

# 超高速碰撞形成一次碎片云特性\*

汪庆桃<sup>1</sup>, 张庆明<sup>2</sup>, 吴克刚<sup>1</sup>, 李必红<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**对超高速碰撞数值模拟方法进行了讨论。采用 ANSYS/AUTODYN 程序的 SPH 方法,对球形弹丸超高速撞击时弹丸的破碎、碎片云的形成及扩展过程进行数值模拟,其结果与实验结果进行比较,并验证了计算方法和模型参数的正确性。在此基础上采用数值模拟方法,对钨合金、轧制均质装甲及 LY12 铝三种材料的球形弹丸超高速撞击靶板之后形成的一次碎片云形貌及演化规律进行了研究,并基于量纲分析方法得出了碎片云特征参数(碎片云头部速度、径向最大膨胀速度及膨胀角)随初始撞击条件的变化规律。

**关键词:**超高速碰撞;SPH 方法;碎片云;演化规律

**中图分类号:**V414.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0124-05

## Description of the first debris clouds formed by hypervelocity Impact

WANG Qingtao<sup>1</sup>, ZHANG Qingming<sup>2</sup>, WU kegang<sup>1</sup>, LI Bihong<sup>1</sup>

(1. College of Basic Education, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:**The hypervelocity impact studied in numerical simulation way was discussed. Damage mechanism, the process of the debris cloud forming and its expanding were simulated with the SPH method of ANSYS/AUTODYN code when spherical projectile hypervelocity impacts thin shield. Tungsten alloy, RHA (Rolled Homogeneous Armor) and aluminum material models and parameters were given, using the modeling methods, material models and parameters of the numerical simulation results in good agreement with the experimental results. The debris cloud parameters such as  $V_{x,max}$ ,  $V_{y,max}$  and the half-angle of maximum radial extension ( $\theta_1$ ) were obtained with numerical simulation, and the above parameters with the variation of the initial impact conditions were also studied. The empirical equations which relate these parameters to impact parameters, such as velocity, material parameters of projectile and target and plate thickness, were obtained based on dimensional analysis.

**Key words:**hypervelocity impact; SPH method; debris cloud; motion law

开展超高速碰撞研究最初最直接的需求来自航天器防护领域,目的是为了保护航天器在受到流星体及空间碎片的撞击时不至于引起灾难性的失效。采用的方法是在航天器外一定距离处设置一块防护板。最早提出这个概念的是美国的 Whipple<sup>[1]</sup>。当空间碎片高速撞击防护板后,会碎裂成许多小颗粒,形成碎片云(Debris Cloud),于是空间碎片对航天器的超高速撞击由集中载荷变成一定范围的分布载荷,对航天器的破坏程度会减小,从而起到防护和屏蔽作用。另外,随着动能武器发射速度的不断提高,其毁伤能力也不断增大,需要对动能武器高速撞击靶板之后在其背面形成的碎片云的破坏能力进行评估。所以,研究超高速撞击靶板之后形成的碎片云特性及运动规律,对于航天器防护及动能武器的毁伤评估有着重要的意义,是爆炸与冲击动力学研究的热点和难点之一。

## 1 数值模拟方法及模型验证

### 1.1 数值模拟方法

弹丸形状为球形,其材料分别为 LY12 铝、轧制均质装甲(Rolled Homogeneous Armor,简称 RHA)及钨合金,靶板材料为 RHA。超高速碰撞是一个典型的材料大变形、高温、高压及高应变率问题,大致包括三个阶段:弹丸撞击/侵彻前板阶段,碎片云形成、扩展阶段,碎片云撞击/侵彻后板阶段。Lagrange 方法可以精确地模拟第一个阶段,而对碎片云的形成、扩展及对后板的破坏就显示出了很大的缺点。由于超高速碰撞现象所具有的强烈的不连续性,传统的 Lagrange 方法和 Euler 方法虽然解决了一系列的问题,但是在描述材料的碎裂方面有很大的局限性。这种局限性一直到

\* 收稿日期:2013-03-28

基金项目:国家部委资助项目(404030203)

作者简介:汪庆桃(1978—),男,湖南平江人,讲师,博士,E-mail:qtwang@bit.edu.cn

以质点动力学为基础的数值模拟方法如 SPH 方法(Smoothed Particle Hydrodynamics)在超高速碰撞领域的广泛应用才得以解决<sup>[2]</sup>。

SPH 技术源自天体物理(Lucy 等<sup>[2-3]</sup>),其思想为把连续介质看作运动粒子流。针对有限元分析中的网格扭结和畸变问题,Libersky 等<sup>[4]</sup>在 SPH 算法中考虑了弹塑性本构关系,从而把这一技术引入了固体力学领域。SPH 以插值理论为基础,其算法的核心是借助核函数对场变量在一点上的值给出积分形式的核估计,从而把偏微分形式的控制方程化为积分方程。核函数具有一定的影响宽度,其解析形式是事先选定的。场变量在一点上的核估计通过相邻点上的核函数值以及场变量值求和来近似得到,计算中不考虑点与点之间的连接关系,这就是 SPH 算法不需要网格的原因。

由于本文仅考虑垂直碰撞情况,为了节约计算资源,可以把其简化为二维轴对称模型。在进行计算时,弹体、靶板材料均离散成 SPH 粒子,光滑半径为 0.15mm。

### 1.2 材料模型

在进行数值计算时,LY12 铝采用 Tilloston<sup>[5]</sup>

状态方程、Johnson-Cook<sup>[6]</sup>本构模型;RHA 及钨合金均采用 Gruneisen 状态方程、Johnson-Cook<sup>[6]</sup>本构模型。铝由于熔点及气点较低,在超高速碰撞中,会发生熔化甚至气化现象。在处理这类高压下的大变形及多相态共存问题时,用 Tillotson 状态方程将会非常方便。Tillotson<sup>[5]</sup>状态方程是 Tillotson 和 Allen 提出来的,主要用来在大范围内精确描述金属材料在高速冲击下的响应问题。该状态方程适用的压力范围非常广,一般从 0 ~ 10<sup>3</sup>Mbar 范围内的压力均能较好地应用。它不但能够描述材料在高压下的冲击压缩问题,而且对于材料的熔化和气化也能够很好地描述。LY12 铝的 Tillotson 状态方程的具体参数见表 1<sup>[7]</sup>。Johnson-Cook 本构模型<sup>[6]</sup>是 Johnson 和 Cook 等于 1983 年提出的一个用于描述金属大变形、高应变率 and 高温情况下的经验型动态本构模型。由于该模型形式简单、使用方便、有着较高的精度,而且使用的变量在大多数计算程序中已经具备,所以该模型在一般的冲击动力学研究中得到了广泛的应用。三种材料的失效均采用最大拉应力失效。LY12 铝、钨合金及 RHA 的材料参数见表 2。

表 1 LY12 铝状态方程参数<sup>[7]</sup>

Tab. 1 Material parameters of EOS of LY12 aluminium

材料	A/GPa	B/GPa	a	b	$\alpha$	$\beta$	$e_0/J \cdot kg^{-1}$	$e_1/J \cdot kg^{-1}$	$e_2/J \cdot kg^{-1}$
LY12 铝	75	65	0.5	1.63	5	5	$5.0 \times 10^6$	$3.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^7$

表 2 铝、钨合金及 RHA 材料参数

Tab. 2 Material parameters of LY12Al, Tungsten alloy and RHA

材料	$\rho/g \cdot cm^{-1}$	$\gamma$	$c/m \cdot s^{-1}$	s	G/GPa	$Y_0$ /GPa	B /GPa	n	C	m	$T_{melt}/K$	$P_{min}$ /GPa
铝 <sup>[8]</sup>	2.785				27.6	0.265	0.426	0.34	0.015	1.0	775	1.2
钨合金 <sup>[9]</sup>	17.3	1.54	4029	1.237	145.0	1.46	0.177	0.12	0.016	1.0	1723	2.5
RHA <sup>[9]</sup>	7.86	1.67	4610	1.73	77.3	0.916	0.510	0.26	0.014	1.03	1793	2.5

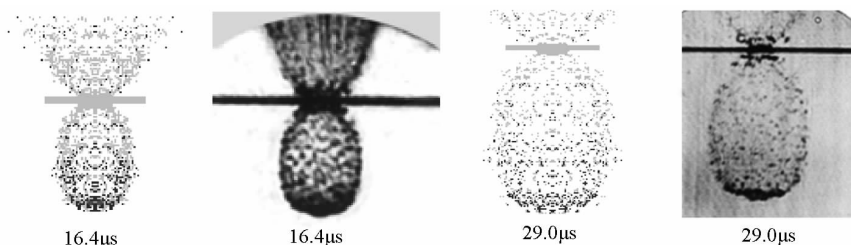


图 1 一次碎片云的数值模拟结果和实验结果的比较

Fig. 1 Simulation results and corresponding images about the first debris cloud

### 1.3 碎片云形态的数值模拟及实验验证

在进行数值模拟时,算法、材料模型及参数的选取会在很大程度上影响数值模拟结果的准确性和可信性,因此,在进行数值模拟研究之前,要根

据实验结果对数值模拟方法及参数的正确性进行验证。图 1 为直径为 4.0mm 的铝球以 4.28km/s 的速度撞击 2mm 铝板时不同时刻的数值模拟结果与实验结果<sup>[10]</sup>的比较。从图 1 可以看出,两个

时刻的数值模拟结果与实验结果吻合得较好。

图 2 为直径为 9.12mm 的铝球以 5.09km/s 的速度撞击 0.95mm 铝板时数值模拟结果与实验结果<sup>[11]</sup>的比较。从图 2 可以看出,两个时刻的数值模拟结果与实验结果吻合得较好。从上可以看出,本文采用的数值模拟方法、材料模型及参数能够正确描述超高速碰撞产生碎片云及其演化过程。

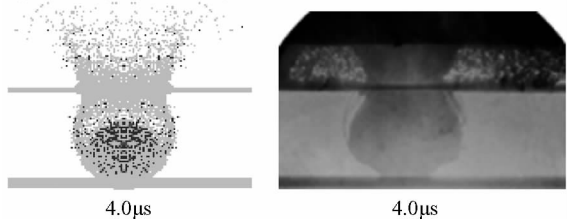


图 2 一次碎片云的数值模拟结果和实验结果的比较  
Fig. 2 Simulation results and corresponding images about the first debris cloud

## 2 一次碎片云演化规律

对不同撞击初始条件下碎片云的形貌及运动特征参数进行综合分析,可以得到碎片云运动扩展规律及随撞击初始条件的变化规律。

图 3 为某超高速撞击时刻碎片云形貌图,图中“1”为轴线上碎片云最前端位置,“3”为碎片云径向膨胀速度最大点,则根据定义,一次碎片云扩展半角  $\theta_1$  有如下关系式:

$$\tan\theta_1 = \frac{V_{y,3}}{V_{x,3}} \quad (1)$$

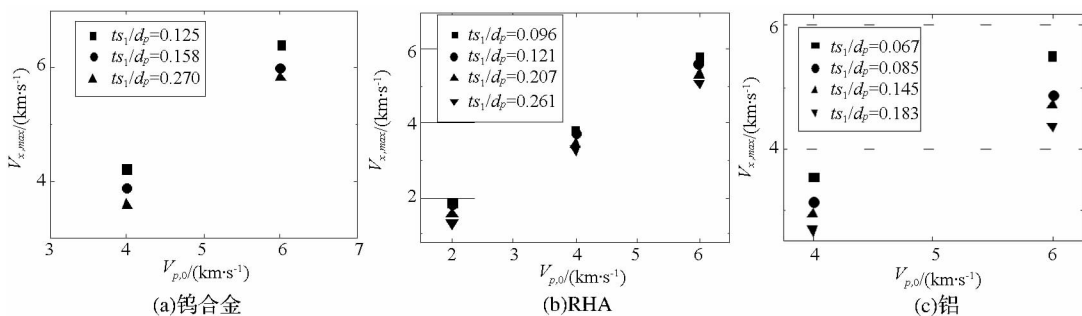


图 4 一次碎片云头部速度与初始撞击速度关系  
Fig. 4 The velocity of the tip of debris cloud Vs  $V_{p,0}$

为不同直径的 RHA 弹丸撞击靶板时头部速度随  $ts/d_p$  值变化图。从图 4(b)可以看出,对于 RHA 弹丸撞击靶板,碎片云头部速度随着弹丸初始撞击速度的增大而增大,但均小于弹丸初始速度,且随着  $ts/d_p$  值的增大,头部速度不断减小。图 4(c)为不同直径的铝弹丸撞击靶板时头部速度随  $ts/d_p$  值变化图。从图 4(c)可以看出,碎片云头部速度随着弹丸初始撞击速度的增大而增大,但都小于初始撞击速度,而且比相同初始速度的

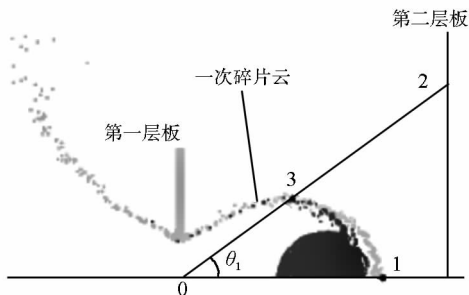


图 3 典型碎片云形貌

Fig. 3 Image of the first debris cloud

对不同尺寸及材料的弹丸超高速撞击时碎片云的  $V_{x,1}, V_{x,3}, V_{y,3}$  进行测量,便可以得到一次碎片云头部最大速度、径向膨胀最大速度及膨胀角随初始撞击条件的变化关系。

图 4(a)为钨合金弹丸撞击靶板时一次碎片云头部速度随  $ts/d_p$  ( $ts$  为靶板厚度,  $d_p$  为弹丸直径)值的变化情况。从图 4(a)可以看出,碎片云头部速度随着弹丸初始撞击速度的增大而增大。在弹丸初始撞击速度为 4km/s、 $ts/d_p$  值为 0.125 时,一次碎片云头部速度大于弹丸初始速度,当  $ts/d_p$  值为 0.158 时,头部速度与撞击速度几乎相等,当  $ts/d_p$  值为 0.27 时,头部速度小于初始速度。在初始速度为 6km/s 时也有着相同的规律。这说明,对于球形钨弹丸,随着  $ts/d_p$  值的增大,一次碎片云头部速度减小。分析原因主要为随着  $ts/d_p$  值的增大,撞击引起的激波在靶中衰减越大,从而导致靶板背面粒子速度相应减小。图 4(b)

RHA 弹丸撞击时的速度更小。同样,随着  $ts/d_p$  值的增大,头部速度不断减小。

图 5(a)为钨合金弹丸撞击靶板时一次碎片云径向最大膨胀速度随  $ts/d_p$  值的变化情况。从图 6(a)可以看出,碎片云径向最大膨胀速度随着弹丸初始撞击速度的增大而增大,随着  $ts/d_p$  值的增大,径向最大膨胀速度减小。图 5(b)、图 5(c)分别为不同直径的 RHA 弹丸及铝弹丸撞击靶板

时径向最大膨胀速度随  $ts/d_p$  值变化图。从图 5(b)、图 5(c) 可以看出,对于 RHA 弹丸及铝弹丸,撞击靶板形成的一次碎片云,其径向最大膨胀

速度随着弹丸初始撞击速度的增大而增大,随着  $ts/d_p$  值的增大而减小。

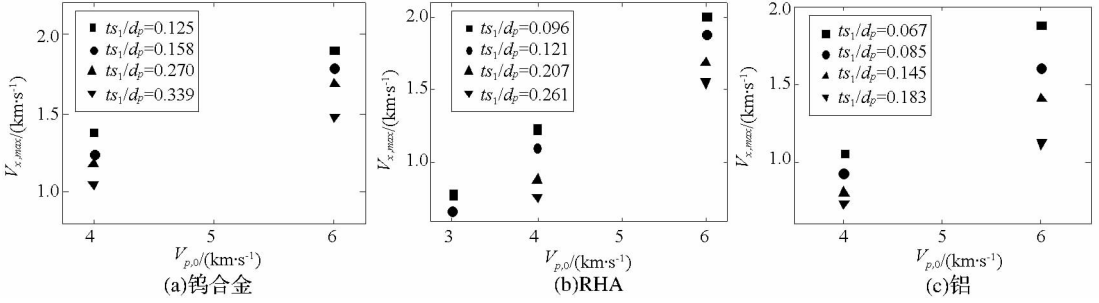


图 5 一次碎片云径向膨胀最大速度与初始撞击速度关系  
Fig. 5 The velocity of the maximum radial extension Vs  $V_{p,0}$

图 6(a) 为钨合金弹丸撞击靶板时一次碎片云膨胀半角随  $ts/d_p$  值的变化情况。从图 6(a) 可以看出,一次碎片云膨胀半角随着弹丸初始撞击速度的增大而增大,随着  $ts/d_p$  值的增大,一次碎片云膨胀半角减小。图 6(b)、图 6(c) 分别为不同直径的 RHA 弹丸及铝弹丸撞击靶板时一次碎片云膨胀半角随  $ts/d_p$  值变化图。从图 6(b)、图 6(c) 可以看

出,对于 RHA 弹丸及铝弹丸撞击靶板形成的一次碎片云,其膨胀半角随着弹丸初始撞击速度的增大而增大,随着  $ts/d_p$  值的增大而减小。

从图 4 ~ 图 6 可以看出,钨合金、RHA 及铝三种材料的弹丸撞击靶板时,一次碎片云头部速度、径向最大膨胀速度及膨胀半角均与弹靶材料特性、尺寸  $ts/d_p$  及初始撞击速度相关。

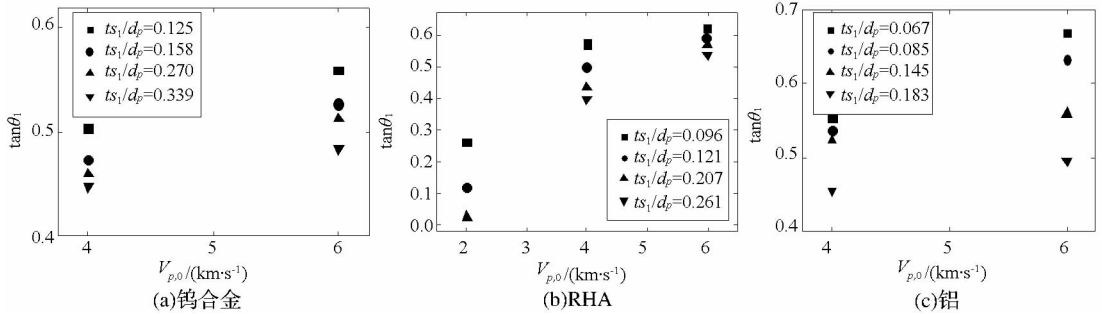


图 6 一次碎片云膨胀半角与初始撞击速度关系  
Fig. 6 The half-angle of maximum radial extension Vs  $V_{p,0}$

数值模拟结果得出钨合金、RHA 及铝三种材料的弹丸撞击靶板时,一次碎片云头部速度、径向最大膨胀速度及膨胀角等参量(记为  $F$ ) 均与弹靶材料特性、尺寸  $ts/d_p$  及初始撞击速度相关。本文的数值模拟包含了四个初始条件的变化(弹丸直径  $d_p$ , 密度  $\rho_p$ , 撞击速度  $V_{p,0}$ , 靶板厚度  $ts$ ), 当分析初始条件对  $F$  的影响时,  $F$  为包含四个变量的函数。保持三个初始参数不变,只考虑第四个初始参数变化对  $F$  的影响,往往较容易得到  $F$  随该初始参数变化的规律。

为了得到经验关系式的可能形式,考虑在初始参数变化下  $F$  的变化。考虑材料的可压缩性,引入声速  $C$ ,忽略材料强度、熔化和气化效应,则有

$$F = F(V_{p,0}, d_p, \rho_p, C_p, ts, \rho_t, C_t) \quad (2)$$

选择靶板密度  $\rho_t$ 、材料声速  $C_t$  及弹丸直径  $d_p$  作为基本量进行无量纲化,有

$$F = F\left(\frac{V_{p,0}}{C_t}, \frac{C_p}{C_t}, \frac{ts}{d_p}, \frac{\rho_p}{\rho_t}\right) \quad (3)$$

借鉴 Depczuk<sup>[12]</sup> 的分析,假定  $F$  的形式为

$$F = k_0 \cdot \left(\frac{V_{p,0}}{C_t}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{C_p}{C_t}\right)^{k_3} \cdot \left(\frac{ts}{d_p}\right)^{k_4} \quad (4)$$

式中  $k_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$  为待定参数。

对式(4)进行拟合,当  $F$  为碎片云头部速度  $V_{x,max}$  时,有

$$\frac{V_{x,\max}}{C_t} = 0.6554 \left(\frac{V_{p,0}}{C_t}\right)^{1.0801} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0.2281} \cdot \left(\frac{C_p}{C_t}\right)^{0.4204} \cdot \left(\frac{ts}{d_p}\right)^{-0.167} \tag{5}$$

当  $F$  为径向膨胀速度时,有

$$\frac{V_{y,\max}}{C_t} = 0.1451 \left(\frac{V_{p,0}}{C_t}\right)^{1.3192} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0.2376} \cdot \left(\frac{C_p}{C_t}\right)^{-0.0012} \cdot \left(\frac{ts}{d_p}\right)^{-0.3129} \tag{6}$$

当  $F$  为碎片云膨胀半角  $\theta_1$  时,有

$$\tan\theta_1 = 0.3686 \left(\frac{V_{p,0}}{C_{t,1}}\right)^{0.4084} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_{t,1}}\right)^{0.3693} \cdot \left(\frac{C_p}{C_{t,1}}\right)^{2.3031} \cdot \left(\frac{ts_1}{d_p}\right)^{-0.1822} \tag{7}$$

### 3 结论

本文对超高速碰撞数值模拟方法进行了讨论,在数值模型参数验证的基础上采用数值模拟方法对不同材料的球形弹丸超高速撞击靶板之后形成的一次碎片云形貌及演化规律进行了研究,基于量纲分析方法得出了碎片云特征参数(碎片云头部速度、径向最大膨胀速度及膨胀角)随初始撞击条件的变化规律。

### 参考文献 (References)

[1] Whipple F L. Meteorites and space travel[J]. *Astronomical Journal*, 1947(1161):131.

[2] Lucy L B, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. *Astron. J.*, 1977,1013:82.

[3] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars[J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1977,81:375.

[4] Libersky L D, et al. High strain lagrangian hydrodynamics [J]. *Computational Physics*, 1993,109:67-75.

[5] Theory manual (Revision 4.3)[R]. *Century Dynamics*, 2005.

[6] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures [C]//*Proceedings of the 17th International*

*Symposium on Ballistics*. Holland,[s.n.]. 1983:541-547.

[7] Hiermaier S, Konke D, Stalp A J, et al. Computational simulation of the hypervelocity impact of Al-spheres on thin plates of different materials[J]. *Int. J. Impact Engng*, 1997, 20:363-374.

[8] Marc Andre Meyers. *Dynamic behavior of materials*[M]. John Weley & Sons, 1994.

[9] 汪庆桃,张庆明. 多层板结构超高速碰撞效应的数值模拟 [J]. *兵工学报*,2012,33:227-230.

WANG Qingtao, ZHANG Qingming. Simulation for damage effect about multi-plate structure impact by hypervelocity projectile[J]. *Acta Armamentar II*, 2012,33:227-230. (in Chinese)

[10] 陈沿海. 超高速斜碰撞碎片云模型[D]. 北京:北京理工大学,2006.

CHEN Yanhai. Description of debris cloud formed by oblique hypervelocity impact [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006. (in Chinese)

[11] 龙仁荣. 超高速碰撞多层板结构的碎片云运动破坏模型 [D]. 北京:北京理工大学,2008.

LONG Renrong. Description and damage effects of debris cloud formed by impact of hypervelocity projectile on multi-plate structure[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

[12] Depczuk D, Schonberg W P. Characterizing debris clouds created in oblique orbital debris particle impact[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2003,16(4):177-190.