文章编号:1000-5773(2012)06-0621-06

超高速正撞击溅射物实验与仿真研究*

郑 伟,庞宝君,彭科科,林 敏,傅 翔

(哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:随着人类航天活动日益频繁,由微流星体和空间微小碎片超高速撞击航天器表面反溅生成的溅射物,对空间碎片环境的影响将越来越大。利用 2017-T4 铝合金球弹丸超高速正撞击 5A06 铝合金靶板进行了地面模拟实验与数值仿真计算,研究了反溅碎片特性参数,其中包括溅射物的平均速度、平均尺寸、平均溅射角,为空间碎片溅射物模型的建立奠定基础。采用多元回归方法,确定了溅射物平均速度与弹丸速度、弹丸尺寸之间的函数关系。研究表明,利用光滑粒子法(SPH)进行数值仿真计算,可以有效模拟溅射物平均尺寸、平均速度、平均溅射角;溅射物平均速度随弹丸速度、弹丸尺寸的增加而增加;溅射物基本呈圆锥形反溅,溅射物平均溅射角在 41°左右,基本不受弹丸速度、弹丸尺寸的影响。

关键词:空间碎片;溅射物;超高速撞击;数值仿真;光滑粒子法

中图分类号:V416.5;O341 **文献标识码**:A

1 引 言

溅射物是微流星体和空间微小碎片撞击航天器表面反溅生成的新碎片[1]。直径小于 10.0 mm 的微小碎片是空间碎片防护的重点,溅射物粒子在尺寸范围为 0.1～10.0 mm 的空间碎片中占有较大的比例。Siguier 等研究发现,尺寸在微米级到毫米级间的空间微小碎片超高速撞击航天器表面产生的溅射物总质量是该碎片质量的几百倍,甚至是几千倍[2]。随着人类航天活动日益频繁,溅射物对航天活动的影响将越来越大。在国际上,IADC 防护工作组已经将航天器外表面材料溅射物模型列为各成员国共同研究的合作课题之一,以分析超高速撞击中溅射物的分布规律;其中,评估用不同材料制成的太阳能电池阵列、热控涂层的反溅碎片特性是以后研究的重点,将在未来几年内完成地面模拟实验研究[3]。

空间碎片溅射物模型主要是由溅射物的速度、尺寸、角度概率密度分布函数等组成。溅射物的平均速度、平均尺寸、平均溅射角是分别对反溅碎片速度、尺寸、反溅角度进行数值平均得到的,它们对建立溅射物的速度、尺寸、角度概率密度分布函数有重大价值,能形成更为准确的基于典型航天器外表面材料的溅射物模型,从而了解溅射物的分布规律。国外当前所有的溅射物模型中以欧空局MASTER2005溅射物模型最为完备,但该模型并不完善,模型中的诸多假设存在问题,比如:假定超高速撞击任意厚板时溅射物的最小尺寸为 0.1 μm。国内目前尚无针对超高速撞击靶板中反溅碎片特性问题的具体研究,有必要利用实验与数值仿真手段进行前期的探索分析,为建立空间碎片溅射物模型提供理论支持,对在轨航天器的安全运行有重要意义。

本工作研究 2017-T4 铝合金球形弹丸超高速正撞击 5A06 铝合金靶板的反溅碎片特性,利用二级轻气炮进行超高速撞击地面模拟实验,并在马志涛[4]编译的 Impact_3D 程序的基础上进行数值仿真计

* **收稿日期**:2011-03-11;**修回日期**:2011-04-09

基金项目:国家空间碎片专题项目(KJSP06211)

作者简介:郑 伟(1986—),男,博士研究生,主要从事超高速冲击动力学、航天器防护研究等相关工作.
E-mail:zhengwei19862008@126.com

算，主要研究反溅碎片的特性参数，其中包括溅射物的平均速度、平均尺寸、平均溅射角。在验证数值仿真有效的基础上，确定溅射物的平均速度与平均溅射角分别随撞击弹丸的速度、尺寸变化的规律，为建立溅射物速度、溅射角的概率密度分布函数奠定基础。

2 实验与数值仿真

2.1 实验方案

本研究使用哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击中心的非火药驱动二级轻气炮进行超高速正撞击实验。该轻气炮系统包括发射系统、测速系统、配气系统、靶舱与真空系统等 4 个部分[5]。由于空间碎片的平均密度接近金属铝的密度，而铝合金是航天器外表面的主要材料之一，故本研究选用 2017-T4 铝合金作为模拟弹丸材料，5A06 铝合金作为靶板材料。实验时，弹丸为球形弹丸，直径分别取 2.4 和 3.2 mm。靶板厚度为 7.5 mm，截面为正方形，尺寸为 120 mm×120 mm。实验中，弹丸沿飞行方向正撞击靶板，撞击速度选择 2 和 3 km/s，实验环境温度为室温。利用磁测速与激光测速方法测量弹丸的飞行速度，测量误差小于 1%。

在弹丸超高速正撞击靶板产生反溅碎片过程中，对于延性靶板，溅射物基本上只有圆锥形反溅碎片；而对脆性靶板，有圆锥形反溅碎片及散裂碎片两种[1]。综合考虑，选用铝箔测量实验中反溅碎片的特性参数，并利用数理统计理论进行数据归纳分析。基于此，将厚度为 11.5 μm 的铝箔固定于泡沫板上，二者共同组合形成收集板，在收集板的中心开孔，以使弹丸通过，如图 1 所示。收集板与靶板的间距 L 为 9 cm。选用数码显微镜对收集板进行观测，设备如图 2 所示。

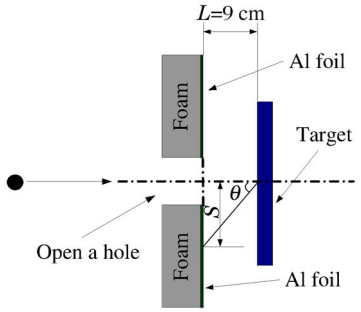


图 1 撞击实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impact experiment



图 2 数码显微镜

Fig. 2 Digital microscope

实验采用 Nakamura 等[6-7]提出的利用铝箔测量撞击粒子速度的经验公式来获取溅射物速度。该经验公式需要知道撞击粒子尺寸、密度、飞行方向与靶板法线方向的夹角等参数。由于铝箔厚度很小，反溅碎片尺寸近似等于该碎片撞击铝箔时形成的撞击孔尺寸[6]。图 3 为实验工况中铝箔上的撞击孔。在测量铝箔上任意一个撞击孔尺寸时，选取该撞击孔上任意两点间的最大距离作为 L_x，两点间的方向称为 x 方向；在撞击孔平面上，将垂直于 x 方向称为 y 方向，选取 y 方向上撞击孔的最大距离作为 L_y；取 L_x 与 L_y 二者的平均值作为撞击孔的直径，如图 4 所示。同时，由文献[8]可知，弹丸超高速正撞击金属靶板过程中，反溅碎片主要是由激波与膨胀波的相互作用使得靶板材料破碎后形成。因此，反溅碎片基本由撞击板材料组成，其密度近似等于实验中靶板材料的密度。另外，通过测量获取铝箔上任意一个撞击孔与收集板中心线的距离 S，将其与间距 L 相除，可以得到该撞击孔所对应的反溅碎片的溅射角正切值，由此得到所有反溅碎片的溅射角 θ。



图 3　铝箔上的撞击孔

Fig. 3　Impact holes in aluminum foil

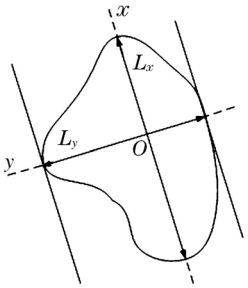


图 4　撞击孔尺寸测量

Fig. 4　Size measurement of impact hole

2.2　数值仿真方案

计算机仿真作为一个辅助手段在空间碎片超高速撞击效应研究中具有重要的作用。超高速撞击数值仿真所使用的弹丸与靶板的材料参数直接影响仿真结果的有效性,相关材料模型包括:物态方程、强度方程和失效准则。数值模拟中由于缺乏 2017-T4 铝合金的材料参数,而 2017-T4 铝合金与 2024 铝合金性质接近,因此用 2024 铝合金的参数代替。参考多个文献中关于 2017-T4 与 5A06 铝合金的材料模型及其所对应的参数值[9-11],对于 2017-T4 铝合金采用 Johnson-Cook 屈服模型,5A06 铝合金材料采用 Steinberg-Guinan 屈服模型,两种材料均采用 Mie-Grüneisen 状态方程,所有模型的相关参数如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1　2017-T4 铝合金的 Johnson-Cook 屈服模型参数

Table 1　Parameters of Johnson-Cook strength model for Al 2017-T4

G/(GPa)	A/(MPa)	B/(MPa)	C	m	n	T_{room}/(K)	T_{melt}/(K)
27.6	265	426	0.015	1.0	0.34	300	775

表 2　5A06 铝合金的 Steinberg-Guinan 屈服模型参数

Table 2　Parameters of Steinberg-Guinan strength model for Al 5A06

G_0/(GPa)	Y_0/(MPa)	Y_{max}/(MPa)	β	n	G'_p	G'_T/(MPa)	Y'_p	T_{room}/(K)	T_{melt}/(K)
27	290	680	125	0.1	1.8	−17	0.019	300	1 220

表 3　Mie-Grüneisen 状态方程参数

Table 3　Parameters of Mie-Grüneisen equation of state

Materials	ρ/(g/cm^3)	c_0/(m/s)	S	c_V/[J/(kg·K)]	Γ
2017-T4	2.79	5 370	1.338	875	2.00
5A06	2.64	5 328	1.338	921	2.00

在超高速撞击过程中,使用拉格朗日等网格算法进行计算时会使得网格变形较大,网格扭曲严重,导致仿真结果失真,因此采用光滑粒子法(SPH 法)进行数值仿真计算。利用软件进行数值仿真计算后,可以获得各个时间节点上对应的反溅粒子的速度、尺寸、角度等参数。当计算时间历程达到某一时刻时,靶板基本不再反溅粒子,选择该时间节点所输出的反溅粒子的各项数据进行分析。由于利用 SPH 法进行数值仿真计算需要将物体分解成等质量的离散粒子,导致计算结果为离散粒子,与实际碎片存在差异,因此需要将数值仿真所得到的位置、速度等参数基本一致的反溅粒子进行合并,从而最终确定反溅碎片的速度、尺寸、溅射角等参数。

3 数值仿真与实验结果的对比

为验证数值仿真计算的有效性，对超高速撞击实验的 4 个工况进行数值仿真模拟，并将数值仿真所得到的反溅碎片平均尺寸、平均速度、平均溅射角等统计量，与其对应的超高速撞击实验工况的结果进行比较，实验与数值仿真的最终对比结果如表 4 所示。

表 4 实验与仿真结果的对比

Table 4 Comparison between simulated results and experimental results

No.	Projectile diameter /(mm)	Impact velocity /(km/s)	Mean size of ejecta /(μm)		Mean velocity of ejecta /(m/s)		Mean ejected angle /(°)	
			Exp.	Simulat.	Exp.	Simulat.	Exp.	Simulat.
1	2.41	2.14	285.0	278.0	99.0	92.2	44.8	47.5
2	2.40	2.92	298.7	292.5	114.0	129.6	42.0	42.1
3	3.20	2.06	303.8	294.3	130.0	140.7	43.1	49.6
4	3.21	2.93	308.0	314.0	167.6	185.1	40.9	44.6

由表 4 可知，实验与数值仿真所获得的溅射物平均尺寸、平均速度的相差幅度均在 10%左右，且二者随撞击条件的变化规律基本一致。实验与数值仿真所获得的平均溅射角相差不超过 7°，吻合较好。实验与数值仿真结果之间的误差主要是由实验设备系统偏差、实验方法不完善及仿真模拟中材料参数的误差所引起。从工程实验角度出发，针对溅射物平均尺寸、平均速度、平均溅射角的数值模拟结果是有效的，因此可以利用数值仿真对溅射物特性参数进行分析。

4 溅射物平均速度、平均溅射角的分布规律

由数值仿真所得到的溅射物平均速度 v_{mean} 与撞击初始参数(v,D)的关系如图 5 所示。由图示曲线，可以设 v_{mean} 与弹丸撞击速度 v 呈幂函数，弹丸尺寸 D 作为函数中各个系数的变化参数。将溅射物平均速度 v_{mean} 与撞击条件 v、D 进行多元非线性回归拟合分析，方程形式如下(其中，a、b 均为 D 的函数)

$$v_{\mathrm{mean}} = a \cdot (v-1)^b \tag{1}$$

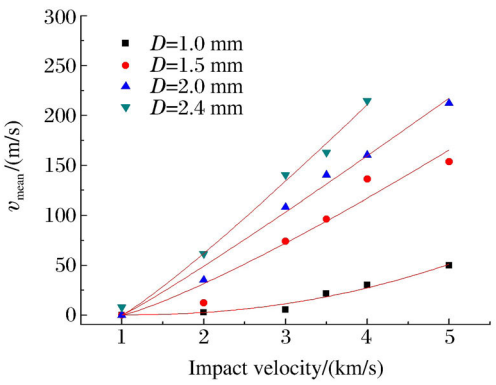


图 5 溅射物平均速度与撞击条件的关系

Fig. 5 Function between mean velocity of ejecta and impact condition

由于空间中绝大多数微小空间碎片粒子撞击航天器外表面时均未穿透航天器，因此在本研究中，撞击速度 v 应小于使单层板发生临界穿透的撞击速度 v_{c}。利用 Christiansen 对 Burton Cour-Palais 单板成坑经验方程进行修改后的 JSC 方程，计算获得单层板发生临界穿透的撞击速度 v_{c}[12]

$$D = [0.087 t H_{\mathrm{B,b}}{}^{0.25} (\rho_b/\rho_p)^{0.5} (c_b/v_c)^{2/3}]^{18/19} \tag{2}$$

式中：D 为撞击弹丸直径(cm)；ρ_{p} 表示弹丸密度(g/cm^3)；ρ_{b} 为单层板密度(g/cm^3)；$H_{\mathrm{B,b}}$ 为单层板的布氏硬度(9.8 MPa)；v_{c} 是指单层板发生临界穿透的撞击速度(km/s)，c_{b} 表示单层板材料的声速(km/s)，t 为单层板厚度(cm)。根据所选材料，相关几何与物理参数为：t = 0.75 cm，$H_{\mathrm{B,b}}$ = 901.6 MPa，ρ_{p} = 2.77 g/cm^3，ρ_{b} = 2.64 g/cm^3，c_{b} = 5.34 km/s，由此得到临界撞击速度 v_{c} 与 D 之间的关系为

$$v_c = 0.48 D^{-19/12} \tag{3}$$

在弹丸撞击速度保持不变时，a、b 将随弹丸直径的变化而变化。利用最小二乘法对仿真数据进行回归

分析,可以得到 a、b 与 D(cm)的函数关系式

$$a = -51.725 + 35.503\mathrm{e}^{5.075D} \tag{4}$$

$$b = 0.202D^{-1.020} \tag{5}$$

由 a、b 的函数关系式,结合公式(1)可以得到溅射物平均速度 v_{mean} 的完整函数关系式。

根据上述方程,在所研究的撞击条件范围内,分析发现:(1) 在弹丸撞击速度不大于 1 km/s 时,基本不产生反溅碎片,溅射物平均速度趋于零;(2) 当弹丸尺寸保持不变时,溅射物平均速度随弹丸速度的增加而增大;(3) 当弹丸速度保持不变时,随着弹丸尺寸的增加,溅射物平均速度的值也随之增大。这主要是因为当撞击速度低于 1 km/s 时,撞击过程主要是固体对固体的冲击,没有液化、汽化、再凝结过程,反溅物质较少,反溅碎片不易产生,溅射物平均速度趋于零;而在超高速撞击条件下,随着弹丸尺寸、弹丸速度的增加,弹丸总体的冲击能量也随之增加,导致弹丸撞击靶板产生的高速反溅碎片更多,最终使得反溅碎片的平均速度也随其变大。

另一方面,经研究发现,实验与数值仿真中溅射物基本呈圆锥形反溅。数值模拟所得到的溅射物平均溅射角 θ_{mean} 随撞击初始条件(v,D)的变化情况如图 6 所示。对这些数值仿真结果进行分析发现,除个别仿真工况外,平均溅射角 θ_{mean} 在一个常数值附近,基本不受弹丸撞击速度 v、弹丸尺寸 D 的影响。与此同时,在超高速正撞击实验中发现收集板上的绝大多数撞击孔呈细圆环状分布,这也表明在本研究研究范围内,可以认为平均溅射角 θ_{mean} 为常数。欧空局的 MASTER2005 溅射物模型认为在超高速正撞击大多数厚板时,溅射物的平均溅射角为常数,一般可以取 30°。二者大小不一致的主要原因是由适用范围及国内外材料差异等引起的。

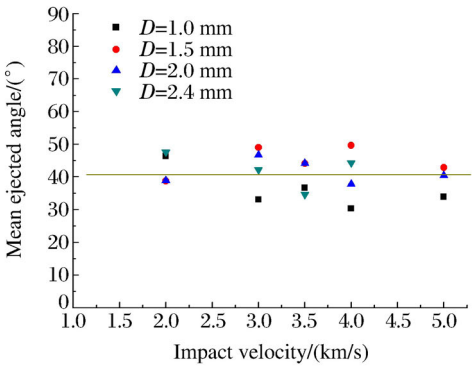


图 6　溅射物平均溅射角与撞击条件的关系

Fig. 6　Function between mean ejected angle of ejecta and impact condition

5　结　论

通过对 2017-T4 铝球弹丸超高速正撞击 5A06 铝合金靶板进行实验与数值仿真研究,并在验证数值仿真有效性的基础上,分析了溅射物平均尺寸、平均速度、平均溅射角,得到以下几点结论。

(1) 数值仿真所获得的溅射物平均尺寸、平均速度、平均溅射角是有效的,可以利用 Impact_3D 程序进行超高速撞击溅射物数值仿真模拟。

(2) 在弹丸速度未达到靶板临界穿孔速度的条件下,利用多元非线性拟合方法得到了溅射物平均速度与弹丸速度、弹丸尺寸之间的函数关系,且溅射物平均速度随着弹丸速度、弹丸尺寸的增加而增加。

(3) 在 2017-T4 铝合金弹丸超高速撞击 5A06 铝合金靶板过程中,溅射物基本呈圆锥形反溅。数值仿真所得到的溅射角平均值与本研究所进行的超高速撞击实验结果一致,溅射角平均值在 41°附近,基本不受弹丸速度、弹丸尺寸的影响。

本研究只是针对超高速撞击反溅问题进行了初步的探讨,对更复杂的工程应用须进一步完善。

References:

[1] Rival M, Mandeville J C. Modeling of ejecta produced upon hypervelocity impacts [J]. Space Debris, 1999, 1: 45-57.

[2] Siguier J M, Mandeville J C. Test procedures to evaluate spacecraft materials ejecta upon hypervelocity impact [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2007, 221(6): 969-974.

[3] Mandeville J C. Characterisation of ejecta from HVI on spacecraft outer surfaces [R]. Germany: The European

Space Operations Centre,2009.

[4] Ma Z T. Smoothed particle hydrodynamics method and behavior of aluminum foams under hypervelocity impact [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2008:82-100. (in Chinese)
马志涛. 光滑质点法与泡沫铝空间碎片防护结构研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:82-100.

[5] Guan G S,Pang B J,Ha Y,et al. Damage of Al-whipple shield rear wall caused by hypervelocity impact of Al-spheres [J]. Acta Armamentarii,2007,28(1):94-100. (in Chinese)
管公顺,庞宝君,哈 跃,等. 铝球弹丸超高速正撞击铝 Whipple 防护结构舱壁的损伤分析 [J]. 兵工学报,2007,28(1):94-100.

[6] Nakamura A M,Fujiwara A,Kadono T. Velocity of finer fragments from impact [J]. Planet Space Sci,1994,42(12):1043-1052.

[7] Yamamoto S,Nakamura A M. Velocity measurements of impact ejecta from regolith targets [J]. Icarus,1997,128:160-170.

[8] Piekutowski A J. Formation and description of debris cloud produced by hypervelocity impact,NASA-CR-4707 [R]. USA:NASA Johnson Space Center,1996.

[9] Walsh J M,Rice M H,McQueen R G,et al. Shock-wave compression of twenty-seven metals,equation of state of metals [J]. Phys Rev,1957,108(2):196-216.

[10] Johnson G R,Cook W H. A constitutive model and data for materials subjected to large strains,high strain rates and high temperatures [A]//Proceeding of the Seventh International Symposium on Ballistics [C]. The Hague,The Netherlands,1983:541-547.

[11] Steinberg D J,Cochran S G,Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high strain rate [J]. J Appl Phys,1980,51(3):1498.

[12] Christiansen E L. Shielding sizing and response equations,NASA-TM-105527 [R]. USA:NASA Johnson Space Center,1991.

Hypervelocity Impact Experiment and Simulation for Ejecta

ZHENG Wei,PANG Bao-Jun,PENG Ke-Ke,LIN Min,FU Xiang

(*School of Astronautics,Harbin Institute of Technology,Harbin* 150080,*China*)

Abstract:With more and more frequently increasing of human's space activities,ejecta produced by micrometeoroid and small space debris impacting on spacecraft surface will also further affect the space debris environment. The ground experiments and numerical simulations about aluminum sphere projectile hypervelocity impacting on 5A06 aluminum plate were carried out in this work. The mean value of the special ejecta parameters,such as the mean velocity of ejecta,the mean size of ejecta,the mean ejected angle of ejecta,were studied,setting up a foundation for constructing the space debris environment model for ejecta. In this paper,multiple regression method was used to obtain the relation among the mean velocity of ejecta,the impact velocity,and the size of the projectile. The results show that SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) can be effectively used in numerically simulating the mean velocity of ejecta,the mean size of ejecta and the mean ejected angle of ejecta;the mean velocity of ejecta increases with the impact velocity,and the size of the projectile;the ejecta in the process of material ejection can obey cone shape approximately,and the mean ejected angle is nearly 41° but basically unaffected by the impact velocity and the size of the projectile.

Key words:space debris;ejecta;hypervelocity impact;simulation;smoothed particle hydrodynamics