

电场下悬浮六方氮化硼摩擦特性的研究

陈星源 黄瑶 彭倚天

Tribological properties of suspended hexagonal boron nitride under electric field

Chen Xing-Yuan Huang Yao Peng Yi-Tian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 166801 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210386

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210386>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

悬浮石墨烯摩擦特性

Friction properties of suspended graphene

物理学报. 2021, 70(8): 086801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201796>

高温高压下立方氮化硼和六方氮化硼的结构、力学、热力学、电学以及光学性质的第一性原理研究

First-principles study of structural, elastic, thermodynamic, electronic and optical properties of cubic boron nitride and hexagonal boron nitride at high temperature and high pressure

物理学报. 2019, 68(7): 077102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182030>

六方氮化硼层间气泡制备与压强研究

Synthesis and pressure study of bubbles in hexagonal boron nitride interlayer

物理学报. 2021, 70(6): 069801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201482>

六方氮化硼表面石墨烯纳米带生长与物性研究

Synthesis and characterization of graphene nanoribbons on hexagonal boron nitride

物理学报. 2019, 68(16): 168102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191036>

基于原子力显微镜的石墨烯表面图案化摩擦调控

Controllable nano-friction of graphene surface by fabricating nanoscale patterning based on atomic force microscopy

物理学报. 2020, 69(10): 106801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200124>

基于二维六方氮化硼材料的光子晶体非对称传输异质结构设计

Design of asymmetric transmission of photonic crystal heterostructure based on two-dimensional hexagonal boron nitride material

物理学报. 2021, 70(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200741>

电场下悬浮六方氮化硼摩擦特性的研究*

陈星源 黄瑶[†] 彭倚天

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

(2021年2月28日收到; 2021年4月15日收到修改稿)

六方氮化硼 (hexagonal boron nitride, h-BN) 因其良好的润滑性和绝缘性, 在微纳机电系统中有巨大的应用潜力. 本文通过基底刻蚀的工艺, 在 SiO_2/Si 基底上制备了微孔阵列, 然后将 h-BN 转移到微孔基底上形成悬浮结构, 利用原子力显微镜研究电场对悬浮 h-BN 摩擦特性的影响. 结果表明: 悬浮状态的 h-BN 的表面摩擦力小于有基底支撑的 h-BN 的表面摩擦力, 原因是更大的面内拉伸削弱了褶皱效应. 电场作用下, 针尖与 h-BN 之间的静电相互作用增强, 悬浮 h-BN 表面的摩擦力随偏压的增大而增大, 且正偏压的影响大于负偏压的影响. 同时, 在电场下针尖在悬浮 h-BN 表面的黏滑行为出现单步黏滑向多步黏滑的转变. 此外, 与有基底支撑的 h-BN 相比, 悬浮状态的 h-BN 受电场的影响更大, 这是由于针尖与基底界面距离的缩小以及基底氧化层的缺失导致静电力增强. 本文提出了通过施加外电场来调节悬浮 h-BN 表面摩擦的方法, 对研究二维材料摩擦特性提供了一定的理论指导.

关键词: 摩擦力, 悬浮六方氮化硼, 原子力显微镜, 静电力

PACS: 68.35.Af, 68.55.-a, 68.37.Ps, 68.35.Np

DOI: 10.7498/aps.70.20210386

1 引言

精密化制造是现代制造业的一个重要的发展方向, 而微纳机电系统由于尺寸的急剧缩小, 比表面积更大, 受黏附和摩擦磨损的影响会更严重^[1]. 传统的液体润滑剂显然不再适用于解决微纳尺度下的润滑问题, 而二维材料由于具有原子级厚度以及优异的润滑性表现出巨大的应用潜力. 其中, 六方氮化硼 (hexagonal boron nitride, h-BN) 具有优异的绝缘和机械特性, 越来越受到关注. 因此, 研究 h-BN 的摩擦特性, 对于推动微纳机电系统的发展具有重要意义^[2-5].

h-BN 层内是由氮、硼原子交替相连形成六边形的网状结构, 而层间依靠范德华力相连接^[6,7]. 这样的晶体结构与石墨烯非常相似, 因此 h-BN 也被称为“白石墨”. 与石墨烯不同, h-BN 层间是 ABA

堆叠方式, 属于宽带隙绝缘体^[8]. 二维材料的研究和应用通常是置于光滑的基底表面, 因此研究基底因素对于二维材料摩擦特性的影响是十分必要的. 研究发现当 h-BN 放置在二氧化硅上时, 其表面摩擦力会表现出和石墨烯一样厚度依赖性. 由于其具有良好的柔性, 摩擦过程中的褶皱变形会影响摩擦力的大小^[9]. 这一现象在原子级光滑的云母基底上无法重现, 因为云母表面更高的黏附作用抑制了二维材料的褶皱变形. 在软基底上的摩擦会产生更大的弹性变形, 这会增强二维材料的褶皱效应, 进而增大摩擦力^[10]. 此外, 微纳机电系统中常有电场存在, 电场也是影响二维材料摩擦的一个重要因素. 在施加电场的条件下研究硅表面的纳米摩擦行为, 发现摩擦力随着静电相互作用的增强而增大, 但是由于其表面较大的粗糙度, 摩擦力变化地较为不稳定^[11]. 通过给针尖施加负电压可以调控石墨烯表面的摩擦力, 而较大的电压会造成石墨烯表面氧

* 国家自然科学基金 (批准号: 51905089) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2232020D-31) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: huanghuang36@dhnu.edu.cn

化^[12]. 综上所述, 基底和外加电场的确实会影响二维材料表面的摩擦. 考虑到 h-BN 同时具有良好的润滑性与绝缘性, 在电场下不易发生氧化和短路的现象, 研究电场下悬浮 h-BN 的摩擦特性对于发掘其应用潜力具有重要意义.

本文通过对基底氧化层进行接触式光刻和湿法刻蚀处理, 制备了微孔阵列的 SiO₂/Si 基底, 并将 h-BN 转移到微孔上形成悬浮的 h-BN 样品. 利用原子力显微镜研究悬浮的 h-BN 的摩擦特性. 通过给 SiO₂/Si 基底施加直流电压, 研究在不同电场下 h-BN 表面摩擦力的变化规律, 同时测量其表面的黏附力和黏滑特性, 并分析电场对 h-BN 表面摩擦行为的影响机理. 另外, 对比悬浮状态和有基底支撑的 h-BN 在电场下的摩擦差异, 对机理进行进一步的探讨. 本文提出了一种通过施加电场来调节二维材料表面摩擦的新方法, 对于二维材料的研究和应用具有良好的推动作用.

2 实验部分

实验使用的基底为 P 型掺杂的硅基底, 表面存在 SiO₂ 氧化层. SiO₂/Si 基底在丙酮溶液、乙醇溶液和去离子水中各超声 20 min, 再用氮气干燥. 图 1(a) 中展示的光刻机为中国科学院光电技术研究所生产的 URE-2000/25L 型紫外深度光刻机. 采用接触式光刻与湿法刻蚀工艺, 在基底的氧化层表面刻蚀出排布均匀的圆形孔洞, 孔间距为 10 μm, 半径为 2 μm, 如图 1(b) 所示. 实验所用的 h-BN 晶体购买于荷兰 HQ Graphene 公司. 采用机械剥离的方法将 h-BN 晶体转移至微孔阵列的基底上制备成悬浮 h-BN 样品. 使用美国 Asylum Research 公司生产的 MFP-3D 型原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 对 h-BN 和微孔的形貌进行表征, 使用保加利亚 BudgetSensors 公司生产的 Multi75Al-G 型号的硅探针. 采用非接触法对探针进行法向和横向标定^[13]. 测量摩擦的扫描范围为 500 nm × 500 nm, 扫描频率为 1 Hz, 摩擦力的取值为 3 次连续线扫描的平均值. SiO₂/Si 基底放置在导电铝箔上, 由 AFM 的内置电源提供 -10—+10 V 的直流电压. 利用 AFM 的内置软件调节电场的强度和方向, 研究电场对悬浮 h-BN 纳米摩擦的影响. AFM 实验环境的温度为 20—30 °C, 相对湿度为 40%—50% RH.

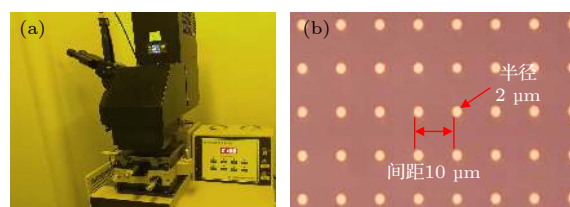


图 1 制备微孔阵列硅片的设备及试样 (a) 紫外深度光刻机; (b) 微孔阵列硅片的光学图

Fig. 1. Equipment for preparing micro-hole array silicon wafer and sample: (a) Ultraviolet depth lithography machine; (b) optical image of micro-hole array silicon wafer.

3 结果与讨论

3.1 悬浮 h-BN 的摩擦特性

h-BN 晶体经机械剥离后覆盖在微孔阵列的基底上, 在光学显微镜下确定悬浮状态的 h-BN 的位置. 图 2(a) 显示了样品的光学图, 红色方框处所对应的 AFM 形貌图如图 2(b) 所示, 可以看出左下角绿色虚线圈内的微孔上覆盖了 h-BN. h-BN 的形貌表征是在 AFM 的轻敲模式下进行的, 扫描范围为 20 μm × 20 μm, 扫描频率为 1 Hz. 从图 2(b) 的插图中可知红色虚横截线处的 h-BN 的高度为 23 nm. 由于 h-BN 样品与基底贴合并非完全紧密, 实验测得的样品厚度可能会略大于理论值^[14].

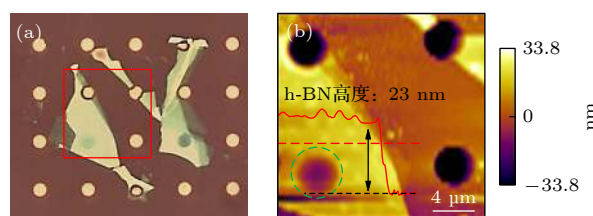


图 2 样品的光学图和形貌图 (a) 微孔基底上 h-BN 的光学图; (b) 微孔基底上 h-BN 的 AFM 形貌图, 插图为 h-BN 的高度轮廓图

Fig. 2. Optical image and topography of the sample: (a) Optical image of h-BN on microporous substrate; (b) AFM topography of h-BN on microporous substrate, the illustration shows the height profile of h-BN.

为了确定 h-BN 的悬浮状态, 首先对没有 h-BN 覆盖的微孔进行了形貌测量, 形貌图如图 3(a) 所示. 红色横截线处所对应的高度轮廓如图 3(b) 所示, 微孔的直径为 4 μm, 深度为 120 nm, 表面形状工整, 底部平坦. 图 3(c) 为有 h-BN 覆盖的微孔的 AFM 形貌表征图. 绿色横截线处所对应的高度轮廓图如图 3(d) 所示, 发现 h-BN 的最大下落高度为 25 nm, 远小于微孔自身的深度. 该微孔上方

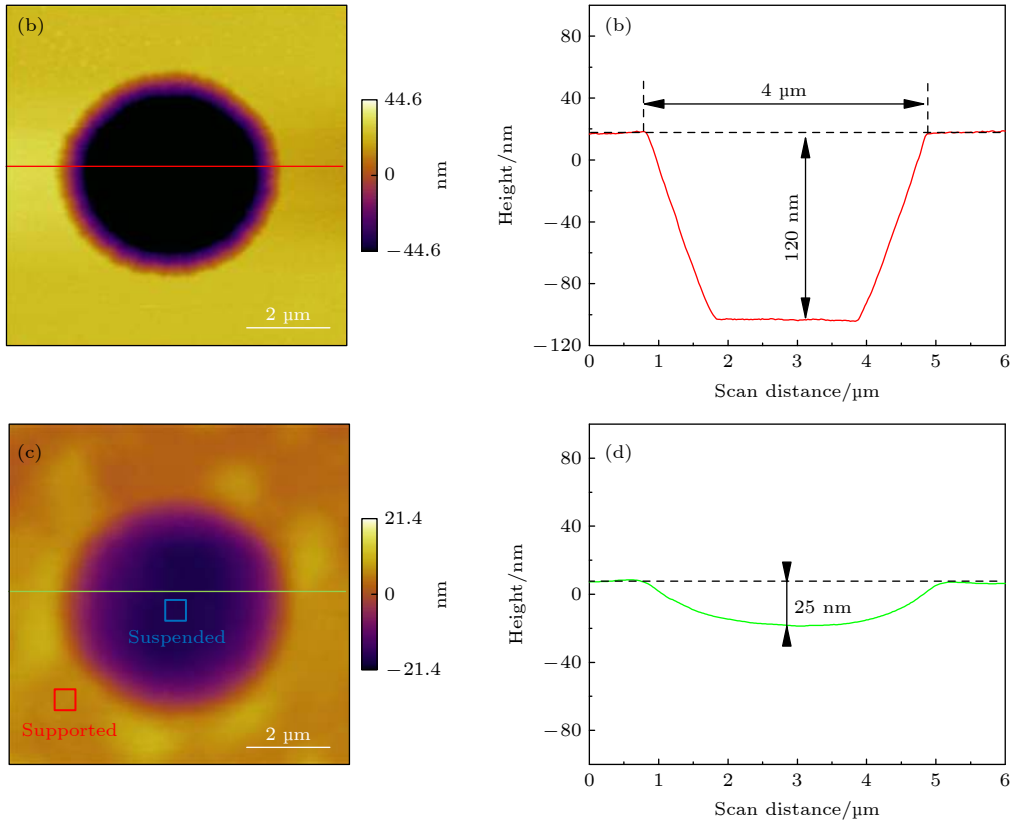


图 3 微孔和悬浮 h-BN 的形貌及高度轮廓图 (a) 微孔的 AFM 形貌图; (b) 微孔的高度轮廓图; (c) 悬浮 h-BN 的 AFM 形貌图; (d) 悬浮 h-BN 的高度轮廓图

Fig. 3. Topography and height profile of microporous and suspended h-BN: (a) AFM topography of micropores; (b) height profile of micropores; (c) AFM topography of suspended h-BN; (d) height profile of suspended h-BN.

的 h-BN 虽略有下落, 但并不足以触及微孔底部, 因此该处的 h-BN 处于悬浮状态. 相较于 $2\ \mu\text{m}$ 的微孔半径, h-BN 在微孔上的下落高度非常小, 通过正切函数计算出的倾斜角仅为 0.0125° . 同时考虑到测量摩擦选取的实验区域为微孔上方悬浮 h-BN 的中心位置, 倾斜角相较于两边更小, 所以该处的悬浮 h-BN 表面是平坦的. 为了保证摩擦测量区域的平整光滑, 在待测区域进行了粗糙度测量, 全局粗糙度的均方根 (RMS) 维持在 $100\ \text{pm}$ 上下, 处于实验的合理区间内, 符合摩擦实验表面平整的要求.

为了研究悬浮状态对 h-BN 摩擦性质的影响, 在有基底支撑 (图 3(c) 中红方框处) 和悬浮状态 (图 3(c) 中蓝方框处) 的 h-BN 表面分别进行了变载荷摩擦实验. 图 4(a) 中黑色和红色的直线分别表示悬浮状态和支撑状态 h-BN 的摩擦力-载荷关系拟合线, 可以看出悬浮 h-BN 的摩擦力小于有基底支撑处的摩擦力且摩擦系数基本没有变化. 在 $10\ \text{nN}$ 的载荷下, 两者的摩擦力差值约为 $0.069\ \text{nN}$,

即悬浮状态下的摩擦力减小了约 16.7%. 同时, 在摩擦实验区域进行黏附力测量, 如图 4(b) 所示, 发现二者的黏附力区别甚微, 悬浮状态下的黏附力仅减小了约 0.3%. 黏附力作为实际载荷的一部分, 黏附力的变化会导致实际载荷的变化. 由图 4(a) 可知悬浮 h-BN 的摩擦系数约为 0.0191. 经计算可知 $0.11\ \text{nN}$ 的载荷变化量导致的摩擦力差异约为 0.002 , 远小于摩擦力的差距 $0.069\ \text{nN}$. 从数值量级上考虑, 导致悬浮状态和支撑状态的 h-BN 的摩擦力差异主要原因不在于黏附力. 结合 Amonton's 定律和单粗糙摩擦定律, h-BN 表面的摩擦力 F_f 可以描述为^[15]

$$F_f = \tau A + \mu L, \quad (1)$$

其中, τ 为界面剪切强度; A 为针尖与 h-BN 之间的接触面积; μ 为摩擦系数; L 为法向载荷. 剪切强度与界面间相互作用相关, 由于黏附力的相对变化非常小, 剪切强度的变化可以忽略. 悬浮状态下, 载荷与摩擦系数也没有发生改变. 针尖与 h-BN 之间的接触面积是重要的影响因素. 当 h-BN 放置在

刚性基底上时, 由于基底的阻挡, h-BN 难以向下拉伸. 针尖在支撑状态的 h-BN 上摩擦过程中会在针尖前方动态地形成褶皱, 增大针尖与 h-BN 之间的接触面积, 导致摩擦力变大. 当悬浮状态的 h-BN 受到针尖的下压力时, 由于缺少基底的支撑, h-BN 更易向下拉伸. 相较于有基底支撑的 h-BN 而言, 悬浮状态的 h-BN 在摩擦过程中的褶皱更容易被“拉平”, 褶皱效应更弱, 摩擦力更小 [9,16,17].

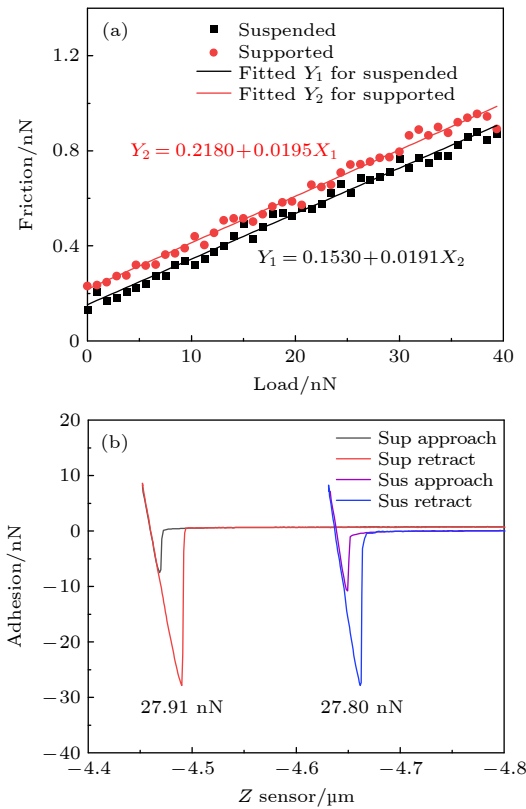


图 4 h-BN 在悬浮和支撑状态下的摩擦和黏附对比 (a) 悬浮状态和支撑状态的 h-BN 的摩擦力-载荷关系; (b) 悬浮状态和支撑状态的 h-BN 的黏附力图

Fig. 4. Comparison of friction and adhesion on h-BN in suspended and supported state: (a) Friction-load relationship of suspended and supported h-BN; (b) adhesion on suspended and supported h-BN.

3.2 电场对悬浮 h-BN 的摩擦特性的影响

为了探究电场对悬浮 h-BN 摩擦的影响, 设计在不同偏压下的变载荷摩擦实验. 通过程序化地控制载荷从 40 nN 降至 -20 nN, 得到摩擦力-载荷关系. 从图 5(a) 和 5(b) 中发现, 随着载荷的下降, h-BN 表面的摩擦力也呈现下降的趋势. 将数据进行线性拟合, 得到在 0 V, ± 2 V, ± 4 V, ± 6 V, ± 8 V 偏压下的摩擦力-载荷关系拟合线. 当正向的偏压增大时, 摩擦力-载荷的关系拟合线出现上移, 相同

载荷下的摩擦力得到增大. 这一现象在正偏压大于 +4 V 以及负偏压达到 -8 V 时开始逐渐明显. 在负向偏压作用下, 各载荷下的摩擦力也都有所增大, 但摩擦力的增量与正偏压下摩擦力的增量相比较小. 当载荷小于零时, 由于针尖与样品表面的黏附作用使得针尖无法脱离样品表面, 摩擦力依然存在. 针尖临界脱离样品表面瞬间的黏附力也随着偏压的增大而变大.

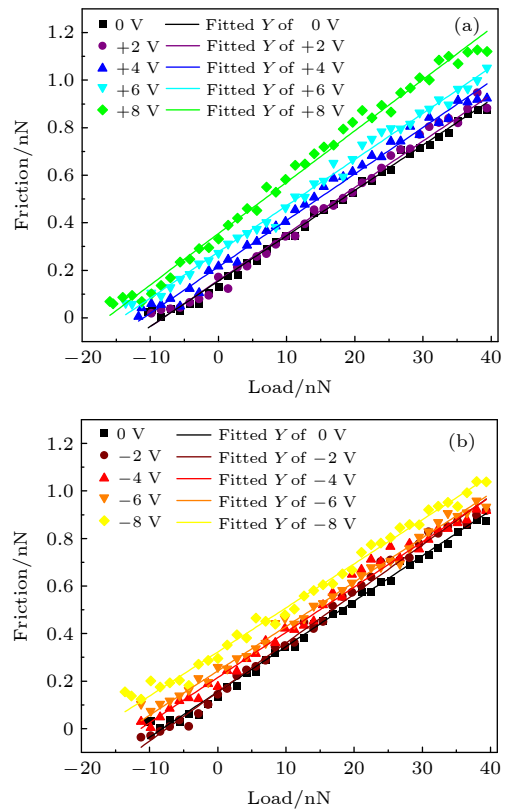


图 5 不同电场下悬浮 h-BN 的摩擦力-载荷关系的对比 (a) 不同正偏压下悬浮 h-BN 的摩擦力-载荷关系; (b) 不同负偏压下悬浮 h-BN 的摩擦力-载荷关系

Fig. 5. Comparison of friction-load relationship of suspended h-BN under different electric fields: (a) Friction-load relationship of suspended h-BN under different positive biases; (b) friction-load relationship of suspended h-BN under different negative biases.

为了探究电场对 h-BN 表面摩擦行为的影响机理, 在摩擦实验的区域进行了黏附力的定量测量. 通过测量 5 次力曲线得到黏附力的平均值, 图 6(a) 和 6(b) 分别表示在正偏压和负偏压下 h-BN 表面黏附力的变化. 从实验结果中可以清楚地看出, 不施加电场时的黏附力为 18.54 nN, 在 +2 V, +4 V, +6 V 和 +8 V 偏压下的黏附力分别为 22.18 nN, 25.25 nN, 29.72 nN 和 34.21 nN.

正电场的施加使得针尖与 h-BN 之间的黏附力增大. 负偏压下也出现黏附力随电压的增大而增大的现象. 当偏压增大至 -8 V 时, 黏附力达到 22.69 nN, 但仍小于 +8 V 偏压下的黏附力. 黏附力在电场下的变化规律与摩擦力的变化规律相同, 两者都随着偏压的增大而增大, 且在正偏压下的增量大于负偏压下的增量.

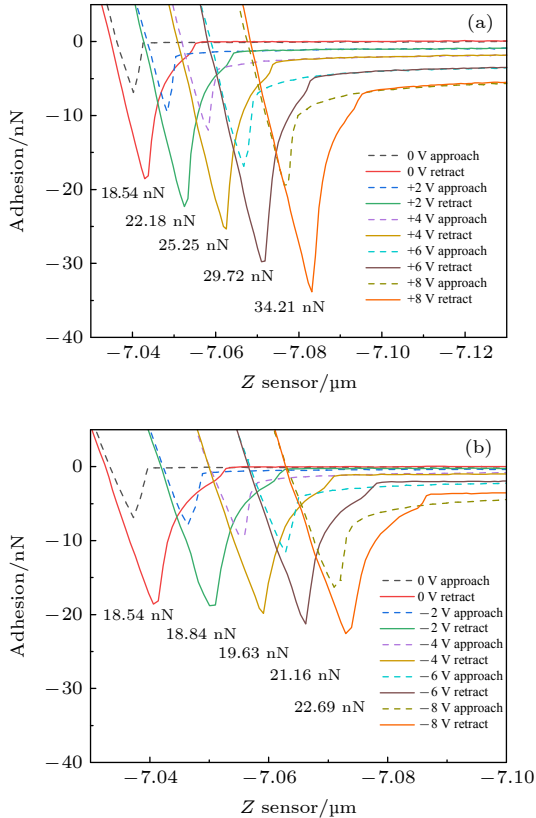


图 6 不同电场下悬浮 h-BN 的黏附力对比 (a) 不同正偏压下悬浮 h-BN 表面的黏附力; (b) 不同负偏压下悬浮 h-BN 表面的黏附力

Fig. 6. Comparison of adhesions on suspended h-BN under different electric fields: (a) Adhesions on suspended h-BN under different positive biases; (b) Adhesions on suspended h-BN under different negative biases.

黏附力的 4 大组成部分为范德华力、毛细力、化学键力和静电力. 其中, 范德华力作为一种分子间作用力主要受原子间距离的影响. 密切关注实验中电场施加前后的形貌图, 发现 h-BN 的高度没有差异, 因此范德华力在电场下并未发生改变. 考虑到电场可能会影响毛细力, 在低湿度 (RH < 20%) 的环境下重复实验, 依旧可以观察到相同的现象. 同时考虑到 h-BN 的疏水性, 其表面的毛细力的影响可以忽略^[18]. h-BN 具有良好的化学惰性, 表面

没有悬空的化学键, 电场下化学键力的影响也不在考虑作用范围内^[19]. 电场的施加对于范德华力、毛细力、化学键力这 3 个组成部分都不会产生较大影响, 电场下黏附力的改变主要由静电力主导. 由于硅针尖与 h-BN 之间的功函数差异, 二者接触时会发生电荷的转移并达到一个平衡状态^[20]. 即使在不施加电场的情况下, 针尖与 h-BN 之间也存在接触电势差^[11,21,22]. 所以在相同绝对值的正负偏压下, 接触在 h-BN 表面的针尖上的实际电势并不同, 从而导致正负电场影响针尖所受静电力的不对称性.

根据库仑定律, 针尖受到的静电力 F_e 可以简单定性表示为^[23]

$$F_e = K \frac{Q_t Q_s}{d^2}, \quad (2)$$

其中, K 代表库伦常数, Q_t 和 Q_s 分别表示针尖上和 Si 基底上针尖垂直对应区域上产生的感应电荷, d 表示针尖与 Si 基底之间的距离. 施加电场后, 硅针尖会在电场的作用下会产生感应电荷, 针尖与 Si 基底之间的静电相互作用增强, 使得针尖所受到的静电力变大. 静电力的增大会产生额外的载荷, 进而使得摩擦力增大.

尖端与样品表面的相互作用可以反映在原子尺度的黏滑运动中. 黏滑运动 (stick-slip) 是纳米摩擦的一个特性, 可以反映出摩擦过程中能量的变化过程. 针尖开始运动时需要克服原子间的势垒, 发生滑移, 从一个稳态跃迁到下一个局部势能最低点. 在测量摩擦的区域内选取了 $3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$ 的区域进行黏滑运动实验, 施加固定载荷 10 nN, 扫描频率 1 Hz. 由图 7(a) 所示, 在不施加电场的条件下, 测量出 10—11 个峰, 这与 h-BN 的理论晶格常数 0.25040 nm 保持一致. 当施加 +5 V 偏压以后, 峰的数量减少到如图 7(b) 所示的 6—7 个. 电场的施加会减少单位长度内黏滑运动的周期, 并增大黏滑运动的幅值. 该现象表示在电场作用下 h-BN 表面的黏滑运动发生了从单步黏滑向多步黏滑的转变, 针尖与 h-BN 之间的相互作用增强^[24]. 电场的施加增大了针尖原子与 h-BN 之间的势垒, 针尖在 h-BN 表面的摩擦会产生更大的能量耗散.

3.3 电场下悬浮与支撑状态的 h-BN 摩擦特性对比

本文进一步对比了有基底支撑与悬浮状态的 h-BN 在电场下的摩擦特性. 如图 8(a) 和 8(b) 所

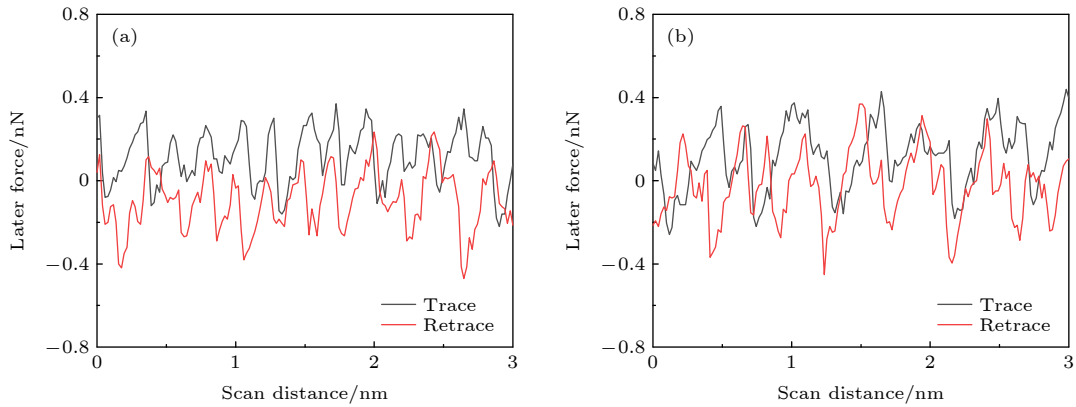


图 7 悬浮 h-BN 的黏滑运动在电场下的变化 (a) 无电场时悬浮 h-BN 的侧向力曲线; (b) +5 V 偏压下悬浮 h-BN 的侧向力曲线
 Fig. 7. Variation of stick-slip behavior of suspended h-BN under electric field: (a) Lateral force curves measured on suspended h-BN without bias; (b) lateral force curves measured on suspended h-BN under +5 V bias.

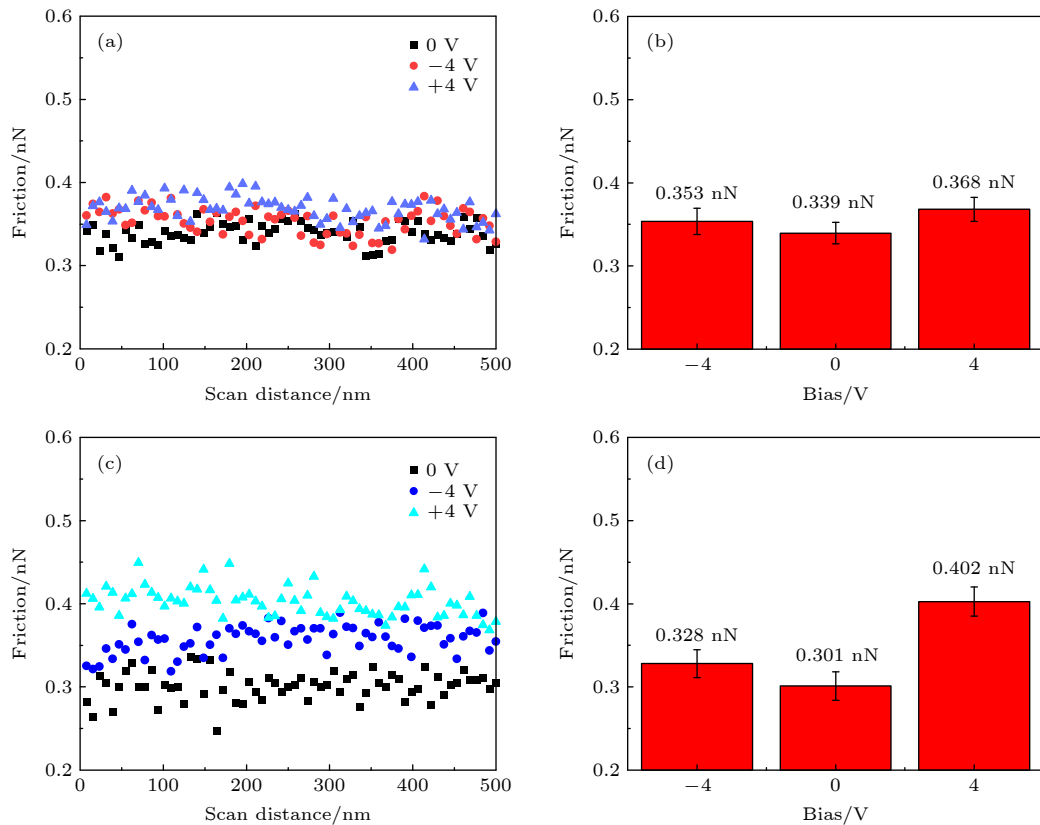


图 8 电场下支撑与悬浮状态的 h-BN 的摩擦力对比 (a) 电场下有基底支撑的 h-BN 的摩擦力图; (b) 不同偏压下有基底支撑的 h-BN 的摩擦力柱状图; (c) 电场下悬浮 h-BN 的摩擦力图; (d) 不同偏压下悬浮 h-BN 的摩擦力柱状图
 Fig. 8. Comparison of the friction on the supported and suspended h-BN under electric fields: (a) Friction on supported h-BN under biases; (b) histogram of the friction on supported h-BN under different biases; (c) friction on suspended h-BN under biases; (d) histogram of the friction on suspended h-BN under different biases.

示, 在有基底支撑的 h-BN 上施加 -4 V 和 +4 V 的偏压, 发现电场所引起的摩擦力变化并不明显, 这是由于该 h-BN 样品具有较厚的厚度, 静电力的影响被大大削弱. 然而在悬浮的 h-BN 上, 摩擦力却仍然受电场的影响较大. 由图 8(c) 和 8(d) 所示,

在 +4 V 偏压下的摩擦力较无偏压下的摩擦力相比已经有了明显的增大, -4 V 偏压下的摩擦力也略有增大.

图 9(a) 和 9(b) 分别为电场下有基底支撑的和悬浮状态的 h-BN 的示意图. 悬浮 h-BN 的下落高

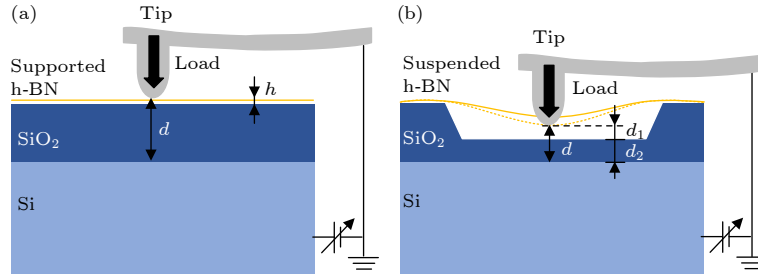


图 9 电场下支撑与悬浮状态的 h-BN 示意图对比 (a) 电场下有基底支撑的 h-BN 的示意图; (b) 电场下悬浮 h-BN 的示意图
Fig. 9. Comparison of schematic diagram of h-BN in supported and suspended state under electric field: (a) Schematic diagram of supported h-BN under electric field; (b) schematic diagram of suspended h-BN under electric field.

度缩短了针尖与 Si 基底之间的距离 d , 针尖加载后又会使悬浮 h-BN 再产生一定的向下变形量, 如图 9(b) 中虚线所示.

对静电力进一步分析可得:

$$F_e = \frac{Q_t Q_s}{4\pi\epsilon_e d^2}, \quad (3)$$

其中, ϵ_e 为针尖与 Si 基底之间的整体介电常数, 通过电容串联公式可推:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{C_e} &= \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_{d_1}} + \frac{1}{C_{d_2}} \\ &= \frac{h}{\epsilon_0\epsilon_h S} + \frac{d_1}{\epsilon_0\epsilon_{d_1} S} + \frac{d_2}{\epsilon_0\epsilon_{d_2} S} \\ &= \frac{h\epsilon_{d_1}\epsilon_{d_2} + d_1\epsilon_h\epsilon_{d_2} + d_2\epsilon_h\epsilon_{d_1}}{\epsilon_0\epsilon_h\epsilon_{d_1}\epsilon_{d_2} S}, \\ C_e &= \frac{S\epsilon_e}{h + d_1 + d_2} = \frac{S\epsilon_e}{d}, \\ \epsilon_e &= \frac{d}{\frac{h}{\epsilon_0\epsilon_h} + \frac{d_1}{\epsilon_0\epsilon_{d_1}} + \frac{d_2}{\epsilon_0\epsilon_{d_2}}}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

针尖与 Si 基底间的距离 d 由三部分组成: h-BN 厚度 h 、h-BN 与微孔底部的间距 d_1 、未刻蚀部分 SiO₂ 的厚度 d_2 . C_h, C_{d_1}, C_{d_2} 以及 C_e 分别代表这三部分以及整体的电容. S 为针尖与 Si 基底之间的相对面积. ϵ_h 为 h-BN 的相对介电常数, 空气的相对介电常数 ϵ_{d_1} 小于 SiO₂ 的相对介电常数 ϵ_{d_2} . 由 (4) 式可知, 当被基底氧化层被刻蚀后, SiO₂ 厚度 d_2 的减小会导致针尖与 Si 基底之间整体的介电常数 ϵ_e 减小. 同时, 悬浮 h-BN 受重力和针尖载荷的作用而向下变形, 缩小针尖与 Si 基底间的距离 d . 由 (3) 式可知, 这两方面的共同作用会增大针尖所受到的静电力, 从而加强电场对摩擦的影响. 这与悬浮 h-BN 的摩擦力受电场影响比支撑处更大的实验结果相符合.

由电容公式可知, 在电容值不变的条件下, 针尖上的电荷量 Q 与所受电势 U 成正比关系, 如 [22]:

$$Q = CU = C(V_S - V_C) = C \left(V_S - \frac{\phi_{\text{tip}} - \phi_{\text{h-BN}}}{e} \right). \quad (5)$$

其中, V_S 为施加在基底上的偏压, V_C 为针尖与 h-BN 之间的接触电势差. ϕ_{tip} 和 $\phi_{\text{h-BN}}$ 分别为针尖和 h-BN 的功函数. 结合 (5) 式和 (3) 式可知, 理论上针尖上的静电力与电势的平方值成正比关系并且受到零偏压下的固有电势差影响. 这也与 h-BN 的摩擦力随偏压增大而增大且正负偏压影响不对称的实验结果相符合.

通过以上实验发现, 悬浮处理和施加电场是调节 h-BN 表面摩擦的有效方法. 悬浮状态下, 摩擦过程中的面内拉伸在一定程度上减少了褶皱的产生, 达到减摩的目的. 在电场下, 静电力的增大会增加针尖所受到的实际载荷, 产生增摩的效果. 本文研究发现可以通过调节外加电场的大小和方向来不同程度地增大 h-BN 表面的摩擦力. 偏压越大, 摩擦力越大, 正电压的影响大于负电压的影响, 并且这一增摩作用可以通过刻蚀基底氧化层的方法进一步加强. 这对研究二维材料表面摩擦的调控具有一定的启发意义.

4 结 论

本文研究了电场对悬浮 h-BN 表面纳米摩擦的影响. 悬浮状态的 h-BN 的摩擦力小于有基底支撑处 h-BN 的摩擦力. 原因是悬浮状态下 h-BN 在针尖的加载下会产生更大的面内拉伸, 削弱表面的褶皱效应. 电场下, 悬浮 h-BN 表面的黏附力和摩擦力会随着偏压的增大而增大, 并且由于针尖与 h-BN 之间存在固有电势差, 正向偏压下的摩擦力增量大于负向偏压下的摩擦力增量. 电场的施加使

针尖受到额外的静电力, 从而增大摩擦过程中的实际载荷, 进而影响摩擦力大小. 同时, 电场下悬浮 h-BN 上的黏滑运动的幅值变大, 周期变小, 出现单步黏滑向多步黏滑的转变, 摩擦过程会产生更大的能量耗散. 此外, 在有基底支撑的较厚 h-BN 样品上, 电场对摩擦的影响较小, 而对于悬浮的 h-BN 而言, 针尖与 Si 基底间界面距离的缩短和界面整体介电常数的下降共同导致针尖上受到的静电力进一步增强. 本文研究了悬浮 h-BN 在电场下的摩擦特性, 提出了通过悬浮处理和改变外加电场的大小与方向来调控二维材料表面摩擦力大小的方法, 并分析了其内在机理和影响因素, 为二维材料在微纳机电系统中的应用提供了理论帮助.

参考文献

- [1] Zheng Q S, Ouyang W G, Ma M, Zhang S M, Zhao Z H, Dong H L, Lin L 2016 *Sci. Technol. Rev.* **34** 12 (in Chinese) [郑泉水, 欧阳稳根, 马明, 张首沫, 赵治华, 董华来, 林立 2016 科技导报 **34** 12]
- [2] Zhang S, Ma T B, Erdemir A, Li Q Y 2019 *Mater. Today* **26** 67
- [3] Spear J C, Ewers B W, Batteas J D 2015 *Nano Today* **10** 301
- [4] Dean C R, Young A F, Meric I, Lee C, Wang L, Sorgenfrei S, Watanabe K, Taniguchi T, Kim P, Shepard K L 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 722
- [5] Liu X C, Hwang E H, Yoo W J, Lee S, Cheong B K 2015 *Solid State Commun.* **209** 1
- [6] Mirkarimi P B, McCarty K F, Medlin D L 1997 *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **21** 47
- [7] Martin J M, Mogné T L, Chassignette C, Gardos M N 1992 *Tribol. Trans.* **35** 462
- [8] Watanabe K, Taniguchi T, Kanda H 2004 *Nat. Mater.* **3** 404
- [9] Lee C G, Li Q Y, Kalb W, Liu X Z, Berger H, Carpick R W, Hone J 2010 *Science* **328** 76
- [10] Zeng X Z, Peng Y T, Yu M C, Lang H J, Cao X A, Zou K 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 8214
- [11] Jiang Y, Yue L L, Yan B S, Liu X, Yang X F, Tai G A, Song J 2015 *Nano* **10** 1550038
- [12] Lang H J, Peng Y T, Shao G W, Zou K, Tao G M 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 6041
- [13] Wagner K, Cheng P, Vezenov D 2011 *Langmuir* **27** 4635
- [14] Nemes-Incze P, Osváth Z, Kamarás K, Biró L P 2008 *Carbon* **46** 1435
- [15] Elinski M B, Menard B D, Liu Z, Batteas J D 2017 *J. Phys. Chem. C* **121** 5635
- [16] Fang L, Liu D M, Guo Y Z, Liao Z M, Luo J B, Wen S Z 2017 *Nanotechnology* **28** 245703
- [17] Smolyanitsky A, Killgore J P, Tewary V K 2012 *Phys. Rev. B* **85** 035412
- [18] Li H, Zeng X C 2012 *ACS Nano* **6** 2401
- [19] Kostoglou N, Polychronopoulou K, Rebholz C 2015 *Vacuum* **112** 42
- [20] Jean M S, Hudlet S, Guthmann C, Berger J 1999 *Eur. Phys. J. B.* **12** 471
- [21] Qi Y B, Park J Y, Hendriksen B L M, Ogletree D F, Salmeron M 2008 *Phys. Rev. B* **77** 184105
- [22] Law B M, Rientord F 2002 *Phys. Rev. B* **66** 035402
- [23] Lang H J, Peng Y T, Cao X A, Zou K 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 25503
- [24] Medyanik S N, Liu W K, Sung I H, Carpick R W 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 136106

Tribological properties of suspended hexagonal boron nitride under electric field*

Chen Xing-Yuan Huang Yao[†] Peng Yi-Tian

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(Received 28 February 2021; revised manuscript received 15 April 2021)

Abstract

Hexagonal boron nitride (h-BN) has huge potential applications in micro-nano electromechanical system due to its good lubricity and insulation. In this paper, a microporous array is prepared on a SiO₂/Si substrate by the substrate etching process, and then the h-BN is transferred to the microporous substrate to form a suspension structure. The effect of electric field on tribological properties of suspended h-BN is studied by atomic force microscopy. The results show that the friction of the suspended h-BN is smaller than the friction on the h-BN supported by the substrate, because the greater in-plane stretch weakens the puckering effect. The electric field increases the friction of the suspended h-BN, and the influence of positive bias is greater than that of negative bias. The application of the electric field increases the electrostatic force on the tip, thereby increasing the additional load and the interface barrier in the friction process. The electric field causes the stick-slip behavior to change from single-slip to multi-slip. Compared with the h-BN supported by the substrate, h-BN in the suspended state is strongly affected by the electric field. The reduction of the interface distance and the absence of the substrate oxide layer lead the electrostatic force to increase. This paper proposes a method to adjust h-BN's friction by electric field, which provides theoretical guidance for studying the friction characteristics of two-dimensional materials.

Keywords: friction force, suspended hexagonal boron nitride, atomic force microscope, electrostatic force

PACS: 68.35.Af, 68.55.-a, 68.37.Ps, 68.35.Np

DOI: 10.7498/aps.70.20210386

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51905089) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2232020D-31).

[†] Corresponding author. E-mail: huanghuang36@dhu.edu.cn