

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20221031002

脉冲电化学光整加工中表面形貌变化试验^{*}

庞桂兵 闫兆彬 张智信 王满富 樊双蛟
(大连工业大学机械工程与自动化学院 大连 116034)

摘要: 探究脉冲电化学光整(PECF)加工过程中表面形貌变化特性及其工艺能力。在能实现表面良好加工效果的参数范围内,对304不锈钢车削与磨削表面进行脉冲电化学光整加工,通过对加工前后表面微观形貌变化规律的对比分析,研究脉冲电化学光整加工工艺对不同表面的整平能力。试验结果表明:脉冲电化学光整加工车削和磨削表面所能获得的最终表面粗糙度大体相当,加工后两种表面粗糙度 R_a 、 R_z 和 R_{sm} 值处于同一量级,分别达到 0.09、0.7、50 μm 左右。表面微观形貌趋于一致,表面完整性良好,表面特征指标不具有显著差异性。脉冲电化学光整加工车削和磨削表面的形貌变化过程有所差别,车削表面存在由原始表面形貌向脉冲电化学光整加工表面形貌转变的一段中间过程,磨削表面形貌则在短时间内迅速转变为脉冲电化学光整加工表面形貌。对原始表面较为粗糙的零件或者难以采用磨削加工的薄壁件,PECF 加工是一种具有实际应用价值的加工方式,且对于一些具有特殊要求的功能性表面形貌,车削后进行 PECF 加工可能成为一种新的加工方法。

关键词: 脉冲电化学; 光整加工; 表面粗糙度; 表面形貌

中图分类号: TG662

Experimental on Surface Micro Morphology of Pulse Electrochemical Finishing

PANG Guibing YAN Zhaobin ZHANG Zhixin WANG Manfu FAN Shuangjiao
(College of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: The changes in surface morphology and processing ability were investigated during pulse electrochemical finishing (PECF) of 304 stainless steel surfaces. To realize optimal surface finishing effects, the turning and grinding surfaces were processed via PECF. Surface profile images and roughness parameter values were obtained using a probe-type roughness meter. These data were analyzed and summarized to understand the changes in surface topography characteristics during processing. Variance analysis was performed on the surface roughness before and after machining to verify the rules governing surface topography changes during the process. Scanning electron microscope(SEM) and atomic force microscope(AFM) were employed to observe and compare surface micro-morphology before and after processing, confirming the leveling ability of PECF. During machining, height parameters R_a and R_z exhibited similar overall change trends, with “inflection points” appearing at 17.5 s and 7.5 s, respectively. The width parameter R_{sm} showed a pattern of initially rising and then falling to varying degrees. A one-factor variance analysis of the roughness parameters of the two surfaces before and after processing revealed that the F values of the roughness parameters R_a , R_z , R_{sm} , R_c , and R_q of the two surfaces before processing were greater than $F_{0.01(1,4)}=21.198$, indicating that there were significant differences in various roughness indicators between the turning and grinding surfaces. However, after PECF processing, the F values of roughness parameters R_a , R_z , R_{sm} , R_c , and R_q of the two surfaces were less than $F_{0.05(1,4)}=7.708$, indicating that there were no significant differences in surface roughness indices after the two surfaces were processed via PECF, and the surface topography became more uniform. The post-processing roughness values R_a , R_z , and R_{sm} for both surfaces were of the same order of magnitude, and they were approximately 0.09 μm , 0.7 μm , and 50 μm , respectively. The surfaces displayed good integrity and high quality. PECF led to different morphology changes in the turning and grinding surfaces. There was an intermediate process in the turning surface of the

* 国家自然科学基金(51975081)和辽宁省教育厅科学研究经费(LJKZ0510, J2020106)资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51975081) and Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKZ0510, J2020106).

20221031 收到初稿, 20230110 收到修改稿

original surface morphology when compared to the surface morphology by PECF, where micro-burrs were leveled while macro-contour undulations retained turning contour characteristics. This finding suggests a potential new method for forming functional surface topographies with specific requirements. Conversely, the grinding surface morphology quickly transformed into the surface morphology by PECF in a short time. By combining SEM and AFM images with the statistical analysis of the surface topography parameters, it can be concluded that turning + PECF processing can realize a similar surface topographic effect as turning + grinding + PECF processing. Direct PECF processing on the turning surface can significantly reduce surface roughness values R_a and R_z . Through short-duration, single-step processing, the resulting surface roughness range can surpass that obtained by grinding, which is beneficial for shortening the processing cycle and enhancing efficiency. PECF machining is a valuable method for processing parts with rough original surfaces or thin-walled parts that are challenging to grind. PECF after turning can become a new machining approach for functional surface morphologies with specific requirements.

Keywords: pulse electrochemical; finishing; surface roughness; surface topography

0 前言

光整加工是提高工件表面质量的有效手段^[1-3]。光整加工工艺的表面粗糙度整平能力和整平质量决定了工艺的适用性, 整平能力越强、整平质量越好, 工艺的适用性就越广, 工艺能力范围就越宽^[4-6]。对于一些零件, 甚至可实现粗加工之后直接光整加工, 能有效提高加工效率和降低加工成本^[7-9]。

电化学加工是重要的光整加工技术之一, 具有不受工件材料硬度制约、无刀具磨损、无残余加工应力和热应力、不产生微观裂纹、毛刺等特点^[10-12], 研究表明电化学加工中采用脉冲电流可以实现较好的表面粗糙度整平效果^[13-15]。根据目前文献, 脉冲电化学光整 (Pulse electrochemical finishing, PECF) 加工技术研究主要集中在精加工后表面的光整, WANG 等^[16]利用 NaNO_3 溶液 (10%~30%) 对磨削后的碳钢表面进行 PECF 加工, 将表面粗糙度 R_a 值从 0.217~1.13 μm 降到 0.041 μm ; ZHOU 等^[17]利用移动阴极式 PECF 加工技术对磨削后的 40Cr 表面进行光整加工, 将 R_a 从 0.5 μm 降到 0.065 μm 。马宁等^[18]采用溶液配比为 55% 磷酸 + 0.3% 抗坏血酸 + 0.2% 乙烯硫脲的电解液对磨削加工后的紫铜片进行 PECF 加工, 将 R_a 从 100 nm 降低到 17 nm。王辉等^[19]采用 PECF 加工对 9CrMo 轧辊表面进行光整加工, 将轧辊 R_a 从 1.33 μm 降低到 0.277 μm 。原始表面较为粗糙的 PECF 加工方面, 阿达依·谢尔亚孜旦等^[20]研究了 20CrNiMo 材质的螺旋锥齿轮齿面 PECF 加工, 将齿面 R_a 值从 2.5~3.2 μm 降低到 0.1 μm ; XU 等^[21]通过 PECF 加工将 TiAl 合金材质的叶片 R_a 从 5.5 μm 左右降低到 0.9~1.8 μm 。上述研究针对不同材料, 采用不同实施方式, 对 PECF 加工的整平能力进行了有益探索。

光整加工过程本质上是表面微观形貌演化的过程, 表面整平特性的背后是微观形貌的变化机理和规律, 研究微观形貌的变化规律和机理是掌握光整加工工艺能力的基础。本文以生产中常用的 304 材料为例, 以车削与磨削两种具有不同表面粗糙度的原始表面作为粗、精加工表面的研究对象, 对比分析微观轮廓及表面形貌在光整加工过程中的变化, 探究 PECF 加工表面粗糙度的整平机理, 以及表面形貌特性的变化规律, 为较为系统地掌握 PECF 加工工艺能力提供依据。

1 试验设计

1.1 试验装置

图 1 显示了扫描式阴极 PECF 加工的原理, 图 2 显示了相应的试验装置。电源的正极与负极分别与工件和阴极连接, 工件转速、阴极位置由控制系统调节, 工件上与阴极相对应的部分为加工区域。加工时循环电解液会充满加工间隙, 随着工具阴极扫过工件表面, 实现工件的光整加工。

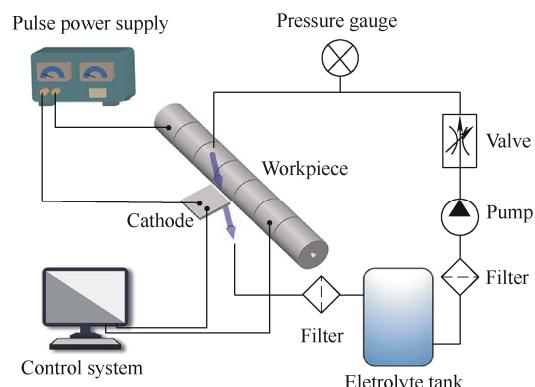


图 1 扫描式阴极 PECF 加工原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PECF with a scanning cathode

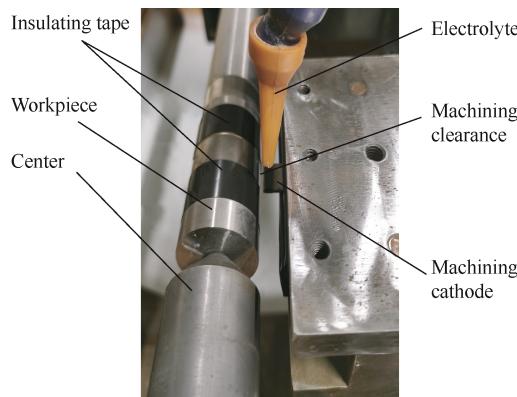


图2 扫描式阴极PECF加工试验装置图

Fig. 2 Experimental device of PECF with a scanning cathode

1.2 试验条件

试验条件和试件材料成分见表1和表2。

表1 试验条件

Table 1 Experimental conditions

Experimental conditions	Machining conditions	Value
Workpiece	Material	304 stainless steel
	Diameter Φ / mm	40
	Length / mm	260
	Initial roughness of turning surface R_a / μm	2.50~2.60
	Initial roughness of grinding surface R_a / μm	0.6~0.7
Cathode	Material	304 stainless steel
	Width / mm	14
	Thickness / mm	2
Electrolyte	Main compositions	20% NaNO_3 + water
	Voltage / V	0~36
Pulse power supply	Electric current / A	0~200
	Duty ratio / %	0~100
	Pulse frequency / Hz	1~10
Measuring instrument	Surface roughness measuring instrument	LINKS 2250B
	Scanning electron microscope SEM	JCM-6000PLUS
	Atomic force microscope AFM	Bioscope resolve

表2 304材料材质成分

Table 2 Composition of 304 material wt / %

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Content	0.08	1.0	2.0	18.0~20.0	8.0~10.0	0.03	0.045

1.3 试验方案

试验参数选取在前期试验中证明能够获得良好表面粗糙度的参数值，列于表3。对车削和磨削表面进行脉冲电化学光整加工，每隔2.5 s测量试件表面粗糙度值、表面轮廓曲线与材料去除量，分析表面形貌特征的变化；进行加工前后表面粗糙度参数指标的单因素分析，讨论表面形貌的差异性；观测加工前后工件表面SEM图像、AFM图像，对比加工前后微观形貌变化。

表3 实验参数

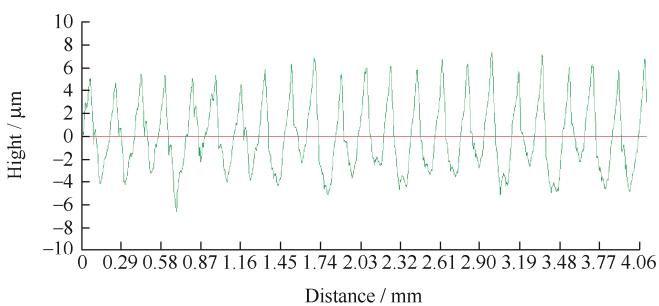
Table 3 Experimental parameters

Parameter	Value
Processing voltage / V	31
Rotate speed / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	300
Initial machining clearance / mm	0.4
Pulse frequency / kHz	8
Power duty cycle / %	50

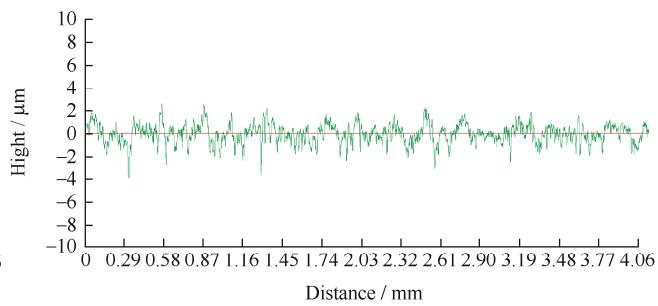
2 试验结果与分析

2.1 表面形貌变化分析

图3为PECF加工车削和磨削表面粗糙度轮廓变化图。图3a1和3b1为工件原始轮廓，两种原始表面形貌差异较大，车削表面粗糙度轮廓最大波峰高度大于磨削表面，最小波谷深度要小于磨削表面；车削表面轮廓算术平均中线上的波峰与波谷交替分布，而磨削表面波峰与波谷随机分布。图3a2~3a5和图3b2~3b5分别为二者在PECF加工过程中的轮廓形貌变化，粗糙轮廓逐渐整平的同时，尖峰状微观轮廓逐渐被圆角化，整体呈现平坦化，持续一段时间加工后，二者表面微观形貌趋于一致。



(a1) Turning surface profile
 $R_a=2.5109 \mu\text{m}$, $R_z=11.9088 \mu\text{m}$, $R_{sm}=165 \mu\text{m}$,
 $R_p=7.4615 \mu\text{m}$, $R_v=6.5807 \mu\text{m}$,



(b1) Grinding surface profile
 $R_a=0.6591 \mu\text{m}$, $R_z=5.2233 \mu\text{m}$, $R_{sm}=30 \mu\text{m}$,
 $R_p=2.6442 \mu\text{m}$, $R_v=3.9855 \mu\text{m}$,

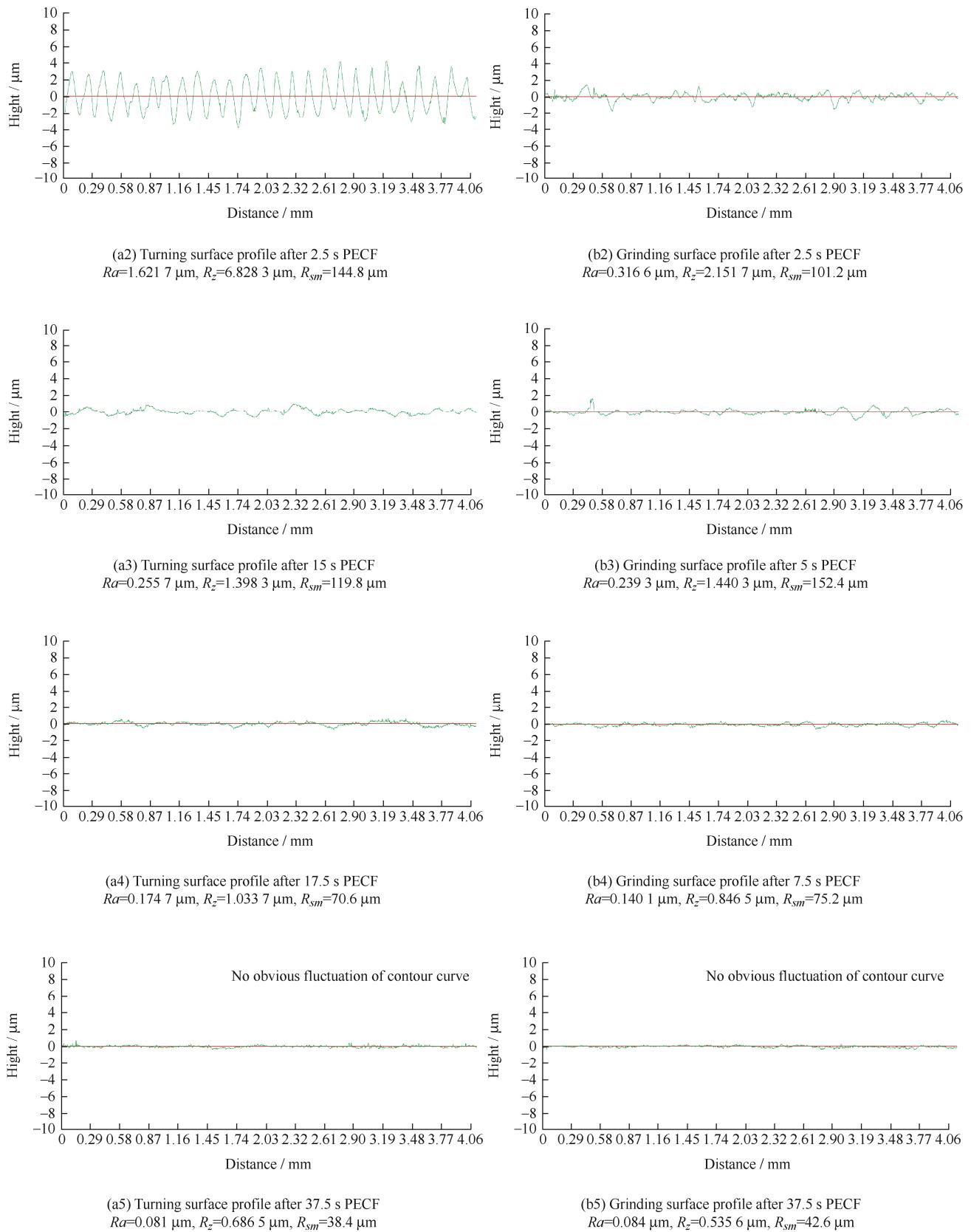


图3 PECE 加工过程中粗糙度轮廓的变化

Fig. 3 Change of roughness profile in PECE

结合图4所示的 R_a 值与材料去除量变化规律分析, PECE 加工车削与磨削表面分别在 17.5 s 与

7.5 s 附近时 R_a 变化出现“拐点”, 此时二者的 R_a 值基本在 0.2 μm 左右, 车削表面轮廓由初始的低频

波为主的特征转变为频率较高的波形特征，而磨削表面轮廓由初始的高频波为主的特征转变为频率较低的波形特征，去除量分别为 0.085 mm 和 0.039 mm，说明达到同样的粗糙度，车削表面的去除量和加工时间要远大于磨削表面。经过 37.5 s 加工后，二者的 R_a 值分别为 0.1014 μm 和 0.0806 μm， R_a 值基本不再降低，如图 5 所示， R_z 值的变化趋势与 R_a 值的变化趋势基本相同。车削和磨削表面高度参数大幅降低的同时，宽度参数 R_{sm} 值先有不同程度的升高，然后又缓慢降低。结合图 3 所示的表面粗糙度曲线，二者的表面微观形貌总体上都是由“尖峰状”变为“波浪状”，但是变化规律并不一致。

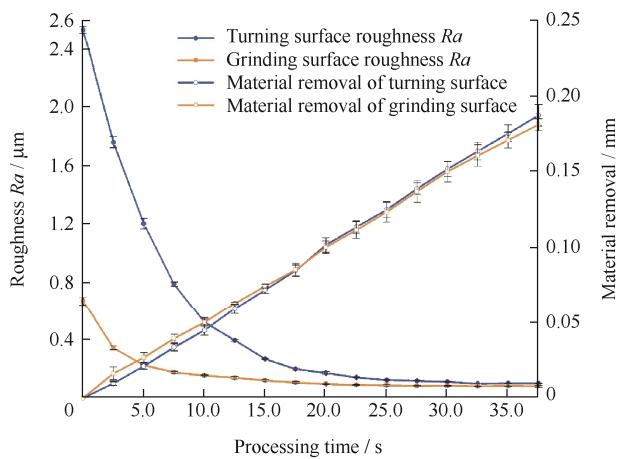


图 4 表面粗糙度 R_a 值与材料去除量变化

Fig. 4 Variation of R_a value and material removal

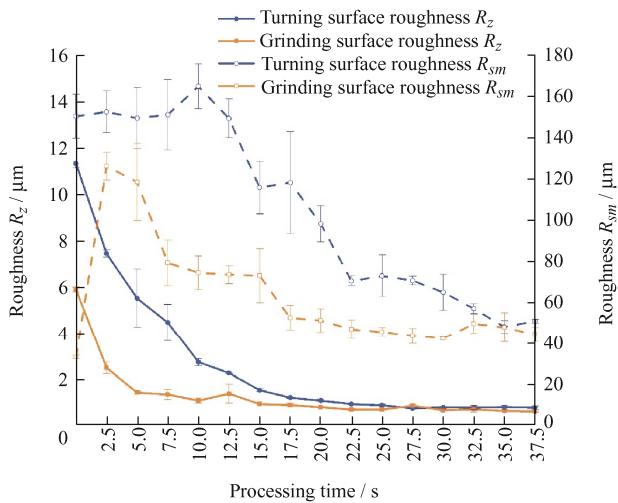


图 5 表面粗糙度 R_z 与 R_{sm} 值变化

Fig. 5 Variation of surface roughness R_z and R_{sm}

车削表面与磨削表面 PECD 过程中变化规律的差异性可以根据法拉第定律得到解释。波峰与波谷处因加工间隙的差异会使整平速率产生差异，波峰的整平速度 v_p 与波谷的整平速度 v_g 的表达式为：

$$\begin{cases} v_p = \frac{\eta \omega \sigma U}{A} \\ v_g = \frac{\eta \omega \sigma U}{A + R_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中， η 为电流效率， A/cm^2 ； ω 为阳极体积电化学当量， $\text{cm}^3/(\text{A} \cdot \text{min})$ ； σ 为电解液电导率， S/cm ； U 为加工电压， V ； A 为加工间隙， mm ； R_z 为轮廓表面最大高度， μm 。

根据式(1)可以分别计算车削与磨削工件表面整平的速度 v_1 和 v_2 ，其速度为 v_p 与 v_g 的差值：

$$\begin{cases} v_1 = \frac{\eta \omega \sigma U}{A} - \frac{\eta \omega \sigma U}{A + R_{z1}} = \eta \omega \sigma U \frac{R_{z1}}{A(A + R_{z1})} \\ v_2 = \frac{\eta \omega \sigma U}{A} - \frac{\eta \omega \sigma U}{A + R_{z2}} = \eta \omega \sigma U \frac{R_{z2}}{A(A + R_{z2})} \end{cases} \quad (2)$$

式中， R_{z1} 为车削表面粗糙度 R_z 值， μm ； R_{z2} 为磨削表面粗糙度 R_z 值， μm 。

因为车削表面 R_z 大于磨削表面，通过 v_1 和 v_2 之间的差值不难得出因波峰高度的差异性，车削表面整平速率快于磨削表面，与图 4 中 R_a 下降的趋势一致。

2.2 表面粗糙度单因素方差分析

为了确定加工前后及加工过程中表面形貌的差异及变化规律，采用单因素方差分析法确定加工前后和加工过程中表面形貌特征的差异性。单因素方差分析(One-way ANOVA)通过比较各组内样本观测值之间的差异与组间观测值平均值的差异，确定因素对试验影响的显著程度^[22-25]。本文对 3 次重复试验的两组表面粗糙度参数进行方差分析，因素为参数 R_a 、 R_z 、 R_{sm} 、 R_c 和 R_q ，方差分析中水平 $r=2$ ，每个水平下的样本容量 $s=3$ ，则 $d_{f_A}=1$ ， $d_{f_E}=4$ 。取显著水平 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ ，则 $F_\alpha(1, 4)=7.708$ ， $F_{0.01(1, 4)}=21.198$ ，比较 F 和 F_α 可得：

(1) 当 $F > F_{0.01(1, 4)}$ 时，认为对比的两个表面粗糙度数值差异较大，表面形貌差异高度显著。

(2) 当 $F_{0.05(1, 4)} < F < F_{0.01(1, 4)}$ 时，认为对比的两个表面粗糙度数值具有一定的差异，表面形貌差异显著。

(3) 当 $F < F_{0.05(1, 4)}$ 时，认为对比的两个表面粗糙度数值不具有差异，表面形貌差异不显著。

2.2.1 加工前后表面粗糙度单因素方差分析

根据 2.1 的结果，加工 37.5 s 后的表面形貌特征呈现为完全 PECD 加工表面形貌特征，因此在表 1 条件下，对车削与磨削表面进行 3 次时长 37.5 s 的 PECD 加工，表 4 是加工前后表面粗糙度各项指

标值。表 4 中, A₁、A₂、A₃ 为车削加工表面, B₁、B₂、B₃ 为磨削加工表面; a₁、a₂、a₃ 分别为车削表面经 37.5 s 脉冲电化学加工后表面, b₁、b₂、b₃ 分别为磨削表面经 37.5 s 脉冲电化学加工后表面。对表 4 中第 1 组所示的原始粗糙度指标逐项进行单因素方差分析, 结果示于表 5。Ra、R_z、R_{sm}、R_c 及 R_q 值的分析结果中 F 值均大于 F_{0.01(1,4)}=21.198, 说明车削和磨削两种表面的多项粗糙度指标存在明显差异, 可以判定表面质量具有显著差异。对表 4 中

第 2 组所示的加工后粗糙度指标数值逐项进行单因素方差分析, 结果示于表 6。Ra、R_z、R_{sm}、R_c 及 R_q 的分析结果中 F 值均得到不同程度的降低, 其数值均小于 F_{0.05(1,4)}=7.708, 说明两种表面经过 PECF 加工后, 表面粗糙度指标无明显差异, 加工后的表面形貌参数表现出一致性。对比第 1 组与第 2 组的分析结果可知, 对于粗糙度指标存在显著差异性的初始表面, 通过 PECF 加工可以短时间内消除其表面粗糙度指标差异, 使加工后的表面形貌趋于一致。

表 4 工件表面各项粗糙度指标

Table 4 Roughness indexes of workpiece surface

No. of group	Status of surface	No. of workpiece	Ra / μm	R _z / μm	R _{sm} / μm	R _c / μm	R _q / μm
1	Turning surface	A ₁	2.508	11.580	165.300	9.208	2.969
		A ₂	2.545	11.327	140.300	8.668	2.980
		A ₃	2.564	11.108	145.900	8.763	2.982
	Grinding surface	B ₁	0.658	6.023	31.500	1.848	0.878
		B ₂	0.648	5.754	33.600	1.689	0.857
		B ₃	0.713	5.859	33.700	1.827	0.931
2	Turning surface after PECF	a ₁	0.102	0.870	52.050	0.265	0.135
		a ₂	0.100	0.708	50.450	0.223	0.126
		a ₃	0.102	0.713	49.650	0.217	0.128
	Grinding surface after PECF	b ₁	0.105	0.797	53.750	0.280	0.102
		b ₂	0.098	0.813	44.250	0.243	0.097
		b ₃	0.116	1.005	58.750	0.331	0.109

表 5 第 1 组各项指标单因素方差分析

Table 5 One-way ANOVA of group 1

Factors	DOF	SS	MS	F	P-value	F _a
Ra	1	5.222 934 0	5.222 934 0	5 130.583 497 1**	0.000 000 2	
Error	4	0.004 072 0	0.001 018 0			
Total	5	5.227 006 0				
R _z	1	44.711 940 2	44.711 940 2	1 205.617 707 3**	0.000 004 1	
Error	4	0.148 345 3	0.037 086 3			
Total	5	44.860 285 5				
R _{sm}	1	20 732.881 666 7	20 732.881 666 7	238.770 974 5 **	0.000 102 4	
Error	4	347.326 666 7	86.831 666 7			
Total	5	21 080.208 333 3				
R _c	1	75.437 604 2	75.437 604 2	1 665.853 140 1**	0.000 002 2	
Error	4	0.181 138 7	0.045 284 7			
Total	5	75.618 742 8				
R _q	1	6.541 704 2	6.541 704 2	8 433.653 846 2**	0.000 000 1	
Error	4	0.003 102 7	0.000 775 7			
Total	5	6.544 806 8				

$$F_{0.01(1,4)}=21.198$$

$$F_{0.05(1,4)}=7.708$$

表6 第2组各项指标单因素方差分析

Table 6 One-way ANOVA of group 2

Factors	DOF	SS	MS	F	P-value	F_a
R_a	1	0.000 037 5	0.000 037 5	0.896 414 3	0.397 356 5	
Error	4	0.000 167 3	0.000 041 8			
Total	5	0.000 204 8				
R_z	1	0.017 496 0	0.017 496 0	1.599 000 8	0.274 704 4	
Error	4	0.043 767 3	0.010 941 8			
Total	5	0.061 263 3				
R_{sm}	1	3.526 666 7	3.526 666 7	0.126 532 3	0.740 021 4	$F_{0.01(1,4)}=21.19$
Error	4	111.486 666 7	27.871 666 7			$F_{0.05(1,4)}=7.708$
Total	5	115.013 333 3				
R_c	1	0.003 700 2	0.003 700 2	2.807 055 3	0.169 160 2	
Error	4	0.005 272 7	0.001 318 2			
Total	5	0.008 972 8				
R_q	1	0.000 054 0	0.000 054 0	0.549 152 5	0.499 809 0	
Error	4	0.000 393 3	0.000 098 3			
Total	5	0.000 447 3				

2.2.2 加工过程中表面粗糙度单因素方差分析

对 PECF 加工过程中相邻两个测量时间的表面形貌特性进行单因素方差分析, 从 F 值的变化情况

可以判断表面形貌特征在加工过程中的转变情况。

单因素方差分析分组情况见表 7。

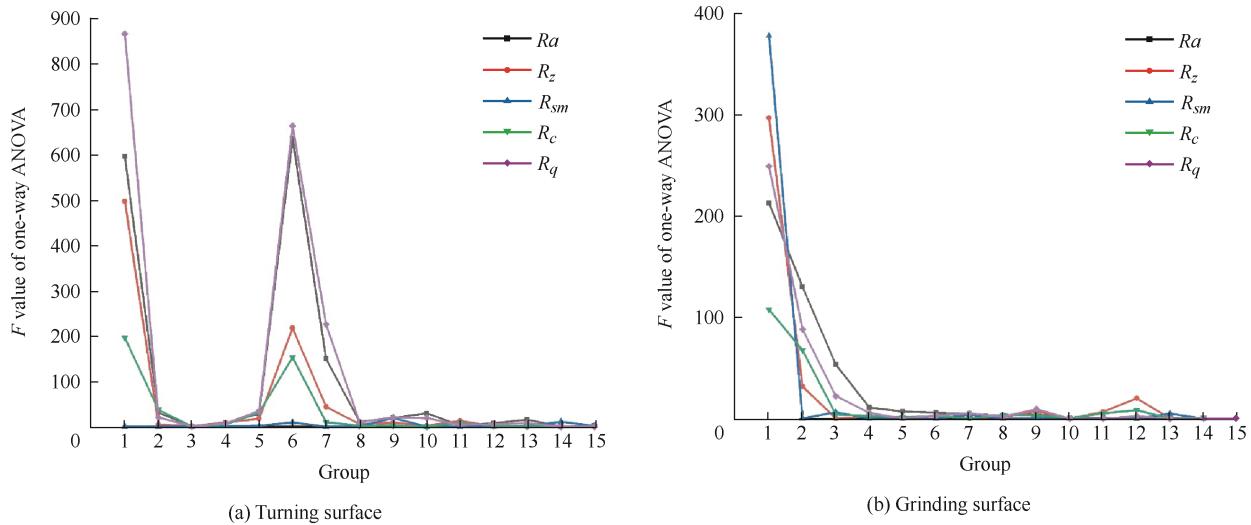
表7 单因素方差分析分组
Table 7 Grouping of one-way ANOVA

Surface	No. of group														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Turning surface	0 s And	2.5 s And	5 s And	7.5 s And	10 s And	12.5 s And	15 s And	17.5 s And	20 s And	22.5 s And	25 s And	27.5 s And	30 s And	32.5 s And	35 s And
Grinding surface	2.5 s	5 s	7.5 s	10 s	12.5 s	15 s	17.5 s	20 s	22.5 s	25 s	27.5 s	30 s	32.5 s	35 s	37.5 s

车削表面 PECF 加工过程中 F 值的变化如图 6a 所示。根据 F 值的变化趋势可以发现, 表面轮廓高度特征参数 R_a 、 R_z 、 R_c 和 R_q 变化趋势表现出一定的规律性。在整体加工过程中, 轮廓表面波峰高度 R_q 的差异性最明显。表面轮廓宽度特征值 R_{sm} 整体变化较为平坦。在第 1 组与第 6 组的时间附近, F 值出现突变, 说明 0 s 到 2.5 s、12.5 s 到 15 s 这两个时间段表面特性发生了显著变化。结合表面形貌图分析, 在 2.5 s 到 12.5 s 之间, 轮廓局部微尖峰和微凹谷被去除, 形貌演化为整体上起伏明显但微观光滑的形貌特征, 且这一形貌特征在 2.5 s 到 12.5 s 之间相对稳定; 15 s 加工以后的表面特性不再显著变化, 转变为完全的 PECF 加工表面形貌特征。在加工过程中车削表面特征变化主要体现在轮廓高度特征的变化。

磨削表面加工过程中 F 值的变化如图 6b 所示。

根据 F 值的变化趋势可以发现, 表面轮廓高度与宽度特征参数变化趋势的规律具有一致性。在第 1 组到第 3 组时间范围内, F 值变化显著, 第 1 组的时间范围内, 轮廓表面宽度特征参数 R_{sm} 变化最明显。而在第 2 组和第 3 组的时间范围内, 轮廓表面高度特征参数的变化差异性较为明显。结合表面形貌图分析可知, 在 0 s 到 7.5 s 之间, 短时间内表面轮廓特性发生了根本性变化。在 0 s 到 2.5 s 之间, 磨削表面特征变化主要体现在轮廓高度特征的变化, 轮廓波峰的高度逐渐下降, 波谷深度逐渐变小, 而轮廓形貌依然维持以低频波为主的形貌特征。2.5 s 到 7.5 s 之间, 磨削表面轮廓在维持低频波形特征的同时, 对表面轮廓波峰和波谷进行修整。7.5 s 加工以后, F 值未呈现显著变化, 可以判定 7.5 s 之前为磨削表面微观形貌转变为脉冲电化学加工表面形貌的过渡阶段。

图 6 表面粗糙度单因素分析 F 值变化Fig. 6 Change of F value of one-way ANOVA of surface roughness

2.3 表面微观形貌分析

图 7 所示为工件表面 SEM 扫描图像。如图 7a 所示, 车削加工表面存在较为明显的微观毛刺与局部缺陷。如图 7b 所示, 磨削加工表面横向加工纹路

更为密集, 波峰与波谷起伏明显。如图 7c 和图 7d 所示, 经过 PECAF 光整加工后, 车削和磨削表面均没有明显毛刺, 横向密集的切削纹路或磨削纹路被去除, 表现为横向稀疏的流痕纹理。

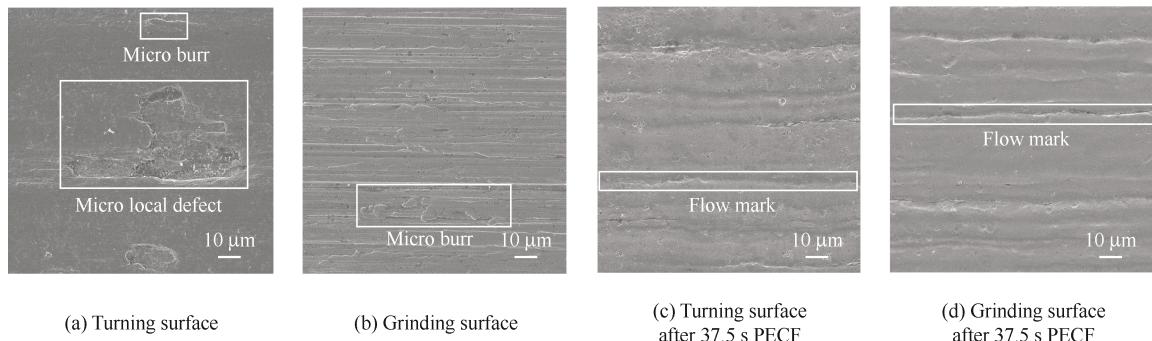


图 7 工件表面 SEM 扫描图像

Fig. 7 SEM image of workpiece surface

图 8 所示为工件表面 AFM 扫描图像。如图 8a 和图 8b 所示, 车削表面波谷与波峰宽度较宽, 磨削表面波谷与波峰宽度较窄, 波峰与波谷离散分布, 二者宽

度和深度呈现无规律变化, 车削与磨削表面差异明显。经过 PECAF 光整加工后, 二者微观形貌趋于相同, 表面平整, 无明显波峰与波谷, 如图 8c 和 8d 所示。

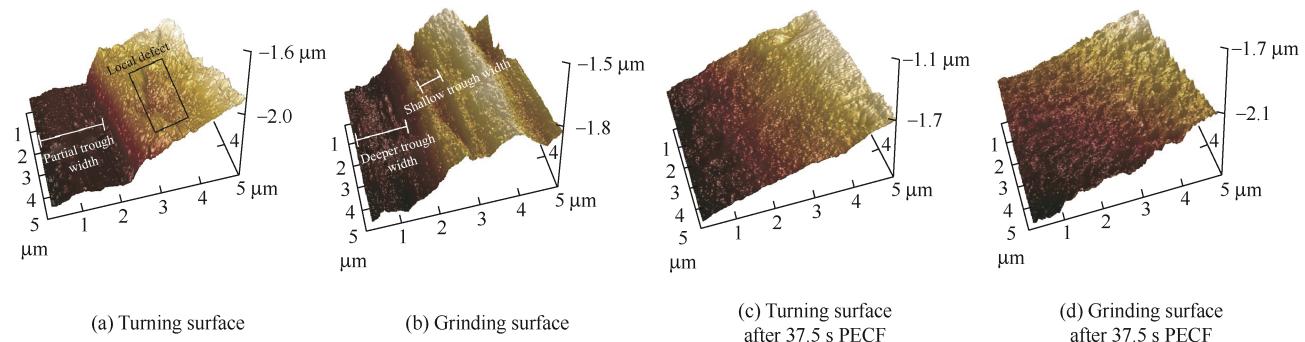


图 8 AFM 扫描图像

Fig. 8 AFM image of workpiece surface

2.4 综合分析

表8显示了PECF加工、车削(粗、精)、磨削(粗、精)的满足经济性加工的工艺能力范围^[26]。PECF加工的表面粗糙度Ra值能在一道工序内从大于2.6 μm降低到0.1 μm左右,跨越6个表面粗糙度等级;表面粗糙度Rz值能在一道工序内从大于10 μm降低到1 μm左右,跨越4个等级。结合表面SEM图像、AFM图像以及表面形貌参数统计分析

可知,车削+PECF加工能够获得和车削+磨削+PECF加工类似的表面形貌效果。车削表面直接进行PECF加工可以大幅降低表面粗糙度Ra与Rz值,在一道工序内通过短时间加工,所获得的表面粗糙度范围可跨域磨削加工,有利于缩短加工周期、提高加工效率,对于较为粗糙表面的整平,以及一些难以采用磨削加工的薄壁件加工等,车削+PECF加工工艺具有良好的实际应用价值。

表8 PE CF光整加工工艺能力分析

Table 8 Analysis of PE CF's process capability

Processing method		Ra / μm							
		6.30	3.20	1.60	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05
Turning	Rough Turning	—							
	Semi-finish Turning	—	—	—					
	Fine Turning			—	—				
Grinding	Rough Grinding	—	—	—					
	Semi-finish Grinding			—	—				
	Fine Grinding					—	—		
PECF	Commonly		—	—	—	—	—	—	
Processing method		Rz / μm							
		16	6	2.5	1.0	0.4			
Turning		—	—	—					
Grinding			—	—	—				
PECF		—	—	—	—	—	—	—	

研究PECF加工车削和磨削表面的形貌变化过程表明,二者在加工过程中,表面形貌特征变化的规律有所差别,车削表面存在由原始表面形貌向PECF加工表面形貌转变的一段中间过程,这为形成一些具有特殊要求的功能性表面形貌可能提供了一种新方法。磨削表面形貌则在短时间内迅速转变为PECF加工表面形貌。

3 结论

(1) PECF加工车削和磨削表面的形貌特征变化规律有所差别。车削表面存在由原始表面形貌向PECF加工表面形貌转变的一段中间过程,这一过程中表面形貌上的微小毛刺被整平,而轮廓宏观起伏特性保留车削轮廓的特点,可能这为一些具有特殊要求的功能性表面形貌的形成提供了一种新的方法。

(2) 原始表面粗糙度差异较大的车削和磨削表面经过PECF加工后表面微观形貌趋于一致,表面

完整性良好,表面特征指标不具有显著差异性。对原始表面较为粗糙的零件,或者难以采用磨削加工的薄壁件,PECF加工是一种具有实际应用价值的加工方式。

参 考 文 献

- [1] GAO Wei, YANG Shenqiang, TIAN Jianyan, et al. Research on the optimization model of the abrasive blocks using weighted case-based reasoning[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 1-12.
- [2] 刘文浩,陈燕,张东阳.基于低频交变磁场的陶瓷管内表面磁力研磨加工[J].中国表面工程,2021,34(5):146-154.
LIU Wenhao, CHEN Yan, ZHANG Dongyang. Magnetic abrasive finishing of ceramic tube inner surface based on low frequency alternating field[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(5): 146-154. (in Chinese)
- [3] GUO Jiang, FENG Wenhe, JONG Henry, et al. Finishing of rectangular microfeatures by localized vibration-

- assisted magnetic abrasive polishing method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49(C): 204-213.
- [4] ZELINKO A, WELZEL F, BIERMANN D, et al. Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools[J]. Production Engineering, 2022, 16(4): 523-533.
- [5] 陈博文, 孙树峰, 王茜, 等. 材料表面激光抛光技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 74-89.
CHEN Bowen, SUN Shufeng, WANG Xi, et al. Research progress of laser polishing technology for material surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 74-89. (in Chinese)
- [6] 廖明, 韩冰, 陈燕, 等. 钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 123-131.
LIAO Ming, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Inner surface of titanium alloy tube by electrochemical magnetic abrasive compound finishing[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 123-131. (in Chinese)
- [7] 刘文浩, 陈燕, 王杰, 等. SLM 成型零件型腔内表面电解辅助磁粒研磨加工研究[J]. 中国表面工程, 2021, 34(3): 100-109.
LIU Wenhao, CHEN Yan, WANG Jie, et al. Study on electrolysis assisted magnetic abrasive finishing of SLM parts cavity surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(3): 100-109. (in Chinese)
- [8] 周泳全, 张卫, 肖海兵, 等. 连续激光高速抛光冷作模具钢的表面粗糙度及性能[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 347-353.
ZHOU Yongquan, ZHANG Wei, XIAO Haibing, et al. Roughness and property of CW laser high speed polishing of die steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 347-353. (in Chinese)
- [9] 姚燕生, 周瑞根, 张成林, 等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 244-256.
YAO Yansheng, ZHOU Ruigen, ZHANG Chenglin, et al. Surface polishing technology for additive manufacturing complex metal components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 244-256. (in Chinese)
- [10] 王振东, 庞桂兵, 辛开开, 等. 两步法电化学加工薄壁钼长管的数学建模与实验研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(4): 425-431.
WANG Zhendong, PANG Guibing, XIN Kaikai, et al. Mathematical modeling and experimental study on two-step electrochemical machining of thin-wall long pipes of molybdenum[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(4): 425-431. (in Chinese)
- [11] CHEN Y, ZHOU X, CHEN P, et al. Electrochemical machining gap prediction with multi-physics coupling model based on two-phase turbulence flow[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 1057-1063.
- [12] LIU Guixian, ZHANG Yongjun, NATSU Wataru. Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 142: 66-75.
- [13] 罗红平, 张清荣, 刘桂贤, 等. 电解加工电源研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 201-213.
LUO Hongping, ZHANG Qingrong, LIU Guixian, et al. The state of the art and development of power supply technology in ECM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13): 201-213. (in Chinese)
- [14] CHEN Yuanlong, JIANG Lijun, FANG Ming, et al. Multi-time scale simulation of pulse electrochemical machining process with multi-physical model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7-8): 2203-2210.
- [15] WANG Jiangtao, XU Zhengyang, GENG Tianyu, et al. Dependency of the pulsed electrochemical machining characteristics of Inconel 718 in NaNO₃ solution on the pulse current[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(10): 2485-2502.
- [16] WANG H, ZHOU J J, XU W J. The research of carbon steel surface finished by pulse electrochemical finishing technology[J]. Key Engineering Materials. 2005, 524(291-292): 573-578.
- [17] ZHOU Jinjin, PANG Guibing, WANG Hui, et al. Research on pulse electrochemical finishing using a moving cathode[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2005, 7(2-4): 352-365.
- [18] 马宁, 刘家宁, 陈阳, 等. 电化学抛光铜的实验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 83-89.
MA Ning, LIU Jianing, CHEN Yang, et al. Experimental study on electrochemical polishing of copper[J]. Surface Technology, 2018, 47(7): 83-89. (in Chinese)
- [19] 王辉, 翟小兵, 李洪友, 等. 成型轧辊表面的脉冲电化学光整加工技术研究[J]. 制造技术与机床, 2009(11): 95-97.
WANG Hui, ZHAI Xiaobing, LI Hongyou, et al. The finishing of shaping roller by pulse electrochemical technology[J]. Manufacturing Technology & Machine

- Tool, 2009(11): 95-97. (in Chinese)
- [20] 阿达依·谢尔亚孜旦, 周进锦, 庞桂兵, 等. 螺旋锥齿轮脉冲电化学光整加工工艺实验研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(4): 476-481.
- ADAYI-Xieeryazidan, ZHOU Jinjin, PANG Guibing, et al. Pulse electrochemical finishing process for spiral bevel gears[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(4): 476-481. (in Chinese)
- [21] XU Zhengyang, LIU Jia, ZHU Dong, et al. Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 1263-1272.
- [22] TAHIRI Mutlu Hakan, FIKRI Gökpınar, ESRA Gökpınar, et al. A new computational approach test for one-way ANOVA under heteroscedasticity[J]. Communications in Statistics Theory and Methods, 2017, 46(16): 8236-8256.
- [23] SAHBAZ Cafer, BAHSI Emrullah, INCE Bayram, et al. Effect of the different finishing and polishing procedures on the surface roughness of three different posterior composite resins[J]. Scanning, 2016, 38(5): 448-454.
- [24] 李建平, 边永亮, 霍鹏, 等. 喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 79-88.
- LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, et al. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 79-88. (in Chinese)
- [25] 张存鹰, 赵波. 超声振动辅助加工表面微结构及其特性研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 259-274.
- ZHANG Cunying, ZHAO Bo. Research progress of properties of surface micro-structure in ultrasonic vibration assisted machining[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 259-274. (in Chinese)
- [26] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- CHENG Daxian. Handbook of mechanical design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

作者简介: 庞桂兵, 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种精密加工、精密仪器设计与制造。

E-mail: pangguibingsx@163.com

樊双蛟 (通信作者), 女, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为工业工程、特种精密加工。

E-mail: fan_sj@dlpu.edu.cn