

文章编号: 1001-1455(2009)05-0449-08

# 板厚、温度和速度对单搭接胶接接头强度的影响\*

陈 焯<sup>1</sup>, 李玉龙<sup>1</sup>, 史飞飞<sup>1</sup>, 赵海燕<sup>2</sup>, 马 啸<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

2. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

**摘要:** 为了探讨单搭接胶接接头结构的破坏机理, 采用 Hopkinson 拉杆实验技术, 研究了板厚、温度和速度(试样端部的最大速度)对单搭接胶接接头强度的影响。实验结果表明, 板越厚、温度越低、速度越大, 接头的强度越大。运用有限元方法分析了胶层的应力分布, 通过引入剥离应力对试样强度的影响因子, 研究发现板越厚、温度越低、速度越大, 剥离应力对接头强度的影响越小。

**关键词:** 爆炸力学; 破坏机理; Hopkinson 拉杆; 单搭接胶接接头; 板厚; 温度; 速度; 强度

**中图分类号:** O347.1

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

## 1 引 言

随着单搭接胶接结构的大量应用, 该结构在冲击载荷作用下的力学性能, 特别是在动态加载条件下速度、环境温度和板的厚度对其力学性能的影响, 日益受到关注<sup>[1-4]</sup>。L. Goglio 等<sup>[5]</sup>用钟摆冲击实验设备对单搭接试样进行了剪切实验, 研究了板厚对接头强度的影响; J. A. Harris 等<sup>[6]</sup>研究了胶接接头的动态力学行为, 认为就他们所研究的胶粘剂而言, 接头的强度受加载速率的影响并不显著; L. F. M. da Silva 等<sup>[7]</sup>研究了 3 种不同的结构胶粘剂在 -55~200 °C 范围内的拉伸和剪切性能。

Hopkinson 杆实验装置自 1949 年问世以来, 经过几十年的发展, 已经成为动态力学测量的重要装置, 近些年来许多学者将该装置用于拉伸、剪切、扭转、弯曲等实验<sup>[8-10]</sup>。L. Goglio 等<sup>[11]</sup>使用 Hopkinson 压杆和 Hopkinson 拉杆研究了双组分环氧树脂胶的高应变率压缩和拉伸行为, 并指出胶粘剂的强度随着应变率的增加而显著增加。M. Adamvalli 等<sup>[12]</sup>采用 Hopkinson 压杆对不同加载速率和不同温度(25~100 °C)下单搭接接头的动态压剪强度进行了研究, 发现接头的强度随加载速率的增加而显著增加, 在 75~100 °C 时接头的强度明显地低于 25 °C 时的强度。

本文中采用 Hopkinson 拉杆(SHTB)装置对单搭接胶接接头进行实验研究, 旨在揭示速度、实验温度以及板厚对试样强度的影响, 为单搭接接头的广泛应用提供设计参考。

## 2 实验技术

### 2.1 试样设计

试样为硅胶粘接钢板, 胶层厚约 0.22 mm。图 1 给出了试样的结构和尺寸, 图中  $L$  为钢板厚度, 取 0.75 和 2.25 mm 等 2 种。为便于夹持试样, 在试样两端夹持部分粘上垫片并开有  $\varnothing 5$  mm 的销钉孔。

### 2.2 实验方法

实验中所采用的 Hopkinson 拉杆装置由气室、撞击杆、入射杆和透射杆组成, 如图 2 所示。开始加载时, 气室推动子弹撞击凸缘, 产生脉宽为 0.1 ms 的应力波, 应力波反射成为一个入射拉伸波传向入射杆端头, 到达入射杆端头时, 一部分入射波反射回入射杆中, 另一部分经过试样传入透射杆。通过测量入射杆和透射杆上相应的入射、反射和透射应力波, 并根据一维应力波理论,

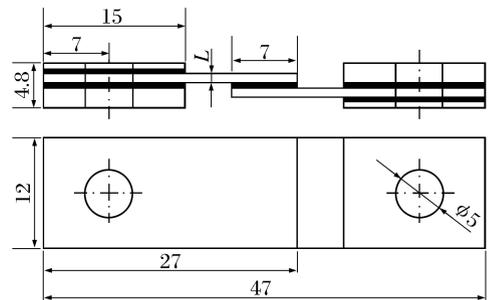


图 1 试样结构及尺寸

Fig. 1 Specimen geometry

\* 收稿日期: 2008-05-08; 修回日期: 2008-08-07

作者简介: 陈 焯(1983—), 男, 硕士研究生。

可以得到试样两端的力及胶层的平均剪切应力分别为

$$F = E_b A_b \epsilon_s, \quad \tau = \frac{F}{A_s} = E_b \epsilon_s \frac{A_b}{A_s}$$

式中:  $A_b$  是弹性杆的横截面积,  $E_b$  是弹性杆的弹性模量,  $A_s$  是试样的搭接面积,  $\epsilon_s$  是透射杆的应变。

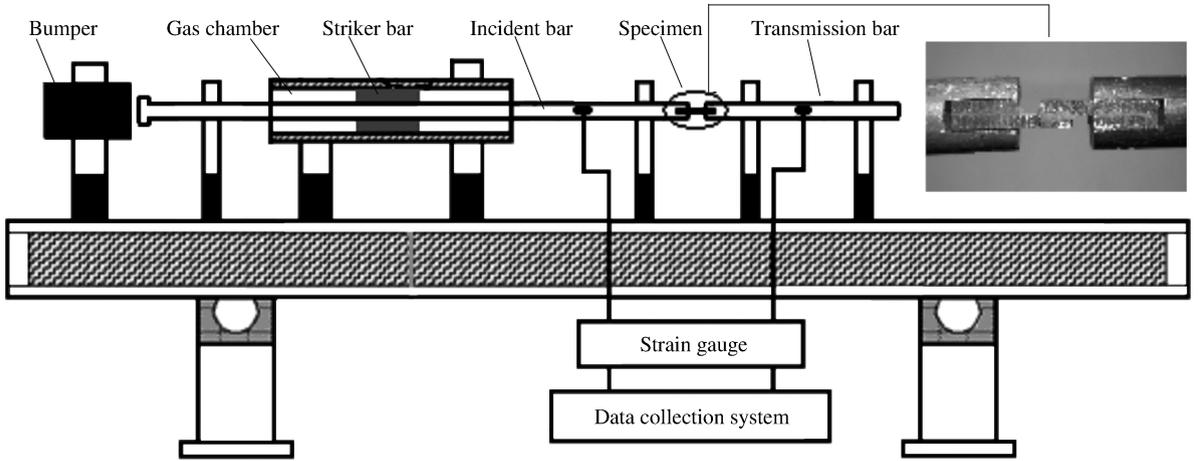


图 2 Hopkinson 拉杆实验装置示意图及试样与杆子连接照片

Fig. 2 Schematic diagram of the Hopkinson bar with the connection between the specimen and the bars specified

### 2.3 实验条件

为了充分地研究温度和速度对试样强度的影响,实验在以下条件下进行。

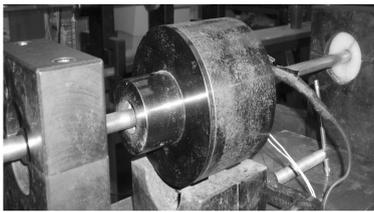
(1) 速度分别取 6.67 和 20.00 m/s,通过调节气室的气压来控制。

(2) 实验温度分别取  $-40$ 、 $20$ 、 $80$   $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 高温实验时,将试样与弹性杆连接好,一同放置于电热炉内进行加热,使用温控仪来控制温度,如图 3(a)所示。由于弹性杆的温度 ( $80$   $^{\circ}\text{C}$ ) 未超过其淬火温度 ( $400$   $^{\circ}\text{C}$ ),没有降低弹性杆的屈服极限,因此不考虑温度的变化所引起的弹性杆中的波阻抗的变化<sup>[10]</sup>。根据谢若泽等<sup>[13]</sup>关于炉温分布的研究结果,试样位于炉心 20 mm 内时可保证其受热均匀。 $80$   $^{\circ}\text{C}$ 时,保温 2 h,温度波动为  $\pm 3$   $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 低温实验时,将试样放入冷却室中,如图 3(b)所示,利用液氮蒸发气进行降温。 $-40$   $^{\circ}\text{C}$ 时,保温 2 h,温度波动为  $\pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ 。

(a) High temperature



(b) Low temperature



图 3 控温实验装置

Fig. 3 Experimental devices for controlling temperature

## 3 实验结果

### 3.1 破坏模式

图 4 给出了不同温度下试样破坏后的形貌。从试样破坏后的胶层表面可以看到,试样不完全按照预期估计的在胶层内发生内聚破坏,而发生由胶层内聚破坏和胶层与钢板之间的界面破坏组成的混合破坏。虽然这一现象给实验结果带来了一定的分散性,但是胶层的内聚破坏在试样的破坏形式中仍然占主导作用,因此这种偏离并不影响实验结果<sup>[5]</sup>。

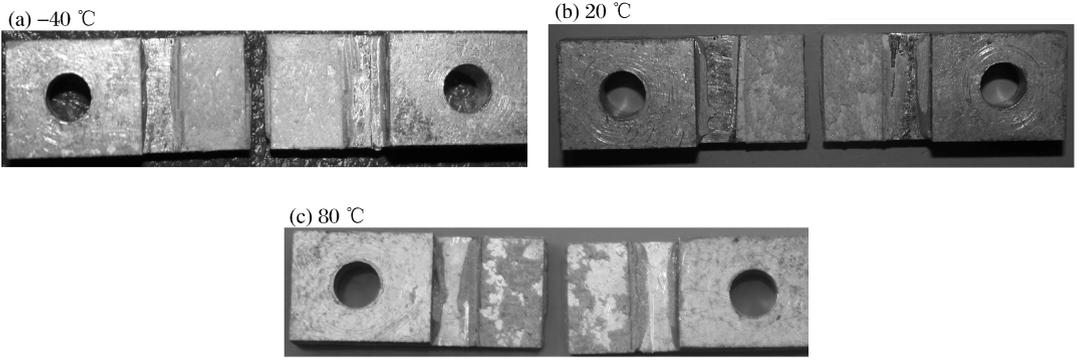


图 4 不同温度下试样破坏形貌

Fig. 4 Broken specimens at different temperatures

### 3.2 板厚、温度和加载速度对强度的影响

按照 2.3 节中的实验条件进行实验,每种条件下进行 5 次重复性实验,所得实验数据如表 1 所示,表中  $v$  为试样端面的最大速度, $L$  为钢板厚度, $\theta$  为实验温度, $T$  为试样剪切强度, $\bar{T}$  为试样平均剪切强度。图 5 中给出了试样随板厚、温度和加载速度变化的典型的平均剪切应力-时间曲线。从图 5 中可以看到,试样以一种非线性的特征加载至极限应力后,由于胶体具有良好的塑性,试样应力缓慢下降,直至减小为 0。图 5(a)中,当板厚从 0.75 mm 增加到 2.25 mm 时,试样的强度从 77.0 MPa 增加至 85.6 MPa,上升了 11.1%。图 5(b)中,−40 °C 时,试样的强度为 94.0 MPa,比常温时上升了 9.8%,比 80 °C 时上升了 26.8%,可见随着温度的降低,试样的强度增加的趋势非常明显。图 5(c)中,加载速度从 6.67 m/s 增大到 20.00 m/s 时,试样强度由 70.4 MPa 增大至 85.6 MPa,上升了 21.6%,可见试样强度随加载速度的增加而增加的趋势亦非常明显。

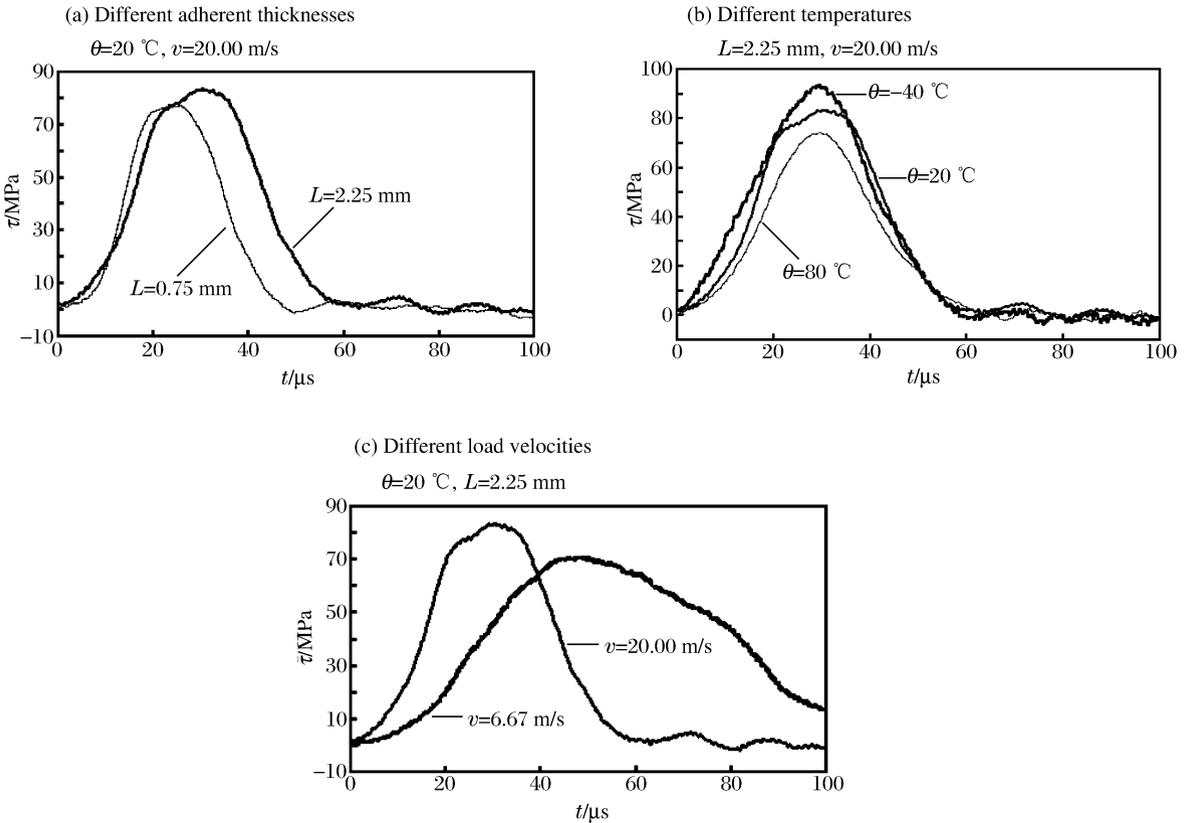


图 5 随板厚、温度和速度变化的平均剪切应力-时间曲线

Fig. 5 Typical mean shear stress-time curves under different conditions

表 1 不同实验条件下测得的试样剪切强度

Table 1 Experimental shear strengths of specimens under different experimental conditions

$v/(m/s)$	$L/mm$	$\theta/^\circ C$	试样号	$T/MPa$	$\bar{T}/MPa$	$v/(m/s)$	$L/mm$	$\theta/^\circ C$	试样号	$T/MPa$	$\bar{T}/MPa$		
6.67	0.75	-40	1	62.0	60.6	20.00	0.75	20	1	68.0	78.1		
			2	62.0					2	72.3			
			3	56.0					3	76.0			
			4	61.0					4	91.0			
			5	62.0					5	83.0			
	0.75	20	80	1	61.0		60.2	20.00	0.75	20	1	69.0	67.8
				2	60.0						2	66.0	
				3	67.0						3	76.0	
				4	54.0						4	51.0	
				5	59.0						5	77.0	
	2.25	20	80	1	51.0		51.6	20.00	2.25	20	1	56.8	63.8
				2	52.0						2	62.0	
				3	50.0						3	73.0	
				4	51.0						4	63.0	
				5	54.0						5	64.5	
	2.25	80	-40	1	72.0		74.7	20.00	2.25	80	1	94.0	91.7
				2	74.0						2	88.5	
				3	65.0						3	93.0	
				4	88.6						4	94.0	
				5	74.0						5	89.0	
2.25	20	80	1	77.0	71.7	20.00	2.25	20	1	80.0	77.2		
			2	70.6					2	83.0			
			3	68.0					3	71.0			
			4	69.0					4	77.0			
			5	74.0					5	75.0			
2.25	80	-40	1	58.0	63.8	20.00	2.25	80	1	72.0	74.2		
			2	63.6					2	70.0			
			3	66.6					3	72.0			
			4	63.0					4	83.0			
			5	68.0					5	74.0			

图 6 描绘了剪切强度与温度、板厚和速度的关系。从图 6 中可以看出,试样强度随着板厚的增大而增大,随着温度的降低而增大,随着速度的增大而增大。在高速下,由低温至常温强度的下降趋势比由常温至高温强度的下降趋势明显;而在低速下则相反。值得注意的是,板厚为 2.25 mm 的试样在低速时的强度(74.7、71.7、63.8 MPa)与板厚为 0.75 mm 的试样在高速时的强度(78.1、67.8、63.8 MPa)非常接近,这说明板厚与速度对试样强度的影响程度基本相同。另外,在板厚相同时,高温高速时试样的强度与低温低速时试样的强度非常相近;板厚为 2.25 mm 的试样在低温低速下的强度(74.7 MPa)高于板厚为 0.75 mm 的试样在高温高速下的强度(63.8 MPa)。

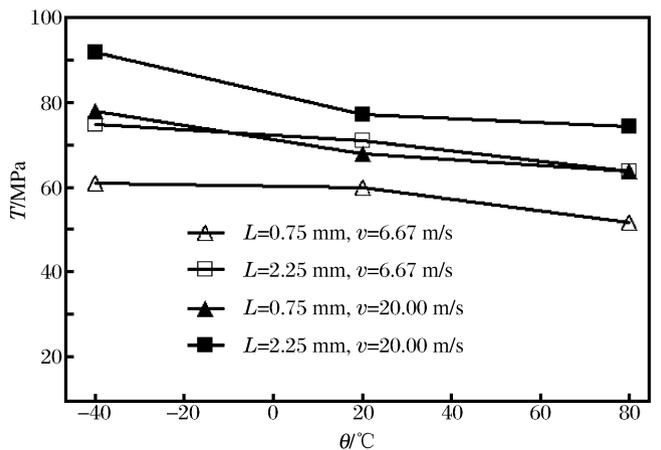


图 6 不同条件下试样的剪切强度随温度的变化  
Fig. 6 Shear strengths of specimens varying with temperatures under different conditions

### 4 胶层应力分析

单搭接试样中胶层的应力不是单纯的剪切应力，而是由剪切应力  $\tau$  和剥离应力  $\sigma$  组成的复合应力，其中剥离应力是由于载荷偏离单搭接试样的轴线引起的弯矩而产生的，其方向垂直于胶界面。M. Adamvalli 等<sup>[12]</sup> 预测在 Hopkinson 杆实验中，试样破坏所需要的加载时间短，由弯矩作用产生的剥离应力对胶层的剪切强度不会产生很大的影响。为了深入分析胶层中剥离应力在不同的板厚、温度和速度下对试样强度的影响程度，本文中采用有限元方法分析胶层的剪切应力和剥离应力的分布。

借鉴 U. K. Vaidya 等<sup>[14]</sup> 的分析模型，在建模过程中，试样材料均被定义为线弹性材料，所用单元类型为 3D solid 实体单元，胶层网格为六面体网格。AB 面和 CD 面分别表示胶层与钢板接触的上、下表面。试样搭接区域的有限元模型如图 7 所示。

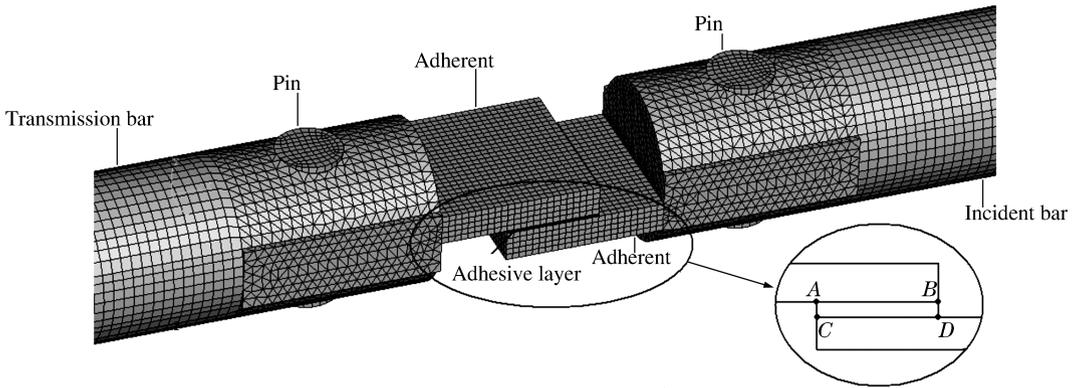


图 7 试样搭接区域的有限元模型

Fig. 7 Finite element modeling of the overlap area

以试样 ( $L=2.25\text{ mm}, \theta=20^\circ\text{ C}, v=20.00\text{ m/s}$ ) 为例，胶层 AB 面和 CD 面的剪切和剥离应力分布曲线如图 8 所示。从图 8 中可以发现，胶层上、下 2 表面的剪切应力呈反对称分布，剥离应力基本相同。试样在受载发生破坏的过程中，剪切应力占主导地位，在搭接边缘的 A、D 2 点承受最大剪切应力，在 B 点和 C 点，剪切应力最小，趋近于 0。相比较而言，剥离应力只占很小的一部分，并呈现拉压交替现象，在搭接端部 A 点和 D 点为最大拉应力，在搭接区域的中间压应力最大。同时还可以看到，A 与 D 点存在应力差异，这是由于应力波的传播造成的。应力波传播时，首先经过 D 点，而后经过 A 点，任一时刻，D 点与 A 点的应力可能不同，但相差很小，当试样两端达到平衡时，A 点与 D 点的应力趋于相同。

图 9 为 CD 面上随板厚、温度和速度变化的应力分布曲线。为了更好地反映剥离应力对试样强度的影响程度，里定义影响因子  $\mu = \sigma/\tau$ ，其中， $\sigma$  和  $\tau$  分别为剥离应力和剪切应力在 D 点的值，不同情况下影响因子的大小如表 2 所示。从表 2 中可以看出，钢板越厚，剥离应力对试样强度的影响越小；剥离应力在低温实验条件下对试样强度的影响比在高温时小；剥离应力在高速下对试样强度的影响比在低速下小。

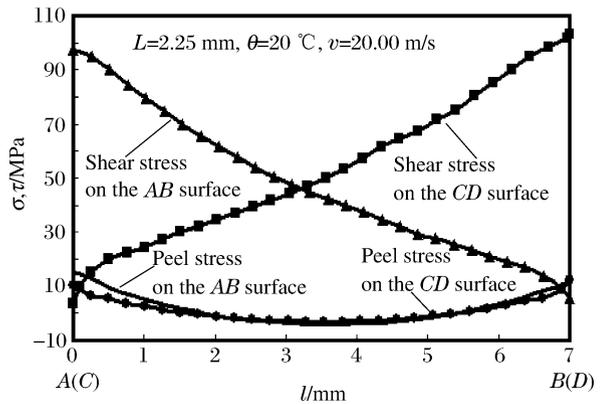


图 8 胶层 AB 面和 CD 面沿搭接长度方向上的应力分布  
Fig. 8 Stress distribution on the adhesive surfaces AB and CD along the overlap length direction

表 2 不同实验温度条件下的影响因子

Table 2 Influencing factors under different conditions

L/mm	$\mu$	$\theta/^\circ\text{C}$	$\mu$	$v/(\text{m/s})$	$\mu$
0.75	0.140	-40	0.056	6.67	0.130
2.25	0.077	20	0.077	20.00	0.077
		80	0.150		

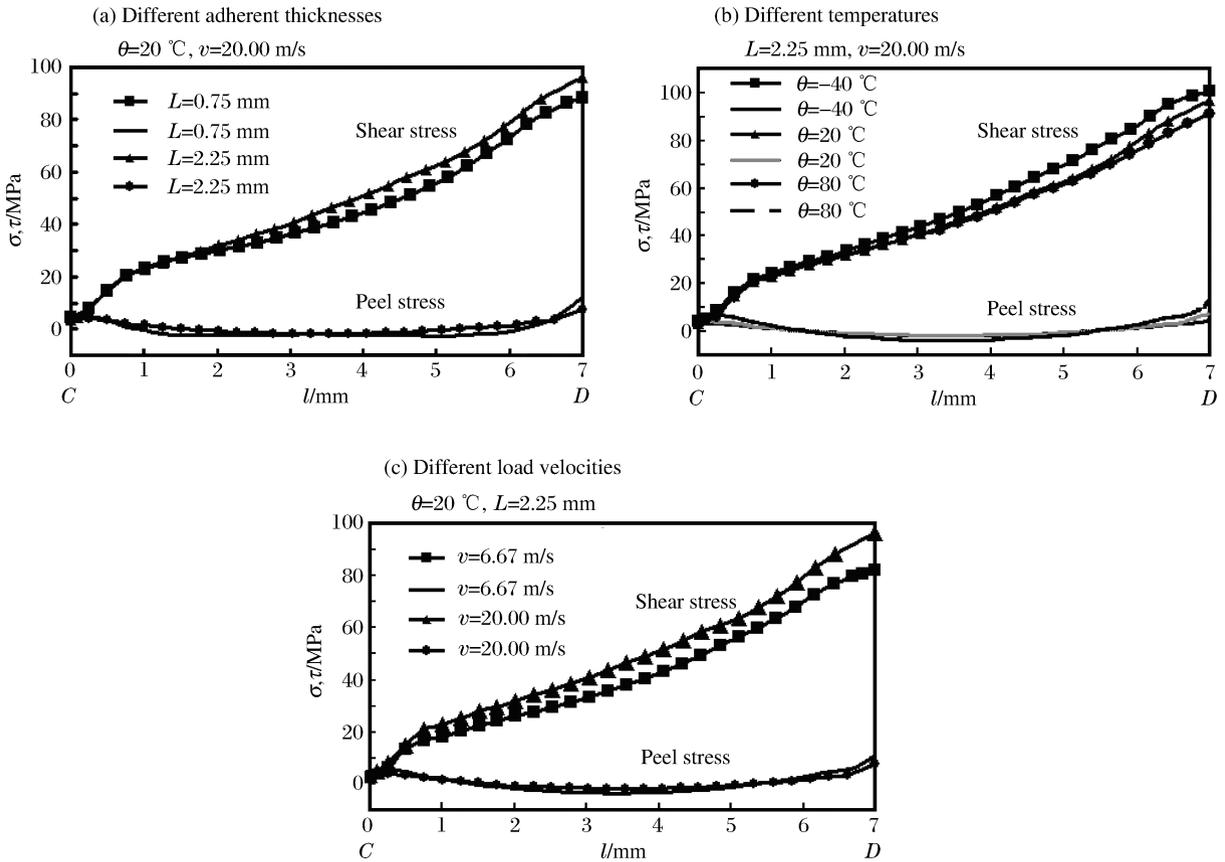


图9 不同实验条件下胶层CD面沿搭接长度方向上的应力分布

Fig. 9 Stress distribution on the adhesive surface CD along the overlap length direction under different conditions

## 5 讨论

(1)破坏机理。从有限元分析的结果中可以看出,胶层在搭接区域端部有最大剪应力值和最大剥离应力值,也就是说在搭接端部会首先出现初始裂纹,随后裂纹沿着搭接长度方向开始向中间区域扩展。在裂纹扩展过程中,会发生内聚破坏和界面破坏这2种破坏形式,导致破坏的原因是由于胶粘剂在发生固化反应时,会有缩聚反应产生的分子逸散行为和加聚反应产生的原子间距离缩短现象,使得溶剂挥发,胶层体积收缩,从而在粘接区域产生微裂纹。这些微裂纹构成了胶层内的应力集中点,并引发胶层内应力。另外,试样在制成冷却过程中,由于胶层与钢板的热膨胀系数不同而引发的热应力,也会使胶层产生微小裂纹。因此当试样受载时,这些裂纹在剪切应力、拉应力、压应力、热应力以及应力集中等作用下迅速扩展。由于界面破坏能小,裂纹就沿着界面能小的方向扩展,从而更容易发生胶层与钢板间的界面破坏。

(2)温度的影响。从图4中可以看到,低温实验时( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )试样破坏后其断口胶层分布均匀,而高温实验时( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ )试样破坏后其断口呈现复合破坏,这与M. Adamvallid等<sup>[12]</sup>的研究结果一致:试样在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时破坏断口的胶层分布比较均匀,在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则呈现明显的界面破坏,接头的动态强度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时明显降低。M. Adamvallid等<sup>[12]</sup>认为这主要是由于温度升高引起了胶粘剂的分解,胶层内的热应力对接头强度的降低几乎没有影响。本文中认为胶层热应力的增加并不是引起接头强度降低的主要原因。剥离应力与胶层厚度、钢板厚度和模量、剥离速率以及温度有关,在其他参数不变的情况下,温度的升高引起了剥离应力的增大,而剥离应力的增大又导致裂纹向胶粘剂和钢板的界面扩展,从而发生界面破坏,这是导致接头强度降低的最本质的原因。

(3)板厚的影响。钢板越薄,则由弯矩作用而产生的剥离应力越大,剥离应力对强度的影响越大,接头的强度也越小。L. Goglio等<sup>[5]</sup>对 $1.5$ 和 $3.0\text{ mm}$ 板厚下的剥离应力对接头强度影响的研究结果也说明了这一点。

(4)速度的影响。在动态加载条件下,高速( $20.00\text{ m/s}$ )时试样中应力作用的时间比在低速( $6.67\text{ m/s}$ )时短,这就需要更高的应力来满足胶层裂纹扩展所需的能量,使胶层发生破坏,表现出接头的强度随着加载速度的增加而增大。另

外,当试样端面的速度减小时,试样中胶层的剥离速率随之减小,胶层的剥离应力随之增大,接头的强度降低。J. A. Harris等<sup>[6]</sup>研究发现:就他们所研究的胶粘剂而言,接头的强度受加载速率的影响并不显著。本文中认为这种现象可能是由于所用胶粘剂材料而引起的,就大部分的结构胶粘剂而言,其胶接接头的动态强度随着加载速度的增加而增大,M. Adamvalli等<sup>[12]</sup>的研究也证实了这一点。

在本文的分析中存在一定的假设,比如在有限元分析中假设所有材料都是弹性体,而实际上胶层是粘弹性体;胶层的剪切应力和剥离应力分布难以通过实验手段进行实测。这就使得分析结果与实际情况存在一定的偏离,因此有待于后续的工作中继续探讨。

## 6 结 论

(1)研究了不同板厚、温度和速度对单搭接胶接头试样强度的影响:板厚  $L$  越大,温度  $T$  越低,速度  $V$  越大,则试样强度越大。(2)通过分析胶层的应力分布发现,剪切应力占主导地位,而剥离应力占很小部分。(3)定义了剥离应力对强度的影响因子,并得出钢板板越厚、温度越低、试样端面的最大速度越大,剥离应力对试样强度的影响越小。

## 参考文献:

- [1] Bezemer A A, Guyt C B, Vlot A. New impact specimen for adhesives: Optimization of high-speed-loaded adhesive joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1998,18(4):255-260.
- [2] Kihara K, Isono H, Yamabe H, et al. A study and evaluation of the shear strength of adhesive layers subjected to impact loads[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2003,23(4):253-259.
- [3] Shahin K, Taheri F. Analysis of deformations and stresses in balanced and unbalanced adhesively bonded single-strap joints[J]. *Composite Structures*, 2007,81(4):511-524.
- [4] De Moraes A B, Pereira A B, Teixeira J P, et al. Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2007,27(8):679-686.
- [5] Goglio L, Rossetto M. Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007,35(7):635-643.
- [6] Harris J A, Adams R D. An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1985,199(2):121-131.
- [7] Da Silva L F M, Adams R D. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2005,19(2):109-141.
- [8] 崔云霄,卢芳云,林玉亮,等.一种新的高应变率复合压剪技术[J].*实验力学*,2006,21(5):584-590.  
CUI Yun-xiao, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, et al. A new combined compression-shear loading technique at high strain rates[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006,21(5):584-590.
- [9] Li Y L, Ramesh K T. An optical technique for measurement of material properties in the tension Kolsky bar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007,34(4):784-798.
- [10] 李玉龙,秦涛,郭伟国,等.确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统[J].*爆炸与冲击*,2005,25(6):487-492.  
LI Yu-long, SUO Tao, GUO Wei-guo, et al. Determination of dynamic behavior of materials at elevated temperatures and high strain rates using Hopkinson bar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(6):487-492.
- [11] Goglio L, Peroni L, Peroni M, et al. High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008,28(7):329-339.
- [12] Adamvalli M, Parameswaran V. Dynamic strength of adhesive single lap joints at high temperature[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008,28(6):321-327.
- [13] 谢若泽,张方举,颜怡霞,等.高温 SHPB 实验技术及其应用[J].*爆炸与冲击*,2005,25(4):330-334.  
XIE Ruo-ze, ZHANG Fang-ju, YAN Yi-xia, et al. High-temperature SHPB experimental technique and its application[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(4):330-334.
- [14] Vaidya U K, Gautam A R S, Hosaur M, et al. Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006,26(3):184-198.

## Influences of adherent thickness, temperature and velocity on strength of adhesively-bonded single-lap joints

CHEN Xuan<sup>1</sup>, LI Yu-long<sup>1\*</sup>, SHI Fei-fei<sup>1</sup>, ZHAO Hai-yan<sup>2</sup>, MA Xiao<sup>2</sup>

(1. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an 710072, Shaanxi, China;*

2. *Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University,  
Beijing 100084, China)*

**Abstract:** In order to explore the failure mechanism of the structures with adhesively-bonded single-lap joints, a Hopkinson tension bar technique was applied to investigate influences of adherent thickness, temperature and velocity (the maximum velocity at the end of the specimen) on the strength of this kind of joint. Experimental results show that the strengths of the specimens tested increase with the increase of the adherent thickness and velocity and the decrease of the temperature. The finite element method was adopted to analyze the stress distribution in the adhesive layer. Analysis displays that shear stress affects the strength of the specimen more dominantly than peel stress. An influencing factor, which was the value of peel stress divided by shear stress, was introduced to further discuss the effect of peel stress on the strength of the specimen. Further discussions indicate that the effect of peel stress decreases with the increases of adherent thickness and velocity and the decrease of temperature.

**Key words:** mechanics of explosion; failure mechanism; Hopkinson tension bar; single-lap joint; adherent thickness; temperature; velocity; strength

---

\* Corresponding author: LI Yu-long

E-mail address: liyulong@nwpu.edu.cn

(责任编辑 张凌云)