



空间碎片防护结构效能评价仿真系统和应用

刘有英¹,王海福²,黄 海¹

1. 北京航空航天大学宇航学院,北京 100191
2. 北京理工大学;爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081

摘要 论述了流星体/空间碎片(M/OD)防护的重要性,给出了自主开发的空间碎片防护结构效能评价仿真平台总体框架。通过分析不同防护参数及碰撞参数条件下的防护结构效能,总结了防护间距、防护屏厚度、碰撞速度和碰撞角等参数对空间碎片防护结构效能的影响规律。针对基本的 Whipple 防护结构,碰撞速度 $v < 3$ km/s 时,防护结构的防护效能不受防护间距变化的影响,碰撞速度 $v > 3$ km/s 时,防护间距越大,防护结构的防护效能越好;Whipple 防护结构的防护屏厚度越大,防护结构抗空间碎片撞击的能力越强,即其防护效能越好;在整个碰撞速度范围内(0~15 km/s),防护结构的防护效能呈现出 3 种不同的变化趋势,且防护结构的防护效能随碰撞角增大而提高。提出了一种波纹填充式防护结构,确定了可有效防护小尺寸空间碎片的防护设计参数。

关键词 流星体/空间碎片;防护结构;效能评价;航天器

中图分类号 V414

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)18-0033-05

Development and Application of a Performance Evaluation System for Meteoroid/Orbital Debris Shield

LIU Youying¹, WANG Haifu², HUANG Hai¹

1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The importance of a Meteoroid/Orbital Debris (M/OD) shield is analyzed and the framework of a performance evaluation system for M/OD shield is given. Based on the analysis of the shield performance for different shield parameters and impact parameters, the influences of shield spacing, thickness of wall, impact velocities and impact angles on the shield performance are discussed. The shield performance of the Whipple shield is not influenced by shield spacing, when the impact velocities are less than 3 km/s, but significant influence of shield spacing is evident when the impact

velocities are at the range of $v > 3$ km/s. Better shield performance is found in thicker shield. The ballistic limit curves have three different trends. The critical projectile diameter increases with impact velocities at the range of $v \leq 3$ km/s or $v \geq 7$ km/s, and decreases with impact velocities at the range of $3 \text{ km/s} < v < 7 \text{ km/s}$. Namely, the shield performance sees three different trends with the impact velocities ranging from 0 to 15 km/s. And better performance is expected with larger impact angle. A design method for Corrugated Stuffed Whipple shield (CSW) is given. The results of analysis show that shield performance for CSW improves with increase of corrugated angle. The shield parameters of CSW are established to protect spacecraft from small orbital debris impact.

Keywords Meteoroid/Orbital Debris; shield structure; performance evaluation; spacecraft

0 引言

随着人类航天发射活动的日益频繁和空间碎片环境的不断恶化,空间碎片防护已成为当前航天技术领域的前沿性重大研究课题。由于空间碎片运动具有方向性,航天器在不同方向遭遇空间碎片碰撞的风险不同,故需采取不同的防护结构形式以确保航天器安全在轨运行。同时,由于航天器舱段功能不同,对遭遇 M/OD 碰撞时要求的非失效概率也不尽

收稿日期:2009-07-15

基金项目:爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(20080231)

作者简介:刘有英,博士后,研究方向为空间碎片防护技术,电子信箱:lyyliu@163.com



相同,因此,即使是同一方向的不同舱段也需要采取不同的防护结构形式,如载人舱通常要求非失效概率高达 99.99%。压力容器舱的非失效概率要求也相当高,压力容器穿透时会产生喷气推力,可能导致航天器自控能力丧失,进而使电源和其他分系统失效,也可能导致结构失效,如果具有足够强的冲击压力,会使压力容器安装结构失效,或造成压力容器松动,乃至航天器的某些薄弱连接点变形或断裂。为确保航天器安全在轨运行,航天器防护结构类型不断丰富,新材料层出不穷^[1-10]。选择防护结构类型及材料时,需针对各种防护结构效能评价,根据防护要求选择满足要求的防护结构类型及相应的防护结构参数。本研究在 Matlab 平台上自主开发空间碎片防护结构效能评价仿真系统 MODSPAT(Meteoroid and Orbital Debris Shields Performance Assessment Tools),通过对不同防护及碰撞参数进行分析,给出碰撞碎片临界直径 d_c 随碰撞参数的变化规律,可对不同防护参数及材料的防护结构效能进行分析比较,为不同任务要求选择合适的防护结构提供参考。

1 系统总体框架

MODSPAT 由框架平台、应用程序模块和服务软件三部分组成,框架结构如图 1 所示,程序主界面如图 2 所示^[11]。该仿真系统主要针对目前各国已开发的常用 M/OD 防护结构类型效能进行评估,包括“基本防护结构”和“先进防护结构”两种效能评价模式。基本防护结构针对整体式(Monolithic, Mon)和 Whipple 防护结构进行分析,先进防护结构针对填充式(Stuffed Whipple Shield, SW)、多层冲击(Multi-Shock Shield, MS)、混合多层冲击(Hybrid Multi-shock Shield, HMS)、柔性多层冲击(Flexible Multi-shock Shield, FMS)和网状双层防护(Mesh Double-bumper Shield, MDB)等防护结构进行防

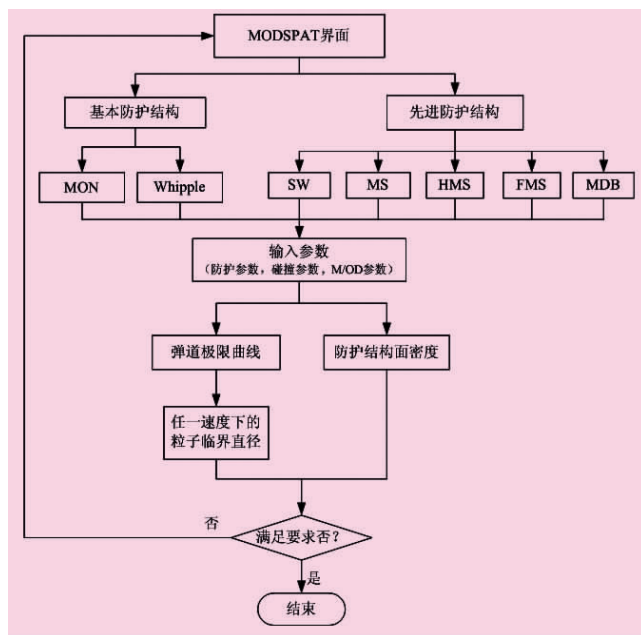


图 1 M/OD 防护结构效能评价仿真系统总体框架
Fig. 1 Framework of MODSPAT

柔性多层冲击(Flexible Multi-shock Shield, FMS)和网状双层防护(Mesh Double-bumper Shield, MDB)等防护结构进行防护效能评价。



图 2 MODSPAT 主界面
Fig. 2 Main panel of MODSPAT

2 防护结构效能评价

航天器防护结构的防护效能与防护参数(防护间距、防护屏厚度、舱壁厚度等)以及碰撞参数(碰撞速度、碰撞角)密切相关,同一类型的防护结构,由于参数不同,其防护效能存在很大差异。本文以简单 Whipple 防护结构为例,采用 MODSPAT 评价其在不同防护结构参数下的防护效能。Whipple 防护结构参数有:防护屏材料 Al 2024-T3,舱壁材料 Al 2024-T3,防护屏厚度 0.1 cm,舱壁厚度 0.2 cm。

2.1 防护间距的影响

M/OD 防护结构的防护原理是利用防护屏碎化弹丸,分散能量,减小对航天器舱壁的毁伤,其中防护间距具有重要作用,足够的防护间距可使碎片云充分扩散。Whipple 结构在不同防护间距下的防护效能评价结果如图 3 所示。

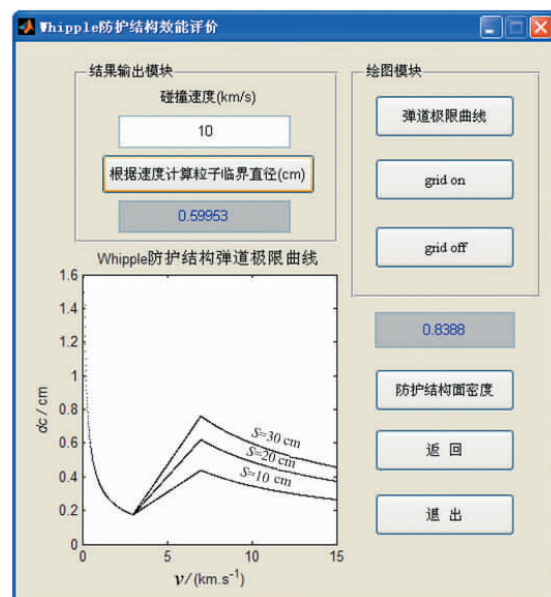


图 3 防护结构间距对防护效能的影响
Fig. 3 Influence of shield spacing on shield performance

表 5 CSW($\alpha=30^\circ$)与 SW 防护结构效能比较
Table 5 Comparison of shield performance for CSW and SW

碰撞速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)			1.5	2.6	4.5	6.5	9.0	12.0	14.0
临界直径 /cm	$\theta=0^\circ$	SW	0.338 7	0.234 7	0.487 1	0.754 0	0.676 5	0.614 6	0.583 8
		CSW	0.410 3	0.284 3	0.466 5	0.695 6	0.726 9	0.660 5	0.627 4
	$\theta=30^\circ$	SW	0.410 3	0.284 3	0.466 5	0.695 6	0.726 9	0.660 5	0.627 4
		CSW	0.853 4	0.591 4	0.517 8	0.635 1	0.781 9	0.869 2	0.825 7
	$\theta=45^\circ$	SW	0.537 6	0.372 6	0.461 0	0.644 2	0.804 5	0.730 9	0.694 3
		CSW	2.053 2	1.422 9	0.987 1	0.923 0	0.952 0	0.986 9	1.010

表 6 CSW 结构防护效能 ($\theta=30^\circ$)
Table 6 Shield performance for CSW ($\theta=30^\circ$)

碰撞速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)			1.500	2.600	4.500	6.500	9.000	12.00	14.00
临界直径 /cm	$\alpha=10^\circ$		0.483 2	0.334 8	0.459 8	0.660 4	0.772 9	0.702 2	0.667 1
	$\alpha=30^\circ$		0.853 4	0.591 4	0.517 8	0.635 1	0.781 9	0.869 2	0.825 7
	$\alpha=35^\circ$		1.067 8	0.740 0	0.578 0	0.668 0	0.780 6	0.915 7	0.898 1
	$\alpha=40^\circ$		1.415 9	0.981 2	0.687 9	0.747 0	0.820 9	0.909 5	0.968 7
	$\alpha=45^\circ$		2.053 2	1.422 9	0.987 1	0.923 0	0.952 0	0.986 9	1.010 1
	$\alpha=50^\circ$		3.495 7	2.422 6	1.680 5	1.349 0	1.323 0	1.292 1	1.271 4

从表 6 可看出,当入射粒子碰撞角一定时,防护结构的防护效能随波纹角增大而增强,上述防护参数条件下, $(\alpha+\theta)>75^\circ$ 时,CSW 基本能够防护所有小于 1 cm 的空间碎片。

4 结论

针对空间碎片环境日益恶化问题,在 Matlab 平台下自主开发了 M/OD 防护结构效能评价仿真系统,该系统可用于评价不同防护结构的防护效能及进行防护结构设计。

- 1) 给出了 M/OD 防护结构效能评价仿真系统总体框架。
- 2) 碰撞速度小于第一速度门槛值时,防护间距对防护结构的防护效能没有影响,碰撞速度大于第一速度门槛值时,防护结构的防护效能随防护间距的增加而增强。
- 3) 整个碰撞速度范围(0~15 km/s)内,防护屏厚度小于 0.3 cm 时,Whipple 防护结构的防护效能随着防护屏厚度的增加而增强。
- 4) 防护结构的防护效能随碰撞速度的变化,存在 3 种不同的变化趋势;随着碰撞角的增大,防护结构抗空间碎片撞击的临界粒子直径增大。
- 5) 提出了一种波纹填充式防护结构(CSW),并采用效能评价仿真系统对其防护效能进行了评价,在 $(\alpha+\theta)>75^\circ$ 条件下,CSW 结构可以抵抗几乎所有 1 cm 以下的 M/OD 高速/超高速撞击。

参考文献 (References)

- [1] Palmieri D, Faraud M, Destefanis R, et al. Whipple shield ballistic limit at impact velocities higher than 7 km/s[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26: 169–180.
- [2] Liu Youying, Wang Haifu. Corrugation stuffed shield for spacecraft and

- its performance [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2006, 15 (4): 397–400.
- [3] Christiansen E L, Kerr J H. Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection [J]. *Int J Impact Eng*, 1993, 14: 169–180.
- [4] Wang Haifu, Liu Youying. Performance analysis of shield systems for spacecraft [C]. 2004 ISSST, Progress in Safety Science and Technology Vol IV. Beijing: Science Press, 2004: 3006–3009.
- [5] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding[J]. *Int J Impact Eng*, 2001, 26: 93–104.
- [6] 刘有英,王海福. 高速碰撞下航天器防护结构效能评价 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 359–361.
Liu Youying, Wang Haifu. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 359–361.
- [7] Olsen G D, Nolen A M. Advanced shield design for space station FREEDOM[J]. *Int J Impact Eng*, 1993, 14: 541–549.
- [8] Wang Haifu, Yu Qingbo, Liu Youying. Meteoroid and orbital debris risk assessment and shielding system [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009, 18(1): 6–10.
- [9] 王海福,余庆波,刘有英. 空间碎片风险评估系统[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(12): 1039–1042.
Wang Haifu, Yu Qingbo, Liu Youying. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(12): 1039–1042.
- [10] 余庆波,王海福,王辉. 在轨航天器空间几何遮挡算法 [J]. 科技导报, 2009, 27(16): 36–39.
Yu Qingbo, Wang Haifu, Wang Hui. *Science & Technology Review*, 2009, 27(16): 36–39.
- [11] 刘有英. 空间碎片碰撞风险评估建模与仿真技术研究[D]. 北京: 北京理工大学宇航学院, 2007.
Liu Youying. Modelling and simulation of orbital debris risk assessment [D]. Beijing: School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, 2007.
- [12] Schonberg W P, Bean A J, Darzi K. Hypervelocity impact physics[R]. Alabama: University of Alabama–Huntsville, 1991.

(责任编辑 代丽)