

光学检测在材料科学领域的关键作用

黎樽彪

441224*****3294

摘要: 光学检测在材料科学领域扮演着至关重要的角色，其为材料的性能表征、缺陷分析与评估，以及制备与加工过程提供了强大的工具。通过非侵入式、高灵敏度和实时的特性，光学检测方法能够深入揭示材料内部结构和动态变化，从而推动材料科学的深入理解和技术创新。同时，对于功能材料如半导体、量子点、生物材料等的特性研究，同样发挥着不可或缺的作用。光学检测在材料缺陷分析与评估中也展现出强大的潜力。为材料性能的提升、结构优化及新工艺探索打下坚实基础。

关键词: 光学检测；材料科学；性能表征；缺陷分析；制备与加工

DOI: 10.69979/3041-0673.25.08.013

前言

光学检测技术在材料科学领域的应用如同一把神奇的钥匙，逐步揭示了材料微观世界的奥秘，为科研人员提供了深入理解材料性能、结构和加工过程的强大工具。从宏观到微观，从单个分子到复杂结构，光学检测方法的应用广泛且深入，不仅推动了基础研究的进展，也为材料工程的创新提供了重要支撑。随着光学技术的发展，光学检测的精度和灵敏度也在不断提升，其在材料科学中的应用前景将更加广阔。

1 光学检测方法在材料科学中的应用

在材料缺陷检测方面，使用扫描近场光学显微镜 (SNOM) 检测设备^[1]或光学相干断层扫描 (OTDR) 等高分辨率技术，能够直视材料内部的纳米级细节，对微裂纹、错位、空洞等缺陷进行精准定位和量化。这些技术的发展为质量控制和失效分析提供了前所未有的微观视角，有助于提升材料的可靠性和性能。

在材料制备与加工过程中，光学检测技术如激光诱导击穿光谱 (LIBS) 和动态光散射 (DLS) 发挥了关键作用。使用激光诱导击穿光谱 LIBS 技术^[3]可以实时监测材料合成、烧结过程中的元素组成和温度变化，帮助优化工艺条件，确保产品质量。动态光散射 DLS 技术则通过研究光散射模式分析粒子尺寸和分布，为薄膜沉积、纳米粒子生长等过程的监控提供了便利^[4]。

光学检测技术在可穿戴传感器和痕量气体检测中的应用同样不容忽视。可穿戴光学汗液传感器利用光的衍射效应和柔性界面，实现了对人体生理指标的实时、连续监测，为健康监测与疾病预防提供了创新手段^[5]。

在痕量气体检测领域，光纤模式相位差探测的激光光热光谱技术实现了万亿分之一量级的检测限，为环境监测、安全预警提供了高效解决方案^[6]。

在光子器件和光子集成中，等离激元光子学、光子晶体等领域的发展，使得光学检测技术在实现光的局域操控方面展现出巨大潜力。例如，低阈值纳米激光器的制备以及涡旋光束的产生，为光子集成和光子信息处理系统的优化提供了新思路^[7]。

2 基于光学检测的材料性能表征

2.1 光学检测在材料结构表征中的应用

光学检测技术在材料结构表征中起着重要作用，其可揭示材料的微观结构特性，为材料性能的优化提供关键信息。其中拉曼光谱技术^[8]以其非破坏性和分子识别能力，成为研究材料晶体结构和振动模式的首选工具。拉曼光谱技术利用的是拉曼效应（又称拉曼散射，指的是光波经过物质被散射后频率发生变化的现象），通过测量分子内部振动的频率，可以分析并确定材料的晶格结构，确定材料内部信息。另外，在纳米复合材料或多相体系中，拉曼光谱也能辨别不同相的结构信息。光学检测在材料结构表征中的应用，从单个分子到复杂系统，从静态结构到动态过程，都提供了细致入微的洞察。这些表征手段为材料性能的深入理解、新材料的设计以及现有材料的优化提供了不可或缺的工具。

2.2 光学检测在材料表面性质分析中的作用

在材料科学中，表面性质对材料的性能和应用具有决定性的影响^[9]。光学检测技术在材料表面性质的分析

中扮演着至关重要的角色，它能够提供无损、实时且高分辨率的信息，对于材料表面的成分、粗糙度、化学性质及功能化改性等进行深入研究。

拉曼光谱检测技术在材料表面性质分析中具有独特的优势，同时也有更多相关的技术能够实现材料表面性质的分析，比如荧光光谱技术^[10]、表面等离子共振（SPR）技术^[11]、光学干涉和衍射技术等。荧光光谱技术在表面性质分析中有着广泛的应用，其可通过测量材料表面吸附的荧光探针分子的荧光光谱变化，来推断材料表面的化学组成和结构；表面等离子共振（SPR）技术是另一种重要的光学检测手段，其利用金属表面等离子体的共振现象来探测材料表面的物理化学变化。光学干涉和衍射技术，如白光干涉、干涉反射光谱和光栅光谱，能够提供材料表面粗糙度、光学厚度和折射率的定量信息，是评估薄膜、涂层和复合材料表面质量的重要工具。其在表面粗糙度控制、薄膜厚度测量以及表面改性效果评估中起着关键作用。

3 基于光学检测的材料缺陷分析与评估

3.1 光学检测在材料缺陷检测中的关键作用

OTDR（光学相干断层扫描）是一种基于光干涉原理的无损检测技术，可以揭示光纤、光波导或生物组织内部的微小结构变化。其通过发送一束光脉冲并测量其在材料中传播后的后向散射光，能够形成内部结构的深度分布图像，有效检测材料内部的反射或散射中心，如微裂纹、空洞或掺杂不均匀。在光纤通信、光电子器件和医学成像中，OTDR 的缺陷检测能力对确保材料和器件的性能稳定起着重要作用。

激光共聚焦显微镜^[12]、二次离子质谱^[13]（SIMS），以及结合了电子显微镜的光学技术（如光电子能谱^[14]、X 射线吸收精细结构分析^[15]等）在缺陷检测中也发挥了重要作用。激光共聚焦显微镜通过聚焦激光束，实现对样品表面及其内部的高分辨率观察，尤其适用于观察生物材料、复合材料和薄膜的缺陷。SIMS 则通过高能离子轰击样品，将表面材料离子化并进行质谱分析，能够精确测量缺陷部位的元素分布，这为理解和修复材料缺陷提供了有力手段。

3.2 光学检测在材料寿命评估中的应用

在材料科学中，材料的寿命评估通常涉及对材料耐久性、稳定性和抗损伤能力的深入理解。光学检测技术

在这一领域发挥了不可或缺的作用，通过表征材料的老化过程、监测性能退化以及捕捉潜在失效机制，为材料寿命预测和耐用性改进提供有力的工具。

利用光谱检测技术，研究人员可以追踪材料老化过程中物理和化学性质的变化。例如，光致发光衰减的测量可以识别材料在光暴露下的稳定性，对于光敏材料如有机光伏器件和光传感器而言，这是至关重要的。拉曼光谱能够通过分析频移和强度变化，揭示分子结构随时间的演变，尤其是对于聚合物和生物材料等易受环境影响的材料。荧光寿命的衰减则可以反映分子间的相互作用变化，从而评估聚合物网络或生物分子复合体的老化程度。

光学显微技术在材料寿命评估中的应用同样广泛。在显微镜下，可以观察到材料表面的腐蚀、裂纹扩展和疲劳现象，这些都直接影响材料的使用寿命。例如，扫描电子显微镜^[16]（SEM）和透射电子显微镜^[17]（TEM）能够提供高分辨率的微观图像，展示微米到纳米级别的损伤细节，帮助识别早期材料失效的迹象。同时，利用数字图像相关分析技术，可以通过比较材料在不同时间点的形貌，量化材料的形变和损伤积累。

光学干涉和散射技术如白光干涉和光散射测量可以揭示材料表面粗糙度随时间的变化，此对于评估材料磨损和腐蚀的速率有着重要作用。此外，结合光栅光谱，可以对涂层或表面处理的耐用性进行评估，通过观察反射光谱的变化，判断处理层是否剥落或性能退化。

动态光学检测技术在材料寿命评估中展现了独特优势。其中，通过超快光学技术，可以实时捕捉材料在应力作用下的动态响应，如裂纹的出现和延展，这对于理解材料的疲劳寿命和预测失效具有重要意义。使用时间分辨荧光技术，可以研究材料在老化过程中的分子动力学，比如染料的荧光寿命变化，以评估材料的耐候性。

光学检测技术在材料寿命评估中的应用，不仅提升了我们对材料耐久性认识的深度，还为材料的优化设计和失效预防提供了科学依据^[18]。通过精确地表征和监测材料在实际使用条件下的性能变化，科研人员可以开发出更具耐用性的材料，广泛应用于从电子器件到航空航天等多个领域。

4 基于光学检测的材料制备与加工

4.1 光学检测在材料制备工艺监控中的应用

在材料科学的研究进程里，精确控制材料制备工艺

以实现预期性能至关重要。光学检测技术在该过程担当了不可或缺的角色,其能够实时监测和调控关键工艺参数,确保产品质量的稳定性和一致性。其中,激光诱导击穿光谱(LIBS)和动态光散射(DLS)等技术发挥了关键作用。

例如,在薄膜沉积过程中,DLS可以监控溶液中纳米颗粒的大小变化,确保在沉积过程中颗粒大小均匀,从而获得性状均一的薄膜。在生物材料制备中,如多糖或蛋白质自组装,DLS可以监测分子间的相互作用,帮助科研人员调控组装过程,以形成预期的结构和功能。在复合材料制备中,通过DLS实时监测不同组分的分散状态,可以优化分散和固化过程,保证复合材料的均匀性和性能稳定性。

4.2 光学检测在材料加工过程中的应用

动态光散射(DLS)在纳米材料加工过程中是必不可少的工具,其能实时监测溶液中颗粒的大小、形状和分布,对于控制颗粒生长动力学至关重要。例如,在纳米颗粒的合成和生长过程中,DLS能帮助科研人员精确地调整反应条件,如温度、浓度和搅拌速度,以获得尺寸均一、形貌可控的纳米颗粒,这对于制备高性能的电池材料、催化剂和光学材料等至关重要。

光热技术在材料烧结和薄膜沉积过程中也有广泛的应用。通过监测材料吸收光后产生的温度变化,可以精确控制烧结的温度和速率,保证材料的致密性和微观结构。在薄膜沉积中,光热反馈可以调整沉积速率,避免薄膜过快沉积导致的缺陷,从而获得性能优良的薄膜。

光谱成像技术如拉曼光谱和荧光光谱在材料加工过程中的实时监控也有显著作用。例如,拉曼光谱可以检测热处理过程中相变信息,监控材料的微结构变化;而荧光光谱仪可以实时评估光敏材料在曝光过程中的活性变化,这对于光刻工艺的优化至关重要。

光学显微技术如共聚焦显微镜和超分辨率显微镜在材料加工过程中的观察也日益重要。其可在微米甚至纳米级别下观察材料表面的形貌变化,揭示加工过程中的微观机制,比如观察到晶粒的生长、位错的迁移,以及加工引入的缺陷等,这对于优化加工参数,提高产品质量具有重要意义。光学检测技术在材料加工过程中的应用,无论是通过实时监控化学成分、颗粒状态,还是通过调控温度和形貌变化,都为材料的高质量制备提供了强有力的支持。

5 总结与展望

综上所述,在材料性能表征方面,光学技术如拉曼光谱、荧光光谱和偏振光谱等,能够揭示材料的晶体结构、电子状态、相变信息以及功能性分子的活性,为材料的性能优化提供关键数据。通过扫描近场光学显微镜、光学相干断层扫描等技术,可以实现亚微米甚至纳米级别的分辨率,帮助科研人员对材料的微结构缺陷、损伤和界面特性进行高精度监测,为质量控制和失效分析提供有力支持。在材料制备与加工过程中,光学检测技术如激光诱导击穿光谱和动态光散射等,可以实时监测和调控材料合成、烧结、薄膜沉积等过程中的参数变化,优化工艺参数,提高产品质量和一致性。未来,随着光学技术的持续发展和创新,其在材料性能提升、结构优化以及工艺控制等方面的作用将更加显著,为材料科学的发展打开新的篇章。

参考文献

- [1]Liu X , Wang J , Li D .Scanning Near-field Optical Microscope and Application[J].CHINESE JOURNAL OF LASERS, 1999.
- [2]陈童,侯习平,付秀华.光学相干断层扫描成像系统中消偏振分光膜的研制[J].长春理工大学学报(自然科学版),2015,38(03):14-17.
- [3]李祥友,刘可,周冉,等.激光诱导击穿光谱技术及应用综述[J].中国激光,2022,49(12):152-183.
- [4]刘伟,王雅静,申晋.动态光散射最优拟合累积分析法[J].光学学报,2013,33(12):319-326.
- [5]陈至威,陈艳霞,陈晨,等.可穿戴光学汗液传感器的研究进展[J/OL].中国科学:化学,1-11[2024-10-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5838.06.20240708.2116.002.html>.
- [6]徐赞然.光反馈腔增强吸收光谱优化技术研究[D].国防科技大学,2018.DOI:10.27052/d.cnki.gzjgu.2018.000551.
- [7]张雨轩.基于光学非线性效应的全光开关以及EP的研究[D].电子科技大学,2024.DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2024.005332.
- [8]张曦,南瑞华,坚佳莹,等.拉曼光谱技术及其应用进展[J].化学研究,2024,35(01):1-15.DOI:10.14002/j.hxya.2024.01.001.

- [9] 刘轩邑,汪俊陶,邹鹏程,等. 复合材料修复技术与可修复性研究综述[J/OL]. 航空制造技术,1-10[2024-10-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20241016.1614.002.html>.
- [10] 冯先进,章连香. 原子荧光光谱技术在我国发展及标准化应用现状[J]. 中国无机分析化学,2022,12(02):16-25.
- [11] 袁克皋. 表面等离子共振检测技术及其传感器实验装置研究[D]. 浙江大学,2006.
- [12] 刘东武,牟洪善. 激光扫描共聚焦显微镜技术在材料科学研究中的应用[J]. 生命科学仪器,2006,(05):11-14.
- [13] Haneda H .A study of defect structures in oxide materials by secondary ion mass spectrometry[J]. Applied Surface Science, 2003, 203(Jan):625-629. DOI:10.1016/S0169-4332(02)00779-1.
- [14] 陈静允,龙银花,左宁,等. X 射线光电子能谱法和深度剖析法检测 CdS 薄膜的成分[J]. 理化检验(化学分册),2017,53(01):28-33.
- [15] 史向华,刘小兵,王萍辉,等. X 射线吸收谱精细结构分析的理论探讨(英文)[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版),2000,(03):63-67.
- [16] Zworykin V A , Hillier J , Snyder R L . A Scanning Electron Microscope[J]. 1942.
- [17] by David B. Williams, C. Barry Carter. Transmission Electron Microscopy[M]. Springer US,2009.
- [18] 崔洪波,孟祥毅,吴峰,等. 自动光学检测技术在引线键合中的应用[J]. 电子工艺技术,2024,45(05):24-27. DOI:10.14176/j.issn.1001-3474.2024.05.007.

作者简介:黎樽彪,男,汉,广东怀集,理学硕士,光学工程师,无职称,光学系统研发与应用,广州检验检测认证集团有限公司