

基于 Ansys 的冲击载荷下蜂窝夹芯板的动力学响应

李永强, 宦 强

(东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以四边固支铝基蜂窝夹芯板为研究对象, 针对蜂窝夹芯板胞元中添加颗粒的位置及填充量对动力学响应的影响进行了 Ansys 数值模拟计算, 并比较了不同条件下的蜂窝夹芯板应力应变值。结果表明: 在冲击载荷下, 蜂窝夹芯板胞元中添加颗粒后能很好地减小应力应变值, 增大蜂窝夹芯板的吸能效果。颗粒填充范围为 0.2 ~ 0.25, 颗粒填充数为两粒时, 蜂窝夹芯板的应力应变值最小, 吸能效果最佳, 过多的填充不仅不具有更好的吸能效果, 反而会激振蜂窝夹芯板。

关 键 词: 蜂窝夹芯板; 冲击载荷; 颗粒; 填充范围; 填充颗粒数

中图分类号: TB 123 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)06-0858-05

Dynamic Response of Honeycomb Sandwich Panel Under Impact Loading Based on Ansys

LI Yong-qiang, HUAN Qiang

(School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Yong-qiang, E-mail: yqli@mail.neu.edu.cn)

Abstract: For the aluminum honeycomb sandwich panel with SCSC edge supports, the dynamic response numerical calculations were conducted using the Ansys by considering the range and quantity of the filling particles in cell of honeycomb sandwich panel. The stress and strain of the honeycomb sandwich panel in different conditions were further compared. The result indicates that filling particles in the panel cell can well reduce the stress and strain and increase the energy absorption effect. When the range of filling particles is from 0.2 to 0.25 and the quantity of filling particles is 2, the stress and strain of honeycomb sandwich panel are minimal and the effect of the energy absorption is best. Too much filling particles do not have a better energy absorption effect but conversely can shock the honeycomb sandwich panel.

Key words: honeycomb sandwich panel; impact loading; particles; filling range; quantity of filling particles

蜂窝夹芯板被广泛运用在航空航天、船舶、国防等领域, 在承受载荷时, 呈现应力几乎不变的塑性变形过程, 起到良好的吸能作用。

针对蜂窝夹芯板在冲击作用下的动力学响应, 国内外学者做了许多研究。管公顺等^[1]研究了铝球弹丸超高速正撞击薄铝板穿孔的尺寸。何永亮^[2]研究了低速冲击下蜂窝夹层板损伤标识量的提取。Fleck 等针对六边形蜂窝板进行了抗爆性能优化设计, 并与波纹板的结果进行了对比分析^[3]。Schonberg 等^[4]对铝合金双层板结构在超

高速撞击下的穿孔尺寸与裂纹长度进行了分析。Sawle^[5], Maiden 等^[6], Nysmith 等^[7]分别给出了铝球弹丸高速正撞击铝板穿孔直径的经验公式。Hutchinson 等^[8-9]针对不同几何形式的夹芯层下的蜂窝夹芯板吸能效果进行了研究。但未见在蜂窝夹芯板胞元中添加颗粒后其动力学响应的研究报道。

本文应用 ansys 的 ls-dyna 模块对中速子弹撞击蜂窝夹芯板进行仿真。针对蜂窝夹芯板添加颗粒的位置与填充量来研究添加颗粒后其中速撞

收稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105066)。

作者简介: 李永强(1970-), 男, 河北饶阳人, 东北大学教授。

击下的动力学特征. 通过改变蜂窝夹芯板添加颗粒的位置与填充量, 比较不同填充方式下蜂窝夹芯板的位移和应力应变, 判断其吸能机制, 寻求最佳的填充范围与填充量.

宋延泽在研究泡沫铝子弹撞击下多孔金属夹芯板的塑性动力响应^[10]时, 曾经用 ls - dyna 对撞击过程进行仿真. 本文参照其仿真方法, 对冲击载荷下蜂窝夹芯板的动力学响应进行研究.

1 仿真方法与内容

实验采用 ansys/ls - dyna 软件进行仿真数值计算, 模拟子弹中速撞击蜂窝夹芯板的过程, 其有限元模型见图 1. 子弹与颗粒均选择实体单元 SOLID164, 蜂窝夹芯板选择壳单元 SHELL163.

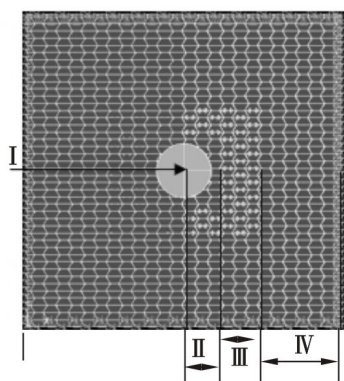


图 1 蜂窝夹芯板的有限元模型与区域划分

Fig. 1 FEM model of the panel and its regional division

蜂窝夹芯板芯层采用正六边形, 边界为四边固支, 考虑到颗粒在承受冲击后会产生激振, 依据哈密顿原理其受迫振动的动力学方程为^[11]

$$f(x, y) = - \int_0^t \int_{-h/2}^{h/2} \int_R (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \sigma_{xy} \delta \gamma_{xy} + \sigma_{yz} \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dAdzdt + \int_0^t \int_R F \cos(\Omega t) \cdot \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta w dt + \frac{1}{2} \delta \int_0^t \int_{-h/2}^{h/2} \int_R \rho [(u')^2 + (v')^2 + (w')^2] dAdzdt.$$

其中 $f(x, y)$ 为撞击时颗粒产生的激振力.

本文旨在研究中速冲击载荷下的蜂窝夹芯板的动力学特征, 而中等速度一般在 11 ~ 16 m/s, 因此子弹速度取中间值, 定为 13 m/s. 考虑到可能存在边界效应影响, 蜂窝夹芯板尺寸不宜过小, 因此长宽均定为 0.15 m. 蜂窝板与子弹之间的接触为 ansys/ls - dyna 中 surface to surface 的 Eoriding, 颗粒与蜂窝板、颗粒与颗粒、子弹与颗粒间接接触均选择 surface to surface 中 Automatic.

蜂窝夹芯板在承受冲击载荷后, 应力、应变等

响应以波的形式传递. 本文研究颗粒的填充范围 (FR) 与每个胞元中颗粒填充数目 (QFP) 对于蜂窝夹芯板吸能机制的影响, 充分考虑有限元仿真的计算机时与其动力学响应的传播方式, 最终选取蜂窝夹芯板的颗粒填充方式如表 1 所示. 填充颗粒后, 将整体板划分为四个区域: 撞击点 I, 撞击点到填充区域的过渡区 II, 填充区域 III, 外围区域 IV (见图 1).

表 1 蜂窝夹芯板的颗粒填充方式

Table 1 Methods of filling particles on honeycomb sandwich panel

填充范围 (III/III + IV)	0.2	0.25	0.33	0.5
填充颗粒数	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4

在子弹冲击载荷下, 分别将蜂窝夹芯板在不同颗粒填充条件下与不填充颗粒的位移、等效应力、等效应变进行对比, 找到最佳的颗粒填充范围与填充数, 使得蜂窝夹芯板具有最好的能量吸收机制.

2 仿真结果与分析

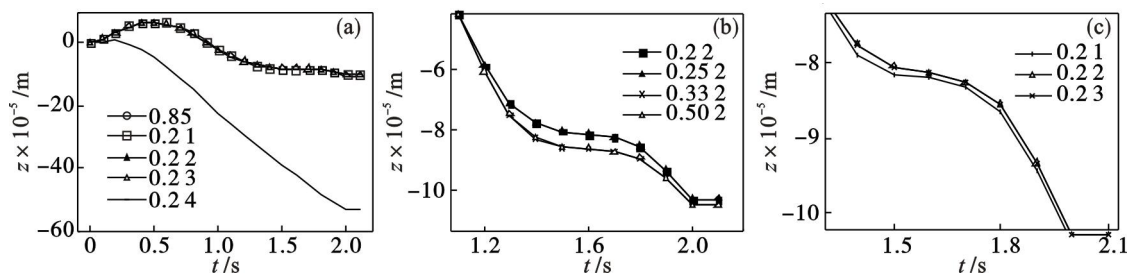
比较不同区域以及整个蜂窝夹芯板在撞击下的动力学响应 (图 2 ~ 图 10), 探究不同条件下蜂窝夹芯板的动力学特征, 找到最优的填充区域和最合适的填充颗粒数, 使得蜂窝夹芯板具有最佳的吸能机制. 图示中为 0.85 的曲线均表示未添加颗粒的蜂窝夹芯板.

2.1 蜂窝夹芯板的位移响应

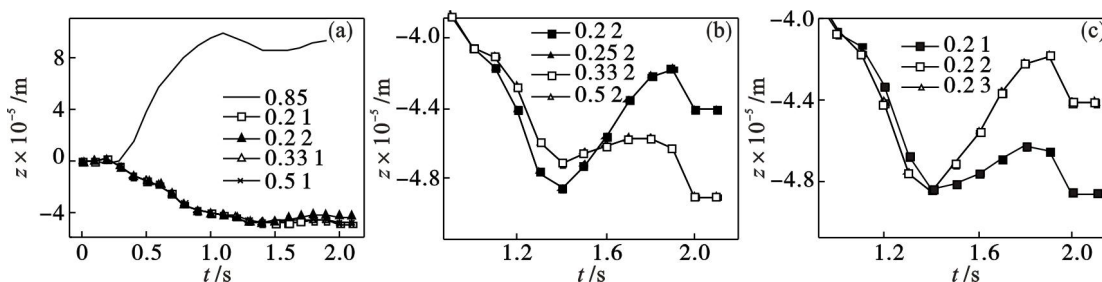
从图 2 到图 5 可以看出, 蜂窝夹芯板添加颗粒后, 承受冲击载荷时位移明显减小, 位移降幅最低达 30%, 最高达 80%; 颗粒填充率在 0.2 ~ 0.25 之间时, 蜂窝板的位移降幅最大; 超过 0.25 后, 随着填充率继续增大, 蜂窝板位移略有增大; 每个胞元填充 2 个颗粒数即可, 再多则吸能效果无明显改善.

从图 6 看, 对于整个板而言, 从边缘到撞击点, 位移逐渐增大. 添加颗粒后, 蜂窝板的位移明显减小; 颗粒填充率为 0.2 ~ 0.25 时, 蜂窝板位移减小最大, 吸能最好; 超过 0.25 后随着填充率的增加, 位移增大; 每个胞元添加颗粒为两个时, 位移最小, 再多则吸能效果无明显改善.

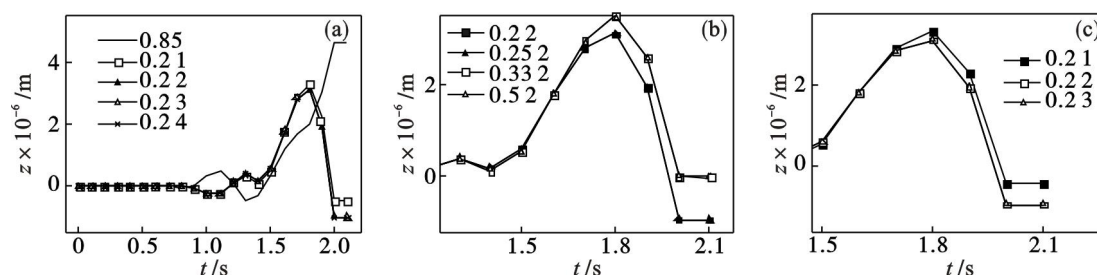
等效应力、等效应变呈现的规律与位移一致. 由于篇幅的限制, 其余两种响应只写出外围区域和整个蜂窝板的响应.

图2 不同条件下撞击点处 z 方向位移Fig. 2 z displacement under different additions at the impact point

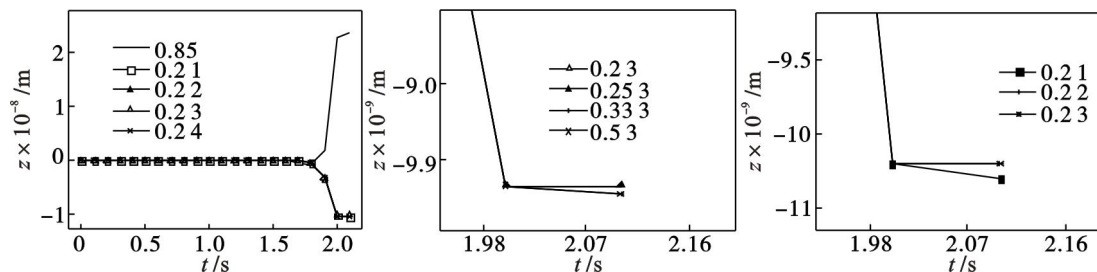
(a)—FR 为 0.2 时不同 QFP 与未填充颗粒的 $z-t$ 曲线; (b)—QFP 为 2 时不同 FR 的 $z-t$ 曲线;
(c)—FR 为 0.2 时不同 QFP 的 $z-t$ 曲线.

图3 不同条件下过渡区 z 方向位移Fig. 3 z displacement under different additions at transitional region

(a)—FR 为 0.2 时不同 QFP 与未填充颗粒 $z-t$ 曲线; (b)—QFP 为 2 时不同 FR 的 $z-t$ 曲线;
(c)—FR 为 0.2 时不同 QFP 的 $z-t$ 曲线.

图4 不同条件下颗粒填充区 z 方向位移Fig. 4 z displacement under different additions at filling grain region

(a)—FR 为 0.2 时不同 QFP 与未填充颗粒 $z-t$ 曲线; (b)—QFP 为 2 时不同 FR 的 $z-t$ 曲线;
(c)—FR 为 0.2 时不同 QFP 的 $z-t$ 曲线.

图5 不同条件下外边缘区 z 方向位移Fig. 5 z displacement under different additions at outside region

(a)—FR 为 0.2 时不同 QFP 与未填充颗粒 $z-t$ 曲线; (b)—QFP 为 3 时不同 FR 的 $z-t$ 曲线;
(c)—FR 为 0.2 时不同 QFP 的 $z-t$ 曲线.

2.2 蜂窝夹芯板的等效力响应

从图 7 看,添加颗粒后边缘区域最大应力减小;填充率为 0.2~0.25 时,最大应力较小;超过

0.25 后随着填充率增大,最大应力增大;每个胞元填充颗粒为两颗时,最大应力较小,再添加颗粒最大应力无明显变化.

从图8看,对于整个板而言,添加颗粒后最大应力减小;填充率为0.2~0.25时最大应力减小幅度较大,但是在过渡区域会呈现波动;超过

0.25后填充率增加,最大应力增大;每个胞元填充两个颗粒时最大应力减小最明显,再添加颗粒最大应力无明显减小。

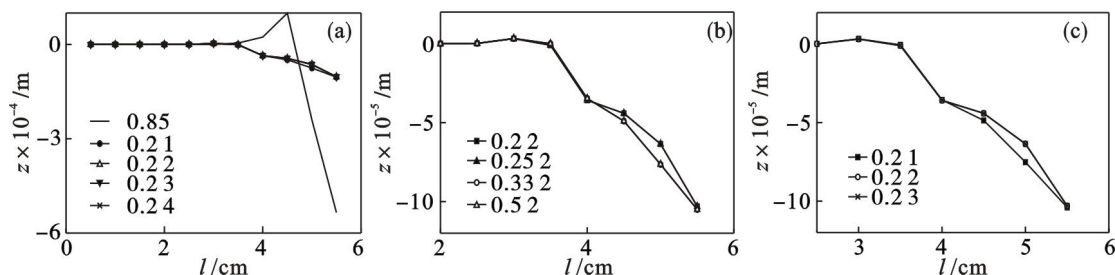


图6 整个蜂窝板不同条件下z方向位移

Fig. 6 z displacement under different additions at the whole honeycomb sandwich panel

(a)—FR为0.2时不同QFP与未填充颗粒 $z-l$ 曲线; (b)—QFP为2时不同FR的 $z-l$ 曲线; (c)—FR为0.2时不同QFP的 $z-l$ 曲线。

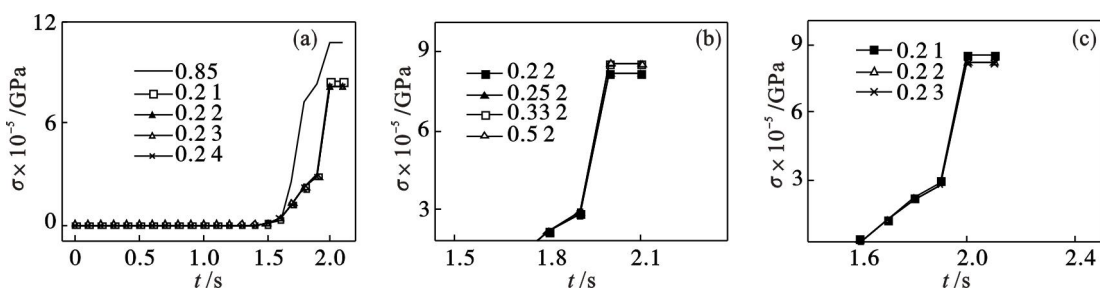


图7 不同条件下边缘区等效应力

Fig. 7 von Mises stress under different additions at outside region

(a)—FR为0.2时不同QFP与未填充颗粒 $\sigma-t$ 曲线; (b)—QFP为2时不同FR的 $\sigma-t$ 曲线; (c)—FR为0.2时不同QFP的 $\sigma-t$ 曲线。

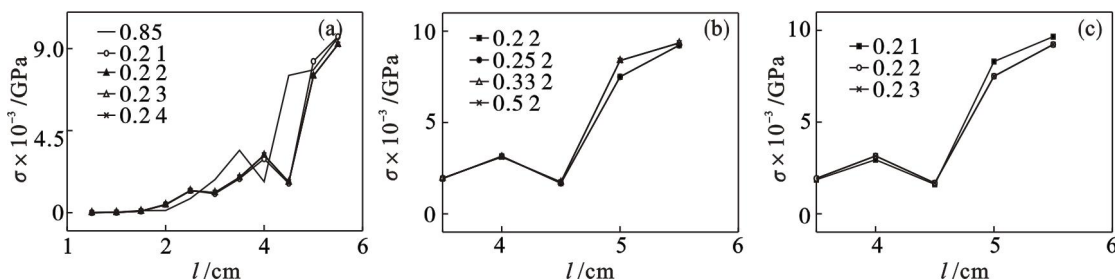


图8 整个蜂窝板不同条件下等效应力

Fig. 8 von Mises stress under different additions at the whole honeycomb sandwich panel

(a)—FR为0.2时不同QFP与未填充颗粒 $\sigma-l$ 曲线; (b)—QFP为2时不同FR的 $\sigma-l$ 曲线; (c)—FR为0.2时不同QFP的 $\sigma-l$ 曲线。

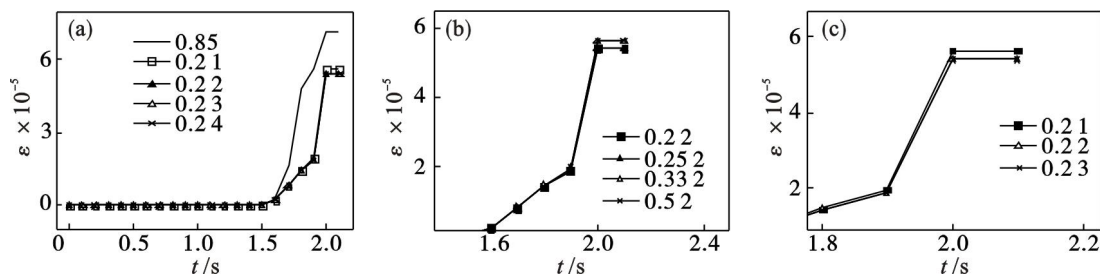


图9 不同条件下边缘区等效应变

Fig. 9 von Mises strain under different additions at outside region

(a)—FR为0.2时不同QFP与未填充颗粒 $\epsilon-t$ 曲线; (b)—QFP为2时不同FR的 $\epsilon-t$ 曲线; (c)—FR为0.2时不同QFP的 $\epsilon-t$ 曲线。

2.3 蜂窝夹芯板的等效变形响应

从图 9 看,在边缘区域,添加颗粒后,蜂窝板的等效应变减小;填充率为 0.2~0.25 之间,等效应变略有减小;超过 0.25 后,随着填充率的增大,等效应变增大;每个胞元填充两个颗粒时,等效应变较小,再添加等效应变无明显减小。

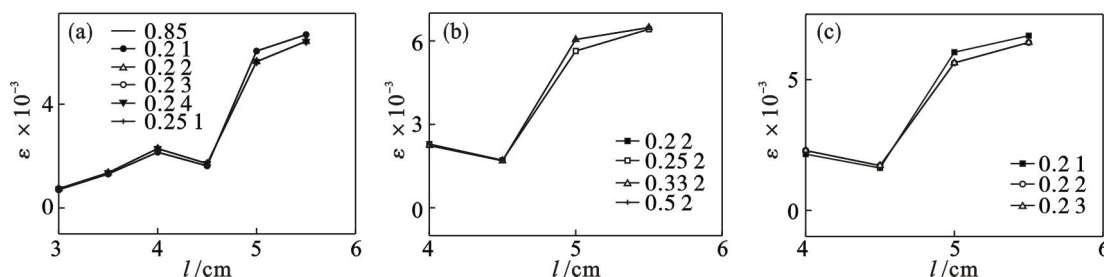


图 10 整个蜂窝板不同条件下等效应变

Fig. 10 von Mises strain under different additions at the whole honeycomb sandwich panel

(a)—FR 为 0.2 时不同 QFP 与未填充颗粒 $\varepsilon-l$ 曲线; (b)—QFP 为 2 时不同 FR 的 $\varepsilon-l$ 曲线; (c)—FR 为 0.2 时不同 QFP 的 $\varepsilon-l$ 曲线。

3 结 论

1) 蜂窝夹芯板在填充颗粒后,承受冲击载荷时,位移、应力、应变均有显著减小,能量吸收机制显著增强。

2) 颗粒填充率为 0.2~0.25 时,填充颗粒下的蜂窝夹芯板具有最好的吸能效果。填充率超过 0.25 后,过大的填充率对蜂窝板起激振作用。

3) 每个胞元填充颗粒为两个时,填充颗粒下的蜂窝夹芯板具有最好的吸能效果。每个胞元填充颗粒超过两个,不会提高蜂窝板的吸能效果。

参考文献:

- [1] 管公顺,庞宝君,崔乃刚,等. 铝球弹丸超高速正撞击薄铝板穿孔尺寸研究[J]. 工程力学,2007,24(12):181-185.
(Guan Gong-shun, Pang Bao-jun, Cui Nai-gang, et al. Size investigation of hole due to hypervelocity impact aluminum spheres on thin aluminum sheet[J]. *Engineering Mechanics*, 2007,24(12):181-185.)
- [2] 何永亮. 低速冲击下蜂窝夹层板损伤标识量的提取研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
(He Yong-liang. Study on damage detection of honeycomb sandwich plate with low velocity impact damage [D]. Shenyang:Northeastern University,2011.)
- [3] Fleck A N, Deshpande S V. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*,2004,71(3):386-401.
- [4] Schonberg W P, Mohamed E. Analytical hole diameter and

从图 10 看,对于整个蜂窝板而言,添加颗粒后等效应变明显减小;填充率为 0.2~0.25 时,蜂窝板的等效应变较小,在过渡区域会呈现波动;超过 0.25 后,随着填充率的增大,蜂窝板的等效应变增大;每个胞元填充颗粒数为 2 时,蜂窝板的等效应变较小,再添加等效应变无明显变化。

crack length models for multi-wall systems under hypervelocity projectile impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*,1993,23(1):835-864.

- [5] Sawle D R. Hypervelocity impact in thin sheets, semi-infinite targets at 15 km/s [C]// AIAA Hypervelocity Impact Conference. Cincinnati, 1969:69-378
- [6] Maiden C J, McMillan A R. An investigation of the protection afforded a spacecraft by a thin shield[J]. *AIAA Journal*,1964,2(11):1992-1998.
- [7] Nysmith C R, Denardo B P. Experimental investigations of momentum transfer associated with impact into thin aluminum targets[R]. NASA TND-5492. Washington, DC, 1969.
- [8] Hutchinson J W, Xue Z. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*,2005,47(4):545-569.
- [9] Xue Z, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*,2004,30(10):1283-1305.
- [10] 宋延泽. 泡沫铝子弹撞击下多孔金属夹芯板的塑性动力响应研究[D]. 太原:太原理工大学,2009.
(Song Yan-ze. Investigation on plastic dynamic response of sandwich plates with cellular metallic materials subjected to foam aluminium projectile impacting [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009)
- [11] 李永强,李锋,何永亮. 四边固支铝基蜂窝夹层板弯曲自由振动分析[J]. 复合材料学报,2011,28(3):210-216.
(Li Yong-qiang, Li Feng, He Yong-liang. Flexural vibration analysis of honeycomb sandwich plate with completely clamped support [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011,28(3):210-216.)