

# 不同约束方式下膨胀套管的旋转膨胀有限元分析

李俊<sup>1</sup>, 杨甘生<sup>1</sup>, 于好善<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**基于 LS-DYNA 动态有限元分析, 建立了旋转拟合方式的膨胀套管模型, 并模拟了整个膨胀过程。通过对套管不同约束方式的模拟结果分析发现, 旋转拟合膨胀所需膨胀力为实心锥反拉膨胀的 1/5 左右, 在不同约束方式下膨胀套管轴向长度的变化规律也不同: 上约束方式下, 套管长度先略有减少后稳定增加; 下约束方式下, 轴向长度一直减少。该规律通过对 Ø95 mm 套管的实际旋转膨胀试验得到验证, 证明了模拟情况的可信性。

**关键词:**膨胀套管; LS-DYNA; 约束方式; 膨胀力; 轴向长度变化率

**中图分类号:** P634.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2011)01-0039-04

**Finite Element Analysis on the Rotating Expansion of Expansion Tubular in Different Constraint Methods/LI Jun<sup>1</sup>, YANG Gan-sheng<sup>1</sup>, YU Hao-shan<sup>1,2</sup>** (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Based on the analysis on LS-DYNA dynamic finite element, rotating fitting expansion tubular model was established with the whole expansion process simulation. By the analysis on stimulation results of different constraint methods to the tubular, it was found that the swelling force required in rotating fitting expansion is 1/5 of that in reverse tensile of solid cone; and change rule of axial length of the expansion tubular was variable in deferent constraint methods: with upper constraint method, the tubular length was a little decreased at first, and then steadily increased; while with underneath constraint method, the tubular length decreased all the time. This rule was proved by the rotary expansion test on Ø95mm tubular, the simulation was credible.

**Key words:** expansion tubular; LS-DYNA; constraint method; expansion force; change rate of axial length

## 0 引言

可膨胀套管技术作为 21 世纪石油钻采行业的核心工艺之一<sup>[1]</sup>, 在我国大型油田中已经开始有应用, 该技术在油田开发过程中进行套管补贴、侧钻井完井等多项领域内有较好的技术优势<sup>[2]</sup>。膨胀套管技术的工作原理就相当于金属材料的冷加工<sup>[3]</sup>, 通过外力使套管发生塑性变形, 管径增大, 以达到扩大井眼的目的。

目前, 膨胀套管可分为有缝膨胀套管和无缝膨胀套管。有缝膨胀套管膨胀过程容易, 但套管的制作较难; 无缝膨胀套管制作容易但膨胀较难。

无缝膨胀套管按膨胀方法可分为 2 种<sup>[4]</sup>: 一种为实心锥反拉膨胀法 (Drawbacks with Solid Cone Expansion); 另一种为旋转拟和膨胀法 (Rotary Compliant Expansion)。

实心锥反拉膨胀法使用实心锥对膨胀管进行膨胀, 是靠反拉强行膨胀, 膨胀锥与膨胀管之间的摩擦力很大, 所需的反拉力也很大。

旋转拟和膨胀法采用旋转拟和膨胀工具对膨胀

管进行膨胀。其膨胀锥上有 3 个均匀分布的滚锥。膨胀作业时, 膨胀工具从上往下旋转行进, 在膨胀锥将膨胀管胀开的同时, 径向布置的滚锥在液压力的推动下向外伸出, 滚锥在绕钻具中心公转的同时绕各自的心轴自转。

从国内外的文献中不难发现, 在所需膨胀力大小, 膨胀困难程度, 膨胀后套管效果等方面旋转拟合方式都优于实心锥反拉膨胀。但在理论研究方面国内在旋转拟合膨胀方面所做工作很少, 鲜有相关方面的报道。仿真模拟中, 由于实心锥反拉膨胀的模型简单、运动单一模拟容易, 而旋转拟合膨胀运动复杂涉及很少。鉴于此, 本文运用大型有限元分析软件 LS-DYNA 对旋转拟合膨胀方法进行了模拟, 并分析了不同约束方式下膨胀套管的变化情况。

## 1 模型的建立

模型的建立是基于 LS-DYNA 有限元分析软件。LS-DYNA 为显式动力分析程序, 其显式算法特别适合于分析各种非线性结构与冲击动力学问

收稿日期: 2010-07-04; 修回日期: 2010-10-08

作者简介: 李俊(1985-), 男(汉族), 湖北襄樊人, 中国地质大学(北京)硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事于膨胀套管有限元模拟研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号, 054042lijun@163.com。

题,如爆炸、结构碰撞、金属加工成型等高度非线性的问题<sup>[5]</sup>。图1为旋转拟合膨胀实物图及结构示意图<sup>[6]</sup>。



图1 旋转拟合膨胀实物图及结构示意图

借鉴国外已有的旋转拟合膨胀锥头,本文所建膨胀锥模型也是由3个互成 $120^\circ$ 夹角的锥型滚锥、中心轴和链接部件组成。滚锥按其结构可分为前导部分、膨胀部分以及保径部分。前导部分主要起导前稳定作用,保径部分为膨胀后保持套管直径不缩小,膨胀部分的作用为起涨,使套管由原直径扩大到一定直径。而将膨胀的套管模型较简单,为一定厚度的薄壁圆管。

所建立模型的结构参数为:套管内径75 mm,外径89 mm,套管长度500 mm;3个膨胀滚轮前导长度5 mm,保径段长度5 mm,各滚轮的半径为8 mm,滚轮轴心到膨胀套管内径的间距为10 mm,膨胀锥头锥角为 $8.5^\circ$ 。膨胀后套管的外径由89 mm扩大到95 mm。

建立模型时,选用SOLID164单元,这个单元只用在动力显式分析中。根据旋转膨胀系统的工作原理及旋转膨胀系统的具体结构,由于膨胀过程中,仅有膨胀锥头上的滚锥与套管有接触,为了建模方便以及节省计算时间,对主要零件进行了简化处理,仅模拟了3个滚锥而没有设置膨胀锥中心体和连接部件。其膨胀滚锥和膨胀套管模型见图2。

## 2 膨胀过程仿真

利用建立好的模型对材质为20钢的套管进行了模拟,其特征参数为:套管屈服强度 $\sigma_s = 195$  MPa,弹性模量 $E = 206$  GPa,剪切模量 $G = 113$  MPa,密度 $\rho = 7.85$  g/cm<sup>3</sup>,泊松比 $\nu = 0.28$ ;膨胀锥头弹

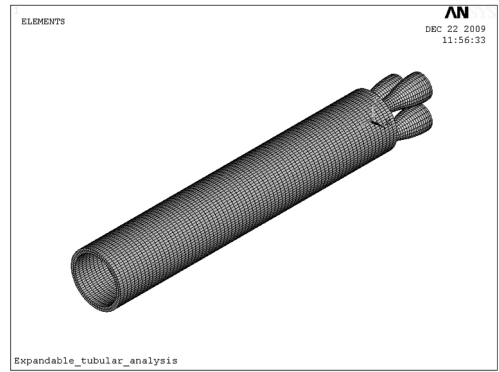


图2 旋转拟合膨胀锥和套管模型

性模量 $E = 2100$  GPa,剪切模量 $G = 1130$  MPa,泊松比 $\nu = 0.3$ ,密度 $\rho = 7.85$  g/cm<sup>3</sup>。

求解时,假设3个滚轮将同步由上向下旋转膨胀,轴向移动速度9 m/min,旋转速度为167 r/min。

膨胀套管的约束分为2种情况,上部约束和下部约束。上部约束时,套管顶端面轴向位移为零;下部约束时,套管底端面轴向位移为零。如图3所示,图3(a)、(b)为下端约束,图3(c)、(d)为上部约束。由于锥头的膨胀方向不同,造成的结果不同,因而下文的研究是在锥头是由上向下膨胀时不同约束下进行的,即(a)约束方式和(d)约束方式为本文的研究约束方式。

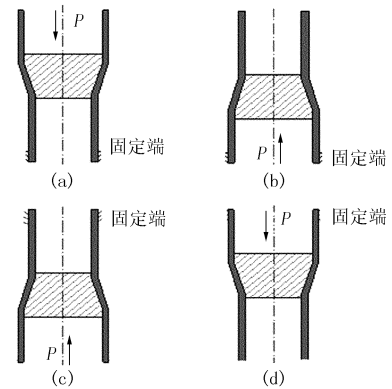


图3 不同约束方式

套管的膨胀过程比较复杂,本质上是金属的大变形塑性成形问题,为了便于模拟,将管材视为弹塑性体,膨胀锥头视为刚性体,并将管材作如下假设<sup>[7]</sup>:

- (1) 管材质地均匀且各向同性;
- (2) 套管在膨胀变形过程中,管材体积保持不变;
- (3) 膨胀套管的变形服从 Misses 屈服条件。

## 3 结果讨论

仿真结果的处理主要从膨胀时所需的膨胀力大

小、轴向长度改变量和壁厚变化量 3 个方面来进行讨论。

### 3.1 膨胀力大小

膨胀力即推动膨胀锥头沿套管轴心运动所需的力,膨胀力的大小直接决定了膨胀的难易程度和膨胀质量。

表 1 为上约束情况下,实体锥反拉膨胀方式和旋转拟合膨胀方式下 20 钢材质的套管由  $\varnothing 89$  mm 膨胀到  $\varnothing 95$  mm 的模拟结果对比,旋转拟合膨胀所需的膨胀力大小约为 31 kN,而实体锥反拉膨胀所需膨胀力约 156 kN。从表 1 中可以看出相同情况下旋转拟合膨胀方式所需的膨胀力远小于实体锥反拉膨胀方式的,前者仅为后者的 1/5 左右。

表 1 不同膨胀方式下所需膨胀力的比较

| 膨胀方式  | 膨胀力/kN | 套管材料 |
|-------|--------|------|
| 实体锥反拉 | 156    | 20 钢 |
| 旋转拟合  | 31     | 20 钢 |

究其原因,是因为与实体反拉膨胀相比,旋转拟合膨胀时,膨胀锥头上的滚锥做类似于行星齿轮般的运动,一边绕锥头轴心公转一边绕自身轴心自转,以至于滚锥在与膨胀套管接触过程中并非实心锥反拉膨胀时的滑动接触而是滚动接触,滚动摩擦力要远小于滑动摩擦力,这将使旋转膨胀时所需膨胀力大大的减小。同时,旋转拟合膨胀的滚锥与套管的接触为线接触,接触面积很小,而实体锥反拉膨胀锥头与套管的接触为面接触,面积较大。这就导致了旋转拟合膨胀时的膨胀力远小于实体锥反拉膨胀。

旋转拟合膨胀时,下端约束所需膨胀力约为 30 kN,上端约束所需膨胀力约为 31 kN,两种约束方式下所需的膨胀力相差的并不多,见表 2。可见,不同约束方式对旋转膨胀过程中所需膨胀力影响不大。

表 2 旋转膨胀时不同约束方式下所需膨胀力对比

| 约束方式 | 膨胀力/kN | 套管材料 |
|------|--------|------|
| 下端约束 | 30     | 20 钢 |
| 上端约束 | 31     | 20 钢 |

### 3.2 轴向长度改变量

膨胀锥头在膨胀过程中,套管半径变大而体积不变从而导致套管的轴向长度会略有改变。套管的单位收缩量对确定膨胀时下入的膨胀套管长度有重要的指导作用。

在实体锥反拉膨胀模拟中,不管是上约束还是下约束,套管的轴向长度都是减小的。但在旋转拟合膨胀模拟中,套管的轴向长度将有明显的变化。

图 4 所示为旋转拟合模拟时上端约束情况下(a 约束)和下端约束情况下(d 约束)套管轴向长度随时间的变化量。由图中可看出,在不同的约束情况下,两种膨胀模拟所产生的结果明显的不同:上约束方式下,在膨胀锥头进入套管时套管长度开始略有减少,锥头完全进入套管后套管长度稳定增加;下约束方式下,膨胀套管的轴向长度一直处于收缩状态(长度为负表示长度减小),开始阶段收缩幅度较大,这是膨胀头刚进入套管上端面所造成的,当膨胀锥头完全进入套管后,轴向收缩量趋于稳定。

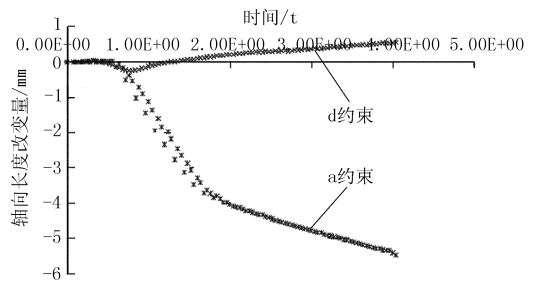


图 4 旋转膨胀时不同约束方式下轴向长度改变量

当旋转膨胀稳定后,两种约束方式下单位长度的轴向长度改变率也有较大的区别。如表 3 所示,上端约束情况下,轴向长度伸长量为 0.53%;下端约束情况下,轴向长度收缩率为 1.30%。可见,当膨胀稳定后,相同长度的膨胀套管在下端约束情况下的轴向长度改变量更大。但不管何种约束方式,在旋转拟合膨胀方式下轴向长度改变率要小于实体锥反拉膨胀方式下的,在实体锥反拉膨胀模拟中,套管的轴向长度收缩率约为 4.8%。

表 3 不同约束方式下轴向长度改变量对比

| 膨胀方式  | 约束方式 | 轴向长度改变率/% |
|-------|------|-----------|
| 旋转拟合  | 下端约束 | (缩)-1.50  |
|       | 上端约束 | (伸)0.53   |
| 实心锥反拉 | 上端约束 | (缩)-4.80  |

### 3.3 壁厚变化量

膨胀套管膨胀过程中,由于内外径的膨胀速率不一致(内径速率往往大于外径速率),造成了膨胀套管壁厚的减薄。膨胀套管壁厚是其承载能力强弱的重要参数。

套管壁厚的变化情况不仅与膨胀方式、约束方式有关,还受到膨胀锥头的锥角大小,锥头形状,膨胀套管材料,套管的膨胀幅度以及膨胀锥和套管之间的摩擦的影响。表 4 为其他情况相同时,不同膨胀方式和约束方式下的壁厚变化量。由表可见,旋转拟合膨胀时壁厚变化量上约束大于下约束;如果

把轴向长度改变量考虑在内,相对而言,实心锥反拉膨胀的壁厚变化量要小于旋转拟合膨胀的。因而,实际膨胀施工时,在井壁侧应力较大的地方应充分考虑到壁厚减薄对套管抗外压能力的影响。

表4 不同约束方式下套管壁厚变化量对比

| 膨胀方式  | 约束方式 | 壁厚变化量  | 轴向长度改变率  |
|-------|------|--------|----------|
|       |      | /mm    | /%       |
| 旋转拟合  | 下端约束 | -0.858 | (缩)-1.50 |
|       | 上端约束 | -1.375 | (伸)0.53  |
| 实心锥反拉 | 上端约束 | -1.05  | (缩)-4.80 |

### 3.4 实验对比

为了验证不同的约束方式对膨胀过程的影响,中国地质科学院勘探技术研究所对不同约束方式的套管进行了实际旋转拟合膨胀试验。在膨胀试验中不同约束方式下套管长度的变化情况由于设备限制没有记录到数据,仅观察到的变化情况为:上约束时,套管轴向长度先略缩短后缓慢增加;下约束时,套管长度一直减小。此变化情况和模拟的规律大体上是符合的,也直接证明了仿真模拟的正确性。

## 4 结论

(1)旋转拟合膨胀方式所需膨胀力较小,约为实心锥反拉膨胀方式的1/5左右;

(2)旋转拟合膨胀不同约束方式下所需膨胀力相差不大;

(3)上约束方式下套管长度先略有减少后稳定增加,下约束方式下轴向长度一直减少;

(4)相同膨胀情况下,下约束比上约束的轴向长度改变率大;

(5)上约束时壁厚变化量大于下约束;

(6)通过实际膨胀试验证明了模拟的合理性。

### 参考文献:

- [1] 杨明.可膨胀管明显提高钻井效率[J].世界石油工业,2000,7(3):35-37.
- [2] 唐明,等.实体膨胀管技术在油田开发中的应用[J].钻采工艺,2008,5:70-72.
- [3] 王强,杨斌.摩擦因数对膨胀套管影响的有限元模拟研究[J].石油机械,2007,7(6):11-13.
- [4] Enventure Global Technology. Solid Expandable Tubular Enabling technology. Drillingcontractor,2001,(4):36-39
- [5] 白金泽.LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M].北京:科学出版社,北京,2005.
- [6] 姚彤宝.实体膨胀管力学及模拟实验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [7] 付胜利,等.实体可膨胀管变形力与膨胀工具模角关系研究[J].石油机械,2006,1(34):25-27.
- [8] 姚彤宝,于好善,夏柏如,等.膨胀管技术在地质勘探领域应用初探[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(2):8-11.

## 单井抽回两用系统在浅层地热能开发中成功应用

**本刊讯** 近日,由河南省地矿局第二水文地质工程地质队设计施工的“单井抽回两用系统”成功运用于荥阳市鑫苑住宅小区(总建筑面积16500 m<sup>2</sup>)的供暖制冷空调系统。

该队技术人员在荥阳市鑫苑小区结合浅层地热能开发进行了野外试验和实际工程应用,成井2口(井深261 m)、单井出水量70 t/h、回灌率达100%。不但解决了场地狭小、传统布井数量多(原设计8口井)、回灌率低等问题,而且节约了建设费用和施工周期。通过试验、方案及设计改进和夏冬两季的运行,其系统性能稳定、室内温度正常舒适,达到了实际应用效果和预期目的。

冬季:该井出水温度19.4℃,经过热泵机组后产生45℃左右的热水进行供暖和提供生活热水,回水温度10℃,室内温度达到20~23℃,人体感觉舒适。

夏季:出水温度20℃,不经过热泵机组直接在管路系统循环,室内温度在23~25℃,人体感觉舒适。特别是夏季仅靠2台水泵抽水,而不需要热泵机组进行能量交换,故可大量节约用电。

目前,经过一年的试验和夏冬两季的应用,节能减排和运行效果显著,年节约电费约86万元、排污费30万元,取得

了较好的经济、社会和环境效益。

单井抽回两用系统在浅层地热能(水源热泵)开发工程中具有以下特点:(1)一口井同时可以实现抽回两个功能,解决了传统一井抽水多口回灌和回灌困难等突出问题;(2)在细、中颗粒地层中,一口井相当于传统4口井(一口抽水,3口回灌),故可节约建井数量、节约土地,达到占地少、建设费用低、管理方便等目的;(3)单井抽回两用系统是通过垂向距离和地下水头压力来实现能量的正常交换和提取,在解决回灌困难问题的同时,克服了利用水平距离布井实现抽水和回灌的传统方法所不能解决的问题(如场地狭窄、回灌率低等)。

单井抽回两用系统在浅层地热能(水源热泵)开发工程中具有可行性、实用性和创新性,是目前能够彻底解决回灌困难和占地面积大问题的方法之一,对浅层地热能开发技术的发展和地质环境的保护具有重要意义。

河南省第二水文队今后将继续深入研究,加大该新技术的推广运用,加强科技成果的转化,大力发展低碳经济,创新河南品牌,为河南省新能源开发利用工作做出更大的贡献。

(严珊珊 供稿)