

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.010

# 基于响应面法优化增韧尼龙 66 切削工艺参数

张继林<sup>1</sup>, 罗文翠<sup>1</sup>, 唐林虎<sup>2</sup>, 王栋梁<sup>2</sup>(1. 兰州工业学院, 甘肃省精密加工技术及装备工程研究中心, 兰州 730050;  
2. 兰州工业学院, 绿色切削加工技术及应用甘肃省高校重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 为了探索切削工艺参数(切削速度、进给量和背吃刀量)对增韧尼龙 66 材料切削性能的影响规律,以切削力、切削温度和表面粗糙度为响应值进行单因素试验,结果表明,随着切削速度的逐渐增加,切削力逐渐降低,切削温度逐渐升高,表面粗糙度逐渐增大;随着进给量和背吃刀量的逐渐增加,切削力逐渐增大,切削温度逐渐升高,表面粗糙度逐渐增大。基于单因素研究结果,设计并进行响应面法试验方案,进一步探索切削参数间的交互作用对其切削性能的影响规律。利用 Design-Expert 软件建立试验因素与响应值之间的数学模型,通过方差分析,得到车削加工中影响增韧尼龙 66 切削力、切削温度和表面粗糙度的主次顺序分别为:进给量>背吃刀量>切削速度,切削速度>进给量>背吃刀量,切削速度>背吃刀量>进给量。以最小切削力、切削温度和表面粗糙度为目标进行切削工艺参数优化,并进行试验验证,切削力、切削温度和表面粗糙度的试验值与预测值的相对误差分别为 2.69%, -1.64%, -2.88%, 相对误差较小,说明模型比较准确。

**关键词:** 增韧尼龙 66; 响应面法; 切削工艺参数; 预测模型; 优化

**中图分类号:** TQ323, TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0056-08

## Optimization of Toughened Nylon 66 Cutting Process Parameters based on Response Surface Method

Zhang Jilin<sup>1</sup>, Luo Wencui<sup>1</sup>, Tang Linhu<sup>2</sup>, Wang Dongliang<sup>2</sup>

(1. Gansu Province Precision Machining Technology and Equipment Engineering Research Center, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Green Cutting Processing Technology and Application in Gansu Province Universities, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract :** In order to explore the influences of cutting process parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut) on the cutting performance of toughened nylon 66, a single-factor test was conducted with cutting force, cutting temperature and surface roughness as response values, and the results show that with the gradual increase of cutting speed, the cutting force gradually decreases, the cutting temperature gradually increases and the surface roughness gradually increases. With the gradual increase of feed rate and depth of cut, the cutting force gradually increases, the cutting temperature gradually increases and the surface roughness gradually increases. Based on the results of the single-factor study, a response surface method test program was designed and conducted to further explore the influences of the interaction between cutting parameters on their cutting performance. The mathematical model between the test factors and the response values was established by using Design-Expert software. Through variance analysis, the primary and secondary order of the effects of cutting force, cutting temperature and surface roughness of toughened nylon 66 in turning machining were obtained as follows : feed rate > depth of cut > cutting speed, cutting speed > feed rate > depth of cut, cutting speed > depth of cut > feed rate. The cutting process parameters were optimized with the objectives of minimum cutting force, cutting temperature and surface roughness, and were verified experimentally. The relative errors of the experimental and predicted values of cutting force, cutting temperature and surface roughness are 2.69%, -1.64% and -2.88%, respectively, which are relatively small and indicate that the model is more accurate.

**Keywords :** toughened nylon 66 ; response surface method ; cutting process parameter ; predictive model ; optimization

**基金项目:** 甘肃省自然科学基金项目 (20JR5RA376), 甘肃省高等学校创新基金项目 (2021B-251), 甘肃省重点人才项目 (甘组通字 [2022]77 号), 兰州工业学院大学生创新创业训练计划项目 (DC2111807CX657, S202111807007)

**通信作者:** 王栋梁, 副教授, 硕士, 主要从事材料切削性能的研究

**收稿日期:** 2022-06-16

**引用格式:** 张继林, 罗文翠, 唐林虎, 等. 基于响应面法优化增韧尼龙 66 切削工艺参数 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):56-63.

Zhang Jilin, Luo Wencui, Tang Linhu, et al. Optimization of toughened nylon 66 cutting process parameters based on response surface method[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):56-63.

尼龙 66 (PA66) 具有无毒、无臭、力学强度高、耐热、韧性优良、电绝缘性好等优点,已应用在汽车零件、家具等领域<sup>[1-2]</sup>,但是 PA66 存在吸水率高、低温冲击强度低等缺陷,制约了应用范围<sup>[3]</sup>。因此,急需提高 PA66 的韧性,目前有物理共混增韧和化学反应增容增韧两种方法<sup>[4]</sup>。国内外学者对 PA66 增韧进行了研究,王秀秀等<sup>[1]</sup>探讨了在常温和低温条件下两种增韧剂用量对 PA66 材料力学性能的影响。徐宁<sup>[2]</sup>探讨了增韧剂添加量对 PA66 的增韧改性效果。马小丰等<sup>[5]</sup>以乙烯-辛烯共聚物接枝马来酸酐(POE-g-MAH)、纳米 TiO<sub>2</sub> 作为改性剂,通过双螺杆挤出机共混制备增韧 PA66,研究了增韧剂 POE-g-MAH 含量对增韧 PA66 力学性能、热性能、耐低温冲击性能的影响。张伟等<sup>[6]</sup>研究了不同增韧剂及低黏度 PA66 对 PA66 韧性和流动性的影响,结果表明,添加适量的低黏度 PA66 以及以进口 POE-g-MAH 作为增韧剂,改性的增韧 PA66 的力学性能接近或达到了美国杜邦公司 ST801 材料的水平。

目前,对 PA66 主要集中于增韧工艺及机理的研究,很少关注增韧后 PA66 的切削加工性能问题,而对增强树脂复合材料的切削加工研究相对较多。贾振元等<sup>[7]</sup>进行了碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)切削机理研究,研究表明,切削深度和纤维角度影响纤维变形深度,即切深越大,纤维变形深度越大,更易产生加工损伤;随着纤维角度增加,纤维变形深度减小。秦旭达等<sup>[8]</sup>进行了不同纤维方向角时 CFRP 切削力建模,研究表明,建立的切削力解析模型可以较为准确地预测 CFRP 正交切削力。综上所述,开展增韧 PA66 切削工艺参数的优化显得比较重要。

笔者在单因素试验基础上借助响应面法<sup>[9-11]</sup>设计试验方案,通过车削试验系统对增韧 PA66 进行切削试验,研究切削工艺参数对切削力、切削温度和表面粗糙度的影响规律,以切削力最小、切削温度最低和表面粗糙度最小为目标,进行切削工艺参数优化,旨在获得最佳的切削工艺参数,为增韧 PA66 复合材料的车削加工提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

增韧 PA66 样品:采用反应浇铸获得,自制。

### 1.2 主要仪器与设备

数控车床:CAK5085si 型,沈阳机床股份有限公司;

车刀:刀尖为金刚石,其前角为 20°,后角为 15°,刃倾角为 0°,刀尖圆弧半径为 0.6 mm,定制;

便携式表面粗糙度测量仪: SJ210 型,日本三丰公司;

三向测力仪: Kistler 9257B 型,瑞士奇石乐公司;

在线测温红外热像仪: DM63-37 型,浙江大立科技股份有限公司。

### 1.3 试验方法

以切削力 ( $Y_1$ )、切削温度 ( $Y_2$ ) 和表面粗糙度 ( $Y_3$ ) 为响应指标,采用单因素轮换法依次研究切削速度 ( $X_1$ )、进给量 ( $X_2$ )、背吃刀量 ( $X_3$ ) 对增韧 PA66 切削性能的影响。在此基础上,利用响应面法设计与分析进行三因素三水平响应面优化切削工艺参数。试验过程中记录稳态阶段的三向切削力和切削温度,切削力求绝对值的平均值再求合力,切削温度求平均值;表面粗糙度测量三次求平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验分析

单因素试验法设计方案及结果见表 1,依据表 1 试验数据分别分析切削工艺参数与切削力、切削温度和表面粗糙度的变化关系。

表 1 单因素试验设计方案及结果

| 试验号 | $X_1/$<br>( $m \cdot min^{-1}$ ) | $X_2/$<br>( $mm \cdot r^{-1}$ ) | $X_3/$<br>mm | $Y_1/$<br>N | $Y_2/$<br>°C | $Y_3/$<br>$\mu m$ |
|-----|----------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------------|
| 1   | 80                               | 0.20                            | 3.0          | 114.267     | 152.7        | 0.978             |
| 2   | 110                              | 0.20                            | 3.0          | 95.794      | 168.3        | 0.985             |
| 3   | 140                              | 0.20                            | 3.0          | 91.549      | 178.0        | 1.101             |
| 4   | 170                              | 0.20                            | 3.0          | 83.419      | 193.7        | 1.151             |
| 5   | 200                              | 0.20                            | 3.0          | 69.791      | 201.1        | 1.246             |
| 6   | 140                              | 0.10                            | 3.0          | 51.856      | 148.2        | 0.799             |
| 7   | 140                              | 0.15                            | 3.0          | 58.665      | 163.7        | 0.985             |
| 8   | 140                              | 0.20                            | 3.0          | 90.038      | 176.7        | 1.104             |
| 9   | 140                              | 0.25                            | 3.0          | 111.046     | 194.3        | 1.218             |
| 10  | 140                              | 0.30                            | 3.0          | 128.296     | 212.3        | 1.451             |
| 11  | 140                              | 0.20                            | 2.0          | 43.528      | 139.0        | 0.985             |
| 12  | 140                              | 0.20                            | 2.5          | 73.528      | 154.9        | 1.045             |
| 13  | 140                              | 0.20                            | 3.0          | 92.500      | 175.7        | 1.086             |
| 14  | 140                              | 0.20                            | 3.5          | 105.940     | 197.0        | 1.130             |
| 15  | 140                              | 0.20                            | 4.0          | 110.940     | 198.3        | 1.208             |

#### (1) 切削速度对切削性能的影响。

由表 1 中 1~5 号试验可知,随着切削速度的逐渐增加,切削力逐渐减小,切削温度和表面粗糙度均逐渐增大;当切削速度由 80 m/min 增至 200 m/min 时,切削力降低 38.92%,切削温度和表面粗糙度增加 31.70% 和 27.40%,表面粗糙度变化幅度相对较小。随着切削速度增加,刀刃的切割能力增大,切削力降低,但增加了刀具与已加工表面的摩擦,使

得切削温度升高,最终使表面粗糙度变化幅度不大。

### (2) 进给量对切削性能的影响。

由表1中6~10号试验可知,随着进给量逐渐增加,切削力、切削温度和表面粗糙度均逐渐增大;当进给量由0.10 mm/r增至0.30 mm/r时,切削力、切削温度和表面粗糙度分别增加147.41%、43.25%和81.60%,切削温度变化幅度相对较小。随着进给量增加,切削层公称面积增大,切削功增大,切削力和切削温度增大,导致表面粗糙度增大。

### (3) 背吃刀量对切削性能的影响。

由表1中11~15号试验可知,随着背吃刀量逐渐增加,切削力、切削温度和表面粗糙度均逐渐增大;当背吃刀量由2.0 mm增至4.0 mm时,切削力、切削温度和表面粗糙度分别增加154.87%、42.66%、22.64%,表面粗糙度变化幅度相对较小,背吃刀量对切削力影响相对较大。随着背吃刀量增加,切削层公称面积增大,切削功增大,切削力和切削温度增大,进而表面粗糙度增大。

综上所述,以切削速度为单因素变量,当切削速度为200 m/min、进给量为0.20 mm/r、背吃刀量为3.0 mm(5号试验)时,切削力、切削温度和表面粗糙度分别为69.791 N,201.1℃,1.246 μm,此时切削力最小、切削温度最高、表面粗糙度最大;以进给量为单因素变量,当切削速度为140 m/min、进给量为0.10 mm/r、背吃刀量为3.0 mm(6号试验)时,切削力、切削温度和表面粗糙度分别为51.856 N,148.2℃,0.799 μm,此时切削力最小、切削温度最低、表面粗糙度最小;以背吃刀量为单因素变量,当切削速度为140 m/min、进给量为0.20 mm/r、背吃刀量为2.0 mm(11号试验)时,切削力、切削温度和表面粗糙度分别为43.528 N,139.0℃,0.985 μm,此时切削力最小、切削温度最低、表面粗糙度最小。综合考虑切削工艺参数对切削力、切削温度和表面粗糙度的影响关系,选择切削速度为140 m/min、进给量为0.2 mm/r、背吃刀量为3.0 mm。

## 2.2 响应面法分析

依据单因素试验选择的切削速度为140 m/min、进给量为0.2 mm/r、背吃刀量为3.0 mm,同时依据相关文献<sup>[12-13]</sup>、现有机床以及自制材料等因素,为进一步研究切削工艺参数对切削性能的影响,采用表2的方案进行响应面法试验。

### (1) 模型建立及显著性分析。

响应面法本质上是一种统计优化方法,不仅考

虑了试验随机误差,而且能够将复杂的未知函数关系在小区域内用简单的一次或二次多项式模型来拟合,可以获得精度高、预测性好的模型,从而分析不同因素之间对试验结果的相互影响规律<sup>[12-18]</sup>。依据单因素试验结果以及相关文献<sup>[19-20]</sup>,为进一步探索切削工艺参数间的交互作用对材料切削性能的影响规律,采用响应面法的因素与水平见表2,试验方案及结果见表3。

表2 响应面法的因素与水平

| 因素                                     | 水平  |     |     |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|
|                                        | -1  | 0   | 1   |
| $X_1/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 80  | 140 | 200 |
| $X_2/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$  | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| $X_3/\text{mm}$                        | 2.0 | 3.0 | 4.0 |

表3 响应面法设计方案及结果

| 试验号 | $X_1/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | $X_2/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$ | $X_3/\text{mm}$ | $Y_1/\text{N}$ | $Y_2/^\circ\text{C}$ | $Y_3/\mu\text{m}$ |
|-----|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|----------------|----------------------|-------------------|
| 1   | 80                                     | 0.2                                   | 4               | 124.142        | 159.5                | 1.120             |
| 2   | 140                                    | 0.3                                   | 2               | 84.890         | 165.4                | 1.188             |
| 3   | 200                                    | 0.3                                   | 3               | 110.859        | 204.1                | 1.389             |
| 4   | 140                                    | 0.1                                   | 2               | 18.310         | 115.1                | 1.307             |
| 5   | 200                                    | 0.1                                   | 3               | 51.222         | 171.6                | 1.191             |
| 6   | 80                                     | 0.2                                   | 2               | 68.955         | 129.3                | 0.915             |
| 7   | 140                                    | 0.2                                   | 3               | 88.549         | 178.3                | 1.129             |
| 8   | 140                                    | 0.3                                   | 4               | 135.857        | 199.7                | 1.688             |
| 9   | 140                                    | 0.2                                   | 3               | 91.125         | 175.7                | 1.192             |
| 10  | 140                                    | 0.2                                   | 3               | 92.600         | 176.7                | 1.108             |
| 11  | 80                                     | 0.3                                   | 3               | 136.789        | 163.2                | 1.145             |
| 12  | 200                                    | 0.2                                   | 2               | 60.452         | 168.9                | 1.152             |
| 13  | 80                                     | 0.1                                   | 3               | 48.141         | 118.7                | 0.986             |
| 14  | 140                                    | 0.2                                   | 3               | 91.904         | 178.6                | 1.159             |
| 15  | 140                                    | 0.2                                   | 3               | 91.600         | 175.9                | 1.181             |
| 16  | 140                                    | 0.1                                   | 4               | 64.020         | 163.7                | 1.195             |
| 17  | 200                                    | 0.2                                   | 4               | 103.283        | 215.2                | 1.433             |

采用二次多项式进行拟合,二次多项式如式(1)所示:

$$Y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中:  $Y_i$ ——响应值( $i=1,2,3$ );

$x_i, x_j$ ——设计变量( $j=1,2,3$ );

$a_0$ ——常数;

$a_{ii}, a_{ij}$ ——回归系数;

$k$ ——设计变量个数, $k=3$ 。

采用 Design-Expert 软件,根据式(1)对表3的试验数据进行回归拟合,获得切削速度、进给量和背吃刀量三个试验因素的切削力、切削温度和表面粗糙度真实值预测模型方程分别为式(2)、式(3)和式(4)。对上述回归模型进行方差分析和显著性检验,结果见表4、表5和表6。为了分析模型拟合程度,主要考察方差分析结果中  $F$  值和  $P$  值。 $F$  值是对

试验值与预测值进行  $F$  检验获得,  $P$  值是表示结果可信度的一个递减指标,表示原假设被拒绝的概率,  $F$  值与  $P$  值之间以一定的统计学原理相关联。  $F$  值越大,  $P$  值越小,回归模型越显著<sup>[21-22]</sup>。统计学中可靠显著要求一般是  $P < 0.05$ <sup>[23]</sup>。信噪比一般大于 4 时,表明模型的精密度较高。

$$Y_1 = -155.16141 - 0.063961X_1 + 845.01283X_2 + 67.70934X_3 - 1.20879X_1X_2 - 0.051483X_1X_3 + 13.14250X_2X_3 + 1.25499 \times 10^{-3}X_1^2 - 892.08000X_2^2 - 6.46555X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = -95.52194 + 0.50232X_1 + 779.17500X_2 + 54.40333X_3 - 0.50000X_1X_2 + 0.067083X_1X_3 - 35.75000X_2X_3 - 7.48611 \times 10^{-4}X_1^2 - 994.5000X_2^2 - 6.12000X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 2.18044 - 7.24431 \times 10^{-3}X_1 - 8.17275X_2 - 0.74493X_3 + 1.62500 \times 10^{-3}X_1X_2 + 3.16667 \times 10^{-4}X_1X_3 + 1.53000X_2X_3 - 2.29931 \times 10^{-5}X_1^2 + 10.67250X_2^2 + 0.083975X_3^2 \quad (4)$$

表 4 切削力模型方差分析结果

| 方差源      | 平方和      | 自由度 | 均方       | F 值     | P 值      | 显著性 |
|----------|----------|-----|----------|---------|----------|-----|
| 模型       | 16204.23 | 9   | 1800.47  | 461.01  | < 0.0001 | 显著  |
| $X_1$    | 340.75   | 1   | 340.75   | 87.25   | < 0.0001 |     |
| $X_2$    | 10274.75 | 1   | 10274.75 | 2630.84 | < 0.0001 |     |
| $X_3$    | 4738.27  | 1   | 4738.27  | 1213.23 | < 0.0001 |     |
| $X_1X_2$ | 210.41   | 1   | 210.41   | 53.88   | 0.0002   |     |
| $X_1X_3$ | 38.17    | 1   | 38.17    | 9.77    | 0.0167   |     |
| $X_2X_3$ | 6.91     | 1   | 6.91     | 1.77    | 0.2252   |     |
| $X_1^2$  | 85.94    | 1   | 85.94    | 22.01   | 0.0022   |     |
| $X_2^2$  | 335.08   | 1   | 335.08   | 85.8    | < 0.0001 |     |
| $X_3^2$  | 176.01   | 1   | 176.01   | 45.07   | 0.0003   |     |
| 残差       | 27.34    | 7   | 3.91     |         |          |     |
| 失拟项      | 17.7     | 3   | 5.9      | 2.45    | 0.2036   | 不显著 |
| 误差       | 9.64     | 4   | 2.41     |         |          |     |
| 模型与残差之和  | 16231.57 | 16  |          |         |          |     |

表 5 切削温度模型方差分析结果

| 方差源      | 平方和      | 自由度 | 均方      | F 值    | F 值      | 显著性 |
|----------|----------|-----|---------|--------|----------|-----|
| 模型       | 11788.47 | 9   | 1309.83 | 391.09 | < 0.0001 | 显著  |
| $X_1$    | 4469.85  | 1   | 4469.85 | 1334.6 | < 0.0001 |     |
| $X_2$    | 3333.36  | 1   | 3333.36 | 995.27 | < 0.0001 |     |
| $X_3$    | 3176.04  | 1   | 3176.04 | 948.3  | < 0.0001 |     |
| $X_1X_2$ | 36       | 1   | 36      | 10.75  | 0.0135   |     |
| $X_1X_3$ | 64.8     | 1   | 64.8    | 19.35  | 0.0032   |     |
| $X_2X_3$ | 51.12    | 1   | 51.12   | 15.26  | 0.0058   |     |
| $X_1^2$  | 30.58    | 1   | 30.58   | 9.13   | 0.0193   |     |
| $X_2^2$  | 416.43   | 1   | 416.43  | 124.34 | < 0.0001 |     |
| $X_3^2$  | 157.7    | 1   | 157.7   | 47.09  | 0.0002   |     |
| 残差       | 23.44    | 7   | 3.35    |        |          |     |
| 失拟项      | 16.21    | 3   | 5.4     | 2.99   | 0.1589   | 不显著 |
| 误差       | 7.23     | 4   | 1.81    |        |          |     |
| 模型与残差之和  | 11811.92 | 16  |         |        |          |     |

表 6 表面粗糙度模型方差分析结果

| 方差源      | 平方和                   | 自由度 | 均方                    | F 值    | P 值      | 显著性 |
|----------|-----------------------|-----|-----------------------|--------|----------|-----|
| 模型       | 0.49                  | 9   | 0.054                 | 50.78  | < 0.0001 | 显著  |
| $X_1$    | 0.12                  | 1   | 0.12                  | 117.21 | < 0.0001 |     |
| $X_2$    | 0.067                 | 1   | 0.067                 | 62.76  | < 0.0001 |     |
| $X_3$    | 0.095                 | 1   | 0.095                 | 89.71  | < 0.0001 |     |
| $X_1X_2$ | $3.80 \times 10^{-4}$ | 1   | $3.80 \times 10^{-4}$ | 0.36   | 0.5689   |     |
| $X_1X_3$ | $1.44 \times 10^{-3}$ | 1   | $1.44 \times 10^{-3}$ | 1.36   | 0.2823   |     |
| $X_2X_3$ | 0.094                 | 1   | 0.094                 | 87.97  | < 0.0001 |     |
| $X_1^2$  | 0.029                 | 1   | 0.029                 | 27.1   | 0.0012   |     |
| $X_2^2$  | 0.048                 | 1   | 0.048                 | 45.06  | 0.0003   |     |
| $X_3^2$  | 0.03                  | 1   | 0.03                  | 27.9   | 0.0011   |     |
| 残差       | $7.45 \times 10^{-3}$ | 7   | $1.06 \times 10^{-3}$ |        |          |     |
| 失拟项      | $2.51 \times 10^{-3}$ | 3   | $8.37 \times 10^{-4}$ | 0.68   | 0.6096   | 不显著 |
| 误差       | $4.94 \times 10^{-3}$ | 4   | $1.24 \times 10^{-3}$ |        |          |     |
| 模型与残差之和  | 0.49                  | 16  |                       |        |          |     |

由表 4 可知,切削力模型的  $F=461.01$ ,  $P < 0.0001 < 0.05$ ,表明模型非常显著;切削力模型失拟项的  $F=2.45$ ,  $P=0.2036 > 0.05$ ,表明模型的失拟项不显著,说明模型合理,可以用模型的响应值代替试验值。另外,模型的确定系数  $R^2=0.9983$ ,校正决定系数  $R_{adj}^2=0.9962$ ,表明模型的拟合度较高;模型的信噪比为  $79.402 > 4$ ,表明模型的精密度较高,可以利用响应值预测实际值。其中,一次项  $X_1$ ,  $X_2$  和  $X_3$  的  $P$  值都  $< 0.0001$ ,说明  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  都为显著影响因素,三个因素对切削力的影响顺序依次为  $X_2 > X_3 > X_1$ ;二次项  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  的  $P$  值分别为  $0.0022$ ,  $< 0.0001$ ,  $0.0003$ ,说明  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  的曲面效应都显著。

由表 5 可知,切削温度模型的  $F=391.09$ ,  $P < 0.0001 < 0.05$ ,表明模型极其显著;切削温度模型失拟项的  $F=2.99$ ,  $P=0.1589 > 0.05$ ,表明模型的失拟项不显著,说明模型合理,可以用模型的响应值代替试验值。另外,模型的确定系数  $R^2=0.9980$ ,校正决定系数  $R_{adj}^2=0.9955$ ,表明模型的拟合度较高;模型的信噪比为  $70.354 > 4$ ,表明模型的精密度较高,可以利用响应值预测实际值。其中,一次项  $X_1$ ,  $X_2$  和  $X_3$  的  $P$  值都  $< 0.0001$ ,说明  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  都为显著影响因素,三个因素对切削温度的影响顺序依次为  $X_1 > X_2 > X_3$ ;二次项  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  的  $P$  值分别为  $0.0193$ ,  $< 0.0001$ ,  $0.0002$ ,说明  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  的曲面效应都显著。

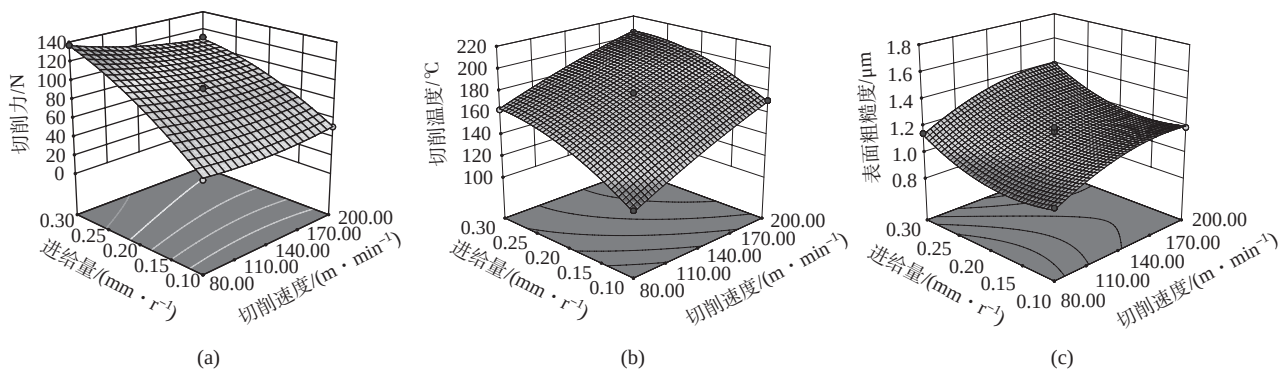
由表 6 可知,表面粗糙度模型的  $F=50.78$ ,  $P < 0.0001 < 0.05$ ,表明模型非常显著;表面粗糙度模型失拟项的  $F=0.68$ ,  $P=0.6090 > 0.05$ ,表明模型的失拟项不显著,说明模型合理,可以用模型的响应值代替试验值。另外,模型的确定系数  $R^2=0.9849$ ,校

正决定系数  $R_{adj}^2=0.9655$ , 表明模型的拟合度好; 模型的信噪比为  $30.303 > 4$ , 表明模型的精密度较高, 可以利用响应值预测实际值。其中, 一次项  $X_1$ ,  $X_2$  和  $X_3$  的  $P$  值都  $< 0.0001$ , 说明  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  都为显著影响因素, 三个因素对表面粗糙度的影响顺序依次为  $X_1 > X_3 > X_2$ ; 二次项  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  的  $P$  值分别为  $0.0012, 0.0003, 0.0011$ , 说明  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  的曲面效应都显著。

### (2) 切削速度与进给量的交互作用。

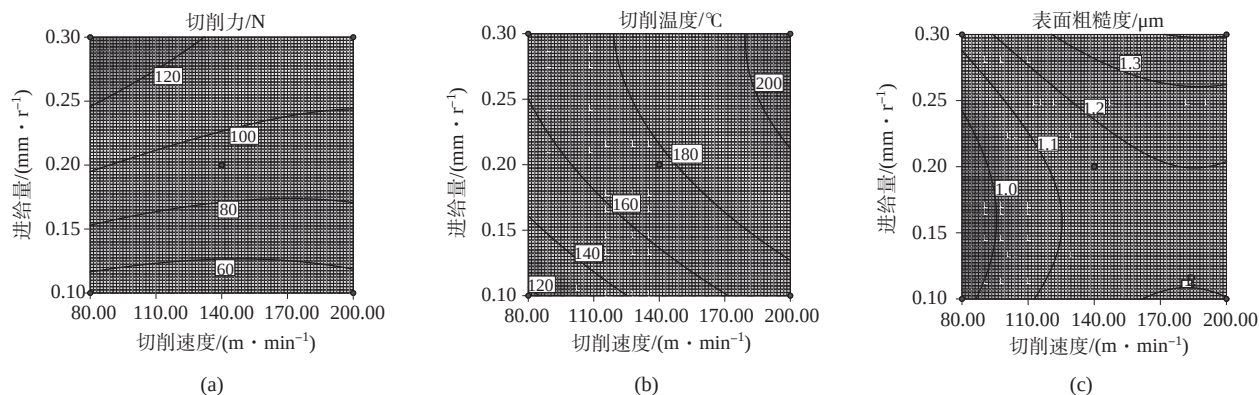
切削速度与进给量对切削力、切削温度和表面粗糙度影响的响应面图和等高线图分别如图 1、图 2

所示。由图 1 可知, 在进给量不变条件下, 随着切削速度的逐渐增加, 切削力逐渐变小, 切削温度逐渐升高, 表面粗糙度逐渐变大; 在切削速度不变条件下, 随着进给量的逐渐增加, 切削力逐渐变大, 切削温度逐渐升高, 表面粗糙度逐渐变大。由图 2a 可知, 由于沿进给量变化方向的等高线密度大于沿切削速度变化方向的等高线密度, 故进给量对切削力的影响大于切削速度的影响; 由图 2b 和图 2c 可知, 由于沿切削速度变化方向的等高线密度大于沿进给量变化方向的等高线密度, 故切削速度对切削温度和表面粗糙度的影响大于进给量的影响。



a—切削力的 3D 响应面; b—切削温度的 3D 响应面; c—表面粗糙度的 3D 响应面

图 1 切削速度和进给量交互作用对切削性能的 3D 响应面



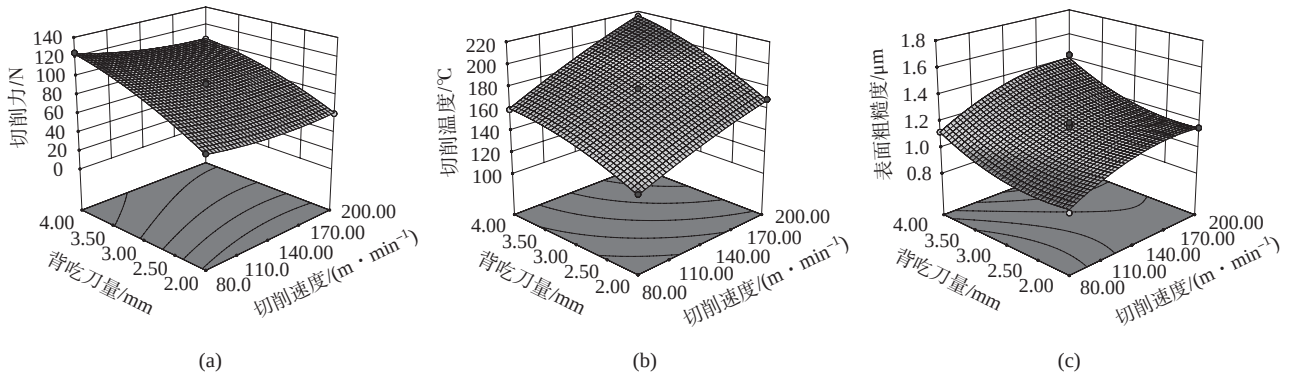
a—切削力的等高线图; b—切削温度的等高线图; c—表面粗糙度的等高线图

图 2 切削速度和进给量交互作用对切削性能的等高线图

### (3) 切削速度与背吃刀量的交互作用。

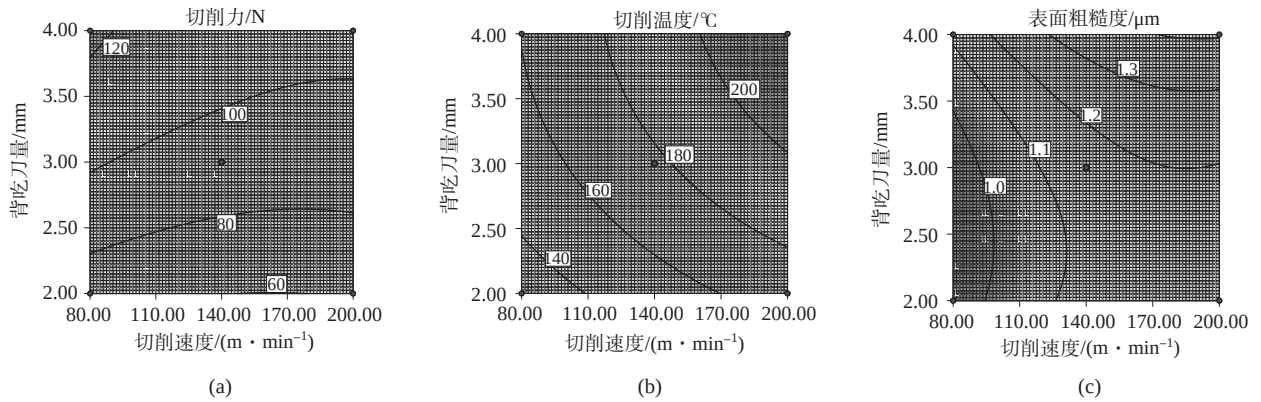
切削速度与背吃刀量对切削力、切削温度和表面粗糙度影响的响应面图和等高线图分别如图 3、图 4 所示。由图 3 可知, 在背吃刀量不变条件下, 随着切削速度逐渐增加, 切削力逐渐变小, 切削温度逐渐升高, 表面粗糙度逐渐变大; 在切削速度不变条件下, 随着背吃刀量逐渐增加, 切削力逐渐变大, 切

削温度逐渐升高, 表面粗糙度逐渐变大。由图 4a 可知, 由于沿背吃刀量变化方向的等高线密度大于沿切削速度变化方向的等高线密度, 故背吃刀量对切削力的影响大于切削速度的影响; 由图 4b 和图 4c 可知, 由于沿切削速度变化方向的等高线密度大于沿背吃刀量变化方向的等高线密度, 切削速度对切削温度和表面粗糙度的影响略大于进给量的影响。



a—切削力的 3D 响应面; b—切削温度的 3D 响应面; c—表面粗糙度的 3D 响应面

图3 切削速度和背吃刀量交互作用对切削性能的 3D 响应面



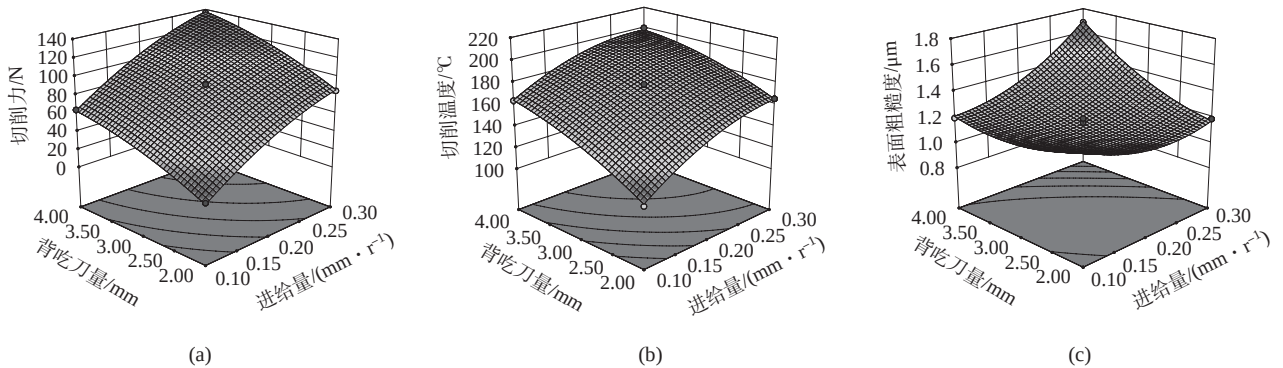
a—切削力的等高线图; b—切削温度的等高线图; c—表面粗糙度的等高线图

图4 切削速度和背吃刀量交互作用对切削性能的等高线图

#### (4) 进给量与背吃刀量的交互作用。

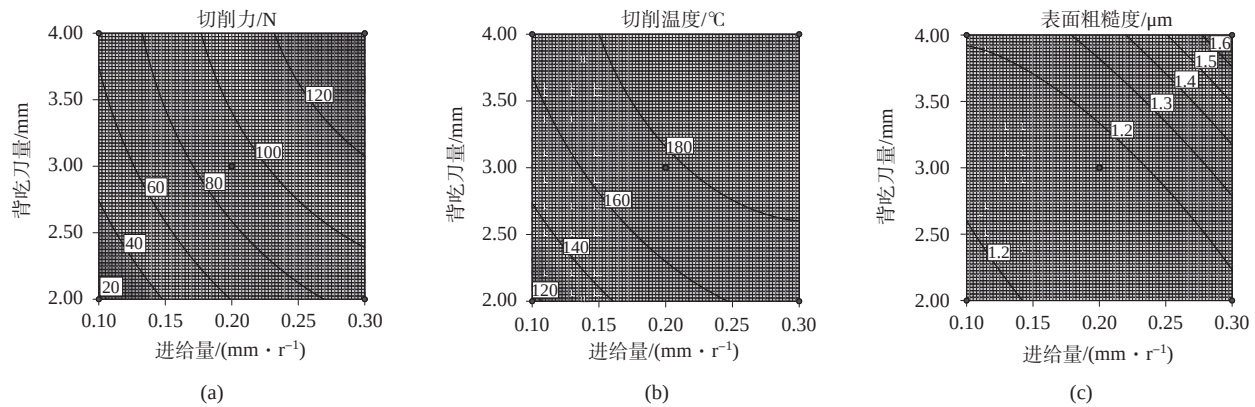
进给量与背吃刀量对切削力、切削温度和表面粗糙度影响的响应面图和等高线图分别如图5、图6所示。由图5可知,在进给量不变条件下,随着背吃刀量逐渐增加,切削力逐渐变大,切削温度逐渐升高,表面粗糙度逐渐变大;在背吃刀量不变条件下,随着进给量逐渐增加,切削力逐渐变大,切削温度逐

渐升高,表面粗糙度逐渐变大。由图6a和图6b可知,由于沿进给量变化方向的等高线密度大于沿背吃刀量变化方向的等高线密度,故进给量对切削力和切削温度的影响大于背吃刀量的影响;由图6c和表6可知,由于沿背吃刀量变化方向的等高线密度略大于沿着进给量变化方向的等高线密度,故背吃刀量对表面粗糙度的影响大于进给量的影响。



a—切削力的 3D 响应面; b—切削温度的 3D 响应面; c—表面粗糙度的 3D 响应面

图5 进给量和背吃刀量交互作用对切削性能的 3D 响应面



a—切削力的等高线图; b—切削温度的等高线图; c—表面粗糙度的等高线图

图6 进给量和背吃刀量交互作用对切削性能的等高线图

### 2.3 优化预测与试验验证

综合考虑切削力、切削温度和表面粗糙度的影响,以切削力、切削温度和表面粗糙度三个响应取得最小值为目标,利用 Design-Expert 软件中 Optimization 对切削工艺参数进行优化求解,其最优切削工艺参数为:切削速度 80.00 m/min、进给量 0.10 mm/r、背吃刀量 2.19 mm,对其进行试验验证,获得的预测与试验结果见表 7,可以看出,预测模型相对误差较小,验证了建立预测模型的可靠性。

表7 预测优化与验证

| 项目      | 切削力 /N | 切削温度 /°C | 表面粗糙度 /μm |
|---------|--------|----------|-----------|
| 预测值     | 24.698 | 97.5     | 1.077     |
| 试验值     | 25.362 | 99.1     | 1.108     |
| 相对误差 /% | 2.69   | -1.64    | -2.88     |

### 3 结论

(1) 利用单因素试验方法研究了切削工艺参数对增韧 PA66 切削力、切削温度和表面粗糙度的影响,研究表明:随着切削速度的逐渐增加,切削力逐渐降低,切削温度逐渐升高,表面粗糙度逐渐增大;随着进给量和背吃刀量的逐渐增加,切削力逐渐增大,切削温度逐渐升高,表面粗糙度逐渐增大。

(2) 运用 Design-Expert 软件建立试验因素与响应值之间的数学模型,通过方差分析得到车削加工中增韧 PA66 的切削力、切削温度和表面粗糙度影响的主次顺序分别为:进给量>背吃刀量>切削速度,切削速度>进给量>背吃刀量,切削速度>背吃刀量>进给量。通过分析多因素之间的响应面与等高线得到因素之间的交互影响规律。

(3) 综合考虑切削性能的影响规律,以最小切削力、切削温度和表面粗糙度为目标进行切削工艺参数优化,并进行试验验证,所得结果相对误差较小,说明模型比较准确。

### 参考文献

- [1] 王秀秀,郭红,关宏宇,等. PA66 的低温增韧改性[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(12):26-30.  
Wang Xiuxiu, Guo Hong, Guan Hongyu, et al. Low temperature toughening of PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):26-30.
- [2] 徐宁. 聚酰胺 66 (PA66) 的低温增韧改性研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2016.  
Xu Ning. Toughening modification study of polyamide 66 (PA66) at low temperature [D]. Shenyang:Liaoning University, 2016.
- [3] 刘云斌. 纤维增强尼龙复合材料的韧性研究进展[J]. 塑料科技, 2021, 49(8):117-120.  
Liu Yunbin. Research advance in the toughness of fiber reinforced nylon composites[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(8): 117-120.
- [4] 王正宏,张敏,黄宁选,等. 尼龙 66 改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(1):121-125.  
Wang Zhenghong, Zhang Min, Huang Ningxuan, et al. Research progress on modification of nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(1):121-125.
- [5] 马小丰,金旺,刘莉莉,等. 增韧尼龙 66 的制备及耐低温性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(6):38-42.  
Ma Xiaofeng, Jin Wang, Liu Lili, et al. Preparation and low temperature properties of toughened polyamide 66[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6):38-42.
- [6] 张伟,吴玉成,孙圳. 高流动性增韧尼龙 66 材料的研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(6):36-38.  
Zhang Wei, Wu Yucheng, Sun Zhen. Study on toughened nylon 66 with high flowability[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(6):36-38.
- [7] 贾振元,毕广健,王福吉,等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23):199-208.  
Jia Zhenyuan, Bi Guangjian, Wang Fuji, et al. The research of machining mechanism of carbon fiber reinforced plastic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23):199-208.

- [8] 秦旭达,朱圣富,李士鹏,等.不同纤维方向角时碳纤维增强树脂基复合材料切削力建模[J].宇航材料工艺,2020,50(6):31-40.  
Qin Xuda, Zhu Shengfu, Li Shipeng, et al. Modeling of cutting force for carbon fiber reinforced plastic with different fiber orientation angle[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(6):31-40.
- [9] 李聪波,肖溱鸽,李丽,等.基于田口法和响应面法的数控铣削工艺参数能效优化方法[J].计算机集成制造系统,2015,21(12):3182-3191.  
Li Congbo, Xiao Qingge, Li Li, et al. Optimization method of NC milling parameters for energy efficiency based on Taguchi and RSM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(12):3182-3191.
- [10] 王永鑫,张昌明.基于响应面法 AerMet100 超高强度钢钻削预测与优化试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(36):123-127.  
Wang Yongxin, Zhang Changming. Experimental study on prediction and optimization of drilling AerMet100 ultra high strength steel based on response surface method[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36):123-127.
- [11] 孙捷夫,孔繁霖,杨巍,等.基于响应面法的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢车削参数优化[J].机床与液压,2021,49(13):65-69.  
Sun Jiefu, Kong Fanli, Yang Wei, et al. Optimization of turning Parameters of 1Cr18Ni9Ti stainless steel based on response surface method[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(13):65-69.
- [12] 高贵,龚俊,李瑞红,等.表面结构对 PTFE 复合材料摩擦磨损行为的影响[J].摩擦学学报,2020,40(6):697-706.  
Gao Gui, Gong Jun, Li Ruihong, et al. Effect of surface texture on friction and wear behavior of PTFE composites[J]. Tribology, 2020, 40(6):697-706.
- [13] Yücel E, Yücel Y, Durak M. Process optimization for window material CdS thin films grown by a successive ionic layer adsorption and reaction method using response surface methodology[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 664:530-537.
- [14] 王永菲,王成国.响应面法的理论与应用[J].中央民族大学学报:自然科学版,2005,14(3):236-240.  
Wang Yongfei, Wang Chengguo. The application of response surface methodology[J]. Journal of the Central University for Nationalities: Natural Sciences Edition, 2005, 14(3):236-240.
- [15] 崔丽霞,王相友,许英超.基于响应面法的马铃薯分选机参数优化及试验[J].中国农机化学报,2021,42(11):80-88.  
Cui Lixia, Wang Xiangyou, Xu Yingchao. Parameter optimization and experiment of potato sorter based on response surface method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11):80-88.
- [16] 陈新欣,关健.基于响应面法的激光烧结成型工艺参数优化[J].激光杂志,2020,41(12):131-135.  
Chen Xinxin, Guan Jian. Optimization of laser sintering process parameters based on response surface method[J]. Laser Journal, 2020, 41(12):131-135.
- [17] 嵇友迪,龚红英,贾星鹏,等.基于响应面与遗传算法的汽车油箱托盘仿真优化[J].塑性工程学报,2021,28(12):29-35.  
Ji Youdi, Gong Hongying, Jia Xingpeng, et al. Simulation and optimization of automobile fuel tank tray based on response surface and genetic algorithm[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(12):29-35.
- [18] 崔磊,刘静,李兰云.基于响应面法的双层 316L/Inconel625 波纹管液压胀形工艺参数优化[J].兵器材料科学与工程,2018,41(6):19-26.  
Cui Lei, Liu Jing, Li Lanyun. Optimization of hydroforming process parameters of bi-layered 316L/Inconel625 bellows based on response surface method[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(6):19-26.
- [19] 康文利,范孝良.工程塑料的切削性能研究[J].工具技术,2003,37(10):28-30.  
Kang Wenli, Fan Xiaoliang. Research on machinability of engineering plastics[J]. Tool Engineering, 2003, 37(10):28-30.
- [20] 白清顺,姚英学.加工复合地板耐磨层时 PCD 刀具切削参数的研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2005(3):16-19.  
Bai Qingshun, Yao Yingxue. Research on cutting parameters of PCD tool when machining wear resistant layer of high pressure laminated flooring[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2005(3):16-19.
- [21] 邹东雷,李婷婷,高梦薇,等.基于响应面的可见光催化材料制备与优化[J].吉林大学学报:地球科学版,2015,45(6):1833-1838.  
Zou Donglei, Li Tingting, Gao Mengwei, et al. Preparation and optimization of the photocatalytic materials under visible light with response surface methodology[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(6):1833-1838.
- [22] 贾晓凤,刘玉慧.响应曲面法优化超声振动辅助 ELID 复合内圆磨削 ZTA 陶瓷的边界损伤长度[J].人工晶体学报,2021,50(5):938-946.  
Jia Xiaofeng, Liu Yuhui. Optimization of boundary damage length in ultrasonic vibration assisted electrolytic in-process dressing internal grinding of ZTA ceramics by response surface methodology[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(5):938-946.
- [23] 徐祥,杨明,梁益龙,等.响应面对一种新型摩擦材料的性能优化及其磨损机理[J].材料工程,2018,46(9):101-108.  
Xu Xiang, Yang Ming, Liang Yilong, et al. Optimization of tribological properties and its wear mechanism of a new type friction materials with response surface methodology[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(9):101-108.