文章编号:1000-5773(2009)03-0167-06

# 渐变阻抗飞片超高速发射数值模拟*

陈 朗[1],刘 群[1],鲁建英[1,2],龚自正[3],郭欣伟[4]

(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.防化指挥工程学院,北京 102205;
3.中国空间技术研究院总装与环境工程部,北京 100094;
4.辽宁大学物理系,辽宁沈阳 110036)

**摘要**:为在轻气炮上实现二级飞片的超高速发射,设计了波阻抗连续变化的渐变阻抗飞片。变阻抗飞片撞击面为镁,底面为钨,中间为镁、铜和钨的掺合材料。建立了变阻抗飞片超高速发射的计算模型,采用分成单元层描述阻抗变化。对变阻抗飞片超高速发射二级飞片过程进行了数值模拟计算,分析了阻抗分布、二级飞片直径和缓冲层厚度对二级飞片速度的影响。结果表明:在优化阻抗分布、二级飞片直径和缓冲层厚度的条件下,二级飞片的最大速度能够达到 16 km/s 以上。

**关键词**:轻气炮;超高速发射;变波阻抗飞片;数值模拟
**中图分类号**:O521.12 **文献标识码**:A

## 1 引 言

空间碎片与航天器之间的撞击速度平均在 10 km/s 左右,最高可达 20 km/s。二级轻气炮弹丸的发射速度一般不超过 10 km/s。发展速度大于 10 km/s 的超高速发射手段,是模拟空间碎片高速撞击实验的关键技术之一。变阻抗飞片超高速发射是能够在轻气炮上将二级飞片发射到 10 km/s 速度以上,撞击压力达 TPa 量级的技术。

1995 年,Timothy 等人采用数值模拟方法对梯度飞片超高速发射置进行了设计[1]。1999 年,华劲松等人对由镁、铝、钛、铜材料组成的梯度飞片,碰撞二级钛飞片过程进行了一维和二维数值模拟计算,结果表明:把缓冲层材料加在二级飞片上,可使二级飞片达到更高的速度[2]。2000 年,林绍明等应用二维拉各朗日有限元程序 EPFT101 对超高速发射过程进行了数值模拟,并对超高速发射装置进行了优化设计[3]。2004 年,柏劲松等人采用基于维数分裂法的 MFPPM2 计算程序,对组合式梯度飞片发射过程进行了数值模拟计算[4]。目前,变阻抗飞片结构向阻抗连续变化方向发展。

本研究设计了波阻抗连续变化的渐变阻抗梯度飞片,建立了变阻抗飞片超高速发射的计算模型,对发射过程进行了数值模拟计算分析,目的是为渐变阻抗梯度飞片超高速发射装置设计提供理论根据。

## 2 渐变阻抗飞片设计

变阻抗飞片主要有两种,一种是组合式梯度飞片,它由不同阻抗的材料分层组合而成,内部波阻抗准连续变化;另一种是渐变阻抗飞片,它由波阻抗不同的金属粉末进行掺合制备而成,内部波阻抗连续变化。由于渐变阻抗飞片阻抗变化连续性好,对二级飞片的加载更能接近准等熵压缩过程。因此,能够达到更好的发射效果。

* **收稿日期**:2008-04-18;**修回日期**:2008-09-29
**作者简介**:陈 朗(1965—),男,教授,主要从事动态冲击、爆轰、燃烧研究. E-mail:chenlang@bit.edu.cn

渐变阻抗飞片阻抗分布特征可以用下面公式表示[5]

$$Z(x)=Z_0+A(x/d)^P \tag{1}$$

式中:$Z(x)$为沿飞片任意厚度方向 $x$ 处的阻抗值,$d$ 为飞片厚度,$P$ 为阻抗分布指数,$Z_0$ 为飞片碰撞面的阻抗,$A$ 为比例系数。通过 $P$ 值的变化即可改变阻抗的变化规律。确定飞片 $P$ 值,靠近碰撞面和底面的阻抗值后,就可以计算出飞片中不同位置的阻抗。

由于 $P\leqslant 1$ 时,材料的大部分都是处于高阻抗值,这样很容易形成冲击加载,而 $P\geqslant 3$ 时,材料的前半部分波阻抗值变化过于平坦,而后部又变化太快,不利于形成准等熵加载,因此本研究取 1.0、1.5、2.0、3.0 作为 $P$ 值进行设计。在变阻抗飞片撞击面材料镁和底面材料钨的阻抗值已知条件下,通过变化 $P$ 值,可以计算出渐变阻抗飞片内不同位置的阻抗值。

## 3 数值模拟计算

采用非线性有限元动力学计算方法[6],对变阻抗飞片超高速发射结构,在不同条件下二级飞片的加速过程进行数值模拟计算。

### 3.1 物理模型

渐变阻抗飞片超高速发射结构采用具有汇聚作用炮管结构,如图 1 所示,在炮管内嵌入圆环状的内套管,可以防止缓冲层汽化或离解形成的高压气体外泄,延长高压气体对二级飞片的作用时间,使二级飞片达到更高速度。在气炮的弹头上安装变阻抗飞片。变阻抗飞片撞击缓冲层后,加速内管中的二级飞片,使其达到更高的速度。

### 3.2 几何模型

根据图 1 的飞片发射结构建立计算模型。由于结构为轴对称,因此建立二维轴对称计算模型,如图 2所示。模型主要描述变阻抗飞片加速二级飞片的过程。变阻抗飞片在气炮身管中以一定速度撞击内管中的缓冲层后加速二级飞片。为缩短计算时间,在计算初始时刻,变阻抗飞片应尽量靠近二级飞片。

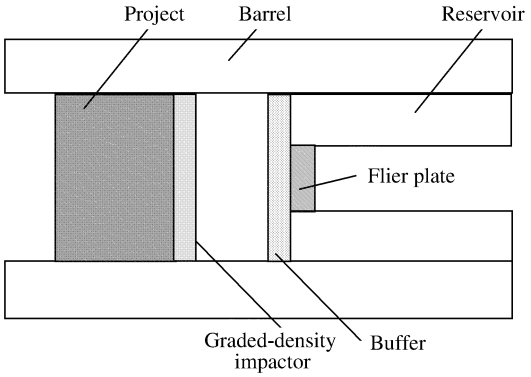



图 1 超高速发射结构示意图

Fig. 1 Sketch of hypervelocity launch

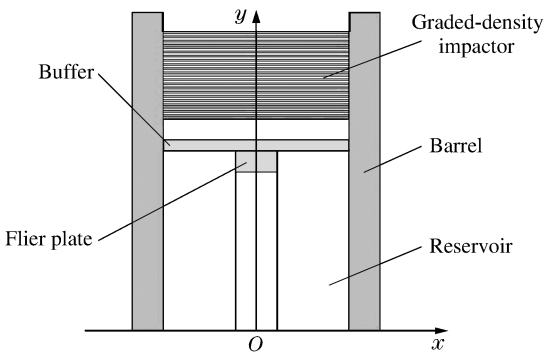



图 2 几何模型图

Fig. 2 Diagram of geometry model

为了实现变阻抗飞片阻抗的连续变化,采用分成单元层的方法来描述变阻抗飞片的阻抗变化。根据飞片轴向的变化规律,设定各个单元层的阻抗,最大限度实现阻抗的连续变化。计算中变阻抗飞片厚度为 8.2 mm,直径为 18 mm。二级飞片的厚度为 2 mm,直径为 2~8 mm。

### 3.3 材料本构

发射结构中所有材料都采用弹塑性流体力学模型,材料状态方程采用 Grüneisen 状态方程。定义压缩材料的压力为

$$p=\frac{\rho_0 C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\upsilon_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu+S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+a\mu) \tag{2}$$

定义膨胀材料的压力为

$$p=\rho_0 C^2\mu+(\gamma_0+a\mu)E \tag{3}$$

式中:$C$ 为冲击 Hugoniot 关系 $u_s$-$u_p$ 曲线截距,$S_1$、$S_2$、$S_3$ 是 $u_s$-$u_p$ 曲线斜率系数,$\gamma_0$ 是 Grüneisen 常数,$a$ 是对 $\gamma_0$ 的一阶体积修正,其中 $\mu=\rho/\rho_0-1$。

变阻抗飞片由不同波阻抗值材料(如镁、铜、钨)掺合而成,缓冲层为聚 4-甲基 1-戊稀(TPX),二级飞片为金属钛,气炮身管和内管为金属钨。表 1 为几种材料的模型参数和 Grüneisen 状态方程参数,表中主要参数来源于文献[3]。

**表 1　材料参数和 Gruneisen 状态方程参数**

**Table 1　Parameters of material and Grüneisen equation of state**

| Material | Density $\rho_0$/(g/cm$^3$) | Shear modulus $G_0$/(GPa) | Yield stress $\sigma_0$/(GPa) | Sound velocity $c$/(km/s) | $S$ | $\gamma_0$ | $a$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu | 8.94 | 47.7 | 0.120 | 3.960 | 1.489 | 1.99 | 0.4 |
| Ti | 4.51 | 44.04 | 0.138 | 4.695 | 1.147 | 2.04 | 0.4 |
| Mg | 1.78 | 16.5 | 0.190 | 4.650 | 1.200 | 1.46 | 0.4 |
| TPX | 0.835 | 0.1 | 0.010 | 2.200 | 1.513 | 0.97 | 0.4 |
| W | 19.3 | 16.0 | 2.200 | 4.005 | 1.268 | 1.20 | 0.4 |

## 4　计算结果与分析

图 3 和图 4 是二级飞片加速过程中不同时刻下计算形变图。变阻抗飞片的 $P$ 值为 1.0,初速度为 7 km/s,缓冲层厚度为 1 mm,二级飞片直径为 6 mm,厚度为 2 mm。0.74 μs 时,二级飞片在变阻抗飞片撞击作用下被加速并发生变形。1.44 μs 时,二级飞片达到了最大速度,下表面中心部分向外凸起,变阻抗飞片已完全变形。由于强烈的撞击作用,身管内部已发生较大的变形,但变形没有超过计算中设定的身管厚度范围。图 5 是二级飞片下表面中心位置的速度时间曲线。最大速度达到了 15 km/s 左右,速度上升过程大致可分为 3 段,从 0.58 μs 到 1 μs 左右,速度上升到了 10 km/s 左右,1.0～1.2 μs 速度基本保持不变,1.2 μs 之后速度快速上升,大约在 1.4 μs 达到 15 km/s 的最大速度。

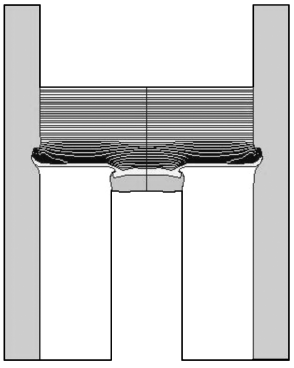


图 3　0.74 μs 时的形变图

Fig. 3　Deformation image at 0.74 μs

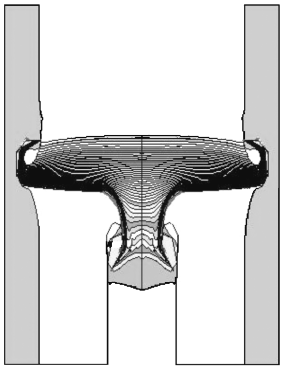


图 4　1.44 μs 时的形变图

Fig. 4　Deformation image at 1.44 μs

分别对 $P$ 值为 1.0、1.5、2.0 和 3.0 的阻抗分布飞片进行模拟计算，分析阻抗分布对二级飞片速度的影响。计算中变阻抗飞片厚度为 8.2 mm，初速度为 7 km/s，缓冲层厚度为 1 mm，二级飞片直径为 6 mm，厚度为 2 mm。结果表明：4 种 $P$ 值条件下二级飞片的速度变化趋势相似，都存在 3 个较明显的速度上升段。$P=1$ 时二级飞片达到的速度最高，$P=2$ 时二级飞片的速度变化最平滑，$P=3$ 时二级飞片速度最小。表 2 为 4 种 $P$ 值条件下二级飞片下表面的最大速度。

**表 2 4 种 $P$ 值条件下二级飞片下表面最大速度**

**Table 2 Maximal velocity history of the flyer center at the lower surface under different $P$ values**

| $P$ | Max. velocity $v_m$/(km/s) |
|---|---|
| 1.0 | 15.00 |
| 1.5 | 14.10 |
| 2.0 | 13.60 |
| 3.0 | 12.70 |

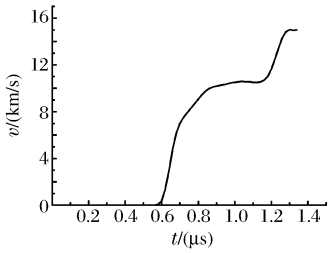



图 5 二级飞片下表面中心位置的速度-时间曲线

Fig. 5 Velocity history of flier center at the lower surface

对直径分别为 2、4、6、8 mm 的二级飞片，在 $P=1$ 的变阻抗飞片作用下的加速情况进行了模拟计算。计算中变阻抗飞片厚度为 8.2 mm，初速度为 7 km/s，缓冲层厚度为 1 mm。图 6 是 2 mm 直径二级飞片达到最大速度时的形变图。直径为 2 mm 的二级飞片在加速过程中发生穿透现象。这是由于 2 mm直径二级飞片的直径较小，二级飞片边缘对飞片运动影响较大。在二级飞片被加速时，中间部分的速度很大，但是边缘部分由于受到内管壁的摩擦作用而运动速度较慢，会在飞片内部产生剪切应力。如果二级飞片的直径较小，边缘摩擦作用的影响会更显著，使飞片内部产生很大的剪切应力，使飞片破裂导致发生穿透现象。4、6 和 8 mm 直径的二级飞片在达到最大速度时没有出现破裂或穿透。表 3 是 4、6 和 8 mm 直径二级飞片的最大速度。可以看到 6 mm 直径的二级飞片达到的速度最高。

**表 3 不同直径二级飞片的最大速度**

**Table 3 Maximal velocity history of the center of flier plate below surface in different diameter**

| Diameter of secondary flier plate $d$/(mm) | Max. velocity $v_m$/(km/s) |
|---|---|
| 4 | 13.80 |
| 6 | 15.0 |
| 8 | 14.0 |

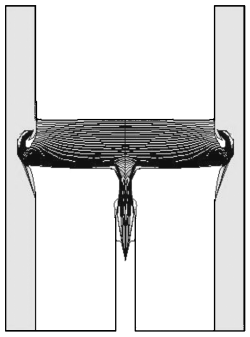


图 6 2 mm 直径二级飞片下的形变图

Fig. 6 Deformation image of ∅2 mm flier plate

缓冲层厚度对二级飞片的速度也有很大影响。因此，对不同缓冲层厚度下的二级飞片速度进行了计算分析。计算中变阻抗飞片厚度为 8.2 mm，初速度为 7 km/s，二级飞片直径为 6 mm，厚度为 2 mm。缓冲层的厚度分别取 1、2、3、4 和 5 mm。表 4 是 1、2、3、4 和 5 mm 缓冲层厚度下二级飞片的最大速度。3 mm 缓冲层厚度下二级飞片的速度最大，达到了 16.13 km/s。图 7 是 3 mm 缓冲层厚度下二级飞片达到最高速度时的形变图。二级飞片的形变相对较小，下表面的平面性较好。

模拟计算结果表明，对设计的模型结构，计算中变阻抗飞片的 $P$ 值为 1.0，厚度为 8.2 mm，初速度为 7 km/s，二级飞片直径为 6 mm，厚度为 2 mm。缓冲层的厚度为 3 mm 时，二级飞片的最大速度能够达到 16.13 km/s。在此结构条件下系统处于比较优化状态，可以作为工程设计的依据。表 5 是此结构在不同变阻抗飞片速度下，二级飞片能够达到的最大速度。

**表 4　不同缓冲层厚度下二级飞片的最大速度**

**Table 4　Maximal velocity history of the center of flier with different thicknesses of buffer**

| Thickness of Buffer /(mm) | Max. velocity $v_m$/(km/s) |
|---|---|
| 1 | 15.00 |
| 2 | 15.50 |
| 3 | 16.13 |
| 4 | 16.10 |
| 5 | 15.70 |

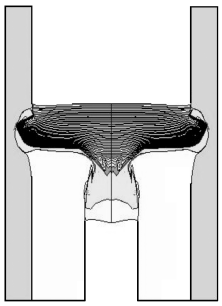


图 7　3 mm 缓冲层厚度下的形变图

Fig. 7　Deformation image of flier with a buffer of 3 mm thickness

**表 5　不同变阻抗飞片速度下二级飞片的最大速度**

**Table 5　Maximal velocity history of the center of flier at different impact velocities**

| Velocity of change impedance flier plate $v_0$/(km/s) | Max. velocity of secondary flier plate $v_m$/(km/s) |
|---|---|
| 5.00 | 11.00 |
| 6.00 | 13.70 |
| 7.00 | 16.13 |

## 5　结　论

建立了变阻抗飞片超高速发射的计算模型,采用分成单元层的方法来描述变阻抗飞片的阻抗变化,实现阻抗的连续变化。通过数值模拟计算分析了变阻抗飞片的阻抗分布,二级飞片直径和缓冲层厚度对二级飞片速度的影响。结果表明:变阻抗飞片撞击面为镁,底面为钨,中间为镁、铜和钨的掺合材料,阻抗 $P$ 值为 1.0,厚度为 8.2 mm,初速度为 7 km/s,二级飞片直径为 6 mm,厚度为 2 mm。在缓冲层厚度为 3 mm 的条件下,二级飞片的最大速度能够达到 16 km/s 以上。

## References:


[1]　Timothy G, Trucano T C, Chhabildas L C. Computational Design of Hypervelocity Launchers [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17: 849-860.

[2]　Hua J S, Tan H, Dong Y B, et al. Theoretical Design of Hypervelocity Launcher [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(4): 277-282. (in Chinese)
华劲松,谭　华,董玉斌,等. 超高速发射器的理论设计 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(4): 277-282.

[3]　Lin S M, Xu N X, Chen D Q. Numerical Simulation of Hypervelocity Launchers [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(2): 139-145. (in Chinese)
林绍明,徐南仙,陈栋泉. 超高速发射装置数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(2): 139-145.

[4]　Bai J S, Tan H, Li P, et al. Numerical Simulation Method for 2D Hypervelocity Launcher under the Graded Density Impactor Drives [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2004, 21(7): 305-310. (in Chinese)
柏劲松,谭　华,李　平,等. 阻抗梯度飞片加载下的超高速发射二维数值模拟方法 [J]. 计算物理, 2004, 21(7): 305-310.

[5]　Shen Q, Zhang L M, Wang C B, et al. Design and Optimization of Wave Impedance Distribution for Flyer Materials [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(7): 1663-1667. (in Chinese)

沈 强,张联盟,王传彬,等. 梯度飞片材料的波阻抗分布设计与优化 [J]. 物理学报,2003,52(7):1663-1667.

[6] Lawrence Livermore National Laboratory. LS-DYNA User's Manual (Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions) [Z]. California: University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.

# Numerical Simulation of Hypervelocity Launch of Flier Plate with Gradual Change Impedance

CHEN Lang[1], LIU Qun[1], LU Jian-Ying[1,2], GONG Zi-Zheng[3], GUO Xin-Wei[4]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *The Institute of Chemical Defense, Beijing* 102205, *China*;
3. *Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing* 100094, *China*;
4. *Liaoning University Faculty of Physics, Shenyang* 110036, *China*)

**Abstract**: A graded-density flier plate with gradual change impedance was designed to launch the secondary flier plate in hypervelocity on a light gas gun. The impact surface of graded-density flier plate was made of magnesium, the base surface was made of tungsten, and the middle part was made of the mixture of magnesium, copper and tungsten. A calculating model of hypervelocity launch was developed. The numerical simulations of hypervelocity launch with graded-density flier plate were conducted. The effects of change law of impedance, diameter of secondary flier plate and thickness of buffer on the secondary flier plate velocity were analyzed. The calculated results indicated that the maximum velocity of the secondary flier plate exceeded 16 km/s in the condition of optimizing the change law of impedance of graded-density flier plate, diameter of secondary flier plate, and thickness of buffer.

**Key words**: light-gas gun; hypervelocity launch; flier plate of graded impedance; numerical simulation