文章编号:1000-5773(2009)06-0453-07

含泡沫铝防护结构的超高速撞击数值模拟研究*

贾 斌[1],马志涛[2],庞宝君[1]

(1.哈尔滨工业大学航天工程系,黑龙江哈尔滨 150001;
2.清华大学航天航空学院,北京 100084)

摘要:泡沫铝是一种新型航天器防护材料,拥有良好的抵御空间碎片超高速撞击的特性。模仿泡沫金属的生产原理,建立了泡沫金属微结构几何模型,结合自编的光滑质点流体动力学程序进行了超高速撞击数值仿真,通过与实验结果的对比,验证了模型的有效性。提出了两种含泡沫铝的空间碎片防护结构,即填充泡沫铝结构和夹层泡沫铝结构。对这两种结构分别进行了仿真计算,获得了其撞击极限曲线。分析结果表明,在空间碎片防护领域涉及的大部分撞击速度区间内,填充泡沫铝结构的防护性能优于夹层泡沫铝结构。

关键词:泡沫铝;防护结构;超高速撞击;SPH;撞击极限;空间碎片
中图分类号:V423.42;O347 **文献标识码**:A

1 引 言

微流星体及空间碎片的超高速撞击严重威胁航天器的安全在轨运行,造成航天器损伤及发生灾难性失效的事例已发生多起,有关防护微流星体和空间碎片超高速撞击的研究得到了国内外的高度重视[1]。基于 1947 年 F. L. Whipple 提出的 Whipple 防护结构,通过高速撞击实验及数值仿真,进行了大量航天器防护结构性能研究工作,发展了各种防护结构,并用于航天器的安全防护[2-3]。因为超高速撞击实验的速度限制及费用比较高,超高速撞击数值仿真成为防护结构性能研究的有效方法。常用的方法有拉格朗日(Lagrange)、欧拉(Euler)、拉格朗日-欧拉耦合(ALE)以及光滑质点流体动力学(SPH)法等。采用有效的材料模型和数值模拟方法可以得到与实验非常一致的结果[4-6]。而超高速撞击数值模拟的有效性,很大程度上取决于防护结构的材料模型。铝合金等金属材料的材料模型和相关数据得到了深入研究,具有很高的置信度[4-6]。

泡沫金属是 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的一种功能与结构一体化的新型工程材料,具有多种优异性能。欧空局初步开展了涉及泡沫铝的防护结构的超高速撞击实验,结果表明,具有一定厚度的泡沫铝防护屏能在弹丸中引起多次击波加载,更容易使弹丸破碎甚至熔化,在低至 2.6 km/s 的撞击速度下也能观察到大量弹丸熔化迹象,因此泡沫金属是很好的航天器防护材料之一[7-9]。但目前的商业计算软件难以模拟超高速碰撞下泡沫金属的力学行为,因为其提供的材料模型将泡沫金属近似处理为均匀体,而泡沫金属的孔洞大小与空间碎片模拟弹丸的直径或防护屏厚度相比通常是不可忽略的,而且撞击后所形成的碎片云微粒撞击泡沫材料孔壁时引起的材料破碎及物态变化是在微观结构上进行的。本研究根据泡沫金属的生产原理,建立微结构几何模型,结合自编的 SPH 程序进行超高速撞击数值模拟,

* **收稿日期**:2008-11-30;**修回日期**:2009-02-22
基金项目:中国空间技术研究院创新基金(CAST200723)
作者简介:贾 斌(1975—),男,博士,副教授,主要从事航天器空间碎片防护研究. E-mail:jiabin@hit.edu.cn

并通过与实验的对比，验证了该模型的有效性；在此基础上分别对填充泡沫铝防护结构和夹层泡沫铝防护结构进行了仿真计算，得到了其撞击极限曲线并进行了对比分析。

2 泡沫金属微结构几何建模

泡沫金属的制造方式一般为发泡法，以渗流铸造法为例：将随机分布的发泡剂放入熔融状态的金属中，铸造完成后，再用溶剂或热处理将发泡剂去掉。本模型模仿泡沫金属的生成原理，根据泡沫金属的真实微结构建立几何模型，如图 1 所示。

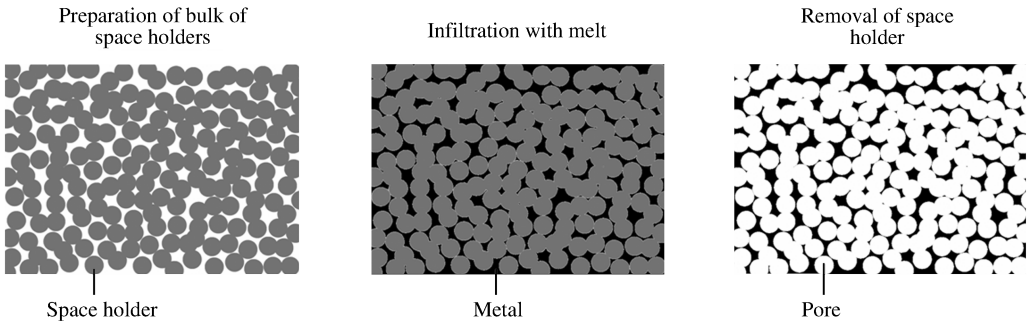


图 1 泡沫金属模型原理图

Fig. 1 Illustrative diagram of principle of metallic foam model

以建立方形泡沫金属模型为例：首先在方体内部和边界上随机分布若干个空球，然后在该方体其余位置填充基体材料，即形成泡沫金属板。球平均半径定义为

$$\bar{r}=d/\alpha \tag{1}$$

式中：d 是孔洞的平均半径，α 是改变泡沫金属相对密度的参数。对于开孔材料，$0<\alpha<1$；对于闭孔材料，$\alpha>1$。球的半径定义为

$$r=f(\bar{r}) \tag{2}$$

$$\Delta x_i=g(0) \tag{3}$$

$$x_i=(n_i-1)d+g(0.5d)+\Delta x_i \tag{4}$$

式中：x_i 是该球球心的空间坐标，n_i 是该球在坐标 x_i 方向上的序号，$n_i\geqslant 1$，$g(\nu)$ 和 $f(\nu)$ 是以 ν 为平均值的随机分布函数（可根据不同微结构的泡沫金属进行选取，本研究采用的是线性随机函数）。根据上述方程，生成的相对密度为 27%的开孔泡沫铝离散模型与实际材料的微结构照片分别如图 2 和图 3 所示。

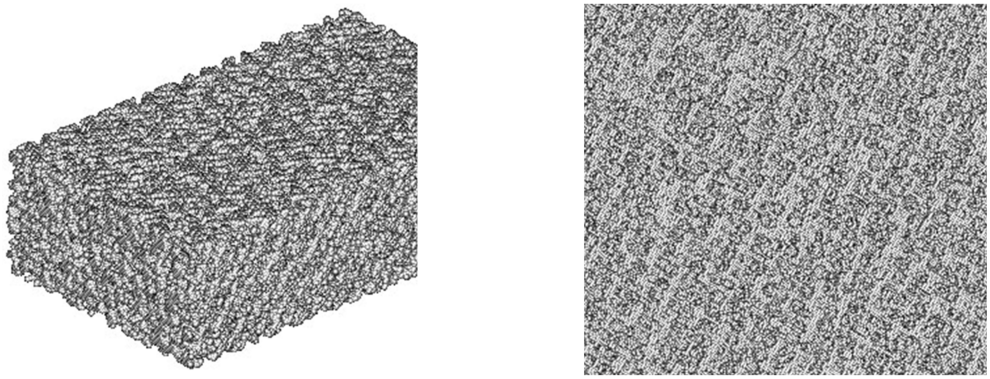


图 2 相对密度为 27%的开孔泡沫铝的 SPH 离散模型

Fig. 2 SPH discretisations of open cell Al-foam with a relative density of 27%

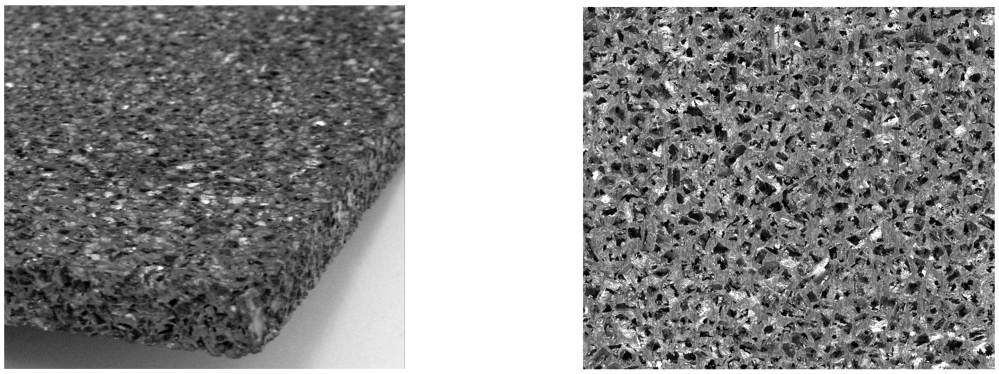


图 3　相对密度为 27%的开孔泡沫铝的微结构照片

Fig. 3　Photo of microstructure of open cell Al-foam with a relative density of 27%

3　数值仿真模型验证

3.1　几何构型

对图 4 所示的填充泡沫铝防护结构进行超高速撞击实验和数值模拟,数值模拟采用自编的 SPH 计算程序和泡沫铝微结构几何模型。图 4 中第一层防护屏为 2A12 铝合金板,厚度为 2 mm;第二层防护屏为泡沫铝板,其基体材料为 ZL102 铝合金,相对密度为 27%,平均孔径为 1 mm,厚度为 10 mm,位于舱壁和第一层防护屏的中间,其前表面垂直距离第一层防护屏后表面 69 mm;舱壁为 5A06 铝合金板,厚度为 2 mm;弹丸为 2017 铝球,直径为 6.35 mm,撞击角度为 0°,撞击速度分别为 2.19、3.41、4.06 km/s。该防护结构的整体面密度为 1.795 g/cm^2,整体防护间距为 152 mm。

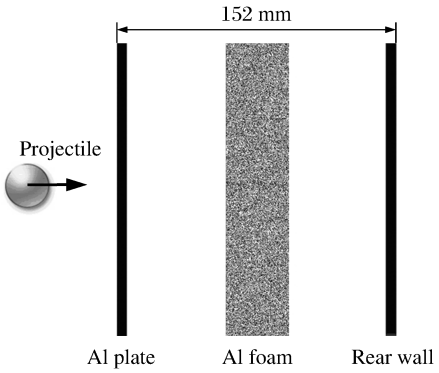


图 4　填充泡沫铝防护结构示意图

Fig. 4　Schematic configuration of Al-form stuffed shield

3.2　材料模型

由于建立了泡沫金属的微结构几何模型,故可使用其基体金属的材料模型。对铝合金材料,采用 Mie-Grüneisen 状态方程,其方程如下

$$\begin{cases} p = p_{\mathrm{H}} + \Gamma\rho(e - e_{\mathrm{H}}) \\ p_{\mathrm{H}} = \dfrac{\rho_0 c_0^2 \mu(1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2},\ e_{\mathrm{H}} = \dfrac{p_{\mathrm{H}}}{2\rho_0}\left(\dfrac{\mu}{1+\mu}\right),\ \mu = \dfrac{\rho}{\rho_0} - 1 \\ \Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0 = C_1,\ U = c_0 + s u_{\mathrm{p}} \end{cases} \tag{5}$$

式中:p 和 e 分别为静水压力和比内能;p_{H} 和 e_{H} 分别为冲击 Hugoniot 曲线上静水压力和比内能的参考值;Γ 和 ρ 分别为 Grüneisen 参数和密度,相应地 Γ_0 和 ρ_0 为初始 Grüneisen 参数和初始密度;C_1 为常数;U 和 u_{p} 分别为冲击波波速和波后质点速度,c_0 为体积声速,s 为 U 和 u_{p} 之间线性关系的斜率;μ 为压缩比。各材料参数取值如表 1 所示[10]。

强度模型采用 Johnson-Cook 模型,其屈服应力 σ_{y} 与等效塑性应变 ε_{p}、等效塑性应变率 $\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$ 和温度 T 之间的关系为

$$\sigma_{\mathrm{y}} = (A + B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})[1 + C\ln(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}/\dot{\varepsilon}_0)](1 - T^{*m}) \tag{6}$$

式中:参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ \mathrm{s}^{-1}$;$A$、$B$、$n$、$C$ 和 m 是材料常数,A 为材料在准静态下的屈服强度,B 和 n 为应变硬化的影响,C 为应变率敏感指数,m 为温度软化系数。若室温为 T_{room},熔点为 T_{melt},则同系温度的

定义为

$$T^* = (T - T_{\text{room}})/(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}) \tag{7}$$

各材料参数取值如表 2 所示[10]。

表 1 Mie-Grüneisen 状态方程参数[10]

Table 1 Parameters of Mie-Grüneisen equation of state[10]

Material	ρ/(g/cm^3)	c_0/(m/s)	S	c_V/[J/(kg·K)]	Γ
Al2024	2.785	5 328	1.338	875	2.0
2A12	2.77	5 328	1.338	921	2.0
5A06	2.64	5 328	1.338	921	2.0
ZL102	2.65	5 328	1.338	838	2.0

Note: Parameters of Al2024 was used instead of Al2017 due to the unavailable data. The same below.

表 2 Johnson-Cook 强度模型参数[10]

Table 2 Parameters of Johnson-Cook strength model[10]

Material	G/(GPa)	A/(MPa)	B/(MPa)	C	m	n	T_{room}/(K)	T_{melt}/(K)
Al2024	27.6	265	426	0.015	1.0	0.34	300	775
2A12	26	265	426	0.015	1.0	0.34	300	775
5A06	27	265	426	0.015	1.0	0.34	300	864
ZL102	20	265	426	0.015	1.0	0.34	300	700

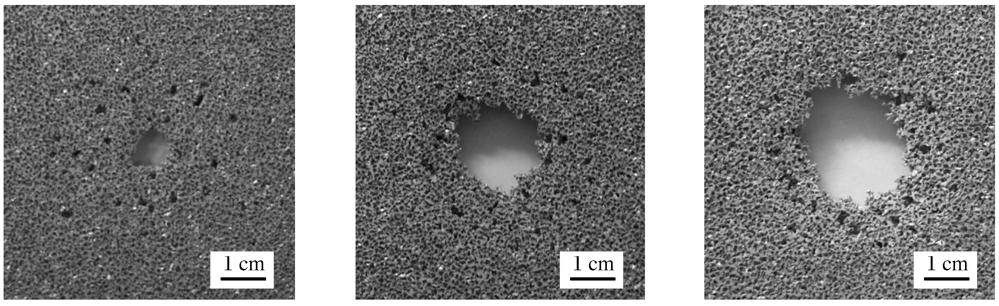
3.3 对比分析

表 3 给出了超高速撞击填充泡沫铝防护结构的实验和数值模拟损伤结果(表中 e_r 表示相对误差),图 5 给出了第二层泡沫铝防护屏的实验和数值模拟结果。由图 5 可见,由于泡沫铝平均孔径和分布的随机性,使得撞击后的泡沫铝和舱壁的穿孔形状并不规则,因此测量的穿孔直径采用等效圆面积直径。从表 3 可以看出,数值模拟结果与实验结果相比,相对误差不超过 15%,表明所建立的微结构几何模型能够对泡沫铝的超高速撞击进行较好的模拟并取得规律一致的结果;第一层和第二层防护屏的穿孔直径都随着弹丸撞击速度的增加而增加;舱壁损伤程度在 3.41 km/s 时最小,说明撞击极限曲线在该速度附近存在拐点。

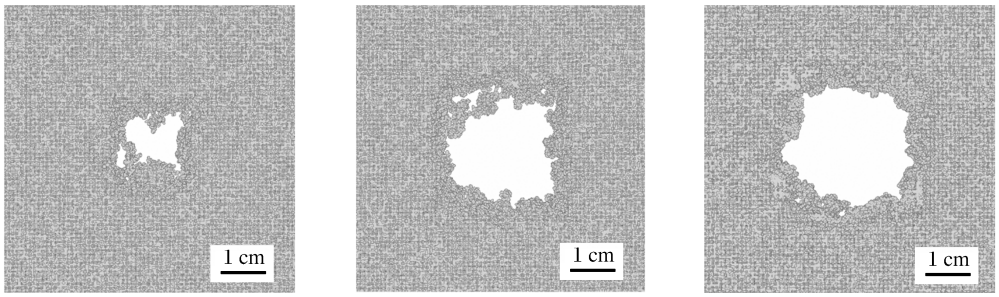
表 3 实验与数值模拟结果

Table 3 Results of experiments and simulations

Sequence number	Impact velocity /(km/s)	Hole diameter of the first bumper/(mm)			Hole diameter of the second bumper/(mm)			Hole diameter of the rear wall/(mm)		
		Exp.	Simul.	e_r/(%)	Exp.	Simul.	e_r/(%)	Exp.	Simul.	e_r/(%)
1	2.19	9.26	9.44	1.94	12.81	14.46	12.9	9.46	8.36	11.6
2	3.41	10.84	10.91	0.65	29.72	34.01	14.4	No bulge	No bulge	—
3	4.06	11.48	11.39	0.78	38.87	42.76	10.0	Bulge	Bulge	—



(a) Experiment(2.19 km/s)　(b) Experiment(3.41 km/s)　(c) Experiment(4.06 km/s)



(d) Simulation(2.19 km/s)　(e) Simulation(3.41 km/s)　(f) Simulation(4.06 km/s)

图 5　第二层防护屏损伤结果

Fig. 5　The second bumpers after impact

4　撞击极限仿真结果与分析

所谓撞击极限是指在给定撞击速度下使舱壁失效(穿孔或剥落)的临界弹丸直径,是定量评价结构防护性能的主要指标。采用二分法获得防护结构的撞击极限,即取前一次失效和未失效的中间值作为下一次计算的初始值,最后在达到一定计算精度时,取使舱壁失效的最小弹丸直径与未使舱壁失效的最大弹丸直径的平均值作为该速度下的临界弹丸直径。

本研究另提出一种夹层泡沫铝防护结构,如图 6所示。其中防护屏由两层厚度各为 1 mm 的 2A12 铝合金板夹层泡沫铝板而成,其余各材料(包括泡沫铝)及几何参数均与填充泡沫铝防护结构相同。通过数值模拟计算得到了两种含泡沫铝防护结构的撞击极限曲线,分别如图 7 和图 8 所示。为对比分析,图中还给出了相同面密度的 Whipple 防护结构(即未填充泡沫铝材料)的撞击极限曲线,该曲线出自文献[3]的经验方程。

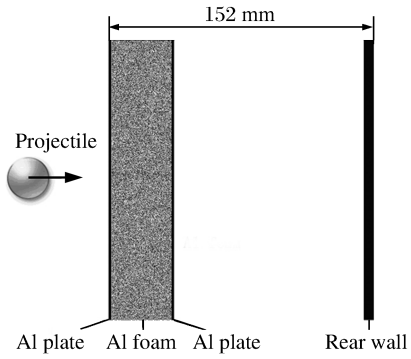


图 6　夹层泡沫铝防护结构示意图

Fig. 6　Schematic configuration of Al-foam sandwiched shield

将这两条曲线对比可以发现:夹层泡沫铝防护结构的防护性能在低速情况下(<2.8 km/s)优于填充泡沫铝防护结构,但在较高速时(>2.8 km/s),结果正好相反。其原因主要在于低速情况下,夹层泡沫铝防护结构将防护质量集中在一起作为一层防护屏,可以使弹丸破碎的效果更好;但随着撞击速度增加,撞击填充泡沫铝防护结构的第一层防护屏后弹丸破碎的程度增加,形成了膨胀的碎片云,使得撞击在中间放置的泡沫铝上的分布区域较大,此时泡沫铝则可以更有效地将碎片云的能量分散并吸收,并通

过多次击波加载使碎片云材料发生液化和汽化，从而减少最后对舱壁的损伤。总体而言，在空间碎片防护领域涉及的大部分撞击速度区间内，填充泡沫铝防护结构优于夹层泡沫铝防护结构。此外，在所讨论的速度区间内，这两种结构的防护性能均明显优于相同面密度的 Whipple 防护结构，表明填充泡沫铝材料对提高防护性能具有显著的作用。

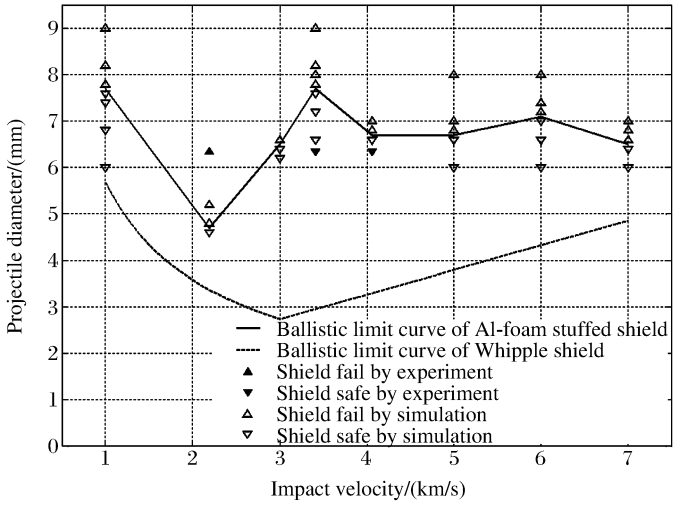


图 7 填充泡沫铝防护结构撞击极限曲线

Fig. 7 Ballistic limit curve of Al-foam stuffed shield

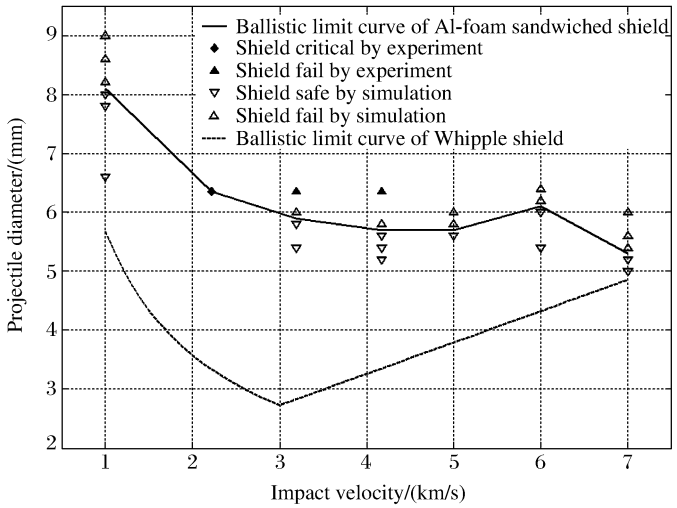


图 8 夹层泡沫铝防护结构撞击极限曲线

Fig. 8 Ballistic limit curve of Al-foam sandwiched shield

5 结 论

(1) 模仿泡沫金属的生成原理，根据泡沫金属的真实微结构建立几何模型，可以很好地模拟其超高速撞击行为。

(2) 采用 SPH 离散算法和泡沫铝微结构几何模型，结合金属材料在超高速撞击条件下的力学模型，计算了 2～4 km/s 撞击速度范围内的填充泡沫铝防护结构，模拟结果与实验结果吻合良好。

(3) 在空间碎片防护领域涉及的大部分速度区间内，填充泡沫铝防护结构的防护性能优于夹层泡沫铝防护结构，并且两种含泡沫铝结构的防护性能均明显优于 Whipple 防护结构。

References:

[1] Min G R, Xiao M X. Reliability Design of Spacecraft Module Wall against Meteoroid Perforation [J]. Chinese Space Science and Technology, 1986, 6(6): 45-48. (in Chinese)
闵桂荣,肖名鑫. 防止微流星体击穿航天器舱壁的可靠性设计 [J]. 中国空间科学技术, 1986, 6(6): 45-48.

[2] Zhang W, Pang B J, Zou J X, et al. Meteoroid and Space Debris Shielding Concepts for Spacecraft [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 32(2): 18-22. (in Chinese)
张　伟,庞宝君,邹经湘,等. 航天器微流星体及空间碎片的防护方案 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 32(2): 18-22.

[3] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistics Limit Equations for Spacecraft Shielding [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 93-104.

[4] Hiermaier S, Konke D, Stilp A J, et al. Computational Simulation of the Hypervelocity Impact of Al-Spheres on Thin Plates of Different Materials [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20: 363-374.

[5] Hayhurst C J, Clegg R A. Cylindrically Symmetric SPH Simulations of Hypervelocity Impacts on Thin Plates [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20: 337-348.

[6] Zhang W, Pang B J, Jia B, et al. Numerical Simulation of Debris Cloud Produced by Hypervelocity Impact of Projectile on Bumper [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(1): 47-52. (in Chinese)
张　伟,庞宝君,贾　斌,等. 弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 47-52.

[7] Destefanis R, Schäfer F, Lambert M, et al. Enhanced Space Debris Shields for Manned Spacecraft [J]. Int J Impact Eng, 2003, 29: 215-226.

[8] Thoma K, Schäfer F, Hiermaier S, et al. An Approach to Achieve Progress in Spacecraft Shielding [J]. Adv Space Res, 2004, 34: 1063-1075.

[9] Destefanis R, Schäfer F, Lambert M, et al. Selecting Enhanced Space Debris Shields for Manned Spacecraft [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33: 219-230.

[10] Hayhurst C J, Livingstone I H. Advanced Numerical Simulations for Hypervelocity Impacts [R]. ESTEC 12469-97-NL-GD, 1998.

Numerical Simulation Investigation in Hypervelocity Impact on Shield Structure Containing Aluminum Foam

JIA Bin[1], MA Zhi-Tao[2], PANG Bao-Jun[1]

(1. *Department of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*;
2. *School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Aluminum foam is a new type of material for shield of spacecrafts which bears fine characteristics when subjected to hypervelocity impact of space debris. A microstructure model of geometry for metallic foams was developed to simulate their manufacturing process. Numerical simulations on hypervelocity impact were carried out using self-programmed Smooth Particle Hydrodynamics, and the proposed model is validated by comparison with experimental results. Two Al-foam-containing shield structures against space debris were presented including Al-foam stuffed shield and Al-foam sandwiched shield. Ballistic limit curves of both shields were obtained respectively through numerical simulations. Analyses results indicate that the shield performance of Al-foam stuffed shield is better than that of Al-foam sandwiched shield for the majority of impact speed range referring to shield against space debris.

Key words: aluminum foam; shield structure; hypervelocity impact; SPH; ballistic limit; space debris