

梯度复合 Whipple 防护结构防护性能的数值仿真研究

张虎生, 戴兰宏

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为了提高航天器防护结构的防护性能, 提出一种梯度复合 Whipple 防护结构, 并采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对球形弹丸以不同的速度撞击该结构防护屏时形成碎片云的过程进行了有限元仿真, 将仿真结果与撞击相同面密度的单层铝合金防护屏的仿真结果进行了比较。结果表明: 梯度复合 Whipple 防护结构的防护性能要优于相同面密度的传统 Whipple 防护结构。

关键词: 爆炸力学; 空间碎片; 防护结构; 梯度复合; SPH

中图分类号: O347.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)S2-0366-04

Numerical Simulation of Shielding Effectiveness of Gradient Composite Whipple Shielding Structure

ZHANG Hu-sheng, DAI Lan-hong

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The gradient composite Whipple shielding structure was designed to improve the shielding capability of spacecraft. The hypervelocity impact of spherical projectile on the bumper of this shielding structure was numerically simulated by using ANSYS/LS-DYNA hydro-code. The debris cloud formed by impacting this structure was compared with that of aluminum alloy Whipple bumper. The results show that the shielding effectiveness of the former is better than that of the latter under the condition of identical area density.

Key words: explosion mechanics; space debris; shielding structure; gradient composite; SPH

0 引言

随着航天事业的发展, 残留在外层空间轨道上的废弃航天器及轨道活动中生成的残骸物等空间碎片与日俱增。据统计, 在最具应用价值的 2 000 km 近地空间中, 可跟踪的大于 10 cm 的碎片大约有 16 094 个^[1], 大于 1 cm 的碎片不少于 3.6×10^5 个, 大于 1 mm 的碎片约有 1.8×10^8 个。这些空间碎片以平均速度 10 km/s 互相穿越, 严重威胁着在轨航天器的安全运行^[2]。大于 10 cm 的空间碎片将导致航天器毁灭性损坏; 厘米级的空间碎片也可以导致航天器的彻底损坏; 毫米级的空间碎片能导致航天

器表面产生撞坑甚至使舱壁穿孔, 撞击部位不同, 危害程度也会有很大的差异。由于大量高速运行的空间碎片已严重威胁人类日益频繁的航天活动, 因此, 航天器防护的研究得到了世界各航天大国普遍重视。随着我国航天事业的迅速发展, 在未来几十年里, 我国发射进入太空的载人与不载人航天器的数量将会有有一个大的飞跃。因此, 在我国系统地开展航天器的防护研究工作, 不仅必要, 而且十分迫切。

目前, 国际上应用最为广泛的空间碎片防护结构是经典的 Whipple 防护结构及其各种改进型(如, 多层 Whipple、网状 Whipple、填充式 Whipple 结构等^[3]), 防护结构所选用的主体材料一般为铝合金

收稿日期: 2012-12-10

基金项目: 空间碎片专题研究项目(KJSP07204)

作者简介: 张虎生(1974—), 男, 助理研究员。E-mail: hszhang@lm.imech.ac.cn

材料。众所周知, Whipple 防护结构的防护屏在防护碎片冲击过程中起到极为关键的作用, 它的主要作用是破碎撞击来的碎片, 使碎片破碎得更小, 同时撞击产生的绝热温升也可使碎片液化或汽化, 从而达到减缓碎片对被防护主结构损毁的目的。要使 Whipple 结构的防护屏产生很好的防护效能, 就必须要求防护屏材料的强度和硬度足够高, 以有效破碎撞击来的碎片。然而目前广泛使用的铝合金材料的破坏强度一般为 200 ~ 500 MPa, 从更有效破碎撞击来碎片的角度来看, 它的强度显然还不足够高。因此, 如果能在保持防护结构重量基本不增加的前提下, 用强度和硬度更高的材料来替换或部分替换目前的铝合金材料作为 Whipple 结构的防护屏, 那么其防护效果将会得到显著改善。为此, 戴兰宏等^[4]提出了一种新型梯度复合 Whipple 防护结构, 其结构如图 1 所示。

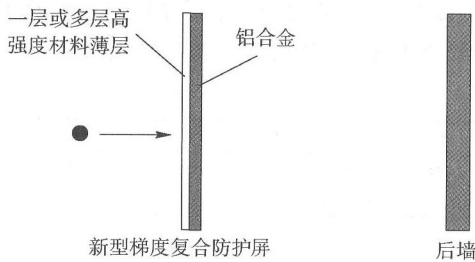


图 1 梯度复合 Whipple 防护结构示意图

该结构的设计思想是: 将目前国内外正在迅速崛起的高强度非晶态合金(或亚微米晶、超细晶)的

薄层与铝合金板采用特殊工艺制成双层或多层梯度复合 Whipple 结构的防护屏, 由于非晶态合金(或亚微米晶、超细晶)的强度和硬度通常比传统金属材料高 3 ~ 5 倍, 因此用此类材料与铝合金复合形成防护屏的前表层可以有效破碎撞击空间碎片, 从而显著提高结构防护空间碎片超高速撞击的能力。

为了证明梯度复合 Whipple 防护结构的防护性能优于相同面密度的传统 Whipple 防护结构, 本文采用 ASYS/LS-DYNA 有限元软件对球形弹丸撞击这两种防护结构防护屏的过程进行了有限元仿真研究, 并对有限元仿真结果进行了比较。

1 有限元仿真

1.1 基本方案

有限元仿真所采用的结构参数如表 1 所列, 弹丸为直径 3.96 mm 的 2024-T3 铝合金圆球, 梯度复合防护屏是由 0.48 mm 厚的锆基非晶合金和 0.976 mm 厚的 2024-T3 铝合金板组成, 其面密度略低于 2 mm 厚的 2024-T3 铝合金板。撞击速度取 7 km/s 和 3 km/s 两种情况。

超高速撞击后形成的膨胀碎片云对防护屏防护效果评估非常重要, 因此有限元仿真应尽可能精确地描述碎片云, 尤其是碎片云的膨胀速度、密度及碎片分布情况。光滑粒子流体动力学(SPH)方法既克服了拉格朗日方法网格畸变的问题, 同时又继承了欧拉方法中的大部分优点, 成为了超高速撞击有限元仿真应用中最有前景的一种方法^[5]。

表 1 防护结构参数

防护屏结构	弹丸		前板				
	材料	直径/mm	材料	厚度/mm	面积/mm × mm	面密度/(g·cm ⁻²)	
单层铝合金板	Al-2024-T3	3.96	Al-2024-T3	2	80 × 80	0.557 0	
梯度复合板	Al-2024-T3	3.96	表层	锆基非晶合金	0.48	80 × 80	0.554 5
			底层	Al-2024-T3	0.976		

1.2 有限元模型

为节省计算机资源增强计算效率, 本文采用了 Lagrange 与 SPH 耦合的方法进行有限元仿真, 有限元模型如图 2 所示, 防护屏中心 24 mm × 24 mm 方形区域为 SPH 粒子, 方形区四周为 Lagrange 单元, SPH 粒子与 Lagrange 单元之间的耦合采用 LS-DYNA 中的固连接触来实现。弹丸采用 SPH 粒子。

1.3 材料模型

弹丸与防护屏均采用 Johnson-Cook 强度模型来

描述, 其具体表达式^[6]为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\varepsilon_0} \right) \right] (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变, 参考应变率 $\varepsilon_0 = s^{-1}$; A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料参数, A 为材料在准静态条件下的屈服强度, B 和 n 分别为应变硬化常数和应变硬化指数, C 为应变率硬化常数, m 为温度软化常数。

状态方程采用 Mie-Gruneisen 状态方程, 其表达式^[7]为

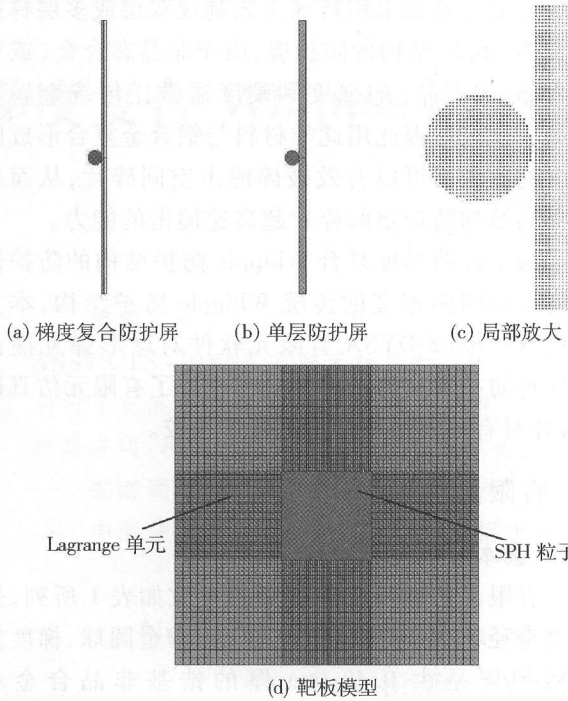


图 2 有限元模型

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 C_B^2 \mu \left[1 + \left(1 + \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{\mu + 1} \right]^2} + \\ (\gamma_0 + a\mu) E_0, & \text{压缩阶段;} \\ \rho_0 C_B^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E_0, & \text{膨胀阶段.} \end{cases} \quad (2)$$

式中： ρ_0 、 E_0 分别为初始密度和初始内能； C_B 为材料中的声速； γ_0 为 Gruneisen 系数； S_1 、 S_2 和 S_3 为材料的冲击波速度 $D - u$ 关系表达式中的系数。

计算中所采用的具体材料模型参数如表 2 所列。

2 有限元仿真结果

两种超高速撞击速度下碎片云在不同时刻的形态分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3 中弹丸以 7 km/s 的速度撞击梯度复合防护屏所形成的碎片云在 6 μ s 时刻的形态可以看出，撞击发生后大量的破碎粒子向后反溅，而相同的弹丸撞击单层铝合金板时，破碎弹丸粒子几乎没发

表 2 材料参数

	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G / GPa	A / GPa	B / GPa	n	C	m	$C_B / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	γ_0
Al-2024-T3	2.785	28.6	0.265	0.426	0.34	0.015	1.000	5328	1.339	2.00
锆基非晶合金	5.900	35.3	1.900	0.753	0.42	0	0.822	5044	0.3238	1.93

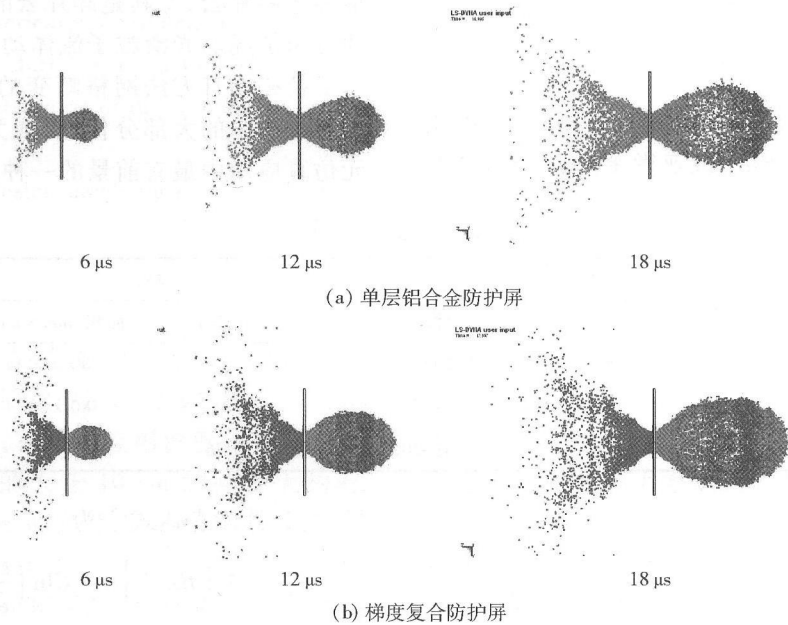


图 3 撞击速度为 7 km/s 时不同时刻的碎片云形态

生反溅。反溅的粒子多将意味着穿透防护屏的粒子数目的减少，从而在相同条件下其对后墙的破坏作用也将减小，这就从一个方面说明梯度复合结构对空间碎片的防护效果要优于相同面密度的单层铝合金结构。

对于撞击速度为 3 km/s (图 4) 的情况也可以得到相同的结论。

对某一时刻 (撞击速度为 7 km/s 时取 18 μ s, 撞击速度为 3 km/s 时取 45 μ s) 碎片的形状尺寸及防护屏穿孔的尺寸进行了测量，测量结果列于表 3。

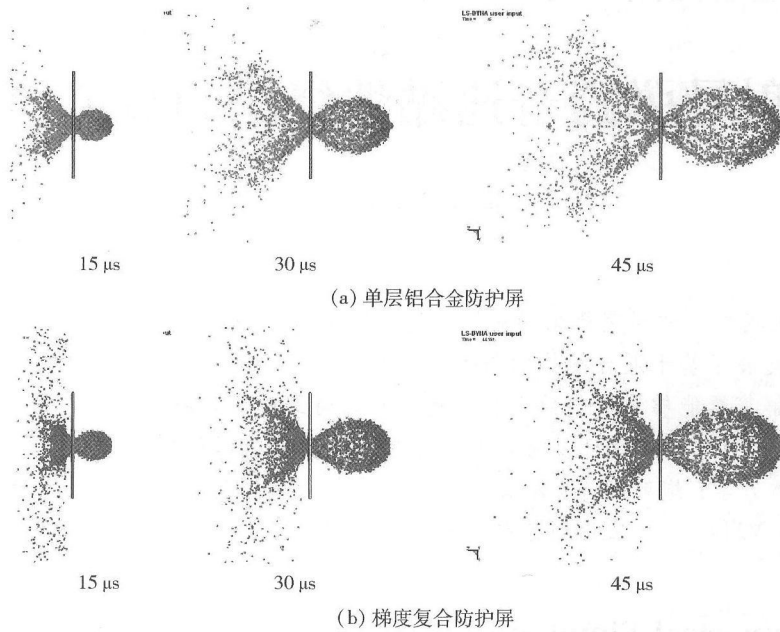


图 4 撞击速度为 3 km/s 时不同时刻的碎片云形态

从表中可以看出,相同条件下弹丸撞击梯度复合防护屏所形成碎片云的体积比较小,也就是它的膨胀速度要比撞击单层铝合金防护屏所形成碎片云的膨胀速度要低,这也就从另一个角度说明了梯度复合结构对空间碎片的防护效果优于相同面密度的单层铝合金结构。从表中还可以看出相同条件下,弹丸撞击梯度复合防护屏所形成的穿孔比其撞击单层铝合金防护屏所形成的要小,这样形成碎片云中防护屏的粒子数目也相应比较少,碎片云对后墙的破坏作用也要小。

性能要优于相同面密度的传统 Whipple 防护结构。

表 3 碎片云形状尺寸及防护屏穿孔尺寸

撞击速度/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	结构	径向膨胀 距离/mm	轴向膨胀 距离/mm	前板穿孔 直径/mm
7	单层铝合金	36.18	108.02	1.15
	梯度复合	32.72	99.81	1.12
3	单层铝合金	34.86	99.22	0.90
	梯度复合	28.92	90.71	0.81

参考文献 (References)

- [1] 赵振岩, 王宇飞, 邱瑞. 卫星主动规避空间碎片碰撞研究—中国空间技术研究院卫星规避空间碎片工作的现状及差距 [J]. 空间碎片研究与应用, 2011, 11(4): 43-47. ZHAO Zhen-yan, WANG Yu-fei, QIU Rui. Research of satellite active avoid space debris—current state and shortage of CAST satellite avoid space debris [J]. Space Debris Research and Application, 2011, 11(4): 43-47. (in Chinese)
- [2] 都亨, 张文祥, 庞宝君, 等. 空间碎片 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007. DU Heng, ZHANG Wen-xiang, PANG Bao-jun, et al. Space debris [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [3] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. Protection Manual, IDAC-04-03 [R]. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 2008.
- [4] Huang X, Ling Z, Liu Z D, et al. Amorphous alloy reinforced Whipple shield structure [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 42(4): 1-10.
- [5] Randles P W, Libersky L D. Smoothed particle hydrodynamics: Some recent improvements and applications [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139(1-4): 375-408.
- [6] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C] // 7th International Symposium on Ballistics. Hague: [s. n.], 1983: 541-544.
- [7] Hallquist J O. LS-DYNA keyword user's manual, Version 970 [M]. Livermore CA: Livermore Software and Technology Corporation, 2003.

3 结论

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对球形弹丸以不同的速度撞击梯度复合结构防护屏形成碎片云的过程进行了有限元仿真,并将仿真结果与撞击相同面密度的单层铝合金防护屏的结果进行了比较。通过比较可以,看出弹丸与撞击单层铝合金防护屏相比,弹丸撞击梯度复合防护屏时防护屏穿孔较小,飞溅粒子较多且分散,碎片云膨胀速度较低;该仿真结果表明梯度复合 Whipple 防护结构的防护

(本文责编 孙戈川)