文章编号：1000-5773(2009)02-0081-06

平面二级炸药强爆轰驱动装置的优化设计*

文尚刚，孙承纬，赵 锋，谭多望

（中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：在推广的 Gurney 理论模型基础上，采用遗传算法优化技术，对平面二级强爆轰驱动非线性问题进行了初步的优化设计。飞片及炸药的材料分别为钢及 JO-9159，在初级飞片和次级飞片厚度分别为 2.5 mm 和 0.5 mm 时，得到了不同初级飞片速度(5.0～6.5 km/s)下次级飞片的最大速度及对应的次级炸药最佳厚度。并对铝、铜、钼及钽等几种典型金属材料飞片进行了计算，得到了初级飞片速度为 5 km/s 时对应的次级炸药最佳厚度等优化参数。这些计算结果可以为二级强爆轰驱动装置的实验设计提供重要参考。

关键词：炸药；强爆轰驱动；Gurney 模型；遗传算法；优化设计
中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

所谓的炸药强爆轰驱动飞片技术，就是利用高速飞片（又称初级飞片或一级飞片，速度超过炸药的 CJ 粒子速度）撞击炸药，在炸药中形成强爆轰，并在爆轰产物中形成高压力平台区，在强爆轰产物作用下使得下一级飞片（又称次级飞片或二级飞片）达到更高速度。结合阻抗匹配技术，这种炸药强爆轰驱动装置获得的超高速金属飞片的最高速度可超过 10 km/s，由它撞击靶材料可产生几百万大气压的压力，是一种简易可行的超高压加载手段[1-3]。

在平面二级炸药强爆轰驱动问题中，要使次级飞片速度达到最理想状态，将涉及到初级飞片厚度、次级炸药厚度、初级飞片与次级炸药之间的距离等多种因素。在初级飞片加载能力一定的条件下，初级飞片过厚时，它作用于次级炸药的时间较长，但撞击速度较低，从而在次级炸药中形成的压力较低或难以形成强爆轰；而当初级飞片过薄时，它的速度虽然较高，但它对次级炸药的作用时间会缩短，从而在次级炸药爆轰产物中形成的高压平台较窄。此外，次级炸药的厚度对次级飞片速度的影响也较大。当次级炸药较厚时，在次级炸药中形成的强爆轰容易衰减为正常爆轰，从而使强爆轰驱动失去意义。因此，初级飞片的速度及厚度、次级炸药的厚度、次级飞片的厚度、飞片的材料等之间存在一个匹配关系。

本研究在推广的 Gurney 理论模型基础上，采用遗传算法(Genetic Algorithm)优化技术，对平面二级强爆轰驱动非线性问题进行了初步的优化设计，得到了不同初级飞片速度(5.0～6.5 km/s)下次级飞片的最大速度及对应的次级炸药最佳厚度。初级飞片速度为 5.0 km/s 时，得到了不同飞片材料对应的次级炸药最佳厚度等优化参数。这些优化计算参数可以为相应的实验设计提供重要参考。

2 推广的 Gurney 模型

如图 1 所示，Gurney 模型假定初级和次级飞片都是刚性的，两个飞片之间的爆轰产物速度为线性

* **收稿日期**：2008-07-03；**修回日期**：2008-12-19
基金项目：国防科技工业基础科研项目(A1520070075)
作者简介：文尚刚(1968－)，男，博士，研究员，主要从事爆轰物理学研究. E-mail：wensg@21cn.com

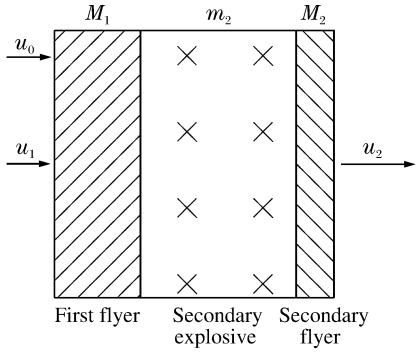


图 1 飞片撞击下炸药爆轰驱动的 Gurney 模型

Fig. 1 The Gurney model for explosive driving system impacted by a high speed flyer

分布,由炸药爆轰驱动系统的动量和能量守恒,可得到它们的最终速度 u_1 和 u_2。标准的 Gurney 模型中,初级飞片和次级飞片在爆炸前是静止的。设次级炸药的 Gurney 速度为 u_g;质量为 m_2;初级飞片及次级飞片的质量分别为 M_1 和 M_2;μ_1 及 μ_2 分别为初级飞片及次级飞片相对次级炸药的质量比或装填比,即 $\mu_1=M_1/m_2$,$\mu_2=M_2/m_2$。得到如下计算公式[4]

$$u_2=\frac{a}{b}u_0+\left\{\frac{3}{(2+a)b-3}\left[\frac{2(1-a)}{b}+\frac{a}{b}\left(1-\frac{a}{b}\right)\left(\frac{u_0}{u_g}\right)^2\right]\right\}^{1/2}u_g \tag{1}$$

$$u_1=(1-b)u_2+au_0 \tag{2}$$

式中

$$a=\frac{2\mu_1}{1+2\mu_1},b=1+\frac{1+2\mu_2}{1+2\mu_1} \tag{3}$$

(1)式说明,在次级炸药材料固定的情况下,次级飞片速度依赖 3 个参数:a、b 和初级飞片初速度 u_0。用(1)式对文献[5]中的实验模型进行计算,计算结果与实验结果符合较好,相对误差在 3%左右。

3 二级强爆轰驱动装置的优化设计

一般说来,若次级炸药层过厚,强爆轰波传至次级飞片界面时可能已经退化为正常爆轰波,初级飞片动能无法传递给次级飞片,此时次级飞片的加速过程将近似退化为简单的正常爆轰驱动飞片问题;若次级炸药层过薄,则无法体现次级炸药层对次级飞片驱动的贡献,从而退化为 Balchan[6] 等人提出的简单的二次飞片速度增益系统。由此可知,这类前级/次级爆轰驱动系统的合理设计问题,可以归结为对次级炸药层厚度及两级飞片质量比的确定问题。

炸药化爆加载下炸药强爆轰驱动飞片及气炮加载下炸药强爆轰驱动飞片问题都可以简化成高速初级飞片撞击次级炸药强爆轰驱动次级飞片问题。对于二级强爆轰驱动装置(不考虑初级飞片的加载方式),需要优化的主要参数有:初级飞片的材料和厚度、次级飞片的材料和厚度、次级炸药的材料和厚度等。为了简化分析,将初级飞片及次级飞片的材料选为同一种材料。将次级炸药选用目前爆轰性能较好的 JO-9159,该炸药的密度为 1.86 g/cm^3,正常爆速为 8.86 km/s,爆压为 36.8 GPa,Gurney 速度约为 2.85 km/s,与美国的 PBX9404 炸药性能相当,基本上是我国军用炸药中爆轰性能最好的一种。根据文献[4]的分析,在初级飞片速度固定的条件下,初级飞片与次级飞片的质量比 k 越大,次级飞片获得的速度越高,但随着 k 的增大,次级飞片获得的速度增量逐渐减小。如果 k 需要进一步增大,则可以通过增加初级飞片厚度或减小次级飞片厚度来实现,显然这两种方法都有一定的局限性。当初级飞片过厚时,由于所采用加载装置(化爆加载或气炮加载)的加载能力的限制,将会导致初级飞片速度降低,这样做反而得不偿失。而当次级飞片厚度太小时,其可用性将变差,可能会带来次级飞片容易变形、为末级飞片提供的动能变小等问题。一般情况下,k 取 5 是一个较好的选择。

基于上述考虑,初步将初级飞片厚度设定为 2.5 mm,次级飞片厚度设定为 0.5 mm,飞片及炸药材

料分别为钢及 JO-9159。在飞片、炸药材料及飞片厚度不变的前提下,采用遗传优化算法,对初级飞片速度(≥5 km/s)一定、次级炸药厚度不同时的二级强爆轰驱动装置进行优化计算。

遗传算法是一种由生物界的进化规律(适者生存,优胜劣汰遗传机制)演化而来的随机化搜索方法。它是由美国的 J. Holland 教授于 1975 年首先提出的,其主要特点是:直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定;具有内在的隐并行性和很好的全局寻优能力;采用概率化的寻优方法,能自动获取和指导优化搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定的规则。遗传算法的这些性质,已被人们广泛地应用于组合优化、机器学习、信号处理、自适应控制和人工生命等领域[7]。

在本研究的计算中,目标函数取次级飞片速度的负值,即

$$f=-\frac{a}{b}u_0-\left\{\frac{3}{(2+a)b-3}\left[\frac{2(1-a)}{b}+\frac{a}{b}\left(1-\frac{a}{b}\right)\left(\frac{u_0}{u_g}\right)^2\right]\right\}^{1/2}u_g \tag{4}$$

主要决策变量取次级炸药质量 m_2(或炸药厚度 l),约束条件为固定两级飞片厚度、飞片及炸药的材料。对这个非线性问题求解,通过求目标函数的最小值,得到对应次级飞片最大速度的次级炸药厚度 l_{optimal}。初级飞片选取以下几个典型速度:5.0 km/s、5.5 km/s、6.0 km/s、6.5 km/s。计算结果列于表 1。图 2 为这几种速度条件下次级飞片速度与次级炸药厚度的关系曲线。可见,当初级飞片速度在5.0～6.5km/s之间时,次级炸药的最佳厚度为1.6～2.3mm,且随着初级飞片速度的提高,对应次

表 1　二级强爆轰驱动装置优化计算结果

Table 1　Optimal calculation results of two stage strong detonation setup

u_0/(km/s)	$u_{2\max}$/(km/s)	u_{ideal}/(km/s)	l_{optimal}/(mm)
5.0	8.74	8.33	2.3
5.5	9.53	9.17	2.0
6.0	10.32	10.00	1.8
6.5	11.12	10.83	1.6

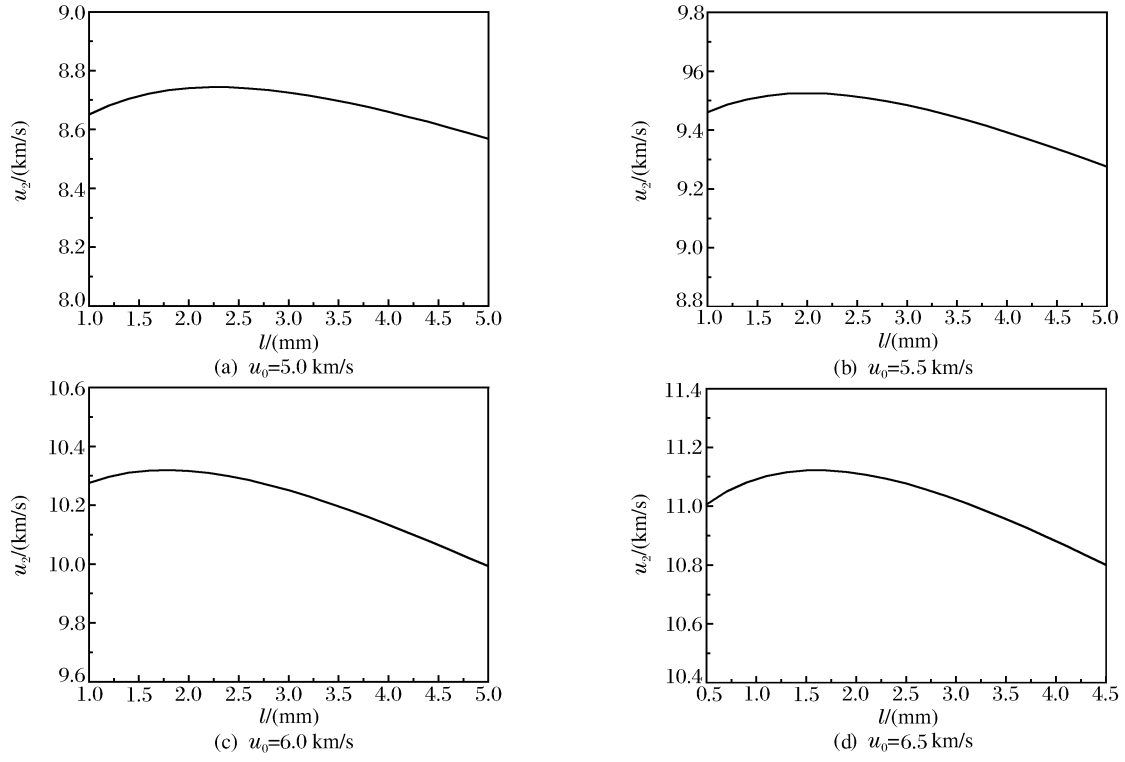


图 2　次级飞片速度与炸药厚度的关系

Fig. 2　Velocity of the secondary flyer versus thickness of the explosive

级炸药最佳厚度逐渐减小。表1中还给出了不考虑次级炸药存在时，完全按照动量守恒及能量守恒关系(即初级飞片与次级飞片进行理想的完全弹性碰撞)计算出的次级飞片速度 u_{ideal}。可以看出，强爆轰驱动作用下的次级飞片速度均比完全弹性碰撞作用下的次级飞片速度略高。对文献[5]的实验结果进行了类似的计算，也得到同样的结论。由此可以看出：在二级强爆轰驱动装置中，次级炸药对次级飞片的增速作用十分明显。

根据上述的优化思路，我们对文献[5]中的实验模型进行了计算，发现初级飞片速度分别为 4.27 km/s、4.13 km/s 和 4.01 km/s 时对应的次级炸药最佳厚度分别为 3.3 mm、3.7 mm 和 4.3 mm (实验中的炸药厚度分别为 5.0 mm、4.0 mm 和 3.0 mm)，次级飞片速度均可提高 0.5%左右。可见，文献[5]中的实验模型有进一步优化的可能。

由表 1 还可以看出，当初级飞片速度为 6.0 km/s 时，0.5 mm 厚的次级钢飞片最大速度可以达到 10.32 km/s，这个结果是相当令人鼓舞的。后续实验研究工作将在此基础上进行设计，并通过实验对上述优化模型进行验证和修正。

上述计算结果均是针对飞片为钢，炸药为 JO-9159 进行的。现保持炸药材料为 JO-9159 不变，对飞片为铝、铜、钽及钼等几种典型材料进行计算。计算条件设定为：初级飞片与次级飞片均为相同材料，它们的厚度分别为 2.5 mm 和 0.5 mm(即对应两者的 k 值均为 5)，初级飞片速度为 5.0 km/s，通过计算得到次级炸药的最佳厚度。计算主要参数与计算结果如表 2 所示，从表中可以看出，飞片采用不同材料得到的次级飞片的最大速度均是相同的，这是由于它们的 k 值都相同的缘故。但是，随着飞片材料密度的提高，对应次级炸药厚度也在增加，由 0.8 mm(对应为铝飞片)增加到 4.8 mm(对应为钽飞片)，说明需要补充的能量也在增加。

表 2 几种不同飞片材料的优化计算结果

Table 2 Optimal calculation results for different flyer material

Material	Density/(g/cm^3)	u_{2max}/(km/s)	$l_{optimal}$/(mm)
Al	2.79	8.74	0.8
Fe	7.80	8.74	2.0
Cu	8.93	8.74	2.6
Mo	10.20	8.74	3.0
Ta	16.65	8.74	4.8

若初级飞片采用阻抗较高的材料，而次级飞片采用阻抗相对较低的材料，则通过强爆轰驱动获得的二级飞片将有更高的速度增益。仍取初级飞片速度 u_0 为 5.0 km/s，并保持初级飞片及次级飞片的厚度分别为 2.5 mm 及 0.5 mm。采用上述同样的优化计算方法，在不同材料飞片组合下对次级飞片的最大速度及对应炸药的最佳厚度进行了计算，结果列于表 3。与表 2 的结果比较，可以看出：次级飞片速度有明显的提高，最高提高了 16.7%，但对应次级炸药的厚度也有较大增加。

表 3 不同材料飞片组合的优化计算结果

Table 3 Optimal calculation results for different combination of flyers

First flyer material	Secondary flyer material	u_{2max}/(km/s)	$l_{optimal}$/(mm)
Ta	Mo	9.71	4.73
Ta	Cu	9.96	4.63
Ta	Fe	10.20	4.52
Mo	Cu	9.02	2.97
Mo	Fe	9.29	2.96
Cu	Fe	9.02	2.60

综上所述,在次级飞片材料及厚度确定的条件下,为了提高次级飞片速度,应采取以下的优化原则对二级强爆轰驱动装置进行优化:

(1) 尽可能提高初级飞片的速度;

(2) 增加初级飞片的厚度;

(3) 初级飞片采用阻抗较大的材料;

(4) 炸药的厚度选用最佳厚度。

显然,上述(1)～(3)条件是不可能同时满足的。实际设计中应结合加载初级飞片设备的加载能力进行综合考虑,充分利用它可能达到的加载能力,优先提高初级飞片速度。下一步的实验研究将采用二级轻气炮发射的飞片作为强爆轰驱动的初级飞片。根据流体物理研究所二级轻气炮的发射能力,初级飞片速度范围将选定在 5.0～6.5 km/s,初级飞片的厚度可以选为 2.5～3.0 mm,飞片材料可选为钽、钨等。

4　结　论

本研究应用推广的 Gurney 模型对平面二级强爆轰驱动模型进行了初步的优化设计,得到了飞片及炸药材料分别为钢及 JO-9159,初级飞片和次级飞片厚度分别为 2.5 mm 和 0.5 mm 时,不同初级飞片速度(5.0～6.5 km/s)下次级飞片的最大速度及对应的次级炸药最佳厚度。同样地,对铝、铜、钼及钽等几种典型金属材料飞片进行了计算,得到了初级飞片速度为 5.0 km/s 时对应的次级炸药最佳厚度等优化参数,并提出了二级平面强爆轰驱动装置的优化设计原则。这些结果可以为二级平面强爆轰驱动装置的实验设计提供重要参考。

所采用的推广 Gurney 模型,尚未考虑当飞片相对较薄时产物密度非均匀分布的影响,也未考虑飞片受冲击压缩和其它耗散引起的能量损失。在初级飞片速度较高的情况下,计算结果可能有较大误差,需要通过实验作进一步验证,并对优化设计模型进行修正。

References:

[1] Zhao F, Wen S G, Sun C W, et al. Experimental Studies on Multiple-Stage Flyer [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 13-16. (in Chinese)
赵　峰,文尚刚,孙承纬,等. 多级串联式超高速飞片装置实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2001,21(1):13-16.

[2] Sun C W, Zhao F, Wen S G, et al. High Velocity Flyers Accelerated by Multistage Explosive Slabs [A]//Proceeding of 1997 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter [C]. New York, 1998: 971-974.

[3] Wen S G, Sun C W, Zhao F. Multi-Stage Detonation System－A New Loading Technology for Studying Hypervelocity Impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2000, 14(1): 22-27. (in Chinese)
文尚刚,孙承纬,赵　峰. 多级爆轰驱动——研究超高速碰撞的一种新的加载技术 [J]. 高压物理学报,2000,14(1):22-27.

[4] Sun C W, Wen S G, Zhao F. An Optimal Analysis of Multi-Stage Explosive Accelerated High Velocity Flyers with the Improved Gurney Model [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(4): 299-304. (in Chinese)
孙承纬,文尚刚,赵　峰. 多级炸药爆轰高速驱动技术的 Gurney 模型优化分析 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(4):299-304.

[5] Wen S G, Zhao F, Sun C W, et al. Experimental Study on Hypervelocity Flyer Driven by Strong Detonation at Low Vacuum Condition [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2004, 18(4): 315-318. (in Chinese)
文尚刚,赵　锋,孙承纬,等. 低真空条件下炸药强爆轰驱动超高速飞片实验研究 [J]. 高压物理学报,2004,18(4):315-318.

[6] Balchan A S, Cowan G R. Method for Accelerating Flat Plates to High Velocity [J]. Review of Scientific Instru-

ments,1964,35(8):937-944.

[7] Ji W T,Mao F Y. Genetic Algorithm and Developing Trend [J]. Computer Development & Applications,1999,12(8):8-13. (in Chinese)
姬旺田,毛法尧. 遗传算法及其发展动向 [J]. 电脑开发与应用,1999,12(8):8-13.

An Optimal Design for Planar Two-Stage Strong Detonation Driving Device

WEN Shang-Gang,SUN Cheng-Wei,ZHAO Feng,TAN Duo-Wang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

Abstract:Based on the improved Gurney model for explosive acceleration,a planar two-stage strong detonation driving device has been optimized with genetic algorithm. The flyer and the explosive are steel and JO-9159,and the thicknesses of the first and the secondary flyer are 2.5 mm and 0.5 mm,respectively. The maximal velocity of the secondary flyer and the optimized thickness of the explosive are obtained at different velocities of the first flyer from 5.0 km/s to 6.5 km/s. In a similar way,the optimized parameters are also obtained when the flyer's material is aluminium,copper,molybdenum and tantalum,respectively,with a initial velocity of the first flyer of 5.0 km/s. The calculation results can be used in experimental design of planar two-stage strong detonation driving device.

Key words:explosive;strong detonation driving;Gurney model;genetic algorithm;optimization design