

# 基于响应曲面法电火花线切割回转零件实验研究

巩亚东, 马晓腾, 孙 瑶

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以低速走丝电火花线切割加工回转铜钨合金 (CuW70) 试件为研究对象, 采用 Design - Expert 软件设计 Box - Behnken 实验, 利用响应曲面法分析得出不同速度参数对工件表面粗糙度及材料去除率的影响规律, 并得出兼顾加工效率与表面质量的最优工艺参数组合. 结果表明, 速度参数对表面粗糙度影响的主次关系为工件转速 > 进给速度 > 走丝速度; 对材料去除率影响的主次关系为进给速度 > 工件转速 > 走丝速度. 多目标参数优化得出: 当工件转速为 46 r/min, 进给速度为 1.0 mm/min, 走丝速度为 45 mm/s 时, 表面粗糙度达到 0.882  $\mu\text{m}$ , 材料去除率达到 0.625  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

**关 键 词:** 低速走丝电火花线切割; 铜钨合金; 响应曲面法; 表面粗糙度; 材料去除率

中图分类号: TG 661      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2018)07-1005-06

## Experimental Study on the Wire Electrical Discharge Machining of Rotary Parts Based on the Response Surface Method

GONG Ya-dong, MA Xiao-teng, SUN Yao

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The low speed wire electrical discharge machining (LS-WEDM) method was used to fabricate the rotary CuW70 workpiece. Box-Behnken experiment of CuW70 was designed with Design-Expert software, and the response surface method was used to analyze the influencing rule of different speed parameters on surface roughness and material removal rate. Then the optimized machining parameters for high machining efficiency and precision were obtained. The results showed that the influencing order of speed parameters on the surface roughness is followed by rotating speed, feeding speed and wire speed. And the influencing order of speed parameters on material removal rate is followed by feeding speed, rotating speed and wire speed. The multi-objective optimizing results indicated that when the rotating speed is 46 r/min, the feeding speed is 1.0 mm/min, and the wire speed is 45 mm/s, the surface roughness is 0.882  $\mu\text{m}$  and the material removal rate is 0.625  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

**Key words:** low speed wire electrical discharge machining (LS-WEDM); CuW70; response surface method; surface roughness; material removal rate

电火花线切割加工 (wire electrical discharge machining, WEDM) 也叫数控线切割加工, 它是在电火花成形加工基础上发展起来的一种新的工艺形式, 该加工方法线电极与工件电极既没有直接接触, 又没有宏观作用力, 因此不受材料物理性能制约, 在硬质合金等难加工材料的微细结构或微模具的加工领域具有十分广阔的应用空间<sup>[1-2]</sup>.

针对某些具有非完全贯穿回转体或局部具有微回转结构的特殊构件, 传统切削显然不能满足加工需求. 电火花线切割机床虽为五轴联动, 但只可实现上下异形或复杂直纹曲面的加工, 并不能加工出具有非完全贯穿的回转体或局部具有微回转结构的特殊构件. 本实验采用在线切割机床上搭建旋转机构系统的方法, 以实现六轴联动的电火花

线切割回转加工 (WEDT)<sup>[3-4]</sup>. 依据低速走丝线切割机床可实现数控编程的特点,在保证加工精度的基础上,可加工出多种复杂回转体微零件和局部具有微回转结构的特殊构件.

铜钨合金 (CuW70) 作为一种高性能、低损耗、加工稳定的工具电极材料,被广泛应用于高硬度、高强度等难加工材料 (如钛合金、硬质合金) 电火花成形加工中<sup>[5-6]</sup>. 本实验以低速走丝电火花线切割加工回转铜钨合金 (CuW70) 为研究对象,基于 Design - Expert 设计三因素三水平的 Box - Behnken 实验,建立表面粗糙度  $R_a$  及材料去除率 MRR 的数学模型,并利用响应曲面法探究速度参数 (工件转速、进给速度、走丝速度) 对加工表面粗糙度及材料去除率的影响规律,从而得到兼顾加工效率与表面质量的多目标工艺参数最优组合,并用实验验证这一最优组合的可靠性,为实际加工提供选择依据.

# 1 实验设计

本实验采用阿奇夏米尔 CA20 低速单向走丝线切割机床,并在机床上搭建旋转机构系统,如图 1 所示. 试件被装夹在旋转机构系统上,在电机的带动下做回转运动,并随着工作台在水平面做横向进给;线电极为黄铜丝,低速通过加工区;工作液为去离子水,有利于熔融的蚀除物的排除,提高加工速度;冲液方式为全浸入下冲液;试验的具体条件见表 1. 选取工件转速  $v_n$ 、进给速度  $v_s$ 、走丝速度  $v_w$  为加工速度参数,并用 -1,0,1 代表各速度参数的不同水平取值,见表 2. 其中表面粗糙度  $R_a$  在三维表面轮廓仪下测出;材料去除率 MRR 利用公式  $MRR = \pi(D - \Delta t) \cdot \Delta t \cdot v_s$  计算得出,式中,  $D$

为工件直径,  $\Delta t$  为单边去除量,可在超景深显微镜下测得. 电火花线切割回转加工实验设计及结果见表 3.

表 1 电火花线切割实验条件	
Table 1 Experimental conditions of WEDM	
参数	数值或条件
工件材料	铜钨合金 CuW70
电极材料	黄铜丝
工作介质	去离子水
工件尺寸/mm	3 ± 0. 01
电极直径/mm	0. 2
冲液压力/MPa	0. 8
导电率/( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	5
流量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	4
丝张力/N	16
峰值电流/A	180
开路电压/V	65
脉冲宽度/ $\mu\text{s}$	6

表 2 Box - Behnken 实验因素与水平			
Table 2 Experimental factors and levels of Box-Behnken			
速度参数	水平		
	- 1	0	1
$v_n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	20	40	60
$v_s/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0. 5	1. 0	1. 5
$v_w/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	30	45	60

表 3 实验设计及结果					
Table 3 Experimental design and results					
序号	$v_n$	$v_s$	$v_w$	$R_a/\mu\text{m}$	$MRR/(\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
1	0	0	0	0. 916	0. 617
2	1	0	- 1	0. 942	0. 374
3	0	- 1	- 1	0. 876	0. 234
4	0	- 1	1	0. 830	0. 185
5	0	0	0	0. 916	0. 617
6	1	- 1	0	0. 810	0. 205
7	- 1	1	0	1. 980	0. 609
8	1	1	0	0. 931	0. 461
9	0	1	1	1. 320	0. 542
10	0	0	0	0. 916	0. 617
11	0	1	- 1	1. 240	0. 562
12	0	0	0	0. 916	0. 617
13	0	0	0	0. 916	0. 617
14	1	0	1	0. 799	0. 339
15	- 1	0	1	1. 420	0. 415
16	- 1	0	- 1	1. 560	0. 390
17	- 1	- 1	0	0. 992	0. 195

# 2 实验结果与讨论

## 2. 1 表面粗糙度 $R_a$ 的响应曲面分析

利用 Design - Expert 对表面粗糙度进行数据

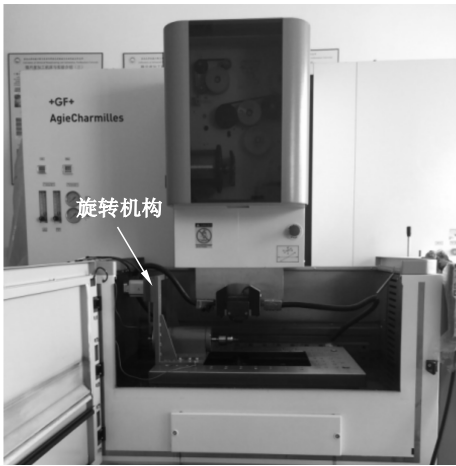


图 1 阿奇夏米尔 CA20 线切割机床  
Fig. 1 Agie Charmilles CA20

回归分析,分析结果显示二次项显著,因而采用二次项对表面粗糙度进行拟合<sup>[7]</sup>. 拟合的表面粗糙度  $R_a$  与各影响因子之间数学模型为

$$R_a=2.189-0.031v_n+0.575v_s-0.037v_w-0.022v_nv_s-2.5\times10^{-6}v_nv_w+4.2\times10^{-3}v_sv_w+4.7\times10^{-4}v_n^2+0.297v_s^2+3.4\times10^{-4}v_w^2.$$

为了评价该数学模型的可信度,对实验结果进行方差和显著性分析,如表 4 所示.

表 4 表面粗糙度  $R_a$  的方差及显著性分析  
Table 4 Variance analysis and confidence degree analysis for  $R_a$

误差来源	方差平方和	自由度	方差均方根	$F$ 值	概率 $P>F$ 值	显著性
$S_a$	1.66	9	0.18	62.29	< 0.000 1	高度显著
$v_n$	0.76	1	0.76	257.92	< 0.000 1	高度显著
$v_s$	0.48	1	0.48	162.91	< 0.000 1	高度显著
$v_w$	$7.75\times10^{-3}$	1	$7.75\times10^{-3}$	2.62	0.149 5	不显著
$v_n\times v_s$	0.19	1	0.19	63.56	< 0.000 1	高度显著
$v_n\times v_w$	$2.25\times10^{-6}$	1	$2.25\times10^{-6}$	$7.61\times10^{-4}$	0.978 8	不显著
$v_s\times v_w$	$3.97\times10^{-3}$	1	$3.97\times10^{-3}$	1.34	0.284 6	不显著
$v_n^2$	0.15	1	0.15	50.33	0.000 2	高度显著
$v_s^2$	0.023	1	0.023	7.85	0.026 5	显著
$v_w^2$	0.024	1	0.024	8.28	0.023 7	显著

从表 4 中可以看出,该模型的  $F$  值为 62.29, 概率  $P$  小于 0.000 1,表示该模型特征高度显著;此外,本文模型复相关系数  $R^2$  和  $R$  分别为 0.987 7,0.971 8,二者相近,表示该数学模型拟合度较好,可用于分析预测表面粗糙度; $v_n,v_s,v_w$  的  $F$  值分别为 257.92,162.91,2.62,说明各因素对表面粗糙度影响程度为工件转速最大,进给速度次之,走丝速度最小.

对比第 7 组与第 8 组实验三维轮廓仪下表面形貌,如图 2,图 3 所示,发现  $v_n=20\text{ r/min}$  时的三维合成图高度差为  $10\text{ }\mu\text{m}$ ,表面形貌沟壑清晰;而  $v_n=60\text{ r/min}$  时的三维合成图高度差为  $7.5\text{ }\mu\text{m}$ ,表面形貌沟壑较浅,说明工件转速大时表面较平整;对比超景深显微镜下观测的加工表面,如图 4 所示,可发现相似的规律,说明不同工件转速对表面粗糙度影响较大.

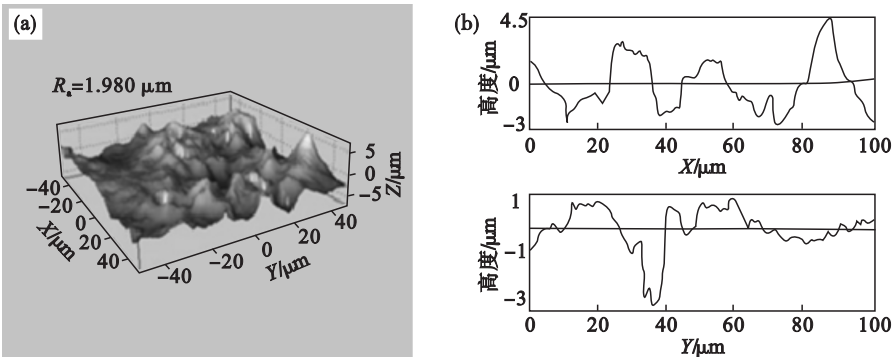


图 2 第 7 组实验工件表面形貌  
Fig. 2 Workpiece surface topography for the 7th experiment  
(a)—三维表面形貌;(b)—截面轮廓图.

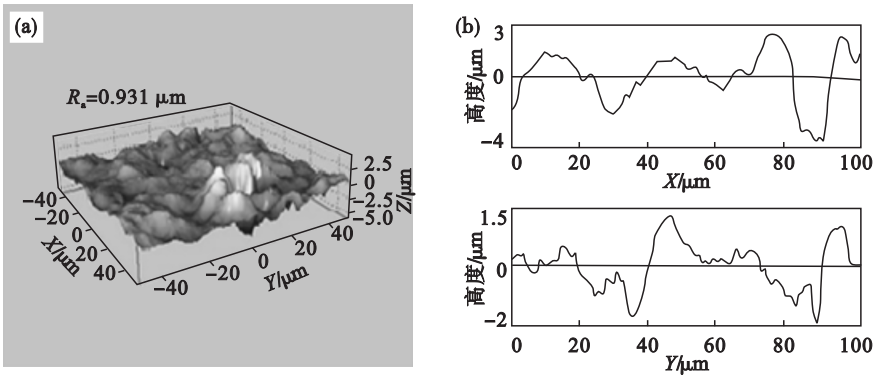


图 3 第 8 组实验工件表面形貌  
Fig. 3 Workpiece surface topography for the 8th experiment  
(a)—三维表面形貌;(b)—截面轮廓图.

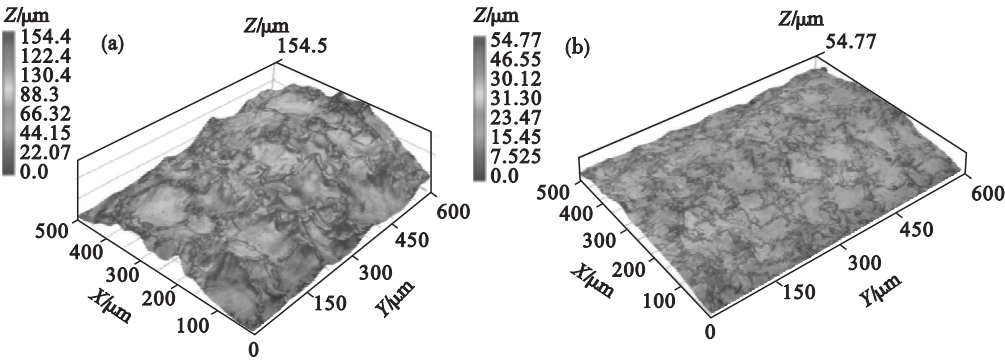


图 4 超景深观测的加工表面  
Fig. 4 Machining surface for super depth of field microscope  
(a)—第 7 组实验; (b)—第 8 组实验.

响应曲面法又称回归设计,它是建立试验指标与各因子间多项式回归方程,评价各因子及其交互作用,寻找各因子水平最佳组合的一种试验设计方法<sup>[8]</sup>.表面粗糙度的响应曲面及等高线可根据式(1)绘制而成,如图 5 所示.

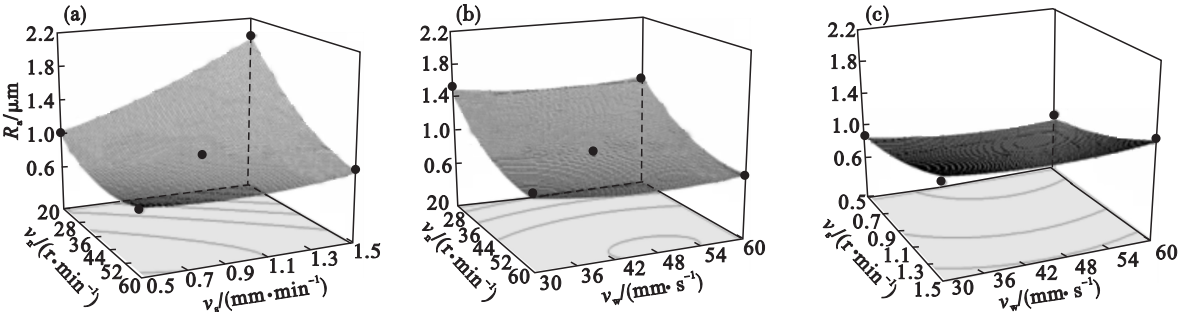


图 5 表面粗糙度的响应曲面及等高线  
Fig. 5 Response surface and contours of the surface roughness

(a)— $v_n$  和  $v_s$  的响应曲面及等高线; (b)— $v_n$  和  $v_w$  的响应曲面及等高线; (c)— $v_s$  和  $v_w$  的响应曲面及等高线.

从图 5a 中可以看出,当  $v_n$  在 20 ~ 60 r/min 之间,  $v_s$  在 0.5 ~ 1.5 mm/min 之间,  $R_a$  与  $v_n$  呈负相关关系,与  $v_s$  呈正相关关系. 从图 5b, 图 5c 可以看出,  $v_n$ ,  $v_s$  与  $v_w$  交互作用均不显著;但随着  $v_w$  的增加,  $R_a$  先减小后增大,但变化不太明显. 通过预测优化可得到单目标最优工艺参数组合:  $v_n$  为 45 r/min,  $v_s$  为 0.5 mm/min,  $v_w$  为 51 mm/s 时,  $R_a$  可达到最小值 0.721  $\mu\text{m}$ .

2.2 材料去除率 MRR 的响应曲面分析

利用 Design – Expert 对材料去除率进行回归分析时,分析结果显示为二次项显著,因而采用二次项对材料去除率进行拟合,并对实验结果进行方差和显著性分析,如表 5 所示,以确保实验结果的可靠性和数学模型的可信度. 拟合的材料去除率 MRR 与各影响因子之间数学模型为

$$\begin{aligned} \text{MRR} = & -1.846 + 0.003 v_n + 1.446 v_s + \\ & 0.045 v_w - 3.95 \times 10^{-3} v_n v_s - 5 \times 10^{-5} v_n v_w + \\ & 9.667 \times 10^{-4} v_s v_w - 3.134 \times 10^{-4} v_n^2 - 0.497 v_s^2 - \\ & 4.983 \times 10^{-4} v_w^2. \end{aligned} \tag{2}$$

从表 5 中可以看出,该模型的  $F$  值为 480.73,概率  $P$  小于 0.000 1,表示该模型特征高度显著;此外,模型复相关系数  $R^2$  和  $R$  分别为 0.998 4,0.996 3,二者相近,表示该数学模型拟合度好,可用于分析和预测表面粗糙度;  $v_n$ ,  $v_s$ ,  $v_w$  的  $F$  值分别为 63.6,2 207.52,7.5,说明各因素对材料去除率影响程度为进给速度最大,工件转速次之,走丝速度最小. 材料去除率的响应曲面及等高线可根据式(2)绘制而成,如图 6 所示.

从图 6a 可以看出,当  $v_n$  在 20 ~ 60 r/min 之间, MRR 与  $v_s$  呈正相关关系;在  $v_s$  为 1.5 mm/min 时, MRR 先随着  $v_n$  增大而增大,在达到最大值后,随着  $v_n$  增大反而减小. 这是由于随着  $v_n$  的增大,电极间放电状态得到改善,便于电蚀产物的排出,因此提高了 MRR,但  $v_n$  过大时易出现单区域放电蚀除不完全,从而导致 MRR 降低. 从图 6b, 图 6c 可以看出,  $v_n$ ,  $v_s$  与  $v_w$  交互作用均不显著,但随着  $v_w$  的增加, MRR 呈先增大后减小趋势. 通过预测优化可得到单目标最优工艺参数组合:当  $v_n$  为



35 r/min,  $v_s$  为 1.4 mm/min,  $v_w$  为 45 mm/s 时, MRR 可达到最大值 0.681 mm<sup>3</sup>/min.

表 5 材料去除率 MRR 的方差及显著性分析  
Table 5 Variance and confidence degree analysis for MRR

误差来源	方差平方和	自由度	方差均方根	<i>F</i> 值	概率 <i>P</i> > <i>F</i> 值	显著性
MRR	0.45	9	0.050	480.73	<0.000 1	高度显著
$v_n$	$6.613 \times 10^{-3}$	1	$6.613 \times 10^{-3}$	63.60	<0.000 1	高度显著
$v_s$	0.23	1	0.23	2 207.52	<0.000 1	高度显著
$v_w$	$7.801 \times 10^{-4}$	1	$7.801 \times 10^{-4}$	7.50	0.028 9	显著
$v_n \times v_s$	$6.241 \times 10^{-3}$	1	$6.241 \times 10^{-3}$	60.03	0.000 1	高度显著
$v_n \times v_w$	$9.000 \times 10^{-4}$	1	$9.000 \times 10^{-4}$	8.66	0.021 6	显著
$v_s \times v_w$	$2.103 \times 10^{-4}$	1	$2.103 \times 10^{-4}$	2.02	0.198 0	不显著
$v_n^2$	0.066	1	0.066	636.61	<0.000 1	高度显著
$v_s^2$	0.065	1	0.065	623.98	<0.000 1	高度显著
$v_w^2$	0.053	1	0.053	509.16	<0.000 1	高度显著

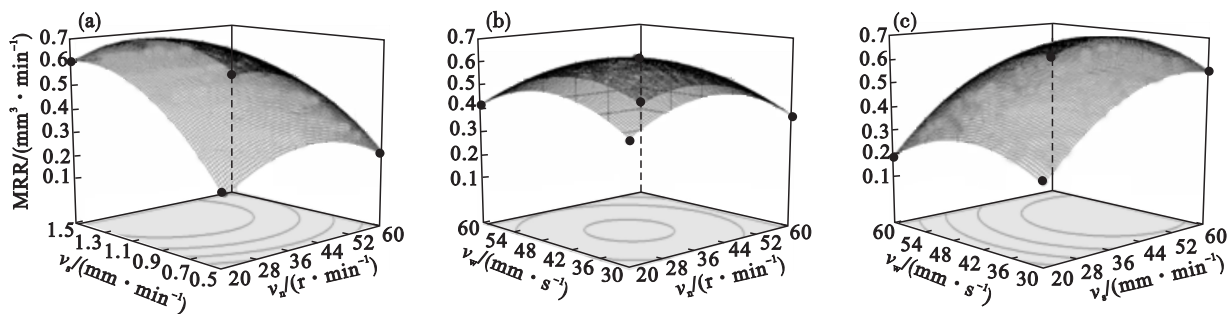


图 6 材料去除率的响应曲面及等高线  
Fig. 6 Response surface and contours of material removal rate

(a)— $v_n$  和  $v_s$  的响应曲面及等高线; (b)— $v_n$  和  $v_w$  的响应曲面及等高线; (c)— $v_s$  和  $v_w$  的响应曲面及等高线.

2.3 多目标预测与优化

在实验结果分析及模型拟合的基础上,采用 Design – Expert 进一步对实验参数进行多目标回归分析,即在保证加工表面粗糙度足够小的前提下,寻求材料去除率的最大化<sup>[8]</sup>,具体优化条件: $v_n$  为 20 ~ 60 r/min,  $v_s$  为 0.5 ~ 1.5 mm/min,  $v_w$  为 30 ~ 60 mm/s,  $R_a$  为 0 ~ 2  $\mu\text{m}$ , MRR 为 0.1 ~ 1 mm<sup>3</sup>/min.

优化结果表明:当  $v_n$  为 46 r/min,  $v_s$  为 1.0 mm/min,  $v_w$  为 45 mm/s 时,  $R_a$  可达到足够小为 0.882  $\mu\text{m}$ , MRR 可达到足够大为 0.625 mm<sup>3</sup>/min.

3 实验验证

按多目标最优工艺参数  $v_n = 46$  r/min,  $v_s = 1.0$  mm/min,  $v_w = 45$  mm/s, 重复进行 3 次实验验证,具体参数如表 6 所示. 表 6 的预测值是通过上述数学模型式(1)、式(2)计算所得的各响应因子值,实际值为实验所得的各因子实际测量值. 误

差的计算公式如式(3)所示:

$$\text{误差率} = \frac{\text{实际值} - \text{预测值}}{\text{实际值}} \times 100\% . \quad (3)$$

表 6 实验验证  
Table 6 Experimental verification

序号	$R_a/\mu\text{m}$		MRR/(mm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )		误差率	
					$e_{R_a}$	$e_{\text{MRR}}$
	预测值	实际值	预测值	实际值	%	%
1	0.882	0.865	0.625	0.609	-1.97	-2.63
2	0.882	0.902	0.625	0.638	2.22	2.04
3	0.882	0.917	0.625	0.645	3.82	3.10

如表 6 所示,3 次验证实验中表面粗糙度  $R_a$ 、材料去除率 MRR 的误差均在  $\pm 5\%$  的范围内,并观察多目标最优工艺参数组合下加工后的工件表面形貌,如图 7 所示. 可以看出在最优工艺参数组合下,三维合成图高度差为 6  $\mu\text{m}$ ,表面较平整,表面粗糙度较小,说明上述数学模型优化出的工艺参数可信度较高,可以为低速走丝电火花线切割加工回转零件提供理论指导.

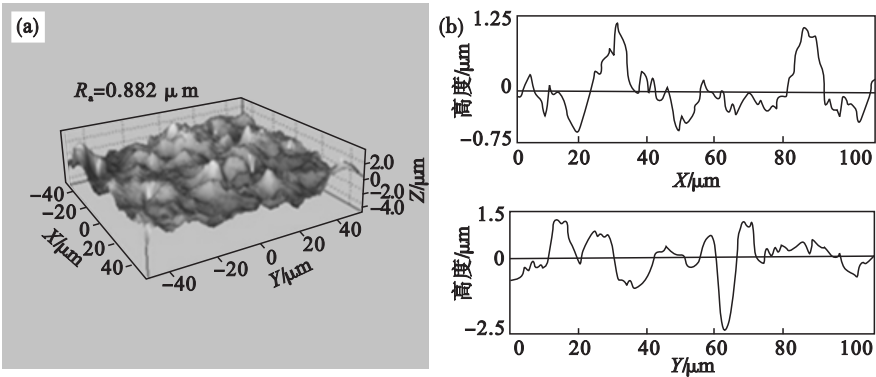


图 7 多目标最优参数组合下表面形貌  
Fig. 7 Surface topography for multi-objective optimal parameter combination  
(a)—三维表面形貌; (b)—截面轮廓图.

4 结 论

1) 当工件转速在 20 ~ 60 r/min 之间,进给速度在 0.5 ~ 1.5 mm/min 之间,走丝速度在 30 ~ 60 mm/s 之间时,实验因素对表面粗糙度影响的主次关系:工件转速 > 进给速度 > 走丝速度;对材料去除率影响的主次关系:进给速度 > 工件转速 > 走丝速度.

2) 通过单目标参数优化,可得当工件转速为 45 r/min,进给速度为 0.5 mm/min,走丝速度为 51 mm/s,表面粗糙度可达到最小值 0.721 μm;当工件转速为 35 r/min,进给速度为 1.4 mm/min,走丝速度为 45 mm/s 时,材料去除率可达到最大值 0.681 mm<sup>3</sup>/min.

3) 通过多目标参数优化,可得到兼顾加工效率与表面质量最优工艺参数组合,即当工件转速为 46 r/min,进给速度为 1.0 mm/min,走丝速度为 45 mm/s 时,表面粗糙度可达到足够小为 0.882 μm,材料去除率可达到足够大,为 0.625 mm<sup>3</sup>/min.

参考文献:

[1] Gong Y D, Sun Y, Wen X L, et al. Experimental study on surface integrity of Ti-6Al-4V machined by LS-WEDM[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1/2/3/4): 197 - 207.

[2] Gong Y D, Sun Y, Wen X L, et al. Experimental study on

accuracy and surface quality of TC2 in LS-WEDM multiple cuts[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2016, 38 (8): 2421 - 2433.

[3] Samuel G L. Analysis on the effect of discharge energy on machining characteristics of wire electrical discharge turning [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230 (11): 2064 - 2081.

[4] Aminollah M, Alireza F T, Ehsan E, et al. Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 205 (1/2/3): 283 - 289.

[5] 杨建明, 乔斌, 李化强. 电火花加工用工具电极材料的研究进展[J]. *工具技术*, 2007, 41(8): 13 - 16.

(Yang Jian-ming, Qiao Bin, Li Hua-qiang. Research progress in tool electrode materials of EDM [J]. *Tool Technology*, 2007, 41(8): 13 - 16.)

[6] 陈虎, 张立新, 喻俊志, 等. 电火花加工中电极材料对加工性能影响的试验研究 [J]. *现代制造工程*, 2013 (4): 79 - 84.

(Chen Hu, Zhang Li-xin, Yu Jun-zhi, et al. Experimental study on processing performance of electrode material in electric discharge machining [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2013(4): 79 - 84.)

[7] 巩亚东, 孙瑶, 刘寅. 低速单向走丝电火花线切割钛合金 TC4 表面粗糙度试验研究与建模 [J]. *兵工学报*, 2016, 37 (6): 1058 - 1065.

(Gong Ya-dong, Sun Yao, Liu Yin. Experimental investigation and modeling of three-dimensional surface roughness in LS-WEDM of TC4 [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(6): 1058 - 1065.)

[8] Bhardwaj B, Kumar R, Singh P K. An improved surface roughness prediction model using Box-Cox transformation with RSM in end milling of EN 353 [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28 (12): 5149 - 5157.