

受剪载荷下 C/SiC 铆接接头应力 数值模拟与实验验证

张青, 刘永胜, 门静, 汪清, 成来飞, 张立同

(西北工业大学 超高温结构复合材料重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 通过建立有限元模型研究 C/SiC 铆接接头剪切应力分布及接头剪切破坏形式, 并采用实验的方法对模型的准确性进行验证。计算结果表明: 按本研究方案尺寸设计的 C/SiC 铆接接头受剪切载荷时, 应力分布合理, 以铆钉被剪断的方式破坏。实验验证中所有接头以铆钉被剪断的形式破坏, 断口出现在连接板内侧, 与计算结果一致, 说明本研究所建立的计算分析 C/SiC 铆接接头的破坏形式的模型是合理的。

关键词: C/SiC; 铆接; 剪切载荷; 数值模拟; 实验验证

中图分类号: TB332; TQ174.758.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)02-0327-04

C/SiC 复合材料具有优异的力学与热物理化学性能, 在航空、航天、兵器、核能等领域具有广泛的应用前景^[1,2]。由于复合材料的“材料—工艺—结构”一体化特性, 复合材料和构件的制造往往是同时进行的, 对于复杂构件, 必需用到各种连接技术, 因此需要解决复合材料及其构件的连接组装问题。对于陶瓷材料的连接方法, 国内外已经有了较为深入的研究, 但关于纤维增韧陶瓷基复合材料 (fiber reinforced ceramic matrix composite, FRCMC) 的连接方法研究不多, 碳纤维增韧碳化硅基复合材料 (C/SiC) 的连接研究仍处于起步阶段^[3-11]。

复合材料的连接方法主要为粘接^[5,6]、机械连接^[12]和焊接^[13]。西北工业大学利用化学气相渗透工艺 (chemical vapor infiltration, CVI) 的优势, 发展了 C/SiC 复合材料铆接技术^[14,15], 有效地解决了陶瓷基复合材料与金属材料的热膨胀不匹配以及金属材料耐温较低等问题, 实现了 C/SiC 复合材料的在线组装和连接。

前期对 C/SiC 铆接接头受拉伸载荷时的应力集中和破坏形式进行了模拟和试验验证^[16]。除了拉伸载荷, 剪切载荷也是 C/SiC 铆接接头经常遇到的载荷形式之一。C/SiC 铆接接头在受剪切载荷时, 有 5 种破坏形式: 复合材料铆钉被剪断; 复合材料连接板发生拉伸破坏; 复合材料连接板被压坏, 发生铆钉拉脱破坏; 连接板发生剪切破坏; 连接板发生劈裂破坏。这

些不同的破坏方式对应不同的几何结构设计接头的薄弱环节, 例如铆钉直径过小将使复合材料铆钉被剪断; 复合材料板的宽度和厚度不满足使用条件将使被连接板发生拉伸破坏; 复合材料板的厚度太小将使复合材料板被压坏等^[12,17]。而这些几何参数相互制约, 关系复杂, 因此需要计算分析铆接接头的破坏形式, 为接头的几何结构设计提供一定的理论依据。

本研究首先建立有限元计算模型, 模拟计算分析接头受剪时的应力分布情况, 然后确定复合材料铆接接头的破坏形式, 最后采用实验对模型和模拟结果的正确性进行验证。

1 受剪载荷的铆接接头破坏形式的数值分析

1.1 有限元模型建立

连接板的尺寸为: 100 mm×30 mm×3 mm, 中心距离边 15 mm 处开 $\Phi 3.4$ mm 孔, 铆钉尺寸为 $\Phi 3.4$ mm×8 mm。采用 ANSYS 软件对铆接接头受剪载荷的应力分布进行模拟分析。由于铆接接头及载荷的对称性, 取接头的 1/4 对称面为研究对象。图 1 给出了铆接接头的有限元几何分析模型, 节点总数为 355, 单元总数为 913, 采用 4 节点等参单元, 采用经典的双线性随动强化模型进行计算。由试件的载荷示意图可知, 通过对连接板施加 X 方向的水平拉应力, 使铆接接头的中截面受纯剪切应力。因此, 连接板的 ABEG 面、HFCD

收稿日期: 2013-04-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51002120)

作者简介: 张青, 女, 1979 年生, 博士, 讲师, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88494622, E-mail: zhangqing@nwpu.edu.cn

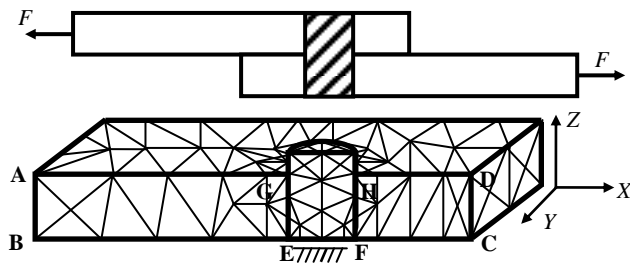


图 1 受剪载荷铆接接头应力分析有限元模型

Fig.1 FEM model of stress distribution in the joints under shear load

面和铆接接头的 GEFH 面在 Y 和 Z 方向没有位移，而线段 EF 在 X 方向不能移动。

1.2 破坏形式分析

由于复合材料固有的非均质性，比较薄弱的单层破坏总是使多向复合材料层板极限破坏提早发生^[18]，结构中应力集中是裂纹产生和扩展的根源，因此通过计算分析应力集中可以确定结构最初的破坏点。

在前期的实验研究中发现，当剪切载荷达到 1200 N 时，C/SiC 铆接接头开始发生破坏。因此，本研究对 C/SiC 铆接接头受 1200 N 剪切载荷时的应力分布情况及破坏形式进行研究。图 2 给出了铆接接头在受 1200 N 剪切载荷时，接头中 X 方向应力云图。由图可知，接头中的最大拉应力出现在与载荷垂直的复合材料板的铆钉孔内侧，其值为 231 MPa，由于应力集中将导致裂纹产生和扩展，这里可能是铆接接头发生拉伸破坏的起点；最大压应力出现在与载荷平行的复合材料板的铆钉孔内侧，其值为 419 MPa，这里可能是铆接接头连接板发生压破坏的起点。图 3 给出了铆接接头在受 1200 N 剪切载荷时，接头中 XY 方向的剪切应力云图，由图可知，最大剪切应力出现在两块连接

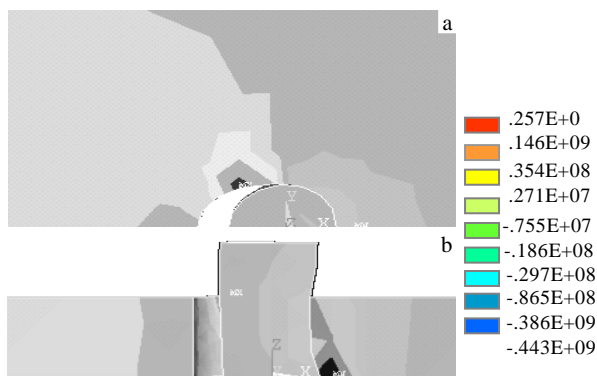


图 2 接头 X 方向应力云图

Fig.2 X-stress distribution in the joints: (a) planform of the model and (b) main view of the model

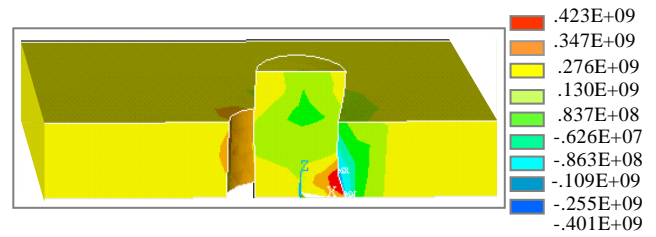


图 3 接头 XY 向剪切应力云图

Fig.3 XY-shear stress in the joints

板相接部位上方的铆钉中，其值为 378 MPa，最大剪切应力没有出现在相接部位，这说明如果铆钉被剪断，起始破坏点并不会出现在连接板接点处。

计算结果表明当铆接接头受剪切载荷时，接头中拉应力、压应力和剪切应力的最大值都分别超过了复合材料的拉伸、压缩和剪切强度值（见表 1）。但是根据复合材料的极限破坏理论^[7]：由于复合材料的非均质性，当外加载荷超过破坏强度后，复合材料还有可能承受更大的载荷。也就是说，接头中应力集中的部位只是复合材料接头最初破坏的部位。而表 1 中的实验值是复合材料破坏时，整个承载面的平均强度，因此必须计算出模型承载面的平均应力值，并将其与复合材料的强度比较才能确定接头的破坏方式。

图 4 中 L1、L2、L3 表示 3 条路径，3 条路径的应力均值可代表模型中 3 个承载面的平均应力值，其中路径 L1 是可能产生拉伸破坏面上的线段，路径 L2 是可能产生压破坏面上的线段，路径 L3 是可能产生剪切破坏面上的线段。通过 ANSYS 软件计算可得到这 3 条路径的应力值，再对路径上的应力进行计算得到其均值，最终将这些应力均值与材料的破坏强度进行比较，若所得的计算均值大于材料的破坏强度，接头就发生该种破坏。图 5 给出了拉应力、压应力和剪切应力分别在路径 1、2、3 上的分布曲线，坐标值沿图 4 中所示路径箭头方向增加。

表 1 复合材料的强度值

Table 1 Strength of the composites		
Tensile strength, σ_t /MPa	Compressive strength, σ_c /MPa	Longitudinal shear strength, τ /MPa
124	409	219

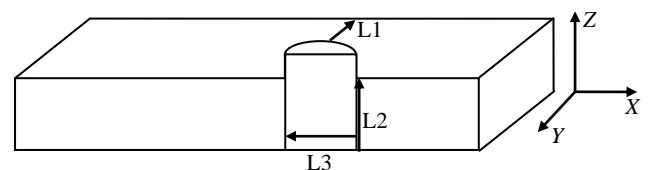


图 4 模型中路径示意图

Fig. 4 Sketch map of the loads in the model

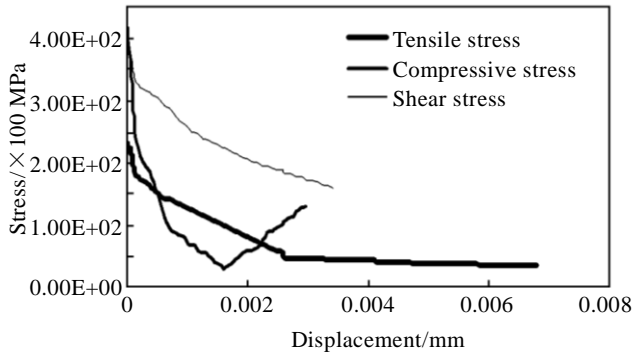


图 5 路径上应力分布曲线

Fig. 5 Stress distribution curve on the loads

路径上的应力均值可以通过下式计算：

$$\sigma_a = \frac{\int_L \sigma dl}{L} \quad (1)$$

利用式 (1) 可计算出 3 条路径上也即是 3 个承载面上的平均应力值，计算结果为路径 1 上的拉应力均值 σ_{ta} 小于材料的拉伸强度，路径 2 上的压应力平均值 σ_{ca} 也小于材料压缩强度，而路径 3 上的剪应力均值 τ_a 大于材料的剪切强度，计算结果表明复合材料的铆接接头的铆钉将发生剪切破坏。

2 受剪载荷的实验验证

2.1 实验过程与方案

(1) 制备带铆钉孔的复合材料板及铆钉：选用 1K 碳布叠层制备尺寸为 120 mm×250 mm 纤维预制体，用平板石墨模具对预制体进行定型。纤维预制体首先沉积热解碳界面层，工艺条件为：沉积温度 850 °C、气氛压力 0.2 kPa、丙烯流量 30 mL/min、Ar 流量 300 mL/min、沉积时间 50 h。然后沉积碳化硅基体，工艺条件为：沉积温度 900 °C、气氛压力 2 kPa、H₂ 流量 200 mL/min、Ar 流量 300 mL/min、MTS 温度 30 °C、H₂ 与 MTS 的摩尔比为 10:1、沉积时间 150 h。将复合材料加工为 100 mm×30 mm×3 mm 的连接板，在距连接板边缘 15 mm 中心处开 $\Phi 3.4$ mm 通孔。铆钉由二维 C/SiC 复合材料在普通车床上加工（铆钉的轴向平行于碳布的纤维方向），加工尺寸为 $\Phi 3.4$ mm×8 mm。

(2) 铆钉填充搭接板。将 2 块连接板反向搭接在一起，并将铆钉铆入连接板的通孔内，组装成搭接板。然后对其沉积 SiC，使之连接紧密，沉积时间为 60 h，工艺条件与复合材料相同。

(3) 力学性能测试。实验在 Instron 1196 万能材料试验机上进行，通过在搭接板上施加拉伸载荷，使铆

钉受到剪切载荷，测试速度为 0.5 mm/min。

(4) 断口显微结构分析。电镜型号为 S-2700。

2.2 实验结果与分析

2.2.1 铆接接头力学性能

表 2 给出了铆接接头的几何尺寸、力学性能和接头的破坏形式，结果表明：所有铆钉都被剪坏，这与计算结果相符合。

2.2.2 铆接接头断口显微结构分析

图 6 为铆接接头受剪切试验破坏后，断口横截面的显微结构图，从图中可以看出铆钉在连接板内侧破坏，铆钉的起裂点出现在连接板接点的内侧，而非接点处，说明应力集中在此处，这与计算结果相吻合。

表 2 受剪载荷铆接接头的力学性能与破坏形式

Table 2 Mechanical properties and failure forms of the joints

Sample($\Phi 3.4$)	E1	E2	E3	E4
Lap width/mm	17.46	17.32	17.12	17.56
Lap length/mm	30.42	29.28	30.30	30.14
Maximum load/kN	1.09	3.37	1.39	2.22
Strength/MPa	120.1	371.2	153.1	244.5
Failure mode	Rivet failure	Rivet failure	Rivet failure	Rivet failure
Average strength/MPa	222.23			

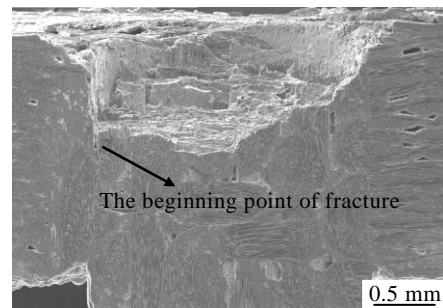


图 6 铆接接头的断口形貌 SEM 照片

Fig.6 SEM image of the riveted joint

3 结 论

1) 采用所建立的有限元模型，计算分析 C/SiC 复合材料铆接接头受剪切载荷时的应力分布是合理的，按该尺寸设计的铆接接头受剪切载荷时，将以铆钉被剪断的方式破坏。

2) 铆接接头在受剪载荷时，所有接头以铆钉被剪断的形式破坏，断口出现在连接板内侧，与计算结果一致，说明本研究所建立的计算分析铆接接头的破坏形式的模型是合理的。

参考文献 References

- [1] Zhang Litong(张立同), Cheng Laifei(成来飞), Xu Yongdong(徐永东). *Aeronautical Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2003(1): 24
- [2] Raman V, Bhatia G, Mishra A *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2005, 412(1-2): 31
- [3] Suo Jun(所俊), Zhang Lingjiang(张凌江), Chen Chaohui(陈朝辉). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(S3): 641
- [4] Wang Xing(王兴), Cheng Laifei(成来飞), Fan Shangwu(范尚武) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(9): 1544
- [5] Nicholas M G, Peteves S D. *Scripta Material*[J], 1994, 31(8): 1091
- [6] Loehman R E. *Key Engineering Material*[J], 1999, 161-163: 657
- [7] Santella M L. *American Ceramic Society Bulletin*[J], 1992, 71(6): 947
- [8] Cawley J D. *American Ceramic Society Bulletin*[J], 1989, 68(9): 1619
- [9] Guo Lingjun(郭领军), Guo Chen(郭琛), Li Hejun(李贺军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2011, 40(1): 111
- [10] Bates C H, Foley M R, Rossi G A. *American Ceramic Society Bulletin*[J], 1990, 69(3): 350
- [11] Ouddane M, Boukhili R. *Journal of Material Science*[J], 1999, 34: 2719
- [12] Dano M L, Gendron G, Picard A. *Composite Structures*[J], 2000, 50(3): 287
- [13] Kang S, Dunn E M. *American Ceramic Society Bulletin*[J], 1989, 68(9): 1608
- [14] Wang Qing(汪清). *Numerical Analysis of Residual Stresses and Fracture Forms in C/SiC Composite Joints(C/SiC 复合材料连接接头应力与破坏形式数值分析)*[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005:1
- [15] Ke Qingqing(柯晴青), Cheng Laifei(成来飞), Tong Qiaoying(童巧英) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2006, 35(9): 1497
- [16] Liu Yongsheng(刘永胜), Hu Chenghao(胡成浩), Wang Qing(汪清) *et al. Acta Materiae Compositae Sinica(复合材料学报)*[J], 2013, 30(3): 205
- [17] Tong L Y, Soutis C. *Recent Advances in Structural Joints and Repairs for Composite Materials*[M]. Germany: Springer, 2003: 212
- [18] Cahn R W, Haasen P, Kramer E J. *Structure and Properties of Composites(复合材料的结构与性能)*[M]. Beijing: Science Press, 1999: 12

Numerical Stimulation and Experimental Validation of Stress in C/SiC Riveted Joints under Shear Load

Zhang Qing, Liu Yongsheng, Men Jing, Wang Qing, Cheng Laifei, Zhang Litong
(Science and Technology on Thermostructural Composite Materials Laboratory,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The stress concentration and fracture form of C/SiC riveted joints under shear load were investigated by using a FEM model and its accuracy was validated by experiments. The calculation results show that the stress concentration in C/SiC riveted joints is reasonable under shear load and the riveted joints in given size will be damaged in shear fracture form. All riveted joints are damaged in shear fracture form in the experimental validation. All of the starting fracture points occur at the inner of junction plates, which demonstrates that the established model for analysis of fracture form of C/SiC rivet is correct.

Key words: C/SiC; riveted joints; shear load; numerical simulation; experimental validation

Corresponding author: Zhang Qing, Ph. D., Lecturer, Science and Technology on Thermostructural Composite Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494622, E-mail: zhangqing@nwpu.edu.cn