

# 金属胶接接头内应力研究新进展

杜建军 姚英学

( 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001 )

**文 摘** 论述了金属胶接接头内应力研究的新进展,提出基于粘弹性理论胶层固化内应力的计算方法和薄膜弯曲法测定内应力的方法,以及周期性温度变化会使胶层内产生残余拉伸应力(热应力),并且分析了气泡和填充物对热应力的影响。

**关键词** 胶接,固化内应力,粘弹性,薄膜弯曲法,热应力

## Research Progress of Residual Stress in Metal Adhesive Joints

Du Jianjun Yao Yingxue

( School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology Harbin 150001 )

**Abstract** Research progress of residual stress in metal adhesive joints is discussed. New methods is presented, such as the finite element methods based on viscoelastic theory and the measuring methods of membrane deflection to determinate the solidifying residual stress. The influence of thermal cycling and hole defects and rigid fillers on the thermal stress are also discussed.

**Key words** Adhesive, Solidifying stress, Viscoelastic, Membrane deflection, Thermal stress

### 前言

在机械结构的连接中,胶接获得了广泛的应用,它具有简化结构、优化性能等优点,但是胶接接头中内应力的存在会对胶接性能有很大的影响,限制了胶接在一些重要场合的应用。通常胶粘剂在固化过程中由于溶剂挥发、缩聚反应时小分子产物逸出或加聚反应时原子间距离缩短等原因,胶层体积缩小,引发收缩内应力;因为胶粘剂和被粘物热膨胀系数的不同,在温度改变时会出现热应力,这通常会导致接头强度下降,有时甚至会使得接头自动破裂。而在一些精密仪表中,例如惯性器件的生产中,内应力会使一些薄壁件变形,影响仪表的性能,故有必要深入研究接头的内应力,探讨消除其有害作用的措施。

### 1 金属胶接接头固化收缩应力

对接接头中的收缩应力见图 1。

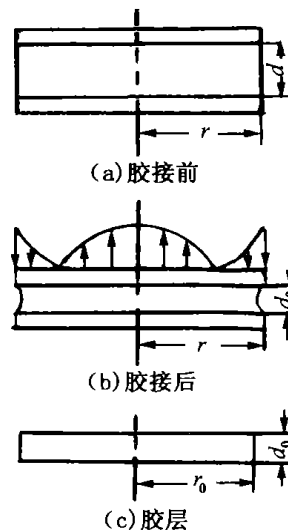


图 1 对接接头中的收缩应力

Fig. 1 Solidifying stress of a butt joint

收稿日期:2001-02-26

杜建军,1974 年出生,博士研究生,主要从事惯性器件装配工艺改进的研究工作  
宇航材料工艺 2001 年 第 5 期

在工程上可采用解析计算、有限元和实测等方法确定胶层的固化收缩应力,且不同的接头形式固化内应力不同,下面主要讨论常用的对接接头形式的固化收缩应力。

### 1.1 胶粘剂固化内应力计算

早期,人们采用弹性理论,推导出一系列各种不同接头形式的收缩应力计算公式<sup>[1,2]</sup>,其中对接接头形式的计算公式如下:

$$= 2 E_a e_0 \left[ \frac{1/2 - (x/r_0)^2}{1/2 + (d_0/r_0)^2} \right] \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为垂直于胶层的正应力;  $E_a$  为固化后胶的弹性模量;  $e_0 = d/d_0 - 1$ , 为胶层的收缩率,  $d$  和  $d_0$  分别为胶层固化前后的厚度;  $r_0$  为固化后胶层半径;  $x$  为距圆心的位置。

经计算发现,对常用的对接形式的接头,如胶的弹性模量为 98.1 MPa, 固化后收缩 2.5%, 则最大的正应力为 49.6 MPa, 最大的剪切应力为 34.4 MPa, 确实是一个相当可观的数字。

### 1.2 胶粘剂固化内应力有限元分析

采用有限元法可以较精确的计算出内应力的大小、分布和应力集中点<sup>[3,4]</sup>, 对接接头形式的内正应力和剪应力在胶接边缘处最大, 而胶层内部距离胶接边缘 5 倍胶层厚度处应力逐渐趋向均匀。

新近的研究将粘弹性理论引入到有限元分析中<sup>[5,6]</sup>。首先, 采用如图 2 所示的装置测定胶粘剂的粘弹性特性, 胶粘剂注入外部圆筒与内圆柱之间, 固定外部圆筒, 力  $F$  产生扭矩施加给内圆柱, 通过编码器测定内圆柱相对于外圆柱的转角, 从而测定胶粘剂固化过程中不同时间段的粘弹性特性。然后根据测定结果构造了 Voigt 4 要素模型(见图 3)表示胶粘剂的粘弹性特性:

$$\sigma(t) = \left\{ \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{G_2}{\eta_2} t \right) \right] + \frac{t}{\eta_1} \right\} \tau \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为阶跃式剪切应力作用下  $t$  时刻的剪切变形量,  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为实验测得和时间  $t$  有关参数。

利用此关系进行有限元分析, 将胶粘剂体积收缩产生的变形作为初变形, 由瞬间弹性率  $G_1$  求得刚度矩阵, 从而求得应力分布; 由应力产生的蠕变变形由 Voigt4 要素模型求得, 然后将初变形和蠕变变形叠加作进一步的迭代计算, 得到固化过程中的应力特性。计算结果表明在胶界面的边缘处有明显

的应力集中(如图 4 所示, 应力为对粘接部起剥离作用的正应力  $\sigma_y$ ); 并且和弹性解析相比, 粘弹性模型中由于应力松弛的影响而使应力集中程度减小。

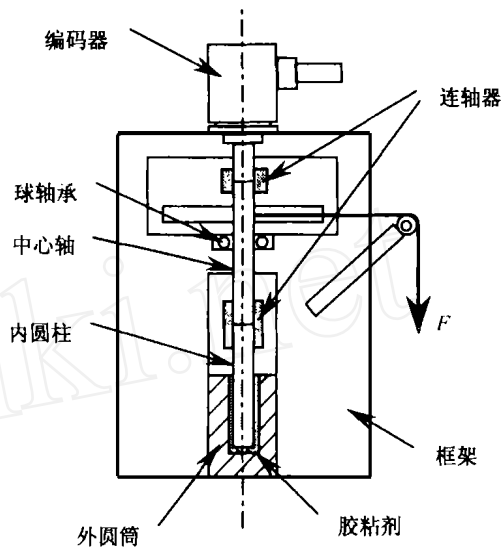


图 2 胶粘剂固化粘弹性测定装置

Fig. 2 Configuration of a rheometer

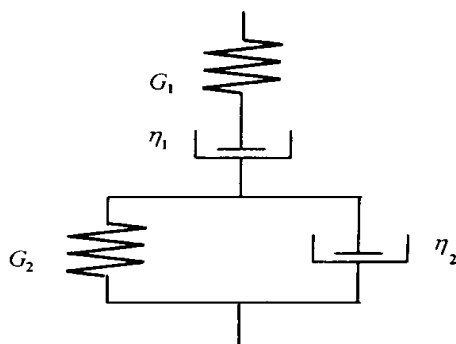
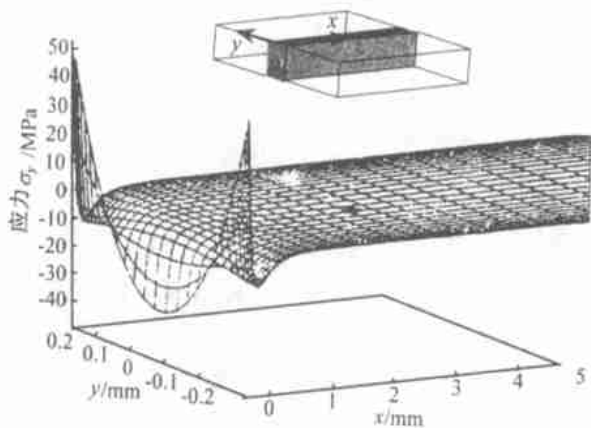
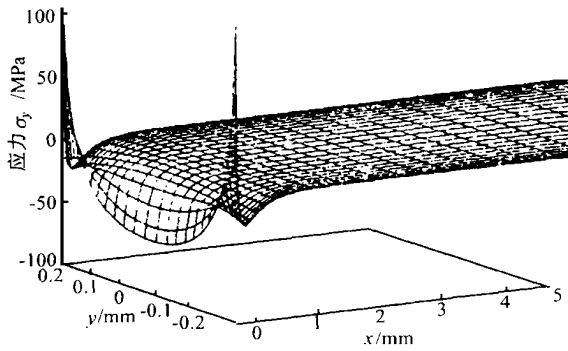


图 3 Voigt4 要素模型

Fig. 3 Voigt four-element model



(a) 粘弹性模型



(b) 弹性模型  
图4 胶层应力分析结果  
Fig.4 Analysis of stress in epoxy resin

$$= \frac{E_s t_s}{12} \cdot \frac{1}{n(n+1)(1+mn^2)} \sqrt{\frac{(1-mn^2)(1-m)}{n(n+1)(1+mn^2)}} + \frac{[mn(n+2)+1]^3 + m(mn^2+2n+1)^3}{n(n+1)(1+mn^2)} \quad (3)$$

另一种方法是利用薄膜原理<sup>[9]</sup>,即采用化学的方法(例如汞齐化作用),将基体与胶膜分离,但保持胶膜原有的约束,如图5所示。

移走基体的胶膜类似于鼓膜,利用全息干涉法测出它的共振频率即可求出内应力的,但它对测量仪器和环境的要求很高。一种新的方法是对胶膜(半径为  $b$ )施压(压头半径为  $a$ ,  $a/b < 0.1$ ),如果胶膜的弯曲刚度较小,那么胶膜的回复力很大程度上取决于胶膜内的固化残余内应力,如图6示。

表1列出了几种聚合物的内应力测试结果,可以看出,对于低刚度和中等刚度的胶膜,测试精度能够满足要求,而相对于全息干涉法更简便易行,适应性更好,不受环境、湿度等的限制。这里必须说明的是由于汞有毒,所以在制备胶膜时,必须保证工作环境通风以及佩戴防护用具等。

### 1.3 胶粘剂固化内应力测试

上述计算方法需测定胶粘剂固化的收缩率、胶的模量以及固化蠕变柔量等,但进行这样的测试实际上往往非常复杂,所以常采用实测的方法确定收缩应力的。简单的方法是在金属箔的一侧涂上胶层,固化之后,由于收缩应力的作用箔片就会发生弯曲,测定曲率半径、胶层厚度  $t_a$  和箔片厚度  $t_s$ ; 可由(3)式计算内应力的大小<sup>[7,8]</sup>,式中,  $E_s$  为箔片的弹性模量,  $E_a$  为胶粘剂的弹性模量,  $m = E_a/E_s$ , 为胶粘剂与箔片的弹性模量之比,  $n = t_a/t_s$ , 为胶层厚度与箔片厚度之比。

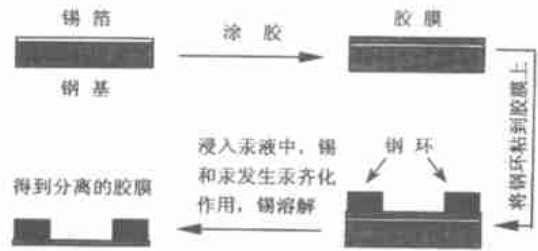


图5 胶膜制备过程

Fig.5 Diagram of sample preparation process

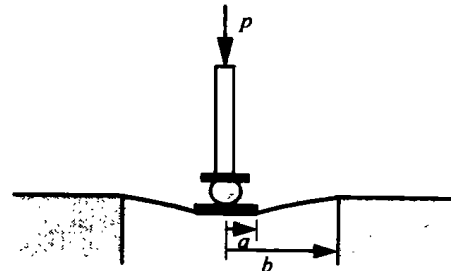


图6 薄膜弯曲测内应力

Fig.6 Diagram of membrane deflection technique

表1 薄膜弯曲法测得应力与全息干涉法测得应力对比

Tab.1 Measuring stress comparison of membrane deflection with holography

试样	弹性模量/MPa	膜厚/ $\mu\text{m}$	薄膜弯曲法测得应力/MPa	全息干涉法测得应力/MPa	弯曲刚度/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^4$
乳胶	10	85	0.45 $\pm$ 0.00	0.42 $\pm$ 0.00	6.82 $\times 10^{-7}$
热固聚酰亚胺	3 000	11.4	19.8 $\pm$ 0.03	19.8 $\pm$ 0.03	4.07 $\times 10^{-7}$
聚氨酯	70	80	0.42 $\pm$ 0.02	0.45 $\pm$ 0.02	3.18 $\times 10^{-6}$
感光性树脂	1 750	86.2	2.36 $\pm$ 0.09	4.47 $\pm$ 0.22	1.03 $\times 10^{-4}$

另外,还有其它内应力测试方法,例如电阻丝包埋法测量胶层内部应力分布<sup>[10,11]</sup>,光弹法、喇曼光谱法等测量方法均可以对胶层内应力作精确的测量<sup>[12,13]</sup>。

## 2 接头上的热应力

由于胶粘剂的热膨胀系数比金属大,当温度升高时,胶层的热膨胀被刚性金属约束,所以产生压缩热应力。

热应力是一种暂时的内应力,随温度均匀后自然消失,但实验中发现热应力对接头强度有很大的影响<sup>[14]</sup>。而在惯性器件的生产中,如果涂胶不当,发现经过几次高低温循环处理之后(例如 - 40 ~ +55),胶接的薄壁部位会产生明显的变形,使惯性器件产生漂移,所以深入研究胶接热应力的形成规律,以及如何将其有害影响减小到最低程度是很有意义的。

### 2.1 温度载荷引起的胶层热应力

一种理论认为<sup>[15]</sup>,随温度升高而产生的压缩热应力会使胶层产生塑性应变。例如,若胶粘剂弹性模量  $E_1$  为 2.5 GPa,屈服极限  $\sigma_s$  为 20 MPa,线胀系数  $\alpha_1$  为  $110 \times 10^{-6} / \text{K}$ ,则使胶层产生屈服的温升  $T_s$  值为:

$$T_s = \sigma_s / (E_1 \cdot \alpha_1) = 72.7 \quad (4)$$

可见,只要温升达 72.7,即会出现不可逆的塑性压缩应变,当温度回复时,这部分塑性应变将导致收缩,出现了残余的拉伸应力。

近来,有人采用粘弹性理论和有限元方法<sup>[16~18]</sup>,较精确地分析了胶接接头受周期性的温度变化载荷时热应力的变化规律,其结论也是胶层内出现残余拉伸应力,但它是基于粘弹性体的应力松弛原理。

例如,对于一个受到 27 ~ 70 温度循环载荷的接头,温度升高时,胶层内出现压缩热应力(如图 7 所示为负值),但这种压缩应力会很快在高温下松弛;当温度降低时,高温下松弛的应力会以残余拉应力(如图 7 所示为正值)的形式表现出来。在下一个温度循环开始前,由于低温时应力松弛较慢,所以残余拉应力不能完全释放,这样经过几次高低温循环处理,就会有残余拉伸应力的累积(图 7 所示)。

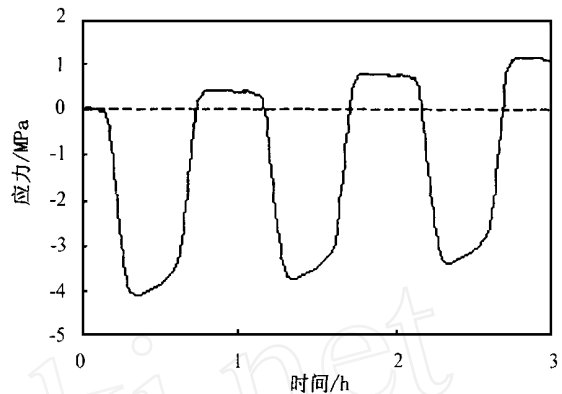


图 7 温度循环引起的胶层热应力

Fig. 7 Stress development over 3 thermal cycles

### 2.2 胶层内气泡、填充物等对热应力的影响

人们对胶接接头进行热应力分析时,常假设胶层为理想材料即内部无任何缺陷,但在实际粘接过程中,胶层内不可避免地要夹入气泡;另外,为了改善接头性能,例如提高剪切模量和抗蠕变性能,常在胶粘剂里添加一定的填充物,象铝粉、硅粉等,这些气泡、填充物对接头内应力的影响主要以热应力的方式体现,以前对此研究较少,但实际上在气泡和填充物周围形成的应力集中对接头性能有重要的影响,所以有必要深入研究其机理。

文献<sup>[15]</sup>认为,温度升高会使气泡内压力增大,例如将温度从 25 ( $T_1 = 298.15 \text{ K}$ ) 提高到 60 ( $T_2 = 358.15 \text{ K}$ ),则由于体积不变,温升前后压力之比:

$$P_2 = (T_2 / T_1) P_1 = 1.2 P_1 \quad (5)$$

可见,虽然温度升高仅将气泡内压力提升 0.2 倍,但由于气泡的体积在胶粘剂固化时减少了许多,泡内压力上升了很多倍,也就是说  $P_1$  已大大高于收缩应力以维持气泡的存在,  $P_2$  的增加,再加上胶粘剂的屈服极限随温度升高而急剧下降,这样的双重作用会使气泡周围的胶层产生塑性压缩,在温度降低时产生拉伸残余应力。

新近的研究综合考虑了气泡和填充物的大小、分布对胶层热应力的影响<sup>[19,20]</sup>,即温度改变不仅使胶合界面的边缘处出现应力奇异性,也会使气泡和填充物周围出现应力集中;但如果在边缘附近含有填充物,反而会减小边缘处的应力奇异程度。经计

算,发现气泡比填充物引起的应力集中更大,并且随着气泡尺寸减小,其引起的应力集中会增大。

### 3 结语

金属胶接接头中不可避免的要存在内应力,除了采用合适的工艺措施以减小内应力以外,研究接头中内应力的大小及分布规律从而减小其有害影响是十分有意义的。

(1) 采用粘弹性模型计算胶粘剂的固化收缩应力可以获得更精确的结果。

(2) 薄膜弯曲法测定低刚度和中等刚度胶膜的固化内应力具有精度高、操作简便等优点。

(3) 应十分重视温度载荷引起的胶层热应力(残余拉伸应力),建立更精确的粘弹性模型计算胶层热应力是今后研究的重点。

(4) 填充物和气泡周围引起的应力集中(热应力)不可忽视,常常会造成接头断裂,应建立精确的数学模型深入研究其机理。

### 参考文献

- 1 Gent A N. Fracture mechanics of adhesive bonds. Rubber Chem. Technol. , 1974;47:202 ~ 212
- 2 Gent A N, Meinecke E A. Compression, bending and shear of bonded rubber blocks. Polymer Engineering and Science, 1970;10(1):48 ~ 53
- 3 Harrison N L. The Stresses in an adhesive layer. J. Adhesion, 1972;3:195 ~ 212
- 4 顾志芬等. 纤维铝合金胶接层板残余应力分布. 复合材料学报, 1995;12(1):75 ~ 80
- 5 Nakamura, Hirohumi, Sato, Chiaki. Internal stress induced during curing process of adhesively bonded parts of resin and metal. Zairyo/J. of the Society of Materials Science, 1997;46(7):820 ~ 825
- 6 大崛雅司等. Viscoelastic properties and internal stress of thermosetting resin in curing process. 材料, 1994;43(1):18 ~ 22
- 7 Croll G S. Internal stress in a solvent-cast coating. J. Coatings Technol. , 1978;50(638):33 ~ 38

- 8 Chow T S, Liu C A. Strains induced upon drying thin films solvent-cast on flexible substrates. J. Polymer Science, Polymer Physics Edition, 1976;14:1311 ~ 1316

- 9 Jennings R M, Taylor J F. Determination of residual stress in coatings by a membrane deflection technique. J. Adhesion, 1995;49:57 ~ 74

- 10 Hahn H T. Residual stress in the interfacial bond zone of curing adhesives by a sensitive strain measurement technique. J. Adhesion, 1984;17:21 ~ 32

- 11 郭源君等. 耐磨胶粘涂层固化残余应力的测试分析. 摩擦学学报, 1997;17(3):263 ~ 266

- 12 Kim P K, Xu Y Y, Chang C, Hsu S L. Spectroscopic-mechanical analysis of stress distribution. Polymer, 1986;27(10):1547 ~ 1552

- 13 Galotis C. Interfacial studies on model composites by laser raman spectroscopy. Comp. Sci. & Tech., 1991;42(1~3):125 ~ 150

- 14 杨玉昆等. 合成胶粘剂. 北京:科学出版社;1983:38 ~ 45

- 15 游敏等. 金属胶接接头的内应力及其消除. 中国粘接剂, 1996;5(3):26 ~ 28

- 16 Robert Humfeld JR, Dillard D A. Residual stress development in adhesive joints subjected to thermal cycling. J. Adhesion, 1998;65:277 ~ 306

- 17 Weitsman Y. Residual. Thermal stresses in a symmetric double-lap Joint. J. of thermal stresses, 1980;3:521 ~ 535

- 18 Ramani, Karthik, Wenping Zhao. Evolution of residual stresses in thermoplastic bonding to metals. Int. J. of Adhesion and Adhesives, 1997;17(4):353 ~ 357

- 19 Yuichi Nakano, Masahide Katsuo. Two-dimensional thermal stress analysis in adhesive butt joints containing hole defects and rigid fillers in adhesive under non-uniform temperature field. J. Adhesion, 1998;65:57 ~ 80

- 20 Nakagawa F, Nakano Y, Sawa T. Two-dimensional thermal stress analysis of butt adhesive joint having rigid fillers in the adhesive. JSME Int. J., 1994;37:238 ~ 245