

高速侧铣参数对7050-T7451铝合金表面粗糙度的影响

王莹¹,王鹏¹,白敬彬²,曹鹏飞³,王晋鹏¹,魏海涛³,杨昆明¹,李阿为¹

(1. 西安航空学院 机械工程学院,陕西 西安 710077;

2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司,陕西 西安 710089;

3. 西安兴航航空制造有限公司,陕西 西安 710003)

摘要:为提高航空结构件加工效率和表面质量,通过单一铣削参数实验,研究采用两种硬质合金刀具在高速铣削7050-T7451铝合金时,主轴转速、径向铣削深度、铣削进给速度等切削参数以及加工方式(顺铣、逆铣)对表面粗糙度的影响。分析表明:表面粗糙度随刀具尺寸和径向切深增大而增加,在铣削进给速度增加趋势下仅有较小波动,不受主轴转速直接影响。此外,从表面形貌及表面灰度角度分析了加工方式的影响,用分形-盒维数法分析了灰度曲面。结果表明:逆铣曲面复杂程度高于顺铣,与表面粗糙度实测值完全一致。

关键词:航空铝合金7050-T7451;侧铣参数;表面粗糙度;分形;表面灰度

中图分类号:TH161+.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)01-0030-04

Effect of High Speed Side Milling Parameters on Surface Roughness of 7050-T7451 Aluminum Alloy

WANG Ying¹, WANG Peng¹, BAI Jingbin², CAO Pengfei³, WANG Jinpeng¹, WEI Haitao³, YANG Kunming¹, LI Awei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China;

3. Xi'an Xinghang Aviation Manufacturing Co., Ltd., Xi'an 710003, China)

Abstract: To improve the machining efficiency and surface quality of aeronautical structural parts, a single milling parameter experiment is used to study the effects of cutting parameters (tool, spindle speed, radial milling depth, milling speed) and machining methods (up milling and back milling) on surface roughness. The analysis shows that the surface roughness increases with the increase of tool size and radial cutting depth, but only fluctuates slightly with the increase of milling speed, which is not directly affected by the spindle speed. In addition, the influence of machining methods on surface topography and surface grayscale is analyzed, and the grayscale surface is analyzed by fractal - box dimension method. The result shows that the complexity of surface milling is higher than that of surface milling, which is consistent with the measured surface roughness.

Keywords: aluminum alloy 7050-T7451; side milling parameters; surface roughness; fractal; surface grayscale

0 引言

航空铝合金具有强度和硬度较高、导热系数高、切削温度有限、化学磨损小等特性^[1],是航空航天制造业常采用的材料之一。虽然铝合金材料本身易于加工,但航空航天工业所要达到的高精密度和高质量^[2],显然用普通的加工方法来加工铝合金零件是不够的。传统铣加工的侧铣具有高效率、高精度等优点^[3],而且可实现热变形零件加工以及复杂材料加工^[4]。但高速侧铣受到切削参数的影响较多,目前还未建立完整的侧铣加工体系。

表面粗糙度是评价表面质量的因素之一^[5],不同工艺加工的零件表面形貌存在结构性差异。正确选用评定参数对定量表征加工表面质量,从而进一步指导加工工艺的改进具有重要意义^[6]。在不考虑机床及刀具本身刚性

的情况下,切削参数对表面粗糙度有很大的影响^[7]。由于加工表面的粗糙程度较为复杂,传统的二维轮廓已不能全面表征出表面质量。因此,将三维参数用于评价、预测表面质量备受学者们关注^[6,8-9]。李晟等^[6]通过随机森林算法,筛选出用于评定钛材加工表面质量的参数集,发现由算术平均高度、方均根高度及偏斜度组成的参数集具有表征表面质量的最高重要性,并可精准区分不同加工表面。李文琴等^[8]提出了一种基于灰色关联度的三维表征表面粗糙度检测指标,并用该检测指标验证了最优工艺参数,实现了表面粗糙度和表面异常特征最小化的目的。安琪等^[9]对实测车削表面形貌的采集信号进行频谱分析处理,提出了一种基于少量参数的车削表面形貌的仿真方法,并且得到了加工过程中各影响参数对表面形貌形成的影响规律。

三维参数表征具有更明确的表征指标,然而,除了表面

基金项目:陕西省教育厅专项科研项目(19JK0427)

第一作者简介:王莹(1979—),女,副教授,博士,研究方向为航空金属材料加工及切削性能。

粗糙度的预测方法不同之外,预测的准确性更需要与实际加工过程相对应。因此,本文通过研究航空铝合金高速铣削加工中主轴转速、铣削进给速度、径向铣削深度等切削参数对工件表面粗糙度的影响,采用灰度分析和分形维数作为表征表面粗糙度的一种新方法,并通过实验结果来验证,目的在于为优化高速侧铣加工工艺提供有力的参考依据。

1 高速侧铣航空铝合金 7050-T7451 实验

1.1 材料选择

本文选择的航空铝合金为 7050-T7451,用于板材类零件,在航空制造中常用于飞机机翼以及飞机大梁材料。7050-T7451 材料的组成成分及力学性能如表 1、表 2 所示^[10-11]。

表 1 7050-T7451 铝合金质量分数 单位: %

Cr	Zr	Zn	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Cu	Al
≤0.04	0.08~0.15	5.7~6.7	≤0.12	0~0.15	≤0.1	1.9~2.6	≤0.06	2.0~2.6	余量

表 2 7 系铝合金力学性能

热膨胀系数 (20℃~100℃)	泊松比	熔点 范围/℃	弹性 模量/MPa	电阻率 (20℃)	拉伸强度 (20℃)/MPa
23.5	0.33	490~630	70.3	0.041 5	510

1.2 铣削参数及实验设计

本次实验采用 VC-4016G 龙门铣机床,加工刀具为 φ16R0 和 φ10R1 两种硬质合金刀。主要切削参数为:主轴转速、径向切深和铣削进给速度。铣削方式为:顺铣和逆铣。本文主要研究表 3 中的加工参数对表面质量及微观组织的影响规律。

表 3 侧铣加工参数

主轴转速/(r/min)	径向切深/mm	铣削进给速度/(m/min)
4 000	0.5	1 000
9 000	1.0	1 150
16 000	2.0	1 340

切削进给方向如图 1 所示。高速铣削前、后零件表面外观如图 2 所示。



图 1 切削进给方向



图 2 7050-T7451 铝合金零件

表面粗糙度测量采用 TIME3221 便携式表面粗糙度测量仪。为了减小误差,每个试样的表面粗糙度取 3 次测量的平均值。仪器参数设置如表 4 所示。

表 4 仪器测量参数

测量标准	滤波器	取样长度/mm	放大倍数	量程/μm
ISO1997	Gauss	0.80	5	400

采用 WMJ-9635 金相显微镜观察 7050-T7451 铝合金表面微观形貌,并和模拟表面形貌进行对比。

2 单一铣削参数对表面粗糙度的影响规律

2.1 主轴转速对表面粗糙度的影响

试样除主轴转速不同外,其余加工参数均相同,具体参数如表 5 所示。试样表面粗糙度的测量结果如图 3 所示。

表 5 侧铣加工参数

主轴转速/(r/min)	径向切深/mm	铣削进给速度/(m/min)
4 000		
9 000	1.0	1 340
16 000		

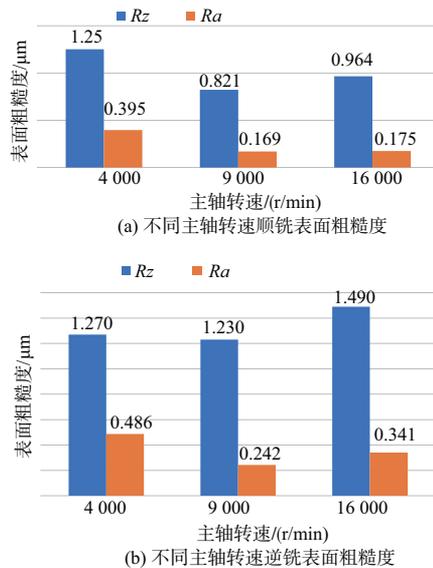


图 3 不同主轴转速表面粗糙度对比

由实验结果可知,表面粗糙度和主轴转速增加并没有直接关系,当转速增加到 9 000 r/min 时,表面粗糙度最低,为 0.169 μm。随着机床主轴转速继续升高,表面粗糙度仅略微升高。分析可能由以下原因造成:1) 在高速切削中,机床主轴高速旋转,切削产生大量热量,但大部分由切屑带走,所以传递给加工表面的热量并不多,导致切削表面的温升并不是很大;2) 高速切削时的塑性变形很小,使得加工表面的缺陷减少;3) 随着主轴转速的继续增高,

引起的刀具振动也逐渐剧烈,刀具磨损加速,从而导致主轴转速升高到一定数值后,表面粗糙度仅略微增高。并且,从图 3 可知,随着主轴转速的增加,不论是顺铣或逆铣,其变化趋势均相同,均呈现先下降后升高的趋势,在 9 000 r/min 时为最低值,且顺铣的表面粗糙度总体较逆铣更低。参照金属切削原理,在机床特征和刀具几何参数确定的前提条件下,切削力与切削参数之间经验公式的通用形式为^[12]

$$F_{\theta} = C_{F_{\theta}} v^{x_{F_{\theta}}} a_p^{y_{F_{\theta}}} f^{m_{F_{\theta}}} a_w^{n_{F_{\theta}}} d \quad (1)$$

式中: $C_{F_{\theta}}$ 和加工材料、切削条件相关,工件为 7050-T7451 铝合金,刀具材料为合金钢; a_p 为铣削深度; v 为铣削进给速度; f 为进给量; a_w 为铣削宽度; d 为刀具直径。根据实验的具体参数,可计算出 x, y, z 向切削力,由于 y 向计算值平均误差最小^[13],故本文主要对比 y 方向切削力 F_y ,下同。经计算,切削力分别为 75.42 N、50.71 N、38.26 N,表明随主轴转速的增加,切削力逐渐减小。根据以上数据可知,主轴转速使切削热、刀具振动以及塑性变形等影响因素增多,切削力增加不一定会降低表面粗糙度值。

2.2 径向铣削深度对表面质量的影响

试样除径向切削深度不同外,其余加工参数均相同,侧铣加工参数见表 6。测量结果如图 4 所示。

表 6 侧铣加工参数

主轴转速/(r/min)	径向切深/mm	铣削进给速度/(m/min)
16 000	0.5	1 340
	1.0	
	2.0	

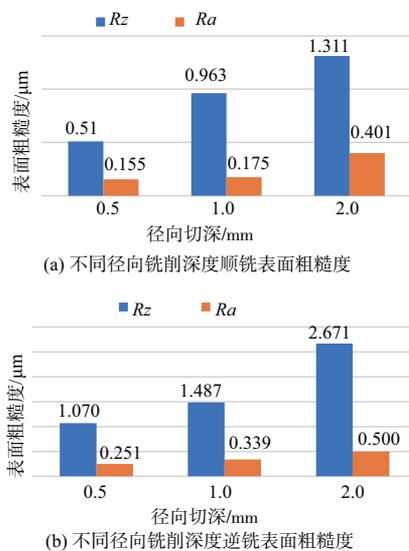


图 4 不同径向铣削深度表面粗糙度

由图 4 分析可知,表面粗糙度随径向切深的增大而增加,当径向切深为 0.5 mm 时,表面粗糙度最低。由于主轴高速旋转时,径向切深增加,切削面积增大,导致切削力增加,经计算可知切削力分别为 20.24 N、38.26 N、72.35 N,同时刀具振动变大,故而导致工件表面粗糙度增加。

2.3 铣削进给速度对表面粗糙度的影响

试样除铣削加工速度不同外,其余加工参数均相同,侧铣加工参数如表 7 所示。测量结果如图 5 所示。

表 7 侧铣加工参数

主轴转速/(r/min)	径向切深/mm	铣削进给速度/(m/min)
16 000	1.0	1 000
		1 150
		1 340

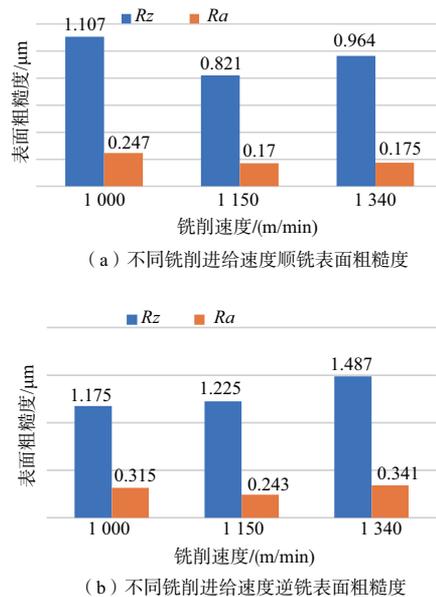


图 5 不同铣削进给速度表面粗糙度

由图 5 分析可知,随着铣削进给速度的增加,无论逆铣或顺铣,表面粗糙度均呈现先降低后升高的趋势。整体来说顺铣更低。在 1 150 m/min 时,工件表面最为平滑。切削力经式(1)计算分别为 51.65 N、48.24 N、44.76 N。分析主要是因为主轴转速增加会导致机床的振动加剧,引起刀具振动,然而铣削进给速度过大时也会导致刀具的温度增加,造成切削变形。因此随着切削速度增加,切削力虽有略微下降,但是仍然造成粗糙度略微增加。

2.4 刀具对表面粗糙度的影响

本小节主要探讨刀具对表面粗糙度的影响。侧铣刀具均为硬质合金刀,直径分别为 $\phi 16R0$ 和 $\phi 10R1$ 。加工参数如表 6 所示,加工方式为顺铣。

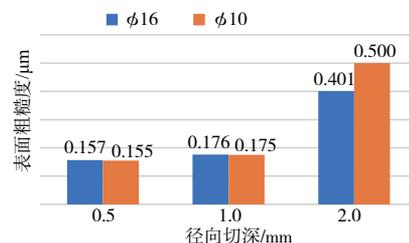


图 6 $\phi 16R0$ 和 $\phi 10R1$ 顺铣不同径向切深表面粗糙度对比

由图 6 可知,当径向切深 $<1\text{ mm}$ 时,两种刀具加工出的表面粗糙度基本一致。然而,当切削深度达到 2 mm 时, $\phi 16$ 刀具加工的表面粗糙度明显低于 $\phi 10$,经计算切削力如表 8 所示。

表 8 $\phi 16$ 及 $\phi 10$ 切削力比较

径向切深/mm	$\phi 16$ 切削力/N	$\phi 10$ 切削力/N
0.5	20.03	12.52
1.0	37.87	23.68
2.0	71.61	44.76

从表 8 可知, $\phi 16$ 刀具的切削力明显高于 $\phi 10$,表明 $\phi 16$ 刀具具有更大的切削力以及切削强度,同时随着径向切深的明显增加, $\phi 16$ 刀具加工出的表面粗糙度更低。

3 表面粗糙度与表面形貌的关系

根据前面的分析可知,顺铣加工表面粗糙度优于逆铣。这是由于顺铣加工作用在工件上的垂直切削分力总是压在工件上,有利于工件的紧固,不容易引起振动;而逆铣加工则恰恰相反,不利于工件的紧固,容易引起振动。同时在逆铣时,每个切削刃的切削厚度是从零逐渐增加至最大,而且切削刃并不是绝对锋利,因此在铣削过程中容易在工件表面上产生相对滑移,从而影响表面粗糙度。

研究学者发现,基于工程粗糙表面的微观形貌具有统计自相似分形的特征,分形几何学也可运用于金属材料表面的形貌研究^[14]。同时,粗糙表面的分形参数与加工条件密切相关。

为了进一步讨论表面粗糙度和表面形貌的关系,将顺铣和逆铣后工件的原始表面拍摄微观照片,如图 7 所示。

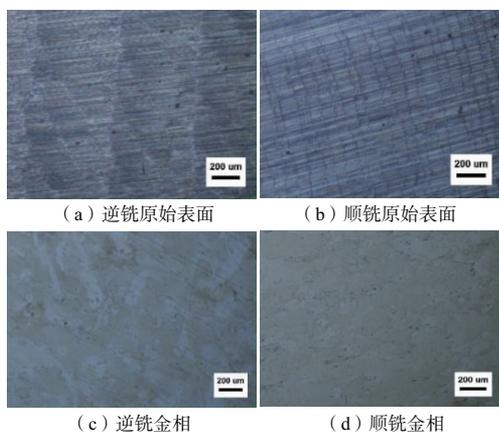


图 7 逆铣和顺铣表面微观形貌

由图 7(a)、图 7(b) 分析可知,逆铣工件的表面波纹歪曲,波纹宽度约 $500\text{ }\mu\text{m}$,并且波纹间有明显凸起的棱边;而顺铣工件的表面波纹较平直,间隔明显变窄,平均宽度约 $89.5\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 7(c)、图 7(d) 可知,顺铣工件的晶粒组织分布更加均匀、整齐,并且其中黑色的弥散相分布也更加均匀和统一。表明顺铣加工出的工件微观组织更好。

图 8 展示出了逆铣和顺铣的图像灰度。从图中可以看出,逆铣加工的表面尖峰有明显的高低差异,在整个平

面上某些固定间距的位置峰值明显偏高,而其余位置由于峰谷较低所以未显示出明显粗糙表面。而顺铣加工的表面,表面峰尖基本处于同一位置,表明整个表面粗糙情况基本一致,并且整体峰值偏低,故而说明顺铣加工表面粗糙度更低。

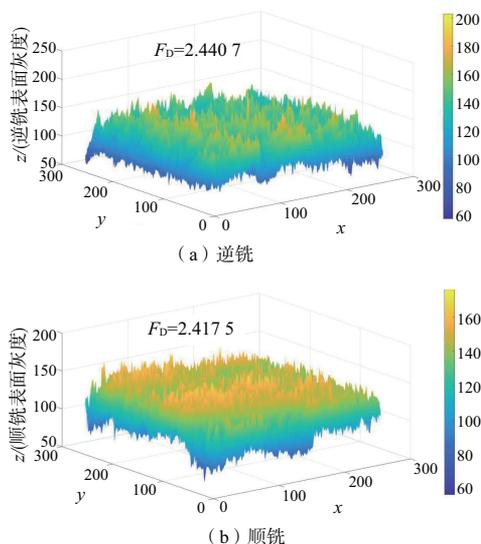


图 8 逆铣及顺铣加工表面图像灰度值及盒维数

为了进一步说明表面粗糙的程度,对顺铣及逆铣图像进行灰度分析,即:把图像放在在 xOy 平面上,像素的灰度值作为 z 轴上的值。灰度值能够体现出加工表面的粗糙情况,不过曲面的复杂程度仍未能体现出来,由于这些灰度峰体现出分形结构的自相似性,因此可以采用分形维数来衡量图像灰度的复杂程度,也就是图像灰度曲面的复杂性分形维数越高代表曲面越复杂,图像也越粗糙。公式(2)为分形维数的计算公式^[15]。

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} [\log N(\varepsilon) / \log(1/\varepsilon)] \quad (2)$$

以盒维数的思想来计算上述公式,其中 ε 代表每个立方体盒子的边长, N 为所需要的盒子数,把平面图像用网格进行划分,然后用不同大小的盒子去“覆盖”图像的灰度平面。计算时以边长为 i 的立方体盒子和网格数 j 去覆盖整个灰度平面,即覆盖该区域内的灰度曲面记作 $N_r(i, j)$,整个灰度曲面共需要用 $N_r = \sum N_r(i, j)$ 个盒子来覆盖这个曲面。对公式两边求对数可得到: $d = \frac{\log N}{\log 1/\varepsilon}$,将 ε 取不同的值,可得到 N 的值,最后用最小二乘法拟合就可以得到分形维数 d 值。根据计算可知,逆铣和顺铣的分形维数 F_D 分别为 2.4407 和 2.4175 。故而,逆铣的曲面复杂程度明显高于顺铣,即顺铣表面更加平滑。

4 结语

本文围绕主轴转速、径向铣削深度、铣削进给速度以及刀具参数、加工方式等切削参数分析了不同参数对表面粗糙度的影响规律,并对比了顺铣和逆铣加工件的表面形貌及表面灰度。主要结论如下:

(下转第 48 页)

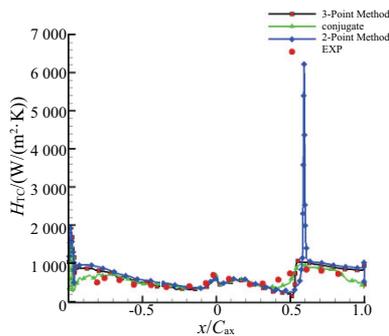


图 10 $T_r = 0.84$ 条件下外换热系数分布对比

4 结语

本文以典型高压涡轮平面叶栅 C3X 为例,采用 NUA-TURBO 求解器和 CFX 求解器主要研究高压涡轮叶片外换热系数与壁温的关系。得出以下结论:

1) 非耦合计算时,壁温对叶片前缘处 HTC 的影响较小,但是在叶片尾缘有明显的非线性。特别地,在 $T_r = 0.60$ 与 $T_r = 0.95$ 两种情况下,HTC 相差达到 30% 左右。耦合计算时,带转轮的 $k-\omega$ SST 湍流模型能较为准确地预测外换热系数分布。

2) 基于牛顿冷却定律的非线性形式,采用非线性方法来计算不同壁温下外换热系数。与传统方法相比,可以有效地对 $H_{TC}-T_w$ 依赖性进行校正。非线性方法是在给定壁面温度的情况下获得外换热系数,这种基于当地的而不是全局的校正方法,提高了计算精度。

参考文献:

- [1] 丁林. 涡轮叶片热分布测量方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [2] LUO J, RAZINSKY E H. Conjugate heat transfer analysis of a cooled turbine vane using the V2F turbulence model [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 773-781.
- [3] 褚云会,钟易成,徐伟祖,等. 跨音速涡轮叶栅数值计算方法研究与试验验证[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1): 49-54.
- [4] CROCE G. A conjugate heat transfer procedure for gas turbine blades[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2001, 934(1): 273-280.
- [5] 郭兆元,王贤义,李程,等. 单级冲动式汽轮机叶片气热耦合数值计算[J]. 节能技术,2020,38(2): 99-103.
- [6] HYLTON L D, MIHELIC M S, TURNER E R, et al. Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surfaces of turbine vanes[EB/OL]. (1983-06-05) [2021-10-15] https://www.researchgate.net/publication/24315094_Analytical_and_experimental_evaluation_of_the_heat_transfer_distribution_over_the_surfaces_of_turbine_vanes

收稿日期:2020-11-16

(上接第 33 页)

1) 表面粗糙度随主轴转速的增加呈现先降低后升高的趋势,主轴转速为 9 000 r/min 时, Ra 最低为 $0.169 \mu\text{m}$; 表面粗糙度随径向切深的增加而降低,切深 0.5 mm 时, Ra 最低为 $0.155 \mu\text{m}$; 随着切削进给速度的增加,切削力的波动造成表面粗糙度变化趋势不稳定,进给速度为 1 150 m/min 时, Ra 最低,为 $0.17 \mu\text{m}$;

2) 仅考虑刀具时, $\phi 16$ 刀具的切削力明显高于 $\phi 10$ 的,且切削强度和径向切深更大,切深 1.0 mm 以下时两者表面粗糙度基本一致,切深 2.0 mm 时 $\phi 16$ 加工表面粗糙度最低,为 $0.401 \mu\text{m}$;

3) 通过对被加工件表面形貌和表面灰度的分析可知,逆铣和顺铣的分形维数分别为 2.440 7 和 2.417 5,即逆铣加工的曲面更为复杂,顺铣表面更平滑,其结论和表面粗糙度的实测值完全一致。

参考文献:

- [1] 仲为武. 空气喷射辅助少量润滑对航空铝合金 7050-T7451 铣削力的影响[J]. 机床与液压,2019,47(7): 35-38.
- [2] 贾振元,肖军,湛利华,等. 大型航空复合材料承力构件制造关键技术[J]. 中国基础科学,2019,21(2): 20-27.
- [3] 黄丽娟,申世杰. 叶片数控侧铣表面质量的工艺实验研究[J]. 机械设计与制造,2017(1): 164-166.
- [4] LIU C Q, LI Y G, JIANG X, et al. Five-axis flank milling tool path generation with curvature continuity and smooth cutting force for pockets[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(2): 730-739.

- [5] LIU B, YUAN J X, ZHANG Z J. Simulation analysis of surface roughness for milling process[J]. Natural Science, 2019, 11(5): 127-135.
- [6] 李晟,周超. 基于随机森林的钛加工表面质量评定研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6): 36-38, 60.
- [7] 赵鹏,赵旭. 超高速切削的技术体系、技术现状和发展趋势[J]. 科技传播,2012,4(15): 124, 87.
- [8] 李文琴,许金凯,于化东,等. 基于多目标优化的微铣削表面粗糙度检测指标研究[J]. 航空制造技术,2020,63(19): 66-72.
- [8] 李文琴,许金凯,于化东,等. 基于多目标优化的微铣削表面粗糙度检测指标研究[J]. 航空制造技术,2020,63(19): 66-72.
- [9] 安琪,索双富,林福严,等. 车削粗糙表面的特征解耦与形貌仿真[J]. 机械工程学报,2019,55(23): 200-209.
- [10] 董义兵,刘涛,刘利江. 航空铝合金及其材料加工[J]. 中国高科技,2018(11): 52-54.
- [12] 王立涛,柯映林,黄志刚. 航空铝合金 7050-T7451 铣削力模型的实验研究[J]. 中国机械工程,2003(19): 70-72.
- [13] 彭臣西,吴运新,易守华,等. JC 本构模型对 7050 铝合金二维切削仿真影响的研究[J]. 工具技术,2018,52(11): 59-62.
- [14] 刘丽艳,陈富强,杨薇,等. 分形维数与铣削参数的模型关联及验证[J]. 机械设计与制造,2015(5): 122-126.
- [15] 安琪,索双富,林福严,等. 基于小波变换的三维粗糙表面分形维数计算方法[J]. 润滑与密封,2020,45(3): 88-92.

收稿日期:2021-06-15