

层合梁横向冲击的动力学效应

张双寅

(中国科学院力学研究所 北京,100080)

李国耀

蔡忠龙

(香港城市大学)

(香港理工大学)

摘 要

研究了十字叠层复合材料梁横向冲击响应的动力学效应,根据冲击实验曲线用动态有限元方法计算了惯性效应和应力波效应对位移和应力响应的影响。

关键词:结构动力学;冲击响应;动力学效应;层合梁

中图分类号:TB122;O347

引 言

层合复合材料对横向冲击很敏感,极易发生基体裂纹与层间开裂等内部损伤,大大降低承载能力,所以近年来对此问题人们进行了大量研究^[1]。由于问题的复杂性,初期的工作多为实验研究,近来,发表了一些有限元及理论分析模型的文章^[2,3],这些模型都是准静态的,即忽略了动态效应。关于低速冲击下力学行为的准静态假设的合理性,笔者在文[4]中做了讨论。但在多大的冲击速度下其动态效应不可忽略?这时的动态效应对冲击响应的影响有多大?这些问题尚无人回答。本文试图用动态有限元计算分析这一问题,结果表明在冲击加载(即载荷上升)初始阶段和较高加载速率下应力波效应对应力分布有显著影响。

1 有限元分析

1.1 分析对象

研究对象为 $[0_2/90_4/0_4/90_2]$,十字叠层 T300/QY9811 复合材料梁,名义尺寸为 $50 \times 12 \times 3$ (mm)。文[4]对实验研究进行了详细的描述,本文不再重复。为使问题简化,仅对文[4]图3b中冲击载荷随时间线性上升加载阶段进行研究,其冲击时间区间为 $0 \sim 1.4$ ms。冲击位移 $\delta(t)$ 曲线绘于图1。

· 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期:1994-03-12;修改稿收到日期:1995-03-29

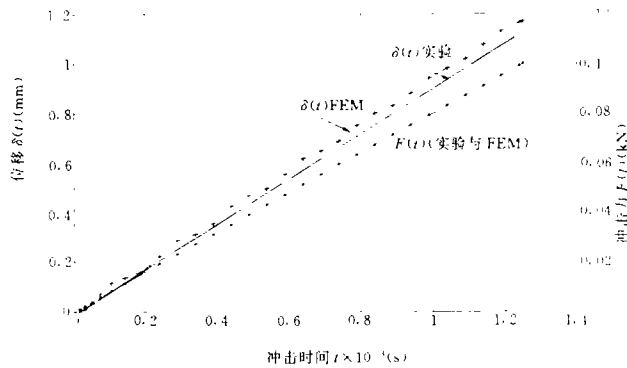


图1 动态分析的冲击力 $F(t)$ 与位移 $\delta(t)$ 曲线

1.2 有限元网格

以下的动态分析基于小挠度、线弹性和平面应变假设。有限元网格如图2所示,利用对称性只计算长度的一半,取 x 坐标为梁轴线方向, z 方向为垂直方向。网格图的右端线为对称线,右上角节点为冲击点,左下角左起第二个节点为支撑点,其半长度为18.75mm。分为8个单元层,上面为第一层,每层15个单元,共划分120个单元,采用四边形八节点等参元^[5],共计407个节点。在分割单元网格时严格按材料的铺层结构划分。第1、3、6、8层单元属于 0° 层,其余为 90° 层,中面处 90° 层分为两个单元层。

1.3 材料常数

由材料试验测得如下材料常数

0° 层: $E_{11} = 145.9\text{GPa}$, $E_{33} = 8.855\text{GPa}$, $G_{13} = 5.3\text{GPa}$, $\nu_{13} = 0.32$, $\rho_0 = 1.5\text{g/cm}^3$ 。

90° 层: $E_{11} = E_{33} = 9.67\text{GPa}$, $G_{13} = 3.38\text{GPa}$, $\nu_{13} = 0.30$, $\rho_0 = 1.5\text{g/cm}^3$ 。 ρ_0 为材料密度。

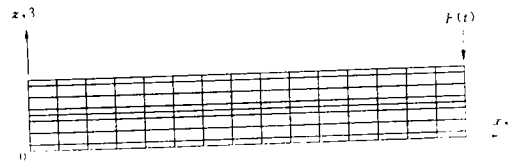


图2 有限元网络与坐标

1.4 计算结果

计算是用国际商用大型有限元程序 ABAQUS 完成的。根据文[4]的试验曲线,采用图1的 $F(t)$ 作为有限元计算的冲击力函数,这是线性加载函数,升载区间取为 $t=0$ 至 $t=1.25\text{ms}$ 。计算步长 Δt 在 1.25 与 $25.0\mu\text{s}$ 之间变化,由程序根据迭代收敛情况调整。取30个中间结果做了存储,用‘*’表示,下边分别讨论位移响应和应力响应的计算结果。

1.4.1 冲击位移响应

冲击载荷作用点的位移响应计算结果也绘于图1,用‘+’表示。可见,这条位移响应曲线不是直线,而是在线性上升函数上叠加一个周期振荡函数,其周期约为 0.15ms 。这个周期振

荡函数为梁的简谐振动函数,周期为基频振动周期。

由弹性振动理论,三点弯曲简支梁自由振动频率为

$$\omega_b = (2n + 1) \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (1)$$

式中 ω_b 为圆频率, L 为跨距, E 为等效模量, I 为弯曲惯性矩, ρ 为单位长度质量, n 为振型参数, 对于基频 $n=0$ 。将材料常数代入上式可得 $\omega_b=50.5 \times 10^3/s$, 周期 $t_0=0.1245ms$, 其结果与有限元计算结果一致。

将有限元计算与实验测得的 $\delta(t)$ 相比, 可见实验 $\delta(t)$ 上没有振荡现象。这由于有限元计算中没有计及冲击锤的质量, 而实验中冲击锤与试件结合形成一个振动系统, 其振动周期为

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

$m=2.99kg$ 为冲击锤质量, 比试件总质量大得多。 $k=48EI/L^3$ 为梁的三点弯曲刚度。将材料与试件参数代入式(2)得 $t_0=7.08ms$, 比有限元预测的挠度函数上的振荡周期大得多, 甚至比冲击加载时间区间 $1.25ms$ 也大许多。所以冲击实验的挠度曲线 $\delta(t)$ 呈直线。

1.4.2 动态效应对应力响应的影响

从两方面研究动态效应对应力的影响, 其一, 升载过程早期与后期应力分布特征的不同; 其二, 在不同加载速率下, 达到满载时应力水平的不同。

图3表示冲击载荷函数上升到 $t=1.25\mu s$ 时刻第1层(上层)的应力分布; 图4表示此刻第7材料层(下层)的应力分布。不难看出, 此刻应力局限于冲击点附近, 远离冲击点的地方(左边)应力为零。对比图3与图4可见, 两者的应力绝对值差别很大, 以 σ_{xx} 为例, 第1层的 σ_{xx} 值为第7层 σ_{xx} 的三倍, 这个现象可用应力波传播理论进行解释。因为应力波先到达第1层, 后到达第7层, 所以前者应力比后者大。

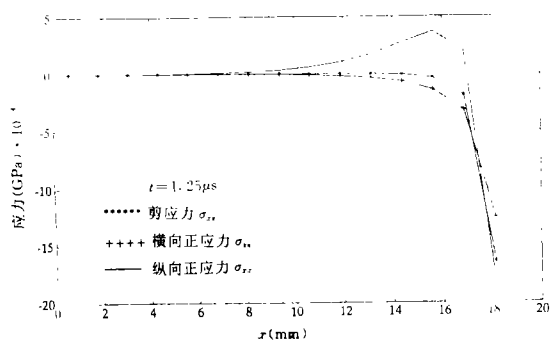


图3 1.25μs 时第1层应力分布

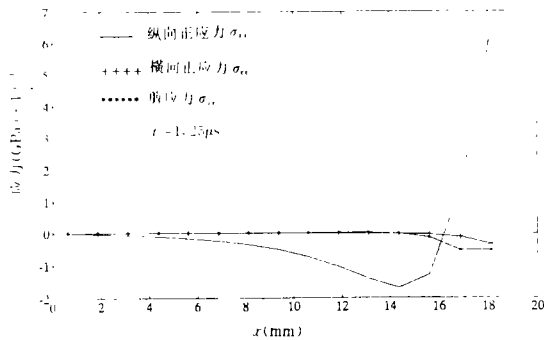


图4 1.25μs 时第7层应力分布

由弹性应力波理论, 正应力波速 c_1 与剪应力波速 c_t 分别为

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_{11}}{\rho_0}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{G_{13}}{\rho_0}} \quad (3)$$

将材料常数代入上式,忽略应力波色散效应,得到 $c_1 = 9.87 \times 10^3 \text{m/s}$, $c_t = 1.88 \times 10^3 \text{m/s}$ 。当 $t = 1.25 \mu\text{s}$ 时,正应力传播距离为 12.3mm,剪应力波传播 2.35mm。这个估算与有限元结果符合相当好。

然后计算了 $t = 48.91 \mu\text{s}$ 时的第1层与第7层中的应力分布,此刻应力分布接近于静态弯曲应力的结果,限于篇幅,将曲线图略去。以 σ_{xx} 为例,正应力波在 $t = 48.91 \mu\text{s}$ 时传播 482.7mm,相当于从冲击点到支撑点距离的 27 倍。应力波经过 27 次往返传播已趋于稳态化。然而,此刻第1层中的应力绝对值大于第7层中的应力值,这是由于此刻加载过程仍在继续,冲击载荷仍在线性上升中。

为了研究加载速率对应力水平的影响,计算了在三种不同载荷上升速率下达到满载时刻第1层内的正应力分布曲线,示于图5。这三种加载过程均为线性升载过程,达到相同满载的时间分别为:(i)准静态;(ii)1.25ms;(iii)50 μs 。由图5可见,加载时间为1.25ms的应力水平和分布与准静态分析结果几乎完全相同;但在高速率加载下,即加载时间为50 μs 的应力水平比另外两种情况低许多,在这种情况下用准静态假设进行分析误差会很大。文中也计算了三种加载速率下的剪应力分布,与正应力分布的结论类似,限于篇幅,略去其曲线图。

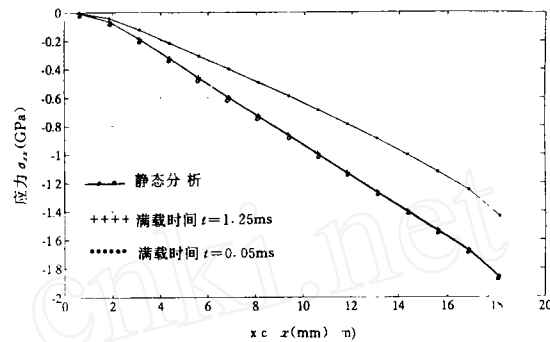


图5 不同冲击加载速率下第1层 σ_{xx} 分布

2 结束语

本文对层合梁横向冲击下的动态效应进行了有限元分析,结果表明:在落锤冲击加载速率下(文[4]),加载初始阶段应力分布不均匀,局限于加载点附近,当加载时间持续到 45 μs 时应力波效应趋于消失;三种加载速率情况相比表明,比落锤冲击加载率高 24 倍的冲击必须考虑应力波效应。

参 考 文 献

- 1 Serge Abrate. Impact on laminated composite materials. Applied Mechanics Review, 1991;44(4):155-190
- 2 Greszczuk L B. Impact dynamics. John Wiley and Sons, Chapter 3, 1982; 55-94
- 3 Lee S W R and Sun C T. A quasi-static penetration model for composite laminates. Journal of Composite Materials, 1993; 27(3): 251-271

- 4 李国耀,蔡忠龙,张双寅. T300/QY8911十字叠层复合材料冲击损伤与破坏的实验研究. 复合材料学报, 1995;12(1):92-99.
- 5 张双寅, C M. 利奇. CSM 玻璃钢复合型断裂的有限元分析. 应用数学和力学, 1986;7(8):689-701

Dynamic Effect of Laminated Beam Subjected to Transverse Impact

Zhang Shuangyin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences Beijing, 100080)

Robert K. Y. Li

C. L. Choy

(City University of Hong Kong) (Hong Kong Polytechnic University)

Abstract

A study on dynamic effect of three point bending beam made of laminated composite subjected to transverse impact have been carried out. Emphasis of this investigation is focused upon the inertia effect and stress wave effect on the impact response and stress distribution of the beam. Dynamic finite element analysis was conducted and the famous commercial program ABACUS was utilized. The impact loading function of time recorded in the experimental study of the previous paper was used in the FEM analysis and the resulted deflection response $\delta(t)$ of FEM was compared with that of experiment, The FEM $\delta(t)$ curve exhibits some difference from that of experiment, i. e. there is small high frequency oscillation wave superposing on the main $\delta(t)$ curve of FEM, whereas the recorded $\delta(t)$ curve is simply straight. This is because of ignorance of the mass of impact hammer in FEM calculations, but in the drop weight impact test the beam specimen combining the hammer constitutes a vibration system. The period of the oscillation is proved to be the period of free vibration of the beam for the first vibration mode.

The stress wave propagation was examined. At the early period of the loading process, the stress was localized in small area of the vicinity of impact point and the stress values in the upper layer of the beam was larger than those in the lower layer. At the later stage of loading process stress distribution tends to be the same as static bending. For studying the effect of loading rate, three loading cases were considered. When the maximum load was reached, the stress for the drop weight loading case is nearly the same as static loading. On the contrary, if the loading rate is enhanced by a factor of 25, the stress was smaller than the former two cases for the same load level.

Key words: structural dynamics; impact response; dynamic effect; laminated beam