

# 基于 GRA-RSM 的微铣削表面质量 多目标参数优化

李文琴, 于占江, 许金凯, 江海宇, 于化东

(长春理工大学, 长春 130022)

**摘 要:** **目的** 建立表面粗糙度和残余应力的灰色关联度预测模型, 确定微铣削工艺参数优化方案, 在降低表面粗糙度的基础上, 最大化减小残余应力。**方法** 首先, 采用 BBD 试验方法设计三因素三水平微铣削试验, 测量工件表面的表面粗糙度和残余应力; 其次, 基于灰色关联分析 (Grey Correlation Analysis, GRA) 方法, 以表面粗糙度和残余应力的信噪比为性能指标, 将多目标转化为单一目标进行优化; 再次, 在主成分分析的基础上, 建立灰色关联分析与工艺参数之间的二阶回归预测模型; 最后, 利用响应面法 (Response Surface Method, RSM) 获得了最优参数组合。**结果** 构建的灰色关联度预测模型的平均误差为 6.9%, 优化结果提高了 3.91%。实验结果表明, 最优工艺参数组合为: 主轴转速 20 000 r/min, 轴向切深 60  $\mu\text{m}$ , 进给速度 285.8 mm/min。**结论** 灰色关联度预测模型的拟合度良好, 可靠性和准确性较高。基于 GRA-RSM 优化方法获得的工艺参数组合可以实现同时使表面粗糙度和残余压应力达到理想效果的最优解。

**关键词:** 表面粗糙度; 残余应力; 微铣削加工参数; 灰色关联度; 响应面法

**中图分类号:** TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0370-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.043

## Multi-objective Parameters Optimization of Micro-milling Surface Quality Based on GRA-RSM

LI Wen-qin, YU Zhan-jiang, XU Jin-kai, JIANG Hai-yu, YU Hua-dong

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a grey correlation degree prediction model of surface roughness and residual stress and determine the optimization scheme of micro-milling process parameters, to minimize residual stress on the basis of reducing surface roughness. Firstly, a three-factor three-level micro-milling test was designed by BBD test method, and the surface

收稿日期: 2019-08-12; 修订日期: 2020-08-07

Received: 2019-08-12; Revised: 2020-08-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1107403); 中国“111”计划 (D17017); 吉林省科技发展规划 (20190101005JH, 20180201057GX); 长春理工大学青年科学基金 (XQNJJ-2018-09)

**Fund:** Supported by the National Key Research and Development Plan Project (2018YFB1107403), the “111” Project of China (D17017), Jilin Province Scientific and Technological Development Program (20190101005JH, 20180201057GX) and Science Fund for Youth Scholar of Changchun University of Science Technology (XQNJJ-2018-09)

作者简介: 李文琴 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为精密传感与测试技术。

**Biography:** LI Wen-qin (1995—), Female, Master, Research focus: precision sensing and testing technology.

通讯作者: 于化东 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术及装备技术。邮箱: yuhudong@cust.edu.cn

**Corresponding author:** YU Hua-dong (1961—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision ultra-precision machining technology and equipment technology. E-mail: yuhudong@cust.edu.cn

引文格式: 李文琴, 于占江, 许金凯, 等. 基于 GRA-RSM 的微铣削表面质量多目标参数优化[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 370-377.

LI Wen-qin, YU Zhan-jiang, XU Jin-kai, et al. Multi-objective parameters optimization of micro-milling surface quality based on GRA-RSM[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 370-377.

roughness and residual stress of workpiece were measured. Secondly, taking the signal-to-noise ratio of surface roughness and residual stress as performance indexes, multiple targets were converted into a single target for optimization based on grey correlation analysis. Thirdly, on the basis of principal component analysis, a second-order regression prediction model between grey correlation analysis (GRA) and process parameters was established. Finally, the response surface method (RSM) was used to obtain the optimal combination of parameters. The average error of grey correlation degree prediction model was 6.9% and the optimized results were improved by 3.91%. According to the experimental results, the optimal processing parameters were as follows: the spindle speed of 20 000 r/min, the axial cutting depth of 60  $\mu\text{m}$ , and the feed speed of 285.8 mm/min. Therefore, the grey correlation degree prediction model has good fitting degree and high reliability and accuracy, and the combination of process parameters based on the method proposed in this paper can achieve the optimal solution of surface roughness and residual compressive stress at the same time.

**KEY WORDS:** surface roughness; residual stress; micro-milling parameters; grey correlation degree; response surface method

微铣削是微制造业中的一种先进制造技术,具有可加工三维曲面的独特优势<sup>[1-2]</sup>。微铣削相较于常规铣削,其加工工件和使用的刀具尺寸显著减小,导致表面形貌更加复杂,从而使表面质量更难控制,直接对零部件产生影响,如耐磨性、使用寿命以及强度和刚度等<sup>[3-4]</sup>。

作为表面质量的典型代表值,表面粗糙度(Surface Roughness, SR)<sup>[5]</sup>和残余应力(Residual Stress, RS)<sup>[6]</sup>分别可以用来测试成品的形貌特征和应力性能。主轴转速、轴向切深和进给速度等工艺参数对 SR 和 RS 均有影响<sup>[7-8]</sup>,但由于工艺参数对二者的影响不同,难以同时达到最优。高奇等人<sup>[9]</sup>通过对微铣削进行正交试验设计,研究了单晶  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基高温合金的表面粗糙度,分析了不同参数对加工表面质量的影响,结果显示影响主次顺序为铣削深度>主轴转速>进给速度,并获得了优化工艺方案。Al-Zubaidi 等人<sup>[10]</sup>基于 GSA 算法,建立了回归模型,对铣削的切削参数(切削深度、进给量和切削速度)进行了优化,获得了最小的 Ti6Al4V 合金表面粗糙度。Burlacu 等人<sup>[11]</sup>研究了独立参数对表面粗糙度的影响,得到了表面粗糙度参数  $R_a$  与工艺变量之间的关系,建立了数学优化预测模型,并验证了模型的准确性。龚军振等人<sup>[12]</sup>分析了铣削精加工工艺参数对 Al6061 工件表层残余应力的影响,为机加工残余应力的控制提供了依据。Peng 等人<sup>[13]</sup>构建了一种考虑刀具刃口半径、材料强化效应、初始应力的微铣削残余应力预测模型,讨论了刀刃半径、前角、每齿进给量和主轴转速对残余应力的影响,这对工程应用具有指导意义。由于微铣削使用的刀具和加工工件较小,其表面质量的影响因素众多,上述研究均单一地关注表面粗糙度或残余应力。目前关于微铣削工艺参数对于表面粗糙度和残余应力的多目标参量影响研究鲜见,因此非常有必要开展相应方面的研究,来优化微铣削工艺,提高微铣削质量。

响应曲面法由 Box 和 Wilson<sup>[14]</sup>提出,是统计方法和数学方法的结合,通过拟合多个影响因素与响应变量的数学关系,建立二阶响应曲面模型,从而在实

验设计规划范围内,确定最佳影响因素组合,以获得最优响应。响应曲面法有多种实验设计类型,最常用的是 Central Composite Design (CCD) 和 Box-Behnken Design (BBD),适用于评估因素的非线性影响,可以对多个影响因素及其交互作用与响应变量之间的关系进行定量分析和评价,现已成功地用于开发、改进和优化过程<sup>[15]</sup>。杨海吉等人<sup>[16]</sup>针对小直径钛合金细长管内表面磁力研磨进行了实验,利用响应面法分析了工件转速、磨粒粒径和研磨液用量的交互作用对研磨效率的影响规律,根据优化后的加工参数组合,获得了最佳效果。Bohlouli 等人<sup>[17]</sup>设计了 CCD 实验,研究了温度、时间和  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$  质量比对钨浸出率的影响,得到了最佳实验条件,结果表明,二阶响应曲面预测模型的预测结果与实验数据吻合较好,温度对钨浸出率的影响相比于其他影响因素更显著。Sindhu 等人<sup>[18]</sup>利用响应曲面法研究了刀具进给速度、刀具转速和超声功率及其相互作用对石英玻璃的材料去除率和表面粗糙度的影响,分析了不同加工参数下的材料去除机理,经响应曲面法建模,分析得到了同时使石英玻璃的材料去除率达到最大和表面粗糙度达到最小的最佳加工参数组合。

灰色关联分析用于判断多因素之间的关联性,适用于多目标参量分析。本文采用 BBD 试验设计方法,研究了微铣削过程中的主要切削工艺参数对 7075 铝合金表面粗糙度和残余应力的影响规律,基于田口法、灰色关联分析和响应面法实现多目标参数优化,构建灰色关联度(Grey Relational Grade, GRG)预测模型,从而得出最佳工艺参数,获得了微铣削加工方式中更小的表面粗糙度和残余应力。

## 1 试验

### 1.1 试验设计

试验中使用的材料为 7075 铝合金块,体积参数为 16 mm×16 mm×20 mm。为了防止刀具磨损对加工表面产生影响,每组试验均使用全新的刀具,刀具选

用直径为 1 mm 的双刃硬质合金端铣刀,螺旋角为 30°,切削方式为干切削。试验在 408S2 五轴立式加工中心(WILLEMIN-MACODEL,瑞士)上进行。图 1 所示为微铣削试验现场。

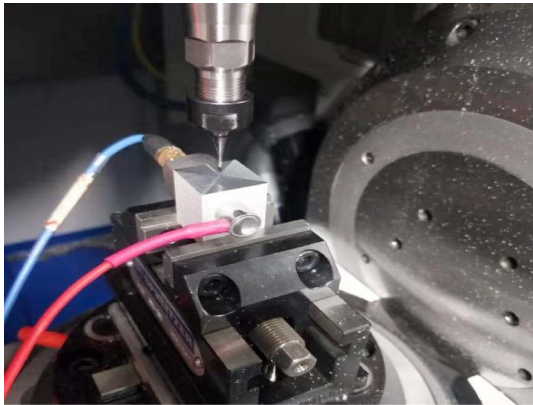


图 1 微铣削试验现场  
Fig.1 Micro-milling test site

BBD 是最常用的响应面优化法之一<sup>[19-21]</sup>。在影响因素数量相同的情况下,BBD 比 CCD 减少了试验次数,降低了试验成本,因此采用 BBD 方法进行三因素三水平试验。选取的加工参数为:主轴转速  $n$  (r/min)、轴向切深  $a_p$  ( $\mu\text{m}$ )和进给速度  $v_f$  (mm/min)。

鉴于刀具振动会产生不可避免的随机误差,为了避免刀具振动对表面形貌的显著影响,根据机床性能、相关手册并结合实际经验,确定的参数水平如表 1 所示。

表 1 试验因素及其水平分布  
Tab.1 Test factors and level distribution

Level	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	$v_f/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
1	10 000	20	100
2	15 000	40	200
3	20 000	60	300

1.2 测量

表面粗糙度  $Ra$  的测量使用 MarSurf LD 120 表面粗糙度轮廓测量仪(德国马尔公司,德国);使用 X 射线残余应力分析仪(STRESSTECH OY,芬兰)进行残余应力  $\sigma$  的测量。在微铣削后的表面均匀地选择三个测量点分别进行表面粗糙度(取样长度为 5.6 mm)和残余应力的测量,取均值作为最后的测量结果。在对目标进行分析前,需将表面粗糙度  $Ra$  和残余应力  $\sigma$  转化为信噪比  $S/N$  (Signal-to-Noise Ratio,  $S/N$ ),试验参数安排、测量及转化结果如表 2 所示,其中第 0 组试验为微铣削加工前表面的粗糙度和残余应力。

表 2 试验参数安排及测量结果  
Tab.2 Arrangement of test parameters and measurement results

No.	Experiment parameters			SR		RS	
	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	$v_f/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$Ra/\mu\text{m}$	$S/N$	$\sigma/\text{MPa}$	$S/N$
0				0.8430		-67.1	
1	20 000	40	300	0.8493	1.4184	-71.1	-37.8826
2	15 000	40	200	1.0611	-0.5153	-56.3	-37.1707
3	20 000	60	200	0.8980	0.9345	-68.7	-36.7812
4	15 000	20	300	0.9910	0.0785	-67.4	-36.8771
5	10 000	40	100	0.9893	0.0931	-74.9	-37.4935
6	20 000	20	200	0.5910	4.5683	-89.2	-38.6933
7	15 000	60	100	1.0540	-0.4568	-50.9	-38.6799
8	20 000	40	100	0.9623	0.3335	-81.9	-38.1015
9	15 000	40	200	1.0623	-0.5245	-49.3	-37.1587
10	15 000	40	200	1.0605	-0.5105	-50.2	-37.2151
11	10 000	60	200	0.7310	2.7217	-83.1	-38.3972
12	15 000	40	200	1.0597	-0.5037	-53.7	-37.2068
13	15 000	60	300	0.6353	3.9400	-75.9	-37.5186
14	10 000	40	300	2.0037	-6.0365	-84.6	-38.8369
15	15 000	40	200	1.0621	-0.5233	-55.4	-37.2605
16	10 000	20	200	0.9567	0.3848	-77.5	-37.8121
17	15 000	20	100	1.0987	-0.8173	-85.5	-38.2974

1.3 多目标优化实现方法

表面粗糙度和残余应力是两个不同量纲的目标

参数,为了使表面粗糙度和残余压应力同时达到理想效果,本文集田口法<sup>[22-23]</sup>、灰色关联分析<sup>[24]</sup>和响应面法为一体,将多目标转换为单一目标进行参数优化<sup>[25-26]</sup>。

首先, 根据田口法的“望大特性”, 通过计算, 将表面粗糙度和残余应力的信噪比作为性能指标; 其次, 利用主成分分析法计算多目标的权重, 基于灰色关联度, 将微铣削的多目标优化问题简单化为单目标优化问题; 最后, 利用响应面法建立微铣削工艺参数与灰色关联度之间的映射关系。具体过程如下:

1) 信噪比计算。田口法是一种常用的以信噪比分析为主要工具的试验优化方法, 根据田口法将 SR 和 RS 转化为信噪比, 量化噪声对质量特性的影响。对于微铣削加工, 表面粗糙度和残余压应力均越小越好, 其信噪比可描述为:

$$\eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^2 \right) \quad (1)$$

式中,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $A_i$  为目标值, 即第  $i$  次试验的表面粗糙度  $Ra_i$  或残余应力  $\sigma_i$ 。

2) 信噪比标准化处理。灰色关联分析是根据曲线间几何相似程度来判断其联系是否紧密, 在进行灰色关联分析时, 需要确定参考序列和比较序列。选取信噪比的原始序列为参考序列, 记为  $x_i^0(k)$ , 对 SR 和 RS 的信噪比分别进行标准化处理 (见表 2), 并将其作为比较序列, 记为  $x_i^*(k)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $k=1, 2, \dots, n$ ,  $m$  和  $n$  分别表示试验次数和目标响应数。本文中,  $m=17$ ,  $n=2$ 。信噪比是“望大特性”, 即信噪比越大, 意味着质量越好。因此对信噪比的原始序列做标准化处理, 如式 (2) 所示。

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (2)$$

3) 灰色关联系数计算。灰色关联系数 (Grey relational coefficients, GRC) 表示参考序列和比较序列在某一时刻的关联程度。两序列对应点的绝对差值为  $\Delta_i(k) = |x_i^0(k) - x_i^*(k)|$ , 则灰色关联系数的计算见公式 (3)。

$$\gamma(x_i^0(k), x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \lambda \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中:  $0 < \lambda(x_i^0(k), x_i^*(k)) \leq 1$ ,  $\lambda \in [0, 1]$ , 为分辨系数;  $\Delta_{\max} = \max_i \max_j \Delta_i(k)$ ,  $\Delta_{\min} = \min_i \min_j \Delta_i(k)$ 。

4) 响应权重计算。得到各目标的灰色关联系数之后, 需要进行影响权重的计算。主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA) 是一种降维技术, 可以分析各个目标对响应的贡献率。本文通过 PCA 量化分析 SR 和 RS 对灰色关联度的影响权重, 从而将两个目标融合, 以进行灰色关联度计算。

5) 灰色关联度计算。灰色关联度是灰色关联系数的加权和, 是综合评价的结果, 其值越大, 对应的加工组合越接近响应变量的最优值。灰色关联度的计算公式如下:

$$\gamma(x_i^0, x_i^*) = \sum_{k=1}^n \beta_k \gamma(x_i^0(k), x_i^*(k)) \quad (4)$$

式中:  $\beta_k$  为第  $k$  个响应变量的权重,  $\sum_{k=1}^n \beta_k = 1$ 。

6) 优化模型建立。为表征工艺参数与灰色关联度之间的关系, 利用 Design Expert 软件构建灰色关联度的多元二次回归预测模型。

7) 确定最优工艺参数并验证。利用 Design Expert 软件对所建立的预测模型进行分析, 确定工艺参数的最佳组合。选择合适的加工参数进行对比实验, 以验证最佳工艺参数组合优化的精确度。图 2 为多目标优化实现的流程图。

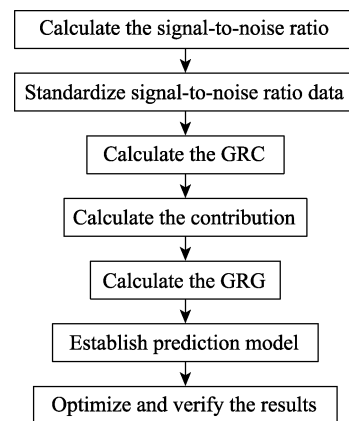


图 2 多目标优化实现流程图

Fig.2 Flow chart of multi-objective optimization

## 2 结果及分析

### 2.1 灰色关联度分析

对表 2 中的数据进行处理, 执行本文 1.3 节中步骤 1—5, 结果见图 3, 主成分分析的响应权重结果见表 3。由表 3 数据可知, 式 (4) 中  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为 0.587 和 0.413, 说明表面粗糙度 SR 贡献率大于残余应力 RS, 即 SR 是第一主成分, 其次是 RS。再根据式 (4) 得到图 3 中的灰色关联度, 灰色关联度越大, 表示相应的目标越接近期望的质量特性。从图 3 的灰色关联度曲线可以看出, 第 13 组试验的 GRG 值最大, 达到了最佳响应特性; 第 14 组的 GRG 值最小, 响应结果最不理想。

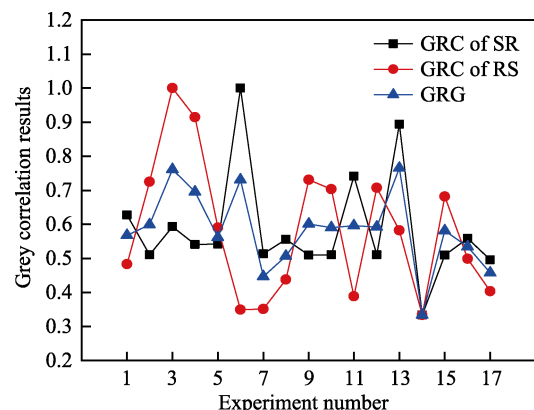


图 3 灰色关联分析结果

Fig.3 Results of grey correlation analysis

表3 响应权重  
Tab.3 Response weight

Principal component	Eigenvalue	Contribution
SR	1.1736	58.7%
RS	0.8264	41.3%
Total	2	100%

## 2.2 影响规律分析

本文利用田口法将 SR 和 RS 的数值转换成信噪比, 根据其“望大特性”, 将多目标转化成单目标, 研究微铣削工艺参数对 SR 和 RS 的影响, 计算了单个响应变量的平均信噪比, 如图 4 所示。由图可知, 对于表面粗糙度 SR, 轴向切深  $a_p$  对 SR 的影响最大, 其次是主轴转速  $n$ , 影响最小的是进给速度  $v_f$ 。各个工艺参数的最优水平为: 主轴转速 20 000 r/min, 轴向切深 60  $\mu\text{m}$ , 进给速度 200 mm/min。对于残余应力 RS, 主轴转速  $n$  是影响 RS 的主要工艺参数, 其次是轴向切深  $a_p$ , 影响最小的是进给速度  $v_f$ 。各个工艺参数的最优水平为: 主轴转速 15 000 r/min, 轴向切深 40  $\mu\text{m}$ , 进给速度 200 mm/min。

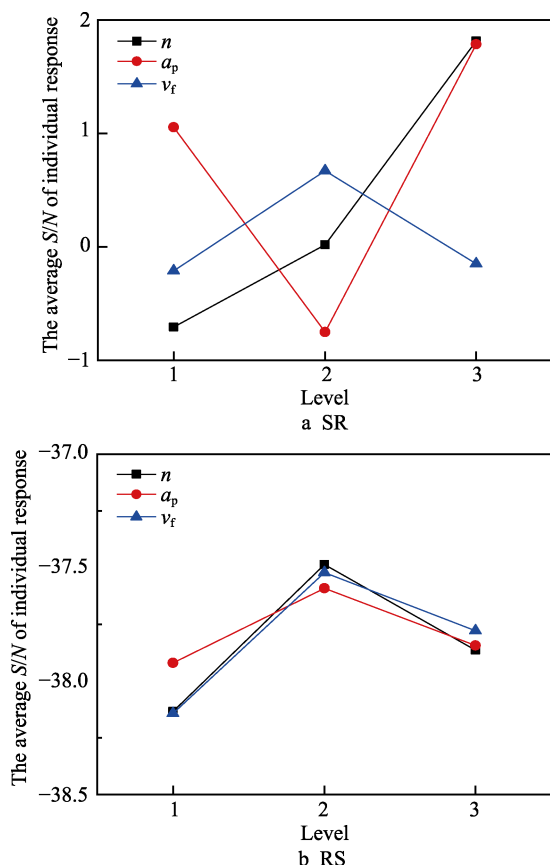


图4 单个响应变量的平均信噪比

Fig.4 Average S/N for the levels of individual response

## 2.3 优化模型建立

为达到优化的目的, 本文根据 BBD 试验设计方案, 建立了灰色关联度和工艺参数间的映射关系, 构

建 RSM 的二阶灰色关联度预测模型为:

$$\begin{aligned} \text{GRG} = & 0.55610 + 9.27270 \times 10^{-6} n - 0.016077 a_p + \\ & 1.19978 \times 10^{-3} v_f - 7.92756 \times 10^{-8} n \cdot a_p + \\ & 1.44708 \times 10^{-7} n \cdot v_f + 1.01658 \times 10^{-5} a_p \cdot v_f - \\ & 7.16791 \times 10^{-10} n^2 + 2.02105 \times 10^{-4} a_p^2 - \\ & 8.23034 \times 10^{-6} v_f^2 \end{aligned} \quad (5)$$

图 5 为 GRG 的计算值和预测值的比较。从图中可以看见, 2 者变化趋势基本一致, GRG 的平均误差为 6.9%, 表明预测模型合理, 拟合效果较好, 与计算值之间无显著差异。图 6 为预测模型的残差图, 所有试验的分布点接近一条直线, 说明预测模型的拟合度良好。因此, 该二阶预测模型可作为灰色关联度的预测模型。

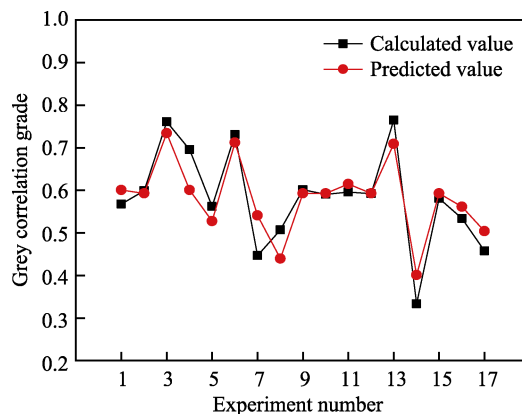


图5 GRG 的计算值和预测值

Fig.5 Calculated and predicted values of GRG

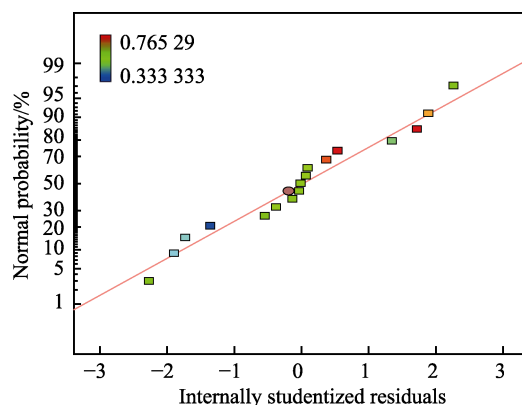


图6 预测模型的残差分布图

Fig.6 Residual distribution of prediction model

## 2.4 最优灰色关联度预测

基于灰色关联度预测模型, 图 7 绘制了 GRG 与微铣削工艺参数相关的响应轮廓, 可以根据颜色变化更加直观地观察三个工艺参数对灰色关联度的整体影响。暖色代表着更高的灰色关联度, 所对应的目标响应更好。同时, 本文使用期望函数对灰色关联度值进行分析, 寻求 GRG 值的最优解, 从而求得满意度最高的工艺参数组合。图 8 为根据 Design-Expert 软



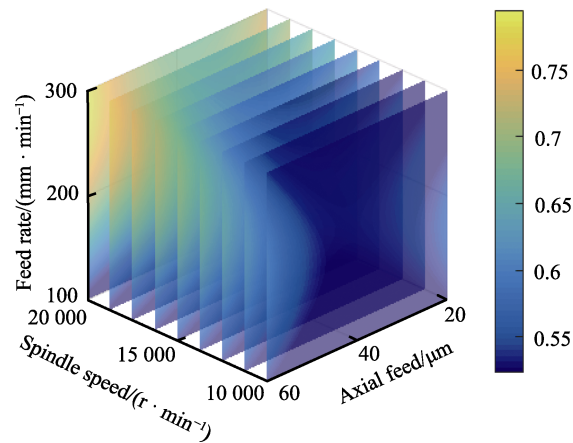


图 7 GRG 与微铣削工艺参数的响应轮廓  
Fig.7 GRG and response profile of micro-milling process parameters

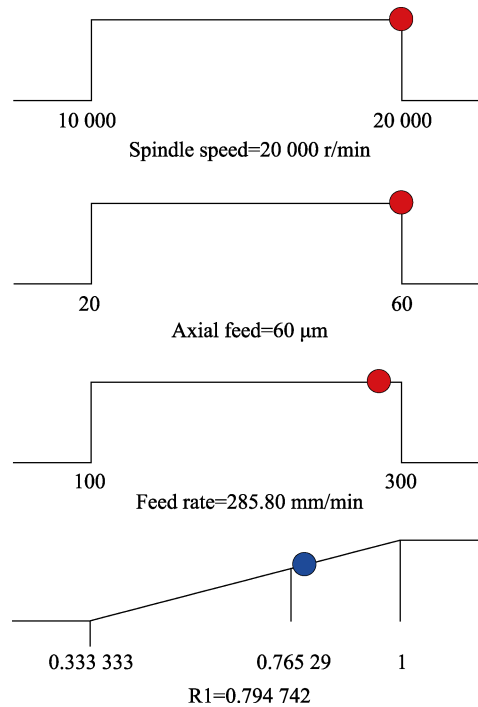


图 8 最优预测值  
Fig.8 Optimal prediction values

件求出的目标最佳响应条件，其中 GRG 的最佳预测值为 0.7947，优于实际 GRG 值。

2.5 实验验证

为了验证预测的最优工艺参数水平，选择设计试验中 GRG 值最大，即最优的试验参数组合作为验证实验的第一组，预测的最优参数组合作为第二组，随机选取最优参数组合附近的 5 组参数作为对比实验，参数安排及测量结果见表 4，验证实验的结果见图 9。结果表明，最优参数组合的实际 GRG 值为 0.7952，优于表 4 中其他实验结果。基于 GRG-RSM 的多目标优化结果相对于第一组参数组合提高了 3.91%。为了能更加直观地比较微铣削前后的效果，本文使用激光共聚焦显微镜 LMS700（Carl Zeiss MicroImaging GmbH，德国）观察试样表面形貌，为了获得较大视场和较大的分辨率，选用 20×物镜，如图 10 所示。

表 4 验证实验参数安排及测量结果  
Tab.4 Arrangement of validation experiment parameters and measurement results

Level	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	$v_f/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	$Ra/\mu\text{m}$	$\sigma/\text{MPa}$
1	15 000	60	300	0.6353	-75.9
2	20 000	60	285.8	0.6133	-72.6
3	20 000	60	300	0.6236	-73.1
4	20 000	60	270	0.6273	-72.9
5	20 000	50	285	0.6327	-74.2
6	19 000	60	286	0.6294	-73.0
7	19 000	50	285	0.6342	-73.8

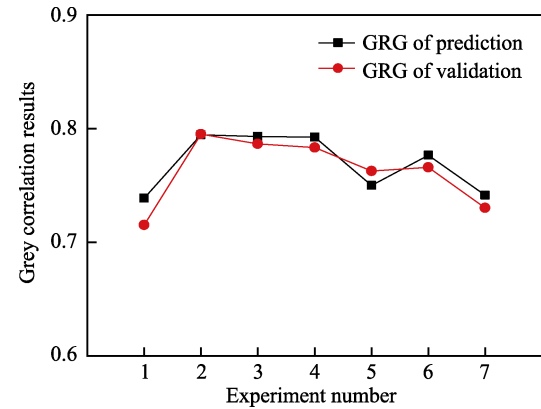
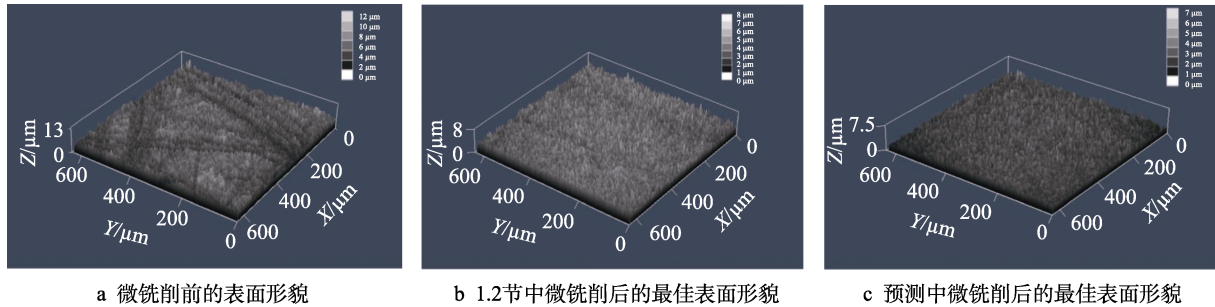


图 9 验证实验的实际值和预测值  
Fig.9 Actual and predicted values of verification experiment



a 微铣削前的表面形貌      b 1.2节中微铣削后的最佳表面形貌      c 预测中微铣削后的最佳表面形貌

图 10 微铣削前后表面形貌  
Fig.10 Surface morphology before and after micro-milling: a) surface morphology before micro-milling; b) optimal surface morphology after micro-milling in section 1.2; c) optimal surface morphology after micro-milling in prediction

其中图 10a 为微铣削前的表面, 可见表面形貌纹理杂乱, 没有规律; 图 10b 为 1.2 节试验中选取最佳微铣削加工参数进行微铣削的试样表面, 可见有明显的微铣削刀痕, 但整体较平整; 图 10c 为最佳微铣削加工参数优化后, 进行微铣削的试样表面, 可见表面最平整, 无明显刀痕。从表面形貌的变化趋势来看, 优化后得到的最佳响应的表面形貌效果最好。因此, 该方法可以满足表面粗糙度和残余应力同时降低的要求。

### 3 结论

1) GRA-RSM 方法可以将多目标的信噪比转化为单目标, 进行工艺参数优化分析。

2) 通过分析响应变量的平均信噪比, 微铣削工艺参数对表面粗糙度的影响大小顺序为: 主轴转速>轴向切深>进给速度。微铣削工艺参数对残余应力的影响大小顺序为: 轴向切深>主轴转速>进给速度。

3) 基于 GRA-RSM 构建的二阶 GRG 预测模型有效地预测了微铣削加工参数的最佳设置, 达到了降低表面粗糙度的同时, 减小残余应力的目的。

#### 参考文献:

- [1] GUCKENBERGER D J, GROOT T E D, WAN A M D, et al. Micromilling: A method for ultra-rapid prototyping of plastic microfluidic devices[J]. Lab chip, 2015, 15(11): 2364-2378.
- [2] KURAM E, OZCELIK B. Micro milling[M]. Heidelberg: Springer, 2014.
- [3] DECHIFFRE L, CHRISTIANSEN S, SKADE S. Advantages and industrial applications of three-dimensional surface roughness analysis[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 1994, 43(1): 473-478.
- [4] VIPINDAS K, KURIACHEN B, MATHEW J. Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 100: 1207-1222.
- [5] YANG A, HAN Y, PAN Y, et al. Optimum surface roughness prediction for titanium alloy by adopting response surface methodology[J]. Results in physics, 2017, 7: 1046-1050.
- [6] ZHAO X, XUE G, LIU Y. Gradient crystalline structure induced by ultrasonic impacting and rolling and its effect on fatigue behavior of TC11 titanium alloy[J]. Results in physics, 2017, 7: 1845.
- [7] CHEN Z, SHI Y, LIN X, et al. Analysis and optimization of process parameter intervals for surface quality in polishing Ti-6Al-4V blisk blade[J]. Results in physics, 2019, 12: 870-877.
- [8] 张浩, 刘玉德, 石文天, 等. 微细切削加工表面质量的

研究综述[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 219-232.

ZHANG Hao, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, et al. Quality of micro machined surface[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 219-232.

- [9] 高奇, 巩亚东, 周云光. 单晶 Ni<sub>3</sub>Al 基高温合金微铣削表面粗糙度试验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(6): 801-804.

GAO Qi, GONG Ya-dong, ZHOU Yun-guang. Experimental study on surface roughness in micro-milling of single crystal Ni<sub>3</sub>Al-based superalloy[J]. China mechanical engineering, 2016, 27(6): 801-804.

- [10] AL-ZUBAIDI S, GHANI J A, HARON C H C. Optimization of cutting conditions for end milling of Ti6Al4V alloy by using a gravitational search algorithm (GSA)[J]. Meccanica, 2013, 48(7): 1701-1715.

- [11] BURLACU C, IORDAN O. Mathematical modelling to predict the roughness average in micro milling process[J]. IOP conference series: Materials science and engineering, 2016, 145(7): 072004.

- [12] 龚军振, 马泳涛, 吴政协, 等. Al6061 铣削精加工表层残余应力分布试验研究[J]. 表面技术, 2018(4): 281-285.

GONG Jun-zhen, MA Yong-tao, WU Zheng-xie, et al. Test of surface residual stress distribution in Al6061 after fine milling[J]. Surface technology, 2018(4): 281-285.

- [13] PENG F Y, DONG Q, YAN R, et al. Analytical modeling and experimental validation of residual stress in micro-end-milling[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87: 3411-3424.

- [14] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[M]. New York: Springer, 1992.

- [15] KHURI A I. Response surface methodology[M]. Heidelberg: Springer, 2011.

- [16] 杨海吉, 张晓君, 陈燕, 等. 磁力研磨精密抛光  $\phi 4 \times 150$  mm TC4 管内表面的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 259-264.

YANG Hai-ji, ZHANG Xiao-jun, CHEN Yan, et al. Polishing of inner surface of  $\phi 4 \times 150$  mm TC4 tube by magnetic abrasive finishing[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 259-264.

- [17] BOHLOULI A, AFSHAR M R, ABOUTALEBI M R, et al. Optimization of tungsten leaching from low manganese wolframite concentrate using response surface methodology (RSM)[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2016, 61: 107-114.

- [18] SINDHU D, THAKUR L, CHANDNA P. Parameter optimization of rotary ultrasonic machining on quartz glass using response surface methodology (RSM)[J]. Silicon, 2019, 48: 629-643.

- [19] 杨振凯, 王海军, 刘明, 等. 基于响应曲面法的 Ar-N<sub>2</sub> 等离子射流特性研究[J]. 表面技术, 2016(1): 148-154.

YANG Zhen-kai, WANG Hai-jun, LIU Ming, et al. Characteristics of the Ar-N<sub>2</sub> plasma jet by response surface

- methodology[J]. *Surface technology*, 2016(1): 148-154.
- [20] SUBRAMANIAN M, SAKTHIVEL M, SUDHAKARAN R. Modeling and analysis of surface roughness of Al7075-T6 in end milling process using response surface methodology[J]. *Arabian journal for science & engineering*, 2014, 39(10): 7299-7313.
- [21] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- DENG Ju-long. Basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [22] 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 Cong-bo, XIAO Qin-ge, 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.
- [23] 辛民, 王西彬, 解丽静, 等. 基于灰色理论的铣削参数优化方法研究[J]. *中国机械工程*, 2009(23): 39-42.
- XIN Min, WANG Xi-bin, XIE Li-jing, et al. Research on optimization method of milling parameters based on grey theory[J]. *China mechanical engineering*, 2009(23): 39-42.
- [24] PIEPEL G F. Quality control, robust design, and the Taguchi method[M]. Heidelberg: Springer, 1989.
- [25] 邓朝晖, 符亚辉, 万林林, 等. 面向绿色高效制造的铣削工艺参数多目标优化[J]. *中国机械工程*, 2017(19): 2365-2372.
- DENG Zhao-hui, FU Ya-hui, WANG Lin-lin, et al. Multi objective optimization of milling process parameters for green high-performance manufacturing[J]. *China mechanical engineering*, 2017(19): 2365-2372.

(上接第 338 页)

- [15] CHEN Q A, LIU X H. FEM analysis of partial flash processing for a plate[J]. *AIP conference proceedings*, 2013, 1532(1): 1085.
- [16] 樊新民, 黄洁雯. 结构钢热处理技术数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- FAN Xin-min, HUANG Jie-wen. Data manual of heat treatment technology for structural steel[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [17] 陈庆安, 彭文, 卢日环, 等. 厚钢板瞬时淬火淬硬层深度预测[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(14): 214-216.
- CHEN Qing-an, PENG Wen, LU Ri-huan, et al. Predicting for hardened depth of thick steel plate flash processing[J]. *Hot working technology*, 2015, 44(14): 214-216.
- [18] 刘方强, 林晨, 陶洪伟, 等. 加热时间对高频感应熔覆 Ni45B 合金涂层的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 14-16.
- LIU Fang-qiang, LIN Chen, TAO Hong-wei, et al. The effect of heating time on the high-frequency induction clad Ni45B alloy coating[J]. *Surface technology*, 2013, 42(1): 14-16.
- [19] 高长刚, 孙维连, 孙铂, 等. 高频淬火加热时间对钢管表面组织和性能的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(1): 141-145.
- GAO Chang-gang, SUN Wei-lian, SUN Bo, et al. Effect of high frequency quenching heating time on surface microstructure and properties of steel tube[J]. *Surface technology*, 2017, 46(1): 141-145.

(上接第 363 页)

- [10] BICKER M, VON-HULSEN U, LAUDAHN U, et al. Optical deflection setup for stress measurements in thin films[J]. 1998, 69(2): 460-462.
- [11] KUME T, EGAWA S, MIMURA H. Development of internal stress measurement technique for Ni electroforming using Shack. Hartmann sensor[J]. *International journal of electrical machining*, 2016, 21: 25-30.
- [12] 许晓军, 陆启生, 刘泽金. 剪切干涉仪与哈特曼波前传感器的波前复原比较[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(3): 269-272.
- XU Xiao-jun, LU Qi-sheng, LIU Ze-jin. Comparison of wavefront reconstruction by lateral shear interferometer and hartman wavefront sensor[J]. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(3): 269-272.
- [13] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1909, 553: 172-175.
- [14] HEARNE S J, FLORO J A. Mechanisms inducing compressive stress during electrodeposition of Ni[J]. *Journal of applied physics*, 2005, 97(1): 014901.
- [15] YU Y T, YUAN W Z, QIAO D Y. Effects of imperfections on bifurcation of multi-layer microstructures of MEMS under thermal loading[J]. *Key engineering materials*, 2007, 339: 276-280.
- [16] 宋磊. 微电铸层内应力与微模具型芯制作的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- SONG Lei. Study on stress in micro electrodeposited coating and fabrication of micro mould insert[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [17] 乔俊强, 虎学梅. 电沉积纳米晶镍镀层微结构的调控及其对力学性能的影响[J]. *材料保护*, 2018, 51(9): 66-72.
- QIAO Jun-qiang, HU Xue-mei. Microstructure regulation and its effect on the mechanical properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings[J]. *Materials protection*, 2018, 51(9): 66-72.