

基于均匀设计的钛合金化铣工艺研究与应用

薛露平, 叶 晖, 许维超
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 化学铣切是一种能使表面形状复杂、加工精度要求高的零件达到加工要求的表面处理方法。简要介绍了钛合金化学铣切的工艺方法, 阐述了化学铣切的反应机理, 并在均匀设计试验的基础上讨论了化学铣切温度和溶液配方对钛合金产品化学铣切质量的影响。通过实验数据回归分析确定了最优的化学铣切工艺方案, 分析表明验证结果与理论是相符的, 可应用于实际生产。

关键词: 钛合金化学铣切; 均匀设计; 铣切速度; 浸蚀比

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 04-0097-06

Study and application of chemical milling technology of Ti alloy based on uniform design

XUE Luping, YE Hui, XU Weichao
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Chemical milling is a surface processing method which can make the parts with complicated surface and high roughness achieve the processing requirements. In this paper, the chemical milling technology for titanium alloy is introduced briefly, the reaction mechanism of titanium alloy chemical milling is described, and the influence of chemical milling temperature and solution formulation on the chemical milling quality of the Ti alloy are discussed on the basis of experiment of the uniform design. The best scheme of the chemical milling technology was determined on the basis of regression analysis of the experimental data. The discussion and analysis results show that the verification result is consistent with the theoretical calculation result, which can provide a guidance for the actual production.

Keywords: chemical milling of Ti alloy; uniform design; milling velocity; erosion ratio

0 引言

钛合金由于具有密度小、比强度高、抗断裂

和耐蚀性好等一系列的优点, 使其在液体轨姿控火箭发动机头部隔热框制造中得到应用。如图 1 所示, 隔热框多为薄壁棱台结构, 且需在薄壁上

收稿日期: 2016-08-09; 修回日期: 2016-09-13

作者简介: 薛露平 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机表面工程

加工多个尺寸精度要求较高的窗口。由于钛合金具有屈强比高、弹性模量低、回弹大、易粘模具和切削温度高等特点,使得此类薄壁异形零件窗口的精加工难以通过常规机械加工实现^[1-2]。为此,常采用化学铣切代替常规的机械加工。与其他加工方法相比,化学铣切具有工艺简单,生产成本低,加工精度高,不产生切削应力,零件无变形,并可同时加工多个零件等众多优点^[3-4]。

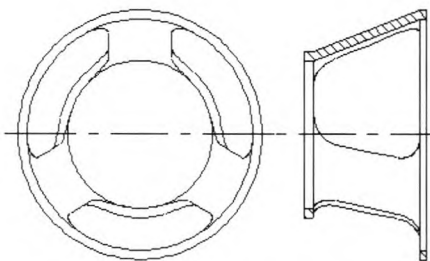


图 1 隔热框结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of thermal insulation frame

钛合金化铣是一个受多因素影响的复杂过程。以往人们通过确定单一因素对铣切质量效果的影响来认识化铣过程的主要特征^[5-6],但单一因素法未考虑到全因素的交互作用。为了更全面地了解化铣过程中各因素对化铣质量的影响作用,本文将采用均匀设计开展化铣工艺参数的优化研究。均匀设计是将数论与多元统计相结合而建立起来的一种试验方法,这一成果已在我国许多行业中取得了重大成果。均匀设计适合于多因素多水平试验,可使试验处理数目减少到最小程度,仅等于因素水平个数。尽管均匀设计节省了大量的试验处理量,但仍能反映事物变化的主要规律^[7]。

本文采用均匀设计试验结合现有工艺参数,对钛合金化学铣切过程中各影响因素进行详细的讨论分析并确定了最优的铣切方案。

1 试验方案

1.1 试验材料及流程

试验材料: TC4, 长 80×宽 50×厚 1.5, mm。

试验流程: 钛合金零件化学铣切流程如图 2 所示。

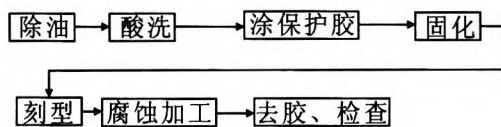
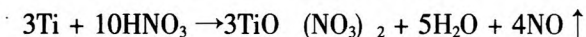
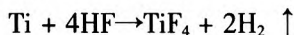


图 2 化铣工艺流程图

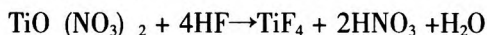
Fig. 2 Process flow diagram of chemical milling

1.2 化学铣切的反应机理及评价指标

钛合金化铣是通过化学反应有选择、可控制地切除金属,从而达到加工零件的目的。其化铣溶液通常由腐蚀剂、氧化剂、添加剂组成。由于钛本身固有的抗蚀性,选用 HF 作为腐蚀剂来加速钛的腐蚀溶解; HNO₃ 作为氧化剂,主要作用是提高化铣表面的光洁度;添加剂使用十二烷基苯磺酸钠,目的是提高化铣溶液的寿命^[6]。具体反应过程如下:



同时 TiO (NO₃)₂ 钝化膜被氢氟酸溶解:



随着化学反应的周而复始,铣切加工不断的进行。

如图 3 所示,在化学铣切过程中,铣切垂直于零件表面进行,同时保护材料下面也会产生化学腐蚀,其宽度等于铣切深度乘浸蚀比。因而在生产中铣切速度和浸蚀比是化铣质量重要评价指标,其计算公式如下:

$$\text{铣切速率: } V = b/t$$

$$\text{浸蚀比: } P = a/b$$

式中: a 为侧向铣切量; b 为垂直铣切量; t 为铣切时间。

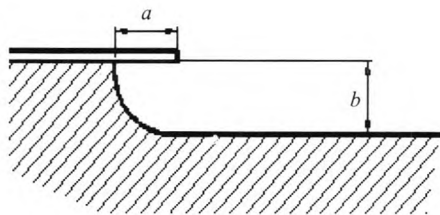


图 3 浸蚀比 (a/b)

Fig. 3 Erosion ratio (a/b)

1.3 均匀设计方案

均匀设计是一种试验设计方法, 只考虑试验点在试验范围内均匀散布的一种试验设计方法。试验设计就是如何在试验域内最有效地选择试验点, 通过试验得到响应的观测值, 然后进行数据分析求得达到最优响应值的试验条件。因此, 试验设计的目标就是要用最少的试验取得关于系统尽可能充分的信息^[7-8]。均匀设计可以较好地实现这一目标, 尤其对多因素多水平的试验。

均匀设计的标志: $U_n(r)$
式中: U 为均匀表代号; n 为均匀表横行数 (需要做的试验次数); r 为因素水平数, 与 n 相等; l 为均匀表纵列数。

据钛合金化学铣切工艺参数, 确定该试验为 4 因子 (温度、钛离子浓度、HF 和 HNO_3 的含量), 由 $m/2+1$ =因素数, 得 $m=6$, $n=m+1=7$ (在均匀设计表中, m 为列数, n 为试验次数和水平数), 所以选择 $U_7(7^6)$ 表 (表 1), 使用表见表 2。氢氟酸工艺要求为 50~80 g/L, 若分为 7 水平, 每个水平间隔为 5 g/L, 为满足均匀设计“均匀分散”的原则, 且钛合金在化铣过程中, 溶液成分、温度、钛离子浓度的变化较快, 范围较窄不易控制。所以将温度、钛离子浓度、硝酸含量适当放宽 (温度: 35~65 ℃; 钛离子: 0~24 g/L; HNO_3 : 70~100 g/L), 分为 7 个水平进行试验。

表 1 $U_7(7^6)$

Tab. 1 $U_7(7^6)$

试验号	列 序					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	4	6	1	3	5
3	3	6	2	5	1	4
4	4	1	5	2	6	3
5	5	3	1	6	4	2
6	6	5	4	3	2	1
7	7	7	7	7	7	7

表 2 $U_7(7^6)$ 使用表

Tab. 2 Application table of $U_7(7^6)$

因素数		列 数			
2	1	2			
3	1	2	3		
4	1	2	3	6	

在参数方案设计中, 以化铣温度、钛离子浓度、氢氟酸和硝酸含量作为正交设计的 4 个因素, 每个因素设置 7 个水平, 均匀设计水平表见表 3。

表 3 化铣参数均匀设计水平表

Tab. 3 Uniform design of chemical milling parameters

水平数	钛离子/ (g·L ⁻¹)	HF /(g·L ⁻¹)	HNO ₃ /(g·L ⁻¹)	温度/℃
1	0	50	70	35
2	4	55	75	40
3	8	60	80	45
4	12	65	85	50
5	16	70	90	55
6	20	75	95	60
7	24	80	100	65

试验选用 4 因素 7 水平的均匀设计方案 $U_7(7^6)$, 其试验参数设置方案见表 4。

表 4 方案设置

Tab. 4 Setting up of scheme

试验号	钛离子/ (g·L ⁻¹)	HF /(g·L ⁻¹)	HNO ₃ /(g·L ⁻¹)	温度/℃
1	0	55	80	60
2	4	65	95	55
3	8	75	75	50
4	12	50	90	45
5	16	60	70	40
6	20	70	85	35
7	24	80	100	65

2 试验结果与讨论

2.1 试验数据

按表 4 试验方案进行 7 组不同参数组合试验, 实验结果见表 5。从试验结果可知, 铣切速度和浸蚀比随工艺参数的改变有较大波动。

2.2 逐步回归分析

利用 Minitab 软件分别以铣切速度和浸蚀比为响应变量, 以钛离子浓度、HF 含量、HNO₃ 含量和温度为预测变量, 对试验数据进行逐步回归分析。表 6 为铣切速度和各因数分析结果, 结果表明温度和 HF 的含量为铣切速度主要影响因子。

表 5 试验数据记录

Tab. 5 Recorded test data

试验号	钛离子/(g·L ⁻¹)	HF/(g·L ⁻¹)	HNO ₃ /(g·L ⁻¹)	温度/℃	铣切速度/ (μm·min ⁻¹)	浸蚀比
1	0	55	80	60	67	1.19
2	4	65	95	55	58	1.08
3	8	75	75	50	60	1.43
4	12	50	90	45	25	0.79
5	16	60	70	40	27	0.97
6	20	70	85	35	27	1.01
7	24	80	100	65	86	0.81

表 6 铣切速度与各影响因数逐步回归分析

Tab. 6 Stepwise regression analysis of milling velocity and impact factors

	步 骤		
	1	2	3
常量	-0.083 07	-0.078 30	-0.092 17
温度	9.45	12.71	11.27
T 值	0.011	0.001	0.000
P 值	0.011	0.001	0.000
HNO ₃ 含量	-0.000 19	-0.000 26	
T 值	-1.02	-1.65	
P 值	0.415	0.197	
HF 含量	0.000 87	0.000 77	0.000 74
T 值	4.79	5.44	0.000 74
P 值	0.041	0.012	4.39
钛离子浓度	-0.000 23		0.012
T 值	-0.92		
P 值	0.453		
S	0.003 67	0.003 58	0.004 29
R-Sq	99.21	98.88	97.85
R-Sq (调整)	97.64	97.75	96.78
Mallows Cp	5.0	3.9	4.5

注: 后退法逐步回归, 删除用 Alpha: 0.1

浸蚀比和各因数的逐步回归分析结果见表 7, 结果表明温度、HF 和 HNO₃ 的含量是浸蚀比的主要影响因素。

表 7 浸蚀比与各影响因素逐步回归分析
Tab. 7 Stepwise regression analysis of erosion ratio and impact factors

	步骤	
	1	2
常量	1.149	1.207
温度	-0.004 1	
<i>T</i> 值	-1.14	
<i>P</i> 值	0.373	
HNO ₃ 含量	-0.008 6	-0.010 8
<i>T</i> 值	-2.64	-3.97
<i>P</i> 值	0.119	0.029
HF 含量	0.017 3	0.015 6
<i>T</i> 值	5.32	5.13
<i>P</i> 值	0.034	0.014
钛离子浓度	-0.024 9	-0.021 9
<i>T</i> 值	-5.55	-5.77
<i>P</i> 值	0.031	0.010
<i>S</i>	0.065 7	0.689
<i>R-Sq</i>	97.10	95.21
<i>R-Sq</i> (调整)	91.29	90.43
Mallows <i>Cp</i>	5.0	4.3

注: 后退法逐步回归, 删除用 Alpha: 0.1

2.3 回归分析

为进一步分析各工艺参数对铣切质量的交互影响, 利用 Minitab 分别对铣切速度和浸蚀比进行回归分析, 得出具体的回归方程。

由铣切速度回归分析(见表 8) 获得铣切速度与温度、HF 含量的回归方程:

$$V=-0.0922+0.00189T+0.000735C_F$$

式中: *V* 表示铣切速度; *T* 为温度; *C_F* 为 HF 的含量。

从方程可知, 铣切速度和温度、HF 的含量成正比。

由浸蚀比回归分析(见表 9) 获得浸蚀比与钛离子浓度、HF、HNO₃ 含量回归方程:

$$P=1.21-0.0219C_T+0.0156C_F-0.0108C_N$$

式中: *P* 表示浸蚀比, *C_T* 为钛离子浓度, *C_F* 为 HF 的含量, *C_N* 为 HNO₃ 的含量。

从方程可知, HF 的含量越高, 浸蚀比越大, 温度和 HNO₃ 的含量越高, 浸蚀比越小。

2.4 参数优化

在实际生产中, 一般控制铣切速度 *V* ≈ 40 μm/min, 浸蚀比 *P* ≈ 0.9, 可以获得较好的铣切质量, 且能控制溶液温度不会升温过快。所以根据回归方程: *V* = -0.0922 + 0.00189*T* + 0.000735*C_F* 得:

$$T=70-0.39C_F$$

根据回归方程 *P* = 1.21 - 0.0219*C_T* + 0.0156*C_F* - 0.0108*C_N* 得:

$$C_F=0.7C_N+1.4C_T-19.8$$

表 8 铣切速度与温度、HF 含量回归分析结果

Tab. 8 Regression analysis results of milling velocity, temperature and HF content

自变量	系数	系数标准误差	<i>T</i>	<i>P</i>
常量	-0.092 17	0.012 07	-7.63	0.002
温度	0.001 887 6	0.000 167 5	11.27	0.000
HF 含量	0.000 735 2	0.000 167 5	4.39	0.012

$$S=0.004\ 291\ 74\quad R-Sq=97.9\%\quad R-Sq\text{ (调整)}=96.8\%$$

$$\text{回归方程: 铣切速度} = -0.092\ 2 + 0.001\ 89\ \text{温度} + 0.000\ 735\ \text{HF 含量}$$

表 9 浸蚀比与钛离子浓度、HF、HNO₃ 含量回归分析结果

Tab. 9 Regression analysis results of erosion ratio, Ti ionic concentration, HF, HNO₃ content

自变量	系数	系数标准误差	T	P
常量	1.206 8	0.264 7	4.56	0.020
钛离子浓度	-0.021 916	0.003 801	-5.77	0.010
HF 含量	0.000 735 2	0.000 167 5	4.39	0.029
HNO ₃ 含量	-0.010 805	0.002 719	-3.97	0.029

$S = 0.068\ 887\ 3$ $R-S_q=95.2\%$ $R-S_q(\text{调整})=90.4\%$

回归方程:浸蚀比=1.21-0.021 9 钛离子浓度+0.015 6HF 含量-0.010 8HNO₃ 含量

在化铣加工过程中,必须同时考虑铣切速度和浸蚀比,根据以上两个方程,得出在不同钛离子浓度下的工艺参数方案(表 10)。

表 10 工艺参数控制

Tab. 10 Control of technological parameters

钛离子/(g·L ⁻¹)	硝酸和氢氟酸/(g·L ⁻¹)	温度/℃
5	$C_F=0.7C_N-13$	$T=70-0.39C_F$
10	$C_F=0.7C_N-6$	
15	$C_F=0.7C_N+1$	
20	$C_F=0.7C_N+8$	

3 方案验证

根据表 10 参数控制要求,选择一组工艺参数进行验证试验: $T=40\sim45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C_T=15.79\text{ g/L}$, $C_F/C_N=65/95$ 。加工的试验件浸蚀比为 0.86,铣切速度为 37.5 μm/min,满足对钛合金化铣产品质量控制要求,说明表 10 制定的工艺参数控制方案有效、准确。

4 结论

1) 铣切速度主要受温度和 HF 浓度影响,与温度和 HF 浓度成正比;

2) 浸蚀比与温度、HNO₃ 浓度成反比,与 HF 含量成正比;

3) 通过均匀设计试验、分析,得出钛合金化铣工艺的参数控制方案且经验证有效。

参考文献:

[1] 锥亚涛,王相勇. 钛合金弧板类零件冲压成型回弹仿真计算[J]. 火箭推进, 2014, 40(2): 72-76.
LUO Yatao, WANG Xiangyong. Simulating calculation for spring-back magnitude of titanium alloy plates with arc formed by stamping[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40 (2): 72-76.

[2] 张绪虎,单群,陈永来,等. 钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(6): 28-32.

[3] 曹立英,邓炬,洪权,等. 化铣对 TA2 和薄板性能的影响[J]. 中国有色金属报, 1998, 32(8): 289-291.

[4] 赵永岗,张春刚,王辉,等. 化学铣切在钛合金加工中的研究及应用[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 83-86.

[5] 尹茂生. 钛离子含量对钛合金化学铣切的影响[J]. 涂料涂装与电镀, 2006, 4(3): 32-33.

[6] 侯世民,张锦伟,卢相平,等. 钛合金化铣工艺及生产线[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 37-41.

[7] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 69-97.

[8] 张慧,陈国荣. 基于均匀设计思想的结构优化方法[J]. 河海大学学报, 2009, 37(1): 62-65.

(编辑: 陈红霞)