

考虑应变率效应的复合材料层合板冲击动态响应

黄桥平¹, 赵桂平², 卢天健³

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安;
3. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 基于对分离式霍普金斯拉杆试验结果的分析,建立了 T300/epoxy 复合材料考虑应变率效应的黏弹性本构模型,并将该模型引入有限元分析软件 LS-DYNA,对 T300/epoxy 复合材料层合板进行了冲击动态响应模拟计算,计算结果与试验结果吻合较好,验证了模型的有效性.从层合板抗冲击性能的角度提出了有效冲击时间的概念,探讨了考虑应变率效应时复合材料层合板在高速冲击有效时间内的应力(应变)分布、挠度随冲击速度的变化等动态响应规律.分析发现:最大正应变和层间剪应力沿层合板边长方向的衰减先快后慢,衰减速度明显变小的范围大约在距弹着点 20 mm 附近;在相同冲击速度条件下,层合板的挠度随到冲击点距离的增大而减小,在 2 个垂直方向上挠度分布规律基本相同,层合板表现出整体变形的对称性;存在冲击影响域,在一定范围(10 mm)之外,冲击速度高时层合板的挠度反而小,冲击影响域也小.

关键词: 复合材料;应变率;动态响应;应力分布

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0072-05

Dynamic Response with Strain Rate Dependence of Composite Laminates

HUANG Qiaoping¹, ZHAO Guiping², LU Tianjian³

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. MOE Key Laboratory of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A viscoelastic constitutive model considering the strain rate effect of T300/epoxy composite laminates was established based on the analysis of high velocity impact experiment results. Then the model was integrated into LS-DYNA to carry out dynamic response simulation of T300/epoxy laminates subjected to impact. The results of simulation coincide with the experimental data well. The concept of effective time was proposed from the point of impact-resistance ability of laminates. Considering the high strain rate effect, the dynamic response characteristics of T300/epoxy laminates such as distribution of maximum stress (strain) at different location of the plate during the effective time and the variation of deflection with impact velocities were investigated. It is found that the decaying of maximum strain and maximum shear stress tends to be fast at first and then become slow along the direction of laminates length. The changing location of decaying rate is about 20 mm from the impact point. The deflections of the laminates decrease with the distances far from the impact point under the same impact velocity. The distribution of deflections is similar in two perpendicular directions of the laminates to show a symmetrical deformation in the

whole view. The affecting area can be observed, and the deflections are smaller beyond a certain distance (10 mm) under higher impact velocities than those under lower impact velocities due to the difference of impact affecting area.

Keywords: composite; strain rate; dynamic response; stress distribution

复合材料层合板由于其特有的轻质、高强、高模量性能而被广泛地应用于工程界,尤其是在航空航天领域,碳纤维增强复合材料已成为一种不可缺少的特种工程材料。例如:美国空军主力战斗机 F-22 (猛禽)结构质量的 25% 为碳纤维增强复合材料,几乎覆盖了飞机的全部外表面;欧洲空中客车 A-380 的外翼、机身蒙皮以及所有操纵面都采用了碳纤维增强复合材料;我国东方红 3 号卫星中由碳纤维增强复合材料制成的结构占卫星结构总质量的 80% ~ 90%。相对于金属材料而言,复合材料层合板对冲击荷载更敏感。在高速冲击荷载作用下,由于存在应变率效应的问题,因而破坏模式与应变率密切相关,了解这种与应变率效应相联系的破坏机理,对合理地设计层合板相当重要。虽然层合板的冲击破坏机理和破坏影响因素在国内外已经研究得很多^[1-7],但到目前为止这些研究或是单独研究考虑应变率效应的本构关系,或是研究冲击速度、冲击物形状等因素与层合板破坏、吸能间定性或经验式的关系,很少集中讨论考虑应变率效应对层合板在冲击过程中的动态响应的影响。为了研究应变率效应对冲击特性的影响,本课题组首先进行了 T300/epoxy(碳纤维/环氧树脂)复合材料的准静态拉伸和分离式霍普金斯拉杆材料性能试验^[8],得到了 prony 级数^[9]形式的考虑应变率效应的黏弹性本构关系,然后将试验得到的黏弹性本构关系引入动力有限元计算软件 LS-DYNA,对轻气炮高速冲击试验进行了数值模拟,通过数值模拟计算,讨论了复合材料层合板的冲击动态响应。

1 黏弹性本构模型

1.1 广义 Maxwell 模型

根据冲击拉伸试验结果可以看出, T300/epoxy 复合材料层合板表现出较明显的应变率相关性^[8]。为了考虑应变率效应,可以在应变率无关的本构模型中加入黏弹性项来实现。最简单的模型就是 Maxwell 模型,它由弹簧元件和黏性元件串连组成,根据作用于每个组件的应力相等而总应变为 2 个组件的应变之和,容易得到 Maxwell 模型的微分关系为

$$\sigma + \frac{\eta}{E}\dot{\sigma} = \eta\dot{\epsilon} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; η 为黏性系数; E 为弹性模量; $\dot{\sigma}$ 为应力率; $\dot{\epsilon}$ 为应变率。记 $\theta = \frac{\eta}{E}$, 通常称为具有时间量纲的松弛时间。这个模型只能给出具有单一松弛时间的响应,在应力松弛恒应变条件下易得单个 Maxwell 的应力解为

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-t/\theta) = E\epsilon_0 \exp(-t/\theta) \quad (2)$$

式中: σ_0 表示初始应力; ϵ_0 表示初始应变。当应变率的变化范围较大时,单个 Maxwell 单元不能描述实际情况,可以增加 Maxwell 单元的数量,组成具有多松弛时间的广义模型。广义 Maxwell 模型的总应力为各个 Maxwell 单元应力之和,若令 N 趋于无穷,则可以得到连续应变率的黏弹性本构模型,不同松弛时间 θ_i 反映不同应变率的影响。考虑到本次试验所测得的应变率都是某一范围内的常应变率,只要松弛时间涵盖了试验中应变率的最大值和最小值,就可以用有限间距较近的松弛时间级数序列

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N E_i \exp(-t/\theta_i) \quad (3)$$

来代替实际情况。因此,在常应变率条件下,按照广义 Maxwell 模型的思想,可以采用多个离散松弛时间来描述实际情况,则复合材料层合板黏弹性本构模型简化为

$$\sigma(t) = E_0 \epsilon(t) + \sum_{i=1}^N E_i \theta_i \dot{\epsilon}_i [1 - \exp(-\tau/\theta_i \dot{\epsilon}_i)] \quad (4)$$

式中: τ 表示松弛过程中的任意时间; E_0 为初始弹性模量; $\dot{\epsilon}_i$ 为第 i 个应变率。模型中的各项参数可以根据试验测得的数据拟合得到。

1.2 材料性能试验及黏弹性参数的确定

从试验应力-应变图^[8]上可以看出,不同应变率下曲线的形状和变化趋势都不同,各曲线在开始时都有稳定的上升段,试件开始破坏后便逐渐下降。本文重点考虑的是材料在破坏点之前的应力-应变关系,故只取曲线的稳定上升段,见图 1。通过数据分析发现,各应变率条件下的破坏应变约为 0.015,即最大应力出现在应变约为 0.015 的时候^[8]。基于此,数值计算时采用最大应变作为破坏准则。准静态数据选取的应变率为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,相应的应力-应变曲线在 0.015 的应变范围内几乎呈直线,将其作

为静态参考曲线. 中应变率下选取的应变率为 1.70 s^{-1} 和 0.40 s^{-1} , 高应变率下选择的应变率为 941.86 s^{-1} 、 962.16 s^{-1} 和 1028.00 s^{-1} , 将这 5 组数据作为确定材料参数的依据. 对试验数据采用最小二乘法拟合, 得到广义 Maxwell 模型的 prony 级数形式.

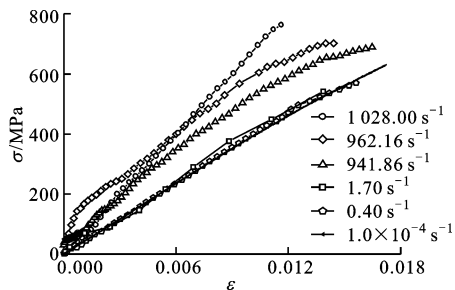


图1 不同应变率下的应力-应变关系

2 层合板动态响应分析

为了验证数值模拟的结果, 本文所采用的有限元计算模型的尺寸和材料参数与试验^[8]中的完全一致. 单层板的性能: 沿纤维方向拉伸强度为 1300 MPa , 拉伸模量为 $(125 \pm 15) \text{ GPa}$, 泊松比为 0.3 , 压缩强度为 1150 MPa , 压缩模量为 $(120 \pm 20) \text{ GPa}$; 垂直纤维方向拉伸强度为 35 MPa , 拉伸模量为 $(9.5 \pm 1.5) \text{ GPa}$, 压缩强度为 170 MPa , 压缩模量为 $(8.25 \pm 2.25) \text{ GPa}$; 面内剪切模量为 $(5.5 \pm 1.0) \text{ GPa}$. 计算模型所用的层合板平面尺寸为 $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$, 厚度为 4.8 mm , 铺层顺序为 $[(0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ)_4]_s$, 层合板四边固支, 面内中心选为 xz 坐标的原点, 冲击弹沿 y 轴负方向冲击层合板.

2.1 模型有效性验证

图2是利用试验得出的本构关系由有限元数值模拟得到的复合材料层合板在钢质子弹冲击下吸收的能量随子弹冲击速度的变化, 以及和试验结果的比较, 可以看出计算结果与试验结果吻合较好, 由此验证了本文数值计算模型的合理性. 因为数值计算是理想条件, 一些因素如边界条件、冲击点位置等与试验条件有一定差异, 所以图2中的计算结果略大于试验值.

2.2 考虑应变率效应的层合板应力应变分布

首先在计算模型中采用不考虑应变率效应(模型1)和考虑应变率效应(模型2)2种本构关系分别进行模拟计算, 对层合板中同一坐标线上离靶心不同距离点的应力、应变变化规律进行比较, 分析应变率效应的影响. 图3和图4分别是冲击速度为

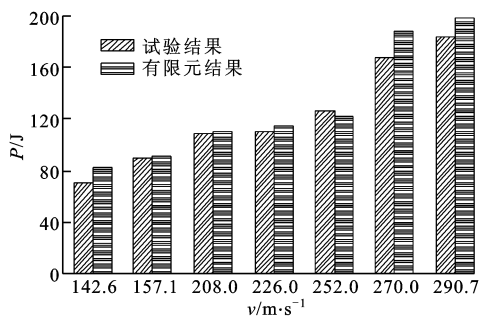


图2 层合板吸能随冲击速度的变化

270.0 m/s 和 208.0 m/s 时, 层合板上点 $(10 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 处考虑与不考虑应变率效应 2 种情况下 σ_x 和 ϵ_x 随时间变化的比较.

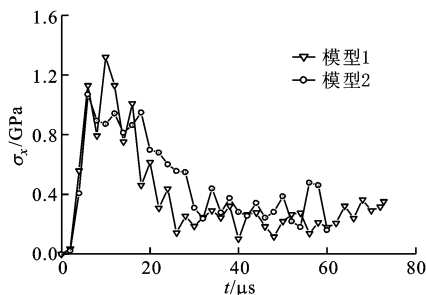


图3 冲击速度为 270.0 m/s 时点 $(10 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 处的应力变化

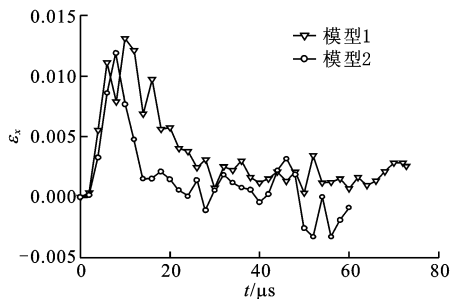


图4 冲击速度为 208.0 m/s 时点 $(10 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 处的应变变化

从图3和图4中可以看到, 在相同位置 2 种模型的应力和应变随时间的变化趋势是一致的: 开始时, 由于子弹冲击层合板, 使应力、应变急剧上升, 到达峰值后停留一段时间, 这段时间就是子弹击穿层合板的过程, 之后层合板被穿透, 层合板对子弹的阻力逐渐减小, 应力、应变开始回落, 最后保持于稳定的水平. 但是, 从图4可以看出, 在同一时刻考虑应变率效应的应变比不考虑应变率效应的要小, 特别是在应变达到最大值附近的一段比较明显. 同时, 考虑应变率效应的应力曲线比不考虑应变率效应的曲线要光滑, 没有突然跳跃点, 主要原因是黏弹性本构

模型引入了应变率相关的应力项后,应力和应变呈现出应变率相关的非线性关系.以下的模拟计算分析中均采用黏弹性本构模型.

图5是子弹穿板过程的典型加速度-时间曲线.根据曲线特点可将子弹穿透层合板的全过程分为以下3个阶段:

(1)当时间处于A区域时,子弹加速度为0,不受阻力作用,对层合板没有冲击作用;

(2)当时间处于B区域时,子弹由于所受的阻力较大,加速度急剧增加,层合板为了抵抗子弹冲击,材料不断地发生破坏并吸收子弹的动能;

(3)当时间处于C区域时,子弹的加速度再次在0附近徘徊,子弹所受阻力几乎为0,此时层合板已被击穿.

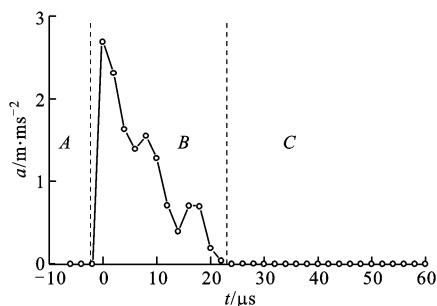


图5 子弹冲击层合板的典型加速度-时间曲线

材料破坏与冲击过程中的最大应变(应力)密切相关.为了研究层合板的最大应变(应力)分布规律和冲击速度对层合板最大应变(应力)的影响,数值分析中重点考察B区域这段时间内层合板上不同位置的应变(应力)最大值.为了方便计,称B区域对应的时间为有效时间.选取高速冲击试验中典型的3种冲击速度(270.0 m/s, 252.0 m/s, 208.0 m/s)冲击时层合板中的最大单层应力和应变作为考察对象.沿x方向及z方向分别每隔5 mm取1个点,观察这些点在有效时间内最大正应力、最大正应变及最大横向剪应力的变化;沿对角线方向每隔7.07 mm取1个点,观察这些点在冲击过程中最大横向剪应力的变化.

图6、图7给出了冲击速度为208.0 m/s时有效时间段内层合板中最大正应变 ϵ_x 、 ϵ_z 及最大剪应力 τ_{yz} 沿层合板边长方向的分布情况(限于篇幅,其他冲击速度下的结果这里未给出).分析结果如下.

(1)层合板中最大正应变随着到靶心距离的增大开始迅速衰减,之后衰减速度变慢(见图6).在离靶心大约20 mm的范围内,应变急剧减小,在离靶

心20 mm范围以外,应变值在0附近徘徊,说明层合板直接受到冲击影响的区域是在距靶心较近的20 mm范围内.

(2)与层合板分层撕裂密切相关的横向剪应力最大值开始时衰减较快,随后衰减的速度变缓(见图7).衰减速度明显变小的范围大约在距靶心15~25 mm之间.面内剪应力 τ_{xz} 的衰减规律与横向剪应力相似.

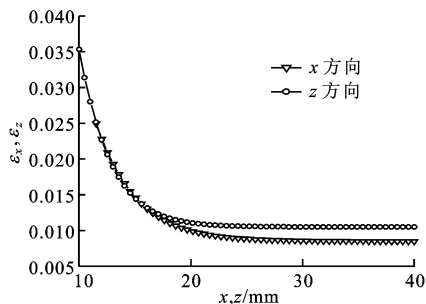


图6 x、z方向的正应变分布

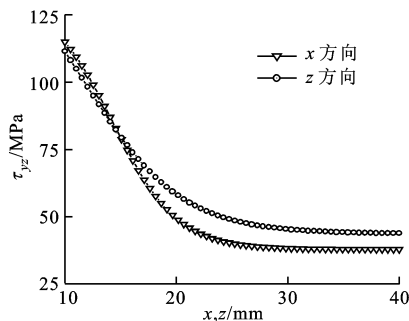


图7 剪应力分布

2.3 不同冲击速度时层合板的动态响应

图8~图10是层合板在3种速度冲击下的应力、应变和挠度分布衰减规律比较.由图可以看出:

(1)在一定范围内,冲击速度较高时层合板沿z方向在接近靶心处的最大正应变比冲击速度较低时的大(见图8),而沿x方向的正应变分布规律相同,由于冲击影响的局部性,冲击速度越高层合板受冲击影响的区域就越小,反之冲击速度越低受影响的区域越大,因此在一定区域之外,高速冲击时相同距离处的应力反而比低速冲击时的小(见图9);

(2)冲击速度相同时,层合板的挠度随距靶心距离的增大而减小(见图10),两垂直方向距靶心相同距离的点上挠度基本相同,层合板表现出整体变形的对称性;

(3)冲击速度不同时,在距离靶心一定范围(10 mm)之外的同一位置,冲击速度高时的挠度反而小,说明高速冲击时受影响的只是弹着点附近的

有限区域,冲击速度越高受冲击影响的区域就越小。

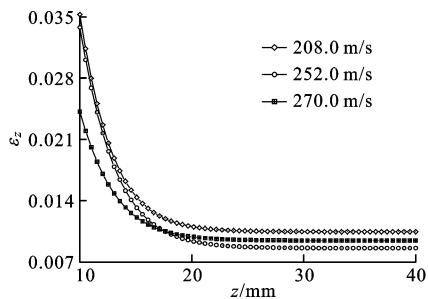


图8 不同冲击速度下层合板中的 z 向正应变比较

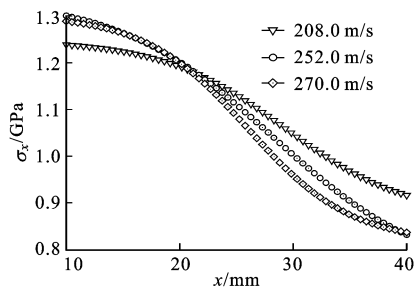


图9 不同冲击速度下层合板中的 x 向正应力比较

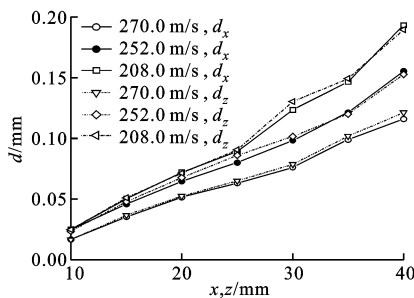


图10 不同冲击速度下层合板的 x 和 z 向挠度比较

3 结 论

(1)在有效时间内,复合材料层合板中的最大正应变和横向剪应力衰减随到冲击点距离的增加先快后慢,衰减速度明显减慢的范围大约在距靶心20 mm附近。面内剪应力的衰减规律与横向剪应力相似。

(2)在相同冲击速度条件下,2个垂直方向的挠度分布规律基本相同,层合板表现出整体变形的对称性。

(3)在不同的冲击速度下,速度越高在有效时间内层合板受影响的动态响应区域越小;反之,速度越低受影响的区域越大。

参考文献:

- [1] THIRUPPUKUZHI S V, SUN C T. Testing and modeling high strain rate behavior of polymeric composites [J]. Composites: Part B, Engineering, 1998, 29(5): 535-546.
- [2] WEEKS C A, SUN C T. Modeling non-linear rate dependent behavior in fiber-reinforced composites [J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(3/4): 603-611.
- [3] XIA Yuanming, WANG Xing. Constitutive equation for unidirectional composites under tensile impact [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(2): 155-160.
- [4] 汪洋,夏源明. 单向KFRP的应变率相关的本构方程[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 193-199.
WANG Yang, XIA Yuanming. A strain rate dependent constitution equation for unidirectional KFRP [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 193-199.
- [5] 吴横毅,马钢,夏源明. PMMA低、中应变率单向拉伸力学性能的试验研究[J]. 试验力学, 2005, 20(2): 193-199.
WU Hengyi, MA Gang, XIA Yuanming. Experimental study on mechanical properties of PMMA under unidirectional tensile at low and intermediate strain rates [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 193-199.
- [6] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. A model for predicting penetration and perforation of FRP laminates by 3-D impactors [J]. Composite Structures, 2002, 56(3): 243-248.
- [7] MAHANTA B B, CHAKRABORTY D, DUTTA A. Accurate prediction of delamination in FRP composite laminates resulting from transverse impact [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(15): 2341-2351.
- [8] 王正浩. 碳/环氧树脂复合材料应变率效应及抗冲击性能的实验研究[D]. 西安:西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 2006.
- [9] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual version 960 [M]. Livermore, CA, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2001.

(编辑 葛赵青)