

## 缓冲与隔振

## 工字梁型蜂窝芯材共面冲击性能的有限元模拟

刘晓瑞, 陈满儒, 孙德强  
(陕西科技大学, 西安 710021)

**摘要:** 目的 研究双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材的共面冲击性能。方法 借助有限元软件 Ansys/LS-DYNA, 建立工字梁型蜂窝芯材的有限元模型, 并进行 CAE 分析。结果 在不同冲击速度下, 工字梁型蜂窝芯材表现出不同的变形模式。当工字梁型金属蜂窝芯材的其他结构参数固定时, 其共面动态峰应力与冲击速度的平方成线性关系; 当冲击速度一定时, 共面动态峰应力与壁厚边长比成幂指数关系。同时, 拟合得到了工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力关于壁厚边长比和冲击速度的经验计算公式。结论 工字梁型蜂窝具有优良的结构和吸能能力, 研究工字梁型蜂窝的冲击性能具有重要的科学研究和工程应用价值。

**关键词:** 工字梁型; 蜂窝芯材; 共面冲击性能; 变形模式; 共面动态峰应力

**中图分类号:** TB484.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0028-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.006

### Finite Element Simulation of In-Plane Impact Properties for I-beam Honeycomb Cores

LIU Xiao-rui, CHEN Man-ru, SUN De-qiang  
(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the in-plane impact properties of double-walled metal I-beam honeycomb cores. The finite element model of I-beam honeycomb cores was established by means of finite element software Ansys/LS-DYNA and the CAE analysis was carried out. The different deformation modes were expressed by the I-beam honeycomb cores at different impact velocities. When other structural parameters of metal I-beam honeycomb cores were kept constant, the in-plane dynamic peak stresses were linearly proportional to the square of impact velocities. When the impact velocities remained constant, its in-plane dynamic peak stress was in exponential relation with the ratio of wall thickness to side length. In the meantime, the empirical calculating formula with respect to the ratio of wall thickness to side length and impact velocities of the in-plane dynamic peak stress of the metal I-beam honeycomb cores was obtained by fitting. The I-beam honeycombs have excellent structure and energy absorption ability. The study on the impact performance of I-beam honeycombs has important value of scientific research and engineering application.

**KEY WORDS:** I-beam; honeycomb cores; in-plane impact properties; deformation modes; in-plane peak stresses

工字梁型蜂窝材料由 Mullen 和 Stephen 于 1986 年提出并取得专利, 其竖壁采用矩形波状的方式增加力学刚度和强度, 然后将波状片进行局部焊接, 使它们连接在一起<sup>[1]</sup>, 所得蜂窝材料竖壁厚度增加了 1 倍, 作为一种二维多孔材料, 它具有结构优良、吸能、隔热等特点, 可作为缓冲材料应用于航空、包装、军事、制造等领域。

Gibson<sup>[2]</sup>等对工字梁型蜂窝材料进行了理论研究, 给出了工字梁型蜂窝的相对密度及异面弹性模量。卢文浩<sup>[3]</sup>等研究了蜂窝材料在动态冲击下的力学行为。Li<sup>[4]</sup>等研究了均匀壁厚六边形蜂窝芯材。孙德强等研究了三角形<sup>[5]</sup>、四边形<sup>[6]</sup>、多层次规则排列圆形<sup>[7]</sup>、凹六边形<sup>[8]</sup>和多层次 U 形 A 瓦楞结构材料<sup>[9]</sup>等蜂窝芯材在动态冲击下的力学行为, 并利用有限元软件进行数

收稿日期: 2017-08-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51575327)

作者简介: 刘晓瑞 (1992—), 女, 陕西科技大学硕士生, 主攻包装工程。

通信作者: 陈满儒 (1957—), 男, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为运输包装。

值模拟,得到以上各构型蜂窝材料结构参数对其蜂窝缓冲性能的影响规律及相关经验公式。

这里借鉴上述学者研究各构型蜂窝材料的方法,借助有限元分析软件 Ansys/LS-DYNA 构建双壁厚工字梁型蜂窝芯材共面冲击模型,针对不同冲击速度和不同壁厚边长比下的工字梁型蜂窝样品进行有限元模拟,以探究双壁厚工字梁型蜂窝芯材的共面冲击性能,旨在给出不同冲击速度下双壁厚工字梁型蜂窝的共面变形模式。由于共面动态峰应力为描述蜂窝芯材共面冲击性能的主要参数,所以这里旨在揭示壁厚边长比和冲击速度与双壁厚工字梁型蜂窝共面动态峰应力的关系。

## 1 有限元模型

采用显式有限元软件 Ansys/LS-DYNA 进行模拟计算,将双壁厚工字梁型蜂窝单元放置在上下刚性压板间,设置约束使工字梁型蜂窝单元仅发生共面变形。令下压板固定,使质量足够大的上压板沿冲击方向匀速运动以向蜂窝芯材施加载荷。设置 Belytschko 类型壳单元 Shell 163 进行网格划分。定义整个模型为自动单面接触,工字梁型蜂窝单元与上下刚性板间为自动面面接触。

工字梁型金属蜂窝基材为各向同性双线性硬化材料铝合金,蜂窝芯材双壁厚处单元厚度为单壁厚处的 2 倍。双壁厚工字梁型蜂窝芯材的结构参数有特征单元边长  $l$ ,  $h$ , 壁厚  $d$ 、扩展角  $\theta$  和深度  $b$ ,其中  $h/l$  为边长比,  $d/l$  为壁厚边长比。 $x_1$  轴垂直于蜂窝单元的竖向壁面,  $x_2$  轴平行于蜂窝单元的竖向壁面,  $x_1-x_2$  面为共面,蜂窝芯材在该面所表现出来的性能称为共面性能。取蜂窝深度为 8 mm,  $x_1$  方向上 15×14 的蜂窝单元阵列为共面动态冲击分析的有限元分析模型,见图 1。

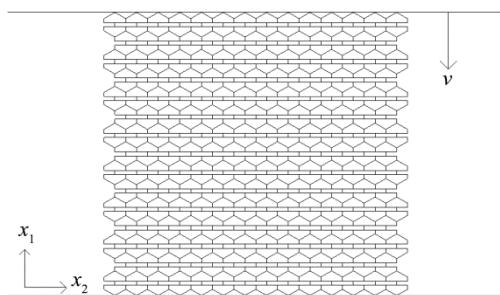


图 1 双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面冲击分析模型  
Fig.1 In-plane impact analysis model of double-walled metal I-beam honeycomb cores

## 2 分析方法

利用上述双壁厚工字梁型蜂窝芯材有限元模型进行共面冲击计算后,将数据利用后处理软件

LSPREPOSTD 得到工字梁型蜂窝芯材的压缩力时间曲线  $F-t$ 、位移时间曲线  $u-t$ 、动能时间曲线  $K-t$ 、内能时间曲线  $U-t$  和吸收总能量时间曲线  $T-t$  等, XYPILOT 运算处理后得压缩力位移曲线  $F-u$ 、功位移曲线  $W-u$ 、动能位移曲线  $K-u$  及吸收总能量位移曲线  $T-u$  等。 $l=3$  mm,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $d=0.07$  mm 的双壁厚工字梁型蜂窝铝芯在冲击速度为 100 m/s 时的  $F-u$  曲线见图 2a, 对应的  $K-u$ ,  $W-u$  和  $T-u$  曲线见图 2b。

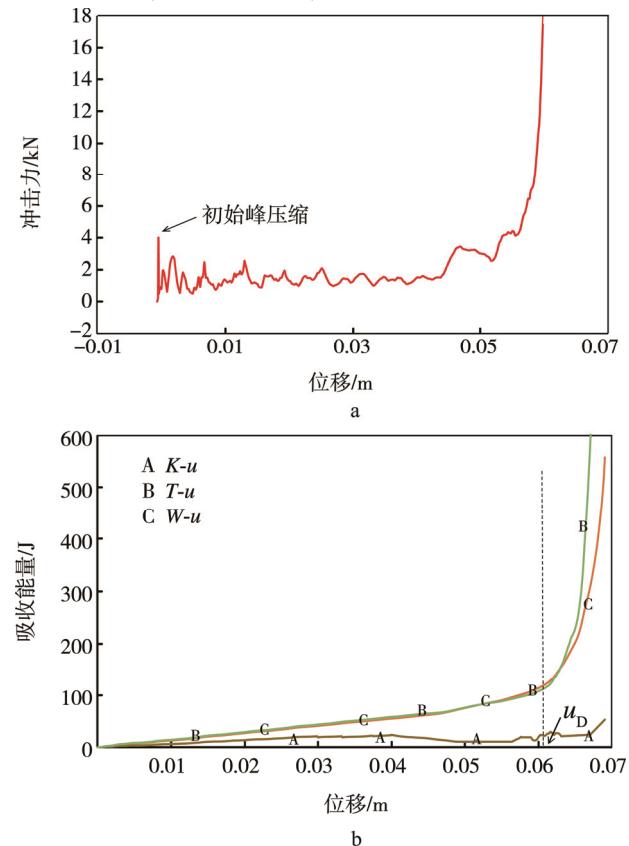


图 2 工字梁型蜂窝芯材共面冲击力和能量吸收曲线  
Fig.2 In-plane impact force and energy absorption curves of I-beam honeycomb cores

有限元模拟计算结果表明,双壁厚工字梁型蜂窝芯材共面冲击响应遵循二维多孔材料的基本响应规则<sup>[10]</sup>。线弹性阶段时间历程几乎为一瞬态,之后冲击力  $F$  快速增至初始峰压缩力,对应初始位移  $u_0$ , 初始功  $W_0$ 。随后冲击力突然下降并保持在一水平值附近,蜂窝芯材经历较长的平台区变形,在  $W-u$  曲线上对应一条较平缓斜线,之后曲线陡然上升进入密实化变形,对应密实化位移  $u_D$ , 密实化功  $W_D$ 。设蜂窝样品沿冲击方向横截面面积为  $S$ ,则双壁厚工字梁型蜂窝芯材共面动态峰应力  $\sigma_p$  为:

$$\sigma_p = \frac{W_D - W_0}{S(u_D - u_0)} \quad (1)$$

在上述变形过程中,双壁厚工字梁型蜂窝芯材能量的吸收主要集中在平台区。虽然在密实化阶段能量吸收明显,但冲击力急剧增加,故在缓冲应用中应使

工字梁型蜂窝变形进入平台区，避免进入密实化区。

### 3 结果分析

#### 3.1 变形模式

在  $x_1$  方向上，低速冲击时双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材的变形过程见图 3，其中  $b=8 \text{ mm}$ ,  $l=3 \text{ mm}$ ,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $d=0.07 \text{ mm}$ ,  $v=3 \text{ m/s}$ ,  $t$  为冲击持续的时间。工字梁型蜂窝芯材首先发生线弹性变形，之后蜂窝单元顶部出现局部倒“V”字形坍塌变形，随后蜂窝单元底部出现局部“V”字形坍塌变形，最后蜂窝单元出现轻微倾斜并被压实。每个工字梁型蜂窝芯材的

胞单元都是插入矩形波状的部分较晚发生坍塌，且坍塌较为缓慢。

在  $x_1$  方向上，中速冲击时双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材的变形过程见图 4，其中  $b=8 \text{ mm}$ ,  $l=3 \text{ mm}$ ,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $d=0.07 \text{ mm}$ , 冲击速度  $v=70 \text{ m/s}$ 。工字梁型蜂窝芯材发生线弹性变形后，蜂窝单元顶部首先出现“W”字形坍塌变形，坍塌带前沿以“V”字形下移，随后蜂窝单元底部出现“V”字形坍塌变形，最终整个蜂窝单元一起被压实。每个工字梁型蜂窝芯材的胞单元都是插入矩形波状的部分较晚发生坍塌，且坍塌较为缓慢。

在  $x_1$  方向上，高速冲击时双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材的变形过程见图 5，其中  $b=8 \text{ mm}$ ,  $l=3 \text{ mm}$ ,

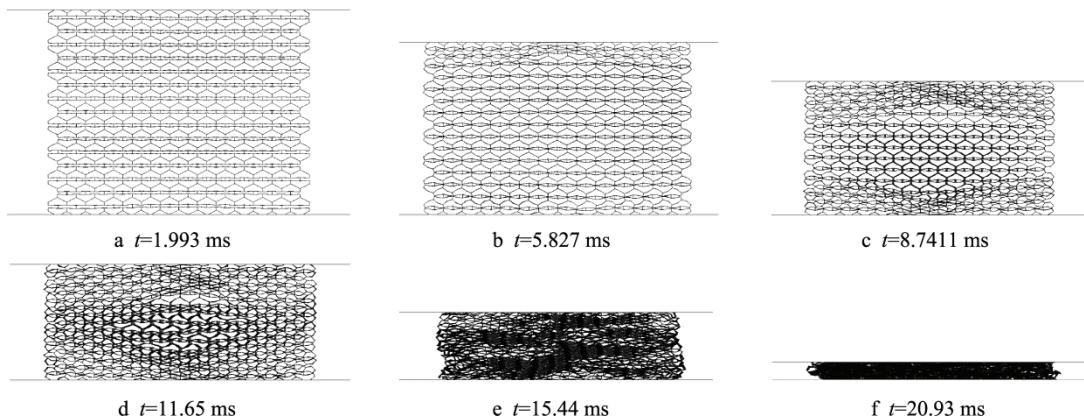


图 3 低速冲击下工字梁型蜂窝芯材  $x_1$  方向上的变形过程  
Fig.3 Deformation course of I-beam honeycomb cores at low impact velocity in  $x_1$  direction

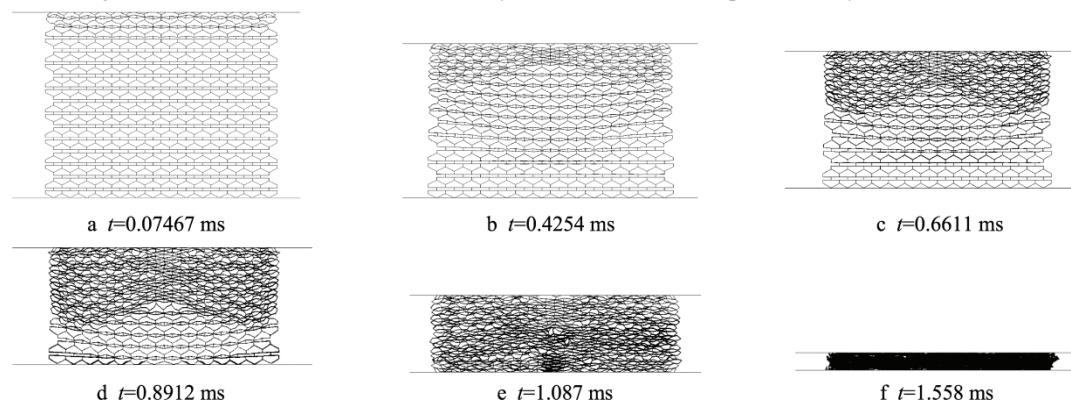


图 4 中速冲击下工字梁型蜂窝芯材  $x_1$  方向上的变形过程  
Fig.4 Deformation course of I-beam honeycomb cores at medium impact velocity in  $x_1$  direction

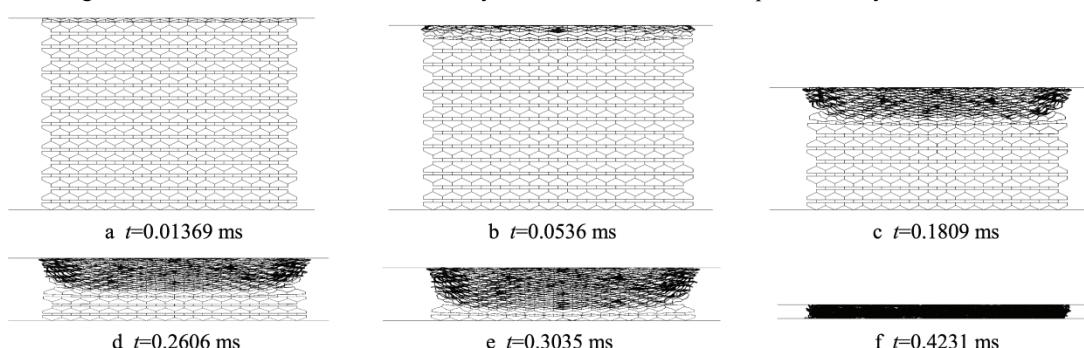


图 5 高速冲击下工字梁型蜂窝芯材  $x_1$  方向上的变形过程  
Fig.5 Deformation course of I-beam honeycombs at high impact velocity in  $x_1$  direction

$h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $d=0.07$  mm, 冲击速度  $v=150$  m/s。冲击初始, 工字梁型蜂窝单元底部还没来得及发生变形, 蜂窝单元顶部就已经出现“一”字形坍塌变形带, 之后坍塌变形带以“一”字形不断下移, 整个工字梁型蜂窝单元最终被压实。

从图3—5可以看出, 在低速冲击条件下, 双壁厚工字梁型蜂窝芯材共面方向的变形模式表现为局部坍塌, 整个变形过程与 Scott<sup>[11]</sup>的静态实验结果类似。其他各冲击速度下双壁厚工字梁型蜂窝芯材的共

面变形模式也与 Zheng<sup>[12]</sup>等利用有限元模拟蜂窝材料动态冲击的结果类似, 这也就从变形模式上证明了上述工字梁型蜂窝芯材共面有限元模型的可靠性。

### 3.2 共面动态峰应力

按照上述工字梁型蜂窝芯材共面冲击分析的有限元模型, 取  $l=3$  mm,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$  的双壁厚工字梁型蜂窝铝芯样品, 在不同壁厚和冲击速度下,  $x_1$  方向上的工字梁型蜂窝芯材共面动态峰应力见表1。

表1  $x_1$  方向不同壁厚和冲击速度下工字梁型蜂窝芯材的动态峰应力

Tab.1 Dynamic peak stresses of I-beam honeycomb cores with different wall thicknesses at different impact velocities in  $x_1$  directions

MPa

冲击速度/(m·s <sup>-1</sup> )	壁厚/mm					
	0.03	0.05	0.07	0.08	0.1	0.13
3	0.016	0.027	0.034	0.086	0.111	0.194
20	0.052	0.079	0.113	0.145	0.198	0.217
40	0.101	0.199	0.306	0.374	0.405	0.612
70	0.412	0.642	1.038	1.139	1.456	2.032
100	1.067	1.325	1.834	2.276	2.918	4.178
150	1.889	3.054	4.185	5.062	6.481	10.037

利用 Matlab 根据最小二乘法拟合不同壁厚下工字梁型蜂窝芯材共面动态峰应力与冲击速度之间的关系曲线, 见图6。可以看出, 在不同壁厚边长比下, 当其余蜂窝结构参数固定时, 双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力与冲击速度的平方成线性关系。

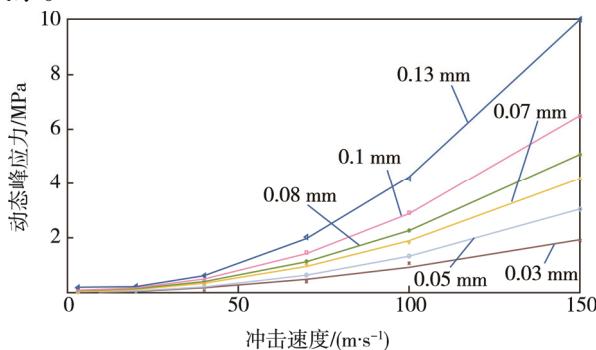


图6 不同壁厚下工字梁型蜂窝芯材共面动态峰应力与冲击速度之间的关系曲线

Fig.6 Relation curves between in-plane dynamic peak stresses of I-beam honeycomb cores with different wall thicknesses and the impact velocities

根据 Reid<sup>[13]</sup>提出的适用于中高速冲击下的工字梁型蜂窝<sup>[14]</sup>动态峰应力  $\sigma_p$  在不同冲击速度  $v$  下的计算公式:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + Av^2 \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{p0}$  为类静态峰应力;  $A$  为动态峰应力与壁厚边长比的关系系数。

通过模拟计算易知, 当规格为  $l=3$  mm,  $h/l=1$ ,

$\theta=30^\circ$  的双壁厚工字梁型蜂窝芯材样品在 3 m/s 的冲击速度下时, 密实化变形之前动能与总能量吸收之比都小于 2%, 故此时的共面动态峰应力可视为类静态峰应力, 即  $\sigma_{p0}$ <sup>[15]</sup>。根据双壁厚工字梁型蜂窝样品共面动态峰应力的计算结果, 拟合可得系数  $A$  的值, 分别为 85.91, 134.92, 183.88, 222.49, 285.67 和 441.56 kg/m<sup>3</sup>。

利用 Matlab 根据最小二乘法拟合得到不同冲击速度下工字梁型蜂窝芯材共面动态峰应力与壁厚边长比之间的关系曲线, 见图7。可以看出, 在不同冲击速度下, 当其余蜂窝结构参数固定时, 双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力与壁厚边长比成幂指数关系, 且随着冲击速度的逐步增加, 双壁厚工

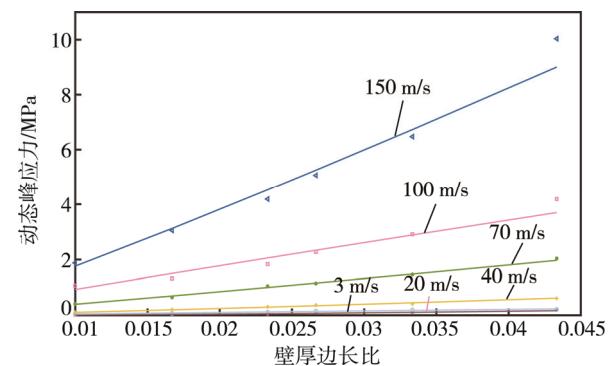


图7 不同冲击速度下工字梁型蜂窝芯材共面动态峰应力与壁厚边长比之间的关系曲线

Fig.7 Relation curves between in-plane dynamic peak stresses of I-beam honeycomb cores and the ratio to wall thickness to side length at different impact velocities

字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力与壁厚边长比也逐步趋于直线关系。公式表示为:

$$\sigma_p = \sigma_{ys} B(d/l)^k \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{ys}$  为工字梁型蜂窝基材的屈服峰应力;  $B$  和  $k$  均为动态峰应力与壁厚边长比的关系系数。

对上述蜂窝芯材样品来说, 当  $v$  分别为 3, 20, 40, 70, 100 和 150 m/s 时, 得到的双壁厚工字梁型金属蜂窝共面动态峰应力经验关系式分别为  $401.6(d/l)^{1.75}$ ,  $61.4(d/l)^{1.04}$ ,  $270.1(d/l)^{1.21}$ ,  $617.5(d/l)^{1.10}$ ,  $713.2(d/l)^{0.94}$  和  $293.9(d/l)^{1.11}$ 。

## 4 结语

针对双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面冲击的有限元模型进行了大量的模拟计算, 总结了双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材分别在低速、中速和高速等不同冲击速度下的变形模式, 讨论了冲击速度和壁厚边长比对双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力的影响规律。

模拟计算结果表明, 在  $x_1$  方向上, 当蜂窝芯材其他结构参数固定时, 双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力与冲击速度的平方呈线性关系; 当冲击速度一定时, 双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力与壁厚边长比成幂指数关系, 且随着冲击速度的逐步增加, 双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力与壁厚边长比也由幂指数关系逐步变为近似直线关系。同时, 通过数据拟合得到了双壁厚工字梁型金属蜂窝芯材共面动态峰应力关于壁厚边长比和冲击速度的经验计算式, 可为工字梁型蜂窝材料的理论研究及缓冲优化设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] MULLEN, STEPHEN J. I-Beam Honeycomb Material: USA, 4632862[P]. 1986-12-30.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids Structure and Properties[M]. Oxford: Pergamon, 1986.
- [3] 卢文浩, 鲍荣浩. 动态冲击下蜂窝材料的力学行为[J]. 振动与冲击, 2005, 24(1): 49—53.  
LU Wen-hao, BAO Rong-hao. Dynamic Crushing Behavior of Honeycomb Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(1): 49—53.
- [4] LI K, GAO X L, WANG J. Dynamic Crushing Behavior of Honeycomb Structures with Irregular Cell Shapes and Non-uniform Cell Wall Thickness[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(15): 5003—5026.
- [5] SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong. Energy Absorption Performance of Staggered Triangular Honeycombs under In-plane Crushing Loadings[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2013, 139(2): 153—166.  
孙德强, 孙玉瑾, 郑波波, 等. 正方形蜂窝芯材共面冲击力学性能[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 1—5.  
SUN De-qiang, SUN Yu-jin, ZHENG Bo-bo, et al. In-plane Impact Properties of Square Honeycomb Cores [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 1—5.
- [6] SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong, ZHAO Yu-cong, et al. In-plane Crushing and Energy Absorption Performance of Multilayer Regularly Arranged Circular Honeycombs[J]. Composite Structures, 2013, 96: 726—735.
- [7] SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong, ZHAO Yu-cong, et al. In-plane Crushing and Energy Absorption Performance of Multilayer Regularly Arranged Circular Honeycombs[J]. Composite Structures, 2013, 96: 726—735.
- [8] 孙德强, 张小强, 王复会, 等. 凹六边形蜂窝芯材共面准静态力学行为[J]. 陕西科技大学学报, 2015, 33(5): 153—156.  
SUN De-qiang, ZHANG Xiao-qiang, WANG Fu-hui, et al. In-plane Quasi-static Crushing of Cissoidal Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2015, 33(5): 153—156.
- [9] 孙德强. 多孔缓冲材料有限元结构分析与设计方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [10] 孙德强, 方众望, 罗显洲, 等. 多层 U 形 A 瓦楞结构材料的共面力学性能[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 8—12.  
SUN De-qiang, FANG Zhong-wang, LUO Xian-zhou, et al. In-plane Mechanic Properties of Multilayer A-type U-shaped Corrugated Structural Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 8—12.
- [11] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. In-plane Compressive Response and Crushing of Honeycomb[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1994, 42(10): 1499—1532.
- [12] ZHENG Z J, YU J L, LI J R. Dynamic Crushing of 2D Cellular Structures: A Finite Element Study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1): 650—664.
- [13] REID S R, PENG C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5): 531—570.
- [14] FLUGRAD D, FLUGRAD D, SHAKOOR M, et al. Theoretical and Finite Element Study of a Compact Energy Absorber[J]. Advances in Engineering Software, 2008, 39(2): 95—106.
- [15] 王青春, 范子杰. 利用 LS-DYNA 计算结构准静态压溃的改进方法[J]. 力学与实践, 2003, 25(3): 20—23.  
WANG Qing-chun, FAN Zi-jie. Improvement in Analysis of Quasi-static Collapse with LS-DYNA[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(3): 20—23.