

AP/HTPB 复合底排推进剂激光点火燃烧特性

张领科¹ 赵 威² 吴立志³

¹ 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094
² 中国航天科工第六研究院 41 所, 内蒙古 呼和浩特 010010
³ 南京理工大学应用化学系, 江苏 南京 210094

摘要 基于实验研究高氯酸铵与端羟基聚丁二烯(AP/HTPB)复合推进剂的点火燃烧性能,有助于揭示燃烧一致性机理,进而改进燃烧特性,提高底排增程弹射击效能。激光具有能量可调与高输出稳定性的优点,是最佳的含能材料点火燃烧实验的能量源。利用大功率固体激光系统,并借助高速录像系统,研究了 AP/HTPB 复合底排推进剂试样的点火延迟时间,点火延迟时间随激光强度的增加先显著缩短,继而趋于平缓;基于试样燃烧序列图像及图像处理技术,计算出了复合推进剂的燃速约为 3.41 mm/s。基于含能材料一维激光点火模型,对试样的点火燃烧进行数值模拟,点火延迟时间的计算结果与实验情况比较吻合,并得到了激光作用的推进剂表面温度随时间及激光强度的变化历程。

关键词 激光器;激光点火;AP/HTPB 复合推进剂;点火燃烧;数值模拟

中图分类号 TJ412 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0803005

Ignition and Combustion Characteristics of AP/HTPB Composite Propellant by Laser

Zhang Lingke¹ Zhao Wei² Wu Lizhi³

¹ School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
² 41th Branch, 6th Research Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China
³ Department of Applied Chemistry, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract It is contributed to reveal the combustion consistent mechanism of ammonium perchorate and hydroxyl-terminated polybutadiene (AP/HTPB) composite propellant by studying its characteristics of ignition and combustion based on experiment. The firing efficiency of base bleed projectile will increase by improving combustion characteristic. Laser has the advantages of adjustable energy and high output stability, so it is the best energy source for energetic materials ignition and combustion test. The ignition delay time of AP/HTPB composite propellant samples is researched by using high power solid-state laser and high speed video system. The ignition delay time is dramatically shortened with laser intensity increasing and then tends to be gentle. The combustion speed is calculated as 3.41 mm/s based on combustion ordinal images and image processing technology. Numerical simulations of ignition and combustion of the test samples are conducted by building the one-dimensional laser ignition model for energetic materials. The calculated results of ignition delay time are in accordance with the test greatly, and the temperature variation with time and intensity is obtained.

Key words lasers; laser ignition; AP/HTPB composite propellant; ignition and combustion; numerical simulation

OCIS codes 000.3110; 140.6810; 350.5340

收稿日期: 2013-01-17; 收到修改稿日期: 2013-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(51106075)

作者简介: 张领科(1978—),男,副研究员,主要从事现代火炮高效发射技术以及含能材料稳燃控制技术等方面的研究。

E-mail: nustzlk@126.com

1 引 言

高氯酸铵(AP)与端羟基聚丁二烯(HTPB)复合固体推进剂广泛应用在火箭、导弹、火箭弹及底部排气弹等战略战术武器系统上^[1]。相比较而言,用于底部排气弹上的 AP/HTPB 复合推进剂通常要求在亚大气压环境下稳定燃烧,且燃速也比较低,约为 2~3 mm/s^[2]。实践表明,底部排气弹相对于常规弹丸的主要缺点是射程散布比较大;影响底部排气弹射程散布偏大的一个重要的因素是弹丸出膛口后的二次点火时间延迟不一致,即点火延迟时间中间误差较大^[3-4]。为此,如何进一步改善底部排气弹射程散布,提高底部排气弹二次点火延迟时间的一致性是当前国内外研究的一项重要课题。研究含能材料的点火特性通常采用的点火方式有电热丝点火、炙热气流点火、半导体桥点火以及激光点火等^[5-7]。激光具有输出能量高且可调、点火时间可控制、无干扰等特点,逐渐成为深入地研究固体推进剂点火性能的一种新的可靠手段,特别是高功率激光器的出现,使激光点火技术应用于固体推进剂点火性能研究成为新的研究热点^[8-10]。

本文实验研究了 AP/HTPB 复合底排推进剂的激光点火燃烧特性,得出了点火延迟时间、燃速、推进剂表面温度等重要参量的规律。

2 复合底排推进剂激光点火实验

2.1 实验样品

本实验采用某制式 155 mm 底排装置配备 AP/HTPB 复合推进剂,通过切割打磨的方式制成 3 mm×3 mm×20 mm 的试样,如图 1 所示。研究表明,AP 粒度分布对 AP/HTPB 复合推进剂的点火与燃烧有着显著的影响^[11]。为了今后的对比研究,对试样进行了切片与电镜扫描,图 2 为切片试样的扫描电子显微镜(SEM)图像;利用图像处理技术与手动边界标示方法对试样 SEM 图像进行 AP 颗



图 1 底排推进剂实验样品

Fig. 1 Test samples of base bleed propellant

粒边界的标示,如图 3 所示。基于颗粒等效直径理论,对试样中的 AP 颗粒粒径进行了统计分析,如图 4 所示,不难发现试样中 AP 颗粒为两级配比,平均当量直径分别为 103 μm 与 181 μm。

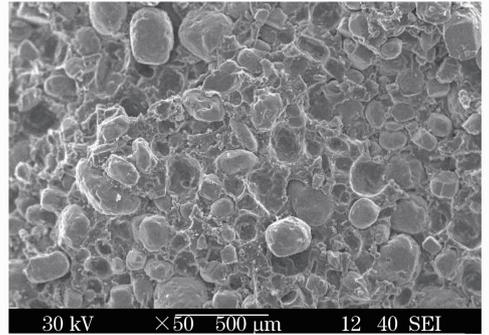


图 2 样品 SEM 图

Fig. 2 SEM picture of test sample

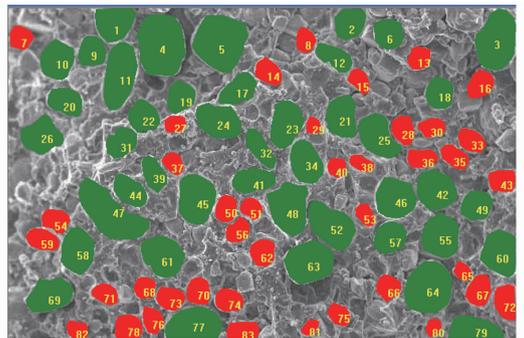


图 3 SEM 图像的 AP 颗粒标示

Fig. 3 AP particles marked on SEM picture

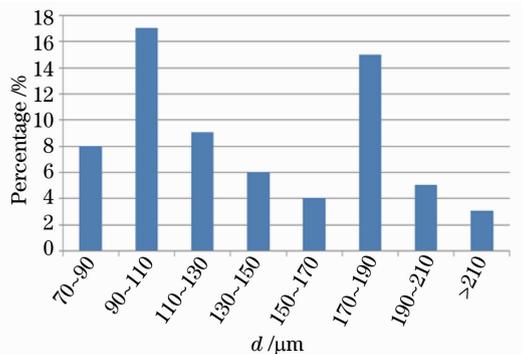


图 4 AP 颗粒的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of AP particles

2.2 实验系统与点火燃烧实验

实验系统主要包括 SYNRAD_F201 型二氧化碳激光器(200 W)、能量计、NEC 高速录像系统、同步触发系统、多通道数据采集器、示波器、笔记本、试样支架等,如图 5 所示。将激光器触发开关、高速录像触发开关与同步触发系统及多通道数据采集器连接,触发动作由安装在电脑上的控制系统执行,激光器工作过程由示波器显示,复合底排推进剂点火燃

烧过程由高速录像系统记录。

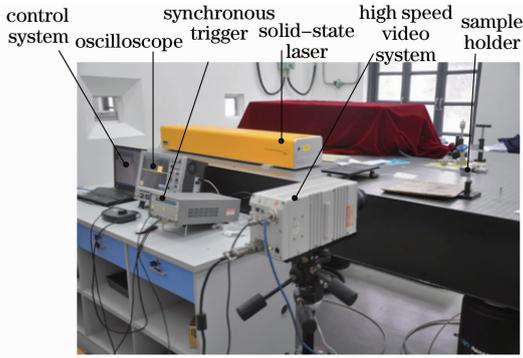


图5 激光点火实验系统

Fig. 5 Experimental system for laser ignition

实验准备:1) 将实验样品放在温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内保温 24 h ; 2) 调节激光器光斑直径为 3.5 mm , 调整支架位置, 使得光斑中心落在支架夹钳的中心位置, 固定激光器与支架的位置; 3) 将高速录像的采样频率设为 500 frame/s , 镜头中心对准支架夹钳, 并使得实验样品在支架上完全成像在取景框内; 4) 设置电脑触发系统中的激光器触发信号比高速录像系统的触发信号延迟 3 s ; 5) 调节室内空调, 使得实验环境温度维持在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 并处于一个无风的状态; 6) 分别设定激光器的输出能量百分比为 2.5% 、 3.0% 、 4.0% 、 6.0% 与 8.0% 5 个等级, 用能量计对每一个级别标定 3 次并求其平均值, 得到激光功率 Φ 分别为 2.214 、 4.03 、 7.03 、 14.99 、 22.61 W , 作为实验时的 5 个激光强度等级。

实验方法:1) 将样品安装在支架的夹钳上, 检查样品端面是否落在激光器光斑内与高速录像系

统取景框内, 若有异常, 进行微调以满足实验要求; 2) 点击控制系统的触发按钮, 启动高速录像系统, 3 s 后启动激光器, 直至复合底排推进剂样品点火燃烧, 存贮燃烧序列图像; 3) 在不同激光强度等级下, 分别对试样进行重复实验; 最后, 采用图像处理软件计算出不同工况下的点火延迟时间 t_d 与实验的燃速 r 。

2.3 实验结果与计算分析

实验共进行 10 次, 针对不同激光强度, 分别做了 1~3 次实验。激光强度为 6% 时的典型推进剂燃烧序列如图 6 所示, 实验数据处理结果如表 1 所示。底排推进剂着火起始点依据图像序列中有发光点确定, 燃烧结束点依据有微弱火光时确定, 当然, 这种确定存在主观的判断误差。众所周知, 若在推进剂被点燃后激光穿过火焰依然作用推进剂燃烧表面, 将会加剧推进剂表面 AP 颗粒的燃烧, 从而导致 AP 颗粒的燃烧速度比正常条件下的燃烧速度偏大。为此, 实验时一旦观察到推进剂表面着火, 待激光作用时间 t_w 后, 开始稳定燃烧, 就马上关掉激光器, 维持自身稳定燃烧, 直至燃烧结束。燃速的计算方法: 首先, 将支架圆柱部的直径 D 作为标准参照物, 然后再任取激光停止工作后的 2 个时刻 t_1 和 t_2 的照片, 利用图像处理软件分别测得标准参照物的图上尺寸 D' 以及 2 张图片中还没有燃烧的推进剂的图上长度, 分别记作 l_1 和 l_2 , 假设推进剂在这个时间段的实际燃烧长度为 s , 其中 $s = [(l_1 - l_2) \cdot D]/D'$, 则推进剂的燃速 $r = s/(t_2 - t_1)$ 。每次从燃烧序列中抽取 10 组照片, 燃速取多组均值。

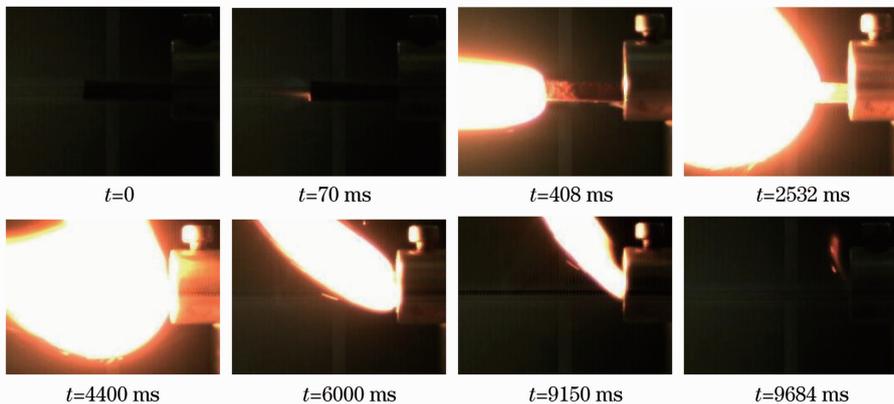


图6 AP/HTPB 底排复合推进剂激光点火燃烧序列

Fig. 6 Laser ignition and combustion images for AP/HTPB base bleed composite propellant

由表 1 可以计算出, 该复合底排推进剂的燃速 $r=3.41\text{ mm/s}$, 五种工况下的平均点火延迟时间 t_d 分别为 1872 、 447 、 271 、 64 、 41 ms 。由此可见, 1) 入射

光的能量强度对点火延迟时间影响明显, 能量强度越高其点火延迟时间越短; 2) 在较低的激光能量强度范围内, 点火延迟时间随激光强度变化很剧烈, 激光

强度达到一定值后,点火延迟时间变化不大,继而随着能量的增加,点火延迟时间几乎没有变化;3) 对于同样的入射光强度,推进剂的点火延迟时间也有差

异,如 4.03 W 时的 2 个点火延迟时间相差有 7%,而 22.61 W 时的差异甚至达到 40%,主要是由激光作用位置、端面粗糙度以及点火位置点确认误差引起的。

表 1 底排复合推进剂点火燃烧实验结果

Table 1 Test results of ignition and combustion for base bleed composite propellant

| No. | Sample size /mm | Laser power Φ /W | Working time t_w /ms | Ignition delay time t_d /ms | Combustion time t_r /ms | Burning rate r /(mm/s) |
|-----|-----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 3.1×3.4×20.5 | 2.21 | 2420 | 1872 | 11610 | 3.40 |
| 2 | 2.8×3.5×20.9 | 4.03 | 792 | 432 | 11920 | 3.35 |
| 3 | 3.4×2.5×21.3 | | 1060 | 462 | 12640 | |
| 4 | 2.8×3.3×20.1 | 7.03 | 638 | 268 | 10500 | 3.35 |
| 5 | 3.1×3.3×20.4 | | 840 | 274 | 11280 | |
| 6 | 2.8×3.4×20.4 | 14.99 | 715 | 66 | 10590 | 3.50 |
| 7 | 2.9×3.1×20.4 | | 527 | 62 | 96260 | |
| 8 | 2.8×3.1×19.9 | 22.61 | 541 | 42 | 10470 | 3.45 |
| 9 | 2.9×3.5×20.5 | | 474 | 34 | 11420 | |
| 10 | 3.0×3.0×21.1 | | 490 | 48 | 11860 | |

3 复合底排推进剂激光点火数值模拟

3.1 激光点火数学模型

激光点火机理可被看作是热点火机理。本文含能材料激光点火一维模型^[12-14]为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho Q A \exp(-E/RT) + (1-f)\beta I_0 \exp(-\beta x), \quad (1)$$

式中 ρ 为推进剂密度, c 为比热容, λ 为导热系数, Q 为推进剂的化学反应热, A 为频率因子, E 为推进剂的活化能, R 为通用气体常数, f 为推进剂的光反射率, β 为推进剂的光吸收系数, I_0 为激光的强度。

考虑(1)式采用向前差分的格式进行离散,设时间步长为 Δt ,空间步长为 Δx ,则数学离散方程为

$$\rho c \frac{T(i, j+1) - T(i, j)}{\Delta t} = \lambda \frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{\Delta x^2} + \rho Q A \exp(-E/RT) + (1-f)\beta I_0 \exp(-\beta x). \quad (2)$$

定解条件为

$$\left. \begin{cases} T(x, t) \Big|_{t=0} = T_0 & \text{initial conditions} \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = (1-f)I_0 + \Delta x \rho Q A \exp(-E/RT) - (1-f)\beta I_0 \exp(-\beta \Delta x) \end{cases} \right\} \text{boundary conditions.} \quad (3)$$

3.2 数值计算与分析

某 AP/HTPB 复合底排推进剂的热物性参数为 $\rho=1690 \text{ kg/m}^3$, $c=1200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, $\lambda=0.23 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $Q=2.154 \times 10^9 \text{ J/kg}$, $A=2 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, $E=2.2 \times 10^5 \text{ J/mol}$, $f=0.16$, $\beta=1.4 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ 。含能材料点火判据比较多,这里采用文献[14]中的临界温度作为点火判据条件,即认为当药柱表面温度达到 750 °C 时(此值为 AP 颗粒分解加速温度),认为

推进剂点火并可稳定燃烧。初始温度取 300 K,点火延迟时间的数值模拟和实验结果对比如图 7 所示。不同激光强度下推进剂表面温度随时间的变化关系如图 8 所示。

由图 7 可以看出,理论计算与实验结果吻合较好,最大相对误差约为 6%。其原因主要有几点:1) 热物性参数随温度和时间变化而变化,如比热 c 与导热系数 λ ,这里作为常数存在误差;2) 由于本样品

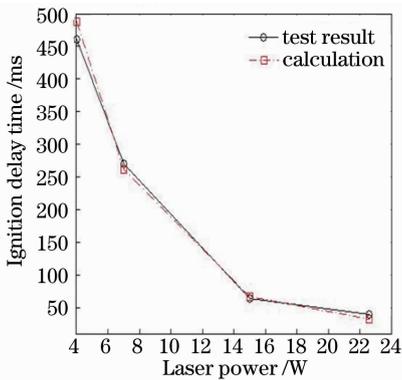


图 7 点火延迟时间与激光功率的关系

Fig. 7 Relationship between ignition delay time and laser power

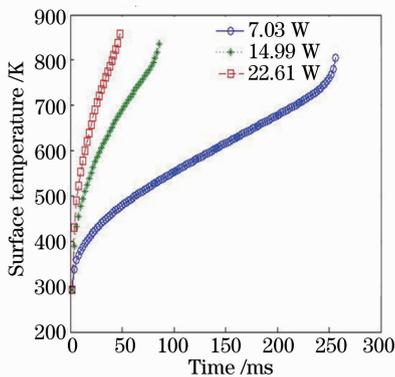


图 8 不同激光功率表面温度与时间的关系

Fig. 8 Surface temperature versus time under different laser powers

化学反应参数采用的是 AP/HTPB 复合推进剂的基本数据,与实际情况可能略有不同;3)由于模型的局限性,如没有考虑激光光斑直径对推进剂的影响;4)推进剂的点火和燃烧都是在自然环境中进行的,而所建立的模型是忽略了推进剂和自然环境的对流和辐射换热的。由图 8 中可以看出,随着入射激光能量的增大,推进剂表面温度上升加快,激光能量大小影响点火延迟时间。从激光作用起,推进剂表面温度从环境温度开始增长,开始时与外界温差较小,所以增长率较大。随着推进剂温度的升高,与外界气体的温差变大,故热损失率变大,导致表层温度增长率变小。而当温度达到某个定值时,增长率达到最小值。随后,推进剂由于化学反应不断释放热量,放热速率呈指数增长,使推进剂表面迅速达到点火温度。

4 结 论

采用激光作为热源,通过调整不同的能量级别,对 AP/HTPB 底排复合推进剂的点火燃烧进行了实验研究,发现点火延迟时间随激光强度的增加迅

速缩短,达到一定程度后趋于平缓;并得到了点火延迟时间与激光强度的定量关系。借助高速录像系统与图像处理软件,得到了试样的燃速约为 3.41 mm/s。基于一维激光点火模型计算了点火延迟时间及作用表面温度的变化趋势,点火延迟时间数值计算结果与实验吻合较好。

参 考 文 献

- Zhao Yu, Bao Futing, Hu Zhiwei, *et al.*. A combustion model for AP/HTPB composite propellant using detailed chemical kinetics [J]. *J Solid Rocket Technology*, 2012, 35(3): 311-318.
- 赵瑜, 鲍福廷, 胡志伟, 等. AP/HTPB 复合推进剂燃烧的详细化学动力学建模[J]. *固体火箭技术*, 2012, 35(3): 311-318.
- Guo Xifu. Exterior Ballistics of Base Bleed Projectile [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995.
- 郭锡福. 底部排气弹外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- Zhang Yanqing, Zhao Zihua. Igniting process of base bleed unit influencing on range dispersion of bleed projectile[J]. *J Ballistics*, 1994, 6(1): 53-56.
- 张炎清, 赵子华. 底部排气弹底排装置点火过程对距离散布的影响[J]. *弹道学报*, 1994, 6(1): 53-56.
- Zhang Lingke, Zhou Yanhuang, Yu Yonggang. Research on range dispersion of base bleed projectile caused by inconsistent working characteristics of base bleed unit [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 442-446.
- 张领科, 周彦煌, 余永刚. 底排装置工作不一致性对射程散布影响的研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(4): 442-446.
- Zhang Xiaobing, Yuan Yaxiong, Ren Ruhai. Experimental and theoretical study on the performance of laser ignition of energetic materials[J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(1): 23-26.
- 张小兵, 袁亚雄, 任如海. 含能材料激光点火性能研究[J]. *兵工学报*, 2002, 23(1): 23-26.
- Xu Jiao, Wu Lizhi, Shen Ruiqi, *et al.*. Effect of confinement on the capability of laser ignition[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 418-423.
- 徐娇, 吴立志, 沈瑞琪, 等. 边界条件对激光性能的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 418-423.
- Yan Nan, Zhang Huiqing, Hua Guang, *et al.*. The effect of pressing pressure and hermetic intensity on the laser diode ignition characteristic of B/KNO₃ [J]. *Applied Laser*, 2001, 21(6): 389-391.
- 严楠, 张慧卿, 华光, 等. 压药压力及密封性对 B/KNO₃ 激光点火特性的影响[J]. *应用激光*, 2001, 21(6): 389-391.
- Zhao Xinghai, Gao Yang, Cheng Yongsheng. A summary of laser ignition technology[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 307-313.
- 赵兴海, 高杨, 程永生. 激光点火技术综述[J]. *激光技术*, 2007, 31(3): 307-313.
- Hao Haixia, Nan Baojiang, An Ting, *et al.*. Laser ignition characteristics of CL-20 composite modified double-base propellants[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0502009.
- 郝海霞, 南宝江, 安亭, 等. 含 CL-20 改性双基推进剂激光点火特性[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0502009.
- Li Guan, Jiang Jie, Zhang Qian, *et al.*. High sensitive detection of trace Hg(II) in natural water with laser ignition assisted spark-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0715002.
- 李关, 姜杰, 张谦, 等. 水环境中痕量汞的激光点火辅助火花诱导击穿光谱高灵敏检测[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0715002.
- Zhang Honglin, Liu Baomin, Jiao Zongping, *et al.*. Effect of particle size of AP on burning rate of base bleed charge[J]. *Chinese J Explosives & Propellants*, 2010, 33(4): 66-69.
- 张洪林, 刘宝民, 焦宗平, 等. AP 粒度对底排药燃速的影响[J].

火炸药学报, 2010, 33(4): 66-69.
 12 Hu Yan, Shen Ruiqi, Ye Yinghua. Effect of step on one-dimensional simulation of laser ignition[J]. Applied Laser, 2001, 21(1): 35-37.
 胡 艳, 沈瑞琪, 叶迎华. 步长对激光点火一维模型的影响[J]. 应用激光, 2001, 21(1): 35-37.
 13 Hu Yan, Shen Ruiqi, Ye Yinghua. One dimension finite difference simulation of laser ignition[J]. Laser Technology, 2001, 25(5): 331-334.
 胡 艳, 沈瑞琪, 叶迎华. 激光点火过程的一维有限差分模拟

[J]. 激光技术, 2001, 25(5): 331-334.
 14 Zhang Lingke, Zhou Yanhuang, Zhao Wei, et al.. Numerical analysis on effect of high temperature gas in bore on ignition process of base bleed propellant[J]. J Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 34(6): 770-774.
 张领科, 周彦煌, 赵 威, 等. 膛内高温燃气对底排药剂点火过程影响的数值分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 770-774.

栏目编辑: 宋梅梅

基于飞秒激光技术的毫米波天线近场测量

随着超快激光技术的发展, 基于光电采样原理的超快激光电磁场测量技术也逐渐成为研究的热点。本课题组设计并制作了一款全介质型电磁场探针, 并结合光纤飞秒激光器搭建了一套微波天线的近场测量系统, 实现了 100 GHz 附近频率的天线近

场测量, 测量结果与仿真结果吻合的很好。

图 1 是实验装置示意图, 该系统基于飞秒激光的超快光电取样原理, 激光源为主动锁模光纤飞秒激光器, 脉宽为 70 fs, 重复频率为 80 MHz, 输出平均功率为 80 mW, 中心波长为 1550 nm。

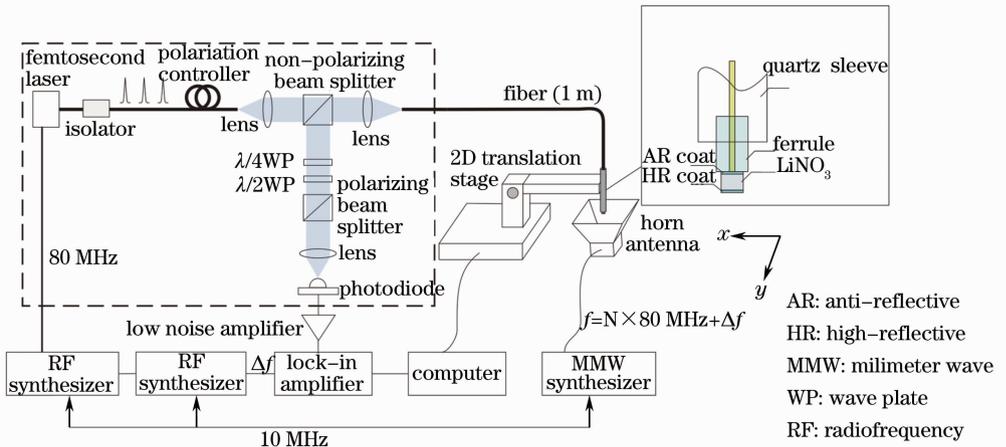


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

实验中测量的天线是具有标准增益的角锥喇叭天线, 工作频率在 73.8~112 GHz。馈源通过 WR10 矩形波导向角锥喇叭馈入毫米波信号并辐射出去。馈源的输出功率为 7 dBm, 频率为 100.01 GHz。角锥喇叭的口径面为 26.92 mm×18.27 mm, 测量平面距离口径面为 1 mm。电场极化方向沿图中 x 方向, 整个测量过程在非暗室环境下进行。

针的存在对近场区的分布影响几乎可以忽略。这种基于光学技术的毫米波测量系统可以作为一种非侵入式的测试手段应用在毫米波天线的近场测量领域。

图 2(a) 为实测结果, 图 2(b) 为采用 CST Microwave Studio 软件的仿真结果。实验中空间采样间隔为 $50\mu\text{m}$, 实验与仿真的结果吻合的很好, 电磁场分布特征非常清晰, 没有发生明显的畸变, 证明探

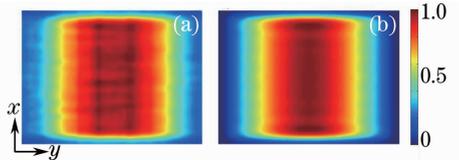


图 2 归一化电场的近场分布。(a) 测量结果; (b) 仿真结果
 Fig.2 Normalized near-field distribution of electric field.

(a) Experimental result; (b) simulation result

王昌雷¹ 田晓光¹ 武 帅¹ 刘博文² 胡明列² 栗岩锋² 柴 路² 王清月²

(¹ 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 微波光子学研究中心, 安徽 合肥 230088)
² 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072

收稿日期: 2013-05-10; 收到修改稿日期: 2013-06-14

* E-mail: changlei.wang@qq.com