

文章编号: 1000-8055(2008)11-2001-06

# T300/ BMP316 层合板冲击后压缩强度试验

崔海坡<sup>1</sup>, 温卫东<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院 上海 200093;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院 南京 210016)

**摘 要:** 对两种不同铺层参数的 T 300/ BMP 316 复合材料层合板进行了冲击后的剩余压缩强度试验研究. 结果表明, 虽然随着冲击能量的增加, 层合板的剩余压缩强度逐渐降低, 但二者之间不满足线性关系; 不同铺层参数对层合板冲击损伤投影图形的长轴方向有一定的影响, 但对冲击损伤投影面积大小几乎没有影响; 层合板的剩余压缩强度与冲击损伤投影面积的大小没有直接关系.

**关 键 词:** 复合材料层合板; 剩余压缩强度; 冲击; 试验

中图分类号: TB33

文献标识码: A

## Post-impact compressive strength experiment of T300/ BMP316 composite laminates

CUI Hai po<sup>1</sup>, WEN Wei dong<sup>2</sup>

(1. College of Medical Device and Food,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Experiment study on impact damage and residual compressive strength had been done on T300/ BMP316 composite laminates with different layer parameters. The results show that although the residual compressive strength gradually decreased with the increasing impact energy, there is no linear relationship between of them. The layer parameters has effect on the long-axis direction of impact damage figure, but hasn't influence on the impact damage area. The residual compressive strength has no direct relationship with the impact damage area.

**Key words:** composite laminates; residual compressive strength; impact; experiment

纤维增强复合材料由于具有比强度、比刚度高, 可设计性强等特点, 已广泛应用于航空航天、医疗器械、以及体育用品等领域中. 复合材料层合结构在制造和使用过程中常常会遇到诸如工具坠落、设备撞击等低速冲击, 受冲击后, 结构容易产生损伤, 并且表面损伤一般很小, 难以直接观察到, 而内部往往会产生基体开裂、基纤剪切、分层和纤维断裂等微观损伤, 这些内部损伤将使层合

结构的力学性能严重退化, 强度甚至可削弱 35%~40%<sup>[1]</sup>, 对结构的整体破坏和失效形成潜在的威胁, 甚至会直接导致事故的发生. 因此, 研究复合材料层合结构的低速冲击损伤及剩余强度问题具有重要的理论与实践意义. Papanicolaou 等<sup>[2]</sup>在试验研究的基础上, 提出了一种预测冲击后层合板剩余压缩强度的宏观模型, 该模型只考虑线弹性材料, 不考虑塑性变形. Soutis 等<sup>[3]</sup>把准各向同

收稿日期: 2007-10-22; 修订日期: 2008-03-30

作者简介: 崔海坡(1978-), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 博士, 主要研究方向为材料力学. E-mail: h\_b\_cui@163.com

性层合板受冲击后的损伤近似地看作为一个圆柱形开孔, 剩余压缩强度通过内聚面模型(该模型用于分析含孔层合板的剩余压缩强度)来预测. Harris 等<sup>[4]</sup>提出了一种分析层合板强度的逐渐损伤模型, 该模型可以估算含缺口层合板在外载荷作用下的刚度降及剩余强度. Asp 等<sup>[5]</sup>研究了冲击后层合板中的分层扩展对其剩余压缩强度的影响. Hosur 等<sup>[6]</sup>通过对 T300/914CFRP 层合板的低能冲击试验及冲击后的压缩试验, 建立了冲击能量与剩余压缩强度之间的非线性方程. 在冲击能已知的条件下, 利用该方程可求得层合板的剩余压缩强度. 程小全等<sup>[7]</sup>基于对 T300/5228 复合材料层合板低能冲击后压缩破坏的试验结果和机理的分析, 提出了一种分析冲击后层合板剩余压缩强度的方法, 该方法将冲击损伤区域简化为圆形, 直接对冲击损伤区域进行刚度衰减, 然后用点应力准则判断冲击后层合板的最终破坏.

T300/BMP316 是一种国内生产的复合材料. 目前, 对该材料的结构力学性能, 尤其是冲击后压缩强度特性的研究还十分薄弱, 有关的试验还很少见. 本文对 T300/BMP316 层合板在冲击载荷及冲击后压缩载荷作用下的破坏过程进行详细的试验研究, 分析不同冲击能量和不同铺层方式对冲击损伤及剩余压缩强度的影响规律, 从而为其抗冲击结构设计及使用提供一定的指导.

1 无损伤层合板压缩强度试验

为与冲击后层合板的剩余压缩强度进行比较, 本文首先进行了无损伤层合板的压缩强度试验. 试验采用 T300/BMP316 复合材料层合板, 其几何尺寸为 110mm×12.5mm×2.5mm, 铺层参数为 (45/-45/90/0/-45/0/45/0/90/0)<sub>s</sub>. 试验设备为 MTS 高温拉扭复合试验机, 如图 1 所示. 压缩试验加载速率取每分钟 1mm<sup>[8]</sup>. 试验结果见表 1.

表 1 压缩试验数据  
Table 1 Compressive test data

| 试件编号 | 破坏强度/<br>MPa | 平均破坏强度/<br>MPa | 离散系数/<br>% |
|------|--------------|----------------|------------|
| Z1   | 481.14       |                |            |
| Z2   | 461.04       | 471.39         | 0.0220     |
| Z3   | 472.00       |                |            |

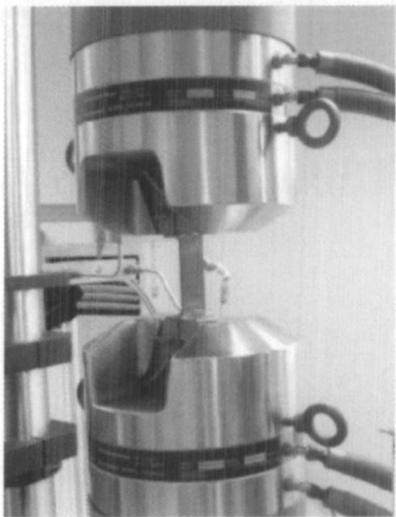


图 1 压缩试验设备  
Fig. 1 Compressive test equipment

2 冲击试验

2.1 材料与试件

试验采用 T300/BMP316 复合材料层合板. 为研究不同铺层参数对层合板冲击损伤及剩余压缩强度的影响规律, 本试验选取了两种铺层参数的层合板, 各试件的基本参数见表 2.

表 2 试验件基本参数  
Table 2 Specimens parameters

| 试件<br>编号 | 冲击<br>能量/J | 试件<br>数量 | 铺层参数                                             | 几何尺寸                |
|----------|------------|----------|--------------------------------------------------|---------------------|
| C1       | 2.2        | 4        | [45/-45/90/0/<br>-45/0/45/0/90/0] <sub>s</sub>   | 89mm×55mm<br>×2.5mm |
| C2       | 5.9        | 5        |                                                  |                     |
| C3       | 8.6        | 5        |                                                  |                     |
| D1       | 5.9        | 4        | [45/-45/90/90/<br>-45/0/45/90/90/0] <sub>s</sub> | 89mm×55mm<br>×2.5mm |

2.2 试验设备

采用自由落体冲击试验机对复合材料层合板进行冲击损伤预制, 如图 2 所示.

冲击时试样夹在两块中间有边长为 40mm 正方形孔的钢板之间. 为保证冲击时冲头能够冲击到层合板的正中心区域, 在下夹具的中间部分开了一个 90mm×56mm×1mm 的矩形槽, 这样基本保证了板的受冲击点与板的中心点之间的距离在 1mm 以内. 冲击锤锤体为圆柱形, 其端部为半球形, 直径是 16mm, 质量固定在 2.2kg, 通过调整冲头的下落高度控制冲击能量. 试验前, 随机抽取部分试件进行 X 光拍摄, 确保没有任何缺陷

存在. 试验过程中采用特殊装置避免冲击锤反弹后下落造成二次冲击.

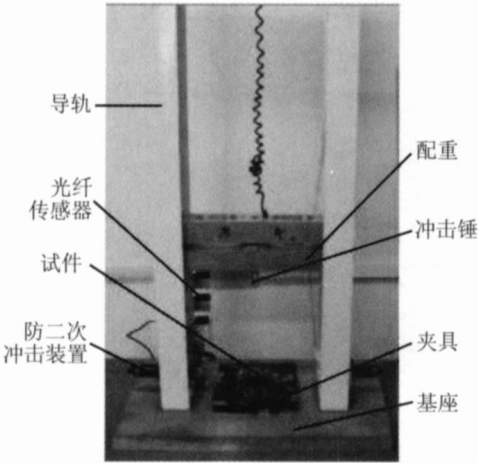


图 2 冲击试验装置  
Fig. 2 Impact test equipment

2. 3 冲击损伤检测

利用 F99- IIIAC 医用诊断 X- 光机对冲击后的试样进行无损检测. 各试样冲击后的 X- 光损伤如图 3 所示, 图中的椭圆形曲线为计算损伤面积时的轮廓线. 从图中可以看出, 随着冲击能量的增加, 层合板的损伤面积明显增大. 通过对试件 C2 和 D1 进行比较可以发现, 在同样 5.9J 能量冲击条件下, 虽然其损伤图形都近似椭圆型, 但试件 C2 的长轴接近 45° 方向, 而试件 D1 的长轴接近 90° 方向. 这说明铺层参数对层合板冲击损伤投影图形的长轴方向有一定的影响.

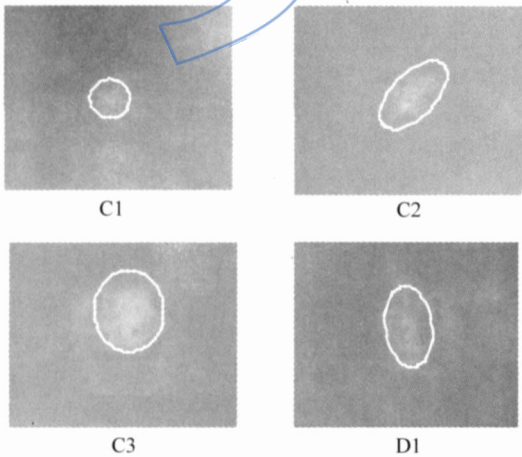


图 3 各试件冲击后的 X 光损伤图形  
Fig. 3 X ray damage of specimen after impact

各试件的冲击能量与冲击损伤面积见表 3. 由表中的数据可以发现, 随着冲击能量增加, 试件的损伤面积增大. 通过对试件 C2 和 D1 进行比较

可以发现, 受同样 5.9J 能量冲击后, 其损伤面积相差不多, 说明铺层参数对层合板冲击损伤投影面积的影响不大. 这主要是因为低能冲击载荷作用下, 复合材料层合板的主要破坏模式为基体开裂. 而对于层合板中的每一单层板, 纤维铺设方向主要影响基体开裂扩展的方向, 对其面积的大小则几乎没有影响. 因此, 就整体趋势而言, 不同铺层参数对层合板冲击损伤投影图形的长轴方向 (即基体开裂的扩展方向) 会有一定的影响, 但是对冲击损伤投影面积的影响并不大.

表 3 冲击能量与冲击损伤面积  
Table 3 Impact energy and damage area

| 试件编号                  | C1     | C2         | C3           | D1         |
|-----------------------|--------|------------|--------------|------------|
| 冲击能量/ J               | 2. 2   | 5. 9       | 8. 6         | 5. 9       |
| 凹陷深度/ mm              | < 0. 1 | 0. 1~ 0. 2 | 0. 27~ 0. 31 | 0. 1~ 0. 2 |
| 损伤面积/ mm <sup>2</sup> | 133    | 338        | 406          | 327        |

3 冲击后压缩试验

试验件取自冲击试验结束后的试件. 由于要测量的是层合板的压缩强度, 所以试验中不允许层合板出现整体失稳, 但允许有局部失稳, 故在试件的侧向加支持, 允许试件在受载方向移动. 根据上述要求, 本文设计的压缩试验夹具如图 4 所示.

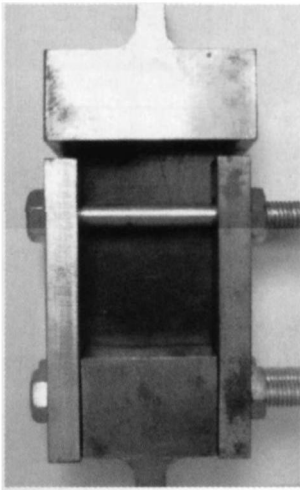


图 4 压缩试验夹具  
Fig. 4 Compressive test clamps

3. 1 逐渐损伤扩展试验

为了解含冲击损伤试件在各级压缩载荷下的损伤扩展情况, 首先在各类试件中分别选出一个试件进行分级加载试验. 各试件分级加载后的损伤 X- 光照片见图 5. 图中的 0MPa 表示未施加压

缩载荷前, 试件冲击损伤的 X-光照片. 从图中可以看出: ①由于在冲击损伤处, 层合板有应力集中存在, 因此在压缩载荷作用下, 新的损伤首先在此处产生; ②随着载荷的增加, 损伤沿与载荷垂直的

方向逐渐向外扩展, 并会引发新的损伤模式出现; ③在各种损伤的交互作用下, 层合板的强度不断降低, 直至完全破坏.

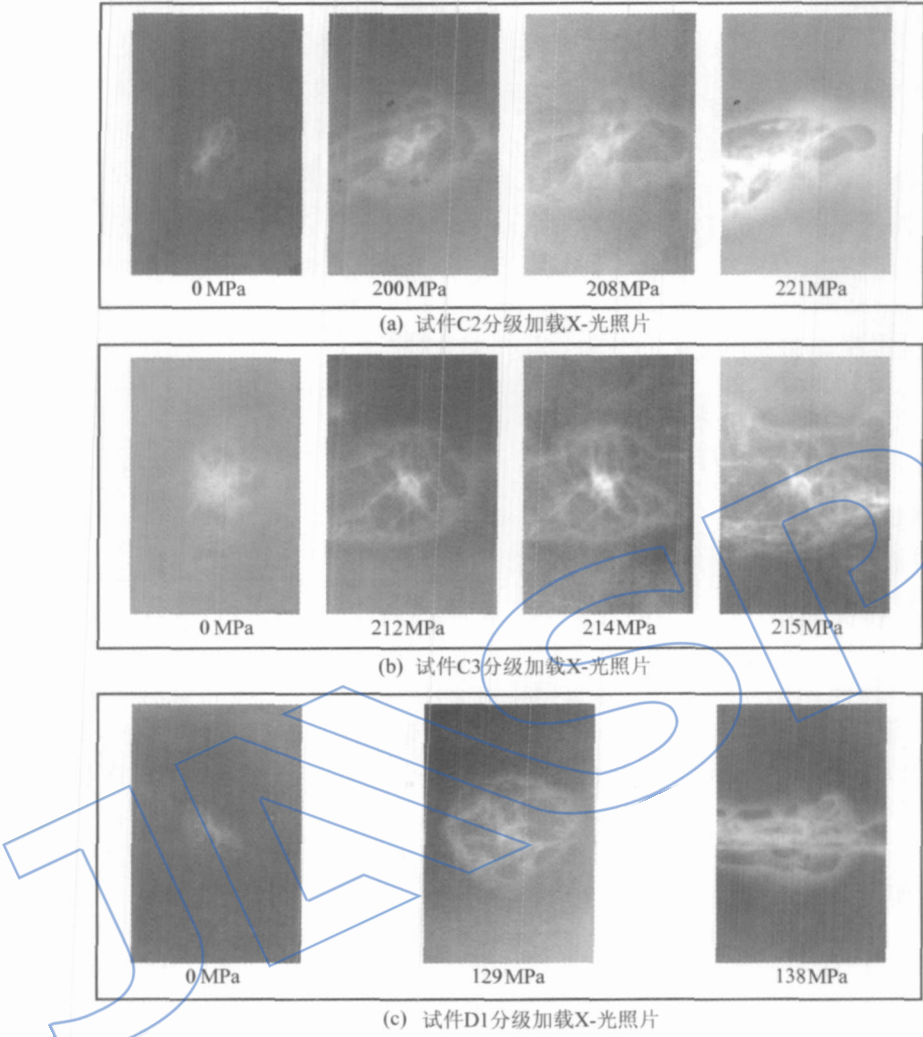


图 5 各试件分级加载的损伤 X 光照片  
Fig. 5 Progressive damage X ray photo

3. 2 剩余压缩强度试验

试件压断后的外观照片见图 6. 为显示清晰, 图中的侧面照片只取了试件的中间部分. 从图中可以看出, 试件的断裂是截断式破坏, 从侧面看沿长度方向存在分层现象. 试验测得的层合板剩余压缩强度见表 4.

表 4 层合板剩余压缩强度

| Table 4 Residual compressive strength of laminates |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 试件编号                                               | C1      | C2      | C3      | D1      |
| 冲击能量/J                                             | 2. 2    | 5. 9    | 8. 6    | 5. 9    |
| 剩余强度/<br>MPa                                       | 329. 62 | 213. 07 | 196. 44 | 158. 29 |

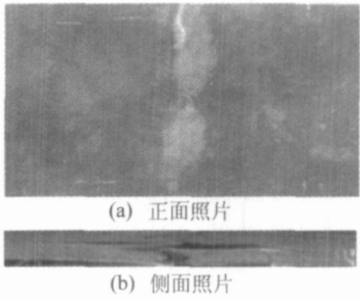


图 6 试件压断后的外观照片  
Fig. 6 Compressive cracking photo

层合板剩余压缩强度与冲击能量的关系见图 7. 从图中可以看出, 对于铺层参数不同的两类试件 C2 和 D1 而言, 在同样 5. 9J 能量冲击条件下,

虽然 C2 的冲击损伤面积比 D1 多 3.4%, 但其剩余压缩强度却要比 D1 高出 34.6%, 这说明: ①受相同能量冲击后, 不同铺层参数层合板的剩余压缩强度与冲击损伤投影面积的大小没有直接关系; ②层合板中 0° 铺层所占比例越大(C2 类试件 0° 铺层所占比例为 40%, D1 类试件 0° 铺层所占比例为 20%), 层合板的剩余压缩强度就越高. 这主要是因为压缩载荷的作用方向是沿着 0° 铺层的纤维铺设方向, 故 0° 铺层将承受大部分的压缩载荷. 从图 7 中还可以看出, 对于铺层参数相同的层合板, 虽然随着冲击能量的增加, 试件的剩余压缩强度逐渐降低, 但是二者之间并不满足线性关系, 即曲线上存在拐点. 从本文选择的三种冲击能量所对应的剩余压缩强度曲线来看, 随着冲击能量的增加, 复合材料层合板的剩余压缩强度降低幅度有变缓的趋势. 这主要是由于复合材料层合板的压缩强度受纤维断裂损伤的影响较大, 而在低能冲击载荷作用下, 纤维断裂损伤主要发生在与冲头接触的区域. 由于冲头的尺寸是固定的, 所以纤维断裂损伤的面积会有一个对应的极值. 在达到该极值之后, 即使冲击能量增加较多, 纤维断裂损伤的面积也只会少量的增大. 因此, 就整体趋势而言, 复合材料层合板的剩余压缩强度会随着冲击能量的增加, 下降幅度变缓.

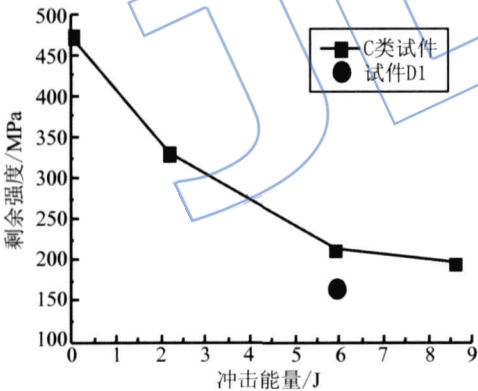


图 7 冲击能量与剩余压缩强度的关系

Fig.7 Relationship of impact energy and residual compressive strength

受不同能量冲击后, 各试件的强度降低百分比见表 5. 从表中可以看出, 受 2.2 J 能量冲击后, 试件的剩余压缩强度降低了 30.1%, 已经对层合板的强度产生了比较大的影响; 而受 5.9 J 能量冲击后, 层合板的剩余压缩强度降低了 54.8%, 严重影响其继续使用; 受 8.6 J 能量冲击后, 试件的剩余压缩强度降低了 58.3%, 与 5.9 J 能量冲击后的强度降低大致相当.

表 5 冲击后层合板压缩强度降低百分比

Table 5 Reduction percentage of compressive strength

| 冲击能量/J     | 0      | 2.2    | 5.9    | 8.6    |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| 剩余压缩强度/MPa | 471.39 | 329.62 | 213.07 | 196.44 |
| 强度降低百分比/%  | -      | 30.1   | 54.8   | 58.3   |

4 结 论

本文对两种不同铺层参数 T 300/ BM P316 层合板冲击后的压缩强度问题进行了试验研究, 结论如下:

- 1) 虽然随着冲击能量的增加, 试件的剩余压缩强度逐渐降低, 但是二者之间并不满足线性关系, 即曲线上存在拐点. 从本文选择的三种冲击能量所对应的剩余压缩强度曲线来看, 随着冲击能量的增加, 复合材料层合板的剩余压缩强度降低幅度有变缓的趋势.
- 2) 在相同的冲击能量条件下, 不同铺层参数将影响冲击损伤投影图形的长轴方向, 但对层合板的冲击损伤投影面积大小几乎没有影响.
- 3) 铺层参数不同的层合板, 受同样能量冲击后, 尽管冲击损伤面积相差不大, 其剩余压缩强度仍有较大差别, 即层合板的剩余压缩强度与冲击损伤投影面积的大小没有直接关系.

参考文献:

[ 1 ] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[ M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[ 2 ] Papanicolaou G C, Sravopoulos C D. New approach for residual compressive strength prediction of impacted CFRP laminates[ J]. Composites, 1995, 26( 77): 517-523.

[ 3 ] Soutis C, Curtis P T. Prediction of the post impact compressive strength of CFRP laminated composites[ J]. Compos Sci Technol, 1996, 56( 6): 677-684.

[ 4 ] Harris C E. A progressive damage model and analysis methodology for predicting the residual strength of composite laminates[ J]. J. Comp. Tech. & Res, 1997, 19( 1): 3-9.

[ 5 ] Asp L E, Nilsson S, Singh S. An experimental investigation of the influence of delamination growth on the residual strength of impacted laminates[ J]. Composites: Part A, 2001, 32( 9): 1229-1235.

[ 6 ] Hosur M V, Murthy C R L, Ramurthy T S. Compression after impact testing of carbon fibre reinforced plastic laminates[ J]. J. Comp. Tech. & Res, 1999, 21( 2): 51-64.

[ 7 ] 程小全, 张子龙, 吴学仁. 小尺寸试件层合板低速冲击后的  
剩余压缩强度[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 8-12.  
CHENG Xiaoquan, ZHANG Zilong, WU Xueren. Post-  
impact compressive strength of small composite laminate  
specimens[ J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19  
(6): 8-12. (in Chinese)

[ 8 ] 国家标准局. (GB/T 5258-1995) 纤维增强塑料薄层板压缩  
性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

