

文章编号:1000-6893(2006)06-1194-09

层合复合材料 z-pinning 增强技术的力学进展

孙先念, 郑长良

(大连海事大学 机电与材料工程学院, 辽宁 大连 116026)

Advances on Modeling Through-the-thickness Reinforcement of Laminated Composite by z-pinning

SUN Xian-nian, ZHENG Chang-liang

(Electromechanics and Materials Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

摘要: z-pinning 技术是自 20 世纪 90 年代中期发展起来的一种增强层合复合材料层间韧性的新技术。此项技术通过在层合板内嵌入体积比小于 5% 的 z-pin, 能使层合板的 I 型层间断裂韧性提高十几倍, 减少 50% 由低能量冲击所产生的层间分层, 并且只造成层合板面内拉压强度的少量退化或不退化。同时, z-pinning 技术较之其他层间增强技术, 如编织、纺织和缝合技术等, 又具有易于加工, 且便于控制工艺质量等优点。因此, 这一技术在近年来逐渐受到重视, 并在一些航空、航天复合材料结构中得到了应用。简要介绍了 z-pinning 技术的工艺特点, 重点综述这一领域细观力学模型与实验测试等力学分析工作的最新进展, 并对准确评估 z-pin 力学行为的研究工作进行了展望。

关键词: 层合复合材料; z-pinning; 分层; 层间增强; 分层韧性

中图分类号: V257 **文献标识码:** A

Abstract: Through-the-thickness reinforcement of laminated composites by z-pinning has attracted more and more attention since the middles of 1990s. The insertion of z-pin, with the volume fraction of fibrous z-pin less than 5%, can lead to an up to 18-fold increase in mode I fracture resistance of the z-pinned polymer composite laminates, with a retention of 91%-98% the tensile and 100% of the compressive strengths. There is also a 50% reduction in the delamination area after the low-energy impact. Compared to the other reinforce technologies, such as weaving, knitting, braiding, and stitching, etc., z-pinning is easier to be manufactured and controlled in its quality, which has been applied to some engineering structures in aerospace industry in recent years. In this paper, the z-pinning technology is briefly described and recent advances on modelling the mechanical behaviour of z-pin is reviewed.

Key words: composite laminates; z-pinning; delamination; interlaminar improvement; delamination toughness

随着科学技术的不断发展,在航空、航天工业领域越来越广泛地应用了复合材料,并对复合材料提出了越来越高的要求。作为纤维增强复合材料的主要基本结构形式,层合板具有很好的面内机械性能,但其偏低的层间断裂韧性成为其工程应用瓶颈,这是由于高性能纤维与树脂基体的机械性能不匹配而造成的。由于层间断裂韧性偏低,层合板在低能量冲击下(如加工过程中的工具跌落或机场跑道上砂石对机翼冲击等)容易产生层间分层,这些层间分层又使得受损层合板在较低的压缩载荷作用下就发生分层失稳和扩展,从而导致结构失效^[1-3]。虽然增加层合板的厚度可以在一定程度上解决这一问题,但这将加大结构

自重,并在一定程度上限制了复合材料的结构设计。因此,如何提高层合板的层间断裂韧性就成为充分利用纤维增强复合材料的关键。另一方面,较弱的树脂基体性能也限制了复合材料结构之间的连接。由于传统的机械连接方式(螺栓或铆钉连接)需要在层合板上钻孔,这将破坏层合板内的增强纤维的连续性,因此不适合用于连接复合材料结构;胶接连接方式则容易由于较弱的胶接层发生破坏而导致结构失效。由此可见,提高层合复合材料的层间韧性,同时也是复合材料结构连接技术的要求。

本文将简要介绍 z-pinning 技术的工艺特点,并与其他层间增强技术,如编织、纺织和缝合技术等进行了比较,重点综述 z-pin 的细观力学模型与实验测试等力学分析工作的最新进展,指出当前对 z-pinning 技术理论评估方面存在问题。

收稿日期:2005-06-20;修订日期:2005-12-09
基金项目:国家自然科学基金(10502010)

1 z-pinning 技术的工艺特点

自 20 世纪 70 年代末,世界各国的学者就开始致力于研究如何改善层合复合材料的层间韧性,并提出了许多不同的增韧方法^[4-7]。在这些方法中,大致可以分为两大类:①通过改善组分材料性能来提高层合板层间韧性的材料学方法;②在厚度方向上引入增强纤维的结构设计方法,如三维编织、缝合和 z-pinning 技术等。一般来说,提高树脂基体性能和改善基体与面内纤维界面性能总是受到材料本身的制约,对层合板的增韧幅度有限,而且价格昂贵。相比之下,较早出现的三维编织、纺织和缝合技术在损失一小部分的面内性能的基础上,能较好地改进层合板在厚度方向上的力学性能:一方面使得层合板在低能量冲击下产生较小面积的层间分层损伤;另一方面,分层子板由于受到横向增强纤维的约束作用,故而在压缩载荷下不易发生失稳和扩展,从而提高层合板的压缩损伤容限。它们的不足之处在于其应用上的局限性,前两种技术费用高,不适用于复合材料结构的连接,且设计与分析十分复杂;后者则不适用于复合材料预浸件,不能满足不同工艺流程的要求,而且缝合过程中工艺质量较难控制。

z-pinning 技术借鉴了缝合复合材料技术中不连续缝线方法^[4],在层合板的预浸件中直接嵌入固化好的纤维短棒(fibrous z-pin)或金属短棒(metallic z-pin),然后再固化预浸件形成层合板。一般地,可采取 2 种方式向预浸件嵌入 z-pin,即多个排列有序的 z-pin 一次性整体嵌入(参见图 1)和利用高压枪单个 z-pin 逐点高速射入,其中前者较适用于平面结构且耗时少,后者则更具有灵活性,并可用于曲面结构的加工。z-pin 的直径一般在 0.2 mm~0.6 mm 之间,体分比一般在 2%~5%左右。由于 z-pin 的直径很小,为防止 z-pin 在嵌入过程中发生屈曲,因此在嵌入时要采用泡沫支撑或提高嵌入速度。根据 Freitas 等的试验研究^[8],z-pin 可以用金属(不锈钢、铝合金和钛合金等)或非金属(碳纤维、玻璃纤维和 Kevlar 纤维等)材料制作。

Freitas 等在 1994 年发表了一篇关于 z-pinning 技术试验研究的论文^[8],在这篇论文里,Freitas 与其合作者测试了 z-pin 对层间断裂韧性、冲击分层及面内机械性能的影响。结果表明,在层合板内引入少量的 z-pin(体分比低于 5%)能将 I 型的层间断裂韧性提高至 18 倍,减少 50%

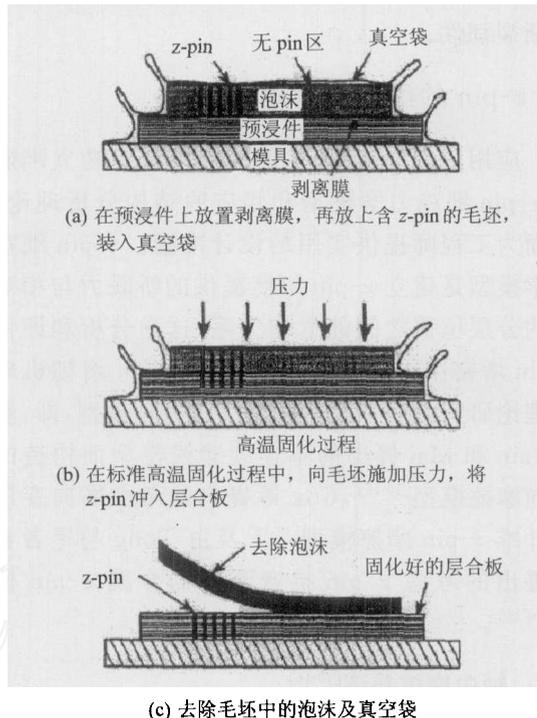


图 1 z-pin 的整体嵌入^[8]

Fig. 1 Insertion of z-pin

的冲击分层,保持 91%~98%的面内拉伸强度。Partridge 等^[9]的最新试验结果也证明了 z-pin 能大幅度地提高层合板的 I, II 型层间断裂韧性。这些试验结果表明 z-pinning 技术是一种非常有效的新型增韧技术,并引起学术界和工业界广泛关注。1995 年,专门利用 z-pinning 技术生产复合材料构件的 Aztex 公司在美国成立,标志着这一技术在工程结构中的正式应用。

值得指出的是,由于早期工作主要以研究纤维 z-pin 为主,故在一些文献中 z-pin 也被称为 z-fibers。由于 z-fibers 已被美国的 Aztex 公司注册为商标,所以,目前的文献中一般使用 z-pin 一词。由于目前尚没有准确的 z-pin 中文名称,为避免歧义,本文直接使用英文原文。

2 z-pinning 的增韧机理

一般认为,当含分层的层合板在压缩载荷作用下发生屈曲时,相邻的分层子层发生相对位移(相邻分层子层张开或相对错动),同时带动分层区内的 z-pin 与其周围的基体产生相对移动,z-pin 与周围基体的界面将阻止二者的相对移动,这部分阻力将对分层屈曲产生约束。随着相对位移的增加,此界面受到破坏,z-pin 被从基体中拔出,此时 z-pin 与周围基体的产生相互摩擦,这部分摩擦力在相邻子层之间产生桥联力,继续阻止相邻子层的发生相对位移,从而提高层合板的层

间断裂韧性。

3 z-pin 的细观力学模型

应用 z-pinning 技术的关键前提是建立准确的 z-pin 细观力学模型和相应的结构分析理论,进而为工程师提供实用的设计准则。z-pin 细观力学模型是建立 z-pin 所能提供的桥联力与相对应的分层位移之间的本构关系,这是分析和评估 z-pin 增韧作用的基础。目前在 z-pin 增韧机理的理论研究方面主要有 3 种细观力学模型,即:基于 Jain 和 Mai 提出的不连续缝线模型而构造的轴向摩擦模型^[10-16],Cox 等提出的考虑横向变形的纤维 z-pin 摩擦模型^[17-19]及由 Tong 与笔者合作提出的考虑 z-pin 抗弯刚度的金属 z-pin 模型^[20-23]。

3.1 轴向摩擦模型^[10-16]

如图 2 所示,一个 z-pin 被嵌入一个分层子层,上表面为自由表面,下表面为分层界面。在分层界面施加向下拨出的拉力 F 时,由于受周围基体界面的约束,z-pin 将首先发生弹性拉伸变形,而且发生弹性变形的长度 Y 随着拉力的增加从 0 扩展到基体厚度 H 。继续增加轴向载荷,将使得 z-pin 与周围基体之间的界面发生破坏,在这一过程中,桥联力达到最大值。继续施加载荷,z-pin 从基体中拔出,z-pin 与其周围的树脂基体之间产生相互滑动摩擦,直至全部拔出。常摩擦模型忽略了拔出过程中界面变化对摩擦力的影响,假设拔出时的摩擦力只与摩擦面积有关,即只与 z-pin 保留在基体内的长度 S 有关。这样,对于如图 2

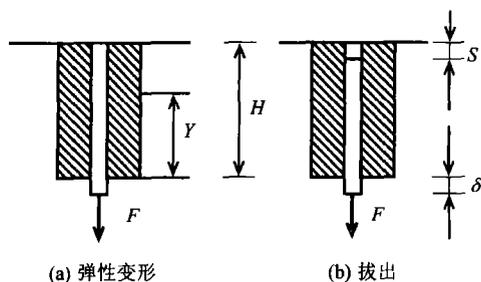


图 2 z-pin 从基体中拔出

Fig. 2 A z-pin is pulled out from matrix

所示的 z-pin 在拔出过程中拔出力 F (桥联力) 与拔出位移 δ 之间的本构关系为^[10]

$$F = \tau \pi d_i [YU(\xi_1)U(\xi_2) + (H - S) \cdot (1 - U(\xi_1))U(\xi_2)U(\xi_4)] \quad (1)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= [H - H/r \cdot \ln(1 + r)] \cdot \\ &\quad (1 + r) - \delta \\ \xi_2 &= H - \delta \\ \xi_3 &= L_c - Y \\ \xi_4 &= L_c - H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: τ 为 z-pin 与其周围基体之间的摩擦剪应力; d_i 为 z-pin 的直径; δ 为拔出长度; $U(\xi_i)$ ($i = 1, \dots, 4$) 为 Heaviside 阶跃函数; L_c 为极限嵌入长度,用来考虑弹性变形过程中 z-pin 被拉断的情况,定义为

$$L_c = d_i \sigma_{tu} / 4\tau \quad (3)$$

式中: σ_{tu} 为 z-pin 的拉伸强度。

弹性变形长度 Y 由下式给出

$$f(Y) = [Y - H/r \cdot \ln(Yr/H + 1)] \cdot (1 + Yr/H) - \delta = 0 \quad (4)$$

计算 z-pin 保留在基体内的长度 S 的方程为

$$f(S) = \{(H - S) - H/r \cdot \ln[(H - S) \cdot r/H + 1]\} \cdot [(H - S) \cdot r/H + 1] - \delta = 0 \quad (5)$$

$$\text{延伸率} \quad r = \tau \pi d_i H / A_i E_i \quad (6)$$

式中: A_i 和 E_i 分别为 z-pin 的横截面积和杨氏模量。

需要指出的是,文献[10]中的方程是针对不连续缝线给出的,假设缝线从 2 个分层子层中的 1 个子层拔出,缝线长度为 $2H$,计及了缝线在 2 个子层内的变形,而这里只考虑了 1 个子层,所以式(1)与文献[10]中的方程相比去掉了系数“2”,式(3)~式(5)也做了相应的改动。

由式(1)可以看出,Jain 和 Mai 的模型假设 z-pin 的弹性变形长度 Y 达到子层厚度时,z-pin 与基体之间的界面就全部发生断裂。纤维拔出的实验结果表明^[12],此界面的破坏是从分层面(下表面)开始,逐渐扩展到自由表面。为了考虑 z-pin 与基体界面的破坏过程,Yan 等^[12-15]采用分段函数来描述桥联力与拔出位移之间的本构关系

$$F = \begin{cases} \frac{\delta}{\delta_1} P_d & (0 \leq \delta \leq \delta_1) \\ \frac{\delta_2 - \delta}{\delta_2 - \delta_1} P_d + \frac{\delta - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} P_f & (\delta_1 < \delta \leq \delta_2) \\ P_f + \frac{\delta_2 - \delta}{h - \delta_2} P_f & (\delta_2 < \delta \leq H) \end{cases} \quad (7)$$

式中: δ_1 为 z-pin 与周围基体界面未发生破坏之前的最大拔出位移; δ_2 为界面完全破坏但尚未发生相对滑动之前的最大位移; P_d 与 P_f 分别为完

好界面最大剪力和最大摩擦力。这 4 个参数可由单个 z-pin 的拔出试验来测定。图 3 给出了轴向摩擦模型的 z-pin 拔出力-拔出位移关系示意图。

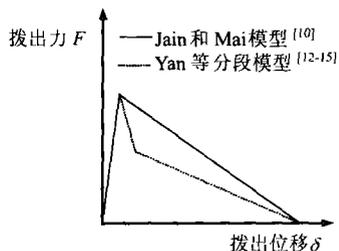


图 3 轴向摩擦模型的 z-pin 拔出力-拔出位移关系
Fig. 1 Axial bridging law for a z-pin

当 z-pin 沿轴线方向被拔出时,轴向摩擦模型能给出较为准确的拔出力-拔出位移之间的本构关系。由于在用于测量 I 型层间断裂韧性的双悬臂梁(Double Cantilever Beam, DCB)试验中, z-pin 主要是沿其轴线方向拔出,所以一般采用此模型来进行 DCB 试验的模拟分析^[14,16]。

3.2 考虑横向变形的纤维 z-pin 摩擦模型^[17-19]

从式(1)和式(7)可以看出,轴向摩擦模型中的桥联力只与 z-pin 的轴向变形和轴向拔出位移有关,这种情况只有在 z-pin 完全是沿着其轴线方向拔出时才是可能的。但是在实际结构中,分层层间的断裂模式是混合型的,z-pin 往往是沿偏离其轴线一定角度的方向拔出的。即使是在 DCB 试验中,z-pin 也会因分层子层的弯曲变形而发生侧向弯曲,从而使得 z-pin 的桥联力与其轴向和横向位移均相关。基于实验观测,Cox 等^[17-19]提出一种考虑 z-pin 横向位移,适于 II 型断裂模式的纤维 z-pin 摩擦模型,此模型也可用于分析混合型断裂模式。该模型将 z-pin 当作一个能承受轴向拉伸和横向剪切的梁来处理,其桥联力由 z-pin 与周围基体界面的摩擦力和由横向位移引起的界面压力两部分来平衡。为了计算 z-pin 对其周围基体的压力,将 z-pin 周围的基体假设成理想刚塑性介质。这样,z-pin 的本构关系就简化成一个一维问题。

如图 4 所示,Cox 等的纤维 z-pin 模型采用了下列假设:(1)由于纤维 z-pin 内纤维间的界面强度较弱,因此纤维 z-pin 内的轴向剪切本构关系可以假设为理想刚塑性材料本构关系,且轴向剪切强度约为 70 MPa;(2)轴向拔出力由界面上的均匀剪切摩擦力来平衡;(3)层合板在垂直于板

面方向上变形对 z-pin 的位移的影响忽略不计;(4)z-pin 内的所有应变(轴向拉伸和轴向剪切应变)在 z-pin 的横截面上是均匀的,也就是说由 z-pin 横向变形造成的弯曲效应忽略不计;(5)假设 z-pin 周围的基体为平面应变状态下的理想刚塑性介质。

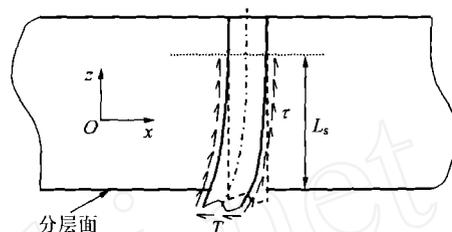


图 4 考虑 z-pin 横向位移的摩擦模型

Fig. 4 z-pin frictional model considering deflection

如图 5 所示,一个 z-pin 单元体的 2 个变形分量分别用 $\xi(z)$ 和 $\zeta(z)$ 来表示,其轴向应变 ϵ 和转角 θ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \left[\left(\frac{\partial \xi}{\partial z} \right)^2 + \left(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \\ \theta &= \arctan \left[\frac{\partial \xi}{\partial z} / \left(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

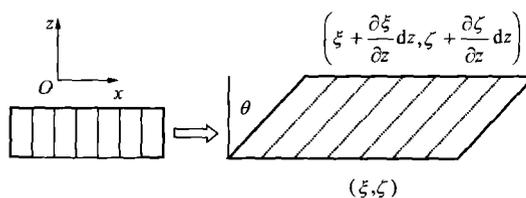


图 5 z-pin 单元体的变形

Fig. 5 Deformation of a z-pin

z-pin 内轴向应变 δ_s 为(沿 z-pin 轴线方向)

$$\sigma_s = \epsilon E_s \quad (9)$$

式中: E_s 为 z-pin 的轴向杨氏模量。

轴向力平衡方程可以写为

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial z} = \frac{2\tau}{R} \quad (10)$$

其中

$$\sigma_s = \sigma_0 - 2\tau \frac{z}{R} \quad (z < l_s)$$

$$l = \frac{R\sigma_0}{2\tau}$$

式中: τ 为 z-pin 与周围基体界面的摩擦系数; R 为 z-pin 的半径; σ_0 为 σ_s 在分层面上的值($z=0$)。

横向力平衡方程为

$$\left(\sigma_0 - \frac{2\tau z}{R} \right) \frac{\partial \theta}{\partial z} = -P_x \quad (11)$$

式中: P_x 为层合板对 z-pin 在 x 方向上的横向支

撑力,与理想刚塑性基体有关。

分层面上的边界条件可以写为

$$\left. \begin{aligned} T &= \tau_0 + \sigma_0 \sin \theta \\ \zeta(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: T 为 z -pin的剪切桥联力; τ_0 为 z -pin内的轴向剪应力。

将边界条件式(12)代入平衡方程式(10)和式(11)中,经非线性迭代,即可得 z -pin桥联力与轴向和横向位移之间的本构关系。此模型对于 z -pin的边界条件和混合断裂模式的更多讨论可参见文献[19]。

3.3 考虑 z -pin的抗弯刚度的金属 z -pin模型^[20-23]

Cox等^[17-19]通过实验观察指出,由于纤维 z -pin内纤维间的界面强度较弱(<100 MPa),此界面在较低弯曲剪力作用下(横向变形)就会发生破坏,然后, z -pin就会象绳子一样可任意弯曲,也就是说,纤维 z -pin所能承受弯矩是很低的,因此,由纤维 z -pin的抗弯刚度所形成的桥联力是可以忽略的。与此相反,金属 z -pin在侧向弯曲过程中能保持稳定的弯曲刚度,直至发生塑性弯曲变形。基于这一特点,Tong和笔者^[20-23]在近期合作提出了考虑金属 z -pin的抗弯刚度的 z -pin模型。该模型认为 z -pin提供的增韧桥联力由两部分组成,即 z -pin与周围基体之间的轴向摩擦力和 z -pin抵抗侧向弯曲的横向剪力,其中轴向摩擦力可采用Jain和Mai的轴向摩擦模型来计算,下面主要介绍金属 z -pin所承受的弯矩的计算。

图6给出了金属 z -pin的I型、II型断裂模式下的变形,可以看到,金属 z -pin的抗弯能力也起到了桥联2个分层子层的作用。金属 z -pin模型采取了下列假设:(1)分层子层内位于 z -pin周围的基体可以被假设为位于刚性基础上的弹簧,每一个弹簧由2个分层子层的基体弹簧所支撑;(2)每一个刚性基础的位移与位于 z -pin处的分层子层中面的位移相一致;(3)支撑 z -pin的基体弹簧是线弹性的;(4)金属 z -pin有足够高的强度,从而在分析中不考虑 z -pin在弯曲变形过程中的破坏;(5)不考虑金属 z -pin的塑性变形。通过上述的假设,金属 z -pin就被无数个线弹性基体弹簧所支撑,由于 z -pin发生横向变形,这样基体弹簧对 z -pin的压力在 z -pin的轴线方向上的分布是不均匀的。这里由于没有计及基体弹簧的塑性,因此,该模型给出的弯矩可能会偏高。

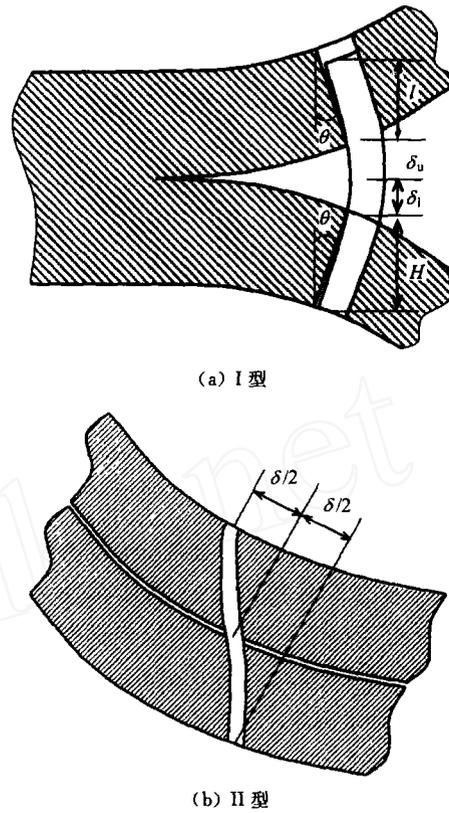


图6 金属 z -pin在不同断裂模式下的变形示意图
Fig. 6 Deformation of a metallic z -pin in different fracture modes

如图7所示,在对称条件下,对于分层子层内的金属 z -pin,其在弹性基础支撑下I型横向变形的控制方程可写为

$$E_t I_t \frac{d^4 w_z}{d\xi^4} + k \left[w_z + \theta \left(\xi - \frac{1}{2} H \right) \right] = 0 \quad (0 \leq \xi \leq l) \quad (13)$$

式中: w_z 为 z -pin的横向位移; k 为分层子层基体线弹性弹簧的弹簧系数; E_t 和 I_t 分别为 z -pin的杨氏模量和截面惯性矩; θ 为分层子层 z -pin处的

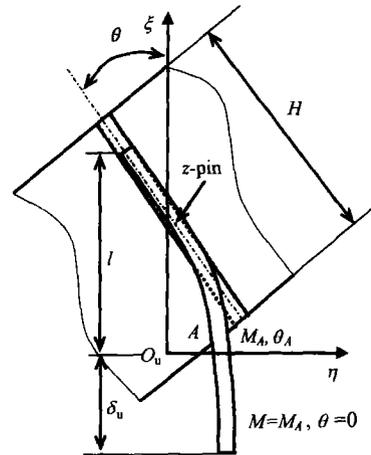


图7 分层子层内的金属 z -pin的I型横向变形
Fig. 7 The mode I lateral deformation of a metallic z -pin embedded in a sublaminate

转角。相应地, z-pin 与基体弹簧之间的相对位移为: $w_R = w_z + \theta \left(\xi - \frac{1}{2} H \right)$ 。

z-pin 位于 2 个分层子层之间的部分的控制方程为

$$E_f I_f \frac{d^4 w_z}{d\xi^4} = 0 \quad \left(-\frac{\delta}{2} \leq \xi \leq 0 \right) \quad (14)$$

在 z-pin 的自由端 $\xi=l$ 处的边界条件为

$$w_z''|_{\xi=l} = 0, \quad w_z'''|_{\xi=l} = 0 \quad (15)$$

$\xi=-\delta_u$ 处的对称边界条件为

$$w_z'|_{\xi=-\delta_u} = 0, \quad w_z''|_{\xi=-\delta_u} = 0 \quad (16)$$

将边界条件式(15)、式(16)代入控制方程式(13)、式(14),可以得到金属 z-pin 在 A 点处所承受的弯矩为(此弯矩即为金属 z-pin 的弯曲桥联力)

$$M_A = \frac{E_f I_f \theta}{\delta_u + \frac{\sinh(\alpha l) \cosh(\alpha l) + \cos(\alpha l) \sin(\alpha l)}{\alpha(\sinh^2(\alpha l) - \sin^2(\alpha l))}} \quad (17)$$

式中: $\alpha = \sqrt[4]{k/(4E_f I_f)}$ 。

文献[22]还给出了计算金属 z-pin 在 I 型断裂模式下弯矩的非对称模型,这里不再赘述。类似地,也可给出 II 型断裂模式下 z-pin 所提供的弯曲桥联力,所不同的是,II 型的弯曲桥联力表现为作用于 z-pin 位于分层面处的横向剪力。相应地,对于如图 8 所示的金属 z-pin 在 II 型断裂模式下的横向变形,式(13)可用作金属 z-pin 在 $0 \leq \xi \leq H$ 内的控制方程,其自由端边界条件可以写为

$$w_z''|_{\xi=H} = 0, \quad w_z'''|_{\xi=H} = 0 \quad (18)$$

$\xi=0$ 处反对称边界条件为

$$w_z|_{\xi=0} = 0, \quad w_z''|_{\xi=0} = 0 \quad (19)$$

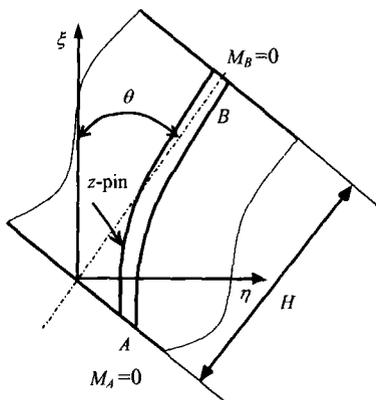


图 8 分层子层内的金属 z-pin 的 II 型横向变形
Fig. 8 The mode II lateral deformation of a metallic z-pin embedded in a sublamine

于是,将式(18)、式(19)代入式(13),可得金属 z-pin 在其对称点 A 处所承受的横向剪力为

$$Q(x) = E_f I_f \alpha^3 \delta \cdot f(\alpha H) = \frac{d_f \delta}{8} \sqrt[4]{\pi E_f k^3} \cdot f(\alpha H) \quad (20)$$

式中

$$f(\alpha H) = \frac{[\sin^2(\alpha H) - \sinh^2(\alpha H)]}{\sin(\alpha H) \cos(\alpha H) - \sinh(\alpha H) \cosh(\alpha H)}$$

4 z-pin 增韧机理的试验研究

研究 z-pin 对层合板增韧机理的最直接的方法是通过实验测量,然而由于 z-pin 本身几何尺寸较小(直径在 0.2 mm~0.6 mm 之间^[8]),受力状态复杂,而且被树脂基体包围,所以实验测量十分困难。目前,试验研究工作主要在细观和宏观 2 个层次上进行。

在细观试验研究方面,对于 I 型断裂性能,一般采用纤维拔出试验来测定 z-pin 与周围基体之间的摩擦力^[12,24-26];而对于 II 型断裂性能,则需要设计专用夹具来测定^[26]。尽管纤维拔出试验能比较直接地测出 z-pin 的细观本构关系,但这种试验一般是将 z-pin 嵌入树脂基体内进行测试,与实际应用中是嵌入在面内纤维和树脂基体组成的层合板内,因此测量结果在用于分析含 z-pin 的结构时受到一定的限制。此外,试件制备十分困难,所以在 z-pin 增韧机理研究方面,多采用宏观试验方法。

如图 9~图 11 所示,在宏观试验研究方面,一般采用含 z-pin 的双悬臂梁(Double Cantilever

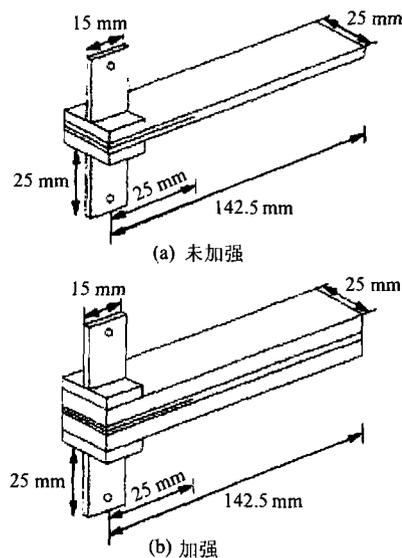
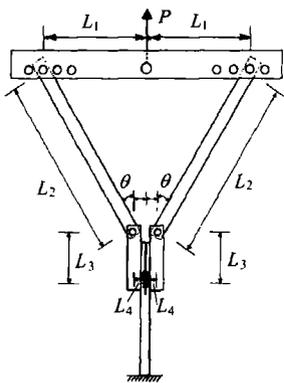
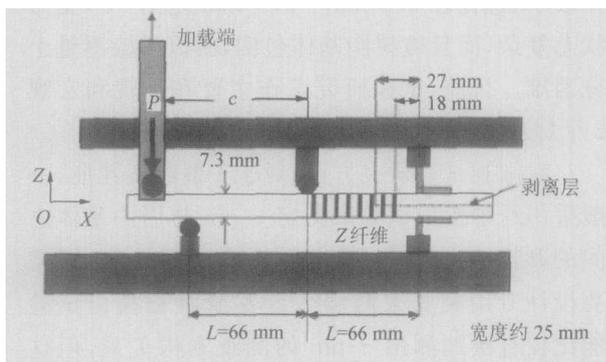


图 9 DCB 试件^[27]
Fig. 9 DCB specimen^[27]

图10 新型DCB试验装置^[28]Fig. 10 Novel DCB test setup proposed by Chen et al^[28]图11 混合型断裂模式试验装置^[29]Fig. 11 Schematic of mixed mode bending test specimen and apparatus (not to scale)^[29]

Beam, DCB) 和端部开口弯曲 (End Notched Flexure, ENF) 试验来分别研究 z -pin 对 I 型、II 型层间断裂性能的增强作用^[13,27,28] 或通过专用夹具来研究混合型 (I 型、II 型混合) 断裂性能^[29] (图 11)。由于 z -pin 大大提高了层合板的层间韧性, 使得标准的 DCB 和 ENF 试件在 z -pin 增强区尚未达到饱和之前就发生破坏, 不能有效地测出 z -pin 的增强作用, 因此, 要对标准的 DCB 和 ENF 试件进行相应的加强或修改^[27,28], 如图 9 和图 10 给出了 2 种改进 DCB 试件的试验方案。需要指出的是, 这 2 种方案是针对缝合技术提出的, 其方法也适用于对 z -pinning 技术的研究。

5 结论与展望

z -pinning 是目前层合复合材料增韧领域的最新技术, 对 z -pinning 技术的增韧机理的研究工作已经取得了很多成果, 提出了几种不同的 z -pin 细观力学模型, 部分模型还经过了试验的验证。这项技术目前已经开始应用到工程结构中, 这方面的研究工作也在近年来逐渐增加。但由于这一技术主要在军事敏感性结构, 如航空、航天结

构中应用较多, 故而这一领域的文献不是很多。从公开发表物来看, 这方面的研究主要集中在美国、澳大利亚、英国和日本等国家, 而且这些研究主要是针对非金属 z -pin 进行的。值得指出的是, 这一最新研究领域也逐渐为中国的学者所关注, 如韩立军等^[30] 和田旭等^[31] 的研究工作, 都已经取得了一些初步成果。目前, 在该领域存在的问题主要是:

(1) z -pinning 的增韧机理尚不明确。尽管目前已经提出了上述的一些 z -pin 细观力学模型来模拟其增韧作用, 但这些模型是基于实验观察的推测或理论预报, 其应用受材料体系与测量方法的限制, 尤其是抗弯刚度对 z -pin 在 I 型、II 型断裂模式下的细-宏观本构关系的影响尚不清楚, 因此, 对增韧机理还需要进一步深入研究来完善。

(2) 评估 z -pinning 增强作用的实验方法不统一。由于 z -pinning 技术能较好地改善层合板的层间性能, 使分层子板在 z -pin 增强区达到饱和之前就发生断裂, 故而需要对标准的断裂试件 (DCB, ENF) 进行修改以保证准确评估 z -pin 对层间韧性的增强作用。由于目前的修改方案并不统一, 所以不同方法得到的数据尚难以相互参考。

(3) 缺乏适用于混合型层间韧性研究和分析的 z -pin 模型。在实际工程结构中, 分层屈曲和扩展的断裂模式一般为混合型的, 因此, 混合型断裂模式是 z -pinning 技术的分析设计的一个关键。而目前所提出的 z -pin 模型一般是基于 I 型或 II 型断裂模式分别提出的, 如何将 I 型、II 型的研究成果应用到混合型断裂模式中, 是发展 z -pinning 技术必须解决的问题。

(4) 评估 z -pin 的各设计参数的统一实验和分析标准还没有形成。金属 z -pin 由于有较高的由弯曲刚度形成的桥联力, 较之非金属 z -pin 能更好地改善层合板的层间韧性, 尤其是 II 型层间韧性。此外, 金属 z -pin 还具有易于加工、造价低的特点, 因此, 金属 z -pin 将是 z -pinning 技术的一个全新发展方向。总之, 在中国发展 z -pinning 技术, 尤其是率先开展对金属 z -pin 的研究工作, 将有利于提高中国层合复合材料的设计与应用水平, 并大力促进中国航空、航天事业的发展。

参 考 文 献

- [1] Serge A. Impact on laminated composites; recent advances [J]. Applied Mechanics Review, 1994, 47: 517-544.

- [2] 范赋群. 复合材料损伤与断裂的研究进展[M]//沈真. 复合材料及其结构力学进展. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1992.
Fan F Q. Mechanics advances on composites and structures [M]//Shen Z. Advances on Composites Damage and Fracture. Wuhan; Press of Wuhan university of Technology, 1992. (in Chinese)
- [3] 陈浩然, 孙先念. 层合复合材料低速冲击损伤研究[M]//复合材料结构的力学设计与评估. 北京: 中国力学学会, 1998: 96-111.
Chen H R, Sun X N. An overview of recent development of low velocity impact on composites[M]//Mechanics, design, application and evaluation of composite structures. Beijing: Press of Chinese Mechanics Committee, 1998: 96-111. (in Chinese)
- [4] Dransfield K A, Baillie C, Mai Y W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching-a review[J]. Composites Science and Technology, 1994, 50: 305-317.
- [5] Mouritz A P, Leong K H, Herszberg. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites [J]. Composites. Part A, 1997, 28: 979-991.
- [6] Mouritz A P, Bannister M K, Falzon P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites [J]. Composites, Part A, 1999, 30: 1445-1461.
- [7] Emile G, Matthew H. The assessment of novel materials and processes for the impact tolerant design of stiffened composite aerospace structures[J]. Composites, Part A, 2003, 34(2): 151-161.
- [8] Freitas G, Magee C, Dardzinski P, et al. Fiber insertion process for improved damage tolerance in aircraft laminates [J]. Journal of Advanced Materials, 1994, 25: 36-43.
- [9] Partridge I K, Cartie D D R. Delamination resistant laminates by z -fiber pinning; Part I manufacture and fracture performance[J]. Composites, Part A, 2005, 36(1): 55-64.
- [10] Jain L K, Mai Y W. On the effect of stitching on mode I delamination toughness of laminated composites[J]. Composites Science and Technology, 1994, 51: 331-345.
- [11] Jain L K, Mai Y W. Determination of mode II delamination toughness of stitched laminated composites[J]. Composites Science and Technology, 1995, 55: 241-253.
- [12] Dai S C, Yan W Y, Liu H Y, et al. Experimental study on z -pin bridging law by pullout test[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(16): 2451-2457.
- [13] Liu H Y, Yan W Y, Mai Y W. z -pin bridging force in composite delamination[C]//Blackman B R K, Pavan A, Williams J G. Fracture of Polymers, Composites and Adhesives II. Amsterdam; Elsevier, 2003: 491-502.
- [14] Yan W Y, Liu H Y, Mai Y W. Numerical study on the mode I delamination toughness of z -pinned laminates[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63:1481-1493.
- [15] Yan W, Liu H Y, Mai Y W. Mode II delamination toughness of z -pinned laminates [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(13-14):1937-1945.
- [16] Grassi M, Zhang X. Finite element analyses of mode I interlaminar delamination in z -fibre reinforced composite laminates [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63:1815-1832.
- [17] Cox B N. A constitutive model for through-thickness reinforcement bridging a delamination crack [J]. Advanced Composite Letters, 1999, 8(5): 249-256.
- [18] Cox B N. Constitutive model for a fiber tow bridging a delamination crack [J]. Mechanics of Composite Materials and Structures, 1999, 6:117-138.
- [19] Cox B N, Sridhar N. A traction law for inclined fibre tows bridging mixed mode cracks[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2002, 9:229-331, 2002.
- [20] Tong L, Sun X. Effect of through-thickness reinforcement bending on delamination toughness of composite laminates [C]//Proceedings of the 35th International SAMPE Technical Conference Dayton. Ohio, USA; [s. n.], 2003.
- [21] Sun X, Tong L, Rispler A. Design curves for metallic z -pinned composite laminated double cantilever beams[C]//45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. California; Palm Springs, 2004.
- [22] Tong L, Sun X. Bending effect of through-thickness reinforcement rods on mode I delamination toughness of DCB specimen I: Linearly elastic and rigid-perfectly plastic analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(24-25): 6831-6852.
- [23] Tong L, Sun X. Bending effect of through-thickness reinforcement rods on mode II delamination toughness of ENF specimen: Linearly elastic and rigid-perfectly plastic analysis[J]. Composite, Part A(in press).
- [24] Brandstetter J, Peterlika H, Krompa K, et al. A new fibre-bundle pull-out test to determine interface properties of a 2D-woven carbon/carbon composite[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63:653-660.
- [25] Cartie DDR. Effect of z -fibres on the delamination behaviour of carbon fibre/epoxy laminates [D]. U K: Cranfield Univeristy, 2000.
- [26] Cartie D D R, Cox B N, Fleck N A. Mechanisms of crack bridging by composite and metallic rods[J]. Composites, Part A, 2004, 35(11): 1325-1336.
- [27] Jain L K, Mai Y W. Recent work on stitching of laminated composites-theoretical analysis and experiments [C]//Proceedings of the 11st International Conference on Composite Materials. Australia; Gold Coast, 1997.
- [28] Chen L S, Sankar B V, Ifju P G. A new mode I fracture test for composites with translaminar reinforcements[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(10-11): 1407-1414.
- [29] Rugg K L, Cox B N, Massabo R. Mixed mode delamina-

- tion of polymer composite laminates reinforced through the thickness by z-fibers[J]. Composites Part A, 2002, 33: 177-190.
- [30] 韩立军,李铁虎,刘建军,等.采用z-pin增强体的3D炭/炭复合材料层间断裂行为[J].新型炭材料,2004,19(2):97-102.
- Han L J, Li T H, Liu J J, et al. Interlaminar fracture behaviour of 3D C/C composites using z-pin as through-thickness reinforcements [J]. New Carbon Materials, 2004, 19(2), 97-102. (in Chinese)
- [31] 田旭,肖军,李勇. X-cor 夹层结构试制与性能研究[J]. 飞机设计,2004(1):22-25.
- Tian X, Xiao J, Li Y. Study on X-cor sandwich structure manufacture and its mechanical performance [J]. Aircraft

Design, 2004(1): 22-25. (in Chinese)

作者简介:



孙先念(1970-) 男,教授,博士。主要研究方向:复合材料及其结构力学。E-mail: xsun@newmail.dlmu.edu.cn

郑长良(1963-) 男,教授,博士。主要研究方向:计算力学。E-mail: Zhengcl@newmail.dlmu.edu.cn

(责任编辑:蔡 斐)



《航空学报》蝉联“百种中国杰出学术期刊奖”

2006年10月27日,第十四届中国科技论文统计结果发布会在北京国际会议中心举行。根据中国科学技术信息研究所的统计结果,《航空学报》再次荣获“百种中国杰出学术期刊奖”,至此,本刊已连续5次获此殊荣。

“百种中国杰出学术期刊”评选活动是2002年起由中国科学技术信息研究所发起举办的,每年开展一次,今年已是第5届。中国科学技术信息研究所是国内从事科技期刊评价的权威机构,其出版的《中国科技期刊引证报告》选择了1652种中国出版的中英文科技期刊作为来源期刊,根据来源期刊的引文数据,如总被引频次、影响因子、即年指标、基金论文比和他引总引比等国际通用的期刊评价指标,进行规范化处理和统计分析,建立起科技期刊综合评价指标体系,便于读者对科技期刊的学术水平、学科地位、编辑状况、交流范围等有一个客观的、概括的了解。“百种中国杰出学术期刊”依据中国科学技术信息研究所对科技期刊的统计结果评出,整个评审过程完全由中国科学技术信息研究所独立进行,其评审结果比较公正、客观,获奖期刊代表了中国科技期刊的最高学术水平。

《航空学报》在2006年发布的《中国科技期刊引证报告》中被列入航空、航天类,综合排名位居同类期刊之首,其总被引频次、影响因子、他引总引比等指标均居同类期刊前列,部分数据参见下表。

期刊名称	载文量	总被引频次	影响因子	即年指标	他引总引比	基金论文比
航空学报	155	666	0.400	0.045	0.90	0.75
宇航学报	167	438	0.481	0.042	0.76	0.55
推进技术	128	408	0.409	0.070	0.69	0.56
北京航空航天大学学报	293	483	0.205	0.024	0.93	0.58
航空动力学报	200	354	0.354	0.070	0.74	0.47
南京航空航天大学学报	163	405	0.361	0.030	0.88	0.55
哈尔滨工业大学学报	503	706	0.317	0.028	0.88	0.64
西北工业大学学报	183	362	0.252	0.005	0.94	0.48

(张利平)