

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.08.014

微磨具磨削钠钙玻璃的磨损机理实验研究

巩亚东, 黄雄俊, 温雪龙, 周俊
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 建立了微磨削过程中单颗磨粒的磨损数学模型,通过观测微磨具磨削前后直径变化、表面形貌变化及加工前后试件的表面质量,分析了微磨削过程中不同阶段磨粒的磨损情况. 利用粒度 500[#]微磨具对钠钙玻璃进行单因素磨损实验,研究不同的磨削影响因素对微磨具磨损的影响规律. 实验结果表明:随着磨削速度和进给速度增大,磨粒的磨损和破碎现象加剧;随着去除材料体积的增加,微磨具直径先是急剧减小,而后呈线性减小趋势;加工表面的粗糙度随着去除工件体积的增加总体呈下降趋势. 研究结果为提高微磨具的使用寿命和加工性能提供了理论参考和实验依据.

关 键 词: 微磨具; 钠钙玻璃; 磨粒磨损; 磨损机理; 粗糙度

中图分类号: TH 161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)08-1128-05

Experimental Research on Wear Mechanism of Micro-grinding Tool in Grinding Soda-Lime Glass

GONG Ya-dong, HUANG Xiong-jun, WEN Xue-long, ZHOU Jun
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: WEN Xue-long, E-mail: wenxl@me.neu.edu.cn)

Abstract: Single grain abrasive wear model is established for the micro grinding process. The abrasive wear at different stages in micro-grinding process is analyzed by the observation toward the diameter variation and the surface appearance of the micro-grinding tools as well as the surface quality variation of the workpieces. Tool wearing influence rules caused by various grinding influence factors are also studied through single-factor experiments on soda-lime glass, with [#]500 particle size micro-grinding tools adopted. The experiment results indicate that the wear and breakage of abrasive grains are increased as long as the feed speed and feed rate increase during the micro grinding process. In addition, as the material removal volume increases, the diameter of the micro grinding tool decreases sharply at first, and then decreases linearly. Generally, a decrease trend of the roughness value is observed form the machine surface. The achievements of this paper provides theoretical and experimental basis for increasing working life and improving processing performance of micro-grinding tool.

Key words: micro-grinding tool; soda-lime glass; abrasive wear; wear mechanism; roughness

磨削过程中,磨具不断磨损,当磨损到一定程度时,磨削力会显著增加,磨削温度随之迅速升高,并伴有振动产生,严重影响了加工表面质量和精度.

在磨损方面,专家学者们已有大量研究. Zhang 等^[1]做了金刚石刀具切削反应烧结碳化硅的磨损实验,发现占主导地位的磨损机制是在刀具-工件界面的碳化硅颗粒的磨料划伤的影响. Jia 等^[2]研究了金刚石刀具切削碳酸钙玻璃刀具的磨损特性和玻璃的表面粗糙度,发现前刀面上的磨损要比侧翼磨损小得多. Ding 等^[3]研究了金刚石砂轮在超声振动辅助下研磨碳化硅的磨损,金刚石颗粒的宏观断裂是主要的磨损形式. Uhlmann 等^[4]研究了化学气相沉积金刚石涂层硬质合金刀具的磨损机理和残余应力分析,发现高涂层质量因子和高压缩残余应力的工具使用寿命更长. Glardon 等^[5]研究了用于加工玻璃的单点

金刚石工具的磨损形式,发现磨损过程中磨损平面的形成在刀具边缘且平行于工件表面. Uhlmann 等^[6]研究了晶粒尺寸对微细电火花加工金刚石涂层磨损性能的影响,发现纳米晶涂层比微晶金刚石涂层形成的放电坑更小. Gelfusa 等^[7]研究了单颗金刚石涂层珠的切削力和刀具磨损,发现当切削速度一定时,进给速度越大磨损越严重.

但是,目前对电镀金刚石微小磨具磨损机理的研究还未见相关报道. 本文通过对单层电镀金刚石微磨具磨削钠钙玻璃的磨损机理的实验研究,分析不同加工参数下磨损前后的微磨具磨头直径、磨损和破损磨粒所占的比例,探讨用不同磨损阶段的微磨具加工后试件表面粗糙度变化规律. 为提高微磨具切削加工性能和延长微磨具的使用寿命提供理论参考和实验依据.

1 微磨具磨损机理

微磨具磨削钠钙玻璃过程如图 1 所示.

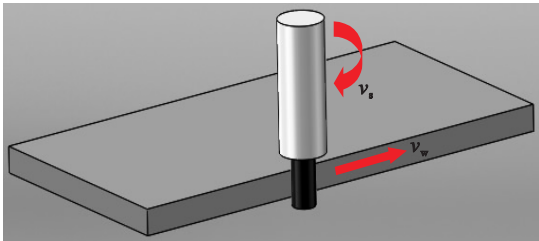


图 1 微磨具磨削过程

Fig. 1 Grinding process of micro grinding tool

在电镀金刚石微磨具磨削过程中,其磨损的主要形式为磨耗磨损、磨粒破碎、磨粒脱落及电镀层磨损等形式^[8],在微磨削过程中,微磨具自身尺寸较小(磨头直径小于 1 mm),即使进给速度很小,由于主轴转速较高(最高可达 60 000 r/min),磨粒仍会受到较大的高频冲击力. 因此,电镀金刚石微磨具的磨损形式主要是磨粒的磨耗磨损和磨粒破碎,还有磨粒脱落和电镀层磨损等形式. 选择合理的磨削参数,以减小磨粒受到的高频冲击力,对微磨具的加工性能和使用寿命有着重要的意义.

1) 磨耗磨损. 微磨具磨粒在磨削工件的初始阶段,电镀层对磨粒的把持力较强,磨粒不易脱落,随着磨削的进行,磨粒逐渐被磨出小平面,此时微磨具磨损的主要形式为磨耗磨损.

2) 磨粒破碎. 虽然微磨削的进给速度较小,但是主轴转速较高,磨粒会受到高频冲击,产生应

力集中,达到一定程度后会在磨粒的缺陷部分发生破碎.

3) 磨粒脱落. 随着磨削的进行,磨削刃磨钝,磨削力会变大,磨粒出刃高度降低导致电镀层损伤,当电镀层对磨粒的把持力小于所受的磨削力时,磨粒会出现脱落现象.

4) 电镀层磨损. 随着磨粒的磨损和破碎,磨粒的出刃高度逐渐减小,当继续磨削时,工件会直接与电镀层接触,出现电镀层的损伤现象.

2 磨削过程数学建模

在超景深显微镜下观测磨粒实际形貌,可把单颗磨粒模型近似看作正三棱台,如图 2 所示.

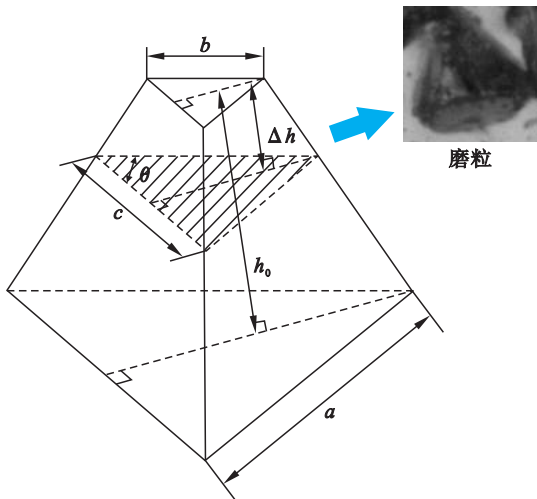


图 2 单颗磨粒模型

Fig. 2 Single grain model

本文通过计算单颗磨粒磨损比例 ε 来表示磨粒的磨损程度:

$$\varepsilon = \frac{V_s}{V_m} \tag{1}$$

式中: V_s 为磨粒磨损的体积; V_m 为磨粒总体积,

$$V_m = \frac{\sqrt{2}}{12} (a^3 - b^3) \tag{2}$$

式中: a 为磨粒底端面边长(本模型中可近似为磨粒直径 d_0); b 为磨粒顶端面边长, b 可表示为

$$b = a - \frac{\sqrt{6}}{2} h_0 \tag{3}$$

式中 h_0 为磨粒高度.

磨粒磨损体积 V_s 为

$$V_s = \int_0^{\Delta h} S(h) dh \tag{4}$$

式中: Δh 为任意时刻磨粒磨损掉的高度; $S(h)$ 为磨粒从开始磨损到磨损高度为 Δh 之间任意截面面积,则 $S(h)$ 可表示为

$$S(h)=\frac{1}{2}c^2\cos\frac{\theta}{2}.$$

(5)

式中: θ 等于 60° ; c 为任意截面边长,

$$c=b+\frac{\sqrt{6}}{2}h.$$

(6)

式中: h 为磨粒磨损到任意截面时,磨粒磨损掉的高度. Δh 可由磨削到任意时刻微磨具的直径减小量求得:

$$\Delta h=\frac{D_0+D_t}{2}.$$

(7)

式中: D_0 表示微磨具的初始直径; D_t 表示 t 时刻微磨具的直径.

利用 MATLAB 中非线性拟合函数 lsqcurvefit 对 2[#]微磨具实测直径进行数据拟合,可以求得

$$D_t=857.69+12.6986e^{-0.232t}.$$

(8)

将式(3)、式(5)、式(6)代入到式(4),得

$$V_s=\int_0^{\Delta h}\frac{1}{2}\left(d_0+\frac{\sqrt{6}}{2}h-\frac{\sqrt{6}}{2}h_0\right)^2\cos\frac{\theta}{2}dh.$$

(9)

所以任意时刻磨粒磨损比例的预测公式为

$$\varepsilon=\frac{2\sqrt{3}}{2}\times\cos\frac{\theta}{2}\times\frac{\left[d_0+\frac{\sqrt{6}}{4}(D_0-D_t)-\frac{\sqrt{6}}{2}h_0\right]^3-\left(d_0-\frac{\sqrt{6}}{2}h_0\right)^3}{d_0^3-\left(d_0-\frac{\sqrt{6}}{2}h_0\right)^3}.$$

(10)

3 实验设备与方案

3.1 实验设备

本磨削实验使用的设备为东北大学机械学院先进制造研究所的 JX-1A 型玻璃精雕机,机床最大主轴转速可以达到 60 000 r/min,加工精度为 1 μm . 可进行微尺度铣削和磨削加工.

本实验利用 VHX-1000E 超景深显微镜,观测微磨具表面与工件的表面形貌,并实际测量磨具直径. 其低倍镜最大可放大 200 倍,高倍最大可放大 5 000 倍.

实验用法国 STIL 公司的三维表面轮廓仪,可对工件表面进行非接触测量,其最大采样区为 2 mm \times 2 mm,最小采样步长为 0.5 μm .

3.2 实验方案

实验用微磨具为单层电镀金刚石微磨具,其磨头直径为 0.9 μm ,500[#]磨粒. 试件所用材料为钠钙玻璃,尺寸为 40 mm \times 10 mm \times 1 mm. 微磨具和钠钙玻璃见图 3. 钠钙玻璃材料特性见表 1.

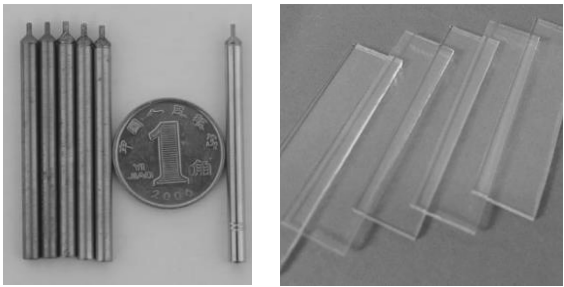


图 3 微磨具和钠钙玻璃
Fig. 3 Micro-grinding tool and soda-lime glass

表 1 钠钙玻璃材料的特性
Table 1 Properties of soda-lime glass

材料特性	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 200
比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	820
导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	1.2
热膨胀系数/($\mu\text{m}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	3.3
弹性模量/MPa	532.7
泊松比	0.5
玻璃熔化温度/ $^\circ\text{C}$	500
室温/ $^\circ\text{C}$	25

本实验是用单层电镀金刚石微磨具对钠钙玻璃进行加工,通过改变磨削速度、进给速度和磨削深度,在湿磨的条件下进行逆磨,研究不同磨削参数条件下微磨具的磨损情况,具体实验参数如表 2 所示.

在磨削实验开始前,利用超景深显微镜对微磨具进行一次检测,而后累计去除工件体积 8, 24, 40, 80, 120, 160, 200 mm^3 时各为一组实验. 每组实验结束后分别利用超景深显微镜对微磨具进行观测,分析其直径变化、表面形貌及磨粒磨损破碎情况,并利用三维表面轮廓仪对加工试件表面进行粗糙度检测与形貌分析.

表 2 微磨削磨损实验参数
Table 2 Parameters for micro-grinding wear experiment

磨具编号	磨削速度 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	进给速度 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	磨削深度 μm
1 [#]	1.413	25	20
2 [#]	1.413	50	20
3 [#]	1.413	100	20
4 [#]	2.826	50	20

4 实验结果分析

4.1 微磨具磨损和破碎磨粒比例及影响因素

4 支微磨具每组实验后统计出的磨损磨粒及破碎磨粒占总磨粒数比例的变化曲线分别如图 4 和图 5 所示。

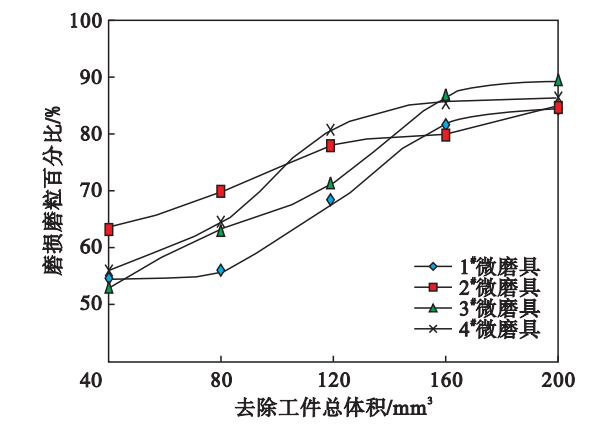


图 4 磨损磨粒百分比随去除工件体积的变化曲线
Fig. 4 Percentage of worn grains vs. removed volume

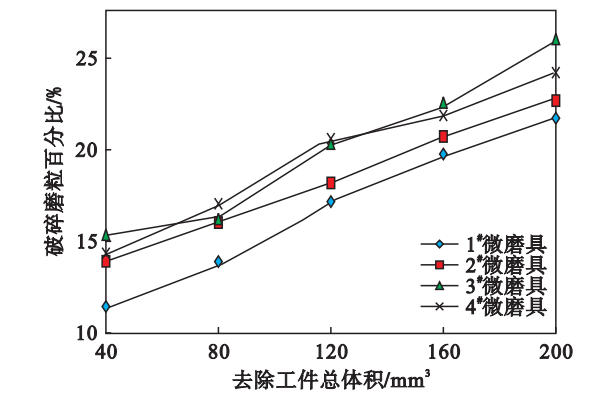


图 5 破碎磨粒百分比随去除工件体积的变化曲线
Fig. 5 Percentage of broken grains vs. removed volume

由图 4 和图 5 可知,磨粒的磨损比例远大于磨粒的破碎比例.这是由于金刚石的硬度高,不易破碎,其中少数磨粒的破碎是由于主轴转速高,磨粒局部受到较大冲击,产生应力集中,在磨粒缺陷处产生裂纹,积累到一定程度后导致磨粒破碎;而大部分磨粒都是正常的磨耗磨损。

对比 1[#], 2[#], 3[#] 微磨具,随着去除工件体积的增加,磨粒磨损和破碎比例均增大,可以看出,三支微磨具的进给速度越大,磨粒的磨损和破碎越严重.这是由于单颗磨粒在每次接触工件时,水平移动距离更长,磨粒的磨削深度更深,磨削力也就越大,所以磨粒的磨损和破碎更严重。

由图 4 和图 5 可知,2[#]和 4[#]微磨具磨削速度越大,磨粒的磨损和破碎越严重.这是由于磨削速度越大,磨粒与工件接触的频率越高,磨粒磨损的次数越多,磨粒所受的冲击力越大,所以磨粒的磨损和破碎越严重。

4.2 微磨具直径变化对磨损的影响

4 支微磨具直径随去除工件总体积的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,当去除工件体积小于 40 mm³ 时,微磨具的直径迅速减小,当去除工件体积大于 40 mm³ 直到 200 mm³ 时,其直径呈缓慢减小趋势.这是由于磨削的初始阶段部分磨粒出刃高度较高,微磨具开始磨削的阶段部分出刃高度较低的磨粒不参与磨削,所以开始阶段参与磨削的磨粒受到的平均磨削力较大,会快速磨损,直径减小得快.磨削一段时间后,随着磨粒的磨损,磨粒的出刃高度差减小,有效磨粒数越来越多,单颗磨粒所受的平均磨削力越来越小,磨粒磨损速度减缓,所以磨具直径减小的速度趋于平稳。

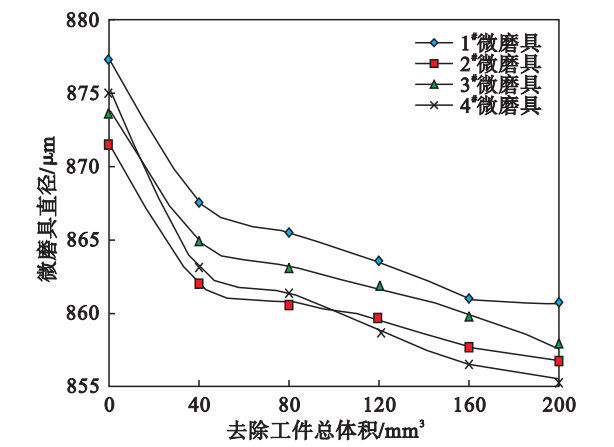


图 6 微磨具直径随工件去除体积的变化曲线
Fig. 6 Diameter of the micro-grinding tool vs. removed volume

4.3 微磨具磨损对加工表面粗糙度的影响

图 7 为试件被加工表面粗糙度随去除工件体积的变化曲线.由图可知,当去除工件体积为 40 mm³ 时,1[#] 微磨具的加工表面粗糙度值为 1.415 μm,当去除工件体积为 80 mm³ 时,其表面粗糙度为 1.075 μm.当去除工件体积从 40 mm³ 增加到 200 mm³ 时,2[#], 3[#], 4[#] 微磨具的加工表面粗糙度分别减小了 0.160, 0.525, 0.070 μm。

由图可见,试件加工表面粗糙度值总体呈先减小后增大的趋势.这是由于微磨具在加工的初始阶段,磨粒的出刃高度分布不均匀,部分磨粒的出刃高度较高,磨粒磨削工件的深度不一致,导致参与磨削的有效磨刃数较少,进而使得加工表面

粗糙度较大. 随着磨削的进行,磨粒不断磨损,磨粒的出刃高度差减小,参与磨削的有效磨刃数增多,使得加工表面粗糙度值减小. 当磨削进行一定时间后,试件表面粗糙度值开始逐渐增大,磨削表面质量变差. 这是由于磨粒的磨损使得磨削刃变钝,同时磨粒受到的磨削力增加,磨削温度升高,进而影响加工表面的质量.

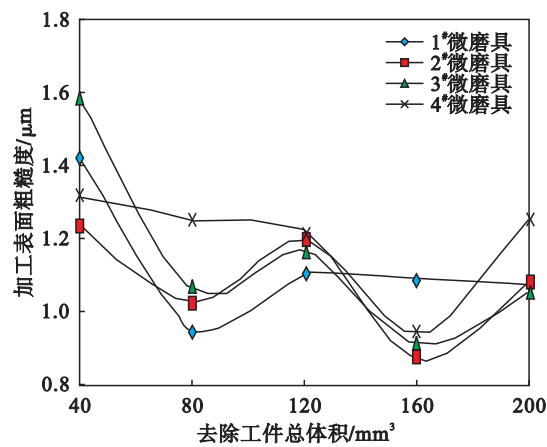


图 7 粗糙度随工件去除体积的变化曲线
Fig. 7 Roughness vs. removed volume

4. 4 实验结果与预测曲线对比分析

图 8 为 4 支微磨具直径的实际测量值与预测值随时间变化的曲线. 由图可见,4 支微磨具实际测量直径与预测曲线直径变化趋势一致. 3#和 4#微磨具直径变化曲线与预测曲线的最大误差仅为 2. 21 μm . 1#微磨具由于制备时的误差,其初始直径比其他 3 支微磨具大,约为 6 μm ,而 1#微磨具直径变化与预测直径的最大误差也仅 8 μm ,且曲线变化趋势一致,所以预测曲线也适用于 1#微磨具. 由此可见,预测公式具有一定的科学性.

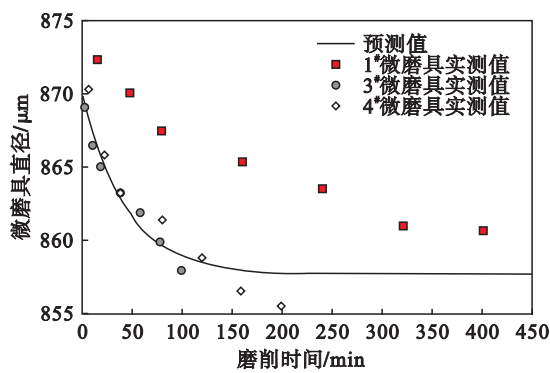


图 8 微磨具直径随磨削时间变化的预测曲线
Fig. 8 Forecast curves of micro-grinding tool diameter vs. grinding time

5 结 论

- 1) 建立了单颗磨粒数学模型,推导出任意时刻磨粒磨损比例的预测公式.
- 2) 随着去除工件体积的增加,磨损和破碎磨粒的比例不断增加,同时,进给速度和磨削速度越大,磨粒的磨损和破碎越严重.
- 3) 在微磨具去除工件体积的过程中,当去除工件总体积小于 40 mm^3 ,微磨具直径急剧减小;当去除工件总体积大于 40 mm^3 ,微磨具直径呈缓慢减小趋势.
- 4) 在微磨削实验过程中,加工表面粗糙度值总体呈先减小后增大的趋势,其中,3#微磨具表面粗糙度减小量最多,为 0. 525 μm .

参考文献:

[1] Zhang Z Y, Yan J W, Kuriyagawa T. Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 57: 117 – 125.

[2] Jia P, Zhou M. Tool wear and its effect on surface roughness in diamond cutting of glass soda-lime[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(6): 1224 – 1230.

[3] Ding K, Fu Y C, Su H H, et al. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71: 1929 – 1938.

[4] Uhlmann E, Sammler F, Meixner M, et al. Analysis of residual stresses and wear mechanism of HF-CVD diamond coated cemented carbide tools [J]. *Production Engineering—Research and Development*, 2015, 9(1): 99 – 107.

[5] Glardon R E, Finnie I. Some observations on the wear of single point diamond tools used for machining glass [J]. *Journal of Materials Science*, 1981, 16(7): 1776 – 1784.

[6] Uhlmann E, Rosiwal S, Bayerlein K, et al. Influence of grain size on the wear behavior of CVD diamond coatings in micro-EDM[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47: 919 – 922.

[7] Gelfusa G, Turchetta S. Cutting force and tool wear of single diamond-coated bead [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72: 1063 – 1072.

[8] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 电镀金刚石微磨具磨损机理分析与实验研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(11): 177 – 185.
(Wen Xue-long, Gong Ya-dong, Cheng Jun, et al. Mechanism analysis and experimental research on wear of electroplated diamond micro-grinding tool [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(11): 177 – 185.)