

一种基于布拉格光纤光栅测量湿蒸汽 两相流湿度场的新方法

盛德仁¹, 黄雪峰¹, 陈坚红¹, 李蔚¹, 任浩仁¹, 陈军²

(1. 浙江大学电厂热能动力及自动化研究所, 浙江省 杭州市 310027; 2. 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江省 杭州市 310027)

A NOVEL METHOD BASED ON FIBER BRAGG GRATING SENSOR MEASUREMENT IN TWO-PHASE WET STEAM FLOW MOISTURE FIELD

SHENG De-ren¹, HUANG Xue-feng¹, CHEN Jian-hong¹, LI Wei¹, REN Hao-ren¹, CHEN Jun²

(1. Institute of Power Plant Thermal Energy Engineering & Automation, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, Zhejiang Province, China; 2. The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The paper represents a novel method based on Fiber Bragg Grating(FBG) sensor measurement in two-phase wet steam flow moisture field, for FBG sensor takes on particular characterization. In this article the mechanism of based on FBG sensor measurement in two-phase wet steam flow moisture and temperature field was researched and investigated clearly. It conceives and describes elaborately experimental systemic device, and analyses and discusses FBG's mechanism of improving moisture sensitivity, furthermore, choosing and smearing method of moisture sensitive material, besides influencing factors to result of measurement. Consequently, this method solves difficult technical problem of dynamic and quasi-distributing measurement in two-phase wet steam flow.

KEY WORDS: Thermal power engineering; FBG; Moisture field; Moisture sensitive material; Two-phase wet steam flow

摘要: 在论述 Bragg 光纤光栅传感测试技术独特性能的基础上, 提出了一种基于 Bragg 光纤光栅传感技术测量湿蒸汽两相流湿度场的新方法。重点对光纤光栅测量湿蒸汽两相流湿度场以及温度场的机理进行研究, 对实验系统装置的构建作了详尽的描述。讨论光纤光栅的湿增敏机理、湿敏材料的选择和涂覆方法, 并对测量的影响因素和误差进行分析。该测试新方法将能解决湿蒸汽两相流中湿度的动态、准分布测量的技术难题。

关键词: 热能动力工程; Bragg 光纤光栅; 湿度场; 湿敏材料; 湿蒸汽两相流

1 引言

随着火电机组容量的大幅度增加及核电机组的投运, 在汽轮机内部, 湿蒸汽对汽轮机的经济性和安全性的影响更加明显。在火电站中大型凝汽式汽轮机的末几级和核电站中大型汽轮机的全部级都在湿蒸汽状态下工作, 而蒸汽的湿度存在大大降低了汽轮机效率。1910年 Baumann 就定性提出: 蒸汽出现 1% 的湿度可能使汽轮机效率降低大约 1%^[1]。另外, 湿蒸汽中存在大量的水滴运动, 会撞击汽轮机叶片, 对汽轮机叶片还存在一定的腐蚀性, 使得叶片变得粗糙, 出现凹坑, 甚至会导致叶片发生断裂事故, 严重影响汽轮机的经济性和安全性^[2]。

湿蒸汽中湿度的测量方法主要分为热力学法和光学法两大类。热力学法又可以分为节流法、凝结法、加热法等。热力学法采用绝对法测量湿度, 虽不受汽流中水滴直径大小限制, 但测量精度和实时性较差。光学法是随着激光技术的发展而完善起来的测量方法, 主要有全息法、相关法、散射法(包括消光法)等, 尤其以散射法研究为多。散射法能进行实时测量, 在国内外已有不少学者进行相当程度的研究^[3-4], 但散射法受到一些因素的制约, 如多

重散射的影响、光学窗口洁净等。

Bragg 光纤光栅传感器是把光栅制作在光纤上。这样，Bragg 光纤光栅传感器除了具有普通光纤传感器的许多优点^[5-8]，如抗电磁干扰、可远距离传递信息、灵敏度高以外，更有其独特的优点：光源波长绝对调制，测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗等因素的影响；避免一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和对固有参考点的依赖；能方便使用波分复用技术，利用多个 Bragg 光栅进行分布式测量；光纤光栅易于埋入材料内部和复杂设备内部，对其内部的参数进行高分辨率的准分布式实时测量等。

2 光纤光栅测量湿蒸汽湿度的传感原理

根据 Bragg 光纤光栅 (FBG) 衍射条件可知

$$\lambda_{ij} = 2n_{eff} \Lambda_{ij} \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤的有效折射率； Λ_{ij} ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2$) 为 FBG 的栅距。

由于湿蒸汽的温、湿度变化会引起光纤光栅的折射率和栅距发生变化，从而引起后向反射光波长移动。因此，对式(1)求全微分并整理可得

$$\frac{\Delta \lambda_{ij}}{\lambda_{ij}} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta \Lambda_{ij}}{\Lambda_{ij}} \quad (2)$$

湿度变化量 ΔY 引起的弹光效应和温度变化量 ΔT 引起的热光效应会使光纤光栅折射率发生变化， ΔY 引起的湿膨胀和 ΔT 引起的热膨胀使得光纤光栅的轴向应变发生变化，从而光栅栅距发生变化，分别对应于式(2)中右边的第一与第二项^[9]。

对于同时感受温、湿度的光纤光栅而言，由于光纤与湿敏涂层之间存在相互约束，则湿度变化量 ΔY 和温度变化量 ΔT 引起光纤光栅轴向应变，因而栅距发生改变，由弹性理论可得

$$\frac{\Delta \Lambda_{i1}}{\Lambda_{i1}} \Big|_H = C_{i1} \beta \Delta Y \quad (3)$$

$$C_{i1} = \frac{E_M (r_M^2 - r_F^2) (1 - 2\mu_F)}{(1 - 2\mu_M) r_F^2 E_F + (1 - 2\mu_F) (r_M^2 - r_F^2) E_M};$$

β 、 μ_M 、 E_M 分别为湿敏材料的湿膨胀系数、泊松比和杨氏模量； μ_F 、 E_F 为光纤的泊松比和杨氏模量； r_F 、 r_M 为湿敏涂层和光纤包层的横截面半径^[10-11]。

发生轴向应变而引起的光纤光栅的波长位移变化为

$$\frac{\Delta \lambda_{i1}}{\lambda_{i1}} = C_{i1} (1 - p_e) \beta \Delta Y + [C_{i1} (\alpha_M - \alpha_F) + \xi] \Delta T =$$

$$K_{M1} \Delta Y + K_{T1} \Delta T \quad (4)$$

其中， $K_{M1} = C_{i1} (1 - p_e) \beta$ ； $K_{T1} = C_{i1} (\alpha_M - \alpha_F) + \xi$ ； p_e 、 ξ 分别为光纤的弹光系数和热光系数； α_M 、 α_F 分别为湿敏材料和光纤的线膨胀系数； K_{T1} 、 K_{M1} 分别为光纤光栅的温、湿度灵敏度系数。

对于只受温度变化影响的光纤光栅而言，取 $\beta=0$ ，即 $K_{M2}=0$ 可得。因此，波长位移变化为

$$\frac{\Delta \lambda_{i2}}{\lambda_{i2}} = [(1 - p_e) \alpha_F + \xi] \Delta T = K_{T2} \Delta T \quad (5)$$

式中 K_{T2} 为光纤光栅的温度灵敏度系数， $K_{T2} = (1 - p_e) \alpha_F + \xi$ 。

联立式(4)、(5)，求解方程组即可求出相对湿度变化量 ΔY 和温度变化量 ΔT 。

3 光纤光栅传感器测量系统装置

图 1 为 Bragg 光纤光栅测量湿蒸汽湿度实验原理图。对于光纤光栅波长漂移的测量，采用密集波分复用 (DWDM) 的滤波曲线进行测量。宽带光源的光经过耦合器再经过分路器分为多路，分别连到光纤光栅传感器上。安装在每个光纤光栅的中心反射波长都不同，从多路光纤光栅反射回来的光经过分路器成为一路，再经过耦合器到达 DWDM，DWDM 的每一个通道对反射光进行滤波。滤波后所得的光强信号包含了光纤光栅的反射中心波长信号。每一路的光强信号经过放大和高速采样，接入计算机数据处理。为同时测量湿度和温度，光纤光栅处于自由状态，无外加应力。在同一个地点布置两个光栅，其中一个光栅密封在石英管内，只感受蒸汽温度变化；而另一个经过湿敏复合材料涂层，同时感受蒸汽湿度和温度的变化。这两个变化都会引起光栅波长位移，按式(4)、(5)计算，能同时得到温、湿度变化的具体数据。

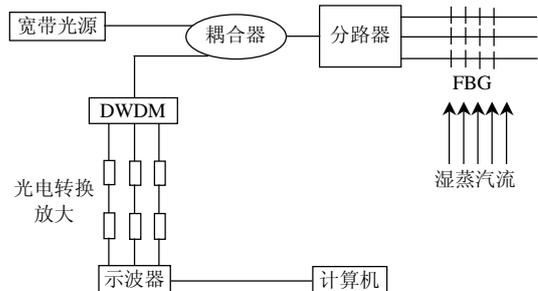


图 1 Bragg 光纤光栅测量湿蒸汽温、湿度实验原理图
Fig.1 Schematic diagram of temperature/ moisture measurement with FBG

4 感湿材料的选择

光纤光栅对温度和应变的变化感应灵敏,而对湿度变化敏感性很差,所引起的波长位移很小,因此,需要在光纤的外表面涂上一层感湿材料,增大光纤光栅对湿度变化的敏感性。

对感湿材料的感湿特性已有很多研究。按感湿材料分类,可以分为:①烧结型半导体陶瓷材料,如 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$ 、 $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$ 、 $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ 等;②瓷粉型感湿材料,又称为涂覆膜型陶瓷材料,如 Fe_3O_4 、 Al_2O_3 等;③多孔氧化物感湿材料,如 SiO_2 、 Al_2O_3 等;④元素半导体感湿材料,常见的有元素 Ge 膜、C 膜及 Si 烧结膜;⑤电解质类感湿材料,如氯化锂、高分子羟乙基纤维素碳、高分子聚苯乙烯磺酸锂等;⑥复合材料聚酰亚胺感湿材料;⑦复合材料环氧-酚醛树脂感湿材料。按感湿材料的感湿特征值分类,可以分为:①电阻变化量,如 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$ 、 $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ 、 Fe_3O_4 、 Al_2O_3 、元素半导体感湿材料等;②电容变化量,如 $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$ 等^[12];③线性膨胀量,如碳纤维复合材料、聚酰亚胺复合材料、环氧-酚醛树脂复合材料等。

根据光纤光栅感湿原理,在选择感湿材料时,感湿材料的感湿特征值必须是线性膨胀量。而湿膨胀量是一个微小量,纵向几乎为零,横向变形也只有几十微米,所以要求膨胀量精度应达 L 级,而且和热膨胀不同,湿膨胀与水份含量的关系要在很长时间内进行测量。所以要求湿膨胀线性度好,感应湿度量程大,工作温度范围宽,灵敏度高,响应时间短,湿滞迥差小等。经过对数十种湿敏材料的对比分析,选择碳纤维复合材料、环氧-酚醛树脂湿敏材料和聚酰亚胺为实验感湿材料较理想。

碳纤维复合材料是高分子聚合物,具有良好的感湿性^[13],利用其吸收水分后体积膨胀的特性,其湿膨胀线性度好,湿度 Y 与湿应变 ϵ 的关系曲线如图 2 所示。

环氧-酚醛树脂湿敏材料,对水异常敏感,将促使复合材料发生物理降解,并影响其物理及力学性能。在国内外还很少有人对复合材料的感湿特性进行研究,关于这方面的报道也很少。环氧-酚醛树脂材料在热湿环境中,吸湿特性显著^[14],但湿膨胀线性度较差(图 3)。

聚酰亚胺薄膜的性能良好,耐高温、耐腐蚀、湿膨胀线性度好,它的机械性能、介电性能、耐辐射性能好,因此聚酰亚胺薄膜是一种很好的感湿材

料,在湿度传感器中的应用越来越广^[15-16]。其测湿量程宽,测湿精度高^[17],性能稳定好。其湿滞迥差曲线和响应时间如图 4、5 所示。

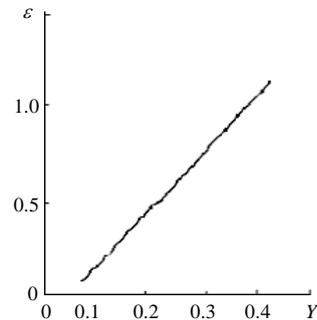


图 2 碳纤维复合材料湿应变 ϵ 随湿度 Y 变化
Fig.2 The moisture strain of carbon fibre composite materials with the hygroscopic rate

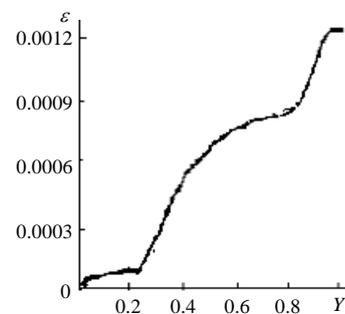


图 3 环氧-酚醛树脂湿应变 ϵ 随湿度 Y 变化
Fig.3 The moisture strain of epoxy-phenolic resin with the hygroscopic rate

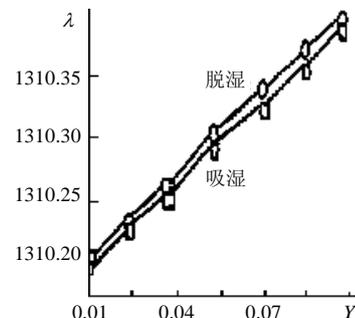


图 4 湿滞迥线
Fig.4 Hysteresis of relative moisture measurement

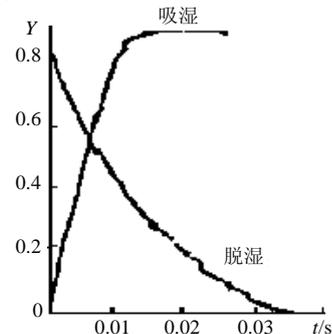


图 5 响应时间
Fig.5 Responding time of relative moisture measurement

5 涂覆方法

常采用刷涂法和喷涂法对感湿膜进行涂覆。刷涂法用经过酒精润湿过的刷浸蘸上湿敏材料溶液，轻轻的涂覆在已经清洁好的光纤上，根据要求的厚度进行涂覆，可以达到 10、20、30、50、80、100 μm 等^[18]。为了使器件性能稳定，涂覆后需要对涂层进行热处理，从而也消除应变的影响。喷涂法就是将湿敏材料溶液装入干燥清洁喷枪中，垂直对准光纤进行喷涂，只要控制好喷涂液的浓度、喷枪口的大小、喷涂的速度、时间，多次喷涂后便能得到需要的厚度。喷涂后任须进行热处理以消除残余应力。

6 传感器测量的影响因素和误差分析

(1) 涂层厚度 增大涂覆层厚度能提高传感器的性能，使传感器的温、湿度灵敏度大大提高，但增大涂覆层厚度时应保证不影响传感器的动态响应时间，否则效果并不明显；涂覆层即感湿膜太薄，器件的感湿特性的重复性较差、滞后现象严重、线性度不好，引入较大误差；感湿膜太厚则易剥落，所以感湿膜的厚度一般取 20~40 μm 为适宜^[18]。

(2) 光纤包层半径 减小光纤包层半径也能使传感器的温、湿度灵敏度大大提高，精度较高，计算误差小，但要考虑目前光纤的制造工艺。

(3) 测量位置 由于光纤是采用分布式布置的，所以布置要选择易测量、便于安装的位置，这是一个非常复杂的问题，结合汽轮机内部结构，需要具体考虑。

(4) 粘胶 一般用塑性粘合剂将光纤强有力的粘结在汽轮机内壁上，使得光纤能够有效地感应蒸汽的温、湿度的变化。常用刚性环氧酚醛树脂玻璃胶^[19]。而且需要考虑粘胶的涂覆厚度，粘胶会受到温度和湿度的影响。粘胶太厚在高温或高湿条件会引起光纤光栅发生感应，栅距增大，从而引入更大的测量误差。粘胶太薄可能在一段时间后降低光纤与汽轮机内壁的粘结力，从而降低光纤光栅的灵敏度。

(5) 环境因素（压力、洁净程度等） 压力太大可能会破坏光纤光栅，使得测量不准确；如果环境中灰尘较多，易粘附在湿敏材料上，使得湿敏材料的感湿性能变差，灵敏度降低，延长响应时间，增加滞后性，增大测量误差。

7 结论

利用光纤光栅来测量应变、温度的研究已趋于

成熟，正在向工业化应用方向发展，但国内外用光纤光栅来测量湿蒸汽中湿度分布的研究还很少。本文利用光纤光栅传感器具有传统传感器所具有的特殊优点，如能实现动态的实时、准分布测量和精度高等，对同时测量湿蒸汽两相流中湿度场以及温度场的机理进行了详细的理论分析。可知，在光纤外面涂覆对湿度敏感的湿敏材料，采用分布式方式对蒸汽进行多点实时测量，根据上面的原理便能同时测出湿蒸汽两相流中湿度与温度值以及变化量，实时动态确定湿度场与温度场的分布。

参考文献

- [1] 蔡颀年, 王乃宁. 湿蒸汽两相流[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [2] 韩中合, 张淑娥, 田松峰, 等. 汽轮机排汽湿度谐振腔微扰测量法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 199-202.
Han Zhonghe, Zhang Shue, Tian Songfeng *et al.* Study on a method of wetness measurement based on resonant cavity perturbation for steam turbine exhaust[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 199-202.
- [3] 盛德仁. 激光角散射诊断气固两相流粒度及浓度的研究[J]. 激光技术, 2000, 24(3): 163-166.
Sheng Deren. Research on evaluation of particle size distribution and mean concentration by laser scattering[J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 163-166.
- [4] 胡柱国, 盛德仁. 液滴微粒直径分布的激光散射法测量[J]. 光学学报, 1989, 9(12): 1119-1125.
Hu zhuguo, Sheng Deren. Measurement of droplet diameter distribution by laser scattering method[J]. ACTC Optica Sinica, 1989, 9(12): 1119-1125.
- [5] Kersey A D, Davis M A, Berkoff T A *et al.* Progress towards the development of practical fiber bragg grating instrumentation systems[J]. Proc SPIE 1996, 28(39): 40-63.
- [6] Qiu Y Y, Azeredo L C, Alcacer J R *et al.* A CMOS humidity sensor with on-chip calibration[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2001, 92(1-3): 80-87.
- [7] Gerlach G, Sager K. A piezitive humidity sensor[J]. Sensor and Actuators, A: Physical, 1994, 43(1-3): 181-184..
- [8] 尚丽平, 张淑清, 史锦珊. 光纤光栅传感器的现状与发展[J]. 燕山大学学报, 2001, 25(2): 139-143.
Shang Liping, Zhang Shuqing, Shi Jinshan. The development and status quo of fiber grating sensor[J]. Journal of Yanshan University, 2001, 25(2): 139-143.
- [9] 彭仕玉, 元秀华, 张国云. 光纤光栅传感器温度和轴向应变灵敏度的研究[J]. 光通信研究, 2003, 116(2): 46-48.
Peng Shiyu, Yuan Xiuhua, Zhang Guoyun. Study on temperature and axial strain's sensitivity of optical fiber grating sensors[J]. Study on Optical Communication, 2003, 116(2): 46-48.
- [10] 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2003, 32(10): 1167-1169.
Zhang Xiangdong, Li Yulin, Peng Wenda *et al.* Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on FBG[J]. ACTA Photonica Sinica, 2003, 32(10): 1167-1169.
- [11] Shiue S T. Thermal stresses in tightly jacketed double coated optical

- fibers at low temperature[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(12): 7695-7703.
- [12] 易惠中. 湿度传感器用湿敏材料[J]. *仪表材料*, 1990, 21(2): 118-124.
Yi Huizhong. Moisture sensitive material used by humidity sensor[J]. *Journal of Functional Materials*, 1990, 21(2): 118-124.
- [13] 尹京智. 碳纤维复合材料湿膨胀系数试验方法[J]. *材料工程*, 1997, (5): 26-27.
Yin Jingzhi. A study of a test method for the coefficient of moisture expansion of composite materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1997, (5): 26-27.
- [14] 江大志, 唐羽掌. 环氧-酚醛树脂的湿效应实验研究[J]. *宇航材料工艺*, 1992, (5): 29-31.
Jiang Dazhi, Tang Yuzhang. Experiment study of hygroscopic property of epoxy-phenolic resin[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1992, (5): 29-31.
- [15] Takaaki K, Tomohito H, Akihiko I *et al.* A thin polyimide based capacitive type relative humidity sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 1993, 13(14): 89-91.
- [16] Karsten S, Gerald G, Andreac S *et al.* A humidity sensor of a new type[J]. *Sensors and Actuators B*, 1994, 18(1-3): 85-88.
- [17] Masanobu M, Takaaki K, Tetsuya M *et al.* Stability and reliability of capacitive-type relative humidity sensors using crosslinked polyimide films[J]. *Sensors and Actuators B*, 1998, 52(1-2): 53-57.
- [18] 康昌鹤, 唐省吾. 气、湿敏感器件及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [19] 江毅, 陈伟民, 杨礼成, 等. 光纤光栅用于应变/温度传感初探[J]. *传感技术学报*, 1997, 10(3): 43-46.
Jiang Yi, Chen Weimin, Yang Licheng *et al.* The investigation on strain/temperature sensor based on optic-fiber grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 1997, 10(3): 43-46.

收稿日期: 2004-12-07。

作者简介:

盛德仁(1960-), 男, 教授, 从事汽轮机组性能分析、湿蒸汽两相流的激光测量技术等方面的研究。