

波速测量层合复合材料冲击损伤实验^{*}

江大志 王兴业

(国防科技大学材料工程与应用化学系 长沙 410073)

沈为 黄玉盈

(华中理工大学力学系 武汉 430074)

摘要 在层合复合材料横向冲击试验中,用应变片记录层合板表层在冲击过程中的应变响应,根据波的传播理论和连续损伤力学,从波速变化间接测得冲击下材料的损伤及损伤率。通过实验测得玻璃纤维/环氧(GE)正交层合板的动态损伤阈值,并证实了GE复合材料在拉伸阶段比在压缩阶段有更快的损伤扩展速率。

关键词 层合复合材料, 横向冲击, 应变波, 损伤阈值, 损伤扩展

分类号 TQ320

Impact Damage of Composite Laminates Measured by Variance of Wave Speed

Jiang Dazhi Wang Xingye

(Department of Material Engineering & Applied Chemistry, NUDT, Changsha, 410073)

Shen Wei Huang Yuying

(Department of Mechanics, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract The response of strain on the face of composite laminates impacted by a projectile was recorded by strain gages. According to the theory of wave propagation and continuum damage mechanics, the damage and damage threshold in the glass fiber/epoxy composite laminates were measured by variance of wave speed. It was found that the damage propagation in glass fiber/epoxy composites was faster during tension than during compression.

Key words composite laminates, transverse impact, strain wave, damage threshold, damage propagation

* 国家自然科学基金资助
1996年5月24日收稿

弹脆性材料在卸载过程中的行为一般可分为三个阶段，即无损的线弹性阶段、损伤引起的非线性阶段和断裂阶段。在线弹性阶段（对应于 ϵ_e ），其应力-应变关系是线性的，即弹性模量 E 是常数；当应变进一步增大到阈值 ϵ_h （拉伸和压缩过程的阈值应变分别用 ϵ_{h+} 和 ϵ_{h-} 表示，一般而言， $\epsilon_{h+} < \epsilon_{h-}$ ），此时应力-应变关系由线性转变为非线性，损伤开始发生；当应变大于 ϵ_h 时，损伤扩展，弹性模量随之减小。对于各向同性介质，波速 V_x 与材料 x 方向的杨氏模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 之间的关系为^[1]：

$$V_x^2 = \frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1)$$

从(1)式可以看出，材料无损时， E 、 ν 和 ρ 均为常数，因此波速也是常数。一旦材料受损，其弹性模量降低，如果忽略材料的密度和泊松比变化，则其波速也随之降低，即传播周期加长。因此，有可能从应变波波速的变化，测得材料的损伤及损伤变化。

1 实验过程

1.1 试件制备

采用无纬布-铺层-模压工艺制备试样。纤维材料采用的是无碱高强玻璃纤维纱，以E-51环氧树脂为基体，固化剂为胺酸酐；体积分数为 $V_f = 65\%$ 。环氧-酚醛体系在110保温2h，175 固化3h，然后自然冷却，试样尺寸为 $170 \times 170 \times 2(\text{mm}^3)$ ，有效承载面积为 $126 \times 126(\text{mm}^2)$ 。两种铺层的材料性能如附表所示。

附表 玻璃纤维/环氧复合材料的基本性能

	$E_1(\text{GPa})$	$E_2(\text{GPa})$	ν	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$V(\text{m/s})$
[0/90] _{2s}	23.58	23.58	0.09	1.74	1162.8
[0/45/-45/90] _s	18.96	18.96	0.27	1.75	1163.6

1.2 加载系统

加载系统由高压气体，贮气腔，阀门和加速管组成。贮气腔内的气体进入加速管，推动弹丸向前运动，从而使弹丸加速。冲击物为14.50mm的球形钢弹，冲击速度为50m/s左右，试件边界为四边固支。

1.3 贴片位置

应变片的位置如图1所示。采用BE120-1AA型普通电阻应变片，阻值为 $120 \pm 0.2\%$ ，灵敏系数为 $2.13 \pm 1\%$ ，栅长 \times 栅宽为 $1 \times 1\text{mm}^2$ 。

1.4 测试原理

对于无损材料，取材料体元 $\Delta x = x_2 - x_1$ ，研究体元沿 x 方向的损伤度及损伤度变化率。在材料对称中心点冲击载荷作用下，在 x_1 和 x_2 两点的应变波($\epsilon-t$)曲线上，相同相位 θ 的时间差 Δt 是相等的，即：

$$\Delta t(\theta) = t_1(\theta) - t_2(\theta)$$

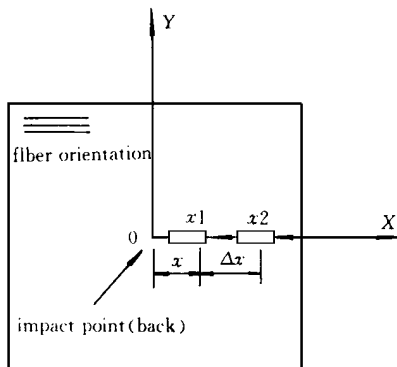


图1 坐标系统与应变片粘贴位置

$$= \text{常数} \quad (\theta = 0^\circ \sim 360^\circ) \quad (2)$$

$$V_x = \Delta x / \Delta t(\theta) \quad (3)$$

即波速 V_x 为常数。对于受损材料, 其典型的波形是非线性的, 如图3c所示。对于所研究的两点, 其对应位置之间的时间差 Δt 是逐步增大的, 反映了材料损伤的影响。

$$\Delta t(\theta) = t_1(\theta) - t_2(\theta) \quad (4)$$

$$V_x = \Delta x / \Delta t(\theta) \quad (5)$$

波速 V_x 与材料的杨氏模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 之间的关系由(1)式决定; 若忽略 ν 和 ρ 的变化, 则对于受损材料便有

$$\bar{V}_x^2 = \frac{\bar{E}(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (6)$$

采用能量等效性假设^[1]:

$$D(t) = 1 - (\bar{E}/E)^{1/2} \quad (7)$$

从而

$$D_x(t) = 1 - \bar{V}_x/V_x \quad (8)$$

式中, D_x 为 x 方向的损伤度。

2 实验结果及分析

图2(a)为 GE[0/90]_{2s} 层合板在 x 轴方向, $x = 24\text{mm}$, $\Delta x = 4\text{mm}$ 的两点, 在弹速为 $V_0 = 54.47\text{m/s}$ 冲击过程的应变波形。A、B 两曲线分别表示位置 x_1 和 x_2 的应变波形。现研究第一个正弦波形在所取单元内的传播。可以认为, 拉伸是由于受冲击结构弯曲所造成的拉伸波, 而压缩波是由于冲击压缩在所取单元的响应。从图2(b)可以看出, 平均波速及损伤度对时间的曲线有一个平台, 这是因为, 当 $\epsilon < \epsilon_{h+}$ 或 $\epsilon < \epsilon_{h-}$ ($\epsilon, \epsilon_{h-} < 0$) 时, 材料又恢复到弹性状态。对应于平台两个端点的应变分量分别为 $\epsilon_{h+} = 2.4 \times 10^{-3}$, $\epsilon_{h-} = -1.2 \times 10^{-3}$ 。由此分别得到了材料在拉、压状态下的阈值。从图中还可以看出, 在压缩过程中, 损伤的扩展速率小于拉伸时的损伤扩展速率。

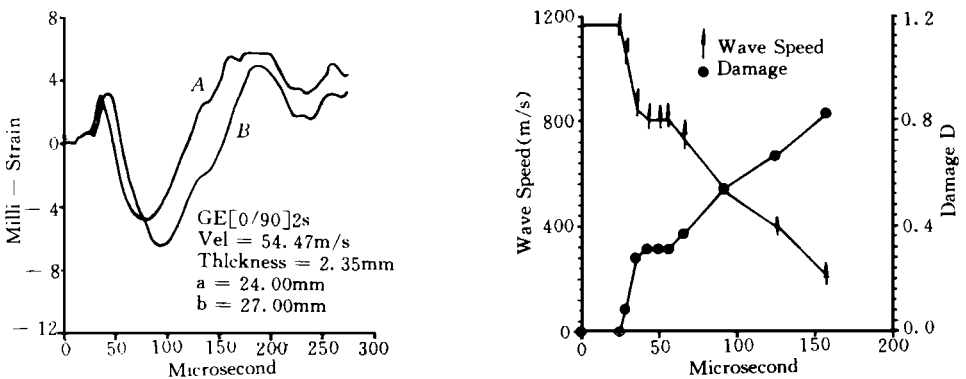


图2 正交层合板 x 方向 $x = 24\text{mm}$, $\Delta x = 4\text{mm}$ 材料段的应变平均波速及损伤度随时间的变化

图3(a)、(b)、(c)和(d)分别为GE[$\pi/4$]_s 层合板,在弹速为 $V_0=44.72\text{m/s}$ 冲击下, x 轴方向 $x=24\text{mm}$, Δx 分别为7mm和4mm 的两点的应变波形图及波速和损伤度随冲击时间的变化。

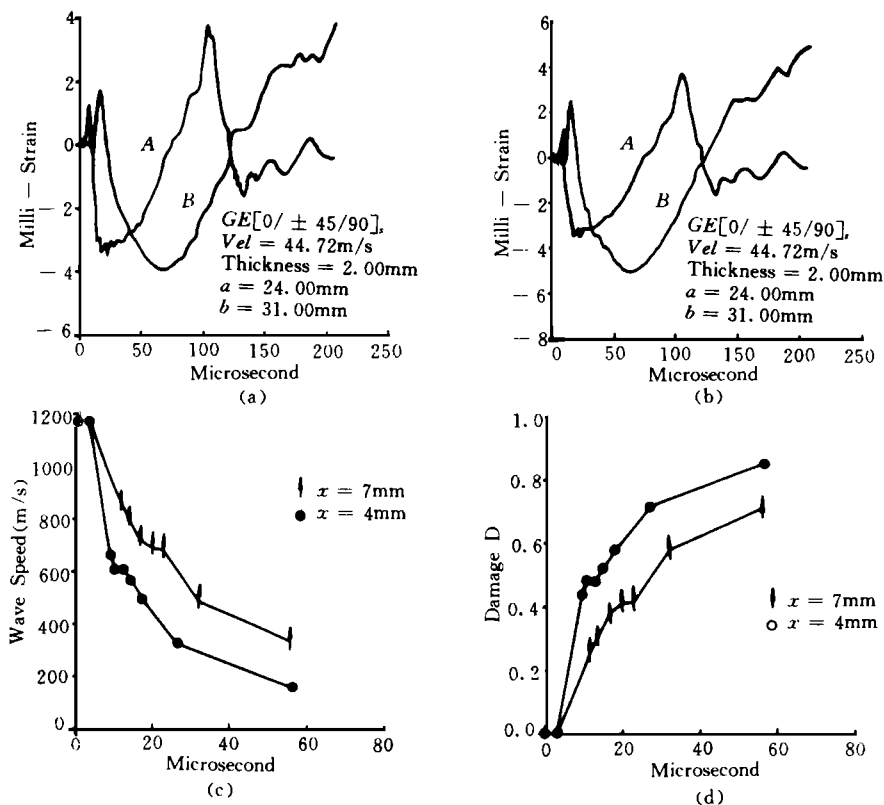


图3 [$\pi/4$]_s 层合板 x 方向 $x=24\text{mm}$, 两点间距 Δx 分别为7mm 和4mm 的应变波形、平均波速及损伤度

从图3(d)可以看出, $\Delta x=7\text{mm}$ 时的平均损伤度比 $\Delta x=4\text{mm}$ 时的平均损伤度小。这表明距离冲击中心点越远, 材料损伤程度越小。

感谢中国科技大学夏源明教授对本文工作的大力支持。

参 考 文 献

- 1 沈为. 损伤力学. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- 2 Avery JG, Porter T R. Comparisons of the ballistic impact response of metals and composites for military aircraft applications. ASTM, STP568, 1973.

(责任编辑 石少平)