

实验室聚能高速碎片生成装置设计与研究^{*}

李志龙 徐全军 姜楠 白帆

解放军理工大学工程兵工程学院(江苏南京,210007)

[摘要] 地面超高速模拟实验是研究微小空间碎片撞击效应最经济和最有效的手段。目前的空间碎片生成装置安全性较低,无法在实验室内使用。为了在实验室模拟空间超高速碎片,研究设计了带防护壳体的占据式聚能装药空间碎片生成装置。根据数值模拟结果,加工制作了实验装置,通过试验测得截取的射流头部速度为 10.52 km/s、10.62 km/s,与利用 AUTODYN 软件模拟得到的射流头部速度 11.385 km/s 基本吻合。装置的保护外壳较为完整,实现了在实验室中模拟空间超高速碎片。

[关键词] 高速碎片 聚能射流 占据体 防护壳体

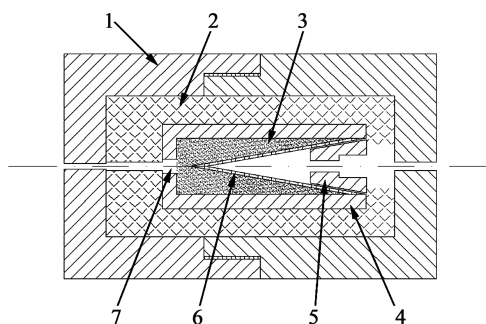
[分类号] TP69 V416.5

引言

随着人类的空间活动逐渐频繁,太空中日益增多的空间碎片对空间轨道上的航天器的安全构成了严重的威胁^[1]。质量在 1 g 左右的碎片虽然单次对航天器的撞击效应并不明显,但多次撞击带来的累积损伤可能导致十分严重的后果。因此,在地面研究微小碎片的撞击效应就显得尤为重要。由于空间碎片与空间中其他物体发生撞击的速度平均为 10 km/s 以上,如何在地面实验室内产生质量 1 g 左右,速度为 10 km/s 以上的高速碎片也逐渐成为相关研究的重点。现有的超高速碎片加载技术中,二级轻气炮、电炮加载技术和强激光驱动发射技术的发射能力一般在 7 km/s 左右,准等熵加载三级炮装置对安装精度、梯度飞片中同截面的一致性提出了很高的要求。电磁炮加速装置可以获得 15 km/s 或更高的超高速粒子,但是存在着大电流能源和电流通过轨道回路时的耗能问题。多级爆轰驱动技术存在着爆轰产物与飞片界面处波相互作用的稳定性等问题。本文利用占据式聚能射流,通过数值模拟,并结合试验,研究利用占据式聚能射流在实验室内模拟空间碎片的可行性。

1 占据式聚能射流装药

占据式聚能射流装药(conical shaped charge with the inhibitor,简称 CSCI)是在圆锥罩聚能射流装药内侧加设一个占据式阻隔体。在射流形成后,由于聚能罩向轴线挤压,导致占据体闭合,在射流头部通过后切断聚能射流,从而形成一个高速的聚能射流体^[2-3],装置如图 1 所示。



1 - 保护壳体;2 - 缓冲泡沫塑料;3 - 8701 聚能装药;
4 - 内壳体;5 - 占据体;6 - 锥形药型罩;7 - 雷管放置处

图 1 CSCI 装置示意图

为了能在实验室中安全使用,在徐全军等^[4]研究的基础上进行了优化设计。增加了保护部分,包括保护壳体、缓冲泡沫塑料和内壳体,为爆轰产物提供膨胀空间,缓冲高温高压的爆轰产物,吸收爆炸能量,保证碎片不产生径向飞散,另外还起到一定的爆炸噪声控制作用。保护壳体、内壳体和占据体均采用 45 号钢,在受到爆轰加载时,壳体膨胀变形吸收的能量较多^[5],通过合理设计壳体结构,45 号钢可以防止因爆炸的瞬间高压而造成的壳体破坏。装置的吸能吸声材料为聚氨脂泡沫。聚氨脂泡沫为多孔材料,受到冲击波作用后,通过材料致密,消除内部空隙后可以吸收大量能量^[6]。其成本低、吸能吸声系数高,故选其为内衬材料。药型罩材料使用延展性更好的紫铜,对截取的射流头部大小进行了研究。

本装置的优点主要体现在以下几个方面:

1) 安全性。此装置的结构强度大。通过衰减装药的爆炸能量来减弱爆炸冲击波,控制爆炸冲击波、

^{*} 收稿日期:2012-05-13

作者简介:李志龙(1987~),男,硕士,主要从事爆破器材爆炸作用研究。E-mail:9479937@qq.com

通讯作者:徐全军(1966~),男,博士,教授,主要从事爆破器材爆炸作用研究。E-mail:xquanjun@hotmail.com

破片等危害效应,使该装置能够在实验室内使用。

2)外壳结构合理性。整个装置的外壳由保护壳体、聚氨酯泡沫材料、内壳体组成硬—软—硬的“三明治”式的多层柱壳结构。在脆性材料中放置泡沫材料,可有效减小爆炸波应力峰值,降低自由表面的拉伸应力波幅,减少由拉伸引起的局部破坏^[7]。

3)装置方便性。装置零部件结构简单。

4)经济性。装置采用的材料来源广泛,装置的壳体等零部件可以回收。

2 计算模型及参数

AUTODYN 是由美国 ANSYS 子公司世纪动力公司 (Century Dynamics Inc.) 开发的一个显式有限元分析程序^[8],可以较好地模拟爆炸冲击波等载荷下的大变形等问题,符合本文模拟的要求。

2.1 基本假设

为了方便建模,对装置作以下假设:

1)整个装置的结构为严格的轴对称结构;

2)炸药、药型罩、保护外壳、内壳体、填充材料和占据体均为连续介质;

3)整个爆炸过程为绝热过程。

经过以上假设,将三维空间问题转化为二维轴对称问题,即可采用二维计算软件 ATUODYN-2D 进行模拟和求解。

2.2 材料模型及参数

本文模型中 8701 炸药的材料模型采用高能炸药燃烧模型 (High Explosive Burn), 状态方程采用 Lee 提出的 JWL 状态方程^[9]。炸药相关材料参数如表 1 所示。

表 1 8701 炸药材料模型的主要参数

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$A/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	B/GPa	R_1	R_2
1.695	854.5	20.493	4.6	1.35
ω	$v_{\text{C-J}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$E_0/(\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$p_{\text{C-J}}/\text{GPa}$	
0.25	8425	8.5	29.66	

表 1 中, ρ 为 8701 炸药密度, A 、 B 、 R_1 、 R_2 及 ω 为 JWL 方程参数, $v_{\text{C-J}}$ 为 C-J 爆轰速度, E_0 为 8701 炸药初始内能, $p_{\text{C-J}}$ 为 C-J 爆轰压力。模型中涉及到的其他相关材料模型如表 2 所示。

表 2 数值模拟中的材料模型

部件名称	材料名称	状态方程	强度模型
炸 药	8701	JWL	None
药 型 罩	紫铜	Shock	Johnson Cook
外 壳	45 号钢	Shock	Johnson Cook
占 据 体	45 号钢	Shock	Johnson Cook
空 气	空气	Ideal Gas	None

2.3 模型建立

本模型的单位制为 mm-mg-ms。由于聚能射流的形成是一个典型的大变形、高压、高应变率问题,因此在本文中采用多物质 EULER 的求解算法。模型大小为 200mm × 100mm,采取变网格划分技术,总网格数为 102 万,满足计算精度的要求。

3 模拟数据分析

为了获取药型罩最佳的锥角和壁厚,进行了 17 组模拟仿真。通过模拟仿真,得到了锥角、药型罩壁厚等对射流速度的影响参数,确定了药型罩的尺寸,模拟结果如图 2 和图 3 所示。

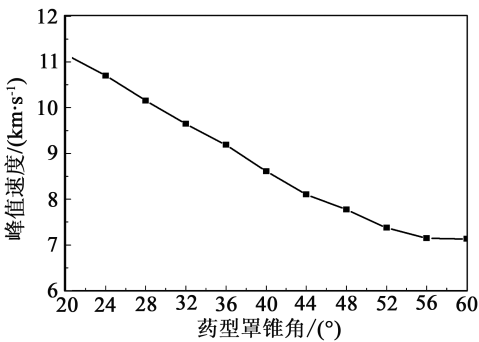


图 2 壁厚 1 mm 时头部速度随锥角变化图

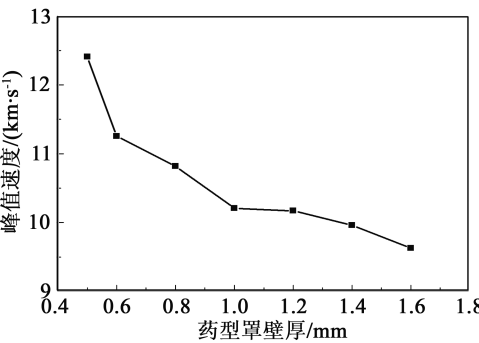


图 3 锥角 20°头部速度随壁厚变化图

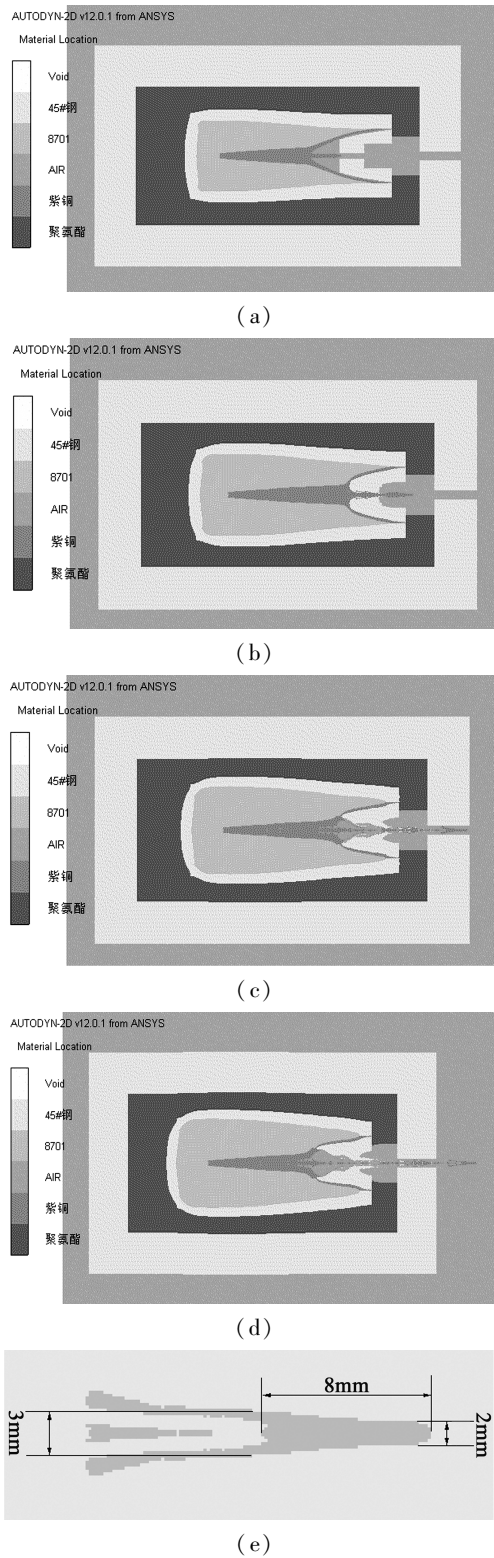
随着药型罩锥角的减小,射流头部的速度逐渐升高,考虑到装药的长径比不宜太大,锥角取 20°。相关研究表明,使用圆锥形铜罩时,进入射流的罩质量比例平均约为 10% ~ 20%^[10],结合药型罩壁厚对射流头部速度的影响,以及对截取头部质量的要求,药型罩壁厚取 1 mm。

当炸点起爆后,由于炸药爆轰波的作用,各个罩微元相继变形,并在轴线上相互碰撞,生成的爆轰产物和聚能药型罩相互作用,药型罩随之压合并形成聚能射流。射流头部在 6.502μs 时接近占据体,如图 4(a) 所示。在 7.5μs 时通过占据体,此时,占据体没有闭合,如图 4(b) 所示。

在 8.5μs 时,由于药型罩的压合作用,占据体闭合,截断聚能射流头部与杆体的连接,如图所示。被截断的射流头部继续向前运动,并在 10.5μs 时,到

达整个装置的开口处,如图 4(c)所示。

在12μs时,截断的射流头部运动到装置外部,如图4(d)所示。此时,射流头部的速度为11.385 km/s,达到了预期的要求。截取的射流头部如图4



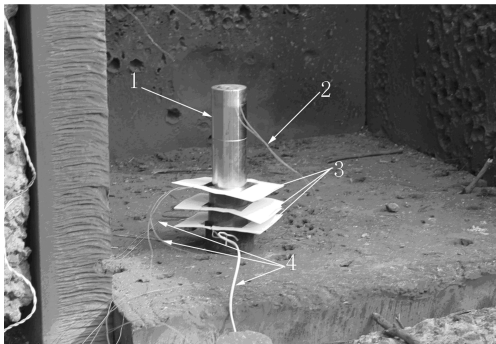
(a) 射流头部到达占据体 ;(b) 射流头部通过占据体
(c) 截取的射流头部到达装置开口处;(d) 截取的射流头部到达装置外部;(e) 截取的射流头部

图 4 聚能射流对应时刻的射流状态

(e)所示,其长度为 8mm,左边直径为 3mm,右边直径为 2mm,符合预期大小的要求。

4 验证试验

根据模拟优化的尺寸,加工制作了实验装置。为了保证实验数据的可信性,进行了两次重复性试验。实验装置设置如图 5 所示。



1 - 占据式聚能射流生成装置;2 - 雷管起爆导线;
3 - 锡箔靶纸;4 - 测速仪信号线

图 5 实验装置设置

占据式聚能射流装置垂直向下放立,在其下方依次放置测速靶纸。射流速度采用铝箔靶进行测量,其中间为夹层绝缘层,绝缘层的两侧为厚 0.1 mm 的铝箔。射流穿过靶板时会接通两侧的铝箔,从而产生电信号启动示波器。利用射流穿过两个靶板时产生的脉冲信号的时间间隔和靶间距来计算射流的速度,进而得到射流穿过各靶间的平均速度。两个靶之间的距离为 43 mm,通过导线连接到测速系统上。测速系统采用 HG202C—V 型测速仪。

实验测得的射流头部速度如表 3 所示,3 个靶板从上到下依次命名为①号、②号、③号靶板。装置产生的碎片平均速度:第一发为 10.52 km/s,第二发为 10.60 km/s,比模拟结果稍小,考虑到试验中空气阻力等因素,认为试验结果与模拟结果基本一致,达到的 10 km/s 以上,符合设计要求。

表 3 射流头部测速试验

测速区域	第一发碎片速度/ (km · s ⁻¹)	第二发碎片速度/ (km · s ⁻¹)
① ~ ②	10.12	10.64
② ~ ③	10.91	10.55
平均速度	10.52	10.60

由聚氨酯和钢壳组成的防护层隔爆效果比较明显。图 6(a)中为第一组实验的壳体,壳体断成两截,但没有飞散。图 6(b)中为第二组实验后的壳体,壳体下半部分完整,由于聚能装药处于上下两部分连接处以上,上半部分被炸碎。在下一步的设计中可改进壳体的连接处来增大整个装置的安全性。



(a)



(b)

(a) 第一组; (b) 第二组

图 6 试验后的壳体

5 结论

本文利用 AUTODYN 软件模拟仿真,分析了锥角和壁厚等对占据式聚能装药射流头部速度的影响,结合试验研究了利用占据式聚能装药在实验室内模拟空间碎片的可能性,得出以下结论:

1) 利用占据式聚能装药生成的碎片模拟空间碎片是可行的。其碎片的速度和大小都基本与空间碎片接近,但对碎片的形状缺乏可控性,与实际的空间碎片还有一定差距,有待进一步研究。

2) 截取的射流头部在速度和动能与空间碎片较为符合,但流体(半流体)的形态与空间碎片的固体状态不同,可在后续研究中通过瞬间冷却等方式

加以解决。

3) 通过 AUTODYN 软件模拟来设计占据式聚能装药是可行的,截取的头部速度,其仿真模拟的结果为 11.385 km/s,试验结果为 10.52 km/s、10.62 km/s,两者基本吻合,符合设计要求。

4) 聚氨酯和钢壳组成的“三明治”式保护壳隔爆效果明显,但装置本身还是受到了一定的破坏,说明装置局部的结构强度还不够,需要进一步改进。

参 考 文 献

- [1] 袁庆智,孙越强,壬世金,等. 天基微小空间碎片探测研究[J]. 空间科学学报,2005(3):212-217.
- [2] Katayama M., Takeba A., Toda S., et al. Analysis of Jet Formation and Penetration by Conical Shaped Charge with the Inhibitor [J]. Int. J. Impact Eng., 1999, 23(1): 443-454.
- [3] Walker J. D., Grosch D. J., Mulin S. A. A Hypervelocity Fragment Launcher Based on an Inhibited Shaped Charge [J]. Int. J. Impact Eng., 1993, 14(1-4): 763-774.
- [4] 徐全军,白帆,伍睿星. 占据式聚能装药射流形成的数值模拟及试验研究[J]. 爆破器材,2011,40(3):11-13.
- [5] 胡昌明,贺红亮,胡时胜. 45 号钢的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(2):188-192.
- [6] 王海福,冯顺山. 爆炸载荷下聚氨酯泡沫材料中冲击波压力特性[J]. 爆炸与冲击,1999,19(1):78-82.
- [7] 董永香,冯顺山,李学林. 爆炸波在硬—软—硬三明治介质中传播特性的数值分析[J]. 弹道学报,2007,19(1):59-63.
- [8] Century Dynamics Inc. AUTODYN Users Manual [M]. California: Century Dynamics Inc, San Ramon, 1997.
- [9] Tillotson J. H. Metallic Equations of State for Hypervelocity Impact [R]. GA-3216, General Atomic, CA, 1962.
- [10] Л. П. 奥尔连科. 爆炸物理学 [M]. 孙承伟,译. 3 版. 北京: 科学出版社, 2011: 926.

Design and Research of Laboratory Hypervelocity Debris Launcher Based on Shaped Charge

LI Zhilong, XU Quanjun, JIANG Nan, BAI Fan

Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology (Jiangsu NanJing, 210007)

[ABSTRACT] Ground hypervelocity simulation experiment is the most economical and effective means for studying the space micro-debris impact effect. The existent space debris launcher is not safe enough to use in the laboratory. This paper researched and designed a conical shaped charge with an inhibitor, which was equipped with a protecting shell and thus enables to apply in the laboratory, to simulate the hypervelocity space debris. According to the simulation results, an experimental device was installed to measure the speed of the tip. The results show that the speeds of the tip are 10.52 km/s and 10.62 km/s, which are consistent to that of 11.385 km/s simulated by the AUTODYN software. The protecting shell of the device is relatively integrated, which realizes simulating the hypervelocity space debris in the laboratory.

[KEY WORDS] hypervelocity debris; shaped charge; inhibitor; protecting shell