

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.004

不同胶层厚度单搭接接头剪切试验与强度预测*

李 龙¹ 胡 平² 刘立忠²

(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】 对不同胶层厚度的单搭接胶接接头进行拉伸载荷的剪切试验,对比胶层厚度以及胶瘤等因素对搭接接头强度的影响,通过有限元数值仿真,模拟不同胶层厚度试验件在接头破坏位置附近的等效应力情况,得出随胶层厚度的增加接头强度逐渐减小、端部胶瘤降低了粘接表面应力峰值从而提高接头强度等结论。同时引用Hart-Smith弯矩系数计算出较厚胶层单搭接接头强度的保守值。

关键词: 车身 单搭接接头 胶层厚度 胶瘤 剪切试验 强度预测

中图分类号: U463.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0017-05

Strength of Adhesively Bonded Single Lap for Differential Bondline Thickness and Tension Loading Prediction

Li Long¹ Hu Ping² Liu Lizhong²

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

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

Abstract

Adhesively bonded lap is used extensively in the manufacture of automotive structures. In order to explore the strength of the structures with lap joints, the adhesively bonded single lap joints with differential bondline thickness were tested in tension loading which creates shear across the bondline. Various parameters were investigated such as the bondline thickness and spew fillet. The equivalent stress was obtained through finite element analysis to define the effect of spew fillet for thick bondline, which helped to get the conclusions that strength of single lap was decreasing as bondline thickness increasing and spew fillet could reduce the peak value of stress so as to enhance the strength of lap joints. Hart-Smith factor was used to compute the tension load of single lap joints, which helped to get conservative prediction of strength.

Key words Auto body, Single lap joints, Bondline thickness, Spew fillet, Shear test, Strength prediction

引言

随着汽车向轻量化方向的发展,汽车连接技术逐渐成为汽车车身制造中需要升级和突破的关键性技术。目前广泛应用于车身制造中的焊接方式,由于成本和技术瓶颈等原因,很难应用于非钢板材料

车身零部件的连接工序中。所以,粘接技术作为一种新的连接技术逐步应用于现代汽车的生产制造中。同时,随着高强度胶粘剂的产生,结构胶将对车身强度起到更重要的作用。但是目前车身中的承载和半承载结构很少应用结构胶作为主要连接手段。为了将粘接技术更广泛的应用于车身设计中,需要

收稿日期: 2010-03-10 修回日期: 2010-04-23

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA04Z101)

作者简介: 李龙, 博士生, 主要从事汽车轻量化及车身部件连接技术研究, E-mail: llong702@yahoo.com

通讯作者: 胡平, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车车身先进设计与制造技术研究, E-mail: pinghu@dlut.edu.cn

进一步展开相关试验与分析工作,例如车身结构中不同形式粘接接头的强度预测等。单搭接接头是应用最为普遍的胶接接头形式之一,本文将单搭接胶接结构作为研究对象。

针对单搭接接头在拉伸载荷作用下的剪切强度问题,国内外学者做过相应的工作^[1~3]。游敏和郑小玲等分别针对胶层间隙^[4]以及胶粘剂力学性能参数^[5]对接头应力应变的影响做了一系列研究。周青等对焊接与胶接结合的结构进行了快速建模方法探讨与尝试^[6~7]。随着试验条件的不断完善和有限元方法的成熟,学者对胶瘤的研究也逐渐地增多^[8~9]。在以往的研究中,胶层的厚度大多小于1 mm,对于厚度大于1 mm的较厚胶层的研究工作较少。由于结构胶的发展迅速,目前商用的结构胶最大填充厚度可达到4 mm,为此本文对较厚胶层的单搭接胶接接头进行拉伸剪切强度试验,并考虑胶瘤对厚胶层接头的强度影响,同时引用 Hart-Smith 弯矩系数^[10]来预测接头的强度值。

1 试验方法

1.1 胶粘剂与被粘接材料

试验中单搭接接头所用的胶粘剂为 ESP110 型号环氧树脂胶,该结构胶被广泛应用于汽车车身的胶接结构中。针对车身某部位结构,选取被粘接材料厚度为 1.5 mm 的 DC01 低碳钢板。

1.2 单搭接试验样件

单搭接胶接接头是工程应用中最常见的胶接接头形式之一,也是其他类型接头分析的基础。根据国标 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)”制作了试验样件,尺寸如图 1 所示。胶层厚度分别为 (0.2 ± 0.1) mm、 (0.8 ± 0.1) mm、 (1.5 ± 0.1) mm、 (2.5 ± 0.1) mm (ESP110 胶粘剂最大填充缝隙为 4 mm)。分别将每种胶层厚度的单搭接件制作作为无胶瘤和有胶瘤,即粘接末端为直角和填充 45° 胶粘剂两种结构形式,如图 1 所示。

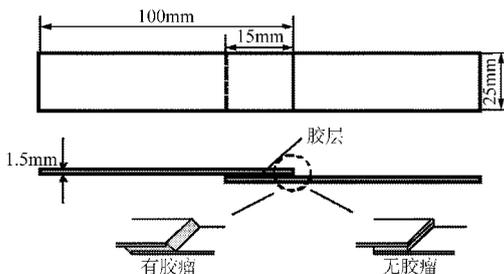


图1 单搭接接头结构示意图

Fig. 1 Dimensions for adhesive-bonded specimens

方向进行打磨,利用丙酮去除其表面油污和杂质。然后通过不同夹具实现胶层不同的厚度值。

1.3 试验方案

不同胶层厚度的单搭接试件通过伺服试验机进行拉伸剪切强度试验,如图 2 所示。试验机加载速率为 2 mm/min。每种条件下进行 6 次重复性试验。

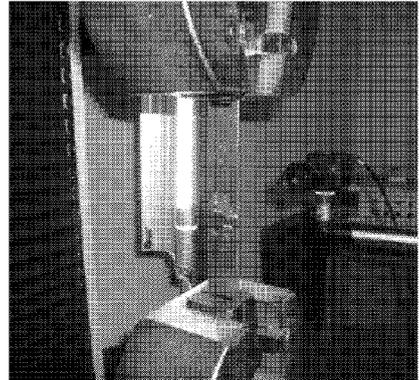


图2 单搭接接头拉伸剪切强度试验

Fig. 2 Experiments of single lap joint in tension loading

2 试验结果与分析

2.1 不同胶层厚度试验结果

不同胶层厚度的单搭接接头失效模式均以界面破坏为主,即胶粘剂与被粘物界面处发生粘附失效。有胶瘤的搭接接头发生破坏时,不同胶层厚度的搭接末端(胶瘤处)失效模式均为胶粘剂的内聚失效。接头破坏后的形貌如图 3 所示。

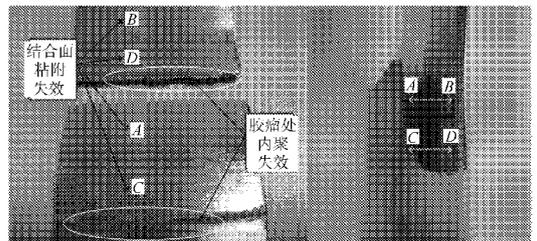


图3 接头破坏后形貌

Fig. 3 Fracture surface of single lap joint

以 2 mm/min 加载速率对不同胶层厚度的试验件进行拉伸剪切强度试验,得到相应的试验力-位移曲线,如图 4 所示。图中位移指试验件夹持端行程。图中阴影部分为相同胶层厚度不同试验件所得到的试验力-位移曲线范围。

从试验力-位移曲线可以看出,单搭接接头的强度随着胶层厚度的增加而降低。无胶瘤的单搭接试验件胶层厚度为 0.2 mm 和 0.8 mm 时,试验件的试验力-位移曲线部分重合。当胶层大于 1 mm 时,胶层厚度对接头强度的影响逐渐增大。由于单搭接接头在剪切强度破坏时,粘接区域断裂为瞬间过程,高速摄像机也很难捕捉胶层与被粘物分离的过程。所

被粘接钢板涂胶部位经过同一型号砂纸沿同一

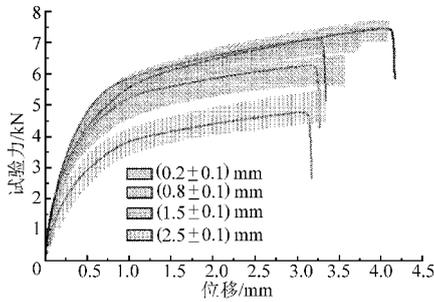


图 4 不同胶层厚度试验力-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves for lap joints with various bondline thickness

以假定曲线中的试验力最高值为该试验件所能承受的最大拉伸力,试验力在未达到该值前胶层未发生破坏。不同胶层厚度搭接接头破坏时的拉伸力如表 1 所示。

表 1 不同胶层厚度试验结果

Tab. 1 Experimental results of lap joints

胶层厚度 /mm	平均最大拉伸力 (无胶瘤)/kN	平均最大拉伸力 (有胶瘤)/kN
0.2	7.16	7.22
0.8	7.05	7.18
1.5	6.14	6.52
2.5	4.72	5.40

2.2 胶瘤的影响

从试验结果中得到,胶瘤使单搭接接头的强度增大。当胶层厚度为 0.2 mm 时,接头有无胶瘤对其接头的强度影响并不明显,当胶层厚度增加到 2.5 mm 时,有胶瘤的搭接接头拉伸强度要比无胶瘤接头大 0.68 kN。胶层厚度为 0.8 mm 和 2.5 mm 的接头,存在胶瘤情况下的试验力-位移曲线如图 5 所示。从图中可知,端部胶瘤对 2.5 mm 胶层接头强度的影响明显大于 0.8 mm 胶层接头。

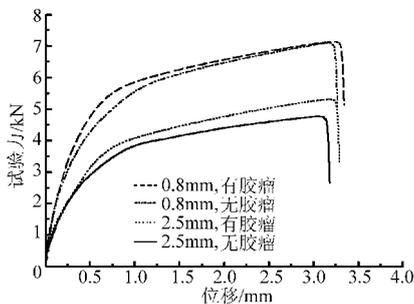


图 5 有无胶瘤结构试验件试验力-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves for lap joints with square ends and the ones with a spew fillet

2.3 最大拉伸力预测

对于单搭接胶接接头结构,预测其接头所能承受的最大拉伸力可以更合理的设计搭接接头尺寸。

Adams^[11] 提出一种简便的方法来估算单搭接胶接接头所能承受最大拉伸力的范围。从接头胶层的塑性变形方面考虑,得到最大拉伸力(拉伸力预测范围的上限值)为

$$T_{\text{upper}} = \tau_s bl \quad (1)$$

式中 τ_s ——胶的剪切屈服强度

b ——接头宽度 l ——接头搭接长度

假定胶层为各向同性,利用 Von Mises 准则,由单项拉伸和纯剪切时的条件可以得到 $\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}$ 。从而计算出 T_{upper} 的值为 17 kN。因为本次试验中试验力最大值在 8 kN 左右,所以可以证明在搭接接头破坏时胶层还没有达到塑性变形。

当单搭接接头受到拉伸力作用时,被粘钢板粘接部位承受拉伸力和弯矩 ($M = \frac{Tkt}{2b}$)^[12] 共同作用。由拉伸力产生的轴向拉应力为

$$\sigma_t = T / (bt) \quad (2)$$

式中 t ——被粘钢板的厚度 T ——拉伸力

由弯矩所产生的被粘钢板表面应力为

$$\sigma_m = 6M / (bt^2) = 3Tk / (b^2t) \quad (3)$$

其中 k 是弯矩系数,随着搭接区域的扭转而减小。因此,钢板所承受的轴向应力为

$$\sigma_{\text{sum}} = T(1 + 3k/b) / (bt) \quad (4)$$

当应力达到被粘钢板屈服强度 σ_s 时,拉伸力为

$$T_s = \sigma_s bt / (1 + 3k/b) \quad (5)$$

将 T_s 作为拉伸力(预测)的下限值。

当接头将要发生破坏时,粘接区域偏转程度趋于最大,所以假定此时弯矩系数 k 趋近于零,从而得到一个保守的拉伸力

$$T'_s = \sigma_s bt \quad (6)$$

根据式(6)可求得接头破坏时拉伸力大小为 6.7 kN。这个值小于试验中 0.2 mm 胶层厚度接头最大试验力,但是大于 2.5 mm 试验力的结果。为了在胶层厚度较大时得到更为准确的最大拉伸力预测值,引用带有胶层厚度参量 Hart-Smith 弯矩系数

$$k = \left(1 + \frac{t_a}{t}\right) \frac{1}{1 + \xi c + \frac{(\xi c)^2}{6}} \quad (7)$$

其中 $\xi = \sqrt{T/D}$ $D = \frac{E't^3}{12}$ $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$

式中 t_a ——胶层厚度

c —— $\frac{1}{2}$ 接头搭接长度

\bar{T} ——单位宽度所加载的拉伸力

E ——被粘钢板的弹性模量

ν ——泊松比

利用 Mathematica 数学软件可以得到对应 2.5 mm 胶层厚度接头的 T_s 数值解为 4.35 kN。该值均小于试验值,与无胶瘤接头试验值相差 8% 左右。所以通过 Hart-Smith 弯矩系数预测的较厚胶层最大拉伸力与无胶瘤接头真实值相近,与同等厚度的有胶瘤接头相差较大。在工程中为了保守预测单搭接粘接接头的强度值,可以通过 Hart-Smith 弯矩系数计算该结构中能承受的最大拉伸力。同时,也可以根据预计的载荷来反向设计接头尺寸等参数。

3 数值仿真

利用 Hypermesh 软件对单搭接试验件剖面通过 2D 网格进行建模。根据试验结果,对发生失效的界面处进行网格细化,最小网格尺寸为 0.1 mm。数值仿真是为了研究接头胶瘤部位的应力情况以及胶瘤对界面破坏处应力的影响。

为了对比不同胶层厚度有限元模型界面处的应力值,采用一种均匀规则的网格划分方法,保证不同厚度试验件的有限元网格模型在界面附近处的网格尺寸均一致。图 6 所示为胶层厚度 2.5 mm 的胶瘤

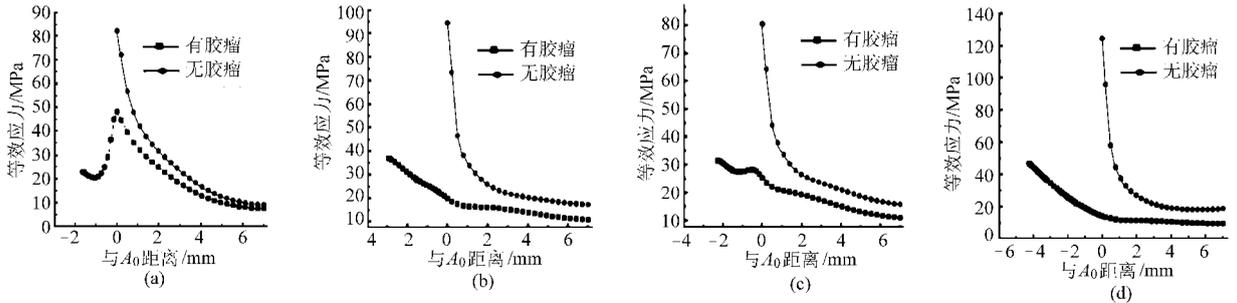


图 6 2.5 mm 胶层有限元网格

Fig. 6 Mesh refinement in lap joint of 2.5 mm thickness

胶层弹性模量 1 900 MPa,泊松比 0.33,通过对胶体轴向拉伸 (ASTM D638M 测试标准) 得到最大强度为 68 MPa,断裂时应变为 2.6% (常温)。试验中 2.5 mm 胶层厚度的搭接接头所能承受的最大平均载荷为 4.72 kN (根据试件尺寸约 90 MPa),为了考虑接头在未发生破坏时胶瘤对胶层应力分布的影响,在 Ansys 软件中分别加载 80 MPa,对不同厚度的有限元模型进行数值仿真。

以 A_0 为原点沿 X 方向胶层单元的等效应力曲线如图 7 所示。

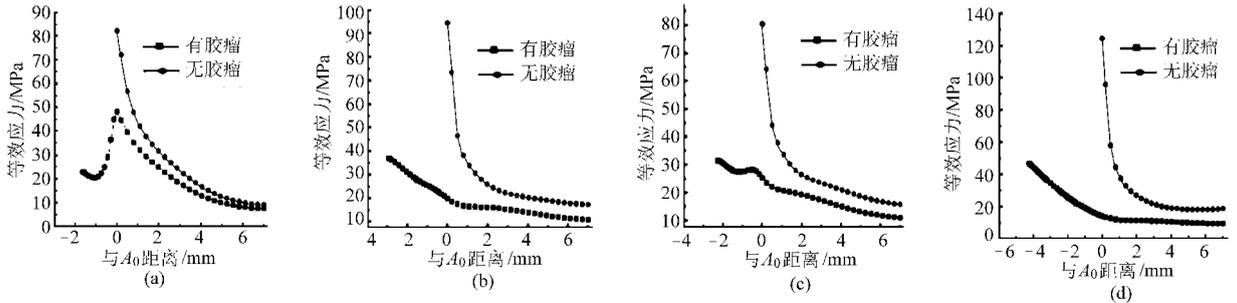


图 7 胶层等效应力曲线

Fig. 7 Equivalent stress curves in adhesive

(a) 0.2 mm (b) 0.8 mm (c) 1.5 mm (d) 2.5 mm

从曲线中可以看出,胶瘤减小了接头胶层应力峰值,从而提高了单搭接接头剪切强度。在工程应用中对于不同厚度的胶接接头,可以通过被粘接钢板端部形成胶瘤来提高其最大承受拉伸载荷的能力。

4 结束语

针对应用于车身制造中的钢板/环氧树脂胶/钢板这类单搭接胶接接头结构,通过对其不同胶层厚度和不同接头端部形式(有无胶瘤)的胶接试验件

进行拉伸剪切强度试验,得出该种接头强度随胶层厚度的增加而减小。尤其对于较厚胶层(2.5 mm)接头,其强度比薄胶层(0.2 mm)小 30% 以上。对于较厚胶层结构,接头端部胶瘤由于减小了胶层与钢板粘接表面的应力峰值,所以会明显提高接头强度。对于较厚胶层接头,可以通过 Hart-Smith 弯矩系数来计算接头结构的保守值,预测工程中这种结构所能承载的最大拉伸力值。在实际应用中也可以通过该方法来设计胶接接头尺寸参数。

参 考 文 献

- 1 Li Gang, Pearl Lee-Sullivan. Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2001, 21(3): 211 ~ 220.
- 2 You M, Yan Z M, Zheng X L, et al. A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints

- with an inner chamfer on the adherends[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2008, 28(1~2):71~76.
- 3 Fessel G, Broughton J G, Fellows N A, et al. Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2007, 27(7):574~583.
 - 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. 胶粘剂力学性能参数对劈裂载荷作用下胶接头中应力分布的影响[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(4):110~114.
Kong Fanrong, You Min, Zheng Xiaoling, et al. Effect of mechanical parameters of adhesive on stress distribution of adhesive bonded joints under cleavage loading[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(4):110~114. (in Chinese)
 - 6 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.
 - 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 II: dynamic experiments and simulations [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4):427~433.
 - 8 Lang T P, Mallick P K. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1998, 18(3):167~177.
 - 9 Belingardi G, Goglio L, Tarditi A. Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002, 22(4):273~282.
 - 10 Hart-Smith L J. Adhesive bonded single lap joints [R]. NASA Contract Report 115536, 1973.
 - 11 Adams R D, Comyn J, Wake W C. Structural adhesive joints in engineering [M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997.
 - 12 Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints [J]. *J. Appl. Mech.*, 1944, 11(1):17~27.
-

(上接第16页)

- 2 Mz X J, Sun Z Q, He Y Y. Analysis and design of fuzzy controller and observer [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 1998, 6(1):41~51.
- 3 刘志新,张大卫,李幼德. 基于滑转率的四轮驱动汽车防滑模糊控制仿真 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(12):21~24.
Liu Zhixin, Zhang Dawei, Li Youde. Research on acceleration slip regulation system for four-wheel drive vehicle using fuzzy control method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(12):21~24. (in Chinese)
- 4 郭孔辉,王德平. 汽车驱动防滑控制理论的初步研究 [J]. *吉林工业大学学报*, 1997, 87(3):1~5.
Guo Konghui, Wang Deping. A preliminary theoretical study on anti-slip regulation [J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 1997, 87(3):1~5. (in Chinese)
- 5 Ming-chin Wu, Ming-chang Shih. Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode PWM control [J]. *Mechatronics*, 2003, 13:331~351.
- 6 杨化方,李军伟. 双轮驱动电动汽车防滑控制系统研究 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2009(2):14~17.
Yang Huafang, Li Junwei. Research on acceleration slip regulation system for two-wheel drive electric vehicle using fuzzy-PID control [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2009(2):14~17. (in Chinese)
- 7 王良良. 四轮驱动汽车防滑控制系统的设计 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
Wang Liangliang. Design of acceleration slip regulation for four wheel drive vehicle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- 8 席爱民. 模糊控制技术 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.