

# 柔性固体燃料弹性模量测试的实验研究\*

张 洁 朱 永 陈伟民 黄尚廉

(重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要** 利用砝码对柔性固体燃料试件加载, 并采用光纤法珀应变传感器对试件进行应变测试; 结合砝码重量和测得应变计算出燃料试件弹性模量. 测量的标准差为 23.04 MPa, 在误差允许范围内, 离散度可以接受. 实验表明: 用光纤法珀应变传感器测量柔性固体燃料的弹性模量是可行的.

**关键词** 光纤法珀应变传感器; 柔性固体燃料; 弹性模量; 标准差

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

弹性模量是材料力学的关键参数之一, 弹性模量的测量是材料研究中的一个重要环节. 通常根据材料试件所受的载荷和对应应变的比值来求取弹性模量; 目前, 常用的应变测量方法是以电阻应变片为代表的电类测量方法<sup>[1]</sup>. 然而, 柔性固体燃料是火药的一种, 质地比较柔软且容易燃烧; 在对柔性固体燃料测试中应避免电信号的出现, 故不适宜选择电阻应变片, 因而柔性固体燃料弹性模量测试是固体燃料研究中的一个难题; 有必要寻求一种新的应变测量方法. 光纤应变传感器是近年来发展起来的一种新型应变测量技术, 与传统的电类应变传感器相比, 光纤应变传感器具有柔韧、体积小、重量轻等优点<sup>[2~4]</sup>; 利用这种传感器对质地柔软的材料作应变测量, 可以在测得材料应变的同时又不影响材料本身的特性, 同时可以避免电信号引起的测量危险. 因此, 采用光纤应变传感器对柔性固体燃料的弹性模量进行实验研究有望解决固体燃料弹性模量测量的难题, 具有重要意义.

## 1 原理

由材料力学的知识, 可以得到弹性模量为

$$E = F / (\epsilon \cdot A) \quad (1)$$

式中  $F$  为试样所受的载荷,  $\epsilon$  为试样在载荷  $F$  作用下的应变,  $A$  为试样的面积.

从式(1)可以看出, 在已知柔性固体燃料试件的横截面积  $A$  条件下, 只要知道施加于柔性固体燃料试件的荷载  $F$  和试件所产生应变, 就可以求出柔性固体燃料的弹性模量  $E$ .

### 1.1 光纤法珀传感器原理

对于应变的测量, 由于光纤法珀应变传感器具

有体积小、重量轻等优点, 选择其对固体化学材料的应变进行测量. 光纤法珀应变传感器主要是基于白光多光束干涉的原理, 其原理如图 1. 它是将两根光

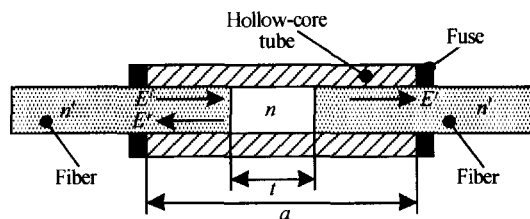


图 1 光纤法珀应变传感器原理  
Fig. 1 Construction of the F-P strain sensor

纤的端面加工为镜面反射面, 使它们严格平行、同轴, 形成一个长度为  $t$  的空气间隙, 并用一个密封管保护、定位. 当一束光通过其中一根光纤入射进入空气间隙时, 光纤的两个镜面反射面与空气间隙就会对光束形成一个光学谐振腔(简称法珀腔或 F-P 腔), 使得光束在光纤的腔内多次反射、形成干涉输出. 若光纤入射的光强度及光波长分别为  $I_i$  及  $\lambda$ , 光纤两端面的反射率及间距分别为  $R$  及  $t$ , 则根据光学法珀干涉原理<sup>[5~7]</sup>, 且考虑白光干涉的情况, 该光纤法珀腔沿原路反射信号中每一波长成分的强度为

$$I_R(\lambda, t) = \frac{(2 - 2\cos(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot n \cdot t))R}{1 + R^2 - 2R\cos(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot n \cdot t)} \cdot I_i(\lambda) \quad (2)$$

利用相位解调的方法, 应变值<sup>[4]</sup>如

$$\epsilon = \frac{t_1 - t_0}{a} = \frac{k}{2a} \left( \frac{\lambda_i \cdot \lambda_{i-k}}{\lambda_{i-k} - \lambda_i} - \frac{2t_0}{k} \right) \quad (3)$$

式中  $t_0$  是传感器未受外力时初始腔长,  $a$  是传感器的有效长度,  $k$  为两干涉波长级次之差, 波峰位置  $\lambda_i$  和  $\lambda_{i-k}$  对应干涉级次  $m$  和  $m-k$ . 根据以上原理可以建立如图 2 的光纤应变测试系统<sup>[8]</sup>. 这种系统与光强波动、电源波动、电路漂移、电器噪声等关系不大, 因此这种应变传感系统具有高准确度、高稳定度的特性, 可基本解决电阻应变测量仪存在的时漂、温漂等缺陷. 图 3 是基于以上原理研制出的光纤法珀应变仪.

\*国家自然科学基金重点项目资助(No. 50135030)  
Tel: 023-65112467 Email: jiezhang1980@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2004-08-30

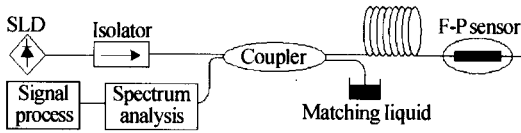


图2 光纤 F-P 应变测试系统  
Fig. 2 System of fiber F-P strain measurement

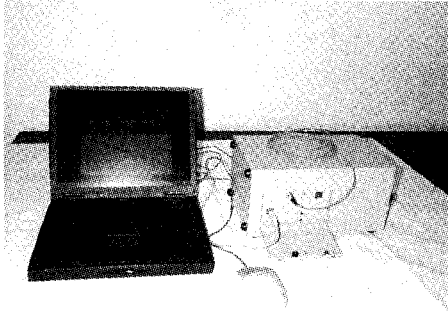


图3 光纤应变仪  
Fig. 3 Optical fiber strain gauge

1.2 加载方式

由于柔性固体燃料比较柔软,选择精密的砝码对其进行加载.

另外,选择精密的游标卡尺对其长、宽等几何参数进行测量,以得到试样的面积.

2 测试实验系统

将柔性固体燃料试样上端固定在支架上,在其下端系上一个托盘,用来装砝码,以实现柔性固体燃料的加载;同时将光纤法珀应变传感器粘贴在柔性固体燃料表面中央,利用光纤应变仪对柔性固体燃料试样进行应变的记录,如图4.图5是按

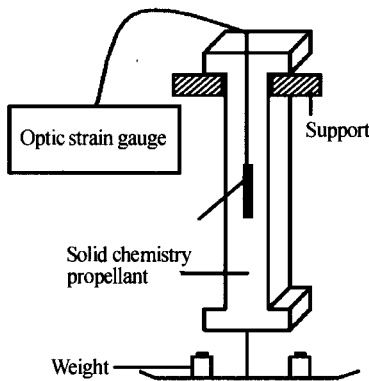


图4 实验方案  
Fig. 4 Experiment scheme

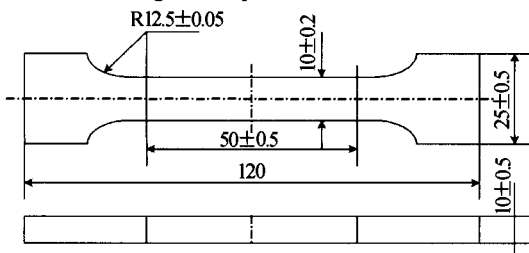


图5 柔性固体燃料形状和尺寸  
Fig. 5 Shape and dimension of flexible solid fuel

GB770A-97 要求加工 A 型柔性固体燃料试样. 这样,利用式(1)可以计算出柔性固体燃料的弹性模量.

3 实验结果

实验时,利用相同的材料、同样的制作方法制作了 4 个柔性固体燃料试样,利用游标卡尺分别测量试样工作段任意三处的宽度和厚度,得到平均数据如表 1.

表 1 试样结构尺寸和实验标距

标号	宽/mm	厚/mm	传感器标距/mm
1	10.08	10.06	40.00
2	10.32	10.20	40.00
3	10.18	10.08	40.00
4	10.22	10.12	40.00

根据图4的实验方案对试样进行弹性模量实验. 实验时,将砝码轻轻地放置在托盘里,等待光纤应变仪读数趋于平衡时,记录此时的砝码质量和柔性固体燃料试件的应变值;然后增加等量砝码,同样的原理,记录一组载荷和应变值. 1、2 号试样实验结果如图 6;3、4 号试样实验结果如图 7.

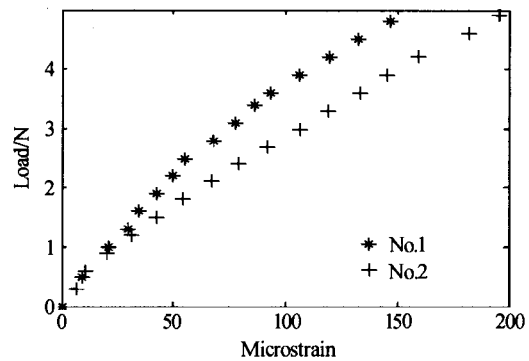


图6 实验结果(1、2号)  
Fig. 6 Experiment results

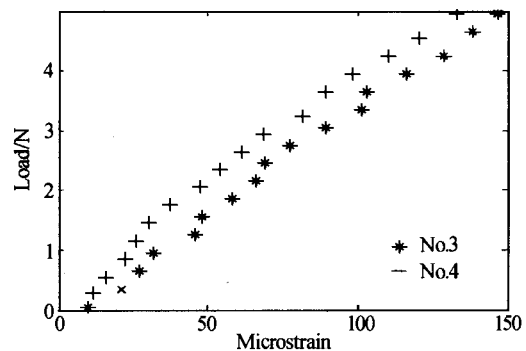


图7 实验结果(3、4号)  
Fig. 7 Experiment results

从图 6、7 可以看出,柔性固体燃料所受的载荷和相应的应变值成正比关系,与式(1)相吻合. 根据最小 2 乘原理,对实验数据进行 1 次拟合,带入式(1),得到 1~4 号试件的弹性模量分别为 313.2 MPa、333.7 MPa、348.7 MPa、367.6 MPa.

标准差是反应一组数据离散程度最常用的一种

量化形式,采用误差理论和数据处理方法<sup>[9]</sup>,就可以得到测量数据的标准差 $\sigma$ ,标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l m_i (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中  $n = \sum_{i=1}^l m_i$ ,  $x_i$  表示每次测量值,  $n$  为测量次数,  $\bar{x} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n x_i$  为测量的平均值。

将上述4个数据的平均值为340.80 MPa,带入式(4),得到标准偏差为23.04 MPa,在10%的误差允许范围内,可见测量的离散度是可以接受的。

## 4 结论

通过材料实验机和光纤应变仪对复合材料的弹性模量的实验,得到以下结论:1)在传统技术不能测量柔性固体燃料弹性模量的情况下,利用光纤法珀应变传感器和砝码加载的方法进行测量,取得了误差可以接受的试验数据;2)测量的标准差为23.04 MPa,在误差允许范围内,可见测量的离散度是可以接受的;3)该方法测量柔性固体燃料的弹性模量是可行的。

由于实际使用的柔性固体燃料的受力多样性,要从理论上准确计算柔性固体燃料的弹性模量,并用光纤应变传感器进行测试、验证,还需要进行深入的分析和实验。

### 参考文献

- 1 陈少华,赵启大,赵路明,等.布拉格光纤光栅用于标准钢筋试件应变传感和弹性模量测量的实验研究.应用激光,2004,24(2):66~68

- 2 Chen S H, Zhao Q D, Zhao L M, et al. *Applied Laser*, 2004,24(2):66~68
- 3 Peter L F, Dryver R H, Timothy P A, et al. Internet monitoring of an instrumented civil structure. *SPIE*, 1995,2446:301~307
- 4 李景义,饶云江,牛永昌,等.基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统.光子学报,2005,34(3):431~433
- 5 Li J Y, Rao Y J, Niu Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(3):431~433
- 6 江建,饶云江,牛永昌,等.应用LPFG/EFPI集成式光纤传感器实现温度及应变的同时测量.光子学报,2003,32(9):1063~1066
- 7 Jiang J, Rao Y J, Niu Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(9):1063~1066
- 8 章鹏,朱永,陈伟民.光纤法布里-珀罗传感器腔长的傅里叶变换解调原理研究.光子学报,2004,33(12):1449~1452
- 9 Zhang P, Zhu Y, Chen W M. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(12):1449~1452
- 10 阮驰,高应俊,刘志麟,等.光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔液位传感器.光子学报,2003,32(10):1170~1174
- 11 Ruan C, Gao Y J, Liu Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(10):1170~1174
- 12 朱永,张洁,陈伟民,等.提高光纤F-P应变传感器输出信号质量的方法研究.光子学报,2004,33(5):544~548
- 13 Zhu Y, Zhang J, Chen W M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(5):544~548
- 14 张洁,朱永,陈小强,等.复合材料层间应变测试实验.光电工程,2004,31(5):56~59
- 15 Zhang J, Zhu Y, Chen X Q, et al. *Opto-electronic Engineering*, 2004,31(2):56~59
- 16 罗迎社.材料力学.武汉:武汉理工大学出版社,2001.295~299
- 17 Luo Y S. *Material Mechanics*. Wu Han: Wu Han University of Technology Publishment Company, 2001. 295~299

## Experimental Study on Young's Modulus Measurement of Flexible Solid Fuel by Optical Fiber Strain Sensor

Zhang Jie, Zhu Yong, Chen Weimin, Huang Shanglian

*Opto-electronic Engineering Department, Chongqing University, Chongqing 400030*

Received date:2004-08-30

**Abstract** Young's modulus is a key characteristic of material, which can be got by strain and load of material. Because the flexible solid fuel is soft and incensive, traditional measurement method using strain slice is unsuitable. So a new method should be put forward. In this paper, optic fiber F-P strain sensor is stick on the surface of the flexible solid fuel to measure the strain of flexible solid fuel. And the weights supply load. Theory analysis is carried on. Experiments demonstrate that the measurement standard deviation is about 23.04 MPa and receivable, and the measurement method using optic fiber F-P strain sensor is agreeable.

**Keywords** Optical fiber F-P strain sensor; Flexible solid fuel; Young's modulus; Standard deviation

**Zhang Jie** was born in Chengdu, in 1980. She received her B. S. degree in mechanism electron engineering at Opto-electronic Engineering Department of CQU (Chongqing University), in 2002. She is now studying for Ph. D. degree in Chongqing University. She is engaged in the area of optical fiber communication and microsystem.

