文章编号：1000-5773(2005)04-0343-05

二级装药强爆轰驱动次级飞片的分析*

文尚刚，邓文荣，赵 锋，孙承纬

（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实验室，四川绵阳 621900）

摘要：对二级炸药/飞片爆轰系统产生高速度飞片的需求背景作了介绍。在平面一维假定下，应用气体动力学的一维推体公式和推广的Gurney公式对次级飞片的速度进行了计算。在初级炸药和末级飞片厚度一定的条件下，对二级炸药/飞片爆轰系统的几何参数选取进行了优化分析，给出了爆轰系统驱动飞片的算例，与数值模拟结果和实验测量结果进行了比较，证实了经验公式的合理性。并对如何提高两级飞片的速度及平面度问题进行了探讨。

关键词：炸药；强爆轰；刚性飞片

中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

为了研究超高压加载下材料动态力学性质和超高速碰撞等问题，人们发展了多种动高压加载技术，如气体炮、化爆技术、高功率激光和地下核爆炸等。其中利用炸药化爆增压技术由于结构简单、操作方便而成为一种比较常用的加载手段。在化爆增压技术中除了接触爆炸、空腔增压、多层增压以及变截面、二维产物会聚等方法外，还可利用炸药强爆轰方法增压。在炸药中形成强爆轰，可以利用高速炸药引爆低速炸药、对炸药的冲击预压、飞片撞击炸药、爆轰波的马赫反射、曲面炸药的收敛爆轰等。其中利用飞片撞击炸药在炸药中形成的强爆轰波与其它方法相比，具有易操作、强爆轰波作用面积大且平面性较好的特点。

二级爆轰驱动装置作用基本过程如下：第一级炸药爆轰驱动初级飞片撞击第二级炸药/飞片组合，在次级炸药中形成强爆轰，使其爆轰产物流动区成为较均匀分布的高压区，从而使得强爆轰驱动的次级飞片速度达到中高速或超高速。这里除了要求高质量的平面波发生器、密度很均匀的药柱以及精密装配工艺外，恰当的理论设计对于装置参数选择、能量转换效率的提高和飞片完整性的保持，都是十分重要的。使用这样的简易爆轰驱动装置可以较容易将厚度为1 mm的钢飞片驱动到6～7 km/s，且在较大面积范围内具有较好的平面度。用该次级飞片再去撞击组合或梯度飞片，就可能构成结构简单、体积较小、成本不高、操作简便的超高速飞片装置，作为高动压加载的撞击器，具有重要的应用前景[1～3]。

在本文中，对二级强爆轰驱动系统进行了数值计算和理论分析，并对如何提高两级飞片的速度及平面度问题进行了探讨。

2 二级爆轰驱动系统中飞片速度的计算

2.1 初级飞片速度计算

设初级炸药E_1和次级炸药E_2为同种炸药，它们的质量分别为m_1和m_2，具有初始密度ρ_0和定态正常爆速D_J，爆轰产物的绝热指数为γ。初级飞片F_1和次级飞片F_2为同种材料，质量分别为M_1和M_2。系统的基本模型结构为E_1/F_1/空腔/E_2/F_2，假设初级飞片F_1为不可压缩的刚性飞片，则由气体

* **收稿日期**：2004-04-16；**修回日期**：2004-07-21

基金项目：国家自然科学基金(19882003)；中国工程物理研究院预研基金(YKXJ-970106)

作者简介：文尚刚(1968—)，男，博士，副研究员，主要研究方向为爆轰物理. E-mail：wensg@21cn.com

动力学可得初级炸药 E_1 驱动初级飞片 F_1 的极限速度为

$$u_{1\max}=D_J\left(1-\frac{2}{1+\sqrt{1+2\eta}}\right) \tag{1}$$

式中：$\eta=16m_1/27M_1$，在以平面波透镜起爆的爆轰系统中，m_1 可以取为相应的等效质量，则公式(1)与数值解和实验结果的误差小于 6%[4]，因此(1)式可用于计算初级飞片的速度。

2.2 强爆轰炸药对次级飞片驱动的速度计算

次级飞片 F_2 受初级飞片 F_1 作用和次级炸药 E_2 爆炸加速，炸药 E_2 在速度为 u_0 的平面刚性活塞驱动下，其爆轰状态根据 u_0 是否高于爆轰产物中粒子速度 $u_J=D_J/(\gamma+1)$ 而有所不同，对于 u_0 小于 u_J 的情形，飞片 F_1 对 F_2 的贡献较小。当飞片 F_1 的速度 u_0 大于 u_J 时，在次级炸药 E_2 中将产生强爆轰，文献[5]在刚性飞片和 $\gamma=3$ 的假定下，采用拟定态强爆轰波近似和飞片 F_1 对炸药 E_2 的单向作用近似，对强爆轰的传播和驱动问题进行了分析，结果表明拟定态强爆轰近似和数值模拟比较接近，而按单向作用线性近似给出的飞片 F_2 的极限速度是偏低的估计。

气体动力学计算可以给出爆轰驱动的完整过程，但就飞片最终速度的估算来说，Gurney 模型更为方便。这个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分布，应用(飞片 F_1/炸药块/飞片 F_2)系统的动量和能量平衡，可得到它们的最终速度 u_1 和 u_2。标准的 Gurney 模型中，F_1 和 F_2 在爆炸前是静止的，把这模型推广到 F_1 具有撞击炸药的初速 u_0 的情形，设次级 E_2 的厚度为 l，则 $m_2=\rho_0 l$，得到如下计算公式

$$\begin{cases}u_1=[2M_1u_0/m_2-(1+2M_2/m_2)u_2]/(1+2M_1/m_2)\\ u_2=(-H+\sqrt{H^2+4FI})/2F\end{cases} \tag{2}$$

式中：

$$F=1/3+M_2/m_2+G/3+(1/3+M_1/m_2)/G^2$$
$$G=-(1+2M_2/m_2)/(1+2M_1/m_2)$$
$$H=2M_1u_0[1+6(1/3+M_1/m_2)G]/3m_2(1+2M_1/m_2)$$
$$I=u_g^2+M_1u_0^2(1+8M_1/3m_2)/m_2(1+2M_1/m_2)^2$$

当 $u_0=0$ 时，$H=0$，$I=u_g^2$，(2)式即为标准的 Gurney 公式。根据实验测量[6]，PBX-9404 炸药的 Gurney 速度为 $u_g=2.86$ km/s，取初、次级钢飞片的厚度分别为 2.5 mm 和 1.0 mm，次级炸药的厚度为 4 mm，并取 $u_0=4.9$ km/s。则由(2)式给出 $u_1=0.64$ km/s，$u_2=7.04$ km/s，同数值模拟和国外有关结果十分接近。

3 次级飞片驱动的数值模拟

计算模型如图 1 所示，JO-9159 炸药为类似于 PBX-9404 的炸药，数字为各对应部分的厚度(mm)，C_1 和 C_2 为空腔，初始真空，采用二维有限元动力学程序 DYNA-2D 进行一维数值模拟，计算中 JO-9159 炸药的产物状态方程为 JWL，金属飞片采用流体弹塑性模型。由于强爆轰阵面压力高，爆轰反应过程快，计算的空间和时间步长应取得很小。

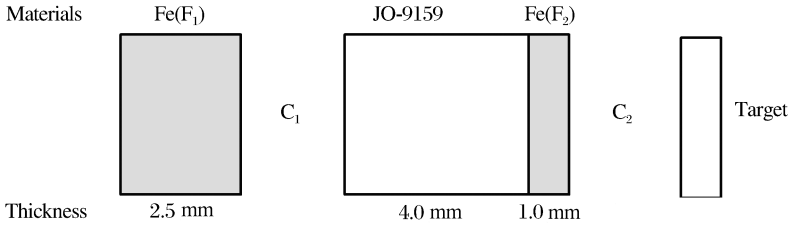


图 1 多级爆轰驱动装置的计算模型

Fig. 1 Schematic of calculation model for strong detonation driving

计算结果的准确性与采用的物性常数有关。强爆轰时产物中压力可高达 100 GPa 以上,比 Neumann 尖压力高一倍。根据实验研究,强爆轰产物的状态近似地位于过 CJ 点的正常爆轰产物的等熵线上[7],因此其物态方程仍可沿用通常由 Grüneisen 方程以等熵线为参考态而导出的形式及数据,如 HOM、JWL 等。钢飞片 F_1 经 C_1 后以恒定初速 $u_0=4.9$ km/s 撞击次级炸药,次级飞片 F_2 的前后表面速度历史见图 2,它们的最大速度约为 6.80 km/s,F_2 和 F_1 之间的动能比例 η 为 77%。由于受飞片 F_1 的撞击,炸药块处于强爆轰状态,如图 3,飞片 F_1 作为活塞,使爆轰波的压力剖面基本保持为常数,爆轰波与飞片 F_2 作用后,又向爆轰产物内反射了一个压力达 100 GPa 的冲击波,有效地使飞片 F_2 达到与爆速接近的中高速范围。如果改用单级爆轰装置,要使 1 mm 厚的钢飞片达到 7 km/s 的速度,JO-9159 炸药的有效装药量要厚达 25 cm,并且为了保持平面一维性,其直径应大于 0.5 m。这显然是很难做到的。可以看出,这种二级爆轰驱动的方法可以明显提高次级飞片的速度,不受初、次级飞片材料间阻抗匹配的限制,得到较高的能量传递效率。

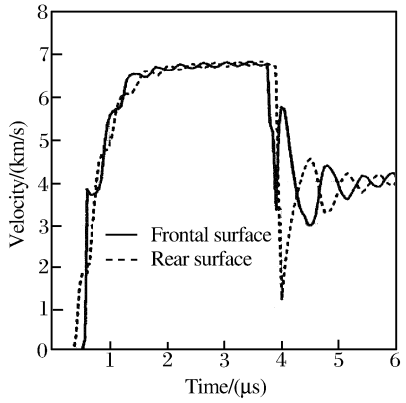


图 2　钢飞片 F_2 的前后表面速度历史

Fig. 2　Frontal and rear surface speed of steel flyer(F_2)

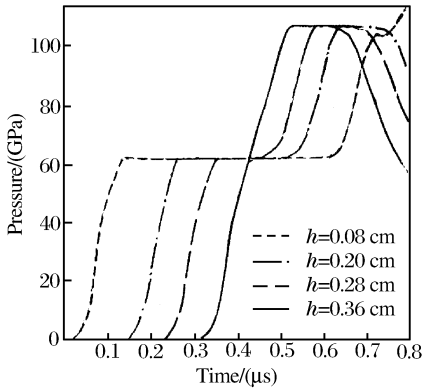


图 3　JO-9159 中不同 Lagrange 位置 h 的压力历程

Fig. 3　Pressures at different Lagrange position into JO-9159

4　模型的优化

次级飞片 F_2 的速度除了与之自身的质量有关外,还与炸药 E_1 和 E_2 的质量、飞片 F_1 的质量或厚度有关,直观上认为 m_1 和 m_2 越大,F_2 的厚度越小,则其速度就越高,但受实际爆轰装置平面性要求和应用的限制,飞片 F_1 和炸药 E_1 或 E_2 的厚度和质量总是有限的,因此,从几何上进行气体动力学优化的思路是建立在 F_2、E_1 的厚度一定,且 E_2 的厚度远小于 E_1 的前提下进行的,因此对于图 1 所示的模型,需进行优化的几何参数为初级飞片厚度和次级炸药厚度。

采用数值编码进行优化计算,可以比较准确地反映由几何参数变化引起的流场变化、次级飞片速度变化的细节,但可能对整个过程物理作用图像较为模糊,且比较费时,故本研究拟采用分析公式(1)和公式(2)进行这种优化。

以 l_{E_1}、l_{E_2} 和 l_{F_1} 分别代表炸药 E_1、E_2 和飞片 F_1 的厚度,对于 $l_{E_1}=10.5$ cm,$l_{E_2}=0.4$ cm,$l_{F_1}=0.25$ cm 的模型,公式(2)与数值解的比较见图 4,二者在初级飞片厚度大约 0.35 cm 附近都出现了极大值,但经验公式计算的速度比数值结果稍高,因为有限元程序 DYNA 计算的飞层速度常低于实验测量结果,因此可以认为公式(2)较好地反映了在高速飞片撞击下次级炸药的爆轰驱动能力。以公式(2)为基础,对不同初级飞片厚度、不同次级炸药厚度作了计算,次级飞片速度变化如图 5 所示,可知在 $l_{F_1}=0.35$ cm 和 $l_{E_2}=0.4$ cm 的位置附近,次级飞片速度 u_2 达到极大值 7.16 km/s。这与最初的直观认识是不同的。这说明,l_{F_1} 为 0.35 cm 时它既提高了对 E_1 的能量吸收率,又保持了一定的高速度;而次级炸药过厚则其从初级飞片吸收的能量超过了其自身释放出的能量,所以适当的厚度才能使 F_2 在较短的时间或空间范围内达到极大速度。

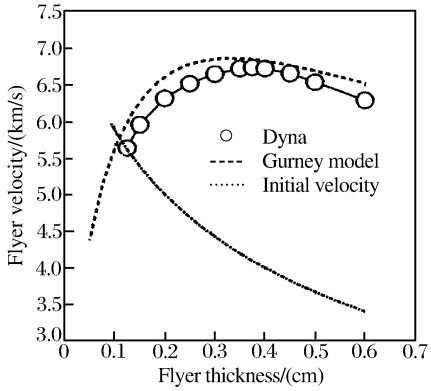


图 4 分析公式与数值计算结果的比较

Fig. 4 Comparison of Gurney formula and numerical simulation

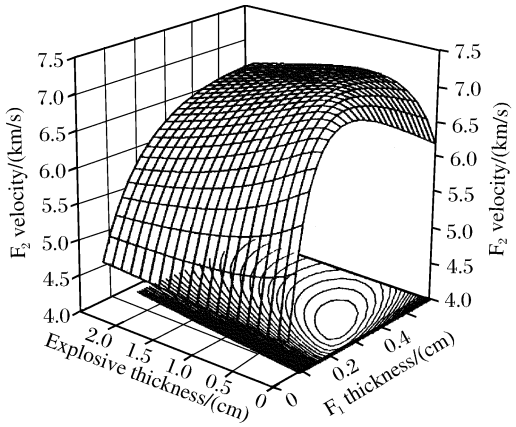


图 5 次级飞片速度随不同 F_1 和 E_2 厚度的变化

Fig. 5 F_2 velocity versus different thickness of F_1 and E_2

5 计算结果与实验结果的比较

实验中一级和二级飞片材料采用钢，炸药采用以 HMX 为主要成分的 JO-9159 炸药，模型为初级炸药的等效厚度 10.5 cm，次级炸药 0.4 cm，次级飞片厚度为 0.10 cm。第一空腔约为 5.0 cm，初级飞片有两种厚度，分别为 0.25 cm 和 0.36 cm，采用电探针测试方法，实验测得初级飞片速度分别为 4.9 km/s 和 4.3 km/s，次级飞片速度分别为 7.0 km/s 和 7.5 km/s，这与图 5 所示的结果基本一致。

6 讨 论

(1) 采用经验分析公式可以较好地进行这种强爆轰驱动飞片装置设计。

(2) 由一维推体公式可以得出，提高一定厚度初级飞片速度的主要途径为增加初级炸药的有效装药量和初级炸药尽可能选用爆速较高的高能炸药，而增加初级炸药的有效装药量则可以通过增加装药厚度或给初级炸药增加约束如加一个一定厚度的重金属套筒来实现。

(3) 初级飞片和次级炸药均存在一个最佳匹配厚度，使次级飞片的速度达到极大值，次级炸药过厚将过多地吸收初级飞片的动能，使次级炸药中的强爆轰逐渐衰减成正常爆轰或接近于正常爆轰反而不利于次级飞片的加速。

References:

[1] Trebinski R, Trzcinski W, Wlodarczyk E. On Driving Bodies Seperated by Plane Layers of Explosives [J]. J Tech Phys, 1980, 21(1): 51－62.

[2] Swierczynski R, Tyl J, Wlodarczyk E. Layered Single Stage Driving System for Plane Liners [J]. J Tech Phys, 1985, 25(2): 207－224.

[3] Chhadildas L C, Kmetyk L N. An Impact Technique to Accelerate Flyer Plate to Velocities over 12 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17: 183－194.

[4] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State (2nd ed) [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第 2 版) [M]. 北京：科学出版社，1999.

[5] Sun C W, Zhao F. High Velocity Flyers Accelerated by Multistage Explosive Slabs [A]. Proc of 1997 Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter [C]. Boston, MA, 1997.

[6] Vigil M G. Analyses of Terminal Flyer Plate Velocities for Various Cased Explosive Configurations [R]. DE91012132, 1991.

[7] 邓全农. 过加载下固体炸药的实验研究和爆轰产物的高压状态方程 [D]. 绵阳：中国工程物理研究院流体物理研究所，1989.

Analysis of Two Stages Explosive/Flyer System

WEN Shang-Gang, DENG Wen-Rong,
ZHAO Feng, SUN Cheng-Wei

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

Abstract: The driving abilities of strong detonation in two stages explosive/flyer system have been studied by both analysis and experiments. Under certain condition, the system's geometric parameters are optimized in order to drive final flyer to high speed. The abilities of strongly detonating explosive slab in driving metallic flyers to high speed are shown in our calculation model. Calculated results agree with experimental results. The performances of strong detonation are illustrated. And numerical calculation shows that converging detonation can be an effective method to accelerate a flyer up to high speed.

Key words: explosives; strong detonation; stiff flyer

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。《高压物理学报》力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。《高压物理学报》征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。《高压物理学报》接受中、英文稿件。

来稿应论点明确、数据可靠、逻辑严密、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6000～12000 字以内，论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用中华人民共和国法定计量单位。第一作者应确保全体作者同意文章署名，并提供所有联系方式，简要介绍工作背景和论文意义。来稿应一式 3 份。稿件中所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

自 1987 年创刊以来，《高压物理学报》取得了较大的成就。2001 年，《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为“中国期刊方阵”双效期刊。国际主要检索系统“EI Compendex”和“CA”一直收录《高压物理学报》文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续四版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊(北京大学出版社，1992 年、1996 年、2000 年、2004 年)。据中国科学引文数据库公布的“2000 年影响因子最高的中国科技期刊 300 名排行榜”显示，《高压物理学报》影响因子为 0.3627，全国排名第 94 名，列物理类期刊第 3 名。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在 3 个月甚至更短时间内刊出。为缩短邮寄时间，编辑部建议作者使用电子邮件投稿。

重点注意事项

▲ 快速发表　评审意见均为“优”的文章享有快速发表通道，欢迎广大专家学者将优秀稿件投给《高压物理学报》。

▲ 中英文摘要　作为文章精华部分，中、英文摘要一定要仔细斟酌，特别是英文摘要，其质量直接决定文章能否被 EI Compendex 收录。《高压物理学报》要求文章的中文摘要在 200～400 个字之间，英文摘要不少于 120 个单词；摘要内容千万不要泛泛而谈，应有具体内容。为促进论文的国际交流，英文摘要必须：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，应重点包括 4 个要素：即研究目的、方法、结果、结论等，结果、结论是最重要的；应要素齐全，繁简得当。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。(3) 英文摘要中尽量避免特殊字符(希腊字符、上下标)及特殊字符组成的数学表达式，且第 1 句不要与英文题名重复。

▲ 参考文献　科技论文必须引用参考文献，《高压物理学报》要求作者应充分著录参考文献，并尽量引用近期期刊文章。中文参考文献必须附英译文，著录项目齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》和万方数字化科技期刊群。凡经本刊录用的稿件，作者便自动将光盘版和网络版出版权转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

来稿请寄：四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

电子邮件：gaoya@caep.ac.cn；gywl@chinajournal.net.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；传真：(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部启