

基于单元切削过程利润率模型的 TB6 铣刀筛选

Milling Tool Selection of TB6 Titanium Based on Profit Rate Model of Unit Cutting Process

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 葛士坤 崔季 陈志同 徐义平

[摘要] 对典型难加工钛合金 TB6 材料的铣削刀具进行筛选试验,利用基于单元切削过程利润率模型的刀具切削性评价方法进行评价,通过测量并拟合后刀面磨损曲线得到刀具耐用度的大小,分别计算刀具的利润率数值,筛选出了一种最适合于 TB6 铣削的刀具,与工厂之前使用的刀具相比,利润率提高了 200% 以上,并得到了利润率与耐用度、切除率之间的相互关系,为刀具切削性评价提供了一种新思路。

关键词: TB6 利润率模型 刀具筛选 刀具磨损

[ABSTRACT] A milling tool selection experiment of TB6 titanium, a typical hard to cutting material, is conducted. The performance of each cutting tool is evaluated by an approach based on profit rate model of unit cutting process. The best tool for cutting TB6 titanium is selected out through measuring and fitting the flank worn value curve and calculating the profit rate value, which is as higher as more than 200% comparing with the using tools in factory. Additionally, the relevance of profit rate, tool life and the material cutting rate is obtained, which provides a new method for evaluating cutting tool.

Keywords: TB6 Profit rate model Milling tool selection Milling tool worn

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.034

随着航空工业和材料工程的飞速发展,越来越多的难加工材料被用于飞机制造中。其中,具有比强度高、韧性好、抗腐蚀能力强等优点的钛合金材料在飞机制造中的应用到达了一个空前的高点。如美国第三代战斗机 F-15 钛合金用量占 27%,而第四代战斗机 F-22 和 F-35 钛合金用量甚至达到了 40%。而目前在各类钛合金中,性能更为优良的是 β 相钛合金 TB6 (国外牌号为 Ti1023),其已经逐渐取代高强钢成为直升机桨毂、中央件等疲劳寿命要求高的关键结构件的首选材料。但是, TB6 的加工性能较差,切削力大,切削温度高,断屑困难,刀具磨损严重等缺点严重制约着其进一步应用。

解决上述问题的首要步骤是选用合适的切削刀具。由于目前全球范围内的刀具厂商众多,各家均提供认为适合加工 TB6 的刀具,而且各有优势,如何正确评价加

工 TB6 的刀具就成为亟待解决的问题。一直以来,刀具的评价方法多种多样,比如比较同一切削用量下的寿命,比较相同条件下的体积切除率等。这些评价方法均忽视了价值方面的问题。切削加工的过程是一个产生利润的过程。有些刀具价格高,寿命短,有些切削效率高,价格昂贵,因此不能只从某一方面进行比较,需要确定一个统一比较指标,同时考虑到这些影响因素。如果缺乏一个统一的评价标准,则很难合理评价刀具的价值。

本文通过钛合金 TB6 铣削刀具磨损试验,采用刀具磨损检测装置进行刀具后刀面磨损的测量,将单元切削过程利润率模型用于刀具评价,对多个品牌的刀具进行试切试验,从而筛选出加工 TB6 利润率最好的一把刀具,并讨论了利润率、耐用度及切除率之间的相互关系。

1 刀具评价模型简介

目前,对刀具技术性能的评价有多种方法,车间常用的是比较刀具耐用度、比较刀具的切除总量等。这些方法的优点是能够比较直观、简单地做出选择,但是直观比较刀具耐用度的方法很少考虑刀具的切除率。一般情况下,切除率越低,则耐用度就会越高,因此选刀试验时,通常刀具厂商的推荐参数均偏低,以此达到高耐用度的目的;还有的是比较参与评价的每种刀具的最终切除总量,这种方法忽视了加工时间成本,也是不可取的。

现有的评价方法对经济性的考虑存在着明显问题,没有考虑到生产过程中用到的资本总量,因此北京航空航天的陈志同等^[1]提出一种单元切削过程利润率评价模型用于刀具的评价。当机床、刀具、工件选定后,对单元切削过程所用到的固定资产和流动资产的总额 p 为一个固定值,并推导出一个利润率模型作为目标函数用于切削参数优化问题。该目标函数为:

$$\Delta p = \bar{w}_v \dot{V}_{ij} - (e_m + e_h + e_p + e_{o2} + c_r \frac{1}{T}) \quad (1)$$

其中,刀具耐用度 T 通过试验测量获取,而机床折旧成本率 e_m 、工人工时成本率 e_h 、动力成本率 e_p 、刀具一次使用成本 c_r 、铣削时的体积切除率 V 、体积价值系数 \bar{w}_v 依次如下列各式所示。

$$e_m = \frac{\text{机床价格}}{\text{机床使用寿命} \times 365 \times 16 \times 60} \text{ (元/min)}, \quad (2)$$

$$e_h = \frac{\text{工人工资}}{60} \text{ (元/min)}, \quad (3)$$

$$c_h = \frac{\text{机床功率} \times \text{电费}}{60} \text{ (元/min)}, \quad (4)$$

$$c_1 = \frac{\text{刀片价格} \times \text{刀具齿数}}{\text{可转为次数}} \text{ (元)}, \quad (5)$$

$$\dot{V} = a_p \times a_e \times \frac{v_c}{\pi \times d} \times z \times f_z \text{ (cm}^3/\text{min)}, \quad (6)$$

$$\bar{w}_v = \frac{\text{机床加工费用}}{\text{经验参数下的材料体积切除率}} \text{。} \quad (7)$$

该模型从经济学角度出发,结合了加工过程中所用到的全部资金的共同作用,已经对切削参数优化问题进行了深入的探讨,但还未在刀具评价方面形成应用。考虑了在切削过程中形成加工后的金属表面的过程不只是刀具在起作用,其他如机床、工人、能源等因素也都在起作用。因此,研究刀具的性价比绝对不能孤立地研究,必须结合具体生产过程。一个可行的评价思路应该是尽量使外部因素相同时,整个系统的利润率达到峰值。

2 刀具筛选试验

2.1 试验材料及其力学性能

TB6 钛合金是一种典型的近 β 型钛合金,该合金具有比强度高、断裂韧性好、各向异性小、锻造温度低和抗应力腐蚀能力强等优点,能够满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性。TB6 钛合金的主要半成品是棒材和锻件,也可以制成厚板和型材。主要用于制造飞机机身、机翼和起落架结构中的锻造零件,通过热处理可以实现不同强度和塑性及韧性水平的配合。该合金的化学成分如表 1 所示^[3]。TB6 钛合金室温下的力学性能^[3]如表 2 所示。

表1 TB6钛合金化学成分 %

元素	Al	V	Fe	Ti
含量	2.6~3.4	9.0~11	1.6~2.2	余下部分

表2 室温下TB6钛合金的力学性能

$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	HRC	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m})$
1105	1005	4~10	29	≥ 60

2.2 试验条件

(1) 试验机床。

试验在意大利蓝粒蒂公司生产的型号为

RAMMATIC1001 的五坐标立式加工中心上进行,该机床的价格为 445 万元,机床加工费用为 400 元/小时,机床寿命为 10 年,机床整机功率为 70kW。

(2) 测量设备。

测量刀具磨损的传统方法是采用工业显微镜测量,但是该方法需要将刀具拆卸下来,测量完毕后需要重新装刀对刀,耗时耗力,无法实现在线监测。试验中采用北航自研自制的刀具磨损检测仪进行刀具后刀面磨损检测,整个试验系统原理如图 1 所示。首先通过对焦,利用图像获取设备获取刀片后刀面磨损照片,调整倍率进行放大,传送给计算机,利用磨损测量软件进行测量,将测得的磨损带宽度值与仪器标定所确定的系数相乘就获得当前点的磨损量,为保证数据可靠性,需要进行多次测量取均值^[4]。

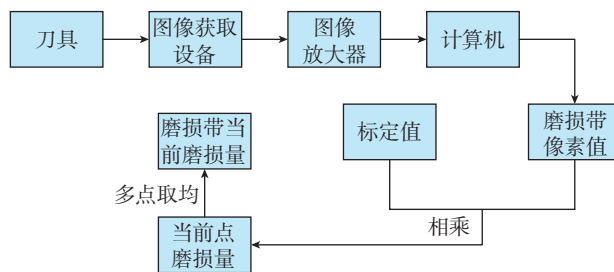


图1 磨损检测原理示意图

Fig.1 Principle diagram of wear detection

(3) 工件材料尺寸。

待加工工件为航空 TB6 锻件,工件尺寸为 120mm × 120mm × 50mm,已去除黑皮。

(4) 刀具信息。

由于材料的难加工性,目前市面上能用于 TB6 铣削的刀具种类较少,试验所用刀片是从国外几个知名刀具厂家收集的,均能用于 TB6 材料的加工,且保证刀具安装悬长基本一致,选取的刀具信息如表 3 所示。

2.3 试验方案

试验所用刀片均为可转位方肩刀,材质均为涂层硬质合金,综合考虑工厂经验参数,刀具厂商推荐参数,并结合加工类似材料的切削参数,选取切削参数如表 4 所

表3 试验刀具信息

刀具品牌	刀片型号	刀杆型号	刀杆直径/mm
Sandvik1	R390-1704 31E-PMS30T	BT50 ER32	32
Iscar	ADKT 150532R-HM 1C328	BT50 ER32	32
Sandvik2	R390-1704 31E-PMS40T	BT50 ER32	32
Kenna	EDPT180532PDSRGD KC725M	BT50 ER32	32
Seco	XOMX180631R-M10F40M	BT50 ER32	32

表4 试验刀具参数信息

刀具	$v_c / (m \cdot min^{-1})$	$f_z / (r \cdot z^{-1})$	a_p / mm	a_e / mm
Sandvik 1	25	0.15	5	12
Sandvik 2	33	0.15	5	12
Iscar	25	0.1	5	12
Kenna	32	0.15	5	12
Seco	30	0.18	5	12

注: 如果刀具未磨损到磨钝标准崩刃, 则结束实验, 寿命计算到崩刃时间为止。

示。选用磨钝标准 $VB=0.3mm$, 5 种刀具依次切削至后刀面磨损到达 $0.3mm$ 为止。

3 试验结果与分析

试验中的 5 种刀具表现差异较大, 表 3 中前 3 种刀具经历了明显的初期磨损、正常磨损、急剧磨损阶段, 最终失效, 失效形态主要为磨损, 并伴随微崩刃; 后两种刀具则明显不适应 TB6 的加工, 刚刚切入不久即明显崩

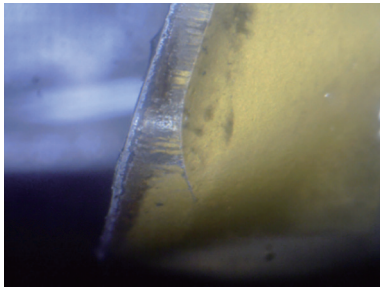


图2 Sandvik S40T 磨损
Fig.2 Wear of Sandvik S40T

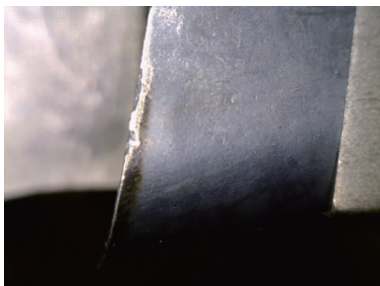


图3 Iscar磨损
Fig.3 Wear of Iscar

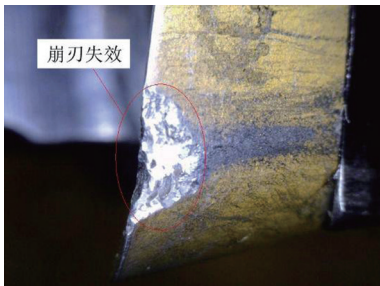


图4 Kenna失效
Fig.4 Failure of Kenna

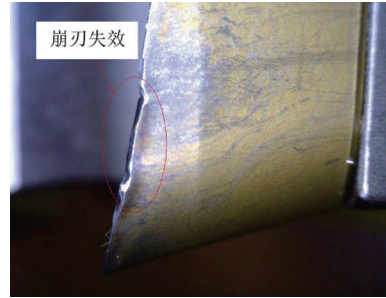


图5 Seco失效
Fig.6 Failure of Seco



图6 Sandvik S30T磨损
Fig.6 Wear of Sandvik S30T

刃, 刀片磨损如图 2~6 所示。

TB6 钛合金的磨损形式主要是后刀面磨损, 由于其切削力大, 后刀面与材料摩擦严重, 且切削速度低, 温度不高, 根据磨损产生机理粘结磨损的可能性较大, 刚进入切削时, 刀具涂层中存在氮化钛、碳氮化钛等化合物, 易粘结到刀刃表面上, 影响了测量磨损的准确性。以 Sandvik S30T 为例, 由于刚进入切削, 涂层与刀具基体粘结牢固, 在刀具后刀面上形成冷焊结, 如图 7 所示。



图7 Sandvik S30T后刀面钛化合物亲和现象
Fig.7 Titanium compound affinity of Sandvik S30T in flank face

随着切削的不断进行由于摩擦面之间的相对运动, 后刀面上的一层银白色的粘结物逐渐被带走, 并且随着切削温度升高, 涂层与刀具基体粘结力减小, 涂层逐渐脱落, 后刀面露出刀具基体颜色, 如图 8 所示。涂层脱落后, 刀刃强度明显下降, 进入急剧磨损阶段。此时, 刀刃上逐渐出现一些微小的沟槽, 并逐渐增大至崩刃, 如

图9所示。

对这5把刀具进行磨损曲线拟合,如图10所示。

从刀具磨损曲线得知,Sandvik S30T的刀具耐用度明显领先于其余4种刀具,达到了2个多小时,Iscar和Sandvik S40T两种刀具耐用度达到了1h左右,Seco和Kenna两种刀具则寿命很短。

作者对企业在设计工艺条件下加工TB6钛合金参数进行调研,其参数如表5所示。

根据评价函数中的各参量要求,调研了刀片价格如表6所示。

据此,计算体积切除率 $V=4.5\text{cm}^3/\text{min}$,并结合机床信息,计算体积价值系数、机床折旧成本率,并结合社会工人工资成本,电费成本,计算工人工时成本率、动力成本率,其他可分割成本率包括场地费、切削液费、工装夹具使用费等,估算为0.1(元/min),其计算结果如表7所示。



图8 Sandvik S30T基体颜色出现

Fig.9 Colour of the Sandvik S30T matrix occurred



图9 Sandvik S30T逐渐崩刃

Fig.9 Sandvik S30T edge is gradually collapsed

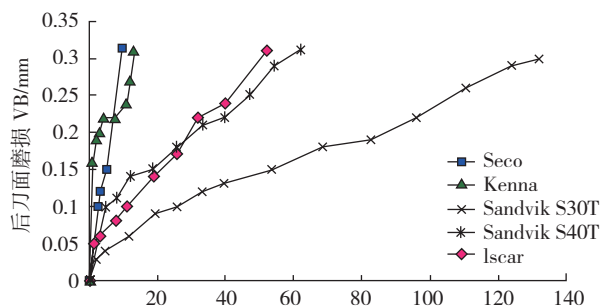


图10 磨损拟合线

Fig.10 Wear fitted line

表5 车间切削TB6采用的参数

$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_z / (\text{r} \cdot \text{z}^{-1})$	a_p / mm	a_e / mm	d / mm	z / mm
25	0.1	12	5	32	3

表6 刀具价格

品牌	Kenna	Seco	Sandvik S30T	Sandvik S40T	Iscar
价格 / 元	120	110	120	130	110

表7 目标函数系数

元/min

e_m	e_h	e_p	e_{n2}
1.27	0.2	0.58	0.1

将上面计算出的各成本率代入评价函数,可计算出每种品牌的刀具的单元利润率,可求得各刀片对应的单元切削过程利润率值,其利润率大小、切除率和耐用度对比如图11所示。

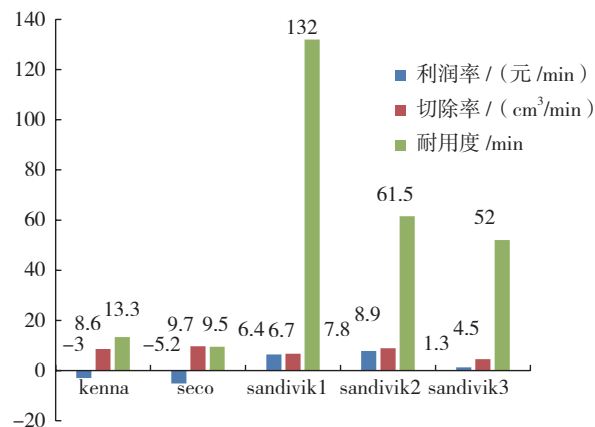


图11 刀具利润率、切除率、耐用度对比

Fig.11 Compare of the Cutting tool margins、resection rate and durability

根据对比图11,可得出以下结论:

(1)按照利润率评价,Sandvik S40T以微弱的优势领先,Sandvik S30T则排在第二位,远大于其余刀具;Kenna与Seco两种刀具的利润率出现了负值,可见,若工厂采用这两种刀具,将会带来负利润;

(2)Kenna、Seco、Sandvik S40T的切除率较大,说明其切削参数选择比较大,而Sandvik S30T的参数稍小,Iscar则相对最为保守,切除率不足最大值的50%;

(3)根据对比不难得知,Sandvik S30T的刀具耐用度以两倍以上水平高于其余刀具,Sandvik S30T和Iscar耐用度达到了40min以上,而Kenna与Seco刀具则在10min左右分别崩刃;

(4)Sandvik S30T选用的切削参数比较理性,保证了一定的切除率,而带来了两倍于其他刀具的刀具耐用

度,并且获得了很理想的利润率,对于工厂而言,既能保证较高切除效率和较好的利润率,并且获得极大刀具寿命的情况是非常理想的,因为这样能省去中间一半以上的换刀过程,减少了辅助时间,并且减少了刀具破损的概率,提高了可靠性,这样的刀具及参数适合车间进行大批量生产某零件时使用;

(5)Sandvik S40T 选用的切除率较大,计算得到的利润率也超过了 S30T,但是,唯一的缺陷在于牺牲了刀具耐用度,不难看出该刀具的特点在于能承受大参数、重载荷切削,且在这种切削环境下仍然能保证很高的利润率和能接受的刀具耐用度,适用于车间进行单件或小批量生产且时间比较紧的任务;

(6)Iscar 刀具虽然选用了最小的参数,但其并没有获得最持久的刀具耐用度和理想的利润率,显然不适宜在车间大规模使用,另外两种刀具则明显看出不适宜进行 TB6 钛合金的切削,切削过程是一个产生利润的过程,选刀不当将会给车间带来负利润。

综上所述,一般情况下,某些车间会更多追求避免频繁换刀带来的麻烦,将耐用度作为一个主要指标,这种情况下可以优先选用 SandvikS30T 刀具,而在进行重切削或单件生产时,将利润率和切除率放在首位,则推荐选用 Sandvik S40T 刀具,其余 3 种刀具则不适合用于 TB6 加工。

4 刀具耐用度模型

刀具耐用度是指刀具自开始切削直到磨损量达到磨钝标准为止的,不包括用于对刀、测量、快进、回程等非辅助时间的净切削时间^[5]。

刀具耐用度可以用来简单比较不同刀具材料在相同条件下的切削性能;同一种刀具材料切削各种工件材料,则可以用耐用度来比较材料的切削加工性。对于某一切削加工,当工件、刀具材质和刀具几何形状选定之后,切削用量是影响刀具耐用度的主要原因。本节拟通过试验研究 TB6 切削中的刀具耐用度的主要影响因素以及影响程度。

4.1 试验设计

由刀具筛选试验结果可知, Sandvik S30T 与 S40T 是车间使用性价比最高的 2 种刀具,由于 S40T 换刀频繁,因此通常 S30T 成了车间的首选。本试验以 S30T 为例,建立精加工参数下的刀具耐用度模型。试验采用的因素有切削速度 v_c 、每齿进给量 f_z 、径向切深 a_z ,保持轴向切深 $a_p=5\text{mm}$ 不变。各因素均取 3 个水平,水平值如表 8 所示,进行 3 因素 3 水平的等水平正交试验 L9(3³),正交表设计如表 9 所示。

切削方式为顺铣,侧铣加工。鉴于精加工时,要求

表8 耐用度试验水平表

试验水平	试验因素		
	切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (\text{r} \cdot \text{z}^{-1})$	径向切深 a_p / mm
	A	B	C
1	20	0.07	0.4
2	40	0.1	0.7
3	60	0.13	1

表9 耐用度试验安排表

试验水平	试验因素		
	切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (\text{r} \cdot \text{z}^{-1})$	径向切深 a_p / mm
1	20	0.07	0.4
2	20	0.1	0.7
3	20	0.13	1
4	40	0.07	0.7
5	40	0.1	1
6	40	0.13	0.4
7	60	0.07	1
8	60	0.1	0.4
9	60	0.13	0.7

刀尖锋利,因此本次试验设定磨钝标准为后刀面 VB 为 0.15mm。按照以往经验,切削开始阶段刀刃上会粘附部分工件材料,呈银白色,此时刀刃实际并未磨损,随着切削的进行,该银白色粘附物会逐渐消退,此时可以测量后刀面磨损值,因此,测量时要等越过这个阶段再进行,否则会使数据失效。

4.2 试验结果

正交试验的磨损试验结果如表 11 所示。并将各个因素的极差分析数据记录在其中。

(1)回归分析。

回归分析(regression analysis)是一种处理变量之间相关关系最常用的统计方法,用它可以寻找出隐藏在随机性后面的统计规律^[6]。对于切削力试验来讲,回归分析可以得到其相应的经验模型公式,从而找出各切削参数与切削力之间的数学关系。

对试验结果进行回归分析,刀具耐用度模型采用指数模型。

刀具耐用度指数模型为:

$$T = C v_c^m f_z^n a_z^k$$

对上式两边同时取对数变换为线性函数:

$$\ln T = \ln C + m \ln v_c + n \ln f_z + k \ln a_z$$

表10 刀具寿命正交试验表

试验序号	试验因素			刀具耐用度 T/min
	A 切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	B 每齿进给量 $f_z / (\text{r} \cdot \text{z}^{-1})$	C 径向切深 a_e / mm	
1	20	0.07	0.4	1113
2	20	0.1	0.7	724
3	20	0.13	1	510
4	40	0.07	0.7	513
5	40	0.1	1	340
6	40	0.13	0.4	238
7	60	0.07	1	263
8	60	0.1	0.4	179
9	60	0.13	0.7	128
K1	2347	1890	1530	
K2	1091	1243	1365	
K3	569	876	1113	
$\bar{K1}$	782	630	510	
$\bar{K2}$	364	414	455	
$\bar{K3}$	190	292	371	
R	A1	B1	C1	
	593	338	139	

表11 耐用度回归分析及F检验

差异源	平方和 SS	自由度 d_f	均方和 MS	F 值	$F_{-0.05}$ 临界值	显著性	回归系数
a_e / mm	0.0120	1	0.0120	0.0323	9.65		-0.0128
$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	0.5562	1	0.5562	456.0880	9.65	√	-1.2619
$f_z / (\text{r} \cdot \text{z}^{-1})$	0.1619	1	0.1619	196.2821	9.65	√	-1.2171
回归	0.7181	3	0.2394	50.0730	5.67	√	284.7404
残差	0.0061	5	0.0012				

$$T = 1949.2615 \times a_e^{-0.0128} \times v_c^{-1.2619} \times f_z^{-1.2171}$$

令

$$\hat{y} = \ln T, b_0 = \ln C, b_1 = m, x_1 = \ln v_c, \\ b_2 = n, x_2 = \ln f_z, b_3 = k, x_3 = \ln a_e,$$

则将指数模型转化为了线性模型:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3,$$

而后使用最小二乘法求解各系数。

回归方程是一种预测模型,仅仅是一种假设,尽管这种假设具有根据,但仍然需要在求出模型以后,对预测模型进行显著性检验,并由此判定预测模型拟合程度的好坏^[7]。

对于模型的回归分析及F检验如表12所示。

从回归分析结果表中可以看出:回归方程是高度显著的,耐用度T的F统计值为50.0730,远大于显著性水平取0.05时的临界值5.67,说明了回归方程可靠性,可用于耐用度的预测。

(2)因素显著性分析。

通过对表12中正交试验数据做极差分析并记录在其中,得到了各铣削因素对刀具耐用度的影响显著性,如图12所示。

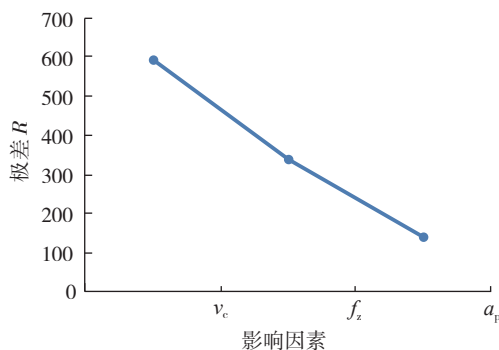


图12 极差分析结果

Fig.12 Result of range analysis

从图12可以看出,铣削速度对刀具耐用度的影响最为显著,其次是每齿进给量,而铣削深度的影响则较弱,也可以通过中的F检验值看出,铣削深度的回归值为0.0323,远远小于临界值9.65,说明铣削深度是高度不显著的,而铣削速度的检验值达到了456.0880,每齿进给量的检验值达到了196.2821,均远大于临界值9.65,说明是高度显著的。

5 结论

(1)将切削过程利润率模型用于刀具评价,推广了该模型的适用范围,实现了对刀具的耐用度、材料切除率、刀具价格和其它加工成本的综合评价。为刀具切削性能评价和选择提供了有据可循的新思路。

(2)利用相对磨损率试验法,快速确定刀具耐用度,通过切削过程利润率模型计算并筛选出适合于加工TB6的刀具和相应切削参数。

(3)对典型难加工钛合金TB6进行刀具筛选,找出了利润率最大的一种刀片,由于工厂目前以使用Sandvik 1刀片与Iscar刀片为主,因此可估算使用Sandvik 2刀片将提高工厂利润200%以上。

(4)参数优化目标函数——基于单元切削过程的利润率模型运用到刀具评价中,在若干刀具中筛选出最合适

(下转第61页)

在签署过程中,需要在 CAPP 中对工艺文件自动进行电子签名。当 PDM 在流程中需要对工艺文件进行签署时,调用 CAPP,传入参数, CAPP 根据传入的参数,打开 PDM 检出的工艺文件,进行用户、日期等流程信息签署,并自动提交回 PDM,如图 9 所示。

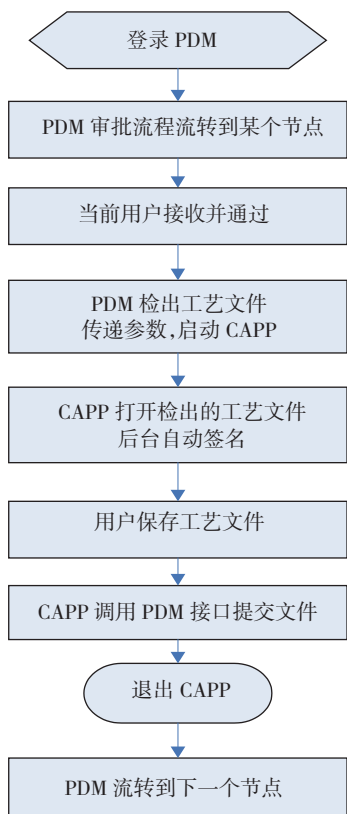


图9 工艺文件审签流程

Fig.9 Countersignature flow chart for process file

4.5 工艺数据存储集成

工艺数据的存储采用冗余数据存储方案, CAPP 系统在 CAPP 数据库中直接存储 CAPP 工艺文件以及对应的结构化工艺数据。在 PDM 系统中, CAPP 编制的工艺文件以附件的形式进行流程作业,将 CAPP 系统编制的工艺表格进行有效存储,并将相应的结构化工艺数据转化为具有特定约束的 XML 文件提交 PDM 进行工艺数据的统一管理,如图 10 所示。

5 结论

综上所述, CAPP 与 PDM 深度集成的实施应用,不但可以给企业带来业务模式的全新变革,在实现企业产品全生命周期管理同时,提升业务执行与业务管理的水平,而且通过工程数据和工程知识的充分管理与良好应用,将形成新的核心竞争力,实现技术带动生产。

无论从企业信息化应用的实际需求和应用效果

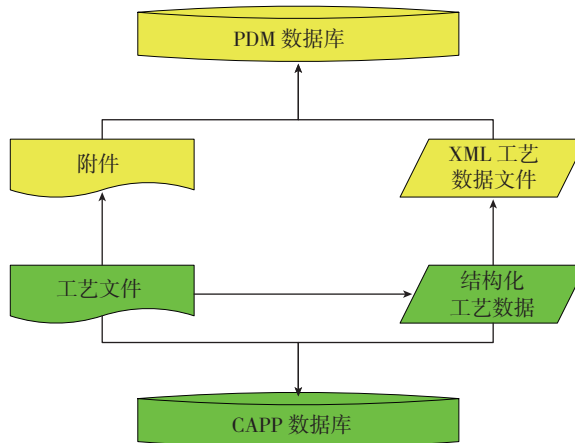


图10 工艺数据存储管理

Fig.10 Storage management flow chart for process file

来看,还是从产品全生命周期思想和技术的发展方向来看,甚至从企业整体协同的角度出发, CAPP 系统与 PDM 系统深度、紧密的集成,可以让制造数据与设计数据能够切实连接起来,确保数字化制造过程进行有效的信息共享与交流。

参考文献

- [1] 李原,李建军,何为平,等.基于 PDM 的 CAx 集成技术研究.制造业自动化,2000(1):23-26.
- [2] 张振明,许建新,贾晓亮,等.现代 CAPP 技术与应用.西安:西北工业大学出版社,2001.

(责编 叶枫)

(上接第 39 页)

用于加工 TB6 钛合金的刀具,并建立了刀具耐用度指数模型。

参考文献

- [1] 陈志同,张保国.面向单元切削过程的切削参数优化模型.机械工程学报,2009,45(5): 230-236.
- [2] 编委会.中国航空材料手册.第二版.北京:中国标准出版社,2002.
- [3] 干勇,田志凌.中国材料工程大典.北京:化学工业出版社,2006.
- [4] 张保国.涂层刀具铣削加工 300M 钢的刀具磨损试验研究.航空精密制造技术,2008.
- [5] 熊良山,严晓光,张福润.机械制造技术基础.第三版.武汉:华中科技大学出版社,2006.
- [6] 茆诗松,丁元,周纪芈,等.回归分析及其试验设计.上海:华东师范大学出版社,1986: 37-71
- [7] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理.北京:化学工业出版社,2008.

(责编 早春)