文章编号:1000-5773(2008)04-0343-07

弹丸形状对超高速撞击厚合金铝靶成坑影响的数值模拟*

张 伟,管公顺,贾 斌,庞宝君

(哈尔滨工业大学高速撞击研究中心,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:采用 AUTODYN 软件进行了弹丸形状对超高速正撞击厚合金铝靶成坑过程影响的数值模拟。给出了二维及三维模拟的结果。研究了在相同质量和速度的条件下,不同形状弹丸长径比、撞击方向等对超高速撞击厚合金铝靶所产生弹坑的损伤特性尺寸和成坑形状的影响,并与球形弹丸撞击所产生的坑进行了比较。结果表明:弹丸的长径比越大,弹丸的撞击成坑深度越大;非球弹丸的形状和撞击方向不同,成坑的形状和损伤的特征尺寸是不同的。

关键词:固体力学;超高速撞击;数值模拟;形状效应

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],并基于 1947 年 Whipple 提出的 Whipple 防护,通过超高速撞击实验及数值模拟进行了大量航天器防护结构防护性能的研究工作,发展了各种防护结构,并用于航天器微流星体及空间碎片的防护[2]。大量研究主要采用球形弹丸,而微流星体和空间碎片的形状是多种多样的。超高速撞击靶件将产生成坑、剥落和穿孔等损伤,确定弹丸形状对超高速撞击成坑过程的影响是非常重要的。在同样的撞击条件下非球弹丸比相同质量的球形弹丸损伤性更大[3-4,6]。因为超高速撞击实验的速度、质量、形状和材料等的限制及费用比较高,超高速撞击数值模拟成为防护结构防护性能研究的有效方法。采用有效的材料模型可以得到与实验非常一致的结果[3-7]。本研究采用 AUTODYN 软件进行了弹丸形状对超高速正撞击厚合金铝靶成坑过程影响的数值模拟。给出了二维及三维模拟的结果。研究了在相同质量和速度的条件下,不同形状弹丸长径比、撞击方向等对超高速撞击厚合金铝靶所产生弹坑损伤特性尺寸和坑形的影响,并与球形弹丸撞击所产生的坑进行了比较。

2 弹丸撞击厚合金铝靶数值模拟的方案

各种形状弹丸的材料采用 2A12 铝合金,质量与直径 6 mm 的球形弹丸的质量相同,为 316 mg,弹丸正撞击的速度为 5.3 km/s。弹丸采用 SPH 质点建模,质点直径为 0.1 mm;6061 铝合金靶件的厚度为 60 mm,直径为 80 mm,采用 Lagrange 网格,引入侵蚀算法并剔除了侵蚀的结点。采用的侵蚀应变为 100%。图 1 给出了本研究所采用的弹丸形状和撞击方向。图 2 给出了椭球弹丸长径比的几何描述,其由 3 个半轴 a、b 和 c 加以描述,半轴 c 的方向即 z 轴方向为弹丸的撞击方向,椭球具有相同的两个半轴即 $a=b$,而其长度 $L=2c$ 与其直径 $d=2a=2b$ 的比为椭球弹丸的形状因子 f,$f<1$ 为扁椭球,$f>1$

* **收稿日期**:2007-10-26;**修回日期**:2008-06-21

作者简介:张 伟(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事超高速撞击动力学理论、实验和数值仿真等方面的研究. E-mail:zhdawei@hit.edu.cn

为长椭球[3]。弹丸超高速正撞击厚合金铝靶成坑损伤的形态和特征尺寸如图 3 所示，在弹坑的周围具有翻边，D_C 表示弹坑直径，即成坑在靶件表面截面的直径，T_C 表示弹坑深度，D_L 表示翻边直径，H_L 表示翻边的高度。

弹丸和厚合金铝靶的材料模型采用 Mie-Grüneisen（Shock）状态方程，强度模型采用 Johnson-Cook 模型。而失效模型采用最大拉应力。2A12 和 6061 铝合金的最大拉应力分别采用 2.5 GPa 和 2.6 GPa。材料模型的数据输入采用标准 AUTODYN 库数据[8]。

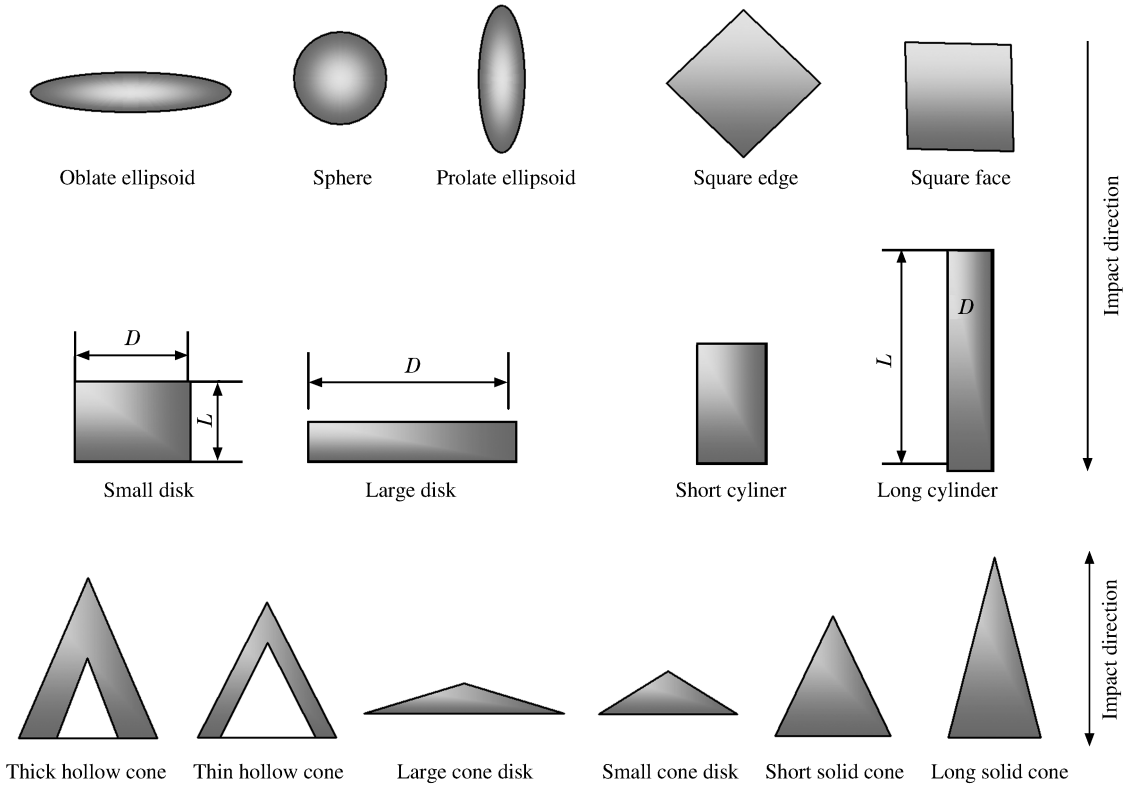


图 1 弹丸的形状

Fig. 1 Investigated projectile shapes

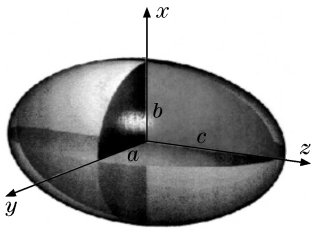


图 2 椭球弹丸的描述

Fig. 2 Nomenclature of ellipsoidal projectile

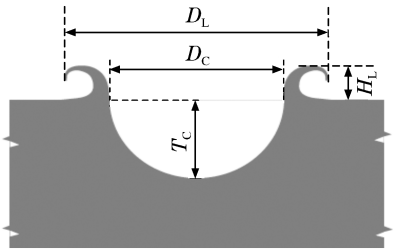


图 3 靶板损伤形态

Fig. 3 Morphology of damage target

3 数值模拟结果及分析

3.1 椭球弹丸长径比对成坑的影响

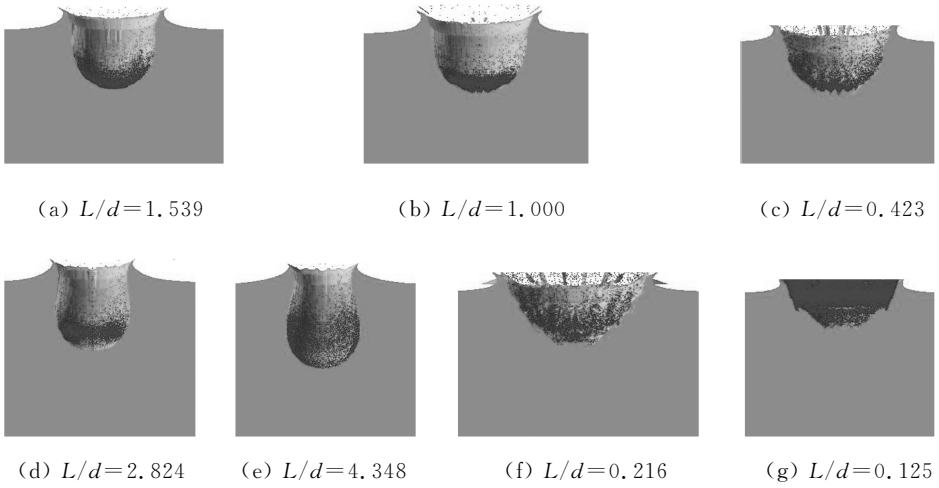
椭球弹丸长径比对正撞击成坑的影响研究采用 AUTODYN-3D 的 Lagrange 法和 SPH 法，即弹丸 2A12 铝采用 SPH 质点，而厚合金铝靶 6061 铝采用 Lagrange 网格。不同长径比椭球弹丸的特征几何参数及撞击方向如表 1 所示。不同长径比椭球弹丸撞击成坑数值模拟的结果如图 4 和图 5 所示。由

图 4和图 5 可见,随椭球弹丸长径比的增加,成坑的深度增加,而成坑的最大直径减小。弹坑的形状随弹丸长径比的增加从浅坑－类似半球坑－半球坑－深坑变化。

表 1　椭球弹丸特征几何参数及撞击方向

Table 1　Characteristic geometric parameters of ellipsoidal projectile and impact direction

Exp. No.	Projectile shape	L/d	d/(mm)	L/(mm)	Impact direction
Shap4	Oblate ellipsoid	0.423	8.00	3.38	Length
Shap8	Oblate ellipsoid	0.125	12.00	1.50	Length
Shap7	Oblate ellipsoid	0.216	10.00	2.16	Length
Shap6	Prolate ellipsoid	4.348	3.68	16.00	Length
Shap5	Prolate ellipsoid	2.824	4.25	12.00	Length
Shap2	Prolate ellipsoid	1.539	5.20	8.00	Length
Shap3	Sphere	1.000	6.00	—	—



(a) L/d=1.539　(b) L/d=1.000　(c) L/d=0.423

(d) L/d=2.824　(e) L/d=4.348　(f) L/d=0.216　(g) L/d=0.125

图 4　不同长径比椭球弹丸撞击成坑的形态

Fig. 4　Craters morphology impacted by ellipsoidal projectile with different aspect ratios

3.2　典型非球弹丸对成坑的影响

典型非球弹丸超高速撞击厚合金铝靶板的数值模拟采用与直径 6 mm 2A12 铝合金球相同质量的各种形状弹丸。弹丸形状的特征几何参数及撞击方向如表 2 所示。各种形状弹丸撞击成坑损伤的特征尺寸如表 3 所示。不同形状弹丸撞击成坑的形态如图 6～图 11 所示。

3.2.1　柱状弹丸长径比对成坑的影响

不同长径比柱状弹丸撞击厚合金铝靶所产生的坑形态如图 6 所示。由图可见长径比为 5 的长柱弹丸所产生弹坑比较深,而长径比为 2 的短柱弹丸所产生弹坑比较浅。随长径比的减小,成坑直径、翻边的高度和翻边的最大直径增加。

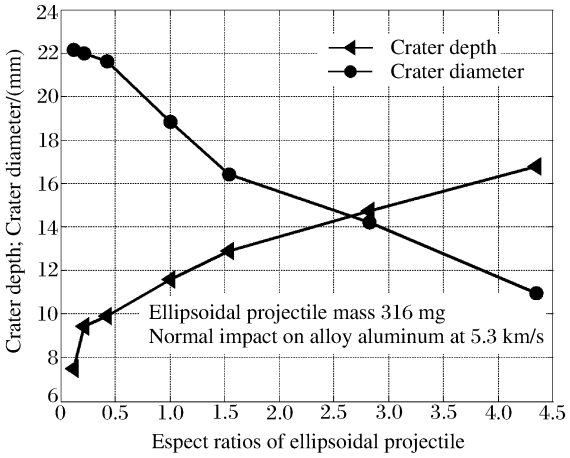


图 5　椭球弹丸长径比对成坑损伤尺寸的影响

Fig. 5　Effect of different aspect ratios of ellipsoidal projectile on crater damage size

3.2.2　盘形弹丸长径比对成坑的影响

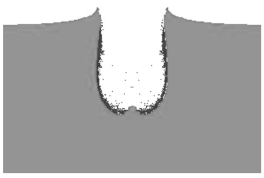
盘形弹丸撞击合金铝靶所产生的坑形态如图 7 所示。由图可见长径比为 0.2 的大盘形弹丸撞击所产生的弹坑形态与长径比为 0.5 的小盘形弹丸撞击

所产生的弹坑形态基本相同,但坑底的形状不同。随长径比的增加,成坑的深度增加,成坑直径减小,翻边的高度变化不大,而翻边的最大直径增加。

表 2 非球弹丸特征几何参数及撞击方向

Table 2 Characteristic geometric parameters of non-spherical projectile and impact direction

Projectile shape	L/d	d/(mm)	Length/(mm)	Impact direction
Square	—	—	4.84	Face
Square	—	—	4.84	Edge
Long cylinder	5	3.065	15.325	Length
Short cylinder	2	4.16	8.32	Length
Large disk	0.2	8.96	1.792	Length
Small disk	0.5	6.6	3.30	Length
Large cone disk	0.12	15.524	1.793	Cone bottom
Large cone disk	0.12	15.524	1.793	Cone tip
Small cone disk	0.288	11.44	3.3	Cone bottom
Small cone disk	0.288	11.44	3.3	Cone tip
Long solid cone	2.89	5.31	15.33	Cone bottom
Long solid cone	2.89	5.31	15.33	Cone tip
Short solid cone	1.16	7.2	8.32	Cone bottom
Short solid cone	1.16	7.2	8.32	Cone tip
Thick hollow cone	Outer 2.88,Inner 2.88	Outer 5.551,Inner 2.78	Outer 16.00,Inner 8.00	Cone bottom
Thick hollow cone	Outer 2.88,Inner 2.88	Outer 5.551,Inner 2.78	Outer 16.00,Inner 8.00	Cone tip
Thick hollow cone	Outer 2.88,Inner 2.88	Outer 7.19,Inner 5.40	Outer 20.76,Inner 15.567	Cone bottom
Thick hollow cone	Outer 2.88,Inner 2.88	Outer 7.19,Inner 5.40	Outer 20.76,Inner 15.567	Cone tip



(a) Long cylinder



(b) Short cylinder

图 6 不同长径比柱状弹丸产生的坑形态

Fig. 6 Crater morphology produced by cylindrical projectile of different aspect ratios



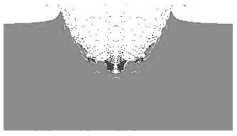
(a) Large disk with $L/d=0.2$



(b) Small disk with $L/d=0.5$

图 7 不同长径比盘形弹丸产生的坑形态

Fig. 7 Crater morphology produced by disk projectile of different aspect ratios



(a) Large cone disk tip impact



(b) Large cone disk bottom impact



(c) Small cone disk tip impact



(d) Small cone disk bottom impact

图 8 锥盘形弹丸撞击坑形态

Fig. 8 Crater morphology produced by conical disk projectile

表 3　非球弹丸撞击成坑损伤特征尺寸

Table 3　Characteristic sizes of crater damage impacted by non-spherical projectiles

Projectile shape	T_C/(mm)	D_C/(mm)	H_L/(mm)	D_L/(mm)
Square	10.23	9.137	6.14	22.78
Square	10.75	7.785	5.53	24.96
Long cylinder	15.39	10.64	3.34	13.62
Short cylinder	11.74	15.66	4.48	13.88
Large disk	9.39	19.62	3.43	22.34
Small disk	9.75	19.14	3.29	24.2
Large cone disk	11.25	18.1	2.35	20
Large cone disk	9.03	18.24	2.45	21
Small cone disk	10.36	20.48	2.55	24
Small cone disk	10.36	18.24	2.69	20.54
Long solid cone	12.87	16.46	3.94	10
Long solid cone	17.37	9.77/Max. 13.79[a]	3.29	12
Short solid cone	9.42	19.12	3.36	22.32
Short solid cone	13.81	15.564	3.45	19.2
Thick hollow cone	9.53	16.46	4.32	19.66
Thick hollow cone	17.17	10.2/Max. 13.3/Min. 8.88[a]	3.49	12.96
Thick hollow cone	11.43	18.28	4.48	20
Thick hollow cone	20.66	9.34/Max. 16.48/Min. 8.44[a]	3.45	13.9

Note:(a) First number is D_C, second and third number represent maximum and minimum crater diameter.



(a) Thick hollow cone tip impact　(b) Thick hollow cone bottom impact　(c) Thin hollow cone tip impact　(d) Thin hollow cone bottom impact

图 9　空心锥形弹丸撞击成坑形态

Fig. 9　Crater morphology produced by hollow cone projectile

3.2.3　锥盘形弹丸对成坑的影响

大锥盘形弹丸和小锥盘形弹丸在不同撞击方向撞击合金铝靶所产生的弹坑形态如图 8 所示。由图可见,锥盘形弹丸撞击合金铝靶所产生的弹坑具有显著的特点。在锥尖撞击时所产生的弹坑坑底比较平一些。而在锥底撞击时所产生的弹坑坑底比较尖一些,成锥状。

大锥盘锥底撞击的成坑深度较锥尖撞击大,成坑直径、翻边高及翻边的最大直径变化不大。小锥盘撞击的成坑深度和翻边高变化不大,成坑直径锥底撞击较锥尖撞击大,翻边的最大直径锥底撞击较锥尖撞击大。大锥盘锥底撞击的坑深最大,小锥盘锥底撞击的坑径和翻边的直径最大。

3.2.4　空心锥形弹丸对成坑的影响

厚壁空心锥形弹丸和薄壁空心锥形弹丸在不同撞击方向撞击合金铝靶所产生的成坑形态如图 9 所示。由图可见,在锥尖撞击时厚壁空心锥弹丸和薄壁空心锥弹丸撞击合金铝靶所产生的弹坑形态如同一个倒置的鸭梨,坑底有一个锥形凸台。而锥底撞击所产生的坑底也有凸台,犹如一个圆柱桶,上下直径变化不大。其成坑损伤特征尺寸如表 3 所示。厚壁空心锥锥尖撞击时坑的直径为 10.2 mm,坑的最

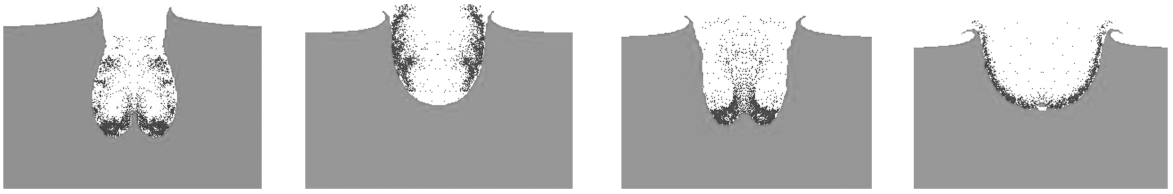
大直径为 13.3 mm,最小直径为 8.88 mm;而薄壁空心锥锥尖撞击坑的直径为 9.34 mm,最大直径为 16.48 mm,最小直径为 8.44 mm。

由表 3 可见,薄壁空心锥锥尖撞击的成坑深度最大为 20.66 mm,薄壁空心锥锥底撞击成坑的坑径最大为 18.28 mm。

3.2.5 *固锥形状弹丸对成坑的影响*

短固体锥形弹丸和长固体锥形弹丸不同撞击方向撞击厚合金铝靶所产生的弹坑如图 10 所示。由图可见,长固锥锥尖撞击时产生的弹坑像一个倒置的鸭梨,而短固锥锥尖撞击时成坑像一个敞口的圆柱,二者坑底都有一个锥形凸台。长固锥和短固锥弹丸锥底撞击时坑底是圆形的,长固锥锥底撞击成坑像半个椭球坑,而短固锥锥底撞击成坑像一个半球。长固锥锥尖撞击成坑的损伤尺寸为坑深最大 17.17 mm,成坑直径为 9.77 mm,最大坑径为 13.79 mm,翻边高 3.29 mm,翻边直径为 12 mm。

由表 3 可见,长固锥锥尖撞击成坑的坑深最大 17.17 mm,短固锥锥底撞击的成坑直径最大为 19.12 mm。



(a) Long solid cone tip impact (b) Long solid cone bottom impact (c) Short solid cone tip impact (d) Short solid cone bottom impact

图 10 固体锥形弹丸撞击成坑形态

Fig. 10 Crater morphology produced by solid cone projectile

3.2.6 *立方体弹丸撞击方向对成坑的影响*

立方体弹丸撞击方向对成坑影响的数值模拟结果如图 11 所示。由图可见,立方体的撞击方向对弹丸的成坑有很大的影响。成坑的形态面撞击和棱边撞击均为球形,面撞击为半球形,而棱边撞击为深球形。由表 3 可见,面撞击的成坑深度比棱边撞击的成坑深度略小,而成坑直径比棱边撞击的大。



(a) Square face impact (b) Square edge impact

图 11 立方体弹丸不同撞击方向成坑形态

Fig. 11 Crater morphology produced by cubic projectile

通过上面各种非球弹丸超高速撞击厚合金铝靶成坑数值模拟结果的分析,可以得到如下的结论:在相同的质量、速度和撞击入射角的条件下,薄壁空心锥弹丸锥尖撞击的成坑深度最大为 20.66 mm,长固体锥形弹丸锥尖撞击的成坑深度次之为 17.37 mm。小锥盘锥底撞击的成坑直径最大为 20.48 mm。

4 结 束 语

通过各种形状弹丸超高速撞击合金铝靶板成坑数值模拟结果的比较分析,可以得到如下结论:

(1) 在弹丸质量、速度和撞击入射角相同的条件下,弹丸的长径比越大,弹丸的撞击成坑深度越大。椭球弹丸撞击成坑的深度随弹丸长径比的增大而增大;而成坑的最大直径随长径比的增加而减小。

(2) 在弹丸质量、速度和撞击入射角相同的条件下,非球弹丸的撞击方向不同,成坑的形状和损伤的特征尺寸是不同的。

(3) 与铝合金球形弹丸具有相同质量的非球弹丸,在相同的撞击条件下,薄壁空心锥弹丸锥尖撞击的成坑深度最大,长固体锥形弹丸锥尖撞击的成坑深度次之。小锥盘形弹丸锥底撞击的成坑直径最大。

References:

[1] Min G R, Xiao M X. The Reliability Design to Prevent Meteors from Penetrating Spacecraft Bulkhead [J]. Chinese Space Science and Technology, 1986, (6): 45-51. (in Chinese)
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):45-51.

[2] Christiansen E L. Enhanced Meteoroid and Orbital Debris Shielding [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17: 217-228.

[3] Scharfer F K, Herrwerth M. Shape Effects in Hypervelocity Impact on Semi-Infinite Metallic Targets [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 699-711.

[4] Hu K F, Schonberg W P. Ballistic Limit Curves for Non-Spherical Projectiles Impacting Dual-Wall Spacecraft Systems [J]. Int J Impact Eng, 2003, 29: 345-35.

[5] Zhang W, Pang B J, Jia B, et al. Numerical Simulation of Debris Cloud Produced by Projectile Hypervelocity Impact 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.

[6] Zhang W, Ma W L, Ma Z T, et al. Numerical Simulation of Craters Produced by Projectile Hypervelocity Impact on Aluminium Targets [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1): 1-5. (in Chinese)
张　伟,马文来,马志涛,等. 弹丸超高速撞击铝靶成坑数值模拟 [J]. 高压物理学报,2006,20(1):1-5.

[7] Zhang W, Ma W L, Guan G S, et al. Numerical Simulation of Non-Spherical Projectiles Hypervelocity Impact on Spacecraft Shield Configuration [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(3): 240-245. (in Chinese)
张　伟,马文来,管公顺,等. 非球弹丸超高速撞击航天器防护结构数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(3):240-245.

[8] AUTODYN Users Manual Revision 6.1 [Z]. San Ramon, CA94583 USA: Century Dynamics, Incorporated, 2006.

Numerical Simulation of Projectile Shape Effects on Craters in Hypervelocity Impact on Thick Alloy Aluminum Target

ZHANG Wei, GUAN Gong-Shun, JIA Bin, PANG Bao-Jun

(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: The numerical simulation of projectile shape effects on craters in hypervelocity impact on thick alloy aluminum target at normal angles has been carried out using the AUTODYN hydro-codes. The results of 2D and 3D simulation are given. The effect of projectile with different shapes and aspect ratios as well as impact orientations etc. on damage characteristics sizes and shapes of craters produced by hypervelocity impact on alloy aluminum targets have been investigated at the same mass and velocity. The simulation results are compared with the cratering created by spherical projectiles. It is shown that projectile has a larger aspect ratio, it has a larger crater depth; the damage sizes and shapes of craters created by non-spherical projectiles impact depend on the projectile shapes and impact orientations.

Key words: solid mechanics; hypervelocity impact; numerical simulation; shape effect