

文章编号: 1001-1455(2007)06-0546-07

球形弹丸正撞击薄板防护屏碎片云特性研究*

张永强^{1,2}, 管公顺², 张伟², 庞宝君²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 哈尔滨工业大学高速撞击研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 以质量、动量和能量守恒为基础, 结合平面激波理论和热力学理论, 对球形铝弹丸正撞击薄板铝防护屏形成的碎片云特性进行了建模, 模型计算结果与实验结果吻合较好。利用该模型对多种工况下碎片云特性进行了计算, 结果表明: (1) 碎片云质心速度和膨胀速度随撞击速度和弹丸直径的增加而增大, 随防护屏厚度增大而减小; 膨胀半角随撞击速度和防护屏厚度的增大而增大, 随弹丸直径的增大而减小; (2) 速度和膨胀半角变化曲线具有相似性; (3) 对于给定的弹丸和防护屏材料, 碎片云中受到激波加载部分的材料各相态质量分数只与弹丸撞击速度有关。这些规律与实验规律吻合。

关键词: 爆炸力学; 碎片云; 超高速撞击; 空间碎片

中图分类号: O347

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

微流星体和空间碎片的超高速撞击严重地威胁着在轨航天器的安全, 为了保护在轨航天器的安全运行, 基于 Whipple 在 1947 年提出来的在航天器舱壁外面一定距离处放置一块防护屏即 Whipple 防护, 发展了多种改良型 Whipple 防护或者多层防护^[1-2]来保护在轨航天器的安全, 使得微流星体和空间碎片对航天器舱壁的威胁变成碎片云对舱壁的威胁。为此必须对高速撞击后产生的碎片云特性进行研究, 尤其是碎片云的速度特性、相态特性和膨胀半角特性。碎片云的速度特性直接影响碎片云对舱壁的成坑、穿孔等效应; 相态特性能从一定程度上体现出具有不同相态成分的碎片云对舱壁损伤大小; 膨胀半角描述出碎片云对舱壁的损伤作用范围。

目前, 对高速撞击产生碎片云的研究已引起了各国特别是航天大国的高度重视, 对碎片云的研究也取得了很多成果。对碎片云的研究一般有三种方法: 一是通过地面高速撞击实验, 但高速撞击实验受到速度的限制, 又需要大量实验配套设备的支持, 同时地面高速撞击实验的费用也很高。二是通过数值模拟, 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。三是提出理论模型, 从理论的角度, 建立模型并同已有的实验进行比较, 最后进一步修正模型。A. J. Piekutowski^[3-4]、S. Akahoshi 等^[5]通过地面高速撞击实验对碎片云进行了大量的研究, 对碎片云的空间位置分布、舱壁的损伤范围进行了研究。张伟等^[6]用 Autodyn 软件进行了大量的数值模拟, 其结果和 A. J. Piekutowski 的实验结果符合得很好。W. P. Schonberg^[7-8]在理论方面进行了深入的研究, 取得了大量的成果。E. Corvonato 等^[9]提出了一种新的碎片云积分模型, 把碎片云看成是一个连续的整体进行研究。

本文中基于质量、动量和能量守恒, 结合平面激波理论^[10]和热力学理论, 建立碎片云模型, 通过与实验结果比较, 欲表明该模型的合理可用。并利用该模型对不同工况下产生的碎片云的速度特性、相态质量分数和膨胀半角特性进行计算, 通过分析得出碎片云的速度特性、相态质量分数以及膨胀半角随弹丸直径、防护屏厚度和撞击速度的变化规律, 和实验进行比较。

* 收稿日期: 2006-05-22; 修回日期: 2006-08-28

基金项目: 国防科工委空间碎片专项项目

作者简介: 张永强(1981—), 男, 硕士, 实习研究员。

2 碎片云模型

当弹丸高速撞击薄板防护屏时，弹丸中反向的激波和防护屏中的激波在传播到各自背面时，各自反射一稀疏波。在入射波和稀疏波的共同作用下，弹丸和防护屏穿孔材料破碎，形成固体颗粒。当撞击速度足够高时，部分固体材料出现融化甚至气化。除一小部分反向喷出外，大部分弹丸和防护屏材料一起以碎片云的形式向前推出，X 光高速摄像机拍摄到的碎片云如图 1 所示。

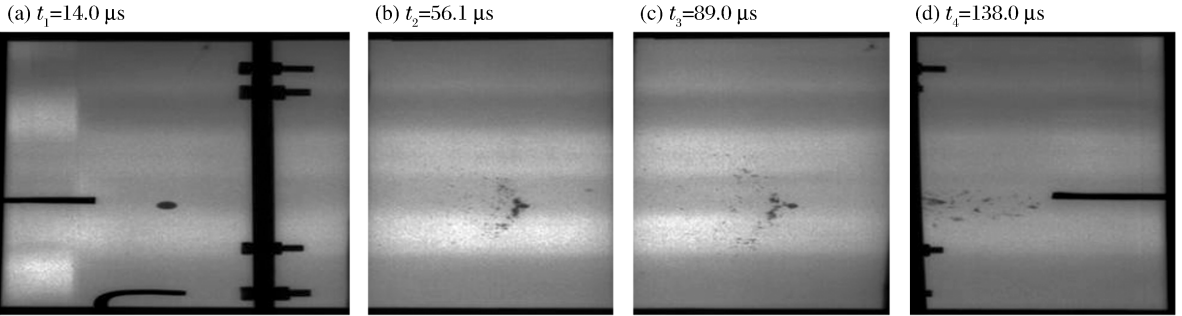


图 1 碎片云 X 光照片

Fig. 1 X radiograph of debris cloud

2.1 质心速度、膨胀速度和膨胀半角

碎片云速度特性描述如图 2 所示。对碎片云速度特性的研究是指质心速度和膨胀速度。由于弹丸撞击防护屏形成碎片云的物理过程时间很短，将弹丸质量 m_p 和防护屏中被弹丸击穿部分的质量 m_b 看作是一个整体，碎片云质心速度、膨胀速度和膨胀半角^[3]分别为

$$v_{ax} = \frac{m_p v_0}{m_p + m_b} \tag{1}$$

$$v_{exp} = \sqrt{\frac{2(E_{im} - E_p m_p - E_b m_b - E_{dc,ax})}{m_p + m_b}} \tag{2}$$

$$\theta = \arctan \frac{v_{exp}}{v_{ax}} \tag{3}$$

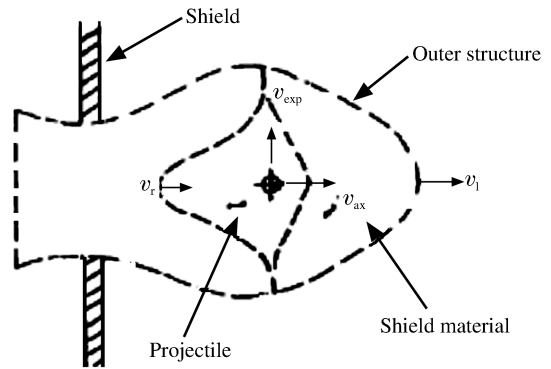


图 2 碎片云速度描述

Fig. 2 Description of debris cloud velocities

式中： E_{im} 、 E_p 、 E_b 、 $E_{dc,ax}$ 、 $E_{dc,exp}$ 分别为撞击前弹丸的动能、弹丸材料经激波加载和释放后单位质量的剩余能量、防护屏材料经激波加载和释放后单位质量的剩余能量、碎片云轴向方向的动能、碎片云膨胀方向的动能。取球形弹丸撞击薄板穿孔直径 $D_h = 3.4D(t/D)^{1/3} (v_0/c_b)^{1/3} (1 - 0.0308\rho_b/\rho_p)^{[7]}$ ， t 、 D 为防

表 1 薄板穿孔直径

Table 1 Hole diameter in a thin plate

No	D/mm	v_0 /(km/s)	t/mm	$D_{h,c}$ /mm	$D_{h,c}$ /mm
1	3.96	4.81	1.00	7.36	7.60
2	4.10	3.42	1.00	6.68	6.95
3	4.23	3.62	1.00	6.70	7.23
4	4.98	3.52	1.00	7.48	7.99
5	5.07	4.31	1.00	8.50	8.65
6	5.16	4.46	1.00	8.30	8.85
7	5.56	4.10	1.00	8.68	9.04
8	5.84	3.43	1.00	8.22	8.81
9	5.84	3.52	1.00	8.25	8.88

护屏厚度和弹丸直径, ρ_b, ρ_p 为防护屏和弹丸密度, c_b 为防护屏声速。穿孔直径的计算结果与实验结果如表 1 所示, m_b 可由 D_h, t 和 ρ_p 求得。

2.2 激波加载及释放

弹丸与防护屏超高速正撞击时,在弹丸与防护屏材料中产生激波加载和等熵释放两个过程,采用 Tillotson 状态方程修正式^[11]对弹丸和防护屏材料的等熵释放过程进行描述,弹丸和防护屏材料中激波加载的比内能 E_H 可由平面激波基本关系式求出,等熵释放的能量 E_{R1} 可由有限差分法得到。两者之差即为剩余比内能 E_{RE} 。

2.3 碎片云中固态、液态和气态的质量分数

弹丸和被击掉防护屏材料分为两个部分:一部分是受到激波加载和释放的,另一部分是未受到激波加载和释放的。这是由在弹丸和防护屏材料中的反射波超过相对应的激波的位置所决定的^[12],碎片云中三相状态由剩余比内能决定。所讨论的碎片云中固态、液态和气态的质量分数 Q_S, Q_L, Q_V 指的是受到激波加载和释放那部分。

如果 $E_{RE} < e_m, e_m$ 为零压下材料熔化所需比内能。则认为材料未熔化,这时材料仍为固相。即

$$\begin{cases} Q_S = 1 \\ Q_L = 0 \\ Q_V = 0 \end{cases} \quad (4)$$

如果 $e_m + H_f > E_{RE} > e_m, H_f$ 为材料熔化潜热。则认为材料初始熔化,这时材料处于液相与固相的混合物状态。即

$$\begin{cases} Q_S = 1 - (E_{RE} - e_m) / H_f \\ Q_L = (E_{RE} - e_m) / H_f \\ Q_V = 0 \end{cases} \quad (5)$$

如果 $e_m + H_f < E_{RE} < e_m + H_f + c_{PL}(T_V - T_m), c_{PL}$ 为材料液相状态比热, T_V 为材料沸点。则认为材料完全熔化。即

$$\begin{cases} Q_S = 0 \\ Q_L = 1 \\ Q_V = 0 \end{cases} \quad (6)$$

如果 $e_m + H_f + c_{PL}(T_V - T_m) < E_{RE} < e_m + H_f + c_{PL}(T_V - T_m) + H_V, H_V$ 为材料的气化潜热。则认为材料初始气化,这时材料处于液相与气相的混合物状态。即

$$\begin{cases} Q_S = 0 \\ Q_L = 1 - \{E_{RE} - [e_m + H_f + c_{PL}(T_V - T_m)]\} / H_V \\ Q_V = \{E_{RE} - [e_m + H_f + c_{PL}(T_V - T_m)]\} / H_V \end{cases} \quad (7)$$

如果 $E_{RE} > e_m + H_f + c_{PL}(T_V - T_m) + H_V$, 则认为材料完全气化。即

$$\begin{cases} Q_S = 0 \\ Q_L = 0 \\ Q_V = 1 \end{cases} \quad (8)$$

3 碎片云特性计算和分析

为了得到碎片云的质心速度和膨胀速度与防护屏的厚度和弹丸的直径之间的变化规律,首先计算了与文献[3]中相同工况下的情况,并进行了比较,结果如图 3 和表 2 所示。由图 3 和表 2 可见,碎片

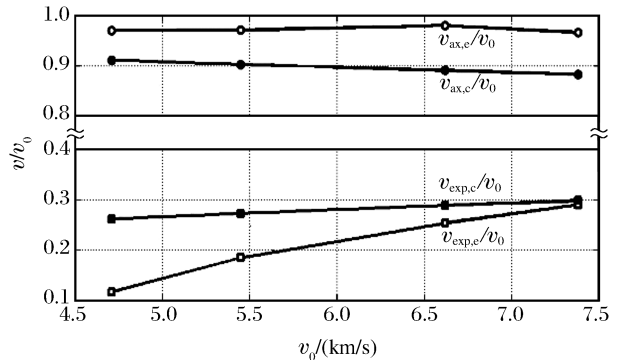


图 3 碎片云速度特性

Fig. 3 Characteristics of debris cloud velocities

云速度特性的模型计算与实验结果吻合得比较好,从而表明了模型的合理可用。

表 2 碎片云速度特性

Table 2 Characteristics of debris cloud velocities

D/mm	t/D	$v_0/(km/s)$	$v_{ax,c}/v_0$	$v_{exp,e}/v_0$	$v_{ax,c}/v_0$	$v_{exp,c}/v_0$
9.53	0.03	6.54	0.99	0.12	0.96	0.17
9.53	0.05	7.38	0.97	0.29	0.89	0.30
9.53	0.06	6.78	0.97	0.33	0.84	0.34
9.53	0.08	6.68	0.96	0.36	0.77	0.39
9.53	0.10	6.72	0.95	0.44	0.70	0.42

3.1 撞击速度、弹丸直径和防护屏厚度对速度特性影响

直径 6 mm 的铝球弹丸以不同速度正撞击不同厚度的铝防护屏形成的碎片云速度特性的计算结果如图 4~5 所示;不同直径的铝球弹丸以不同速度正撞击 1 mm 厚的铝防护屏形成的碎片云速度特性结果如图 6 所示。

从图 4~6 中可以看出,质心速度和膨胀速度随撞击速度和弹丸直径的增加而增大,随防护屏厚度的增大而减小;并且从曲线的形状上来看具有相似性,这种相似性能够为更高速度撞击产生的碎片云的速度特性进行预测。

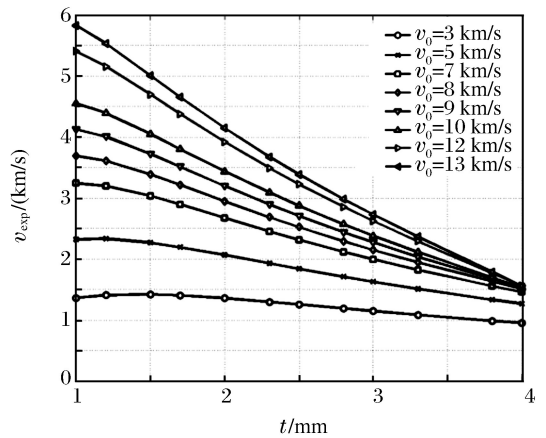
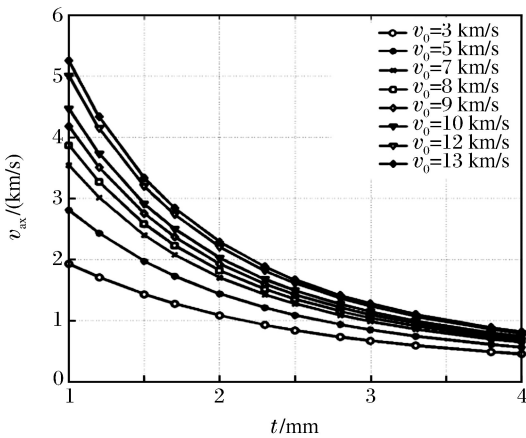


图 4 不同 v_0 下 t 对碎片云速度特性的影响

Fig. 4 Effects of shield thicknesses on debris cloud velocities at different impact velocities

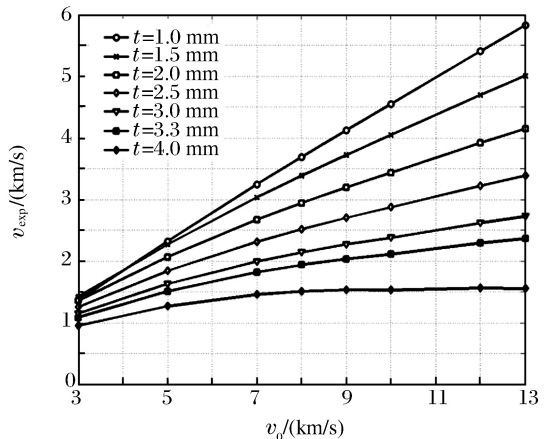
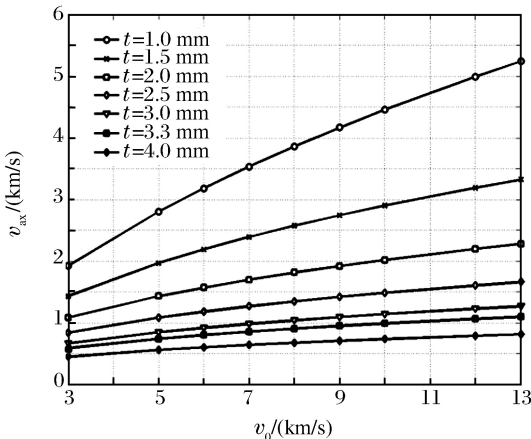


图 5 不同 t 下 v_0 对碎片云速度特性的影响

Fig. 5 Effects of impact velocities on debris cloud velocities under different shield thicknesses

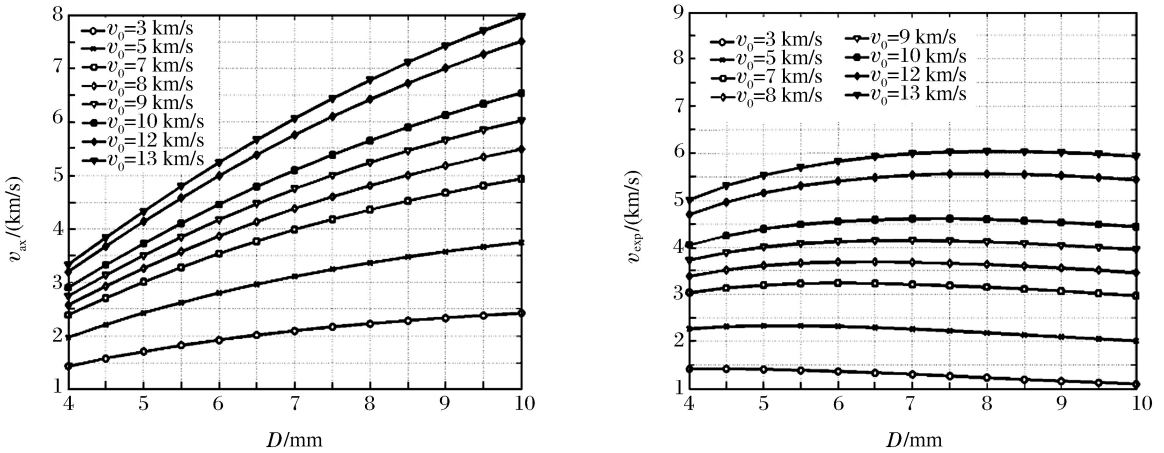


图6 不同 v_0 下 D 对碎片云速度特性的影响

Fig. 6 Effects of projectile diameters on debris cloud velocities under different impact velocities

3.2 撞击速度、弹丸直径和防护屏厚度对膨胀半角的影响

膨胀半角是衡量碎片云对舱壁损伤范围的参量。从图7~8可以发现,膨胀半角随撞击速度和防护屏厚度的增大而增大,随弹丸直径的增大而减小。结合撞击速度、弹丸直径和防护屏厚度对碎片云速度的影响,可以看出撞击速度对膨胀速度的影响大于对质心速度的影响,说明由撞击速度增大而增加的初始动能主要分配到膨胀方向上。同时,当撞击速度增大到碎片云开始气化时,由于气态存在内压,所以膨胀速度会比质心速度增大得快。弹丸直径和防护屏厚度的影响则相反,对于弹丸直径而言,虽然质心速度和膨胀速度都随直径的增大而增大,但由质量增大引起的初始动能的增加主要分配到质心速度方向上。而就防护屏厚度来说,虽然质心速度和膨胀速度都随厚度的增大而减小,但质心速度比起膨胀速度的减小更迅速。撞击速度、弹丸直径和防护屏厚度对膨胀半角的影响和文献[3]是一致的。同时对于不同厚度的防护屏和直径的弹丸,其膨胀半角随撞击速度的变化曲线也具有相似性。

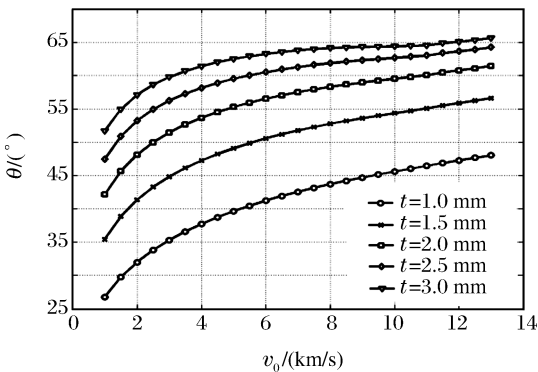


图7 不同 t 下 v_0 对 θ 的影响

Fig. 7 Effects of impact velocities on spread half angle under different shield thicknesses

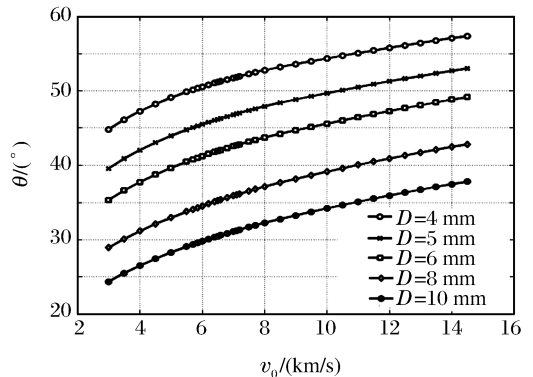


图8 不同 D 下 v_0 对 θ 的影响

Fig. 8 Effects of impact velocities on spread half angle under different projectile diameters

3.3 弹丸直径、防护屏厚度和撞击速度对相态特性的影响

碎片云中材料各相态的质量分数随弹丸撞击速度的变化如图9所示。从图10可以看出,球形弹丸正撞击防护屏后产生的碎片云中各相态质量分数只与撞击速度有关。对于弹丸和防护屏均为铝材料,撞击速度小于等于5.8 km/s时,碎片云中的物质均为固态,相当于多个微小弹丸撞击舱壁;在5.81~7.10 km/s的范围内是固液相共存,但这个范围很小,即碎片云中物质液相的质量分数随速度变化很快;在7.10~11.2 km/s这个较大范围内,碎片云为液相;从11.3 km/s开始碎片云中的物质开始气

化,出现液气相共存。计算结果和文献[13]吻合。

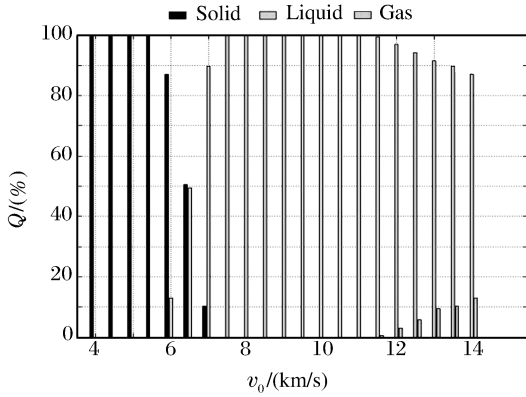


图 9 不同 v_0 下碎片云中材料各相态的质量分数
Fig. 9 Percentages by mass of materials in different phase states for debris cloud under different impact velocities

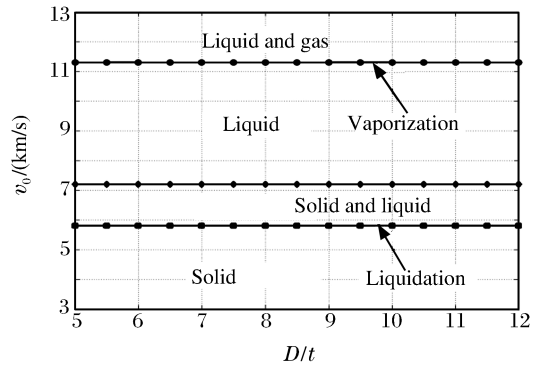


图 10 v_0 和 D/t 对碎片云相态特性的影响
Fig. 10 Effects of impact velocity and ratio of projectile diameter to shield thickness on phase state for debris cloud

4 结 论

通过与实验结果比较,表明了本文模型的合理可用。利用该模型计算和分析铝球正撞击薄板铝防护屏后产生的碎片云速度特性、膨胀半角特性以及相态特性,可以得到如下结论:

(1)质心速度和膨胀速度随撞击速度和弹丸直径的增加而增大,随防护屏厚度的增大而减小;膨胀半角随撞击速度和防护屏厚度的增大而增大,随弹丸直径的增大而减小。其变化曲线具有相似性,能够预测更高速度撞击后产生的碎片云特性。

(2)对于给定的弹丸和防护屏材料,碎片云中受到激波加载那部分材料各相态质量分数只与弹丸撞击速度有关。

参考文献:

- [1] 闵桂荣,肖名鑫. 防止微流星击穿航天器舱壁的可靠性设计[J]. 中国空间科学技术, 1986(6):45-48.
MIN Gui-rong, XIAO Ming-xin. Reliability design of spacecraft module wall against meteoroid perforation[J]. Chinese Space Science and Technology, 1986(6):45-48.
- [2] 张伟,庞宝君,邹经湘,等. 航天器微流星和空间碎片的防护方案[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999,31(2):18-22.
ZHANG Wei, PANG Bao-jun, ZOU Jing-xiang, et al. Meteoroid and space debris shielding concepts for spacecraft [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999,31(2):18-22.
- [3] Piekutowski A J. Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact[R]. NASA4707, 1996.
- [4] Piekutowski A J. Debris clouds produced by the hypervelocity impact of nonspherical projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26:613-624.
- [5] Akahoshi S, Nakamura T. Construction of mass, three-dimensional and velocity distribution for the second debris cloud[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26:1-11.
- [6] 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.
ZHANG Wei, PANG Bao-jun, JIA Bin, et al. Number simulation of debris cloud produced by hypervelocity impact of projectile on bumper[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(1):47-52.
- [7] Schonberg W P. Vulnerability of Space Station Freedom Modules—A Study of the Effects of Module Perforation on Crew and Equipment: Volume II, Analytical Modeling of Internal Debris Cloud Effects[R]. NASA4716, 1995.
- [8] Schonberg W P. Modelling oblique hypervelocity impact phenomena using elementary shock physics[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23(1):823-834.

- [9] Corvonato E, Destefanis R, Faraud M. Integral model for the description of the debris cloud structure and impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26:115-128.
- [10] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 第 2 版. 北京:科学出版社, 1999:86-95.
- [11] Schonberg W P. A First-Principles Based Model Characterization the Debris Cloud Created in a Hypervelocity Impact[R]. AIAA94-4487, 1994:1-10.
- [12] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1984:336-340.
- [13] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京:科学出版社, 2000:164-166.

Characteristics of debris cloud produced by normal impact of spherical projectile on thin plate shield

ZHANG Yong-qiang^{1,2*}, GUAN Gong-shun², ZHANG Wei², PANG Bao-jun²

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)*

Abstract: Based on the equations for the conservation of mass, momentum, and energy together with the theory of plane shock wave and thermodynamics, a debris cloud model was proposed to characterize the debris cloud produced by normal impact of spherical projectile on thin plate shield. Characteristics of debris cloud calculated by using the proposed model are in agreement with the experimental results. Under different conditions, calculated results of characteristics for debris cloud by using the proposed model show the following conclusions. (1) The center-of-mass and spread velocities of debris cloud increase with the increase of impact velocity and projectile diameter, and decrease with the increase of shield thickness, and spread half angle increases with the increase of impact velocity and shield thickness and decreases with the increase of projectile diameter. (2) The change curves of velocity and spread half angle of debris cloud have similarities. (3) Under the determination of projectile and shield material, percentage by mass of materials in different phase states has relation only to impact velocity of projectile for the debris cloud loaded by shock wave. These conclusions are consistent with the experimental results.

Key words: mechanics of explosion; debris cloud; hypervelocity impact; space debris

* Corresponding author: ZHANG Yong-qiang
E-mail address: zqiang6590@sina.com
Telephone: 86-816-2491854