

层合复合材料Z-pin增强 技术研究进展

Research Progress of Z-pin Reinforced Composite Laminate

南京航空航天大学 孙涛 李勇 王鹏 马丹 范琳 程培忠 肖军



孙涛

南京航空航天大学材料科学与技术学院硕士研究生,研究方向为复合材料自动化成型。

纤维增强复合材料层合板具有良好的面内力学性能和可设计性,但较低的层间强度和层间断裂韧性影响了其工程应用,层合板在低能量冲击(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)下容易产生分层而导致结构失效;厚板及开口处容易产生分层破坏;共固化共胶结结构容易在结合面上形成

纤维增强复合材料层合板具有良好的面内力学性能和可设计性,但较低的层间强度和层间断裂韧性影响了其工程应用。应用各种Z向增强技术(包括缝合技术、三维编织、Z-pin增强技术等)提高层合复合材料抗分层性能是航空复合材料结构技术的重要研究内容。

结构薄弱点。应用各种Z向增强技术(包括缝合技术、三维编织、Z-pin增强技术等)提高层合复合材料抗分层性能是航空复合材料结构技术的重要研究内容。其中,Z-pin增强技术是自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。与其他三维增强技术相比,该项技术具有更容易操作、便于控制工艺质量等优点,尤其适于预浸料成型工艺。本文简要介绍了Z-pin增强技术的工艺特点,重点综述了这一领域国内研究的最新进展。

Z-pin 增强技术及其应用

Z-pin增强技术是将针状细杆Z-pin植入到未固化的层合构件形

成三维增强,从而提高其层间抗破坏能力。常用的Z-pin材料是直径为0.2~1.0mm的高强度、高模量钛合金针和碳纤维针。在摩擦力和材料对其约束的双重作用下,Z-pin像钉子一样将层合板的各个子层固结在一起。

20世纪末,美国Aztex公司提出了UAZ(Ultrasonically Assisted Z-Fibre)工艺方法,将其用于大规模的高速植入Z-pin,其中将Z-pin植入到未固化的层合板包括2个步骤:首先用数控植入机将Z-pin按预先设计的方案植入到泡沫载体中,然后用专用的超声波枪将植入到泡沫中的Z-pin压入层合板,最后去掉压碎的泡沫。UAZ已成为现阶段应用最广泛的Z-pin植入工

艺。

层合结构中植入少量的 Z-pin (体积分数一般为 0.5% ~ 4.0%) 后,可获得明显的增韧效果。1998 年波音公司率先在 F/A-18E/F 战斗机上采用 Z-pin 增强技术,在机身段和进气道使用手工植入 Z-pin 来取代传统的机械连接方式,增强部位面积达 5.1m²,共取代 4600 处机械连接紧固件,每架战机减重 17kg,减少成本 83000 美元。在民用方面,Z-pin 已用于增强 F1 赛车的防滚架。

Z-pin 增强技术的发展

Z-pin 增强技术是目前层合复合材料增韧领域的新技术,公开发表文献主要集中在美国、澳大利亚、英国等发达国家。美国波音公司申请了一系列 Z-pin 增强技术的专利,其中包括 Z-pin 增强夹层结构和 Z-pin 增强层合板。

Z-pin 增强技术是装备技术、材料工艺技术的综合技术集成,包括:

(1) Z-pin 材料及拉挤技术。材料体系应满足快速固化以适应拉挤成型要求;应用热分析及工艺模拟与试验,确定预处理温度、最佳模具的温度分布、拉挤速度等工艺参数。

(2) Z-pin 过渡植入技术。采用数控技术将 Z-pin 植入到过渡泡沫,需要开发专用设备及其软硬件系统,精确控制 Z-pin 植入位置、深度和植入角度。

(3) 低成本载体技术。研究不同泡沫对 Z-pin 的握力与支撑刚性、压缩后残余变形与恢复特性,筛选适用于不同结构特征的低成本泡沫材料。

(4) 超声植入工艺与装备。研究超声频率与功率密度对植入效果的影响,开发专用超声锤系统。

(5) Z-pin 增强设计数据库。研究不同 Z-pin 材料、密度、植入方式、工艺及其对层间和面内性能的影响



植入 Z-pin 的泡沫载体和超声植入机

规律,获得设计数据。

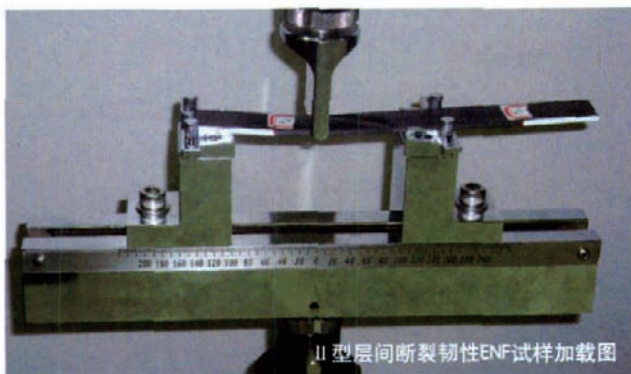
国内 Z-pin 增强技术的研究现状

国内研究 Z-pin 增强技术已有几年历史,基础研究主要包括各种力学行为与机理理论分析,但 Z-pin 增强设计制造与应用技术在国内仍处于试验阶段。

目前 Z-pin 增强技术基础研究主要集中在 Z-pin 对于材料性能的影响,不仅包括抗分层、冲击损伤容限、厚度方向的刚性、连接强度和接头挤压强度等,而且包括 Z-pin 植入导致材料面内性能的降低(如拉伸强度、压缩强度、弯曲强度和疲劳特性等)。大连海事大学的孙先念等建立了用于分析含有 Z-pin 的双悬臂梁(Double Cantilever Beam, DCB)的有限元模型,通过数值算例分析了 Z-pin 对层间韧性增强效果的影响及其原因。数值计算结果表明: Z-pin 的几何分布对其增强层间韧性的影响相对较小。清华大学航空航天学院的滕锦等对层合板的低速冲击损伤过程进行了有限元模拟,并对含有直径 1.12mm、体积分数 1% 的 T300/3234 碳纤维树脂基复合材料进行了研究,结果表明:采用碳纤维 Z-pin 增强可使冲击后层

间分层区面积减少 50% 左右,有限元模拟的结果为 50.6%。中国飞机强度研究所的张阿盈等用模拟计算的方法研究了 Z-pin 增强复合材料 DCB 层合板 I 型裂纹的疲劳扩展问题。模拟计算表明:无论是位移控制模式还是载荷控制模式,Z-pin 都可以有效地降低分层扩展速率。

国内 Z-pin 增强设计制造研究起步先于基础研究,但受装备技术制约进展缓慢。北京航空制造工程研究所较早开展 Z-pin 制造技术及应用研究,手工制 Z-pin、通过模具导向过渡植入、应用进口超声锤实现了 Z-pin 增强锤制造,为国内诸多单位开展理论研究提供了支撑;并将缝合技术与 Z-pin 技术有效结合,对某盒形件开展了有益探索。南京航空航天大学以自动化和工程应用为目标,从装备与工艺入手,2007 年研制成功 Z-pin 拉挤技术及装备、Z-pin 数控植入机及 Z-pin 过渡泡沫技术,2008 年研制成功超声植入锤,开展了 Z-pin 植入和典型件性能试验探索,形成了成套技术与装备,2008 年开始与多家航空企事业单位及民用复合材料单位合作,进行 Z-pin 增强技术试验,研究 Z-pin 的直径、体积分数、植入角度对层合板面内力学性能的影响。



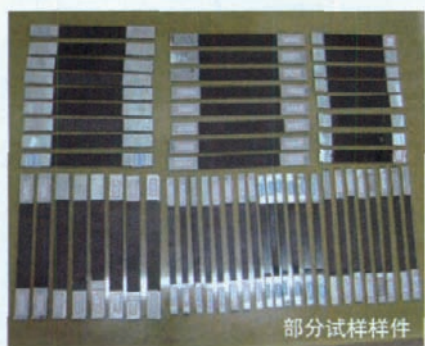
II型层间断裂韧性ENF试样加载图

1 Z-pin 增强复合材料基本性能研究

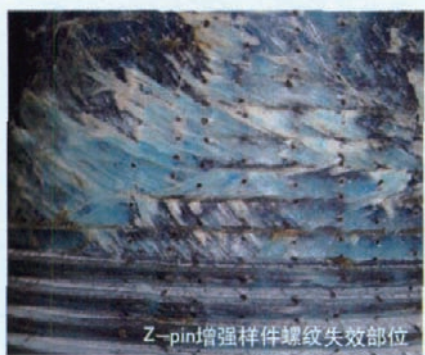
试验件: 碳/环氧树脂复合材料预浸料, 铺层方式为 $[0]_6$ 、 $[0]_{12}$ 、 $[90]_{12}$ 、 $[0/+45/-45/90]_{2S}$ 、 $[45/-45]_{4S}$ 、 $[(0, 90)]_{4S}$ 、 $[(\pm 45)/(0, 90)]_{2S}$ 、 $[(\pm 45)]_{4S}$ 。

Z-pin: T300 碳纤维/环氧拉挤单向复合材料。

拉伸试验结果表明: 对于 $\phi 0.3\text{mm}$ 和 $\phi 0.5\text{mm}$ 的 Z-pin, 植入体积分数为 2% ~ 4% 时, 层合板面内力学性能(强度、模量)损失在 5% ~ 10% 之间, 泊松比基本没有变化, 破坏模式相同。Z-pin 对于不同铺层方式的影响也不同, 其中对于单向铺层的影响最大, 例如对于铺层方式 $[0]_6$, 相比于空白样件, Z-pin 增强样件拉伸强度下降 9.4%, 拉伸模



部分试样样件



Z-pin增强样件螺纹失效部位

量下降 4%。而对于航空航天领域广泛采用的 $[0/90]$ 、 $[0/+45/-45/90]$ 铺层, 则影响较小。

Z-pin 的植入改变了层合板内的微观结构, 微观结构的改变决定了其面内损失和层间增

强效果。首先分析 Z-pin 对层合板微观结构的影响。

(1) 对纤维的影响: Z-pin 被压入到层合板过程中, 在面内方向上, 周围的纤维会变形为波浪状绕开 Z-pin, 并在周围形成一个“眼状”区域。同时, 压入过程会使周围的纤维在厚度方向上产生变形。

(2) 对树脂基体的影响: 由于 Z-pin 周围的纤维在压入过程中变形, 在 Z-pin 周围会形成一个富树脂区, 这一区域在层合板固化后会成为一个薄弱点, 从而影响层合板的面内力学性能。

其次, 分析 Z-pin 直径和体积分数的影响, 随着直径的增大, 受损伤的纤维会增多, 并且单根 Z-pin 周围所形成的“眼状”区域面积也会增大, 从而导致面内力学性能的降低。而随着体积分数的加大, 除了眼状区域的总体面积会增大外, Z-pin 之间很小的间距还有可能使得相邻的区域连接成为一个更大的富树脂区, 从而使得性能急剧下降。

2 Z-pin 增强复合材料 II 型断裂性能研究

采用端部预制裂纹弯曲试验 (End Notched Flexure, ENF) 方法研究了 Z-pin 的植入密度对 $[0]_{24}$ 铺层层合板 II 型层间断裂韧性的影响。Z-Pin 植入密度为 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ (体积分数 0.44%)、 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ (体积分数 1.77%)、 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ (体积分数 3.14%)。结果表明: 相比于空白样件, Z-Pin

增强样件 II 型层间断裂韧性分别提高 31.3%、190%、350%。

3 Z-pin 增强复合材料应用研究

为拓宽 Z-pin 技术在民用复合材料应用, 南京航空航天大学与扬州新扬科技发展产业有限公司合作, 针对深油井复合材料高压油管轴向拉伸载荷大、螺纹接头部分易出现拉脱失效的问题, 应用 Z-pin 技术增强最薄弱的螺纹连接部分来提高接头的连接强度。结果表明: 在轴向拉伸载荷下, 植入少量的 Z-pin 能显著提高螺纹接头的连接强度, 改善各齿的应力分布, 提高齿根部纤维层的层间剪切强度。并基于试验观察和数据分析, 深入研究了螺纹接头的破坏模式和 Z-pin 技术的增强机理, 其增强机理是植入的 Z-pin 在层间裂纹处形成桥接区域, 从而有效地阻止了早期裂纹的扩展, 改善了破坏模式, 接头的破坏载荷提高 10% 以上。

结束语

Z-pin 增强技术是目前层合复合材料增韧领域的新技术, 国内外研究工作已经取得了许多成果, 但尚有许多基础问题需要研究: (1) Z-pin 的增韧机理尚不明确, 尽管目前已经提出了多种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, 因此, 对增韧机理还需要进一步深入研究来完善; (2) 评估 Z-pin 的各设计参数的统一试验和分析标准还没有形成, 亟待建立可供工程应用的公式、图标和数据库; (3) Z-pin 的植入角度对于材料性能的影响有待深入研究, 特别是带角度的 Z-pin 对于接头连接强度的影响。而就应用而言, 更需要设计制造和研究人员积极合作, 研究不同材料体系、结构单元及其增强效应和规律, 通过试验获得工程实用数据, 大胆应用。 (责编 小颖)