

基于激光驱动的飞片速度的理论计算

赵翔, 苏伟

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 飞片速度是激光冲击片雷管设计中必须考虑的关键参数之一, 对其准确快速地预估一直是火工品设计者追求的目标。为此, 基于激光诱导爆轰波理论为基础, 通过建立激光-靶耦合的力学模型, 提出了一种新的飞片速度的计算方法, 克服了传统方法分析参数单一的不足。采用该算法, 定量分析了激光参数(功率密度、脉宽和焦斑直径)和飞片结构参数(飞片半径和厚度)对飞片速度的影响规律, 结果表明: 飞片速度与激光功率密度成递增关系, 而与脉宽和光斑直径则在局部范围内成递增关系; 对于飞片半径和厚度来说, 则呈现递减规律。

关键词: 爆轰波; 起爆; 激光; 耦合

中图分类号: TN249 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.009

Theoretic calculation of laser-driven flyer plate's velocity

ZHAO Xiang, SU Wei

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The flyer plate's velocity is one key parameter during the design of laser slapper detonator. Exactly and fast estimating the flyer plate's velocity is always the aim of initiators & pyrotechnics designers. As a result, based on laser-supported-detonation-wave theory, laser-target coupling dynamic module is build up. A new computing method of flyer plate's velocity is put forward, which overcomes the shortcoming of using single analyzing parameter by traditional way. With the arithmetic, we analyze the influence of laser parameters (such as focus spot diameter, influence, pulse width) and flyer construction parameters (such as flyer radius, thickness) on the flyer plate's velocity. The calculated results indicate that flyer plate's velocity increases by degrees with the laser power density, while it increases by degrees with pulse width, focus spot diameter in local area. The flyer velocity decreases by degrees with flyer plate's radius and thickness.

Key words: detonation wave; initiation; laser; couple

1 引言

激光驱动飞片技术是 20 世纪 70 年代由美国 SANDIA 实验室首先开发并使用的一项新技术。由于其在激光起爆、动高压加载、材料超应变以及模拟太空粒子运动规律方面有广泛应用, 因此一经问世就受到国内外专家学者的高度重视。他们在理论和实验研究方面开展了大量工作, 取得了很多有价值的成果^[1-2]。

飞片速度是激光冲击片雷管设计的关键要素之一, 它的大小直接决定了雷管的起爆能量和可靠性。对一批制造完成的冲击片雷管, 传统的做法是通过

抽验, 实测飞片速度。这不仅需要大量的样本数量, 而且实验经费昂贵、测试过程复杂。因此, 如何通过理论计算, 提前预估飞片速度就显得尤为重要。在这方面, 国内外学者一般都采用 Gurney 模型进行计算, 但由于该模型过于简化, 不能较为全面地反映激

基金项目: 十一五预研重点项目资助课题; 中国工程物理研究院发展基金重点课题资助。

作者简介: 赵翔(1974-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光起爆技术, 激光与物质作用机理的研究。E-mail: zhaoxiang7410@sina.com

收稿日期: 2011-03-03; **修订日期:** 2011-03-24

光参数和飞片结构对飞片速度的影响,且只能计算飞片的极限速度,不能计算飞片的瞬时速度,因此,应用存在一定地局限^[3]。本文通过解析激光-靶的力学关系,从动力学的角度入手,深入探讨作用在飞片上爆轰波压力的时空分布,结合冲量定理,推导了飞片速度的数学公式,并对计算结果进行了分析和讨论。

2 计算模型

在激光脉冲作用期间,激光诱导爆轰波的压强维持不变,可近似视为一维处理。激光脉冲结束后,激光支持爆轰波(LSDW)在横向和纵向都发生衰减,应视为二维流场分析计算^[4]。为了简化计算,假定激光是“平顶”分布,即:作用于飞片上任何一点的功率密度相同。图1为LSDW一维结构。

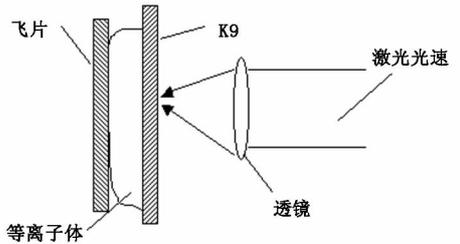


图1 LSDW一维结构

假设激光脉宽为 t_p , 定义 LSDW 两维运动的特征时间 t_{2d} , 它等于 LSDW 波前扩张到光斑直径距离时所需要的时间, 即:

$$t_{2d} = \int_0^{D_s} \frac{v_L}{v_L} dx = \frac{D_s}{v_L} \quad (1)$$

式中, D_s 是激光束的光斑直径; v_L 表示 LSDW 的传

$$I_{AT} = 2.07 \times 10^9 \times I_0^{1/2} \times t_p \times \pi \times \frac{D_s^2}{4} \times (107.1 \times t_p^{1/3} \times \left(\frac{\gamma_b + 1}{\rho_0}\right)^{1/6} \times D_s^{-1/3} - 2) +$$

$$0.561 \times 10^6 \times I_0^{1/3} \times t_p^{2/3} \times D_s^{7/3} \times \left(\frac{\rho_0}{\gamma_b + 1}\right)^{1/3} \times \left[\left(\frac{2R_T}{D_s}\right)^{8/5} - 1\right] +$$

$$2.899 \times R_T^2 \times \pi \times 10^8 \times I_0^{1/2} \times t_p^{2/3} \times D_s^{1/3} \times \left(\frac{\gamma_b + 1}{\rho_0}\right)^{-1/6} \left[\left(\frac{D_s}{2R_T}\right)^{2/5} - \left(\frac{\rho_0}{p_2}\right)^{1/6}\right]$$

其中, $p_2 = 2.638 \times 10^{12} \times I_0^{1/2} \times t_p^{2/3} \times D_s^{-2/3} \times \left(\frac{2.2}{\rho_0}\right)^{1/3}$ 。

因此,易得飞片速度的计算公式:

$$V_T = 1.625 \times 10^9 \times I_0^{1/2} \times t_p \times \left(\frac{\gamma_b + 1}{2 \times \gamma_b}\right) \times D_s^2 \times \left[0.659 \times 10^{-4} \frac{D_s \times \sqrt{\rho_0}}{t_p \times \sqrt{I_0^{1/2} \times (\gamma_b + 1)}} - 2\right] / m_f +$$

$$2.003 \times 10^7 \times I_0^{5/12} \times t_p^{2/3} \times D_s^{7/3} \times \left(\frac{\rho_0}{\gamma_b + 1}\right)^{1/6} \times \left[\left(\frac{2R_T}{D_s}\right)^{8/5} - 1\right] / m_f +$$

$$3.204 \times 10^8 \times R_T^2 \times I_0^{5/12} \times t_p^{2/3} \times D_s^{1/3} \times \left(\frac{\rho_0}{\gamma_b + 1}\right)^{1/6} \left[\left(\frac{D_s}{2R_T}\right)^{2/5} - \left(\frac{\rho_0}{p_2}\right)^{1/6}\right] / m_f \quad (3)$$

(2) 当 $t_p > t_{2d}$ 时

播速度。其计算公式为:

$$v_L = \sqrt{\frac{2.07 I_0^{1/2} (\gamma_b + 1)^{[5]}}{\rho_0}} \quad (2)$$

式中, I_0 为激光功率密度 (GW/cm^2); ρ_0 为飞片表面气体的密度; γ_b 为气体的绝热指数, 一般取 1.2。

定义冲击波压力衰减到等于外界气压时所对应的时刻为 t_0 , 飞片半径为 R_T , 激光束的光斑半径为 ω_s , I_0 为激光的功率密度, ρ_0 为外界气压。由于 $t_p < t_{2d}$ 与 $t_p > t_{2d}$ 这两种情况下, 飞片表面所受爆轰波压强的变化规律不同, 因此, 需分别讨论。

(1) 当 $t_p < t_{2d}$ 时

当 $0 < t < t_p$ 时, LSDW 的波压不变, 飞片所受压

强不变, 即: $p_s(t) = \rho_0 \frac{v_L^2}{\gamma_b + 1} \left(\frac{\gamma_b + 1}{2\gamma_b}\right)^{2\gamma_b}$; 当 $t_p < t <$

t_{2d} 时, LSDW 呈平面衰减, 即: $p_s(t) = \rho_0 \frac{v_L^2}{\gamma_b + 1} \cdot$

$\left(\frac{\gamma_b + 1}{2\gamma_b}\right)^{2\gamma_b} \left(\frac{t_p}{t}\right)^{2/3}$; 当 $t > t_{2d}$ 时, LSDW 呈圆柱面衰

减, 即: $p_s(t) = \rho_0 \frac{v_L^2}{\gamma_b + 1} \left(\frac{\gamma_b + 1}{2\gamma_b}\right)^{2\gamma_b} t_p^{2/3} t^{-6/5} t_{2d}^{8/15}$; 因

此, 激光作用在飞片上的总冲量为^[6-7]:

$$I_{AT} = \int_0^{t_{2d}} p_s(t) dt \pi \left(\frac{D_s^2}{4}\right) + \int_{t_{2d}}^{t_s} \int_0^{\omega} p_s(t) 2\pi \omega d\omega dt + \int_{t_s}^{t_0} p_s(t) dt \pi R_T^2$$

不考虑激光烧蚀材料的影响^[8-9], 并代入相关数据, 由冲量定理得飞片的总动量为:

当 $0 < t < t_{2d}$ 时, LSDW 压力不变, 即: $p_s(t) = \rho_0 \frac{v_L^2}{\gamma_b + 1} \left(\frac{\gamma_b + 1}{2\gamma_b - 1} \right)^{\frac{2\gamma_b}{\gamma_b - 1}}$; $t > t_{2d}$ 时, LSDW 呈强球面衰

减, 即: $p_s(t) = \rho_0 \frac{v_L^2}{\gamma_b + 1} \left(\frac{\gamma_b + 1}{2\gamma_b - 1} \right)^{\frac{2\gamma_b}{\gamma_b - 1}} \left(\frac{t_{2d}}{t} \right)^{4/5}$ 。推导过程同上, 可得飞片的速度, 其计算公式为:

$$V_T = 1.632 \times 10^5 \times D_s \times I_0^{1/4} \times \rho_0^{1/2} \times (\gamma_b + 1)^{-1/2} \times \omega_s^2 / m_f + 1.166 \times 10^5 \times D_s \times I_0^{1/4} \times \rho_0^{1/2} \times (\gamma_b + 1)^{-1/2} \times \omega_s^2 \times \left[\left(\frac{R}{\omega_s} \right)^{7/3} - 1 \right] / m_f + 8.16 \times 10^5 \times D_s \times I_0^{1/4} \times \rho_0^{1/2} \times (\gamma_b + 1)^{-1/2} \times R^2 \times \left[\left(\frac{p_1}{\rho_0} \right)^{1/4} - \left(\frac{R}{\omega_s} \right)^{1/3} \right] / m_f \quad (4)$$

3 影响因素分析与讨论

在飞片速度的计算式中, 其影响因素大致可分为两类: 激光参数和飞片参数。它们的变化对飞片速度的影响程度和范围是不同的。为此, 下面分别讨论激光参数(功率密度、脉宽和焦斑)和飞片参数(飞片半径和厚度)对飞片速度的影响情况。

3.1 功率密度对飞片速度的影响

给定参数如表 1 所示, 计算结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 提高功率密度对提高飞片速度是有益的。在不增加系统设备体积、质量的情况下, 尽可能提高激光功率密度无疑是很好的选择。

表 1 计算参数

脉宽 / ns	光斑直径 / mm	绝热指数	气体密度 / (kg · m ⁻³)	飞片半径 / mm	铝密度 / (×10 ³ · kg · m ⁻³)	飞片厚度 / μm	大气压 / (×10 ⁵ Pa)
10	0.5	1.2	1.295	0.5	2.7	5.5	1.01

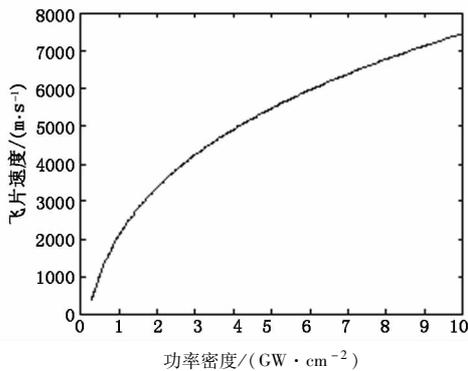


图 2 飞片速度与功率密度的关系

3.2 脉宽对飞片速度的影响

给定参数如表 2 所示, 计算结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出: ①飞片速度在脉宽 $t_p = 8.43$ ns 附近出现了跳变, 从 2 km/s 跃升到 3 km/s; ②当 $t_p < 8.43$ ns, 飞片速度随脉宽增加有小幅增加; 当 $t_p > 8.43$ ns, 飞片速度将保持不变。

分析原因, 有三点: ①因为特征时间(t_{2d})不随脉宽(t_p)变化而改变。对于 $t_p < t_{2d}$ 和 $t_p \geq t_{2d}$ 的情况, 飞片速度的计算公式不同, 因此表现为飞片速度

曲线不同; ②当 $t_p < t_{2d}$ 时, 随着脉宽增加, 由于飞片可获得更多的冲量, 导致速度得以提高; 当 $t_p \geq t_{2d}$ 时, 由于飞片获得的冲量不变, 所以速度保持不变; ③不同的计算参数, 跳变点的位置也随之不同。因此, 在实际应用中应选择合适的脉宽, 过长的脉宽对提高飞片速度没有意义。

表 2 计算参数

功率密度 / (GW · cm ⁻²)	光斑直径 / mm	绝热指数	气体密度 / (kg · m ⁻³)	飞片半径 / mm	铝密度 / (×10 ³ · kg · m ⁻³)	飞片厚度 / μm	大气压 / (×10 ⁵ Pa)
1	0.5	1.2	1.295	0.5	2.7	5.5	1.01

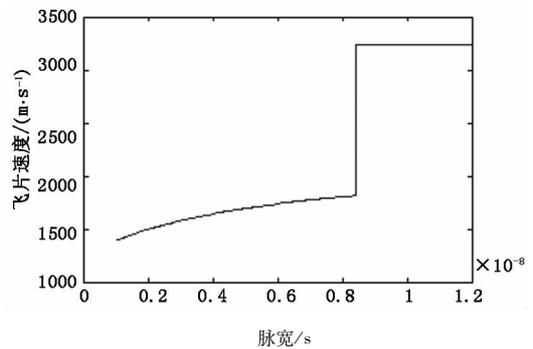


图 3 飞片速度与脉宽的关系

3.3 焦斑对飞片速度的影响

给定参数如表 3 所示, 计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出: ①光斑直径 $D_s = 0.6$ mm 时, 飞片速度变化出现了拐点; ②在 $0.1 \text{ mm} \leq D_s < 0.6$ mm 和 $0.6 \text{ mm} < D_s \leq 1$ mm 的分段区间内, 飞片速度随光斑直径的增大是上升的。

分析原因:

(1) 根据式(1)可知, 特征时间(t_{2d})与入射光斑直径(D_s)呈正比关系, 具体关系为: $t_{2d} \propto D_s$;

(2) 当光斑直径 $D_s = 0.6$ mm 时, 脉宽(t_p)与特征时间(t_{2d})相等; 因此, 当 $0.1 \text{ mm} \leq D_s < 0.6$ mm 和 $0.6 \text{ mm} < D_s \leq 1$ mm 时, 对应: $t_p > t_{2d}$ 和 $t_p < t_{2d}$, 根据式(3)和(4), 飞片速度的计算结果也是不同的。

表3 计算参数

功率密度 /(GW·cm ⁻²)	脉宽 /ns	绝热指数	气体密度 /(kg·m ⁻³)	飞片半径 /mm	铝密度 /(×10 ³ ·kg·m ⁻³)	飞片厚度 /μm	大气压 /(×10 ⁵ Pa)
1	10	1.2	1.295	0.5	2.7	5.5	1.01

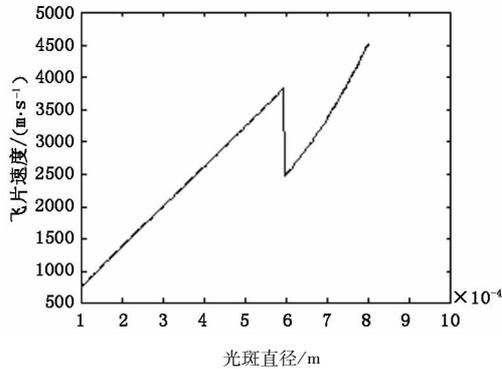


图4 飞片速度与光斑直径的关系

3.4 飞片半径对飞片速度的影响

给定参数如表4所示,计算结果如图5所示。从图5中可以看出,飞片速度随飞片的半径的增大而减小。在相同条件下,小飞片比大飞片能获得更高的速度。

表4 计算参数

功率密度 /(GW·cm ⁻²)	脉宽 /ns	绝热指数	气体密度 /(kg·m ⁻³)	飞片半径 /mm	铝密度 /(×10 ³ ·kg·m ⁻³)	飞片厚度 /μm	大气压 /(×10 ⁵ Pa)
0.5	10	0.5	1.2	1.295	2.7	5.5	1.01

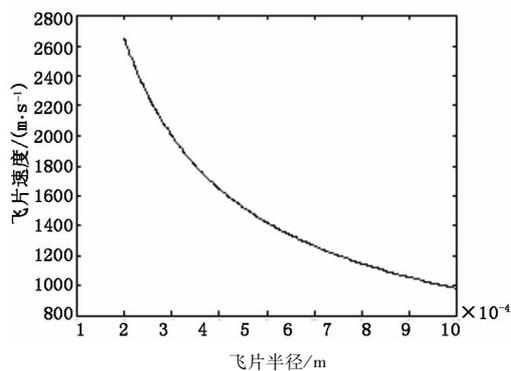


图5 飞片速度与飞片半径的关系

3.5 飞片厚度对飞片速度的影响

给定参数如表5所示,计算结果如图6所示。从图6中可以看出,飞片速度随飞片厚度的增加而减小。因此,在实际使用中,为了获得较高的飞片速度,应尽可能使用薄飞片。当然,飞片变薄,可能会

带来完整性问题,同时还要考虑飞片烧蚀的影响。因此,要综合考虑多方面因素,合理设计飞片厚度。

表5 计算参数

功率密度 /(GW·cm ⁻²)	脉宽 /ns	绝热指数	气体密度 /(kg·m ⁻³)	飞片半径 /mm	铝密度 /(×10 ³ ·kg·m ⁻³)	飞片厚度 /μm	大气压 /(×10 ⁵ Pa)
0.5	10	0.5	1.2	1.295	2.7	1	1.01

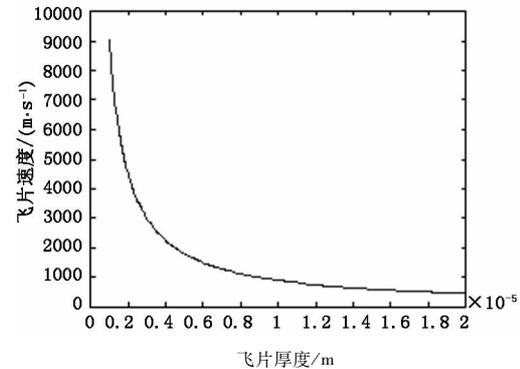


图6 飞片速度与飞片厚度的关系

4 结论

传统的计算飞片速度的 Gurney 定理,分析参数很有限,不能全面反映激光参数和飞片结构对飞片速度的影响规律。基于激光诱导爆轰波理论,从分析飞片上爆轰波的变化规律入手,建立了激光-靶耦合的力学模型,为计算激光驱动飞片速度提供新的思路。在此基础上,以铝飞片为例,重点分析了激光的聚焦光斑、脉宽、功率密度和飞片的直径和厚度对飞片速度的影响规律,理论计算结果表明,为了获得最大的飞片速度,必须合理设计和优化激光参数与飞片结构参数。

参考文献:

- [1] Paisley D L, laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives[R]. DE89-016587.
- [2] Paisley D L, Montoya N I, Stahl D B. Interferometry, streak photography, and stereo photography of laser-driven miniature flying plates[R]. DE91-007493.
- [3] Gu Zuowei, Sun Chengwei. The experiments research of high-speed flyer driven by mini size pulse laser[J]. China Laser, 2002, 29(5): 407-410. (in Chinese)
谷卓伟,孙承伟. 小型脉冲激光器驱动高速飞片的实验研究[J]. 中国激光, 2002, 29(5): 407-410.
- [4] Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics theory of laser-material interaction [M]. Beijing: China Machine Press,

- 1996:145 - 147. (in Chinese)
- 陆建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1996:145 - 147.
- [5] Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing. Property of laser-induced shockwave with confinement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(8):981 - 984. (in Chinese)
- 王声波,范勇,吴鸿兴. 约束结构下激光冲击波特性实验研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(8):981 - 984.
- [6] Zhao Xiang, Su Wei, Li Dongjie, et al. Research of momentum coupling model for laser driving flyer plates[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8):1275 - 1278. (in Chinese)
- 赵翔,苏伟,李东杰,等. 激光驱动飞片的动量耦合模型研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8):1275 - 1278.
- [7] Zhao Xiang, Su Wei, Li Dongjie, et al. Momentum calculation of laser driven flyer plates[J]. Laser & Infrared, 2007, 19(8):1275 - 1278. (in Chinese)
- 赵翔,苏伟,李东杰,等. 激光驱动飞片的动量计算[J]. 激光与红外,2007,37(9):822 - 823.
- [8] Sun Chengwei, Zhuang Shiming, Wang Chunyan. Calculation of shock initiation of explosives impacted by the laser-driven[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(3):471 - 476. (in Chinese)
- 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.
- [9] S Watson, J E Field. Measurement of the ablated thickness of films in the launch of laser-driven flyer plates[J]. Appl. Phys, 2000, 33:170 - 174.