

引文格式: 贾宗强, 白海清, 张乐, 等. A100钢干式高速铣削表面粗糙度控制研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(23/24): 79–87, 95.

JIA Zongqiang, BAI Haiqing, ZHANG Le, et al. Research on Surface Roughness Control of Dry High-Speed Milling of A100 Steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(23/24): 79–87, 95.

# A100钢干式高速铣削表面粗糙度控制研究

贾宗强<sup>1</sup>, 白海清<sup>1,2</sup>, 张乐<sup>1</sup>, 任泽康<sup>1</sup>, 周俊<sup>1</sup>, 李高伟<sup>1</sup>

(1. 陕西理工大学, 汉中 723001;

2. 陕西省工业自动化重点实验室, 汉中 723001)

**[摘要]** A100 超高强度钢是飞机起落架的主体材料, 也是一种典型的航空难加工材料。为解决其干式高速铣削加工中存在的加工效率低和表面质量难以控制等问题, 同时平衡加工效率和表面质量, 以材料去除率、表面粗糙度及其信噪比为评价指标, 对铣削工艺参数进行多目标优化试验研究。首先, 设计了正交试验, 根据试验结果分析铣削工艺参数对评价指标的影响规律, 建立优化目标预测模型。然后, 采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解, 得到工艺参数的非支配解集。最后, 在考虑了加工效率后, 通过 TOPSIS 综合评价法对所得非支配解集进行二次筛选, 得到最优工艺参数组合。经对比发现, 优化后表面粗糙度相对于优化前最佳值降低了34.52%, 同时信噪比提高了7.14%, 为合理选择干式高速铣削参数提供了参考依据。

**关键词:** 超高强度钢; 高速铣削; 表面粗糙度; 多目标优化; 正交试验; 非支配排序遗传算法(NSGA-II)

中图分类号: V261.2; TG54

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.23/24.079

## Research on Surface Roughness Control of Dry High-Speed Milling of A100 Steel

JIA Zongqiang<sup>1</sup>, BAI Haiqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Le<sup>1</sup>, REN Zekang<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>1</sup>, LI Gaowei<sup>1</sup>

(1. Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China)

**[ABSTRACT]** A100 ultra-high-strength steel is the main material of aircraft landing gear and a typical difficult-to-machine aerospace material. In order to solve the problems of low machining efficiency and difficult to control surface quality in its dry high-speed milling processing, and to balance the machining efficiency and surface quality at the same time, the multi-objective optimization experimental research on milling process parameters is carried out with the material removal rate, surface roughness and its signal-to-noise ratio as the evaluation indexes. Firstly, orthogonal experiments were designed to analyze the influence law of milling process parameters on the evaluation indexes based on the experimental results, and establish the optimization target prediction model. Then, the fast non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was used to solve the problem and get the non-dominated solution set of the process parameters. Finally, after considering the machining efficiency, the obtained non-dominated solution set is screened twice by TOPSIS comprehensive evaluation method to obtain the optimal process parameter combinations. After comparison, it is found that the optimized surface roughness is reduced by 34.52% compared to the optimal value before optimization, while the signal-to-noise ratio is improved by 7.14%, which provides a reference basis for the reasonable selection of dry high-speed milling parameters.

**Keywords:** Ultra-high strength steel; High speed milling; Surface roughness; Multi-object optimization; Orthogonal test; Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)

超高强度钢是指屈服强度大于 1380 MPa,或抗拉强度大于 1470 MPa 的钢材<sup>[1]</sup>。A100 钢 23Co14Ni12Cr3MoE 是一种新型高钴、镍,二次硬化型超高强度钢,性能接近美国的 Aermet100 钢,其抗拉强度高达 1931~2069 MPa,同时断裂韧性可以达到  $120 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  以上<sup>[2]</sup>,具有强度高、韧性好、屈服极限高等优点,广泛应用于飞机起落架的外筒、活塞杆、下扭力臂等航空关键承力构件。然而,该材料在切削过程中存在断屑困难、加工表面质量差、效率低等问题,是一种典型的航空难加工材料<sup>[3-4]</sup>。相关成形件对表面质量要求较高,而表面粗糙度显著影响着工件耐磨性、疲劳强度和接触刚度,是表面质量的重要组成部分<sup>[5]</sup>,因此,针对 A100 钢切削加工中表面粗糙度控制的研究具有重要意义。

随着我国进入高质量发展阶段,国家号召制造业要环保、节能和高效。为此,在切削加工领域,干式加工和微量润滑加工等干式、半干式切削逐步取代了湿式切削,适当减少了生产成本、环境污染和废液处理费用<sup>[6]</sup>,成为研究热点。Zhang 等<sup>[7]</sup>研究了干式加工和低温微量润滑加工两种不同润滑条件对刀具磨损的影响。Zhang 等<sup>[8]</sup>采用微织构刀具,有效减少了干式切削加工过程中的刀具磨损,提高了加工表面质量。高速铣削具有高效、优质、低能耗等优点,杨振朝等<sup>[9-10]</sup>分析了高速铣削工艺参数对表面残余应力、显微硬度和表面粗糙度的影响规律,得到了兼顾多个加工性能指标的最优铣削参数组合。Wang 等<sup>[11]</sup>以切削力和表面粗糙度为评价指标,研究了高速车削参数对 A100 钢加工表面质量的影响规律。Guo 等<sup>[12]</sup>采用正交试验法分析了高速铣削参数对铣削力和铣削温度的影响规律,并建立了二者的预测模型。

干式切削的切削用量较小,为提高加工效率,干式切削常与高速切削技术配合使用<sup>[13]</sup>。薛海鹏等<sup>[14]</sup>针对 AlCrSiN 涂层难以满足干式高速切削加工需求的问题,通过添加 B 元素在刀具表面制备了 AlCrBSiN 涂层,并证实了其具有较好的切削加工性能。韩英瑞等<sup>[15]</sup>研究了干式高速车削未淬火的 D6AC 高强度钢涂层硬质合金刀具的磨损特点及切削力和表面粗糙度的变化规律。赵杨等<sup>[16]</sup>采用涂层硬质合金刀具对 AF1410 超高强度钢进行了干式高速铣削试验,研究了铣削力随工艺参数的变化规律。杜凯等<sup>[17]</sup>研究了淬硬 45CrNiMoVA 钢的精车代磨工艺,发现干式硬车削可显著提高加工表面硬度,且表面形貌一致性良好。工艺参数优化是一种提高切削加工性能的重要手段,Xu 等<sup>[18]</sup>采用硬质合金刀具对 AF1410 钢进行铣削加工,以铣削力、表面粗糙度和材料去除率为优化目标,利用 NSGA-II 算法进行了多目标优化;岳源等<sup>[19]</sup>利用粒子群算法优化了 TC25 钛合金的铣削加工参数,使表面粗糙度降低了 16.7%,加

工效率提高了 36.2%。

综上所述,通过干式高速铣削工艺参数的优化对 A100 钢加工表面粗糙度进行控制,具有很高的应用价值,然而目前关于 A100 超高强度钢干式高速铣削加工的公开资料较少。因此,本研究对 A100 钢的干式高速铣削加工进行正交试验研究,以材料去除率、表面粗糙度及其信噪比为评价指标,研究各工艺参数的影响规律,并基于主成分分析法和遗传算法进行多目标的铣削工艺参数优化。

## 1 试验条件与方案

### 1.1 试验条件

试验在 DMU50 五轴数控加工中心上进行,该机床最高主轴转速为 14000 r/min, X 轴最大行程为 500 mm, Y 轴最大行程为 450 mm, Z 轴最大行程为 400 mm, XYZ 3 向的最大进给速度为 30 m/min,重复定位精度为 0.008 mm。刀具采用涂层整体硬质合金四刃立铣刀,刀具直径  $D$  为 16 mm,涂层采用 PVD 工艺制备,涂层材料为 TiAlCrN,厚度为 4  $\mu\text{m}$ 。工件材料为 A100 超高强度钢 23Co14Ni12Cr3MoE。加工方式为干式顺铣,并使用瑞士 KISTLER 公司的 9527B 型三向动态压电式测力仪测量铣削力(取稳定加工阶段实时主铣削力的平均值为试验结果),使用 TR200 型表面粗糙度测量仪测量粗糙度(在已加工表面沿刀具进给方向调整位置,连续测量 3 次取平均值作为试验结果)。试验现场情况如图 1 所示。

### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 设计试验方案

根据前期所做的工作,确定了试验方案的因素水平如表 1 所示。

为了便于试验中的参数设置,将铣削速度和每齿进给量用机床主轴转速和进给速度来表示,即

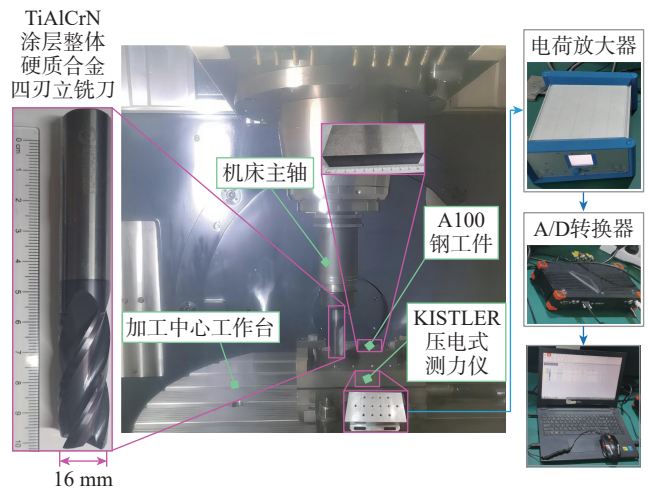


图 1 铣削试验

Fig.1 Milling experiment

$$n = \frac{1000V}{\pi D} \quad (1)$$

$$V_f = Zn f \quad (2)$$

式中,  $n$  为主轴转速, r/min;  $V$  为铣削速度, m/min;  $V_f$  为铣刀进给速度, mm/min;  $Z$  为铣刀刃数, 取值为 4。

将表 1 与式 (1) 和 (2) 结合, 得到表 2 所示正交试验方案。

### 1.2.2 工件的预处理

采用电火花线切割的方法切割 A100 钢, 得到 100 mm × 40 mm × 15 mm 的矩形工件, 并保证其上下待加工表面平行, 用砂纸打磨四周棱角并用酒精擦拭待加工表面, 以去除毛刺和油污。工件通过左右两端夹持的方式安装在测力仪上, 此时可加工段长度为 80 mm, 本研究准备了两个相同的工件完成加工试验。

### 1.2.3 确定试验方案的加工顺序

加工顺序遵循铣削深度先深后浅、铣削宽度先宽后窄的原则, 将正交试验方案划分为 5 组依次进行加工, 具体如图 2 所示。

## 2 试验结果与分析

材料去除率是重要的切削加工性能指标, 其数学表达式如式 (3) 所示。可见, 材料去除率与各铣削工艺参数呈线性正相关关系。

$$Q = \frac{ZfVa_w a_p}{\pi D} \quad (3)$$

式中,  $Q$  为材料去除率, cm<sup>3</sup>/min。

在加工过程中, 由于刀具刚度、夹套、刀具悬伸量的不同, 以及刀具磨损等都会对产品质量造成干扰。信噪比 (Signal to noise ratio, S/N) 可以反映产品质量的稳健性, 信噪比越大则加工质量的抗干扰能力越强, 反之则产品质量难以把控<sup>[20]</sup>。

信噪比按输出特性的不同可分为 3 类, 分别是“望大型”、“望小型”和“望目型”。其中, “望目型”设计是一种基于损失模型的稳健性设计方法, 属于“三次设计”理论中的“参数设计”部分, 用来确定使误差最小时可

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Levels of factors in orthogonal experiments

水平	铣削速度 $V/(m/min)$	每齿进给量 $f/(mm/z)$	铣削宽度 $a_w/mm$	铣削深度 $a_p/mm$
1	150.0	0.0500	3.0	0.20
2	162.5	0.0625	3.5	0.25
3	175.0	0.0750	4.0	0.30
4	187.5	0.0875	4.5	0.35
5	200.0	0.1000	5.0	0.40

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal experiment design

组别	序号	$n/(r/min)$	$V_f/(mm/min)$	$a_w/mm$	$a_p/mm$
第 1 组	1	2984	1193.6	5.0	0.40
	2	3233	969.9	4.5	0.40
	3	3482	696.4	4.0	0.40
	4	3730	1305.5	3.5	0.40
	5	3979	994.8	3.0	0.40
第 2 组	6	3979	795.8	5.0	0.35
	7	2984	1044.4	4.5	0.35
	8	3233	808.3	4.0	0.35
	9	3482	1392.8	3.5	0.35
	10	3730	1119.0	3.0	0.35
第 3 组	11	3730	932.5	5.0	0.30
	12	3979	1591.6	4.5	0.30
	13	2984	895.2	4.0	0.30
	14	3233	646.6	3.5	0.30
	15	3482	1218.7	3.0	0.30
第 4 组	16	3482	1044.6	5.0	0.25
	17	3730	746.0	4.5	0.25
	18	3979	1392.7	4.0	0.25
	19	2984	746.0	3.5	0.25
	20	3233	1293.2	3.0	0.25
第 5 组	21	3233	1131.6	5.0	0.20
	22	3482	870.5	4.5	0.20
	23	3730	1492.0	4.0	0.20
	24	3979	1193.7	3.5	0.20
	25	2984	596.8	3.0	0.20

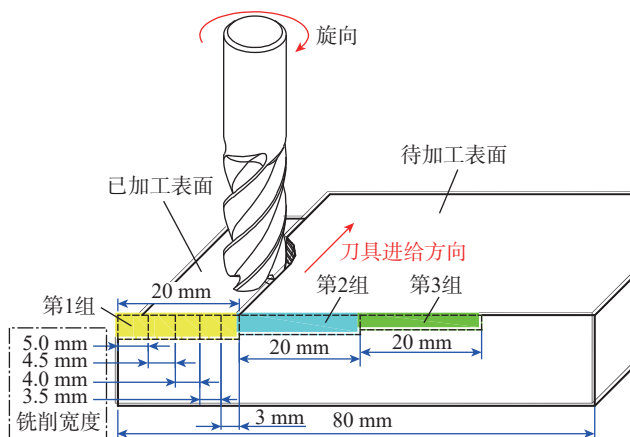


图 2 铣削加工示意图

Fig.2 Schematic diagram of milling process

控因素的最佳组合,以实现稳定的系统输出质量<sup>[21]</sup>。为提高加工表面质量的稳健性,故采用“望目型”信噪比分析,其计算公式为

$$S/N = 10 \lg \frac{\frac{1}{n}(S_m - S_y^2)}{S_y^2} \quad (4)$$

式中,  $n$  为重复试验的次数;  $S_m = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2$ ,  $y_i$  为观测数据的值;  $S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ,  $\bar{y}$  为观测数据平均值。

试验结果如表 3 所示。表面粗糙度、信噪比和材料去除率在各试验方案间的分布情况如图 3 所示。可见,铣削工艺参数显著影响着加工效率、表面粗糙度及其信噪比。

### 2.1 铣削力的影响规律分析

铣削力是重要的过程变量,间接反映了铣削加工过程的许多状况,如刀具是否磨损或崩刃等。利用极差分析法分析铣削力,得到铣削力随铣削工艺参数的变化规律(即主效应图)如图 4 所示。可见,在高速铣削阶段,铣削力随铣削速度的增加而减小;由于增加了切屑的截面积,故铣削力随每齿进给量、铣削宽度和铣削深度的增加而增大。各工艺参数对铣削力影响的主次顺序为:铣削深度 > 每齿进给量 > 铣削宽度 > 铣削速度。

### 2.2 表面粗糙度的影响规律分析

同样的方法,得到的表面粗糙度主效应图如图 5 所示。可见,由于铣削力的减小,刀具振幅降低,使表面粗糙度随铣削速度的增大而减小。与此类似的,表面粗糙度随每齿进给量和铣削深度的增加而增大。当铣削宽度为 4 mm 时表面粗糙度最低,表面粗糙度随铣削宽度的增加先减小后增大,通过对切屑的观察可以发现,这种变化规律产生的原因是:更大的铣削宽度产生的切屑长度更长,使切屑更容易卷曲和脱离,从而更好地避免了积屑瘤的产生,故粗糙度减小;而当铣削宽度增大到一定程度后,导致铣削宽度方向已加工表面残留高度明显增大,因此表面粗糙度增大<sup>[22]</sup>。

为进一步分析工艺参数对表面粗糙度影响的显著性大小,对表面粗糙度进行了方差分析,结果如表 4 所示。可见,铣削宽度对表面粗糙度的影响不显著,各工艺参数影响的主次顺序为:每齿进给量 > 铣削深度 > 铣削速度 > 铣削宽度。

### 2.3 信噪比的影响规律分析

表面粗糙度信噪比的主效应图如图 6 所示,其方差分析结果见表 5。可以直观看到,信噪比随铣削速度、每齿进给量、铣削深度的增大而减小,随铣削宽度的增加而增大,说明刀具振动频率和振动幅度的增大都会加剧加工表面质量的不稳定性,而增大铣削宽度有利于抑

制刀具振动(由于铣削速度的影响并不显著,故信噪比在铣削速度为 187.5 m/min 时出现了一个小的拐点,这可能是测量误差引起的)。各工艺参数对信噪比影响的主次顺序为:铣削深度(方差贡献率 42.27%) > 每齿进给量(方差贡献率 20.94%) > 铣削宽度(11.4%) > 铣削速度(2.03%),铣削深度对信噪比起到决定性作用,应严格控制。

### 2.4 铣削力对表面粗糙度的影响分析

铣削力是影响表面粗糙度的关键参数<sup>[23]</sup>。灰色相对关联度分析法表征了参考序列  $Y_0$  与比较序列  $X_i$  相对于起始点变化速率之间的近似关系,二者变化速率越接近则相对关联度的值越接近于 1<sup>[24]</sup>。前文结合铣削

表 3 试验结果

Table 3 Experimental results

序号	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$				S/N	铣削力 F/N
	No.1	No.2	No.3	均值		
1	1.605	1.264	1.428	1.432	18.46	128.89
2	0.999	1.136	1.039	1.058	23.53	103.29
3	0.616	0.581	0.555	0.584	25.61	92.32
4	1.003	0.800	1.110	0.971	15.76	109.08
5	1.082	0.982	1.195	1.086	20.15	87.41
6	0.554	0.521	0.535	0.537	30.21	80.81
7	1.221	1.110	1.300	1.210	22.05	101.76
8	0.993	1.050	1.117	1.053	24.59	78.75
9	0.970	1.301	1.150	1.140	16.72	103.97
10	0.902	0.727	1.108	0.912	13.53	80.05
11	0.719	0.703	0.747	0.723	30.23	70.12
12	0.710	0.825	0.701	0.745	20.64	99.43
13	0.989	1.059	0.988	1.012	27.91	75.92
14	0.491	0.522	0.510	0.508	30.23	69.15
15	1.118	1.470	1.188	1.259	16.56	77.04
16	0.600	0.598	0.631	0.610	30.36	64.98
17	0.508	0.494	0.509	0.504	35.57	56.42
18	0.530	0.525	0.700	0.585	15.33	69.82
19	0.810	0.810	0.823	0.814	40.71	55.84
20	0.908	0.995	1.304	1.069	14.16	71.19
21	0.820	0.823	0.831	0.825	43.86	58.97
22	0.566	0.578	0.570	0.571	39.42	46.16
23	0.615	0.628	0.631	0.625	37.32	63.15
24	0.737	0.784	0.715	0.745	26.50	48.67
25	0.665	0.664	0.649	0.659	37.33	44.86

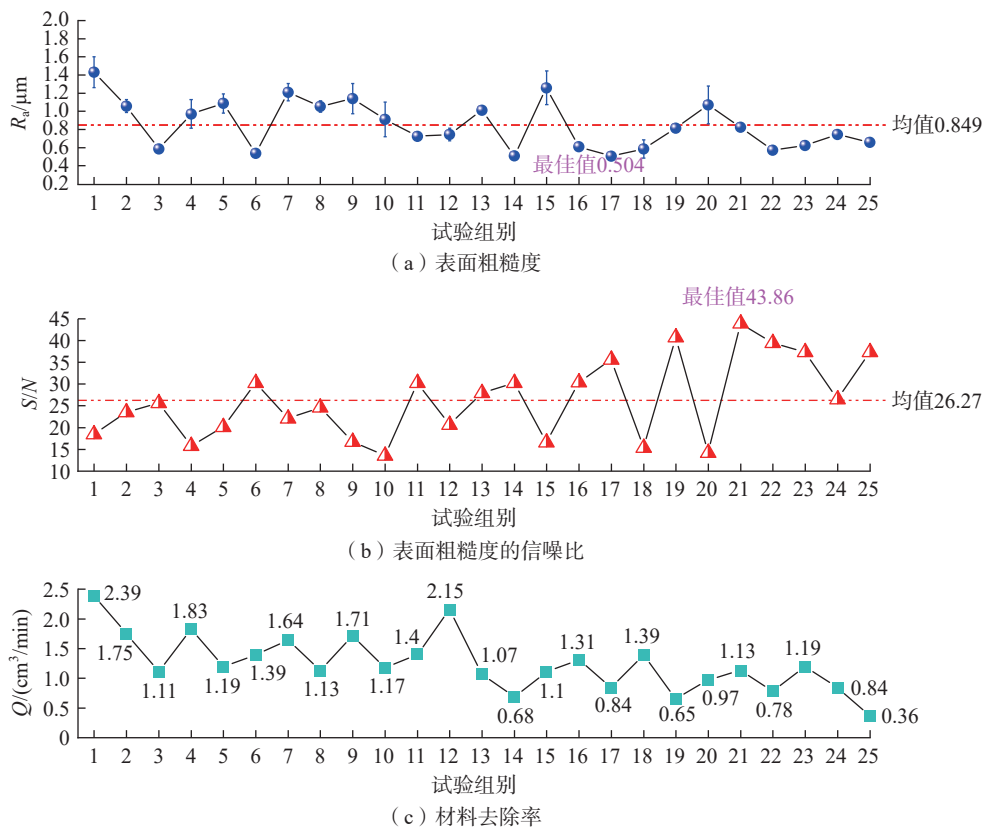


图3 试验结果分布

Fig.3 Distribution of test results

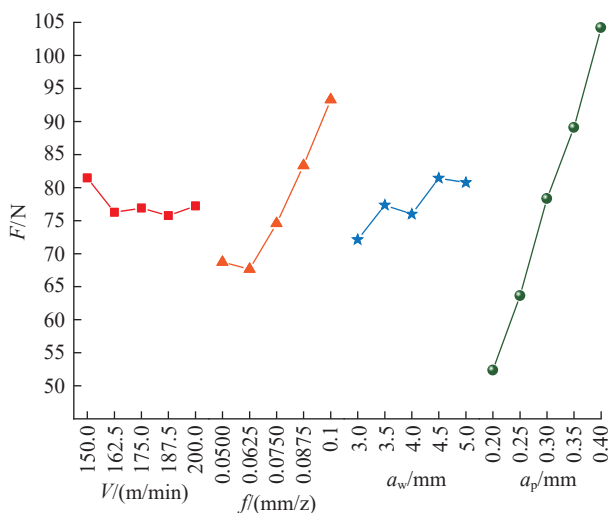


图4 铣削力的主效应图

Fig.4 Main effect plot of milling force

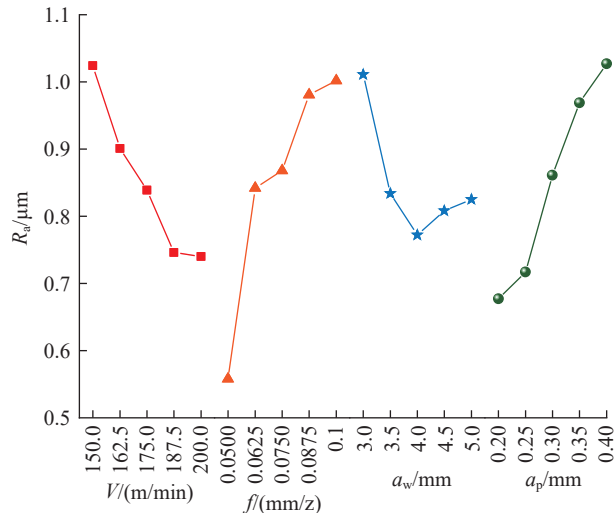


图5 表面粗糙度的主效应图

Fig.5 Main effect plot of surface roughness

力的变化,分析了表面粗糙度随铣削工艺参数的变化规律,这里利用灰色相对关联度分析法进一步研究铣削力与表面粗糙度的相关性,具体计算步骤如下。

(1) 构造原始序列。

原始比较序列  $X_i$  和原始参考序列  $Y_0$  分别为表面粗糙度和铣削力的转置,其计算公式为

$$X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)] \quad (5)$$

$$Y_0 = [y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(k)] \quad (6)$$

式中,  $i$  为数据序列号,  $i=1$ ;  $k$  为数据序号,  $k=1, 2, \dots, n, k=1$ 。

(2) 初始化。

原始序列  $X_i$  和  $Y_0$  经过初始化后,得到初始化序列  $X'_i$  和  $Y'_0$ 。

表 4 表面粗糙度方差分析  
Table 4 ANOVA for surface roughness

因素	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性	方差贡献率/%
$V$	0.28351	4	0.07088	3.79	0.05	*	8.11
$f$	0.61509	4	0.15377	8.22	0.006	**	28.21
$a_w$	0.14808	4	0.03702	1.98	0.191	—	—
$a_p$	0.45343	4	0.11336	6.06	0.015	*	18.41
误差	0.14971	8	0.01871	—	—	—	—
合计	1.64981	24	—	—	—	—	—

注：“\*”、“\*\*”分别代表“显著”、“极其显著”。

$$X_i' = [x_i'(1), x_i'(2), \dots, x_i'(k)] \quad (7)$$

$$Y_0' = [y_0'(1), y_0'(2), \dots, y_0'(k)] \quad (8)$$

式中,  $x_i'(k) = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}$ ,  $y_0'(k) = \frac{y_0(k)}{y_0(1)}$ 。

(3) 计算始点零化象。

$$X_i'' = [x_i''(1), x_i''(2), \dots, x_i''(k)] \quad (9)$$

$$Y_0'' = [y_0''(1), y_0''(2), \dots, y_0''(k)] \quad (10)$$

式中,  $x_i''(k) = x_i'(k) - x_i'(1)$ ,  $y_0''(k) = y_0'(k) - y_0'(1)$ 。

(4) 计算灰色相对关联度。

$$\gamma'_{i0} = \frac{1 + |s'_0| + |s'_i|}{1 + |s'_0| + |s'_i| + |s'_i - s'_0|} \quad (11)$$

式中,  $|s'_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} y_0''(k) + 0.5y_0''(n) \right|$ ,  $|s'_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i''(k) + 0.5x_i''(n) \right|$ ,

$|s'_i - s'_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} [x_i''(k) - y_0''(k)] + 0.5[x_i''(n) - y_0''(n)] \right|$ 。

经计算,发现铣削力与表面粗糙度之间的相对关联度为 0.9874,说明铣削力变化引起表面粗糙度变化的概率高达 98.74%,二者强相关。

### 3 铣削参数多目标优化

令  $A_i$  为铣削速度,  $B_i$  为每齿进给量,  $C_i$  为铣削宽度,

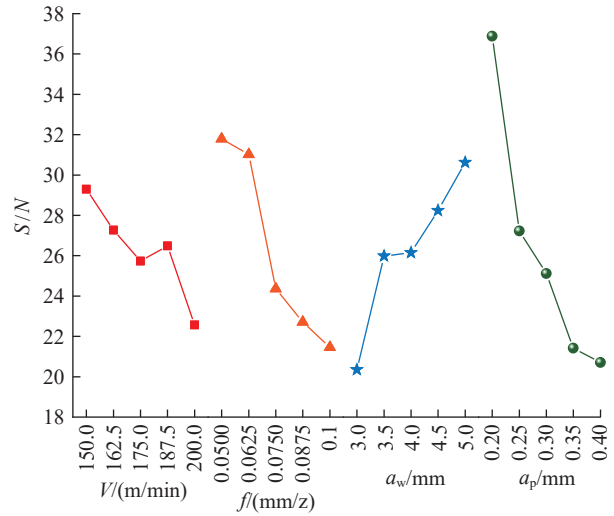


图 6 信噪比的主效应图

Fig.6 Main effect plot of signal-to-noise ratio

$D_i$  为铣削深度 ( $i=1, 2, \dots, 5$  分别代表各自的取值水平), 则由图 5 可知,表面粗糙度最低时对应的工艺参数组合为  $A_5B_1C_3D_1$ 。同样由图 6 可知,使信噪比最高时对应的工艺参数组合为  $A_1B_1C_5D_1$ 。由式 (3) 可知,材料去除率最高时对应的工艺参数组合为  $A_5B_5C_5D_5$ 。可以发现,各优化目标之间存在竞争关系,因此可以采用 NSGA-II

表 5 信噪比方差分析  
Table 5 ANOVA for signal-to-noise ratio

因素	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性	方差贡献率/%
$V$	120.93437	4	30.23359	2.87	0.096	—	2.03
$f$	462.14369	4	115.53592	10.96	0.002	**	20.94
$a_w$	290.03249	4	72.50812	6.88	0.011	*	11.40
$a_p$	847.23258	4	211.80814	20.10	0.000	**	42.27
误差	84.31541	8	10.53943	—	—	—	—
合计	1804.65855	24	—	—	—	—	—

注：“\*”、“\*\*”分别代表“显著”、“极其显著”。

算法进行多目标优化。

具体实施方法是采用 MATLAB 优化工具箱中基于 NSGA-II 算法改进的 gamultiobj 函数,其原理如图 7 所示。可见,其选择操作是基于序值和拥挤度距离的。首先,随机产生一定数量的种群,经过选择、交叉、变异得到子代种群。然后,将父、子代种群放在一起按非支配占优原理进行排序,当序值不同时,序值小的个体将被选中,当序值相同时,则拥挤距离大的个体将被选中。最后,将选中的个体与随机产生的新个体合并,进入下一轮循环,直至选中的个体随迭代的进行保持不变<sup>[25]</sup>。

其参数设置情况如下:

- (1) 在修剪种群阶段对序值的选择上,采用锦标赛方法,锦标赛规模设置为  $2^{[26]}$ ;
- (2) 种群大小为 1000;
- (3) 设定交叉率为中间交叉,设置为 0.9;
- (4) 变异概率为 0.1;
- (5) 精英解的比例为 0.03;
- (6) 迭代次数为 3000 代。

### 3.1 优化目标预测模型的建立

在多目标优化问题求解之前,需要先建立各优化目标的数学预测模型。采用逐步回归的方法,挑选出对评价指标有显著影响的项建立二次多项式的数学表达式,其模型为

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 \quad (12)$$

利用编程软件对数据进行编程处理,得到表面粗糙度的数学模型(式(13))和信噪比的数学模型(式(14)),这些数学模型也可称之为回归方程。

$$R_a = -1.6717 + 79.305f - 0.12178a_w - 0.26995V_f + 20.192fa_p + 0.000043V^2 - 1.99.3143f^2 \quad (13)$$

$$S/N = 68.8817 + 41.8317a_w - 730.335a_p - 3.0039V_f + 2.486Va_p + 89.105fa_w - 0.00175V^2 - 5.3577a_w^2 + 357.014a_p^2 \quad (14)$$

使用  $F$  检验法对回归方程(式(13))进行检验,可得  $F$  值为 21.1624,大于临界值  $F_{0.01}(6, 18) = 4.015$ ,说

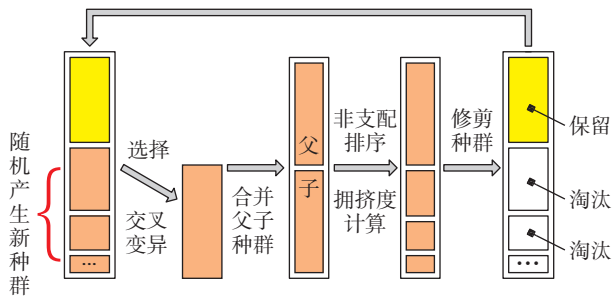


图7 NSGA-II 算法原理图

Fig.7 Schematic diagram of NSGA-II algorithm

明回归方程高度显著,可以使用。

对回归方程(14)进行显著性检验得  $F$  值为 14.6,大于临界值  $F_{0.01}(8, 16) = 3.89$ ,说明回归方程可用。

### 3.2 数据降维处理

为将计算资源更多地用于优先级更高的优化目标上,对表面粗糙度、信噪比和材料去除率进行主成分分析(PCA)<sup>[27]</sup>,计算方法如下。

(1) 建立原始矩阵  $Y$ 。

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,  $m$  为试验的次数;  $n$  为评价指标数量;  $y$  为评价指标矩阵,本文按列依次为表面粗糙度、信噪比和材料去除率,故  $m=25, n=3$ 。

(2) 计算皮尔逊相关系数矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中,  $r_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ) 为评价指标  $y_i$  与  $y_j$  的皮尔逊相关系数,  $r_{ij}=r_{ji}$ ,计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (y_{kii} - \bar{y}_{ii})(y_{kij} - \bar{y}_{ij})}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (y_{kii} - \bar{y}_{ii})^2 \sum_{k=1}^m (y_{kij} - \bar{y}_{ij})^2}} \quad (17)$$

式中,  $ii=1, 2, \dots, n, jj=1, 2, \dots, n$ ,且  $ii \neq jj$ ,表示不同的评价指标。

(3) 计算特征值与特征向量。

通过式(18)可得特征值  $\lambda_k$  及对应的特征向量  $\mu_k$ ,  $k=1, 2, \dots, n$ ,并将特征值从大到小排列。

$$R\mu_k = \lambda_k \mu_k \quad (18)$$

(4) 计算主成分贡献率和累计贡献率。

主成分贡献率为

$$\alpha_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

累计贡献率为

$$N_p = \sum_{k=1}^p \lambda_k / \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad (p=1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

当  $p$  个主成分的累计贡献率  $N_p \geq 85\%$  时,则提取的主成分特征可反映原来高维特征的信息。主成分分析结果如表 6 所示,前两个主成分的累计方差贡献率已经超过了 85%,因此只需选择表面粗糙度和信噪比进行多目标优化即可。

### 3.3 多目标优化及求解

#### 3.3.1 多目标优化

通过主成分分析,确定了将式(13)和式(14)作为NSGA-II算法的适应度函数,约束条件为正交试验中设计变量因素水平上下限。求解得到30个非劣解,其分布情况如图8所示,可见各非劣解按非支配关系均匀排列,效果较好。

#### 3.3.2 非支配解集筛选

为确定多目标问题的最优解,需要对非劣解集进行筛选。常用的方法有TOPSIS法(即优劣解距离法),其计算过程如下。

假设非劣解集矩阵为 $X$ (式(21)),通过式(22)进行指标同向化处理,得到同向化矩阵 $Z$ ,再通过式(24)和(25)得到矩阵 $Z$ 每列元素的最大值和最小值 $Z^+$ 、 $Z^-$ (即正理想解和负理想解),分别由式(26)和(27)计算各非劣解与 $Z^+$ 、 $Z^-$ 之间的距离 $D^+$ 、 $D^-$ ,并由式(28)计算各非劣解与正理想解的贴近程度 $C_i$ (即得分),得分越高,说明该解越优。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (21)$$

表6 主成分特征值及贡献率

Table 6 Eigenvalues and contributions of principal component

主成分	特征值	贡献率/%
第1主成分 $R_a$	2.057	68.56
第2主成分 $S/N$	0.516	17.21
第3主成分 $Q$	0.427	14.23
累计贡献率/%	100	

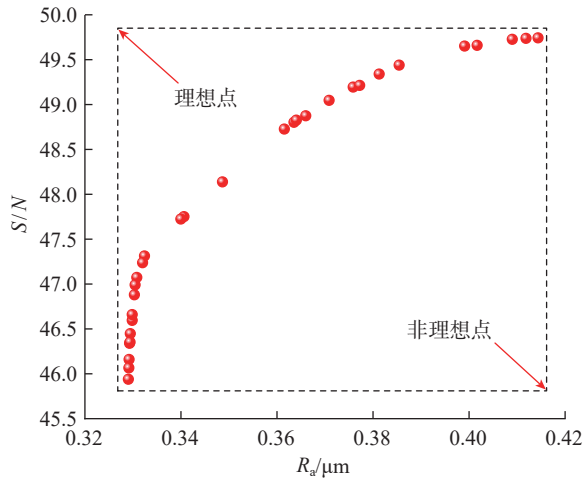


图8 非支配解集分布

Fig.8 Distribution of non-dominated solution sets

$$z_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, \text{高优指标} \\ 1/x_{ij}, \text{低优指标} \end{cases} \quad (22)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1j} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i1} & z_{i2} & \cdots & z_{ij} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$Z^+ = \max(Z_j) \quad (24)$$

$$Z^- = \min(Z_j) \quad (25)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^j (Z_k^+ - z_{ik})^2} \quad (26)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^j (Z_k^- - z_{ik})^2} \quad (27)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (28)$$

筛选流程如下:通过式(3)得到各非劣解对应的效率,选择前10个效率最高的非劣解,然后利用TOPSIS法进行评分,结果如图9所示。可见第9个非劣解的得分最高,即可得到最优的铣削工艺参数组合:铣削速度151.5 m/min、每齿进给量0.05 mm/z、铣削宽度5.0 mm、铣削深度0.20 mm。

#### 3.3.3 优化效果评价

结合表2、表3和图3可知,优化前表面粗糙度最佳值为0.504 μm,对应第17个正交试验方案,即铣削速度187.5 m/min、每齿进给量0.0500 mm/z、铣削宽度4.5 mm、铣削深度0.25 mm;信噪比最佳值为43.86,对应第21组试验方案,即铣削速度162.5 m/min、每齿进给量0.0875 mm/z、铣削宽度5.0 mm、铣削深度0.20 mm;各试验方案结果取平均,可得优化前的表面粗糙度均值为0.849 μm、信噪比均值为26.27。优化前后的表面质量对比如表7所示,可见经过对工艺参数的多目标优化,铣削加工表面粗糙度降低了34.52%,信噪比提高了

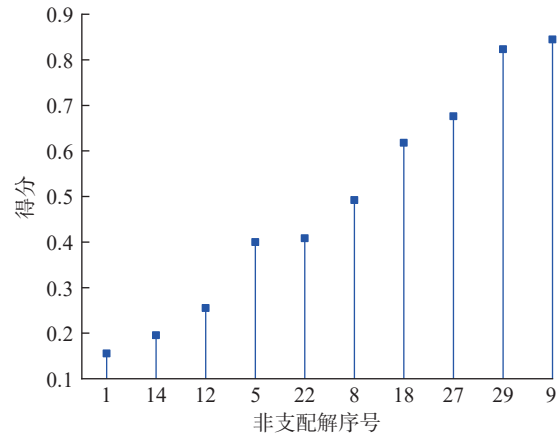


图9 非支配解集评分情况

Fig.9 Scoring of non-dominated solution sets

表7 优化效果对比

Table 7 Comparison of optimization effects

目标	优化后	优化前 均值	相对于 均值变化 率/%	优化前 最佳值	相对于 最佳值 变化率/%
$R_a$	0.33 $\mu\text{m}$	0.849 $\mu\text{m}$	-61.13	0.504 $\mu\text{m}$	-34.52
S/N	46.99	26.27	78.87	43.86	7.14

7.14%，两者均得到了显著改善，达到了预期效果。

## 4 结论

(1) 在 A100 超高强度钢的干式高速铣削加工中，工艺参数对表面粗糙度影响的主次顺序为每齿进给量 > 铣削深度 > 铣削速度 > 铣削宽度；对信噪比影响的主次顺序为铣削深度 > 每齿进给量 > 铣削宽度 > 铣削速度。其中铣削宽度对表面粗糙度的影响不显著、铣削速度对信噪比的影响不显著，而铣削深度对信噪比起到决定性作用，应加以严格控制。

(2) 利用灰色相对关联度分析方法，计算得到铣削力与表面粗糙度的相对关联度为 0.9874，即由铣削力变化所引起表面粗糙度发生变化的概率高达 98.74%，铣削力与表面粗糙度之间有着很强的关联性。

(3) 采用主成分分析法确定了 A100 钢铣削加工的输出评价指标权重，分别为表面粗糙度 68.56%、信噪比 17.21% 和材料去除率 14.23%，给出了将材料去除率作为非劣解集二次筛选依据的新方法。

(4) 最优的铣削工艺参数组合为铣削速度 151.5 m/min、每齿进给量 0.05 mm/z、铣削宽度 5.0 mm、铣削深度 0.20 mm。相比于优化前最佳值，优化后的表面粗糙度降低了 34.52%，表面粗糙度的信噪比提高了 7.14%，工艺参数优化取得了显著成效。

## 参考文献

- [1] ZHANG C M, MU A L, WANG Y X, et al. Influence of turning parameters on turning performance of ultra-high strength steel[J]. Integrated Ferroelectrics, 2020, 209(1): 110–118.
- [2] 任书杰, 罗飞, 田野, 等. A100超高强度钢的流变应力曲线修正与唯象本构关系[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 144–151.
- REN Shujie, LUO Fei, TIAN Ye, et al. Flow stress curve correction and phenomenological constitutive relationship of A100 ultra-high strength steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(6): 144–151.
- [3] AJAJA J, JOMAA W, BOCHER P, et al. Hard turning multi-performance optimization for improving the surface integrity of 300M ultra-high strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1): 141–157.
- [4] LIU Y K, YIN Z M, LUO J T, et al. The constitutive relationship and processing map of hot deformation in A100 steel[J]. High Temperature Materials and Processes, 2016, 35(4): 399–405.
- [5] 刘超, 黄尊鹏, 黄绍服. 考虑材料形变的旋风铣削螺纹工件

表面粗糙度建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(4): 761–771.

LIU Chao, HUANG Zunpeng, HUANG Shaofu. Surface roughness modeling of thread workpieces in whirlwind milling considering material deformation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(4): 761–771.

[6] 张而耕, 张致富, 周琼, 等. 两种DLC涂层对ZL108铝合金干式铣削性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 356–363.

ZHANG Ergeng, ZHANG Zhifu, ZHOU Qiong, et al. Effects of two DLC coatings on dry milling performance of ZL108 aluminum alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 356–363.

[7] ZHANG H P, ZHANG Z S, ZHENG Z Y, et al. Tool wear in high-speed turning ultra-high strength steel under dry and CMQL conditions[J]. Integrated Ferroelectrics, 2020, 206(1): 122–131.

[8] ZHANG N, YANG F Z, LIU G H. Cutting performance of micro-textured WC/Co tools in the dry cutting of Ti-6Al-4V alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(9): 3967–3979.

[9] 杨振朝, 薛阳, 袁启龙, 等. 高速铣削参数对超高强度钢表面完整性影响研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(6): 39–43.

YANG Zhenchao, XUE Yang, YUAN Qilong, et al. Effect of high-speed milling parameters on surface integrity of ultra-high strength steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(6): 39–43.

[10] 杨振朝, 杨福杰, 袁启龙, 等. 超高强度钢高速铣削表面完整性实验研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(7): 1061–1066.

YANG Zhenchao, YANG Fujie, YUAN Qilong, et al. Experimental study of surface integrity in high-speed milling of ultra-high strength steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(7): 1061–1066.

[11] WANG Y X, ZHANG C M, GUO C S, et al. Test and simulation study on turning of ultra high strength steel A-100[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 493: 012107.

[12] GUO C S, ZHANG C M, BAI H Q, et al. Influence of milling parameters on milling performance of 300M ultra high strength steel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 493: 012065.

[13] 胡明哲. 干式切削加工技术的发展及应用[J]. 机床与液压, 2019, 47(13): 179–185.

HU Mingzhe. Development and application of dry cutting technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(13): 179–185.

[14] 薛海鹏, 房磊琦, 蔡飞, 等. AlCrBSiN复合涂层制备及高速干式切削性能[J]. 中国表面工程, 2023, 36(4): 118–128.

XUE Haipeng, FANG Leiqi, CAI Fei, et al. Deposition and high-speed dry cutting performance of AlCrBSiN-coated cutters[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(4): 118–128.

[15] 韩英瑞, 庄重, 石海城, 等. 干式高速高效车削D6AC高强钢的试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(1): 83–88.

HAN Yingrui, ZHUANG Zhong, SHI Haicheng, et al. Experimental study on dry high speed and high efficiency turning of D6AC high strength steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(1): 83–88.

[16] 赵杨, 黄树涛, 许立福, 等. 铣削高强钢时高效余量去除的切削力研究[J]. 工具技术, 2022, 56(4): 28–33.

ZHAO Yang, HUANG Shutao, XU Lifu, et al. Research on cutting force of high efficient margin removal milling of high strength steel[J]. Tool Engineering, 2022, 56(4): 28–33.

[17] 杜凯, 焦黎, 颜培, 等. 淬硬超高强度钢45CrNiMoVA硬车削加工性研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 773–782.

(下转第 95 页)

LIN Lin, ZHAO Zhilei, JIANG Dongcen, et al. Characteristics analysis of abrasive water jet from pointed nozzle and its influence on profile of removal function[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(9): 116–129.

[9] 张旭, 秦世康, 齐欢, 等. 超声辅助微细磨料水射流冲蚀K9玻璃的实验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 346–353.

ZHANG Xu, QIN Shikang, QI Huan, et al. Experimental study on erosion processing of K9 glass using ultrasonic-assisted micro-abrasive water jet[J]. Surface Technology, 2021, 50(11): 346–353.

[10] 杨欢, 侯荣国, 吕哲, 等. 多物理场作用下磁场辅助微细磨料水射流流场数值模拟[J]. 机床与液压, 2019, 47(11): 151–154, 107.

YANG Huan, HOU Rongguo, LÜ Zhe, et al. Numerical simulation of micro abrasive water jet flow field assisted by magnetic field under action of multi-physics field[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(11): 151–154, 107.

[11] 花煜昌. 前混合磨料水射流切割45号钢的切深理论与试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.

HUA Yuchang. Theory and experimental study on cutting depth of 45 steel with pre-mixed abrasive water jet[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021.

[12] 王中昱, 张连新, 孙鹏飞, 等. 磨料水射流抛光技术综述[J]. 电加工与模具, 2019(S1): 70–74.

WANG Zhongyu, ZHANG Lianxin, SUN Pengfei, et al. Review on technology of abrasive jet polishing[J]. Electromachining & Mould, 2019(S1): 70–74.

[13] 陈逢军, 尹业青, 胡天. 仿形喷嘴磨料射流抛光微结构仿真及试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(15): 177–187.

CHEN Fengjun, YIN Yeqing, HU Tian. Simulation and experimental research on polishing microstructure by using abrasive water jet with profiling nozzle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15): 177–187.

[14] 王志阳, 王凯. 基于FLUENT的磨料水射流抛光喷嘴的流场仿真[J]. 中国设备工程, 2017(9): 101–103.

WANG Zhiyang, WANG Kai. Flow field simulation of abrasive water jet polishing nozzle based on FLUENT[J]. China Plant Engineering, 2017(9): 101–103.

[15] 张艺琳. 磨料水射流去除深孔及交叉孔毛刺的加工技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

ZHANG Yilin. Machining technology and mechanism of abrasive water jet deburring deep hole and cross hole[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[16] 马文涛, 潘俊锋. 不同喷嘴结构下水射流流场及破岩特征数值模拟[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 17–20.

MA Wentao, PAN Junfeng. Numerical simulation of flow field of water jet with different nozzle structures and rock breaking characteristics[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(9): 17–20.

[17] 夏楠, 马小刚, 吴传宗, 等. 磁力研磨工艺提高叶片表面质量的试验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 67–77.

XIA Nan, MA Xiaogang, WU Chuazong, et al. Experimental investigation of magnetic finishing for improving blade surface quality[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 67–77.

通信作者: 马小刚, 副教授, 博士, 研究方向为精密与特种加工。

(责编 阳光)

(上接第 87 页)

DU Kai, JIAO Li, YAN Pei, et al. Study of the hard turning processability of hardened ultra-high strength steel 45CrNiMoVA[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(3): 773–782.

[18] XU J, YAN F W, LI Y, et al. Multiobjective optimization of milling parameters for ultrahigh-strength steel AF1410 based on the NSGA-II method[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1): 8796738.

[19] 岳源, 王璋. 基于改进粒子群算法的钛合金TC25铣削参数优化[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 119–124.

YUE Yuan, WANG Zhang. Optimization of titanium alloy TC25 milling parameters based on improved particle swarm optimization[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(22): 119–124.

[20] LI Y E, ZHAO J, ZHANG H H. Prediction of the machined surface quality of ball-end milling of H13 die steel using MLBP method[J]. Machining Science and Technology, 2019, 23(5): 794–823.

[21] ASHENAFI A M, GEREMEW S. A combined simulation-based taguchi robust design approach for improved parameter design[J]. Industrial Engineering & Management Systems, 2020, 19(3): 644–656.

[22] 谭靛, 张定华, 姚倡锋. 高速铣削参数对TC17钛合金表面变质层的影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 75–81.

TAN Liang, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng. Effect of high-speed milling parameters on surface metamorphic layer of TC17 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 75–81.

[23] 张宏基, 葛媛媛, 唐虹, 等. 高速铣削工艺参数对AM50A镁合金铣削力和表面形貌的影响[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 124–131.

ZHANG Hongji, GE Yuanyuan, TANG Hong, et al. Effect of high speed milling process parameters on the milling force and surface topography of AM50A magnesium alloy[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 124–131.

[24] 胡东方, 王卓, 姬源浩. 基于广义灰关联的舱体结构可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15): 2021–2029.

HU Dongfang, WANG Zhuo, JI Yuanhao. Structure reliability analysis for airborne pod frame based on generalized grey relational method[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(15): 2021–2029.

[25] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB智能算法30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

SHI Feng, WANG Hui, YU Lei, et al. Analysis of 30 cases of MATLAB intelligent algorithm[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2011.

[26] 雷英杰, 张善文. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.

LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. MATLAB genetic algorithm toolbox and its application[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2014.

[27] 孔晓瑶, 袁松梅, 朱光远, 等. 基于灰色关联分析的微量润滑系统工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 73–81.

KONG Xiaoyao, YUAN Songmei, ZHU Guangyuan, et al. Optimization of process parameters of minimum quantity lubrication system based on grey relation analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 73–81.

通信作者: 白海清, 教授, 主要研究方向为数字化制造及装备、机电系统监测与控制技术。

(责编 阳光)