



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.05.08.03

文章编号: 1674-5086(2022)02-0159-09

中图分类号: TE977

文献标志码: A

## 衬里复合管液压胀接力的弹塑性有限元研究

陈俊文<sup>1</sup>, 练章华<sup>2</sup>, 汤晓勇<sup>1</sup>, 谷天平<sup>2\*</sup>, 施岱艳<sup>1</sup>

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

**摘要:** 液压胀接力是影响衬里复合管液压成型质量的关键参数。根据实验数据建立了两种 316L 衬管材料的多线性强化的有限元模型, 基于 Tresca 屈服准则, 开展了衬里复合管在液压成型过程中极限胀接压力范围、胀接压力与紧密度关系的研究, 并将有限元计算结果和解析解计算结果进行了对比。结果表明, 当满足成型条件时, 选择硬化强度较低的衬管材料, 可以增大胀接力范围和紧密度区间, 有利于制管胀接力的设计和控制; 根据计算结果拟合了该成型条件下紧密度和胀接力的关系曲线, 得出了两种材料的最小胀接力值分别为 113.38 MPa 和 126.99 MPa。建立的材料多线性强化有限元模型可以准确地考虑衬管材料在胀接过程中的应变强化过程, 为精确控制衬里复合管液胀成型参数提供了理论依据。

**关键词:** 衬里复合管; 液胀成型; 多线性强化模型; 有限元法; 紧密度

## A Study on Elastoplastic Finite Element Study of Hydraulic Expansion of Lined Composite Pipe

CHEN Junwen<sup>1</sup>, LIAN Zhanghua<sup>2</sup>, TANG Xiaoyong<sup>1</sup>, GU Tianping<sup>2\*</sup>, SHI Daiyan<sup>1</sup>

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp., Southwest Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

**Abstract:** Hydraulic expansion pressure is a key parameter that affect the forming quality of lined composite pipe. In this paper, based on the experimental data, multi-linear reinforced finite element models of two 316L liner materials are established; based on the Tresca yield criterion, we carried out research on the limit expansion pressure range, expansion pressure and tightness of the lined composite pipe in the process of hydraulic forming. The finite element results are compared with the analytical results. The results show that, when the forming conditions are satisfied, the selection of liner material with lower hardening strength can increase the expansion range and the tightness interval, which is conducive to the design of expansion pressure can be controlled. According to the calculation results, the relationship curve between the tightness and the expansion pressure under the forming condition is fitted, The minimum expansion values of the two materials are obtained to be 113.38 and 126.99 MPa respectively. The finite element model of material multi-linear strengthening established in this paper can accurately consider the strain strengthening process of liner material in the process of expansion joint and provide theoretical basis for the accurate control of the parameters of liquid expansion forming of lined composite pipe.

**Keywords:** lined composite pipe; hydraulic expansion; multi-linear reinforced model; finite element method; tightness

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20220321.0956.002.html>

陈俊文, 练章华, 汤晓勇, 等. 衬里复合管液压胀接力的弹塑性有限元研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 159-167.

CHEN Junwen, LIAN Zhanghua, TANG Xiaoyong, et al. A Study on Elastoplastic Finite Element Study of Hydraulic Expansion of Lined Composite Pipe[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(2): 159-167.

\* 收稿日期: 2020-05-08 网络出版时间: 2022-03-22

通信作者: 谷天平, E-mail: 597332793@qq.com

基金项目: 中国石油 CPECC 资助项目(CPECC2019KJ13)

## 引言

高含硫气田地面集输系统面临的  $H_2S$  和  $CO_2$  等环境下管线腐蚀问题是制约此类气田安全开发的难点之一<sup>[1-3]</sup>。衬里复合管以其良好的经济性和耐腐蚀性能被广泛应用于高腐蚀性气田的集输管线中<sup>[4-5]</sup>。衬里复合管的成型方式有多种,其中,液压胀型方式以其显著的成型优点被制造单位广泛采用<sup>[6]</sup>。液胀压力的大小不仅影响衬管、基管的变形量和残余接触压力(又称紧密度),更是决定胀接成功与否的关键<sup>[7-8]</sup>。衬里复合管的成型力学原理,就是适度利用衬管材料的塑性变形来实现的。因此,必须科学精确地控制胀接压力范围来指导衬里复合管的生产制造过程。

对于衬里复合管液胀力学控制问题,国内外学者做了大量研究。Updike 等<sup>[9]</sup>首次提出并使用材料当量屈服强度来代替实际屈服强度进行复合管成型参数计算。吕建斌等<sup>[10]</sup>根据经典弹塑性力学理论,推导出了双金属管液胀成型压力与紧密度的计算公式。张正潮等<sup>[11]</sup>使用图解法给出了材料当量屈服强度的推导步骤。唐越等<sup>[12]</sup>通过有限元方法和实验验证了使用当量屈服强度方法可以提高复合管成型参数计算精度。胡洪等<sup>[13]</sup>使用有限元方法研究了液压胀形压力与紧密度的变化关系。李兰云等<sup>[14]</sup>研究了初始间隙对液压成型参数的影响,发现随着初始间隙的增大,衬里复合管紧密度有所下降。杜清松等<sup>[15]</sup>通过设定双金属复合管有

限元模型的几何尺寸、材料模型和加载压力等参数来模拟不同条件下复合管成型过程中的力学特性。Akisanya 等<sup>[16]</sup>利用变形协调条件来描述实际卸载过程并推导了液胀压力计算公式。Olabi 等<sup>[17]</sup>使用有限元方法对比研究了不同加载路径对制管参数的影响,得出了最优的加载路径。

以上学者的研究均在一定程度上对复合管液胀成型模型做了假设和简化,其研究成果仍具有重要的参考价值,但是由于复合管成型力学的特殊性:不同材料的弹塑性变形涉及复杂的应力应变过程,以往的理论研究无法准确描述衬管材料液胀成型时的应变强化过程。鉴于此,本文提出采用有限元方法,建立材料的多线性等向强化模型,准确地考虑材料真实的应力应变情况,为精确控制衬里复合管液胀成型参数提供理论依据。

## 1 液压胀接力学模型讨论

衬里复合管液胀成型过程主要涉及 4 个阶段:初始阶段、加载阶段、稳载阶段和卸载阶段。初始阶段衬管和基管之间存在适当的初始间隙,加载阶段将胀接压力  $p_i$  作用于衬管的内壁,通过衬管的弹塑性变形将载荷传递给基管,使基管发生弹性变形,达到设计压力后进入稳载阶段并稳压一定的时间,卸载后由于基管的弹性恢复将抱紧衬管,在两管之间形成残余接触压力从而完成复合管成型<sup>[18]</sup>,如图 1 所示。

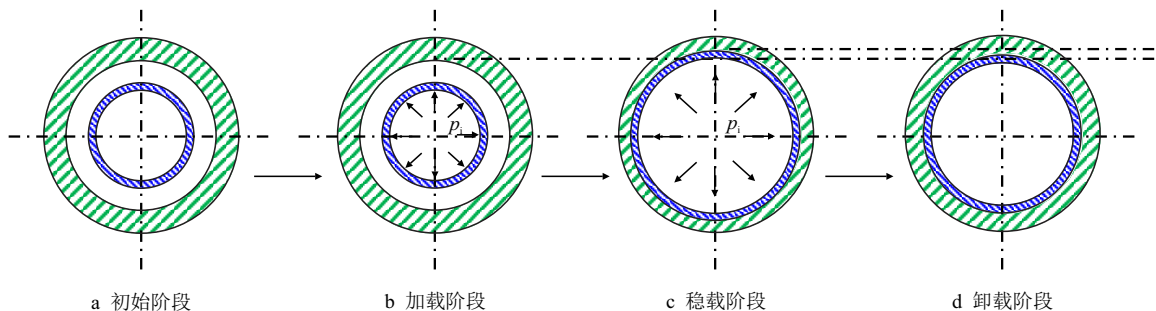


图 1 衬里复合管液胀成型过程

Fig. 1 Hydraulic forming process of lined composite pipe

在进行衬里复合管胀接力学参数计算时,根据复合管结构特点,假设衬管为理想弹塑性材料,将复合管的胀接过程应力应变问题简化为平面应力力学问题,建立极坐标系如图 2 所示,其中:  $R_0$ —基管的外径, mm;  $R_i$ —基管的内径, mm;  $r_0$ —衬管的外径,

mm;  $r_i$ —衬管的内径, mm;  $R$ —基管的中性层半径, mm;  $r$ —衬管的中性层半径, mm;  $\delta$ —基管和衬管的间隙, mm;  $\theta$ —目标点与  $x$  轴之间的夹角, ( $^\circ$ )。

基于 Tresca 屈服准则,使用 Lamé 公式和卸载阶段衬管基管的协调变形关系,推导了残余接触压力、

胀接压力计算公式<sup>[19]</sup>。其中, 残余接触压力  $p_{cr}$  为

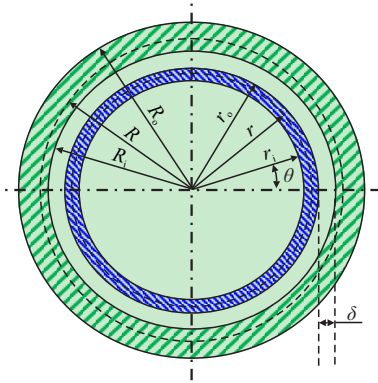


图 2 衬里复合管平面分析模型

Fig. 2 Plane analysis model of lined composite pipe

$$p_{cr} = \left[ 1 - \frac{2r_o}{E_1(k^2 - 1)(Ar_o + BR_i)} \right] p_i - \sigma_{seq1} \ln k \quad (1)$$

胀接压力  $p_i$  的区间为

$$\frac{E_1(k^2 - 1)(Ar_o + BR_i) \sigma_{seq1} \ln k}{E_1(k^2 - 1)(Ar_o + BR_i) - 2r_o} < p_i \leq \frac{\sigma_{sb}(K^2 - 1)}{2K^2} + \sigma_{seq1} \ln k \quad (2)$$

式中:

$$A = \frac{k^2(1 - \mu_1) + (1 + \mu_1)}{E_1(k^2 - 1)}$$

$$B = \frac{K^2(1 + \mu_b) + (1 - \mu_b)}{E_b(K^2 - 1)}$$

$E_1$ —衬管弹性模量, MPa;

$k$ —衬管外内径之比,  $k = \frac{r_o}{r_i}$ ;

$\sigma_{seq1}$ —衬管当量屈服强度, MPa;

$\sigma_{sb}$ —基管屈服强度, MPa;

$K$ —基管外内径之比,  $K = \frac{R_o}{R_i}$ ;

$\mu_1$ —衬管泊松比, 无因次;

$\mu_b$ —基管泊松比, 无因次;

$E_b$ —基管弹性模量, MPa。

式(1)和式(2)的解析解数学模型有效地指导了衬里复合管制造过程的成型压力控制, 但该解析方法仍存在两个不足之处: (1) Lamé 公式仅适用于厚壁筒弹性材料, 而双金属复合管成型时, 衬管需要达到塑性变形才能获得与基管内壁接触的紧密度, 该公式的适用性受到了限制。(2) 解析法使用衬管材料当量屈服强度  $\sigma_{seq1}$  来代替不同应变时衬管材料真实的塑性硬化强度, 但是针对不同制管间隙和衬管材料时, 在液压胀型过程中衬管的变形程度存在明显差异, 若仍使用当量屈服强度  $\sigma_{seq1}$  计算将不能保证计算精度。然而, 使用有限元法可以不简化

地输入衬管材料的真实应力应变曲线数据, 在其液压膨胀和卸载过程中, 获得较为准确的应变强化数据以及获得准确的紧密度值。下面将基于材料多线性强化理论和有限元方法来解决复合管成型过程中衬管材料强化问题。

## 2 材料多线性强化有限元模型的建立

### 2.1 多线性强化模型的建立

目前在衬管选材方面, 316L 材料以其良好的力学性能和耐腐蚀性能被广泛应用于衬管制造中。为了研究不同硬化强度的衬管材料对衬里复合管液压胀型紧密度区间的影响, 选取两种 316L 材料在 MTS 材料实验机上进行拉伸实验测试。两种 316L 材料的应力应变曲线测试结果如图 3 所示。材料 1 是相对于材料 2 较软的一种 316L 材料, 材料 1 应变在前 20% 以内, 其强化应力比材料 2 低得多, 随后两种材料应力差值缩小。

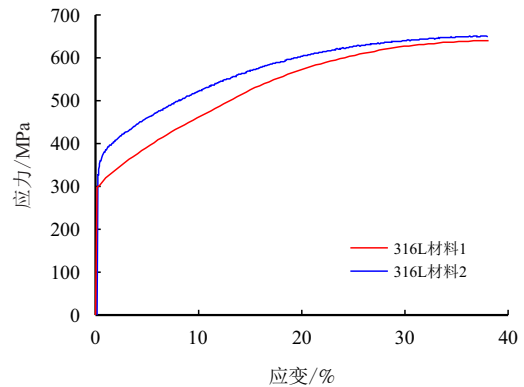


图 3 两种 316L 材料拉伸实验下应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of two 316L materials under tensile test

通过实验测试出两种 316L 材料应力-应变曲线后, 由于其数据量较大, 不便于用于有限元分析的材料模式, 因此, 需通过数据处理, 用多段直线段来拟合、逼近实验曲线, 拟合后两段直线的连接点即可以代表材料应力应变性能的关键点。在本研究中, 衬管膨胀受到基管内壁空间的限制, 其应变范围超不过 10%, 因此, 仅取了两种 316L 材料实验数据的前 10% 进行多线性应力-应变曲线拟合, 其结果见图 4。

根据图 4 中多线性应力应变曲线数据可知, 随着材料应变的增加, 第一段直线的斜率即材料的弹性模量, 后面几段直线斜率则依次反映了对应应变程度下材料应变强化能力的大小。依次将图 4 曲线

中的关键点数据在有限元软件中建立两种 316L 材料的多线性材料强化模型。

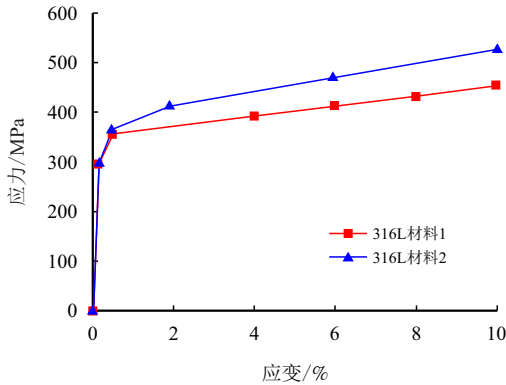


图 4 两种 316L 材料在应变前 10% 内的多线性材料应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of two 316L materials within the first 10% of strain

### 2.2 有限元模型的建立

以某常用的衬里复合管为例, 基管材料为管线钢 X70, 衬管材料为不锈钢 316L, 衬里复合管基管规格为  $\phi 200 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ , 衬管规格为  $\phi 148 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 初始制管间隙为 2 mm, 通过实验测得基管与衬管材料的具体力学参数见表 1。根据复合管结构特点和弹塑性力学理论, 建立复合管 1/4 平面应变有限元模型, 施加对称约束。胀接压力  $p_i$  均匀施加于衬管内壁, 设置基管内壁和衬管外壁为接触对, 并对接触界面附近的网格进行二次加密, 提高接触参数计算精度, 如图 5 所示。

表 1 衬里复合管材料力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of lined composite pipe material

名称	材料	弹性模量/ GPa	屈服应力/ MPa	抗拉强度/ MPa	泊松比/ 无因次
衬管	316L 材料 1	195	299.1	658.1	0.26
	316L 材料 2	195	298.0	639.3	0.26
基管	X70	207	522.2	626.8	0.30

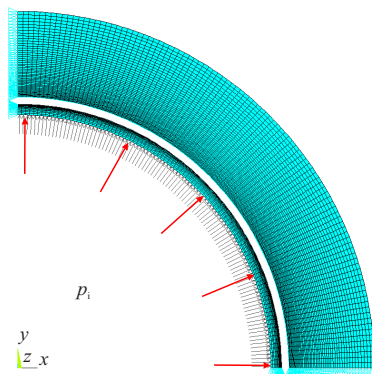


图 5 衬里复合管平面应变有限元模型

Fig. 5 Plane strain finite element model of lined composite pipe

接触设置方法为: 基管内壁为目标面, 衬管外壁为接触面, 接触单元类型分别为 target169 单元和 conta171 单元, 接触求解方法选择增广拉格朗日法。

### 2.3 加载—卸载方式

为了使加载过程更加真实地模拟制管加载工况, 有限元计算时将加载方式分为 10 个分析步, 加载—卸载的分析步方式如图 6 所示。0~2 分析步为加载阶段, 载荷先从零逐渐线性加载到最大设计值; 2~8 分析步为稳载阶段, 保持该内压值一段时间, 稳载阶段使得衬管材料处于强化过程的缓冲区, 并充分与基管内壁贴合, 符合实际制管过程中的加载方式, 提高计算结果的可靠性; 8~9 分析步为卸载阶段, 将压力值渐线性卸载到零; 9~10 分析步为卸载后阶段, 此时内压力卸载为零, 基管的弹性回弹将抱紧衬管, 使得衬管和基管之间存在一定的紧密度。

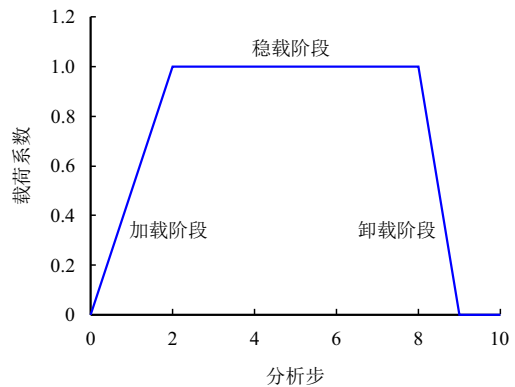


图 6 有限元模型加载—卸载方式

Fig. 6 Load and unload mode of finite element model

## 3 液压胀接计算结果分析与讨论

### 3.1 胀接内压极限载荷分析

在有限元计算时, 在衬管内逐渐施加胀接压力  $p_i$ , 衬管逐渐膨胀, 其材料由弹性变形过渡到塑性变形, 并且衬管开始与基管接触, 继续增加胀接压力  $p_i$ , 达到  $p_{imin}$  时, 将  $p_{imin}$  载荷全部卸掉, 基管的弹性恢复完成刚好与衬管外壁接触, 即为胀接压力的最小极限载荷  $p_{imin}$ 。如果在最小极限载荷  $p_{imin}$  之后继续加载胀接压力  $p_i$ , 衬管径向膨胀推动基管膨胀, 基管处于弹性变形, 按规定制管过程中基管不能进入塑性变形, 因此, 在有限元模拟计算过程中, 可以计算出基管内壁刚好进入塑性变形时的胀接压力  $p_{imax}$ , 即为胀接压力的最大极限载荷。

当胀接压力  $p_i$  从 0 线性加载到 150.00 MPa, 其有限元模拟计算结果见图 7 中一系列的胀接变形及其基管、衬管(316L 材料 1)内的 Tresca 应力变化过程。由图 7 中计算结果可知: 随着胀接压力  $p_i$  的增加, 衬管内的 Tresca 应力也逐渐增加, 当  $p_i=12.90$  MPa 时, 衬管外壁刚好开始与基管内壁接触, 如图 7c 所示, 衬管内最大 Tresca 应力为 369.70 MPa, 超过其屈服应力 299.10 MPa, 说明此时衬管已经发生塑性变形。继续增加衬管内

壁的胀接压力  $p_i$ , 基管内的应力也逐渐增加, 直到  $p_i=130.50$  MPa 时, 基管内壁开始出现塑性变形, 如图 7d, 即其应力超过基管材料的屈服应力 522.20 MPa, 这是实际生产制管时不允许出现的。因此, 制管过程中的最大胀接压力  $p_{imax}=130.50$  MPa。如果继续增加  $p_i$ , 基管内的塑性应力也逐渐增大, 直到  $p_i=150.00$  MPa 时, 基管内的 Tresca 应力达到 610.13 MPa, 已经接近其抗拉强度极限值 626.80 MPa, 此时基管材料接近内压失效, 见图 7f。

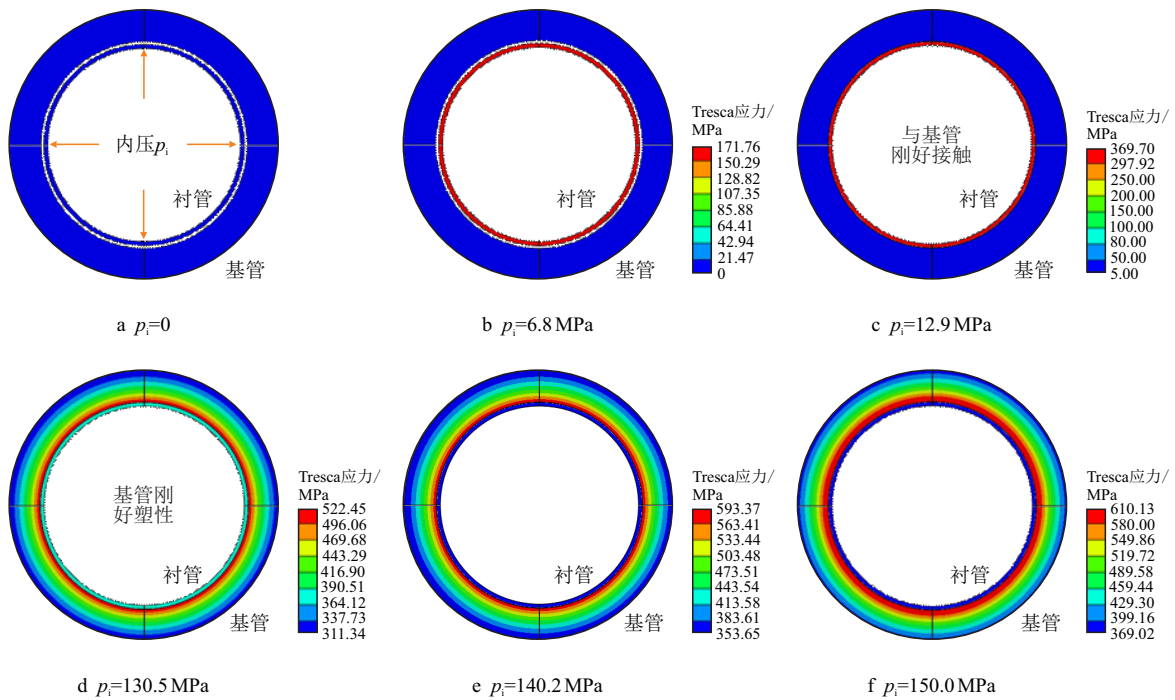


图 7 基管、衬管内的 Tresca 应力随胀接压力的变化过程  
Fig. 7 Variation process of Tresca stress in outer pipe and liner pipe with expansion pressure

将有限元计算结果中基管内壁和两种 316L 材料衬管外壁的 Tresca 应力随其胀接压力变化的数据提取出来, 并通过计算获得其紧密度分布区间, 计算结果分别见图 8、图 9。

由图 8 可知, 材料 2 衬管和基管开始屈服时的胀接压力分别为 12.80 和 132.50 MPa, 残余接触压力为零的最小胀接压力为 125.10 MPa, 为了保证成型制管具有紧密度, 材料 2 的胀接压力范围理论上必须控制在 125.10~132.50 MPa。同理, 根据图9的计算结果可知, 材料 1 衬管和基管开始屈服时的胀接压力分别为 12.80 和 130.50 MPa, 残余接触压力为零的最小胀接压力为 111.45 MPa, 因此, 材料 1 胀接压力的有效范围为 111.45~130.50 MPa。同时, 为了保证基管不发生塑性变形, 两种材料衬管内的最大胀接压力分

别不能超过 132.50 和 130.50 MPa。

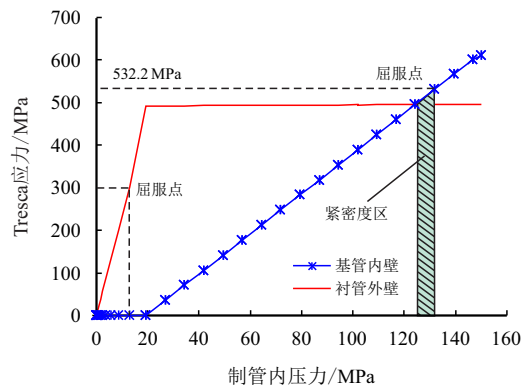


图 8 基管、衬管应力随胀接力的变化曲线(316L 材料 2)  
Fig. 8 Variation curve of stress of outer pipe and liner pipe with expansion pressure(316L material 2)

从图 8、图 9 中制管后的紧密度区的变化还可

以看出,在相同初始复合管结构尺寸下,316L 材料 2 和材料 1 的紧密度区宽度分别为 7.40 和 19.05 MPa,表明相同应变位置衬管材料硬化强度高,其紧密度区越窄,变窄后不利于制管过程中胀接力的控制,即胀接力的灵敏度控制较差。因此,在复合管生产制造时,相同初始复合管结构尺寸下,选择硬化强度较低的材料(材料 1),其紧密度区间较宽,更有利于制管胀接力的设计和控制。因此,建议复合管制造厂家在衬管材料选择时,也应将材料的塑性硬化性能考虑在内。

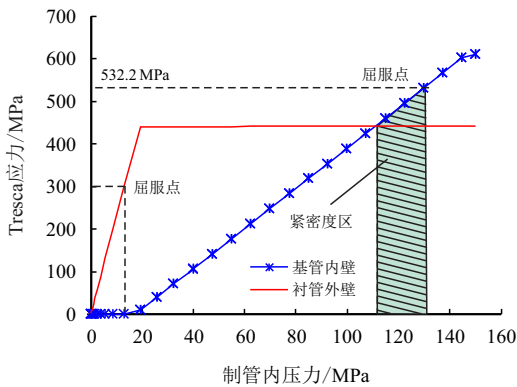


图 9 基管、衬管应力随胀接力的变化曲线(316L 材料 1)  
Fig. 9 Variation curve of stress of outer pipe and liner pipe with expansion pressure(316L material 1)

与此同时,复合管制造商也应关注不同批次的材料应变强化参数的差异问题,在进行液压胀型前,必须对不同批次的复合管材料进行力学参数测试和评价,充分考虑材料的硬化强度对制管参数的影响,通过计算确定每一批材料对应的制管参数来指导实际生产过程,提高复合管成型的精度和质量。

### 3.2 胀接载荷与紧密度的关系

根据本文建立的有限元计算模型,通过大量的有限元计算数据,在有效紧密度范围内建立两种 316L 材料胀接载荷同紧密度的关系,并对两者关系曲线进行了拟合,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,在其有效紧密度范围内,紧密度与其胀接力为线性变化关系,对两种材料条件下的有限元计算结果进行拟合,其拟合关系的数学计算式为

$$y_1 = 0.1553x_a - 17.308 \quad (3)$$

$$y_2 = 0.1551x_a - 19.396 \quad (4)$$

式中:

$x_a$ —胀接力,MPa;

$y_1$ —316L 材料 1 紧密度,MPa;

$y_2$ —316L 材料 2 紧密度,MPa。

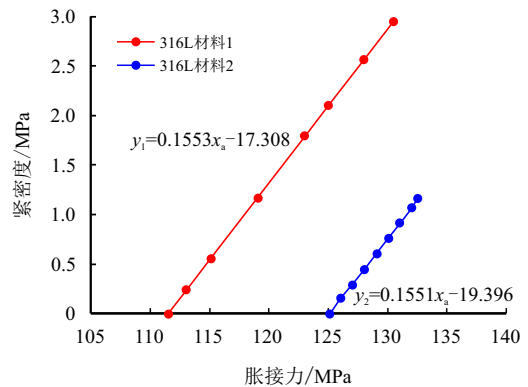


图 10 衬里复合管紧密度随胀接力的变化关系曲线  
Fig. 10 Variation curve of tightness of lined composite pipe with expansion pressure

根据 CJ/T 192—2017《内衬不锈钢复合钢管》的规定,双金属复合管在成型后两管间的紧密度必须大于 0.3 MPa,才可正常投入使用。所以当卸除压力后查看基管内壁的管间紧密度状况来确定最小胀接压力值。根据紧密度 0.3 MPa 的标准,由图 10 中 316L 材料 1、材料 2 的紧密度和胀接力关系拟合公式,可得这两种材料的最小胀接力分别为 113.38 和 126.99 MPa。

### 3.3 有限元解和解析解计算结果对比

对衬管 316L 材料 1 和材料 2 的多线性有限元计算结果和解析解结果进行对比分析,由于解析法使用材料当量屈服强度  $\sigma_{seq1}$  进行胀接力学参数计算,而有限元法直接使用材料的应力应变曲线拟合后的多线性应力应变数据来进行计算,因此,解析解与有限元计算结果对比分析时,以有限元法计算的结果为基准进行对比。根据上文中解析解计算式(1)和式(2)计算胀接成型参数,经过多次试算后发现衬管材料当量屈服强度  $\sigma_{seq1}$  的取值对计算结果影响很大,为了验证解析公式的计算精度,分别将有限元计算中两种 316L 材料对应应变位置的强化应力数据提取出来,作为当量屈服强度  $\sigma_{seq1}$  代入解析公式中进行计算,其中,316L 材料 1 和材料 2 对应的强化应力分别为 441.2 和 493.9 MPa。两种方法的计算对比结果如图 11 所示。

由图 11 可知,两种材料模式下,有限元计算结果与解析解计算结果基本吻合,验证了解析解的计算精度和准确性。这说明使用解析方法计算复合管成型参数时,若衬管的当量屈服强度取值合理,使

用解析法是可以满足复合管成型参数计算的。但是,解析法计算时所需要的关键参数——当量屈服强度  $\sigma_{\text{seq1}}$  是不能直接获得的。目前,求解材料的当量屈服强度最常用的方法为图解法<sup>[20-22]</sup>。使用图解法求解当量屈服强度的误差是不可避免的,尤其针对不同复合管规格、材料和制管间隙时,材料的应变范围变化较大,图解法的应用受到了巨大的限制。由此可见,使用解析法进行复合管成型参数计算的劣势非常明显。使用有限元方法求解复合管成型参数,不仅能够保证计算精度,而且可以根据计算结果实时调整优化成型参数,提高复合管的成型质量。

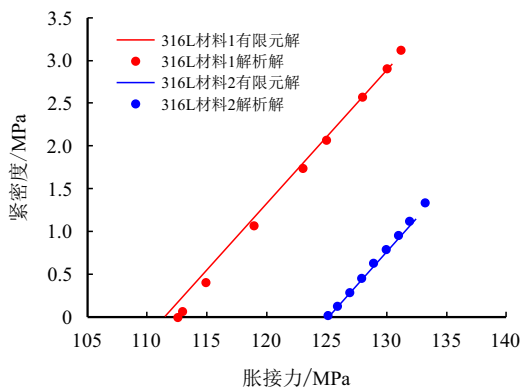


图 11 两种 316L 材料胀接力、紧密度有限元计算结果与解析解计算结果对比

Fig. 11 Comparison of the finite element results and the analytical results of expansion pressure and tightness of two 316L materials

## 4 结 论

(1) 通过有限元分析计算结果可知:当满足衬里复合管成型条件时,选择硬化强度较低的衬管材料,可以增大胀接力范围和紧密度区间,更有利于制管时胀接力的设计和控制。

(2) 满足本文结构尺寸复合管的紧密度大于 0.3 MPa,该两种 316L 材料 1 和材料 2 的最小胀接力值分别为 113.38 MPa 和 126.99 MPa,建议复合管制造商应关注不同批次的材料应变强化参数的差异问题,制管前对不同批次的复合管材料进行力学参数测试和评价,及时调整制管参数以保证成型质量。

(3) 当衬管材料的当量屈服强度  $\sigma_{\text{seq1}}$  取值合适时,有限元计算结果与解析解计算结果吻合度高。但解析法的缺陷为当量屈服强度  $\sigma_{\text{seq1}}$  取值精度控

制较差。

(4) 文中建立的材料多线性强化有限元模型,使用材料的真实应力应变曲线拟合后的多线性应力应变数据来进行计算,完整考虑了衬管材料在胀接过程中的应变强化,计算结果更加准确。

## 参考文献

- [1] 羊东明,李亚光. 雅克拉气田集气管线内腐蚀分析及材质选用[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 74-77. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.10.018  
YANG Dongming, LI Yaguang. Internal corrosion analysis and material selection of gas gathering lines in the Yakela Gas Field, Southwest Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 74-77. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.10.018
- [2] 叶帆,高秋英. 凝析气田单井集输管道内腐蚀特征及防腐技术[J]. 天然气工业, 2010, 30(4): 96-101. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.04.024  
YE Fan, GAO Qiuying. Internal corrosion characteristics and anti-corrosion techniques of gathering and transportation pipelines of a single well in gas condensate fields[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(4): 96-101. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.04.024
- [3] 李时杰,杨发平,刘方俭. 普光气田地面集输系统硫沉积问题探讨[J]. 天然气工业, 2011, 31(3): 75-79. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.03.020  
LI Shijie, YANG Faping, LIU Fangjian. A discussion on the sulphur deposition in the ground surface gathering and transmission system of the Puguang Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(3): 75-79. doi: 10.3787/j.issn.-1000-0976.2011.03.020
- [4] 李发根,魏斌,邵晓东,等. 双金属复合管技术经济性分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1): 86-88.  
LI Fagen, WEI Bin, SHAO Xiaodong, et al. Technical and economic analysis on bimetal pipeline[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(1): 86-88.
- [5] 周培山,杨笠. L245NCS/316L 复合输气管道的焊接技术[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 96-101. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.11.013  
ZHOU Peishan, YANG Li. Welding technology for L245NCS/316L bimetal gas line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 96-101. doi: 10.3787/j.issn.10000976.2016.11.013
- [6] 马海宽,李培力,隋健,等. 关于液胀成型技术是双金属复合管发展趋势的探讨[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 215-216, 219. doi: 10.3969/j.issn.1672-6413.-

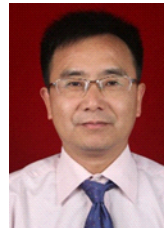
- 2015.06.092  
MA Haikuan, LI Peili, SUI Jian, et al. Discussion on the development trend of hydraulic forming technology for clad tube[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(6): 215–216, 219. doi: 10.3969/j.issn.1672-6413.-2015.06.092
- [7] 陶文东. 双金属复合管液胀成形过程分析及数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015. doi: 10.7666/d.-D01279205  
TAO Wendong. Investigation of liquid bulge forming process of bimetal tube used numerical simulation method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015. doi: 10.7666/d.-D01279205
- [8] 寇永乐, 徐能惠, 刘继高, 等. 双金属复合管液胀成形技术分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 221–222.  
KOU Yongle, XU Nenghui, LIU Jigao, et al. Analysis of hydraulic bulge forming technology of bimetal composite pipe[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2014(6): 221–222.
- [9] UPDIKE D P, KALNINS A, CALDWELL S M. Residual stresses in tube-tubesheet joints with grooves[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1992, 114(2): 249–251. doi: 10.1115/1.2929037
- [10] 吕建斌, 刘岩, 郭会光. 双层管复合成形的力学分析[J]. 太原重型机械学院学报, 1995, 16(2): 103–108.  
LÜ Jianbin, LIU Yan, GUO Huiguang. The mechanical analyses of compositely forming double-deck pipes[J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 1995, 16(2): 103–108.
- [11] 张正潮, 刘富君, 郑津洋, 等. 当量屈服强度法在双层管液压成形中的应用[J]. 压力容器, 2008, 25(8): 20–24. doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2008.08.005  
ZHANG Zhengchao, LIU Fujun, ZHENG Jinyang, et al. Application of equivalent yield strength method to double-layered tube during hydraulic forming[J]. Pressure Vessel Technology, 2008, 25(8): 20–24. doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2008.08.005
- [12] 唐越, 倪兴健, 王勇勤. 316L/X70 双金属复合管液压胀接成形机理[J]. 锻压技术, 2018, 43(1): 90–96. doi: 10.13330/j.issn.1000-3940.2018.01.016  
TANG Yue, NI Xingjian, WANG Yongqin. Mechanism of hydraulic expansion forming for bimetal composite tube 316L/X70[J]. Forging and Stamping Technology, 2018, 43(1): 90–96. doi: 10.13330/j.issn.1000-3940.2018.01.-016
- [13] 胡洪, 梁国栋, 寇永乐, 等. 双金属复合管液胀成形压力分析研究[J]. 重型机械, 2016(6): 25–30.  
HU Hong, LIANG Guodong, KOU Yongle, et al. Research on the press during the hydraulic expansion forming of dual-metal clad tube[J]. Heavy Machinery, 2016(6): 25–30.
- [14] 李兰云, 张阁, 刘静, 等. 初始间隙对双金属复合管液压成形的影响研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5): 136–140. doi: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.05.034  
LI Lanyun, ZHANG Ge, LIU Jing, et al. Effect of initial clearance on hydroforming of bimetal clad pipe[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(5): 136–140. doi: 10.-14158/j.cnki.1001-3814.2019.05.034
- [15] 杜清松, 曾德智, 杨斌, 等. 双金属复合管塑性成型有限元模拟[J]. 天然气工业, 2008, 28(9): 64–66. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2008.09.019  
DU Qingsong, ZENG Dezhi, YANG Bin, et al. Finite-element simulation on plastic forming of bi-metal composite pipe[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(9): 64–66. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2008.09.019
- [16] AKISANYA A R, KHAN F U, DEANS W F. Cold hydraulic expansion of oil well tubulars[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2011, 88(11–12): 465–472. doi: 10.1016/j.ijpvp.2011.08.003
- [17] OLABI A G, ALASWAD A. Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(10): 815–820. doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.-05.022
- [18] 陈俊文, 顾泓, 王磊, 等. 集输系统机械复合管紧密度性能探讨[J]. 天然气与石油, 2017, 35(6): 18–23. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2017.06.004  
CHEN Junwen, GU Hong, WANG Lei, et al. Research on the tightness of mechanical composite pipe in gathering system[J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35(6): 18–23. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2017.06.004
- [19] 王学生, 王亚辉, 李培宁, 等. 液压胀合复合管的应力应变分析[J]. 郑州工业大学学报, 2001, 22(1): 33–35. doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2001.01.009  
WANG Xuesheng, WANG Yahui, LI Peining, et al. Analysis of stress and strain for clad pipe manufactured by hydraulic expansion[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2001, 22(1): 33–35. doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.2001.01.009
- [20] 郭小联, 刘富君, 郑津洋, 等. 适用于双层管液压胀合的当量屈服强度法[J]. 轻工机械, 2009, 27(3): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1005-2895.2009.03.001  
GUO Xiaolian, LIU Fujun, ZHENG Jinyang, et al. Application of equivalent yield strength to double layered tube hydro expanding[J]. Light Industrial Machinery, 2009, 27(3): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1005-2895.2009.03.001

- [21] 马海宽, 李培力, 隋健, 等. 双金属复合管液胀成形选材标准理论分析探讨[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(3): 73-75. doi: 10.3969/j.issn.1009-3281.2015.03.018  
MA Haikuan, LI Peili, SUI Jian, et al. Theoretical analysis and discussion of hydraulic expansion forming and material selection standards for dual metals lined pipe[J]. Process Equipment and Piping, 2015, 52(3): 73-75. doi: 10.3969/j.issn.1009-3281.2015.03.018
- [22] 刘富君, 郑津洋, 郭小联, 等. 双层管液胀接的判据准则及分析比较[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 235-239. doi: 10.3321/j.issn:1001-9669.2006.02.016  
LIU Fujun, ZHENG Jinyang, GUO Xiaolian, et al. Criterion and comparison for bimetallic tube formed by hydraulic expansion[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(2): 235-239. doi: 10.3321/j.issn:1001-9669.2006.02.-016

## 作者简介



陈俊文, 1987 年生, 男, 汉族, 四川成都人, 工程师, 主要从事油气田地面工程的研究。E-mail: chen-junw\_sw@cnpcc.com.cn



练章华, 1964 年生, 男, 汉族, 四川自贡人, 教授, 博士生导师, 主要从事 CAD/CAE/CFD、计算力学、油气井工程与安全领域的计算机仿真等方面的研究。E-mail: cwctlzh@swpu.edu.cn



汤晓勇, 1970 年生, 男, 汉族, 四川南充人, 教授级高级工程师, 主要从事油气田地面工程方面的研究。E-mail: tangxiaoyong@cnpcc.com.cn



谷天平, 1994 年生, 男, 汉族, 陕西渭南人, 博士研究生, 主要从事油气井工程力学方面的研究工作。E-mail: 597332793@qq.com



施岱艳, 1969 年生, 女, 汉族, 四川南充人, 高级工程师, 主要从事油气田地面工程的研究。E-mail: shidaiyan@cnpcc.com.cn

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>