

文章编号:1006-9941(2022)11-1118-07

吸收系数对激光烧蚀二硝酰胺铵推进性能影响

孔红杰,叶继飞,毛晨涛,杜宝盛,郑永赞,崔海超

(航天工程大学宇航科学与技术系激光推进及其应用国家重点实验室,北京 101416)

摘要: 为研究吸收系数对激光烧蚀二硝酰胺铵(ADN)-丙酮基液体推进剂的推进性能的影响,将ADN液体工质在0~80%区间内,按照10%为等比例间距,与吸收剂充分混合构成不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂。利用近红外光谱仪测量装置对不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂的吸收系数进行测量与计算;在激光能量60 mJ,液膜厚度300 μm 的工况下,利用高精度扭摆对激光烧蚀不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂所产生的冲量进行测量。实验结果表明:随着ADN含量的增加,吸收系数呈现下降趋势。当ADN含量达到30%时,冲量取得峰值并随后不断下降,当ADN含量达到80%时,冲量又产生一个大幅度上升。分析认为,ADN含量为30%~70%时冲量不断下降主要原因是由于吸收系数的下降导致推进剂所沉积的激光能量变少引起的,而ADN含量为80%处的冲量大幅度上升则是由于吸收系数趋于0的推进剂与基底构成“水炮靶”,激光烧蚀基底容器,推进剂起到约束作用而造成的。

关键词: 激光推进;二硝酰胺铵(ADN);吸收系数;推进性能

中图分类号: TJ55; TN249

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022015

0 引言

激光烧蚀推进作为一种新概念推进技术,拥有最小冲量元极小、低能耗、无污染等诸多优点^[1],可用于微纳卫星的轨道保持,姿态调整等极小推力宽范围^[2]内的可调节推进任务。因此各国学者对激光推进进行了许多深入研究,发现合适靶材的选择对于激光推进有着十分重要的意义。目前,常见的靶材主要分为固体靶材和液体靶材2种。其中固体靶材主要为金属、高分子聚合物、含能靶材和掺杂靶材等;相对于固体靶材,液体靶材有着冲量耦合系数大、便于供给和存储^[3]等优点,但关于液体靶材的相关研究较少,尤其对一些新型液体燃料的研究。

二硝酰胺铵(ADN)自Zelinsky有机化学研究所首次合成后^[4],众多学者对其合成工艺与燃烧过程进

行了诸多研究。而目前ADN基液体推进剂的研究与应用依旧处于初步阶段。国外方面,Wingborg^[5]、Kappenstein^[6]、Amrousse等^[7]先后对ADN的溶解度、ADN的水溶液以及其热解催化剂进行了相关研究。瑞典空间研究中心用ADN、甘氨酸、水、甲醇等组分研制出LMP-103S液体推进剂,并首次将其应用于空间卫星姿态调整^[8]。国内方面,大连化学物理研究所和中科院航天催化材料重点实验室^[9]将ADN、甲醇以及微量稳定剂作为组分进行研制并取得了一定成果。陈君^[10]对ADN基液体推进剂高压燃烧反应以及其催化分解过程进行了模型建立实验验证,同时研究了喷注压力与推进剂结构参数对其燃烧过程的影响。景李钊^[11-12]、张涛^[13]分别对ADN基液体推进剂空间发动机和推力器进行了仿真模拟。李雷等^[14]研究了不同电极对ADN基液体推进剂电点火特性的影响。北京控制工程研究所^[15-17]设计了一种以ADN燃料的空间微推力器,实际推力达到1.03 N,比冲达到210.2 s。对于ADN基液体推进剂的研究,国内外学者研究大多基于传统的点火方式,在激光烧蚀推进方面则缺乏相关的研究。

本研究将激光烧蚀推进与ADN液体推进剂相结合,把ADN-丙酮基液体推进剂作为液体靶材,激光烧

收稿日期:2022-01-17;修回日期:2022-05-18

网络出版日期:2022-05-26

基金项目:基础加强计划技术领域基金项目(2019-JCJQ-JJ-120)

作者简介:孔红杰(1997-),男,硕士研究生,主要从事激光推进技术研究。e-mail:sanzc223@163.com

通信联系人:叶继飞(1981-),男,副研究员,主要从事激光推进技术研究。e-mail:yjfi1981@163.com

引用本文:孔红杰,叶继飞,毛晨涛,等.吸收系数对激光烧蚀二硝酰胺铵推进性能影响[J].含能材料,2022,30(11):1118-1124.

KONG Hong-jie, YE Ji-fei, MAO Chen-tao, et al. Effect of Absorption Coefficient on Propulsion Performance of Laser-ablated Ammonium Dinitramide[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(11):1118-1124.

蚀作为点火方式,以ADN工质比例作为自变量,对ADN-丙酮基液体推进剂进行吸收系数的测量,同时利用高精度扭摆对激光烧蚀不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂所产生的微冲量进行测量。结合吸收系数测量结果与容器表征形貌对推进剂所产生的微冲量变化趋势进行分析。

1 实验部分

1.1 实验装置

吸收系数的测量主要利用近红外光谱仪测量装置,如图1所示,主要组成部分为LS-NIR-PRO可调型光源、近红外光谱仪微型光纤式模块NIR-M-F1、支架、电源等。LS-NIR-PRO可调型光源是近红外的宽光谱光源,光谱范围为600~2500 nm,其采用35 W大功率发光灯泡,通过双重透镜的精密调节,把光斑高效聚焦到SMA905光纤口,能够将输出功效提高十倍以上。NIR-M-F1近红外光谱仪测量范围为900~1700 nm,光学分辨率10 nm,波长精度1 nm,信噪比6000:1,适用于反射、透射及光源测量。支架用于放置比色皿,同时隔离外界光线,避免干扰。比色皿为透明的石英玻璃材质,内部空间厚度为100 μm 。

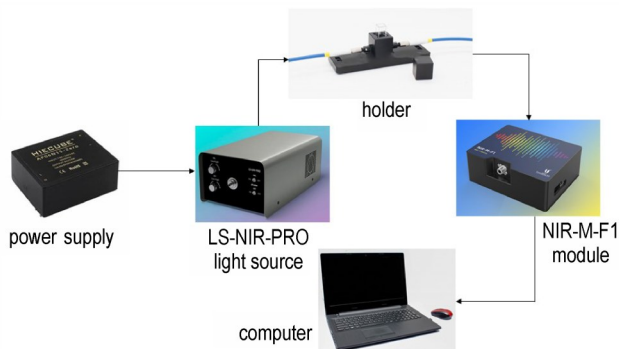


图1 光谱仪测量装置

Fig.1 Spectrometer measuring apparatus

微冲量的测量依靠微推力测量平台,如图2所示,主要由高精度扭摆、激光测距仪、反射镜、平凸透镜等部分构成。其中激光器为Beamtech公司的Nimma-400,重复频率1~10 Hz,脉宽6~8 ns,波长1064 nm,光斑直径8 mm左右,最大单脉冲能量450 mJ;激光测距仪为wenglor公司的PNBC001,分辨率0.06 μm ,量程4 mm,线性偏差2 μm 。通过调整位置角度,保证聚焦后的激光光斑落在容器的中心位置,且直径约1 mm。

高精度扭摆主要由基座、支撑架、枢轴、枢轴支架、横梁支架、横梁等部分组成,如图3a所示。高精度扭

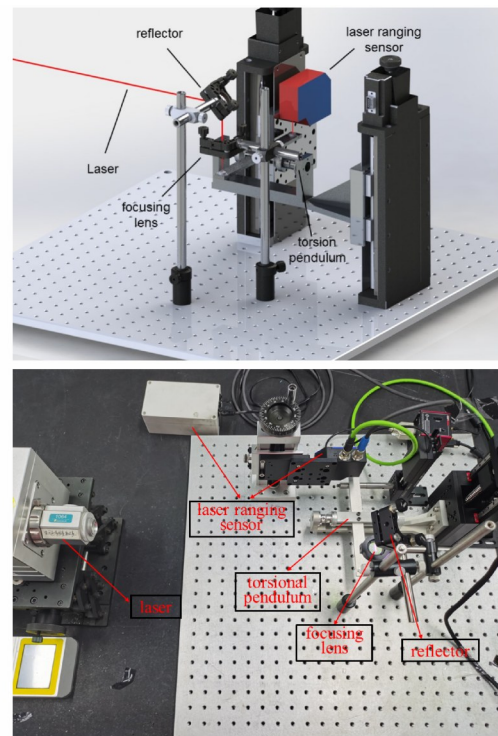
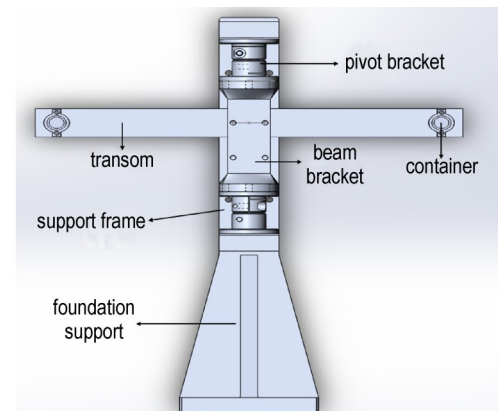
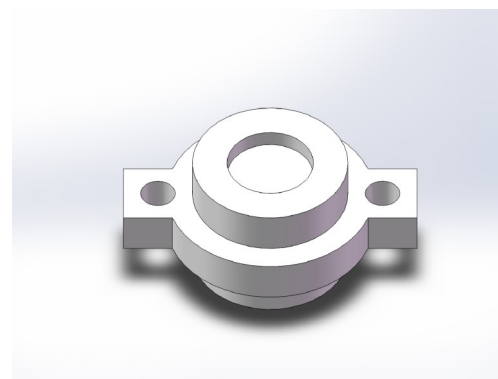


图2 微推力测量平台

Fig.2 Micro - thrust measuring platform



a. torsional pendulum



b. container model

图3 高精度扭摆和容器模型

Fig.3 High-precision torsional pendulum and container model

摆的核心部分为枢轴,其位于2个枢轴支架中心,为扭摆提供了回复力,使得扭摆在受到脉冲力后能够进行二阶有阻尼自由振动。放置液体工质的容器如图3b所示,其中心为 $\Phi 5\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的圆柱体空间用于放置推进剂;两侧为 $\Phi 2\text{ mm}$ 的通孔,方便固定于扭摆横梁上。容器内底面采用精加工的方式,平整度 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

YAG脉冲激光经反射镜和聚焦透镜后,作用于容器内的ADN-丙酮基液体推进剂上。推进剂吸收激光能量后,迅速产生气化、燃烧、溅射等一系列复杂的物理过程,从而产生冲量。由于容器固定在扭摆横梁上,横梁也受到瞬时作用的影响,在垂直平面内发生角度偏移,如图4所示。扭摆在枢轴提供的回复力下进行二阶阻尼振动。

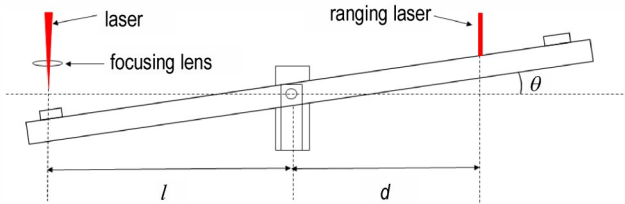


图4 扭摆的偏转状态

Fig.4 Deflection of a torsional pendulum

设扭摆系统^[18-19]的扭转角为 θ ;烧蚀力臂,即烧蚀端容器中心与枢轴中心的距离为 l ;测量力臂,即测距激光与枢轴中心的距离为 d ,扭摆的最大偏移量为 L ,则有:

$$I = \frac{J\omega_n L}{dl} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) = I_s L \quad (1)$$

式中, I 为微冲量, J 为扭摆的转动惯量, ω_n 为无阻尼固有频率, L 为扭摆的最大偏移量, d 为烧蚀力臂长度, l 为测量力臂长度, ζ 为阻尼比。其中转动惯量 J ,无阻尼固有频率 ω_n 、阻尼比 ζ 均为系统参数,需进一步标定获得。

运用脉冲响应法^[20-21]对本实验系统进行标定,最终得到的结果为 $l=0.095\text{ m}$, $d=0.085\text{ m}$, $J=2.47\times 10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $\omega_n=19.47\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\zeta=0.0014$ 。

由于激光测距仪的最大量程为 4 mm ,即扭摆振荡最大幅值 $L_{\max}=2\text{ mm}$,线性误差为 $2\text{ }\mu\text{m}$,即扭摆振荡最小测量值 $L_{\min}=2\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,微冲量测量的最大值与最小值的关系如(2)式:

$$I_{\max(\min)} = I_s \times L_{\max(\min)} \quad (2)$$

计算得出 $I_{\min}=1.177\text{ }\mu\text{N}\cdot\text{s}$, $I_{\max}=1177\text{ }\mu\text{N}\cdot\text{s}$,即该测量装置的冲量测量范围为 $1.177\sim 1177\text{ }\mu\text{N}\cdot\text{s}$ 。

根据误差传递公式,在扭摆测量装置中有误差传递关系:

$$\frac{\sigma_I}{I} = \sqrt{\frac{(\sigma_J)^2}{J^2} + \frac{(\sigma_{\omega_n})^2}{\omega_n^2} + \frac{(\sigma_\zeta)^2}{\zeta^2}} \quad (3)$$

式中, σ_I 为微冲量的标准差, σ_J 为转动惯量的标准差, σ_{ω_n} 为无阻尼固有频率的标准差, σ_ζ 为阻尼比的标准差。利用已知数据,结合扭摆的测量范围,带入式(3)中得到的冲量测量的相对误差 1.26% 。说明扭摆的测量结果可信度较高,能满足实验要求。

1.2 实验过程

工质采用由大连化学物理研究所研制的ADN液体工质,该工质是一种淡黄色透明液体,对 1064 nm 激光的吸收率极低。采用epolin公司的E2057红外染料与丙酮的混合溶液作为吸收剂。称量 15 mg 的红外染料与 1 mL 的丙酮溶液,将其混合并完全溶解,制成吸收剂。以 10% 为等比例间距,将ADN工质与吸收剂充分混合,构成不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂。

依次将不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂注入比色皿中,利用近红外光谱仪测量装置对其透射率进行测量,并根据透射率测量结果计算出吸收系数。

将不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂注入容器内,将液膜厚度控制在 $(300\pm 50)\text{ }\mu\text{m}$,利用 60 mJ 的单脉冲YAG激光进行烧蚀,通过微冲量测量装置对烧蚀产生的微冲量进行测量,将获得的实验结果绘制成曲线。

结合ADN-丙酮基液体推进剂的吸收率,对其微冲量变化趋势进行分析。

2 结果与讨论

2.1 吸收系数测量结果

不同比例的ADN-丙酮基液体推进剂通过近红外光谱仪测量装置得到的透射率结果如图5所示,为了便于区分,按奇偶比例分为图5a(偶数)与图5b(奇数)。图中垂直黑线与曲线的交点即为该比例推进剂在 1064 nm 激光下的透射率。

由图5可以看出,推进剂在 1064 nm 激光下的透射率随着ADN含量的增加而增加,而吸收率则不断下降。纯吸收剂与 10% 的推进剂的透射率无限接近 0 。ADN含量在 $20\%\sim 50\%$ 区间内,其透射率呈现小幅度的上升;在 $50\%\sim 80\%$ 区间内,透射率上升速度逐渐变

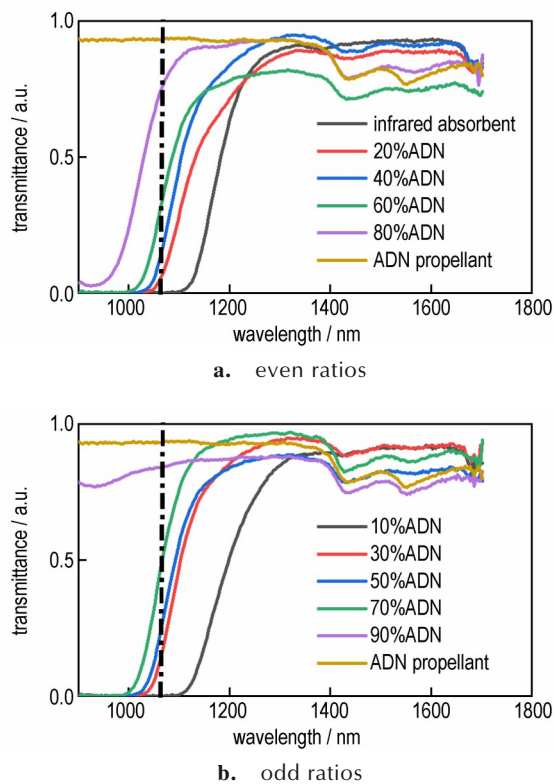


图5 不同ADN含量的推进剂的透射率

Fig.5 Transmission ratios of propellants with different content of ADN

快;超过80%的区间,其透射率上升速度出现下降且变缓。

根据测得的不同液体推进剂的透射率结果,结合朗伯比尔定律^[22]进一步计算出吸收系数,结果如图6所示。由图6可以看出,ADN含量在0~10%时,推进剂的吸收系数在 70 cm^{-1} 左右;当ADN含量达到20%时,推进剂的吸收系数大幅度下降,随后在20%~80%区间呈现出近线性下降的趋势;ADN含量超过80%时部分吸收系数更是趋近于0。由于在激光烧蚀推进

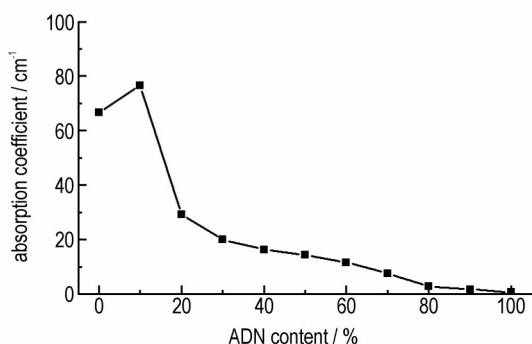


图6 推进剂吸收系数随ADN含量的变化规律

Fig.6 Variation law of absorption coefficient with ADN content in propellant

需要在工质层沉积足够的能量,而吸收系数在ADN比例超过80%后过小,因此选择0~80%的比例区间进行研究与分析。

2.2 冲量分析

在激光能量 60 mJ ,液膜厚度 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的工况下,不同比例ADN-丙酮基液体推进剂所产生的冲量随ADN工质比例的变化趋势如图7所示。由图7可以看出,随着工质ADN含量的上升,冲量大体呈现出先上升后下降再上升的变化趋势。

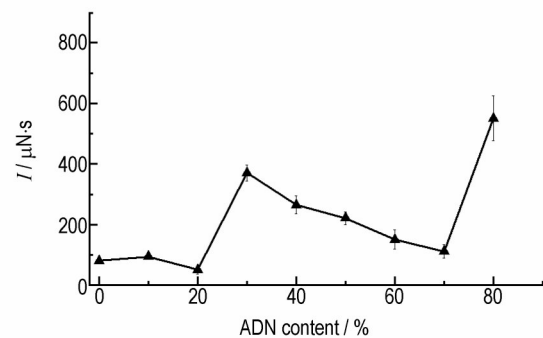


图7 不同激光能量下,冲量随ADN含量的变化

Fig.7 Variation of impulse with ADN content under different laser energy

结合推进剂的吸收系数变化趋势进一步分析冲量变化趋势:ADN含量在0~20%区间时,吸收系数较大但冲量并不高,分析其主要原因可能是由于吸收剂的比例过高,吸收剂里的丙酮挥发较快,使得激光烧蚀的并非是液体推进剂而是基底容器。随着ADN含量的上升,冲量于ADN含量为30%处达到峰值点,该点为一个较好的ADN工质和吸收剂的混合比例。该混合比例下的推进剂挥发较少,且能够沉积较多的激光能量,使得激光对推进剂产生烧蚀,进而产生较大的冲量。当ADN的含量超过30%时,冲量呈现与吸收系数相似的近线性的下降趋势。因此,认为ADN含量在30%~70%区间内,冲量下降的主要原因可能是由于ADN含量的上升导致的液体推进剂的吸收系数下降,使得沉积在液体推进剂上的激光能量逐渐减小,烧蚀效果减弱,进而导致冲量不断减小。当ADN含量达到80%时,冲量不再延续下降趋势,而是产生陡增,结合吸收系数变化趋势可以看出该点的吸收系数趋近于0,也就意味着激光能量基本不会沉积于液体推进剂上。因此,分析认为该点的大部分冲量也并非由激光烧蚀液体推进剂产生,而是大部分激光能量透过液体推进剂,作用于基底容器产生冲量。与ADN含量在0~20%区间内的推进剂相比,ADN含量为80%的推

进剂里的ADN含量高,不易挥发,进而形成一层液膜,构成“水炮靶”,因此ADN含量为80%的推进剂产生的冲量远高于ADN含量在0~20%区间内的推进剂。

在上述冲量结果分析的基础上,为进一步证明分析的合理性,在液膜厚度300 μm 、激光能量60 mJ的工况下,设置空白对照组,即在0~80%区间内,按照等差为10%的比例混合ADN工质与丙酮(不添加红外染料),获得对照组的推进剂,进行对照试验,所得到的冲量结果如图8所示。

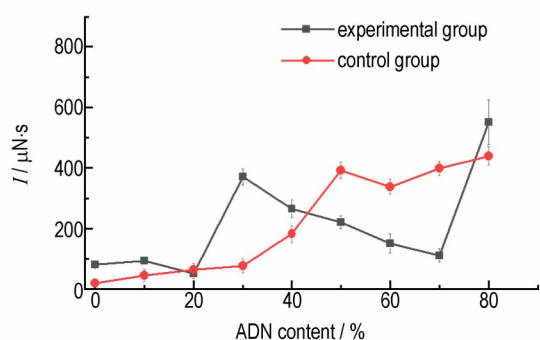


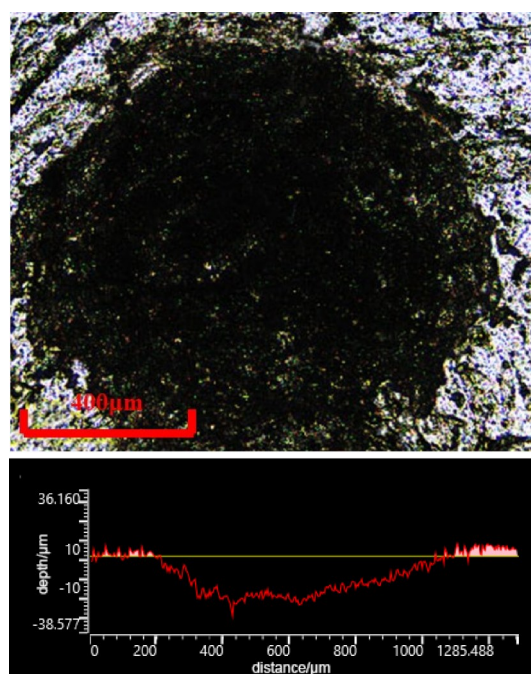
图8 实验组(添加红外染料)与对照组(未加红外染料)的冲量变化

Fig.8 Variation of impulse of experimental group (with infrared dye) and control group (without infrared dye)

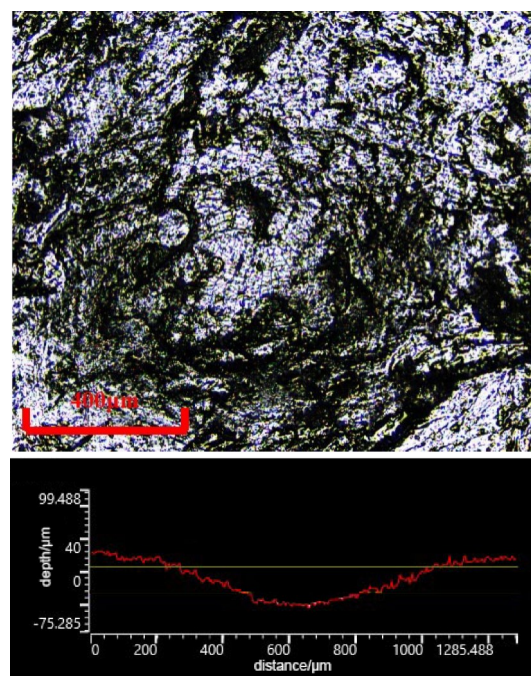
对比2组的冲量变化趋势,可以发现在ADN含量在0~20%区间内,实验组(添加红外染料)的冲量略高于对照组;ADN含量在30%~70%区间内,实验组冲量呈下降趋势,而对照组相反,呈现逐渐上升后平稳的变化趋势;ADN含量在80%处,2组的冲量近似。对照组的液体推进剂由于未添加红外染料,对激光的吸收率接近于0,因此其冲量上升的主要原因为ADN含量的增加,使得液体推进剂挥发减少,形成液膜,当激光作用于基底容器时,构成“水炮靶”,进而冲量增加。

通过对比,可以认为实验组在ADN含量为30%~70%区间内,冲量的下降确实是由于液体推进剂的吸收系数的下降而造成。同时实验组在ADN含量为80%处的冲量与对照组冲量平稳区间大致相同,因此从冲量角度来看,实验组在ADN含量为80%处的冲量陡增主要是由“水炮靶”造成的。

对实验后的容器底部的表面利用共聚焦显微镜进行观察,如图9示,图9a、图9b分别为实验组激光烧蚀ADN含量为80%和30%的推进剂后的容器表面形貌。对比观察可以发现,图9a中可以观察到明显的金属烧蚀坑,表面十分粗糙,与激光直接作用于铝靶材的形貌十分相似,直径约800 μm ,深度约20 μm ;而



a. 80% ADN



b. 30% ADN

图9 80%与30%ADN下容器烧蚀形貌

Fig.9 Ablation morphology of the vessel under 80% and 30% ADN

图9b中的烧蚀坑没有明显的金属烧蚀痕迹,且依旧保持金属光泽,金属凹坑的直径约700 μm ,深度约40 μm 。此外,还可以明显看出金属凹坑的轮廓线近似抛物线,十分平缓,认为这是由于推进剂在与激光能量相互耦合时,所产生的力作用于容器的金属表面,金

属受力凹陷同时对部分推进剂产生反作用力,从而产生大量液滴的飞溅现象。

综合上述的冲量大小与容器烧蚀形貌表征,可以判断出 80%ADN-丙酮基液体推进剂的冲量变大的主要原因是推进剂与基底容器构成“水炮靶”,激光能量主要沉积在基底容器上,对容器进行烧蚀,而液体推进剂起到了约束作用。

3 结论

(1) 不同比例的 ADN-丙酮基液体推进剂,其吸收系数随着 ADN 比例的增加大体呈现下降趋势。当 ADN 含量在 0~10% 时,吸收系数保持在 70 cm^{-1} 左右;当 ADN 含量在 20%~80% 时,吸收系数呈现近似线性的下降趋势,且在 20% 处下降幅度较大;当 ADN 含量超过 80% 时,吸收系数趋近于 0。

(2) 激光烧蚀不同比例的 ADN-丙酮基液体推进剂时,所产生的冲量大体呈现先上升后下降再上升的变化趋势。当 ADN 含量低于 30% 时,液体推进剂由于吸收剂过多,挥发较快,冲量较小;当 ADN 含量在 30%~70% 时,液体推进剂的吸收系数逐渐下降,冲量也逐渐下降;当 ADN 含量达到 80% 时,液体推进剂与基底容器构成“水炮靶”,进而冲量大幅度增加。

(3) 通过与未添加红外染料的对照组的冲量对比和容器烧蚀形貌的观察,发现 ADN 含量为 80% 的推进剂的冲量与对照组近似,且产生的烧蚀坑形貌粗糙,轮廓不规则,与 ADN 含量为 30% 的推进剂产生的近似抛物线的光滑凹坑完全不同。

参考文献:

- [1] 李南雷,叶继飞,周伟静. 掺杂对甘油激光烧蚀冲量耦合特性的影响[J]. 推进技术, 2015, 36(10): 1595-1600.
LI Nan-lei, YE Ji-fei, ZHOU Wei-jing. Effects of dopant on impulse coupling of laser ablated glycerin[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1595-1600.
- [2] 李永,刘旭辉,汪旭东,等. 空间极小推力宽范围可调推进技术研究进展[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(6): 1-12, 19.
LI Yong, LIU Xu-hui, WANG Xu-dong, et al. Review and prospect on the large-range thrust throttling technology with extremely small thrust[J]. *Aerospace Control and Application*, 2019, 45(6): 1-12, 19.
- [3] 盛德仁,史香锟,陈坚红,等. 液体靶材激光推进研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 16-24.
SHENG De-ren, SHI Xiang-kun, CHEN Xiang-hong. Research progress of laser propulsion with liquid propellants[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 16-24.
- [4] 王伯周,张志忠,朱春华,等. ADN 的合成及性能研究(I)[J]. 含能材料, 1999(4): 145-148.
WANG Bo-zhou, ZHANG Zhi-zhong, ZHU Chun-hua, et al. Study on synthesis of ADN(I)[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 1999(4): 145-148.
- [5] WINGBORG N. Ammonium dinitramide-water: Interaction and properties[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2007, 51(5): 1582-1586.
- [6] KAPPENSTEIN C, BATONNEAU Y, PERIANU E, et al. Comparison of physico-chemical properties and evaluation of ADN and HAN[C]//Space Propulsion 2004 - 2nd International Conference on Green Propellants for Space Propulsion, 2004.
- [7] AMROUSSE R, FUJISATO K, HABU H, et al. Catalytic decomposition of ammonium dinitramide (ADN) as high energetic material over CuO-based catalysts[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2013, 3(10): 2614-2619.
- [8] ANFLO K, MOLLERBERG R. Flight demonstration of new thruster and green propellant technology on the PRISMA satellite[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65: 1238-1249.
- [9] 马智勇,朱少敏,丛伟民,等. 氨水与金属离子对 ADN 基绿色推进剂稳定性影响[J]. 推进技术, 2021, 42(11): 2610-2616.
MA Zhi-yong, ZHU Shao-min, CONG Wei-min, et al. Effects of ammonia and metal ions on stability of ADN-based green propellant system[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(11): 2610-2616.
- [10] 陈君. 二硝酰胺铵(ADN)基液体推进剂催化分解及高压燃烧反应的试验与计算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
CHEN Jun. Experimental and computational study of catalytic decomposition and high pressure combustion reaction based on ammonium dinitramide(ADN) liquid propellant[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [11] 景李玥. ADN 甲醇水溶液的燃烧特性及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2017.
JING Li-yao. The combustion characteristics of ammonium dinitramide methanol aqueous solution and its applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [12] 景李玥,霍佳龙,姚兆普,等. ADN 基液体推进剂空间发动机工作过程模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(10): 1085-1090.
JING Li-yao, HUO Jia-long, YAO Zhao-pu, et al. Numerical investigation of an aerospace thruster with ADN-based liquid propellant[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2016, 56(10): 1085-1090.
- [13] 张涛. ADN 基推进剂雾化特性试验及 ADN 基推力器工作过程的仿真研究[D]. 北京交通大学, 2017.
ZHANG Tao. Experimental study on the atomization characteristics of ADN-based propellant and simulation study on the working process of ADN based thruster[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [14] 李雷,李国岫,李洪萌,等. 不同电极材料下 ADN 基液体推进剂电点火特性的实验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 65-72.
LI Lei, LI Guo-xiu, LI Hong-meng, et al. Experimental study of electrical ignition characteristics of ADN based liquid propellants with different electrode material[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 65-72.
- [15] 张伟,王梦,陈阳,等. 1N ADN 基推力器瞬态启动性能试验研究[J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(4): 63-68.
ZHANG Wei, WANG Meng, CHEN Yang, et al. Experimental investigation on transient start-up of ADN-based thruster[J].

- Aerospace Control and Application*, 2021, 47(4): 63-68.
- [16] 付拓取, 刘旭辉, 张伟, 等. 一种绿色无毒单元微推力器性能试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 85-91.
FU Tuo-qu, LIU Xu-hui, ZHANG Wei, et al. Experimental investigation on performance of a green, non-Toxic, monopropellant micro-thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 85-91.
- [17] 姚兆普, 张伟, 王梦, 等. ADN基液体空间发动机的实验研究与在轨验证[J]. 火箭推进, 2018, 44(1): 8-14.
YAO Zhao-pu, ZHANG Wei, WANG Meng. Experimental investigation and on-orbit flying validation of an ADN-based liquid space engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(1): 8-14.
- [18] 洪延姬. 微推力和微冲量测量方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 97-126.
HONG Yan-ji. Micro thrust and micro impulse measurement methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 97-126.
- [19] 罗乐乐, 窦志国, 李南雷. 基于扭摆测量系统的微冲量测量方法[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 2: 20-22.
LUO Le-le, DOU Zhi-guo, LI Nan-lei. The micro-impulse measuring method based on torsion pendulum [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*. 2017, 2: 20-22.
- [20] 金星, 洪延姬, 周伟静, 等. 一种用于微小推力冲量测量的扭摆系统参数标定方法[J]. 推进技术, 2015, 36(10): 1554-1559.
JIN Xing, HONG Yan-ji, ZHOU Wei-jing. A parameter calibration method for torsion pendulum using in micro thrust and impulse measurement [J]. *Journal of Propulsion Technology*. 2015, 36(10): 1554-1559.
- [21] 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.
WEN Ming, LI Nan-lei, WU Jie. Experimental study on impulse coupling characteristics of 532 nm/1064 nm laser ablated Al target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): 30-34.
- [22] 吕玉光. 仪器分析[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2016.
LV Yu-guang. Instrumental Analysis[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2016.

Effect of Absorption Coefficient on Propulsion Performance of Laser-ablated Ammonium Dinitramide

KONG Hong-jie, YE Ji-fei, MAO Chen-tao, DU Bao-sheng, ZHENG Yong-zan, CUI Hai-chao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application Department of Aerospace Science Technology Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: The aim of this study is to explore the effect of absorption coefficient on propulsion performance of the laser ablated ammonium dinitramide (ADN)-acetone based liquid propellant. ADN and absorbent were mixed with different proportions in the range of 0-80% and a proportional distance of 10% to form ADN-acetone based liquid propellants. The absorption coefficients of propellants with different proportions were measured and calculated using a near-infrared spectrometer. Under the laser energy of 60 mJ and liquid film thickness of 300 μm condition, the impulses generated by laser ablation of propellants with different proportions were measured using a high-precision torsion pendulum. Results show that the absorption coefficient decreased with the increase of ADN content. In addition, the impulse decreased after peaking at ADN content of 30%, but increased again at ADN content of 80% sharply. The decrease of impulse in the ADN content range of 30%-70% is mainly caused by the decrease of absorption coefficient which leads to the decrease of laser energy deposited by the propellant. The impulse increase at ADN content of 80% is caused by the propellant whose absorption coefficient approaches to 0 and constitutes a "water cannon target" with the container. After the container is ablated by the laser, the propellant will act as a constraint, and result in the increase of impulse.

Key words: laser propulsion; ammonium dinitramide(ADN); absorption coefficient; propulsion performance

CLC number: TJ55; TN249

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022015

(责编: 王艳秀)