

小口径勘探用可膨胀波纹管 ANSYS 模拟与实验分析

陈晓君^{1,2}, 宋刚², 孟庆鸿², 邵玉涛², 张化民²

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:可膨胀波纹管技术是通过将圆形管材进行特殊工艺处理, 使管径发生变形以便其顺利通过井孔到达问题地层, 然后通过液压膨胀复原, 达到修井固井的目的。经过多年的技术发展, 此技术已在石油工程中得到很多实践应用, 但是在口径相对较小的地质勘探孔中, 由于受口径以及工艺技术等限制, 尚未有相关应用。主要针对材料编号为 KP02 的 $\varnothing 75$ mm 小口径梅花状可膨胀波纹管进行研究, 通过利用 ANSYS 有限元软件进行模拟以及实验室实验, 得到其膨胀变形参数并对其膨胀过程进行对比分析。

关键词:可膨胀波纹管; 地质勘探; 小口径钻孔; ANSYS 模拟分析

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)11-0037-04

ANSYS Simulation of Expandable Convoluted Tubing for Small Diameter Bore Prospecting and Experimental Analysis/CHEN Xiao-jun¹, SONG Gang², MENG Qing-hong², SHAO Yu-tao², ZHANG Hua-min² (1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Expandable convoluted tube technology is based on a special process on round tubing to make the tubing deformed so as to it can smoothly reach the trouble formation through the borehole; then by hydraulic expansion recovery, workover and cementing are realized. This technology has been used in petroleum engineering a lot after its many years' development, but due to the confinement of the diameter and technology, it has not been applied in geological prospecting with smaller diameter. This paper presents the study that is mainly based on $\varnothing 75$ mm small diameter quincuncial shape expandable convoluted tube being made of KP02 seamless steel tube, expansive transformation parameters are obtained by simulation with ANSYS finite element software and indoor experiments, and the contrast and analysis are made on the expanding process.

Key words: expandable convoluted tubing; geological prospecting; small diameter bore; ANSYS simulation analysis

0 引言

膨胀波纹管技术(EPL)是通过将圆形管材进行冷压或拔处理, 使圆管径向发生大的塑性变形, 截面形状呈波纹状, 以达到减小外径的目的, 使其可以通过上层套管或裸孔顺利到达所封隔地层位置, 借助液压将其膨胀, 再在胀管器的作用下, 使其完全膨胀成圆管, 用来封隔复杂地层的一项新技术^[1]。

俄罗斯鞑靼斯坦石油公司(TATNEFT)在 20 世纪 70 年代就已利用可膨胀波纹管技术来封隔漏层, 解决井漏问题。国内自 1998 年开始, 中国石油勘探开发研究院、中国石油大学(北京)、中石化德州石油钻井研究所也相继开展了膨胀波纹管的研究。我国自行研发的波纹管现场试验的成功, 标志着我国也初步具有了该项技术, 大大降低了膨胀波纹管技术的应用成本。

目前, 可膨胀波纹管施工技术还只是在石油工

程中应用, 在复杂地层的勘探作业中, 主要还是以“预防为主, 处理为辅”的指导方针, 尽量避开选择情况复杂的地层进行勘探作业^[2]。中国地质科学院勘探技术研究所创新性地将石油钻探中用到的可膨胀波纹管技术引入到地质勘探作业中, 并于 2012 年依托国土资源公益性行业科研专项项目开始展开各项研究实验工作。

1 波纹管膨胀过程有限元模拟

在进行可膨胀波纹管研究的过程中, 通过对多种型材的屈服强度、强度极限等性能进行研究对比, 考虑到所选管材的可塑性及材料的易得性, 本项目最终确定选择膨胀管材料的编号为 KP02 号无缝钢管作为地质勘探用可膨胀波纹管的材料研究对象。

为了使 $\varnothing 89$ mm 的钢管能够下放至 $\varnothing 75$ mm 的孔中, 通过对 $\varnothing 89$ mm 原管材进行特殊加工处理得

收稿日期: 2014-09-24

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目“马坑矿区复杂地层膨胀管技术的应用研究”(201311059)

作者简介: 陈晓君(1989-), 男(汉族), 湖北十堰人, 河南理工大学在读硕士研究生, 岩土工程专业, 从事岩土钻掘工程研究工作, 河南省焦作市高新区世纪大道 2001 号, chenxiaojun.107@163.com。

到最大外径 70 mm、壁厚 3 mm 的十瓣梅花状可膨胀波纹管,如图 1。

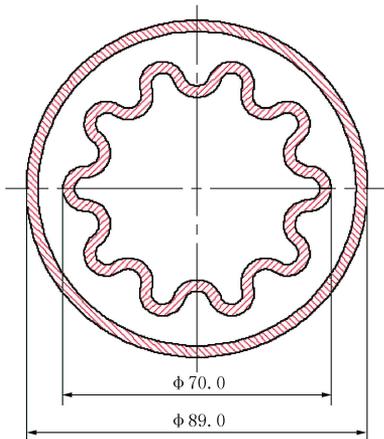


图 1 十瓣梅花状波纹管

ANSYS 数值模拟分析所选用的对象为 $\varnothing 75$ mm 地质勘探用可膨胀波纹管,最大外径 70 mm,壁厚 3 mm,材料为 KP02 号无缝钢管,屈服强度 σ_s 为 193 MPa,极限强度为 520 MPa,弹性模量 E 为 2.0 GPa,泊松比为 0.3。波纹管在膨胀过程中是通过液体介质压力膨胀的,其膨胀过程中受力情况如图 2。

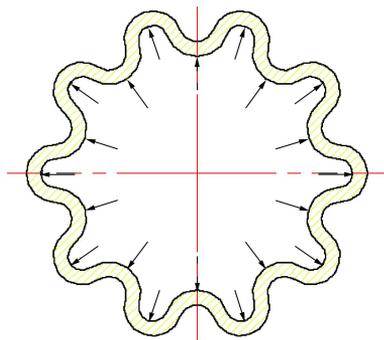


图 2 波纹管膨胀受力示意图

由于波纹管是轴对称结构,根据有限元模拟理论,其膨胀过程的力学模型可取 1/4 的结构模型进行膨胀研究^[3],其简化图如图 3 所示。模型选择结构实体单元中的 PLANE183 平面应变单元,如图 3 所示。

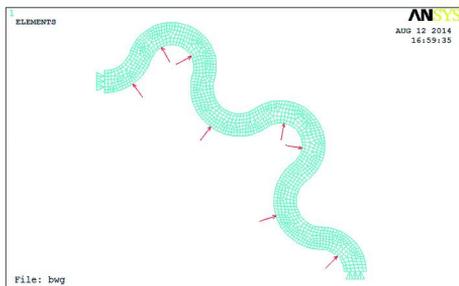


图 3 波纹管 1/4 的结构模型

模拟过程中假设波纹管结构为均匀的各向同性结构体,对其 1/4 结构切片进行网格划分,对边界进行相应的位移条件约束。根据实际实验、施工情况分析:波纹管膨胀力是一个随时间增长的时间效应载荷。在波纹管内面边界施加 76 s 时间步载荷,步长 1 s,0.5 MPa,最终膨胀压力为 38 MPa。加载后,变形情况如图 4。

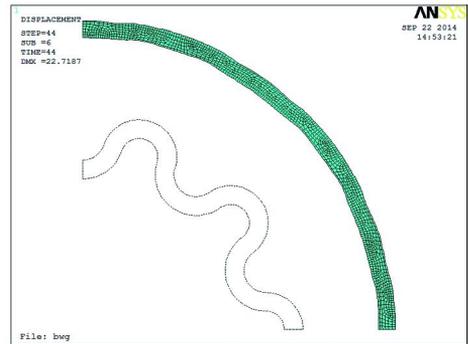


图 4 波纹管受力变形情况模拟

1.1 波纹管成形情况 ANSYS 有限元结果

针对 $\varnothing 75$ mm 地质勘探用可膨胀波纹管膨胀过程进行了 ANSYS 有限元模拟,模拟中当时间步载到 45 s 时停止运算,通过检查发现,此时已加压至 22.5 MPa,波纹管的应力已达到其极限强度值。

通过对波纹管的波峰和波谷进行关键点定义,得到其载荷位移曲线图,如图 5 所示。通过对其载荷位移曲线图进行分析发现,当加载压力 > 4.5 MPa 时波纹管开始有较明显的位移变化,继续加载压力至 15 MPa 时波纹管尺寸已能满足设计要求,加压至 17.5 MPa 时波纹管已基本涨圆,压力达到 22 MPa 时波纹管管体已发生破坏情况。

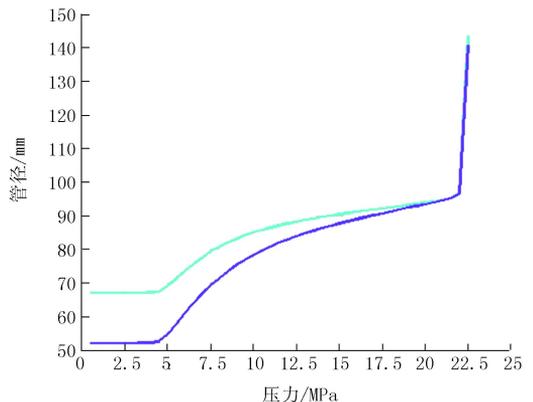


图 5 波纹管受力变形情况模拟

当加载压力至 17.5 MPa 时,波纹管的外径达到 92.89 mm,波谷处外径达到 90.77 mm,管体已完全胀圆,其变形情况如图 6 所示。此时波纹管的最大

应力达到 508 MPa,波纹管 17 MPa 时 Mises 应力云图如图 7 所示。当压力加载至 22 MPa 时,波纹管的最大应力已达到 518 MPa,如图 8 所示,趋近波纹管的极限强度值,导致软件无法继续计算,出现错误提示。从云图中可以看出,波纹管在成型过程中,其最大应力集中在波纹管的波峰顶端内侧和波谷外侧底端。

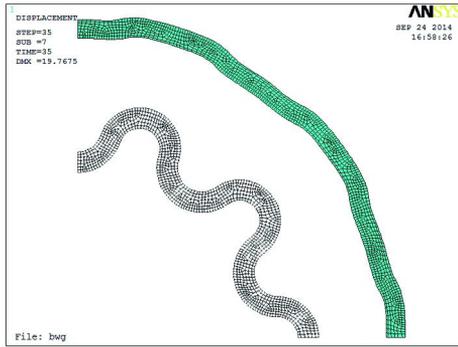


图 6 17.5 MPa 波纹管位移变化云图

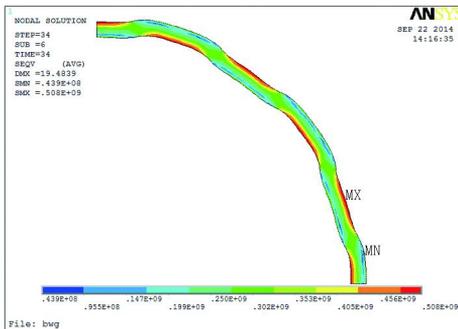


图 7 17 MPa 波纹管 Mises 应力云图

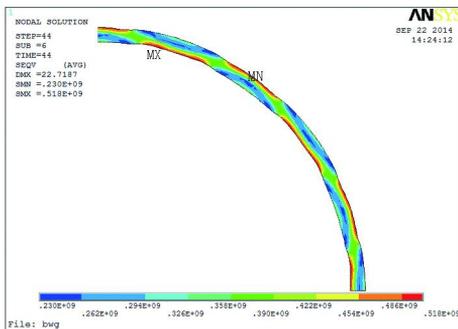


图 8 22 MPa 波纹管 Mises 应力云图

整理数据发现,在第 30 s 时,所模拟的波纹管波峰处外径达到 90.46 mm、波谷处外径已达到 87.73 mm,此时管体内径最小值(波谷处直径)已达到 81.73 mm,已能满足 $\varnothing 75$ mm 地质勘探钻孔继续施工要求。此时加载压力为 15 MPa,管体最大应力为 506 MPa,如图 9 所示,变形情况如图 10 所示。

1.2 波纹管成形情况 ANSYS 有限元结果分析
通过进行 ANSYS 有限元模拟,得出了所研究的

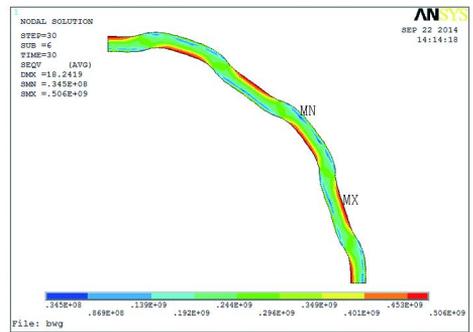


图 9 15 MPa 波纹管 Mises 应力云图

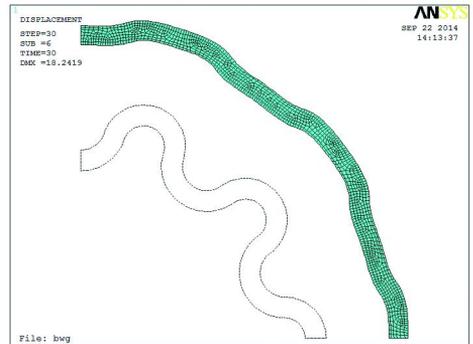


图 10 15 MPa 波纹管位移变化云图

小口径地质勘探用可膨胀波纹管材料 KP02 的膨胀过程以及膨胀参数。

(1)由膨胀模拟节点位移变形情况发现, $\varnothing 75$ mm 可膨胀波纹管在压力达到 4.75 MPa 时开始发生较为明显的膨胀变形。

(2)当膨胀力达到 15 MPa 时,波纹管的最小内径(波谷处直径)为 81.73 mm,此时已能满足设计要求,可满足 $\varnothing 75$ mm 地质勘探孔后续施工。

(3)膨胀压力达到 22 MPa 时波纹管应力已达到其极限强度临界值,在实际管体膨胀中应注意控制膨胀压力在 20 MPa 左右。

(4)从 ANSYS 模拟中可以看出,波纹管在膨胀过程中,其最大应力集中在波纹管的波峰内侧和波谷外侧,分析预测:实际施工膨胀过程中,波峰和波谷容易发生破坏。

2 $\varnothing 75$ mm 膨胀波纹管膨胀实验

$\varnothing 75$ mm 膨胀波纹管是基于地质勘探施工过程中复杂地层处理的新型技术工艺,为了保证其能更好地服务于地质勘探项目,进行了大量的实验研究和模拟。

2.1 波纹管膨胀实验过程及结果

在波纹管的膨胀打压实验过程中,通过采取分级逐次加压的方式,对成型的波纹管样品进行了多

次打压实验,打压系统示意图见图 11。结合 ANSYS 模拟分析,在实际打压过程中,当压力达到 20 MPa 时,波纹管的最小直径(波谷处直径)达到 85.23 mm,最大直径(波峰处直径)达到 88.6 mm,此时波纹管的内径已 > 76 mm;继续升压,当压力达到 26 MPa 时,波纹管管体发生爆裂,此时,波纹管的外径最大值达到 90 mm,最小值达到 88 mm。具体实验数据情况见表 1。

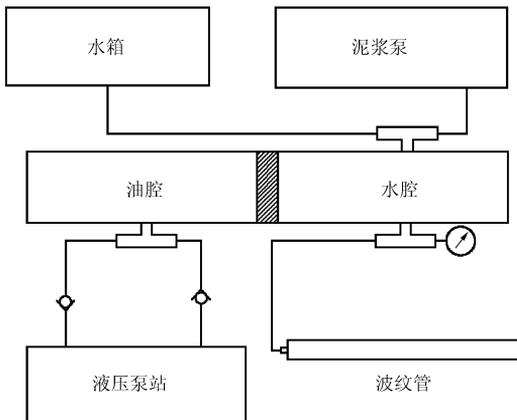


图 11 膨胀波纹管打压装置示意图

表 1 波纹管膨胀实验过程数据

压力/MPa	波峰/mm	波谷/mm	压力/MPa	波峰/mm	波谷/mm
0	68.5	55	20	88.6	85.23
5	69.73	57.07	23	89.7	86.43
10	79.96	72.5	24	90.3	88.27
15	86.37	81.27	26	90.63	88.9
18	87.9	84.12			

在实验中,当波纹管打压到一定的压力后会发生破裂,实验中绝大部分的管材的破裂压力都 > 24 MPa,最大达到 26 MPa。为了保证后续施工的可靠性,此处选择的膨胀压力为 23 MPa。由表中数据可以看出,当压力达到 20 MPa 时,波纹管的最小内径已达到 79.23 mm(壁厚 3 mm),此时波纹管已达到设计要求,可以满足 $\varnothing 75$ mm 钻孔钻具的下放/提起施工。膨胀过程中波峰波谷变形情况见图 12,膨胀后的波纹管效果见图 13。

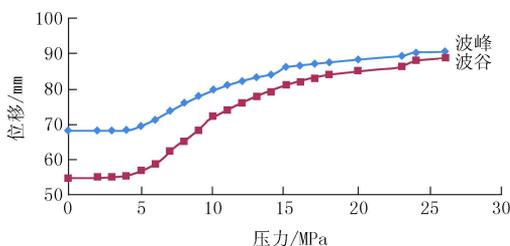


图 12 膨胀实验过程波峰波谷变形图



图 13 波纹管膨胀效果图

2.2 波纹管膨胀实验结果分析

通过对 $\varnothing 75$ mm 的小口径可膨胀波纹管进行膨胀打压实验,并对其实验结果进行整理分析。

(1) 实验过程中的数据显示,当波纹管压力达到 5 MPa 时,波纹管开始有明显的膨胀变形迹象;

(2) 根据数据可以确定, $\varnothing 75$ mm 的小口径可膨胀波纹管在施工打压过程中,当膨胀压力达到 20 MPa 时即可满足后续施工工作要求;

(3) 通过破坏性实验观察发现,膨胀管的破坏点超过 90% 以上都是发生在波纹管波峰的位置,见图 14。

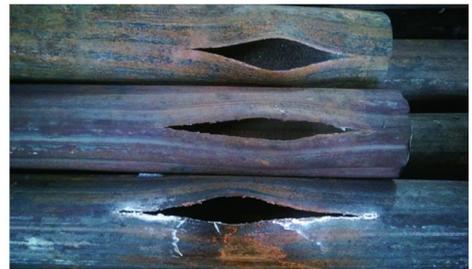


图 14 波纹管破坏性实验效果图

3 结论

通过利用 ANSYS 有限元模拟以及大量的实验工作,基本得到了所研究的小口径地质勘探用可膨胀波纹管的膨胀工作参数,为今后可膨胀波纹管在地质勘探领域的应用打下了良好的基础。研究得出了如下结论:

(1) 通过对材料的研究,确定选择编号为 KP02 号材料作为地质勘探用可膨胀波纹管基管材料;

(2) 通过模拟、实验研究,验证了可膨胀波纹管在地质勘探领域的可行性;

(3) 利用 ANSYS 有限元软件进行模拟分析得到的结果与实验结果基本能够吻合,进一步验证了 ANSYS 有限元软件在模拟材料弹塑性大变形领域的可靠性;

(下转第 45 页)

刹车后,试块下降平稳。然后用总质量5 t的试块对副卷扬进行单绳一速提升能力试验,试验结果制动迅速可靠。

(3)液压系统起升钻塔平稳,液压支腿伸出准确稳定,节流阀调节稳定锁死,各部件无渗漏油现象。

(4)对钻塔进行加载试验,逐级加载至满载,保持10 min后卸载,钻塔无永久变形,焊缝、焊口处无开焊及裂纹现象。

(5)对水龙头进行静载试验,卸载后所有受力零件无永久变形;对水龙头进行静水压试验,每一个试验点保持2 min,各试验点无渗漏现象。



图5 SPT-1500型拖车钻机施工现场

6 SPT-1500型拖车钻机实际生产情况

2011年4月,第一台SPT-1500型拖车钻机在新疆呼图壁顺利开钻,孔径325 mm,孔深672 m,历时15天。在本次钻井施工中,该钻机钻塔液压起升不平稳,后经检验是两个液压起升油缸的液压锁导致的问题,将液压锁替换为单向节流阀,经试验解决了问题。本次钻井施工中,钻机能力得到证实,钻塔承载能力符合使用要求,钻机配置合理,得到了客户的一致好评。钻机施工现场见图5。

7 结语

近年来水文水井钻机的结构和品种随着钻进方法的发展在不断地变化,机械化程度也在不断的提高。SPT-1500型拖车钻机因其搬迁转场方便快捷,省时省力,钻井较深以及适中的价格显示出其

优越性。目前SPT-1500型拖车钻机已成功打开新疆市场,用户好评不断,也为我们不断完善此钻机提供了很多宝贵意见。我们将不断完善此类钻机,并研发新型钻机满足市场需求。

参考文献:

- [1] 金晶.一种用于新疆地区的拖装式浅井钻机的研制[J].新疆石油科技,1993,2(3):77-80.
- [2] 胡仲杰,章联库,等.HXY-800QT型拖车钻机的研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(6):34-37.
- [3] 史亚楠,刘庆林,等.水井钻机的选型与配套[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(9):27-32.
- [4] 王慧岭,程林,等.新型SPT-600拖车钻机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(6):26-28,32.
- [5] DZ/T 0047-93,水文水井钻机技术条件[S].
- [6] DZ/T 0048-93,水文水井钻机试验方法[S].

(上接第40页)

(4)通过对研究数据的分析,得到了小口径地质勘探用可膨胀波纹管的膨胀压力、工作压力以及安全压力范围;

(5)研究发现了地质勘探用可膨胀梅花波纹管工作过程中的薄弱点,可为今后对梅花状膨胀管的研究起到指导性作用。

参考文献:

- [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,(2):91-95.
- [2] 甄绍记.岩溶发育地层水文孔钻探施工技术[J].西部探矿工程,2009,(12):58-60.
- [3] 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,(9):99-101.
- [4] 赵凯,宋刚.可膨胀管技术实验方法与仿真分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):45-48.
- [5] 于好善,王成彪,宋刚,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.