

文章编号: 1006-9941(2013)04-0527-06

激光冲击起爆炸药关键技术研究进展

王猛, 何碧, 蒋明

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 激光冲击起爆炸药系统具有时间控制精确, 快速响应, 抗电磁干扰的特点, 满足现代火工品的应用需求, 但是由于激光传输效率和利用效率较低, 目前难以实现真正的实用化和工程化。分析了激光驱动飞片起爆炸药的临界飞片速度的估算方法, 提出需要提高系统能量利用率的必要性, 总结了利用光纤传能和激光驱动复合飞片提高系统能量利用率这两项关键技术研究进展。指出, 选用适宜的光纤, 改善光纤抗损伤能力, 设计合理的光纤传输光路, 优化激光参数, 改进复合靶膜结构, 合理选取复合靶膜各层厚度等是实现激光冲击片雷管小型化、实用化、工程化必须解决的问题。

关键词: 军事化学与烟火技术; 激光冲击片雷管; 高功率脉冲激光传输光纤; 复合结构靶

中图分类号: TJ450.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.024

1 引言

随着战场环境的恶化, 武器系统安全性得到了越来越多的关注。火工品是武器中弹药引燃或引爆的初始能量提供者, 火工品作为武器系统中一个重要的零部件, 一旦发生问题, 往往会造成武器系统意外启动或爆炸, 造成巨大的损失。激光火工品由于利用激光脉冲信号触发, 相比电起爆火工品, 它有着对电磁场、静电放电或杂散电流等意外点火源钝感的优势。作为激光火工品中的一种, 激光冲击片雷管采用激光驱动飞片的方式起爆炸药, 该方式除了具有抗电磁干扰的特性, 还有着精确计时、快速响应的优势^[1]。

现有激光驱动飞片起爆系统主要采用固体调 Q 激光器作为激光脉冲源, 稳定起爆猛炸药的激光输出能量在 400 ~ 500 mJ, 但是激光能量与驱动飞片的动能之间的转化率目前只有 20% 左右^[2-3], 损耗了相当大一部分激光能量。一旦系统能量利用率得到了有效提高, 可以使得激光脉冲源的输出能量维持在较低能量水平, 即可成功驱动飞片起爆炸药, 这就为激光冲击片雷管在武器系统中的实际应用提供了方便。本研究通过分析激光驱动飞片起爆炸药的临界飞片速度的估算方法, 针对起爆系统能量利用率较低这一现状, 提出需要提高系统能量利用率的必要性, 总结了利用光纤

传能和激光驱动复合飞片提高系统能量利用率这两项关键技术研究进展。

2 激光驱动飞片起爆系统简介

激光驱动飞片起爆系统工作原理如图 1^[4], 它的主要部分为图中所示飞片部分。该系统采用高功率脉冲激光束作为激光源, 激光束辐射沉积于基底材料的薄膜上, 薄膜吸收入射的激光束能量后发生烧蚀、气化, 并在薄膜表面产生高温高压等离子体。等离子体继续吸收激光能量从而发生膨胀喷溅, 其反冲作用力会形成强冲击波, 当冲击波传播到未烧蚀薄膜反面(即自由面)时, 冲击波将迅速卸载, 未烧蚀薄膜将获得沿冲击波传播方向的附加速度, 促使未烧蚀薄膜通过加速膛切割形成飞片。在驱动激光脉冲持续时间内, 飞片将不断吸收激光能量, 将其转化成自身的动能, 加速向前飞行。通过加速膛后飞片将达到每秒几千千米的速度^[5]。飞片最终撞击炸药柱, 在炸药端面激起压力为 p 、持续时间为 τ 的冲击波, 当 $p^2\tau$ 超过炸药的冲击起爆临界值时激起炸药爆轰。

3 激光驱动飞片起爆猛炸药的估算

激光驱动飞片起爆系统的稳定性主要由飞片撞击起爆猛炸药的稳定性决定, 即由飞片撞击速度大小、飞片表面平整性好坏等因素决定^[6-8]。具体地, 激光驱动飞片成功撞击起爆猛炸药, 需要将激光驱动飞片速

收稿日期: 2012-06-01; 修回日期: 2012-08-24

作者简介: 王猛(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光火工品研究。
e-mail: kuby011@yahoo.com.cn

度提升到多少是合适的, 需要进行相关的计算。

由炸药冲击引爆判据^[9]:

$$\rho^2 \tau = K \quad (1)$$

式中, ρ 为炸药中的碰撞压力, Pa; τ 为碰撞脉冲时间宽度, s。

$$\rho = \rho_e (C_e + S_e u_e) u_e \quad \tau = 2\delta_f / c_f \quad (2)$$

式中, ρ_e 为受主炸药密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S_e 和 C_e 为受主炸药雨果尼奥曲线两系数, S_e , 无量纲, C_e , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_e 为飞片碰撞产生应力波后炸药粒子速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; δ_f 为飞片厚度, m; c_f 为飞片材料声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

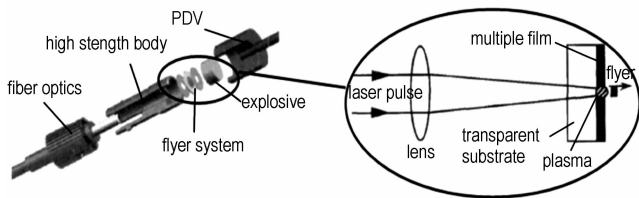


图1 激光驱动飞片起爆系统示意图^[4]
Fig.1 Schematic diagram of laser-driven miniflyer system

K 为受主炸药冲击起爆常数, 与受主炸药的类别、成分、密度有关。冲击片雷管中常用猛炸药的 K 值见表 1。

表1 冲击片雷管常用猛炸药 K 值^[10]

Table 1 K value of common explosives used in slapper detonators

explosive	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$K / \text{Pa}^2 \cdot \text{s}$
PETN	1000	5×10^{10}
PETN	1600	125×10^{10}
HNS	1600	220×10^{10}

由表 1 可看出, 飞片撞击起爆 $1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (压装) 的 HNS、PETN 的困难程度比 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (松装) 的 PETN 要大得多。将 (2) 式代入 (1) 式中, 可得到飞片冲击起爆猛炸药的临界粒子速度 u_e :

$$u_e = \frac{1}{2S_e} \left\{ -c_e + \sqrt{c_e^2 + \frac{4S_e}{\rho_e} \sqrt{\frac{c_f K}{2\delta_f}}} \right\} \quad (3)$$

得到了起爆猛炸药的临界粒子速度 u_e , 结合冲击波相关理论^[11], 可反推出对应的临界飞片速度。已知飞片材料和炸药材料的 Hugoniot 关系:

$$\text{令} \begin{cases} A = \rho_{of} S_f \\ B = \rho_{of} C_{of} - 2S_f \rho_{of} u_e \\ C = \rho_{of} S_f u_e^2 - \rho_{of} C_{of} D_e u_e \end{cases} \quad (4)$$

式中, ρ_{of} 、 C_{of} 、 S_f 分别为飞片材料的初始密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、体声速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 Hugoniot 系数, D_e 为炸药的冲击波速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 可近似取炸药的爆速。

则临界炸药粒子速度对应的飞片速度 v_{ic} :

$$v_{ic} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

此速度为激光驱动飞片能够成功起爆猛炸药所必须满足的最小速度。

用公式 (3)、(4)、(5) 进行计算, 结果见表 2。

表2 激光驱动飞片起爆炸药临界速度

Table 2 Critical velocity of explosives shock by laser-driven flyer

explosive	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\delta_f / \mu\text{m}$	$u_e / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_{ic} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
PETN	1000	5.0	975.76	1455.34
HNS	1600	5.0	2674.31	4144.72
HNS	1600	10.0	2232.06	3505.52

由此可以看出, $5 \mu\text{m}$ 厚 Al 飞片成功撞击起爆压装 HNS ($1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的临界粒子速度为 $2674.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 要达到这样的炸药粒子速度, 对应的飞片速度应在 $4100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 这需要较高的激光能量才能达到。飞片厚度越厚, 炸药起爆的临界粒子速度就越小, 对应的飞片速度也相应降低, 炸药也越容易起爆。但同时, 相同能量下, 激光驱动飞片的速度会随着飞片的厚度的增加而逐步降低^[12], 即要达到相同的飞片速度, 厚的飞片需要的激光能量更多。因此, 对于单层 Al 飞片来说, 无论飞片是厚是薄, 要想成功起爆压装炸药, 均需要用大型固体激光器作为驱动源, 为起爆系统提供较高激光能量, 但这显然不利于起爆系统的小型化。此外, 飞片的表面平整度也是成功撞击起爆炸药的关键因素, 而单层 Al 飞片表面的平整度较差^[7]。综合来看, 用小型的激光器驱动单层 Al 飞片, 成功撞击起爆压装炸药 ($1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 在现有条件下具有很多困难, 这也是目前激光冲击片雷管未能大范围应用的原因。

因此, 目前对激光驱动飞片起爆系统关键技术改进最主要的目标为: 降低不必要的能量损失, 提高激光能量利用率, 进而提升飞片速度, 使得应用小型激光器作为驱动源, 即能够驱动飞片达到理想起爆速度, 并同时保证飞片表面良好的平整度, 最终成功撞击起爆压装猛炸药。这方面的改进对于激光冲击起爆系统的工程化、实用化具有很大的意义。改进的方式主要从提高起爆系统能量利用率这一关键入手, 具体地, 就是

改进激光导出方式和飞片结构参数。

4 提高起爆系统能量利用率关键技术

4.1 改进激光导出方式

最初,激光驱动飞片是通过透镜聚焦激光束的方式实现的。LANL 的 Paisley D L^[13] 利用这种方式,将原始厚度 2~10 μm,直径 0.4~1 mm 的铝和铜箔飞片加速 5 km·s⁻¹ 以上。但是由于激光传输在常规条件下进行,周边环境中的空气会耗散掉大部分激光能量,用此种方式传输激光能量,激光传输效率得不到有效提高。

为了有效利用能量,各国研究人员开始利用光纤传输的方式,提高激光的传输效率。与透镜聚焦方式相比,光纤传输有两个主要的优点:一是光斑大小由光纤芯径决定,传输灵活,激光聚焦后注入光纤,避免了复杂的外部光路;二是由于光纤内激光束的多次反射,使得光束能量空间分布更加均匀,避免了焦斑中心的局部热点。另外,利用光纤可适应于各种环境下与薄膜靶的连接,更易于实现工程应用。但是这项技术也有局限,如何把强激光束耦合进光纤而损失较少,这是实验技术中的一个难题。因此,利用光纤传输激光驱动飞片所达到的速度等指标目前也低于透镜聚焦传输的技术指标。Trott W M^[14] 利用光纤传输的方式驱动直径为 0.2 mm、厚度为 25 μm 的铝膜,得到了 2 km·s⁻¹ 的飞片速度。圣迪亚国家实验室的 Watson S^[15] 在 21 世纪初用芯径 0.4 mm 的光纤端面沉积了约 10 μm 厚的铝膜,最终激光辐射后产生的飞片速度达 3 km·s⁻¹。

光纤传输技术受传能光纤的限制影响很大。激光通过光纤传输的能量最终要起爆钝感炸药才能使火工品发挥作用,起爆钝感炸药需要较高的激光功率密度,因此激光驱动飞片起爆需要的功率密度应大于 10 GW·cm⁻²。如此高功率密度的激光,使激光与光纤的耦合、激光在光纤内的传输变得愈加困难。在传输高功率激光脉冲过程中,激光很可能会造成光纤受损并使之失效,这对通过光纤传输高功率激光来说,是一个严峻的挑战。

4.2 优化传能光纤参数

4.2.1 光纤材料

常见的传能光纤有:石英玻璃光纤、卤化物玻璃光纤、有源玻璃光纤、硫属化合物玻璃光纤、塑料光纤^[16]。石英玻璃光纤在高温下不易变形;热膨胀系数低,耐热冲击;化学稳定性好,在可见光和红

外光区域透明度高。卤化物玻璃光纤在波长 2~5 μm (红外波段) 范围内使用性能良好,传输损耗极低,适合短距离激光传输。有源玻璃光纤可实现光波在其中通过时的放大或被吸收,或产生相位延迟。硫属化合物光纤具有很高的光学非线性及很长的相互作用长度。卤化物玻璃光纤、有源玻璃光纤、硫属化合物光纤因为价格较昂贵而很少用于激光传能。塑料光纤成本较低,但它的能量损耗较大。

用于传输高功率激光的传能光纤,在长期工作中会形成一定的热量积累,一方面玻璃由于热膨胀产生热机械应力导致光纤破裂,另一方面更高的热量积累会导致光纤局部熔化,最终使传能光纤失效或损坏^[17]。考虑到光纤材料的成本、材料的热膨胀系数和玻璃化温度,目前,常用的传能光纤多为直径数百微米的石英光纤。

4.2.2 数值孔径

光纤的数值孔径(Numerical Aperture, NA)是光纤的重要参数,它表征光纤收集光功率的能力,它被用来预测光纤的注入效率、接头连接损耗和微弯/宏弯性能;对光纤与光纤、光纤与光源之间的耦合起关键作用。

较大的数值孔径有利于光纤更好的接收激光,较小的数值孔径则有利于减小出射光纤的发散角,提高输出光能的集中度。高亚明^[18] 等人利用低、高折射率双层涂料涂覆光纤,使得光纤数值孔径参数可调,大幅提升了光纤传能能力。

4.2.3 光纤芯径

传能光纤的芯径一般在 100 μm~1 mm 之间。光纤芯径越大,能够传输的激光功率越高,但同时将导致光纤柔软性下降,输出激光光束质量变差,假设光纤数值孔径相同,较小芯径的光纤输出的激光束可以聚焦得更小。赵兴海^[19] 认为应采用大芯径光纤传输激光能量,原因有两个:一方面,大芯径光纤收集光功率的效率比小芯径光纤高;另一方面,激光功率在端面和纤芯内分布区域更大,可以减少光纤端面和芯径内的能量密度,减少光纤的激光诱导损伤可能性,提高传输激光的能量。崔卫东^[20] 等认为小芯径光纤具有较小的截面积,点火/起爆过程中作用于光纤的压力峰值也较小,采用小芯径光纤传能,具有耐受高压的优势。

由光纤耦合条件^[16]:

$$\omega_0 \theta \leq \frac{d_{\text{core}} \arcsin(NA)}{2}$$

光纤芯径 d_{core} 的大小取决于光束质量和数值孔径。

一般来说,大功率 Nd:YAG 激光光束参数乘积 $\omega_0\theta$ 一般大于 $25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 因此:

$$\frac{d_{\text{core}} \arcsin(NA)}{2} \geq 25 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (6)$$

纯石英光纤的数值孔径一般为 0.22, 对应的入射角为 220 mrad , 因此, 理论上光纤的芯径应大于 0.4 mm 。

4.3 改进激光与飞片能量耦合方式

有效提高激光驱动飞片起爆系统能量利用率的另一个关键技术, 是从激光与飞片的能量耦合方面出发, 利用激光驱动复合结构靶, 提高激光能量利用效率。

早期的研究采用激光驱动单膜结构靶, 形成飞片。当激光能量过大时, 单膜结构膜表面的汽化和烧蚀会破坏单层膜的结构, 从而影响飞片的完整性^[21]。为了避免激光直接烧蚀飞片层, 破坏飞片结构, Stahl 等^[22]在单层金属飞片的前端加入了一层碳黑, 减少了激光的反射, 使飞片层不被激光直接烧蚀。实验发现该方法不仅使得飞片平面性和完整性得到了保证, 也增强了靶膜材料对激光的能量吸收率, 使飞片速度提高了 10%。Hatt 等^[23]发现与单层 Al 飞片比较, 在金属飞片层前端镀上一层金属 Mg, 能使飞片速度提高 27% 左右。Greenaway M W^[24]等人利用激光能量密度仅为 $5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 Nd:YAG 激光器, 驱动 $2 \mu\text{m}$ 厚, $500 \mu\text{m}$ 直径复合飞片达到了 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度, 并成功撞击起爆了低密度 PETN 和 HNS, 并对炸药颗粒度对压力脉宽的影响进行了分析。此外经测试, 该实验中复合飞片获得的最高速度可达 $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可以明显看出, 采用驱动复合结构靶技术, 能显著提高激光起爆系统能量利用率。

复合结构靶技术的应用, 能大幅提升飞片的各方面性能。与此同时, 优化复合飞片靶结构、选择或研制新的各层膜材料、改进飞片制备方式等问题也需要得到解决。通过结构和参数的优化设计可以加强激光与飞片的能量耦合, 提高飞片的速度, 改善飞片的平面性、完整性, 为激光驱动飞片起爆系统的运用提供成熟的技术基础。

4.4 优化飞片参数

4.4.1 复合飞片结构

飞片结构是激光驱动飞片技术研究中的一个关键点, 与激光驱动飞片速度有很大关系。早期的研究采用单膜结构, 对于一层结构, 由于等离子体高温高压作用, 容易让飞片破碎。采用复合飞片, 在中间加入金属氧化层, 可以有效阻止热传导, 提高激光能量转化率。

目前的结构多为 $\text{Mg}/\text{MgF}_2/\text{Cu}$ 和 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 。后者具有更好的性能, 因为 Al_2O_3 具有很好的绝缘性。当激光能量过大时, 单膜结构金属膜表面的汽化和烧蚀会破坏金属膜的结构, 从而影响飞片的平面性和完整性。因此, 现阶段研究大多采用如图 2 所示结构^[25]。

4.4.2 复合飞片材料

光学窗口作为约束层, 主要的作用是阻碍等离子体逆向膨胀, 增强能量耦合和增强飞片的冲击动量耦合^[26]。约束层首先应该对相应波长的激光透射率高, 材料多用 Al_2O_3 玻璃、BK7 玻璃或蓝宝石玻璃等。约束层要保证足够的强度, 可以通过增加玻璃强度和厚度的方法来保证。烧蚀层采用反射率低、激光吸收率高的石墨、炭黑、氧化钛、氧化锆等非金属材料。激光作用时, 烧蚀层将吸收激光能量产生等离子体, 避免激光直接作用到金属膜上产生汽化和烧蚀, 影响飞片的平面性和完整性^[27]。烧蚀层的厚度应适中, 既不能太薄以保证对激光能量的完全吸收从而达到保护飞片层的目的, 又不会因为太厚导致冲击波的衰减, 影响飞片速度。

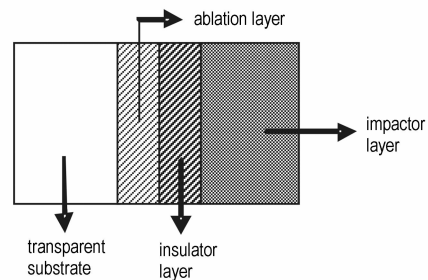


图 2 典型复合飞片结构^[25]

Fig. 2 Typical structure of multiple flyer

隔热层的作用主要是阻止热扩散, 增加等离子体高温持续时间以便提高压力, 有利于提高飞片速度。Paisley^[28]采用 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜产生飞片, 与单 Al 膜相比, 采用 Al_2O_3 隔热层可以将飞片速度提高 30%。另外, 谷卓伟^[29]在烧蚀层与 Al 膜之间加入 Al_2O_3 隔热层, 同样条件下复合膜飞片在黄铜靶上的冲击成坑形状更规则、深度更均匀。显然, 复合结构靶膜飞片的速度、平面性和完整性均优于单膜靶。

飞片层作为产生飞片的来源, 大多选用金属, 如 Cu、Al。

4.4.3 复合飞片制备

飞片靶材的制备方法选择决定了飞片的结构性能参数, 因此对产生的飞片形态及完整性有重要影响。

董洪建^[30]等人测验了场致热扩散、涂层粘膜、磁控溅射镀膜和胶粘剂粘膜四种粘膜方法产生的飞片,结果显示,磁控溅射镀膜产生的飞片太脆,在激光驱动下完全破碎,而用胶粘剂粘膜产生的飞片光强中心处呈现撕裂状,这是由于激光光强分布不均所导致的,只有场致热扩散和涂层粘膜两种方法可以获得完整的飞片。然而目前应用最广泛的飞片靶制作方法却是真空磁控溅射法。因为该方法制作的飞片厚度容易控制,操作比较简单,可以按照需要制得各种单层或多层膜,并能保证飞片各层膜的纯度。

4.5 飞片形态表征

除了飞片速度,检验激光驱动飞片性能指标还有飞片飞行过程中的平面性和完整性。飞片飞行的平面性非常重要,它关系着飞片撞击的平面性,直接影响撞击效果。如果飞片不平,得到的冲击波就不均匀;而飞片的完整性可以避免飞片动量损失,所以测量飞片飞行过程中的平面性和完整性是至关重要的。通常使用线性激光速度干涉仪(VISAR)来测量飞片平面性和完整性^[31],但是线性VISAR只能得到一维的飞片平面性和完整性,并且仪器价格较高。赵翔^[7]采用了较为实用的光纤探针阵列测试系统开展了飞片的平面性测试,发现了复合飞片中隔热层的增加有利于提高飞片表面的平整度。此外,对飞片表面平整度更为简便的表征方法是采用胶带粘合法^[8]和纯水接收法,可回收得到最终的飞片形貌。

5 结论与展望

对于激光驱动飞片起爆系统的研究,具有先进火工品与激光、光纤光学、能量光电子学、微精细加工等多学科交叉的特点。国内目前由于相关条件的限制,还没有公开文献报道关于激光驱动飞片起爆系统的具体应用。该起爆系统的小型化及实用化仍有一些难题需要解决。在激光能量传输方面,选用适宜的光纤传输高功率激光能量,进一步改善光纤抗损伤能力,合理设计光纤传输光路,设计最优激光参数,使高功率激光能量传输效率得到大幅度提高。在激光能量转化方面,尤其是激光能量与复合飞片耦合方面,复合靶膜结构的进一步改进和优化,复合靶膜各层厚度的选取机理的探讨,以及进一步的数值模拟也需要大量工作去完成。只有解决好这些问题,使激光参数和光纤、飞片得到最优匹配,提高激光传输和转化效率,才能最终提高激光驱动飞片起爆系统能量利用率,实现激光冲击片雷管的小型化、实用化、工程化。

参考文献:

- [1] Kennedy, J E. Motivation for laser detonator and firing system developments[C]//Proc. of SPIE. Sam Diego:CA,2006: 6287.
- [2] Paisley D L, Montoya N I, Stahl D B, et al. Interferometry, streak photography, and stereo photography of laser driven miniature flying plates[C]//19th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, UK: Cambridge, 1990 (1358): 760-765.
- [3] 谷卓伟. 激光驱动高速飞片的实验和理论研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2002.
GU Zhuo-wei. Experimental and Theoretical Research on the High Speed Flyer Driven by Laser[D]. Mianyang: CAEP, 2002.
- [4] Bowden M D, Drake R C. The initiation of high surface area PETN using fiber-coupled laser-driven flyer plates[C]//Proceedings of SPIE, Sam Diego: CA, 2007 (6662): 66620D1-66620D12.
- [5] 谷卓伟, 孙承伟, 罗利军. 激光驱动飞片实验研究及其应用分析[J]. 红外与激光工程, 2002,31(5): 428-431.
GU Zhuo-wei, SUN Cheng-wei, LUO Li-jun. Experimental research on laser driven flyer and its application possibility in simulation of aerospace particles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002,31(5): 428-431.
- [6] Watson S, Gifford M J, Field J E. The initiation of fine grain PETN by laser-driven flyer plates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(1): 65-69.
- [7] 赵翔. 激光驱动飞片点火设计技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.
ZHAO Xiang. The technology research on initiation design of laser-driven flyer plates[D]. Mianyang: CAEP, 2009.
- [8] 吴立志. 激光驱动金属飞片冲击起爆技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
WU Li-zhi. Shock Initiation Technology of Explosives by Laser-driven Metal Flyer[D]. Nanjing: NJUST, 2010.
- [9] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. *Explosive Stoffe*, 1969, 17(1): 9.
- [10] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.9.
ZHANG Guan-ren, CHEN Da-nian. The initiation dynamics of condensed explosives[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.9.
- [11] 孙承伟, 庄仕明, 王春彦. 激光驱动飞片冲击引爆炸药的计算[J]. 强激光与粒子束, 1997,9(3): 471-476.
SUN Cheng-wei, ZHUANG Shi-ming, WANG Chun-yan. Calculation of shock initiation of explosives impacted by the laser-driven flyer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997,9(3): 471-476.
- [12] Christopher W M. Set-up and evaluation of laser-driven miniflyer system[D]. Georgia Institute of Technology, 2009.
- [13] Paisley D L. Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives[R]. DE89016587, 1989.
- [14] Trott W M, Meeks K D. High-power Nd:Glass laser transmission through optical fibers and its use in acceleration of thin foil targets[J]. *J Appl Phys*, 1990,67(7): 3297-3301.
- [15] Watson S, Field J E. Measurements of the ablated thickness of films in the launch of laser-driven flyer plates[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000,33: 170-174.
- [16] 张阔海. 大功率 Nd:YAG 激光束光纤耦合技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.

- ZHANG Kuo-hai. Research on Fiber Optic Coupling for the High-power Nd:YAG Laser Beam[D]. Beijing: BUT, 2003.
- [17] 高杨, 赵兴海, 赵翔. 石英光纤的传能效率、损伤阈值和损伤累积效应研究[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(1): 1-4.
- GAO Yang, ZHAO Xing-hai, ZHAO Xiang. A study on power-delivery efficiency laser, laser-induced damage threshold and damage accumulation effect of silica fiber[J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(1): 1-4.
- [18] 高亚明, 冯光, 刘永建. 纯石英光纤芯掺氟玻璃包层光纤的数值孔径[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 169-172.
- GAO Ya-ming, FENG Guang, LIU Yong-jian. Numerical aperture of optical fiber with pure quartz core and fluorine-doped glass cladding[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 169-172.
- [19] 赵兴海, 高杨, 徐美健, 等. 高峰值功率脉冲激光的光纤传能特性[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 444-448.
- ZHAO Xing-hai, GAO Yang, XU Mei-jian, et al. Power delivery characteristics of fibers for high-peak power pulse laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 444-448.
- [20] 崔卫东, 朱升成, 史红漫, 等. 光纤对激光起爆系统的影响[J]. 火工品, 2000, 34(4): 34-37.
- CUI Wei-dong, ZHU Sheng-cheng, SHI Hong-man, et al. Effects of optical fiber on laser firing and initiating system[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000, 34(4): 34-37.
- [21] Paisley D L. Laser-driven flyer plate: US 5046423[P]. 1991.
- [22] Stahl D B, Paisley D L. Carbon assisted flyer plates: United States Patent 5301612[P]. 1994.
- [23] Hatt D J, Waschl J A. A study of laser-driven flyer plates[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, UK: NASA, 1996, 370: 1221-1224.
- [24] Greenaway M W, Field J E. The development of a laser driven flyer system[C]// Proceedings of Shock Compression of Condensed Matter, UK, Cambridge, 2004: 1389-1392.
- [25] Bowden M D, Knowles S L, Maisey M P. Characterisation of laser-driven flyer performance using photonic Doppler velocimetry[C]// Proc. of EURO PYRO, France: Reims, 2011: 633-646.
- [26] 张文兵, 龚自正, 董洪建, 等. 激光驱动飞片速度和完整性的影响因素分析[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(3): 150-160.
- ZHANG Wen-bing, GONG Zi-zheng, DONG Hong-jian, et al. Parameter analysis of laser-driven flyer technique[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(3): 150-160.
- [27] Labaste J L, Brisset D, Doucet M. Investigation of driving of plasma materials for laser acceleration of flyer plates[C]// Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Snowbird: American Physical Society, 2000, 505: 1189-1192.
- [28] Paisley D L, Swift D C, Forsman A C, et al. Dynamic material property studies by laser-launched flyer plate impact And transient x-ray diffraction[J]. *Shock-wave and High-Strain-rate Phenomena*, 2001: 575-580.
- [29] 谷卓伟, 张兴卫, 孙承纬. 激光驱动带窗口宏观飞片特性实验研究[J]. 高压物理学报, 2008, 22(1): 103-107.
- GU Zhuo-wei, ZHANG Xing-wei, SUN Cheng-wei. Experimental research on the characters of laser-driven macro-flyers[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22(1): 103-107.
- [30] 董洪建, 黄本诚, 王吉辉. 激光驱动微小碎片技术可行性研究[J]. 中国空间科学技术, 2002, 5(8): 49-53.
- DONG Hong-jian, HUANG Ben-cheng, WANG Ji-hui, et al. Feasibility study of laser-driven debris technique[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2002, 5(8): 49-53.
- [31] Paisley D L, Luo SN, Greenfield S R, et al. Laser-launched flyer plate and confined laser ablation for shock wave loading: validation and applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(2): 023902-023909.

Review on Key Technologies of Laser-driven Miniflyer System

WANG Meng, HE Bi, JIANG Ming

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Laser-driven miniflyer system is characterized by high precision control in time, prompt initiation, anti EMI and reliable initiation, which meets the requirements of modern initiators. Due to low transmission and utilization efficiency of laser, it's difficult to apply this system in practice. The velocity of laser-driven flyer in explosive detonation is predicted and the necessity of improving efficiency is put forward. Two key technologies in improving energy efficiency are highlighted and reviewed, including transmission through fibers and coupling with multi-flyer. It must be solved for realizing miniaturized, practical and engineered initiation system of laser-driven flyer to select proper optic fiber, enhance fiber damage resistance, design proper fiber transmission channel, optimize laser parameters, improve structure of multi-flyer, and determine the thickness of each layer.

Key words: military chemistry and pyrotechnics technique; laser-driven miniflyer system; transformation efficiency; optical fiber; multiple flyer

CLC number: TJ450.1

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.024