

文章编号:1006-9941(2023)03-0295-11

## 含能材料颗粒特性对激光诱导微爆炸冲击波的影响

鲍圆,郭伟,李明,薛鹏伊,王翔,郝世龙,陈思同,曹威,徐金江,李洪珍

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

**摘要:** 使用基于微秒时间尺度上毫克级含能材料的激光诱导空气冲击波爆轰性能测试方法——The Laser-induced Air Shock from Energetic Materials (LASEM),结合脉冲激光系统和高速纹影研究了不同粒径以及不同堆积密度对六硝基六氮杂异戊炔烷(CL-20)、奥克托金(HMX)、黑索今(RDX)、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)和2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM105)这5种含能材料冲击波特征速度的影响。结果表明,粒径小于75 μm时,测量结果偏差较大;粒径在75~500 μm之间时,测量结果波动性较弱,且与爆压值的排列顺序一致,能够作为参考数据评估实际的爆轰性能。堆积密度小于0.7 g·cm<sup>-3</sup>时,测量结果波动范围较大;堆积密度在0.7~1.35 g·cm<sup>-3</sup>之间时,测量结果较为平稳,且与爆压值的排列顺序一致,测量值更具参考价值。

**关键词:** 激光诱导;含能材料;粒径;冲击波特征速度;微爆炸

**中图分类号:** TJ06;TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022291

### 0 引言

当高能脉冲激光作用在含能材料表面时,会发生激光诱导的微爆炸反应,在此基础上近年来含能材料领域发展了一种毫克量含能材料爆轰性能评估方法——含能材料的激光诱导空气冲击(The Laser-induced Air Shock from Energetic Materials, LASEM)<sup>[1]</sup>。该方法凭借其实验室尺度等优势,利用光学平台在微秒量级时间尺度上直观地观察微爆炸反应的过程,从而能够在相对安全的环境下获得含能材料的爆轰参数,对新型含能材料的合成研究以及配方的筛选很有帮助,在微量级含能材料爆轰性能检测以及释能机制研究等方面具有很好的应用前景<sup>[2]</sup>。该方法是利用含能材料在激光诱导的作用下产生的冲击波特征速度推算出其实际的爆速爆压等爆轰参数,其中冲

击波特征速度是由纹影系统以及高速相机捕捉到激光诱导等离子体演化图像,进而拟合并反推出的冲击波初始时刻速度<sup>[3]</sup>。LASEM作为一种新型技术,已有研究证明了冲击波特征速度和大尺度爆轰参数具有良好的关联性,但是各种因素(例如样品的粒径、堆积密度、形貌特征、老化程度、激光能量等)的影响尚不清晰,需要进一步深入研究<sup>[4]</sup>。

Gottfried<sup>[5-7]</sup>对含能材料所产生的激光诱导冲击波做了机理性研究,并建立了含能材料激光诱导空气冲击方法,将测定的不同类型传统含能材料的特征冲击波速度,与其燃烧热、爆轰能、爆压、爆速分别进行对比,发现它们具有很好的线性相关性。随后在2018年对该方法进行系统性的总结,研究了各种因素作用下的影响情况,其研究认为黑索今(RDX)的粒径对测量结果影响很小,奥克托金(HMX)以及PBXN-5的堆积密度对测量的激波速度没有显著影响,但是其实验样品的种类较少,未展开深入分析,难以作为一般性结论应用到测量标准中。

含能材料界的许多研究认为粒径以及堆积密度会影响含能材料的爆轰性能。Bai等<sup>[8]</sup>对不同粒径和孔隙率的PBXC03炸药在不同冲击载荷下进行了一系列冲击起爆试验。研究发现,炸药粒径越小,炸药越难被点燃,但在炸药被点燃后,爆轰生长速度较快。周水平

收稿日期:2022-12-05;修回日期:2023-03-07

网络出版日期:2023-03-17

基金项目:化工材料研究所学科基金(SXK-2021-19)

作者简介:鲍圆(1998-),男,硕士在读,主要从事含能材料性能检测相关研究。e-mail:baoyuan20@gscaep.ac.cn

通信联系人:李明(1971-),男,研究员,主要从事爆炸力学相关研究。e-mail:li\_ming@caep.cn

郭伟(1992-),男,助理研究员,主要从事含能材料冲击起爆及其激光化学物理相关研究。e-mail:guoweizmf@caep.cn

引用本文:鲍圆,郭伟,李明,等.含能材料颗粒特性对激光诱导微爆炸冲击波的影响[J].含能材料,2023,31(3):295-305.

BAO Yuan, GUO Wei, LI Ming, et al. Effects of Particle Properties of Energetic Materials on Laser-induced Micro-explosive Shock Waves[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(3):295-305.

等<sup>[9]</sup>利用静态和水中声发射法测试了六硝基六氮杂异戊烷(CL-20)粒度对NEPE推进剂燃速的贡献顺序,结果表明,粗粒度的CL-20比细粒度的贡献更高。冯晓军等<sup>[10]</sup>通过烤燃实验研究了不同孔隙率TNT及JB-B的反应温度与反应剧烈程度,结果发现,孔隙率越大,烤燃反应的延滞时间越长,压力增加率更大,使得反应温度以及反应剧烈性更大。徐鸿儒<sup>[11]</sup>研究了膨化硝酸铵炸药后认为,提高膨化硝酸铵炸药的堆积密度能够增加炸药的体积威力。白建明<sup>[12]</sup>研究堆积密度对粉状乳化炸药爆轰性能的影响时发现,随着堆积密度的增加,其殉爆距离、爆速和猛度先增加后减小。含能材料颗粒特性对起爆输出性能的影响研究已经比较丰富,而颗粒特性对激光诱导作用下的冲击波的影响还有待深入研究。

在前期的研究工作中,发现含能材料的激光诱导冲击波特征速度会受到其粒径和堆积密度的影响,因此本研究开展含能材料颗粒特性(粒径、堆积密度以及形貌特征等)对激光诱导微爆炸冲击波流场演化的深入研究,分析含能材料颗粒特性对激光诱导冲击波速度的影响规律,为LASEM方法的标准化建立提供数据支撑,以便后续研究其他因素对激光诱导微爆炸冲击的影响<sup>[13]</sup>。这将有利于该方法在毫克量级含能材料爆轰性能快速评估上的应用,减少含能材料的研制时间与成本,从而改善实验测量的环境并提高了测量人员的安全性,提高新型含能材料创制效率。本研究采用LASEM方法研究了不同粒径以及不同堆积密度下CL-20、HMX、RDX、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)和2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM105)这5种含能材料的激光诱导冲击波特征速度差异,并分析了合适的粒径和堆积密度区间。

## 1 实验部分

### 1.1 测量原理

当激光作用在含能材料表面时,会发生复杂的物理化学反应,LASEM方法主要通过捕捉激光诱导含能材料反应过程特征参量,来获取含能材料的激光诱导冲击波:(1)高能脉冲激光作用在含能材料上产生微爆炸,从而形成激光诱导等离子体,内外的压差促使等离子体快速向外膨胀,引起激光诱导冲击波;(2)建立纹影系统使得透明的冲击波可视化,利用高速彩色相机捕捉微秒时间尺度的激光诱导微爆炸冲击波纹影图像;(3)利用图像处理程序从纹影图中采集冲击波位

移-时间数据,对数据拟合计算后得到激光诱导微爆炸冲击波速度-时间曲线,定义0时刻处的速度为激光诱导冲击波特征速度,该速度值与含能材料实际爆速、爆压等宏观爆轰性能具有良好的关联性。

样板的制作是在玻璃片上粘着一层双面胶带,用药匙和刮刀将药粉均匀地涂抹在胶带上,尽量铺满表面,使得药粉以堆积的状态粘贴在玻璃片的双面胶带上。样板每次受到激光激发后就会平移5 mm,在一处新的区域进行下一次实验,每个样品重复10次实验<sup>[14]</sup>。

实验数据通过图像纹影系统获取,实验平台示意图如图1所示。采用了直列式纹影成像装置,以纹影氙灯光源HSX-F300作为背景光源,额定发光功率为300 W,光线经过狭缝和准直透镜(直径10.8 cm,焦距114 cm)后在工作区形成平行光束,光束经过聚焦透镜(直径10.0 cm,焦距100 mm)聚焦,两面透镜之间的距离为108 cm,在焦点处被刀片切割大约一半的光线,刀口距离相机21 cm,最后经过滤光片被高速彩色相机(SA-Z)捕捉。高速彩色相机以每秒 $2 \times 10^5$ 帧的速度记录激光诱导的冲击波在样品表面的扩展,快门为1  $\mu\text{s}$ ,图像大小为135 $\times$ 509像素。使用高速相机捕捉纹影图像可以从单个镜头中连续地收集到冲击波位置信息,从而减小了镜头偏移带来的实验误差<sup>[15-16]</sup>。

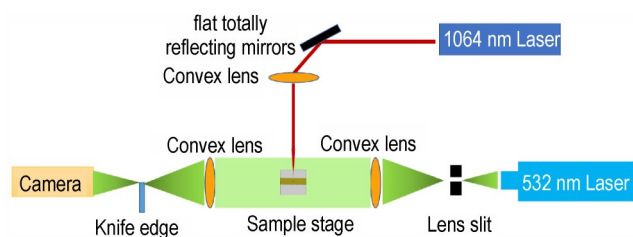


图1 实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental platform

### 1.2 数据处理

在得到如图2a所示的纹影图像后,利用基于MATLAB(R2022b)所编写的程序实现图像处理,处理过程包括中值滤波降噪、灰度化以及Canny边缘检测,处理结果如图2b所示。利用tabulate函数对已经处理过的纹影图像进行灰度统计,就可以得到冲击波位移-时间关系<sup>[17-19]</sup>。根据Dewey由大规模TNT爆轰实验所得的经验公式(1)可以得到激光诱导冲击波的位移-时间函数,进而基于九阶多项式拟合计算出激光诱导冲击波速度-时间关系。并定义此曲线0  $\mu\text{s}$ 处的速度为激光诱导微爆炸冲击波的特征速度,该速度是激光诱导等离子体膨胀现象反推出来的冲击波初始速



图2 纹影(a)原图和(b)处理后图像示例

Fig.2 Example of the original (a) and processed (b) images of the grain shadow

度。因此,本微秒尺度的毫克级含能材料测量方法能够根据测得的激光诱导微爆炸特征速度推算出实际的爆轰参数,实现短时间内的性能评估<sup>[20-21]</sup>。

$$R = A + Bt + C \ln(1 + t) + D(\ln(1 + t))^{1/2} \quad (1)$$

式中, $A, B, C, D$ 为拟合系数; $R$ 和 $t$ 分别是冲击波的半径和膨胀时间。

### 1.3 材料准备

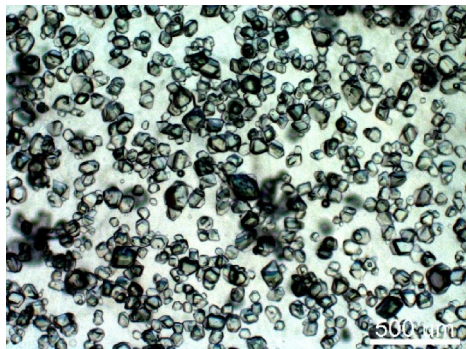
对5种含能材料(CL-20、HMX、RDX、FOX-7、LLM105)的不同粒径以及不同堆积密度样品进行颗粒特性测试,以便后续分析粒径和堆积密度对激光诱导微爆炸特征速度的影响,测试结果如表1所示。其

表1 实验样品颗粒信息<sup>[27-31]</sup>

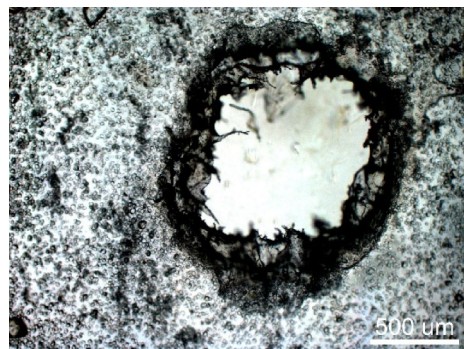
Table 1 Experimental sample particle information

explosive	$d_0 / \mu\text{m}$						$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$					$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$p / \text{GPa}$
CL-20	10	45	75	150	325	475	0.68	0.79	0.95	1.13	1.22	9650	42.5
HMX	65	150	275	325	550	\	0.67	0.92	\	\	\	8917	39
FOX-7	10	45	\	\	\	\	0.51	0.41	\	\	\	8870	34
RDX	50	250	400	\	\	\	0.58	0.96	\	\	\	8661	32.6
LLM105	22.5	50	225	500	\	\	0.37	0.55	0.86	0.91	\	8560	34.99

Note:  $d_0$  is the particle size;  $\rho$  is the bulk density;  $D$  is the detonation velocity;  $p$  is the pressure peak of shock wave.



a. before micro-explosion



b. after micro-explosion

图3 65 μm HMX激光诱导微爆炸前后的显微图像

Fig.3 Microscopic images before and after laser-induced micro-explosion of 65 μm HMX

中粒径 $d_0$ 是通过显微镜对药粉进行显微表征,绘制相应的粒度分布曲线从而得到的,同时可以观察样品的形貌特征<sup>[22-23]</sup>;堆积密度 $\rho$ 是按照标准ISO9136-2将盛有药粉的量筒振荡200次,忽略雷诺膨胀,取三次测量的平均值作为堆积密度测量结果<sup>[24-26]</sup>。另外,在表1中给出了由国军标方法测得的传统爆速 $D$ 和爆压 $p$ 数值,以便在后续研究中将激光诱导微爆炸特征速度和含能材料实际爆速或者爆压作对比,讨论特征速度和实际爆轰参数之间的关联性,这两组数据是查找文献得出的<sup>[27-31]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冲击波纹影的形态分析

研究采用光学显微镜对激光诱导微爆炸前后的65 μm HMX进行测试,如图3所示,由图3可以看出含能材料会发生高温化学反应,向周围未受高能脉冲激光的药粉传播。

研究采用LASEM方法对CL-20、HMX、RDX、FOX-7、LLM105 5种含能材料进行激光诱导微爆炸测试,得到了这5种含能材料在小粒径和大粒径两种状态下的0~100 μs时间尺度下激光诱导微爆炸冲击波高速纹影图像,如图4~8所示。

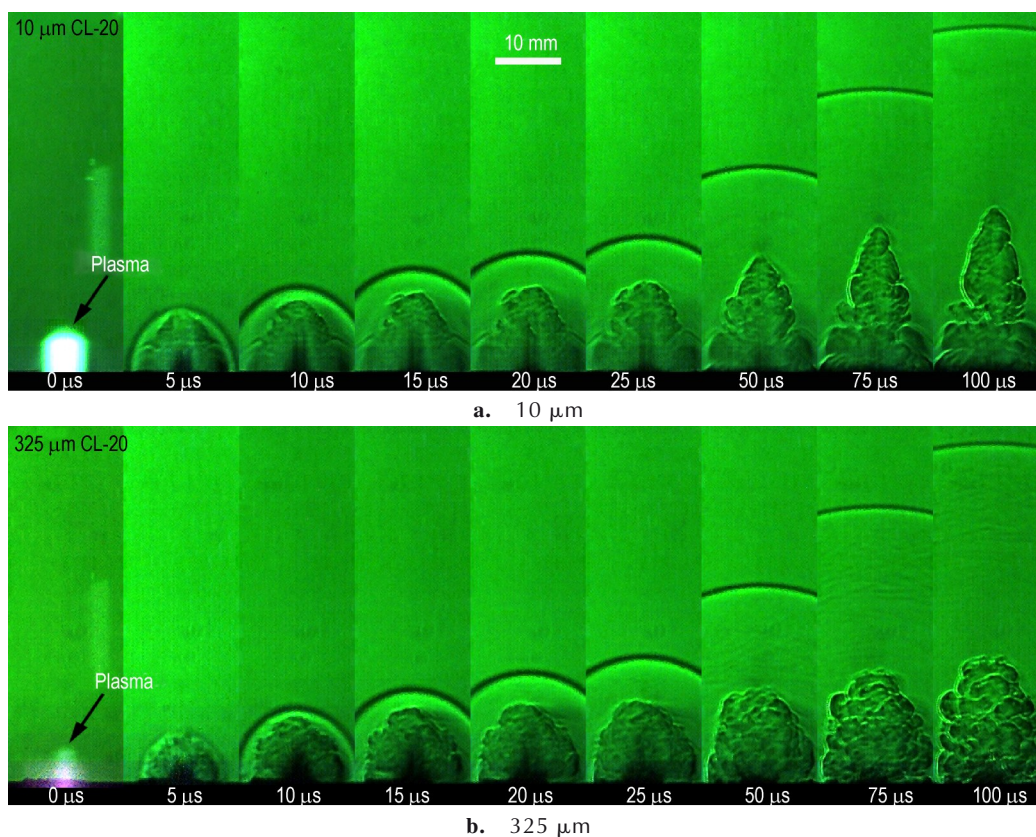


图4 10 μm 和 325 μm CL-20 在等离子体形成开始后不同时间的高速纹影照片

Fig.4 High-speed grain shadow photographs of CL-20 with 10 μm and 325 μm at different time after the onset of plasma formation

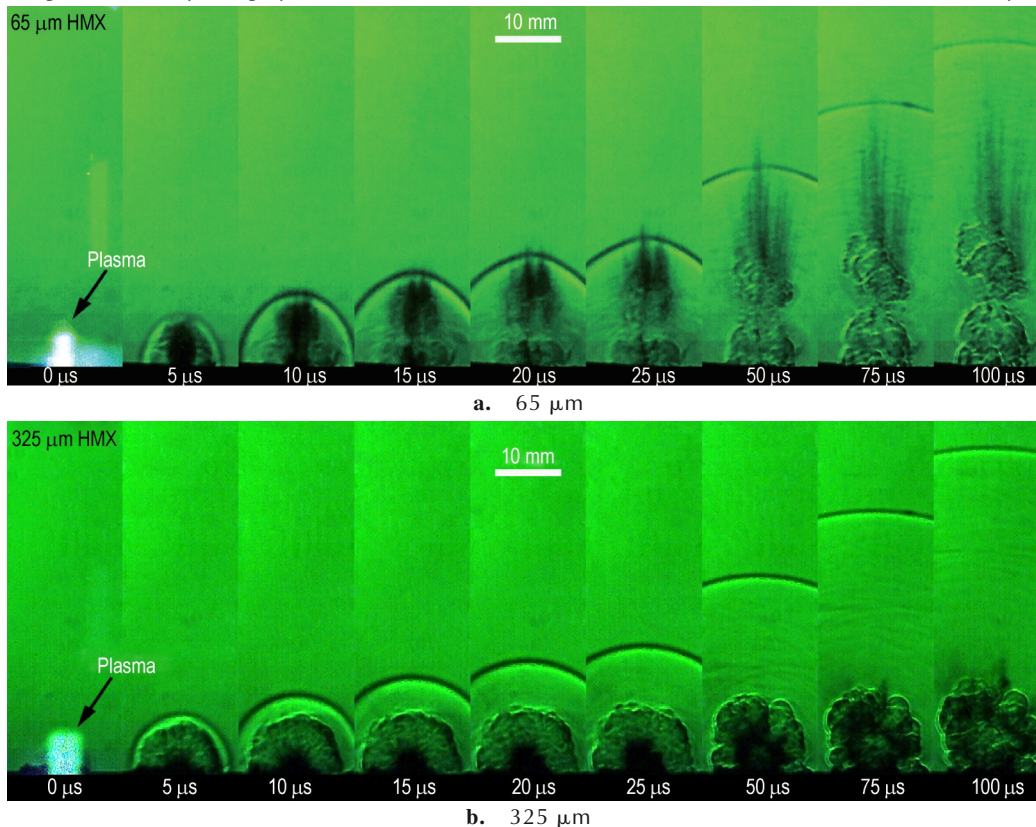


图5 65 μm 和 325 μm HMX 在等离子体形成开始后不同时间的高速纹影照片

Fig.5 High-speed grain shadow photographs of HMX with 65 μm and 325 μm at different time after the onset of plasma formation

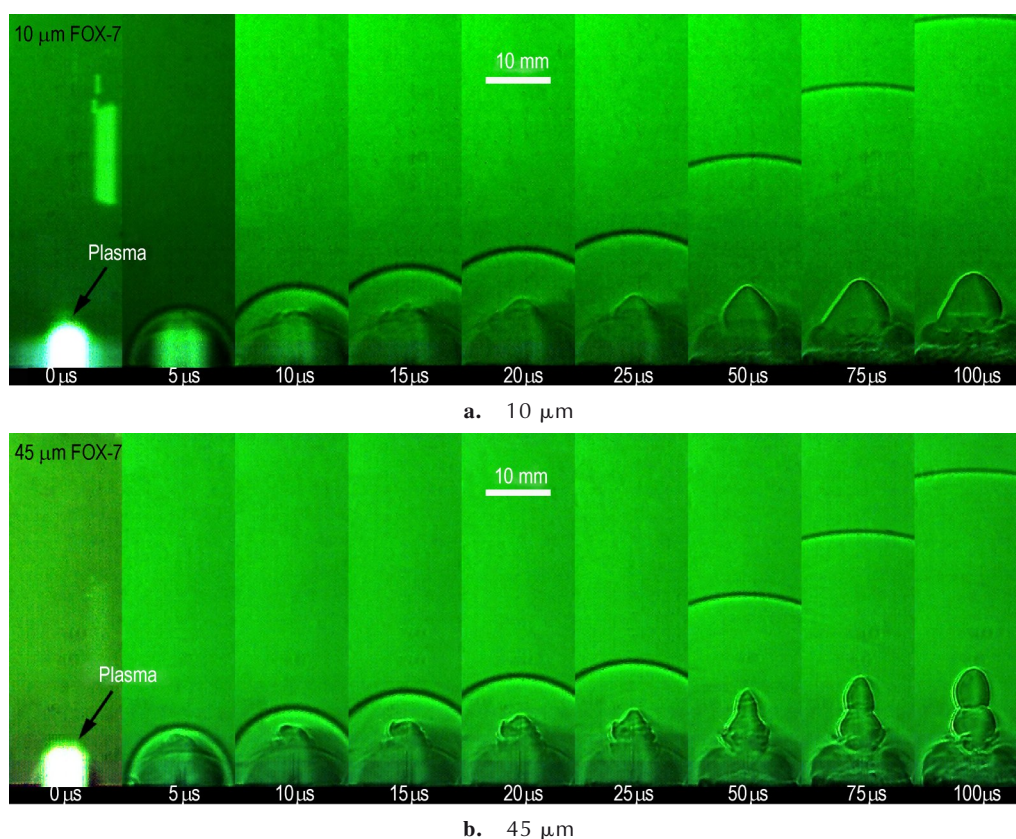


图6 10 μm FOX-7和45 μm FOX-7在等离子体形成开始后不同时间的高速纹影照片

Fig.6 High-speed ripple shadow photographs of FOX-7 with 10 μm and 45 μm at different time after the onset of plasma formation

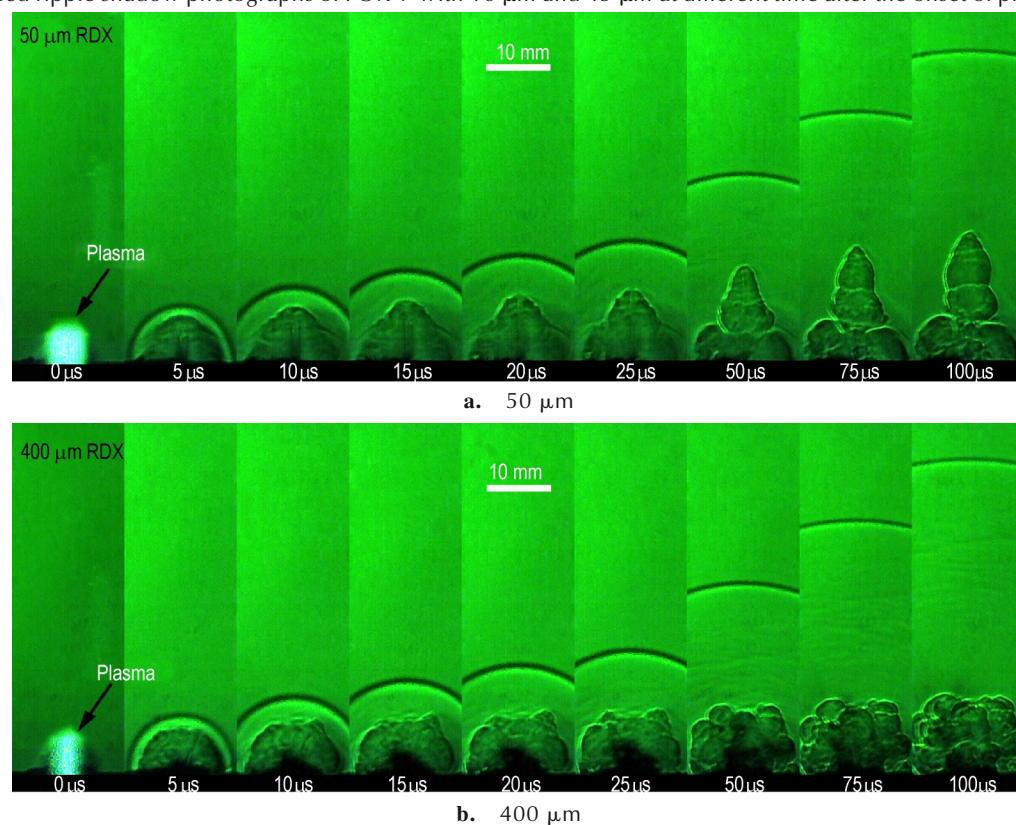


图7 50 μm RDX和400 μm RDX在等离子体形成开始后不同时间的高速纹影照片

Fig.7 High-speed grain shadow photographs of RDX with 50 μm and 400 μm at different time after the onset of plasma formation

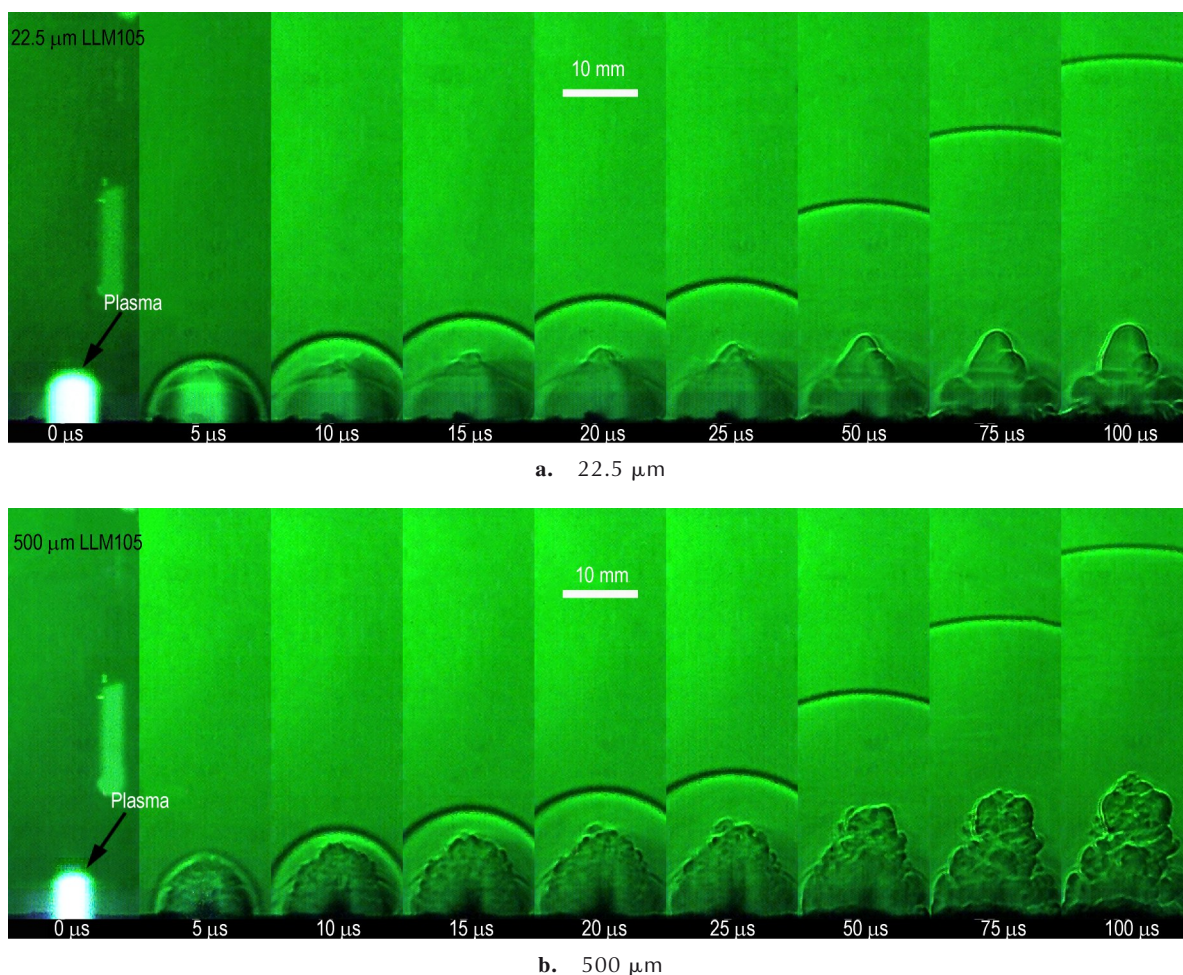


图8 22.5  $\mu\text{m}$  LLM105和500  $\mu\text{m}$  LLM105在等离子体形成开始后不同时间的高速纹影照片

Fig.8 High-speed grain shadow photos of LLM105 with 22.5  $\mu\text{m}$  and 500  $\mu\text{m}$  at different time after the onset of plasma formation

由图4可以看出,在0  $\mu\text{s}$ 可以观察到高亮度的激光诱导等离子体。5  $\mu\text{s}$ 后,可以清晰地看到减弱了的等离子体和半圆形的冲击波锋面。随后,冲击波开始与等离子体分离,快速向外扩展,并且激光支持爆轰波使得样板上方的蒸气云产生突起,向上方继续运动。对比两种粒径CL-20的高速纹影图,由图4a可以看出10  $\mu\text{m}$  CL-20的等离子体在50  $\mu\text{s}$ 时刻可以看到明显的两个侧瓣,上层的等离子体羽流的宽度随着时间的增加而减小,长度的增加较多,形成较为明显的三叶结构,等离子体流场扩散得更为迅速,分析认为这是由于小粒径含能材料在与爆轰无关的发光辐射中消耗较多能量,导致0  $\mu\text{s}$ 处的等离子体更亮,减弱了微爆炸性能,并且小颗粒药粉反应迅速,喷射出的药粉颗粒较少,使得蒸气云亮度较高但侧面积较小;由图4b可以看出325  $\mu\text{m}$  CL-20则没有明显的三叶结构,随着时间的增加,等离子体羽流逐渐向柱状发展,分析认为这是由于大粒径药粉内部没来得及反应,在喷射的过程

中持续进行高温化学反应,未反应的药粉遮挡了光束,使得蒸气云颜色较深,这与文献<sup>[4]</sup>中报道的激光诱导等离子体光学特征相似。

由图5a可以看出,65  $\mu\text{m}$  HMX反应时小颗粒药粉会迅速产生微爆炸现象,引起周围的细小颗粒溅射到等离子体上方,但是激光作用的区域所喷射出的药粉较少,因此50  $\mu\text{s}$ 后可以看出其蒸气云比起大尺寸样品较少,并且50  $\mu\text{s}$ 后等离子体羽流开始分离,上下两层蒸气距离比其他种类的药粉更远,且都有更加紊乱的流场;由图5b可以看出,325  $\mu\text{m}$  HMX的纹影特征与大粒径CL-20的相似,但是其亮度更低,分析认为这是由于大尺寸CL-20颗粒的形貌趋于方块状,有明显的棱边且外表较为光滑,而大尺寸的HMX颗粒则趋于球形,外表有较多的凹坑,这使得单个HMX药粉颗粒与外界空气的接触面积更大,更易发生反应,促使更多的药粉内部颗粒跟随激光诱导冲击波喷射出。同时,较快的反应使得小尺寸HMX的蒸气云比大尺寸

的高度更低,说明颗粒细小 HMX 的快速反应促使蒸气云更快地向样板上方膨胀,但是喷射出来的药粉较小,蒸气云的运动较为集中,甚至产生分层;而大尺寸的 HMX 反应相对缓慢,但持续时间长,蒸气云呈柱状逐步向外扩展。

由图 6a 可以看出,10  $\mu\text{m}$  FOX-7 的等离子体突起特征并不明显,蒸气云的扩散行为并不激烈,可能是由于药粉过于细小,使得其高温化学反应更加迅速,但是持续时间较短,受激光支持爆轰波的影响较大,加强了蒸气云的突起现象产生;由图 6b 可以看出,45  $\mu\text{m}$  FOX-7 则会在 50  $\mu\text{s}$  之后产生十分明显的等离子体分离现象,形成葫芦状的羽流,分析认为这是由于该粒径下 FOX-7 的反应虽然更加剧烈一些,但是反应释放的能量不足使得等离子体核支持较长时间,中间的蒸气密度较低,造成的等离子体核的衰变与坍塌。由图 7a 可以看出,50  $\mu\text{m}$  RDX 与 45  $\mu\text{m}$  FOX-7 的纹影图相似,有多层等离子体在空气中膨胀,扩展的宽度较窄;由图 7b 可以看出,400  $\mu\text{m}$  RDX 的等离子体羽流与其他大粒径含能材料的相似,但是更矮更宽一些,分析认为这是由于其颗粒表面的缺陷比大尺寸 HMX 更多,反应速率更快。由图 8a 可以看出 22.5  $\mu\text{m}$  LLM105 的激光诱导等离子体与 10  $\mu\text{m}$  FOX-7 的相似,等离子体表面比较光滑,随着时间的推移会在中间产生小突起,这与文献[5]中报道的激光支持爆轰波的结构相似;由图 8b 可以看出 500  $\mu\text{m}$  LLM105 的等离子体会有更多的未反应内部颗粒药粉喷射出来,蒸气云的侧面面积更大,这可能与 LLM105 的棱柱状形貌特征有关,其较多的棱边与长条状的排布减少了药粉颗粒与外界空气的接触,造成更多的样品喷射出来。

综上所述,不同粒径含能材料的等离子体成长特征不一样,微小尺寸( $\leq 22.5 \mu\text{m}$ )条件下,蒸气外观较为光滑,中间会产生小突起,分析认为这是由于小尺寸药粉的高温化学反应十分迅速,但只有较少的药粉能够喷射到样板上方的空气中去,蒸气云的侧面积较小,而激光支持爆轰波对等离子体的影响更加明显,此时突起现象十分清晰;中等尺寸(22.5~50  $\mu\text{m}$ )时,等离子体向上突起长度较长,但是宽度较窄,且有分离现象产生,分析认为这是由于此时虽然有较多的药粉喷射出去,但是含能材料在发光辐射上耗费较多的能量,减弱了微爆炸反应,使得等离子体核较早产生衰变和坍塌,引起上下层的蒸气云分离;尺寸较大( $> 50 \mu\text{m}$ )时,反应比较剧烈,蒸气云流场十分紊乱,等离子体羽流较宽,分析认为这是由于有大量的未反应药粉喷射出来,

在激光诱导冲击波形成后继续反应,遮挡了光线,使得蒸气云颜色较暗。本实验是将激光诱导的微尺度等离子体行为与宏观爆轰相关联,参与反应的等离子体越多越能体现二者的关联性,因此由大粒径含能材料所测得的激光诱导冲击波结果更符合理论预期。

## 2.2 粒径

研究采用显微镜对 CL-20、HMX、RDX、FOX-7、LLM105 5 种含能材料的粒径进行测量,结合由 LASEM 测得的激光诱导冲击波速度,得到了激光诱导冲击波速度-时间曲线,如图 9a~9e 所示。由图 9a~9e 可知该曲线在前 20  $\mu\text{s}$  有一个骤减的趋势,此时是冲击波初始膨胀的时刻,不同种类的含能材料的激光诱导微爆炸过程也会产生较大的差异,从而能够根据图像以及数据分析造成这些差异的原因。另外,0~20  $\mu\text{s}$  内不同粒径含能材料的激光诱导冲击波速度测量误差较大,因此使用了  $2 \times 10^5$  的帧率进行图像捕捉,以便在此区间内获得较多的图像数据,提高拟合结果的可信度。而后冲击波速度会逐渐趋于空气声速,在 100  $\mu\text{s}$  之后变得平稳,因此本文主要对比了前 100  $\mu\text{s}$  的纹影图像进行分析,并设计数据处理程序,利用 0~100  $\mu\text{s}$  的冲击波位移-时间数据反推出 0  $\mu\text{s}$  处的冲击波速度,并定义此时的速度为激光诱导微爆炸冲击波特征速度<sup>[6]</sup>。由图 9 可知,不同粒径含能材料的激光诱导微爆炸冲击波特征速度会在一定范围内波动,总体的波动幅度较小,但小粒径含能材料的数值会出现较大偏差。

将 CL-20、HMX、RDX、FOX-7、LLM105 5 种含能材料的激光诱导微爆炸冲击波特征速度与相对应的含能材料粒径单独绘图,得到的结果如图 9f 所示。由图 9f 可知,当含能材料粒径较小时(一般是小于 75  $\mu\text{m}$ ),粒径对激光诱导冲击波特征速度会造成一定的影响,10  $\mu\text{m}$  CL-20 的激光诱导冲击波特征速度比起其他粒径要小 6.12%,65  $\mu\text{m}$  HMX 的激光诱导冲击波特征速度比起其他粒径要大 15.91%。此时测得的特征速度标准差较大,在 100  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,不适合用来评估含能材料的爆轰性能;当粒径较大时(一般在 75~500  $\mu\text{m}$  以内),粒径对测量结果的影响不大,但差异还是不可忽视。例如 65  $\mu\text{m}$  HMX 的激光诱导特征速度较大,分析认为这是由于激光烧蚀区的周围有过多的未反应药粉受到微爆炸的影响喷射出样板表面,如图 5 所示,从而影响了冲击波的膨胀;当平均粒径为 275  $\mu\text{m}$  时的 HMX,其激光诱导冲击波特征速度有下降的趋势,由粒径分布图可知,此时的样品对应的是粒径为 300~

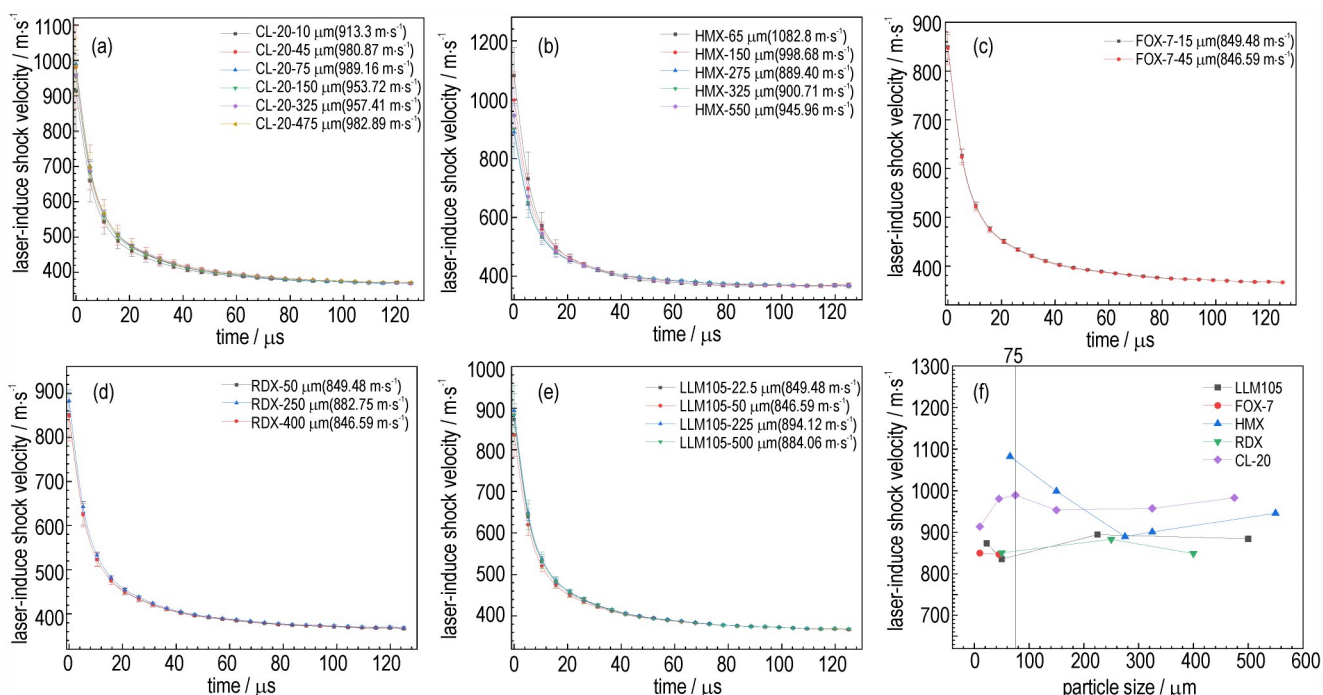


图9 不同粒径含能材料激光诱导冲击波速度-时间曲线以及激光诱导冲击波特征速度-粒径曲线

Fig.9 Laser-induced shock wave velocity-time curves and laser-induced shock wave characteristic velocity-grain size curves for different particle size energetic materials

600  $\mu\text{m}$  的 HMX,但是实际药粉中含有较多颗粒大小为 200~250  $\mu\text{m}$  的小颗粒,这可能导致其测量结果偏小。对比含能材料粒径在 75  $\mu\text{m}$  前后的冲击波特征速度可知,CL-20 在 75  $\mu\text{m}$  之前的冲击波特征速度区间为 913.3~989.16  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在 75  $\mu\text{m}$  之后则为 953.72~989.16  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,后者波动范围更小;HMX 在 75  $\mu\text{m}$  之后平均冲击波特征速度区间为 944.04  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与 75  $\mu\text{m}$  之前的数值相差较大。

当 HMX 粒度较大时,散射比表面积相对较小,各个颗粒能较快地积累能量,含能材料的反应区较窄,热量损失降低,反应速度更快,从而导致 275  $\mu\text{m}$  HMX 烧蚀孔洞比 65  $\mu\text{m}$  HMX 烧蚀孔洞大;装药孔隙较大时,含能材料分解所产生的气体会沿着孔隙流动,从而加快压力升高速率,引起更剧烈的反应,这与文献结果相一致<sup>[9-10]</sup>。当药粉粒径较大时,高能脉冲激光只会激发少数几个含能材料颗粒,孔隙大小对测量结果的影响较小。当药粉粒径较小时,受到激光作用的药粉颗粒数量较多,相邻含能材料之间的孔隙会影响含能材料分解生成的气体流动,从而减小高温化学反应的速率;然而,细粒度含能材料拥有较高的比表面积,从而提高化学反应速率,因此小粒径含能材料的测量结果受制样质量的影响较大。综上所述,粒径在 75~500  $\mu\text{m}$  之间的药粉能够减少 LASEM 测试中含能材料

粒径对实验结果的影响。

对 CL-20、HMX、RDX、LLM105 这四种含能材料中大于 75  $\mu\text{m}$  粒径的特征速度分别取平均值,按照从大到小的顺序排列结果为 CL-20, HMX, LLM105 以及 RDX,这与它们实际爆压的排列顺序相一致,说明以 75  $\mu\text{m}$  作为粒径标准分界线是具有一定参考价值的。

综上所述,含能材料粒径较小时(一般是小于 75  $\mu\text{m}$ ),较小的孔隙率会阻碍含能材料分解气体的流动,抑制高温化学反应的进行,但高的比表面积会提高反应速率,实际测量结果受到多个因素的影响,例如含能材料与激光能量或者波长的耦合程度等等;纹影图像显示此时参与反应的等离子体相对较少,降低了测量结果的参考价值。当粒径较大时(一般在 75~500  $\mu\text{m}$  之间),颗粒表面的凹坑等缺陷清晰可见,激光烧蚀孔洞直径逐渐增大,纹影图像体现了有较多的等离子体反应发生,激光诱导冲击波特征速度较为平稳,此粒径下的测量结果有较高的参考价值,本研究暂时没有对更大粒径的含能材料做进一步研究。

### 2.3 堆积密度

研究采用量筒和电子天平对 CL-20、HMX、RDX、FOX-7、LLM105 五种含能材料的堆积密度进行测量,并与这五种含能材料的激光诱导特征速度相关联,得到激光诱导特征速度-堆积密度的折线图,如图 10 所



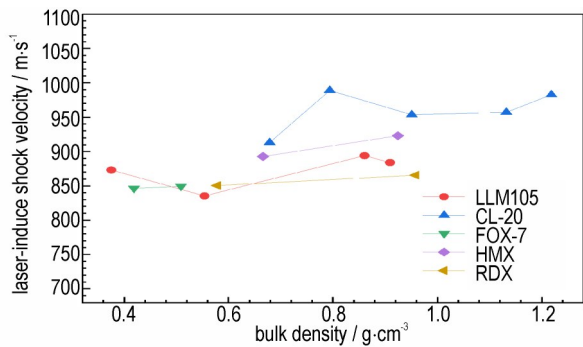


图 10 激光诱导特征速度-堆积密度折线图

Fig. 10 Line graph of laser-induced characteristic velocity-bulk density

示。由图 10 可以看出,随着堆积密度的增加,激光诱导冲击波特征速度趋于平稳,但是在小堆积密度下依然会有速度的波动,在堆积密度小于  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时,CL-20 的激光诱导冲击波特征速度降低了 5.93%,RDX 降低了 1.74%,LLM105 则降低了 3.90%。当堆积密度较高 ( $0.7\sim 1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间) 时,CL-20 的特征速度在  $953.72\sim 989.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,LLM105 的特征速度在  $835.57\sim 894.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,药粉形状趋于一致,细颗粒粉末能够填充颗粒之间的空隙,使得含能材料在样板上分布更加均匀,减小因分布不均对测量结果造成的影响。另一方面,当样板上药粉堆积密度较小时,激光会通过药粉间的间隙作用到双面胶带上发生高温化学反应,反应产生的热能会影响含能材料的能量传输,并且双面胶带燃烧后的副产物也会混入药粉中,从而对样板上含能材料的微爆炸过程产生干扰。因此,在利用 LASEM 技术对含能材料性能进行较为精确的评估时需要提高制样要求,使得样板上药粉密度尽量高于  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

本研究暂时没有对更大堆积密度的含能材料做进一步研究,对 CL-20、HMX、RDX、LLM105 这 4 种含能材料在  $0.7\sim 1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间堆积密度的特征速度取平均值,按照从大到小的顺序排列结果为 CL-20、HMX、LLM105 以及 RDX,这与它们爆压的排列顺序相一致,说明以  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  为堆积密度标准分界线是具有一定参考价值的。

综合分析可以认为:当含能材料粒径较小(小于  $75 \mu\text{m}$ )时,激光诱导微爆炸的反应十分迅速,但是所产生的能量可能在发光辐射上有较多的耗费,使得等离子体蒸气云亮度较高但是体积较少,且能量的不足会促使中间处的等离子体核较早产生衰变和坍塌,继而形成上下层的等离子体分离。同时周围未参与反应

的细小颗粒易受到微爆炸反应的影响而向外喷射,从而对特征速度的测量造成影响,测量结果波动性较强,难以作为参考数据进一步分析;当含能材料粒径较大(在  $75\sim 500 \mu\text{m}$  之间)时,药粉颗粒外表面会首先与高能脉冲激光接触而发生微爆炸现象,颗粒内部的药粉可能会喷射到蒸气云内继续反应,增大了蒸气云的体积与密度,此时测得的特征速度波动性较弱,适合作为参考数据评估含能材料的爆轰性能。当堆积密度较小(小于  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )时,激光可能会与药粉背后的双面胶带发生反应,造成不必要的能量耗散,从而影响了上方含能材料的微爆炸反应;堆积密度较大(在  $0.7\sim 1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间)时,形貌特征更加均一,致密的样品堆叠会充分利用高能激光能量,测得的特征速度波动性较小。另外,粒径在  $75\sim 500 \mu\text{m}$  之间、堆积密度在  $0.7\sim 1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间的含能材料特征速度排列顺序和它们的实际爆压值顺序一致,证明了二者作为测量标准的实用价值。因此,在样板制作时需要控制粒径、堆积密度在一定范围内,对样板制作以及实验操作实现更加详细的标准化规定,从而减小样品本身所产生的测量结果误差,为以后研究其他因素对激光诱导微爆炸冲击的影响提供参照。

### 3 结论

(1) 研究了粒径对 LASEM 测量结果的影响。结果表明,当含能材料粒径小于  $75 \mu\text{m}$  时,测量结果容易受颗粒特性影响而产生较大偏差;粒径在  $75\sim 500 \mu\text{m}$  之间时,激光诱导冲击波特征速度受粒径变化的影响较小,由 CL-20、HMX、RDX、LLM105 这四种含能材料所测得的特征速度与实际爆压值排列顺序一致。控制粒径在  $75\sim 500 \mu\text{m}$  之间,能够减少样品本身对测量结果的影响。

(2) 研究了堆积密度对 LASEM 测量结果的影响。结果表明,堆积密度小于  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时,特征速度波动性较大;堆积密度在  $0.7\sim 1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间时,堆积密度对冲击波特征速度没有明显影响。致密的样板制作能够减少制样过程对测量结果的影响。

#### 参考文献:

- [1] DE LUCIA F C, GOTTFRIED J L. Laser-induced breakdown spectroscopy for the detection and characterization of explosives [M]//Counterterrorist Detection Techniques of Explosives. Elsevier, 2022: 269-313.
- [2] MILLER K K, GOTTFRIED J L, WALCK S D, et al. Plasma surface treatment of aluminum nanoparticles for energetic materi-

- al applications [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 206: 211-213.
- [3] WAINWRIGHT E R, DEAN S W, LAKSHMAN S V, et al. Evaluating compositional effects on the laser-induced combustion and shock velocities of Al/Zr-based composite fuels [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 213: 357-368.
- [4] WANG X, He Y, CAO W, et al. Fast explosive performance prediction via small-dose energetic materials based on time-resolved imaging combined with machine learning [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10 (24): 13114-13123.
- [5] GOTTFRIED J L. Influence of exothermic chemical reactions on laser-induced shock waves [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, 16(39): 21452-21466.
- [6] GOTTFRIED J L. Laboratory-scale method for estimating explosive performance from laser-induced shock waves [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(5): 674-681.
- [7] GOTTFRIED J L. Laser-induced air shock from energetic materials (LASEM) method for estimating detonation performance: challenges, successes and limitations [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2018, 1979(1): 100014.
- [8] BAI Z, DUAN Z, WEN L, et al. Embedded Manganin Gauge Measurements and Modeling of Shock Initiation in HMX - Based PBX Explosives with Different Particle Sizes and Porosities [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(6): 908-920.
- [9] 周水平, 吴芳, 唐根, 等. CL-20 含量及其粒度级配对 NEPE 推进剂燃烧性能的影响 [J]. *火炸药学报*, 2020, 43(2): 195-202.  
ZHOU Shui-ping, WU Fang, TANG Gen, et al. Influence of CL-20 content and its particle size gradation on combustion performance of NEPE propellants [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2020, 43(2): 195-202.
- [10] 冯晓军, 王晓峰. 装药孔隙率对炸药烤燃响应的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(1): 109-112.  
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng. Influence of charge porosity on cook-off response of explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1): 109-112.
- [11] 徐鸿儒. 提高岩石膨化硝酸铵炸药的堆积密度研究 [J]. *爆破器材*, 2010, 39(2): 10-13.  
XU Hong-ru. Study on increasing the bulk density of rock expanded AN explosive [J]. *Explosive Materials*, 2010, 39(2): 10-13.
- [12] 白建明. 影响粉状乳化炸药质量的关键因素探讨 [J]. *煤矿爆破*, 2020, 38(2): 19-21.  
BAI Jian-ming. Discussion on the key factors affecting the quality of powdery emulsion explosive [J]. *Coal Mine Blasting*, 2020, 38(2): 19-21.
- [13] ZHANG W, TANG Y, SHI A, et al. Recent developments in spectroscopic techniques for the detection of explosives [J]. *Materials*, 2018, 11(8): 1364.
- [14] SHIMAMURA K, OFOSU J A, KOMURARASAKI K, et al. Predicting propagation limits of laser-supported detonation by Hugoniot analysis [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 54(1): 016201.
- [15] LI X, WANG X, LU Z, et al. Numerical simulations of trajectories of shock wave triple points in near-ground explosions of TNT charges [J]. *Energetic Materials Frontiers*, 2022, 3(2): 61-67.
- [16] SETTLES G S, HARGATHER M J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 042001.
- [17] KAMIYAMA M, TAGUCHI A. Color conversion formula with saturation correction from HSI color space to RGB color space [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2021: 2020EAL2087.
- [18] SHAH A, BANGASH J I, KHAN A W, et al. Comparative analysis of median filter and its variants for removal of impulse noise from gray scale images [J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34(3): 505-519.
- [19] GAURAV K, GHANEKAR U. Image steganography based on Canny edge detection, dilation operator and hybrid coding [J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2018, 41: 41-51.
- [20] HERMANS F, STORM T. TrueGrid: Code the table, tabulate the data [C]//Federation of International Conferences on Software Technologies: Applications and Foundations. Springer, Cham, 2016: 388-393.
- [21] DEWEY J M. The properties of a blast wave obtained from an analysis of the particle trajectories [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1971, 324(1558): 275-299.
- [22] 张秀芳, 于爱兵, 贾大为, 等. 应用数字图像识别法检测金刚石磨粒的形状与粒度 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2007(01): 47-49.  
ZHANG Xiu-fang, YU Ai-bing, JIA Da-wei, et al. Measuring the shape and size of diamond grains by digital image identification method [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2007(01): 47-49.
- [23] 郭伟, 曹金乐, 常仕民, 等. 基于新型半导体激光系统的 B/KNO<sub>3</sub>/PF 点火特性 [J]. *含能材料*, 2020, 28(2): 89-98.  
GUO Wei, CAO Jin-le, CHANG Shi-min, et al. Ignition characteristics of B/KNO<sub>3</sub>/PF based on semiconductor laser system [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(2): 89-98.
- [24] 邵迎君, 彭振宇, 赵明新. 微粉堆积密度的测量方法 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2007(4): 86-88.  
HAO Ying-jun, PENG Zhen-yu, ZHAO Ming-xin. Measuring method of bulk density of abrasive microparticles [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2007(4): 86-88.
- [25] 庞维强, 樊学忠. 不同粒径团聚硼颗粒的堆积密度研究 [J]. *含能材料*, 2010, 18(3): 304-308.  
PANG Wei-qiang, FAN Xue-zhong. Bulk density of different sizes of agglomerated boron particles [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(3): 304-308.
- [26] SELIMEFENDIGIL F, ÖZTOP H F. Effects of local curvature and magnetic field on forced convection in a layered partly porous channel with area expansion [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 179: 105696.
- [27] 张超, 张晓宏, 马亮, 等. LLM-105 研究新进展 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(23): 75-86.  
ZHANG Chao, ZHANG Xiao-hong, MA Liang, et al. The new progress of 2, 6-diamino-3, 5-dinitro pyrazine-1-oxide [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(23): 75-86.
- [28] 吴瑞荣, 霍冀川, 段晓惠, 等. 含能材料 LLM-105 及其类似物生成热和稳定性研究 [J]. *安徽大学学报 (自然科学版)*, 2007(02):

- 63-66.  
WU Rui-rong, HUO Ji-chuan, DUAN Xiao-hui, et al. Theoretical studies on heat of formation and stability for energetic materials of LLM-105 and its analogues[J]. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, 2007(02):63-66.
- [29] 陈鲁英, 杨培进, 张林军, 等. CL-20 炸药性能研究[J]. *火炸药学报*, 2003(03):65-67.  
CHEN Lu-ying, YANG Pei-jin, ZHANG Lin-jun, et al. Study of the performance of explosive CL-20[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2003(03):65-67.
- [30] 付小龙, 樊学忠, 李吉祯, 等. FOX-7 研究新进展[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(14):112-119.  
FU Xiao-long, FAN Xue-zhong, LI Ji-zhen, et al. The New Progress of FOX-7[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(14):112-119.
- [31] 郜婵, 孙晓宇, 梁文韬, 等. RDX、HMX 及 CL-20 晶体的高温高压相变研究进展[J]. *含能材料*, 2020, 28(9):902-914.  
GAO Chan, SUN Xiao-yu, LIANG Wen-tao, et al. Review on phase transition of RDX, HMX and CL-20 crystals under high temperature and high pressure[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(9):902-914.

## Effects of Particle Properties of Energetic Materials on Laser-induced Micro-explosive Shock Waves

BAO Yuan, GUO Wei, LI Ming, XUE Peng-yi, WANG Xiang, HAO Shi-long, CHEN Si-tong, CAO Wei, XU Jin-jiang, LI Hong-zhen

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

**Abstract:** The Laser-induced Air Shock from Energetic Materials (LASEM), a laser-induced air shock performance test method based on milligram-scale energetic materials on microsecond time scales, was combined with a pulsed laser system and high-speed ripple shadowing. The effects of different particle sizes and different stacking densities on the characteristic velocities of shock waves from five energetic materials (CL-20, HMX, RDX, FOX-7, LLM105) were investigated. The results show that when the particle size is less than 75  $\mu\text{m}$ , the measurement results deviation is large. When the particle size is in the range of 75-500  $\mu\text{m}$ , the measurement results are less volatile and consistent with the order of the burst pressure value, which can be used as reference data to assess the actual burst performance. When the bulk density is less than  $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , the measurement results fluctuate in a wide range. When the bulk density is in the range of  $0.7-1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , the measurement results are more stable and consistent with the order of the burst pressure value, and thus the measurement value is more valuable.

**Key words:** laser induced; energetic materials; particle size; shock wave characteristic velocity; micro-explosion

**CLC number:** TJ06; TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022291

**Grant support:** Science Foundation of Institute of Chemical Materials(No. SXX-2021-19)

(责编:姜梅)