

表面摩擦与润滑

基于 Lennard-Jones 势的界面摩擦黏滑行为
动力学研究

龚中良, 周成博, 彭远征

(中南林业科技大学 机电工程学院, 长沙 410004)

摘要: **目的** 研究界面摩擦过程中, 原子间的相互作用关系及规律。 **方法** 基于 Lennard-Jones (L-J) 势理论, 建立界面摩擦黏滑行为的非线性弹性振子模型, 并以 α -Fe 晶体为例进行仿真分析。 **结果** 在假设条件下, 质块振动主振频率约为 16 Hz; 运动端宏观速度 $v=1\times 10^{-3}$ m/s 是主振幅值增大的临界值; 刚度系数 k 和阻尼系数 c 分别在 $1.0\sim 100$ N/m, $1.0\times 10^{-4}\sim 1.0\times 10^{-1}$ N/(m/s) 范围内变化时, 黏滑频率和主振频率分别随二者的增大而提高; 摩擦界面真实接触面积 S 在 $1.0\times 10^{-18}\sim 1.0\times 10^{-14}$ m² 内变化时, 增大摩擦界面间的法向压力将导致黏滑强度增大。仿真计算表明: 摩擦界面单个原子受到的激励力与原子间作用势及晶格常数有关, 质块的黏滑行为与激励力、相对滑动速度、质块质量、系统刚度系数、系统阻尼系数及真实接触面积等内外因素有关。 **结论** 相对滑动速度或真实接触面积增大时, 黏滑强度增强; 质块质量、系统刚度系数、系统阻尼系数增大时, 黏滑强度减弱。系统刚度系数、系统阻尼系数增大时, 黏滑频率增大; 质块质量增大时, 黏滑频率减小; 相对滑动速度、真实接触面积对黏滑频率的影响不显著。

关键词: L-J 势; 非线性弹性振子; 阻尼; 刚度; 黏滑; 界面摩擦

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)09-0036-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.007

Dynamics of Stick-slip on Interfacial Friction Based on the Lennard-Jones Potential Theory

GONG Zhong-liang, ZHOU Cheng-bo, PENG Yuan-zheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the interaction relationship and discipline between atoms in interface friction process. **Methods** A non-linear elastic oscillator model of stick-slip friction during interfacial friction was established based on Lennard-Jones potential

收稿日期: 2015-04-21; 修订日期: 2015-05-10

Received: 2015-04-21; Revised: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405036); 湖南省自然科学基金项目(11JJ3060); 湖南省科技计划项目(2012GK3144); 中南林业科技大学研究生科技创新基金资助项目(CX2015B22)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51405036), the Natural Science Foundation of Hunan Province (11JJ3060), the Science and Technology Project of Hunan Province (2012GK3144), and Scientific Innovation Fund for Graduate of Central South University of Forestry and Technology (CX2015B22)

作者简介: 龚中良(1965—), 男, 湖北人, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦润滑技术及理论。

Biography: GONG Zhong-liang(1965—), Male, from Hubei, Ph. D., Professor, Research focus: friction lubrication technology and theory.

theory, then alpha Fe crystal was taken as an example and simulation experiment was conducted. **Results** Under the condition of hypothesis, the main vibration frequency of the mass was 16 Hz; the macro velocity equaling to $v=1\times10^{-3}$ m/s was the critical value of the increase of main amplitude values. The stick-slip frequency and main vibration frequency increased respectively along with the augment of the stiffness and damping coefficient in the ranges of 1.0 ~ 100 N/m and $1.0\times10^{-4} \sim 1.0\times10^{-1}$ N/(m/s), respectively. When the real contact area of friction interface ranged from 1.0×10^{-18} to 1.0×10^{-14} m², increasing the normal pressure of friction interface caused the augment of stick-slip intension. The simulation calculation results showed that the excitation force on the upper interface atoms was related to the interatomic potential and the lattice constants, and the stick-slip behavior was related to the excitation force, relative sliding velocity, block mass, system stiffness, damping coefficient and the real contact area. **Conclusion** When the relative sliding velocity or real contact area increased, the stick-slip intensity increased. When the mass of the sliding block or system stiffness, damping coefficient increased, the stick-slip strength was weakened. When the system stiffness or damping coefficient increased, the stick-slip frequency increased. When the mass of the sliding block increased, the stick-slip frequency decreased. The effects of the relative sliding velocity and the real contact area on the stick-slip frequency were not significant.

KEY WORDS: L-J potential; non-linear elastic oscillator; damping; stiffness; stick-slip; interfacial friction

摩擦过程中的黏滑行为不仅影响机电系统的稳定性,而且直接影响系统的使用寿命。长期以来,人们对摩擦过程中黏滑现象产生的机理进行了大量的理论和实验研究,从宏观来看,产生原因基本上可以归结为三类:弹性变形^[1-2]、熔化凝结^[3]和黏着分离^[4]。然而,自 Mate^[5]首次用原子力显微镜发现原子尺度下的黏滑现象以来,越来越多的研究者借助原子力显微镜,运用分子动力学模拟^[6-10]及声子耗散^[11-12]等理论,对微摩擦条件下的黏滑行为进行研究,并取得了大量的研究成果。

微尺度下摩擦界面原子间耦合作用模型是分子动力学模拟研究黏滑行为的基础。对于原子间耦合作用模型,人们先后提出了“鹅卵石”模型^[13]及声子模型,如 Independent Oscillator (IO)模型^[14]、Frenkel-Kontorov (FK)模型^[15]和 FK-Tomlinson (FKT)模型^[16],此外还有许中明等提出的基于摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型^[17],丁凌云等在分析 IO 模型特点的基础上提出的耦合振子模型^[18]。在上述各类模型中,原子间相互作用的刚度系数通常被认为是常数或者直接采用宏观尺度下的材料参数,但是根据 Lennard-Jones (L-J) 势理论^[19],原子间刚度系数与原子间的距离有关,呈现出典型的非线性弹性特性。

文中以 L-J 势理论为基础,通过对界面摩擦过程中原子间相互作用关系的分析,建立反映界面摩擦黏滑行为的非线性弹性振子模型,仿真计算界面摩擦过程中内外因素对黏滑频率及黏滑强度的影响规律。

1 非线性弹性振子模型

使晶体结合在一起的作用力称为化学键。化学

键主要有离子键、共价键、范德瓦耳斯键和金属键。虽然它们的起源和性质不同,但是都具有一个共同特征,即结合力可以分为排斥和吸引两部分。晶体原子之间的相互作用关系通常采用 L-J 作用势 $u(r)$ 来描述:

$$u(r)=4\varepsilon(\sigma^m r^{-m}-\sigma^n r^{-n}) \tag{1}$$

式(1)中, m 和 n 为模型参数, ε 和 σ 为 L-J 常数, r 为两原子之间的距离。一般情况下, $m=12,n=6$ 。根据式(1),原子间相互作用力 $f(r)$ 为:

$$f(r)=\frac{du(r)}{dr}=4\varepsilon(6\sigma^6 r^{-7}-12\sigma^{12} r^{-13}) \tag{2}$$

式(2)中,前项为吸引力,后项为排斥力。

令 $k(r)$ 为两原子间距为 r 时的等效刚度系数,则有:

$$k(r)=\frac{df(r)}{dr}=4\varepsilon(156\sigma^{12} r^{-14}-42\sigma^6 r^{-8}) \tag{3}$$

选取材料 Fe 为研究对象,根据式(1)——(3),并结合表 1 中所列的参数值,可分别计算出原子间作用势 $u(r)$ 、作用力 $f(r)$ 及等效刚度系数 $k(r)$ 与原子间距 r 的关系,如图 1 所示。

表 1 几种材料的 L-J 势能参数^[20]
Tab. 1 The L-J potential energy parameters of several kinds of materials^[20]

材料	ε /eV	σ /nm
Cu	0.415	0.2277
Fe	0.18	0.2110
Al	0.3754	0.2551
C	0.002 637	0.3385

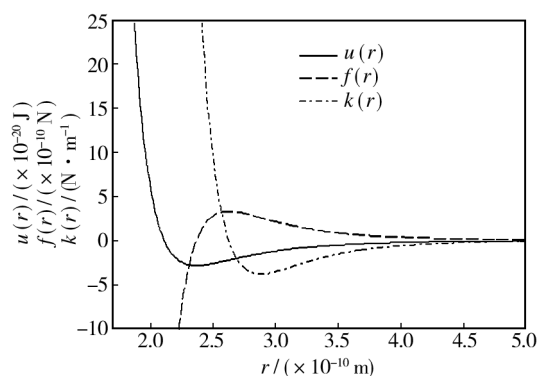


图1 L-J势、作用力和等效刚度系数与原子间距的关系
Fig.1 The relationship of L-J potential, force and equivalent stiffness coefficient with atomic spacing

令 $f(r) = 0$, 则原子处于受力平衡时的间距 $r_0 = 0.23684 \text{ nm}$ 。从图1可以看出, 当 $r > r_0$ 时, 吸引力大于排斥力, 此时两原子互相吸引。随着原子间距离减小, 虽然吸引力和排斥力都增大, 但排斥力比吸引力增大得更快, 所以当 $r = r_0$ 时, 原子处于平衡位置。当 $r < r_0$ 时, 两原子间作用力表现为排斥力性质。显然, 原子间的作用力不是简单的线弹性力, 而是具有一定指数关系的非线性弹性力。因此, 在建立原子耦合振子模型时, 不能简单认为原子间的作用为弹性作用, 应引入等效刚度系数来反映振子的非线性弹性特性。

对于界面摩擦, 如果仅考虑上界面表面层原子在滑动过程中受到下界面表面层原子的作用, 则可建立由一维无限原子链所组成的界面层原子间非线性弹性作用的微摩擦系统模型, 如图2所示。

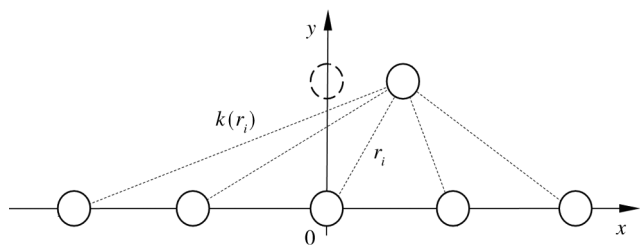


图2 一维无限原子链非线性弹性模型

Fig.2 The nonlinear elastic model of one-dimensional infinite atomic chain

假设上下界面表面层相对应原子之间的距离为 y , 晶格常数为 a , 当上界面原子偏离水平位置 x ($0 \leq x \leq a$) 时, 上界面某个原子与下界面单个原子间距 r_i 为:

$$r_i = \sqrt{(ia - x)^2 + y^2} \quad (4)$$

式中, $i = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 为下界面原子在一维

链上的排列顺序数。

由于采用了一维无限的原子链模型, 因此在研究上界面单个原子的受力情况时, 可以初始位置为 0 的上界面的单个原子为对象来研究上界面原子在滑动过程中的受力情况, 则上界面单个原子在滑过一个晶格常数范围时所受到的水平力 $F_{0 \leq x \leq a}(x, y)$ 为:

$$F_{0 \leq x \leq a}(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{ia - x}{\sqrt{(ia - x)^2 + y^2}} f(r_i) \quad (5)$$

在不考虑同界面原子间相互作用的情况下, 上界面单个原子与下界面一维原子链间作用的等效水平刚度系数为:

$$k_h(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{ia - x}{\sqrt{(ia - x)^2 + y^2}} k(r_i) \quad (6)$$

由于上界面原子受到下界面无限个原子的作用, 因此式(5)可近似写成积分形式:

$$F_{0 \leq x \leq a}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{4\epsilon(ia - x)}{\sqrt{(ia - x)^2 + y^2}} \{6\sigma^6 [(ia - x)^2 + y^2]^{-\frac{7}{2}} - 12\sigma^{12} [(ia - x)^2 + y^2]^{-\frac{13}{2}}\} di \quad (7)$$

显然, 在滑动过程中, 上界面层原子与下界面层原子间作用力的变化是非线性弹性的。如果两界面表面层原子均匀排列, 则当上下界面层原子处于一维对称位置, 即 $x = 0, a/2, a$ 时, $F_{0 \leq x \leq a}(x, y) = 0$, 表明上界面单个原子在滑动过程中所受到的水平力 F_h 为以 a 为周期的周期力, 即:

$$F_h(x, y) = F_h(x + ia, y) \quad (8)$$

以 Fe 原子为例, $\epsilon = 0.18 \text{ eV}$, $\sigma = 0.211 \text{ nm}$, $a = 0.28664 \text{ nm}$ 。当滑动质块所受法向载荷不变时, 式(7)中的 y 可认为是常数, 令 $y = a$ 。

假设上质块水平滑过 4 个晶格常数的距离, 根据式(7)仿真计算滑动过程中上界面单个原子在下界面层原子链作用下水平方向受力的变化, 见图3。

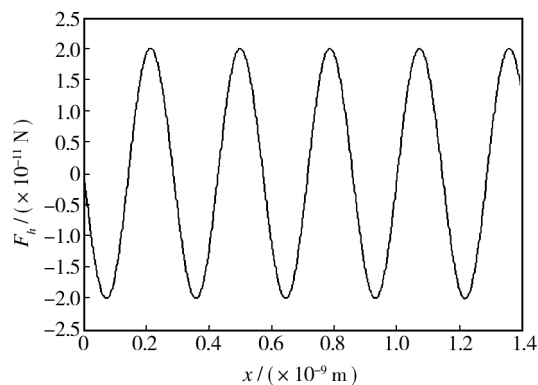


图3 界面层原子水平受力变化

Fig.3 The horizontal force change of interface layer atoms

对于理想均匀的界面,当上界面原子在水平方向上匀速运动时,界面原子在水平方向上的受力可以近似为一正弦力,据此可以构造一正弦函数:

$$F_h(x) = -F_0 \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \quad (9)$$

式中: F_0 为上界面原子正弦激励力的幅值,对于 Fe 原子,根据(7)式可算得 $F_0 = 2.0032 \times 10^{-11}$ N。

2 黏滑行为动力学建模

假设摩擦系统中质块 M 通过刚度系数为 k' 、阻尼系数为 c 的两元件连接在运动端,下界面固定,且两界面在 y 方向上没有运动,如图4所示。当运动端沿 x 方向以匀速 v 运动,且质块 M 与下界面的实际接触面积为 S 时,参与摩擦的上下界面原子数均为 $n = S/a^2$,此时,当质块在 x 方向上滑过一个晶格常数的距离,界面原子在周期力 $F_h(x)$ 作用下就被激励一次。

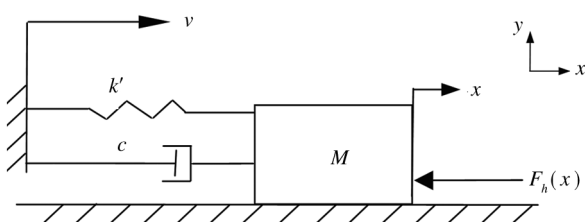


图4 界面摩擦黏滑行为动力学模型

Fig. 4 Dynamics model of interface stick-slip friction

根据上述模型,系统的动力学方程为:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + k'x - \frac{SF_0}{a^2} \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) = cv + k' \int v dt \quad (10)$$

显然,该系统为非线性时变系统。为求解该模型的数值解,选择状态变量 $\begin{cases} x_1 = \dot{x} \\ x_2 = x \end{cases}$,则式(10)对应的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{M} \left[-cx_1 + \frac{SF_0}{a^2} \sin\left(\frac{2\pi}{a}x_2\right) - k'x_2 + k'vt + cv \right] \\ \dot{x}_2 = x_1 \end{cases} \quad (11)$$

根据上述状态变量方程,可以仿真计算出系统状态变量 x_1, x_2 ,即上界面原子(质块)在滑动过程的瞬时位移和瞬时速度。

3 仿真计算与讨论

以 α -Fe 晶体为例,每个单胞含 2 个 Fe 原子,晶

格常数 $a = 2.8664 \times 10^{-10}$ m,原子质量 $m = 9.3 \times 10^{-26}$ kg。模拟微摩擦条件,选取 $S = 1.0 \times 10^{-18}$ m²,质块质量 $m = 1.0 \times 10^{-4}$ kg,质块运动端的速度 $v = 1.0 \times 10^{-3}$ m/s,系统阻尼系数 $c = 1.0 \times 10^{-3}$ N/(m/s),系统刚度系数 $k' = 1.0$ N/m。在仿真计算时,为消除初始运动对质块瞬时速度的影响,假设质块初速度与运动端速度相等。为有效考察质块运动过程中的振动情况,计算时只考虑质块实际位移与匀速运动位移差值的波动情况。依据上述参数值及条件,对式(11)进行仿真计算,结果见图5。

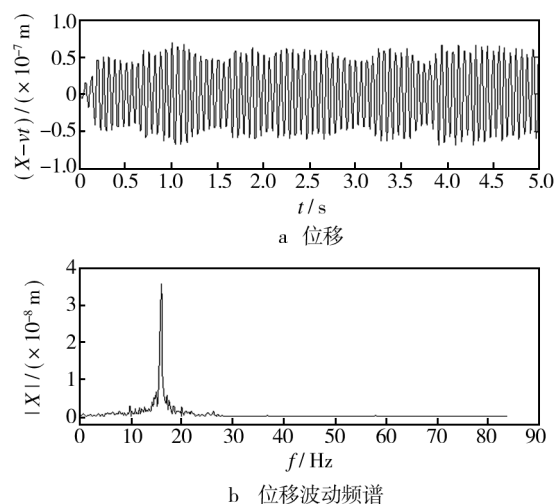


图5 质块滑动位移及位移波动频谱特性

Fig. 5 The mass sliding displacement (a) and the frequency spectrum characteristics (b) of displacement fluctuation

从图5a可以看出,在质块滑动过程中,由于摩擦上下界面原子间存在周期激励力,质块的位移与匀速运动位移之间存在波动的差值,且这种波动呈现出高频与低频两种成分。该结论与文献[9]的结论相吻合。分析表明,质块在滑动过程中,不仅存在高频振动成分,而且还有低频振动成分。

从图5b可以看出,在上述假设条件下,质块振动主振频率约为 16 Hz。显然,质块在运动过程中所表现出的黏滑行为特征主要由该主振频率和主振幅值决定,主振频率反映黏滑的频率,主振幅值则反映黏滑的强度。

在其他参数和条件不变的前提下,当运动端速度 v 在 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-3}$ m/s 范围内改变时,可分别计算出不同运动端速度下质块瞬时位移波动的主振频率及主振幅值,仿真计算结果见图6。如图6a所示,质块运动端速度变化不影响质块的主振频率,但质块的主振幅值随运动端速度增大而增大,且当运动端速度

大于 1×10^{-3} m/s 的宏观速度段时,运动端速度的增加将导致主振幅值迅速增大。这表明增大界面间的相对滑动速度虽然不会影响黏滑频率,但会使黏滑强度有所提高,特别是在运动端速度较高时,黏滑强度随运动端速度的增大而显著增强。

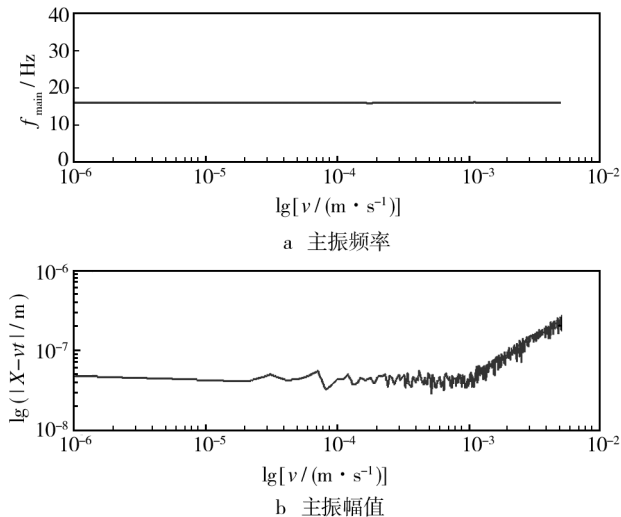


图6 运动端速度对主振频率及主振幅值的影响

Fig. 6 Effects of speed of movement end on the main vibration frequency (a) and the main vibration amplitude value (b)

当滑块质量 m 在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1}$ kg 范围内变化时,质块瞬时位移波动的主振频率及主振幅值仿真计算结果见图7。如图7a所示,质块质量增加,主振频率略有降低,但在质块质量较大时,质块质量的增加对主振频率的影响并不显著。如图7b所示,质块位移波动的主振幅值随质块质量的增大呈现出减小的

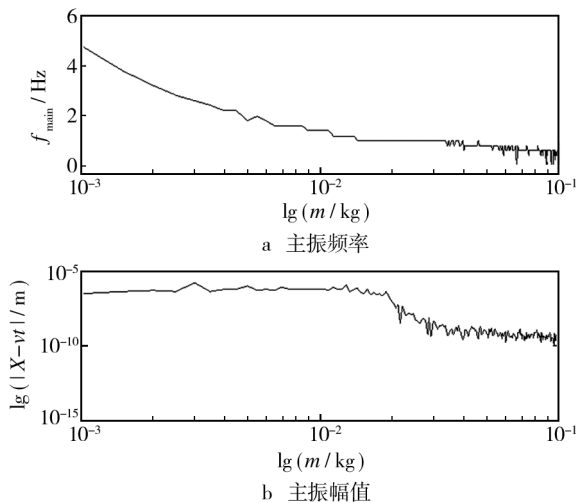


图7 质块质量对主振频率及主振幅值的影响

Fig. 7 The influences of mass on the main vibration frequency (a) and the main vibration amplitude value (b)

趋势。上述结果表明,增大质块质量不仅可以减小滑动过程中的黏滑频率,而且可以减轻黏滑行为的强度。不过,难以通过增加质块质量来同时抑制黏滑行为的频率与强度。

在 $1.0 \sim 100$ N/m 范围内改变系统的刚度系数 k ,质块瞬时位移波动的主振频率及主振幅值仿真计算结果见图8。图8a表明,质块瞬时位移的主振频率随系统刚度系数增大而提高,且系统刚度系数愈小,主振频率随刚度系数增加而提高的趋势愈显著。图8b表明,系统刚度系数增大时,质块的主振幅值略有减小。分析可知,增大系统的刚度系数将导致黏滑频率提高,但可以适当降低黏滑强度。

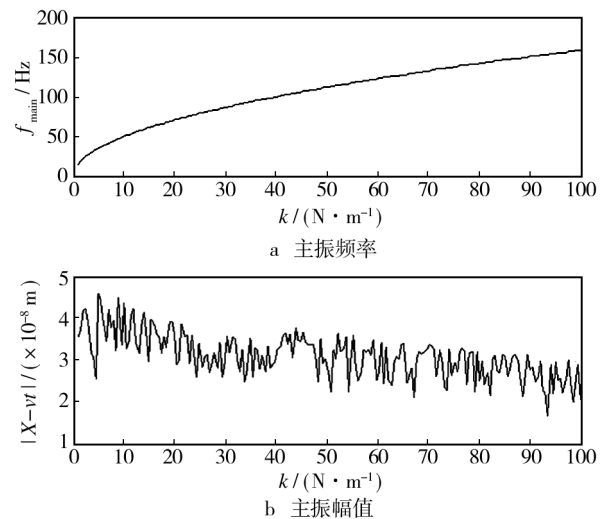


图8 刚度系数对主振频率及主振幅值的影响

Fig. 8 The influences of stiffness coefficient on the main vibration frequency (a) and the main vibration amplitude value (b)

当系统阻尼系数 c 在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ N/(m/s) 范围内变化时,质块瞬时位移波动的主振频率及主振幅值的仿真计算结果见图9。如图9所示,当系统阻尼系数很小时,系统阻尼系数增大基本不影响质块的主振频率,但主振幅值会随之显著减小。阻尼系数较大时,增加系统阻尼系数,质块的主振幅值基本不变,但主振频率会随之显著提高。分析可知,虽然可以通过改变系统阻尼系数来抑制黏滑行为,但要结合系统的整体参数来看系统阻尼系数对黏滑行为的影响。

当摩擦界面真实接触面积 S 在 $1.0 \times 10^{-18} \sim 1.0 \times 10^{-14}$ m² 范围内变化时,质块瞬时位移波动的主振频率及主振幅值仿真计算结果见图10。图10反映了主振频率及主振幅值随真实接触面积的变化规律。当摩擦界面真实接触面积增加时,上下界面间相互作用

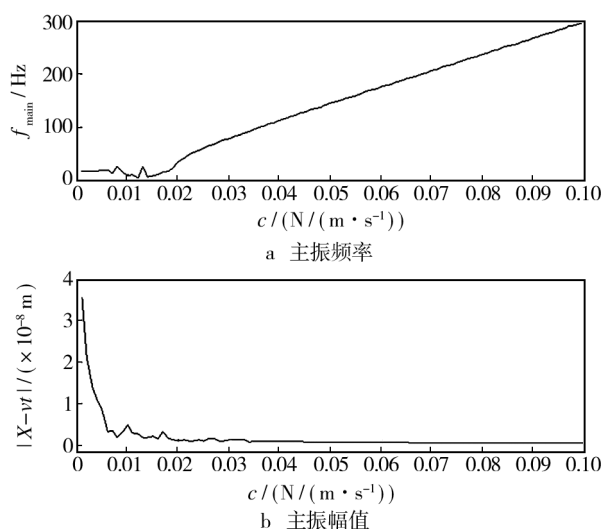


图9 阻尼系数对主振频率及主振幅值的影响

Fig. 9 Influences of damping coefficient on the main vibration frequency (a) and the main vibration amplitude value (b)

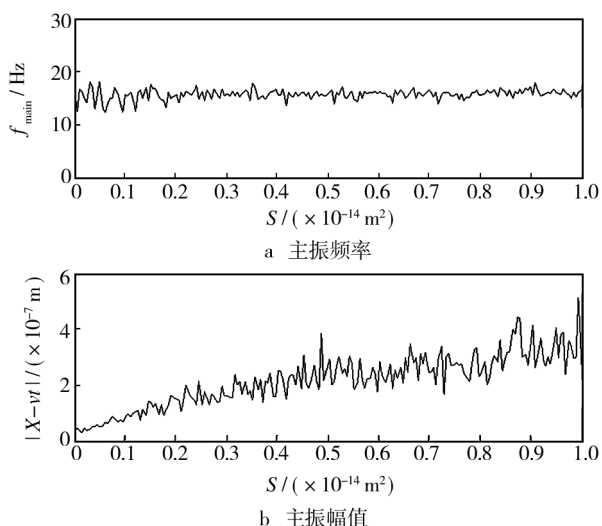


图10 真实接触面积对主振频率及主振幅值的影响

Fig. 10 Influences of the real contact area on the main vibration frequency (a) and the main vibration amplitude value (b)

的原子个数增多,即质块在滑动过程中受到的周期激励力的力幅增加,质块滑动时的主振频率基本不变,但主振幅值随之增强。分析可知,加大摩擦界面间的法向压力将导致黏滑强度增大,但不改变质块的黏滑频率。

此外,上界面单个原子受到的水平正弦激励力的周期及力幅大小反映了摩擦界面材料的晶体结构特征。激励力幅越大或晶格常数越小,在相同真实接触面积的情况下,下界面对上界面的总水平激励力幅就越大。因此,激励力幅对质块的主振频率和主振幅值

的影响趋势与真实接触面积的影响趋势一致,而晶格常数的影响趋势与真实接触面积的影响趋势相反。

4 结论

1) 在界面摩擦过程中,界面原子间的作用力具有周期的非线性弹性特性,且作用力的大小与材料的作用势有关,作用力的周期与材料的晶格常数有关。界面摩擦过程中的黏滑频率、黏滑强度不仅与晶体材料的作用势、晶格常数等内部因素有关,而且与界面间相对滑动速度、质块质量、系统的刚度系数和阻尼系数、界面的真实接触面积等外部因素有关。

2) 界面间相对滑动速度愈大,黏滑强度就愈大。特别是在速度较高时,黏滑强度随相对滑动速度增大而显著增大,但质块的黏滑频率基本不随相对滑动速度的变化而变化。增大滑动质块质量不仅可以减小滑动过程中的黏滑频率,而且可以减轻黏滑强度,但难以通过增加滑动质块质量来同时抑制黏滑频率与黏滑强度。系统刚度系数愈大,黏滑频率愈高,而黏滑强度减小。系统阻尼系数很小时,其值增大基本不影响黏滑频率,但黏滑强度随之显著减小;系统阻尼系数较大时,其值增大,黏滑强度基本不变,但黏滑频率显著增高。界面真实接触面积增加时,黏滑频率基本不变,但黏滑强度增强。

参考文献

- [1] LI B, CLAPP P C, RIFKIN J A, et al. Molecular Dynamics Simulation of Stick-slip [J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(6): 3090—3094.
- [2] PERSSON B N J. Friction Dynamics for Curved Solid Surfaces with Long-range Elasticity [J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(13): 5477—5484.
- [3] ARANSON I S, TSIMRING L S, VINOKUR V M. Stick-slip Friction and Nucleation Dynamics of Ultrathin Liquid Films [J]. Physical Review B, 2002, 65: 125402—125408.
- [4] BUDAKIAN R, PUTTERMAN S J. Time Scales for Cold-welding and the Origins of Stick-slip Friction [J]. Physical Review B, 2002, 65: 235429—235442.
- [5] MATE C M, MCCLELLAND G M, ERLANDSSON R, et al. Atomic-scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface [J]. Physical Review Letters, 1987, 59: 1942—1945.
- [6] RIEDO E, GNECCO E, BENNEWITZ R, et al. Interaction Potential and Hopping Dynamics Governing Sliding Friction [J]. Physical Review Letters, 2003, 91: 084502—084505.

- [7] SCHIRMEISEN A, JANSEN L, FUCHS H. Tip-jump Statistics of Stick-slip Friction[J]. *Physical Review B*, 2005, 71: 245403-1—255403-7.
- [8] SILLS S, OVERNEY R M. Creeping Friction Dynamics and Molecular Dissipation Mechanisms in Glassy Polymers[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91: 095501—095504.
- [9] 罗彬宾. 粘滑的分子动力学模拟[J]. *科学时代*, 2011 (19): 79—81.
LUO Bin-bin. Molecular Dynamics Simulation of Stick Slip [J]. *Science Times*, 2011, 19: 79—81.
- [10] MULLIAH D, KENNY S D, SMITH R. Modeling of Stick-slip Phenomena Using Molecular Dynamics[J]. *Physical Review B*, 2004, 69: 205407-1—205407-8.
- [11] 龚中良, 黄平. 界面摩擦过程非连续能量耗散机理研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(4): 2358—2362.
GONG Zhong-liang, HUANG Ping. Study on Discontinuous Energy Dissipation Mechanism of Friction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(4): 2358—2362.
- [12] 王亚珍, 黄平. 纳米级随机粗糙表面微观滑动摩擦力的计算研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 106801-1—106801-6.
WANG Ya-zhen, HUANG Ping. Study on Micro Sliding Friction of Randomly Nanorough Surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 106801-1—106801-6.
- [13] ISRAELACHVILI J N, BERMAN A D. Microtribology and Microrheology of Molecularly Thin Liquid Films[M]. New York: CRC Press LLC, 2001.
- [14] GNECCO E, BENNEWITZ R, SOCOLIUC A, et al. Friction and Wear on the Atomic Scale[J]. *Wear*, 2003, 254: 859—862.
- [15] ANDREA V, ALAN B R, VIRGINIO B. Role of Substrate Geometry in Sliding Friction[J]. *Nanotechnology*, 2004, 15: 790—794.
- [16] WEISS M, ELMER F J. Dry Friction in the Frenkel-Kontorova-Tomlinson Model: Static Properties[J]. *Physical Review B*, 1996, 53: 7539—7549.
- [17] 许中明, 黄平. 摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(5): 2427—2432.
XU Zhong-ming, HUANG Ping. Composite Oscillator Model for the Energy Dissipation Mechanism of Friction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(5): 2427—2432.
- [18] 丁凌云, 龚中良, 黄平. 基于耦合振子模型的摩擦力计算研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6500—6506.
DING Ling-yun, GONG Zhong-liang, HUANG Ping. Interfacial Friction Calculation Based on the Coupled-oscillator Model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6500—6506.
- [19] GUO Xiang-yun, BRAULT P. Early Stage of Silicon Nitride Film Growth Studied by Molecular Dynamics Simulations[J]. *Surface Science*, 2001, 488: 133—140.
- [20] 张丝雨. 最新金属材料牌号、性能、用途及中外牌号对照速用速查实用手册[M]. 北京: 中国科技文化出版社, 2005.
ZHANG Si-yu. The New Inquiry Handbook of Metal Brand, Performance, Function and the Comparison of Brand between China and Foreign Country[M]. Beijing: China Science and Culture Press, 2005.

(上接第 22 页)

- [11] 曹学强. 热障涂层材料[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CAO Xue-qiang. Thermal Barrier Coating Materials[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang. Handbook of Thermodynamic Data for Inorganic Substances[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993.
- [13] 关振铎, 张中太, 焦云生. 无机材料物理性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
GUAN Zhen-duo, ZHANG Zhong-tai, JIAO Yun-sheng. Physical Properties of Inorganic Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [14] 王敬栋, 潘伟, 徐强. 稀土锆酸盐的制备和热膨胀性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(1): 581—584.
WANG Jing-dong, PAN Wei, XU Qiang. Synthesis and Thermal Expansion of the Rare-earth Zirconate Ceramics[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(1): 581—584.
- [15] MAEKAWA T, KUROSAKI K, YAMANAKA S. Thermophysical Properties of BaY₂O₄: A New Candidate Material for Thermal Barrier Coatings[J]. *Materials Letters*, 2007, 61: 2303—2306.