

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.09.016

基于水基 MQL 的 DD5 单晶合金铣削表面粗糙度研究

李 强^{1,2}, 巩亚东¹, 梁彩霞¹, 刘洛君¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为探究 DD5 单晶镍基高温合金铣削表面质量, 基于响应曲面法及水基微量润滑技术, 采用四刃整体立铣刀在(001)晶面上沿[110]晶向进行槽铣实验. 以主轴线速度、每齿进给量、切削液流速、空气压强及水油流量比为变量, 表面粗糙度 R_a 为评价指标, 基于极差和方差分析, 找出显著影响铣削表面质量的冷却和铣削参数, 并对其交互效应机理进行深入分析. 进而采用逐步回归方法和粒子群优化算法对铣削表面粗糙度进行预测和优化, 并基于均匀化设计对预测和优化结果进行评价.

关键词: DD5; 表面质量; 响应曲面法; 交互效应; 逐步回归; 粒子群优化

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)09-1293-06

Research on Milled Surface Roughness of DD5 Single Crystal Superalloy Based on Water-Based MQL Method

LI Qiang^{1,2}, GONG Ya-dong¹, LIANG Cai-xia¹, LIU Ming-jun¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China. Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to explore the relative problems of milled surface roughness of DD5 single crystal Ni-based superalloy, based on the response surface method (RSM) and water-based minimum quantity lubrication (MQL) technique, a series of milling experiments on (001) crystal plane along [110] crystal direction with the four flute whole end mill were conducted. The main spindle linear speed, tool feed per tooth, cutting fluid flow rate, air pressure and the flow rate ratio of water and oil were selected as the variables, while the surface roughness R_a was chosen as the evaluation indicator. Based on the range and variance analysis, the milling and cooling parameters that significantly affect the surface quality were found out and the interactive effects were deeply studied. Moreover, the surface roughness was predicted and optimized with stepwise regression and particle swarm optimization (PSO) method, respectively. The results were verified based on the uniform design method.

Key words: DD5; surface quality; RSM (response surface method); interactive effect; stepwise regression; particle swarm optimization (PSO)

单晶镍基高温合金由于消除了高温高压服役条件下与主应力轴垂直的晶界, 避免了大量弱化源的产生. 因此, 其可表现出更优异的高温强度、抗蠕变性能及高温抗氧化能力, 被广泛应用于航空航天等关键热端部件^[1]. 然而, 正由于其强度

高、导热性差等特点, 在加工过程中铣削力大、温度高, 易造成刀具磨损和被加工材料表面质量恶化, 其也成为一种典型的难加工材料.

目前, 对单晶镍基零件加工表面质量的研究已进行了一些初步性的探索. 如: Zhou 等^[2] 基于

收稿日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375082).

作者简介: 李 强(1986-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生; 巩亚东(1958-), 男, 辽宁本溪人, 东北大学教授, 博士生导师.

理论和经验方法对 DD98 微尺度磨削表面粗糙度进行了建模,并对磨削参数对表面质量的影响规律进行了分析;Gao 等^[3]采用响应曲面法研究了微铣削参数对 Ni₃Al 基单晶镍基高温合金表面粗糙度的影响规律并实现了优化;Zhu 等^[4]采用分子动力学仿真方法,对单晶镍的加工机理进行探讨,并基于时间-空间平均法对切削温度场分布进行研究.但就目前所查阅的文献来看,对单晶镍基高温合金 DD5 的宏观铣削仍鲜有报道.由于宏观铣削加工余量大,切削加工性差,因此有必要采取适当方法对铣削工艺及参数进行优化,改善表面质量.

水基 MQL 技术是在 MQL 基础上发展起来的一种新型绿色冷却方法.目前已被广泛应用于各工业领域并取得了一定成果^[5-6].水油混合物在高压空气流带动下,雾化成微米级油膜附水滴加工液,并以 10~100 mL/h 的流速高速渗入切削区,实现冷却和润滑.由于该技术采用去离子水作为冷却介质,其热传递系数明显高于高压空气,因此具有更优异的冷却效果,同时也可显著改善 DD5 铣削表面质量.

虽然铣削及 MQL 冷却参数对被加工表面质量的影响规律已被广泛研究^[7-8],此两种因素之间存在着一定的交互作用,但就目前所查阅的文献来看,该效应的作用机理并不明确.而基于中心复合设计(CCD)的 RSM 不但可用较少的实验数量对交互效应和平方响应进行评价和估计,而且可改善分析的稳定性和回归的精确性^[9].另外,基于逐步回归模型,一些现代优化算法如遗传(GA)、粒子群(PSO)及模拟退火(SA)等算法均可被采用以优化参数最优序列^[10-12].由于 PSO 可避免陷入局部最优并具有较强的联合搜索能力及快速的收敛速率,因此可采用该方法完成参数序列的优化.

本文以铣削参数(主轴线速度 v_s 及每齿进给量 f_z)和冷却参数(切削液流速 Q 、空气压强 p 及水油流量比 R)为变量,基于 RSM,设计正交槽铣实验.其次,基于方差分析,对交互效应的显著性及作用机理进行深入分析,进而通过逐步回归方法及 PSO 对表面粗糙度进行预测和优化.最后,基于均匀化实验设计,对预测和优化结果进行验证.

1 实验条件和方法

1.1 实验条件

实验以 DD5 单晶镍基高温合金为研究对象,

其由 63.2% 的 Ni,7.5% 的 Co,7% 的 Cr,6.5% 的 Ta,6.2% 的 Al 以及一些微量元素如 Mo, Hf, Re 等组成.其硬度、屈服强度、收缩率及熔点分别为 397.54 HV, 1 109 MPa, 13.5% 及 1 368 °C,金相结构如图 1a 所示,已完全消除图 1b 中多晶合金的晶界.

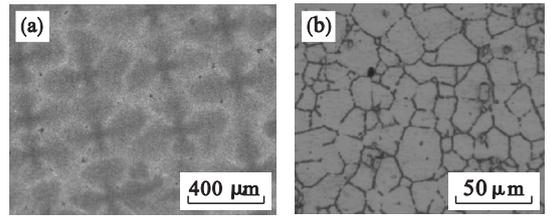


图 1 镍基高温合金金相组织结构
Fig. 1 Metallurgical structure of Ni-based superalloy
(a)—DD5; (b)—Inconel718.

为避免刀具与材料由于过强亲和力产生的剧烈粘结,采用 Al 和 Ti 原子比为 1:1 的 6 mm 刀径 PVD-AlTiN 涂层超精密钨钢基体四刃整体立铣刀 GM-4E 在 TH5650 三轴立式铣镗加工中心上沿 [110] 晶向进行槽铣实验,主轴最高转速为 6 000 r/min.另外,采用 KEYENCE VHX-1000E 数字光学显微镜及 STIL 三维表面轮廓仪分别对铣削表面形貌及粗糙度进行检测.实验加工、检测及水基 MQL 系统如图 2 所示.

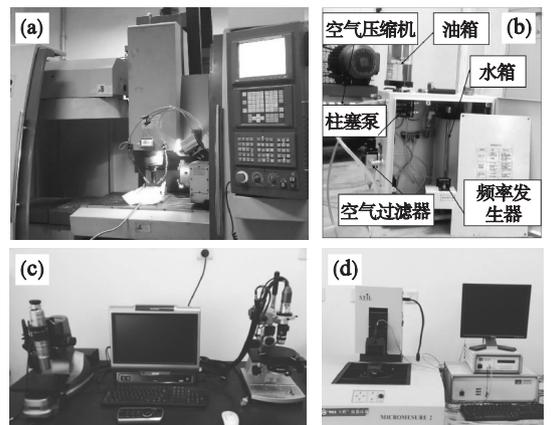


图 2 实验加工、检测及水基 MQL 系统
Fig. 2 Machining, measuring and water-based MQL systems

(a)—TH5650 加工中心; (b)—水基 MQL 系统;
(c)—VHX-1000E 光学显微镜;
(d)—STIL 3D 表面轮廓测量仪.

1.2 实验方法

为探究加工和冷却参数交互效应对铣削表面质量的影响规律并对 DD5 铣削表面粗糙度进行预测、优化和验证,需进行以下两方面实验:

1) 基于中心复合设计在 Minitab 环境下构建响应曲面,在响应曲面构建过程中需考虑以下三个问题,即是否选择全因子进行实验,如何确定星

号点位置以及如何确定中心点数量. 由于本实验中, 变量因子为 5 个, 为避免实验规模过于庞大, 选择部分因子实验方案; 对于 α (轴向点的非零项) 的确定除保证设计的近似旋转性, 还要保证参数的可调性, 避免参数过溢, 因此设置 $\alpha = 1.5$, 则中心点、立方体点和星号点可分别编码为 0, ± 1 及 ± 1.5 , 表 1 为各因子的编码及未编码水平. 另外, 为避免刀具磨损对表面质量的影响, 每把刀具只进行三次切削, 每次切削距离均为 20 mm.

表 1 切削参数的水平设置
Table 1 Levels of cutting parameters

未编码变量					编码变量
v_s $m \cdot \min^{-1}$	f_z μm	Q $mL \cdot h^{-1}$	R	p bar	
13.75	7.5	7.5	0.5	1.5	-1.5
20	9	20	1	2	-1
32.5	12	45	2	3	0
45	15	70	3	4	1
51.25	16.5	82.5	3.5	4.5	1.5

注: v_s —主轴转速; f_z —每齿进给量; Q —切削液流量; R —水油比; p —空气压强.

2) 均匀设计从数论一致理论出发, 考虑实验点在所选范围内的均匀散布并保证每个因素的每个水平仅做一次实验, 从而以求通过最少的实验来获得最多的信息, 并且任何一组均匀化实验均可反映所选范围的全局特征. 因此可以此实验方法对粗糙度的预测及优化结果进行评价和验证, 如表 2 所示.

表 2 五因素八水平均匀实验设计
Table 2 Five factors eight level uniform experimental scheme

编号	v_s $m \cdot \min^{-1}$	f_z μm	Q $mL \cdot h^{-1}$	R	p bar
1	20	8.6	40	3	4.5
2	24.3	10.8	80	2.22	4
3	28.6	13	30	1.36	3.65
4	32.9	15.5	70	0.93	3.22
5	37.2	7.5	20	3.5	2.8
6	41.5	9.7	60	2.65	2.36
7	45.8	11.9	10	1.8	1.93
8	50.1	14.1	50	0.93	1.5

2 实验结果及讨论

2.1 基于方差分析的变量显著性研究

在响应曲面实验设计中, 为验证实验是否是在均一环境下进行的, 采用 6 个中心点对实验结果进行评价, 共进行 32 组实验. 按照点类型进行

分类的实验结果与运行序之间的关系如图 3 所示. 其中 0 代表中心数据点, ± 1 代表星号点和立方点. 从散点图中可以看出, 趋势正常, 并没出现连续上升或下降趋势, 且表面粗糙度 R_a 数据没有明显偏倚, 因此可视为正态分布. 从散点图中还可看出数据中心点所对响应值稳定, 说明实验环境趋于一致.

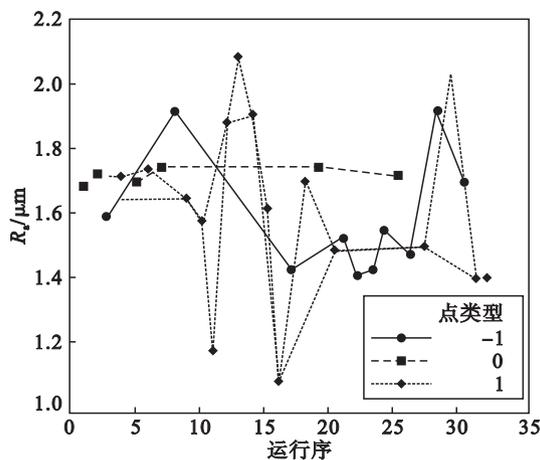


图 3 R_a 与运行序的关系

Fig. 3 Relationship between R_a and running order

为避免算法自身缺陷性, 本研究采用逐步回归方法逐一判断各交互效应对指标影响的显著性, 并建立二阶部分因素回归模型, 如式(1)所示:

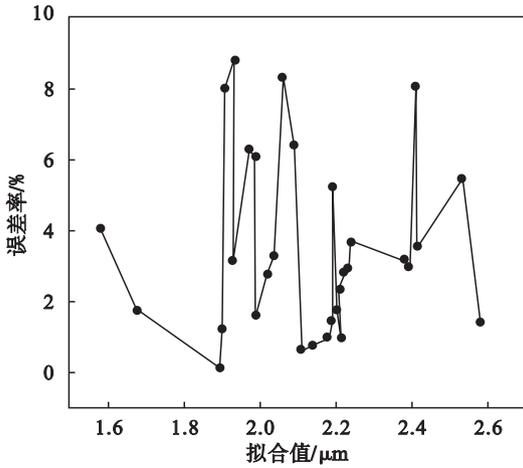
$$R_a = 1.657 - 0.013 7v_s - 0.071 3f_z + 0.004 4Q + 0.736R + 0.198P - 0.000 1Q^2 + 0.001 6v_s \cdot f_z + 0.001 25f_z \cdot Q - 0.005 8Q \cdot R - 0.126 2R \cdot P \quad (1)$$

其基本思想是: 基于 F 检验和 t 检验, 向统计模型中逐个引入对指标影响显著的自变量, 并逐一删除不显著的变量, 并重复该过程, 直至模型外没有显著的自变量可以引入. 方差分析结果如表 3 所示.

表 3 表面粗糙度 R_a 的方差分析结果
Table 3 Results of ANOVA analysis for R_a

来源	自由度	Adj(SS)	Adj(MS)	F 值	P 值
$v_s \times f_z$	1	0.060 03	0.060 025	4.63	0.044
$f_z \times Q$	1	0.140 62	0.140 625	10.86	0.004
$Q \times R$	1	0.330 62	0.330 625	25.52	0.000
$R \times P$	1	0.255 02	0.255 025	19.69	0.000

由于回归计算中 α 值取 0.15, 因此, 对于 P 值小于 0.15 的交互效应对指标的影响均是显著的. 另外, 为进一步验证模型的准确性, 还需对其残差进行进一步分析. 残差率与拟合值的关系如图 4 所示. 从图中可以看出去除异常点后, 表面粗糙度 R_a 的误差率均小于 10%, 说明其预测模型性态良好.

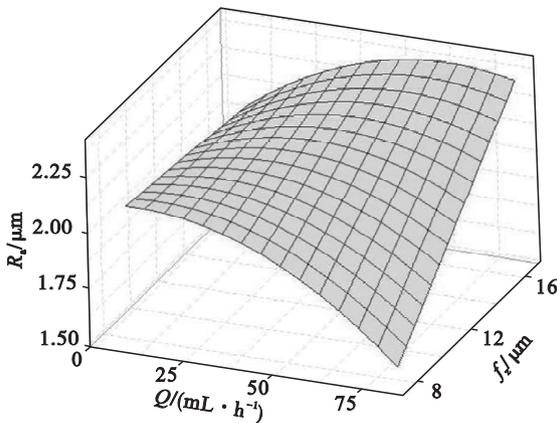
图 4 R_a 预测残差率与拟合值的对应关系Fig. 4 Relationship between the residual rate and fitting values of surface roughness R_a

2.2 加工、冷却参数交互效应

基于上述分析,显著影响 DD5 铣削表面质量的加工和冷却交互参数只有 f_z 和 Q 一组. 另外,在水基 MQL 中,水油流速比及空气压强对表面粗糙度的影响也值得关注,因此需对 p 和 R 的交互效应机理进行评析.

2.2.1 f_z 和 Q 对表面粗糙度 R_a 的交互效应

图 5 为 f_z 和 Q 对表面粗糙度 R_a 的交互效应图,其中, $v_s = 32.5 \text{ m/min}$, $R = 2$, $p = 3 \text{ bar}$. 从图中可以看出, R_a 随 Q 的增加呈现出开口向上的近抛物线趋势,且随 f_z 的增加,开口逐渐向大流速偏移. 另外,在铣削过程中,加工表面残余面积将会随 f_z 的降低而减少,切削力和振动强度也会随之减弱,这均有益于 DD5 铣削表面质量的改善.

图 5 f_z 和 Q 对表面粗糙度 R_a 的交互效应图Fig. 5 Interactive effect of f_z and Q on R_a

微量润滑技术对被加工表面质量的影响主要通过控制冷却和润滑两方面因素而产生作用的. 在同等铣削条件下,雾化切削油喷射速度越高到达切削区雾化颗粒直径越细,在高动能作用下就

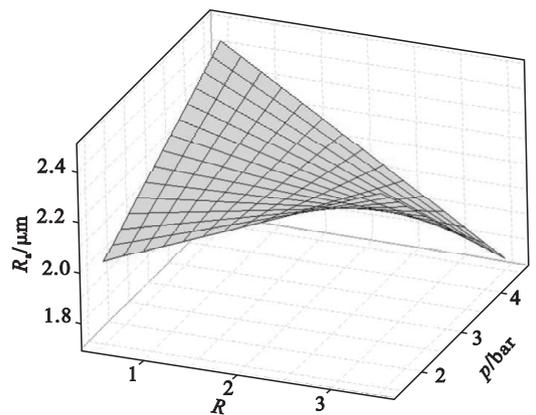
越容易渗入到切削区从而改善冷却和润滑条件. 基于式(2),在其他参数不变的条件下,切削油流量越小,雾化颗粒直径便越细. 当 f_z 取低水平时,即使较大直径的雾化颗粒也可渗入到切削区,若 Q 增加,可保证在加工区形成足够厚度的油膜,实现充分的边界润滑. 而当 f_z 取高水平时,由于刀具较快的进给速度,大颗粒无法充分渗入到切削区,恶化其润滑冷却效果;但若 Q 继续增加,使切削区形成喷射式冷却,其表面质量仍有所改善. 因此, R_a 随 Q 的增加呈现出开口向上的近抛物线趋势.

$$d = \frac{0.585}{U_R} \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{0.5} + 53 \left(\frac{\mu_l^2}{\sigma \rho_l} \right)^{0.225} \left(\frac{Q_l}{Q_g} \right)^{1.5}. \quad (2)$$

其中: d 为雾化颗粒直径, mm; U_R 为雾化喷口处高压空气及切削油的相对流速, m/s; σ (N/m), ρ_l (kg/m^3) 及 μ_l ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$) 分别为切削液表面张力、密度及黏度; Q_l 和 Q_g 分别为切削油和高压空气单位时间流量, m^3/s .

2.2.2 p 和 R 对表面粗糙度 R_a 的交互效应

图 6 为 p 和 R 对 R_a 的交互效应图,其中, $v_s = 32.5 \text{ m/min}$, $f_z = 12 \text{ μm}$, $Q = 45 \text{ mL/h}$. 当 p 取低水平时, R_a 随 R 的增加而增大,而当 p 取高水平时, R_a 随 R 的变化趋势截然相反.

图 6 p 和 R 对表面粗糙度 R_a 的交互效应Fig. 6 Interactive effect of p and R on R_a

在水基 MQL 中,当气体种类和喷嘴结构固定时,空气压强直接影响油膜附水滴加工液的雾化程度以及冷却液的流速. 而当切削油流量固定时,水油比 R 也对冷却液浓度、黏度和液体张力及流量产生直接影响. 如式(2)所示,当 R 取高水平时,虽然液体张力和黏度均有所下降,但冷却液流量增加,其液滴粒度仍增大,在低压空气流作用下,冷却液不能被充分雾化,从而引起对冷却液剪切和拖拽的难度,恶化切削液的渗入能力. 另外,当采用高水油比时,切削油被过分稀释,难以形成

油膜附水滴颗粒,当水膜接触高温区时,迅速蒸发,从而造成油滴的迅速蒸发,无法在切削区形成完整的油膜以改善润滑条件.而当 p 取高水平时,在能量空气流剪切和拖拽作用下,大量冷却液被充分雾化并渗入切削区,改善了冷却润滑效果,降低了表面粗糙度.但若 R 取值过小,在高压空气流作用下,油膜附水滴颗粒可能被吹散,难以有效渗入切削区.另外,过少去离子水的引入也会增加切削区的温度,这也使得在低水平 R 和高水平 p 的综合作用下,表面粗糙度 R_a 有所增加.另外,若 R 过大,达到某个临界点,由于稀释作用,粗糙度可能出现不降反升的现象.

2.3 基于 PSO 的加工参数优化

为优化铣削和冷却参数并得到最优表面粗糙度的加工参数序列且避免陷入局部收敛,PSO 方法被采用.该算法从随机解出发,通过迭代寻找最优解,并通过适应度评价解的品质.基于实验设计参数区间,PSO 的目标参数及边界条件如式(3)和式(4)所示.另外,粒子群规模、最大迭代次数、惯性因子及加速度常数分别设置为 20,1 500,0.9 和 2,粒子飞行的最大速度取每一个维度区间的 10% ~ 20%.

$$Y = \text{Min}[R_a(p, Q, R, f_z, v_s)] \quad (3)$$

其中: $1.5 \text{ bar} \leq p \leq 5 \text{ bar}$;

$10 \text{ mL/h} \leq Q \leq 80 \text{ mL/h}$;

$0.5 \leq R \leq 3$;

$7 \mu\text{m} \leq f_z \leq 15 \mu\text{m}$;

$15 \text{ m/min} \leq v_s \leq 55 \text{ m/min}$.

如图 7 所示,适应度 g_{best} 随迭代次数的增加逐步趋于稳定,尽管最大迭代次数被设置为 1 500,但当迭代到 1 100 次左右时,结果便趋于收敛.从图中可以看出,最优的 g_{best} 为 -1.01,即最

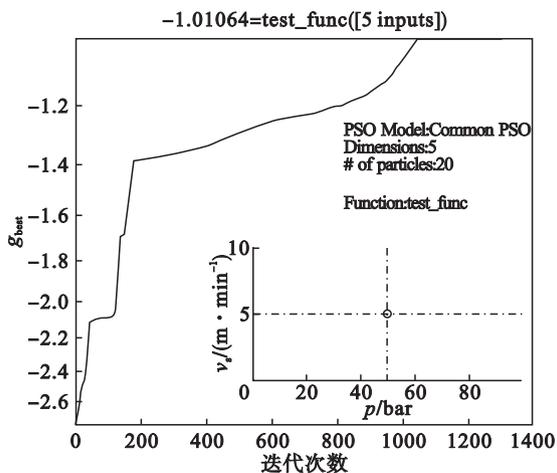


图 7 PSO 结果

Fig. 7 Results of PSO

优表面粗糙度 $R_a = 1.01 \mu\text{m}$. 此时加工参数序列取 $v_s = 49.77 \text{ m/min}$, $f_z = 7 \mu\text{m}$, $Q = 80 \text{ mL/h}$, $R = 3$, $p = 5 \text{ bar}$.

3 实验验证

为评价预测模型和优化方法的准确性和适用性,采用均匀化实验设计方法在全局空间上对其验证.实验及预测结果如图 8 所示.

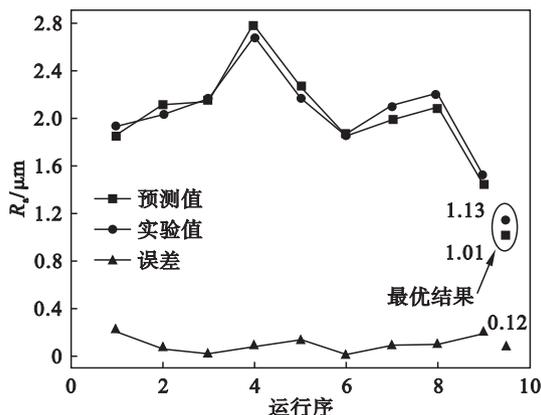


图 8 预测及优化验证结果

Fig. 8 Verification results of prediction and optimization

从图 8 中可以看出,实验及预测值随运行序表现出了一致的变化趋势,且最大误差率不超过 12%. 另外,该组实验最小粗糙度为 $1.43 \mu\text{m}$,小于经 PSO 方法优化后所得加工参数序列条件下的粗糙度.因此,可判定预测模型和优化方法在全空间是可靠的.最优条件下 DD5 铣削表面轮廓及粗糙度的线、面分布如图 9 所示.

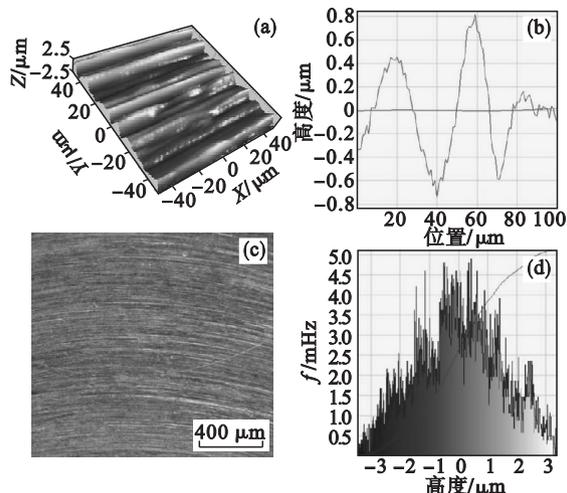


图 9 DD5 铣削表面轮廓及粗糙度分布

Fig. 9 The milled surface topography and roughness distribution of DD5

(a)—铣削表面三维轮廓;(b)—粗糙度分布规律;
(c)—铣削表面形貌;(d)—铣削表面微光高度分布图.

4 结 论

1) 通过方差分析,证明每齿进给量及切削油流量对表面粗糙度存在显著交互效应。由于切削液的雾化程度、到达切削区雾化颗粒的直径、形成油膜的厚度以及切削液的渗入能力受 Q 及 f_z 的综合影响,因此 R_a 随 Q 的增加呈先减小后增大的趋势,且随 f_z 的增加,转折点向大流量偏移。

2) 由于在水基 MQL 中,空气压强直接影响切削液的雾化程度以及流速。而当切削油流量固定时,水油流速比 R 直接决定了冷却液的浓度、黏度和液体张力,并对流量产生影响。因此当 p 取低水平时, R_a 随 R 的增加而增大;而当 p 取高水平时, R_a 随 R 的增大而减小。

3) 基于逐步回归法、粒子群优化算法以及均匀化实验设计方法,对 DD5 铣削表面粗糙度分别进行预测、优化和验证。其最优加工序列为 $v_s = 49.77 \text{ m/min}$, $f_z = 7 \text{ }\mu\text{m}$, $Q = 80 \text{ mL/h}$, $R = 3$, $p = 5 \text{ bar}$, 所得粗糙度 $R_a = 1.01 \text{ }\mu\text{m}$ 。

参考文献:

[1] Chen Y H, Jiang C H. Effect of shot peening on surface characteristics of Ni-based single-crystal superalloy [J]. *Materials Transactions*, 2013, 54(10): 1894 - 1897.

[2] Zhou Y G, Gong Y D, Zhu Z X, et al. Modelling and optimization of surface roughness from micro grinding of nickel-based single crystal superalloy using the response surface methodology and genetic algorithm [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(9): 2607 - 2622.

[3] Gao Q, Gong Y D, Zhou Y G. Experimental study on surface quality in micro-milling of single crystal superalloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2016, 1136: 196 - 202.

[4] Zhu Z X, Gong Y D, Zhou Y G, et al. Molecular dynamics simulation of single crystal nickel nanometric machining

[J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(6): 867 - 875.

[5] Najiha M S, Rahman M M. Experimental investigation of flank wear in end milling of aluminum alloy with water-based TiO_2 nanofluid lubricant in minimum quantity lubrication technique [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9/10/11/12): 2527 - 2537.

[6] Mao C, Tang X, Zou H, et al. Experimental investigation of surface quality for minimum quantity oil - water lubrication grinding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(1): 93 - 100.

[7] 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]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 89(1): 1 - 16.

[8] Çakır A, Yağmur S, Kavak N. The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(9): 1 - 7.

[9] Jayakumar S, Marimuthu K, Ramachandran T. Prediction of cutting force, tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(9): 2813 - 2822.

[10] Mahesh G, Muthu S, Devadasan S R. Prediction of surface roughness of end milling operation using genetic algorithm [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(1): 369 - 381.

[11] Moghaddam M A, Kolahan F. Application of orthogonal array technique and particle swarm optimization approach in surface roughness modification when face milling AISI1045 steel parts [J]. *Journal of Industrial Engineering International*, 2016, 12(2): 199 - 209.

[12] Somashekhar K P, Mathew J, Ramachandran N. A feasibility approach by simulated annealing on optimization of micro-wire electric discharge machining parameters [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(9): 1209 - 1213.