

Z-pins对 2D 编织陶瓷基复合材料搭接接头连接性能的影响

陶永强, 矫桂琼, 王波, 常岩军

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129)

摘要: 对 Z-pins 增强 2-D 编织陶瓷基复合材料搭接接头在单向载荷作用下的连接性能进行了试验研究。试验结果表明 Z-pins 的加入能够改善 2-D 编织陶瓷基复合材料搭接接头的连接性能, 反映在载荷-位移曲线的后半段, 载荷变化出现了波动不大的起伏区域。产生此区域的原因为 Z-pins 从搭接接头拔出的过程中, 与复合材料形成桥联, 消耗了部分本该作用在开裂尖端的能量。利用有限元的方法模拟了有、无 Z-pins Z-pins 在不同直径和间距下搭接接头的失效过程, 并与试验结果相比较, 吻合较好。

关键词: 陶瓷基复合材料; 搭接接头; Z-pins 直径; 间距

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)06-0096-06

2D 编织陶瓷基复合材料具有优良性能, 如高的比刚度、比强度, 耐高温, 耐腐蚀等。2D 编织陶瓷基复合材料已经广泛应用于航空、航天等领域中, 如空天飞行器的热防护系统和热结构中^[1]。但是, 2D 编织陶瓷基复合材料也存在本身所固有的弱点: 厚度方向的性能较差, 容易发生分层。特别是 2D 编织陶瓷基复合材料在实际使用中不仅仅要满足简单结构的要求, 而且也要满足复杂结构的要求。在复杂结构中, 搭接是比较常见的结构形式, 汪清, 成来飞等^[2]研究表明 2D 编织陶瓷基复合材料搭接接头的搭界面两端存在严重的应力集中现象, 所以搭接接头更容易发生分层失效。为了提高搭接接头抑制分层能力, 研究人员提出了很多方法, 如胶接法、机械连接、在线液相渗透连接、复合材料铆钉法、Z-pins 法^[3-6]。

胶接法是通过高温将硅等胶接剂熔解于连接处, 使得陶瓷基复合材料得以连接, 胶接法主要缺点是接头的厚度方向性能很差, 特别是抗剥离性能很低。机械连接是靠机械紧固件如螺栓、螺母等对复合材料进行连接, 这在很大程度上增加了成本, 而且

紧固件的尺寸一般比较大, 因而对复合材料面内性能损伤也较大, 同时紧固件也会改变搭接接头的表面形状。在线液相渗透法是将熔融状态的钛渗透进入复合材料孔隙中的连接方法, 但是它大大的增加了陶瓷基复合材料连接的工艺难度, 而且还要考虑到金属与陶瓷基复合材料之间的相容性问题。复合材料铆钉法是通过, 由复合材料制成的铆钉对复合材料进行连接, 该方法解决了相容性问题, 但需要配钻出对复合材料面内性能造成较大损伤的孔, 同时复合材料铆钉法对工艺的要求也比较高。Z-pins 的方法是将金属杆、纤维束、或其他材料沿着复合材料的厚度方向植入, 以达到增强厚度方向性能的作用。

Z-pins 法由于工艺简单、成本低、对复合材料面内性能损伤小、不会改变搭接接头表面的完整性, 已广泛被应用于树脂基复合材料的搭接结构中。Larry W. Byrd 和 Victor Biman^[7]对复合材料接头的分层破坏进行了研究, 证明 Z-pins 能够减小裂纹尖端的应变能释放率, 有效的抑制裂纹的扩展。P. Chang 和 B. N. Cox^[8]采用试验的方法对搭接接头静态拉伸性能和疲劳性能进行了分析, 分析表明 Z-pins 能够增加搭接接头的疲劳寿命、改善搭接接头的连接性能。然而, 以上研究多集中在 Z-pins 增强树脂基复合材料搭接接头上, 对于 Z-pins 用在陶瓷基复合材料搭接接头的研究很少见到。

本研究对 Z-pins 增强 2D 编织陶瓷基复合材料搭接接头在单向载荷作用下的连接性能进行了试验研究, 探讨了 Z-pins 在搭接接头中所起作用及其机

收稿日期: 2007-04-25; 修订日期: 2008-10-12

基金项目: 自然科学基金(90405015), 高等学校博士学科点专项科研基金(20030699040)

作者简介: 陶永强(1981), 博士研究生, 从事陶瓷基复合材料力学研究(E-mail) tyq@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者: 矫桂琼, 教授, 博士生导师, 从事复合材料力学的研究(E-mail) jiaogq@nwpu.edu.cn

理。结合有限元的方法对有、无 Z-pins 不同直径、间距 Z-pins 增强搭接接头的失效进行数值分析,并与试验相比较,得到了满意的结果。

1 试验步骤

1.1 试验件

试验件的整体长度为 175mm, 宽度为 15mm, 单边厚度为 2mm, 搭接区域的厚度为 4mm, 搭接处长度为 15mm; 试验件中 Z-pins 的直径为 0.4mm, 间距为 5mm。搭接接头上、下搭接板的碳纤维布铺层角度相同, 都与加载方向成 0 度角, 铺层数为 6。图 1 为搭接接头的几何尺寸、Z-pins 的分布、铺层角度和铺层数目。

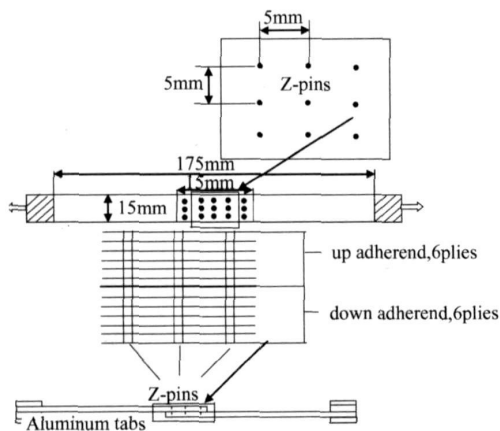


图 1 搭接接头的几何尺寸、Z-pins 的分布、铺层角度和铺层数目, 箭头为加载方向

Fig 1 Joint s dimension, Z-pins distribution, ply s angle and amount, Arrow s represent load direction

1.2 单向加载试验

所有试验都是室温条件下进行的, 试验机选用量程为 100kN 的静态拉压 INSTRON 1196。加载方式选用位移控制加载, 加载速度为 0.5mm/min。采用标距为 25mm 的引伸计测量上、下搭接板相对位移。

2 试验结果

图 2 为典型 Z-pins 增强 2D 编织陶瓷基复合材料搭接接头, 在单向载荷作用下的载荷-位移曲线。从载荷-位移曲线的后半段, 可以看出载荷变化出现了波动不大的起伏区域, 通过对试验过程的对比发现: 此区域载荷的第一次下降和搭接接头的开裂相对应, 第二次下降与靠近搭接处两端的 Z-pins 的拔

出相对应, 由于搭接长度较小, 靠近搭接处两端的 Z-pins 拔出后, 搭接处中间的 Z-pins 基本上不起作用, 所以只出现了一次起伏。试验曲线表明 Z-pins 起到了一定抑制裂纹扩展的作用。图 3 为搭接接头搭接面的开裂。图 4 为拔出的 Z-pins。表 1 为三个搭接接头的最大载荷值。

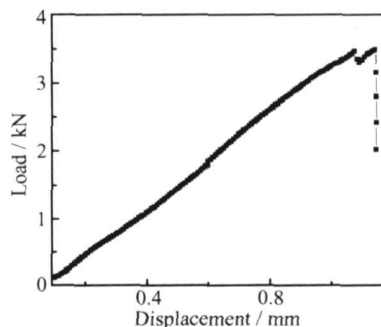


图 2 在单向载荷作用下, 接头的载荷-位移曲线

Fig 2 Load-displacement of tensile experiments for joint

表 1 搭接接头的最大载荷

Table 1 Maximum load of specimens

Specimens	1	2	3
Maximum load / kN	3.49	3.39	3.10

3 试验结果分析

在搭接接头载荷-位移曲线中 (图 2), 载荷变化出现了波动不大的起伏区域, 形成此区域的原因是 Z-pins 从搭接接头拔出的过程中, 与复合材料之间依次产生静摩擦力和滑动摩擦力的作用, 形成桥联。静摩擦力使 Z-pins 本身发生了形状的改变, 消耗了一部分本应作用在裂纹尖端的开裂能量; 滑动摩擦力使 Z-pins 与复合材料之间产生相对运动, 摩擦力做负功, 再一次消耗了作用于裂纹尖端的开裂能量。两种消耗能量的方式共同作用使得载荷变化产生了上述起伏区域, 这种解释可以从图 3 和图 4 中得以证实。

4 有限元分析

4.1 弹簧单元模型

有限元模拟中, Z-pins 使用非线性弹簧单元来模拟, 搭接接头中 Z-pins 受到剪切和轴向两个方向的作用, 如图 5 所示, 而非线性弹簧单元在有限元计算时应用的是剪切方向和轴向方向载荷和相对位移

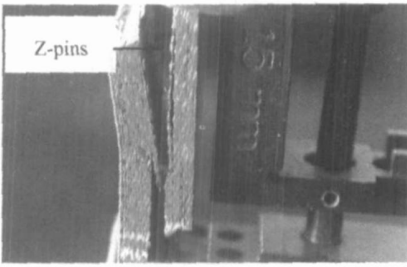


图 3 搭接面的开裂
Fig. 3 Cracking joint

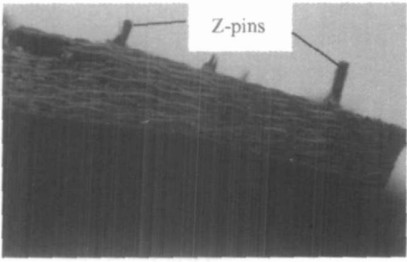


图 4 拔出的 Z-pins
Fig. 4 Drawn Z-pins

之间的关系,所以需要赋予非线性弹簧单元轴向和剪切方向载荷与相对位移之间的关系。考虑到模拟研究的目的,假定轴向方向的与剪切方向的弹簧刚度是相互独立的,即轴向和剪切方向载荷、相对位移关系是相互独立的。因为确定 Z-pins 轴向和剪切方向载荷、相对位移关系过程类同,所以以轴向方向为例,说明载荷和相对位移之间关系的确定过程。

B. N. COX^[16~18]对 Z-pins 的桥联力与位移之间的关系进行了研究,发现当 Z-pins 处于脱胶和拔出的临界位置时,桥联力最大; B. N. COX^[19]对 Z-pins 从复合材料拔出进行了试验研究,发现 Z-pins 的桥联力与桥联位移之间呈双线性分布,分为界面脱胶阶段和摩擦滑动拔出两个阶段。Marcello Grassi Xiang Zhang^[20]把 Z-pins 的这种由界面脱胶阶段和摩擦滑动拔出阶段所形成桥联力和桥联位移之间的双线性关系,应用到 Z-pins 增强复合材料 I 型张开模拟研究中,得到了较符合的结果。通过本文的试验也可以观察到 Z-pins 的是以拔出的形式失效的。借鉴上述文献的研究成果,假定界面摩擦力为恒定的,并且做了其他的一些适当的简化,对 Z-pins 轴向载荷和轴向相对位移之间的关系进行了推导,其推导的过程如下,根据库仑定律得,拔出所需要的最小载荷 $P_{b_{min}}$ 为:

$$P_{b_{min}} = dl \quad (1)$$

d 为 Z-pins 的直径, l 为 Z-pins 从搭接接头中拔

出的最大长度。

而由材料力学知识得, Z-pins 所能承受的最大拉伸载荷 $P_{t_{min}}$ 为:

$$P_{t_{min}} = \frac{d^2 \sigma_{max}}{4} \quad (2)$$

当 $P_{t_{min}} < P_{b_{max}}$ 时,表明 Z-pins 将不会断裂,而是从搭接接头中拔出。Z-pins 所受的载荷经历由零增大到 $P_{b_{min}}$,再由 $P_{b_{min}}$ 减少到零的过程。因为 Z-pins 属于脆性材料,应力和应变遵循线性变化关系 ($\sigma = E \epsilon$),载荷由零增大到 $P_{b_{min}}$ 的过程,也是 Z-pins 稳定的形变过程,此过程载荷和相对位移之间的表达式为:

$$P_t = \frac{d^2 \sigma}{4} = \frac{d^2 E \epsilon}{4} = \frac{d^2 E u_t}{4l} \quad (3)$$

当载荷达到 $P_{b_{min}}$ 时, Z-pins 稳定形变阶段的相对位移也达到最大为:

$$u_{t_{max}} = \frac{P_{b_{min}}}{\frac{d^2 E}{4}} = \frac{4P_{b_{min}}}{d^2 E} = \frac{4l^2}{dE} \sigma_{max} \quad [0, u_{t_{max}}] \quad (4)$$

其中, $\epsilon = \frac{u_t}{l}$ 。

载荷由 $P_{b_{min}}$ 变化到零的过程,也是 Z-pins 稳定摩擦滑动过程,此过程载荷与相对位移之间的变化也为线性关系。关系表达式为:

$$P_b = d(l - u_b) \quad [0, l] \quad (5)$$

总之, Z-pins 在形变和摩擦滑动两阶段轴向载荷与轴向相对位移之间的关系可归纳为:

$$\begin{cases} P_t = \frac{d^2 E u_t}{4l} & 0 \leq u_t \leq u_{t_{max}} = \frac{4l^2}{dE} \\ P_b = d(l - u_b) & 0 \leq u_b \leq l \end{cases} \quad (6)$$

图 5 为,在 Z-pin 形变阶段和摩擦滑动阶段, Z-pins 轴向载荷、相对位移关系曲线,及在这两个阶段 Z-pins 的变形。

4.2 界面单元模型

有限元分析中开裂的界面层使用 ABAQUS[9] 中的界面单元。选用二次名义应力幂函数准则作为界面单元的刚度降阶的起始准则。选用 B-K (Benzeggagh-Kenane) 准则作为界面单元损伤演化的准则。

4.3 有限元模型

所选用模型的加载状况完全与试验条件下的相同。选用非线性弹簧单元来模拟 Z-pins 使用界面单元模拟搭接面的开裂。搭接接头网格划分如图 6 所示。陶瓷基复合材料的材料属性如表 2^[11, 13, 14]。幂函数准则和 B-K 准则所使用的性能参数如表

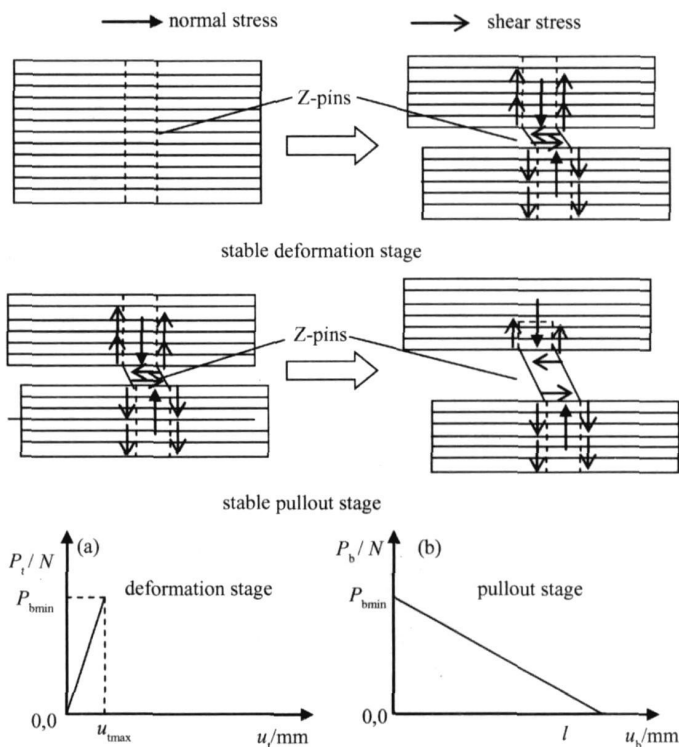


图 5 Z-pins轴向载荷与相对位移曲线 (a)形变阶段; (b)摩擦滑动阶段

Fig 5 Relationship between principal axis load and relative displacement

(a) the stage of deformation (b) the stage of pullout

$3^{[10, 13]}$ 。与非线性弹簧单元性能参数相关的 Z-pins 的几何尺寸、材料常数、材料性能见于表 4^[10, 12]。本工作分别模拟了无 Z-pins、Z-pins 的直径为 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm, Z-pins 的间距为 5mm, 3mm, 2mm 情况下, 搭接接头在单向载荷作用下的破坏。

E_{ij}, G_{ij}, ν_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 为分别拉伸模量, 剪切模量, 泊松比, 下标 1, 2, 3 轴向, 横向, 平面外方向。

E, G 分别为界面的拉伸弹性模量和剪切弹性模量; $G^{C_n}, G^{C_s}, G^{C_t}$ 分别为引起垂直界面层方向和第一、

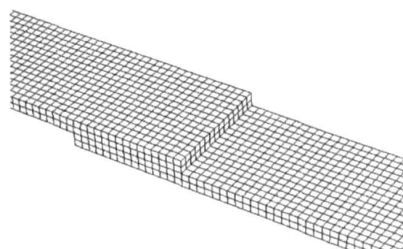


图 6 搭接接头的网格划分

Fig 6 FEA model

表 2 陶瓷基复合材料的弹性常数

Table 2 Constants of CMCs

E_{11}	E_{22}	E_{33}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
110GPa	110GPa	310GPa	0.045	0.2	0.2	45GPa	26GPa	26GPa

表 3 界面单元的相关参数

Table 3 Constants of cohesive element

E / GPa	G / GPa	$G_n^C / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$G_s^C / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$G_t^C / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
450	193	0.034	0.124	0.124

表 4 Z-pins的几何尺寸、材料性能、材料常数

Table 4 Dimension and constants of Z-pins

Tensile modulus/ GPa	Tensile strength/ MPa	Interface shear strength/ MPa	Pullout length/ mm	Diameter/mm
100.5	414.4	10.52	4	d

第二剪切方向失效的临界开裂能量^[9];

4.4 数值分析结果

本研究对有、无 Z-pins 不同直径和不同间距 Z-pins 增强陶瓷基复合材料搭接接头的破坏进行了数值分析。图 7 为模拟与试验条件完全相同有 Z-pins 条件下 ($d = 0.4\text{mm}$, $s = 5\text{mm}$), 搭接接头的载荷-应变曲线与试验条件下载荷-应变曲线的比较, 试验载荷-应变曲线中, 应变通过引伸计得到。这里采用载荷-应变曲线是因为, 试验机在位移的测量上存在误差, 无法与模拟的位移结果比较。从图中可以看出, 模拟的最大载荷比试验值稍高, 但整体的变化趋势相同。

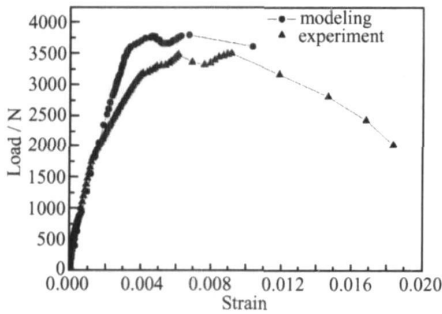


图 7 试验与模拟条件下的载荷-应变曲线

Fig. 7 Modeling and experimental strain-load curve

图 8 为模拟的三种不同直径的 Z-pins 和无 Z-pins 增强陶瓷基复合材料搭接接头的载荷-位移曲线, 从图中可以发现: 在 Z-pins 直径较小时, 与无 Z-pins 时相比较, 最大载荷没有太大的增加, 但是载荷变化出现波动不大的起伏区域; 随着 Z-pins 直径的增大, 搭接接头的最大载荷值也随之增大。总之, 增大 Z-pins 直径能够起到抑制裂纹扩展的作用, 改善搭接接头的连接性能。

图 9 为模拟的三种不同间距的 Z-pins 和无 Z-pins 增强陶瓷基复合材料搭接接头的载荷-位移曲线, 从图中可以看出随着 Z-pins 间距的减小, 搭接接头的最大载荷逐渐增大; 当间距减小到 2mm 时, 搭接接头最大载荷值得到显著的增加, 为从有限元模拟中得到的无 Z-pins (图中黑方块表示无 Z-pins) 时搭接接头最大载荷的 1.5 倍多。可以说: 减小的 Z-

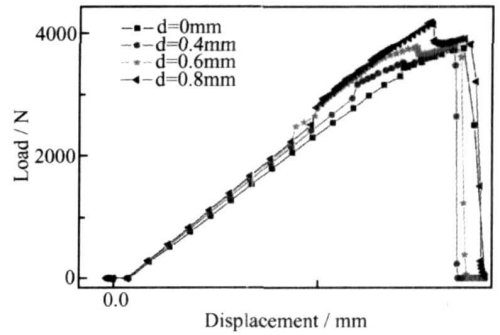


图 8 Z-pins 直径与载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement for different Z-pins' diameters

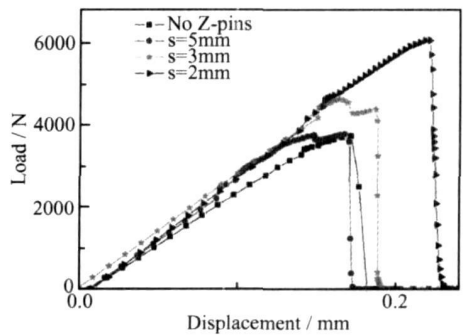


图 9 Z-pins 间距与载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement for different Z-pins' spacing

pins 间距有助于搭接接头连接性能的改善。

5 结论

通过对 Z-pins 增强 2D 编织陶瓷基复合材料搭接接头, 在单向载荷作用下的连接性能的试验研究和数值分析, 得出以下结论:

(1) Z-pins 增强 2D 编织陶瓷基复合材料搭接接头在单向载荷作用下的载荷-位移曲线中, 载荷变化出现波动不大的起伏区域。此区域是由 Z-pins 与复合材料之间形成桥联, 消耗了部分本应作用于开裂尖端的能量而形成的。说明 Z-pins 具有一定的改善搭接接头连接性能的能力。

(2) 基于界面单元和非线性弹簧单元, 对搭接接头的破坏过程进行了数值分析, 模拟结果试验吻

合较好。

(3)减小 Z-pins 间距, 增加 Z-pins 的直径都能够起到改善搭接接头连接能力的作用, 间距的变化对连接能力的影响更为显著。

参考文献:

[1] TAKASHI Ishikawa, TOSHIO Orgasawara. Overview of development activities of spaceplane components using NUSK-CMC (CMC with continuous SiTiC-O fiber) [R], AIAA-2001-1879. Kyoto Japan: AIAA, 2001.

[2] 汪清, 成来飞. C/SiC 复合材料连接接头应力与破坏形式数值分析 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005, 59-67.

[3] CAWLEY J D. Joining of ceramic matrix composites [J]. Journal of American ceramic society Bulletin, 1989, 68 (9): 1619-1623

[4] ABD-EL-NABY SEM. Load distribution in two-pinned polymer composites joints [A]. Marshall TH, Composite Structure, Amsterdam: Elsevier [C], 1991, 6: 553-574

[5] DANO ML. Stress and failure analysis of mechanical fastened joints in composite laminates [J]. Composite Structure, 2000, 50(3): 287-296

[6] ICTEN BM, KARAKUZU R. Progressive failure analysis of pin-baded carbon-epoxy woven composite plates [J]. Composite Science Technology, 2002, 62(9): 1259-1271.

[7] LARRY W. Byrd, VICTOR Biman. Effectiveness of z-pins in preventing delamination of co-cured composite joints on the example of a double cantilever test [J]. Composites (B): Engineering, 2006, 4-5(37): 365-378

[8] CHANG P, MOURITZ A P, COX B N. Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension [J]. Composites Science and Technology, 2006, 13(66): 2163-2176

[9] HKS, ABAQUS, User's Manual [M]. Version 6.5-1.

[10] 王波. 三维编织复合材料力学行为研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004, 75-96

[11] 刘伟华, 矫桂琼. Z-pin 增强陶瓷基复合材料拉伸和层间剪切性能 [J]. 复合材料学报, 2007, 1(24): 86-90

[12] 孔宪仁, 黄玉东, 范洪涛, 等. 细编穿刺 C/C 复合材料不同层次界面剪切强度的测试分析 [J]. 复合材料学报, 2001, 2(18): 57-60

[13] 贾成厂. 陶瓷基复合材料导论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 124-150

[14] 张增光. 2D-C/SiC 复合材料的弹性常数预测及失效模式研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005, 43-55

[15] JAMES G, RATCLIFFE T, Kevin O'Brien. Discrete Spring Model for Predicting Delamination Growth in Z-Fiber Reinforced DCB Specimens [R]. NASA/TM-2004-213019 Hampton, Virginia: NASA, 2004

[16] COX B N. Constitutive model for fiber tow bridging a delamination crack mechanics [J]. Composite Structure, 1999, 6: 117-38

[17] COX B N. Snubbing effects in the pullout of fibrous rod from a laminate [J]. Mechanics Advanced Material Structure, 2005, 12(2): 85-98

[18] COX B N, SRIDHAR N. A traction law for inclined fiber tows bridging mixed-mode cracks [J]. Mechanics Advanced Material Structure, 2002, 9: 299-331

[19] CARTIE D D R, COX B N. Mechanisms of crack bridging by composite and metallic rods [J]. Composite (A), 2004, 13: 25-1336

[20] MARCELLO G massi, ZHANG X. Finite element analyses of mode I interlaminar delamination in z-fibre reinforced composite laminates [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 1818-32

Effect of Z-pins on Connecting Performance of Single-Lap Composite Joints

TAO yong-qiang JIAO gu-qiong WANG bo CHANG yan-jun

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

Abstract In this paper the single-lap joint reinforced by Z-pins is studied on its carrying capacity through experiments. The results indicate that Z-pins can restrain cracking and improve carrying capacity because the varied load has a stabilization area. Area is shaped by the interaction between Z-pins and joint during Z-pins draw from the joint. The paper stimulates the connecting performance of the single-lap joint reinforced by Z-pins including no-pins, different diameters and spacing Z-pins, modeling results are agreed with experimental results. The numerical results indicate enlarging diameter and decreasing spacing of Z-pins are in favor of improving the connecting performance of the joints.

Key words ceramic matrix composite; single-lap joint; Z-pins; diameter; spacing