

文章编号:1000-6893(2007)01-0213-04

厚度对混合机织复合材料低速冲击和准静态横向压缩性能的影响

王立朋¹, 燕 瑛¹, 曾 东¹, 王国平²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 哈尔滨飞机工业集团, 黑龙江 哈尔滨 150066)

Influence of Thickness on Low-Speed Impact and Quasi-static Indentation Performances of Mixed Woven Composites

WANG Li-peng¹, YAN Ying¹, ZENG Dong¹, WANG Guo-ping²

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Harbin Aviation Industry (Group) Ltd, Harbin 150066, China)

摘要: 将二维机织碳布和单向碳布预浸料按照一定比例铺设成的混合机织复合材料兼具比刚度、比强度高、抗低速冲击损伤以及工艺性好等优点。试验研究了3个铺层结构相似,但总厚度不同的混合机织复合材料的低速冲击性能,采用超声波C扫描法记录了各层合板损伤面积,测量了剩余压缩强度,并进行了准静态横向压缩试验。实验结果表明,厚度增加会使层合板内部的超声波C扫描损伤面积增加,但并不会明显影响其剩余压缩强度。

关键词: 混合机织复合材料; 厚度; 低速冲击; 准静态横向压缩

中图分类号: V258; TB33 **文献标识码:** A

Abstract: The mixed woven composites being laid up by 2D woven and unidirectional carbon prepreg alternately have the advantages of special stiffness, special strength and impact performance, and the processibility is good also. In this paper, three types of laminates of similar stacking structure but be different in thickness were investigated. Low-speed impact, residual compressive strength and quasi-station indentation experiments were performed. It was found that the damage area got by ultrasonic C-scan method will increase with the thickness increase, but the residual compressive strength will not be influenced obviously.

Key words: mixed woven composites; thickness; low-speed impact; quasi-static indentation

与传统层合板相比,由碳纤维机织布铺设的复合材料层合板具有优异的抗低速冲击性能,而且与其他三维结构复合材料相比,有加工工艺性好、成本低的优点^[1-3]。但机织预浸料单层在材料主向的刚度和强度性能都不及单向帘子布,二者交替混和铺层使用能够取长补短,兼顾刚度、强度、耐冲击等性能指标。笔者在前期研究中^[4]分析了由这2种按照不同铺层比例制成的混合机织铺层复合材料的刚度、强度以及低速冲击性能,通过试验分析表明在机织层合板中添加一定比例的单向预浸料铺层能够在不影响其抗低速冲击性能的前提下大大提高其材料主向的刚度和强度,试验结果表明这种混合铺层中0°单向布所占比例在40%以下时并不会明显影响层合板的低速冲击性

能。本文根据先前的试验数据,适当增加了混合铺层中的0°单向布比例,但该比例的潜力已经接近极限,否则将严重影响其横向冲击损伤容限。要提高机织复合材料的承载能力,除了填充单向布之外,另一条途径就是增加其铺层板厚。有研究表明铺层板厚同样会影响层合板的抗冲击性能^[5,6],层合板厚度的变化能够引起复合材料的能量吸收模式和损伤模式的改变,厚度增加时冲击力将会明显增加,从而给层合板造成更严重的内部损伤。

本文将试验分析层合板厚度对其低速冲击性能的影响,针对不同厚度的3个混合机织铺层层合板,进行了多个能量级别的低速冲击试验和准静态横向压缩试验,以分析对比其在抗冲击性能方面的差异。

1 试验材料

与之前的试验研究^[4]相同,本次试验分析的

收稿日期:2005-09-27; 修订日期:2006-04-08

基金项目:国家自然科学基金(50073002)

通讯作者:燕 瑛 E-mail:yingyanfao@buaa.edu.cn

2种较厚的混合铺层复合材料层合板也是由5步法缎纹碳布和无纬单向碳布混合铺设而成,缎纹布单层厚0.27 mm,无纬单向布单层厚0.16 mm,层合板用热压罐成型,纤维体积含量

为60%±5%。为了对比分析,将之前试验研究^[4]中的P-4铺层试验数据也一并列出,所有3种铺层结构如表1所示。2种较厚的层合板铺层除了总厚度增加外,0°单向布所占比例也适当有所增加。

表1 混合铺层复合材料的铺层情况

Table 1 Stacking sequence of mixed woven composites

编号	铺层顺序*	铺层数	理论板厚/mm	0°单向布厚度比例/%
P-4	$[(\pm 45)/0/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/90/\bar{0}]_s$	21	4.24	41.5
P-7	$[(\pm 45)/0/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/0_2/90/\bar{0}]_s$	25	4.88	49.2
P-8	$[(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/0_2/(\pm 45)/90/\bar{0}]_s$	29	5.74	47.4

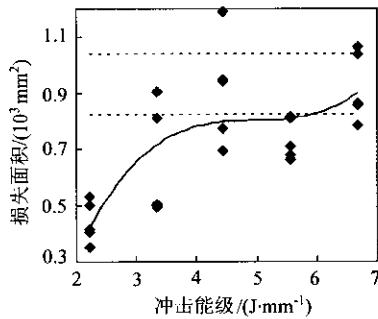
* (±45)表示一层机织单层,与试件主向成45°角铺设;0与90°分别表示沿着或者垂直试件主向的单向布铺层

2 低速冲击试验

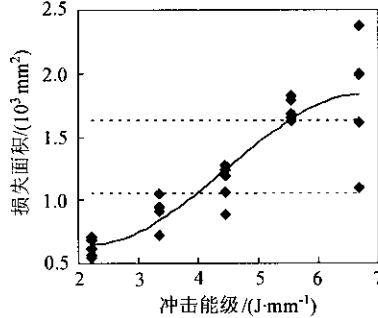
冲击试验方法参考美国先进复合材料供应商协会推荐的SACMA SRM 2-88试验标准,试样大小为150 mm×100 mm,采用落锤法进行冲击,通过调整冲击球的高度调整冲击能量,冲击能量分为每毫米2.23 J,3.34 J,4.45 J,5.56 J,6.67 J这5个等级,对每个铺层的试样在每个等级的冲击能量下都选取5个试件进行试验,然后采用超声波C扫描检测试样内部损伤面积,并测量冲击后的剩余压缩强度以评估各铺层的抗低速冲击性能,为了对比分析,将之前研究的P-4的数据同时列出。

超声波C扫描方法可以在不损伤试样的前提下直观、准确地判别出层合板内部的低速冲击损伤。本研究由计算机采集数据,通过分析处理,直接显示损伤区的大小。C扫描结果将损伤程度分为8个不同色带,在本试验研究中取损伤最严重的2个色带的面积和作为总损伤面积。各试样的C扫描损伤面积如图1所示。

从损伤面积对比来看,P-8铺层的损伤面积明显要大一些,这说明虽然同一冲击能级下单位厚度承载的冲击能量相同,但由于P-8铺层板厚明显大于另外两种铺层,弯曲刚度相应增加,对冲击的缓冲作用不足,造成冲击过程中的冲击力增加,从而给层合板造成了更为严重的内部损伤。



(b) P-7 铺层



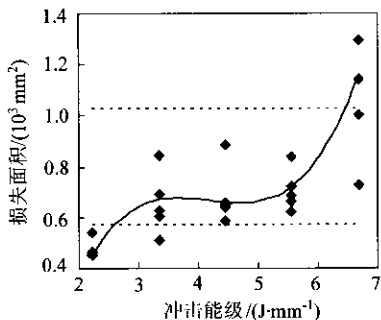
(c) P-8 铺层

◆ 冲击试验数据点 - - - - 准静态横向压缩数据
— 冲击试验数据3次拟合曲线

图1 各试样的损伤面积

Fig. 1 Damage areas of three different composites

图2对比了3种铺层的损伤面积随着总冲击能量的变化趋势,图中曲线为平均值的3次拟合曲线,可以看出当总冲击能量大于20 J时,P-8铺层的



(a) P-4 铺层

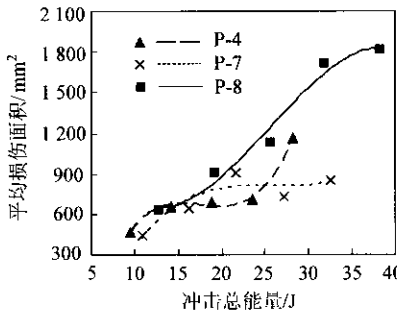


图2 各铺层平均损伤面积随冲击总能量的变化

Fig. 2 Connection between average damage area and total impact energy

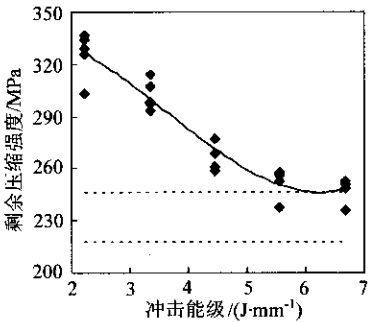
损伤面积开始明显大于其他 2 个铺层,可见即使相同的冲击总能量,增加层合板厚度对冲击损伤也是不利的。另外 P-7 铺层的损伤面积与 P-4 相差无几,证明将 0°单向布提高到 50%是合理的,根据先前的试验分析^[4],这个比例不宜进一步提高。同时还观测到与先前混合铺层层合板相同的试验现象,即低速冲击的损伤面积具有相当大的离散性,这同样是由于损伤中含有个别较大的分层区所致。

各铺层的冲击后压缩强度如图 3 所示。与冲击损伤面积不同,不同铺层试样的剩余压缩强度相差并不大,损伤面积较大的 P-8 铺层甚至还要稍高一些,这是因为子层屈曲是含低速冲击损伤层合板受压缩时的主要损伤形式之一^[7,8],板厚较大的铺层在承受冲击时虽然会产生较大的分层损伤,但一般来说,较大的分层区只出现在少数

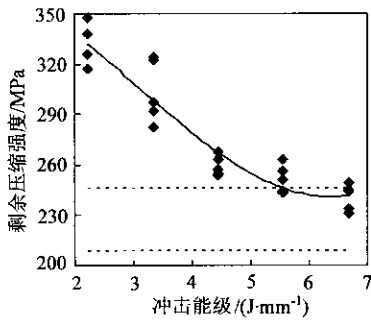
分层界面,较厚的层合板出现分层后的子层相对也要厚一些,这就增加了子层的屈曲强度,从而抵消了分层损伤面积大的影响,或者说较厚的试样受子层屈曲影响较小^[9],从而使整体上其冲击后剩余压缩强度并没有受到过多影响,另外,0°单向布比例的增加也是其剩余强度增加的一个因素。同时发现,冲击能级高于 6 J/mm 后各铺层的冲击后剩余压缩强度就基本不再降低,说明对于本文研究的混合比例接近为 50%的混合铺层层合板,6 J/mm的冲击能量已基本将其冲透。

3 准静态横向压缩试验

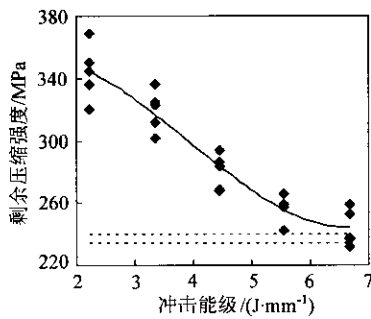
有研究表明^[10,11],准静态横向压缩对复合材料层合板所造成的损伤及其剩余压缩强度可以和低速冲击损伤相当,且对其继后的压缩破坏几乎没有影响,准静态横向试验的损伤面积和剩余压缩强度可以看做是其承受较大冲击时的损伤面积和冲击后剩余压缩强度,并可以作为获取冲击试验冲击力曲线的替代方案。本次试验研究对 3 种铺层都做了 2 个试样的准静态横压试验,同样采用直径为 12.7 mm 钢制压头,试样大小和装卡方案也与低速冲击试验一致,压头压入速度为 1 mm/s。横压后的损伤面积和剩余压缩强度值已分别标明在图 1 和图 3 中。3 种试样中各取 1 个的压头横压力-位移如图 4 所示。



(a) P-4 铺层



(b) P-7 铺层



(c) P-8 铺层

◆ 冲击试验数据点 - - - - 准静态横向压缩数据
— 冲击试验数据 3 次拟合曲线

图 3 不同试样的剩余压缩强度

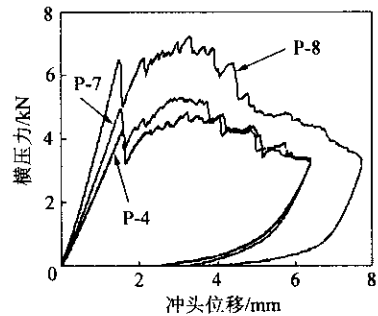


图 4 横压力-冲头位移曲线

Fig 4 Curves of the transverse force-displacement of the plunger tip

从图 1 可以看出,除 P-7 较为接近外,其他 2 个铺层的横向压缩损伤面积与冲击试验中的最大损伤面积都低很多,这说明准静态横向压缩与低速冲击的损伤模式并不完全相同^[7],而且与冲击试验一样,2 个试样本身的损伤面积值也相差较大。不管是低速冲击还是准静态横向压缩,虽然都存在着纤维断裂和基体开裂的损伤形式,但分层损伤的面积肯定是最小的,而 C 扫描的损伤面积只是所有分层损伤的整体投影面积,并不能反

Fig. 3 Residual compressive strength of different laminates

映整体复杂的分层损伤情况。

与C扫描损伤面积不同的是,由于横压的程度较深,准静态横向压缩的剩余压缩强度与冲击试验中的最低值相差无几,甚至稍低一些,本文的横压载荷很大,基本上已经将层合板压透,进一步证明6 J/mm左右的冲击能量已经对本研究中的层合板造成了最大冲击损伤。

从损伤面积离散度较大而剩余强度趋势明显的试验结果可以看出,不管是低速冲击还是准静态横向压缩都会在层合板内部造成个别不仅面积大,而且具有较大的随机性的分层界面,但其对于剩余强度的影响却并不是很大。

图4中的横压力曲线中,各试样的曲线走向基本一致,在曲线第1次出现跳跃点前,压缩载荷-压头位移曲线都是线性的。在跳跃点处层合板内部产生了对板的弯曲刚度有明显影响的内部损伤,之后,各层合板的压缩载荷仍会随压入位移继续缓慢上升,且在其间曲线不断有小的跳跃,表明板内损伤在不断扩展,并有层内基体开裂、纤维断裂等损伤形式出现。到达最大压缩载荷(曲线的最高点)之后,压缩载荷开始下降,这时层合板内的损伤达到最大值。随着板厚的增加,层合板的弯曲刚度增加,因此横压力-位移曲线的斜率相应增加,各曲线第1个跳跃点的压入位移基本一致,说明这几个铺层结构相近的层合板在承受横向压缩时的初始破坏应变基本上是一致的。

4 结 论

(1) 相同的铺层结构时,厚度越高层合板对低速冲击损伤越敏感,但由于厚度增加同时也提高了屈曲强度,二者相抵,使得层合板的剩余压缩强度并没有太大的变化。

(2) 在机织层合板中添加适当比例的 0° 单向布并不会显著影响其抗低速冲击性能,该比例以不高于50%为宜。

(3) 准静态横向压缩过程与低速冲击过程有相仿之处,但是较高程度的横向压缩造成的损伤面积一般要低于较高能量冲击造成的损伤面积,而剩余压缩强度则基本相当。

参 考 文 献

[1] Ding Y Q, Yan Y, Mallhagger R. Effect of impact and fatigue loads on the strength of plain weave carbon-epoxy composites[J]. Materials Processing Technology, 1995, 55(2): 58-62.

- [2] Hosur M V, Alexander J, Jeelani S, et al. Impact response of affordable graphite/epoxy woven fabric composites[R]. AIAA, 2001-1192, A01-25012, 2001.
- [3] Kim J K, Sham M L. Impact and delamination failure of woven fabric composites[J]. Compos Sci Technol, 2000, 60(5): 745-761.
- [4] 王立朋, 燕瑛. 混合机织复合材料刚度、强度及低速冲击性能试验研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 851-855.
Wang L P, Yan Y. Experimental study of stiffness, strength and low-speed impact performance on mixed woven composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 851-855. (in Chinese)
- [5] Rohchoon P, Jyongsik J. Effect of laminate thickness on impact behavior of aramid fiber/vinylester composites[J]. Polymer Testing, 2003, 22(8): 939-946.
- [6] Tai N H, Ma C C M, Lin J M, et al. Effects of thickness on the fatigue-behavior of quasi-isotropic carbon/epoxy composites before and after low energy impacts[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(11): 1753-1762.
- [7] Kyoung W C, Kim C G, Hong C S. Modeling of composites laminates with multiple delaminations under compressive loading[J]. J Comp Mater, 1998, 32(10): 951-968.
- [8] Kyoung W C, Kim C G, Hong C S. Buckling and post buckling behavior of composite cross-ply laminates with multiple delaminations[J]. Composite Structure, 1999, 43: 257-274.
- [9] 燕瑛, 曾东. 复合材料层板低速冲击剩余强度的研究[J]. 航空学报, 2003, 24(2): 137-139.
Yan Y, Zeng D. Study on the post-impact compressive strength of composite laminates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(2): 137-139. (in Chinese)
- [10] 张子龙, 程小全, 益小苏. 复合材料层合板准静态横压损伤及其压缩破坏研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(5): 108-113.
Zhang Z L, Cheng X Q, Yi X S. Studies on quasi-static indentation damage and compressive failure of composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(5): 108-113. (in Chinese)
- [11] Cheng X Q, Zhang Z L, Yi X S, et al. Effect of SACMA and QMW test methods on compressive properties of composite laminates after low velocity impact [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2002, 15(2): 90-97.

作者简介:

王立朋(1979—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 飞机复合材料结构设计与分析。

E-mail: hbwlp@ase. buaa. edu

燕瑛(1963—) 女, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 飞行器结构设计与复合材料结构设计。

E-mail: yingyanfao@buaa. edu. cn

(责任编辑: 蔡 斐)