

# 地质勘探用膨胀波纹管截面设计与选择

张化民, 于好善, 宋 刚

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**膨胀波纹管技术是将圆管制成异形截面管, 下入孔内后胀圆维护孔壁稳定的一种新兴钻探技术。针对地质勘探的行业需求, 提出了一套膨胀波纹管截面形状的设计理论, 系统地阐述了膨胀波纹管截面设计的相关步骤和细节, 设计出了 6 种花形不同尺寸的膨胀波纹管截面设计图。在此基础上, 利用 ANSYS14.0 数值模拟软件对不同的设计截面进行了对比分析, 得出了膨胀波纹管选择的 3 条原则: 六瓣梅花形是最佳截面形式; 设计截面的波峰和波谷的半径、弧度应尽量接近; 在满足护壁压力要求的情况, 壁厚应尽量的小。

**关键词:**钻探; 膨胀波纹管; 截面设计; 形状选择; 数值模拟

中图分类号: P645.3 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 7428(2015)08 - 0055 - 05

**Design and Selection of Cross Section of Expandable Convuluted Tube for Geological Exploration/ZHANG Hua-min, YU Hao-shan, SONG Gang** (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Expandable profile liner (EPL) is a new drilling technology of hole wall stability maintenance, the round tube is pressed to be special cross-section tube, lowering into the hole, then expanding to circular tube. Aiming at the requirements of geological exploration industry, a set of design theory of expandable profile liner section shape is put forward in this paper, the related steps and details of the design are systematically described, and design diagrams of expandable profile liner section shape of 6 different models and sizes were presented. On this basis, comparative analysis on the different designed section shapes are made by using ANSYS14.0 numerical simulation software, 3 principles for expandable profile liner selection are obtained: plum blossom with six petals is the best section shape; the crest & troughs radius dimensions of the designed section and the radian should be as close as possible; and the wall thickness should be as small as possible under the prerequisite of satisfying the requirements of wall protection pressure.

**Key words:** drilling; expandable profile liner; cross section design; shape selection; numerical simulation

## 0 引言

膨胀波纹管技术 (Expandable Profile Liner, EPL) 主要用于钻井过程中在不减小井眼尺寸的情况下封堵各种复杂地层、补贴损坏套管、延长技术套管长度等。采用这种技术能大大降低钻井过程中的各种风险。由于能够实现单一尺寸井眼钻井和连续封隔复杂地层等作用 (图 1), 膨胀波纹管技术被认为是 21 世纪钻井工程的重大技术革命之一<sup>[1]</sup>。近年来, 石油钻井行业内不断有大口径的膨胀波纹管产品在现场应用成功。

我所针对地质钻探行业需求展开了膨胀管相关技术的系列研究, 开发出了 3 种小口径膨胀波纹管产品, 现已进入推广应用阶段。

膨胀波纹管技术首先是将金属圆管制成截面

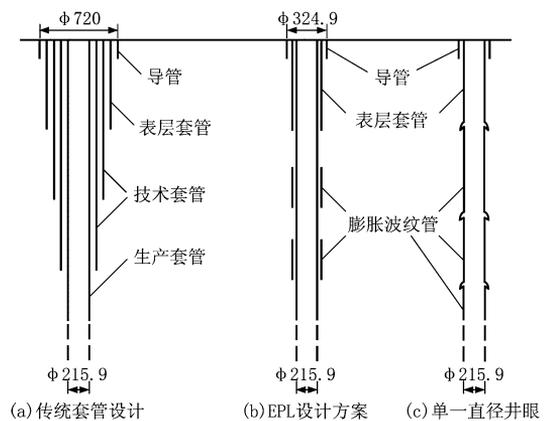


图 1 波纹管实现等径钻进方案

异形管 (见图 2), 波纹管下入孔内后, 在水力和胀管器作用下, 膨胀恢复到要求的尺寸。膨胀波纹管护壁技术主要用于封隔复杂孔段, 处理恶性漏失或塌

收稿日期: 2015 - 04 - 28; 修回日期: 2015 - 05 - 21

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项“膨胀套管护壁技术研究与推广应用” (编号: 2012ES130021); 国土资源部公益性行业科研专项“马坑矿区复杂地层膨胀管技术的应用研究” (编号: 201311059) 联合资助

作者简介: 张化民, 男, 汉族, 1981 年生, 工程师, 硕士, 从事岩土钻掘相关钻头与钻具设计工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, 15100707651@163.com。

孔等事故,可保证复杂地区深孔钻探的顺利进行。为了保证波纹管顺利通过钻孔,下入到护壁孔段,同时膨胀护壁后不损失孔径,下孔前波纹管最大外径尺寸应小于钻孔直径,膨胀完成后的波纹管管段内径尺寸应大于钻孔直径;为了满足制作和应用的可行性,波纹管断面形状要易于成形和膨胀,波纹管膨胀后管段应有尽可能小的椭圆度,最小的残余应力;为达到封堵地层维持孔壁稳定的目的,膨胀后的管体应具有尽可能大的抗外挤强度、抗内压强度等性能。这就势必要对波纹管材料、截面、成形方法和膨胀过程进行分析,研究满足目的性、经济性和实用性要求的膨胀波纹管设计方法、成形工艺和施工工艺。

本文在总结我所膨胀波纹管研究工作的基础上,主要论述地质勘探用小口径膨胀波纹管截面设计理论和基于 ANSYS14.0 数值模拟的截面形状优选。

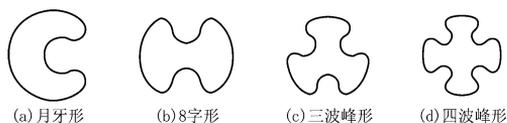


图2 各种波纹管截面形状

## 1 可膨胀波纹管截面设计理论

### 1.1 截面设计参数

#### 1.1.1 最小弯曲半径

在初步设计波纹管截面时,要根据波纹管材料特性,借助板料弯曲时最小弯曲半径的确定方法<sup>[2]</sup>,以允许伸长率为条件计算并确定波纹管截面的最小相对弯曲半径  $r_{\min}$ 。

相对弯曲半径是指板材折弯时弯曲半径与板厚地比值,反映了板料的弯曲变形程度。相对弯曲半径越小,弯曲变形程度越大。在保证外层不发生破裂时,所能达到的内圆角半径与厚度的比值,称为最小相对弯曲半径。表示弯曲时的成形极限。

$$\frac{r_{\min}}{t} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\delta_{\max}} - 1 \right)$$

式中: $r_{\min}$ ——最小弯曲半径; $t$ ——壁厚; $\delta_{\max}$ ——材料的延伸率。

以延伸率为25%的钢材为例计算,设计波纹管的最小弯曲半径为不得小于壁厚的2倍。

#### 1.1.2 管材径厚比

管材的径厚比是指管材的外径与壁厚的比值,由管材的抗内压与抗外挤强度确定<sup>[1]</sup>。

抗内压强度采用薄壁圆筒内压破坏计算得出:

$$p_0 = \frac{2t}{D} \sigma_b$$

式中: $p_0$ ——圆管的抗内压强度,MPa; $D$ ——管材外径,mm; $\sigma_b$ ——管材抗拉极限强度,MPa。

采用抗拉强度为400 MPa的钢材质波纹管,以抗内压 $\leq 20$  MPa为目标,设计的波纹管径厚比 $\geq 40$ 。

圆管抗外挤强度按圆柱薄壳弹性失稳时的临界载荷考虑,计算式如下:

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

式中: $q_0$ ——圆管的抗外挤强度,MPa; $E$ ——管材弹性模量,MPa; $\mu$ ——管材泊松比。

以普通钢材参数 $\mu=0.3$ , $E=2.1$  GPa为例,当设计要求抗外挤强度 $\leq 20$  MPa时,设计波纹管径厚比 $\geq 26.57$ 。

#### 1.1.3 成形后最大外径和膨胀后最小内径

本文所设计的波纹管主要用于地质钻探中的护壁,其成形最大外径要小于钻孔直径,膨胀完成后的内径要不小于钻孔直径。根据文献[3],选取3种尺寸进行研究: $\varnothing 127$  mm变 $\varnothing 108$  mm、 $\varnothing 108$  mm变 $\varnothing 89$  mm和 $\varnothing 89$  mm变 $\varnothing 73$  mm(参见表1)。

表1 三种规格膨胀波纹管的应用尺寸要求 mm

序号	规格	钻头直径	原管外径	成形后外径	膨胀后内径
1	$\varnothing 127$ 变 $\varnothing 108$	110	127	$< 108$	$> 110$
2	$\varnothing 108$ 变 $\varnothing 93$	95	108	$< 93$	$> 95$
3	$\varnothing 89$ 变 $\varnothing 73$	76	89	$< 73$	$> 76$

### 1.2 截面设计计算

可膨胀波纹管截面形式可以分为8字形和四、六、八、十瓣梅花形,波峰、波谷为相切的圆弧连接而成,形状参数为波峰半径、弧度和波谷半径、弧度。

参见图3,笔者研究分析发现,可膨胀波纹管形状参数之间存在以下关系:

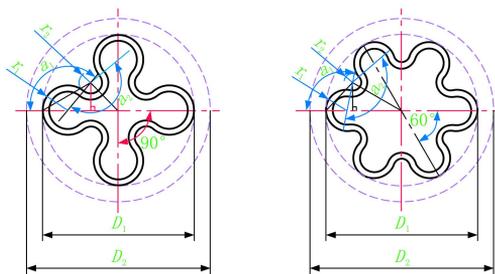


图3 多瓣梅花形截面尺寸计算示意图

$$\begin{cases} 2\alpha_1 - \alpha_2 = 360^\circ/n \\ (\alpha_1/360^\circ)2\pi r_1 + (\alpha_2/360^\circ)2\pi r_2 = \pi D^2/n \\ r_1 + (r_1 + r_2)\cos(180^\circ - \alpha_1) + (r_1 + r_2)\sin(180^\circ - \alpha_1)\cot\frac{180^\circ}{n} = D_1 \end{cases}$$

式中: $\alpha_1$ ——1/2 波峰圆弧角度; $\alpha_2$ ——波谷圆弧角度; $r_1$ ——波峰圆弧半径; $r_2$ ——波谷圆弧半径; $D_1$ ——波纹管成形后最大外径; $D_2$ ——波纹管成形前圆管外径; $n$ ——波纹管花瓣数。

在一种规格波纹管截面设计时,加工前圆管外径和波纹管成形最大外径为已知,该方程组为四元一次三项方程组,3 个方程,4 个未知数,理论上存在无数组解。考虑最小弯曲半径,峰谷外圈半径值不应小于壁厚的 2 倍,除去无意义解。考虑加工制作

的方便性,峰谷半径值取整数,可以初步选定数组尺寸组合,在绘图软件中成图,完成膨胀波纹管截面设计。以  $\varnothing 89\text{mm}$  变  $\varnothing 73\text{mm}$  规格为例,部分可膨胀波纹管计算尺寸如表 2 所示,设计图如图 4 所示。

表 2 部分  $\varnothing 89\text{mm}$  变  $\varnothing 73\text{mm}$  规格膨胀波纹管设计截面尺寸

花形	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$\alpha_1/(\text{°})$	$\alpha_2/(\text{°})$
十瓣 ( $n=10$ )	7	3	83.73	131.45
	6	4	88.48	140.95
八瓣 ( $n=8$ )	8	4	87.85	130.70
	7	5	92.68	140.36
六瓣 ( $n=6$ )	9	5	109.16	158.31
	8	7	101.81	143.61
四瓣 ( $n=4$ )	10	9	125.48	160.96

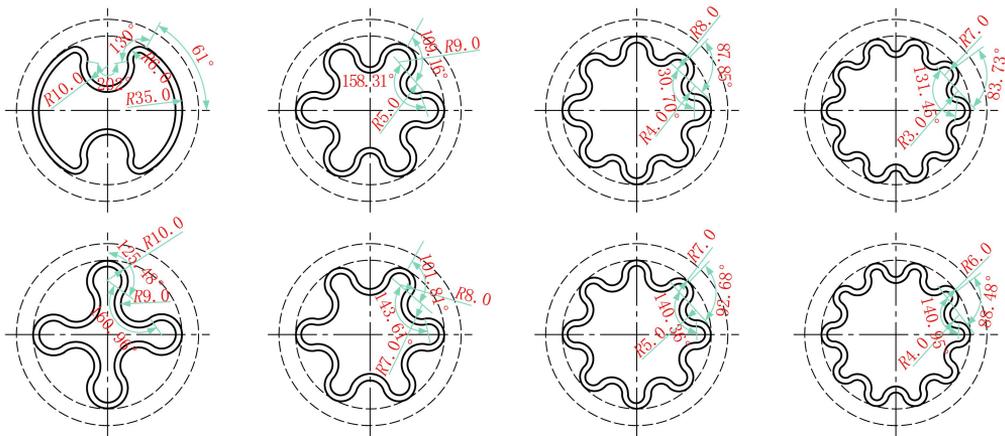


图 4 部分  $\varnothing 89\text{mm}$  变  $\varnothing 73\text{mm}$  规格膨胀波纹管设计图

## 2 基于 ANSYS 数值模拟分析的膨胀波纹管截面选择

膨胀波纹管有多种截面形式,每种截面形式又有多种尺寸组合,每种规格可以设计出十多个截面图纸,何种截面设计图是最佳方案需要进一步研究。如果采用物理实验的研究方法,不同截面尺寸需要不同的成形模具和加工设备,需要大量的试验设备和检测工具,成本高效率低,费时费力。数值模拟分析方法以其直观、高效、低成本的特点,更适用于此项研究。

本文通过 ANSYS 软件对不同花形、不同尺寸和不同壁厚的截面形式进行了比较,总结出了可膨胀波纹管截面优选的一般规律。

所用软件为 ANSYS14.0,所选单元为 PLANE183,材料参数为:弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3,屈服强度 270 MPa,切线模量 5 GPa。将 CAD

图纸导入 ANSYS 中建立模型,进行网格划分,施加固定约束和内压,打开大变形进行求解,运算完成后进行后处理,统计分析变形之后的最大内径和最小内径<sup>[4]</sup>。分析过程参见图 5。

### 2.1 不同花形之间的比较

选取的波纹管不同花形设计见图 6。同规格 ( $\varnothing 89\text{mm}$  变  $\varnothing 73\text{mm}$ )、同壁厚 (3 mm) 的不同花形的波纹管在同一内压 (30 MPa) 下的膨胀结果如图 7 所示。最小外径代表了膨胀后波纹管的通畅能力,最小外径值越高,膨胀效果越好,六瓣梅花形截面表现最佳。椭圆度表示波纹管膨胀后的均匀度,膨胀后最大直径与膨胀后小直径差除以膨胀后最大外径得出的值,用百分比表示。椭圆度越低,表明膨胀越均匀。分析结果表明随花瓣数的增多,波纹管膨胀后的椭圆度升高。综合最小外径和椭圆度两方面考虑,六瓣梅花形截面是波纹管的最佳形式。多于六瓣的花形不但最小外径值低,且椭圆度高,不宜采用,见图 7。

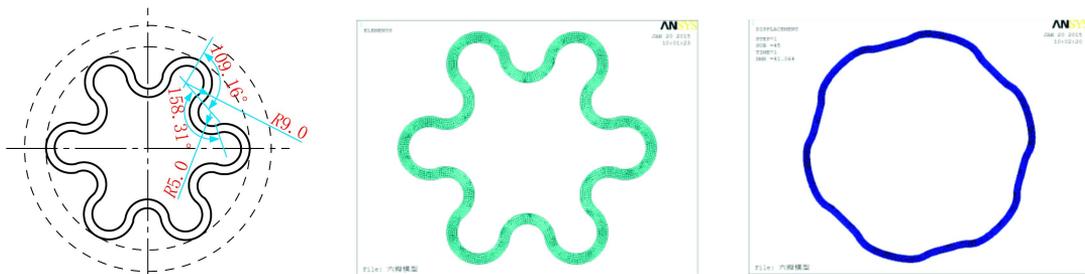


图5 设计图、模形和膨胀结果

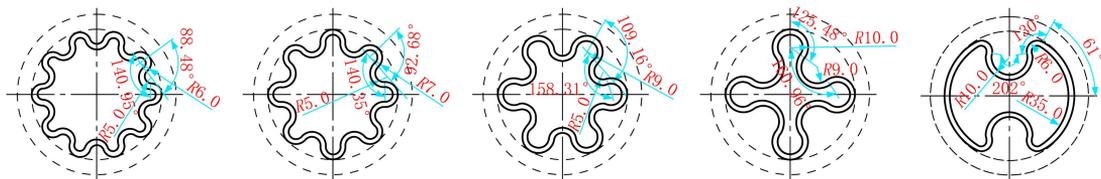


图6 选取的不同花形设计图

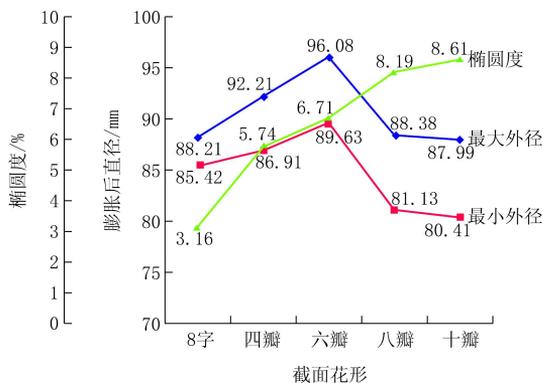


图7 不同花形截面的波纹管膨胀结果对比

### 2.2 不同设计尺寸之间的比较

同为六瓣梅花形截面,可以有多种不同峰谷半径尺寸组合,选取4组尺寸组合进行分析比较(见图8),数值分析结果见表3。

表3 对比研究的4种不同截面尺寸组合

截面花形	序号	波峰半径/mm	波谷半径/mm	波峰弧度/(°)	波谷弧度/(°)
六瓣	1	10	4	101.16	142.32
	2	9	5	109.16	158.31
	3	8	7	101.81	143.61
	4	7	9	97.20	134.40

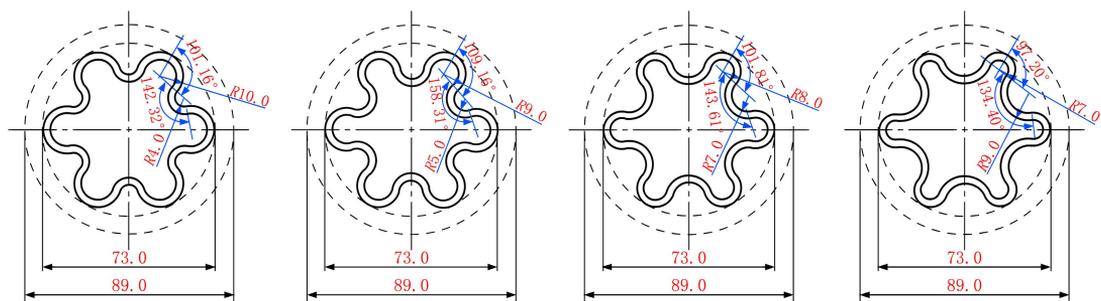


图8 对比研究的四种截面设计图

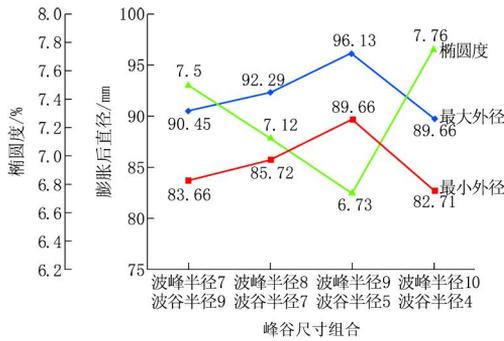
经实验数据统计分析,不同峰谷尺寸组合的波纹管截面膨胀后的最大外径、最小外径和椭圆度如图9所示,研究结果表明波峰波谷的半径的值越接近,膨胀后的椭圆度越低,最小外径越高。所以设计波纹管截面应以波峰波谷的尺寸和形状越接近越佳。

### 2.3 不同壁厚波纹管之间的比较

增大膨胀波纹管的壁厚,可以得到较高的膨胀

后抗内压强度和抗外挤强度。但壁厚的增大势必增加加工制作和膨胀工艺的难度。选取何种厚度是膨胀波纹管设计中的一个关键问题。

本文选取4种厚度(2、3、4和5mm)的六瓣花形最优尺寸截面进行比较数值模拟。分析数值模拟结果,4种壁厚的膨胀波纹管膨胀后的最大外径、最小外径和椭圆度如图10所示。波纹管膨胀效果随壁厚的增加而变差,且呈现非线性增量式变化。所以,



注:此处波峰半径为外沿半径,波谷半径为内沿半径,波谷外沿半径 = 内沿半径 + 壁厚(3 mm)。

图 9 不同峰谷尺寸组合的波纹管膨胀结果对比

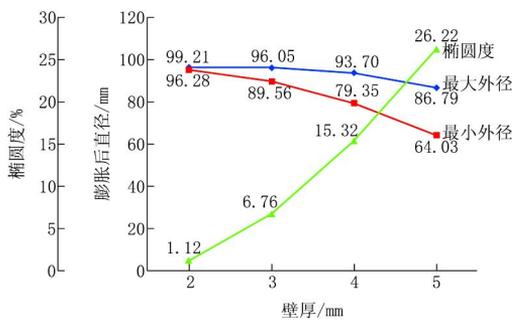


图 10 不同壁厚波纹管膨胀的膨胀效果对比

在满足抗内压和抗外挤强度的要求的情况下,膨胀波纹管的壁厚应尽量的小。

以上分析论述以  $\varnothing 89$  mm 变  $\varnothing 73$  mm 规格为基础,其他两种规格膨胀波纹管的数值模拟分析也同样存在以上规律。

在以上设计理论和截面选择的基础上,我所研制成功了 3 种规格(见表 4)的膨胀波纹管。膨胀波纹管实物和膨胀后效果见图 11、12。

表 4 三种膨胀波纹管的相关尺寸 mm

序号	规格	原管外径	成形后外径	膨胀后内径
1	$\varnothing 127$ 变 $\varnothing 108$	127	108	$\geq 110$
2	$\varnothing 108$ 变 $\varnothing 93$	108	93	$\geq 95$
3	$\varnothing 89$ 变 $\varnothing 73$	89	73	$\geq 76$



图 11 加工完成的波纹管实物



图 12 膨胀完成的波纹管实物

### 3 结语

(1) 本文在总结我所膨胀波纹管一系列研究的基础上,建立了一套用于地质勘探的膨胀波纹管设计理论。该理论以钻探护壁需求和工程实际为出发点,经过数学和力学计算,设计出实用、经济、合理的膨胀波纹管截面形式。为膨胀波纹管的产品研制和工艺研发奠定了基础。

(2) 本文采用数值模拟的方法,对不同的膨胀波纹管的设计截面进行了对比分析,得出了膨胀波纹管设计截面的优选原则:六瓣梅花形截面是膨胀波纹管的最佳截面形式;膨胀波纹管的峰谷半径和弧度应尽量接近;在满足内压和外挤强度的要求下,膨胀波纹管的壁厚应尽量的小。

### 参考文献:

- [1] 陶兴华,朱宏武,张宏,等.波纹管成形及膨胀过程力学性能分析[J].石油机械,2011,39(3):12-15.
- [2] 官英平,李洪波,王凤琴.板材弯曲最小相对弯曲半径计算方法探讨[J].金属成形工艺,2003,21(5):52-53.
- [3] GB/T 9808—2008,钻探用无缝钢管[S].
- [4] 张洪才,等. ANSYS14.0 理论解析与工程应用[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [5] 杨顺辉. 钻井用可膨胀波纹管技术研究[D]. 山东青岛:中国石油大学(华东),2008.
- [6] 练章华,施太和,韩建增. 膨胀套管摩擦系数与轴向位移的模拟研究[J].石油机械,2002,30(1):1-6.
- [7] 余金陵,周延军,王锡洲. 膨胀管技术的应用研究初探[J].石油钻探技术,2002,30(5):55-57.
- [8] 李日宁,贺新敬,刘今朝,等. 可膨胀管技术及其在石油钻探行业中的应用[J].石油机械,2002,30(7):66-68.
- [9] 张建兵. 钻井实体膨胀管技术[J].石油机械,2003,31(S1).
- [10] 杨利,等. 可膨胀管在油田钻井和完井中的应用[Z].胜利石油管理局钻井工艺研究院,2001.
- [11] 孟庆昆,等. 可膨胀套管技术概述[J].钻采工艺,2003,26(4).
- [12] 何育荣,等. 新形井身结构及膨胀管技术[C]. 中国石油学会石油工程学会会议,2003.
- [13] 韩建增,张先普. 残余应力对套管抗挤强度影响的有限元分析[J].钻采工艺,2001,24(2):41-45.
- [14] 仇伟德,赵怀文. 影响套管抗挤压强度的主要因素[J].石油大学学报(自然科学),1995,(2).
- [15] 于好善,杨甘生,宋刚,等. 深孔膨胀套管护壁技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):130-137.
- [16] 于好善,王成彪,杨甘生,等. 膨胀套管护壁技术研究现状及工作原理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):1-4.
- [17] 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),2014,41(11):37-40,45.