

# C/C 复合材料开孔强度研究及典型连接应用

谭志勇, 董威利, 占续军

(空间物理重点实验室, 北京临近空间飞行器系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对 C/C 复合材料热结构的开孔和连接问题进行了相关研究。测试了开孔板的强度性能并分析了点应力准则的适用性, 结果表明直接采用孔边应力来评估开孔和连接强度将明显偏于保守。测试了 C/C 开孔的挤压强度特性, 对不同的影响参数进行了分析。在此基础上完成了典型连接的开孔设计和强度试验。

**关键词:** 复合材料; 开孔性能; 连接

**中图分类号:** TB332/O341 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2017) 03-0039-06

## Strength Research of C/C Composite Material with Opening Hole and Application of Typical Connection

TAN Zhi-yong, DONG Wei-li, ZHAN Xu-jun

(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing Institute of  
Nearspace Vehicle's Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Research on the opening hole and connecting problem of C/C composite material and thermal-structure was conducted. The strength characteristic of plate with opening hole was tested and the applicability of stress criteria focused on particular point was analyzed. Results indicate that it's obviously conservative to evaluate open hole and joint strength by hole-edge stress criteria. Moreover, the extruding strength characteristic of C/C structure with opening hole was tested, and different affecting parameters were analysed. Based on these, design and strength test of typical connection were completed.

**Key words:** Composite material; Opening's character; Connection

### 0 引言

C/C 作为一种新型超高温复合材料, 是目前高超声速飞行器主承力热结构重要备选方案之一, 而复合材料部件之间的连接问题是从材料跨越到工程结构的重要环节。为保证热结构部件的可拆卸性要求, 机械连接是一种不可替代的选择, 而机械连接的基础是获得材料开孔的力学性能。

目前, 针对树脂基材料的开孔和连接性能已有较多研究。谢鸣九<sup>[1]</sup>采用工程化的方法对开孔性

能及连接设计进行了系统论述和总结。王富生等<sup>[2]</sup>对开孔形状、配合间隙对性能的影响进行了研究, 宋祚禹等<sup>[3]</sup>研究了不同开孔形状的连接性能, 王佩艳等<sup>[4]</sup>研究了材料的钉孔挤压强度及其统计分布。这些工作也反映出树脂基复合材料已较为成熟地应用于航空类主承力结构中。但是, C/C 复合材料与树脂基材料在力学性能特点、表征方面均有较大的差异, 对此 Tzeng<sup>[5]</sup>、乔志军<sup>[6]</sup>和康永等<sup>[7]</sup>综述了材料的表现, 韩红梅等<sup>[8]</sup>讨论了高温环境对

收稿日期: 2017-07-04; 修订日期: 2017-07-31

基金项目: 国家自然科学基金 (11572086); 国防重点实验室基金 (61422110205162211002)

作者简介: 谭志勇 (1965-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为复合材料力学、结构力学。E-mail: tanzhy\_01@163.com

性能的影响,但进一步关于C/C材料开孔、连接还少见于研究报道。相关试验表明,C/C材料开孔的应力和应变特点以及机械连接影响因素均不能照搬树脂基复合材料的规律和结论。

针对C/C热结构的开孔连接需求,本文对典型开孔的力学特性进行了研究,通过试验测试了开孔板的常温强度性能,发现材料拉伸强度对开孔不敏感,对试验结果分析了点应力准则的适用性,分析了C/C孔的挤压强度特性。并以理论分析为基础,设计了典型圆轴的开孔连接方式并在常温和高温强度试验中进行了验证。

## 1 C/C开孔板的强度性能测试及点应力准则分析

C/C开孔试验件采用碳布层叠缝合工艺,碳布铺层顺序为 $0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ,缝合间距为4mm,平板纤维含量约45%~48%。试验件宽度为20mm。

对开孔平板进行拉伸试验获得强度性能,开孔直径分别为2mm、4mm、6mm、8mm,材料的开孔拉伸强度采用名义强度计算公式,即:

$$\sigma_{bn} = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{bn}$ 为试件的名义拉伸强度, $P_{\max}$ 为最大破坏载荷, $A_0$ 为包括孔截面的名义截面面积。 $\sigma_{bn}$ 随孔径的变化规律以及典型破坏情况在图1给出,开孔直径为0即为材料的平均拉伸强度值。从试验结果可以看出,试件在开孔直径小于4mm时强度没有明显的降低,表明材料对圆形开孔不敏感。

图2分别给出了2个不开孔试件以及单个6mm开孔试件在开孔面不同位置的应力-应变测试情况。分析可知,不开孔试验件具有较好的一致性,由于C/C拉伸性能主要由纤维控制,表现出明显的线性和脆性特点,破坏应变约为 $1600\mu\epsilon$ 。而开孔试验件在离孔较远的应变略低于无孔状态破坏应变,在孔边具有应力和应变集中,是首先发生破坏的位置。对比图1和图2看出,若直接采用孔边应力来评估开孔和连接强度明显偏于保守,6mm开孔试件的保守量达到1.9倍左右。

针对开孔的应力集中条件下强度可采用点应力准则进行评估,即采用距离开孔位置特定距离的应力状态来评估在拉/压载荷下开孔试件的破坏载荷,它是基于不开孔强度 $\sigma_{b0}$ 和特征尺寸 $d_0$ 的两

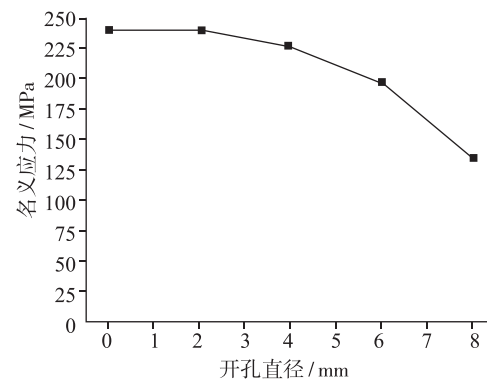
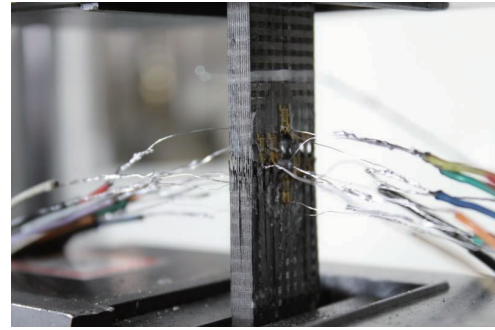


图1 C/C试件的典型破坏以及不同开孔直径的名义强度变化规律

Fig. 1 Typical failure of C/C sample and nominal strength change law for openings of different diameters

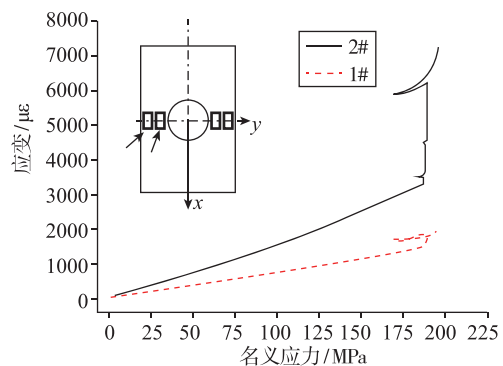
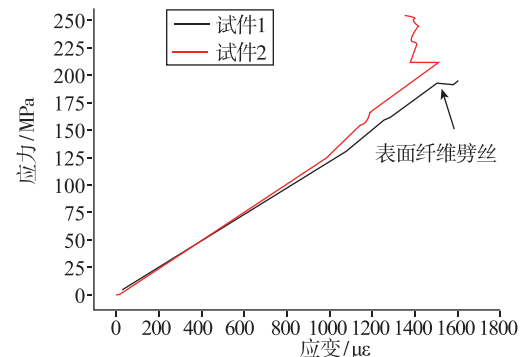


图2 C/C不开孔试件和6mm开孔试件的典型应力-应变曲线

Fig. 2 Typical stress-strain curves of C/C samples without opening and sample with 6mm opening

参数简单模型。Ahmed 等<sup>[9]</sup>给出了点应力准则的理论计算公式, 定义拉伸特征尺寸  $d_0$  为开孔破坏发生时, 板上应力达到不开孔拉伸/压缩强度的点距孔边的距离, 有:

$$\sigma_b(0, R + d_0) = \sigma_{b0} \quad (2)$$

当满足式 (2) 时开孔板发生破坏。针对半无限大开孔平板进行线性条件下的应力分析, 可得到开孔板强度与无孔板强度的比值为:

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{b0}} = \frac{2}{2 + \beta^2 + 3\beta^4 - (K_T^\infty - 3)(5\beta^6 - 7\beta^8)} \quad (3)$$

式中  $\beta = R/(R + d_0)$ ,  $R$  为中央开孔的半径,  $K_T^\infty$  为应力集中系数, 其值可通过式 (4) 计算:

$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{2[\sqrt{E_x/E_y} - \mu_{xy} + E_x/(2G_{xy})]} \quad (4)$$

式中,  $E_x$ 、 $E_y$  为两个方向的杨氏模量,  $G_{xy}$  为面内剪切模量,  $\mu_{xy}$  为泊松比。

$d_0$  是与破坏区域相关的几何量, 一般可用有限元计算及试验得到, 但有限元计算具有某些人为假定因素, 本文由 6mm 开孔试验件拉伸破坏载荷时的应变实测数据获得特征尺寸为 4.0mm。按照无孔拉伸以及  $E_x = E_y = 85\text{GPa}$ 、 $\mu_{xy} = 0.035$ 、 $G_{xy} = 20\text{GPa}$  代入上述公式, 得到开孔板强度与无孔板强度的比值为 0.88, 而试验实际测得两者比值为 0.84。表明点应力准则作为一种简单有效的预测方法在本试验中的适用性较好, 可以得出在  $d_0 \approx R$  具有获得较为吻合且偏安全的结果。由于特征尺寸与材料、开孔尺寸、边界条件等诸多因素有关, 得出的结论一般只适用于特定条件。

## 2 C/C 开孔的挤压强度特性及连接设计

C/C 孔挤压强度采用双剪搭接挤压测试, 将试验件夹持固定后通过搭接板对金属螺栓施加剪切载荷, 使用激光引伸计测量孔的变形。得到典型的载荷变形曲线, 如图 3 所示。图中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  点对应的载荷定义为:  $a$  点为试件首次发出劈裂声响、即发生不可逆初始损伤时刻, 称为挤压初始破坏强度  $\sigma_{jy}^a$ ;  $b$  为曲线的第一次载荷峰值即极限强度点, 此时孔周围已发生严重的损伤, 称为挤压极限强度  $\sigma_{jy}^b$ ;  $c$  为曲线的二次载荷峰值即剩余强度点, 在经过第一个峰值后, 材料进入另一种破坏模式并产生大量的破坏物堆积, 称为挤压剩余强度  $\sigma_{jy}^c$ 。

孔挤压应力按式 (5) 定义计算:

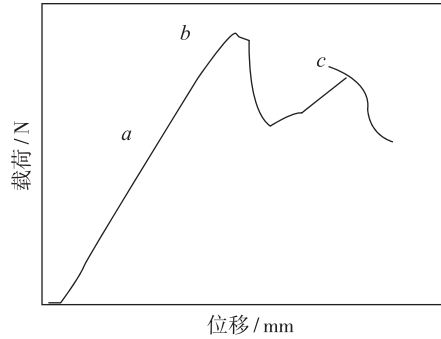
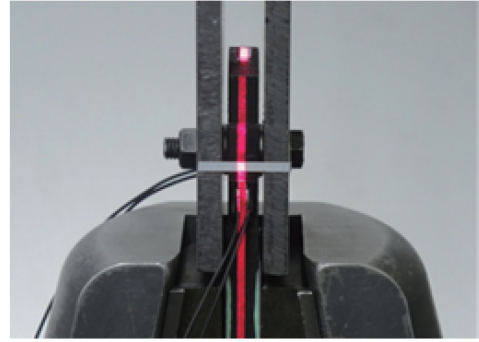


图 3 C/C 孔挤压试件以及获得的典型载荷-变形曲线

Fig. 3 C/C hole extrusion test specimen and the obtained typical load-deformation curve

$$\sigma_{jy}^i = \frac{F_i}{Dt} \quad (i = a, b, c) \quad (5)$$

式中  $F_a$ 、 $F_b$ 、 $F_c$  分别为图 3 的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  点载荷。针对一定板宽的试验件, 可获得不同面内载荷方向、不同开孔直径和不同预紧力等连接参数对挤压强度、破坏模式的影响, 如图 4、图 5 所示。

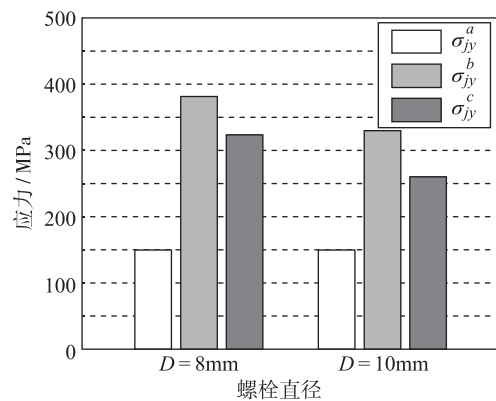


图 4 不同直径螺栓对挤压开孔性能的影响

Fig. 4 Influence of different diameters of bolt on the extrusion properties of opening hole

挤压应力试验结果表明, 开孔直径对  $\sigma_{jy}^a$  影响不大, 均在 150MPa 附近发生初始损伤。8mm 直径的  $\sigma_{jy}^b$  较 10mm 直径的高 16.2%, 低于直径增加 20% 的幅度。这说明 C/C 开孔的初始损伤强度是材料的固有特性, 与具体开孔尺寸  $D$  无关; 而挤压极限强

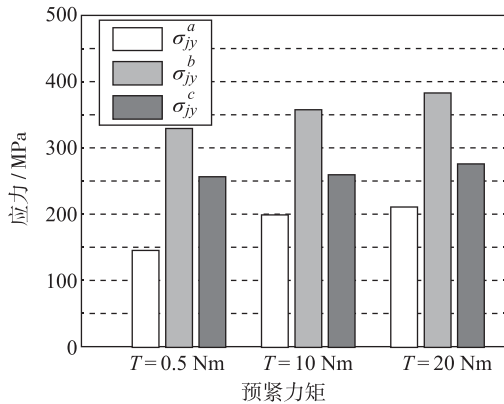


图5 不同螺栓预紧力矩对挤压开孔性能的影响

Fig. 5 Influence of different pretensioning moments of bolt on the extrusion properties of opening hole

度、剩余强度明显受尺寸因素的影响，是连接参数的函数。在剩余强度的  $c$  点，挤压试验件已经产生了严重的孔变形（通常大于 20%），不能作为结构设计条件。

随着螺栓预紧力矩的增加， $\sigma_{jy}^a$  与  $\sigma_{jy}^b$  均有所增加，其中  $\sigma_{jy}^a$  的增加更为显著，但两者增加的趋势均逐渐减小。施加预紧力可有效提高挤压初始破坏强度，因为适当的侧向约束可有效延迟载荷方向纤维受压屈曲。

图 6 给出了 C/C 材料在不同方向铺层工艺下的挤压力学性能对比。表明以  $\pm 45^\circ$  铺层为主的材料开孔挤压刚度、挤压初始破坏强度均大于以  $0^\circ/90^\circ$  铺层为主的材料开孔，这与树脂基复合材料的规律相符。而  $\pm 45^\circ$  铺层的挤压极限强度相对偏小，主要是试验件边距偏小导致试验件产生了净拉伸破坏。

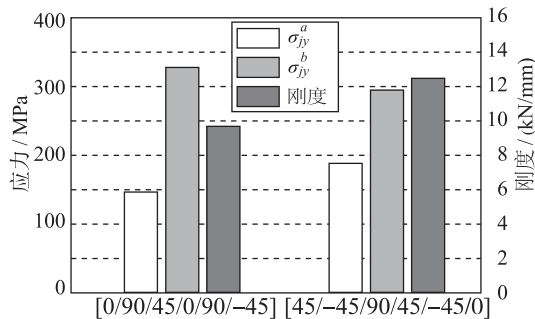


图6 10mm 直径开孔条件下 C/C 材料不同方向铺层的挤压力学性能对比

Fig. 6 Comparison of extrusion mechanical properties of opening hole with 10mm diameter of C/C material layering at different directions

总结 C/C 材料的开孔和孔挤压试验结果得出，对于 C/C 多列开孔连接结构设计，以  $0^\circ/90^\circ$  铺层为主的材料孔间距在 3~4 倍孔径即可，而以  $\pm 45^\circ$  铺

层为主的材料孔间距需要  $\geq 5$  倍孔径，需要具体权衡单孔强、刚度增加与连接个数减少对综合承载能力的影响。

### 3 复合材料典型圆轴的连接开孔应用

圆轴是舵、襟副翼类热结构的关键承载部位，其强度薄弱环节一般都与开孔应力集中以及螺栓连接导致的孔挤压强度有关。在开孔位置附近的应力状态较为复杂，需要考虑的因素众多。为保证足够的载荷传递能力，圆轴会采用双排甚至多排的开孔螺栓连接，这就需要分析孔挤压载荷与旁路载荷的影响，保证各排开孔承载的合理性。建立受剪螺栓连接结构在受载孔附近承受孔挤压与净截面拉伸应力的比值关系，两者的共同作用效果可通过式 (6) 确定：

$$K_{jy}\sigma_{jy} + K_{tc}\sigma_b = \sigma_{b0} \quad (6)$$

式中， $\sigma_{b0}$  为无开孔的材料拉伸强度， $\sigma_{jy}$  为受载孔挤压应力， $\sigma_b$  为由旁路载荷引起的净截面拉伸应力。 $K_{jy}$  为受载孔挤压应力集中减缩系数， $K_{tc}$  为开孔拉伸应力集中减缩系数。按照相关文献<sup>[10-11]</sup>的公式并代入前面 8mm 开孔试验件获得的数据，可以得到单孔在拉伸、挤压联合作用下的破坏包线示意，如图 7 所示。在灰色的 OAB 区域内，连接结构发生挤压破坏；在白色的 OBC 区域内，连接结构发生拉

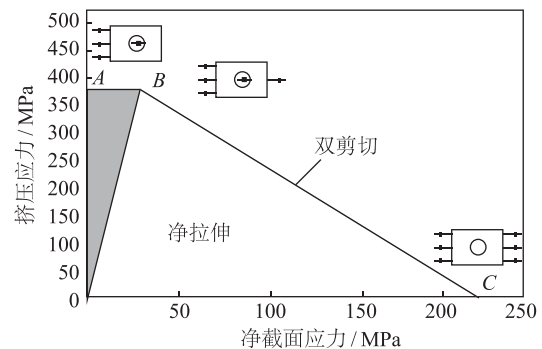


图7 C/C 试验件的双剪开孔连接的破坏包线

Fig. 7 Failure envelope of double shear opening hole joint of C/C test specimen

伸破坏，以此作为 C/C 典型圆轴在弯、扭联合载荷下连接强度设计的基础。

从图 7 看出这类开孔更应关注拉伸破坏模式的影响。具体结构设计中应综合考虑开孔形状、大小尺寸、间距，以及连接螺栓刚度、预紧力矩和间隙要求等因素。不仅要实现常温条件下的优化，还需要考虑高温热膨胀和导致的附加热应力影响。

通常情况下,增加圆轴开孔直径与降低螺栓刚度的要求是矛盾的,这可以通过开槽或空心的方法来削弱大直径金属螺栓的刚度、实现多排螺栓的刚度匹配,使得孔挤压载荷与旁路载荷具有合理的分配。此外,适度改变开孔形状可以减小特定载荷下的应力集中,这可以通过螺栓衬套的方式

实现。

设计得到典型圆轴的开孔连接之后进行了常温、高温试验,如图8所示。圆轴承受弯、扭矩复合载荷,弯扭矩比例约为1:2,高温为800℃以上的稳态条件。常温、高温试验结果表明圆轴破坏均未发生在开孔位置,从而验证了设计的正确性。



图8 复合材料典型圆轴的开孔连接以及常温、高温承载试验

Fig. 8 Opening hole joint and high and normal temperature bearing test of typical circular shaft

#### 4 结论

C/C复合材料的开孔强度、孔挤压强度规律是这类热结构采用螺栓机械连接设计和分析的重要基础。本文通过典型试验件获得了具体的应力集中敏感系数以及采用点应力准则的特征尺寸。试验表明孔挤压初始损伤强度可以表征为材料的固有特性,而挤压极限强度、剩余强度则是与连接参数有关的结构特性,这与以往的树脂基复合材料有着明显的区别。以此为基础,本文进行了典型复合材料圆轴的开孔连接设计和试验考核验证。

后续相关工作将进行高温环境下典型试验件的开孔力学特性研究,探讨热应力与外载荷应力的耦合特性以及热匹配特性,而高温条件下的试验数据的获取是需要解决的难点。

#### 参考文献

- [1] 谢鸣九. 复合材料连接 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [2] 王富生, 刘洋, 岳珠峰. 复合材料层合板连接件力学性能影响因素分析 [J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28 (1): 58-61.
- [3] 宋祚禹, 王西昌, 曹正华, 等. 碳纤维/聚酰亚胺树脂基复合材料开孔件的连接力学性能 [J]. 航空制造技术, 2009 (S1): 139-140.

- [4] 王佩艳, 朱振涛, 王富生, 岳珠峰. 复合材料螺栓连接性能的分散性和可靠性分析 [J]. 力学季刊, 2008, 29 (4): 573-577.
- [5] Tzeng S S, Lin W C. Mechanical behavior of two-dimensional carbon/carbon composites with interfacial carbon layers [J]. Carbon, 1999, 37 (12): 2011-2019.
- [6] 乔志军. 碳/碳复合材料力学性能的研究进展 [J]. 天津化工, 2011, 25 (3): 1-7.
- [7] 康永, 柴秀娟. 碳/碳复合材料的性能和应用进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2010, 39 (3): 38-48.
- [8] 韩红梅, 李贺军, 李克智, 等. 高温对碳/碳复合材料性能影响的研究 [J]. 西北工业大学学报, 2003, 21 (3): 352-355.
- [9] Ahmed K S, Vijayarangan S, Naidu A C B. Elastic properties, notched strength and fracture criterion in untreated woven jute-glass fabric reinforced polyester hybrid composites [J]. Materials & Design, 2007, 28 (8): 2287-2294.
- [10] Hart-Smith L J. Adhesively bonded joints for fibrous composite structures [M] // Recent Advances in Structural Joints and Repairs for Composite Materials, Springer Netherlands, 2003: 173-210.
- [11] Hart-Smith L J. Bolted joints in graphite/epoxy composites [R]. Technical Report NASA CR-144899, National Aeronautics and Space Administration, USA, 1977.