

# L360QS/Incoloy825 镍基合金复合管的 液压胀合工艺

徐学利<sup>1</sup>, 王纯<sup>1</sup>, 毕宗岳<sup>1,2</sup>, 张万鹏<sup>2</sup>, 杨耀斌<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 宝鸡 721008)

**摘要:**介绍了双金属复合管的复合工艺,特别是液压胀合工艺特点。通过对 L360QS/Incoloy825 镍基合金管的液压胀合原理分析、液压胀合压力计算及试验装置的设计,成功地进行了液压胀合试验。结果表明:最小试验胀合压力  $P_{\min}$  为 49.10 MPa,最大胀合压力  $P_{\max}$  为 57.42 MPa;管段长度为 200、50 mm 时,其管间残余接触应力分别为 0.7、0.65 MPa,均大于 API Spec 5LD 的标准要求 0.2 MPa。

**关键词:**双金属复合管; 液压胀合; 镍基合金

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.17.028

中图分类号: TG386.49

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2015)17-0095-04

## Hydraulic Expansion Process of L360QS/Incoloy825 Nickel Based Alloy Clad Pipe

XU Xueli<sup>1</sup>, WANG Chun<sup>1</sup>, BI Zongyue<sup>1,2</sup>, ZHANG Wanpeng<sup>2</sup>, YANG Yaobin<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:**The clad technology of double metal clad pipe, especially hydraulic bulging process characteristics were introduced. Through the analysis of the principle of the hydraulic expansion, the hydraulic expanding pressure calculation, the design of the test apparatus for L360QS and Incoloy825 nickel-based alloy pipe, the hydraulic bulging test was successfully carried out. The results show that: the minimum expansion test pressure  $P_{\min}$  is 49.10 MPa, the maximum expansion pressure  $P_{\max}$  is 57.42 MPa; when section length is 200, 50 mm, the residual contact stress between the tubes is 0.7 MPa and 0.65 MPa respectively, which are greater than the standard requirement of API Spec 5LD of 0.2MPa.

**Key words:**double metal clad pipe; hydraulic expansion; nickel based alloys

双金属复合管<sup>[1]</sup>由两种不同的金属管材构成,管层之间通过各种变形和连接技术形成紧密结合,受外力作用时,内外管材同时变形且界面不分离。外包覆的双金属管大量用于装饰和结构管用,内复合双金属管则主要用在防止有害介质对管道的腐蚀等方面<sup>[1]</sup>。与单一金属管相比,双金属复合管的基管满足管道的设计应力,衬管满足耐腐蚀或耐磨损等性能要求。由于其兼具了基层和复层材料各自的优势,且节约了稀有贵金属的使用,降低了生产成本,在石油、化工、核电、轻工和机械工程等行业有着广阔的

应用<sup>[2-3]</sup>。按照复合管界面的结合方式,双金属复合管可以分为机械型复合管<sup>[4]</sup>和冶金型复合管<sup>[5]</sup>。冶金复合工艺包括热轧复合、热挤压复合、爆炸焊接复合、离心铸造复合等,其工艺是熔合两种金属。因此复合牢固、结合强度较高,冷热缩胀一致,但由于其生产成本高、制作受设备限制,产品规格有限,因此应用范围有限。机械复合工艺包括液压胀合、旋压复合等,由于设备工艺比较简单、工序较少、生产成本较低。

液压胀合工艺与其他工艺相比,它具有胀合力均匀且容易确定和测量、易于对胀合过程进行力学分析和数值模拟等一系列优点,因此有着广泛的开发前景和应用价值。但到目前为止,有关 L360QS/Incoloy825 镍基合金(简称 825 镍基合金)的液压胀合复合管的试验研究还未见相关报道。本文通过对复合管的胀

收稿日期:2015-06-02

基金项目:国家高技术研究发展 863 计划(2013AA031303);陕西省优势学科专项资金资助项目(ys37020203)

作者简介:徐学利(1963-),男,陕西泾阳人,教授,主要研究方向为材料组织性能研究;E-mail:31584549@qq.com

合原理进行分析, 计算了 L360QS、825 镍基合金的胀合压力。对试验装置进行设计, 并成功进行液压胀合试验。试验结果检测复合管间的残余接触应力满足 API Spec 5LD 的标准要求。

## 1 试验材料与试验参数

### 1.1 试验材料

试验材料为 L360QS 无缝碳钢管和强度较低的 825 镍基合金不锈钢管, 试验材料常规力学性能见表 1。

表 1 L360QS 钢与 825 镍基合金的力学性能  
Tab.1 The mechanical properties of L360QS steel and 825 nickel-based alloy

材料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率(%)
Incoloy825 合金	410	600	49
L360QS 钢	530	610	25

### 1.2 试验参数

外管 L360QS 碳钢管, 长度 6000 mm, 屈服强度 530 MPa, 伸长率 25%, 弹性模量 206 GPa, 泊松比 0.3, 外径 219 mm, 壁厚 10 mm; 内管 825 镍基合金管, 长度 5900 mm, 屈服强度 410 MPa, 伸长率 49%, 弹性模量 195 GPa, 泊松比 0.3, 外径 196 mm, 壁厚 2.5 mm。内外管初始间隙 2.0 mm,  $K=D_o/D_i=1.10$ ,  $k=d_i/d_o=1.03$  ( $d_i, d_o$  为内层管内、外直径, mm;  $D_i, D_o$  为外层管内、外直径, mm)。

双金属复合管胀合过程内外管胀合的应变与压力关系如图 1 所示。将两管套装在一起, 则管间存在原始平均间隙  $\delta$ 。对内层管, 在液压成形内压力的作用下, 首先发生弹性变形, 然后产生塑性变形, 随压力的增加达到 T 点, 内外管间隙消除, 压力继续升高时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  $P^*$ 。外管内壁发生弹性变形,

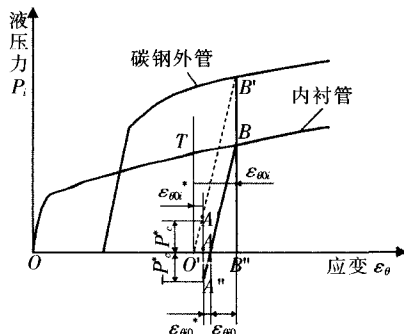


图 1 双金属复合管胀合过程内外管应变与液压力的关系  
Fig.1 The relationship between the strain and hydraulic pressure of double metal clad pipe in expanding process

甚至可能产生部分塑性变形。

当压力达到所需的胀合压力  $P_i$  值时 (外管内壁开始发生屈服时的胀合液压力为  $P_{max}$ ) 泄压, 内管与外管发生弹性回复, 外管内壁的自由弹性回复量  $O'B''$  大于内管外壁的自由弹性回复量  $O''B''$ , 由于内管外径不可能大于外管内径, 自由弹性回复受阻, 变形协调的结果是外管内径等于内管外径, 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  $P^*$ , 在内管外壁上留有相反接触应力  $-P^*$ 。

运用弹塑性理论, 根据胀合过程中内外管的变形协调, 得出复合管液压成形的理论最大、最小胀合压力的计算公式<sup>[9]</sup>。最小液压胀合压力的计算公式为:

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

最大液压胀合压力的计算公式为:

$$P_{max} = \frac{K^2-1}{2K^2} \sigma_{s0} + \sigma'_{si} \ln k \quad (2)$$

利用公式(1)、(2)计算得到液压胀合时内管屈服压力  $P_i$  为 10.59 MPa, 最小胀合压力  $P_{min}$  为 49.10 MPa, 最大胀合压力  $P_{max}$  为 57.42 MPa。

## 2 试验方法与试验结果

L360QS 碳钢管和 Incoloy825 合金的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-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, 如图 2 所示。

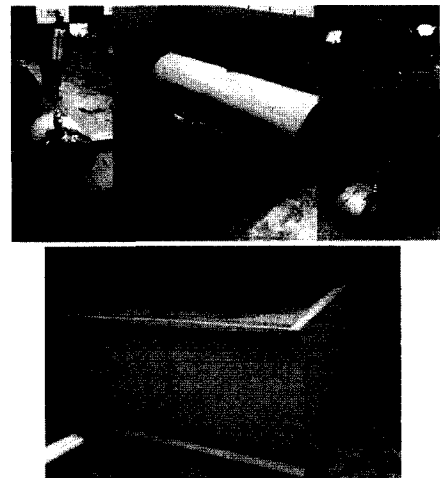


图 2 静水压试验系统  
Fig.2 Hydrostatic pressure test system

试验前, 采用 GB4235-60A 型卧式带锯床切取

L360QS 碳钢管与 825 合金管。在距离 L360QS 碳钢管外管两端各 80mm 处钻直径 3mm 的通孔, 然后将 825 镍基合金管套入 L360QS 外管并进行内外管间隙处的环焊接, 图 3 是胀合前贴合处的焊接形貌及排气孔。焊前先对 825 镍基合金管的端头和碳钢管的贴合处进行打磨除锈清理, 保证内管焊接处无杂质、水分。

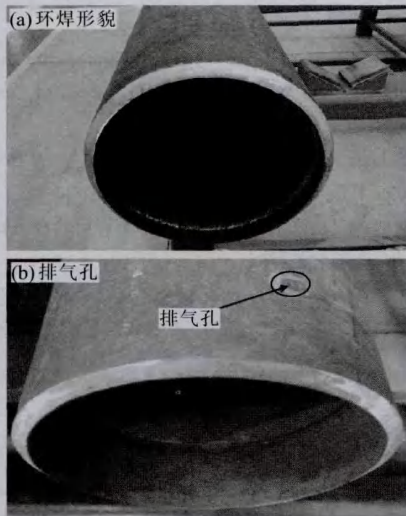


图 3 试验前管端的焊接形貌及排气孔  
Fig.3 The weld appearance and the vent holes in the tube end before the test

采用堵头对外管封焊, 管体两端的堵头选用外径和碳钢管外径相同的 45 钢, 壁厚 100mm, 进水孔设在堵头直径的 1/4 处, 注水孔设在厚度的 1/2 处, 与进水孔相通。堵头外紧箍的设计规格为  $\phi 239\text{mm} \times 12\text{mm} \times 160\text{mm}$ , 套在碳钢管外与堵头焊接处以防止压力过大引起的堵头意外断裂状况。在焊合好的堵头上焊接进出水接口, 然后在出水口一端接入压力传感器, 进水口一端接入注水系统, 检查无误后进行胀合试验。试验压力从 0 开始打压直至 57MPa, 并保压 10s, 若无压降现象产生, 然后卸载胀合压力。

采用 V405-T 型手工电弧焊机对堵头与管体进行封焊, 焊材为 SH-J557, 打底焊条规格  $\phi 3.2\text{mm} \times 350\text{mm}$ , 填充、盖面焊条规格为  $\phi 4\text{mm} \times 400\text{mm}$ ; 采用 TIG-200S 型氩弧焊机对不锈钢管与碳钢管端的间隙处进行封焊, 焊材为 ENICrMo-3。焊前采用 YCH-100 型烘烤箱对焊条进行烘干, 保证焊接电弧能够稳定地燃烧且防止焊后焊缝中产生气孔。焊接工艺参数见表 2。

参考 API Spec 5LD 的标准要求, 切取长度为

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 The parameters of welding process

焊接层次	焊接方法	焊接电流		电弧电压 /V	焊接速度 / $(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	热输入 / $(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	保护气 / $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	
		极性	电流 /A				正面	反面
堵头 外环 焊处	打底	手工	DC 130~140	10~14	8~12	5~15	8~14	-
	填充	电弧	DC 135~145	10~14	6~10	5~15	8~14	-
	盖面	电弧	DC 145~150	10~14	9~13	5~15	8~14	-
内环焊处	TIG	DC	100~110	15~20	6.5~7.5	14~18	8~14	12~18

200 和 50mm 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。试验采用推出法, 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 3mm/min, 如图 4 所示。检测 L360QS 碳钢管与 825 镍基合金管分离移动时的最大结合力分别为 86.2 kN(200mm) 和 20.01 kN(50mm), 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:

$$P = \frac{F}{\pi DH} \quad (3)$$

式中:  $F$  为试样衬管与基管间分离移动时的最大结合力, N;  $D$  为内层不锈钢管的外径, mm;  $H$  为试样的结合高度, mm;  $P$  为内外管间的残余接触应力, MPa。

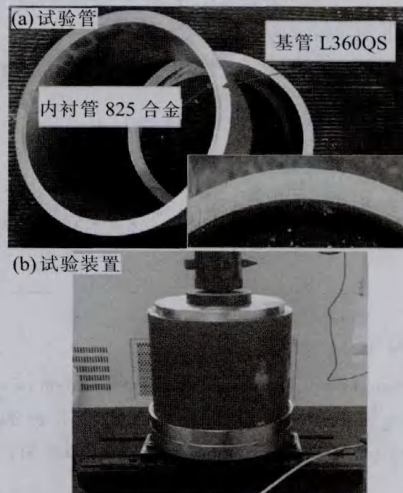


图 4 推出法测试内外管间结合力  
Fig.4 The bonding force between inside and outside tube tested by launch method

由式(3)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为 0.7 MPa (200 mm) 和 0.65 MPa (50 mm), 远大于 APISpec 5LD 及 SYT 6623-2012 《内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管规范》的最低要求(0.2 MPa)。

### 3 结论


(1) 通过对液压胀合原理进行分析, 计算得到了 L360QS/Incoloy825 镍基合金管的最小胀合压力  $P_{\min}$  为 49.10 MPa, 最大胀合压力  $P_{\max}$  为 57.42 MPa。

(2) 采用全套静水压系统对 L360QS/825 镍基合金管成功地进行了液压胀合试验, 胀合压力值为 57 MPa。

(3) 采用推出法测得管段长度为 200、50 mm 的 L360QS/Incoloy825 镍基合金复合管分离时的最大结合力分别为 86.2、20.01 kN, 计算得到其内外管间残余接触应力分别为 0.7、0.65 MPa, 均大于 API5LD

的标准要求的 0.2 MPa。

#### 参考文献:

- [1] 赵卫民. 金属复合管生产技术综述 [J]. 焊管, 2003, 26(3): 10-14.
- [2] 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.
- [3] Wright H, Oduyemi T, Evans H R. The experimental behavior of double skin composite elements [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, (19): 91-110.
- [4] Rommerskirchen I. New progress caps 10 years of work with bubi pipes [J]. World Oil, 2005, 226(7): 69-71.
- [5] 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): 10-12.
- [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. 

(上接第 91 页) 温度分布规律始终保持一致, 最大温度差  $\Delta T_{\max} \leq 34^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 结论

(1) 进入变形区金属温度不断升高, 等通道入口处温升最高, 约  $91^{\circ}\text{C}$ 。


(2) 进入等通道的坯料金属温度整体沿着等通道不断降低, 降幅约为  $20\sim 26^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 型材中间部位温度高于两翼, 且温度分布始终保持一致, 温度差  $\Delta T_{\max} \leq 34^{\circ}\text{C}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 李琳琳, 张治民, 薛勇. AZ31 镁合金管材挤压成形数值模拟

研究 [J]. 特种成形, 2006(2): 70-72.

- [2] 张青来, 肖富贵, 郭海玲, 等. AZ31B 镁合金薄板超塑性气胀成形 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(7): 1259.
- [3] 刘英, 陈维平, 张卫文, 等. 等通道转角挤压后 AZ31 镁合金的微观结构与性能 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 50-53.
- [4] 赵国群, 徐淑波. 等通道弯角多道次挤压工艺累积变形均匀性研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 177-181.
- [5] 杜文博, 秦亚灵, 严振杰, 等. 大塑性变形对镁合金微观组织与性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(10): 1870-1875.
- [6] 王其军. AZ31 镁合金自行车曲柄等温闭式锻造数值模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008. 

(上接第 94 页)

Jiun Shyan Chen. Die shape design optimization of sheet metal stamping process using meshfree method [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 51: 1385-1405.

- [8] Naceur H, Guo Y Q, Batoz J L, et al. Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process [J]. International Journal of Mechanical Science, 2001, 43: 2407-2434.

- [9] 潘江峰, 钟约先, 袁朝龙. 基于多目标遗传算法的板料拉深成形工艺参数优化设计 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (增刊): 74-76.
- [10] 郭成, 史东才, 王朝明, 等. 基于经验知识的覆盖件成形过程数值模拟与参数优化 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 191-194.
- [11] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. 