文章编号：1000-5773(2011)05-0435-09

超高速撞击下钛基复合材料动力学行为研究*

宋卫东[1]，栗建桥[1]，刘海燕[2]

（1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081；
2.北京理工大学宇航学院，北京　100081）

摘要：基于已有的铝合金超高速撞击实验研究结果，采用动力分析软件，对铝球撞击铝板进行了数值模拟，验证了数值模拟结果的可靠性，进而对铝防护屏以及与铝防护屏质量相同的钛基复合材料(TMC)防护屏进行了5.52、7.00、和8.00 km/s速度下的超高速撞击模拟，分别对直径为5.02 mm的铝球以及质量等同于铝球的钛基复合材料球做了3种速度下撞击铝屏和钛基复合材料防护屏的数值模拟。通过数值模拟研究可以看出，随着撞击速度的增加，钛基复合材料防护屏的防护效果优于铝防护屏；速度不变，钛基复合材料防护屏防护钛基复合材料球撞击的效果好，铝防护屏防护铝球撞击的效果好。通过超高速撞击模型分析可知，钛基复合材料防护屏的防护效果优于铝防护屏。

关键词：超高速撞击；钛基复合材料；光滑粒子法；数值模拟
中图分类号：O347.1；V423　　**文献标识码**：A

1　引　言

空间碎片的超高速撞击可能导致航天器发生严重的损伤甚至灾难性的失效，由于近地轨道上空间碎片的数量日益增长，航天器面临的危险越来越大，必须设置防护结构以对航天器进行保护。1947年，Whipple提出了为抵御微流星体高速撞击的Whipple防护方案，该技术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、陨石、空间碎片等对航天器的高速撞击所带来的破坏。近年来，国内学者对Whipple防护结构进行了大量的实验和数值模拟研究，取得了较为丰富的成果。唐蜜等[1]用光滑粒子法进行了铝球对防护屏撞击的数值模拟研究，得到了与实验吻合得很好的结果，验证了数值模拟的可行性。张伟、庞宝君等进行了超高速撞击防护屏碎片云的数值模拟[2-4]，分析了碎片云的影响因素，得到了防护屏厚度、弹丸直径、弹丸形状、弹丸撞击速度和所选用状态方程及材料强度模型对碎片云的影响。胡震东、黄海、张庆明等对碎片云的特性进行了分析[5-6]，通过分析弹靶材料物理量随时间的变化，得到不同时刻弹靶变形和穿孔直径以及碎片云自相似特征。目前绝大部分工作都是围绕铝弹丸和铝防护屏进行的实验和数值模拟研究，撞击极限方程和经验公式也是描述撞击铝合金防护屏的情况。近年来钛和钛基复合材料越来越广泛地应用于航天器的制造中[10]，随着航天器进入太空以及在太空中的破碎，钛基复合材料的空间碎片将会越来越多，所以对以钛基复合材料为弹丸和防护结构的超高速撞击进行研究势在必行。本研究采用动力分析程序对铝球撞击铝板进行了数值模拟，通过对比同样条件下的实验结果来验证数值模拟的可行性，在此基础上对钛基复合材料防护屏和铝防护屏的不同工况进行了数值模拟，得到使用不同材料的弹丸和防护屏时航天器舱壁的毁伤情况。

---

* **收稿日期**：2010-06-23；**修回日期**：2010-09-29
基金项目：国家自然科学基金(91016013，新世纪优秀人才支持计划)；国家重点基础研究发展计划(2010CB832706)
作者简介：宋卫东(1975—)，男，博士，副教授，主要从事冲击动力学研究. E-mail：swdgh@bit.edu.cn

2 数值模拟与实验结果验证

采用轴对称建模，选取弹丸直径 5.02 mm，撞击速度 5.52 km/s，板厚为 1.94 mm，板面直径为 180 mm。由于板的尺寸远大于撞击影响的范围，所以可用圆板近似实验中的方板。弹丸和防护屏材料都是 LY12 铝，建模时弹丸和防护屏都采用光滑粒子算法，粒子大小设为 0.05 mm，弹丸和防护屏材料模型相同。以文献[13]中给出的在中国空气动力研究与发展中心超高速研究所进行的铝质 Whipple 屏超高速撞击实验的部分结果为基础，用其实验结果来验证数值模拟结果的可靠性。

在实验室撞击条件下(弹丸速度小于 8 km/s)，铝材料采用冲击状态方程(Shock)，Johnson-Cook 强度模型，拉伸方向上最大主应力失效模型，强度极限 G 为 2.0 GPa，屈服应力 Y 为 0.45 GPa[14]。采用 AUTODYN 2D 标准材料数据库中提供的数据。

2.1 材料模型选取

选用在超高速撞击数值模拟分析中广泛采用的 Shock 状态方程，钛基复合材料的强度模型采用 Steinberg-Guinan 模型[11]，铝合金材料强度模型采用 Johnson-Cook 模型[12]。在高应变速率时，对于 Steinberg-Guinan 强度模型，其剪切模量 G 和屈服应力 Y 的本构关系是

$$G = G_0\left[1 + \frac{G_p'}{G_0}\frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{G_T'}{G_0}(T-300)\right] \tag{1}$$

$$Y = Y_0\left[1 + \frac{Y_p'}{Y_0}\frac{p}{\eta^{1/3}} + \frac{G_T'}{G_0}(T-300)(1+\beta\varepsilon)^n\right] \tag{2}$$

限制条件为：$Y_0(1+\beta\varepsilon)^n \leqslant Y_{\max}$，其中 ε 为有效塑性应变，T 为温度(K)，$\eta = v_0/v$ 为比容比；在参考状态下，$T=300$ K，$p=0$，应变 $\varepsilon=0$，带有脚标 p 和 T 的参数是对压力和温度的导数。Johnson-Cook 模型是一个以经验为主的本构模型，主要应用于大变形、高应变率、高温变形材料，可应用于各种晶体结构。Johnson-Cook 模型的一般形式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\left(\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m\right]\left[1 - D\left(\frac{T-T_0}{T_0}\right)^k\right] \tag{3}$$

式中：A、ε、T_0 分别表示准静态实验下材料的屈服应力、应变速率和温度，$\dot{\varepsilon}$ 为变形速率，T 为变形温度，B、n、C、m、D、k 为 6 个待定材料参数。

2.2 数值模拟与实验结果对比

表 1 给出了数值模拟计算结果，穿孔直径为 11.57 mm，与实验结果(11.7 mm)的相对误差为 1.20%，图 1 给出了数值模拟碎片云和相同条件下实验获得的碎片云图片，表明采用光滑粒子算法能够很好地模拟超高速碰撞过程，其模拟结果具有较高的可信度。

表 1 数值模拟结果与实验结果对比

Table 1 The comparison between the numerical simulation result and the experimental result

Impact velocity /(km/s)	Diameter of projectile/(mm)	Thickness of the shield/(mm)	Hole-diameter in the simulation/(mm)	Hole-diameter in the experiment/(mm)	Relative error /(%)
5.52	5.02	1.94	11.57	11.7	1.20



(a) Debris cloud shape of numerical simulations (b) Debris cloud shape of experiments

图 1 数值模拟和实验碎片云形状对比

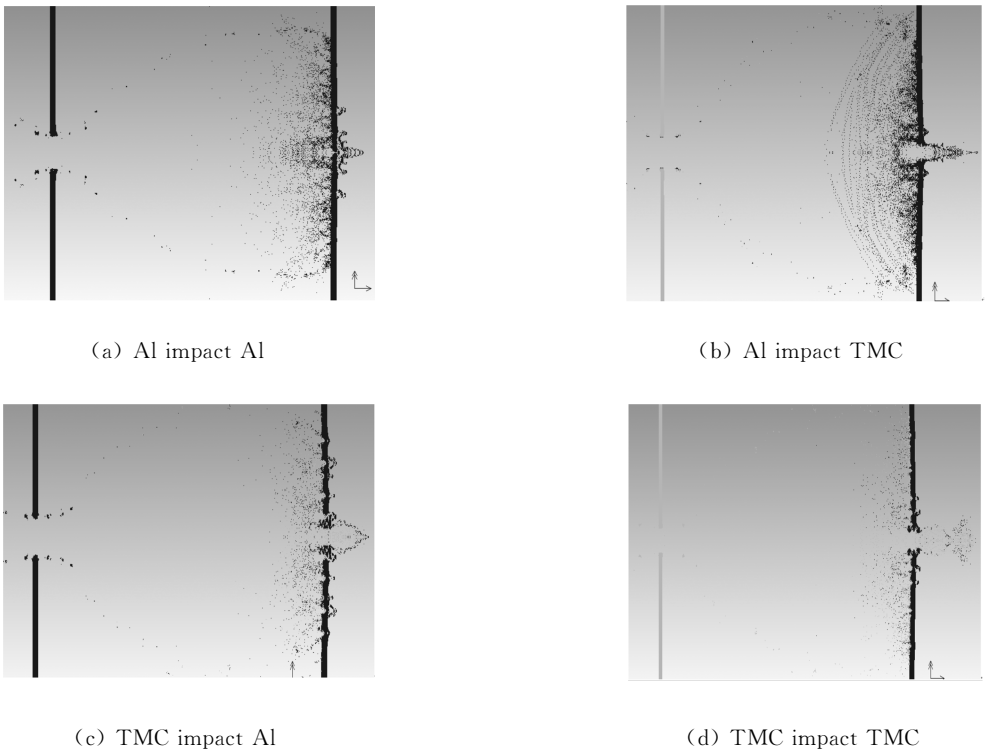
Fig. 1 The comparison between the numerical simulation debris cloud shape and the experimental result

3 数值模拟结果与分析

3.1 冲击速度为 5.52 km/s 的数值模拟

如同文献[13]方法,放置一块观察板来观察碎片云对后板的毁伤,放置后板后计算到 30 μs。铝球以 5.52 km/s 的速度撞击铝防护屏,得到碎片云充分发展后的模拟结果如图 2(a)所示。将防护屏材料换成等质量的钛基复合材料板,由于钛基复合材料的密度大于铝,所以板厚小于铝板的厚度,约 1.223 mm厚(铝板厚度为 1.94 mm),同样使用铝球以 5.52 km/s 的速度撞击,得到的前板穿孔、碎片云参数见表 2,30 μs 时后板的毁伤见图 2(b)。

改变弹丸材料,使用与铝球同质量的钛基复合材料球(其直径为 4.30 mm,铝球直径为 5.02 mm)撞击,防护屏材料分别为铝和钛基复合材料,尺寸与之前模拟相同,分别模拟了 2 种工况,具体结果见表 2 和图 2(c)、图 2(d),表 2 中 l/d 表示碎片云长径比。



(a) Al impact Al　　(b) Al impact TMC

(c) TMC impact Al　　(d) TMC impact TMC

图 2　5.52 km/s 速度撞击下模拟结果

Fig. 2　Simulation results under the velocity of 5.52 km/s

表 2　5.52 km/s 速度撞击下的模拟结果

Table 2　Simulation results under the velocity of 5.52 km/s

Case	Diameter of projectile/(mm)	Hole-diameter of the shield/(mm)	l/d	Scattering angle/(°)	Hole-diameter of the back wall/(mm)
Al impact Al	5.02	11.57	1.437	32.745	0.00
Al impact TMC	5.02	9.56	1.299	34.172	3.90
TMC impact Al	4.30	9.97	1.326	35.180	4.92
TMC impact TMC	4.30	8.17	1.302	35.970	4.35

对于较低速度的撞击,防护结果最好的情况是铝屏防护铝球撞击,最坏的是铝屏防护钛基复合材料球撞击,弹丸的材质对防护效果影响很大。其主要原因是,当撞击速度较低时,铝和钛的材料性能差异

表现得很突出。铝在低速撞击下能完全破碎成碎片云,包括铝弹丸和铝屏,所以,使用铝球撞击铝屏时碎片云质量分散得很好,而且出现了熔化等相变,使动能转化成内能。对于钛基复合材料而言,较低撞击速度不容易使钛基复合材料发生破碎,而且钛基复合材料的熔沸点远高于铝,所以钛基复合材料的破碎和熔化均不充分,部分质量集中的钛基复合材料会将铝质后板击穿。所以提高撞击速度,可以有效地改善钛基复合材料球和钛基复合材料屏的防护效果。

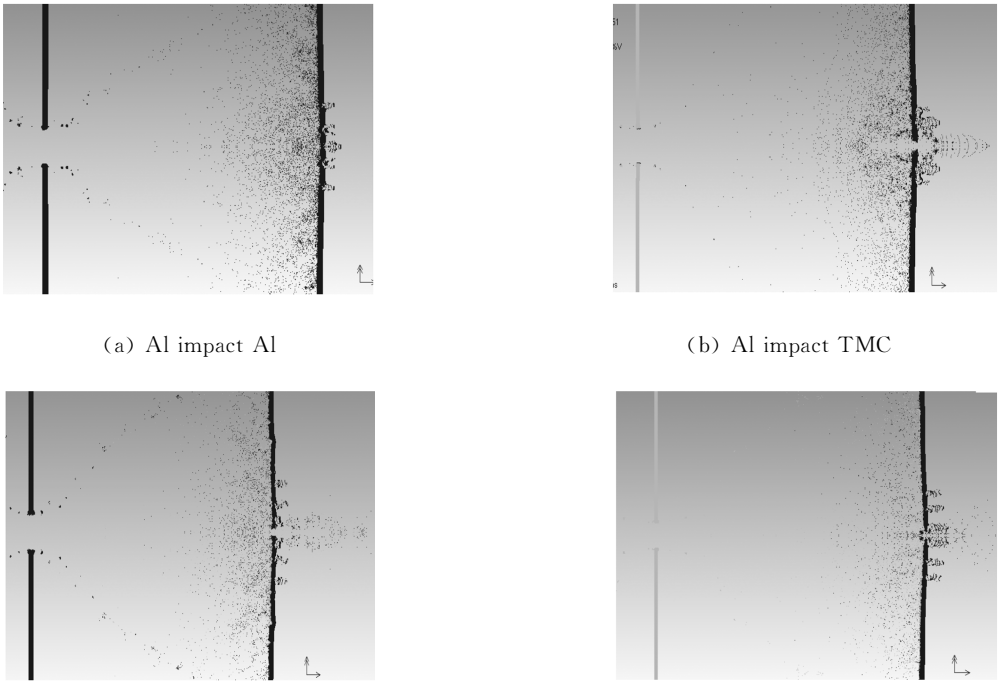
3.2 冲击速度为 7.00 km/s 的数值模拟

将撞击速度提高到 7.00 km/s,重复上述工况,得到的具体结果见表 3 和图 3。

表 3 7.00 km/s 撞击速度的数值模拟结果

Table 3 Simulation results under the velocity of 7.00 km/s

Case	Diameter of projectile/(mm)	Hole-diameter of the shield/(mm)	l/d	Scattering angle/(°)	Hole-diameter of the back wall/(mm)
Al impact Al	5.02	12.49	1.403	32.22	0.00
Al impact TMC	5.02	9.82	1.238	35.70	2.12
TMC impact Al	4.30	11.10	1.379	33.50	2.17
TMC impact TMC	4.30	8.80	1.362	38.20	1.87



(a) Al impact Al (b) Al impact TMC

(c) TMC impact Al (d) TMC impact TMC

图 3 7.00 km/s 速度撞击下的模拟结果

Fig. 3 Simulation results under the velocity of 7.00 km/s

从表 3 和图 3 的结果可以看出,使用铝球撞击铝板其后板损伤最小,背面有剥落但是没有击穿,用铝板防护钛基复合材料球撞击的效果最差,后板穿孔直径最大。在数值模拟过程中,当使用铝球撞击钛防护屏时,撞击区域的防护屏材料不能充分破碎,中心处有一质量集中区域,速度较高,并且几乎没有径向速度,相当于一个短柱弹丸撞击,所以对后板的破坏最大。当使用与铝球相同质量的钛基复合材料球撞击时,使用钛基复合材料防护屏其后板损伤较小,但是,凡是涉及钛基复合材料的撞击其后板都出现了穿孔。原因有两点:第一是因为钛基复合材料的强度、硬度和熔沸点远大于铝,所以相同动能撞击时钛的破碎没有铝的充分,产生了熔化甚至汽化,导致质量集中,且转化为内能的动能较少,对后板的毁伤

较严重;第二是撞击速度较低时已经能够使铝防护屏充分破碎。

根据 Eichelberger 和 Gekring 公式[15]

$$E/V = 0.25B \tag{4}$$

式中:E 为弹丸动能,V 是弹丸体积,B 是防护屏材料的硬度,将 $E=mv^2/2$ 代入(4)式可以得到密度、硬度和撞击速度的关系

$$v = \sqrt{0.5\rho B} \tag{5}$$

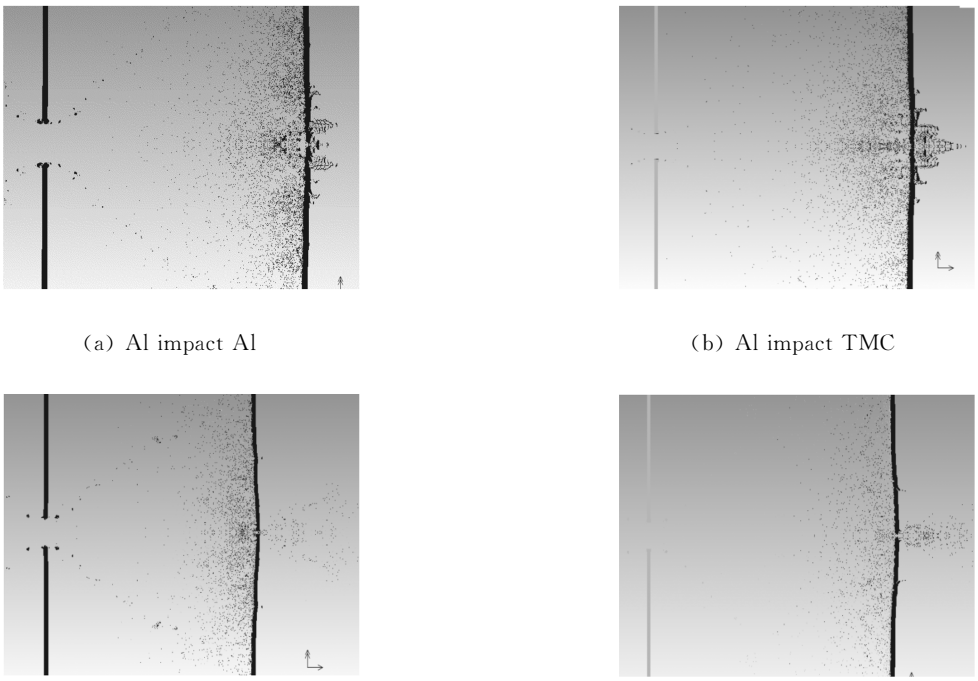
式中:v 是能产生碎片云的最小撞击速度(m/s),ρ 是弹丸的密度。通常使用的钛合金材料的硬度是铝的 3 倍左右,由(5)式看出,使用铝球撞击钛基复合材料防护屏能产生碎片云的速度是铝球撞击铝防护屏的 1.732 倍,所以要达到相同或者相近的防护效果,撞击钛基复合材料防护屏的速度应远大于撞击铝防护屏的速度,也就是说,对于使用同种材料的撞击,相比于同质量的铝防护屏,钛基复合材料防护屏适合于防护更高速度的撞击。

若使用与铝球相同质量的钛基复合材料球撞击防护结构,则铝屏和钛基复合材料屏能产生碎片云的撞击速度均需达到铝球撞击速度的 1.264 倍,即对高速撞击的防护效果好。但并不是一味地提高撞击速度就能得到好的防护效果,当撞击速度达到一定值时,防护屏和弹丸已经充分破碎,部分产生熔化甚至汽化,当继续提高撞击速度时,增加的动能只有小部分转化成内能,大部分直接作为碎片云的动能撞击到后板上,对后板的毁伤也会因为碎片云动能的增加而增加。

从表 3 中数据来看,由于钛基复合材料板较薄,形成的碎片云的长径比较小,质量分散,因而对后板的毁伤较轻。事实也是如此,在后板碎片云作用范围内,钛基复合材料防护屏的总体变形较小,但是由于其中心处的质量集中导致中心出现穿孔,从而使防护效果不如铝屏。而对于钛基复合材料球的撞击,显然钛基复合材料屏的防护效果优于铝屏。

3.3　冲击速度为 8.00 km/s 的数值模拟

将撞击速度提高到 8.00 km/s,进行上述几种材料撞击的模拟计算,得到同质量的弹丸和防护屏的结果见图 4 和表 4。



(a) Al impact Al　　(b) Al impact TMC

(c) TMC impact Al　　(d) TMC impact TMC

图 4　8.00 km/s 速度撞击下的模拟结果

Fig. 4　Simulation results under the velocity of 8.00 km/s

表 4 8.00 km/s 撞击速度的数值模拟结果

Table 4 Simulation results under the velocity of 8.00 km/s

Case	Diameter of projectile/(mm)	Hole-diameter of the shield/(mm)	l/d	Scattering angle/(°)	Hole-diameter of the back wall/(mm)
Al impact Al	5.02	13.13	1.430	33.31	1.20
Al impact TMC	5.02	10.18	1.182	39.88	0.00
TMC impact Al	4.30	11.75	1.433	30.34	1.05
TMC impact TMC	4.30	9.05	1.332	35.95	0.80

从图 4 和表 4 可以看出，当撞击速度提高到 8.00 km/s 时，铝屏的防护结果劣于钛基复合材料屏，这是由于在撞击过程中增加的动能对铝相变的贡献不如对钛基复合材料相变的贡献大，所以相比于 7.00 km/s 撞击的情况，铝屏的防护效果下降，钛基复合材料屏的防护效果提高。这时充分体现了钛基复合材料屏的优势：前板穿孔小，打下来的物质少，板薄有利于碎片云的飞散，使质量分散，在垂直于撞击方向上的动能增加，沿撞击方向上的动能则减少，从而对后板的毁伤减弱，钛基复合材料屏的防护明显优于铝屏。

将 8.00 km/s 速度撞击的模拟结果与 5.52 和 7.00 km/s 撞击结果进行对比发现，铝球撞击铝板时，撞击速度为 7.00 km/s 时的情况最好，当速度进一步提高后，增加的动能比转化的内能大得多，所以，后板的损伤变得严重，说明在 7.00 km/s 速度撞击时铝已经充分破碎和熔化，甚至产生部分汽化。使用钛防护屏，8.00 km/s 撞击速度时其防护效果最好，同时后板损伤区域也最大，这是因为速度提高，钛基复合材料的熔化和破碎越来越充分，同样撞击方向上动能也越来越大，在较低速度时不能影响后板的区域也因为动能的提高而对后板产生了破坏。由于中心区域破碎飞散和熔化得较充分，因而对后板的损伤迅速降低，在 7.00 km/s 撞击时后板还有穿孔，但是在 8.00 km/s 时后板没有被击穿，只是出现了一片整体剥落，中心撞击能量已经分散到了剥落范围内。相比于铝防护屏，钛基复合材料防护屏的缺点是中心处的能量过于集中，当速度足够高时，其能量集中程度已经不足以击穿后板。

4 理论分析模型

对超高速撞击形成的碎片云进行理论分析时，可以做某些假定以简化模型。将碎片云的运动分解为撞击轴上质心系的平动和质心系中碎片云的球形膨胀，并假定碎片是均布的空心球壳。

首先在不考虑转化为内能的动能损失情况下列出动量守恒方程和能量守恒方程

$$\frac{1}{2}m(u^2+v^2)=\frac{1}{2}(m_1+m_2)(u^2+v^2)=\frac{1}{2}m_1w^2 \tag{6}$$

$$(m_1+m_2)u=m_1w \tag{7}$$

式中：m_1 为弹丸质量，m_2 为前板对碎片云质量的贡献，u、v、w 分别为质心速率、质心系中碎片膨胀速率和弹丸初始速率。由(6)式和(7)式可得到

$$v=\frac{\sqrt{m_1m_2}}{m_1+m_2}w,\quad u=\frac{m_1}{m_1+m_2}w \tag{8}$$

图 5 为质心系下碎片云的膨胀，球壳厚度为 Δr，可考虑前半球部分的动量为破坏后板的动量

$$P=\int_r^{r+\Delta r}\frac{mR^2}{4\pi\Delta rR^2}\mathrm{d}R\int_0^{\pi/2}(u+v\cos\varphi)\sin\varphi\mathrm{d}\varphi\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\theta=$$

$$\frac{m}{2}\left(u+\frac{v}{2}\right) \tag{9}$$

$$P=\frac{1}{2}m_1w+\frac{1}{4}\sqrt{m_1m_2}w \tag{10}$$

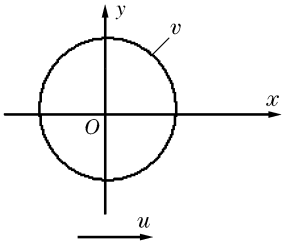


图 5 碎片云膨胀模型

Fig. 5 Model about expend of debris

相应地可以计算碎片云的长径比 λ 和飞散角 θ

$$\lambda = \frac{(u+v)t}{2vt} = \frac{1}{2}\left(\frac{u}{v}+1\right) = \frac{1}{2}\left(1+\sqrt{m_1/m_2}\right) \tag{11}$$

$$\tan\theta = vt/ut = v/u = l/s \tag{12}$$

$$l = vs/u = s\sqrt{m_2/m_1} \tag{13}$$

式中:l 为后板的毁伤半径,s 为两板间距。得到后板的破坏范围,进而可得到平均作用在后板上的动量

$$\frac{P}{\pi l^2} = \overline{P} = \frac{2m_1^2 w + w\sqrt{m_1^3 m_2}}{4\pi m_2 s^2} \tag{14}$$

可见对于较大的 m_2,碎片云的长径比较小,碎片更分散,且后板单位面积上受到的平均冲量较小。即在不考虑动能减少的情况下,对于同等厚度的前板,较大密度材料的防护效果较好。考虑动能损失时,可认为主要为弹和板的塑性变形做功使得内能增加,在冲击条件下可不考虑其弹性,动能减少的功可表示为

$$W = a\int_0^{\varepsilon_f} d\cdot\sigma\mathrm{d}\varepsilon \tag{15}$$

式中:ε_f 为失效时的应变;$d\cdot\mathrm{d}\varepsilon$ 表示塑性变形;a 表示面积;σ 为当前应变和应变率下的应力,由 Johnson-Cook 模型给出

$$\sigma = (A+B\varepsilon^n)\left[1+C\left(\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m\right]\left[1-D\left(\frac{T-T_0}{T_0}\right)^k\right] \tag{16}$$

式中:A、ε_0、T_0 分别表示准静态实验下的屈服应力、应变速率和温度;$\dot{\varepsilon}$ 为变形速率,T 为变形温度;B、n、C、m、D、k 为 6 个待定材料参数。如果不考虑温度,且 $m=1$,则

$$\sigma = (A+B\varepsilon^n)\left[1+C\left(\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \tag{17}$$

将(17)式代入(15)式有

$$W = \pi dr^2\int_0^{\varepsilon_f}(1+C\ln\dot{\varepsilon})\left(A\mathrm{d}\varepsilon+\frac{B}{n+1}\mathrm{d}\varepsilon^{n+1}\right) \tag{18}$$

假设应变率不随应变发生变化,在变形过程中保持不变,则(18)式积分结果为

$$W = \pi dr^2(1+C\ln\dot{\varepsilon})\left(A\varepsilon_f+\frac{B}{n+1}\varepsilon_f^{n+1}\right) \tag{19}$$

(18)式和(19)式是冲塞前板材料的塑性变形功,对于弹丸来说

$$W_p = 4\pi r^3(1+C\ln\dot{\varepsilon})\left(A\varepsilon_f+\frac{B}{n+1}\varepsilon_f^{n+1}\right) \tag{20}$$

板和弹丸的塑性变形功之和为动能的减少量。其中板和弹丸的应变率分别为

对于板　　$\dot{\varepsilon} = v/d$　　(21)

对于弹丸　　$\dot{\varepsilon}_p = v/r$　　(22)

将表 5 中的材料参数代入相应公式,可得到铝和钛的动能损失。

表 5　Johnson-Cook 模型参数

Table 5　Parameters of Johnson-Cook model

Material	A/(MPa)	B/(MPa)	n	C
TMC	1135	250	0.20	0.032
Al	265	426	0.34	0.015

铝板和钛基复合材料板的塑性变形功分别为 W_{Al} 和 W_{TMC},若两板质量相同,则板厚比 $d_{Al}/d_{TMC} = \rho_{TMC}/\rho_{Al} = 1.6$。若为同样的弹丸、同样的撞击速度,则

$$\frac{W_{Al}}{W_{TMC}} = 1.6\,\frac{[1+0.015\ln(\dot{\varepsilon}_{Al}/\dot{\varepsilon}_0)](265\varepsilon_{Al,f}+318\varepsilon_{Al,f}^{1.34})}{[1+0.032\ln(\dot{\varepsilon}_{TMC}/\dot{\varepsilon}_0)](1135\varepsilon_{TMC,f}+208\varepsilon_{TMC,f}^{1.2})} \tag{23}$$

对于撞击速度为数千米每秒的情况,同质量的钛基复合材料板和铝板,其膨胀速度 $v = w\sqrt{m_1 m_2}/(m_1+m_2)$ 最大不超过初始速度的一半,与初始速度同量级,则 $\dot{\varepsilon} = v/d$,其量级为 10^6,$\dot{\varepsilon}_0 = 1\ \mathrm{s}^{-1}$,则(23)式的比值约为

$$\frac{W_{\mathrm{Al}}}{W_{\mathrm{TMC}}}=\frac{(513\varepsilon_{\mathrm{Al,f}}+615.6\varepsilon_{\mathrm{Al,f}}^{1.34})}{(1643.5\varepsilon_{\mathrm{TMC,f}}+301\varepsilon_{\mathrm{TMC,f}}^{1.2})} \tag{24}$$

由文献[16-17]中的结果可以看出,钛基复合材料的失效应变远大于铝的,所以本研究所给出的 $W_{\mathrm{Al}}/W_{\mathrm{TMC}}<1$,即用钛基复合材料作防护屏时其碎片云动能更小,防护效果更好。在撞击速度较低时,碎片破碎不完全,分布不均匀,存在动量集中,作用在后板上的动量不均匀,在中心处会出现穿孔现象。可见在撞击速度很高、使弹丸和防护屏完全破碎时,钛基复合材料防护屏的防护效果优于铝防护屏。

5 结 论

采用光滑粒子方法,研究了铝球对钛基复合材料防护屏及钛基复合材料球对铝防护屏的超高速撞击过程。通过数值分析可以看出,撞击速度较低时铝屏的防护效果好于钛屏,随着速度的提高,铝屏的防护效果逐渐下降,而钛屏的防护效果逐渐提高,当撞击速度提高到 7.00 km/s 时,铝屏的防护效果与钛屏相当,这时钛屏穿孔较小。当速度提高到 8.00 km/s 时,钛屏的防护效果明显优于铝屏。通过以上分析可以得出如下结论:

(1) 受弹丸撞击时,钛防护屏的穿孔直径较小,有利于多次防护;

(2) 钛防护屏使碎片云的长径比减小,增加了碎片云的径向动能,使撞击方向上的动能减小;

(3) 钛的熔沸点和强度、硬度较高,密度较小,适合于对较高撞击速度的防护;

(4) 使用钛防护屏时,后板的毁伤范围较小;

(5) 通过理论分析得到,在一定冲击条件下钛屏的防护效果优于铝屏。

References:

[1] Tang M, Bai J S, Li P, et al. Numerical Simulation of Hypervelocity Impact of Al-Spheres on Bumper [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2007, (3): 23-27. (in Chinese)
唐 蜜, 柏劲松, 李 平, 等. 铝球超高速撞击防护屏的数值模拟研究 [J]. 火工品, 2007, (3): 23-27.

[2] Zhang W, Pang B J, Jia B. 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. 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.

[3] Guan G S, Zhang W, Pang B J. 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. 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.

[4] Chi R Q, Guan G S, Pang B J, et al. Models for Momentum of Debris Cloud and Ejecta Produced by Hypervelocity Impacts of Aluminum Spheres with Thin Aluminum Sheets [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(1): 59-64. (in Chinese)
迟润强, 管公顺, 庞宝君, 等. 碎片云动量特性数值仿真研 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(1): 59-64.

[5] Jia G H, Huang H, Hu Z D. Simulation Analyze of Hypervelocity Impact Perforation [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(1): 47-53. (in Chinese)
贾光辉, 黄 海, 胡震东. 超高速撞击数值仿真结果分析 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 47-53.

[6] Hu Z D, Huang H, Jia G H. The Characteristics of Debris Cloud Produced by Hypervelocity Impact [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 747-749. (in Chinese)
胡震东, 黄 海, 贾光辉. 超高速撞击碎片云特性分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 747-749.

[7] Jia Bin, Ma Z T, Pang B J. Numerical Simulation Investigation in Hypervelocity Impact on Shield Structure Containing Aluminum Foam [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6): 453-459. (in Chinese)
贾 斌, 马志涛, 庞宝君. 含泡沫铝防护结构的超高速撞击数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 453-459.

[8] Jia G H, Huang H. Hypervelocity Impact SPH Simulation on Honeycomb Type Plate [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2004, 24(4): 145-147. (in Chinese)
贾光辉, 黄 海. 蜂窝夹层板超高速撞击 SPH 仿真初探 [J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(4): 145-147.

[9] Li J Z, Huang F L, Zhang Q M. A Study of Hypervelocity Impact on 3D BC/SiC Composite Material Dual-Plate Armor [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(2): 163-169. (in Chinese)
李金柱, 黄风雷, 张庆明. 超高速弹丸撞击三维编织 C/SiC 复合材料双层板结构的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 163-169.

[10] Zhao Y Q, Xi Z P, Qu H L. Current Situation of Titanium Alloy Materials Used for National Aviation [J]. Journal

of Aeronautical Materials,2003,23:215-219. (in Chinese)
赵永庆,奚正平,曲恒磊. 我国航空用钛合金材料研究现状 [J]. 航空材料学报,2003,23:215-219.
[11] Ma Z T,Zhang W,Jia B,et al. Numerical Simulation of Projectile Hypervelocity Impact on Semi-Infinite Aluminum Plates [J]. Materials Science and Technology,2004,12(3):283-286. (in Chinese)
马志涛,张　伟,贾　斌,等. 弹丸超高速撞击半无限厚铝板数值模拟 [J]. 材料科学与工艺,2004,12(3):283-286.
[12] Yang Y,Zeng Y,Wang B F. Analysis of Dynamic Constitute of TC16 Based on Johnson-Cook Model [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals,2008,18(3):505-510. (in Chinese)
杨　扬,曾　毅,汪冰峰. 基于Johnson-Cook模型的TC16钛合金动态本构分析[J]. 中国有色金属学报,2008,18(3):505-510.
[13] 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.
[14] Tang M,Bai J S,Li P. Factors Analysis of Debris Cloud's Shape of Hypervelocity Impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2007,21(4):425-432. (in Chinese)
唐　蜜,柏劲松,李　平. 超高速撞击中影响碎片云形状因素分析 [J]. 高压物理学报,2007,21(4):425-432.
[15] Zhang Q M,Huang F L. Introduction to Hypervelocity Impact Dynamics [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.
[16] Xie R Z,Zhang F J,Tian C J. The Study on Compressing Dynamic Mechanical Characteristics of LY12Al under the Conditions of High Temperature and Strain Rate [A]//The 7th National Conference of Shock-Wave Dynamics [C]. Kunming,2005. (in Chinese)
谢若泽,张方举,田常津. 高温高应变率下 LY12 铝的动态压缩力学性能研究 [A]//全国第七届冲击动力学讨论会文集 [C]. 昆明,2005.
[17] Wang X F,Lu F Y,Lin Y L. Study on Dynamic Mechanical Characteristics of TC4 Titanium [A]//The 5th National Conference of Explosion Mechanical Experiment Technology [C]. Xi′an,2008:230-236. (in Chinese)
王晓峰,卢芳云,林玉亮. TC4 钛合金的动态力学性能研究 [A]//第五届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集 [C]. 西安,2008:230-236.

Dynamic Behavior of Titanium Matrix Composites under Hypervelocity Impact

SONG Wei-Dong[1], LI Jian-Qiao[1], LIU Hai-Yan[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Based on experimental results, numerical simulations were performed to study the hypervelocity impact of aluminum balls against aluminum targets, verifying the reliability of the numerical model. Hypervelocity impact simulations under three different velocities of 5.52, 7.00 and 8.00km/s against aluminum target and titanium matrix composite target with the same mass of the aluminum target were simulated. The process of aluminum balls with a diameter of 5.02 mm and titanium matrix composite balls with the same mass of the aluminum balls impacting aluminum shields and titanium matrix composite shields were analyzed by using a dynamic analysis program under the above three velocities, respectively. It can be found that the protective effect of the titanium matrix composite shields is more efficient than that of the aluminum shields when increasing the impact velocities. When the velocity is constant, the protective effect of titanium matrix composite shield against titanium matrix composite ball is good and the protective effect of aluminum shield against aluminum ball is good. With a theoretical analysis on impact process, it can be concluded that protective effect of the titanium matrix composite shields is more efficient than that of the aluminum shields.

Key words: hypervelocity impact; titanium matrix composites; smoothed particle hydrodynamics method; numerical simulation