

# 摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型研究<sup>\*</sup>

许中明<sup>†</sup> 黄 平

(华南理工大学机械工程学院, 广州 510640)

(2005 年 8 月 30 日收到, 2005 年 10 月 28 日收到修改稿)

提出无磨损界面摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型, 指出滑动摩擦过程同时存在整体做低频弹性振动的宏观振子和界面原子受激励产生热振动的微观振子, 并在此基础上分析了宏观振子和微观振子对摩擦能量耗散的不同影响. 通过对界面原子的动力学分析, 指出摩擦过程界面激励力的频率是能量转换的关键: 在平衡力作用阶段, 界面作用力的频率趋于零, 因而可以直接作用到每个原子, 力的作用效果是整体和均匀的; 在失稳跳跃阶段, 由于界面激励力的频率极高, 造成摩擦界面原子获得的能量分布很不均匀, 从而产生不可逆的能量耗散过程. 与目前通用的独立振子模型比较, 复合振子模型能够更准确描述摩擦能量耗散过程, 可为摩擦控制提供理论指导.

关键词: 摩擦, 能量耗散机理, 复合振子模型, 独立振子模型

PACC: 6220P, 8140P

## 1. 引 言

摩擦的能量耗散机理是计算和控制摩擦的关键, 因此一直以来都是物理学界和工程界研究的重要课题<sup>[1-3]</sup>. 早期的摩擦能量耗散机理基本上是在建立在固体表面纯几何理论的基础上并以机械理论为主<sup>[4]</sup>, 之后 Bowden 的黏附摩擦理论提出摩擦的能量耗散方式是黏着接触点分离时材料的塑性变形<sup>[5]</sup>. 近年来, 随着微纳技术的发展, 人们对原子尺度无磨损界面摩擦的微观机理和能量耗散机理的认识有了一定的进展<sup>[6,7]</sup>, 提出了微观摩擦能量耗散的声子模型和电子激励模型, 并对各种声子摩擦模型如 Independent Oscillator (独立振子, 即 IO) 模型<sup>[8-10]</sup>、Frenkel-Kontorov (FK) 模型<sup>[11-13]</sup>和 Frenkel-Kontorova-Tomlinson (FKT) 模型<sup>[14,15]</sup>等以及电子激励摩擦模型<sup>[16,17]</sup>进行大量的理论分析与实验对比研究. 然而, 迄今为止人们对摩擦的微观能量耗散机理仍然知之不多<sup>[1,18]</sup>, 例如虽然 IO 模型提出了摩擦能量耗散产生的原因, 但却缺乏具体的能量耗散方式, 当应用于计算时不得不对能量耗散做一些假设<sup>[9]</sup>. 这些理论的不完善, 限制了摩擦学理论在工程实践中的应用, 因此, 摩擦的能量耗散机理仍是今后摩擦学研

究的重点. 另一方面, 自然界的一切宏观过程都是不可逆的<sup>[19]</sup>, 摩擦不可逆能量耗散过程的研究, 对于现代自然科学从经典力学和量子力学等可逆理论体系向具有更广泛意义的不可逆理论体系发展和完善也具有重要意义.

本文在近年研究人员对摩擦微观能量耗散机理研究的基础上, 分析了独立振子模型能量耗散机理的局限性, 提出无磨损界面摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型, 指出摩擦过程同时存在整体做低频振动的宏观振子和界面原子受激励产生热振动的微观振子, 并在此基础上分析了宏观振子和微观振子对摩擦能量耗散的不同影响.

## 2. 独立振子模型的能量耗散机理及其局限性

1929 年 Tomlinson<sup>[20]</sup>提出固体摩擦能量耗散机理的独立振子模型 (IO 模型), 如图 1 所示. IO 模型认为界面原子的总势能在滑动时随着微观相对位置的变化而变化, 当处于局部最低点时, 界面原子平稳滑动, 如图 1(a)-(d)所示, 当处于局部最高点时, 界面原子将出现失稳并自动跳跃到下一局部最低点, 然后在此平衡位置剧烈震荡和激发声子, 从而使

<sup>\*</sup> 广东省自然科学基金 (批准号 D4020089) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: exzm@sina.com

能量不可逆地以声子的形式耗散掉,如图 1(e)所示.

IO 模型非常简单,并较好地说明了摩擦过程能量耗散的产生在于界面原子的失稳跳跃,因此近年来受到研究人员的重视并进行了较多研究. FK 模型和 FKT 模型进一步考虑了界面原子间的相互作用,但它们的能量耗散机理与 IO 模型是相同的. 然而,摩擦的能量耗散是一个非常复杂的过程,而 IO 模型过于简单,特别是它将基体和表面原子的作用仅用一个刚度为  $K$  的弹簧代表,这忽略了很多重要信息,无法准确描述摩擦时物体整体的弹性振动和界面原子激发热振动的具体过程,因而很难进一步研究摩擦的能量耗散机理.

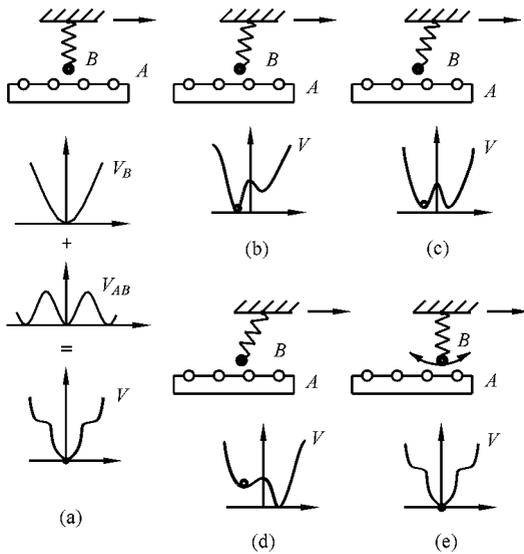


图 1 独立振子模型

### 3. 摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型

为了能进一步研究滑动摩擦过程的能量耗散机理,本文在 IO 模型的基础上提出无磨损光滑界面摩擦的复合振子模型(composite oscillator model),见图 2. 复合振子模型由宏观整体的弹性振子(刚度分别为  $K_A$  和  $K_B$ )和界面的多个微观独立振子(刚度分别为  $K_{A,S}$  和  $K_{B,S}$ )共同组成.

在复合振子模型中,滑动摩擦失稳跳跃后同时出现两种不同的振子运动,一种是物体宏观整体的低频弹性振动,另一种是界面原子的微观高频热振动,即声子. 如图 2 所示,物体  $B$  在外力的拉动下缓

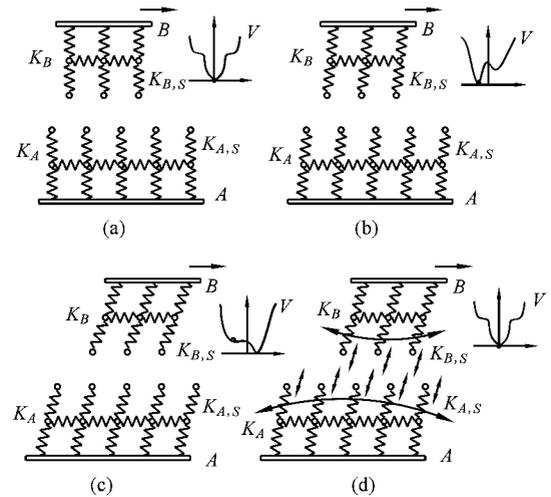


图 2 复合振子模型

慢滑动,图 2(a)~(b)阶段,界面原子受到平衡力作用,系统总势能始终处于局部最低的稳定状态,此时作平稳滑动,外力做功使摩擦物体整体的弹性势能以及界面势能增加. 当  $B$  滑动到图 2(c)所示的临界平衡位置时,系统总势能为局部最高的不稳定状态. 之后  $B$  继续向前滑动越过临界位置,此时界面原子受力突然失去平衡,因而自动跳跃到下一平衡位置,并在此位置做复合振动,如图 2(d)所示的. 由于这一阶段受力失去平衡,一方面摩擦物体在弹性恢复力的作用下整体作低频弹性振动,另一方面,界面势能也相应跳跃至一个较低的稳定值,从而导致界面作用力在该点出现突变. 这等效于突然产生一个高频激励力,该力作用的时间非常短. 激励消失之后,界面原子在弹性恢复力作用下产生自由振动,振动频率为界面原子的固有振动频率. 因此在这个界面高频激励力的作用下,界面原子被激发产生与原子固有频率相同的高频振动,即热振动或声子,从而使界面势能的减小部分转化为界面层原子的热能.

### 4. 复合振子模型的两种振子对摩擦能量耗散的影响

#### 4.1. 宏观振子对摩擦能量耗散的影响

在复合振子模型的平衡力作用阶段,界面作用力和外力共同作用使物体整体的弹性势能增加,当作用力失去平衡后,物体在弹性恢复力作用下整体

做低频弹性振动,这就是宏观振子.宏观振子与摩擦噪声等现象有关,对其深入研究具有重要意义.由于低频弹性振动能量在物体内各处分布均匀,因此如果不考虑材料的内耗和声能散失,那么这个能量是不耗散的.

平衡临界点的位置以及失稳跳跃后新平衡点的位置对摩擦能量耗散分析具有重要作用.从复合振子模型可以看出平衡状态是摩擦物体在整体上的平衡,因此平衡临界点可以通过宏观振子的弹性势能和界面势能  $V_{AB}$  共同确定.平衡力阶段摩擦系统的总势能为

$$V_{\text{tot}} = V_A + V_B + V_{AB}. \quad (1)$$

物体  $B$  的势能(此处仅做一维情形的分析)为

$$V_B = \frac{1}{2} K_B (x_s - x_B)^2, \quad (2)$$

式中  $x_s$  为界面原子坐标,  $x_B$  为基点坐标.

为简化分析,将物体  $A$  当作刚体处理,即  $V_A = 0$ . 摩擦系统受力平衡时总势能的一阶导数为零,即

$$\frac{\partial V_{\text{tot}}}{\partial x_s} = 0. \quad (3)$$

将(1)式和(2)式代入(3)式,可得到力平衡方程

$$\frac{\partial V_{AB}}{\partial x_s} + K_B (x_s - x_B) = 0, \quad (4)$$

根据(4)式可计算出  $x_s$  在物体  $B$  处于不同基点位置时对应的值.

摩擦系统处于临界力平衡状态时,总势能的二阶导数为零,即

$$\frac{\partial^2 V_{\text{tot}}}{\partial x_s^2} = 0. \quad (5)$$

将(1)式和(2)式代入(5)式,可得到临界力平衡方程

$$\frac{\partial^2 V_{AB}}{\partial x_s^2} + K_B = 0. \quad (6)$$

根据(4)(6)式可计算出摩擦系统势能的变化.

#### 4.2. 微观振子对摩擦能量耗散的影响

复合振子模型中,当界面作用力和外力失去平衡时,界面势能跳跃至一个较低的稳定值,由此突然产生一个高频激励作用力,在这个力的作用下,激发界面原子产生与原子固有频率相同的高频热振动,这就是微观振子.

根据弹簧振子的动力学特性可算出发生失稳跳跃时,界面层原子从突然出现的界面高频激励作用力中获得的能量的分布.弹簧振子模型如图3所

示.图中仅画出界面处的四个原子.以界面原子  $B_1$  为研究对象,其质量为  $m$ ,受到界面激励力  $F_{AB}$  和弹性恢复力  $F_K$  的共同作用,设界面激励力为  $F_{AB} = H \sin \omega t$ ,如图3(a)所示.界面作用力的频率有两种不同情况,当平稳滑动时界面作用力作周期性变化,此时其频率处于低值,当发生失稳跳跃时,界面作用力突然从图3(a)中的1跳到2处,此时其频率相应突然出现一个极高值,如图3(b)所示.按图3(c)给出的计算模型,界面原子  $B_1$  运动的微分方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -K_{B,S} x + H \sin \omega t. \quad (7)$$

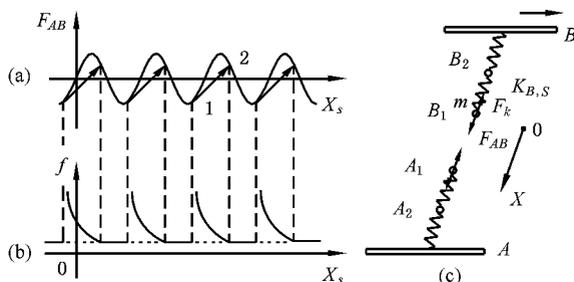


图3 界面层原子的动力学分析 (a)界面作用力的变化;(b)界面作用力频率的变化;(c)界面层原子的动力学分析模型

该方程的解由两部分组成:  $x = x_1 + x_2$ , 其中  $x_1$  为对应于(7)式的齐次方程的通解,即频率为固有频率的自由振动部分,  $x_2$  为(7)式的特解,即频率为激励力频率的受迫振动部分.弹簧振子的动力学特性主要由受迫振动部分  $x_2$  决定,因此这里主要分析  $x_2$  的作用:

$$x_2 = \frac{H}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin \omega t, \quad (8)$$

式中  $\omega$  为界面激励力  $F_{AB}$  的角频率,  $\omega_n$  为原子  $B_1$  的固有角频率,  $\omega_n = (K_{B,S}/m)^{0.5}$ .

因此,激励力  $F_{AB}$  通过界面原子  $B_1$  和相应的弹簧传递到  $B_2$  原子的力为

$$F_{B1-B2} = K_{B,S} x_2 = K_{B,S} \frac{H}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin \omega t. \quad (9)$$

力的传递率为

$$\eta = \frac{K_{B,S} \frac{H}{m(\omega_n^2 - \omega^2)}}{H} = \frac{1}{|1 - (f/f_0)^2|}, \quad (10)$$

式中  $f_0$  为界面原子  $B_1$  的固有振动频率,  $f$  为界面作用力  $F_{AB}$  的频率.

同样,以原子  $B_2, B_3, \dots$  为研究对象时,分别用

$F_{B_1-B_2}, F_{B_2-B_3}$  作为激励力, 可以依次算出各个原子传递给下一个原子的激励力  $F_{B_2-B_3}, F_{B_3-B_4}, \dots$

设界面激励力经  $B_1$  传递到  $B_2$  的传递率为  $\eta_1$ , 再传递到  $B_3, B_4, B_5, \dots$  的传递率依次为  $\eta_2, \eta_3, \eta_4, \dots$ . 由于各原子之间的弹簧刚度相同, 同时各个原子受迫振动部分的频率均与界面激励力的频率相同, 因此根据 (10) 式可知各相邻原子间力的传递率相同, 故  $\eta_2 = \eta_1^2, \dots, \eta_n = \eta_1^n$ . 因此, 第  $n$  个原子受到来自界面作用力  $F_{AB}$  激励产生的力幅为

$$F_n = \eta_1^n H = \frac{1}{|1 - (f/f_0)^2|^n} H. \quad (11)$$

在此力激励下各原子得到的能量为

$$U_n = \frac{1}{2} \frac{F_n^2}{K_{BS}} = \frac{H^2}{2K_{BS}} |1 - (f/f_0)^2|^{-2n}. \quad (12)$$

### 5. 结果与讨论

图 4 给出从 (4) 式和 (6) 式得到的图解以及其相应摩擦系统势能的变化. 图 4(a) 中代表宏观振子弹性力的直线  $L_1$  对应的宏观振子基点位置为平稳滑动位置,  $L_1$  与界面作用力曲线只有一个交点, 直线  $L_2$  对应的宏观振子基点位置为临界平衡位置,  $L_2$  与界面作用力曲线相切(与 (6) 式的解对应) 并有两个交点, 此时物体突然跳跃至另一具有更低势能的平衡位置, 从而使势能  $V_{AB}$  和  $V_B$  都相应降低, 如图 4(b)(c) 所示, 其中  $\Delta V_{AB}$  转化为界面层原子的热能,  $\Delta V_B$  是宏观振子的弹性振动能量.

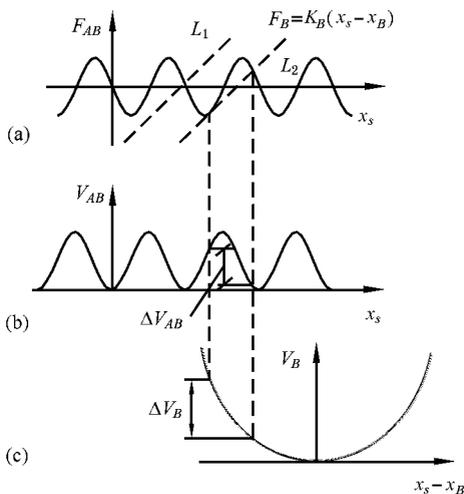


图 4 复合振子模型势能的变化

从图 4 可以看出, 控制摩擦可从改变界面势能  $V_{AB}$  和宏观振子的刚度  $K_B$  两方面进行. 润滑是通过改变  $V_{AB}$  从而控制摩擦的最常见方法, 而通过改变刚度来控制摩擦的方法还有待进一步研究.

图 5 是根据 (12) 式计算得到的界面层原子在界面激励力作用下获得能量的分布情况. 从图中可以看出, 在高频激励力的作用下, 界面各层原子得到的能量极不均匀, 并依次迅速减少. 绝大部分的能量分布在最表面的几层原子. 从图中还可以看出, 界面激励力的频率越高, 界面各层原子得到的能量分布就越不均匀. 而在平衡力作用阶段,  $F_{AB}$  的频率  $f \rightarrow 0$  根据 (10) 式可以得到  $\eta = 1$ , 此时界面作用力可以直接传递作用到每个原子, 力的作用效果是整体和均匀的. 由此可以看出, 界面原子热振动的产生实际上是摩擦系统对界面高频激励力作用响应的结果, 而弹性势能的产生则是对界面低频激励力作用响应的结果.

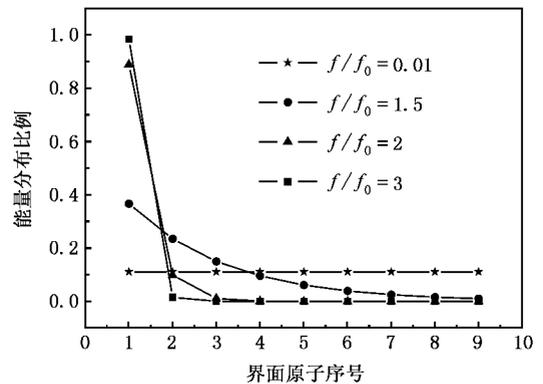


图 5 界面各层原子在界面高频激励力作用下获得能量的分布 (图中只计算 9 个原子)

由于在高频激励力的作用下, 能量沿摩擦界面法向分布极不均匀, 并且主要分布在界面最外几层原子中, 因此通过原子之间的相互作用, 界面原子的振动能量不断向外传递, 使能量分布趋于均匀即系统的熵趋于最大, 这样就产生了摩擦的不可逆能量耗散. 界面原子的实际能量状态将影响下一次跳跃时外力所需做的功, 因此摩擦能量耗散的数值与物体材料的热物理特性如热传导系数等有重要联系, 也与滑动速度有关. 当滑动速度较快或热传导能力差时, 界面原子的能量相对较高, 再次发生跳跃时外力所要做的功较小, 因而摩擦力也较小.

## 6. 结 论

本文分析了 IO 模型的局限性, 提出摩擦微观能量耗散机理的复合振子模型, 指出摩擦过程同时存在整体做低频弹性振动的宏观振子和界面原子受激励产生热振动的微观振子, 并研究了两种振子对摩擦能量耗散的不同影响. 通过对复合振子模型的研究, 可以得到以下结论:

1. 宏观振子反映了滑动摩擦过程力平衡阶段的特性, 并决定跳跃临界点以及新平衡点的位置和相应能量状态. 微观振子反映了滑动摩擦过程非平衡阶段的特性, 决定了具体的能量耗散过程, 如获得能量的分布、不均匀能量的传递和耗散等. IO 模型

无法区分这两种不同的过程, 因而有较多的局限, 也与工程实际有较大的不同.

2. 摩擦过程界面激励力的频率是能量转换的关键: 在平衡力作用阶段, 界面作用力频率趋于零, 因而可以直接作用到每个原子, 力的作用效果是整体和均匀的. 在失稳跳跃阶段, 由于界面激励力的频率极高, 使摩擦界面各层原子获得的能量分布极不均匀, 从而使能量由界面向外不断传递和耗散. 界面激励力的频率越高, 摩擦界面各层原子得到的能量分布就越不均匀.

3. 复合振子模型能够更准确描述滑动摩擦的能量耗散过程, 可以促进摩擦能量耗散机理研究的深入, 并为摩擦控制提供理论指导.

- 
- [ 1 ] Krim J 2002 *Surface Science* **500** 741
- [ 2 ] Ringlein J, Robbins M O 2004 *American Journal of Physics* **72** 884
- [ 3 ] Cieplak M, Smith E D, Robbins M O 1994 *Science* **265** 1209
- [ 4 ] Wen S Z, Huang P 2002 *The Theory of Tribology* ( Beijing : Tsinghua University Press )( in Chinese ) 温诗铸、黄平 2002 摩擦学原理 ( 北京 : 清华大学出版社 )
- [ 5 ] Bowden F P, Tabor D 1954 *The Friction and Lubrication of Solids* ( Oxford : Oxford University Press )
- [ 6 ] Zhang X G, Meng Y G, Wen S Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 728 ( in Chinese ) [ 张向军、孟永钢、温诗铸 2004 物理学报 **53** 728 ]
- [ 7 ] Qian L M, Luo J B, Wen S Z, Xiao X D 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2240 ( in Chinese ) [ 钱林茂、雒建斌、温诗铸、萧旭东 2000 物理学报 **49** 2240 ]
- [ 8 ] Gnecco E, Bennewitz R, Socoliuc A *et al* 2003 *Wear* **254** 859
- [ 9 ] Sasaki N, Kobayashi K, Tsukada M 1996 *Phys. Rev. B* **54** 2138
- [ 10 ] Buldum A, Ciraci S 1997 *Phys. Rev. B* **55** 2606
- [ 11 ] Andrea V, Alan B R, Virginio B 2004 *Nanotechnology* **15** 790
- [ 12 ] Kawaguchi T, Matsukawa H 1997 *Phys. Rev. B* **56** 13932
- [ 13 ] Van Erp T S, Fasolino A, Radulescu O, Janssen T 1999 *Phys. Rev. B* **60** 6522
- [ 14 ] Gyalog T, Thomas H 1997 *Zeitschrift fuer Physik B : Condensed Matter* **104** 669
- [ 15 ] Weiss M, Elmer F-J 1996 *Phys. Rev. B* **53** 7539
- [ 16 ] Ciraci S, Buldum A 2003 *Wear* **254** 911
- [ 17 ] Popov V L 2001 *Tribology International* **34** 277
- [ 18 ] Urbakh M, Klafter J, Gourdon D *et al* 2004 *Nature* **430** 525
- [ 19 ] Ilya Prigogine 1997 *The End of Certainty : Time, Chaos, and the New Laws of Nature* ( New York : The Free Press )
- [ 20 ] Tomlinson G A 1929 *PhilMag Series* **7** 905

# Composite oscillator model for the energy dissipation mechanism of friction<sup>\*</sup>

Xu Zhong-Ming<sup>†</sup> Huang Ping

( *College of Mechanical Engineering , South China University of Technology , Guangzhou 510640 , China* )

( Received 30 August 2005 ; revised manuscript received 28 October 2005 )

## Abstract

A composite oscillator model is proposed for studying energy dissipation mechanism of atomic-scale wearless friction. The model consists of the whole macroscopic oscillator and the micro oscillators of interfacial atoms. Different influences of the two oscillators on the energy dissipation process of friction are discussed. It is found that the frequency of the interfacial excitation force is the key to energy conversion in the friction process by analyzing the dynamic characteristics of interfacial atoms. In the equilibrium stage, the interfacial force acts integrally and uniformly on each atom because its frequency is nearly zero. In the non-equilibrium stage, however, the distribution of the energy received by the interfacial atoms is not uniform because the frequency of the interfacial acting force is very high. Therefore, the extra energy may be easily transferred to the adjacent atoms to make the energy dissipate. The results show that the composite oscillator model can more clearly explain the energy dissipation mechanism of friction in detail.

**Keywords** : friction , energy dissipation mechanism , composite oscillator model , independent oscillator model

**PACC** : 6220P , 8140P

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China ( Grant No. 04020089 ).

<sup>†</sup> E-mail : exzm@sina.com