

# 间隙连接对胶接接头应力分布和强度的影响<sup>\*</sup>

孔凡荣 游敏 郑小玲 杨春梅

(三峡大学机械与材料学院, 宜昌 443002)

**文 摘** 运用弹塑性有限元法结合实验研究了连续和间隙连接的单搭接接头应力分布规律,并考虑了胶瘤的影响。结果表明,在相当大间隙长度范围内和适当的间隙位置条件下,间隙连接接头并没有大幅度地减小其承载能力,相反其有效搭接区域剪切强度呈明显升高趋势;胶层应力峰值仍然发生在搭接末端;胶瘤承担了相当大的载荷作用;过大的间隙长度以及不当的间隙位置会导致胶层靠近间隙端应力集中明显加剧,成为新的高应力区,可能导致接头破坏模式的改变。实验结果与数值分析结果很好地吻合。

**关键词** 胶接接头,间隙连接,应力分布,有限元法,胶瘤

## Effect of Recessed Bonding on Stress Distribution and Strength of Adhesively Bonded Joints

Kong Fanrong You Min Zheng Xiaoling Yang Chunmei

(College of Mechanical and Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002)

**Abstract** The stress distribution of continuous and recessed bonding single-lap joints is discussed with use of elastoplastic finite element method (FEM) and experiment, considering the effect of fillet. The results show that with suitable position and a rather wide range of recessing, the shear strength of effective lap length increases distinctly instead of evidently reducing carrying capacity for recessed bonding. The maximum stress appears still in the endpart of lap joints and there is a higher stress in the fillet. Oversize recessing or improper position results in sharp stress concentration near the recessing to be a new higher stress zone, which may lead to the alternation of failure mode of joints. The finite element results show a close agreement with experimental results.

**Key words** Adhesively bonded joint, Recessed bonding, Stress distribution, Finite element method, Adhesive fillet

### 1 前言

现代工业的发展,对产品的质量和费用都提出了更高的要求,尤其是在汽车和航空航天领域更是如此,因此胶接作为一种高质、轻载、低费的连接方式就成为了首要的选择。与其他传统的连接方式相比,胶接能够以更低的费用、更轻的质量得到相当于

或者优于其他连接方式的性能。作为进一步降低费用和结构质量的一种尝试,实验中取出了胶接接头搭接区域中的部分胶,使胶层中形成一段或一段以上的间隙,这种连接方式被称为间隙连接。

迄今为止,关于间隙连接胶接接头的应力分布和强度研究的报道尚不多见,研究主要集中在

收稿日期:2004-01-06;修回日期:2004-04-05

<sup>\*</sup>湖北省教育厅自然科学研究重大资助项目:No. 2003Z001

孔凡荣,1980年出生,硕士,主要从事连接接头强度计算与数值模拟的研究工作

宇航材料工艺 2004年 第4期

— 39 —

连续单搭接接头强度和应力问题。Olia<sup>[1]</sup>和 T. P. Lang<sup>[2]</sup>对间隙连接做过一些数值分析,但前者把间隙视为一种缺陷,后者主要用有限元的方法分析了单段间隙对单搭接接头胶层应力分布的影响,但是模型很粗糙,有待进一步改进。郭忠信<sup>[3]</sup>对铝合金胶接接头在搭接长度的中部留一些不涂胶的空隙进行剪切强度测试,结果表明中间留一定范围的空隙基本上不影响接头总的承载能力。游敏等<sup>[4,5]</sup>做了进一步实验研究发现胶层间隙的存在虽然名义强度降低,但对于提高单搭接接头的实际强度有明显的作用,剪切强度最大值可比连续接头增加 90%。本文运用弹塑性有限元法对间隙长度及间隙位置分布形式对胶接接头应力分布及强度的影响进行分析。

## 2 有限元模型的建立

试件模型的几何尺寸见图 1,试件板长 100 mm,宽 50 mm,厚 2 mm,胶层厚 0.12 mm,上、下板和胶粘剂层网格各分为三层,搭接区边缘附近区域网格细分,最小尺寸为 0.04 mm,改变间隙长度和位置时,胶层靠近间隙一端和搭接边缘的网格尺寸大小保持不变。分析中不考虑胶层中存在气孔等空隙,假定结构连接完好,结合面上不存在缺陷,搭接末端存在等腰三角形胶瘤,胶瘤直角边长为被粘物厚度与胶层厚度之和。计算中所用材料的力学性能列于表 1,被粘物为 45# 钢,胶粘剂为环氧树脂胶 XH-11。利用 ANSYS 5.7 有限元分析软件,计算了外加载荷  $P=1$  kN(即名义应力  $\sigma_1=20$  MPa) 条件下接头搭接区中的应力分布。分析考虑了材料非线性,用双线性应力应变曲线描述材料的弹塑性性能。三维有限元分析表明,胶层沿板宽度方向的应力呈两边低中间高的分布<sup>[6]</sup>,故本文重点研究板宽中心截面上的应力分布。

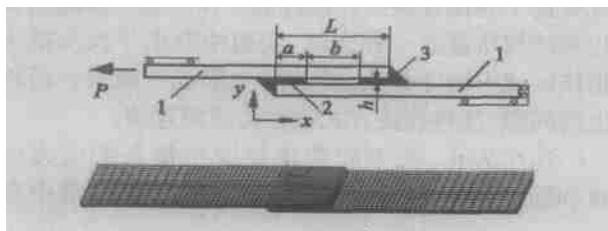


图 1 试样尺寸和有限元模型

Fig. 1 Dimensions of specimen and mesh of FEM

1 - 被粘物; 2 - 胶层; 3 - 胶瘤。

表 1 有限元分析中所用材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of the adhesives and adherents of FEM analysis

材 料	弹性模量 $E/$ GPa	泊松比	屈服强度 $\sigma_s/$ GPa	硬化模量 $E_t/$ GPa
45# 钢	210	0.3	353	2
环氧树脂胶	1.888	0.33	50	0.05

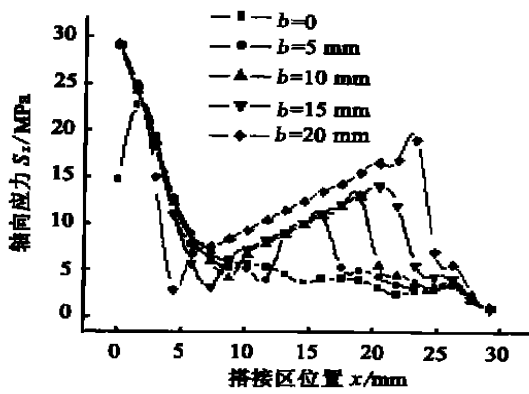
## 3 结果与讨论

### 3.1 间隙长度对接头应力分布规律的影响

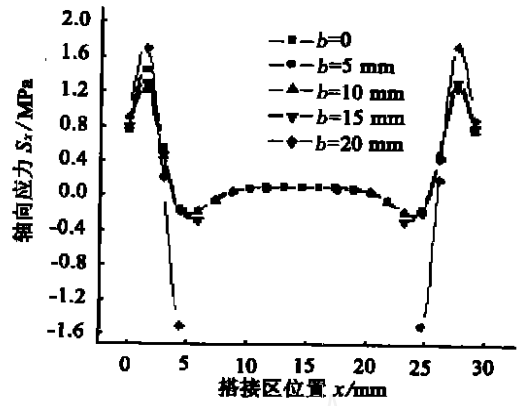
运用弹塑性有限元分析了采用环氧树脂胶制备的单搭接接头 ( $L=25$  mm) 在不同间隙长度  $b$  下板宽中心截面上胶层界面和中央处应力分布规律。结果表明,不同间隙长度下接头应力分布趋势大体相同,胶层内应力峰值都处于搭接末端区域,胶层中部是低应力区,对接头的承载能力贡献不大;在一定范围内 ( $b$  小于 15 mm) 随着间隙长度的增加,应力峰值增加不明显,实际剪切强度反而上升了,同时值得注意的是,胶层靠近间隙端应力上升幅度明显,胶瘤的承载作用进一步增强;胶瘤形状对应力分布的影响作用详见文献[4,7]。

随着间隙长度的增加,胶层界面上应力峰值由胶层内被粘物拐角处趋于向胶瘤外侧转移,同时胶层上(下)界面右(左)段胶层靠近间隙区域成为新高应力增长区(图 2)。胶层中央应力峰值区随着间隙长度的增加由被粘物拐角处向胶层内靠近间隙端转移(图 3)。在胶层界面上应力分布形式以轴向应力为主;在胶层内部应力分布形式则以剪切应力为主,搭接长度中部为低剪切应力区。

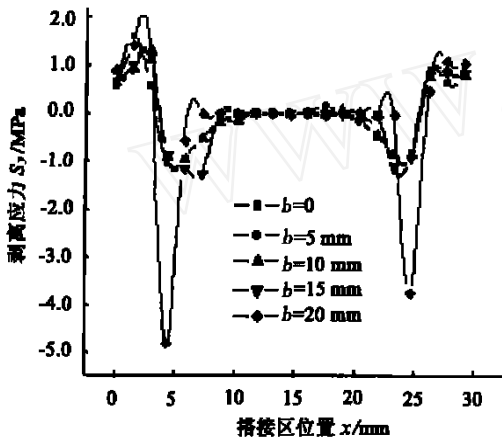
图 4 给出了搭接长度为 25 mm 采用 45# 钢和环氧树脂胶 XH-11 制备的单搭接连续和间隙接头强度的实验结果。可以看出间隙连接的单搭接接头强度与连续的接头强度相比,虽然最大破坏载荷有所降低,但是搭接区域的实际剪切强度却大幅度地增加,当间隙为 16 mm 时,最大剪切强度比连续接头几乎增大 80%。这证明了胶接中部区域的胶粘层对接头的承载能力贡献不大的理论,与数值模拟结果相吻合。



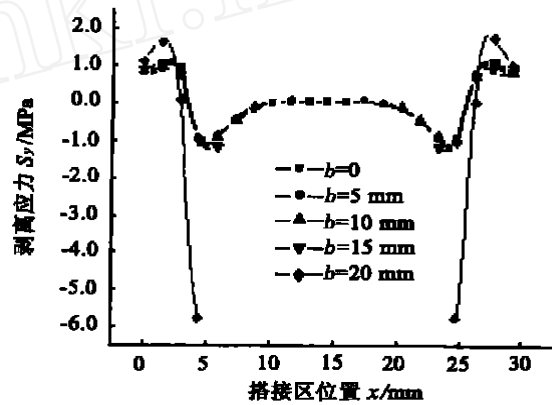
(a) 轴向应力



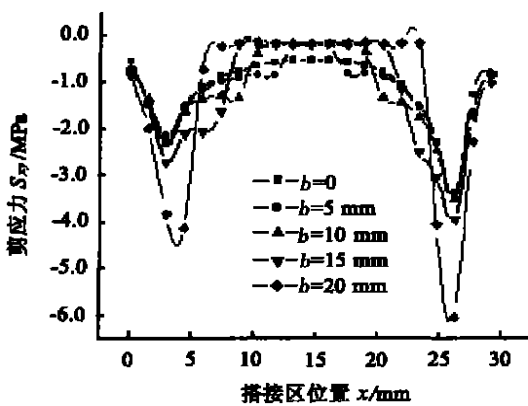
(a) 轴向应力



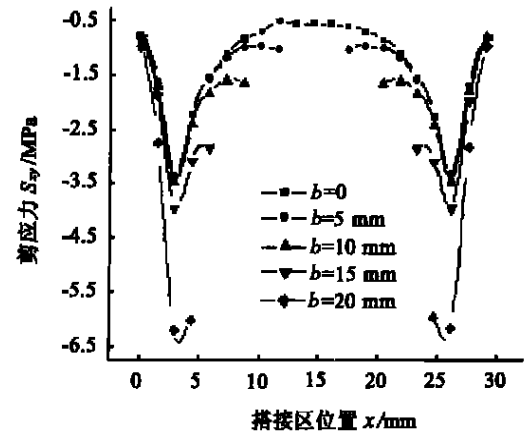
(b) 剥离应力



(b) 剥离应力



(c) 剪切应力



(c) 剪切应力

图2 间隙长度对胶层上界面应力分布影响的数值模拟结果

图3 间隙长度对胶层中央应力分布影响的数值模拟结果

Fig. 2 Numerical simulation of influence of recess length on stress distribution at interface of adhesive layer

Fig. 3 Numerical simulation of influence of recess length on stress distribution at adhesive midthickness

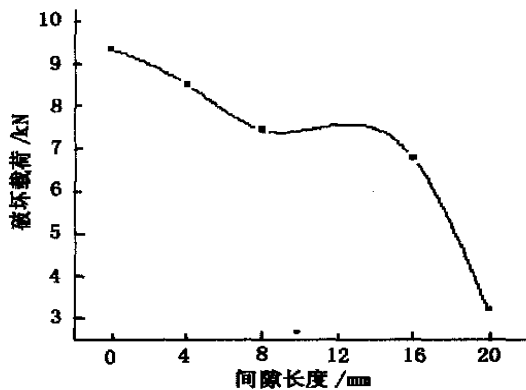


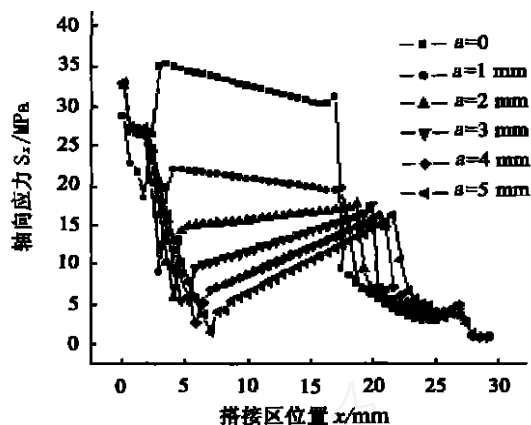
图4 连续和间隙连接接头强度的实验结果

Fig.4 Experiment results of strength on continuous and recessed bonding single-lap joints

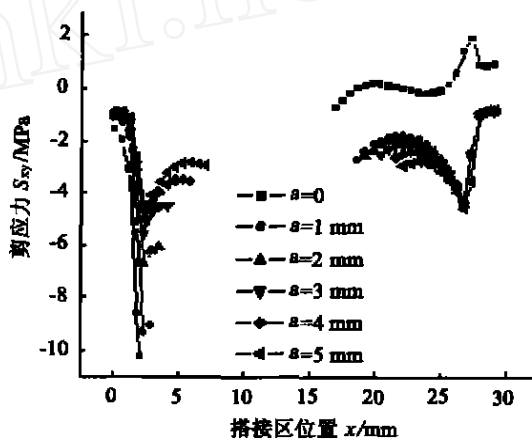
### 3.2 间隙位置对接头应力分布的影响

为了分析间隙位置对接头应力分布和强度的影响,分别就搭接长度一定( $b = 15 \text{ mm}$ ,  $L = 25 \text{ mm}$ )采用环氧树脂胶制备的单搭接接头,在  $a = 0 \text{ mm}$ 、 $1 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm}$  六种间隙位置条件下胶接接头应力分布规律进行了有限元分析。结果表明:不同位置间隙的条件下,胶层应力分布有着明显不同,偏离搭接长度中心对位置越远(即  $a$  值越大),胶层界面上靠近间隙端附近区域的应力集中越明显;间隙位于最偏位置( $a = 0$ )时,胶层-被粘物界面上靠近间隙端的应力集中相对于间隙位于搭接长度中心位置(即  $a = 5 \text{ mm}$ )时上升 2 倍之多,轴向应力峰值由搭接端部胶瘤内向胶层内靠近间隙一侧转移,见图 5(a)。同时,随着间隙位置偏离中心位置越远(即  $a$  值增加),胶层内部剪切应力分布趋于不平衡,左段胶层内应力水平升高,而右段胶层内应力水平下降,见图 5(b)。

综上所述,间隙长度一定时,处于搭接长度中心位置的间隙对接头应力集中影响最小;反之,间隙偏离搭接中心位置越远则越加剧搭接区域应力集中程度,应力峰值由搭接末端胶瘤内趋于向胶层内靠近间隙一侧转移,这可能导致接头破坏模式的改变。由于篇幅有限,对于分段间隙对接头应力分布和强度的影响将会另作阐述。



(a) 胶层界面上轴向应力



(b) 胶层中央剪切应力

图5 间隙位置对胶层界面上轴向应力和胶层中央剪切应力分布的影响

Fig.5 Influence of recess position on axial stress and shear stress distribution

## 4 结论

(1) 与连续接头应力分布规律相比,间隙连接接头搭接区域应力峰值仍然发生在搭接末端(胶瘤内),胶瘤承载作用加强;在间隙位置适当条件下连接接头在较大间隙长度范围内并没有大幅度地降低其承载能力,相反,其有效搭接区域剪切强度呈明显升高趋势。

(2) 实验结果和数值模拟表明,设计合理的间隙连接有利于实际承载能力(强度)的提高,并可以作为一种高质、轻结构质量、低费用的连接方式加以应用。

(3) 间隙长度过大以及间隙位置过于偏离搭接

中心位置均会导致胶层靠近间隙端应力集中明显加剧,成为新的高应力区,并可能导致接头破坏模式的改变。

### 参考文献

- 1 Olia M, Rossetto J N. Analysis of adhesively bonded joints with gaps subjected to bending. *Int. J. Solids Struct*, 1996; 33 (18): 2 681 ~ 2 693
- 2 Lang T P, Mallick P K. The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single - lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1999; 19: 257 ~ 271
- 3 郭忠信. 铝合金结构胶接. 国防工业出版社, 1993

4 郑小玲, 娜日松, 游敏等. 胶瘤对单搭接胶接头强度的影响. *三峡大学学报*, 2001; (6): 530 ~ 532

5 游敏. 金属 - 胶层复合材料接头性能及基础研究. 华中科技大学博士学位论文, 2002

6 Gonçalves J P M, De Moura M F S F, De Castro P M S T. A three - dimensional finite element model for stress analysis of adhesively joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002; 22: 357 ~ 365

7 Lang T P, Mallick P K. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1998; 18: 167 ~ 177

(上接第 34 页)

和陶瓷颗粒的膨胀量与基体塑性变形量之和。压应力对膨胀产生的阻碍作用引起的膨胀量的减小可能远小于其所引起的基体塑性变形量,因而最终导致了此阶段复合材料变形量的增加,从而使线膨胀系数增加。关于这一解释,可以从图 3 中当温度高于 200 时复合材料线膨胀系数随温度变化的斜率变大现象得到验证。所以在高温加热区时应力对膨胀量的改变有较大影响,应力的改变引起了线膨胀系数较大的改变。

### 4 结论

(1)  $\text{SiC}_p/\text{ZL101}$  复合材料的线膨胀系数比 ZL101 合金的线膨胀系数显著降低。

(2) 在 Turner 模型和 Kerner 模型对  $\text{SiC}_p/\text{ZL101}$  复合材料的线膨胀系数计算值中, Turner 模型的计算值与实验值更接近。

(3)  $\text{SiC}_p/\text{ZL101}$  复合材料,在低温加热区时,应力因素对线膨胀系数变化的贡献不明显,在高温加热区时,应力的改变能引起线膨胀系数较明显的改变。

### 参考文献

- 1 Carl Zweben. Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging. *JOM*, 1998; 50(7): 47 ~ 51
- 2 催岩等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用. *材料工程*, 2002; (6): 3 ~ 6
- 3 黄强等. 电子封装材料的研究现状. *材料导报*, 2000; 14(9): 28 ~ 32
- 4 张建云等. 陶瓷粒子增强铝基复合材料制取新工艺及其磨损性能. *机械工程材料*, 1996; 20(4): 26 ~ 28
- 5 Sharma S C. Effect of albite particles on the coefficient of thermal expansion behavior of the Al6061 alloy composites. *Metallurgical and materials transactions*, 2000; 31A(3): 773 ~ 780
- 6 张国定等. 金属基复合材料. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 13
- 7 刘鸿文. 材料力学. 北京: 人民教育出版社, 1979: 43
- 8 Geiger A L, Jackson M. Low expansion MMCs boost avionics. *Advanced Materials Processes*, 1989; (7): 23 ~ 30
- 9 Vaidya R U, Chairla K K. Thermal expansion of metal matrix composites. *Composites Science and Technology*, 1994; 50 (1): 13 ~ 22