文章编号：1001-1455(2014)04-0451-06
DOI：10.11883/1001-1455(2014)04-0451-06

复合材料 T 型接头冰雹高速撞击损伤的数值模拟*

刘建刚，李玉龙，索 涛，崔 浩
（西北工业大学航空学院，陕西 西安 710072）

摘要：利用高速空气炮进行了冰雹撞击复合材料 T 型接头的实验，研究了不同撞击速度下结构的损伤情况。同时，采用光滑质点流体动力学方法与黏聚区模型相结合的方法，对冰雹撞击复合材料 T 型接头进行了数值模拟。通过与实验结果的对比，验证了数值模拟模型的有效性。在此基础上，利用数值模型研究了影响复合材料 T 型接头冰雹撞击损伤的各种因素。计算结果表明：冰雹撞击对复合材料 T 型接头造成的损伤主要为分层损伤；冰雹的撞击速度、尺寸、入射角等，都对 T 型接头的损伤程度有很大影响；T 型接头的分层面积与冰雹的撞击能量之间呈近似线性关系，分层面积随着撞击能量的增大而增大；冰雹的入射角越大，分层面积与撞击力峰值也越大。

关键词：固体力学；分层损伤；黏聚区模型；复合材料 T 型接头；冰雹；高速撞击
中图分类号：O346.5；TB330.1　　**国标学科代码**：1301540　　**文献标志码**：A

飞机在飞行过程中，机翼、尾翼前缘、机身前段以及发动机吊舱等都容易受到冰雹撞击。复合材料在飞机结构中的应用日益广泛，而冰雹撞击对复合材料结构所造成的损伤主要为目视不可检损伤，这种内部损伤会大大降低结构的剩余强度，对结构的承载能力造成很大影响。由于冰雹撞击实验费用高、难度大，因此利用数值模拟手段模拟冰雹撞击过程，评价影响结构性能的各项参数，对复合材料结构的抗冰雹撞击设计具有重要的指导意义。

在冰雹撞击试验和数值模拟方面，已有了大量研究并取得了较多成果。S. Singh 等[1]设计了一种动态测量装置，得到了冰雹撞击的撞击力。M. Lavoie 等[2]建立了一个简单的冰的弹性光滑质点流体动力学(smoothed particle hydrodynamics，SPH)模型。H. Kim 等[3]用球形冰模拟冰雹撞击碳/环氧树脂板件，发现撞击力峰值与能量呈线性关系。H. Kim 等[4]采用带失效的弹塑性材料模型模拟冰雹的力学性能。M. Anghileri 等[5]发现，相对于 Lagrange 模型和 ALE 模型，冰雹的 SPH 模型能更好地描述冰雹撞击过程及其力学行为，且具有最小的计算时间和较高的计算精度。T 型接头是复合材料机翼或加筋板中最常见的结构单元。D. D. R. Cartié 等[6]利用黏聚区模型(cohesive zone model，CZM)预测了复合材料 T 型接头在拉伸载荷下的失效。崔浩等[7]利用 CZM 模拟了 T 型结构根部填充区的随机裂纹扩展，研究了 T 型接头的拉伸失效行为。但迄今为止，对于冰雹撞击复合材料 T 型接头的研究仍然较少。

本文中，利用高速空气炮进行冰雹撞击复合材料 T 型接头的实验，采用 SPH 与 CZM 相结合的方法，建立冰雹撞击复合材料 T 型接头的数值模型，实验结果用于对数值模型结果的验证，并运用验证后的数值模型研究影响复合材料 T 型接头损伤的因素。

1 实 验

T 型接头由 3 个层合板共固化而成，如图 1 所示，层合板材料为 T700/ Q Y8911。接头长 200 mm (x 轴)，高 120 mm(z 轴)，宽 50 mm(y 轴)。接头根部填充区为圆弧过渡区，内部由单向带填充。其中子层 1 与子层 2 的弧形区半径为 5 mm，铺层数为 13 层，铺层间方向错开，顺序为 −45°、0°、45°、90°、−45°、0°、90°、0°、45°、90°、−45°、0°、45°，子层 3 的铺层为 16×2 层，铺层顺序为 45°、0°、−45°、90°、0°、45°、0°、−45°、90°、0°、45°、0°、−45°、0°、45°、−45°，复合材料单层厚度为 0.125 mm。

* 收稿日期：2012-12-07；修回日期：2013-03-11
作者简介：刘建刚(1986—)，男，硕士研究生。

接头夹持方式如图 2 所示，T 型接头沿 x 轴方向两端各有一个夹板，用螺栓将接头与夹具固定于试验台上，固支边界的长度为两端各 25 mm。冰球直径为 25.4 mm。撞击部位为 T 型接头子层 3 的中心位置，运用载荷(压力)传感器、位移传感器、应变片分别测量试验件在撞击过程中的载荷、位移和应变。

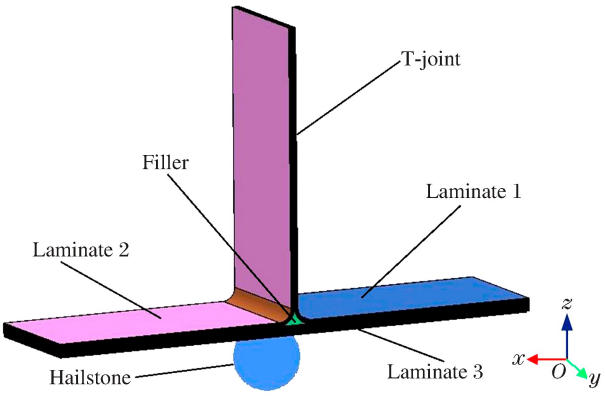

图 1 T 型接头及冰雹的三维模型

Fig. 1 The 3D model of composite T-joint

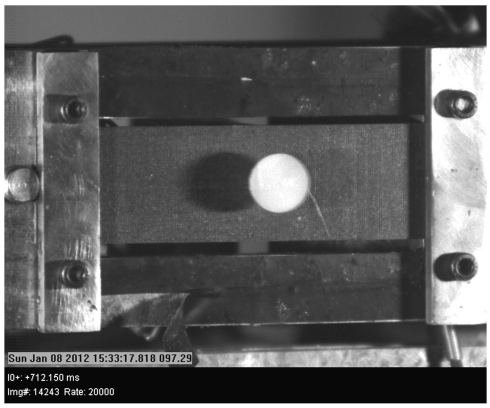

图 2 T 型接头夹持方式

Fig. 2 T-joint specimen fixed

2 数值计算模型

2.1 冰雹的 SPH 模型

冰雹在高速撞击情况下会呈现流体特性，所以冰雹的材料模型需要充分考虑冰雹在撞击变形后的流体性质。SPH 是一种无网格算法，基本思想是：将连续的流体(或固体)离散为多个相互作用具有质量的质点，通过求解质点组的动力学方程及每个质点的运动轨道，求得整个系统的力学行为。选用 LS-DYNA 中一种弹塑性流体动力学材料模型 MAT10 作为冰雹的本构模型，材料的力学参数分别为[5]：密度为 846 kg/m^3，剪切模量为 3.46 GPa，屈服强度为 10.30 MPa，塑性硬化模量为 6.89 GPa，拉伸失效应力为−4.00 MPa。汪洋[8]通过冰雹试验及数值模拟的结果对比，证明了该材料模型的有效性。

2.2 黏聚区模型

近年来，黏聚区模型越来越多地用于模拟复合材料结构层间分层损伤的起始和演化过程。黏聚区模型中，将材料分为连续体及连续体之间的黏聚层，层间失效由黏接面的分离即黏聚层单元的失效描述。在黏聚区模型中，裂纹前端的黏聚区由损伤起始阶段和损伤扩展阶段两部分组成，黏聚单元的应力随着裂尖张开位移的增大而逐渐增大，当达到强度极限后开始出现刚度退化，最终直至完全失去承载能力，黏聚单元失效，如图 3 所示。

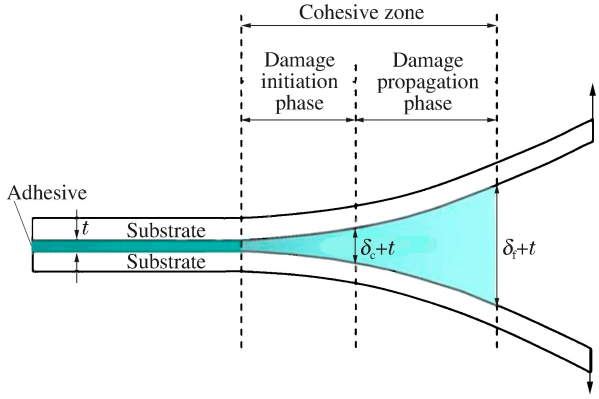

图 3 黏聚区模型

Fig. 3 Cohesive zone model

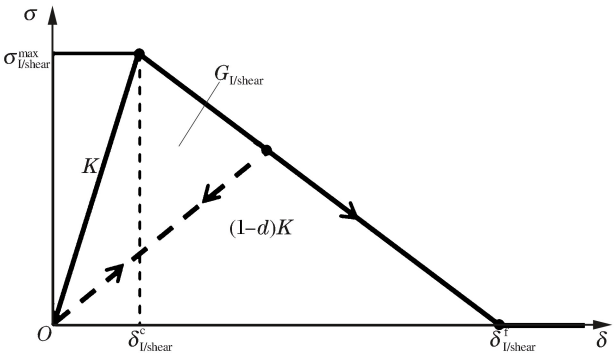

图 4 双线性黏聚区本构模型

Fig. 4 Bilinear cohesive zone constitutive law

黏聚区模型的本构方程一般由黏聚单元的应力和裂尖张开位移的关系式给出。本文中采用双线性本构模型，如图 4 所示[9]：K 为黏聚单元的初始刚度，$\sigma_{\mathrm{I/shear}}^{\max}$ 为材料的强度极限（即拉伸强度 T、剪切强度 S），$\delta_{\mathrm{I/shear}}^{\mathrm{c}}$ 为单元达到强度极限时的位移，$\delta_{\mathrm{I/shear}}^{\mathrm{f}}$ 为黏聚单元完全失效时的位移，$(1-d)K$ 为单元包含损伤后的刚度，曲线下的面积 $G_{\mathrm{I/shear}}$ 代表断裂过程中耗散的能量。

2.3　有限元模型

复合材料单层板采用八节点六面体实体单元（Solid 164），雹撞击过程中 T 型接头内部的分层损伤，可由各铺层之间的黏聚单元的失效及删除模拟，分层面积可通过被删除的黏聚单元尺寸确定。观察试验件的失效模式发现：分层主要出现于填充区附近各子层与填充物以及各子层之间的胶接界面上，因此只在上述界面定义厚度为 0.01 mm 的黏聚单元，如图 5 所示。在冰雹撞击区域及填充区内网格划分较密集，其他区域网格逐渐变粗，最终建立的有限元模型中八节点六面体实体单元数为 336 735，SPH 冰雹粒子数为 17 256。复合材料单层板和黏聚单元的材料模型分别为增强复合材料损伤模型和黏聚混合材料模型，具体的材料参数分别为：T700/QY8911 复合材料单层板，$\rho=1.6$ t/m^3，$E_{11}=125$ GPa，$E_{22}=10.4$ GPa，$\nu_{12}=0.34$，$G_{12}=6.120$ GPa，$G_{23}=6.0$ GPa，$G_{31}=6.0$ GPa；黏聚单元，$\rho=1.24$ t/m^3，$E_{\mathrm{N}}=10^8$ MPa，$E_{\mathrm{T}}=10^8$ MPa，$G_{\mathrm{IC}}=504$ J/m，$G_{\mathrm{IIC}}=1.33$ kJ/m，$T=15$ MPa，$S=25$ MPa。填充物为单向带，其力学性能与 T700/QY8911 单层板的材料参数一致。撞击过程中系统的沙漏能和系统阻尼能基本为零，总能量基本保持不变，从能量角度来看计算是收敛的。

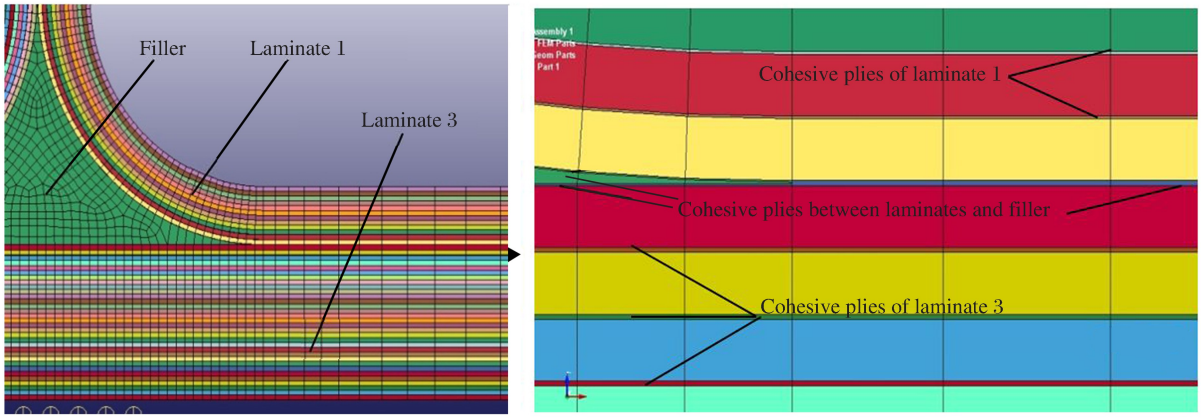

图 5　填充区附近黏聚单元的布置

Fig. 5　The distribution of cohesive elements near the filler

3　结果与讨论

3.1　接头损伤分析

通过对撞击后试验件的超声波 C 扫描，可以得到结构内部的分层损伤情况。本文中通过 x 轴方向子层 3 与子层 1、2 以及填充物间胶接层损伤的长度，描述分层损伤的尺寸，图 6 为某试验件在直径为 25.4 mm 的冰雹撞击后的 C 扫描图。

图 7 给出了冰雹撞击 T 型接头的实验和数值模拟结果，可见当速度低于 74 m/s 时，冰雹撞击不会对接头造成明显分层损伤，而随着冰雹速度的提高，所造成的分层损伤尺寸也逐渐增大。冰雹速度为 161 m/s 时，数值分析和实验得到的结果差别较大，通过对相应 C 扫描图分析发现，损伤缺陷在接头的筋条两侧分布明显偏向一侧，说明实验中冰雹撞击位置出现偏差，撞击能量多被接头的蒙皮吸收，因此实验结果远大于数值模拟结果。

图 8 为典型的黏聚单元失效删除过程，可以看出在冰雹撞击下，损伤最先出现于圆弧区，随后扩展至填充物的边缘，并沿着子层 1、2 与子层 3 的界面扩展，在撞击时间 0.445 ms 后，基本不再出现黏聚单元失效。

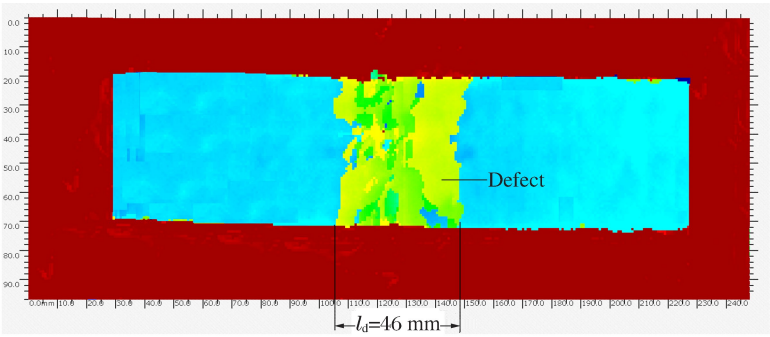

图 6 冰雹撞击后试验件的 C 扫描图

Fig. 6 The C-scan result of the specimen after impact

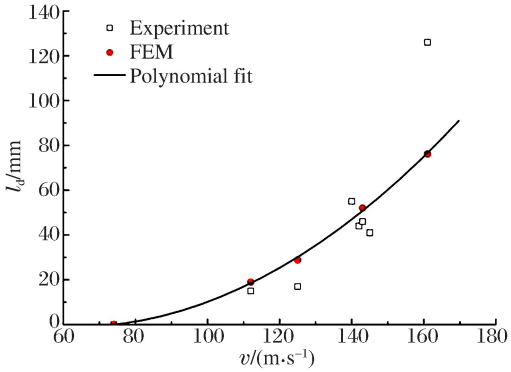

图 7 x 方向上的分层长度

Fig. 7 Delamination length in x direction

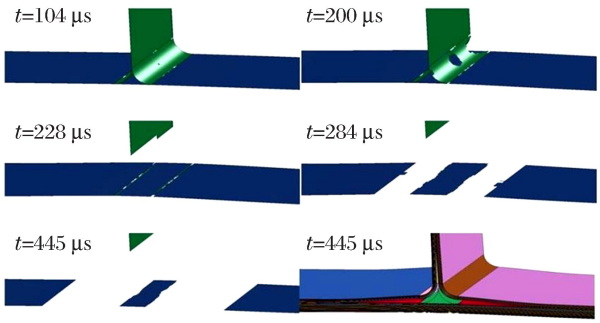

图 8 典型的黏聚单元失效删除过程

Fig. 8 The failure and deletion process of cohesive elements

3.2 位移比较

实验中通过激光位移传感器记录了 T 型接头筋条顶点处的位移历程。图 9 为上述试验件的实验和数值结果对比曲线。在实验中，在 t=0.44 ms 时 T 型接头筋条顶点处的位移为 3.01 mm，在 t=0.55 ms 时位移达到最大值 3.30 mm。在数值模拟中，当 t=0.44 ms 时，T 型接头筋条顶端的位移达到最大值 3.31 mm。数值模拟的位移变化趋势及峰值与实验结果较一致，只是数值模拟中峰值出现时间比实验中稍早一些。

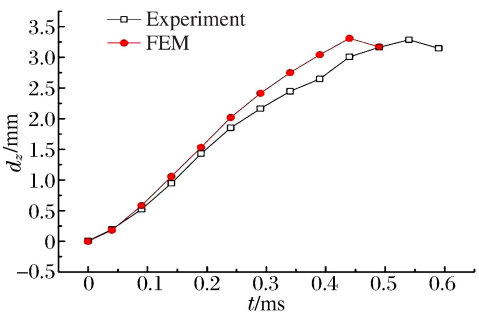

图 9 试验件筋条顶点处 z 方向位移曲线

Fig. 9 Displacement in z direction at the top of fillet of the specimen

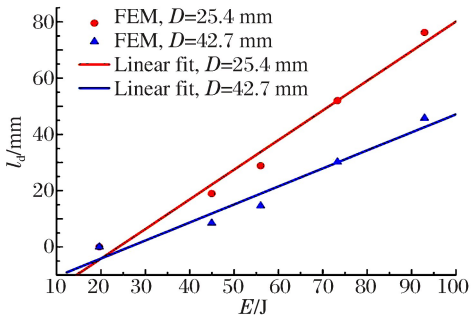

图 10 冰雹接头在 x 方向的分层长度与撞击能量关系

Fig. 10 Delamination length in x direction versus impact energy

3.3 影响冰雹撞击损伤的因素

有限元模拟结果与实验结果的比较表明，采用所建立的分析模型能够较准确地模拟冰雹撞击复合材料 T 型接头的过程。因此，可以应用该模型进一步研究冰雹的撞击能量和入射角度对 T 型接头分层损伤尺寸的影响。

3.3.1　冰雹撞击能量

冰雹的撞击能量与冰雹的尺寸(质量)及初始撞击速度有关。图 10 给出了直径为 25.4 和42.7 mm 的冰雹在不同撞击能量下的数值模拟结果，可以看出：T 型接头内部在长度方向上的分层长度与冰雹的撞击能量之间呈近似线性关系，分层长度随着撞击能量的增大而增大，但当撞击能量在某一阈值以下时，撞击不会产生明显的分层现象。相同撞击能量下，尺寸较小速度较高的冰雹造成的分层面积相对更大，损伤更严重，这是因为冰雹的直径越小，与 T 型接头的撞击区域越小，应力会更加集中，更容易产生分层。

3.3.2　冰雹的入射角

冰雹与复合材料撞击面之间的夹角为入射角。飞机在实际飞行过程中，很多情况下冰雹的入射角都小于 90°，因此有必要研究冰雹入射角对结构损伤的影响。由于 T 型接头形状的特殊性，相同撞击角下不同形式的速度矢量对结构造成的损伤也有所差异，因此在分析入射角的影响时，将冰雹的入射速度矢量固定在 yz 平面内，通过调整冰雹在 y、z 方向上的速度分量控制入射角度。模拟中采用的入射角分别为 30°、45°、60°，冰雹撞击速度固定为 143 m/s。图 11 给出了 3 种入射角下的计算结果，撞击角越大，分层面积也越大，当撞击角为 90°时达到最大值，即正撞击对结构造成的损伤是最严重。图 12 为撞击角为 60°时 T 型接头的分层情况，可看出沿 y 轴负向一侧的损伤远大于正向一侧。

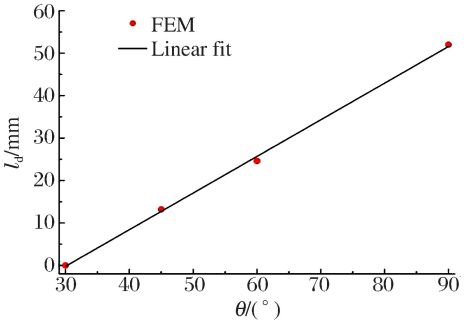

图 11　分层长度与撞击角度关系

Fig. 11　Delamination length in x direction versus impact angle

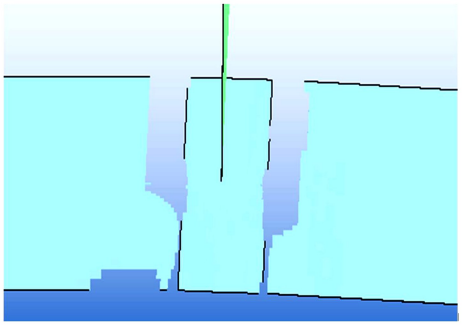

图 12　撞击角为 60°时黏聚单元失效情况

Fig. 12　The failure and deletion of cohesive elements when the impact angle is 60°

4　结　论

(1) 进行了冰雹高速撞击复合材料 T 型接头结构的实验，并在 LS-DYNA 中建立了相应的数值模型。针对 T 型接头在撞击后的内部分层损伤，应用该数值模型可以获得与实验较吻合的结果，这证实了该模型的准确性。

(2)复合材料 T 型接头受到冰雹撞击后的损伤主要是分层损伤，主要集中在填充区与 3 个子层的胶接界面处，且损伤最早起始于填充区圆弧胶接面处。

(3)T 型接头长度方向上的分层长度与撞击能量之间呈近似线性关系。撞击能量小于某阈值时，并不会产生明显分层；相同撞击能量下，尺寸较小的冰雹造成的分层损伤更严重。

(4)冰雹入射角越大，分层尺寸也越大，入射角为 90°时对结构造成的损伤最严重。

参考文献：

[1]　Singh S, Masiulaniec K C, DeWit K J, et al. Measurements of the impact forces of shed ice striking a surface[C]// Proceedings of the 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1994.

[2]　Lavoie M, Ensan M N, Gakwayal A. Development of an efficient numerical model for hail impact simulation based on experimental data obtained from pressure sensitive film[J]. Mechanics Research Communications, 2011,38(1): 72-76.

[3] Kim H, Welch D A, Kedward K T. Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003,34(1):25-41.

[4] Kim H, Kedward K T. Modeling hail ice impacts and predicting impact damage initiation in composite structures [J]. AIAA Journal, 2000,38(7):1278-1288.

[5] Anghileri M, Castelletti L M L, Invernizzi F, et al. A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(8):929-944.

[6] Cartié D D R, Dell'Anno G, Partridge E P. 3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by Z-pinning and tufting [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006,73(16):2532-2540.

[7] 崔浩,李玉龙,刘元镛. 基于粘聚区模型的含填充区复合材料接头失效数值模拟[J]. 复合材料学报,2010,27(2):161-168.
Cui Hao, Li Yu-long, Liu Yuan-yong. Numerical simulation of composites joints failure based on cohesive zone model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010,27(2):161-168.

[8] 汪洋. 高速冰雹撞击碳纤维增强复合材料层合板研究[D]. 西安:西北工业大学航空学院,2012.

[9] Fan C, Jar P Y B, Cheng J J. Cohesive zone with continuum damage properties for simulation of delamination development in fibre composites and failure of adhesive joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008,75(13):3866-3880.

Numerical simulation of high velocity impact of composite T-joint by hailstone*

Liu Jian-gang, Li Yu-long, Suo Tao, Cui Hao

(*School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*)

Abstract: This paper was dedicated to developing a numerical model which could predict the delamination of composite T-joint structures caused by high velocity impact of hailstone. Experiments of hailstone impact and subsequent numerical analyses were performed to study the performance of composite T-joints under hailstone impact. The smooth particle hydrodynamic (SPH) approach and the cohesive zone model (CZM) were both employed in numerical simulations to predict the delamination of composite T-joints, and the numerical results show good agreement with that of experiments such as delamination size and displacement of the composite T-joints. In addition, based on the numerical simulation, the influence of calculation parameters on the damages of the T-joints were investigated, and the results show that the velocity, the dimension and the impact angle of hailstone had great influence on the damage of the composite T-joint structures. The numerical simulation show an approximately linear relationship between the impact energy and the delamination size. The peak force of impact and the delamination size increase with the increase of the impact angle.

Key words: solid mechanics; delamination damage; cohesive zone model; composite T-joint; hailstone; high velocity impact

* Received 7 December 2012; Revised 11 March 2013
Corresponding author: Li Yu-long, liyulong@nwpu.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)