

引文格式:刘琦,秦浩轩,杨媛媛,等.基于宽温域高响应压阻传感的螺栓松动监测方法研究[J].航空制造技术,2025,68(21):42-51.

LIU Qijian, QIN Haoxuan, YANG Yuanyuan, et al. Bolt loosening monitoring based on wide-temperature high-response piezoresistive sensing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(21): 42-51.

基于宽温域高响应压阻传感的螺栓松动监测方法研究*

刘琦^{1,2}, 秦浩轩¹, 杨媛媛¹, 孙茂之¹, 孙虎^{1,2}, 王奕首¹, 卿新林¹

(1. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361002;

2. 四川天府新区厦大创新研究院, 成都 610213)

[摘要] 航空航天、石油化工及轨道交通等重大装备领域,螺栓连接结构常处于高温、大压强及多源载荷耦合的复杂工况,螺栓松动监测对于保障结构安全与服役稳定性具有重要意义。压阻传感器因其制备工艺成熟、成本低和响应灵敏,在工程实践中具有良好应用前景。本文研制了一种具备耐高温、高集成度与宽响应范围特性的压阻传感器。通过将炭黑(CB)、氧化铝(Al_2O_3)与聚酰胺酸(PAA)溶液机械搅拌并超声分散,制得导电溶液,结合刮涂与热亚胺化工艺,制备出厚度为100 μm 的传感器,并实现与柔性电路板(FPC)的集成。试验结果表明,该传感器可在300 $^{\circ}C$ 下稳定工作,在M20大尺寸螺栓松动监测中实现了100 $N \cdot m$ 扭矩与34.30 MPa压力响应。测试结果验证了它在高温与大载荷工况下的稳定监测能力,为重大装备大尺寸螺栓连接结构的松动状态监测提供了可靠的技术手段,具备良好的工程应用前景。

关键词:螺栓松动;结构健康监测;压阻传感器;高温;宽量程

中图分类号:V250.2;TB33 文献标志码:A DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2025.21.042



刘琦

助理教授,博士,研究方向为结构健康监测、智能传感技术。

螺栓连接作为常用的机械连接形式,具有连接强度高、拆卸便捷、制造成本低、适应复杂工况等优点^[1-2],广泛应用于航空航天、石油化工、轨道交通等领域的重大装备关键部件中。螺栓连接结构在长期服役过程中易在拉应力、剪切应力等多种载荷作用下发生松动,进而导致连接性能退化,诱发结构失效、材料疲劳与寿命缩短,严重时可能引起部件脱落,带来严重安全隐患。因此,螺栓松动监测显得尤为重要,其有助于保障工程安全,提高设备可靠性以及降低维护成本,是当前学者们研究的方向^[3-4]。结构健康监测(Structural

health monitoring, SHM)技术通过在结构关键部位布设传感器,实现结构响应数据的实时采集与分析,从而对结构状态进行动态评估,识别潜在损伤及性能退化趋势,此技术已在工程领域得到广泛应用^[5-6]。针对螺栓松动问题,SHM技术可实现对状态变化的在线感知与预警,可逐步取代传统依赖人工巡检的方式,在提升检测效率的同时显著降低潜在安全风险,使其具有重要的工程应用价值。

现有研究主要基于声发射信号分析^[7-8]、超声导波与信号处理算法融合技术^[9-10]、光纤布拉格光栅应变感知方法^[11-12],以及基于机器视觉

*基金项目:国家自然科学基金(12402225, U2141245);福建省自然科学基金(2023J05018);厦门市自然科学基金(3502Z202372009);中国石油科技创新基金(2024DQ02-0309);四川天府新区厦大创新研究院开放课题基金(202401YB008)。

的图像特征分析等方法^[13-14],对螺栓松动状态进行监测。然而,现有传感技术在工程应用中仍面临诸多如器件构型复杂、制造成本高、灵敏度有限及环境适应性不足等问题。相比之下,压阻传感器因其结构简单、制造成本低、便于集成等优势,在螺栓松动监测领域展现出较大应用潜力^[15-16]。表1对上述各类方法在螺栓松动监测中的优势与不足进行了归纳与对比。

Song等^[17]基于炭黑(Carbon black, CB)和聚乙烯吡咯烷酮复合材料开发了一种高灵敏度压阻传感器,通过调控组分质量分数及优化电极布局,实现了对碳纤维增强复合材料螺栓连接结构松动状态的高效监测,为复合材料连接结构的健康监测提供了新的技术路径。Jiang等^[18]研制的一种基于MXene/柔性电路板(Flexible printed circuit board, FPC)的压阻传感器,具有优异的力学性能和环境适应性,在63000次压力循环加载后仍保持稳定响应,并可在振动环境下准确识别螺栓松动状态,展现出较高的可靠性与耐久性。上述研究表明,压阻传感器凭借结构简单、灵敏度高及易于集成等优势,已在螺栓连接结构松动监测中展现出良好的应用潜力。然而,针对高温服役工况下大尺寸螺栓连接结构的压阻传感监测技术的相关研究仍较为

薄弱,且仍面临多项关键技术难题。

重大装备在运行过程中常处于高温环境,其连接部位通常采用具有耐热胀冷缩、抗氧化及抗应力松弛性能的螺栓连接结构。螺栓不仅需在常温下保持连接可靠性,更需在高温工况下长期稳定服役。因此,实现高温条件下的螺栓松动监测具有重要的工程应用价值。针对该需求,国内外学者持续开展高温环境下压阻传感器的相关研究。Zhang等^[19]提出将截锥截面结构与绝缘硅基压阻元件相结合,有效隔离热源,使传感器在高达800℃的环境下实现了1.6 GPa的超高压测量,然而,该方案因传感器整体尺寸较大,难以集成于螺栓连接结构中,限制了其在紧凑空间内的工程应用。Yang等^[20]提出一种 $Ti_3C_2T_x$ MXene/Au双层导电网络和微球状结构的压阻传感器,其具备1000 kPa的压力监测范围和 497 kPa^{-1} 的灵敏度,并可在400℃高温环境下保持稳定工作性能。该传感器虽通过结构设计显著提升了灵敏度,但其压力量程有限,从而制约其在大尺寸螺栓连接结构松动监测中的适用性。Kadkhodazadeh等^[21]采用高弹性模量聚氨酯基体,掺杂碳纳米管(Carbon nanotube, CNT)和石墨烯纳米片(Graphene nanoplatelets, GNP)导电填料,开发出一种具有优异热稳定性的压阻传感器,能够在150℃下

实现10 MPa量程的压力监测。该传感器在中低温下具有良好性能,但其聚氨酯基体不耐高温,长期服役易发生性能退化,难以满足高温环境下螺栓状态监测的应用需求。现阶段,压阻传感器在耐高温、宽量程及薄型化等方面仍难以同时满足螺栓松动监测的工程应用需求,其在高温环境下的实际应用仍处于探索阶段。

为解决上述问题,本文设计并制备了一种以CB和聚酰亚胺(Polyimide, PI)为主要功能组分的压阻传感器,其具备优良的耐高温性能、宽响应范围及薄型结构特征,可满足高温环境下螺栓松动监测的关键技术要求。传感器在制备时首先将CB、热稳定剂氧化铝(Al_2O_3)与聚酰胺酸(Polyamic acid, PAA)溶液混合,通过机械搅拌与超声分散实现导电溶液的均匀分散,随后采用刮涂与热亚胺化工艺将其转化为传感层,并实现与FPC基底的一体化集成。本文系统分析了传感器的工作机理,对不同导电填料类型、质量分数及热稳定剂对传感性能的影响进行了对比分析,并开展了传感器压阻响应特性、高温环境下耐久性与重复性等方面的性能测试。进一步通过螺栓连接结构松动监测试验,验证了所研制传感器在高温工况下的稳定性与长期服役性能。所提出的松动监测方法展现出良好的工程适用性,为高温服役环境下螺栓连接结构的状态感知与健康监测提供了有效的技术支撑。

表1 现有螺栓松动监测方法优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and limitations of different bolt looseness monitoring methods

监测方法	优点	缺点
声发射法	可检测松动引起的摩擦、冲击、裂纹等突发事件	误报率高,无法持续监测渐进式松动
超声导波法	对结构完整性变化敏感,可进行多螺栓监测	对螺栓预紧力变化不够敏感
光纤光栅法	可嵌入螺栓内部,精准检测螺栓轴向应变变化	安装复杂,成本高,不易频繁拆装
机器视觉法	非接触式识别松动,易于自动识别和集成AI算法	只能监测可视表面,易受光照、遮挡等条件影响
压阻传感法	成本低、结构薄,可直接贴附于螺栓及垫片处监测压力变化	需与螺栓紧密集成,灵敏度与稳定性易受材料影响

1 传感器原理及制备流程

1.1 传感器工作原理

本文采用的纳米复合材料压阻传感器,其电阻变化主要来源于导电路径重构与隧穿效应变化。导电路径的变化主要表现为导电颗粒在聚合物基体中构建三维导电网络,外力作用下颗粒间接触点数量发生改变,从而引起整体电阻的降低或升高。该传感器由导电填料以及基体材料

PI组成,其中,PI作为主要受力载体,导电填料在其内部均匀分散,形成连续导电网络。同时,当外加载荷作用时,颗粒间距减小,电子隧穿概率上升,导致隧穿电阻降低;在载荷卸除后,颗粒间距恢复,隧穿效应减弱,电阻随之增大,如图1所示。基于此,传感器的电阻变化可用于表征所受压力的变化情况。

1.2 传感器制备流程

本文制备压阻传感器的具体工艺流程如图2所示。首先,将导电填料、热稳定剂加入PAA溶液进行混合,充分溶解并混合得到导电溶液。随后,对该溶液进行机械搅拌(2 h)与超声分散(0.5 h),以充分破除溶质团聚体,提升导电填料的分散均匀性。然后,将导电溶液均匀涂覆于预先设计的柔性FPC上,采用刮膜机控制涂覆厚度并确保膜层均匀。涂覆完成后,将样品置于高温干燥箱中,按照预设的温度梯度程序分阶段加热,依次在80℃加热20 min、120℃加热30 min、180℃加热30 min、200℃加热10 min、220℃加热20 min、250℃加热30 min及280℃加热20 min的条件下进行处理,以实现导电溶液的逐步热亚胺化。经过该过程,导电溶液转化为具备压阻效应的传感层,牢固附着于FPC基底表面,并与其凹槽结构中的铜电极实现接触。随后,在传感层表面再次涂覆一层纯PAA溶液,并重复上述热亚胺化步骤,形成聚酰亚胺保护层,从而增强传感层的结构稳定性与服役耐久性。FPC及压阻传感器的结构示意图如图3所示。本文所采用的试验平台由M20螺栓,规格为21 mm×37 mm×1.6 mm的平垫片以及150 mm×150 mm×60 mm的钢块组成。为兼顾螺栓与垫片的尺寸适配性,同时避免对螺栓连接结构的强度造成干扰,FPC整体结构设计由直径8 mm、厚100 μm的圆柱体及6 mm×500 mm×100 μm的矩

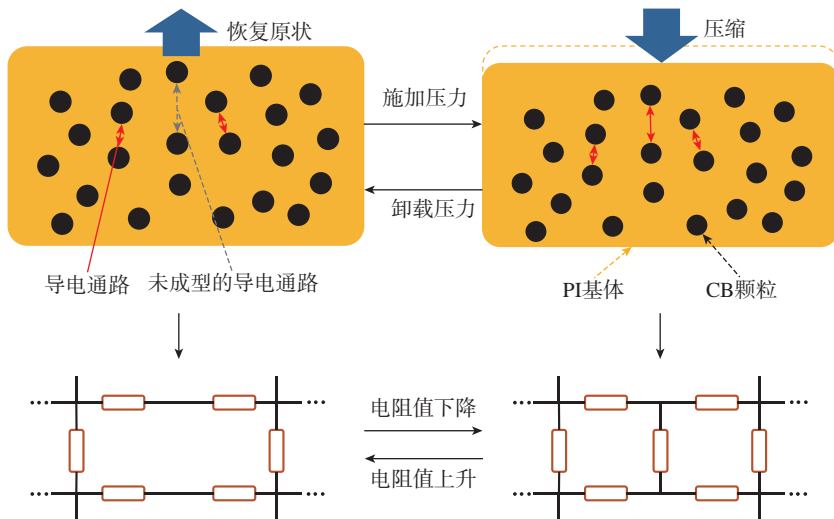


图1 压阻传感器工作原理

Fig.1 Working principle of piezoresistive sensor

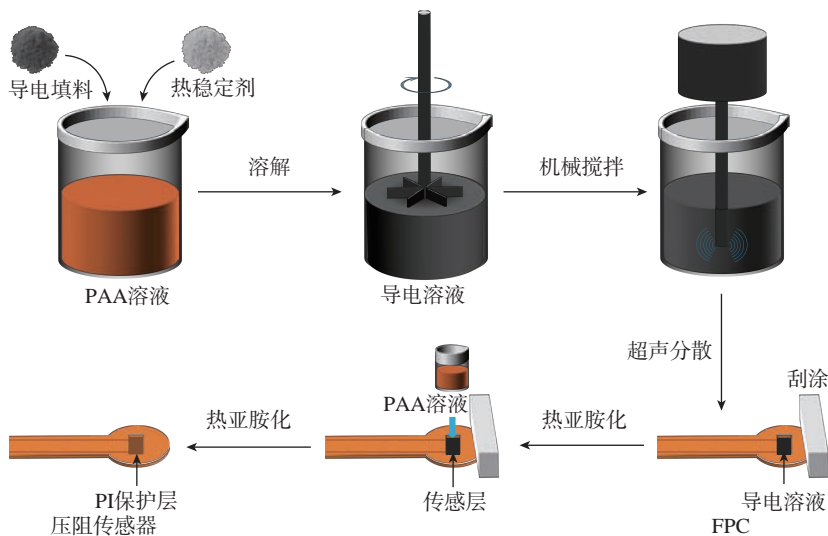


图2 压阻传感器制备流程图示意图

Fig.2 Schematic diagram of fabrication process for piezoresistive sensor

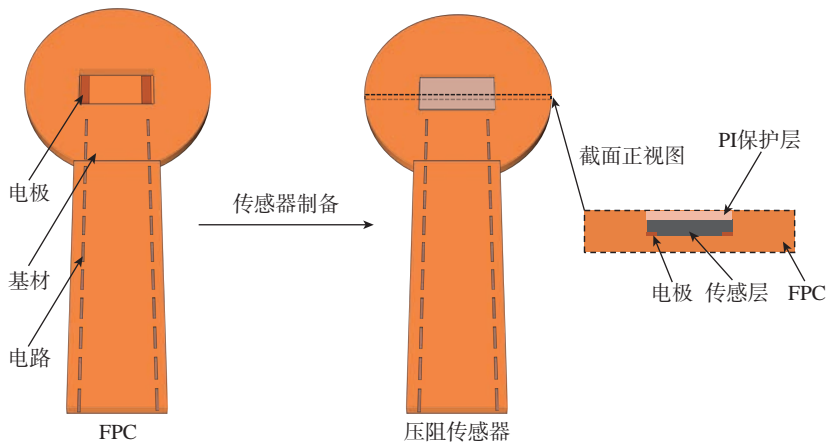


图3 FPC及压阻传感器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of FPC and piezoresistive sensor structure

形条带组成。其中,圆柱体内部开设尺寸为 $2\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 60\text{ }\mu\text{m}$ 长方体结构的凹槽,用于嵌入传感功能区域;凹槽底部两侧设置尺寸为 $0.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的铜电极。凹槽中预设传感层厚度为 $40\text{ }\mu\text{m}$,上方覆盖 $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 PI 保护层。

2 传感器组成及性能表征

2.1 传感器导电填料与质量分数选择

在聚合物基复合材料中,碳基导电填料因其优异的电学性能、力学强度及良好的稳定性,被广泛应用于高性能复合材料与传感器领域,典型材料包括 CB、CNT 和 GNP 等。本文所用 CB 粉末由瑞士特密高公司提供, GNP 与 CNT 粉末由苏州碳丰公司提供, Al_2O_3 粉末由中研纳米新材提供, PAA 溶液由江苏特越塑胶提供,溶液中固含量质量分数为 18%,溶剂为 N-甲基吡咯烷酮(N-methyl-2-pyrrolidone, NMP)。

为评估不同碳基导电填料在高温环境下的压阻响应特性,本文选取 3 种导电填料 CB、CNT 和 GNP,分别与 PAA 溶液混合制备导电溶液。通过高温热亚胺化过程将 PAA 转化为 PI,使传感层固化并与 FPC 集成。各类传感器传感层的组成及其导电溶液中溶质含量见表 2 所示。不同导电填料的传感器在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 的热稳定性试验结果如图 4 所示,其中 5CB/PI 的电阻值下降 0.017%、5CNT/PI 下降 0.274%,而 5GNP/PI 则上升 2.944%。对比之下,采用 CB 作为导电填料的 5CB/PI 传感器在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下表现出更优异的电阻稳定性,该差异主要源于 CB 作为高温热解产物,自身对温度变化的敏感性低于 GNP 和 CNT,因此在高温环境下具备更好的热稳定性。

为提升压力响应灵敏度,本文基于渗流理论来确定导电填料最优质量分数,通过制备不同 CB 质量分数

的传感器并开展电导率测试,明确渗流阈值区间,从而优化填料配比以增强传感性能。各传感器传感层组成及其导电溶液中溶质质量如表 3 所示。电导率测试结果如图 5 所示,当 CB 质量分数 $\leq 2\%$ 时,传感器处于绝缘状态,电导率小于 $6.0 \times 10^{-4}\text{ S/m}$;当 CB 质量分数从 2%~4% 时,传感器电导率从 $6.0 \times 10^{-4}\text{ S/m}$ 急剧上升至 2.1 S/m ;当 CB 质量分数从 4%~7% 时,

电导率从 2.1 S/m 缓慢上升至 5.5 S/m 。综上所述,CB 质量分数为 2%~4% 时,传感器处于渗流阈值区间,在该区间内的对外部压力变化最为敏感。因此,本文后续采用 3% 的质量分数作为压阻传感器传感层中 CB 的质量分数。

在确定导电填料为 3% CB 的基础上,本文通过扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对 3CB/PI 传感器的传感层微观形

表 2 不同导电填料压阻传感器传感层组成

Table 2 Composition of sensing layers in piezoresistive sensors with different conductive fillers

传感器名称	传感层组成及其质量分数	导电填料质量 /g	PAA 质量 /g
5CB/PI	5% CB+95% PI	0.18	3.42
5CNT/PI	5% CNT+95% PI	0.18	3.42
5GNP/PI	5% GNP+95% PI	0.18	3.42

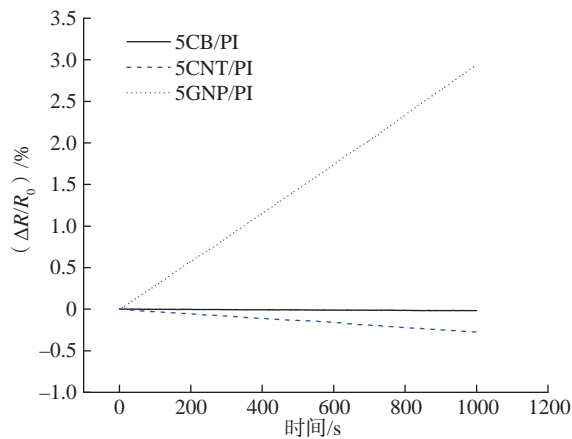


图 4 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 下 5CB/PI、5CNT/PI 及 5GNP/PI 的电阻热稳定性对比

Fig.4 Comparison of thermal stability of electrical resistance for 5CB/PI, 5CNT/PI, and 5GNP/PI at $300\text{ }^\circ\text{C}$

表 3 压阻传感器在不同 CB 质量分数下传感层组成

Table 3 Composition of sensing layers in piezoresistive sensors with varying CB mass fractions

传感器名称	传感层组成及其质量分数	CB 质量 /g	PAA 质量 /g
1CB/PI	1% CB+99% PI	0.036	3.564
2CB/PI	2% CB+98% PI	0.072	3.528
3CB/PI	3% CB+97% PI	0.108	3.492
4CB/PI	4% CB+96% PI	0.144	3.456
5CB/PI	5% CB+95% PI	0.18	3.42
6CB/PI	6% CB+94% PI	0.216	3.384
7CB/PI	7% CB+93% PI	0.252	3.348

貌进行表征。SEM 测试采用 ZEISS SUPRA 55 SAPPHIRE 电子显微镜,在加速电压 15 kV、放大倍率 2000 倍 的条件下获取图像,如图 6 所示。结果表明, CB 颗粒在 PI 基体表面及内部均匀分布,有助于形成稳定、连续的导电网络,增强传感层的应变响应一致性 与可靠性,从而提升传感器在高温及复杂载 荷环境下的性能表现。

为提高高温环境下传感器的工作稳定性, 在确定导电填料为 3% CB 的基础上,进一步 添加热稳定剂 Al_2O_3 以增强热稳定性。制备 含 Al_2O_3 的压阻传感器与不含 Al_2O_3 的压 阻传感器,各传感层组成及导电溶液中溶质 质量见表 4。测试结果如图 7 所示,3CB/PI 传感器在 300 °C 下持续 1000 s 后电阻值下降 0.101%,而 3CB/ Al_2O_3 /PI 传感器电阻值仅下降 0.058%,电阻变化明显减小,热稳定性显著 提升。这是由于在高温环境下,电子迁移率显 著增加,高能载流子易破坏传感层内分子链, 导致 PI 基体产生高密度结构缺陷。而 Al_2O_3 具备优异的耐高温性能,掺杂后可在 PI 基 体内形成高电阻路径,降低载流子迁移速率, 有效减缓对分子链的损伤,提高基体结构稳 定性,从而提升传感器在 300 °C 下的热稳定性。

2.2 传感器性能测试

本文采用 3CB/ Al_2O_3 /PI 传感器作为性能 测试用样品,实物图如图 8 所示。测试过程 中,将该传感器安装于微小电磁力疲劳试验 机上,传感器的引脚通过导线与源表连接,源 表实时记录测试过程中的电阻变化,并通过 数据线将电阻值传输至计算机进行数据采 集与图像绘制,以实现 对传感器性能的评估。压力测试装置如图 9 所示。

使用压力测试装置对 3CB/ Al_2O_3 /PI 传 感器进行压力-电阻响应测试。通过微小电 磁力疲劳试验机,施加频率为 0.01 Hz、压 强分别为 0.4 MPa、0.8 MPa、1.2 MPa 和 1.6 MPa 的压力,

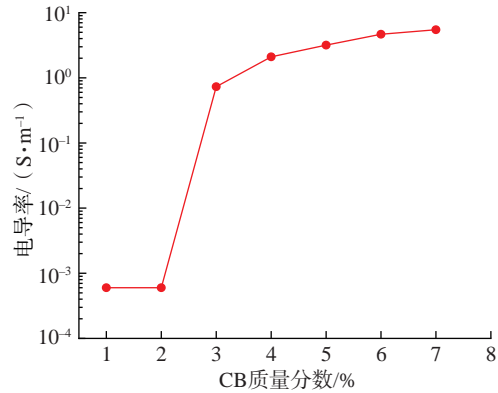


图 5 压阻传感器的电导率与 CB 质量分数关系
Fig.5 Relationship between electrical conductivity of piezoresistive sensors and CB mass fraction

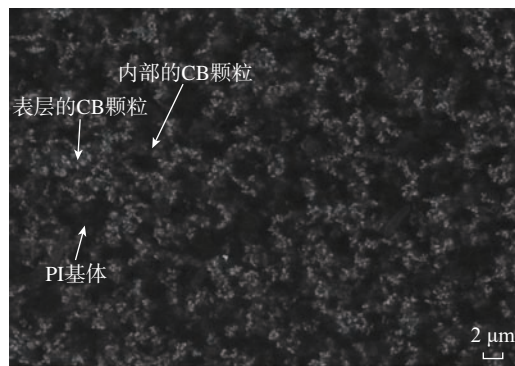


图 6 3CB/PI 压阻传感器传感层的 SEM 拍摄图
Fig.6 SEM images of sensing layer in 3CB/PI piezoresistive sensor

表 4 未添加与添加 Al_2O_3 情况下压阻传感器传感层组成

Table 4 Composition of sensing layers in piezoresistive sensors with and without Al_2O_3

传感器名称	传感层组成及其质量分数	导电溶液中 CB 质量 /g	导电溶液中 Al_2O_3 质量 /g	导电溶液中 PAA 质量 /g
3CB/PI	3% CB+97% PI	0.108	0	3.492
3CB/ Al_2O_3 /PI	3% CB+1% Al_2O_3 +96% PI	0.108	0.036	3.456

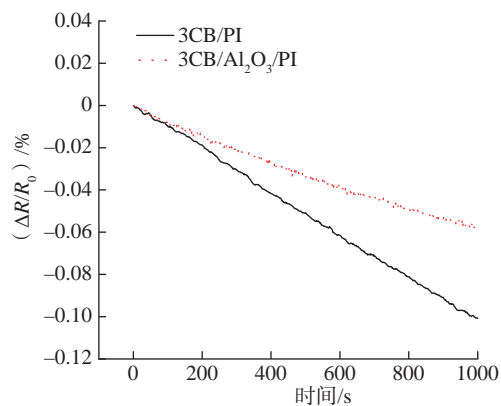


图 7 Al_2O_3 对压阻传感器热稳定性的影响
Fig.7 Effect of Al_2O_3 on the thermal stability of piezoresistive sensors

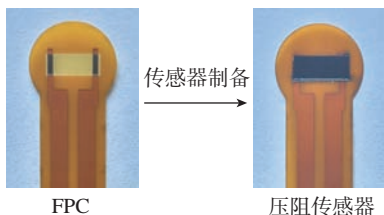


图8 FPC及压阻传感器实物图

Fig.8 Photograph of FPC and the piezoresistive sensor

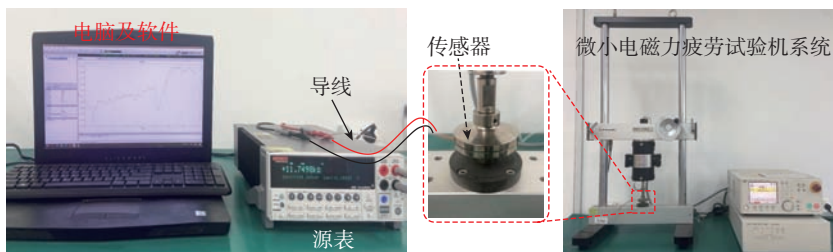


图9 压力测试装置图

Fig.9 Diagram of pressure testing device

监测并记录传感器在不同压力条件下的电阻响应。图 10 显示了压阻传感器在不同压力作用下的电阻响应特性,当传感器分别承受 0.4 MPa、0.8 MPa、1.2 MPa 和 1.6 MPa 的压强时,其电阻值依次下降 0.021%、0.038%、0.059% 和 0.083%,且电阻值在加载后的短时间内保持稳定。图 11 展示了传感器的电阻变化率绝对值随施加压强增加的响应规律。结果表明,电阻变化率绝对值随压强增大而同步增加,且两者呈近似线性关系,表明所制备传感器在压力加载过程中的线性响应特性良好,具备稳定且准确的压力感知能力。

本文对 3 种不同质量分数 CB 的传感器开展了循环压力测试,在频率为 0.01 Hz、压强为 0.8 MPa 的条件下施加 500 次正弦波循环载荷,实时监测并记录传感器在循环加载过程中的电阻响应,各传感器传感层组成及其导电溶液中溶质含量如表 5 所示。图 12 展示了不同质量分数的 CB 压阻传感器在循环压力作用下的重复性测试结果。其中,3CB/Al₂O₃/PI 传感器在循环压力下的电阻变化率约为 0.04%,显著高于 5CB/Al₂O₃/PI 与 7CB/Al₂O₃/PI 传感器,对应上文所述 3% 的质量分数为传感器渗流阈值的分析结果,表明该质量分数下传感器对外部载荷变化更为敏感。此外,该传感器在 500 次压力循环过程中表现出稳定的电阻响应,说明该压阻传感器具有良好的重复性和稳定性,可满足长期服役需求。

为研究传感器在受压变形后的

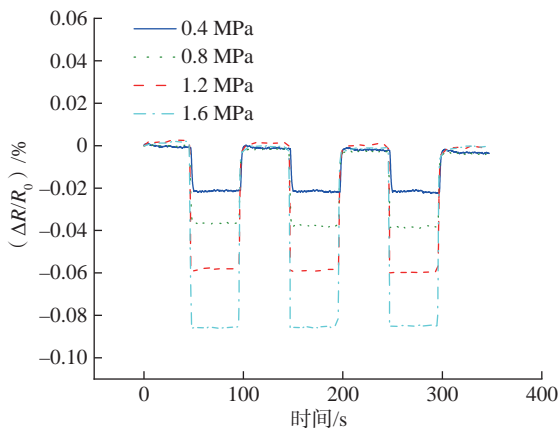


图10 不同压强下压阻传感器电阻响应

Fig.10 Resistance response of piezoresistive sensor under different pressures

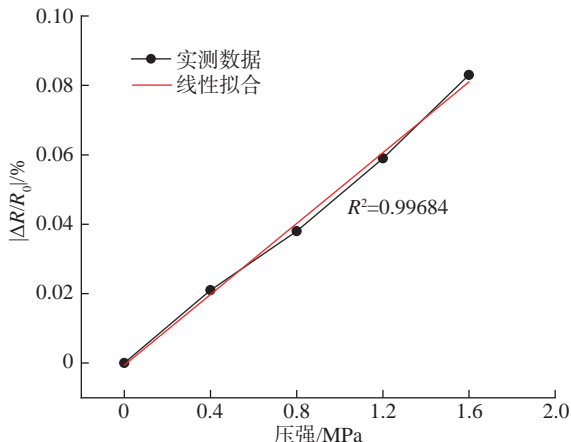


图11 压阻传感器电阻变化率与压强之间关系

Fig.11 Relationship between resistance change of piezoresistive sensor and applied pressure

表5 含 Al₂O₃ 的不同 CB 质量分数压阻传感器传感层组成
Table 5 Composition of sensing layers in Al₂O₃-containing piezoresistive sensors with varying CB mass fractions

传感器名称	传感层组成及其质量分数	CB 质量 /g	Al ₂ O ₃ 质量 /g	PAA 质量 /g
3CB/Al ₂ O ₃ /PI	3% CB+1% Al ₂ O ₃ +96% PI	0.108	0.036	3.456
5CB/Al ₂ O ₃ /PI	5% CB+1% Al ₂ O ₃ +94% PI	0.18	0.036	3.384
7CB/Al ₂ O ₃ /PI	7% CB+1% Al ₂ O ₃ +92% PI	0.252	0.036	3.312

形变恢复能力,本文对 3CB/Al₂O₃/PI 传感器进行了压力加载-卸载测试。在施加与卸载 1.6 MPa 压力过程中,实时记录传感器的压强与应变变化。图 13 表明,加载阶段压强与应变呈近似线性关系,卸载阶段存在一定滞后,主要源于 PI 基体弹性效应。循环结束后,测试曲线基本恢复至初始状态,表明传感器具有良好的形变恢复能力与结构稳定性。

2.3 螺栓松动测试

为验证压阻传感器在室温及 300 °C 高温环境下对大尺寸螺栓松动状态的监测能力,本文将制备的传感器应用于 M20 大尺寸螺栓松动试验中。试验平台由 M20 螺栓、尺寸为 21 mm × 37 mm × 1.6 mm 的垫片及 150 mm × 150 mm × 60 mm 钢块组成,传感器区域位于垫片与钢块之间。试验装置如图 14 所示,同时高温条件下的螺栓松动监测试验在恒温 300 °C 的高温干燥箱中进行。

试验中采用数显扭力扳手施加不同扭矩,实现螺栓的预紧与松动状态调控。传感器所受压强可依据式(1)与(2)进行计算。

$$F = \frac{T}{Kd} \quad (1)$$

$$P = \frac{F}{S} \quad (2)$$

式中, F 为螺栓预紧力; T 为螺栓扭矩; K 为拧紧力系数(本文取 0.2); d 为螺栓公称直径; P 为垫片下方压强; S 为垫片面积。根据上述公式可以得到扭矩与压强间的关系如表 6 所示。

图 15 展示了不同质量分数 CB 传感器在 300 °C 条件下螺栓松动试验中的测试结果。在松动过程中,螺栓扭矩由 100 N·m 逐渐下降至 70 N·m,3 种传感器中 3CB/Al₂O₃/PI 表现出最高灵敏度,其电阻值上升了 0.62%,显著高于 5CB/Al₂O₃/PI 的 0.14% 与 7CB/Al₂O₃/PI 的 0.11%。试

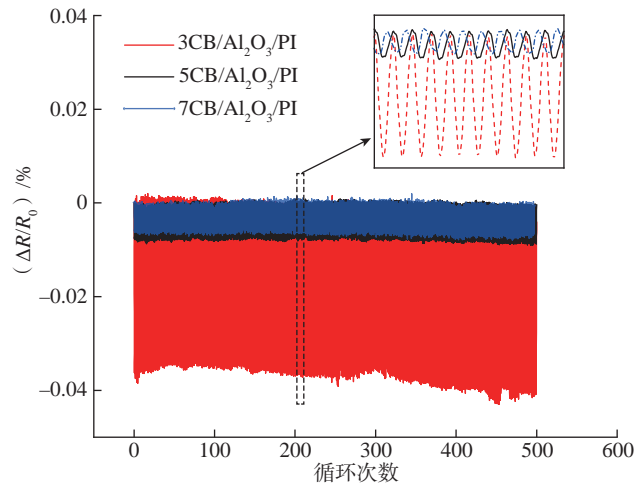


图 12 不同质量分数 CB 压阻传感器在循环载荷下的电阻响应
Fig.12 Resistance response of piezoresistive sensors with different CB mass fractions under cyclic loading

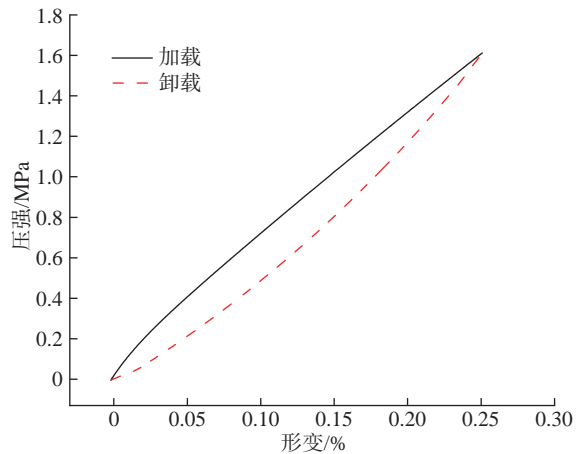


图 13 压阻传感器滞回曲线

Fig.13 Hysteresis curve of piezoresistive sensor

验结果表明,300 °C 高温及压力的大幅变化对 3CB/Al₂O₃/PI 的灵敏度优势无明显影响,上述结果进一步证明了本文所选用的 3CB/Al₂O₃/PI 传感器在不同质量分数配置的传感器中显示出较优的综合性能。在此基础上,对该传感器在不同温度条件下的螺栓松动监测响应进行了进一步分析。

传感器 3CB/Al₂O₃/PI 在室温及 300 °C 高温条件下的螺栓松动测试结果如图 16 所示。随着螺栓扭矩由 100 N·m 降至 70 N·m,垫片下方压强由 34.30 MPa 降至 24.01 MPa。当扭矩下降至 70 N·m 时传感器电阻

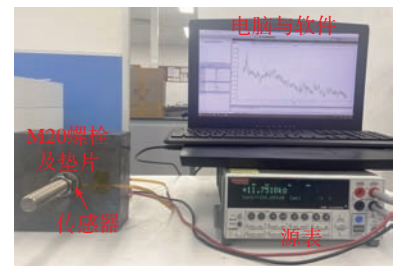


图 14 螺栓松动测试装置

Fig.14 Test setup for bolted joint loosening monitoring

在室温条件下上升了 0.65%;在 300 °C 条件下上升了 0.62%。该电阻上升主要源于螺栓松动导致接触压力降低,传感器所受应力减弱,同时 CB 颗粒间距增大使得导电通道减少,从而引

表 6 M20 螺栓下扭矩与传感器所受压强关系

Table 6 Relationship between torque and pressure on the sensor in M20 bolted joints

扭矩 / (N · m)	压强 /MPa
100	34.30
95	32.59
90	30.87
85	29.16
80	27.44
75	25.73
70	24.01
<70	<24.01

起电阻增大。在 300 °C 高温环境中，电阻的上升幅度略低于室温条件，这归因于高温下传感器内部电子迁移率的提升，部分在松动过程中应断裂的导电通路其中一部分仍保持导通状态，从而减弱了电阻的变化幅度。该现象可通过压阻传感器的渗流模型进行解释，即在 300 °C 条件下，CB 质量分数为 3% 时对应的渗流曲线斜率小于室温下的斜率，反映出其灵敏度在高温环境下有所降低。整体测试结果表明，该压阻传感器在室温与 300 °C 高温环境下均能实现对螺栓松动过程的稳定监测，展现出良好的热稳定性与压阻响应性能，具备在高温场景中的应用潜力。

结合上述试验结果与分析，将本文提出的传感器与现有压阻传感器进行了性能对比，如表 7 所示。现有压阻传感器在高温服役环境下螺栓松动监测中的应用仍存在温度适应性不足、监测量程有限以及与结构集成难度较大等问题。相比之下，本文提出的传感器在最高工作温度、监测压力范围及结构厚度等关键性能参数上实现了有效提升，兼具高温环境下的稳定性与良好的结构集成适应性，显示出较强的工程应用潜力，更适用于飞行器结构、航空发动机、燃气轮机等重大装备复杂服役环境下

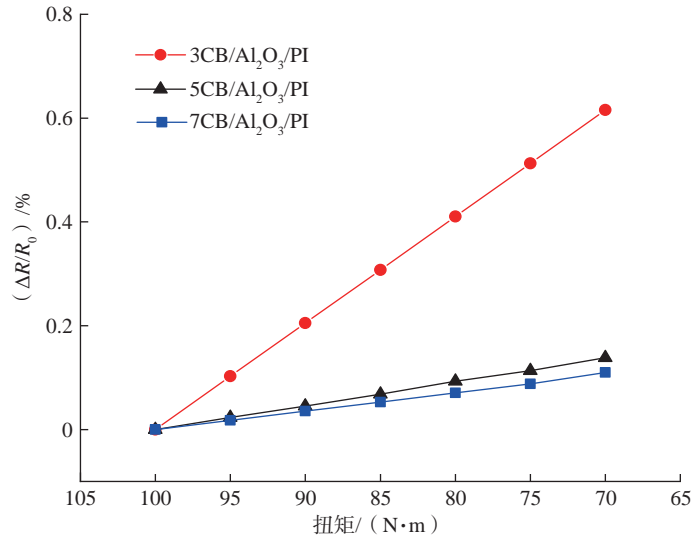


图 15 300 °C 下螺栓连接结构松动过程中不同质量分数 CB 传感器的电阻变化率与扭矩关系

Fig.15 Relationship between resistance variation rate of CB-based sensors with different mass fractions and torque during bolt loosening at 300 °C

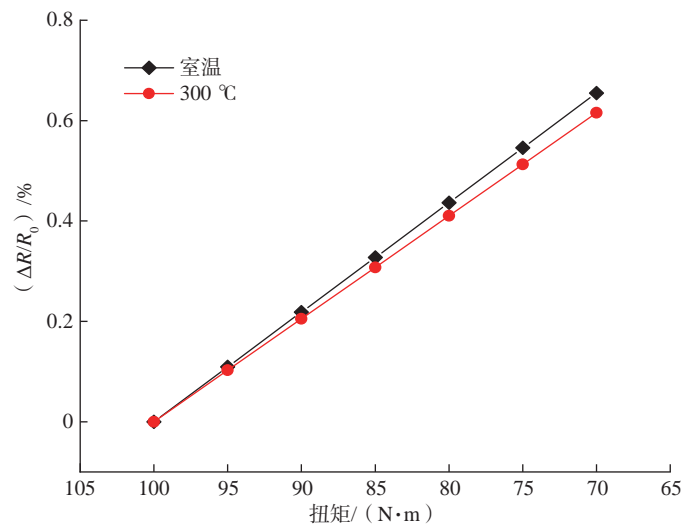


图 16 室温及 300 °C 下螺栓连接结构松动过程中传感器电阻变化率与扭矩关系

Fig.16 Relationship between sensor resistance variation rate and pressure during bolt loosening at room temperature and 300 °C

表 7 不同压阻传感监测方法性能参数对比分析

Table 7 Performance comparison of various piezoresistive sensing methods

传感器构成	最大监测压力	最高工作温度	厚度	来源
炭黑 / 聚乙烯吡咯烷酮	0.9 MPa	—	—	[17]
MXene	120 MPa	—	120 μm	[18]
绝缘硅基压阻元件	1.6 GPa	800 °C	180 mm	[19]
Ti ₃ C ₂ T _x MXene/Au	1000 kPa	400 °C	0.66 mm	[20]
聚氨酯 / 碳纳米管 / 石墨烯纳米片	10 MPa	150 °C	0.4~0.5 mm	[21]
炭黑 / 氧化铝 / 聚酰亚胺	34.3 MPa	300 °C	100 μm	本文

大尺寸螺栓连接结构的实时松动状态监测。

3 结论

本文提出了一种适用于高温环境的基于CB/Al₂O₃/PI压阻传感器的螺栓松动监测技术,实现了在300℃高温条件下对大尺寸螺栓松动状态的稳定实时监测,主要取得以下研究成果。

(1) 针对高温环境下螺栓松动监测的应用需求,本文通过对不同导电填料类型及其质量分数的系统测试,设计并制备了兼具热稳定性、耐久性与高灵敏度的压阻传感器。进一步引入Al₂O₃作为热稳定剂,有效提升了传感器在高温条件下的性能表现。同时,结合柔性电路一体化集成工艺技术,实现了传感器对外部压力变化的可靠响应。

(2) 对传感器的灵敏度、重复性及可恢复性进行了系统评估。试验结果表明,该传感器对不同压力水平具有良好的响应分辨能力,在长时程循环加载条件下表现出优异的稳定性,并在加载-卸载过程中展现出显著的形变恢复性能,验证了其在螺栓松动监测中的应用可行性与工程适用性。

(3) 开展了室温及300℃高温环境下的螺栓松动监测试验,系统研究了CB/Al₂O₃/PI压阻传感器在不同螺栓松动程度下的电阻响应特性。试验结果表明,传感器在室温与300℃高温环境中均呈现出一致的电阻变化趋势,且电阻变化量随螺栓松动程度的增加呈现出良好的线性关系,展现出较高的响应灵敏度。在监测范围方面,传感器可实现最高达100 N·m的螺栓扭矩松动识别,对应的压力量程可达34.30 MPa,进一步验证了该压阻传感器在高温等极端环境下开展螺栓松动监测的工程适用性与应用潜力。

参考文献

[1] 王娟,施建伟,张书亭,等. 复合材料螺栓连接接头渐进损伤分析研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 85-89, 96.

WANG Juan, SHI Jianwei, ZHANG Shuting, et al. Research progress of progressive damage analysis of composite bolted joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(3): 85-89, 96.

[2] CROCCOLO D, DE AGOSTINIS M, FINI S, et al. Failure of threaded connections: A literature review[J]. Machines, 2023, 11(2): 212.

[3] 宫涛,杨建华,庄絮竹,等. 螺栓松动故障监测实验研究综述[J]. 机械设计与制造, 2024(2): 354-363.

GONG Tao, YANG Jianhua, ZHUANG Xuzhu, et al. Review of experimental research on bolt looseness monitoring[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(2): 354-363.

[4] 龚裕,唐国良,王孝然,等. 螺栓连接松动的监测技术研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2025, 51(2): 192-213.

GONG Yu, TANG Guoliang, WANG Xiaoran, et al. Detection and monitoring technologies for bolt connection loosening: A review[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(2): 192-213.

[5] VIJAYAN D S, SIVASURIYAN A, DEVARAJAN P, et al. Development of intelligent technologies in SHM on the innovative diagnosis in civil engineering—A comprehensive review[J]. Buildings, 2023, 13(8): 1903.

[6] 田童,李建乐,邓德双,等. 飞行器结构健康监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 41-67, 98.

TIAN Tong, LI Jianle, DENG Deshuang, et al. Research progress of structural health monitoring technology for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 41-67, 98.

[7] ZHOU Y, WANG S Y, ZHOU M, et al. Percussion-based bolt looseness identification using vibration-guided sound reconstruction[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(2): e2876.

[8] YUAN R, LV Y, XU S J, et al. ResNet-integrated very early bolt looseness monitoring based on intrinsic feature extraction of percussion sounds[J]. Smart Material Structures, 2023, 32(3): 034002.

[9] CHEN D D, LI W, DONG Z Q, et al. Multi-bolt looseness monitoring using guided waves: A cross-correlation approach of the wavelet energy envelope[J]. Smart Material Structures, 2024, 33(12): 125019.

[10] SUI X D, ZHANG R, LUO Y Z, et al. Multiple bolt looseness detection using SH-typed guided waves: Integrating physical mechanism with monitoring data[J]. Ultrasonics, 2025, 150: 107601.

[11] CHEN D D, HUO L S, LI H N, et al. A fiber Bragg grating (FBG)-enabled smart washer for bolt pre-load measurement: Design, analysis, calibration, and experimental validation[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2586.

[12] ZHANG W X, WANG T, YU W, et al. FBG-based loosening angle measurement sensor for bolt looseness monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(3): 4254-4260.

[13] DENG L, SA Y, LI X F, et al. A vision-based bolt looseness detection method for a multi-bolt connection[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4385.

[14] LUO J, LI K L, XIE C Q, et al. A novel anti-loosening bolt looseness diagnosis of bolt connections using a vision-based technique[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11441.

[15] ZHAO Y J, MIAO L W, XIAO Y, et al. Research progress of flexible piezoresistive pressure sensor: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(20): 31624-31644.

[16] SANLI A, DEMIRKALE B, KANOUN O. Real-time detection of loosening torque in bolted joints using piezoresistive pressure-sensitive layer based on multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy nanocomposites[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 4830.

[17] SONG P Q, LIU Q J, WANG K, et al. On-site monitoring of composite bolted joints looseness using CB/PVP nanocomposite piezoresistive sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(21): 21179-21187.

[18] JIANG X W, MA K M, LU S W, et al. Structure bolt tightening force and loosening monitoring by conductive MXene/FPC pressure sensor with high sensitivity and wide sensing range[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331: 113005.

[19] ZHANG G D, ZHAO Y L, ZHAO Y, et al. Research of a novel ultra-high pressure

sensor with high-temperature resistance[J]. *Micromachines*, 2017, 9(1): 5.

[20] YANG N, YIN X Y, LIU H L, et al. High-performance wearable piezoresistive sensor with a wide temperature range via a $Ti_3C_2T_x$ MXene/Au dual-layer conductive network and microspike structure[J]. *ACS*

Applied Nano Materials, 2024, 7(14): 16964–16974.

[21] KADKHODAZADEH M, POURMAHDIAN S, AFSHAR-TAREMI F. Piezoresistive polyurethane nanocomposites of MWCNT–graphene with high modulus and thermomechanical stability[J]. *Polymer*

Composites, 2025, 46(10): 8892–8905.

通信作者：卿新林，教授，博士生导师，研究方向为结构健康监测、智能材料与结构。

Bolt Loosening Monitoring Based on Wide-Temperature High-Response Piezoresistive Sensing

LIU Qijian^{1,2}, QIN Haoxuan¹, YANG Yuanyuan¹, SUN Maozhi¹, SUN Hu^{1,2},
WANG Yishou¹, QING Xinlin¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361002, China;

2. Sichuan Institute of Xiamen University, Chengdu 610213, China)

[ABSTRACT] In advanced engineering applications such as aerospace, petrochemical, and rail transportation, bolted joints often operate under complex service conditions involving high temperatures, high pressures, and multi-source coupled loads. Piezoresistive sensors exhibit strong potential for engineering applications owing to their mature fabrication process, low cost, and sensitive response characteristics. In this study, a piezoresistive sensor featuring high-temperature resistance, high integration, and a wide response range was developed. A conductive solution was prepared by mechanically stirring and ultrasonically dispersing carbon black (CB), aluminum oxide (Al_2O_3), and polyamic acid (PAA) solution. The sensor, with a thickness of 100 μm , was fabricated using blade coating followed by thermal imidization, and subsequently integrated with a flexible printed circuit (FPC). Experimental results show that the sensor can operate stably at 300 $^{\circ}C$ for extended periods. In monitoring tests of M20 large-size bolted joints looseness, the sensor demonstrated a torque measurement range of up to 100 $N \cdot m$ and a pressure range of 34.30 MPa. The experimental results verify its stable monitoring performance under high-temperature and high-load conditions, offering a robust technical solution for the identification of loosening states in large-scale bolted joint structures of critical engineering equipment and demonstrating significant potential for practical engineering applications.

Keywords: Bolt looseness; Structural health monitoring; Piezoresistive sensor; High temperature; Wide measurement range

(责编 晓月)