

# 刚度不平衡单搭接胶接接头剪切试验与强度分析\*

李龙<sup>1</sup> 胡平<sup>2</sup> 刘立忠<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 大连理工大学汽车工程学院, 大连 116024)

**【摘要】** 对被粘接件为钢板和铝板的刚度平衡、非平衡搭接胶接接头进行不同温度下的拉伸载荷剪切强度试验, 分别得到各种类型搭接件在3种温度下的最大拉伸力值。以Goland和Reissner的一维梁模型为基础, 参考Wu Z J提出的接头解析方法推导出求解刚度不平衡接头端部载荷的相关公式, 并且通过有限元仿真对试验中各种类型接头进行胶层应力分析, 最后针对刚度非平衡结构对接头强度的影响进行了讨论。

**关键词:** 单搭接接头 胶接 刚度不平衡接头 应力分析

**中图分类号:** U463.82; TG49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0213-05

## Strength of Unsymmetric Single-lap Adhesively Bonded Joints

Li Long<sup>1</sup> Hu Ping<sup>2</sup> Liu Lizhong<sup>2</sup>

(1. College of Automobile Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Automobile Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

### Abstract

In order to explore the strength of the structures with unsymmetric lap-joints, the adhesively bonded single-lap joints whose adherends were steel sheets, aluminum sheets and steel-aluminum were separately tested in tension loading which created shear across the bondline. The tests were conducted under different temperatures to provide the experimental tension loads for the three kinds of dissimilar lap-joints. According to the method which Wu Z J proposed, the equations of edge-loads were given based on G-R's theory. The stress of adhesive was obtained through finite element analysis. In addition, the effects of the unsymmetric structure on the strength of joints were discussed.

**Key words** Single-lap joints, Adhesive bonding, Unsymmetric lap-joints, Stress analysis

### 引言

由于汽车材料的不断更新和进步, 目前在车身制造中一直被广泛应用的焊接方式因为技术和成本等原因, 很难被广泛应用于车身铝板以及非金属材料零部件的连接工序中。胶接技术作为一种新的连接技术, 由于具有良好的异质材料连接性、密封性和抗疲劳性, 正逐步被应用于现代汽车的生产制造中。目前车身中的承载与半承载结构件还很少应用胶接技术作为主要的连接手段。但是随着粘接技术不断成熟和完善, 这种连接方式将会在车身生产中起到更重要的作用。

针对单搭接结构胶接接头应力与强度的问题, 国内外的学者曾做过相应的工作<sup>[1-3]</sup>。游敏等分别对胶瘤以及胶层不同力学性能参数对胶接接头应力分布与强度的影响做了一系列研究<sup>[4-5]</sup>。Zhao X 等对单搭接接头端部载荷求解提出了新的算法<sup>[6]</sup>。周青通过静载和动载试验分别对粘接与焊接结构件的性能进行了对比, 并且在有限元仿真中对其快速建模方法进行了探讨<sup>[7-8]</sup>。另外, 关于温度场对胶接接头强度的影响也有学者进行过相关工作<sup>[9-10]</sup>。随着搭接接头研究的深入, 非平衡刚度胶接接头的研究工作也在逐步的展开<sup>[11-12]</sup>。在以往研究中, 胶接接头在拉伸载荷下的剪切试验多基于平衡接头,

收稿日期: 2010-06-02 修回日期: 2010-08-03

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA04Z101)

作者简介: 李龙, 博士生, 主要从事汽车轻量化研究, E-mail: llong702@yahoo.com

对刚度不平衡搭接结构相关的试验研究,尤其是不同温度场中刚度不平衡接头的试验还很少。由于被粘结构的异质性,非平衡接头失效情况与平衡接头有很大差异,求解接头端部载荷及胶层应力的解析方法也有所不同。由于汽车工作环境不仅为常温条件(通常范围为 $-40\sim 90^{\circ}\text{C}$ ),对于这方面的工作还需要作出一定的补充和完善。本文以此为目的,对被粘接件为钢板和铝板的刚度平衡、非平衡接头进行不同温度下的拉伸剪切强度试验,并给出刚度不平衡接头端部载荷公式,同时通过有限元仿真对不同类型接头的胶层应力进行对比。

## 1 试验方法

### 1.1 胶粘剂与被粘接材料

试验中所有单搭接胶接试验件的胶层均采用ESP110环氧树脂胶,该种结构胶被广泛应用于汽车车身的胶接结构中。被粘接材料分别为车辆结构中常见的DC01低碳钢板和6016铝板。钢板和铝板厚度分别是1.5 mm和0.8 mm。

### 1.2 单搭接试验样件

单搭接胶接接头在工程应用中是最常用的胶接接头形式之一,也是其他类型接头分析的基础。根据GB/T 7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》制作钢板-钢板,钢板-铝板和铝板-铝板3种类型的搭接试验样件,尺寸如图1所示。通过同一夹具实现不同单搭接胶接接头胶层厚度均为 $0.1\text{ mm}\pm 0.02\text{ mm}$ 。

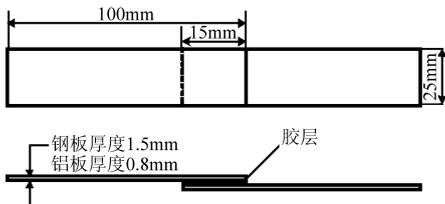


图1 单搭接接头尺寸示意图

Fig.1 Dimensions for adhesive-bonded specimens

被粘接钢板涂胶部位经过同一型号砂纸沿同一的方向进行打磨,用丙酮去除其表面油污和杂质。胶层固化条件为 $150^{\circ}\text{C}$ 固化45 min。

### 1.3 试验方案

为了研究温度对不同单搭接试样强度的影响,粘接结构件拉伸试验将置于可控式恒温箱内进行。温箱可控制温度范围为 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ ,温度波动为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。根据车身实际工况,本次试验中选取 $-35$ 、 $20$ 和 $90^{\circ}\text{C}$ 3种温度进行单搭接件的拉伸剪切强度试验。

伺服试验机加载速率为 $0.2\text{ mm}/\text{min}$ ,每组试验通过6个相同类型试验样件来完成。

## 2 试验结果

### 2.1 失效模式

不同温度中所有单搭接试样在拉伸力载荷作用下均在粘接部位发生胶层失效断裂,并且由于剥离应力的作用,破坏后粘接区域都发生明显的弯曲变形。图2为试验件破坏后的形貌(框内为粘接区域),从低温试验( $-35^{\circ}\text{C}$ )和常温试验( $20^{\circ}\text{C}$ )的胶层失效部位可以看到,当两种被粘接板条为同一材料时,即钢板-钢板连接或铝板-铝板连接,失效模式均为界面破坏,且破坏形貌沿粘接区域中线对称,两种温度下破坏形貌无明显区别。但被粘接板条在高温条件下( $90^{\circ}\text{C}$ ),会出现胶黏剂的内聚失效,断裂区域胶层分布不均匀。当钢板与铝板混合搭接时,低温试验( $-35^{\circ}\text{C}$ )和常温试验( $20^{\circ}\text{C}$ )中单搭接接头的胶层界面失效位置发生在铝板与胶层结合面,由于刚度不平衡接头端部非平衡载荷的影响,与上述平衡接头不同,失效区域并非为对称形式;高温试验中接头破坏时胶层粘附失效与内聚失效同时发生,即混合破坏。

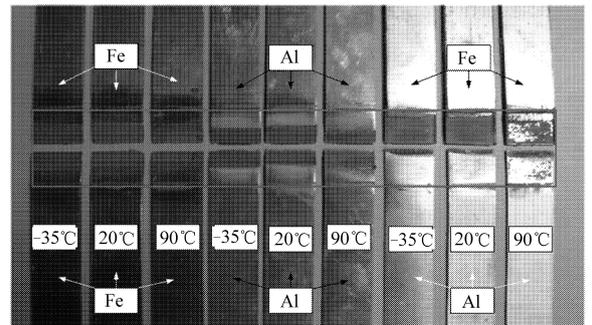


图2 不同温度下试验件破坏后形貌

Fig.2 Broken specimens under different temperatures

### 2.2 温度与被粘接材料对强度的影响

通过不同材料胶接试验件在3种温度下的测试,得到试验力-位移曲线如图3所示。从曲线中可以看到,胶接接头随着环境温度的降低,接头强度随之增大。当被粘接板条均为钢板时,搭接件在 $-35^{\circ}\text{C}$ 下的最大拉伸力(重复试验的平均值)比常温下高13.6%;被粘接板条为铝板-铝板和钢板-铝板两种情况下, $-35^{\circ}\text{C}$ 时的最大拉伸力比 $20^{\circ}\text{C}$ 时分别提高了6.61%和2.79%。同时, $90^{\circ}\text{C}$ 时上述3种材料接头最大拉伸力分别比 $20^{\circ}\text{C}$ 时低10.39%、4.58%和5.58%。试验数据表明温度对材料为钢板的搭接接头强度影响要大于铝板胶接接头和钢铝混合搭的胶接接头。

在相同温度下钢板接头的强度要高于铝板与钢铝混合接头的强度,而铝板-铝板搭接时接头强度最小。从表1中所述的试验结果中可得,钢-钢接头

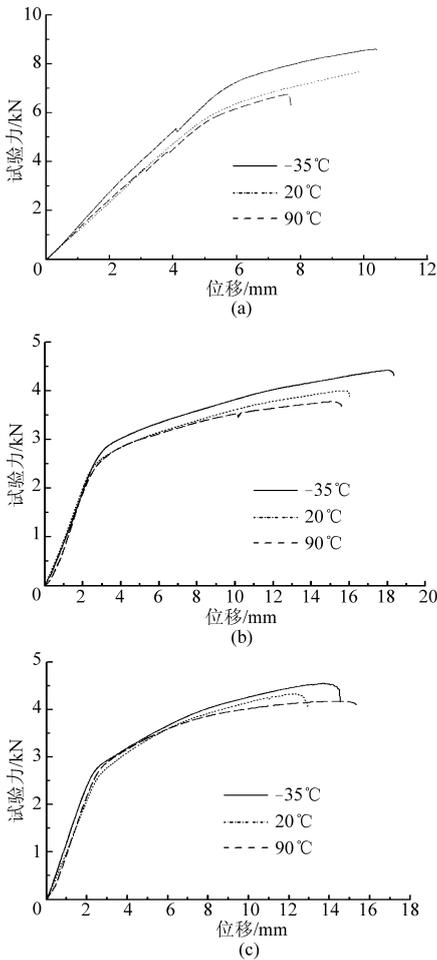


图 3 单搭接试验件在不同温度下试验力-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves for lap-joints at different temperatures

- (a) 钢板-钢板搭接接头
- (b) 铝板-铝板搭接接头
- (c) 钢板-铝板搭接接头

在 -35℃ 时所能承受的最大拉伸力是铝-铝接头的 2 倍,随着温度的提高前者比后者分别高出 88.5% (20℃) 和 77% (90℃)。钢-铝接头在这 3 种温度下的强度分别略高于铝-铝接头 (均在 10% 以内)。可见不同刚度的被粘接板件对接头强度的影响非常明显。值得注意的是,对于钢板与钢板搭接的刚度平衡接头,当其中一件被粘接板换成刚度较低的铝板时,接头强度会大大降低;对于铝板与铝板搭接的平衡接头,当其中一件被粘接板换成刚度较大的钢板时,虽然接头形式由平衡变为刚度不平衡,但其强度

表 1 平均最大拉伸力试验结果

Tab. 1 Experimental results of tension loading kN

单搭接试验件 (被粘接板材料)	温度/℃		
	-35	20	90
钢板-钢板	8.42	7.41	6.64
铝板-铝板	4.19	3.93	3.75
钢板-铝板	4.42	4.30	4.06

会略有提高。

在刚度不平衡胶结接头中,两种被粘板件的不同弹性模量、泊松比以及板厚度均会引起接头端部载荷的不平衡,其相关解析方程如 3.1 节所述。

### 3 接头端部载荷与胶层应力分析

#### 3.1 接头端部载荷解析方程

对于刚度不平衡胶结接头,在承受外部载荷情况下求解其接头端部载荷大小是非常必要的,它是接头强度预测和胶层应力分析的前提。以 Goland 和 Reissner 的一维梁模型为基础,参考 Wu Z J<sup>[11]</sup> 提出的接头解析方法可以推导出求解刚度不平衡接头端部载荷的相关公式。

如图 4 所示接头几何尺寸,该尺寸的刚度不平衡搭接件承载时各段的挠度函数分别为

$$w_1 = A_1 ch\mu_1 x_1 + B_1 sh\mu_1 x_1 + \alpha x_1$$

$$w_c = A_c ch\mu_c x_c + B_c sh\mu_c x_c + \alpha(x_c + l_1) - h_1/2 + d$$

$$w_2 = A_2 ch\mu_2 x_2 + B_2 sh\mu_2 x_2 + \alpha(l_1 + 2c + x_2) - (h_1 + h_2)/2$$

待定系数  $A_i, B_i (i = c, 1, 2)$  由边界条件计算得到。

其中

$$\mu_i = \sqrt{T/D_i} \quad (i = c, 1, 2)$$

$$D_i = \frac{E_i h_i^3}{12(1 - \nu_i^2)} \quad (i = 1, 2)$$

$$D_c = \frac{E_1}{3(1 - \nu_1^2)} [(h_1 - d)^3 + d^3] +$$

$$\frac{E_2}{3(1 - \nu_2^2)} [(h_2 - d)^3 + d^3]$$

$$d = \frac{1}{2} \left( \frac{E_1 h_1^2}{1 - \nu_1^2} - \frac{E_2 h_2^2}{1 - \nu_2^2} \right) \left( \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} + \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \right)$$

式中  $E_1, \nu_1, h_1$  和  $E_2, \nu_2, h_2$  分别为两种被粘接材料的弹性模量、泊松比和厚度。从而得到接头端部载荷  $M_i$  和  $Q_i$ , 其中  $i = 1, 2$ , 分别为上下板在接头两端的弯矩和剪力,如图 4 所示。

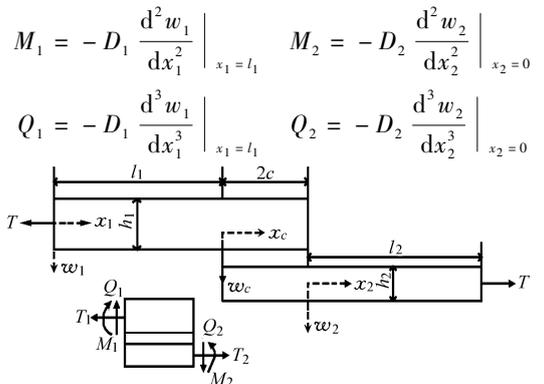


图 4 刚度不平衡接头几何尺寸与接头端部载荷

Fig. 4 Geometric parameters of joint with stiffness unbalanced adherends and joint-edge loads

从上述公式可知,对于不同厚度、不同材料的被粘接件,其连接接头端部会产生不平衡载荷。这也是导致这种单搭接胶接接头失效形式不平衡的原因。

### 3.2 胶层有限元仿真

为了深入分析刚度平衡接头与非平衡接头胶层应力情况,采用有限元方法对试验中不同类型的单搭接接头进行仿真分析。搭接接头几何尺寸见图1,其中胶层厚度为0.1 mm。根据胶粘剂提供商所给出的该环氧树脂胶的材料属性,可知材料参数(常温下)为胶层弹性模量1 900 MPa,泊松比为0.33。

利用二维平面单元对搭接接头进行建模,模型采用8节点等参单元。通过ABAQUS有限元软件进行计算。边界条件为一端固支,另一端铰支,铰支端进行加载。考虑到试验结果中最大拉伸力范围,并且为了对不同接头进行应力对比,仿真中载荷大小均设置为2 kN。模型中胶层端部单元尺寸由0.02 mm均匀过渡到0.1 mm,试验件胶层附近的有限元模型如图5所示。

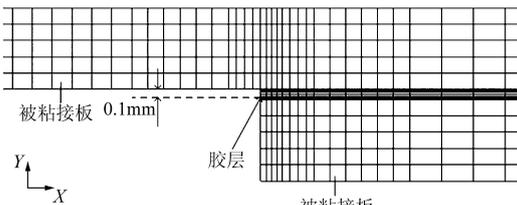


图5 试验件胶层附近的有限元模型

Fig. 5 Mesh refinement in overlap area of lap-joint

从图6~7中可以看出,在相同载荷条件下钢板与钢板搭接接头的粘接面(失效位置)胶层应力均小于钢板与铝板搭接接头的(钢板表面)对应位置的胶层应力值;同时,铝板与铝板搭接接头的粘接面(失效位置)胶层应力均高于铝板与钢板搭接接头的(铝板表面)对应位置的胶层应力值。这个结果与试验中钢板-钢板、钢板-铝板和铝板-铝板3种粘接件最大拉伸力依次递减的情况相符合。从仿真应力分布情况判断,其失效模式与试验一致。

图8给出了沿胶层厚度平均剪应力的有限元解

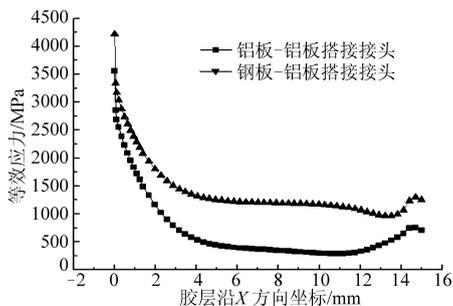


图6 接头钢板表面胶层等效应力曲线

Fig. 6 Stress curves in adhesive near bonded steel panel surface

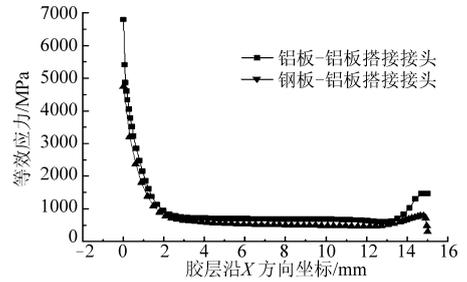


图7 接头铝板表面胶层等效应力曲线

Fig. 7 Stress curves in adhesive near bonded aluminum panel surface

与解析解,通过对其进行对比,可知二者曲线基本吻合,但是有限元解中最大应力发生在端部附近,而解析解却发生在端部。

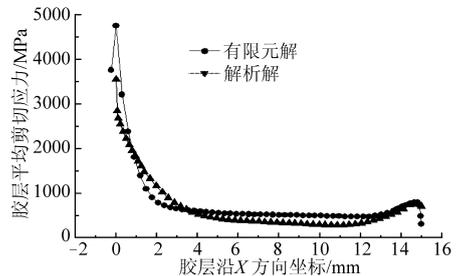


图8 沿胶层厚度的平均剪应力

Fig. 8 Adhesive stresses along the bond

对于试验中此类型的非平衡粘接件,由于接头两端形成的不平衡载荷造成了胶层应力非平衡性,从而增加了胶层和界面失效的危险,所以曾有学者建议:材料粘接时尽量减小被粘物刚度的不对称性,通过选择合适的接头参数使两者被粘物的刚度尽量相等。但是根据试验结果与应力分析的结论可知,如果用刚度较大板件代替原平衡接头中某一被粘接板,则该粘接接头强度会有小幅提高。所以在工程应用中,为了提高该接头的局部强度,可以考虑将搭接接头中的一件被粘板换成刚度较高的材料。

## 4 结束语

在温度分别为-35、20和90℃的条件下,通过对被粘接板件为铝板、钢板的刚度平衡与非平衡搭接接头进行拉伸剪切强度试验,得出该种类型接头随着环境温度的降低,接头强度会随之增大。并且温度对钢板搭接接头强度的影响要大于铝板胶接接头和钢铝混合搭接的胶接接头。刚度不平衡接头端部会产生不平衡载荷,因此造成了胶层应力的非平衡性,从而增加了胶层和界面失效的危险。但是如果用刚度较大板件代替原平衡接头中某一被粘接板,则粘接接头强度会有小幅提高。在实际应用中,可以通过此方法对原有平衡刚度搭接接头进行改进,从而提高该接头的局部强度。

## 参 考 文 献

- 1 Grant L D R, Adams R D, Lucas F M da Silva. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4): 405 ~ 413.
- 2 You M, Yan Z M, Zheng X L, et al. A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminum single lap joints with an inner chamfer on the adherends [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2008, 28(1 ~ 2): 71 ~ 76.
- 3 Castagnetti D, Dragoni E. Standard finite element techniques for efficient stress analysis of adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(2): 125 ~ 135.
- 4 余海洲, 游敏, 郑小玲, 等. 单搭接接头胶层间隙对强度和应力的影响[J]. *机械强度*, 2006, 28(5): 775 ~ 779.  
Yu Haizhou, You Min, Zheng Xiaoling, et al. Effect of adhesive of recessing on the strength and stress of single-lap joint [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2006, 28(5): 775 ~ 779. (in Chinese)
- 5 孔凡荣, 游敏, 郑小玲, 等. 间隙连接对胶接接头应力分布和强度的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2004(4): 39 ~ 43.  
Kong Fanrong, You Min, Zheng Xiaoling, et al. Effect of recessed bonding on stress distribution and strength of adhesively bonded joints [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2004(4): 39 ~ 43. (in Chinese)
- 6 Zhao X, Adams R D, Lucas F M da Silva. A new method for the determination of bending moments in single lap joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2010, 30(2): 63 ~ 71.
- 7 Xia Yong, Zhou Qing, Wang P C, et al. Development of a high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, part I: static experiments and simulations [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4): 414 ~ 426.
- 8 Xia Yong, Zhou Qing, Wang P C, et al. Development of a high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, part II: dynamic experiments and simulations [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4): 427 ~ 433.
- 9 陈焯, 李玉龙, 史飞飞, 等. 板厚、温度和速度对单搭接胶接接头强度的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(5): 450 ~ 456.  
Chen Xuan, Li Yulong, Shi Feifei, et al. Influences of adherent thickness, temperature and velocity on strength of adhesively-bonded single-lap joints [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(5): 450 ~ 456. (in Chinese)
- 10 Grant L D R, Adams R D, Lucas F M da Silva. Effect of the temperature on the strength of adhesively-bonded single lap and T joints for the automotive industry [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(5): 535 ~ 542.
- 11 Wu Z J, Romeijn A, Wardenier J. Stress expressions of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends [J]. *Composite Structures*, 1997, 38(1 ~ 4): 273 ~ 280.
- 12 赵波. 刚度非平衡胶接接头的二维应力分析[J]. *工程力学*, 2008, 25(12): 6 ~ 13.  
Zhao Bo. A two-dimensional solution for unsymmetric single-lap adhesive bonded joints [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(12): 6 ~ 13. (in Chinese)