the finite element theory, and the indoor hydrodynamic expansion test is carried out. Under the condition of satisfying the extrusion strength and internal pressure strength, the thinner the wall thickness of liners, the better the expansion effect; the "8" shape section liners suitable for 120 mm boreholes should meet the following conditions: yield ratio ≤ 0.6 , elongation $\geq 25\%$, tensile strength $\sigma_b \geq 410$ MPa; the minimum diameter of the liners after expansion can meet the requirements of subsequent mechanical expansion, and the maximum expansion pressure is 13.6MPa, which meets the requirements of drilling site operation. This provides technical support for field test of the liners.

Key words: "8" shape section expandable liner; geological drilling; finite element analysis; hydraulic expansion test

可膨胀波纹管技术是利用金属管材的塑性变形特性,将由圆管压制而成的波纹管从上层套管穿入下入目标地层,借助液压和机械方式加压,在井下将波纹管膨胀还原至贴紧井壁,优势是能够在保持井

眼尺寸不变的情况下封堵各种复杂地层,减少套管层数,大幅度降低井下事故处理成本^[1-2]。目前可膨胀波纹管封堵技术在 $\varnothing 149.2$ 、 215.9 、 244.5 、 311 mm 等井段中均有成功应用,其截面形状主要有

收稿日期:2018-10-31 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.01.005

基金项目:国家国际科技合作专项项目“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)

作者简介:苏辉,男,汉族,1993年生,在读硕士研究生,研究方向为钻探与钻井工程,suhui6102@163.com。

通信作者:刘宝林,男,汉族,1959年生,重点实验室主任,学术委员会副主任,教授,博士生导师,博士,从事钻探技术、钻井方面的科研和教学工作,北京市海淀区学院路29号,lbaolin@cugb.edu.cn。

引用格式: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.

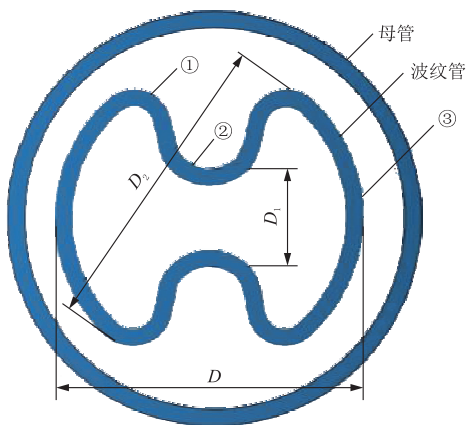
8 字形和六瓣梅花形两种^[3-4]。其中 8 字形波纹管因其易于加工成形且膨胀效果良好,在大口径石油钻井中应用较多^[5-6],随着地质钻探的不断深入,小口径钻孔面临的井下复杂情况日益增多,故本文就适用于 $\varnothing 120$ mm 井眼的 8 字形可膨胀波纹管技术开展研究,通过有限元分析和现场试验对波纹管选材及设计进行优化,为该技术的成功应用奠定基础,并填补国内相关研究的空白。

1 波纹管截面形状设计

8 字形波纹管是由圆形母管经冷轧压制而成,其名称来源于压制后管材的截面形状,如图 1 所示,截面形状由波峰、波谷和过渡曲线组成^[7-8],分别对应凸棱、凹槽和大圆弧。为确保波纹管能够顺利通过上部井段下入目标地层,波纹管要满足如下要求:最大外形尺寸要小于井眼直径;截面形状要易于压制,且成形后残余应力较小;膨胀成形后管串内径要大于等于钻孔内径。所以本研究中,8 字形波纹管经过液压和机械膨胀后的最小内径要 ≥ 120 mm,通过查阅资料,得知在满足应用要求的情况下,波纹管在液压膨胀后的椭圆度一般在 $8\% \sim 15\%$,机械膨胀后椭圆度缩小至 $2\% \sim 6\%$ ^[11-12],椭圆度用于衡量波纹管变形的均匀程度,其计算公式为:

$$u = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: u ——椭圆度, $\%$; D_{\max} ——波纹管膨胀后的最大外径,mm; D_{\min} ——波纹管膨胀后最小外径,mm; D_0 ——波纹管母管直径,mm。



①—棱;②—凹槽;③—大圆弧; D —横向外径; D_1 —最小外径; D_2 —最大外径

图 1 波纹管截面

Fig.1 Section of the expandable liner

假设膨胀后的波纹管最大外径为圆管的直径 D_0 ,设膨胀后波纹管的最小内径为 d_1 ,波纹管壁厚为 t ,以上数据带入公式(1),得到关系式(2):

$$d_1 = (1-u)D_0 - 2t \quad (2)$$

令椭圆度 $u = 6\%$,由于设计要求 $d_1 \geq 120$ mm,当壁厚 t 为 3 mm 时,计算得到母管的外径 $D_0 \geq 134$ mm。另一方面,压制后的波纹管最大外径要小于 120 mm 并保留合理间隙才能够顺利通过上部井段,所以将波纹管的最大外径确定为 116 mm。波纹管截面形状设计的另一个关键是波峰和波谷处的曲率,研究表明,波峰和波谷的曲率越接近,波纹管的膨胀性能越好^[9]。考虑到管材压制过程中实际存在的断面收缩情况^[10],针对 $\varnothing 120$ mm 井眼的需求,波纹管截面形状设计参数如下: $D_1 = 35.8$ mm, $D_2 = 116$ mm, $D = 113$ mm,波峰和波谷处半径为 14.1 mm,截面形状的外侧周长为 426.2 mm,等周长的圆管外径为 135.7 mm,参考现有地质套管标准,确定母管的外径为 140 mm。

2 有限元分析

波纹管的壁厚和材质是影响其抗压强度和膨胀性能的重要因素。基于 ANSYS 有限元理论模拟了波纹管的水力膨胀过程,从膨胀压力、膨胀成形的椭圆度等多个角度出发,归纳总结壁厚与材质对波纹管膨胀性能的影响规律,确定适用于 $\varnothing 120$ mm 井眼的波纹管壁厚和材质的最佳设计。

有限元分析所用软件为 ANSYS18.0,利用 CAD 创建波纹管二维模型,因其截面形状轴对称,故取 1/4 截面进行分析计算,选用 PLANE183 平面应变单元^[13],内表面施加均布压力,随时间线性增大,最大值为 30 MPa,时间长度为 30 s,模型边界采用对称约束,如图 2 所示,默认材料参数为:弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3,屈服强度 245 MPa,抗拉强度 410 MPa。

2.1 不同管材厚度模拟

随着波纹管的壁厚增加,其对应的抗外挤和抗内压强度增大,但同时波纹管的加工难度和膨胀难度也会提高,因此波纹管厚度的选取十分关键。

试制波纹管的过程中,圆管在受到模具施加的径向载荷超过圆管的压力极限时发生塑性变形,因此波纹管抗外挤强度可视为其母管弹性失稳时受到的外部压力,同理,水力膨胀时,波纹管内壁会受到

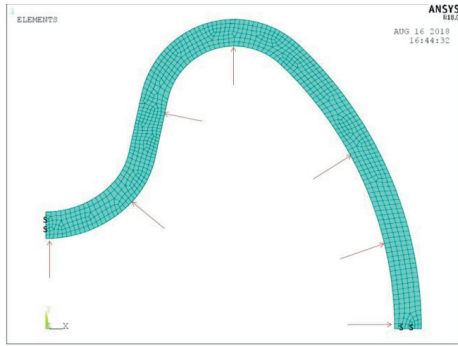


图2 波纹管有限元模型

Fig.2 Finite element model of the pipe

均布载荷,内压升高直至其截面形状尺寸不再发生变化。因此波纹管抗内压强度可视为其母管承受的最大内压,公式(3)、(4)分别为圆管的抗外挤强度和抗内压强度计算公式^[13]。

$$q_0 = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \left(\frac{2t}{D_0}\right)^3 \quad (3)$$

$$p_0 = (2t/D_0)\sigma_b \quad (4)$$

式中: q_0 ——圆管的抗外挤强度,MPa; E ——管材弹性模量,MPa; t ——管材壁厚,mm; μ ——泊松比; D_0 ——圆管外径,mm; p_0 ——圆管的抗内压强度,MPa; σ_b ——管材抗拉极限,MPa。

结合地层压力情况、波纹管的压制工艺以及实际野外作业的条件,确定 $\varnothing 120$ mm 井眼用波纹管的抗外挤强度范围为5~35 MPa,抗内压强度范围为15~40 MPa,当管材的泊松比为0.3、屈服强度为245 MPa、弹性模量为210 GPa时,根据设计要求计算得到波纹管的壁厚范围为3.6~6.1 mm,故参照现有地质套管无缝管规格,选取了4、4.5、5和6 mm 四种厚度的8字形波纹管进行ANSYS有限元分析。波纹管膨胀后的外径是影响实际施工的关键参数,因此采用椭圆度评价其膨胀性能,椭圆度越低,表明膨胀效果越好。图3和图4分别为波纹管最大应力达到其强度极限时的应力云图和截面形状数据,最大膨胀压力如表1所示。

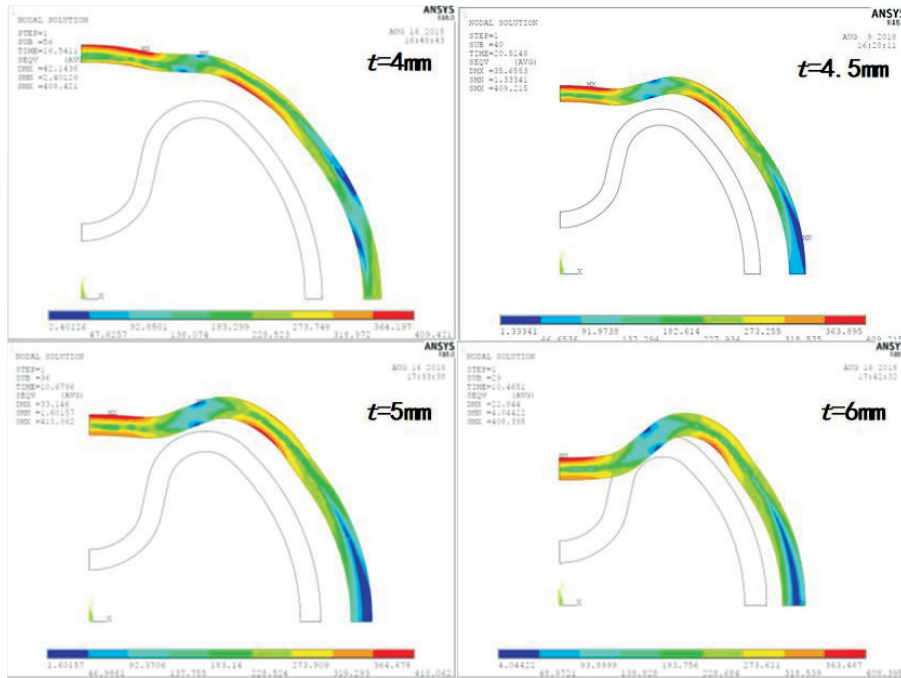


图3 不同壁厚的波纹管膨胀后应力云图

Fig.3 Stress nephogram of bellows with different wall thickness after expansion

表1 不同壁厚波纹管的最大膨胀压力

Table 1 Maximum expansion pressure of different wall thickness bellows

波纹管壁厚 t /mm	最大膨胀压力/MPa
4	16.8
4.5	13.5
5	10.8
6	8.7

由模拟结果可知,波纹管在水力膨胀过程中,其最大应力和最大位移出现在凹槽处,即凹槽处更易发生断裂;最小应力和最小变形位于大圆弧中部。随着壁厚的增加,波纹管的抗内压强度变大,管体应力增幅变大,导致最大膨胀压力减小,同时外径极值不断变小,椭圆度逐渐升高,膨胀效果变差。因此

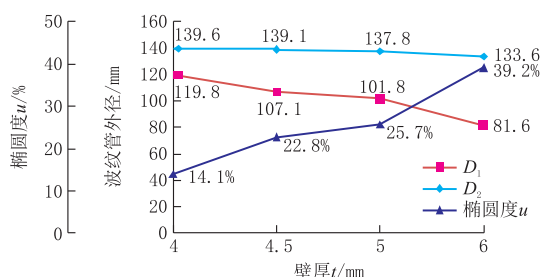


图 4 不同壁厚波纹管膨胀数据对比

Fig.4 Comparison of expansion data of bellows with different wall thickness

波纹管壁厚越薄,膨胀效果越好,但壁厚必须满足抗外挤强度和抗内压强度设计要求。

本次模拟中,壁厚为 4 mm 波纹管,膨胀后椭圆度为 14.0%,最小外径为 119.8 mm,最大膨胀压力 16.8 MPa,基本满足后续机械膨胀作业要求和野外施工条件。

2.2 不同材质模拟

膨胀波纹管主要用于封堵复杂地层,补贴受损套管,其材质应具备以下特征:较高的塑性变形能力,且变形均匀;屈强比低;良好的可焊性,以保证单根间的焊缝具备足够的强度^[14]。共选用了 5 种材料进行有限元分析^[15],其力学特性参数如表 2 所示,依据公式(3)、(4)分别计算了不同材质的 $\Phi 140$ mm \times 4 mm 无缝圆管的抗内压和抗外挤强度,计算结果均满足设计要求。ANSYS 水力膨胀模拟结果如表 3 所示。

表 2 不同牌号管材的力学特性

Table 2 Mechanical properties of different types of pipes

管材牌号	均匀延伸率 δ /%	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	屈强比	弹性模量 E/GPa	抗外挤强度/MPa	抗内压强度/MPa
TG01	16.9	450	235	0.52	210	10.99	25.71
TG02	25.0	410	245	0.60	206	10.42	23.42
TG03	40.0	520	205	0.39	193	9.55	29.71
TG04	24.0	520	345	0.66	212	10.94	29.71
TG05	29.5	415	290	0.70	210	10.76	23.71

表 3 不同管材波纹管膨胀数据对比

Table 3 Comparison of expansion data of different pipes

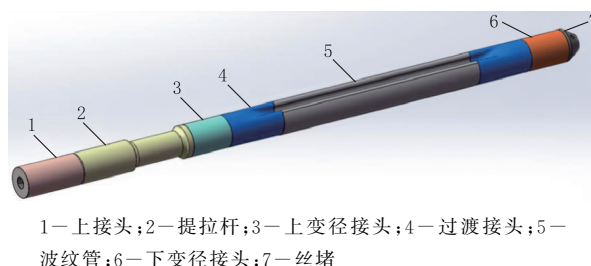
管材牌号	最小外径/mm	椭圆度/%	最大膨胀压力/MPa
TG01	113.5	17.6	21.9
TG02	119.8	14.1	16.8
TG03	126.4	9.7	21.3
TG04	116.8	15.0	13.8
TG05	93.4	30.6	9.0

本次模拟用于评价波纹管膨胀性能的指标中:(1)最小外径代表了膨胀后的波纹管的通径能力,其值越大,波纹管的膨胀越均匀;(2)屈强比是反映钢管延性和强度储备能力的指标,其值越低,钢管的延性越好,在塑性变形阶段中钢管的均匀变形能力越强;而屈强比与管材的延伸率成反比,延伸率越低,管材的变形能力越差;(3)管材的抗内压强度和抗外挤强度与管材的强度极限成正比。所以要求波纹管管材具有较低的屈强比、较高的屈服强度和延伸率。根据模拟结果,TG02 和 TG03 材质的波纹管膨胀后最小外径较大,椭圆度较低,膨胀压力 <30 MPa,能够满足后续机械膨胀及野外作业的要求。

由以上分析可知,适用于 $\Phi 120$ mm 井眼的 8 字形波纹管,其材质应符合以下条件:屈强比 ≤ 0.6 ;延伸率 $\delta \geq 25\%$;抗拉强度 $\sigma_b \geq 410$ MPa。TG02 和 TG03 材质理论上能够满足波纹管的膨胀性能要求。

3 波纹管水力膨胀试验

在优化设计的基础上采用冷轧工艺将 $\Phi 140$ mm \times 4 mm 圆管压制成为 $\Phi 120$ mm 井眼用 8 字形波纹管,材质分别为 TG02 和 TG03,进行了室内水力膨胀试验。管串组合如图 5 所示。



1—上接头;2—提拉杆;3—上变径接头;4—过渡接头;5—波纹管;6—下变径接头;7—丝堵

图 5 波纹管管串示意图

Fig.5 Bellow string structure diagram

试验参数为:最大泵压 30 MPa,流量 4 L/h;采用分级逐次加压,压力增幅为 0.5 MPa/次,每次增压后稳压 10 min。对两种波纹管分别进行了多次打压试验。TG02 材质波纹管在压力升至 3 MPa 时,开始出现明显的变形,在压力达到 13 MPa 时,最小外径达到 117 mm,已满足机械膨胀要求,继续增压至 14.0 MPa 时,波纹管发生爆裂,裂缝位置为凹槽与凸棱的过渡区域,如图 6 所示。经过多次试验确定 TG02 波纹管的最大膨胀压力为 13.6 MPa,采用同样的方法对 TG03 材质波纹管进行了试验。

上述两种材质波纹管水力膨胀后的截面形状及外径随压力变化曲线,分别如图7~10所示。



注: TG02 波纹管发生爆裂破坏时的膨胀压力为 14 MPa, 裂隙长度 20 cm, 最大宽度 2 cm

图 6 TG02 波纹管破坏试验结果

Fig.6 Failure test results of TG02 bellows



注: TG02 波纹管最大膨胀压力为 13.6 MPa, 膨胀后截面尺寸 $D_1=117.8\text{ mm}$, $D_2=137.6\text{ mm}$, $D=131.6\text{ mm}$

图 7 TG02 波纹管膨胀后截面

Fig.7 Section of TG02 steel bellows after expansion

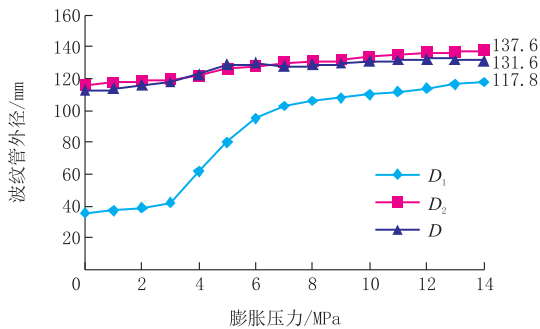


图 8 TG02 波纹管直径随压力变化曲线

Fig.8 Diameter changes of TG02 steel bellows with pressure

由试验结果可知:(1)在膨胀压力由 3 MPa 逐渐增大至 8 MPa 的过程中,波纹管截面形状变化显著,特别是凹槽处位移量较大,在压力超过 10 MPa 后,波纹管变形量逐渐减小,当膨胀压力超过最大



注: TG03 波纹管最大膨胀压力为 12.5 MPa, 膨胀后截面尺寸 $D_1=119\text{ mm}$, $D_2=137.8\text{ mm}$, $D=137\text{ mm}$

图 9 TG03 波纹管膨胀后截面

Fig.9 Section of TG03 steel bellows after expansion

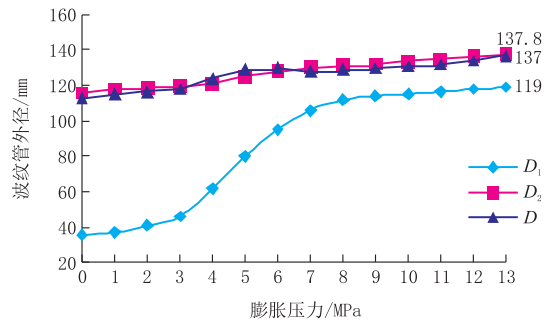


图 10 TG03 波纹管直径随压力变化曲线

Fig.10 Diameter changes of TG03 steel bellows with pressure

压力时,波纹管会发生爆裂;(2)TG02 波纹管的现场试验结果与有限元模拟结果基本一致(见表 4),验证了 TG02 材质具备良好的膨胀性能,可进行下一步机械膨胀试验;(3)TG03 波纹管的试验结果与模拟结果相比,膨胀后外径极值与膨胀压力均有减小,但仍满足波纹管的性能要求,可以继续试验。

表 4 TG02 和 TG03 波纹管数值模拟结果与现场试验结果的对比

Table 4 Comparison of simulation results of TG02 and TG03 bellows with their field test results

材质		指 标		
		最小外径/mm	椭圆度/%	最大膨胀压力/MPa
TG02	试验值	117.8	14.1	13.6
	模拟值	119.8	14.1	16.8
TG03	试验值	119.0	13.4	12.2
	模拟值	126.4	9.7	21.3

4 结论

本文在总结石油和地质领域波纹管应用情况的基础上,通过理论分析、有限元模拟和室内试验,归纳整理了一套适用于 $\varnothing 120\text{ mm}$ 井眼的可膨胀波纹管的设计参数,以实现波纹管封隔复杂地层、补贴破

损套管的功能为出发点,将波纹管膨胀后的外径极值和椭圆度、管材的屈强比和延伸率等多个参数作为评价指标,设计出了合理实用的可膨胀波纹管截面形式,为小口径 8 字形波纹管技术的成功应用奠定了基础。研究得到了以下结论:

(1)为使波纹管能够顺利下入 $\varnothing 120$ mm 井眼,应选用外径为 140 mm 的圆管作为母管。

(2)通过对不同壁厚的波纹管进行水力膨胀数值模拟,对比模拟结果后得到如下规律:波纹管壁厚越薄,膨胀效果越好,但壁厚必须满足抗外挤强度和抗内压强度条件。

(3)针对不同材质波纹管的数值模拟结果和室内试验结果表明,适用于 $\varnothing 120$ mm 井眼的 8 字形波纹管,其材质应符合如下条件:屈强比 ≤ 0.6 ;延伸率 $\delta \geq 25\%$;抗拉强度 $\sigma_b \geq 410$ MPa。室内试验所用的 TG02 和 TG03 材质、壁厚为 4 mm 的波纹管膨胀性能较好,能够满足钻探现场的使用要求。

参考文献 (References):

- [1] 胡彦峰,涂玉林,汪胜武,等.膨胀波纹管技术降低钻井风险实践[J].西部探矿工程,2011,23(2):91-94.
HU Yanfeng, TU Yulin, WANG Shengwu, et al. Expansion bellows technology reduces drilling risk practice[J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23(2): 91-94.
- [2] 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 lid expandable liners in directional well sections of the Daniudi gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 61-67.
- [3] 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. Application of expandable bellows technique in well Wei 15-19[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 55-57.
- [4] 王治平,卓云,廖富国,等.波纹管堵漏技术在黄龙 004-X1 井的应用[J].天然气工业,2008,28(5):67-68.
WANG Zhiping, ZHUO Yun, LIAO Fuguo, et al. Application of bellow pipe for lost circulation control in well Huanglong 004-X1[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(5): 67-68.
- [5] 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.
- [6] Dupal K K, Campo D B, Lofton J E, et al. Solid expandable tubular technology —— A year of case histories in the drilling environment[J]. SPE IADC Drilling Conference, 2011:1-16.
- [7] 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,(11):72-75.
WU Mingwei, ZHANG Wei, LIU Jinyu, et al. Expandable bellows plugging technology applied research[J]. Oil Field Equipment, 2013, 38(3): 1-4.
- [8] 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.
- [9] 张化民,于好善,宋刚.地质勘探用膨胀波纹管截面设计与选择[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):55-59.
ZHANG Huamin, YU Haoshan, SONG Gang. Design and selection of cross section of expandable convoluted tube for geological exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(8): 55-59.
- [10] 孟令博,张康生,刘文科,等.楔横轧小断面收缩率轴类件的椭圆度研究[J].北京科技大学学报,2012,34(5):571-575.
MENG Lingbo, ZHANG Kangsheng, LIU Wenke, et al. Ovality study of shafts with light area reduction by cross wedge rolling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(5): 571-575.
- [11] 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.
- [12] 陈晓君,宋刚,孟庆鸿,等.小口径勘探用可膨胀波纹管 ANSYS 模拟与实验分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,42(11):37-40.
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, 42(11): 37-40.
- [13] 尹飞,高宝奎,张进,等.油井堵漏可膨胀波纹管的有限元分析[J].石油机械,2012,(5):66-69.
YIN Fei, GAO Baokui, ZHANG Jin, et al. Finite element analysis of the expandable bellows for oil well plugging[J]. China Petroleum Machinery, 2012, (5): 66-69.
- [14] 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.
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.
- [15] 秦大同,谢里阳.现代机械设计手册(第 1 卷)[M].北京:化学工业出版社,2011.
QIN Datong, XIE Liyang. Modern mechanical design manual (Volume 1)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

(编辑 韩丽丽)