

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.01.007

光纤布喇格光栅的炸药熔铸温度监测研究^{*}

王小燕^{①②} 闻 强^{①②} 张 陈^{①②} 袁俊明^③ 赵 辉^{①②} 王 高^{①②}

①中北大学电子测试技术国家重点实验室(山西太原,030051)

②中北大学信息与通信工程学院(山西太原,030051)

③中北大学环境与安全工程系(山西太原,030051)

[摘 要] 为了实现对炸药熔铸过程的温度监测,利用多通道解调仪对炸药熔铸过程温度场进行监测,在炸药熔铸测温的过程中采用了经过特殊封装处理过的光栅传感器。简单介绍了光栅的传感原理、布喇格光栅数据解调仪的原理、实验所用光纤布喇格光栅的封装工艺。将获取的温度数据经 Matlab 和 Origin 处理并绘制时间—温度曲线,发现炸药熔铸相变发生的瞬间,温度曲线发生较大的变化。研究结果表明:炸药在熔铸过程中会释放出潜热,在释放潜热时炸药的温度会从 88 ℃ 上升到 90 ℃,特殊封装后的光纤布喇格光栅传感器能很好地对炸药熔铸过程进行温度测量。

[关键词] 光纤布喇格光栅;炸药熔铸;物态变化;温度监测

[分类号] TP212.1+1;TQ560.7

引言

国内外目前普遍使用的一种炸药装药技术是炸药熔铸成型,炸药熔铸成型技术主要应用于以 TNT 作为载体的液相混合炸药或单质 TNT 炸药^[1]。在熔铸炸药的同时伴随着许多物理变化,物态变化是其中一个非常重要的变化,即向模具中注入熔融态的炸药,随着炸药温度下降,液体炸药将逐渐凝固变成固体,在这一过程中伴随着复杂的温度变化和体积变化,而且这一过程也决定着熔铸炸药成型后炸药的质量,进而影响炸药的爆炸性能。在温度监测方面,目前国内外设计了多种炸药熔铸成型温度监测系统。如热电偶传感测温技术^[2]、DS1820 数字测温仪和光纤测温技术^[3]等,但这些技术都存在着不足之处,很难安全准确地对炸药进行实时温度检测。

光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating)传感器在测温领域已经得到了广泛应用,它采用波长调制技术和波分复用技术^[4];波长调制技术能够避免光谱信号容易受到光源变动的影响;波分复用技术可以使多个布喇格光栅传感器接在同一根光纤上同时进行实时温度采集。本文应用 Origin 软件对采集到的数据进行处理,绘制时间—温度曲线和时间—温度—深度三维曲线对数据进行分析,提出了一种炸药熔铸测温的新方法,提高了温度测量的精度,实现了

狭小空间多点温度变化的精确测量。

1 试验装置

试验中,光栅点所处位置的光栅温度与被测物相同,环境温度变化会引起光栅相关的各项参数变化而改变反射波长,光栅反射回来的布喇格波长与光栅温度之间呈线性关系。

基于光纤布喇格光栅的炸药熔铸温度监测系统可对熔铸炸药的多个不同位置同时进行温度监测,而且不会相互干扰,装置依据具体测温位置的不同设计传感器位置的分布,建立炸药熔铸的具体模型,光纤布喇格光栅的炸药熔铸温度监测系统如图 1 所示。宽带光源发出宽带光经过耦合器进入光纤,宽带光经光纤传到光栅传感器,光栅传感器根据测试位置要求布置在炸药熔铸模具的不同位置,当光栅

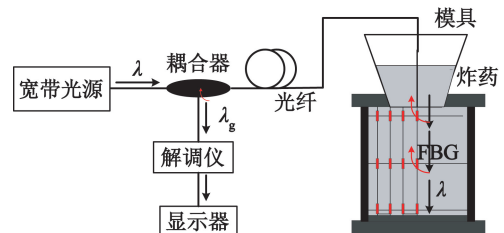


图 1 光纤布喇格光栅测温原理图

Fig.1 Temperature measurement principle diagram of fiber Bragg grating

^{*} 收稿日期: 2013-06-25

基金项目: 山西省青年科技研究基金(2012021013)

作者简介: 王小燕(1981~),女,硕士研究生,讲师。主要研究方向: 从事光电检测技术研究。E-mail: wangxiaoyan@nuc.edu.cn

通信作者: 王高(1973~),男,硕导,副教授,主要研究方向: 光电仪器、非线性光学、物质检测等。E-mail: gxw@nuc.edu.cn

的温度发生变化时,经光栅反射回耦合器的布喇格波长也相应地发生变化,经解调仪解调后将反射回的布喇格波长和对应的温度显示在显示器上,并将采集到的数据保存在指定的 TXT 文档里。

2 光栅传感原理

宽带光源射出的宽带光经 x 点处的光栅反射回中心波长为 $\lambda_B(x)$ 的窄带光波^[5]:

$$\lambda_B(x) = 2n_{\text{eff}}(x)\Lambda(x). \quad (1)$$

式中:光纤纤芯在 x 点处对应的折射率为 $n_{\text{eff}}(x)$;光栅在 x 点处对应周期为 $\Lambda(x)$ ^[6]。

光栅在 x 点处对应的反射波长 $\lambda_B(x)$ 随 $\Lambda(x)$ 和 $n_{\text{eff}}(x)$ 的改变而改变。关系式为:

$$\Delta\lambda_B(x) = 2\Lambda(x)\Delta n_{\text{eff}}(x) + 2n_{\text{eff}}(x)\Delta\Lambda(x); \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_B(x) = 2\left[\frac{\partial n_{\text{eff}}(x)}{\partial T}\Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_e + \frac{\partial n_{\text{eff}}(x)}{\partial \alpha}\Delta\alpha\right]\Lambda + 2n_{\text{eff}}(x)\frac{\partial \Lambda(x)}{\partial T}\Delta T. \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: $\Delta\lambda_B(x)$ 为光栅中心波长的偏移量; $\Delta n_{\text{eff}}(x)$ 为光栅中心波长的折射率变化量; $\Delta\Lambda(x)$ 为光栅的周期的变化量; $\partial n_{\text{eff}}(x)/\partial T$ 表示光纤光栅的折射率温度系数,描述光纤折射率随温度变化关系; $(\Delta n_{\text{eff}})_e$ 为热膨胀导致的弹光效应; $\partial n_{\text{eff}}(x)/\partial \alpha$ 为热膨胀引起的波导效应。

当这些参数受到环境影响时会发生变化,因此测量某些参数的变化就可以间接测量环境中某些物理量的变化。如应变、温度、压力、磁场、位移等^[7-11]。通过解调系统解调出反射波的变化就能测出环境温度的变化^[12-13]。

试验所用光栅的传感原理如图 2 所示,入射光谱经光纤传输到光栅,光栅将与之匹配的光谱反射回去,不匹配光谱经过光栅继续向前传输。

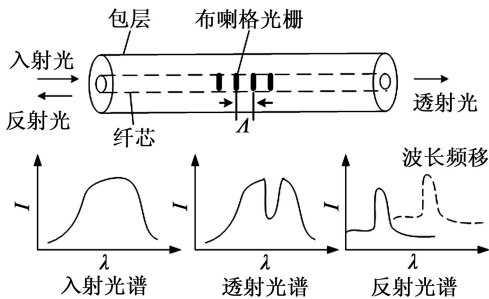


图 2 光纤布喇格光栅原理图

Fig. 2 Principle diagram of fiber Bragg grating

3 适于布拉格光栅的解调系统

光纤布喇格光栅测温系统的基本原理如图 3 所示。宽带光源、3 dB 耦合器、频率较宽的宽带光波

从宽带光源出发,经 3 dB 耦合器出来送到光栅,光栅根据自己所处环境条件参数的不同反射回不同频率波段的光波。反射回的光波经过调谐滤波器到达光电探测器,模数转换器将来自探测器的信号进行转换后送往数据处理器进行数据处理。

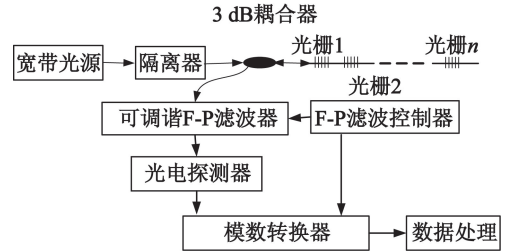


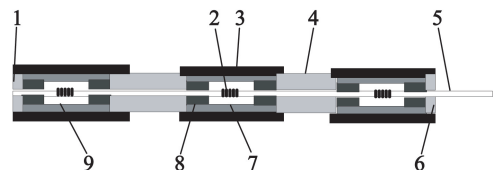
图 3 光纤反射解调仪原理

Fig. 3 Principle of grating reflection demodulator

4 光纤光栅温度传感器的制备

炸药在熔铸过程中会有复杂的物理过程发生,如体积发生变化、物体由液态变为固态、温度降低等。炸药熔铸过程中,由于不同位置的炸药体积收缩不同步,会对光纤产生拉力,改变光栅的布喇格波长而对温度测量产生干扰。因此,用于监测炸药熔铸降温过程的光纤布喇格光栅温度传感器必须经过特殊封装。光纤布喇格光栅温度传感器封装体积过大会影响炸药的温度场,不能真实测量炸药熔铸过程的温度变化,所以本试验对布喇格光栅的封装选择的铜管外径分别为 1.0 mm、1.2 mm 和 1.5 mm,并且在光栅与铜管之间填充导热硅子,以减小热传递的时间。

试验是对炸药内部相对较近的多个点同时进行监测,光栅 1 与光栅 2 的距离为 60 mm,光栅 2 与光栅 3 的距离为 80 mm,必须消除邻近的光栅由于热传递产生的干扰,因此,光栅与光栅之间的光纤采用聚四氟乙烯管保护。整个光纤布喇格光栅传感器的封装结构如图 4 所示。试验使用的光纤布喇格光栅传感器的写入波长分别为 1546、1548、1550 nm,温度分辨率为 9.842、9.795、10.105 pm/°C (pm 为皮米)。布喇格光栅的温度波动为 0.3 °C,光纤布喇格光栅传感器的波长分辨率为 3 pm。



1、6 - 环氧树脂胶;2 - 布喇格光栅;3 - 铜管 1;4 - 聚四氟乙烯管;5 - 光纤;7 - 铜管 2;8 - 铜管 3;9 - 导热硅子

图 4 封装过的光纤布喇格光栅传感器结构

Fig. 4 Structure of packaged fiber Bragg grating sensor

5 试验结果与分析

解调仪采集到的数据保存在指定的 TXT 文件里,应用 Matlab 软件对数据进行处理,绘制时间—温度—深度的三维曲线如图 5。曲线图中两个采样点之间的间隔为 30 s,从图 5 的 3 条曲线图中可以看出,模具中没有加炸药时光栅采集的温度为室温 20.341、20.375、20.269℃。加入熔融态的炸药后,光栅传感器采集的温度迅速上升到 103℃,随着时间的推移温度迅速下降,温度下降到 88℃ 左右出现拐点,之后随着时间的推移温度有小幅度的上升。表明炸药在熔铸过程中会释放潜热,在释放潜热时炸药的温度从 88℃ 上升到 90℃。

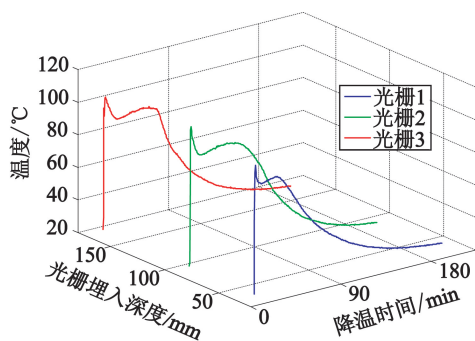


图 5 3 个采集点的三维曲线图

Fig. 5 3D graphs of the three sampling points

将解调仪设置为每 7 min 采集一次温度数据,应用 Origin 软件对采集的数据进行处理,绘制时间—温度曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,由于炸药凝固热传导阻力作用,随着炸药结晶凝固,炸药的凝固层越来越深,炸药降温凝固越来越慢,也就是越靠近炸药中心,炸药温度下降的“拐点”越滞后。中心位置的 2 号光栅温度在 90℃ 时停留的时间比其它位置长,因此,如果此时让炸药自然冷却,炸药在熔铸过程中容易出现缺陷。

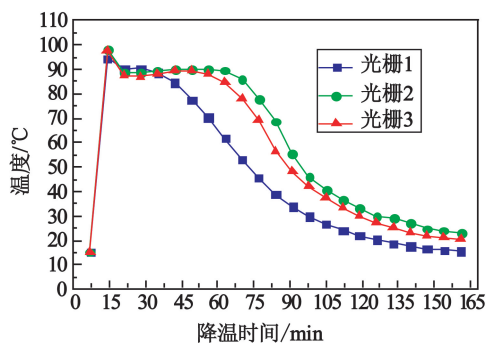


图 6 3 个光栅采集的温度—时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curves obtained from 3 gratings

从采集的数据可知,经特殊封装的光纤布喇格光栅温度传感器能很好地分辨出炸药不同位置的温

度变化情况,下一步将采用热电偶测温技术与光纤布喇格光栅测温技术进行炸药测温对比试验,验证采用光纤布喇格测温的精度。

6 结论

1) 通过应用光纤布喇格光栅对炸药熔铸过程温度的监测,探讨了炸药从液态变为固态的相变规律和温度变化特点,说明了温度与相变之间的联系,证明了炸药在熔铸过程中会释放潜热,在释放潜热时炸药的温度会从 88℃ 上升到 90℃,在此过程中炸药的温度会明显上升。

2) 试验表明在炸药熔铸过程中,炸药中心位置的温度下降慢,中心位置的 2 号光栅温度在 90℃ 时的持续时间比其它位置长,因此,如果此时让炸药自然冷却,炸药在熔铸过程中容易出现缺陷。

参 考 文 献

- [1] 郭朋林,罗观,习彦,等. TNT 基熔铸炸药冷却过程温度场变化规律研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 93-96.
Guo Penglin, Luo Guan, Xi Yan, et al. Distribution of temperature field during cooling process of melt-cast explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(1): 93-96.
- [2] 王代华,宋林丽,张志杰. 基于钨铼热电偶的接触式爆炸温度测试方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(3): 23-27.
Wang Daihua, Song Linli, Zhang Zhijie. Contact measuring method of explosion temperature based on tungsten-rhenium thermocouple[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(3): 23-27.
- [3] 杨宪元,李洋波,黄达海,等. 分布式光纤测温技术在水工混凝土中的应用[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 106-108, 68.
Yang Xianyuan, Li Yangbo, Huang Dahai, et al. Application of distributed optical fiber temperature measurement system to hydraulic concrete[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(2): 106-108, 68.
- [4] 王高,刘少聪,闻强,等. 基于光谱线性频移的粮仓温度网络监测系统研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1146-1150.
Wang Gao, Liu Shaocong, Wen Qiang, et al. Research on granary temperature network monitoring system based on the linear frequency shift of spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1146-1150.
- [5] 张锦龙,余重秀,王葵如,等. 基于偏振干涉的光纤光栅传感解调方法[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3988-3994.
Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru, et al. Fiber grating sensor demodulation method based on polarization

- interference [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58 (6): 3988-3994.
- [6] 杨兴, 胡建明, 戴特力. 光纤光栅传感器的原理及应用研究[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 26 (4): 101-104.
Yang Xing, Hu Jianming, Dai Teli. Principle and typical current applications of fiber grating sensors[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2009, 26 (4): 101-104.
- [7] Antunes P, Varum H, André. Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity[J]. *Measurement*, 2011, 44(1): 55-59.
- [8] 刘丽梅, 倪欧琪, 刘永, 等. 粉状乳化炸药爆温的理论计算[J]. *爆破器材*, 2010, 39(4): 1-4.
Liu Limei, Ni Ouqi, Liu Yong, et al. Theoretical calculation for the explosion temperature of powdery emulsion explosives[J]. *Explosive Materials*, 2010, 39(4): 1-4.
- [9] 苏洋, 张宝富, 朱勇, 等. 基于光栅透射光斯托克斯参数的实时压力传感方法及性能优化[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1-6.
Su Yang, Zhang Baofu, Zhu Yong, et al. Real-time pressure measurements using stokes parameter in fiber Bragg gratings and the performance analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1-6.
- [10] 何亚蓉, 葛海波, 闫雪琴, 等. 布喇格光栅磁场传感器交叉敏感的研究[J]. *光通信技术*, 2013(1): 47-50.
He Yarong, Ge Haibo, Yan Xueqin, et al. Research of the cross sensitive of magnetic field sensors based on FBG [J]. *Optical Communication Technology*, 2013 (1): 47-50.
- [11] Chuang K C, Ma C C. Multidimensional dynamic displacement and strain measurement using an intensity demodulation-based fiber Bragg grating sensing system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(13): 1897-1905.
- [12] 李永倩, 朱向南, 姚国珍. 光纤光栅解调系统信号处理算法的实现[J]. *光通信技术*, 2011(9): 34-36.
Li Yongqian, Zhu Xiangnan, Yao Guozhen. Algorithm implemented of fiber grating demodulation system signal processing [J]. *Optical Communication Technology*, 2011(9): 34-36.
- [13] 余有龙, 王雪微, 王浩. 不同采样方式下光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. *光子学报*, 2012, 41 (11): 1274-1278.
Yu Youlong, Wang Xuewei, Wang Hao. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by different sampling methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1274-1278.

Research of Temperature Monitoring for Process of Melt-cast Explosives based on Fiber Bragg Grating

WANG Xiaoyan^{①②}, WEN Qiang^{①②}, ZHANG Chen^{①②}, YUAN Junming^③, ZHAO Hui^{①②}, WANG Gao^{①②}

①State Key Laboratory of Science and Technology on Electronic Test & Measurement, North University of China
(Shanxi Taiyuan, 030051)

② College of Information and Communication Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

③ Department of Safety and Environmental Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In order to realize temperature monitoring effectively, a multiple channels data demodulator has been used to detect the temperatures in melt-casting process of explosive, as well as a grating sensor with special package. It introduced the principle of grating sensing, fiber Bragg grating data demodulator and the packaging process of fiber Bragg grating. The obtained temperature data were processed by Matlab and Origin to draw a temperature-time curves. It is most valuable to obtain temperature curves during the process of melt-cast explosive especially at the moment when the phase transformation occurred. The results show that the explosive can release latent heat in the process of melt-casting, and the temperature of explosive rises from 88℃ to 90℃. The experimental results prove that special packaged fiber Bragg grating sensor can be used well for temperature measurement in explosives melt-casting process.

[KEY WORDS] fiber Bragg grating; explosive melt-casting; change of state; temperature monitoring