DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0888-07

球头落锤冲击下金字塔点阵夹芯板结构的动态响应实验*

张振华,钱海峰,王媛欣,牟金磊,梅志远,牛　闯
(海军工程大学舰船工程系,湖北 武汉 430033)

摘要:为研究金字塔点阵夹芯板结构在球头落锤碰撞冲击下的抗冲击性能,采用模型实验的方法,加工制作了金字塔点阵4层夹芯板实验模型。通过实验得到了金字塔点阵夹芯板结构在碰撞冲击载荷作用下的坍塌变形过程和变形模式,揭示了点阵结构夹芯层的吸能机理。结果表明,在球头落锤的中等强度冲击载荷下,整个夹芯板结构的最终变形可划分为迎冲面、夹层和背冲面3个区域,形成类似"三明治"式的变形模式。

关键词:固体力学;抗冲击性能;碰撞冲击;夹芯板结构;金字塔点阵

中图分类号:O347.3　　**国标学科代码**:13015　　**文献标志码**:A

近年来,随着材料制备和机械加工技术的迅速发展,轻质多孔点阵材料受到航空航天飞行器和舰船等运载设备等诸多领域的广泛关注[1-2],是极具潜力的先进轻质高强多功能材料。点阵材料与传统材料的最大不同在于其具有千变万化的微结构和高孔隙率[3-4],因而具备许多特有的优良性能,包括轻质、高强、抗爆、抗弹道冲击、高效散热、隔热、电磁隐身性能、吸声性能以及可设计性等特点[5]。

H. N. G. Wadley 等[6-7]通过实验研究了不同拓扑结构的多层夹芯结构作为船壳结构在冲击载荷下的防护能力,并研究了金字塔点阵结构在水下爆炸冲击作用下的压缩响应;Z. Wei 等[8]通过数值模拟和实验的方法比较了金属板和夹芯板在局部冲击载荷下响应的差异,并比较了其抗冲击性能;Z. Xue 等[9]比较了铝合金三棱锥桁架夹芯圆板和实体圆板的冲击力学行为;G. W. Kooistra 等[10]研究发现单位体积或单位质量吸收较低的冲击能量时,采用蜂窝材料更具有优势,但点阵材料更适合于要求单位体积或单位质量吸收冲击能量较高的工况。从已经发表的文献中可以看出,金字塔点阵结构具有较强的抗冲击性能,但目前对金字塔点阵材料的抗冲击性能的研究尚在起步阶段。

本文中对金字塔点阵夹芯板结构进行球头落锤冲击实验,探讨金字塔点阵夹芯板结构在大质量低速碰撞冲击载荷下的抗冲击性能,研究其坍塌变形过程和吸能机理,为后续的理论分析提供实验支撑。

1　实验设计和实施

1.1　模型设计

碰撞实验模型由金字塔点阵夹芯板结构、支座和压条3部分组成。其中金字塔点阵夹芯板结构为冲击对象,从上至下依次由上面板、金字塔单元结构、层间板和下面板组成。其中金字塔单元结构为钢筋材料,板结构材料为普通钢,具体结构尺寸如下。

(1)金字塔单元结构:金字塔单元结构为金字塔点阵结构的基本组成部分,点阵结构由金字塔单元按照一定的方向周期性重复排列构成。每个金字塔单元由4个杆元和上下面板单元组成。其中每个杆元的长度为50 mm,杆元直径为3.8 mm,每个杆元与其在下面板的投影的夹角为45°,金字塔单元上面板和下面板为正方形,边长为50 mm。由杆元组成的金字塔的高度为35.36 mm。图1为金字塔单元

* **收稿日期**:2014-05-16;**修回日期**:2014-09-27
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目;国家自然科学基金面上项目(51479205);国家自然科学基金项目(51309231)
第一作者:张振华(1976—　),男,博士,副教授;**通讯作者**:王媛欣,1016648121@qq.com。

结构的设计尺寸图。

已知金字塔单元结构杆元的欧拉应力为：

$$\sigma_{\mathrm{E}}=\frac{k^2\pi^2 EI}{Al^2} \tag{1}$$

式中：k 为杆端刚度旋转因子，将杆元的两端视为固支，则取 $k=2$；E 为材料弹性模量；I 为杆元的惯性矩；A 为杆元截面积；l 为杆元长度。由图 1 中的参数得到杆元的欧拉应力为 2 924 MPa。对金字塔单元的杆元试件做准静态压缩实验，得到杆元发生塑性屈曲的临界应力$\sigma_{\mathrm{cr}}=509$ MPa。杆元的塑性屈服应力和塑性屈曲应力的关系为[11]：

$$\sigma_{\mathrm{cr}}=\sigma_{\mathrm{s}}\left(1-\frac{\sigma_{\mathrm{s}}}{4\sigma_{\mathrm{E}}}\right) \tag{2}$$

求解式(2)得到杆元的屈服破坏应力 $\sigma_{\mathrm{s}}=532$ MPa。比较各破坏应力可初步判断金字塔单元在压缩载荷作用下首先发生塑性屈曲破坏模式。

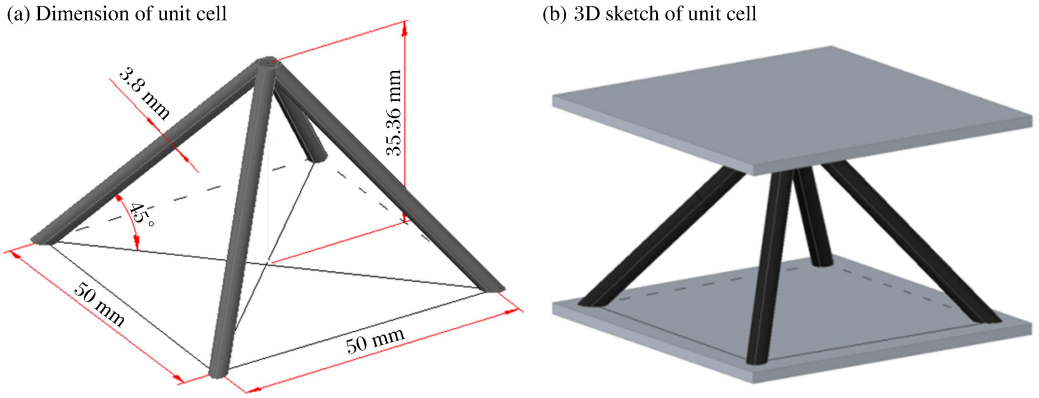

图 1 金字塔单元结构的设计尺寸图

Fig. 1 Dimension of unit cell of pyramidal lattice structure

(2)金字塔点阵夹芯板结构：实验模型共有 4 层夹芯层，每层由金字塔单元结构按 10×10 在两个方向上排列，夹芯层的高度为 35.36 mm；上面板厚 5 mm，尺寸为 560 mm×560 mm；层间板厚 2 mm，尺寸为 550 mm×550 mm；下面板厚 5 mm，尺寸为 700 mm×700 mm。为使实验模型下面板四周为固支边界，在下面板上加工直径为 15 mm 的圆孔 24 个，下面板上的每个圆孔间距相等，均为 100 mm，如图 2 所示。

(3)支座和压条结构：支座为夹芯板结构提供支撑边界，压条的作用是将模型下面板固支在支座上。支座板厚 15 mm，内空高 200 mm，实验模型装配后如图 3 所示。

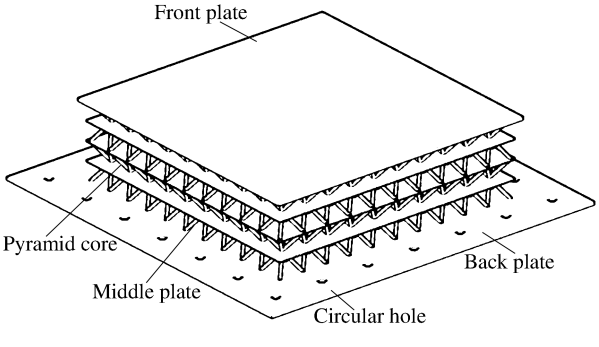

图 2 金字塔点阵夹芯板结构设计图

Fig. 2 Design chart of multilayered pyramidal lattices

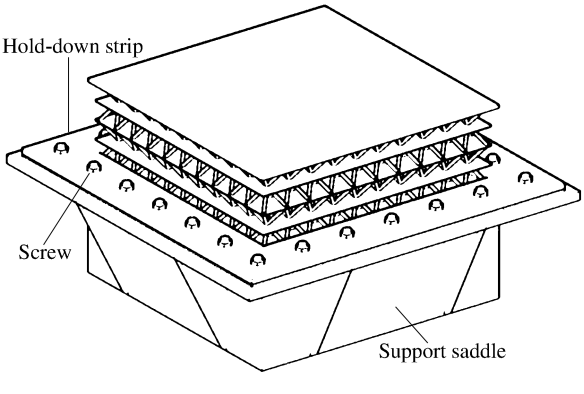

图 3 模型装配设计图

Fig. 3 Assemble chart of multilayered pyramidal lattices

1.2 实验实施

(1)冲击实验架和模型定位

将模型放置在冲击实验槽的底部,使其处于水平平稳状态。冲击实验架放置于模型的正上方。冲击实验架中设置了导轨,以确保落锤可以垂直下落。考虑到高速摄影仪的视野,模型置于冲击实验槽中的位置如图 4 所示,冲击实验架和模型定位情况如图 5 所示。



图 4 实验实施情况

Fig. 4 The testing ground

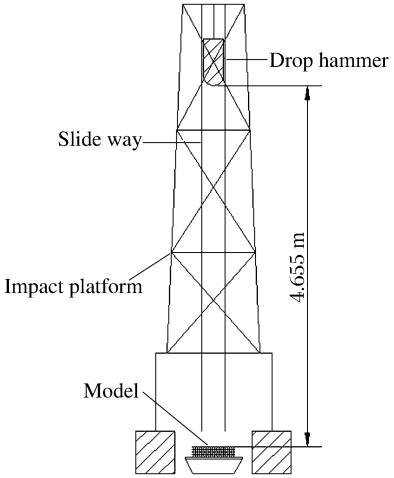

图 5 冲击架和模型定位情况

Fig. 5 The location of the model

(2)落锤安装及工况设定

冲击实验架的最大设计落高为 5 m,最大设计碰撞速度为 9.9 m/s。碰撞实验的落锤质量设定为 220 kg,由 2 个 80 kg 圆柱形落锤和 1 个 60 kg 球头落锤通过连杆拼接而成,落锤的形状和尺寸如图 6 所示。

(3)起吊落锤实施碰撞

由于实验为大质量冲击实验,作用到结构上的冲击载荷随落高变化比较敏感,因此必须对落锤进行准确定位以确保冲击载荷准确。通过滑轮将落锤起吊至冲击实验架顶端,对落锤与模型的相对位置进行了校核,确保其中心在同一条垂线上,测量得到模型上表面至落锤下端的实际距离为 4.655 m,预计落锤自由下落至模型上面板时的速度为 9.6 m/s。确定高速摄影处于待触发状态,拉开控制开关实施碰撞冲击。

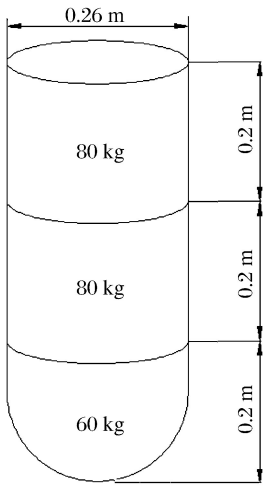

图 6 落锤尺寸图

Fig. 6 Dimension of the drop hammer

2 实验结果与分析

2.1 高速摄影及数据处理

实施冲击后,对高速影像进行处理。以落锤开始下落为零时刻,对 0.965～0.986 s 之间的 22 张高速摄影照片进行处理,每帧图片之间的时间间隔为 0.001 s。如图 7 所示,在 0.975 s 时落锤接触到金字塔点阵夹芯板结构的上面板。

对高速摄影数据进行处理,可以得到落锤在不同时刻的位移和速度。图 8～9 给出了落锤位移和速度的时程曲线。由图 8 看出,在落锤与实验模型发生碰撞之前,位移-时间曲线与自由下落的位移-时间

曲线相吻合；在开始碰撞后的 3 ms 之内，落锤与上面板中心点保持相同的速度向下移动，随后位移趋于稳定。由图 9 看出，在落锤与实验模型发生碰撞之前，落锤的速度在自由下落的速度附近波动，这是因为落锤下落时周围有导轨，虽然控制了落锤水平方向的位移，但导轨与落锤产生的摩擦力使落锤速度产生波动。当落锤与模型发生碰撞之后，落锤速度急剧降低，并在 0.985 s 左右速度降为零。

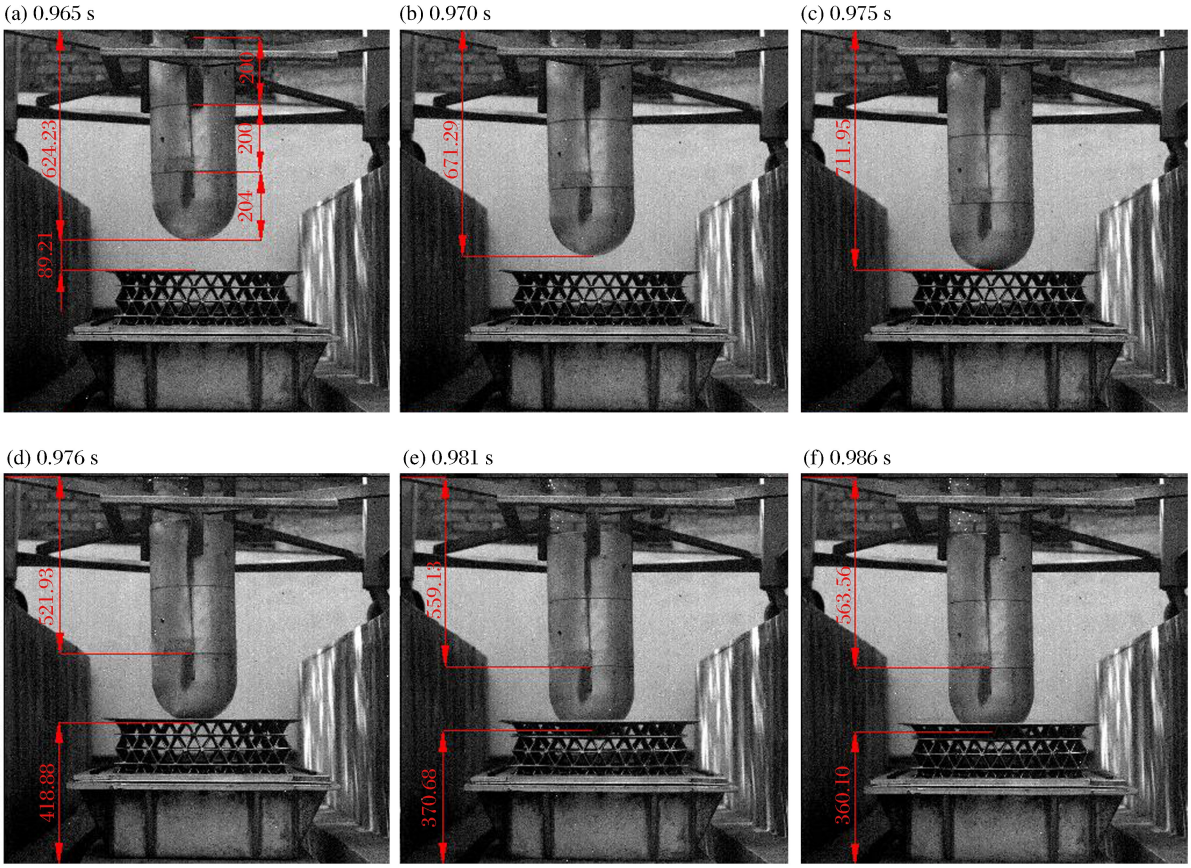

图 7 高速摄影影像(单位：mm)

Fig. 7 High-speed photographic image(unit: mm)

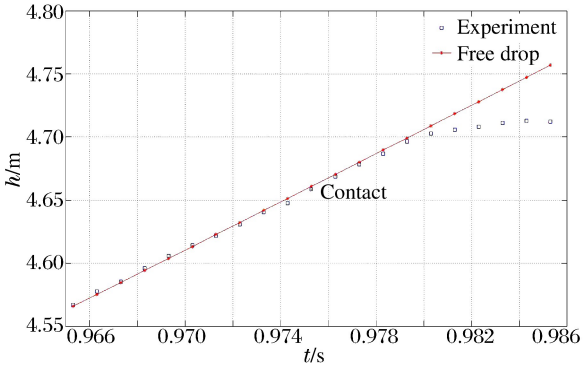

图 8 落锤的位移时程图

Fig. 8 Displacement of drop hammer

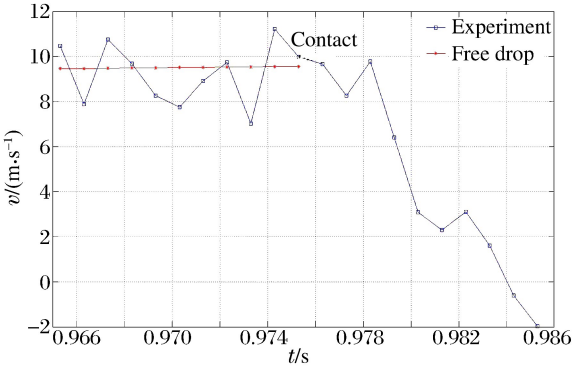

图 9 落锤的速度时程

Fig. 9 Speed histories of drop hammer

对高速摄影中实验模型上面板的坍塌过程进行数据处理，得到上面板中心点的坍塌位移和速度，对实验数据进行拟合，得到坍塌位移和速度时程曲线如图 10～11 所示。上面板中心点的坍塌位移和速度

的拟合曲线分别为：

$$\begin{cases}\omega(t) = -500t^2 + 980t - 480 \\ v(t) = -12\ 000t^2 + 22\ 000t - 10\ 000\end{cases} \tag{3}$$

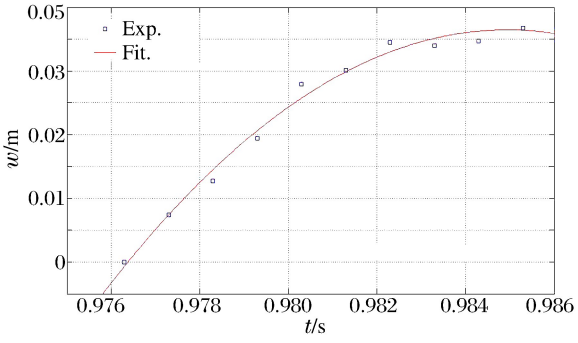

图 10 上面板中心点坍塌位移拟合曲线

Fig. 10 Displacement history of central point of front plate

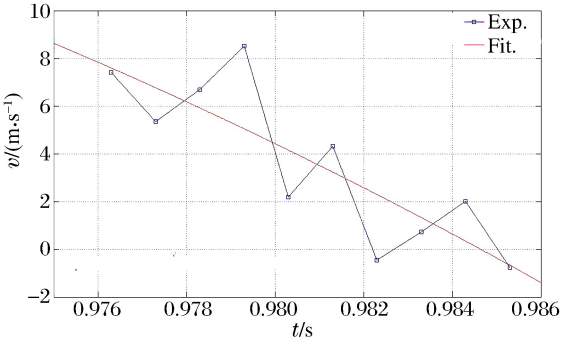

图 11 上面板中心点坍塌速度拟合曲线

Fig. 11 Speed history of central point of front plate

2.2 模型损伤分析

碰撞结束后观测到的金字塔点阵夹芯板结构实验模型如图 12 所示。上面板变形如图 13 所示，可以看到实验模型的上面板有较大的内凹变形，呈抛物线形，芯层结构整体略向下沉。实验模型下面板存在少量变形，如图 14 所示。

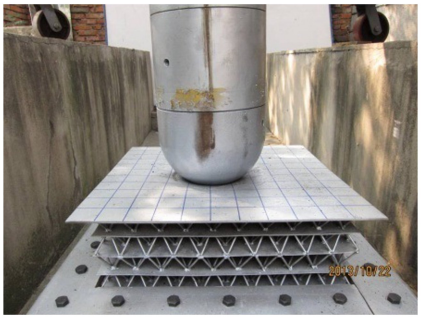

图 12 模型整体破坏情况图

Fig. 12 Model after collision

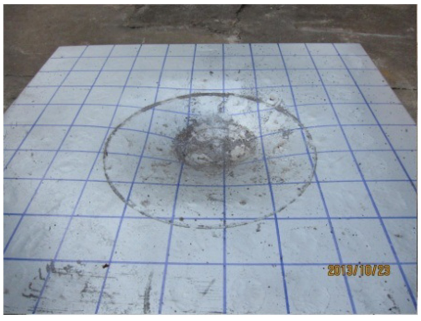

图 13 上面板凹陷情况图

Fig. 13 Distortion of front plate

实验之前在模型四边上各取两点测量模型的芯层厚度，取平均值，得到芯层厚度为 164.4 mm。冲击实施后采用相同方法测量芯层厚度为160.3 mm，故芯层压缩量为 4.1 mm。观察到上面板和下面板的最大变形均处于板的中心位置，最大变形值分别为 36、6 mm。夹芯层整体变形情况如图 15 所示。可以看到，与上面板相接的第 1 层夹芯层和与下面板相接的第 4 层夹芯层的压缩变形较大，而处于中间的第 2～3 夹芯层变形相对较小。仔细观察模型可以发现受到碰撞冲击之后，其变形主要分为以下 3 个区域：



图 14 下面板变形情况

Fig. 14 Distortion of back plate

(1)迎冲面区域：主要包括与落锤接触的上面板中心区域，以及与上面板中部相邻的第 1 层夹芯结构。在该区域，上面板由于直接受到大质量落锤的撞击，表面产生与球形锤头相匹配的内凹塑性变形。与上面板相邻的第 1 层夹芯结构由于受到上面板传递过来的冲击力作用，在中心部分的金字塔单元结

构也相应的发生塑性屈曲变形。

(2)背冲面区域:主要包括下面板以及与下面板相邻的第 4 层夹芯结构。由于该区域四周受到边界的固定约束,因此当碰撞产生的应力波传递到边界时,会在结构中产生反射的压缩应力波。入射波和反射波在背冲面汇聚,使得该区域结构产生永久塑性变形,其中下面板表现出整体内凹的变形模式,金字塔单元结构表现出塑性屈曲的变形模式。

(3)夹层区域:主要包括除去迎冲面和背冲面的其他区域。当碰撞冲击强度并不是很强时,由迎冲面传递过来的应力波和背冲面反射过来的压缩波均不足以使其发生破坏,从而表现出弹性振荡的变形模式。当然在碰撞冲击强度足够的情况下,夹层区域也会部分甚至全部产生坍塌破坏。

由实验结果看出,在中等碰撞冲击强度下,金字塔点阵夹芯板结构产生迎冲面、背冲面和夹层 3 个变形区域,形成类似"三明治"的变形模式,即由产生永久变形的迎冲面和背冲面夹裹着弹性变形的夹层区域。金字塔单元结构则存在弹性变形和塑性屈曲两种变形模式,塑性屈曲出现于迎冲面和背冲面区域,而夹层区域大部分属于弹性变形,如图 15 所示。

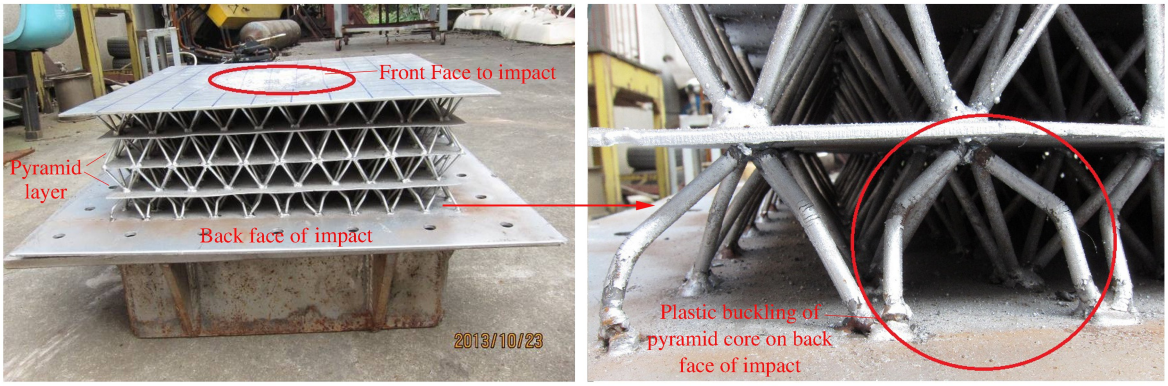

图 15 夹芯层整体变形情况

Fig. 15 View of the damaged core layers

3 结 论

加工制作了金字塔点阵夹芯板结构的实验模型,并在下面板固支的边界条件下实施了球头落锤的冲击实验,得到了球头落锤的位移和速度时程拟合曲线、上面板坍塌的位移和速度时程曲线以及金字塔点阵夹芯板结构的永久变形,并得到以下结论:

(1)在球头落锤中等强度的碰撞冲击下,金字塔点阵夹芯板结构产生了迎冲面、背冲面和夹层 3 个变形区域,形成类似"三明治"的变形模式,即由产生永久变形的迎冲面和背冲面夹裹着弹性变形的夹层区域。

(2)在球头落锤冲击载荷下,金字塔点阵夹芯板结构的上面板产生与球形锤头相匹配的内凹塑性变形,上面板中心点坍塌的位移时程曲线近似为二次抛物线。与上面板相邻的的金字塔单元结构发生相应的塑性屈曲变形。

(3)背冲面区域的下面板表现出整体内凹的变形模式,与其相邻的夹芯层金字塔单元结构表现出塑性屈曲的变形模式。在碰撞强度不是很大时,迎冲面和背冲面之间的夹层区域表现出弹性振荡的变形模式。而在冲击具有足够强度的情况下,夹芯层区域也会产生整体坍塌变形。

参考文献:

[1] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展,2006,36(4):517-535.
Lu Tian-jian, He De-ping, Chen Chang-qing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. Advances in Mechanics, 2006,36(4):517-535.

[2] 范华林,杨卫.轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展[J].力学进展,2007,37(1):99-112.
Fan Hua-lin, Yang Wei. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. Advances in Mechanics, 2007,37(1):99-112.
[3] Evans A G. Lightweight materials and structures[J]. Materials Research Bulletin, 2001,26:790-797.
[4] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. Progress in Materials Science, 2001,46(3):309-327.
[5] 方岱宁,张一慧,崔晓东.轻质点阵材料力学与多功能设计[M].北京:科学出版社,2009:5-9.
[6] Wadley H N G. Blast and fragment protective sandwich panel concepts for stainless steel monohull designs[R]. ADA488340, 2008.
[7] Wadley H, Dharmasena K, Chen Y, et al. Compressive response of multilayered pyramidal lattices during underwater shock loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35:1102-1114.
[8] Wei Z, DeshpandeVS, Evans A G, et al. The resistance of metallic plates to localized impulse[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008,56(5):2074-2091.
[9] Xue Z, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistance metal sandwich plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30:1283-1305.
[10] Kooistra G W, Deshpande V S, Wadley H. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structure made from aluminum[J]. Acta Materialia, 2004,52(14):4229-4237.
[11] 吴梵,朱锡,梅志远.船舶结构力学[M].北京:国防工业出版社,2010:187-195.

Experiment of dynamic response of multilayered pyramidal lattices during ball hammer collision loading

Zhang Zhen-hua, Qian Hai-feng, Wang Yuan-xin,
Mou Jin-lei, Mei Zhi-yuan, Niu Chuang
(*Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei*, *China*)

Abstract: To investigate the shock resistance of multi-layered pyramidal lattice panels impacted by a ball hammer, we carried out an experiment of 4-layered pyramidal lattices under the impact of a ball hammer, analyzed the collapse deformation process and mode, and put forward the energy absorption mechanism. Our results show that, when subjected to a medium impact of a ball hammer, the final deformation of the multilayered pyramidal lattice panels can be composed of three parts where deformation occurs: head-on, interlayer, and backside, thus forming a "sandwich"-like deformation mode.
Key words: solid mechanics; shock resistance; impact; composite sandwich; pyramidal lattices

(责任编辑　曾月蓉)