

纳米压痕方法在力学实验教学探索中的应用

乔吉超¹ 陶 凯^{1,2}

(¹ 西北工业大学力学与交通运输工程学院, 陕西 西安 710072;

² 上海电机学院机械学院, 上海 201306)

摘 要 本文针对力学实验教学的改革需求, 提出了引入纳米压痕技术作为教学手段的创新方案。实验教学作为培养大学生理论与实践创新能力的重要途径, 如何在现有条件下设计丰富且高效的教学方案, 成为当前力学实验教学改革的的关键问题。本文以非晶合金这一先进结构材料为载体, 通过纳米压痕实验测量其弹塑性行为, 探索了一种新的力学实验教学模式。纳米压痕技术具有快速、精确的测量特点, 能够直观地展示材料的力学性能, 非常适合用于实验教学。通过将这一先进技术引入课堂, 学生不仅能够观察到非晶合金在压入过程中的弹塑性行为, 还能通过数据分析深入理解材料的力学特性。这种教学方式不仅提升了学生的理论知识掌握能力, 还显著增强了他们的动手实践能力。现场教学实践表明, 基于纳米压痕实验的教学方案能够有效调动学生的学习积极性。学生在实验过程中不仅能够直观地理解理论知识, 还能通过实际操作培养科学研究的思维方式和创新意识。这种教学模式为学生提供了从理论到实践的全方位训练, 有助于培养他们的综合能力 and 创新精神。

关键词 纳米压痕; 非晶合金; 教学探索; 力学实验

APPLICATION ON NANOINDENTATION METHOD IN TEACHING EXPLORATION OF MECHANICAL EXPERIMENT

QIAO Jichao¹ TAO Kai^{1,2}

(¹ School of Mechanics and Transportation Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072;

² School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306)

Abstract This paper proposes an innovative approach to introduce nanoindentation techniques into mechanics laboratory teaching to address the demands of curriculum reform. As a critical pathway for cultivating theoretical and practical innovation for the undergraduate students, experimental teaching faces the challenge of designing rich and efficient instructional programs under existing conditions. Amorphous alloys are advanced structural material, the paper explores a new model of mechanical experimental teaching through nanoindentation measurements of its elastoplastic behavior. Nanoindentation techniques, characterized by rapid and

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 西北工业大学教育教学改革研究项目资助项目(项目编号:2025JGZ17);西北工业大学研究生教育综合改革创新发展创新项目(课程改革专项,项目编号:KCJG202513)。

通信作者: 乔吉超, qjczy@nwpu.edu.cn。

引文格式: 乔吉超, 陶凯. 纳米压痕方法在力学实验教学探索中的应用[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 297-304.

Cite this article: QIAO J C, TAO K. Application on nanoindentation method in teaching exploration of mechanical experiment[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 297-304. (in Chinese)

precise measurements, which provides an intuitive demonstration of material mechanical properties, making them highly suitable for laboratory instruction. By introducing this advanced technology into the teaching, students not only observe the elastoplastic behavior of amorphous alloys during the indentation process but also gain a deeper understanding of the material's mechanical properties through data analysis. This teaching method improves students' grasp of theoretical knowledge as well as significantly enhances their hands-on practical skills. On-site teaching practices have shown that a teaching plan based on nanoindentation experiments can effectively stimulate students' learning enthusiasm. During the experiment, students can not only intuitively understand theoretical knowledge but also develop scientific thinking and innovation awareness through practical operations. This teaching model provides students with comprehensive training from theory to practice, which help to cultivate their overall abilities and innovative spirit.

Key words nanoindentation; metallic glass; teaching exploration; mechanical experiment

本文聚焦于凝聚态物理、固体物理及固体力学等学科的教学改革,强调在本科生和研究生的培养过程中,除了注重课堂专业基础理论的教学外,还应加强实验操作能力的锻炼。随着科技的快速发展,传统的力学实验教学方法已无法满足现代创新性研究的需求。在新工科背景下,教学改革需要向研究性方向发展,注重力学测试方法和技术的创新,使学生能够贴近科研实践,培养其发现问题和解决问题的能力。

传统的宏观拉伸或压缩实验虽然能够获得材料的力学常数,但对于三维尺寸较小或脆性材料的力学性能测试却存在局限性^[1]。纳米压痕技术在传统力学实验教学中发挥了重要的补充作用。与传统的低碳钢拉伸实验不同,纳米压痕技术能够在纳米尺度上精确测量材料的力学性能,尤其适用于薄膜、涂层等低维材料^[2-3]。纳米压痕技术不仅拓宽了实验的适用范围,还能够提供微观和纳观尺度下的材料力学特性,帮助学生深入理解材料在微观尺度上的行为。具体来说,纳米压痕技术可以测量硬度、弹性模量、塑性指数、弹性恢复能力等物理参数,这些数据有助于揭示材料在微观尺度下的力学特性,对于学生理解材料的微观力学行为至关重要^[4]。纳米压痕技术不仅能够提供更多种类的材料力学数据,还能帮助学生更全面地掌握材料的微观力学特性。因此,纳米压痕技术在力学实验教学中弥补了传统实验的不足,提升了实验内容的深度和广度,进一步加强了教学效果。

非晶合金(又称金属玻璃)是一种典型的亚稳态金属材料,具有高强度、高断裂韧性和高弹性极限等独特的力学和物理性能^[5,6]。在宏观尺度上,非晶合金表现为各向同性,但其微观结构却呈现出固有的非均匀特征。非晶合金微观结构可以看作由“类固区”和“类液区”组成,原子堆积密度随位置变化而不同。当受到外部应力时,“类液区”会表现出滞弹性响应,而“类固区”则表现出典型的弹性变形行为。这种独特的微观结构使非晶合金在力学行为上表现出复杂的特性,为纳米压痕技术提供了丰富的研究对象。

本文以非晶合金为例,探讨了纳米压痕技术在凝聚态物理和固体力学实验教学中的应用。通过纳米压痕实验,学生可直观观察非晶合金的弹塑性行为,并测量其力学性能参数。这种实验方法不仅能够帮助学生深入理解材料的力学行为,还能培养他们的实验操作能力和数据分析能力。

1 纳米压痕实验

1.1 教学实验步骤

实践教学可以加强学生对所学理论知识的掌握,是培养具有创新能力和高素质的工程技术人才的关键手段。为提高学生实践创新能力,需加强实践教学,构建一套成体系的科学实践教学体系^[7-12]。笔者在纳米压痕实验教学中,首先对该实验基本原理进行讲解。

在进行压痕实验之前,首先需要准备非晶合

金样品并对其进行抛光。为确保实验结果的可靠性,样品表面应抛光至镜面状态,并通过光学显微镜观察样品表面无明显划痕。随后,打开纳米压痕测试系统并进行校准。将非晶合金样品放置到测试平台上,按照测试要求设定相关参数,开始实验。最后,分析实验数据,计算非晶合金的弹性模量、硬度等力学性质。

纳米压痕的基本原理:纳米压痕技术,又称深度敏感压痕技术,能够通过计算机系统控制压入荷载,并通过传感器监测压入深度。整个压痕过程可分为三个阶段:(i)加载阶段,(ii)保载阶段和(iii)卸载阶段。在加载阶段,施加外部荷载于压头,使其压入样品表面,随着荷载的增大,压入深度也随之增加。当荷载达到最大值时,保持当前荷载进入保载阶段。为了避免热漂移过大,保载时间应控制在合理范围内。接着进入卸载阶段,当外荷载移除后,样品表面将留下压痕痕迹。图1为荷载-位移数据示意图,从图中可以看出,随着荷载的增大,位移不断增加;当荷载达到最大值时,位移也达到最大值,即最大压痕深度 $h_{\max}$ 。卸载后,位移回到某一固定值,此时的残留深度为 h_f ,表示压头在样品表面留下的永久塑性变形。

在纳米压痕实验中,硬度(Hardness, H)可以通过荷载-位移曲线导出。具体来说,硬度是指单位面积上的压入荷载。根据加载阶段的荷载和压痕深度数据,可以通过以下公式计算硬度^[14]

$$H = \frac{P}{A_c} \quad (1)$$

式中: P 是最大荷载, A_c 是压痕的接触面积。接触面积 A_c 可通过压痕深度 h 和压头几何形状的关系来推算^[14]

$$A_c = 24.56h_c^2 + C_1h_c^1 + C_2h_c^{1/2} + C_3h_c^{1/4} + \dots + C_8h_c^{1/128} \quad (2)$$

方程(2)右侧的第一项表示理想Berkovich压头尖端的面积函数,而其他项则反映了由于磨损造成偏离理想状态的程度。因此,在使用熔融石英压痕结果进行经验拟合对样品进行测试之前,需要先获得金刚石尖端常数 C_i 。材料的弹性模量可以通过获得的折合模量 E_r 来定义^[14]

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \quad (3)$$

其中, E_s 和 ν_s 分别为样品的弹性模量和泊松比, $E_i=1411\text{GPa}$ 和 $\nu_i=0.07$ 分别为金刚石压头的

弹性模量和泊松比^[11]。折合模量定义为^[14]

$$E_r = \frac{S}{2\lambda} \sqrt{\frac{\pi}{A_c}} \quad (4)$$

其中,对于Berkovich尖端, λ 是等于1.034的常数, $S=dP/dh$ 是接触刚度,可根据卸载曲线计算得到,在连续刚度模式测量中也可直接获得。

由图1所示 $P-h$ 曲线导出的待测试样弹性模量和硬度的数据分析方法,主要基于卸载阶段的数据。这一方法假定卸载阶段的荷载-位移关系满足特定的函数形式,并通过拟合实验数据来分析,从而确定卸载刚度 S ,进而计算弹性模量和硬度。该数据分析方法的理论基础由Oliver和Pharr于1992年提出,通常被称为Oliver-Pharr方法(OP方法)^[14]。目前,许多商业化纳米压痕仪所配备的标准数据处理软件也都是基于OP方法构建的。对于实际测试者来说,只需按照要求准备样品,并在纳米压痕仪上设置好相关参数进行测试,即可直接获得所需的弹性模量和硬度数值。

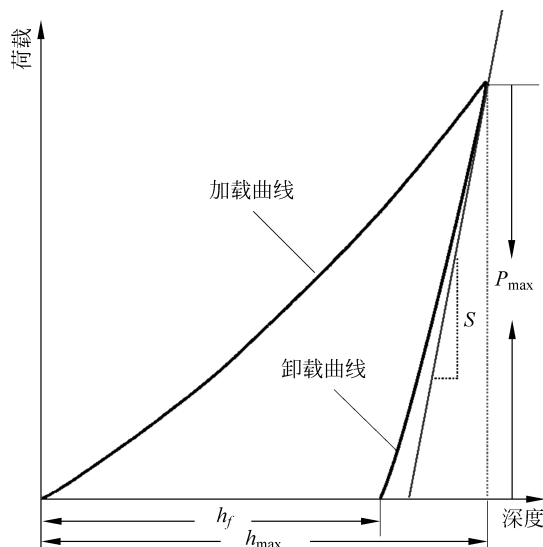


图1 纳米压痕荷载-位移曲线示意图

如上述所,纳米压痕实验数据的处理涉及两个关键环节:一是通过分析荷载-位移曲线卸载部分获得初始卸载斜率作为接触刚度 S ,进而计算出接触深度 h_c ;二是采用标准样品标定面积函数 A 。这两个关键环节中的任何一个如果引入较大的误差都将最终影响到弹性模量和硬度测试结果的可靠性。对纳米压痕实验数据测试精度产生影响的仪器自身因素,除了荷载传感器、位移传感器

等量测组件的精度外,还有在操作过程中出现的一些问题,如接触零点、机架柔度及热漂移等。

纳米压痕实验数据的处理涉及两个关键环节:一是通过分析载荷-位移曲线的卸载部分,获得初始卸载斜率作为接触刚度 S ,进而计算出接触深度 h_c ;二是采用标准样品标定面积函数 A 。这两个关键环节中的任何一个如果引入较大的误差,都将最终影响弹性模量和硬度测试结果的可靠性。除了载荷传感器、位移传感器等量测组件的精度外,影响纳米压痕实验数据测试精度的仪器自身因素还包括操作过程中可能出现的一些问题,如接触零点、机架柔度、热漂移等。近期,笔者基于 Hertzian 模型提出了一种刚度校正方法,特别是在较浅压入深度时,这种方法可以有效确定测量样品硬度值^[15]。

2 实验和教学效果分析

2.1 恒定加载速率模式

基于纳米压痕实验,图 2 为 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 非晶合金恒定加载速率下的加载函数。

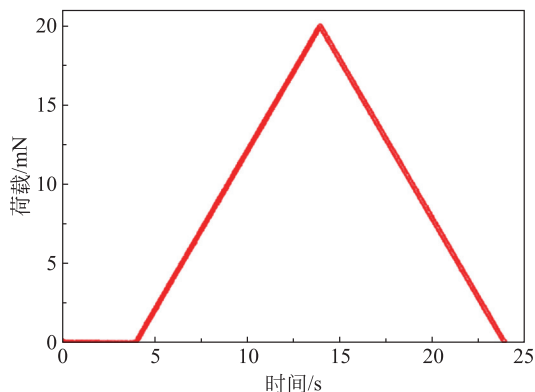


图 2 纳米压痕实验加载函数

图 3(a)为其对应的荷载-位移($P-h$)曲线,学生可以直观地感受到纳米压痕过程中荷载随时间及压入深度的演化,从而加深对非晶合金力学行为的理解,如弹性和塑性,特别是在纳米尺度下,非晶合金的力学行为与宏观尺度存在显著差异。 $P-h$ 曲线中表现出一个位移突进(Pop-in)现象。在材料的纳米压痕力学行为研究中,Pop-in 是一个常被提及的现象,指的是在加载过程中,某一载荷水平下位移突然增大。通常,在首次 Pop-in 位置处 $P-h$ 曲线开始偏离 Hertzian 弹性接触力学

的预期关系^[15]

$$P = \frac{4}{3} E_r \sqrt{R} h^{3/2} \quad (5)$$

其中, R 表示压头半径。

这种偏离现象表明,材料在第一次 Pop-in 之前的变形是纯弹性的。图 3(b)给出了(a)中黑色箭头所指示的 Pop-in 事件的放大视图。在非晶合金中,这种位移突进现象通常被认为与材料内部剪切带的运动有关。位移突进现象可以直观地理解为:当压头受力压入材料表面时,压头在某一位移处遇到一个变形阻力较小的区域,从而导致位移变化速率增大,而载荷则仍按照预设速率增加;由于载荷增加速率赶不上位移变化速率,载荷-位移关系曲线中会出现位移突进现象。基于这一理解,不难得出结论:位移突进是否发生及其程度应与加载速率有关,这一推测已通过实验得到验证。采用不同加载速率对非晶合金进行纳米压痕实验的结果表明:在较高加载速率下, $P-h$ 曲线基本很难观察到位移突进现象,而随着加载速率降低,位移突进现象逐渐出现,并且突进的次数也随着加载速率的降低而增多。

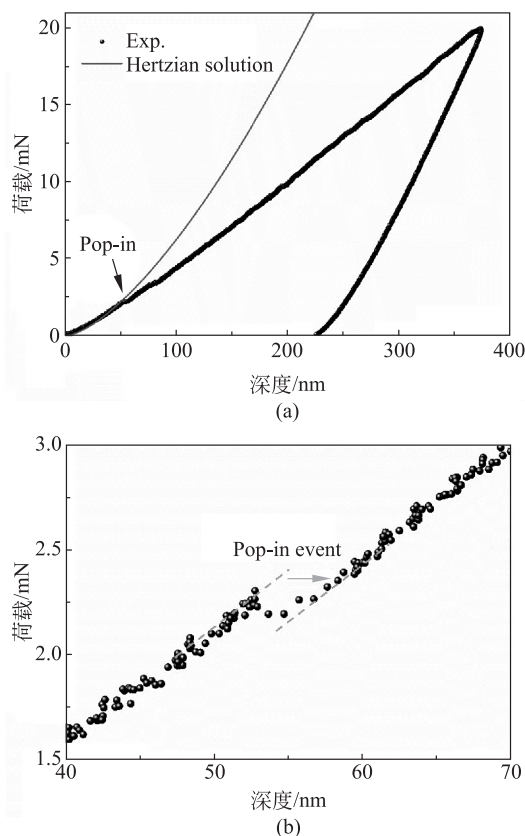


图 3 纳米压痕实验数据

(a) 纳米压痕荷载位移曲线; (b) Pop-in 事件放大视图

2.2 纳米压痕蠕变实验

图4为纳米压痕蠕变实验所设置的加载函数,为使學生充分理解非晶合金弹塑性行为,笔者设置了多阶段不同荷载下蠕变实验。图5为对应荷载位移曲线,可清晰地观察到多次加载、保载和卸载过程。为使學生进一步理解蠕变过程,图6为蠕变过程中,压入深度随保载时间的演化规律。可以看到,不同最大荷载下蠕变深度呈现出的异同,随着保载时间加长,蠕变深度增大。荷载较大时,蠕变深度更大,结果符合教学实验预期。

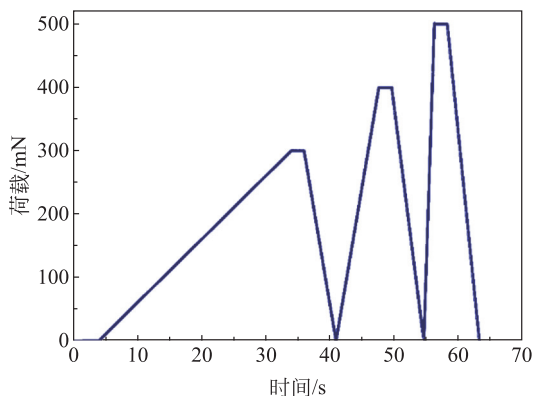


图4 纳米压痕蠕变实验加载函数

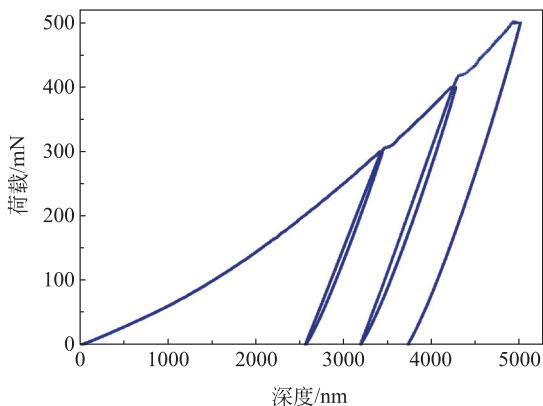


图5 纳米压痕蠕变过程荷载位移曲线

对于准静态压痕试验而言,在峰值荷载 $P_{\max}$ 不变的情况下,可变的实验参数包括加载时间、保载时间和卸载时间。这些实验数据的选择可以在最大程度上减小与时间有关的形变过程对测试结果的影响。与时间有关的形变过程一般包括滞弹性、蠕变等。滞弹性是相对于弹性而言的。理想的弹性体其发生弹性变形的速度非常快,因此,认为在加载过程中应力和应变是同步的,二者间存在单调函数关系且服从胡克定律。但是真实材料

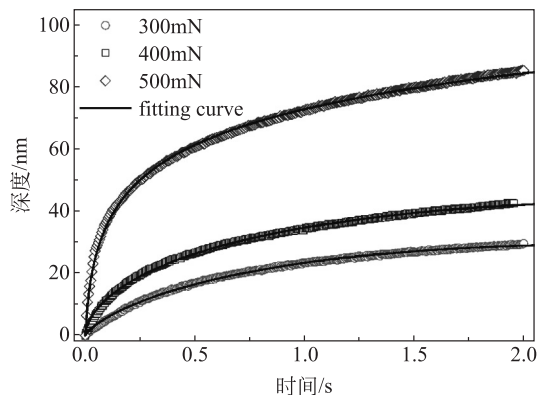


图6 纳米压痕蠕变位移随保载时间演化曲线,
图中实线由公式(6)拟合

中一般都存在有应变落后于应力的现象:在载保持不变的情况下,材料的弹性变形随着时间的延续而缓慢增长;在移除外加载荷后,这种变形不能立即恢复,而是在一段时间内缓慢恢复。蠕变则是材料在恒定载荷作用下,应变随时间延续而持续增大的现象。蠕变形变与滞弹性形变不同:去除外力后,后者可以缓慢恢复,而前者则不能恢复。也就是说,蠕变是一种不可逆形变,塑性形变也是一种不可逆形变。蠕变与塑性形变的区别在于对时间的依赖性:蠕变形变随时间延续而增大,塑性形变则可以视作是一个与时间无关的过程。

通常情况下,在恒定载荷作用下发生的蠕变形变可以大致分为四个阶段^[14]。首先是蠕变的起始阶段,在此阶段,材料在外力作用下发生瞬时弹性形变;如果外力超过材料的弹性极限,则会发生部分塑性形变,这一过程可以近似看作是瞬时发生的。经历了极短暂的起始阶段后,蠕变进入到应变速率随时间不断减小的减速蠕变阶段。减速蠕变阶段通常持续时间较短,很快过渡到稳态蠕变阶段。在稳态蠕变阶段,应变速率几乎保持恒定。随着变形量逐渐增加,当达到某一极限值时,蠕变进入加速蠕变阶段。在加速蠕变阶段,应变速率迅速增大,最终导致材料断裂。

从图6所示的曲线上可明显地看到减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段的存在。由于保载时间仅有2s,因此,这些压痕蠕变试验并没有观察到加速蠕变阶段。蠕变曲线可通过经验公式进行拟合^[16]

$$h = h_0 + at^k + bt \quad (6)$$

其中, h_0 为初始深度, a, b, k 为拟合参数, t 为蠕变时间。如图6黑色实线所示,经典蠕变经验公

式可很好预测非晶合金的蠕变过程,满足理论和实验教学要求。

2.3 纳米压痕连续刚度模式

正如 2.1 与 2.2 节所采用的方法,纳米压痕实验中采用较多的加载方式通常是准静态加载方式,即采用一定的加载速率对压头施加特定加载速率的载荷函数至预先确定的最大值 $P_{\max}$,而后以设定的卸载速率卸载。采用这一加载卸载方式进行的纳米压痕试验通常称为准静态纳米压痕试验(Quasi-Static Nanoindentation Tests)。此外,也可以在准静态加载信号上叠加一个相对较高频率(当前测试采用较为常用的频率为 45Hz)的简谐力,通过测量压头的简谐响应实现接触刚度 S 的连续测定。这一测试方法称为连续刚度测试技术(Continuous Stiffness Measurements, CSM)。在连续刚度法压痕实验中接触刚度一般表示为^[16]

$$S = \left[\frac{1}{\frac{P_o}{H_{os}} \cos(\varphi) - (K_s - m\omega^2)} - \frac{1}{K_f} \right]^{-1} \quad (7)$$

其中, K_s 和 K_f 分别表示弹簧和框架刚度, m 是压头质量, P_o 和 h_{os} 分别是叠加正弦载荷和位移振幅。载荷和位移的角频率等于 ω , 位移滞后于载荷的相移为 φ 。

图 7(a)为恒定加载速率 $\dot{P}/P=0.25s^{-1}$ 加载函数,图 7(b)为对应 $P-h$ 曲线。因为当前测试是在 45Hz 的动态振荡频率下测量的,接触刚度是几分之一秒内确的,在此期间热漂移可以忽略不计(当前测试的热漂移率为 $\sim 0.05nm/s$)。

图 8 为接触刚度随压入深度变化的规律。在连续刚度压痕测试的加载部分,能够直接测量动态接触刚度,并且对热漂移有较低的敏感性。这使得研究者在测试中可准确地观察到材料在小体积变形下的响应,有助于提高对材料行为的理解和分析。

我们可以通过纳米压痕测试来评估塑性变形样品的纳米力学响应。采用连续刚度测量法记录整个压痕深度的力学特性。图 9 为在样品压痕最大深度为 $2\mu m$ 时,弹性模量和硬度随压入深度演化规律。可以观察到,在非常浅的深度处,纳米压痕结果呈现出明显的变化。这一现象是可以理解的,因为硬度是与测试方法及载荷相关的物理量。测试载荷对硬度结果的影响通常较为显著,这种

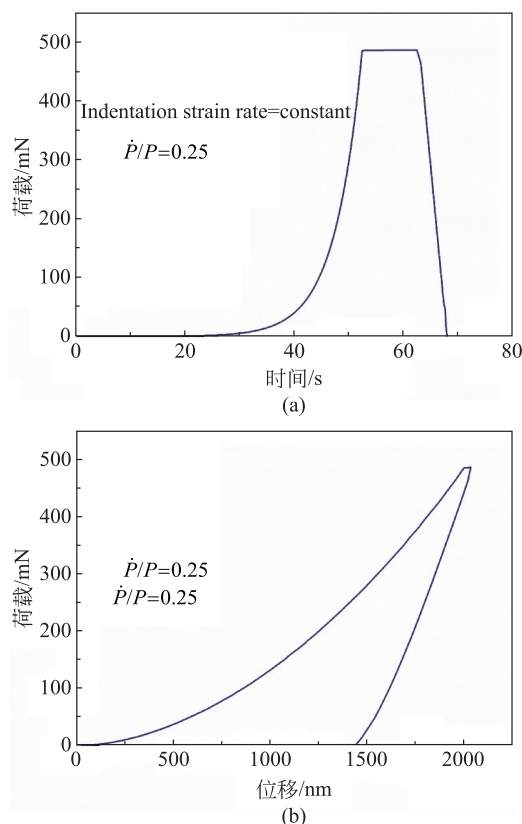


图 7 纳米压痕实验数据

(a) 纳米压痕连续刚度模式加载函数; (b) 对应 $P-h$ 曲线

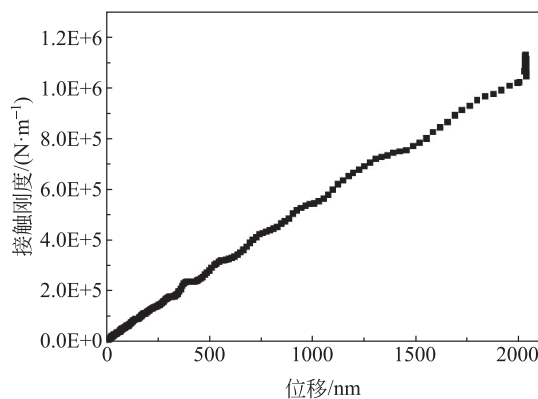


图 8 接触刚度随压入深度演化规律

影响被称为硬度的压痕尺寸效应(Indentation Size Effect)^[16]。通常情况下,金属材料的硬度压痕尺寸效应比陶瓷、玻璃等非金属材料更为显著。在脆性材料压痕过程中,表面会发生较为严重的沉陷,最终形成的残余压痕形状如图 10 所示。从扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope)图像中可以看出,压痕周围出现了明显的剪切带,这表明在压痕过程中非晶合金经历了塑性

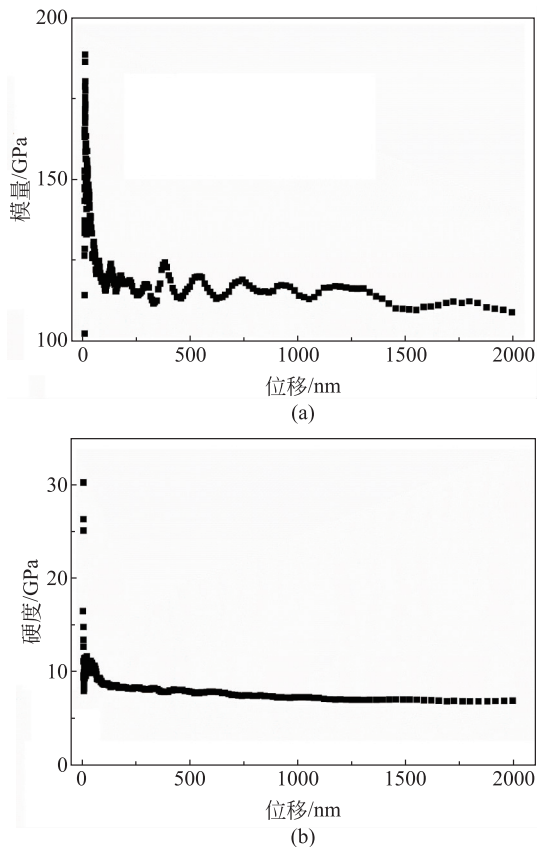


图9 纳米压痕实验数据

(a) 弹性模量; (b) 硬度随压痕深度的变化

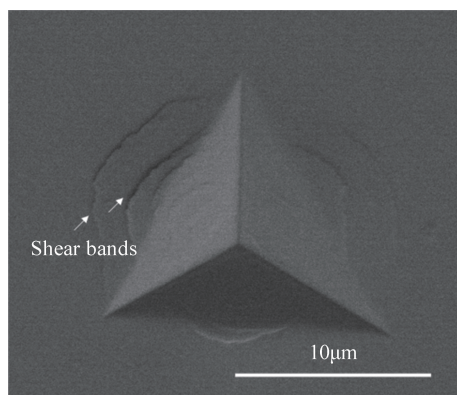


图10 压痕形貌

箭头所示处为剪切带

形变^[17]。

结合本文实验测试与初步结果,对纳米压痕测试课堂教学进行了课程内容、仪器使用以及数据分析方面的详细介绍。目的是让选修学生充分了解纳米压痕测试手段在材料微纳力学性能研究的重要作用。总体而言,该课程充分发挥了纳米压痕实验方法的优势,达到了理论与实践相结合、

深化理论应用、促进学生理解的教学目标。需要注意的是,纳米压痕方法是一种可精确测量材料力学性能的手段,将其引入实验教学,对于开展先进结构材料力学性能测量可与国家重大工程背景结合,不仅可以加深学生对理论课程的理解,也可以拓展学生视野,培养学生科研兴趣,创新思维,加强学生的动手能力和解决科研问题的实践能力。

3 结语

本文探讨了基于纳米压痕实验的力学实验教学改革,旨在提升工科基础教学的创新性和实践性。通过对非晶合金进行纳米压痕实验,测量其弹塑性力学性能,不仅丰富了教学内容,还拓宽了学生的知识视野,增强了他们的创新实践能力。纳米压痕技术作为一种先进的测量手段,能够对非晶固体的力学行为进行精细化测量,帮助学生从物理角度深入理解非晶固体的力学特性。这种技术的引入,使得实验教学更加贴近现代科学研究的前沿,增强了学生对材料力学行为的直观认识。

此外,将现代先进设备测量技术和功能材料引入实验教学,不仅提高了学生的学习兴趣,还加深了他们对理论知识的理解。通过实际操作和数据分析,学生能够更好地掌握科学研究的基本方法,培养了他们的科研意识和实践动手能力。总的来说,本文提出的教学改革方案符合工科教育的创新要求,通过引入纳米压痕实验等现代技术手段,有效提升了学生的综合素质和科研能力,为未来的工程实践和科学研究奠定了坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] 李银银, 蒋玮. 基于纳米压痕的激光修复层晶体材料常数反演方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 97-104.
LI Y Y, JIANG W. Extracting Crystal Parameters of Laser Repaired Layer by Nanoindentation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 97-104. (in Chinese)
- [2] 张泰华, 杨业敏. 纳米硬度技术的发展和应[J]. 力学进展, 2002, 32(3): 349-364.
HANG T H, YANG Y M. Development and application of nano-hardness technology [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(3): 349-364. (in Chinese)
- [3] 张泰华, 杨业敏, 赵亚博, 等. MEMS 材料力学性能的测试技术[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 545-562.
ZHANG T H, YANG Y M, ZHAO Y P, et al. Measurement of mechanical properties of mems materials[J]. Advances in

- Mechanics, 2002, 32(4): 545-562. (in Chinese)
- [4] T Rouxel, J I Jang, U Ramamurty. Indentation of glasses [J]. Progress in Materials Science, 2021; 121: 100834
- [5] 乔吉超, 张浪淳, 童钰, 等. 基于微观结构非均匀性的非晶合金力学行为[J]. 力学进展, 2022, 52(1): 117-152
QIAO J C, ZHANG L T, TONG Y, et al. Mechanical properties of amorphous alloys: In the framework of the microstructure heterogeneity [J]. Advances in Mechanics, 2022, 52(1): 117-152. (in Chinese)
- [6] 郝奇, 乔吉超, Jean-Marc Pelletier. 锆基非晶合金的动态弛豫机制和高温流变行为[J]. 力学学报, 2020, 52(2): 360-368.
HAO Q, QIAO J C, PELLETIER J M. Dynamic relaxation characteristics and high temperature flow behavior of Zr-based bulk metallic glass[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(2): 360-368. (in Chinese)
- [7] 关丽, 王淑芳. 物理学类课程思政建设成效评价体系的思考[J]. 物理与工程, 2022, 32(1): 179-183.
GUAN L, WANG S F. Thinking on the evaluation system of ideological and political education in physic scourses[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 179-183. (in Chinese)
- [8] 李晨, 孙伟, 唐静静, 等. 基础力学课程教学设计浅析[J]. 力学与实践, 2022, 44(1): 218-224.
LI C, SUN W, TANG J J, et al. Analysis on teaching design of elementary mechanics[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1): 218-224. (in Chinese)
- [9] 王学德, 陈少松, 胡常莉, 等. 大类招生背景下能源动力类本科生流体力学跨专业教学的探索与实践[J]. 力学与实践, 2021, 43(2): 278-284.
WANG X D, CHEN S D, HU C L, et al. Interdisciplinary teaching of fluid mechanics for energy and power undergraduates in view of major category enrollment mode[J]. Mechanics in Engineering, 2021, 43(2): 278-284. (in Chinese)
- [10] 胡海岩. 力学教育的几个问题及其对策[J]. 力学与实践, 2020, 42(5): 598-602
- HU H Y. Some problems and their solutions in mechanics education[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(5): 598-602. (in Chinese)
- [11] 白莉, 刘玉泉, 倪玲英, 等. 融入创新性试验的流体力学研究性课程[J]. 力学与实践, 2018, 40(1): 89-92
BAI L, LIU Y Q, NI L Y, et al. Integrating innovative experiments into fluid mechanics research-based course[J]. Mechanics in Engineering, 2018, 40(1): 89-92. (in Chinese)
- [12] 叶贵根, 薛世峰, 戴兰宏. 高速切削实验平台在力学实验教学中的应用[J]. 实验力学, 2016, 31(5): 715-722
YE G G, XUE S F, DAI L H. On the application of high speed cutting experimental platform in mechanics experiment teaching[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5): 715-722. (in Chinese)
- [13] 沙毅, 李其朋, 李勇. 流体力学计算机仿真实验教学的开发与设计[J]. 实验力学, 2018, 33(4): 655-664
SHA Y, LI Q P, LI Y. On the development and design in mmputer simulation experiment teaching of fluid mechanics [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4): 2655-661. (in Chinese)
- [14] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [15] TAO K, HE X, LU H, et al. Model for the onset of plasticity and hardness in bulk metallic glasses investigated by nanoindentation with a spherical indenter[J]. International Journal of Solids and Structures, 2025, 310: 113238.
- [16] TAO K, KHONIK V A, QIAO J C. Indentation creep dynamics in metallic glasses under different structural states [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 240: 107941.
- [17] TAO K, LI F, LIU Y, et al. Distinct avalanche dynamics detected in metallic glasses with high energy state revealing the crack-like shear banding mechanism[J]. International Journal of Plasticity, 2024, 174: 103873.