

考虑初始应力的X850/IM+复材板高速冲击试验



王计真*

中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要:为更准确评估飞机复合材料结构的抗冲击能力,开展面内初始应力作用下的复合材料层合板冲击影响与损伤特性研究。设计一种面内拉伸/压缩初始应力施加设备,提出一种初始应力复合材料高速冲击试验方法,针对X850/IM+牌号的复合材料层合板,开展高速冲击试验。结果表明,面内初始应力对其高速冲击行为影响显著;相比无初始应力作用下的结果,面内压缩应力降低了结构抗弯刚度、横向冲击载荷和剩余速度,提高了弹道速度;而面内拉伸应力作用则反之。

关键词:面内初始应力;复合材料层合板;高速冲击试验;弹道速度

中图分类号:V285,V216

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.01.011

纤维增强复合材料是航空领域的重要材料之一,且得到广泛应用^[1,2]。飞机复合材料结构服役过程中,会遭遇工具坠落、轮胎碎片、碎石、冰雹、飞鸟和武器碎片等的冲击威胁,导致结构失效破坏,威胁飞机结构和乘员安全。

当前对复合材料冲击行为的相关研究,主要针对无预载荷情况,而真实飞机结构遭受冲击时均承受一定载荷。飞机起降过程中,机身底部易遭受跑道碎石冲击威胁,此时机身底部蒙皮结构承受较大压缩载荷;飞机检修时,工具坠落可能砸伤机翼上表面,此时其结构内部存在较大拉伸载荷。20世纪80—90年代,就有学者^[3-5]曾预见,静态分布载荷对民机复合材料结构冲击影响研究将成为一个热点。德国宇航中心在该领域进行了大量试验和数值仿真,认为初始应力效应对结构冲击损伤有明显影响,进行复合材料强度评估时必须重视初始应力作用^[6,7]。此外,美国AC 20-107B中指出,在研究复合材料结构意外冲击时,须考虑实际边界和载荷约束^[8]。

国外相关学者针对预载荷状态下复合材料结构的冲击行为已开展了相关试验,以评估飞机实际冲击碰撞场景的复合材料强度。参考文献[9]~参考文献[12]考虑拉伸初始载荷作用下开展冲击试验,参考文献[10]、参考文献[13]、参

考文献[14]考虑压缩初始载荷开展冲击试验,得到结论:拉伸初始载荷使复合材料层合板抗弯刚度增大,进而导致冲击载荷峰值提高、层合板冲击变形减小;而压缩载荷则反之。此外压缩预载荷还可能引起层合板面内屈曲。国内,仅见部分文献^[15,16]开展了预应力复合材料的初步理论建模和数值仿真,得到了类似结论,未见开展相关试验研究。

本文设计了一种初始应力加载试验装置,并针对X850/IM+牌号的复合材料层合结构,采用气炮法开展初始应力高速冲击试验,讨论了初始应力类型和大小对结构响应的影响。

1 初始应力冲击试验装置与方法

1.1 初始应力施加设备

面内初始应力施加设备为试验件提供设计初始应力形式和大小,通过框架四周均布加载螺栓的旋进或旋出,以实现单向或二向初始拉伸、压缩或剪切的模拟,如图1所示。面内加载大小通过应变形式描述,基于螺栓旋进或旋出的圈数换算成螺栓轴向行程(螺纹螺距已知),实现预设应变的加载。

收稿日期: 2019-09-05; 退修日期: 2019-10-02; 录用日期: 2019-10-15

基金项目: 航空科学基金(2016ZA23005)

*通信作者. Tel.: 13087501018 E-mail: wangjizhen623@163.com

引用格式: Wang Jizhen. High-speed impact tests of composite panels under prestressing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(01): 81-84. 王计真. 考虑初始应力的X850/IM+复材板高速冲击试验[J]. 航空科学技术, 2020, 31(01): 81-84.

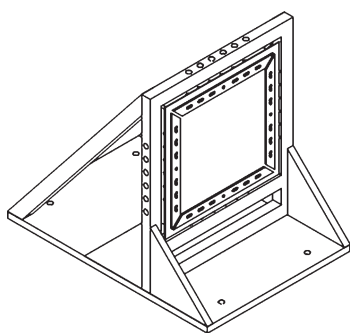


图 1 初始应力施加设备连接关系图

Fig.1 Prestressing device diagram

1.2 高速冲击试验装置

高速冲击试验基于空气炮装置开展,试验设备包括气炮装置、控制系统、瞄准设备、测速系统以及数据材料处理系统等,图2为试验设备框图,图3为冲击试验原理图。

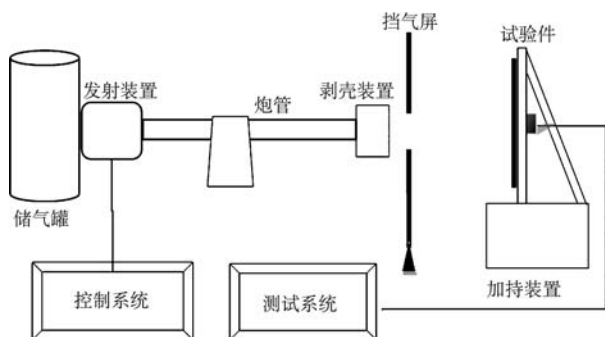


图 2 D80 气炮系统设备框图

Fig.2 D80 gas gun diagram

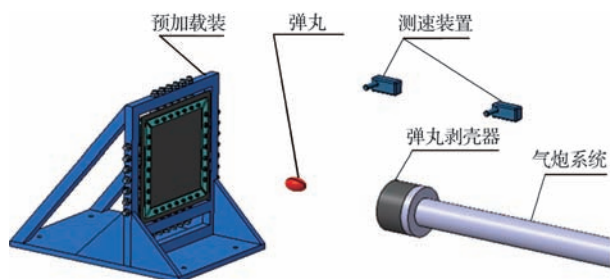


图 3 考虑初始载荷的高速冲击试验原理图

Fig.3 High speed impact test diagram under preloading

一个高速摄像机拍摄靶板正面拍摄靶板侧面记录板的变形;另外一台高速摄像机拍摄钢弹飞行轨迹,记录钢弹飞行姿态。根据实际需要放置背景板和补充光源,提高钢弹与背景的对比度。

冲击试验过程中记录试验件冲击速度、穿透/反射速度、应变数据,并通过C扫描对层合板冲击损伤,层合板中

心位移采用激光位移传感器测量,层合板贴片位置如图4所示。

测速装置安装在弹体飞行中途、挡气屏之后、试验件之前。在弹体飞行路径上装置两个光幕,测量弹体飞过两个光幕时间间隔,计算得到入射速度。

完成冲击试验后,对层合板进行无损检测,采用C扫描,检测层合板的纤维、基体和分层损伤情况。

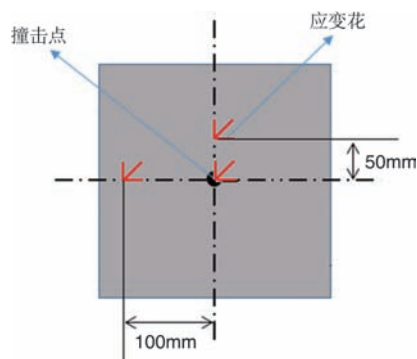


图 4 贴片位置

Fig.4 Strain gauge attachment position

2 试验结果分析

2.1 试验件规划

层合板试验件为正方形,尺寸为 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 2.1\text{mm}$;材料牌号为X850/IM+,共18件,铺层方式为 $[45/-45/0/90/45/-45/90/0/-45/45]$ 。

冲击试验采用D80气炮系统,冲击物为直径25.4mm的钢球。冲击速度分别为40m/s、50m/s和60m/s。初始应力通过螺栓施加,通过监测应变花的应变数据确定大小;共施加三种初始应力形式,分别为 $-5000\mu\epsilon$ (压缩应变5‰)、0和 $5000\mu\epsilon$ (拉伸应变5‰)。试验矩阵见表1。

表 1 试验矩阵

Table 1 Test matrix

冲击速度/(m/s)	预应变施加方式		
	$-5000\mu\epsilon$	0	$5000\mu\epsilon$
40	2件	2件	2件
50	2件	2件	2件
60	2件	2件	2件

2.2 结果分析

如图5所示,为不同初始速度和不同初始应力状态下的层合板撞击剩余速度,其中正值表示反弹,负值表示穿透。可看出,随着冲击初始速度的增加,冲击反弹速度在增

加至一定状态后开始降低,直至出现穿透,且传递至层合板的能量(层合板破坏耗能和弹性变形储能)增加。

在同一速度下,施加拉伸初始应力使剩余速度增加,施加压缩初始应力使剩余速度减小,表明拉伸初始应力提高了层合板的弯曲刚度,而压缩初始应力降低了层合板弯曲刚度。

在40m/s和50m/s时,该种牌号的复合材料层合板均未被穿透,在60m/s时,无初始应力的层合板和施加5000 $\mu\epsilon$ (拉伸应变5‰)的层合板出现穿透,而施加-5000 $\mu\epsilon$ (压缩应变5‰)的层合板未穿透并反弹。可以推测,高速横向冲击过程,层合板面内为拉伸应力状态,而在拉伸初始应力叠加作用下,复合材料纤维更容易断裂,使层合板的弹道速度(刚好穿透层合板的冲击速度)降低;反之,压缩初始应力抵消部分冲击面内拉伸应力,层合板内纤维不容易断裂,因而提高了层合板的弹道速度。

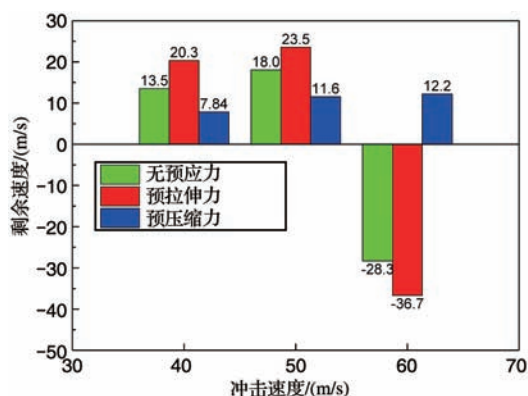


图5 冲击反射/穿透速度

Fig.5 Rebound velocity and penetration velocity

3 结论

本文提出了一种考虑初始应力的薄板高速冲击试验方法,设计了面内拉伸/压缩初始应力试验装置,并针对X850/IM+牌号的复合材料层合板,开展了高速冲击试验,得到如下结论:

(1) 在同一速度下,施加拉伸初始应力使剩余速度增加,施加压缩初始应力使剩余速度减小,表明拉伸初始应力提高了层合板弯曲刚度,而压缩初始应力降低了层合板弯曲刚度。

(2) 随着速度的增加,冲击反弹速度先增加后逐渐降低,直至出现穿透。

(3) 高速横向冲击过程,拉伸初始应力叠加作用下,层合板的弹道速度降低;而压缩初始应力提高了层合板的弹

道速度。

AST

参考文献

- [1] 孙侠生,王元元. 欧盟框架计划航空研发项目特点分析及启示[J]. 航空科学技术, 2019, 30(6): 1-9.
Sun Xiasheng, Wang Yuanyuan. Analysis of EU framework programme aviation R&D projects and the enlightenment [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30 (6): 1-9. (in Chinese)
- [2] 孙银宝,李宏福,张博明. 连续纤维增强热塑性复合材料研发与应用进展[J]. 航空科学技术, 2016, 27(5): 1-7.
Sun Yinbao, Li Hongfu, Zhang Boming. Progress in research and application of continuous fiber reinforced thermoplastic composites [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (5): 1-7. (in Chinese)
- [3] Williams J G, Anderson M S, Rhodes M D, et al. Recent developments in the design, testing and impact-damage tolerance of stiffened composite panels[M]. Fibrous Composites in Structural Design, 1980.
- [4] Soderquist J R. Certification of civil composite aircraft structure[R]. SAE Technical Paper, 1981.
- [5] Nettles A T, Lance D G. The effect of compressive preload on the compression-after-impact strength of carbon/epoxy[R]. NASA technical paper TP3303, 1992.
- [6] Heimbs S, Bergmann T, Schueler D, et al. High velocity impact on preloaded composite plates[J]. Composite Structures, 2014, 111: 158-168.
- [7] Toso N, Johnson A. LIBCOS: Significance of load upon impact behavior of composite structure[R]. Final Report EASA2009 OP24, German Aerospace Center (DLR), Instt for Struct and Design, Stuttgart, 2009.
- [8] FAA Advisory Circular. AC20.107B composite aircraft structures[S]. American: Federal Aviation Administration, 2009.
- [9] Kelkar A D, Sankar J, Grace C, et al. Behavior of tensile preloaded composites subjected to low-velocity impact loads [J]. Pressure Vessels and Piping Division Newsletter, 1997(3): 32-40.
- [10] Whittingham B, Marshall I H, Mitrevski T, et al. The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage[J]. Composite structures, 2004, 66(1): 685-698.
- [11] Mitrevski T, Marshall I H, Thomson R S, et al. Low-velocity

- impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes[J]. Composite structure, 2006, 76(3):209-217.
- [12] Johnson A F, Toso-Pentecote N, Schueler D. Damage tolerance of pre-stressed composite panels under impact loads[J]. Applied Composite Materials, 2014, 21(1):123-147.
- [13] Zhang X, Davies G, Hitchings D. Impact damage with compressive preload and post-impact compression of carbon composite plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(5): 485-509.
- [14] Heimbs S, Heller S, Middendorf P, et al. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10): 1182-1193.
- [15] 王计真,刘小川.预加载复合材料层合薄板低速冲击理论分析[J].应用力学学报,2018,35(6):1248-1253.
- Wang Jizhen, Liu Xiaochuan. Analysis of low-speed impact of pre-loaded composite laminates[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(6): 1248-1253. (in Chinese)
- [16] 王计真. 预应力状态下复合材料板冲击响应数值方法研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(4): 25-31.
- Wang Jizhen. Numerical method of impact response of composite plates under prestressed state[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(4): 25-31. (in Chinese)
- (责任编辑 王为)
- 作者简介**
王计真(1987—)男,工程师,硕士。主要研究方向:冲击动力学。
Tel: 13087501018
E-mail: wangjizhen623@163.com

High-speed Impact Tests of Composite Panels Under Prestressing

Wang Jizhen*

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: In order to reveal the real impact resistance of aircraft composite structures, the impact behavior and damage of composite panels under prestressing are studied. A kind of in-plane tension and compression loading device was designed, and a kind of high-speed impact test method for prestressed composite structures was proposed. High-speed impact tests for X850/IM+ composite panels were conducted. The results show that in-plane prestress has a significant influence on the impact response. Compared with non-prestressed impact result, the in-plane pre-compression reduces the structural bending stiffness and relieves the lateral impact load, resulting in a decrease of the residual speed and an increase of the ballistic velocity, while the in-plane pretension on the contrary.

Key Words: in-plane prestressing; composite panels; high-speed impact tests; ballistic velocity

Received: 2019-09-05; **Revised:** 2019-10-02; **Accepted:** 2019-10-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2016ZA23005)

***Corresponding author.** Tel. : 13087501018 **E-mail:** wangjizhen623@163.com