

# 封隔器式膨胀管的有限元数值模拟分析

李运鹏<sup>1</sup>, 尹飞<sup>1\*</sup>, 孙肖<sup>1</sup>, 冯建月<sup>2</sup>, 刘义<sup>1</sup>, 陈志昂<sup>3</sup>, 张云飞<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309; 3. 河北工程大学机械与装备工程学院, 河北邯郸 056000)

**摘要:** 封隔器式膨胀管技术被研发用于水文地质勘探护壁和破损井管补贴修复, 具有成本低、工艺简单的特点。为了使封隔器能满足膨胀管的要求, 对封隔器膨胀机构进行了改进, 利用封隔器对不同性能的管材进行了试验, 根据试验结果决定选择 316L 不锈钢作为膨胀管管材。为了研究封隔器式膨胀管两次膨胀过程中膨胀压力与膨胀管长度和厚度变化的关系, 通过 Abaqus 软件对  $\varnothing 219 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的膨胀管膨胀过程进行数值模拟, 以获得膨胀过程中的应力和应变变化情况, 并用同样规格的膨胀管进行野外试验, 模拟结果与试验结果进行对比, 结果表明模拟结果与实际示范结果基本相同, 说明数值模拟结果可以作为实际施工的参考。

**关键词:** 封隔器式膨胀管; 膨胀管; 数值模拟; 井管修复

中图分类号: P634.8 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2025)02-0106-05

## Finite element numerical simulation analysis of packer-type expandable tubular

LI Yunpeng<sup>1</sup>, YIN Fei<sup>1\*</sup>, SUN Xiao<sup>1</sup>, FENG Jianyue<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, CHEN Zhi'ang<sup>3</sup>, ZHANG Yunfei<sup>1</sup>

(1. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300309, China; 3. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056000, China)

**Abstract:** The packer expansion tube technology has been developed for the hydrogeological exploration of wall protection and the repair of damaged well pipes. It has the characteristics of low cost and simple process. In order to make the packer meet the requirements of the expandable tubular, the expansion mechanism of the packer is improved. The packer is used to test the pipes with different properties. According to the test results, 316L stainless steel is selected as the expandable tubular. In order to study the relationship between the expansion pressure and the change of the length and thickness of the expansion tube during the two expansions of the packer-type expansion tube, the expansion process of the expansion tube with  $\varnothing 219 \text{ mm}$  and wall thickness of 4mm was numerically simulated by Abaqus software to obtain the change of stress and strain during the expansion process, and field tests were conducted on the expansion tube with the same specifications. Then, by comparing the simulation results with the test results, it is concluded that the simulation results are basically the same as the actual demonstration results, indicating that the numerical simulation results can be used as a reference for the actual construction.

**Key words:** packer type expansion mechanism; expandable tubular; numerical simulation; well pipe repair

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-06-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.02.014

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“东部地区战略性矿产靶区查证技术支撑”(编号: DD20240012、DD20242959)、“战略性矿产靶区查证技术支撑”(编号: DD20230399)

第一作者: 李运鹏, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 机械专业, 硕士, 从事钻探技术工作, 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, 510949882@qq.com。

通信作者: 尹飞, 男, 汉族, 1982年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探技术工作, 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, 510949882@qq.com。

引用格式: 李运鹏, 尹飞, 孙肖, 等. 封隔器式膨胀管的有限元数值模拟分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 106-110.

LI Yunpeng, YIN Fei, SUN Xiao, et al. Finite element numerical simulation analysis of packer-type expandable tubular[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 106-110.

## 0 引言

在水文地质勘探工作中,由于地层不稳定,经常会遇到钻孔掉块、坍塌、漏失、缩径等问题<sup>[1]</sup>,常采用下套管的方式进行护壁。自1998年以来,国外开发出膨胀管技术并成功应用在石油钻井中,此技术在2003年前后进入我国开始试验使用,并发展到今天<sup>[2]</sup>。在水文地质勘探领域,为了解决护壁后孔径减小的问题,研发了封隔器式膨胀管技术,该技术具有成本低、工艺简单和护壁后孔径变化不大等特点<sup>[3]</sup>。封隔器式膨胀管还可用于破损井并管修复,延长井的使用寿命<sup>[4]</sup>。

封隔器式膨胀管技术是在地面把膨胀管套在封隔器上,对封隔器加压膨胀后悬挂膨胀管放入井内<sup>[5]</sup>,在井下对封隔器继续加压使膨胀管膨胀至与井壁完全贴合<sup>[6]</sup>。因膨胀管是在井下膨胀,不容易观察其膨胀情况,膨胀压强控制不好,会导致膨胀管发生开裂和变形<sup>[5,7-8]</sup>。为了防止膨胀管出现开裂和不可控形变,通过数值建模,模拟封隔器和膨胀管在井下加压膨胀过程,总结出适合不同规格膨胀管的封隔器压强值,并在实际施工中进行验证模拟结果的准确性,以达到指导施工的目的。

## 1 封隔膨胀系统

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心对封隔器式膨胀管开展了研究,改进了封隔器膨胀机构,研发了新型膨胀管护壁技术。该技术原理是利用金属的塑性变形性质,用封隔器作为动力膨胀机构,在地面把封隔器放入膨胀管中,对封隔器加压到能悬挂膨胀管的状态,再用封隔器悬挂膨胀管下入井内到达井壁破损处,然后对封隔器加压使其膨胀,膨胀管在经过弹性变形后达到屈服强度,然后发生塑性变形,当膨胀管变形至与井壁贴合后再稳压一段时间,塑性形变稳定后膨胀管就贴合在井壁上不再回弹,达到护壁、封堵及井管补贴的技术目的(如图1所示)。膨胀管技术系统主要组成部件为封隔器、膨胀管材和膨胀打压系统3部分。

## 2 膨胀管膨胀试验

为了测试膨胀管管材的性能,模拟井内施工状况,可将膨胀管放置到保护套管中,把封隔器放置到膨胀管的中心,通过膨胀机构对封隔器进行打压试验,当封隔器压力达到一定数值后,膨胀管开始膨胀,随着不断加压,膨胀管膨胀十分迅速,变形几乎

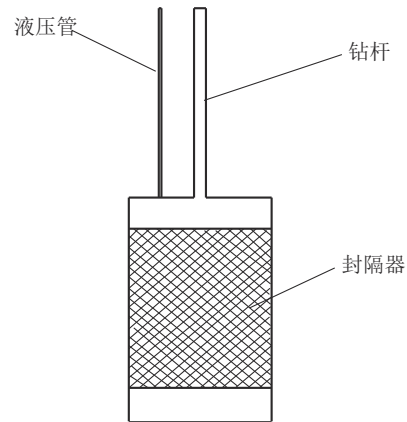


图1 膨胀管封隔器

Fig.1 Expandable tubular packer

与压力增大同时进行,膨胀过程主要分为3个阶段:

(1)轻微变形。当封隔器压力不断增大,管材表面会发生轻微的变形,形状与封隔器膨胀后外形一致。

(2)塑性变形。随着封隔器膨胀压力逐步加大,膨胀管剧烈变形,并会伴随多次响声,当压力达到膨胀管管材的屈服强度值时,膨胀管管材发生塑性变形,并与管壁部分贴合。

(3)变形完成。当封隔器加压到一定压力后,管材完全贴合到保护套管上,膨胀管变形完成。

前人通过实验发现<sup>[1]</sup>,316L不锈钢强度适中,延展性能良好,壁厚平均缩小0.2 mm,且膨胀后金属面十分均匀。由于该不锈钢具有耐腐蚀、不污染水质等优点,因此,本次研究主要对316L不锈钢进行室内模拟和室外试验,并推荐使用该材料用于水井井壁护壁修复。

## 3 膨胀过程有限元模拟

数值模拟的无缝钢管规格参数是 $\varnothing 219 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,材料为316L不锈钢,选取 $\varnothing 273 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 的高强度无缝管作为保护管。膨胀管通过封隔器加压膨胀,封隔器有效膨胀长度1600 mm,选取2300 mm膨胀管作为模拟对象,经过2次加压膨胀完成膨胀过程,贴近实际施工过程,模拟过程中假设膨胀过程中膨胀管内壁均匀受力。

### 3.1 几何模型构建

膨胀管模型为三维可变形实体,保护管模型为三维离散刚体,把膨胀管和保护管装配成一个实例,并设置约束关系<sup>[9-10]</sup>,模型如图2所示。

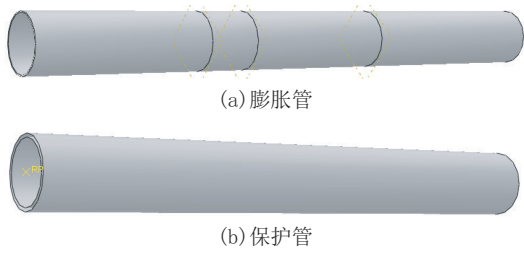


图2 膨胀管和保护管模型

Fig.2 Models of expandable tubular and protective tubular

3.2 材料参数定义

模拟膨胀管材料为316L不锈钢,屈服强度 $\sigma_s=217$  MPa,杨氏模量 $E=210$  GPa,泊松比 $\nu=0.3$ ,由于膨胀管在膨胀过程中发生塑性变形,涉及材料非线性问题,为了能真实模拟膨胀管膨胀过程中应力和应变的变化情况,需要把拉伸试验获得的名义应力和名义应变换算成真实应力和真实应变,并通过计算得出材料的塑性应变<sup>[11-14]</sup>,参数如表1所示。

表1 真实应力应变值

Table 1 Real stress-strain values

真实应力/MPa	塑性应变	真实应力/MPa	塑性应变
217.1	0	368	0.19
230	0.02	388	0.24
276	0.06	398	0.29
306	0.09	412	0.33
350	0.14	430	0.39

3.3 网格系统构建和约束加载

模拟过程中假设膨胀管为均匀各项同性结构体,对结构体进行网格划分,采用六面体扫掠网格划分技术,模型选择结构实体单元中的C3D8R八结点线性六面体单元,减缩积分,沙漏控制,如图3所示。在装配阶段对模型边界进行共轴约束。在模拟过程中,设置2个分析步,通过两次加压完成膨胀,每个分析步设置膨胀管和保护管相应的接触关系,分步施加载荷,设置边界条件。在模拟试验给膨胀管内壁21 MPa的均匀压强,观察膨胀管的膨胀过程<sup>[7,15]</sup>。

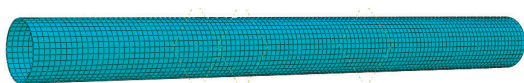


图3 膨胀管网格划分

Fig.3 Mesh generation of expandable tubular

3.4 有限元模拟结果

3.4.1 膨胀管膨胀完全云图

膨胀管膨胀完全后,对模型进行剖分(如图4所示),膨胀管完全膨胀,膨胀管外壁与保护管完全贴合,膨胀管明显缩短。



图4 膨胀管剖面云图

Fig.4 Cloud chart of expandable tubular profile

3.4.2 膨胀管应力

膨胀管分为两步进行膨胀,每步膨胀完膨胀管应力分布和重复膨胀段的应力变化如图5和图6所示。

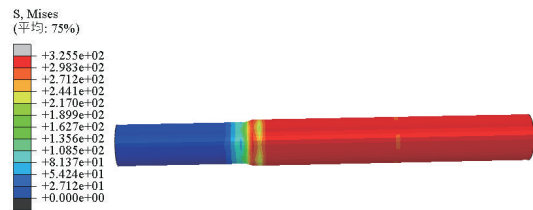


图5 膨胀管第一步膨胀完应力分布云图

Fig.5 Cloud chart of stress distribution after expansion in the first step of expandable tubular

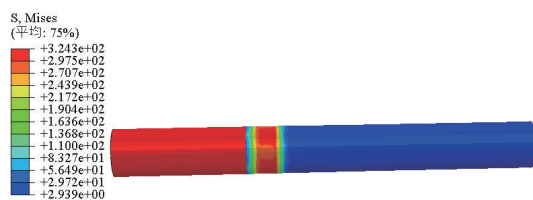


图6 膨胀管第二步膨胀完应力分布云图

Fig.6 Cloud chart of stress distribution after expansion in the second step of expandable tubular

3.4.3 位移变化

膨胀过程中,膨胀管直径发生变化,管壁变薄,长度变短,其直径和长度方向的变化情况分别如图7和图8所示。因膨胀管为均匀圆管,各向同性,直径方向仅给出X轴方向位移云图。

3.5 有限元模拟结果分析

膨胀管起胀压力约为9 MPa,外壁开始贴合压力约为17 MPa,壁厚变为3.77 mm,减少了0.23

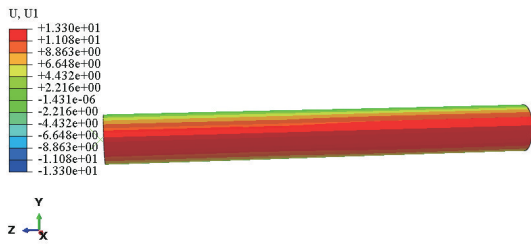


图 7 膨胀管 X 轴方向位移变化云图

Fig.7 Cloud chart of displacement change in the X-axis direction of expandable tubular



图 8 膨胀管 Z 轴方向位移变化云图

Fig.8 Cloud chart of displacement change in the Z-axis direction of expandable tubular

mm;长度变为 2179.33 mm,缩短了 120.67 mm。膨胀过程中最大应力约为 324.30 MPa。第一段膨胀完全后,膨胀管长度为 2214.61 mm,第二段膨胀完全后长度变为 2179.33 mm,缩短 35.28 mm。如果膨胀管为 3000 mm,先膨胀中间段,再膨胀两边,膨胀管预计长度为 2144.05 mm,缩短 15.6 mm。两次膨胀管重复膨胀段为 200 mm,从云图看,没有出现明显的应力集中和凸起,能满足使用要求。

#### 4 膨胀管应用技术示范

2020年11月25日,在河北省保定市顺平县水利局钻井队院内,开展了膨胀管管井补贴修复技术示范。

#### 4.1 示范内容

示范的破损井管内径为  $\varnothing 245$  mm,为减少井径损失,且破损位置为非含水地层,直接用膨胀管进行膨胀。经分析计算决定使用尺寸为  $\varnothing 219$  mm $\times$ 4 mm,材质为 316L 的不锈钢管作为膨胀管,补贴长度为 3000 mm。膨胀管下到破损位置后,直接用封隔器进行膨胀,膨胀压力为 21 MPa。先膨胀中间部分,再分别膨胀下端和上端,封隔器膨胀后的有效长度按照 1600 mm 计算,为防止段与段之间膨胀相互影响,过渡段采取重复膨胀的方式进行。将膨胀管下放到预定位置后,通过封隔器加压膨胀,压力达到 21 MPa 后停止加压,憋压 5 min,憋压过程中无异常情况出现,说明井管已经较为顺利地膨胀。通过计算封隔器中心位置再上下各移动 1 m 再进行膨胀,即完成了 3 个段次的补贴修复工作。详细施工情况见表 2。

表 2 井管补贴施工信息

Table 2 Construction information for well pipe repair

序号	封隔器膨胀位置/m	膨胀压力/MPa	井管补贴有效位置/m	施工时长/min
1	19.2~20.8	4~21	19.5~20.5	20
2	20.6~22.2	4~21	20.5~22.2	25
3	17.8~19.4	4~21	17.8~19.5	30

#### 4.2 示范应用效果评价

通过实时观察井下电视拍摄的井内录像,可以非常清晰的观测到(见图 9),膨胀管端口处、井管内壁与外管贴合紧密,整根膨胀管内壁光滑,膨胀后该井在破损段的内径为  $\varnothing 237$  mm 左右,减小 8 mm 左右(损失井径为膨胀管壁厚),不影响后续使用。

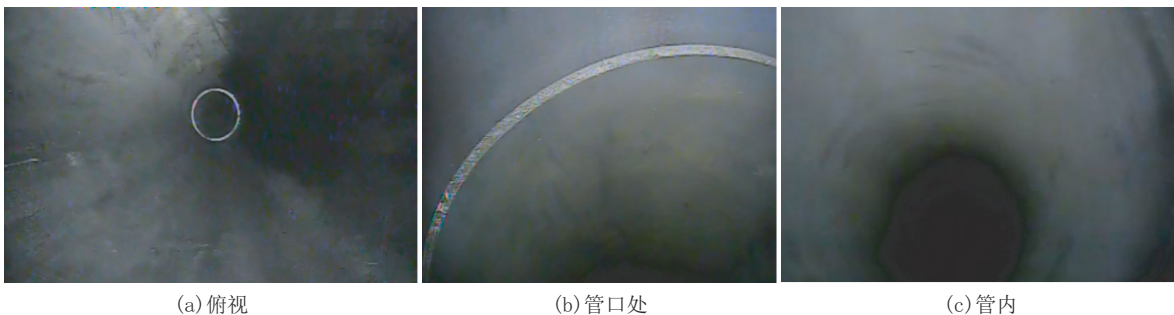


图 9 施工效果

Fig.9 Construction effect



## 5 结论

通过对封隔器膨胀系统的改进,更适合对膨胀管进行膨胀。对不同性能管材进行膨胀性能试验后发现,316L不锈钢管材更适合作为膨胀管。通过对 $\varnothing 219\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的膨胀管进行数值建模,用Abaqus软件对封隔器膨胀管的膨胀过程进行了数值模拟。在野外用同一种规格的膨胀管进行了膨胀试验,并通过视频电视观察其膨胀效果。

(1)数值模拟结果与示范结果对比,验证了模拟结果的准确性,可以用来指导现场施工。

(2)根据不同口径膨胀管有限元模拟结果,总结出不同直径不同厚度膨胀管膨胀过程所需的压力,制成不同规格参数表格,指导封隔器压力设置,保证膨胀管在井下完全膨胀,贴合并壁,增强护壁效果。

(3)根据膨胀管膨胀过程中厚度的变化,为实际应用中膨胀管的选择提供理论依据,根据施工现场井的口径和破碎情况,选择合适壁厚的膨胀管,保证膨胀后膨胀管的强度。

(4)根据分段模拟的数值结果,合理设置重复膨胀区长度,保证过渡段平滑膨胀,不影响已经膨胀贴合的膨胀管段。

## 参考文献(References):

- [1] 冯建月,叶成明,王营超,等.封隔器式膨胀管护壁技术研发与应用[J].钻探工程,2022,49(3):123-129.  
FENG Jianyue, YE Chengming, WANG Yingchao, et al. Development and application of the packer-activated expandable tubular technology for well wall protection[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):123-129.
- [2] 龚恩德,邓祖保,马敏,等.自张式膨胀管技术的研究与应用[J].钻探工程,2024,51(1):83-90.  
GONG Ende, DENG Zubao, MA Min, et al. Research and application of expansion casing technology for drilling holes in complex formations[J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):83-90.
- [3] 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 the application of foreign expansion tube technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(5):29-32.
- [4] 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.
- [5] 张建兵,孔德涛,蒋成银,等.工具锥角对膨胀套管环向残余应力的影响[J].塑性工程学报,2022,29(1):155-161.  
ZHANG Jianbing, KONG Detao, JIANG Chengyin, et al. Effect of tool cone angle on circumferential residual stress of expansion

- casing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022,29(1):155-161.
- [6] 王磊.膨胀管变径膨胀锥片厚度优化研究[J].西部探矿工程,2022,34(6):65-68.  
WANG Lei. Study on thickness optimization of expansion cone in expansion tube [J]. West-China Exploration Engineering, 2022,34(6):65-68.
- [7] 王全宾,高昆,强琳,等.基于不同材料模型的膨胀管有限元分析[J].石油矿场机械,2016,45(2):54-57.  
WANG Quanbin, GAO Kun, QIANG Lin, et al. Numerical simulation of solid expandable tubular based on ABAQUS[J]. Oil Field Equipment, 2016,45(2):54-57.
- [8] 胡其军,高明.液压胀管技术模拟研究[J].四川建材,2020,46(5):231-232.  
HU Qijun, GAO Ming. Simulation research on hydraulic tube expansion technology[J]. Sichuan Building Materials, 2020,46(5):231-232.
- [9] 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.
- [10] 张艳军,雷美荣.实体膨胀管膨胀力理论模型简化[J].机床与液压,2019,47(7):150-154.  
ZHANG Yanjun, LEI Meirong. Entity expansion pipe expansion force theory model simplification[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019,47(7):150-154.
- [11] 刘鹏,罗建伟,邢洪宪,等.基于有限元的膨胀管膨胀过程力学分析[J].石油矿场机械,2021,50(5):8-12.  
LIU Peng, LUO Jianwei, XING Hongxian, et al. Mechanical analysis of expansion process of expansion pipe based on finite element method[J]. Oil Field Equipment, 2021,50(5):8-12.
- [12] 宋开红,李春福,季正勇,等.316L不锈钢25~300℃动态拉伸及流变应力计算[J].热加工工艺,2011,40(8):64-67.  
SONG Kaihong, LI Chunfu, JI Zhengyong, et al. Dynamic tensile test and calculation for flow stress of 316L stainless steel at 25~300℃[J]. Hot Working Technology, 2011,40(8):64-67.
- [13] 杨立辉,李春福,宋开红,等.316L不锈钢膨胀筛管基管井下膨胀有限元分析[J].石油机械,2011,39(8):11-15.  
YANG Lihui, LI Chunfu, SONG Kaihong, et al. Finite element analysis of downhole expansion of 316L stainless steel expansion screen base[J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(8):11-15.
- [14] 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.  
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.
- [15] 董成林.实体膨胀管大塑性变形有限元分析[J].石油矿场机械,2014,43(3):43-47.  
DONG Chenglin. Finite element analysis for severe plastic deformation of solid expandable tube[J]. Oil Field Equipment, 2014,43(3):43-47.

(编辑 王跃伟)