

# 基于灰色系统理论的盘铣 TC4 工艺参数优化

王丽博<sup>1</sup>, 陈俭<sup>1</sup>, 辛红敏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河南机电职业学院;<sup>2</sup>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

**摘要:** 基于 TC4 盘铣试验开展盘铣工艺参数优化研究。测量盘铣表面残余应力和刀具振动加速度,利用灰色系统理论计算灰色关联系数及灰色关联度,得出试验范围内的最优工艺组合为  $n = 100\text{r/min}$ 、 $a_p = 10\text{mm}$ 、 $v_f = 80\text{mm/min}$ 。计算各工艺因素各水平平均关联系数,得出单目标最优工艺组合:残余应力最优工艺组合  $n = 100\text{r/min}$ 、 $a_p = 10\text{mm}$ 、 $v_f = 60\text{mm/min}$ ,刀具振动最优的工艺组合  $n = 70\text{r/min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 80\text{mm/min}$ ;计算各工艺因素各水平平均关联度,得出多目标最优工艺组合  $n = 100\text{r/min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 100\text{mm/min}$ 。通过试验验证了灰色系统理论优化盘铣工艺参数有效可行。

**关键词:** 盘铣;正交试验;残余应力;刀具振动;灰色系统理论;工艺参数优化

**中图分类号:** TG506.7;TH162

**文献标志码:** A

## Disc-milling TC4 Technological Parameters Optimization Based on Gray System Theory

Wang Libo, Chen Jian, Xin Hongmin

**Abstract:** With blisk disc-milling as research object, disc-milling technological parameters optimization is carried on. Measuring disc-milling surface residual stress and vibration acceleration of tool, through counting gray correlation coefficient and gray correlation degree by using gray system theory, the conclusion of optimal combination of technological parameters within limits of experiment are reached:  $n = 100\text{r/min}$ ,  $a_p = 10\text{mm}$ ,  $v_f = 80\text{mm/min}$ ; through computing each level average correlation coefficient of each technological factor, optimal combination of technological about single-goal arrived at:  $n = 100\text{r/min}$ ,  $a_p = 10\text{mm}$ ,  $v_f = 60\text{mm/min}$  of residual stress,  $n = 70\text{r/min}$ ,  $a_p = 15\text{mm}$ ,  $v_f = 80\text{mm/min}$  of vibration acceleration; through calculating each level average correlation degree, optimal combination of technological about multi-goal obtained:  $n = 100\text{r/min}$ ,  $a_p = 15\text{mm}$ ,  $v_f = 100\text{mm/min}$ . Through verification test, gray system theory is effective on optimizing technological parameters of disc-milling.

**Keywords:** disc-milling; orthogonal experiment; residual stress; tool vibration; gray system theory; technological parameters optimization

### 1 引言

钛合金以密度小、强度高、耐高温、抗腐蚀性好等特点,在航空、航天、航海、汽车等行业得到广泛应用。但钛合金导热系数低、弹性模量小、化学活性大,使其切削加工性较差,主要表现为切削温度高、变形系数小、单位面积切削力大,在切削刃附近出现冷硬和粘刀现象,刀具磨损严重,同时在工件表面和内部产生残余应力。残余应力的存在,一方面会降低工件强度,产生变形和开裂;另一方面在自然释放过程中又会降低工件的疲劳强度、应力腐蚀等力学性能,所以必须考虑钛合金加工残余应力的影响。

盘铣工艺以切削效率高、材料去除量大等优点而广泛应用于开槽加工,如小曲率船用推进器大型叶片加工及整体叶盘的开槽加工。盘铣切削属于断续切削,切削力大,在切削过程中不可避免地会产生

刀具振动,使刀具与工件间产生相对位移,使加工表面产生波纹,严重影响零件的表面质量和使用性能;工艺系统将持续承受动态交变载荷的作用,刀具极易磨损,机床联接特性受到破坏;振动中的噪声还将危害操作者的健康,所以研究人员针对铣削钛合金时产生振动和残余应力开展了大量的研究。

罗秋生等<sup>[1]</sup>研究了 TC17 钛合金高速铣削参数对表面残余应力的影响。杜随更等<sup>[2]</sup>研究了 TC4 高速铣削表面形貌及表层组织。Sridhar B. R. 等<sup>[3]</sup>研究了工艺参数和热处理对钛合金表面残余应力的影响。Yao Changfeng 等<sup>[4]</sup>对高速铣削钛合金 TC11 表面产生的残余应力进行了研究。Dayri A. 等<sup>[5]</sup>研究了进给率在高速铣削钛合金时对表面完整性的影响。Wu Daoxia 等<sup>[6-11]</sup>通过试验及数值模拟等手段研究了高速铣削钛合金时的表面完整性。Wang M. H. 等<sup>[12]</sup>采用有限元方法,研究了高速切削钛合金时表面残余应力。Wu Hongbing 等<sup>[13]</sup>通过数值仿真,研究了钛合金表面的残余应力。Huang Panling

等<sup>[14]</sup>以切削力为基础,研究了铣削钛合金时刀具的振动情况。Chen Jian 等<sup>[15]</sup>研究了在高速切削时,切削振动的形成与控制。Gutakouskis V. 等<sup>[16]</sup>研究了金属切削过程中的刀具振动情况。Zhu X. J. 等<sup>[17]</sup>进行了超声波振动珩磨的工艺参数优化试验研究。Rao M. A. 等<sup>[18]</sup>利用神经网络技术对减振器的工艺参数进行优化。

目前钛合金压气机整体叶盘采用五坐标加工中心高速插铣或侧铣的工艺成型。试验表明,与侧铣法相比,插铣法将整体叶盘粗加工效率提高 50% 以上,避免了大切除量时的刀具振动现象,保证了加工过程中叶盘零件的安全性,但加工效率仍不能满足整体叶盘批量化生产的要求。盘铣切削以切削力大、切削效率高优势已得到广泛应用,如小曲率推进器大型叶片加工及整体叶盘的开槽加工,经试验验证,盘铣开槽加工效率是插铣的 2 倍以上,将盘铣应用于整体叶盘的开槽加工可有效提高整体叶盘的加工效率。但盘铣切削力大,切削温度高,势必在加工表面形成较深的塑性变形区和残余应力层,所以本文模拟盘铣开槽加工的环境,采用相关的铣削参数进行试验,对 TC4 钛合金盘铣表面的残余应力和刀具振动特性进行研究,以为优化盘铣工艺参数提供可靠的理论依据和试验基础。

## 2 铣削条件和测量方法

### 2.1 试验设计基础

整体叶盘盘铣开槽粗加工见图 1,盘铣刀在整体叶盘毛坯上依次开槽,最终形成图 2 所示的整体叶盘通道特征。采用错齿三面刃铣刀进行加工,主切削刃切削形成见图 2 中 B 面所示轮毂的加工面,副切削刃形成见图 2 中 A 面的叶盆叶背加工面,盘铣为断续切削,切除余量大,切削力大,不可避免引起刀具振动。

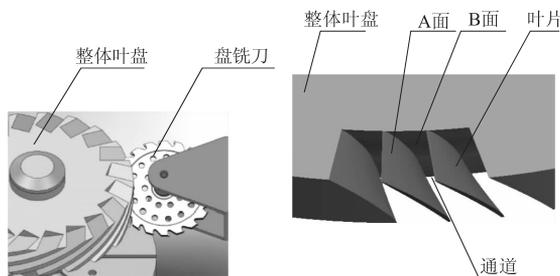


图 1 整体叶盘盘铣加工

图 2 整体叶盘通道特征

### 2.2 铣削条件

XH716 立式加工中心;TC4 钛合金试块 3 块,120mm × 60mm × 15mm;错齿三面刃盘铣刀 1 把,盘

铣刀参数见表 1;顺铣方式;湿铣。盘铣工艺参数见表 2。

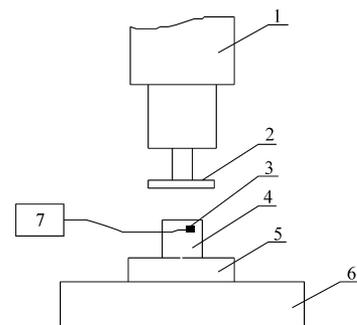
盘铣试验及原理见图 3,盘铣刀与主轴连接装夹于机床上,工件用虎钳装夹在工作台上,采用正交试验法,每块工件采用不同的参数铣削三次,第一次装夹铣削 1、2 位置,第二次装夹铣削 3 位置(见图 4),每块铣削完成的工件进行 1、2、3 顺序标号,第二块、第三块依次类推为 4、5、6、7、8、9。

表 1 盘铣刀参数

直径(mm)	齿数	厚度(mm)	刀体材料	
200	16	20	合金结构钢	
刀片材料	前角	后角	刃倾角	主偏角
YG1H	5°	4°	90°	20°

表 2 盘铣工艺参数

因素	铣削速度 $n$ (r/min)	切削深度 $a_p$ (mm)	进给速度 $v_f$ (mm/min)
水平 1	40	10	60
水平 2	70	15	80
水平 3	100	20	100



1. 主轴 2. 盘铣刀 3. 加速度传感器 4. 工件  
5. 虎钳 6. 工作台 7. 多功能测试系统

图 3 盘铣试验加工原理

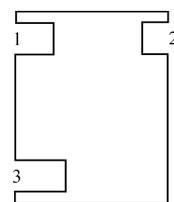


图 4 已加工工件

### 2.3 加速度和残余应力测试

采用加速度传感器测量刀具的振动,加速度传感器型号 3055B2,灵敏度 101.3,将加速度传感器粘贴在工件上,采用 DEWESOFT 独立多功能测试系统采集加速度信号,并对采集到的信号进行 FFT 频率分析,根据分析结果对信号进行高频滤波,取绝对值,将绝对值除以 2 作为所测加速度值,记为  $g$ 。

采用 LXR D MG2000 残余应力测试分析系统,其测试原理是当表面存在残余应力时,发生布拉格

衍射,产生的衍射峰的位移与应力大小有关,所以可通过测量表面衍峰的位移情况来测量残余应力,所测结果实际上是残余应变,通过虎克定律转换为残余应力。在铣削加工表面 A 面选取 3 个点进行测试,取 3 点平均值作为测量值,记为  $\sigma$  (见图 5)。

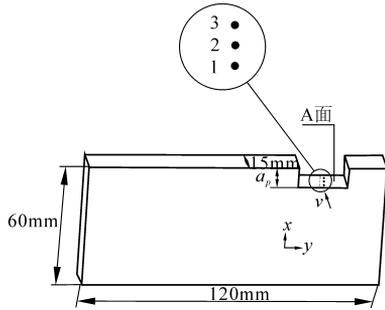


图 5 残余应力测量方案

为了有效安排试验次数,使用 Taguchi 法正交设计<sup>[19]</sup>,结合表 2 数据,选取正交表  $L_9(3^3)$  安排试验,试验结果见表 3。因素 A、B、C 分别表示铣削速度  $n$  (r/min)、切削深度  $a_p$  (mm)、进给速度  $v_f$  (mm/min),  $\sigma$  为残余应力,  $g$  为加速度测量值。

表 3 TC4 表面残余应力及加速度测试值

试验号	因素			结果	
	A	B	C	$\sigma$ (MPa)	$g$ (m/s <sup>2</sup> )
1#	1	1	1	-441.2	0.486
2#	1	2	2	-598.01	0.141
3#	1	3	3	-482.48	0.162
4#	2	1	2	-463.46	0.191
5#	2	2	3	-458.32	0.115
6#	2	3	1	-380.3	0.163
7#	3	1	3	-263.16	0.162
8#	3	2	1	-292.92	0.156
9#	3	3	2	-449.71	0.34

### 3 灰色关联度分析

灰色系统理论可以同时兼顾多个目标,对目标的侧重点不同,可得到不同的工艺参数优化结果。在实际加工中,除工艺参数外,工件材料、机床性能、冷却液等都会对铣削表面残余应力及刀具振动产生影响,但无法对其影响程度进行具体分析。灰色关联度分析只考虑各因素的影响结果而不对其进行机理研究,根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线相似程度越高,相应序列之间关联度就越大,即为最优工艺参数组合<sup>[20]</sup>。

#### 3.1 试验数据变化方法

为了使不同单位的试验数据具有可比性,需对收集到的原始数据进行变换和处理,消除其量纲。多因素多目标的数据变化方法主要依赖于目标的属

性类型,目前常见的属性类型有效益型、成本型、固定型、区间型、偏离型、偏离区间型六种<sup>[21]</sup>。成本型属性是指目标值越小越好的属性,效益型属性是指目标值越大越好的属性,固定型属性是指目标值越接近某固定值  $a(k)$  越好,区间型属性是指目标值越接近某固定区间  $[a(k), b(k)]$  (包括落入该区间) 越好,偏离型属性是指目标值越偏离某固定值越好,偏离区间型属性是指目标值越偏离某区间  $[c(k), d(k)]$  越好<sup>[22]</sup>。

在铣削试验中,表面残余应力及刀具振动加速度越小越好,因此采用成本型对试验数据进行变换(变换后的数据见表 4),计算公式为

$$y_i = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (1)$$

式中,  $i$  为试验次数;  $k$  为优化目标,此处为表面残余应力或加速度值;  $x_i(k)$  为原始数列;  $y_i(k)$  为变换后数列。

表 4 试验数据变换结果

		$y_i(\sigma)$	$y_i(g)$
$y_0(k)$		1.0	1.0
$y_i(k)$	1	0.469	0
	2	0	0.93
	3	0.345	0.873
	4	0.40	0.795
	5	0.42	1
	6	0.65	0.870
	7	1	0.873
	8	0.911	0.889
	9	0.443	0.394

#### 3.2 灰色关联系数与灰色关联度计算与分析

关联性实质上是曲线间几何形状的差别,可以将曲线差值的大小作为关联程度的衡量尺度,灰色关联系数计算公式<sup>[22]</sup>为

$$\xi_i = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (2)$$

式中,  $\Delta_{oi}(k) = |y_0(k) - y_i(k)|$  为绝对差,  $y_0(k)$  为参考数列,残余应力、加速度变换后最优值均为 1,参考数列取为  $[1, 1]$ ;  $\Delta_{\min} = \min_i \Delta_{oi}(k)$  为最小差;  $\Delta_{\max} = \max_i \Delta_{oi}(k)$  为最大差;  $\rho$  为分辨系数,一般取 0.5,用来削弱  $\Delta_{\max}$  数值过大而失真的影响,以提高关联系数之间差异的显著性。

关联系数反映了工艺参数对工艺目标的影响程度,其数值不止一个,不便于进行整体性比较,因此有必要将同一参数下各工艺目标的关联系数集为一个值,即求平均值,作为对比数列与参考数列间关联程度的数量表示,记为关联度  $r_i$ ,计算公式为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

关联度  $r_i$  表示参考序列  $y_0(k)$  与对比序列  $y_i(k)$  的相关程度,其数值反映对比序列对参考序列的影响程度,关联程度的值越高,则证明该序列更能影响参考序列。

将表4中的数据代入式(2),得出工艺参数对残余应力及振动加速度影响的灰色关联系数,将灰色关联系数代入式(3),得出工艺参数对残余应力及振动加速度的灰色关联度,并将其排序(见表5)。依据表5中的数据,绘制灰色关联度曲线(见图6)。

表5 灰色关联系数及灰色关联度

试验号	灰色关联系数		灰色关联度	排序
	$\xi_i(\sigma)$	$\xi_i(g)$		
1#	0.485	0.333	0.409	9
2#	0.333	0.877	0.605	6
3#	0.433	0.797	0.615	5
4#	0.455	0.709	0.582	7
5#	0.463	1	0.732	3
6#	0.588	0.793	0.690	4
7#	1	0.797	0.898	1
8#	0.849	0.818	0.834	2
9#	0.473	0.452	0.463	8

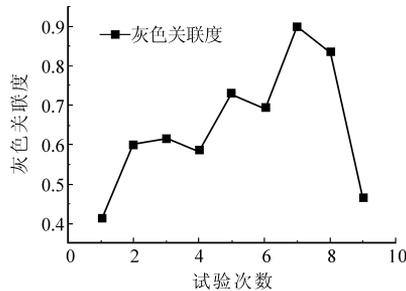


图6 试验次数灰色关联度趋势

由表5及图6可知,试验号7#拥有最高的灰色关联度,因此在试验范围内使残余应力及刀具振动加速度最小的工艺参数组合为: $n = 100\text{r/min}$ 、 $a_p = 10\text{mm}$ 、 $v_f = 80\text{mm/min}$ 。

## 4 目标优化

### 4.1 单目标优化

由灰色系统相关理论可知,灰色关联系数反映了各工艺因素在不同水平下与理想工艺结果的相关程度,不同水平下的关联系数越大,该水平越理想。根据表5中的灰色关联系数,通过式(4)计算A、B、C三因素在不同水平下的平均灰色关联系数

$$\overline{\xi_{XY}(k)} = \frac{1}{N} \sum_{j=m}^n \xi_j(k) \quad (4)$$

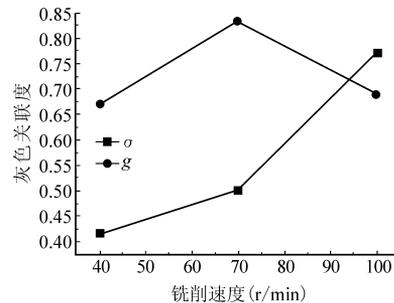
式中, $X$ 为工艺因素; $Y$ 为工艺水平; $j$ 为因素 $X$ 取水

平 $Y$ 时对应的试验序号; $m$ 和 $n$ 分别为因素 $X$ 水平 $Y$ 所在试验序号中的最小值和最大值; $N$ 为因素 $X$ 在水平 $Y$ 时试验出现次数。

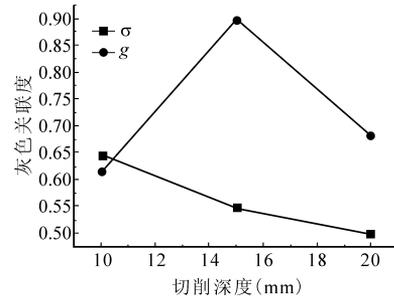
计算结果见表6,各因素所对应的最大值即为单目标的最优水平,各因素水平影响曲线见图7。

表6 各项工艺因素的平均灰色关联系数

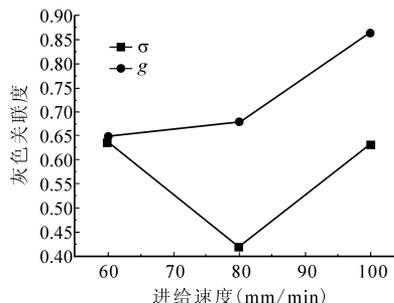
		平均灰色关联系数	
		$\overline{\xi_{XY}(\sigma)}$	$\overline{\xi_{XY}(g)}$
A	1	0.417	0.669
	2	0.502	0.834
	3	0.774	0.689
B	1	0.647	0.613
	2	0.548	0.898
	3	0.498	0.680
C	1	0.641	0.648
	2	0.420	0.679
	3	0.632	0.865



(a) 铣削速度



(b) 切削深度



(c) 进给速度

图7 各因素水平的影响趋势

由表6及图7可知,各因素三个水平中,关联系数越大,该水平越理想。残余应力最优的工艺参数组合为  $n = 100\text{r/min}$ 、 $a_p = 10\text{mm}$ 、 $v_f = 60\text{mm/min}$ ; 刀

具振动加速度的最优工艺参数组合为  $n = 70\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 80\text{mm}/\text{min}$ 。

#### 4.2 多目标优化

由以上分析可知,追求的指标不同,得出的最优参数组合不同。通过灰色关联度分析,可以统筹兼顾多个目标,得出最佳的工艺参数组合。根据表5及各组试验工艺参数水平组合情况,计算得到各工艺因素在各水平下的平均灰色关联度为

$$\bar{r}_{XY} = \frac{1}{N} \sum_{j=m}^n r_j \quad (5)$$

各工艺因素各水平平均灰色关联度的最大差值  $\delta_{\max}$  为

$$\delta_{X\max} = \max \bar{r}_{XY} - \min \bar{r}_{XY} \quad (6)$$

各因素各水平平均灰色关联度的计算结果见表7。各因素在各水平下的平均灰色关联度曲线见图8。

表7 各因素在各水平下的平均灰色关联度

因素	平均灰色关联度			$\delta_{\max}$
	水平1	水平2	水平3	
A	0.543	0.668	0.732*	0.189
B	0.63	0.724*	0.59	0.134
C	0.644	0.55	0.748*	0.198

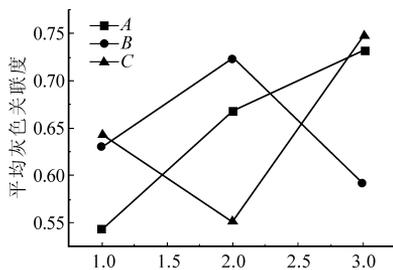


图8 各因素水平的平均灰色关联度

由灰色系统理论可知,  $\delta_{X\max}$  代表各工艺参数对考察指标的影响程度。由表7及图8可知,因素C(即进给速度)对铣削效果影响最大,根据  $\delta_{\max}$  的大小将各个因素影响程度排序依次为:进给速度(因素C) > 铣削速度(因素A) > 切削深度(因素B)。

表7中的灰色关联度表示参考序列与对比序列各水平之间的关系,灰色关联度越大表示对比序列与参考序列之间的关联性越大<sup>[20]</sup>。灰色关联度越大该参数水平特性越好,表7中带\*号所示为各因素最佳水平,因此,综合考虑表面残余应力和刀具振加速度的最佳组合为 C3B2C2,即铣削速度  $n = 100\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 100\text{mm}/\text{min}$ 。

#### 4.3 试验验证

上述灰色关联度分析优化后的工艺参数组合没有出现在9次正交试验中,因此以最优化的工艺参

数即  $n = 100\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 100\text{mm}/\text{min}$  进行铣削试验,试验方法同上,试验图见图9和图10。经测量,残余应力值为 256.34MPa,加速度值为 0.145g。图11为刀具振动加速度信号波形。

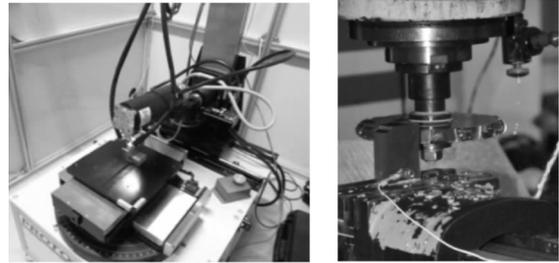


图9 残余应力测试 图10 刀具振动加速度测试

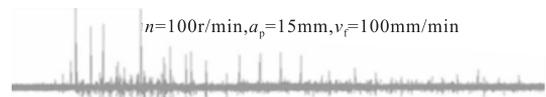


图11 刀具振动加速度信号波形

将验证值与正交试验结果同时进行灰色关联度计算,计算结果见表8。验证值的灰色关联度为 0.931,高于正交试验中7#试验的灰色关联度 0.879。可见,基于灰色关联度理论的盘铣工艺参数优化方法可靠有效。

表8 试验因素灰色关联系数及灰色关联度

试验号	灰色关联系数		灰色关联度	排序
	$\xi_i(\sigma)$	$\xi_i(g)$		
1#	0.48	0.333	0.406	10
2#	0.33	0.877	0.603	7
3#	0.43	0.797	0.613	6
4#	0.452	0.709	0.581	8
5#	0.458	1	0.729	4
6#	0.579	0.793	0.686	5
7#	0.96	0.797	0.879	2
8#	0.824	0.818	0.821	3
9#	0.47	0.452	0.461	9
10#验证值	1	0.862	0.931	1

## 5 结语

(1)通过各因素各水平平均关联度系数的计算,获得单目标的优化结果,即残余应力最优的工艺参数组合为  $n = 100\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 10\text{mm}$ 、 $v_f = 60\text{mm}/\text{min}$ ;刀具振动加速度最优的工艺参数组合为  $n = 70\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 80\text{mm}/\text{min}$ 。

(2)通过灰色关联度分析,获得多目标优化结果,即  $n = 100\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 15\text{mm}$ 、 $v_f = 100\text{mm}/\text{min}$ 。

(3)根据各因素各水平间平均关联度的最大差值,对各因素对多目标的影响程度排序,即进给速度(因素C) > 铣削速度(因素A) > 切削深度(因

素 B)。

(4) 试验结果表明, 基于灰色系统理论的铣削参数优化方法有效可行, 可推广到不同的加工方法及加工对象上。

### 参考文献

- [1] 罗秋生, 姚昌锋, 任军学. TC17 钛合金高速铣削参数对表面残余应力影响研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1500 - 1503.
- [2] 杜随更, 吕超, 任军学, 等. 钛合金 TC4 高速铣削表面形貌及表层组织研究[J]. 航空学报, 2008(11): 1710 - 1715.
- [3] Sridhar B R, Devananda G, Ramachandra K, et al. Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress in Titanium alloy IMI-834 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139: 628 - 634.
- [4] Yao Changfeng, Yang Zhenchao, Huang Xinchun, et al. The study of residual stress in high-speed milling of titanium alloy TC11 [J]. Advanced Materials Research, 2012, 443 - 444: 160 - 165.
- [5] Dayri A, Boujebene M, Bayraktar E, et al. Influence of feed rate on surface integrity of titanium alloy in high speed milling [J]. Advanced Materials Research, 2011, 264 - 265: 1228 - 1233.
- [6] Wu Daoxia, Yao Changfeng, Tan Liang, et al. Experiment study on surface integrity in high speed milling of titanium alloy TB6 [J]. Applied Mechanics and Material, 2013, 328: 867 - 871.
- [7] Yang Zhenchao, Zhang Dinghua, Yao Changfeng, et al. Surface integrity in high-speed milling of titanium alloy TC11 [C]. 2010 International conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2010: 3334 - 3337.
- [8] Daymi A, Boujelbene M, Ben Amara A, et al. Surface integrity in high speed end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. Material Science and Technology, 2011, 27(1): 387 - 394.
- [9] Yang Xiaoyang, Ren Chengzu, Wang Yand, et al. Experimental study on surface integrity of Ti-6Al-4V in high speed side milling [J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(3): 206 - 212.
- [10] Moussaoui Kamel, Mousseigne Michel, Senatore Johanna, et al. Influence of milling on surface integrity of Ti-6Al-4V [J]. Diffusion and Defect Data Pt B: Solid State Phenomena, 2013, 201: 127 - 136.
- [11] Rao Barkshna, Dandekar Chinmaya R, Shin Yung C, et al. An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool performance and surface integrity [J]. Journal of Material Processing Technology, 2011, 211(2): 294 - 304.
- [12] Wang M H, Liu Z H, Wang H J, et al. Study on residual stress for high-speed cutting titanium alloy based on finite element method [J]. Advanced Materials Research, 2011, 188: 216 - 219.
- [13] Wu Hongbing, Liu Gong, Ke Yinglin, et al. Numerical simulation on surface residual stress for titanium alloy [J]. Zhejiang Daxue Xuebao, 2007, 41(8): 1389 - 1393.
- [14] Huang Panling, Li Jianfeng, Sun Jie, et al. Vibration analysis in milling titanium alloy based on signal processing of cutting force [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5-8): 613 - 621.
- [15] Chen Jian, Song Zhipeng, Wang Guicheng, et al. Formation and control of the cutting vibration in high-speed machining [J]. Materials Sciences Forum, 2012, 729: 62 - 66.
- [16] Gutakouskis V, Bunga G, Pikurs G. Cutting tool vibration in the metal cutting process [J]. Journal of Vibroengineering, 2011, 13(4): 676 - 681.
- [17] Zhu X J, Gao Y X, Chen Q, et al. Test research on the optimizing technology parameters of ultrasonic vibration honing [J]. Advanced Materials Research, 2008, 53 - 54: 185 - 190.
- [18] Rao M A, Srinivas J, Gopala Rao L V V. Optimization of parameters of vibration absorber using artificial neural network technology [J]. Journal of the Institution of Engineers, 2011, 82: 134 - 137.
- [19] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [20] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [21] 刘树华, 邱翊华. 多属性决策基础理论研究 [J]. 系统工程理论与实践, 1998, 20(1): 38 - 43.
- [22] 肖新平, 宋中民, 李峰. 灰技术基础及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

第一作者: 王丽博, 讲师, 河南机电职业学院机电工程学院, 451191 郑州市

First Author: Wang Libo, Lecturer, School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Mechanical Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China