

技术专论

蜂窝铝的面内动态冲击有限元研究

欧阳昊, 成伟

(中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

摘要: **目的** 研究双壁厚蜂窝铝的面内动态冲击力学行为。 **方法** 利用Ansys/LS-DYNA有限元软件, 建立双壁厚蜂窝铝有限元模型, 分析蜂窝铝壁厚和冲击速度对蜂窝铝面内变形模式和平台应力的影响。 **结果** 随着冲击速度的增大, 在蜂窝铝的压缩方向上观测到3种变形模式, 获得了变形模式转换的临界速度, 并给出了临界速度与厚跨比的关系式。计算了不同冲击速度和厚跨比下蜂窝铝的平台应力。 **结论** 变形模式对平台应力有很大的影响, 不同的变形模式下呈现不同的规律: 准静态模式时, 平台应力与冲击速度无关; 过渡模式和冲击模式时, 平台应力随着冲击速度 v 的增大而增大, 分别与 $v^{1.5}$ 和 v^2 成线性关系。根据有限元结果, 拟合得到了不同的变形模式下平台应力与冲击速度的经验公式。

关键词: 双壁厚蜂窝铝; 面内冲击; 变形模式; 平台应力

中图分类号: TB484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0016-05

In-plane Dynamic Impact Behavior of Aluminum Honeycombs Based on Finite Element Simulation

OUYANG Hao, CHENG Wei

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the in-plane dynamic impact behavior of double-walled aluminum honeycombs. The finite element model of double-walled aluminum honeycombs was established by Ansys/LS-DYNA. The influences of honeycomb cell wall thickness and impact velocity on the deformation mode and the plateau stress were analyzed. Three deformation modes were observed in the compressed direction with the increasing impact velocities. The transition velocities of deformation modes were obtained and the formula between critical velocities and height-to-width ratios were suggested. The dynamic plateau stresses of aluminum honeycombs were calculated with different height-to-width ratios at different impact velocities. The deformation mode had a great influence on the plateau stress which presented different variations at different deformation modes. In quasi-static mode, the plateau stresses had nothing to do with impact velocities. However, in transition mode and dynamic mode, the plateau stresses increased linearly with increasing $v^{1.5}$ and v^2 , respectively. The empirical formulas between plateau stress and impact velocity were given at different deformation modes according to the finite element simulation results.

KEY WORDS: double-walled aluminum honeycombs; in-plane impact; deformation mode; plateau stress

蜂窝铝是一种以铝合金为基体的多孔材料, 其具有相对密度低、比强度和比刚度高、能量吸收好等特性, 因此被作为各种轻质结构和缓冲吸能构件, 广泛应用于包装、航空、交通运输等领域^[1-3]。国内外关于蜂窝铝面内力学性能的研究有很多。Gibson 和

Ashby^[4]系统地研究了蜂窝材料的静力学性能。Papka 和 Kyriakides^[5-6]通过数值模拟并结合实验研究了蜂窝铝面内的坍塌行为。于江^[7]利用Ansys/LS-DYNA有限元软件模拟了圆形蜂窝铝的共面冲击过程, 研究了不同冲击速度下的变形模式和动态峰应力。Ruan 等人^[8]

收稿日期: 2014-09-20

作者简介: 欧阳昊(1989—), 男, 四川绵阳人, 中国工程物理研究院硕士生, 主攻高性能计算与数值模拟。

通讯作者: 成伟(1972—), 男, 湖南湘乡人, 中国工程物理研究院研究员, 现从事工程数值模拟以及冲击动力学研究。

模拟了均匀壁厚蜂窝铝的面内动态行为,总结了蜂窝铝壁厚和冲击速度对面内动态响应的影响,并提出了相应的面内变形模式。孙德强等人^[9]通过有限元模拟研究了双壁厚蜂窝铝芯的共面冲击力学性能,给出了不同冲击速度下蜂窝铝的共面变形模式。胡玲玲和余同希^[10]研究了蜂窝铝的共面冲击坍塌强度,通过结构的观点分析蜂窝铝结构高速冲击下可重复的坍塌过程,给出了蜂窝铝面内动态坍塌强度的解析公式。Zou和Reid等人^[11]根据一维冲击波理论研究了在冲击作用下蜂窝铝的面内动态坍塌应力、能量吸收。A. Hnig和W.J. Stronge^[12-13]模拟了蜂窝铝在面内冲击载荷作用下的力学行为,分析了波的传播对坍塌过程的影响。Qiu等人^[14-15]分析了各种几何构型蜂窝的面内准静态压缩坍塌强度,对面内动态响应进行了模拟,得到了动态坍塌强度的经验公式。

文中建立双壁厚蜂窝铝面内冲击的有限元模型,研究蜂窝铝的变形模式及不同变形模式下的平台应力,讨论壁厚和冲击速度对变形模式和平台应力的影响,并给出相应的经验公式。

1 有限元模型

常见的商用蜂窝铝是双壁厚蜂窝铝,结构见图1a。每个蜂窝胞元具有4个长为 l ,壁厚为 t 的孔壁,2个长为 h ,壁厚为 $2t$ 的孔壁,窝孔深度为 b 。 tl 为厚跨比, h/l 为边长比, θ 为扩展角。 T 方向是异面方向, $L-W$ 面内为共面方向。双壁厚蜂窝铝面内冲击有限元模型见图1b。蜂窝窝孔为正六边形,即边长比 $h/l=1$,扩展角 θ 为 30° 。窝孔边长 $l=3\text{ mm}$,壁厚 t 为 $0.07\sim 0.18\text{ mm}$,深度 $b=5\text{ mm}$ 。基体材料为铝合金,选取双线性硬化材料本构,其力学参数为:弹性模量 $E_s=68.97\text{ GPa}$,屈服应力 $\sigma_y=292\text{ MPa}$,正切模量 $E_{tm}=689.7\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.35$,密度 $\rho=2700\text{ kg/m}^3$ 。整个模型置于固定刚性墙和移动刚性墙之间,刚性墙与蜂窝铝的摩擦因数取 0.17 。移动刚性墙的质量为 50 kg ,冲击初速度 v 为 $2\sim 200\text{ m/s}$ 。利用5个积分点Shell 163单元划分网格,窝孔边划分为8个单元,整个模型定为自动单面接触。

2 变形模式

不同冲击速度下的双壁厚蜂窝铝呈3种不同的变形模式:准静态模式、过渡模式和冲击模式,见图2—6。

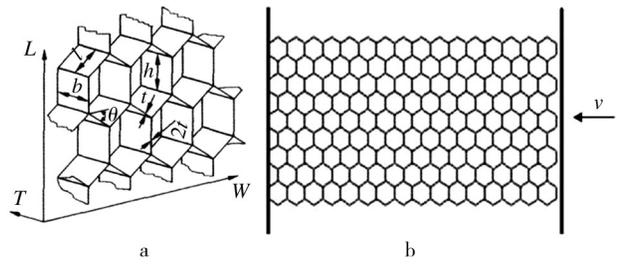


图1 双壁厚蜂窝铝结构和W向压缩有限元模型

Fig.1 Configuration of double-walled aluminum honeycomb and its finite element model in W direction

2.1 准静态模式

蜂窝铝W方向受到低速冲击(5 m/s)时,首先会在两端先后各呈现一个倾斜的“X”型变形带(见图2a—b),然后分别以“V”型变形带向中间汇聚(见图2c),直至压实(见图2d)。低速时,蜂窝铝的变形模式对边界条件和模型的高宽比很敏感。当压缩方向的模型长度不够或者边界条件不同时,可能会产生双“V”型变形带,而不会产生“X”型变形带,PAPKA^[6]和ZOU^[11]等人的研究得到了相关结论。

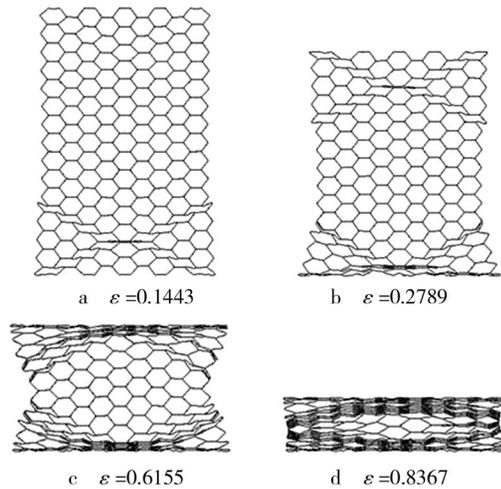


图2 $t=0.07\text{ mm}$, $v=5\text{ m/s}$ 时蜂窝铝压溃变形

Fig.2 The crushing deformation process of aluminum honeycombs, $t=0.07\text{ mm}$, $v=5\text{ m/s}$

2.2 过渡模式

蜂窝铝W方向受到中速冲击(30 m/s)时,首先会在冲击端产生一个“V”型的变形区域(见图3a),而非一个变形带,随着这个“V”型变形区域的压扁,会产生开口向下的“V”型变形带并逐步向下传播(见图3b—c)。如果冲击速度较小或者压缩方向的模型足够长,

冲击端产生“V”型变形带后会在支撑端产生一个“X”型变形带(见图4c)。冲击速度较低时,支撑端“X”型变形带出现时间早,冲击速度较高时,支撑端“X”型变形带出现时间晚,甚至不出现;如果压缩方向模型长度不够,不会出现“X”型变形带,见图5。

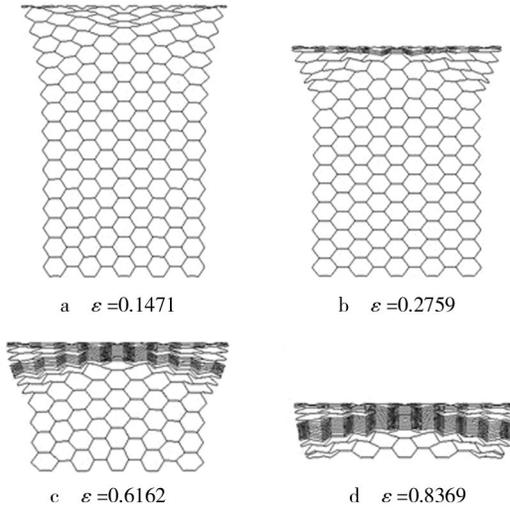


图3 $t=0.07\text{ mm}, v=30\text{ m/s}$ 时蜂窝铝压溃变形

Fig.3 The crushing deformation process of aluminum honeycombs, $t=0.07\text{ mm}, v=30\text{ m/s}$

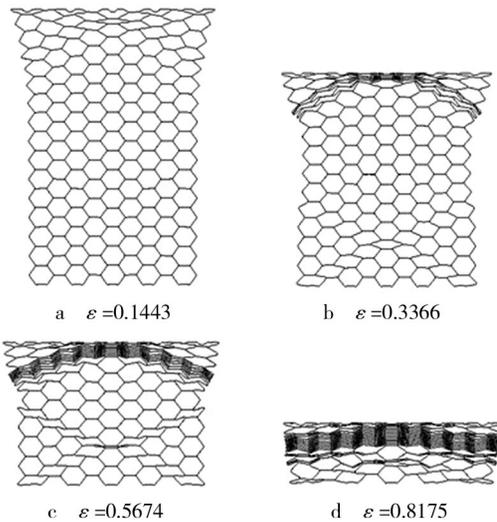


图4 $t=0.07\text{ mm}, v=20\text{ m/s}$ 时蜂窝铝压溃变形

Fig.4 The crushing deformation process of aluminum honeycombs, $t=0.07\text{ mm}, v=20\text{ m/s}$

2.3 冲击模式

蜂窝铝 W 方向受到高速冲击(100 m/s)时,在冲击端会出现一个与冲击方向垂直的横向局部变形带——“I”型变形带。随着压缩的进行,变形带会一层一层向下传播直到支撑端,见图6。

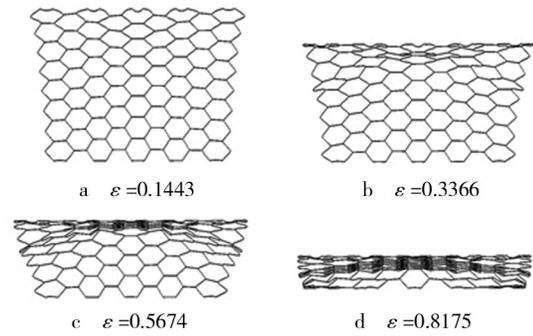


图5 压缩方向模型长度减半时蜂窝铝压溃变形($t=0.07\text{ mm}, v=20\text{ m/s}$)

Fig.5 The crushing deformation process of aluminum honeycombs when the length of the model decreased by half in the compress direction, $t=0.07\text{ mm}, v=20\text{ m/s}$

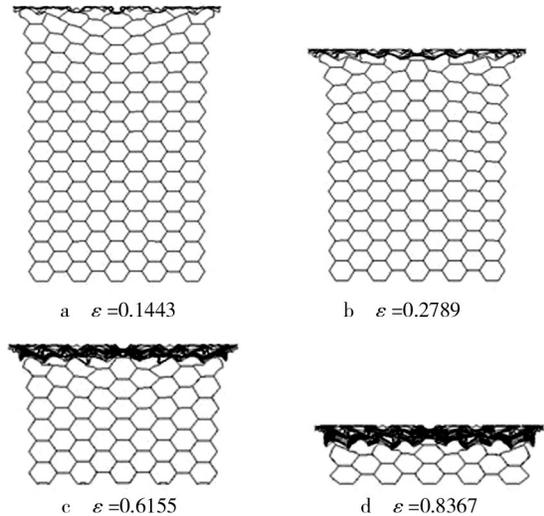


图6 $t=0.07\text{ mm}, v=100\text{ m/s}$ 时蜂窝铝压溃变形

Fig.6 The crushing deformation process of aluminum honeycombs, $t=0.07\text{ mm}, v=100\text{ m/s}$

蜂窝铝的变形模式主要受结构、边界条件和惯性等因素的影响。低速时,结构和边界条件对蜂窝铝的变形模式起主导作用;高速时,惯性决定了蜂窝铝的变形模式;中速时,结构、边界条件和惯性共同主导蜂窝铝的变形模式,并且冲击速度越高,惯性的影响越大。不同壁厚蜂窝铝的变形模式转换临界速度见表1。

如图7,临界速度与 $\sqrt{\frac{t}{l}}$ 成线性关系,关系式为:

$$v_{c1} = 56.9 \sqrt{\frac{t}{l}} + 4.7 \quad (1)$$

$$v_{c2} = 420.8 \sqrt{\frac{t}{l}} - 7.0 \quad (2)$$

表1 W方向上不同壁厚下蜂窝铝的变形模式临界速度

Tab.1 The transition velocities of deformation modes at different honeycomb cell wall thicknesses in W direction

壁厚/mm	$v_{c1}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{c2}/(m \cdot s^{-1})$
0.05	12	48
0.07	13.5	56
0.10	15	70
0.12	16	78
0.14	17	84
0.15	17.5	87
0.16	18	90
0.18	18.5	96

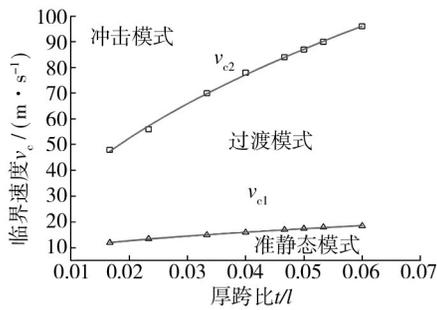


图7 临界速度 v_{c1}, v_{c2} 与厚跨比 t/l 关系曲线

Fig.7 Critical velocities v_{c1} and v_{c2} at different height-to-width ratios

3 平台应力

不同冲击速度下蜂窝铝的应力-应变曲线见图8, 低速时, 应力-应变曲线几乎重合, 波动小, 平台应力很接近; 速度较高时, 随着冲击速度的增加, 应力增大, 波动增大, 平台应力增大。

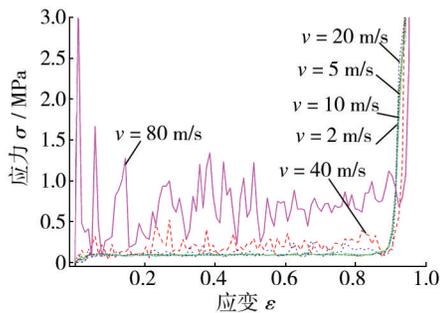


图8 $t=0.07$ mm 时不同冲击速度下蜂窝铝的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of aluminum honeycombs at different impact velocities, $t=0.07$ mm

根据模拟计算结果发现, 蜂窝铝的平台应力在不同的变形模式下呈现不同的规律, 见图9—11。准静

态模式时, 平台应力几乎成一条直线, 与冲击速度无关; 过渡模式和冲击模式时, 平台应力随着冲击速度的增加而增大, 分别与 $v^{1.5}$ 和 v^2 成线性关系。

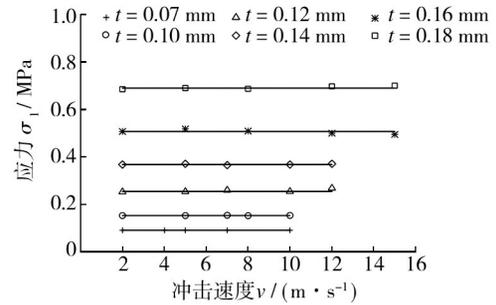


图9 准静态模式下不同壁厚蜂窝铝平台应力与冲击速度关系曲线

Fig.9 Relationship between plateau stress and impact velocity at different honeycomb cell wall thicknesses in quasi-static mode

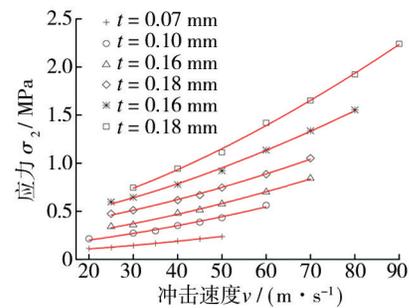


图10 过渡模式下不同壁厚蜂窝铝平台应力与冲击速度关系曲线

Fig.10 Relationship between plateau stress and impact velocity at different honeycomb cell wall thicknesses in transition mode

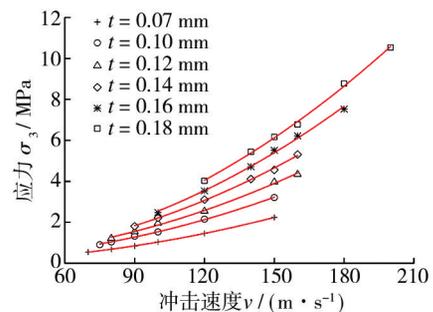


图11 冲击模式下不同壁厚蜂窝铝平台应力与冲击速度关系曲线

Fig.11 Relationship between plateau stress and impact velocity at different honeycomb cell wall thicknesses in dynamic mode

通过最小二乘拟合, 3种变形模式下的平台应力与冲击速度的关系为:

$$\text{准静态模式: } \sigma_1 = A \quad (3)$$

$$\text{过渡模式: } \sigma_2 = Av^{1.5} + B \quad (4)$$

$$\text{冲击模式: } \sigma_3 = Av^2 + B \quad (5)$$

公式(3)—(5)中的系数与 t/l 有关,通过最小二乘拟合,最终可得:

$$\text{准静态模式: } \sigma_1 = 187.4(t/l)^2 = 0.64 \sigma_y (t/l)^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{过渡模式: } \sigma_2 = & [0.5865 \left(\frac{t}{l}\right)^2 - 0.0063 \frac{t}{l} + 3.71 \times \\ & 10^{-4}] v^{1.5} - 18.712 \left(\frac{t}{l}\right)^3 + 2342 \left(\frac{t}{l}\right)^2 - 82.7 \frac{t}{l} + 0.96 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{冲击模式: } \sigma_3 = & [0.01144 \left(\frac{t}{l}\right)^2 + 0.00345 \frac{t}{l} + \\ & 8.585 \times 10^{-6}] v^2 + 19.527 \left(\frac{t}{l}\right)^3 - 2441 \left(\frac{t}{l}\right)^2 + 103.7 \times \\ & \frac{t}{l} - 1.275 \end{aligned} \quad (8)$$

4 结语

在面内载荷下,双壁厚蜂窝铝在压缩方向表现出3种变形模式:准静态模式、过渡模式和动态模式。结构、边界条件和惯性等因素共同影响蜂窝铝的变形模式。蜂窝铝的平台应力受到壁厚和变形模式的影响,平台应力随着壁厚的增加而增加;准静态模式下,平台应力随着冲击速度的增加基本保持不变;过渡模式和冲击模式下,平台应力与分别与 $v^{1.5}$ 和 v^2 成线性关系。得出了平台应力与冲击速度和厚跨比在不同变形模式下的经验公式,为蜂窝优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的研究及应用[J]. 包装工程, 2000, 21(4): 5—8.
WANG Mei. The Research of the Honeycomb Fiber-board Crushing Performance and The Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5—8.
- [2] 王虹, 王文明, 胡兵林, 等. 纸蜂窝材料的有效缓冲及其预压缩试验[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 20—23.
WANG Hong, WANG Wen-ming, HU Bing-lin, et al. Effective Cushioning of Paper Honeycomb Material and Pre-compression Test[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 20—23.
- [3] 陈永军, 左孝青, 史庆南, 等. 金属蜂窝的开发、发展和应用[J]. 材料导报, 2003, 17(12): 32—35.
CHEN Yong-jun, ZUO Xiao-qing, SHI Qing-nan, et al. Development and Application of Honeycombed Metal[J]. Materials Review, 2003, 17(12): 32—35.
- [4] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Oxford: Pergamon Press, 1988.
- [5] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. In-plane Compressive Response and Crushing of Honeycombs[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1994, 42(10): 1499—1532.
- [6] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. Experiments and Full-scale Numerical Simulations of In-plane Crushing of a Honeycomb[J]. Acta Materialia, 1998, 46: 65—76.
- [7] 于江, 李晓娟. 圆形金属蜂窝芯材冲击性能的有限元分析[J]. 包装工程, 2008, 29(11): 30—31.
YU Jiang, LI Xiao-juan. Finite Element Analysis on the Impact Performance of Circular Metal Honeycomb Core[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 30—31.
- [8] RUAN D, LU G, WANG B, et al. In-plane Dynamic Crushing of Honeycombs: a Finite Element Study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(3): 161—182.
- [9] 孙德强, 张卫红. 双壁厚蜂窝铝芯的共面冲击力学性能[J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 69—74.
SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong. In-plane Impact Properties of Aluminum Double-walled Honeycomb Cores[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(7): 69—74.
- [10] HU L L, YU T Y. Dynamic Crushing Strength of Hexagonal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010(37): 467—474.
- [11] ZOU Z, REID S R, TAN P J, et al. Dynamic Crushing of Honeycombs and Features of Shock Fronts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 165—176.
- [12] HNIG A, STRONGE W J. In-plane Dynamic Crushing of Honeycomb. Part I: Crush Band Initiation and Wave Trapping[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002(44): 1697—1714.
- [13] HNIG A, STRONGE W J. In-plane Dynamic Crushing of Honeycomb. Part II: Application to Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002(44): 1697—1714.
- [14] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part I: Quasi-static Strength Predicted by Limit Analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 1223—1230.
- [15] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part II: Dynamic Crushing Based on Finite Element Simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 1231—1241.