

填充泡沫铝防护结构的超高速撞击数值模拟

贾 斌¹, 马志涛², 庞宝君¹

(1. 哈尔滨工业大学 航天工程系, 150080 哈尔滨, jiabin@hit.edu.cn; 2. 清华大学 航天航空学院, 100084 北京)

摘 要: 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模拟, 分别对6种形式的填充泡沫铝防护结构进行了仿真计算, 比较了其撞击极限性能. 结果表明当泡沫铝处于适当的位置时, 填充泡沫铝结构的防护性能优于相同面密度的填充实心铝板结构. 通过不同防护结构碎片云特性参数的对比分析表明, 泡沫铝对小尺寸碎片的防护效果显著, 其微结构能够使碎片云的法向动量有效分散, 并通过多次加载使得碎片云液化、气化的比例大幅提升.

关键词: 泡沫铝; 防护结构; 超高速撞击; SPH; 空间碎片

中图分类号: O347; V423.42

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0016-05

Numerical simulation investigation in hypervelocity impact on Al-foam stuffed shields

JIA Bin¹, MA Zhi-tao², PANG Bao-jun¹

(1. Dept. of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China, jiabin@hit.edu.cn;

2. School of Aerospace, Tsinghua University, 100084 Beijing, 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 set up based on their manufacturing process and hypervelocity impact numerical simulations were conducted by self-programmed Smooth Particle Hydrodynamics. Six types of Al-foam stuffed shields were calculated and their ballistic limits were compared with each other. The results indicated that shield performance of Al-foam stuffed shield was better than that of solid Al-plate stuffed shield with the same areal density if the Al-foam was stuffed at appropriate position. The analyses of characteristic parameters of debris cloud of different shields indicated that Al-foam had better shield performance on small-size debris. The microstructure of Al-foam could effectively spread the perpendicular momentum of debris cloud and significantly increase the proportion of material liquefaction and gasification in debris cloud through multi-shock.

Key words: Aluminum foam; shield structure; hypervelocity impact; SPH; space debris

微流星体及空间碎片的超高速撞击会造成航天器损伤及发生灾难性失效的事例, 严重威胁航天器的安全在轨运行, 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]. 1947年Whipple^[2]提出了著名的Whipple防护结构, 即在距被防护舱壁外侧一定距离处放置金属防护屏, 防护屏的作用是将弹丸破碎, 形成

由弹丸材料和防护屏材料组成的碎片云, 碎片云在通过间距过程中发生膨胀, 使得作用在舱壁单位面积上的冲量减小, 从而减轻对舱壁的破坏能力. 此后, 在Whipple结构的基础上又发展了应用新型材料的多种构型相似的防护结构, 通过超高速撞击实验及数值仿真进行了大量防护结构性能研究工作, 并用于航天器的安全防护^[3-4]. 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. 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. 铝合金等金属材料的

收稿日期: 2009-10-23.

基金项目: 中国空间技术研究院创新基金资助项目(CAST200723).

作者简介: 贾 斌(1975—), 男, 副教授;

庞宝君(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

材料模型和相关数据得到了深入研究, 具有很高的置信度^[5-6].

泡沫金属是上个世纪 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^[7-8]. 由于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, 故弹丸超高速撞击薄防护屏后, 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. 为了有效地模拟泡沫金属材料真实超高速撞击行为, 本文根据泡沫金属的生产原理建立微结构几何模型, 结合自编的光滑质点流体动力学 (SPH) 程序进行超高速撞击数值模拟, 分别对 6 种形式的泡沫铝防护结构进行了仿真计算, 比较了其撞击极限性能, 并进行了机理分析.

1 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. 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.

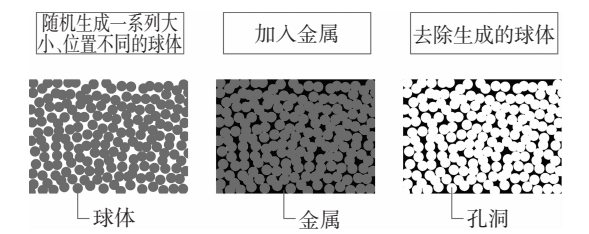


图 1 泡沫金属模型原理

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. 球的平均半径 $\bar{r}$ 定义为

$$\bar{r} = d/\alpha.$$

其中: 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 $r = f(\bar{r})$. 球心的空间坐标 x_i 定义为

$$x_i = (n_i - 1)d + g(0.5d) + \Delta x_i.$$

式中: $\Delta x_i = g(0)$; n_i 是该球在坐标 x_i 方向上的序号, $n_i \geq 1$; $g(v)$ 和 $f(v)$ 是以 v 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择, 本文采用的是线性随机函数). 图 2 是直径 6.35 mm 的 Al2017 球形弹丸以 4.08 km/s 的速度正撞击开孔泡沫铝板的实验结果, 泡沫铝基体材料为 ZL102, 厚度为 10 mm, 孔隙率为 73%, 平均孔洞直径为 0.6 mm. 图 3 给出了数值模拟结果, 使用了自编的三维 SPH 计算程序和泡沫铝微观模型, 与实验结果相吻合, 表明该几何模型可较好地模拟泡沫金属的超高速撞击行为.

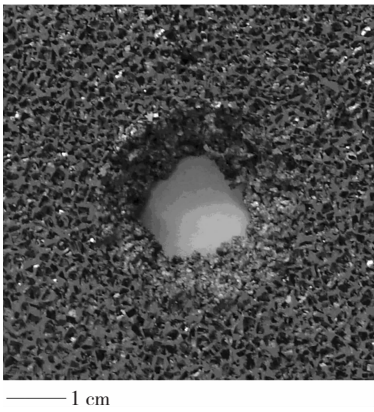


图 2 超高速撞击实验结果

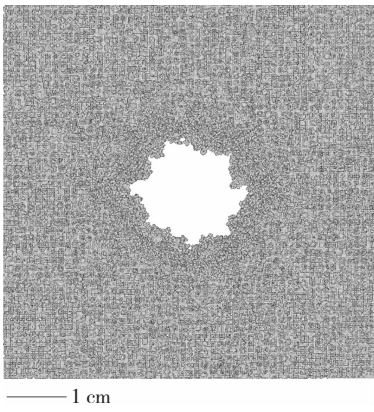


图 3 数值仿真结果

2 不同防护结构的模拟结果

2.1 防护结构方案

设计了 6 种相同面密度的填充泡沫铝防护结构, 如图 4 所示, 总体面密度均为 1.078 g/cm², 总体防护间距均为 90 mm. 开孔泡沫铝平均孔径为 1.6 mm, 相对密度为 27%, 厚度为 6.0 mm, 基体材料为 ZL102. 舱壁均为厚 1.2 mm 的 Al5A06. 其它防护屏材料均为 Al2A12, 图 4(a) 和 (b) 中两块铝防护屏的厚度均为 0.6 mm, 图 4(c) ~ (f) 中的铝防护屏厚度均为 1.2 mm. 图 4(a) 和 (b) 为填充

铝板/泡沫铝复合防护屏的 Whipple 结构,其本质是把图 4(c)中的第 1 层防护屏沿厚度均分为 2 层,并将第 2 层分别置于泡沫铝的前面或后面,以比较这 3 种结构防护性能的差异. 图 4(c) ~ (f) 为单纯填充泡沫铝的 Whipple 结构,其各层防护屏均相同,用于考察泡沫铝的填充位置对防护性能的影响.

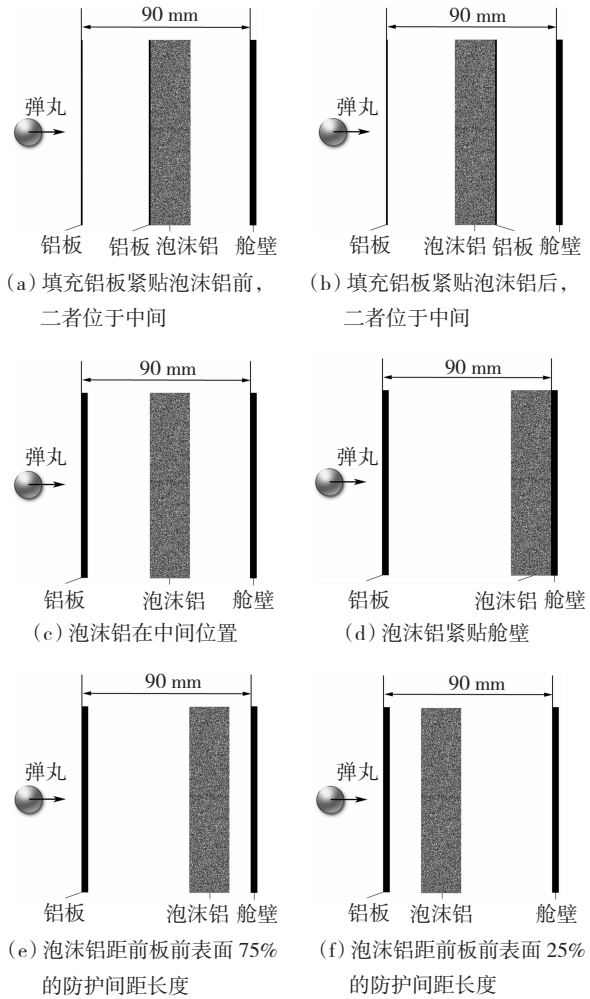


图 4 填充泡沫铝防护结构示意图

为了与非泡沫铝防护结构进行对比,还对图 5 所示的 2 种填充实心铝板防护结构进行了数值模拟,它们的总体面密度和总体防护间距与填充泡沫铝防护结构相同. 这 2 种结构中间填充的铝板材料为 ZL102,与泡沫铝基体材料相同,并处于防护结构的中间位置. 舱壁材料与厚度均与填充泡沫铝防护结构相同. 第 1 层防护屏材料均为 Al2A12. 图 5(a)中第 1 层防护屏厚度为 1.2 mm,与图 4(c) ~ (f)的第 1 层铝板相同;第 2 层厚度为 1.6 mm,面密度与图 4(c) ~ (f)中填充的泡沫铝相同. 图 5(b)中第 1 层防护屏厚度为 0.6 mm,与图 4(a)和(b)的第 1 层铝板相同;第 2 层厚度为 2.2 mm,面密度与图 4(a)和(b)中填充的铝

板/泡沫铝复合防护屏相同.

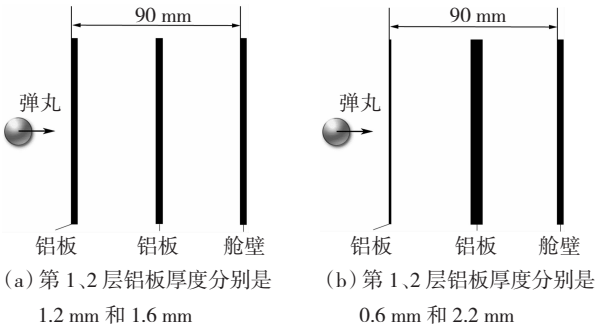


图 5 填充实心铝板防护结构示意图

2.2 数值模拟结果对比分析

采用 Al2017 球形弹丸,分 3、6、9 km/s 这 3 个速度进行超高速撞击模拟,入射角均为 0,即正撞击. 使用自编的 SPH 程序,所有材料均采用 Mie-Grüneisen 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型^[4]. 对于泡沫铝,由于建立了其微结构模型,故只需在孔壁材料处使用其基体材料的力学模型,在孔洞处是不填充材料的. 但需要指出的是,受到实验条件的限制,在 9 km/s 速度下的仿真结果尚无有效的验证手段.

定量评价防护性能的主要指标是撞击极限,即给定撞击速度下使舱壁失效(穿孔或剥落)的临界弹丸直径. 采用二分法获得防护结构的撞击极限,即首先通过试算得到使舱壁失效和未失效的弹丸直径初始值,然后取其平均值作为下一次计算的初始值,重复这一过程,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. 6 种填充泡沫铝防护结构和 2 种填充实心铝板防护结构的模拟结果如表 1 ~ 3 所示,表中 x、o、+ 分别表示舱壁失效、未失效和临界状态.

表 1 撞击速度为 3 km/s 时不同防护结构的模拟结果								
弹丸直径/ mm	防护结构形式							
	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)	图 4(f)	图 5(a)	图 5(b)
3.8							o	o
4.0	o	o	o	x	x	o	x	o
4.2	o	x	x			x		x
4.4	x	x						

由表 1 可见,弹丸撞击速度为 3 km/s 时,各方案防护性能比较接近,撞击极限最大差别仅为 0.4 mm. 图 4(a)所示的方案性能最好. 图 4(c)和(f)所示的方案优于图 4(d)和(e)的方案,表明在此速度下,泡沫铝处于防护结构中间或靠前的

位置时其性能优于靠后的位置. 图 4(c)、(f)的方案和图 5(b)的方案相当,图 4(d)、(e)的方案和图5(a)的方案相当,表明在此速度下,单纯填充泡沫铝和填充实心铝板的方案性能基本相当.

表 2 撞击速度为 6 km/s 时不同防护结构的模拟结果

弹丸直径/ mm	防护结构形式							
	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)	图 4(f)	图 5(a)	图 5(b)
3.8					o		o	
4.0		o		o	x	x	o	o
4.2				o			x	+
4.4	o	o	o	x	x	x	x	x
4.6	x	+	x	x	x	x	x	x
5.0		x						

表 3 撞击速度为 9 km/s 时不同防护结构的模拟结果

弹丸直径/ mm	防护结构形式							
	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)	图 4(f)	图 5(a)	图 5(b)
2.2				o				
2.4				x				o
2.6								o
2.8			o	x				x
3.0			x					
3.2		o	x	x	o	o		x
3.4	o	x	x	x	x	x	o	x
3.6	x	x						x

由表 2 可见,弹丸撞击速度为 6 km/s 时,各方案防护性能之间的差别增大,撞击极限最大差别达到了 0.7 mm. 图 4(b)方案的性能最好,其次为图 4(a)和(c),但两者相差仅 0.1 mm. 图 4(c)的方案优于图 4(d)、(e)和(f),表明在此速度下,泡沫铝处于防护结构中间位置时其性能优于其它位置. 图 5(a)、(b)方案的性能介于图 4(c)、(d)和(e)、(f)之间,表明在此速度下,泡沫铝的填充位置决定了其性能是否优于填充实心铝板的方案,如果位置不当,单纯填充泡沫铝的性能甚至不如填充实心铝板.

由表 3 可见,弹丸撞击速度为 9 km/s 时,各方案防护性能之间的差别进一步增大,撞击极限最大差别达到了 1.2 mm. 图 4(a)和图 5(a)的方案性能最好. 图 4(c)方案的性能介于图 4(d)和(e)、(f)之间,表明在此速度下,泡沫铝处于防护结构中间位置时其性能与其它位置相比并非最优. 图 5(a)方案优于图 4(c)~(f),图 5(b)方案仅优于图 4(d),表明在此速度下,填充实心铝板的性能优于单纯填充泡沫铝.

3 机理分析

泡沫铝作为第 1 层防护屏的防护效果弱于实心铝板,是由于弹丸与孔洞相比尺寸较大,因此孔洞直接坍塌然后密实,导致其微结构难以有效起到多次加载的作用. 但当将泡沫铝置后,撞击实心铝板产生的碎片云遇到泡沫铝时,由于其中碎片的尺寸较小,泡沫铝的微结构能够对其有效地实施多次加载,即使在较低的撞击速度下,也可使得碎片云材料大量液化、气化. 图 4(a)所示防护方案在泡沫铝前放置的第 2 块薄铝板对弹丸撞击第 1 层铝板所产生的碎片云中的碎片进一步碎化,起到了更好的防护效果,由此可以推断出泡沫铝对小尺寸碎片的防护效果显著,即图 4(a)型方案防护效果占优的原因. 撞击速度在 3 km/s 时,弹丸刚刚开始破碎,因此各种防护方案的临界弹丸直径相差不大,而撞击速度在 6 km/s 和 9 km/s 时,弹丸破碎以及液化、气化的程度增大,因而临界弹丸直径相差较大,这个结果进一步支持了该推断.

为了进一步分析不同方案防护效果的机理,对图 4(a)~(c)和图 5(a)~(b)所示的 5 种相似的防护方案进行了深入研究,分析的对象是这 5 种方案第 2 层防护屏后的碎片云,即撞击到舱壁上的碎片云. 分为撞击速度 3 km/s、弹丸直径 4.2 mm;撞击速度 6 km/s、弹丸直径 4.6 mm;撞击速度 9 km/s、弹丸直径 3.4 mm 这 3 种工况进行比较. 表 4~6 给出了碎片云的特性参数.

通过表 4~6 的对比可以发现:在每一个速度值,碎片云的最大法向动量面密度越小,即意味着法向动量面密度分布越均匀,则结构的防护能力越强;而最大碎片云质量面密度对防护能力的强弱仅有一定程度的影响. 因此,防护能力的强弱主要取决于是否能够将碎片云的法向动量有效分散. 由于开孔泡沫铝的孔棱方向是随机分布的,因而对处于膨胀状态的碎片云的多次加载可有效地分散其法向动量. 同时,撞击泡沫铝防护结构产生的碎片云液化、气化的比例大幅高于填充实心铝板防护结构,即泡沫铝通过多次加载作用还可以使碎片云材料的温度升高,提高其液化、气化比例,消耗碎片云的部分动能,从而起到减轻其冲击能力的作用. 另外,在 6 和 9 km/s 时,撞击泡沫铝防护结构产生的碎片云的总质量和法向总动量低于对应的填充实心铝板防护结构,即在较高速度时,泡沫铝相比实心铝板能够吸收更多的法向动量.

表 4 撞击速度为 3 km/s、弹丸直径为 4.2 mm 时不同防护方案的碎片云特性

防护方案	临界弹丸直径/mm	液化气化百分比/%	总质量/ (10 ⁻⁶ kg)	法向总动量/ (10 ⁻³ kg·m·s ⁻¹)	质量面密度最大值/ (kg·m ⁻²)	法向动量面密度最大值/ (10 ³ kg·(m·s) ⁻¹)
图 4(a)	4.3	42.100	72.340	64.150	6.057	7.809
图 4(b)	4.1	35.800	60.120	56.210	6.023	8.373
图 4(c)	4.1	43.200	46.470	40.450	10.900	9.065
图 5(a)	3.9	21.800	93.680	62.340	24.120	12.160
图 5(b)	4.1	21.300	56.940	67.720	6.020	8.537

表 5 撞击速度为 6 km/s、弹丸直径为 4.6 mm 时不同防护结构的碎片云特性

防护方案	临界弹丸直径/mm	液化气化百分比/%	总质量/ (10 ⁻⁶ kg)	法向总动量/ (10 ⁻³ kg·m·s ⁻¹)	质量面密度最大值/ (kg·m ⁻²)	法向动量面密度最大值/ (10 ³ kg·(m·s) ⁻¹)
图 4(a)	4.5	70.700	157.600	144.100	6.027	7.220
图 4(b)	4.6	71.700	125.900	110.600	5.317	6.202
图 4(c)	4.5	65.800	124.300	103.300	5.779	6.501
图 5(a)	4.1	46.600	194.200	152.700	12.910	8.800
图 5(b)	4.2	63.900	207.900	182.100	19.800	13.570

表 6 撞击速度为 9 km/s、弹丸直径为 3.4 mm 时不同防护结构的碎片云特性

防护方案	临界弹丸直径/mm	液化气化百分比/%	总质量/ (10 ⁻⁶ kg)	法向总动量/ (10 ⁻³ kg·m·s ⁻¹)	质量面密度最大值/ (kg·m ⁻²)	法向动量面密度最大值/ (10 ³ kg·(m·s) ⁻¹)
图 4(a)	3.5	67.600	112.800	83.820	6.918	6.801
图 4(b)	3.3	69.100	96.610	68.720	7.099	9.552
图 4(c)	2.9	71.800	106.600	70.700	10.570	12.770
图 5(a)	3.5	40.700	137.000	101.400	7.647	7.013
图 5(b)	2.7	63.500	140.100	109.400	15.980	13.340

4 结 论

1) 泡沫铝的填充位置对结构的防护性能有较大影响. 当泡沫铝处于适当的位置时,填充泡沫铝结构的防护性能优于相同面密度的填充实心铝板结构. 总体而言,泡沫铝处于防护结构的中间位置时性能较好.

2) 通过不同防护结构碎片云特性参数的对比分析表明,使碎片云的法向动量越有效分散,结构的防护能力越强.

3) 泡沫铝对小尺寸碎片的防护效果显著,其微结构能够对碎片云有效地实施多次加载,使得碎片云液化、气化的比例大幅提升.

参考文献:

[1] 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] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel[J]. Astronomical Journal, 1947, 52: 132-137.

[3] 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.

[4] CHRISTIANSEN E L, KERR J H. Ballistics limit equations for spacecraft shielding [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26: 93-104.

[5] 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]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 363-374.

[6] HAYHURST C J, CLEGG R A. Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 337-348.

[7] THOMA K, SCHAFFER F, HIERMAIER S, et al. An approach to achieve progress in spacecraft shielding[J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 1063-1075.

[8] DESTEFANIS R, SCHAFFER F, LAMBERT M, et al. Selecting enhanced space debris shields for manned spacecraft[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33: 219-230.

(编辑 张 宏)