文章编号：1001-4888(2022)05-0745-10

埋入式光纤布拉格光栅传感器低温力学传感性能的基础实验研究*

张鹏年[1]，滕青芳[1]，关明智[2,3]

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院，甘肃兰州 730070；2. 中国科学院 近代物理研究所，甘肃兰州 730000；
3. 兰州大学 土木工程与力学学院 西部灾害与环境力学教育部重点实验室，甘肃兰州 730000)

摘要：在绕制、冷却和强磁场等极端运行条件下，高温超导磁体内部将会产生复杂的应力和应变，其内部最大应变可达到数千微应变，极易引起超导性能的退化，造成结构的破坏，因此，高温超导磁体结构内部的力学状态直接关系到运行的安全性和可靠性。而国内外针对高温超导磁体结构内部应变测量的技术尚处于初步研究阶段。基于光纤布拉格光栅(FBG)应变测量技术，结合钇钡铜氧(YBCO)高温超导带材结构，本文提出了一种埋入式 FBG 传感测量技术，即利用低温黏接剂等特殊材料将 FBG 传感器封装至带材的一侧，且几乎不影响带材尺寸，待绕制成磁体结构后，FBG 传感器自然地埋入至线圈层间，以测量结构内部的形变行为等。结合 YBCO 高温超导线圈固化材料及固化技术，研制了 4 种不同的埋入式 FBG 应变传感器，并对传感器进行了测试对比和精度分析，给出了相应的实验标定曲线，以探讨 FBG 传感器在制备过程中粘贴工艺、低温环境等对实验结果的影响。结果表明：在低温胶以及环氧树脂的正确封装和良好固化情况下，所研制的埋入式 FBG 传感器在室温和液氮温区下具有较高的测量精度，可应用于低温环境下双层超导带材结构内部的应变监测等；所研制的埋入与准分布式 FBG 传感器在低温环境下无明显的啁啾现象，具有较高的测量精度。

关键词：应变测量；埋入式 FBG 传感器；YBCO

中图分类号：O343 **文献标识码**：A DOI：10.7520/1001-4888-21-192

0 引言

医用重离子加速器治疗装置可以在几乎不损伤病灶周围健康组织的前提下，精确消杀癌细胞，尤其适用于无法接受手术治疗的人群，例如心血管病人、糖尿病人、老年人等，目前已逐渐成为治疗癌症的一把“利器”[1]。但是，重离子治疗装置由于常规或低温超导电磁铁磁场强度(<5T)的限制，导致设备规模大，占地和配套建筑及辅助设施要求高，运行和维护成本较大，对该装置的推广与应用造成了一定的难度。有研究表明[2,3]，若基于 YBCO 高温超导磁体技术的下一代重离子治癌小型化装置得到顺利研发和推广，将有望大幅提高医用重离子加速器治疗装置的磁场强度，降低使用功耗以及减少土地使用面积，因此 YBCO 高温超导磁体被公认为下一代重离子治疗装置研制的关键性技术[4]。

相对于传统的低温超导磁体(运行温度为 4.2K，K 为温度单位，开尔文)来说，YBCO 高温超导磁体具有更高的临界温度(>40K)、更强的载流能力、超高的上临界磁场(>20T)，这对于医用重离子加速

* **收稿日期**：2021-08-23；**修回日期**：2021-10-14

基金项目：国家自然科学基金面上项目(12172357)；国家自然科学基金重点项目(11932008)；中国科学院青年创新促进会基金(2019404)；中国科学院西部之光西部青年学者资助

通信作者：关明智(1983－)，男，博士，研究员。主要研究领域：超导电磁结构力学。Email：mzg615@impcas.ac.cn

器高场化、小型化的研制来说是不可或缺的。然而，YBCO 高温超导材料往往是多达 10 余层的层状结构，最大层厚比甚至相差 100 倍，其超导电性随力学变形的退化响应也不尽相同，甚至超导带材加工热处理、冷却过程中残余应力、层间失配应力等也显著影响其力学性能和输电性能，尤其对于运行于极端条件下的磁体结构，复杂电磁场工况下 Lorentz 力引起的内部变形、分层等对其载流能力将产生显著影响，往往会导致磁体结构的设计值与实验值不一致，从而严重制约其进一步的应用，因此，探索 YBCO 超导磁体的力学表征及其测试方法是研制高温、高场超导磁体结构和保证其多场安全、稳定运行的必要条件[5-7]。

针对运行于极端多场环境的超导磁体结构力学实验表征与测量技术，国内外尚无统一的标准，与之有关的研究工作尚处于探索阶段。低温电阻应变片是最早应用于重大超导磁体工程应变测量与实验表征的技术手段(如国外的 ITER 项目，FAIR 工程，Wendelstein 7-X 项目；国内的大科学工程项目，包括 HT-7U、CIADS 等)[8-12]。与传统的低温电阻应变片传感器相比，光纤类传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰性强、检测距离长、体积小、重量轻以及可以组成二维或三维的传感网络等优点，被广泛应用于超导磁体结构表面的温度和应变检测。从 20 世纪 90 年代到 21 世纪的前 10 年，美国强磁场中心 Schultz 小组、英国牛津公司以及英国 Crafied 大学均开展了光纤布拉格光栅(FBG)技术在低温超导磁体结构表面的温度、应变等检测研究[13,14]。特别是，自 21 世纪以来，光纤检测技术在 ITER、LHC 等国际重大工程中得到了进一步的应用。如 Willsch 等[15]对 FBG 传感器在低温和变温环境下的应变传感功能进行了实验研究，并运用环氧基体封装的 FBG 传感器测试了低温超导线圈结构表面励磁过程中的应变变化情况。Ramalingam 等[16]则结合 FBG 传感器分布测量的特点，在一条长光纤中刻入若干个光栅传感器，并将 FBG 传感器缠绕在磁体结构表面，利用 FBG 传感器的波长解调技术，依次得到超导磁体表面不同位置处的应变变化情况。中科院电工研究所 Zhang 等[17]运用 FBG 传感器测量了双饼高温超导磁体和 8T 超导磁体在励磁过程中的应变、温度，并给出了 FBG 传感器在低温下的标定曲线等。兰州大学王省哲小组[18,19]研制了可用于超低温、强磁场等极端多场环境的聚酰亚胺 FBG 传感器，在极端低温和变温环境下完成了该传感器的力学实验标定后，埋入至 4T 的 NbTi 超导磁体和 10T 的 Nb3Sn/NbTi 混合超导磁体中，测量分析了超导线圈内部的应力和应变，结果表明：在超导线圈内部压力近百兆帕时，聚酰亚胺封装的 FBG 传感器可以埋入到超导线圈内部正常工作(传统的电阻应变片基本损坏，而光纤光栅传感器的存活率达 80%以上)。

尽管运用 FBG 传感器可以对强磁场、低温环境下超导磁体结构表面的温度和应变进行有效测量与表征，但是大量工程实践表明：对于实用型超导磁体结构，尤其是高温、高场超导磁体结构，通常内部结构的力学变形及耦合效应才是导致整体结构失效和破坏的真正原因。而与高温、高场超导磁体内部结构有关的埋入式 FBG 传感器测量方法与机制，在应变测量方面尚鲜有基础实验研究。在 FBG 传感器埋入超导磁体的过程中，不但需要充分考虑 FBG 传感器自身的低温传感特性、结构特征等问题，还需要结合被测超导材料的特点，从结构的相容性、复杂载荷、绕制工艺、极低温多场环境等角度出发，开展磁体结构内部埋入式光纤测量基础方法与相关机制的研究。基于埋入式光纤的测量技术在超导磁体应用研究方面主要有两种模式：直接粘贴式和材料内封式。直接粘贴式主要是借鉴了表面粘贴式的经验，直接将光纤传感器粘贴在超导线圈内部，这种模式在应用于复杂的超导磁体结构方面，存在诸多问题[20]。材料内封式是近年来针对 YBCO 高温超导材料结构而发展的新兴传感器设计，利用光纤极小的体积，在 YBCO 材料制备过程中，将光纤封装至复合材料的层间，这种模式需要考虑复杂的制备工艺与规模，且埋入至材料内部狭小空间后，光纤的光损机制尚不明确，目前只适合于超导短样品的技术初步验证[21]。

综上所述，针对埋入式 FBG 传感器在超导磁体结构内部应变测量方面的不足，本文基于 FBG 传感器超小体积和 YBCO 超导磁体宏观连续绕制的特点，研制了一种埋入式 FBG 应变传感器，利用低温黏接剂将 FBG 传感器封装至 YBCO 超导带材的一侧，以达到保护传感器的目的，待带材绕制成磁体结构后，FBG 传感器随带材一起绕制于超导线圈层匝间，从而实现测量内部的形变行为等。本文结合YBCO 超导线圈在绕制与固化过程中的固化材料、粘贴材料以及在磁体绕着过程中的顺序，研制了 4 种不同的

埋入式 FBG 应变传感器，并对研制的传感器进行了测试对比和精度分析，给出了相应的实验标定曲线，确定了最优的埋入式 FBG 应变传感器。

1　FBG 传感原理

FBG 传感器是利用掺杂光纤的光敏特性，通过特定的技术手段使光纤纤芯的折射率沿光纤轴向呈周期性的变化，反射光的入射波长 λ_B（也叫中心波长）满足以下表达式：

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

式中：Λ 为光栅的折射率调制周期；n_{eff} 为光栅的有效折射率。

当 FBG 传感器所处环境的物理量如温度、应力等发生变化时，光纤纤芯折射率和调制周期也会随之发生变化，从而导致 FBG 传感器反射中心波长的偏移。FBG 传感器在测量温度和应变时，FBG 传感器的中心波长变化 $\Delta\lambda_B$ 满足：

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = K_\varepsilon \lambda_\varepsilon + K_T \lambda_T \tag{2}$$

式中：K_ε 为 FBG 传感器应变灵敏度；K_T 为 FBG 传感器的温度灵敏度。

由式(2)可见，FBG 传感器的中心波长变化 $\Delta\lambda_B$ 受温度和应变的共同作用。由于石英光纤光栅主要由 SiO_2 组成，当环境温度 T 为恒温（即 $\Delta T=0$）或环境温度低于 20K 时，温度对石英光纤光栅波长漂移的影响十分微弱[19,20]，即

$$\Delta\lambda_B = \begin{cases} K_\varepsilon \cdot \varepsilon & T \leqslant 20\,\mathrm{K}, \Delta T = 0 \\ K_\varepsilon \cdot \varepsilon + K_T \cdot \Delta T & T > 20\,\mathrm{K} \end{cases} \tag{3}$$

光纤被埋入测试样品时，由于采用的粘贴工艺与埋入技术不同，埋入式光纤光栅的应变灵敏度也会不尽相同，因此，本文将着重针对不同埋入工艺对其低温应变基础传感性能开展其基础标定研究。

2　实验研究

2.1　实验样品的制备

实验选用上海超导科技股份有限公司生产的 YBCO 高温超导带材，本文采用不同的封装工艺制作了 A、B、C、D 4 种不同的埋入式 FBG 应变传感器，即将 FBG 传感器封装至样品一侧，且几乎不影响带材整体尺寸，待带材绕制成磁体结构后，FBG 传感器随带材一起绕制于超导线圈层匝间。在粘贴制备过程中，使用 Varnish 低温胶作为 FBG 传感器的黏接剂（适用于 4.2K～400K），采用双组分的环氧树脂（适用于 4.2K～500K）作为制备测试样品的固化剂。

实验主要是在液氮温区下进行，且要求封装后的光纤传感器不影响带材本身的尺寸，以方便带材的绕制，因此，在执行封装工艺的过程中，需要严格控制每个环节的关键技术。首先，使用粗砂纸交叉倾斜 45°打磨截取的 YBCO 带材；然后，分别使用丙酮、酒精擦洗 YBCO 带材表面的粉末、杂质等，保证整个表面的清洁；最后，将光纤固定于 YBCO 带材表面的合适位置处，使用 Varnish 低温胶均匀地涂覆 FBG 传感器，在常温下即可完成固化。在测试样品的制备过程中，结合超导磁体在绕制与固化过程中的工艺情况，采用不同的封装材料和粘贴顺序，本文研制了工艺 A、工艺 B、工艺 C 和工艺 D 等 4 种埋入式 FBG 应变传感器。图 1 为基于工艺 A 样品的纵截面示意图，将 FBG 传感器粘贴到试样后，使用 Varnish 低温胶均匀地涂覆于光纤栅区周围，从而起到封装光纤传感器的作用。图 2 为基于工艺 B 样品的纵截面示意图，在工艺 B 的封装过程中，考虑了低温剪切力对埋入式 FBG 传感器特性的影响，在工艺 A 的基础上，均匀地再涂覆一层环氧树脂保护薄膜，使得光纤传感器封装到 Varnish 低温胶和环氧层的内部，进一步加强了低温抗剪特性。图 3 为基于工艺 C 样品的纵截面示意图，在超导磁体制备过程中，需要使用环氧树脂浇注，以达到固定超导线的目的，工艺 C 在制备过程中直接在光纤栅区涂覆一层环氧树脂薄膜。图 4 为基于工艺 D 样品的纵截面示意图，工艺 D 的制备方法是首先在 YBCO 带材表面均匀地涂覆一层环氧树脂，待完全固化后，再使用 Varnish 低温胶将光纤栅区黏接于环氧树脂层表面。在以上 FBG 传感器实际封装过程中，环氧树脂薄膜层太厚或太薄对于光纤的封装保护和应变传递率都会有不利的影响，因此，本文中将封装层的厚度控制在 0.3mm 左右[21]。

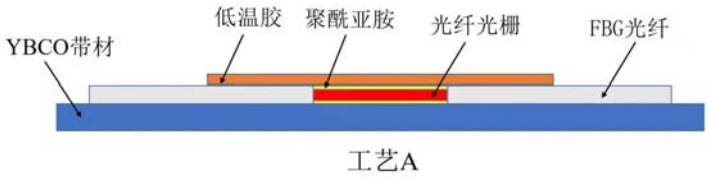


图 1 基于工艺 A 样品的纵截面示意图

Fig. 1 The sample diagram of vertical section with technology A

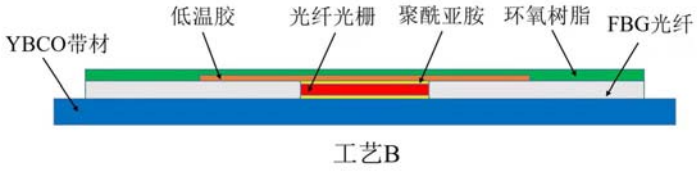


图 2 基于工艺 B 样品的纵截面示意图

Fig. 2 The sample diagram of vertical section with technology B

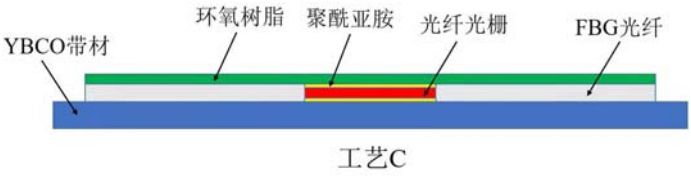


图 3 基于工艺 C 样品的纵截面示意图

Fig. 3 The sample diagram of vertical section with technology C

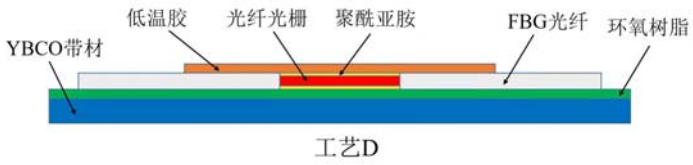


图 4 基于工艺 D 样品的纵截面示意图

Fig. 4 The sample diagram of vertical section with technology D

2.2 实验过程

本文中,被测样品为浸泡于液氮温区下的 YBCO 超导带材,基于不同的封装工艺,将光纤传感器封装至带材一侧,且几乎不影响带材的体积。光纤传感器采用的是光纤布拉格式光栅,其测量应变的温度为从室温(300K)至 4.2K,光纤栅区的直径为 0.22mm,栅区长度为 10mm。

低温光纤测试系统由光纤光栅信号测量解调单元、信号采集单元和数据存储单元组合而成。该系统可实现低温和变温、强磁场等多场、极端环境下光纤光栅传感器信号的采集和存储,如温度、应变、压力等信号。同时,该系统还具有较高的测量精度,例如:拥有宽泛的动态波长测量范围(具有 1530nm～1550nm 的测量波长),最小空间分辨率仅为 1pm,时间分辨率高达 5000Hz,测量误差不超过 5pm。另外,该系统共有 16 组独立工作的通道,可实现多组通道的长期同步采集。

所研制的埋入式光纤及测试样品的标定实验是在兰州大学、中国科学院近代物理研究所和锐义科技(北京)有限公司联合开发的低温力-热耦合性能测试系统上完成的。图 5 为低温力-热耦合性能测试系统,该测试系统配备有 100kN 的电子万能试验机,用于完成测试样品的力学加载试验,试样的夹具置于 77K 低温杜瓦内,而测力传感器置于室温环境中。为了在低温环境下获得更准确的实验结果,系统还配备有 20kN、2kN、0.2kN 三套高精度负荷传感器。

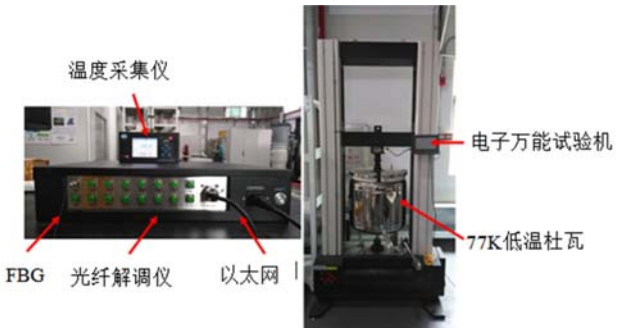


图 5　低温力-热耦合性能测试系统

Fig. 5　Stress- thermal coupling measurement system at cryogenics

3　结果与分析

3.1　相关的基础性标定实验

为了分析不同工艺制备流程对埋入式 FBG 传感器性能的影响，确保所研制的埋入式 FBG 传感器测量结果的准确性，针对不同的 FBG 传感器封装工艺及测试样品，开展了在不同温度、封装工艺等因素影响下的基础性标定实验。

图 6 为在室温(300K)和液氮浴(77K)下，采用工艺 A 制备的测试样品的应变与波长关系。由图 6 可知，在室温(300K)和液氮浴(77K)中所标定的 FBG 传感器的应变灵敏度基本吻合，平均约为 1.198pm/με，与标准裸光纤的应变灵敏度(1.2pm/με)相比，最大误差仅为 0.6%，且几乎不受温度的影响。虽然工艺 A 在室温和低温下的应变灵敏度具有较好一致性，但是缺乏必要的固化措施，抗拉与抗剪切能力较弱，因此，工艺 A 并不适用于低温等复杂工况下的应变测量。

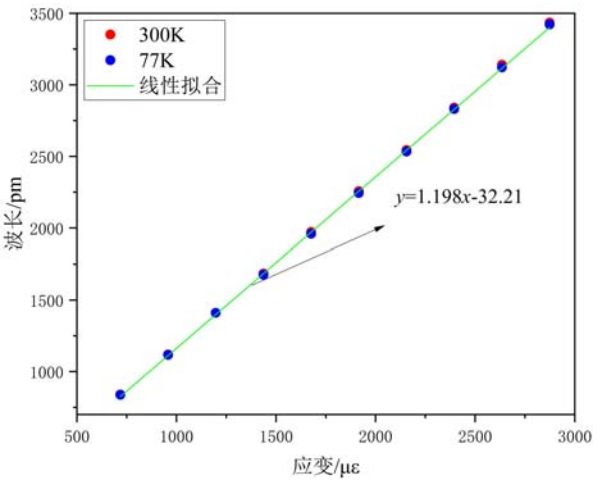


图 6　采用工艺 A 制备的测试样品的应变与波长关系

Fig. 6　The relationship between strain and wavelength of sample with technology A

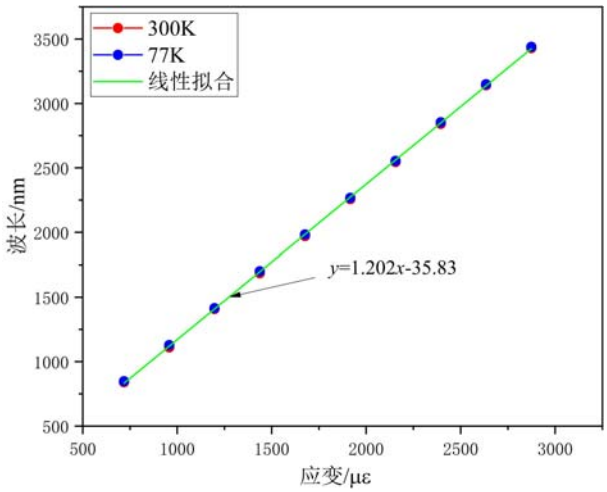


图 7　采用工艺 B 制备的测试样品的应变与波长关系

Fig. 7　The relationship between strain and wavelength of sample with technology B

图 7 为采用工艺 B 制备的测试样品的应变与波长的关系。由图 7 可知，不同温度环境下应变与波长的变化曲线几乎一致，并且表现出良好的线性关系，通过线性拟合得到的应变灵敏度为 1.202pm/με，非常接近于标准裸光纤的应变灵敏度，因此，工艺 B 制备的样品可以适用于室温和低温下埋入式的应变测量。

图 8 为采用工艺 C 制备的测试样品的应变与波长关系。由图 8 可知，测试样品的应变灵敏度在液氮浴(77K)中约为 1.0 pm/με，而在室温(300K)的应变灵敏度仅为液氮浴(77K)中的一半，约为 0.49 pm/με，可见温度效应对测试结果影响较大。由于光纤光栅的应变传递率与胶体的弹性模量具有正相

关性,受环境温度的影响,在室温下环氧树脂的弹性模量仅为液氮浴中的三分之一[22],因此,采用工艺 C 制备的样品需要在不同温度下精确标定后,方可使用。

图 9 为采用工艺 D 制备的测试样品的应变与波长关系。由图 9 可知,测试样品的应变灵敏度几乎不受温度的影响,约为 1.27pm/με,高于标准裸光纤的应变灵敏度,而位于光纤光栅下层的环氧树脂会影响其应变传感性能,因此,工艺 D 并不适用于低温等复杂工况下的应变测量。

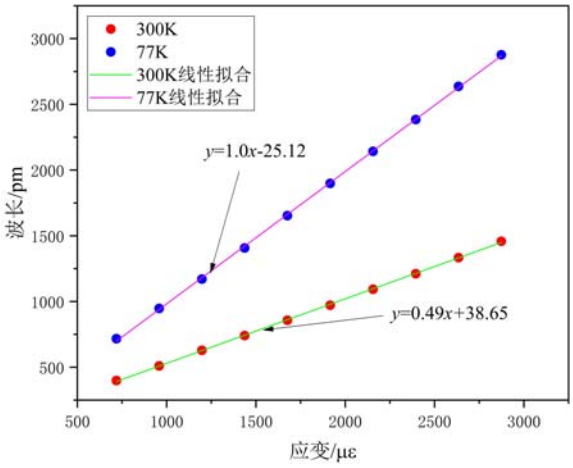


图 8 采用工艺 C 制备的测试样品的应变与波长关系

Fig. 8 The relationship between strain and wavelength of sample with technology C

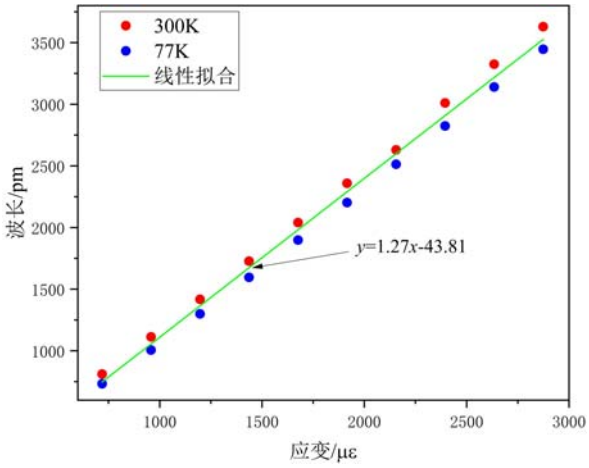


图 9 采用工艺 D 制备的测试样品的应变与波长关系

Fig. 9 The relationship between strain and wavelength of sample with technology D

表 1 列出了 4 种工艺制备的埋入式光纤光栅在低温下的应变灵敏度与标准值。由表可以看出,工艺 A 和工艺 B 低温下的应变灵敏度与标准值较为接近,但工艺 A 未采取环氧封装保护措施,不适合埋入运行于极端工况下的超导磁体结构内部;而工艺 C、工艺 D 与标准值相差较大(高 10%～20%),在应用过程中需要对其进行细致的二次标定,以提高测量精度。

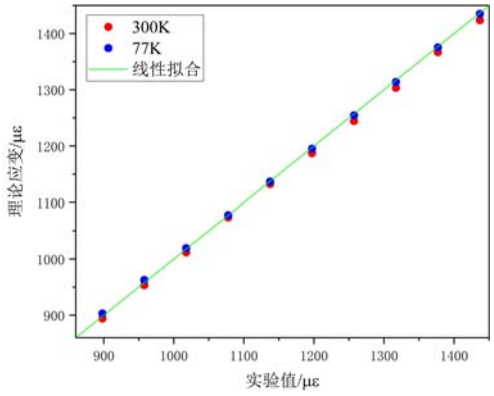


图 10 工艺 B 制备的双层测试样品实验值与理论值应变关系

Fig. 10 The relationship between experimental and theoretical strain of double-layer sample with technology B

表 1 低温下 4 种工艺的应变灵敏度

Tab. 1 Strain sensitivity of four technologies at cryogenics

工艺类别	低温应变灵敏度/(pm/με)
标准值	1.2
工艺 A	1.198
工艺 B	1.202
工艺 C	1.0
工艺 D	1.27

3.2 液氮浴中 YBCO 超导带材的应变测量实验

基于表 1 中 4 种埋入式工艺的应变灵敏度,可以发现工艺 B 是适合用于低温环境下埋入式应变测量的封装工艺。基于工艺 B,首先,我们制作了双层 YBCO 带材,将 FBG 传感器封装至被测带材的层间,并对双层 YBCO 带材在室温和液氮温区中进行应变测量。然后,我们制备了 YBCO 超导带材的准分布式 FBG 传感器,在液氮环境中开展应变传感性能实验研究。图 10 为采用工艺 B 制作的双层测试样品在室温和液氮温区下的实验值和理论值的应变关系。由图 10 可知,在不同的拉伸载荷情况下,对于 YBCO 带材结构内部的应变,理论值与实验值比较吻合。

通常，利用一根准分布式 FBG 传感器便能实现超导磁体内部多点应变的测量。本文基于工艺 B，将准分布式光纤光栅封装于 YBCO 带材表面，在室温（300K）和液氮浴（77K）下，对测试样品进行了加载实验研究。图 11 为采用工艺 B 制备的准分布式 FBG 传感器测试样品（6 个传感栅区）在降温前、降温后和加载到 2500$\mu\varepsilon$ 时波长与功率的关系。由图 11 可知，在测试样品降温前，6 组光纤光栅无任何啁啾现象。当温度降至 77K 时，第 1 组和第 6 组的光纤光栅出现了轻微的波峰展宽、劈波等啁啾现象，这是由于粘贴端部效应所引起的，而另外 4 组光纤光栅在整个降温和加载的过程中光谱保持良好，无任何啁啾现象。

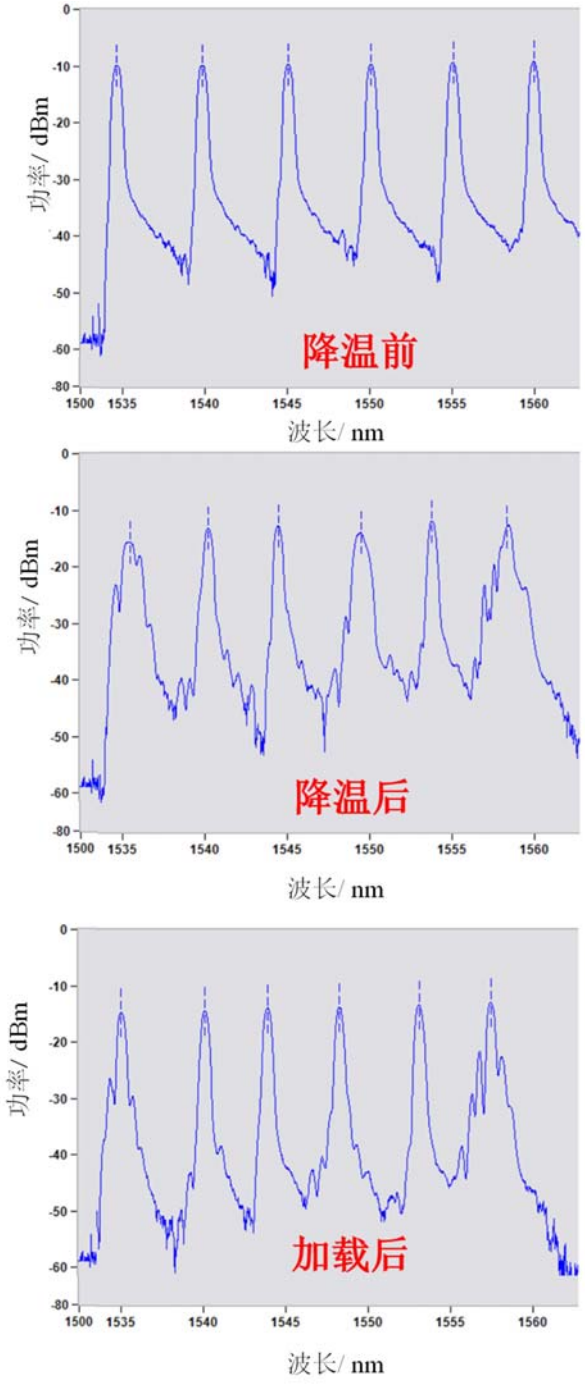


图 11　降温前/后与加载过程中封装至样品上分布式 FBG 传感器波长与功率的关系

Fig. 11 the relationship between wavelength and power of distributed FBG sensor embed on the sample before/after cooling and during loading

图 12 为采用工艺 B 制备的准分布式 FBG 传感器测试样品的实验值和理论值的应变关系,由图可知,与理论应变值相比,实验测得的应变值在室温(300K)和液氮浴(77K)中具有较好的一致性,加载到约 2500$\mu\varepsilon$ 时,测量精度高达 98.8%。

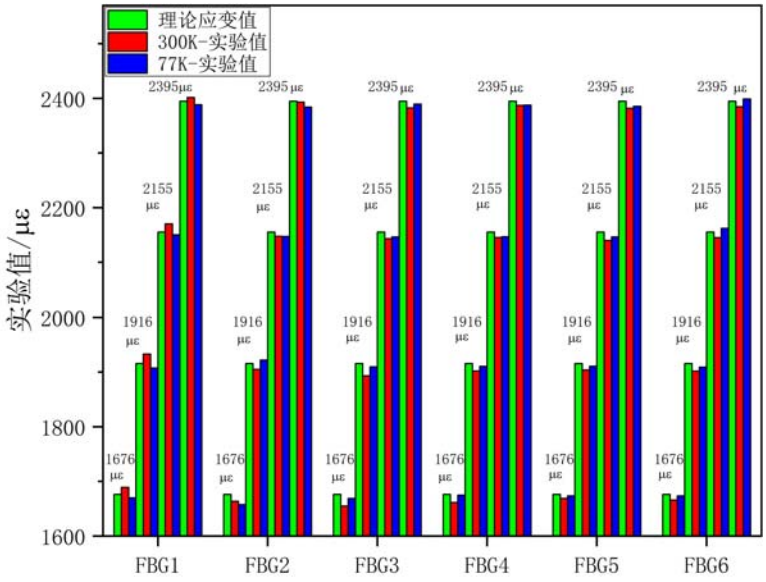


图 12 工艺 B 制备的分布式 FBG 传感器测试样品实验值与理论值的应变关系

Fig. 12 The relationship between experimental and theoretical strain of distributed FBG sensor sample with technology B

4 结论

本文基于 YBCO 超导磁体宏观连续绕制的特点,研制了 4 种不同工艺的埋入式 FBG 传感器,针对研制的埋入式 FBG 传感器,进行了测试对比和精度分析,并给出了相应的实验标定曲线。文中确定了一种最优的埋入式 FBG 传感器,并讨论了该传感器在室温和液氮温区下的应变测量精度及应用。得到以下主要结论:

(1) 在 FBG 传感器正确封装与粘贴的情况下,工艺 A(Varnish 低温胶封装)标定的应变灵敏度与理论应变灵敏度大致相同,约为 1.198 pm/$\mu\varepsilon$,但在低温环境中抗剪性能较差。

(2) 工艺 C(环氧树脂封装)制备的测试样品需要在不同的温度中分别标定应变灵敏度后,方可使用。工艺 D(先环氧树脂固化,再用 Varnish 低温胶封装)受环氧树脂和 YBCO 复合材料的影响,标定的应变灵敏度为 1.27pm/$\mu\varepsilon$,明显高于理论应变灵敏度,在测试样品加载至 2500$\mu\varepsilon$ 时,最大误差接近 10%,并不适合于 YBCO 超导结构内部的应变测量。工艺 B(先用 Varnish 低温胶封装,再用环氧树脂固化)则在室温和液氮浴中具有较好的抗剪切能力,平均应变灵敏度约为 1.202 pm/$\mu\varepsilon$,测得的应变最接近于 YBCO 带材的实际应变,非常适用于超导磁体结构内部的应变测量。

(3) 基于工艺 B 将准分布式 FBG 传感器封装于 YBCO 带材表面,除去粘贴端部效应的影响,准分布式 FBG 传感器在降温、加载至约 2500$\mu\varepsilon$ 的过程中光谱保持良好,无任何啁啾现象。工艺 B 可为 FBG 传感器封装至 YBCO 超导带材表面,自然地绕制于超导线圈层间监测分布式应变提供参考。

(4) 工艺 B 制备的埋入式 FBG 传感器在 YBCO 双层测试样品和分布式测量样品中具有较高的精度,可作为将光纤封装于 YBCO 带材表面的埋入式测量手段。

参考文献:

[1] 茹加, 胡正国, 袁小华. 我国重离子治癌研究取得重大进展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(4):502－503 (RU Jia, HU Zhengguo, YUAN Xiaohua. Significant progress in heavy ion cancer treatment in China[J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(4):502－503 (in Chinese))

[2] Furuse M. Design and fabrication of HTS coils for a vector magnet[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3):3900504.

[3] Koyanagi K, Takayama S, Miyazaki H, et al. Development of saddle-shaped coils for accelerator magnets wound with YBCO-coated conductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3):1－4.

[4] Shin H S, Dizon J, Ko R K, et al. Reversible tensile strain dependence of the critical current in YBCO coated conductor tapes[J]. Physica C Superconductivity & its Applications, 2007, 463－465(none):736－741.

[5] Wei L, Zhang X, Zhou J, et al. Delamination strength of the soldered joint in YBCO coated conductors and its enhancement[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4):1－9.

[6] Markiewicz W D, Swenson C A. Winding strain analysis for YBCO coated conductors[J]. Superconductor Science & Technology, 2010, 23(4):045017.

[7] Kaufman A. Investigation of strain gages for use at cryogenic temperatures[J]. Experimental Mechanics, 1963, 3(8):177－183.

[8] Guan M Z, Hu Q, Gao P F, et al. Mechanical analysis and measurements of a multicomponent NbTi/Cu superconducting magnets structure for the fully superconducting electron cyclotron resonance ion source[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(5):058502.

[9] Guan M Z. Stress and strain measurements on a 5T superconducting magnet during coil excitation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3):9002404.

[10] Guan M, Wang X, Xin C, et al. Structural mechanics exploration for multicomponent superconducting solenoids by hoop strain tests during cooling and excitation[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2014, 27(5):1179－1185.

[11] Guan M, Wang X, Ma L, et al. Magnetic field and strain measurements of a superconducting solenoid magnet for C-ADS injector-II during excitation and quench test[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2013, 26(7):2361－2368.

[12] Van Oort J M, Ten Kate H H J. A fiber optics sensor for strain and stress measurements in superconducting accelerator magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 30(4):2600－2603.

[13] Schultz J H, Pourrahimi S. Principles of advanced quench detection design in cable-in-conduit (CICC) magnets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2):455－460.

[14] Baxter S, Lakrimi M, Thomas A M, et al. Validation of a novel fiber optic strain gauge in a cryogenic and high magnetic field environment[J]. Cryogenics, 2010, 50(10):700－707.

[15] Willsch M, Bosselmann T, Ecke W, et al. Fiber optical temperature and strain measurements for monitoring and quench detection of superconducting coils[C]. Proceedings of SPIE－The International Society for Optical Engineering, 2008, 7004:70045G-70045G-4.

[16] Ramalingam R K, Klaser M, Schneider T, et al. Fiber Bragg grating sensors for strain measurement at multiple points in an NbTi superconducting sample coil[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3):873－881.

[17] Zhang H, Deng F, Wang Q, et al. Development of strain measurement in superconducting magnet through fiber Bragg grating[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2):1419－1422.

[18] Guan M, Wang X, Xin C, et al. Experimental measurements of the sensitivity of fiber-optic Bragg grating sensors with a soft polymeric coating under mechanical loading, thermal and magnetic under cryogenic conditions[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 1(32):144－148.

[19] Hu Q, Wang X, Guan M, et al, Strain responses of superconducting magnets based on embedded polymer-FBG and cryogenic resistance strain gauge measurements[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 29:1－7.

[20] Chiuchiolo A, Bajas H, Bajko M, et al. Advances in fiber optic sensors technology development for temperature and strain measurements in superconducting magnets and sevices[D]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26:1－5.

[21] 徐义武，张素侠. 表贴式胶体与光纤弹性模量比对应变传递率的影响[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(21)：137－141 (XU Yiwu, ZHANG Suxia. Effect of elastic modulus ratio of surface－bonded colloidand optical fiber on train transfer rate[J]. Laser & Opto－electronics Progress, 2020, 57(21):137－141 (in Chinese))

[22] 李志伟. 环氧树脂及其复合材料的低温力学性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2018 (LI Zhiwei. The study on cryogenic mechanical properties of epoxy resin and its composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese))

Basic experimental study on low temperature mechanical sensing performance of embedded fiber Bragg grating sensor

ZHANG Pengnian[1], TENG Qingfang[1], GUAN Mingzhi[2,3]

(1. Lanzhou Jiaotong University, School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Lanzhou University, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Complex stress and strain can arise from the winding, cooling down and intense field in YBCO superconducting magnets, which can induce maximum internal strain to about several thousand micro-strain in magnets and cause the degradation of superconducting performance and even damage easily the internal structure of superconducting magnets. Especially for high temperature superconductor, the internal stress state is related directly to its safety and reliability operation. The relevant measurement technology of internal strain in the ultra-low temperature is rarely involved at home and abroad. Based on fiber Bragg grating (FBG) strain measurement technology, it is proposed that an embedded FBG sensor measurement technology for YBCO high temperature superconducting taps, namely, FBG sensor is attached slightly to the surface of strip by adhesive and special crafts, whereas the size of tap is hardly influenced; then the FBG sensor is naturally embedded between the coil layers when winding. Furthermore, measurement precision of four kinds of FBG based on the different preparation crafts were compared and analyzed. The corresponding experimental calibration curves were shown, and the effects of binder, bonding process and low temperature environment on the results were discussed. The results show that the developed embedded FBG sensing measurement technology can work well in liquid nitrogen cooling environment when the proper curing of low-temperature adhesive and epoxy resin. The measurement technology is also applied for internal strain measurement of double-layer superconducting taps at cryogenic temperature. There was not chirp phenomenon of FBG sensor occurred in liquid nitrogen environment for the developed quasi-distributed embedded FBG sensor with high measurement accuracy.

Keywords: strain measurement; embedded FBG sensor; YBCO