

# ELID 成形磨削实验研究与表面粗糙度预测

张宇鑫 任成祖 左明泽 王志强

(天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350)

**文 摘** 为了探究 ELID 成型磨削中磨削参数和电解参数对表面粗糙度的影响规律, 基于未变形切屑厚度模型, 考虑砂轮上磨粒出刃高度的随机性以及 ELID 磨削中氧化膜的影响, 建立了针对 ELID 磨削的表面粗糙度预测模型。单因素实验研究了 ELID 成形磨削电源参数对表面粗糙度的影响规律, 并探讨了电解电流与氧化膜厚度之间的关系。全因子实验以工件转速、砂轮转速和进给切深为影响因素, 研究了磨削参数对表面粗糙度的影响规律, 并对预测模型进行了验证。结果表明: 磨削参数中, 其他条件一定时, 表面粗糙度随砂轮转速的增大而减小, 随工件转速和切深的增大而增大; 同时对于粗糙度的预测误差达到了 8.75%, 预测模型有效可靠。

**关键词** ELID 磨削, 切屑厚度, 表面粗糙度模型, 氧化膜

中图分类号: TH161.14

DOI: 10. 12044/j. issn. 1007-2330. 2018. 06. 005

## Experimental Study and Prediction of Surface Roughness in of ELID Form Grinding

ZHANG Yuxin REN Chengzu ZUO Mingze WANG Zhiqiang

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350)

**Abstract** In order to explore the influence of grinding parameters and electrolysis parameters on surface roughness in ELID grinding process, the surface roughness prediction model of ELID grinding was established based on the undeformed chip thickness model by taking into account the randomness of the grit height at the grinding wheel and the influence of the oxide layer in the ELID grinding. Single factor experiments were carried out to study the influence of the parameters of ELID grinding on the surface roughness, and the relationship between the electrolytic current and the thickness of the oxide layer was discussed. In the full factor experiment, the influence of the grinding parameters on the surface roughness was studied by taking the workpiece speed, the grinding wheel speed and the feed depth as the influencing factors, and the prediction model was verified. The results show that in the grinding parameters, when the other conditions are fixed, the surface roughness decreases with the increase of the wheel speed, and increases with the increase of the workpiece speed and the depth of the cutting. At the same time, the prediction error of the roughness is 8.75%, the prediction model is valid and reliable.

**Key words** ELID grinding, Chip thickness, Model of surface roughness, Oxide layer

### 0 引言

轴承作为一种重要的基础机械部件, 在机械装备中起着重要作用。各类主机的工作精度、性能、寿命、可靠性等各项指标, 都与轴承性能有着密切的关系。传统轴承沟道的加工工艺主要包括沟道成型磨削和油石超精研, 然而传统的轴承沟道成型磨削存在砂轮容易堵塞、修锐困难等问题, 不适合采用超硬

微细磨料砂轮, 只能用于沟道的粗磨和半精磨。在线电解修整技术(ELID)由日本物理化学研究所中川、大森整于 1987 年提出, 该技术既能保证金属结合剂把持能力强、砂轮寿命长、保形精度高等优点, 还可以很好地解决超精密磨削过程中微细磨料砂轮易堵塞和金属结合剂修锐困难等问题<sup>[1-2]</sup>。将 ELID 磨削技术应用用于轴承套圈沟道的成形加工, 可以在保

收稿日期: 2018-06-12

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(15JCZDJC39500); 国家自然科学基金(51675377)

第一作者简介: 张宇鑫, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事于 ELID 磨削加工机理的研究。E-mail: 15900336651@126.com

通信作者: 任成祖, 1962 年出生, 教授。E-mail: renchz@tju.edu.cn

证套圈沟道表面质量的同时极大地提高沟道的形位精度,从而提高轴承的品质。

表面粗糙度是评价磨削表面质量的一个重要参数,它影响着零件的摩擦磨损性能。对表面粗糙度建立预测模型,可以为磨削加工提供理论指导,以确定最优表面粗糙度所需的加工参数。目前常用的粗糙度建模方法有经验法和理论分析法。经验法是对实验数据进行处理,在分析实验结果的基础上建立预测模型,其通用性较差<sup>[3]</sup>;理论分析法是根据基本定理的推导来建立预测模型,该方法一般需要对砂轮微观结构进行理想化、尺寸化,如磨粒尺寸、磨粒间距等。TIAN利用多元非线性回归理论分析了工程陶瓷表面磨削纹理特征与粗糙度 $Ra$ 之间的关系<sup>[4]</sup>;CHENG采用线性回归方法建立了TC4钛合金砂带磨削表面粗糙度预测模型<sup>[5]</sup>;ZHOU通过对磨削过程的运动学分析,建立了一种粗糙度预测模型,并提出磨粒出刃高度服从高斯分布的假设<sup>[6]</sup>;HECKER提出了未变形切屑厚度模型,该模型假设磨粒为四棱锥体,并与外圆磨削实验结果进行了对比<sup>[7]</sup>;AGARWAL等建立了陶瓷磨削的表面粗糙度预测模型,该模型考虑了磨粒在砂轮上的随机分布情况,并认为磨粒出刃高度满足瑞利分布,单颗磨粒在工件上切出的沟槽应该为圆弧形或抛物线形<sup>[8-9]</sup>。SHAO等在AGARWAL的模型基础上,考虑了脆性去除和塑性去除两个方面的影响,预测误差大大减小<sup>[10]</sup>。

相较普通磨削来说,ELID磨削是一种集磨削、抛光于一体的加工方式,其表面粗糙度相对会更小。上述表面粗糙度预测模型都是针对普通磨削提出的,尚未有针对ELID磨削的表面粗糙度预测建模,因此本文基于未变形切屑厚度模型,同时考虑ELID磨削电参数对表面粗糙度的影响,建立针对ELID磨削的表面粗糙度预测模型,并对模型进行实验验证。

### 1 粗糙度模型建立

传统磨削加工的表面粗糙度受很多因素的影响,如砂轮特性、工件特性以及加工条件等。对于ELID磨削来说,电源参数也对表面粗糙度有一定影响。建立表面粗糙度预测模型时,需要将这些影响因素以参数化的形式表现出来。砂轮的表征参数有磨粒尺寸、磨粒密度以及磨粒分布情况等;磨削参数一般有砂轮转速、工件速度以及切深等;电源参数一般有电源电压、占空比、峰值电流等。

#### 1.1 未变形切屑厚度模型

实际加工过程中,砂轮上磨粒随机分布,大小、形状各不相同,每个磨粒产生的沟痕也完全不同,因此不可能得到一个完全表征表面粗糙度的模型。本文在建模过程中会做出一些简化和假设:

- (1)单颗磨粒的表面上有许多微小的切刃,而且磨粒尖端有一定的弧度,假设磨粒尖端为抛物线形;
- (2)磨粒在工件表面产生的沟槽形状相同,都是抛物线形,并由进给深度或未变形切屑厚度决定;
- (3)不考虑砂轮磨粒磨损及机床震颤的影响;
- (4)不考虑表面塑性侧流和耕犁现象。

在图1所示的磨削系统中,磨粒沿砂轮轴向圆弧均匀分布<sup>[11]</sup>。由于磨粒体积和出刃高度的不同,有效磨粒切削工件产生的未变形切屑厚度满足瑞利分布函数,表达式如下:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{t}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right\}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $t$ 代表未变形切屑厚度, $\sigma$ 定义了概率方程,它由磨削条件、工件材料特性以及砂轮特性决定。

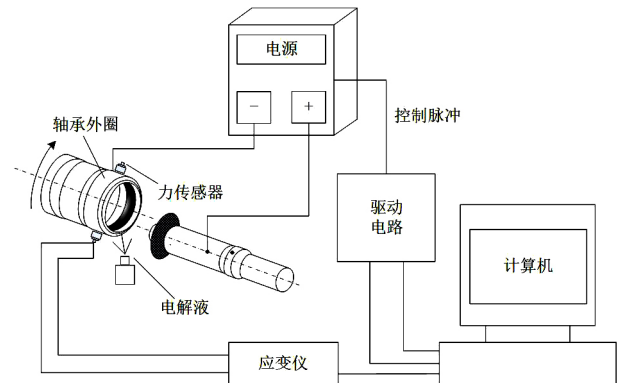


图1 轴承套圈沟道ELID成形磨削示意图

Fig.1 A sketch map of ELID forming grinding in bearing ring groove

单颗磨粒切削工件产生的切屑如图2所示,可以看到切屑厚度从0增长到最大值 $t_m$ ,其截面形状均为抛物线形。

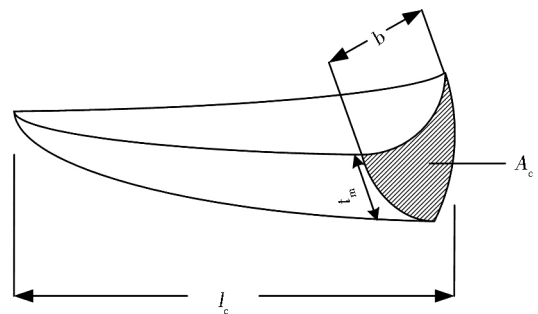


图2 未变形切屑的3D示意图

Fig.2 3D schematic diagram of undeformed chips

AGARWAL等建立了陶瓷磨削的表面粗糙度预测模型<sup>[9]</sup>,得到粗糙度计算模型如下:

$$E(Ra) = 0.396(1 - \phi) \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^n t_m \quad (2)$$

式中,  $\phi$  为磨痕重叠系数,  $E_1$  为氧化膜的弹性模量, 一般为 30~40 GPa;  $E_2$  为工件的弹性模量, 轴承钢的弹性模量为 210 GPa;  $t_m$  为最大未变形切削厚度<sup>[12]</sup>;  $n$  为比例常数, 与砂轮和工件之间的线性和非线性变形有关, 通过公式(3)~(5)计算得到。

$$F_t v_s = 120(C b_s v_s) \left[ \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^n t_m \right]^2 \sqrt{a_e d_{eq}} \quad (3)$$

$$t_m = \sqrt{\frac{4}{Cr} \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_e}{d_{eq}}}} \quad (4)$$

式中,  $C$  为单位面积上参与磨削的动态磨粒数。

$$C = \frac{4f}{d_g^2 \left( \frac{4\pi}{3v} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (5)$$

XU 等人从几何学关系的角度推导出了  $C$  的计算公式<sup>[13]</sup>。  $F_t$  是砂轮切向力,  $b_s$  为砂轮宽度,  $d_g$  为磨粒的当量球径,  $v$  是磨粒在砂轮中的体积分数,  $f$  为动态有效磨刃数与静态有效磨刃数的比值, 本文取值 0.25。由于沟槽形状为抛物线形, 取  $r$  为 4<sup>[9]</sup>;  $v_w$  为工件速度,  $v_s$  为砂轮速度,  $a_e$  为等效切深,  $d_{eq}$  为砂轮当量直径。

## 1.2 ELID 粗糙度预测模型

ELID 磨削过程中, 除了砂轮与工件之间的机械摩擦去除作用之外, 电极还与砂轮发生在线电解反应, 对砂轮进行在线电解修整, 并形成一层氧化膜。氧化膜的存在一方面提高了容屑能力和对磨粒的把持能力; 同时氧化膜相较基体弹性更大, 使实际切深小于名义进给深度。氧化膜的这些优点既减少了砂轮磨损, 又改善了加工表面粗糙度<sup>[14-15]</sup>。

氧化膜本身是一层绝缘体, 但是由于氧化膜不是很致密, 氧化膜层中会存有渗透进入的电解磨削液, 使得氧化膜具有一定导电性。ELID 磨削过程中氧化膜电阻为:

$$R_0 = \frac{\rho_0 h_0}{A_a} \quad (6)$$

式中,  $R_0$  为氧化膜电阻;  $h_0$  为氧化膜厚度;  $\rho_0$  为氧化膜电阻率;  $A_a$  为电解反应的有效面积。

$$A_a = b \sqrt{a_e' d_{eq}} \quad (7)$$

式中,  $b$  为接触区域宽度,  $a_e'$  为实际等效切深。结合欧姆定律, 可得  $h_0$  的表达式:

$$h_0 = \frac{U A_a}{I \rho_0} \quad (8)$$

可以看到, 氧化膜厚度受到电解过程的有效电压  $U$  和电解电流  $I$  的影响。考虑到氧化膜厚度对实际进给切深量的影响, 结合弹性模量的定义, 忽略工

件自身受力的弹性变形, ELID 磨削中砂轮切入工件的实际等效深度表示为:

$$a_e' = a_e - \frac{F_t h_0}{\mu E_1 A_a} \quad (9)$$

式中,  $\mu$  为磨粒材料与工件材料之间的摩擦因数<sup>[11]</sup>。在切入式成形磨削过程中, 砂轮的形貌会“复印”在工件上, 砂轮的缺陷也会在工件上体现出来, 砂轮的修整情况对表面粗糙度的影响很大。因此, 需要引入砂轮修整情况系数  $R_f$  对模型进行修正。

最终得到 ELID 沟道成形磨削的表面粗糙度预测模型为:

$$E(Ra) = 0.396K \sqrt{\frac{d_g^2 \left( \frac{4\pi}{3v} \right)^{\frac{2}{3}}}{fr} \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_e'}{d_{eq}}}} \quad (10)$$

式中,  $K = R_f(1 - \phi)$ 。

## 2 ELID 电源参数对表面粗糙度的影响

进行两组实验: 一组单因素实验用以探讨 ELID 电源参数对氧化膜厚度及加工表面粗糙度的影响, 另一组三因素三水平全因子实验用以验证表面粗糙度预测模型, 所有实验均在改造后的 3MZ1410 磨床上完成。球轴承套圈沟道的 ELID 成形磨削实验系统如图 3 所示, 采用自行研发的 TJCP-II 型高频直流脉冲电源和 TJMX-V 型 ELID 电解液; 金属结合剂 CBN 砂轮粒径 40~50  $\mu\text{m}$ , 浓度 100%, 直径 45 mm, 宽 10 mm; 球轴承外圈直径 62 mm, 宽度 16 mm, 材料为 GCr15 轴承钢, 硬度 63HRC。测量仪器采用 TAYLOR HOBSON 公司生产的粗糙度轮廓仪 Form Talysurf i120。

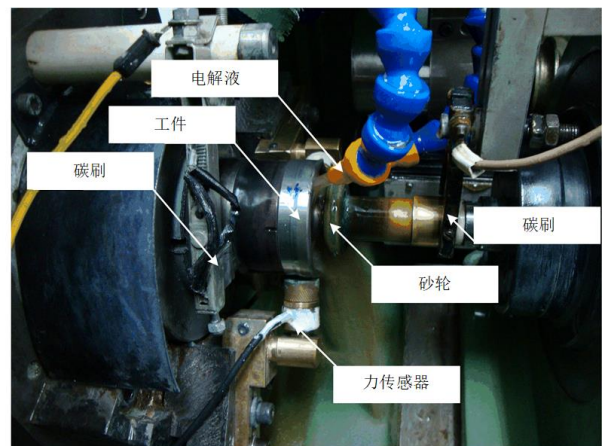


图3 球轴承套圈沟道 ELID 成形磨削实验系统

Fig.3 Experimental system for ELID forming grinding of ball bearing ring groove

相较于普通磨削, ELID 磨削可以对砂轮进行在线电解修整, 砂轮与工件之间除了物理上的摩擦去除作用以外, 砂轮、工件和磨削液之间还会发生复杂

的电化学反应,其对加工表面粗糙度的影响也更加复杂。

实验采用氧化膜主动控制策略,通过控制电解强度,以电解电流表征氧化膜的状态。实验过程中,磨削参数保持恒定:工件转速 40 r/min,砂轮转速 10 000 r/min,进给切深为 1.2  $\mu\text{m}$ 。

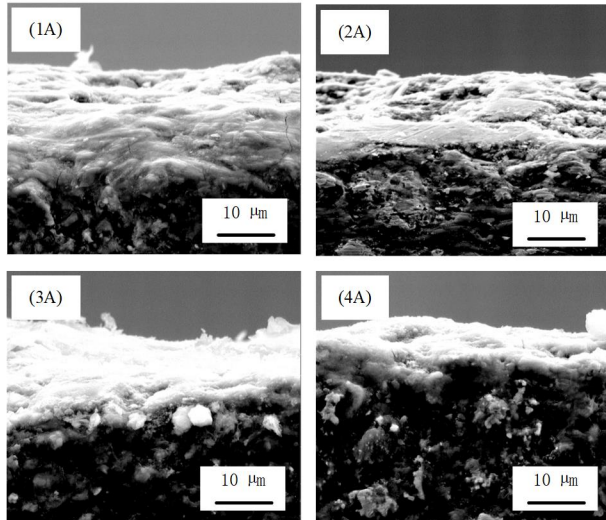


图4 不同电流下的氧化膜厚度

Fig.4 Thickness of oxide film under different current

峰值电流是主动控制方案中表征氧化膜状态的参数,它与氧化膜的厚度直接相关。为了使磨粒在氧化膜覆盖后仍有一定的出刃高度,选取的砂轮粒径 40~50  $\mu\text{m}$ ,粒径相对较大。实验峰值电流分别设定为 1、2、3、4 A 四种,通过扫描电镜观察四种电流下的砂轮氧化膜厚度,SEM 观察结果如图 4 所示,白色部分为氧化膜,黑色部分是基体。通过图 4 可以看到,电解电流从 1 A 增长到 4 A 时,氧化膜厚度由 35.33  $\mu\text{m}$  减小到 15.73  $\mu\text{m}$ 。可以看出氧化膜的厚度随着电解电流的增大而减小。这是由于氧化膜的厚度与其电阻大小正相关。

TJCP-II 型高频直流脉冲电源是基于氧化膜状态主动控制方案设计的,它的峰值电压有三个档: 60、90、120 V。图 5 为三种电压下表面粗糙度随电解电流变化的折线图。由于当设定电解电流较小时,电解平衡时氧化膜的厚度较大,氧化膜抛光的作用增强;同时由于氧化膜相较于基体的弹性模量较小,对于相同进给量,氧化膜的存在会导致切深的降低,单颗磨粒的未变形切削厚度降低,从而工件表面粗糙度随之降低。对于电源电压来说,其影响着脉冲放电量的大小,当电源电压增大时,脉冲能量增大,电解作用增强,氧化膜的生成速度加快,更容易达到电解平衡,生成有一定厚度的氧化膜,进而降低了单颗粒磨粒的未变形切削厚度,降低了表面粗糙度。

可以明显从图 5 中看到,在相同峰值电压下,随着电解电流从 1 A 到 4 A,表面粗糙度逐渐变大。当设定电流相同时,随着电压增大,表面粗糙度有轻微降低。

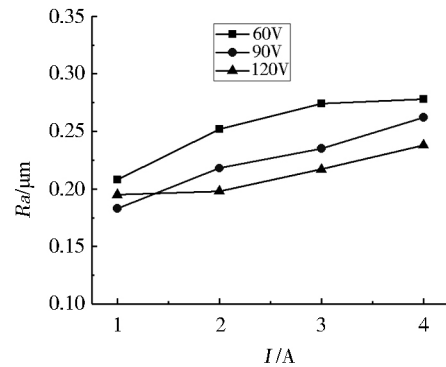


图5 不同设定电流下的表面粗糙度

Fig.5 Surface roughness under different set current

在 ELID 磨削中,磨粒大部分处于氧化膜的包裹中,以研磨抛光的方式对工件进行加工,因此磨削过程中,一定厚度的氧化膜会使加工表面粗糙度更低。因此在 ELID 磨削中,可以通过调整电解参数来改变氧化膜厚度,从而获得更低的表面粗糙度。

### 3 预测模型验证

#### 3.1 实验设计

通过上述实验发现,大电压、小电流可以得到更好的表面粗糙度,但是考虑到电压过大会使电解作用增强,加剧砂轮磨损,因此最后选定电源电压 90 V、峰值电流 2 A 作为后续实验中 ELID 磨削的电源参数。实验以砂轮转速、工件转速及进给切深作为影响因素,每个因素取三个水平,通过测得不同参数下表面粗糙度,对预测模型进行验证。各因素水平取值如表 1 所示。

表1 测量表面粗糙度实验的因素与水平

Tab.1 Factors and levels of measuring the surface roughness test

水平	砂轮转速 $n_s$ /r·min <sup>-1</sup>	工件转速 $n_w$ /r·min <sup>-1</sup>	进给切深 $a_e$ / $\mu\text{m}$
1	6000	40	1.2
2	10000	80	2.4
3	14000	120	3.6

#### 3.2 结果与分析

通过力传感器测得不同参数组合下的磨削切向力,结果如表 2 所示,根据切向力的数值得到比例常数  $n$  的平均值为 0.249。

设计专用夹具来固定轴承套圈,分别取三个位置对每个套圈进行粗糙度测量,将所得表面粗糙度值取平均,所得结果如表 2 所示。

表2 实验结果及预测结果

Tab.2 Experimental results and prediction results

序号	砂轮转速	工件转速	进给切深 $a_e$	切向力	比例常数	ELID磨削 $Ra$	ELID磨削 $Ra$
	$n_s/r \cdot \text{min}^{-1}$	$n_w/r \cdot \text{min}^{-1}$	$/\mu\text{m}$	$F/N$	$n$	实测值/ $\mu\text{m}$	预测修正值/ $\mu\text{m}$
1	6000	40	1.2	0.67	0.213	0.278	0.245
2	6000	40	2.4	1.13	0.257	0.306	0.309
3	6000	40	3.6	1.57	0.277	0.336	0.348
4	6000	80	1.2	0.82	0.339	0.330	0.333
5	6000	80	2.4	1.88	0.304	0.425	0.412
6	6000	80	3.6	1.94	0.400	0.447	0.485
7	6000	120	1.2	0.91	0.417	0.434	0.396
8	6000	120	2.4	1.56	0.456	0.476	0.518
9	6000	120	3.6	3.47	0.355	0.498	0.558
10	10000	40	1.2	0.49	0.162	0.227	0.197
11	10000	40	2.4	0.86	0.196	0.246	0.243
12	10000	40	3.6	1.42	0.171	0.235	0.271
13	10000	80	1.2	0.92	0.179	0.278	0.250
14	10000	80	2.4	1.34	0.260	0.313	0.333
15	10000	80	3.6	1.83	0.284	0.347	0.377
16	10000	120	1.2	1.26	0.202	0.323	0.265
17	10000	120	2.4	1.44	0.346	0.364	0.405
18	10000	120	3.6	2.41	0.318	0.405	0.452
19	14000	40	1.2	0.52	0.061	0.220	0.166
20	14000	40	2.4	0.90	0.098	0.221	0.205
21	14000	40	3.6	1.06	0.160	0.232	0.232
22	14000	80	1.2	0.63	0.189	0.243	0.229
23	14000	80	2.4	1.11	0.222	0.265	0.286
24	14000	80	3.6	2.08	0.165	0.279	0.316
25	14000	120	1.2	0.78	0.139	0.245	0.270
26	14000	120	2.4	1.47	0.254	0.325	0.341
27	14000	120	3.6	1.93	0.288	0.360	0.389

通过粗糙度预测值与实测值的对比,处理数据,可得  $K = 0.581$ 。代入  $K$  对预测模型进行修正,修正后的预测值列入表2。修正后的模型预测精度  $\Delta$  采用式(11)计算:

$$\Delta = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(Ra)_{i, \text{expe}} - (Ra)_{i, \text{pred}}}{(Ra)_{i, \text{pred}}} \right| \quad (11)$$

式中,  $N$  为实验次数。求得该模型的预测值与实验值之间的平均误差为 8.75%, 即该模型的预测精度为 8.75%。

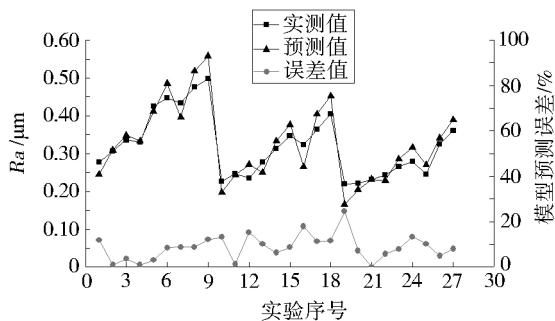


图6 表面粗糙度预测值与实际值的比较

Fig.6 Comparison of the predicted values of surface roughness with the actual values

由图6可以看出,19号数据误差较大,分析认为应该是实验过程中工艺参数发生了变化,如砂轮表面氧化膜崩裂脱落等。其余实验情况下表面粗糙度预测值与实验值吻合较好,模型预测误差均在10%左右。而且可以发现,实验结果与预测结果变化趋势一致。

从表2数据中取一部分数据研究磨削用量对表面粗糙度的影响,如图7所示。取5、14、23组数据,在图7(a)中,保持工件转速和进给深度一定,砂轮转速由6000 r/min增加到14000 r/min时,由于随着砂轮速度增大,单位时间参与磨削的磨粒数增多,会使单颗磨粒未变形磨屑厚度减小,磨削得到的表面粗糙度减小,因此实测表面粗糙度由0.425  $\mu\text{m}$ 减小到0.265  $\mu\text{m}$ ;取11、14、17组数据,图7(b)中,保持砂轮转速和进给深度一定,随着工件转速增加,单颗磨粒的未变形切屑厚度增大,表面粗糙度增大。

取13、14、15组数据。图7(c)表现了进给切深对表面粗糙度的影响。在砂轮转速和工件转速一定时,随着切深的增大,实测表面粗糙度由0.278  $\mu\text{m}$ 增长到0.347  $\mu\text{m}$ 。当切深增大时,单颗磨粒未变形磨

屑厚度增大,砂轮与工件之间的磨削力增大,影响磨削加工过程。

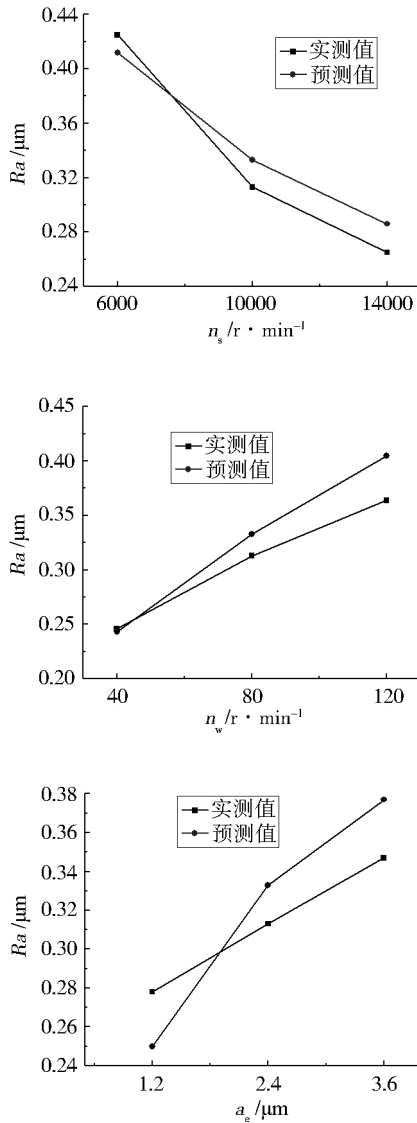


图7 磨削参数对表面粗糙度的影响

Fig.7 Influence of grinding parameters on surface roughness

#### 4 结论

(1)在基于氧化膜状态主动控制的ELID磨削中,电解电流的大小表征着氧化膜的厚度,并且氧化膜厚度与电解电流大小成反比;

(2)ELID磨削中,电源参数会对表面粗糙度产生影响,在其他条件不变的情况下,可以通过调整电源参数来获得适宜磨削的氧化膜厚度。磨削参数中,在其他条件不变的情况下,表面粗糙度随砂轮转速的增大而减小,随工件转速和切深的增大而增大;

(3)模型预测结果与实验结果吻合良好,预测误差在10%左右,ELID磨削表面粗糙度预测模型有效

可靠。

#### 参考文献

- [1] OHMORI H, NAKAGAWA T. Mirror surface grinding of silicon wafers with electrolytic in-process dressing [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1990, 39(1): 329-332.
- [2] OHMORI H, NAKAGAWA T. Analysis of mirror surface generation of hard and brittle materials by ELID (electronic in-process dressing) grinding with superfine grain metallic bond wheels [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44(1): 287-290.
- [3] MALKIN S. Grinding technology theory and applications of machining with abrasives[M]. Horwood E. Halsted Press, 1989.
- [4] TIAN X L, WANG J Q, ZHANG B G, et al. Research on predicting model of surface roughness for ground engineering ceramics [J]. Advanced Materials Research, 2012, 476-478: 1036-1040.
- [5] CHENG R K, Huang Y. Experimental research on the predictive model for surface roughness of titanium alloy in abrasive belt grinding [J]. Advanced Materials Research, 2013, 716(8): 443-448.
- [6] ZHOU X, XI F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 969-977.
- [7] HECKER R L, LIANG S Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(8): 755-761.
- [8] AGARWAL S, RAO P V. A new surface roughness prediction model for ceramic grinding [J]. Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers. part B. Journal of Engineering Manufacture, 2005, 219(11): 811-821.
- [9] AGARWAL S, RAO P V. Modeling and prediction of surface roughness in ceramic grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(12): 1065-1076.
- [10] SHAO Y, LI B, LIANG S Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding of ceramics [J]. Machining Science & Technology, 2015, 19(2): 325-338.
- [11] LAW S S, WU S M. Simulation study of the grinding process [J]. Journal of Engineering for Industry, 1973, 95(4): 972-978.
- [12] 任敬心. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [13] HOCKIN H. K. XU, SAID Jahanmir, LEWIS K. Ives. Effect of grinding on strength of tetragonal zirconia and zirconia-toughened alumina [J]. Machining Science & Technology, 1997, 1(1): 49-66.
- [14] 杨黎健. 基于氧化膜状态主动控制的ELID磨削及其应用研究[D]. 天津大学, 2011.
- [15] 关佳亮, 郭东明, 袁哲俊. ELID镜面磨削中砂轮生成氧化膜特性及其作用的研究 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(5): 89-92.