

# 防弹层压复合材料防弹效果的理论分析

熊 杰

(浙江工程学院,杭州,310033)

顾伯洪 王善元

(东华大学)

摘 要:从能量吸收的角度,分析纤维的能量吸收与波传播和纤维与树脂复合效应,可以采用树脂仅存在于平面织物之间,即不渗入到纱线之间以及纤维之间的孔隙的复合方式,而纤维体积分数应大于 80%左右。

关键词:军需用纺织品 层压复合材料 防弹效果 理论分析

中图法分类号:TS 106.6 文献标识码:A

复合材料具有的轻质和高性能使其在弹道防护领域的应用日益拓展。然而迄今为止,防弹复合材料的研制和开发几乎是以经验为依据的,研究者们设计大量的实验要素的组合,然后进行实验测试和比较来获得所需要的防弹复合材料,这种方法不但费时、费力,增加研制成本,实际上也很难获得真正优化的设计制作方案。当然,一种新的防弹材料的研制成功最后必须付诸于实际的测试,但任何一种对复合材料结构设计能够提供指导的方法始终是研究者们努力探求的。本文在 Smith<sup>[1]</sup>, Roylance<sup>[2]</sup>, Freeston<sup>[3]</sup>,和 Sierakowski<sup>[4]</sup>等人的研究基础上,对防弹层压复合材料靶板的结构设计进行了理论分析,目的在于在防弹层压复合材料靶板研制过程中缩小实验探索的范围,提高研制的针对性和效率。

## 1 纤维材料的能量吸收与波传播

层压复合材料的防弹效果与该材料在高应变率(10<sup>2</sup>~10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>)下的性能有关,主要取决于在高应变率下该材料的能量吸收能力。在高应变率下层压复合材料的能量吸收能力与组成该复合材料的纤维的断裂应变能密度和在能量吸收过程中参与能量吸收的纤维材料数量密切相关。纤维材料的断裂应变能密度由该纤维应力应变曲线下的面积决定,而参与能量吸收过程的纤维材料数量则由从冲击点发散的冲击波的传播速度决定。为了便于分析,假设:1)纤维在变形时横截面保持平面,沿截面只有均匀的轴向应力。2)与应变率无关,即应力只是应变的单值函数。

根据 Smith<sup>[1]</sup>对纤维或纱线受横向弹体冲击的分析,结合 Freeston<sup>[3]</sup>等人对织物受弹道冲击时应变波反射的研究,忽略应变波沿纤维轴向传播时所遇到交结点的反射。图 1 显示了受横向冲击的纤维中波的传播。

弹体的速度为  $V$ ,冲击引起两个应变的轴向波

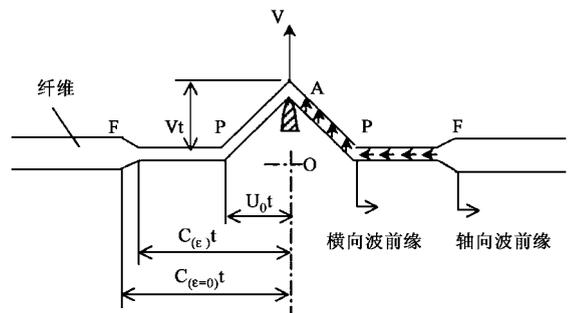


图 1 受横向冲击的纤维中波的传播

向相反方向传播,其速度为  $C$ 。同时还产生一种横向波,它的形状呈倒 V 字形,基脚在 P 点,以速度  $U_0$  向两侧传播。在  $t$  时, F 点以外的纤维质点尚未受到冲击。

对于轴向波传播,相对未变形的质点而言,应变波速度  $C$  为:

$$C = C(\epsilon) = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\epsilon}} = \sqrt{\frac{E_f}{\rho}} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  是纤维密度;  $d\sigma/d\epsilon$  为纤维应力应变曲线的斜率,即为轴向杨氏模量  $E_f = E(\epsilon)$ ,是应变的函数。

对于横向波传播,材料的流动速度为  $W$ ,即当轴向应变波通过后,APF 中质点开始朝反方向收缩的速度,由下式给出

$$W = \int_0^{\epsilon_0} C(\epsilon) d\epsilon = \int_0^{\epsilon_0} \sqrt{E_f/\rho} d\epsilon \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_0$  为纤维的最大拉伸应变。在横向波前缘,质点的水平运动停止,并突然以冲击速度  $V$  向上(横向)运动,这种横向波向两侧移动的速度相对于未变形的质点而言为  $U$ :

$$U = \sqrt{v_0^2 [\rho(1 + \epsilon_0)]} \quad (3)$$

式中,  $q_0$  为纤维中的最大拉伸应力。因此相对观察者而言, 横向波前进速度  $U_0$  应为:

$$U_0 = (1 + \varepsilon_0) U - W \quad (4)$$

从图 1 有:  $OA = W, OP = U_0 t, AP = (1 + \varepsilon_0) Ut$  因此得:

$$V = \sqrt{(1 + \varepsilon_0)^2 U^2 - [(1 + \varepsilon_0) U - W]^2} \quad (5)$$

方程(2)~(5)四个方程确立了四对关系, 含变量  $V, W, \varepsilon_0, q_0, U, U_0$ , 其中  $q_0$  与  $\varepsilon_0$  由纤维材料动态应力应变关系确定, 已知冲击速度  $V$  时, 其余四个独立变量  $W, \varepsilon_0, U, U_0$  总是可以求得。

假如纤维材料具有线弹性, 可求得

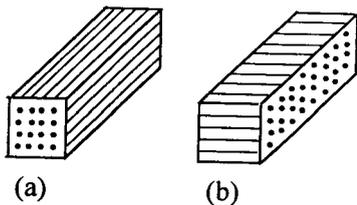
$$U_0 = C \sqrt{\varepsilon_0(1 + \varepsilon_0) - \varepsilon_0} \quad (6)$$

由(1)和(6)可以看出轴向波和横向波的传播速度都与  $C$  有关, 即与纤维材料的模量有关, 纤维材料模量越大即  $C$  越大, 则在一定时间内参与能量吸收的材料数量就越多。

## 2 复合效应

从弹道防护的要求出发, 层压复合材料的综合性能应表现在两个方面: 1) 高的能量吸收能力; 2) 结构的刚性和整体性。树脂在平面织物层压复合材料中可能有两种存在的极端情况: 第一种情况, 树脂不仅存在于平面织物之间, 而且渗入到织物的纱线之间以及纱线的纤维之间, 即纤维被树脂充分浸渍, 树脂在复合材料中呈连续相; 第二种情况, 树脂仅存在于平面织物之间, 不渗入到织物内部, 即不渗入到纱线之间以及纤维之间的孔隙。

假设在第一种情况下, 即纤维材料被树脂充分浸渍, 并且不考虑织物交织点的影响。在受到弹体冲击的复合材料靶板中, 应力波不仅在靶板平面内传播, 而且也沿着靶板厚度方向传播。因此, 可以将复合材料靶板看作充满树脂的纤维束集合体。对沿平面内传播和沿厚度方向传播的两种情况取如图 2 所示的一维单元加以分析。



(a) 沿纤维轴向, 相应于应力波沿平面内传播  
(b) 沿纤维横向, 相应于应力波沿厚度方向传播

图 2 靶板内应力波传播单元

对于图 2(a) 所示单元, 沿单元轴向即沿纤维轴

向的波传播速度  $C_L$  由下式给出:

$$C_L = \sqrt{E_L / \rho} \quad (7)$$

式中,  $E_L$  是纤维束经树脂浸渍形成的复合材料所具有的轴向等效模量,  $\rho$  是复合材料的等效密度。

根据“混合定律”<sup>[4]</sup>, 复合材料的弹性模量和密度取决于纤维和基质的模量以及复合材料纤维和基质的相对比例, 即体积分数。

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m = (E_f - E_m) V_f + E_m \quad (8)$$

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m = (\rho_f - \rho_m) V_f + \rho_m \quad (9)$$

式中,  $V_f, V_m$  分别是纤维和基质的体积分数;  $E_f, E_m$  分别是纤维和基质的弹性模量;  $\rho_f, \rho_m$  分别是纤维和基质的密度。因此, 沿纤维轴向的波传播速度为:

$$C_L = \sqrt{[(E_f - E_m) V_f + E_m][(\rho_f - \rho_m) V_f + \rho_m]} \quad (10)$$

对于图 2(b) 所示单元, 根据文献[5]可得复合材料横向等效模量  $E_T$ :

$$E_T = [E_m(1 + 2\eta V_f) / (1 - \eta V_f)] \quad (11)$$

式中,

$$\eta = [(E_f / E_m) - 1] / [(E_f / E_m) + 2] \quad (12)$$

因此, 沿该单元轴向即沿纤维横向的应力波传播速度由下式给出:

$$C_T = \sqrt{[E_m(1 + 2\eta V_f) / \{(\rho_f - \rho_m) V_f + \rho_m\} (1 - \eta V_f)]} \quad (13)$$

假如纤维采用 Twaron 标准型, 树脂采用酚醛/PVB, 则有  $E_f = 70 \text{ GPa}, E_m = 3.14 \text{ GPa}, \rho_f = 1.44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, \rho_m = 1.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 因此可以得出  $C_L$  和  $C_T$  与  $V_f$  的关系曲线, 如图 3 所示。

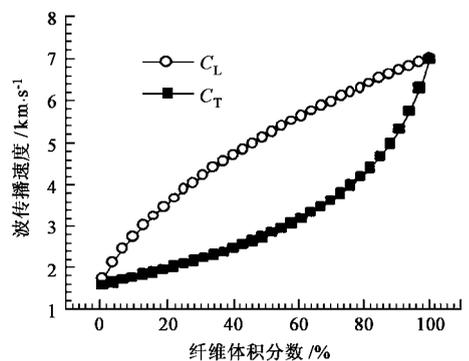


图 3 沿纤维轴向和横向的波传播速度与纤维体积分数的关系

从图 3 可以看出, 复合材料中沿纤维轴向和横向传播的应力波速度随纤维体积分数的变化关系, 复合材料的波传播速度介于纤维和树脂基体的波传

播速度之间,纤维体积分数高,则应力波传播速度大,说明纤维与树脂复合以后,纤维的变形受到限制,纤维的波传播速度被抑制。显然,要使复合材料具有高的波传播速度,则应提高纤维的体积分数。然而,过高的纤维含量会导致树脂的量不足以铺展而影响纤维-树脂界面的粘结,从而影响层压复合材料靶板结构的刚性和整体性。由此可以设想在层压复合材料中,要使纤维材料最大限度地保持其波传播能力,又要取得复合材料的刚性和整体性,可以采用第二种复合方式。因此必须仔细控制树脂的含量,以取得复合材料结构的刚性和整体性与弹道性能之间的平衡。就应力波传播的角度来看,从图3可知,沿纤维轴向的波传播速度随纤维体积分数的增加呈平稳上升的趋势,而沿纤维横向的波传播速度随纤维体积分数的变化,在纤维体积分数为80%左右时有一个转折,即当纤维体积分数大于80%左右时,冲击波传播速度对纤维体积分数的变化较为敏感,因此初步推定纤维体积分数应大于80%左右。至于纤维含量(或树脂含量)最佳的取值范围,只有根据以上的分析进行实验研究才能确定。

### 3 结束语

本文在 Smith, Roylance, Freeston 和 Sierakowski 等

人的研究基础上,从能量吸收的角度,分析了纤维的能量吸收与波传播和纤维与树脂复合效应。初步推断,在层压复合材料中,要使纤维材料最大限度地保持其波传播能力,又要取得复合材料的刚性和整体性,可以采用树脂仅存在于平面织物之间,不渗入到织物内部,即不渗入到纱线之间以及纤维之间的孔隙的复合方式;纤维体积分数应大于80%左右。

---

致谢:本研究得到中国人民解放军总后军需装备研究所的大力支持,特致谢意!

### 参 考 文 献

- 1 Smith J. C. et al. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading. Part VI: Velocity of Strain Waves Resulting from Impact. T. R. J., 1960(30):752.
- 2 David Roylance et al. Ballistic Impact of Textile Structures. T. R. J., 1973(1):41~43.
- 3 Freeston, W. D. JR. Strain Wave Reflections During Ballistic Impact of Fabric Panels. T. R. J., 1973(6):348~351.
- 4 Sierakowski R. L. Dynamic Loading and Characterization of Fiber Reinforced Composites. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997:15~95.
- 5 Ross, C. A. et al. Elastic Wave in Fiber Reinforced Materials. Shock and Vibration Digest, 1975(1):96~107.