

钛合金切削力和表面粗糙度试验研究

丁悦,王焱,刘畅,向颖

(中航工业北京航空制造工程研究所,北京 100024)

[摘要] 在对 TC4-DT 钛合金进行铣削试验的基础上,从切削力和刀具失效的角度研究了铣削刀具适配性,根据优选刀具的试验结果建立了表面粗糙度预测模型,分析了铣削参数对表面粗糙度的影响规律。结果表明:在选定的刀具条件下,无涂层、大刀尖圆弧半径和刀齿数少的刀具适合切削 TC4-DT 钛合金;铣削宽度对表面粗糙度影响最大;铣削深度和铣削宽度对表面粗糙度的综合影响呈马鞍面趋势。

关键词:钛合金;铣削;切削力;刀具失效;表面粗糙度

Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness When Milling Titanium Alloy

DING Yue, WANG Yan, LIU Chang, XIANG Ying

(AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] A series of tests are conducted by milling TC4-DT titanium alloy for investigating cutting force and surface roughness. A surface roughness model is established using the selected cutting tool. Thus the relationship between surface roughness and milling parameters is analyzed. The results show that it is suitable for cutting TC4-DT titanium alloy by an uncoated carbide cutting tool with larger corner radius and less number of flute. In addition, width of cutting has the greatest influence on surface roughness. Moreover, the variation tendency of surface roughness, which is influenced by the interaction between depth and width of cutting, is as the saddle surface.

Keywords: Titanium alloy; Milling; Cutting force; Cutting tool failure; Surface roughness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.088

钛合金由于具有比强度高、耐腐蚀性好、耐高温等优点,广泛地应用于航空航天发动机结构中^[1]。其中,TC4-DT 钛合金是我国结合纯净化熔炼技术和新型的 β 热处理工艺技术而研发的新型中强度高损伤容限型钛合金,该合金具有很高的韧性、低的疲劳裂纹扩展速率、优异的焊接性能、优良的工艺性能和较低的成本等综合性能,特别适合制造飞机大型整体框架类重要承力构件^[2]。但是,从切削加工性能的角度来看,TC4-DT 钛合金是典型的难加工材料,其导热性能差、化学活性高、弹性模量小、加工硬化严重,使得切削速度低、刀具寿命短、加工效率低下^[3-4]。本研究以 TC4-DT 钛合金为研究对象,采用科学试验和理论分析相结合的方法,研究铣削刀具材料和铣削参数与切削力之间的关系,并分析特定刀具材料下的铣削表面粗糙度,为合理选择 TC4-DT 钛合金铣削参数提供依据。

1 试验方案

工件材料为 TC4-DT 钛合金,化学元素含量如表 1

所示。试验机床为桥式龙门铣床,最高转速 4000r/min,最大扭矩为 950N·m。采用水基冷却液顺铣方式进行铣削试验,首先测量不同刀具和铣削参数下的切削力,然后根据试验结果测量铣削表面粗糙度。

采用单因素试验方法进行钛合金切削力试验,铣削参数为:每齿进给量 $f_z=0.08\text{mm/z}$ 、铣削深度 $a_p=2\text{mm}$ 、铣削宽度 $a_e=4\text{mm}$ 、铣削速度 $v_c=20\sim 80\text{m/min}$ 。切削力采用 Kistler 9257B 型测力仪测量,由于铣削力随铣削时间波动,取铣削周期内的平均铣削力进行分析。试验刀具为陕西硬质合金厂生产的硬质合金螺旋刃立铣刀,刀具型号如表 2 所示。钛合金表面粗糙度试验采用四因素四水平正交试验^[5],各因素及其水平如表 3 所示。试验刀具根据切削力试验结果选择。选用表面粗糙度采用时代公司的 TR220 粗糙度仪测量表面粗糙度,在不同的 3 个位置重复 5 次测量。

2 结果分析

2.1 切削力分析

表1 材料元素含量 (质量分数) %

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.0	3.96	0.03	0.02	0.007	0.001	0.08	其余

表2 试验刀具型号

刀具编号	刀具直径 D/mm	刀尖圆弧半径 r_e/mm	刀齿数	刀具涂层
1	20	0	4	无涂层
2	20	3	3	无涂层
3	20	0	3	TiAlN
4	20	3	4	无涂层
5	20	3	3	TiAlN

表3 表面粗糙度试验因素及水平

水平	$v_c/m \cdot \min$	$f_z/mm \cdot z$	a_v/mm	a_e/mm
I	20	0.05	0.5	0.5
II	40	0.08	2	4
III	60	0.12	3	6
IV	80	0.16	3.5	8

图1所示为钛合金切削力随铣削速度的变化趋势。从图中可以看到,在选定的铣削参数范围内切削力随铣削速度的提高而减小,而且减小的趋势逐渐变缓。切削力减小的现象可用热软化效应来解释。当切削速度提高时,材料在剪切区的应变率相应的提高,更多的变形能转化为热能,导致剪切区温度升高,材料在较高的温度下强度降低,因此切削力变小。同时由于切削速度提高,产生的热量来不及分散,使得剪切区温度升高,这会加剧热软化效应,导致切削力变小。切削速度的提高还会导致切屑-刀具接触长度变短和切屑厚度增加,使得切削力变小。此外由于温度的升高,使切屑-刀具-工件接触面的摩擦系数降低,最终出现切削力随切削速度的提高而变小的现象。当切削速度达到某一值时,热软化效应接近极限,单纯的提高切削速度对降低切削力的意义不大。

对比几种刀具的切削力发现,在相同的条件下, TiAlN 涂层刀具的切削力要大于无涂层刀具的切削力。这是因为钛合金的化学性能比较活泼,在温度达到一定程度时容易与相似材料发生亲和现象,造成刀具磨损严重(图2(a)),使得 TiAlN 涂层刀具的切削力较大,因此在切削钛合金时要尽量避免选择含钛涂层的刀具。从图1中还可以看到,刀尖圆弧半径小的刀具切削力较低。需要注意的是,刀尖圆弧半径越小,切削刃所承受的载荷越大,刀具越容易发生崩刃。在本研究中,刀具1和刀具3的刀尖圆弧半径为零,在铣削过程中均发生了严重的崩刃现象,如图2(b)(c)所示。最后发现,

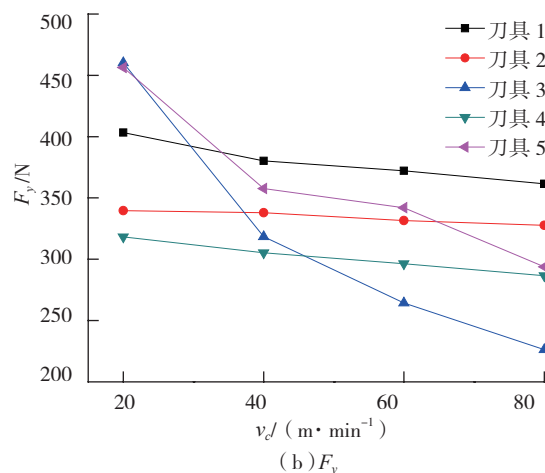
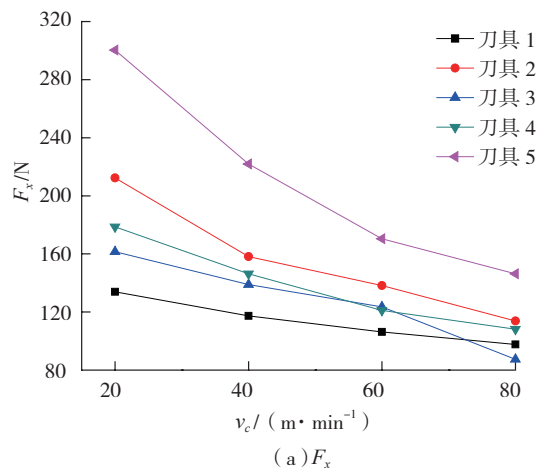
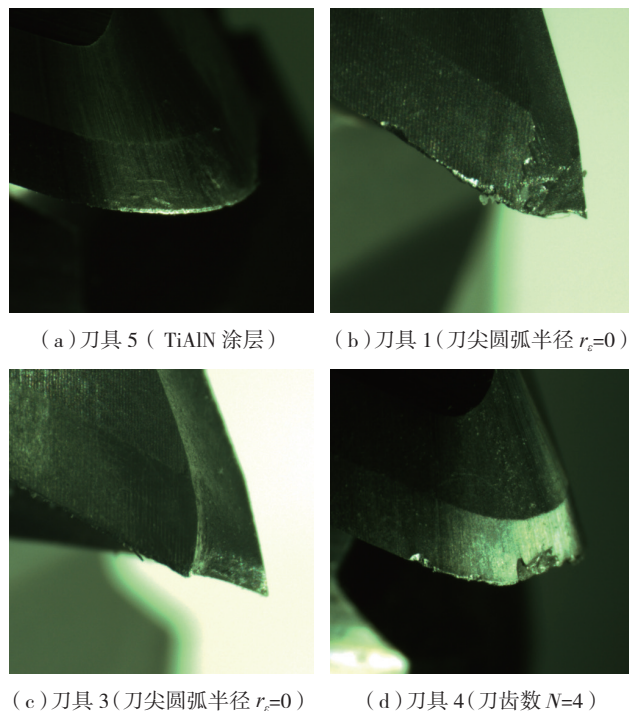
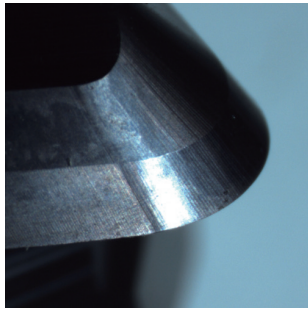


图1 切削速度对钛合金切削力的影响
Fig.1 Influence of cutting speed on cutting force





(e) 刀具 2 (无涂层、刀尖圆弧半径 $r_c=3\text{mm}$ 、刀齿数 $N=3$)

图2 铣削钛合金后刀具照片

Fig.2 Worn carbide tools in milling titanium alloy

增加刀齿数会明显降低切削力,但也相应地增加了刀具受冲击次数,造成切削刃磨损加剧,同时发生微崩刃现象,如图 2 (d)。综上所述,以切削力和刀具磨、破损的角度分析,刀具 2 的铣削性能最佳,即无涂层、大刀尖圆弧半径和刀齿数少的刀具比较适合切削 TC4-DT 钛合金,通过观察铣削后刀具 2 (图 2 (d))也证明了分析结论。

2.2 表面粗糙度分析

选用刀具 2 进行钛合金铣削表面粗糙度 (R_a) 试验,试验结果如表 4 所示。对表 4 进行极差分析可以发现,影响表面粗糙度因素的主次关系分别是 a_c 、 f_z 、 a_p 和 v_c 。

采用曲面响应法建立粗糙度数学模型,对表 4 试验

数据进行拟合,得到铣削参数对表面粗糙度的经验公式,如式(1)所示。

$$R_a = -0.183 - 0.021v_c + 20.115f_z - 0.361a_p + 0.778a_c + 0.000001v_c^2 + 16.508f_z^2 + 0.114a_p^2 - 0.071a_c^2 - 0.139v_c f_z + 0.01v_c a_p + 0.001v_c a_c - 3.067f_z a_p - 0.001f_z a_c - 0.036a_p a_c \quad (1)$$

将表 3 中铣削参数代入到式(1)中,得到表面粗糙度计算值 $R_a=0.993\mu\text{m}$,与实测值相比误差基本在 10% 以内,说明建立的表面粗糙度响应模型具有较高的精度。

为直观分析钛合金铣削表面粗糙度随着铣削参数变化的趋势,根据式(1)得到了铣削参数对表面粗糙度的影响趋势,如图 3 所示,可以看到,铣削速度的增加会成比例的降低表面粗糙度;而每齿进给量的增加会成比例的提高表面粗糙度。对于铣削深度的影响,表面粗糙度先随铣削深度的增加而减小,当铣削深度达到 1.5~2mm 之间时,表面粗糙度达到最低值,随后表面粗糙度剧烈地增加。铣削宽度的影响规律与铣削深度相反,在 4~6mm 之间表面粗糙度最大。

为研究铣削深度和铣削宽度对表面粗糙度的综合影响规律,根据经验公式得到表面粗糙度特征曲面(图 4)。从图 4 中可以看到,特征曲面呈马鞍面分布,在较低的铣削深度和最小的铣削宽度处能够获得最小的表

表4 表面粗糙度试验结果

编号	$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	a_p / mm	a_c / mm	实测 $R_a / \mu\text{m}$	预测 $R_a / \mu\text{m}$	误差 / %
1	80	0.08	3.5	0.5	1.307	1.385	5.95
2	40	0.12	3	0.5	1.355	1.337	1.3
3	60	0.16	2	0.5	1.286	1.181	8.14
4	20	0.05	0.5	0.5	0.578	0.549	5.09
5	40	0.16	3.5	4	3.229	3.175	1.66
6	80	0.05	3	4	2.511	2.375	5.43
7	20	0.08	2	4	2.296	2.3	0.19
8	60	0.12	0.5	4	2.39	2.315	3.13
9	20	0.12	3.5	6	2.864	2.735	4.5
10	60	0.08	3	6	2.708	2.435	10.08
11	40	0.05	2	6	1.94	1.893	2.42
12	80	0.16	0.5	6	2.84	2.484	12.52
13	60	0.05	3.5	8	2.148	2.035	5.27
14	20	0.16	3	8	2.791	2.639	5.45
15	80	0.12	2	8	2.06	1.795	12.86
16	40	0.08	0.5	8	2.253	2.028	10.00
I	2.132	1.794	2.015	1.131			
II	2.194	2.141	1.9	2.607			
III	2.133	2.167	2.341	2.588			
IV	2.18	2.537	2.387	2.313			
R	0.062	0.743	0.487	1.476			

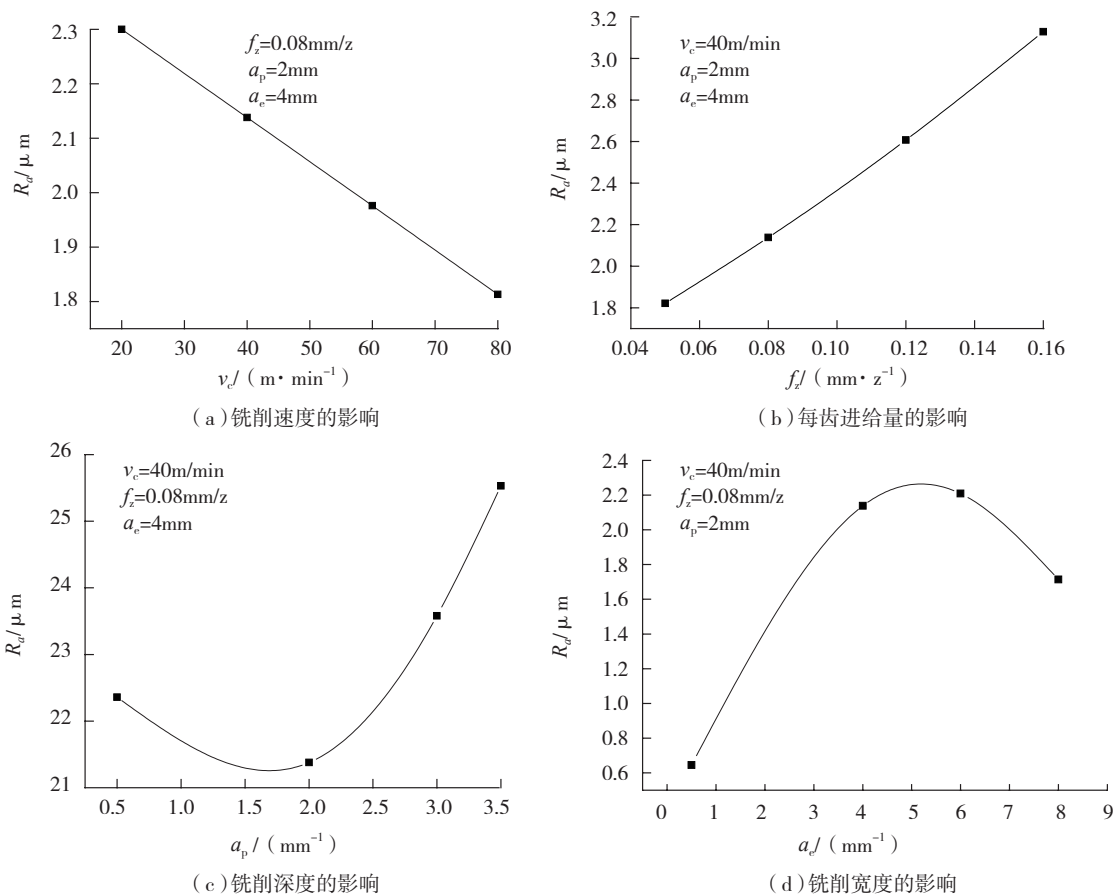
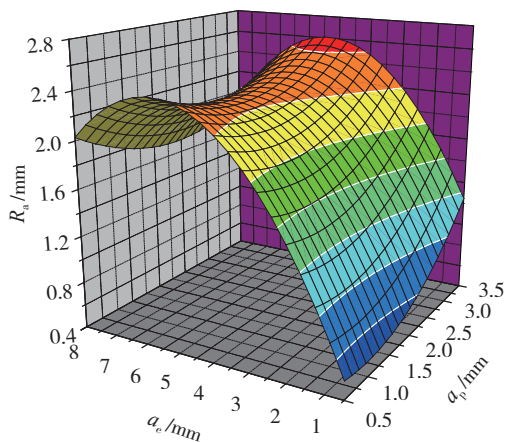


图3 铣削参数对表面粗糙度的影响

Fig.3 Influence of milling parameters on surface roughness

图4 铣削深度和铣削宽度对表面粗糙度的特征曲面
(铣削条件: $v_c=40\text{m/min}$, $f_z=0.08\text{mm/z}$)Fig.4 Contour plot of simulated roughness as a function of depth and width of cutting
(milling condition: $v_c=40\text{m/min}$, $f_z=0.08\text{mm/z}$)

面粗糙度。此外,铣削宽度的影响效果明显强于铣削深度,这也印证了极差分析的结果,因此在工程应用中,为降低表面粗糙度应优先降低铣削宽度。根据经验公式,以表面粗糙度 $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$ (对应7级光洁度) 为目标

对铣削参数进行优化,铣削宽度的合理使用范围应小于2mm。

3 结论

通过对 TC4-DT 钛合金进行铣削试验,分析其切削力和表面粗糙度,得到以下结论:(1)在本次试验的切削刀具中,无涂层、大刀尖圆弧半径和刀齿数少的刀具比较适合切削 TC4-DT 钛合金;(2)在选定的铣削刀具和铣削参数条件下,影响表面粗糙度因素的主次关系分别是铣削宽度、每齿进给量、铣削深度和铣削速度;(3)铣削速度的增加和每齿进给量的减小会成比例的降低表面粗糙度,提高铣削深度会使表面粗糙度先减小后增加,而铣削宽度的影响呈与铣削深度相反的趋势;(4)铣削深度和铣削宽度对表面粗糙度的综合影响呈马鞍面趋势,为降低表面粗糙度应优先降低铣削宽度。

参考文献

- [1] 付艳艳,宋月清,惠松骥,等.航空用钛合金的研究与应用进展[J].稀有金属,2006(6):850-856.

(下转第95页)