

引文格式: 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.

基于灰色关联分析的微量润滑系统工艺参数优化*

孔晓瑶^{1,2},袁松梅^{1,2},朱光远^{1,2},张文杰^{1,2}

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;
2. 北京市高效绿色数控加工工艺及装备工程技术研究中心,北京 100191)

[摘要] 为解决钛合金铣削加工中微量润滑系统工艺参数优化问题,采用正交试验法以空气流量、切削液用量、切削液浓度为变量,表面粗糙度 R_a 和切削力为评价指标开展钛合金微量润滑铣削试验。基于灰色关联和主成分分析法对微量润滑系统工艺参数进行多目标优化,通过分析各因素对灰色关联度的影响规律,确定了最佳系统参数组合为空气流量90L/min、切削液用量15mL/h、切削液浓度70%。经验证优化后的工艺参数可有效提高工件表面质量,减小切削力,为合理选择微量润滑系统工艺参数提供了参考依据。

关键词: 钛合金; 铣削; 微量润滑; 多目标优化; 灰色关联分析

Optimization of Process Parameters of Minimum Quantity Lubrication System Based on Grey Relation Analysis

KONG Xiaoyao^{1,2}, YUAN Songmei^{1,2}, ZHU Guangyuan^{1,2}, ZHANG Wenjie^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Beijing Engineering Technological Research Center of High-Efficient & Green CNC Machining Process and Equipment, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of parameter optimization of minimum quantity lubrication (MQL) system in titanium alloy milling, Taguchi method was used. With air flow rate, cutting fluid usage and cutting fluid concentration as variables, surface roughness R_a and cutting force as evaluation indexes, the MQL milling test of titanium alloy was carried out. Multi-objective optimization of minimum quantity lubrication system parameters was carried out using grey relation analysis and principal component analysis method. By analyzing the influence of various factors on grey relation grade, the optimal combination of system parameters was determined to be air flow rate of 90L/min, cutting fluid usage of 15mL/h and cutting fluid concentration of 70%. The optimized process parameters can effectively improve the surface quality of the workpiece and reduce the cutting force, which provides a reference for the reasonable selection of parameters of MQL system.

Keywords: Titanium alloy; Milling; Minimum quantity lubrication; Multi-objective optimization; Grey relation analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.06.073

钛合金作为航空航天工业中使用的重要结构材料具有比强度高、质量轻、耐腐蚀,机械性能好等特点^[1]。然而由于其弹性模量小、摩擦系数大、导热系数低,在切削加工中容易造成切削温度高、冷硬现象严重、刀具易磨损等现象,使钛合金成为了一种典型难加工材料^[2]。

微量润滑 (Minimum quantity lubrication, MQL) 切削技术作为一种新型的绿色冷却润滑方式,与其他润滑方式相比优势明显,具有较强的渗透吸附能力,能够有效改善钛合金切削加工过程中的冷却润滑条件,提高加工精度、减小刀具磨损^[3-5]。

* 基金项目:“高档数控机床与制造装备”科技重大专项(2018ZX04042001-004)。

目前,国内外学者对微量润滑铣削加工工艺开展了大量研究,主要集中于对比不同冷却润滑方式对切削力、表面质量以及刀具磨损情况的影响规律研究。Benjamin等^[6]通过开展钛合金低温微量润滑铣削试验,发现低温微量润滑切削能够减小材料和刀具间摩擦系数,有效降低切削力和切削温度,有助于提高加工过程中钛合金的断屑性能。陈博川等^[7]研究了不同冷却润滑方式对钛合金铣削加工的作用效果,结果表明在MQL条件下的切削力小,工件表面质量好,且刀具磨损程度小于传统浇注式和干式切削,更适用于钛合金铣削的精加工。在微量润滑技术的实际应用中,切削参数与冷却润滑参数的选择对切削加工效果的影响极为关键,Mia等^[8]对AISI 4140钢的微量润滑铣削加工工艺参数进行了优化,结果表明进给速度对切削力的影响最大,表面质量主要受切削液用量大小的影响。Do等^[9]采用正交试验法对AISI H13钢铣削加工微量润滑系统工艺参数进行了优化,切削液用量在50mL/h,空气压力为3kg/cm²时能够获得较好的加工效果。李强等^[10]以主轴速度、每齿进给量、切削液流速、空气压强以及水油流量比为变量,对铣削参数和MQL冷却参数的交互效应机理进行了深入分析,研究表明空气压强直接影响切削液的雾化程度以及流速,每齿进给量和切削液流量对表面粗糙度的影响存在显著交互作用。MQL系统工艺参数影响着切削液的雾化质量、液滴的喷射速度以及切削界面间雾粒的渗透效果,是实现微量冷却润滑作用效果的关键。

在切削加工中要想获得良好的加工效果需要科学合理地选择试验方法进行参数优化,综合考虑工艺参数对切削力、表面质量、刀具磨损等的影响规律。李志山等^[11]基于灰色关联分析法确定了钛合金盘铣开槽工艺参数优化方案。李体仁等^[12]采用正交试验法研究了切削参数对高速铣削钛合金切削力的影响规律,并基于Pareto遗传算法对切削参数进行了优化。Tosun等^[13]开展了不同冷却润滑方式下的铝合金铣削试验,基于灰色关联法对表面粗糙度和材料去除率进行了多目标优化。Khan等^[14]采用响应曲面法对AISI D2钢MQL铣

削温度和表面粗糙度进行了多目标参数优化并建立了预测模型。在进行工艺参数优化时多目标优化能够综合考虑各因素对试验指标的影响,与单目标优化相比更加科学合理,能够满足实际生产需求。灰色关联分析作为一种多目标优化方法可实现多个试验指标的协同优化,因而得到了广泛的应用。

本文为研究MQL系统工艺参数对钛合金常规铣削加工性能的影响规律,以切削力和表面粗糙度为优化目标,基于灰色关联和主成分分析法对水基切削液浓度、空气流量以及切削液用量进行多目标参数优化。

1 试验及方法

1.1 试验设备与材料

试验以TC4(Ti-6Al-4V)为研究对象,该材料是一种(α+β)两相钛合金,试验样件尺寸为90mm×90mm×20mm,其化学成分及力学性能见表1和2。

采用某企业钛合金铣削加工常用的切削参数,机夹式铣刀以及硬质合金涂层刀片在哈斯立式加工中心上进行槽铣试验,为保证加工质量以及刀具寿命采用顺铣的加工方式,铣削示意图如图1所示,参数设置如表3所示。试验所用微量润滑装置为课题组自主研发的MQL系统,可实现切削液用量在0~360mL/h范围内的精确控制,加工现场喷嘴方位的设置以及试验平台的搭建如图2所示。为研究切削液浓度对钛合金微量润滑铣削加工的作用效果,将去离子水与水基切削液原液按照不同质量比进行混合,配制不同浓度的水基微量润滑切削液。

切削力测量系统由Kistler 9257B测力仪、5070A型电荷放大器及数模转换器组成,在切削过程中,测力仪系统能够实时采集 F_x 、 F_y 、 F_z 3向铣削力信号,利用MATLAB软件对切削过程中连续稳定阶段的切削力信号进行滤波分析,输出 F_x 、 F_y 、 F_z 3向铣削力峰值的平均值,由式(1)可以得到铣削力合力 F ,每组试验参数均进行3次切削试验,将铣削力合力的平均值作为最终的测试结果。

表1 TC4化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of TC4 (mass fraction)

Ti	Fe	C	N	H	O	Al	V
余量	≤ 0.30	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.20	5.5~6.8	3.5~4.5

表2 TC4力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC4

屈服强度 δ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ %	断面收缩率 ψ %
≥ 800	≥ 895	≥ 10	≥ 25

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

表面粗糙度 R_a 通过手持式表面粗糙度仪 TR200 进行检测, 为避免引入试验误差, 测量位置选在切削宽度的中间部分, 避开切入、切出区域, 在每组试验参数下均沿着进给方向等距选取 5 个点测量, 取每组测量结果的平均值作为试验数据。

1.2 试验方案

为探究微量润滑系统工作参数对钛合金铣削效果的影响规律, 试验以切削液浓度、空气流量、切削液用量为变量, 以切削力和表面粗糙度 R_a 为指标进行三因素四水平的正交试验 $L_{16}(4^3)$, 根据前期预试验结果以及微量润滑装置实际工作性能进行参数选取, 正交试验参数与水平设置如表 4 所示。

2 结果与讨论

为使得试验安排更加科学合理, 按照正交试验表的统计学要求共进行了 16 组钛合金铣削试验。具体试验顺序与结果如表 5 所示, 其中 A、B、C 分别表示切削液浓度、空气流量和切削液用量, 1、2、3、4 分别代表不同因素的不同工艺参数水平。

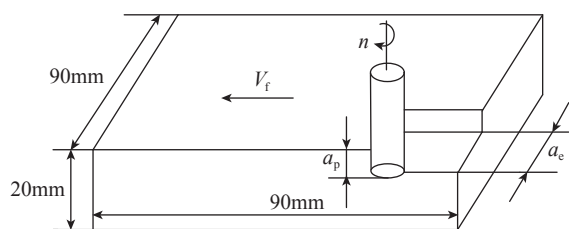


图1 铣削示意图

Fig.1 Schematic diagram of milling

2.1 灰色关联分析

2.1.1 灰色关联系数

(1) 评价指标矩阵。

在灰色关联法中, 假设评价系统中有 n 个评价指标, m 个试验方案, 则评价指标矩阵 A 为:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2) 数据无量纲化。

由于试验中各因素的物理意义不同, 数据的量纲也不尽相同, 为实现对切削力和表面粗糙度的综合处理, 需要进行试验指标的无量纲化。切削力和表面粗糙度

表3 切削加工参数

Table 3 Machining parameters

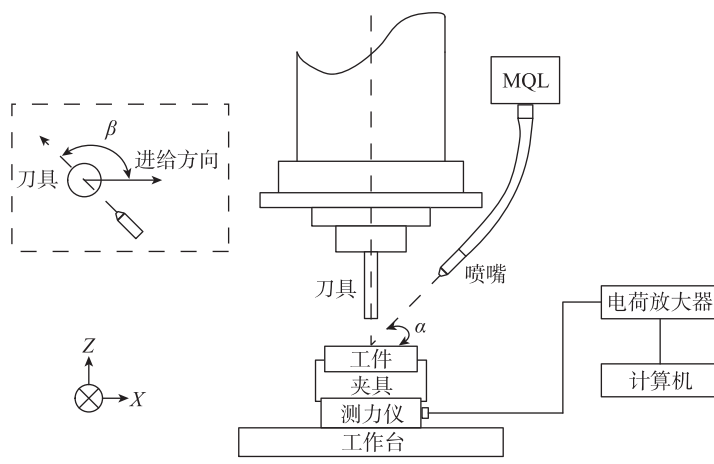
名称	参数
机床	HAAS 立式加工中心
材料	TC4 (Ti-6Al-4V)
刀具	SMTCL VMC0850B, $\phi=16\text{mm}$
刀片	SUMITOMO AXMT123508PEER-E
齿数 z	2
铣削速度 $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	60
铣削深度 a_p / mm	1
铣削宽度 a_e / mm	16
每齿进给量 $f / (\text{mm} \cdot z^{-1})$	0.05
喷嘴仰角 $\alpha / (^{\circ})$	60
喷射方向与进给方向夹角 $\beta / (^{\circ})$	120
喷嘴距切削区距离 d / mm	50
切削液	Blaser 7000



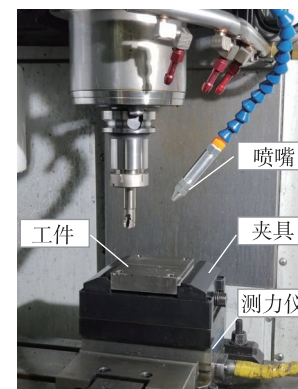
(a) HAAS 立式加工中心



(b) 微量润滑装置



(c) 切削平台示意图



(d) 试验现场

图2 试验设备及现场设置

Fig.2 Experimental equipment and setup of experimental site

R_a 值越小表明切削效果越好,可根据式(3)对表5中的数据进行无量纲处理^[13]:

$$x_i(k) = \frac{\max a_i(k) - a_i(k)}{\max a_i(k) - \min a_i(k)} \quad (3)$$

其中, $x_i(k)$ 为无量纲处理后的数列; $a_i(k)$ 为原始数列; i 为试验次数; k 为优化目标,即表面粗糙度和切削力; i 为试验次数, $i=1, 2, 3, \dots, m$ 。

(3) 灰色关联系数。

计算评价指标矩阵对应元素的灰色关联系数 ζ_i :

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (4)$$

其中, $x_0(k)$ 为参考数列,表面粗糙度和切削力经无量纲处理后的最优值均为1,故参考数列取 [1, 1]; $x_i(k)$ 为

经无量纲化处理后的数据, $i=1, 2, 3, \dots, m$; ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$, ρ 越小,关联系数间差异越大,区分能力越强,通常取 ρ 为 0.5。试验指标原始数据经处理后得到的灰色关联系数,如表6所示。

2.1.2 权重计算

通过主成分分析法可以确定切削力和表面粗糙度对灰色关联度的影响权重,具体计算步骤如下^[11]:

(1) 建立原始数列 Y 。

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_1(2) & \cdots & y_1(n) \\ y_2(1) & y_2(2) & \cdots & y_2(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_m(1) & y_m(2) & \cdots & y_m(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, m 为试验次数; n 为试验指标; y 为每个指标所对应的灰色关联系数,本文 $m=16, n=2$ 。

(2) 计算相关系数矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, r_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 表示原变量 y_i 与 y_j 的相关系数, $r_{ij}=r_{ji}$,计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (y_{ki} - \bar{y}_i)(y_{kj} - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (y_{ki} - \bar{y}_i)^2 \sum_{k=1}^m (y_{kj} - \bar{y}_j)^2}} \quad (7)$$

表4 正交试验因素与水平

Table 4 Taguchi experiment factors and levels

水平	因素		
	切削液浓度 A/%	空气流量 B/ (L · min ⁻¹)	切削液用量 C/ (mL · h ⁻¹)
1	10	40	15
2	30	60	30
3	50	90	60
4	70	110	90

表5 正交试验结果

Table 5 Taguchi experimental results

序号	因素				误差	切削力 F/N	表现粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
	切削液浓度 A	空气流量 B	切削液用量 C				
1	1	1	1	1	1	322.38	0.43
2	1	2	2	2	2	309.14	0.42
3	1	3	3	3	3	306.43	0.39
4	1	4	4	4	4	305.60	0.40
5	2	1	2	3	3	343.64	0.41
6	2	2	1	4	4	326.15	0.38
7	2	3	4	1	1	318.13	0.39
8	2	4	3	2	2	317.96	0.40
9	3	1	3	4	4	342.58	0.38
10	3	2	4	3	3	349.29	0.36
11	3	3	1	2	2	338.29	0.33
12	3	4	2	1	1	340.01	0.35
13	4	1	4	2	2	369.60	0.36
14	4	2	3	1	1	355.90	0.31
15	4	3	2	4	4	350.49	0.29
16	4	4	1	3	3	343.03	0.30

(3) 计算特征值与特征向量。

根据特征方程(8)求解出特征值 λ_k 及其对应的特征向量 μ_k , $k=1, 2, \dots, n$, 并将特征值按照从大到小的顺序排列 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ 。

$$(R - \lambda_k I_k) \mu_k = 0 \quad (8)$$

(4) 计算主成分贡献率及累计贡献率。

贡献率 α_i :

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

前 p 个主成分的累计贡献率 N_p :

$$\frac{\sum_{k=1}^p \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (p < n) \quad (10)$$

当累计贡献率 $N_p \geq 85\%$ 时, 特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 即为第 1, 第 2, \dots , 第 p 主成分。主成分分析结果如表 7 所示, 表面粗糙度的贡献率为 77.25%, 切削力的贡献率为 22.75%。从上述结果可知, 表面粗糙度对关联度的影响最大, 而切削力的影响相对较小, 对 MQL 系统参数进行优化能够有效提高钛合金铣削加工的表面质量。

2.1.3 灰色关联度

灰色关联度是灰色关联系数的加权和, 灰色关联度越大说明目标响应越好, 计算公式如下^[10]:

$$\gamma(x_o^*, x_i^*) = \sum_{k=1}^n \beta_k(x_o^*(k), x_i^*(k)) \quad (11)$$

其中, $\gamma(x_o^*, x_i^*)$ 代表 x_i^* 对 x_o^* 的灰色关联度; β_k 为第 k 个输出特性的权重。各试验指标的灰色关联度如表 6 所示, 其中第 15 组试验的关联度最大, 对应的目标响应越好。

2.2 优化结果分析

2.2.1 极差与方差分析

在正交试验中, 常采用极差 R 来反映各因素的水平变动对试验结果的影响大小, 极差越大表示该因素的水平变动对结果的影响越大。利用 Minitab 软件对灰色关联度进行极差分析, 结果如表 8 所示, 切削液浓度对关联度的影响最大, 其次是空气流量和切削液用量。误差在整个试验中对关联度的影响最小, 说明各因素间的交互作用很小, 可忽略不计, 试验结果是由各因素的水平变化而导致的, 并非试验的随机波动。

灰色关联度越大代表试验指标的响应越好, 根据这一原则可知, 在正交试验中最大灰色关联度对应的水平即为最优参数。因此, 在本试验条件下钛合金微量润滑铣削加工系统的最佳工作参数为 A4B3C1, 即水基切削液浓度 70%、空气流量 90L/min、切削液用量 15mL/h。

为进一步研究各因素对试验结果的影响程度, 在正交试验的基础上对灰色关联度进行了方差分析, 结果如表 9 所示。切削液浓度和空气流量在 $\alpha=0.05$ 水平下对

表6 试验指标数据处理结果

Table 6 Data processing results of experimental indicators

序号	无量纲化处理		灰色关联系数		灰色关联度	排序
	表面粗糙度 R_a	切削力 F	表面粗糙度 R_a	切削力 F		
1	0	0.7378	0.3330	0.6560	0.4067	15
2	0.0714	0.9447	0.3500	0.9004	0.4752	11
3	0.2857	0.9870	0.4118	0.9747	0.5398	5
4	0.2143	1	0.3889	1	0.5279	6
5	0.1429	0.4056	0.3684	0.4569	0.3885	16
6	0.3571	0.6789	0.4375	0.6089	0.4765	10
7	0.2857	0.8042	0.4118	0.7186	0.4816	9
8	0.2143	0.8069	0.3889	0.7214	0.4645	12
9	0.3571	0.4222	0.4375	0.4639	0.4435	14
10	0.5	0.3173	0.5000	0.4228	0.4824	8
11	0.7143	0.4892	0.6364	0.4947	0.6041	4
12	0.5714	0.4623	0.5385	0.4819	0.5256	7
13	0.5	0	0.5000	0.3333	0.4621	13
14	0.8571	0.2141	0.77778	0.3888	0.6893	3
15	1.0000	0.2986	1.0000	0.4162	0.8672	1
16	0.9286	0.4152	0.8750	0.4609	0.7808	2

关联度的影响显著,其贡献率分别为 51.16%、27.81%,而切削液用量对试验结果的影响相对较小,与极差分析所得的结果相一致。在钛合金铣削加工中,切削液的冷却润滑效果对改善刀具-工件间的摩擦状态起着至关重要的作用,切削液浓度的改变会对液体的黏度、表面张力以及喷嘴内部的流动速率产生影响,进而影响着液体的雾化效果以及刀具表面的油滴覆盖率,因此,切削液的选取是影响 MQL 冷却润滑效果最重要的因素。空气流量作为雾化的媒介决定着液滴的尺寸分布和运动速度,影响着刀具-工件、刀具-切屑接触面间液滴的渗透和吸附效果,此外较大的空气流量能够加强对流换热效果,带走加工过程中更多的切削热,有效降低切削温度。

2.2.2 影响规律分析

利用主效应法分析微量润滑系统工艺参数对表面粗糙度、钛合金铣削力以及关联度的影响规律,如图 3、4、5 所示, X 轴表示不同工艺水平, Y 轴表示信噪比均值响应,信噪比越大所对应的试验指标越好。

由图 3 (a)可知,表面粗糙度对应的灰色关联系数随着切削液浓度的增加而增大。切削液浓度较低时,液滴携带的润滑油成分极少,难以形成油膜附水滴颗粒,而在加工过程中切削区温度可达到几百℃,当液滴接触到加工区时会迅速蒸发,无法形成完整的润滑油膜。切

削液浓度越高液体黏度越大,液滴在刀具和工件表面的吸附性能越强,使得切削界面间润滑效果增强,工件表面质量得到提高。而切削力对应的灰色关联系数随着浓度的增加而减小,这是由于低浓度的切削液水含量高,与高浓度切削液相比换热效果更强,能有效降低切削区温度,在一定程度上能够起到降低切削力的作用,如图 4 (a)所示。灰色关联度是各试验指标所对应关联系数的加权和,由图 5 (a)综合分析可知最佳切削液浓度为 70%。

长期以来微量润滑切削机理是基于毛细管渗透理论,切削表面的微通道尺寸在 5~10μm,在 MQL 切削加工过程中直径较小的液滴能够有效渗透到切削区起到良好的冷却润滑作用。空气流量作为切削液雾化的媒介,其流量大小不仅会影响液体雾化性能,还将决定雾粒是否具有足够的动能到达切削加工区,改善界面间的冷却润滑条件。由图 3 (b)、图 4 (b)可知灰色关联系数随着空气流量的增加而增大,当空气流量超过 90L/min 时增加幅度减缓,甚至会有所减小。一方面是由于空气流量的增大对切削液的扰动作用增强,使得表面的振幅逐渐变大,促使液体能够更好地雾化成小液滴,有利于切削液对界面微通道的充分、快速填充^[15]。另一方面,空气流量的增加可以加快切削区热量的交换,能够在一定程度上起到降低切削区温度的作用,提高工

表7 主成分特征值及贡献率

Table 7 Principal component characteristic value and contribution rate

主成分	特征值	贡献率 /%
第 1 主成分 R_1	1.545	77.25
第 2 主成分 F	0.455	22.75
累积贡献率 /%	100	

表8 灰色关联度均值响应

Table 8 Mean response of grey relation grade

水平	切削液浓度 A	空气流量 B	切削液用量 C	误差
1	0.4874	0.4252	0.5670*	0.5258
2	0.4528	0.5309	0.5641	0.5015
3	0.5139	0.6232*	0.5343	0.5479
4	0.6998*	0.5747	0.4885	0.5788
R	0.2471	0.1980	0.0785	0.0773
排秩	1	2	3	4

注: * 为最优参数水平。

表9 灰色关联度方差分析结果

Table 9 Analysis of variance of grey relational grade

因素	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	F 临界值	显著性	贡献率 /%
切削液浓度 A	0.14640	3	0.048799	22.57	4.76	*	51.16
空气流量 B	0.08550	3	0.028501	13.18	4.76	*	27.81
切削液用量 C	0.01595	3	0.005317	2.46	4.76	—	1.14
误差	0.01297	6	0.002162	—	—	—	—
合计	0.26082	15	—	—	—	—	—

注: * 表示该影响因素在 $\alpha=0.05$ 水平下对试验结果的影响显著。

件表面质量。与此同时,随着空气流量的增加单个液滴获得的动能变大,当液滴撞击到刀具表面的速度过大时会产生液滴回弹现象^[16],不利于形成稳定的润滑油膜,因此,当空气流量增加到一定程度以后,其冷却润滑作用将有所减小。由图 5 (b) 综合分析空气流量对表面粗糙度和切削力的影响规律可知,灰色关联度随着空气流量的增加呈现出先增加后减小的趋势,在本试验条件下,90L/min 为最佳空气流量值。

与切削液浓度和空气流量相比,切削液用量对试验

结果的影响非常小,灰色关联度整体呈现逐渐减小的趋势,如图 5 (c) 所示。从雾化的角度来说,微量润滑切削加工中切削液的使用量极小,液体流量小范围的改变对液滴直径和尺寸分布的影响较小,因此,仅改变切削液用量对试验结果的影响不大。此外,当切削液用量处于一定范围内时,刀具表面的油膜边界比较稳定,切削液用量的增加并不一定会提高 MQL 的冷却润滑性能^[17]。在一定程度上,当空气流量保持恒定,较低的切削液用量可以使液体雾化得相对充分,液滴获得的动能

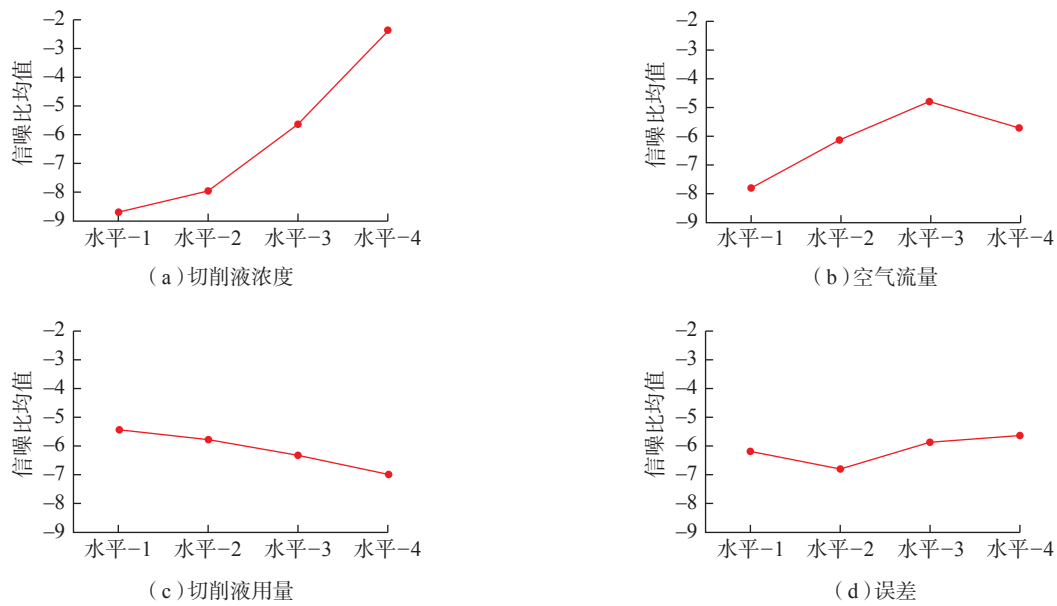


图3 表面粗糙度灰色关联系数信噪比均值响应图

Fig.3 Signal-to-noise ratio mean response of gray relation coefficient of surface roughness

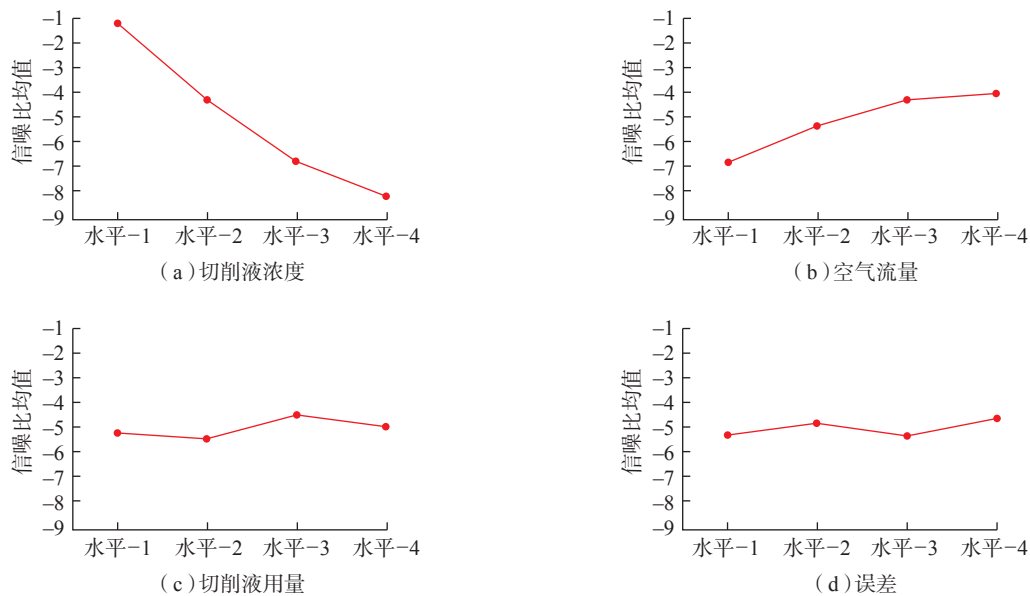


图4 切削力灰色关联系数信噪比均值响应图

Fig.4 Signal-to-noise ratio mean response of gray relation coefficient of cutting force

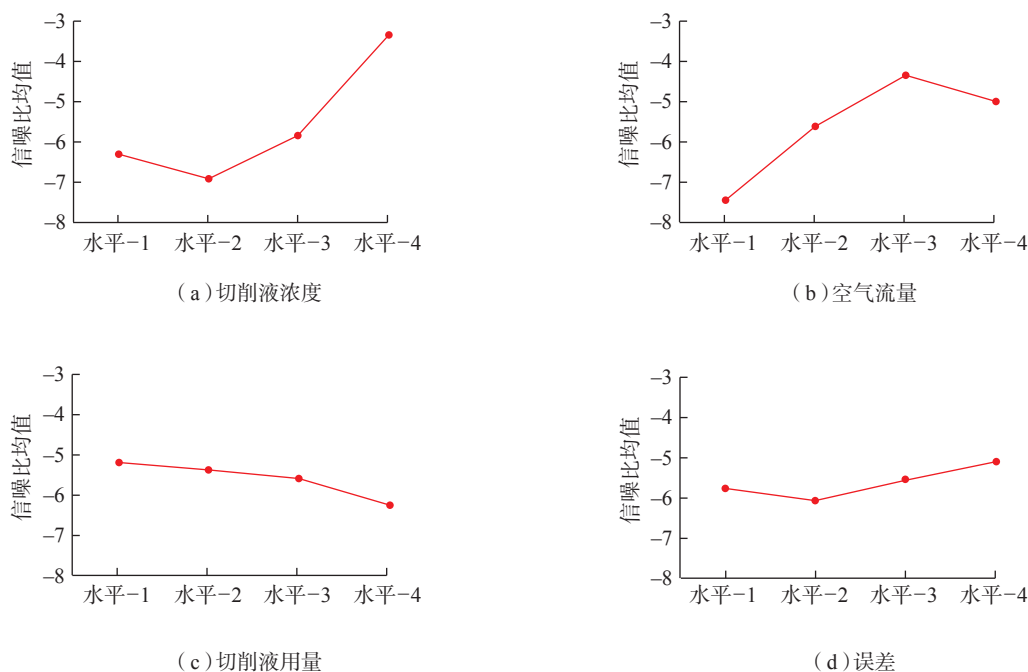


图5 灰色关联度信噪比均值响应图

Fig.5 Signal-to-noise ratio mean response of gray relation grade

增大,有利于雾粒在切削界面间的渗透吸附。

2.3 试验验证

根据试验结果确定的最佳系统工艺参数组合为:切削液浓度 70%、空气流量 90L/min、切削液用量 15mL/h,开展最优工艺参数验证试验,将正交试验中的最大关联度组合第 15 组参数作为对照组。经验证,在最佳工艺参数组合下,钛合金微量润滑铣削加工的表面粗糙度 R_a 为 $0.26\mu\text{m}$,切削力为 335.15N,灰色关联度为 0.8908,与对照组相比表面粗糙度降低了 10%。

3 结论

(1) 针对钛合金铣削微量润滑系统工艺参数优化问题,在正交试验的基础上,采用灰色关联与主成分分析法相结合的方式可实现对多个试验指标的协同优化,为实际生产中微量润滑系统工艺参数的选择提供了参考依据和优化方法。

(2) 采用主成分分析法确定了在钛合金微量润滑铣削加工中表面粗糙度 R_a 和切削力对灰色关联度的影响权重分别为 77.25%、22.75%,通过对 MQL 系统进行工艺参数优化可有效提高钛合金铣削加工的表面质量。

(3) 在本试验选定的刀具和铣削参数条件下,切削液浓度对试验结果的影响最大,其次是空气流量,而切削液用量的影响相对较小,根据实际工况合理选择切削液类型是有效提高钛合金微量润滑铣削加工质量的

前提。

(4) 在本试验条件下,钛合金微量润滑铣削加工的最佳系统工艺参数组合为切削液浓度 70%、空气流量 90L/min、切削液用量 15mL/h,经验证,该条件下表面粗糙度 R_a 为 $0.26\mu\text{m}$ 、切削力为 335.15N,灰色关联度为 0.8908。

参考文献

- [1] 程锐,艾兴,葛栋良,等. MQL 条件下微织构刀具车削钛合金的切削加工性试验分析[J]. 工具技术, 2018, 52(11): 36-39.
- [2] 王小明,韩江. TC4 钛合金高速铣削表面粗糙度研究[J]. 机械设计与制造, 2019(5): 232-236, 240.
- [3] 袁松梅,朱光远,王莉. 绿色切削微量润滑技术润滑剂特性研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 131-140.
- [4] KOLAHDOUZ S, HADI M, AREZOO B, et al. Investigation

of surface integrity in high speed milling of gamma titanium aluminide under dry and minimum quantity lubricant conditions[J]. Procedia CIRP, 2015, 26: 367–372.

[5] PERVAIZ S, ANWAR S, QURESHI S, et al. Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based techniques[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019, 6(1): 133–145.

[6] BENJAMIN D M, SABARISH V N, HARIHARAN M V, et al. On the benefits of sub-zero air supplemented minimum quantity lubrication systems: An experimental and mechanistic investigation on end milling of Ti–6–Al–4–V alloy[J]. Tribology International, 2018, 119: 464–473.

[7] 陈博川, 袁松梅, 朱光远, 等. 钛合金铣削加工中冷却润滑方式的作用效果研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(21): 83–93.

CHEN Bochuan, YUAN Songmei, ZHU Guangyuan, et al. Effects of different cooling and lubrication methods on milling of titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(21): 83–93.

[8] MIA M, BASHIR M A, KHAN M A, et al. Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1–4): 675–690.

[9] DO T V, HSU Q C. Optimization of minimum quantity lubricant conditions and cutting parameters in hard milling of AISI H13 steel[J]. Applied Sciences, 2016, 6(3): 83.

[10] 李强, 巩亚东, 梁彩霞, 等. 基于水基 MQL 的 DD5 单晶合金铣削表面粗糙度研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39(9): 1293–1298.

LI Qiang, GONG Yadong, LIANG Caixia, et al. Research on milled surface roughness of DD5 single crystal superalloy based on water-based MQL method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(9): 1293–1298.

[11] 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 Zhishan, SHI Yaoyao, XIN Hongmin, et al. Grey relation grade optimizing process parameters of disk milling grooving for titanium alloy[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 139–148.

[12] 李体仁, 胡晓强. 高速铣削钛合金 TC4 切削力试验研究及切削参数优化 [J]. 机床与液压, 2019, 47(1): 45–48.

LI Tiren, HU Xiaoqiang. Experimental research on cutting force of high speed milling titanium alloy TC4 and optimization of cutting parameters[J]. Hydromechanics Engineering, 2019, 47(1): 45–48.

[13] TOSUN N, PIHTILI H. Gray relational analysis of performance characteristics in MQL milling of 7075 Al alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5–8): 509–515.

[14] KHAN A M, JAMIL M, UL HAQ A, et al. Sustainable machining. Modeling and optimization of temperature and surface roughness in the milling of AISI D2 steel[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(2): 267–277.

[15] ISKANDAR Y, TENDOLKAR A, ATTIA M H, et al. Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 77–80.

[16] ZHUG Y, YUANS M, CHEN B C. Numerical and experimental optimizations of nozzle distance in minimum quantity lubrication (MQL) milling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(1–4): 565–578.

[17] LIUZ Q, CAIX J, CHEN M, et al. Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti–6Al–4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(8): 1273–1279.

通讯作者: 袁松梅, 教授, 博士生导师, 工学博士, 研究领域为先进制造, E-mail: yuansm@buaa.edu.cn。

(责编 阳光)

(上接第 72 页)

[6] XI Z W, ZHANG P, NIE W R, et al. A novel MEMS omnidirectional inertial switch with flexible electrodes[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 212: 93–101.

[7] YANG Z Q, ZHU B, CHEN W G, et al. Fabrication and characterization of a multidirectional-sensitive contact-enhanced inertial microswitch with a electrophoretic flexible composite fixed electrode[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(4): 045006.

[8] CAI H G, YANG Z Q, DING G F, et al. Development of a novel MEMS inertial switch with a compliant stationary electrode[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(7): 801–808.

[9] LEE J I, SONG Y, JUNG H, et al. Deformable carbon nanotube-contact pads for inertial microswitch to extend contact time[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4914–4920.

[10] 陈光焱, 王超. 微惯性开关设计技术综述 [J]. 信息与电子工程, 2009, 7(5): 439–442.

CHEN Guangyan, WANG Chao. Review of the design of micro inertial switch[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009, 7(5): 439–442.

[11] 杜立群, 王伟泰, 杜成权, 等. 基于微电铸工艺的镍微型惯性开关的研制 [J]. 电加工与模具, 2019(2): 47–51.

DU Liqun, WANG Weitai, DU Chengquan, et al. Development of nickel micro inertial-switch based on micro electroforming technology[J]. Electromachining & Mould, 2019(2): 47–51.

通讯作者: 杜立群, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微器件 UV-LIGA 加工技术、微模具制造、超声在微纳加工中的应用等, E-mail: duliquan@dlut.edu.cn。

(责编 阳光)