

高速铣削 TC21 钛合金的表面粗糙度

周 成 李海滨

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

文 摘 通过对 TC21 钛合金进行高速铣削加工试验,测量不同切削参数下的表面粗糙度。采用正交方法来安排试验和极差分析法对实验数据处理,分析了不同切削参数对粗糙度的影响。其中对 TC21 钛合金表面粗糙度影响最为显著的因素是每齿进给量,其次为切削深度和切削速率,最后为切削宽度。通过对粗糙度影响机理分析在加工中宜采用较小的进给量和切削深度、较大的切削速率和切削宽度。

关键词 TC21 钛合金,高速铣削,切削参数,表面粗糙度

Surface Roughness of High-Speed Milling TC21 Titanium Alloy

Zhou Cheng Li Haibin

(Ministry of Education Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacture,
Northwest Poly-Technical University, Xi'an 710072)

Abstract Through the milling test of titanium alloy TC21, the surface roughness is measured with different cutting parameters. Orthogonal experimental design method is used to arrange the test and range analysis to process experimental data, and the effect on surface roughness caused by different cutting parameters, is analyzed. The most significant effect on the TC21 titanium alloy surface roughness of the factors is the feed per tooth, followed by the cutting depth and cutting speed, and the least important comes to cutting width. Based on the analysis of the mechanism of effect on surface roughness, smaller amount of feed and cutting depth, larger cutting speed and cutting width should be used in processing.

Key words Titanium alloy TC21, High-speed milling, Cutting parameter, Surface roughness

0 引言

TC21 钛合金金属高强高韧损伤容限型钛合金,目前国内同行仅对材料的物理、化学和力学性能进行了初步研究^[1],在机械加工领域尤其是高速铣削的研究还是一片空白。而钛合金属于典型难加工材料,采用高速切削可以克服其热导率低、化学活性高、摩擦因数大等不利于机械加工的缺点。高速切削技术^[2-3]是先进制造技术发展的方向。随着对高速切削加工技术的发展,对切削加工表面质量的分析和控制^[4]是亟待解决的问题之一。

高速切削加工中,影响表面粗糙度的因素有很多,目前对高速切削工件表面粗糙度形成机理还不完善^[5-6]。切削参数对表面粗糙度的影响,包括切削深度、切削宽度、切削速率和每齿进给量,这些因素之间

存在着相互耦合的关系。本文通过高速铣削 TC21 钛合金加工试验,研究铣削参数对铣削 TC21 钛合金的表面粗糙度的影响。

1 实验

TC21 钛合金尺寸为 140 mm × 140 mm × 140 mm (主要成分为 Ti6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb)。试验在三坐标数控加工中心 TK5680 上进行;使用美国 SGS 公司生产的带 TiAlN 涂层的整体硬质合金刀具(硬质合金 K30,刀具直径为 20 mm,齿数为 4)。

TC21 试件表面粗糙度的测量,利用 Surf Test SJ-201 型粗糙度仪,其测量范围为 -200 ~ +150 μm,可同时测量 R_a 、 R_z 和 R_q 。

铣削加工方式采用的是侧铣,这种切削加工方式的加工表面只测量沿进给方向的粗糙值 R_a 。每个粗糙度的值均为三次以上的测量值取平均而得到。试

收稿日期:2012-04-12;修回日期:2012-05-11

作者简介:周成,1987 年出生,硕士,主要从事数控加工过程中的工艺规划研究。E-mail:zhoucheng1987@yahoo.cn

件是在金属去除量相同的情况下,然后检测各种加工方案下的工件表面完整性情况。采用正交试验设计方法来安排试验和处理数据,本文采用四因素三水平的 $L_9(3^4)$ 形式来安排实验,如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

Tab. 1 Orthogonal factor level table

因素	切削速率 /m·min ⁻¹	每齿进给量 /mm·z ⁻¹	切削宽度 /mm	切削深度 /mm
水平 1	20	0.05	0.5	10
水平 2	60	0.10	1.0	20
水平 3	100	0.15	1.5	30

2 结果及分析

2.1 实验结果

对 TC21 钛合金试件每个粗糙度值的测量结果见表 2。可以看到: X-1、X-4、X-7 号试件表面粗糙度均较小, R_a 为 0.54 ~ 0.81 μm , 它们对应的加工方案下, 被加工零件表面粗糙度值较小。该结论是通过试验直接得到的。

表 2 铣削 TC21 零件表面粗糙度测量结果及极差分析表

Tab. 2 Milling TC21 parts surface roughness measurements and range analysis table

试样	切削速率 /m·min ⁻¹	每齿进给量 /mm·z ⁻¹	切削宽度 /mm	切削深度 /mm	表面粗糙度/ μm
X-1	20	0.05	0.5	10	0.72
X-2	20	0.10	1.0	20	2.76
X-3	20	0.15	1.5	30	2.00
X-4	60	0.05	1.0	30	0.81
X-5	60	0.10	1.5	10	1.08
X-6	60	0.15	0.5	20	2.78
X-7	100	0.05	1.5	20	0.54
X-8	100	0.10	0.5	30	1.05
X-9	100	0.15	1.0	10	1.54
k_1	1.8267	0.6900	1.5167	1.110	
k_2	1.5567	1.6300	1.7033	2.030	
k_3	1.0433	2.1067	1.2067	1.290	
极差 R	0.8033	1.4167	0.4967	0.890	
重要排名	3	1	4	2	
优组合					$A_3B_1C_3D_1$

不同铣削参数条件下零件表面粗糙度的变化趋势如图 1 所示。可以看出铣削速率为 100 m/min 时, 试样的粗糙度值反而下降。这说明高速铣削有望在提高加工效率的同时, 保证较好的表面加工质量。

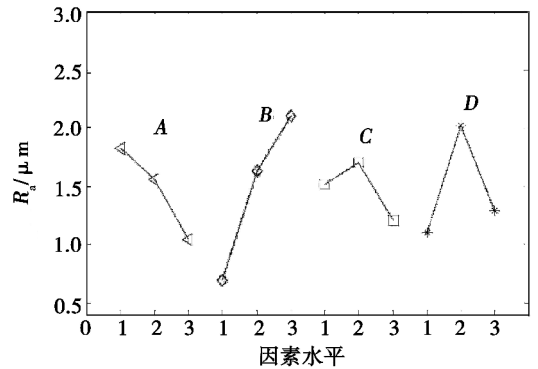


图 1 各铣削参数对零件表面粗糙度的影响趋势

Fig 1 Effect of each milling parameters on part surface roughness

2.2 实验分析

由表 2 所示结果分析, 可以看出各影响因素的极差关系为 $R_B > R_D > R_A > R_C$, 各切削参数因素中每齿进给量对粗糙度影响最大, 其次切削深度, 再次就是切削线速度和切削宽度。根据实验结果分析可得: X-1 组的 R_a 较小, 其铣削加工特点是低切削速率、小的进给量、小的切削深度和小的切削宽; X-3 组的 R_a 较大且变化急剧, 主要是每齿进给量处在最大值; 对 X-7 组和 X-9 组数据分析可知, 在相同的切削速率下, 若材料去除率相近, 采用较大的切削宽度、切削深度和较小的进给量所获得的粗糙度值低于较小的切削宽度、切削深度和较大进量所获得的粗糙度值。当每齿进给量比较小时, 其他参数对表面粗糙度的影响规律并不明显。

各影响因素对零件表面粗糙度的交互影响关系比较复杂(图 1), 随着因素 A 的增大, 零件表面粗糙度递减; 随着因素 B 的增加, 零件表面粗糙度递增; 因素 C 与 D 对粗糙度的影响规律相同, 两种因素水平逐渐增大时均存在最大值, 实际加工时应避开最大粗糙度的参数范围。

直观分析不能估计试验中必然误差的大小, 即不能区分因素各水平所对应的试验结果间的差异究竟是由于因素水平不同所引起的, 还是由于试验误差造成的, 因而不能知道分析的精度。为了弥补直观分析的不足, 可采用方差分析的方法。方差分析及 F 值显著性检验结果如表 3 所示。

本次试验无空列, 因 C 列偏差平方和较小, 故以 C 列作为误差列。由于 F 值均小于 $F_{0.05}(2, 2)$ 和

$F_{0.01}(2,2)$ 切削参数对粗糙度的影响均不显著。

表3 方差分析及显著性检验表¹⁾

Tab.3 Analysis of variance and significant test table

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F 值	F_{α}
A	0.9500	2	0.4750	2.5158	
B	3.1178	2	1.5589	8.2563	$F_{0.05}(2,2) = 19.00$
C 误差 e	0.3776	2	0.1888		$F_{0.01}(2,2) = 99.01$
D	1.412	2	0.7059	3.7387	
总和	6	8			

注:1)显著水平:均不显著。

在机床加工系统和刀具几何参数确定的前提下,假定表面粗糙度与切削参数之间存在复杂的指数关系,应用统计方法,建立正交回归实验的通用模型为:

$$R_a = Cv^{b_1} f_z^{b_2} a_p^{b_3} a_e^{b_4} \quad (1)$$

式中, C 为加工材料、切削条件的系数; b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4

$$X = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.3010 & -1.3010 & 1.0000 & -0.3010 \\ 1.0000 & 1.3010 & -1.0000 & 1.3010 & 0 \\ 1.0000 & 1.3010 & -0.8239 & 1.4771 & 0.1761 \\ 1.0000 & 1.7782 & -1.3010 & 1.4771 & 0 \\ 1.0000 & 1.7782 & -1.0000 & 1.0000 & 0.1761 \\ 1.0000 & 1.7782 & -0.8239 & 1.3010 & -0.3010 \\ 1.0000 & 2.0000 & -1.3010 & 1.3010 & 0.1761 \\ 1.0000 & 2.0000 & -1.0000 & 1.4771 & -0.3010 \\ 1.0000 & 2.0000 & -0.8239 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} -0.1427 \\ 0.4409 \\ 0.3010 \\ -0.0915 \\ 0.0334 \\ 0.4440 \\ -0.2676 \\ 0.0212 \\ 0.1875 \end{bmatrix}$$

由 $B = (X'X)^{-1} X'Y$ 。

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4390 \\ -0.2876 \\ 1.0131 \\ 0.1593 \\ -0.1339 \end{bmatrix}$$

计算可得各切削参数的指数,建立高速铣削 TC21 钛合金粗糙度经验预测公式

$$R_a = 27.4789v^{-0.2876} f_z^{1.0131} a_p^{0.1593} a_e^{-0.1339} \quad (5)$$

可对粗糙度经验公式进行检验回归方程的 $F = 18.5293 > F_{0.01}(4,4) = 16.0$, 则得回归方程是显著的,与实际情况拟合良好。

从公式(5)可以看出,每齿进给量 f_z 对 R_a 的影响指数最大,说明 f_z 在切削用量要素中对 R_a 的影响是最大的,其次是切削速率 v 、切削深度 a_p 、切削宽度 a_e ,这与极差分析的结果出现偏差。在极差分析中对粗糙度影响程度切削深度 $D >$ 线速度 A ,但是数值相近。由于极差具有“跳跃性”的不足,有时会使方案有一定的偏差。本文在充分利用正交试验信息的基础上,用回归分析的方法,对极差分析的结果进行验

为待定系数。

两边分别取对数得:

$$\lg R_a = \lg C + b_1 \lg v + b_2 \lg f_z + b_3 \lg a_p + b_4 \lg a_e \quad (2)$$

令:

$$y = \lg R_a, x_1 = \lg v, x_2 = \lg f_z \\ x_3 = \lg a_p, x_4 = \lg a_e, b_0 = \lg C$$

$$\text{则: } y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (3)$$

建立多元线性回归方程:

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1 x_{11} + b_2 x_{12} + b_3 x_{13} + b_4 x_{14} + \varepsilon_1 \\ y_2 = b_0 + b_2 x_{21} + b_2 x_{22} + b_3 x_{23} + b_4 x_{24} + \varepsilon_2 \\ \begin{cases} y_3 = b_0 + b_1 x_{31} + b_2 x_{32} + b_3 x_{33} + b_4 x_{34} + \varepsilon_3 \\ \dots \\ y_9 = b_0 + b_1 x_{91} + b_2 x_{92} + b_3 x_{93} + b_4 x_{94} + \varepsilon_9 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

根据表1 正交实验表面粗糙度测量结果,通过 MATLAB 软件计算得:

证和修正,使工艺参数更符合实际情况。

2.3 对尺寸精度影响

机械加工产生误差主要原因:主轴回转误差、传动链误差、刀具的几何误差、定位误差、工艺系统受力变形产生的误差、工艺系统受热变形引起的误差等。切削参数对加工尺寸精度影响主要通过影响工艺系统受力变形产生的误差以及工艺系统受热变形引起的误差。过大的切削力会使工件、刀具、机床部件刚度不足从而引起变形导致加工精度不足。工艺系统热变形对加工精度的影响比较大,特别是在精密加工和大件加工中,由热变形所引起的加工误差有时可占工件总误差的50%。在选定参数时应尽量减少切削力,降低加工温度。

在铣削加工 TC21 钛合金时,宜采用较小的进给量和切削深度、较大的切削速率和切削宽度。这主要是因为适当的增加切削深度就意味着增加了切屑与主切削刃(立铣刀侧刃)的接触面积,改善了刀具的散热条件,同时也增加了刀具的接触刚性,但是,由于过大的切深使得切削力变大,振动剧烈,切削条件恶化,不利于获得较好的表面质量和提高加工精度;增

大每齿进给量,去除单位面积材料的走刀次数减少,工件表面的残留高度增加,表面粗糙增大,切削力增大会引起刀具变形;切削宽度和切削速率对表面粗糙度影响最小,增大切宽和切速可显著提高加工效率,但是有时候切宽也不宜过大,大的切削宽使得刀具和切屑的接触时间增长,散热条件恶化,切削温度升高,黏刀现象严重从而加剧刀具磨损影响加工质量。

3 结论

由实验所得的铣削参数对粗糙度的影响趋势曲线及数学模型可知:对 TC21 钛合金高速铣削加工表面粗糙度影响最为显著的因素是每齿进给量,其次为切削深度和切削速率,最弱影响为切削宽度。通过对粗糙度影响机理分析,在实际加工中宜采用较小的进给量和切削深度、较大的切削速率和切削宽度。

参考文献

[1] 周长军. 钛合金材料高效加工切削机理及参数优化研究[D]. 西北工业大学,2012

[2] Rahman M, Wang Z G, Wong Y S. A review on high-speed machining of Titanium alloys [J]. JSME International Journal, Series C, 2006, 49(1): 11-20

[3] 王素玉,赵军,艾兴,等. 高速切削表面粗糙度理论研究综述[J]. 机械工程师,2004(1):3-5

[4] Kaha Lee, Dornfeld D A. A Study of Surface Roughness in the Micro-end-Milling Process [M]. Laboratory for Manufacturing Atom Action, 2004

[5] Vivancos J, Luis C J, Costa L. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(155/156):1505-1502

[6] Yusuf Sahin, R IZA Motorcu A. Surface roughness prediction model in machining of carbon steel by PVD coated cutting tools [J]. American Journal of Applied Sciences, 2004(1):12-17

(编辑 吴坚)

航天材料及工艺研究所研制成功 抗激光、防热一体化涂层

兼具抗激光突防、防热与“三防”等多功能的有机涂层于 2012 年 10 月顺利通过了由中国航天科技集团公司组织的成果鉴定。

本项目是针对激光武器的突防需求,研究涂层材料对激光的反射、吸收和能量转化技术,以突破抗激光有机涂层材料的设计和制备技术,提高抗激光突防能力。

鉴定委员会认为:该项目不仅揭示并阐明了高能激光辐照条件下有机硅涂层的烧蚀机理,而且通过配方设计及反射、烧蚀、隔热的有效匹配,解决了涂层在大面积厚喷涂时易产生厚度不均、鼓泡、针孔、应力残留的难题,耐湿热、耐霉菌、耐盐雾性能优于 2 级,具有质量轻、施工周期短,可修复性强等优点。

该涂层材料总体技术水平处于国内领先,在同等面密度条件下激光防护能力达到国际先进水平,应用前景广阔。

· 罗焱 ·

烧蚀维形防热涂层技术通过鉴定

烧蚀维形防热涂层是航天材料及工艺研究所针对在中低热流环境下的长时防热与烧蚀维形问题而开展的研究项目,该涂层具有气动烧蚀、烧蚀透气的特点,与传统防热涂层有着很大区别。

2012 年 10 月,该项成果顺利通过了由中国航天科技集团公司组织的成果鉴定。鉴定专家一致认为:该项目利用气动热烧蚀来提高涂层烧蚀产物的强度,增强了涂层对高温高速剪切气动环境的适应能力,满足了涂层在烧蚀前后厚度基本保持不变的需求;同时,该项目还利用烧蚀透气的多孔结构来减少由于材料放气而导致的不均匀膨胀,从而改善了鼓泡、不均匀烧蚀现象,进一步保证了涂层的烧蚀外形。这项成果填补了国内在烧蚀维形防热涂层技术方面的空白,其总体技术已达到国内领先水平,其中韧性环氧类烧蚀维形防热涂层材料达到了国际先进水平,社会效益和经济效益显著。

· 罗焱 ·