

SPM 技术用于高熵薄膜在微观尺度上的摩擦学行为研究

SPM-034

摘要：高熵合金薄膜凭借其独特的成分设计和优异的力学性能，在摩擦学领域展现出巨大潜力。然而，传统表征手段难以精确解析其微观摩擦机制，制约了材料性能的进一步优化。扫描探针显微镜（SPM）作为一种强大的纳米表征工具，能够在微观尺度上实时、原位地研究材料表面的摩擦学行为，为揭示高熵金属薄膜的摩擦机制提供了新的视角。本文将利用 SPM 技术，研究 Cu-Ni-Al 薄膜在微观尺度上的微观摩擦行为，阐明其摩擦机制，为设计高性能高熵合金薄膜提供理论指导。

关键词：Cu-Ni-Al 高熵薄膜 摩擦学行为 SPM

技术特点：

- ❖ 可以快速准确的对样品的表面形貌进行表征，并可同时获得其摩擦力分布图。
- ❖ 通过仪器自带的软件可以将二维形貌图转化为 3D 图，可以更直观观察样品表面的形貌。

与传统合金相比，高熵合金薄膜由多种主元元素以近似等原子比构成，具有高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和“鸡尾酒”效应等特性，这些特性赋予了材料优异的力学性能、耐腐蚀性和耐磨性，使其在航空航天、精密机械、电子信息等领域具有广阔的应用前景。然而，高熵合金薄膜的摩擦学行为涉及复杂的界面相互作用和微观结构演变，传统表征手段难以精确解析其微观摩擦机制，制约了材料性能的进一步优化。

扫描探针显微镜（SPM）作为一种强大的纳米表征工具，能够在微观尺度上实时、原位地研究材料表面的摩擦学行为，为揭示高熵金属薄膜的摩擦机

制提供了新的视角。SPM 通过探针与样品表面的相互作用，可以精确测量纳米尺度下的摩擦力、粘附力、表面形貌等信息，并结合多种成像模式（如接触模式、轻敲模式、横向力模式等）和功能模块（如摩擦力显微镜、静电力显微镜等），实现对材料表面力学、电学、磁学等性能的多维度表征。近年来，SPM 技术在高熵合金薄膜的微观摩擦行为研究中取得了显著进展，为理解材料的摩擦磨损机制、优化材料性能提供了重要依据。

本文将利用 SPM 技术，对高熵金属薄膜在 Cu-Ni-Al 薄膜在微观尺度上的微观摩擦行为进行研究，为设计高性能高熵合金薄膜提供理论指导。

实验部分

1.1 仪器

岛津扫描探针显微镜 SPM-9700HT



图 1 扫描探针显微镜 SPM-9700HT（带环境控制舱）

1.2 测试条件

功能模式：摩擦力（侧向力）模式 扫描器：10 μm x 10 μm x 1 μm
 探针：0.2 N/m （扫描范围、深度）
 像素：512 x 512

1.3 样品及前处理

直接用双面胶将三个生长有 Cu-Ni-Al 高熵薄膜的固体基底分别固定到不锈钢片样品托上，测试面朝上，如图 2 所示。三个测试样品的具体信息如表 1 所示，三个样品的命名分别为 TF1、TF2、TF3。

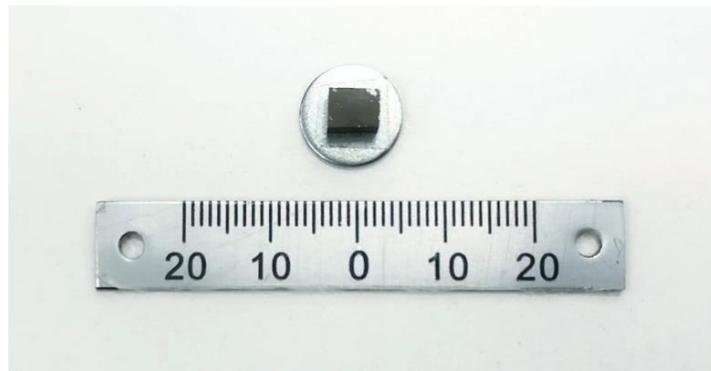


图 2 固定后的样品图片

表 1 样品的具体信息

衬底温度	化学成分 (at. %)			厚度 (μm)	命名
	Cu	Ni	Al		
RT	53.6	35.5	10.9	0.84	TF1
573K	65.4	26.9	7.7	2.88	TF2
773K	58.0	32.6	9.4	4.5	TF3

■ 结果与讨论

使用 SPM-9700HT 的摩擦力（侧向力）模式分别对样品进行测试，可以同时得到测试区域内的表面形貌和摩擦系数分布图，测试结果如图 3 所示。使用仪器配套的软件可以快速将二维形貌图转化为三维形貌图，可以直观展示薄膜表面的微观形貌，包括颗粒尺寸、颗粒间隙等微观结构特征。根据已有研究表明，薄膜的微观结构（如颗粒尺寸和分布）对其摩擦系数有显著影响，例如，颗粒间隙区域的摩擦系数波动较大，而颗粒顶部区域的摩擦系数相对稳定且更能反映材料的内在摩擦特性。

通过对比三个样品（TF1、TF2、TF3）的摩擦系数图和形貌图，发现薄膜的内在摩擦系数与其成分（尤其是 Ni 和 Al 含量）相关，Ni 和 Al 含量越高，内在摩擦系数越低。该测试结果支持了关于 Cu-Ni-Al 薄膜摩擦机制的假设。

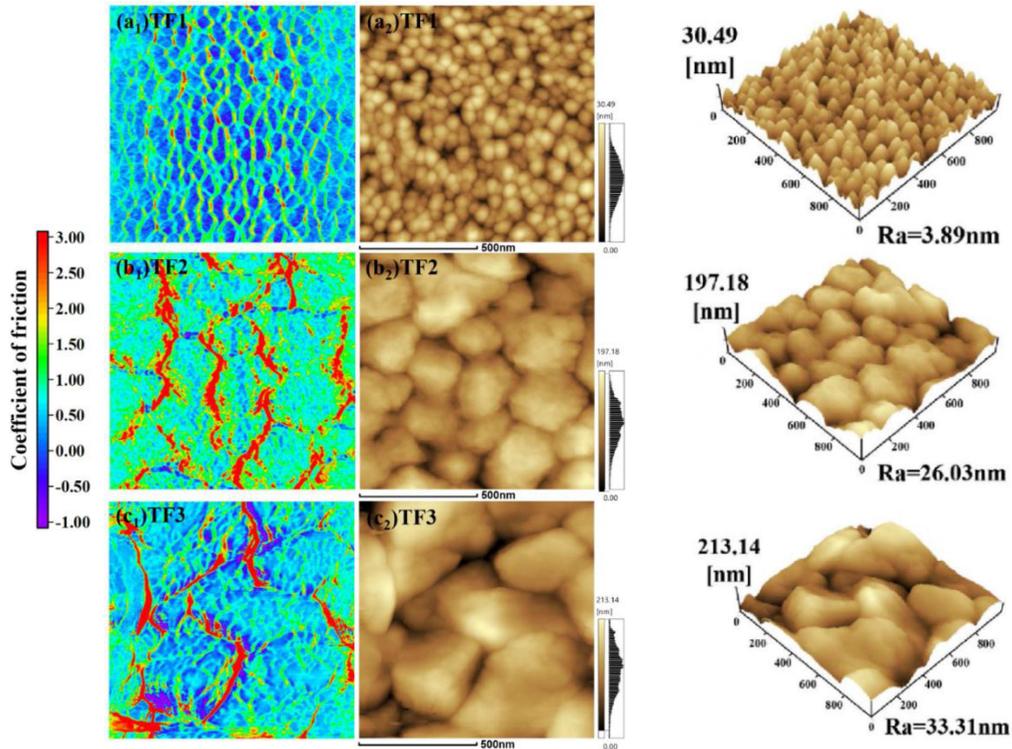


图3 三个样品的测试数据图：摩擦力分布图（左）、二维形貌图（中）和三维形貌图（右）

■ 结论

使用岛津 SPM-9700HT 对不同样品进行观测，通过微观摩擦测试和表面形貌分析，揭示 Cu-Ni-Al 薄膜在微观尺度上的摩擦学行为，补充宏观摩擦测试结果，并验证薄膜的微观摩擦机制。它为研究人员提供了一种从微观角度理解薄膜摩擦特性的工具，有助于全面评估薄膜在不同温度和载荷条件下的摩擦学性能。

岛津应用云

