

Z-pins 参数对复合材料层间韧性的影响

刘 韡¹, 陈豪文¹, 张为民¹, 矫桂琼²

(1. 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘要: Z-pins 植入平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料层压板能提高层间 I 型断裂韧性. 作为一种一体化设计的新型材料, Z-pin 增强陶瓷基复合材料具有重要的应用前景. 研究 Z-pins 增强陶瓷基复合材料的层间断裂韧性对于指导材料的设计与应用具有十分重要的理论意义和实用价值. 基于离散弹簧-悬臂梁模型研究了 Z-pins 直径、Z-pins 间距、单位厘米宽度上 Z-pins 个数对平纹编织陶瓷基复合材料 I 层间断裂韧性的影响. 结果表明: 增加 Z-pins 直径、减小 Z-pins 间距和增加单位厘米宽度上 Z-pins 个数可以提高 Z-pins 增强平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料 I 型层间断裂韧性.

关键词: Z-pins; 陶瓷基复合材料; 层间断裂韧性

中图分类号: TB321

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)06-0894-04

陶瓷基复合材料 (CMC) 既保留了单纯陶瓷材料低密度、高刚度、耐高温的优良性能, 又克服单纯陶瓷材料脆性大、抗损伤能力差的缺点, 已成为空天飞行器的热防护系统 (TPS) 和热结构的理想材料. 平纹编织陶瓷基复合材料层压板或层压壳结构, 如航天飞机机翼, 既起着防热作用又承担着较高的飞行载荷. 层间强度低、抗冲击性能差、易分层, 限制了陶瓷基复合材料层压板在热承力结构中的应用. 为提高层压结构层间强度、抗冲击性能, 国内外学者提出采用 Z-pins 技术对层压结构进行增强, 并取得明显效果. Partridge 等人研究发现 Z-pins 增强 IMS/924 复合材料层压板的 I 型和 II 型能量释放率随着 Z-pins 面积密度的增加而增加^[1]. Z-pins 增强碳/环氧复合材料层压板, Z-pins 植入能提高高层压板的层间 I 型和 II 型断裂韧性. 随 Z-pins 的体分比增加, 层间 I 型和 II 型断裂韧性的数值按线性增大. Z-pins 体分比每增加 0.5%, 层间 I 型断裂韧性的数值提高 2 倍^[2]. 张翔等人对厚度为 2, 4, 6 mm 碳/环氧 T300/914C 试样的试验研究发现, Z-pins 增强试样的冲击损伤较未 Z-pins 增强试样小, Z-pins 增强试样减少的冲击损伤面积高达 64%; Z-pins 能显著提高冲击后压缩强度, Z-pins 增强试样的冲击后压缩强度较未增强试样提高了约 45%. 提高飞机结构设计应变极限约 50%^[3]. Z-pin 增强树脂基复合材料层合板的研究相对较多, 而对于 Z-pins 增强陶瓷基复合材料层压板方面的报道很少. 陶永强等对 Z-pins 增强陶瓷基复合材料单搭接接头的裂纹尖端能量释放率进行了数值模拟, 研究发现形成桥连的 Z-pins 具有一定抑制开裂的能力, Z-pins 直径对于裂纹尖端能量释放率的影响较大, 而 Z-pins 间距对于裂纹尖端能量释放率也有影响, 但当间距小到某一限度时, 再减小间距裂纹尖端能量释放率基本保持不变^[4]. 另外, 陶永强等还研究了搭接长度对 Z-pins 增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响, 结果表明: 搭接长度大于、等于 20 mm 的接头由搭接板断裂而失效; 搭接长度等于 15 mm 的接头由搭接面的脱胶而失效. 在搭接长度为 20~60 mm 之间, 接头的最大破坏载荷与搭接长度之间呈线性关系变化^[5]. 刘韡^[6-7]等通过双悬臂梁对称弯曲实验和三点弯曲实验研究了 Z-pins 增强陶瓷基复合材料 I 型应变能释放率和 I+II 混合型层间断裂韧性, 采用离散弹簧-悬臂梁模型^[8]预测了 Z-pins 增强陶瓷基复合材料 I 型层间断裂韧性. 作为一种新的层间增强概念, Z-pins 增强陶瓷基复合材料具有重要的应用前景.

本文基于离散弹簧-悬臂梁模型, 采用数值分析方法, 研究了 Z-pins 直径、Z-pins 间距、单位厘米宽度上 Z-pins 个数对平纹编织陶瓷基复合材料 I 层间断裂韧性的影响.

1 离散弹簧-悬臂梁模型

Z-pins 增强平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料双悬臂梁试件对称弯曲, 可看作为上、下两个悬臂梁, 且所受载荷、材料性能和几何尺寸完全相同. 因此, 可取其中一个悬臂梁进行分析, 桥连层间裂纹的 Z-pins 可以视为一系列离散弹簧, 建立离散弹簧-悬臂梁模型, 悬臂梁任一点的位移为双悬臂梁试件该点张开位移的一半. Z-pins 植入产生的裂纹闭合力即为弹簧的弹性力

$$F_i = w_i k_i = (w_i/2)(2k_i)$$

其中: F_i 和 k_i 为第 i 排弹簧的弹性力和刚度, Z-pins 的刚度 k_i 采用双线性软化损伤模型来模拟, w_i 为双悬臂梁试件在该处的张开位移。

假设桥连层间裂纹的 Z-pins 排数为 n , 悬臂梁受载荷 P 和离散弹簧作用, 加载点到层间裂纹尖端的距离为 a , 第 i 排弹簧到层间裂纹尖端的距离为 a_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)。悬臂梁的示意图和受力图如图 1 所示。由能量法求得, 双悬臂梁在第 1、2、3、 \dots 、 $n-1$ 和 n 排 Z-pins 处的层间张开位移 w_1 、 w_2 、 w_3 、 \dots 、 w_{n-1} 和 w_n 分别为

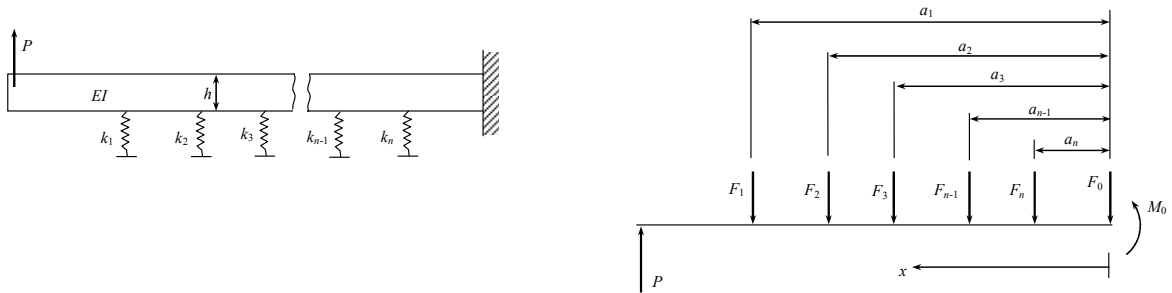


图 1 n 排 Z-pins 桥连 DCB 试件的模型及其受力示意图。

Fig. 1 Model of DCB specimen arms bridged by n rows of Z-pins and its force diagram.

$$\begin{cases} w_1 = [Pa_1^2(3a - a_1) + w_2 k_2 a_2^2(a_2 - 3a_1) + w_3 k_3 a_3^2(a_3 - 3a_1) + \dots + w_n k_n a_n^2(a_n - 3a_1)] / (3EI + 2k_1 a_1^3) \\ w_2 = [Pa_2^2(3a - a_2) + w_1 k_1 a_1^2(a_2 - 3a_1) + w_3 k_3 a_3^2(a_3 - 3a_2) + \dots + w_n k_n a_n^2(a_n - 3a_2)] / (3EI + 2k_2 a_2^3) \\ \dots \\ w_n = [Pa_n^2(3a - a_n) + w_1 k_1 a_1^2(a_n - 3a_1) + w_2 k_2 a_2^2(a_n - 3a_2) + \dots + w_{n-1} k_{n-1} a_{n-1}^2(a_n - 3a_{n-1})] / (3EI + 2k_n a_n^3) \end{cases} \quad (1)$$

联解这些位移, 得到 n 排 Z-pins 桥连层间裂纹的 DCB 试件在每一排 Z-pins 处的位移。DCB 试件的柔度

$$C_n = \delta_n / P = (2a^3 / 3EI) + (1/3PEI) \sum_{i=1}^n k_i w_i a_i^2 (a_i - 3a) \quad (2)$$

预测得到的加载点位移、载荷 P 和相应的层间裂纹扩展长度 a 按照柔度方法

$$G_{IC} = mP\delta / 2Ba \quad (3)$$

来计算实际试件的层间 I 型临界应变能释放率。其中, B 为试件的宽度, C 为柔度, 均取系数 $m = 3$ 。

2 Z-pins 直径 d 对韧性的影响

图 2(a) 是初始层间裂纹长度 $a_0 = 50$ mm, 单位厘米宽度上 Z-pins 个数 $j = 1$, Z-pins 间距 $s = 5.0$ mm 的三种不同直径 $d = 0.6$ mm, $d = 0.4$ mm, $d = 0.3$ mm, Z-pins 增强平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料层压板 DCB 试件的载荷-位移预测曲线。由于初始裂纹长度相同, 平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料层压板的 I 型层间临界应变能释放率一样, 因而三种不同 Z-pins 直径的试件在裂纹未扩展之前的载荷-位移曲线是相同的, 即载荷-位移曲线在第一拐点之前相同。在层间裂纹扩展的初始阶段, 各 DCB 试件的载荷-位移曲线基本相同, 这主要是因为 Z-pins 桥连区域的大小和 Z-pins 的个数相同, Z-pins 产生的层间闭合力基本相同。随着层间裂纹的扩展, Z-pins 直径最小的 DCB 试件, 裂纹扩展首先达到稳定阶段, Z-pins 桥连区域的大小和 Z-pins 的个数基本保持不变, 载荷开始下降, 而 Z-pins 直径较大的 DCB 试件尚未到达稳定阶段, Z-pins 桥连区域的大小和 Z-pins 的个数继续增加, 因而, 加载点位移和载荷继续增大, Z-pins 直径 $d = 0.6$ mm 的 DCB 试件, Z-pins 拔出时的载荷和位移最大。

图 2(b) 是这三种不同 Z-pins 直径增强平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料层压板 DCB 试件的 R-曲线。从图中可以看出: I 型层间临界应变能释放率随着 Z-pins 直径的增加而变大, 但对于 Z-pins 直径 $d = 0.6$ mm 和 $d = 0.4$ mm 的 DCB 试件, I 型层间临界应变能释放率的变化幅度相对较小。这说明 Z-pins 直径 d 的增加能够提高 Z-pins 增强平纹编织 C/SiC 陶瓷基复合材料层压板的 I 型层间断裂韧性。

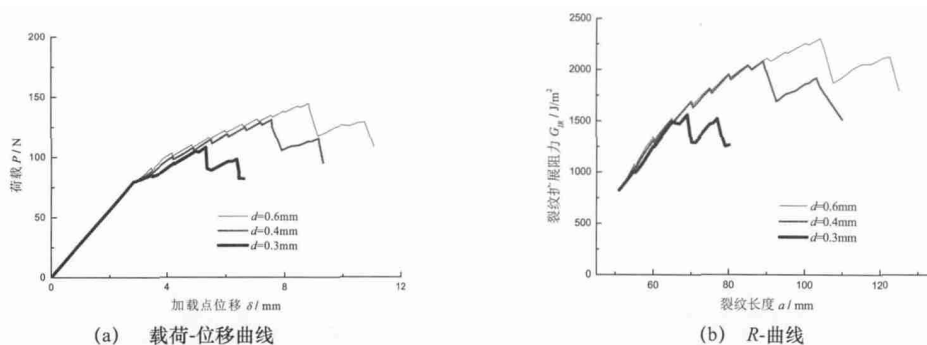


图2 不同Z-pins直径 d 的DCB试样的载荷-位移曲线和R-曲线
Fig. 2 Load-displacement and R curves of different diameter d of Z-pins in DCB specimen

3 Z-pins间距 s 对韧性的影响

图3(a)是初始层间裂纹长度 $a_0 = 50\text{mm}$,单位厘米宽度上Z-pins个数 $j=1$,Z-pins直径 $d=0.3\text{mm}$ 的三种不同间距 $s=5.0\text{mm}$, $s=3.5\text{mm}$, $s=3.0\text{mm}$,Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板DCB试件的载荷-位移预测曲线.从图中可以看出:三种不同Z-pins间距的试件在裂纹未扩展之前的载荷-位移曲线是相同的,即载荷-位移曲线在第一拐点之前相同.这是由于初始裂纹长度相同,平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间临界应变能释放率一样的缘故.随着Z-pins间距的减小,DCB试件承受的最大载荷增大,这主要是因为Z-pins桥连区域的大小和Z-pins的个数增大,Z-pins产生的层间闭合力增大;在Z-pins拔出时,间距 $s=3.5\text{mm}$, $s=3.0\text{mm}$ 的DCB试件下降幅度较小,这是后续Z-pins及时补充保持Z-pins桥连区域Z-pins的个数基本不变的结果.因而,采用Z-pins方法提高复合材料I型层间断裂韧性时,建议设计较小的Z-pins间距,避免出现载荷大起大落的现象.图3(b)是这三种不同间距Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板DCB试件的R-曲线.

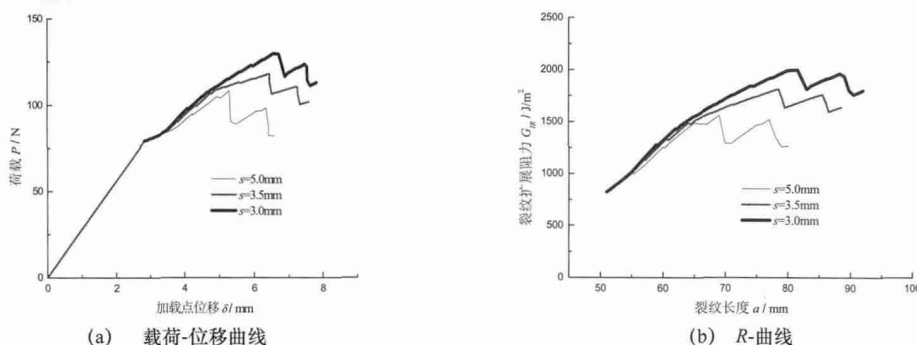


图3 不同Z-pins间距 s 的DCB试样的载荷-位移曲线和R-曲线
Fig. 3 Load-displacement and R curves of different spacing of Z-pins in DCB specimen

从图中可以看出:I型层间临界应变能释放率随着Z-pins间距的减小而变大,但对于Z-pins间距 $s=3.0\text{mm}$ 和 $s=3.5\text{mm}$ 的DCB试件,I型层间临界应变能释放率的变化幅度相对较小.减小Z-pins间距可以提高Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间断裂韧性.

4 Z-pins个数 j 对韧性的影响

图4(a)是初始层间裂纹长度 $a_0 = 50\text{mm}$,Z-pins直径 $d=0.3\text{mm}$,间距 $s=5.0\text{mm}$,单位厘米宽度上Z-pins个数 $j=1$ 和 $j=2$ 的Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板DCB试件的载荷-位移模拟曲线.由于初始裂纹长度相同,平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间临界应变能释放率一样,因而两种试件在裂纹未扩展之前的载荷-位移曲线是相同的,即载荷-位移曲线在第一拐点之前相同.随着单位厘米宽度上Z-pins个数的增加,DCB试件进入稳定扩展阶段的载荷增大, $j=2$ 时的最大载荷是 $j=1$ 的1.3倍.这主要也是Z-pins桥连区域的大小和Z-pins的个数增大,Z-pins产生的层间闭合力增大的缘故.

图4(b)是 $j=1$ 和 $j=2$ 时Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板DCB试件的R-曲线.该曲线表明:I型层间临界应变能释放率随着单位厘米宽度上Z-pins个数 j 的增加而增大,增加单位厘米宽度上Z-pins个数 j 可以提高Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间断裂韧性.

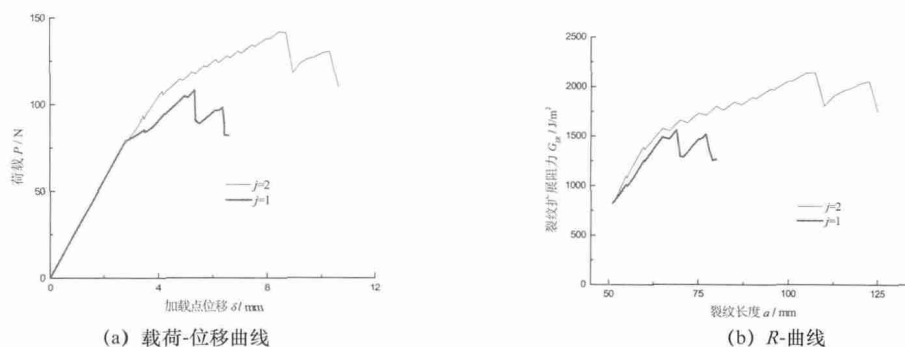
图4 不同Z-pins个数 j 的DCB试样的载荷-位移曲线和R-曲线

Fig. 4 Load-displacement and R curves of different number of Z-pins per cm width in DCB specimen.

5 结论

基于层间裂纹扩展离散弹簧-悬臂梁预测模型, 预测了Z-pins参数对平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板I型层间开裂载荷-位移曲线的影响, 采用柔度法计算裂纹扩展力得到R-曲线. 研究表明:

(1) 增加Z-pins直径 d 可以提高Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间断裂韧性; (2) 减小Z-pins间距 s 可以提高Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间断裂韧性; (3) 增加单位厘米宽度上Z-pins个数 j 可以提高Z-pins增强平纹编织C/SiC陶瓷基复合材料层压板的I型层间断裂韧性.

参考文献 References

- [1] PARTRIDGE Ivana K., CARTIÉ Denis D.R. Delamination resistant laminates by Z-Fiber pinning: Part I manufacture and fracture performance[J]. Composites: Part A applied science and manufacturing, 2005, 36: 55-64.
- [2] MOURITZ A.P. Review of Z-pinned composite laminates[J]. Composites: Part A, 2007, 38: 2383-2397.
- [3] ZHANG X, HOUNSLOW L, GRASSI M. Improvement of low-velocity impact and compression after impact performance by z-fibre pinning [J]. Composites Science and Technology, 2006(66): 2785-2794.
- [4] 陶永强, 矫桂琼. Z-pins 增强陶瓷基复合材料单搭接接头的裂纹尖端能量释放率[J]. 应用力学学报, 2008, 25(2): 347-350. TAO Yongqiang, JIAO Guiqiong. Strain Energy Release Rate of Z-pins Reinforced Ceramic Matrix Composite Single Lap Joint at Crack Tips [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(2): 347-350.
- [5] 陶永强, 矫桂琼, 王波, 等. 搭接长度对Z-pins 增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(4): 593-598. TAO Yongqiang, JIAO Guiqiong, WANG Bo, et al. Effect of the Overlap Length on the Connecting Performance of the Single-lap Joint Reinforced by Z-pins [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2008, 26(4): 593-598.
- [6] 刘韡, 矫桂琼. Z-pins 增强陶瓷基复合材料I型应变能释放率[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(3): 381-384. LIU Wei, JIAO Guiqiong. Mode I Strain Energy Release Rate of Z-pin Reinforced CMC laminate [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2009, 27(3): 381-384.
- [7] 刘韡, 矫桂琼, 张为民. Z-pins 增强CMC层间I+II混合型断裂韧性[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(3): 357-360. LIU Wei, JIAO Guiqiong, ZHANG Weimin. Mixed Mode I+II Interlaminar Fracture Toughness for Z-pins Reinforced CMC [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2012, 30(3): 357-360.
- [8] 刘韡, 矫桂琼. Z-pins 增强C/SiC复合材料层间I型断裂韧性[J]. 固体力学学报, 2013, 34(5): 466-472. LIU Wei, JIAO Guiqiong. Mode I interlaminar fracture toughness for Z-pins reinforced C/SiC composites [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34(5): 466-472.

Effect of Z-pins on mode I interlaminar toughness of composites

LIU Wei¹, CHEN Haowen¹, ZHANG Weimin¹, JIAO Guiqiong²

(1. School of Science, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Mechanics and Civil Construction, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Interlaminar fracture toughness of mode I is improved by Z-pins insertion into woven C/SiC ceramic matrix composites. As integratedly designed new materials, Z-pins reinforced ceramic matrix composites (CMCs) have wide application. The researches in interlaminar fracture toughness of Z-pins reinforced CMCs is very important both theoretically and practically for guiding the design and application of materials. Based on discrete spring-cantilever beam model, the effect of the diameter and the spacing of Z-pins and the number of Z-pins per cm width on mode I delamination fracture toughness were investigated. Conclusions are shown as following: Increasing diameters of Z-pins, and reducing spacing of Z-pins and increasing the number of Z-pins per cm width can improve mode I delamination fracture toughness of woven C/SiC ceramic matrix composites.

Key words: Z-pins; ceramic matrix composites (CMC); interlaminar fracture toughness

(本文编辑 吴海西)