

# 晶界对单层多晶 $\text{MoS}_2$ 和 $\text{MoSe}_2$ 摩擦性能的影响

张欢<sup>a</sup>, 何文远<sup>a</sup>, 严鑫洋<sup>a</sup>, 郑学军<sup>a,b</sup>

(湘潭大学 a.机械工程学院, b.复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** **目的** 基于阿蒙顿固体摩擦理论和静电力理论, 利用原子力显微镜和开尔文显微镜研究晶界对单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$  纳米片摩擦性能的影响。**方法** 用化学气相沉积法制备单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$ , 结合摩擦显微镜模块、开尔文显微镜模块, 在单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$  不同区域上 (500 nm×500 nm), 研究晶界对其摩擦性能的影响。**结果** 对于单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$ , 有明显晶界区域的粗糙度、接触电势差和粘附力要大于无明显晶界区域或无晶界区域。有明显晶界区域的摩擦系数大于其他区域, 无明显晶界区域的摩擦系数大于无晶界区域。**结论** 探针在晶界处滑动时, 受到棘轮效应和压电效应的双重作用, 导致探针更大的变形量与更多的能量耗散, 因此有明显晶界区域的摩擦力显著增大。对于晶界不明显的区域, 其摩擦力仅受压电效应的作用, 也会有所增大。对于无晶界的区域, 因探针滑动时不会受到棘轮效应和压电效应的作用, 其摩擦力相对较小。

**关键词:** 原子力显微镜; 开尔文显微镜; 晶界;  $\text{MoS}_2$ ;  $\text{MoSe}_2$ ; 棘轮效应; 压电效应; 摩擦性能

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0188-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.028

## Effect of Grain Boundary on Friction Properties of Monolayer Polycrystalline $\text{MoS}_2$ and $\text{MoSe}_2$

ZHANG Huan<sup>a</sup>, HE Wen-yuan<sup>a</sup>, YAN Xin-yang<sup>a</sup>, ZHENG Xue-jun<sup>a,b</sup>

(a.School of Mechanical Engineering, b.Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**ABSTRACT:** Based on Amonotons' solid friction and the electrostatic force theory, the effect of grain boundary on the friction properties were studied by using atomic force microscope and Kelvin microscope for molybdenum disulfide and molybdenum diselenide nanosheets. The polycrystalline  $\text{MoS}_2$  and  $\text{MoSe}_2$  with monolayer were prepared by chemical vapor deposition, and the effect of grain boundary on the friction properties were measured in different regions (500 nm×500 nm) by friction microscopy module and Kelvin microscopy module. For the monolayer polycrystalline  $\text{MoS}_2$  and  $\text{MoSe}_2$ , the roughness, contact potential and adhesive force in the obvious grain boundary area for the morphology map were larger than those in the non-obvious grain boundary region or the non-grain boundary region. The friction coefficient in the obvious grain boundary region was larger than that in other regions, and the friction coefficient in the non-obvious grain boundary region was larger than that in the

收稿日期: 2018-10-30; 修订日期: 2019-02-14

Received: 2018-10-30; Revised: 2019-02-14

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”基金 (IRT-14R48); 国家自然科学基金 (11832016, 51775471)

Fund: Supported by Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in Ministry of Education (IRT-14R48), the National Natural Science Foundation of China (11832016, 51775471)

作者简介: 张欢 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为功能薄膜与器件。

Biography: ZHANG huan (1993—), Male, Master candidate, Research focus: functional films and devices.

通讯作者: 郑学军 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为低维纳米结构材料及微器件。邮箱: 201610161688@smail.xtu.edu.cn

Corresponding author: ZHENG Xue-jun (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: low-dimension structural materials and microdevices. E-mail: 201610161688@smail.xtu.edu.cn

non-grain boundary region. When the probe slid on the grain boundary, it was affected by both the ratchet effect and piezoelectric effect, and they led to the larger deformation and more energy dissipation. Therefore, there is higher friction in the obvious grain boundary region. For the increased friction in the non-obvious grain boundary region, it was only affected by piezoelectric effect. For the non-grain boundary regions, the friction were relatively small because the probe couldn't be affected by the ratchet effect and piezoelectric effect.

**KEY WORDS:** atomic force microscope; Kelvin microscope; grain boundary;  $\text{MoS}_2$ ;  $\text{MoSe}_2$ ; ratchet effect; piezoelectric effect; friction properties

现代工业、信息技术、生物医疗和航空航天等学科的迅猛发展, 以及设备工作环境的复杂和多样化, 对高性能材料的开发、制备和装置的制造加工技术提出了极大的挑战。在这种背景下, 传统的润滑油已经不能满足各种复杂环境的需求, 如高温、高压、强辐射等。因此, 急需开发新一代的润滑油和润滑剂<sup>[1-2]</sup>。而二硫化钼 ( $\text{MoS}_2$ ) 和二硒化钼 ( $\text{MoSe}_2$ ) 等过渡金属硫化物, 由于具有独特的层与层之间容易发生滑动的特性, 被作为润滑剂广泛应用于各种光电器件<sup>[3-4]</sup>、微机电系统<sup>[5]</sup>、润滑器件、传感器<sup>[6]</sup>以及柔性电子设备<sup>[7]</sup>。

随着科学技术的发展, 原子力显微镜的灵敏度可达到 0.1 nN 级, 这为纳米和原子尺度的摩擦实验提供了基础测量工具。另外原子摩擦模型被许多研究者用来解释纳米尺度摩擦中的行为, 并进行了理论和实验研究, 以了解负载、速度、接触面积以及材料表面粗糙度等表面因素和变形温度、湿度等环境参数对纳米材料摩擦特性的影响。这为探究晶界对单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$  摩擦性能的影响提供了理论和实验基础, 但目前关于晶界对摩擦性能的影响鲜有深入研究, 其机理解释也仅局限于棘轮效应<sup>[8]</sup>。

本文在阿蒙顿固体摩擦理论<sup>[9]</sup>和静电力理论<sup>[10]</sup>的基础上, 引入接触电势差 (CPD), 从棘轮效应和压电效应出发, 探究了晶界对单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$  摩擦性能的影响, 构建以固体摩擦理论为基础的纳米材料摩擦性能评估机制, 这对解决纳米材料实际应用中面临的纳米摩擦学问题具有重要意义。

## 1 实验

### 1.1 实验材料的制备

单层多晶  $\text{MoS}_2$  的制备: 利用化学气相沉积法 (CVD), 选择三温区管式炉进行生长, 用硫粉 (99.5%, 阿拉丁) 和三氧化钼 (99.95%, 阿拉丁) 作为前驱体, 分别称取 0.7 g 硫粉和 0.07 g 三氧化钼粉末, 并分别放在两个陶瓷舟中。将装硫粉的陶瓷舟放在管式炉一温区, 以 5 °C/min 速率加热到 140 °C, 保温 15 min; 将装三氧化钼粉末和硅片 (面朝下) 的陶瓷舟放在管式炉中间温区, 以 22 °C/min 速率加热到 650 °C, 保温 15 min。使用高纯氩气作为载流气

体和保护气体, 加热前先以 200 mL/min 的流量通氩气 20 min, 以排除反应管中其他杂质气体。然后以 150 mL/min 的流量直通到实验结束, 并冷却到室温。

单层多晶  $\text{MoSe}_2$  的制备: 称取 0.7 g 硒粉 (99.99%, 阿拉丁) 和 0.07 g 三氧化钼粉末, 将装硒粉的陶瓷舟放在管式炉一温区, 以 7 °C/min 速率加热到 200 °C, 保温 15 min。将装三氧化钼粉末和硅片 (面朝下) 的陶瓷舟放在管式炉中间温区, 以 22 °C/min 速率加热到 650 °C, 保温 15 min。用高纯氩气作为载流气体和保护气体, 然后以 200 mL/min 的流量通直到实验结束, 并冷却到室温。

### 1.2 材料的形貌、电学、力学表征

利用原子力显微镜 (Cypher S, AR, USA) 进行形貌、电学、力学表征, 如图 1 所示, 其中硅探针 (AC240TS, Olympus, USA) 的弹性常数和半径分别为 1.06 N/m 和 9 nm, 在加载力 12 nN 下, 使用原子力显微镜的接触模式获得样品形貌和厚度。用拉曼光谱仪 (InVia Raman microscope, Renishaw, UK) 确定样品的结构, 并通过拉曼光谱特征峰之间的距离来确定样品层数。用摩擦力显微镜 (FFM) 模块获得摩擦力图像。根据样品表面晶界的分布, 分别在多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$  样品上选择三个不同区域进行测试, 用 FFM 模块、扫描开尔文显微镜 (SKPM) 和粘附力测试模块, 对三个区域进行扫描测试, 获得电势差图、粘附力图和摩擦图, 进行高斯统计后, 获得 CPD、粘附力和摩擦力的数值。

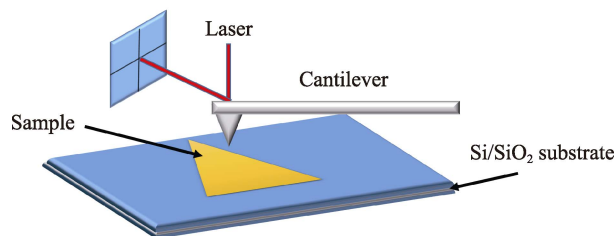


图 1 原子力显微镜测试示意图  
Fig.1 Schematic diagram for AFM test

### 1.3 实验原理

根据阿蒙顿提出的固体摩擦理论, 纳米尺度的摩擦学行为被描述为:

$$F_f = \mu \times (F_{ad} + F_n) \quad (1)$$

其中,  $F_f$  为接触面之间的摩擦力,  $\mu$  为摩擦系数,  $F_{ad}$  为粘附力,  $F_n$  为外部施加的载荷。  $F_{ad}$  由静电力、范德华力和毛细力组成<sup>[11]</sup>, 因此  $F_{ad}$  可以表示为:

$$F_{ad} = F_e + F_{vaw} + F_{cap} \quad (2)$$

其中,  $F_e$  为静电力,  $F_{vaw}$  为范德华力,  $F_{cap}$  为毛细力。在同一实验条件下,  $F_{vaw}$ 、 $F_{cap}$  是常数。  $F_e$  可以表示为:

$$F_e = -\pi \times \epsilon_0 \times R(V - V_c)^2 / d \quad (3)$$

其中,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $R$  为针尖半径,  $V$  为外部施加电压,  $V_c$  为接触电势差,  $d$  为针尖和样品之间的距离。

结合公式(1) — (3), 摩擦力可以表示为:

$$F_f = \mu \times (\pi \times \epsilon_0 \times R(V - V_c)^2 / d + F_n + F_{vaw} + F_{cap}) \quad (4)$$

当考虑棘轮效应时, 摩擦力公式表示为:

$$F_f = \mu \times (\pi \times \epsilon_0 \times R(V - V_c)^2 / d + F_n + F_{vaw} + F_{cap}) + F_r \quad (5)$$

其中,  $F_r$  为棘轮效应带来的额外摩擦力。

## 2 结果与分析

### 2.1 多晶 MoS<sub>2</sub> 和多晶 MoSe<sub>2</sub> 的形貌图、摩擦图和拉曼光谱

图 2a 和图 2c 是多晶 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 在加载力为

12 nN 时的扫描形貌图, 图 2b 和图 2d 是相应的摩擦图。从形貌图中红色实线所在位置的横截面高度可以看出, 图中 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 的厚度分别为 0.7 nm 和 0.72 nm, 由于单层 MoS<sub>2</sub> 的理论厚度为 0.61 nm<sup>[12]</sup>, 单层 MoSe<sub>2</sub> 的厚度通常为 0.70~1.0 nm<sup>[13]</sup>, 可以推算出图中多晶 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 均为单层。从形貌图可以看出, 所选区域表面颜色分布均匀, 说明表面相对平坦。对于区域 1, 无论是形貌图, 还是摩擦图, 晶界都很明显; 区域 2 形貌图中看不到明显晶界, 但与之对应的摩擦图可以看到明显的晶界; 对于区域 3, 无论是形貌图, 还是摩擦图, 都没有晶界。从摩擦图中穿过区域 1、2、3 的横截面摩擦曲线可以看出, 在经过区域 1、2 时, 曲线发生明显的起伏, 经过区域 3 时, 曲线基本没有波动, 说明探针在经过区域 1、2 时的摩擦力大于经过区域 3 时的摩擦力。

表 1 是 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 形貌图中区域 1、2、3 的粗糙度, 可以看出, 无论是 MoS<sub>2</sub>, 还是 MoSe<sub>2</sub>, 区域 1 的粗糙度明显大于区域 2、3, 而区域 2 和区域 3 的粗糙度基本相同。结合形貌图分析, 区域 1 的粗糙度偏大, 说明晶界处的形貌相对于其他区域有更多凸起粗糙峰; 区域 2 和区域 3 的粗糙度基本相同且小于区域 1, 说明区域 2、3 相对平坦, 无明显形貌凸起。

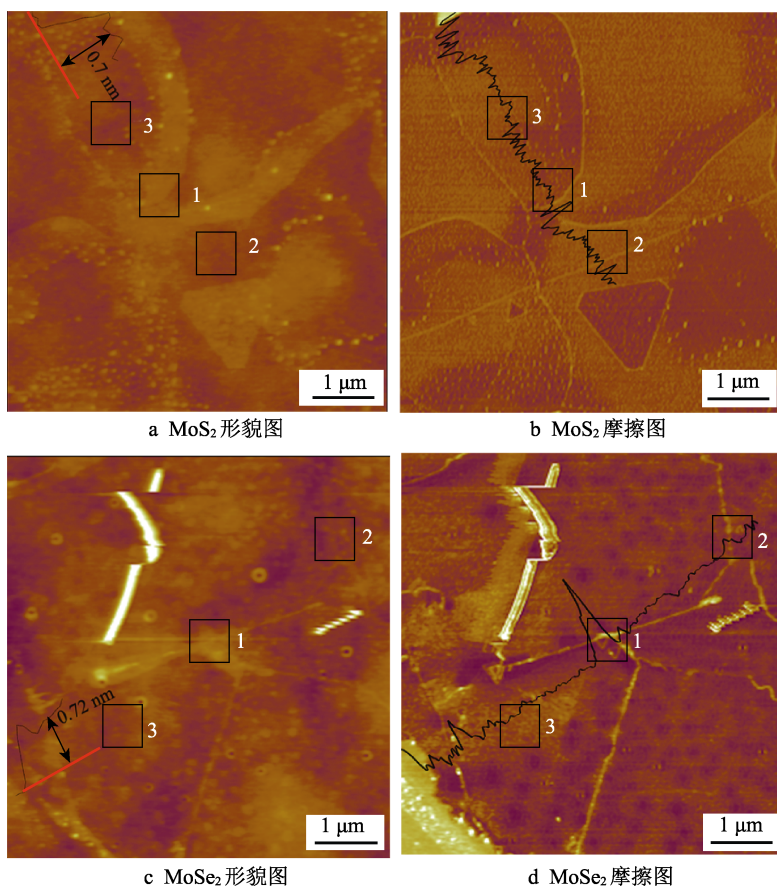


图 2 多晶 MoS<sub>2</sub> 和多晶 MoSe<sub>2</sub> 形貌图和摩擦图

Fig.2 The topographies of (a) polycrystalline MoS<sub>2</sub>, (c) polycrystalline MoSe<sub>2</sub>; the friction force maps of (b) polycrystalline MoS<sub>2</sub>, (d) polycrystalline MoSe<sub>2</sub>

表 1 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 不同区域的粗糙度  
Tab.1 The roughness of the scanning area of MoS<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>

Area	pm		
	1	2	3
MoS <sub>2</sub>	607.426	599.238	599.613
MoSe <sub>2</sub>	509.894	500.053	500.789

图 3a 和图 3b 是多晶 MoS<sub>2</sub> 和多晶 MoSe<sub>2</sub> 的拉曼光谱, 图 3a 中两个特征峰分别出现在 384.3 cm<sup>-1</sup> 和 402.9 cm<sup>-1</sup> 处, 分别对应于 MoS<sub>2</sub> 特征峰 E<sub>2g</sub><sup>1</sup> 和峰 A<sub>1g</sub>, 且特征峰之间的距离为 18.6 cm<sup>-1</sup>。因此可以判断出 MoS<sub>2</sub> 是单层的<sup>[14]</sup>。图 3b 中两个特征峰分别出现在 240.2 cm<sup>-1</sup> 和 287.1 cm<sup>-1</sup> 处, 分别对应于 MoSe<sub>2</sub> 特征峰 A<sub>1g</sub> 和峰 E<sub>2g</sub><sup>1</sup>, 且特征峰之间的距离为 46.9 cm<sup>-1</sup>。由此可以判断出 MoSe<sub>2</sub> 是单层的<sup>[15]</sup>。

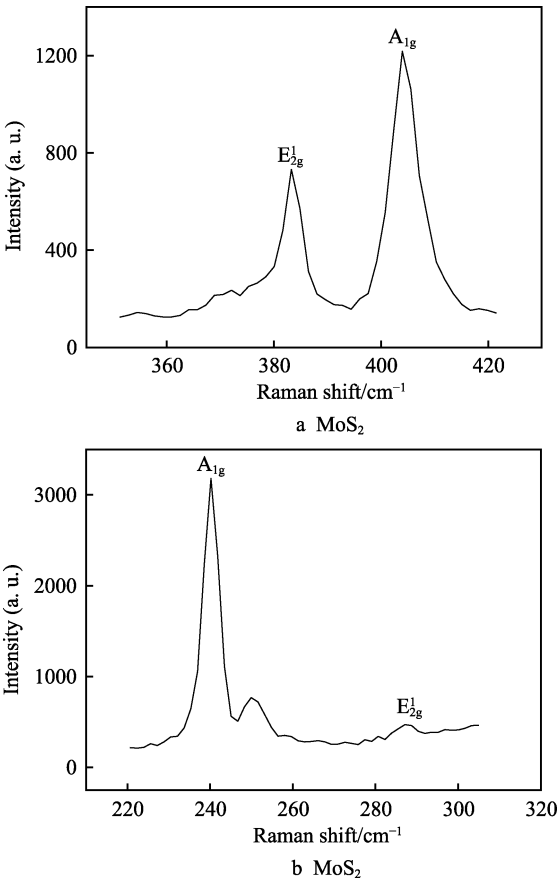


图 3 多晶 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 拉曼光谱  
Fig.3 Raman spectrum of (a) polycrystalline MoS<sub>2</sub> and (b) polycrystalline MoSe<sub>2</sub>

2.2 不同晶界分布区域的接触电势差和粘附力

表 2 是不同扫描区域的 CPD, 可以得出区域 1、2 的接触电势差明显低于无晶界的区域 3, 而且区域 1 和区域 2 的接触电势差差别不大。区域 1、2 包括晶界, 区域 3 没有晶界, 说明晶界对接触电势差有影

响, 可能是因为单层 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 的结构缺乏对称性, 使其具有压电效应<sup>[16-17]</sup>。当探针沿着样品表面滑动时, 使样品表现出面内压电性, 并使每一个纳米颗粒携带一个偶极子, 从而吸收空气中的极性粒子和带电粒子<sup>[18]</sup>。晶界处存在许多空位、位错和键变形等缺陷, 使吸收的极性粒子和带电粒子分布在晶界周围, 改变样品的表面势, 从而导致有晶界区域的接触电势差小于无晶界区域。

表 2 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 扫描区域的接触电势差  
Tab.2 The contact potential difference of the scanning area of MoS<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>

Area	mV		
	1	2	3
MoS <sub>2</sub>	-144.370	-142.390	-122.360
MoSe <sub>2</sub>	-205.950	-204.590	-186.640

图 4a 和图 4b 是在 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 不同扫描区域的粘附力图。从图 4 可以看出, 区域 1 的粘附力明显大于区域 2、3 的粘附力, 而区域 2 的粘附力明显大于区域 3 的粘附力。这是由于在晶界周围吸收的极性粒子和带电粒子改变了接触电势差, 同时根据公式(2) — (3)可以看出, 接触电势差的变化引起了粘附力的变化。

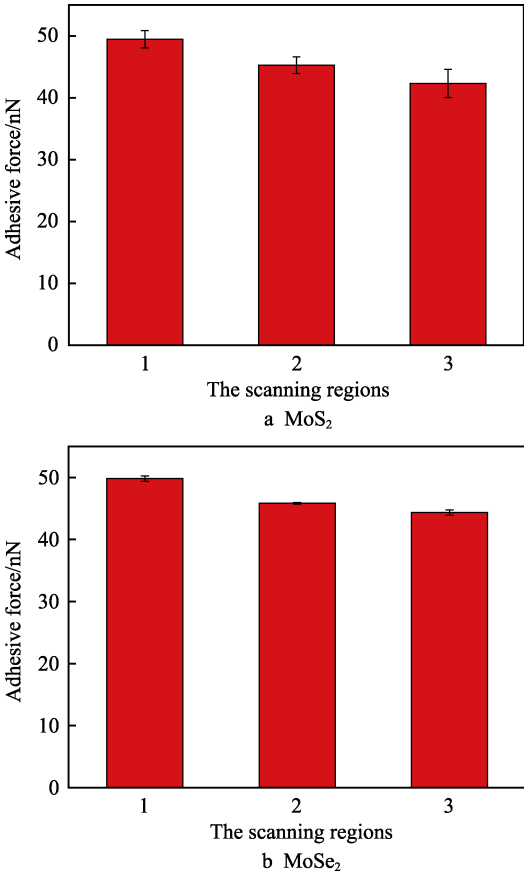


图 4 多晶 MoS<sub>2</sub> 和 MoSe<sub>2</sub> 不同区域的粘附力变化图  
Fig.4 The adhesive force indifferent grain boundary distribution areas (a) polycrystalline MoS<sub>2</sub>, (b) polycrystalline MoSe<sub>2</sub>



## 2.3 不同晶界分布区域的摩擦力和摩擦系数

图 5a 和图 5b 是在  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$  不同扫描区域、载荷为 10~60 nN 时的摩擦力曲线, 图 5c 和图 5d 是与之对应的不同区域的摩擦系数。从图 5a、b 可以得出, 区域 1 的摩擦力最大, 区域 2 的摩擦力大于区域 3。晶界处的摩擦系数要大于不明显或没有晶界区域的摩擦系数。单层多晶  $\text{MoS}_2$  中有晶界区域的摩擦系数比晶界不明显的区域高 0.002, 比没有晶界的区域高 0.003; 单层多晶  $\text{MoSe}_2$  中有晶界区域的摩擦系数比晶界不明显的区域高 0.002, 比没有晶界的区域高 0.007。由于区域 1 的晶界可能属于大角度晶界, 该区域原子排列比较混乱且结构疏松, 原子排列的畸变程度相对较大, 所以形貌图中能看到明显的晶界。当 AFM 探针向上扫描一个粗糙峰并沿着斜坡滑动时,

由于受到棘轮效应的影响, 它会受到更高的侧向力<sup>[8,19]</sup>, 反馈给 AFM 一个更高的探针扭转变形信号, 此时的摩擦力是材料摩擦和粗糙峰斜率的组合。另外由于受到压电效应的影响, 使得吸收的极性粒子和带电粒子分布在晶界周围, 这些极性粒子和带电粒子不仅改变了材料的表面势能, 而且当探针滑动时, 极性和带电粒子的移动增加了能量耗散<sup>[18]</sup>, 增大了摩擦力, 所以区域 1 呈现出较大的摩擦力。区域 2 的晶界可能属于小角度晶界, 与区域 1 处的晶界相比, 此处晶界上的很多原子为两个晶粒所共有, 原子排列的畸变程度相对较小, 所以区域 2 的形貌图中晶界不明显, 当 AFM 探针在此处滑动时, 不会引起探针额外的扭转变形, 但会受到压电效应带来的影响, 导致摩擦力偏大。无晶界区域不会受到棘轮效应和压电效应的作用, 所以区域 3 的摩擦力相对较小。

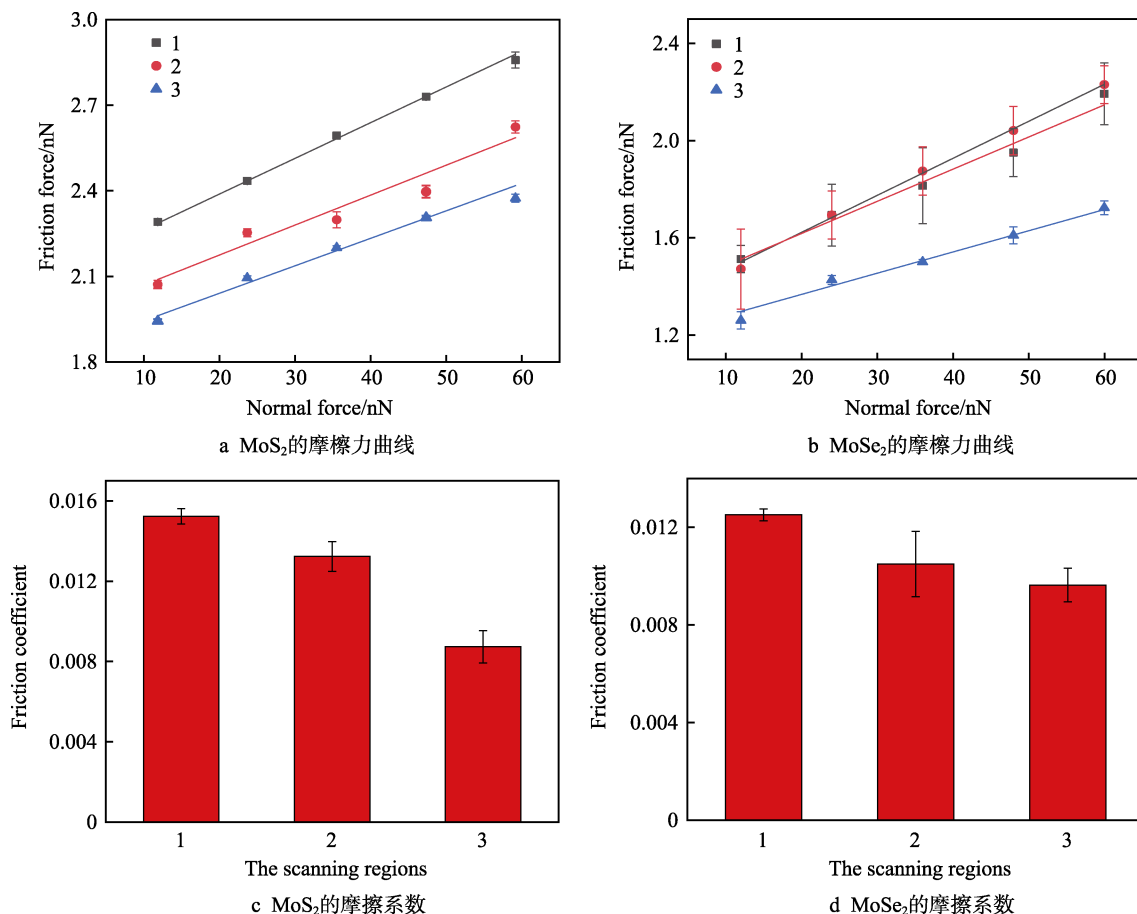


图 5 多晶  $\text{MoS}_2$  和多晶  $\text{MoSe}_2$  在不同载荷下的摩擦力变化曲线和不同晶界分布区域的摩擦系数变化

Fig.5 The frictional force vs normal force of (a) polycrystalline  $\text{MoS}_2$ ; (b) polycrystalline  $\text{MoSe}_2$ ; the friction coefficient in different grain boundary distribution regions of (c) polycrystalline  $\text{MoS}_2$ ; (d) polycrystalline  $\text{MoSe}_2$

## 3 结论

1) 对于单层多晶  $\text{MoS}_2$  和  $\text{MoSe}_2$ , 不同晶界分布区域的摩擦系数的大小顺序是: 有明显晶界区域>无明显晶界区域>无晶界区域。

2) 形貌图中有明显晶界的区域, 探针滑动时受

到棘轮效应和压电效应的双重作用。

3) 形貌图中有不明显晶界的区域, 探针滑动时仅受到压电效应的影响。

## 参考文献:

[1] GREENBERG R, HALPERIN G, ETSION I, et al. The

- effect of WS<sub>2</sub> nanoparticles on friction reduction in various lubrication regimes[J]. Tribology letters, 2004, 17(2): 179-186.
- [2] MURUGAN P, VIJAY K, YOSHIYUKI K, et al. Atomic structures and magnetism in small MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> clusters[J]. Physical review A, 2005, 71(6): 362-368.
- [3] YIN Z, LI H, LI H, et al. Single-layer MoS<sub>2</sub> phototransistors[J]. ACS nano, 2012, 6(1): 74-80.
- [4] LEE H S, MIN S, CHANG Y, et al. MoS<sub>2</sub> nanosheet phototransistors with thickness-modulated optical energy gap[J]. Nano letters, 2012, 12(7): 3695-3700.
- [5] CUMINGS J, ZETTL A. Low-friction nanoscale linear bearing realized from multiwall carbon nanotubes[J]. Science, 2000, 289(5479): 602.
- [6] LI H, YIN Z, HE Q, et al. Fabrication of single- and multilayer MoS<sub>2</sub> film-based field-effect transistors for sensing NO at room temperature[J]. Small, 2012, 8(1): 63-67.
- [7] LEE G H, YU Y J, CUI X, et al. Flexible and transparent MoS<sub>2</sub> field-effect transistors on hexagonal boron nitride-graphene heterostructures[J]. ACS nano, 2013, 7(9): 7931-7936.
- [8] MAHARAJ D, BHUSHAN B. Characterization of nanofriction of MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> nanotubes[J]. Materials letters, 2015, 142: 207-210.
- [9] LUCAS M, ZHANG X, PALACI I, et al. Hindered rolling and friction anisotropy in supported carbon nanotubes[J]. Nature materials, 2009, 8(11): 876-881.
- [10] MICHAËL G, SÉBASTIEN A, JÉRÔME D, et al. Analysis and specificities of adhesive forces between microscale and nanoscale[J]. IEEE transactions on automation science and engineering, 2013, 10(3): 562-570.
- [11] FEARING R S. Survey of sticking effects for micro parts handling[C]//International conference on intelligent robots and systems. Germany: IEEE Computer Society, 1995: 2212.
- [12] JIANG J W, PARK H S, RABZUK T. Molecular dynamics simulations of single-layer molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>)[J]. Journal of applied physics, 2013, 114(6): 183.
- [13] SHAW J C, ZHOU H, CHEN Y, et al. Chemical vapor deposition growth of monolayer MoSe<sub>2</sub> nanosheets[J]. Nano research, 2014, 7(4): 511-517.
- [14] LI S L, MIYAZAKI H, SONG H, et al. Quantitative Raman spectrum and reliable thickness identification for atomic layers on insulating substrates[J]. Acs nano, 2012, 6(8): 7381-8.
- [15] CHANG C H, FAN X, LIN S H, et al. Orbital analysis of electronic structure and phonon dispersion in MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub> monolayers under strain[J]. Phys rev B, 2013, 88(19): 1352-1355.
- [16] ZHU H, WANG Y, XIAO J, et al. Observation of piezoelectricity in free-standing monolayer MoS<sub>2</sub>[J]. Nat nanotechnol, 2015, 10: 1515.
- [17] WU W, WANG L, LI Y, et al. Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS<sub>2</sub> for energy conversion and piezotronics[J]. Nature, 2014, 514(7523): 470-4.
- [18] LAVINI F, CALÒ A, GAO Y, et al. Friction and work function oscillatory behavior for an even and odd number of layers in polycrystalline MoS<sub>2</sub>[J]. Nanoscale, 2018, 10(10): 561.
- [19] RUAN J A, BHUSHAN B. Atomic-scale and microscale friction studies of graphite and diamond using friction force microscopy[J]. Journal of applied physics, 1994, 76(9): 5022-5035.