

纳米压痕技术在材料微纳米力学性能测试中的应用研究

邱阳

浙江城乡工程研究有限公司

DOI : 10.12238/jpm.v5i7.7029

[摘要] 材料的微观力学性能是决定其宏观性能的关键因素之一。随着科技的发展,人们对新型功能材料的需求日益增加,对其微观尺度下的力学行为有着更高的研究需求。传统的宏观力学测试手段已经难以满足这一需求,因此亟需开发能够精确表征材料微纳米尺度力学特性的新技术。纳米压痕技术是近年来快速发展的一种重要表征手段,它可以通过在样品表面施加微小载荷而获得材料的硬度、弹性模量等参数,从而揭示其微观尺度下的力学行为。这不仅为我们深入认识材料的力学本质提供了宝贵的实验数据,也为新型功能材料的设计优化提供了重要依据。

[关键词] 功能材料; 微观力学; 纳米压痕技术

Research on the application of nanoindentation technology in the testing of micro-nano mechanical properties of materials

Qiu Yang

Zhejiang Urban and Rural Engineering Research Co., Ltd

[Abstract] The micromechanical properties of materials are one of the key factors determining their macroscopic properties. With the development of science and technology, people's demand for new functional materials is increasing, and there is a higher demand for their mechanical behavior at the microscopic scale. Traditional macroscopic mechanical testing methods can no longer meet this demand, so there is an urgent need to develop new technologies that can accurately characterize the mechanical properties of materials at the micro and nano scales. Nanoindentation technology is an important characterization method that has developed rapidly in recent years, which can obtain the hardness, elastic modulus and other parameters of materials by applying a small load on the surface of the sample, so as to reveal its mechanical behavior at the microscopic scale. This not only provides valuable experimental data for us to deeply understand the mechanical nature of materials, but also provides an important basis for the design and optimization of new functional materials.

[Key words] functional materials; micromechanics; Nano indentation technique

前言

纳米压痕技术通过在样品表面施加微小载荷,测量材料的硬度、弹性模量等参数,从而获得材料在微观尺度下的力学特性。这对于理解和设计具有优异力学性能的新型功能材料至关重要。与传统的宏观力学测试相比,纳米压痕技术能够精确地测量材料的局部力学行为,提供了前所未有的洞察。它可以用于分析晶体内缺陷对力学性能的影响,或者评估薄膜、涂层等界面材料的力学特性。这对于开发具有可控微观结构的先进材料具有重要意义。纳米压痕技术还为材料力学建模和仿真提供了宝贵的实验数据支持。通过与理论模型的对比较证,可以更

好地理解影响材料力学行为的关键机理,为材料设计 optimization 提供指导。

1.背景技术与发展现状

纳米压痕技术是一种用于材料微纳米力学性能测试的无损检测方法。它通过在材料表面施加微小的压力,测量压痕的形成和变形,从而获得材料的力学性能参数。纳米压痕技术具有高载荷和位移分辨率的优势,可以广泛应用于硬度、弹性模量、塑性应变、薄膜界面结合强度以及材料疲劳特性等方面的测试。这项技术已经在材料科学领域得到广泛应用。它可以用于各种材料的力学性能测试,包括金属、陶瓷、聚合物、生物

材料等。同时，纳米压痕技术也可以用于薄膜、纳米颗粒和纳米结构材料的力学性能研究。

随着技术的发展，纳米压痕技术的测试方法和原理也在不断改进。引入了动态纳米压痕技术，可以更准确地测量材料的力学性能。此外，还有一些新的测试方法和原理被提出，如纳米冲击技术和纳米压痕扫描显微镜技术，进一步拓宽了纳米压痕技术的应用领域。纳米压痕技术与其他材料表征技术的结合也得到了进一步的发展。纳米压痕技术与原子力显微镜和扫描探针显微镜等技术的结合，可以实现对材料力学性能的多尺度表征。

尽管纳米压痕技术在材料力学测试中取得了显著的进展，但仍然存在问题需要解决。例如，纳米压痕仪的标定和校准问题，以及在测试过程中可能引入的误差。此外，纳米压痕技术在材料疲劳断裂模型建立方面还有待进一步研究。展望未来，结合有限元模拟建立材料疲劳断裂模型是纳米压痕技术在力学测试方面的发展趋势。

2. 纳米压痕技术的基本原理与实验方法

2.1 纳米压痕技术的工作原理

纳米压痕技术是通过在试样表面施加微小的压痕载荷，测量压痕过程中的载荷-位移曲线，从而获得材料的硬度、弹性模量等力学参数的一种表征材料微观力学性能的手段。纳米压痕实验在试样表面施加一个精确控制的载荷，使试样发生微小的塑性变形。随着压痕深度的增加，载荷-位移曲线被实时记录下来。在卸载过程中，材料表面弹性回复，压痕深度减小，也会形成相应的载荷-位移曲线。基于这一加载-卸载曲线，可以通过 Oliver-Pharr 方法计算出材料的硬度 H 和弹性模量 E 。硬度 H 定义为单位投影面积上所承受的最大载荷，反映材料的抗变形能力；弹性模量 E 则代表材料的刚性，反映了材料抵抗弹性变形的能力。此外，纳米压痕技术还可以获得材料的其他力学参数，如塑性变形能、应力-应变曲线等。这些信息不仅能揭示材料在微观尺度下的力学行为特征，而且为材料的微观结构-性能关系研究提供重要依据。

2.2 不同类型的纳米压痕设备及其适用范围

随着纳米压痕技术的不断发展，已经出现了多种类型的纳米压痕设备，主要包括原子力显微镜 (AFM) 压痕和专用的 $HaHo$ 压痕仪两大类。原子力显微镜 (AFM) 压痕是利用 AFM 探针作为压痕头，在试样表面施加微小载荷并测量位移响应的一种方法。这种方式具有操作灵活、测试区域可控等优点，适用于对薄膜、涂层等微小体积材料的力学性能表征。但由于 AFM 自身的分辨率和负荷能力有限，其测试深度一般仅在几十纳米量级。相比之下，专用的 $HaHo$ 压痕仪具有更强大的负荷和位移测量能力。其典型结构包括精密的压痕头、样品台、位移传感器等部件，能精确施加从微牛到几牛的载荷，测量分辨率可达皮米量级。这种设备不仅可以测试薄膜、涂层等微小体积材料，也能用于分析金属合金、陶瓷等体积较大的功能材料。

此外，一些先进的 $HaHo$ 压痕仪还集成了原位观察、高温等功能，进一步拓展了其应用范围。

3. 纳米压痕技术在薄膜材料性能表征中的应用

3.1 纳米压痕在评估薄膜硬度、界面黏结强度等方面的优势

纳米压痕技术能够精准测量薄膜材料的硬度和弹性模量等力学参数。由于薄膜的厚度通常只有几十纳米到几微米，常规的宏观力学试验难以获得可靠数据。而纳米压痕技术可以在纳米尺度下实现局部性能表征，从而更好地反映薄膜自身的力学特性。该技术能够有效评估薄膜与基底之间的界面黏结强度。在压痕过程中，如果压痕深度超过薄膜厚度，压痕就会穿透至基底。此时，载荷-位移曲线会出现明显的转折点，对应着界面发生破坏的临界点。通过分析这一临界点，可以推算出薄膜-基底界面的黏结强度，为薄膜的制备工艺优化提供重要依据。与宏观力学试验相比，纳米压痕技术具有样品用量少、测试区域可控等特点，非常适用于表征微小尺度、非均质性的薄膜材料。这不仅能够揭示薄膜本身的力学性能，还能为探究薄膜结构-性能关系提供重要支撑。

3.2 纳米压痕在研究薄膜结构-性能关系中的重要作用

薄膜材料的力学性能往往高度依赖于其内部微观结构，如晶粒尺度、缺陷分布、界面状态等。纳米压痕技术作为一种微观力学表征手段，在研究这些结构-性能关系中发挥着重要作用。纳米压痕可用于分析薄膜的界面效应。当压痕深度逐渐增大时，压痕区域会逐步由表层进入基底。通过分析载荷-位移曲线的变化趋势，可以得到薄膜-基底界面的附着强度、界面响应特性等信息，为优化薄膜的界面设计提供依据；纳米压痕技术还能够表征薄膜表面及内部缺陷对力学性能的影响。如果薄膜中存在孔洞、裂纹等缺陷，在压痕过程中会导致载荷-位移曲线出现异常。通过分析这些异常特征，可以推断出缺陷的类型、尺度及其对材料强度的影响。这对于薄膜制备工艺的控制和缺陷的修复具有重要的指导意义；

还可以结合其他表征手段，如原子力显微镜 (AFM) 等，实现薄膜微观结构与力学性能的相关性分析。通过同步测量薄膜表面形貌和力学响应，可以更深入地探究薄膜的微观结构-性能关系，为优化薄膜设计提供重要依据。

4. 纳米压痕在金属、陶瓷等功能材料性能分析中的应用

4.1 纳米压痕在评估金属合金、陶瓷等功能材料的参数方面的作用

在金属合金、陶瓷等功能材料的性能分析中，这项技术也发挥着重要作用。这些功能材料通常具有复杂的微观结构，如晶粒尺度、相界面状态等，往往难以通过宏观力学试验准确测量其力学特性。而纳米压痕技术则能够在纳米尺度下实现局部性能表征，为揭示材料微观结构与力学性能之间的关系提供关键依据。

以金属合金为例，其力学性能不仅取决于合金成分，还高

度依赖于晶粒尺度、相组成、沉淀物分布等微观结构特征。通过纳米压痕技术,可以精确测量金属合金在纳米尺度下的硬度和弹性模量等参数,为深入探究其微观结构-力学性能关系提供重要依据。例如,在研究时效处理对铝合金性能的影响时,纳米压痕可用于分析时效过程中沉淀物的生成及其对合金硬度的影响,为优化时效工艺提供指导;同样地,在陶瓷材料中,纳米压痕也能够发挥类似的作用。陶瓷通常具有高硬度、高强度的特点,但其力学性能容易受到晶粒尺度、晶界状态、孔洞缺陷等因素的影响。利用纳米压痕技术,可以精确测量陶瓷材料在微观尺度下的硬度、弹性模量等参数,为优化陶瓷的微观结构设计提供依据。例如,在研究添加剂对陶瓷硬度的影响时,纳米压痕可用于表征添加剂对陶瓷晶粒尺度及晶界状态的调控作用,从而分析其对力学性能的影响机制。

4.2 纳米压痕在揭示材料微观结构与力学性能关系中的重要意义

材料的力学性能往往高度依赖于其内部微观结构,如晶粒尺度、缺陷分布、相界面状态等。纳米压痕技术作为一种微观力学表征手段,在揭示这些微观结构-力学性能关系中发挥着关键作用。纳米压痕能够充分利用其高分辨率的优势,精确表征材料微观结构对力学性能的影响。例如,通过分析载荷-位移曲线,可以推断出材料中缺陷的类型、尺度及其对强度的影响。这对于优化材料的微观结构设计,提高其力学性能具有重要意义;其次,纳米压痕技术可与其他表征手段如透射电子显微镜 (TEM)、原子力显微镜 (AFM) 等结合使用,实现材料微观结构与力学性能的相关性分析。通过同步测量材料的微观形貌、晶体结构以及力学响应,可以更深入地探究材料微观结构-性能关系,为优化材料设计提供重要依据。还能够用于表征材料在不同环境条件下的力学行为。例如,通过在高温或腐蚀性环境中进行纳米压痕测试,可以分析材料在恶劣条件下的力学性能变化,从而为材料在服役环境中的可靠性设计提供依据。

5. 纳米压痕技术与材料力学模拟仿真的融合应用

材料的力学性能是其功能发挥的基础,准确预测和模拟材料在复杂工作环境下的力学行为是材料科学研究的核心任务之一。而纳米压痕技术作为一种精细的微观力学表征手段,其实验数据为材料力学模型的建立和验证提供了宝贵的支撑。纳米压痕实验可以获取材料在纳米尺度下的硬度、弹性模量等关键力学参数。这些高分辨率的微观力学性能数据为构建材料本构模型提供了必要的输入。例如,在建立金属合金的本构模型时,可以利用纳米压痕测试得到的硬度、应变强化行为等参数,为模型中描述材料微观尺度变形机制的本构方程提供参数输入,从而提高模型的预测精度。

纳米压痕实验还能够提供材料变形机理方面的重要信息。通过分析载荷-位移曲线以及压痕形貌等数据,可以推断出材料中缺陷的类型、尺度及其对力学性能的影响。这些关于材料

微观变形机制的实验观察结果,为力学模型中描述变形行为的本构关系提供重要参考依据,使得模型能够更加准确地反映材料的实际力学响应。

通过比较模拟预测与实验测量结果,可以评估模型对材料微观力学行为的描述能力,进而优化模型参数或完善模型假设,最终实现模型与实验数据的良好吻合。这种模型-实验互补的方式,在材料力学研究中发挥着不可或缺的作用。

材料的力学性能往往高度依赖于其复杂的微观结构,如晶粒尺度、相界面状态、缺陷分布等。而这些微观力学行为的建模仿真研究,反过来又为纳米压痕实验的设计提供了重要指导。

此外,材料微观力学行为的建模仿真有助于确定纳米压痕实验的最佳参数设置。例如,通过模拟分析可以预测材料在不同载荷条件下的变形响应,从而为纳米压痕实验的载荷选择提供依据,使得实验能够更加有针对性地表征材料的关键力学特性;此外,模拟结果还可用于指导压痕尺寸的选择,确保压痕深度小于材料的特征微观结构尺度,从而获得具有代表性的力学响应数据。通过模拟分析材料在高温、腐蚀性环境等恶劣条件下的力学响应,可以预测其微观变形行为的演化规律,为相应的纳米压痕实验提供指导。这不仅有助于增强实验的针对性,还能提高实验数据的可靠性,为材料在复杂服役环境下的性能评估提供依据。通过模拟分析压痕尖端与材料微观结构的相互作用,可以优化压痕头的几何形状,提高其对微观结构敏感性。同时,模拟结果还可用于指导压痕过程中测量参数的选择,如载荷、卸载速率等,从而进一步提高纳米压痕技术的微观力学表征能力。

结语

纳米压痕技术作为一种精确表征材料微观力学性能的有效手段,在材料科学研究中扮演着日益重要的角色。它不仅能够为我们深入认识材料的力学行为提供宝贵数据支持,也为新型功能材料的设计优化提供了重要依据。随着该技术的不断发展和改进,相信未来必将在促进材料科学研究,服务于国家创新发展战略等方面发挥更加重要的作用。

[参考文献]

- [1] 准静态纳米压痕的理论基础与数据分析[J]. 龚江宏. 陶瓷学报, 2021 (02)
- [2] 纳米压痕测试技术在复合材料中的应用研究[J]. 郭小萍; 吕琴丽; 杨中元; 纪红; 孙泽明. 金属功能材料, 2020 (03)
- [3] 基于纳米压痕的煤岩微观力学特性及其影响因素剖析[J]. 蔡益栋; 贾丁; 邱峰; 刘大猛; 闫霞; 周优; 安康. 煤炭学报, 2023 (02)
- [4] 球压痕试验法评价金属材料的强度[J]. 黄礼洋; 关凯书. 机械工程材料, 2021 (01)
- [5] 材料应力-应变的球形纳米压入法研究进展[J]. 汪可华; 陈坚; 王福德; 梁晓康; 孙正明. 材料导报, 2019 (09)