

文章编号:1006-9941(2019)03-0255-10

激光驱动飞片飞行特征研究进展

王志昊,李勇,覃文志,高原,蒋小华,王亮,何碧

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 激光驱动飞片是高效的冲击加载方法,作为激光起爆炸药的一种方式,具有本质安全性。激光驱动飞片起爆炸药的可靠性与飞片的飞行特性密切相关,飞片的飞行速度和表观形貌(平面度和完整性)是成功起爆的两个重要参数。因此,从飞片的飞行特性的表征手段与影响因素两方面出发,综述了激光驱动飞片技术的研究进展。针对单层飞片,介绍了观测、表征和接收方法,分析讨论了飞片性能影响因素作用规律的近年研究成果,梳理归纳了现有研究中存在的不足,指出了今后的发展方向,包括激光驱动飞片飞行过程的系统物理模型和激光驱动飞片的平面度和完整性定量参数。

关键词: 冲击起爆;激光驱动飞片;飞片速度;飞片形貌

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018235

1 引言

激光驱动飞片是重要的动高压加载手段,其广泛应用于状态方程研究^[1]、快速成型工艺^[2]、空间碎片模拟^[3]以及点火起爆^[4]等领域。作为激光起爆方式的一种,因具有安全性高、同步性好、响应速度快等优点^[5],自20世纪70年代^[6]起,激光驱动飞片起爆技术得到了广泛关注。

激光驱动飞片起爆炸药的基本原理是:较高功率密度的激光烧蚀金属靶材,靶材先后经历熔化、气化、电离过程并产生高温高压等离子体,随后,未被烧蚀的靶材部分在等离子体作用下沿激光入射方向快速运动,形成高速飞片撞击炸药,引起炸药快速化学反应实现爆轰输出。判定是否稳定输出爆轰是激光驱动飞片起爆技术的重点。一般地,应用较为成熟的是F. E. Walker的一维冲击起爆判据^[7-8];起爆阈值与飞片冲击压力和持续时间呈正比,而冲击压力和持续时间分

别与飞片速度和质量相关,即飞片速度越高、质量越大,越有利于起爆炸药。同时,飞片的平面度与完整性决定了飞片冲击能量的利用率,直接影响冲击起爆的可靠性。飞片的平面度确保冲击的一维性,而飞片越完整,携带的能量就越充分,碰撞产生的平面波也越完整。由于飞片速度快、尺寸小、成形过程复杂,所以如何表征平面度与完整性,并得到激光与飞片结构参数对激光驱动飞片的影响规律就成了颇具争议的问题与研究的焦点。

众所周知,激光驱动飞片装置一般包括两种:一种是在烧蚀靶材前有光学玻璃制成的光窗作为约束层,能够一定程度上增强烧蚀产物的推动效果;另一种则不含光窗,激光直接照射靶材。事实上,除激光核聚变领域外,一般激光驱动飞片装置都含光窗^[9-10],因此,本研究针对含光窗的激光驱动飞片装置,从试验规律与理论推导两方面出发,简述了激光驱动飞片速度、平面度与完整性,即飞片飞行特征的国内外研究现状。

2 激光驱动飞片平面度与完整性研究现状

2.1 激光驱动飞片平面度与完整性表征

飞片尺寸小、速度快,其飞行过程的表征是相关领域研究的难点^[9]。得益于测试技术的进步,先进诊断技术逐渐应用于飞片飞行过程的表征,例如高速扫描

收稿日期:2018-08-28;修回日期:2018-11-17

网络出版日期:2018-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助(11802277)

作者简介:王志昊(1994-),男,硕士研究生,主要从事激光火工品换能元研究。e-mail:287571647@qq.com

通信联系人:何碧(1970-),男,研究员,从事先进火工品研究研究。e-mail:hebi@caep.com

引用本文:王志昊,李勇,覃文志,等.激光驱动飞片飞行特征研究进展[J].含能材料,2019,27(3):255-264.

WANG Zhi-hao, LI Yong, QIN Wen-zhi, et al. Research Progress in the Flight Characteristics of Laser-driven Flyer[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(3):255-264.

摄像技术、阴影成像技术、纹影技术、分幅面成像任意反射面速度干涉仪(面VISAR)技术、全息技术以及三维重建技术等,获得的信息也越来越完善。

高速扫描摄像技术^[11-12]能较易获得飞片飞行过程中的侧面影像(图1),分析获得的影像即可定性判断飞片的完整性及一维平面度。受限于镜头对焦及景深问题,高速扫描摄像技术难以获得较好的正面影像。线VISAR技术也能通过计算飞片各点的时间分散获得飞片的一维平面度^[10]。

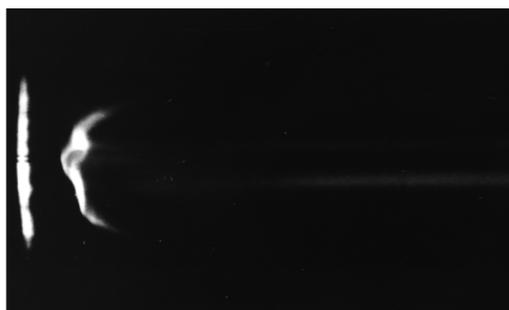


图1 扫描相机拍摄的飞片照片^[11]

Fig.1 Streak photographs of flyers taken by scanning camera^[11]

阴影成像技术基于探测范围内介质对光强的影响,利用CCD或ICCD相机获取图像。T. Mattle等^[13]通过在不同方向设置光源并联动的方式研究飞片飞行过程侧面与正面影像(包括反射成像与投射成像)。阴影成像技术可以获得清晰的飞片飞行过程侧面图像及冲击波演变过程^[14],但如图2所示,阴影成像技术得到的飞片飞行图像信息量有限,对于飞片平面度与完整性的表征能力也不足,即使加入正面照射的方式仍只能得到飞片的粗略轮廓,无法获得飞片更细节的信息。实际上仍是一维的平面度与完整性。

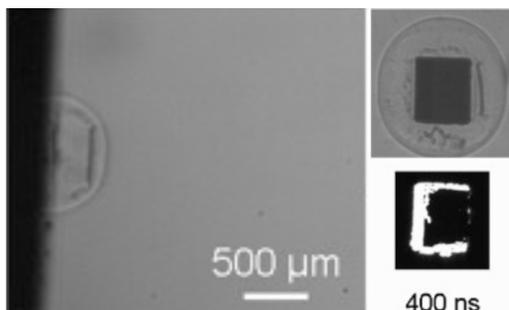


图2 飞片侧面与正面的阴影成像照片^[13]

Fig.2 Shadow imaging photos of the side and front of the flyer^[13]

面VISAR技术为获取更准确、丰富的飞片平面度和完整性信息提供了技术手段。刘寿先等^[15]基于面成像VISAR原理^[16],搭建了用于诊断激光驱动飞片平面度与完整性的试验系统,即分幅面成像VISAR测速

系统,与光电分幅相机串联,将VISAR获得的干涉条纹信息实时传输到高速相机记录,通过处理条纹图像得到了飞片的二维平面度。A. A. Banishev等^[17]利用ICCD相机设计了一套直接拍摄飞片飞行及撞靶过程正面照片的光学系统,并联动光子多普勒测速仪(Photonic Doppler Velocimeter, PDV)进行测速,实验结果如图3,获取的图像可清晰分辨飞片边缘的弯曲程度。

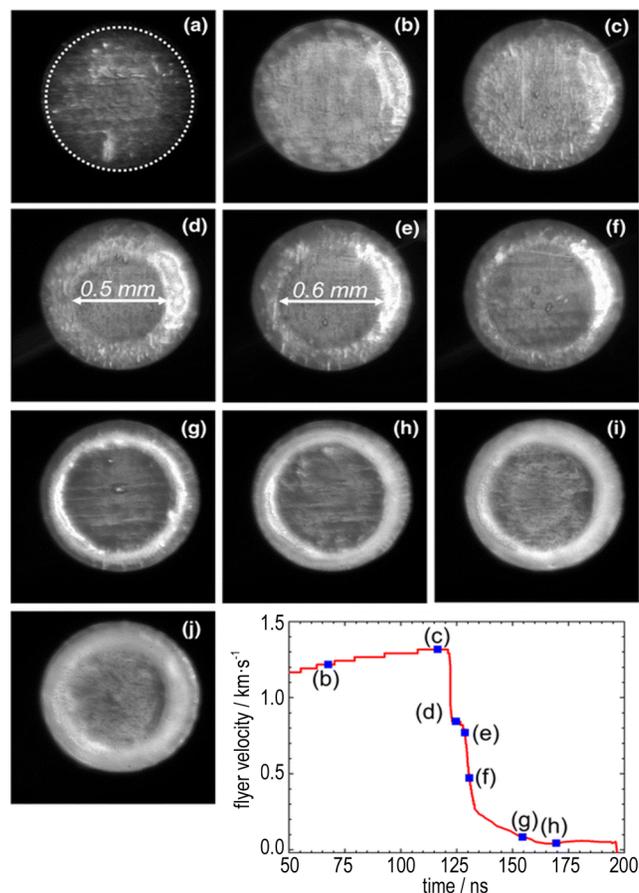


图3 ICCD相机拍摄的飞片照片与PDV测速结果^[17]

Fig.3 Photographs of flyers captured by ICCD camera and results of the velocity measured by PDV^[17]

全息技术能够记录光的相位信息,因而全息技术也被用于高速飞散物的观测与表征。J. D. Yeager等^[18]利用数字同轴全息技术(DIH)研究了雷管输出飞散物的三维形貌、位置及速度分布,如图4,DIH技术得到的照片能够清晰地获得每块飞散物的外观轮廓与冲击波纹样。因此,若将全息照相技术用于激光驱动飞片研究,将有助于构建相关物理模型,同时也是数值仿真的重要参考。

速度接近光速的相对论性电子在环形加速器中行进时发出的X射线强度高且特性优异,非常适合作为测试光源,同步辐射技术正是基于此原理。T. M. Wil-

ley等^[19]利用Argonne国家实验室的先进光源(APS, Advanced Photon Source),通过Los Alamos国家实验室的4相机系统拍摄了爆炸箔起爆器发射飞片的X光图像;图5展示了飞片侧面(0°)与飞片顶部(90°)的X光图像。此外,Willey还拍摄了15°、30°、45°、60°与75°的飞片图像并通过镜像得到了105°、120°、135°、150°与165°的飞片图像。利用这些平面图像,Willey通过利弗莫尔层析成像工具(Livermore Tomography Tools,LTT)程序包最终生成了三维重建模型。

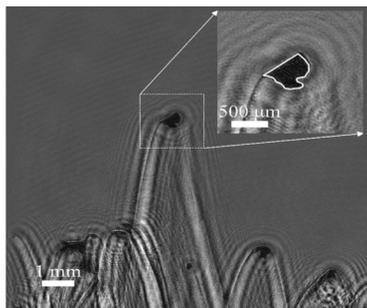
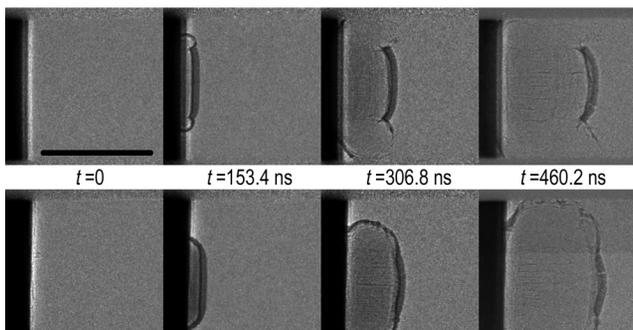
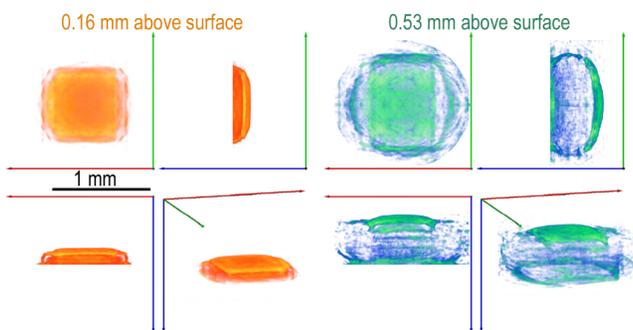


图4 典型的飞散物全息图像^[18]

Fig.4 Typical DIH image of fragments^[18]



a. APS X-ray images of EFI



b. geometry model obtained by 3D-reconstruction

图5 利用同步辐射光源与三维重建技术对飞片的研究^[19]

Fig.5 Research of flyers with APS and 3D-reconstruction technology^[19]

实体模型对于研究、表征、展示飞片的形貌特征有很高的应用价值。前述研究表明,先进的观测、表征手段应用于激光驱动飞片研究是行之有效的。因

此,将更多的先进技术引入激光驱动飞片相关研究,将有助于深入解析相关机理、定量表征飞片质量,对于激光驱动飞片起爆技术的研究也将发挥重要作用。

除此上述观测与表征手段之外,接收并收集飞片或其残骸也是表征飞片平面度与完整性的可行方法。按照材料的硬度,收集材料可以简单分为硬质材料与软质材料:传统上往往使用硬质材料收集发射的飞片或残骸,例如,聚甲基丙烯酸甲酯^[5]、玻璃材料^[20]、聚碳酸酯^[21]以及橡皮^[22]等,然而这些材料中较透明的材料硬度高,不利于保证飞片本来的形态;而较软的聚合物材料如PVC泡沫塑料^[23]等则不透明,不便于观察,需要三维重建获得细节信息。为了解决这一矛盾,在微层裂研究领域已广泛采用诸如凝胶、蜡等软质材料收集层裂碎屑。E. Lescoute等^[24]利用Varagel 6527凝胶回收了激光加载金靶微层裂得到的碎片,由于Varagel 6527凝胶具有一定的强度且透明度较好,如图6所示,其回收的层裂碎片清晰可见。

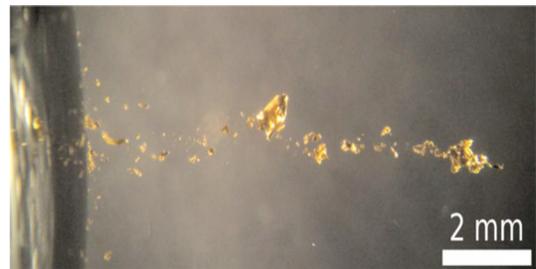


图6 凝胶中的微层裂碎片^[24]

Fig.6 Microscopic diagram of the fragments recovered in gels^[24]

因此,参考微层裂研究中使用的接收材料,选择透明度高、耐热、耐冲击性能好的软质材料接收激光驱动飞片或其残骸,将有可能既能够保持飞片相当程度的完整性,也便于直接观测飞片,对于飞片飞行及碰撞过程的研究可能产生重要意义;另外,若能从冲击动力学入手,利用收集到的飞片碎片分布、烧蚀程度等信息推断飞片飞行过程中平面度与完整性,将使得相关论证更加有力。

2.2 激光驱动飞片平面度与完整性影响因素

2.2.1 飞片飞行距离或飞行时间

飞片飞行加速的动力来自于等离子体膨胀做功,速度极快,对飞片表面持续产生压缩加载,而压缩波的叠加可能产生冲击波作用,相关实验结果也表明,飞片飞过一段距离或经过一定时间的飞行后会发破碎甚至解体^[25-26]。飞片的完整性、平面度与飞片飞行过程的损伤机制密切相关,该过程极为复杂,不同学者对于

实验规律的解释不尽相同。

早期学者认为,等离子体的侵蚀作用会造成飞片的质量逐渐减少,同时,使飞片飞过一段距离后发生损坏^[26]。然而,A. D. Curtis等^[20]对比了不同飞行距离的飞片碰撞玻璃靶的时间,发现飞行距离的增加并没有使碰撞时间显著减少,据此认为飞片破碎的主要原因并不是等离子体侵蚀,而是冲击波在飞片内的反复加卸载。A. D. Curtis的实验^[20]比较了脉宽10 ns与脉宽20 ns激光驱动飞片的完整性,结果表明脉宽较长情形下的飞片完整性更好,即飞片厚度不变时激光脉宽越短则冲击波的反复反射现象越严重。但是,该实验中两种脉宽激光总能量相同,脉宽增长的同时激光功率在时间域的分布也更为均匀,实验结果不能排除这一因素的干扰。

综上所述,学界对飞片飞行过程中,飞片与等离子体相互作用认识仍不够透彻;关于相互作用对飞片平面度与完整性的影响也尚存在争议。实际情况应当至少包括等离子体侵蚀、层裂效应与冲击熔化三方面的综合作用,不同时间尺度或空间距离各因素的贡献及飞片平面度与完整性的影响等诸多问题还有待进一步研究。

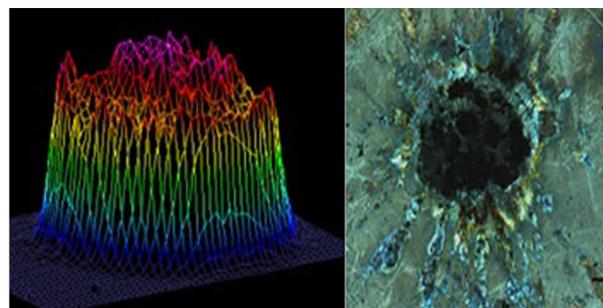
2.2.2 激光形貌

一般地,激光能量时空分布均匀性决定等离子体成长的均匀性,从而影响飞片平面性。研究者通过实验和数值模拟方法^[27-28]对比了不同激光能量剖面(即激光形貌)产生的飞片质量,结果表明“平顶”激光形成的飞片平面度与完整性均优于“尖顶”激光,

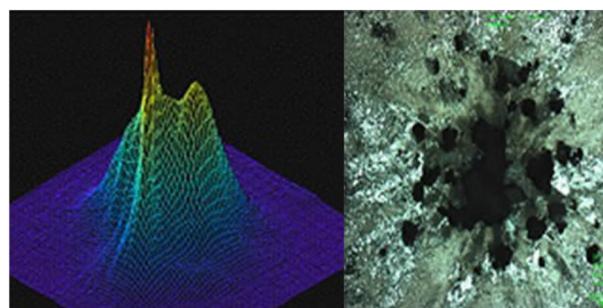
图7为文献^[29]中的典型对比试验结果。其中,图7a为“平顶”型激光的激光形貌与对应飞片在靶上形成的“撞击坑”,图7b为“尖顶”型激光的激光形貌与对应飞片在靶上形成的“撞击坑”。如图7所示,飞片的撞击坑形状规则、边缘清晰,说明平顶激光产生的飞片具有较好的完整性;而当激光形貌为尖顶型时,撞击坑不规则且有大量小坑,表明飞片较为破碎,完整性较差。

激光的形貌可通过设计光路整形并由光束分析仪^[12]表征,整形方法主要包括:非球面透镜法、衍射光学元件法以及小孔光阑等^[30]。其中,小孔光阑通过直接遮挡只允许部分激光透过而控制光斑形貌,故能量利用率较低;典型的衍射光学元件是刻蚀出若干衍射单元的二氧化硅薄片,每个衍射单元被照亮后都能形成衍射斑,经透镜汇聚后可交叠出较均匀的激光光斑区^[31],但因其衍射的本质而易造成激光散斑,从而影

响驱动飞片的效果;而非球面透镜是理论上最优秀的 Gauss 光束整形器件,但其对于近 Gauss 光束整形效果较差,且激光功率控制能力有限^[32]。因此选取合适的光学器件组获得均匀平整的激光光束,对于提高激光驱动飞片质量,获得完整而平面的飞片有着重要意义。



a. “top hat” energy profile and intergrated flyer



b. strong “hot spot” energy profile and broken flyer

图7 “平顶”激光与“尖顶”激光能量剖面及对应条件下的飞片完整性的比较^[29]

Fig.7 Comparison of energy profiles driven by “top-hat” and “hot-spot” laser and flyer integrities under corresponding conditions^[29]

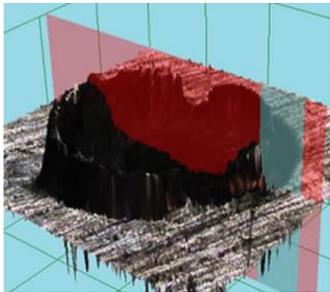
2.2.3 飞片制备方法

飞片的制备方法与工艺直接影响到飞片结构的力学性能,一般地,采用溅射或沉积等方法制备的飞片较薄、与基底结合力较好,而采用粘胶或硅脂等方法粘贴的飞片较厚、与基底结合力较差。董洪建^[33]等用磁控溅射镀膜、涂层粘胶、场致热扩散和粘胶直接贴膜4种方法制备飞片靶,通过对比激光烧蚀后的靶材形貌认为,场致热扩散和涂层粘胶方法可以得到完整的飞片,而磁控溅射镀膜则无法得到完整的飞片。牛锦超等^[29]则对比了不同韧性与强度的飞片靶产生飞片的效果与质量,分别为:离子束溅射制得的3 μm单层Al飞片(图8a)、场致热扩散法粘贴的13 μm铝箔飞片(图8b)、离子束溅射制备的50 nm Cr/10 μm Al的多层飞片(图8c)以及电子束蒸发制备的50 nm Cr/10 μm Al多层飞片(图8d)。可见在没有加速腔约束

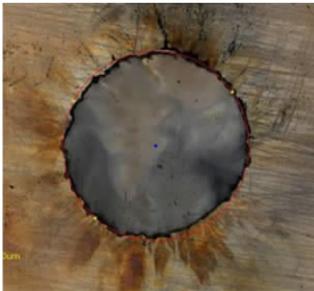
的情况下,离子束溅射得到的Al单层飞片剪切形貌清晰,粘贴的Al箔有显著的拉伸纹样,离子束溅射的多层飞片有清晰的剪切纹样,电子束蒸发的多层飞片则有鼓包与拉伸纹样。牛锦超据此认为,飞片结构需要适中的韧性:好的韧性能够保证飞片的平面度与完整性,但韧性过高会导致飞片形成过程消耗过多的激光



a. single Al flyer prepared by ion beam sputtering



b. single Al flyer prepared by field-assisted diffusion bonding



c. Cr/Al flyer prepared by ion beam sputtering



d. Cr/Al flyer prepared by electron beam evaporation

图8 不同工艺制备飞片系统发射后的形貌^[29]

Fig. 8 Morphologies of flyer systems prepared by different technologies after launching^[29]

能量,并产生显著拉伸与层裂效应,反而影响飞片的平面度与完整性;韧性过低则会导致等离子体生成过程中受到的约束不足,加速效果不够理想,同时飞片对于冲击加载的承受能力不够,从而影响到飞片的平面度与完整性。

工程应用中,通常在飞片靶材料后置一加速腔用于限制飞片飞行轨迹和剪切形状,因而制备方法对飞片质量的影响更为复杂。目前对于制备方法的影响尚处于简单对比实验现象的阶段,未来的研究应当明确并定量测量飞片结构的特征力学性能参数,并与飞片的速度、平面度与完整性联系起来,探索其作用规律。

3 激光驱动飞片速度研究进展

前文提到了飞片速度对冲击起爆的重要意义,文献中对激光驱动飞片速度的研究主要包括:激光驱动飞片速度的理论模型、影响速度因素的作用规律以及速度测量技术。目前速度测量技术主要为光学方法,瞬时速度测量以PDV与VISAR为典型代表,平均速度测量以高速摄影为主。文献[9]较全面地综述了飞片速度测量技术的研究现状,本文不再赘述。

3.1 激光驱动飞片速度理论计算方法

激光驱动飞片是多种因素综合作用的过程,因此不同学者对于激光驱动飞片速度理论模型的建立有不同的出发点,理论基础也不尽相同,文献报道中的推导出出发点主要包括:能量守恒定律、激光支持的爆轰波(LSD)以及等离子体状态方程。

3.1.1 基于能量守恒定律

1943年,R. W. Gurney^[34]提出了用于计算炸药驱动破片运动速度的模型,Gurney避开了复杂的爆轰物理问题而仅利用能量守恒关系,并假设爆轰产物密度恒定且速度呈一维线性分布、爆轰能量完全转换为破片与爆轰产物动能并且不考虑冲击波作用,得到计算公式的基本形式为:

$$EC = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_0^2 + \frac{1}{2} v_0^2 S \rho \int_0^a \left(\frac{r}{a}\right)^2 dr \quad (1)$$

式中, v_0 为破片的终速度, $m \cdot s^{-1}$; S 为弹药壳体的表面积, m^2 ; ρ 为爆轰产物的密度, $kg \cdot m^{-3}$; r 为破片到爆炸中心的距离, m ; a 为爆轰产物的作用距离, m ; m_i 为某一破片的质量, kg ; C 为装药的质量, kg ; E 为Gurney能, $m^2 \cdot s^{-2}$ 。该式的物理意义为:爆轰能量等于破片动能加上爆轰产物动能。此外,Gurney在该报告中提到,根据弹药壳体的不同形状,能够化简得到不同的计

算公式。Gurney公式以其理论清晰、形式简单以及计算便捷,在爆轰理论与实践得到了广泛的应用^[35]。

1993年,Lawrence等^[36]首先针对激光驱动飞片问题,在Gurney公式的基础上假设:驱动粒子速度呈一维线性分布、激光烧蚀能完全转化为动能、不考虑冲击波作用,驱动粒子密度取固体材料密度,得到的理论方程为:

$$\rho x_d E = \frac{1}{2} \rho (x_0 - x_d) v_0^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^{x_d} \left(\frac{x}{x_d} v_0 \right)^2 dx \quad (2)$$

式中, v_0 为飞片的终速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; x_0 为飞片的原始厚度, m ; x_d 为飞片在激光辐射下的烧蚀厚度, m ; ρ 为飞片材料的线密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$; E 为Gurney能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

等式左边表示激光烧蚀材料产生的总能量,右边分别为飞片动能与驱动飞片粒子的动能, Lawrence改进的Gurney公式(Lawrence-Gurney公式)形式与实质都与Gurney公式一致,化简式(2)可得飞片终速度 v_0 与Gurney能 E 的关系式。

$$v_0 = \sqrt{\frac{3E}{\frac{3x_0}{2x_d} - 1}} \quad (3)$$

尽管Lawrence-Gurney公式的推导与形式简单明了,但式中最重要参量——Gurney能 E 却相对复杂,其计算式涉及到大量材料参数,需要相当繁复的实验测定与经验估计。由此可见, Lawrence-Gurney公式有大量可改进的地方,诸如在等式右边加入各种修正项^[37-38],其中,孙承纬等^[37]等从相变角度改进了Lawrence-Gurney公式,其能量守恒表达式写作:

$$m e_t = m e(t) + \frac{1}{2} d(t) \int_0^{x_t} u^2(x, t) dx + \frac{1}{2} m_i u_i^2(t) \quad (4)$$

式中, $e(t)$ 为状态方程, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; $d(t)$ 为等离子体线密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$; $u(x, t)$ 为等离子体粒子速度函数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; e_t 为金属膜中沉积的比激光能, m 和 m_i 分别为金属膜和飞片单位面积上的质量, kg ; $x_t(t)$ 和 $u_t(t)$ 表示飞片的位置和速度,单位分别为 m , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

与Lawrence-Gurney公式相比,孙承纬在等式中加入了比内能项 $e(t)$,其由孙承纬引入的相变状态方程给出。通过数学变换,可将上式写成描述飞片速度与位置的微分方程;通过引入相变状态方程,式(4)更好地描述了激光驱动飞片的物理过程,不过数学形式相对复杂,且只有数值解。

不过,修正项相关参数同样需要实验获得,实际上复杂化了方程,甚至只能通过数值方法求解;此外,也

有仅对Gurney能 E 作出修正的,如D. Mallick等^[39]从损耗系数 r 着手改进了Lawrence-Gurney公式。损耗系数描述的是激光能量从发射到用于驱动飞片完整过程中的能量损耗,在Lawrence-Gurney公式中对激光Gurney能 E 和烧蚀深度 x_d 的计算有显著影响。Mallick定义的损耗系数 r_{total} 为:

$$r_{\text{total}} = 1 - (1 - r_{\text{trans}})(1 - r_{\text{coupling}})(1 - r_{\text{epoxy}})(1 - r_{\text{tearing}}) \quad (5)$$

式中, r_{total} 为总的损耗系数, r_{trans} 为激光传输过程中的损耗, r_{coupling} 是光纤耦合的损耗系数,当不使用光纤对飞片施加激光时,该系数为0; r_{epoxy} 与 r_{tearing} 分别为光学胶与剥离过程产生的损耗, Mallick假定这两项对能量损失的影响较小,并有研究^[20]显示当入射激光能量通量小于 $30 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,这两项造成的损耗才有意义。Mallick对上述参数的获取进行了实验测定、曲线拟合与相关分析,将模型预测的飞片速度与实验结果对比发现,当飞片较厚($50 \mu\text{m}$)时与实验结果符合程度较好;而当飞片厚度较薄时,改进后的模型符合程度并不理想。

Lawrence-Gurney公式的建立思想与数学形式都相当简单明了,将其复杂化的修正有可能使方程的解更为准确,但并不一定实用;因此,尝试修正、改进诸如Gurney能 E 等参数的计算测试方法,对于Lawrence-Gurney公式的研究可能更为有效且具有实用性。

3.1.2 基于激光支持爆轰波

2007年,赵翔等^[40]认为Gurney公式不足以反映激光参数和飞片结构对飞片速度及动能的影响,因而将等离子体运动视作二维流场,选择激光支持的爆轰波(LSDW, laser supported detonation wave)相关理论作为基础,推导了激光驱动飞片速度模型。其假设激光能量在空间与时间上均均匀分布,定义激光光斑直径 D_s, m ; 爆轰波波速 $v_L, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; LSDW维持二维运动的特征时间 $t_{2d} = D_s / v_L$, 激光脉宽 t_p, s 。赵翔认为 $t_p < t_{2d}$ 与 $t_p > t_{2d}$ 两种情形下的爆轰波传播规律不同,需要分类讨论,在LSDW传播过程中,当 $t_p < t < t_{2d}$ 时, LSDW呈平面衰减,当 $t_{2d} < t$ 时, LSDW呈圆柱面衰减;若 $t_p > t_{2d}$, 当时间 $0 < t < t_{2d}$ 时, LSDW呈平面衰减,当 $t_{2d} < t$ 时, LSDW呈球面衰减。

各个阶段的LSDW压力由不同的计算公式给出,冲量作用的面积也各不相同,定义冲击波压力 p_s, Pa ; 压力衰减到等于外界气压所对应的时刻为 t_0, s ; 飞片半径为 R_f, m ; 激光束的光斑半径为 ω, m ; 爆炸波传播

到飞片边界即 $\omega=R_T$ 所需时间为 t_s, s ;则当 $t_s < t \leq t_0$ 时间时,冲量传递面积为飞片面积。

综上所述,由动量定理可知,整个飞行过程中的动量改变量等于冲量,将各阶段冲量加和得:

$$I = \int_0^{t_s} p_s dt \pi \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 + \int_{t_s}^{t_0} \int_0^{\omega} p_s 2\pi d\omega dt + \int_{t_s}^{t_0} p_s dt \pi R_T^2 \quad (6)$$

将 LSDW 压力的计算公式代入以上各式可得飞片的总动量,以总动量除以飞片质量即为飞片终速度,赵翔将计算结果与实验比较后认为其模型与实际符合较好。

然而,从文中推导过程可以看出,赵翔推导的速度公式形式复杂,参量繁多,也存在大量经验估计的参数,例如激光烧蚀形成的飞片质量准确预估较为困难,而在该理论中质量参数对速度结果影响较大,综合分析,该理论模型对激光烧蚀驱动飞片的物理过程描述与结果准确度不一定优于 Lawrence-Gurney 公式。

3.1.3 基于等离子体状态方程理论推导

飞片飞行过程中的做功介质是激光烧蚀金属材料形成的等离子体,做功对象为飞片材料,因此,从状态方程出发,根据等离子体膨胀做功过程建立飞片速度模型也是可行的途径。然而,等离子体的状态方程研究在等离子体物理中是一个长期而困难的课题^[41];适用范围广的状态方程精度差但计算方便,而适用范围窄的状态方程精度高但计算复杂;此外,想要通过实验手段获得激光驱动飞片过程中等离子体的电离度、温度、压力等计算状态方程所需的参数也相对困难。

2009年,P. Zhang等^[42]针对其他模型无法同时描述激光加热等离子体热场与飞片飞行时空信息的缺陷,从激光加热等离子体的热场出发,假定等离子体状态方程为理想气体状态方程,从而得到了一套激光驱动飞片的物理模型。其基本假设包括:(1)入射激光垂直照射金属表面;(2)金属膜各向同性,并且激光烧蚀深度远小于金属膜厚度;(3)已经产生的等离子体不会遮挡后续激光。由于激光能量空间分布为尖顶锥形,因此 Zhang 采用柱坐标给出了热场分布方程:

$$\rho c(T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + (1 - R(T)) \alpha I_0(r, t) e^{-\alpha z} \quad (7)$$

式中, $\rho, c, k, R, \alpha, I_0$ 分别为固体金属膜材料的密度、热容、热导率、反射率、吸收系数以及激光的能量密度,其单位均依照国际单位制,同理加入相变焓之后可以得到液态、气态金属膜材料的热场方程,与理想气体状态

方程联立即可求得等离子体压力关于时间的函数,然后利用动量定理求出速度关于时间的函数,Zhang 给出的金属膜破裂的临界压力由相关经验公式^[43-44]得到。

Zhang^[42]随后利用有限差分法对这一微分方程组进行了数值计算,从等离子体的基本性质可以得知^[45],不完全电离的等离子体状态比理想气体粘稠的多,因此,Zhang 的这一假设与实际相差较大,但提供了一种与能量守恒截然不同的思路。Zhang 指出,计算结果与实验结果相对比,飞片速度较低,且在飞片厚度较小时误差较大。

事实上,从文献报道的数量来看,三种推导中,基于能量守恒的 Lawrence-Gurney 公式及其改进模型得到了最广泛的应用,而 Gurney 公式及其改进模型中,改进模型的应用范围比不上经典的 Lawrence-Gurney 公式^[46],得到的飞片速度与易测的材料参数的关系也不够明确,此外,也有学者^[47]通过实验对比与理论分析得出结论,认为基于 Lawrence-Gurney 公式的速度公式对于 10 μm 以下的薄飞片的驱动过程描述存在较大的系统误差,不能准确预测薄飞片的速度。因此,对于激光驱动飞片速度模型的建立与修正,还需要大量而深入的研究工作。

3.2 影响激光驱动飞片速度的因素

关于影响飞片速度的因素,理论研究一般从应用的速度模型入手选择研究的参量,而实验研究也受其指导与制约。文献中影响因素的研究一般从激光器与飞片两方面展开,其一是激光器参量对激光驱动飞片速度的影响,其二是飞片本身结构参数对激光驱动飞片速度的影响。

激光器主要参数包括波长、脉宽、聚焦光斑的直径以及激光功率密度等,除波长研究较少^[48]、脉宽认识不够^[49]外,上述参数本质上是激光能量在时间与空间上的分布问题,即激光功率密度问题。

最初认为激光光斑越小、激光功率密度越高,飞片速度会单调增高^[50];后来发现对于厚度一定的 Al 膜,当能量增大到一定程度后,飞片速度反而会下降,即飞片速度存在最大值^[51]。因此代福等^[51]提出,确定厚度的 Al 飞片速度与激光能量大小之间存在一定的耦合关系,若将飞片动能与激光能量的比值定义为耦合系数,则耦合系数存在最大值,K. E. Brown等^[31]通过实验也得到了相似的结果。此现象尚无较具说服力的解释,陈少杰^[5]认为主要是由于等离子体的屏蔽效应,即等离子体吸收激光,导致激光对于靶材的后续作用下

降,不过,文献中没有给出实证证据,详细的机理可能需要进一步研究。

单层飞片的结构参数包括金属膜材料的参数与透明基底材料的参数。对于金属膜材料,一般认为在不影响飞片的完整性与平面度的情况下,其厚度越薄、密度越低、直径越小,即越轻质速度越快,这一点无论是实验还是理论都得到了验证^[50]。基底材料允许通过的激光能量的大小是有限制的,当激光能量过大时,基底材料因损伤而透过率下降,实际驱动飞片的激光能量降低;基底材料的厚度、强度直接影响对等离子体约束的效果及冲击波的损耗,也是影响飞片速度的重要因素。不过,关于基底材料研究的文献报道较少,仅见2014年A. D. Curtis等^[20]比较了不同厚度硼硅酸盐玻璃基底对1064 nm波长激光的透过率,以及在相同激光能量下驱动相同厚度Al飞片的速度。Curtis通过实验发现,在光斑直径为700 μm的激光照射下,当激光能量超过50 mJ时,玻璃基底表面就产生了肉眼可见的损伤;激光透过率随着玻璃基底厚度的增加而增加,但速度最高的飞片却在透过率第二高的玻璃基底处获得,Curtis猜测不同批次之间的误差与玻璃表面质量的不同造成了该现象,而玻璃基底约束冲击波与等离子体的能力,如声阻抗与抗烧蚀能力等,也是可能的影响因素之一。因此,约束层对激光驱动飞片速度的作用规律,值得进一步深入研究。

综上所述,目前激光驱动单层飞片的各种影响因素的宏观规律研究已经得到一定的成果,但仍有许多方面的认识较为模糊或有争议,有待于理论模型与实验设计两方面的进一步研究。

4 总结与展望

结合激光驱动飞片的国内外研究现状,论述了飞片形貌对于冲击起爆的重要性,回顾了飞片的速度模型与冲击效应的研究历程,总结了国内外激光驱动飞片平面度与完整性的研究进展。激光驱动飞片已经得到了大量应用,但物理模型还相对粗糙,因此,对于激光驱动飞片,需要进一步研究与发展的领域包括:

(1)发展能够更加全面系统地描述激光驱动飞片飞行过程的物理模型,丰富与扩展目前使用的Lawrence-Gurney公式,能够涵盖激光驱动飞片过程中的各种影响因素,从而更好地预测和描述飞片的速度、能量、冲击响应以及对飞片作用物质的冲击过程,以达到指导工程设计的目的。

(2)确定影响激光飞片平面度与完整性的影响因素,获得这些影响因素作用于飞片的物理规律,并指导飞片完整性和平面度的设计与制备方法。

(3)定义能够定量描述激光驱动飞片平面度与完整性的参数系统,并开发能够测量计算这一参数的实验系统,使飞片平面度与完整性的影响因素也定量化,从而获得能够指导工程实际的经验、半经验公式甚至物理模型。

参考文献:

- [1] Shu H, Huang X, Ye J, et al. Absolute equation of state measurement of aluminum using laser quasi-isentropic-driven flyer plate[J]. *Laser and Particle Beams*, 2017, 35: 145-153.
- [2] 王霄,刘辉,沈宗宝,等.激光驱动多层飞片加载金属箔板的成形能力[J].中国激光,2013,40(5):0503006(1-6).
WANG Xiao, LIU Hui, SHEN Zong-bao, et al. Forming ability of the metal foil forming by laser-driven multi-layered flyer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0503006(1-6).
- [3] 马子良,杨继运,李宇,等.微米级空间碎片撞击太阳能电池研究[J].装备环境工程,2015,12(3):49-52+74.
MA Zi-liang, YANG Ji-yun, LI Yu, et al. Research of micron-sized space debris impacting on solar cells[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2015, 12(3): 49-52+74.
- [4] Dean S W, de Lucia F C, Gottfried J L. Indirect ignition of energetic materials with laser-driven flyer plates[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 134-141.
- [5] 陈少杰.激光驱动多层飞片冲击起爆HNS-IV的规律和机理研究[D].南京:南京理工大学,2016.
CHEN Shao-jie. Research on shock initiation of HNS-IV using laser-driven multilayer flyers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [6] Krehl P, Schwirzke F, Cooper A W. Plasma produced by laser irradiation of plane solid targets[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 44(6): 4400-4406.
- [7] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. *Explosive Stoffe*, 1969, 17(1): 9-13.
- [8] 濮赞泉.破片撞击起爆战斗部影响因素及判据研究[D].南京:南京理工大学,2016.
PU Zan-quan. Influence factors and criteria of warhead shock initiation by fragments[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [9] 吴立志,沈瑞琪,徐娇,等.激光驱动飞片技术的研究进展[J].兵工学报,2010(31):219-228.
WU Li-zhi, SHEN Rui-qi, XU Jiao, et al. Research advance in laser-driven flyer technology[J]. *Acta Armamentaria*, 2010(31): 219-228.
- [10] 税敏,储根柏,席涛,等.神光Ⅲ原型装置激光驱动高速飞片实验研究进展[J].物理学报,2017,66(6):064703(1-9).
SHUI Min, CHU Gen-bai, XI Tao, et al. Experimental progress of laser-driven flyers at the SG-III prototype laser facility[J]. *Acta Phys Sin*, 2017, 66(6): 064703(1-9).
- [11] Watson S, Field J E. Integrity of thin, laser-driven flyer plates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(7): 3859-3864.
- [12] Bowden M D, Drake R C. The initiation of high surface area

- Pentaerythritol Tetranitrate using fiber-coupled laser-driven flyer plates[C]//Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing III, San Diego, CA, 2007, 6662: 66620D (1-12).
- [13] Mattel T, Shaw-Stewart J, Schneider C W, et al. Laser induced forward transfer aluminum layers: Process investigation by time resolved imaging[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258: 9352-9354.
- [14] Liu C Y, Mao X L, Greif R, et al. Time Resolved Shadowgraph Images of Silicon during Laser Ablation Shockwaves and Particle Generation[C]//8th International Conference on Laser Ablation, 2007, 59: 338-342.
- [15] 刘寿先, 温伟峰, 袁树云, 等. 分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断激光驱动飞片全场速度[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912007(1-7).
LIU Shou-xian WEN Wei-feng, YUAN Shu-yun, et al. Full field velocity measurement of laser-driven flyer using framing-imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912007(1-7).
- [16] Celliers P M, Erskine D J, Sorce C M, et al. A high-resolution two-dimensional imaging velocimeter[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2010, 81(3): 035101.
- [17] Banishev A A, Shaw W L, Bassett W P, et al. High-speed laser-launched flyer impacts studied with ultrafast photography and velocimetry[J]. *Journal of Dynamic Behavior Materials*, 2016(2): 194-206.
- [18] Yeager J D, Bowden P R, Guildenbecher D R, et al. Characterization of hypervelocity metal fragments for explosive initiation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 035901(1-9).
- [19] Willey T M, Champley K, Hodgins R, et al. X-ray imaging and 3D reconstruction of in-flight exploding foil initiator flyers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119: 235901(1-4).
- [20] Curtis A D, Banishev A A, Shaw W L, et al. Laser-driven flyer plates for shock compression science: Launch and target impact probed by photon Doppler velocimetry[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2014, 85(4): 043908(1-12).
- [21] Ressayguier T D, Signor L, Dragon A, et al. Experimental investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(1): 013506(1-7).
- [22] 郭俊峰, 曾庆轩, 李明愉, 等. 飞片材料对微装药驱动飞片形貌的影响[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 315-320.
GUO Jun-feng, ZENG Qing-xuan, LI Ming-yu, et al. Influence of flyer material on morphology of flyer driven by micro charge[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 315-320.
- [23] Signor L, Ressayguier T D, Dragon A, et al. Investigation of fragments size resulting from dynamic fragmentation in melted state of laser shock-loaded tin[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 887-900.
- [24] Lescoute E, Ressayguier T D, Chevalier J M, et al. Soft recovery technique to investigate dynamic fragmentation of laser shock-loaded metals[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(21): 211905(1-3).
- [25] Cottet F, Romain J P. Formation and decay of laser-generated shock waves[J]. *Physics Review A*, 1982, 25(1): 576-579.
- [26] Watson S, Field J E. Measurement of the ablated thickness of films in the launch of laser-driven flyer plates[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, 33(2): 170-174.
- [27] Stein C, Roybal R, Tlomak P, et al. A review of hypervelocity debris testing at the Air Force Research Laboratory[J]. *Space Debris*, 2004, 2(4): 331-356.
- [28] Jr Farnsworth A V, Trott W M, Setchell R E. A computational study of laser driven flyer plates[C]//AIP Conference Proceedings, 2001, CP620: 1355-1358.
- [29] 牛锦超, 龚自正, 曹燕, 等. 8 km/s激光驱动飞片发射技术实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(2): 129-136.
NIU Jin-chao, GONG Zi-zheng, CAO Yan, et al. Experimental research on laser-driven flyer plates up to 8 km/s[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 129-136.
- [30] 高瑀含. 高斯光束整形技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
GAO Yu-han. Research of Gaussian beam shaping[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [31] Brown K E, Shaw W L, Zheng X, et al. Simplified laser-driven flyer plates for shock compression science[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 103901(1-12).
- [32] Fujiwara H, Brown K E, and Dlott D D. High-energy flat-top beams for laser launching[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): 3723-3731.
- [33] 董洪建, 董靖宇, 黄本诚. 真空环境下空间碎片超高速撞击试验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2004, 24(2): 109-112.
DONG Hong-jian, TONG Jing-yu, HUANG Ben-cheng. Impact simulation of hypervelocity space debris in vacuum environment[J]. *Vacuum Science and Technology(China)*, 2004, 24(2): 109-112.
- [34] Gurney R W. The initial velocities of fragments from bombs, shell, grenades[R]. *Ballistic Research Laboratory Report No. 405*, 1943.
- [35] 韩秀凤, 严楠, 蔡瑞娇. 对炸药驱动飞片速度的理论计算方法的分析与评价[J]. *火炸药学报*, 2005, 28(1): 63-66.
HAN Xiu-feng, YAN Nan, CAI Rui-jiao, et al. Analysis and assessment on theoretical calculation methods for the velocity of explosive-driven flyer plate[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2005, 28(1): 63-66.
- [36] Lawrence R J, Trott W M. Theoretical analysis of a pulsed laser-driven hypervelocity flyer launcher[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14: 439-449.
- [37] 孙承纬, 庄仕明, 王春彦. 激光驱动飞片冲击引爆炸药的计算[J]. *强激光与离子束*, 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.
- [38] 朱励, 泰明, 郝军. 一个描述强激光驱动飞片高速运动的Gurney模型[J]. *四川大学学报*, 2005, 42(4): 775-778.
ZHU Li, XIAO Tai-Ming, HAO Jun. A Gurney model for the high velocity launch of laser-driven foil plate[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2005, 42(4): 775-778.
- [39] Mallick D, Shaeffer M, Dean S, et al. Investigating the velocity envelope of laser-driven micro-flyers for hypervelocity impact experiments[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 204: 215-222.
- [40] 赵翔, 苏伟, 李东杰, 等. 激光驱动飞片的动量耦合模型研究[J]. *强激光与离子束*, 2007, 19(8): 1275-1278.

- ZHAO Xiang, SU wei, LI Dong-jie, et al. Momentum coupling model for laser driven flying plates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8): 1275-1278.
- [41] 汤文辉,徐彬彬,冉宪文. 高温等离子体的状态方程及其热力学性质[J]. *物理学报*, 2017, 66(3): 030505(1-18).
- TANG Wen-hui, XU Bin-bin, RAN Xian-wen. Equations of state and thermodynamics properties of hot plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(3): 030505(1-18).
- [42] Zhang P, Qin Y, Zhao J, et al. Numerical simulation of the temperature field in laser-material interactions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 225302(1-9).
- [43] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1498-1504.
- [44] 陈湘涛,李茂生,陈栋泉. 一种实用的弹塑性流体状态方程(II)[J]. *高压物理学报*, 1988, 2(1): 153-158.
- CHEN Xiang-tao, LI Mao-sheng, CHEN Dong-quan, et al. A particle eos of elastic-plastic fluid(II)[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1988, 2(1): 153-158.
- [45] Chen F F. 等离子体物理学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-3.
- Chen F F. Introduction to plasma physics[M]. Beijing: Science Press, 2016:1-3.
- [46] 周建忠,戴磊,黄舒,等. 激光冲击驱动飞片成型性能[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1743-1750.
- ZHOU Jian-zhong, DAI Lei, HUANG Shu, et al. Formability of laser shock-induced high speed flyers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1743-1750.
- [47] 牛锦超,龚自正,曹燕. Lawrence-Gurney模型对于激光驱动飞片的适用性分析[J]. *航天器环境工程*, 2013, 30(2): 141-145.
- NIU Jin-chao, GONG Zi-zheng, CAO Yan. The applicability of Lawrence-Gurney model in describing laser-driven flyer plates[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(2): 141-145.
- [48] 吴优. 激光冲击波驱动微结构研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- WU You. The research on microstructure driven by laser shock wave[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [49] Paisley D L, Swift D C, Johnson R P, et al. Laser-launched flyer plates and direct laser shocks for dynamic material property measurements[C]// AIP Conf. Proc. 620, 1343 (2002).
- [50] 曹燕,龚自正,代福,等. 激光驱动飞片速度的理论分析[J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(4): 307-312.
- CAO Yan, GONG Zi-zheng, DAI Fu, et al. Theoretical analysis on the velocity of laser-driven flyer[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(4): 307-312.
- [51] 代福,龚自正,曹燕. 激光驱动飞片超高速发射技术实验研究[J]. *强激光与离子束*, 2010, 22(12): 3011-3014.
- DAI Fu, GONG Zi-zheng, CAO Yan. Experiment study on technologies for laser-driven flyer hypervelocity launch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 3011-3014.

Research Progress in the Flight Characteristics of Laser-driven Flyer

WANG Zhi-hao, LI Yong, QIN Wen-zhi, GAO Yuan, JIANG Xiao-hua, WANG Liang, HE Bi

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Laser-driven flyer is an efficient shock loading method, which has essential safety as a method of initiating explosives by laser. The reliability of initiating explosives by laser-driven flyer is closely related to the flight characteristics of flyer. The flying velocity and apparent morphology (planarity and integrity) of flyer are two important parameters for a successful initiation. Therefore, in this paper, the research progresses of laser-driven flyer technique were reviewed from two aspects of characterization means and influencing factors of flight properties of flyer. Focusing on laser-driven single layer foils, the methods of observation, characterization and reception were introduced. The research findings for the function law of influencing factors of flight performance in recent years were analyzed and discussed. The deficiencies existing in current researches were hackled and summarized and the future development directions, including the systematic physical model of flight process of laser-driven flyer and quantitative parameters of planarity and integrity of laser-driven flyer, were pointed out.

Key words: shock initiation; laser-driven flyer; flyer velocity; flyer morphology

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018235

(责编 王艳秀)