

文章编号: 1006-9941(2014)04-0525-04

# 激光火工品单光纤光路检测技术

祝明水, 邢宗仁, 蒋明, 蒋小华

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对目前激光火工品的光路检测问题,在激光火工品与药剂接触的光纤端面蒸镀能透过点火激光而反射检测激光的短波通滤光膜片,利用光路环行器,建立了一种单光纤激光火工品光路检测系统。研究表明,在基本不改变原激光火工品结构的情况下,该单光纤光路检测系统能够实现激光火工品光路连续性检测,光路完整时的检测激光反射电流可以达到 200~300  $\mu\text{A}$ ,高于光路折断时的 30  $\mu\text{A}$ ;检测激光反射电流与点火激光能量传输效率基本成二次函数递增关系,能够反映点火激光能量传输效率的相对大小。

**关键词:** 光学工程;激光火工品;光路检测;单光纤;激光能量传输效率

**中图分类号:** TJ55; O43

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.019

## 1 引言

激光火工品通过光纤实现能量到药剂的传递,避免了药剂与外界的直接电联系,从根本上保证了该类火工品的抗静电、杂散电流等电磁安全性。除此之外,激光火工品还具有发火能量低、发火可靠性高等优点<sup>[1]</sup>。从 20 世纪 90 年代开始,国外将激光火工品列为重点发展项目<sup>[2]</sup>。截止目前,国外已有多种导弹、火箭、弹药等武器系统配备了激光火工品<sup>[3]</sup>。国内激光火工品的研究起步较晚,目前还有一些应用的关键技术未得到有效解决。激光火工品的光路连续性检测就是其一。与电火工品通过测量桥路电阻来判断电路的通畅不同,激光火工品没有任何可直接电测的参量来判断光路的通畅。传统的光功率检测无法实现对激光火工品成品的检测。而传统的光时域反射(OTDR)技术信号微弱,对仪器设备要求较高,检测信号比较复杂,对信号的判读需要较强的专业技巧<sup>[4]</sup>。目前,一些激光火工品采用的双光纤检测技术,也存在信号微弱、结构复杂、药剂受检测激光直接照射等问题<sup>[5]</sup>。针对上述问题,本研究在激光火工品与药剂接触的光纤端面蒸镀能透过点火激光而反射检测激光的短波通滤光膜片<sup>[6]</sup>,利用 OTDR 技术,建立了一种单光纤激光火工品光路检测系统,在有效实现激光火工品光路

连续性检测的同时,还具有基本不改变原激光火工品结构、检测结构简单、激光火工品能量传输效率提高、检测激光对药剂影响较小等优点。

## 2 基本原理

激光火工品单光纤光路检测系统如图 1 所示,主要由检测激光器及其驱动电源、光路环行器、光电二极管及其偏置电源、激光火工品、负载、电流表和示波器等组成。检测时,检测激光器发出特定波长的检测激光,经多模光纤进入光路环行器,再经多模光纤进入激光火工品,检测激光到达激光火工品内短波通滤光膜片后,绝大部分被反射回光路环行器。光路环行器依据法拉第磁光效应,主要由偏振光分束器、法拉第旋光晶体、天然旋光晶体和直角棱镜等组成。激光进入后在磁场作用下发生偏转,偏转反向总是与磁场方向构成右手螺旋关系,能够实现正向传输光和反向传输光的隔离<sup>[5]</sup>。因此,理论上由检测激光器发出的激光只能进入激光火工品,而由激光火工品反射回的检测激光只能进入光电二极管。在偏置电压一定的情况下,光电二极管产生的光电流与反射回的检测激光强度成线性关系。反射进入光电二极管的激光主要由背向瑞利散射和非涅尔反射组成。背向瑞利散射是由小于入射激光波长的光纤材料密度的不均匀、杂质、缺陷等因素引起的,散射的光强与入射波长的四次方成反比,随波长增加,背向瑞利散射迅速减小。光纤的几何缺陷、活接点、冷接点会导致折射率的突变,从而产生非涅尔

收稿日期: 2013-07-23; 修回日期: 2013-10-15

作者简介: 祝明水(1977-),男,副研究员,主要从事燃烧、爆炸以及火工品研究等相关工作研究。e-mail: zhumsilz@163.com

反射<sup>[6]</sup>。背向瑞利散射和菲涅尔反射的光强均与入射光功率成正比,因此在一定程度上提高入射光功率,有利于提高检测信号强度。在整个激光火工品单光纤检测系统中,与药剂接触的光纤端面蒸镀短波通滤光膜片处的菲涅尔反射最强,如果光路通畅,检测激光到达该位置后反射会使光电二极管产生比背向瑞利散射和一般几何缺陷、活接点、冷接点高得多的光电流。因此,光电二极管产生的光电流可近似表示成:

$$I = I_0 + \frac{A \cdot I_1}{A_1} \quad (1)$$

式中,  $I_0$  表示由于背向瑞利散射和一般菲涅尔反射(几何缺陷、活接点、冷接点)产生的光电流,  $\mu\text{A}$ ;  $I_1$  表示与药剂接触的光纤端面蒸镀短波通滤光膜片处的全部通光面积  $A_1$  的菲涅尔反射产生的光电流,  $\mu\text{A}$ ;  $A$  表示与药剂接触的光纤端面蒸镀短波通滤光膜片处产生菲涅尔反射的实际等效面积,其与接插、检测光纤、镀膜情况等有关,极限值为  $A_1, \text{mm}^2$ 。

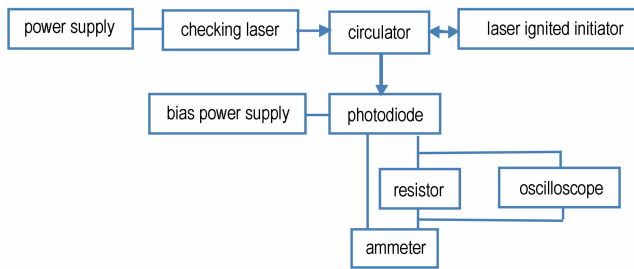


图1 激光火工品单光纤检测系统示意图

Fig.1 Sketch of light path checking system for laser ignited initiator with single optical fiber

式(1)的极限值为  $I_0 + I_1$ ,通过电流表测得的光电流值与该值进行比较,即可对从激光器到激光火工品的光路连接情况和激光传输效率做出判断。另外,通过示波器测量光电二极管负载两端的电压随时间的变化,还可以对光路接续点、光路缺陷等现象进行分析,即传统 OTDR 的功能。

### 3 系统主要参数

#### 3.1 检测激光

为了减小背向瑞利散射和光路对检测激光的吸收损耗,检测激光波长选为 1310 nm。为了保证检测过程激光火工品的安全,检测激光最大功率为 4 ~ 5 mW。

#### 3.2 检测光纤

为了保证与药剂接触的光纤端面蒸镀短波通滤光

膜片处菲涅尔反射的检测激光能够充分进入光电二极管,检测光纤选择与激光火工品内置光纤相同。本研究中为多模光纤,芯径为 105  $\mu\text{m}$ 。

#### 3.3 短波通滤光膜片

短波通滤光膜片蒸镀在光纤端面,膜片反射检测激光功率不低于 95%,透射点火激光功率不低于 90%。

### 4 检测结果与分析

#### 4.1 检测激光反射光电流与点火激光能量传输效率的关系

利用单光纤检测系统和激光能量计分别对激光火工品检测激光反射光电流和点火激光能量传输效率进行了测量,结果如图 2 所示。图 2 中,点火激光能量传输效率是点火激光器连接激光火工品后输出的激光能量与未连接激光火工品输出激光能量之比,反射光电流为检测激光器输出功率 5 mW 时光电二极管的输出电流(下文同)。

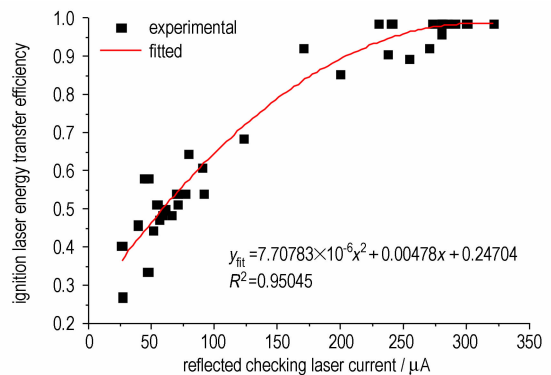


图2 检测激光反射光电流与点火激光能量传输效率的关系

Fig.2 Relationship between reflected checking laser current and ignition laser energy transfer efficiency

由图 2 可见,当反射光电流小于 240  $\mu\text{A}$  时,检测激光反射光电流基本上与点火激光能量传输效率成线性关系;反射光电流大于 240  $\mu\text{A}$  时,能量传输效率接近 1。检测激光反射光电流基本能够反映点火激光能量传输效率的大小。实际应用时,在激光火工品装药前,测得一个最大的检测激光反射电流和点火激光能量传输效率;激光火工品装药后,通过测得的检测激光反射电流与之前测得的光反射电流进行比较,就可以判定激光火工品点火激光能量传输效率是否达到要求,为激光火工品的可靠发火提供保障。

#### 4.2 激光火工品短波通滤光膜层的检测

图 2 中普遍存在点火激光传输效率相同而反射光电流确存在较大差别的情况。这是由于镀膜不均匀,

镀膜光纤表面某些部位存在空洞,这些空洞会导致膜片菲涅尔反射实际等效面积减小,导致检测激光反射光电流相对较小,但这些空洞部位对点火激光透过没有影响,因而仍然可以保持较高的能量传输效率。图3是检测到的镀膜和未镀膜的多个激光火工品的光反射电流,由图3可见能量传输效率相同的镀膜激光火工品和未镀膜激光火工品的检测激光反射光电流差异显著。因此,为了使检测激光反射光电流能够比较准确地反映点火激光的能量传输效率,必须保证激光火工品光纤镀膜有足够的致密度。这对于保证检测过程的安全和减小检测对激光火工品性能的影响也是很重要的。同时,这也说明该光路检测系统结合激光能量计可以对膜层质量进行检查。

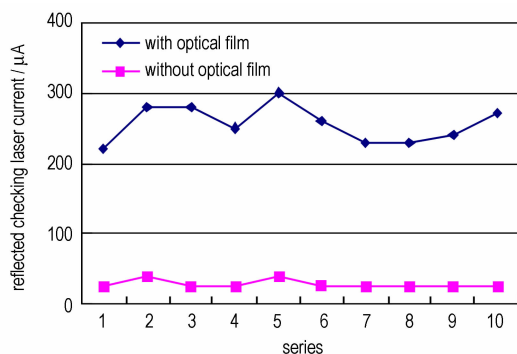


图3 镀膜和未镀膜的激光火工品反射光电流检测结果分布

Fig. 3 Distribution of the reflected checking laser current from initiators with and without optical film

#### 4.3 激光火工品与光纤跳线接插状态的检测

激光火工品与光纤跳线进行接插,除了无隙正对的理想状态外,还存在图4所示的间隙、对偏等状态,对检测激光反射光电流和点火激光能量传输效率产生影响。这主要是由于耦合进光纤的激光能量减小导致等。假设光纤直径为 $D$ ,光束发散角为 $\alpha$ ,紧密接触时的反射光电流为 $I_2$ ,点火激光能量传输效率为 $\beta_0$ 。则理论上,检测光纤与激光火工品有间隙且间距为 $L$ ,检测激光反射光电流为 $I_2 / (1 + 2L \operatorname{tg}(\alpha/2) / D)^4$ ,点火激光能量传输效率为 $\beta_0 / (1 + 2L \operatorname{tg}(\alpha/2) / D)^2$ ,检测激光反射光电流减小的幅值要比点火激光能量传输效率减小的幅值大得多。同样,当检测光纤和激光火工品内光纤对偏时,假设重叠直径为 $d$ ,则检测激光反射光电流为 $I_2 d^4$ ,点火激光能量传输效率为 $\beta_0 d^4 / D^2$ 。当然实际情况可能既有间隙又存在对偏,对检测激光反射光电流和点火激光能量传输效率的影响就更加复杂。但无论如何,都会引起检测激光反射光电流和点火激光能量传输效率的下降,且反射光电流下降

比点火激光能量传输效率的下降要快。因为,根据间隙和对偏状态的分析,可以推出光反射电流 $I$ 与点火激光能量传输效率 $\beta$ 呈二次函数关系,即 $I=f(\beta^2)$ 。

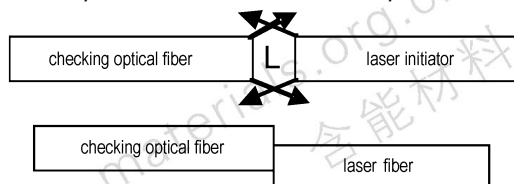


图4 激光火工品与光纤跳线插接状态示意图

Fig. 4 Sketch of linking states between initiator and optical linker

图5是随机抽取的两个镀膜激光火工品样品的光纤跳线与激光火工品不同插接状态时点火激光能量传输效率与检测激光反射光电流之间的关系。由图5可见,光纤跳线端面与激光火工品光纤紧密接触和间隙接触的检测激光反射光电流差异显著,相应地其能量传输效率的差异也很显著,并且能量传输效率与光反射电流呈二次函数关系,与上文分析结果一致。表明单光纤光路检测系统的检测结果能够反映光纤跳线与激光火工品的插接状态。样品1和样品2呈现的二次函数关系不一致,是由样品自身镀膜、光纤等状态的差异导致的。

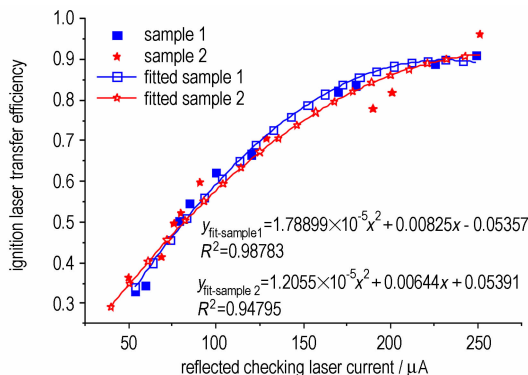


图5 光纤跳线与激光火工品不同插接状态时能量传输效率和光反射电流之间的关系

Fig. 5 Relationship between ignition laser energy transfer efficiency and reflected checking laser current at various linking states between initiator and optical linker

#### 4.4 光纤断路状态的检测

光纤跳线光纤人为折断后与激光火工品连接,用单光纤光路检测系统进行检测,测得的反射光电流仅为 $14 \mu\text{A}$ ,远小于未折断前正常插接的 $200 \mu\text{A}$ 以上。说明单光纤光路检测系统能够对短波通滤光膜层与检测激光器之间光纤的断裂进行检测。这主要是因为光纤断裂后,断面处全反射状态被破坏,检测激光能量成

为辐射能量散失到环境中,不能到达膜层。系统测得的微弱光电流由断面以及接续点的菲涅尔反射和背向瑞利散射产生。

#### 4.5 系统的光时域检测

将系统连接示波器,激光火工品单光纤光路检测系统就具有了传统的光时域检测功能,可以对光纤质量、光路缺陷、光路节点等细节情况进行分析。图6是系统测得的光时域信号。图中出现的多个突变与光路检测系统采用的多级放大系统延迟有关,对结果分析没有太大的影响,本研究主要以系统输出基本稳定后的状态对激光火工品光路状态进行分析。由图6可见,加载激光镀膜火工品后,测得电压水平明显高于空载时的电压水平,因此从测得的电压大小,也可以对点火激光的能量传输效率做出判断。由于对激光火工品的检测主要涉及能量传输效率,对于信号模式、保真等没有特殊的要求,实际上用不着对细微的光纤质量、光路缺陷等差别进行分析,使用光电流作为检测参数就足够了。

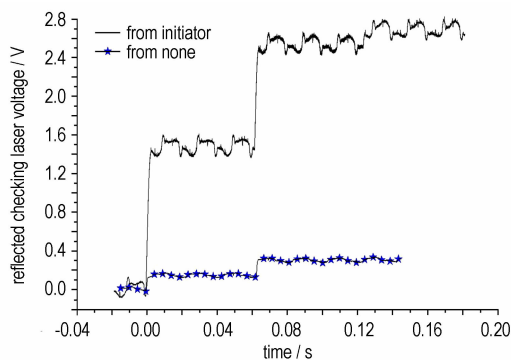


图6 系统测得的时域信号

Fig.6 OTDR signal of system

## 5 结论

建立单光纤光路检测系统,以光路环形器和短波通滤光膜层为基础,在基本不改变激光火工品结构的

情况下,以反射光电流为指标,能够实现对激光火工品点火激光能量效率、光路接插状态、膜层质量、光纤状态等进行检测,光路完整时的检测激光反射电流可以达到 200~300  $\mu\text{A}$ ,高于光路折断 30  $\mu\text{A}$ ,能够清楚地反映光路的通断情况;检测激光反射电流与点火激光能量传输效率基本成二次函数递增关系,能够反映点火激光能量传输效率的相对大小,基本解决了激光火工品光路连续性的检测问题,对于确保激光火工品的可靠发火具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Roman N B M. Laser Ignition of Explosives and its Application in a Laser based Ignition System[C]//Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 1991.
- [2] 张小英. 激光单点点火系统技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006. ZHANG Xiao-ying. Studies on Laser Ignition System with Single Optical Fiber[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [3] 赵兴海, 高杨, 程永生. 激光点火技术综述[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 306-310. ZHAO Xing-hai, GAO Yang, CHENG Yong-shen. A summary of laser ignition technology[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 306-310.
- [4] 杨育卿, 王其新. 光路检测原理及注意事项[J]. 电信快报, 2002(4): 18-19. YANG Yu-qing, WANG Ji-xin. The light path detection principle and the matters needing attention[J]. *Telecom Letters*, 2002(4): 18-19.
- [5] 唐璜, 冯阳, 赵栋, 等. 激光点火检测系统的研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(2): 46-47. TANG Huan, FENG Yang, ZHAO Dong, et al. The research on laser ignition detection system[J]. *Laser Journal*, 2010, 31(2): 46-47.
- [6] 唐晋发, 顾陪夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 11. TANG Jin-fa, GU Pei-fu, LIU Xu, et al. Modern optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2006: 11.
- [7] 王辉. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 1. WANG Hui. Optical Fiber Communication[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 1.
- [8] 石顺祥, 孙艳玲, 马琳, 等. 光纤技术及应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 9. SHI Shun-xiang, SUN Yan-ling, MA Lin, et al. Optical fiber technology and application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009: 9.

## Light Path Checking Technology of Laser Ignited Initiators with Single Optical Fiber

ZHU Ming-shui, XING Zhong-ren, JIANG Ming, JIANG Xiao-hua

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A checking system with single optical fiber was established, which was mainly constituted of a light circulator and a optical film reflecting checking laser and transferring ignition laser between initiators and optical linker. Results show that the system can check the light path continuity of laser ignited initiators without changing the structure of laser ignited initiator. The reflected checking laser current is up to 200-300  $\mu\text{A}$  when light path is perfectly continuous, which is only 30  $\mu\text{A}$  when the light path is not continuous, and the laser energy transfer efficiency is approximatively quadratic function with the reflected checking laser current.

**Key words:** optical engineering; laser ignited initiators; light path checking; single optical fiber; laser energy transfer efficiency

**CLC number:** TJ55; O43

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.019