

# 磨粒磨损中微观接触过程的有限元分析\*

樊瑜瑾 杨晓京 李浙昆 刘剑雄

(昆明理工大学机电工程学院 昆明 650093)

摘要：分析了磨粒压入被磨损材料表面、磨粒在材料表面滑动和卸载脱离接触的过程，研究了这三个接触阶段材料表层的应力应变、接触压力和接触摩擦切应力特征。结果表明，微观接触过程不仅存在材料的非线性作用和摩擦接触的状态非线性作用，而且存在着由于材料表面变形引起的几何非线性作用，被磨损材料表层的应力应变和接触压力的分布和大小与材料表面变形过程有关。

关键词：磨粒磨损 摩擦接触 表面变形 有限元

中图分类号：TH117

## 0 前言

由外界硬颗粒或者对磨表面上的硬突起物引起的磨粒磨损是最普遍的磨损形式之一，因磨粒磨损所造成的损失占整个磨损损失的一半左右<sup>[1]</sup>。机械零件的磨粒磨损发生在摩擦表面的微观局部，研究摩擦表面上的微观动态行为与变化是认识磨粒磨损机理的重要途径<sup>[2-5]</sup>。真实的摩擦磨损过程特别是磨粒磨损过程伴随金属材料表面明显塑性变形<sup>[6]</sup>。因此磨粒磨损过程不仅存在着材料非线性和摩擦接触带来的状态非线性相互作用，而且存在着由于材料表层变形引起的几何非线性作用。经典的摩擦磨损模型和简单的解析数学公式<sup>[7-8]</sup>很难准确描述这些非线性关系。

利用 ANSYS 有限元软件分析磨粒压入金属材料表面并在材料表面上滑动的过程，研究被磨损材料表层应力应变特征与表层变形过程，分析材料表面微观接触区域的接触压力与摩擦应力特点，力图揭示磨粒磨损过程中表面接触的力学关系。

## 1 基本模型及算法

### 1.1 几何模型

几何模型中假设磨粒轮廓形状为圆形，磨粒轮廓直径  $d = 10 \mu\text{m}$ 。被磨损金属材料初始表面几何形状为理想光滑平面，有限元区域网格划分：宽  $b = 30 \mu\text{m}$ ，分为 60 网格；高  $h = 5 \mu\text{m}$ ，分为 10 网格，有限元单元采用了二维大变形实体单元。被磨损金属材料边界条件：与磨粒接触的表面为自由表面，

在其他三条区域边界上沿边界的法向附加位移约束。

### 1.2 接触模型

采用了二维刚性目标面与柔性面的接触模型，假设磨粒为刚性体，被磨损材料为弹塑性柔性体，接触协调条件采用了在接触平衡迭代中增加接触刚度的罚函数法和增加附加自由度的拉格朗日乘子法相结合的增强拉格朗日法。

### 1.3 材料本构模型

被磨损材料为 45 钢调质材料，材料本构模型采用了双线性等向强化模型，该模型满足 Von Mises 屈服准则。材料弹性模量  $E = 206 \text{ GPa}$ ，泊松比  $\nu = 0.3$ ，磨粒与被磨损材料相对滑动时的摩擦因数  $\mu = 0.15$ ，屈服点  $s_s = 355 \text{ MPa}$ ，切线模量  $E_t = 1\ 155 \text{ MPa}$ 。

### 1.4 加载过程及收敛条件

加载使用了位移载荷，磨粒磨损过程的模拟分为三个阶段：第一阶段是法向加载阶段，有三个法向加载步，每个法向加载步有 40 个子步，在磨粒上法向共施加  $1 \mu\text{m}$  的位移载荷；第二阶段是磨粒切向滑动阶段，有五个切向滑动步，每个滑动步有 20 个子步，切向滑动阶段共滑动  $5 \mu\text{m}$ ；第三阶段是法向卸载阶段，有两个法向卸载步，每个卸载步有 20 个子步，卸载到磨粒与被磨损材料表面完全脱离接触。求解计算中采用了修正牛顿—拉普森方法，计算中力的迭代收敛精度为 0.5%，刚度矩阵在每一子步中都进行修正。但在一个子步的平衡迭代中不修正刚度矩阵。

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 材料表面变形过程

图 1 是磨粒压入材料表面，并在材料表面滑动和卸载脱离接触时材料表层的变形过程，从图 1b

\* 国家自然科学基金资助项目(50065001)。20040613 收到初稿，20041226 收到修改稿

中可以看到磨粒滑动时在被磨损材料表层产生切向挤压和塑性流动,材料表层变形比图 1a 中单纯法向压入时的材料表层变形大得多,图 1c 卸载脱离接触后在被磨损材料表面留下明显的塑性变形。

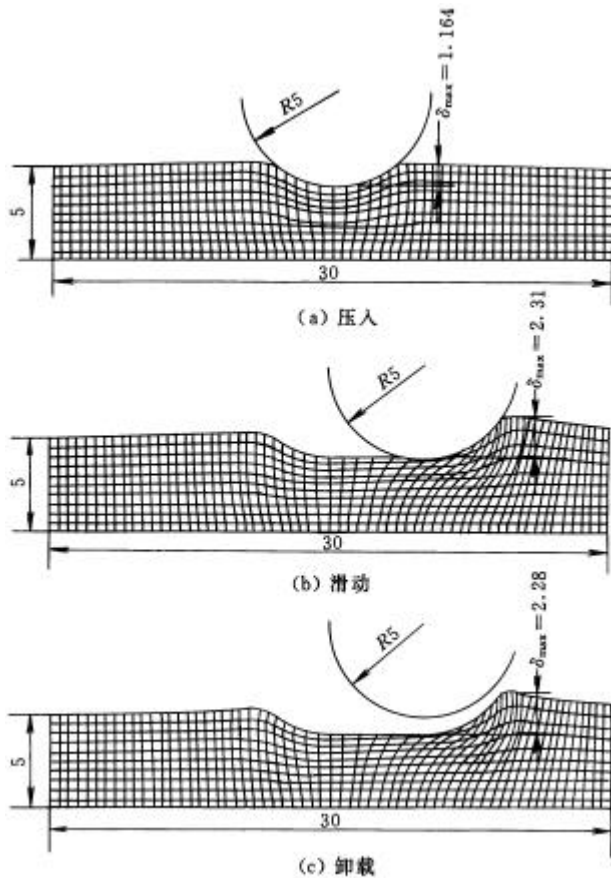


图 1 磨粒在材料表面摩擦时材料的变形(单位:  $\mu\text{m}$ )

## 2.2 材料表层的应力与应变

图 2 是磨粒在材料表面摩擦时材料的 Von Mises 应力,图 3 是磨粒在材料表面摩擦时材料的 Von Mises 应变。从图中可以看到磨粒滑动时在被磨损材料表层产生的应力和应变不仅比磨粒法向压入时产生的应力和应变大得多,而且应力和应变分布规律有很大的不同。磨粒脱离接触后在材料表层存在着较大的残余应力和残余应变。

## 2.3 接触压力和接触摩擦切应力

图 4 是磨粒在材料表面摩擦时接触区的压力,图 5 是磨粒在材料表面摩擦时接触区的摩擦切应力。从图中可以看到磨粒滑动时接触区的压力分布与磨粒法向压入时接触区的压力分布相比产生了很大的偏斜。磨粒滑动时的最大接触压力和最大摩擦切应力也比磨粒法向压入时的最大接触压力和最大摩擦切应力大得多。

## 2.4 讨论

从磨粒压入材料表面,并在材料表面滑动的整个过程来看,磨粒滑动时产生的切向挤压作用使得

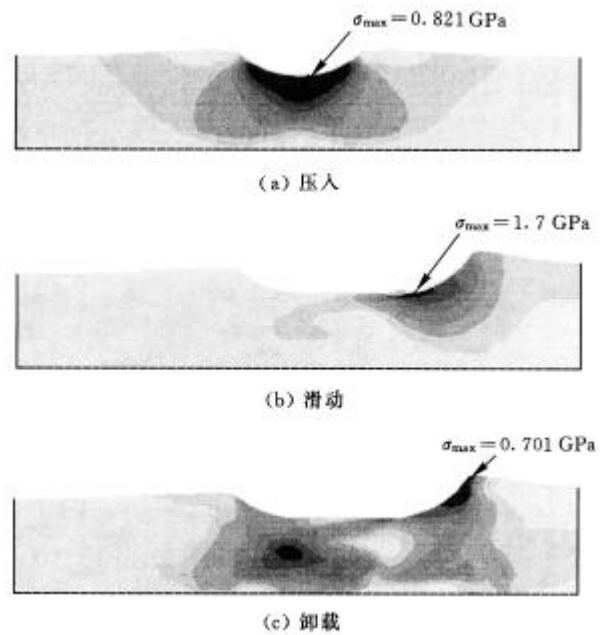


图 2 磨粒在材料表面摩擦时材料的 Von Mises 应力

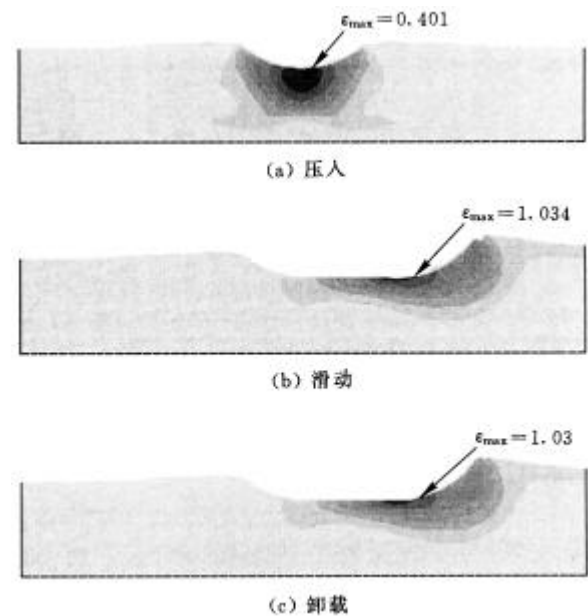


图 3 磨粒在材料表面摩擦时材料的 Von Mises 应变

在被磨损材料表层的应力分布和应变分布产生很大变化。材料表面的变形进一步使得摩擦接触区的压力分布和摩擦切应力分布产生偏斜。材料表面几何变形引起的几何非线性失稳导致材料表面的塑性流动,产生犁沟作用。实际上磨粒磨损中微观接触过程不仅存在材料的非线性作用和摩擦接触的状态非线性作用,而且存在着由于材料表面变形引起的几何非线性作用,被磨损材料表层的应力应变分布和接触压力分布和大小与材料表面变形过程有关。因此用简单的解析数学公式很难表示这种非线性关系,如果把法向接触的公式和结论直接用于滑动接触将带来较大误差。

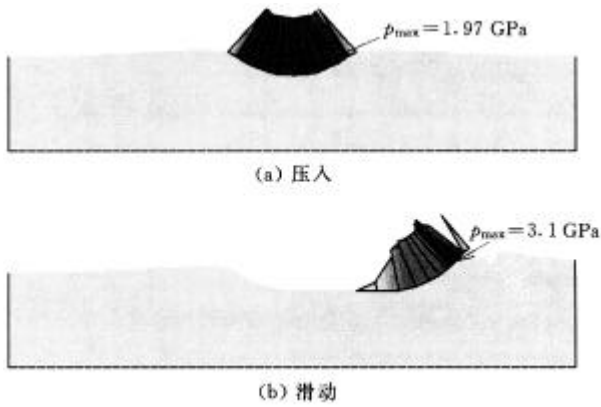


图 4 磨粒在材料表面摩擦时接触区的压力

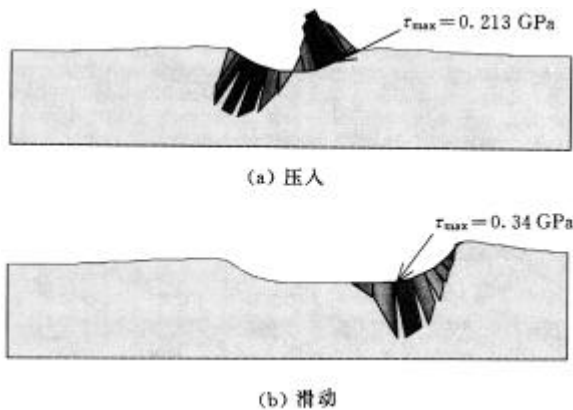


图 5 磨粒在材料表面摩擦时接触区的摩擦切应力

### 3 结论

(1) 磨粒磨损过程中微观接触问题是涉及材料非线性、摩擦接触状态非线性和材料表面变形几何非线性的耦合问题，材料表层的应力应变分布和接触压力分布与磨粒滑动接触过程有关，很难用简单的解析数学公式准确表示应力应变大小和分布规律。

(2) 磨粒在材料表面滑动接触时比单纯磨粒在材料表面法向接触时的应力应变、表面变形、接触压力和摩擦切应力大得多。应力应变和接触压力的分布规律也明显不同。摩擦接触后被磨损材料表层存在明显的残余应力、残余应变和塑性变形。

#### 参 考 文 献

- 1 温诗铸 黄平. 摩擦学原理. 北京 清华大学出版社 2002
- 2 Warren M, Garrison J. Abrasive wear resistance, the effects of ploughing and the removal of ploughed material. *Wear*, 1987, 114 : 239 ~ 247

- 3 Overney R, Meyyer E, Frommer J. Friction measurement on phaseseparated thin films with a modified atomic force microscope. *Nature*, 1992, 359(6 391) : 133 ~ 135
- 4 Ruan J, Bhushan B. Atomic-scale and microscale friction studies of graphite and diamond using friction force microscopy. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76 (9) : 5 022 ~ 5 035
- 5 Ludema K C. Mechanism-based modeling of friction and wear. *Wear*, 1996, 200 : 1 ~ 7
- 6 Tarassov S Y, Kolubaev A V. Effect of friction on subsurface layer microstructure in austenitic and martensitic steels. *Wear*, 1999, 231 : 228 ~ 234
- 7 Greenwood J A, Rowe G W. Deformation of surface asperities during bulk plastic flow. *J. Appl. Phys.*, 1965, 36 (2) : 667 ~ 668
- 8 Wu C W, Zheng L Q. A general expression for plasticity index. *Wear*, 1987, 121 : 161 ~ 172

### MICRO CONTACT PROCESS ANALYSIS IN ABRASIVE WEAR BY FINITE ELEMENT METHOD

Fan Yujin Yang Xiaojing

Li Zhekun Liu Jianxiong

(College of Mechanical and Electronical Engineering,  
Kunming University of Science and Technology,  
Kunming 650093)

**Abstract** : The process of a particle penetrating into material and sliding on the surface, then unloading is analyzed, the characters of stress, strain, contact pressure and friction shearing stress in three contact stages are studied. It is shown that micro contact process of a particle against material surface is not only affected by the nonlinearities of material and contact state, but also affected by the nonlinearity of deformed surface shape as a result of rubbing. The stress, strain and contact pressure of material surface is related to the surface deformation process.

**Key words** : Abrasive wear Friction contact

Surface deformation Finite element

作者简介：樊瑜瑾，男，1962 年出生，教授。主要研究方向为摩擦学及 CAE。

E-mail : fanyujin@public.km.yn.cn