

基于灰色关联分析的 GH2132 线材 高精度切削参数优化

史丽晨¹, 刘亚雄¹, 史炜椿¹, 卢竹青², 豆卫涛³

(1.西安建筑科技大学, 西安 710055; 2.西部超导材料科技股份有限公司, 西安 710018;
3.西安航空职业技术学院, 西安 710089)

摘要: **目的** 通过无心车床车削去除 GH2132 线材的表面缺陷, 分析无心车床加工参数对线材表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的响应关系, 并建立 GH2132 线材表面灰色关联度多目标优化模型, 确定可行工艺参数域。**方法** 采用响应曲面中心复合设计, 测量车削后 GH2132 线材的表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度; 利用响应曲面法 (Response Surface Method, RSM) 分别建立表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的单目标预测模型, 确定单目标优化最优工艺参数组; 基于灰色关联分析 (Grey Correlation Analysis, GRA) 理论, 以表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度为优化指标进行降维处理, 构建车削工艺参数与灰色关联度的二阶回归预测模型; 绘制车削工艺参数与灰色关联度值的等值线图, 确定可行工艺参数域。**结果** 对建立的表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的单目标预测模型进行方差分析, 显著度均小于 0.000 1。得到了最小表面粗糙度工艺参数组, 切削速度 $n=373.919$ r/min, 进给速度 $v_f=0.475$ m/min。得到了最小尺寸误差工艺参数组, $n=375.636$ r/min, $v_f=0.596$ m/min。得到了最大表面显微硬度工艺参数组, $n=337$ r/min, $v_f=0.903$ m/min。对于灰色关联度多目标预测模型, 误差范围为 0.13%~9.4%, 确定的可行工艺参数域对应的最小灰色关联度值为 0.544 37。**结论** 基于灰色关联分析的多目标预测模型的准确度较高, 主轴转速 n 对多目标的响应程度大于进给速度 v_f 。通过确定可行工艺参数域, 为 GH2132 线材去除表面缺陷提供工程参考。

关键词: 表面缺陷; 多目标优化; 无心车床; 灰色关联度; 可行工艺参数域

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)11-0373-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.11.035

Optimization of High-precision Cutting Parameters of GH2132 Wire Based on Grey Relational Analysis

SHI Li-chen¹, LIU Ya-xiong¹, SHI Wei-chun¹, LU Zhu-qing², DOU Wei-tao³

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

收稿日期: 2021-12-27; 修订日期: 2022-03-29

Received: 2021-12-27; Revised: 2022-03-29

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2020GY-104); 陕西省自然科学基金面上项目 (2021JM-599)

Fund: Key Research Project of Shaanxi Province (2020GY-104); General Project of Shaanxi Natural Science and Technology Fund (2021JM-599)

作者简介: 史丽晨 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为机械设计及理论。

Biography: SHI Li-chen (1972-), Female, Doctor, Professor, Research focus: mechanical design and theory.

通讯作者: 刘亚雄 (1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为机械优化设计。

Corresponding author: LIU Ya-xiong (1996-), Male, Master, Research focus: mechanical optimization design.

引文格式: 史丽晨, 刘亚雄, 史炜椿, 等. 基于灰色关联分析的 GH2132 线材高精度切削参数优化[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 373-384.

SHI Li-chen, LIU Ya-xiong, SHI Wei-chun, et al. Optimization of High-precision Cutting Parameters of GH2132 Wire Based on Grey Relational Analysis[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 373-384.

ABSTRACT: It is an advanced surface improvement technology, which can improve surface properties such as surface roughness, dimensional error, surface microhardness while removing surface defects by turning GH2132 wire. Since GH2132 wire is a raw material for aviation fasteners with a diameter of less than 10 mm and a length of more than 60 m and the processability is poor, the process parameters are the source of improving the surface performance. The work aims to remove surface defects of GH2132 wire by centerless lathe turning, analyze the response relationship between machining parameters of centerless lathe and surface roughness, dimensional error and surface microhardness of wire, and establish a multi-objective optimization model of grey correlation degree of GH2132 wire surface to determine the feasible process parameter domain.

Herein, a response surface center composite design was taken to measure the surface roughness, dimensional error, and surface microhardness of the GH2132 wire after turning. The single-objective prediction models of surface roughness, dimensional error, and surface microhardness were established respectively based on the response surface method (RSM), to determine the optimal set of process parameters for single-objective optimization. Then, surface roughness, dimensional error, and surface microhardness were used as optimization indicators to reduce dimensionality and furthermore construct second-order regression prediction model of turning process parameters and grey correlation degree based on Grey Correlation Analysis (GRA) theory. The contour map of turning process parameters and grey correlation degree value was drawn to determine the feasible process parameter domain. The XF-WXC centerless lathe was used in the experiment. The test material was GH2132 wire with a diameter of 8 mm, which was not heated. The length of the test-piece was 1300 mm, and the test process parameters were processed after the trial cutting of 300 mm. The 300 mm interval for trial cutting of each group of process parameters was set as the non-measurement interval. YG8 cemented carbide tools were used in the test. The spindle speeds during cutting were 337, 350, 380, 410 and 422 r/min, respectively. The feed rates were 0.196, 0.3, 0.55, 0.8 and 0.903 m/min, respectively. Then, the surface roughness of the processed specimen was detected with a roughness meter (TR2000). The surface microhardness of the processed specimen was also measured with a hardness tester (Time5310). A digital display micrometer was used to measure the diameter of the processed specimen.

The significance was less than 0.000 1 for the established single-objective prediction models of surface roughness, dimensional error, and surface microhardness which were analyzed by variance analysis. Minimum surface roughness process parameter group was: cutting speed $n=373.919$ r/min and feed speed $v_f=0.475$ m/min. The minimum size error process parameter group was: $n=375.636$ r/min and $v_f=0.596$ m/min. Maximum surface microhardness process parameter group was: $n=337$ r/min and $v_f=0.903$ m/min. For the grey correlation degree multi-objective prediction model, the error range was between 0.13% and 9.4%, and the minimum grey correlation degree value corresponding to the determined feasible process parameter domain was 0.544 37. The accuracy of the multi-objective prediction model based on grey relational analysis is higher, and the response degree of the spindle speed n to the multi-target is greater than the feed speed v_f . Through the determined feasible process parameter domain, it provides engineering reference for removing surface defects of GH2132 wire.

KEY WORDS: surface defects; multi-objective optimization; centerless lathe; grey relational degree; feasible process parameter domain

GH2132 是一种 Fe-25Ni-15Cr 基高温合金, 在 650 °C 内具有高的屈服极限和优异的抗疲劳性能, 还具有优异的断裂性能和组织稳定性, 因而广泛应用于航空紧固件^[1-2]。GH2132 线材盘圆是直径小于 10 mm、长度超过 60 m 的航空紧固件重要原材料, 在经过熔炼、锻造、轧制、拉丝减径等工艺后会出现表面裂纹、折叠等表面缺陷, 放置一段时间后还会产生表面黑皮缺陷。表面裂纹、折叠和表面黑皮缺陷会极大地影响航空紧固件的加工表面质量, 通过进一步加工去除其表面缺陷, 对于提高航空紧固件的表面质量具有重要意义^[3-6]。针对上述 GH2132 线材盘圆存

在的表面缺陷问题, 文中采用无心车床对 GH2132 进行表面车削, 无心车床的工艺参数是影响加工表面质量的决定性因素^[7]。

对于工艺参数的优化, 众多学者进行了大量研究, 并取得了丰硕成果。其中, 有些学者对工艺过程进行了单目标优化研究, 贺连芳等^[8]通过实验设计, 研究了工艺参数与优化目标间的影响规律, 利用响应曲面法获得了最优的工艺参数组; 陈聪等^[9]通过线性回归方法得到了最优工艺参数组; 刘刚等^[10]通过正交分析得到了最优工艺参数组。

随着科技的发展和工程实际中对加工质量的多

方位要求,更多的研究集中在多目标优化方面。其中,仇中军等^[11]通过正交试验,研究了磨削加工中磨削参数对表面粗糙度和磨削效率的影响规律,利用加权综合评分法得到了多目标优化工艺参数组;练国富等^[12]基于响应曲面法分别建立了加工参数与多个优化目标间的关系模型,通过工程实际确定了不同优化目标的权重,得到了多目标优化工艺参数组;刘永等^[13]基于响应曲面法分别建立了加工参数与多个优化目标间的关系模型,并利用粒子群优化算法进行了优化求解;何彦等^[14]构建了加工参数与多个优化目标间的响应曲面模型,并利用改进型非支配排序遗传算法进行了优化求解;张雷等^[15]通过神经网络建立了工艺参数与优化目标的关系模型,并利用遗传算法对优化模型进行了全局寻优;李文龙等^[16]通过神经网络与粒子群算法相结合的方法,对工艺参数进行了优化求解;李志山等^[17]、梁存光等^[18]、陈侠宇等^[19]基于灰色关联分析,对多目标进行了降维处理,利用响应曲面法对降维后的优化目标进行求解,得到了最优工艺参数组。

在切削表面质量优化方面,众多学者也进行了探索。Laamouri 等^[20]探究了铣削工艺参数对 X160CrMoV12 高温合金钢表面粗糙度的影响,研究发现,逆铣有助于改善其表面质量;Zheng 等^[21]使用硬质合金刀具铣削 Invar 36,随着每齿进给量和轴向切削深度的增大,硬度逐渐增大;Weng 等^[22]研究了曲面车削 AISI 304 不锈钢时切削力、切屑形态和表面完整性的演变规律。对于切削表面质量的优化,众多学者的研究对象多为大直径棒料和型材,针对较小直径线材盘圆的研究较少。

根据工程实际, GH2132 线材盘圆加工表面质量的评价指标主要有表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度等。基于上述学者所做的研究,并考虑实验难度和优化速度,选用基于响应曲面法中心复合试验设计,分析表面车削去除表面缺陷过程中工艺参数对表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度等的影响规律。同时,基于灰色关联分析理论,将表面完整性的评价指标进行降维处理,并构建表面质量的灰色关联度值响应曲面预测模型,确定最优工艺参数组和可行工艺参数域,文中研究拟为工程实际提供多方位指导意义。

1 试验

1.1 设备与材料

试验在 XF-WXC 无心车床上进行,通过车削除试样的表面缺陷,加工原理如图 1 所示。将 GH2132 来料由前夹送和前导向送至主轴箱,完成固定和导向工作。主轴箱空心主轴带动周向布置的 4 把刀具对 GH2132 的表皮进行快速剥除,将切削后的 GH2132 线材由后导向和后夹送固定,并带动 GH2132 线材做直线进给运动,从而达到去除线材表面缺陷的目的^[23-24]。

试验材料为 GH2132 线材盘圆,试样的直径为 8 mm,线材盘圆在热拉拔后未经热处理。通过对试验材料进行检测,得到其化学成分,如表 1 所示,在室温下试验材料的力学性能如表 2 所示。通过测量可知,试样表面黑皮处的表面粗糙度 Ra 为 1.620 7~2.185 0 μm ,表面显微硬度为 301HB~332HB。考虑了

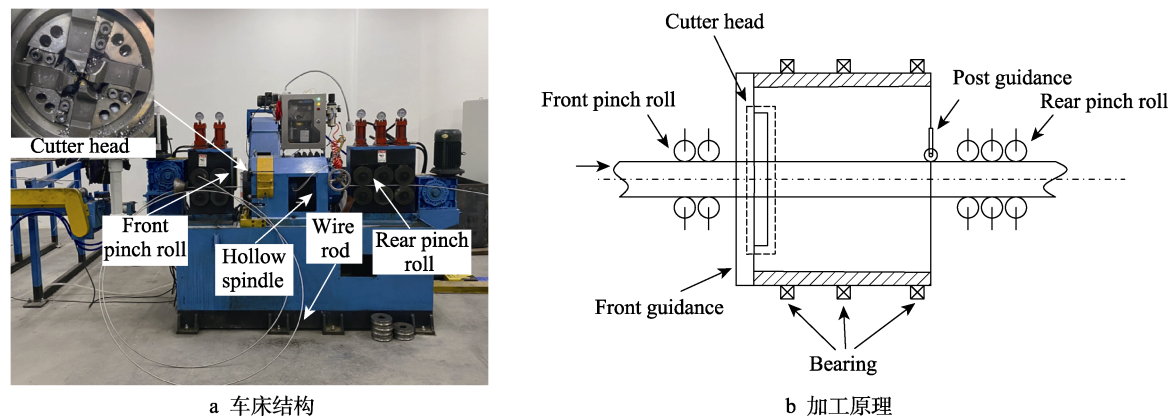


图 1 无心车床的结构与原理
Fig.1 Centerless lathe structure and processing principle: a) lathe structure; b) processing principle

表 1 GH2132 线材的化学成分
Tab.1 Chemical composition of GH2132 wire

Alloying element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	V	S	Ti	Fe
Content/wt. %	0.08	0.90	1.20	24.60	14.60	0.40	0.20	0.02	1.98	Surplus

表 2 GH2132 线材的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of GH2132 wire

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Reduction of area/%
674	281	26	71

GH2132 的切削加工导热性能, 以及刀具与 GH2132 的化学相容性, 选用 YG8 硬质合金刀具, 刀具前角为 2° , 后角为 5° , 刃倾角为 0° , 主偏角为 90° , 刀具圆弧半径为 0.3 mm。

对主轴转速 n 和进给速度 v_f 分别进行单因素试验, 确定其水平区间, 通过响应曲面设计的中心复合设计法 (Central Composite Design, CCD) 构建实验设计方案。考虑线材表面缺陷厚度、材料力学特性、无心车床力学性能、加工经验等多种因素, 车削剥除厚度为 0.3 mm, 实验设计如表 3 所示。

表 3 实验设计
Tab.3 Experimental design

ID	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
-1.414	337	0.196
-1	350	0.300
0	380	0.550
1	410	0.800
1.414	422	0.903

1.2 响应检测

为了减少随机误差和测量误差, 选取试件的长度为 1 300 mm, 在试切 300 mm 后进行试验工艺参数加工。将每组工艺参数试切的 300 mm 区间设定为非测量区间。

利用时代 TR2000 粗糙度仪检测加工后试件的表面粗糙度, 在每组测量区间内, 对工件外圆表面等距取 3 个测量点, 且每个测量点周向旋转 120° , 求得 3 个测量点的均值, 即为该组工艺参数下的表面粗糙度。

尺寸误差的计算如式 (1) 所示。其中, 试件的实际尺寸采用数显千分尺测量外径得到, 在每组测量区间内对工件外圆表面等距取 3 个测量点, 且每个测量点周向旋转 120° , 测量后代入式 (1), 求得 3 个测量点的均值, 即为该组工艺参数下的尺寸误差。

$$\delta = |D_0 - D| \quad (1)$$

式中: δ 为试件加工误差绝对值, 即尺寸误差; D 为实际尺寸; D_0 为加工的理论尺寸。

采用 Time5310 硬度测试仪对试件表面的显微硬度进行测量, 在每组测量区间内对工件外圆表面等距取 3 个测量点, 且每个测量点周向旋转 120° , 求得 3 个测量点的均值, 即为该组工艺参数下的表面显微硬度。试验安排和表面粗糙度 (Ra)、尺寸误差 (δ)、表面显微硬度 (H) 的测量结果如表 4 所示。

表 4 试验安排和结果
Tab.4 Experimental arrangement and results

Number	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$Ra/\mu\text{m}$	δ/mm	$H(\text{HB})$
1	350	0.300	0.624 5	0.024 00	307
2	337	0.550	0.722 5	0.019 10	318
3	350	0.800	0.764 9	0.012 60	339
4	380	0.196	0.646 7	0.027 40	279
5	380	0.550	0.456 8	0.003 40	289
6	380	0.550	0.426 7	0.003 80	290
7	380	0.550	0.397	0.005 50	293
8	380	0.550	0.407 1	0.004 75	291
9	380	0.550	0.476 1	0.005 90	298
10	380	0.903	0.932 2	0.019 22	342
11	410	0.300	0.722 4	0.020 80	254
12	422	0.550	0.976	0.023 50	239
13	410	0.800	1.092 8	0.022 13	280

2 结果与分析

2.1 单目标响应分析

响应曲面法以各试验设计点求解的目标参数值为基础, 在不需要完全求解的情况下, 就可快速地给出设计空间中所有点的目标参数近似值^[25]。文中利用响应曲面法构建了表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的二阶多项式响应曲面, 分别描述表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度与无心车床加工参数之间的线性关系, 并通过显著性验证拟合结果。工艺参数与响应值的二阶回归方程可表示为式 (2)^[26]。

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (2)$$

式中: \hat{y} 为估计的响应值; n 为工艺参数数量; β 为二次回归系数; ε 为试验误差。

2.1.1 响应面模型构建

根据 Ra 、 δ 、 H 的测量数据, 利用 MINITAB 软件对实验数据进行回归分析, 建立工艺参数与 Ra 、 δ 、 H 的二阶数学响应模型, 如式 (3) 所示。给定的显著性水平 $F_{0.05}(5, 12) = 3.11$, 检验结果如表 5 所示, 对 Ra 进行方差分析, 得到模型的 F 值为 133.58 (大于 3.11), $R_{Sq} = 98.22\%$, 且 $P < 0.000 1$, 远小于置信系数 0.05; 对 δ 做方差分析, 得到模型的 F 值为 80.76 (大于 3.11), $R_{Sq} = 97.08\%$, 且 P 小于置信系数 0.05; 同样, 对 H 进行方差分析, 得到模型的 F 值为 80.61 (大于 3.11), $R_{Sq} = 97.07\%$, 且 P 小于置信系数 0.05。由此可见, Ra 、 δ 、 H 模型的可信度较高, 显著性较好。目标真实值和预测值柱状对比如图 2 所示, 可以清晰看到, 表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度与无心

表 5 方差分析
Tab.5 Variance analysis

Object	Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>Ra</i>	Model	5	0.637 162	0.127 432	133.58	<0.000 1
	Error	7	0.006 678	0.000 954		
	Aggregate	12	0.643 840			
	Model summary		<i>R</i> _{Sq} =98.22%	<i>R</i> _{Sq} (adj)=96.43%		
<i>δ</i>	Model	5	0.000 953	0.000 191	80.76	<0.000 1
	Error	7	0.000 017	0.000 002		
	Aggregate	12	0.000 969			
	Model summary		<i>R</i> _{Sq} =97.08%	<i>R</i> _{Sq} (adj)=90.51%		
<i>H</i>	Model	5	10 012.4	2 002.48	80.61	<0.000 1
	Error	7	173.9	24.84		
	Aggregate	12	10 186.3			
	Model summary		<i>R</i> _{Sq} =97.07%	<i>R</i> _{Sq} (adj)=90.64%		

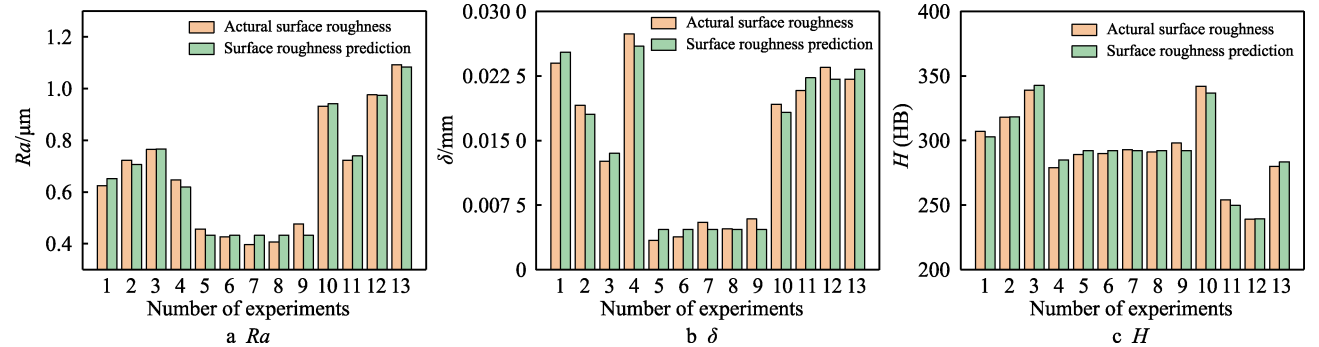


图 2 目标真实值和预测值柱状对比
Fig.2 Comparison of histograms of target real value and predicted value

车床加工参数的二阶数学响应模型拟合效果较好。

$$\begin{cases} \hat{y}_1 = 34.5 - 0.172\,99x_1 - 5.516x_2 + 0.000\,227x_1^2 + \\ \quad 2.783x_2^2 + 0.00767x_1x_2 \\ \hat{y}_2 = 1.355\,4 - 0.006\,679x_1 - 0.325\,4x_2 + \\ \quad 0.000\,009x_1^2 + 0.139\,49x_2^2 + 0.000\,424x_1x_2 \\ \hat{y}_3 = -495 + 4.99x_1 - 15x_2 - 0.007\,65x_1^2 + \\ \quad 149.3x_2^2 - 0.2x_1x_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中： x_1 为主轴转速，r/min； x_2 为进给速度，m/min； \hat{y}_1 表示预测的表面粗糙度 Ra ， μm ； \hat{y}_2 表示预测的尺寸误差 δ ，mm； \hat{y}_3 值表示预测的表面显微硬度 H ，HB。

2.1.2 影响规律分析

表面粗糙度与工艺参数的主效应如图 3 所示。无心车床的主轴转速对加工后线材表面粗糙度的响应趋势如图 3a 所示，当主轴转速为 337~380 r/min 时，表面粗糙度呈现逐渐减小的趋势；当主轴转速为 380~422 r/min 时，表面粗糙度迅速增大；当主轴转速由 337 r/min 逐渐上升时，由刀具传递的切削热逐渐增多；当主轴转速达到 380 r/min 左右时，试验材料会产生可见高频振动，使工件的表面粗糙度激增。

表面粗糙度对进给速度的响应趋势如图 3b 所示，当进给速度较低时，单位时间内产生的切削热停留在工件切削表面的时间会延长，使得切削刀具出现了积屑瘤，导致 GH2132 线材表面出现了规则的纹路，导致其表面质量变差。当进给速度在 0.55~0.903 m/min 内逐渐增大时，切削刃与 GH2132 线材的接触磨损加快，产生了大量的切削热，其表面粗糙度骤增。

尺寸误差与工艺参数的主效应如图 4 所示。尺寸误差对主轴转速的响应趋势如图 4a 所示，随着主轴转速的增大，尺寸误差呈现先减小后增大的变化趋势。尺寸误差对进给速度的响应趋势如图 4b 所示，进给速度由 0.196 m/min 变化到 0.55 m/min 的过程中，尺寸误差迅速下降；主轴转速由 0.55 m/min 变化到 0.903 m/min 的过程中，尺寸误差逐渐增大。总体变化趋势与表面粗糙度的变化趋势较为符合。尺寸误差总体小于 0.03 mm，总体变化幅值较小，进一步表明无心车床的加工精度较高。

表面显微硬度 H 与工艺参数的主效应如图 5 所示。无心车床主轴转速对加工后线材表面显微硬度的响应趋势如图 5a 所示，可以看出，当主轴转速从 337 r/min 升至 422 r/min 时，表面显微硬度逐渐下降，在主轴转速增大时会产生更多的切削热，从而导致工

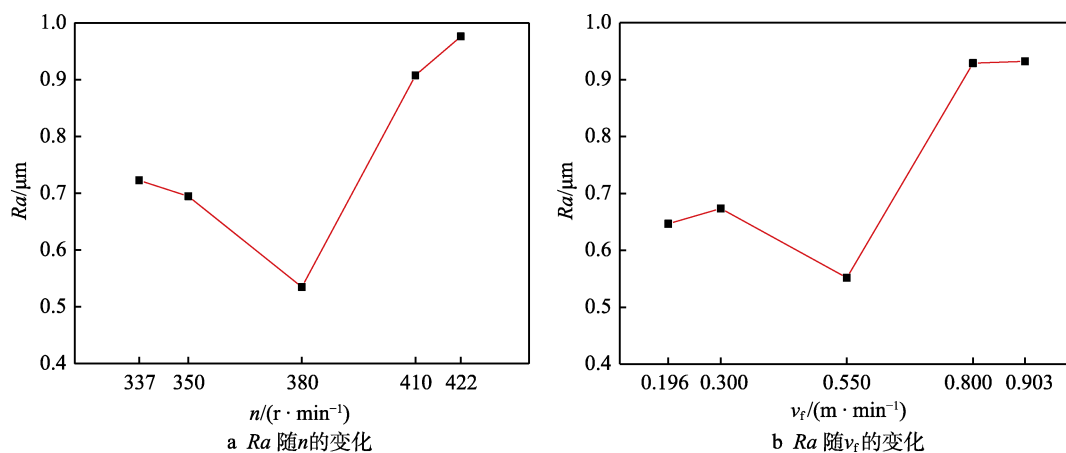


图3 表面粗糙度主效应

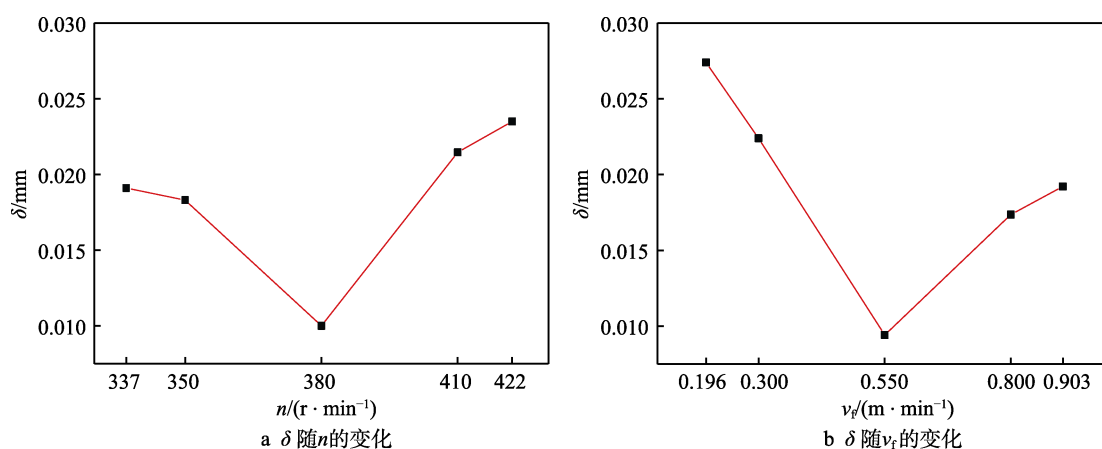
Fig.3 Main effect of surface roughness: a) Change of Ra with n ; b) Change of Ra with v_f 

图4 尺寸误差主效应

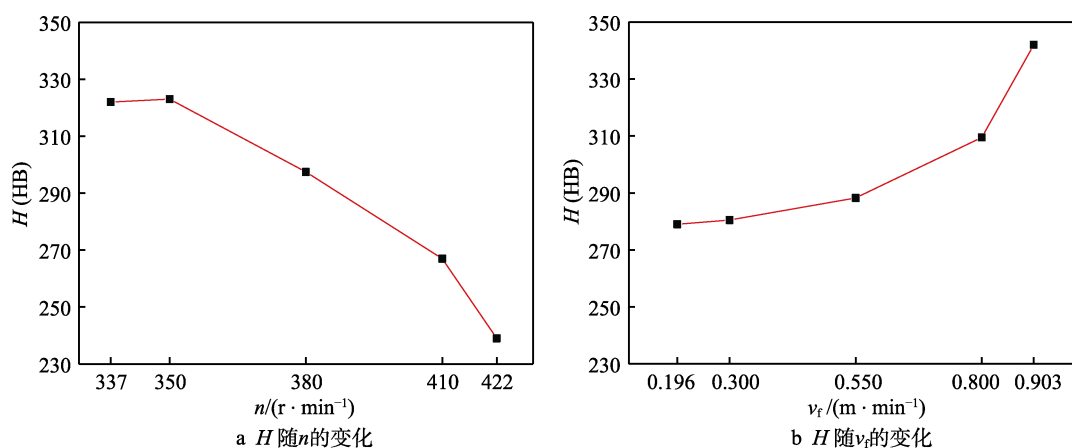
Fig.4 Main effect of dimensional error: a) Change of δ with n ; b) Change of δ with v_f 

图5 表面显微硬度主效应

Fig.5 Main effect of surface microhardness: a) Change of H with n ; b) Change of H with v_f

件表面软化。由于 GH2132 线材与切削刀的接触时间缩短, 线材表面加工硬化未能充分完成, 使得表面显微硬度减小。表面显微硬度对进给速度的响应趋势如图 5b 所示, 表面显微硬度随着进给速度的增大而增大。随着无心床进给速度的增大, GH2132 线材表面与切削刀具之间的摩擦加剧, 导致其表面发生塑性变形, 使得晶格出现了位错的缠结, 晶粒被拉长、破碎

和纤维化, 导致冷作硬化现象的发生, 促使其表面显微硬度增大。

根据各响应的二阶数学预测模型, 绘制切削工艺参数的交互作用图, 如图 6 所示。对于无心车床去除线材表面缺陷, 无心车床主轴转速的变化对表面粗糙度的影响更显著, 表面粗糙度随着主轴转速的增大, 变化幅值相对较大; 主轴转速和进给速度对尺寸误差

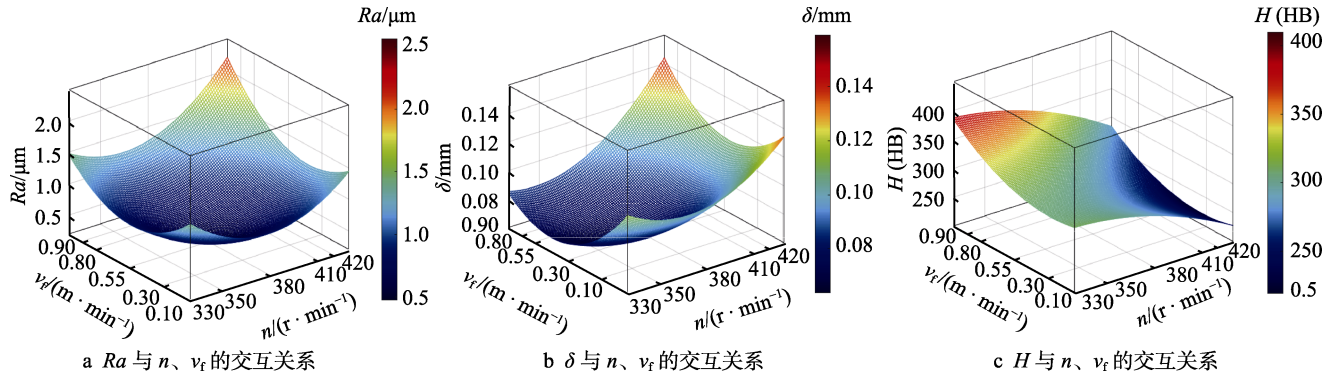


图 6 目标与工艺参数的交互作用

Fig.6 Interaction of objective and process parameters: a) interaction relationship between Ra and n , v_f ; b) interaction relationship between δ and n , v_f ; c) interaction relationship between H and n , v_f

的影响程度较为相近;可以明显看出,在较小的主轴转速和较大的进给速度下,可获得较高的表面显微硬度。由图 6 可知,最小表面粗糙度 Ra_{\min} 为 $0.405\ 233\ \mu\text{m}$, 所对应的工艺参数为主轴转速 $n=373.919\ \text{r/min}$, 进给速度 $v_f=0.474\ 515\ \text{m/min}$; 最小尺寸误差 δ_{\min} 为 $0.004\ 302\ \text{mm}$, 所对应的工艺参数为主轴转速 $n=375.636\ \text{r/min}$, 进给速度 $v_f=0.595\ 919\ \text{m/min}$; 最大表面显微硬度 H_{\max} 为 365.903HB , 所对应的工艺参数为主轴转速 $n=337\ \text{r/min}$, 进给速度 $v_f=0.903\ \text{m/min}$ 。

2.2 多目标优化模型构建

2.2.1 灰色关联度计算过程

在多目标优化研究中,灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA) 通过降维的方法将多个优化目标转化为灰色关联度值,并对其进行单一目标优化分析^[27]。灰色关联度值越大,响应的输入响应越优^[28]。

1) 归一化处理。把表面粗糙度、尺寸误差、表面显微硬度分别归一化至 $[0, 1]$, 表面粗糙度和尺寸误差越小越好,其数据变换如式 (4) 所示;显微硬度越大越好,其数据变换如式 (5) 所示。

$$N = \frac{\max(y) - y}{\max(y) - \min(y)} \quad (4)$$

$$N = \frac{y - \min(y)}{\max(y) - \min(y)} \quad (5)$$

式中: N 为试验得到的相应的归一化值; $\max(y)$ 为实际响应的最大值; $\min(y)$ 为实际响应的最小值; y 为每组工艺参数下的实际值。

2) 灰色关联系数 (Gray Relational Coefficient, G_{RC}) 计算。灰色关联系数反映了测量结果与最优解之间的关系^[29], N 为比较序列, G_{RC} 的计算如式 (6) — (7) 所示。

$$G_{RC} = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta + \xi \Delta_{\max}} \quad (6)$$

$$\Delta = 1 - N \quad (7)$$

式中: Δ 表示偏差序列; Δ_{\min} 和 Δ_{\max} 为偏差序列的最小值和最大值; ξ 为判断系数, $\xi \in [0, 1]$, ξ 在这里取 0.5。

3) 灰色关联度 (Gray Relational Grade, G_{RG}) 计算。灰色关联度反映了试验工艺参数与响应间的关系,它是 G_{RC} 的加权和,得到的灰色关联度越高,说明其对应的工艺参数组合越接近于期望值。 G_{RG} 的计算如式 (8) 所示。

$$G_{RG} = \sum_{i=1}^n \beta_i G_{RC} \quad (8)$$

式中: β_i 为第 i 个响应变量的权值,通过层次分

析法由步骤 4 求得, $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$ 。

4) 层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)。在实际应用中,各响应的参考性和重要性不是平均的,为了确保各响应权值与实际应用需求相符,选用层次分析法确定 G_{RG} 计算中各响应对应的权值^[30-31]。通过构建响应评价矩阵 P ,选用九级标度法,对不同响应两两之间进行定量比较。根据以下基本原则标注:“1”表示 2 个目标具有相同重要性;“2—9”,数字越大表示重要程度越高;其中记第 i 个响应相对于第 j 个响应的重要程度为 a_{ij} ,则第 j 个响应相对于第 i 个响应的重要程度 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。采用生产专家和研究专家打分的方式,构建响应评价矩阵 P ,如式 (9) 所示。通过求矩阵 P 的最大特征值 λ_{\max} 所对应的特征向量 x ,经归一化后得到响应权重矩阵 β 。

$$P = [a_{ij}]_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: n 表示响应数量。

2.2.2 灰色关联度计算结果与分析

分别利用式 (4) — (5) 对试验结果进行归一化处理,通过式 (6) 计算 G_{RC} 。进一步用 AHP 构建响应矩阵 P ,如式 (10) 所示,求得 $\lambda_{\max}=3.135\ 6$,其

对应的特征向量 \mathbf{x} 如式 (11) 所示, 归一化后得到权重矩阵 $\boldsymbol{\beta}$, 如式 (12) 所示。由此可知, 表面粗糙度的权重为 0.7, 尺寸误差的权重为 0.2, 显微硬度的权重为 0.1, 这一结果清晰地反映了切削去除表面缺陷的主要评价指标为表面粗糙度。最终代入式 (8) 得到 G_{RG} , 计算结果如表 6 所示。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{x} = (0.952\ 4 \quad 0.274\ 7 \quad 0.132\ 1)^T \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\beta} = (0.7 \quad 0.2 \quad 0.1) \quad (12)$$

表 6 灰色关联度计算结果
Tab.6 Calculation results of grey correlation degree

Number	N			G_{RG}			G_{RG}
	Ra	δ	H	Ra	δ	H	
1	0.673 13	0.141 67	0.660 19	0.604 69	0.368 10	0.595 38	0.556 44
2	0.532 33	0.345 83	0.766 99	0.516 70	0.433 21	0.682 12	0.516 55
3	0.471 41	0.616 67	0.970 87	0.486 10	0.566 04	0.944 95	0.547 97
4	0.641 24	0.000 00	0.388 35	0.582 23	0.333 33	0.449 78	0.519 21
5	0.914 08	1.000 00	0.485 44	0.853 36	1.000 00	0.492 82	0.846 63
6	0.957 33	0.983 33	0.495 15	0.921 37	0.967 74	0.497 58	0.888 26
7	1.000 00	0.912 50	0.524 27	1.000 00	0.851 06	0.512 44	0.921 46
8	0.985 49	0.943 75	0.504 85	0.971 80	0.898 88	0.502 44	0.910 28
9	0.886 35	0.895 83	0.572 82	0.814 80	0.827 59	0.539 27	0.789 80
10	0.231 03	0.340 83	1.000 00	0.394 02	0.431 34	1.000 00	0.462 08
11	0.532 47	0.275 00	0.145 63	0.516 78	0.408 16	0.369 18	0.480 30
12	0.168 10	0.162 50	0.000 00	0.375 40	0.373 83	0.333 33	0.370 88
13	0.000 29	0.219 58	0.398 06	0.333 40	0.390 50	0.453 74	0.356 85

灰色关联度越大, 其对应试验工艺参数组合下的目标响应越好, 如表 7 所示。从主轴转速 n 和进给速度 v_f 5 个水平的平均灰色关联度可知, n 的最优水平为 Level 3 (380 m/min), v_f 的最优水平为 Level 3 (0.55 m/min)。同时, 根据极差分析理论, 由 max-min 的值可知, 主轴转速对多目标响应的影响大于进给速度。

表 7 不同工艺参数各水平灰色关联度的平均值
Tab.7 Average value of each grey correlation degree under different process parameters

Process parameters	n	v_f
Level 1	0.516 55	0.196 00
Level 2	0.552 21	0.518 37
Level 3	0.762 53	0.749 12
Level 4	0.418 57	0.452 41
Level 5	0.370 88	0.462 08
max-min	0.391 65	0.296 71

经过各响应的单目标分析可以发现, 表面粗糙度、尺寸误差和显微硬度均为参数依赖性响应, 因此灰色关联度 G_{RG} 亦为参数依赖性响应。由此可见, 工艺参数对灰色关联度的影响程度也是对表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度影响大小的加权和。工艺参数对三者的影响可以通过灰色关联度的变化来体现, 可以通过预测灰色关联度来实现对表面粗糙度、尺寸误差和显微硬度的多目标预测。

2.2.3 G_{RG} 响应模型构建

G_{RG} 的二阶数学预测模型如式 (13) 所示, 灰色关联度 G_{RG} 的二阶数学预测模型的方差分析与残差分析结果如表 8 所示, 给定的显著性水平 $F_{0.05}(5, 12) = 3.11$, 对 Ra 进行方差分析, 得到模型的 F 值为 57.47 (大于 3.11), $R_{Sq}=95.92\%$, 且 $P<0.000\ 1$, 远小于置信系数 0.05。同时, R_{Sq} 与 $R_{Sq}(\text{adj})$ 非常接近, 说明预测模型的可靠性很高。模型预测值与真实值的分布和对比如图 7 所示, 预测值与真实值无明显差别, 误差

表 8 GRG 响应模型方差分析
Tab.8 Variance analysis of GRG response model

Object	Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F	P
G_{RG}	Model	5	0.519 613	0.103 923	57.47	<0.000 1
	Error	7	0.012 657	0.001 808		
	Aggregate	12	0.532 271			
Model summary			$R_{Sq}=95.92\%$	$R_{Sq}(\text{adj})=95.14\%$		

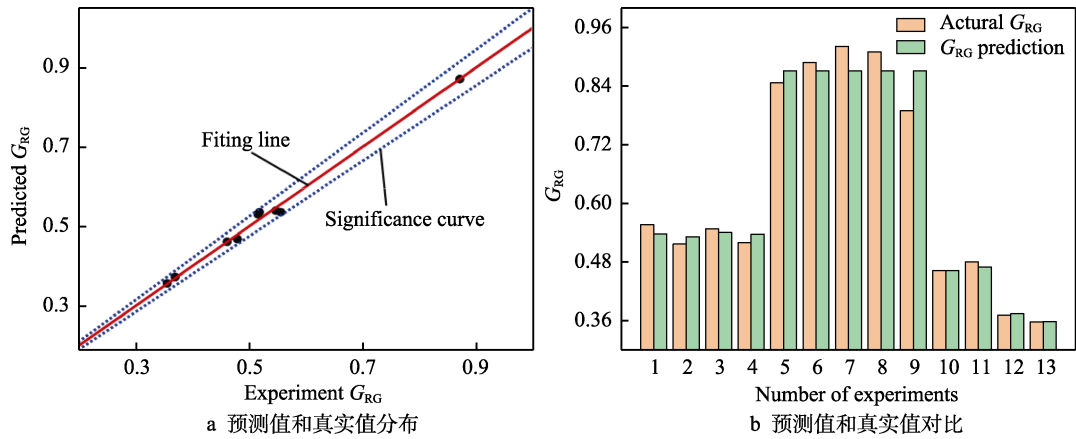


图 7 G_{RG} 预测值与真实值的分布和对比
Fig.7 Distribution and comparison of G_{RG} predicted value and real value: a) distribution of predicted value and real value; b) comparison of predicted value and real value

区间为 0.13%~9.4%，无异常点出现，说明预测模型对观测值的拟合度较好。

$$\hat{y}_4 = -33.53 - 0.1766x_1 + 4.62x_2 - 0.000232x_1^2 - 2.975x_2^2 - 0.00383x_1x_2 \quad (13)$$

式中： x_1 为主轴转速，r/min； x_2 为进给速度，m/min； \hat{y}_4 表示预测的灰色关联度 G_{RG} 。

使用 MINITAB 软件中的响应优化器结合响应面（图 8）对 G_{RG} 响应面预测模型进行了优化分析，用响应曲面法得到的最优灰色关联度 $G_{RG_{max}}$ 为 0.876 7，

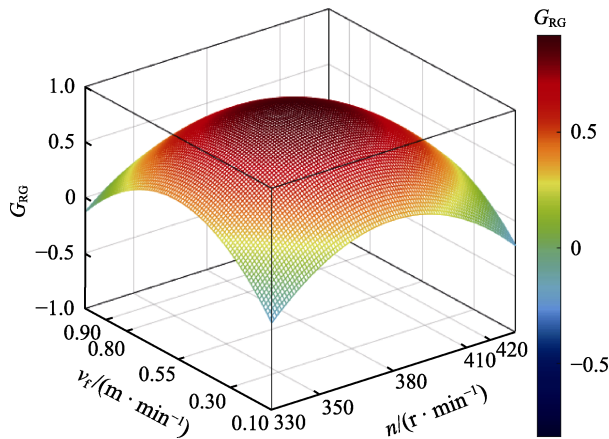


图 8 GRG 工艺参数响应面图
Fig.8 Response surface of GRG process parameters

其对应的工艺参数组为：主轴转速 $n=375.636\ 4\ \text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=0.531\ 6\ \text{m/min}$ 。

3 试验验证

通过分析试验结果，确定了最优灰色关联度 $G_{RG_{max}}$ 工艺参数组，下面通过试验来对 $G_{RG_{max}}$ 进行验证。为了与设计试验运行中的 $G_{RG_{max}}$ 工艺参数组进行比较，选用最小表面粗糙度 Ra_{min} 、最小尺寸误差 δ_{min} 、最大表面显微硬度 H_{max} 、最优灰色关联度工艺参数组作为对照试验。试验结果对比如表 9 所示， Ra_{min} 工艺参数组得到的表面粗糙度相对最小； δ_{min} 工艺参数组得到的尺寸误差相对最小； H_{max} 工艺参数组得到的表面显微硬度相对最大，证明了表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的单目标预测模型的可行性。

在 $G_{RG_{max}}$ 工艺参数组取得的试验结果中，相对于 Ra_{min} 工艺参数组，尺寸误差降低了约 34.48%，表面显微硬度提高了约 5.86%；相较于 δ_{min} 工艺参数组，表面粗糙度降低了约 8.97%，表面显微硬度提高了约 1.29%；相对于 H_{max} 工艺参数组，表面粗糙度降低了约 54.39%，表面显微硬度提高了约 59.36%。进一步证明了基于灰色关联分析的响应曲面法的可行性。

表 9 响应最优工艺参数组试验
Tab.9 Experiment of response optimal process parameter group

Object	Parameter	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$Ra/\mu\text{m}$	δ/mm	$H\ (\text{HB})$
Ra_{min}	Prediction	373.919 0	0.474 5			
	Actual	374	0.475	0.396	0.011 6	290
δ_{min}	Prediction	375.636 0	0.596 0			
	Actual	376	0.596	0.457	0.003 9	311
H_{max}	Prediction	337.000 0	0.903 0			
	Actual	337	0.903	0.912	0.018 7	351
$G_{RG_{max}}$	Prediction	375.635 4	0.531 6			
	Actual	376	0.532	0.416	0.007 6	307

为了验证 $G_{RG_{max}}$ 工艺参数组对于不同尺寸线材盘圆的加工适用度, 选用 $\phi=6$ mm 的 GH2132 线材盘圆进行试验验证。试验结果表明, Ra 为 $0.490 \mu\text{m}$, δ 为 0.0088 mm, H 为 312HB, 试验结果满足工艺要求, 验证了优化工艺参数对不同尺寸盘圆的适用度。

4 可行工艺参数域

根据工艺参数与表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的多目标优化结果, 得到等值线图, 如图 9 所示。

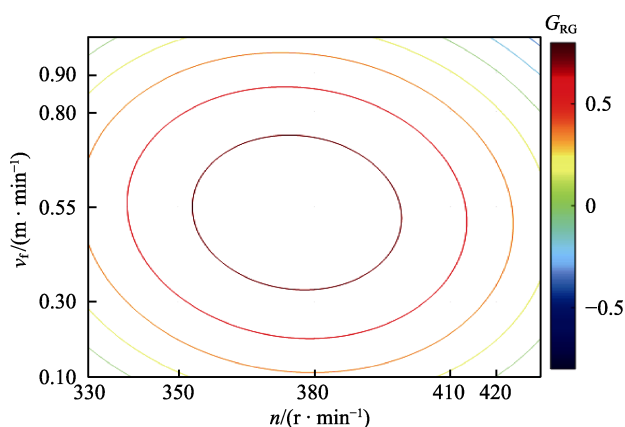


图 9 G_{RG} 工艺参数等值线图
Fig.9 Contour map of process parameters of G_{RG}

在工程实际中, 表面粗糙度的最大指标为 $0.8 \mu\text{m}$, 尺寸误差的最大指标为 0.05 mm, 表面显微硬度的最小指标为 280HB, 其对应最低评价指标 $G_{RG_{min}}$ 为 0.544 37。求解图 9 中 G_{RG} 最小评价指标所对应的等值线边界值和递变方向, 确定了可行工艺参数域的参数区间, 可为工程实际提供参考。

5 结论

1) 利用响应曲面中心复合试验, 根据试验数据并通过响应曲面法构建了表面粗糙度、尺寸误差和显微硬度的单目标响应曲面模型。同时, 通过分析可知, 表面粗糙度和尺寸误差随着工艺参数(主轴转速和进给速度)的增大, 呈现先减小后增大的趋势; 表面显微硬度呈现出随着主轴转速的增大逐渐减小、随着进给速度的增大逐渐增大的趋势。

2) 在切削去除表面缺陷的同时, 获得了最低表面粗糙度的工艺参数组: 主轴转速 $n=373.919$ r/min, 进给速度 $v_f=0.475$ m/min; 最小尺寸误差的工艺参数组: 主轴转速 $n=375.636$ r/min, 进给速度 $v_f=0.596$ m/min; 最大表面显微硬度的工艺参数组: 主轴转速 $n=337$ r/min, 进给速度 $v_f=0.903$ m/min。试验验证结果表明, 预测值与实验值的吻合度相符。同时, 表面粗糙度、尺寸误差和显微硬度得到有效改善, 表明使用各目标优化工艺参数组合可以在去除表面缺

陷的同时追求较好的目标响应。

3) 利用灰色关联理论, 对无心车床加工表面质量进行了多目标优化, 采用灰色关联分析方法将优化目标进行降维处理, 利用响应曲面法构建表面粗糙度、尺寸误差和表面显微硬度的多目标灰色关联度模型, 并验证其预测结果。同时考虑工程实际情况, 得到表面粗糙度、尺寸误差和显微硬度的灰色关联度值最低评价指标 $G_{RG_{min}}$ 为 0.544 37, 这对于线材盘圆表面缺陷的去除具有工程意义。

参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 93-112.
"China Aviation Material Handbook" Editorial Committee [M]. Beijing: China Standard Press, 2001: 93-112.
- [2] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 110-112.
HUANG Qian-yao, LI Han-kang. High-temperature Alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 110-112.
- [3] 鲁文婷, 陈亚军, 刘燕, 等. 17-4PH 航空紧固件表面氧化皮去除工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(1): 47-54.
LU Wen-ting, CHEN Ya-jun, LIU Yan, et al. Study on the Removal Process of Oxide Scale on the 17-4PH Aviation Fasteners[J]. Plating and Finishing, 2021, 43(1): 47-54.
- [4] 李英亮. 紧固件概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 188-192.
LI Ying-liang. Fasteners Basics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 188-192.
- [5] 董琦, 张学辉. 钢丝生产工艺及设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 41-45.
DONG Qi, ZHANG Xue-hui. Steel Wire Production Technology and Equipment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016: 41-45.
- [6] 徐效谦, 阴绍芬. 特殊钢钢丝[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 4-10.
XU Xiao-qian, YIN Shao-fen. Special Steel Wire[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 4-10.
- [7] 史丽晨, 贾永康, 张军锋. 车削去除钛合金棒材表面氧化皮工艺参数试验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 372-379.
SHI Li-chen, JIA Yong-kang, ZHANG Jun-feng. Research on Technological Parameters of Removing Oxide Coating from Titanium Alloy Bar Surface by Turning[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 372-379.
- [8] 贺连芳, 赵国群, 李辉平, 等. 基于响应曲面方法的热冲压硼钢 B1500HS 淬火工艺参数优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 77-82.
HE Lian-fang, ZHAO Guo-qun, LI Hui-ping, et al. Optimization of Quenching Parameters for Hot Stamping Boron Steel B1500HS Based on Response Surface Methodology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,

- 47(8): 77-82.
- [9] 陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 79-85.
CHEN Cong, GAO Ming, GU Yun-ze, et al. Study on Fiber Laser Cutting of Aluminum Alloy Sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 79-85.
- [10] 刘刚, 张恒, 王亚飞, 等. 碳纤维增强复合材料螺旋铣孔切削力及加工质量研究[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1292-1299.
LIU Gang, ZHANG Heng, WANG Ya-fei, et al. Study on Cutting Force and Machining Quality of Orbital Drilling for CFRP[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1292-1299.
- [11] 仇中军, 周立波, 房丰洲, 等. 石英玻璃的化学机械磨削加工[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1554-1561.
QIU Zhong-jun, ZHOU Li-bo, FANG Feng-zhou, et al. Chemical Mechanical Grinding for Quartz Glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1554-1561.
- [12] 练国富, 姚明浦, 陈昌荣, 等. 激光熔覆多道搭接成形质量与效率控制方法[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 229-239.
LIAN Guo-fu, YAO Ming-pu, CHEN Chang-rong, et al. Control of the Quality and Efficiency of Multi-Track Overlapping Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 229-239.
- [13] 刘永, 李淑娟, 李言, 等. 基于中心复合设计试验的 SiC 单晶片超声振动加工工艺参数优化[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 193-198.
LIU Yong, LI Shu-juan, LI Yan, et al. Central Composite Design Test Based Process Parameters Optimizing for Compound Machining with Ultrasonic Vibration on SiC Wafer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 193-198.
- [14] 何彦, 余平甲, 王乐祥, 等. 丝杠硬态旋铣工艺的多目标参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 894-904.
HE Yan, YU Ping-jia, WANG Le-xiang, et al. Multi-Objective Optimization of Machining Parameters for Hard Whirlwind Milling of Screw[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(4): 894-904.
- [15] 张雷, 张北鲲, 鲍宏. 面向低碳低噪的螺纹车削工艺参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 639-648.
ZHANG Lei, ZHANG Bei-kun, BAO Hong. Cutting Parameters Optimization of Thread Turning Oriented to Low Carbon and Low Noise[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(3): 639-648.
- [16] 李文龙, 陈燕, 赵杨, 等. 采用神经网络和遗传算法优化磁粒研磨 TC4 弯管工艺参数[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 330-336.
LI Wen-long, CHEN Yan, ZHAO Yang, et al. Optimizing Technological Parameters of Magnetite Grinding TC4 Elbow by Neural Network and Genetic Algorithms[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 330-336.
- [17] 李志山, 史耀耀, 辛红敏, 等. 灰色关联度优化钛合金盘铣开槽工艺参数[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 139-148.
LI Zhi-shan, SHI Yao-yao, XIN Hong-min, et al. Technological Parameter Optimization of Disc-Milling Grooving of Titanium Alloy Based on Grey Correlation Degree[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 139-148.
- [18] 梁存光, 李新梅. 基于灰色关联分析与回归分析 WC-¹²Co 涂层工艺参数的多目标优化[J]. 材料导报, 2018, 32(10): 1752-1756.
LIANG Cun-guang, LI Xin-mei. Multi-objective Optimization of WC-¹²Co Coatings Based on Grey Relational Analysis and Regression Analysis[J]. Materials Review, 2018, 32(10): 1752-1756.
- [19] 陈侠宇, 黄卫东, 张伟杰, 等. 基于灰色关联分析的选区激光熔化成形 18Ni300 模具钢多目标工艺优化[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 341-351.
CHEN Xia-yu, HUANG Wei-dong, ZHANG Wei-jie, et al. Multiple Targets Technology Optimization Based Grey Relative Analysis of 18Ni300 Die Steel Formed by Selective Laser Melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 341-351.
- [20] LAAMOURI A, GHANEM F, BRAHAM C, et al. Influences of Up-milling and Down-milling on Surface Integrity and Fatigue Strength of X160CrMoV12 Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 1209-1228.
- [21] ZHENG Xing-wei, YING Guo-fu, CHEN Yan, et al. The Effects of Cutting Parameters on Work-Hardening of Milling Invar 36[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1089: 373-376.
- [22] WENG Jian, ZHUANG Ke-jia, XU Dong-dong, et al. A Comprehensive Study on Cutting Mechanisms and Surface Integrity of AISI 304 when Turning a Curved Surface[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36(11): 1285-1298.
- [23] 史丽晨, 臧志达, 王海涛, 等. 无心车床空心主轴系统振动特性分析及结构优化[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(9): 1375-1380.
SHI Li-chen, YUN Zhi-da, WANG Hai-tao, et al. Analysis of Vibration Characteristics and Structure Optimization for Hollow Spindle System of Centerless Lathe[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(9): 1375-1380.
- [24] 皇甫云峰. 无心车床导向机构系统的特性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 7-10.
HUANGFU Yun-feng. Analysis of the Characteristics of the Guide Mechanism System of Centerless Lathe[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017: 7-10.
- [25] 张烘州, 明伟伟, 安庆龙, 等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(4): 447-451.
ZHANG Hong-zhou, MING Wei-wei, AN Qing-long,

- et al. Application of Response Surface Methodology in Surface Roughness Prediction Model and Parameter Optimization[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010, 44(4): 447-451.
- [26] BOX G E P, HUNTER J S. Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1957, 28(1): 195-241.
- [27] LIU Si-feng, FORREST J Y L. Grey systems: theory and applications[M]. Berlin: Springer, 2011:1-16.
- [28] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2822-2832.
- HONG Qi, SHI Yao-yao, LU Dan-ni, et al. Multi-Response Parameter Optimization for the Composite Tape Winding Process Based on Grey Relational Analysis and Response Surface Methodology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2822-2832.
- [29] DENG J. The Theory and Method of Socioeconomic Grey Systems[J]. Social Sciences in China, 1984, 6: 47-60.
- [30] 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 基于博弈论的 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(10): 1973-1981.
- DONG Peng-yu, WANG Hong-wei, CHEN You. GRA-TOPSIS Emitter Threat Assessment Method Based on Game Theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(10): 1973-1981.
- [31] LUO Zhi-meng, ZHOU Jian-zhong, ZHENG Li-ping, et al. A TFN-ANP Based Approach to Evaluate Virtual Research Center Comprehensive Performance[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 8379-8386.

责任编辑: 彭颀

(上接第 346 页)

- [10] ZHAO Jun, HUANG Jin-feng, WANG Rui, et al. Investigation of the Optimal Parameters for the Surface Finish of K9 Optical Glass Using a Soft Abrasive Rotary Flow Polishing Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 26-34.
- [11] 李敏. 剪切增稠抛光方法的基础研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 30-43.
- LI Min. Fundamental Research on Shear-Thickening Polishing Method[D]. Changsha: Hunan University, 2015: 30-43.
- [12] LI Min, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear-Thickening Polishing Method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 88-99.
- [13] SHAO Qi, DUAN Shi-xiang, FU Lin, et al. Shear Thickening Polishing of Quartz Glass[J]. Micromachines, 2021, 12(8): 956.
- [14] LYU B H, SHAO Q, HANG W, et al. Shear Thickening Polishing of Black Lithium Tantalite Substrate[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(9): 1663-1675.
- [15] WANG Jia-huan, LYU Bing-hai, JIANG Liang, et al. Chemistry Enhanced Shear Thickening Polishing of Ti-6Al-4V[J]. Precision Engineering, 2021, 72: 59-68.
- [16] SHAO Qi, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear Thickening Polishing of the Concave Surface of High-Temperature Nickel-Based Alloy Turbine Blade[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 72-84.
- [17] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海. 剪切增稠抛光磨料液的制备及其抛光特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2513-2521.
- LI Min, YUAN Ju-long, LYU Bing-hai. Preparation of Shear Thickening Polishing Abrasive Slurries and Their Polishing Properties[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(9): 2513-2521.
- [18] PETERS I R, MAJUMDAR S, JAEGER H M. Direct Observation of Dynamic Shear Jamming in Dense Suspensions[J]. Nature, 2016, 532(7598): 214-217.
- [19] 张周玲. 聚氧化乙烯/纳米二氧化硅水溶液剪切增稠行为的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2012: 35-38.
- ZHANG Zhou-ling. Studies on the Shear-Thickening Behavior of Solution Composed of PEO and Nano-SiO₂[D]. Hefei: Anhui University, 2012: 35-38.
- [20] PRABHU T A, SINGH A. Effect of Carrier Fluid and Particle Size Distribution on the Rheology of Shear Thickening Suspensions[J]. Rheologica Acta, 2021, 60(2): 107-118.
- [21] HOSHINO T, KURATA Y, TERASAKI Y, et al. Mechanism of Polishing of SiO₂ Films by CeO₂ Particles[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 283(1-3): 129-136.
- [22] 翁海舟, 吕冰海, 胡刚翔, 等. 石英晶片剪切增稠抛光优化实验[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(3): 227-233.
- WENG Hai-zhou, LYU Bing-hai, HU Gang-xiang, et al. Optimization Experiments for Shear Thickening Polishing of Quartz Substrates[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(3): 227-233.
- [23] 于淼. 纳米二氧化硅流体的剪切增稠行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019: 20-29.
- YU Miao. The Study on the Shear Thickening Behaviors of Nanosilica Fluids[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019: 20-29.

责任编辑: 彭颀