

G/K 织物混杂增强复合材料层合板 冲击损伤特性研究

黄 英 刘晓辉 李郁忠

(西北工业大学 西安 710072)

文 摘 采用空气炮实验装置、渗透剂增强的 X 射线照相法和高强光背射法对中心受到横向冲击的 G/K 织物混杂增强复合材料层合板的冲击损伤情况进行研究,讨论了 G、K 织物交替铺层时层合板的应力特征与损伤状况,分析了面、背板与芯板材质变化时层合板的应力与冲击损伤的关系、铺层角变化时层合板的损伤特征。结论强调指出,为提高复合材料层合板的抗弹能力,应采用混杂铺层、铺层角的错配方式,并避免将 Kevlar 作为背板使用。

关键词 G/K 织物混杂,复合材料层合板,冲击损伤

Study of Impact Damage Characteristics of G/K Commingled-wave-fabric Reinforced Composite Plate

Huang Ying Liu Xiaohui Li Yuzhong

(Department of Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

Abstract To meet potential needs for bulletproof apparel, the means of improving bulletproof properties of G/K wave-fabric reinforced composite laminated plate to afford better protection to its users are studied by air-gun impact device and X rays. The stress and damage characteristics of composite laminated plate reinforced with G/K wave-fabrics are discussed, and the relationship of laminated plate stress and impact damage with change of face panels and cores, as well as the damage properties with layer angle are analyzed. Experimental results show that the commingled weave layers, the layer angle changing and no Kevlar back face should be adopted in order to improve the bulletproof properties of composite laminated plate.

Key words G/K commingled-wave-fabric, Reinforced composite laminated plate, Impact damage

1 引言

Kevlar (K) 织物与 S—玻璃纤维 (G) 织物增强复合材料在航空、航天、人体装甲防护与坦克装甲防护等领域中获得了广泛的应用, S—玻璃纤维虽然密度较大, 但延伸率大, 且价格低, 而 Kevlar 材料的密度比玻璃纤维约小一半, 在防护能力相同的情况下, 其质量可减轻近 1/3; 在给定质量下的 Kevlar 层压板的

防弹能力是钢的 3 倍; 在高应变率下, 芳纶纤维除强度有一定的上升外, 其失效应变也有提高, 故在受到弹丸冲击时, 破坏应变能明显提高, 可吸收大量的冲击动能, 是优良的防弹材料; 但此类材料受冲击损伤后, 性能降低, 出现“后破坏效应”。为了进一步发挥两种织物的特长, 得到一种纯纤维织物增强复合材料所不具备的综合、优越的性能, 本文在空气炮实验

收稿日期: 2002-01-14; 修回日期: 2002-07-22

黄英, 1961 年出生, 硕士, 主要从事高分子材料及精细化工的研究工作

的基础上,利用 Mindlin 假设的二维有限元法编制的程序对子弹冲击问题进行模拟计算,研究 G/K 织物混杂增强复合材料的抗子弹冲击性能与损伤机理,得到了一些有意义的结论,对抗弹复合材料的设计与应用具有指导意义。

2 实验方法

2.1 材料成型工艺

平纹编织的 Kevlar 纤维(牌号 49049, Du Pont 公司出品)与平纹编织 S-玻璃纤维(南京玻璃纤维研究院提供)进行混杂铺层设计,基体选择环氧树脂,采用梯步加热加压固化,在 60 时加压 30 min, (100 ±5) 与 (120 ±5) 分别维持一定压力 1 h, 制得复合材料层合板。

2.2 基本力学性能测试

依据 GB3354—82、GB3355—82、GB3856—83、GB3357—82 测试复合材料的基本力学性能。

2.3 冲击加载实验

采用如图 1 所示的空气炮装置,弹丸为带球头的圆柱体,规格为 12.7 mm × 35 mm,重 36 g。复合材料层合板的几何尺寸为 180 mm × 80 mm × 3 mm,受冲击的试件用四边固支的方式置于试验台架上,弹丸垂直冲击试件中心。

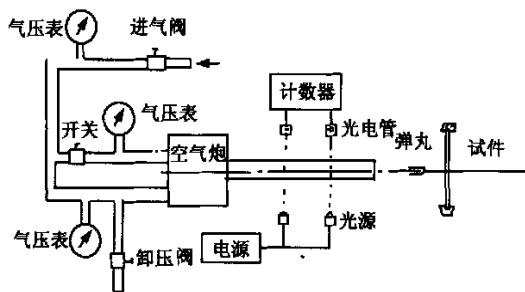


图 1 空气炮冲击加载示意图

Fig. 1 A sketch of air-gun impact device

2.4 损伤检测

采用渗透剂(三溴甲烷)增强的 X 射线照相法及高强光背射法。

3 理论分析与实验讨论

3.1 理论分析

对层合板的分析基于如下假设:

宇航材料工艺 2002 年 第 6 期

(1)层合板的横向位移相对于板的厚度很小,故可作为线弹性问题处理;

(2)变形前垂直于板中面的法线在变形后仍保持为直线;

(3)垂直于板中面的正应力 σ_z 相对于其它应力分量很小,故忽略不计。

为计算层合板中各层的应力值,按如图 2 所示的方向定义坐标系。

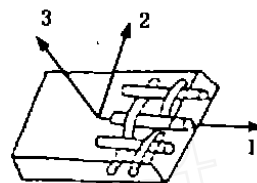


图 2 层合板的坐标方向

Fig. 2 Coordinate of a laminated plate

纤维织物有两个互相正交的方向,分别定义为方向 1、方向 2、法线方向为 3,则铺层的正轴应力—应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & & & \\ & Q_{21} & Q_{22} & & \\ & & & Q_{66} & \\ & & & & Q_{44} \\ & & & & & Q_{55} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_{11} = E_{11} / (E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}) \\ Q_{12} = Q_{21} = \nu_{12} E_{11} E_{22} / (E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}) \\ Q_{22} = E_{11} E_{22} / (E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}) \\ Q_{66} = G_{12} \\ Q_{44} = G_{23} \\ Q_{55} = G_{13} \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_{ij} 、 τ_{ij} 分别为正轴的正应力、剪应力; ϵ_{ii} 、 ϵ_{ij} 分别为正轴的正应变、剪应变; Q_{ij} 为材料的正轴刚度系数; E_{ij} 为弹性模量; ν_{ij} 为泊松比。两种织物增强的复合材料层合板的性能参数见表 1^[1]。

表 1 复合材料层合板的性能参数

Tab.1 Engineering constant of composite laminate

| 增强材料 | 弹性模量/ GPa | | | 剪切模量/ GPa | | | 主泊松比 | 密度 / g·cm ⁻³ | 单层厚度 h/mm | 拉伸强度 /MPa | | 压缩强度 /MPa | | 剪切强度 /MPa | | | |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------------|-----------|-----------|-----|-----------|-----|-----------|------|-----------------|-----------------|
| | 横向 | | 纵向 | 横向 | | 面内 | | | | 纵向 | | 纵向 | | 横向 | | 面内 | 层间 |
| | E ₂₂ | E ₃₃ | E ₁₁ | G ₁₃ | G ₂₃ | G ₁₂ | | | | 12 | 纵向 | 横向 | 纵向 | 纵向 | 纵向 | S ₁₃ | S ₂₃ |
| S—玻璃纤维 | 35.1 | 8.33 | 35.1 | 4.63 | 4.63 | 6.98 | 0.150 | 1.83 | 0.100 | 735 | 735 | 690 | 690 | 54.3 | 54.3 | 109 | 13.5 |
| Kevlar 纤维 | 39.1 | 4.20 | 39.1 | 3.01 | 3.01 | 1.21 | 0.031 | 1.37 | 0.190 | 966 | 966 | 292 | 292 | 31.1 | 31.1 | 62.1 | 11.8 |

* K/G 间层间剪切强度 S_i 为 5.62 MPa。

弹丸性能参数为:弹性模量 E = 207 GPa,泊松比 = 0.28,密度 = 7.80 g/cm³。

以表 2 中给定的弹丸质量和冲击速度,得到五种不同形式的层合板冲击载荷—时间曲线(图 3),图 3 中的第一个载荷峰值处,对应的时间约为 50

μs,此间隔近似等于应力波从撞击点到边界后又反射回原处所需的时间,这时层合板所产生的损伤为局部效应,但在复合材料层合板冲击问题的研究中,局部效应为总损伤的主要成分,故本文以 50 μs 为计算的时间基准进行讨论^[2]。

表 2 织物混杂增强复合材料层合板冲击实验结果

Tab.2 Summary of test specimens

| 层合板型号 | 混杂铺层形式 | 弹丸速度 / m s ⁻¹ | 冲击动能 / J | 弹丸质量 / g | 损伤类型 |
|-------|--|--------------------------|----------|----------|------------|
| A | [(0°/90°) ₁₀ /K/(0°/90°) ₁₀] | 58.0 | 60.6 | 36 | 纤维断裂与多层间分层 |
| B | [(0°/90°) ₁₀ /K/(0°/90°) ₁₀] | 58.0 | 60.6 | 36 | 多层间分层 |
| C | [(0°/90°) ₁₀ G/(0°/90°) ₂ K/(0°/90°) ₁₀ S] | 57.7 | 59.9 | 36 | 一个层间有分层 |
| D | [(0°/90°) ₁₀ S/K/(0°/90°) ₁₀ G/S] | 58.1 | 60.7 | 36 | 一个层间有分层 |
| E | {[(0°/90°) ₁₀ /K/(±45°) ₂]/(0°/90°) ₁₀ /K/[(0°/90°) ₁₀ /G/(±45°) ₂]/(0°/90°) ₁₀ S} | 58.1 | 61.7 | 36 | 一个层间有分层 |
| F | [(0°/90°) ₁₀ /G/(±45°) ₂]/K/[(0°/90°) ₁₀] | 57.7 | 60.0 | 36 | 纤维断裂与多层间分层 |

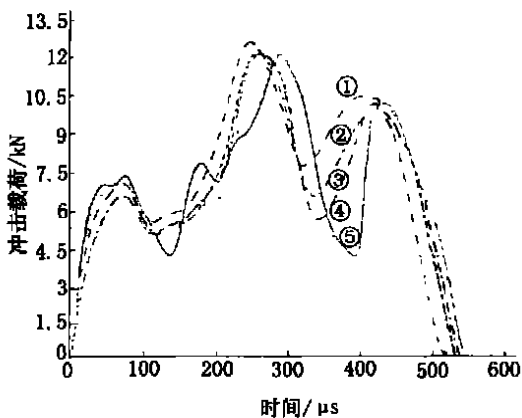


图 3 五种层合板的冲击载荷—时间曲线

Fig. 3 Impact load vs time for five laminated plates

—Kevlar 织物; —D 型板; —C 型板;
—E 型板; —S 玻璃纤维织物。

3.2 实验结果

图 4 给出了各层合板的冲击损伤情况。

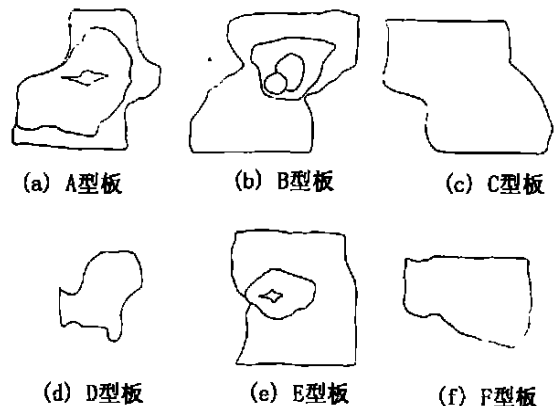


图 4 各层合板的冲击损伤情况

Fig. 4 Impact damage of different laminated plates

图4是以相同比例缩小的,由强光背射法复形出分层区的轮廓线。其中A型、B型板主要探讨两种织物增强的复合材料层合板,当面板与背板材料不同时,其抗弹性能的差异;C型、D型板分别研究当面板与背板为S—玻璃纤维/环氧层合板,夹芯材料为Kevlar/环氧层合板,以及面板与背板为Kevlar/环氧层合板,夹芯材料S—玻璃纤维/环氧层合板的抗弹效果,其中面板、背板、芯板的厚度平均值为1mm;而E型板、F型板的构成分别与D型板、A型板相同,但铺层角由 $(0^\circ, 90^\circ)/(0^\circ, 90^\circ)$ 变为 $(0^\circ, 90^\circ)/(\pm 45^\circ)$ 。从实验结果可以看出,GK织物混杂增强复合材料层合板的损伤模式包括了纤维断裂与分层^[3,4]。

3.3 分析与讨论

3.3.1 G、K织物交替铺层对层合板冲击损伤特性的影响

图5为50 μ s时A型板与B型板上的 σ_{11} 拉、 σ_{11} 压、 σ_{12} 、 σ_{23} (最大应力处)与板厚的关系曲线。从图5可见,A型板与B型板的各应力沿板厚的分布规律

基本相同,拉、压应力在板厚方向呈非对称分布,这主要是由于两板均为非对称铺层的缘故。同时由于S—玻璃纤维与Kevlar织物交替铺层,造成板中各层材料性质上存在差异,使 σ_{11} 、 σ_{12} 沿板厚也按非对称的折线规律变化。由于板的厚度较小,使层间应力 σ_{23} 受材料性质的影响较小,故其沿板厚度基本按抛物线规律变化,层间应力值在板厚中部达到最大值^[5]。

为了进一步了解板的损伤状况与板中的各应力值,现选择A型板、B型板的第1、2、9、20层,计算该层中的各应力值,结果见表3。由于GK层间界面粘结性较差,基本力学性能测试中测得其剪切强度只有5.62MPa,而较大的层间应力值出现在板厚的中部,从表3可见两板中第9层的层间应力值较大,A型板为140MPa,B型板为136MPa,故在冲击实验中A型板、B型板出现了多层间的分层现象,且在板厚中部层间应力值最大,分层极有可能起始于该处。因为应力波在试件的夹持边受到反射,使该两板的分层出现图4(a)、图4(b)所示的不规则形状^[6]。

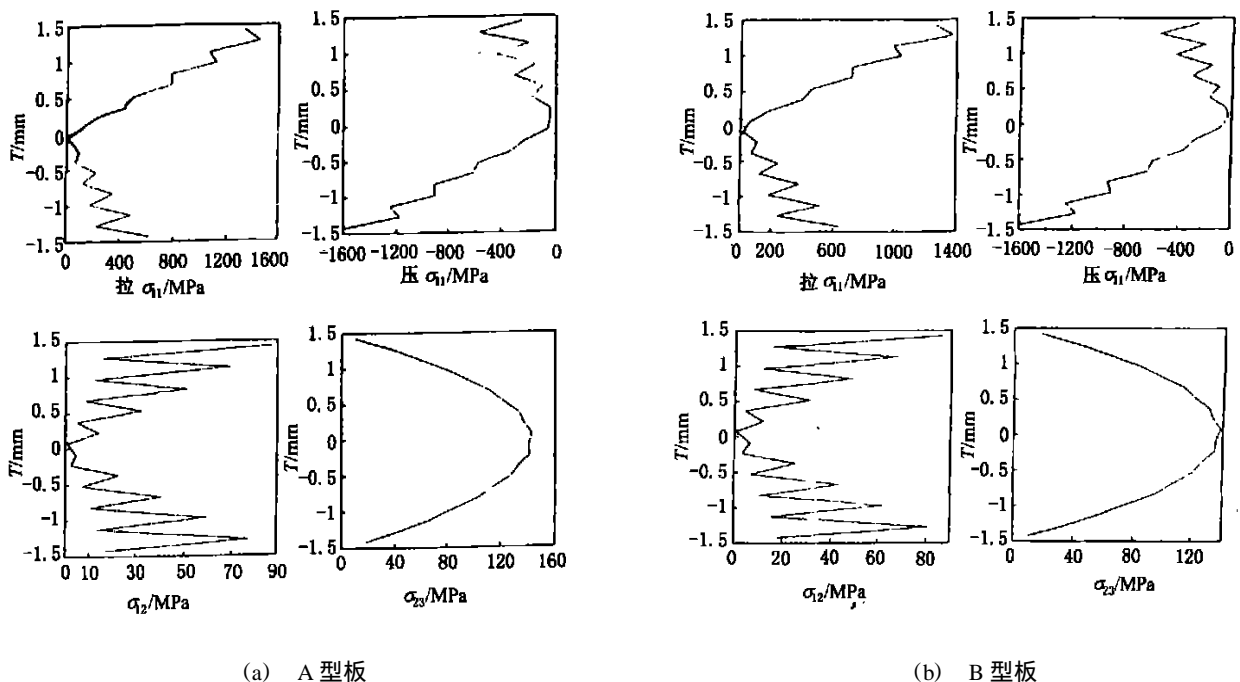


图5 A型板、B型板上的 σ_{11} 拉、 σ_{11} 压、 σ_{12} 、 σ_{23} (最大应力处)与板厚的关系曲线

Fig. 5 Stress (at ultimate stress points) vs thickness for A and B plates

表 3 A 型板、B 型板指定层中的各应力极值

Tab. 3 Maximum stress of designated layers in A & B plates

| 层序 | 11 | 22 | 12 | 13 | 23 | |
|------|------|--------|--------|------|------|------|
| | /MPa | /MPa | /MPa | /MPa | /MPa | |
| A 型板 | 1 | 653 | 988 | 62.4 | 10.4 | 10.2 |
| | 2 | 584 | 545 | 11.1 | 17.2 | 15.7 |
| | 9 | 78.6 | 166 | 10.1 | 140 | 137 |
| | 20 | -1 583 | -1 253 | 12.3 | 17.2 | 17.6 |
| B 型板 | 1 | 614 | 931 | 61.5 | 16.9 | 16.6 |
| | 2 | 820 | 510 | 11 | 17.5 | 17.8 |
| | 9 | 87.8 | 135 | 8.50 | 136 | 134 |
| | 20 | -1 583 | -1 510 | 12.8 | 9.90 | 10.1 |

在 A 型板中,与弹丸的接触层为 S—玻璃纤维织物层,从表 3 可见,其受到较大的拉应力 σ_{11} 、 σ_{22} ,导致了该层中的纤维发生了如冲击实验所显示的断裂现象;第 2 层为 Kevlar 织物层,从表中可见,各应力值降低,故实验中该层没有出现纤维断裂现象;第 20 层为 Kevlar 织物层,虽有较大的压应力,但并无

纤维压断现象,表明 G 与 K 交替铺层,可使层合板的抗弹能力提高。

对于 B 型板来说,与弹丸接触层为 Kevlar 层,具有较高的纵、横向拉伸强度,故在与弹丸的接触表面层没有出现纤维断裂现象,第 20 层为 S—玻璃纤维织物层,虽有较大的压应力,但由于其压缩强度值较大(基本力学性能测试中测得 S—玻璃纤维/环氧树脂层合板在 1、2 方向的压缩强度均为 690.30 MPa),故在 B 型板中只出现了图 4(b) 所示的多层间的分层现象,而无纤维断裂。由此可见,对于 S—玻璃纤维与 Kevlar 织物交替铺层的层合板,弹丸的冲击速度基本相同时,与弹丸接触面的材质不同,铺层顺序的差异,引起层合板的损伤状况不同,而 B 型板铺层方式的抗弹性能优于 A 型板。

3.3.2 面、背板与芯板材质变化对层合板冲击损伤特性的影响

对于 C 型板,计算 $50 \mu s$ 时, σ_{11} 拉、 σ_{11} 压、 σ_{12} 、 σ_{23} (最大应力处)沿板厚 T 的变化规律见图 6(a)。

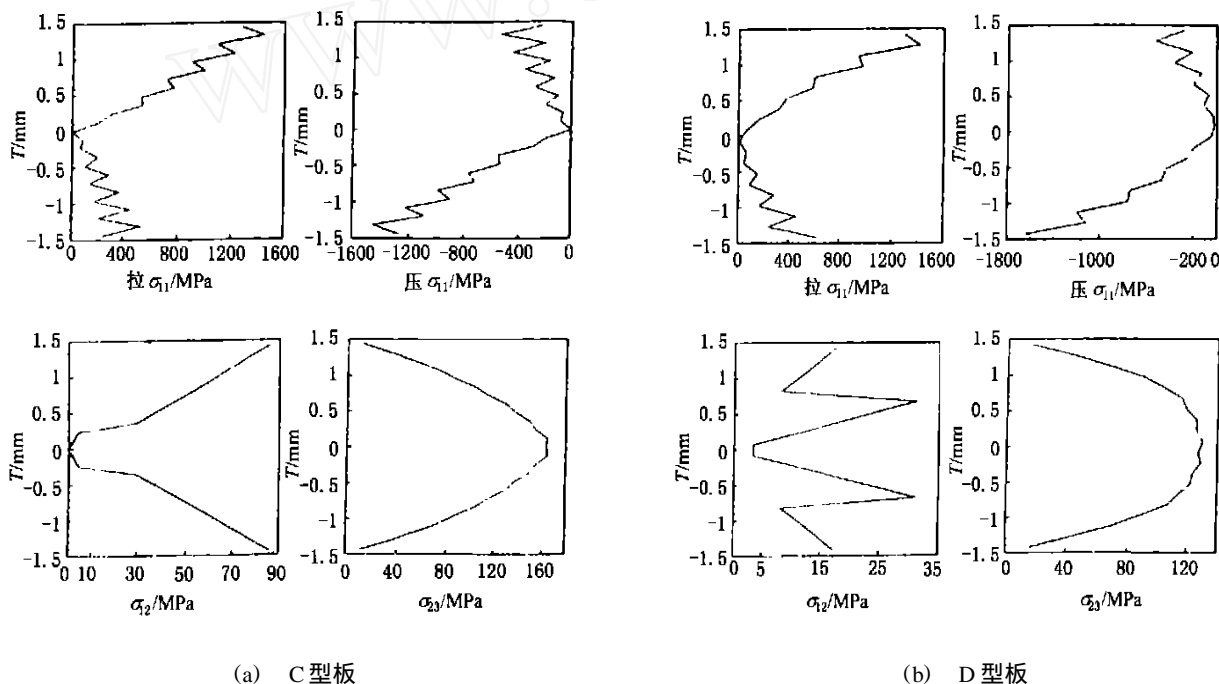


图 6 C 型板、D 型板上的 σ_{11} 拉、 σ_{11} 压、 σ_{12} 、 σ_{23} (最大应力处)与板厚的关系曲线

Fig. 6 Stress (at ultimate stress points) vs thickness for C and D plates

从图 6(a) 可知,较高的层间应力出现在试件中部的 Kevlar 层中(如第 12 层)。而在 S—玻璃纤维织物与 Kevlar 织物界面处层间剪切强度较低,因此分别计算具有较高应力值的第 1 层、两种织物界面处的第 10、16 层、层间应力较大的第 12 层中的各应力

值见表 4。D 型板的冲击损伤状况见图 4(d),在 $50 \mu s$ 时,板中各应力沿板厚的变化规律见图 6(b)。由图 6(b) 可知,较高的层间应力出现在板中部的 S—玻璃纤维层中(如第 10 层)。两种织物的界面为第 5、6、16 层,而第 1 层中具有较大的 σ_{11} 、 σ_{22} 值,故

分别计算第 1、5、6、10、16 层中的各应力值,结果见表 4。

表 4 C 型板、D 型板指定层中的各应力极值

Tab.4 Maximum stress of designated layers in C & D plates

| 层序 | 11 | 22 | 12 | 13 | 23 | |
|-------------|------|-------|-------|------|------|------|
| | /MPa | /MPa | /MPa | /MPa | /MPa | |
| C 型 板 | 1 | 625 | 952 | 61.5 | 11.4 | 11.2 |
| | 10 | 329 | 216 | 21.3 | 147 | 144 |
| | 12 | 116 | 71.7 | 1.51 | 164 | 160 |
| | 16 | - 542 | - 442 | 21.3 | 147 | 144 |
| D 型 板 | 1 | 391 | 988 | 12.5 | 16.0 | 15.6 |
| | 5 | 181 | 457 | 5.77 | 106 | 104 |
| | 6 | 356 | 153 | 22.4 | 116 | 114 |
| | 10 | 39.5 | 17.0 | 2.48 | 130 | 106 |
| | 16 | - 756 | - 587 | 5.77 | 106 | 104 |

从表 4 可知,C 型板第 1、16 层 S—玻璃纤维织物层虽具有较大的 σ_{11} 、 σ_{22} 绝对值,但试件并未发生纤维断裂现象;第 12 层具有较大的层间应力值 ($\sigma_{13} = 164 \text{ MPa}$),而 Kevlar/ 环氧层合板的横向剪切强度值在基本力学性能测试中测得为 31.1 MPa ,故此层有可能发生分层现象。在两种织物界面处的第 10、16 层,不仅 σ_{11} 、 σ_{22} 的绝对值较第 12 层大,且层间应力也已达 147 MPa ,而 G/K 层间剪切强度值仅为 5.62 MPa ,可见在两种织物的界面处更易发生分层。观察 C 型板的冲击损伤状况[图 4(c)],可知损伤分层确实只发生在 G/K 织物的界面处。

由图 6(b) 可见,在板中部具有最大的层间应力,如表 4 中 D 型板第 10 层 $\sigma_{13} = 130 \text{ MPa}$,但基本力学性能测试中测得 S—玻璃纤维/ 环氧层合板的横向剪切强度值为 54.3 MPa ;在两种织物的界面具有较大的层间应力,如第 5、16 层达 106 MPa ,第 6 层达 116 MPa ,同时在此界面处又有低的界面剪切强度 (5.62 MPa),故与试件中部的第 10 层相比,在 K/G 界面上更易发生分层破坏。由图 6 可见,在 D 型板中,其层间应力值普遍小于 C 型板的层间应力值 σ_{23} ,故 D 型板的分层面积较 C 型板的分层面积小,正如图 4(d) 所示。对 D 型板的第 1 层,虽具有较大的 σ_{11} 、 σ_{22} ,但 Kevlar 织物层具有高的拉伸强度,故受力状况良好。而在受冲击背面 Kevlar 织物层有较大的压应力,Kevlar 层的压缩强度又较低,使试件的受力不佳^[7]。

3.3.3 铺层角变化时层合板的损伤特性研究

宇航材料工艺 2002 年 第 6 期

对于 A 型板的铺层方式,考虑铺层角由 $(0^\circ, 90^\circ) / (0^\circ, 90^\circ)$ 变为 $(0^\circ, 90^\circ) / (\pm 45^\circ)$ 的 F 型板,该试件的冲击损伤状况见图 4(f)。由实验结果可知,F 型板的纤维断裂程度很小,可见铺层角的错配,阻止了层间裂纹自冲击面开始的自相似扩展,故在 F 型板中冲击损伤以扩大分层面积的形式表现出来,第 1 层的分层面积较小,而第 2 层分层面积就有了明显的增加。对 E 型板的铺层形式而言,从图 4(e) 可见,铺层角的错配也使试件中的分层面积明显地增大,但却无纤维断裂现象。表明铺层角的错配,可以改善弹丸对纤维的损伤状况。

4 结论

(1) 分层与纤维断裂是混杂复合材料层合板的基本破坏方式,铺层角的错配可使裂纹的横向自相似扩展阻力增大,但却使分层面积增加,故可通过采用三维编织等技术提高层间剪切强度,降低复合材料靶板的分层破坏趋势,改善其抗弹性能。

(2) 混杂铺层可使层合板的抗弹能力提高,表明合理的混杂铺层可使层合板的整体刚度降低,有利于 Kevlar 织物的变形,以吸收更多的冲击动能。

(3) Kevlar 织物的压缩强度远低于其拉伸强度,故应避免将其排列在背面,可将 S—玻璃纤维织物增强的复合材料层合板作为背板,或采用混杂纤维复合材料进行梯度设计以达到性能优化。

参考文献

- 1 Sun C T, Chen J K. On the impact of initially stressed composite laminates. *J. of Composite Materials*, 1985; 19(5): 490 ~ 504
- 2 Cunniff P M. An analysis of the system effects in non-woven fabrics under ballistic impact. *Non-woven Industry*, 1991; 22(4): 28 ~ 30
- 3 Abrate S. Impact on laminated composites: recent advances. *Applied Mechanics Review*, 1994; 47(11): 517 ~ 544
- 4 朱锡, 张振中, 刘润泉等. 混杂纤维增强复合材料抗弹丸穿甲的实验研究. *兵器材料科学与工程*, 2000; 23(1): 3 ~ 7
- 5 高田忠彦. 对位型芳纶的性能和应用. *高科技纤维与应用*, 1998; 23(6): 40 ~ 44
- 6 黄晨光, 施楣梧, 段祝平. 头盔用复合材料抗侵彻性能研究进展. *力学进展*, 2000; 30(2): 239 ~ 251
- 7 黄英, 刘晓辉, 李郁忠. S—玻纤织物增强复合材料层合板的冲击损伤特性研究. *机械科学与技术*, 1999; 18(3): 483 ~ 485

(编辑 李洪泉)