

## ●研究简报●

## 双金属复合管液压成形压力的计算\*

## CALCULATION OF HYDRO-FORMING PRESSURE FOR BI-METAL CLAD PIPE

王学生\*\*<sup>1</sup> 李培宁<sup>2</sup> 王如竹<sup>1</sup> 许煜雄<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200030)(2. 华东理工大学 机械学院, 上海 200237)

WANG Xuesheng<sup>1</sup> LI Peining<sup>2</sup> WANG Ruzhu<sup>1</sup> XU Yuxiong<sup>1</sup>

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

(2. Mechanical Engineering Institute, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**摘要** 根据基本假设,建立双金属复合管的材料模型及力学模型。采用弹塑性理论,分析双金属复合管液压成形过程中内管及外管的应力应变状态。利用变形协调条件,得出液压力  $P_i$  与复合管内外管之间残余接触压力  $P_c^*$  的计算公式,给出液压成型压力的最大值与最小值,并通过试验验证理论公式的准确性。双金属复合管复合成形时要想获得残余接触压力,外层管材料屈服强度必须大于内层管材料屈服强度或强化后的应力值。

**关键词** 复合管 液压成型 残余接触压力

**中图分类号** TH123.4 TH123.3

**Abstract** The double-wall, bimetallic CRA-lined pipe has an inner layer made of a very resistant CRA and an outer layer made of low-cost carbon steel providing the line pipe with the required strength and toughness, which has been widely applied in oil production, nuclear power plants and refining industry. Clad pipe can be manufactured by various techniques that include hot coextrusion, hot-rolled bonding, explosive bonding, centrifugal casting and hydraulic expansion of a CRA pipe inside and a carbon-steel outer pipe. Compared with kinds of methods, hydraulic expansion process is easy to control, clad pipe can be economically manufactured and its quality is better, so it is deserved to develop. This paper mainly presents the clad pipe, which inner pipe is stainless steel and outer pipe is carbon steel to be formed by hydraulic expansion process.

According to the basic supposition, the material and mechanics models of inner pipe and outer pipe have been established. (1) The material of the inner pipe is considered as linear hardening behavior, and the outer pipe is described as ideally plastic material since its plastic deformation is smaller. (2) During the hydraulic expansion, the axial force in pipes can be neglected according to our experimental model, so the stress on pipes can be got by simplified as problem of planar stress.

The main principle of hydraulic expansion process for clad pipe has been described. Adopting the elasticity-plasticity theory, the stress and strain during loading and the residual stress and strain after unloading for the inner and outer pipe of clad pipe have been discussed. By using the distortion matching condition the calculating formulas related hydro-forming pressure to the residual contact pressure between has been derived. The range of expansion pressure is got according to the different demands for residual contact pressure of clad pipe, and the maximum and minimum value of hydro-forming pressure is given. In order to obtain the residual contact pressure, the yield stress of outer pipe must be more than inner pipe or its hardening stress. The theoretical analysis is verified by experimental results.

**Key words** Clad pipe; Hydro-forming; Residual contact pressure

*Correspondent*: WANG Xuesheng, *E-mail*: wangxuesh@163.com, *Fax*: +86-21-62932601

*Manuscript received* 20010327, in revised form 20010608.

## 1 引言

双金属复合管是用两种金属材料管复合而成,因而具备两种材料的特性,在输送流体过程中能适应腐蚀性强、磨损大及压力、温度较高的环境。与单材质金属管相比,可节省材料,降低成本。因此双金属管在石油、化工、核电、轻工及机械工程等工业部门有广泛应用。目前加工此种复合管的方法有双金属挤压、爆炸

熔焊、离心铸造等<sup>[1]</sup>,液压成型法因胀合力均匀,且大小容易控制,比其他方法更易实现<sup>[2]</sup>。其复合原理是将两管套装在一起,对内层管加压,随着管内压力升高,内层管由弹性变形进入塑性变形状态,且两管紧密贴合在一起,当内管压力卸除后,如外层管弹性回复大于内层管的弹性回复,则内外管紧密贴合制成双层复合管,图1所示。

\* 20010327 收到初稿,20010608 收到修改稿。

\*\* 王学生,男,1965年3月生,山东省临朐县人,汉族。副教授,工学博士。主要从事过程装备强化、压力容器及压力管道技术方面的教学与科研工作。

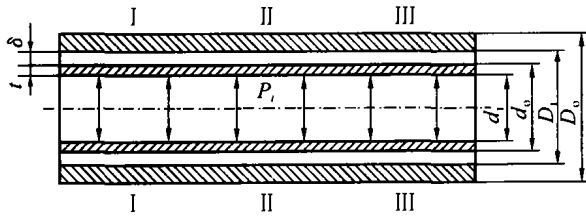


图1 复合管结构图  
Fig.1 Construction of clad pipe

## 2 复合管成形的应力应变分析

### 2.1 基本假设

1)内层管与外层管贴合时,内层管将发生较大的塑性变形,应考虑材料的强化,假设内层管为线弹性强化材料模型。而外层管在复合成形时一般控制在弹性范围之内,即使发生塑性变形也非常小,对于塑性较好的材料大都落在其屈服平台内,因此可忽略材料的强化,认为外层管为理想弹塑性材料模型,如图2所示。

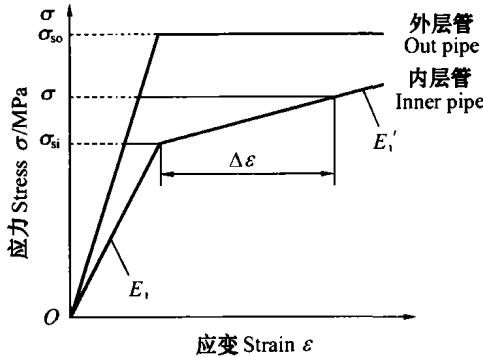


图2 内层管与外层管的材料模型曲线  
Fig.2 Materials model of inner and outer pipe

2)复合管在液压成形过程中,采用两端开式的自紧式密封结构<sup>[2]</sup>,内外管的轴向力很小,故管子受力状态可忽略轴向力的影响,按平面应力分析。

### 2.2 内层管变形阶段受力分析

对复合管内层管内壁表面施加均匀液压力 $P_i$ ,内层管首先处于弹性变形阶段。随着压力 $P_i$ 的升高,内层管进入全面屈服状态,此时内压力为

$$P_i = \sigma_{si} \ln(d_o/d_i) = \sigma_{si} \ln k \quad (1)$$

由于内层管外壁与外层管内壁存在一定间隙( $\delta = 1 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$ ,图1所示),当内层管的外壁与外层管的内壁刚要接触时,内层管已发生较大的塑性变形而进入塑性强化阶段,忽略较小的弹性应变,此时内层管内的应力近似为

$$\sigma_{si}' = \sigma_{si} + E_i' \Delta \varepsilon \approx \sigma_{si} + E_i' (2\delta/d_o) \quad (2)$$

并认为此值在以后的胀合过程中不变,此时所需内压力为

$$P_i = \sigma_{si}' \ln \frac{d_o + 2\delta}{d_i + 2\delta} \approx \sigma_{si}' \ln k \quad (3)$$

### 2.3 复合管成形阶段的应力应变状态

随着内压力的继续增加,内层管与外层管贴合,

并产生接触压力 $P_c$ 。内层管的受力状况如图3a所示。依据特雷斯卡(H. Tresca)屈服准则<sup>[3]</sup>外壁面的应力为

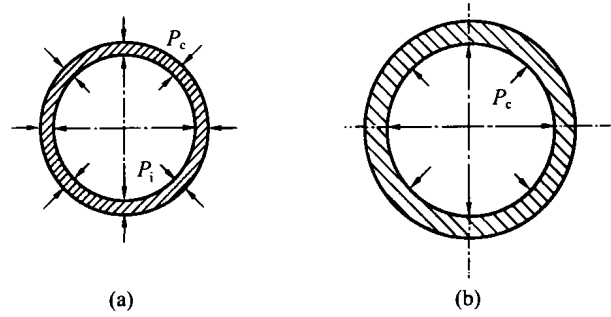


图3 复合管成形过程中的受力状态

Fig.3 Forces on the clad pipe during process of hydro-forming

$$\begin{cases} \sigma_{r_{io}} = -P_c \\ \sigma_{\theta_{io}} = \sigma_{si}' - P_c \\ P_i - P_c = \sigma_{si}' \ln k \end{cases} \quad (4)$$

根据广义虎克定律,内层管外壁的周向弹性应变(即具有弹性恢复的应变) $\varepsilon_{\theta_{io}}$ 为

$$\varepsilon_{\theta_{io}} = \frac{1}{E_i} (\sigma_{\theta_{io}} - \mu_i \sigma_{r_{io}}) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得

$$\varepsilon_{\theta_{io}} = \frac{1}{E_i} [\sigma_{si}' - (1 - \mu_i) P_c] \quad (6)$$

外层管的受力状况如图3b所示。当处在弹性状态时,其内壁面处的应力为

$$\begin{cases} \sigma_{r_{oi}} = -P_c \\ \sigma_{\theta_{oi}} = \frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} P_c = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} P_c \end{cases} \quad (7)$$

同理其内壁面周向弹性应变为

$$\varepsilon_{\theta_{oi}} = \frac{1}{E_o} \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) P_c \quad (8)$$

### 2.4 复合管成形后的应力应变状态

当管内压力 $P_i$ 卸除后,为了保证内外管紧密贴合,内外管之间存在残余接触压力 $P_c^*$ ,由于 $P_c^*$ 作用,内外管处于弹性结合状态,此时内层管外壁处的应力为

$$\begin{cases} \sigma_{r_{io}}^* = -P_c^* \\ \sigma_{\theta_{io}}^* = -\frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} P_c^* \end{cases} \quad (9)$$

内层管外壁由残余接触压力 $P_c^*$ 产生的周向应变为

$$\varepsilon_{\theta_{io}}^* = -\frac{1}{E_i} \left( \frac{k^2 + 1}{k - 1} - \mu_i \right) P_c^* \quad (10)$$

外层管内壁处的应力状态为

$$\begin{cases} \sigma_{r_{oi}}^* = -P_c^* \\ \sigma_{\theta_{oi}}^* = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} P_c^* \end{cases} \quad (11)$$

外层管内壁由残余接触压力 $P_c^*$ 产生的周向应变为

$$\epsilon_{\theta_{oi}}^* = \frac{1}{E_o} \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) P_c^* \quad (12)$$

### 3 复合管液压成形力的计算

#### 3.1 复合管液压成形过程原理

在复合管内加压,首先内层管发生弹性变形到达1点,此时液压力大小可由式(1)算出;超过1点以后,伴随着压力的升高,内层管进入塑性强化阶段,当到达2点时内层管的外壁刚好与外层管的内壁接触,此时所需液压力的大小可由式(3)计算。此时内层管外壁总应变为  $2\delta/d_o$ ,正好消除了与外层管内壁之间的间隙  $\delta$ 。此后压力升高外层管内壁开始发生弹性变形,当到达3点时卸压,外层管的内壁与内层管的外壁应变同时到达2点,两壁面已没有间隙,但没有任何残余应力与应变。3点所对应的压力为最小胀合压力  $P_{i \min}$ 。显然当成形压力在3点以前卸压是不可能产生残余应力与应变的。继续加压从3点到4点后卸压,发现两者的变形最后停留在5点,此时壁面之间存在永久残余接触压力  $P_c^*$  与残余应变  $\epsilon_{\theta}^*$ 。要想获得较大的残余接触压力可继续加压,但是由于外层管的弹性变形是有限的,当到达6点时外层管内壁开始屈服,其弹性变形亦达到最大。此时卸压可获得最大的残余接触压力  $P_{i \max}$  与最大残余应变  $\epsilon_{\theta \max}^*$ 。

#### 3.2 成形液压力 $P_i$ 与残余接触压力 $P_c^*$ 的关系式

根据图4得出变形协调条件

$$\epsilon_{\theta_{io}} - \epsilon_{\theta_{oi}}^* = \epsilon_{\theta_{oi}} - \epsilon_{\theta_{oi}}^* \quad (13)$$

由式(4)、(6)、(8)、(10)、(12)联立整理得

$$\frac{\sigma_{si}'}{E_i} + \frac{1}{E_i} \left( \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} - \mu_i \right) P_c^* + \frac{1}{E_o} \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) P_c^* =$$

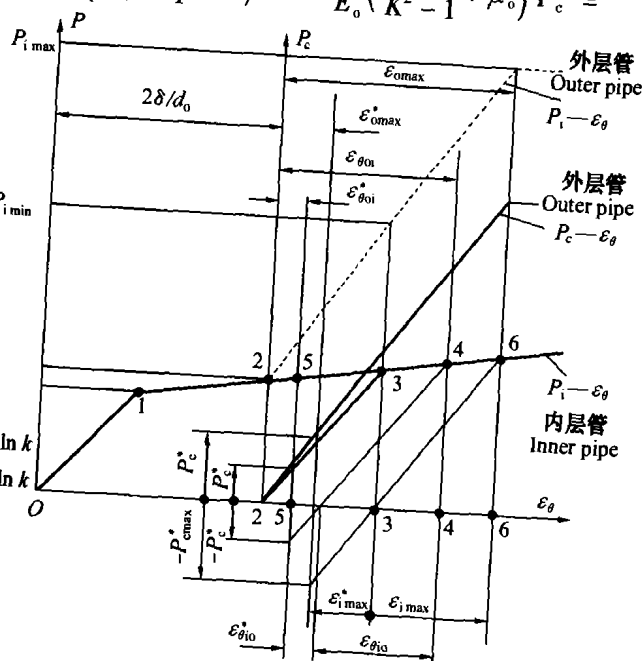


图4 复合管液压成形过程

Fig.4 The hydro-forming process of clad pipe

$$\left[ \frac{1}{E_o} \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) + \frac{1}{E_i} (1 - \mu_i) \right] (P_i - \sigma_{si}' \ln k) \quad (14)$$

$$\text{令 } \frac{1}{A} = \frac{1}{E_i} \left( \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} - \mu_i \right) + \frac{1}{E_o} \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right)$$

$$\frac{1}{B} = \left[ \frac{1}{E_o} \left( \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) + \frac{1}{E_i} (1 - \mu_i) \right]$$

代入式(14)得

$$\frac{P_i}{B} = \frac{P_c^*}{A} + \left[ \frac{1}{E_i} + \frac{1}{B} \ln k \right] \sigma_{si}' \quad (15)$$

式(15)为成形液压力  $P_i$  与残余接触压力  $P_c^*$  的计算关系式。当  $E_i \approx E_o = E$  及  $\mu_i \approx \mu_o = \mu$ , 则式(15)简化为

$$P_i = \left( \frac{K^2 - 1}{2K^2} + \ln k \right) \sigma_{si}' + \frac{k^2 K^2 - 1}{K^2 (k^2 - 1)} P_c^* \quad (16)$$

#### 3.3 复合管液压成形的极限压力范围

由图4知当外层管内壁面应变大于内层管外壁面弹性应变时,内层管与外层管之间的残余接触应力  $P_c^* \geq 0$ , 因此其最小压力由式(15)和式(16)得

$$P_{i \min} \geq \left( \frac{B}{E_i} + \ln k \right) \sigma_{si}' \text{ 或 } P_{i \min} \geq \left( \frac{K^2 - 1}{2K^2} + \ln k \right) \sigma_{si}' \quad (17)$$

在一定范围内残余接触压力  $P_c^*$  随液压力  $P_i$  的增加而增大,但外层管的弹性变形是有限的,当外层管内壁开始屈服时,其弹性变形达到最大。此时卸压可获得最大的残余接触压力  $P_{i \max}$  与最大残余应变  $\epsilon_{\theta \max}^*$ 。外层管内壁开始屈服时接触压力  $P_c$  为

$$P_c = \frac{K^2 - 1}{2K} \sigma_{so} \quad (18)$$

因此液压成形的最大压力为

$$P_{i \max} = \frac{K^2 - 1}{2K^2} \sigma_{so} + \sigma_{si}' \ln k \quad (19)$$

如果内外管刚度差别较大,内外管之间的残余接触应力  $P_c^*$  会引起内层管的反向屈服,在不考虑材料包辛格效应时,内层管内壁不发生屈服的残余接触压力为

$$P_c^* \leq \frac{k^2 - 1}{2k^2} \sigma_{si} \quad (20)$$

实际操作时,将式(20)代入式(15)求得液压成形力,与式(19)比较取小者。

### 4 试验研究

试验用复合管基本结构如图1所示。内层管采用  $\varnothing 144 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  不锈钢管,外层管采用  $\varnothing 159 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  碳钢管,间隙  $\delta = 1.5 \text{ mm}$ , 长度为  $1200 \text{ mm}$ 。沿内层管及外层管的周向制作拉伸试件,各一组平行试件的材料性能平均值见表1。

在图1所示外层管的 I、II、III 每横截面处,沿周向均布4只  $90^\circ$  的应变花,在内层管内加压到一定压力后卸压,记录这一过程中不同测点的周向应变  $\epsilon_\theta$  及轴

表 1  
Tab.1

复合管 Clad pipe	材料牌号 Material trademark	屈服强度 Yield stress $\sigma_s$ /MPa	抗拉强度 Tensile stress $\sigma_b$ /MPa	弹性模量 Elastic modulus E/MPa	弹性强化模量 Elastic strength modulus E'/MPa	泊松比 Poisson's ratio $\mu$
内层管 Inner pipe	0Cr18Ni9	213	590	$1.96 \times 10^5$	$1.6 \times 10^3$	0.3
外层管 Outer pipe	20	281	480	$2.05 \times 10^5$	0	0.3

过程,得到在不同的压力下卸压外层管不同测点残余周向应变  $\epsilon_{\theta}^*$  及轴向应变  $\epsilon_r^*$  值,由于  $\epsilon_r^*$  值很小,可忽略不计。取所有  $\epsilon_{\theta}^*$  试验数据的平均值,通过式(21)可得加压到一定压力下卸压后的残余接触压力值。

$$P_c^* = \frac{K^2 - 1}{2} E_i \epsilon_{\theta}^* \quad (21)$$

根据复合管几何尺寸及材料性能,由式(15)得出液压成形力  $P_i$  与残余接触压力  $P_c^*$  的理论计算表达式  $P_i = 3.56P_c^* + 24.6$ 。

从图 5 的理论计算与试验结果看出,试验数据基本落在理论线附近,这说明式(15)的理论计算公式是可行的。试验证明当液压力超过  $P_{i,max}$  线时残余接触压力值几乎没有变化。

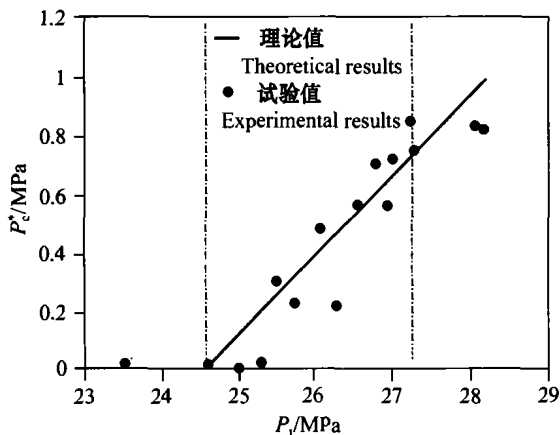


图 5 液压力与残余接触压力  
Fig.5 Hydraulic pressure and residual contact pressure

### 5 结论

1)通过复合管的材料模型及力学模型假设,本文得出的双金属复合管液压成形压力  $P_i$  与残余接触压力  $P_c^*$  的理论计算公式试验验证是可行的,可应用于工程实际。

2)复合管的内层管与外层管之间能产生残余接触压力,必须使  $\sigma_{so} > \sigma_{si}$ ,当内层管材料屈服后强化幅度较大时,内层管与外层管之间间隙  $\delta$  应尽量减小,以免内层管材料强化后应力超过外层管的屈服强度。

3)在最大与最小成形压力范围内,残余接触压力  $P_c^*$  随液压成形压力  $P_i$  的升高而增大。

### References

- 1 Mark A Spence, Ces V Roscoe. Bi-metal CRA-lined pipe employed, for north sea field development. Oil & Gas Journal, 1999, 97(18): 80~88.
- 2 WANG Xuesheng, LI Peining, GUO Chaxiu. Hydraulic expansion device of stainless steel clad pipe. Mechanical Engineer, 2001, 114(2):10~11 (In Chinese)(王学生,李培宁,郭茶秀. 不锈钢复合管液压胀接装置. 机械工程师, 2001, 114(2):10~11).
- 3 XU Bingye, LIU Xingsheng. Applied mechanics of elasticity and plasticity. Beijing: Tsinghua University Press, 1995(In Chinese)(徐秉业,刘信声. 应用弹塑性力学. 北京:清华大学出版社, 1995).

### 符号说明

- $E_i, E_o$ ——内层管、外层管材料的弹性模量,MPa
  - $E_i'$ ——内层管材料的线性强化模量,MPa
  - $\sigma_{si}, \sigma_{so}$ ——内层管、外层管材料的屈服强度应力,MPa
  - $\sigma_{si}'$ ——内层管材料的应变强化应力,MPa
  - $\mu_i, \mu_o$ ——内层管、外层管材料的泊松比
  - $d_i, d_o$ ——内层管内、外直径,mm
  - $D_i, D_o$ ——外层管内、外直径,mm
  - $t$ ——内层管的壁厚,mm
  - $\delta$ ——内层管外壁与外层管内壁之间间隙,mm
  - $\sigma_{r_{io}}, \sigma_{\theta_{io}}$ ——内层管外壁的径向应力和周向应力,MPa
  - $\sigma_{r_{io}}^*, \sigma_{\theta_{io}}^*$ ——内层管外壁的残余径向应力和残余周向应力,MPa
  - $\sigma_{r_{oi}}, \sigma_{\theta_{oi}}$ ——外层管内壁的径向应力和周向应力,MPa
  - $\sigma_{r_{oi}}^*, \sigma_{\theta_{oi}}^*$ ——外层管内壁的残余径向应力和残余周向应力,MPa
  - $\epsilon_{\theta_{io}}, \epsilon_{\theta_{oi}}$ ——内层管外壁、外层管内壁的周向应变
  - $\epsilon_{\theta_{io}}^*, \epsilon_{\theta_{oi}}^*$ ——内层管外壁、外层管内壁的残余周向应变
  - $P_i$ ——液压胀形压力,MPa
  - $P_c$ ——复合管成形过程中内层管与外层管的接触压力,MPa
  - $P_c^*$ ——复合管成形后内层管与外层管之间的接触压力,MPa
- $$K = D_o/D_i \quad k = d_o/d_i$$