

## 基于 LS-DYNA 模拟碰撞诱发的裂纹扩展

马 辉<sup>1</sup>, 曾 劲<sup>1</sup>, 吴志渊<sup>1</sup>, 秦朝辉<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 以限位装置这一实例为研究对象, 基于 LS-DYNA 有限元软件, 根据材料的结构特性, 选择了分段线性塑性材料模型, 进而模拟了运动物体与限位装置碰撞产生的裂纹扩展路径. 分析了不同裂纹角度、裂纹深度、失效应变以及冲击速度等 4 种工况下的裂纹扩展规律. 研究结果表明针对本研究的限位装置, 冲击速度和裂纹角度对裂纹扩展路径影响较大, 而裂纹深度和失效应变对裂纹扩展路径影响较小.

**关 键 词:** 裂纹扩展; LS-DYNA; 限位装置; 显式动力学; 碰撞

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)11-1653-05

## Crack Propagation Simulation Caused by Collision Based on LS-DYNA Software

MA Hui<sup>1</sup>, ZENG Jin<sup>1</sup>, WU Zhi-yuan<sup>1</sup>, QIN Zhao-ye<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Corresponding author:

MA Hui, E-mail: huima@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** The crack propagation path was simulated based on the piecewise linear plastic material model, which was caused by the collision between moving object and caging device using LS-DYNA software. Furthermore, four cases related to crack angles, crack depths, failure strains, and impact velocities were presented to analyze the crack growth laws. The results show that impact velocities and crack angles both have a great influence on crack propagation path, while crack depths or failure strains impacts relatively less.

**Key words:** crack propagation; LS-DYNA; caging device; explicit dynamic; collision

卫星机载设备中,很多运动部件需要限位,一般通过安装在机体上的限位座与运动部件上的限位块通过碰撞接触实现限位.在碰撞的过程中,可能会出现裂纹甚至会产生扩展.与这样类似的实际工程结构由碰撞导致的裂纹还有很多,且形状复杂、扩展路径带有随机性.近年来高性能计算机的高速发展,为数值模拟提供良好的计算平台,有限元等计算力学方法也为裂纹扩展的研究提供了数值解法.文献[1-4]采用 LS-DYNA 软件实现了实际物理过程在计算机上的仿真,并通过仿真结果与实验数据的对比增强了仿真结果的可信性.董赞等<sup>[5]</sup>使用 LS-DYNA 提出了基于损伤

力学的疲劳寿命和裂纹扩展的数值分析方法. Elmarakbi 等<sup>[6]</sup>使用 LS-DYNA 模拟了复合材料中的脱层扩展过程. Simonsen 等<sup>[7]</sup>使用 LS-DYNA 模拟了大型壳体结构的延性裂纹扩展过程. Moslemian 等<sup>[8]</sup>使用 LS-DYNA 模拟了双材料界面上的裂纹加速疲劳扩展过程. Børvik 等<sup>[9]</sup>使用 LS-DYNA 建立了弹道侵彻过程中的数值仿真模型.

在上述文献的基础上,本文基于 LS-DYNA 模拟了限位装置在给定工况下的裂纹扩展过程,分析了裂纹角度、裂纹深度、失效应变以及冲击速度对裂纹扩展规律的影响.

收稿日期: 2014-01-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1433109); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130403006, N140301001); 教育部新世纪人才支持计划项目(NCET-11-0078).

作者简介: 马 辉(1978-),男,河北安平人,东北大学副教授,博士.

## 1 显式动力学有限元法基本理论

显式动力学基本理论<sup>[10]</sup>通常采用中心差分法求出  $t$  时刻的加速度:

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_t^{\text{ext}} - \mathbf{F}_t^{\text{int}}). \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为质量矩阵;  $\mathbf{F}_t^{\text{ext}}$  为外界作用力矢量;  $\mathbf{F}_t^{\text{int}}$  为内力矢量.

$$\mathbf{F}^{\text{int}} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_n d\Omega + \mathbf{F}^{\text{hg}} + \mathbf{F}^{\text{con}}. \quad (2)$$

式中:  $\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_n d\Omega$  为单元在外力作用下的等效节点内力, 其中  $\mathbf{B}$  为单元应变矩阵,  $\boldsymbol{\sigma}_n$  为单元的节点应力,  $\Omega$  为对单元的积分, 根据有限元法的基本理论, 将所有单元的节点内力进行求和, 其中单元间共节点的内力需进行代数相加, 所得结果即为内力矢量;  $\mathbf{F}^{\text{hg}}$  为沙漏阻力(为克服单点高斯积分所引起的沙漏问题引入的黏弹性阻力);  $\mathbf{F}^{\text{con}}$  表示的是接触力.

节点速度和位移如下:

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t, \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \Delta t. \quad (4)$$

式中:  $\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$ ;  $\Delta t_{t-\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t-\Delta t})$ .

新的几何构型由初始构型加上位移增量获得, 即:

$$\mathbf{x}_{t+\Delta t} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{u}_{t+\Delta t}. \quad (5)$$

对于显式时间积分, 保证收敛的临界时间必须满足以下方程:

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{cr}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}}. \quad (6)$$

式中:  $\Delta t_{\text{cr}}$  为临界时间步长;  $\omega_{\text{max}}$  为系统的最高固有振动频率, 由系统中最小单元的特征值方程  $|\mathbf{K}^e - \omega^2 \mathbf{M}^e| = 0$  得到. 为保证收敛, LS-DYNA 采用变步长积分法, 每一时刻的积分步长由当前构型中的最小单元决定. 由于时间步小, 显式分析仅仅对瞬态问题有效.

## 2 运动物体与限位装置有限元模型

### 2.1 实体模型及网格划分

本文的研究对象由限位装置和运动物体两部分构成, 研究对象的几何尺寸如图 1 所示. 图 2a 为限位装置及运动物体组成的结构图, 图 2b 为有限元模型. 在 LS-DYNA 中, 选用三维实体单元 SOLID164, 来对限位装置和运动物体进行映射网格划分. 图 2b 中  $\alpha$  为初始裂纹角, 本文仅研究  $\alpha$

$= 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$  时限位装置的裂纹扩展;  $L$  为初始裂纹长度, 本文选择  $L = 0.5, 1, 1.5$  和  $2 \text{ mm}$ , 来研究限位装置的裂纹扩展路径. 初始裂纹通过预置裂纹的方式给定, 对裂纹可能的路径扩展区域进行了网格细化处理, 以便于对裂纹进行研究. 在碰撞过程中, 初始裂纹可能会发生接触. 因此, 定义初始裂纹间的接触形式为自动面面接触, 摩擦系数设置为  $0.3$ .

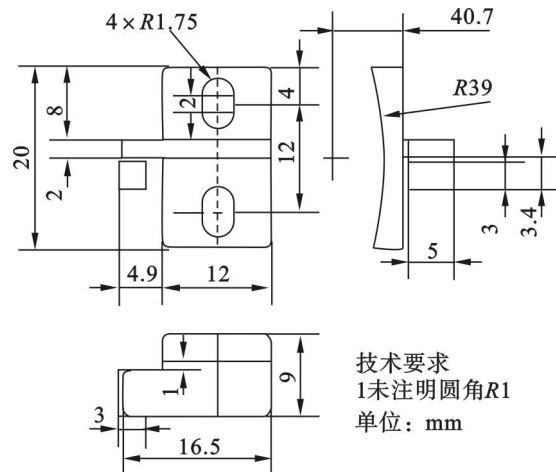


图 1 实体模型的尺寸

Fig. 1 Dimensions of solid models

对机构的约束形式(参照图 2b 中的坐标系 XYZ 进行约束设置): 限位装置的螺栓孔内表面全约束, 限位装置底面约束  $Z$  向位移; 运动物体的侧面约束  $Z$  向位移和  $Y$  向位移. 接触方式设置为点面接触, 且定义运动物体为主面, 限位装置为从面.

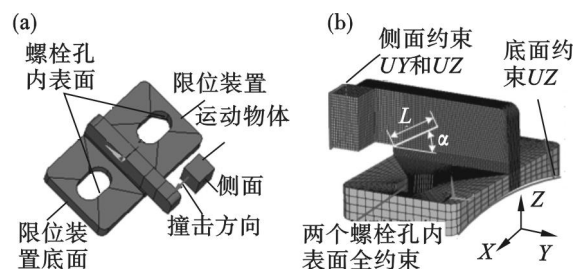


图 2 实体及有限元模型

Fig. 2 Solid model and finite element model

(a)—结构图; (b)—有限元模型.

### 2.2 材料及载荷模型确定

根据实验得出的某合金应力应变曲线, 在 LS-DYNA 中选取分段线性塑性材料模型进行定义, 如图 3 所示. 图中用箭头标示的  $\varepsilon$  是分段线性塑性材料模型中的失效应变, 当材料实际应变大于失效应变时, 材料失效.

假定运动物体在撞击限位装置的过程中是匀

速且能顺利通过限位装置. 在 LS-DYNA 中, 通过在运动物体上施加位移载荷, 来模拟这一匀速撞击过程, 即  $8 \times 10^{-4}$  s 时运动物体运动位移达到 13 mm ( $v = 16.25$  m/s), 进而撞开限位装置造成限位失效.

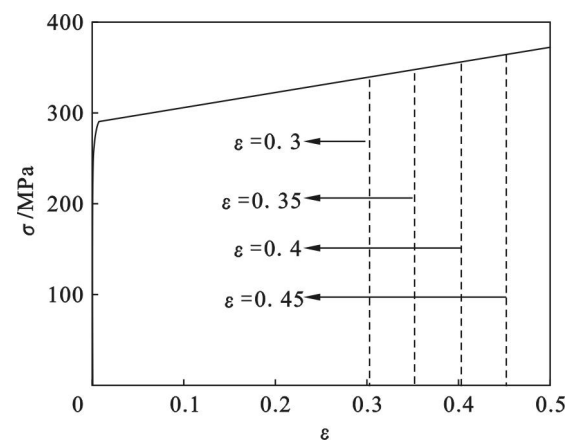


图 3 某合金材料应力应变曲线  
Fig. 3 Stress-strain curve of an alloy

3 模型验证

由于限位装置是由于运动物体多次碰撞, 才出现的裂纹, 而多次碰撞的计算效率低下, 故本文拟通过一次碰撞分析裂纹扩展规律. 下面基于一个简单的模型, 讨论 1 次和  $n$  次碰撞 ( $n = 8$ ) 产生的裂纹规律. 需要说明的是, 多次碰撞和单次碰撞的加载方式: 单次碰撞中运动物体从起始位置匀速运动到终点位置走过的位移为 12 mm; 多次碰撞中运动物体以 1.5 mm 的位移增量对限位装置进行碰撞, 共进行了 8 次. 每次碰撞后运动物体以同样大小的速度反向回到起始位置, 进行下一次撞击. 仿真中所选择的裂纹参数为:  $\alpha = 0^\circ$ ,  $L = 1$  mm,  $v = 15$  m/s,  $\varepsilon = 0.3$ . 在 8 次和单次碰撞诱发的裂纹对比, 如图 4 所示.

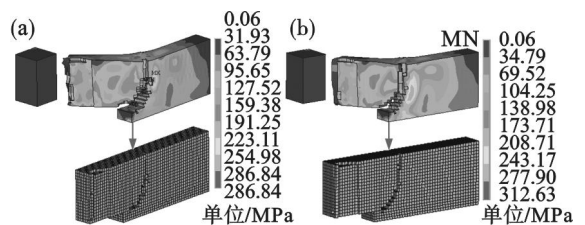


图 4 多次和单次碰撞诱发的裂纹对比  
Fig. 4 Crack comparison between multi and single collisions

(a)—8 次碰撞; (b)—单次碰撞.

图 4a 中限位装置承受运动物体多次往复撞击并顺利通过; 而图 4b 则是运动物体一次撞击限

位装置并顺利通过. 对比图 4a 和图 4b 中的裂纹扩展轨迹图和应力云图可以看出: 限位装置在多次撞击下的裂纹扩展轨迹与单次撞击下的裂纹扩展轨迹基本吻合. 考虑到 8 次碰撞的计算时间要远远大于单次碰撞所需时间 (计算机配置: Inter i3-2120 CPU 3.3 GHz (4CPU), 内存 4 GB, 64 位 Windows 7 操作系统; 碰撞 1 次计算时间 6 min, 8 次大于 48 min (8 倍于 1 倍碰撞时间)), 考虑到接下去本文针对的更为完整的模型仿真, 一次碰撞计算约为 7 h, 而 8 次估计大于 56 h. 因此为了提高计算效率, 本文中采用单次碰撞方式来研究多次碰撞下的裂纹扩展规律.

4 工况分析

本文主要进行了 4 种工况下 (见表 1) 限位装置裂纹扩展规律分析, 分析了限位装置在 4 种工况下的裂纹扩展路径、应力云图以及碰撞接触力曲线, 如图 5 ~ 图 8 所示. 这些分析结果表明如下裂纹扩展规律:

1) 对于工况 1 而言 (见图 5), 当  $\alpha = 0^\circ$  时, 裂纹先沿  $0^\circ$  方向扩展, 接着沿弧线方向扩展, 最后沿  $90^\circ$  方向扩展; 当  $\alpha = 45^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$  时, 裂纹则先沿弧线方向扩展, 最后沿  $90^\circ$  方向扩展图 (见图 5b, 图 5c 和图 5d). 对比 4 个参数下的应力云图可以看出, 随着初始裂纹角的增大, 限位装置的刚度在减小, 抵抗变形的能力在减弱, 越容易达到给定的失效应变, 故发生断裂的风险性越高.

表 1 仿真工况

Table 1 Simulation conditions

工况	变参数	定参数
工况 1	$\alpha = 0^\circ$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
	$\alpha = 45^\circ$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
	$\alpha = 60^\circ$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
	$\alpha = 90^\circ$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
工况 2	$L = 0.5$ mm	$\alpha = 45^\circ$ , $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
	$L = 1.5$ mm	$\alpha = 45^\circ$ , $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
工况 3	$L = 2.0$ mm	$\alpha = 45^\circ$ , $v = 16.25$ m/s, $\varepsilon = 0.3$
	$\varepsilon = 0.35$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\alpha = 45^\circ$
	$\varepsilon = 0.40$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\alpha = 45^\circ$
工况 4	$\varepsilon = 0.45$	$L = 1$ mm, $v = 16.25$ m/s, $\alpha = 45^\circ$
	$0.1v = 1.625$ m/s	$L = 1$ mm, $\alpha = 45^\circ$ , $\varepsilon = 0.3$
	$10v = 162.5$ m/s	$L = 1$ mm, $\alpha = 45^\circ$ , $\varepsilon = 0.3$

2) 对于工况 2 而言 (见图 6), 当  $L = 0.5, 1, 1.5$  和  $2$  mm 时 (见图 6a, 图 5b, 图 6b 和图 6c), 裂纹都先沿弧线方向扩展, 最后沿  $90^\circ$  方向扩展; 对比 4 个参数下的应力云图, 限位装置发生断裂



的风险性很高,然而初始裂纹深度对裂纹扩展路径的影响很小。

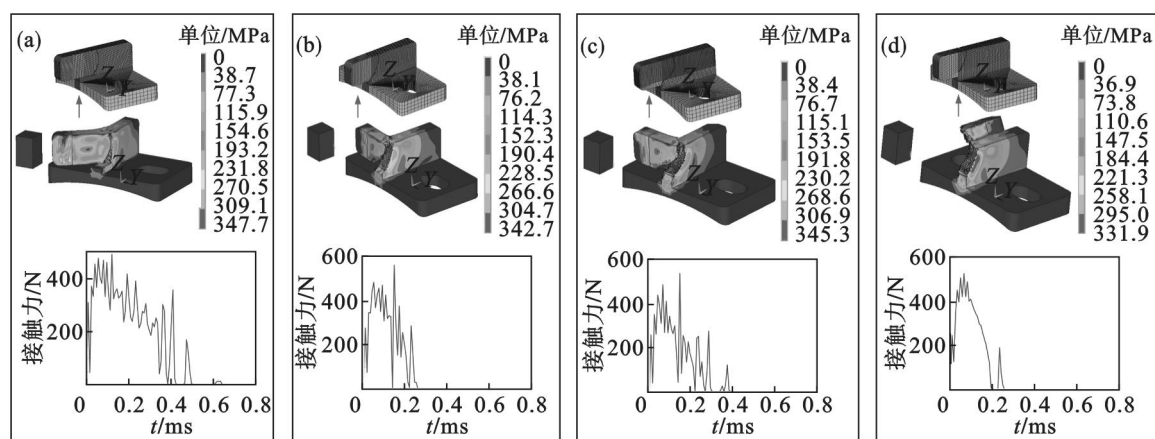


图5 不同初始裂纹角度下的裂纹扩展轨迹、应力云图以及碰撞接触力曲线

Fig. 5 Crack propagation path, stress nephogram and collision contact force curve based on different crack angles

(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=45^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ ; (d)— $\alpha=90^\circ$ .

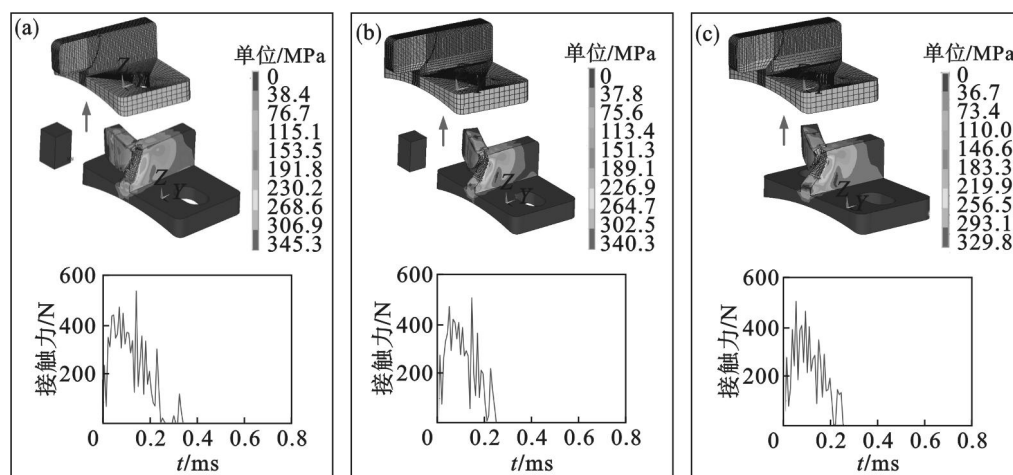


图6 不同裂纹深度下的裂纹扩展轨迹、应力云图以及碰撞接触力曲线

Fig. 6 Crack propagation path, stress nephogram and collision contact force curve under different initial crack depths

(a)— $L=0.5\text{ mm}$ ; (b)— $L=1.5\text{ mm}$ ; (c)— $L=2.0\text{ mm}$ .

3) 对于工况 3 而言(见图 7),当失效应变  $\varepsilon=0.3, 0.35, 0.40$ (见图 5b,图 7a 和 7b)时,裂

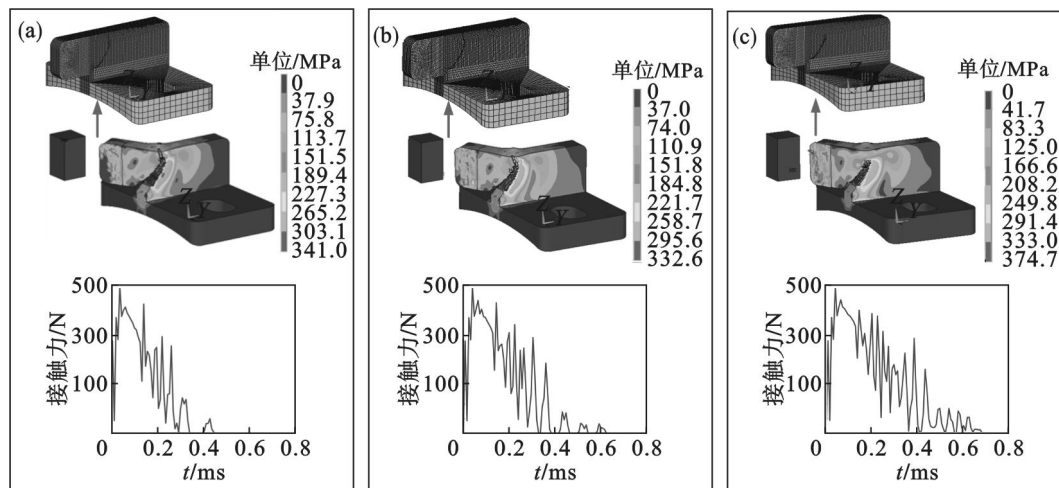


图7 不同失效应变下的裂纹扩展路径、应力云图以及碰撞接触力曲线

Fig. 7 Crack propagation path, stress nephogram and collision contact force curve under different failure strains

(a)— $\varepsilon=0.35$ ; (b)— $\varepsilon=0.40$ ; (c)— $\varepsilon=0.45$ .

纹先沿弧线方向扩展,最后沿  $90^\circ$  方向扩展;当  $\varepsilon = 0.45$  时(见图 7c),裂纹只有弧线扩展部分.对比 4 种参数下的应力云图,可以看出随着失效应变的增大,限位装置发生断裂的风险性越低.

4) 对于工况 4 而言(见图 8),当速度为  $0.1v, v, 10v$  时(见图 8a, 图 5b 和图 8b),裂纹沿弧线方向扩展;当速度为  $10v$  时(见图 8b),裂纹的弧线扩展规律发生了改变;对比 3 种参数下的应力云图,可以看出随着速度的增加,裂纹的弧线扩展规律会发生变化.

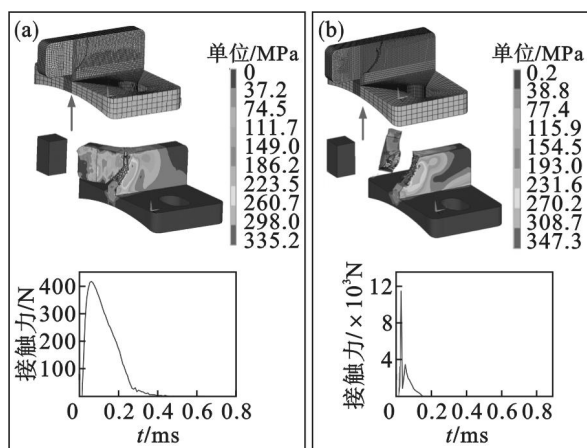


图 8 不同冲击速度下的裂纹扩展轨迹、应力云图以及碰撞接触力曲线

Fig. 8 Crack propagation path, stress nephogram and collision contact force curve under different impact velocities

(a)—冲击速度为  $0.1v$ ; (b)—冲击速度为  $10v$ .

## 5 结 论

1) 基于 LS-DYNA 软件,考虑材料塑性应变,提出了一种模拟裂纹扩展的方法.

2) 裂纹角度较小时( $0^\circ$ ),先沿着  $0^\circ$  扩展一段距离后沿弧线扩展,最后接近于  $90^\circ$  直线扩展;而裂纹角度较大时( $45^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$ ),主要沿弧线扩展,最后呈  $90^\circ$  直线扩展;裂纹角度越大,断裂的风险越高.

3) 在裂纹角度为  $45^\circ$  时,随着裂纹深度的增加,主要裂纹扩展轨迹先为弧线再变为直线,裂纹扩展轨迹差别不大.

4) 随着失效应变的增加,材料塑性更好,此时裂纹扩展规律类似,结构断裂风险显著降低.在

冲击速度较小时,裂纹扩展基本类似;而当冲击速度较大时,裂纹扩展规律会发生改变.

## 参考文献:

- [1] Børvik T, Hopperstad O S, Berstad T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage or impact and penetration[J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2001, 20(5): 685 - 712.
- [2] Hosseinzadeh R, Shokrieh M M, Lessard L. Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(1): 61 - 68.
- [3] Ehlers S, Broekhuijsen J, Alsos H S, et al. Simulating the collision response of ship side structures: a failure criteria enrichment study[J]. *International Shipbuilding Progress*, 2008, 55(1/2): 127 - 144.
- [4] Baluch A H, Park Y, Kim C G. High velocity impact characterization of Al alloys for oblique impacts[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 128 - 135.
- [5] 董赞, 蔡敢为, 郑战光, 等. 基于损伤力学的疲劳寿命和裂纹扩展的数值分析[J]. *中国机械工程*, 2011, 21(20): 2412 - 2415.  
(Dong Yun, Cai Gan-wei, Zheng Zhan-guang, et al. Numerical analyses of fatigue life and crack growth based on damage mechanics[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 21(20): 2412 - 2415.)
- [6] Elmarakbi A M, Hu N, Fukunaga H. Finite element simulation of delamination growth in composite materials using LS-DYNA[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(14): 2383 - 2391.
- [7] Simonsen B C, Törnqvist R. Experimental and numerical modelling of ductile crack propagation in large-scale shell structures[J]. *Marine Structures*, 2004, 17(1): 1 - 27.
- [8] Moslemian R, Karlsson A M, Berggreen C. Accelerated fatigue crack growth simulation in a bimaterial interface[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(12): 1526 - 1532.
- [9] Børvik T, Hopperstad O S, Berstad T, et al. Numerical simulation of plugging failure in ballistic penetration[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(34/35): 6241 - 6264.
- [10] 王泽鹏, 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS 13.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 107 - 117.  
(Wang Ze-peng, Hu Ren-xi, Kang Shi-ting, et al. ANSYS 13.0/LS-DYNA nonlinear finite element analysis of example instruction[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 107 - 117.)