文章编号：1000-5773(2005)02-0132-07

铝球弹丸高速正撞击薄铝板穿孔研究*

管公顺，张 伟，庞宝君，哈 跃

（哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨 150001）

摘要：低地球轨道上的航天器易受到微流星体及空间碎片的超高速撞击，导致其严重的损伤甚至灾难性的失效。撞击损伤特性研究是航天器防护设计的一个重要问题。通过铝球弹丸超高速正撞击薄铝板的实验研究和数值模拟，证明了 AUTODYN-2D 软件数值模拟预测薄铝板超高速撞击穿孔直径的有效性。通过对弹丸直径、弹丸撞击速度和薄铝板厚度影响薄铝板超高速撞击穿孔直径的数值模拟，以及利用实验结果和数值模拟结果拟合的曲线，得到了铝球弹丸超高速撞击薄铝板的穿孔规律以及影响薄铝板超高速撞击穿孔直径的主要因素。

关键词：超高速撞击；穿孔直径；薄铝板；数值模拟

中图分类号：V423.41；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着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]。基于 1947 年 Whipple 提出的 Whipple 防护，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[2~5]。目前，轻气炮技术可将弹丸发射至 8 km/s，当超过该速度时，就要借助于数值模拟来研究航天器防护结构的防护性能。利用数值模拟技术研究防护结构的工作已经得到广泛开展[6~8]。Whipple 防护是将一层薄金属板放置在航天器舱壁外一定距离处，用于击碎撞击的空间碎片，从而减小对航天器舱壁的冲击载荷，起到保护航天器的作用。薄铝合金板受到低速撞击后的损伤形式为鼓包、撕裂和穿孔[9]。，而超高速撞击的损伤形式则主要是穿孔。因此进行薄板超高速撞击穿孔的实验和数值模拟研究，加深对薄板撞击穿孔规律和影响因素的理解是非常必要的。本研究首先进行了薄铝合金板穿孔的高速撞击实验，然后，采用 AUTODYN-2D 软件对实验工况进行了数值模拟，从实验结果和数值模拟结果得到的穿孔规律是一致，验证了数值模拟方法的有效性。最后，又采用 AUTODYN-2D 软件进行了薄铝板高速撞击穿孔 SPH 法的数值模拟，研究了弹丸直径、弹丸撞击速度和薄铝板厚度对薄铝板高速撞击穿孔直径的影响。

2 薄铝板穿孔高速撞击实验

2.1 实验方法

薄铝板穿孔高速撞击实验是利用哈尔滨工业大学的非火药驱动二级轻气炮进行的，球形弹丸材料和薄板材料均为 2A12 铝合金，薄板大小为 200 mm×200 mm，薄板厚度为 1 mm，薄板四边均固定在靶架上。弹丸直径为 4～6 mm，撞击速度为 3～5 km/s，撞击角度为 0°。撞击时靶舱内抽真空，靶舱内压力小于 100 Pa，由于实验条件的限制，本次实验没有对空间轨道上的失重情况进行实验模拟。

* **收稿日期**：2004-07-04；**修回日期**：2004-12-01

作者简介：管公顺(1969—)，男，博士研究生，主要研究方向：超高速撞击动力学理论、实验及数值模拟. E-mail：ggsh@hit.edu.cn

2.2　实验结果

弹丸高速撞击薄铝板后,薄铝板均出现了圆形穿孔,穿孔边缘整齐,无裂纹和撕裂现象。薄铝板穿孔试样如图 1 所示,薄铝板穿孔直径大小如表 1 所示。

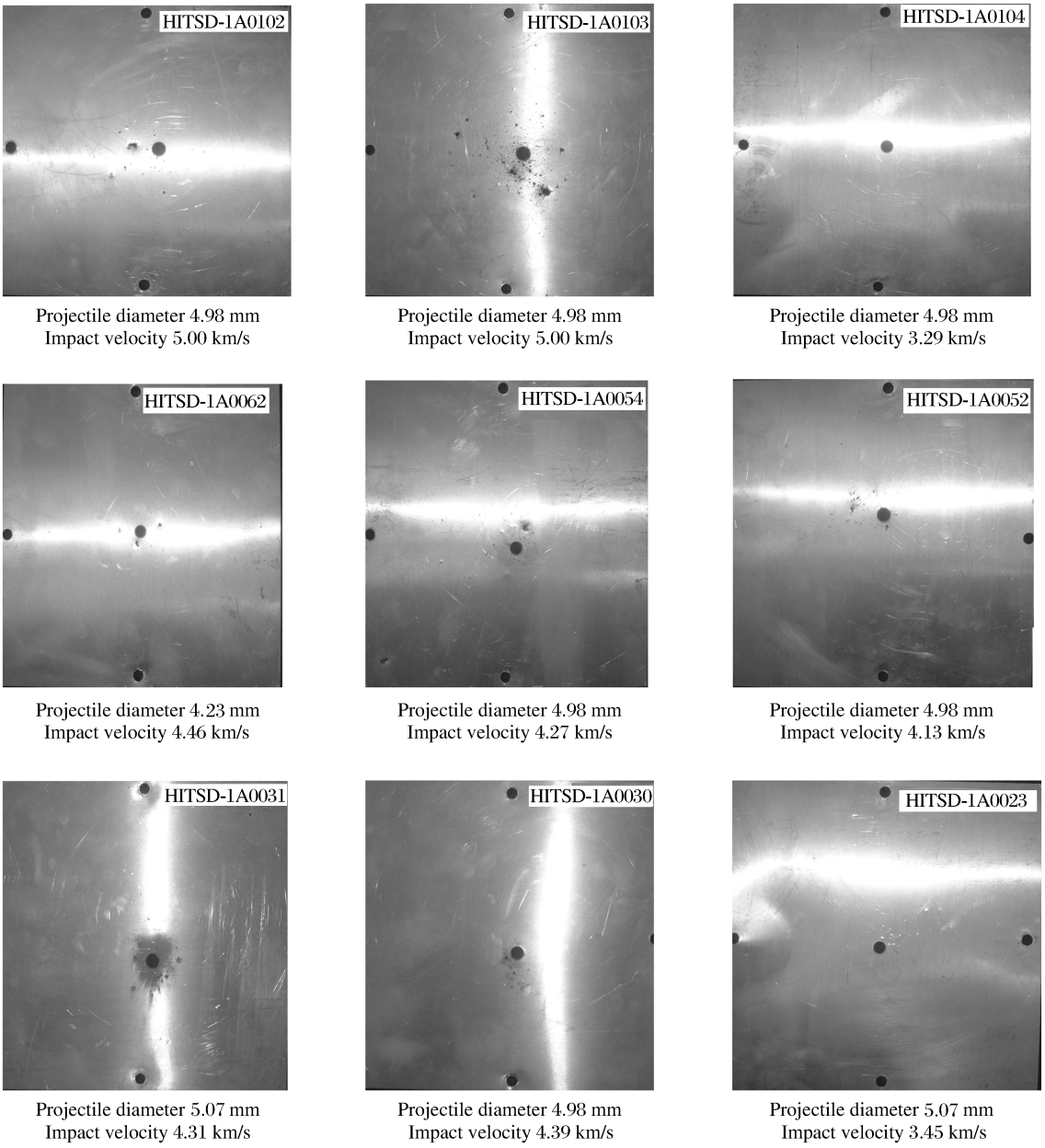


图 1　薄铝板穿孔结果

Fig. 1　Results of penetration hole in thin Al-plate

3　薄铝板穿孔高速撞击数值模拟

高速撞击薄铝板穿孔数值模拟分两部分进行。首先,对实验工况进行了数值模拟,弹丸材料和薄板材料均为 2A12,建模时薄铝板和弹丸都采用 SPH 法。材料特性模拟采用的是模型数据库提供的标准的冲击状态方程和 Steinberg-Guinan 强度模型,失效准则是只在拉伸方向的最大主应力失效。强度极限是 2.0 GPa,最大剪应力为 1.01×10^{20}。用 AUTODYN-2D 轴对称建模时,SPH 粒子的大小为 0.05 mm,这样就使薄板厚度方向上的 SPH 粒子数不少于 20 个,从而可以满足数值模拟精度的要求。然后将模拟结果与实验结果进行了比较,比较结果如表 1 所示。

最后,用同样的方法对 1100-0 铝合金弹丸和薄板进行了高速撞击数值模拟,材料特性模拟采用的仍是模型数据库提供的标准的冲击状态方程和 Steinberg-Guinan 强度模型,失效准则也是只在拉伸方向的最大主应力失效。强度极限是 1.0 GPa,最大剪应力为 1.01×10^{20}。用 AUTODYN-2D 轴对称建模时,SPH 粒子的大小为 0.05 mm,同样使薄板厚度方向上的 SPH 粒子数不少于 20 个。根据模拟结果分析了弹丸直径、弹丸速度和薄铝板厚度对高速撞击穿孔直径的影响,数值模拟结果如表 2～表 4 所示。

表 1 实验穿孔直径与数值模拟结果的比较

Table 1 Comparison of experimental penetration hole diameters with simulation results

No.	Projectile diameter /(mm)	Impact velocity /(km/s)	Al-plate thickness /(mm)	Experimental hole diameter /(mm)	Simulation hole diameter /(mm)	Error /(%)
1	3.96	4.24	1.00	7.00	7.08	1.14
2	3.96	4.81	1.00	7.36	7.40	0.54
3	4.10	3.42	1.00	6.68	6.72	0.60
4	4.23	3.62	1.00	6.76	6.98	3.25
5	4.23	4.46	1.00	7.10	7.48	5.35
6	4.89	4.03	1.00	7.82	7.92	1.28
7	4.89	4.27	1.00	7.81	8.20	4.99
8	4.89	4.39	1.00	7.84	8.22	4.85
9	4.89	4.55	1.00	7.98	8.34	4.51
10	4.98	3.29	1.00	7.20	7.58	5.28
11	4.98	3.52	1.00	7.48	7.80	4.28
12	4.98	4.00	1.00	7.86	8.08	2.80
13	4.98	4.13	1.00	7.90	8.06	2.03
14	4.98	4.27	1.00	7.94	8.22	3.53
15	4.98	4.46	1.00	8.00	8.28	3.50
16	4.98	4.46	1.00	7.96	8.28	4.07
17	4.98	4.55	1.00	8.22	8.30	0.97
18	4.98	5.00	1.00	8.28	8.64	4.35
19	4.98	5.00	1.00	8.38	8.64	3.10
20	5.07	3.45	1.00	7.38	7.82	5.96
21	5.07	3.73	1.00	7.60	8.06	6.05
22	5.07	4.31	1.00	8.50	8.58	0.94
23	5.16	4.46	1.00	8.30	8.62	3.86
24	5.56	4.10	1.00	8.68	8.74	0.69
25	5.84	3.43	1.00	8.22	8.58	4.38
26	5.84	3.52	1.00	8.25	8.58	4.00
27	5.84	3.68	1.00	8.38	8.70	3.82
28	5.84	4.31	1.00	9.02	9.22	2.22
29	5.97	4.39	1.00	8.90	9.36	5.17

表 2　薄铝板穿孔直径随弹丸撞击速度变化的模拟结果

Table 2　Simulation results of penetration hole diameters in thin Al-plate with impact velocity

No.	Projectile diameter/(mm)	Impact velocity/(km/s)	Al-plate thickness/(mm)	Hole diameter/(mm)
1	4.00	1.50	1.00	6.08
2	4.00	2.00	1.00	6.80
3	4.00	2.50	1.00	7.48
4	4.00	3.00	1.00	7.74
5	4.00	3.50	1.00	8.30
6	4.00	4.00	1.00	8.58
7	4.00	4.50	1.00	8.82
8	4.00	5.00	1.00	9.26
9	4.00	5.50	1.00	9.57
10	4.00	6.00	1.00	9.71
11	4.00	6.50	1.00	9.86
12	4.00	7.00	1.00	9.96
13	4.00	7.50	1.00	10.09
14	4.00	8.00	1.00	10.51
15	4.00	8.50	1.00	10.54
16	4.00	9.00	1.00	10.64
17	4.00	9.50	1.00	10.80
18	4.00	10.00	1.00	10.90
19	4.00	10.50	1.00	11.02
20	4.00	11.00	1.00	11.00
21	4.00	12.00	1.00	11.14

表 3　薄铝板穿孔直径随弹丸直径变化的模拟结果

Table 3　Simulation results of penetration hole diameters in thin Al-plate with projectile diameter

No.	Projectile diameter/(mm)	Impact velocity/(km/s)	Al-plate thickness/(mm)	Hole diameter/(mm)
1	1.00	7.00	1.00	4.67
2	1.50	7.00	1.00	5.90
3	2.00	7.00	1.00	6.89
4	2.50	7.00	1.00	7.92
5	3.00	7.00	1.00	8.59
6	3.50	7.00	1.00	9.40
7	4.00	7.00	1.00	9.81
8	4.50	7.00	1.00	10.86
9	5.00	7.00	1.00	11.04
10	5.50	7.00	1.00	11.92
11	6.00	7.00	1.00	12.43
12	6.50	7.00	1.00	12.78
13	7.00	7.00	1.00	13.28
14	7.50	7.00	1.00	14.06
15	8.00	7.00	1.00	14.30
16	8.50	7.00	1.00	14.96
17	9.00	7.00	1.00	15.64
18	9.50	7.00	1.00	16.16
19	10.00	7.00	1.00	16.62

表 4 薄铝板穿孔直径随薄板厚度变化的模拟数据

Table 4 Simulation results of penetration hole diameters in thin Al-plate with Al-plate thickness

No.	Projectile diameter/(mm)	Impact velocity/(km/s)	Al-plate thickness/(mm)	Hole diameter/(mm)
1	4.00	6.00	1.00	9.75
2	4.00	6.00	1.50	11.39
3	4.00	6.00	1.75	13.26
4	4.00	6.00	2.00	13.54
5	4.00	6.00	2.25	14.66
6	4.00	6.00	2.50	14.73
7	4.00	6.00	2.75	15.92
8	4.00	6.00	3.00	16.06
9	4.00	6.00	3.25	16.06
10	4.00	6.00	3.50	16.23
11	4.00	6.00	3.75	16.72
12	4.00	6.00	4.00	16.84
13	4.00	6.00	4.50	17.10
14	4.00	6.00	5.00	17.42
15	4.00	6.00	5.50	17.64
16	4.00	6.00	6.00	17.71

4 实验结果与模拟结果对比分析

4.1 实验结果与模拟结果对比

比较撞击实验和数值模拟得到的薄铝板穿孔直径大小,可以看出,数值模拟结果均略大于实验结果,增加量如表 1 所示。

从表 1 中的统计数据可以得到,数值模拟结果比实验结果的高出量最大为 6.05%,最小为 0.54%,平均的高出量为 3.36%。由于数值模拟材料选用的是模拟软件材料库中 2A12 铝合金的标准性能参数,与实验用铝合金材料 2A12 的实际性能参数可能会略有差别,因此,数值模拟结果与实验结果存在微小差别的可能性是存在的,从二者相差的数量来看,也是合理的。同时,由实验结果和数值模拟结果分别拟合得到的曲线变化规律是完全相同的,所以,可以利用数值模拟对薄铝板高速撞击穿孔规律进行预测分析。图 2 给出了实验数据与数值模拟数据的拟合曲线的对比。

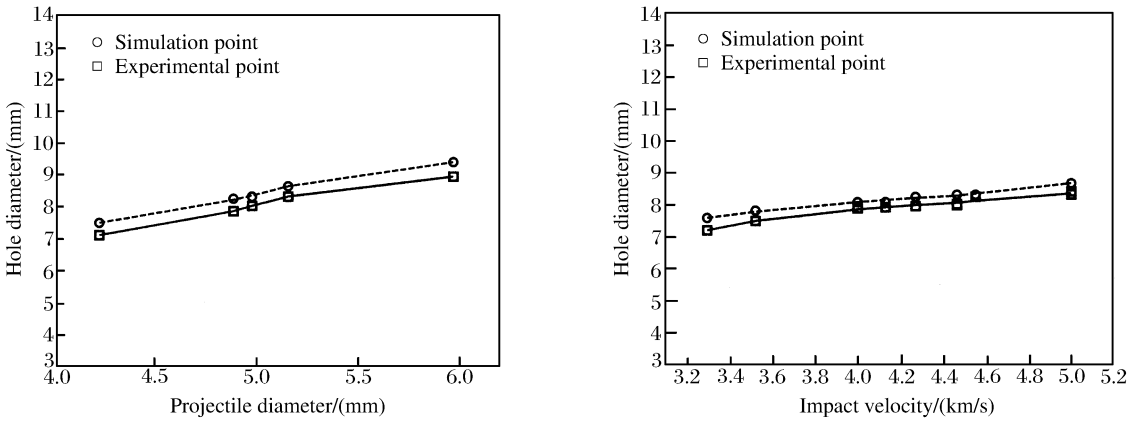


图 2 实验穿孔直径与数值模拟结果的比较

Fig. 2 Comparison between experimental penetration hole diameters and simulation results

4.2　薄铝板高速撞击穿孔直径规律分析

弹丸高速撞击薄铝板时,在弹丸与薄铝板材料中所产生的压缩波与反射稀疏波的共同作用使弹丸和弹丸前的薄铝板材料被抛出,从而在薄铝板上形成穿孔。

图 3 给出了薄铝板高速撞击穿孔直径随撞击弹丸直径变化的规律,当弹丸撞击速度和被撞薄铝板厚度不变时,薄铝板高速撞击穿孔直径随着球形弹丸直径的增大而增大,二者接近于正比关系。因此,撞击弹丸直径始终是影响薄铝板高速撞击穿孔直径的主要因素。

图4给出了薄铝板高速撞击穿孔直径随弹丸撞击速度变化的规律,当撞击弹丸直径和被撞薄铝板

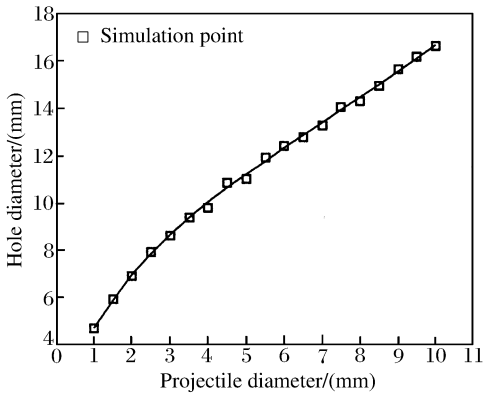


图 3　薄铝板撞击穿孔直径随弹丸直径的变化

Fig. 3　The projectile diameter dependence of penetration hole diameters in thin Al-plate

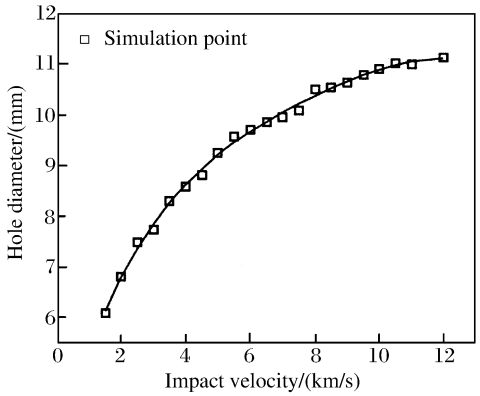


图 4　薄铝板撞击穿孔直径随弹丸撞击速度的变化

Fig. 4　The impact velocity dependence of penetration hole diameters in thin Al-plate

厚度不变时,薄铝板高速撞击穿孔直径随着弹丸撞击速度的增加而增大,但增大的幅度随着弹丸撞击速度的增加而减小。对于直径为 4 mm 的铝球弹丸和厚度为 1 mm 的薄铝板,弹丸撞击速度在 2～10 km/s 时,弹丸的撞击速度对薄铝板高速撞击穿孔直径的影响较大。当弹丸撞击速度超过 10 km/s 后,弹丸撞击速度对薄铝板高速撞击穿孔直径的影响不再明显,即薄铝板高速撞击穿孔直径随弹丸撞击速度的进一步增加而趋近于固定值。

图 5 给出了薄铝板高速撞击穿孔直径随薄铝板厚度变化的规律,当撞击弹丸直径和弹丸撞击速度不变时,薄铝板高速撞击穿孔直径随着薄铝板厚度的增加而增大,但增大的幅度随着薄铝板厚度的增加而减小。对于直径为 4 mm 的铝球弹丸,在撞击速度为 6 km/s 的情况下,薄铝板厚度在 1～4 mm 时,对薄铝板高速撞击穿孔直径影响较大,当薄铝板厚度大于 4 mm 后,薄铝板厚度的影响不再明显。

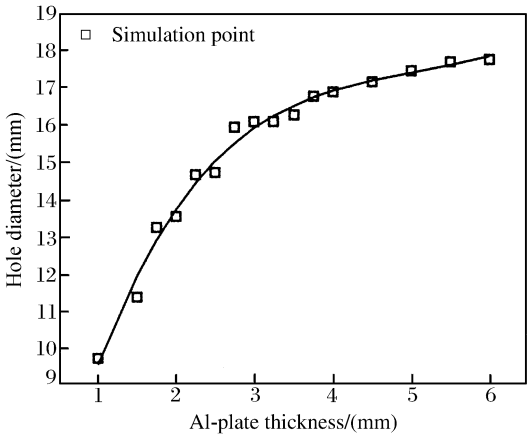


图 5　薄铝板穿孔直径随薄铝板厚度的变化

Fig. 5　The Al-plate thickness dependence of penetration hole diameters in thin Al-plate

5　结　论

通过薄铝板的高速撞击穿孔实验和数值模拟以及利用实验结果和模拟结果获得的拟合曲线,可以得到以下初步结论:

(1) 排除材料性能参数带来的差异,数值模拟可以作为预报薄铝板高速撞击穿孔直径大小的简便方法。

(2) 薄铝板高速撞击穿孔直径大小与撞击弹丸直径大小成比例,撞击弹丸直径始终是影响薄铝板高速撞击穿孔直径的主要因素。

(3) 弹丸撞击速度在一定范围内对薄铝板高速撞击穿孔直径产生较大影响,超出该速度范围,弹丸撞击速度对薄铝板高速撞击穿孔直径的影响不再明显。

(4) 薄铝板厚度在一定范围内对薄铝板高速撞击穿孔直径产生较大影响,超出该厚度范围,薄铝板厚度对薄铝板高速撞击穿孔直径的影响不再明显。

References:

[1] Min G R, Xiao M X. Reliability Design Spacecraft Module Wall against Meteoroid Perforation [J]. Chinese Space Science and Technology, 1986, (6): 45－48. (in Chinese)
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): 45－48.

[2] Zhang W, Pang B J, Zou J X, et al. Meteoroid and Space Debris Shielding Concepts for Spacecraft [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 32(2): 18－22. (in Chinese)
张 伟,庞宝君,邹经湘,等. 航天器微流星体和空间碎片的防护方案 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 32(2): 18－22.

[3] Zhang W, Guan G S, Pang B J, et al. Optimization of Parameter for Spacecraft Single-Bumper Shielding Structure against Space Debris [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(2): 119－221. (in Chinese)
张 伟,管公顺,庞宝君,等. 航天器空间碎片单护屏防护结构参数优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(2): 119－221.

[4] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistics Limit Equations for Spacecraft Shielding [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 93－104.

[5] Zhang W, Guan G S, Pang B J, et al. Experimental Investigation of High Velocity Projectile Impact Damage on Pressure Vessels [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(2): 229－235. (in Chinese)
张 伟,管公顺,庞宝君,等. 弹丸高速撞击压力容器损伤实验研究 [J]. 实验力学, 2004, 19(2): 229－235.

[6] Palmieri D, Faraud M, Destefanis R. Whipple Shied Ballistic at Impact Velocity Higher than 7 km/s [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 579－590.

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

[8] Palmieri D, Schafer F, Hiermaier S, et al. Numerical Simulation of Non-Perforation Impacts on Shielded Gas-Filled Pressure Vessels [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 591－602.

[9] Zhu X, Feng W S. A Study of the Modes of Failure of a Thin Plate Penetrated by a Conical Projectile at Low Velocity [J]. Acta Armamentar, 1997, 18(1): 27－32. (in Chinese)
朱 锡, 冯文山. 低速锥头弹丸对薄板穿孔的破坏模式研究 [J]. 兵工学报, 1997, 18(1): 27－32.

A Study of Penetration Hole Diameter in Thin Al-Plate by Hypervelocity Impact of Al-Spheres

GUAN Gong-Shun, ZHANG Wei, PANG Bao-Jun, HA Yue

(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: All spacecraft in low orbit are subjected to hypervelocity impacts by meteoroids and space debris, which can lead to significant damage and catastrophic failure. Investigation into the impact damage characteristics has become an important problem for spacecraft protection designing. In this paper, by experiment and numerical simulation of hypervelocity impact on thin Al-plate by Al-spheres, and it is found that AUTODYN-2D SPH is an effective method of predicting penetration hole diameter in thin Al-plates from hypervelocity impact. By numerical simulation of projectile diameter, projectile velocity and thin Al-plate thickness effect on penetration hole diameter in thin Al-plates from hypervelocity impact, and fitting curves with experiment and simulation results, the law of penetration hole diameter and leading factors affecting penetration hole diameter in thin Al-plates from hypervelocity impact was proposed.

Key words: hypervelocity impact; penetration hole diameter; thin Al-plate; numerical simulation