

# 应用弹性砂轮对铝合金镜面磨削工艺研究

袁伟杰<sup>1</sup>, 邓日涛<sup>1</sup>, 杨振涛<sup>2</sup>, 尹韶辉<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南长步道光学科技有限公司, 长沙 410202)

**摘要:** **目的** 解决铝合金手机外壳传统抛光工艺中存在的抛光效率低等问题。**方法** 采用聚氨酯弹性砂轮对 6061 铝合金进行了磨削加工, 使用正交试验研究了磨料粒度、进给速度、切削深度、砂轮线速度对加工表面粗糙度及材料去除率的影响。试验中使用折线走刀方式进行加工, 可减轻磨料分布不均带来的影响。使用白光干涉仪测量了加工后表面的粗糙度, 通过计算单位时间内工件的质量变化得出了去除率, 并通过对结果的综合优化得出了最优工艺参数。**结果** 在选取的 16 组磨削工艺参数中, 可获得的最低表面粗糙度为 44.87 nm, 最大去除率为 0.329 g/min。对表面粗糙度影响最大的因素为磨料粒度, 影响最小的因素为进给速度; 对材料去除率影响最大的因素为切削深度, 影响最小的为进给速度。经过综合优化, 最佳工艺参数组合为: 砂轮 600<sup>#</sup>, 转速 2000 r/min, 切削深度 0.04 mm, 进给速度 20 mm/min。**结论** 弹性聚氨酯砂轮应用于铝合金磨削可提高加工表面质量, 可简化工艺流程, 节省备料和安装调整时间, 从而提高效率。

**关键词:** 弹性砂轮; 铝合金磨削; 正交实验; 表面粗糙度; 综合优化; 去除率

**中图分类号:** TG58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0021-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.004

## Mirror Grinding Process for Aluminum Alloy Using Elastic Grinding Wheel

YUAN Wei-jie<sup>1</sup>, DENG Ri-tao<sup>1</sup>, YANG Zhen-tao<sup>2</sup>, YIN Shao-hui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Changbudao Optical Technology Co., Ltd, Changsha 410202, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problem of low polishing efficiency in traditional polishing process for aluminum alloy mobile phone shell. Grinding process for 6061 aluminum alloy was studied by using polyurethane elastic grinding wheel. Orthogonal test was performed to study the influences of abrasive particle size, feed speed, cutting depth and grinding wheel linear speed on surface roughness and material removal rate. Turning line approach was used for processing in the test, which could reduce the influence of uneven abrasive distribution. Roughness of machined surface was measured with a white light interferometer, and removal rate was obtained by calculating mass change of the workpiece in unit time. Optimal process parameters were obtained based upon comprehensive optimization of the results. In the selected 16 grinding parameters, the minimum obtainable surface roughness  $R_a$  was 44.87 nm, and the maximum removal rate was 0.329 g/min. The most important factor affecting surface roughness was abrasive particle size, and the minimum factor was feed rate. As for the material removal rate, the most important factor was cutting depth, the least was feed rate. After comprehensive optimization, the optimal combination of

收稿日期: 2018-02-15; 修订日期: 2018-06-21

Received: 2018-02-15; Revised: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675171)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51675171)

作者简介: 袁伟杰 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超精密及微纳制造技术与装备。

Biography: YUAN Wei-jie (1993—), Male, Master, Research focus: ultra precision and micro/nano manufacturing technology and equipment.

通讯作者: 尹韶辉 (1967—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为超精密加工。

Corresponding author: YIN Shao-hui (1967—), Male, Professor, Ph. D. tutor, Research focus: ultraprecision machining.

process parameters was: grinding wheel as 600<sup>#</sup>, speed as 2000 r/min, cutting depth as 0.04 mm, and feed rate as 20 mm/min. The application of polyurethane elastic grinding wheel to aluminum alloy grinding can improve surface quality, simplify technological process, save material preparation, installation & adjustment time, and further improve efficiency.

**KEY WORDS:** elastic grinding wheel; aluminum alloy grinding; orthogonal experiment; surface roughness; comprehensive optimization; removal rate

手机后盖通常由以镁和硅为主要合金元素的 6 系铝合金制成<sup>[1]</sup>, 最高硬度为 110~120 HB, 最大抗拉强度为 20~30 kg/cm<sup>2</sup>, 其硬度和强度较低, 导致磨削加工时容易划伤和碰伤工件表面。同时, 其塑性延展性大, 在磨削过程中易产生塑性粘附, 阻塞砂轮表面。铝合金的熔点低 (660~780 °C), 在磨削区的高温下, 表面金属熔化, 会产生热熔粘附, 加剧砂轮的阻塞。铝合金的线膨胀系数大, 在磨削热作用下容易变形, 从而影响磨削加工精度。为了克服铝合金工件在磨削加工中产生的热变形, 减少砂轮表面的粘附堵塞, 保证加工表面的质量, 必须增加修整次数, 因此铝合金的磨削效率低<sup>[2-4]</sup>。

目前针对壳体类铝合金零件的打磨抛光工艺, 主要使用的抛光工具有三种: (1) 将羊毛毡、布条安装在电动圆盘上, 再撒上与水混合的氧化物抛光粉, 进行打磨; (2) 将海绵砂纸或百洁布安装在电动偏心圆盘或振动打磨机上, 再进行手工打磨; (3) 使用以布轮、麻轮、高分子为基片, 上面设有含抛光磨料的涂料层的软抛光轮, 进行打磨抛光<sup>[5]</sup>。目前的生产工艺中, 手机后盖的生产打磨需要经过背绒砂纸、海绵砂纸及百洁布多道工序的打磨, 最终表面粗糙度为 0.1~0.2 μm。

这些抛光方案存在以下不足: 打磨工艺需要至少 3 道工序, 用于准备和调整的时间较长, 导致加工效率较低; 海绵砂纸或百洁布只能针对大平面部分进行打磨, 外壳的边缘和转角处难以打磨; 软抛光轮的组成物较多, 制作成本相对较高<sup>[6-7]</sup>。

针对目前铝合金加工中存在的问题和不足, 本文应用弹性砂轮对铝合金进行磨削试验, 磨削一次即可达到原有工艺效果, 并使用正交实验法, 结合常用工艺经验参数确定了磨料粒度  $Q$ 、弹性砂轮线速度  $V_s$ 、磨削深度  $a_p$ 、进给速度  $V_w$  等试验参数水平, 并分析了这些工艺参数对材料去除率和表面粗糙度的影响。

## 1 弹性磨削原理及装置

目前弹性砂轮以聚氨酯微孔弹性体 (PU) 抛光轮为主, 聚氨酯弹性砂轮是将聚醚酯多元醇、交联剂、异氰酸酯等原料混合磨料制成, 其本质是一种高分子聚合物聚氨酯基磨轮<sup>[8-10]</sup>。

聚氨酯弹性砂轮的加工原理与普通陶瓷砂轮和游离磨粒加工有所不同, 其所有磨粒均弹性固结于聚氨酯基体表面的粘结剂中, 聚氨酯基体中的磨粒不能自由移动, 但由于粘结剂的存在, 单个磨粒在各个方向上都受到一定的弹性约束, 可用简单的弹簧缓冲系统代表磨削过程中各物体的弹性变形, 在磨削力的作用下, 磨粒在不脱落的状态下, 产生位移和姿态的变化, 各个磨粒受力可能发生群体效应<sup>[11-12]</sup>。图 1 为弹性砂轮加工过程的示意图。

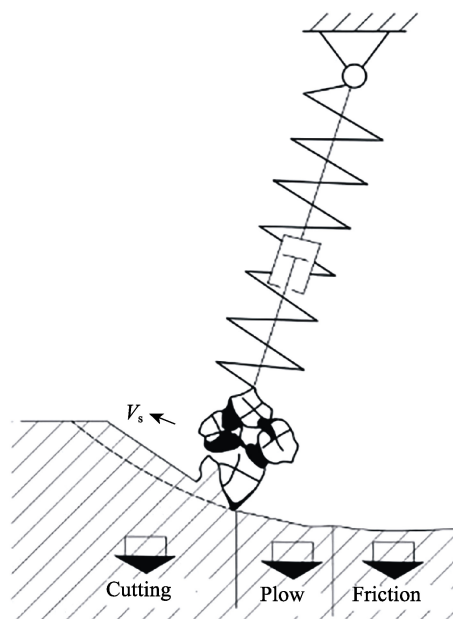


图 1 弹性砂轮磨削过程

Fig.1 Machining process of elastic grinding wheel

用聚氨酯基材作为载体的砂轮, 具有以下特点: (1) 结合剂柔软具有缓性, 磨削时与工件接触弧长更大, 参与磨削的磨粒数量更多, 加工效果均匀。(2) 砂轮组织之间存在气孔, 可迅速排除磨屑, 避免发生堵塞及发热, 适合长时间的研磨工作。(3) 加工效率高, 磨削一次即可达到传统打磨抛光工具多次磨削的效果。(4) 磨削过程中磨料脱落方式主要为随基材磨损而产生整粒脱落<sup>[13-16]</sup>。

本文采用不同规格的聚氨酯微孔弹性体 (PU) 砂轮, 结合不同工艺参数进行磨削研究。所采用的磨削试验装置如图 2 所示。

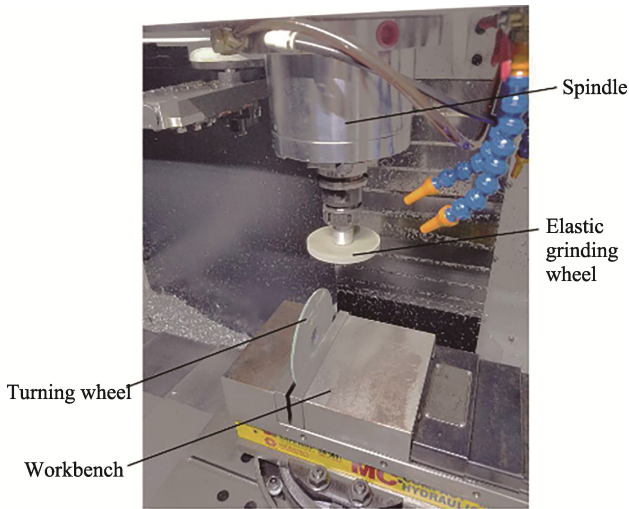


图 2 弹性砂轮磨削试验装置  
Fig.2 Elastic wheel grinding test device

2 试验条件和方法

2.1 材料

采用 6061 铝合金作为试验材料，试件尺寸为 25 mm×15 mm×60 mm。6061 铝合金属 Al-Mg-Si 系合金，中等强度，具有良好的塑性和优良的耐蚀性。表 1 为实验用铝合金的力学性能参数。

表 1 6061 铝合金力学综合性能  
Tab.1 Mechanical properties of 6061 aluminum alloy

Fatigue strength $\sigma^{-1}$ /MPa	Tensile strength $\sigma_b$ /MPa	Yield strength $\sigma_s$ /MPa	Hardness ( HB )	Elongation /%
62.1	124	55.2	95	25.0

2.2 试验方案

在试验前，先使用 600<sup>#</sup>陶瓷砂轮对聚氨酯弹性砂轮进行修整，修整时，砂轮转速为 500 r/min，切深为 0.01 mm，往复运行 10 次，修整后砂轮外圆跳动小于 0.02 mm。

本试验设定折线走刀轨迹。这是由于现有的聚氨酯弹性砂轮受工艺所限，磨料分布存在一定程度的不均匀性，会导致磨削在砂轮的轴向上存在一定差异，采用直线走刀轨迹时，往往容易产生“拉丝”纹理。使用折线走刀轨迹，可以有效减轻砂轮质地不均匀对加工表面质量带来的影响。本试验设定的走刀轨迹如图 3 所示。

试验对试件的 25 mm×60 mm 面进行加工，沿 25 mm 方向进行切入式磨削。试验采用正交法分别考察不同砂轮线速度  $V_s$ 、进给速度  $f$  和磨削深度  $a_p$  对磨削后材料表面质量和材料去除率的影响。每个因子包

括 4 个水平。本试验以传统磨削工艺经验参数为基础，结合可采购种类确定磨料粒度  $Q$  的梯度，基于本领域惯用切削用量确定各切削用量的梯度。最终试验工艺参数如表 2 所示，正交实验表如表 3 所示。

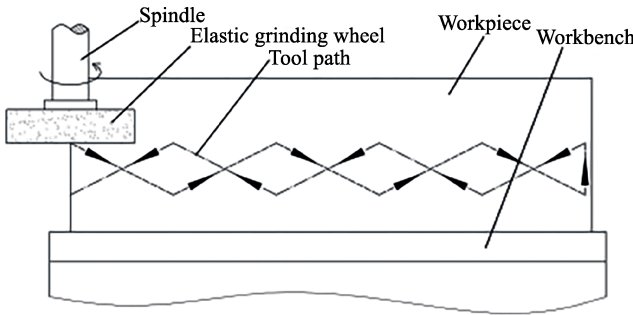


图 3 砂轮走刀轨迹  
Fig.3 Feeding track of grinding wheel

表 2 试验工艺参数  
Tab.2 Process parameters for test

Parameter	Value
Workpiece size	60 mm×25 mm×15 mm
Grinding wheel specification	100 mm×20 mm×15 mm
Abrasive particle size $Q$	120 <sup>#</sup> 、320 <sup>#</sup> 、600 <sup>#</sup> 、2000 <sup>#</sup>
Spindle speed $n$ /(r·min <sup>-1</sup> )	500、1000、1500、2000
Cutting depth $a_p$ /mm	0.01、0.02、0.03、0.04
Feed rate $f$ /(mm·s <sup>-1</sup> )	20、40、60、80
grinding manners	Repeat
Cooling method	Oil cooling

表 3 正交实验因素综合表  
Tab.3 Table of orthogonal experiment factors

No.	Abrasive particle size $Q$	Spindle speed $n$ /(r·min <sup>-1</sup> )	Cutting depth $a_p$ /mm	Feed rate $f$ /(mm·min <sup>-1</sup> )	Surface roughness $Ra$ /nm	Removal rate g/min
1	120	500	0.01	20	177.49	0.05
2	120	1000	0.02	40	173.5	0.147
3	120	1500	0.03	60	190.7	0.084
4	120	2000	0.04	80	195.59	0.325
5	320	500	0.02	60	165.11	0.035
6	320	1000	0.01	80	132.33	0.017
7	320	1500	0.04	20	122.46	0.329
8	320	2000	0.03	40	119.28	0.112
9	600	500	0.03	80	98.41	0.081
10	600	1000	0.04	60	95.39	0.234
11	600	1500	0.01	40	84.53	0.09
12	600	2000	0.02	20	73.92	0.038
13	2000	500	0.04	40	48.93	0.18
14	2000	1000	0.03	20	73.12	0.063
15	2000	1500	0.02	80	53.69	0.02
16	2000	2000	0.01	60	52.84	0.002

### 2.3 测量方法及原理

实验材料的表面粗糙度  $Ra$  通过白光干涉仪进行测量,图4为第3组(较差)与第13组(较优)的测量结果。去除率通过加工前后工件质量的变化进行评定,使用电子天平测量试件在不同工艺参数下磨削10 min 前后的质量差,测量前均用无尘纸和无水乙醇仔细清除工件表面切削液和切屑。

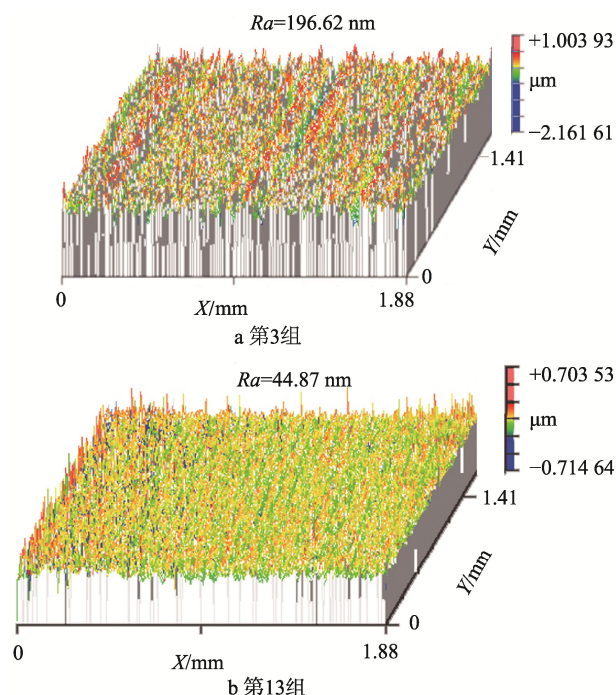


图4 典型工件表面三维微观轮廓形貌

Fig.4 3D profile morphology of typical workpiece surface

## 3 结果与分析

得到测量及计算结果(前文表3)之后,在磨削方式一定的情况下,主要研究改变磨料粒度  $Q$ 、进给速度  $f$ 、主轴转速  $V_s$ 、切削深度  $a_p$  对工件表面粗糙度和材料去除率的影响,图5为一工件表面加工前后的对比图。

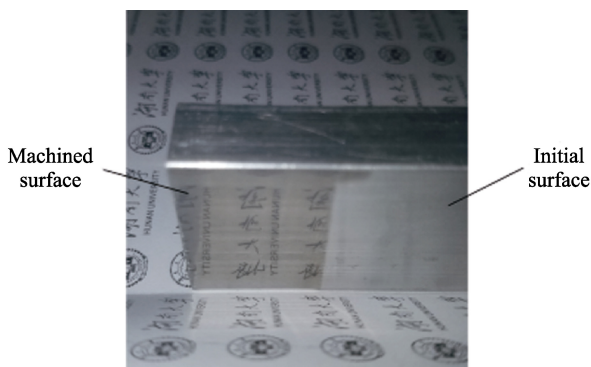


图5 工件加工前后表面对比图(第15组)

Fig.5 Workpiece surface contrast before and after machining

### 3.1 磨削参数对表面粗糙度的影响

图6表明,随着磨料粒度  $Q$  的减小,工件表面粗糙度呈下降趋势,下降趋势先快后慢。这是由于砂轮粒度越细,同时参与切削的磨粒数越多,工件表面上残留的磨粒切削痕迹越小,则磨削表面粗糙度越小。另一方面,受限于砂轮修整精度等其他加工条件,加工表面粗糙度随磨料粒度  $Q$  的变化程度呈变缓趋势。

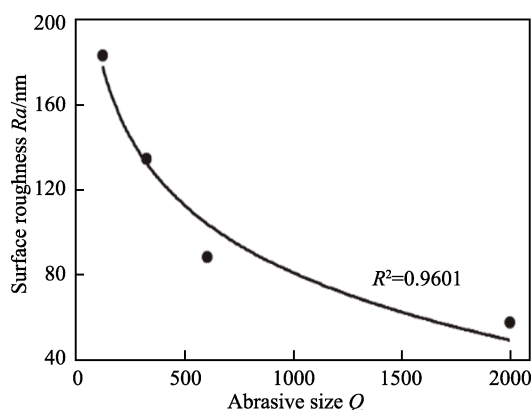


图6 磨料粒度  $Q$  对表面粗糙度的影响

Fig.6 Influence of abrasive size  $Q$  on surface roughness

图7表明,随着进给速度  $f$  的增大,表面粗糙度呈上升趋势,这是由于进给速度增大,将减少工件单位长度上参与磨削的磨粒数,使砂轮磨粒与工件上任一点的接触次数减小,单个磨粒作用时间减少,磨削深度增加,从而使磨削后工件的表面粗糙度增加。

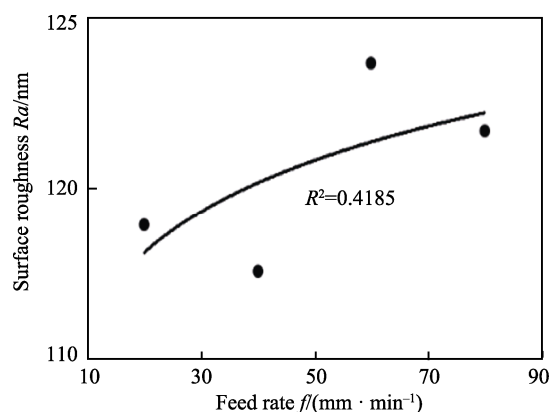


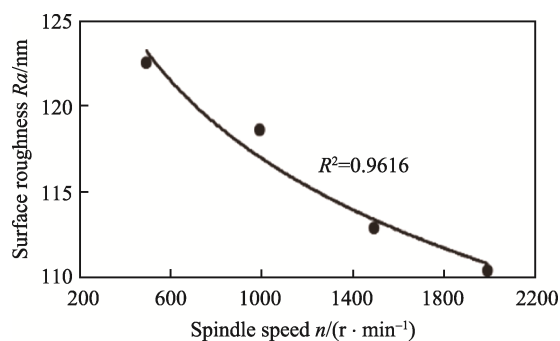
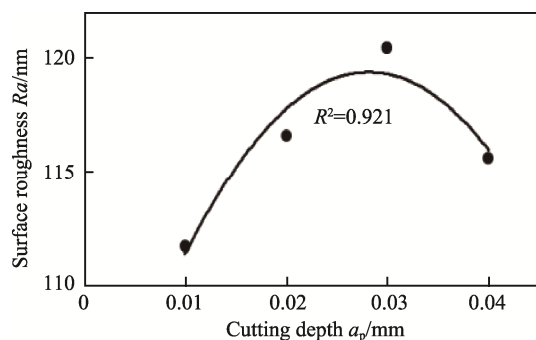
图7 进给速度  $f$  对表面粗糙度的影响

Fig.7 Influence of feed rate  $f$  on surface roughness

图8表明,随着砂轮转速  $n$  的增大,表面粗糙度呈下降趋势,增大砂轮速度可增加单位时间内参与磨削的磨粒数,使单颗磨粒磨削深度减小,工件塑性变形减小,因此表面粗糙度降低。

图9表明,随着切削深度  $a_p$  的增加,加工表面粗糙度先增大,这是因为随着切深增加,单颗粒磨粒的磨削厚度增加,导致磨削过程中磨削力及磨削温度



图 8 转速  $n$  对表面粗糙度的影响Fig.8 Influence of spindle speed  $n$  on surface roughness图 9 切削深度  $a_p$  对表面粗糙度的影响Fig.9 Influence of cutting depth  $a_p$  on surface roughness

都增加,磨削表面塑性变形程度增大所致。当切削深度进一步增加时,粗糙度降低,这是由于随着切深的增加,径向磨削力不断增大,磨料在压力作用下被压入弹性基材中,磨粒切削刃露出量减小,从而减小了磨削厚度,降低了表面粗糙度。

### 3.2 磨削参数对材料去除率的影响

图 10 表明,随着磨料粒度  $Q$  的减小,材料去除率呈下降趋势,这是由于磨粒切削刃越小,使得单颗磨粒的磨削厚度降低,从而使得材料去除率降低。

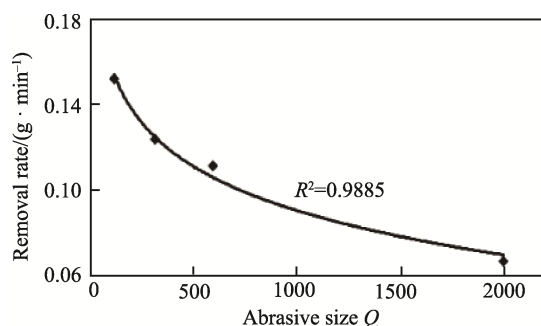
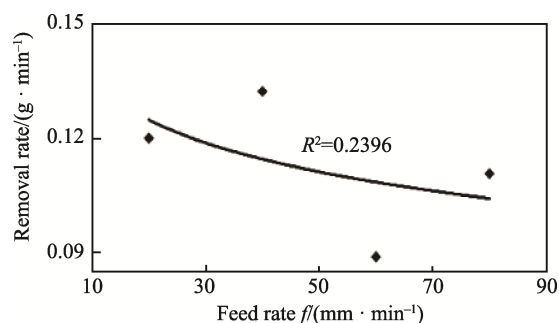
图 10 磨料粒度  $Q$  对材料去除率的影响Fig.10 Influence of abrasive size  $Q$  on material removal rate

图 11 表明,随着进给速度  $f$  的增加,材料去除率呈下降趋势,这是由于进给速度  $f$  增大,使得单颗磨粒的载荷减小,工件塑性变形减小,从而减小了磨削厚度,使得材料去除率降低。

图 12 表明,随着砂轮转速  $n$  的增大,材料去除

图 11 进给速度  $f$  对材料去除率的影响Fig.11 Influence of feed rate  $f$  on material removal rate

率呈上升趋势,这是由于增大砂轮速度可增加单位时间内参与磨削的磨粒数,使得去除率增大。但当砂轮转速过大时,单颗磨粒的切削深度减小,单颗磨粒的磨削力较小,砂轮的自锐能力降低,因而导致材料去除率下降。

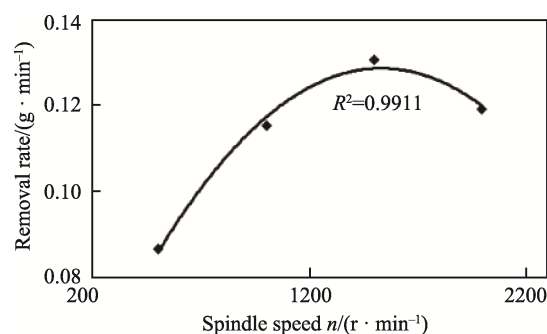
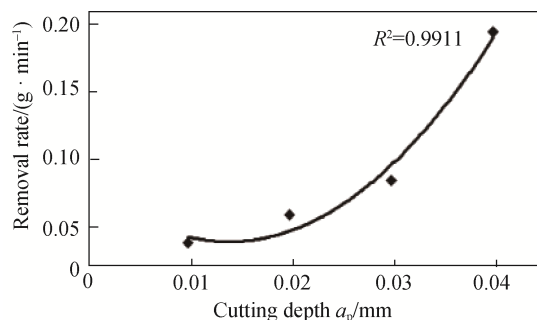
图 12 转速  $n$  对材料去除率的影响Fig.12 Influence of spindle speed  $n$  on material removal rate

图 13 表明,随着切削深度  $a_p$  的增大,材料的去除率也随之增大,这是由于弹性砂轮塑性变形增大,使得接触弧长增大,参与切削的磨粒数增多所致。当切削深度超过一定范围时,去除率上升趋势加强,这是由于磨料在压力作用下被压入弹性基材中,使砂轮的“硬度”增大,加剧了塑性变形,使得材料去除率进一步增大。

图 13 切削深度  $a_p$  对材料去除率的影响Fig.13 Influence of cutting depth  $a_p$  on material removal rate

### 3.3 表面粗糙度与材料去除率正交极差分析

对加工完后工件表面粗糙度和材料去除率进行极差分析,结果如表 4—5 所示。表 4 表明各因素对加工后工件表面粗糙度的影响大小按降序排列为 A

磨料粒度、D 进给速度、B 转速、C 切削深度，最佳组合是 A4B4C1D2，即磨料粒度 2000<sup>#</sup>、转速 2000 r/min、切削深度 0.01 mm、进给速度 40 mm/min。表 5 表明各因素对材料去除率影响的大小按降序排列为 C 切削深度、A 磨料粒度、B 转速、D 进给速度，最佳组合是 A1B3C4D2，即磨料粒度 120<sup>#</sup>、转速 1500 r/min、切削深度 0.04 mm、进给速度 40 mm/min。

表 4 表面粗糙度的正交极差分析  
Tab.4 Orthogonal range analysis of surface roughness nm

Level	Abrasive particle size ( A )	Speed ( B )	Cutting depth ( c )	Feed rate ( D )
1	737.28	489.94	447.19	446.99
2	539.18	474.34	466.22	430.23
3	352.25	451.38	481.51	504.04
4	228.58	441.63	462.37	480.02
Max-min difference $R_j$	127.175	12.0775	8.58	18.4525

表 5 材料去除率的正交极差分析  
Tab.5 Orthogonal range analysis of material removal rate g/min

Level	Abrasive particle size ( A )	Speed ( B )	Cutting depth ( c )	Feed rate ( D )
1	0.606	0.346	0.159	0.48
2	0.493	0.461	0.24	0.529
3	0.443	0.523	0.34	0.355
4	0.265	0.477	0.778	0.443
Max-min difference $R_j$	0.08525	0.04425	0.15475	0.0435

## 4 综合优化

由第 3 章节的分析可以看出，转速（B）和进给速度（D）对表面粗糙度和材料去除率的影响趋同，最佳组合为 B4D1，而磨料粒度（A）和切削深度（C）的影响趋势则不相同，需要综合优化。

定义指定工艺参数在  $i$  水平下对工件的表面粗糙度的影响率为：

$$C_{R,i} = (R_{\max} - R_i) / R_j \quad (1)$$

式中： $R_i$  为指定工艺参数在  $i$  水平下的工件表面粗糙度； $R_{\max}$  和  $R_j$  分别为该工艺参数四个水平下的最大表面粗糙度和表面粗糙度极差。 $C_{R,i}$  越大表示指定工艺参数在  $i$  水平下对工件表面粗糙度的影响程度越大，获得的工件表面粗糙度越小。根据式（1）和表 4 计算磨料粒度（A）和切削深度（C）在各个水平下对工件表面粗糙度的影响率，如表 6 所示。

表 6 A、C 因素对表面粗糙度的影响率  
Tab.6 Influence ratio of factor A and C on surface roughness

Level	Abrasive particle size ( A )	Cutting depth ( C )
1	0	1
2	0.389	0.446
3	0.757	0
4	1	0.558

定义指定工艺参数在  $i$  水平下对材料去除率的影响率为：

$$C_{M,i} = (R_i - R_{\min}) / R_j \quad (2)$$

式中： $R_i$  为指定工艺参数在  $i$  水平下的材料去除率； $R_{\min}$  和  $R_j$  分别为该工艺参数四个水平下的最小材料去除率和材料去除率极差。 $C_{M,i}$  越大表示指定工艺参数在  $i$  水平下对材料去除率的影响程度越大，获得的材料去除率越大。根据式（2）和表 5 计算磨料粒度（A）和切削深度（C）在各个水平下对材料去除率的影响率，如表 7 所示。

表 7 A、C 因素对材料去除率的影响率  
Tab.7 Influence ratio of factor A and C on material removal rate

Level	Abrasive particle size ( A )	Cutting depth ( C )
1	1	0
2	0.669	0.131
3	0.522	0.292
4	0	1

定义指定工艺参数在  $i$  水平下对工件表面粗糙度和材料去除率的综合影响率  $C_i$  为：

$$C_i = C_{R,i} + C_{M,i} \quad (3)$$

$C_i$  越大表示该工艺参数在  $i$  水平下对工件表面粗糙度和材料去除率的综合影响程度越大，此时，既可获得较低的工件表面粗糙度，也可以获得较高的材料去除率。根据式（3）对表 6 和表 7 求和，计算磨料粒度（A）和切削深度（C）在各水平下对工件表面粗糙度和材料去除率的综合影响率，如表 8 所示。

表 8 A、C 因素的综合影响率  
Tab.8 Overall influence ratio of factor A and C

Level	Abrasive particle size ( A )	Cutting depth ( C )
1	1	1
2	1.058	0.577
3	1.279	0.292
4	1	1.558

取综合影响率最大值确定工艺参数磨料粒度(A)和切削深度(C)最佳组合为A3C4,因此工艺参数理想的组合为A3B4C4D1,即砂轮600<sup>#</sup>、转速2000 r/min、切削深度0.04 mm、进给速度20 mm/min时,采用该优化参数加工既可以获得较好的表面粗糙度,又可以兼顾加工效率,具有较高的去除率。

## 5 结论

1) 将弹性聚氨酯砂轮应用于铝合金磨削是可行的,可将原工艺加工后Ra为0.1~0.2 μm的表面粗糙度降至50 nm左右。此外,可将工艺工序简化为1道,可简化工艺流程,节省备料和安装调整时间,从而提高效率。

2) 实验表明,在四个工艺参数中,切削深度对工件表面粗糙度的影响最小,对材料去除率的影响最大。因此,应用弹性砂轮加工时,可以选用较大的切削深度以获得较高的加工效率。

3) 转速和进给速度对加工表面质量和材料去除率的影响趋势一致,使用较高的转速和较低的进给速度,可获得较好的加工表面质量和较高的材料去除率。因此在制定工艺参数时,应该使用高转速慢进给进行加工。

4) 磨料粒度对加工表面质量和材料去除率的影响趋势相反,经过综合优化,选用粒度相对较高的600<sup>#</sup>,既可以得到较好的加工表面质量,同时又能够保证加工效率。

## 参考文献:

- [1] 路兴武,郝钢.论我国智能手机市场发展趋势[J].黑龙江对外经贸,2011(5): 63-64.  
LU Xing-Wu, HAO Gang. Discussion on the Development Trend of Smart Phone Market in China[J]. Heilongjiang Foreign Economic Relations & Trade, 2011(5): 63-64.
- [2] 徐慧,李天生.磨削抛光铝合金的工艺参数研究[J].机械设计与制造,2010(9): 134-135.  
XU Hui, LI Tian-Sheng. Study on Technological Parameters of Grinding and Polishing Aluminum Alloy[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(9): 134-135.
- [3] 丁和艳.铝合金车轮 CNC 机械抛光工艺优化的基础研究[D].武汉:华中科技大学,2010.  
DING He-yan. Basic Research on Optimization of CNC Mechanical Polishing Process for Aluminum Alloy Wheels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010.
- [4] 梅锦波.铝合金化学机械抛光工艺技术的研究[D].长沙:湖南大学,2013.  
MEI Jin-bo. Research on Technology in the Chemical-Mechanical Polishing for Aluminum Alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [5] 金明生.模具自由曲面气囊抛光机理及工艺研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.  
JIN Ming-sheng. Gasbag Polishing Mechanism and Process on Free-form Surface Mould[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [6] 黄诗翘.弹性研磨法的基础研究——弹性砂轮的开发[J].成都科技大学学报,1996(6): 5-11.  
HUANG Shi-qiao. Basic Study of Elastic Grinding Method Development of Elastic Grinding Wheel[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1996(6): 5-11.
- [7] 黄诗翘.弹性研磨法的基础研究——测试与分析[J].四川联合大学学报(工程科学版),1998(5): 39-44.  
HUANG Shi-qiao. Basic Study of Elastic Grinding Method—Test and Analysis[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science Edition), 1998(5): 39-44.
- [8] 杨茹果.聚氨酯抛光材料的研究与应用进展[J].化学工程师,2005(12): 45-47.  
YANG Ru-guo. Progress in Research and Application of Polyurethane Polishing Materials[J]. Chemical Engineer, 2005(12): 45-47.
- [9] 孙清峰,甘经虎,王翠.手机抛光轮用聚氨酯微孔弹性体的研究[J].聚氨酯工业,2016,31(1): 29-32.  
SUN Qing-feng, GAN Jing-hu, WAN Cui. Study on Polyurethane Microcellular Elastomer for Polishing Wheel of Mobile Phone[J]. Polyurethane Industry, 2016, 31(1): 29-32.
- [10] 甘经虎.手机抛光轮用聚氨酯微孔弹性体组合物的研究[J].聚氨酯工业,2014(1): 4-6.  
GAN Jing-hu. Study on Polyurethane Microcellular Elastomer Composition for Mobile Phone Polishing Wheel[J]. Polyurethane Industry, 2014(1): 4-6.
- [11] 周龙,闫如忠,匡艳青.面向精密抛光的聚氨酯磨具研究及其特性分析[J].现代制造工程,2015(7): 98-102.  
ZHOU Long, YAN Ru-zhong, KUANG Yan-qing. Analysis and Research on the Poly-urethane Tool for Precision Polishing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(7): 98-102.
- [12] AURICH J C, CHRISTIAN E. Influence of the Machining Conditions When Preparing Cutting Edges with Elastic Bonded Grinding Wheels[J]. Production Engineering, 2015, 9(3): 329-336.
- [13] 朱纪军,左敦稳,王珉,等.聚氨酯柔性磨具抛光技术的实验研究[J].航空精密制造技术,1996(6): 7-9.  
ZHU Ji-jun, ZUO Dun-wen, WAN Min, et al. Experimental Study on Polishing Technology of Polyurethane Flexible Abrasive Tools[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996(6): 7-9.
- [14] 李亚国,王健,许乔,等.光学元件聚氨酯抛光特性研究[J].光电工程,2008(11): 139-144.  
LI Ya-guo, WANG Jian, XU Qiao, et al. Research on Polyurethane Polishing Characteristics of Optical Components[J]. Opto Electronic Engineering, 2008(11): 139-144.
- [15] LUKAS H, BENJAMIN K, TOBIAS D, et al. Influence of the Quality of Rivet Holes in Carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP) on the Connection Stability[J]. Procedia Manufacturing, 2016(6): 18-21.
- [16] CHRISTIAN E, BEJAMIN K. A New Method for the Preparation of Cutting Edges via Grinding[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2570(769): 55-58.