

doi: 10. 3788/gzxb20164505. 0514004

# 多波段微量 TNT 成像探测的数值分析和实验研究

刘灏, 时家明, 袁忠才, 刘洋

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

**摘 要:**建立了 CO<sub>2</sub> 激光器辐照微量爆炸物温升分布三维模型, 对激光辐照过程和冷却过程中 8~14 μm 和 3~5 μm 波段内的目标表面辐射温度变化特性分别进行分析. 利用设计的探测系统对目标进行初步探测, 用 8~14 μm 和 3~5 μm 热像设备对目标进行观察分析. 研究表明: 在 10.6 μm 激光照射过程中, 8~14 μm 波段内沾有 TNT 目标的辐射温度分别由 TNT、基底在 8~14 μm 波段的发射率和对激光辐照的反射率共同决定; 在 3~5 μm 内目标辐射温度主要由 TNT、基底在 3~5 μm 波段的自身发射率决定. 在探测过程中, 8~14 μm 波段内沾染 TNT 区域的辐射温度明显高于周围区域, 而在 3~5 μm 波段内, 目标表面辐射温度整体下降, 并且沾染区域的辐射温度变得低于周围.

**关键词:**激光光学; 热成像; 多波段; 微量爆炸物; 辐射温度

中图分类号: TN219; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0514004-7

## Numerical Simulation and Experimental Study of Multi-band Trace TNT Detection by Imaging

LIU Hao, SHI Jia-ming, YUAN Zhong-cai, LIU Yang

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

**Abstract:** The simulation of CO<sub>2</sub> laser illumination on explosives was implemented. The three-dimensional models are built for the study of radiation temperature variation of the target surface during process of laser illumination and cooling down in 8~14 μm and 3~5 μm waveband. The target with explosive residues are observed with the thermal imaging equipment(8~14 μm and 3~5 μm). The studies show that the radiation temperatures of TNT and substrates are determined by the emissivity and reflectivity in process of laser illumination in 8~14 waveband. The radiation temperatures of TNT and substrates are determined by the emissivity in 3~5 μm. In the illumination process, the radiation temperature of TNT areas is higher than surrounding areas in 8~14 μm waveband. In 3~5 μm, the radiation temperature of target surface has decreased instantly, and the radiation temperature of stained areas is lower than surrounding areas.

**Key words:** Laser optics; Thermal imaging; Multi-band; Explosive residues; Radiation temperature

**OCIS Codes:** 140. 3390; 140. 6810; 290. 5850

## 0 引言

近年来,随着国际形势的紧张化、复杂化,恐怖事件在全世界以不同形式不断发生,威胁着人们的生命财产安全<sup>[1-3]</sup>.为制止类似事件的发生,高度重视安全保卫工作,大力研发相关探测技术,加强对各种爆炸物的检测,提高保障安全能力<sup>[4]</sup>.

2009年, E. Ali 等利用共聚焦喇曼光谱技术,用 50 倍物镜,将激光聚焦成直径 50 μm 的光斑,获得了隐藏在不同衣物中,质量约为 180pg 爆炸物(太恩、三硝基甲苯、硝酸铵)微粒的喇曼光谱信息<sup>[6]</sup>. 美国海军实验室 Michal R. Papantonakis 和 Chris Kendziora 等利用爆炸物对激光波长进行选择性吸收,通过量子级联激光器和红外热成像技术对远距离微量爆炸物进行探测

基金项目:国防预研基金(No. 4Y023)资助

第一作者:刘灏(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为红外探测技术. Email: dear\_devilhao@sina.com

导师(通讯作者):时家明(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为光学技术应用. Email: sjmeci@yahoo.cn

收稿日期:2015-10-12;录用日期:2015-12-25

<http://www.photon.ac.cn>

并进行了一系列实验,成功探测和区分了 TNT 和 RDX,证明了该技术的可行性<sup>[7]</sup>. 2010 年, Michal R. Papantonakis 等在原来实验基础上进行了完善,通过提高探测设备精确度进一步对远距离微量爆炸物进行探测,取得良好效果<sup>[8]</sup>. 然而,利用高能量激光实现对微量爆炸物的探测,存在设备价格昂贵、探测效率较低且不具备普遍适用性等问题<sup>[9-11]</sup>.

本文建立了 CO<sub>2</sub> 激光器辐照目标表面的三维真实温度分布模型,把不同辐照功率和时间情况下目标的表面真实温度转换计算为相应辐射温度,分析了沾有微量爆炸物目标表面辐射温度随时间变化特性. 利用实验系统对目标进行探测,通过 8~14 μm 和 3~5 μm 热像设备分别获得不同功率和照射时间下目标热像图,并仿真结果对实验现象进行对比分析. 探测中,先确定被探测区域内是否存在可疑物,如若存在,对可疑物进行进一步探测,而无需在初步探测过程中对每种物质进行具体确认,同时也无需标准物质,提高了探测效率,也在很大程度上提高了人员和设备的安全性,在安全检测方面起到关键作用<sup>[12-13]</sup>.

## 1 探测系统组成

当激光照射沾有微量 TNT 的不透明目标表面时,一部分能量被目标吸收,一部分能量则被目标反射. 探测时,分别对 TNT 和基底在 8~14 μm 和 3~5 μm 波段内自身发射和反射两部分辐射能量进行计算分析,以确定激光辐照过程中和辐照后微量 TNT 和基底的辐射温度变化特性,最后结合仿真和实验探测结果判断目标表面是否有可疑物的存在. TNT 透射光谱如图 1,由图 1 可知, TNT 存在较多的特征峰,实验选取 10.6 μm 激光波长进行探测研究.

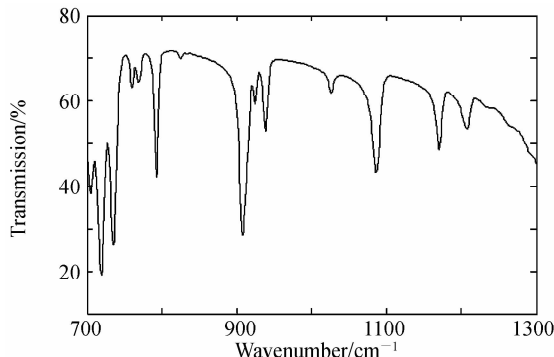


图 1 TNT 的透射光谱

Fig. 1 Transmission spectra of TNT

爆炸物探测系统由激光器、8~14 μm、3~5 μm 热像仪以及光学扩束系统构成,如图 2.

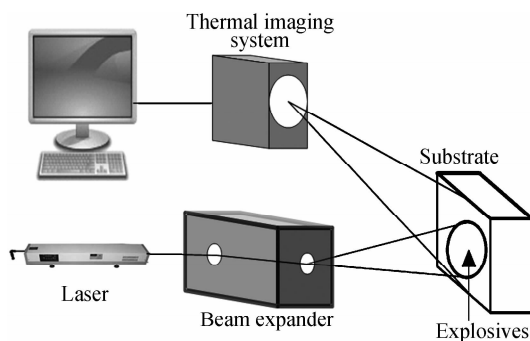


图 2 系统组成

Fig. 2 Diagram of system

利用式(1)、(2)分别计算得出 8~14 μm 和 3~5 μm 波段对应目标在各波段内相应的辐射温度

$$\epsilon \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda + \rho E_o = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_r} - 1} d\lambda \quad (1)$$

$$\epsilon \int_3^5 \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda = \int_3^5 \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_r} - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中  $c_1 = (3.741\ 5 \pm 0.000\ 3) \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $c_2 = (1.438\ 79 \pm 0.000\ 19) \times 10^4 \cdot \text{K}$ ,  $E_o$  为激光的辐射照度,  $T$  为目标真实温度, 为目标的发射率, 为目标对激光的反射率,  $T_r$  为目标表面的辐射温度.

## 2 激光辐照温度模型仿真计算和分析

采用三维瞬态导热模型对目标表面真实温度变化特性进行研究<sup>[14]</sup>, 计算中考虑和分析了 TNT 和基底在特定波长处的发射率、反射率、导热系数、比热、密度以及空气对流换热等因素.

通过有限元分析软件 ANSYS 建立激光辐照温升三维立体模型, 设激光功率为  $P_o$ , 经扩束系统后变为光斑半径为  $w$  的基模高斯光束, 则光束的功率密度分布可表示为<sup>[15]</sup>

$$P(x, y) = \frac{2P_o}{\pi w^2} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (3)$$

在仿真计算过程中, 将热源  $P(x, y)$  加载于目标表面, 基底(帆布)和 TNT 厚度分别为 2 mm 和 10 μm, 激光功率分别为 5、10、20 W, 激光半径为 5 cm. 在激光照射过程中, 时间设为 2、4、6 s 时, 在冷却过程中, 时间设为先辐照 6 s, 再关闭激光 2 s 时, 初始目标真实温度为 293K, 环境温度为 291K. 实验测得, 在 10.6 μm 波长处基底和 TNT 的吸收率分别为 0.95 和 0.35, 干净基底和沾有 TNT 基底对激光的反射率分别为 0.05 和 0.17, 基底和 TNT 相关的物理参数见表 1.

表 1 基底、TNT 的物理参数  
Table 1 Physical parameters of substrate and TNT

Parameters material	Physical	Specific heat/(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity/(W · m <sup>-1</sup> · k <sup>-1</sup> )	Density/(Kg · m <sup>-3</sup> )
Substrate		1 690	0.23	1 150
TNT		1 133	0.203	1 584

取激光照射区域的 1/4 部分进行分析,通过仿真得在功率分别为 5、10、20W 时,辐照目标 2、4、6s 以及停止照射后 2s 时的表面真实温度分布,由于所得数据量较大,并且其中存在类似,故取不同功率时,辐照目标 4s 和辐照 6s 后冷却 2s 时的表面真实温度分布进行分析,如图 3、4。

图 3、4 分别给出不同照射条件下沾有微量 TNT 目标表面的真实温度分布情况,白色方框内表示沾有 TNT 的区域,从图中可知,在未沾有爆炸物区域的目标表面径向真实温度分布近似为高斯分布。图 3 为不同功率辐照目标 4s 后表面的真实温度分布,可以看出,在沾有微量 TNT 区域的真实温度要低于其周围区

域,并且随着激光功率的增加,两者之间的温差逐渐变大,主要由于基底与 TNT 对激光波长的吸收率不同导致两者真实温度的差异。图 4 为停止照射 2s 时目标表面真实温度分布,当功率为 5W 时,沾有 TNT 区域真实温度略高于周围区域,当功率分别为 10、20W 时,则低于周围区域,随着功率的增加,两者之间的温差也逐渐变大,产生上述结果的原因主要因为基底与 TNT 的吸收率、比热、密度、导热系数等因素存在差异,使得冷却后表面沾有 TNT 区域和周围未沾有区域的真实温度有所不同。

实验过程中,通过探测观察得到目标的辐射温度,而并非其真实温度,为方便理论与实际结果的直观比

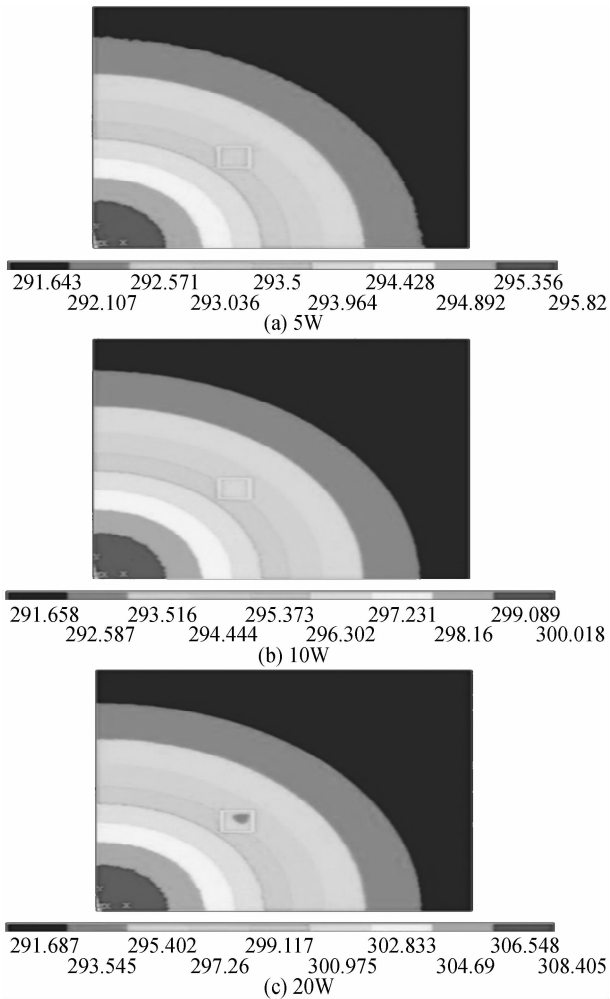


图 3 不同激光功率辐照沾有 TNT 目标 4s 后的表面真实温度分布

Fig. 3 Surface real temperature distribution of target with TNT after illuminated by different laser powers for 4s

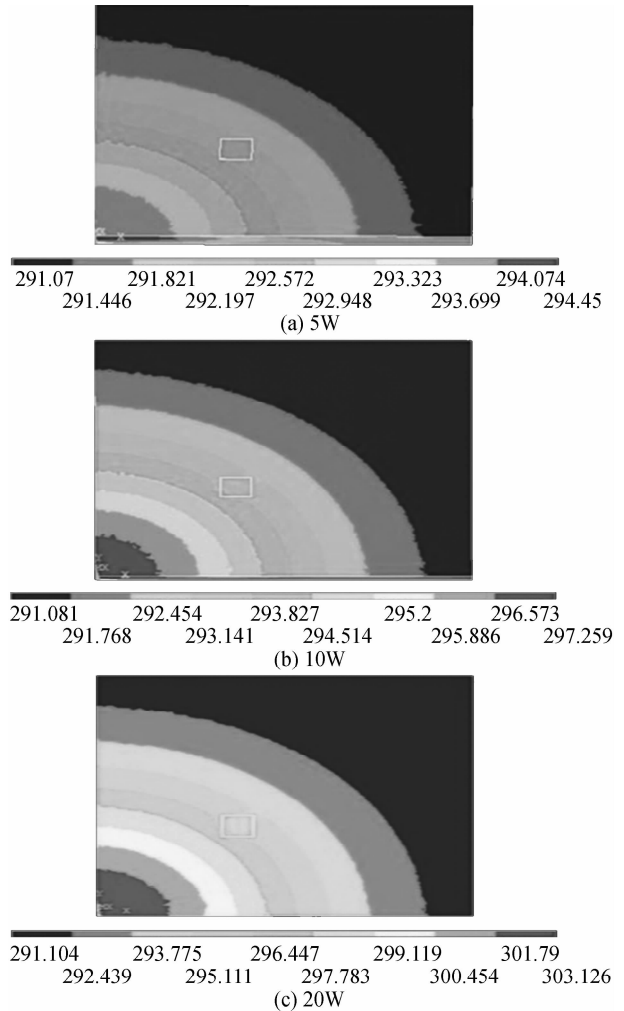


图 4 不同激光功率辐照沾有 TNT 目标 6s 后冷却 2s 时的表面真实温度分布

Fig. 4 Surface real temperature distribution of target with TNT after illuminated for 6s and cooling down for 2s by different laser powers

较判断,需将仿真结果中目标表面的真实温度进一步计算转换为各波段内相应的辐射温度,利用式(1)、(2)和已测得的基底、TNT的吸收率以及对激光的反射率分别计算在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内相对应的辐射温度.此外,由于对目标表面每个样点的真实温度进行转化十分繁杂,因此为减少计算量,在各目标表面真实温度分布图上取经光斑中心和沾有爆炸物区域的路径,对路径上各样点进行相应计算, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内特定路径辐射温度变化曲线如图5.

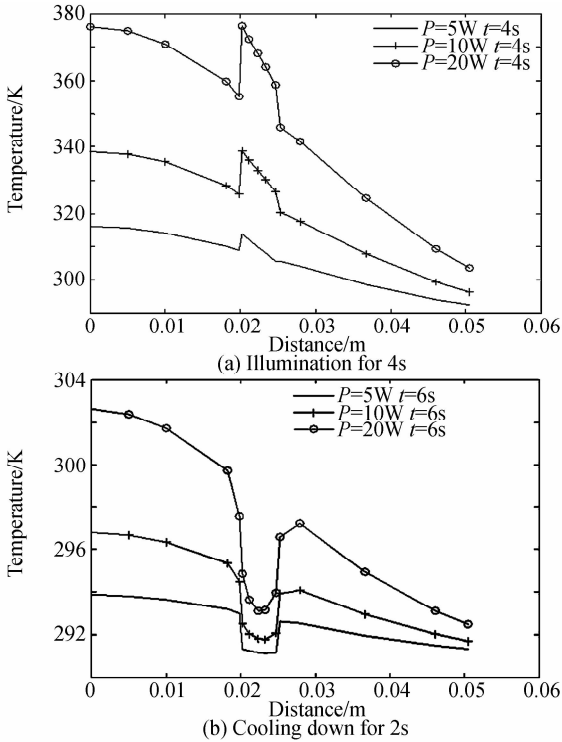


图5 不同激光辐照条件下, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内沾有微量TNT目标表面辐射温度曲线

Fig. 5 Radiation temperature curve of the surface with TNT ( $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ) in a different laser illumination conditions

图5中分别给出激光功率为5、10、20W时,照射目标4s以及照射目标6s后,冷却2s时,辐射温度在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内的变化特性,图中 $0.2\sim 0.25\text{m}$ 处为沾有爆炸物(即TNT)的区域,如图5(a). 污染区域的辐射温度高于周围区域,当激光功率为5W时,污染区域与其周围区域之间温差约为 $0.5\sim 5\text{K}$ ;功率为10W时,温差约为 $6\sim 12\text{K}$ ;功率为20W时,温差约为 $13\sim 21\text{K}$ .由于随着激光功率的增加,对激光的反射也相应增加,所以使得两者之间的温差整体变大.图5(b)为照射目标6s,冷却2s后的辐射温度变化曲线,可以看出,在污染区域的辐射温度低于其周围区域,当功率为5W时,温差约为 $1\sim 2\text{K}$ ;功率为10W时,温差约为 $2\sim 2.7\text{K}$ ;功率为20W时,温差约为 $3.5\sim 4.5\text{K}$ .

在激光照射过程中,污染区域辐射温度高于周围区域,而在冷却过程中,结果正好相反,产生这明显差

异的主要原因是因为在照射过程中,所得辐射温度主要由目标自身辐射和对激光的反射共同决定,而在冷却过程中激光停止照射,对激光的反射部分消失,目标的自身辐射等因素起主导作用,所以使得两过程中污染区域与其周围区域的辐射温差截然不同.

图6为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内目标特定路径辐射温度的变化特性,由图中看出,在照射过程中, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 与 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的辐射温度变化存在明显差异,如图6(a),污染区域辐射温度低于其周围区域,与图5(a)中的变化截然相反,其中由于在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内的辐射温度中还存在激光反射部分的影响,而在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中则无反射部分的影响,所以使得两者存在不同.此外,在冷却过程中激光停止照射,两波段内都无激光自身反射,所以两者的变化趋势大致相同.

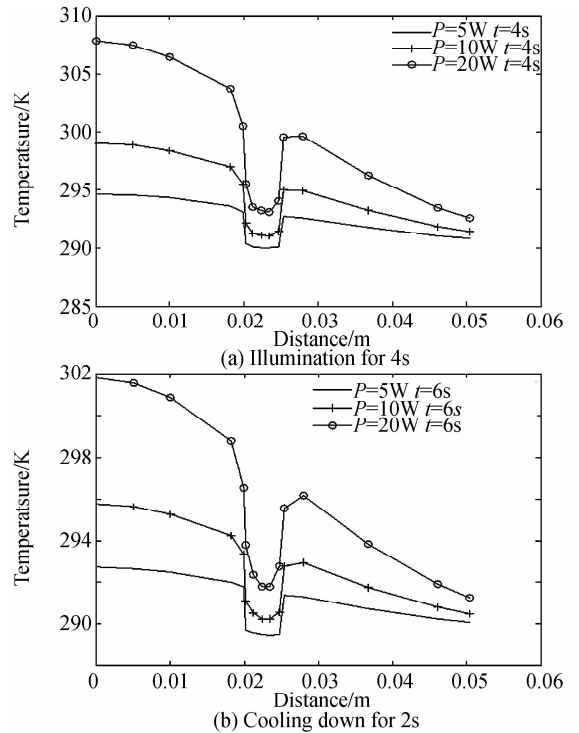


图6 不同激光辐照条件下, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内沾有微量TNT目标表面辐射温度曲线

Fig. 6 Radiation temperature curve of the surface with TNT ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ) in a different laser illumination conditions

### 3 实验论证与分析

利用设计的实验探测系统进行多次重复照射,实验过程中激光照射功率分别为5W和10W,照射持续时间为2s、4s、6s.此外,对照射目标6s后,冷却2s时的情况进行了探测,被探测爆炸物质量约为 $0.01\text{g}$ ,污染面积约为 $9\text{mm}^2$ ,厚度约为几十微米,探测时室温为 $26\text{C}$ ,目标初始温度约为 $29\text{C}$ .分别通过 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段热像设备获得沾有微量TNT目标(帆布)的热像图,如图7、8.

图 7、8 分别是在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  和  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  内照射沾有微量 TNT 目标 2s、4s、6s 以及照射 6s 后冷却 2s 时的热像图,图中大方框指出了沾有 TNT 的区域,并测

得沾染区域的平均辐射温度,小方框内是其周围未沾染区域以及平均辐射温度.从现象中可看出, $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段内,如图 7(a)(b)(c),在辐照过程中沾有 TNT 区

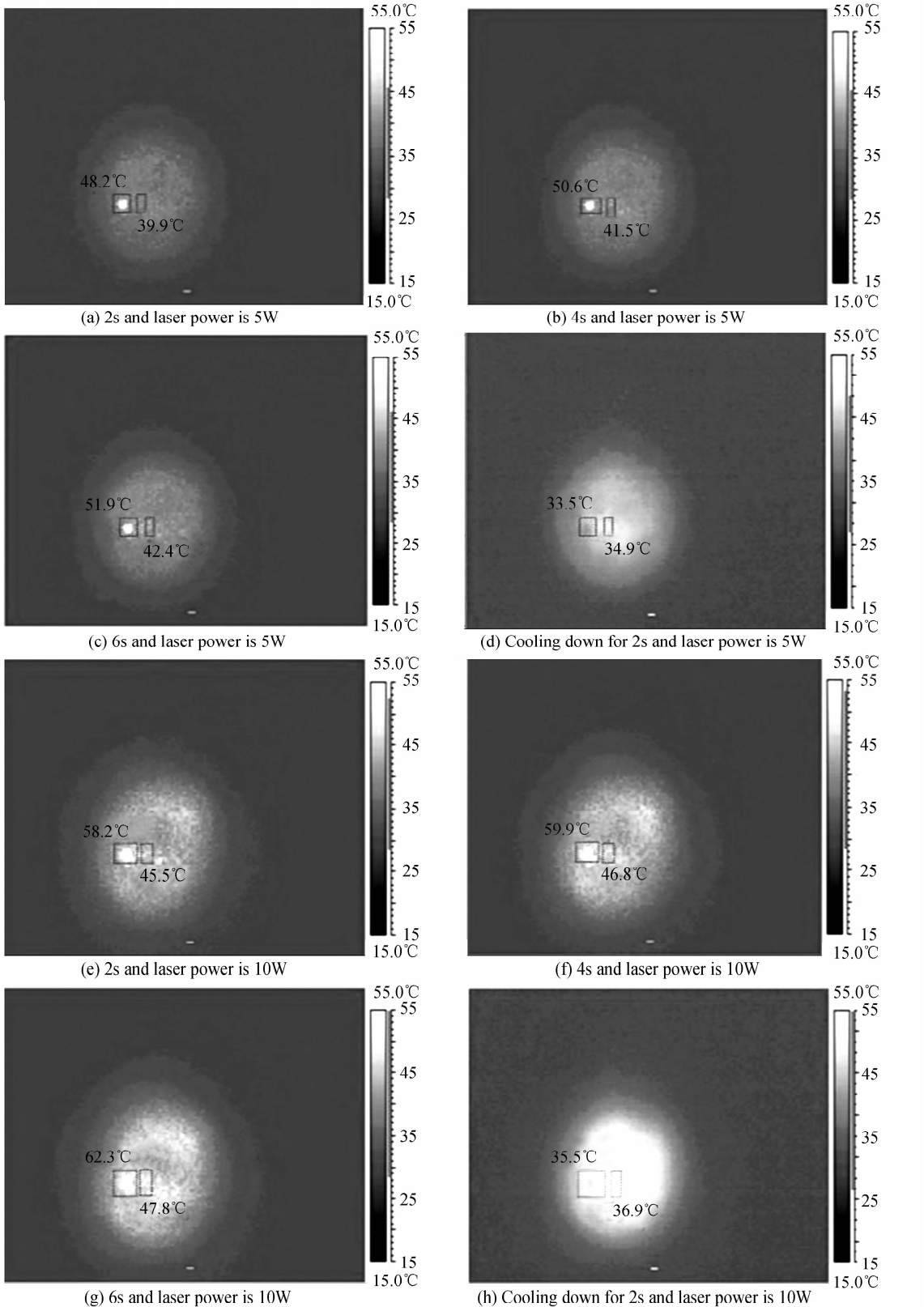


图 7  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  内沾有微量 TNT 目标热像

Fig. 7 Thermal images of target with TNT in  $8\sim 14\ \mu\text{m}$

域辐射温度比其周围区域要高,当激光功率为 5W 时,两区域之间的辐射温差分别约为 8.3℃、9.1℃、9.5℃;当功率为 10W 时,温差约为 12.7℃、13.1℃、14.5℃,而在关闭激光器即冷却过程中,如图 7(d),沾染区域辐射温度瞬间低于周围区域,功率为 5W 和 10W 时,温差都约为 1.4℃. 3~5  $\mu\text{m}$  波段内,如图 8,辐照过程

和冷却过程中沾染区域辐射温度都低于周围区域,当功率为 5W 时,温差分别为 0.44℃、0.67℃、0.68℃、0.5℃;当功率为 10W 时,温差分别为 0.84℃、1.21℃、1.38℃、1.11℃,在该波段探测时排除了激光反射的影响,使得目标自身辐射、比热等因素起到主导作用,从而产生上述结果,仿真计算与实验结果吻合较好.

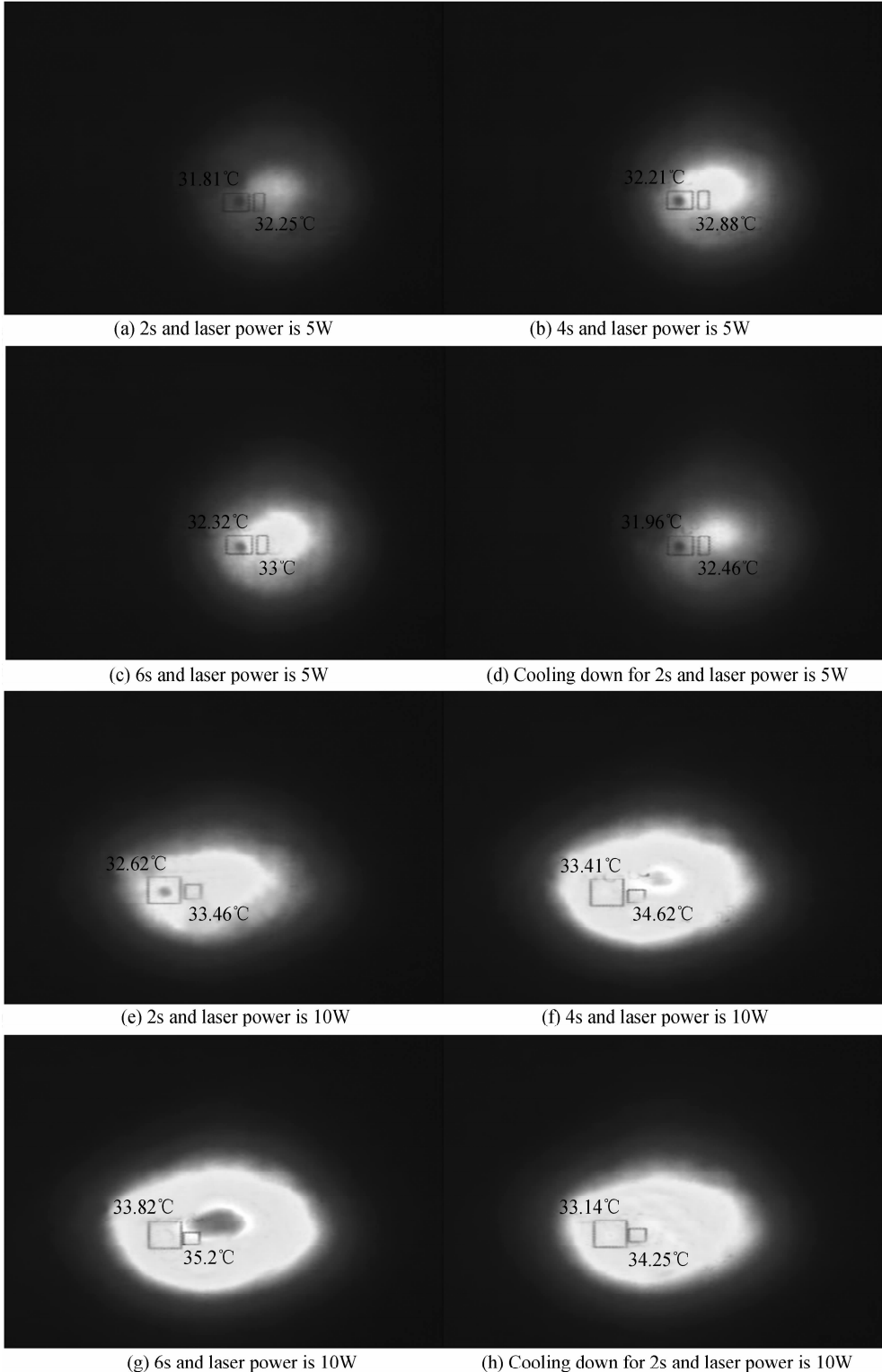


图 8 3~5  $\mu\text{m}$  内沾有微量 TNT 目标热像

Fig. 8 Thermal images of target with TNT in 3~5  $\mu\text{m}$

## 4 结论

本文仿真分析了激光辐照沾有爆炸物目标表面真实温度变化特点,其次利用目标表面真实温度分别计算得出在 8~14  $\mu\text{m}$  和 3~5  $\mu\text{m}$  波段内相应辐射温度变化特性,最后结合实验现象比较分析,得到以下结论:

1) 在 10.6  $\mu\text{m}$  激光照射过程中,8~14  $\mu\text{m}$  波段内目标的辐射温度主要由目标自身辐射和对激光的反射共同影响,而在冷却过程中激光停止照射,对激光的反射消失,从而目标的自身辐射等因素起到主导作用.在 3~5  $\mu\text{m}$  波段内,无论在照射过程还是冷却过程中,都不存在反射因素的作用,从而使得两波段探测所得的实验结果存在明显差异.

2) 对 TNT、基底在照射和冷却过程的温度变化研究中,表面真实温度转换为相应波段内的辐射温度十分重要.

3) 实验探测表明,在 8~14  $\mu\text{m}$  和 3~5  $\mu\text{m}$  波段内沾有微量 TNT 区域的辐射温度与其周围区域的辐射温度具有明显差异,由于不同的照射阶段和条件使得结果有所不同,从而为微量爆炸物的初步判断提供了一定的理论依据.

此外,可对不同种类爆炸物(如:RDX、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 等)沾染常见的材质基底(如:布料、塑料、纸板等)时的情况进行进一步探测研究,通过大量实验研究建立相关数据库,为设备的实用性探测提供有力依据.

### 参考文献

- [1] TANG Qian-jin, 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] CHU Feng-hong. 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**(2): 020401.
- [3] WANG Fang. Research on explosives detection system [D]. Xi'an: Xi'an technological university, 2013.  
王芳. 爆炸物探测系统研究[D]. 西安:西安工业大学, 2013.

- [4] GOYAL A K, SPENCER M, KELLY M, *et al.* Active infrared multispectral imaging of chemicals on surfaces [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2011, **8018**:80180N.
- [5] GOTTFRIED J L, DE LUCIA F C, MUNSON C A, *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] ALI E M A, EDWARDS H G M, SCOWEN L J. In-situ detection of single particles of explosive on clothing with confocal Raman microscopy [J]. *Talanta*, 2009, **78**(3):1201-1203.
- [7] PAPANTONAKIS M R, KENDZIORA C, FURSTENBERG R, *et al.* Stand-off detection of trace explosives by infrared photothermal imaging [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2009, **730418**:1-9.
- [8] KENDZIORA C A, FURSTENBERG R, PAPANTONAKIS M, *et al.* Advances in stand-off detection of trace explosives by infrared photo-thermal imaging [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010, **76641J**:1-12.
- [9] CHANCE C J, MICHAEL A S, LAWRENCE S M, *et al.* Standoff detection of high explosive materials at 50m meters in ambient light conditions using a small Raman instrument [J]. *Applied Spectroscopy*, 2005, **59**(6):769-775.
- [10] PACHECO-LONDONO L C, ORTIZ-RIVERA W, PRIMERA-PEDROZO O M, *et al.* Vibrational spectroscopy standoff detection of explosives [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, **395**:323-335.
- [11] MUKHERJEE A, PORTEN S V, PATEL C N. Standoff detection of explosive substances at distances of up to 150m [J]. *Applied Optical*, 2010, **49**(11):2072-2078.
- [12] SKVORTSOV L A, MAKSIMOV E M. Application of laser photothermal spectroscopy for standoff detection of trace explosive residues on surfaces [J]. *Quantum Electronics*, 2010, **40**(7):565-578.
- [13] BLAKE T A, F. KELLY J, B. GALLAGHER N, *et al.* Passive standoff detection of RDX residues on metal surfaces via infrared hyperspectral imaging [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, **395**:337-348.
- [14] ZHANG J Z, SHEN Y G, ZHANG X X. A dynamic photothermal of carbon dioxide laser tissue ablation [J]. *Laser in Medical Science*, 2009, **24**:329-338.
- [15] WANG Xiao-hua. Study of temperature distribution of the glass surface irradiated by  $\text{CO}_2$  laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.  
王小华.  $\text{CO}_2$  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.