

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.05.021

冲击方向对层合板低速冲击响应的模拟研究^{*}

陈县辉^{1,2}, 张彦飞^{1,2}, 杜瑞奎^{1,2}, 赵贵哲^{1,2}, 刘亚青^{1,2}

(1. 山西省高分子复合材料工程技术研究中心, 太原 030051; 2. 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘要: 利用有限元软件 ABAQUS/Explicit, 采用双线性本构法则和 B-K 断裂能准则, 建立并验证了复合材料层合板的落锤式低速冲击损伤模型。在该验证模型的基础上, 将冲头分别以 30°, 45°, 60° 和 90° 的冲击角度, 以 3.0 J 和 5.0 J 的初始冲击能量对层合板进行冲击模拟试验。结果表明, 冲头的冲击方向对层合板的冲击响应有着较大的影响, 当冲击角度为 45° 时, 冲击方向对层合板的能量耗散影响最大, 当冲击角度为 90° 时, 冲击方向对层合板能量耗散影响最小。

关键词: 低速冲击; 复合材料层合板; 冲击方向; 有限元模拟

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)05-0089-04

Simulation of Effects of Impact Orientations on Low Velocity Impact Responses of Composite Laminates

Chen Xianhui^{1,2}, Zhang Yanfei^{1,2}, Du Ruikui^{1,2}, Zhao Guizhe^{1,2}, Liu Yaqing^{1,2}

(1. Research Center for Engineering Technology of Polymeric Composites of Shanxi Province, Taiyuan 030051, China;

2. School of Material Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Based on the bilinear constitutive law and B-K energy-based evolution law, a low velocity impact damage model was established in the FEA package ABAQUS/Explicit, and then the model was validated. On the basis of the validated model, the effects of impact orientations on the impact responses of the composite laminates were investigated at the initial impact energy of 3.0 J and 5.0 J, respectively. It was demonstrated that the impact orientation had significant influences on the impact responses of the laminates. Among the four kinds of orientations, which were 30°, 45°, 60°, and 90°, respectively, the laminate impacted with 45° orientation dissipated largest level of energy, while the one impacted with 90° orientation dissipated the smallest level of energy.

Keywords: low velocity impact; composite laminate; impact orientation; FEA simulation

纤维增强复合材料由于其优异的性能, 如较高的比强度和比刚度, 质量轻, 以及结构的可设计性等特性, 使得其在航空航天、汽车工业以及船舶工业等领域有着广泛的应用。然而, 由于其较弱的层间剪切强度, 使得复合材料层合板结构的损伤阻抗和冲击强度较差, 尤其是在受到低速冲击这类横向载荷的作用时, 常常会产生一些不可见的或者是勉强可见的层间或者层内损伤, 如基体开裂、层间分层以及纤维断裂等损伤模式^[1-2]。这些损伤的出现, 特别是分层损伤和纤维断裂损伤, 会使得层合板结构的刚度和强度大幅度下降^[3], 在一定程度上制约着复合材料的应用。因此, 研究复合材料层合板的低速冲击损伤机理, 对其结构设计以及保持其优异性能具有重要的研究意义。

国内外已有很多研究学者对复合材料层合板的低速冲击响应做了大量的研究^[4-7]。随着有限元分析技术的发展, 有限元分析在复合材料层合板

结构的损伤机理研究及预测方面得到了广泛的应用, 使得人们对复合材料层合结构的内部损伤机理有了更为直观、深入的认识和理解。M. Nishikawa 等^[8]在基于 Dugdale 假设的基础上, 提出了带有 cohesive zone 的层合板数值分析模型, 并研究了正交层合板的低速冲击响应, 结合其实验结果验证了该模型的准确性和有效性。E. V. Gonzalez 等^[1]利用有限元分析研究了铺层对层合板冲击响应的影响, 其研究表明相同铺层的堆叠对层合板的冲击阻抗有较明显的影响。A. Faggiani 等^[9]通过有限元方法模拟了加筋复合材料层合板的低速冲击试验, 其模拟分析结果和实验测试结果吻合很好。M. F. S. F. De Moura 等^[3]和 Zhang Yan 等^[10]建立了基于双线性本构法则和断裂能损伤退化法则的

^{*} 国防科工局工业基础项目 (C212011C002)

联系人: 刘亚青, 教授, 主要从事高分子及其复合材料研究

收稿日期: 2014-03-12

有限元模型,很好地预测了层合板的层间损伤和面内损伤的萌生和演变过程,进一步验证了有限元模型的有效性和可靠性。

笔者利用有限元软件 ABAQUS/Explicit,采用双线性本构法则和 B-K 断裂能准则,基于 cohesive 界面单元,建立了铺层为 $[0_3/90_3]_s$ 的碳纤维增强复合材料层合板模型,并研究了其受到落锤低速冲击载荷下的冲击响应,结合文献 [11] 的研究结果对该模型进行验证;并在该验证模型的基础上,结合层合板在冲击过程中的能量吸收与耗散机理,研究了冲头的冲击方向对层合板低速冲击响应的影响。

1 有限元模型的建立与验证

1.1 有限元模型的建立

根据文献 [11] 中实验研究的层合板结构,利用 ABAQUS/Explicit 建立相应结构的层合板有限元模型,即铺层结构为 $[0_3/90_3]_s$,层合板尺寸为 $87.5 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,层合板放置在中间矩形开口尺寸为 $67.5 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 的刚性底座上,简支约束;冲头为半球形刚性冲头,直径为 12.5 mm ,冲头质量为 2.3 kg 。

模型中层合板各子层的单元类型为 8 节点的缩减积分连续壳单元 (SC8R),为了能够模拟层合板在低速冲击下的分层损伤模式,不同纤维方向的子层之间的界面层用 cohesive 界面单元 (COH3D8) 建立,厚度为 0.02 mm ,模型结构的装配如图 1 所示。

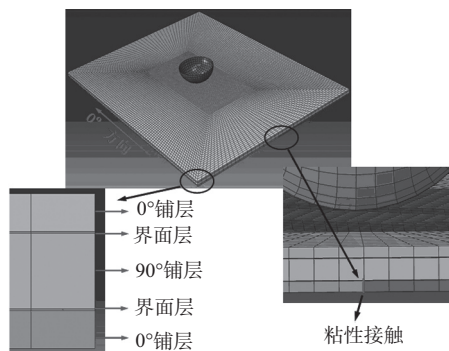


图1 层合板有限元模型

模型中相邻子层和界面层之间的相互作用采用绑定约束定义,而冲头和层合板之间的接触关系则采用通用接触处理^[12],同时冲头和层合板以及相邻子层之间的摩擦系数均定义为 0.3。模型中层合板的层间损伤由基于二次应力的双线性本构法则 (如式 1) 和基于能量的 B-K 退化准则 (如式 2) 进行判定。研究中层合板单层以及 cohesive 界面层的材料参数采用文献 [11] 提供的材料参数数据,如表 1

所示。

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{N}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{S}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{T}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中: t_n , t_s 和 t_t 分别是界面层法向和两个切向方向的应力矢量; N , S 和 T 分别为界面层在模式 I, II 和 III 下的强度值; $\langle \rangle$ 是 Macaulay 运算符, $t_n > 0$ 时, $\langle t_n \rangle = t_n$; $t_n \leq 0$ 时, $\langle t_n \rangle = 0$ 。

$$G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})(G_s/G_T)^n = G_C \quad (2)$$

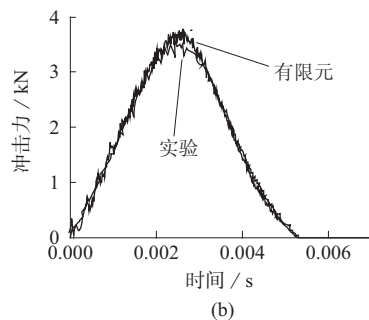
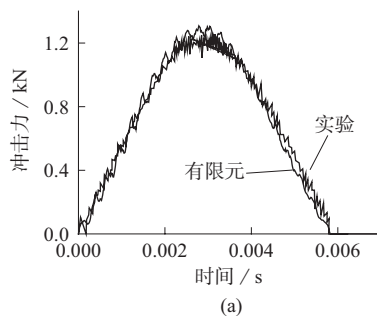
式中: G_{IC} 和 G_{IIC} 分别是模式 I, II 下的临界断裂能; G_T 是界面层牵引力所做的功; G_s 是界面层剪切力所做的功^[12]; n 的取值范围为 $1 \sim 2$ ^[13], 本研究中取 1.5。

表1 层合板及界面层的材料属性

项目	数值	项目	数值
纵向弹性模量 / GPa	93.7	$G_{IIC}, G_{IIC} / (J \cdot m^{-2})$	970
横向弹性模量 / GPa	7.45	法向强度值 / MPa	30
法向弹性模量 / GPa	7.45	切向强度值 / MPa	80
剪切弹性模量 / GPa	3.97	模式 I 的刚度 / $(GPa \cdot mm^{-1})$	120
泊松比	0.26	模式 II, III 的刚度 / $(GPa \cdot mm^{-1})$	43
$G_{IC} / (J \cdot m^{-2})$	520		

1.2 有限元模型的验证

根据文献 [11] 的实验结果分别模拟了层合板在 1.0 J 和 6.0 J 的冲击能量作用下的落锤式低速冲击响应,如图 2 所示。由图 2 可知,无论是曲线的峰值还是冲击力随时间的变化趋势,有限元模拟的结果和文献中的实验结果吻合都很好,说明所建立的层合板模型具有明显的可靠性和有效性。



a—1 J 冲击能; b—6 J 冲击能

图2 不同冲击能作用下实验和有限元模拟层合板的冲击力曲线

2 冲击方向对层合板冲击响应的影响

在实际生产、加工以及维修过程中,由于复合材料构件的装配要求,层合板构件并不总是水平或垂直装配的,因此受到外力冲击时,也有可能出现外力的冲击方向和层合板平面或其曲面法线方向成不同的角度。而在实验测试中大多数都是采用落锤冲击试验,即采用垂直低速冲击来研究层合板的低速冲击损伤机理,由于实验设备或条件的原因无法实现在不同方向上的低速冲击试验,故存在着一定的局限性。

笔者在上述验证模型的基础上,利用有限元模拟的方法,以铺层为 $[0_3/90_3]_s$ 的层合板为研究对象,研究其在不同方向冲击作用下的低速冲击响应。冲头在平行于 0° 纤维方向且垂直于层合板的运动平面内,以 3.0 J 和 5.0 J 的初始冲击能量,分别以 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90° 的冲击角度冲击层合板时,层合板发生的分层损伤响应,其中冲击角度为冲击方向与层合板的夹角。

图 3 示出在不同初始冲击能量作用下,当冲头以不同冲击角度冲击层合板时层合板的能量吸收曲线。由图 3 可知,当冲头的初始能量为 5.0 J 时,不同角度冲击下层合板所吸收的最大能量值并没有都等于或接近于 5.0 J,除了以 90° 的冲击角度冲击的层合板所吸收的最大能量接近 5.0 J 外,其余的层合板所吸收的最大能量则小于 5.0 J,而且还随着冲

击角度的减小而降低。其原因在于冲头以小于 90° 的角度冲击层合板时,存在着冲击速度在平行于层合板的方向上的水平分量,使得垂直于层合板方向的冲击速度减小,该方向的冲击能量也减小,在冲头即将反弹时,垂直方向的能量全部被层合板吸收,而水平方向的能量却没有被完全吸收,如图 4 所示,因此冲击过程中层合板所吸收的最大能量值要小于 5.0 J。对于冲击能量为 3.0 J 的响应也是这样的规律。

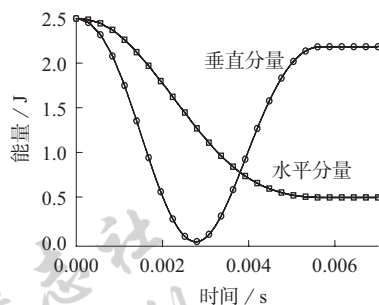
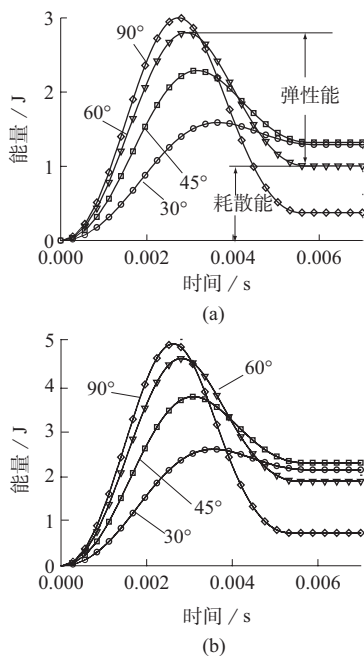


图4 在 5.0 J 冲击能量下以 45° 冲击时冲头能量各分量的变化曲线

从图 3 还可以看出,层合板所吸收的能量值最终达到一个稳定值,也就是冲头反弹脱离层合板后,层合板不再吸收能量,而这些吸收的能量最终主要以基体开裂和分层损伤的形式被耗散掉,有一小部分是摩擦而被耗散。很明显,当冲击角度为 90° 时,冲击的层合板所耗散的能量最少,其次是 60° 的冲击角度冲击的层合板所耗散的能量。值得注意的是,这 4 种冲击角度冲击的层合板所耗散的能量并没有完全随着冲击角度的减小而增大,由于冲击方向是和层合板成一夹角,随着冲击角度的减小,冲击过程中层合板受到的冲击接触力在垂直方向的分量减小,因此垂直方向上所耗散的能量也必然减少;然而根据力学知识可知,冲击接触力在平行于层合板方向的水平分量却是增大了,间接增大了层合板的层间剪切力,从而导致水平方向上所耗散的能量增多了。冲击过程中层合板所耗散的能量大小是垂直方向和水平方向冲击力共同作用的结果。因此,所研究的 4 个案例中,当冲击角度为 45° 时,层合板所耗散的能量最多,其次是 30° 角度冲击的层合板所耗散的能量。

3 结论

(1) 所建立的有限元模型能够很好地模拟层合板在低速冲击过程中的响应,说明利用有限元分析技术在复合材料层合板损伤响应方面的预测和研究中有着很好的应用前景;



a—以 3.0 J 能量冲击; b—以 5.0 J 能量冲击

图3 不同角度时在不同初始冲击能量下层合板的能量吸收曲线

(2) 冲头的冲击方向对层合板的冲击响应有明显的影响。随着冲击角度的减小,层合板在冲击过程中所吸收能量的峰值逐渐减小;而层合板所耗散的能量并没有和冲击角度的减小成负相关的关系,4种冲击角度冲击下的层合板中,以 45° 角度冲击的层合板所耗散的能量最多,其次是 30° 角度冲击的层合板所耗散的能量,而以 90° 角度冲击的层合板所耗散的能量最少。

参考文献

- [1] Gonzalez E V, Maim P, Camanho P P, et al. Effects of ply clustering in laminated composite plates under low-velocity impact loading[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(6):805–817.
- [2] Tiberkak R, Bachene M, Rechak S, et al. Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact[J]. Composite Structures, 2008, 83(1):73–82.
- [3] De Moura M F S F, Gon Alves J P M. Modelling the interaction between matrix cracking and delamination in carbon-epoxy laminates under low velocity impact[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(7–8):1 021–1 027.
- [4] Ghelli D, Minak G. Low velocity impact and compression after impact tests on thin carbon / epoxy laminates[J]. Composites Part B:Engineering, 2011, 42(7):2 067–2 079.
- [5] Wang Shixun, Wu Linzhi, Ma Li. Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates[J]. Materials & Design, 2010, 31(1):118–125.
- [6] Wang Bing, Wu Linzhi, Ma Li, et al. Low-velocity impact characteristics and residual tensile strength of carbon fiber composite lattice core sandwich structures[J]. Composites Part B:Engineering, 2011, 42(4):891–897.
- [7] Sayer M, Bektas N B, Sayman O. An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates[J]. Composite Structures, 2010, 92(5):1 256–1 262.
- [8] Nishikawa M, Okabe T, Takeda N. Numerical simulation of interlaminar damage propagation in CFRP cross-ply laminates under transverse loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(10):3 101–3 113.
- [9] Faggiani A, Falzon B G. Predicting low-velocity impact damage on a stiffened composite panel[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(6):737–749.
- [10] Zhang Yan, Zhu Ping, Lai Xinmin. Finite element analysis of low-velocity impact damage in composite laminated plates[J]. Materials & Design, 2006, 27(6):513–519.
- [11] Aymerich F, Dore F, Priolo P. Simulation of multiple delaminations in impacted cross-ply laminates using a finite element model based on cohesive interface elements[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(11–12):1 699–1 709.
- [12] Simulia D. Abaqus 6.11 Analysis User's Manual[EB]. Abaqus 6.11 Documentation, 2011-2-22.
- [13] Camanho P P, Davila C G, De Moura M F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(16):1 415–1 438.

Teknor Apex 线缆用新型医用弹性体投入商业应用

美国一家定制设计和生产医疗器械专用线缆组件的专业公司 Minnesota Wire, 现已采用 Teknor Apex 公司的新型苯乙烯热塑性弹性体 (TPE-S) 化合物取代了此类应用标准的热塑性硫化橡胶 (TPV) 弹性体。

“我们测试了这一新型 Medalist 化合物,发现其在进行高压灭菌处理前比 TPV 具有更好的拉伸和延展性能;经过多次高压灭菌处理周期后, Medalist 仍然能够很好地保持这些性能,这对于众多需要重复使用的医疗器械而言是一项重要优势,” Minnesota Wire 的设计工程师 Jeff Lewison 如此说道。“此外, Medalist 化合物在挤出和注塑成型时更加稳定,这种更强的可加工性意味着我们在制造精密电路时可以降低压力以减少造成缺陷的可能性。我们的产品外观和触感更佳,客户会更喜欢。”

Teknor Apex 的 Medalist 系列由 TPE-S 化合物, MedalistMD-8421, MD-8431 和 MD-8451 组成,是高纯度医用弹性体的多元化产品系列,产品包括 TPV 在内的其它 TPE。在 2014 年中国国际橡塑展上, Teknor Apex Asia Pacific 介绍了这一新型化合物的相关数据。

Medalist 材料在高压灭菌处理前显示出了优于 TPV 的拉伸强度和延展性,在经过多达 15 次的高压灭菌处理周期后, Medalist 仍然能更好地保持这些性能。(慧聪网)

隔热板行业将为硬质聚氨酯泡沫带来新需求

据中国聚氨酯工业协会统计,2013 年中国聚氨酯产品产量占到全球总产量的 40% 以上,达到 870 万 t,相比 2012 年攀升了 12%。

该协会估计,2014~2015 年,隔热板行业将为中国硬质聚氨酯泡沫再添 31 万~38 万 t 的需求。目前中国有 250 条生产线投入聚氨酯隔热板的生产,创下新高。

中国住房和城乡建设部在 2012 年启动了一项旨在提高建筑能源效率的计划。根据十二五规划,住房和城乡建设部已出台法规,规定城市地区新建的建筑物相比 2010 年必须提高 30% 的能效。上海和北京等一线城市的标准更高,这些地方新建建筑物能效必须接近气候类似的发达国家标准。

该协会还预测说,到 2015 年底,中国有 52% 的人口将居住在城市,到 2015 年建设的新建筑物总面积将达 40~50 亿 m^2 。在未来 3~5 年,聚氨酯隔热板销量有望占到中国建筑物隔热材料总消费量的 30%~50%。(慧聪塑料网)