

文章编号: 1003-1480 (2021) 01-0031-04

超高速碰撞蜂窝铝单层盖板的破坏及吸能特性仿真

郭 凯, 陈 闯, 常孟周

(沈阳理工大学 辽宁省瞬态物理力学与能量转换材料重点实验室, 辽宁 沈阳, 110159)

摘 要: 为了研究蜂窝铝单层盖板结构遭遇超高速碰撞后的破坏和吸能特性, 采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 法, 应用 Johnson-Cook 本构模型、Tillotson 状态方程, 利用 UIDL 语言将 APDL 程序嵌入到 ANSYS 软件中进行结构的三维建模; 开展了铝弹丸超高速碰撞相同盖板厚度的蜂窝铝单层盖板结构的数值模拟, 研究不同碰撞速度、不同弹丸入射角度及蜂窝铝厚度下蜂窝铝的破坏和吸能特性。结果表明, 蜂窝铝芯层越厚吸能效果愈好, 碰撞角度对蜂窝铝吸能效果影响不大, 破坏模式与吸能特性关系密切。

关键词: 超高速碰撞; 破坏模式; 吸能特性; 蜂窝铝; 数值模拟

中图分类号: TJ45⁺9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.009

Numerical Simulation of Damage and Energy Absorption Characteristics for Honeycomb Aluminum with Single Cover Plate during Hypervelocity Impact

GUO Kai, CHEN Chuang, CHANG Meng-zhou

(Key Laboratory of Transient Physical Mechanics and Energy Conversion Materials of Liaoning Province, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159)

Abstract: In order to investigate characteristics of damage and absorption energy for honeycomb aluminum with single cover plate structure during hypervelocity impact, the smooth particle hydrodynamic (SPH) method, Johnson-Cook constitutive model and Tillotson state equation were adopted, and three-dimension model was established by APDL procedure implanted ANSYS software using UIDL computer language. Simulations of aluminum projectile impacting honeycomb aluminum with single cover plate were performed at the same cover plate thickness, the characteristics of damage and energy absorption under different impact velocity, different incidence angles of projectile and honeycomb aluminum thicknesses were studied. Simulation results show that energy absorption effect is better with honeycomb core thickness increasing. However, impact angle has little influence on energy absorption effect of honeycomb, failure mode has some influence on energy absorption characteristics.

Key words: Hypervelocity impact; Failure mode; Absorption energy characteristics; Honeycomb aluminum; Numerical simulation

随着空间碎片对在轨航天器构成的威胁日益加大, 迫切需要对超高速碰撞航天器防护结构进行优化, 并探索新型防护结构。最早在距航天器舱体外表面一定距离设置薄板作为防护屏, 当碎片超高速碰撞航天器防护结构后, 会使防护屏穿孔, 形成许多小的

碎片, 甚至发生相变, 减少空间碎片对防护结构的破坏程度, 进而起到防护作用。铝板夹蜂窝芯材料是一种新型防护结构, 其显著优势是具有对小弹丸优良的动能吸收特性, 故而成为航天器防护研究领域关注的焦点。Chang-HyunLee 等^[1]曾开展了 12.7mm 直径的

收稿日期: 2020-09-09

作者简介: 郭凯 (1980-), 男, 副教授, 从事强动载下材料的力学响应、强动载下的闪光效应及电磁效应等领域研究。

基金项目: 辽宁省“百千万人才工程”培养经费资助项目; 辽宁省高校优秀人才支持计划资助项目 (LR2013008);

沈阳市科技局项目 (18-013-0-34)。

柱状弹丸^[2]碰撞酚醛树脂和增强复合材料板的侵彻实验,采用高速摄影技术对吸能特性进行了研究^[3-4]。研究发现,靶板的吸能效果随弹丸速度增加呈线性增强;Zaera等^[5]也开展了对蜂窝铝结构吸能特性的类似研究;徐小刚等^[6]开展了蜂窝铝夹芯板超高速碰撞的仿真研究,并与试验结果进行比较;穆建春^[7]和侯海量^[8]分别利用圆锥头弹体、球头弹体,进行了超高速正撞击薄板的实验研究,并探讨了薄板的破坏模式。

本文利用 UIDL 语言将 APDL 程序嵌入到 ANSYS 软件中进行了结构的三维建模,采用 SPH 法对球形铝弹丸超高速碰撞蜂窝铝单层盖板结构进行了数值模拟。在不同碰撞速度、弹丸不同入射角度和不同厚度蜂窝铝芯条件下,开展了超高速碰撞蜂窝铝单层盖板结构的破坏和吸能特性仿真研究。

1 模型建立

1.1 材料模型

由于超高速碰撞过程中材料的力学性能受应变率的影响较大,另外考虑温度对材料的影响,本文采用 Johnson-Cook 本构模型及失效判据。具体形式:

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (1)$$

$$d\bar{\epsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot a_i} d\epsilon_{ii}^p \quad (i=1,2,3), d\bar{\epsilon}^p = \frac{2 \cdot d\epsilon_{ij}^p}{\sqrt{3} \cdot a_r} \quad (r=4,5,6) \quad (2)$$

由于 Tillotson 状态方程可以很好地描述材料固相、液相和气相^[10],因此,应用 Tillotson 状态方程,具体形式为:

$$p = \left[a + \frac{b}{E / (E_0 \eta^2) + 1} \right] \frac{E}{V} + Au + Bu^2 \quad (3)$$

式(3)中: $V=1/\rho$, $\eta=\rho/\rho_0$, $u=\eta-1$, a 、 b 、 A 、 E_0 、 B 为方程参数; E 为比内能。表 1 为材料参数。

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters					
LY12 铝	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	E_0/GPa	u	T_r/K
材料常数	2.7	70	50	0.2	293
LY12 铝	T_m/K	A/MPa	B/MPa	a	b
材料常数	933	265	426	0.5	1.63

1.2 材料模型

球形弹丸直径为 2mm,靶板为蜂窝铝单层盖板结构,六边形边长为 1mm,蜂窝铝壁厚为 0.01mm,

蜂窝铝高度分别为 4mm、6mm 和 8mm。为了节省机时,弹丸和单层盖板采用 SPH 模型,粒子数为 20 000 个,粒子间距 x 为 200 μm ,光滑长度 h 均为 1.2 x ;蜂窝芯采用 Lagrange 实体单元进行单元划分,靶板中心处 1 倍弹径范围内的网格尺寸为 0.01mm,1 倍弹径范围以外的网格尺寸为 0.05mm,蜂窝铝总共划分为 55 680/125 680 个单元。在弹靶碰撞界面采用点面接触,实现弹靶的相互作用,在靶板底面施加固支边界约束条件。蜂窝铝结构模型图如图 1 所示。

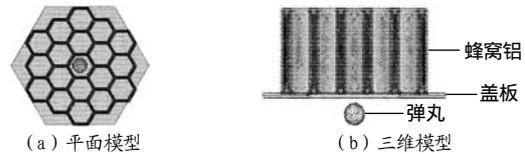


图 1 蜂窝铝结构模型图

Fig.1 Diagram of honeycomb aluminum structure model

1.3 数值模拟参数

数值模拟中,单层铝盖板的厚度为 0.5mm,蜂窝铝芯层的厚度分别为 4mm、6mm 和 8mm,弹丸的碰撞速度分别为 3.35km/s、4.55km/s 和 6.35km/s,弹丸着靶角度分别为 30°、45°和 60°。

2 能量分配

弹丸碰撞蜂窝铝单层盖板结构的过程中,弹丸能量损失,一部分是靶板吸能,另一部分是在超高速碰撞过程中发生相变消耗能量;蜂窝铝结构吸能可分为 4 个过程:(1)弹丸碰撞蜂窝铝后,碰撞区靶板首先在剪力作用下产生变形,贴合于弹头表面,其变形能主要是剪切滑移功和弯曲变形能;(2)蜂窝铝材料贴合于弹头表面后,隆起变形区内部剪力和弯矩分别减小到临界剪力和弯矩以下,膜力增大到超过动态塑性屈服极限,隆起变形区内发生薄膜拉伸吸能;(3)隆起变形结束后,隆起变形区蜂窝铝继续发生薄膜拉伸变形吸能;(4)蜂窝铝发生穿孔失效后,弹靶碰撞区内广义应力均减小到弹性范围,不再发生变形吸能,蜂窝铝吸能 E 及面密度吸能 E_A 的计算公式为:

$$E = \frac{1}{2} M_p (v_0^2 - v_r^2) \quad (4)$$

$$E_A = \frac{E}{\rho_A} \quad (5)$$

式(4)~(5)中, M_p 为弹丸质量; v_0 为弹丸初始速度; v_r 为弹丸穿靶后的剩余速度; A 为靶板面密度。

3 数值模拟结果及分析

3.1 不同碰撞速度蜂窝铝破坏特性

图2为弹靶接触后 $5\mu s$ 时, 直径为 2mm 球形弹丸以 3 种速度正碰撞厚度为 4mm 和 8mm 靶板后靶板的破坏情况。

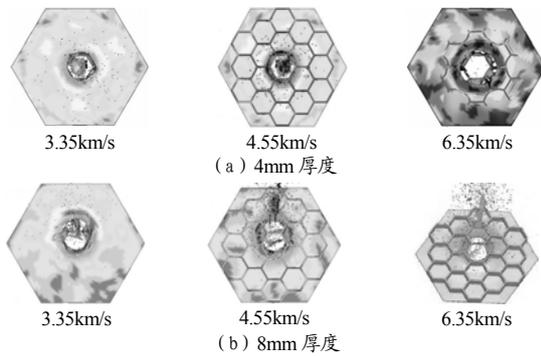


图2 $5\mu s$ 时不同碰撞速度穿孔图
Fig.2 Perforation pattern of different impact velocity after impact $5\mu s$

在碰撞过程中, 类似球状的碎片云经历了快速加载和缓慢的卸载过程。快速加载波和缓慢卸载波在传播过程中使靶板破坏; 由仿真结果可知, 当靶板厚度相同时, 随着碰撞速度的增加, 蜂窝铝结构扰动剧烈, 蜂窝芯出现扭曲现象; 厚靶板使弹丸破碎完整, 但对于穿孔直径影响很小, 表2给出了不同碰撞速度下靶板穿孔的最小直径。

表2 不同碰撞速度下穿孔最小直径

Tab.2 Minimum diameter of perforation under different impact velocity

算例	靶板厚度 /mm	碰撞速度 / $(km \cdot s^{-1})$	穿孔直径 /mm
1	4	3.35	3.5
2		4.55	3.9
3		6.35	5.0
4	8	3.35	3.6
5		4.55	3.9
6		6.35	4.9

当碰撞速度达到一定程度时, 碰撞使材料发生转变, 这部分能量可表述为^[11]:

$$E = (1 - c_1 c_2 c_3) \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (6)$$

式(6)中: c_1 为碰撞射流和剪切热产生的能量增强因子; c_2 为碎片与周围环境气化作用产生的

增强因子; c_3 为自由分子碰撞产生的能量增强因子; m 为弹丸质量; v_0 为弹丸碰撞靶板速度。

3.2 不同入射角度时靶板的破坏特性

图3为直径为 2mm 球形弹丸以 6.35km/s 速度碰撞厚度为 4mm 的靶板, 弹靶接触后 $5\mu s$ 时, 3 种碰撞角度下靶板的破坏情况。由图3可知, 随着碰撞角度的增加, 碎片喷出物增多, 靶板的破碎加剧, 穿孔直径经历了先增大后减小的过程; 碰撞角度对靶板的吸能效果影响很小。靶板的破坏情况与碰撞角度有关系, 在碰撞角度为 45° 时, 靶板的破坏最严重, 孔洞在 X 轴和 Y 轴尺寸分别为 7.25mm 和 6.4mm。

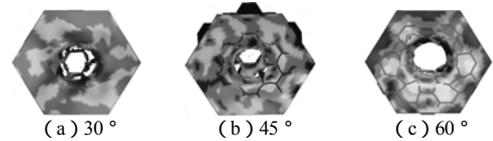


图3 $5\mu s$ 时不同碰撞角度穿孔图
Fig.3 Perforation pattern of different impact angle after impact $5\mu s$

3.3 不同厚度靶板的吸能特性分析

图4为直径为 2mm 球形弹丸以 6.35km/s 的速度碰撞边长为 1mm 的六边形蜂窝铝结构 (蜂窝壁厚为 0.01mm, 盖板厚度为 0.5mm, 高度分别为 4mm、6mm 和 8mm), 弹靶接触后 $5\mu s$ 时, 蜂窝铝单层盖板的破坏情况。由图4可知, 靶板越厚, 弹丸破碎越完整, 对穿孔直径的影响很小。图5给出了碰撞过程中靶板的吸能情况。

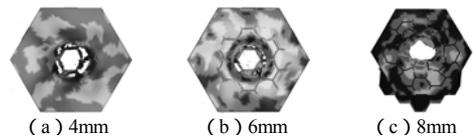


图4 $5\mu s$ 时不同厚度蜂窝铝结构的破坏模式
Fig.4 Failure mode of honeycomb aluminum structure with different thickness at $5\mu s$

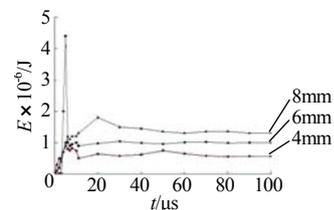


图5 蜂窝铝结构吸能曲线
Fig.5 Energy absorption curve of honeycomb aluminum structure

由图5可知, 靶板厚度为 4mm 时, 吸能为 $0.57 \times 10^{-6} J$; 靶板厚度为 6mm 时, 吸能为 $1.0 \times 10^{-6} J$; 靶板厚度为 8mm 时, 吸能为 $1.3 \times 10^{-6} J$; 可见, 靶板厚度越大, 吸能效果越明显。

3.4 弹丸穿透靶板后剩余速度的预测

图6给出了不同碰撞速度下蜂窝芯速度曲线。由图6可知,不同碰撞速度下弹丸的剩余速度与初始速度的关系近似呈线性关系。弹丸穿透靶板的剩余速度预测公式为^[12]。

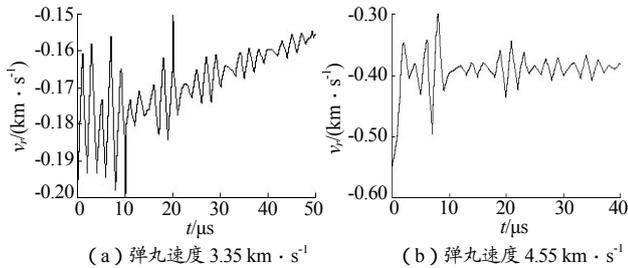


图6 弹丸剩余速度曲线

Fig.6 Residual velocity curve of projectile

$$v_r = [v_0^2 - \frac{\pi d^2 h_c \sigma_e}{2M_p} (1 + 1.5 \sqrt{\frac{\rho_c}{\sigma_e}} v_0)]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式(7)中: v_0 为初始速度; h_c 为靶板厚度,为弹性极限; M_p 为弹丸质量; ρ_c 为靶板密度。因此,弹丸初始速度对靶板吸能效果影响不大。弹丸碰撞蜂窝芯单层盖板结构过程中,相对于不加单层盖板,弹丸剩余速度减小约20%。

4 结论

本文采用Johnson-Cook本构模型、Tillotson物态方程,运用SPH方法,利用UIDL语言将APDL程序嵌入到ANSYS软件中进行结构的三维建模,开展了铝弹丸超高速碰撞相同盖板厚度的蜂窝铝单层盖板结构的数值模拟,针对不同碰撞速度、不同弹丸入射角度及蜂窝铝厚度情况进行了蜂窝铝结构破坏情况的研究。结合理论分析得到如下结论:(1)蜂窝铝结构的防护性能受碰撞速度影响很大,存在明显的速度效应。碰撞速度影响蜂窝铝穿孔直径,但蜂窝铝厚度对穿孔直径影响不明显;(2)弹丸以 45° 入射时碰撞蜂窝铝单层盖板结构的破坏最严重,孔洞在X轴和Y轴尺寸分别为7.25mm和6.4mm;(3)蜂窝铝厚度越厚吸能效果愈好,当蜂窝铝结构厚度达到一定时,再增加蜂窝铝厚度时,吸能效果提高不显著;(4)蜂

窝铝的破坏模式决定了其吸能特性,破坏模式与弹丸碰撞速度关系密切。

参考文献:

- [1] Chang-hyun L. On the ballistic resistance of fibre-reinforced composite[C]//17th International Symposium on Ballistic. Midrand, South Africa: The South African Ballistics Organisation, 1938.
- [2] MIL-P-46593A. Projectiles calibers 22,30,50 and 20 mm fragment-simulating projectile[S]. USA: The Department of Defense, 1962.
- [3] Zaera R, Sanchez-Saez, Perez, et al.. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic[J]. Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(8): 823-833.
- [4] Taylor E A, Glanville Jonathan P, Clegg Richard A, et al.. Hypervelocity impact on spacecraft honeycomb: hydrocode simulation damage laws[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29(3): 691-702.
- [5] Xue Z, Hutchinson J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(4): 687-705.
- [6] 徐小刚, 黄海, 贾光辉. 蜂窝夹芯板超高速碰撞仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(1): 18-21.
- [7] 穆建春. 金属薄板在圆锥头弹体正冲击下的破裂模式[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 74-79.
- [8] 侯海量, 朱锡, 李伟, 等. 低速大质量球头弹冲击下薄板穿甲破坏机理数值分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 40-45.
- [9] 牛雯霞, 黄洁, 罗锦阳, 等. 超高速撞击混凝土冲击压力测量与分析[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集, 2009.
- [10] Liu W, Jun S, Belytschko T. Reproducing kernel particle methods structural dynamics[J]. Int J Number Meth Engrg, 1995(38): 1655-1679.
- [11] 唐恩凌, 唐伟富, 相升海, 等. 超高速碰撞喷出物与等离子体形成的物理机制[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 229-234.
- [12] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 舰船舷侧复合装甲结构抗动能穿甲模拟实验[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 11-18.