

# 砂带磨削表面粗糙度理论预测及灵敏度分析

高超<sup>1</sup>, 王生<sup>1</sup>, 王会<sup>1</sup>, 刘广照<sup>1</sup>, 吴国荣<sup>2</sup>

(1.江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003;

2.东南大学 机械工程学院, 南京 210000)

**摘要:** **目的** 以钢化玻璃磨边为研究对象, 建立金刚石砂带磨削表面粗糙度理论预测模型, 并分析粗糙度对各工艺因素的灵敏度。**方法** 首先, 采用多因素线性回归分析建立了关于磨削工艺参数的粗糙度理论预测模型; 其次, 通过正交试验研究了磨削压力、砂带线速度和砂带张紧力对粗糙度和材料去除率的影响大小, 并得到了工艺参数的优水平组合; 再次, 根据正交试验结果计算了粗糙度理论预测模型的数学表达式, 同时, 建立了灵敏度模型来进行工艺因素的灵敏度分析和工艺参数的区间优化; 最后, 利用随机试验验证了粗糙度理论预测模型的准确性。**结果** 极差分析可知,  $R_A(0.137) > R_C(0.068) > R_B(0.016)$ ,  $M_C(6.828) > M_A(5.228) > M_B(1.784)$ , 磨削工艺参数的优水平组合为  $A_2B_3C_3$ 。电镀金刚石砂带磨削表面粗糙度理论预测模型的表达式为  $Ra = KF^\alpha V_s^\beta T^\delta = 0.6249F^{0.3967}V_s^{-0.0686}T^{-0.2338}$ 。各工艺参数的优选区间为: 磨削压力 10~20 N, 线速度 15~30 m/s, 张紧力 40~60 N。随机试验可得, 粗糙度理论预测模型的相对误差大小维持在 5.5%~10%。**结论** 关于工艺因素对磨削质量的影响, 磨削压力最大, 砂带张紧力次之, 砂带线速度最小。关于工艺因素对材料去除率的影响, 砂带张紧力最大, 磨削压力次之, 砂带线速度最小。磨削压力为 18 N、砂带线速度为 30 m/s、砂带张紧力为 55 N 时, 磨削表面质量最好, 且材料去除率较高。试验参数范围内, 粗糙度对磨削压力的灵敏度随磨削压力的增加而下降, 对砂带线速度和砂带张紧力的灵敏度随着二者的增加而增加。15 组随机试验表明, 粗糙度理论预测模型具有较高的可靠性和准确性。

**关键词:** 电镀金刚石砂带; 钢化玻璃; 磨削; 粗糙度; 理论模型; 灵敏度

**中图分类号:** TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0295-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.042

## Theoretical Prediction and Sensitivity Analysis of Surface Roughness of Abrasive Belt Grinding

GAO Chao<sup>1</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, LIU Guang-zhao<sup>1</sup>, WU Guo-rong<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2.School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to adopt the edge-grinding of tempered glass as the research object to establish the theoretical prediction model of the surface roughness of diamond abrasive belt grinding and analyze the sensitivity of the roughness to the process factors. Firstly, the theoretical prediction model of roughness for grinding process parameters was established by multi factor linear regression analysis. Secondly, the influences of grinding pressure, line speed and tensioning force of abrasive belt on the roughness and material removal rate were studied by orthogonal test, and the optimum combination of process parameters

收稿日期: 2018-02-13; 修订日期: 2018-06-10

Received: 2018-02-13; Revised: 2018-06-10

作者简介: 高超 (1979—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为硬脆及难加工材料的加工技术。邮箱: gaochaozibo@qq.com

**Biography:** GAO Chao (1979—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: the processing technology of hard brittle and difficult-to-machine material. E-mail: gaochaozibo@qq.com

was obtained. Thirdly, the mathematical expression for theory prediction model of roughness was calculated according to the orthogonal test results. Meanwhile, the sensitivity models were established for sensitivity analysis of process factors and optimization of process parameters. Finally, the accuracy of the roughness theory prediction model was verified by random experiments. From the range analysis,  $R_A(0.137) > R_C(0.068) > R_B(0.016)$  and  $M_C(6.828) > M_A(5.228) > M_B(1.784)$  and the excellent level combination of grinding process parameters was  $A_2B_3C_3$ . The expression of the theoretical prediction model for surface roughness of electroplated diamond abrasive belt grinding was described as  $Ra = KF^\alpha V_s^\beta T^\delta = 0.6249F^{0.3967}V_s^{-0.0686}T^{-0.2338}$  and the optimum selection interval of each process parameter was grinding pressure of 10~20 N, linear velocity of 15~30 m/s and tensioning force of 40~60 N. From the random tests, relative error of roughness theory prediction model was maintained at 5.5%~10%. The influence of process factors on roughness is significantly contributed by grinding pressure and then slightly caused by tensioning force, while line speed has the least influence. The influence of process factors on material removal rate is seriously caused by tensioning force and then slightly contributed by grinding pressure, while line speed still has the least influence. The grinding quality is the best and the material removal rate is the highest when the grinding pressure is 18 N, the belt line speed is 30 m/s, and the belt tensioning force is 55 N. In the range of test parameters, the sensitivity of roughness to grinding pressure decreases with the increase of grinding pressure, and the sensitivity to linear velocity and tensioning force increases with the increase of the two factors. The 15 sets of random tests show that the roughness theory prediction model has high reliability and accuracy.

**KEY WORDS:** electroplated diamond belt; tempered glass; grinding; roughness; theoretical model; sensitivity

砂带磨削是一种具有磨削、研磨和抛光作用的复合加工,工件材料在磨粒的滑擦、耕型和切削作用下被去除<sup>[1-2]</sup>,因此砂带磨削具有磨削效率高、加工质量好、适用范围广等优点。特别是电镀金刚石砂带,作为一种新型的柔性磨削工具,克服了传统砂带寿命短、耐磨性差、抗拉强度小等缺点,具有一系列传统磨削工具无法比拟的优良性能,被广泛应用在玻璃、陶瓷、单晶硅、多晶硅、合成材料、硬质合金及铝合金等多种硬脆材料复杂形面的磨削加工领域<sup>[3-7]</sup>。

然而,加工表面在磨粒的挤压作用下容易产生塑性变形、加工硬化以及微裂纹等现象,从而影响磨削表面质量,这与磨削工艺参数紧密相关。建立关于磨削工艺参数的粗糙度理论预测模型,可根据加工表面的粗糙度要求,对磨削工艺参数进行合理设置,从而获得能达到特定粗糙度要求的磨削表面,有利于简化砂带磨削工艺,降低成本。同时也可以根据粗糙度理论模型对加工表面粗糙度进行先期预测,及时调整磨削工艺参数,在不更换砂带的条件下做到一次性磨削成形。

在粗糙度理论模型方面,国内外学者也进行了相应的研究。Yanzhong Wang等<sup>[8]</sup>提出了一种弧齿锥齿轮磨削粗糙度的数学模型,通过该模型可以计算齿轮表面的粗糙度,并且通过实例说明了利用该模型优化磨削参数的几种措施。Vishwas Grover<sup>[9]</sup>提出了磁流变珩磨过程中圆柱工件内表面加工的粗糙度数学模型,来预测表面粗糙度的变化,用于预测各种铁磁圆柱形工件的加工性能。Jinglong Sun等<sup>[10]</sup>建立了硅片自旋转磨削中粗糙度的理论模型,并实验验证了理论模型的正确性。该模型可以定量地识别加工参数、磨粒尺寸、材料性能和磨痕几何形状对粗糙度的影响。Mite Tomov等<sup>[11]</sup>研究了纵向车削表面粗糙度的建模

与预测。苏晓云等<sup>[12]</sup>利用粒子群优化BP神经网络建立大理石加工表面粗糙度精确预测模型。由于砂带磨削是一种非常复杂的材料去除方式,磨削表面质量所受影响因素众多,目前还没看到关于磨削工艺参数的粗糙度理论模型方面的研究,因此非常有必要开展相应方面的研究来优化磨削工艺,简化磨削步骤,降低磨削成本,提高磨削质量。

硬脆材料的复杂形面加工领域中,钢化玻璃的磨边加工一直是限制行业发展的难题。这是由于钢化玻璃是一种特殊的预应力分布的脆性材料<sup>[13-15]</sup>,其强度极限和弹性极限的差值非常小,当所承受磨削载荷超过其弹性极限之后就会发生断裂性破坏,磨削表面呈现出大面积的凹坑和纵横交错的扩展性裂纹,甚至是自爆性破坏,导致加工质量极差。因此,传统工具一般不能对钢化玻璃进行切割、钻孔及磨边加工<sup>[16-18]</sup>。但是,钢化玻璃比普通玻璃具有优越的机械强度、抗热震性、耐冲击性和高冲击韧性<sup>[19-20]</sup>,已经被广泛地应用在汽车制造、建筑材料、家用电器以及航空航天等领域<sup>[21-23]</sup>,为了达到安全性及美观性要求,需要进行磨边加工。传统磨边经常采用预成型金刚石砂轮进行特定形状的磨边加工,但这种加工方法面临着加工过程中玻璃爆边、裂纹扩展、纹理粗糙、表面质量差及加工效率低下等问题。

国外学者Bifano T. G等<sup>[24]</sup>研究发现,所有的脆性材料在磨削深度足够小、磨削精度足够高时,都会表现出塑性流动特征,而不是脆性断裂,这为钢化玻璃的砂带磨边提供了理论依据。因此,基于上述分析,本文将以电镀金刚石砂带为磨削工具,钢化玻璃磨边为研究对象,建立基于磨削工艺参数的砂带磨削表面粗糙度理论预测模型,并进行工艺参数的相应分析,旨在提高磨削质量,优化砂带磨削工艺。

1 试验

1.1 材料

试验所用的钢化玻璃由普通平板玻璃经过高温淬火而来，钢化温度 680 ℃，钢化时间 150 s，急冷风压 500 Pa，急冷时间 120 s，冷却风压 2000 Pa，冷却时间 180 s，如图 1 所示。样本体积参数为 180 mm×



图 1 钢化玻璃  
Fig.1 Tempered glass

100 mm×10 mm，力学性能参数如表 1 所示。

图 2 为定制于瑞士凯吉斯金刚石（广州）有限公司的电镀金刚石砂带，金刚石类型为 SMD40 型，金属镀层组成为 Ni90-Co5-Cu5，金刚石粒度为 230/270 US mesh（63~53 μm），排屑间隙为 1.5 mm，基体厚度为 1.2 mm，镀层厚度比为 2/3，其中尺寸周长为 1256 mm，宽为 30 mm。金刚石磨粒力学性能参数如表 2 所示。

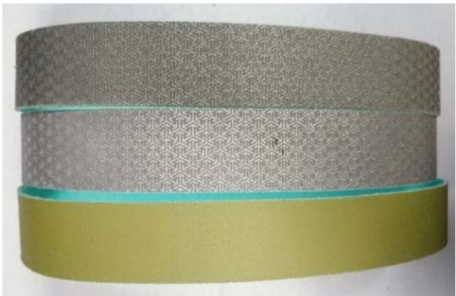


图 2 电镀金刚石砂带  
Fig.2 Electroplated diamond belt

表 1 钢化玻璃力学性能参数  
Tab.1 Mechanical properties of tempered glass

Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Modulus of elasticity/GPa	Vickers hardness/MPa	Fracture toughness/(MPa·m) <sup>1/2</sup>	Bending strength/MPa	Compressive strength/GPa	Poisson ratio μ
2.5	73	60	0.8	6.86	7.84	0.3

表 2 金刚石磨粒力学性能参数  
Tab.2 Mechanical properties of diamond abrasive particles

Type of diamond	Vickers hardness/MPa	Compressive strength/MPa	Shear strength/MPa	Tough index/%
SMD35	0.6×10 <sup>5</sup>	1.12×10 <sup>4</sup>	5.3×10 <sup>3</sup>	68
SMD40	1.0×10 <sup>5</sup>	1.74×10 <sup>4</sup>	8.7×10 <sup>3</sup>	75

1.2 试验设备和条件

磨削工艺研究试验在如图 3 所示的小型砂带磨削机上进行，电机功率为 1500 W，最大主轴转速为 2800 r/min，当接触轮直径为 20 cm 时，砂带线速度可以在 0~42 m/s 之间通过变速器任意调节。采用如图 4 所示的磨削结构来调节磨削压力和砂带张紧力，通过在工作台的导轨上施加重物来控制磨削压力。由

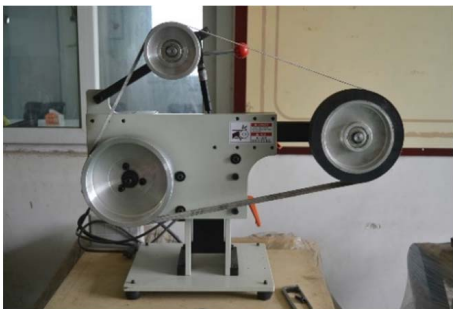


图 3 砂带磨削机  
Fig.3 Abrasive belt grinding machine

于导轨间摩擦阻尼的存在，磨削压力与重物之间的关系为  $F=0.95\ mg$ （ $g=9.8\ \text{kg/m}$ ， $m$  为重物质量），通过张紧机构来调节砂带张紧力。

定义钢化玻璃的磨边长度 100 mm 为一次磨削，采用精度为 0.001 g 的高精度天平称取每次磨削前后的工件质量，以此计算磨削前后工件的质量损失，结合磨削时间计算材料去除率，用秒表记录磨削时间。采用时代公司生产的 TR220 型高精度表面粗糙度测量仪对磨削表面粗糙度进行测量。玻璃磨边时，结合玻璃厚度为 10 mm，粗糙度测量仪的最佳取样长度为 0.25 mm，垂直于磨削方向检测钢化玻璃磨边的磨削表面粗糙度。探针材质为高纯度金刚石（99.99%），测量结果精确。测量仪主要技术参数如表 3 所示。

1.3 试验方案

首先，采用多因素线性回归分析建立关于砂带磨削工艺参数的粗糙度理论预测模型。然后，以粗糙度和磨削效率（单位时间内的材料去除率）作为评价指标，通过正交试验对磨削工艺参数进行优化，同时，

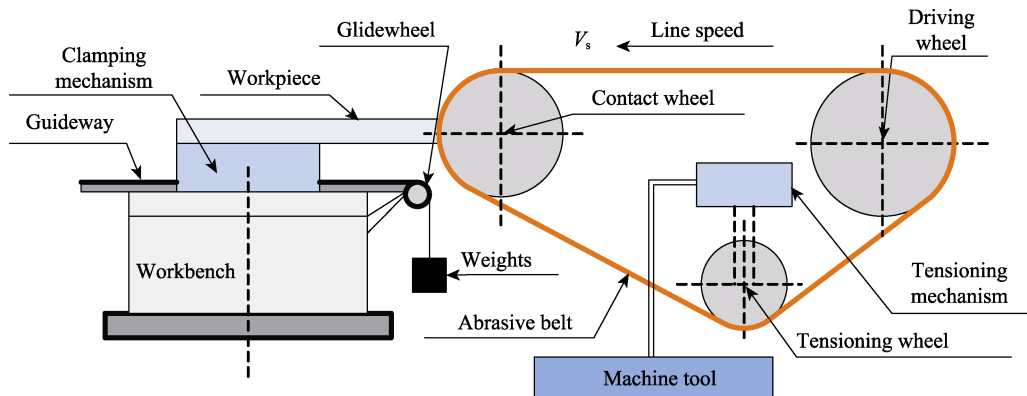


图4 磨削结构示意图

Fig.4 Structural schematic diagram of abrasive belt grinding

表3 TR220 粗糙度仪技术参数

Tab.3 Technical parameters of roughness meter- TR220

Measuring range/ $\mu\text{m}$	Display range/ $\mu\text{m}$	Resolving power/ $\mu\text{m}$	Sampling length/mm	Needle tip radius/ $\mu\text{m}$	Indication error/%
0.025~12.5	0.005~16	0.001	0.25、0.8、2.5	5	$\leq \pm 10$

根据试验结果对粗糙度理论模型进行计算并进行工艺因素的灵敏度分析和工艺参数区间优化。最后,对粗糙度理论预测模型进行验证。正交试验方案如表4所示。

表4  $L_9(3^3)$  正交试验方案Tab.4 The scheme of  $L_9(3^3)$  orthogonal test

Level	Factors		
	Grinding pressure(A)/N	Line speed(B)/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Tensioning force(C)/N
1	13	20	35
2	18	25	45
3	22	30	55

## 2 试验结果及分析

### 2.1 理论建模

通过多元线性回归分析建立粗糙度理论预测模型,可以基于多组单因素试验或正交试验。正交试验将多个需要研究的因素组合在一起进行试验,有助于结合各因素之间的相互影响规律,从而提高理论模型的准确性,因此本文基于正交试验建立粗糙度理论预测模型。

磨削表面粗糙度与磨削压力、砂带线速度以及砂带张紧力之间的理论经验公式可以表示为<sup>[25]</sup>:

$$Ra = KF^\alpha V_s^\beta T^\delta \quad (1)$$

式中:  $Ra$  为磨削表面粗糙度 ( $\mu\text{m}$ );  $K$  为比例系数;  $F$  为磨削压力 (N);  $V_s^\beta$  为砂带线速度 (m/s);  $T$  为砂带张紧力 (N);  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  为各参数指数。

公式(1)为非线性函数,将其两边取对数,使粗糙度理论模型线性化,即:

$$\lg Ra = \lg K + \alpha \lg F + \beta \lg V_s + \delta \lg T \quad (2)$$

令  $y = \lg Ra$ ,  $\beta_0 = \lg K$ ,  $\beta_1 = \alpha$ ,  $\beta_2 = \beta$ ,  $\beta_3 = \delta$ ,  $x_1 = \lg F$ ,  $x_2 = \lg V_s$ ,  $x_3 = \lg T$ , 则对应的线性回归方程为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (3)$$

该线性方程包括3个自变量,  $y$  为试验结果,通过代入正交试验的9组数据来计算  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  的值,第  $i$  组试验的自变量为  $x_{1i}$ 、 $x_{2i}$ 、 $x_{3i}$ , 试验结果为  $y_i$ 。

设  $\hat{\beta}_0$ 、 $\hat{\beta}_1$ 、 $\hat{\beta}_2$ 、 $\hat{\beta}_3$  分别为参数  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  的估计值向量,  $\hat{y}_i$  为试验测量结果  $y_i$  的回归值,因此样本回归方程可以表示为:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1i} + \hat{\beta}_2 x_{2i} + \hat{\beta}_3 x_{3i} \quad (4)$$

试验结果测量值  $y_i$  和回归值  $\hat{y}_i$  之间的差值称为残差  $e_i$ , 即:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1i} + \hat{\beta}_2 x_{2i} + \hat{\beta}_3 x_{3i}) \quad (5)$$

根据最小二乘法原理,应该使残差  $e_i$  的平方和最小,令  $Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)$  为残差  $e_i$  的平方和,即式(6)需要取得最小值。

$$Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \sum_{i=1}^9 e_i^2 = \sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \hat{\beta}_3 x_{3i})^2 \quad (6)$$

根据极值原理,需对函数  $Q$  的各变量求一阶偏导数,并令其导数结果为零,偏导求解可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \hat{\beta}_0} = 2 \sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \hat{\beta}_3 x_{3i})(-1) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \hat{\beta}_1} = 2 \sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \hat{\beta}_3 x_{3i})(-x_{1i}) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \hat{\beta}_2} = 2 \sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \hat{\beta}_3 x_{3i})(-x_{2i}) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \hat{\beta}_3} = 2 \sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \hat{\beta}_3 x_{3i})(-x_{3i}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

方程组 (7) 经过化简后如方程组 (8) 所示:

$$\begin{cases} 9\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^9 x_{1i} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^9 x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^9 x_{3i} = \sum_{i=1}^9 y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^9 x_{1i} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^9 x_{1i}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{3i} = \sum_{i=1}^9 y_i x_{1i} \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^9 x_{2i} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{2i} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^9 x_{2i}^2 + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^9 x_{2i}x_{3i} = \sum_{i=1}^9 y_i x_{2i} \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^9 x_{3i} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{3i} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^9 x_{2i}x_{3i} + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^9 x_{3i}^2 = \sum_{i=1}^9 y_i x_{3i} \end{cases} \quad (8)$$

方程组 (8) 的矩阵形式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} 9 & \sum_{i=1}^9 x_{1i} & \sum_{i=1}^9 x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{3i} \\ \sum_{i=1}^9 x_{1i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{3i} \\ \sum_{i=1}^9 x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{2i}^2 & \sum_{i=1}^9 x_{2i}x_{3i} \\ \sum_{i=1}^9 x_{3i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{3i} & \sum_{i=1}^9 x_{2i}x_{3i} & \sum_{i=1}^9 x_{3i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^9 y_i \\ \sum_{i=1}^9 y_i x_{1i} \\ \sum_{i=1}^9 y_i x_{2i} \\ \sum_{i=1}^9 y_i x_{3i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

把公式 (9) 中左右两边的矩阵项展开后可得:

$$\begin{bmatrix} 9 & \sum_{i=1}^9 x_{1i} & \sum_{i=1}^9 x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{3i} \\ \sum_{i=1}^9 x_{1i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{3i} \\ \sum_{i=1}^9 x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{2i} & \sum_{i=1}^9 x_{2i}^2 & \sum_{i=1}^9 x_{2i}x_{3i} \\ \sum_{i=1}^9 x_{3i} & \sum_{i=1}^9 x_{1i}x_{3i} & \sum_{i=1}^9 x_{2i}x_{3i} & \sum_{i=1}^9 x_{3i}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{19} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{29} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{39} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{19} & x_{29} & x_{39} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^9 y_i \\ \sum_{i=1}^9 y_i x_{1i} \\ \sum_{i=1}^9 y_i x_{2i} \\ \sum_{i=1}^9 y_i x_{3i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{19} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{29} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{39} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_9 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{令 } \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{19} & x_{29} & x_{39} \end{bmatrix} = \mathbf{X}, \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_9 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}, \quad \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \end{bmatrix} = \hat{\boldsymbol{\beta}}, \text{ 其}$$

中  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  为估计值向量, 则由方程组 (9) — (11) 可得:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (12)$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (13)$$

因此, 把正交试验结果带入公式 (13) 可求得估计值向量  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ , 然后通过回归计算求得粗糙度理论预测模型的具体表达式。

## 2.2 正交试验

### 2.2.1 工艺参数优化

磨削压力、砂带线速度以及砂带张紧力对磨削质量和磨削效率的影响是不同的, 通过正交试验来研究各因素的影响大小顺序, 并对磨削工艺参数进行优化。正交试验结果如表 5 所示。

表 5  $L_9(3^3)$  正交试验结果

Tab.5 The results of  $L_9(3^3)$  orthogonal test

Test sequence number	Grinding pressure (A)/N	Line speed (B) / (m·s <sup>-1</sup> )	Tensioning force (C)/N	Test results	
				Roughness/ $\mu\text{m}$	Material removal rate/(g·min <sup>-1</sup> )
1	13	20	35	0.613	24.947
2	13	25	45	0.569	29.726
3	13	30	55	0.547	35.137
4	18	20	45	0.655	34.457
5	18	25	55	0.609	36.261
6	18	30	35	0.665	31.376
7	22	20	55	0.682	37.552
8	22	25	35	0.764	32.145
9	22	30	45	0.692	35.798

为了分析各工艺因素对磨削质量和磨削效率的影响水平大小, 对表 5 中的正交试验结果进行极差分析, 极差分析的计算结果见表 6, 其中  $K_i$  和  $Z_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别为各因素各水平的粗糙度和材料去除率之和,  $k_i$  和  $z_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别为各因素各水平的粗糙度和材料去除率平均值,  $R$  为粗糙度极差,  $M$  为材料去除率极差。

通过极差分析可知,  $R_A(0.137) > R_C(0.068) > R_B(0.016)$ , 因此各工艺因素对粗糙度的影响由大到小为  $A > C > B$ , 即磨削压力对磨削质量的影响最大,

表 6 极差分析结果  
Tab.6 The results of range analysis

Factors		Grinding pressure(A)	Line speed(B)	Tensioning force(C)
Roughness/ $\mu\text{m}$	$K_1$	1.729	1.950	2.042
	$K_2$	1.929	1.942	1.926
	$K_3$	2.138	1.904	1.838
	$k_1$	0.576	0.650	0.681
	$k_2$	0.643	0.647	0.642
	$k_3$	0.713	0.634	0.613
	$R$	0.137	0.016	0.068
Material removal rate/ ( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Z_1$	89.810	96.956	88.468
	$Z_2$	102.094	98.132	99.981
	$Z_3$	105.495	102.311	108.950
	$z_1$	29.937	32.320	29.489
	$z_2$	34.031	32.711	33.327
	$z_3$	35.165	34.104	36.317
	$M$	5.228	1.784	6.828

砂带张紧力次之,砂带线速度的影响最小。同理,由于  $M_C(6.828) > M_A(5.228) > M_B(1.784)$ , 所以各因素对材料去除率的影响顺序为  $C > A > B$ , 即砂带张紧力对材料去除率的影响最大,磨削压力次之,砂带线速度的影响最小。

汽车用钢化玻璃的磨边加工不仅对磨削质量有较高的要求,而且需要具有较高的磨削效率,所以对各因素优水平的选择要兼顾二者。根据正交实验的特点,各因素的三组水平实验是在相同条件下进行的,因此通过分别比较各因素的  $k_i$  和  $z_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 便可选出针对磨削质量和磨削效率的各因素优水平。研究砂带线速度对磨削效果的影响时,针对粗糙度有  $k_{B3}(0.634) < k_{B2}(0.647) < k_{B1}(0.650)$ , 即砂带线速度为第三水平(30 m/s)时,磨削质量最高。针对材料去除率有  $z_{B3}(34.104) > z_{B2}(32.711) > z_{B1}(32.320)$ , 即砂带线速度为第三水平(30 m/s)时,磨削效率最高。因此,砂带线速度的优水平是第三水平 30 m/s。用同样的方法可得,砂带张紧力的优水平为 55 N。

然而,磨削压力对磨削质量和磨削效率的影响是相悖的。针对粗糙度有  $k_{A1}(0.576) < k_{A2}(0.643) < k_{A3}(0.713)$ , 即:当磨削压力为 13 N 时,磨削表面质量最好;磨削压力为 18 N 时,磨削表面质量次之;磨削压力为 22 N 时,磨削表面质量最差。针对材料去除率有  $z_{A3}(35.165) > z_{A2}(34.031) > z_{A1}(29.937)$ , 即:当磨削压力为 13 N 时,磨削效率最低;磨削压力为 18 N 时,磨削效率次之;磨削压力 22 N 时,磨削效率最高。磨削压力是影响磨削质量的关键因素,过大的磨削压力会导致磨削质量较差,因此磨削压力不宜过大。同时观察发现:磨削压力从 13 N 增加到 22 N 时,粗糙度增加了 23.8%,材料去除率增加了

17.5%;磨削压力从 18 N 增加到 22 N 时,粗糙度增加了 10.9%,材料去除率增加了 3.3%;磨削压力从 13 N 增加到 18 N 时,粗糙度增加了 11.6%,材料去除率增加了 13.7%。前两组数据中,粗糙度的增长率均大于材料去除率的增长率,所以磨削压力增加到 22 N 时,对磨削质量的影响弊端大于对材料去除率增长的贡献,因此 22 N 不是磨削压力的优水平。第三组数据中,粗糙度的增长率小于材料去除率的增长率,这意味着磨削压力从 13 N 增加到 18 N 时,对磨削效率的贡献大于对磨削质量影响的弊端,因此 18 N 是磨削压力的优水平。

为了更加合理地选择磨削压力的优水平,定义优水平指数  $W_i = z_i/k_i$  ( $z_i$  是指材料去除率平均值,  $k_i$  是指粗糙度的平均值,  $i$  是水平),  $W_i$  越大说明磨削效果越好,计算结果如表 7 所示,很明显,水平 2 的  $W_2$  值最大,所以磨削压力的优水平为第二水平 18 N,这与上述分析一致。

表 7 磨削压力优水平指数  
Tab.7 The excellent level index of grinding pressure

Levels	Level 1 (13 N)	Level 2 (18 N)	Level 3 (22 N)
$W_i$	51.974	52.925	49.312

基于以上分析,磨削工艺参数的优水平组合为  $A_2B_3C_3$ , 即磨削压力为 18 N、砂带线速度为 30 m/s、砂带张紧力为 55 N 时,汽车用钢化玻璃磨边的磨削质量最好,磨削效率最高。

## 2.2.2 理论模型的计算

根据表 5  $L_9(3^3)$  正交试验结果中粗糙度试验数据来计算粗糙度理论预测模型的表达式,因为  $y = \lg Ra$ ,  $x_1 = \lg F$ ,  $x_2 = \lg V_s$ ,  $x_3 = \lg T$ , 第  $i$  组试验的自变量为  $x_{1i}$ 、 $x_{2i}$ 、 $x_{3i}$ , 试验结果为  $y_i$ , 则与试验结果相对应的对数表如表 8 所示。

表 8 正交试验结果对数表  
Tab.8 The logarithmic table of the results of orthogonal test

Sequence number $i$	$x_{1i}(\lg F)$	$x_{2i}(\lg V_s)$	$x_{3i}(\lg T)$	$y_i(\lg Ra)$
1	1.1139	1.3010	1.5441	-0.2125
2	1.1139	1.3979	1.6532	-0.2449
3	1.1139	1.4771	1.7404	-0.2620
4	1.2553	1.3010	1.6532	-0.1838
5	1.2553	1.3979	1.7404	-0.2154
6	1.2553	1.4771	1.5441	-0.1772
7	1.3424	1.3010	1.7404	-0.1662
8	1.3424	1.3979	1.5441	-0.1169
9	1.3424	1.4771	1.6532	-0.1599

$$\text{因为 } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{19} & x_{29} & x_{39} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1.1139 & 1.3010 & 1.5441 \\ 1 & 1.1139 & 1.3979 & 1.6532 \\ 1 & 1.1139 & 1.4771 & 1.7404 \\ 1 & 1.2553 & 1.3010 & 1.6532 \\ 1 & 1.2553 & 1.3979 & 1.7404 \\ 1 & 1.2553 & 1.4771 & 1.5441 \\ 1 & 1.3424 & 1.3010 & 1.7404 \\ 1 & 1.3424 & 1.3979 & 1.5441 \\ 1 & 1.3424 & 1.4771 & 1.6532 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2125 \\ -0.2449 \\ -0.2620 \\ -0.1838 \\ -0.2154 \\ -0.1772 \\ -0.1662 \\ -0.1169 \\ -0.1599 \end{bmatrix}, \text{ 把矩阵 } \mathbf{X}、\mathbf{X} \text{ 的转置矩阵 } \mathbf{X}^T、\mathbf{Y}$$

$$\text{代入式 (13), 求得估计值向量 } \hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2042 \\ 0.3967 \\ -0.0686 \\ -0.2338 \end{bmatrix}。 \text{ 又}$$

因为  $\beta_0 = \lg K$ ,  $\beta_1 = \alpha$ ,  $\beta_2 = \beta$ ,  $\beta_3 = \delta$ , 则  $K = 0.6249$ ,  $\alpha = 0.3967$ ,  $\beta = -0.0686$ ,  $\delta = -0.2338$ , 所以最终求得关于磨削工艺因素的粗糙度理论预测模型为:

$$Ra = KF^\alpha V_s^\beta T^\delta = 0.6249 F^{0.3967} V_s^{-0.0686} T^{-0.2338} \quad (14)$$

式中:  $Ra$  为粗糙度 ( $\mu\text{m}$ );  $K$  为比例系数;  $F$  为磨削压力 (N);  $V_s^\beta$  为砂带线速度 (m/s);  $T$  为砂带张紧力 (N)。

### 2.2.3 工艺因素灵敏度分析及区间优化

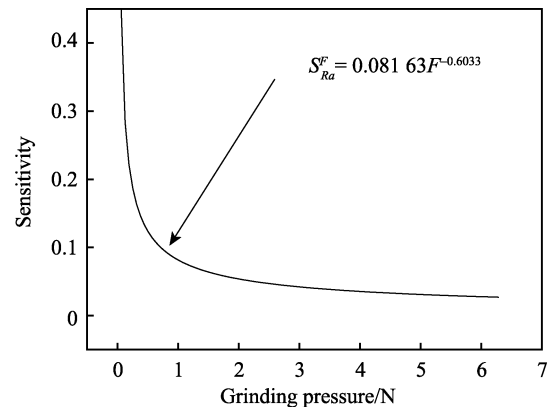
磨削表面粗糙度影响因素的灵敏度是指表面粗糙度对工艺参数变化的敏感程度, 磨削表面粗糙度对磨削压力、砂带线速度和砂带张紧力的灵敏度模型分别表示为:

$$\begin{cases} S_{Ra}^F = \frac{\partial Ra}{\partial F} = 0.24790 F^{-0.6033} V_s^{-0.0686} T^{-0.2338} \\ S_{Ra}^{V_s} = \frac{\partial Ra}{\partial V_s} = -0.04287 F^{0.3967} V_s^{-1.0686} T^{-0.2338} \\ S_{Ra}^T = \frac{\partial Ra}{\partial T} = -0.14610 F^{0.3967} V_s^{-0.686} T^{-1.2338} \end{cases} \quad (15)$$

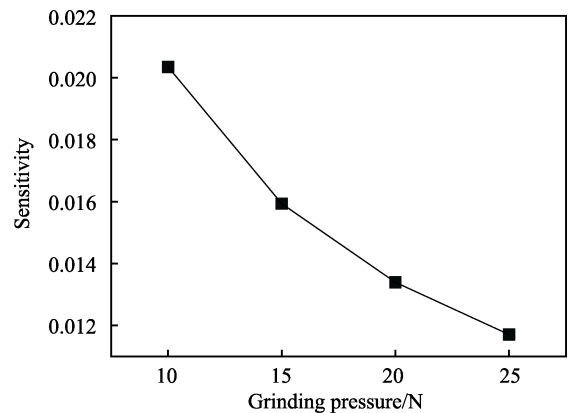
在正交试验的工艺参数范围内, 平均磨削压力  $\bar{F} = 18 \text{ N}$ , 平均砂带线速度  $\bar{V}_s = 25 \text{ m/s}$ , 平均砂带张紧力  $T = 45 \text{ N}$ , 所以各因素的灵敏度模型为:

$$\begin{cases} S_{Ra}^F = \frac{\partial Ra}{\partial F} = 0.08163 F^{-0.6033} \\ S_{Ra}^{V_s} = \frac{\partial Ra}{\partial V_s} = -0.05541 V_s^{-1.0686} \\ S_{Ra}^T = \frac{\partial Ra}{\partial T} = -0.05054 T^{-1.2338} \end{cases} \quad (16)$$

如图 5—7 所示, 分别为根据式 (16) 绘制的表面粗糙度对磨削压力、砂带线速度和砂带张紧力的灵敏度曲线, 以及根据式 (16) 计算的试验参数范围内表面粗糙度对磨削压力、线速度和张紧力的灵敏度。



a 灵敏度曲线



b 试验参数范围内灵敏度

图 5 表面粗糙度对磨削压力的灵敏度

Fig.5 The sensitivity of surface roughness to grinding pressure: (a) the sensitivity curve, (b) the sensitivity within the range of test parameters

由图 5a、6a、7a 可知, 在磨削工艺参数的初始值附近 (磨削压力 0~2 N, 砂带线速度 0~1 m/s, 砂带张紧力 0~1.5 N), 粗糙度对磨削压力、砂带线速和砂带张紧力的灵敏度都存在较大幅度的波动, 其中磨削压力灵敏度值急剧下降, 砂带线速度和砂带张紧力的灵敏度值急剧增加, 之后各工艺因素灵敏度值的变化相对平缓。在试验参数范围内, 分别如图 5b、6b、7b 所示, 磨削压力灵敏度值随着磨削压力的增加而下降, 即粗糙度对磨削压力的敏感程度随着磨削压力的增加而下降; 砂带线速度和砂带张紧力的灵敏度

值,随着砂带线速度和砂带张紧力的增加而增加。需要指出的是:各工艺参数值的变化确实改变了各自因素对粗糙度的影响程度,各因素工艺参数值的变化只

改变自身对粗糙度影响程度的大小,但并不能改变由极差分析得出的各工艺因素对粗糙度的影响程度顺序(磨削压力>砂带张紧力>砂带线速度)。

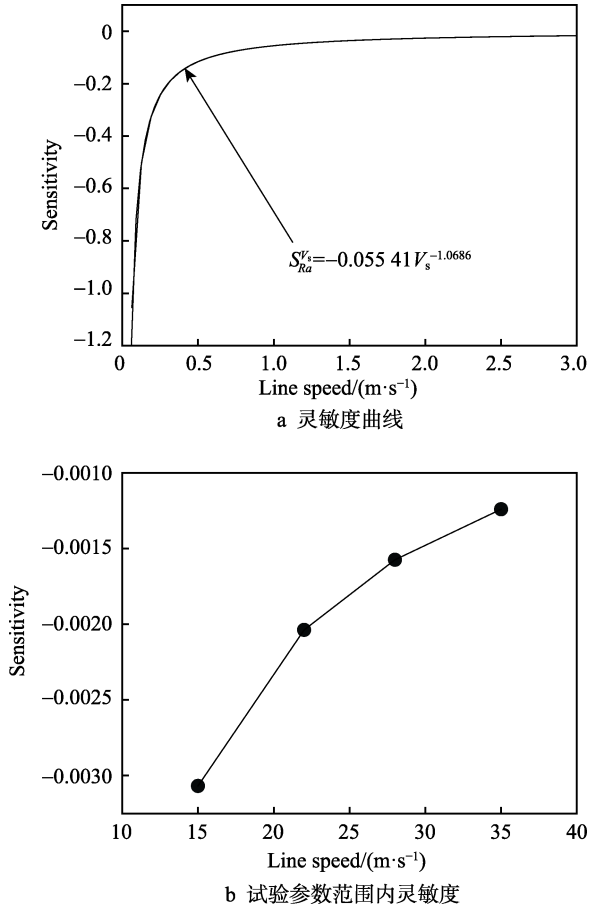


图 6 表面粗糙度对砂带线速度的灵敏度

Fig.6 The sensitivity of surface roughness to line speed of abrasive belt:(a) the sensitivity curve, (b) the sensitivity within the range of test parameters

通过分析试验参数范围内各因素的灵敏度值大小,可以得出各工艺参数的稳定域和非稳定域,如表 9 所示。通过正交试验的极差分析可以得到工艺因素在稳定域和非稳定域时磨削表面粗糙度的变化,如图 8 所示。通过分析试验参数范围内工艺参数对灵敏度的影响和磨削工艺参数对表面粗糙度的影响,得出磨削工艺参数的优选区间,如表 10 所示。

表 9 工艺参数的稳定域和非稳定域

Tab.9 Stable region and unstable region of process parameters

Process parameters	Stable domain	Unstable domain
Grinding pressure $F/N$	20~25	10~20
Line speed $V_s/(m \cdot s^{-1})$	15~30	30~35
Tensioning force $T/N$	30~40	40~60

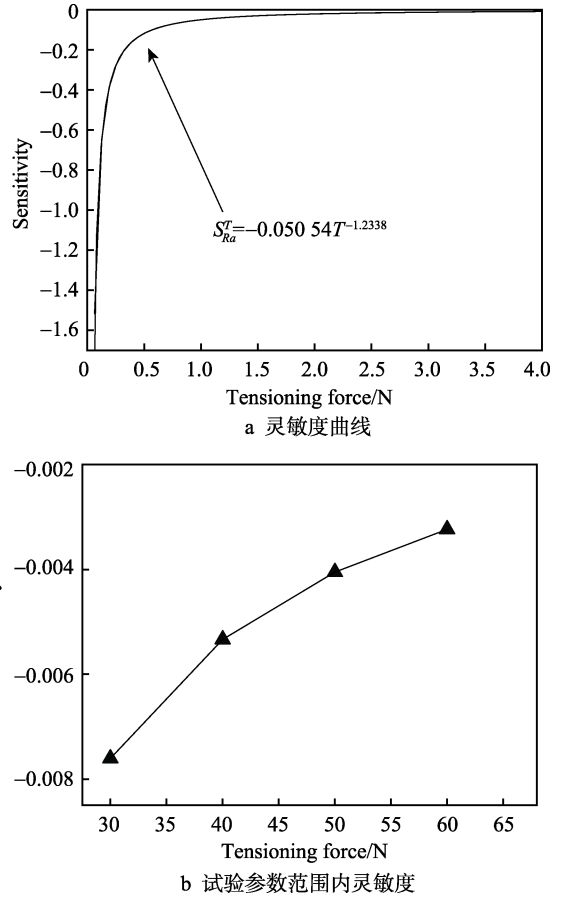


图 7 表面粗糙度对砂带张紧力的灵敏度

Fig.7 The sensitivity of surface roughness to tensioning force of abrasive belt:(a) the sensitivity curve of tensioning force of abrasive belt, (b) the sensitivity of tensioning force of abrasive belt within the range of test parameters

表 10 磨削工艺参数的优选区间

Tab.10 The optimization interval of grinding process parameters

Process parameters	Optimization interval of process parameters	Stable domain or unstable domain	Change trend of roughness
Grinding pressure $F/N$	10~20	Unstable domain	Increase
Line speed $V_s/(m \cdot s^{-1})$	15~30	Stable domain	Decline
Tensioning force $T/N$	40~60	Unstable domain	Decline

## 2.3 粗糙度理论预测模型的验证

粗糙度理论预测模型是基于正交试验建立的,为了更加准确地验证理论模型的可靠性和通用性,采用

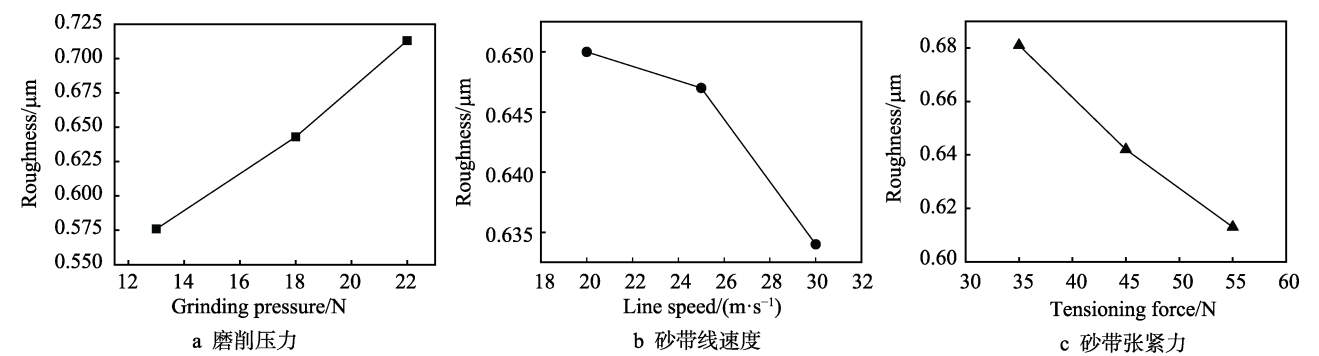


图 8 磨削工艺参数对表面粗糙度的影响  
Fig.8 The influence of grinding process parameters on surface roughness:(a) grinding pressure, (b) line speed of abrasive belt, (c) tensioning force of abrasive belt

随机试验对粗糙度理论模型进行验证。选择与上述研究相同的试验设备和试验材料，在优选区间内对工艺因素进行随机取值，之后进行试验。测量磨削表面粗糙度大小，并对试验测量值和理论模型预测值的误差进行计算和分析，随机试验结果如表 11 所示。

图 9 显示了随机试验中粗糙度的测量值与理论模型预测值的对比情况，观察发现，15 组随机试验中，粗糙度的测量值和理论模型预测值之间均存在一定的误差，并且试验测量值高于理论模型预测值，这说明实际的磨削表面质量要差于理论模型的预测结果。图 10 为试验测量值和理论模型预测值之间的误

差散点分布图，观察发现，粗糙度的相对误差大小维持在 5.5%~10%之间，说明粗糙度理论预测模型具有较高的可靠性和准确性，因此，通过粗糙度理论预测模型来调整磨削加工的工艺参数，可对磨削表面的粗糙度值进行控制和先期预测，具有重要的实际应用价值。造成误差的原因是由于在实际磨削过程中，对磨削压力、砂带线速度、砂带张紧力的控制存在误差，以及磨削过程中金刚石磨粒出现磨损、破碎及脱落等现象，同时，磨削过程中的砂带攒动、磨屑堆积、散热冷却不及时等因素，也是造成粗糙度测量值高于理论模型预测值的原因。

表 11 随机试验结果  
Tab.11 The results of random tests

Sequence number	A/N	B/( $m \cdot s^{-1}$ )	C/N	Ra1/ $\mu m$	Ra2/ $\mu m$	Ra3/ $\mu m$	Ra4/ $\mu m$	$\bar{Ra}$ / $\mu m$	$Ra^*$ / $\mu m$	E/%
1	11	19	55	0.549	0.551	0.547	0.553	0.550	0.518	5.82%
2	17	15	40	0.724	0.726	0.727	0.725	0.726	0.674	7.16%
3	13	20	45	0.622	0.624	0.622	0.625	0.623	0.578	7.22%
4	15	18	59	0.631	0.629	0.630	0.632	0.631	0.578	8.40%
5	12	22	48	0.584	0.582	0.583	0.582	0.583	0.548	6.00%
6	10	16	50	0.566	0.567	0.565	0.568	0.567	0.516	8.99%
7	19	29	58	0.674	0.676	0.675	0.677	0.676	0.617	8.73%
8	14	24	53	0.613	0.615	0.612	0.613	0.613	0.566	7.67%
9	15	17	43	0.679	0.676	0.679	0.678	0.678	0.625	7.82%
10	16	30	52	0.644	0.645	0.643	0.644	0.644	0.590	8.39%
11	18	26	57	0.667	0.669	0.667	0.668	0.668	0.611	8.53%
12	10	28	42	0.557	0.555	0.554	0.556	0.556	0.517	7.01%
13	20	23	47	0.744	0.746	0.745	0.744	0.745	0.672	9.80%
14	14	19	56	0.614	0.614	0.615	0.616	0.615	0.568	7.64%
15	19	24	60	0.682	0.684	0.682	0.682	0.683	0.620	9.22%

注：A 为磨削压力；B 为砂带线速度；C 为砂带张紧力； $Rai(i=1,2,3,4)$  为粗糙度测量值； $\bar{Ra}$  为粗糙度测量结果的平均值； $Ra^*$  为粗糙度理论模型预测值；E 为相对误差， $E=(\bar{Ra}-Ra^*)/\bar{Ra} \times 100\%$

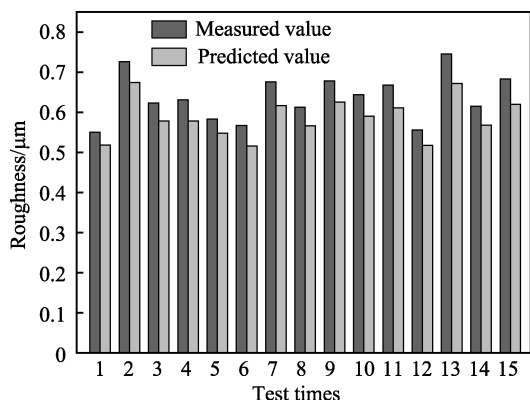


图9 粗糙度的测量值和预测值

Fig.9 The measured values and the predicted values of roughness

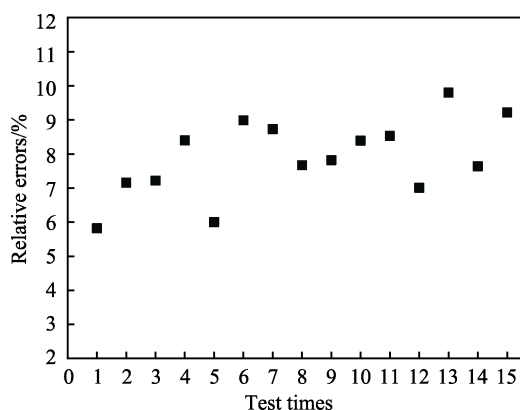


图10 相对误差散点分布图

Fig.10 Scatter plot of relative errors

### 3 结论

1) 正交试验表明, 工艺因素对粗糙度的影响大小顺序为磨削压力>砂带线速度>砂带张紧力, 对材料去除率的影响大小顺序为砂带张紧力>磨削压力>砂带线速度。磨削工艺参数的优水平组合为  $A_2B_3C_3$ , 即磨削压力为 18 N、砂带线速度为 30 m/s、砂带张紧力为 55 N 时, 磨削质量最好且材料去除率最高。

2) 通过正交试验数据可得, 磨削表面粗糙度理论预测模型的数学表达式为:  $Ra = KF^{\alpha}V_s^{\beta}T^{\delta} = 0.6249F^{0.3967}V_s^{-0.0686}T^{-0.2338}$ 。

3) 灵敏度分析表明, 试验参数范围内, 粗糙度对磨削压力的灵敏度随磨削压力的增加而下降, 对线速度和张紧力的灵敏度随着二者的增加而增加, 且各工艺参数的优选区间为: 磨削压力 10~20 N, 线速度 15~30 m/s, 张紧力 40~60 N。

4) 15 组随机试验表明, 粗糙度理论预测模型具有较高的可靠性和准确性, 粗糙度的相对误差维持在 5.5%~10% 范围内。

#### 参考文献:

[1] 罗志海, 杨润泽. 超声振动砂带磨削 TiC-TiB<sub>2</sub> 复合陶

瓷的效率研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(4): 42-45.

LUO Zhi-hai, YANG Run-ze. Researches on efficiency of ultrasonic vibration belt grinding of TiC-TiB<sub>2</sub> composite ceramics[J]. Diamond & abrasives engineering, 2011, 31(4): 42-45.

[2] MEZGHAN I S, SURA E, MANSORIM E. The effect of belt finishing process variables on the topography of finished surfaces[J]. Tribology transactions, 2008, 51(4): 413-421.

[3] 宋旭东, 邹文俊, 彭进. 金刚石砂带的发展现状及应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(6): 79-84.

SONG Xu-dong, ZOU Wen-jun, PENG Jin. Progress and application of diamond abrasive belt[J]. Diamond & abrasives engineering, 2015, 35(6): 79-84.

[4] 徐志强, 王秋良, 张高峰, 等. 可控柔性表面抛光研究综述[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 99-107.

XU Zhi-qiang, WANG Qiu-liang, ZHANG Gao-feng, et al. Summary of research on controllable flexible surface polishing [J]. Surface technology, 2017, 46(10): 99-107.

[5] GAO S, HUANG H, ZHU X L, et al. Surface integrity and removal mechanism of silicon wafers in chemo-mechanical grinding using a newly developed soft abrasive grinding wheel[J]. Materials science in semiconductor processing, 2017, 63: 97-106.

[6] 高超, 王生, 吴国荣, 等. 电镀金刚石砂带磨削氧化铝陶瓷的试验研究[J]. 工具技术, 2017, 51(10): 40-43.

GAO Chao, WANG Sheng, WU Guo-rong, et al. Experimental study on grinding of alumina ceramics using electroplated diamond abrasive belt[J]. Tool technology, 2017, 51(10): 40-43.

[7] 王生, 高超, 吴国荣, 等. 基于电镀金刚石砂带的钢化玻璃磨边试验研究[J]. 工具技术, 2017, 51(11): 41-45.

WANG Sheng, GAO Chao, WU Guo-rong, et al. Study of grinding edge on tempered glass based on electroplated diamond abrasive belt[J]. Tool technology, 2017, 51(11): 41-45.

[8] WANG Y Z, CHEN Y Y, ZHOU G M, et al. Roughness model for tooth surfaces of spiral bevel gears undergrinding[J]. Mechanism and machine theory, 2016, 104: 17-30.

[9] VISHWAS G, ANANT K S. Modelling of surface roughness in a new magnetorheological honing process for internal finishing of cylindrical workpieces[J]. International journal of mechanical sciences, 2018, 144: 679-695.

[10] SUN J L, CHEN P, QIN F, et al. Modelling and experimental study of roughness in silicon wafer self-rotating-grinding[J]. Precision engineering, 2018, 51: 625-637.

[11] TOMOV M, KUZINOVSKI M, CICHOSZ P. Modeling and prediction of surface roughness profile in longitudinal turning[J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 24: 231-253.

[12] 苏晓云, 汪建新, 辛李霞. 基于神经网络的铣削大理石

- 表面粗糙度预测模型[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 274-279.
- SU Xiao-yun, WANG Jian-xin, XIN Li-xia. Prediction model of milling marble surface roughness based on neural network [J]. Surface technology, 2017, 46(8): 274-279.
- [13] HE J Q, DONG Y, LI S T, et al. Study on forcedistribution of the tempered glass based on laser interference technology[J]. Optik international journal for light and electron optics, 2015, 126(24): 5276-5279.
- [14] 刘俊, 田宙, 钟巍, 等. 冲击波作用下单层钢化玻璃抗爆性能的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1402-1408.
- LIU Jun, TIAN Zhou, ZHONG Wei, et al. Numerical investigations on blast resistance of monolithic tempered glass subjected to shock wave[J]. Acta armamentarii, 2017, 38(7): 1402-1408.
- [15] 包亦望, 刘正权. 钢化玻璃自爆机理与自爆准则及其影响因素[J]. 无机材料学报, 2016, 31(4): 401-406.
- BAO Yi-wang, LIU Zheng-quan. Mechanism and criterion of spontaneous breakage of tempered glass[J]. Journal of inorganic materials, 2016, 31(4): 401-406.
- [16] ZHANG X H, HAO H, WANG Z Q. Experimental investigation of monolithic tempered glass fragment characteristics subjected to blast loads[J]. Engineering structures, 2014, 75: 259-275.
- [17] 王海风, 贺雅飞, 郭明星, 等. 化学钢化工艺对钢化玻璃耐磨性的影响[J]. 摩擦学学报, 2007(6): 524-528.
- WANG Hai-feng, HE Ya-fei, GUO Ming-xing, et al. Surface wear resistance of chemically strengthened glass[J]. Tribology, 2007(6): 524-528.
- [18] LE J, SONG L X, PENG X F, et al. Fracture mechanics analysis of thermally tempered glass plate: Fracture induced by an embedded crack[J]. International journal of fracture, 2005, 132(4): 299-309.
- [19] WANG Z Y, WANG Y Q, LIANG Y F, et al. Bearing capacity of tempered glass panel in point supported glass facades against in-plane load[J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2016, 16(4): 935-948.
- [20] LI M X, LU G J, HU Z R, et al. Research on fire endurance of tempered glass based on infrared imaging technology[J]. Procedia engineering, 2014, 84: 553-557.
- [21] SHAO G Z, WANG Q S, ZHAO H, et al. Maximum temperature to withstand water film for tempered glass exposed to fire[J]. Construction and building materials, 2014, 57: 15-23.
- [22] SCHNEIDER J, SCHULA S, WEINHOLD W P. Characterisation of the scratch resistance of annealed and tempered architectural glass[J]. Thin solid films, 2012, 520(12): 4190-4198.
- [23] AMIR F, SAMI R. Structural performance of laminated and unlaminated tempered glass under monotonic transverse loading[J]. Construction and building materials, 2006, 20(9): 761-768.
- [24] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials[J]. Journal of engineering for industry, transactions of the ASME, 1991, 113(2): 184-189.
- [25] WILLIAMSON R C, HELMKE U. Existence and uniqueness results for neural network approximations[J]. IEEE transactions on neural networks, 1995, 6(1): 2-13.