DOI: 10.11883/bzycj-2016-0232
文章编号: 1001-1455(2018)02-0373-08

冰雹撞击下泡沫铝夹芯板的动态响应*

张永康[1],李玉龙[2],汤忠斌[2],杨 洪[1],许 海[1]
(1.苏州市职业大学机电工程学院,江苏 苏州 215104;
2.西北工业大学航空学院,陕西 西安 710072)

摘要: 在传统单层泡沫夹芯结构的上、下面板之间插入中面板,通过移动中面板的位置,获得了外形尺寸相同、质量相等的 5 种构型夹芯结构,其上层芯材与芯材总厚度比分别为 0∶30、10∶30、15∶30、20∶30 和 30∶30。在量纲分析的基础上,应用非线性动力有限元程序 LS-DYNA 对 5 种构型夹芯结构进行了冰雹撞击数值分析,研究了中面板位置对夹芯板的能量吸收、能量耗散和动态响应的影响。结果表明:中面板的存在对下层芯材能形成有效的保护;随着中面板位置由上向下移动,夹芯板的抗撞击性能呈现由大到小再增大的态势。数值计算结果对抗冰雹撞击夹芯结构的优化设计具有一定的参考价值。

关键词: 泡沫铝夹芯板;冰雹;撞击;量纲分析;LS-DYNA
中图分类号: O344.4;V214.1 **国标学科代码**: 1301570 **文献标志码**: A

航空飞行器在飞行中,除了飞鸟的撞击,冰雹对飞行器结构的撞击也具有潜在的威胁[1]。冰雹是由强对流天气引发的一种剧烈天气现象,当航空飞行器在这种严酷的环境下作业,其迎风面构件极易受到冰雹撞击而造成严重的损伤。尽管这些部件主要起到承受气动荷载的作用,但他们往往同时是内部油路系统、控制管线或电气系统的防护屏障,一旦受到撞击破坏,将会对飞行安全造成严重影响,甚至引发灾难性事故。因此,航空结构在冰雹撞击下的安全性是飞机设计中一个非常重要的问题。

泡沫铝夹芯复合结构作为冲击防护结构在航空航天、高速列车、船舶等领域得到广泛的应用,它不仅具有质量小、比强度大、比刚度大的特点,而且还具有优异的能量吸收性能[2]。已有许多学者对夹芯复合结构的抗冲击性能进行了数值模拟和实验研究。Hanssen 等[3]针对鸟体撞击泡沫铝夹心板建立了流固耦合模型,用来预测泡沫铝夹心板避免穿透的最小厚度。Hou 等[4]研究了钢弹侵彻泡沫铝夹芯板的力学特性,探讨了钢弹形状对弹道极限速度和能量吸收的影响。祖国胤等[5]对沫铝夹芯板进行了低速冲击实验,分析了两种夹芯板在低速冲击下的力学响应及破坏形式。杨飞等[6]、李志斌等[7]在泡沫铝夹芯板的侵彻性能研究中发现,面板吸收了绝大多数冲击能量,增加面板厚度、芯层厚度和芯层密度均能有效提高夹芯板的抗侵彻能力。张培文等[8]通过数值模拟,分析了面板厚度及芯层厚度对夹芯板抗爆性能的影响规律。以上研究大多是针对单层夹芯结构,且上、下面板的厚度相等;而通过增加面板厚度、芯层厚度或芯层相对密度来提高夹芯结构的抗撞击性能,必然导致结构的质量增大,直接影响航空飞行器的载重量和飞行性能。

本文中,在传统单层夹芯结构的上、下面板之间插入中面板,在泡沫铝夹芯板的质量和总厚度保持不变的前提下,通过移动中面板的位置,得到 5 种构型泡沫铝夹芯结构,并借助量纲分析和数值模拟,分析中面板位置对夹芯板动态响应的影响,探讨不同构型结构的破坏模式和吸能、耗能机理。

1 量纲分析

冰雹撞击泡沫铝夹芯板模型如图 1 所示。撞击体为冰雹,夹层结构由 5 部分组成,即上、中、下面板和上、下层芯材。中面板将传统单层夹芯结构的芯材分割为上、下两层。

* **收稿日期**: 2016-08-16; **修回日期**: 2016-12-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(11372206)
第一作者: 张永康(1977—),男,博士,副教授,npuzhangyk1@163.com。

以下分析在夹芯结构的质量和总厚度不变的前提下，中面板位置对夹芯板动态响应的影响。冰雹撞击过程是复杂的非线性冲击动力学问题，影响该过程的物理量很多，为简化问题，选取一些对撞击过程起控制作用的关键物理量作为分析参量。Anghileri 等[9]的研究表明，冰雹高速撞击时产生的压力远超其强度极限，致使冰雹发生了流变，因此采用弹塑性流体动力学本构模型和表示体积和压力关系的状态方程来描述冰雹的冲击动力学行为。这样冰雹的独立物理参量可选取为：冰雹直径 d，密度 ρ_1，剪切模量 G，塑性硬化模量 E_h，泊松比 ν_1，屈服强度 Y_1，拉伸失效应力 $p_{cut,1}$，体积与压力关系系数 C_k，初始速度 v，撞击角度 φ。泊沫铝夹芯结构面板的独立物理参量为：密度 ρ_2，弹性模量 E_1，切线模量 E_t，泊松比 ν_2，屈服强度 Y_2，失效应变 ε_f。泡沫铝芯材的独立物理参量为：密度 ρ_3，弹性模量 E_2，泊松比 ν_3，平台应力 σ_P，拉伸失效截止应力 $p_{cut,2}$，芯材总厚度 H，其中上层芯材厚度 H_1，下层芯材厚度 H_2。另外，冰雹撞击过程中结构的响应还与结构边界条件 $B(x)$、撞击发生后的时间 t 等有关。

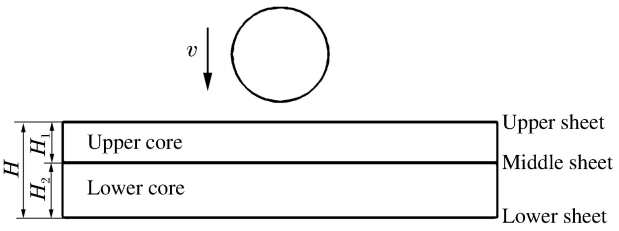


图 1 冰雹撞击泡沫铝夹芯板分析模型

Fig. 1 Analytic model of sandwich panel impacted by hailstone

对于给定的冰雹-结构系统，冰雹撞击过程是一个确定的过程，如用结构的挠度 w 来表示冰雹撞击过程的特征量，则 w 一定是上述参量的函数，一般关系式可表示为：

$$w=f(d,\rho_i,G,E_h,\nu_i,Y_j,p_{cut,j},C_k,v,\varphi,E_j,E_t,\varepsilon_f,\sigma_P,H_j,B(x),t) \qquad i=1,2,3,\quad j=1,2 \tag{1}$$

选取芯材的 ρ_3、E_2、H 为基本量纲，根据Ⅱ定理[10]，将式(1)写成用量纲一参量表示的关系式：

$$\frac{w}{H}=f\left(\frac{d}{H},\frac{\rho_1}{\rho_3},\frac{\rho_2}{\rho_3},\frac{G}{E_2},\frac{E_h}{E_2},\nu_i,\frac{Y_j}{E_2},\frac{p_{cut,j}}{E_2},\frac{C_k}{E_2},\frac{v}{\sqrt{E_2/\rho_3}},\varphi,\frac{E_1}{E_2},\frac{E_t}{E_2},\varepsilon_f,\frac{\sigma_P}{E_2},\frac{H_j}{H},B\left(\frac{x}{H}\right),\frac{t}{H\sqrt{\rho_3/E_2}}\right) \tag{2}$$

$$i=1,2,3,\quad j=1,2$$

在冰雹、结构材料和结构边界条件均给定的情况下，式(2)中相关量纲一参量都是常数，一般关系式可进一步简化为：

$$\frac{w}{H}=f\left(\frac{d}{H},\frac{v}{\sqrt{E_2/\rho_3}},\varphi,\frac{H_j}{H},\frac{t}{H\sqrt{\rho_3/E_2}}\right) \qquad j=1,2 \tag{3}$$

若冰雹特征尺寸、撞击速度和撞击角度保持不变，结构的量纲一挠度随量纲一时间变化的关系仅与上、下芯材的相对厚度(中面板的位置)存在函数关系。

同样的分析方法可得到冰雹与结构间的撞击力、应变等与分析参量的量纲一的一般关系式，这里不再详细给出，下面通过数值模拟对中面板位置不同的 5 种构型泡沫铝夹芯结构动态响应进行分析。

2 数值分析

2.1 模型

按照 ASTM F320-1994[11]，冰雹直径 51 mm(特大冰雹)，面板尺寸为 300 mm×300 mm×0.5 mm，泡沫芯材总厚度为 30 mm。实验研究表明[12]，冰雹与结构高速撞击过程中，冰雹变形很大，呈现近似流体状飞溅。有限元模型中，采用无网格 SPH 粒子模拟冰雹，共 17 256 个 SPH 粒子，以克服传统 Lagrange 算法在大变形下的网格扭曲问题。泡沫铝芯材的单元选取 8 节点六面体单元模拟，采用单点积分与沙漏控制；面板采用 4 节点 Hughes-Liu 薄壳单元模拟，沿壳厚度方向选取 3 个高斯积分点。通过试算以保证数值模拟结果收敛，同时兼顾计算成本，最终将泡沫铝芯材划分为 51 840

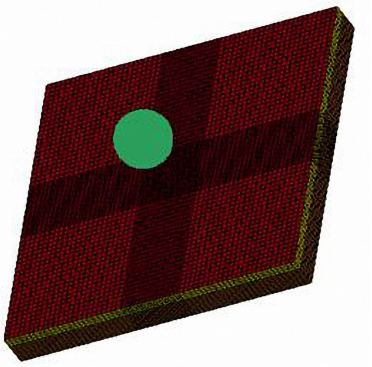


图 2 冰雹撞击泡沫铝夹芯板有限元模型

Fig. 2 Finite element model of sandwich panel impacted by hailstone

个体单元，面板划分为 15 552 个面单元；在冰雹撞击区对面板和芯层进行了网格加密处理（见图 2）。冰雹与泡沫铝夹芯板之间采用点-面侵蚀接触，面板与泡沫芯材之间采用面-面侵蚀接触。接触算法选用对称罚函数算法，这种算法的优点是激起的网格沙漏效应（零能模式）小，动量守恒准确。

2.1.1　冰雹材料模型及验证

选用 LS-DYNA 中的弹塑性流体动力学模型（MAT-10）描述冰雹在高速冲击下的力学行为，通过拉伸失效应力模拟冰雹的破碎，并用水的多项式状态方程[9]控制破碎冰体的体积和压力关系，考虑冰雹在高速撞击下的流体特性。状态方程采用 LS-DYNA 的线性多项式形式，多项式方程系数为[13]：C_1 = 2.18 GPa，C_2 = 6.69 GPa，C_3 = 11.50 GPa。冰雹的材料参数为[9]：ρ = 846 kg·m^{-3}，G = 3.46 GPa，σ_s = 10.30 MPa，E_h = 6.89 GPa，p_{cut} = −4.00 MPa。

为了验证冰雹的本构模型及其参数的合理性，模拟了冰雹撞击平板实验[14]。实验中，直径为 25.40 mm 的冰雹以 192 m/s 的速度正撞 2014-T4 铝平板中心，平板尺寸为 305 mm × 305 mm × 0.92 mm（见图 3），通过夹具安装到试验台上。平板采用 4 节点薄壳单元模拟，单元尺寸为 2 mm。采用 LS-DYNA 中 MAT-24 定义平板材料模型，材料的密度 2 800 kg/m^3、弹性模量 72.4 GPa，输入的应力应变曲线如图 4 所示。

图 5 为 0.15 ms 时平板 A-A 截面在冰雹撞击方向的位移结果，数值模拟结果和实验结果吻合较好，说明冰雹的本构模型及其对应的参数值能很好地模拟冰雹撞击过程。

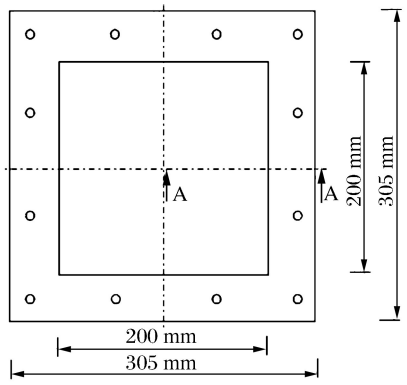


图 3　2014-T4 铝合金平板

Fig. 3　2014-T4 aluminum plate for experiment

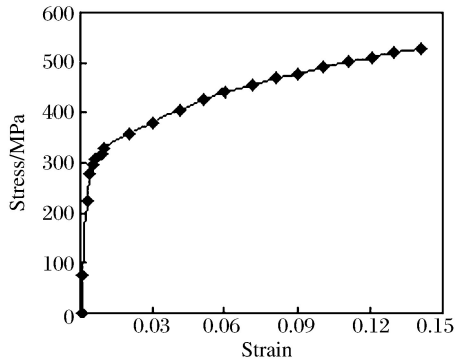


图 4　2014-T4 铝合金的应力应变曲线[15]

Fig. 4　Stress-strain curve of 2014-T4[15]

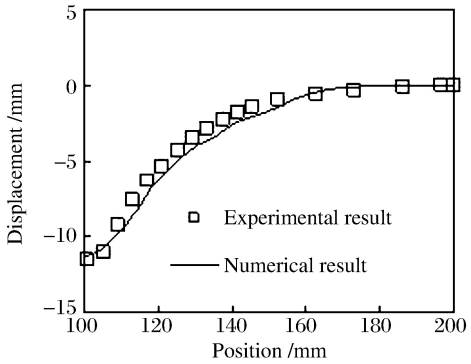


图 5　数值模拟结果和实验结果的比较

Fig. 5　Comparison between numerical and experimental results

2.1.2　泡沫铝夹芯结构材料模型

面板材料为 LY12 铝合金，采用带失效模式的塑性动力学本构模型来模拟（MAT-3）。由于 LY12 铝合金对应变率不敏感，在材料参数设置时对 Cowper-Symonds 应变率参数 C、P 不予赋值，有限元分析程序自动认为不考虑应变率的影响。面板的材料参数为[16]：ρ = 2 780 kg·m^{-3}，E = 73.1 GPa，σ_s = 345 MPa，E_t = 761 MPa，μ = 0.33，ε_f = 0.18。

泡沫铝芯材用 LS-DYNA 中 MAT-63 模型模拟。泡沫铝芯材材料参数为[3]：ρ = 300 kg·m^{-3}，E = 1.5 GPa，μ = 0.05，p_{cut} = −10.0 MPa。泡沫铝芯材应力应变曲线如图 6 所示。

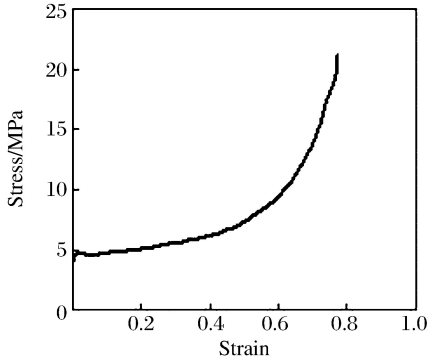


图 6　泡沫铝芯材的应力应变曲线[3]

Fig. 6　Stress-strain curve of aluminum foam[3]

2.1.3 初始条件和边界条件

冰雹分别以 80、120、160 和 200 m/s 的速度正撞泡沫铝夹芯板中心，夹芯板四边固支。

2.2 结果及分析

利用有限元分析软件 LS-DYNA 对上层芯材与芯材总厚度比 $H_1:H$ 为 0∶30、10∶30、15∶30、20∶30和 30∶30 构型泡沫铝夹芯结构进行数值计算，其中 0∶30(上面板厚度为下面板的两倍)和 30∶30(下面板厚度为上面板的两倍)构型为单层夹芯结构，10∶30、15∶30 和 20∶30 构型为双层夹芯结构。

2.2.1 冰雹撞击过程

所有构型的冰雹撞击过程相似，这里仅给出冰雹以 200 m/s 速度撞击 15∶30 构型双层夹芯结构的过程，如图 7 所示。整个撞击过程可以分为 3 个阶段：第 1 阶段为撞击初始阶段，冰雹前端与上面板接触，速度陡降，形成冲击波，冰雹与上面板间产生很高的冲击压力，上面板中心区域产生变形；第 2 阶段为流固耦合阶段，冰雹在冲击压缩波和反射拉伸波的作用下破碎，向结构变形区堆积并沿上面板表面向外扩散，结构变形区逐渐向下扩展，芯层被压缩，夹芯结构整体发生变形，直至冰雹撞击方向结构位移达到最大值；第 3 阶段为结构回弹阶段，冰雹碎粒与结构分离。由此可知，提高上面板刚度，可以增加冰雹碎粒沿上面板表面向外耗散的数量，从而减少它在结构变形区堆积，使得冰雹传递到结构上的能量降低，减小结构在撞击过程中的强度损失。

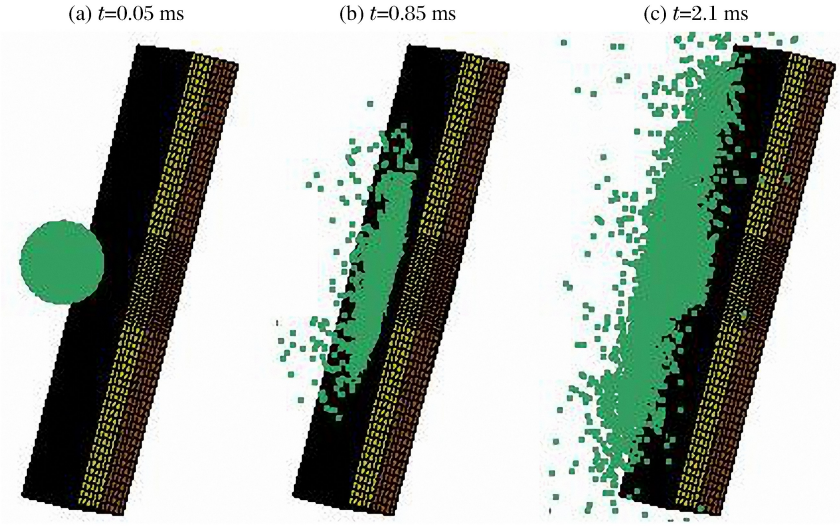


图 7 冰雹撞击过程(v=200 m/s, $H_1:H$=15∶30)

Fig. 7 Impact process of hailstone

2.2.2 中面板对泡沫铝夹芯板吸能特性的影响

图 8～9 给出了 0∶30 单层夹芯结构和 15∶30 双层夹芯结构在不同撞击速度下各部分吸能情况。从图中可以看出，面板和芯层吸收的能量均随撞击速度的提高而增加；相同撞击速度下，沿冰雹撞击方向，面板吸收的能量和芯层吸收的能量均逐渐减小。另外，和文献[6]中金属弹丸侵彻不一样，冰雹冲击能量主要由芯层吸收，如在 160 m/s 的撞击速度下，0∶30 单层夹芯结构和 15∶30 双层夹芯结构的芯层吸收的能量分别占结构吸能总量的 74.02%和 79.22%。从图 9 中还可以看出，15∶30 双层夹芯结构上芯层的吸收能量与撞击速度的关系曲线呈双线性，这主要是由于随着撞击速度的增大，夹芯结构的破坏模式发生了变化。当撞击速度较低时，冲击使上面板撞击中心产生局部凹陷(见图 10)，上芯层主要通过局部压缩变形吸收撞击能量；当撞击速度较高时，上面板被击穿，呈现对称的花瓣型撕裂破坏，冰雹碎粒直接撞击上层芯材，使它发生压缩、剪切、拉伸破坏，吸收的能量陡增。下芯层未出现类似的情况，中面板将集中的撞击荷载分散到整个下芯层，有效地抑制了下芯层的局部失效，主要通过整体压缩变形来吸收冲击能量。可见，由于中面板的存在，对下层芯材形成了有效的保护，对于非整体贯穿型损

伤，仅需更换上层部件即可修复。0∶30 单层夹芯结构的上面板厚度较大，在冲击过程中较好地阻止了冰雹的穿透，夹芯结构主要通过整体弯曲变形来吸收和耗散冲击能量，芯层的吸收能量与撞击速度的关系曲线平稳。

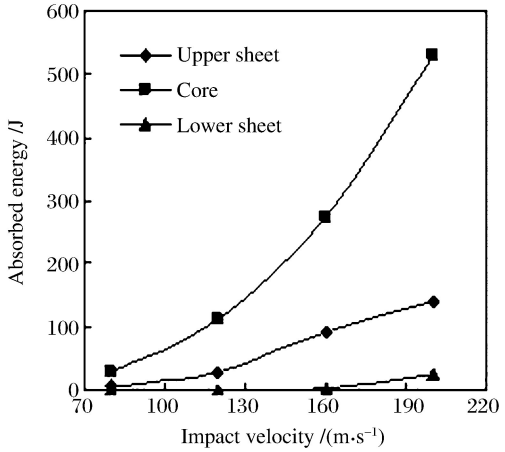


图 8　夹芯结构各部分吸能情况（H_1∶H=0∶30）

Fig. 8　Energy absorption of sandwich panel

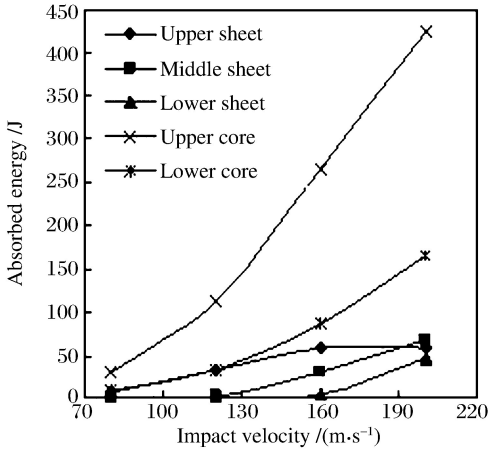


图 9　夹芯结构各部分吸能情况（H_1∶H=15∶30）

Fig. 9　Energy absorption of sandwich panel

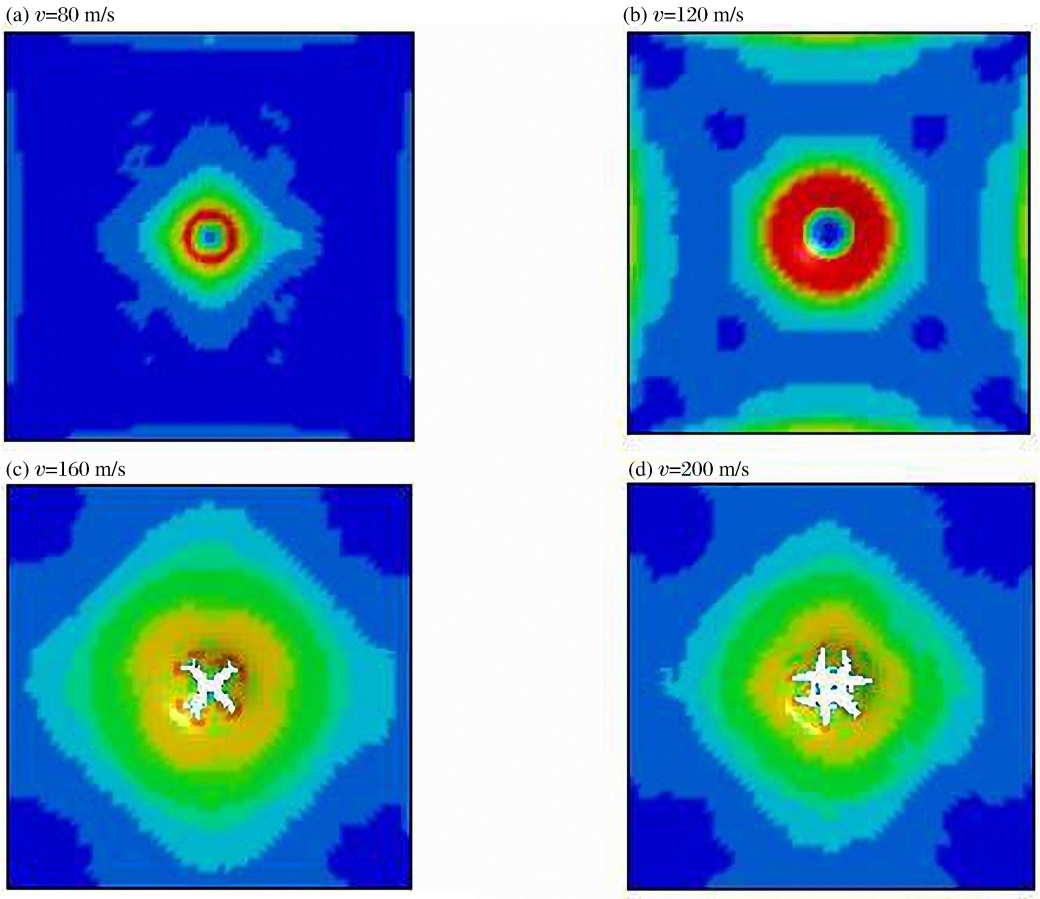


图 10　上面板受损破坏图（H_1∶H=15∶30）

Fig. 10　Images of upper sheets' damage

其他 3 种构型夹芯结构面板、芯材在不同撞击速度下的吸能情况，见表 1。由于上、下芯材的厚度不同，表中采用比吸能来表示芯材的吸能情况。

表 1 夹芯结构在不同撞击速度下的吸能情况

Table 1 Energy absorption of sandwich panels at different impact velocities

H_1 ∶ H	撞击速度/(m·s^{-1})	面板吸能/J			芯材比吸能/(J·kg^{-1})	
		上	中	下	上层	下层
10 ∶ 30	80	5.620	0.203	0.074	99.322	29.965
	120	31.138	2.920	0.407	340.229	109.739
	160	52.602	36.984	5.530	728.125	247.094
	200	58.859	65.632	58.394	1 091.181	497.509
20 ∶ 30	80	5.561	0.114	0.078	62.981	29.444
	120	31.630	1.111	0.757	236.621	90.341
	160	50.551	16.434	17.913	582.899	186.569
	200	57.139	85.902	48.619	931.456	365.222
30 ∶ 30	80	6.540	—	0.056	47.779	
	120	35.296	—	0.179	175.520	
	160	51.697	—	2.980	508.573	
	200	60.143	—	18.799	934.173	

2.2.3 中面板位置对下面板最大挠度的影响

在冲击荷载作用下,夹芯结构常用下面板的最大挠度来评价其抗冲击性能。冰雹撞击速度为 120 m/s时,5 种构型夹芯结构下面板中心点的位移随时间变化情况见图 11。中面板位置的变动,对下面板中心点的峰值位移影响较大, 0 ∶ 30 构型结构的下面板中心点的位移最大值仅为 15 ∶ 30 的 36.79%。不同构型夹芯结构由于初始刚度及冰雹撞击后损伤程度不同,结构在回弹阶段的振动频率表现出明显差异。

图 12 给出了不同撞击速度下,夹芯结构下面板中心点量纲一位移幅值与中面板位置的关系曲线。由图 12 可知,随着中面板由上往下移动,在相同撞击速度下,下面板中心的峰值位移呈现由小到大再减小的趋势,撞击速度越大,这种趋势越明显。文献[17]的实验表明,夹芯结构抗弯刚度主要体现在面板作用上,中面板位置的变动,必然导致夹芯结构在受冲击方向抗弯刚度发生较大的变化,中面板由上往下移动,夹芯结构下面板中心的峰值位移变化趋势与夹芯结构在受冲击方向初始抗弯刚度的变化趋势刚好相反,可见,夹芯结构的初始抗弯刚度是影响其抵抗冰雹撞击性能的主要因素。对于 0 ∶ 30 和

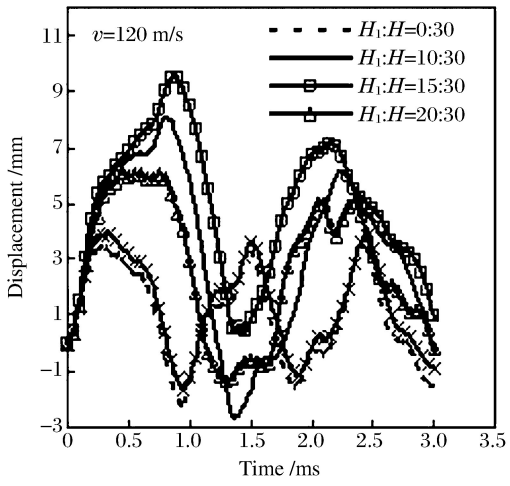


图 11 下面板中心点的位移

Fig. 11 Displacement of central point of lower sheets

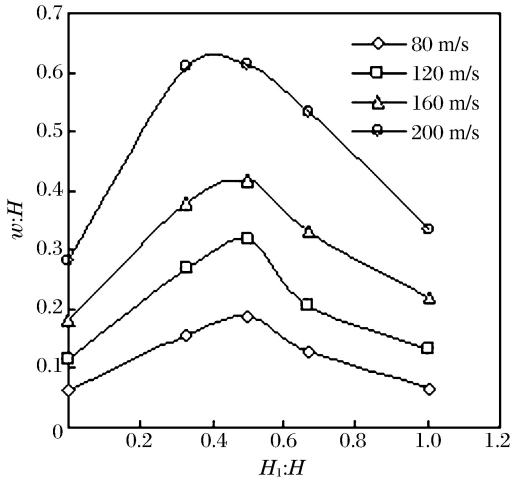


图 12 下面板中心点的位移幅值随中间面板位置的变化

Fig. 12 Displacement amplitude of central point of lower sheet versus position of middle sheet

30∶30单层夹芯结构，以及 10∶30 和 20∶30 双层夹芯结构，尽管在受冲击方向初始抗弯刚度相同，但从数值计算结果看，其抗冰雹撞击性能，单层结构 0∶30 优于 30∶30，双层结构 20∶30 优于 10∶30。原因主要是：0∶30 夹芯结构面板刚度上强下弱，更有利于耗散冰雹撞击能量和抵御冰雹穿透，减少了冰雹与结构间能量的有效传递；而 10∶30 夹芯板受到冰雹撞击后，由于前面板和中面板之间的泡沫铝缓冲层较薄，上面板和中面板的损伤相对较大，导致夹芯板抗弯刚度下降较快。

3　结　论

在泡沫铝夹芯结构外形尺寸相同、质量相等的前提下，通过对 5 种构型夹芯结构冰雹撞击动态响应分析，得到如下结论。

（1）和金属弹丸侵彻不同，冰雹撞击过程中泡沫铝芯层吸收了绝大多数的冲击能量。

（2）中面板的存在对下层芯材能形成有效的保护，对于非整体贯穿型损伤的修复非常有利。

（3）中面板的位置变动，导致夹芯板抗弯刚度的变化，对下面板中心的峰值位移影响较大。随着中面板由上向下移动，下面板中心的峰值位移呈现由小到大再减小的趋势；在研究的撞击速度范围，撞击速度越大，这种趋势越明显。

（4）在保持夹芯结构整体刚度不变的情况下，提高上面板刚度，可以起到更好的防护效果。

参考文献：

[1] SOUTER R K, EMERSON J B. Summary of available hail literature and the effect of hail on aircraft in flight: NASA Technical Note 2734[R]. Washington, 1952:1-33.

[2] ZHU F, ZHAO L M, LU G X, et al. A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(5):687-699.

[3] HANSSEN A G, GIRARD Y, OLOVSSON L, et al. A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(7):1127-1144.

[4] HOU W H, ZHU F, LU G X, et al. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminum[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(10):1045-1055.

[5] 祖国胤，刘佳，李小兵，等. 泡沫铝夹芯板低速冲击性能研究[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2014，35(11)：1583-1587.
ZU Guoyin, LIU Jia, LI Xiaobing, et al. Research on the low-velocity impact performance of aluminum foam sandwich panels[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014,35(11):1583-1587.

[6] 杨飞，王志华，赵隆茂. 泡沫铝夹芯板抗侵彻性能的数值研究[J]. 科学技术与工程，2011，11(15)：3377-3383.
YANG Fei, WANG Zhihua, ZHAO Longmao. Numerical simulation on anti-penetration performance of aluminum foam-based sandwich panels[J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(15):3377-3383.

[7] 李志斌，卢芳云. 泡沫铝夹芯板压入和侵彻性能的实验研究[J]. 振动与冲击，2015，34(4)：1-5.
LI Zhibin, LU Fangyun. Tests for indentation and perforation of sandwich panels with aluminium foam core[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(4):1-5.

[8] 张培文，李鑫，王志华，等. 爆炸载荷作用下不同面板厚度对泡沫铝夹芯板动力响应的影响[J]. 高压物理学报，2013，27(5)：699-703.
ZHANG Peiwen, LI Xin, WANG Zhihua, et al. Effect of face sheet thickness on dynamic response of aluminum foam sandwich panels under blast loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(5):699-703.

[9] ANGHILERI M, CASTELLETTI L M L, IMVERNIZZI F, et al. A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(8):929-944.

[10] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2005：9-19.

[11] ASTM F320-1994. Standard test method for hail impact resistance of aerospace transparent enclosures[S]. 1994.

[12] COMBESCURE A, CHUZEL-MARMOT Y, FABIS J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011,48(20):2779-790.

[13] 张振华,朱锡,白雪飞.水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2004,24(2):182-188.
ZHANG Zhenhua, ZHU Xi, BAI Xuefei. The study on numerical simulation of underwater blast wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):182-188.
[14] HAYDUK R J, THOMSON R G. An improved analytical treatment of the denting of thin sheets by hail: NASA Technical Note D-6102[R]. Washington, 1971:1-36.
[15] BOYER H E. Atlas of stress-strain curves[M]. 2d ed. ASM International, 2002:311.
[16] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册:铝合金、镁合金[M].2 版.北京:中国标准出版社,2002:39-83.
[17] 尚金堂.新型高强度胞状铝合金Ⅱ及层合梁三点弯曲研究[D].南京:东南大学,2003.

Dynamic response of aluminum-foam-based sandwich panels under hailstone impact

ZHANG Yongkang[1], LI Yulong[2], TANG Zhongbin[2], YANG Hong[1], XU Hai[1]
(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou* 215104, *Jiangsu, China*;
2. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*)

Abstract: In this work, by inserting an additional sheet, called the middle sheet, between the upper and lower sheets of a traditional single-layer foam core sandwich panel consisting of a core with bonded with two sheets on either side, we fabricated sandwich panels with five structures that have the same dimensions and weights by changing the position of the middle sheet. The ratios of the upper core thickness to the total core thickness are 0∶30, 10∶30, 15∶30, 20∶30 and 30∶30, respectively. On the basis of dimensional analysis, we conducted numerical analysis of the sandwich panels subjected to hailstone impact using the nonlinear finite element program LS-DYNA, and investigated the influence of the middle sheet's position on the energy absorption, energy dissipation and dynamic response of the sandwich panel. The numerical results show that the middle sheet provides an effective protection for the lower core, and the anti-impact performance of the sandwich panel exhibited a tendency to change from strong to weak and then from weak to strong as the middle sheet moved along the direction of the hailstone impact. The results of the numerical simulation offer a reference for the optimization design of the sandwich structures under hailstone impact.

Keywords: aluminum-foam-based sandwich panel; hailstone; impact; dimensional analysis; LS-DYNA

(责任编辑 丁 峰)