

基于光纤光栅的真空环境不锈钢热传递研究

郑嘉麒, 余有龙, 靳夏文

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 搭建真空环境光纤光栅温度场测量系统,以托卡马克装置中真空室内部支撑的部分结构为原型,构建 304 不锈钢平台作为研究对象,进行常压和真空环境下的稳态热分析。利用铝合金加热板对常压和真空环境下的不锈钢平台施加热载荷,基于微型化管式封装的光纤光栅温度传感器对测点处温度进行监测。实验结果显示,真空环境下热稳态时各测点温度高于常压环境下对应的值,真空环境下不锈钢平台达到热稳态约耗时 4900 s,而常压环境下耗时约为 6150 s。真空和常压环境下均存在热传导和热辐射方式的热量传递。常压环境下不锈钢平台因与空气接触,主要产生热对流形式的热量耗散。因此,不锈钢平台在真空环境下热量损耗少,传热效率高于常压环境。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 不锈钢; 热量传递; 真空

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0406002

Thermal Transmission of Stainless Steel Under Vacuum Condition Based on Fiber Bragg Grating

Zheng Jiaqi, Yu Youlong, Jin Xiawen

*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei, Anhui 230009, China*

Abstract A measurement system of temperature field under vacuum condition is established based on fiber Bragg grating (FBG). A 304 stainless steel frame, which is similar to the support structure of the vacuum chamber in Tokamak devices, is used as the research object to conduct steady-state thermal analysis under both vacuum and normal pressure conditions. Specifically, an aluminum alloy heating plate is adopted to heat the stainless steel frame under either vacuum and normal pressure conditions. As packaged with micro steel capillary, four FBG temperature sensors are placed into measurement points to detect temperature. The experimental results show that the temperatures of four measurement points under vacuum condition are higher than those under normal pressure condition. Meanwhile, the temperature of four measurement points reach stability costs 4900 s and 6150 s, respectively, under vacuum and normal pressure conditions. It is shown that heat transmits by the way of both thermal conduction and thermal radiation under vacuum and normal pressure conditions. As the stainless steel frame contacts with air under normal pressure condition, which leads to thermal losses via thermal convection, the heat loss of stainless steel frame is smaller, and the heat transmission efficiency is higher under vacuum condition.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; stainless steel; thermal transmission; vacuum

OCIS codes 060.2370; 060.2300; 050.2770

1 引 言

真空技术可广泛应用于航空航天^[1-2]、热核技术^[3]等前沿领域。准确掌握结构的热量传递规律和温度分布状态,有助于提高系统工作的可靠性,避免

安全隐患。温度测量方法可分为接触测量法和非接触测量法,前者包括膨胀式温度计测量法、热电偶测量法^[4]、热敏电阻测量法^[5]等,后者包括红外热成像法^[6-7]等。接触测量法中,膨胀式温度计测温响应时间长,热电偶测温结果易受电磁场干扰,热敏电阻测

收稿日期: 2017-10-25; 收到修改稿日期: 2017-11-22

作者简介: 郑嘉麒(1993—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: 18261552696@163.com

导师简介: 余有龙(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤光栅传感器及网络化技术、光纤激光器以及光无源器件等方面的研究。E-mail: youlongyu@163.com(通信联系人)

温非线性现象明显、互换性差;非接触测量法中常用的红外热成像,易受背景温度和被测物表面发射率影响,测量精度有限。

波长编码的光纤布拉格光栅(FBG)传感器体积小,质量轻,易复用成网络,是一种能够快速获取发热物体温度分布情况的探测工具^[8-12]。以托卡马克装置中真空室内部支撑部分结构为原型,设计304不锈钢平台作为研究对象,利用微型化管式封装的FBG温度传感器对常压和真空环境下不锈钢平台多个测点处的温度进行测量,获取不锈钢平台热量传递规律。该技术为了解托卡马克装置及其他真空环境下结构的热量传递和温度分布提供了技术支持。

2 理论分析

热传递主要包括三种方式:热传导、热对流及热辐射。

2.1 热传导

材料内部存在温差时,热量总是向温度降低方

表1 银、铜、铝与304不锈钢的热扩散率

Table 1 Thermal diffusivities of Ag, Au, Al and 304 stainless steel

Material	$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho / (10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$a / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
Ag	429	232	10.49	1.76×10^{-4}
Au	401	386	8.96	1.16×10^{-4}
Al	237	880	2.70	7.97×10^{-5}
304 stainless steel	16	500	7.93	4.03×10^{-6}

2.2 热对流

流体流经物体表面时,与物体表面因温差产生对流传热 Q ,当物体表面温度高于流体温度时,满足:

$$Q = h(t_w - t_f), \quad (3)$$

式中 h 为对流传热系数, t_w 为物体表面温度, t_f 为流体温度。

2.3 热辐射

物体因具有温度而通过电磁波的形式辐射热量,因此热辐射无需任何介质。能够吸收投入到表面所有辐射能的物体称为黑体,其吸收本领和辐射本领在同温度物体中最大,实际物体的辐射能力小于同温度黑体。实际物体的辐射 P 满足修正形式的斯蒂芬-玻尔兹曼定律:

$$P = \varepsilon \sigma t^4, \quad (4)$$

式中 ε 为实际物体发射率, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常量,值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

304不锈钢平台(尺寸如图1所示)按图2所示置于真空杜瓦中,固定一尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的铝合金加热板对其施加热载荷。不锈钢平台用螺丝固定在杜瓦下法兰上,杜瓦

向传递。热流和温度场的关系满足傅里叶定律^[13]:

$$\mathbf{q} = -k \frac{\partial t}{\partial \mathbf{n}}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{q} 为热流密度矢量; k 为材料的导热系数; t 为温度场的空间分布; \mathbf{n} 为通过某一点等温线的法向单位矢量,指向温度升高方向。物体热量传递和升温快慢取决于材质,定义热扩散率 a 为

$$a = \frac{k}{\rho c}, \quad (2)$$

式中 ρ 为材料密度, c 为比热容。 a 越大,则材料内部温度平衡的能力越强,升高单位温度所需的热量越少。

根据(2)式计算出银、铜、铝与304不锈钢的热扩散率(表1)。其中,304不锈钢的热扩散率为 $4.03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,远低于前三者,因此,单位体积的304不锈钢每升高单位温度所需吸收的热量最多,耗时最长,热惯量最大。

下法兰直径为 510 mm 、厚度为 18 mm 。不锈钢平台与法兰之间垫有一尺寸为 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的环氧树脂板。真空杜瓦置于铁架上,杜瓦下法兰的底部与空气接触。

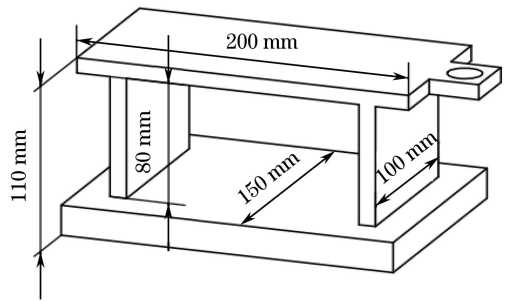


图1 不锈钢平台示意图

Fig. 1 Diagram of stainless steel frame

由于不锈钢平台结构复杂,很难用解析式表述稳态时的传热规律,因此借助ANSYS Workbench 15.0软件以图2中放大部分为分析对象进行稳态热分析。取环氧树脂板导热系数为 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、空气对流换热系数为 $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、铝合金加热板辐射率为 0.2 、不锈钢辐射率为 0.15 ,由托卡马克装置

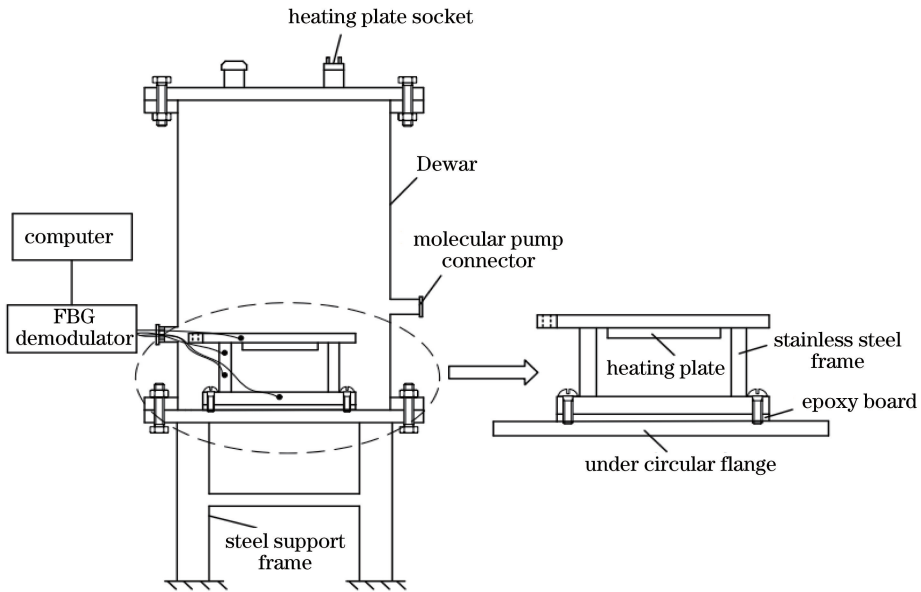


图 2 光纤光栅温度场测量系统

Fig. 2 Measurement system of temperature field based on FBG

中真空室内支撑部分结构顶部温度值设置加热板温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，真空环境下室温为 $19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且仅有下法兰与空气接触，常压环境下室温为 $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且整个分析对象与空气接触，两者温度云图如图 3 所示。由于加热板与不锈钢平台存在温差，因此真空环境下的热量一方面主要通过热传导经不锈钢平台向下传递至各测点，一方面通过热辐射以电磁波形式传递至测点，同时不锈钢平台自身存在对外热辐

射。常压环境下，除热传导和热辐射外，不锈钢平台表面与空气存在热对流。取 x 轴为水平方向， y 轴为垂直方向，仿真结果表明，真空和常压环境下不锈钢平台各处温度沿 y 轴负方向降低，但由于常压环境下热对流的存在，同一点处常压环境下温度值低于真空环境下对应的值。

不锈钢平台由上、下两块不锈钢板与两块作为支撑的不锈钢焊接组成。根据仿真结果，实验设置了如

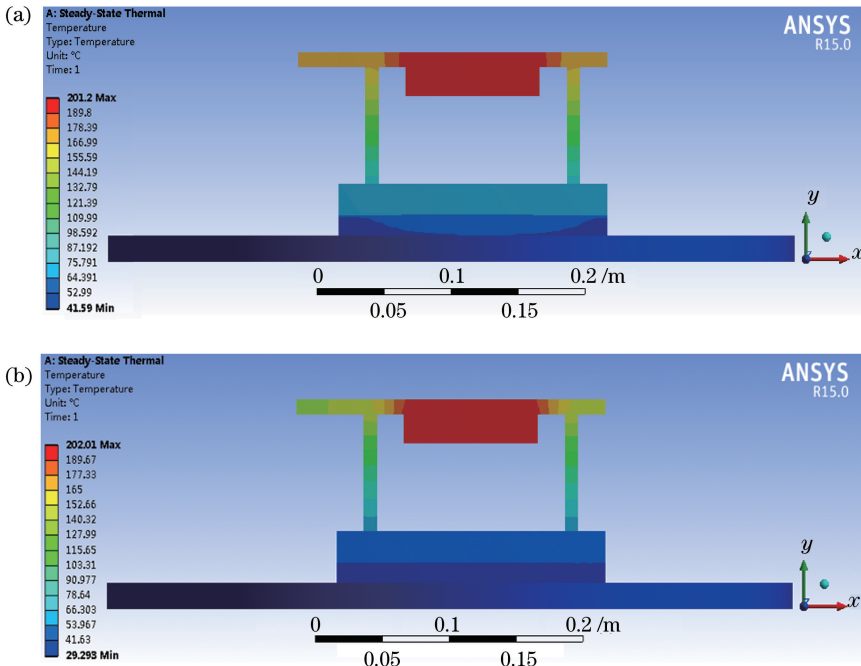


图 3 (a)真空与(b)常压环境下温度云图

Fig. 3 Temperature nephogram under (a) vacuum and (b) normal pressure conditions

图 4(a)所示的 4 个温度测点,以准确获取不锈钢平台的温度分布情况。测点 1(T1)测量不锈钢平台上部温度,由温度云图可知,测点 1 处温度较高但低于加热板温度,避免了与加热板温度过于接近;热量主要通过支承传递至不锈钢平台底部,测点 2(T2)接近上

部,测点 3(T3)接近底座,两者处在支承两端,避免温度相近,因此测点 2、3 用于测量支承部分温度分布;由两个支承部分传递的热量在底部中心汇聚,由温度云图得知,底座温度分布变化较小,因此选取不锈钢平台底部中心位置为测点 4(T4)。

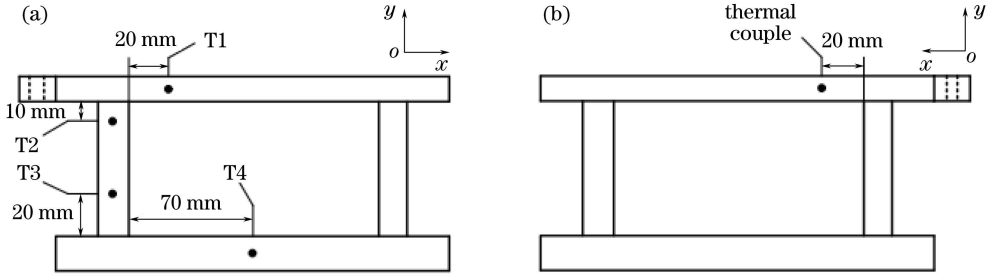


图 4 不锈钢平台测点分布。(a) FBG 传感器;(b)热电偶

Fig. 4 Distribution of measurement points of stainless steel frame. (a) FBG sensor; (b) thermocouple

为了能准确获取不锈钢平台整体温度分布情况,宜选用热惯量小的微型化封装的 FBG 温度传感器^[14-16]。受热膨胀效应和热光效应的共同作用,FBG 布拉格波长相对漂移量为^[17]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移量, λ_B 为布拉格波长, α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为热光系数, ΔT 为温度变化。取石英光纤中 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\xi = 6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。(5)式表明 FBG 布拉格波长相对漂移量与温度变化呈线性关系。为了验证 FBG 温度传感器的优越性,在图 4(b)所示不锈钢平台另一侧与 T1 对称的位置采用 K 型热电偶进行温度测量。

3 实验及分析

3.1 真空环境不锈钢平台温度场测量

实验所用解调仪基于波长扫描技术,波长扫描范围为 1528~1568 nm,分辨率为 1 pm。实验中选用微型化管式封装的 FBG 温度传感器监测各节点温度,封装后传感器外尺寸为长 25 mm、直径

0.5 mm,T1~T4 测点处传感器布拉格波长依次为 1546.02,1547.94,1554.01,1556.12 nm。为了增加测温的准确性,测点处钻直径 5 mm、深 30 mm 的孔,用铜裹住 FBG 温度传感器,紧贴管壁置入孔内。将直径 2 mm 的 K 型热电偶置入图 4(b)所示位置,置入深度 10 mm。

将不锈钢平台按图 2 所示置于杜瓦中,各测点 FBG 温度传感器通过光纤引口引出杜瓦并接入解调仪,解调仪连接至计算机。以铝合金加热板作为热源,通过改变加热板电压,获得不同的加热功率,为不锈钢平台施加热载荷。将加热板温度从室温(22.8 °C)升至 200 °C,并保持该温度直到各测点温度基本不变,期间记录传感器温度值。杜瓦内部使用分子真空泵抽真空,约 3 h 气压降至 0.1 Pa,室温为 19.4 °C,重复常压环境下实验过程,获得真空条件下的温度数据。

3.2 真空环境不锈钢平台温度场测量结果分析

对于实验观测的温度场,用如图 4 所示分布的 FBG 温度传感器获得不锈钢架不同测点处的温度值(图 5)。

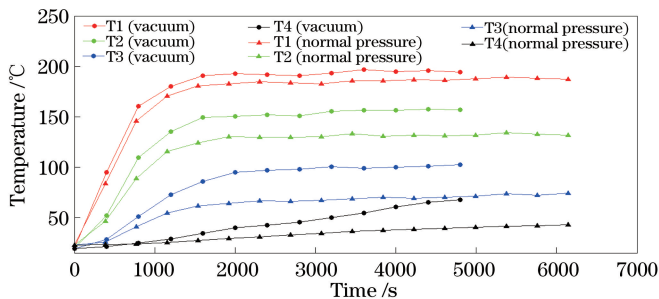


图 5 真空与常压环境下温度曲线图

Fig. 5 Temperature curves under vacuum and normal pressure conditions

由图 5 可知,加热板开始加热后,各测点温度均逐渐升高,T1 处因与加热板最近,升温最快,T4 距离加热板最远,升温最慢。同时,真空环境下各测点的升温速率大于常压环境,且以 T2~T4 处最为明显。因热量主要以热传导方式由加热板传递至 T1 处,真空环境下 T1 处升温速率略大于常压环境,此时温度随时间发生变化,可以认为是瞬态传热;经过一段时间保温后,各测点温度基本保持不变,不随时间变化,认为此时达到稳态传热。

由 FBG 温度传感器实测的稳态温度和由图 3 获得的稳态温度仿真结果如图 6 所示。真空环境下 T1~T4 测点处稳定时温度分别为 194.25,157.02,102.35,67.49 °C,对应的仿真值分别为 194.66,158.15,104.21,69.96 °C,绝对误差分别为 -0.41,-1.13,-1.86,-2.47 °C;常压环境下 T1~T4 测点处稳定时温度分别为 187.34,131.73,74.18,43.16 °C,对应的仿真值分别为 188.56,133.22,77.09,46.31 °C,绝对误差分别为 -1.22,-1.49,-2.91,-3.15 °C,测量结果与仿真值基本一致。从所测温度数据分析可得,真空环境下加热板发出的热量通过热传导和热辐射传递至测点后,一部分热量使得该点处的不锈钢材料温度升高,一部分热量继续向温度低于该点的下部传递,直至通过下法兰表面与空气进行对流换热,同时,不锈钢平台本身也以热辐射的方式向周围环境辐射热量。常压环境下,整个结构与空气紧密接触,加热板通过热传导和热辐射传递的热量除了使得不锈钢材料本身温度升高,以及流向温度更低的不锈钢平台下部外,还与空气产生对流换热,热耗散至周围的空气中,使得供测点处升温的热量减少,因此测点温度比真空环境下的测点温度要低。

经计算,测点 T1~T4 处热对流方式的散热强度分别为 987.24,653.58,308.28,122.16 W/m²,热辐射方式的散热强度分别为 382.43,228.55,

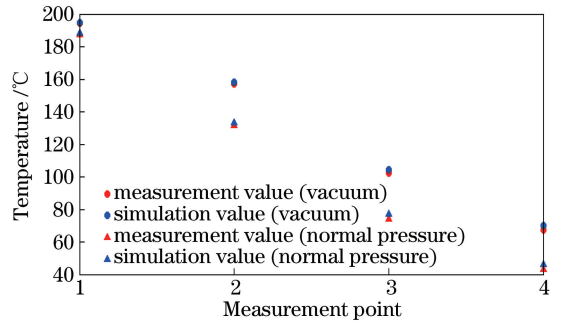


图 6 实验和仿真所得温度值

Fig. 6 Temperature values obtained by experiment and simulation

123.78,85.14 W/m²,因此常压环境下测点处通过对流方式的热量耗散较热辐射强,且温度越高,散热强度越大。

不锈钢热惯量大,达到热稳态所需时间较长。真空环境下不锈钢平台达到热稳态约需 4900 s,常压环境下不锈钢平台达到热稳态的时间更长,约为 6150 s。分析认为,常压环境下热对流传递的热量大部分耗散至空气中,致使可用于不锈钢平台升温的热量与经热传导和热辐射传递的热量相比可忽略不计,测点处需要更多的热量和时间来维持当前温度并升温,因此常压环境下不锈钢平台达到热稳态所耗费的时间较真空环境下长。

FBG 温度传感器与 K 型热电偶在真空和常压环境下的温度-时间变化曲线如图 7 所示,取温度值达到最大值 90% 处的时间为反应时间。由图 7 可知,真空和常压下 FBG 温度传感器反应速度均较热电偶快,反应时间差分别为 17 s 和 26 s,且 FBG 温度传感器测得的稳态值较热电偶所测值更接近仿真值。由此可见,相同环境下 FBG 温度传感器具有更快的反应速度和更高的测量准确度。

造成各测点测量值误差的原因包括:1)各温度

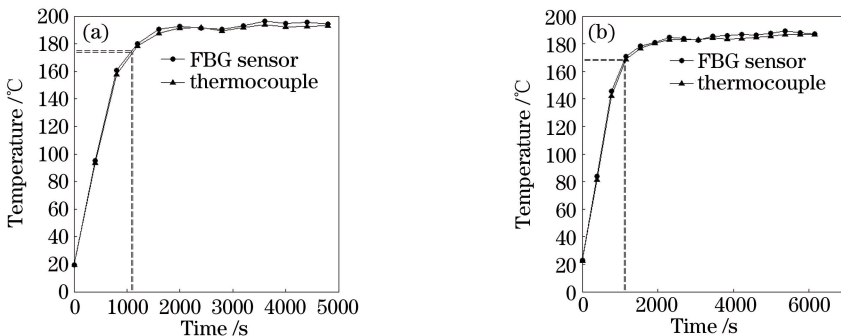


图 7 FBG 温度传感器和热电偶在(a)真空和(b)常压环境下的升温过程

Fig. 7 Comparison curves of FBG sensor and thermocouple under (a) vacuum and (b) normal pressure conditions

传感器的封装质量、实际布设位置与理想情况存在差异;2)实际测量环境的变化导致理论计算时选取的理想参数与实际参数存在差异,理想真空环境无法实现;3)由不锈钢平台、加热板、环氧板、杜瓦下法兰组成的热量传递系统中各部分之间的实际配合与理论模型配合存在偏差;4)即便是采用了微型化封装的FBG温度传感器来减小传感器本身对温度场分布的影响,但还是会存在一定误差;5)由于需通过调节电压来调整加热板功率以保持其温度,因此,电压调节误差会导致温度波动。

4 结 论

利用铝合金加热板对杜瓦中的304不锈钢平台施加热载荷,借助于FBG温度传感器对不锈钢平台在常压及真空环境下的温度分布进行测量。结果表明,真空环境下热量通过热传导及热辐射传递,而常压环境下虽存在热对流,但测点处绝大部分热量通过对流换热的方式耗散至空气中,致使常压环境下测点升温较真空环境下慢,达到稳态传热时各测点的温度也低于真空环境下相对应的值。不锈钢平台在真空环境下热量损耗较少,传热效率高于常压环境。测量误差主要取决于传感器的布设质量、实验条件与仿真条件的偏差等,进一步改善传感器封装工艺,以及提高杜瓦内真空度等均有利于提高测量精确度。本研究验证了FBG温度传感器获取真空条件下结构热量传递信息的可靠性,有助于了解托卡马克装置真空室内部结构的热量传递规律和温度场分布情况。

参 考 文 献

- [1] Liu S R, Xu Z X, Zhang C Y, *et al.* Research progress of heat transfer of honeycomb sandwich panels used in spacecraft[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2012, 18(1): 1-8.
刘绍然, 许忠旭, 张春元, 等. 航天用蜂窝夹层板传热特性的研究进展[J]. *真空与低温*, 2012, 18(1): 1-8.
- [2] Li P F, Wu S P. Numerical simulation of fluid-solid-thermal interaction in hypersonic flows[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(8): 1705-1710.
李鹏飞, 吴颂平. 类航天飞机机身结构与高超声速流场的耦合传热模拟分析[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(8): 1705-1710.
- [3] Zhang S W, Zhang J F, Song Y T, *et al.* Heat transfer and thermal stress analysis for vacuum barrier of ITER CC cryostat feed-through [J].

- Machinery Design & Manufacture*, 2011(12): 194-196.
张善文, 张剑峰, 宋云涛, 等. ITER校正场线圈过渡馈线真空隔断传热及热应力分析[J]. *机械设计与制造*, 2011(12): 194-196.
- [4] Lü P F, Pei D X, Shen D W. The research of transient thermometry technology based on K-style thermocouple[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014(6): 775-780.
吕鹏飞, 裴东兴, 沈大为. 基于K型热电偶的瞬态测温技术的研究[J]. *传感技术学报*, 2014(6): 775-780.
- [5] Liu C L, Li K K, Liu C C, *et al.* Design of combined temperature sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(5): 888-892.
刘川来, 李康康, 刘成才, 等. 一种组合式温度传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(5): 888-892.
- [6] Zhang G H, Huang W. Applications of the infrared thermography on the metal mechanical processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(1): 74-78.
张冠华, 黄炜. 红外热成像测温技术在金属机械加工方面的应用[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(1): 74-78.
- [7] Li M, Li X D, Zhang H, *et al.* Rapid determination of the fatigue limit of aluminum alloy riveted component based on lock-in infrared thermography technique [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 28-33.
李萌, 李旭东, 张辉, 等. 基于锁相红外热成像技术对铝合金铆接结构件疲劳极限的快速测定[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 28-33.
- [8] Cao P Q, Xu G L. Large capacity and fast FBG sensing system based on marshalling measurement and edge filter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1010003.
曹品奇, 许国良. 基于分组测量和边沿滤波的大容量光纤光栅快速传感系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010003.
- [9] Zhao H X, Cheng P H, Ding Z Q, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1010005.
赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010005.
- [10] Yang X F, Zhang C Y, Tong Z R, *et al.* Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. *Chinese*

- Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0405005.
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405005.
- [11] Guo M J, Jiang D S, Yuan H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3): 326-330.
郭明金, 姜德生, 袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 326-330.
- [12] Lee C H, Kim M K, Kim K T, *et al.* Enhanced temperature sensitivity of fiber Bragg grating temperature sensor using thermal expansion of copper tube[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2011, 53(7): 1669-1671.
- [13] Dai G S. Heat transfer theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 16-17.
戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 16-17.
- [14] Hong J, Xue H, Wang Y X, *et al.* The monitoring of small thermal inertia temperature field based on fiber Bragg grating[J]. Optical Instruments, 2013, 35(5): 7-10.
洪俊, 薛航, 王彦晓, 等. 基于光纤光栅的小热惯量温度场监测实验[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 7-10.
- [15] Yu Y L, Xue H, Wang Y X, *et al.* Temperature distributed sensing technique for the local-area of the surface based on fiber Bragg gratings [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0506001.
余有龙, 薛航, 王彦晓, 等. 基于光纤光栅的物体表面附近温度场测量[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0506001.
- [16] Yu Y L, Li D M, Zhang L. Experimental study on the characteristics of fiber Bragg grating temperature sensor packaged with mental tube [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2011, 28(5): 737-740.
余有龙, 李德明, 张林. 金属管封装光纤光栅温度传感器特性的实验研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(5): 737-740.
- [17] Yu Y L. Fiber Bragg grating sensor and its network technology[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2003: 112-115.
余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2003: 112-115.