

石墨烯层间摩擦的面内局部应变调控

张红卫, 刘帅磊, 张苹

(西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 西安 710048)

摘要: **目的** 揭示面内应变对石墨烯层间摩擦行为的影响。**方法** 利用分子动力学模拟方法, 基于支撑的石墨烯基底与单层六边形石墨烯滑片接触模型, 重点考察滑片在加载面内局部拉伸应变的基底表面的滑动摩擦过程。着重分析滑片所受侧向力(即瞬时摩擦力)随滑动距离的变化规律, 计算滑片分别与基底的加载应变区和非应变区的层间作用, 通过计算层间作用势能、接触原子数、能量耗散等, 直观揭示应变对摩擦的影响机制。**结果** 当滑片在基底的局部应变加载区域滑动接触时, 由于滑片与基底界面公度性和层间势能降低, 接触原子数减少, 导致滑片所受侧向力的振幅比其在基底的非应变区滑动时明显降低。具体来讲, 当应变由 0 增加至 10%, 处于应变区的滑片所受侧向力由 1.33 nN 减小至 0.86 nN, 降幅达 35%。通过计算加载均匀应变的基底与滑片层间的摩擦力, 表明摩擦力随应变的增加而逐渐减小, 且载荷越高、滑片尺寸越大时, 摩擦力降幅越明显。**结论** 局部应变可以有效调控摩擦的分布规律, 降低石墨烯层间摩擦力大小。

关键词: 石墨烯; 层间摩擦; 侧向力; 局部应变; 分子动力学

中图分类号: TH117; O343.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)03-0270-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.03.028

Interlayer Friction Regulation of Graphene by In-plane Local Strain Engineering

ZHANG Hong-wei, LIU Shuai-lei, ZHANG Ping

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the influence of the in-plane strain on the interlayer friction behavior of graphene. Based on the model of a hexagonal monolayer graphene slider placed on a supported graphene substrate, the sliding friction of the slider on the substrate with in-plane local tensional strain is studied by molecular dynamics simulation. The work focuses on the variation of the lateral force (i.e., the instantaneous friction force) of the slider with the sliding distance and the interlayer interactions of the flake in the strained region and non-strain region of the substrate. In order to better understand the effect of the local strain on the friction, the interlayer potential energy, contact area, and energy dissipation are investigated. The results demonstrated that when the slider slides in the local strained region of the substrate, the commensurability at the slider-substrate interface is reduced, the interlayer potential energy and the number of contact atoms are decreased. Therefore, the amplitude of the lateral force of the slider in strained region is significantly lower than that in the non-strain region of the substrate.

收稿日期: 2020-03-08; 修订日期: 2020-05-28

Received: 2020-03-08; **Revised:** 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(11602139); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910709037)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11602139) and the National Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program (201910709037)

作者简介: 张红卫(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为纳米摩擦学。邮箱: zhanghongwei@xpu.edu.cn

Biography: ZHANG Hong-wei (1986—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: nano-tribology. E-mail: zhanghongwei@xpu.edu.cn

引文格式: 张红卫, 刘帅磊, 张苹. 石墨烯层间摩擦的面内局部应变调控[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 270-275.

ZHANG Hong-wei, LIU Shuai-lei, ZHANG Ping. Interlayer friction regulation of graphene by in-plane local strain engineering[J]. Surface technology, 2021, 50(3): 270-275.

Specifically, when the strain increases from 0 to 10%, the amplitude of the lateral force of the slider in the strain region is reduced by 35% from 1.33 nN to 0.86 nN. By calculating the friction between the slider and the substrate with uniform strain, it is shown that the friction force gradually decreases with increasing strain, and for the slider with the larger load level (or size), the trend of the friction force decreased is more obvious. It concludes that the local strain can effectively modulate the distribution of friction and reduce the friction between graphene layers.

KEY WORDS: graphene; interlayer friction; lateral force; local strain; molecular dynamics

现代纳米技术的不断发展,促进器件结构的设计越来越趋于微型化。当材料尺寸微缩至纳米尺度时,尺寸效应、表面效应非常明显。比如显著增强的表面粘附作用致使传统的液体润滑策略将不再适用于降低摩擦、减小磨损,因此基于纳米尺度的固体润滑行为研究具有重要意义。以石墨烯为代表的典型层状二维材料^[1],其面内原子之间通过强化学键相连,表面化学惰性强,结构稳定,不易磨损,因此具备优异的摩擦学性能^[2]。尤其独特的原子结构及强大的抗压能力,使得石墨烯具有优异的润滑性能及表面防护作用,这为固体润滑材料的设计带来契机,在润滑领域具有重要的应用前景^[3]。虽然石墨烯层间范德华(vdWs)作用微弱,摩擦较小,且易发生剪切滑移,但是摩擦能耗的影响依然不可忽略。当石墨烯层间堆垛方式、接触状况等不同时,层间相互作用差异显著,会对摩擦行为产生本征影响^[4-5]。因此,探究不同堆垛方式的石墨烯层间摩擦行为,掌握摩擦规律,进而实现摩擦作用的有效调控,具有重要的理论意义和应用价值。

研究发现,通过将上层石墨烯片旋转一定角度并与下层基底形成层间晶格结构失配,即非公度接触时,层间摩擦力几乎接近于 0^[6],呈现所谓的“结构超滑”^[7]。近年来,结构超滑作为纳米尺度固体接触表面有效的降低摩擦、减小磨损、增强润滑的重要方式,受到摩擦学研究者的广泛关注。研究者们基于结构超滑问题开展了大量的研究工作,实现从纳米级^[6,8]、微米级^[9]甚至厘米级(宏观)的超滑^[10]。Berman 等^[11]通过石墨烯包裹金刚石颗粒隔绝金刚石颗粒与无定形碳(DLC)薄膜的直接接触,可显著降低表面相对滑动时的摩擦力,以此实现宏观尺度的超滑过程。通过人为调控方式达到接触表面间的非公度接触,可以实现结构超滑过程。但是,结构超滑现象并非在任何工况下都能保持稳定存在,在某些特定条件下,结构超滑过程也会被破坏。如滑块受到超高载荷作用^[12]或与软基底表面接触时^[13],超滑现象受到抑制。说明超滑现象并非本征存在,仍需进一步开展超润滑及其调控机制的相关研究。

近期研究发现,通过加载应变作用可以改变原子固有的排布方式,有效调控层间范德华相互作用^[14]。Lin 等^[15]利用分子动力学(molecular dynamics)模拟研究发现了非公度接触的石墨烯层间摩擦随面内应变的非单调依赖性,而非公度接触的石墨烯层间摩擦随

应变单调递减。Zhang 等^[16]利用鼓泡技术实现了石墨烯面内应变的稳定加载,并借助原子力显微镜(AFM)测试了石墨烯薄膜鼓泡顶端均匀拉伸区域的摩擦性能。结果发现,应变对石墨烯表面摩擦有显著的调节作用,在 0.6%的应变作用下即可使得石墨烯表面摩擦系数显著降低,实现超润滑过程。Wang 等^[17]发现应变可以调控石墨烯层间摩尔云纹的演化过程,进而有效调控层间摩擦,并揭示了应变工程调控实现稳定的超润滑^[18]。Peng 等^[19]采用分子动力学模拟方法,研究了氢化石墨烯基底与石墨烯滑片之间的摩擦。结果表明,面内应变可降低氢化基底表面的粗糙度,进而使得基底与滑片层间的摩擦力显著减小,实现层间的超滑接触。郭一伯等^[20]基于 AFM 实验及独立振子模型,研究表明横向应力场加载作用可调控二硫化钼(MoS₂)的等效刚度及其表面势垒,进而影响摩擦能耗规律。虽然,应变工程调控石墨烯为主的二维材料的摩擦研究取得了一些重要进展,但是相关调控机制及内在机理研究方面期待更大的突破^[21]。

本文利用分子动力学模拟方法,基于支撑石墨烯基底与六边形的单层石墨烯滑片之间的滑动摩擦过程,研究了面内拉伸应变对摩擦行为的影响。通过在基底的局部区域加载拉伸应变作用而其他区域未加载应变,考察滑片在基底表面滑动全过程中的层间摩擦规律及其作用机制,将为石墨烯相关的二维材料的结构超滑的优化设计提供思路。

1 模拟方法

建立石墨烯滑片与石墨烯基底接触模型,如图 1 所示。计算模型由单层六边形石墨烯滑片与支撑的石墨烯基底构成,其中上层滑片及下层基底前后端边界均为锯齿型,即初始时层间为公度接触。矩形石墨烯基底尺寸确定,长(z 方向)、宽(x 方向)分别为 18.832、8.642 nm,包含 6080 个碳原子。利用“石墨烯-弹簧”模型^[22]模拟弹簧支撑的石墨烯基底,该模型在近年来的相关摩擦学研究中被广泛运用^[13,17]。无特别说明时,基底的支撑弹簧刚度均取为确定值 $k_N=1000$ N/m,该刚度值远大于处于平衡间距的石墨烯层间等效弹簧刚度(~ 2.7 N/m)。该弹簧支撑的基底弯曲刚度较大,因此有效避免了基底面外弯曲变形对摩擦行为的影响,将着重探究面内应变影响下基底与滑片的摩擦规律。

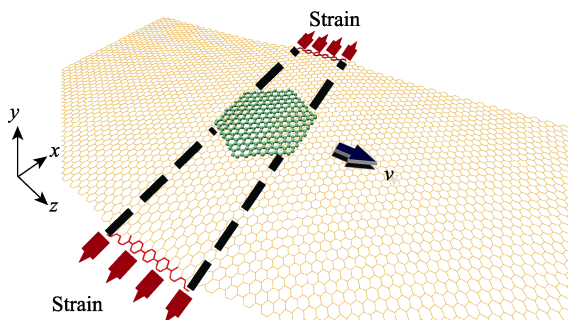


图1 石墨烯基底与滑片接触模型

Fig.1 A simulation model of graphene slider and substrate

模拟系统的三个维度（即 x 、 y 、 z 轴）方向均施加自由边界条件。限制基底质心在 x - z 平面内固定不动，同时限制滑片绕其外法线方向的旋转以及沿 x 轴方向的平动。对基底中段两侧边区域原子（如图1所示红色标记区域）施加位移，使得基底产生拉伸变形，其线应变（ ε ）大小为两侧原子（红色标记）最终距离 L 和初始距离 L_0 之差与初始距离 L_0 的比值，即 $(L - L_0)/L_0$ 。在模拟中精确控制移动原子间距，可以调控相应区域的应变大小。对每个滑片原子施加均布载荷 f_n ，则滑片整体受力等效为 $N \cdot f_n$ （其中 N 为滑片原子数）。在该力作用下，滑片与基底层间距缩小（低于平衡间距），层间作用增强。模拟分为两步：体系的弛豫阶段和滑动接触过程。开始时，先进行 20 ns 的弛豫，使系统达到平衡状态。然后进行滑动摩擦阶段的模拟计算，将刚度为 $k_L = 20$ N/m 的线性弹簧末端连接于滑片质心，以恒定的速度 $v = 10$ m/s 拖动弹簧前端前移，则滑片在弹簧的拖曳作用下沿 z 轴正方向做粘滑（stick-slip）运动。通过计算滑片滑动时每一步的受力，统计得到侧向力（即瞬时摩擦阻力）随滑动距离的变化曲线（一般呈锯齿型）。通过计算侧向力在确定滑动区间段内（0~42 nm）的平均值，进一步可求得该滑动区间段内的平均摩擦力。

分子动力学模拟基于大规模分子动力学开源软件 LAMMPS^[23] 进行。在模拟体系中，利用经验键序势函数（AIREBO）^[24] 描述石墨烯片层内部 C—C 共价键作用。通过 12-6 型 Lennard-Jones 经验对势^[25] 描述石墨烯滑片与石墨烯基底片层之间的范德华（vdWs）相互作用，该势函数中势阱深度、平衡原子间距取值分别为 2.968 meV、0.3407 nm。在 NVT 系综下进行模拟，利用 Nosé-Hoover 控温方法控制体系温度保持为 300 K，时间步长取 1 fs。

2 结果与分析

2.1 面内局部应变的影响

以包含 294 个碳原子的六边形石墨烯滑片与基底接触模型为算例，考察滑片所受侧向力（即瞬时摩擦力）的变化情况。滑片受法向载荷 $f_n = 0.1$ nN/atom 作用，对应层间压强为 3.8 GPa，该值接近于已有的实验及原子模拟中采用的载荷值^[26-27]。如图 2a 所示，考虑应

变分别为 0、6% 和 10% 的 3 种典型情况时，计算滑片由起点 A 滑动至终点 B 位置的全过程所受侧向力随滑动距离的变化。如图 2b 所示，当基底未加载应变时（ $\varepsilon = 0$ ），滑片在基底表面滑动时所受侧向力变化曲线在平衡位置均匀振荡，即振幅不变。当受局部应变作用时（ $\varepsilon = 6\%$ 、 10% ），滑片在基底表面滑动时的侧向力变化曲线振幅不一致。具体来讲，当滑片在非应变区滑动时，侧向力变化曲线振荡均匀且与 $\varepsilon = 0$ 时变化情况几乎一样；而在应变区滑动时，侧向力曲线振幅降低，且应变越大，振幅降低越明显。

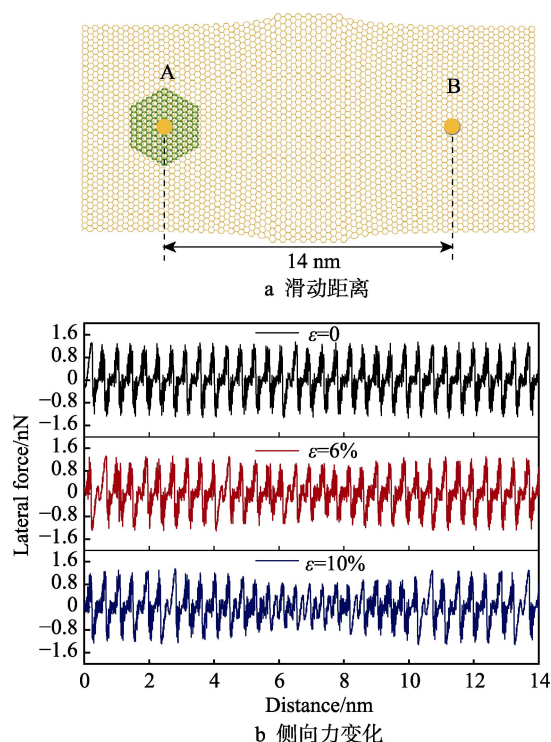


图2 不同局部应变作用下侧向力随滑动距离的变化
Fig.2 (a) Slider slides from A to B position; (b) Lateral force vs the sliding distance at different local strains

对侧向力受应变的影响进行量化分析。将图 2b 所示的侧向力对应的峰值与谷值求差值得 ΔF ，再取其 1/2 可得侧向力曲线振幅。侧向力振幅随应变的变化情况如图 3 所示。结果显示，滑片在非应变区滑动时，侧向力振幅不受局部应变的影响，且其值与 $\varepsilon = 0$ 时相同；而在应变区滑动阶段，侧向力振幅随应变的增加而显著减小。当应变由 0 增加至 10% 时，侧向力由 1.33 nN 降低至 0.86 nN，振幅降低了近 35%。

实际上，加载局部应变作用的基底区域内部 C—C 键长发生改变，导致基底与滑片层间的晶格结构发生失配，层间呈非公度接触。如图 4 所示，当滑片在基底的应变区滑动时，滑片与基底之间具有明显的非公度接触状态（如图 4b 所示）；而当滑片在基底非应变区滑动时，上下层间呈公度接触（如图 4a 和 4c 所示）。已有的研究发现，这种层间公度性的转变显著影响层间摩擦行为^[15]。当公度接触时，层间作用势垒

较高, 层间剪切作用强, 摩擦能耗大; 反之, 当非公度接触时, 层间作用势垒降低, 剪切滑移所需摩擦能

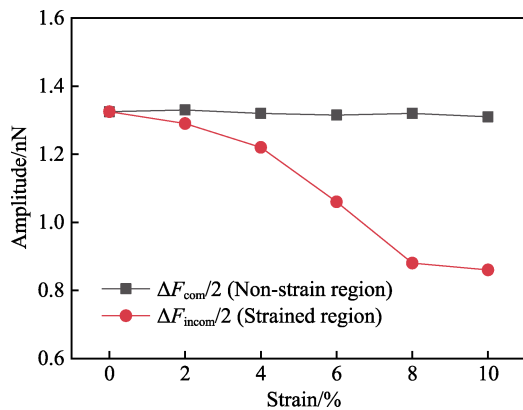


图 3 侧向力振幅随应变的变化曲线

Fig.3 Amplitude of the lateral force vs the strain

耗减少。由公度接触转变为非公度接触的过程中, 不但降低层间侧向力振幅大小, 而且使得层间摩擦系数降低数个量级^[6]。

如果将间距在某一确定范围内的滑片与基底原子视为接触, 那么可以统计滑动的任意时刻与滑片在接触范围内的基底原子数 (即接触面积)。原子间距为 0.45 nm 范围内, 与滑片接触的基底原子数随滑动距离的变化如图 5a 所示。发现未加载应变的基底 ($\varepsilon=0$) 与滑片的接触原子数随滑动位置有小幅波动, 但是整体趋势平稳。然而加载局部应变 ($\varepsilon=6\%$ 、 10%) 的基底与滑片的接触原子数整体上随滑动距离的变化显著, 且在应变区滑动时的接触原子数明显少于非应变区。主要原因是基底的加载应变区域单位面积内包含的原子数降低, 导致与滑片接触原子数减小。应变越大时, 接触原子数越少, 层间非公度性越明显, 摩擦力越小^[15]。

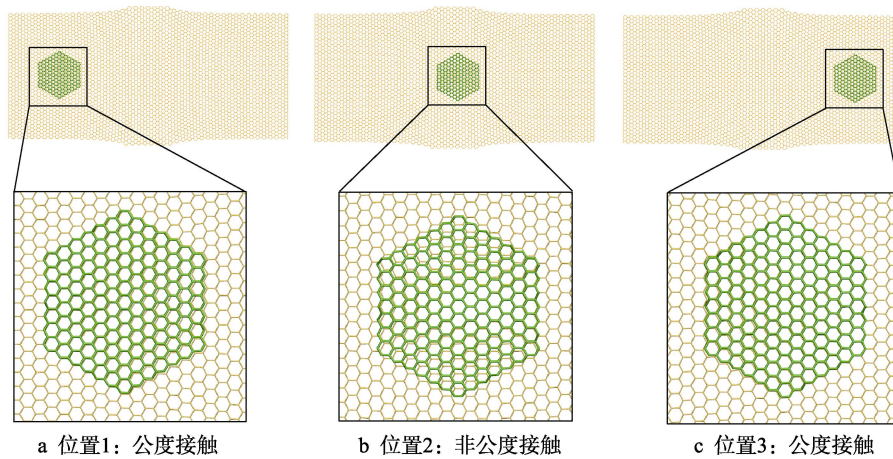


图 4 滑片与基底不同区域的接触状况

Fig.4 Slider placed on non-strain region (a), strained region (b), and non-strain region of the substrate (c)

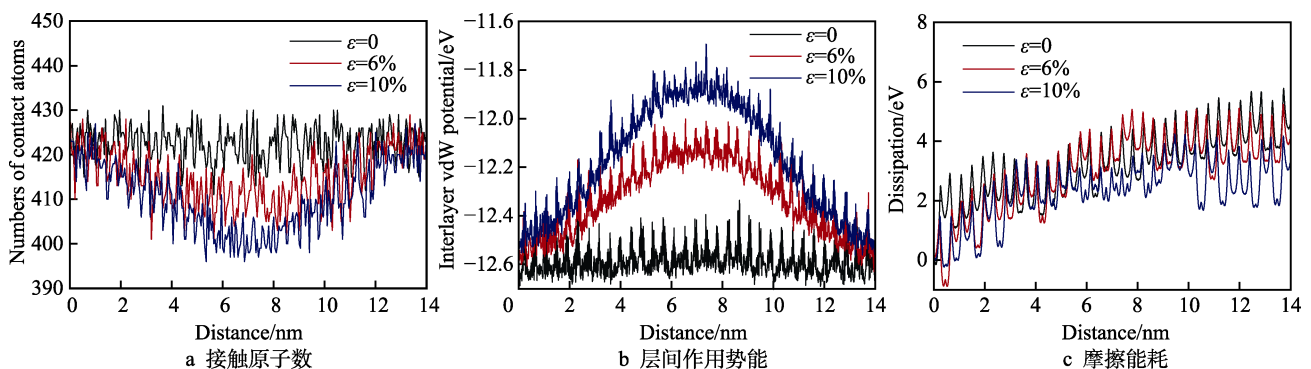


图 5 接触原子数、层间势能和摩擦能耗随距离的变化

Fig.5 (a) Numbers of contact atoms, (b) interlayer potential energy and (c) friction dissipation vs the distance

应变引起的层间晶格结构失配, 可以改变滑片分别与基底的应变区和非应变区之间的作用强度。如图 5b 所示, 通过计算层间范德华作用势能, 发现滑片与基底的应变区域原子之间的层间作用势能增加, 且应变越大时, 相应的层间作用势能增加越明显。层间作用势能增加说明滑片在该区域的稳定性降低, 在相对较小的外力作用下即可使滑片产生滑移, 故而滑片

向前滑动所需摩擦能耗降低, 摩擦力减小^[22,28]。

通过考察滑片在滑动全过程中的能耗变化, 直观分析应变对摩擦的影响。滑片摩擦能耗随滑动距离的变化如图 5c 所示, 结果显示, 应变越大时, 摩擦能耗随位移的增加速度越慢。由于能耗是瞬时摩擦力对位移的累积, 因此局部应变越大时, 侧向力 (瞬时摩擦力) 对位移的累积量 (即层间摩擦能耗) 越小。需要

说明, 计算中基底支撑弹簧刚度为 1000 N/m, 该值远大于平衡间距的石墨烯层间等效弹簧刚度 (~ 2.7 N/m), 因而基底的面外变形几乎忽略不计, 可以忽略基底表面波动因素对摩擦的影响。因此, 层间摩擦力及其摩擦能耗的改变主要是由于基底的面内应变导致的。

2.2 载荷与滑片尺寸的影响

特别计算不同载荷及滑片尺寸情况下的层间作用, 进一步确认局部拉伸应变对滑片摩擦作用的影响规律。计算得到的包含 294 个碳原子的滑片在局部应变为 10% 的基底表面滑动时的侧向力变化如图 6 所示。分别考虑载荷大小为 0.05、0.1、0.2 nN/atom 时的情况, 均发现侧向力振幅在基底的应变区降低, 表现出对应变的依赖性。通过纵向比较, 发现不同载荷作用下, 在基底的相同区域滑动时, 滑片侧向力振幅大小不同; 横向比较, 发现在加载应变的基底区域滑动时, 滑片侧向力振幅显著小于非应变区。该摩擦规律在不同载荷作用时保持一致。

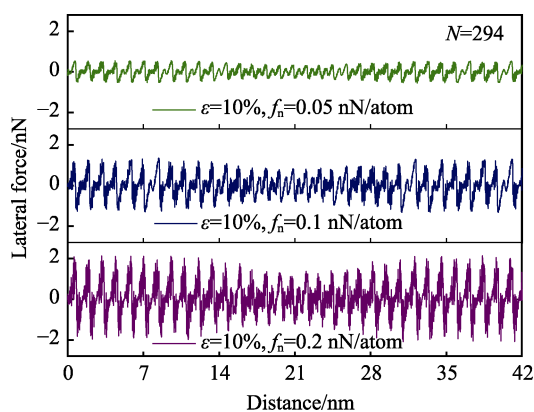


图 6 不同载荷作用下侧向力随滑动距离的变化

Fig.6 Lateral force vs the sliding distance at different normal loads

如图 7 所示, 通过计算, 载荷为 $f_n=0.1$ nN/atom 时, 分别含有 150、294、726 个碳原子的滑片在局部应变为 10% 的基底表面滑动时, 侧向力作用均具有明

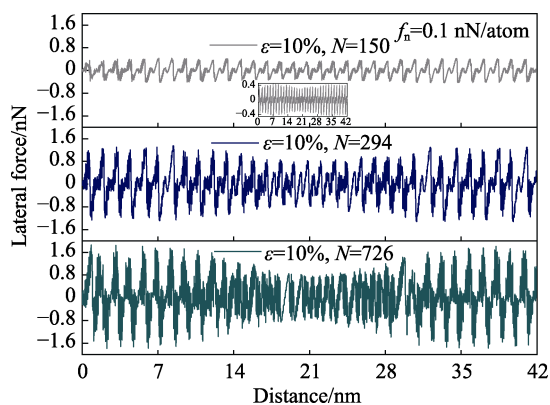


图 7 不同尺寸的滑片所受侧向力随滑动距离的变化

Fig. 7 Lateral force vs the sliding distance for the slider with the different sizes

显的应变依赖性。结果表明, 滑片尺寸越大时, 相应的侧向力振幅也越明显。就整体趋势来讲, 应变区侧向力振幅显著小于非应变区的规律一致。综合考虑图 2、图 6 和图 7 可以看出, 应变对摩擦能耗的弱化作用在一定程度上具有普适性。

2.3 均匀应变基底与滑片层间摩擦

为了直观表达不同应变对摩擦行为的影响, 将特别考察滑片与加载均匀应变的基底之间的摩擦动态过程, 以及平均摩擦力随应变的变化情况。如图 8a 所示, 基底两侧边界原子 (红色标记) 受到拉伸作用向两侧平移, 则基底整体产生均匀的拉伸应变。考虑载荷 $f_n=0.1$ nN/atom, 且应变分别为 0、6%、10% 等 3 种情况, 分别计算滑片在均匀应变基底表面滑动时层间侧向力及其平均摩擦力。如图 8b 所示, 均匀应变对滑片 ($N=294$) 侧向力产生显著影响, 应变越大, 侧向力振幅减小越明显。即就是说, 应变越大, 层间侧向作用强度越低, 层间摩擦能耗越小。

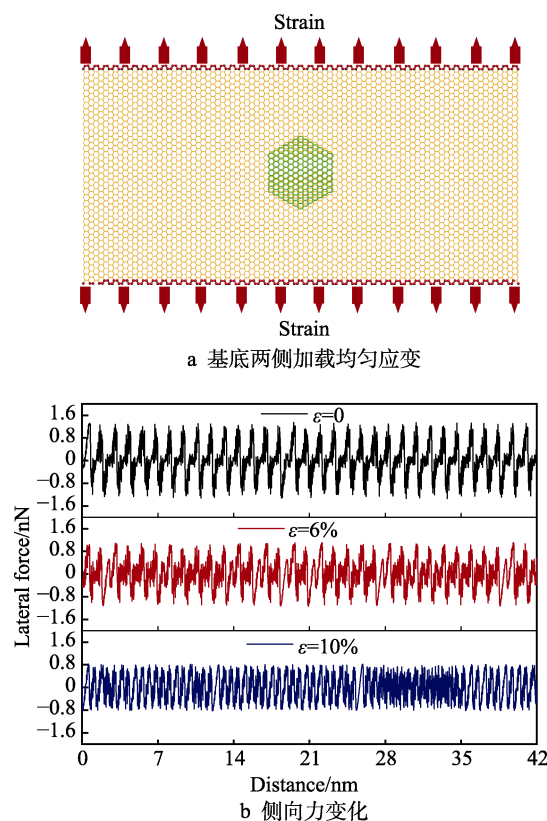


图 8 不同的均匀应变作用下侧向力随滑动距离的变化

Fig.8 (a) Substrate with the uniform strain; (b) Lateral force vs the sliding distance at uniform strains

分析平均摩擦力 (侧向力的平均值) 与应变的定量依赖关系。如图 9a 所示, 计算不同载荷作用下尺寸确定的滑片 (原子数 $N=294$) 与基底层间摩擦力, 结果显示, 摩擦力均随应变的增大而逐渐降低, 且载荷越大, 摩擦力减小越明显。该依赖关系在不同载荷情况下均成立, 且载荷越大, 摩擦力随应变降低

速率越明显。如图 9b 所示, 当滑片单原子所受载荷确定不变时 ($f_n=0.1$ nN/atom), 计算所得不同尺寸的滑片与基底层间摩擦力也均随应变的增大而逐渐降低, 进一步说明面内拉伸应变可有效降低层间摩擦。图 9a 和 9b 的结果直观反映了摩擦力与应变的定量依赖关系, 与已有的实验及分子动力学模拟所得结论一致, 即随着面内拉伸应变的增加, 摩擦力显著降低^[15-16]。说明在面内加载均匀应变, 可有效调控石墨烯层间的摩擦性能, 为其超润滑设计提供思路。

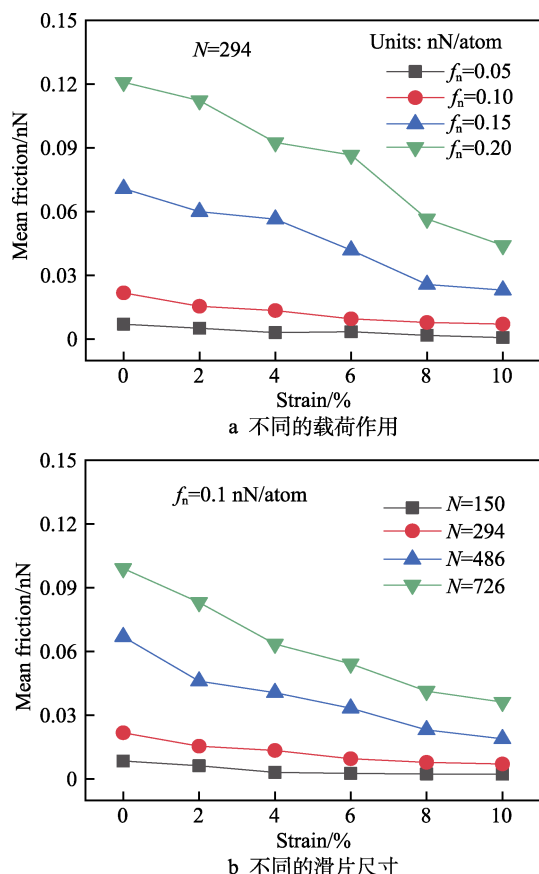


图 9 平均摩擦力随应变的变化

Fig.9 Mean friction vs the strain at the different normal loads (a) and for the different slider sizes (b)

3 结论

1) 基于分子动力学模拟, 研究了六边形石墨烯滑片在加载局部应变的石墨烯基底表面的滑动摩擦过程。结果发现, 侧向力曲线在各区域的振幅不一致。具体来讲, 在应变区, 侧向力振幅显著降低, 摩擦能耗减小; 而在非应变区, 侧向力不受影响。说明局部应变可以有效调控摩擦的分布规律。

2) 针对不同的滑片尺寸及载荷作用情况, 计算发现, 滑片所受侧向力振幅在基底应变区都表现出显著的降低态势。

3) 加载均匀拉伸应变的基底, 其与滑片之间的

摩擦力随着应变的增加而持续减小, 表明应变可以有效降低石墨烯层间摩擦力大小。

参考文献:

- [1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [2] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 93-112.
- [3] PU Ji-bin, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Progress of tribology of graphene and graphene-based composite lubricating materials[J]. Tribology, 2014, 34(1): 93-112.
- [4] HOD O, MEYER E, ZHENG Q S, et al. Structural superlubricity and ultralow friction across the length scales[J]. Nature, 2018, 563(7732): 485-492.
- [5] GHOSH Y F, GUO W L, CHEN C F. Modifying atomic-scale friction between two graphene sheets: A molecular-force-field study[J]. Physical review B, 2007, 76(15): 155429.
- [6] 王玉娟, 李志翔, 毕可东, 等. 缺陷对石墨烯摩擦性能影响的分子动力学研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 599-605.
- [7] WANG Yu-juan, LI Zhi-xiang, BI Ke-dong, et al. Influence of defects on friction properties of graphene based on molecular dynamics[J]. Tribology, 2016, 36(5): 599-605.
- [8] DIENWIDBEL M, VERHOEVEN G S, PRADEEP N, et al. Superlubricity of graphite[J]. Physical review letters, 2004, 92(12): 126101.
- [9] MUSER M H. Structural lubricity: Role of dimension and symmetry[J]. Europhysics letters, 2004, 66(1): 97-103.
- [10] FENG X F, KWON S K, PARK J Y, et al. Superlubric sliding of graphene nanoflakes on graphene[J]. ACS nano, 2013, 7(2): 1718-1724.
- [11] LIU Z, YANG J R, GREY F, et al. Observation of micro-scale superlubricity in graphite[J]. Physical review letters, 2012, 108(20): 205503.
- [12] ZHANG R F, NING Z Y, ZHANG Y Y, et al. Superlubricity in centimetres-long double-walled carbon nanotubes under ambient conditions[J]. Nature nanotechnology, 2013, 8(12): 912-916.
- [13] BERMAN D, DESHMUKH S A, SANKARANARAYANAN S K R S, et al. Macroscale superlubricity enabled by graphene nanoscroll formation[J]. Science, 2015, 348(6239): 1118-1122.
- [14] VAN WIJK M M, DIENWIEBEL M, FRENKEN J W M, et al. Superlubric to stick-slip sliding of incommensurate graphene flakes on graphite[J]. Physical review B, 2013, 88(23): 235423.
- [15] ZHANG H W, GUO Z R, GAO H, et al. Stiffness-dependent interlayer friction of graphene[J]. Carbon, 2015, 94: 60-66.
- [16] HUANG S, ZHANG G, FAN F, et al. Strain-tunable van der waals interactions in few-layer black phosphorus[J]. Nature communication, 2019, 10(1): 2447.

(下转第 307 页)