DOI: 10.3901/JME.2020.10.012

面向旋转部件监测的耐高温量子点传感器研究*

张盼 闫柯 朱永生 洪军 梁潘婷
(西安交通大学现代设计与转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049)

摘要: 航空发动机支撑轴承的内圈、保持架等旋转部件的温升特性在线监测对于轴承乃至整机装备的服役状态评估、预警至关重要。面向航空发动机极端工况下轴承内部旋转部件热状态监测需求,在基于碲化镉(Cadmium telluride, CdTe)量子点传感器在线测温原理及技术研究基础上,通过工艺优化提升传感器性能,使其适用于高温、高速等极端工况下航空发动机支撑轴承旋转部件的运行温度监测。控制制备 CdTe 量子点试验条件(制备时间、配体),通过结构表征探讨量子点的微观形态、平均粒径对其荧光特性的影响机制。搭建高温环境下量子点光致发光温度依赖特性监测试验平台,研究不同量子点传感器光致发光光谱的温度依赖特性及耐高温性能。基于聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)包覆,制备了 CdTe/PVA 高稳定性传感器,实现了量子点荧光强度、最高耐受温度、灵敏性以及稳定性的显著提升,为航空发动机支撑轴承旋转部件的在线温度监测奠定了基础。

关键词: 碲化镉量子点; 温度传感器; 轴承旋转部件监测; 航空发动机

中图分类号: TH133

Research on the Heat Resistant Quantum Dots Sensor for Rotating Components Monitoring

ZHANG Pan YAN Ke ZHU Yongsheng HONG Jun LIANG Panting
(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: The temperature rise characteristics of aero-engine supporting bearing's rotating components is the important on-line monitoring index, which is essential for the service evaluation of the bearing and even the whole equipment as well as warning of them. Based on the on-line temperature measurement principle and technology of cadmium telluride (CdTe) quantum dots sensor, an improved CdTe quantum dots sensor is made by process optimization, which is suitable for operating temperature monitoring under high temperature and high speed, and meets the thermal condition monitoring requirements of internal rotating components of aero-engine bearing under extreme working conditions. The experimental conditions (preparation time and ligand) for preparing CdTe quantum dots are controlled, and the influence mechanism of morphology and average diameter of CdTe quantum dots on their fluorescence properties are discussed by structural characterization. The temperature dependence and high temperature resistance of photoluminescence spectra of different quantum dots are studied by the high temperature experimental platform. In the end, the CdTe/PVA sensor is prepared using the coating of polyvinyl alcohol (PVA). Compared with the former CdTe quantum dots sensor, the key indicators of CdTe/PVA sensor, such as fluorescence intensity, maximum temperature tolerance, sensitivity and stability, have improved significantly. The result lays a foundation for on-line temperature monitoring of aero-engine supporting bearing's rotating components.

Key words: CdTe quantum dots; temperature sensor; bearing rotating components monitoring; aero-engine

0 前言

随着大推重比、高马赫数航空推进技术的不断

发展,发动机支撑轴承面临更为复杂苛刻的服役工况^[1-2],开展高温、高速、重载等极端工况下航空发动机支撑轴承运行性能的在线监测,对于发动机轴承-转子系统的服役状态监测、轴承及整机装备的运行健康评估预警等具有重要意义。

温度是评估航空发动机支撑轴承运行状态及运行可靠性的首选参数。KOVACS 等^[3]对特定工况下

* 国家自然科学基金面上(51875439)和国家重点研发计划课题(2018YFB2000603)资助项目。20190715 收到初稿,20191220 收到修改稿

滚动轴承内部旋转部件热特性研究发现,轴承正常运行温度达到稳定状态时,保持架温度高于外圈温度约 30 ℃;并且在轴承失效时保持架温度会急剧增大,而外圈温度变化较小且相对滞后。可以看出,轴承旋转部件通常含有更丰富的轴承状态信息,能更敏捷反映轴承的运行状态。

受滚动轴承自身结构及使用条件等诸多因素限制,传统的滚动轴承温度监测方法主要是基于静止套圈(多为外圈)的接触式测温,依靠静止套圈某点的温度间接估计轴承内部温度^[4],而针对轴承内部旋转部件的温度监测较少。现有的轴承旋转部件温度测试方法主要有红外测温法和无线温度传感器测温法。基于黑体辐射原理的红外测温法需要严格标定被测物体的辐射率,并且极易受到环境干扰^[5-6]。无线温度传感器测温法是在轴承旋转部件上布置微型温度传感器及测温电路,温度信号通过无线方式传输。如 JIA 等^[7]利用在 LC 振荡电路中布置成对微型温敏电容测试滚子轴承运转过程中保持架的温度变化,受温敏电容尺寸和振荡电路的影响,测试装置安置不便,并且测试精度、轴承运转速度以及轴承尺寸等受到较大的限制;SCOTT 等^[8-9]基于 MEMS 技术设计了集成在轴承保持架上的无线电遥感温度传感器,其最高测试温度可达 300 ℃,但是轴承转速不超过 2 000 r/min,且电容及电感元件易受工作环境中电磁干扰。显而易见,由于现有微型传感器监测方法受通讯线圈、传感器自身结构及尺寸等限制,对轴承内部结构及自身动力学特性产生了较大的影响,使其难以用于航空发动机轴承高速、高温等极端工况下轴承内圈或保持架温度监测。近年来,量子点材料以其独特的光学性能在温度感知领域成为国内外研究热点^[10-13]。作者所在实验室基于碲化镉量子点光致发光光谱峰值波长的温度依赖特征,提出了基于量子点温度传感器的滚动轴承内圈/保持架等旋转部件温度监测原理^[14-16]。前期研究工作表明,量子点温度传感器以其体积小巧对轴承结构影响较小,且测试方法不受转速限制等特点,在高速工况下轴承旋转部件温度监测方面呈现了独特的优越性。

考虑到航空发动机轴承的高速(DN 值 $2.3 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r/min}$,高速滚动轴承通常用 DN 值表示其极限转速,由轴承内径与轴承外径之和除以二与轴承转速相乘得到)、高温(250 ℃)、重载等苛刻工况,目前量子点温度传感器存在以下问题:① 最高耐受温度低,现有文献报道的量子点温度传感器最高耐受温度约为 80 ℃,在航空发动机支撑轴承的高温

服役环境下会发生荧光猝灭失效;② 荧光强度不足,在发动机高油污环境中,荧光强度不足导致光路收发受限,极大地影响了测试的准确性,另外荧光强度随温度的升高而减弱,其衰减速率也会导致传感器最高耐受温度受到限制;③ 稳定性差,由于量子点表面存在大量悬键和缺陷,导致其结构稳定性较差,量子点传感器易与空气发生氧化导致其结构产生不可逆的改变,影响其温度依赖特性,不适用于长时间监测;④ 灵敏性低,现有量子点传感器灵敏度在 0.15 nm/℃左右,即 1 ℃的被测量变化能引起 0.15 nm 的光谱峰值变化,对光谱分辨设备提出了更高要求。上述问题表明,优化量子点传感器合成工艺,提升传感器的耐高温、稳定性等性能是解决极限工况下航空发动机支撑轴承内部热态监测的关键所在。

本文采取结构表征与光学表征相结合的分析方法,研究了制备时间及配体对碲化镉(Cadmium telluride, CdTe)量子点传感器光致发光温度依赖特性的影响,探讨了量子点的微观形态、平均粒径对其荧光特性的影响机制。基于聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)包覆,制备了 CdTe/PVA 传感器并研究了其光致发光温度依赖特性,提高了量子点传感器的最高耐受温度、荧光强度、灵敏性及稳定性,为航空发动机支撑轴承旋转部件的在线监测奠定了基础。

1 量子点传感器制备

量子点传感器制备过程如下。将 4 mL 0.04 mol/L 的氯化镉溶液置于三口烧瓶,用去离子水稀释至 50 mL 并进行搅拌,在搅拌过程中加入 100 mg 柠檬酸钠、4 mL 0.01 mol/L 的亚碲酸钠、50 mg 巯基丁二酸以及 50 mg 硼氢化钠,将三口烧瓶连接至冷凝器并在 100 ℃下冷凝回流。使用水系针头过滤器对量子点溶液进行过滤,将过滤后的量子点溶液涂于聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)薄膜,放入干燥箱干燥 1 h,得到 CdTe 量子点传感器。为研究制备时间对 CdTe 量子点传感器温度依赖特性的影响,选取制备时间为 4 h、6 h、8 h、10 h、12 h、24 h 的 CdTe 量子点溶液分别制备传感器,按顺序命名为 CdTe1~CdTe6 量子点传感器。

图 1 为日光和紫外光照射下的 CdTe1~CdTe6 量子点溶液。可以看出,制备时间不同得到的量子点溶液在日光和紫外光照射下颜色均具有明显的差

别,随着制备时间的增长,量子点溶液颜色从绿色逐渐变为橙色。图2为室温环境下CdTe1~CdTe6量子点溶液在等强度紫外光下的光致发光光谱,CdTe1~CdTe6量子点的发射峰峰值波长分别为525 nm、538 nm、547 nm、556 nm、565 nm和582 nm。可以看出,随着制备时间的增长,光致发光光谱的峰值波长逐渐红移,这与图1中溶液的光致发光颜色从绿色到橙色相吻合。由光致发光光谱的荧光强度可以看出,随着制备时间的增长,量子点荧光强度逐渐增强,在10 h后荧光强度趋于稳定。

图1 CdTe1~CdTe6量子点溶液

图2 CdTe1~CdTe6量子点溶液室温光致发光光谱对比

2 量子点传感器耐高温性能研究

2.1 试验系统搭建

为研究量子点传感器光致发光光谱峰值波长的温度依赖特性,搭建了包括温控装置、温度监测以及光谱监测分析在内的高温环境下的量子点光致发光温度依赖特性监测试验平台,系统原理图及实物图如图3所示。该系统主要由激光器、光谱仪、温控仪、热电偶、光纤等主要部件组成。激光器用于

产生405 nm激光,激发量子点产生光致发光;光纤用于光路传输;光谱仪用于采集量子点光致发光信号,通过光栅衍射分光最终进入光谱成像模块得到光致发光光谱;温控仪用于加热量子点,使量子点可以处于任意设定温度,得到不同温度下量子点光致发光光谱;热电偶用于量子点实际温度的监测。滚动轴承旋转部件温度监测试验中,量子点传感器通过导热硅胶附着在轴承旋转部件的端面,为保持一致性,温度依赖特性研究中将量子点传感器同样地通过导热硅胶附着在温控仪加热面板上进行试验。

图3 温度依赖特性监测系统原理图及实物图

2.2 试验结果与分析

分别对CdTe1~CdTe6量子点传感器进行高温环境下光致发光温度依赖特性研究。CdTe1~CdTe6量子点传感器的最高耐受温度如图4所示。由图4中可以看出,制备时间对量子点传感器的最高耐受温度影响较大。随着制备时间增长,量子点传感器的最高耐受温度呈上升趋势,当制备时间达到12 h时,传感器的最高耐受温度约为180 °C,且后期随着制备时间的增加,其最高耐受温度变化相对较小。相较于本实验室前期制备的量子点传感器的最高耐受温度80 °C^[14],通过改变工艺以及调控制备时间,可以将传感器的最高耐受温度提高100 °C左右,初步满足了高温工况下航空发动机轴承的温度监测需求。

图4 CdTe1~CdTe6量子点最高耐受温度

制备时间6 h和12 h的量子点传感器随温度变化的光致发光光谱曲线分别如图5a和图6a所示。使用Origin对光谱数据进行处理,得到量子点传感

器光谱峰值波长随温度变化的线性拟合关系, 分别如图 5b 和图 6b 所示。处理过程为对光谱数据进行高斯拟合, 寻找曲线峰值; 将峰值波长与量子点温度形成对应关系; 对温度与峰值波长数据点进行线性拟合, 得到量子点温度依赖特性曲线。使用上述数据处理方法得到 CdTe1~CdTe6 量子点传感器光致发光光谱峰值波长的温度依赖线性拟合关系如图 7 所示, 具体参数总结如表 1 所示。

(a) 不同温度下量子点光致发光光谱

(b) 光谱峰值波长温度依赖关系

图 5 制备时间 6 h 量子点温度依赖特性

(a) 不同温度下量子点光致发光光谱

(b) 光谱峰值波长温度依赖关系

图 6 制备时间 12 h 量子点温度依赖特性

图 7 CdTe1~CdTe6 量子点峰值波长温度依赖关系

表 1 量子点光致发光光谱中峰值波长温度依赖特性

名称	制备时间/h	线性关系	拟合系数
CdTe1	4	$W=0.203\ 5T+524.977\ 62$	0.994\ 34
CdTe2	6	$W=0.228\ 39T+537.394\ 9$	0.980\ 18
CdTe3	8	$W=0.182\ 86T+553.849\ 07$	0.991\ 31
CdTe4	10	$W=0.196\ 61T+562.541\ 85$	0.996\ 92
CdTe5	12	$W=0.211\ 04T+570.387\ 29$	0.997\ 65
CdTe6	24	$W=0.185\ 28T+586.586\ 55$	0.997\ 25

量子点光致发光光谱中峰值波长与温度的线性拟合程度用线性拟合系数 Adj.R-Square 来表示, Adj.R-Square 的数值越接近 1 则表明线性关系越好。由表 1 可以看出, CdTe3~CdTe6 量子点传感器的温度依赖线性拟合系数均大于 0.99, 具有明显的线性关系。当制备时间大于 10 h 时, 线性拟合系数均超过 0.995, 线性拟合度较好。由线性关系表达式可以看出, 量子点对于温度的灵敏度几乎不受制备时间的影响。

量子点微观形态是导致其产生宏观性能差异的原因所在。利用透射电子显微镜(Transmission

electron microscope, TEM)对量子点进行结构表征,制备时间为6 h和12 h的量子点的TEM图像分别如图8所示,其平均粒径分别为2.0~2.2 nm和2.4~2.6 nm。由图中可以看出,随着制备时间的增长,量子点的浓度以及平均粒径均增大,进而对光致发光光谱的温度依赖特性产生影响。

(a) 制备时间6 h的CdTe量子点

(b) 制备时间12 h的CdTe量子点

图8 CdTe量子点透射电镜图像

综合分析量子点TEM图像及高温环境下量子点光致发光温度依赖特性试验结果,可以看出量子点传感器的温度依赖特性具有明显的尺寸依赖性。随着制备时间的增长,量子点的粒径逐渐增长而后变化缓慢趋于稳定,其荧光强度及光致发光光谱温度依赖特性均具有与其微观尺寸一致的变化趋势。通过工艺优化以及量子点尺寸调控,实现了量子点传感器最高耐受温度及其荧光强度的显著提升。

3 配体对碲化镉量子点影响

量子点传感器耐高温试验研究表明:在配体选定的情况下制备时间对量子点灵敏度、稳定性等特性影响较小,且制备时间达到10 h后量子点温度依

赖关系各项指标已经呈现一个较为稳定的水平。为研究不同配体在CdTe量子点达到稳定状态时的温度依赖特性,将巯基丁二酸替换为巯基乙酸重复进行上述试验,选取制备时间为10 h的量子点传感器进行对比,其随温度变化的光致发光光谱曲线以及光谱峰值波长随温度变化的线性拟合关系分别如图9所示。表2为不同配体制备所得量子点传感器的光致发光光谱中峰值波长的温度依赖特性参数对比。

由表2可以看出,在相同制备条件下,以巯基乙酸为配体制备所得传感器的灵敏度远高于以巯基丁二酸为配体制备所得量子点,但是前者的温度依赖线性度较低。并且以巯基乙酸为配体制备所得量子点溶液稳定性差极易产生沉淀,导致其荧光强度及温度依赖特性均会发生较大的变化。

(a) 不同温度下量子点光致发光光谱

(b) 光谱峰值波长温度依赖关系

图9 量子点温度依赖特性(配体:巯基乙酸)

表2 量子点传感器(不同配体)光谱温度依赖特性对比

名称	线性关系	拟合系数	极限温度/°C
CdTe(巯基丁二酸)	$W=0.196\ 61T+562.541\ 85$	0.996\ 92	160
CdTe(巯基乙酸)	$W=0.503\ 01T+543.805\ 07$	0.981\ 82	160

4 聚乙烯醇封装工艺研究

滚动轴承长寿命周期运行状态下的温度监测，对传感器的稳定性提出了更高要求。由于量子点表面存在大量悬浮键和缺陷，长时间暴露在空气中会导致其氧化，对量子点的结构造成不可逆的影响，从而引起量子点传感器荧光强度减弱以及峰值波长红移。更为重要的是，其温度依赖线性关系将发生变化，成为影响测试精度的关键因素。

聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)是一种半结晶的亲水性聚合物，具有良好的化学和热稳定性、优异的成膜性能以及良好的透明度，近年来被广泛用作聚合物基体。基于 PVA 的优异性能，本文将 CdTe 量子点与 PVA 聚合物复合形成 CdTe/PVA 复合薄膜，为提升量子点稳定性提供了新思路。

4.1 CdTe/PVA 传感器制备

配体为巯基丁二酸且制备时间为 12 h 的 CdTe 量子点荧光强度、最高耐受温度以及光致发光光谱峰值波长温度依赖线性度均较好，因此选择该量子点与 PVA 复合。CdTe/PVA 复合薄膜制备过程如下：取 CdTe 量子点溶液 20 mL 加入等体积无水乙醇，在 10 000 r/min 转速下离心 10 min 后倒掉上层清液，放入干燥箱干燥 1 h 得到 CdTe 量子点粉末。在单口烧瓶中加入 1 g PVA 粉末和 10 mL 去离子水，以 50 ℃ 的温度搅拌 2 h，观察到溶液从乳白色胶体形态变成透亮的溶液；将 CdTe 量子点粉末加入 PVA 溶液，搅拌 2 h 使 CdTe 量子点均匀分散在 PVA 溶液中；将 CdTe/PVA 溶液涂于 PDMS 薄膜上并在干燥箱中干燥 1 h，得到 CdTe/PVA 复合薄膜，即 CdTe/PVA 传感器。为证明 CdTe/PVA 聚合物的形成，对 CdTe/PVA 溶液进行了 TEM 表征，如图 10 所示。从图中可以看出 CdTe 量子点均匀分散于 PVA 中，形成了网状 CdTe/PVA 聚合物。

图 10 CdTe/PVA 透射电镜图像

4.2 CdTe/PVA 传感器温度依赖特性研究

CdTe/PVA 传感器随温度变化的光致发光光谱曲线如图 11a 所示，其荧光光谱峰值波长随温度变化的线性拟合关系与 CdTe 量子点传感器对比如图 11b 所示，具体参数总结如表 3 所示。

(a) 不同温度下 CdTe/PVA 光致发光光谱

(b) 光谱峰值波长温度依赖关系

图 11 CdTe/PVA 传感器温度依赖特性

表 3 CdTe 与 CdTe/PVA 光谱温度依赖特性对比

名称	线性关系	拟合系数	极限温度/℃
CdTe	$W=0.211\ 04T+570.387\ 29$	0.997 65	180
CdTe/PVA	$W=0.365\ 87T+580.040\ 37$	0.997 12	180

由图 11b 和表 3 可以看出，PVA 的加入几乎不会影响量子点的最高耐受温度，并且 CdTe/PVA 传感器光致发光光谱温度依赖特性的线性拟合系数依然可以达到 0.995 以上，具有良好的线性关系。CdTe 量子点传感器温度每升高 1 ℃ 其峰值波长变化约为 0.21 nm，而 CdTe/PVA 传感器温度每升高 1 ℃ 其峰值波长变化约为 0.36 nm，说明 CdTe/PVA 传感器对温度变化的反应更为灵敏。在轴承服役温度的在线监测过程中这将使实际监测的准确性得到显著提升。同时，CdTe/PVA 传感器中 CdTe 量子点分布

于 PVA 中形成聚合物,可以避免量子点与空气直接接触,使其不易于与空气发生氧化反应影响其性能,提升了量子点的稳定性,有益于量子点传感器的长期使用。

5 结论

本文围绕基于量子点传感器的滚动轴承旋转部件温度监测原理与技术,针对碲化镉量子点温度传感器存在的最高耐受温度、稳定性等问题,从控制时间、配体以及封装工艺等角度进行了改进,具体结论如下。

(1) 试验研究了 CdTe 量子点制备时间对量子点传感器光致发光特性的影响,发现通过控制制备时间可以显著改变传感器的荧光强度、最高耐受温度及温度依赖特性。当制备时间大于 12 h 时,传感器的各项指标均达到较为稳定且优异的水平。

(2) 配体对 CdTe 量子点的最高耐受温度及温度依赖线性关系影响较小,但是对量子点稳定性有较大影响,选用巯基丁二酸作为配体制备所得量子点稳定性显著高于巯基乙酸为配体的量子点。

(3) 提出了利用 PVA 封装量子点提升其稳定性的方法,得到的 CdTe/PVA 传感器在保证最高耐受温度和荧光强度的基础上,其灵敏性及稳定性均得到了显著提升。

量子点传感器性能的提升为航空发动机支撑轴承旋转部件的温度在线监测奠定了基础,具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 孙闯,何正嘉,张周锁,等. 基于状态信息的航空发动机运行可靠性评估[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 30-37.
- [2] SUN Chuang, HE Zhengjia, ZHANG Zhousuo, et al. Operating reliability assessment for aero-engine based on condition monitoring information[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 30-37.
- [3] MA M, SUN C, ZHANG C, et al. Subspace-based MVE for performance degradation assessment of aero-engine bearings with multimodal features[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 298-312.
- [4] KOVACS A, PEROULIS D, SADEGHI F. Early-warning wireless telemeter for harsh-environment bearings[C]// The 6th Annual IEEE Conference on Sensors, October 28-31, 2007, Atlanta, Georgia. NewYork: IEEE, 2007: 946-949.
- [5] 宁练,周子民. 滚动轴承内部温度状态监测技术[J]. 轴承, 2007(2): 26-27, 51.
- [6] NING Lian, ZHOU Jiemin. Research on condition monitoring technique for internal temperature of rolling bearings[J]. Bearing, 2007(2): 26-27, 51.
- [7] USAMENTIAGA R, VENEGAS P, GUEREDIAGA J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12305-12348.
- [8] GUAN Shanghong, WANG Biyi, ZHAO Wanli, et al. Study of temperature measurement precision base on infrared thermal imager[J]. Elector-Optic Technology Application, 2012, 3: 85-88.
- [9] JIA Y, HENAOSEPULVEDA J, TOLEDOQUINONES M. Wireless temperature sensor for bearing health monitoring[J]. Smart Structures & Materials, 2004, 5391: 68-376.
- [10] SCOTT S, KOVACS A, GUPTA L, et al. Wireless temperature microsensors integrated on bearings for health monitoring applications[C]// 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, January 23-27, 2011, Cancun, Mexico. NewYork: IEEE, 2011: 660-663.
- [11] SCOTT S. Harsh-environment MEMS temperature sensors for aircraft bearing health monitoring applications[D]. West Lafayette: Purdue University, 2011.
- [12] WANG Xudong, WOLFBEIS O S, MEIER R J. Luminescent probes and sensors for temperature[J]. Chemical Society Reviews. 2013, 42 (19): 7834-7869.
- [13] JORGE P, MARTINS M A, TRINDADE T, et al. Optical fiber sensing using quantum dots[J]. Sensors, 2007, 7 (12): 3489-3534.
- [14] PUGH T D, WALSH B M, GUPTA M C. CdSe(ZnS) nanocomposite luminescent high temperature sensor[J]. Nanotechnology, 2011, 22(18): 185503.
- [15] LI Sha, ZHANG Kai, YANG Juiming, et al. Single quantum dots as local temperature markers[J]. Nano Letters, 2007, 7(10): 3102-3105.
- [16] 闫柯,高闯,朱永生,等. 基于碲化镉量子点的滚动轴承内圈测温原理与实现技术[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 134-140.
- [17] YAN Ke, GAO Chuang, ZHU Yongsheng, et al. Research on the temperature measurement principle and realization technology of rolling bearing inner ring based on CdTe

(下转第 26 页)

- [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1997, 16(7): 1-3.
- [7] CASTAINGS M, SINGH D, VIOT P. Sizing of impact damages in composite materials using ultrasonic guided waves[J]. NDT & E International, 2012, 46: 22-31.
- [8] LUCA A D, CAPUTO F, KHODAEI Z S, et al. Damage characterization of composite plates under low velocity impact using ultrasonic guided waves[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 138: 168-180.
- [9] FENZA D A, SORRENTINO A, VITIELLO P. Application of artificial neural networks and probability ellipse methods for damage detection using Lamb waves[J]. Composite Structures, 2015, 133: 390-403.
- [10] HARB M S, YUAN F G. Non-contact ultrasonic technique for Lamb wave characterization in composite plates[J]. Ultrasonics, 2016, 64: 162-9.
- [11] YANG Bin, XUAN Fuzhen, CHEN Shaojie, et al. Damage localization and identification in WGF/epoxy composite laminates by using Lamb waves: Experiment and simulation[J]. Composite Structures, 2017, 165: 138-147.
- [12] ZHANG Bing, SUN Xiaochuan, EATON M J, et al. An integrated numerical model for investigating guided waves in impact-damaged composite laminates[J]. Composite Structures, 2017, 176: 945-960.
- [13] RAMADAS C, PADILYAR J, BALASUBRAMANIAM K, et al. Lamb wave based ultrasonic imaging of interface delamination in a composite T-joint[J]. NDT & E International, 2011, 44(6): 523-530.
- [14] SCHAAAL C, MAL A. Lamb wave propagation in a plate with step discontinuities[J]. Wave Motion, 2016, 66: 177-189.
- [15] YANG Bin, XUAN Fuzhen, XIANG Yanxun, et al. Lamb wave-based structural health monitoring on composite bolted joints under tensile load[J]. Materials, 2017, 10: 652.
-
- 作者简介: 杨斌, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料压力容器的力学性能及健康监测。
E-mail: yangbin@ecust.edu.cn
轩福贞(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能传感与先进健康监测技术。
E-mail: fzxuan@ecust.edu.cn

(上接第 18 页)

- quantum dots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 134-140.
- [15] ZHANG Pan, YAN Bei, YAN Ke, et al. Design of quantum dots for rolling bearing inner ring-cage thermal monitoring[C]// Chinese Mechanical Engineering Society. International Conference on Mechanical Design, November 19-21, 2017, Beijing Institute of Technology, Beijing. Beijing: CMES, 2017: 1-10.
- [16] YAN Ke, YAN Bei, LI Bengqiang, et al. Investigation of bearing inner ring-cage thermal characteristics based on CdTe quantum dots fluorescence thermometry[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 279-286.
-
- 作者简介: 张盼, 女, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为量子点传感器及轴承状态监测。
E-mail: zhangpan0203@stu.xjtu.edu.cn
闫柯(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轴承润滑与热特性分析。
E-mail: yanke@mail.xjtu.edu.cn