

Frenkel-Kontorova模型中基底势振动的影响*

雷佑铭 李毅伟† 赵云平

(西北工业大学应用数学系, 西安 710129)

(2014年5月20日收到; 2014年6月26日收到修改稿)

基于一维 Frenkel-Kontorova 模型, 研究了振动的基底势对系统纳米摩擦现象的影响. 分别在相邻原子间的距离与周期势场的周期比为不可公度 (incommensurate)、可公度 (commensurate) 两种情形下, 探讨了基底势振动的振幅和频率对滞回现象 (hysteresis)、最大静摩擦力以及超滑现象的作用机理. 两种情形下, 固定频率, 随着振幅的增大, 滞回区域的面积以及最大静摩擦力都将减小, 对于不同的频率, 减小的趋势不同. 系统甚至产生了超滑现象. 但当频率过大时, 振幅的改变不会影响滞回区域的面积以及最大静摩擦力的大小, 此时与基底不加振动时的情形一致; 当振幅固定, 随着频率的增大, 滞回区域的面积将增大, 对于不同振幅, 增大的趋势不同. 特别地, 对于某些固定的振幅, 最大静摩擦力随着振动频率的增大先逐步减小直至出现超滑现象, 再进一步增大频率, 最大静摩擦力又转而逐步增大. 这一现象类似于共振, 表明存在最佳的振动频率促进系统内所有原子的共同运动, 使得整个系统的最大静摩擦力几乎消失. 另外, 两种情形的区别是, 对于某些固定的频率 (如 $\omega = 0.5$) 和不同的小振幅, 不可公度情形往往具有相同的平均终止速度, 而可公度情形则不同, 表明相同前提下后者具有更复杂的动力学行为.

关键词: Frenkel-Kontorova 模型, 滞回, 最大静摩擦力, 超润滑

PACS: 05.10.-a, 68.35.Af, 81.40.Pq, 82.20.Wt

DOI: 10.7498/aps.63.220502

1 引言

近 20 年, 随着纳米技术的快速发展, 人们对它的研究越来越广泛, 尤其是关于纳米级别的摩擦问题^[1]. 通过对一些低维的简单的摩擦模型^[2]的研究, 使得人们对一些复杂的纳米摩擦学现象有了较为清楚的了解和认识. 为了更深入地了解纳米摩擦学的一些现象, 许多学者借助于经典的 Frenkel-Kontorova (FK)^[3,4] 模型进行研究. FK 模型描述的是受外力驱动的相互作用的原子链受到周期性基底势力的作用. 如今 FK 模型已经成为研究纳米摩擦学领域一些复杂问题的一种理论工具.

目前为止, 关于 FK 模型的研究已经有很多^[5-19]. 由于受到外部激励的影响, 或者系统内部发生变化, 系统产生了许多有趣的现象. 例如, 滞回、超滑、黏滑等现象^[20-24]. 这些现象为我们更

好地了解纳米摩擦学机理提供了依据. 目前对于 FK 模型的研究, 无论是一维的, 还是多维的情形, 都只是针对有固定基底的情形^[25-29]. Vanossi 及其合作者对 FK 模型的研究^[28] 表明, 存在基底振动这一可能性. 在真实的物理系统中, 系统往往受到很多外部因素和内部因素的影响^[30-34], 可能造成基底产生振动. 本文主要通过研究基底在振动的情形下, 振动的频率以及振幅的变化对滞回、最大静摩擦力以及超滑等纳米摩擦现象的影响, 在研究过程中也发现了类似于共振的现象. 在数值模拟过程中, 不考虑噪声对系统的影响. 对于不可公度情形, 因为相邻原子间的距离与周期势场的周期比之间不可通约, 系统内的所有原子容易脱离基底的束缚做同步运动; 而可公度情形, 原子要被束缚在基底势的势阱中, 所以系统本身在不可公度^[10] 和可公度情形下有区别, 因此本文将分别针对不可公度 (以

* 国家自然科学基金 (批准号: 11102156) 和西北工业大学基础研究基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: woshiliyiwei@mail.nwpu.edu.cn

黄金分割为例) 以及可公度两种情形研究系统受基底振动的影响.

2 理论模型

本文研究的系统由 N 个相同原子构成的一维原子链组成, 模型中, 对于第 i ($1 \leq i \leq n$) 个原子满足如下无量纲运动方程:

$$\ddot{x}_i + \gamma \dot{x}_i + \frac{1}{2} \left[\sin \frac{2\pi}{a} x_i + \sin \frac{2\pi\beta}{a} x_i \right] \times [1 + A \cos \omega t] + \frac{d}{dx_i} \left[\sum_{i \neq j} V(|x_i - x_j|) \right] = F, \quad (1)$$

其中 x_i 表示第 i 个原子的位置; γ 为原子链的黏性阻尼系数; $\gamma \dot{x}_i$ 为阻尼项, 常用它来表示原子链由于受激发声子、光子、化学反应等产生的原子能量损耗; 通常是由 A 和 ω 分别表示基底振动的振幅以及频率; F 表示维持原子链运动的无量纲的外力. 在数值模拟过程中, 原子间的作用力采用 Morse 势:

$$V_{\text{int}}(r) = \frac{K}{2} [1 - e^{(b-r)}]^2, \quad (2)$$

其中 K 表示弹性系数, 链长为 L , 晶格常数 (原子链处于平衡状态时相邻原子间的距离) 为 $b = L/N$, a 和 $c = a/\beta$ 决定了基底势. 在数值模拟过程中, 采用周期性边界条件: $x_{i+N} = x_i + Nb$.

当 $b/a = 1$, 称为可公度. 当 $b/a = 144/233$, 称为黄金分割 (golden mean). 当 $b/a = 351/265$, 称为螺旋分割 (spiral mean). 黄金分割和螺旋分割属于不公度情形 [23].

本文采用四阶龙格-库塔法对方程 (1) 进行数学模拟. 系统在初始状态下, 粒子均匀分布, 处于静止状态, 各粒子间距为 b . 在绝热条件下, 外力 F 以步长 $\Delta F = 0.01$ 从 0 增加到 1, 对于每个 F , 为避免瞬态的影响, 系统 (1) 要演化足够长的时间才能到达稳定状态. 单原子分子链在外力 F 的作用下达到稳态时的位移和速度将作为下一个时刻的初始条件. 同样地, 在绝热条件下, 外力 F 以步长 $\Delta F = 0.01$ 从 1 减小到 0, 其他条件与外力 F 绝热增加过程相同. 为描述方便, 本文中称 $F = 0$ 时系统的平均速度为起始速度; $F = 1$ 时系统的平均速度为终止速度, 起始速度和终止速度统称起止速度.

3 数值模拟结果与分析

下面分别从不公度 (以黄金分割为例) 和可公度两种情形, 研究振动基底的频率 ω 以及振幅 A 对系统滞回以及最大静摩擦力的影响.

3.1 黄金分割 ($b/a = 144/233$) 情形

图 1 描述了在系统欠阻尼 ($\gamma = 0.7$) 状态下, 固定频率 ω , 针对不同振幅 A , 研究系统的平均速度 $\langle v \rangle$ 随外力 F 绝热增大和减小而变化的变化规律. 这里我们考虑的是黄金分割情形, $a = 1$, $b = 144/233$, $c = a/\beta = 144/89$, 与此同时链的长度 $L = 144$, 原子的个数为 $N = 233$.

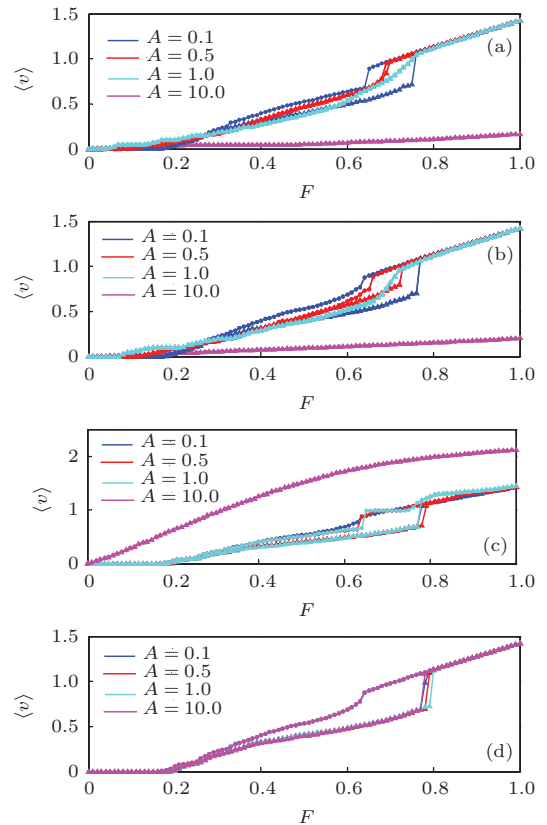


图 1 (网刊彩色) 平均速度随外力的变化规律 (a) $\omega = 0.5$; (b) $\omega = 1.0$; (c) $\omega = 10.0$; (d) $\omega = 100.0$; 图中三角形和圆点分别表示外力 F 绝热增加和减小的过程

如图 1 (a)—(c) 所示, 固定频率 ω , 随着振幅 A 的增大滞回区域的面积随之减小, 最大静摩擦力也有减小的趋势. 但由于频率的不同, 减小的趋势不同. 从图 1 (a)—(c) 随着频率 ω 的增大, 减小的趋势放缓. 由图 1 (a) 可见, 固定频率 $\omega = 0.5$, 改变振幅过程中, 当振幅较小 ($A = 0.1$, $A = 0.5$, $A = 1.0$) 时, 系统的起始速度都为 0, 终止速度也

都相同;但当振幅 $A = 10.0$ 时,系统的终止速度发生改变,不再与其他振幅条件下的终止速度相同.这种现象可从图 1 (b), (c) 中得到验证.表明固定频率,改变振幅过程中,当振幅较小时,基底的振动不改变系统的起止速度;当振幅相对较大时,基底的振动容易使系统的终止速度发生变化.值得关注的是,当频率分别取为 $\omega = 0.5$ 和 $\omega = 1.0$ 时,大振幅 ($A = 10.0$) 时随着外力 F 从绝热增加的过程中系统的平均速度一直低于其他小振幅条件下 ($A = 0.1, A = 0.5, A = 1.0$) 的平均速度;而频率 $\omega = 10.0$ 时,大振幅对应系统的平均速度则始终高于小振幅条件下的平均速度.另外,图 1 (c) 显示系统产生了超滑现象.超滑现象的出现表明基底的振动减小了基底势对原子的束缚,使原子变得更易移动.而图 1 (d) 表明,频率很大时(如 $\omega = 100.0$),振幅的改变则对滞回以及最大静摩擦力等现象几乎没有影响.

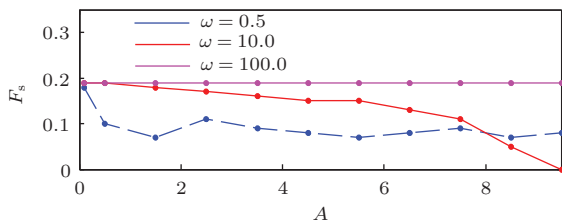


图2 (网刊彩色) 最大静摩擦力 F_s 随基底势的振幅 A 的变化规律

进一步,选取固定的频率,从总体上考察最大静摩擦力 F_s 随基底势振幅 A 变化而变化的规律,结果如图 2 所示.当基底势的频率 ω 在一定范围内,随着振幅的增大,最大静摩擦力有减小的趋势.甚至在一定条件下(如 $\omega = 10.0, A = 9.5$) 产生超滑现象.当频率 ω 过大时,振幅的改变对最大静摩擦力不再产生影响.

另一方面,固定振幅 A , 针对不同的频率 ω , 研究系统的平均速度 $\langle v \rangle$ 随外力驱动力 F 绝热增大和减小而变化的变化规律.如图 3 (a)—(d) 所示,随着频率 ω 的增大,滞回区域的面积有增大的趋势,但当 ω 增大到一定程度时(如 $\omega = 100.0$),滞回区域的面积几乎不再改变,且与基底不加振动^[23] 的情形基本一致.对于不同的振幅,增大的趋势不同,由图 3 (a)—(d) 随着振幅 A 的增大,滞回区域面积增大的趋势放缓.如图 3 (a), (b) 所示,当振幅 A 固定,频率的改变只影响滞回区域的面积和最大静摩擦力的大小,不影响系统的起止速度.而由图 3 (c), (d) 可见,系统在不同频率下的终止速度则不再相

同.图 3 表明,当振幅较小时 ($A = 0.1$ 和 $A = 0.5$),频率的改变不影响系统的起止速度;但当振幅较大时 ($A = 5.0$ 和 $A = 10.0$),频率的改变则影响了系统的终止速度.另外,由图 3 (c), (d) 可见,随着外力 F 的绝热增加,频率 $\omega = 10.0$ 时对应系统的平均速度始终大于其他频率 ($\omega = 0.1, \omega = 1.0, \omega = 100.0$).说明当振幅较大、频率取适当值时,系统在达到平稳状态后反而能有较大的平均速度.观察图 3 (d),随着频率 ω 的增大,系统的最大静摩擦力逐步减小,直至系统产生超滑现象,再进一步增大频率 ω ,最大静摩擦力又转而逐步增大,这一现象也类似于共振现象.

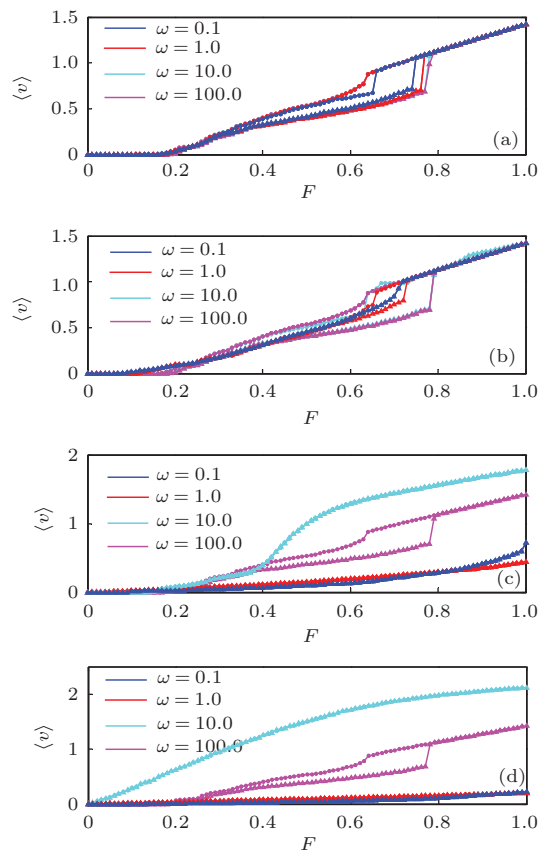


图3 (网刊彩色)(a) $A = 0.1$; (b) $A = 0.5$; (c) $A = 5.0$; (d) $A = 10.0$; 图中三角形和圆点,分别表示外力 F 绝热增加和减小的过程

进一步,图 4 从总体上描述了最大静摩擦力 F_s 随基底势的频率 ω 改变的变化过程.当基底振动的振幅 A 较小 ($A = 0.5$),随着基底势的振动频率 ω 的增大,最大静摩擦力 F_s 有增大的趋势;当基底振幅 A 较大 ($A = 5.0$),随着频率 ω 的增大,最大静摩擦力 F_s 先逐步减小,直到出现超滑现象,进一步增大频率 ω ,最大静摩擦力转而逐步增大,这一现象

类似于共振. 图3和图4中类似共振的现象表明存在最佳的振动频率促进系统内所有原子的共同运动, 使得整个系统的最大静摩擦力几乎消失.

综上, 由图1—图4可得, 不可公度情形下, 当振动的振幅较小时, 频率在一定范围内变化, 基底的振动只影响了系统的滞回面积和最大静摩擦力的大小, 不影响系统的起止速度. 然而当振幅较大, 随着频率的变化, 基底的振动则会影响系统的终止速度, 特别地, 此时存在适当的频率促进系统的所有原子脱离基底的束缚做同步运动, 从而出现超滑, 使得其最大静摩擦力几乎消失.

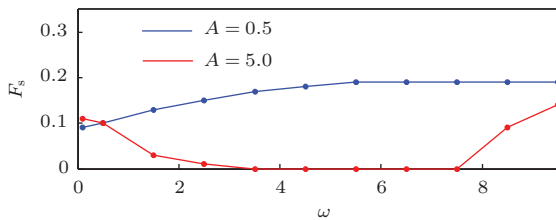


图4 (网刊彩色) 最大静摩擦力 F_s 随基底势的频率 ω 的变化过程

3.2 可公度 ($b/a = 1$) 情形

在这一部分将关注在可公度情形下, 滞回以及最大静摩擦力随着基底振动的变化而变化的规律. 在数值模拟过程中, 我们采用 $a = 1$, $c = a/\beta = 30/24$. 链的长度 $L = 140$, 此时原子的个数 $N = 140$. 图5描述了在系统欠阻尼 ($\gamma = 0.7$) 状态下, 固定频率 ω , 针对不同振幅 A , 研究系统的平均速度 $\langle v \rangle$ 随外驱动力 F 绝热增大和减小而变化的变化规律.

如图5(a)—(c)所示, 固定频率 ω , 随着振幅 A 的增大滞回区域的面积随之减小, 最大静摩擦力也有减小的趋势. 但由于频率的不同, 减小的趋势不同. 从图5(a)—(c)随着频率 ω 的增大, 减小的趋势放缓. 由图5(a)可见, 固定频率 $\omega = 0.5$, 改变振幅过程中, 当振幅较小 ($A = 0.1, A = 0.5, A = 1.0$) 时, 系统的起始速度都为0, 终止速度也相同, 当振幅 $A = 10.0$ 时, 系统的终止速度发生改变, 不再与其他振幅条件下的终止速度相同. 从图5(b)可知, 当频率固定, 对于不同的振幅, 系统的终止速度不再相同, 图5(c), (d)也有类似现象. 然而, 对比相同条件下的不可公度情形下(如图1(a)—(d))可得, 对于某些频率(如 $\omega = 0.5$) 和不同的小振幅(如 $A = 0.1, A = 0.5, A = 1.0$), 不可公度情形往往具有相同的平均终止速度, 可公度情形则不同, 表明

相同前提下后者具有更复杂的动力学行为. 值得关注的是, 当频率分别取为 $\omega = 0.5$ 和 $\omega = 1.0$ 时, 大振幅 ($A = 10.0$) 时随着外力 F 从绝热增加的过程中系统虽然有相对较小的平均速度, 却并非一直低于其他小振幅条件下 ($A = 0.1, A = 0.5, A = 1.0$) 的平均速度. 然而在相同条件下, 不可共度情形则不然(如图1(a), (b)所示); 而频率 $\omega = 10.0$ 时, 大振幅对应系统的平均速度则始终高于小振幅条件下的平均速度. 另外, 图5(c)显示系统产生了超滑现象. 超滑现象的出现表明基底的振动减小了基底势对原子的束缚, 原子变得更易移动. 而图5(d)表明, 频率很大时(如 $\omega = 100.0$), 振幅的改变则对滞回以及最大静摩擦力等现象几乎没有影响.

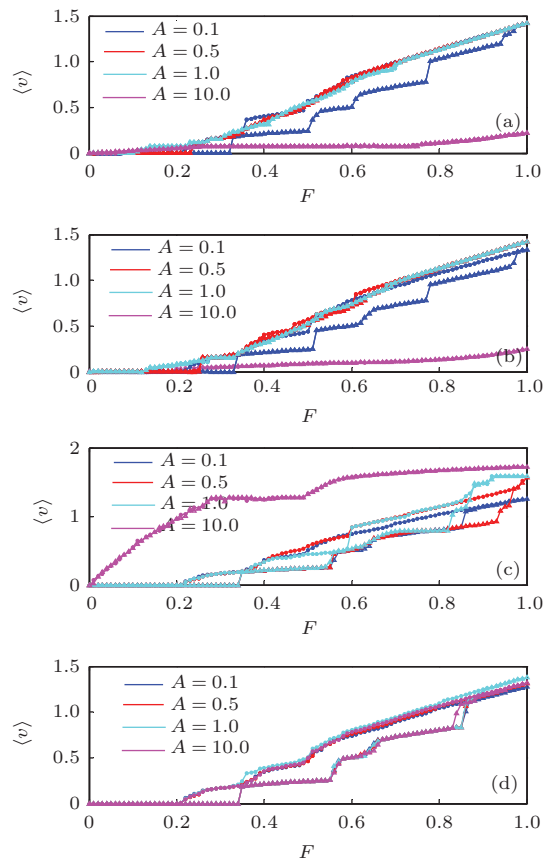


图5 (网刊彩色) (a) $\omega = 0.5$; (b) $\omega = 1.0$; (c) $\omega = 10.0$; (d) $\omega = 100.0$; 图中三角形和圆点分别表示外力 F 绝热增加和减小的过程

进一步, 从总体上考察最大静摩擦力 F_s 随基底势振幅 A 变化而变化的规律, 结果如图6所示. 当基底势振动的频率在一定的范围内, 随着振幅 A 的增大, 最大静摩擦力有减小的趋势. 甚至在一定条件下(如 $\omega = 10.0, A = 8.5$), 系统产生了超滑现象. 然而, 当频率过大时, 振幅的改变则对最大静

摩擦力不再产生影响.

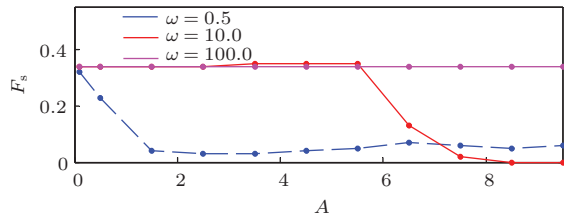


图6 (网刊彩色) 最大静摩擦力 F_s 随基底势的振幅 A 的变化情况

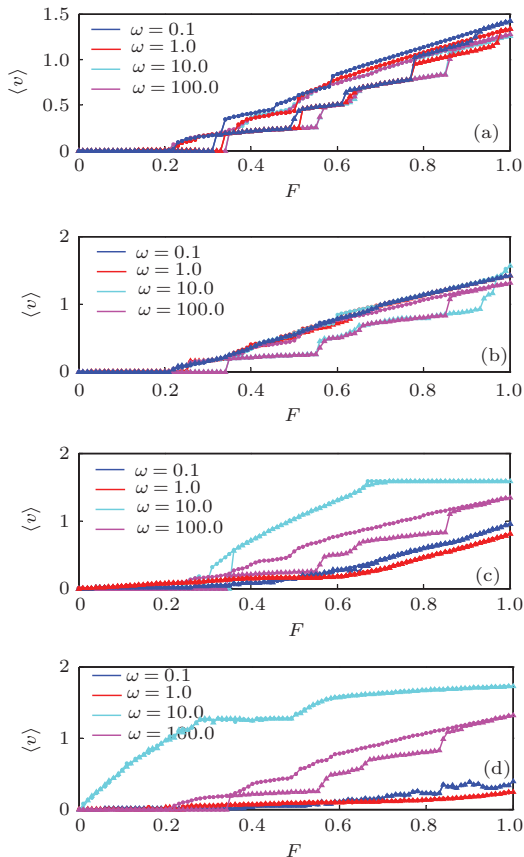


图7 (网刊彩色)(a) $A = 0.1$; (b) $A = 0.5$; (c) $A = 5.0$; (d) $A = 10.0$; 图中三角形和圆点分别表示外力 F 绝热增加和减小的过程

另一方面, 固定振幅 A , 针对不同的频率 ω , 研究系统的平均速度 $\langle v \rangle$ 随外驱动力 F 绝热增大和减小而变化的变化规律. 如图7(a)–(d)所示, 随着频率 ω 的增大, 滞回区域的面积有增大的趋势, 但当 ω 增大到一定程度时(如 $\omega = 100.0$), 滞回区域的面积几乎不再改变, 且与基底不加振动的情形基本一致. 对于不同的振幅, 增大的趋势不同, 从图7(a)–(d)随着振幅 A 的增大, 滞回区域面积增大的趋势放缓. 由图7可知, 当振幅 A 固定, 系统在不同频率下的终止速度不再完全相同. 然而, 对于小振幅 ($A = 0.1$ 和 $A = 0.5$)、不可公度情形(如图3(a), (b))系统却有着相同的终止速度. 另

外, 值得注意的是, 由图7(c), 当外力绝热增加的 $F = 0.35$ 之前, 频率 $\omega = 10.0$ 对应系统的平均速度小于其他频率 ($\omega = 0.1$, $\omega = 1.0$, $\omega = 100.0$) 的平均速度; $F = 0.35$ 之后, 频率 $\omega = 10.0$ 所对应的系统的平均速度大于其他频率下的平均速度. 说明当振幅较大, 频率取适当值时, 系统在达到平稳状态后反而能有较大的平均速度. 观察图7(d), 随着频率 ω 的增大, 系统的最大静摩擦力逐步减小, 直至系统产生超滑现象, 再进一步增大频率 ω , 最大静摩擦力又转而逐步增大, 这一现象也类似于共振现象.

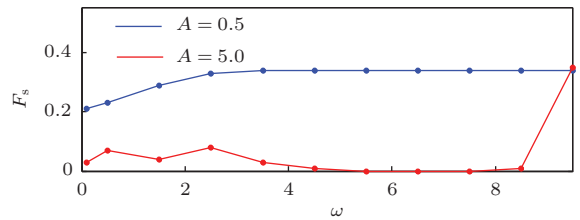


图8 (网刊彩色) 最大静摩擦力 F_s 随基底势的频率 ω 的变化情况

进一步, 图8从总体上描述了最大静摩擦力 F_s 随基底势的频率 ω 改变的变化过程. 当基底振动的振幅 A 较小 ($A = 0.5$), 随着基底势的振动频率 ω 的增大, 最大静摩擦力 F_s 有增大的趋势; 当基底振幅 A 较大 ($A = 5.0$), 随着频率 ω 的增大, 最大静摩擦力 F_s 先逐步减小, 直到出现超滑现象; 进一步增大频率 ω , 最大静摩擦力转而逐步增大, 这一现象类似于共振. 图7和图8中类似共振的现象表明存在最佳的振动频率促进系统内所有原子的共同运动, 使得整个系统的最大静摩擦力几乎消失.

4 结 论

借助一维FK模型, 研究外力驱动下基底的振动对滞回、最大静摩擦力以及超滑等纳米摩擦现象的影响. 结果表明: 无论在不公度或是可公度情形, 固定频率, 随着振幅的增加, 滞回区域的面积和最大静摩擦力均将逐渐减小. 然而, 一旦频率选取过大, 滞回区域的面积以及最大静摩擦力将不随振幅的变化而改变. 另外, 固定振幅, 滞回区域的面积将随振动频率的增大而增大. 不过, 当频率增大到一定程度时, 滞回区域将不再变化, 与基底不加振动的情形一致. 特别地, 对于某些固定的振幅, 最大静摩擦力随着频率的增大先逐渐减小直至出现

超滑现象, 进一步增大频率, 最大静摩擦力又转而增大. 此种现象类似于共振, 表明存在最佳的振动频率促进系统内所有原子的同步运动, 使得整个系统的最大静摩擦力几乎消失. 对于不可公度情形, 因为相邻原子间的距离与周期势场的周期比之间不可通约, 系统内的所有原子容易脱离基底的束缚做同步运动; 对于可公度情形, 虽然原子要被束缚在基底势的势阱中, 但由于基底势受到振动的影响, 特别是一旦振动的频率选择得恰当, 这种束缚将变得极不稳定, 此时原子也会逃离势阱做同步运动.

不可公度和可公度的区别在于: 对于某些固定的频率和不同的小振幅, 不可公度情形往往具有相同的平均终止速度, 而且随着外力的增加系统的平均速度呈现一定的规律, 而可公度情形则有所区别, 相同前提下后者往往具有不同的终止速度, 而且其平均速度的规律也不明显. 表明相同前提下, 后者由于受到基底势更强烈的耦合作用从而具有更复杂的动力学行为. 通过对基底振动的研究, 对人们设计超润滑材料, 以及制造出具有工程应用价值的新材料有一定的借鉴作用.

参考文献

- [1] Luo J B, Li J J 2010 *Lubr. Eng.* **35** 1 (in Chinese) [雒建斌, 李津津 2010 润滑与密封 **35** 1]
- [2] Rozman M G, Urbakh M, Klafter J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 683
- [3] Braun O M, Kivshar Y S 2004 *The Frenkel-Kontorova Model: Concepts, Methods, and Applications* (Berlin: Springer) pp1-5
- [4] Braun O M, Kivshar Y S 1998 *Phys. Reports* **306** 1
- [5] Yang Y, Duan W S, Yang L, Chen J M, Lin M M 2011 *Euro. Phys. Lett.* **93** 16001
- [6] Braun O M, Dauxois T, Paliy M V, Peyrard M 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3598
- [7] Braun O M, Vanossi A, Tosatti E 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 026102
- [8] Vanossi A, Röder J, Bishop A R, Bortolani V 2000 *Phys. Rev. E* **63** 017203
- [9] Li X L, Liu F, Lin M M, Chen J M, Duan W S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2589 (in Chinese) [李晓礼, 刘锋, 林麦麦, 陈建敏, 段文山 2010 物理学报 **59** 2589]
- [10] Yang Y, Wang C L, Duan W S, Shi Y R, Chen J M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130501 (in Chinese) [杨阳, 王苍龙, 段文山, 石玉仁, 陈建敏 2012 物理学报 **61** 130501]
- [11] Xu A G, Wang G R, Chen S G, Yang Z R 1999 *Prog. Phys.* **19** 109 (in Chinese) [许爱国, 王光瑞, 陈式刚, 杨展如 1999 物理学进展 **19** 109]
- [12] Vanossi A, Manini N, Divitini G, Santoro G E, Tosatti E 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 056101
- [13] Tekić J, He D, Hu B 2009 *Phys. Rev. E* **79** 036604
- [14] Mali P, Tekić J, Ivić Z, Pantić M 2012 *Phys. Rev. E* **86** 046209
- [15] Guerra R, Vanossi A, Ferrario M 2007 *Surf. Sci.* **601** 3676
- [16] Jia R J, Wang C L, Yang Y, Gou X Q, Chen J M, Duan W S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 068104 (in Chinese) [贾汝娟, 王苍龙, 杨阳, 苟学强, 陈建敏, 段文山 2013 物理学报 **62** 068104]
- [17] Mali P, Tekić J, Pantić M 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **19** 3469
- [18] Soloviev I I, Klenov N V, Pankratov A L, Il'ichev E, Kuzmin L S 2013 *Phys. Rev. E* **87** 060901
- [19] Bhattacharya M, Dutta A, Barat P 2013 *Phys. Rev. B* **87** 214107
- [20] Lin M M, Duan W S, Chen J M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 026201
- [21] Braun O M, Bishop A R, Röder J 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 3692
- [22] Braun O M, Dauxois T, Paliy M V, Peyrard M 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1295
- [23] Vanossi A, Santoro G, Bortolani V 2004 *J. Phys.: Condens. Matter* **16** 2895
- [24] Manini N, Vanossi A, Santoro G E, Tosatti E 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046603
- [25] Woulanché R L, Vanossi A, Manini N 2013 *Phys. Rev. E* **88** 012810
- [26] Yang Y, Wang C L, Duan W S, Chen J M 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 030503
- [27] Vanossi A, Manini N, Caruso F, Santoro G E, Tosatti E 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 206101
- [28] Vanossi A, Röder J, Bishop A R, Bortolani V 2003 *Phys. Rev. E* **67** 016605
- [29] Vanossi A, Bishop A R, Bortolani V 2004 *Nanotechnology* **15** 790
- [30] Lei Y M, Guan F L 2012 *Int. J. Mod. Phys. C* **23** 1250071
- [31] Yung K L, Lei Y M, Xu Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 010503
- [32] Vanossi A, Benassi A, Varini N, Tosatti E 2013 *Phys. Rev. B* **87** 045412
- [33] Capozza R, Vanossi A, Vezzani A, Zapperi S 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 085502
- [34] Guerra R, Vanossi A, Urbakh M 2008 *Phys. Rev. E* **78** 036110

Effect of the oscillation of substrate potential in driven Frenkel-Kontorova chains*

Lei You-Ming Li Yi-Wei[†] Zhao Yun-Ping

(Department of Applied Mathematics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 20 May 2014; revised manuscript received 26 June 2014)

Abstract

In this paper, the effect of the oscillation of the substrate potential in a one-dimensional Frenkel-Kontorova model is considered. The relationship between the oscillating amplitude, frequency of the substrate and the nanofriction phenomena such as hysteresis, maximum static friction force, super-lubricity are investigated. Similar results are obtained for the two cases in which the ratios of the atomic distance to the period of potential field of the substrate potential field are incommensurate and commensurate respectively. The results show that on one hand, with the appropriate frequency, the area of the hysteresis will decrease while the amplitude increases, and the tendency of the decrease depends on the frequency. In particular, suitable frequency and amplitude give rise to super-lubricity. However, when the frequency is too high, the result is the same as those in the case without oscillation. On the other hand, fixing the amplitude, the area of the hysteresis will increase with the increase of frequency in spite of tendencies being different. At the same time, on a whole, the maximum static friction force has an increasing tendency. Interestingly and importantly, for a certain amplitude, as the frequency increases, the maximum static friction force first decreases to zero (corresponding to super-lubricity), and then increases. That is, there is an optimum oscillating frequency which makes the system have the minimum static friction force. Furthermore, the difference between the above two circumstances lies in that for commensurate interfaces, there are the same start-up velocities for a certain frequency and various small amplitudes, which is different from the incommensurate mating contacts. Hence, it shows that the latter has a more complex dynamic behavior under the same hypothesis.

Keywords: Frenkel-Kontorova model, hysteresis, maximum static friction force, super-lubricity

PACS: 05.10.-a, 68.35.Af, 81.40.Pq, 82.20.Wt

DOI: 10.7498/aps.63.220502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11102156) and the Northwestern Polytechnical University Foundation for Fundamental Research, China

† Corresponding author. E-mail: woshiliyiwei@mail.nwpu.edu.cn