

引文格式: 马付建, 普斌, 刘鑫, 等. 钛合金超声辅助磁性磨料光整加工工艺优化 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 47-52.

MA Fujian, PU Bin, LIU Xin, et al. Process optimization for ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing of titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 47-52.

钛合金超声辅助磁性磨料光整加工工艺优化*

马付建, 普斌, 刘鑫, 罗奇超

(大连交通大学, 大连 116028)

[摘要] 为了研究加工参数对钛合金超声辅助磁性磨料光整加工(UAMAF)的影响,以表面粗糙度和材料去除率(MRR)为指标开展正交试验研究,运用信噪比与灰色关联度分析方法分别对加工参数进行单目标和多目标优化。结果表明,以表面粗糙度和MRR为目标的最佳工艺为磨粒粒度均为50/60#,振幅均为14 μm ,工具转速分别为1000r/min和1200r/min,磁极-工件间隙分别为1mm和1.25mm,加工时间分别为40min和30min,优化的表面粗糙度 R_a 和MRR分别为0.08 μm 和30.5mg/h;综合考虑表面粗糙度和MRR的最佳工艺为磨粒粒度50/60#、振幅14 μm 、工具转速1200r/min、磁极-工件间隙1.00mm、加工时间30min,表面粗糙度 R_a 和MRR分别为0.12 μm 和27.9mg/h。

关键词: 钛合金; 超声辅助磁性磨料光整加工(UAMAF); 表面粗糙度; 材料去除率(MRR); 信噪比(S/N); 灰色关联度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.08.047



马付建

副教授, 博士, 研究方向为难加工材料精密与特种加工技术。

超声辅助磁性磨料光整加工(Ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing, UAMAF)是在传统磁性磨料光整加工(MAF)上,通过施加超声振动,利用多种能量场共同作用进

行光整加工的复合加工技术,可以实现钛合金和高温合金等难加工合金的高质高效光整加工^[1]。在这些难加工合金零部件实际光整加工中,有时需要获得较好的表面加工质量或较高的加工效率,有时需要对两者综合考虑。在UAMAF中,影响表面加工质量与效率的加工参数较多,明确加工参数对UAMAF加工效果的影响,获取能达到预期加工目标的加工工艺,是目前研究的主要方向之一。

因此,许多学者开展了难加工合金MAF及UAMAF加工工艺方面的研究。崔同磊等^[2]针对铜钨合金材料进行MAF试验,基于响应曲面法得出了各因素对表面粗糙度的影响,影响最大的为主轴转速,最小的为进给速度。陈春增^[3]针对Inconel718和K419材料进行了MAF试验,分析了主轴转速、磁极-工件间隙和磨粒粒度对表面粗糙度

的影响规律,并采用直观分析法得到了最优工艺参数。韩冰等^[4]对钛合金弯管进行MAF试验,采用S/N和方差分析方法对加工参数进行优化,得到磁极转速对表面质量的影响最为明显。朱子俊等^[5]针对TC4钛合金进行UAMAF试验,分析了磁场强度、振幅、磨粒粒径等参数对表面质量的影响,得到了在超声辅助情况下,能有效降低工件的表面粗糙度。陈燕等^[6]针对镍基合金进行UAMAF试验,分析主轴转速、磨粒粒径、振幅等各加工参数对异型管表面质量的影响,发现超声复合磁场作用能有效提高加工效率和表面质量。Misra等^[7-8]分别建立了UAMAF的表面粗糙度和材料去除率(MRR)的数学模型,预测了电源电压、工作间隙、电磁铁转速、振幅对MRR及表面粗糙度的影响规律,并通过试验验证了模型的有效性。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51505057); 辽宁省自然科学基金(2021-MS-295); 辽宁省教育厅自然科学研究经费(JDL2020015)。

目前在 MAF 加工工艺规律及工艺优化方面已开展了大量研究,而针对 UAMAF 的研究主要集中在难加工材料加工可行性和提高工件表面质量方面,开展工艺优化方面研究相对较少,为了获得更好的表面加工质量和加工效率,需要针对钛合金 UAMAF 进行加工参数优化研究。为此,运用正交试验法开展 TC4 钛合金 UAMAF 试验,分别以表面粗糙度、MRR 及两者的综合影响作为目标进行加工参数优化,得到最佳工艺及加工参数对优化目标的影响规律,并利用得到的最佳工艺进行 UAMAF 试验,对优化结果进行验证。

1 试验装置及条件

钛合金 UAMAF 试验装置如图 1 所示,主要包括超声波发生器、超声变幅杆、磁极和三轴数控机床等。试验中的工件为表面经过铣削加工的 TC4 钛合金板,其尺寸为 50mm × 15mm × 3mm。

工件表面粗糙度采用泰勒位相光栅干涉表面粗糙度轮廓仪进行检测,工件表面形貌采用 VHX-600E 超景深显微镜进行观测,铣削加工和 UAMAF 后表面粗糙度的测量和表面形貌的观测选取中间稳定加工区域进行,测量 3 次并取其平均值。材料去除率通过 Sartorius CP225D 型电子天平称量工件加工前后质量获得,在称重之前工件需经过超声波清洗和干燥箱干燥处理,并进行 3 次称量取其平均值,电子天平的精度为 0.01mg。

正交试验选取 UAMAF 中磨粒粒度、振幅、工具转速、加工时间和磁极-工件间隙等重要加工参数作为影响因素,每个加工参数取 4 个水平,如表 1 所示。试验方案为 $L_{16}(4^5)$ 型,如表 2 所示。

2 基于信噪比法的单目标优化

2.1 优化目标的信噪比表征

信噪比(S/N)分析方法的特点



图 1 UAMAF 试验装置
Fig.1 Experimental setup of UAMAF

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factor level table of orthogonal experiment

水平	因素				
	磨粒粒度 A/#	振幅 B/ μm	工具转速 C/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	加工时间 D/min	磁极-工件间隙 E/mm
1	30/35	8	1000	20	0.75
2	50/60	10	1200	30	1.00
3	80/100	12	1400	40	1.25
4	100/120	14	1600	50	1.50

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal experimental scheme

试验编号	因素水平				
	磨粒粒度 A	振幅 B	工具转速 C	加工时间 D	磁极-工件间隙 E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

是比较稳定,不易受其他条件干扰^[9],且具有望大和望小特性^[10],利用此方法可以对试验结果进行全面分析。以 UAMAF 的材料去除率为目标进行优化时,希望其越大越好,因此可以利用 S/N 的望大特性,对应 S/N 值 η_i 的表达式为

$$\eta_i = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} \right) \quad (1)$$

式中, n 是每次试验的重复次数; x_i 是第 i 次重复试验的材料去除率值。

以 UAMAF 的表面粗糙度为优化目标时,希望其值越小越好,因此可以利用 S/N 的望小特性,相应 S/N 值 η_j 的表达式为

$$\eta_j = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j^2 \right) \quad (2)$$

式中, y_j 是第 j 次重复试验的表面粗糙度值。

2.2 优化结果及分析

根据表 1 中的加工参数,利用表 2 中的加工方案开展 UAMAF 加工试验,分别得到各组的材料去除率和表面粗糙度试验结果值,见表 3。将得到的各组材料去除率试验结果代入式(1)求得相应的 S/N 值 η_i ,同样将各组的表面粗糙度 R_a 值试验结果代入式(2)得到相应的 S/N 值 η_j 。

将表 3 中每个加工参数水平的 S/N 值进行求和,分别得到各加工参数组合的 MRR 和表面粗糙度的 S/N 值效应,如图 2 所示。

由 S/N 分析方法可知, S/N 值 η 越大代表其所对应的因素水平下的优化目标越好。根据图 2 选取每个因素中最大 η 值对应的水平,作为此优化目标的最佳加工参数,可以得到钛合金 UAMAF 的 MRR 和表面粗糙度的最佳工艺分别为 A2B4C2D2E3 和 A2B4C1D3E2。

由图 2 的极差分析可以看出,对钛合金 UAMAF 的 MRR 影响最大因素为振幅,然后依次为工具转速、加工时间、磨粒粒度和磁极-工件

间隙;对表面粗糙度影响最大的因素为磁极-工件间隙,其他依次为振幅、加工时间、工具转速和磨粒粒度。

3 基于灰色关联度法的多目标优化

3.1 灰色关联度分析

灰色关联分析(GRA)可以将综合考虑表面粗糙度和 MRR 的双目标优化问题转化为单目标。GRA 相关参数为灰生成 x_{ij} 、灰色关联系数 ζ_{ij} 、差值绝对值均值 Δv 、灰色关联度 γ_j 和差值绝对值的均值与试验理想值的比值 ε_Δ 的计算公式分别为^[11]

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}} \quad (3)$$

$$\zeta_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + d \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + d \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \quad (4)$$

$$\Delta v = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |x_i^0(j) - x_{ij}| \quad (5)$$

$$\gamma_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \zeta_{ij} \quad (6)$$

$$\varepsilon_\Delta = \frac{\Delta v}{\Delta_{\max}} \quad (7)$$

式中, y_{ij} 是第 i 项工艺指标下的第 j 次试验; x_i^0 是第 i 项工艺指标下的理想值; x_{ij} 是第 i 项工艺指标下的第 j 次试验结果; ζ_{ij} 是第 i 项工艺指标下的第 j 次试验的灰色关联系数; m 是评价指标的个数; n 是试验次数; d 是分辨系数; Δ_{\max} 为试验理想值。

将表 3 中 MRR 和表面粗糙度分别带入式(3)中进行归一化,将其归一化值代入式(5),可以求得差值绝对值的均值 $\Delta v=0.5719$ 。试验理想值 Δ_{\max} 取值为 1,由于 $\Delta_{\max} \leq 3\Delta v$,根据灰色关联理论可知 $1.5\varepsilon_\Delta < d \leq 2\varepsilon_\Delta$ ^[11],分辨系数的取值范

表 3 试验结果和优化目标的信噪比

Table 3 Experimental results and S/N values of optimization targets

试验编号	磨粒粒度 A	振幅 B	工具转速 C	加工时间 D	磁极-工件间隙 E	试验结果		S/N 值 /dB	
						MRR/(mg·h ⁻¹)	表面粗糙度 R _a /μm	η_i	η_j
1	1	1	1	1	1	18.75	0.33	25.46	9.59
2	1	2	2	2	2	24.71	0.17	27.86	15.37
3	1	3	3	3	3	25.70	0.18	28.20	14.76
4	1	4	4	4	4	23.74	0.20	27.51	13.96
5	2	1	2	3	4	22.57	0.21	27.07	13.36
6	2	2	1	4	3	19.28	0.19	25.70	14.17
7	2	3	4	1	2	25.10	0.20	27.99	13.74
8	2	4	3	2	1	29.70	0.19	29.46	14.25
9	3	1	3	4	2	19.38	0.20	25.75	13.84
10	3	2	4	3	1	22.04	0.28	26.86	10.85
11	3	3	1	2	4	21.45	0.18	26.63	14.53
12	3	4	2	1	3	27.68	0.15	28.84	16.13
13	4	1	4	2	3	20.80	0.22	26.36	12.90
14	4	2	3	1	4	21.30	0.24	26.57	12.14
15	4	3	2	4	1	21.75	0.28	26.75	10.85
16	4	4	1	3	2	23.68	0.11	27.49	19.16

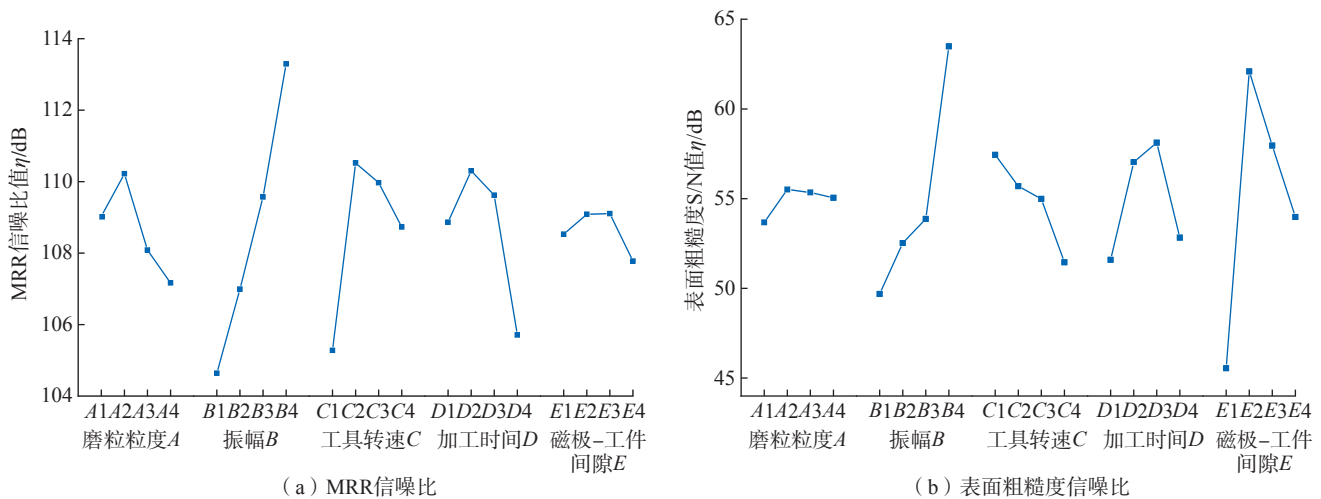


图2 MRR和表面粗糙度信噪比效应图
Fig.2 S/N effect of MRR and surface roughness

围为 $0.8579 < d \leq 1.1438$, 在本次工艺优化中 MRR 和表面粗糙度的重要程度相等, 因此取分辨系数 $d=1$, 并代入式(4)和式(6), 分别得到相关灰色关联系数以及 MRR 和表面粗糙度的 S/N 灰色关联度, 如表4所示。

3.2 多目标参数优化

为了保证试验数据足够可靠, 维持各因素间均衡, 取因素水平对应的灰色关联度均值之差, 来判断对加工工艺的影响^[12]。另外, 在考虑多个指标影响的情况下, 同一个因素中最高的灰色关联度对应的水平就是该因素的最佳水平。根据表4, 将各加工参数所对应的4个水平 S/N 灰色关联度取平均值, 并将各加工参数各水平的 S/N 灰色关联度均值进行极差分析, 得到的各因素水平灰色关联度均值和极差如表5所示。

由表5可知 $R_B > R_D > R_E > R_C > R_A$, 因此可判定钛合金 UAMAF 的各加工参数对表面粗糙度和 MRR 的综合影响程度为振幅的影响最大, 其他因素依次为加工时间、磁极-工件间隙、工具转速和磨粒粒度。取表5中各因素 S/N 灰色关联度均值的最大值所对应的加工参数为最佳工艺, 即综合表面粗糙度和 MRR 多目标优化后的加工参数组合为 A2B4C2D2E2。

4 试验结果与分析

4.1 单目标优化结果

利用表面粗糙度为目标优化的最佳工艺: 磨粒粒度 50/60#、振幅 14 μ m、工具转速 1000r/min、加工时

间 40min 和磁极-工件间隙 1.00mm, 进行钛合金 UAMAF 试验, 得到钛合金工件表面形貌如图3所示。可以看出, 钛合金工件在 UAMAF 前, 表面有规律性的铣削刀痕, 表面粗糙度 R_a 为 0.53 μ m, 经过利用以表面粗糙

表4 灰色关联系数和信噪比灰色关联度

Table 4 Grey correlation coefficient and S/N grey correlation degree

试验编号	表面粗糙度信噪比			MRR 信噪比			S/N 灰色关联度
	均值 /dB	归一化	灰色关联系数	均值 /dB	归一化	灰色关联系数	
1	9.59	0	0.50	25.46	0	0.50	0.50
2	15.37	0.60	0.71	27.86	0.60	0.71	0.71
3	14.76	0.54	0.68	28.20	0.69	0.76	0.72
4	13.96	0.46	0.64	27.51	0.51	0.67	0.66
5	13.36	0.39	0.62	27.07	0.40	0.62	0.62
6	14.17	0.48	0.65	25.70	0.06	0.51	0.58
7	13.74	0.43	0.63	27.99	0.63	0.72	0.68
8	14.25	0.49	0.66	29.46	1.00	1.00	0.83
9	13.84	0.44	0.64	25.75	0.07	0.51	0.57
10	10.85	0.13	0.53	26.86	0.35	0.60	0.57
11	14.53	0.52	0.67	26.63	0.29	0.58	0.63
12	16.13	0.68	0.75	28.84	0.85	0.86	0.81
13	12.90	0.35	0.60	26.36	0.23	0.56	0.58
14	10.85	0.13	0.53	26.57	0.28	0.58	0.55
15	12.14	0.27	0.57	26.75	0.32	0.59	0.58
16	19.16	1.00	1.00	27.49	0.51	0.67	0.83

表5 各因素 S/N 灰色关联度均值及其极差

Table 5 Average and range of S/N grey correlation degree of each factor

水平	磨粒粒度 A	振幅 B	工具转速 C	加工时间 D	磁极-工件间隙 E
1	0.6497	0.5721	0.6382	0.6388	0.6221
2	0.6811	0.6074	0.6844	0.6904	0.7032
3	0.6485	0.6561	0.6733	0.6884	0.6775
4	0.6415	0.7852	0.6250	0.6033	0.6180
极差 R	0.0396	0.2131	0.0594	0.0871	0.0852

度为目标的优化工艺参数加工后,表面铣削刀痕均已被去除,加工表面光滑平整,表面粗糙度 R_a 达到 $0.08\mu\text{m}$,均远小于表3中试验组的表面粗糙度值。

利用以 MRR 为目标优化的最佳工艺:磨粒粒度 50/60#、振幅 $14\mu\text{m}$ 、工具转速 1200r/min、加工时间 30min 和磁极-工件间隙 1.25mm,进行钛合金 UAMAF 试验,得到钛合金 UAMAF 的 MRR 可达 30.5mg/h ,明显高于表3中其他加工参数组合

下的 MRR。

4.2 多目标优化结果

利用综合表面粗糙度和 MRR 多目标优化的最佳工艺:磨粒粒度 50/60#、振幅 $14\mu\text{m}$ 、工具转速 1200 r/min、加工时间 30min 和磁极-工件间隙 1.00mm,进行钛合金 UAMAF 试验,得到加工后工件的表面形貌(图4),其表面粗糙度和 MRR 及其 S/N 值和灰色关联系数结果如表6所示。综合表面粗糙度和 MRR 多目标优化后,钛合金 UAMAF 的表

面粗糙度 R_a 和 MRR 可达到 $0.12\mu\text{m}$ 和 27.9mg/h 。由图4可以看出,经过 UAMAF 后,钛合金表面的铣削刀痕均被去除,加工表面相对平整。由表6还可看出,综合表面粗糙度和 MRR 多目标优化后的 S/N 灰色关联度为 0.90,均大于表4中各试验组的 S/N 灰色关联度,说明了优化后的工艺更有利于表面加工质量和加工效率的提高。

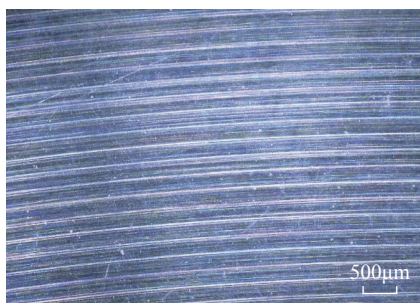
5 结论

通过钛合金 UAMAF 正交加工试验,研究了磨粒粒度、振幅、工具转速、加工时间和磁极-工件间隙对表面粗糙度和 MRR 的影响规律,得出以下结论:

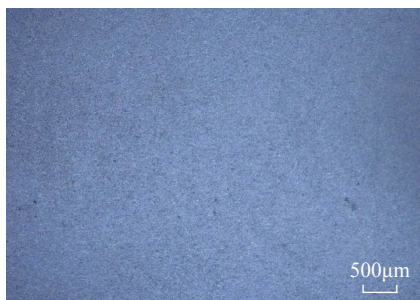
(1) 以表面粗糙度为目标优化的最佳工艺为磨粒粒度 50/60#、振幅 $14\mu\text{m}$ 、工具转速 1000r/min、加工时间 40min 和磁极-工件间隙 1mm,获得的表面粗糙度 R_a 可达 $0.08\mu\text{m}$;

(2) 以 MRR 为目标优化的最佳工艺为磨粒粒度 50/60#、振幅 $14\mu\text{m}$ 、工具转速 1200r/min、加工时间 30min 和磁极-工件间隙 1.25mm,优化后钛合金 UAMAF 的 MRR 可达 30.5mg/h ;

(3) 以综合表面粗糙度和 MRR 为目标优化的最佳工艺为:磨粒粒度 50/60#、振幅 $14\mu\text{m}$ 、工具转速 1200r/min、加工时间 30min 和磁极-工件间隙 1.00mm,综合优化后钛合金 UAMAF 的表面粗糙度 R_a 和 MRR 为 $0.12\mu\text{m}$ 和 27.9mg/h 。



(a) 加工前



(b) 加工后

图3 利用表面粗糙度目标优化后工件表面形貌
Fig.3 Surface morphology of workpiece after objective optimization of surface roughness



图4 多目标优化后工件表面形貌
Fig.4 Surface morphology of workpiece after multi-objective optimization

表6 优化工艺试验结果

Table 6 Experimental results of optimized process

评价指标	试验指标	S/N	归一化	灰色关联系数
表面粗糙度 R_a	$0.12\mu\text{m}$	18.39dB	0.92	0.93
MRR	27.9mg/h	28.91dB	0.86	0.88
S/N 灰色关联度	—	—	—	0.90

参考文献

[1] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. 航空制造技术, 2012, 55(16): 44-49.

KANG Renke, MA Fujian, DONG Zhigang, et al. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(16): 44-49.

[2] 崔同磊, 张桂香, 崔运涛, 等. 响应曲面法优化铜钨合金材料的磁力光整加工参数[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(17): 1209-1214.

CUI Tonglei, ZHANG Guixiang, CUI Yuntao, et al. Optimization of process parameters for magnetic abrasive finishing of copper-tungsten alloy by response surface method[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(17): 1209-1214.

[3] 陈春增. 磁力光整加工镍基高温合金机理及基础试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.

CHEN Chunzeng. Magnetic abrasive finishing mechanism and experimental study for nickel-based superalloy[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016.

[4] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁力研磨法

加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 814-817.

HAN Bing, LIU Lixin, CHEN Yan. Optimization of process parameters on magnetic abrasive finishing to inner surface of bending pipe[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 814-817.

[5] 朱子俊, 韩冰, 李奎, 等. 超声辅助磁粒研磨 TC4 平面的光整试验研究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(10): 6-11.

ZHU Zijun, HAN Bing, LI Kui, et al. Experimental study on ultrasonic-assisted magnetic particle grinding of TC4 plane[J]. Plating & Finishing, 2020, 42(10): 6-11.

[6] 陈燕, 曾加恒, 胡玉刚, 等. 超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 118-124.

CHEN Yan, ZENG Jiaheng, HU Yugang, et al. Special-shaped pipe of nickel based alloy GH4169 by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 118-124.

[7] MISRA A, PANDEY P M, DIXIT U S. Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 133: 344-356.

[8] MISRA A, M PANDEY P, DIXIT U S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131-132: 853-867.

[9] RUIZ-CÁRCEL C, HERNANDEZ E, CAO Y, et al. Use of spectral kurtosis for improving signal to noise ratio of acoustic emission signal from defective bearings[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014, 14(3): 363-371.

[10] HERRMANN H, BUCKSCH H. Signal-to-noise ratio[M]. Berlin: Springer, 2014.

[11] WU W S, PENG Y. Extension of grey relational analysis for facilitating group consensus to oil spill emergency management[J]. Annals of Operations Research, 2016, 238(1-2): 615-635.

[12] SUN G D, GUAN X, YI X, et al. Grey relational analysis between hesitant fuzzy sets with applications to pattern recognition[J]. Expert Systems With Applications, 2018, 92: 521-532.

Process Optimization for Ultrasonic-Assisted Magnetic Abrasive Finishing of Titanium Alloy

MA Fujian, PU Bin, LIU Xin, LUO Qichao

(Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

[ABSTRACT] In order to study the influence of machining parameters on ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing (UAMAF) of titanium alloy, the orthogonal experiments were carried out with surface roughness and material removal rate (MRR) as evaluating indicator. The single-objective and multi-objective optimization of the machining parameters were carried out based on signal-to-noise ratio (S/N) and grey correlation analysis methods. The results show that the best process aiming at surface roughness and MRR is the abrasive particle size of 50/60#, amplitude of 14 μ m, and tool speed of 1000r/min and 1200r/min, magnetic pole and workpiece gap of 1mm and 1.25mm, finishing time of 40min and 30min respectively. The optimized surface roughness and MRR are R_a 0.08 μ m and 30.5mg/h respectively. The optimum process combining surface roughness and MRR is the abrasive particle size of 50/60#, amplitude 14 μ m, finishing time of 30min, magnetic pole and workpiece gap of 1.00mm, tool speed of 1200r/min. The surface roughness and MRR are R_a 0.12 μ m and 27.9mg/h respectively.

Keywords: Titanium alloy; Ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing (UAMAF); Surface roughness; Material removal rate (MRR); Signal-to-noise ratio (S/N); Grey relational degree

(责编 阳光)