文章编号： 1001-1455(2012)01-0043-04

填充式泡沫铝防护结构的弹道极限*

刘文祥，张德志，张向荣，朱玉荣，谭书舜
（西北核技术研究所，陕西　西安　710024）

摘要： 为了探索泡沫材料在空间防护上的应用，结合实验和数值模拟，绘制了弹速 0.5～7.0 km/s 范围内填充式泡沫铝防护结构的弹道极限曲线，并与 Whipple 结构进行了比较。结果表明：填充式泡沫铝防护结构的防护性能优于同等面密度、总厚度的 Whipple 结构；孔隙率对填充式泡沫铝防护结构防护性能影响较小。

关键词： 爆炸力学；弹道极限；超高速撞击；填充式泡沫铝防护结构

中图分类号： O385　　**国标学科代码：** 1303530　　**文献标志码：** A

人类探索空间的活动日益增多，航天器与空间碎片撞击的风险随之增大。发射中的或在轨的航天器与空间碎片相撞击会遭受损伤甚至灾难性的破坏，利用防护结构可以显著降低发生灾难性破坏的机率。从天体物理学家 Whipple 在 20 世纪 40 年代提出一种双层板防护系统——Whipple 结构以来，科研工作者们不断地改进防护结构构型及材料来提高防护能力。泡沫金属为一种新型工程材料，拥有质轻、吸能、吸声、电磁屏蔽等独特的性能，在空间防护上有很大的应用前景。已开展了较多关于泡沫金属材料应用于空间防护方面的研究[1-5]，并已应用于某些航天器[6]。马志涛等[7]通过自主开发的 SPH 计算程序进行填充泡沫铝防护结构的数值研究，并开展了少量撞击实验进行印证。本文中拟通过实验，探讨填充式泡沫铝防护结构的防护性能，并结合数值模拟，绘制该结构的弹道极限曲线。

1　填充式泡沫铝防护结构

图 1 为典型的 Whipple 结构，其前板厚 1 mm，后板厚 3 mm，结构总厚度为 100 mm。图 2 为本文中设计的填充式泡沫铝防护结构，前板、后板之间放置泡沫铝板，前板和后板分别为厚度 1 和 2 mm 的铝板，填充的泡沫铝板面密度相当于 1 mm 厚的铝板，防护结构的总厚度为100mm，前板与泡沫铝板间距为 50 mm。与 Whipple 结构相比，高速弹丸撞击填充式泡沫铝防护结构时，由于中间泡沫铝多孔结构的存在，被前板碎裂成的碎片云团进一步被多次加载，碎裂更充分，对航天器的破坏程度进一步降低。

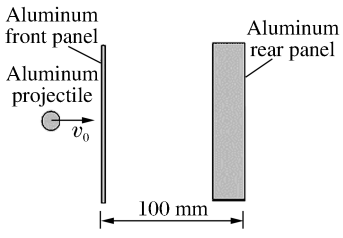

图 1　典型 Whipple 防护结构

Fig. 1　Whipple shield

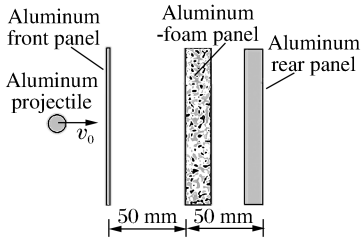

图 2　填充式泡沫铝防护结构

Fig. 2　Aluminum foam-filled shield

2　实验与数值计算方法

实验在∅57 mm/∅10 mm 非火药驱动二级轻气炮上开展。泡沫铝板的基体材料为纯铝，包括 2 种规格：(1)PA，圆形，尺寸为∅100 mm×3 mm，孔径为 1 mm，孔隙率为 65.2%；(2)PB，方形，尺寸为 150 mm ×150 mm×6.35 mm，孔径为 1 mm，孔隙率为 93.0%。对应的防护结构分别为 FA、FB，见图 3。实验中主要研究防护结构 FA。为了研究孔隙率对防护结构性能的影响，开展了数量较少的结构 FB 的高速撞击实验。弹丸材料为纯铝，形状为球形，直径为 2～7 mm，弹速为 2.0～5.3 km/s。

* **收稿日期：** 2010-07-09；**修回日期：** 2011-01-18
作者简介： 刘文祥(1982—　)，男，博士研究生，助理研究员。

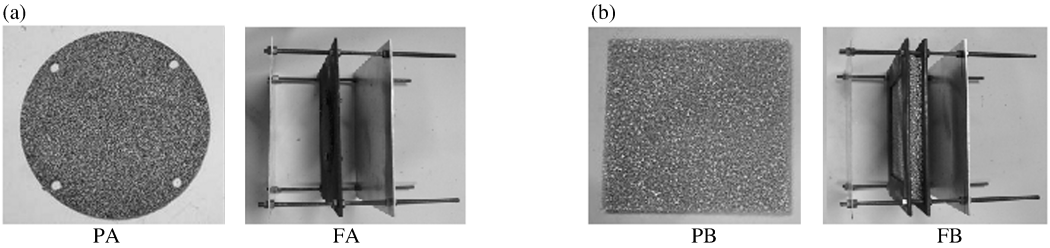

图 3 泡沫铝块及防护结构照片

Fig. 3 Photos for aluminum-foam panel and aluminum foam-filled shield

数值模拟以商业软件为平台，采用 SPH 求解器，通过自编程序，从泡沫铝的微观结构特性出发，建立反映泡沫铝蜂窝状结构特点的网格，采用基体材料（纯铝）的材料本构关系，得到泡沫铝的数值模型。泡沫铝基体材料采用 Shock 强度模型；撞击速度在 5.0 km/s 以下，采用 Grüneisen 状态方程，撞击速度 5.0 km/s 以上，采用 Tillotson 状态方程[8]。数值模拟研究对象为防护结构 FA，通过本文中所述方法建立结构 FB 的数值模型的网格数目较大，而计算机硬件能力有限，使得计算程序无法运行，因此没有开展结构 FB 的数值模拟。数值模型中弹丸为球形，直径为 2～8 mm，弹速为 0.5～7.0 km/s。前板、泡沫铝层采用 SPH 网格，后板采用 Lagrange 网格。

3 实验、数值模拟结果

泡沫材料中孔隙的大小及分布是随机的；数值模拟无法模拟碎片粒子黏附后板；硬件、软件的能力限制了数值模型的网格密度，也限制了数值模拟的精度。以上 3 个主要因素导致了数值模拟不可能完全地再现实验的靶板损伤情况，只能与实验情况大致一致，且数值模拟得到的后板损伤图像只能反映具有较大损伤的弹坑及弹孔。图 4 中给出了数值模拟的后板塑性应变云图和实验的损伤照片，从图中可知两者吻合较好。

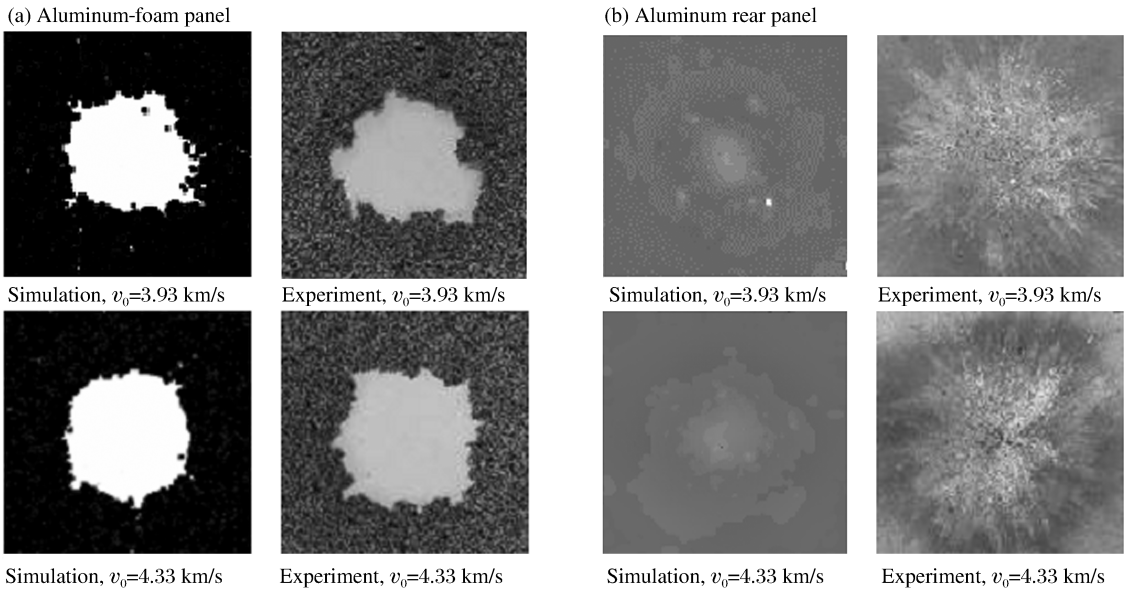

图 4 实验和数值模拟中泡沫铝夹层和后板的损伤比较

Fig. 4 Comparison between experimental and numerical results of aluminum-foam panel and rear panel

表 1 中给出了实验、数值模拟的参数及防护结构的防护效果统计数据，其中 D 为弹丸直径，v_0 为弹丸速度，η 为泡沫铝板的孔隙率。表中数据显示：在直径为 4 mm 的弹丸撞击结构 FA 的情况下，弹速为 1.95 km/s 时，结构没有被穿透，速度增加到 2.15 km/s 时，结构被穿透。这是由于弹丸速度增加，弹丸动能增加，其侵彻能力也增加。当弹速增加到 2.78 km/s 时，结构未被穿透，这是由于弹速增加虽使得

弹丸动能增强，但结构的薄前板起到了粉碎弹丸的作用，弹丸速度越高，弹体被粉碎的越厉害，甚至发生熔化、气化，该因素导致其侵彻后板的能力降低。在直径为 7 mm 的弹丸撞击结构 FA 的情况下，弹速为 4.64 km/s 时，结构被穿透；当速度增加到 5.33 km/s 时，结构未被穿透；原因在前面已经分析，结构的薄前板起到了关键作用。当弹丸速度增加到 7.00 km/s 时，结构又再一次被击穿，这是由于当弹丸能量大到一定程度时，弹丸虽被粉碎，甚至熔化、气化，也不足以影响弹丸的侵彻能力。

表 1 实验和数值计算结果统计

Table 1 Experimental and numerical results

D/mm	v_0/(km/s)	η/%	后板破坏情况		D/mm	v_0/(km/s)	η/%	后板破坏情况	
			实验	模拟				实验	模拟
2.0	2.50	65.2	未穿透	未穿透	6.0	4.33	65.2	未穿透	未穿透
4.0	1.95	65.2	未穿透	未穿透	6.0	4.78	65.2	未穿透	未穿透
4.0	2.15	65.2	穿透	穿透	6.0	5.12	65.2	未穿透	未穿透
4.0	2.78	65.2	未穿透	未穿透	6.0	7.00	65.2		未穿透
4.0	2.83	65.2	未穿透	未穿透	7.0	4.64	65.2	穿透	穿透
4.0	3.00	65.2		未穿透	7.0	5.33	65.2	未穿透	未穿透
4.0	3.56	65.2	未穿透	未穿透	7.0	6.00	65.2		未穿透
4.0	3.63	65.2	未穿透	未穿透	7.0	7.00	65.2		穿透
5.3	1.00	65.2		未穿透	8.0	5.40	65.2		穿透
5.3	1.40	65.2		穿透	8.0	6.00	65.2		穿透
5.3	3.20	65.2		穿透	6.0	3.68	93.0	穿透	
5.3	4.00	65.2		未穿透	6.0	4.22	93.0	未穿透	
6.0	0.50	65.2		未穿透	7.0	4.68	93.0	穿透	
6.0	1.00	65.2		穿透	7.0	4.94	93.0	未穿透	
6.0	3.93	65.2	穿透	穿透					

4 弹道极限曲线

撞击弹道极限曲线是表征给定材料和尺寸的防护结构防护性能的重要方式。某撞击速度和撞击角度下，弹丸直径越大，防护结构的损伤程度越大，当弹丸直径大于某临界值时，后板损伤程度将满足失效准则条件，被认为失效，该临界弹丸直径被称为撞击极限。后板失效准则常被定义为击穿或后板背面发生剥落。以撞击速度为横坐标，临界弹丸直径为纵坐标，连接撞击极限所形成的曲线称为撞击极限曲线。撞击极限曲线是设计防护结构的重要依据。

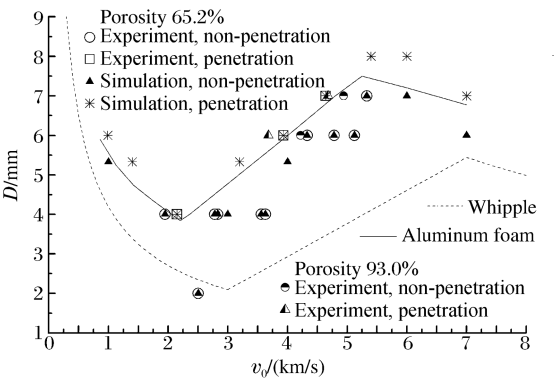

图 5 2 种结构的弹道极限曲线

Fig. 5 Ballistic limit curves of two shields

Christiansen 方程[9]是通过大量实验数据回归获得的 Whipple 典型防护结构的弹道极限方程，根据 Christiansen 方程得到与填充式泡沫铝防护结构具有相同面密度、总厚度的 Whipple 结构的弹道极限曲线。依据填充式泡沫铝防护结构高速撞击下的实验和模拟结果，绘制该结构的弹道极限曲线，穿透点和未穿透点分别位于曲线的两侧。

图 5 为填充式泡沫铝防护结构和具有相同面密度、总厚度的 Whipple 防护结构的弹道极限曲线。填充式泡沫铝防护结构的弹道极限曲线的第 1、2 个拐点比 Whipple 结构的相应拐点偏左、偏上，曲线明显高于 Whipple 结构的弹道极限曲线，说明该结构的防护性能优于 Whipple 结构。结构 FB 的穿透和未穿透数据亦分布于结构 FA 弹道极限曲线两侧，且离曲线较近，初步说明泡沫铝孔隙率的改变没有明显改变该结构的防护性能。

5 结 论

结合实验和数值模拟,绘制了超高速撞击下填充式泡沫铝防护结构的弹道极限曲线,与同等面密度、总厚度的 Whipple 结构相比,填充式泡沫铝防护结构的弹道极限曲线明显高于后者,说明填充式泡沫铝防护结构的防护性能优于同等面密度、总厚度的 Whipple 结构。还研究了孔隙率对填充式泡沫铝防护结构的防护性能的影响,实验数据显示,孔隙率对填充式泡沫铝防护结构防护性能影响有限。

参考文献:

[1] Lavrukhov P V, Plastinin A V, Sil'vestrov V V. Double-layer high-porous copper/duralumin bumper[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10):407-416.

[2] Christansen 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(1):125-136.

[3] estefanis R, Schäfer F, Lambert M, et al. Enhanced space debris shields for manned spacecraft[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10):215-226.

[4] LI Yi, LI Jian-bao, ZHANG Ruo-qi. Energy-absorption performance of porous materials in sandwich composites under hypervelocity impact loading[J]. Composite Structures, 2004,64(1):71-78.

[5] Ryan S, Schaefer F, Destefanis R, et al. A ballistic limit equation for hypervelocity impacts on composite honeycomb sandwich panel satellite structures[J]. Advances in Space Research, 2008,41(7):1152-1166.

[6] Shortliffe G, Christiansen E. Mars trans hab meteoroid and orbital debris shield performance assessment[R]. NASA JSC Technical Report: JSC27892, 1997.

[7] 马志涛,庞宝君,迟润强,等.填充泡沫铝 Whipple 航天器防护结构性能研究[C]//第四届全国空间碎片专题研讨会议,2007.

[8] 张庆明,黄风雷.超高速碰撞动力学引论[M].北京:科学出版社,2000.

[9] Christiansen E, LambertM, Stokes H, et al. IADC protection manual[M]. 3rd ed. Germany: Inter-gency Debris Commitee, 2002.

Ballistic limit of an aluminum foam-filled shield*

LIU Wen-xiang, ZHANG De-zhi, ZHANG Xiang-rong,
ZHU Yu-rong, TAN Shu-shun

(*Northwest Institue of Nuclear Technology*, *Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: To explore the application of foam materials to space protection, the ballistic limit curve of an aluminum foam-filled shield was obtained in the velocity range from 0.5 to 7.0 km/s by experiments and numerical simulation, which was compared with that of the Whipple shield. The results show that the aluminum foam-filled shield has higher space-debris protection performance than the Whipple shield with the same areal density and thickness; and that the foam porosity has few influences on the protection performance of the aluminum foam-filled shield.

Key words: mechanics of explosion; ballistic limit; hypervelocity impact; aluminum foam-filled shield

* Received 9 July 2010; Revised 18 January 2011
Corresponding author: LIU Wen-xiang, wxliu@ustc.edu

(责任编辑 张凌云)