

doi:10.3969/j.issn.1007-2012.2016.01.024

## L360QS/Incoloy825 镍基合金液压复合管的有限元模拟与试验\*

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065) 毕宗岳<sup>1,2</sup> 王纯<sup>1</sup> 晁利宁<sup>2</sup>  
(2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 宝鸡 721008) 张万鹏<sup>2</sup> 杨耀彬<sup>2</sup> 田磊<sup>2</sup>

**摘要:** 基于双金属复合管的液压胀合原理, 计算出 L360QS 碳钢管/Incoloy825 镍基合金管液压胀合的最小胀合压力  $P_{\min}$  = 46.84 MPa、最大胀合压力  $P_{\max}$  = 51.67 MPa。采用 ABAQUS 有限元确定了解析最小胀合压力与残余接触应力  $P_c^*$ , 并通过液压胀合试验进行了验证对比。结果表明, 有限元确定的解析最小胀合压力为 47.45 MPa, 与理论计算值  $P_{\min}$  较吻合; 模拟最大胀合压力  $P_{\max}$  卸载后的管间残余接触应力  $P_c^*$  = 0.98 MPa; 通过液压胀合试验, 采用推出法测定并计算管段长度分别为 200 mm 和 50 mm 时的管间残余接触应力为 0.7 MPa 和 0.65 MPa, 略小于有限元模拟结果, 这是由实际管体的椭圆度、内外管间隙不均匀等原因造成。

**关键词:** 双金属复合管; 液压胀合; 有限元; 残余接触压力

**中图分类号:** TE973.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012(2016)01-0131-05

### Finite element simulation and experimental study of L360QS/Incoloy825 nickel base alloy hydraulic pipe

BI Zong-yue<sup>1,2</sup> WANG Chun<sup>1</sup> CHAO Li-ning<sup>2</sup> ZHANG Wan-peng<sup>2</sup> YANG Yao-bin<sup>2</sup> TIAN Lei<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065 China)

(2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008 China)

**Abstract:** For the L360QS/Incoloy825 nickel base alloy hydraulic expansion pipe, by analyzing the hydraulic pressure expansion principle of double metal composite tube, the minimum expansion pressure  $P_{\min}$  of 46.84 MPa and the maximum expansion pressure  $P_{\max}$  of 51.67 MPa can be calculated. Also, by using ABAQUS finite element method (FEM), the minimum expansion pressure and the residual contact pressure  $P_c^*$  can be obtained and verified by hydraulic bulge test. The results show that the predicted minimum expansion pressure by FEM is 47.45 MPa, which is consistent with the theoretical calculation result. The simulated residual contact stress between the tube is 0.98 MPa after unloading, which is slightly larger than the experimental ones. The reason is attributed to the actual ovality of the pipe body and the uneven clearance inside and outside the pipe.

**Key words:** double metal clad pipe; hydraulic expansion; finite element; residual contact stress

## 引言

在油气田开发和生产过程中, 由于具有强腐蚀性介质的油气直接与石油管内表面接触, 添加缓蚀剂、采用塑料内涂层、采用耐蚀合金等传统单一的

防腐技术及材料, 在耐蚀可靠性、经济性指标上都难以平衡, 已难以满足油气田发展的需要<sup>[1]</sup>。为了提高油气管防腐性能和降低耐蚀合金成本, 双金属复合管应运而生。双金属复合管<sup>[2]</sup>的基管满足管道的设计应力, 具有所要求的高强度; 衬管满足耐腐蚀或耐磨损等性能要求, 与单一金属管相比, 兼具了基层和复层材料各自的优势<sup>[3]</sup>。双金属复合管降低了生产成本, 节约了稀有、贵重等金属的使用, 因此, 在石化、核电、轻工和机械工程等行业有着广阔的应用前景<sup>[4-5]</sup>。

双金属复合管的成型工艺有热轧复合、爆炸焊接复合、堆焊复合、液压胀合、滚压复合、拉拔复合等工艺。其中, 液压胀合成形工艺由于具有设备

\* 国家高技术研究发展 863 计划资助项目 (2013AA031303)。

通讯作者: 王纯 E-mail: 315846549@qq.com

作者简介: 毕宗岳, 男, 1962 年生, 教授, 高级工程师, 主要研究方向为管材开发及焊接技术

收稿日期: 2015-06-2; 修订日期: 2015-07-14

和工艺较简单、生产成本低、效率高、胀合力均匀且容易确定和测量、易于对胀合过程进行数值模拟且不再需要水压试验等一系列优点,得到了广泛认可。到目前为止,对 L360QS/Incoloy825 镍基合金的液压胀合复合管鲜有相关的报道。本文基于复合管的胀合原理,计算出 L360QS/Incoloy825 镍基合金液压胀合的最小、最大胀合压力,运用 ABAQUS 有限元确定了液压胀合的最小胀合压力,及达到最大胀合压力卸载后的内外管间的残余接触应力;进行液压胀合试验,对比分析了试验胀合压力与模拟胀合压力都为最大胀合压力时卸载后的内外管间残余接触应力,为 L360QS/Incoloy825 镍基合金的液压胀合工艺提供指导。

## 1 理论分析

内外管胀合的应变与胀合压力的关系曲线如图 1 所示。首先将内层管套入外层管,则管间存在原始平均间隙  $\delta$ 。内层管在液压胀合压力的作用下产生径向膨胀,在压力增加到  $T$  点时内管外表面与外管内表面刚好接触,间隙消除;随着胀合压力的继续增加,内管自由变形被外管阻止,在内管外壁与外管内壁间产生接触压力  $P_c$ 。外管内壁发生弹性变形,甚至可能产生部分塑性变形;当达到所需胀合压力  $P_i$  (外管内壁刚发生屈服时的胀合压力为  $P_{i\max}$ ) 时泄压,内管与外管发生弹性回复。

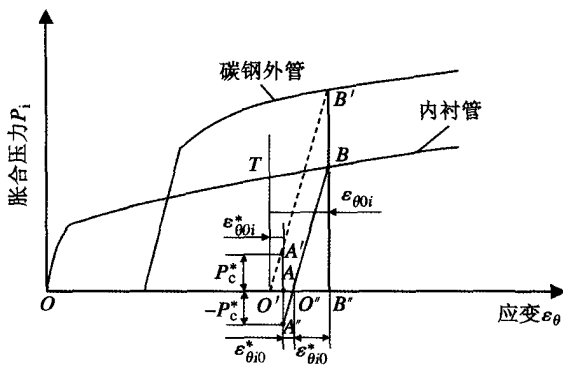


图 1 双金属复合管内外管应变与胀合压力的关系

Fig. 1 The relationship between the strain and expansion pressure of double metal composite tube

由图 1 知,当外管内壁的自由弹性回复量  $O'B'' >$  内管外壁的自由弹性回复量  $O'A''$  时,由于外管内径  $\geq$  内管外径,自由弹性回复受阻。变形协调的结果为,外管内径 = 内管外径,外管内壁的应力状态处于点 A,内管外壁的应力状态处于点 B,从

而残留在外管内壁上有接触应力  $P_c^*$ ,在内管外壁上留有相反接触应力  $-P_c^*$ 。

在复合管胀合过程中,假设内层管为线弹性强化材料模型,这是由于内层管将发生较大的塑性变形,应考虑材料的强化;假设外管为理想弹塑性材料模型,因为外层管一般为弹性变形,塑性变形很小,可忽略材料的强化。运用弹塑性理论,并分析胀合过程内外管的变形协调,可得出复合管液压胀合压力  $P_i$  与残余接触应力  $P_c^*$  的理论计算公式<sup>[6]</sup>。当内层管弹性模量  $E_i \approx$  外层管弹性模量  $E_o = E$  及内层管摩擦系数  $\mu_i \approx$  外层管摩擦系数  $\mu_o = \mu$  时,则胀合压力  $P_i$  与残余接触应力  $P_c^*$  的计算关系式简化为:

$$P_i = \left[ \frac{K^2 - 1}{2K^2} + \ln k \right] \sigma'_{si} + \frac{k^2 K^2 - 1}{K^2 (k^2 - 1)} P_c^* \quad (1)$$

式中  $K = D_o / D_i$

$$k = d_o / d_i$$

由式(1)可知,在一定范围内,内外管间残余接触应力  $P_c^*$  随胀合压力  $P_i$  的增加而增大。当外层管内壁开始屈服时,弹性变形达到最大,此时卸压,即可获得最大的残余接触应力  $P_c^*$ 。液压复合管的最小胀合压力  $P_{i\min}$  和最大胀合压力  $P_{i\max}$  计算公式为<sup>[6]</sup>:

最小液压胀合压力:

$$P_{i\min} \geq \left[ \frac{K^2 - 1}{2K^2} + \ln k \right] \sigma'_{si} \quad (2)$$

最大液压胀合压力:

$$P_{i\max} = \frac{K^2 - 1}{2K^2} \sigma_{so} + \sigma'_{si} \ln k \quad (3)$$

式中  $d_i, d_o$ ——内层管内、外直径/mm

$D_i, D_o$ ——外层管内、外直径/mm

$\sigma_{so}$ ——外层管的屈服强度/MPa

$\sigma'_{si}$ ——内层管的应变强化/MPa

## 2 试验参数

试验材料取自国内某公司提供的 L360QS 无缝碳钢管和 Incoloy825 镍基合金焊管。外管 L360QS 碳钢管,长度 6 000 mm,屈服强度  $\sigma_{so} = 470$  MPa,延伸率 35%,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3,外径  $D_o = 219$  mm,壁厚 10 mm;内管 825 镍基合金管,长度 6 000 mm,屈服强度 390 MPa,延伸率 45%,弹性模量 195 GPa,线性强化模量  $\sigma'_{si} = 1600$ ,泊松比 0.3,外径  $d_o = 196$  mm,壁厚

2.5 mm。内外管初始间隙 2 mm,  $K = D_o/D_i = 1.10$ ,  $k = d_o/d_i = 1.03$ 。利用式(2)、式(3)计算得到液压胀合时内管屈服压力  $P_o = 10.08$  MPa, 最小胀合压力  $P_{min} = 46.84$  MPa, 最大胀合压力  $P_{max} = 51.67$  MPa。

### 3 有限元模拟分析

对上述模型进行分析, 假设双金属复合管的内外层管均为理想圆管。通过分析双金属液压复合管的胀合力学过程可知, 基管与内层管的几何特征、加载压力均呈径向均匀分布的特点<sup>[7]</sup>。本模型同样假设内管为线性强化模型, 内管本构模型为材料实际的应力-应变曲线; 外管为理想弹性材料模型。

运用 ABAQUS 软件分析时, 将双金属复合管的三维模型简化为平面 2D 模型进行分析, 长度取 100 mm, 以提高计算效率。内外管均选用轴对称单元, 内管总单元数为 522 个, 节点数 655 个; 外管总单元个数 630, 节点数 729 个。内外管底部和顶部均施加 Y 方向的对称约束。外层管外壁为自由端, 内层管内壁施加均匀的胀合压力。按照上述双金属复合管的参数建立的有限元模型如图 2 所示。

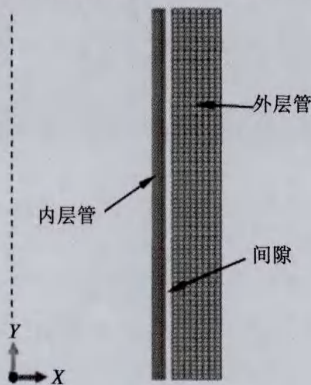


图 2 双金属复合管的 ABAQUS 有限元模型  
Fig. 2 The ABAQUS finite element model of bimetallic clad pipe

液压胀合压力  $P_i = 10$  MPa 时管体截面等效应力分布如图 3 所示。当加载的压力  $P_i = 47.45$  MPa 时, 内外管间隙及内外管结合面的接触应力为 0, 因此, 可认为最小胀合压力  $P_{min} = 47.45$  MPa, 其等效应力云图如图 4 所示。

从 0 MPa 开始对复合管增加压力到最大胀合压力 52 MPa, 其对应的等效应力云图如图 5a 所示, 卸载最大胀合压力后的接触应力分布如图 5b 所示。根据建模特点, S11 为二维模型中的残余径向接触

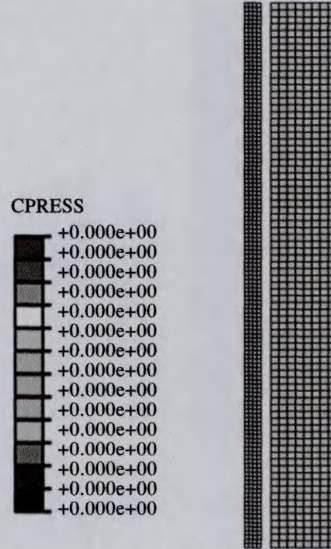


图 3 胀合压力为 10 MPa 时的等效应力云图  
Fig. 3 The expansion pressure for equivalent stress nephogram of 10 MPa

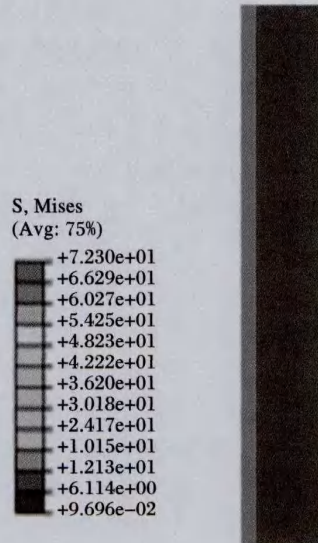


图 4 胀合压力为 47.45 MPa 时的等效应力云图  
Fig. 4 The expansion pressure for equivalent stress nephogram of 47.45 MPa

应力, S22 为残余周向接触应力, 在双金属复合管中残余径向接触应力的大小是内衬管与基管紧密结合的关键, 所以取残余径向接触应力 S11 为分析对象<sup>[8]</sup>。

从图 3 可以看出, 当胀合压力  $P_i = 10$  MPa 时, 内衬管开始由弹性变形变为屈服变形, 内衬管与基管之间存在间隙, 没有贴合; 随着胀合压力的增大, 内衬管的径向尺寸不断增大, 其径向应力也不断增大, 当胀合压力  $P_i = 47.45$  MPa 时, 此时, 内外管

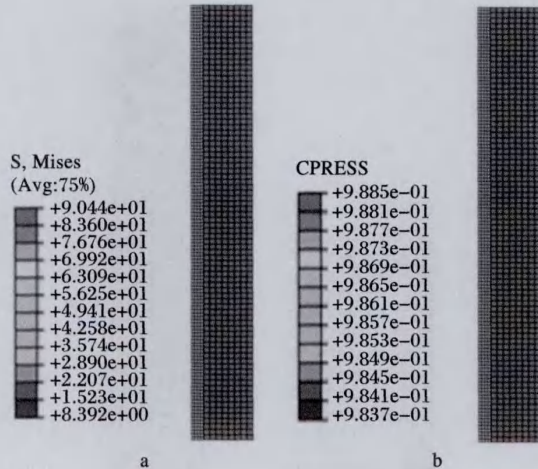


图 5 胀合压力为 52 MPa 时的应力云图

a) 压力为 52 MPa 时的等效应力云图; b) 卸载后的接触应力云图

Fig. 5 The expansion pressure for stress nephogram of 52 MPa

贴合, 间隙缩小至 0, 表明液压复合成形的解析最小胀合压力为 47.45 MPa, 与理论计算的数值解  $P_{\min} = 46.84$  MPa 相近; 压力增大到 52 MPa 时, 内衬管与基管已经接触, 并产生了一定的接触应力。从图 5 可以看出, 在胀合压力  $P_1 = 52$  MPa 时卸载, 基管与内衬管间的残余接触应力为 0.98 MPa, 表明基管与内衬管已经紧密贴合, 达到了较好的结合效果。

#### 4 试验分析

试验前, 对 L360QS 碳钢管内表面进行喷砂除锈, 对 Incoloy825 合金管进行酸洗处理。液压胀合试验按照同轴装配—封焊内外管间隙—封焊外管—焊接进出水接口—连接试验设备—打压试验—泄压—检测的过程进行, 采用全套静水压系统对复合管进行液压胀合试验, 液压胀合试验的压力值达到 52 MPa, 并保压 1 min。如图 6 所示。

参考 API Spec 5LD 的标准要求, 切取长度为 200 mm 和 50 mm 试验复合管环, 在带锯床上切取管环时选取 GCZX-070 型空压机风冷代替冷却液冷却锯条, 防止冷却液进入内外管间隙影响管间的接触应力, 再对管环两端做平头与去毛刺处理。采用推出法, 在 CMT-5502 微机控制电子万能试验机上进行复合管间的残余接触应力试验, 过程拉伸速率为  $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 如图 7 所示。检测 L360QS 碳钢管与 Incoloy825 镍基合金管分离移动时的最大结合

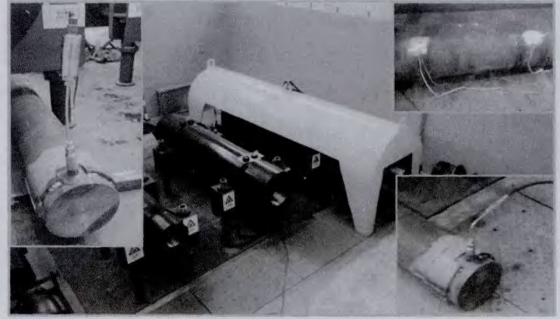


图 6 静水压试验

Fig. 6 Hydrostatic pressure test

力分别为 86.2 kN (200 mm) 和 20.01 kN (50 mm), 按照 CJ/T 192-2004 《内衬不锈钢复合钢管》结合强度试验结果的判定计算公式:

$$P = \frac{F}{\pi DH} \quad (4)$$

式中  $F$ ——试样衬管与基管分离移动时的最大结合力/N

$D$ ——内层不锈钢管的外径/mm

$H$ ——试样的结合高度/mm

$P$ ——内外管间的残余接触应力/MPa



图 7 复合管环端面 and 推出法测试内外管间结合力

Fig. 7 Clad pipe ring end face and testing the bonding force between inside and outside tube by Launch method

由式(4)计算可得, L360QS 碳钢管与 825 镍基合金管胀合后的残余接触应力分别为 0.7 MPa (200 mm) 和 0.65 MPa (50 mm),  $\gg$  API Spec 5LD 及 SYT 6623-2012 《内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管规范》<sup>[9]</sup> 的标准要求 0.2 MPa。试验结果略低于有限元模拟胀合压力为 52 MPa 卸载后的接触应力 0.98 MPa, 这是由于实际管体的椭圆度、内外管间隙不均匀等实际因素对内外管间接触应力有一定的影响。

#### 5 结论

1) 基于双金属复合管的液压胀合原理, 计算了 L360QS 碳钢管/Incoloy825 镍基合金液压复合管的

最小胀合压力  $P_{\min} = 46.84 \text{ MPa}$ 、最大胀合压力  $P_{\max} = 51.67 \text{ MPa}$ 。

2) 建立了 L360QS 碳钢管/Incoloy825 镍基合金复合管的 ABAQUS 有限元模型, 确定了最小胀合压力为  $47.45 \text{ MPa}$ , 与理论计算值  $46.84 \text{ MPa}$  比较吻合; 模拟最大胀合压力  $52 \text{ MPa}$  卸载后的管间残余接触应力为  $0.98 \text{ MPa}$ 。

3) 采用推出法测得管段长度为  $200 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm}$  的 L360QS/Incoloy825 镍基合金复合管分离时的最大结合力, 计算得到其内外管间残余接触应力分别为  $0.7 \text{ MPa}$  和  $0.65 \text{ MPa}$ ,  $\gg$  API Spec-5LD 的标准要求  $0.2 \text{ MPa}$ , 略小于有限元模拟值, 这是由于实际管体的椭圆度、内外管间隙不均匀等原因造成的。

### 参考文献

- [1] 孙育禄, 白真权, 张国超等. 油气田防腐用双金属复合管研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2011, 25(5): 9-13
- [2] 赵卫民. 金属复合管生产技术综述[J]. 焊管, 2003, 26(3): 10-14
- [3] 王永芳, 王戈, 张燕飞等. 铜钛双金属复合管的氩弧焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(21): 147-153
- [4] Alcaraz J L, Gil-Sevillano J, Martinez-Esnaola J M. A fracture condition based on the upper bound method for the extrusion of bimetallic tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 61(3): 265-274
- [5] Wright H O, duyemi T, Evans H R. The experimental behavior of double skin composite elements[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, (19): 91-110
- [6] 王学生, 李培宁, 王如竹等. 双金属复合管液压成型压力的计算[J]. 机械强度, 2002, 24(3): 439-442
- [7] 陆晓峰, 郑新. 基于有限元模拟的 20/316L 双金属复合管拉拔参数的优化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 205-213
- [8] 马海宽, 刘继高, 李培力等. 双金属复合管高压液胀成形理论分析与有限元计算[J]. 钢管, 2013, 42(5): 26-30
- [9] 石油管材专业标准化委员会. SYT 6623-2012 内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2012