

FBGS 在纺织复合材料中的传感机理

杨 斌⁽¹⁾ 俞建勇⁽³⁾ 陶肖明⁽²⁾
(东华大学纺织学院,上海,200051) (香港理工大学纺织制衣学院)

摘 要:介绍纤维布拉格光栅传感器(FBGS)埋入纺织复合材料中的可行性,分析应变-温度测量的传感机理,并对存在问题提出了探讨。结果表明:FBGS 埋入复合材料中是可行的,FBGS 能对物体的应变及温度进行测量。

关键词:纤维布拉格光栅传感器(FBGS) 测量 应变 温度

中图分类号:TS 101.8 文献标识码:A 文章编号:0253-9721(2004)04-0054-02

光导纤维体积小而重量轻,与纱线兼容并易于埋入,甚至可以织入织物内部,因此是构成纺织复合材料检测网络的最有潜力的元件材料。由于绝大多数光纤传感器是基于干涉方法,检测能力有一定限制^[1,2],而光纤布拉格光栅(FBG)具有光纤的小巧、柔软、抗干扰能力强及光栅的波长分离能力强等双重优点,故受到世界各国广泛重视,并进一步发展了利用掺杂光纤对紫外光的强吸收性,即将空间光场呈周期性分布的强紫外光从侧面直接照射光纤,使纤芯的折射率沿轴向呈现出周期分布,从而得到光纤布拉格光栅,光栅周期或折射率变化将引起反射光波长的变化。应变引起的膨胀和收缩使光栅周期发生变化且产生应变-光效应,从而影响布拉格响应。温度引起的膨胀和收缩使光栅周期发生变化且产生热-光效应,也影响布拉格响应。

1 应变及温度传感机理

由 $\lambda = 2n/\Lambda$, $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\Lambda/\Lambda + \Delta n/n$, $\Delta\Lambda/\Lambda = \Delta L/L = \varepsilon$, 则:

$$\Delta\lambda/\lambda = \varepsilon + \Delta n/n$$

式中, Δn 为折射率变化; $\Delta\Lambda$ 为栅距变化; ε 为光纤的轴向应变。

λ, n 在不同的偏振方向有不同的值,以下标 $i = 1, 2, 3$ 来表示,则:

$$\Delta\lambda/\lambda = \varepsilon + \Delta n_i/n_i$$

应变则以下标 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 来表示, $j = 1, 2, 3$ 表示 x, y, z 3 个方向的应变, $j = 4, 5, 6$ 表示剪切应变。光纤应变由热膨胀和应力引起,因此用符号 ε_j 表示仅由应力引起的应变,折射率与温度和应变 ε_j 有关,则:

$$\frac{\Delta n_i}{n_i} = \frac{1}{n_i} \sum_j \frac{\partial n_i}{\partial \varepsilon_j} \varepsilon_j + \frac{\partial n_i}{\partial T} \Delta T$$

根据光应变理论^[3]:

$$\frac{1}{n_i} \sum_j \frac{\partial n_i}{\partial \varepsilon_j} \varepsilon_j = - \frac{n_i^2}{2} \sum_j P_{ij} \varepsilon_j$$

这里, P_{ij} 为基体的光应变系数,假定折射率 n 与温度 T 成线性关系,热光系数 $\xi = \partial n_i / \partial T$ 。

因为光为横波,因此只有在 2, 3 横向方向的折射率变化引起布拉格波长的转移,由此可以求得在 2, 3 方向上的波长转移为:

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = \varepsilon_1 - \frac{n_2^2}{2} [P_{11} \varepsilon_2^* + P_{12} (\varepsilon_1^* + \varepsilon_3^*)] + \xi \Delta T$$

$$\frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_3} = \varepsilon_1 - \frac{n_3^2}{2} [P_{11} \varepsilon_3^* + P_{12} (\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^*)] + \xi \Delta T$$

一般情况下,布拉格光栅传感器的波长转移可以在光纤的 3 个主要应变分量上的每个特征偏振模上观察到。Sirkis 和 Haslack^[4] 发展了 Butter 和 Hocher^[5] 模型,对于干涉型光纤传感器其结果与实验非常接近^[6]。若光纤为一热均匀材料即热膨胀系数 α 为一常数, $\varepsilon_j^* = \varepsilon_j - \alpha \Delta T$ ($j = 1, 2, 3$), 则 $\Delta\lambda_2/\lambda_2$ 与 $\Delta\lambda_3/\lambda_3$ 可写成相同的形式:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \varepsilon_1 \left[1 - \frac{n^2}{2} \left(P_{12} + \frac{\xi}{\varepsilon_1} (P_{11} + P_{12}) \right) \right] + \alpha \frac{n^2}{2} (P_{11} + 2P_{12}) \Delta T + \xi \Delta T = f\varepsilon_1 + \xi^* \Delta T$$

而

$$f = 1 - \frac{n^2}{2} \left(P_{12} + \frac{\xi}{\varepsilon_1} (P_{11} + P_{12}) \right)$$

$$\xi^* = \xi + \alpha \frac{n^2}{2} (P_{11} + 2P_{12})$$

这里, f 为传感器的灵敏度系数, ξ^* 为修正的热光系数。

1.1 灵敏度系数

$$f = 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12})]$$

式中 $\nu = -\xi/\varepsilon_1$ 为有效泊松系数。

图 1 为灵敏度系数 f 对有效泊松系数 ν 的函数曲线,由 Berholds 和 Pandiliker^[7] 提供的光纤材料

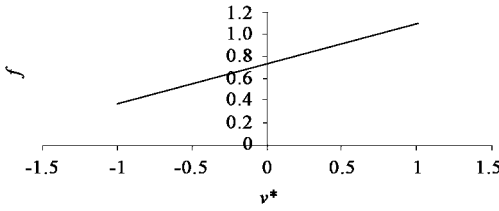


图1 灵敏度系数 f 对有效泊松系数 nu* 的函数曲线

参数可计算出:1) $\nu^* = 0.17, f = 0.798$:假设有效泊松系数与纤维材料的泊松系数相同,灵敏度系数为 0.798,这也是许多 FBGS 制造商的推荐值;2) $\nu^* = -1, f = 0.344$:当光纤 3 个主要方向的应变相等,相当于受到 1 个静态的均匀应力或仅受热膨胀作用;3) $\nu^* = 0.0, f = 0.732$:即没有横向变形。因此当用 FBGS 作为包埋传感器时,必须就横向应变作灵敏度系数校正,否则只有当光纤的横向应变对基体应变场不敏感时,灵敏度系数才可作为常数。

1.2 温度补偿

理想状态下, $\Delta \lambda / \lambda$ 中测量的应变 ϵ 应能代表光纤方向基体的应变,则温度补偿可由下式表示: $\epsilon = (\Delta \lambda / \lambda - \zeta^* \Delta T) / f$ 。因为掺锗氧化硅芯热膨胀系数 ζ 近似为 8.3×10^{-6} ,则修正的 ζ^* 为 8.96×10^{-6} ,若测量应变大于 0.001,而温度变化小于 10°C ,则 $\zeta^* \Delta T$ 比应变要小 1 个多数量级,因此在一些情况下温度补偿可不考虑。

1.3 温度和应变同时测量

若内部温度未知,则仅由 $\Delta \lambda / \lambda$ 是不可能测出温度和应变的。目前主要的研究是用 2 个对应变和温度具有不同响应的测量单元传感系数,对不同光栅类型进行组合,如不同直径、不同布拉格波长、不同掺杂的 FBGS,混合 FBGS 和长周期光栅、Fabry-Perot 腔、激发布里渊分布等^[8-11]。例如可用双波长光纤光栅同时测量温度和应变^[12],有 2 个布拉格波长 $\lambda_{B1}、\lambda_{B2}$,并假定应变和温度感生的 $\Delta \lambda_{Bi}$ 是线性且独立无关,则有 $\Delta \lambda(\epsilon, T) = \alpha_\epsilon \Delta \epsilon + \alpha_T \Delta T$ 。

$$\Delta \lambda(\epsilon, T) = \alpha_\epsilon \Delta \epsilon + \alpha_T \Delta T \quad (13)$$

这里, α_ϵ 与光纤的泊松比、光弹系数和纤芯折射率有关, α_T 由热膨胀系数和热光系数决定,则式(13)可写为:

$$\begin{vmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \alpha_{\epsilon 1} & \alpha_{T 1} \\ \alpha_{\epsilon 2} & \alpha_{T 2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta \epsilon \\ \Delta T \end{vmatrix}$$

| α | 矩阵元可在 $\Delta \epsilon = 0$ 和 $\Delta T = 0$ 的情况下分别测出,则测出 $\Delta \lambda_{Bi}$ 就可解出 $\Delta \epsilon$ 和 ΔT 。

1.4 复用 FBG 传感器进行分布测量

当光纤产生轴向应变时, Λ 的改变导致 λ_B 的改

变,从而引起输出激光波长的变化。由于激光谱线极窄,因而测量分辨率很高。 λ_B 是由 Λ 决定的,而每一个 λ_B 仅在全光谱中占据很窄一部分,如将不同 Λ 的布拉格光栅制作在同一光纤的不同位置上,则各个布拉格光栅的特征波长 λ_B 占据全光谱中的不同波长而互不干扰,由此可形成复用式应变传感方式^[13]。

2 结论

1. 通过 FBGS 埋入复合材料中的可行性分析,认为 FBGS 埋入复合材料中是可行的,FBGS 能对物体的应变及温度进行测量。
2. 用 FBGS 可进行温度、应变同时测量,用复用 FBGS 可进行分布测量。

参 考 文 献

- 1 Sirkkis J S. Complete Phase-strain Relation for Structurally Integrated Interferometric Optical Fiber Strain Sensors. J Intell Mater Sys Struct, 1991(1): 3 ~ 25.
- 2 Jensen D W. Validation of Active Strain Measurements in Composites Using Mach-Zehnder Interferometry with Embedded Optical Fibers. J Reinforced Plastics Composites, 1993(3): 268 ~ 284.
- 3 Butter C D et al. Fiber Optics Strain Gauge. Appl Opt. 1978(17): 2 867 ~ 2 869.
- 4 Sirkis J S et al. Full Phase-strain Relation for Structurally Embedded Interferometric Optic Fiber Sensors. Proceedings of the SPIE, 1990 (1370): 248 ~ 259.
- 5 Youlong Yu et al. Fiber Bragg Grating Sensor for Simultaneous Measurement of Displacement and Temperature. Optics Letters, 2000 (16): 1141 ~ 1143.
- 6 Jackson D A et al. Fiber Optic Sensors. Pot Acta, 1986: 1469 ~ 1503.
- 7 Bertholds A et al. Determination of the Individual Strain-optical Coefficients in Single-mode Optic Fibers. IEEE J Lightwave Technology, 1988(6): 17 ~ 20.
- 8 Bai-Ou Guan et al. Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating. Photonics Technology Letters, 2000(6): 675 ~ 677.
- 9 Wei-Chong Du et al. Fiber Bragg Grating Cavity Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature. Photonics Technology Letters, 1999(1): 105 ~ 107.
- 10 S. W. James et al. Simultaneous Independent Temperature and Strain Measurement Using in-fiber Bragg Grating Sensors. Electronics Letters, 1996(12): 1133 ~ 1134.
- 11 Stiris E. Kanellopoulos et al. Simultaneous Strain and Temperature Sensing with Photogenerated in-fiber Gratings. Optics Letters, 1995(3): 333 ~ 335.
- 12 Xu M G. Elect Lett. 1994(13): 1085 ~ 1087.
- 13 Morey W W et al. Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensors. SPIE, 1991 (1580): 216 ~ 223.