

# 摩擦界面原子受迫振动温升模型 及计算研究

龚中良, 丁凌云, 黄 平

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 通过对界面摩擦过程中原子在接触势能场作用下受迫振动微观机制的分析, 基于受迫振动能量全部转化为系统热能的观点, 针对独立振子模型建立了摩擦界面原子的温升模型. 结果表明: 当晶格常数及原子质量较小时, 界面原子受迫振动后的温升随晶格常数及原子质量的增大而减小; 当晶格常数及原子质量较大时, 晶格常数及原子质量的变化对原子受迫振动温升影响不显著; 当受迫振动频率低于原子固有频率时, 原子受迫振动温升随相对滑动速度的增大而增加; 当受迫振动频率接近原子固有频率时, 温升加剧; 当受迫振动频率高于原子固有频率时, 原子受迫振动温升随相对滑动速度的增加而降低.

**关键词:** 界面原子; 受迫振动; 温升

**中图分类号:** TH117.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2008)04-0322-05

摩擦热直接影响系统的摩擦学性能, 并激发摩擦学过程, 因而研究摩擦热产生机制对摩擦热的预测与控制具有重要意义. 研究发现, 热效应和动力学特性是导致摩擦产生和能量消耗的主要因素<sup>[1]</sup>, 而 85% ~ 95% 的摩擦热转化为热能<sup>[2]</sup>. 人们在摩擦系统温度及温度场分布等方面进行了大量研究并建立了各种计算模型. 如 Blok<sup>[3]</sup>首次提出了“闪温”的概念并推导出最大温升公式. Archard<sup>[4]</sup>进一步研究了表面接触温度的计算, 并为接触表面之间的热边界问题提供了依据. Vick 等<sup>[5]</sup>推导出多点接触模型的温度场分布, 并用格林函数进行求解. Hisham 等<sup>[6]</sup>提出了固体金属摩擦副瞬态温度场模型, Liu<sup>[7]</sup>等考虑热弹性变形和材料屈服等因素建立了粗糙摩擦表面基于热-力耦合的粗糙表面三维温度场分布模型, 并运用有限元方法对最大闪温等进行了分析.

上述研究从宏观上探讨了摩擦系统温度变化及温度场分布规律, 但未对摩擦热产生的微观机制进行研究, 难以提出摩擦热预测与控制的理论依据.

本文建立了原子在界面势能场激励作用下导致界面原子温升的模型, 探讨了晶格常数、原子质量及相对滑动速度等内外因素对界面原子受迫振动温升的影响规律, 以期对摩擦热的预测与控制及摩擦材

料的制备提供理论依据.

## 1 晶体原子热振动能量

两表面摩擦时, 由于界面原子的相互作用而产生接触界面势垒<sup>[8]</sup>, 摩擦时界面原子的力学状态可用独立振子模型(D模型)、FK模型、FKT模型及复合振子模型<sup>[9]</sup>等来描述.

在晶体的情形下<sup>[10]</sup>, 原子间相互作用是强烈的, 相互作用能比每一自由度平均热运动动能  $\frac{1}{2}kT$  大得多,  $k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ . 因此, 一般来说, 晶体中原子的热运动并不能破坏原子之间的结合, 只能使原子在其平衡位置附近作微小的振动. 在室温下, 一般晶体热振动振幅的数量级为  $10^{-11} \text{ m}$ , 还不到原子间距离的  $1/10$ . 由于原子离开平衡位置时受到周围各个原子的作用力, 因此, 振动十分复杂. 可以将原子的振动分解为相互垂直的振动, 每个原子的振动有 3 个自由度. 根据能均分定理, 每一振动自由度的平均动能和平均势能都等于  $\frac{1}{2}kT$ . 因此, 每一振动自由度的平均能量为  $kT$ , 而每一原子的平均振动能量为  $\bar{\epsilon} = 3kT$ .

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20070410819); 国家自然科学基金资助项目(50675068).

收稿日期: 2007-10-24; 修回日期: 2008-03-11 联系人龚中良, e-mail: gzlaa@163.com

作者简介: 龚中良, 男, 1965年生, 博士后, 教授, 目前主要从事摩擦润滑技术及理论研究.

### 2 界面原子受迫振动温升模型

在相对滑动过程中,一方面,因接触界面势能场周期性的变化,使界面势能场内的原子处于受迫振动状态;另一方面,原子从一种平衡态跳跃至另一种平衡态时,激发原子以振子固有频率进行自激振荡.因此,界面原子的温升是上述 2 种热振动叠加的结果.

设界面的相对滑动速度为  $v$ ,界面材料的晶格常数为  $a$ ,则界面原子受界面势能场作用的受迫振动频率为  $f = \frac{v}{a}$ .

选取微观弹簧振子模型 (如图 1 所示),以界面

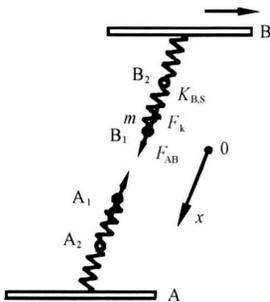


Fig 1 Simple oscillator model  
图 1 简化振子模型

原子  $B_1$  为研究对象,其质量为  $m$ ,振子弹性系数为  $K_{B,S}$ ,受到界面激励力  $F_{AB}$ 和弹簧恢复力  $F_k$ 的共同作用.

假设因界面势场变化而产生的界面激励力为  $F_{AB} = H \sin t$ (其中  $H$ 为激励力幅,为激励力变化的角频率),则界面原子  $B_1$ 运动的微分方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -K_{B,S}x + H \sin t \quad (1)$$

解上述模型可知,原子的振动由两类振动合成:一类是原子以固有频率振动的自由振动;另一类是频率为激励力频率的受迫振动.求解式 (1)得到受迫振动的运动方程为:

$$x_2 = \frac{H}{m \left( \frac{v^2}{a^2} - \omega_n^2 \right)} \sin t \quad (2)$$

式中:  $\omega_n = \sqrt{\frac{K_{B,S}}{m}}$ ,为原子  $B_1$ 的固有频率,  $\omega = 2 \frac{v}{a}$ ,为界面激励力的角频率.

令 
$$A = \frac{H}{m \left( \frac{v^2}{a^2} - \omega_n^2 \right)} \quad (3)$$

则式 (2)变为:  $x_2 = A \sin t$

显然上式与简谐振动的表达式相同.因此振子

因受迫振动而获得的总能量为

$$E = \frac{1}{2} K A^2 \quad (4)$$

其中

$$K = \frac{4 \frac{v^2}{a^2} m}{a^2} \quad (5)$$

将式 (3和 5)代入式 (4)得:

$$E = \frac{2}{m} \left( \frac{avH}{a^2 \frac{v^2}{a^2} - 4 \frac{v^2}{a^2}} \right)^2 \quad (6)$$

假设受迫振动只发生在一个方向 (等同于一个自由度振动),在不考虑其他形式能量 (如声能、光能)耗散的条件下,可以认为界面势能减小部分全部转化为界面层原子的热能.则受迫振动产生的波的能量与原子因受迫振动而导致的温升  $T$ 满足下列关系式:

$$k T = \frac{2}{m} \left( \frac{avH}{a^2 \frac{v^2}{a^2} - 4 \frac{v^2}{a^2}} \right)^2 \quad (7)$$

$$T = \frac{2}{m k} \left( \frac{avH}{a^2 \frac{v^2}{a^2} - 4 \frac{v^2}{a^2}} \right)^2 \quad (8)$$

### 3 结果与讨论

从式 (8)可以看出,界面原子受迫振动后的温升不仅与摩擦材料的结构参数有关,而且与摩擦副之间接触势能及相对滑动速度有关.

以铁原子为例,有:

$$m = 9.3 \times 10^{-26} \text{ kg}, a = 5.29 \times 10^{-10} \text{ m}.$$

$$\text{取 } \omega_n = 3.0 \times 10^{11} \text{ rad/s}, H = 1 \times 10^{-9} \text{ N}$$

以上述参数为基础,对式 (8)进行计算分析.

图 2所示为相对滑动速度与界面原子受迫振动

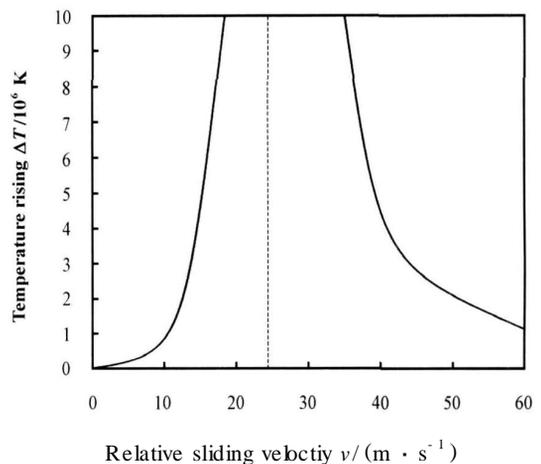


Fig 2 Influence of relative sliding velocity on the temperature rising of atom

图 2 相对滑动速度对原子温升的理论分析

引起界面原子温升的计算曲线.可见:当受迫振动频

率小于原子固有频率时,原子因受迫振动而产生的温升随相对滑动速度增大而增加;当相对滑动速度接近 A 点,即原子受迫振动频率接近振子固有频率时,原子温升急剧增加;在 A 点处,温升为不确定值;当相对滑动速度超过 A 点时,受迫振动频率超过振子的固有频率,原子温升反而随相对滑动速度增大而减小。

在实际工况中,通常滑动速度越大,摩擦热导致的界面温升越高.而本文的分析结果显示,当摩擦速度超过原子的固有频率时,随着速度增加,原子温升急剧降低.显然,上述理论分析结论与实际情况存在差异.这主要是因为一方面界面温升不等同于界面原子温升,界面温升不仅与界面原子温升有关,还与材料的热力学性能及摩擦系统的边界条件有关.此外,实际工况中的摩擦速度达不到界面势能场激励频率超过原子固有频率的阶段.在高速滑动时,界面原子受迫振动温升随相对滑动速度的变化趋势有待进一步研究.另一方面,运动学模型建立过程中采用了简化的独立振子模型,认为原子的固有频率  $\omega_n =$

$\sqrt{\frac{K_{B,S}}{m}}$  是常数.而实际上,晶体中原子与周围原子间均存在场力,当原子振动较小时,其振动能量主要传递给邻近的原子,此时,可以近似采用独立振子模型来描述.然而,当原子振动加剧时,原子的振动能量可以传递到更多原子.因此,在原子温度升高过程中,随着原子振动加剧,原子振子的实际弹性系数  $K_{B,S}$  随振动加剧而增大,即振子的固有频率随温度的升高而增大.从 (8) 式可知,固有频率的增大对界面原子受迫振动温升具有较强的抑制作用.

综合考虑相对滑动速度与振子固有频率的变化对原子温升的影响,可知图 2 中的 A 点并不存在.

图 3 为在低速滑动时,不同晶格常数晶体界面原子受迫振动温升与相对滑动速度之间的关系.

显然,在低速滑动范围内,界面原子受迫振动温升随相对速度增大而增加,且界面晶体的晶格常数愈小,其温升随速度增大而增加的幅度愈明显.

图 4 表明了不同相对滑动速度下晶格常数与原子受迫振动后温升的关系.可见,当晶格常数较小时,界面原子的温升随晶格常数的增加而急剧降低,且相对滑动速度愈大,降低趋势愈明显;随着晶格常数进一步增大,晶格常数的变化对界面原子温升的影响明显减弱;当晶格常数较大时,此时宏观上表现为晶格常数变化对界面原子受迫振动温升无影响.显然,如果考虑摩擦功全部耗散系统热能,则上述计

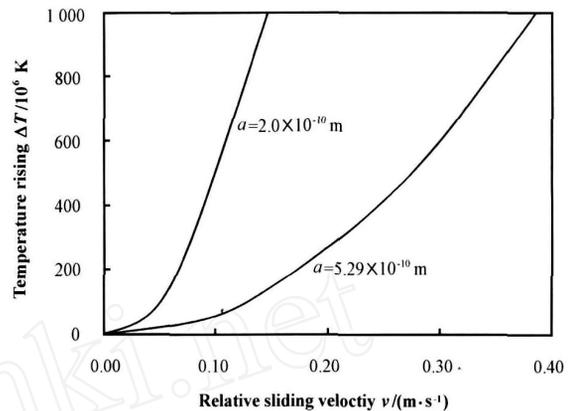


Fig 3 Relationship between the sliding velocity and temperature rising under the lower velocity

图 3 低速滑动时滑动速度与原子温升的关系

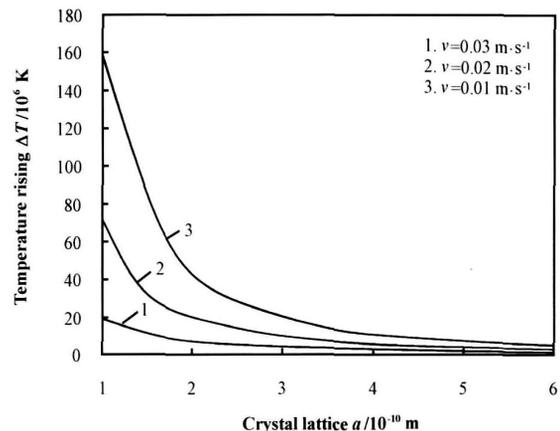


Fig 4 Influence of crystal constant on temperature rising of atom

图 4 晶格常数对原子受迫振动温升的影响

算结果与许中明等<sup>[11]</sup>考虑接触界面材料微观结构与势能参数时对滑动摩擦系数的计算结果基本一致.

图 5 表明了不同相对滑动速度下原子质量与原子受迫振动后温升的关系.可见,当原子质量较小时,摩擦界面原子受迫振动温升随原子质量的增加而迅速减小,且相对滑动速度愈大,降幅愈明显;随着原子质量增加,原子质量对原子受迫振动温升的影响逐渐减弱;当原子质量较大时,原子质量的变化对界面原子受迫振动温升的影响不显著.

上述模型探讨了界面原子在周期势能场作用下受迫振动导致界面原子温升的变化规律.实际上,在摩擦过程中,除了受迫振动外,原子的自激振动也是引起温升的主要原因.以振子模型为例,温升主要是由于相对运动中原子的动力学失稳所导致的自激振荡(振动频率为振子的固有频率)引起的,这种原子

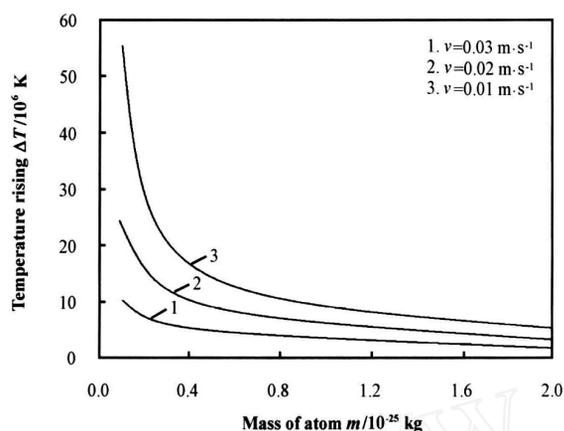


Fig 5 Relationship between the temperature rising and mass of atom under different velocities

图 5 原子质量与原子温升的关系

受激发时的振动能量可能远大于滑动时因势能场变化所引起的受迫振动能量,并逐渐耗散为热能.因此,研究摩擦界面温升时,必须结合材料的热力学性能和系统的边界条件,充分考虑原子自激振动对原子温升的贡献.

#### 4 结论

a 界面原子受界面势能场变化而引起受迫振动,导致界面原子温度升高.界面原子受迫振动温升与原子质量、晶格常数、相对滑动速度及界面接触势能有关.

b 晶格常数及原子质量较小时,界面原子受迫振动后的温升随晶格常数及原子质量的增大而减小;而晶格常数及原子质量较大时,晶格常数及原子质量的变化对原子受迫振动温升的影响不显著.

c 受迫振动频率小于原子固有频率时,随着相对滑动速度增加,界面原子温度升高;受迫振动频率大于原子固有频率时,界面原子因受迫振动而引

起的温升随相对滑动速度增加呈下降趋势.

#### 参考文献:

- [1] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [2] Majcherczak D, Dufrenoy P, Berthier Y. Tribological, Thermal and mechanical coupling aspects of the dry sliding contact [J]. Tribology International, 2007, 40(5): 834-843.
- [3] Blok H. The flash temperature concept [J]. Wear, 1983, 6: 483-493.
- [4] Archard J F. The temperature of rubbing surfaces [J]. Wear, 1958, 2: 438-455.
- [5] Vick Brian, Furey Michael J. A basic theoretical study of the temperature rising in sliding contact with multiple contacts [J]. Tribology International, 2001, 34: 823-829.
- [6] Hisham A, AbdelAal. On the bulk temperature of dry rubbing metallic solid pairs [J]. Int Comm. HeatMass Transfer, 1999, 26(4): 587-596.
- [7] Liu G, Wang Q, Ao Y. Convenient formulas for modeling three-dimensional thermo-mechanical asperity contacts [J]. Tribology International, 2002, 35(7): 411-423.
- [8] 许中明,黄平. 摩擦磨损的接触界面势垒理论研究 [J]. 摩擦学学报, 2007, 27(1): 54-59.  
Xu ZM, Huang P. Study on interfacial potential barrier theory of friction and wear [J]. Tribology, 2007, 27(1): 54-59.
- [9] 许中明,黄平. 摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型的研究 [J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2 427-2 431.  
Xu ZM, Huang P. Composite oscillator model for the energy dissipation mechanism of friction [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2 427-2 431.
- [10] 李椿,章立源,钱尚武. 热学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1979.
- [11] 许中明,黄平. 考虑接触界面材料微观结构与势能参数的滑动摩擦计算研究 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(2): 159-163.  
Xu Zhongming, Huang Ping. Calculating friction force with considering material microstructure and potential on contact surfaces [J]. Tribology, 2006, 26(2): 159-163.

## Study on the Model of Atomic Temperature Rising under the Forced Vibration

GONG Zhong-liang, DING Ling-yun, HUANG Ping

(School of Mechanical and automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With analyzing the mechanism of forced vibration of the interface atoms, based on the independent oscillator model, a temperature rising model of atoms was established. The results indicate that temperature rising of atom increased with decreasing of the atomic mass and the crystal constant. When the forced vibration frequency was lower than the natural frequency of the atom, the temperature rising of atom increases with increasing of the relative sliding velocity. When the forced vibration frequency closed to the natural frequency, the temperature rising will be intensified significantly. When the forced vibration frequency was higher than the natural frequency, the temperature rising of atom reduced with increasing of the relative sliding velocity.

**Key words:** Interface atom, forced vibration, temperature rising

**Author:** GONG Zhong-liang, male, born in 1965, Ph. D., Professor, e-mail: gzlaa@163.com