

微量爆炸物激光辐照成像探测的数值分析和实验研究

刘 灏 时家明 程 立

脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 为了研究激光探测爆炸物时的相关现象,首先对激光辐照目标过程进行理论分析,并通过有限元软件 ANSYS 进行仿真,建立 CO₂激光器辐照爆炸物温升分布的三维立体模型,然后利用 CO₂激光器和扩束系统对目标进行照射(距离 3 m),同时配合 8~14 μm 的红外成像设备分别观察得到沾有少量三硝基甲苯(TNT)和黑索金(RDX)的目标热像图。研究表明,在一定功率的激光辐照下,由于爆炸物和背景的有效辐射出射度大小分别由其在 8~14 μm 波段的吸收率和对激光辐射照度的反射率共同决定,因而可得到爆炸物与背景区域明显不同的热像图。此外,辐照功率和照射时间的变化也可能是影响探测效果的重要因素。

关键词 激光光学; 热像图; ANSYS; 爆炸物

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0602006

Numerical Simulation and Experimental Study of Trace Explosives Detection by Laser Illumination and Imaging

Liu Hao Shi Jiaming Cheng Li

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Anhui, Hefei 230037, China

Abstract To analyze the phenomenon related to the detection of explosives by laser illumination and imaging, theoretical analysis of the process of the laser illumination on the target is carried out firstly. The simulation is implemented with the software ANSYS. Three-dimensional models are built for the study of temperature distribution. A CO₂ laser is used with expanded beam to irradiate the target (3 m away), and obtain thermal images (8~14 μm) of the targets with TNT and RDX residues. Studies show due to the effective radiation of explosive and background is determined by the emissivity and reflectivity in 8~14 μm waveband when laser irradiation at a certain power, the explosives and the substrate have significant difference in thermal images. Moreover, irradiation power and time difference may also be important factors affecting the detection.

Key words laser optics; thermal images; ANSYS; explosive

OCIS codes 140.3470; 140.6810; 290.5850

1 引 言

近几年来,全球恐怖事件呈现日益增长的趋势,恐怖犯罪活动特别是爆炸类事件,会给人们带来生命安全的威胁。为了预防和打击此类事件的频繁发生,各个国家与国际组织对安全的要求越来越高,尤其在一些公共场合,比如地铁站、火车站等人流量大而且密集的场所,需要一种能快速并安全检测隐藏爆炸物的设备^[1-3]。

在爆炸物探测领域,我国起步较晚,无论在理论或者技术上与国外还有一定的差距。所以了解国外爆炸物探测技术与设备,对于我国研制快速、准确、安全的爆炸物探测系统具有重要指导作用。美国麻省理工学院林肯实验室^[4]采用波长为 9.1~9.8 μm 的可调谐量子级联激光器和碲镉汞焦平面阵列对不同基质上的物质进行探测,最后利用多光谱成像技术在 0.1~5 m 的距离内成功分辨基质上的化学物质。美国陆军研究实验室(ARL)^[5]基于激光诱导击穿光谱(LIBS)技术,利用单脉冲激光器成功探测 30 m 处的爆炸物,随后与应用光

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2015-01-26

作者简介: 刘 灏(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光探测技术。E-mail: dear_devilhao@sina.com

导师简介: 时家明(1966—),男,博士,博士生导师,主要从事光学技术应用方面的研究。E-mail: sjmeci@yahoo.cn

子公司合作,联合开展了基于国防安全为背景的远程LIBS检测技术,使得原来的探测系统性能得到进一步的提升,其中还包括利用双脉冲激光器进行探测以达到全波段(紫外、可见光、近红外)探测的目的。为此,针对不同爆炸物探测技术的研究具有重要的意义。

首先通过建立CO₂激光器对目标辐照的温度分布模型,分别对未沾有爆炸物目标和沾有爆炸物目标辐照的温度分布进行模拟,然后利用激光器和红外成像设备进行探测,并对得到的现象和问题进行分析研究。

2 光-热效应探测工作原理及系统构成

常见的爆炸危险品,如三硝基甲苯(TNT)、黑索金(RDX),其分子式中含有H、N、C和O元素,并且与其他类别的有机物相比N的含量更高,超过了丝绸、尼龙等常见的有机材料。图1为TNT和RDX的透射光谱图。

基于光-热效应的少量爆炸物探测,正是因为振动-转动吸收带的存在^[6],所以当一定波长的激光照射表面残留TNT或RDX的目标时,一部分激光能量被吸收,目标和背景产生辐射出射度,另一部分激光能量则被目标和背景反射,所以可采用一定手段对发射和反射这两部分辐射能量进行探测并确定目标和背景之间的温度差异,最终判断是否有可疑物的存在。

由于对目标在8~14 μm波段内的红外辐射进行探测,所以利用(1)式可计算出目标在该波段内的有效辐射出射度为

$$M_1 = \varepsilon_1 \int_8^{14} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda + (1 - \varepsilon_1) E_0, \quad (1)$$

式中 $C_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2)$, $C_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$, E_0 为激光的辐射照度, T 为目标真实温度, ε_1 为目标的长波发射率。由(1)式可知,当激光辐射照度 E_0 达到一定大小时,目标和背景发射的辐射出射度可忽略不计,近似认为它们在该波段的有效辐射出射度即为对激光辐射照度的反射。

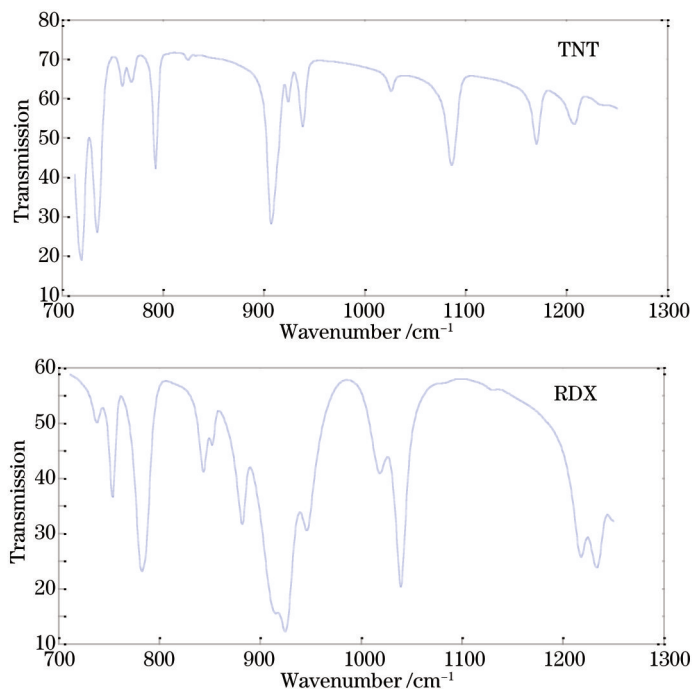


图1 (a)TNT和(b)RDX的透射光谱图

Fig.1 Transmission spectra of (a) TNT and (b) RDX

爆炸物探测系统由激光器、热像分析系统以及辅助的光学扩束系统构成。为了爆炸物能有效吸收激光能量,所采用激光器工作波长必须覆盖爆炸物的吸收峰值。针对TNT和RDX,主要利用其10.6 μm附近的两个较强吸收带,激光器采用工作波长在10.6 μm的CO₂激光器,最大可输出功率为40 W。

热像分析系统采用长波凝视型热像仪,工作波长8~14 μm,热像仪所成热像传递给计算机,进行处理分析。

扩束系统由透镜组构成,用于将激光扩束为一个较大的光斑。系统的工作原理:如图2所示,激光束经扩束后照射在目标区域,热成像系统的成像区域能覆盖激光照射区域。如果激光光斑照射的部分区域内存在少量爆炸物,则由于爆炸物与目标其余区域对激光的吸收和反射能力不同,导致两者存在辐射温度的差异,进而可利用热像仪识别出这种温度差异,再通过计算机进行图像分析处理判断出是否有爆炸物的存在^[7]。

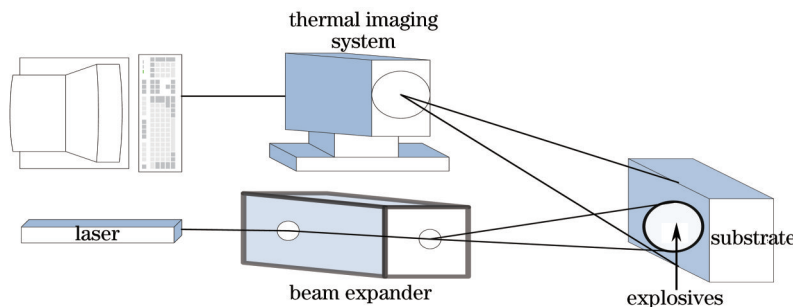


图2 系统组成框图
Fig.2 Diagram of system

3 有无爆炸物黏附时目标表面温度的仿真与分析

采用典型的三维瞬态导热模型模拟目标的温度变化,如图3和图4所示。为了便于研究与计算,仅考虑基底和目标的发射率、反射率、导热系数、比热及密度对温度的影响,并认为目标底面绝热。

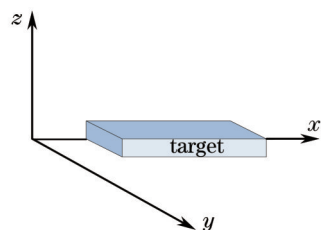


图3 未沾有爆炸物模型
Fig.3 No explosive model

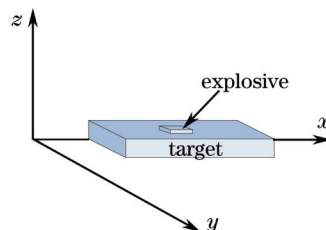


图4 沾有爆炸物模型
Fig.4 Stained with explosives model

若选取作用激光功率为 P_0 , 半径为 w 的基模高斯光束, 则光束的功率密度分布可表示为^[8]

$$P(x,y) = \frac{2P_0}{\pi w^2} \exp\left(-2\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right). \quad (2)$$

通过有限元软件 ANSYS 建立 CO₂ 激光器辐照爆炸物温升分布三维立体模型, $P(x,y)$ 作为载荷对被探测的基质进行照射, 分别设定基底(化纤布料)和爆炸物的厚度约为 2 mm 和 10 μm, 激光功率 P_0 为 30 W, 光斑半径为 2 cm, 照射持续时间为 1 s, 初始温度为 20 °C。经实验测得, 在 10.6 μm 波长处基底、TNT 和 RDX 的吸收系数分别约为 0.5、0.35 和 0.68, 基底与爆炸物的物理参数如表 1 所示。

表1 基底、爆炸物的物理参数

Table 1 Physical parameters of substrate and explosives

Material	Physical parameters		
	Specific heat /(J/kg·K)	Thermal conductivity /(W/m·K)	Density /(kg/m ³)
Substrate	1670	0.26	1150
TNT	1133	0.203	1584
RDX	1124	0.234	1749

可得 CO₂ 激光器辐照爆炸物温升分布仿真结果如图 5 所示。图 5 分别展示了激光与未沾有和沾有爆炸物目标作用的表面温度分布图, 图 5(a) 中激光照射区域温度近似为高斯分布, 图 5(b) 显示了 1/4 的光斑温度分布, 在白色方框内表明沾有少量 TNT 爆炸物, 可看出在沾有 TNT 区域的温度明显要高于其周围区域的温度。图 5(c) 中在白色方框内沾有少量的 RDX, 同样可以明显的观察到在沾有 RDX 区域的温度要低于其周围

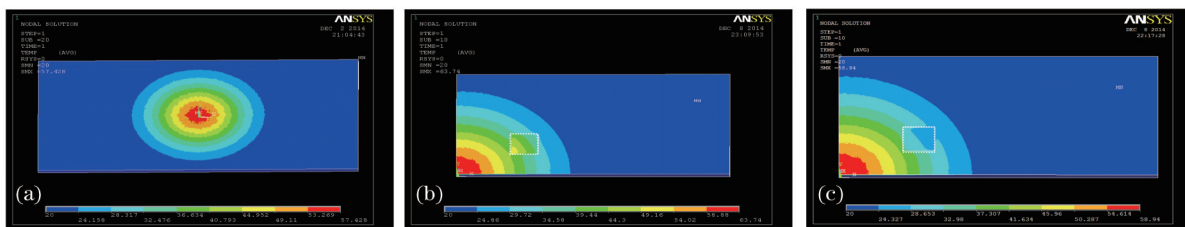


图5 激光辐照目标 1 s 后的表面温度分布图。(a) 未沾有爆炸物;(b) TNT;(c) RDX

Fig.5 Surface temperature distribution after being illuminated by laser for 1s. (a) Without explosives; (b) with TNT; (c) with RDX

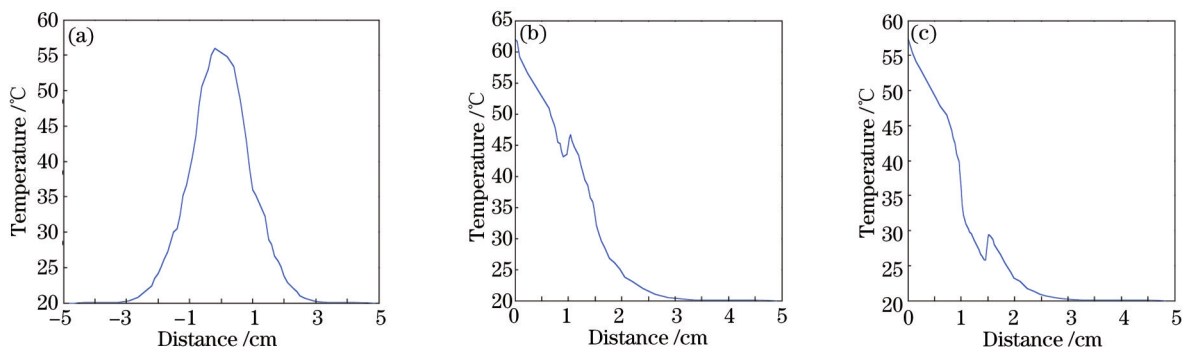


图6 目标温度曲线图。(a) 未沾有爆炸物;(b) 沾有 TNT;(c) 沾有 RDX

Fig.6 Temperature curve of surface. (a) Without explosives; (b) with TNT; (c) with RDX

区域的温度。为进一步分析研究,通过上述温度分布图可分别得到温度的变化曲线如图6所示。

图6(a)中的温度变化曲线近似为高斯分布,能够较好地符合实际,在图6(b)温度变化曲线中,1~1.5 cm处(即涂有 TNT 区域)的温度比未涂有爆炸物时的温度高,而在图6(c)的温度变化曲线中,1~1.5 cm处(即涂有 RDX 区域)的温度比未涂有爆炸物时的温度低。

4 实验论证与分析

本次实验利用 CO₂ 激光器以及扩束系统对沾有少量爆炸物的目标(编织布料)进行照射,激光器最大功率为 40 W,探测距离为 3 m,照射持续时间为 1 s,被探测爆炸物质量约为 0.05 g。通过热像仪观察实验结果,分别得到沾有 TNT 和 RDX 的热像图,如图7和图8所示。

图7显示了沾有少量 TNT 目标的热像图,随着激光照射功率的增加,在沾有 TNT 区域的亮度明显要高于

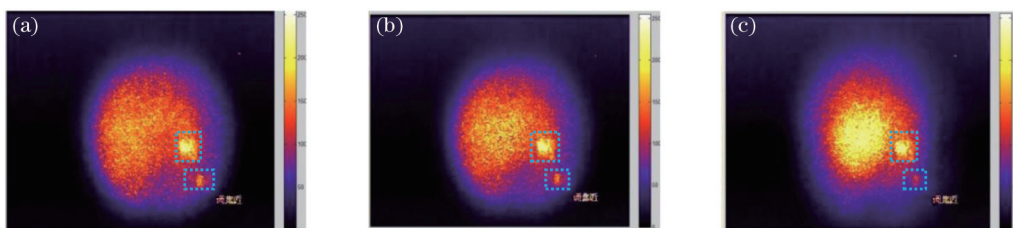


图7 随着激光功率的增加,沾有 TNT(白色方框内)的目标热像图

Fig.7 Thermal images of target with TNT (white frame) with laser power increasing

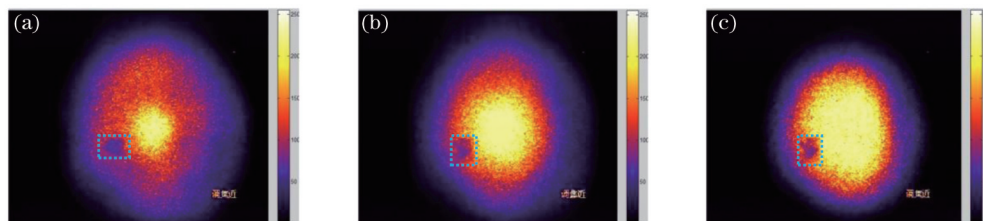


图8 随着激光功率的增加,沾有 RDX(白色方框内)的目标热像图

Fig.8 Thermal images of target with RDX (white frame) with laser power increasing

其周围区域,而在图8中可以看出在沾有RDX区域的亮度明显低于其周围区域。由(1)式可知,当激光照射功率在一定范围内时,因为爆炸物和基底自身的辐射出射度要远小于它们对激光辐射照度的反射,所以沾有爆炸物目标的亮暗程度在一定范围内取决于反射的大小。由于TNT对激光辐射的反射要大于基底,而RDX对激光辐射的反射小于基底,所以热像图中沾有TNT区域的亮度高于周围区域,沾有RDX区域的亮度却低于周围区域。此外,由于从温度场的模拟结果可知被探测物体的真实温度,而热像图则体现了物体的辐射温度,通过对两者温度转换后的对比分析,可进行更加深入的研究。

5 结 论

通过建立CO₂激光器辐照爆炸物温升分布三维立体模型,利用该模型对目标和背景的辐射温度进行了仿真分析,同时结合实验现象得到以下结论:

1) 在一定激光功率范围内,8~14 μm波段内爆炸物和基底自身的辐射出射度远小于其对激光辐射的反射,可近似认为在该波段内目标和基底的有效辐射出射度即为对激光辐射照度的反射。

2) 用一定功率范围内的激光进行照射,沾有少量TNT的区域由于其反射率高而比周围区域更亮,同时沾有少量RDX的区域因为其反射弱于基底而比周围区域暗。

3) 随着激光功率的不断增大,被照射目标温度升高,目标和基底的辐射出射度迅速增大,从而变得不可忽略,使得目标和基底在该波段的有效辐射出射度由其自身辐射出射度和对激光辐射的反射共同决定,最后可能导致热像图中目标的亮暗程度发生改变。

上述结论为激光探测爆炸物方面提供了一定的理论依据,同时为了减少高斯光斑带来的实验干扰,在下一步的研究过程中可采用均匀激光光斑来进行探测。此外,对于不同辐射功率大小和照射时间对实验结果造成的影响以及不同爆炸物热像图的分析研究将成为重点和方向。

参 考 文 献

- 1 Tang Qianjin, Shao Jie. Research and application of standoff explosive detection technology[J]. Technology and Application, 2009, (9): 40-45.
唐前进, 邵杰. 远距离爆炸物探测技术的研究与应用[J]. 技术与应用, 2009, (9): 40-45.
- 2 Shi Guangming, Xu Gengguang, Wang Tingzeng, *et al.*. The problems and countermeasures of hazardous explosives detection[J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2003, 3: 50-52.
石光明, 徐更光, 王廷增, 等. 爆炸危险品探测存在的问题及对策[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2003, 3: 50-52.
- 3 Chu Fenghong. Research progress of sensors used in trace explosives detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 020401.
初凤红. 微量爆炸物检测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 020401.
- 4 A K Goyal, M Spencer, M Kelly, *et al.*. Active infrared multispectral imaging of chemicals on surfaces[C]. SPIE, 2011, 8018: 80180N.
- 5 J L Gottfried, F C De Lucia, C A Munson, *et al.*. Double-pulse standoff laser-induced breakdown spectroscopy for versatile hazardous materials detection[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2007, 62(12): 1405-1411.
- 6 M R Papantonakis, C Kendziora, R Furstenberg, *et al.*. Stand-off detection of trace explosives by infrared photothermal imaging[C]. SPIE, 2009, 7304: 730418.
- 7 C A Kendziora, R Furstenberg, M Papantonakis, *et al.*. Advances in stand-off detection of trace explosives by infrared photothermal imaging[C]. SPIE, 2010, 7664: 76641J.
- 8 Wang Xiaohua. Study of Temperature Distribution of the Glass Surface Irradiated by CO₂ Laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
王小华. CO₂激光辐照下玻璃表面温度分布规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.

栏目编辑: 宋梅梅