

文章编号:1006-9941(2023)06-0598-08

纳米铝粉掺杂太安炸药的激光烧蚀特性

吉祥波,唐舵,覃文志,高原,朴俊宇

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

摘要: 为探索低含量纳米铝粉掺杂炸药的脉冲激光作用过程,采用阴影测量系统研究了单脉冲激光烧蚀1%纳米铝粉掺杂太安(PETN)炸药的等离子体膨胀和冲击波特性,并利用激光诱导击穿光谱监测激光烧蚀过程中的特征光谱。结果表明:当脉冲激光辐照到纳米铝粉掺杂PETN炸药表面时,炸药表面形成高温等离子体,等离子体膨胀后压缩周围空气形成冲击波。冲击波在50 ns时传播速度为 $12500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随着时间的增加,等离子体继续膨胀,冲击波向前推进速度降低。800 ns时,冲击波内部出现大量的喷溅物。Al原子和AlO气相分子的特征谱线都是在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 的强度最大,到 $10\text{ }\mu\text{s}$ 时消失,表明脉冲激光烧蚀下,纳米铝粉与炸药的作用时间小于 $10\text{ }\mu\text{s}$ 。20 mJ激光能量下未检测到C原子和CN的光谱线。当激光能量增加到30 mJ时,纳米铝粉掺杂PETN炸药的光谱中出现C原子和CN的光谱线,表明纳米铝粉掺杂PETN炸药分解所需的激光能量应不少于30 mJ。

关键词: 激光起爆;太安炸药;等离子体;激光诱导击穿光谱

中图分类号: Tj55; O433

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022281

0 引言

脉冲激光起爆是以激光作为起爆能量,激光通过光纤后辐照到炸药表面实现炸药起爆的技术^[1-2]。早在20世纪70年代就已经实现叠氮化铅等敏感起爆药的激光起爆^[3],但起爆药危险性高,难以满足安全性要求。钝感高能炸药安全性高,但难吸收近红外波长激光,起爆需要的脉冲激光能量高(一般为焦耳级),而现有的成熟光纤难以实现高能量脉冲激光的可靠传输,从而限制了脉冲激光起爆在武器系统中的应用。

在 高能 炸药 中 掺 杂 纳 米 颗 粒, 是 一 种 有 效 降 低 脉 冲 激 光 起 爆 能 量 的 方 法^[4]。为 提 高 炸 药 的 激 光 吸 收 效 率, 降 低 起 爆 能 量, 众 多 研 究 者 在 炸 药 中 引 入 少 量 碳 黑、金 属 碳 化 物、氧 化 物 或 金 属 纳 米 颗 粒 作 为 激 光 吸 收 介 质^[5-7]。Aduiev等^[8-10]研究了铝、镍和Al-C超细复合

颗粒等对太安(PETN)炸药脉冲激光起爆性能的影响,研究发现0.5%~4%颗粒能够显著降低PETN的激光起爆阈值,其中以纳米铝粉降低脉冲激光起爆能量的效果最显著。Ji等^[11-13]研究了铝纳米粉含量(0.5%~5%)对PETN、六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)和黑索今(RDX)等炸药脉冲激光起爆性能的影响,研究发现纳米铝粉影响PETN和CL-20的激光起爆能量规律存在显著差异。

脉冲激光起爆纳米铝粉掺杂炸药是一个非常复杂的过程^[14]:首先铝粉吸收激光能量,经光致加热发生相变,形成高温等离子体。接着,高温等离子体将能量传递到炸药,实现炸药起爆。脉冲激光作用在炸药表面形成冲击波和物质喷溅,起爆过程中会出现炸药分解的特征光谱^[15-16]。采用阴影成相系统和激光诱导击穿光谱(LIBS)可以从不同角度认识激光作用下含铝炸药等离子体的行为特性。阴影成相系统可以获得等离子体和冲击波的空间演化^[17-18]。激光诱导击穿光谱可以实时获得等离子体中所含元素成分的特征光谱,实现对元素的定性和定量分析^[19-20]。郭文灿等^[21]采用激光烧蚀RDX基含铝炸药粉末,并实时监测反应过程中的发射光谱分布,研究发现含铝炸药在前期和后期的光谱分布和反应行为存在明显区别。Gottfried

收稿日期:2022-11-18;修回日期:2022-12-31

网络出版日期:2023-05-04

基金项目:国家自然科学基金(12072329)

作者简介:吉祥波(1979-),男,副研究员,主要从事激光起爆炸药研究。e-mail:xiangbo@caep.cn

通信联系人:吉祥波(1979-),男,副研究员,主要从事激光起爆炸药研究。e-mail:xiangbo@caep.cn

引用本文:吉祥波,唐舵,覃文志,等.纳米铝粉掺杂太安炸药的激光烧蚀特性[J].含能材料,2023,31(6):598-605.

JI Xiang-bo, TANG Duo, QIN Wen-zhi, et al. Laser Ablation Characteristics of PETN Explosive Doped With Nano-aluminum Powder[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(6):598-605.

等^[22-23]研究了含铝RDX等几种常见炸药的激光诱导冲击波和光谱特征,并根据激光诱导冲击波估算了炸药的爆轰波速度。现有文献研究所使用的炸药中铝含量较高,一般都大于10%,但降低炸药脉冲激光起爆能量仅需要0.5%~2%的纳米铝粉,且基底材料一般为金属或双面胶有机物,当炸药量少时,激光会烧蚀基底材料而影响光谱特性,目前国内外对于低含量纳米铝粉掺杂炸药的脉冲激光烧蚀作用过程研究较少^[11]。

为此,本研究采用单脉冲激光烧蚀1%纳米铝粉含量的PETN炸药,炸药薄膜在K9玻璃板上制备,以消除基底的影响。利用阴影测量系统对脉冲激光作用下炸药的等离子膨胀和物质喷射特性进行观测,并利用激光诱导击穿光谱技术监测了炸药被激光烧蚀后的特征光谱,以期获得少量纳米铝粉掺杂PETN炸药的脉冲激光烧蚀特性。

1 实验部分

1.1 试剂

PETN炸药,化工材料研究所;铝粉,100~200 nm,四川宏博科技有限公司;乙醇,分析纯,国药化学试剂有限公司。

1.2 实验过程

1.2.1 PETN炸药薄膜的制备

称量4.95 g PETN炸药和0.05 g纳米铝粉加入到20 mL的无水乙醇中,超声混合5 min。采用滴管将PETN的悬浮液滴加到K9玻璃基板上(20 mm×30 mm),炸药悬浮液在基板上自然流平,无水乙醇自然挥发,最终在K9玻璃基板制备出含纳米铝粉的PETN炸药薄膜,厚度为0.8 mm,记为PETN-Al。

1.2.2 性能表征

采用扫描电子显微镜(德国ZEISS)观测样品微观状态;采用能谱仪(德国布鲁克Quantax 75)表征样品元素含量。

阴影测量和激光诱导击穿光谱测量原理如图1所示。2种测试中采用的脉冲激光波长为1064 nm,脉宽为8 ns。阴影测量中脉冲激光经会聚透镜聚焦后,垂直照射到炸药样品的表面,光斑直径为200 μm,激光能量30 mJ,时间分辨型CCD相机垂直于激光光路拍摄物质喷溅和冲击波成长,同步方法是通过延迟发生器(Stanford DG645)触发泵浦激光器、探测激光器、快门控制器和CCD来设置它们的顺序和延迟时间。激光诱导击穿光谱的激光能量分别为20,30 mJ,

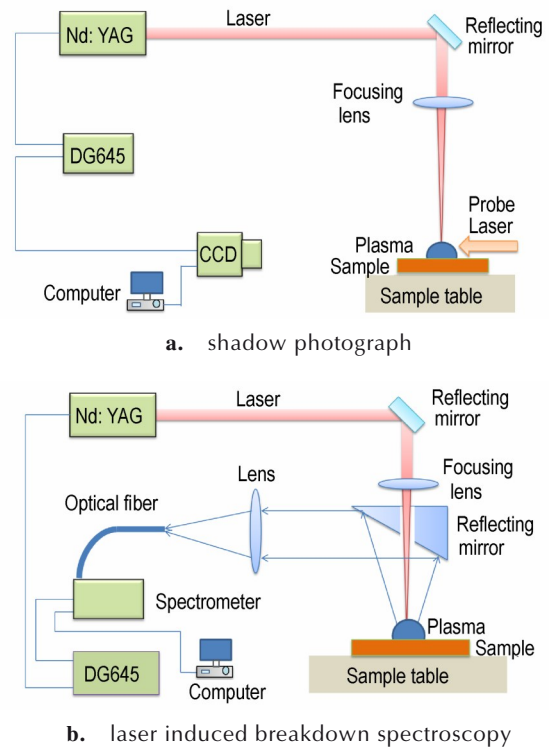


图1 阴影测量和LIBS测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of the shadow photograph and laser induced breakdown spectroscopy

和50 mJ,测量的发射光谱信号从侧面进行收集,经透镜组耦合进光谱仪中,光谱仪采集范围为200~800 nm,每个光谱中包含5个激光烧蚀点的数据,LIBS光谱采集软件和LIBS库软件来自德国Sophi公司。

2 结果与讨论

2.1 纳米铝粉掺杂PETN炸药的微观结构

图2为纳米铝粉掺杂PETN炸药后的微观照片和能谱图。如图2a所示,PETN颗粒本身为无规则形状的松聚集体,超声混合过程中,聚集体颗粒被无水乙醇溶剂超声成多孔状,颗粒尺寸为2~30 μm。纳米铝粉颗粒较小,分散在PETN颗粒中,存在较多的团聚体。在纳米铝粉掺杂PETN炸药能谱(EDX)图中出现了C、N、O元素峰,还有明显的铝元素峰(图2b)。微观结构和能谱分析结果表明,纳米铝粉在PETN炸药中实现了均匀混合。

2.2 纳米铝粉掺杂PETN炸药的等离子体和冲击波

当激光脉冲辐照到炸药表面时,炸药表面在极短的时间内吸收大量的激光能量,烧蚀区域的温度急剧升高,表面原子蒸发形成蒸汽强烈吸收激光能量,进而

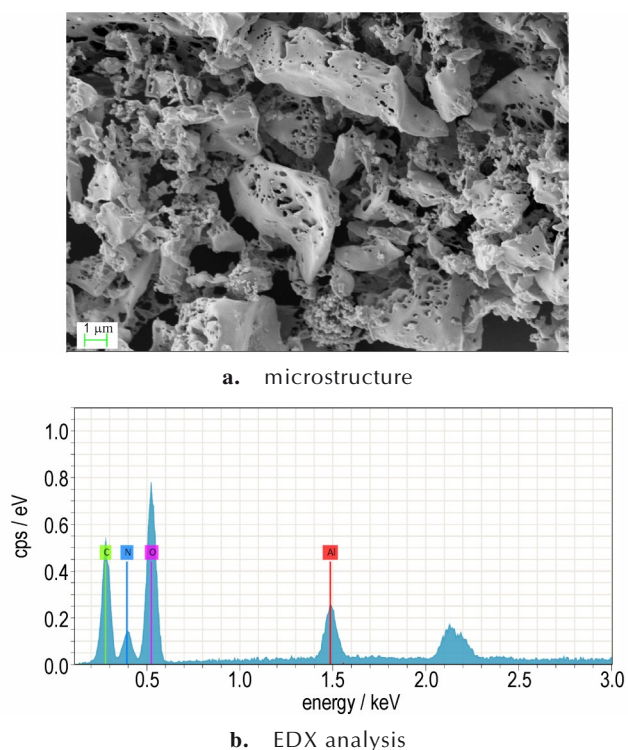


图2 PETN-Al炸药的微观状态和能谱图

Fig.2 Microstructure and EDX analysis of the PETN-Al

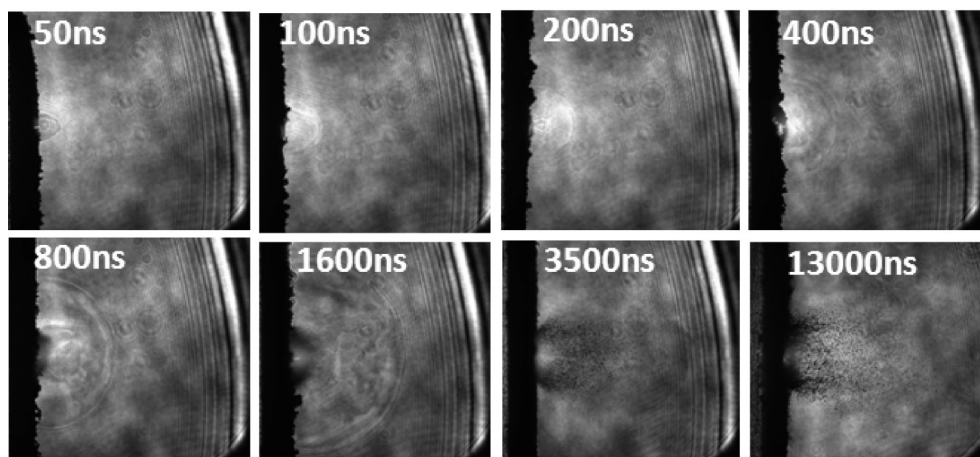


图3 30 mJ单脉冲激光作用下PETN-Al炸药的阴影拍摄图

Fig.3 Shadow photograph of PETN-Al explosive when irradiating with 30 mJ mono-pulse laser

通过阴影光谱中不同时刻冲击波前沿位置,采用距离/时间的方法可以计算出冲击波在一定时间内的平均传播速度。由于冲击波在3500 ns时已经超出观测范围,所以仅计算了冲击波从50 ns到1600 ns的速度。图4为计算得出的30 mJ激光能量作用下纳米铝粉掺杂PETN炸药表面冲击波传播速度随时间的变化曲线。如图4所示,初期的冲击波传输速度快,在50 ns时为 $12500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随着时间的增加,其速度急剧下降。在400 ns时,冲击波速度下降到 $3906 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

发生电离形成高温高密度等离子体,等离子体不断膨胀,压缩其周围空气形成冲击波。当激光能量小于20 mJ时,脉冲激光作用下炸药表面的烧蚀不明显。当激光能量增加到30 mJ时,炸药表面能形成明显的烧蚀坑。因此,阴影成像实验中采用30 mJ激光能量烧蚀纳米铝粉掺杂PETN炸药。图3为30 mJ激光能量作用下阴影成像系统拍摄的等离子体和冲击波阴影图像。由图3可知,当延迟时间为50 ns时,观察到一个明显的冲击波。冲击波前端较突出,说明初期冲击波在激光作用方向传播较快。随着时间的增加,冲击波向前推进,等离子体继续膨胀。在400 ns前,冲击波内未发现明显的物质喷溅,但当观测时间增加到800 ns时,在冲击波内部出现明显的黑色区域,该黑色区域为炸药烧蚀后形成的喷溅物。由于是单脉冲激光作用,激光烧蚀时间仅8 ns,冲击波在传播过程中没有激光能量作用,随着时间的进一步增加,冲击波变弱,在空气中以声速传播逐渐消失,但喷溅物持续喷溅。由于温度的降低,部分气相物质凝聚成液相或固相,因此在3500 ns和13000 ns的图像中,冲击波经过的区域内观测到较明显的颗粒物。

随着时间的进一步增加,冲击波速度逐渐下降,在1600 ns,其速度为 $2031 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。激光诱导冲击波在1000 ns内具备较快的速度,所以如果纳米铝粉降低PETN脉冲激光起爆能量的主要因素是激光诱导冲击波,那么炸药的起爆时间应该为微秒级。

2.3 纳米铝粉掺杂PETN炸药的激光诱导断裂光谱

2.3.1 纳米铝粉加入对激光诱导断裂光谱的影响

炸药在脉冲激光的烧蚀下,发生强烈的电离,电离原子和分子发射特征谱线。纳米铝粉掺杂PETN炸药

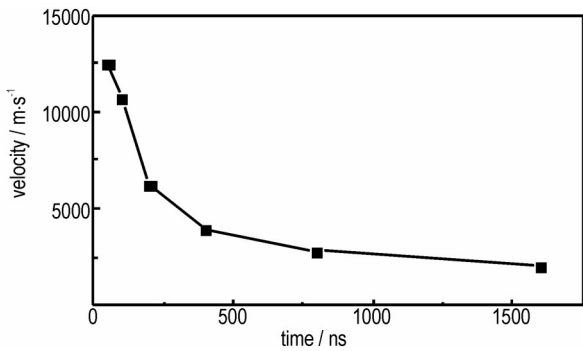


图4 30 mJ单脉冲激光作用下PETN-Al炸药的不同时间的冲击波速度

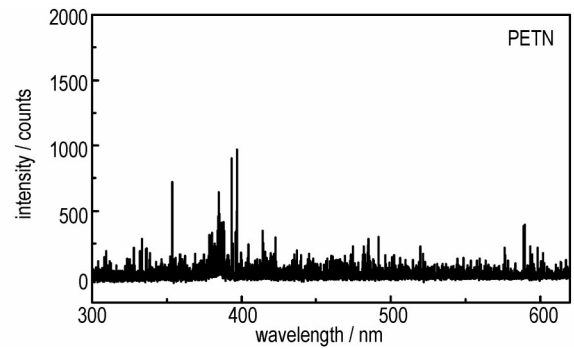
Fig.4 Velocity of shockwave of PETN-Al explosive when irradiating with 30 mJ mono-pulse laser at different time

的谱线中包含C、H、O、N和Al几种原子的谱线。图5为脉冲激光作用下的PETN和纳米铝粉掺杂PETN炸药在1 μs时的LIBS光谱。图5a为PETN在50 mJ脉冲激光作用下的光谱。如图5a所示,整个谱图中的光谱线强度较弱,最强谱线的强度也小于1000。铝粉的加入能够显著增强LIBS光谱的信号强度。图5b~5d为含1%纳米铝粉掺杂PETN炸药在脉冲激光作用下的光谱。如图5b~5d所示,铝粉的加入能够显著增强各个谱线的强度;而且随着激光能量的增加,谱线的强度也增加。光谱中波长为308.2,309.3,394.4 nm和396.2 nm的峰为的铝原子谱线峰。当激光能量从20 mJ增加到30 mJ时,铝原子峰的强度从1446增加至8037,进一步将激光能量增加到50 mJ,铝原子峰强度增到16664。这说明当能量高于30 mJ,激光能导致炸药剧烈反应。同时在纳米铝粉掺杂PETN炸药的光谱中也观测到明显的C(247.3 nm),CN(388.3 nm)和AlO(484.3,486.7 nm和489.0 nm)的峰。

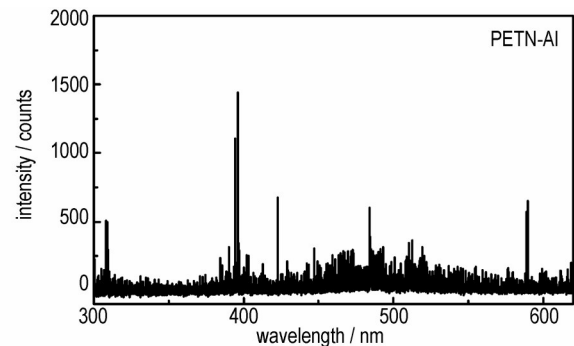
2.3.2 特征原子/基团发射光谱

图6为50 mJ激光能量作用下铝原子光谱随时间的变化图像。如图6a所示,在1 μs时,铝原子谱线强度最大,其在396.2 nm波长处的峰强度达到16664。随着时间的增加,铝原子谱线强度逐渐降低;到2 μs和5 μs时,其在396.2 nm波长处的峰强度分别为3418(图6b)和1591(图6c)。由于脉冲激光能量的注入时间仅8 ns,剧烈电离过程无法维持,后期等离子体通过和周围介质的接触和碰撞逐渐将耗散和冷却掉,来自于等离子体的辐射光谱也将迅速减弱。10 μs时,铝原子谱线已经无法被观测到。

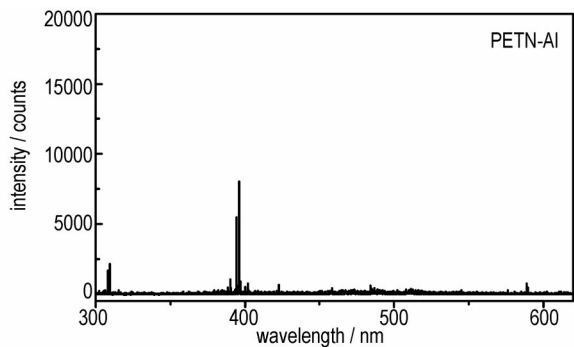
AlO气相分子是活性的气体铝原子被氧化成Al₂O₃的过渡产物,其分子发射光谱是含铝炸药反应和



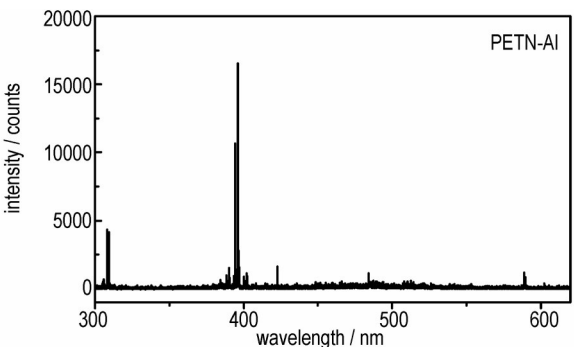
a. 50 mJ



b. 20 mJ



c. 30 mJ



d. 50 mJ

图5 不同脉冲激光作用下PETN和PETN-Al炸药1 μs时的LIBS光谱

Fig.5 LIBS spectra with duration time of 1 μs for the pure PETN and the PETN explosives doped with nano aluminum powder

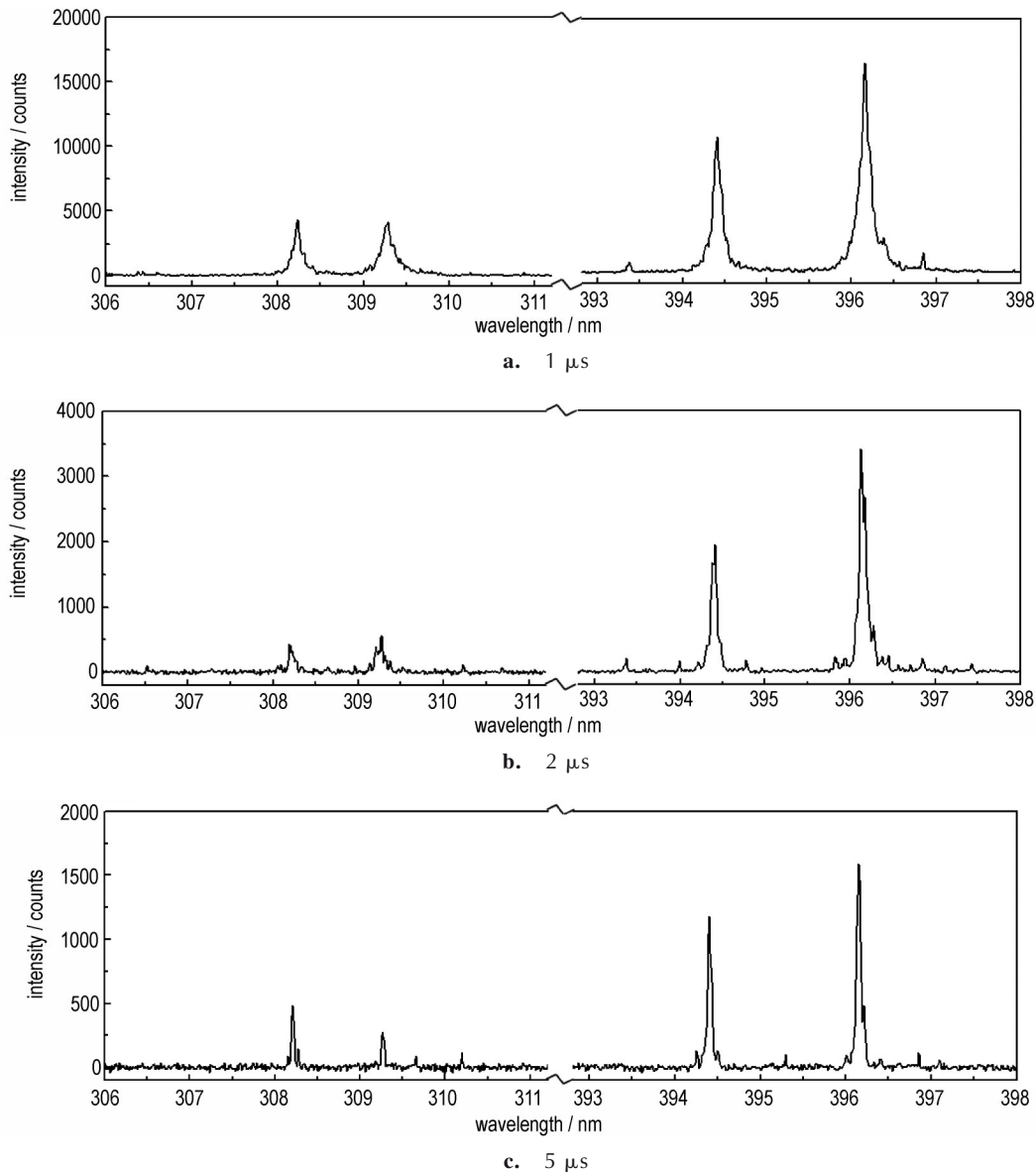


图6 50 mJ单脉冲激光作用下PETN-Al炸药中铝原子峰随时间变化

Fig.6 Variation of the aluminum atom peak with time for PETN-Al when irradiating with 30 mJ mono-pulse laser

燃烧的重要特征。图7为PETN和纳米铝粉掺杂PETN炸药中AIO峰随能量和时间变化的光谱图像。图7a为纳米铝粉掺杂PETN炸药在脉冲激光作用下的AIO分子发射光谱。PETN粉末由于缺少铝元素,其光谱中未观测到AIO分子的发射谱线。在含铝的PETN炸药中能够观测到明显的AIO分子发射谱线,AIO分子发射光谱是由多个谱线组成的带状谱,其主要谱线出现在484.3,486.7 nm和489.0 nm波长处。当激光能量从20 mJ增加到50 mJ时,AIO分子发射光谱强度增加。图7b为50 mJ激光能量下延迟分别为1,2 μ s和5 μ s时的AIO分子发射光谱,其强度在1 μ s最大,随着时间的增加,谱线强度减弱,到

5 μ s时仍能观测到AIO分子发射光谱,到10 μ s时AIO分子发射光谱消失。从铝原子和AIO气相分子的谱线分析发现,2种谱线都是在1 μ s的强度最大,到10 μ s时消失,说明脉冲激光作用下,纳米铝粉与炸药的作用时间在10 μ s以内,10 μ s以后是炸药自身的反应。

图8为不同能量激光作用下PETN炸药和含铝PETN炸药的CN基团发射光谱。如图8所示,CN基团的发射光谱出现在388.3 nm波长处,PETN炸药和含铝PETN炸药在20 mJ的激光能量下没有观测到CN光谱线;当激光能量增加到30 mJ时,CN光谱线出现;随着能量增加到50 mJ,光谱强度增加。纳米铝粉掺

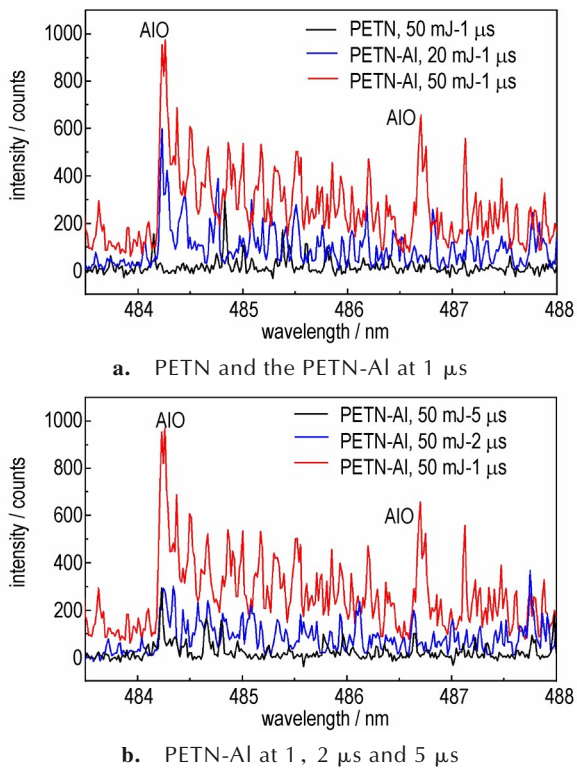


图7 PETN和PETN-AI炸药中AIO峰随能量和时间的光谱
Fig.7 Variation of AIO peak with energy and time in PETN and PETN-AI

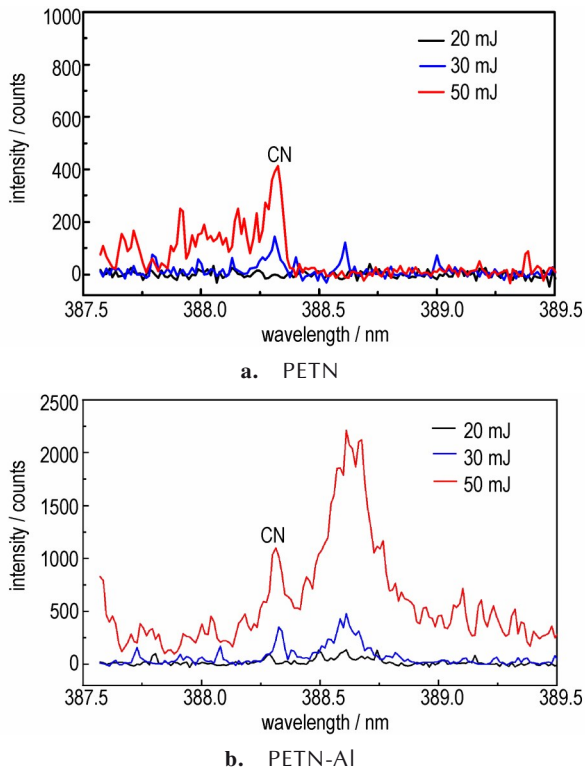


图8 不同脉冲激光作用下PETN和PETN-AI炸药的CN基团发射光谱
Fig.8 Emission spectra of CN group of PETN and PETN-AI under laser irradiation with different energy

杂PETN炸药的CN光谱线强度远大于相同能量下PETN炸药的光谱线强度。CN基团主要是PETN炸药分子分解形成,CN基团光谱线的出现说明当激光能量增加到30 mJ时能够将PETN分子断裂,而纳米铝的加入能够促进PETN炸药分子的分解。

图9为不同激光能量作用下PETN炸药和纳米铝粉掺杂PETN炸药的C原子发射光谱。如图9a所示,C的发射光谱出现在247.8 nm波长处,PETN炸药在20 mJ和30 mJ的激光能量下没有发现C光谱线,当激光能量增加到50 mJ时,C光谱线出现。如图9b所示,纳米铝粉掺杂PETN炸药在20 mJ激光能量下没有发现C光谱线,当激光能量增加到30 mJ时,出现较弱的C光谱线,随着能量增加到50 mJ,光谱强度显著增加。纳米铝粉掺杂PETN炸药的C光谱线强度远大于相同能量下PETN炸药的光谱线强度。C原子特征光谱线的存在表明PETN分子中的部分C原子上的化学键全部被打断,形成单个的C原子,PETN分解程度较高。C的光谱数据表明纳米铝粉的加入能够显著促进PETN分子的分解。

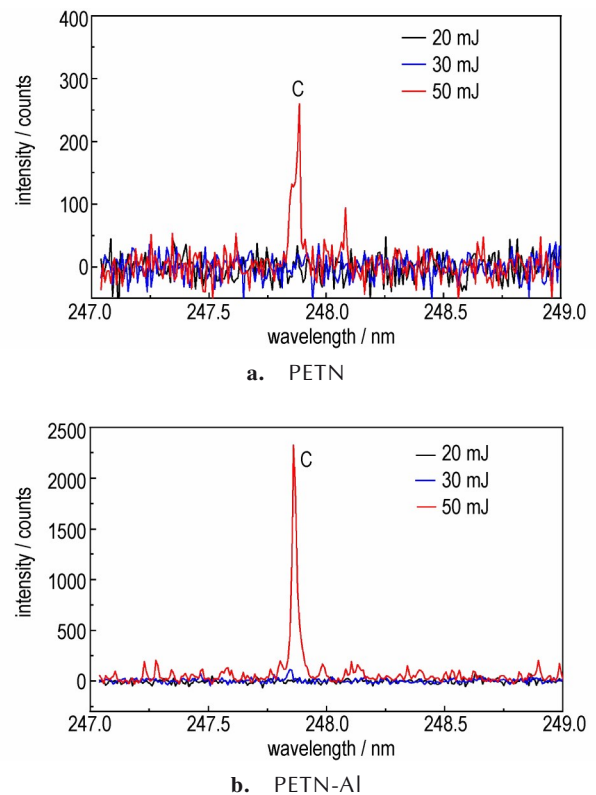


图9 不同脉冲激光作用下PETN和PETN-AI炸药的C原子发射光谱
Fig.9 C atomic emission spectra of pure PETN and the PETN-AI explosive under laser irradiation with different energy

3 结论

采用阴影测量系统研究了单脉冲激光作用下的纳米铝粉掺杂PETN的等离子膨胀和冲击波特性和利用激光诱导击穿光谱技术监测了炸药被激光烧蚀后的特征光谱。具体结论如下:

(1) 炸药表面被脉冲激光烧蚀,形成等离子体和激光诱导冲击波。初期激光诱导冲击波传播较快;随着时间增加,等离子膨胀和冲击波向前推进,冲击波速度下降,并在内部形成物质喷溅。

(2) 脉冲激光作用下,纳米铝粉掺杂PETN炸药中出现Al原子和AlO分子特征谱线,2种谱线强度都是随着激光强度增加而增加。在1 μs 时发射谱线强度最大,随着时间增加谱线强度减弱,到10 μs 时2种特征光谱都消失,说明脉冲激光作用下,纳米铝粉与炸药的作用时间小于10 μs 。

(3) PETN炸药分子分解所需的激光能量不少于30 mJ,纳米铝粉的加入能够促进PETN炸药分子分解。

参考文献:

- [1] ABDULAZEEM M S, ALHASAN A M, ABDULRAHMANN S. Initiation of solid explosives by laser[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50:2117-2121.
- [2] BAI Wen-cai, QIN Wen-zhi, TANG Duo, et al. Constructing interparticle hotspots through cracking silver nanoplates for laser initiation of explosives[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 139:106989.
- [3] ALEKSANDROV E I, VOZNYUK A G. Initiation of lead azide with laser radiation[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1978, 14:480-484.
- [4] SHEIKOV Yu V, BAT'YANOV S M, KALASHNIKOVA O N, et al. Initiating aluminized high explosives by laser radiation[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, 54(5):563-569.
- [5] FANG X, SHARMA M, STENNETT C, et al. Optical sensitisation of energetic crystals with gold nanoparticles for laser ignition[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 183:15-21.
- [6] KHOKHLOV N P, PON'KIN N A, LUK'YANENKO I A, et al. Experimental study of laser initiation of a light-sensitive explosive charge over a $\approx 1000 \text{ mm}^2$ surface[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2021, 57(3):364-371.
- [7] KUZMENKO A V, TVERJANOVICH A S, ILYUSHIN M A, et al. The effect of the concentration of high-absorbing inclusions on the laser initiation threshold of energetic materials: model and experiment[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2019, 37(4):420-432.
- [8] ADUEV B P, NURMUKHAMETOV D R, BELOKUROV G M.. Laser initiation of PETN with inclusions of aluminum nanoparticles under static pressure[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2019, 55(2):237-243.
- [9] ADUEV B P, BELOKUROV G M, KRECHETOV A G, et al. Sensitivity of a mechanical mixture of PETNaerythritetetrani-trate and Ni-C nanoparticles to explosion initiation by laser pulses[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, 45(1):59-63.
- [10] ADUEV B P, NURMUKHAMETOV D R, FUREGA R I, et al. Controlling PETNaerythrite tetranitrate sensitivity to the laser effect through the addition of nickel and aluminum nanoparticles[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics*, 2014, 8(3):352-355.
- [11] JI Xiang-bo, QIN Wen-zhi, TANG Duo, et al. Near-infrared laser initiation mechanism of PETNaerythritol tetranitrate doped with aluminum nanoparticles[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43:1221-1226.
- [12] JI Xiang-bo, QIN Wen-zhi, LI Xiao-dong, et al. Initiation of CL-20 doped with aluminum nanoparticles by using a laser pulse through an optical fiber[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43:1210-1214.
- [13] JI Xiang-bo, QIN Wen-zhi, LI Yong, et al. Influence of aluminum nanoparticles and binders on the laser initiation of the cyclotrimethylenetrinitramine[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 120:105677.
- [14] TARZHANOV V I, SDOBNOV V I, ZINCHENKO A D, et al. Laser initiation of low-density mixtures of PETN with metal additives[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, 53(2):229-235.
- [15] FARHADIAN A H, TEHRANI M K, KESHAVARZ M H. Energetic materials identification by laser-induced breakdown spectroscopy combined with artificial neural network[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12):3372-3377.
- [16] GOTTFRIED J L. Laser-induced plasma chemistry of the explosive RDX with various metallic nanoparticles[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7):B13-B21.
- [17] ALMAZOVA K I, BELONOGOV A N, BOROVKOV V V., et al. Investigation of spark discharge dynamics in an air-filled point-plane gap by shadow photography[J]. *Technical Physics*, 2019, 64(1):61-63.
- [18] 吴泽华,张楠,朱晓农,脉冲飞秒激光烧蚀铝靶动态特性研究[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(8):891-900.
WU Ze-hua, ZHANG Nan, ZHU Xiao-nong. Study of dynamic process in multiple pulses ablation of aluminum by femto-second laser[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2019, 30(8):891-900.
- [19] TIAN Dong-peng, SUN Zhong-mou, WAN En-lai, et al. On-line in situ detection of kitchen environment based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Laser Applications*, 2022, 34:032011.
- [20] 吴杰,李创镛,陈文骏,等.多元线性回归提高激光诱导荧光辅助激光诱导击穿光谱技术的准确度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(3):795-801.
WU Jie, LI Chuang-Kai, CHEN Wen-jun, et al. Multiple liner regression for improving the accuracy of laser-induced breakdown spectroscopy assisted with laser-induced fluorescence (LIBS-LIF)[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(3):795-801.
- [21] 郭文灿,郑贤旭,张旭,等.含铝炸药在激光烧蚀下的发射光谱分布及瞬态温度测量[J]. *含能材料*, 2018, 26(8):671-676.

- GUO Wen-can, ZHENG Xian-xu, ZHANG Xu, et al. Emission spectrum distribution and transient temperature measurement of aluminized explosives under laser ablation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(8): 671-676.
- [22] GOTTFRIED J L. Higher time-resolution LASEM, part III: Influence of laser-induced plasma chemistry on the laser-induced shock waves of aluminized explosives, CCDC Army Research Laboratory US), 2020, Report No.: ARL-TR-9025.
- [23] GOTTFRIED J L. Laboratory-scale method for estimating explosive performance from laser-induced shock waves[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(5):674-681.

Laser Ablation Characteristics of PETN Explosive Doped With Nano-aluminum Powder

JI Xiang-bo, TANG Duo, QIN Wen-zhi, GAO Yuan, PIAO Jun-yu

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics (CAEP), Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to investigate the pulse laser action process of the explosives doped with nano-aluminum powder, the plasma expansion and shock wave characteristics of single-pulse laser ablation of the PETN explosives doped with 1% nano-aluminum powder were studied by shadow measurement system, while the characteristic spectra of the explosives after laser ablation were investigated by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). The results showed that when laser pulses irradiate the surface of PETN explosive doped with nano-aluminum powder, high temperature and high density plasma was formed, which expanded continuously and compressed the surrounding air to form shock wave. At 50 ns, the velocity of shock wave was $12500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. With the increase of time, the plasma continued to expand, the shock wave advanced forward and the velocity decreased. At 800 ns, a large number of ejection materials were observed in the shock wave. The maximum strength of the spectral lines of Al atom and AlO gas phase molecule were achieved at $1 \mu\text{s}$, and disappeared at $10 \mu\text{s}$, indicating that the interaction time between nano-aluminum powder and explosive was less than $10 \mu\text{s}$. The spectral lines of C atom and CN were not detected at 20 mJ laser energy. When the laser energy increased to 30 mJ, the spectral lines of C atom and CN group were observed in the spectrum of PETN explosive doped with nano-aluminum powder, and the spectral intensity increased with the increase of laser energy. Moreover, the laser energy required for the decomposition of the PETN explosives doped with nano-aluminum powder should not be less than 30 mJ.

Key words: laser initiation; PETN; plasma; laser induced breakdown spectroscopy

CLC number: TJ55; O433

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022281

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 12072329)

(责编:王馨逸)