层状化增韧层合复合材料低速冲击有限元分析

郭 颖[1,2], 曾 涛[1], 陆夏美[1]
(1. 哈尔滨理工大学 建筑工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学 复合材料研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:针对低速冲击作用下的层合复合材料,建立了冲击的二维有限元模型. 为了提高层合复合材料的抗冲击损伤性能,采用层状化增韧方法,并利用国际通用显式动力分析程序 ANSYS/LS-DYNA,对层状化增韧后的层合复合材料在冲击载荷作用下的破坏过程进行了数值模拟,确定了增韧方案,为增韧结构设计和选择性增韧提供了理论依据.

关键词:增韧; 复合材料; 力学性能; 冲击
中图分类号: TB332 **文献标志码**: A **文章编号**: 1007-2683(2009)03-0094-04

Finite Element Analysis of Laminated-toughened Composites under Low-velocity Impact

GUO Ying[1,2], *ZENG Tao*[1], *LU Xia-mei*[1]
(1. School of Architecture and Civil Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To analyze the response of laminated composites under low-velocity impact, a finite element analysis model is established. In order to improve impact resistance of laminated composites, a technique of laminated-toughening is adopted and ANSYS/LS-DYNA is utilized to simulate the damage process of laminated-toughened composites under impact load. Then toughening project is confirmed. It gives a theoretical reference for designing highly-effective toughening structure and the selective toughening.

Key words: laminated-toughening; composite; mechanical properties; impact

1 引 言

纤维增强树脂基复合材料因其比强度、比刚度高而具有良好的抗疲劳断裂性能,又因结构可设计而得到了广泛应用. 影响其有效应用的主要因素是其分层倾向. 碳纤维/环氧复合材料在使用中受到外来物体低速冲击后,会在层合板内形成严重的不可见分层损伤,典型的情况是冲击造成目视勉强可检的冲击损伤时,压缩强度已经降低到仅为原来的40%[1]. 而在实际应用中,材料遭受低速冲击损伤的可能性是很大的,跌落的工具、冰雹以及碎石都可能造成一定程度的损伤,可以说低速冲击是复合材料制件使用过程中难以避免的.

分层的存在,将造成复合材料层合板结构强度和刚度的显著下降,限制了复合材料应用水平的进一步提高. 因此如何抑制分层损伤,提高复合材料层合板和层合结构的抗冲击损伤以及抗分层能力,一直是复合材料结构损伤容限设计与分析研究的热点,具有极为重要的实际意义. 根据益小苏教授关于"离位"(Ex-Situ)复合的思想,安学峰博士提出了

收稿日期: 2008-04-12
基金项目: 国家 973项目(2003CB615603); 国家自然科学基金项目(10572068, 10772064); 国家 863项目(2007AA0190)资助.
作者简介: 郭 颖(1974—),女,讲师,哈尔滨工业大学博士研究生.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对碳纤维复合材料层合板的层状化增韧方法[2],即在层合板最薄弱的层间部位——碳纤维铺层间,进行增韧,可以有效地抑制层间分层损伤.经层状化增韧,热固性基体复合材料的抗冲击损伤性能得到了显著提高.

随着有限元的数值方法的广泛应用,近年来已经提出了许多数值模型来分析层合复合材料的低速冲击问题.文[3]在假设层合板中的每层材料都是匀质正交的前提下采用三维有限元模型对冲击问题进行了研究.文[4]提出的冲击损伤模型考虑了冲击过程中基体开裂与分层损伤之间的相互作用,比较准确地反映了复合材料层合板的冲击损伤过程.文[5]提出了用于预测准静态冲击损伤及损伤扩展的分析模型,该模型没有考虑纤维断裂失效形式.

本文利用有限元分析软件 ANSYS9.0和显式动力分析程序 LS-DYNA,对增韧后的层合复合材料在低速冲击下的破坏过程进行了数值模拟,为增韧结构设计和选择性增韧提供了基础.

2　有限元模型

用 Ansys9.0作前处理,利用命令流的方式建模[6],用 Ls-Dyna960进行模块分析和后处理.

2.1　冲击物和层合复合材料的几何模型

冲击物直径为 2.5 mm,层合板长为 20 mm,厚 3.44 mm,纤维层与增韧层厚度比为 8∶1,纤维铺层方向为[0°/90°/90°/0°],两个纤维层中间为增韧层,结构示意图如图 1所示.

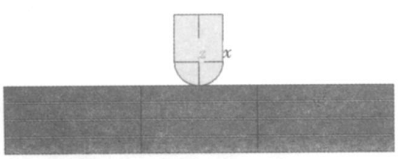

图 1　结构示意图

2.2　网格划分

冲击物采用 2D Solid单元,层合板采用 Thin Shell 163单元,在发生冲击的局部区域网格进行了细化,结构的网格化如图 2所示.整体模型共有 5 275个单元,5 519个节点.

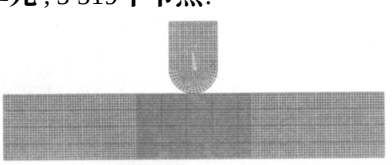

图 2　网格划分图

冲击物和复合材料层合板的接触类型选择单面接触(CONTACT_2D_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE).

2.3　材料模型

冲击物、普通基体层、增韧层和纤维层的材料模型均从 ANSYS/LS-DYNA材料库中选取.冲击物选择为刚体材料模型(MAT_RIGID).冲击物力学参数如表 1所示.

表 1　冲击物力学参数

单元类型	材料模型	密度/(g·cm^{-3})	E弹性模量/GPa	泊松比
Thin Shell 163	Rigid	79.3	200	0.3

普通基体层和增韧层选择为随动塑性材料模型(MAT_PLASTIC_KINEMATIC),此模型通过硬化参数 β来调整各向同性硬化和随动硬化的贡献.应变率用 Cowper-Symonds模型来考虑,屈服应力与应变关系为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right](\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\mathrm{eff}}) \qquad (1)$$

式中:σ_0 为初始屈服应力;$\dot{\varepsilon}$为应变率;C, P 为 Cowper-Symonds应变率参数;$\varepsilon_p^{\mathrm{eff}}$为有效塑性应变;$E_p$ 是由 $E_p = E_{\tan} E/(E - E_{\tan})$给出的塑性硬化模量,应力-应变特性只能在一种温度下给定.普通纤维层和增韧层力学参数如表 2、表 3所示.

表 2　普通基体层力学参数

单元类型	材料模型	密度/(g·cm^{-3})	E弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	失效应变
Thin Shell 163	Plastic kinematic	1.26	3.5	0.28	97	0.40

表 3　增韧层力学参数

单元类型	材料模型	密度/(g·cm^{-3})	E弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	失效应变
Thin Shell 163	Plastic kinematic	1.26	3.5	0.28	97	0.041～0.059

纤维层选择为带损伤的复合材料模型(MAT_COMPOSITE_DAMAGE),该模型的应力-应变关系为

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1\sigma_2) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_1}(\sigma_2 - \nu_2\sigma_1) \\ 2\varepsilon_{12} &= \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中: ε_1, ε_2 和 ε_{12}分别是材料纵向、横向的拉伸应变和面内剪应变; σ_1, σ_2 和 τ_{12}分别是材料纵向、横向拉伸应力和面内剪应力; v_1, v_2 分别是纵向和横向泊松比; E_1, E_2 和 G_{12}是纵向、横向拉伸模量和面内剪切模量; α为非线性剪切应力参数. 纤维层力学参数如表 4所示[3].

表 4 纤维层力学参数

单元类型	材料模型	密度/(g·cm^{-3})	拉伸弹性模量/MPa			
			E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}
Thin Shell 163	Plastic kinematic	1.6	145	9.2	9.2	4.6
G_{13}(GPa)	G_{23}(GPa)	v_{12}	v_{13}	v_{23}	σ_{11}(MPa)	σ_{22}(MPa)
5.2	3.0	0.3	0.3	0.3	2 500	97

注: 1-纤维方向; 2-板面内垂直于纤维方向; 3-垂直于板的面外方向.

3 数值计算结果

冲击物以 6.9 m/s的速度对复合材料层合板进行冲击,用 LS-DYNA Solver进行求解, LS-PRE-POST 2.0进行后处理. 下面考虑如下 8种工况:

1)两个纤维层之间没有进行增韧处理,即采用普通基体层;

2)任两个纤维层之间进行整体增韧;

3)上两个纤维层之间和下两个纤维层之间进行对称完全增韧;

4)上三层纤维层之间进行完全增韧; 5)下三层纤维层之间进行完全增韧;

6)上两层纤维层之间进行完全增韧;

7)中间两层纤维层之间进行完全增韧;

8)下两层纤维层之间进行完全增韧.

工况 2)~8)分别考虑增韧层的失效应变为 0.042、0.044、0.046、0.048、0.050、0.052、0.054、0.056、0.058时的情况. 各种工况时的结构示意图如图 3所示. 冲击破坏的示意图如图 4所示.

4 结果与讨论

在冲击速度和冲击时间完全相同的情况下,可以得到复合材料层合板在不增韧、整体增韧(失效应变为不同值)、部分增韧(失效应变为不同值)时的破坏长度,则失效应变(Failure strain)与破坏长度(Damage length)之间的关系如图 5~9所示.

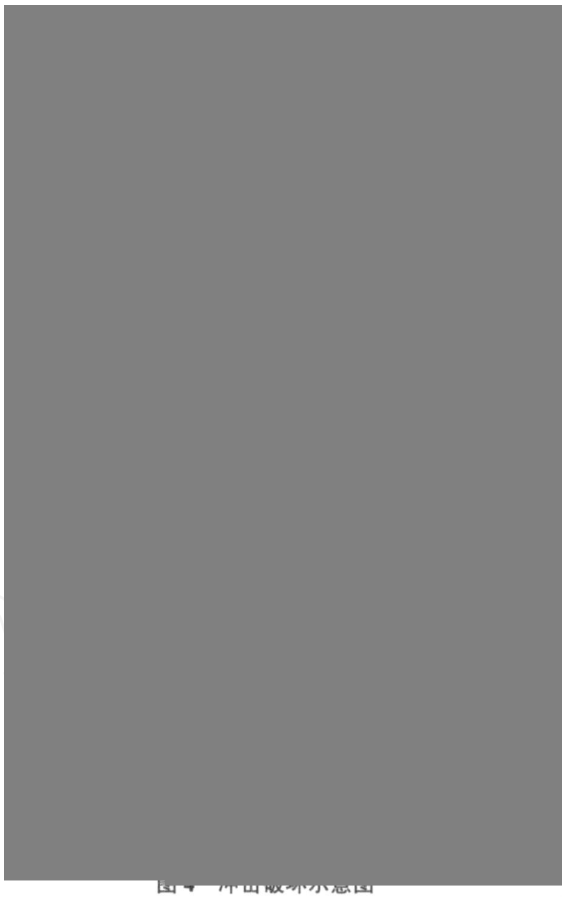

图 4 冲击破坏示意图

由图 5、6、7、9可以看出,随增韧层失效应变的增大破坏长度在逐渐降低,说明增韧后复合材料层合板的抗冲击性能得到了提高. 由图 8可以看出,采用这三种增韧形式后,破坏长度没有发生改变,因此复合材料层合板的抗冲击性能没有得到提高. 比较图 5~9发现,工况 2、3、4、6能起到比较好的增韧效果,在这四种增韧形式中,整体增韧和部分增韧在失效应变相同的情况下使复合材料层合板的抗冲击性能提高的程度基本相同,说明在复合材料层合板制备时,不必进行整体增韧,只需对上两层纤维层之间进行增韧,如图 3(f)所示,即可达到提高复合材料层合板的抗冲击力学性能的目的.

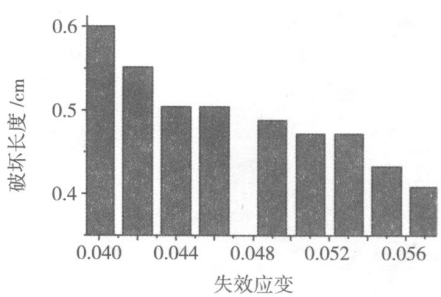

图 5 工况 2失效应变与破坏长度之间的关系曲线

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

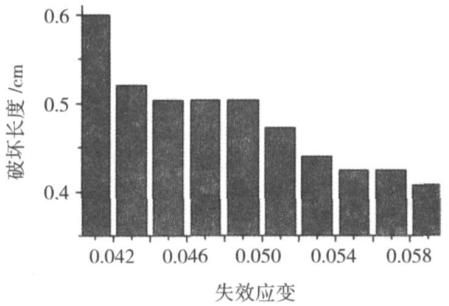

图 6　工况 3 失效应变与破坏长度之间的关系曲线

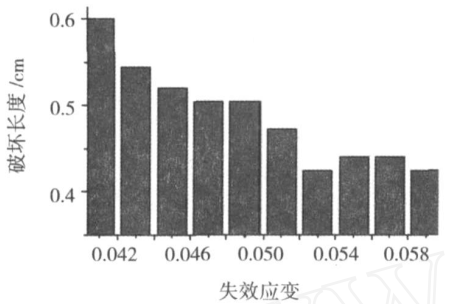

图 7　工况 4 失效应变与破坏长度之间的关系曲线

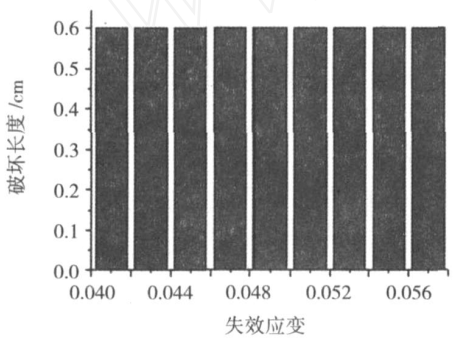

图 8　工况 5、7、8 失效应变与破坏长度之间的关系曲线

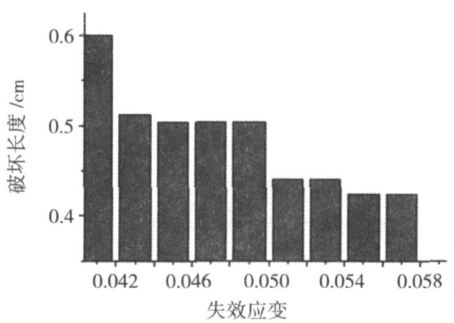

图 9　工况 6 失效应变与破坏长度之间的关系曲线

5 结　语

用 ANSYS/LS - DYNA 对低速冲击下层状化增韧层合复合材料的破坏过程进行了数值模拟,得到了提高复合材料层合板的抗冲击力学性能的优化增韧方案,即对上两层纤维层之间进行增韧,达到了为增韧结构设计和选择性增韧提供理论依据的目的.

参 考 文 献:

[1] 沈　真. 世纪之交复合材料的现状与发展 [C]//全国第十届复合材料学术会议论文集. 长沙:湖南科学技术出版社, 1998: 621 - 625.

[2] 安学峰. 基于复相体系的层状化增韧复合材料研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2004.

[3] CHOI H Y, CHANG F K. A Model for Predicting Damage in Graphite/epoxy laminate Composites Resulting from Low - velocity Point Impact [J]. Composites Material, 1992, 26: 2134 - 2169.

[4] SHAHID I, CHANG F K, SHAH B M. Impact Damage Resistance and Damage Tolerance of Composite with Progressive Damage [R]. AIAA - 96 - 1403 - CP, 1996.

[5] ISSON O R. Analytical Prediction of Large Mass Impact Damage in Composite Laminates [J]. Composites, 2001, 32: 1207 - 1215.

[6] 王凤丽, 宋继良, 谭光宇, 等. 在 ANSYS 中建立复杂有限元模型 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(3): 22 - 24.

[7] LUO R K, CREEN E R, MORRISON C J. An Approach to Evaluate the Impact Damage Initiation and Propagation in Composite plates[J]. Composites, 2001, 32: 51

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net