

填充式波纹夹层结构超高速撞击特性仿真*

周昊¹, 郭锐¹, 南博华², 刘荣忠¹

(1. 南京理工大学智能弹药国防重点学科实验室, 江苏南京 210094; 2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

摘要:基于航天器空间碎片被动防护需求,对一种新型填充式波纹夹层结构进行超高速撞击仿真研究,分析超高速撞击过程以及结构的穿孔破坏情况和所形成的碎片云的特性,并与相同面密度 Whipple 结构进行对比。其撞击现象与 Whipple 结构相似,但其碎片云的头部速度小于 Whipple 结构,而径向膨胀最大速度和膨胀半角均大于 Whipple 结构。随撞击初速从 3 km/s ~ 10 km/s 不断增大,波纹夹层结构的撞击穿孔尺寸变大,形状也更不规则。此外,结构中的填充树脂对碎片撞击能量的吸收贡献最大,后面板所吸收的能量所占比重较大,而前面板和波纹板对碎片撞击能量的吸收贡献较小。研究结果对空间碎片防护结构的设计具有一定的参考意义。

关键词:填充式波纹夹层结构;超高速撞击;穿孔破坏;碎片云特性;能量吸收特性

中图分类号:V423.5;O347.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)02-057-07

Simulation on hypervelocity impact characteristics of stuffed corrugation-cored sandwiches

ZHOU Hao¹, GUO Rui¹, NAN Bohua², LIU Rongzhong¹

(1. ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacture, Shanghai 200245, China)

Abstract: Based on the demand of the spacecraft protection against the orbital debris, numerical simulation of a new designed stuffed corrugation-cored sandwich under hypervelocity impact was carried out. The hypervelocity impact process was obtained, and thereby the perforation of the sandwich and the characteristics of the debris cloud were analyzed. It can be seen that the phenomenon of stuffed corrugation-cored sandwich under hypervelocity impact is similar to that of Whipple structure, but the head velocity of the debris cloud is lower and the expansion velocity and expansion angle is larger. With the impact velocity increasing from 3 km/s to 10 km/s, the size of the sandwich perforation increases accordingly and the shape of the perforation becomes more irregular. Furthermore, the epoxy stuffed in the sandwich absorbs most impact energy of the debris while the front plate and the corrugation core absorb less energy. The research can provide some references for the design of orbital debris shield.

Key words: stuffed corrugation-cored sandwiches; hypervelocity impact; perforation; debris cloud characteristics; energy absorption characteristics

随着人类航天活动日益频繁地开展,空间碎片的数量迅速增加^[1]。空间碎片与在轨航天器撞击时的平均相对速度约为 10 km/s,具有极强的毁伤能力,这使航天器的运行安全受到了严重的威胁,因此空间碎片防护问题一直是国内外相关学者研究的重点^[2-8]。

对于数量庞大的毫米级和微米级碎片,由于无法对其进行逐一追踪、定位和编目,因此只能采用被动防护措施来降低其对航天器的损伤^[9]。被动防护是指在航天器舱壁外设置防护层从而分

解空间碎片的撞击能量,进而降低航天器舱壁被穿透的概率,保护航天器内部的设备和装置。经过多年的研究,国内外相关专家已为国际空间站开发了多种防护结构并对其超高速撞击特性和防护性能进行了研究^[10-11],其中比较典型的防护结构包括 Whipple 防护结构^[2]、填充式 Whipple 防护结构^[3]、多层冲击防护结构^[4]、网状双层防护结构^[12]、泡沫铝防护结构^[13]以及蜂窝夹层防护结构^[14]等。这些结构在空间碎片防护中取得了一定的成效,但是随着空间环境日趋恶化,航天器

* 收稿日期:2015-11-02

基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST201333)

作者简介:周昊(1990—),男,山东东营人,博士研究生,E-mail:zhouhao_njust@163.com;

郭锐(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:guoruid@163.com

防护任务愈发艰巨,因此需要不断开发新型防护结构以满足航天器防护需求。

本文提出了一种波纹夹层内填充树脂材料的新型夹层防护结构(下文简称波纹夹层结构)作为缓冲层,基于 ANSYS/AUTODYN 仿真软件中的光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamic, SPH)算法对其空间碎片超高速撞击过程进行了仿真研究,并对其超高速撞击特性进行分析,重点探讨了防护结构的穿孔特性、撞击形成碎片云特性以及结构的能量吸收特性等,并将其与相同面密度 Whipple 结构进行对比分析。研究内容可为航天器空间碎片防护结构的设计和 optimization 提供一定的参考。

1 波纹夹层结构超高速撞击数值仿真

空间碎片与防护结构最高可达十几千米每秒的撞击速度,结构的变形极其严重,甚至会出现液化和气化的现象,因此传统的有限元算法难以对超高速撞击过程进行准确的描述。SPH 方法作为一种典型的无网格仿真方法,可以很好地解决网格畸变带来的问题,因此选取 ANSYS/AUTODYN 软件中的 SPH 方法对空间碎片超高速撞击波纹夹层结构的过程进行仿真模拟。

1.1 仿真模型

建立空间碎片垂直撞击波纹夹层结构的仿真模型,其中波纹夹层结构设置于航天器舱壁之前且两者间隔一定距离。仿真模型如图 1 所示,考虑到仿真模型的对称性,所建实际模型为三维四分之一对称模型。

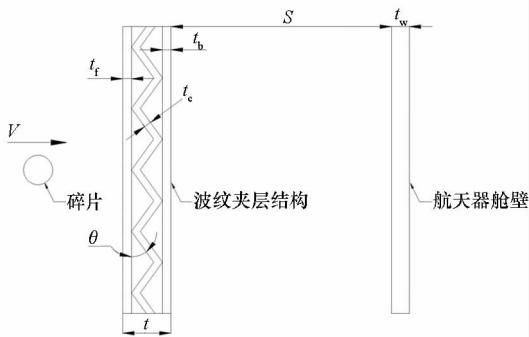


图 1 仿真模型示意图
Fig.1 Simulation model

仿真模型中波纹夹层结构如图 2 所示,此结构由前后面板、波纹板夹层和填充材料组成,其中前后面板和波纹板的材料均为铝合金,填充材料为环氧树脂。由于波纹夹层结构在不同的方向上并不是线性均匀的,为了便于分析,在垂直于空间碎片撞击的方向上,将波纹夹层结构沿波纹板波

纹方向定义为其横向,将与波纹方向垂直的方向定义为其纵向。

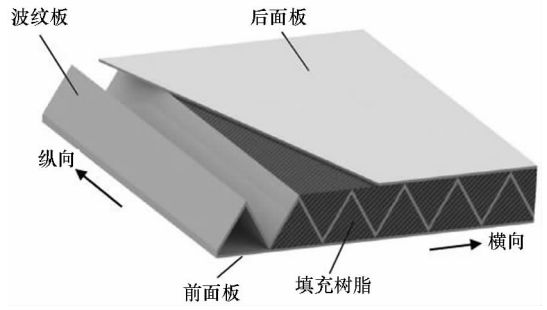


图 2 填充式波纹夹层结构示意图
Fig.2 Diagram of stuffed corrugation-cored sandwich

波纹夹层结构的主要结构参数见表 1, ρ_A 为其面密度。

表 1 波纹夹层结构参数
Tab.1 Parameters of corrugation-cored sandwich

t_f/mm	t_b/mm	t_c/mm	t/mm	$\theta/(^\circ)$	$\rho_A/(g/cm^2)$
0.5	0.5	0.5	4	45	0.74

为了简化计算,将空间碎片形状近似为球形,且撞击位置选为三角形波纹板顶点处,其他模型主要参数见表 2。

表 2 仿真模型参数
Tab.2 Parameters of simulation model

$V/(km/s)$	碎片直径 d_p/mm	S/mm	t_w/mm
3 ~ 10	5	100	3

除已确定的波纹夹层结构材料外,空间碎片和航天器舱壁的材料均选用铝合金。铝合金和环氧树脂材料模型均取自 AUTODYN 材料库。其中,铝合金材料为 Al2024T351,密度为 $2.75 g/cm^3$,选用 Tillotson 状态方程^[15]和 Johnson-Cook 强度模型^[16]进行描述;环氧树脂密度为 $1.19 g/cm^3$,使用 Shock 状态方程^[17]进行描述。材料模型及主要参数见表 3。

1.2 仿真有效性验证

受限于现有试验条件,波纹夹层结构超高速撞击试验难以实现,因此通过 Whipple 结构撞击试验来校验所用仿真方法和材料模型的准确性。选用文献[18]中的一组试验结果作为对比,建立各参数均与之对应的 Whipple 结构超高速撞击仿真模型。其中,缓冲层厚度为 0.194 cm,后墙厚度为 0.190 cm,防护间距为 10 cm,球形空间碎片

表 3 材料模型及主要参数

Tab.3 Key parameters of material models

	材料属性	
	铝合金	环氧树脂
状态方程	Tillotson $\rho = 2.75 \text{ g/cm}^3$ $A = 7.52 \times 10^7 \text{ kPa}$ $B = 6.50 \times 10^7 \text{ kPa}$ $a = 0.5$ $b = 1.63$ $\alpha = 5$ $\beta = 5$	Shock $\rho = 1.19 \text{ g/cm}^3$ $c_0 = 2730 \text{ m/s}$ $s = 1.493$ $\gamma = 1.13$
强度模型	Johnson-Cook $G_0 = 2.76 \times 10^7 \text{ kPa}$ $A = 2.65 \times 10^5 \text{ kPa}$ $B = 4.26 \times 10^5 \text{ kPa}$ $n = 0.34$ $C = 0.015$ $m = 1.0$ $T_{\text{melt}} = 775 \text{ K}$	None

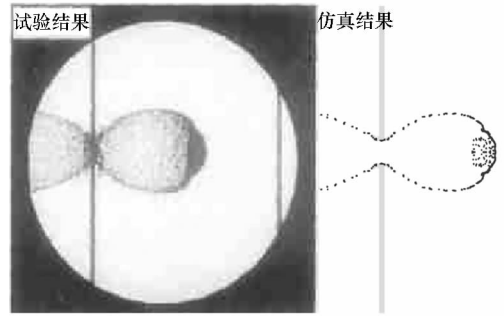


图 3 相同时刻碎片云形状试验结果与仿真结果对比

Fig.3 Comparison for debris cloud of experiment and simulation result

直径为 0.502 cm, 撞击初速为 5.52 km/s。使用与波纹夹层结构超高速撞击模拟相同的仿真算法和材料模型进行计算, 相同时刻试验结果与仿真结果碎片云的形状对比如图 3 所示。

通过图 3 可以看出, 通过数值仿真得到的碎片云与超高速撞击试验在相同时刻的激光阴影照

片相比, 在形貌和尺寸上均具有很高的相似度, 两者碎片云头部形状以及缓冲层后粒子的喷射情况均十分吻合。此外, 数值仿真中缓冲墙穿孔孔径为 11.7 mm, 与试验结果十分接近, 并且最终后墙均未出现穿透, 仅有少量剥落。通过上述对比可验证所选 SPH 算法和相关材料模型的准确性, 可以为后续仿真结果的可靠性提供一定的依据。

2 波纹夹层防护结构超高速撞击特性分析

2.1 球形碎片超高速撞击波纹夹层结构过程描述

以碎片撞击初速为 10 km/s 为例, 球形碎片撞击波纹夹层结构形成碎片云并对航天器舱壁作用的过程如图 4 所示。

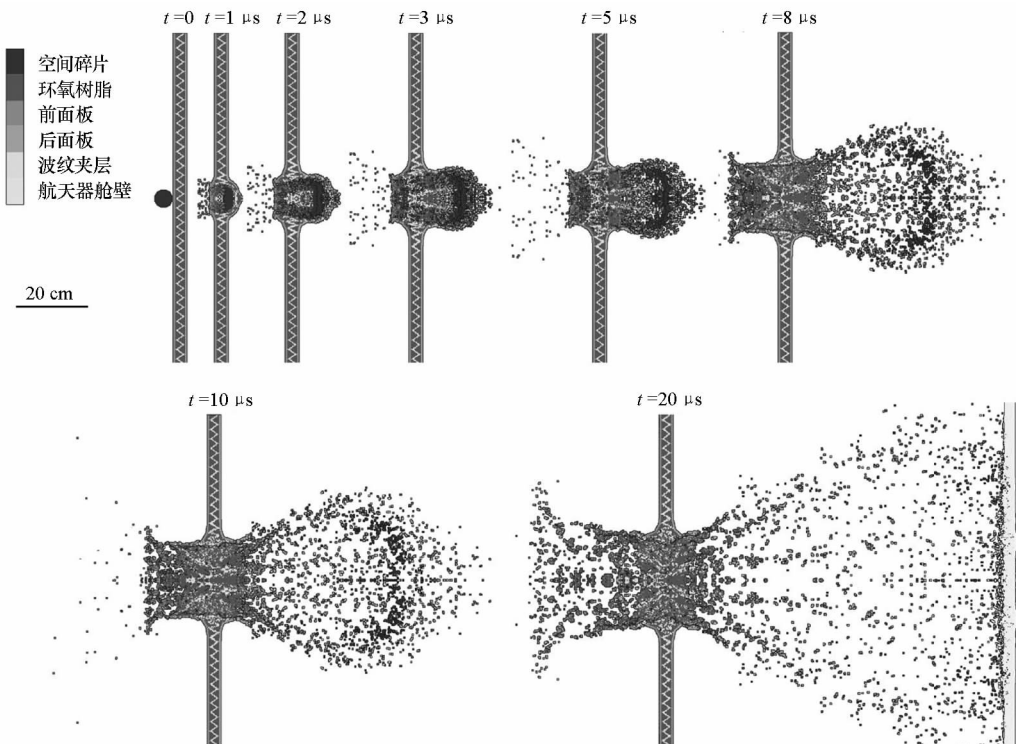


图 4 波纹夹层结构超高速撞击过程

Fig.4 Process of stuffed corrugation-cored sandwich under hypervelocity impact

空间碎片在撞击并穿透波纹夹层结构的过程中发生剧烈破碎,同时波纹夹层结构也发生严重破坏并出现材料剥落的现象,产生大量高速运动的粒子,形成与撞击 Whipple 结构类似的碎片云,形状近似为椭圆形。在 $t = 5 \mu\text{s}$ 时,碎片云的形貌已基本趋于稳定,之后碎片云在向前高速运动过程中同时发生周向扩散和膨胀,碎片云中粒子的分布逐渐变得稀疏,空间碎片的破碎程度也变得愈加彻底,形成较为分散的粒子团,分布于整个碎片云的前部。最终碎片云中的高速粒子先后作用于航天器舱壁,使舱壁产生弯曲、鼓包以及材料崩落等破坏变形现象。

2.2 波纹夹层结构撞击穿孔特性

波纹夹层结构在空间碎片的撞击作用下发生十分严重的穿孔破坏,在撞击初期,其受空间碎片撞击的一面出现翻边破坏,随着撞击过程的进行,翻边高度剧烈增大,大量的高速粒子向后喷出,形成向后运动的碎片云团。与向前运动的碎片云不同,该碎片云形状呈喇叭状,且随着撞击过程的进行其口部扩展程度不断变大。波纹夹层结构在初速为 10 km/s 碎片撞击下形成的穿孔形状如图 5 所示。

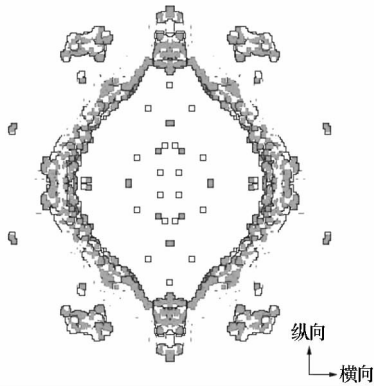


图 5 撞击初速 10 km/s 波纹夹层结构破坏穿孔形状

Fig. 5 Perforation shape of stuffed corrugation-cored sandwich under impact of 10 km/s

通过图 5 可以看出,基于前文对波纹夹层结构方向性的定义,由于波纹夹层结构在横向和纵向上具有不同的几何特性,因此结构在两个方向上的力学特性不相同,与 Whipple 结构中的均质板不同,其在受到空间碎片撞击后形成的穿孔并不是圆形。波纹夹层结构在纵向上的破坏更加严重,其破坏形状也更不规则,而破坏穿孔的横向孔边缘则为比较平滑的圆弧形。波纹夹层结构在不同初速碎片撞击下形成的破坏穿孔形状是类似的,通过其在横向和纵向上的最大穿孔尺寸可以更为准确地描述其穿孔特性,波纹夹层结构在不

同速度碎片撞击下的穿孔特性如图 6 所示。

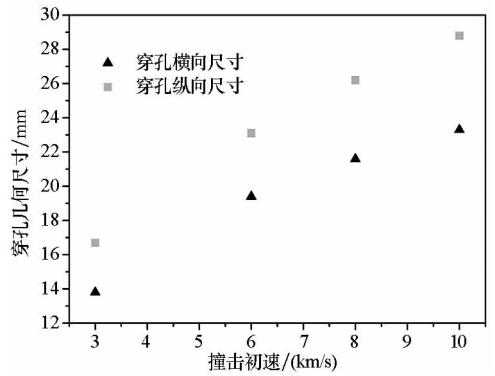


图 6 波纹夹层结构在不同速度碎片撞击下的穿孔特性

Fig. 6 Perforation characteristics of stuffed corrugation-cored sandwich under impact of different velocities

通过图 6 可以看出,波纹夹层结构穿孔尺寸随着撞击初速的增大而不断增大,但随着初速的变大,穿孔尺寸的增大速度则逐渐变小。对比两个方向的穿孔尺寸可知,在不同的撞击初速下,穿孔横向尺寸始终小于纵向尺寸,而且随着碎片撞击初速的增大,波纹夹层结构的破坏更加严重,穿孔在两个方向上的穿孔尺寸之差也增大,因此穿孔形状更不规则。

2.3 超高速撞击形成碎片云特性

空间碎片撞击波纹夹层结构后,同时产生剧烈破碎,形成包含大量高速粒子的碎片云,不同撞击速度下形成的碎片云形状大致相似,典型碎片云的形状如图 7 所示,其中,点 1 为碎片云头部位置,点 2 为碎片云径向膨胀速度最大位置。

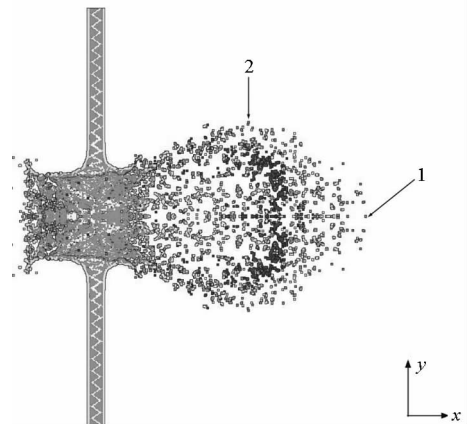


图 7 典型碎片云形状

Fig. 7 Typical shape of debris cloud

表征碎片云特性的参数主要有碎片云头部速度、径向膨胀最大速度以及膨胀角等。膨胀角表征碎片云的膨胀程度,能够反映碎片撞击防护结构后能量的扩散情况,根据参考文献[19]中的计算模型,碎片云膨胀半角可通过式(1)进行计算。

$$\tan\theta_{\text{ext}} = \frac{v_{y,\text{max}}}{v_{x,2}} = \frac{v_{y,2}}{v_{x,2}} \quad (1)$$

式中: θ_{ext} 表示碎片云的膨胀半角; $v_{y,\text{max}}$ 表示碎片云径向膨胀最大速度; $v_{x,2}$ 和 $v_{y,2}$ 分别表示点2碎片云粒子的轴向速度和径向速度。

根据式(1)对仿真结果进行分析和计算,得到不同条件下碎片云的头部速度、径向最大膨胀速度以及膨胀半角等参数,同时与相同面密度 Whipple 结构的碎片云参数进行了对比,这些参数与碎片撞击初速之间的关系分别如图 8(a)~(c)所示。

图 8(a)为碎片撞击波纹夹层结构后形成碎片云的头部速度随撞击初速的变化情况,碎片云头部速度随撞击初速的增大而逐渐增大,且其增大趋势近似于线性。通过与撞击 Whipple 结构形成碎片云头部速度的对比可知,在撞击初速为 3 km/s 时,波纹夹层结构碎片云的头部速度大于 Whipple 结构,但随着撞击初速的增大,其头部速度则逐渐小于 Whipple 结构的,且两者差值有逐渐增大的趋势,说明在较高的撞击初速下,撞击波纹夹层结构形成碎片云的头部速度小于 Whipple 结构,这对航天器舱壁的防护效果是有利的。

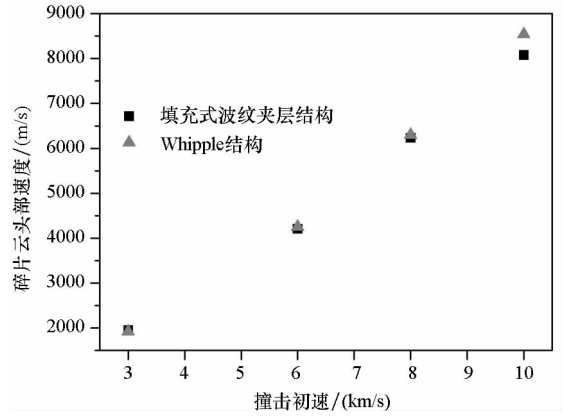
图 8(b)表示碎片云径向膨胀最大速度与碎片撞击初速之间的关系,径向膨胀最大速度同样随撞击初速的增大而逐渐增大,而且其增大速率呈现出递增的趋势。撞击波纹夹层结构形成碎片云的径向膨胀最大速度始终大于 Whipple 结构的,而且随着撞击初速的增大其领先优势愈加明显。

图 8(c)表示碎片云膨胀半角随撞击初速的变化规律,膨胀半角同样随撞击初速的增大而不断增大,其增大趋势也可近似为线性。因此,随着撞击初速的增大,撞击所形成的碎片云扩散就越严重,而且在相同的撞击速度下,撞击波纹夹层结构形成碎片云的膨胀程度大于 Whipple 结构,说明波纹夹层结构对空间碎片的撞击能量有更好的分散作用,可以有效减少撞击航天器舱壁粒子的能量密度,对其有更好的防护作用。

2.4 填充式波纹夹层结构能量吸收特性

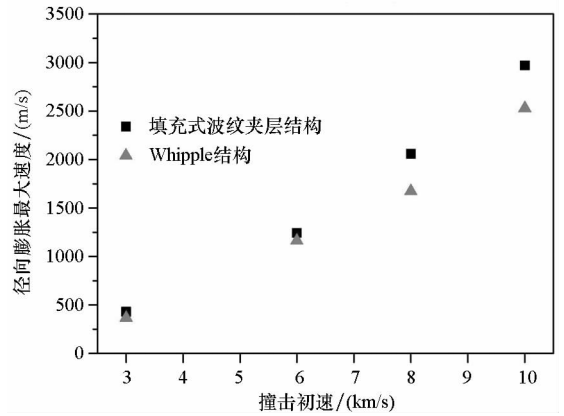
碎片撞击波纹夹层结构之后,一部分撞击动能被夹层结构的各组成部分吸收,使得能量分散,避免了集中能量对航天器舱壁及其内部设备的损伤。

通过图 9 中波纹夹层结构与同面密度 Whipple 结构在撞击过程中吸收能量的对比可知,在四种撞击速度下,波纹夹层结构均能吸收更



(a) 碎片云头部速度随撞击初速变化规律

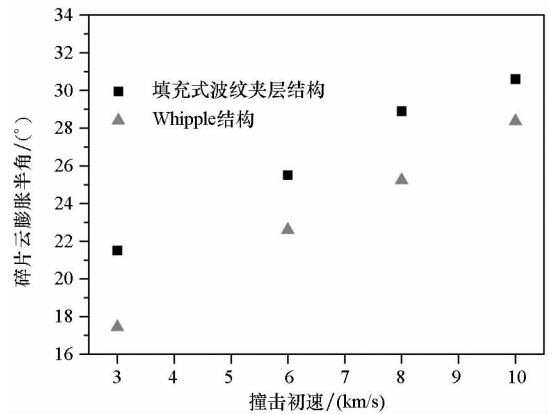
(a) Head velocity versus impact velocity



(b) 碎片云径向膨胀最大速度随撞击初速变化规律

(b) Maximum velocity in radial direction

versus impact velocity



(c) 碎片云膨胀半角随撞击初速变化规律

(c) Half expansion angle versus impact velocity

图 8 碎片云参数与撞击初速关系

Fig. 8 Parameters of debris cloud dependent on impact velocity

多的能量,且这种优势随着撞击初速的增大而更加明显,说明波纹夹层结构能够对空间碎片的撞击能量起到更好的吸收和分散作用,对其防护性能有利。

此外,在不同的撞击速度下,波纹夹层结构四

个组成部分的能量吸收情况是不同的,具体如图 10 所示。

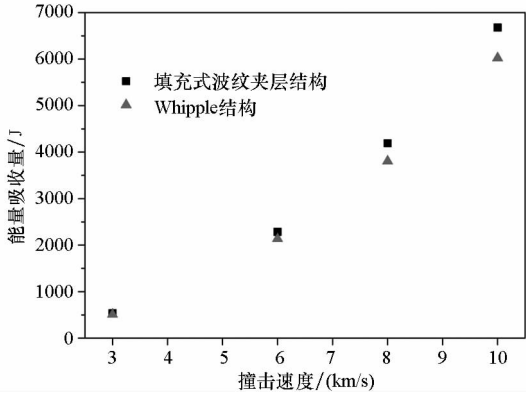


图 9 能量吸收量随撞击初速变化规律

Fig. 9 Energy absorption depending on impact velocity

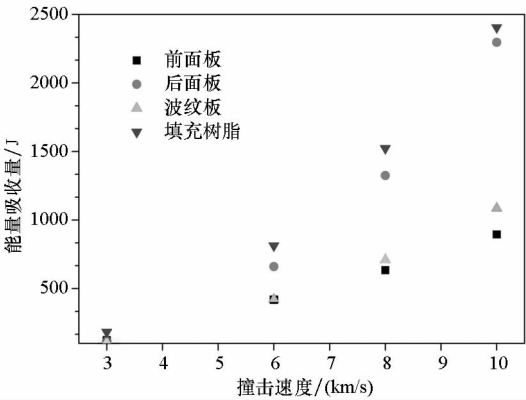


图 10 波纹夹层结构各部分能量吸收情况

Fig. 10 Energy absorption of different part of stuffed corrugation-cored sandwich

通过图 10 可以看出,不同的撞击初速下,在波纹夹层结构的四个组成部分中,填充树脂所吸收的能量最多,其次为后面板,而且两者随撞击初速的增大其能量吸收速度增大,其趋势与图 9 中结构能量吸收总量类似。相比之下,前面板和波纹板吸收的能量较少,并且其随撞击初速的增大其吸收速度减小。通过分析可知,在空间碎片撞击波纹夹层结构的过程中,其与结构各部分接触的顺序依次为前面板、波纹板、填充树脂和后面板,因此空间碎片在与前面板和波纹板接触时速度较快,时间较短,导致这两部分所吸收的能量有限。随着撞击过程的进行,空间碎片速度降低且出现破碎,因此其与填充树脂和后面板接触面积变大,接触时间增长,这两部分吸收的能量较多。而且撞击初速越大,不同结构在与空间碎片的接触时间和接触面积上的差别就更明显,因此能量吸收量的差别也更大。对于环氧树脂材料,由于其具有更优异的能量吸收特性,而且在结构中所

占体积最大,因此与空间碎片的接触时间最长,其吸收的能量也最多。

3 结论

1) 球形碎片超高速撞击填充式波纹夹层防护结构后,结构发生剧烈破坏,形成高速运动的碎片云,撞击现象与 Whipple 结构的相似,但其碎片云的头部速度小于 Whipple 结构的,而径向膨胀最大速度和膨胀半角均大于 Whipple 结构,对于防护效果较为有利。

2) 随着撞击初速的增大,填充式波纹夹层结构的破坏程度愈加严重,撞击穿孔的尺寸增大,且穿孔在两个方向上的尺寸之差也不断变大,穿孔形状更不规则。

3) 填充式波纹夹层结构中,不同部分所吸收的空间碎片的能量是不同的。其中,填充树脂对碎片撞击能量的吸收贡献最大,后面板所吸收的能量所占比重也较大,而前面板和波纹板对碎片撞击能量的吸收贡献较小,这对后续结构的优化设计具有重要的参考意义。

参考文献 (References)

[1] 陈蓉,申麟,高朝辉,等. 空间碎片减缓技术发展研究[J]. 国际太空, 2014, 28(3): 63-67.
CHEN Rong, SHEN Lin, GAO Chaohui, et al. Study on the development of the orbital debris mitigation technology [J]. Space International, 2014, 28(3): 63-67. (in Chinese)

[2] Whipple F L. Meteorites and space travel [J]. Astronomical Journal, 1947, 52: 131.

[3] Christiansen E L, Crews J L, Williamsen J E, et al. Enhanced meteoroid and orbital debris shielding [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(1/2/3): 217-228.

[4] Cour-Palais B G, Crews J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding [J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 10(1/2/3/4): 135-146.

[5] Schonberg W P, Tullos R J. Spacecraft wall design for increased protection against penetration by orbital debris impacts [J]. AIAA Journal, 1991, 29(12): 2207-2214.

[6] 张伟,庞宝君,邹经湘,等. 航天器微流星和空间碎片的防护方案 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(2): 18-22.
ZHANG Wei, PANG Baojun, ZOU Jingxiang, et al. Meteoroid and space debris shielding concepts for spacecraft [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(2): 18-22. (in Chinese)

[7] 侯明强,龚自正,徐坤博,等. 密度梯度薄板超高速撞击特性的实验研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(2): 206-215.
HOU Mingqiang, GONG Zizheng, XU Kunbo, et al. Experimental study on hypervelocity impact characteristics of density-grade thin-plate [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(2): 206-215. (in Chinese)

- [8] 张宝玺, 哈跃, 邓云飞, 等. 超高速撞击 Kevlar 纤维布填充防护结构研究[J]. 高压物理学报, 2013, 27(1): 105 - 112.
ZHANG Baoxi, HA Yue, DENG Yunfei, et al. Optimal structure design of stuffed shields with Kevlar fiber clothes against hypervelocity impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 105 - 112. (in Chinese)
- [9] 龚自正, 杨继运, 张文兵, 等. 航天器空间碎片超高速撞击防护的若干问题[J]. 航天器环境工程, 2012, 24(3): 125 - 130.
GONG Zizheng, YANG Jiyun, ZHANG Wenbing, et al. Spacecraft protection from the hypervelocity impact of space meteoroid and orbital debris [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 24(3): 125 - 130. (in Chinese)
- [10] 闫军, 郑世贵. 填充式防护结构填充层撞击特性研究[J]. 载人航天, 2013, 19(1): 10 - 14.
YAN Jun, ZHENG Shigui. A research on middle layer impact characteristic of stuffed Whipple shields [J]. Manned Spaceflight, 2013, 19(1): 10 - 14. (in Chinese)
- [11] Christiansen E L. Meteoroid/debris shielding: NASA/TP - 2003 - 210788, S - 898, NAS 1. 60:210788 [R]. NASA Technical Reports Server, 2003.
- [12] Christiansen E L, Kerr J H. Mesh double-bumper shield; a low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection [J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 14(1/2/3/4): 169 - 180.
- [13] Yasensky J, Christiansen E L. Hypervelocity impact evaluation of metal foam core sandwich structures: JSC63945 [R]. NASA Technical Reports Server, 2008.
- [14] Taylor E A, Glanville J P, Clegg R A, et al. Hypervelocity impact on spacecraft honeycomb; hydrocode simulation and damage laws [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29(1): 691 - 702.
- [15] Tillotson J H. Metallic equations of state for hypervelocity impact; AD486711 [R]. NASA, 1962.
- [16] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983.
- [17] Gruneisen E. The state of a solid body: AD215056 [R]. NASA, 1959.
- [18] 柳森, 李毅, 黄洁, 等. 用于验证数值仿真的 Whipple 超高速撞击试验结果 [J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 505 - 508.
LIU Sen, LI Yi, HUANG Jie, et al. Hypervelocity impact test results of Whipple shield for the validation of numerical simulation [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 505 - 508. (in Chinese)
- [19] Corvonato E, Destefanis R, Faraud M. Integral model for the description of the debris cloud structure and impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(1): 115 - 128.