

文章编号: 1001-1455(2005)01-0047-07

超高速撞击数值仿真结果分析*

贾光辉, 黄海, 胡震东

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083)

摘要: 为了分析超高速撞击过程的宏观现象和内在机理, 对 $\varnothing 9.53$ mm 铝球以 6.64 km/s 的速度撞击 2.2 mm 厚的铝靶的 SPH 仿真结果进行了量化分析。结果表明: 采用 SPH 方法以及 Steinberg 弹塑性模型和 Mie-Grüneisen 状态方程, 可获得与试验相符的仿真结果; 球形破片开坑或穿孔直径遵循初始快速增加、然后缓慢增加, 直至稳定的变化规律; 破片/靶板界面的最大撞击压力比材料强度大两个量级以上; 靶板阻力最大值发生在破片最大直径侵入靶板时刻; 碎片云的运动过程具有自相似演化特征, 其运动范围不会超出碎片云的包络圆锥范围。

关键词: 固体力学; 超高速撞击; 光滑粒子方法; 数值仿真; 碎片云; 压力

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 130·3530 **文献标志码:** A

1 引言

由于近年来航天事业的迅速发展, 超高速撞击研究日益引起广泛的关注, 以飞行器防护为典型应用背景的超高速撞击研究^[1], 集中表现在撞击后碎片云特征研究和寻求适当的防护结构或材料方面。超高速撞击数值仿真技术的发展有赖于计算机技术的发展和新算法的出现。数值仿真技术需要试验校核, 材料模型参数也源于试验。但仿真技术具有如下优势: 获取的物理量信息在时间和空间上更全面; 动力学过程具有完全重复性; 需求条件相对简单、费用低廉; 可突破发射技术达不到的速度范围等。但是数值仿真技术的使用也会出现误区, 因为仿真过程通常产生的大量数据结果及可视化图像结果, 使人们的注意力容易停留在丰富的仿真结果上, 以为到此问题已得到解决, 从而对物理过程的本质研究弱化, 造成了能解决复杂问题, 却不去探讨内在规律的误区, 削弱了数值仿真技术的应用价值。

事实上, 对数值仿真结果进行深入分析, 将有利于机理性问题的研究。比如超高速撞击贯穿机理是靶板穿孔形成和碎片云形成这一宏观现象的基础, 但人们过多地研究靶板穿孔和碎片云宏观特征, 而对贯穿机理的研究显得不够。本文中依照源于试验的算例, 首先探索不同的算法在超高速撞击仿真问题上的适用性, 研究材料模型对 SPH 仿真结果的影响, 在获得与试验结果一致的仿真结果的基础上, 对超高速撞击贯穿过程的变形、物理量的变化规律及碎片云的演化过程进行分析。

2 超高速撞击过程仿真结果

要对超高速撞击过程的仿真结果进行分析, 必须有符合试验结果的成功的仿真算例。文献[2]中给出了一些撞击试验结果, 本文的仿真算例取自该文献: 铝球直径为 9.53 mm; 薄铝板厚 2.2 mm; 球直径与靶板厚度比为 4.33; 撞击速度为 6.64 km/s, 垂直撞击。有关该算例的试验照片见图 1, 试验结果显示碎片云的前端速度高、后部速度低, 最大速度与球的入射速度接近, 靶孔径约为球直径的 3 倍。

本文中采用 LS-DYNA 非线性动力学软件^[3]用于计算撞击问题的几种算法对该算例进行了仿真计算, 计算结果表明: 该软件提供的传统的拉格朗日实体有限单元法和欧拉空间固定网格法不能很好地解决超高速撞击问题。图2为采用拉格朗日实体单元法的计算结果, 结果表明单元网格畸变使计算过程

* 收稿日期: 2004-04-26; 修回日期: 2004-10-20

基金项目: 中国国家博士后科学基金项目(2004035267)

作者简介: 贾光辉(1966—), 男, 博士后, 副教授。

过早地中断(图 2 中 $t=2.0807 \mu\text{s}$ 为从撞击开始算起的时间,下同)。图 3 给出了采用欧拉空间固定网格法的计算结果,该方法计算的物理过程时间加长,但是结果表明它不能很好地模拟碎片云的形状。

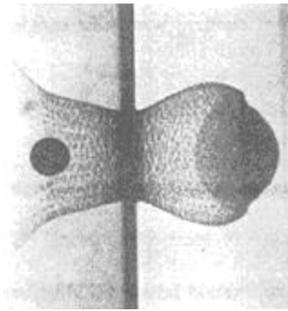


图 1 超高速撞击试验图片

Fig. 1 Hypervelocity impact photograph

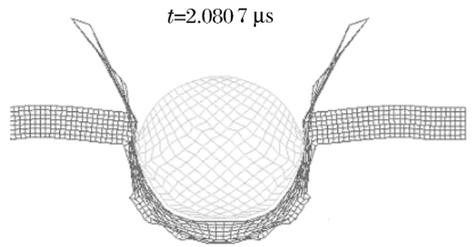


图 2 拉格朗日有限元法结果(变形图)

Fig. 2 Mesh deformation of Lagrangian FEM

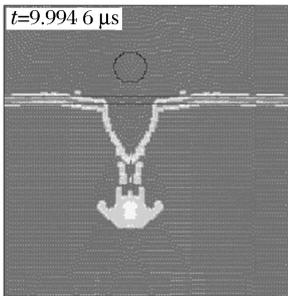


图 3 欧拉网格算法结果(密度图)

Fig. 3 Density contour of Euler method

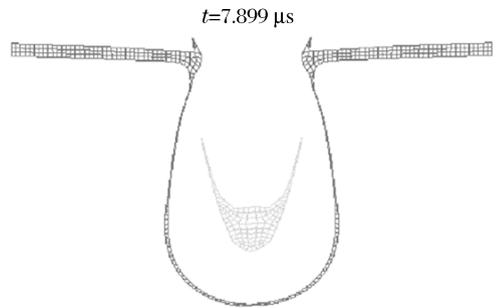


图 4 自适应算法单元变形图

Fig. 4 Mesh deformation of self-adaptive FEM

拉格朗日有限元自适应方法,较好地保留了拉格朗日算法的优势,同时又解决了单元畸变造成的计算中断,使得计算能够更好地进行下去。其做法是对于变形过于激烈的地方,依据设定好的单元重分参数(如单元边长)对畸变单元区域进行网格再划分,使得新的单元网格更合理。本算例结果表明自适应算法的确可以使得物理过程的计算更完全(见图 4),但该计算结果与试验结果(见图 1)也不相符合,主要表现在弹靶材料未能形成离散的碎片状态,因此该方法也不能直接应用于超高速撞击问题。

最近的 LS-DYNA 版本增加了无网格光滑粒子动力学方法(SPH 方法),可用于解决超高速撞击问题,SPH 方法每个计算步的执行步骤见图 5^[3]。无网格方法是近年来发现的求解守恒定律的重要方法,可用来解决连续小变形和大变形物理问题,包括连续介质力学求解、爆炸模拟、固体的延性和脆性断裂问题等。从计算角度看,它是将连续的物质表示为带有速度的运动粒子的集合,每一个粒子均是已知物理特性的插值点,这样整个问题就转化为采用规则插值函数,对所有粒子进行插值计算的问题。

本文中应用 SPH 方法对上述算例进行了计算,同时考虑了材料模型对仿真结果的影响。共采用四种材料模型进行计算,表 1 为有关靶孔直径的计算结果及算例试验结果,可见 Steinberg 弹塑性模型的计算结果最为接近试验结果,流体模型的计算结果也较好。表 2 为计算得到的不同瞬时的弹靶界面

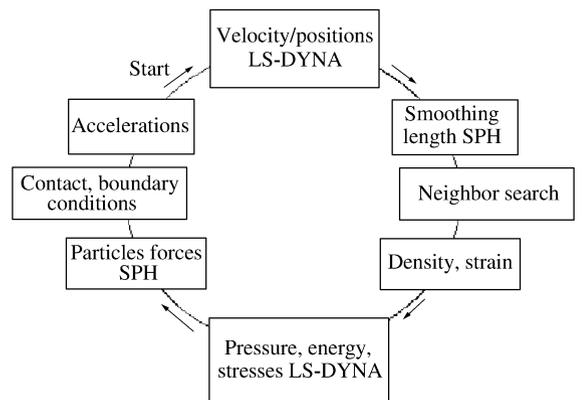


图 5 LS-DYNA SPH 方法计算步骤

Fig. 5 SPH scheme of LS-DYNA

表 1 靶孔直径
Table 1 Diameters of the bar holes

材料模型及试验	状态方程	靶板孔直径/mm
弹性模型		18
理想弹塑性		20
Stenberg 弹塑性	Mie-Grüneisen	29
流体模型	Mie-Grüneisen	32
试验结果		28

表 2 弹靶界面瞬时最大压力

Table 2 The maximal instantaneous pressure on the interface between ball and target

材料模型	状态方程	最大压力/GPa			
		$t=0.2 \mu\text{s}$	$t=0.6 \mu\text{s}$	$t=1.0 \mu\text{s}$	$t=1.4 \mu\text{s}$
弹性模型		36.94	44.73	39.18	23.01
理想弹塑性		37.36	47.18	50.65	53.03
Stenberg	Mie-Grüneisen	187.21	127.69	78.16	65.78
流体模型	Mie-Grüneisen	184.82	129.26	77.22	66.88
一维理论	10 mm 铝球以 7.0 km/s 的速度撞击 2.5 mm 厚的铝靶, Hugoniot 压力为 95 GPa ^[4]				

本算例仿真得到的结果见图 6、图 7。与文献[2]的试验结果相比,碎片云的形状与试验结果符合,碎片云速度分布存在头部大、尾部小的典型分布特征,碎片云速度值也符合试验结果。可见本文中采用 SPH 方法所得到的计算结果符合实际情况,可用于分析超高速撞击贯穿过程中物理量的变化规律。

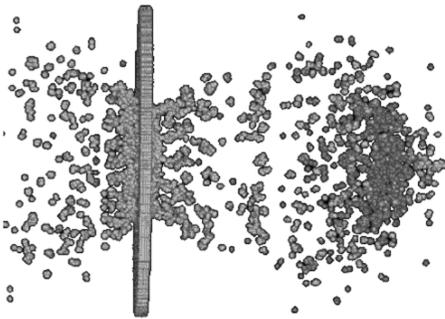


图 6 SPH 计算粒子运动结果
Fig. 6 SPH particles distribution

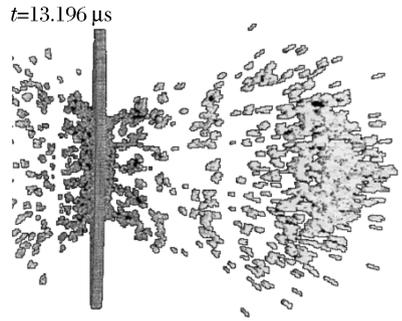


图 7 SPH 计算粒子运动速度矢量
Fig. 7 SPH particle velocity field

3 仿真结果分析

超高速撞击仿真计算到此已得到解决,但是数值仿真给出的大量的信息还有许多值得研究。

3.1 弹靶变形及穿孔直径

首先来看超高速贯穿过程的破片/靶板的变形过程图(见图 8)。由图 8 可以看出,破片最大直径没入靶板前(见图 8(d)),靶板主要发生塑性流动变形,此阶段靶板受到来自破片的高速撞击压力,压力方向与球外表面法向相同,靶板粒子的变形运动呈球面放射状。当破片的最大变形直径(大于破片最大直径)形成时,构成碎片云的物质基本形成,见图 8(i)。在此阶段弹靶双方材料均产生很大的变形,直至失去完整性。图 9 给出了单独球形破片的变形过程图(试验手段难以给出该变形图),说明破片变形随着破片向前运动而加剧。图 8(i)、图 9(i)共同说明了穿孔直径主要由穿过靶板的球形破片的最大变形直

径决定,此时,靶孔的直径为 1.7 cm,为球原始直径的 1.8 倍。穿透之后,靶板的孔径继续缓慢增大,直至 $t=20 \mu\text{s}$ 时刻的 2.94 cm,为球原始直径的 3 倍,见图 10。穿孔直径的变化,与破片的形状密切相关。对于球形破片而言,穿孔直径(此处将未穿透前的撞击区直径通称为穿孔直径)遵循初始快速增加、然后缓慢增加,直至稳定不变这一规律。

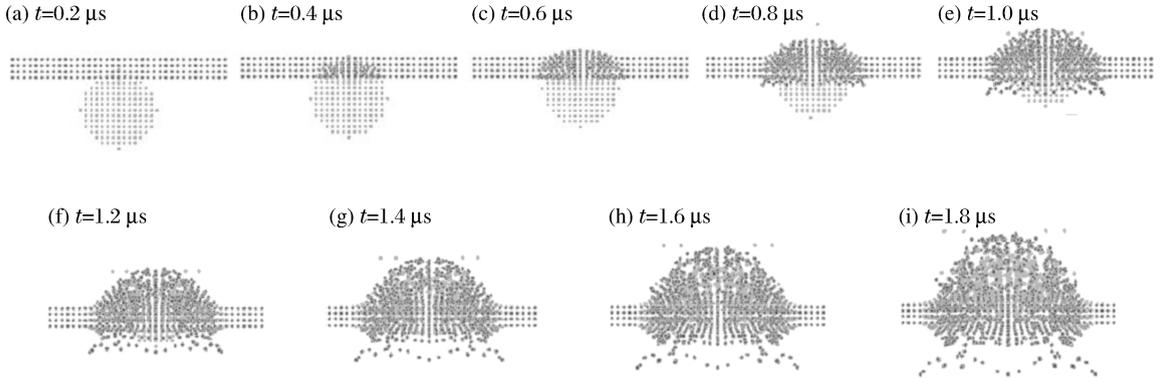


图 8 球/板超高速撞击过程

Fig. 8 Sphere/plate hypervelocity impact process

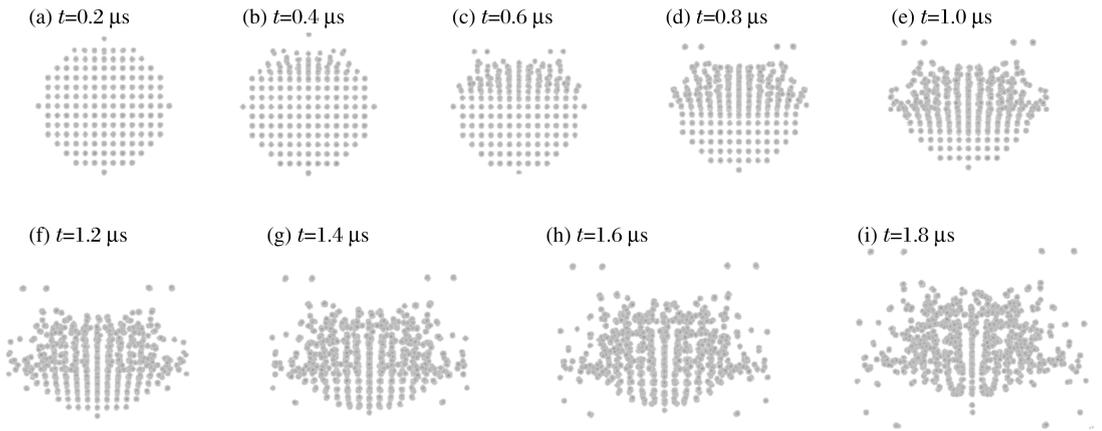


图 9 超高速撞击球的变形过程

Fig. 9 Sphere deformation process

3.2 物理量变化及碎片云形成

通过分析撞击压力可以得到破片/靶板变形直至失去完整性的内在原因,图 11 给出了球/板界面最大压力变化曲线,说明撞击压力曲线有陡峭的上升段(从零到最大值时间很短)和相对缓慢的下降段,最大峰值接近 200 GPa(本文条件下)。超高速撞击具有的极高压力使得任何材料在此高压条件下,力学行为都类似于可压缩流体,可以认为采用完全流体材料模型进行仿真计算将是问题解答的一次近似。

球形破片的穿孔过程,受到靶板的惯性阻力,它是由弹靶界面的压力对接触面的积分得到的。该阻力作用的结果使得球形破片减速、动能减小,同时使

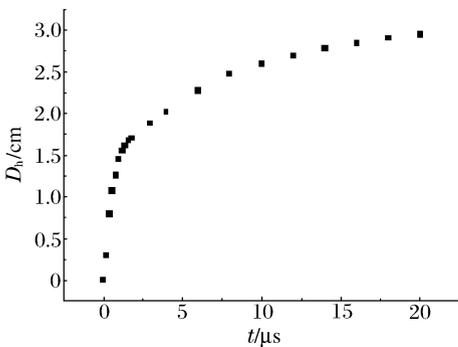


图 10 板孔直径时间曲线

Fig. 10 Diameter of the hole of plate vs. curve

得靶板受撞击临域的材料发生变形、获得速度。球形破片动能的减小量是靶板防护效果的特征量之一。由于靶板对破片的阻抗力的变化规律与弹靶接触面积有关,因此与弹靶界面的最大压力变化规律不同,阻抗力最大值发生在球形破片最大直径侵入靶板时刻。此后,破片进一步变形,形成最大变形直径,压力的下降导致阻抗力随之减小,见图 12。

撞击过程中,球形破片经历了快速加载和缓慢卸载过程,破片受到的高压先使其变形、熔化、流动,但是仍然作为整体存在,但是后续卸载波使其分裂,最终形成离散形状的碎片云。图 13 说明了球中心点的压力变化过程,在破片最大直径没入靶板时刻,该点的压力达到最大值,之后压力迅速卸载直至出现负压,图 14 给出了球中心粒子的应变曲线,说明在撞击过程中应变单调增加,直至达到一个最大值,粒子脱离球体,形成碎片云的颗粒。

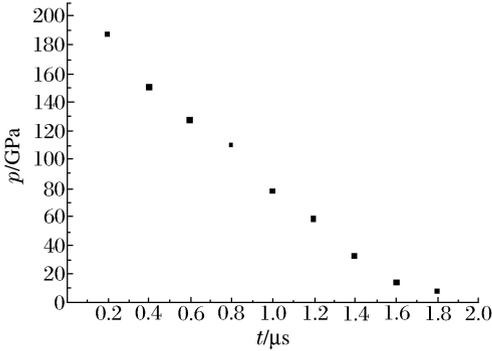


图 11 球/板界面最大压力

Fig. 11 Interface pressure vs. time

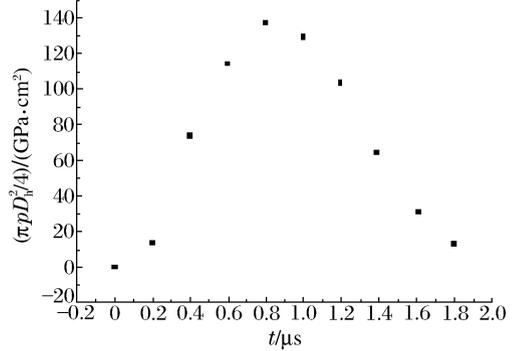


图 12 阻抗力时间曲线

Fig. 12 Resistance vs. time

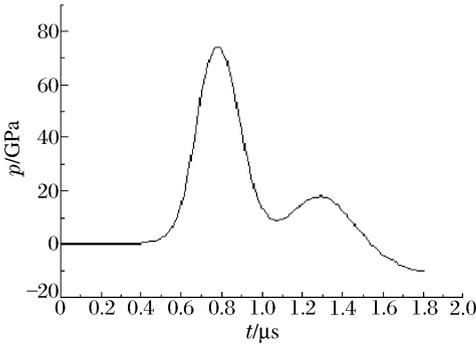


图 13 球中心粒子压力曲线

Fig. 13 Pressure at center of sphere

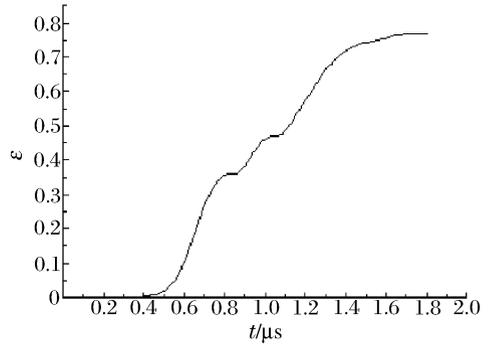


图 14 球中心粒子应变曲线

Fig. 14 Strain at center of sphere

3.3 撞击过程特征点及破片动量动能变化

经过上述分析可以发现,在撞击贯穿过程中有两个时间特征点值得注意,一个是破片的原始最大直径没入靶板时刻,该时刻对应了靶板的最大抗力发生时刻(见图 12),对应了球动能曲线基本平稳时刻(见图 15),也恰好与球形破片的中心粒子的压力峰值相对应,对于本算例,约在 $t = 0.8 \mu\text{s}$ 。另一个是破片的最大变形直径形成时刻(见图 8、图 9),它对应了最大穿孔直径,弹靶碎片云物质基本形成时刻,以及贯穿阶段的结束时刻,对于本算例,约在 $t = 1.8 \mu\text{s}$ 。

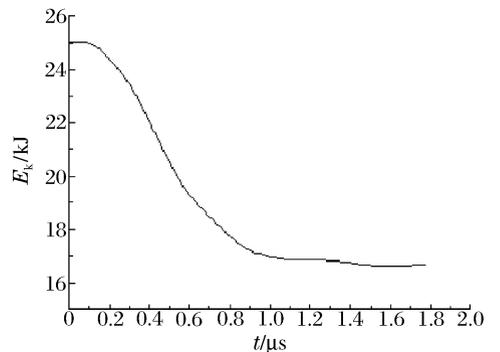


图 15 撞击过程球动能变化

Fig. 15 Kinetic energy

考察破片动量和动能变化:球体与目标撞击后,撞击过程是一个复杂的动力学过程和冲击绝热过程。在这一过程中,球体动量中部分转化为靶板受撞击部分材料的动量,形成同向运动的球体/靶体的混合碎片云。本文条件下,计算结果表明:球体动量减小量为 17.5%,球体的动能减小量约为 33%(见图 15),而球碎片云的剩余动能仍然高达撞击动能的 60%以上,该部分能量将仍然是继续撞击后续靶板或者毁伤内部结构的主要能量部分。

3.4 碎片云的自相似特征及包络圆锥

图 16 为 SPH 仿真计算得到的碎片云瞬时图形。由仿真得到的碎片云各点的位置坐标和相应的速度分量,可知对于碎片云中的任选点,其轴向位置坐标与径向位置坐标的比值等于该点的轴向速度与径向速度的比值,这说明碎片云的运动演化过程具有自相似特征。

碎片云的自相似演化过程可用图 17 来表示,曲线代表不同时刻的碎片云的轮廓线,直线表示碎片云各时刻轮廓线的包络线,二直线的夹角表示碎片云的喷射角。包络线的意义在于:随时间增大,无论碎片云运动到那个位置,都不会超出由该包络线定义的圆锥区域。该圆锥的顶角与弹靶条件有关,一旦弹靶条件确定,该圆锥即被唯一确定,而不随时间变化。本文中称之为碎片云包络圆锥。

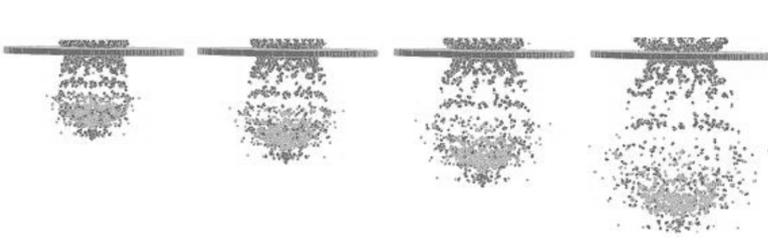


图 16 SPH 仿真不同时刻的碎片云图形
Fig. 16 Debris cloud of SPH simulation

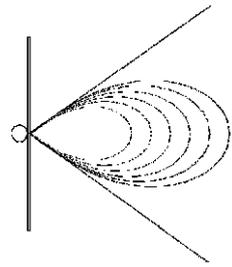


图 17 碎片云演化图形
Fig. 17 Debris cloud evolution

4 结 论

(1)对 $\varnothing 9.53$ mm 铝球以 6.64 km/s 速度对 2.2 mm 厚铝靶超高速撞击贯穿过程的仿真结果进行了分析,发现采用 SPH 方法,并考虑 Steinberg 弹塑性模型和 Mie-Grüneisen 状态方程,仿真获得的撞击压力符合理论计算结果,且碎片云粒子的速度及其分布特征、碎片云的外形符合试验结果。

(2)超高速撞击过程仿真结果显示,球形破片开坑或穿孔直径遵循初始快速增加、然后缓慢增加,直至稳定的变化规律。

(3)仿真结果表明,破片/靶板界面的最大撞击压力曲线有陡峭的上升段和相对缓慢的下降段,超高速撞击具有极高压力,材料的力学行为类似可压缩流体。

(4)球形破片的穿孔过程,受到靶板的惯性阻力,使球形破片减速、动能减小,本文条件下,动能减小量约为 33%,阻力最大值发生在球形破片最大直径侵入靶板时刻,此后破片进一步变形,弹靶界面压力下降,阻力随之减小。

(5)撞击贯穿过程有两个时间特征点值得注意,一是破片的原始最大直径没入靶板时刻,另一个是破片的最大变形直径形成时刻。前者对应了靶板的最大抗力发生时刻,对应了球动能曲线基本平稳时刻,也恰好与球形破片的中心粒子的压力峰值相对应;后者对应了最大穿孔直径,弹靶碎片云物质基本形成时刻,即贯穿阶段的结束。

(6)仿真结果表明,对于碎片云确定的粒子,其轴向位置坐标与径向位置坐标的比值等于该点的轴向速度与径向速度的比值,碎片云的运动过程具有自相似演化特征。且碎片云都不会超出碎片云的包络圆锥范围。

参考文献:

- [1] 曲广吉, 韩增尧. 空间碎片超高速撞击动力学建模与数值仿真技术[J]. 中国空间科学技术, 2002, 22(5): 26-30.
QU Guang-ji, HAN Zeng-yao. Dynamical modeling and numerical simulation of hypervelocity space debris impact [J]. Chinese Space Science and Technology, 2002, 22(5): 26-30.
- [2] Lacerda D, Lacombe Jean-Luc. Simulations of hypervelocity impacts with smoothed particle hydrodynamics[R]. DYNALIS Report, Paris, France, 2003.
- [3] Hallquist J O. LS-DYNA keyword user's manual[Z]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [4] Faraud M. SPH simulations of debris impacts using two different computer codes[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1): 249-260.

Simulation analyse of hypervelocity impact perforation

JIA Guang-hui*, HUANG Hai, HU Zhen-dong

(School of Space Technology, Beijing University of Aero & Astro,
Beijing 100083, China)

Abstract: The hypervelocity impact simulation result is studied about $\varnothing 9.53$ mm Al-sphere impacting 2.2 mm Al-target at 6.64 km/s to analyze the macro phenomena. It is shown that the SPH simulations with Steinberg material model and Mie-Grüneisen EOS are in accordance with the experimental results. The diameter of the hole initially increases, then slow increases, and finally reaches a stable value. The maximum pressure at the interface between the sphere and the plate is two times higher than aluminium strength. The maximum resistance appears at the moment when the maximum diameter of sphere just intrudes the plate. Debris cloud evolves following self-similar law, and the particles of debris cloud move only inside the so-called evolving cone.

Key words: solid mechanics; hypervelocity impact; SPH; numerical simulation; debris cloud; pressure

* Corresponding author: JIA Guang-hui
E-mail address: dcsjgh@sohu.com
Telephone: 010-82395178