文章编号:1000-5773(2011)06-0557-08

一种基于二级轻气炮平台的超高速弹丸发射装置设计*

赵士操[1,2],宋振飞[1],姬广富[1],龚自正[3],赵晓平[2]

(1.中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621900;
2.中国工程物理研究院计算机应用研究所,四川绵阳 621900;
3.北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

摘要:基于强爆轰效应,提出一种新的超高速弹丸发射装置。在二级轻气炮平台上,设计内置炸药柱的三级加速腔,将二级轻气炮发射的克质量弹丸由6～7 km/s,再次加速至9～10 km/s的超高速。通过数值模拟优化设计药柱与飞片的形状,以及弹丸的树脂封装,从而抑制强爆轰产生的中心射流对弹丸的破坏,并且在短脉冲强冲击过程中,避免在直径达厘米级的铝或钛合金弹丸内的层裂破坏。数值模拟结果表明,经过优化设计的三级加速腔可以将气炮出膛速度约6.0 km/s的1.03 g铝合金弹丸加速至9.6 km/s,弹丸最终形状仍保持类球形,速度增益约1.6。

关键词:超高速发射装置;强爆轰;流体动力学模拟;AUTODYN
中图分类号:O521.3;V416.5　　**文献标识码**:A

1 引　言

空间碎片防护结构是保证在轨航天器安全的重要因素。根据2003年美国NASA报告[1],在400 km高度、51.6°倾角,空间碎片对航天器的相对撞击速度为1～15 km/s,平均8～9 km/s。其中对于直径大于厘米级的空间碎片,可以采用遥感技术定位跟踪,并令航天器进行规避,而对于直径较小的空间碎片则需要防护结构对航天器进行保护。这就需要航天器防护结构能经受克量级(密度约2.7 g/cm^3,直径约1 cm)空间碎片10 km/s速度的撞击。

传统的轻气炮通过压缩气体推动弹丸运动,运用弹托分离技术发射球形弹丸,可以开展防护结构的弹道测试[1-2]。但是受气体逃逸速度的限制,二级轻气炮一般只能将克量级的弹丸加速至7 km/s。2006年,Piekutowski等人[3]通过在二级轻气炮平台上安装第三级会聚型加速腔,仅将直径3 mm以下的铝球(质量仅0.037 g)加速至8.65 km/s。

当前,NASA采用美国Sandia实验室的EHVL(Enhanced Hypervelocity Launcher)装置,以及SwRI(Southwest Research Institute)的聚能装药发射装置ISCL(Inhibited Shaped Charge Launcher)开展防护结构的弹道极限曲线实验[1]。其中Sandia实验室的EHVL装置应用阻抗梯度飞片技术;Chhabildas[4-6]等人利用二级轻气炮平台发射初始速度为6～7 km/s的阻抗梯度飞片,在三级加速腔准等熵驱动次级飞片,可将厚度1.98 mm、直径9.96 mm、质量为0.934 g的ZrO_2薄飞片加速至11.7 km/s,并将厚度1.09 mm、直径27.00 mm、质量为2.444 g的Al_2O_3薄飞片加速至14.6 km/s。鉴于层裂等因素,EHVL装置一般只加速薄飞片,在平面撞击条件下将低估Whipple结构的防护性能。同时,次级飞

* **收稿日期**:2010-09-09;**修回日期**:2011-01-21
基金项目:国防科技重点实验室基金(9140067010110 01);国防科工局空间碎片项目(08201)
作者简介:赵士操(1986—),男,硕士研究生,主要从事数值计算研究. E-mail:zhaoshicao@gmail.com
通讯作者:宋振飞(1973—),男,副研究员,主要从事冲击动力学研究. E-mail:song_stanley@sina.com

片后的碎片(由 Pillow 飞片撞击次级飞片产生)也会对防护结构的抗侵彻性能实验产生影响。SwRI 采用的 ISCL 超高速发射装置[7]只能将长径比为 2～3、质量为 0.8～1.5 g 的空心柱状铝弹丸加速至 11 km/s,这种装置对弹丸形状的局限,以及发射后弹丸的状态变化,在一定程度上也不适合作为标准的超高速弹道实验平台。设计与建立克量级球形弹丸 10 km/s 超高速发射装置,仍然是当前防护结构性能评估的关键地基实验技术。

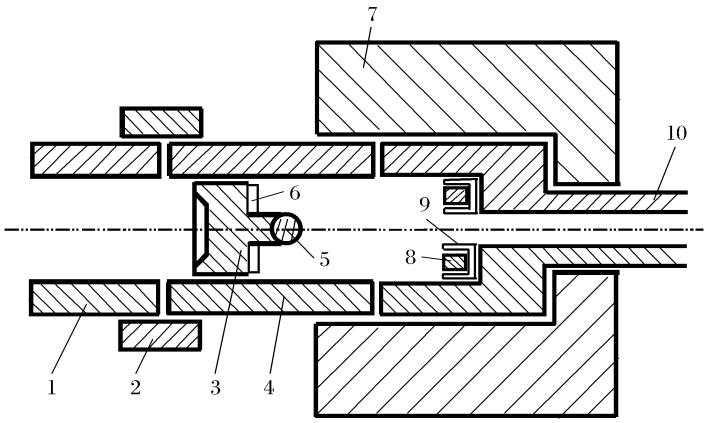
2 超高速弹丸发射装置设计原理

在传统的强爆轰加载技术中,根据冲击波理论

$$p = \rho D u \tag{1}$$

式中:p 是冲击压力,D 是冲击波速度,u 是冲击波后粒子速度,当强冲击加载静止铝飞片至 10 km/s 时,飞片内的峰值压力将高达百吉帕;而如果采用多级驱动,当弹丸从 6 km/s 二次冲击加速至 10 km/s 时,其冲击压力峰值 p 可以降低至单级驱动时的三分之一。

基于十几米长的气体驱动加速路径,二级轻气炮可以准等熵发射速度 6～7 km/s 的克量级弹丸。如果基于多级驱动的技术路径,将轻气炮发射的 6～7 km/s 弹丸二次加速,是实现克量级球形弹丸 10 km/s超高速发射的有效途径。本研究中设计了内置炸药的三级加速腔,通过强爆轰过程实现弹丸/弹托的分离,以及弹丸的二次加速。如图 1 所示,该超高速弹丸发射装置主要由组合式弹托(飞片与弹丸)、延伸段、三级加速腔、高性能炸药组成。球形弹丸粘接在聚碳酸酯弹托的半球面槽内。经过二级轻气炮加速,飞片与弹丸以 6～7 km/s 的速度进入延伸段,继而平稳进入三级加速腔。三级加速腔内粘接一个环形的 PC(聚碳酸酯)树脂套,内嵌入环片状高能炸药,厚度 5～10 mm、质量 2.5～5.0 g。树脂套与炸药环的内径,以及加速腔内膛道直径均略大于弹丸直径,确保球形弹丸的通过。当弹丸已进入 PC 树脂套的内腔,弹托前端面的 45 钢飞片高速撞击炸药,产生强爆轰,高压使弹丸后的聚碳酸酯离解,与爆轰产物一起产生高压气体进一步驱动球形弹丸,获得接近或超过 10 km/s 的速度。



1. Two-stage gas gun; 2. Flange; 3. Sabot; 4. Extension tube; 5. Projectile; 6. Steel flyer; 7. Sleeve; 8. Explosive ring; 9. PC resin thimble; 10. Third-stage accelerating tube

图 1 超高速弹丸发射装置设计示意图

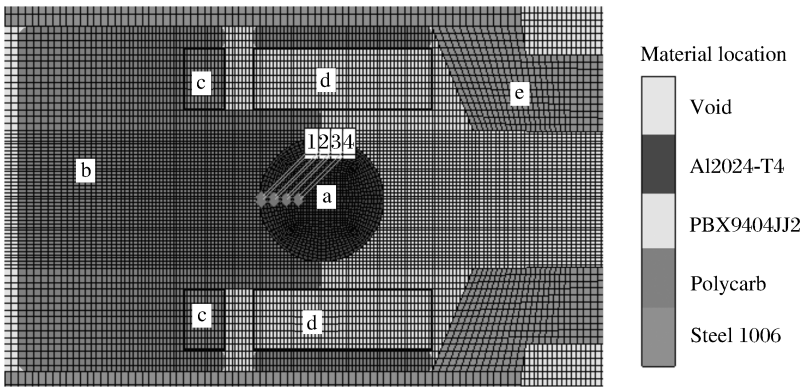
Fig. 1 Schematic of the novel design of a hypervelocity launcher

3 基于 AUTODYN 模拟的发射装置优化设计

在内置炸药环的三级加速腔内,强爆轰效应产生的高速中心射流可能击碎弹丸,并且在弹丸的二次加速过程中,强爆轰产生的高压短脉冲易导致弹丸的层裂破坏。本研究中,基于对强爆轰过程的数值模拟,给出了飞片/弹托,以及三级加速腔的优化设计方案。

3.1 强爆轰中心射流的控制

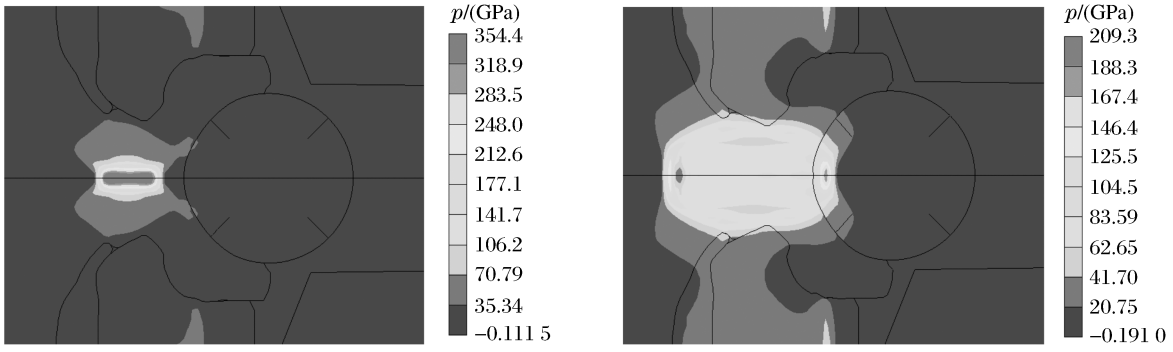
如图 1 所示,当钢飞片垂直撞击炸药产生强爆轰时,弹丸后侧的圆柱形弹托部分将同时产生沿径向传播的会聚冲击波,在轴线附近最终形成高压中心射流。应用 AUTODYN-2D 建立二维轴对称模型模拟这一过程。图 2 给出了 3 mm 厚平板状环形钢飞片正碰 13 mm 厚炸药环的数值计算模型。其中球形弹丸直径为 9 mm,沿半径方向划分 20 份网格,采用 Lagrange 求解器,其材料参数从 AUTODYN 材料库中选取,铝合金弹丸采用材料库中的 Al2024-T4,钛合金弹丸则采用 Ti(6Al-4V),其中铝合金采用 Mie-Grüneisen 状态方程和 Steinberg Guinan 本构模型;钛合金的状态方程则为 Puff 方程,本构模型采用 von Mises 关系。三级加速腔部分也使用 Lagrange 求解器,并对内腔壁进行网格加密,材料参数从 AUTODYN 材料库中选取。其余部分均使用 Euler 求解器,PC 树脂、钢飞片和高能炸药的材料参数同样从 AUTODYN 材料库中取得,其中高能炸药使用 AUTODYN 材料库中的 PBX9404JJ2,采用冲击起爆 Lee-Tarver 模型,爆压 37 GPa,爆速 8.8 km/s。为了保证计算精度,Euler 单元在弹丸的运行轨迹上进行了加密,网格大小为 0.25 mm。为降低弹丸后侧高压射流的冲击破坏,在适当降低速度增益的前提下,延长弹托支承杆的长度,此处弹丸球心至飞片前自由面的距离为 7 mm。图 3 给出了强爆轰不同时刻的压力分布,展现了弹丸后侧高压射流的形成及对弹丸的驱动。中心射流在弹丸内部产生 280 GPa 的峰值压力,其空间分布梯度将导致弹丸在加速过程中的变形破坏。



a. Projectile; b. Sabot; c. Steel flyer; d. Explosive ring; e. Third-stage accelerating tube

图 2 超高速弹丸发射装置计算模型

Fig. 2 The simulation model of the hypervelocity launcher



(a) $t=1.347$ μs (b) $t=1.492$ μs

图 3 平面飞片撞击时中心射流的形成过程

Fig. 3 The formation of detonation-induced jet caused by a planar flyer

基于大量的模拟计算，给出如图 4 所示的斜面飞片设计方案，该方案可以有效降低平面冲击起爆产生的中心射流压力。图 5 给出了采用斜面钢飞片时弹丸后侧高压射流的形成。当采用新飞片构形设计时，炸药的起爆方式从平面撞击的整个炸药端面同时起爆变成了环形的线起爆。这时虽然图 5 中的射流峰值压力没有降低，但射流压力在弹丸内部迅速衰减。如图 6 所示，在使用斜面飞片后，虽然 1 号参考点（弹丸后表面）的峰值压力没有降低，但球内峰值压力明显减小，而且压力脉宽逐步展宽，有效降低了弹丸的冲击破坏。图 6(a)给出了弹丸内部沿轴线方向不同参考点的压力-时间关系，各参考点的位置可参见图 2 中的标注；图 6(b)给出了弹丸内部沿轴线不同参考点的压力。

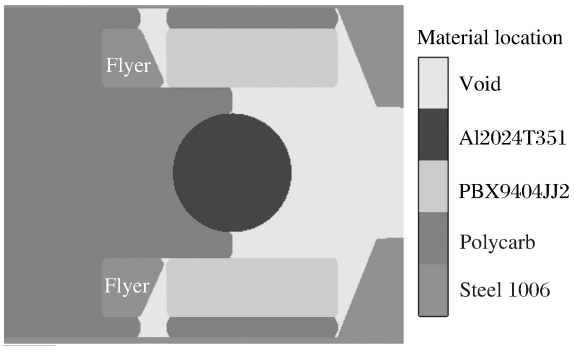
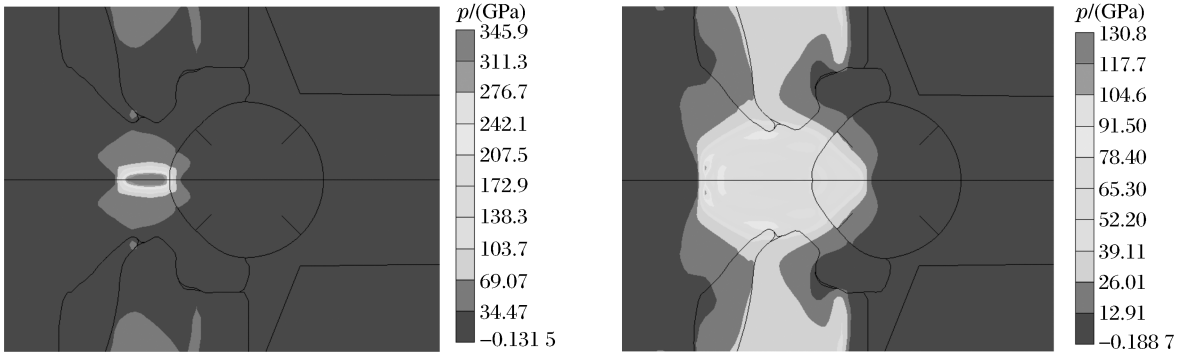


图 4 斜面钢飞片轴对称模型

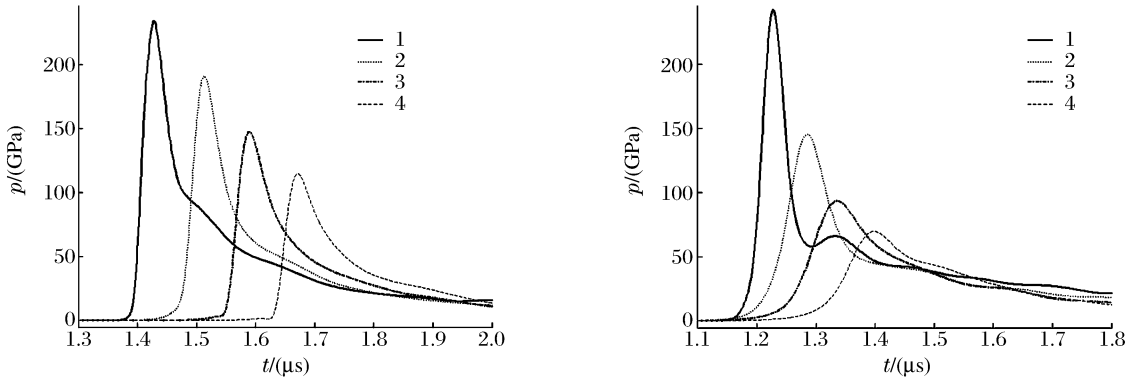
Fig. 4 The axisymmetric model of bevel flyer



(a) $t=1.210$ μs (b) $t=1.378$ μs

图 5 斜面钢飞片撞击时中心射流的形成过程

Fig. 5 The formation of detonation-induced jet caused by a bevel flyer



(a) Original planar flyer (b) Optimized bevel flyer

图 6 飞片形状优化前后弹丸内压力-时间变化曲线

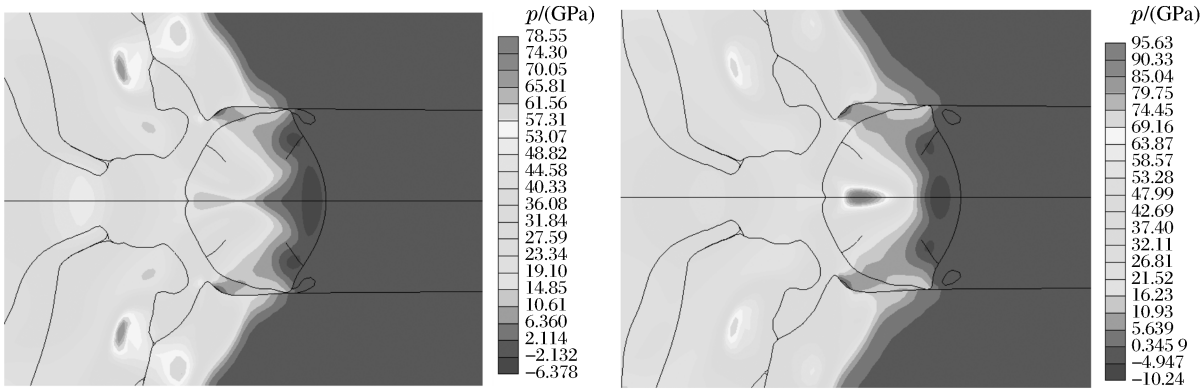
Fig. 6 The pressure-time histories in the projectile using planar and bevel flyer respectively

3.2 冲击脉冲作用下弹丸的层裂破坏控制

当钢飞片平面冲击起爆炸药时，炸药及产物中压力脉冲的宽度约 $2t/D_s$，其中 t、D_s 分别为钢飞片的厚度与冲击波速度。在传统的强爆轰驱动次级飞片的加载技术中，次级飞片的厚度受压力脉宽局限，一般仅为毫米级。在三级轻气炮实验中，梯度飞片的厚度约 3 mm，当加速直径达厘米级的弹丸时，该短脉冲在前、后边界产生的稀疏波可能导致弹丸的层裂破坏，如产生飞层。因此，需要通过药柱长度以及会聚形三级加速腔的优

化设计,在较宽的时间内维系爆轰产物的高推进压力,使弹丸内的拉伸应力控制在层裂强度以内。

图 7 给出采用钢飞片斜面设计时(见图 4),弹丸加速过程中其内部压力的变化。当加载冲击波传播到弹丸前端面时,将产生稀疏波。由于强爆轰产生的压力脉宽受钢飞片厚度的限制,因而当反射稀疏波穿越加载峰值脉冲时,产生拉伸压力,可能导致材料的层裂破坏。弹丸的球形端面处反射产生的稀疏波由于曲面形状效应,将导致如图 7(b)所示的稀疏波汇聚,产生−10 GPa 以上的负压,极可能使弹丸前端破坏。



(a) $t=2.225\ \mu s$　　(b) $t=2.333\ \mu s$

图 7　无树脂包裹时弹丸内层裂的形成

Fig. 7　The formation of spalling in the projectile without the package of epoxy resin

如图 8 所示,通过炸药环形状的优化设计,使炸药起爆后弹丸后压力分布更加均匀,并且弹丸前端面采用树脂封装,将提升弹丸中应力波的平面性,有效降低弹丸内部的瞬态负压。具体效果可见图 9,虽然树脂与铝合金的阻抗相差数倍,但冲击波在树脂包裹的整形下仍然维持了较好的平面性,与图 7 比较,在相同阶段弹丸中的负压由−10 GPa 降至−1 GPa 以下。事实上当装置加速初速为 6 km/s 的铝合金弹丸时,整个驱动过程弹丸内部的峰值负压可以维持在−3 GPa 以下,而且封装后铝合金弹丸的形状也保持较好。

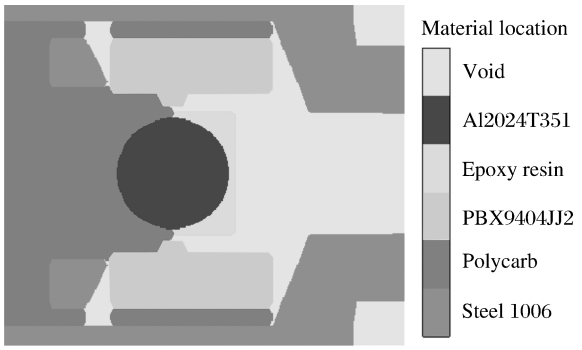
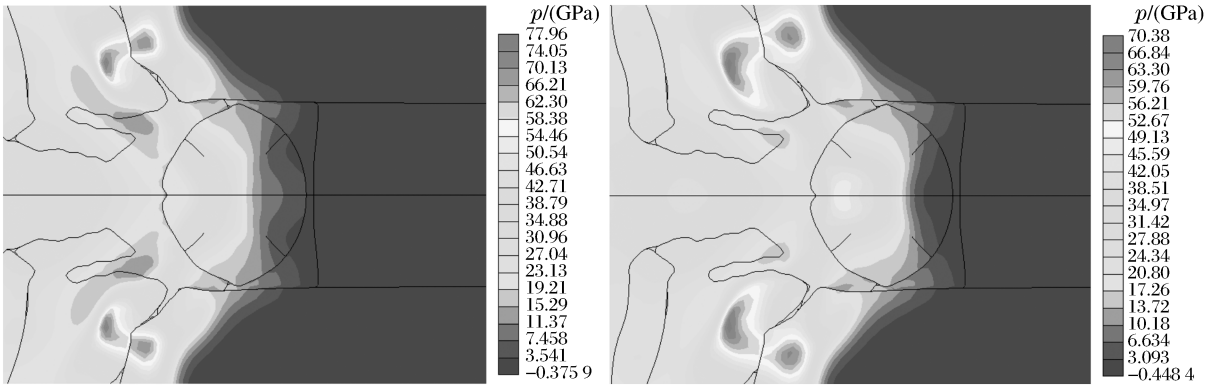


图 8　树脂包裹和改进后的药柱设计

Fig. 8　Epoxy resin package and optimized shape of explosive ring



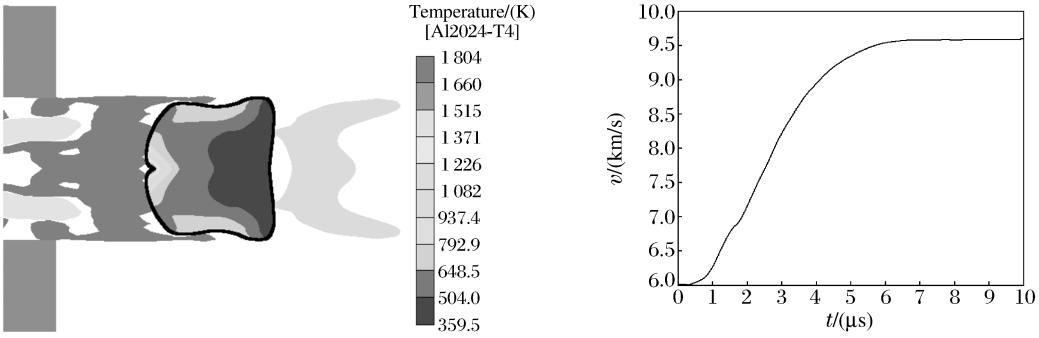
(a) $t=2.222\ \mu s$　　(b) $t=2.315\ \mu s$

图 9　采用树脂包裹设计抑制弹丸层裂破坏

Fig. 9　Inhibiting spallation of the projectile using epoxy-resin package

3.3 铝合金弹丸超高速发射过程模拟结果

应用优化设计装置，可以将直径 9 mm、约 1.03 g 的铝合金弹丸由 6 km/s 初速再次加速至 9.6 km/s，图 10(a)和图 10(b)分别给出了弹丸加速后期的形状，以及弹丸平均速度历史。可以看到，弹丸的加速较平稳，由于铝合金的屈服强度较低，最终弹丸仍然有较大的变形，但却维持了长宽比。而且图 10(a)黑色粗轮廓线内还画出了弹丸的温度云图，可以看出，在 300 K 的参考温度下，弹丸前端面温度最低，温升在 200 K 下，弹丸后部受高压射流影响，以及弹丸侧部受加速腔管道挤压影响，温升较高，超过了 300 K，其中弹丸最后部极小区域温升超过了 1 000 K。



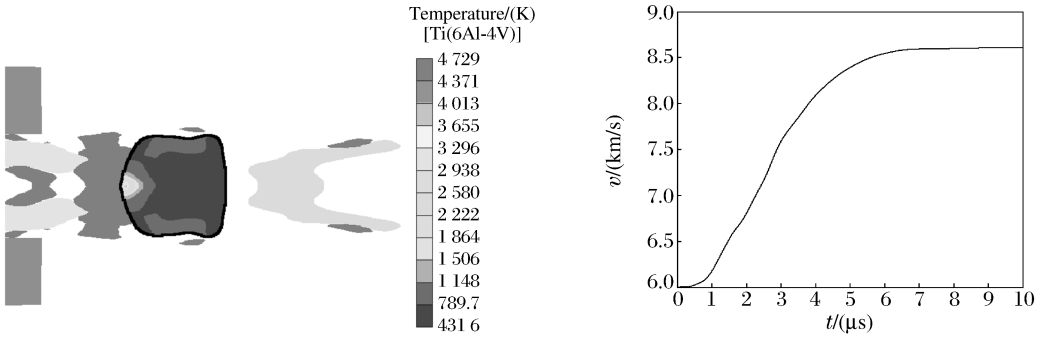
(a) Contour of temperature in the projectile (b) Velocity-time history of the projectile

图 10 加速初速为 6 km/s 铝合金弹丸的模拟结果((a)中黑色粗轮廓线内为弹丸的温度云图)

Fig. 10 Simulation results of the accelerating process of an aluminum alloy projectile with 6 km/s initial velocity (The contour line of launched projectile is marked by bold black line in (a))

3.4 钛合金弹丸超高速发射过程模拟结果

相比铝合金，钛合金具有更高的屈服强度，从而经历强爆轰驱动后弹丸仍然保持较好的类球形。经计算，装置可加速直径 9 mm、质量约 1.7 g 的钛合金弹丸由 6 km/s 初速至 8.6 km/s 的速度，图 11(a)和图 11(b)分别给出弹丸加速后期的形状及温度，以及弹丸平均速度历史。从图 11(b)可以看出，钛合金弹丸呈现明显的类球形，与图 10(a)中的铝合金弹丸相比，钛合金弹丸的变形显著降低，而温升呈现了同图 10(a)一样的趋势，在 300 K 的参考温度下，前端温升最低，大部分区域在 500 K 以内，球后端和侧部温升较高达到 500 K 以上，且后端部分区域温升可达到 2 000 K 以上。

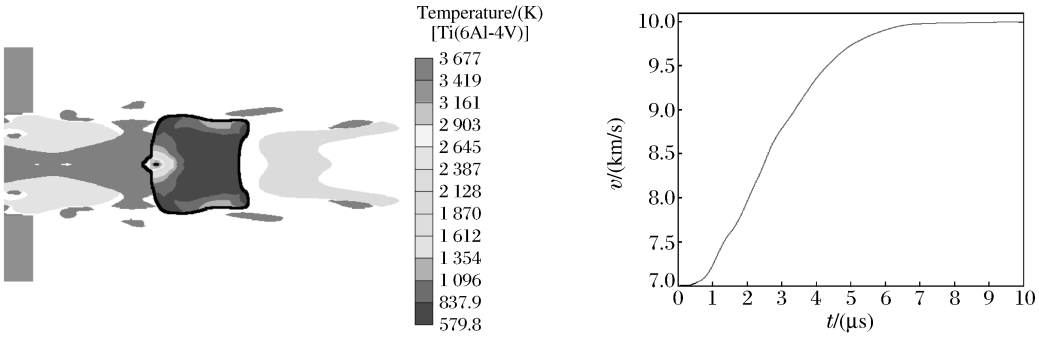


(a) Contour of temperature in the projectile (b) Velocity-time history of the projectile

图 11 加速初速为 6 km/s 钛合金弹丸的模拟结果((a)中黑色粗轮廓线内为弹丸的温度云图)

Fig. 11 Simulation results of the accelerating process of a titanium alloy projectile with 6 km/s initial velocity (The contour line of launched projectile is marked by bold black line in (a))

图 12(a)和图 12(b)分别给出了当弹丸初速为 7 km/s 时,钛合金弹丸加速后期的压力分布,与弹丸加速历史。弹丸可被加速至 10 km/s,但弹丸的变形较大,且弹丸前端温升较初速 6 km/s 的情况高,但趋势相同,弹丸前端大部区域温升仍低于 500 K。



(a) Contour of temperature in the projectile　　(b) Velocity-time history of the projectile

图 12　加速初速为 7 km/s 钛合金弹丸的模拟结果(图(a)中黑色粗轮廓线内为弹丸的温度云图)

Fig. 12　Simulation results of the accelerating process of a titanium alloy projectile with 7 km/s initial velocity (The contour line of launched projectile is marked by bold black line in (a))

4　数值可靠性

基于数值模拟以优化设计超高速发射装置,仿真可靠性值得关注,受篇幅限制简述这一问题。在装置优化过程中进行了大量的计算模型比对,其中包括对各种材料换用不同的模型进行计算比较。例如,在高能炸药模型的选择上除文中使用 AUTODYN 库中的 PBX9404JJ2 外,还采用了 AUTODYN 库中的 HMX 进行计算,在库中这种材料采用 JWL 状态方程并通过在程序中设定起爆点和起爆时间进行引爆,爆压为 42 GPa,爆速为 9.11 km/s。通过比较发现,整个加速过程的模拟结果除数值大小有很小的差异外并没有显著不同,仍然可以达到设计要求。更进一步,在使用环氧树脂状态方程代替聚碳酸酯后仍可以达到设计要求。说明在钢飞片 6 km/s 以上的高速撞击下,高能炸药的起爆延时等问题并不显著,决定弹丸加速过程的是压力-比容关系,所以对于不同的材料模型可以得到近似的计算结果,这也说明了数值计算的可靠性。

5　结　论

与传统的强爆轰加载技术不同,本研究提出一种新的弹丸超高速发射技术,即将二级轻气炮发射的弹丸应用强爆轰效应再次加速至近 10 km/s 的高速。该装置的核心技术在于前伸式弹托设计与钢飞片的形状优化。模拟结果表明,在二级轻气炮 6～7 km/s 的发射条件下,可以将 1 g 的铝弹丸加速至 10 km/s 以上的速度,将 1.6 g 的钛合金弹丸发射至近 10 km/s 的速度。相比于聚能射流等技术,该二级驱动装置发射的弹丸,在加速末态仍然保持类球形或团状固态,从而更适合作为空间碎片防护结构的地基实验平台。

模拟结果也表明,弹丸在加速末态仍然保持整体性,这样可以在弹道实验的靶结构前设计相对长的飞行线路,弹丸后的高压气态产物前期将充分减缓钢飞片的速度,并且在真空环境中充分扩散,从而实现相对“干净”的击靶。

References:

[1]　Christiansen E L. Meteroroid/Debris Shielding, NASA TP-2003-210788 [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 2003.

[2] Gong Z Z, Shi S C, Yang J Y, et al. A New Projectile/Sabot Aerodynamic Separating Technique in Hypervelocity Impact Experiments [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(3): 259-262. (in Chinese)
龚自正,施尚春,杨继远,等. 一种用于超高速撞击实验的新型弹丸弹托分离技术 [J]. 航天器环境工程, 2008, 25(3): 259-262.

[3] Piekutowski A J, Poormon K L. Development of a Three-Stage, Light-Gas Gun at the University of Dayton Research Institute [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33(1-12): 615-624.

[4] Chhabildas L C, Baker L M, Asay J R, et al. Launch Capabilities to over 10 km/s [A]//Schmidt S C, Dick R D, Forbes J W, et al. Shock Waves in Condensed Matter-1991 [C]. Amsterdam: North Holland, 1992: 1025-1031.

[5] Chhabildas L C, Dunn J E, Reinhart W D, et al. An Impact Technique to Accelerate Flier Plates to Velocities over 12 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14(1-4): 121-132.

[6] Chhabildas L C, Kmetyk L N, Reinhart W D, et al. Launch Enhanced Hypervelocity Launcher-Capabilities to over 16 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(1-4): 183-194.

[7] Walker J D, Grosch D J, Mullin S A. Experimental Impacts above 10 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(4-6): 903-914.

A Novel Design of a Hypervelocity Launcher Based on Two-Stage Gas Gun Facilities

ZHAO Shi-Cao[1,2], SONG Zhen-Fei[1], JI Guang-Fu[1],
GONG Zi-Zheng[3], ZHAO Xiao-Ping[2]

(1. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Institute of Computer Application, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
3. *Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: A new scheme of hypervelocity launcher was put forward in this paper by means of strong detonation. An explosive ring was fixed internally in a specially designed third-stage barrel in which the projectile launched by two-stage gas gun at velocity ranging from 6 to 7 km/s was able to be accelerated subsequently to a hypervelocity of 10 km/s or so. Based on hydrocode simulations, the shape of flyer and explosive ring was optimally designed. In addition, through the encapsulation of the sphere projectile by epoxy resin, the projectile damages resulted both from detonation-induced jet and spalling due to the characteristic of short pressure pulse imposed on centimeter-sized projectiles would be suppressed. The simulations illustrate that the optimized hypervelocity launcher has the capability of accelerating 1.03 g aluminum alloy projectile with a velocity of 6 km/s to 9.6 km/s, keeping the sphere-like shape with the velocity amplification ratio of 1.6.

Key words: hypervelocity launcher; strong detonation; hydrocode simulations; AUTODYN