

光纤布拉格光栅在医用蒸汽灭菌器温度监测的应用

饶春芳, 吴锴, 胡友德, 陶欢, 董珺, 张聪睿, 吴超

引用本文:

饶春芳, 吴锴, 胡友德, 等. 光纤布拉格光栅在医用蒸汽灭菌器温度监测的应用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1930–1938.

RAO Chun-fang, WU Kai, HU You-de, et al. Application of fiber Bragg grating in temperature monitoring of medical steam sterilizer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1930–1938.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202809.1930>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玻璃封装医用小型光纤光栅温度传感探头

Medical miniature fiber grating temperature sensing probe encapsulated with glass

光学精密工程. 2017, 25(12): 3105–3110 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172512.3105>

5 MN光纤布拉格光栅力值传感器

Five MN force sensor based on fiber Bragg grating

光学精密工程. 2017, 25(4): 857–866 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172504.0857>

高精度弓型光纤光栅微位移传感器

High-precision bow-shaped fiber Bragg grating micro-displacement sensors

光学精密工程. 2018, 26(3): 556–564 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182603.0556>

光纤Bragg光栅应变计在500 m口径球面射电望远镜工程索力监测中的应用

Application of optical fiber Bragg grating strain gauge to cable force monitoring of FAST

光学精密工程. 2015, 23(4): 919–925 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152304.0919>

碳纤维悬臂梁式振动检波器

Vibration detectors with carbon fiber cantilever

光学精密工程. 2015, 23(10z): 374–380 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0374>

文章编号 1004-924X(2020)09-1930-09

光纤布拉格光栅在医用蒸汽灭菌器温度监测的应用

饶春芳¹, 吴 镨¹, 胡友德^{2*}, 陶 欢¹, 董 珺¹, 张聪睿¹, 吴 超¹

(1. 江西师范大学 物理与通信电子学院 江西省通信与光电子重点实验室, 江西 南昌 330000;
2. 江西省人民医院口腔科, 江西 南昌 330000)

摘要:为了解决由于检测技术原因而导致的医用蒸汽灭菌器温度监测执行率低、设备合格率低等问题,设计了基于光纤布拉格光栅的医用蒸汽灭菌器温度监测系统,对整个灭菌过程中温度监测的可行性、精准性和可靠性进行了研究。根据医用蒸汽灭菌器温度监测的相关标准,运用波分复用技术设计了光纤光栅传感器件。接着,基于光纤光栅传感器件搭建了相应的温度监测系统,并对整个灭菌过程进行了实时温度监测。最后,通过分析灭菌过程中各阶段温度随时间的变化,有效灭菌温度下的灭菌时间,灭菌器空载、半载及满载腔内各点之间的最大温度差,来验证该检测系统的性能。监测结果准确地给出了灭菌器灭菌过程中各阶段温度随时间的变化,所测灭菌器的有效灭菌时间为 7.8 min,空载时腔内各点的最大温差在 2 °C 以内,而满载时可达 4.5 °C。此系统的温度测量范围、分辨率及精度,时间记录精度及数据存贮能力均达到国家及行业标准要求,并具备多点监测成本低及可进入狭小区域监测等突出优势。

关键词: 光纤布拉格光栅; 实时温度监测; 医用蒸汽灭菌器; 可行性; 监测系统

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202809.1930

Application of fiber Bragg grating in temperature monitoring of medical steam sterilizer

RAO Chun-fang¹, WU Kai¹, HU You-de^{2*}, TAO Huan¹,
DONG Jun¹, ZHANG Cong-rui¹, WU Chao¹

(1. *Jiangxi Key Laboratory of Communication and Optoelectronics, College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330000, China;*

2. Department of Stomatology, Jiangxi Provincial People's Hospital, Nanchang 330000, China)

** Corresponding author, E-mail: hydwood@163.com*

Abstract: To improve the low rate of temperature monitoring of medical steam sterilizers, caused by testing technology, a temperature monitoring system based on a fiber Bragg grating (FBG) was designed, and its feasibility, accuracy, and reliability of temperature measurement for the whole sterilization process were studied. First, to meet the related standards for temperature monitoring of medical steam sterilizers, an FBG array sensor was designed using wavelength-division multiplexing technology. Then, the corresponding temperature monitoring system was constructed, and the whole sterilization process was monitored in real time. Finally, the accuracy of the detection system was

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 81460109, No. 11664014, No. 11964014)

verified by analyzing the temperature changes with time at each stage of the sterilization process, the sterilization time under the effective sterilization temperature range, and the maximum temperature difference between points under no-load, half-load, and full-load. The monitoring results accurately showed the temperature changing with time during each stage of the sterilization process. The effective sterilization time is 7.8 min for the monitored sterilizer, and the maximum temperature difference of each point in the cavity is within 2 °C for no-load and 4.5 °C for full-load. The temperature measure range and resolution, time recording accuracy, and data storage capacity of the system met national and industry standards. Moreover, the proposed system possess superior characteristics over traditional systems, displaying the potential for economical multi-point monitoring and the ability to enter the narrow area for monitoring.

Key words: fiber Bragg grating; real-time temperature monitoring; medical steam sterilizer; feasibility; monitoring system

1 引言

2020年伊始,新型冠状病毒肆虐全球,公共卫生安全再次成为全世界的焦点。复用医疗器械的消毒灭菌是预防医院交叉感染的重点^[1]。常用的灭菌方法有物理灭菌法和化学灭菌法。蒸汽灭菌法是一种常用的医用物理灭菌法,其原理是饱和蒸汽在一定的温度和压力下拥有大量的热量,遇到冷的消毒物品时冷凝并释放出大量的热量,使被消毒物品受热受潮,在热与湿的作用下将细菌杀死,达到消毒目的^[2]。它适用于耐高温、高湿的医用器械和实验室物品器材的灭菌。常用的蒸汽灭菌器包括下排式压力蒸汽灭菌器、预真空压力蒸汽灭菌器和脉动真空压力灭菌器,其中预真空和脉动真空压力灭菌器适用于多孔性物品的灭菌^[3]。在我国2012年发布的《医疗技术消毒技术规范(WS/T367-2012)》中规定:“耐热、耐湿手术器械、棉布类敷料和棉纱类敷料,应首选压力蒸汽灭菌”^[4]。为保障灭菌效果,我国卫生行业标准《医用消毒供应中心:第三部分:清洗消毒及灭菌效果监测标准(WS310.3-2016)》(以下简称WS310.3-2016)则明确给出了医用消毒供应中心清洗消毒及灭菌消毒效果监测标准的强制性条款,其中物理监测中包括日常对温度、时间和压力等的监测和每年必须的定期监测^[5]。然而众多调查显示,一方面目前监测合格率低,如2018年对部分军队医院使用中压力蒸汽灭菌器物理参数现况的调查报告显示总体合格率仅为25.00%^[6];另一

方面监测执行率低,例如对广东省2018年部分医疗机构监测执行现状的调查结果表明,只有30.81%的医疗机构执行定期监测制度^[7-8]。

从检测技术方面分析以上情况产生的原因主要有两个方面。首先,传统实验室条件下的物理监测需拆卸灭菌器仪表,影响医务工作,给维护及维修带来不便^[9]。其次,虽然近年来无线温度数据采集系统被应用于医疗蒸汽灭菌器的现场实时检测,但在我国此类设备主要依赖进口,价格昂贵^[10]。同时无线数据传输存在电磁兼容及可靠性等问题^[11-12],特别对于大型灭菌器,需要的测试点多,更增加了保障无线传输的有效性和可靠性的难度,因此其测试成本迅速上升。光纤布拉格光栅传感器(Fiber Bragg Grating, FBG)是目前先进传感器的代表,除灵敏度高、复用性和实时性好,易于与通信网络复用等优势外^[16-17],具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、体积小、径细可弯曲、可实现准分布式、价格便宜等优点,能有效解决医疗蒸汽灭菌器的物理量实时测试需面对的温度场复杂,高温高湿及灭菌器附近可能有强电磁环境等问题。本研究在评估FBG传感器运用到蒸汽灭菌器的温度监测可行性的基础上,探索传感器设计和性能等问题,以期开拓新的蒸汽灭菌器的温度实时在线监测手段。

2 FBG传感器原理

FBG是在光纤纤芯中引入周期性折射率调制的一种光学无源器件,如图1所示。普通通信

用单模光纤主要成份为 SiO_2 , 由纤芯和包层组成, 通常光纤表面有涂覆层以保护光纤, 常规带涂覆层光纤的直径为 $250 \mu\text{m}$ 左右。当宽带光源入射到 FBG 中, 波长满足布拉格条件的部分会被反射, 剩余波长的光则通过光纤继续传输^[13-15]。反射波的中心波长 λ 满足:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

其中: λ 为 FBG 的中心波长, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。当所测环境参量(应变与温度)发生一定改变时, 会引起其有效折射率和

光栅周期发生相应的改变, 从而引起反射光中心波长的漂移, 通过相应的解调仪解调出的中心波长漂移量可反推出外界环境的改变量, 达到测试的目的。相应的传感表达式为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (2)$$

其中: $\Delta\lambda$ 为 FBG 中心波长的漂移量, λ 为一定温度下处于自由状态时 FBG 的中心波长值, P_e 为光纤的有效弹光系数, ϵ 是应变变量, α 是光纤的热膨胀系数, ξ 是光纤的热光系数, ΔT 温度变化量。

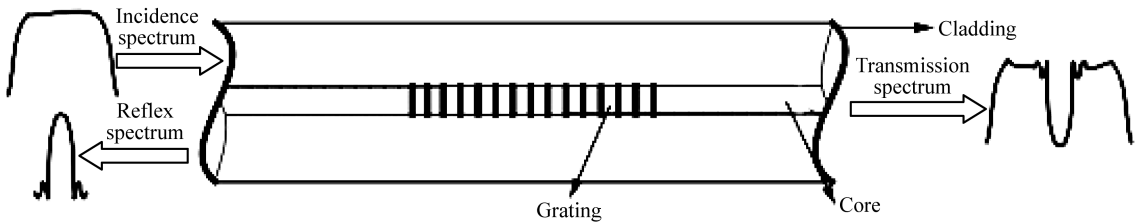


图 1 光纤布拉格光栅原理

Fig. 1 Schematic diagram of fiber Bragg grating

由式(2)可知, 应变和温度会改变 FBG 的中心波长, 该表达式也是通过 FBG 检测应变与温度的基本原理。但在实际测量过程中, 往往需要的是温度与应变中一个参量, 所以当所测环境温度不变, 只考虑应变引起的中心波长偏移时, 式(2)可简化为^[18-19]:

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

当所测环境应变不变, 只考虑温度引起的中心波长偏移时, 式(2)可简化为^[18-19]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha + \xi)\Delta T. \quad (4)$$

当需要进行多点测试时, 可在一根光纤上刻写多个光栅, 形成光栅串, 通过合理设计光栅串的中心波长, 使它在工作中有效光谱不重叠, 即可形成准分布式多点传感器, 其传感原理如图 2 所示。宽带光源(其功率为 $P(\lambda)$), 通过环形器入射到光纤光栅串, 光纤光栅串上的每个光栅都反射回特定波长的峰, 每个 FBG 对应于一个反射峰。当每个 FBG 所处环境的温度或应力发生变化时, 相对应的反射峰的中心波长将发生变化, 光纤光栅解调仪实时记录这些中心波长的变化, 利用式(3)或(4)即可求出相应的温度或应力的变化。

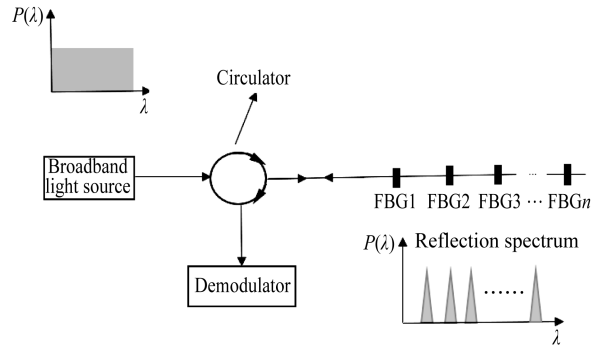


图 2 FBG 串传感原理

Fig. 2 Schematic diagram of FBG arrays sensor

3 实验

3.1 可行性分析

蒸汽灭菌器的灭菌在一个密闭腔体中进行, 光纤传感器为有线传感器, 因此传感器必须能安全接出密闭腔的同时蒸汽灭菌器的正常工作。由于密闭腔使用的是硅胶圈密封门, 硅胶圈有一定弹性, 这里尝试将 FBG 尾纤通过腔体密闭门引出。在测试温度时, 为了排除压力的影响, 首先使用毛细不锈钢管铠装尾纤(直径为 $900 \mu\text{m}$), 实验证明这一直径尾纤从密闭门引出会导致腔体发生水蒸汽泄露。随后使用仅带涂覆层的尾纤通过密

闭门(直径为 $250\ \mu\text{m}$),并将带这种尾纤的传感器分别放置进入3种小型蒸汽灭菌器(Runyes[®] SEA 蒸汽灭菌器(23 L),海鸥[®] BES (18 L, B级-LED),新华[®] MOST-T-45(45 L)),在两周内反复进行实时测试,实验证实传感装置及灭菌器均正常工作,腔体在灭菌工作中没有出现泄露的现象;并且在随后的半年时间内,灭菌器均正常工作。因此,使用带这一直径尾纤的传感器进行测试是可行的。在此后的研究中,传感器选用尾纤直径为 $250\ \mu\text{m}$ 的仅带涂覆层的 FBG。

在刻写过程中根据折射率调制的强弱,光纤光栅分为 I 型、II 型和 III 型。其中, I 型折射率调制弱,温度稳定性不高; II 型折射率调制强,热稳定性强; III 型的热稳定性介于其它两种之间^[20]。目前市售 I 型 FBG 价格低,制作工艺成熟,一般厂家标称长期使用温度极限在 $120\ ^\circ\text{C}$ 。按卫生行业标准 WS310.3-2016 规定,蒸汽灭菌器温度测试上限为 $150\ ^\circ\text{C}$,但在一个灭菌周期中超过 $120\ ^\circ\text{C}$ 的时间不超过 30 min。经过长期测试, I 型 FBG 不会在测试过程中发生热退化。因此,本研究中采用 I 型 FBG 作为传感器,所用温度监测系统符合中华人民共和国国家计量技术规范《医用热力灭菌设备温度计校准规范(JJF-1308-2011)》(以下简

称 JJF-1308-2011)中 5.3 条对校准参考温度计的要求,即:所使用参考温度计,应该满足不破坏灭菌设备及其正常运行条件的要求。工作温度范围满足校准所需温度范围。

3.2 测试方案

以下实验数据使用 Runyes[®] SEA 蒸汽灭菌器(23 L)作为待测仪器,设定灭菌温度为 $134\ ^\circ\text{C}$ 。由于其容积小于 60 L,属于小型压力蒸汽灭菌器,根据国标《小型压力蒸汽灭菌器灭菌效果监测方法和评价(GB/T30690-2014)》(以下简称 GB/T30690-2014)中 4.2.1 条“将温度测定仪放入灭菌器,每层设定 3 个点,各层间按对角线分布点”的要求^[21]。测试传感器分布设计如下:首先,由于 FBG 传感器可方便利用波分复用技术,使用一 FBG 串作为传感器,可在一支传感器上测试多点温度。鉴于仪器隔层对角线长度为 41.5 cm,本文设计了如图 3 所示的 FBG 串(山东重海信息技术有限公司生产)。由于 FBG 同时对温度和压力敏感,为此对于只测温度的 FBG 需要隔绝压力,所以 FBG1, FBG2 和 FBG3 均用直径为 $900\ \mu\text{m}$,长度为 15 mm 的毛细不锈钢管做封装,两端用自凝树脂封口,以保证气压不会对 3 个 FBG 产生影响。

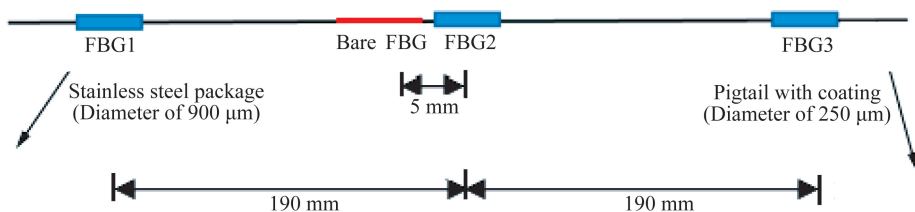


图3 光纤光栅串分布

Fig. 3 Distribution of FBG arrays

3 个 FBG 的设计中心波长 ($20\ ^\circ\text{C}$) 分别为 $1\ 549.83$, $1\ 554.96$ 和 $1\ 539.91\ \text{nm}$ 。在 FBG2 间隔 5 mm 的地方有一个 FBG 不做封装处理,以对比 FBG 对温度和气压同时响应的情况,该 FBG 的原始中心波长为 $1\ 544.94\ \text{nm}$ 。各光栅中心波长间隔大于 4 nm,以保证测试过程中各反射谱不发生重叠。FBG 串分布与光谱分别如图 3 和图 4 所示。

FBG 串放置在灭菌室中层托盘上,各光栅按图 5 所示,呈斜对角方置。FBG 灭菌器测温系统如图 6 所示。

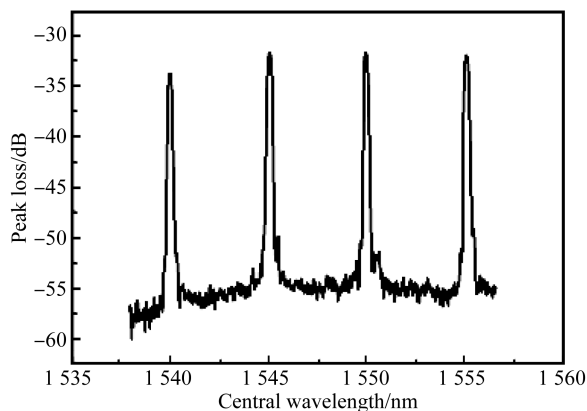


图4 光纤光栅串光谱

Fig. 4 Spectrogram for FBG arrays

整个传感装置由解调仪与传感器组成,解调仪中的宽带光源经环形器入射到 FBG 串,由 FBG 串返回的光经解调仪中的波长检测单元实时读出,其结果由电脑显示并记录。放置好传感器后,使用精度为 0.1 °C 的二等标准温度计实测灭菌腔内起始温度,并记录各 FBG 此时的中心波长,以备后期计算绝对温度使用。

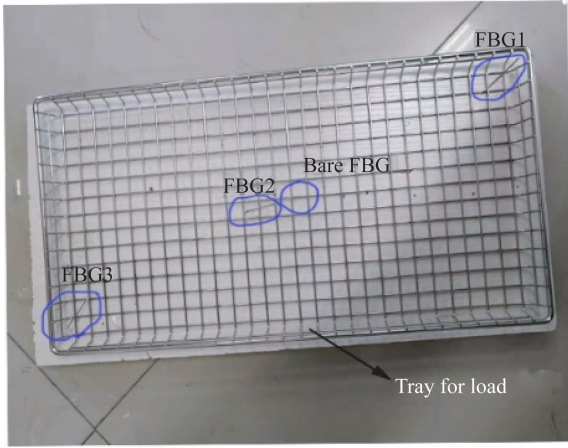


图 5 FBG 沿斜对角线放置在托盘上

Fig. 5 FBGs placed on pallet of sterilizing cavity

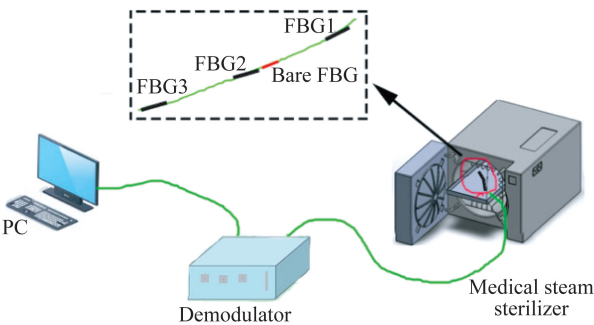


图 6 温度监测系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of temperature monitoring system

3.3 实验结果与分析

本研究使用上海拜安传感有限公司的 FT810-04E 型高精度解调仪读取 FBG 中心波长变化,其波长检测范围为 1 527~1 566 nm,动态解调速率为同步 2 500 Hz,波长分辨率为 0.1 pm,波长测量精度为 ±1 pm,时间读取精度为 1 μs。测试前所有传感器均进行温度灵敏度的标定。实验使用精度为 0.1 °C 的二等标准水银温度计作为参考温度计,并使用恒温水浴箱进行室温 0~90 °C 的温度灵敏度标定,使用恒温干燥箱进行 90~150 °C 的温度灵敏度标定。实测毛细不锈

钢封装光栅的温度灵敏度为 0.013 6 nm/°C,裸光栅的温度灵敏度为 0.012 3 nm/°C,由解调仪波长精度为 ±1 pm,计算可得两种传感器的温度测试精度分别为 0.073 5 °C 与 0.081 6 °C,符合 JJF-1308-2011 中“参考温度计分辨率优于 0.1 °C”的要求。

整个测温过程中,蒸汽灭菌器的工作流程相关的温度与压力变化分以下几个阶段:(1)升温抽负压。预热灭菌室后,真空泵抽真空,到达预定压力(-80 kPa)后,真空泵停止;(2)加压升温。蒸馏水通过蒸发器产生蒸汽进入灭菌室,脉动进汽,使灭菌室内压力上升;(3)脉动。到达预定压力(50 kPa)后,排除水汽和水,进行抽真空,如此往复 3 次,即 3 次真空,排空灭菌室内的空气;(4)升压升温。蒸馏水通过蒸发器产生蒸汽进入灭菌室,脉动进汽,使灭菌室压力到达设定压力(110 kPa 或 210 kPa)和温度;(5)在设定时间内,保压保温灭菌(110 kPa/20 min,210 kPa/6 min);(6)抽负压干燥并降温;(7)灭菌完成后,排除水汽;释放压力当灭菌室内的压力降低至大气压力时,启动真空泵进行抽真空(-80 kPa),在预定的时间抽真空后,真空干燥结束,输入空气降温,使灭菌腔内压力逐渐上升至大气压力,灭菌结束^[22]。整个温度测量过程各个 FBG 中心波长与时间的关系如图 7 所示,为了使不同中心波长 FBG 的温度关系图能在同一张图上显示出来,这里面对不同起始中心波长的 FBG 进行了波长补偿,不改变图像特性。再根据先期二等标准温度计记录的起始温度与各 FBG 起始波长值,通过传感器的灵敏度换算,得到温度随时间的变化关系,如图 8 所示。

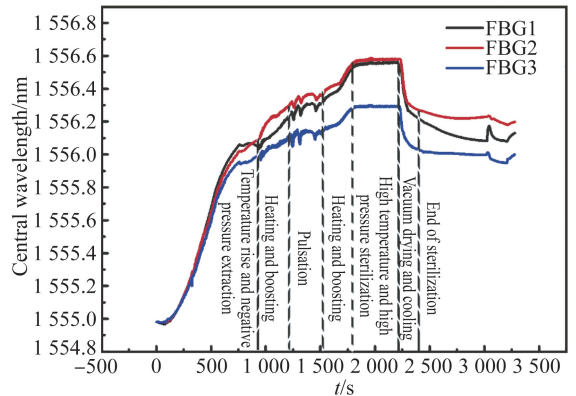


图 7 空载时 3 个 FBG 中心波长与所测时间的关系曲线
Fig. 7 Relationship between central wavelength of three FBGs and time under no-load condition

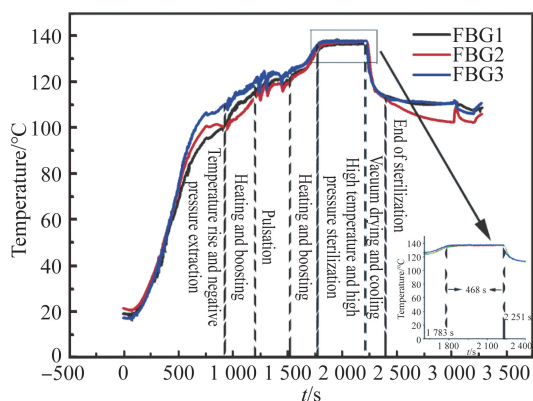


图 8 空载时 FBG 中心波长所对应温度与时间的关系曲线
Fig. 8 Relationship between temperature and time corresponding to FBG central wavelength under no-load condition

由图 7 可知,光纤光栅传感器能够很好地反映出蒸汽灭菌器内的温度变化,具有实时性且非常直观。分析此图像可得各点不锈钢毛细管封装的 FBG 中心波长图像曲线变化的一致性很好,在相同时间段内 FBG 中心波长的变化基本相同。从图 8 温度与时间的对应关系更加直观地发现在初始加温阶段和高温灭菌阶段,各点的温度值基本一致,只有中间脉动阶段温度差异较大。结合灭菌器工作原理,该阶段腔内不断地进行抽气与加压,温度变化较剧烈,所以各点的温差较大。图 8 中的小图为高温高压灭菌部分,它最能反映 FBG 监测的可靠性,从图像可得各点的 FBG 在高温高压灭菌阶段温度维持在 136.47 °C。符合 GB/T30690-2014 中“灭菌温度范围的实测值不低于设定温度值,且不高于设定值 3 °C,灭菌室内任意两点差值不超过 2 °C”的要求。但是,由于维持在设定温度 134 °C 以上的时间为 468 s(7.8 min),超出了标准时间 6 min 的 30%,因此,不符合同一条款中“灭菌时间不低于设定值,且不高于设定值 10%”的要求。

图 9 给出了 FBG2 与裸 FBG 的响应曲线。由图发现裸 FBG 与不锈钢铠装的 FBG2 之间的中心波长对应时间的变化趋势基本一致,两支光栅所测得温度也基本一致。只是在灭菌平台后期开始两支 FBG 指示的温度存在差异,这可能是由

于气流的作用使裸 FBG 与拖盘有压力的作用,因此测试过程中对 FBG 进行铠装以隔绝应力的影响是很有必要的。由图 9 可知,裸 FBG 对腔内的气压并不敏感,无法反映出腔内气压的变化。

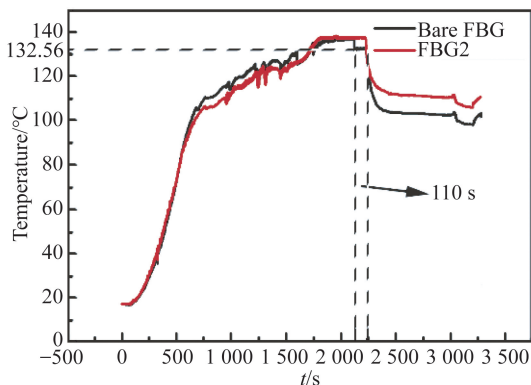


图 9 裸光栅与不锈钢铠装的 FBG 实时温度比较
Fig. 9 Comparison of FBG real-time temperature between naked grating and stainless steel armor

根据 JJF-1303-2011 中“在空装载条件下,设置不低于都 15 s 记录一个读数”,以及附录 B 的建议:“测试在空装载、小装载和最有挑战性满装载下进行”。表 1 分别给出了空载、半载及满载状态下灭菌时 FBG 的中心波长与具体温度,数据取样间隔为 15 s。由表 1 分析可得各种载荷条件下,灭菌时温度均超过设定温度,最高温度在 136.47 °C,符合 WS310.3-2016 中“温度波动在 +3 °C 以内”的要求。此外还可发现,该灭菌器在空载与半载时箱内各点的温度相差值在 2 °C 以内,符合 GB/T30690-2014 中“任意两点差值不得大于 2 °C”的要求。而在满载情况下箱内各点的温差较为明显,最大温差可达 4.5 °C,因此满载时不符合国标要求。经分析,造成该现象的原因在于:FBG2 位于灭菌器内部的中心位置,所堆放的物品较多,热量不易进入到里面;而 FBG1 和 FBG3 位于灭菌器内部的边缘位置,物品较少,热量较易扩散。这些数据与现象进一步体现了 FBG 传感器在蒸汽灭菌器测温方面的实用性和可靠性。

表 1 空载、半载及满载状态下灭菌时 FBG 的中心波长与具体温度

Tab. 1 Central wavelengths and specific temperatures of FBG under no-load, half-load and full-load conditions

	中心波长/nm				中心波长对应的温度/°C			
	FBG3	裸 FBG	FBG1	FBG2	FBG3	裸 FBG	FBG1	FBG2
空载	1 541.557 0	1 546.510 7	1 551.481 1	1 556.345 8	136.00	135.54	136.30	134.24
	1 541.554 0	1 546.511 4	1 551.475 3	1 556.342 0	135.79	135.59	135.89	133.93
	1 541.556 2	1 546.509 2	1 551.465 5	1 556.343 1	135.95	135.43	135.15	134.02
半载	1 541.554 0	1 546.515 0	1 551.476 9	1 556.343 4	135.78	135.86	136.00	134.04
	1 541.557 5	1 546.512 1	1 551.483 4	1 556.344 5	136.04	135.64	136.47	134.13
	1 541.556 5	1 546.516 4	1 551.479 9	1 556.345 2	135.97	135.96	136.21	134.19
满载	1 541.551 2	1 546.449 6	1 551.467 9	1 556.308 8	135.57	131.05	135.33	131.22
	1 541.558 0	1 546.455 2	1 551.475 8	1 556.316 0	136.08	131.46	135.92	131.81
	1 541.556 0	1 546.454 0	1 551.473 5	1 556.312 7	135.93	131.37	135.75	131.54

对照 GBT30690-2014 中对传感器的要求,基于 FBG 的蒸汽灭菌器检测方法操作简单,便于携带,具备大量数据记录的能力;传感器具备耐高温、耐压、耐湿、耐化学品腐蚀的特点,FBG 为无源器件,在灭菌器内部无需电源;温度测量范围、显示分辨率及精度达到要求,时间记录间隔可任意调整,最小记录间隔达微秒级,最长记录时间不限。对照 WS310.3-2016 中“温度探测器的探头需放置在最难探测的地方”的要求,本研究使用的毛细不锈钢管铠装 FBG 直径为 0.9 mm,可以满足诸如牙科手机等带管腔,且形状不规则的手术器械内部温度场的测试。另一方面,对于大型蒸汽灭菌器,JJF-1303-2011 中附录 B3.4 条建议“一般按 10 到 12 个测量点/ m^3 选取参考温度计”。因此,需要对灭菌腔内多点进行实时监测,投入使用的无线温度传感器的成本会随着监测点数量的增加大幅度增加,而对于 FBG 传感器,目前国产商用解调仪可以轻易做到 64 条光通道,每个通道可分布 50 个监测点,完全可以满足大型蒸汽灭菌器多点实时监测的需求,且成本没有显著上升。另一方面,蒸汽灭菌器灭菌的 3 个重要参量为温度、时间和气压。相对于温度和时间,气压为次要指标,因为对于蒸汽灭菌腔中的饱和蒸汽压,温度与气压是对应的,气压测试的目的在于保证灭菌阶段灭菌腔体内为饱和蒸汽压。由图 9 可知,在腔体内直接放于托盘上的裸 FBG 对气压不敏感,后续工作将研究基于 FBG 用间接法测试受体内气压的方法。

4 结 论

为了提高医用蒸汽灭菌器温度监测系统的合格率与系统后期维修的便捷性,本文设计了基于毛细不锈钢管铠装的光纤光栅串的温度监测系统,并对整个灭菌过程中温度监测的精准性和稳定性进行检验。实验结果证明:该温度监测系统的测量精度可达 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$,可实时反映灭菌器工作过程中各个阶段(诸如升温抽负压、加压升温、脉动、高温高压灭菌、抽负压降温干燥)的温度变化及不同工作状态下各点的温度差。所测小型医用蒸气灭菌器空载时的最大温差在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,满载时最大温差达到 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。本温度监测系统的温度测量范围、分辨率及精度,时间记录精度及数据存贮能力均达到国家及行业标准要求。此外,光纤光栅传感器具有耐高温、耐压、耐湿的优势,并且由于光纤光栅本身为无源器件,抗电磁干扰,因此信号稳定可靠;对于诸如具有不规则管状的牙科手机内部等其它测试手段到达不了的狭小区域,FBG 传感器的直径纤细、易于弯曲,可弥补这一短板。同时,由于 FBG 传感器易于形成多点准分布式测试,完全可以满足大型灭菌器多点实时监测的需求且测试成本增加不明显。本研究所提出的测试系统为医用灭菌器的温度监测方面提供了全新的手段,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] DONSKEY C J, YOWLER M, FALCK-YTTER Y, *et al.*. A case study of a real-time evaluation of the risk of disease transmission associated with a failure to follow recommended sterilization procedures [J]. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 2014, 3: 4
- [2] SHINTANI H. Validation study and routine control monitoring of moist heat sterilization procedures [J]. *Biocontrol Science*, 2012, 17(2): 57-67.
- [3] 张静,刘海燕,邹兰花. 建立实验室生物安全管理体系 [J]. 中国卫生质量管理, 2010, 17(5): 92-94.
ZHANG J, LIU H Y, ZOU L H. Establishment of laboratory biosafety management system [J]. *China Health Quality Management*, 2010, 17 (5): 92-94. (in Chinese)
- [4] WS/T367-2012, 中华人民共和国卫生行业标准: 医疗技术消毒技术规范[S]. 中华人民共和国卫生部发布, 2012.
WS/T367-2012, Health Industry Standards of the People's Republic of China; Regulation of disinfection technique in healthcare settings [S]. *Issued by the Ministry of Health of the People's Republic of China*, 2012. (in Chinese)
- [5] WS310. 3-2016, 中华人民共和国卫生行业标准: 医用消毒供应中心: 第三部分: 清洗消毒及灭菌效果监测标准[S]. 中华人民共和国卫生和计划生育委员会, 2017.
WS310. 3-2016, Health Industry Standards of the People's Republic of China; Central sterlie supply department (CSSD)-Part 3: Sruveilance standard for cleaning, disinfection and sterilization [S]. *Issued by the National health commission of Health of the People's Republic of China*, 2017. (in Chinese)
- [6] 夏翔,翁思源,樊林科,等. 部分军队医院使用中压力蒸汽灭菌器物理参数现况调查 [J]. 中国消毒学杂志, 2018, 35(8): 605-607.
XIA X, WENG S Y, FAN L K, *et al.*. Investigation on physical parameters of pressure steam sterilizer in use in some military hospitals [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2018, 35 (8): 605-607. (in Chinese)
- [7] 陈爱琴,郑文,戚维舒,等. 广东省部分医疗机构压力蒸汽灭菌器性能监测执行现状调查 [J]. 中国消毒学杂志, 2018, 35(2): 102-104.
CHEN A Q, ZHEN W, QI W SH, *et al.*. Investi-
- gation on performance monitoring of pressure steam sterilizer in some medical institutions in Guangdong province [J]. *Chinese Journal of Antiseptic*, 2008, 35(2): 102-104. (in Chinese)
- [8] 路海云,温春良,蒙丽婵. 佛山市 69 所医疗机构口腔科复用器械管理现况调查 [J]. 护理学杂志, 2018, 33(21): 53-55.
LU H Y, WEN CH L, MENG L CH. A survey on the management of reusable devices in stomatology of 69 medical institutions in Foshan City [J]. *Journal of Nursing*, 2018, 33(21): 53-55 (in Chinese)
- [9] 王永霞,王顺利. 医用蒸汽灭菌器工作原理及温度压力现场校准方法分析 [J]. 中国检验检疫, 2019, 27(5): 26-28.
WANG Y X, WANG SH L. Working principle of medical steam sterilizer and field calibration method analysis of temperature and pressure [J]. *China Inspection and Testing*, 2019, 27 (5): 26-28. (in Chinese)
- [10] 吴健,王颖,张曦雯,等. 国产无线温度压力验证仪的质量提升方案及探讨 [J]. 中国卫生监督杂志, 2018, 25(1): 8-12.
WU J, WANG Y, ZHANG X W, *et al.*. Quality improvement scheme and discussion of domestic wireless temperature and pressure verifier [J]. *China Journal of Health Supervision*, 2018, 25 (1): 8-12. (in Chinese)
- [11] 张嘉琪. 无线数据传输系统信号完整性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
ZHANG J Q. *Research on Signal Integrity of Wireless Data Transmission System* [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [12] 马广明,李华,张井玲. 无线传感器网络数据传输可靠性研究 [J]. 现代信息科技, 2019, 3(15): 190-192.
MA G M, LI H, ZHANG J L. Research on data transmission reliability of wireless sensor network [J]. *Modern Information Technology*, 2019, 3 (15): 190-192. (in Chinese)
- [13] 许金山. 温度压力双参数一体化测量光纤传感技术研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
XU J SH. *Research on Optical Fiber Sensor Technology for Integrated Temperature and Pressure Measurement* [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018. (in Chinese)
- [14] 何超. 基于光纤光栅的飞行器结构健康监测技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
HE CH. *Research on Aircraft Structure Health*

- Monitoring Technology Based on Fiber Bragg Grating* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [15] RONG-RONG W. Study on the application of fiber bragg grating sensors [C]. *Institute of Management Science and Industrial Engineering. Proceedings of 2018 3rd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences (IWMECS 2018). Institute of Management Science and Industrial Engineering: Computer Science and Electronic Technology International Society*, 2018:129-132.
- [16] 何彦霖,张旭,孙广开,等. 复合基底柔性光纤曲率传感器 [J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(6):1263-1269.
HE Y L, ZHANG X, SUN G K, *et al.*. Flexible fiber curvature sensor with composite substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27 (6): 1263-1269. (in Chinese)
- [17] 章亚男,范迪,沈林勇,等. FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验 [J]. *光学 精密工程*, 2019, 27 (7):1481-1481
ZHANG Y N, FAN D, SHEN L Y, *et al.*. Strain transfer and accuracy experiment of FBG thin-diameter shape sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27 (7): 1481-1481(in Chinese)
- [18] 戎小戈,章献民. 光纤光栅传感器原理及应用 [J]. *武汉科技学院学报*, 2003(3):42-45.
RONG X G, ZHANG X M. Principle and application of fiber Bragg grating sensor [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2003(3):42-45. (in Chinese)
- [19] XUE K Y, NING F S, JING M S. A novel method for simultaneous measurement of temperature and strain based on EFPI/FBG [J]. *Optics Communications*, 2020, 459:125020.
- [20] 苑立波, FarhadAnsari. 光纤光栅原理与应用 (一)——光纤光栅原理 [J]. *光通信技术*, 1998 (1):70-78.
YUAN L B, Farhadansari. Principle and application of fiber grating (I)-principle of fiber grating [J]. *Optical Communication Technology*, 1998 (1): 70-78. (in Chinese)
- [21] GB/T 30690-2014, 中华人民共和国国家标准:小型压力灭菌器灭菌效果监测方法和评价要求[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会联合发布, 2015.
GB/T 30690-2014, National Standards of the People's Republic of China: Monitoring requirements and evaluation of sterilization effect of small steam sterilizer [S]. *Issued by General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and China National Standardization Administration Committee*, 2015. (in Chinese)
- [22] 周忠慈. 蓝野脉动真空蒸汽灭菌器工作原理和常见故障 [J]. *中国医疗设备*, 2015, 30(1):156-158.
ZHOU ZH C. Working principle and common faults of lanye pulsation vacuum steam sterilizer [J]. *Chinese Medical Equipment*, 2015, 30 (1): 156-158. (in Chinese)

作者简介:



饶春芳 (1975—), 女, 博士, 副教授, 2012 年获得工学博士学位; 2016 年至 2017 年美国阿拉巴马大学亨兹维尔分校物理系访问学者, 主要从事基于光纤的超声波无损检测技术的研究。
E-mail: rcf0322@jxnu.edu.cn

通讯作者:



胡友德 (1970—), 男, 江西宜春人, 副主任医师, 硕士, 主要从事口腔种植、口腔生物力学及口腔器械安全的研究。
E-mail: hydwood@163.com