

## TC17 钛合金高速铣削表面粗糙度及参数灵敏度研究\*

Research on TC17 Titanium Alloy Surface Roughness and Parameters Sensitivity  
in High Speed Milling Process

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 任军学 罗远锋 姚倡锋 梁永收 石凯

**[摘要]** 采用单因素试验法,对硬质合金刀具高速铣削 TC17 钛合金时,切削参数对表面粗糙度的影响规律进行了研究,为钛合金整体叶盘叶片类零件精加工的高速切削工艺参数优化提供了试验依据。对切削参数的灵敏度进行了分析,可以看出,每齿进给量对表面粗糙度的影响最为敏感,其次是切削速度和铣削深度。

**关键词:** TC17 钛合金 高速铣削 表面粗糙度 灵敏度

**[ABSTRACT]** The single factor experiment was processed for the study on the effect of the cutting parameters on the TC17 titanium alloy surface roughness using the carbide tool on the condition of the high speed. The purpose is to provide the experimental references for the high speed cutting optimizing for machining of the titanium alloy blade or blisk. The sensitivity analysis for the cutting parameters show that the surface roughness is most sensitive to the feed per tooth, and less sensitive to the cutting speed and cutting depth.

**Keywords:** TC17 titanium alloy High speed milling Surface roughness Sensitivity

钛合金作为一种新型材料具有比强度高、热强度高、抗蚀性好和低温性能好等优点,因此在航空、航天等工业部门中的应用越来越广,常用以制造航空发动机、飞行器等的主体结构 and 主承力构件<sup>[1]</sup>,如整体叶盘、叶片类零件等。但由于这些材料在高温条件下具有活性大、导热系数小、弹性模量小等特性,使其切削加工性很差,具体表现为切削力大、切削温度高、加工硬化倾向大以及刀具磨损严重等<sup>[2]</sup>,这些不利条件对零件已加工表面的完整性造成不利影响,并且会降低钛合金的加工效

率,导致钛合金的加工速度一般都被限制在 55m/min<sup>[3]</sup>。

高速切削由于具有高效率、高精度、高表面质量和可加工高硬材料等优点,得到了越来越广泛的应用,但是国内外对钛合金的高速切削研究还不够深入和系统。史兴宽<sup>[1]</sup>等比较了钛合金 TC4 在高速切削与常规切削参数条件下的加工表面完整性,结果表明高速铣削在提高制造效率和改善表面质量上都是有益的。Velásquez<sup>[4-5]</sup>研究了高速车削 TC4 的表面完整性,采用扫描电镜对材料的微观组织结构进行测试,发现在已加工表面下几微米的深度里存在严重的晶粒变形梯度;采用 X 射线衍射方法对获得表面进行了检测,根据对波峰形状的检测,反映出在已加工表面下存在严重的塑性变形;没有发现相变以及白层。Mantle<sup>[6]</sup>对于高速铣削  $\gamma$ -TiAl 合金表面完整性的研究,可以得出其表面粗糙度  $R_a$  都低于 1.5  $\mu\text{m}$ ,显微硬度分布表明硬化层深度达到 300  $\mu\text{m}$ ,表面具有残余压应力且大于 500MPa,后刀面磨损和切削速度对残余应力影响最大。杜随更等<sup>[7]</sup>研究发现在平底刀铣削 TC4 钛合金时,当切削速度由 113m/min 增大到 377m/min 时,表面质量越来越好。但这些研究普遍存在以下问题:切削参数范围较窄,没有达到很高的切削速度;没有对高速切削参数对表面粗糙度的影响进行比较系统的分析和研究;普遍选用 TC4 等常用钛合金。

本课题以整体叶盘、叶片类零件用钛合金 TC17 为对象,采用单因素试验法,开展 TC17 钛合金高速切削参数(切削速度,切削深度,每齿进给量)对表面粗糙度影响的研究,并进行了参数灵敏度分析,为整体叶盘、叶片类钛合金零件高速切削提供了参数选择依据和方法。

## 1 TC17 钛合金高速铣削试验

## 1.1 试验条件

试验材料为 TC17 钛合金,试件采用楔型试件,试件高 65mm、宽 63mm、夹角 30°,如图 1 所示。试验机床选用 MIKRON HSM 800 高速铣削加工中心,主轴最

\* 国家自然科学基金(50975237)、航空科学基金(2007ZE53061)、教育部重大项目(309026)、西北工业大学科技创新基金(2008KJ02018)资助项目。

大转速 36000r/min,冷却方式采用乳化液冷却。刀具选用  $\phi 8\text{mm}$  整体硬质合金 4 刃球头铣刀,前角  $10^\circ$ ,后角  $12^\circ$ ,螺旋角  $35^\circ$ ,刀具长 100mm,刃长 19mm,刀具悬伸长度 45mm。

表面粗糙度使用 TR240 表面粗糙度仪进行测量。在试件已加工面上,沿进给方向上平均选取 5 个点,测量与进给垂直方向的表面粗糙度值,求取平均值,取样长度 0.8mm,评定长度 5.6mm,如图 1 所示。

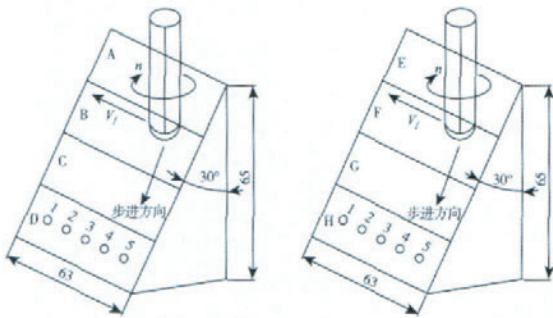


图 1 试验方案示意图

Fig.1 Diagram of experimental scheme

试验中采用统一行距,即铣削宽度  $a_e$  均选用 0.1mm。由于采用的是球头刀具,切削过程示意图如图 2 所示。其中  $O_1$  为第一刀切削位置, $O_2$  为第二刀切削位置,试件与刀具夹角为  $30^\circ$ ,铣削深度  $a_p$  为与沿试件加工面垂直方向切削用量;图中 A 点处为线速度  $v_{\max}$ ,而实际的切削线速度为 B 点处, $v_c = v_{\max} \cdot \cos 30^\circ$ 。

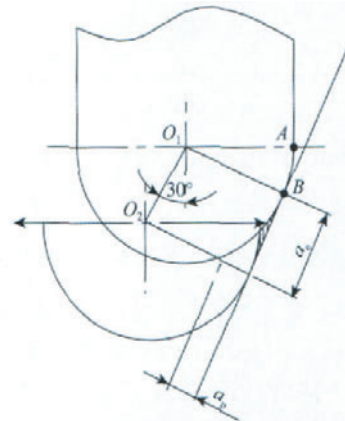


图 2 切削过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of cutting process

## 1.2 试验控制参数与试验过程

为研究切削参数,包括铣削速度  $v_c$ 、铣削深度  $a_p$ 、每齿进给量  $f_z$  对表面粗糙度的影响,本试验采用单因素试验,铣削参数如表 1~3 所示。

表 1 试验方案设计 - 不同切削速度

试验号	铣削深度 $a_p / \text{mm}$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
1~8 号试验	0.2	0.03	218, 261, 305, 348, 392, 435, 479, 522

表 2 试验方案设计 - 不同铣削深度

试验号	切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	铣削深度 $a_p / \text{mm}$
9~16 号试验	348	0.03	0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45

表 3 试验方案设计 - 不同每齿进给量

试验号	切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	铣削深度 $a_p / \text{mm}$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$
17~24 号试验	348	0.2	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08

在试验过程中,将试件加工面设计等分为 4 个区域,完成一组 8 水平切削参数的试验需要使用 2 个试件,如图 1 所示 A、B、C、D、E、F、G、H 区域;针对表 1~3 的共 24 组试验,共加工了 6 块试件。这 24 组试验均采用相同结构参数刀具,每组试验一把,共 24 把。切削过程如图 3 所示。

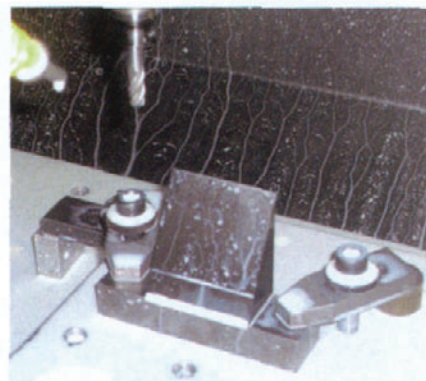


图 3 切削现场

Fig.3 Cutting scene

## 2 切削参数对表面粗糙度的影响规律分析

### 2.1 切削速度对表面粗糙度的影响规律

图 4 为表面粗糙度随切削速度的变化曲线,从图中可看出,切削速度在 218~522m/min 范围变化时,表面粗

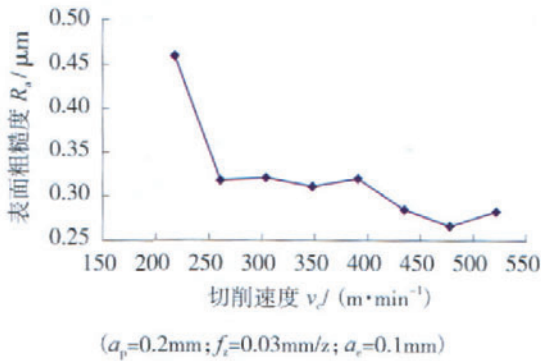


图4 表面粗糙度随切削速度的变化关系

Fig.4 Impact of cutting speed on surface roughness

糙度值整体呈下降的趋势,表面粗糙度值由 0.459 $\mu m$  变化到 0.266 $\mu m$ 。最小表面粗糙度值为 0.266 $\mu m$ 。

切削速度在 218~261m/min 变化的过程中,表面粗糙度值急剧下降;在切削速度从 261~479m/min 的过程中,表面粗糙度值呈十分平缓的下降趋势;当切削速度从 479~522m/min 时,表面粗糙度值略有上升。

### 2.2 铣削深度对表面粗糙度的影响规律

图 5 所示为表面粗糙度随铣削深度的变化曲线,从图中可以看出铣削深度  $a_p$  在 0.10~0.45mm 间变化时,表面粗糙度值整体呈上升趋势,在 0.310~0.535 $\mu m$  范围内变化。在铣削深度为 0.20mm 时,表面粗糙度为最小值 0.310 $\mu m$ 。

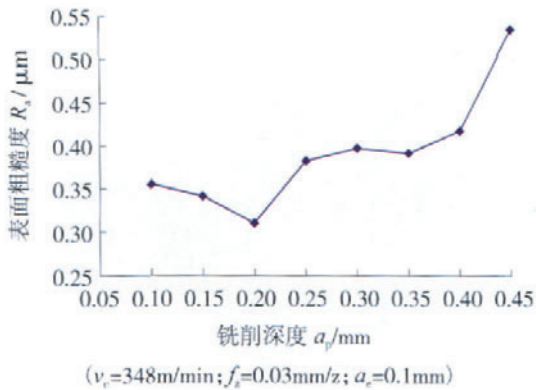


图5 表面粗糙度随铣削深度的变化关系

Fig.5 Impact of cutting depth on surface roughness

铣削深度在 0.10~0.20mm 的变化过程中,表面粗糙度值呈下降趋势;在铣削深度为 0.20mm 时出现拐点;铣削深度在 0.20~0.45mm 的过程中,表面粗糙度值呈上升趋势,其中铣削深度在 0.20~0.25mm,0.40~0.45mm 两个区间时,表面粗糙度值的上升速度较快,在铣削深度在 0.25~0.40mm 范围变化时,表面粗糙度值上升速度平缓。

### 2.3 每齿进给量对表面粗糙度的影响规律

图 6 所示为表面粗糙度随每齿进给量的变化曲线,从图中可以看出每齿进给量  $f_z$  在 0.01~0.03mm/z 范围变化时,表面粗糙度值呈平缓下降趋势,每齿进给量  $f_z$  在 0.03~0.08mm/z 范围变化时,表面粗糙度值呈上升趋势,在 0.295~0.531 $\mu m$  范围内变化。在每齿进给量为 0.02mm/z 时,表面粗糙度为最小值 0.295 $\mu m$ 。

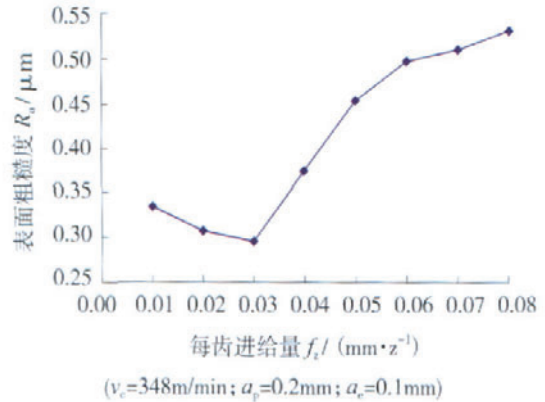


图6 表面粗糙度随每齿进给量的变化关系

Fig.6 Impact of feed per tooth on surface roughness

每齿进给量在 0.01~0.03mm/z 的变化过程中,表面粗糙度值呈下降趋势,在 0.03mm/z 时出现拐点;每齿进给量在 0.03~0.06mm/z 的变化过程中,表面粗糙度值呈急剧上升趋势;每齿进给量在 0.06~0.08mm/z 的变化过程中,表面粗糙度值仍呈上升趋势,但趋势平缓。

## 3 表面粗糙度对高速铣削参数的灵敏度分析

### 3.1 灵敏度定义

为了表达各切削参数对表面粗糙度的影响程度,作者提出了切削参数灵敏度的概念。

灵敏度分析,又称为敏感性分析,是指优化设计目标对各个设计变量变化的敏感程度(或变化率),目的是识别设计变量中对优化设计目标函数影响显著的薄弱环节,从而准确、有效地确定优化变量修改优化方案。

数学上,灵敏度反映设计目标函数  $F(x)$  对设计变量  $x_i$  的变化梯度,若  $F(x)$  可导,其一阶灵敏度  $S$  在连续系统中可表示为<sup>[8-9]</sup>:

$$S = \partial F(x) / \partial x_i \quad (1)$$

为减小各切削参数的取值范围与不同量纲对表面粗糙度变化灵敏度分析的影响,本课题对各切削参数进行归一化处理。对各切削参数进行线性函数转换的归一化处理如式(2):

$$y = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (2)$$

其中  $x, y$  分别为转换前后的值,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为样本的最大值和最小值。

根据式(2), 将表 1~3 中的切削参数变量进行归一化处理, 其转换结果如表 4 所示。图 7 为不同切削参数归一化后的表面粗糙度的变化规律曲线。

表 4 切削参数归一化处理

切削速度 $v_{c1}/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	铣削深度 $a_{p1}/\text{mm}$	每齿进给量 $f_{z1}/(\text{mm}\cdot\text{z}^{-1})$
0	0	0
0.142 9	0.142 9	0.142 9
0.258 7	0.258 7	0.258 7
0.428 6	0.428 6	0.428 6
0.571 4	0.571 4	0.571 4
0.714 3	0.714 3	0.714 3
0.857 1	0.857 1	0.857 1
1	1	1

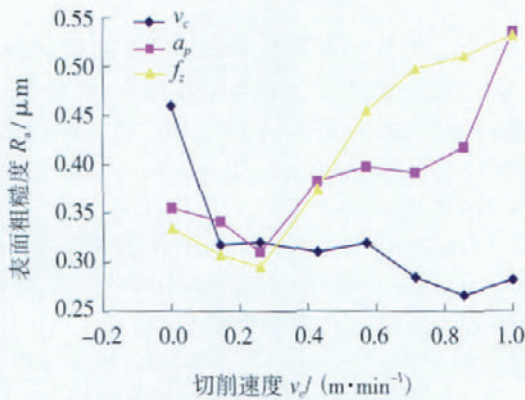


图 7 不同切削参数归一化处理后与表面粗糙度的关系

Fig.7 Impact of various normalization processing cutting parameters on surface roughness

### 3.2 切削参数对表面粗糙度的影响模型及精度分析

在对切削参数进行归一化处理后, 可分别对试验中的 3 个切削参数对表面粗糙度的影响曲线进行拟合, 得到切削参数对表面粗糙度值的影响模型:

$$\begin{cases} R'_a = f(v_{c1}) = -0.66v_{c1}^3 + 1.22v_{c1}^2 - 0.740v_{c1} + 0.44 \\ R'_a = f(a_{p1}) = 0.28a_{p1}^3 - 0.13a_{p1}^2 + 0.02a_{p1} + 0.35 \\ R'_a = f(f_{z1}) = -1.06f_{z1}^3 + 1.70f_{z1}^2 - 0.45f_{z1} + 0.33 \end{cases} \quad (3)$$

将表 4 中的  $v_{c1}$  值从小到大依次代入式  $f(v_{c1})$ , 设得到的结果为  $R'_{ai}$ , 试验测得的各值记为  $R_{ai}$ , 其中  $i$  取值

1~8, 则实际值与预测值的误差为  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = |R'_{ai} - R_{ai}|,$$

从而可以计算平均误差为  $\bar{\varepsilon}$ , 即为影响模型的精度:

$$\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1 + \dots + \varepsilon_7 + \dots + \varepsilon_8) / 8. \quad (4)$$

据此, 得到切削速度对表面粗糙度影响模型计算值与实际测量值的误差为  $0.021\mu\text{m}$ , 该误差为表面粗糙度测量值的平均值  $0.320\mu\text{m}$  的 7%。同理, 得到铣削深度对表面粗糙度影响模型计算值与实际测量值的误差为  $0.020\mu\text{m}$ , 它为表面粗糙度测量值的平均值  $0.391\mu\text{m}$  的 5%; 每齿进给量对表面粗糙度影响模型计算值与实际测量值的误差为  $0.013\mu\text{m}$ , 为表面粗糙度测量值的平均值  $0.413\mu\text{m}$  的 3%。可以看出, 影响模型能够很好的反映切削参数对表面粗糙度的影响。

### 3.3 高速铣削参数灵敏度计算

根据公式(1), (3) 分别求出  $\frac{df(v_{c1})}{dv_{c1}}$ 、 $\frac{df(a_{p1})}{da_{p1}}$ 、 $\frac{df(f_{z1})}{df_{z1}}$ , 即为各表面粗糙度对各参数的灵敏度曲线方程, 记为:

$$\begin{cases} K_{vc1} = \frac{df(v_{c1})}{dv_{c1}} = -1.97v_{c1}^2 + 2.44v_{c1} - 0.74 \\ K_{ap1} = \frac{df(a_{p1})}{da_{p1}} = 0.84a_{p1}^2 - 0.26a_{p1} + 0.02 \\ K_{fz1} = \frac{df(f_{z1})}{df_{z1}} = -3.18f_{z1}^2 + 3.41f_{z1} - 0.45 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知灵敏度曲线为二次方程曲线。如图 8 所示, 对式(5)中的二次曲线进行积分, 求灵敏度绝对值的平均值, 可得出随着每齿进给量的变化, 灵敏度绝对值的平均值为 0.31, 表明每齿进给量在试验参数范围内对表面粗糙度影响最为敏感; 其次是切削速度, 其灵敏度绝对值的平均值为 0.18; 铣削深度对表面粗糙度的影响敏感程度最弱, 灵敏度绝对值的平均值为 0.17。切削速度与铣削深度对表面粗糙度的影响敏感程度相差不多。

由图 8 还可以看到, 在不同的切削参数下, 铣削深度对表面粗糙度影响的灵敏度出现在正数区域, 表明随着铣削深度的增大, 表面粗糙度值呈现上升趋势; 切削速度对表面粗糙度影响的灵敏度主要出现在负数区域, 表明随着铣削速度的增大, 粗糙度值主要呈现变小的趋势, 其中会有微小的波动, 表面粗糙度值随切削速度增大而增大, 但是灵敏度绝对值小, 说明变化极为平稳; 每齿进给量对表面粗糙度影响的灵敏度值, 在正负区域中均出现, 但其绝对值较小, 表明随着每齿进给量的增加, 对表面粗糙度影响相对平稳。

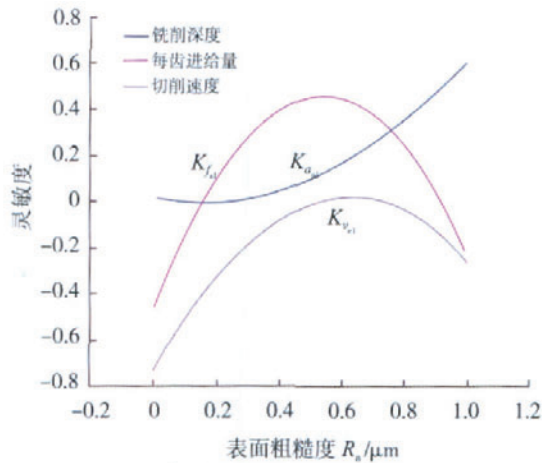


图8 不同切削参数对表面粗糙度影响的灵敏度曲线  
Fig.8 Sensitivity curve of various cutting parameters on surface roughness

因此,由灵敏度定义可以看出在进行切削参数选择时,应该首先对切削深度进行选择,其次是切削速度,最后为每齿进给量。

#### 4 基于灵敏度曲线的高速铣削参数选择方法

目前对钛合金高速铣削参数的选择还缺少指导性的方法,而对切削参数的选择,并不仅仅要求指定具体的一组参数值,在很多情况下需要每个参数能够给定一定的范围,由工艺研究人员根据效率、精度等具体要求等进行试验选择。本课题提出了基于灵敏度曲线的高速铣削参数范围确定方法。主要包括以下4个方面:

(1) 设计单因素试验并进行相关指标(如表面粗糙度)等的测试。对结果进行不同切削参数的归一化处理,得到如图7所示的不同切削参数归一化处理后与表面粗糙度的关系,由该图可以看出参数组合为  $v_c=304\text{m/min}$ ,  $a_p=0.20\text{mm}$ ,  $f_z=0.03\text{mm/z}$  时,即标准归一化后为0.2时,有利于形成最小的表面粗糙度。

(2) 进行切削参数对表面粗糙度的影响模型及精度分析,计算出高速铣削参数灵敏度,绘制出不同切削参数对表面粗糙度影响的灵敏度曲线,如图8所示。

(3) 围绕切削参数归一化后较优值,如0.2,以切削参数变化不会对灵敏度产生较大变化为要求(灵敏度变化不大意味着表面粗糙度变化不灵敏),设定灵敏度上下限,如图8设定为 $\pm 0.4$ ,由此可得归一化后各参数范围: $v_{c1} \in [0.16, 1]$ ;  $a_{p1} \in [0, 0.84]$ ;  $f_{z1} \in [0.02, 0.39] \cup [0.68, 1]$ 。再由图7可以看到在 $f_{z1} \in [0.68, 1]$ 时,具有较大的表面粗糙度值,所以取 $f_{z1} \in [0.02, 0.39]$ 。

(4) 根据式(2)计算出对应参数区域。 $v_c \in [267,$

$522]$ ,单位 $\text{m/min}$ ;  $a_p \in [0.1, 0.39]$ ,单位 $\text{mm}$ ;  $f_z \in [0.01, 0.04]$ ,单位 $\text{mm/z}$ 。在所求得的切削参数区域,可以进一步根据需要进行具体参数的选取。如果以表面粗糙度为优化目标,最优的切削参数组合为  $v_c=304\text{m/min}$ ,  $a_p=0.20\text{mm}$ ,  $f_z=0.03\text{mm/z}$ ,其表面粗糙度值为  $0.35\mu\text{m}$ 。

#### 5 结束语

对航空发动机叶盘、叶片类零件用材料TC17的精加工,通过单因素试验方法,研究了切削工艺对表面粗糙度的影响模型,通过切削参数的灵敏度分析,发现表面粗糙度对每齿进给量的变化最为敏感,其次分别是切削速度和切削深度。在试验参数范围及试验条件下的研究表明,切削参数组合为  $v_c=304\text{m/min}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$ ,  $f_z=0.03\text{mm/z}$  时,其表面粗糙度值为  $0.35\mu\text{m}$ ;当切削速度在  $267\sim 522\text{m/min}$ ,切削深度在  $0.10\sim 0.39\text{mm}$ ,每齿进给量从  $0.01\sim 0.04\text{mm/z}$  和  $0.06\sim 0.08\text{mm/z}$  范围变化时,表面粗糙度值在  $0.25\sim 0.45\mu\text{m}$  间变化,不会有较大的突变。

#### 参 考 文 献

- [1] 史兴宽,杨巧凤,蔡伟,等. 钛合金TC4高速铣削表面完整性研究. 航空制造技术,2001,(1):30-32.
- [2] Ezugwu E O. Key improvements in the machining of aeifficult-to-cut aerospace superalloys. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45:1 353-1 367.
- [3] Nagi Elmagrabi, Che Hassan C.H, Jaharah A.G, et al. High speed milling of Ti-6Al-4V using coated carbide tools. European Journal of Scientific Research, 2008, 22(2): 153-162.
- [4] Puerta Velásquez J D, Bolle B, Chevrier P, et al. Metallurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6wt.%Al-4wt.%V alloy. Materials Science and Engineering, 2007: 452-453, 469-474.
- [5] Puerta Velásquez J D, Bolle B, Chevrier P, et al. Surface integrity in high speed machining of TI-6WT.%AL-4WT.%V alloy. Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, Springer Netherlands, 2008, 1 319-1 320.
- [6] A.L. Mantle, AE.K. Aspinwall. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118: 143-150.
- [7] 杜随更,吕超,任军学,等. 钛合金高速铣削表面形貌及表层组织研究. 航空学报,2008,29(16):1 710-1 715.
- [8] 刘玲玉,熊峰. 结构动力参数的灵敏度分析. 工程结构, 2008,28(1):149-150.
- [9] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等. TC11钛合金插铣加工铣削力影响参数的灵敏度分析. 航空学报,2009,30(9):1 776-1 781.

(责编 玉龙)