

文章编号:1001-5078(2020)09-1027-08

· 综述与评论 ·

基于脉冲激光的铝靶碎片冲量耦合系数的研究进展

梁晓博¹, 张广鹏¹, 方英武²

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安外事学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:综述了冲量耦合系数的测量方法:冲击摆法、激光干涉法、激光结合冲击摆法、水平导轨测量方法、压力传感器法,介绍了冲量耦合系数的主要数值分析方法以及影响因素:激光波长、脉宽、重复频率、功率密度以及碎片材料特性等。在概括总结了激光烧蚀冲量耦合影响因素的基础上,总结了激光烧蚀冲量耦合系数测量实验装置需要改进的措施以及测量装置和激光发射器今后所需要研究的方向。

关键词:冲量耦合系数;脉冲激光;铝靶碎片;研究进展

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.09.001

Research progress of impulse coupling coefficient of pulsed laser to aluminum target fragments

LIANG Xiao-bo¹, ZHANG Guang-peng¹, FANG Ying-wu²

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an International University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The measurement methods of impulse coupling coefficient, such as impact pendulum method, laser interference method, laser combined impact pendulum method, horizontal guideway measurement method, pressure sensor method, the main numerical analysis methods of impulse coupling coefficient and the influencing factors, such as laser wavelength, pulse width, repetition frequency, power density and characteristics of debris materials, are reviewed. On the basis of summarizing the influencing factors of laser ablation impulse coupling, the measures to be improved in the experimental device for measuring laser ablation impulse coupling coefficient and the research direction of the measuring device and laser emitter in the future are summarized.

Keywords: impulse coupling coefficient; pulse laser; aluminum target fragments; research progress

1 引 言

空间碎片主要由太阳系中本身存在的一些固体小颗粒以及人类的太空活动所产生的一些人造空间碎片所组成。随着人类对太空环境的探索活动日益频繁,发射航空航天器数量与日俱增,使得这些人造空间碎片不仅广泛分布于目前正常运行的航空航天器所在区域范围,而且对在轨卫星、航天器、宇航员的安全构成严重的威胁。其中威胁最大的属于厘米

级(1~10 cm)空间碎片,这部分碎片动能大、编目数量少、防护困难,研究探索出一种可以高速高效清除空间碎片的方法是国内外学者一直探讨的话题,特别是近几年来飞秒激光的出现,更加促进了厘米级空间碎片清除方法的研究,这种超快激光的出现,使得激光与铝靶碎片作用产生等离子体所需要的能量密度阈值非常低,一定程度上降低了激光与碎片的作用时间,提高了碎片的清除效率。激光清

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61875231);陕西省重点研发计划(No. 2017ZDXM-GY-133)资助。

作者简介:梁晓博(1994-),男,硕士,主要从事激光辐照技术方面的研究。E-mail:liangxiao_bo@126.com

通讯作者:方英武(1972-),男,博士,副教授,主要从事激光与物质相互作用,航空动力学方面的研究。

E-mail:fangyw72@126.com

收稿日期:2019-09-29;**修订日期:**2019-10-25

除空间碎片的基本原理是利用高能激光束直接作用在近地点位置上的目标碎片表面,目标碎片吸收激光光能后表面温度迅速升温,当激光持续作用,使得激光能量密度达到目标碎片材料的熔化阈值时,碎片表面迅速融化、气化并产生等离子体,沿着碎片运动方向产生一定的反喷羽流,给目标碎片施加一个反向作用力,使得目标碎片轨道运动速度降低,由天体动力学知识可知,当碎片轨道速度降低时其轨道高度也会相应的降低,当碎片近地点轨道高度降低到一定范围后,碎片由于地球引力的影响降入大气层中,并在与大气层的相互作用下烧毁(彻底气化)。

激光清除空间碎片过程中受到多种因素的影响,包括激光参数的影响,例如激光功率、脉宽、波长等;还与目标碎片的尺寸大小、材料特性等密切相关。激光烧蚀冲量耦合系数是其中的重要影响参数之一,是指目标碎片在受到激光辐照作用后所获得的冲量与入射激光总能量的比值,是衡量激光辐照小尺度空间碎片辐照效应的重要参数指标^[1],是衡量激光器清除空间碎片性能优劣的重要参数。冲量耦合系数越大,表明碎片获得冲量的能力越强。因此,冲量耦合系数是计算激光清除空间碎片的重要参数,通过仿真建模分析激光与靶材之间的相互作用关系,并通过一定的实验验证是激光清除空间碎片研究中的重要组成部分^[2]。

目前已经有很多学者做了大量关于冲量耦合系数方面的实验研究,国外 Phipps 等人已经得到靶材与激光作用过程中冲量耦合系数的定标关系,针对铝靶碎片的冲量耦合系数有 $C_m = 5.56 (I\lambda \sqrt{\tau})^{-0.301}$ 。国内金星、洪延姬、叶继飞等人冲击摆法、激光干涉法等方法测量了激光参数与目标碎片冲量耦合系数之间的关系,并提出了一种基于复摆模型的多脉冲冲量耦合系数以及基于复摆模型的高速摄影冲量耦合系数测量方法^[2-3],石乾乾、王成林等人提出了一种非接触、多自由度、多脉冲辐照的后坐力冲击实验测量装置^[4]。袁红、孙承纬等人采用流体力学理论和一维 Lagrange 有限差分法的计算方法对激光烧蚀冲量耦合系数的影响因素进行了简单的分析^[5];金星、常浩等人建立了一个一维热传导和流体动力学模型用来研究激光功率密度对纳秒激光烧蚀冲量耦合影响^[6];龚自正等人从目标碎片

的几何形状对冲量耦合系数的影响方面进行了理论和实验分析^[7];林正国、金星、张黎、赵剑衡等人采用数值分析和实验研究相结合的方法分析了激光辐照光斑尺寸大小与激光能量密度对冲量耦合系数影响^[8-9]。但是大多数激光烧蚀冲量耦合系数的测量方法仍然存在对目标碎片的约束,并没有完全模拟目标碎片在外太空中的失重悬浮状态,不能得到激光辐照后目标碎片的真实运动状态,因此在一定程度上也会存在测量误差,对后续实验结果分析也会产生影响。所以研发设计一套能够真正模拟太空环境的激光烧蚀冲量耦合测试系统是至关重要的,对激光器的参数设定以及激光器的结构设计具有很大的促进作用。

2 分析方法

目前主要是从流体力学模型方面对激光辐照空间碎片过程中碎片状态变化情况进行分析。高能激光束作用在目标碎片后,碎片不断吸收激光能量,当激光能量密度达到一定的数值后,碎片表面迅速升温融化,当激光继续作用达到材料表面气化温度时,会使得碎片表面产生等离子体并迅速向外部扩散,在碎片表面产生羽流现象并给目标碎片施加一个反冲冲力^[10]。由于光斑尺寸非常小,作用时间短,所以在激光辐照碎片产生等离子体羽流的区域也非常小,激光辐照空间碎片产生的热能沿径向方向散射的热量所占比例极小,大多数的热量仍然沿着轴向(即激光入射方向)不断向碎片内渗透,所以可以将辐照过程的三维流体力学模型简化为一维的流体力学模型^[11]。在流体力学模型分析过程中,需要考虑不同材料对激光的吸收率、导热率、对流系数、气化温度等都不同,在对所建立的力学模型求解过程中,需要注意参数的设定,防止混淆参数导致计算结果存在偏差。

假设入射激光能量为 E ,在激光烧蚀过程中烧蚀质量为 Δm ,已知 $\Delta m = \pi \rho \omega^2 v t$ 其中 ω 为光斑半径, ρ 为碎片的材料密度, v 为烧蚀速度, t 为激光作用时间^[11],通过数值计算可得烧蚀速度,从而求解得到烧蚀质量 Δm ,则烧蚀剩余质量为 $m_1 = m - \Delta m$,式中 m 为碎片初始质量,则冲量耦合系数为 $C_m = \frac{I}{E} = \frac{mV}{E} = \frac{(m - \Delta m)V}{E}$,式中 V 为烧蚀剩余碎片的速度。故只需要求得碎片的烧蚀质量和烧蚀速度

就可以求解出冲量耦合系数。

3 测量方法

3.1 冲击摆测量法

冲击摆测量法运动过程类似于平面单摆运动,是将质量为 m 的均质、形状规则的目标靶片悬挂在摆杆长度为 L 的真空舱中(忽略摆动过程中的摩擦力以及摆杆质量、摆杆不可伸缩),然后用脉冲激光辐照目标靶片,靶片被辐照的那一部分会迅速升温融化、气化并产生等离子体,从而给靶片施加一个与激光入射方向相同的力 F ,使得靶片沿力的方向在很短的时间 t 内迅速产生一定的摆角 β ,并由高速相机捕获并储存在计算机中,最后利用单摆运动的运动规律以及能量守恒原理计算出冲量耦合系数 C_m 。

如图1所示为冲击摆测量法实验装置图,图2所示为运动过程分析图。

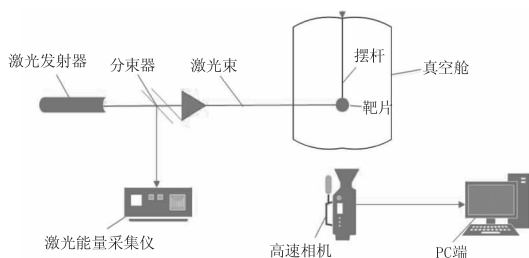


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental device

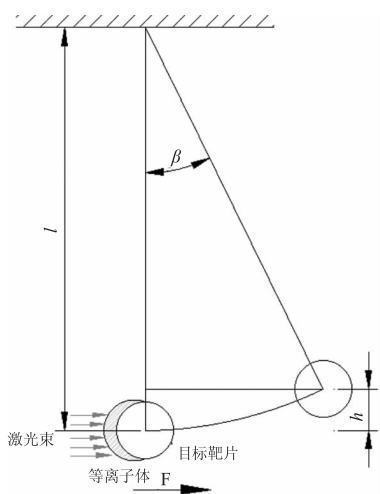


图2 运动过程分析图

Fig.2 Analysis diagram of motion process

由牛顿力学可知,对于冲击摆运动,由角动量定理可得激光辐照冲量对单摆的力矩 M 为:

$$M = J\theta \quad (1)$$

式中, $J = ml^2$ 为冲击摆的转动惯量; $\theta = \frac{d^2\beta}{dt^2}$ 是目

标靶角加速度。

由冲量定理可得,激光对目标靶片的冲量为:

$$I = Ft \quad (2)$$

激光辐照冲量对冲击摆的力矩 M 也可以表示为:

$$M = Fl \quad (3)$$

由式(1)、(3)可得:

$$Fl = J\theta \quad (4)$$

由式(2)、(4)可得: $I = \frac{J\theta}{l}$

对上式进一步简化可得:

$$I = \frac{J\omega}{l} \quad (5)$$

式中, $\omega = \frac{d\beta}{dt}$ 是目标靶角速度。

在冲击摆运动过程中也遵守能量守恒定律,可得:

$$mgh = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (6)$$

式中, $h = l(1 - \cos\beta)$, 是目标靶片的上升高度。

由冲量耦合系数定义可得: $C_m = \frac{I}{E}$, E 为脉冲激光的能量^[12],联立式(5)、(6)可得^[13]:

$$C_m = \frac{\sqrt{2mglJ(1 - \cos\beta)}}{El} \quad (7)$$

冲击摆测量法是目前应用最为广泛,最常见的测量方法,但其中涉及到的相关参数较多,计算过程相对复杂,最终的累积误差也会相对增大,例如转动惯量 J 不仅与目标碎片的形状、质量分布有关,而且与摆杆的回转中心位置有关,对于均质、形状规则的目标靶片在计算转动惯量的过程中可以直接利用公式 $J = ml^2$,而对于不均质、形状不规则的目标靶片的转动惯量则需要进行实验测定,另外在分析过程中忽略了所有的摩擦力,这也会使所计算的冲量 $I = Ft$ 受到一定的影响,最终使得冲量耦合系数的计算结果存在一定的误差。还有冲击摆转动角度 β 的测量精度也会受到不同测量方法的影响,例如用光栅测量和旋转编码器测量所得到的结果之间也会存在一定的相对误差,对于冲击摆测量法高精度的小角度测量装置是非常重要的。

3.2 激光干涉结合冲击摆

激光干涉结合冲击摆的方法利用了光学干涉原理,主要由高能激光发射器、冲击摆、角隅棱镜、分光

镜、激光探测器,激光探测器主要由示波器、光电传感器和 He-Ne 激光发射器组成。具体工作过程为:在激光干涉-冲击摆测量系统中安装一对角隅棱镜,其中一个为固定角隅棱镜,一个为移动角隅棱镜,将移动角隅棱镜固定在目标靶片上当冲击摆摆动一定角度时会使得移动角隅棱镜位置发生变化,从而改变光程,使得两个棱镜光路的光程差改变,从而产生明暗变化的干涉条纹,并在示波器上显示出来,通过建立条纹数目与移动角隅棱镜位移变化的关系式,求解得到冲击摆的动量变化情况以及激光冲量耦合系数^[14]。实验装置如图3所示,运动过程分析如图4所示。

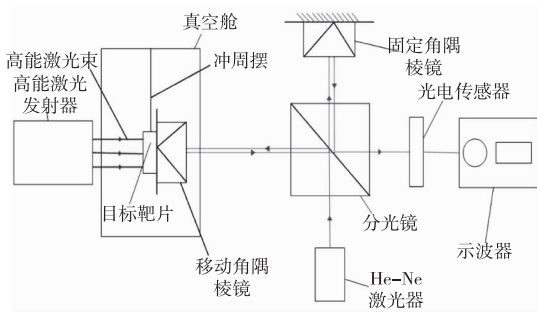


图3 实验装置图

Fig.3 Experimental device

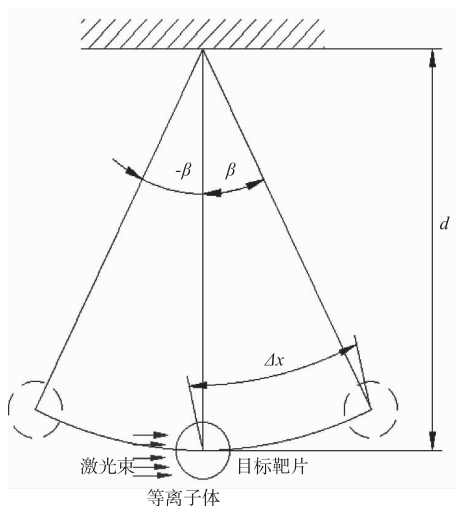


图4 运动过程分析图

Fig.4 Analysis diagram of motion process

激光干涉结合冲击摆利用了激光干涉原理,所以在测量较小位移变化,更小冲量数值方面具有很大的优势,计算精度比其他测量方法相对较高。通过示波器得到明暗条纹数目,假设激光波长为 λ ,当冲击摆摆角为 β 或者 $-\beta$ 时,移动角隅棱镜的位移变化量均为 Δx ,则通过移动角隅棱镜的光束光程变化量为 $2\Delta x$,固定角隅棱镜光束光程不发生变

化,所以两束光光程差 $\Delta l = l_1 - l_2 = 2\Delta x$,明暗条纹数目 $N = 2\Delta x / \lambda$,对于单摆运动假定线位移 Δx 与弧长相等,冲击摆摆长为 d ,则 $\Delta x = d\beta$,当摆角为 $\pm\beta$ 时,明暗条纹数目与摆角 β 的关系式为 $N = (4d\beta) / \lambda$,然后根据冲击摆的冲量耦合系数计算公式,将摆角代入可得^[14]:

$$C_m = \frac{\sqrt{2mgdJ(1 - \cos(\frac{N\lambda}{4d}))}}{Ed} \quad (8)$$

3.3 单激光结合冲击摆法

单激光结合冲击摆的测量方法类似于光电门测速原理,用光电计时器记录挡光片通过光电门时挡光的时间,然后根据挡光片的宽度和挡光时间便可以计算出挡光片的瞬时速度,由于挡光时间非常短,所以假定所得瞬时速度与平均速度相等。单激光结合冲击摆是通过激光能量为 E 的高能激光束作用于目标靶片,使得目标靶片在很短的时间内摆动一定的角度,在摆动的过程中由于目标靶片具有一定的宽度(最好使得目标靶片的尺寸大小与激光探测仪激光束光斑尺寸大小相同),当靶片到达最低点时会对激光探测仪的激光束产生遮挡作用,通过激光探测仪得到遮挡时间 t ,并测量得到目标靶片的尺寸大小和质量 m ,可以得到目标靶片处于最低点(平衡位置)时的瞬时速度,通过运动学规律,从而得到冲量耦合系数^[15-17]。

通过激光探测仪测出靶片在微小时间 Δt 内摆动位移为 Δd (即目标靶片的宽度),然后便可由瞬时速度定义式求得 $v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$,最后由动量 $m\Delta v$ 与高能辐照激光能量 E 之间的关系 $C_m = \frac{I}{E} = \frac{m\Delta v}{E}$ 便可以求解出冲量耦合系数。实验装置如图5所示。

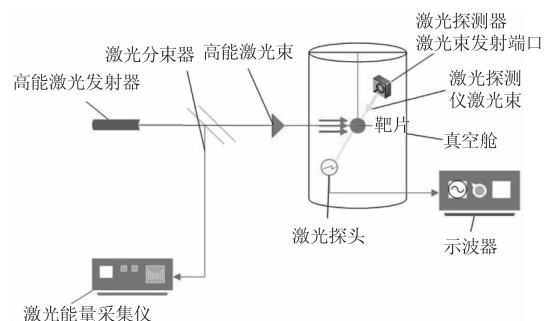


图5 实验装置图

Fig.5 Experimental device

3.4 双激光结合冲击摆法

双激光结合冲击摆的测量方法是在单激光冲击摆方法的基础上进行了改进,在目标靶片最低位置并行布置两个激光探测器,然后分别记录目标靶片通过两个激光探测器激光束的时间 t_1 、 t_2 ,并测出两个激光探测器之间的距离 d ,则可以计算出靶片在最低位置的速度 $v = d/(t_2 - t_1)$,然后根据动量定理 $I = \Delta P = mv_2 - mv_1$ 以及冲量耦合系数定义 $C_m = \frac{I}{E} = \frac{m\Delta v}{E}$ 可求得冲量耦合系数^[15-17]。

采用激光结合冲击摆的方法对冲量耦合系数进行测量避免了其他测量法中对目标靶片线位移、角位移的测量误差,很大程度上降低了冲量耦合系数的计算误差。

3.5 水平导轨测量法

水平导轨测量方法与冲击摆测量方法原理基本类似,冲击摆测量方法是测量目标靶片的角位移来求解冲量耦合系数,而水平导轨测量方法中是将目标靶片与导轨连接,通过测量目标靶片的线位移与运动时间来求解冲量耦合系数^[15-16]。具体运动过程为:激光发射器发出脉冲激光,通过激光分束器将激光按比例分为两部分,其中少数激光进入能量采集仪用于计算作用在靶片上的激光能量 E ,当激光束作用于目标靶片并且激光能量密度达到靶片材料燃烧阈值时,靶片瞬间升温融化、气化并产生等离子体,从而产生反向冲力,使得靶片在极短的时间 t 内产生一定的位移 s ,最后通过对靶片的运动规律分析以及冲量耦合系数的定义便可以计算出冲量耦合系数 C_m 。

在水平导轨测量方法中假定系统阻力恒定,而且忽略等离子体的屏蔽效应对目标靶片的影响,所以目标靶片在受到激光辐照作用获得瞬时初速度 v 后的运动可以近似认为是匀减速运动,对目标靶片的运动学规律进行分析可得目标靶片的运动学关系式为:

$$S = v_0 t - \frac{1}{2} a t^2 \quad (9)$$

$$v_1 = v_0 - a t \quad (10)$$

式中, s 为目标靶片的位移; v_0 为瞬时初速度; v_1 为末速度; a 为加速度; t 为运动时间。

由于目标靶片做匀减速运动,所以末速度为零,对上式进行简化可得:

$$S = \frac{1}{2} a t^2 \quad (11)$$

$$a = \frac{\Delta v}{t} \quad (12)$$

通过高速相机记录位移 s 与运动时间 t ,可以近似得到加速度 a ,从而得到 Δv 。

由冲量耦合系数定义可得^[15-17]:

$$C_m = \frac{I}{E} = \frac{F \Delta t}{E} = \frac{m \Delta v}{E} \quad (13)$$

式中, m 为目标靶片的质量,如图6所示为水平导轨测量方法装置图,如图7所示为运动过程分析图。

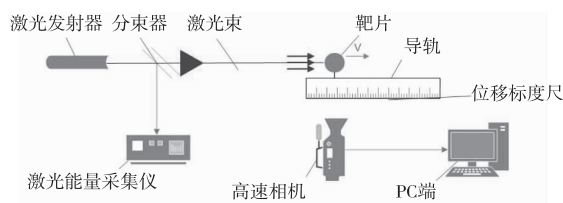


图6 水平导轨测量方法装置图

Fig. 6 Measurement method of horizontal guide rail

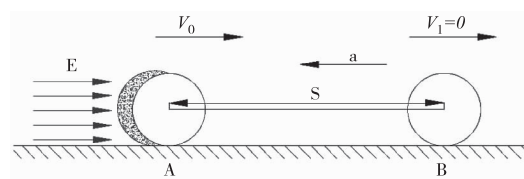


图7 水平导轨测量方法运动过程分析图

Fig. 7 Analysis of the movement process of horizontal guide rail measurement method

3.6 压力传感器法

压力传感器法是利用压力传感器将激光辐照目标靶片时的烧蚀反冲力产生的压力信号转化为电信号,例如通过示波器可以显示压力变化过程曲线图。图8所示为压力传感器法装置示意图。由冲量定义可得,通过对压力曲线在时间上的积分可得反冲冲量的大小,即:

$$I = \int F dt \quad (14)$$

式中, I 为激光作用过程中的反冲冲量; F 为烧蚀反冲力; t 为烧蚀反冲力作用时间。

由冲量耦合系数定义可得^[15-17]:

$$C_m = \frac{I}{E} = \frac{\int F dt}{E} \quad (15)$$

每种测量方法都有一定相似之处,主要是目标靶的固定方式不同以及测量方法不同,每种方式都有一定的误差产生,如何将这几种方法巧妙地结合

从而降低误差提高精度是非常值得研究的,对于激光清除空间碎片中激光冲量耦合系数的计算是非常重要的。

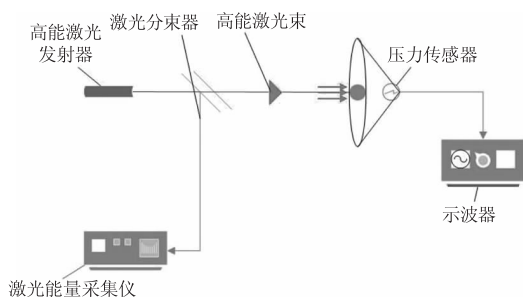


图8 装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of the device

4 影响因素

冲量耦合系数是评价激光清除空间碎片中能量转换高低的重要参数^[10],反映的碎片在入射激光作用下将入射激光的能量转化为碎片冲量能力的大小,是衡量激光清除空间碎片性能优劣的重要参数,可以定义为碎片获得的冲量与入射激光能量的比值^[18-25]。所以冲量耦合系数不仅与碎片的材料特性有关,而且与激光特性有关。对于碎片,具体特性有碎片的形状特性(球体,锥体等其他不规则形状)、热导率、比热、密度、熔点等相关参数,对于密度小熔点低的碎片,当激光作用在表面时会在很短的时间冲量耦合系数达到了最优值并产生等离子体羽流,甚至直接完全融化消失。而对于热导率差、密度大熔点高的金属碎片,需要相对较长的时间产生等离子气体对碎片烧蚀反冲,甚至在整个作用周期内冲量耦合系数一直都无法达到最优值。对于激光参数,主要有激光波长、脉宽、功率密度等。高能激光束辐照空间碎片表面,当激光功率密度达到碎片表面熔点、气化点产生等离子体羽流,会使得碎片在很短的时间内获得一定的冲量,冲量耦合系数也随着不断增加。所产生的等离子体会覆盖在碎片表面并逐渐沿着激光入射方向反喷,当激光仍然持续作用时,由于这些等离子会不断吸收入射激光的能量,所以处在等离子体后面仍未被激光辐照到的那部分碎片获得的激光能量便会减小^[19],碎片获得的的冲量也会降低,冲量耦合系数不会继续增大反而会逐渐减小(这种现象称为等离子体屏蔽效应)。如果将激光的脉冲宽度降低到等离子体屏蔽效应发生的时间,

这样便可以避免等离子体对激光的削弱现象,便可以获得较大的冲量耦合系数^[20],极大的提高了激光清除过程中激光能量利用率。

5 总结

在测量装置方面,目前国内测量冲量耦合系数的实验装置仍然约束了目标靶片的自由度,目标靶片并不是真空中的自由悬浮状态,在模拟激光辐照空间碎片的动力学运动过程中存在一定的不足,动力学参数测量方面仍然存在一定的误差;由于目标碎片的轨道运动姿态、速度(大于7.9 km/s)以及碎片形状效应的影响,要实现模拟空间碎片运动状态仍然存在一定的难度,因此解决碎片形状效应等因素的影响,建立一套目标碎片运动姿态、形状大小和冲量耦合系数之间的数学物理模型是非常重要的,研发适用于激光清除空间碎片过程仿真分析的真空悬浮舱(太空环境模拟舱)至关重要。在激光发射器方面,考虑到等离子体对激光的屏蔽效应、减少激光能量密度达到目标碎片表面材料融化阈值所需时间以及降低激光能量的损耗,研发高功率超短脉宽激光发射器是必不可少的。

参考文献:

- [1] Wen Quan, Ma Sai, Yang Liwei, et al. The effect of ground-based laser on the removal of space debris under turbulence[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(3): 277 - 283. (in Chinese)
温泉, 马赛, 杨丽薇, 等. 湍流作用下地基激光清除空间碎片的影响规律[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 277 - 283.
- [2] Wen Ming, Li Nanlei, Wu Jie. Experimental study on the impulse coupling characteristics of 532nm/1064nm laser ablation aluminum target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(S1): 30 - 34. (in Chinese)
文明, 李南雷, 吴洁. 532 nm/1064 nm 激光烧蚀铝靶冲量耦合特性实验研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(S1): 30 - 34.
- [3] Wen Ming, Hong Yanji, Wang Jun, et al. Measurement method of impulse coupling coefficient of high-speed photography based on compound pendulum model[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1061 - 1065. (in Chinese)
文明, 洪延姬, 王军, 等. 基于复摆模型的高速摄影冲量耦合系数测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18

- (7):1061-1065.
- [4] Wen Ming, Ye Jifei, Xiong Yong, et al. Measurement method of multi-pulse impulse coupling coefficient based on compound pendulum model[J]. Propulsion Technology, 2009, 30(5):633-637. (in Chinese)
文明,叶继飞,熊勇,等. 基于复摆模型的多脉冲冲量耦合系数测量方法[J]. 推进技术, 2009, 30(5): 633-637.
- [5] Shi Qianqian, Zhang Yan, Wang Kunpeng, et al. Experimental research on impact combining effect of a multi-pulse laser on an aluminum target[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(12):41-45. (in Chinese)
石乾乾,张艳,王鲲鹏,等. 多脉冲激光对铝靶脉冲耦合效应的实验研究[J]. 中国光学学报, 2018, 16(12): 41-45.
- [6] Yuan Hong, Tong Huifeng, Sun Chengwei, et al. Numerical simulation of impulse coupling coefficient of laser ablation aluminum target in vacuum environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(12):2853-2856. (in Chinese)
袁红,童慧峰,孙承伟,等. 真空环境下激光烧蚀铝靶冲量耦合系数的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12):2853-2856.
- [7] Chang Hao, Jin Xing, Ye Jifei, et al. Numerical simulation of the influence of laser power density on the coupling of laser ablation impulses[J]. Propulsion Technology, 2013, 34(10):1426-1431. (in Chinese)
常浩,金星,叶继飞,等. 激光功率密度对纳秒激光烧蚀冲量耦合影响的数值模拟[J]. 推进技术, 2013, 34(10):1426-1431.
- [8] Chen Chuan, Gong Zizheng, Yang Wulin, et al. The influence of space debris geometry on laser ablation impulse[J]. Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4):4-15. (in Chinese)
陈川,龚自正,杨武霖,等. 空间碎片几何形状对激光烧蚀冲量的影响规律[J]. 高压物理学报, 2018, 32(4):4-15.
- [9] Lin Zhengguo, Jin Xing, Chang Hao. Study on the impulse coupling characteristics of space debris irradiated by large pulsed laser spots[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12):305-310. (in Chinese)
林正国,金星,常浩. 脉冲激光大光斑辐照空间碎片冲量耦合特性研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 305-310.
- [10] Zhang Li, Zhang Yongqiang, He Jia, et al. Numerical simulation of the influence of target and spot size on laser impulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(5):10-14. (in Chinese)
张黎,张永强,贺佳,等. 靶与光斑尺寸对激光冲量影响的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(5): 10-14.
- [11] Shi Qianqian, Zhang Yan, Zhao Peng, et al. A highly efficient method to remove space debris using space-based laser energy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(12):2621-2627. (in Chinese)
石乾乾,张艳,赵鹏,等. 一种高效利用天基激光能量清除空间碎片的方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(12):2621-2627.
- [12] Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu, et al. Preliminary study on mechanical behavior of space debris removal by high power laser[J]. Applied Laser, 2004, 24(1):24-26. (in Chinese)
彭玉峰,盛朝霞,张虎,等. 强激光清除空间碎片的力学行为初探[J]. 应用激光, 2004, 24(1):24-26.
- [13] Wen Ming, Hong Yanji, Wang Jun, et al. Principle and accuracy analysis of impulse measurement of impact pendulum[J]. Journal of Equipment Command Technology College, 2005, 16(6):110-113. (in Chinese)
文明,洪延姬,王军,等. 冲击摆冲量测量的原理及精度分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(6): 110-113.
- [14] Fang Juan, Hong Yanji, Ye Jifei, et al. Application of laser interferometry in the measurement of micro impulse by torsion pendulum method[J]. Propulsion Technology, 2010, 31(1):119-122. (in Chinese)
方娟,洪延姬,叶继飞,等. 激光干涉法在扭摆法测量微冲量中的应用[J]. 推进技术, 2010, 31(1): 119-122.
- [15] Jin Long. Detection and experimental study of laser impulse coupling[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2013. (in Chinese)
金龙. 激光冲量耦合作用检测及实验研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2013.
- [16] Chen Jing, Tan Rongqing, Zheng Yijun, et al. Comparison of measurement methods for impulse coupling coefficient of laser propulsion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4):871-874. (in Chinese)
陈静,谭荣清,郑义军,等. 激光推进冲量耦合系数测量方法比较[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4):

- 871-874.
- [17] Wang Xiaolong, Li Jie, Feng Wenhui, et al. Study on measurement method of coupling coefficient in laser plasma propulsion[J]. China Science and Technology Information, 2012, 24(12): 63+89. (in Chinese)
王晓龙, 李杰, 冯文辉, 等. 激光等离子体推进中耦合系数的测量方法研究[J]. 中国科技信息, 2012, 24(12): 63+89.
- [18] Shi Haixia. Experimental study on impulse coupling coefficient of TEA CO₂ laser ablation aluminum target[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Electronics), 2007. (in Chinese)
石海霞. TEA CO₂ 激光烧蚀铝靶冲量耦合系数实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2007.
- [19] Yang Liwei, Wen Quan, Zhao Shanghong, et al. Study on the orbit reduction characteristics of small-scale space debris removal by space-based platform laser[J]. Applied Optics, 2018, 39(2): 268-273. (in Chinese)
杨丽薇, 温泉, 赵尚弘, 等. 天基平台激光清除小尺度空间碎片降轨特性研究[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 268-273.
- [20] Chang Hao, Jin Xing, Wen Ming, et al. Analytical calculation model of coupling coefficient of laser ablation impulse[J]. High Power Laser and Particle beams, 2013, 25(5): 1110-1114. (in Chinese)
常浩, 金星, 文明, 等. 激光烧蚀冲量耦合系数解析计算模型[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1110-1114.
- [21] Tsuruta H, Dondelewski O, Katagiri Y, et al. Ablation spot area and impulse characteristics of polymers induced by burst irradiation of 1 μm laser pulses[J]. Acta Astronautica, 2017, 136: 46-54.
- [22] Wen Quan, Yang Liwei, Zhao Shanghong, et al. Study on the process of space-based laser removal of small-scale space debris[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(1): 35-41. (in Chinese)
温泉, 杨丽薇, 赵尚弘, 等. 小尺度空间碎片天基激光清除过程研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(1): 35-41.
- [23] R Battiston, W J Burger, A Cafagna, et al. A systematic study of laser ablation for space debris mitigation[J]. The Journal of Space Safety Engineering, 2017, 4(7): 36-44.
- [24] Jun Chen, Hao Qian, Bing Han, et al. Investigation of the momentum coupling coefficient for propulsion by Nd: YAG laser at 1064 nm in atmospheric and water environment[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(13): 1650-1655.
- [25] C Y Cui, Y J Hong, J F Ye, et al. Effects of laser energy density on impulse coupling coefficient of laser ablation of water for propulsion[J]. Applied Physics A, 2011, 103(1): 239-243.