

# CCF300/BA9916-2 复合材料抗低能量撞击的性能研究

## Response of Laminated Composite Plates of CCF300/BA9916-2 Under Low-Velocity Impact Loading

中航复合材料有限责任公司 田宏伟 梁宪珠 薛向晨

**[摘要]** 试验研究了新型复合材料 CCF300/BA9916-2 复合材料层合板, 3 种不同铺层的低速冲击后压缩载荷作用下的损伤特征。结果表明, 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、冲击损伤投影面积、凹坑深度三者之间没有直接关系。0° 铺层含量对弹性模量、破坏应变和极限强度影响显著, 随着 0° 铺层含量增加, 弹性模量与极限强度变大, 而破坏应变减小。随着冲击能量的增加, 剩余强度指数型下降; 在低速冲击下, 冲击能量不影响层合板的弹性模量。

**关键词:** 落锤 低速冲击 剩余压缩强度 损伤

**[ABSTRACT]** the study on the laminated composite plates of new composite materials CCF300/BA9916-2, shows compression damage characteristics of three different plies under low-velocity impact loading. The results show that different parameters on the ply effect the long axis of damage pattern, but have almost no effect on the size of the damaged area of impact. There is no direct relationship among residual compressive strength of laminates, the damaged area, depth of impact pit. Proportion of fiber with 0° direction effect on elastic modulus, failure strain and ultimate strength significantly. If increase the Proportion of fiber with 0° direction, elastic modulus and ultimate strength increase, but failure strain decreases. If increase impact energy, the residual strength index declines. Impact energy does not affect the elastic modulus of laminates under low-velocity impact.

**Keywords:** Drop hammer Low-velocity impact Residual compressive strength Damage

纤维增强树脂基复合材料由于比强度、比刚度高, 可设计性强等特点, 已在许多重要的工程结构中得到广泛应用。复合材料层合结构对冲击载荷比较敏感, 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, 即使结构的外表面损伤很小, 难以直接观察到, 也可能会在其内部发生基体开裂、基纤剪切、分层和纤维断裂等微观损伤, 从而大大降低结构的承载能力, 严重影响其使用, 甚至会直接导致事故的发生。因此, 对复合材料层合结构的冲击损伤及剩余压缩强度问题进行研究具有重要的工程意义。近年来, 许多研究者都对该问题开展了广泛的研究<sup>[1-6]</sup>。铺层参数对损伤情况影响的研究也受到了广泛关注<sup>[7-10]</sup>。

本文对 3 种不同铺层参数的 CCF300/BA9916-2 复合材料层合板进行了落锤试验与冲击后压缩试验。讨论了不同铺层参数对损伤面积、抗冲击能力以及剩余强度的影响。另外, 还研究了不同能量冲击对损伤面积、弹性模量、剩余强度的影响。

### 1 冲击试验

#### 1.1 材料与试件

试验采用复合材料 CCF300/BA9916-2 复合材料层合板。为了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 3 种铺层参数的层合板, 共计 120 件。各试件的基本参数见表 1。

#### 1.2 落锤冲击试验

由于自由落体冲击可以较好的再现诸如维修工具坠落等低速冲击, 故本文冲击试验采用 INSTRON 9250HV 落锤冲击试验机预制层合板的冲击损伤。试验装置如图 1 所示, 冲击时试样夹在 2 块中间有边长为

表 1 试验件基本参数

方案	铺层比例 0° /45° /90°	铺层	几何尺寸 /mm	试件数量
A	30/60/10	[45/-45/90/45/0/-45/0/45/0] <sub>2S</sub>	150*100*5	40
B	40/50/10	[45/-45/90/45/0/45/0/0/-45/0/45/-45/90/-45/0/45/0/0/-45/0] <sub>S</sub>	150*100*5	40
C	50/40/10	[45/-45/90/0/0/45/0/0/-45/0] <sub>2S</sub>	150*100*5	40

40mm 正方形孔的钢板之间。冲击锤锤体为圆柱形,其端部为半球形,直径是 16mm,质量为 5.756kg,通过调整冲头的下落高度和弹簧的压缩程度控制冲击能量。在试验过程中严格避免冲击锤反弹后下落造成二次冲击。游标卡尺测得冲击后试样的凹坑深度。

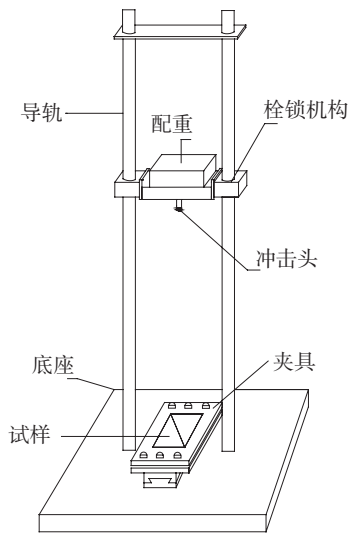


图1 冲击试验装置示意图  
Fig.1 Impact test equipment

### 1.3 冲击损伤检测

采用 ICS- II 型超声 C 扫描仪对冲击后的试样进行无损检测,各试样冲击后的 C 扫描损伤如图 2 所示,图中取损伤面积的长轴与短轴长度依据椭圆面积公式计算损伤面积。通过对试件 A、B、C 进行比较可以发现,在同样 45J 能量冲击条件下,虽然其损伤图形都近似椭圆型,但试件 A、B 的长轴接近 45° 方向,而试件 C 的长轴接近 0° 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2 各试件冲击后的C扫描损伤图形  
Fig.2 C-scan damage of specimen after impact

表2 冲击能量与损伤面积

试件号	A	B	C1	C2
件数	36	40	8	32
冲击能量 / J	45	45	45	50
损伤面积 / mm <sup>2</sup>	1311.34	1365.67	1429.66	1600.5
凹坑深度 / mm	1.0822	0.9584	0.5825	1.0859

各试件的冲击能量与冲击损伤面积见表 2。通过对 3 种试件进行比较可以发现,受同样 45J 能量冲击后,

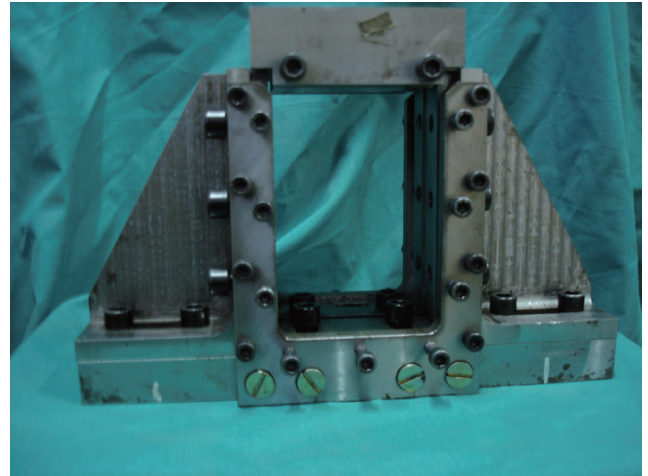


图3 冲击后压缩试用夹具  
Fig.3 Post-impact compression test rig

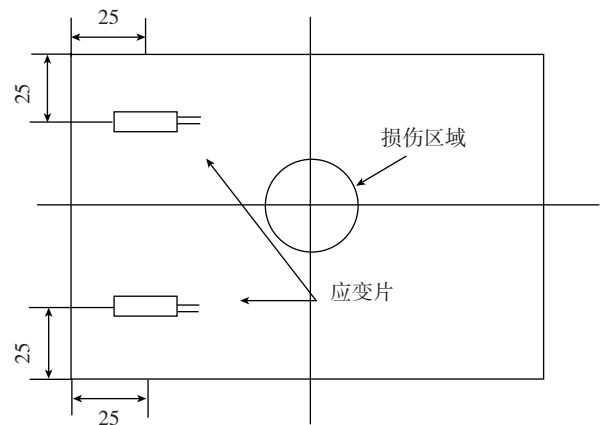


图4 应变片位置示意图  
Fig.4 Position of strain gauge



(a) 受冲击面



(b) 受冲击背面

图5 试件冲击后压缩的外观损伤图形

Fig.5 Surface damage of specimen after post-impact compression

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,在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)会有一些影响,但是对冲击损伤投影面积的影响并不大。

表2给出了3种试验件在不同能量下的凹坑深度,凹坑深度均取同样情况下所有试样的平均值。从表中可以看出,C铺层的试验件在45J能量的冲击下具有相对较小的凹坑深度,当冲击能量增加至50J时,凹坑深

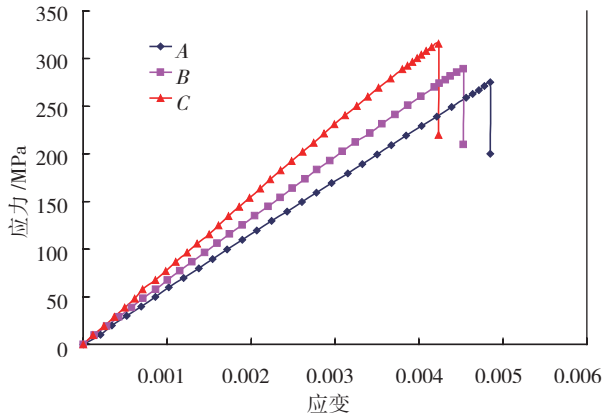


图6 相同能量冲击下的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of the three types of after impact of the same energy levels

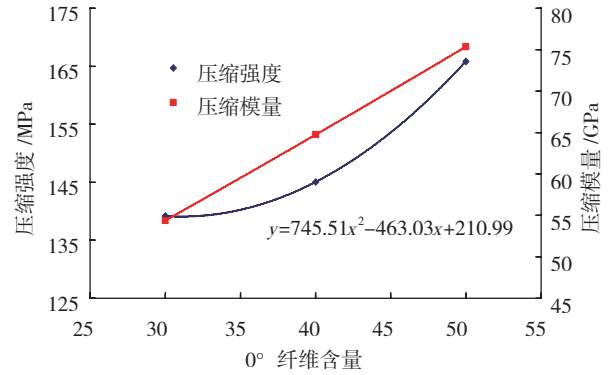
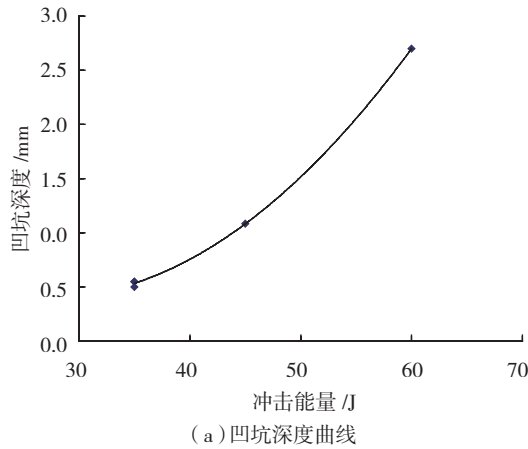
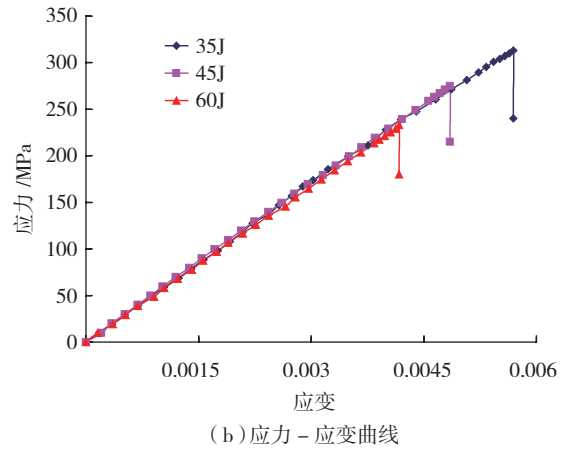


图7 相同能量冲击下的压缩性能

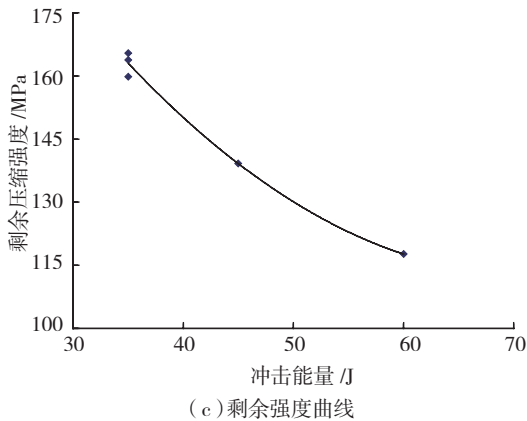
Fig.7 Residual compressive properties of the three types of after impact of the same



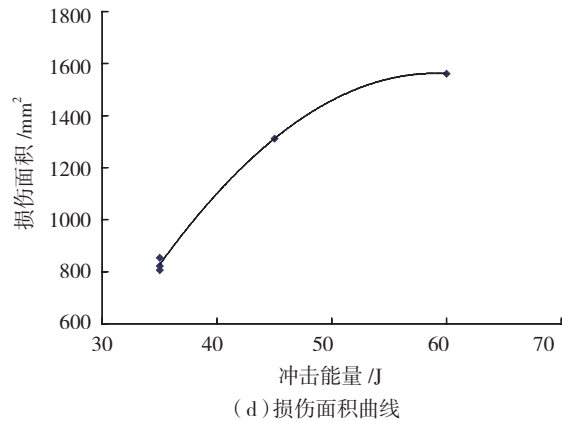
(a) 凹坑深度曲线



(b) 应力-应变曲线



(c) 剩余强度曲线



(d) 损伤面积曲线

图8 不同能量冲击下的损伤情况与力学性能曲线

Fig.8 Damage and mechanical properties after impact of various energy levels

度与其他 2 种试验件具有相同的凹坑深度。即 C 铺层具有更好的抗冲击性能。另外,在同样能量的冲击下,3 种试样内部损伤面积有稍微变大的趋势,凹坑深度却明显减小,说明在不同的铺层情况下,凹坑深度与内部损伤面积没有直接对应关系。

## 2 冲击后压缩试验

试验件取自冲击试验结束后的试件。压缩试验夹具由侧边支持和上下压板组成,保证压缩层板不发生总体失稳破坏,压缩试验夹具如图 3 所示。试验在液态压力机上进行,加载速率为 1.25mm/min,用 DH3186 应变仪记录载荷应变,应变片位置如图 4 所示。

所有试件的破坏均起始于试件的冲击点位置,沿垂直于载荷的方向扩展破坏。图 5 为压缩破坏时前后表面的破坏形式。试件在受压过程中,分层扩展时层合板内会发出响声,当载荷较低时,后表面会出现局部屈曲。继续加载时,该失稳区只沿垂直载荷方向(90°方向)向两边扩展,而在平行载荷方向(0°方向)不变。当载荷达到一定水平时,板的前后表面铺层纤维发生断裂,紧接着整个层合板发生最终破坏。从破坏后板的侧边进行观察,发现大部分铺层已发生断裂。

从图 6 应力-应变曲线也可以看到,在 45J 相同的冲击能量下,3 种不同铺层的试件的曲线均基本呈线性上升,并突然失效。A、B、C 随着 0°方向纤维的增加弹性模量增加,破坏应力增加,破坏应变减小。

层合板的剩余强度、弹性模量随 0°铺层比例增加的变化曲线如图 7 所示。可以看出剩余压缩的弹性模量随着 0°铺层比例的增加,线性增加。对于铺层参数不同的 3 种板而言,在同样能量冲击条件下虽然三者冲击损伤面积相差不大,但剩余强度却相差很多,C 种铺层比 A 种铺层大 19%。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(A<B<C),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。

## 3 不同能量对同种铺层板的冲击压缩响应

为了进一步研究不同能量冲击下层合板的冲击压缩响应,对 A 种铺层板进行了不同能量的冲击与冲击后压缩试验。不同冲击能量下的凹坑深度、应力-应变曲线、剩余强度、与 C 扫描检测的内部损伤面积如图 8 所示。

由图 8(a)可以看到,随着冲击能量的增加,凹坑深度指数型增长。冲击能量增加 33%(45J~60J),凹坑

深度增加了 170%(1mm~2.7mm)。图 8(b)可知,不同的冲击能量下,材料的压缩模量没有变化,破坏应力随冲击能量的增加而减小。图 8(c)可以看出,随着冲击能量的增加,剩余强度指数型下降,即与冲击能量不满足线性关系。冲击能量增加了 71%(从 35J 增加到 60J),材料的剩余强度下降了 28%(从 163MPa 下降到 117MPa)。由于复合材料板的压缩强度受纤维断裂损伤的影响较大,在低能量冲击下,纤维断裂主要发生在冲头区域。冲头大小恒定,纤维断裂损伤大小会有对应的极值。在达到此极值后,冲击能量增加,损伤面积增长缓慢,如图 8(d)。因此就整体趋势而言,复合材料层合板随着冲击强度的增加,下降趋势会变缓。

## 4 结束语

(1)凹坑深度、损伤面积、铺层参数三者之间没有直接关系。在相同冲击能量下,不同的铺层参数对冲击损伤投影面积大小几乎没有影响,但影响冲击损伤投影图形的长轴方向。

(2)三种铺层相比,C 型层合板抗低速冲击性能更好,在同样能量冲击下具有更小的侵彻深度;破坏应变最小,抗变形能力较差。

(3)在同样能量冲击下,随着 0°铺层含量增加,层合板弹性模量线性增加,剩余强度指数型增长。

(4)同种铺层在不同能量冲击下,冲击能量不影响层合板的弹性模量,层合板的剩余压缩强度随冲击能量的增大指数型下降。

## 参考文献

- [1] 程小全,寇长河,郇正能.低速冲击后复合材料层合板的压缩破坏行为.复合材料学报,2001,18(1):115-119.
- [2] 崔海坡,温卫东.T300/BMP316 层合板冲击后压缩强度试验.航空动力学报,2008,23(11):2001-2006.
- [3] 蔡奕霖,周仕刚.玻璃纤维复合材料层合板冲击后的压缩强度.纤维复合材料,2010,(1):8-12.
- [4] 林智育,许希武.复合材料层板低速冲击后剩余压缩强度.复合材料学报,2008,25(1):140-146.
- [5] 范金娟,赵旭,程小全.复合材料层合板低速冲击后压缩损伤特征研究.失效分析与预防,2006,1(2):33-52.
- [6] 范金娟,郑林斌,赵旭,等.含低速冲击损伤复合材料层合板的压缩失效.失效分析与预防,2009,4(1):19-38.
- [7] Z ü leyha A,Ramazan K, Buket Ö.The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading.Composite Structures,2003 (59):119-127.
- [8] 郭兰中,许爱荣.铺层顺序对基体裂纹起始及扩展的影响.玻璃钢/复合材料,2005 (1):8-9.
- [9] 温卫东,崔海坡,徐颖.T300/BMP2316 复合材料板冲击损伤研究.航空动力学报,2007,22(5):749-754.
- [10] 赵卫生,李玲.玻纤铺层方向对玻纤/EVE 复合材料性能的影响.塑料助剂,2010 (1):45-48.

(责编 杰一)