

摩擦学学报

TRIBOLOGY



基于不同探针作用下石墨烯边界效应的摩擦调控

钱宇, 戴惠良

Friction Control of Graphene Boundary Effect Based on Different Probes

QIAN Yu, DAI Huiliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020191>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石墨烯润滑添加剂合成与结构调控

Research Progress on Synthesis and Structural Control of Graphene Lubricant Additives

摩擦学学报. 2021, 41(5): 1 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020199>

基于电泳法的石墨烯涂层制备与摩擦学性能研究

Friction Properties of Graphene Coating Prepared by Electrophoretic Deposition

摩擦学学报. 2018, 38(4): 391 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.04.003>

石墨烯/LaF₃的制备及其作为水基润滑剂的摩擦学性能研究

Synthesis, Structure and Tribological Properties of Graphene/LaF₃ Composites as Water-Based Lubricant Additives

摩擦学学报. 2019, 39(1): 35 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018025>

基于分子动力学方法的多层石墨烯超滑失效机理分析

Mechanism Analysis for the Breakdown of Superlubricity with Multilayer Graphene Based on Molecular Dynamics Method

摩擦学学报. 2017, 37(5): 594 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.005>

两亲性氧化石墨烯/聚(丙烯酸-甲基丙烯酸甲酯)复合水凝胶的制备及介质调控的摩擦学性能研究

Preparation of Amphipathic Graphene Oxide/Poly(acrylic acid-methyl methacrylate) Composite Hydrogel and the Study on Its Tribological Property Under Media Regulation

摩擦学学报. 2018, 38(3): 309 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020191

基于不同探针作用下石墨烯边界效应的摩擦调控

钱宇, 戴惠良*

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 石墨烯作为一种固体润滑剂, 广泛应用于微纳机械设备中. 尽可能地减少石墨烯的摩擦是提高器件性能、延长器件寿命的关键措施. 采用改变石墨烯表面作用区域的方法对石墨烯与探针尖端的摩擦进行了研究. 利用锥形探针和球形探针测量了石墨烯与SiO₂/Si基底的边界位置及到石墨烯中心区域之间的平均摩擦力. 结果表明: 对于单层石墨烯, 在锥形探针的作用下, 石墨烯中心区域的平均摩擦力明显大于其边界区域处的平均摩擦力; 而在球形探针的作用下, 石墨烯的平均摩擦力随所选区域的变化不明显. 对于多层石墨烯, 在两种探针作用下, 石墨烯的平均摩擦力随所选区域的变化都不明显.

关键词: 石墨烯; 球形探针; 微纳机械装置; 摩擦; 固体润滑剂

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)05-0700-10

Friction Control of Graphene Boundary Effect Based on Different Probes

QIAN Yu, DAI Huiliang*

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

Abstract: As a solid lubricant, graphene is widely used in micro and nano mechanical devices. Reducing the friction of graphene as much as possible is the key measure to improve the performance of these devices and extend their life. The friction between graphene and probe tip is studied by changing the active region of graphene surface. The conical probe and spherical probe are used to measure the average friction from the boundary region between graphene and SiO₂/Si substrate to the central region of graphene. The results show that for single-layer graphene, the average friction force in the central region of graphene is significantly greater than that in the boundary region under the action of conical probe, while the average friction force of graphene varies little with the selected region under the action of spherical probe. For multilayer graphene, the average friction force of graphene varies little with the selected region under the action of two kinds of probes.

Key words: graphene; spherical probe; micro and nano mechanical device; friction; solid lubricant

微纳机电系统(MEMS/NEMS), 如数字微镜器件(DMD)^[1]、喷墨打印机的微喷嘴^[2]和生物芯片^[3]等, 对制造业产生了重大影响. 然而, 由于粘附和摩擦的存在, 微纳机电系统器件的发展和商业化在一定程度上受到了限制^[4]. 例如, 在真空中运行的MEMS执行器由

于设备部件的严重磨损而迅速失效^[5]. 石墨烯作为二维材料中的一种, 其被称为固体润滑剂, 在微纳机电系统中可用于减少粘附和摩擦^[6-8]. 自2004年石墨烯出现^[9]以后, 由于其优异的力学性能^[10-11]、电学性能^[12-13]和光电性能^[14], 石墨烯吸引了越来越多的研究者. 鉴

Received 8 September 2020, revised 4 November 2020, accepted 7 December 2020, available online 28 September 2021.

*Corresponding author. E-mail: Daihl@dhu.edu.cn, Tel:+86-13621992491.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51905089).

国家自然科学基金项目(51905089)资助.

于抗摩擦磨损是一个永恒的主题,其促进了石墨烯在MEMS/NEMS器件中的工程应用,因此,需要更多新的、更实用的方法来降低石墨烯的摩擦。

在之前的研究中, Lee等^[15]发现,通过增加SiO₂/Si基底上石墨烯层的数量,可以减小石墨烯的摩擦。Zeng等^[16]通过对石墨烯进行等离子体处理,发现随着处理时间的延长,石墨烯与SiO₂/Si基底之间的粘附力增加,而其摩擦力却减小。Sasaki N等^[17]通过摩擦力显微镜(FFM)对石墨表面进行了摩擦试验,结果表明通过改变探针的滑动方向可以有效地调控石墨的摩擦力。

上述方法可以降低石墨烯的摩擦力,但操作过程复杂。本文作者提出了一种相对简单、通用的方法来调控机械剥离石墨烯的摩擦力。研究表明,石墨烯的面积在碳同素异形体中是最大的,由于其两边可用性,其比表面积达到了2 630 m²/g。因此,可以推断石墨烯具有很强的吸附能力^[18-19]。例如,在100个原子、195 K和1个大气压条件下,其对CO₂的吸附能力为35%^[20]。Ohba等^[21]通过模拟和试验证实了石墨烯的边界效应,且发现该边界点可以在低压下吸附二氧化碳。在本试验中,石墨烯的摩擦力由其边界效应所控制。在单层石墨烯的边界位置处有一些不饱和的悬挂键,其可以吸附空气中的氮气或二氧化碳。这种吸附作用能够抑制石墨烯的面外变形。当锥形探针和球形探针分别作用于单层石墨烯表面的不同区域时,由于探针在石墨烯表面滑动过程中产生的主导变形不同,不同的摩擦现象被观察到。通过改变针尖形状,有效地改变了褶皱效应的相对强度,从而调节了摩擦力对褶皱效应的依赖关系。然而,多层石墨烯的摩擦现象是相似的,由于它们的边界效应不显著。这是首次揭示在不同探针的作用下边界效应对石墨烯摩擦力的影响,并提供了一种有效抑制二维材料褶皱效应的试验方法。这一结果为石墨烯的纳米接触行为及其摩擦控制方法提供了大量的有效信息,对其在纳米器件中的应用具有重要指导意义。

1 试验部分

1.1 材料及制备

在这次试验中,用干氧化法制备出具有300 nm厚度SiO₂的掺N硅基片,分别在丙酮溶液、乙醇溶液和去离子水中超声处理10 min,然后用氮气将其吹干。

石墨烯是通过从高取向热解石墨(HOPG)中机械剥离制备的,将其从真空中取出之后放置在上述清洗过的SiO₂/Si基底上。此外,还使用了两种探针,即锥

形探针(A探针)和球形探头(B探针)。对于具有球形尖端的探针(探针B),硅球形粒子用Epikote粘附在无尖端悬臂梁(TL-NCH, 纳米传感器)上。试验前,用扫描电子显微镜(SEM)对针尖的形状进行了细致的表征。可以通过扫描电子显微镜(HITACHI S-4800)确定针尖的半径并确定它是否磨损。

1.2 试验方法

试验所采用的原子力显微镜是美国Asylum Research公司生产的MFP-3D型多功能原子力显微镜。采用轻敲模式(tapping)表征石墨烯的形貌,在侧向力模式下测量石墨烯的摩擦力。所选用的探针为锥形探针和球形探针。锥形探针的曲率半径、弹性系数和共振频率分别为10 nm、1.50 nN/nm和69.627 kHz;而球形探针的曲率半径、弹性系数和共振频率分别为600 nm、1.97 nN/nm和69.653 kHz。对于锥形探针,在摩擦试验前,用热噪声谱法^[22]确定探针尖端的法向力常数,并用sader法^[23]得到探针的侧向力常数;对于球形探针,在摩擦试验前,采用热噪声谱法确定探针的法向力常数,而采用磁悬浮法^[24]得到探针的侧向力常数。采用上述标定方法得到的锥形探针和球形探针的侧向力常数分别为483和1 464 nN/V。粘附力是通过测量拉拖力来确定的,拉拖力是将原子力显微镜尖端拉离石墨烯表面的最大力,其可以通过力-位移曲线直接测量得到。通过5次不同位置的拉拖力测量,得到了具有标准偏差的粘附力。用作粘附力测量的法向载荷为5 nN,且加载的频率为1 Hz。在所选的100 nm×100 nm的区域上,以恒定5 nN的载荷进行摩擦试验。通过施加7~25 nN范围的载荷,研究了载荷效应对石墨烯摩擦力的影响。分别使用锥形探针和球形探针,在选定的5 nm区域上进行了原子尺度的黏滑试验。所有的摩擦试验均在20~30 °C的温度和40%~50%的相对湿度下进行。

2 结果与讨论

2.1 不同厚度石墨烯不同区域的摩擦力

石墨烯的厚度是其摩擦力的一个重要影响因素,因为石墨烯的变形取决于其厚度^[25]。试验装置示意图及相应探针形貌的SEM照片如图1所示,图1还显示了在SiO₂/Si基底上用于摩擦试验的石墨烯的形貌图和截面高度图。由高度图可知:石墨烯的厚度分别为0.6、1.1和2.0 nm。据报道,单层石墨烯的理论厚度为0.35 ± 0.01 nm^[26],然而,由于AFM仪器的误差、SiO₂/Si基底与石墨烯之间的间隙以及石墨烯表面与尖端之间存在水膜,单层石墨烯的实际厚度为0.6~1.1 nm。

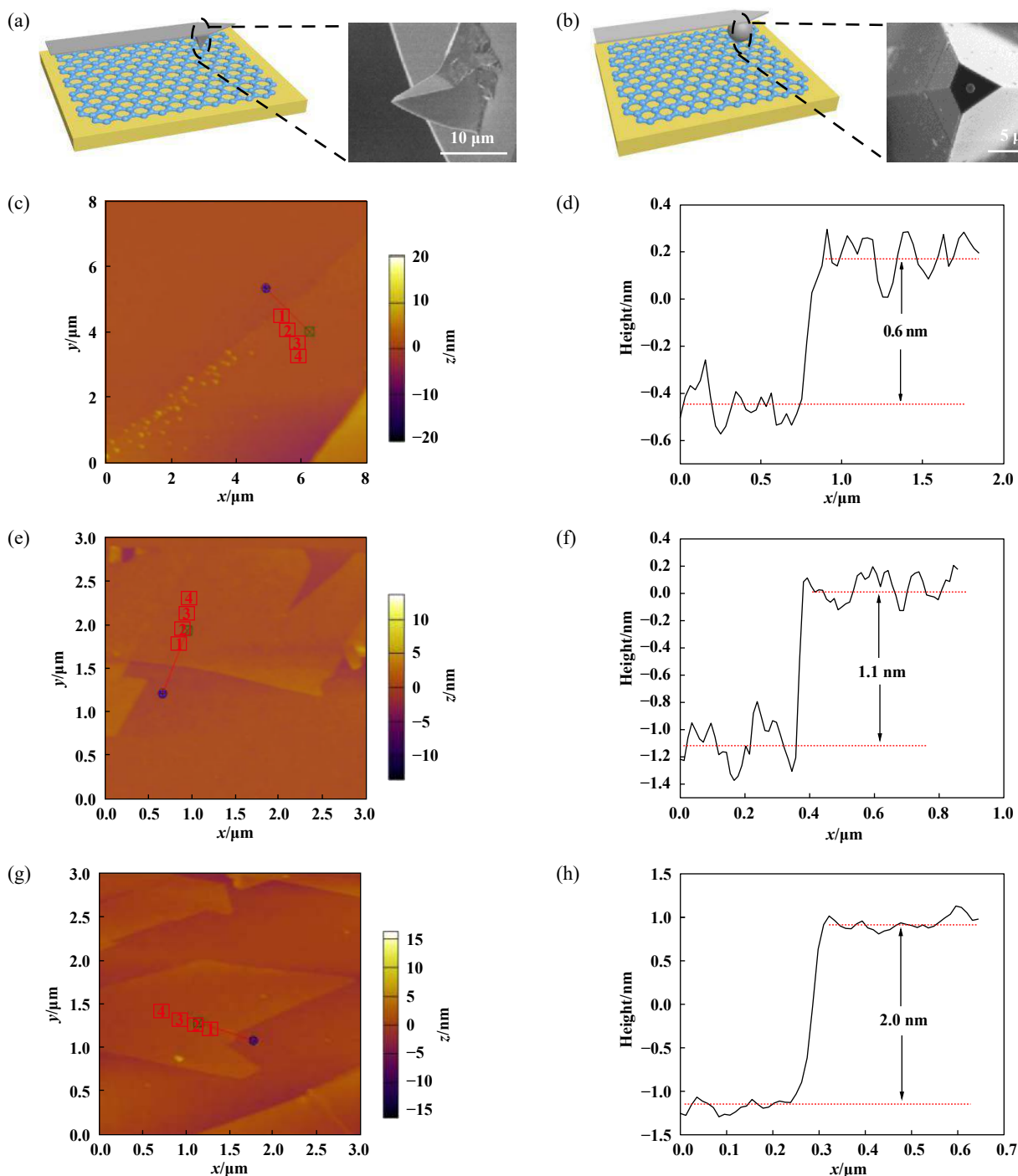


Fig. 1 (a) and (b): Illustration of AFM tip sliding on the graphene and SEM image of the AFM tip; (c), (e) and (g): AFM topographic image of graphene on SiO_2/Si substrate obtained under the tapping mode of AFM; (d), (f) and (h): Cross-sectional profiles of graphene with different thickness in topographic image

图1 (a)、(b): 试验装置图及相应探针的SEM照片; (c)、(e)、(g): 用AFM在轻敲模式下获得 SiO_2/Si 基底上石墨烯的形貌图; (d)、(f)、(h): 不同厚度石墨烯的截面高度图

从石墨烯与 SiO_2/Si 基底的边界位置到其中心区域, 依次选取4个区域, 用1、2、3和4标记, 分别用锥形探针和球形探针在所选取的石墨烯区域上进行摩擦试验. 图2(a)和图2(b)分别显示了在锥形探针和球形探针的作用下, 石墨烯的平均摩擦力随所选区域的变化

情况. 从图2(a)中可以看出, 当锥形探针作用于单层石墨烯表面的不同区域时, 即从石墨烯的边界位置到其中心区域, 单层石墨烯的平均摩擦力在逐渐地增大, 而多层石墨烯的平均摩擦力随作用区域的变化不明显. 然而, 从图2(b)中可以看出, 在球形探针的作用下,

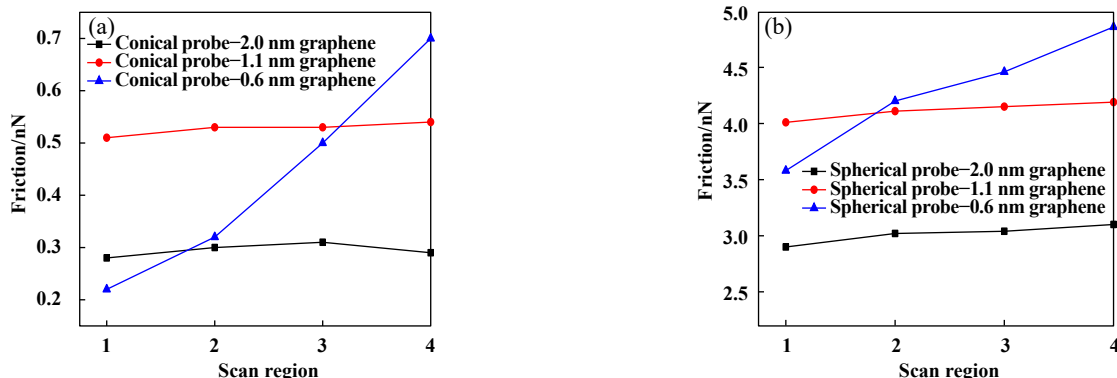


Fig. 2 Average friction force of four scan regions on graphene: (a) under the action of conical probe, (b) under the action of spherical probe

图 2 石墨烯 4 个扫描区域的平均摩擦力: (a)在锥形探针的作用下; (b)在球形探针的作用下

无论是单层石墨烯还是多层石墨烯, 石墨烯的平均摩擦力随所选区域的变化均不明显.

图3显示了石墨烯的摩擦力是法向载荷的线性函数. 从图3中可以看出: 石墨烯在不同探针的作用下, 随着法向载荷的增加, 其摩擦力有不同程度的增加.

图4(a)显示了石墨烯的厚度对其摩擦力的影响. 石墨烯的摩擦力随其厚度的增加而单调减少, 而与探针尖端形状无关. 这种厚度依赖性, 即摩擦力随着 SiO₂/Si 基底上石墨烯层数的增加而减少也被 Lee 等^[17] 通过原子力显微镜观察到. Lee 等认为这是由于石墨烯的刚度增加, 导致变形减少所致, 他还发现, 当石墨烯与云母表面紧密结合时, 厚度依赖性被抑制. 图4(b)显示了石墨烯的粘附力与其厚度之间的关系. 从图4中可以看出, 石墨烯的厚度对其粘附力的影响不显著, 而摩擦力却受其影响较明显, 由此可以推断出石墨烯的粘附力对其摩擦力的影响不显著.

在微纳机电系统(MEMS/NEMS)中, 摩擦能耗的一些可能机制如下: a)磨损; b)弹塑性表面变形效应;

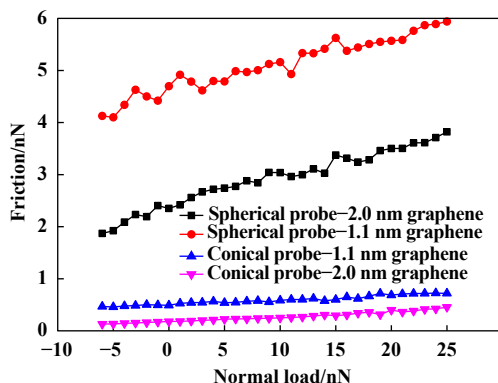


Fig. 3 The relationship between friction of graphene and normal load

图 3 石墨烯的摩擦力与法向载荷的关系

c)热效应; d)电子效应; e)键合; f)声子; g)环境/化学; h)结构效应. 在本文摩擦试验中, 摩擦能耗最有可能的机制是石墨烯表面的弹性变形和针尖的磨损. 为了排除所选区域的表面状况和尖端的磨损对石墨烯摩擦力的影响, 测量了石墨烯表面不同区域的粘附力. 图5显示了所选区域石墨烯的粘附力, 从图5中可以看出, 石墨烯的粘附力随所选区域的变化不明显, 这证实了所选区域的表面状况和尖端的磨损并不是石墨烯摩擦力变化的主要原因. 由此可以推断是石墨烯表面弹性变形的变化导致了其摩擦力的变化.

2.2 不同厚度石墨烯在不同区域的原子尺度黏滑行为

原子力显微镜的针尖在弹性石墨烯表面的滑动最终可由 Prandtl-Tomlinson (PT) 模型解释, 该模型提供了“黏滑”运动的经典描述^[27-28]. 从石墨烯与 SiO₂/Si 基底的边界位置到石墨烯的中心区域, 原子尺度的侧向力随扫描距离的增加而出现不同程度的增加, 当锥形探针和球形探针在 0.6 和 1.1 nm 的石墨烯表面上滑动时, 石墨烯黏滑图上均能观察到均匀锯齿状波. 侧向力作用下的每个黏滑运动的距离约为 0.25 nm, 相当于石墨烯的晶格间距. 在初始阶段, 黏滑运动的侧向力峰值随滑移次数逐渐增大. 初始黏滑峰值增大的强化效应可归因于初始接触过程中界面接触强度的演变或褶皱效应. 一段时间以后, 黏滑行为变得有规律, 且黏滑运动的峰值力保持稳定^[29].

当探针从石墨烯与 SiO₂/Si 基底的边界位置作用到石墨烯的中心区域时, 研究了边界效应对原子尺度摩擦强化效应的影响. 从图6中可以看出, 对于单层石墨烯, 当锥形探针从石墨烯的边界位置作用到其中心区域时, 原子尺度摩擦的强化程度在逐渐地增强, 而在球形探针作用下的石墨烯摩擦强化程度不是很明显. 然而, 从图7中可以看出, 对于多层石墨烯, 无论是

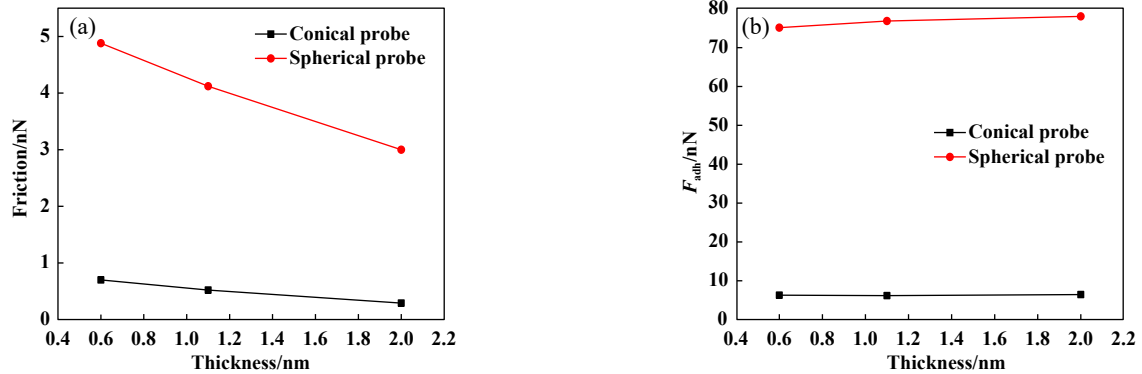


Fig. 4 (a) The relationship between friction and thickness of graphene; (b) The relationship between adhesion and thickness of graphene

图4 (a)石墨烯的摩擦力与其厚度的关系;(b)石墨烯的粘附力与其厚度的关系

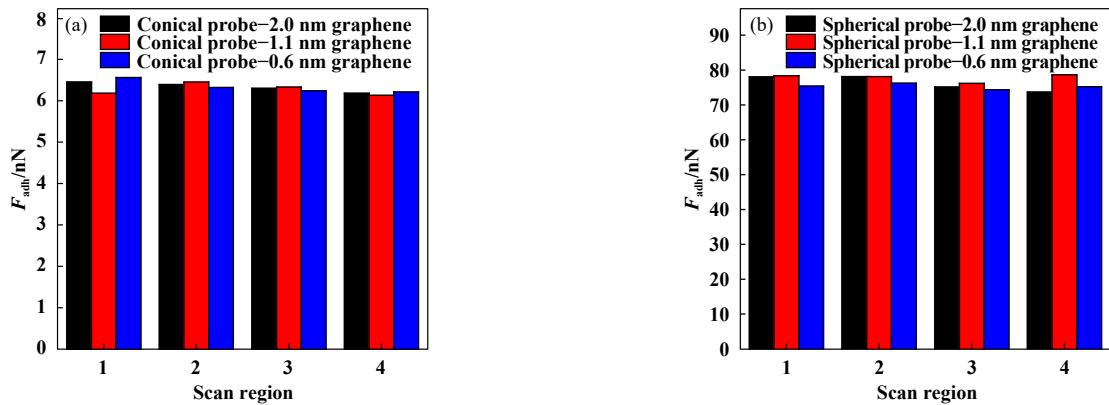


Fig. 5 The adhesion of four scan regions on graphene: (a) under the action of conical probe; (b) Under the action of spherical probe

图5 石墨烯4个扫描区域的粘附力:(a)在锥形探针的作用下;(b)在球形探针的作用下

在锥形探针还是球形探针作用下,原子尺度摩擦强化程度随区域的变化均不明显.这进一步证实了单层石墨烯的边界效应确实可以抑制石墨烯的面外变形,从而抑制褶皱效应,而多层石墨烯的边界效应不明显.

石墨烯在锥形探针作用下的原子尺度摩擦行为与球形探针作用下的略微不同.单层石墨烯在球形探针的作用下,在初始阶段,其摩擦力也随着扫描距离的增加而增大,但摩擦强化程度没有锥形探针作用下的明显.无论是在锥形探针还是球形探针的作用下,随着石墨烯厚度的增加,摩擦强化效果在逐渐地减弱,如图7所示.这是因为厚度的增加提高了石墨烯的面外弯曲刚度,减少了石墨烯的面外变形,减弱了褶皱效应.

2.3 石墨烯摩擦力的控制机理

当探针在石墨烯的表面滑动时,石墨烯的摩擦能耗可分为两部分,一部分来自于压缩接触区域,另一部分来自于褶皱区域.因此,石墨烯的摩擦力能够被表示为: $f = \tau \cdot A + \tau_p \cdot A_p$ ^[30],其中: f 表示为石墨烯的摩擦

力, τ 表示在载荷作用下单位面积的摩擦力, A 表示压缩接触区域的面积,在这次摩擦试验中,可以用尖峰处的圆形面积来表示. $\tau \cdot A$ 表示压缩接触区域的摩擦能耗.由褶皱效应引起的额外摩擦力可由 $\tau_p \cdot A_p$ 表示,其中: τ_p 表示褶皱区域单位面积的摩擦力, A_p 表示褶皱区域的面积.

根据JKR理论^[31],石墨烯的粘附力与探针曲率半径 R 存在着以下关系:

$$F_{adh} = -3\pi R \gamma_{sv} \quad (1)$$

式中: γ_{sv} 表示探针与石墨烯表面之间的界面能.

探针与石墨烯表面之间的接触半径 a_0 和 γ_{sv} 存在如下关系:

$$a_0 = (12\pi R^2 \gamma_{sv} / K)^{1/3} \quad (2)$$

式中: K 为折合弹性模量.折合弹性模量的计算公式为

$$K = \frac{4}{3} \left[\frac{1 - \nu_t^2}{E_t} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right] \quad (3)$$

式中: E_t 和 ν_t 分别表示探针的弹性模量和泊松比;而

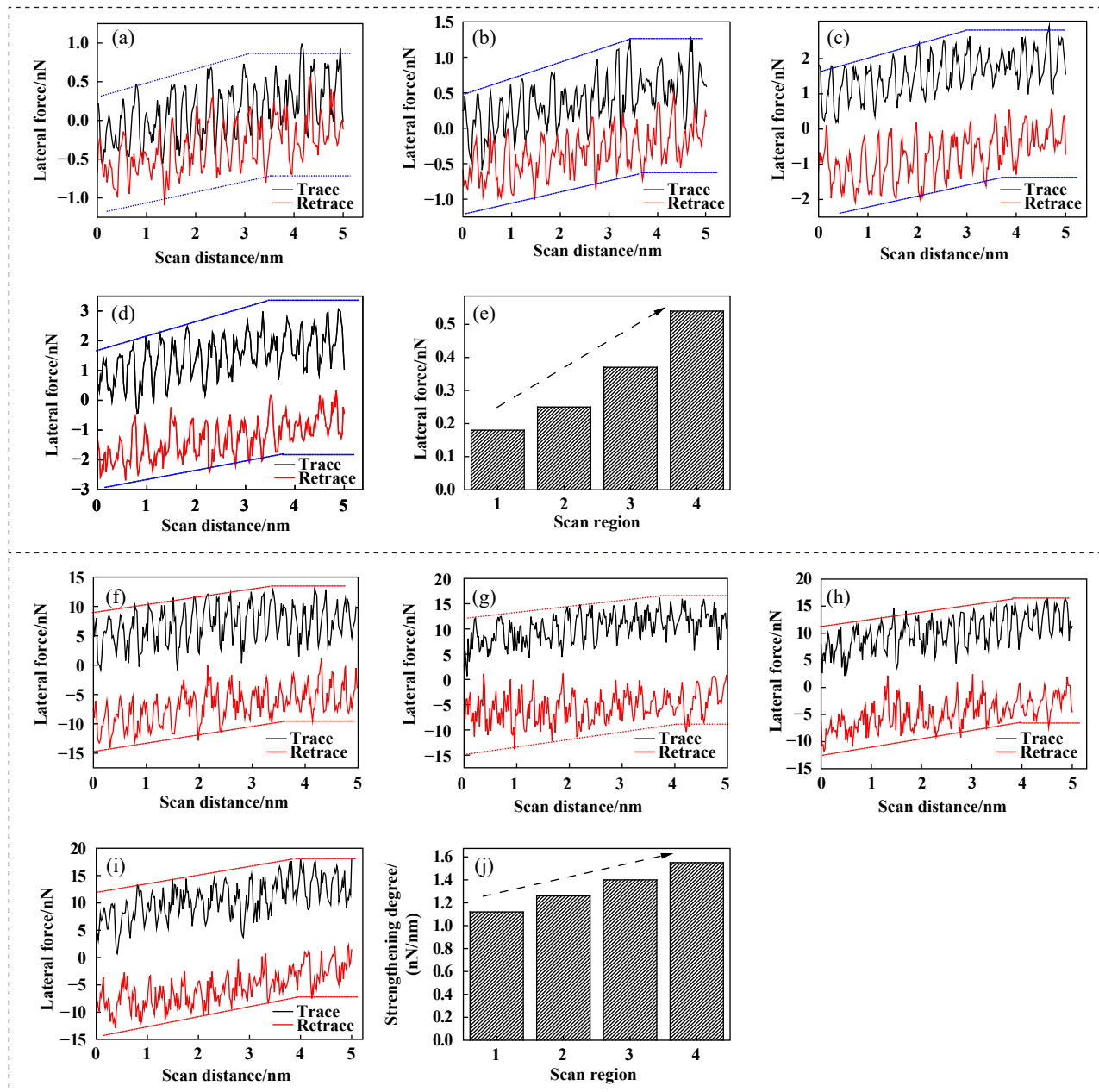


Fig. 6 (a~e): Under the action of conical probe [(a~d): The lateral force as a function of scan distance of four regions from the boundary of graphene to its central, (e) express the friction strengthening degree of four scan regions]; (g~i): Under the action of spherical probe [(f~i): The lateral force as a function of scan distance of four regions from the boundary of graphene to its central, (j) express the friction strengthening degree of scan regions. The applied load is 50 nN, the thickness of graphene is 0.6 nm
 图 6 (a~e)是在锥形探针的作用下[其中(a~d)表示从石墨烯的边界到其中心的4个区域的侧向力与扫描距离之间的关系; (e)表示摩擦强化程度与扫描区域的关系]; (f~j)是在球形探针的作用下[其中(f~i)表示从石墨烯的边界到其中心的4个区域的侧向力与扫描距离之间的关系; (j)表示摩擦强化程度与扫描区域的关系]. 所施加的载荷为 50 nN, 石墨烯厚度为 0.6 nm

E_s 和 ν_s 分别表示石墨烯的弹性模量和泊松比. 在本文中, SiO_2 微球的弹性模量和泊松比分别为73.1 GPa和0.16^[32]; 而石墨烯的弹性模量和泊松比分别为1 000 GPa和0.15^[10]. 根据公式(2-1)、(2-2)以及(2-3), 当采用锥形探针($R=10$ nm)和球形探针($R=600$ nm)作用于单层石墨烯表面的不同区域时(从边界到中心位置), 探针与

石墨烯表面的压缩接触区域的面积分别为0.001 8、0.001 8、0.001 7和0.001 7 nm^2 以及0.137、0.138、0.136和0.136 nm^2 . 由此可见, 当探针作用在石墨烯表面的不同区域时, 压缩接触区域的面积变化不大.

从图8~9可以看出, 当采用锥形探针和球形探针在单层石墨烯的表面滑动时, 主导的变形分别为褶皱

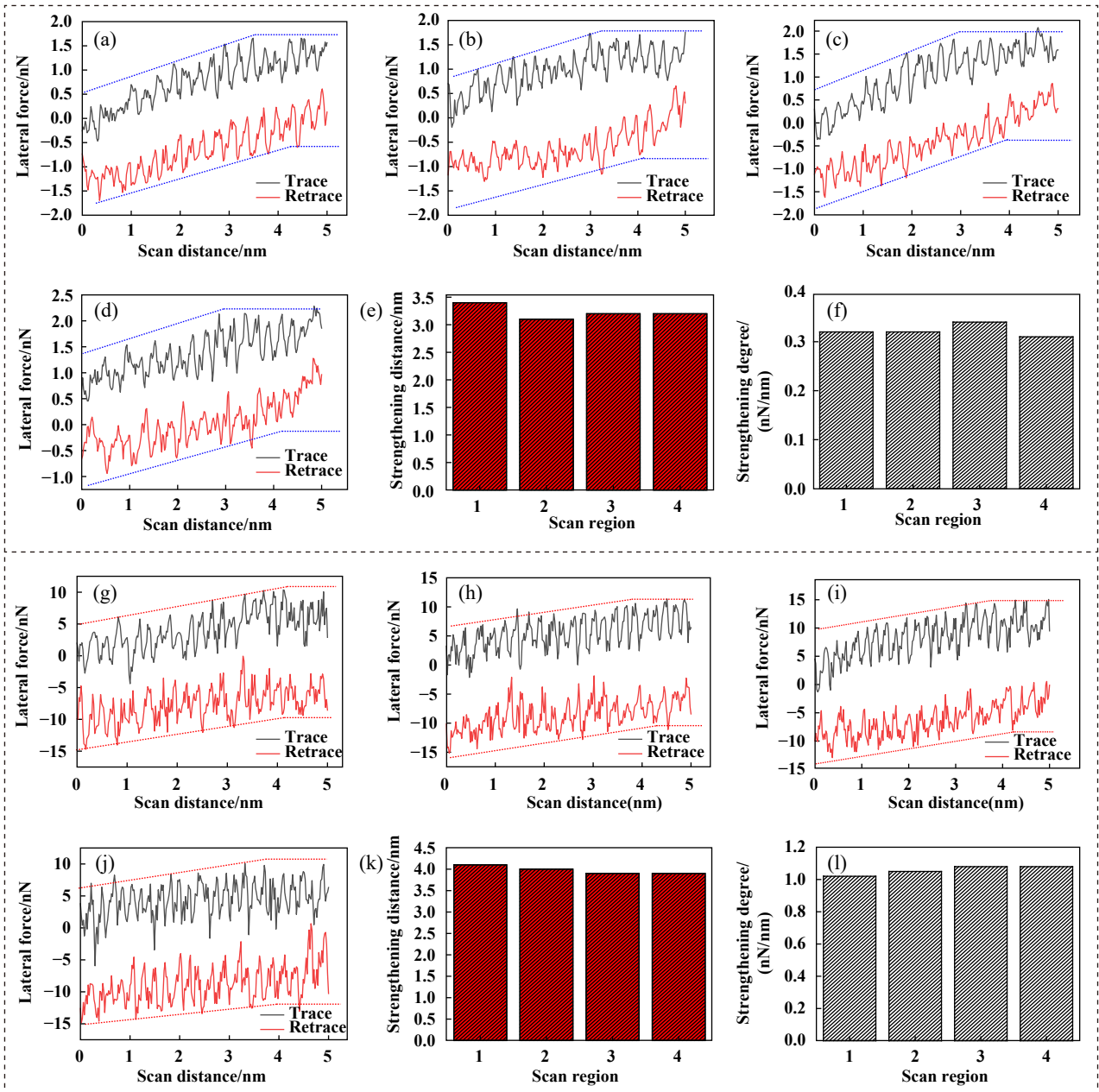


Fig. 7 (a~f): Under the action of conical probe, [(a~d): The lateral force as a function of scan distance of 4 regions from the boundary of graphene to its central, (e) and (f) express respectively the friction strengthening distance and friction strengthening degree of 4 scan regions]; (g~l): Under the action of spherical probe [(g~j): the lateral force as a function of scan distance of 4 regions from the boundary of graphene to its central, (k) and (l) express respectively the friction strengthening distance and friction strengthening degree of 4 scan regions. The applied load is 50 nN, the thickness of graphene is 1.1 nm

图7 (a~f)是在锥形探针的作用下[其中(a~d)表示从石墨烯的边界到其中心的4个区域的侧向力与扫描距离之间的关系, (e)和(f)分别表示4个扫描区域摩擦强化距离和程度]; (g~l)是在球形探针的作用下[其中(g~j)表示从石墨烯的边界到其中心的4个区域的侧向力与扫描距离之间的关系, (k)和(l)分别表示4个扫描区域摩擦强化距离和程度]. 所施加的载荷为50 nN, 石墨烯厚度为1.1 nm

区域和压缩接触区域. 在单层石墨烯的边界位置有一些不饱和的悬挂键, 其可以吸附空气中的氮气或二氧化碳, 这种吸附作用可以抑制石墨烯的面外变形. 因此, 对于锥形探针, 当探针的作用区域从石墨烯与硅

基底的边界位置到石墨烯的中心区域时, 吸附效应在逐渐地减弱, 对石墨烯面外变形的抑制作用也在逐渐减弱, 因此石墨烯的平均摩擦力在逐渐地增大. 而在球形探针的作用下, 单层石墨烯的平均摩擦力随所选

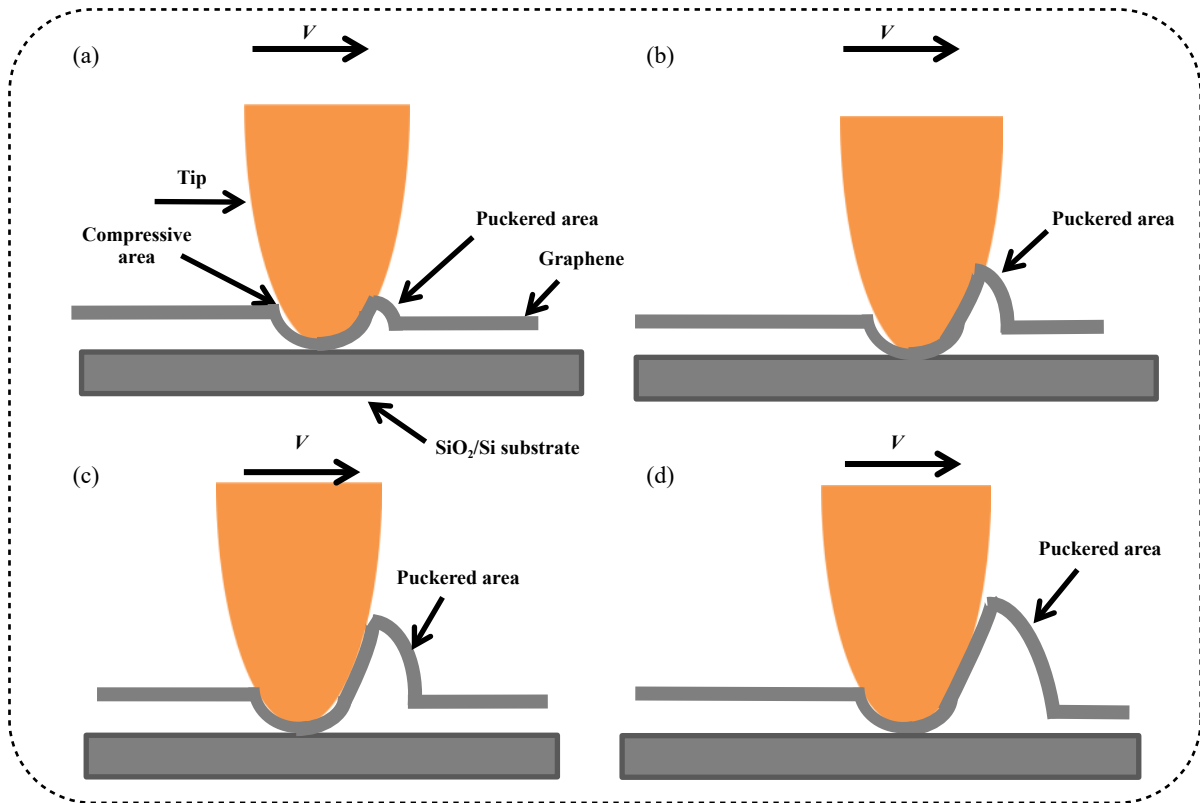


Fig. 8 Illustration of AFM tip (conical probe) sliding against the surface of single-layer graphene on SiO₂/Si substrate: (a) Boundary region between graphene and SiO₂/Si substrate; (b) The region near the boundary position of graphene; (c) The region near the central region of graphene; (d) The central region of graphene

图 8 锥形探针在硅基底上单层石墨烯表面滑动的示意图: (a)在石墨烯与硅基底的边界区域; (b)靠近石墨烯与硅基底的边界区域; (c)靠近石墨烯的中心区域; (d)石墨烯的中心区域

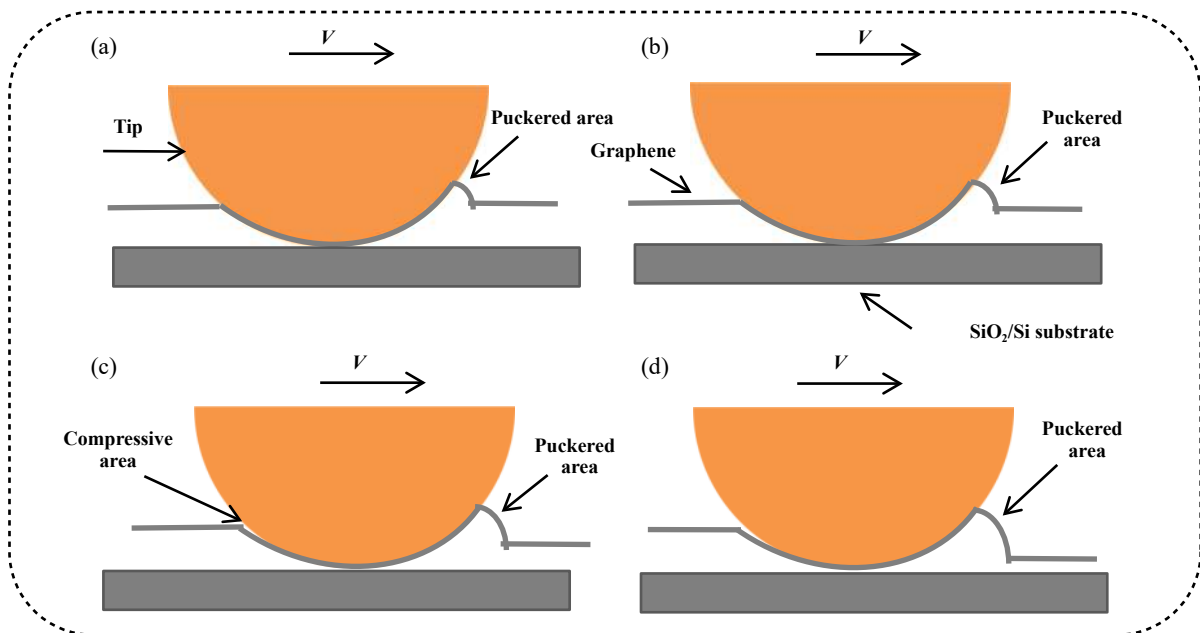


Fig. 9 Illustration of AFM tip (spherical probe) sliding against the surface of single-layer graphene on SiO₂/Si substrate: (a) Boundary region between graphene and SiO₂/Si substrate; (b) The region near the boundary position of graphene; (c) The region near the central region of graphene; (d) The central region of graphene

图 9 球形探针在硅基底上单层石墨烯表面滑动的示意图: (a)在石墨烯与硅基底的边界区域; (b)靠近石墨烯与硅基底的边界区域; (c)靠近石墨烯的中心区域; (d)石墨烯的中心区域

区域变化不明显. 然而, 由于多层石墨烯的边界效应不显著, 因此导致了石墨烯不同区域的平均摩擦力差别不明显.

3 结论

a. 在锥形探针的作用下, 单层石墨烯中心区域的平均摩擦力明显大于其边界位置处的平均摩擦力; 而在球形探针的作用下, 单层石墨烯的平均摩擦力随作用区域的变化不明显.

b. 对于多层石墨烯, 无论是在锥形探针还是球形探针的作用下, 其平均摩擦力随作用区域的变化均不明显.

c. 石墨烯的摩擦力随其厚度的增加而减小, 而粘附力随其厚度的变化不明显.

d. 石墨烯在球形探针作用下的摩擦强化效应强于锥形探针作用下的摩擦强化程度, 石墨烯的摩擦强化效应随其厚度的增加而减弱.

参考文献

- [1] Hornbeck L J. The DMD™ projection display chip: a MEMS-based technology[J]. MRS Bulletin, 2001, 26(4): 325–327. doi: 10.1557/mrs2001.72.
- [2] Yuan Songmei, Zhou Zhaoying, Wang Guohui, et al. MEMS-based piezoelectric array microjet[J]. Microelectronic Engineering, 2003, 66(1-4): 767–772. doi: 10.1016/S0167-9317(02)00997-8.
- [3] Ernst H, Jachimowicz A, Urban G A. High resolution flow characterization in Bio-MEMS[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2002, 100(1): 54–62. doi: 10.1016/S0924-4247(02)00187-5.
- [4] Bhushan B. Nanotribology and nanomechanics[J]. Wear, 2005, 259(7-12): 1507–1531. doi: 10.1016/j.wear.2005.01.010.
- [5] Patton S T, Zabinski J S. Failure mechanisms of a MEMS actuator in very high vacuum[J]. Tribology International, 2002, 35(6): 373–379. doi: 10.1016/S0301-679X(02)00018-X.
- [6] Kim K S, Lee H J, Lee C, et al. Chemical vapor deposition-grown graphene: the thinnest solid lubricant[J]. ACS Nano, 2011, 5(6): 5107–5114. doi: 10.1021/nn2011865.
- [7] Peng Yitian, Wang Zhuoqiong, Zou Kun. Friction and wear properties of different types of graphene nanosheets as effective solid lubricants[J]. Langmuir, 2015, 31(28): 7782–7791. doi: 10.1021/acs.langmuir.5b00422.
- [8] Berman D, Erdemir A, Sumant A V. Graphene: a new emerging lubricant[J]. Materials Today, 2014, 17(1): 31–42. doi: 10.1016/j.mattod.2013.12.003.
- [9] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666–669. doi: 10.1126/science.1102896.
- [10] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385–388. doi: 10.1126/science.1157996.
- [11] Lee C, Wei Xiaoding, Li Qunyang, et al. Elastic and frictional properties of graphene[J]. Physica Status Solidi (b), 2009, 246(11-12): 2562–2567. doi: 10.1002/pssb.200982329.
- [12] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS₂ transistors[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(3): 147–150. doi: 10.1038/nnano.2010.279.
- [13] Schwierz F. Graphene transistors[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(7): 487–496. doi: 10.1038/nnano.2010.89.
- [14] Wang Zhuo, Dong Zhaogang, Gu Yinghong, et al. Giant photoluminescence enhancement in tungsten-diselenide-gold plasmonic hybrid structures[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 1–8. doi: 10.1038/ncomms11283.
- [15] Li Qunyang, Lee C, Carpick R W, et al. Substrate effect on thickness-dependent friction on graphene[J]. Physica Status Solidi (b), 2010, 247(11-12): 2909–2914. doi: 10.1002/pssb.201000555.
- [16] Zeng Xingzhong, Peng Yitian, Lang Haojie. A novel approach to decrease friction of graphene[J]. Carbon, 2017, 118: 233–240. doi: 10.1016/j.carbon.2017.03.042.
- [17] Sasaki N, Kobayashi K, Tsukada M. Atomic-scale friction image of graphite in atomic-force microscopy[J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1996, 54(3): 2138–2149. doi: 10.1103/physrevb.54.2138.
- [18] Leenaerts O, Partoens B, Peeters F M. Adsorption of H₂O, NH₃, CO, NO₂, and NO on graphene: a first-principles study[J]. Physical Review B, 2008, 77(12): 125416. doi: 10.1103/physrevb.77.125416.
- [19] Park C, Anderson P E, Chambers A, et al. Further studies of the interaction of hydrogen with graphite nanofibers[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 1999, 103(48): 10572–10581. doi: 10.1021/jp990500i.
- [20] Ghosh A, Subrahmanyam K S, Krishna K S, et al. Uptake of H₂ and CO₂ by graphene[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(40): 15704–15707. doi: 10.1021/jp805802w.
- [21] Ohba T, Kanoh H. Intensive edge effects of nanographenes in molecular adsorptions[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2012, 3(4): 511–516. doi: 10.1021/jz2016704.
- [22] Stark R W, Drobek T, Heckl W M. Thermomechanical noise of a free v-shaped cantilever for atomic-force microscopy[J]. Ultramicroscopy, 2001, 86(1-2): 207–215. doi: 10.1016/S0304-3991(00)00077-2.
- [23] Sader J E, Sanelli J A, Adamson B D, et al. Spring constant calibration of atomic force microscope cantilevers of arbitrary shape[J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 103705. doi: 10.1063/1.4757398.
- [24] Li Q, Kim K S, Rydberg A. Lateral force calibration of an atomic force microscope with a diamagnetic levitation spring system[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(6): 065105. doi: 10.

- 1063/1.2209953.
- [25] Lee C, Li Q, Kalb W, et al. Frictional characteristics of atomically thin sheets[J]. *Science*, 2010, 328(5974): 76–80. doi: [10.1126/science.1184167](https://doi.org/10.1126/science.1184167).
- [26] Nemes-Incze P, Osváth Z, Kamarás K, et al. Anomalies in thickness measurements of graphene and few layer graphite crystals by tapping mode atomic force microscopy[J]. *Carbon*, 2008, 46(11): 1435–1442. doi: [10.1016/j.carbon.2008.06.022](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.06.022).
- [27] Prandtl L. Ein Gedankenmodell zur kinetischen Theorie der festen Körper[J]. *ZAMM - Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 1928, 8(2): 85–106. doi: [10.1002/zamm.19280080202](https://doi.org/10.1002/zamm.19280080202).
- [28] Tomlinson G A. CVI. A molecular theory of friction[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1929, 7(46): 905–939. doi: [10.1080/14786440608564819](https://doi.org/10.1080/14786440608564819).
- [29] Peng Yitian, Zeng Xingzhong, Yu Kang, et al. Deformation induced atomic-scale frictional characteristics of atomically thin two-dimensional materials[J]. *Carbon*, 2020, 163: 186–196. doi: [10.1016/j.carbon.2020.03.024](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.03.024).
- [30] Fang Liang, Liu Dameng, Guo Yuzheng, et al. Thickness dependent friction on few-layer MoS₂, WS₂, and WSe₂[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(24): 245703. doi: [10.1088/1361-6528/aa712b](https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa712b).
- [31] K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1971, 324(1558): 301–313. doi: [10.1098/rspa.1971.0141](https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141).
- [32] Paolicelli G, Tripathi M, Corradini V, et al. Nanoscale frictional behavior of graphene on SiO₂ and Ni(111) substrates[J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(5): 055703. doi: [10.1088/0957-4484/26/5/055703](https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/5/055703).