

TC6 钛合金整体叶轮数控铣削工艺^{*}

赵 鸿¹, 袁哲俊¹, 卢泽生¹, 庄福通², 傅维助², 肖 波²

(1. 哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 风华机器厂, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 为提高 TC6 钛合金航空发动机整体叶轮零件曲面数控铣削效率与加工质量, 采用正交实验方法, 研究并分析了球头立铣刀几何参数对零件切削表面硬化层及其后刀面磨损的影响, 发现三维曲面铣削时刀具合理几何参数的取值趋向与平面铣削刀具不同的现象, 并依此提出了切实可行的 TC6 航空发动机整体叶轮零件数控铣削工艺。

关键词: 航空发动机; 整体叶轮; 铣削; 数控加工; 钛合金

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)03-0083-03

Numerical control milling for aeroengine integrated impeller of TC6 titanium alloy

ZHAO Hong¹, YUAN Zhe-jun¹, LU Ze-sheng¹, ZHUANG Fu-tong², FU Wei-zhu², XIAO Bo²

(1. Dept. Machine & Electric, Harbin Inst. Technology, Harbin 150001, China;

2. Fenghua Machinery Factory, Harbin 50036, China)

Abstract: To improve the milling efficiency and the quality of integrated impeller of TC6 titanium alloy in aeroengine, the orthonormal experiment was carried out. The effects of geometry parameters of ball nose end-milling on the surface hardness of machined part and flank ware (VB) of tools were studied and analyzed. The result shows that principals of the rational geometry parameters between the 3D freeform surface and the plane are different. The milling technique for TC6 integrated impeller was presented based on the experiment.

Key words: Aircraft engine; Integrated impeller; Milling; Numerically controlled machining; Titanium alloy

1 引 言

多轴数控加工技术已广泛地应用于航空发动机整体叶轮类零件的加工中, 数控铣削加工工艺不仅影响工件表面质量和几何精度, 更重要的是影响生产效率和产品成品质量。尽管人们在钛合金铣削技术方面已进行了大量的研究, 但由于曲面加工的三维切削的特性, 铣削工艺参数的合理性有待于深入研究。在航空发动机叶轮越来越多地应用 TC6、TC4 等钛合金材料的今天, 为提高产品的生产效率和可靠性, 降低研制生产成本, 以航空发动机 TC6 钛合金整体叶轮曲面铣削工艺为对象进行深入的研究就显得非常有

意义了。

2 TC6 钛合金整体叶轮铣削

TC6 (Ti-6Al-2.5Mo-2.0Cr-1.0Fe-0.25Si) 含 15%~20% 稳定化元素, 是 (α + β) 相耐热钛合金, 工作温度 350℃~450℃。常温条件下其规定的抗拉强度 $\sigma_b = 931$ MPa; 伸长率 $\delta = 10\%$, 断面收缩率 $\psi = 23\%$; 450℃温度条件下其抗拉强度 $\sigma_b = 588$ MPa; 持久强度 $\sigma_{100} = 539$ MPa, 属难加工材料。研究表明^[1], 与切削钢材料零件相比造成加工困难的原因在于:

(1) 切削刃负荷重。切削 TC6 材料时切屑变形

* 收稿日期: 1999-06-17; 修订日期: 1999-09-27。基金项目: 原航天工业总公司重点预研项目。

作者简介: 赵 鸿 (1961-) 男, 高级工程师, 博士, 全国可转位刀具专委会委员, 从事整体数控模具铣刀及 CAD/CAM 研究。

系数小,切屑与刀具前面的接触长度很短,只有切钢时的 1/3~1/4。虽然切削力比切钢时约小 20%,但却集中在切削刃附近,容易造成刀具的崩刃。

(2) 切削温度高,由于 TC6 材料导热性很差,且切屑接触长度很短,不利于切削热的导出,致使切削刃区温度较高,实验指出,切削 TC6 材料切削温度比切削 45 钢时约高一倍以上。

(3) 刀具磨损严重,切削 TC6 材料时刀具容易磨损,除了切削温度高这个原因外,在切削过程中 TC6 很容易与空气中的氮和氧化合形成硬脆的表层,使刀具的磨料磨损加剧,另外 TC6 与刀具材料的化学亲合性强,容易和刀具材料中的 Ti、Co、Cr 等元素粘结,加重了刀具的粘结磨损程度。

整体叶轮铣削加工的工艺过程按照加工部位,可将叶轮加工工序分为:

(1) 开槽加工:其任务是粗略形成通道,并给通道两侧的叶片留出比较均匀的加工余量。

(2) 扩槽加工:从开槽位置,由内往外向两边扩槽,同时形成轮箍的表面。

(3) 叶型精加工及清根加工:对于非直纹面叶轮,只能采用球头立铣刀的球形刃与叶型表面的点接触加工。清根加工的目的在于轮毂与叶片根部之间形成光滑连接。

航空发动机 TC6 叶轮三维曲面数控加工工艺存在的问题在于,叶面的成型加工采用球头铣刀和锥球头立铣刀。刃部各点切削速度相差很大,已加工曲面表面粗糙。曲面成型加工时,多轴联动,被切材料与刀具切削刃接触不断改变,切削余量不均。精铣叶片时切削深性变形、切削振动和表面硬化层的综合作用下,刀刃会在工件的半精加工的表面上打滑碾压,如果刀刃不能切透硬化层,切削状态不稳导致曲面外廓变形,精度控制困难。

由于国内外厂商提供的数控铣刀基本采用通用的刀具几何参数,不能很好地适应 TC6 钛合金切削性,效率低,成本高,刀具寿命短。造成了发动机叶轮形成批量生产的瓶颈。刀具几何参数是否合理,直接影响数控加工中心性能的发挥。如果针对工件特定条件,正交试验优化出合理的刀具几何参数,然后利用先进的强力数控磨削技术“量体裁衣”式生产刀具,这对于提高叶面的成型加工效率,降低成本是一条非常有效的新工艺途径。

3 工艺试验与结果分析

根据整体叶轮数控加工过程的分析,实验要解决两个工艺问题:(1) 硬化层的存在,是造成球头立铣刀精铣切削余量小时金属切不下来或切削过深的重要因素。研究曲面半精加工后表面的硬化层厚度的分布状态,制定合理的精加工余量,以使精加工时有足够的余量切透硬化层,使刀刃在硬化层下面切削,改善刀刃的工作条件,保证精加工精度。(2) 以提高切削效率为目的,研究 TC6 材料数控铣削用球头立铣刀切削过程主要几何参数对刀具磨损的影响,优化刀具合理几何参数。

运用正交试验的方法研究球头立铣刀几何参数对曲面铣削过程的影响,考察规划的试验刀具在一定的切削条件下,切削硬化层硬度与厚度,后刀面磨损指标(VB)。表 1 为球头立铣刀几何参数正交实验规划,表 2 为刀具切削试验结果,切削硬化层硬度与厚度测试结果见图 1。

表 3 为切削实验结果的评价,其标准为:20 min 内破损取 0 分;30 min 内 $VB > 0.12$ 取 1 分;30 min 内 $0.05 < VB < 0.12$ 取 2 分;30 min 内 $VB < 0.05$ 取 3 分。从 9 种刀的切削试验结果来看,前角 $\gamma_0 = 12^\circ$,后角 $\alpha_0 = 8^\circ$,刃带宽度 $b_{r1} = 0.3\text{mm}$,螺旋角 $\beta = 38^\circ$ 时刀具的抗磨损能力较强。上述前角、后角的选择结论与传统的钛合金平面铣削时刀具前角、后角的取值原则不同^[2],其主要原因是叶片表面的曲率变化的因素在起作用,前角 γ_0 取值较大可使切削刃锋利,降低切削振动。选择较小后角 α_0 可以增加刀刃强度,而刀具的实际工作角度随着叶片表面曲率变化而不断变化,抗振性和刀刃的强度应是首先考虑的因素。它们直接影响到刀具寿命。

Table 1 Surface contour of ball nose endmilling

Rake $\gamma_0/^\circ$	Clearance $\alpha_0/^\circ$	Land width b_{r1}/mm	Helix $\beta/^\circ$
8	8	0.2	36
8	10	0.3	38
8	12	0.4	40
10	8	0.3	40
10	10	0.4	36
10	12	0.2	38
12	8	0.4	38
12	10	0.2	40
12	12	0.3	36

Table 2 Flank wear (VB) of testing mill

Slot No.	Test result
1#	30 min VB= 0.15 mm; 33 min broke
2#	30 min VB= 0.05 mm; 33 min broke
3#	6 min 3 teeth broke
4#	30 min VB= 0.1 mm; 32 min broke
5#	15 min broke
6#	6 min 1 teeth broke
7#	32 min VB= 0.05 mm
8#	30 min broke
9#	6 min broke

Test condition: rotating speed $n= 540$ r/min, back engagement $a_p= 4$ mm, feed speed $f= 140$ mm/min

切削硬化层的测试结果见图 1, 工件材料表层硬度较低, 这主要是切削热在已加工表面产生退火作用, 刀具前角 γ_0 影响硬化层硬度; $\gamma_0= 10^\circ$ 时硬化层硬度最高达 425 Hv, 刃带宽度 b_{r1} 影响硬化层的深度, 3#、5#、6# 刀具的刃带宽 b_{r1} 在 0.3 mm~0.4 mm 之间, 刀刃强度较高, 切削硬化层较厚, 主要是由刃带对已加工表面的熨平挤压的结果所至, 所有试验刀具

的加工硬化层厚度在 0.08 mm 以内。精铣加工切深应大于切削硬化层的厚度, 这样刀刃切削穿透硬化层在硬度较低的基体切削, 一般可取切深 $a_p> 0.12$ mm 为宜。在航空发动机 $\times\times$ 轮和 $\times\times$ 轮等产品的加工中应用此工艺方案, 其切削效率可比以往提高 80% 以上。

Table 3 Test result analyze

No.	Point	γ_0	α_0	b_{r1}	β
1	1	8	8	0.2	36
2	3	8	10	0.3	38
3	0	8	12	0.4	40
4	2	10	8	0.3	40
5	0	10	10	0.4	36
6	0	10	12	0.2	38
7	3	12	8	0.4	38
8	1	12	10	0.2	40
9	0	12	12	0.3	36
K1		4	6	2	1
K2		2	4	5	6
K3		4	0	3	3
K1/3		1.333	2	0.667	0.333
K2/3		0.667	1.333	1.667	2
K3/3		1.333	0	1	1

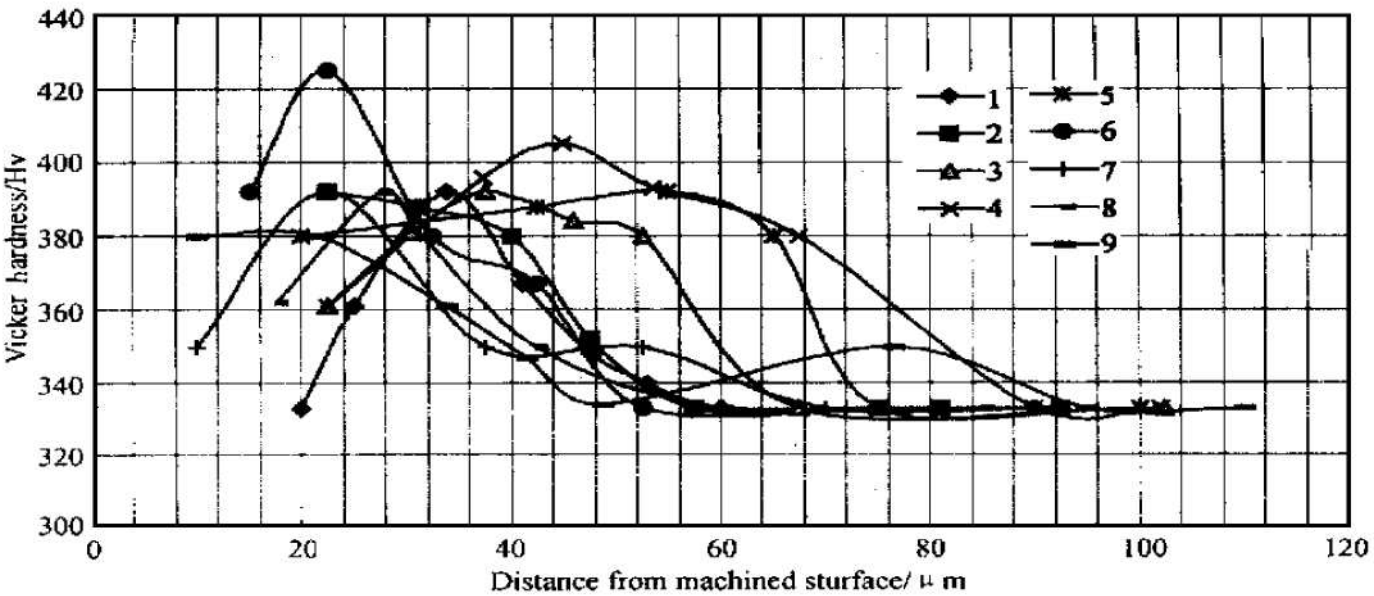


Fig. 1 The hardness of machined surface

Test condition: rotating speed $n= 900$ r/min, back engagement $a_p= 2$ mm, feed speed $f= 720$ mm/min

4 结 论

TC6 钛合金整体叶轮曲面数控铣削工艺研究对球头立铣刀合理几何参数的实验结果表明, 曲面三维铣削与平面铣削的合理刀具几何参数的取值趋向是不同的。使用一般刀具材料, 利用多轴 CNC 强力磨削技术, 针对特定工件、材料的铣削特点, 制造专用数控铣刀可以提高铣削效率和加工质量。这一方法在国内还是首次应用, 取得了预期的效果。

参 考 文 献

[1] 邢淑仪, 王世洪. 铝合金和钛合金 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
[2] Sandvik Coromant, Technical Editorial Dept. Modern metal cutting id•reklam [M]. Sandvikenw, 1994 II -35.
[3] 孟少农. 机械加工工艺手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

(责任编辑: 龚士杰)