

智能应力或结构损伤自敏涂层研究现状及展望

杜修忻¹, 田浩亮¹, 王浩², 金国², 张保森³,
王长亮¹, 郭孟秋¹, 王天颖¹, 张昂¹, 肖晨兵¹

(1.中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095;
2.哈尔滨工程大学 表面科学与技术研究所, 哈尔滨 150001;
3.南京工程学院 材料科学与工程学院, 南京 211167)

摘要: 详细介绍了机械零部件表面应力和结构损伤检测的研究现状, 重点介绍了荧光涂层应力检测的原理、优势以及发展现状。分析了基于稀土荧光离子的应力检测涂层的需求, 并就其应用原理和发展现状进行了表述。介绍了不同材料体系下应力及结构损伤检测范围, 以及应力自敏涂层目前的应用现状和未来发展趋势。

关键词: 应力检测; 结构损伤; 荧光检测; 稀土离子; 应力自敏

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)06-0077-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.012

Research Status and Prospect of Smart Stress or Structural Damage Self-sensing Coatings

DU Xiu-xin¹, TIAN Hao-liang¹, WANG Hao², JIN Guo², ZHANG Bao-sen³, WANG Chang-liang¹,
GUO Meng-qiu¹, WANG Tian-ying¹, ZHANG Ang¹, XIAO Chen-bing¹

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Institute of surface science and technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. School of materials science and engineering, Nanjing Institute of technology, Nanjing 211167, China)

ABSTRACT: This paper introduces the research status of stress and structural damage detection in detail, focusing on the principle, advantages and development status of fluorescent stress detection. The demand of stress detection coating based on rare earth fluorescent ion is analyzed, and its application principle and development status are described. The detection range of stress and structural damage under different material systems, as well as the current application status and future development trend of stress self-sensing coating is introduced.

KEY WORDS: stress detection; structural damage; fluorescence detection; rare earth ions; stress self-sensing

收稿日期: 2021-02-26; 修订日期: 2021-04-27

Received: 2021-02-26; Revised: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075508);北京市科技新星培养计划项目(Z191100001119040);国家科技重大专项(2017-VII-0012-0109)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (52075508); Beijing Science and Technology Rising Star Training Plan Project (Z191100001119040); National Science and Technology Major Project (2017-VII-0012-0109)

通讯作者: 杜修忻(1993—),男,硕士,工程师,主要研究方向为航空关键部件热喷涂防护。

Corresponding author: DU Xiu-xin(1993—), Male, Master, Engineer, Research focus: thermal spray protection for key aviation components.

引文格式: 杜修忻, 田浩亮, 王浩, 等. 智能应力或结构损伤自敏涂层研究现状及展望[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 077-086.

DU Xiu-xin, TIAN Hao-liang, WANG Hao, et al. Research status and prospect of smart stress or structural damage self-sensing coatings[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 077-086.

智能应力或结构损伤自敏涂层是当下发展的热门涂层之一,在机械零部件表面涂覆自敏涂层对其表面进行应力检测以及结构损伤检测可以有效减少因应力或者微小损伤带来的各种严重后果。其主要检测原理是根据稀土离子的上转换发光原理进行检测,通过检测稀土荧光离子光谱的特征参数(如强度、峰形、温度等)来表征涂层中细微的损伤或者应力变化^[1]。上转换发光是固体材料中掺杂稀土离子吸收多个长波光子的过程^[2-4]。稀土离子光谱最早发现于1906年,迄今为止已过了一个多世纪时间。最初是由 Becquerel 在研究矿石光谱时,偶然发现一种含有稀土元素的矿石具有非常尖锐谱线^[5]。相较于传统的根据 Cr^{3+} 的光谱进行应力测量的方法来说,稀土元素荧光强度更高,敏感性更强,并且荧光特征可调节。Zhao Sumei 等^[6-7]在 YSZ 热障涂层中添加 Eu 稀土元素,测量了其高温老化性能、光致发光压电光谱、热循环行为及失效机理等性能。因此稀土材料的荧光光谱比较适用于应力测量以及结构损伤检测。

1 机械装备表面应力或结构损伤检测的研究现状

随着科技越来越发达,各种机械设备和结构零件也越来越复杂,然而,结构越复杂的机械设备,就越容易因为一点小小的结构损伤导致设备的损坏。结构损伤所导致的事故,不仅会造成重大经济损失,甚至会造成严重的人员伤亡,乃至生态环境的严重破坏。例如美国挑战者号航空飞机的爆炸,造成了严重的经济损失和7位航天员的死亡;前苏联切尔诺贝利核电站的爆炸,导致周围城镇变成了死城^[8]。在航空发动机等方面,由于其使用的环境非常恶劣,一点微小的结构损伤都有可能造成非常严重的后果,因此对其表面应力或结构损伤的研究十分必要^[9]。

目前的损伤检测方法主要有电-机阻抗方法、超声波探伤、声发射检测等。电-机阻抗方法最初由 Liang 等人^[10]提出,该方法使用了高频结构激励,由粘在表面的 PZT 贴片产生,监测结构阻抗的变化,而材料内部缺陷会引起结构动力学的变化,从而引起结构阻抗的变化。该方法容易受材料因温度等外界因素引起的阻抗变化的影响。超声波探伤是利用超声波的穿透性,在金属内部传递时,遇到界面等不均匀部分会发生反射,从而达到对金属内部缺陷的检测。超声波无损探伤具有应用方便、适用性强、准确率高、易自动化等许多优点,但是该方法对被检测对象的形状要求较高,且无法对缺陷进行准确的定性定量表征^[11]。声发射检测是一种新型的无损检测技术,该方法利用裂纹起始、移动位错等来检测结构的最终缺陷。当结构出现损伤时,受损区周围产生弹性波,这

些弹性波可以反映出结构内部的损伤情况。该方法的优点是具有很好的灵敏度,但是不能用于结构的连续监测^[12]。

对于结构损伤检测,还可以通过分析应力变化来得出,检测应力变化可以提前预知损伤位置以及进行寿命评估。测量材料应力大小常用的方法有直接测量金属应变、通过半导体压阻变化测量应力变化、通过压电效应反映应力大小、运用光干涉进行测量应力变化、通过温度反映应力、断口反推法、有限元计算分析、荧光方法测量等。

1) 金属应变效应是指金属导体的电阻值随着它受力所产生机械变形(拉伸或压缩)的大小而发生变化的现象。测量方式一般为应变片-引电器-采集系统。该方式需要导线引出,在高温高转速环境下测量受限^[13-14]。半导体压阻效应是指半导体中的应变会影响半导体原子间距,从而使能带发生迁移,改变半导体带间隙宽度,从而最终影响电阻。

2) 半导体压阻型压力传感器优点有灵敏度高、体积小、可靠性高等,缺点是输出线性差^[15]。

3) 通过压电效应反映应力大小是根据某些压电材料受外力会输出电信号的特点进行测量。其优点是具有自生成信号、输出信号大、响应频率高、所占空间较小,但是只能用于动量测量^[16]。

4) 光干涉法测量应力是基于平板理论进行测量应力细微变化。该方法精度较高,但一般仅适用于静态测量^[17]。

5) 温度反映应力主要是通过计算等效应力水平随温度分布变化的规律,以此为根据,通过测量温度来反映应力变化。该方法局限性较大,只能用于热应力的推断^[18]。

6) 断口反推是指材料及其构件发生疲劳断裂后,可根据断口形貌、特征以及其他断口上所提供的信息,对其发生疲劳断裂时所承受的应力进行反推。该方法并不适用所有材料,且无法适用于应力监测等方面的工作^[19]。

7) 有限元计算分析对于计算应力是一种应用较为广泛的方法,一般运用 ABAQUS 等软件,通过采集部分位置应力变化加上材料性质等参数,即可计算出材料在使用过程中应力的变化情况,并根据应力变化推断寿命。该方法所需实验较少,但是精度有限,不宜单独进行计算,需要结合其他测量方法进行佐证^[20-21]。

8) 荧光方法测量是利用应力与被测材料荧光特征之间的关系对应力进行测量。其优点为非接触测量,且不容易受震动、噪声等环境因素的影响^[22]。

2 稀土荧光离子的研究现状

2.1 稀土离子的荧光测试应力原理

稀土离子的上转换发光是由其 4f 电子能级间的

跃迁实现的。根据 2004 年 Auzel 教授^[23]研究表明, 上转换发光机理主要有激发态吸收 (ESA) 上转换过程、能量传递 (ETU) 上转换过程、光子雪崩 (PA) 上转换过程 3 种。上转换能量传递过程如图 1 所示^[24]。目前使用荧光测量方法测量应力所使用的原理主要有荧光压谱效应 (如 Cr^{3+})、稀土荧光压谱效应, 以及拉曼光谱法、荧光寿命法、荧光猝灭法以及应力引起的发光效应^[22]。

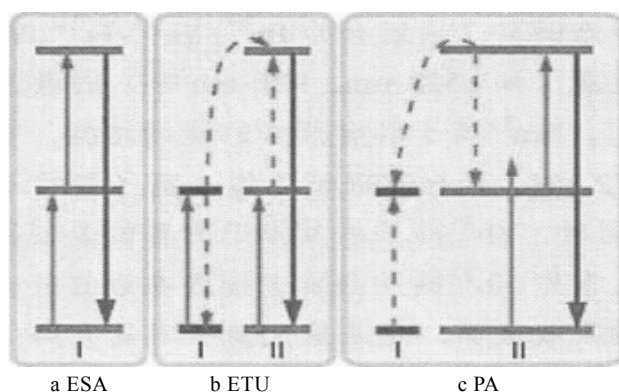


图 1 上转换能量传递过程^[24]
Fig.1 Upconversion energy transfer process^[24]

荧光压谱效应是指荧光光谱峰在高压 (压应力) 下, 由于晶体键长减小, 使得对应的荧光谱线发生红移的现象^[25]。Wang X 等^[26]在对飞机发动机涡轮叶片热障涂层的残余应力测量中采用了该原理, 结果表明, 在热障涂层内部存在残余应力或残余应力发生变化时, R_1 和 R_2 线均会发生变化。通过理论与实践结合, 证明了该测量方法可以被应用于热障涂层中残余应力测量。

拉曼压谱技术是指应力作用于材料时, 会影响材料的分子结构, 表现在拉曼谱上即为拉曼振动模式的产生、消失以及拉曼振动频率的移动, 而在一定范围内, 频率移动与应力变化是呈正比的原理进行应力测量^[27]。郭宁、郑海飞等人^[28-19]研究了部分材料 (如有机醇类、硅油、石英等) 的压力拉曼谱, 得到了特定环境下辨识度高的压力拉曼谱, 可以用于部分环境下的压力测量。

荧光法检测应力是指荧光材料在激励光停止以后, 如同原子衰减一样, 荧光的消失存在衰减周期。通常是以单指数规律衰减, 荧光消失快慢用荧光寿命描述^[30]。姜海丽等^[31]采用悬挂砝码的方式对光纤进行了应力加载, 结果表明, 应力的变化可以改变荧光寿命, 说明可以采用荧光寿命的方式进行应力测量。

氧分压相关的荧光猝灭是指氧分子碰撞到激发态荧光粒子时, 降低了荧光粒子的能量, 使得荧光强度发生了突变^[32]。夏婉莹、肖亚克等^[33-34]对压敏漆进行了大量研究。在现有的光学压敏材料中, 荧光猝灭是最常用的基本原理。一般预先将空气中压力与荧光物质荧光强度的曲线测量并确定出来, 就可根据具体

部位荧光光强的变化确定其应力变化。

荧光应力发光检测应力是指弹性应力发光材料的应力发光强度在弹性变形范围内与其变形程度成正比, 可以直接实时显示应力分布, 可用于测量应力变化。现有的弹性应力发光材料通常具有长余辉发光效应^[35]。S. Nakamura 等^[36]研究 X 射线照射 $\text{KCl}:\text{Eu}^{2+}$ 后的结果表明, 在塑性变形开始时, 发光强度迅速增加, 然后一段时间大致保持不变, 再逐渐下降, 其发光强度与晶体的变形阶段相对应。稀土荧光光谱与过渡族金属 Cr^{3+} 光谱特征相近, 且稀土荧光光谱可调节, 更适用于应力测量。

综上分析表明, 应用于应力检测的稀土荧光离子是一种新型光能和机械能转换功能材料, 具有荧光压谱、荧光寿命、荧光强度等信号与所受外界应力刺激强烈关联的特性, 在应用于高压、高温、交变载荷的复杂工况下, 连续、在线、实时监测应力方面有很大优势。

2.2 不同稀土荧光材料的应力检测特性

国内外对稀土荧光材料的研究已经取得了相当多的成果。R. Turos-Matysiak 等^[37]研究了 $\text{Y}_{2.3-x}\text{Tb}_x\text{Ce}_{0.05}\text{Gd}_{0.65}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($x=0\sim0.575$) 的光致发光特性, 结果表明, 应力引起的 Ce^{3+} 光谱压力位移约等于 200 cm/MPa 。M. Radenka 等^[38]研究了掺杂 Eu^{3+} 的 $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 的应力引起固溶体结构和光谱特征变化趋势, 表明其可用于应力的测量。K. Winskiewski 等^[39]研究了 $\text{KMgF}_3:\text{Eu}^{2+}$ 在高静水压下的发光动力学, 特别讨论了高静水压对 KMgF_3 中 Eu^{2+} 声子能量和能量结构的影响。结果表明, 在 13.5 GPa 以上, 压力会引起 Eu^{2+} 发射波的线宽和非指数发光衰减。在高达 31 GPa 的压力下, Eu^{2+} 荧光发光寿命没有明显变化。Tang X. D. 等^[40]研究了 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 高压下的光谱变化情况, 结果表明, 压力会显著地影响 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的能级和荧光强度。随着气压升高到 7.45 GPa , 光谱强度降低, 峰值变小; 当压力大于 7.5 GPa 时, 荧光强度迅速下降, 峰值移动速率降低。S. Mahlik 等^[41]研究了 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+}$ 光谱随压力的变化情况, 结果表明, 在 14.5 GPa 下, 光谱峰位随压力变化较为灵敏, 精度较高。B. R. Jovanic 等^[42]研究了高静水压对 Sm^{2+} 掺杂 $\text{SrFCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}$ 混合晶体荧光寿命和光谱的影响, 研究结果表明, 在考虑的压力范围 ($0\sim10.5\text{ GPa}$) 内, 测量值与基于荧光寿命预测的理论压力值误差小于 4% 。在此区间内, 荧光寿命与压力存在一定的依赖性。C. K. Jayasankar 等^[43]研究了掺杂 Sm^{3+} 的 K-BA-Al 磷酸盐玻璃在高压下的荧光寿命变化规律, 结果表明, 在 24.4 GPa 的高压下, 随着压力的增加, Sm^{3+} 周围的晶体场强度增加, 说明该材料在 24.4 GPa 压力下, 荧光寿命与压力存在函数关系。C.K. Jayasankar 等^[44]还研究了压力下 K-BA-Al 氟磷酸盐玻

璃中 Tb^{3+} D_4 能级的光致发光, Tb^{3+} 的荧光光谱强度衰减特性结果表明, 荧光寿命与室温压力存在函数关系。李建勇等^[45]研究了自制的掺铒、镱共掺硅酸盐玻璃的荧光寿命, 结果表明, 荧光衰减曲线是一条单指数曲线, 与理论分析相一致, 荧光寿命数量级为毫秒量级。两种稀土离子掺杂对比结果表明, 在所考虑的泵浦范围内, 荧光寿命基本不随泵浦功率的变化而变化; 荧光寿命随掺铒浓度的增加呈现减小趋势, 在铒浓度一定的情况下, 镱浓度的变化对其影响不明显。

综上所述表明, 稀土荧光离子不能单独使用来应用于应力检测, 只是作为激活剂(常用的稀土荧光离子为 Ce^{3+} 、 Eu^{2+} 、 Nd^{2+} 、 Pr^{3+} 、 Sm^{2+} 、 Tb^{3+} 、 Er^{2+} 等)少量复合于其他基质和敏化剂内部, 形成特定的化合物。当受到机械作用的外力后, 激发复合材料内部的稀土离子激活剂吸收能量, 所吸收的能量刺激荧光离子, 将发光中心激发至激发态。发光中心从激发态返回基态的过程中, 以一定波长释放荧光信号, 从而和应力建立关联性, 实现检测应力的目的。因此应力检测的灵敏性不仅与荧光离子自身的电子跃迁特性有关, 复合的基质材料还对其有很大影响。根据不同的使用环境, 设计合适成分配比的荧光特性稀土氧化物及基质材料才能实现荧光检测应力的应用。

3 基于稀土荧光离子的应力自敏涂层研究现状

3.1 应力自敏涂层的发展需求

在工程使用中, 各种各样的机械部件之间存在着摩擦磨损以及腐蚀等现象。这些现象发生在涂层中时, 会导致涂层提前剥落, 使用寿命大大减少, 产生不必要的经济损失。因此实时检测涂层的损伤状况十分必要^[46-47]。应力发光荧光材料具有受到外力(应力、压力、拉力等)作用后其辐射的荧光信号(荧光波长、强度、寿命等)而发生关联变化的特性, 但其目前应用于涂层中存在喷涂工艺、涂层其他成分等影响其应力检测灵敏度的问题。因此开发灵敏度高、有效且能在线监测涂层内部残余应力演变及涂层服役过程中微观损伤过程的可视化监测技术是极其必要的。

将应力发光材料加入到涂层中, 实现在线监测是一种行之有效的方法^[48-49]。Xu Chao-nan 等^[50]根据此原理, 制备了一种可以实时监测桥梁应力的弹性应力发光涂料。Jeong 等^[51]将 ZnS 荧光粉和聚二甲硅氧烷混合, 制备了应力发光膜, 在模拟工况试验后, 该材料发光强度仍能保持原来的 80% 以上, 可以进行实际应用, 证明了该材料在应力发光方面的潜在应用。稀土发光材料使用方式主要分为 2 种: 1) 制备成荧光粉进行使用; 2) 制备成涂层或在涂层中加入稀土

元素。

粉末发光材料基本采用高温固相反应法、燃烧法、沉淀法、水热法、溶胶凝胶法、微波法等来制备^[52-53]。用于发光薄膜和涂层的制备方法有许多, 如喷涂、固相合成、化学镀、溶胶-凝胶法、喷雾热解法、溅射法、脉冲激光沉积法、金属有机物化学气相沉积法、蒸镀法、电子束蒸发法、原子层取向生长法等^[54]。杜连超等^[55]将高铝青铜 Cu-14Al-X 粉末与 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ 粉末以体积比 7:3, 通过机械方式混合均匀, 采用冷喷涂技术制备了高铝青铜涂层及高铝青铜磷光复合涂层。姜妍彦等^[56]将玻璃粉和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ 发光粉按 4:1 混合均匀, 在一定的温度和气氛以及粘结剂的作用下进行热处理, 保温 2 h, 然后自然冷却, 制得陶瓷基长余辉发光玻璃涂层。A. Santhi 等^[57]在 90 °C 下, 采用含有 25 g/L 硫酸镍、20 g/L 次磷酸钠、35 g/L 柠檬酸钠、0~6 g/L 卤磷酸钙和 15 g/L 硫酸铵的镀液 ($\text{pH}=5.5$), 制备了基于卤磷酸钙的发光化学镍复合镀层。张希艳等^[58]利用高温固相反应法合成了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ 长余辉发光粉, 然后以锌硼硅酸盐低熔点玻璃为基础釉熔块, 掺杂该荧光粉, 在一定温度下烧制得到了发光搪瓷涂层。朱思彧等^[59]在环氧树脂中加入夜光粉 ($\text{Sr}_{0.94}\text{Eu}_{0.03}\text{Dy}_{0.03}\text{Al}_2\text{O}_4$), 高速搅拌下分散, 按混合比加入固化剂和适量溶剂, 搅拌, 并制膜, 溶剂挥发后即成膜。对比发现, 采用电镀、涂料刷涂或冷喷涂工艺制备应力自敏涂层具有制备工艺简单、材料选择成分可调性好等优点, 而且制备过程的温度较低, 避免了荧光材料荧光信号的高温衰减问题。

3.2 应力自敏涂层研究现状

1) 腐蚀/摩擦的应力自敏涂层。用发光材料制备涂层来监测材料性能, 已经得到了较为广泛的应用, 并且取得了较好的效果。李松梅等^[60]采用电化学方法制备了一种用于铝合金腐蚀监测的荧光传感涂层, 以苯基荧光酮 (PF) 为感测材料的丙烯酸涂料, 成功监测了 2014 铝合金的腐蚀状况。王云峰^[61]利用纳米 Ag 颗粒的表面等离子体共振使周围局域场增强的特性, 制备了 Ag-ZnO 复合纳米薄膜, 改善了 ZnO 在紫外器件方面的应用, 可用来吸收可见光。花世群^[62]采用只含有发光染料的新型单涂层结构, 通过增大涂层发射信号强度的方法, 提高信噪比, 并以环氧树脂为光弹性材料, 邻苯二甲酸二丁脂为增塑剂, 二乙烯三胺为固化剂, 罗丹明 B 为荧光染料制作的单涂层结构用于发光光弹性涂层。结果表明, 新型涂层相较于两种旧涂层, 相同厚度下应力测量范围大大加强, 且消除了双层涂层之间存在的耦合问题。Michael D. eldstein^[63-65]报道了一种复合电化学镀镍发光涂层, 该涂层在紫外灯照射下产生特征光。该特征在工业生产中, 可作为涂层磨损指示层进行使用。分析目前应力

力自敏涂层的功能化应用方式, 相比将其制成涂料常用于应力的检测外, 采用电化学、磁控溅射、化学镀等工艺具有可以制备涂层结合强度高的优势, 且将应力发光材料制备成梯度的涂层结构。如果腐蚀或磨损至应力自敏层, 表层的耐磨或耐蚀功能层逐渐损失至发光层, 可以达到腐蚀或磨损的失效预警。

2) 可视化检测的应力自敏涂层。基于稀土荧光离子的应力自敏涂层所应用的原理也是基于荧光寿命、应力发光原理以及压谱效应等。赵宇等^[66]采用高温固相合成的方法制备了 YSZ:Eu 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ 的烧结块体。经过测量得出, 14403 和 14433 cm^{-1} 的荧光峰分别为 Cr^{3+} 的 R_1 和 R_2 线, 其峰形、峰位都与红宝石压标中典型的光谱相符。结合 XRD 结果, 这两个峰可以用来进行压应力的测量。经过推导还得出频移应力关系式:

$$\Delta\nu = \frac{1}{3}(\Pi_{11} + \Pi_{22} + \Pi_{33})(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$$

该方法可以通过调节荧光亚层的沉积来控制探测位置, 通过使用激光来实现透过涂层的探测, 这种材料体系采用的原理是荧光压谱效应。初振明^[67]通过传统高温固相烧结法, 在 $5\%\text{H}_2+95\%\text{N}_2$ 还原气氛的条件下, 制备了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Dy}$ 应力发光粉料, 按照 $1:1$ 的质量比制备了环氧树脂与 $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 涂层。选择了一种常用的机械连接机件来实现其应力分布的可视化分析, 即将发光涂层涂覆到机件上。由于在 $100\sim 490\text{ N}$ 发光强度与所受压力呈线性关系, 最终根据拟合方程, 从发光涂层的荧光强度分布研究了整个机械连接机件表面的应力分布状况, 实现了应力监测和可视化分析。相比将稀土离子的荧光强度、荧光波长等与应力建立关联性的检测方式, 将荧光强度采用图像方式可视化显示出应力分布云图更为简便, 可直观地观察应力在整个部件表面的分布和集中区域, 突破了构件表面点位置或局部的应力检测局限, 适用于外场大面积的桥梁、压力储罐、管道等的快速检修。

3) 磨损预警的应力自敏涂层。张咪娜^[68]以高铝青铜耐磨合金粉末与磷光粉体为原料, 采用真空热压烧结制备了具有自敏检测功能的新型耐磨复合发光涂层。通过摩擦磨损实验后进行的荧光检测分析得知, 磨损部位的荧光强度明显降低, 根据这一性质可以对工件进行初步的磨损状况监测, 以防止磨损严重带来不良后果。吕叶^[69]将高铝青铜 (Cu-14Al-X) 合金粉末、镍基 (Ni60) 自熔合金粉末分别与 $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 粉末以体积比 $7:3$ 机械混合后, 在 $45\#$ 钢表面进行超音速喷涂。对涂层进行了摩擦磨损实验, 结果表明, 在高载 185 N 摩擦后的发光强度最弱, 但仍具有发光指示性能。由此可知, 随载荷继续增大, 直至涂层消失, 涂层表面的宏观发光强度将呈现肉眼可见的线性降低趋势, 因此该材料体系的涂层也具有

磨损在线监控指示的功能。Muratore 等^[70]将发光涂层嵌入到了 MoS_2 涂层中, 涂层结构如图 2 所示。将具有发光指示作用的掺杂 Er、Sm 元素的 YSZ 涂层分别嵌入了 MoS_2 涂层中。在发生磨损导致涂层减薄或者涂层剥落时, 靠近涂层表层的掺杂 Er 的 YSZ 涂层会优先暴露出来, 发出一种荧光; 涂层受损严重时, 会导致靠近内部的掺杂 Sm 的 YSZ 涂层暴露发出另一种荧光。根据涂层剥落后产生的不同荧光, 可以简单分析涂层受损的严重情况。在实际使用中可以及时发现受损情况, 及时止损。

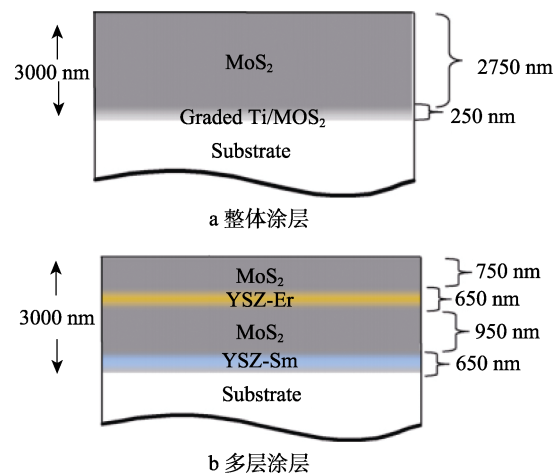


图 2 整体涂层和具有嵌入、发光磨损传感器层的多层涂层^[70]

Fig.2 (a) Overall coating (b) schematic diagram of multilayer coating with embedded and luminous wear sensor layer^[70]

张巍巍等^[71-72]从固体发光理论上分析, 得知稀土掺杂宽带发光材料可能具有更大灵敏度, 制备了 $\text{SrSiAlN}_3\text{:Eu}^{2+}$ 荧光粉与硅胶复合材料。这种材料具有应力敏感性, 其灵敏度远大于荧光压谱技术常用的红宝石材料, 分辨率可达 0.055 MPa 。郑升辉等^[73]采用高温固相法合成了 $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Ho}$ 应力发光材料, 将 $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu,Ho}$ (SAOEH) 应力发光粉末与树脂混合, 制备出了复合应力发光薄膜。将应力发光薄膜应用于钢板焊缝处背面, 应力测试结果表明, 薄膜应力发光先增强、后减弱。当薄膜厚度为 0.9 mm 时, 应力发光最强, 且在焊缝处可得到较高的响应值。结合 CCD 相机可实现钢板焊缝检测的可视化, 并对缺陷定位。综合分析可知, 针对耐磨涂层或焊接应用的零部件使用工况比较苛刻, 长期处于高载荷、高转速的使用条件, 经常性需停机检修拆卸的设备, 造成的经济损失较大。现阶段发展掺杂 Eu^{2+} 、 Dy^{3+} 、 Sm^{2+} 等的应力发光材料在裸眼下即能观察到其发光特性, 为现场在线监测其失效状况提供了可能。

4) 荧光强度检测的应力自敏涂层。当暴露在紫外光源下时, 荧光粉粒子发光中心的电子被激发到更高的能级。当电子松弛到平衡状态时, 光子就会释放出来, 通过荧光检测应力变化可以直接观察荧光强

度。Jeffrey I. Eldridge 等^[74-76]提出了一种上转换发光复合涂层体系,利用背衬底层的成像技术即可直接观察应力发光功能层的发光亮度。具体结构为 YSZ:Eu 的发光亚层下方增加了一个 NiCr 背衬,从而表现出更高的发光强度。反射增强发光的应用特别适合于等离子体散射的 TBCs,因为它们具有高散射的事实,而不是降解对比度,实际上增加了分层和附加区域之间发光强度的对比度,也可以通过测量紫外光源或其他光源激发后的信号进行检测。Wendy Flores-Brito 等^[77]研究表明,通过发光二极管(LED)可以激发产生用于荧光强度测量的有用信号。例如使用荧光分光光度计,测量荧光发射光谱及激发光谱,通过光谱中激发峰的强弱、位置等因素进行荧光强度分析^[78-79]。应力自敏涂层应用的关键在于荧光强度的有效监测,而将荧光强度采用成像技术转化成可直接观察的发光信息,为准确定位应力集中区域的直观观察提供了可能。

5) 应力自敏涂层的智能监测探索应用。基于应力发光原理的应力传感器可用于无线传感或远距离观察应力分布,还可以测量不规则或运动物体的应力分布,因此弹性应力发光材料在测量应力分布方面具有潜在的应用价值^[80]。Wang 等^[81]的研究结果可以精确地辨别一个人的书写方式和书写力度。该研究可以应用于防伪甚至刑侦等方面。殷建等^[82]采用重力沉积法在石英基片上涂 LaPO₄:Ce³⁺,Tb³⁺荧光粉,制备了 LaPO₄:Ce³⁺,Tb³⁺荧光屏。分析结果表明,调整黏结剂或电解质的用量可制备荧光粉和基片结合良好的荧光屏,荧光涂层致密、均匀。日本寺崎研究小组^[83]系统地研究了将具有生物相容性的弹性应力发光材料置入生物体内部,可以通过超声波震动检测生物体内的结构变化以及监测生物体内器官的功能。大量研究表明,应力自敏涂层具有应力发光强度与加载应力及力致变形成正比的特点,在应力传感器、应力分布可视化、显示成像、自我诊断系统、人造皮肤、智能传感器和识别系统等许多领域具有广阔的应用前景。

4 结语

1) 目前具有应力自敏特性的稀土荧光离子主要集中在 Ce³⁺、Eu²⁺、Nd²⁺、Pr³⁺、Sm²⁺、Tb³⁺、Er²⁺等的研究,其基质材料及不同制备工艺对荧光信号的衰减有一定影响,研究双离子共掺杂或对其进行改性,增强其荧光特性是进一步提升监测灵敏度的途径之一。

2) 基于稀土荧光离子的应力自敏涂层,现阶段主要应用于涂层磨损检测以及残余应力的检测。可以提前了解涂层或者工件应力集中处,或者观察到早期的涂层磨损,可实现有效的失效预警目的。目前关于不同热喷涂工艺过程的温度对应力自敏涂层内部稀

土荧光离子的温敏猝灭效应的研究还不够系统,有必要开展多种表面涂层制备手段等对涂层荧光特性及服役性能影响的系统研究。

3) 现阶段应力自敏涂层适用于室温或温度不高的工况下的应力监测,但高温服役的部件也亟需应力的在线实时监测,开展适用于氧化锆等热障涂层内部应力连续监测的材料设计及制备很有必要,并且开发适用于高温环境下原位探测荧光信号的监测系统,可以促进应力自敏涂层在热防护领域的应用。

参考文献:

- [1] 李慧. 稀土掺杂上转换发光材料荧光强度比温度特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LI Hui. Study on the fluorescence intensity ratio temperature characteristics of rare earth-doped up-conversion luminescent materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [2] 崔瑛. 稀土掺杂上转换发光材料的荧光和温度传感特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
CUI Ying. Study on the fluorescence and temperature sensing properties of rare earth-doped up-conversion luminescent materials[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [3] 王诏宣. 稀土掺杂陶瓷示温材料的制备及其非接触温度探测研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
WANG Zhao-xuan. Preparation of rare earth-doped ceramic temperature-indicating materials and research on non-contact temperature detection[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [4] 芦泓宇. 基于稀土掺杂上转换材料荧光峰值比的温度传感[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LU Hong-yu. Temperature sensing based on the fluorescence peak ratio of rare earth-doped up-conversion materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [5] 宋瑞静. 具有双发射的稀土—有机框架材料的设计合成及其荧光温度探测[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
SONG Rui-jing. Design, synthesis and fluorescence temperature detection of rare earth-organic framework materials with dual emission[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [6] ZHAO Su-mei, REN Zhi-min, ZHAO Yu, et al. The application of Eu³⁺ photoluminescence piezo-spectroscopy in the LaMgAl₁₁O₁₉/8YSZ: Eu double-ceramic-layer coating system[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(1): 249-257.
- [7] ZHAO S, GU L, ZHAO Y, et al. Thermal cycling behavior and failure mechanism of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/Eu³⁺-doped 8YSZ thermal barrier coating prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of alloys & compounds, 2013, 580: 101-107.
- [8] 朱洪艳, 王晓红, 张媛, 等. 航空结构损伤健康监测技术研究进展[C]// 第三届中国航空科学技术大会论文集

- (上册). 北京: 中国航空学会, 2017: 67-72.
ZHU Hong-yan, WANG Xiao-hong, ZHANG Yuan, et al. Research progress on health monitoring technology for aviation structural damage[C]// 3rd China aviation science and technology conference proceedings (volume 1). Beijing: Chinese Society of Aeronautics, 2017: 67-72.
- [9] 郑渝. 机械结构损伤检测方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
ZHENG Yu. Research on damage detection method of mechanical structure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [10] LIANG C, SUN F P, ROGERS CA. Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and energy transfer[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 1994(5): 12-20.
- [11] 孟宪伟, 程号, 刘世铎. 超声检测的应用及发展[J]. 西部皮革, 2020, 42(9): 43.
MENG Xian-wei, CHENG Hao, LIU Shi-duo. Application and development of ultrasonic testing[J]. West China leather, 2020, 42(9): 43.
- [12] 刘万超. 声发射检测技术研究[J]. 化学工程与装备, 2015(2): 178-180.
LIU Wan-chao. Research on acoustic emission detection technology[J]. Chemical engineering and equipment, 2015(2): 178-180.
- [13] 吴岳庚, 龚寅生, 张松林. 某压气机叶片动频测量的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, 12(4): 58-62.
WU Yue-geng, GONG Yin-sheng, ZHANG Song-lin. Experimental research on the measurement of the dynamic frequency of a compressor blade[J]. Gas turbine experiment and research, 1999, 12(4): 58-62.
- [14] 彭建, 刘兵. 压气机转子叶片动频动应力测试技术和应用研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(1): 10-13.
PENG Jian, LIU Bing. Dynamic frequency dynamic stress testing technology and application research of compressor rotor blades[J]. Gas turbine test and research, 2003, 16(1): 10-13.
- [15] 高迪. N型硅纳米线压阻效应的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
GAO Di. Research on the piezoresistive effect of N-type silicon nanowires[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [16] 孙广意. 基于压电陶瓷的嵌入式动态拉应力传感器的开发与标定[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
SUN Guang-yi. Development and calibration of embedded dynamic tensile stress sensor based on piezoelectric ceramics[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [17] 郭长立, 杨曼, 郭朝霞, 等. 基于光干涉法的光学玻璃应力测量方法研究[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 923-930.
GUO Chang-li, YANG Man, GUO Zhao-xia, et al. Research on optical glass stress measurement method based on optical interferometry[J]. Applied optics, 2015, 36(6): 923-930.
- [18] 付德斌, 丁水汀, 陶智, 等. 旋转盘应力水平与温度分布的关联分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 623-628.
FU De-bin, DING Shui-ting, TAO Zhi, et al. Correlation analysis between stress level and temperature distribution of rotating disk[J]. Journal of aeronautics and dynamics, 2008, 23(4): 623-628.
- [19] 张卫方, 习年生, 陶春虎, 等. 断口反推疲劳应力在叶片断裂中的应用[C]// 航空发动机叶片故障及预防研讨会论文集. 北京: 解放军空军装备部, 2005: 167-172.
ZHANG Wei-fang, XI Nian-sheng, TAO Chun-hu, et al. Application of fracture reverse thrust fatigue stress in blade fracture[C]// Aviation engine proceedings of the symposium on blade failure and prevention. Beijing: PLA Air Force Equipment Department, 2005: 167-172.
- [20] 张强, 张永峰, 陈钊. 航空发动机桨轴有限元应力分析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(1): 8-11.
ZHANG Qiang, ZHANG Yong-feng, CHEN Zhao. Finite element stress analysis of aero-engine propeller shaft[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautics and Technology, 2010, 27(1): 8-11.
- [21] 李岩, 李旭东, 夏天翔, 等. 采用应力场强法对某型航空发动机压气机轮盘的疲劳寿命评估及试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 220-226.
LI Yan, LI Xu-dong, XIA Tian-xiang, et al. Fatigue life assessment and experimental study of a certain type of aero-engine compressor wheel using stress field strength method[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(7): 220-226.
- [22] 岳俊昕, 张巍巍. 荧光方法测量应力[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(1): 63-68.
YUE Jun-xin, ZHANG Wei-wei. Fluorescence method to measure stress[J]. Failure analysis and prevention, 2012, 7(1): 63-68.
- [23] AUZEL F. Upconversion and anti-Stokes processes with f and d ions in solids[J]. Chem rev, 2004, 104: 139-173.
- [24] 郑书红. 稀土掺杂荧光温度传感材料设计与合成[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
ZHENG Shu-hong. Design and synthesis of rare earth-doped fluorescent temperature sensing materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [25] 西琪, 彭浩然, 张鑫, 等. Cr^{3+} 掺杂 Al_2O_3 陶瓷粉体火焰喷涂工艺探究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(3): 36-40.
YOU Qi, PENG Hao-ran, ZHANG Xin, et al. Research on the flame spraying process of Cr^{3+} doped Al_2O_3 ceramic powder[J]. Thermal spray technology, 2015, 7(3): 36-40.
- [26] WANG X, WU R T, ATKINSON A. Characterisation of residual stress and interface degradation in TBCs by photo-luminescence piezospectroscopy[J]. Surface and coatings technology, 2010, 204(15): 2472-2482.
- [27] 岳俊昕. 纳米稀土荧光材料 Y_2O_3 : Er, Yb 的制备、表征及应力传感应用[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
YUE Jun-xin. Preparation, characterization and stress sensing application of nanometer rare earth fluorescent material Y_2O_3 : Er, Yb[D]. Nanchang: Nanchang Hang

- ong University, 2012. DOI: 10. 7666/d. D346901.
- [28] 郭宁, 郑海飞. 石英拉曼峰进行压力标定的误差研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2161-2163.
GUO Ning, ZHENG Hai-fei. Research on the error of pressure calibration of quartz Raman peak[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2010, 30(8): 2161-2163.
- [29] 郑海飞, 孙楠, 赵金, 等. 金刚石压腔高温高压实验的压力标定方法及其现状[J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 78-82.
ZHENG Hai-fei, SUN Yao, ZHAO Jin, et al. Pressure calibration method and current situation of high temperature and high pressure experiment of diamond cavity[J]. Chinese journal of high pressure physics, 2004, 18(1): 78-82.
- [30] 耿丽琨. 荧光寿命光纤测温系统及其信号处理的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
GENG Li-kun. Fluorescence lifetime optical fiber temperature measurement system and its signal processing [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [31] 姜海丽, 孙伟民, 张聪. 同时测量荧光光纤温度和应变的实验研究[J]. 光子学报, 2007, 36(7): 1281-1284.
JIANG Hai-li, SUN Wei-min, ZHANG Cong. Experimental study on simultaneous measurement of temperature and strain of fluorescent optical fiber[J]. Acta photonica sinica, 2007, 36(7): 1281-1284.
- [32] MARDASHEVA M, NEVSKII L B, PERVUSHIN G E. Measurement of pressure distribution by means of indicator coatings[J]. Journal of applied mechanics and technical physics, 1985, 26(4): 469-474.
- [33] 夏婉莹. 压敏漆压力测量系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2007
XIA Wan-ying. Design of pressure-sensitive paint pressure measurement system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007
- [34] 肖亚克, 马洪志, 张孝棣, 等. 风洞光学测压试验技术及其压力敏感涂料[C]// 2003 空气动力学前沿研究论文集. 北京: 中国空气动力学会, 2003: 514-520.
XIAO Ya-ke, MA Hong-zhi, ZHANG Xiao-di, et al. Wind tunnel optical pressure test technology and its pressure sensitive coatings[C]// 2003 frontier research papers on aerodynamics. Beijing: Chinese Aerodynamics Research Society, 2003: 514-520.
- [35] 郑升辉. 应力发光材料的制备及其应用研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2017.
ZHENG Sheng-hui. Preparation and application of stress luminescent materials[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2017.
- [36] NAKAMURA S, OHGAKU T. Effect of ultrasonic oscillatory stress on deformation luminescence of X-irradiated KCl: Eu²⁺[J]. Radiation measurements, 2008, 43(2-6): 286-286.
- [37] LIN Y S, TUROS-MATYSIAK R, GRINBERG M, et al. High pressure photoluminescence of Ce(3+)-doped(Y(1.725)Tb(0.575)Ce(0.05)Gd(0.65))Al₅O₁₂[J]. Optical materials, 2008, 30(5): 722-724.
- [38] KRSMANOVICWHIFFEN R M, ANTIC Z, SPEGHINI A, et al. Structural and spectroscopic studies of Eu³⁺ doped Lu₂O₃-Gd₂O₃ solid solutions[J]. Optical materials, 2014, 36(6): 1083-1091.
- [39] WINSKIEWSKI K, MAHLIK S, GRINBERG M, et al. Influence of high hydrostatic pressure on Eu²⁺-luminescence in KMgF₃: Eu²⁺ crystal[J]. Journal of luminescence, 2011, 131(2): 306-309.
- [40] ZHANG Z M, TANG X D, DING Z J. Photoluminescence study of Nd: YVO₄ under high pressure[J]. Journal of luminescence, 2007, 122/123: 66-69.
- [41] GRINBERG M, MALINOWSKI M, MAHLIK S. High pressure and time resolved luminescence spectra of Gd₃Ga₅O₁₂: Pr³⁺ crystal[J]. Optical materials, 2011, 33(10): 1525-1529.
- [42] JOVANIC B R. High hydrostatic pressure effect on fluorescence lifetime and spectra for Sm²⁺-doped SrFC10. 5Br0. 5 mixed crystals[J]. Journal of luminescence, 2000, 92(1/2): 161-164.
- [43] JAYASANKAR C K, BALAKRISHNAIAH R, BABU P, et al. High pressure fluorescence studies of Sm³⁺-doped K-Ba-Al phosphate glass[J]. High Pressure Research, 2006, 26(4): 349-353.
- [44] VENKATRAMU V, SIEVERS W, WORTMANN G, et al. Photoluminescence from the 5D₄ level of Tb³⁺ ions in K-Ba-Al fluorophosphate glass under pressure[J]. Journal of non-crystalline solids, 2007, 353(18/21): 1813-1817.
- [45] 李建勇, 李成仁, 李淑凤, 等. 掺铒、镱共掺硅酸盐玻璃 1.54 μm 铒共荧光寿命测量[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 416-418.
LI Jian-yong, LI Cheng-ren, LI Shu-feng, et al. Fluorescence lifetime measurement of 1.54 μm erbium-doped and ytterbium-erbium co-doped silicate glass[J]. Optical technology, 2006, 32(3): 416-418.
- [46] 徐滨士, 王海斗, 朴钟宇, 等. 再制造的热喷涂合金涂层的结构完整性与服役寿命预测研究[J]. 金属学报, 2011, 47(11): 1355-1361.
XU Bin-shi, WANG Hai-dou, PIAO Zhong-yu, et al. Research on structural integrity and service life prediction of remanufactured thermal spray alloy coatings[J]. Acta metall sinica, 2011, 47(11): 1355-1361.
- [47] 周新远, 王海斗, 杨大祥, 等. 涂层寿命预测的智能传感研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 112-115.
ZHOU Xin-yuan, WANG Hai-dou, YANG Da-xiang, et al. Research progress of intelligent sensing for coating lifetime prediction[J]. Materials Review, 2012, 26(19): 112-115.
- [48] 范新华. 弹性应力发光材料的开发及应力发光性能的调控[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
FAN Xin-hua. Development of elastic stress luminescent materials and regulation of stress luminescence properties[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018.
- [49] TERASAKI N, XU C N. Historical-log recording system

- for crack opening and growth based on mechanoluminescent flexible sensor[J]. IEEE sensors journal, 2013, 13(10): 3999-4004.
- [50] 中国航发北京航空材料研究院. 制备残余应力涂层用石墨烯改性热喷涂粉末的制备方法: 中国, CN201710508243. X[P]. 2017-11-17.
ACEE Beijing Institute of Aeronautical Materials. Preparation method of graphene modified thermal spray powder for preparing residual stress coating: China, CN 01710508243. X[P]. 2017-11-17.
- [51] JEONG S M, SONG S, JOO K I, et al. Bright, wind-riven white mechanoluminescence from zinc sulphide microparticles embedded in a polydimethylsiloxane elastomer[J]. Energy & environmental science, 2014, 7(10): 3338-3346.
- [52] 秦宇星. $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 长余辉光致发光材料的制备及其硼掺杂作用机理[D]. 天津: 天津大学, 2006.
QIN Yu-xing. $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ long afterglow photoluminescence material preparation and its boron doping mechanism[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [53] 周亚丽. 纳米长余辉发光材料 $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 的制备及光学性能研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2006.
ZHOU Ya-li. Nanometer long afterglow luminescent material $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ preparation and optical properties research[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2006.
- [54] 朱鲁明. 溶胶-凝胶法稀土硼酸盐、铝酸盐荧光粉和发光薄膜的制备与性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2008.
ZHU Lu-ming. Preparation and properties of rare earth borate and aluminate phosphors and luminescent films by sol-gel method [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2008.
- [55] 杜连超, 李文生, 何玲, 等. 高铝青铜磷光复合冷喷涂层的发光及摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 31-37.
DU Lian-chao, LI Wen-sheng, HE Ling, et al. Luminescence and friction and wear properties of high-aluminum bronze phosphorescent composite cold spray coatings[J]. Surface technology, 2015, 44(8): 31-37.
- [56] 姜妍彦, 徐笑天, 宁桂玲, 等. $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$ 掺杂铝硼硅玻璃涂层的制备与发光性能[C]// 2006 年全国功能材料学术年会. 敦煌: 中国仪器仪表学会, 2006: 46-48, 51.
JIANG Yan-yan, XU Xiao-tian, NING Gui-ling, et al. Preparation and luminescence properties of $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$ doped aluminum-strontium borosilicate glass coating[C]// 2006 national conference on functional materials. Dunhuang: Chinese Society of Instrumentation, 2006: 46-48, 51.
- [57] SANTHI A, SRINIVASAN K N, JOHN S. 发光化学镍复合镀层[J]. 电镀与涂饰, 2009, 28(1): 15-20.
SANTHI A, SRINIVASAN K N, JOHN S. Luminescent chemical nickel composite coating[J]. Electroplating and finishing, 2009, 28(1): 15-20.
- [58] 张希艳, 郭瑜, 柏朝晖, 等. $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 光致发光搪瓷涂层的制备[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(3): 314-317.
ZHANG Xi-yan, GUO Yu, BAI Zhao-hui, et al. Preparation of $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ photoluminescent enamel coating[J]. Materials science and technology, 2002, 10(3): 314-317.
- [59] 朱思或, 张霁, 许飞, 等. 纳米 SrAl_2O_4 /环氧长余辉发光涂料的制备及性能研究[J]. 上海涂料, 2013, 51(2): 11-14.
ZHU Si-yu, ZHANG Ji, XU Fei, et al. Preparation and performance of nano- SrAl_2O_4 /epoxy long afterglow luminescent coatings[J]. Shanghai paint, 2013, 51(2): 11-14.
- [60] LI Song-mei, ZHANG Hong-rui, LIU Jian-hua. Preparation and performance of fluorescent sensing coating for monitoring corrosion of Al alloy 2024[J]. Bulletin of China Nonferrous Metals Society (english edition), 2006, 16(z1): 159-164.
- [61] 王云峰. ZnO 纳米结构的制备及光学性质研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
WANG Yun-feng. Preparation and optical properties of ZnO nanostructures[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- [62] 花世群. 发光光弹性涂层方法研究[D]. 苏州: 江苏大学, 2013.
Hua Shiqun. Research on Luminescent Photoelastic Coating Method[D]. Suzhou: Jiangsu University, 2013.
- [63] MICHAEL D F. Composite coatings with light-emitting properties[J]. Metal finishing, 1999, 97(2): 87-90.
- [64] FELDSTEIN N. Functional coatings comprising light emitting particles. US, US/1996/5514479A[P]. 1996-05-07.
- [65] FELDSTEIN N. Composite plated articles having light-emitting properties: US, 5516591[P]. 1996-03-14.
- [66] 赵宇, 胥佳颖, 赵素梅, 等. YSZ: Eu 荧光应力测量法在拉应力环境下的研究[J]. 中国稀土学报, 2014, 32(3): 282-288.
ZHAO Yu, XU Jia-ying, ZHAO Su-mei, et al. Research on YSZ: Eu fluorescence stress measurement method in tensile stress environment[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2014, 32(3): 282-288.
- [67] 初振明. 应力发光材料的制备及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
CHU Zhen-ming. Research on the preparation and application of stress luminescent materials[D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [68] 张咪娜. 真空热压烧结耐磨自敏涂层组织及其性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
ZHANG Mi-na. Study on the microstructure and performance of vacuum hot-pressing sintered wear-resistant self-sensitive coating[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [69] 吕叶. 超音速等离子喷涂自敏耐磨涂层性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
LV Ye. Research on the properties of supersonic plasma

- sprayed self-sensitive wear-resistant coatings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [70] MURATORE C, CLARKE D R, JONES J G, et al. Smart tribological coatings with wear sensing capability[J]. *Wear*, 2008, 265: 913-920.
- [71] 张巍巍, 秦朝菲, 史久林, 等. SrSiAlN₃: Eu²⁺/环氧树脂复合材料宽带发光的高灵敏应力响应[C]// 2018年全国固体力学学术会议摘要集(上). 哈尔滨: 中国力学学会固体力学专业委员会, 2018: 209.
Zhang Wei-wei, Qin Chao-fei, Shi Jiu-lin, et al. Highly sensitive stress response of SrSiAlN₃: Eu²⁺/epoxy resin composites with broadband luminescence[C]// 2018 national solid mechanics academic conference abstract collection (part 1). Harbin: The Solid Mechanics Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics, , 2018: 209
- [72] 秦朝菲, 张巍巍, 史久林, 等. SrSiAlN₃: Eu²⁺/胶黏剂复合材料荧光的压应力传感特性[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(1): 57-61.
QIN Chao-fei, ZHANG Wei-wei, SHI Jiu-lin, et al. SrSiAlN₃: Eu²⁺/adhesive composite fluorescence based compression stress sensing properties[J]. *Journal of sensor technology*, 2019, 32(1): 57-61.
- [73] 郑升辉, 刘亚楠, 李月婵, 等. SrAl₂O₄: Eu, Ho/树脂应力发光薄膜在焊缝缺陷检测中的应用[J]. *发光学报*, 2018, 39(9): 1225-1232.
ZHENG Sheng-hui, LIU Ya-nan, LI Yue-chan, et al. Application of SrAl₂O₄: Eu, Ho/resin stress luminescent film in weld defect detection[J]. *Journal of luminescence*, 2018, 39(9): 1225-1232.
- [74] BENCIC T J, ELDRIDGE J I. Monitoring delamination of plasma-sprayed thermal barrier coatings by reflectance-enhanced luminescence[J]. *Surface & coatings technology*, 2006, 201(7): 3926-3930.
- [75] JIE A, DEW B. Monitoring thermal barrier coating delamination progression by upconversion luminescence imaging[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 378: 24923.
- [76] ELDRIDGE J I, BENCIC T J. Monitoring delamination of plasma-sprayed thermal barrier coatings by reflectance-enhanced luminescence[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 926-3930.
- [77] KAMAGATE A, KONE D, COULIBALY N T, et al. A comparative study of various evaluation methods of the antibiotic sensitivity of strict anaerobic bacteria of the subgingival flora[J]. *Odontostomatol Trop*, 2001, 24(95): -12.
- [78] 龙琦苇. 钨掺杂磷酸盐红色荧光粉的合成、表征及其热过程动力学研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
LONG Qi-wei. Synthesis, characterization and thermal process kinetics of europium-doped phosphate red phosphor[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [79] 徐佳. 新型机械发光材料的研制及性能研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.
XU Jia. Development and performance research of new mechanical luminescent materials[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2015.
- [80] 王旭升, 张君诚, 杨伟, 等. 一种具有应力发光和电致发光特性的复相陶瓷材料及其制备方法: 中国, CN101343180B[P]. 2011-04-06.
WANG xu-sheng, ZHANG Jun-cheng, YANG Wei, et al. A composite ceramic material with stress luminescence and electroluminescence characteristics and its preparation method: China, CN101343180B[P]. 2011-04-06.
- [81] WANG X, ZHANG H, YU R, et al. Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process[J]. *Adv mater*, 2015, 27(14): 2324-2331.
- [82] 殷建, 柏朝晖, 张希艳, 等. LaPO₄: Ce³⁺, Tb³⁺荧光屏的制备及表征[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(6): 740-745.
YIN Jian, BAI Zhao-hui, ZHANG Xi-yan, et al. Preparation and characterization of LaPO₄: Ce³⁺, Tb³⁺ phosphor screen[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(6): 740-745.
- [83] TERASAKI N, YAMADA H, XU C N. Ultrasonic wave induced mechanoluminescence and its application for photocatalysis as ubiquitous light source[J]. *Catalysis Today*, 2013, 201(1): 203-208.