

液氮温区下光纤布拉格光栅 应变传感器测量性能的研究*

冯遵安^{1,2} 王秋良¹
戴 峰³ 黄国君³

¹ 中国科学院电工研究所, 北京 100080

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

³ 中国科学院力学研究所, 北京 100080

基于光纤布拉格光栅传感器的原理,研究了在液氮浸泡情况下光纤布拉格光栅应变传感器的静态传输特性.实验过程中利用悬臂梁原理和美国 Micron Optics 公司生产的光栅波长可调谐激光扫描法解调系统,分别测量了液氮浸泡中的悬臂梁的正应变和负应变,确定了在液氮温度下悬臂梁应变与光纤光栅波长偏移量之间的关系.为测量高温超导磁体的应变提供了新的方法.

关键词: 光纤光栅, 应力应变, 液氮

PACC: 0710, 0630M

1 引 言

超导体的力学性能直接影响其临界电流密度,因此研究超导体的应力、应变问题是直接关系到超导线的电流传输能力的关键所在.尤其是我们用超导线绕制成超导磁体时,其应力应变行为变得更为复杂.研究表明,超导磁体损坏或磁场强度达不到设计的要求大都是机械的原因.然而要精确地研究超导磁体的机械性能是非常困难地,首先因为磁体是由复合体绕制的,各匝之间还有绝缘物质和填充材料,力学性能表现为各向异性,其应力与应变分布更难预料^[1].其次由于磁体处在极低温和强磁场的极端复杂环境下,普通电阻应变计由于尺寸的原因只能测量其表明的应变情况,并且由于磁阻效应的存在,使用传统的电阻应变仪需要复杂的设计和大量的屏蔽连接,其测量的精确性和可靠性难以保证,更无法深入磁体内部测量出复合体整体表现出来的机械性能.因此我们必须采用新型的传感系统,要求这种传感系统尺寸小能够埋入复合体内部测量应变,精度高并且能够适应极低温和强磁场的极端环境^[2].

光纤传感器是一种新型的传感器,它以极高的灵敏度和精度、本征安全、抗电磁干扰^[3]、

* 国家自然科学基金资助(项目编号: 10355001)资助的课题.

收稿日期: 2003-12-21; 修回日期: 2004-01-09

高绝缘强度、体积小、频带宽而著称,光纤布拉格光栅传感器又是一种新型的光纤类传感器,它除了具有光纤传感器的许多优点外,还有一些明显优于其它光纤传感器的地方,其中最重要的就是光纤光栅传感器的传感信号为波长调制,这一传感机制的好处在于:(1)测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素的影响;(2)避免了一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和固有参考点的需要;(3)能方便的使用波分复用技术,在一根光纤中串连多个光栅进行分布测量.另外,光纤很容易埋入材料中对其内部的应变进行高分辨率和大范围的测量^[4].目前,光纤布拉格光栅传感器已广泛应用于航空航天、电力工业、桥梁建筑、石油化工等领域.所以,与电阻应变片相比,光纤光栅传感器更适合用来研究超导磁体的应力应变.文中我们分析了光纤布拉格光栅传感器的工作原理,测试了光纤布拉格光栅传感器在液氮浸泡情况下静态传输性能,结合悬臂梁原理确定了光栅波长偏移量与应变之间的函数关系,即确定了光纤光栅传感器在液氮温区内的刻度,为我们精确测定超导磁体的应力、应变提供了新方法.

2 传感原理

光纤沿轴径方向从里向外分为纤芯、包层、涂覆层三部分.利用特殊的紫外线照射工艺,对光纤纤芯进行照射,使得光纤纤芯的一段区域折射率发生周期性变化,从而制成光纤光栅.光纤光栅是无源器件,它能将入射光中某一特定波长的光部分或全部反射.光纤和光纤光栅的结构见图 1.

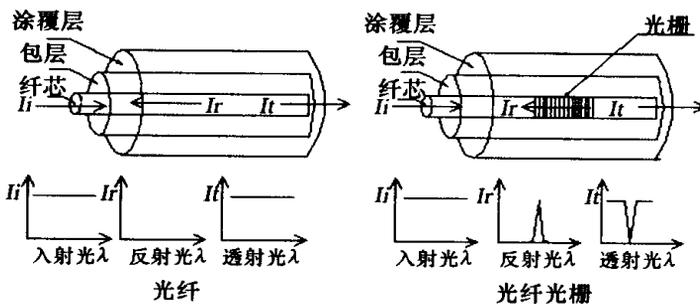


图 1 光纤与光纤光栅结构及光传输特性示意图^[5,6]

对于光纤光栅,满足布拉格条件的入射光波长(即中心波长)被光纤光栅反射

$$\lambda = 2n \tag{1}$$

其中 λ 为光栅中心波长; n 为纤芯有效折射率; Λ 为纤芯折射率的调制周期. 由于 n 是光纤的固定指标,而其布拉格光栅的栅距 Λ 是沿光纤轴向的,因而当光纤产生轴向应变 ϵ 时,布拉格光栅的栅距 Λ 亦同样变为

$$\Lambda' = \Lambda(1 + \epsilon) \tag{2}$$

故由(1)式可知光纤产生应变 ϵ 时,其布拉格反射光波长 λ 亦随之变化为 λ' . 由此可知布拉格反射光波长的变化量 $\Delta\lambda$ 与光纤的变量度 ϵ 之间满足下式

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e)\epsilon \tag{3}$$

式中 P_e 为光纤的有效光弹系数,它与光纤应变张量的分量 P_{11} 及 P_{12} ,光纤的泊松比 ν 满足

下式

$$P_e = (n^2/2) [p_{11} - \nu(p_{11} - p_{12})] \quad (4)$$

据此原理,测出布拉格反射光波长偏移量,便可求出光纤的应变。如果将此种光纤植于磁体内部,便可方便的测量磁体内部的应变。

应用光纤布拉格光栅传感器的关键技术在于光栅反射光的波长检测技术,美国 Micron Optics 公司的解调技术做得比较好,他们用可调谐激光扫描方法生产的 FBGLI 解调系统,其动态范围大于 30nm,分辨率为 1pm,测量精度为 $\pm 5\text{pm}$,扫描速度为 100Hz,可以同时四路光纤多达 256 个布拉格光栅进行询问。

3 实验过程

我们使用的是上海紫栅光电生产的光栅,胶水是由上海合成树脂研究提供 DW-3G 型底温胶。实验前,先用沙纸仔细打磨悬臂梁表面,涂上一薄层胶水,让光栅与梁平行放置,轻压,放置两天,胶水完全固化后,把悬臂梁按图装配起来,放置在液氮储槽中,在充入液氮之前,经我们测试,光纤布拉格光栅传感性能良好。当悬臂梁完全浸泡在液氮中时,我们用光谱仪观察反射光的波长,中心波长有一个非常明显的偏移,这是因为温度的影响使栅距发生了冷缩使从而使中心波长偏移,并未发现其它异常情况,所以我们可以肯定光纤对光的传输性能并没有受到低温的影响,可以继续我们的实验。实验中,我们做了 6 次液氮温度-室温-液氮温度循环实验,我们可以看出在液氮中加砝码和减砝码对光纤光栅来说完全是一个可逆的过程,即我们在逐步减去所有负载后光栅能完全恢复到原状,说明光纤光栅在液氮温度下能够正常工作,具有良好的柔韧性和可回复性。我们测量了悬臂梁上表面和下表面的应变即正应变和负应变的情况,但是由于液氮的沸腾对悬臂梁有冲击,所以显示的结果有轻微的颤,也影响了我们的读数,另外也因为篇幅的原因,我们取 6 次读数的平均值做为测量结果,因此得到了两组数据。

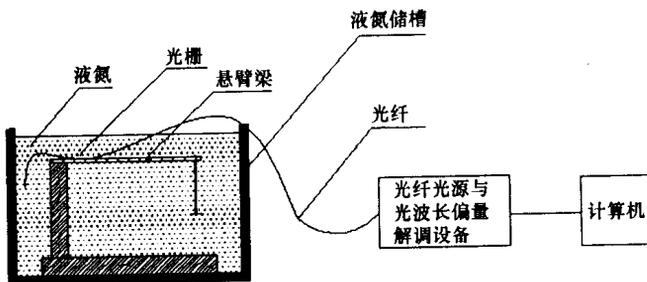


图 2 实验装置示意图

4 光栅应变传感器的标定

根据悬臂梁理论,悬臂梁根部的应变为

$$= \frac{M}{EI} \times \frac{Y}{2} \quad (5)$$

这里 M 是弯矩, $M = F \cdot L$, 即力臂和力的大小的乘积; E 是悬臂梁材料的弹性模量, 对于铝 $E = 20 \times 10^9 \text{ Pa}$; I 是梁的截面惯性矩, 对于矩形截面, $I = \frac{bh^3}{12}$, b 是梁宽度, h 是梁的厚度; y 是梁的厚度, 等于, 是应变.

表 1 计算和测量结果

负载/ kg	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
μ	0	19.9	4.	59.7	79.8	99.5	119.6	139.4	159.7	179.1	199
/ nm(上部)	0	0.006	0.013	0.019	0.025	0.031	0.038	0.044	0.051	0.056	0.063
/ nm(下部)	0	- 0.006	- 0.013	- 0.019	- 0.026	- 0.038	- 0.045	- 0.051	- 0.057	- 0.064	- 0.07

表 2 计算和测量结果(续)

负载/ kg	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1
μ	218.9	238.8	258.7	278.6	289.5	319.4	338.3	359.3	378.1	399.2	419.2
/ nm(上部)	0.069	0.075	0.082	0.088	0.094	0.1	0.107	0.112	0.119	0.125	0.132
/ nm(下部)	- 0.07	- 0.076	- 0.083	- 0.089	- 0.095	- 0.102	- 0.108	- 0.115	- 0.121	- 0.128	- 0.134

表 3 标定参数值

Parameter	Value	Error
A	1.686	0.2482
B	3152.66116	3.1964
R	0.999	
SD	1.6275	
Range	400	

根据光纤光栅传感原理,理想的波长偏移量与应变之间的关系应为

$$\mu = k \tag{6}$$

其中 k 为斜率, 由于我们测量中有误差, 最终得到的函数形式应为 $Y = A + B \cdot X$. Y 表示的是应变, X 表示波长的偏移量, A 和 B 分别表示截距和斜率. 标定曲线如图 3 所示:

我们所用的光波长解调仪的分辨率为 1pm, 所以标定后对应变的最小分辨率为 3 个微应变.

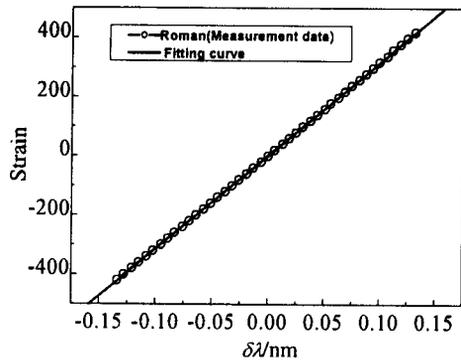


图 3 标定曲线

4 结 论

实验证明,光纤光栅在液氮温区内能正常工作,表现出了良好的柔韧性和可回复性.我们取得了预期的结果,为后来测高温超导磁体的应变打下坚实的基础,其测量结果我们将继续报道.

- [1] 周又和、郑晓静,《电磁固体结构力学》,科学出版社(北京)(1999).
- [2] Johannes M. an Ort and Ronald M. Scanlan, *IEEE TRANCTIONS ON APPLIED SUPER-CONDUCTIVITY*, 5(2) (1995).
- [3] 孙圣和、王廷云、徐影,《光纤测量与传感技术》,哈尔滨工业大学出版社(2000).
- [4] Swee chuang tjin, Jianzhong hao, Yr-zhi lam, *Optics*, 20(2001), 59 ~ 69.
- [5] 王惠文,《光纤传感技术与应用》,国防工业出版社(2001).
- [6] 张鹏,王如竹,《低温物理学报》, 24(2002), 224.

EXPERIMENT ON FIBER BRAGG GRATING STRAIN SENSOR FOR CRYOGENIC ENVIRONMENT*

FENG ZUN-AN^{1,2} WANG QIU-LIANG¹ DAI FENG³ HUANG GUO-JUN³

¹Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing 100080

²Graduate School of the Chinese Academy of science, Beijing 100039

³Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080

(Received 21 December, 2003; revised manuscript received 9 January, 2004)

Experiments on fiber-Bragg Grating Strain Sensor at liquid nitrogen temperature are presented. Based on the principle of the Fiber Bragg Grating Sensor the fiber-Bragg static transmission property was tested at liquid nitrogen temperature. The calibration of the fiber-Bragg grating strain sensor is given. The λ - ϵ curve was established.

Keywords: liquid nitrogen temperature, strain, fiber-Bragg Grating

PACC: 0710, 0630M

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10355001)