

超高速撞击中影响碎片云形状因素分析^{*}

唐 蜜, 柏劲松, 李 平, 张展冀

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

摘要:应用光滑粒子流体动力学(SPH)方法对铝球弹丸正撞击防护屏进行了数值模拟研究, 将计算结果同相应的实验结果进行了比较, 二者符合得很好。在此基础上分析了撞击速度、防护屏厚度、铝球直径、材料、弹丸形状、间隙量等因素对碎片云的影响规律。并以碎片云的长度和径向尺寸为指标, 应用正交设计方法对撞击速度、防护屏厚度、铝球直径三因素对指标的影响主次关系进行了分析研究, 防护屏厚度是碎片云长度的主要影响因素, 而弹丸直径是碎片云径向的主要影响因素。

关键词:超高速撞击; 数值模拟; 碎片云; 正交设计

中图分类号: V423; O347

文献标识码: A

1 引 言

1947 年, F. Whipple 发明了为抵御微流星体高速撞击的 Whipple 防护方案。Whipple 防护方案是将防护屏放置在被防护舱壁外侧一定距离外以减小微流星体的高速撞击破坏。防护屏能起到将高速弹丸充分粉碎甚至尽量熔化或气化的作用, 从而大大的消耗弹丸的动能和破坏了弹丸的完整性, 因此减轻了对第二层主结构垫层板的破坏。弹和防护屏相互作用的结果是防护屏被击穿, 从孔边喷出一股由弹、防护屏材料形成的碎片云^[1]。影响碎片云形成的因素主要有: 弹丸撞击防护屏速度、弹丸的直径、防护屏的厚度、间隙量的大小、弹丸与防护屏的材料和弹丸形状等; 从数值模拟的角度, 状态方程的选取、强度模型的选取、SPH 质点大小的选取, 都对碎片云的形成有影响。由于防护结构方案和防护材料的多样性、弹丸模拟各类空间碎片的局限性, 以及超高速撞击设备有限的试验能力和昂贵的试验费用, 使得数值仿真成为研究超高速碰撞的有力工具。它不仅可以对撞击试验进行预示和印证以及弥补试验数据的不足, 而且还能进行地面试验很难实现的超高速撞击仿真^[2]。在开展数值仿真进行研究之前, 一个必不可少的步骤就是针对已有的实验进行数值模拟, 将模拟结果与实验结果进行对比, 以此来验证数值模拟的准确性。本研究首先对文献[3]中提供的 4 种实验工况进行了数值模拟, 并与其实验结果进行对比。在此基础上以超高速撞击防护屏产生的碎片云为研究对象, 分析了弹丸撞击防护屏速度、弹丸的直径、防护屏的厚度、间隙大小、弹靶材料、以及弹丸形状对碎片云的影响规律。最后应用正交设计方法对弹丸撞击防护屏速度、弹丸的直径、防护屏的厚度这三个因素对碎片云影响的主次关系进行了分析研究。

2 数值验证

为验证数值建模及材料参数选取的正确性, 对文献[3]中提供的 4 种实验工况进行了数值模拟, 并与其实验结果进行对比。计算的几何模型如图 1 所示, 由弹丸及防护屏组成, 弹丸以高速正撞击防护屏, 弹丸材料和防护屏材料均为 LY12Al。弹丸和防护屏的材料模型采用冲击状态方程(Shock), 强度模型采用 Johnson-Cook 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^[4]。建模时弹丸和防护屏都采用 SPH 算法。用 AUTODYN-2D 轴对称建模时, SPH 粒子的大小取为

^{*} 收稿日期: 2006-11-21; 修回日期: 2007-03-09

作者简介: 唐 蜜(1981—), 男, 硕士, 主要从事弹药及高速碰撞理论与数值模拟研究. E-mail: tangmi_117@163.com

0.05 mm。材料模型的主要参数如表 1 所示,具体实验参数可参见表 2。

表 2 给出了数值模拟结果与文献[3]中的实验结果。数值模拟结果与实验结果的相对误差分别为:1.2%、0.51%、1.9%、2.8%,误差均在 3% 以下,结果表明本研究的计算结果与实验结果符合得很好;图 2 给出了碎片云的数值模拟结果与对应的实验结果^[5]的比较,可见计算得到的碎片云形状与实验结果相似。因此,采用 AUTODYN-2D 中的 SPH 算法可以很好地计算超高速碰撞形成的碎片云,本研究模型的建立及材料参数的选取是合理的。

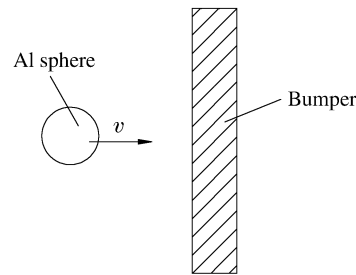


图 1 几何模型简图
Fig. 1 Sketch of geometry model

表 1 材料主要计算参数
Table 1 Simulation parameters of material

Material	$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$G / (\text{GPa})$	$\sigma_y / (\text{GPa})$	$c_0 / (\text{km}/\text{s})$	λ	Γ
LY12Al	2.785	27.6	0.45	5.328	1.338	2.0

表 2 数值模拟结果与实验结果的比较
Table 2 Comparison of experimental and simulation results

No.	Impact velocity /(km/s)	Projectile diameter /(mm)	Al-plate thickness /(mm)	Experimental hole diameter/(mm)	Simulation hole diameter/(mm)	Error /(%)
1	5.29	5.00	1.92	11.5	11.36	1.20
2	5.52	5.02	1.94	11.7	11.64	0.51
3	6.08	5.00	1.94	12.4	12.16	1.90
4	6.15	5.00	1.92	12.6	12.24	2.80

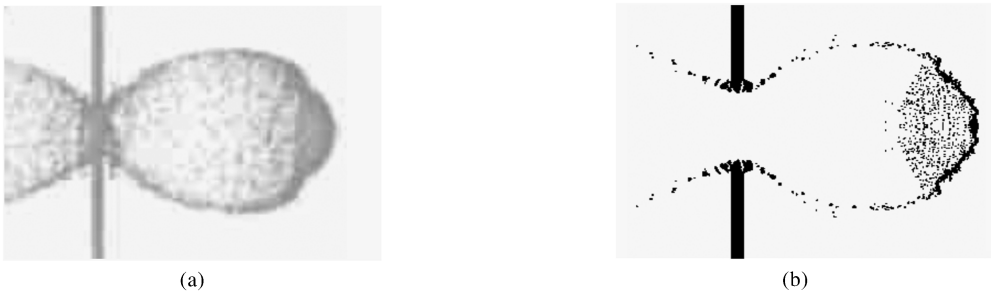


图 2 在 15.1 μs 时刻的碎片云数值模拟结果与实验结果对比
Fig. 2 Debris cloud comparison of experimental and simulation results at 15.1 μs

3 影响因素分析

3.1 撞击速度对碎片云的影响

铝球直径 $d=4.0\text{ mm}$,防护屏厚度 $\delta=1.0\text{ mm}$,弹速 v 从 3.5 km/s 到 8.5 km/s 变化。图 3 给出了在 $5.0\text{ }\mu\text{s}$ 时刻的不同撞击速度形成的碎片云形状,撞击速度越高,形成的碎片云在横向和径向都膨胀的更厉害,颗粒越细、越多、越分散。图 4(a)给出了撞击速度对碎片云横向和径向变化的影响规律。随着撞击速度的增加,碎片云在横向和径向都是增加的,而且,横向的增加幅度高于径向的增加幅度,表现在碎片云的长径比是不断增加的。因此,在满足一定弹丸直径和防护屏厚度的条件下,撞击速度越高,得到的碎片云颗粒越细、越分散,对主结构的防护也就越好。

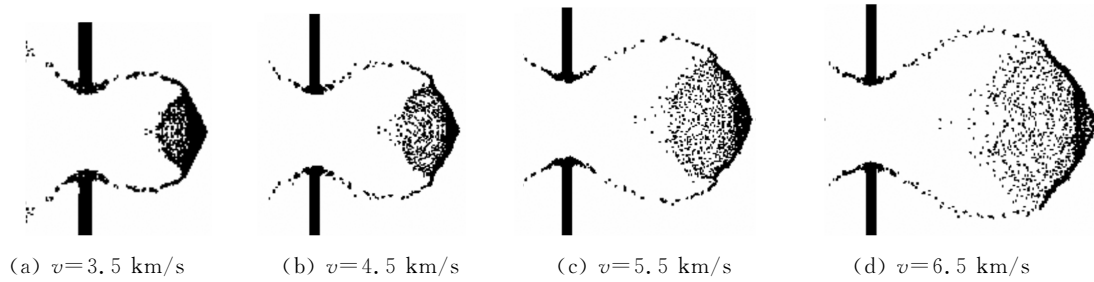


图3 撞击速度变化对碎片云形状的影响

Fig. 3 Effect of different impact velocities on debris cloud

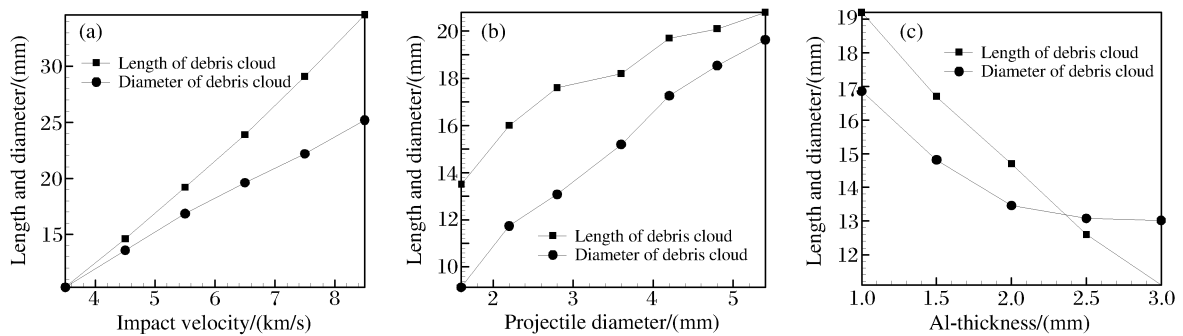


图4 撞击速度、弹丸直径、防护屏厚度对碎片云长度、直径的影响

Fig. 4 Effect of different impact velocities, projectile diameters and bumper thicknesses on length and diameter of debris cloud

3.2 弹丸直径对碎片云的影响

弹速 $v=5.5$ km/s, 防护屏厚度 $\delta=1.0$ mm, 铝球直径 d 分别为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 和 5.5 mm。图 5 给出了在 $5.0 \mu\text{s}$ 时刻的弹丸直径变化时碎片云的形状, 可以看出形成的碎片云形状都比较好, 说明在一定撞击速度和防护屏厚度下, 弹丸直径对碎片云形成的影响不大, 因为其碎片云颗粒都比较分散, 较细、较多。图 4(b) 给出了弹丸直径对碎片云横向和径向变化的影响规律。随着弹丸直径的增加, 碎片云在横向和径向都是增加的, 而且, 横向的增加幅度小于径向的增加幅度, 表现在碎片云长径比是不断减小的。因此, 在满足一定碰撞速度和防护屏厚度下, 弹丸直径对产生碎片云的影响不大, 都能得到颗粒较细、较分散的碎片云, 对主结构的防护也就比较好。

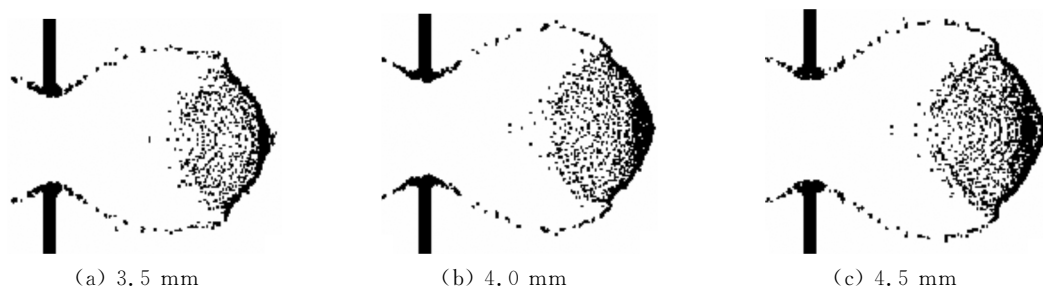


图5 弹丸直径变化对碎片云形状的影响

Fig. 5 Effect of different projectile diameters on debris cloud

3.3 防护屏厚度对碎片云的影响

铝球直径 $d=4.0$ mm, 弹速 $v=5.5$ km/s, 防护屏厚度 δ 分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 mm。图 6 给出了在 $5.0 \mu\text{s}$ 时刻的不同防护屏厚度所形成的碎片云形状, 随着防护屏厚度的增加, 碎片云的横向

与径向膨胀均在减小,而且碎片云的颗粒数也在减少,颗粒越粗越集中。图 4(c)给出了防护屏厚度对碎片云横向和径向变化的影响规律。随着防护屏厚度的增加,碎片云在横向和径向都是减小的,而且,横向的减小幅度大于径向的减小幅度,表现在碎片云长径比也是不断减小的。因此,在满足一定的碰撞速度和弹丸直径条件下,防护屏的厚度越薄,得到的碎片云颗粒越细,能量越分散,对主结构的防护越好。

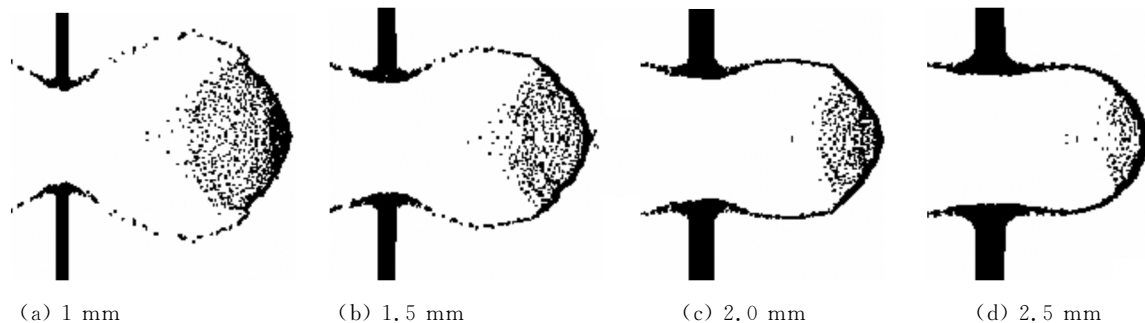


图 6 防护屏厚度变化对碎片云形状的影响

Fig. 6 Effect of different bumper thicknesses on debris cloud

3.4 间隙量对碎片云的影响

设置合适的间隙,使碎片云有充分的时间、空间来膨胀、拉长,使得碎片云的能量也能充分地分散,以此来减小对主结构的破坏。

图 7 分别给出了碎片云从 $1.0 \mu\text{s}$ 到 $5.0 \mu\text{s}$ 的变化过程。这里以时间的变化间接代表间隙量的变化对碎片云的影响。随着时间的推进,碎片云在横向和径向都是在不断地膨胀发散,防护屏与主结构之间的间隙越大,那么碎片云就有足够的空间来膨胀发散,碎片云的能量就越分散,就有利于对主结构的保护。当然,间隙的大小是受到具体结构设计的限制,不可能无限制的增大,只能是在结构允许的范围内,尽可能的增大二者的间隙,使得形成的碎片云能够充分地膨胀。

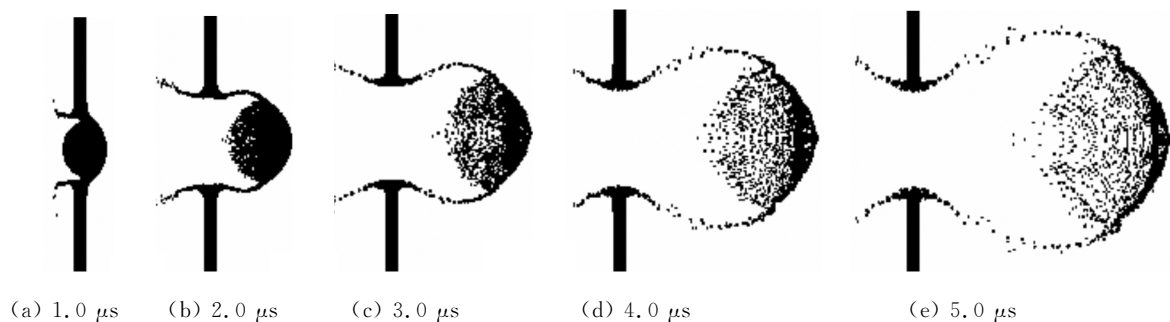


图 7 不同间隙量的碎片云形状

Fig. 7 Effect of different intervals on debris cloud

3.5 材料对碎片云的影响

三种材料分别为 2024-T4Al、1100-0Al、6061-T6Al,数据输入采用标准 AUTODYN 库数据。弹丸和防护屏为同种材料,弹径为 4.0 mm ,撞击速度为 6.0 km/s ,防护屏厚度为 1.0 mm ,失效模型采用最大主应力,三种材料的最大拉应力分别为: 2.5 、 1.0 和 2.6 GPa ^[6]。图 8 给出了在 $5.0 \mu\text{s}$ 时刻三种材料撞击后的碎片云图,三种材料的碎片云比较相似。碎片云的径向尺寸描述了外层颗粒的膨胀情况,为了描述碎片云内部颗粒的分散情况,定义内部碎片云尾锥角,三种材料碎片云的尾锥角分别为 101.8° 、 104.4° 、 98.2° ,因此,对于弹丸和靶是同种材料,1100-0Al 形成碎片云的发散是最大的。

表 3 给出了三种材料碎片云的长度和直径值。其中,1100-0Al 的碎片云的长度和直径都是最大的,说明此种材料得到的碎片云是膨胀最充分的,即对主结构的防护效果是最好的。虽然 6061Al 的长

径比最大,但是其碎片云的长度和直径都是最小的,因此,单从碎片云的长径比来描述碎片云的形状特征是不全面的。

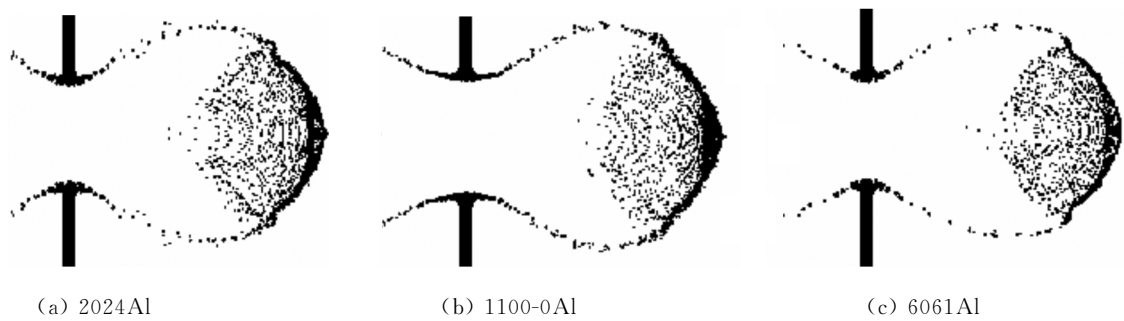


图 8 不同材料对碎片云的影响
Fig. 8 Effect of different materials on debris cloud

表 3 不同材料的碎片云长度、直径
Table 3 Debris's length and diameter of different materials

Materials	Length of debris cloud/(mm)	Diameter of debris cloud/(mm)	Length-to-diameter ratio
2024Al	22.2	19.34	1.15
1100-0Al	22.4	19.84	1.13
6061Al	21.9	18.5	1.18

3.6 弹丸形状对碎片云形成的影响

铝材料为 2024-T4Al,弹丸分别是直径 4.0 mm 的球体,直径 4.0 mm、高度 2.67 mm 的柱体,直径 2.0 mm、长度为 10.67 mm 的杆体,撞击速度为 6.0 km/s,防护屏厚度为 1.0 mm。三种弹丸的质量相等。图 9 分别给出了在 5.0 μ s 时刻三种弹丸撞击防护屏形成的碎片云。三种弹丸撞击得到的碎片云形状是不同的,杆状弹丸未完全破碎,仍有完整的尾部存在,在碎片云前端有前锥,其碎片云的颗粒较少,也比较密集。柱体弹丸形成的碎片云有明显前锥存在,由于柱体弹丸和杆体弹丸形成的碎片云都存在前锥,因此其碎片云的长度要大一些,三种弹丸形成碎片云的长度分别为:球体 22.2 mm,柱体 28.3 mm,杆体 26.2 mm。

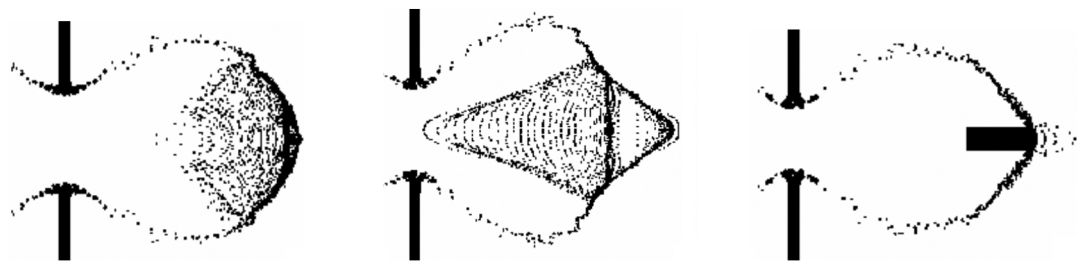


图 9 弹丸形状对碎片云的影响
Fig. 9 Effect of different projectile shapes on debris cloud

碎片云的径向膨胀与弹丸本身的径向尺寸有关,柱体弹丸的径向尺寸处处为 4.0 mm,球体弹丸的径向尺寸只在半径方向为 4.0 mm,而杆体弹丸的直径只有 2.0 mm,相应碎片云的径向尺寸分别为 24.2 mm、19.34 mm、17.62 mm。

三种弹丸形成碎片云的尾锥角大小依次为球体、柱体、杆体。因此三种弹丸中,球体弹丸的碎片云的内层颗粒发散最充分,在水平方向的能量也就小,对主结构的威胁就比较小。

4 正交设计分析

上面计算分析了各因素对碎片云形状的影响规律,当然这些规律是建立在一种因素发生变化,而其它因素固定不变的情况下得到的。例如在分析撞击速度对碎片云的影响时,就是取弹丸直径为 4.0 mm,防护屏厚度为 1.0 mm,改变撞击速度。在随后的分析也提到了,当弹丸直径或者防护屏厚度发生变化,对碎片云也有影响。如果分析各因素对碎片云影响的主次顺序,就需要安排相当多的组合方案来进行全面的分析,工作量就相当大。因此,本研究采用正交设计方法来安排组合方案,以此来确定各因素对碎片云影响的主次关系。

4.1 因素水平表的确定

以碎片云的长度(Length)和直径(Diameter)为考察指标,选取因素为撞击速度(Impact Velocity)、弹丸直径(Projectile Diameter)、薄铝靶厚度(Al-Plate Thickness),水平为四水平。因素水平如表 4 所示。

表 4 因素和水平表
Table 4 Factors and levels

Factors	Impact velocity/(km/s)	Projectile diameter/(mm)	Al-plate thickness/(mm)
1	4.0	3.0	1.0
2	4.5	3.5	1.5
3	5.0	4.0	2.0
4	5.5	4.5	2.5

4.2 表头设计与分析

选用正交表 $L_{16}(4^5)$ 来安排计算,将三个因素依次放在表 $L_{16}(4^5)$ 的第 1、2、3 列,根据正交表安排的 16 种方案分别进行数值计算,将计算结果填入正交表的右侧,所有结果均是在 5.0 μ s 时刻的值,如表 5 所示。

表 5 方案与结果
Table 5 Schemes and results

No.	1 Impact velocity /(km/s)	2 Projectile diameter /(mm)	3 Al-plate thickness /(mm)	4	5	Length of debris cloud /(mm)	Diameter of debris cloud /(mm)
1	1 4.0	1 3.0	1 1.0	1	1	11.2	9.74
2	1 4.0	2 3.5	2 1.5	2	2	10.1	10.18
3	1 4.0	3 4.0	3 2.0	3	3	9.3	10.74
4	1 4.0	4 4.5	4 2.5	4	4	8.7	11.96
5	2 4.5	1 3.0	2 1.5	3	4	11.0	10.08
6	2 4.5	2 3.5	1 1.0	4	3	13.9	12.36
7	2 4.5	3 4.0	4 2.5	1	2	9.7	11.68
8	2 4.5	4 4.5	3 2.0	2	1	11.7	12.7
9	3 5.0	1 3.0	3 2.0	4	2	10.9	10.2
10	3 5.0	2 3.5	4 2.5	3	1	10.3	11.24
11	3 5.0	3 4.0	1 1.0	2	4	16.9	14.76
12	3 5.0	4 4.5	2 1.5	1	3	15.4	14.8
13	4 5.5	1 3.0	4 2.5	2	3	10.4	10.64
14	4 5.5	2 3.5	3 2.0	1	4	13.4	12.36
15	4 5.5	3 4.0	2 1.5	4	1	16.8	14.64
16	4 5.5	4 4.5	1 1.0	3	2	19.6	17.68

计算结果的分析与计算比较简单,只需将各列水平数相同的试验结果相加,就得到各列的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ(因为有四个水平),然后除以4,就得平均值,比较好水平与坏水平的差,就可求出极差。对碎片云的长度而言,极差大小分别为:20.9、11.9、22.5,因此,按极差大小排列各因素对碎片云长度影响的主次顺序为:防护屏厚度、撞击速度、弹丸直径。对碎片云的径向而言,极差大小分别为:12.7、16.48、9.02,因此,按极差大小排列各因素对碎片云径向影响的主次顺序为:弹丸直径、撞击速度、防护屏厚度。

考虑到碎片云在长度方向的膨胀易受结构设计的限制,因此希望尽可能通过在径向膨胀发散来分散碎片云的能量,当然,在长度方向也要有足够的膨胀以使碎片云能够充分的膨胀发散,以提高对主结构的防护能力。因此,按照各因素对碎片云径向影响的主次顺序来分析确定各因素最佳水平的选取。

首先,弹丸直径作为主要影响因素。由图4(b)可见,随着弹丸直径的增加,碎片云在横向和径向都是增加的,长度方向的增加幅度小于径向的增加幅度,由此,定出弹丸直径取最大4.5 mm。再考虑次要因素撞击速度。由图4(a)可见,随着撞击速度的增加,碎片云在横向和径向都是增加的,横向的增加幅度高于径向的增加幅度,因此,撞击速度也是越大越好,取5.5 km/s。最后考虑因素是防护屏厚度。由图4(c)可见,随着防护屏厚度的增加,碎片云在横向和径向都是减小的,横向的减小幅度大于径向的减小幅度。因此,防护屏厚度要越薄越好,取1.0 mm。这种组合正好是方案16,由表5可以看出,该方案得到的碎片云在长度、径向均是所有方案中最大的。

5 结 束 语

(1) 对铝球弹丸正撞击防护屏进行了二维数值模拟,将数值模拟结果同实验结果进行了比较,二者符合得很好,验证了数值模拟方法的正确性及有效性,同时也说明 SPH 方法很适合处理超高速撞击问题。

(2) 研究了撞击速度、防护屏厚度、铝球直径、间隙量、弹靶材料及弹丸形状在满足一定条件下对碎片云的影响规律,并计算了当这些因素变化时,碎片云的长度和径向的变化情况。

(3) 采用正交设计的方法,以碎片云长度和径向为指标,分析了撞击速度、防护屏厚度、铝球直径三因素对其影响的主次顺序。结果表明,对于文中选定的因素水平范围内,防护屏厚度是影响碎片云长度的主要因素,而弹丸直径是影响碎片云径向的主要因素,在此基础上以各因素对碎片云径向影响的主次顺序确定了最佳水平组合。

(4) 正如文中分析,实际影响碎片云的因素很多,本研究只选择了三种因素作为主要影响因素,且因素水平选定范围有限。在实际应用中,可根据具体情况确定因素及水平来进行分析。

(5) 正交设计方法可以有效地用于防护结构参数优化设计,使防护结构各性能参数良好匹配,以达到最佳防护效果。

References:

- [1] Zhang Q M, Huang F L. Dynamics Guide of Hypervelocity Impact [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
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.
- [2] Wang F, Li L, Jin J, et al. Study on Numerical Simulation of Hypervelocity Impact of Debris in Outer Space [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(5): 26-30. (in Chinese)
王 芳, 李 磊, 金 俊, 等. 空间碎片超高速碰撞的数值方法研究 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(5): 26-30.
- [3] Liu S, Li Y, Huang J, et al. Hypervelocity Impact Test Results of Whipple Shield for the Validation of Numerical Simulation [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 505-508. (in Chinese)
柳 森, 李 毅, 黄 洁, 等. 用于验证数值仿真的 Whipple 屏超高速撞击试验结果 [J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 505-508.
- [4] Guan G S, Zhang W, Pang B J, et al. A Study of Penetration Hole Diameter in Thin Al-Plate by Hypervelocity Impact of Al-Spheres [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 132-138. (in Chinese)
管公顺, 张 伟, 庞宝君, 等. 铝球弹丸高速正撞击薄铝板穿孔研究 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(2): 132-138.
- [5] Liu S, Xie A M, Huang J, et al. Laser Shadowgraph for the Visualization of Hypervelocity Impact Debris Cloud [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(2): 35-39. (in Chinese)

- 柳 森,谢爱民,黄 洁,等.超高速碰撞碎片云的激光阴影照相技术 [J].实验流体力学,2005,19(2):35-39.
- [6] 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的数值模拟 [J].高压物理学报,2004,18(1):47-52.

Factors Analysis of Debris Cloud's Shape of Hypervelocity Impact

TANG Mi,BAI Jing-Song,LI Ping,ZHANG Zhan-Ji

(*Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang 621900,China*)

Abstract: The numerical simulations of hypervelocity impact of Al-spheres on bumper at normal are carried out using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) technique. The simulation results are compared with experimental results, and the simulated hole diameters of bumper and debris cloud are well consistent with experimental results. The effect of impact velocity, bumper thickness, projectile diameter, materials, shape of projectile, interval on produced debris cloud are further analyzed. Regarding the length and diameter as index, orthogonal design method is applied to analyze the primary and secondary relations on the debris cloud's index of the three factors, that is impact velocity, bumper thickness and projectile diameter. The results indicate that bumper thickness is the main influence factor of debris cloud's length while projectile diameter is the main influence factor of debris cloud's diameter.

Key words: hypervelocity impact; numerical simulation; debris clouds; orthogonal design