

# 碳纤维增强酚醛树脂复合材料的层裂特性

尚嘉兰 白以龙 徐素珍

(中国科学院力学研究所) (北京特种机电研究所)

**摘要** 用一维应变实验方法研究碳酚醛材料的层裂特性, 给出了损伤程度随撞击速度的增加而增加的指数函数准则, 及产生层裂损伤的临界撞击速度。发现在层裂特性研究中, 应力波衰减有重要意义。

**主题词** 碳纤维增强复合材料, 抗冲击性, 断裂强度。

## Spallation Property of Carbon Fibre Reinforced Phenolic-Resin Composite

Shang Jialan Bai Yilong

(Institute of Mechanics, CAS)

Xu Suzhen

(Beijing Institute of Special Mechanical and Electronic Devices)

**Abstract** The spallation property of carbon fiber reinforced phenolic-resin composite is studied by uniaxial strain experiment. The criterion of spallation for this material given in this paper is represented by an exponential function of damage degree with impact velocity. The threshold velocity of incipient spallation is given. It is found that the attenuation of stress wave is important for study of spallation property.

**Key Words** Carbon fiber reinforced composite, Impact resistance, Rupture strength.

本文于1995年3月10日收到, 本课题为国家自然科学基金资助项目

## 1 前言

平面应力波作用于结构面上时, 结构材料中有一平面压缩波传入。压缩波传至结构的反面, 由于应力平衡条件的约束, 立即在结构材料中传入一个反射拉伸应力波。当结构材料中某处承受的拉应力足够大, 拉伸时间足够长时, 即使材料中产生开裂破坏, 以至出现脱层。对这一现象的研究已经不少, 但多是针对金属或合金材料。沈乐天等曾研究了玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料的层裂特性, 文献 1 报道的这一工作是在一维应变条件下进行的, 文中给出了与均匀材料经受脉冲载荷类似的层裂时间相关性准则:

$$(\sigma - \sigma_0)^n (\tau - \tau_0) = K_0$$

由实验确定了发生层裂所需门槛应力  $\sigma_0$  和所需应力滞后时间  $\tau_0$ 。确立了材料产生初始层裂的撞击应力随拉应力作用持续时间的减少而急剧上升的规律, 并探讨了作为一种复合材料层裂发生发展的机制。

本文讨论的是碳纤维增强酚醛树脂复合材料 (简称碳酚醛) 在工程应用中的抗冲击层裂特性和准则。研究发现, 随撞击速度的增加, 碳酚醛的损伤程度有明显上升的趋势, 各种厚度飞板 (靶板) 产生起始损伤有大致相同的临界撞击速度, 但存在对同一损伤程度, 波长增加, 所需撞击速度也增加这一特殊现象。

## 2 实验

实验材料为碳纤维布经纬线平行铺层, 酚醛树脂热压胶合而成的复合材料, 材料密度  $\rho_0$  为  $1.35 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ , 声速  $3.96 \text{ m/ms}$ 。

一维应变实验在 101mm 口径的轻气炮上进行。实验装置如图 1 所示。试验采用负压放炮, 撞击速度在  $50 \text{ m/s}$  以下, 主要集中在  $10 \sim 35 \text{ m/s}$  范围内。撞击方向垂直于材料铺层方向。

压力测量采用碳膜压阻传感器, 预埋于靶试件中, 传感器规格为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$ , 初始阻值  $50 \sim 100 \Omega$ 。使用瞬态讯号变换记录仪, 记录数字量波形。压阻探头标定曲线见文献 2。

对被撞靶板实行软回收。回收的靶板用建设 11 型超声探伤仪检测内部损伤范围, 可检测出的最小损伤尺寸为  $\phi 8 \text{ mm}$ 。外观无宏观裂纹者为“完整”, 内部损伤范围的尺寸单位为 mm, 在  $\phi$  为  $70 \text{ mm}$  的圆形板面上均有损伤称作“全裂”, 无  $\phi 8 \text{ mm}$  以上损伤区域的试件称作“无裂纹”。

层裂试验共分四组, 靶板与飞板厚度之比约为 2。靶板厚度  $\Delta t$  分别为 6, 8, 10, 12mm, 相应各种  $\Delta t$  的实验次数为 33, 30, 32 和 28, 共计 123 次。应力衰减试验四次。

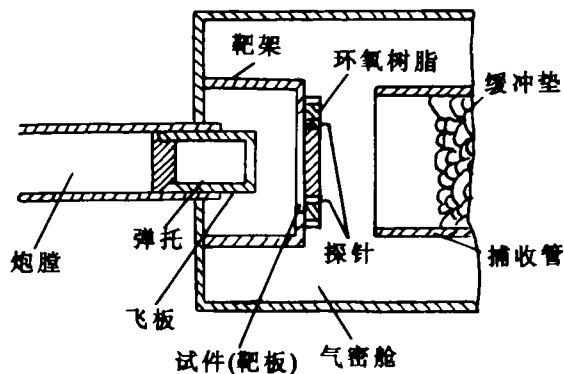


图 1 平板对称碰撞实验装置

### 3 实验结果

将回收的靶板纵向剖开后观察，其裂纹均发生在靶板厚度方向的中部，这与实验设计相吻合。

实验材料为工程材料，剖面上有大量肉眼可见的小孔穴和小裂纹。显微镜下测量，孔穴尺寸可达 0.1mm。考虑材料加工和撞击试验时靶板周边的边界效应，我们将考察范围局限于图 2 所示的半径为  $r$  的范围内。图中， $R$  为靶板半径， $\Delta t$  为厚度， $r = R - \Delta t$ ， $S_0 = \pi(R - \Delta t)^2$ 。在考察范围内，损伤区域面积为  $S$ 。我们定义  $S$  与  $S_0$  之比  $\bar{s} = S/S_0$  为面积损伤量。全裂试件  $\bar{s} = 1$ ，无裂纹试件  $\bar{s} = 0$ 。

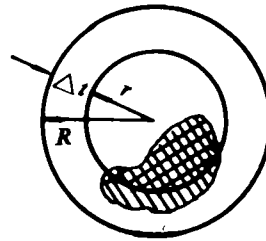


图 2 面积损伤量

图 3 给出靶板厚度为  $\Delta t = 6\text{mm}$  的撞击速度  $v$  与面积损伤量  $\bar{s}$  的关系。这一关系可用指数函数表示：

$$\bar{s} - \bar{s}_0 = A \exp A[B(v - v_0)]$$

其中  $\bar{s}_0$  为  $\phi 8\text{mm}$  的面积损伤量， $\bar{s}$  不大于 0.1 的试验的撞击速度  $v$  的平均值为  $v_0$ 。四种厚度靶板的  $\bar{s} - v$  关系拟合结果列于表 1 并由图 4 给出。上式表明，当撞击速度  $v$  超过一个临界值  $v_0$  时，才可能产生明显的层裂损伤。当  $v = v_0$  时，材料的面积损伤量  $\bar{s}$  较  $\phi 8\text{mm}$  损伤量  $\bar{s}_0$  的增量为  $A$  (即  $\bar{s} - \bar{s}_0 = A$ )。  $A$  和  $B$  都是材料的抗冲击性能常数， $B$  的量纲为  $\text{s/m}$ 。

表 1 对四种厚度靶板冲击速度与面积损伤量关系式的拟合常数

靶板厚 $\Delta t$ (mm)	$v_0$ (m/s)	$\bar{s}_0$	$A$	$B$	相关系数 $r$
6	18.6	0.019 0	0.033 0	0.427	0.946
8	14.2	0.021 9	0.028 1	0.266	0.978
10	17.7	0.025 6	0.033 6	0.271	0.972
12	17.4	0.030 2	0.035 7	0.218	0.950

在图 3 中，撞击速度  $v$  与面积损伤量  $\bar{s}$  有明显的指数函数关系，但实验点分布在一个较为宽阔的区域内。因此就不同  $\bar{s}$  区域的算术平均值进行拟合。图中不同点表示不同组。用圆圈标示的点为平均点，所有平均点的标准误差为 10%~35%。

应力测量结果列于表 2 中。

表 2 压应力测量试验结果

试验号	撞击速度 $v$ (m/s)	两测点距离 (mm)	应力峰值(MPa)		波速 $c$ (m/ms)	应力峰值 衰减(%/mm)
			$\sigma_1$	$\sigma_2$		
86-149	26.3	4.30	63.4	54.1	2.15	3.4
86-150	38.3	4.38	99.0	81.6	2.43	4.0
86-151	87.4	4.30	—	—	2.90	—
86-152	87.1	4.82	244.0	233.0	2.84	0.94

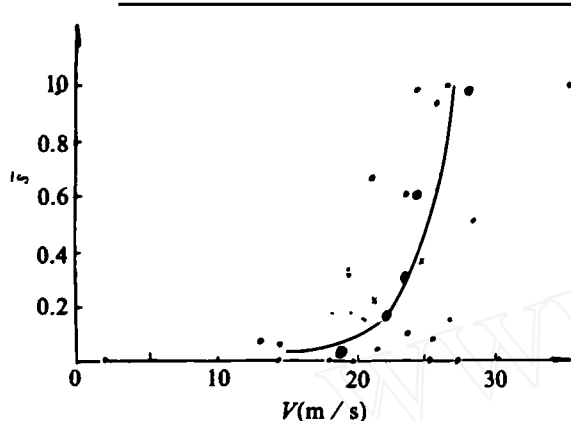


图 3  $\Delta t = 6\text{mm}$  的  $v-\bar{s}$  关系

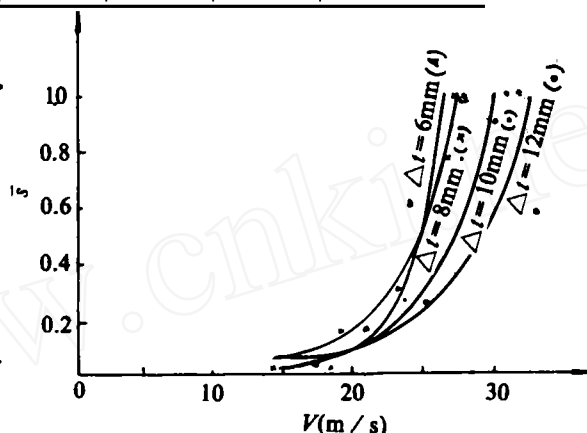


图 4 由分组平均值计算得到的  
四种厚度靶板的  $v-\bar{s}$  关系

#### 4 实验结果和讨论

由图 4 和表 1 可见, 任何一种厚度的靶板, 当撞击速度增加时, 面积损伤量所标志的损伤程度也上升。可以认为损伤是积累的。由图 4 可以看出, 当撞击速度低于  $20\text{m/s}$  时, 面积损伤量  $\bar{s}$  随撞击速度  $v$  的变化十分缓慢。而在  $v$  大于  $20\text{m/s}$  时, 随着  $v$  的增加,  $\bar{s}$  起初变化较慢, 之后迅速上升, 最终达到完全开裂,  $\bar{s} = 1$ 。

图 4 中  $\Delta t = 6, 10, 12\text{mm}$  的三条  $\bar{s}-v$  曲线几乎交于  $\bar{s} = 0.11$  一点, 这时  $v = 20.5\text{m/s}$ ;  $\Delta t = 8\text{mm}$  时,  $\bar{s} = 0.11, v = 18\text{m/s}$ 。由此可知, 对各种不同厚度的靶板, 要产生明显的损伤(如  $\bar{s} = 0.1$ ) 有大体一致的临界撞击速度, 其值为  $18 \sim 20\text{m/s}$ 。

若不考虑应力波的衰减, 按照弹性波理论, 在矩形应力脉冲作用下, 靶板中受到的最大拉应力幅值与撞击应力幅值相同, 可按  $\sigma = \frac{1}{2} \rho_0 c v$  计算。其中  $c$  为波速。由表 2 可见, 在该材料中, 不同幅值应力的波速是不同的。在实验条件范围 (靶板厚度  $\Delta t = 6 \sim 12\text{mm}$ ) 内, 靶板中产生  $\bar{s} = 0.1$  的损伤, 对应于不同的波速, 与其临界撞击速度相应的拉应力幅值列于表 3 中。

表 3 损伤 $\bar{s}=0.1$ 的临界拉应力

波速 $c(\text{m/ms})$	2.2	2.4	2.8~2.9	3.96(声速)
应力 $\sigma(\text{MPa})$	28~31	30~34	35~41	50~55

其中的应力幅值与该材料的屈服强度(50MPa)量级相同。

飞板厚度决定着撞击应力波的波长。压应力波在自由面反射，向靶板内传播的拉应力波的波长决定着拉应力作用于靶板的持续时间。通常认为同样应力幅值的波，作用时间越长，产生的损伤程度越大。然而由图 4 看，同一损伤水平 $\bar{s}$ ，靶板厚度大（即飞板厚度大），所需撞击速度也大。产生这一现象的原因可能是由于该材料中应力波衰减所致。可以这样分析，设层裂发生在靶板厚度的中间层，即对应于厚度为 $\Delta t=6, 8, 10, 12\text{mm}$ 的靶板，使其发生层裂的应力波的行程分别为 9, 12, 15 和 18mm。以所测得的应力峰值衰减量的最低值  $0.94\% / \text{mm}$  估算，经过这些行程后，应力峰值的衰减分别达到 8.5%，11.3%，14.1% 和 16.9%，即波经过薄靶板衰减较少。可见随着靶板厚度的增加，使板产生层裂的应力波的行程增加，随之而来的波幅衰减的增加，导致薄靶板比厚靶板层裂破坏所需的撞击速度更低。

考虑到波在材料中的行程不同，产生衰减程度也不同，我们考察不同厚度靶板的试验中到达发生层裂处的应力。在对称碰撞中，撞击应力  $\sigma = \rho cv / 2$ ，质点速度为撞击速度的一半， $v / 2$ 。试验撞击速度多在  $10 \sim 35\text{m/s}$  范围，可以认为其波速变化不大，这样便可以直接考察发生层裂处的质点速度  $v / 2$ 。将四组不同厚度靶板的速度  $v$  和面积损伤量 $\bar{s}$ 的关系，用衰减后的速度  $v$  (按最低衰减率  $0.94\% / \text{mm}$  计算) 代替，拟合得到新的  $v-\bar{s}$  关系示于图 5 中。可以看到，四种不同厚度靶板的曲线十分接近，于是可以用统一的规律来描述碳酚醛层裂的撞击速度  $v$  和面积损伤量的关系：

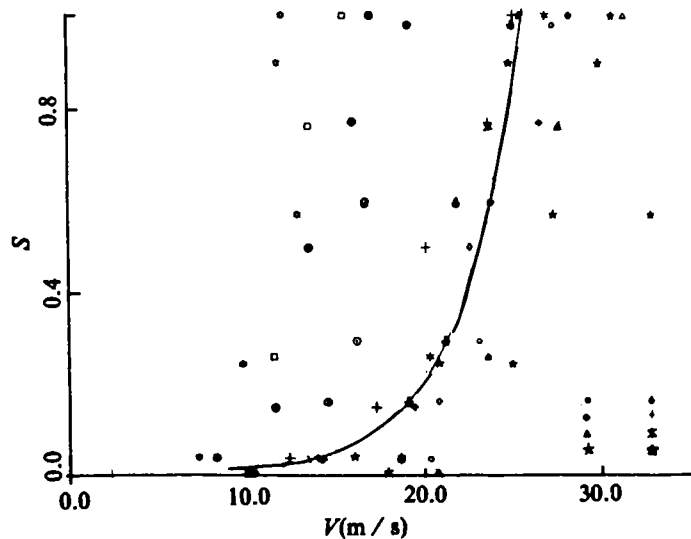


图 5 不同衰减率的 $\bar{s}-v$ 的关系

$$\bar{s} - 0.0242 = 0.0104 \exp[0.467(v - 14.9)]$$

其中  $v$  的单位为  $\text{m/s}$ 。若按更高的衰减速率(如  $3.4\%/\text{mm}$ )计算,得到的  $\bar{s}-v$  曲线显示出产生相同损伤程度,飞板薄,即应力作用时间小,所需的撞击速度高。这与层裂研究中通常考虑的拉伸冲量(应力与应力持续时间之积)原则<sup>[3]</sup>一致。这证明了在本实验中产生相同损伤程度,靶板厚度增加需要的波长也增加这一异常现象确实是由于应力波在材料中的衰减引起的。同时告诉我们应力波在材料中的衰减是十分重要的问题。关于应力波衰减问题的讨论和进一步的实验结果将另文发表。

## 5 结 论

a) 撞击速度(撞击应力)小于临界值时,碳酚醛不发生明显的层裂损伤。撞击速度超过这一临界值时,材料中损伤程度明显变化。随着撞击速度的增加,损伤程度以指数函数的方式上升。

b) 本工作建立了碳酚醛材料的面积损伤量  $\bar{s}$  与撞击速度  $v$  的关系,即

$$\bar{s} - \bar{s}_0 = A \exp[B(v - v_0)]$$

式中  $\bar{s}_0$  为  $\varphi 8\text{mm}$  的面积损伤量;  $v_0$  为产生明显损伤的临界撞击速度 ( $\text{m/s}$ );  $A$ 、 $B$  和  $v_0$  为材料常数(由试验得到的材料常数列于表 1 中)。

c) 在本试验条件下(飞板厚度约为靶板厚度的  $1/2$ ),对  $6\sim 12\text{mm}$  厚靶板产生明显损伤(损伤面积为  $10\%$ ),所需临界撞击速度均为  $18\sim 20\text{m/s}$ 。其相应的临界应力为  $30\sim 50\text{MPa}$ 。

d) 由于原始碳酚醛材料中存在大量  $0.1\text{mm}$  量级的孔洞和裂隙,压应力波在材料中衰减较快,且波速随应力幅值的增加而上升。波的衰减导致对相同损伤程度,波长增加时所需撞击速度也增加这一特殊现象。

**致谢** 本工作曾与赵士达教授讨论,沈乐天、陈淑霞、杨大光和北京特种机电研究所张广兴参加了实验,压力测量由李天佑担任,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 1 沈乐天等. 酚醛玻璃钢层裂准则的实验研究. 力学学报, 1984, 16(6): 615—624
- 2 尚嘉兰等. 碳膜压阻传感器的静压加卸载标定. 实验力学, 1990, 5(2): 185—188
- 3 Seaman L. Experiment of brittle fracture for high velocity [Lecture]. Beijing Industry College, 1984.