

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0266

# 活性 Whipple 结构超高速撞击防护性能实验研究\*

武 强<sup>1</sup>, 张庆明<sup>2</sup>, 龚自正<sup>1</sup>, 任思远<sup>2</sup>, 刘 海<sup>3</sup>

- (1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
3. 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 以二级轻气炮作为加载手段, 针对以 PTFE/Al 活性材料为防护屏的 Whipple 防护结构, 开展不同弹丸尺寸、不同碰撞速度的超高速撞击实验。利用激光阴影照相设备, 获得并分析了碎片云特性; 通过回收的防护结构靶板, 研究了活性材料防护结构超高速撞击条件下的后板损伤特性; 通过与经典 Christiansen 撞击极限方程对比, 获得活性材料 Whipple 结构防护性能, 并拟合得到新型防护结构的撞击极限曲线。结果表明, 相较于同面密度铝合金材料, 活性材料超高速撞击条件下的冲击起爆反应使得碎片云中具有侵彻能力的碎片大幅减少, 从而显著提升航天器的防护能力, 撞击速度为 2.31 km/s 时最大可提升 45%。

**关键词:** Whipple 防护结构; 超高速撞击; 活性材料; 损伤特性; 撞击极限  
**中图分类号:** O389; V414.9      **国标学科代码:** 13035      **文献标志码:** A

## Experimental investigation into performances of an active Whipple shield against hypervelocity impact

WU Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Qingming<sup>2</sup>, GONG Zizheng<sup>1</sup>, REN Siyuan<sup>2</sup>, LIU Hai<sup>3</sup>

- (1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Hypervelocity Aerodynamic Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)

**Abstract:** With the continuous increase of centimeter-scale space debris, the exploration and design of new high-performance shields has become an urgent need. Based on the shield of active materials, the hypervelocity impact experiments with different projectile sizes and impact velocities were carried out by using a two-stage light gas gun. The image characteristics of debris clouds under different impact conditions were obtained and analyzed by laser shadowgraph photography. The damage characteristics of the rear wall of the active Whipple shield were studied. Through the statistical analysis of the number of craters, the influences of active materials on the fragmentation of projectiles under different impact velocities were obtained. Compared with the classical Christiansen ballistic limit equation, the protective performance of energetic active material shield was obtained, and the ballistic limit curve of the new shield was fitted. Analysis suggests that shock initiation characteristics of active materials under impact enhanced the shield performance. When impacted by the space debris, active material shield firstly uses its mechanical strength for primary crushing. During this process, the energetic material shield has an explosive reaction with an instantaneous temperature being as high as 3 800 K, which can promote fragmentation, melting and reduce the size of the space debris. At the same time, the explosion products with high temperature, pressure and high speed motion

\* 收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11802034); 国防科工局“十三五”碎片专项(KJSP2016030301);  
中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心开放基金(20200103)

第一作者: 武 强(1987—), 男, 博士, 工程师, wuqiang12525@126.com

通信作者: 张庆明(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, qmzhang@bit.edu.cn

produce a negative acceleration to the projectile fragments, reducing the axial kinetic energy. The explosion products of the active materials are mostly gaseous, which greatly reduce the number of the fragments with penetration ability in the debris cloud. The penetration failure of the rear plate only comes from the fragments generated by the fragmentation of the projectile. Under the combined action of impact and explosion, the active materials shield can not only fully break and decelerate space debris, but also greatly reduce the number of solid debris in debris cloud, thereby produce a sharp rise in the spacecraft protection ability, and the maximum protection ability can be increased by 45% when the velocity is 2.31 km/s.

**Keywords:** Whipple shield; hypervelocity impact; active materials; damage characteristics; ballistic limit

近年来空间碎片环境日益恶化,截止到 2019 年,尺寸为 1~10 cm 的空间碎片数量约为 75 万个,尺寸为 1~10 mm 的碎片数量超过 1.5 亿个,未来 50 年空间碎片数量将以每年 10% 的速度增长<sup>[1]</sup>。航天器和空间碎片碰撞时的平均相对速度为 10 km/s,一旦撞击将导致航天器表面被损伤或破坏,引起部件、分系统甚至整个航天器失效。

为提高航天器在恶劣空间碎片环境中的生存能力,自 20 世纪 80 年代以来,NASA、ESA、JAXA 等基于传统 Whipple 防护结构进行了大量的超高速撞击实验,研制出多种高性能防护结构,选择的材料主要有高强度铝合金板、铝网、泡沫铝、蜂窝板、Nextel 陶瓷布、Kevlar 纤维布等<sup>[2-5]</sup>。我国航天器空间碎片防护研究工作起步较晚,缺少高性能防护材料,面对空间碎片防护工程需求日趋强烈的现状,一些学者开展了高性能防护材料的研制工作,并得到了初步的工程应用。贾古寨等<sup>[6]</sup>研究制备了高性能玄武岩纤维织物,并进行了超高速撞击实验研究,获得了其超高速撞击损伤与防护机理;王应德等<sup>[7]</sup>研究制备了高性能 SiC 纤维织物,开发了国产高性能 SiC 纤维织物填充防护结构,并建立了对应撞击极限;侯明强等<sup>[8]</sup>提出将阻抗梯度材料应用于空间碎片防护,并系统研究了阻抗梯度材料及其防护结构的超高速撞击特性,获得了材料和结构的最优设计方案。尽管航天器空间碎片防护结构材料多样,但均为惰性材料,由于防护机理单一,很大程度上制约了防护结构对大尺寸空间碎片的防护能力。

PTFE/Al 是一种冲击引发的活性材料,可在冲击加载下被引发反应释放化学潜能,并对目标造成穿甲、燃烧、内爆等多种形式的综合毁伤效应。学者们围绕活性材料动态力学特性、冲击反应释能特性、高效毁伤战斗部应用等进行了大量的理论分析与实验研究,但均以增强战斗部的毁伤效果为研究背景<sup>[9-13]</sup>。因此,开展 PTFE/Al 活性材料超高速撞击实验研究,获取防护结构的损伤与防护特性,对航天器空间碎片防护能力的提高具有重要意义。本文中利用二级轻气炮开展活性材料防护结构的超高速撞击实验,结合防护结构在不同撞击条件下的碎片云与后板损伤特性,探讨活性材料防护性能,拟合得到撞击极限曲线。

## 1 超高速撞击实验

### 1.1 PTFE/Al 活性材料薄板的制备

实验中作为防护屏的 PTFE/Al 是一种零氧配比的活性材料,采用冷压烧结制备工艺,经混合、干燥、压制、烧结而成。其中 PTFE 的质量分数为 73.5%,Al 的质量分数为 26.5%,表 1 中给出了主要原材料的相关参数。由于 PTFE/Al 需要作为空间碎片防护结构的一部分,因此要求材料的力学强度越高越好。通过前期对制备工艺的研究可知,当成型压力为 80 MPa 时,结合具有熔融、结晶平台的烧结工艺(见图 1),获得的材料具有最理想的力学性能。

实验中将防护屏制备成直径 110 mm 的圆板,为了准确控制防护屏面密度,材料参数需要满足公式:

$$\rho_{Al}h_{Al} = \rho_0h_0 \quad (1)$$

式中: $\rho_{Al}$ 、 $h_{Al}$ 分别为铝合金的密度及厚度, $\rho_0$ 、 $h_0$ 为对应 PTFE/Al 活性材料的密度、厚度。

PTFE/Al 活性材料模压成型后,还需要经历

表 1 主要原料参数

Table 1 Parameters of raw materials

原料	规格	生产厂家
聚四氟乙烯	粒径 26 $\mu\text{m}$	美国 Dupont 公司
铝粉	粒径 10 $\mu\text{m}$ , 纯度 99.9%	河南远洋铝业
高纯氩气	纯度 $\geq 99.99\%$	北京亚男伟业
无水乙醇	纯度 $\geq 99.7\%$	北京化工厂

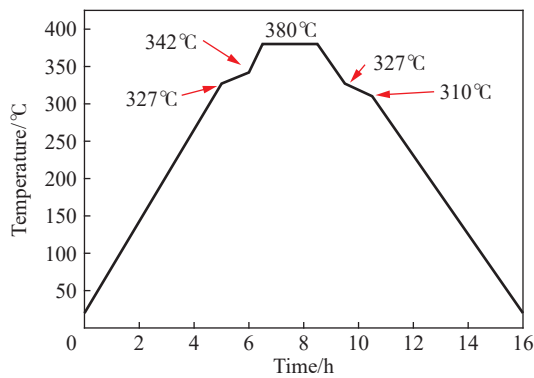


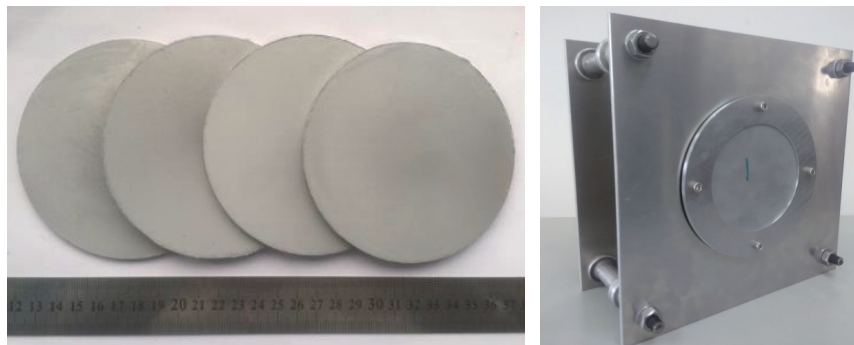
图 1 具有熔融、结晶平台的烧结工艺曲线

Fig. 1 Sintering process curve with melting and crystal platform

为了保证面密度相同, 只需要确定所需活性材料的质量即可, 采用这种方法制备的薄板面密度误差小于 1%。为了尽可能地接近工程应用背景, 同时考虑活性材料制备工艺的可行性, 实验中选用面密度为 0.84 g/cm<sup>2</sup> 的 PTFE/Al 活性材料防护屏, 对应粉末质量为 81.2 g。

### 1.2 实验系统与方案

采用二级轻气炮进行实验, 发射管口径为 14.5 mm, 最高发射速度可达 7.1 km/s。超高速撞击实验靶板结构选用经典的 Whipple 防护结构(见图 2), 撞击角度为 0°, 防护间距为 100 mm, 球形弹丸材料为 LY-12 铝。



(a) Active materials of PTFE/Al

(b) Whipple shield

图 2 Whipple 防护结构实验方案

Fig. 2 Whipple shield configuration

采用磁测速系统测量弹丸速度, 并采用激光阴影摄像机记录弹丸的超高速撞击过程。为了保证弹丸完整性, 采用气动分离系统实现弹丸与弹托的分离, 气动弹托及弹托拦截靶拦截前后对比如图 3 所示。



(a) Projectile and sabot

(b) Interception target before impact

(c) Interception target after impact

图 3 弹丸弹托及拦截靶拦截前后对比图

Fig. 3 Typical sabot and contrast of interception target before and after impact

烧结工艺, 由于烧结过程中基体 PTFE 经历晶体熔化、再结晶, 并伴有孔洞闭合、内应力释放等机制, 烧结前后材料体积会根据成型压力的大小有所变化, 所以很难单独确定  $\rho_0$  或者  $h_0$ 。制备活性材料板所需质量的计算公式为:

$$M = \pi R^2 \rho_0 h_0 \quad (2)$$

式中:  $R$  为模具半径。

将式(1)代入式(2), 可得:

$$M = \pi R^2 \rho_{Al} h_{Al} \quad (3)$$

为了保证面密度相同, 只需要确定所需活性

### 1.3 实验结果

共进行 9 发超高速撞击实验, 除实验 1 的防护屏为铝合金外, 其余实验的防护屏均为 PTFE/Al 活性材料, 面密度均为  $0.84 \text{ g/cm}^2$ 。球形弹丸直径分别为 5.0、6.0、6.4 mm, 弹丸撞击速度范围为 2.3~6.1 km/s。实验结果见表 2, 主要包括弹丸参数、Whipple 防护结构参数以及后板损伤情况。

表 2 实验参数及损伤情况

Table 2 Hypervelocity impact test configurations and damage results

实验	弹丸参数			Whipple防护结构参数			后板损伤
	直径/mm	质量/g	速度/( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	前板材料	面密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	后板材料	
1	6.4	0.38	5.06	LY-12铝	0.84	LY-12铝	穿孔撕裂
2	6.4	0.38	5.03	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	轻微层裂
3	5.0	0.18	3.79	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	鼓包
4	5.0	0.18	3.88	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	鼓包
5	5.0	0.18	4.00	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	鼓包
6	6.0	0.31	3.71	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	穿孔
7	6.4	0.38	6.08	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	轻微鼓包
8	5.0	0.18	2.65	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	鼓包
9	6.0	0.31	2.31	PTFE/Al	0.84	LY-12铝	鼓包

## 2 实验结果分析

### 2.1 碎片云特性

文献 [14] 采用高速摄像机记录弹丸的超高速撞击过程, 证明活性材料在撞击瞬间发生了可靠的冲击起爆反应。由于冲击起爆反应过程伴有剧烈的发光现象, 强光会导致图像的过渡曝光, 使碎片云形貌湮没, 所以高速摄像机无法有效记录含能防护结构碎片云演变过程。激光阴影摄影系统可以很好地解决这一问题 [15]。

图 4~5 给出了弹丸分别撞击铝合金防护屏(实验 1)、含能活性防护屏(实验 2)后碎片云的激光阴影照片, 摄影系统的时间序列间隔为  $5 \mu\text{s}$ 。由于阴影照片的视场直径只有 80 mm, 所以图片中未显示防护结构的后板。

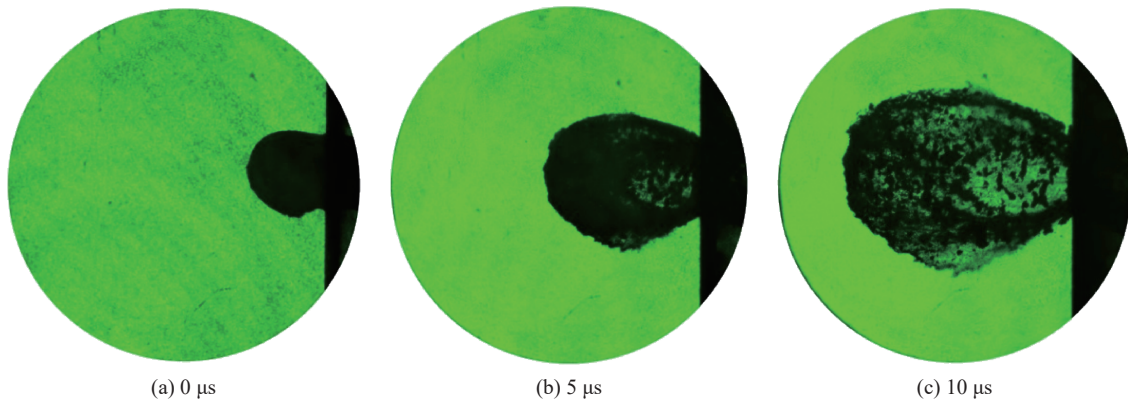


图 4 实验 1 碎片云激光阴影照片(LY-12 铝防护屏)

Fig. 4 Laser shadowgraphs of debris clouds in experiment 1 (LY-12 Al shield)

由图 4 可知, 碎片云的初始时刻由于没有充分膨胀, 碎片密度大, 激光光源无法穿透, 所以照片只能显示碎片云的外部轮廓, 不能分辨出块状碎片。随着碎片云飞行过程中沿轴向、径向的不断膨胀, 碎片

云密度减小, 逐渐有光源可以透过, 可以看到碎片云中包含有非常多的大尺寸碎片, 这些碎片由铝合金防护屏和弹丸材料共同组成, 可导致后板成坑甚至穿孔失效。

不同于图 4 中碎片云的椭球形膨胀过程, 图 5 中弹丸撞击活性材料防护屏后形成的碎片云膨胀过程更接近于球形, 且在整个拍摄过程中碎片云都不透光, 没有观测到大尺寸碎片。这是因为活性材料超高速撞击后发生爆炸反应, 生成高温、高压、高密度的气体产物与弹丸破碎产生的碎片共同组成碎片云, 高密度的气体产物导致激光光源无法穿过, 同时高压气体产物在真空中会迅速膨胀, 使碎片云的轮廓逐渐接近于球形。这一现象也间接证明 PTFE/Al 活性材料在超高速撞击下发生了爆炸反应。此时, 由于活性材料防护屏超高速撞击破碎后大部分发生爆轰或爆燃反应, 少量没有反应的 PTFE/Al 碎片动能非常低, 使得碎片云中具有侵彻能力的碎片主要来自于弹丸材料, 从而大幅减少有害碎片数量, 导致后板损伤情况减弱。

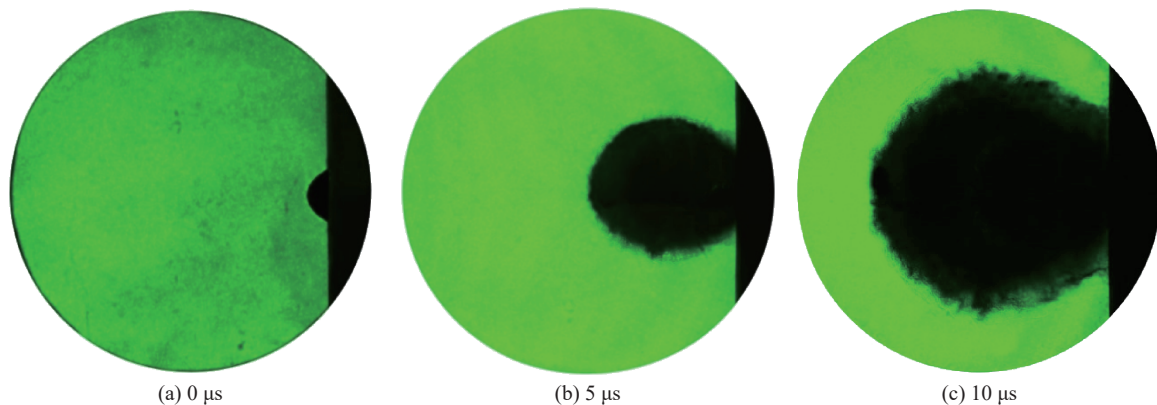


图 5 实验 2 碎片云激光阴影照片(PTFE/Al 防护屏)

Fig. 5 Laser shadowgraphs of debris clouds in experiment 2 (PTFE/Al shield)

## 2.2 后板损伤特性

空间碎片防护结构后板损伤特性的分析对于获取碎片云的形成信息具有重要意义<sup>[16]</sup>, 通过观察分析后板损伤特点, 可以在一定程度上反推碎片云的结构与形态。实验中回收的典型后板损伤情况如图 6~9 所示。

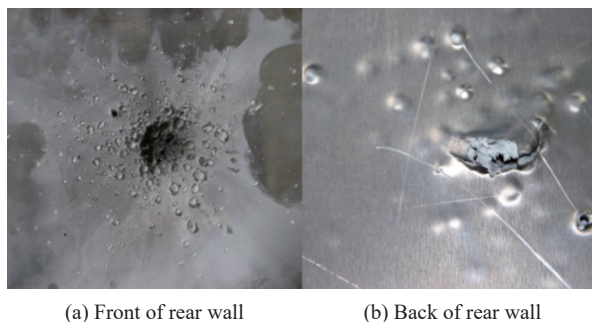


图 6 实验 1 的防护结构后板损伤(LY-12 铝防护屏)

Fig. 6 Rear wall damage of protective structure in experiment 1 (LY-12 Al shield)

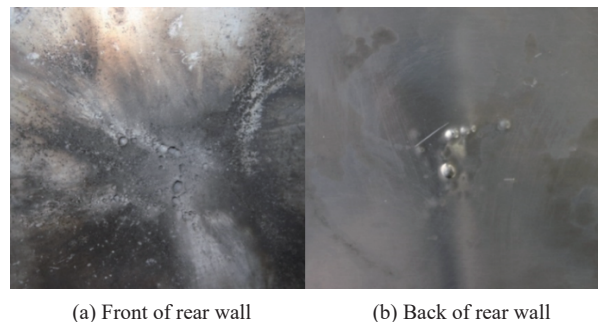


图 7 实验 2 的防护结构后板损伤(PTFE/Al 防护屏)

Fig. 7 Rear wall damage of protective structure in experiment 2 (PTFE/Al shield)

实验 1~2 的防护屏材料分别为铝合金、活性材料, 防护屏面密度等其他实验参数保持一致, 后板损伤情况如图 6~7 所示。实验 1 中后板正面中间有一个直径 25 mm 左右的严重毁伤区, 背面明显发生层裂, 甚至出现长 10 mm 左右的撕裂区, 直径 3 mm 以上的弹坑数目多达 46 个, 而实验 2 后板则未出现大面积毁伤区域, 后板损伤程度大幅降低, 直径 3 mm 以上的弹坑数目只有 13 个, 这是因为活性材料超高速撞击后的反应产物基本不具备侵彻能力, 直观反映就是后墙弹坑数目的大幅降低。



(a) Front of rear wall (b) Back of rear wall

图 8 实验 8 的防护结构后板损伤(PTFE/Al 防护屏)

Fig. 8 Rear wall damage of protective structure in experiment 8 (PTFE/Al shield)



(a) Front of rear wall (b) Back of rear wall

图 9 实验 9 的防护结构后板损伤(PTFE/Al 防护屏)

Fig. 9 Rear wall damage of protective structure in experiment 9 (PTFE/Al shield)

为了更准确地分析活性材料防护结构中后板损伤情况,得到撞击速度对弹丸破碎情况的影响规律,对 3 种尺寸的弹坑数量进行了统计,分别为  $d_c > 4$  mm(大弹坑),  $3 \text{ mm} \leq d_c \leq 4$  mm(中弹坑),  $2 \text{ mm} \leq d_c < 3$  mm(小弹坑),详细结果见表 3。

实验 8~9 中后板只有 1 个 4 mm 以上弹坑,表明弹丸与活性材料防护屏作用后并没有发生整体破碎,仍以比较完整的弹体撞击后板,说明撞击速度为 2.65、2.31 km/s 时,碰撞与爆炸两种作用下产生的冲击力不足以使弹丸发生整体破碎,对应的撞击速度处于弹道段。

实验 3~5 中弹丸速度均为约 4 km/s,此时弹坑总数明显增多,弹坑分布近似于中心圆域,说明此时在碰撞与爆炸两种作用下弹丸已经发生破

碎,撞击速度处于破碎段,对应的撞击速度应该高于弹丸的临界破碎速度。在空间碎片防护结构撞击极限方程中,临界破碎速度定义为弹丸刚好发生破碎时的速度,也是弹道区域破碎区的分界点<sup>[17]</sup>。

实验 2 中撞击速度增大为 5.03 km/s,此时无论是小弹坑数目还是弹坑总数都出现大幅增加,说明相较于实验 3~5 中 4 km/s 左右的撞击速度,此时弹丸材料发生更充分的破碎。弹坑分布也开始发生变化,不再集中在后板中心区域,而是出现不太规则的环状分布,中心区域发生轻微的整体凹陷。

实验 7 中,撞击速度进一步增大到 6.08 km/s,此时,直径大于 4 mm 的大弹坑数目为零,说明弹丸破碎更加充分;但相较于实验 2,弹坑总数反而大幅降低,弹坑分布呈圆环状,直径约 52 mm,中心圆形区域发生明显的整体凹陷,如图 10 所示。由碎片云形成理论可知,如果发生了熔化、气化,这时碎片云是由固、液、气三相组成的气泡。这时碎片云对后板的破坏主要表现为“气泡”对主结构层的整体破坏,起决定作用的是后板单位面积上的冲量。冲量足够大时,可能会使后板出现整体的撕裂破坏,冲量较小时,破坏模式表现为局部凹陷。从后板的损伤情况可以推测,6.08 km/s 撞击条件下,弹丸中部与活性材料防护屏充分接触的部分在碰撞与爆炸的共同作用下发生液化、气化,而在弹丸边缘,稀疏波作用下活性材料不足以充分爆轰,释放能量明显小于中心区域,导致弹丸不能完全液化、气化,而是形成中间为液、气两相气泡,周围为固相颗粒的混合碎片云。分析表明,对于实验中的防护结构,6.08 km/s 的撞击速度已经处于熔化/气化区。

图 11 中给出了弹坑总数随速度的变化趋势,从图 7 可以清晰地观察到弹坑数目的变化主要分为 3 个阶段,当弹丸速度位于弹道区时,弹丸保持完整,弹坑数目为 1;当弹丸进入破碎区后,开始产生破碎,随着速度的增大,破碎程度迅速增加,表现为弹坑数目迅速增多;当速度进一步增大时,由于弹丸材料开始发生熔化、气化,对后板的损伤转变为整体冲量破坏,弹坑数目开始减少。

表 3 后板损伤情况统计

Table 3 Damage statistics of rear wall

实验 编号	撞击速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	弹坑数目			弹坑总数 ( $d_c \geq 2$ mm)
		( $d_c > 4$ mm)	( $3 \text{ mm} \leq d_c \leq 4$ mm)	( $2 \text{ mm} \leq d_c < 3$ mm)	
2	5.03	6	5	12	23
3	3.79	2	2	0	4
4	3.88	5	0	3	8
5	4.00	3	3	1	7
7	6.08	0	6	9	15
8	2.65	1	0	0	1
9	2.31	1	0	0	1



图 10 实验 7 后板弹坑环状分布图(PTFE/Al 防护屏)

Fig. 10 Circular distribution of the craters on the rear wall in experiment 7 (PTFE/Al shield)

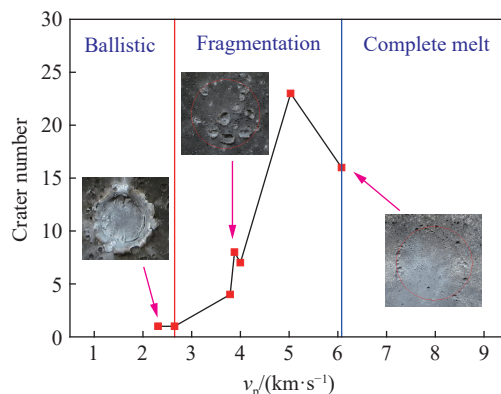


图 11 弹坑数目与撞击速度的关系

Fig. 11 Relationship between impact velocity and crater number

### 2.3 撞击极限分析

撞击极限是航天器空间碎片高速撞击风险评估、防护结构和防护材料优化设计的重要依据,是指结构在撞击后发生失效与不发生失效的临界状态,通常的定义形式包括弹丸的直径及撞击速度、板的厚度、防护间距,舱壁强度等。防护结构后板穿孔或层裂则定义为结构失效,失效区位于撞击极限曲线上方,未失效区位于曲线下方。

目前应用最广泛的是 Christiansen 方程<sup>[17]</sup>,可用于描述铝合金 Whipple 双层结构撞击极限。根据弹丸不同速度下破坏机理的不同,将速度分为 3 个阶段:弹道区、破碎区、熔化/气化区,并直接给出弹丸撞击极限尺寸。一般情况下,对于铝合金 Whipple 双层结构分段速度为别为 3、7 km/s。方程具体形式如下:

当  $v_0 \cos \theta \leq 3$  km/s 时:

$$d_p = \left[ \frac{t_w \left( \frac{\sigma}{40} \right)^{0.5} + t_b}{0.6(\cos \theta)^{5/3} \rho_p^{1/2} v_0^{2/3}} \right]^{18/19} \quad (4)$$

当  $3 \text{ km/s} < v_0 \cos \theta < 7 \text{ km/s}$  时:

$$d_p = \left[ \frac{t_w \left( \frac{\sigma}{40} \right)^{0.5} + t_b}{1.248 \rho_p^{1/2} \cos \theta} \right]^{18/19} \left( 1.75 - \frac{v_0 \cos \theta}{4} \right) + \left[ 1.071 t_w^{2/3} \rho_p^{-1/3} \rho_b^{-1/9} S^{1/3} \left( \frac{\sigma}{70} \right)^{1/3} \right] \left( \frac{v_0 \cos \theta}{4} - 0.75 \right) \quad (5)$$

当  $v_0 \cos \theta \geq 7$  km/s 时:

$$d_p = 3.918 t_w^{2/3} \rho_p^{-1/3} \rho_b^{-1/9} (v_0 \cos \theta)^{-2/3} S^{1/3} \left( \frac{\sigma}{70} \right)^{1/3} \quad (6)$$

式中:  $d_p$  为临界弹丸直径, cm;  $\rho_p$  为弹丸密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_b$  为防护屏密度, g/cm<sup>3</sup>;  $t_w$  为后板厚度, cm;  $S$  为防护间距, cm;  $v_0$  为弹丸撞击速度, km/s;  $\theta$  为撞击速度与靶板法线方向夹角, (°);  $\sigma$  为后板屈服强度, MPa。

实验 2 弹丸直径为 6.4 mm, 撞击速度为 5.03 km/s, 此时虽然后板没有发生穿孔, 但后表面产生了小尺寸层裂区域, 判断为发生轻微层裂, 防护结构恰好处于临界防护状态, 则 6.4 mm 为防护结构的临界弹丸直径。由方程(5)可知, 此速度下铝合金防护结构对应的临界弹丸直径为 5.04 mm, 计算可知活性材料防护结构防护能力提高约 27%, 活性材料防护结构撞击极限曲线刚好通过该实验点。实验 7 保持弹丸直径不变, 将撞击速度提高到 6.08 km/s, 此时防护结构后板只是轻微的鼓包, 没有发生失效, 说明活性材料防护结构的防护能力在该速度段内与速度成正比, 实验点应处于活性材料防护结构撞击极限曲线的下方。

实验 3~5 表明, 弹丸直径为 5 mm 时, 在 3.79~4.0 km/s 速度范围内, 防护结构均处于有效防护状态, 为了能够在这个速度段内找到含能防护结构的失效点, 实验 6 中将弹丸直径增大到 6 mm, 速度降为

3.71 km/s, 此时防护结构发生失效。对比铝合金防护结构临界弹丸直径可知, 4.0 km/s 左右时活性材料防护结构防护能力提升约 25%~50%, 活性材料防护结构撞击极限曲线应该处于实验点 3~5 和 6 对应的数据点之间。

为了进一步探索活性材料防护结构在弹道区( $\leq 3$  km/s)的防护能力, 实验 8 的撞击速度降为 2.65 km/s, 对应的弹丸直径为 5 mm, 此时防护结构未发生失效。由式(4)可知, 活性材料防护结构防护能力提高了 31%。实验 9 撞击速度为 2.31 km/s, 弹丸直径增大为 6 mm, 但此时防护结构依然没有失效, 防护能力提高大于 45%。由此可知, 在弹道段, 撞击速度的降低有利于防护能力的提高, 这是因为活性材料超高速撞击下完全反应时释放的能量是一定的, 当弹丸速度降低时, 释放能量与弹丸动能之比增大, 防护能力提高。但这是以活性材料完全反应为前提的, 由于 PTFE/Al 活性材料的冲击起爆特性与撞击速度密切相关, 当弹丸速度过低以致其穿靶过程中活性材料没有来得及反应时, 活性材料防护屏也就失去了其防护能力的立足之本, 加上其无论是波阻抗还是屈服强度都远低于铝合金, 所以在弹道段总有一个速度点使 PTFE/Al 活性材料与铝合金防护能力相当, 当低于这个速度时铝合金防护能力更强, 高于这个速度时 PTFE/Al 活性材料更强。利用最小二乘法, 结合实验 8~9 对弹道段撞击极限曲线进行拟合, 过防护状态临界点(实验 4)并结合实验 5~9 对破碎段撞击极限进行拟合, 获得活性材料面密度为  $0.84 \text{ g/cm}^2$  时对应的弹道段与破碎段的撞击极限曲线, 如图 12 所示, 两者的交点为弹道段与破碎段的分界点, 黑色对比曲线为同面密度铝合金防护结构对应的撞击极限曲线。通过对比可知, 活性材料防护结构防护能力获得大幅提升。

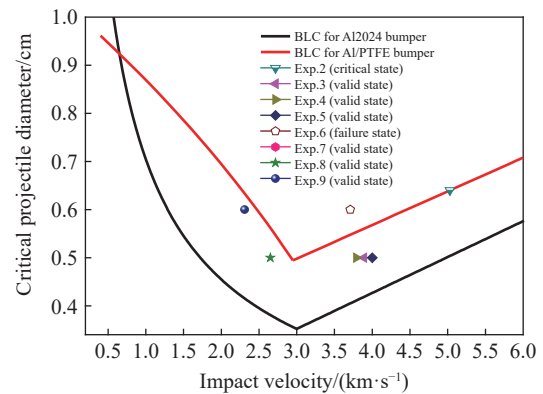


图 12 活性材料及铝合金 Whipple 结构撞击极限曲线对比  
Fig. 12 Comparison of ballistic limit curves between active material and aluminum alloy Whipple shields

## 2.4 防护机理分析

弹丸与防护屏超高速撞击作用下的破碎、熔化甚至气化现象, 是 Whipple 结构防护机理的核心, 弹靶冲击压力则是弹丸与防护屏破碎、相变的能量源, 活性材料的应用直接改变了这种能量源。首先, 弹丸撞击活性材料产生的冲击压力不仅包括冲击压缩引起的压力, 还包括因化学能释放而贡献的压力, 两种压力的共同作用增加了弹丸的破碎与相变程度。同时, 活性材料的冲击起爆过程伴随有高温、高压产物的剧烈膨胀, 会对弹丸产生反向冲量而降低弹丸的轴向动能。其次, 后板弹坑分析表明, 相较于铝合金结构, 活性材料结构后墙弹坑数量大幅减少, 这是因为活性材料冲击起爆过程伴随有化学能的迅速释放, 导致自身产物多为气态, 对后板没有侵彻能力, 后板的侵彻破坏只来自于碎片云中弹丸破碎产生的碎片。

## 3 结 论

利用二级轻气炮完成 PTFE/Al 活性材料的超高速撞击实验, 速度范围为 2.3~6.1 km/s, 覆盖弹道区、破碎区。碎片云特性及后板损伤特性分析表明, 由于活性材料超高速撞击发生冲击起爆反应, 爆炸产物尺寸非常细小且多为气态, 此时碎片云中具有侵彻能力的碎片仅由弹丸破碎产生, 大大减弱了对后板的破坏。撞击极限分析显示, 相较于同面密度铝合金, 活性材料具有更加优异的防护性能, 提升比例与撞击速度密切相关。活性材料良好的防护特性使其可能成为未来航天器防护材料的新选择。

## 参考文献:

- [1] 龚自正, 赵秋艳, 李明, 等. 空间碎片防护研究前沿问题与展望 [J]. 空间碎片研究, 2019, 19(3): 2-13.  
GONG Z Z, ZHAO Q Y, LI M, et al. The frontier problem and prospect of space debris protection research [J]. Space Debris Research, 2019, 19(3): 2-13.



- [2] COUR-PALAIS B G, CREW J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 10: 135–146. DOI: 10.1016/0734-743X(90)90054-Y.
- [3] 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: 169–180. DOI: 10.1016/0734-743X(93)90018-3.
- [4] 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(1–3): 217–228. DOI: 10.1016/0734-743X(95)99848-L.
- [5] CHRISTIANSEN E L, KERR J H, DE LA FUENTE H M, et al. Flexible and deployable meteoroid/debris shielding for spacecraft [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 23(11): 125–136. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00068-8.
- [6] 贾古寨, 哈跃, 庞宝君, 等. 玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构撞击极限及损伤特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 433–440. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0433-08.
- JIA G Z, HA Y, PANG B J, et al. Ballistic limit and damage properties of basalt/Kevlar stuffed shield [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 433–440. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0433-08.
- [7] 王应德, 冯春祥, 宋永才, 等. 碳化硅纤维连续化工艺研究 [J]. *宇航材料工艺*, 1997(2): 21–25.
- WANG Y D, FENG C X, SONG Y C, et al. Study on process of continuous sic fibers [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1997(2): 21–25.
- [8] 侯明强, 龚自正, 徐坤博, 等. Al/Mg 阻抗梯度材料超高速撞击机理数值仿真研究 [J]. *航天器环境工程*, 2013, 30(6): 581–585. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.06.003.
- HOU M Q, GONG Z Z, XU K B, et al. Numerical study on hypervelocity impact mechanism of Al/Mg wave impedance-grade material [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(6): 581–585. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.06.003.
- [9] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(8): 083508. DOI: 10.1063/1.4793281.
- [10] WANG H, ZHENG Y, YU Q, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(7): 074904. DOI: 10.1063/1.3644974.
- [11] 门建兵, 蒋建伟, 帅俊锋, 等. 复合反应破片爆炸成型与毁伤实验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(10): 1143–1146. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2010.10.007.
- MEN J B, JIANG J W, SHUAI J F, et al. Experimental research on formation and terminal effect of explosively formed compound reactive fragments [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(10): 1143–1146. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2010.10.007.
- [12] 肖艳文, 徐峰悦, 余庆波. 类钢密度活性材料弹丸撞击铝靶行为实验研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(6): 1016–1022. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.06.007.
- XIAO Y W, XU F Y, YU Q B. Experimental research on behavior of active material projectile with steel-like density impacting aluminum target [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(6): 1016–1022. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.06.007.
- [13] 徐松林, 阳世清, 张炜, 等. PTFE/Al 含能复合物的本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 439–444. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)04-0439-06.
- XU S L, YANG S Q, ZHANG W, et al. A constitutive relation for a pressed PTFE/Al energetic composite material [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 439–444. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)04-0439-06.
- [14] 武强, 张庆明, 龙仁荣, 等. 活性材料防护屏在球形弹丸超高速撞击下的穿孔特性研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(11): 2126–2133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.11.007.
- WU Q, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Perforation characteristics of energetic material shield induced by hypervelocity impact of spherical projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(11): 2126–2133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.11.007.
- [15] 柳森, 谢爱民, 黄洁, 等. 超高速碰撞碎片云的四序列激光阴影照相 [J]. *实验流体力学*, 2010, 24(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2010.01.001.
- LIU S, XIE A M, HUANG J, et al. Four sequences laser shadowgraph for the visualization of hypervelocity impact debris cloud [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2010.01.001.
- [16] 张庆明, 黄凤雷. 超高速碰撞动力学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 110–122.
- [17] CHRISTIANSEN E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shield [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(6–10): 145–156. DOI: 10.1016/0734-743X(93)90016-Z.

(责任编辑 曾月蓉)