**DOI:**10.16136/j.joel.2023.05.0298

# 双 FBG 燃料棒温度、应变与振动同步测量研究

郭裕丰1,吴德操1\*,罗彬彬1,刘晓晶2,赵明富1,龙俊宇1

(1.重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室,重庆 400054; 2.上海交通大学 核科学与核工程学院,上海 200240)

摘要:压水核反应堆堆芯结构设计中通常需要借助模型实验装置验证其热工特性。其中,对装置内的电加热仿真燃料棒进行温度、应变和振动同步测量是研究堆芯棒束通道水力学参数的重要环节。针对传统检测方法抗电磁干扰能力弱、体积较大,且只能实现单参数测量等问题,本文基于双光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG)光纤传感法对此进行了研究,首先通过光纤封装的优化设计,改变棒体上两 FBG的波长漂移系数,实现应变、温度传感的可靠解耦,解决两者的测量串扰问题;然后对 FBG 中心波长进行动态采集,在频域上分析了燃料棒的振动特性,最终实现三种参数的精准测量。实验表明,在流动水浴环境下,该方法可观察到不同流速下流致振动幅度存在明显的单调增长,对棒体表面温度和应变的测量误差均低于 0.5%,可为反应堆研究设计提供可靠的数据支撑。

关键词:光纤布拉格光栅(FBG);燃料棒;同步测量;多参数 中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)05-0449-08

# Research on synchronizing measurement of temperature, strain and vibration of fuel rod with dual FBGs

GUO Yufeng<sup>1</sup>, WU Decao<sup>1</sup>\*, LUO Binbin<sup>1</sup>, LIU Xiaojing<sup>2</sup>, ZHAO Mingfu<sup>1</sup>, LONG Junyu<sup>1</sup> (1. Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. School of Nuclear Science and Nuclear Engineering, Shanghai Jiao Tong University, shanghai 200240, China)

Abstract: In the design stage of the core structure of a pressurized water nuclear reactor, a model experimental device is usually used to verify the thermal characteristics. Synchronizing measuring temperature, strain and vibration of the electrically heated simulated fuel rods in the device is an important part of studying the hydraulic parameters of the core rod bundle channel. In this paper, the research of fiber sensing method based on double fiber Bragg grating (FBG) is to solve the problems of traditional detection methods, such as weak anti-electromagnetic interference ability, large volume, and single parameter can be measured only. Firstly, the wavelength drift coefficient of the two FBGs on the rod body is changed by using the optimized design of the optical fiber package to realize the reliable decoupling of strain and temperature sensing, therefore the measurement crosstalk problem of the two parameters is resolved; Then, by dynamically collecting the FBG center wavelength, the acquisition of the vibration characteristics of the fuel rods is analyzed in the frequency domain, and the precise measurement of the three parameters is achieved finally. Experiment results measured by this method show that the vibration amplitude caused by the flow increases monotonically with the flow rate in the flowing water bath environment, and the measurement error rate of the rod surface temperature and strain is less than 0.5%, which can provide reliable data support for the research and design of the reactor.

Key words fiber Bragg grating (FBG); fuel rod; synchronizing measurement; multiple parameters

\* E-mail:guoyufeng\_email@163.com

**收稿日期:**2022-04-22 修订日期:2022-06-25

基金项目:国家自然科学基金重点基金项目(U20B2011)、重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202001117)、重庆市自然 科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0243)、重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K201905601)、重庆英才计 划包干 制 项目(cstc2021ycjh-bgzxm0128、CSTC2021YCJH-BGZXM0287)和重庆理工大学研究生创新项目(clgycx20202046、gzlcx20223085)资助项目

# 0 引 言

压水核反应堆中,燃料棒产生的大量热量由 冷却剂向后级回路传递<sup>[1,2]</sup>。棒束通道内的冷却 剂具有高温、高压、高流速等特点,使得通道结构 在满足较高传热系数的同时,还必须具备良好的 温度和压力分布特性,避免燃料棒出现局部温度 异常或显著的流致振动<sup>[3-5]</sup>与流制磨损弯曲<sup>[6,7]</sup>, 以保障棒束及反应堆的工作安全。因此,在反应 堆设计阶段,通常需要基于热工模型构建堆芯实 验装置,通过电加热复现堆芯工作环境,并对燃料 棒温度、应变和振动进行检测,进而根据测量参数 完成堆芯结构的热工设计优化<sup>[1,2]</sup>。

目前针对燃料棒的温度、应变和振动三参数 测量,国内外进行了大量研究,如 KATSUYUKI 等<sup>[8]</sup>开发出一款 Pt-Mo 合金热电偶,能在高温真 空中长期稳定工作,;唐俐等<sup>[9]</sup>利用电阻式应变片 对燃料组件的应变特性进行了研究,通过改进应 变片的粘贴工艺,使得实验应变数据更加接近理 论值;张波涛等<sup>[10]</sup>借助激光多普勒测振仪测量了 棒束横流方向的振动信号,并对流致振动进行了 特征分类。 上述方法大多采用了电学有源测量方案<sup>[8+9]</sup>, 或基于开放腔体的光学非接触测量<sup>[10]</sup>。由于部 分堆芯实验装置的加热电流可达数千安培,压力 数十兆帕<sup>[11,12]</sup>,这些方法难以同时满足抗电磁干 扰、绝缘和密封承压要求,而且测量三种参数需使 用不同的传感器,结构较为复杂,有可能大幅改变 棒体表面形态,影响其水力学特性分析。因此,也 有学者引入光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)进行了燃料棒参数测量研究,如李晗<sup>[13]</sup>等采 用单光栅传感器配合最小二乘法解耦,实现了棒 束振动、温度双参数检测,但测温范围较小(80 ℃ 内),算法拟合精度相对受限。

鉴于此,本文研究了一种基于双 FBG 的燃料 棒三参数无源测量方法,其环境耐受力强,结构紧 凑,可实现温度-应变-振动同步检测,有利于堆芯 热工特性的精准分析。

#### 1 检测原理

FBG的结构如图 1 所示,由涂覆层、包层、纤芯和 Bragg 光栅刻线组成,为确保测温线性区延伸至 250 ℃,需选用紫外写入光栅配合聚酰亚胺涂覆层制作的特种光纤。



Fig. 1 FBG structure diagram

FBG 的反射中心波长  $\lambda_{\rm B}$  取决于纤芯的有效折射率  $n_{\rm eff}$ 和光纤光栅周期  $\Lambda$ ,可表示为:

 $m\lambda_{\rm B} = 2n_{\rm eff}\Lambda,\qquad(1)$ 

式中,系数m为FBG的中心波长阶数。当环境温度改 变或栅区受力产生形变时,将使 $n_{\text{eff}}$ 和 $\Lambda$ 发生变化, 从而引起 $\lambda_{\text{B}}$ 偏移<sup>[14,15]</sup>。

其偏移量  $\Delta \lambda_{B}$  可由光纤解调仪进行精密测量, 它与应变、温度满足如下关系:

 $\Delta \lambda_{\rm B} = k_{\varepsilon} \Delta \varepsilon + k_{\rm T} \Delta T , \qquad (2)$ 

式中, $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta T$ 分别为应变改变量和温度改变量, $k_{\varepsilon}$ 、  $k_{T}$ 为 FBG 的应变系数与温度系数,可通过实验标定 测得。 本文以 0 °C 无应变环境为基准,定义此时的  $\lambda_B$  为基准中心波长  $\lambda_R$ ,则式(2)可改写为:

 $\Delta \lambda_{\rm B} = \lambda_{\rm B} - \lambda_{\rm R} = k_{\varepsilon}(\varepsilon - 0) + k_{\rm T}(T - 0) \,\, (3)$ 

对于  $\varepsilon$ 、*T* 双变量的求解,还需引入额外的约束条件。本文采用双 FBG 紧密串联测量方式,通过设置不同的中心波长  $\lambda_{B1}$ 、 $\lambda_{B2}$ 和不同的温度应变系数  $(k_{\epsilon 1}, k_{T1} | k_{\epsilon 2}, k_{T2})$ ,从而构建二元方程,实现温度、应变的同步解算,如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\varepsilon 1} & k_{T1} \\ k_{\varepsilon 2} & k_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} .$$
(4)

对于振动信号,实为应变的高频分量,通过对应 变测值的高速采样,经由傅里叶变换即可得到其频 率和幅度<sup>[16]</sup>,其中 FBG 振动测量灵敏度 S 与振动加速度 a 的关系可表示为:

$$S = \frac{\Delta \lambda_{\rm B}}{a} \,. \tag{5}$$

# 2 FBG 传感器的标定与安装

#### 2.1 FBG温度、应变特性标定

由上文可知,FBG 温度、应变系数的准确标定是 燃料棒参数测量的基础。实验采用了常温下 $\lambda_B$ 分别 为1533nm(FBG1)和1546nm(FBG2)的双光加热 FBG 传感区实现,如图 2(a)所示。温升范围 40— 250 ℃,步进值为 10 ℃。标定时 FBG 必须保持松弛 伸直,确保此时应变近似为零。利用光纤解调仪记 录 $λ_B$  与温度的关系曲线,如图 2(b)所示。

从图 2 可知,随温度升高, $\lambda_{\rm B}$  发生线性红移,通 过拟合可得  $k_{T1}$ (FBG1)和  $k_{T2}$ (FBG2)的标定值分别 为12.10 pm / ℃、13.15 pm / ℃; $\lambda_{R1}$ 、 $\lambda_{R2}$ 分别为 1532.6533 nm、1545.4808 nm。

应变标定实验装置结构如图3(a)所示,由两个 精密水平位移台组成,被测FBG两端放置于位移台







图 3 应变标定实验台与标定曲线:(a) 应变标定实验台;(b) 双 FBG 光纤应变标定曲线 Fig. 3 Strain calibration test bench and calibration curve:(a) Strain calibration test bench; (b) Strain calibration curve of dual FBG fibers

凹槽内,并用磁铁和胶带拉直固定。为避免温度带 来误差,标定全程环境温度保持在 20 °C。两个水平 位移台相距 118.21 mm,每次移动右平台 10  $\mu$ m, FBG 轴向应变相应增加 84.6  $\mu$ ε (1  $\mu$ ε 为 1 m 的光纤 拉伸 1  $\mu$ m 所需要施加的拉力),记录  $\lambda_{\rm B}$ 。 $\lambda_{\rm B}$  应变曲 线如图 3(b)所示,直线拟合得  $k_{\rm el} = 0.87$  pm/ $\mu$ ε, $k_{\rm e2}$ =0.875 pm/ $\mu$ ε。

#### 2.2 光纤传感器安装与温度-应变解耦

由标定结果可知,双 FBG 的温度、应变系数相 近,若直接代入式(4)将使方程病态,导致较大的计 算误差。因此,需要通过封装结构设计改变两者的 系数值。本文考虑测温光栅(FBG1)的封装采用套 管粘接方式,即整个栅区和光纤尾端一并置于石英 毛细管内(外径 0.6 mm,内径 0.3 mm),再把毛细管 使用高温有机胶粘接至燃料棒上。此时,FBG1 处于 游离活动状态,不受燃料棒形变影响,kel取零。

FBG2 需要让其受到温度-应变的共同作用,采 用与棒体直接粘贴的方式封装,如图 4 所示。

需说明的是,文中实验采用直径 9.5 mm,长度 300 mm 的不锈钢棒模拟燃料棒的应变特性,通过内 置电热丝加热升温,后文所提及的燃料棒均指代该 棒体。

将双 FBG 传感器安装好后,对燃料棒进行加热, FBG1 不受应变影响,可直接解出  $T_{\circ}$  而 FBG2 受温 度影响的同时还因棒体受热膨胀引入轴向应变,故 需要进行温度-应变解耦。将上文标定得到的双 FBG 的温度、应变系数代入式(4),但其中  $k_{\epsilon 1}$ 取零, 得到耦合矩阵方程(式(6))。再将光纤解调仪测得 的 $\Delta\lambda_{\rm B1}$ 、 $\Delta\lambda_{\rm B2}$ 代入式(6),即可实现T和 $\epsilon$ 的同时 测量。



图 4 FBG 封装示意图与安装实物图 Fig. 4 Schematic diagram of FBG package and physical installation

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ T \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0 \text{ pm}/\mu\varepsilon & 12.10 \text{ pm}/^{\circ}C \\ 0.875 \text{ pm}/\mu\varepsilon & 13.15 \text{ pm}/^{\circ}C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} .$$
(6)

为验证 FBG 应变测量的准确性,可由理论计算 燃料棒的热胀长度进行对比,如式(7)所示:

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T' , \qquad (7)$$

式中, $L_1$  为燃料棒原长, $\Delta L$  为燃料棒的理论膨胀长度, $\alpha$  为热膨胀系数, $\Delta T'$ 为燃料棒的温度变化量。燃料棒材料为 304 不锈钢,取  $\alpha = 17$ , $L_1 = 0.3$  m (20 ℃),代入式(7)可得:

$$\Delta L = 17 \times 0.3 \times (T - 20)$$
(8)

将温度代入式(8),即可求得当前环境下的理论 应变值  $\epsilon_T = \Delta L/L$ 。实验利用 FBG 在 40—250 ℃ 范围内对燃料棒温度一应变进行解耦测试,结果如 表1所示。

表中, *T*<sub>PT100</sub> 为热敏电阻(PT00)测得的参考温度; *T*<sub>FBG</sub>、ε<sub>FBG</sub>分别为 FBG 传感获取的棒体温度和解算的棒体应变量。对比可知, FBG 和 PT100 的温度

检测互差最大值为±1.4 ℃,均值为±0.74 ℃。考 虑到 PT00 测值同样存在 1%左右的不确定度,说明 FBG 温度传感可以达到与 PT00 相似的测量精度。 根据表 1 绘制应变理论值与实测值曲线,如图 5

# 表 1 FBG 燃料棒温度-应变解耦数据

1 ab. 1	Temperature-strain	decoupling	data of	r bG Tuel ro	a

$T_{ m PT100}$ / °C	$T_{ m FBG}/$ °C	$\mathbf{arepsilon_{FBG}}/\mu$ e	$\epsilon_{\scriptscriptstyle T}/\mu~\epsilon$
42.4	43.2	275.7	278.8
60.1	59.0	595.8	613.7
70.0	68.6	789.5	780.0
81.3	80.2	936.8	974.1
91.9	92.0	1104.1	1154.3
100.4	101.8	1 236.9	1 298.8
201.0	200.7	2847.3	3009.0
210.8	210.1	3008.8	3 177.8
220.5	221.3	3163.2	3 342.9
231.1	230.3	3 339.6	3 523.5
239.9	240.7	3469.4	3673.3
250.1	250.7	3637.6	3846.9

所示,可见 FBG 实测应变值接近理论应变值,但由于 粘接胶水降低了应变的传递效率,斜率略有不同。 对  $k_{e2}$ 乘以加权值  $k_1/k_2$  进行损失补偿,其中  $k_1$  为理 论应变值曲线斜率, $k_2$  为检测应变值曲线斜率,得到 修正系数1.056。将其代入式(4)重新解耦,测量结 果在 0—4000  $\mu\epsilon$  的传感范围内,最大误差为±39.51  $\mu\epsilon$ ,平均误差±8.91  $\mu\epsilon$ ,传感性能得到进一步改善。



#### 图 5 燃料棒理论应变值、检测应变值和 补偿后应变值对比曲线图

Fig. 5 Comparison curve of theoretical strain value, detected strain value and

strain value after compensation of fuel rod

# 3 基于 FBG 燃料棒振动传感研究

FBG 燃料棒振动传感实验系统如图 6 所示,实验仪器包括光纤光栅解调仪、燃料棒、PC 机以及亿恒科技标准振动校准仪。其中,振动台输出频率范围为0-10 kHz,加速度0-10g,数据精度±1%,

满足实验需求。燃料棒夹持于振动仪上,使用 FBG2 作为测振光栅。通过 PC 机解算动态应变值,并执行 快速傅里叶变换得到振动频谱。实验中,温度和热 胀应变属于准静态信号(0 Hz 附近),不会对振动产 生干扰。

加载 350 Hz 振动信号时测得的时域和频域图 如图 7 所示,可知本方法具备良好的频率测量精度。

利用 Ansys 有限元仿真软件建立燃料棒谐振模型, 仿真参数为, 材料: 304 不锈钢; 密度: 7.98 g/cm<sup>3</sup>;弹性模量: 193 GPa; 泊松比: 0.25; 长度: 30 cm; 内径/外径: 6.5 mm/9.5 mm。分别在棒束的不同位置加载振动信号。发现当加载点位于燃料棒一端, 谐振频率最低, 为 170 Hz; 位于燃料棒中间的谐振频率最高, 为662 Hz。在燃料棒距端点1/3处加载振动信号的仿真结果如图 8 所示, 此时棒束的谐振频率为 385.76 Hz。

利用 FBG 传感器对仿真结果进行对比测试,将 振动台夹持点以及 FBG2 设置在燃料棒三分之一位 置,加载振动加速度0.5g,频率从50 Hz起以 10 Hz步进增加至500 Hz,测量绘制 FBG 输出的振 幅-频率响应曲线,如图9(a)所示。从图可知,谐振 频率(峰值振幅点)约为380 Hz,该实验结果与 Ansys 仿真结果基本契合。

随后,在150 Hz,250 Hz,350 Hz 3 个频率进行 加速度实验,加速度从 0.2 g 起以 0.2 g 步进增加至 1.6 g,记录加速度响应曲线如图 9(b)所示,随着加 速度的增大,FBG 的  $\Delta\lambda_B$  线性增加,三种频率下的振 动灵敏度分别为 1.07 pm/g (150 Hz)、1.23 pm/g (250 Hz)和 11.52 pm/g (350 Hz)。





Fig. 7









# 4 水浴环境下 FBG 的燃料棒监测实验

如图 10 所示,为构建的水浴环境实验系统,由 燃料棒、水槽、水箱、水泵及相应控制一测量单元构 成。燃料棒表面封装双 FBG 光纤与热敏电阻温度传 感器,并密封固定在水槽中。该装置可实现常压条 件下水流量和燃料棒表面温度的闭环控制,温度调 节范围 40—160 ℃,流量 0.5—3.5 m<sup>3</sup>/h。

实验设定固定水流量0.5 m<sup>3</sup>/h,并在100— 160 ℃之间改变燃料棒温度,将光纤解调仪采集数据 带入式(4),并结合前文标定的 $k_{T1}$ 、 $k_{T2}$ 及 $k_{\epsilon 2}$ 修正系 数,得到的测试结果如表 2 所示。由表可知,温度测 量最大误差为±0.80 ℃,平均误差约为±0.56 ℃; 在 0—2 300  $\mu \epsilon$  的传感范围中,应变测量的最大误差 为±20.35  $\mu \epsilon$ ,平均误差为±8.53  $\mu \epsilon$ 。温度、应变 误差率均小于 0.5%。

为探究该方法对流致振动的测量能力,固定加 热温度为 40 ℃,调节水流量分别为 0.5 m<sup>3</sup>/h、2.0 m<sup>3</sup>/h 和 3.5 m<sup>3</sup>/h,分别得到振动测量频谱如图 11 (a)所示。由于图中频谱成分较复杂,为方便观察,以 50 Hz 频宽计算均值频谱,如图 11(b)所示。



图 9 燃料棒夹持 1/3 处的响应图:(a)频率响应图;(b)加速度响应图 Fig. 9 Response diagram of fuel rod clamping 1/3: (a) Frequency response plot; (b) Acceleration response plot



## 图 10 基于 FBG 的燃料棒水浴实验系统图 Fig. 10 System diagram of fuel rod water bath experiment system based on FBG

从图中可知,高流量下对燃料棒施加的流致振动强度显著高于低流量,振动能量主要集中于低频段;不同流量下的振动频谱形态相近,在150 Hz 出现了谐振响应,并在300 Hz、450 Hz 附近出现了其二次谐波和三次谐波。

表 2 基于双 FBG 的燃料棒水浴环境温度应变解耦结果 Tab. 2 Temperature strain decoupling results in the water bath environment based on dual FBGs

$T_{\mathrm{PT100}}$ / °C	$T_{ m FBG}$ / °C	Error of $T$	$arepsilon_{ m FBG} / \mu arepsilon$	$arepsilon_T \ / \mu arepsilon$	$ \begin{array}{c} {\rm Error \ of \ } \epsilon \\ / \sqrt[]{0}_0 \end{array} \end{array} $
100.1	99.6	0.49	1 288.1	1 281.7	0.49
110.0	109.5	0.45	1444.9	1 451.7	0.46
119.9	120.5	0.5	1637.3	1643.9	0.40
130.0	130.1	0.07	1801.5	1803.5	0.10
140.0	140.5	0.35	1979.9	1981.1	0.06
149.9	150.6	0.46	2164.0	2 153.3	0.49
160.1	160.5	0.25	2331.8	2 320.4	0.49

测量结果表明流致振幅与水流速度正相关,燃 料棒在水浴高阻尼环境下谐振频率明显降低,不同 流速下振动频谱分布具备一致性。





(a) Spectrum; (b) The segmented mean spectrum

### 5 结 论

本文研究了一种双 FBG 燃料棒温度、应变和振 动三参数同步测量方法,通过封装设计实现了温度、 应变的准确解耦,实验证明在 250 ℃内的温度、应变 测量的误差较小,并具备燃料棒振动谱分析能力。 该传感方式相比于传统方法具有良好的精度和量 程,且集成度高,结构更加简单,不受电磁干扰影响, 可有效地促进反应堆实验装置的性能评估以及设计 优化。

#### 参考文献:

[1] WU P,REN Y H,SHAN J Q,et al. Assessment of no-coremelt concept for pressure tube supercritical water cooled reactors under extreme accidents[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(5): 156-161.

吴攀,任彦昊,单建强,等.压力管式超临界水堆极限事故下"无堆芯熔化"概念评估[J].核动力工程,2021,42 (5):156-161.

- [2] CAIWH,WEIZS,LISL,et al. Numerical study of singlephase flow and heat transfer characteristics in 5×5 petal-shape fuel rod bundle assembly[J]. Atomic Energy Science and Technology,2021,55(11):1939-1949. 蔡伟华,韦徵圣,李石磊,等.5×5 花瓣形燃料棒束组件 内单相流动与换热特性数值模拟研究[J].原子能科学 技术,2021,55(11):1939-1949.
- [3] MA Y. Numerical analysis of flow-induced vibration of PWR fuel rod assembly[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2019.

马源. 压水堆燃料组件流致振动数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2019.

- [4] FERRARI G, FRANCHINI G, BALASUBRAMANIAN P, et al. Nonlinear vibrations of a nuclear fuel rod supported by spacer grids[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 361:110503.
- [5] DE SANTIS D. SHAMS A. Numerical study of flow-induced vibration of fuel rods [J]. Nuclear Engineering and Design. 2020.361:110547.
- [6] YAMAMOTO A, ENDO T, NAGANO H, et al. A simple treatment of increased gap due to fuel assembly bowing through correction of cross sections[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, 56(6):471-478.
- [7] YANG W, KANG H S, PARK J H. Flexural vibration analysis of nuclear fuel rod bundles interacting with surrounding fluid subjected to pressure wave[J]. Applied Sciences, 2020,10(7):2282.
- [8] ARA K,YAMADA M,WAKAYAMA N, et al. High-temperature characteristics of Pt-Mo alloy thermocouple for incore temperature measurements in very high temperature gas-cooled reactor [J]. Journal of Nuclear Science and Technology,2012,24(6):480-489.
- [9] TANG L, WANG J, MA W H. Reserach of bonded technology of strain gage for fuel assembly model guide tube [J]. Nuclear Power Engineering, 2018,39(3):48-50. 唐俐,王军,马文慧.模拟燃料组件导向管上应变计的粘

贴工艺研究[J].核动力工程,2018,39(3):48-50.

[10] ZHANG B T, ZHU Y C, GONG S J, et al. Experimental study on flow induced vibration of different size strips of fuel rod bundles[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40 (5):192-196.

张波涛,朱晔晨,龚圣捷,等.燃料棒束格架不同尺寸条 带流致振动实验研究[J].核动力工程,2019,40(5): 192-196.

- [11] SOROKIN A P,BOGOLOVSKAYA G P,TRUFANOV A A, et al. Investigation of the effect of radiation-induced shape change of fuel assemblies on the temperature regime and stress-strain state of fuel-element cladding [J]. Atomic Energy,2016,120(6):418-425.
- [12] LYS S,KANYUKA A. Analysis of fuel rod performance per cycle:temperature field,FGP release,swelling[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 25: 100961.
- [13] LI H, ZHANG B T, WANG J J, et al. Decoupling of vibration and temperature signals of fiber Bragg grating sensor
  [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56
  (2):214-222.
  李晗,张波涛,王俊杰,等.光纤光栅传感器振动与温度

信号解耦[J]. 上海交通大学学报,2022,56(2):214-222.

- WANG H P, DAI J G, WANG X Z. Improved temperature compensation of fiber Bragg grating-based sensors applied to structures under different loading conditions[J].
   Optical Fiber Technology, 2021, 63:102506.
- [15] WANG Z,HUA S,WANG D, et al. Design and verification of FBG strain gauge [J]. The Journal of Engineering, 2019,2019(23):8535-8538.
- [16] ZHANG S, HE J, YU Q, et al. Multi-scale load identification system based on distributed optical fiber and local FBG-based vibration sensors [J]. Optik, 2020, 219: 165159.

#### 作者简介:

吴德操 (1984-),男,博士,讲师,主要从事激光传感与光谱法水质 检测方面的研究.