第38卷第2期 东北大学学报(自然科学版) Vol.38,No.2
2017年2月 Journal of Northeastern University(Natural Science) Feb. 2017

doi:10.3969/j.issn.1005-3026.2017.02.019

# 预应力淬硬磨削加工表面微观形貌仿真与实验

邓延生[1],宋建伟[2],修世超[1],王雨时[1]
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819;2. 中航工业沈阳黎明发动机(集团)有限责任公司,辽宁 沈阳 110043)

**摘 要**:为了揭示预应力对磨削淬硬过程及表面微观形貌的影响机理,根据热弹塑性有限元理论,在不同大小的预应力作用下,以45钢试件为研究对象,使用DEFORM-3D进行单磨粒切削仿真,并结合预应力淬硬磨削实验,对等效应变、沟槽深度、表层微观组织及表面微观形貌进行分析.研究表明:施加预应力对热-机械等效应变影响较小,对微观组织转变影响明显,进而影响位错密度和晶粒体积,间接影响表面粗糙度;在预应力取值较小时,随着预应力增大表面沟槽深度减小,有利于减小表面粗糙度值,但在预应力超过某一数值后,会引起表面褶皱,反而使表面粗糙度数值增大.

**关 键 词**:预应力淬硬磨削;等效应变;沟槽深度;表面粗糙度;仿真与实验
**中图分类号**:TG 580.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3026(2017)02-0244-05

# Simulation and Experiment of Micro-surface in Pre-stressed Hardening Grinding Process

*DENG Yan-sheng*[1], *SONG Jian-wei*[2], *XIU Shi-chao*[1], *WANG Yu-shi*[1]
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. AVIC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation Ltd, Shenyang 110043, China. Corresponding author: XIU Shi-chao, E-mail: dysstudy@163.com)

**Abstract**: To reveal the effect of pre-stressing on grinding hardening process and micro-surface, single grain cutting simulations on test specimens made of 45 steel under action of different pre-stresses were carried out by using DEFORM-3D based on the thermal-elastic-plastic finite element theory. The equivalent strain, groove depth, surface layer microstructure as well as the micro-surface were analyzed by simulation and experiment of pre-stressed hardening grinding process. The results indicate that pre-stressing has little effect on thermal-mechanical equivalent strain, but has obvious effect on microstructure transformation which has indirect effect on surface roughness by affecting the dislocation density and grain size. As the pre-stress increases within a low range, the groove depth decreases and the surface roughness value reduces. However, once the pre-stress exceeds a certain value, surface fold appears and surface roughness value increases instead.

**Key words**: pre-stressed hardening grinding; equivalent strain; groove depth; surface roughness; simulation and experiment

磨削加工可以获得较高的加工精度与表面质量,在工程中得到了广泛应用.磨削过程会产生大量的磨削热量,致使温度过高,使加工表面层发生金相组织改变,甚至造成表面的热损伤,因此需要喷注磨削液来控制磨削温度[1].1994年,Brinkdmeier等学者提出在磨削过程中直接利用磨削热对零件进行表面淬火—磨削淬硬工艺[2].Zarudi和Zhang为了揭示磨削淬硬层的产生机理,以回火态AISI 4140钢为研究载体开展磨削淬硬实验研究[3].葛培琪等对磨削淬硬技术的发展进行了综述,指出其有助于缩短产品生产周期[4].刘菊东等针对65 Mn钢进行磨削淬硬实验,分析其淬硬层形成机理,并开展了磨削工艺参数控制方面的研究[5].修世超等开展了小切深条

**收稿日期**:2015-09-30
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(51375083);沈阳市科学技术计划项目(F16-205-1-02);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N140306002).
**作者简介**:邓延生(1992-),男,湖南岳阳人,东北大学博士研究生;修世超(1958-),男,辽宁凌源人,东北大学教授,博士生导师.

件下的点磨削实验，揭示了该条件下工件表面冲击强化机理[6]. 周泽华等以实现对机械加工表面残余应力的控制为目的，首先开展了预应力切削实验研究[7]. 修世超等提出的预应力淬硬磨削复合加工（pre－stressed hardening grinding）新工艺[8]融合了磨削淬硬工艺和预应力加工的特点，能够对工件表面残余应力进行主动控制. 目前，对于预应力加工的研究集中在残余应力方面的研究[7-8]，针对预应力对表面微观形貌影响的研究未见更多报道.

磨削过程有限元仿真是研究磨削工艺的一种有效手段. 假设不考虑磨粒间相互影响，磨削可视为大量随机分布的磨粒独立切削累积效应的结果. 使用 DEFORM－3D 对预应力淬硬磨削过程进行动态仿真，可以获得加工过程中和加工后表面材料参数和表面形貌特征等信息. 本文结合预应力淬硬磨削实验，对等效应变、沟槽深度及表面微观形貌进行分析，以揭示预应力对磨削淬硬过程及表面微观形貌的影响机理.

# 1　单磨粒切削有限元模型的建立与仿真

磨削过程实际是大量随机分布在砂轮表面的各个磨粒对工件表面的切削过程，通过预应力条件下单颗磨粒切削仿真可以分析预应力淬硬磨削加工表面微观形貌创成机理. 材料本构模型、断裂准则和摩擦模型的选择是仿真的关键. 假设单磨粒为绝对刚体，则不存在本构模型和断裂准则的选择.

## 1.1　模型选择

对于 45 钢，采用 Johnson－Cook 模型[9]，该模型可用于绝热条件下多数金属材料的塑性变形仿真. 其表达式为

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n][1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}][1 - \hat{T}^m]\ . \quad (1)$$

式中：$\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\varepsilon}^{pl}$ 为等效应力和应变值；$A, B, n, C, m$ 为材料参数，45 钢相关材料参数取值[10]如表 1 所示；$\hat{T} = (t - t_{room})/(t_{melt} - t_{room})$，$\hat{T}$ 为归一化处理后温度值，$t$ 为试件温度，$t_{room}$ 为室温，取值 20 ℃，$t_{melt}$ 为材料融化温度，取值 1 500 ℃.

表 1　45 钢相关材料参数取值

Table 1　Relevant material parameters of 45 steel

| $A$ | $B$ | $n$ | $C$ | $m$ |
|---|---|---|---|---|
| 553.1 | 600.8 | 0.234 | 0.013 4 | 1 |

磨粒选择 $Al_2O_3$ 磨料，相关材料参数见表 2，均采用软件材料库默认值.

表 2　磨粒材料相关材料参数取值

Table 2　Relevant parameters of grain material

| 弹性模量 / MPa | 泊松比 | 热膨胀系数 / $K^{-1}$ | 导热系数 / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| $4.15 \times 10^5$ | 0.22 | $8.4 \times 10^{-6}$ | 7.5 |

材料断裂模型应用无量纲 Normalized Cockcroft & Latham 准则，表达式为

$$\int_0^{\varepsilon_f} \sigma^* / \bar{\sigma} \mathrm{d}\bar{\varepsilon} = c\ . \quad (2)$$

式中：$\varepsilon_f$ 为材料发生断裂时的应变值；$\sigma^*$ 为最大应力；$\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$ 为等效应力、应变；$c$ 为材料临界破坏值.

为了使计算准确且用时较少，采用剪切摩擦模型，摩擦系数取 0.3[11].

## 1.2　有限元仿真过程

建立磨粒和工件的几何模型. 磨粒采用锥顶带圆角的圆锥体简化模型，圆锥底面直径 $d = 280\ \mu m$，计算得出磨粒顶锥角 $2\theta = 110°$，磨粒切削刃钝圆半径是 20 μm. 考虑到尺度问题，将工件尺寸缩小处理，工件尺寸为 0.7 mm × 0.5 mm × 0.2 mm. 工件网格数量选择 40 000，磨粒网格数量选择为 5 000，并在接触区做局部细化处理，如图 1 所示. 为防止网格变形过大发生畸变，当工件表面和磨粒之间的干涉深度大于 0.001 mm 时，将自动对网格进行重新划分. 仿真模式选择热传递和变形，迭代方法为直接迭代法，变形求解器选择共轭梯度求解器，基本算法选择拉格朗日增量（Lagrangian incremental）算法. 工件边界约束，磨粒和工件干涉切削示意图如图 2 所示. 表 3 为仿真实验条件.

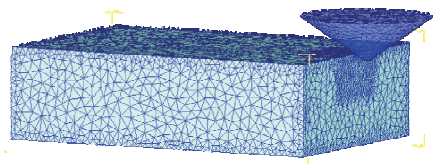

图 1　工件和单磨粒网格划分

Fig. 1　Workpiece and single grain meshing

表 3　仿真实验条件

Table 3　Conditions of simulation experiment

| 实验号 | 预应力 $\sigma'$/MPa | 磨粒速度 $v$/($m \cdot s^{-1}$) | 切深/μm |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | | |
| 2 | 50 | | |
| 3 | 100 | 37 | 13 |
| 4 | 150 | | |
| 5 | 200 | | |

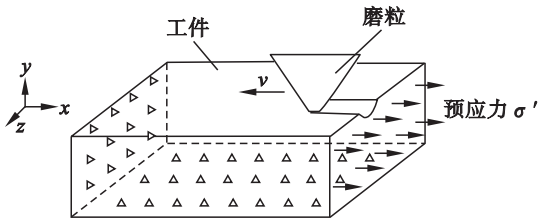


图 2 工件约束条件和单磨粒微切削示意图

Fig. 2 Workpiece constraints and single grain micro cutting

为了分析预应力对淬硬磨削后表层等效应变和沟槽深度的影响,仿真步骤如下:

1) 在工件的右端沿 $x$ 方向施加一个不超过材料弹性范围的拉力,使工件发生稳定的弹性变形;

2) 调整磨粒和工件之间的位置,使其产生一定的干涉深度模拟磨削切深,以砂轮线速度和进给速度的差作为磨粒运动速度,使磨粒快速划过工件表面,并产生沟槽;

3) 为了消除磨粒冲击对工件表面应力应变的影响,当磨粒在工件表面划过一段距离后,使磨粒快速提起离开表面并结束运动;

4) 施加足够的时间载荷步,使工件在空气中冷却至室温,随后释放预应力.

## 2 预应力作用下单磨粒切削仿真结果分析

### 2.1 等效应变对表面形貌的影响

等效应变和位错密度是微观塑性变形的两种体现,等效应变越大,微观塑性变形越剧烈,剧烈的微观塑性变形又导致位错的大量形成,使得位错密度增大和晶粒体积减小. 因此,等效应变可用来评估位错密度和晶粒体积大小. 在磨削淬硬过程中,实际上引起表层产生微观塑性变形的因素不仅有热-机械作用,还有微观组织相变的影响,而在单磨粒切削仿真中忽略了这一影响. 图 3 为已加工工件表层纵向剖面等效应变云图.

图 3 中,H,I,J 区域较小,B,C,D,E,F,G 为表层主要等效应变区域,因此对 B,C,D,E,F,G 区域进行分析. 在不同大小预应力作用下,表层等效应变均表现为:表面的等效应变值最大,随着深度的增加,等效应变值逐渐减小,这是由于距离表面越近的材料在磨粒划过表面时受到磨粒的划擦和挤压作用越大,因此微观塑性变形越严重. 整体上,剖面上磨削稳定区域各个等效应变等值区域在 $x$ 向分布均匀,不存在畸变区域. 但是,在磨削

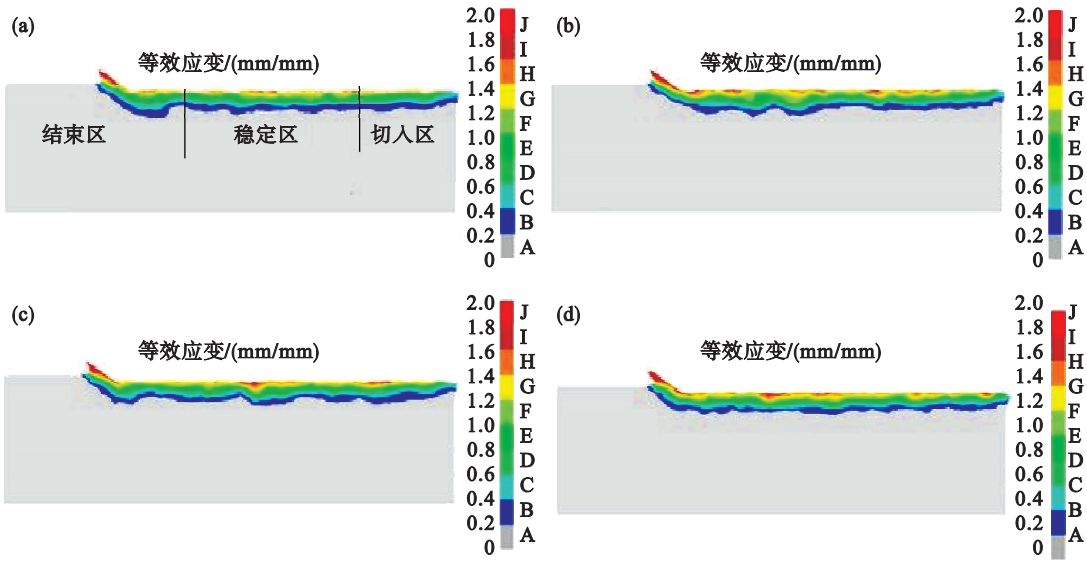


图 3 等效应变分布图

Fig. 3 Effective strain distribution

(a)—预应力 = 0 MPa;(b)—预应力 = 50 MPa;(c)—预应力 = 100 MPa;(d)—预应力 = 150 MPa.

结束区域,相较于稳定区和切入区,磨削等效应变层较大. 这可能是由于划擦结束瞬间磨粒突然提起,引起磨粒与工件表面之间的干涉速度发生突变,使得材料受到冲击作用.

对比图 3a ~ 图 3d,可以看出,不同预应力作用下的表层等效应变大小变化并不明显,这是由于相对于磨削过程中砂轮对表层材料的挤压力而言,施加的预应力较小. 但由于仿真过程中得到的表层等效应变并没有考虑到微观组织相变因素的影响,所以在实验中对表层微观组织进行了观测.

### 2.2　预应力对单磨粒切削仿真沟槽深度的影响

单磨粒切削工件表面形成的沟槽深度和磨削表面粗糙度有相似之处，磨削表面粗糙度实际是砂轮上磨粒划过零件表面形成的若干沟槽的干涉叠加. 预应力单磨粒切削仿真中得到的沟槽可用于研究预应力对表面粗糙度的影响. 图 4 为预应力单磨粒切削仿真得到的沟槽形貌，沟槽表面不均匀，有周期波动特征. 磨削切入区和结束区的沟槽形貌并不能代表实际的磨削表面特征，在磨削稳定区不同位置使用 DEFORM－3D 中的 CAD 测量模块对沟槽深度进行测量，类比轮廓算术平均偏差 $R_a$ 得到沟槽深度算术平均值. 沟槽深度算术平均值随预应力变化趋势如图 5 所示. 表面沟槽深度随预应力的增大先减小后增大. 这是由于磨削后试件表层材料发生了马氏体相变，形成马氏体组织，使得表层材料弹性模量减小. 释放预应力后，表面不仅发生弹性回复，还受到基体材料弹性回复时的压缩作用. 当预应力较小时，压缩作用使得表面更为紧致，沟槽深度减小，但是当预应力超过一定值后，压缩作用过大，使得表面出现褶皱，反而使沟槽深度增大. 因此可以得出以下结论：预应力较小时，施加预应力有利于降低表面粗糙度，提高表面质量，但是预应力值不宜过大. 根据仿真结果，对于 45 钢，预应力不应大于 100 MPa.

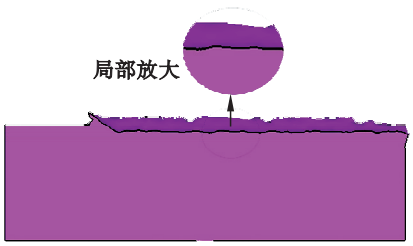


图 4　沟槽实际轮廓形貌

Fig. 4　Morphology of the actual groove profile

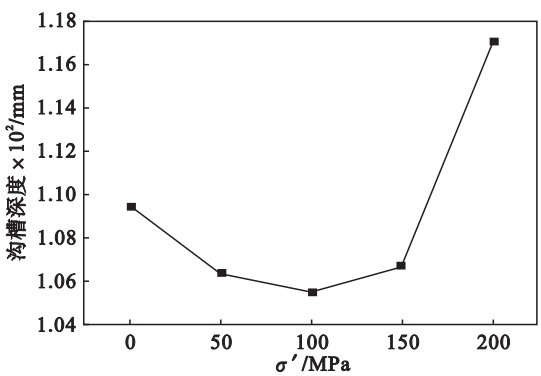


图 5　不同预应力下沟槽深度变化

Fig. 5　Groove depth under different pre-stresses

## 3　预应力对表面微观形貌的影响

磨削加工实际上是多个随机分布在砂轮表面的磨粒进行微切削的综合过程. 因此，在对预应力作用下单磨粒微切削过程进行仿真的基础上，对 45 钢试件进行预应力淬硬磨削实验，以进一步分析工件表面微观形貌随预应力的变化规律. 实验设备为 M7120A 平面磨床，采用磨料粒度为 F46 的陶瓷结合剂白刚玉砂轮，砂轮直径为250 mm. 试件加工段尺寸 $l \times h \times b$ 为 50 mm × 22 mm × 10 mm，磨削宽度为 10 mm. 磨削方式为干式顺磨. 实验中采用特殊设计的夹具施加预应力，预应力大小通过调节预紧力矩实现. 实验分三组进行，实验 1、实验 2 和实验 3 预应力值分别为28.4，56.8 和 85.2 MPa；其他磨削参数：磨削深度 $a_p = 200$ μm，进给速度 $v_w = 0.02$ m/s，砂轮线速度 $v_s = 37$ m/s. 实验过程和试件如图 6 所示.

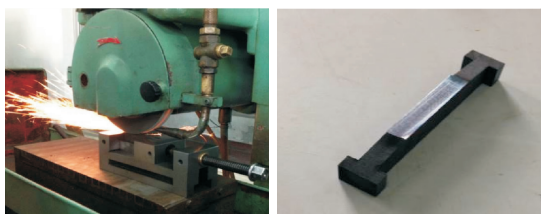

图 6　预应力淬硬磨削过程与试件

Fig. 6　Pre-stressed hardening grinding process and test specimen

采用 OLYMPUS GX71 倒置金相显微镜对磨削后试件表层微观组织进行观测，结果如图 7 所示. 由图 7 可见，表层组织均发生了不同程度的马氏体转变，在本次实验下，相变程度随着预应力的增大呈现为大—小—大的变化趋势. 相变程度直接影响表层组织的位错密度和晶粒体积大小，从而间接影响表面微观形貌.

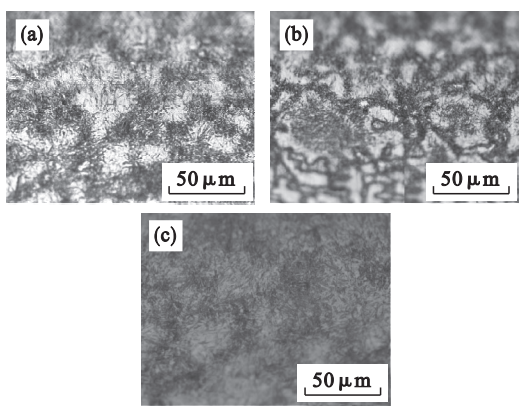


图 7　表层金相组织图

Fig. 7　Microstructure of surface layer

(a)—预应力 = 28.4 MPa；(b)—预应力 = 56.8 MPa；(c)—预应力 = 85.2 MPa.

采用 TR300 粗糙度形状测量仪测量实验后试件表面粗糙度. 在试件的磨削稳定区域进行表面粗糙度测量,表 4 为测量结果.

表 4 表面粗糙度测量结果

Table 4 Measurement results of surface roughness

| 实验号 | 预应力值 $\sigma'$/MPa | 表面粗糙度 $R_a$/μm |
|---|---|---|
| 1 | 28.4 | 1.517 |
| 2 | 56.8 | 1.516 |
| 3 | 85.2 | 1.490 |

可以看出,预应力淬硬磨削过程中,表面粗糙度数值随着预应力值增大呈减小趋势,这与前述预应力下单磨粒切削仿真实验中预应力值小于 100 MPa 时沟槽深度分析所得结论一致,即随着预应力数值增大,工件表面粗糙度数值减小. 实验结果也证明,预应力的施加在一定范围内有利于减小表面粗糙度值,提高表面质量,同时也说明,采用单颗磨粒切削仿真所得沟槽形貌研究表面粗糙度随预应力的变化规律,这种方法可行.

## 4 结 论

1) 预应力淬硬磨削工件表层等效应变分布均匀,不存在畸变区域,预应力的施加和预应力的大小不会影响表层等效应变分布规律,对热 - 机械引起的等效应变影响不明显,但会对微观组织相变程度产生较大影响,从而影响位错密度和晶粒体积大小,间接影响表面微观形貌.

2) 工件表面沟槽深度在较小预应力值范围内随预应力增大而减小,表面粗糙度值呈下降趋势,但预应力数值不宜过大,过大的预应力会引起表面褶皱的产生,进而使得表面粗糙度值增大,在本文仿真实验条件下,预应力不应超过 100 MPa.

3) 在预应力值不超过阈值的条件下,对于表面粗糙度数值随预应力的变化趋势及规律,单磨粒切削仿真结论与预应力淬硬磨削实验结果基本一致,表明采用 DEFORM - 3D 有限元软件进行单磨粒切削仿真以研究预应力对磨削淬硬加工表面微观形貌的影响机理的方法可行.

**参考文献:**


[1] Rowe W B, Morgan M N, Black S C E, et al. A simplified approach to control of thermal damage in grinding[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 1996, 45(1): 299 - 302.

[2] Brinksmeier E, Brockhoff T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 1996, 45(1): 255 - 260.

[3] Zarudi I, Zhang L C. Modelling the structure changes in quenchable steel subjected to grinding [J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(20): 4333 - 4341.

[4] 葛培琪,孙建国,刘镇昌. 磨削淬硬——磨削加工与表面淬火集成制造技术[J]. 工具技术, 2001, 35(1): 7 - 10.
(Ge Pei-qi, Sun Jian-guo, Liu Zhen-chang. Grinding hardening—integration manufacturing technology of grinding and surface heat treatment process [J]. *Tool Engineering*, 2001, 35(1): 7 - 10.)

[5] Liu J D, Wang G C, Wang Z, et al. Experimental research on grind-hardening of 65Mn steel[J]. *Materials Science Forum*, 2006, 505/506/507: 787 - 792.

[6] Xiu S C, Yuan S X, Cai G Q. Researches on effect of impact micro-damages in contact layer on machinability in quick-point grinding [J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 389/390: 229 - 234.

[7] Zhou Z H, Guo D T. Pre-stressed machining: combined use of heuristics and optimization methods[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Production Research. Cincinnati, 1987: 257 - 263.

[8] 修世超,白斌,张修铭,等. 预应力淬硬磨削复合加工表层硬化试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 86 - 90.
(Xiu Shi-chao, Bai Bin, Zhang Xiu-ming, et al. Study of the surface hardening in pre-stressed hardening grinding combined machining[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(1): 86 - 90.)

[9] Johnson G, Cook W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. Hague, 1983: 541 - 547.

[10] Jaspers S P F C, Dautzenberg J H. Material behavior in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(2): 322 - 330.

[11] Cai G, Feng B, Jin T, et al. Study of the friction coefficient in grinding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1): 25 - 29.