

电化学砂带复合加工回转沟槽表面 的形貌与精度特性

庞桂兵¹, 辛开开^{1,2}, 徐文鹏¹, 蔡晓¹, 高腾¹, 卜繁岭¹

(1.大连工业大学, 辽宁 大连 116034;

2.大连汇智工大特种精密机械有限公司, 辽宁 大连 116034)

摘要: **目的** 通过电化学砂带复合加工实现回转表面上沟槽结构的光整。**方法** 针对沟槽结构的特殊性, 提出阴极悬浮定位方式控制加工间隙。通过对比有无电化学作用条件下砂带抛磨加工获得的表面形貌差异, 以及分析加工过程中表面形貌的变化规律, 研究电化学作用和机械作用对表面形貌与精度特性的影响机理。进行工艺参数对表面粗糙度和圆度影响的实验, 获得单因素条件下各工艺参数的优化取值范围。进行正交实验和极差分析, 获得各工艺参数对表面粗糙度和圆度影响重要性的排序。综合单因素和正交实验结果, 确定面向表面粗糙度和圆度的工艺参数优化取值范围。**结果** 砂带无轴向运动时, 该工艺能实现小极间间隙条件下的稳定加工, 同时获得良好的表面质量和加工精度。机械作用参数对表面粗糙度的影响程度大于电化学作用参数, 砂带压力为主要因素; 电化学作用参数对圆度的影响程度大于机械作用参数, 加工电流为主要因素。**结论** 对回转沟槽表面等磨具难以实现轴向运动的部位进行表面光整加工, 电化学砂带复合加工是一种有效方法。

关键词: 电化学加工; 电化学砂带复合加工; 光整加工; 回转表面; 沟槽

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0073-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.010

Surface Topography and Accuracy Characteristics of Electrochemical Abrasive Belt Finishing of Rotational Groove

PANG Gui-bing¹, XIN Kai-kai^{1,2}, XU Wen-peng¹, CAI Xiao¹, GAO Teng¹, BU Fan-ling¹

(1.Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2.Dalian Huizhongda Special Precision Machinery Company, Dalian 116034, China)

ABSTRACT: The rotational groove structure is a class of important structure on the mechanical parts. However, it is difficult to finish the surface because of the limitation of the structure. This work aims to realize the finishing of rotational groove structure by electrochemical abrasive belt finishing. Considering the characteristic of the groove structure, the suspension cathode was adopted to control the machining gap. By comparing the difference of the surface topography obtained by abrasive belt polishing with and without electrochemical action and studying the change rule of surface topography during the machining process, the influence mechanism of electrochemical action and mechanical action on surface topography and accuracy characteristics was

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-03-08

Received: 2018-01-31; Revised: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51675072); 辽宁百千万人才项目 ((2015) 69 号)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51675072), Liaoning Talents Project ((2015) No.69)

作者简介: 庞桂兵 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为特种加工、精密光整加工及其相关的智能制造。

Biography: PANG Gui-bing (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: non-traditional machining, precision machining and finishing, and their related intelligent manufacturing.

studied. The influence of process parameters on the roundness and surface roughness was studied to obtain the optimization range of each process parameter by the single factor experiment. The importance of process parameters' influence on the surface roughness and the roundness was obtained by orthogonal experiment and the extreme difference analysis. The optimum range of process parameters for surface roughness and roundness was determined by the results of single factor and orthogonal experiments. When the abrasive belt was free from axial movement, this method could machine with small gap steadily and achieve the excellent surface quality and precision. The influence of mechanical parameters on the surface roughness is more important than the electrochemical parameters, and the abrasive belt pressure is the most important influencing factor. The influence of electrochemical parameters on the roundness was more important than the mechanical parameters and the current is the most important influencing factor. Electrochemical abrasive belt finishing is an effective method to finish the surface of the rotational groove where is difficult to conduct axial movement of abrasive tool.

KEY WORDS: electrochemical machining; electrochemical abrasive belt finishing; finishing; rotational surface; groove

回转沟槽结构是机械零件的一类重要结构,广泛存在于液压部件上的密封部位、滚子轴承滚道部位^[1]等,沟槽表面粗糙度和加工精度直接影响零件的密封性、疲劳特性等使用性能及寿命,提高这些部位的表面质量和加工精度十分必要^[2]。目前这类表面的精加工工艺主要是超精加工等机械加工^[3],为了提高加工效率和质量,要求工具有轴向往复运动,而沟槽结构制约了工具在沟槽内部的往复运动,解决此问题的方法是在沟槽内部开设越程槽,但是对于一些小型沟槽结构仍然具有困难。

电化学机械复合加工在同一过程中复合了电化作用作用和机械作用,具有高表面质量、工具无损耗、加工不受工件材料刚度和硬度制约等优势,可以高效率抛光零件表面^[4-5]。新近的研究表明,电化学机械复合加工不仅可改善零件粗糙度,还可在一定程度上提高零件精密度,故越来越受到研究者的重视^[6]。该技术在轴承滚道^[7]、轧辊工作面^[8]等外圆回转面,精密钢管内孔等内圆回转面^[9],以及齿轮齿面^[10]、锥齿面^[11-12]、模具型腔表面^[13]等复杂曲面上已获得研究应用,并取得了良好的加工效果。针对回转表面沟槽加工难题,本文提出采用砂带作为机械刮膜工具,采用悬浮阴极形成加工间隙的电化学砂带复合加工方法,研究在砂带无轴向运动条件下该工艺的表面粗糙度和圆度特性。通过单因素实验,获得工艺参数对表面粗糙度和圆度的影响规律及各工艺参数的优化取值范围。由于获得最佳表面粗糙度和圆度的工艺参数取值范围可能不完全重合,通过正交实验和极差分析,研究各工艺参数对表面粗糙度和圆度影响的重要性排序。综合单因素和正交实验结果,确定面向表面粗糙度和圆度的工艺参数优化取值范围,为回转件沟槽表面光整加工提供一种新方法。

1 加工原理

图 1 为回转沟槽表面电化学机械复合加工的原

理。考虑到沟槽结构的特殊性,阴极采用悬浮支撑方式,通过阴阳极间电解液的液膜压力支撑实现与自身重力的平衡,形成极间间隙。这种定位方式应用于沟槽结构的优点是间隙大小可通过极间电解液压力调整,避免了沟槽结构导致的间隙观测和调整的不便。另外,悬浮阴极可实现稳定的小间隙加工,也有利于零件圆度误差的改善。砂带的施压方式与常规的电化学机械复合加工中砂带的施压方式没有本质区别,但是沿沟槽表面轴向没有往复运动。

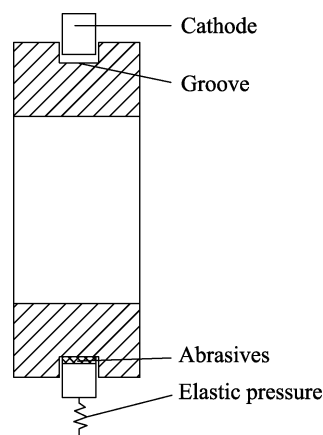


图 1 加工原理
Fig.1 Machining principle

2 实验条件及装置

实验条件如表 1 所示。实验装置见图 2。阴极设置于工件上方,阴极与导轨相连,导轨在滑块中只能上下移动,使得阴极只能沿垂直于工件表面的方向移动,保证阴极在电解液压力作用下在工件表面悬浮,磨具依靠气缸施压于工件表面,通过控制气压来控制磨具对工件表面的压力。电解液由软管导入电解液进口,软管选用薄壁软橡胶管,尽可能降低软管对间隙产生的干扰。电解液管路中设置流量计、压力表分别对电解液流量和压力在线检测,导轨上端设置千分表

表 1 实验条件
Tab.1 Experimental conditions

Parameters		Range of parameter values
Cathode	Size/mm	$\phi 95 \times 16 \times 1/3$ (Using 1/3 of the whole round surface)
	Outlet size/mm	$\phi 12$
	Material	2Cr13
Workpiece	Size/mm	$\phi 95 \times 17.5$
	Material	GCr15
	Original surface roughness/ μm	$R_a=1.406, R_z=7.6272, R_v=8.9637, S_m=52$
Power supply	Output capacity/($\text{kV} \cdot \text{A}$)	20
	Input voltage/V	380
	Output voltage/V	0~30
	Maximum output current/A	100
Electrolyte	Flowrate/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	200~600
	Pressure/MPa	0.030~0.070
	Main ingredients	NaNO_3 +Others
	Mass fraction/%	10~25
Range of the main experimental parameters	Machining current/A	10~50
	Machining gap/mm	0.05~0.20
	Revolving speed of workpiece/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	300~800
	Abrasives pressure/MPa	0.05~0.15
	Machining time/s	10~60
	Abrasives and granularity/ μm	PZ533 Belt, 30
Measuring device	Roughness meter	YS2205B
	Roundness meter	YS2901

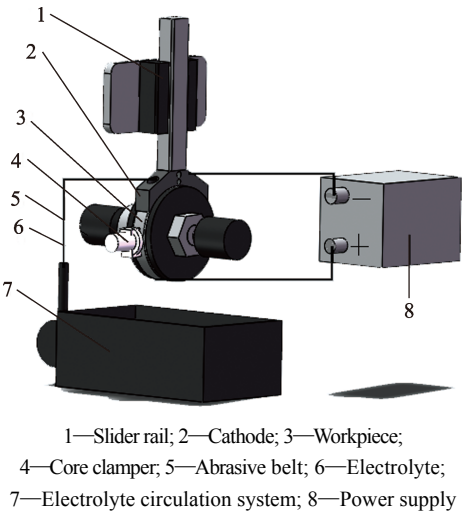


图 2 回转件悬浮阴极电化学砂带复合光整加工装置
Fig.2 Equipment of electrochemical abrasive belt finishing for rotating parts with suspended cathode

实时检测间隙。

3 结果及讨论

3.1 电化学作用对整平效果的影响

对实验试件进行砂带无轴向运动条件下有无电化学作用的抛磨对比实验。试件转速为 600 r/min、砂带压力为 0.1 MPa 时，对试件进行机械抛磨加工。在相同机械作用条件下，引入电化学作用，进行电流为 20 A 的电化学砂带复合加工，获得的工件微观轮廓曲线见图 3，轮廓特征参数见表 2。

由图 3 及表 2 可知，在砂带无轴向运动条件下，其他条件相同时，有无电化学作用时的试件表面形貌高度特征参数均得到降低，但有电化学作用时的轮廓高度特征参数的降低幅度明显大于无电化学作用时的降低幅度；而宽度参数在无电化学作用时得到降低，有电化学作用时却升高。有无电化学作用的表面

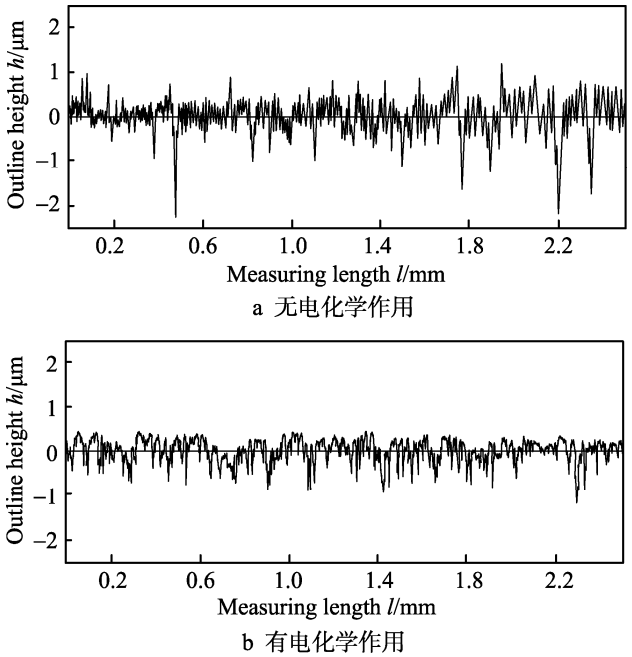


图 3 有无电化学作用时表面轮廓对比
Fig.3 Comparison of surface profile with and without electrochemical action: a) without electrochemical effect, b) with electrochemical effect

表 2 有无电化学作用时表面轮廓参数对比
Tab.2 Comparison of surface profile parameters with and without electrochemical action

Roughness parameters	Without electrochemical effect				With electrochemical effect			
	R_a	R_y	R_z	S_m	R_a	R_y	R_z	S_m
Before machining/ μm	0.41	3.74	3.14	31.4	0.39	4.25	3.36	19.5
After machining/ μm	0.30	3.98	2.84	28.5	0.22	2.29	1.80	24.4
Variation/ μm	-0.11	0.24	-0.30	-2.9	-0.17	-1.96	-1.56	4.9
Amplitude of variation/%	26	-6	9	9	43	46	46	-25

形貌差异显著,无电化学作用时,轮廓曲线峰谷起伏波动较大;而有电化学作用时,轮廓峰谷起伏较平缓。

在砂带有轴向运动的条件下,其往复运动使砂带表面的切削微粒处于试件表面的不同位置,不断均化试件表面轮廓的峰谷差,能获得较低的表面粗糙度值。而当砂带无轴向运动时,砂带表面切削微粒始终位于试件表面的相同位置,试件表面轮廓主要由砂带磨粒在试件表面的复映情况所决定。这是砂带无轴向运动条件下难以获得高质量表面的原因。

一般认为,电化学机械复合加工有利于阳极表面整平的原因主要是选择性阳极溶解,即阳极表面电化学作用后产生了钝化膜,高点处的钝化膜在受到机械作用时较低点处的膜更容易去除,故在下一次电化学作用时,高点处的金属去除速度更快,从而有利于阳极整平。当砂带有往复运动时,砂带磨粒与试件表面微观轮廓不同部位的高点优先接触,试件表面微观高点处的氧化膜优先去除,因而选择性阳极溶解起主导作用。

但是,砂带无轴向运动条件下,电化学作用的引入也能大幅度改善加工效果。这是因为除了选择性阳极溶解,电化学机械复合加工还存在其他两种整平机理——尖峰电力线集中效应和轮廓侧向溶解效应。机械作用过程中,砂带磨粒对试件表面的犁沟、刻划、碾压形成了尖峰状表面,有电化学作用时,此种尖峰状表面更容易突显电力线尖峰集中和轮廓侧向溶解导致的尖峰优先溶解效应。电力线尖峰集中效应已为广大电化学加工研究学者熟知,而侧向溶解则是电化学加工阳极整平的一种新解释。图 4 为具有不同轮廓波长(用轮廓夹角表示)、相同轮廓高度 L_0 的两个轮廓波,可见轮廓表面法向溶解深度相同时,图 4a 所示轮廓在高度方向的溶解量要大于图 4b,即在图 4 中,当 $\beta > \alpha$ 时,在 $V_{\text{tp}} = V_{\text{fa}}$ 条件下, $Z_{\text{fa}} > Z_{\text{tp}}$ 。因此,如果将长波长的轮廓破坏为短波长的尖峰状轮廓,电化学作用导致的整平效果更显著。关于此理论,作者曾做过详细的理论推导和实验验证^[14]。

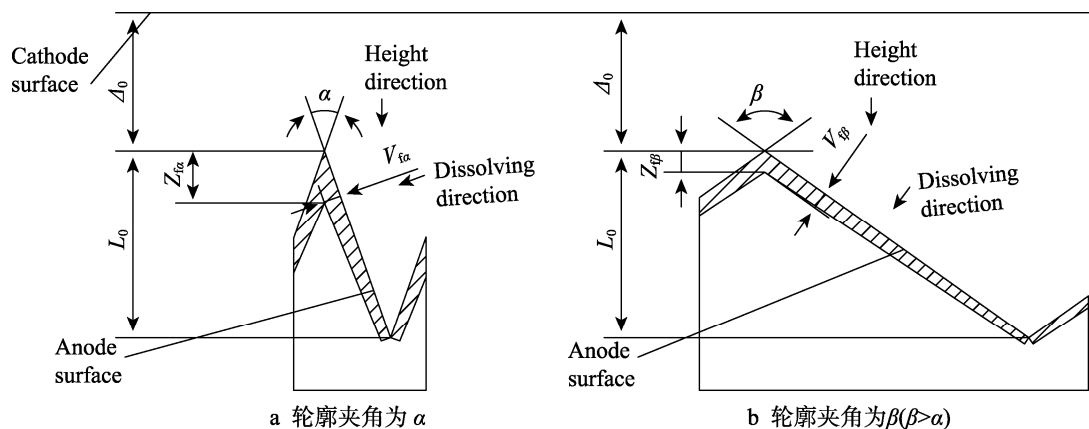


图 4 阳极微观轮廓溶解过程

Fig.4 Dissolution of anodic micro-profile: a) profile angle is α , b) profile angle is β ($\beta > \alpha$)

图 5 为砂带无轴向运动条件下有无电化学作用获得的试件轮廓对比,可见磨粒对微观表面的抛磨作用使得电化学作用后的表面成为尖峰状,从而使阳极表面的微观形貌再次经历电化学作用时的尖峰优先溶解效应更突出,这点不论在砂带有或无轴向运动时都成立。从这个角度解释图 3 所示的表面微观轮廓对比,原因更了然。

3.2 工艺参数对加工效果的影响——单因素实验

3.2.1 实验设计

电化学砂带复合加工影响回转件精度和表面粗糙度的主要因素包括:加工电流、加工间隙、砂带压力、试件转速、加工时间等,设计的单因素实验方案如表 3 所示。

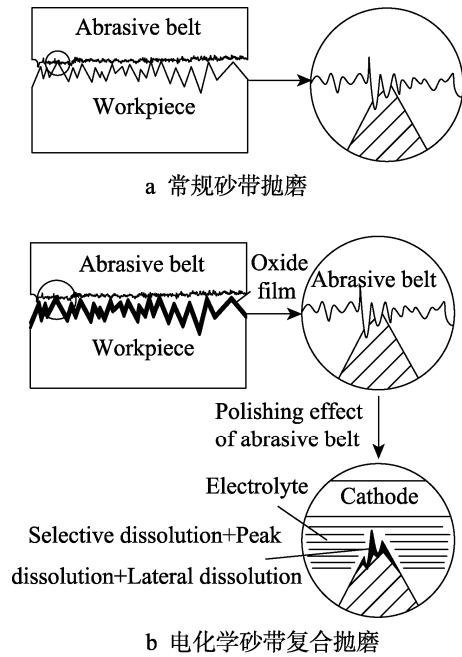


图 5 电化学作用对砂带抛磨微观轮廓的影响
Fig.5 Influence of electrochemical action on abrasive belt polishing micro-profile: a) conventional belt polishing, b) electrochemical abrasive belt polishing

表 3 单因素实验参数取值
Tab.3 Parameter value of single factor experiment

Working current/A	Machining gap/mm	Workpiece revolving speed/(r·min ⁻¹)	Abrasives pressure/MPa	Machining time/s
15、20、25、30	0.15	600	0.10	20
20	0.09、0.12、0.15、0.18	600	0.10	20
20	0.15	400、500、600、700	0.10	20
20	0.15	600	0.08、0.10、0.12、0.14	20
20	0.15	600	0.10	20、30、40、50

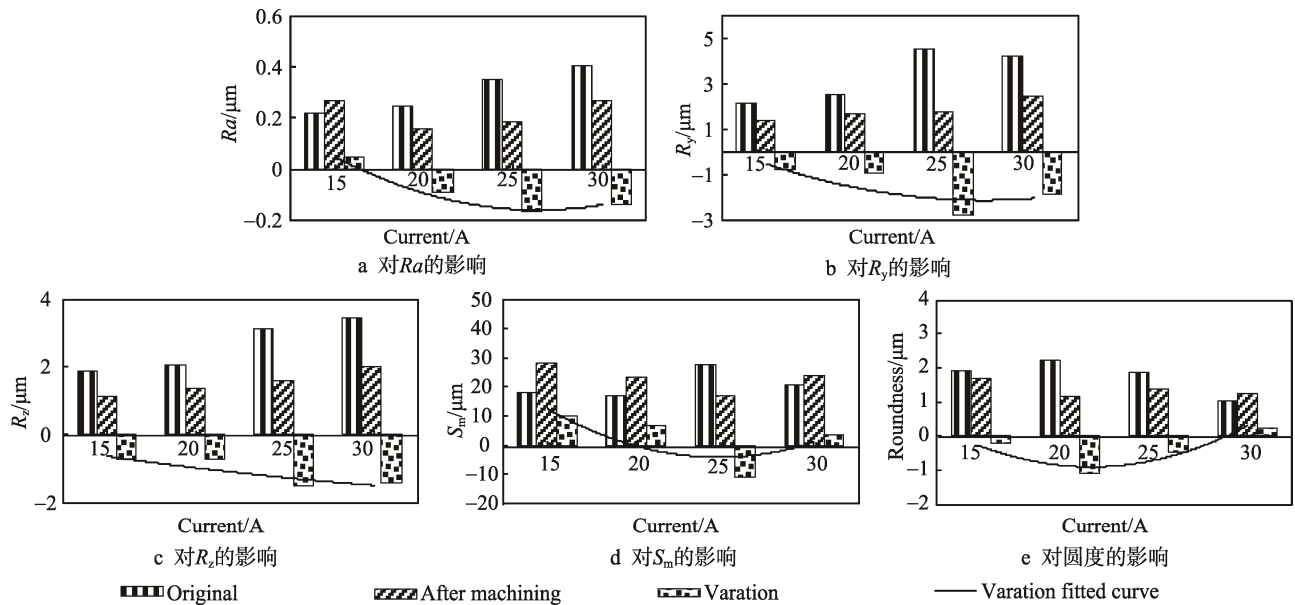


图 6 加工电流对轮廓参数的影响
Fig.6 Influence of machining current on profile parameters: a) influence on R_a , b) influence on R_y , c) influence on R_z , d) influence on S_m , e) influence on roundness

3.2.2 加工电流的影响

如图 6 所示，加工后的表面粗糙度高度参数值总体上都得到降低，电流为 25 A 时，降低幅度最大；圆度值总体上也降低，电流在 20 A 附近时，圆度值的降低幅度最大。

3.2.3 加工间隙的影响

如图 7 所示，加工后表面粗糙度高度参数值总体上得以降低，当加工间隙在 0.09 mm 附近时，表面粗糙度参数的降低幅度最大。圆度值的降低幅度随加工间隙值的减小呈增大趋势，但间隙减小到一定程度后，圆度值不再降低，当间隙在 0.15 mm 附近时，圆度值的降低幅度最大。

3.2.4 试件转速的影响

如图 8 所示，加工后表面粗糙度高度参数值总体上得以降低。试件转速在 700 r/min 附近时，表面粗糙度参数的降低幅度最大。表面圆度值总体上也降低，试件转速在 600 r/min 附近时，圆度值的降低幅度最大。

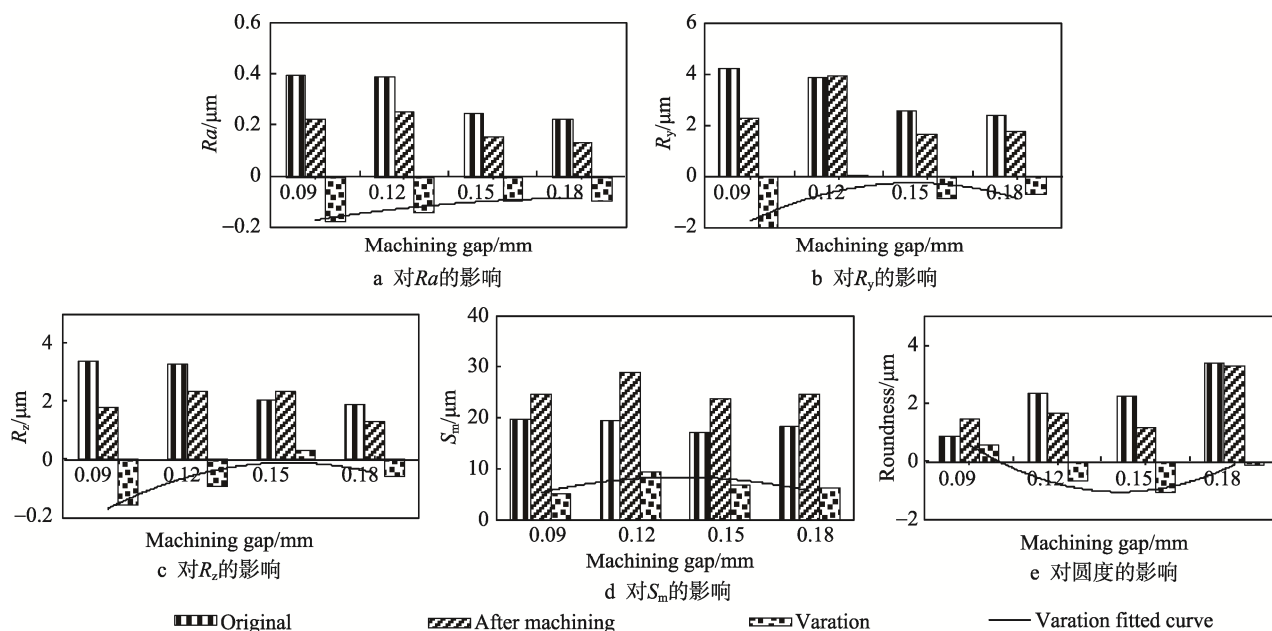


图7 加工间隙对轮廓参数的影响

Fig.7 Influence of machining gap on profile parameters: a) influence on R_a , b) influence on R_y , c) influence on R_z , d) influence on S_m , e) influence on roundness

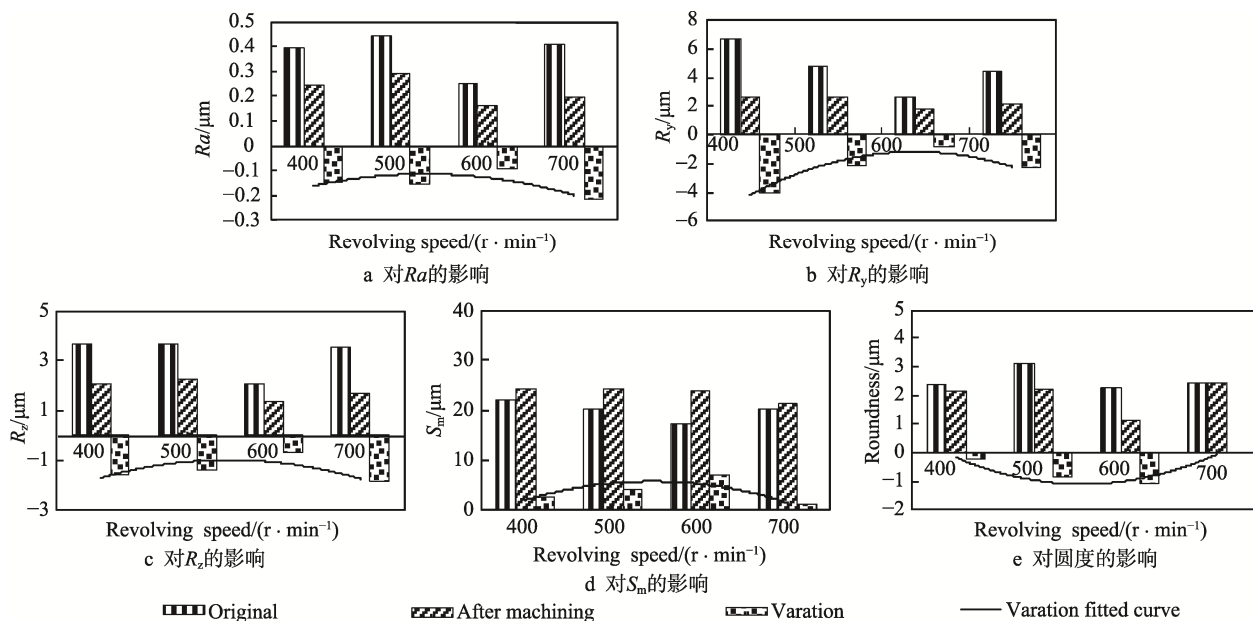


图8 试件转速对轮廓参数的影响

Fig.8 Influence of workpiece revolving speed on profile parameters: a) influence on R_a , b) influence on R_y , c) influence on R_z , d) influence on S_m , e) influence on roundness

3.2.5 砂带压力的影响

如图9所示,加工后表面粗糙度高度参数值总体上降低,砂带压力在0.12 MPa附近时,降低幅度最大。表面圆度值总体上也降低,砂带压力为0.12 MPa时,圆度值的降低幅度最大。

3.2.6 加工时间的影响

如图10所示,加工后的表面粗糙度高度参数值和圆度值总体上降低,超过一定加工时间(本文实验条件下为20 s)后,粗糙度高度参数值和圆度值受加

工时间的影响较小。

根据以上实验结果还可发现,在整个工艺参数取值范围内,表面粗糙度宽度参数均提高,说明经过电化学砂带复合加工后,表面轮廓均呈现平坦化效果。

单因素实验结果表明,获得最佳表面粗糙度和圆度时的工艺参数取值范围不完全重合。考虑到各因素之间可能存在相互影响,为获得工艺参数对表面粗糙度和圆度影响程度的重要性排序,以便进一步优化工艺参数,有必要进行正交试验。

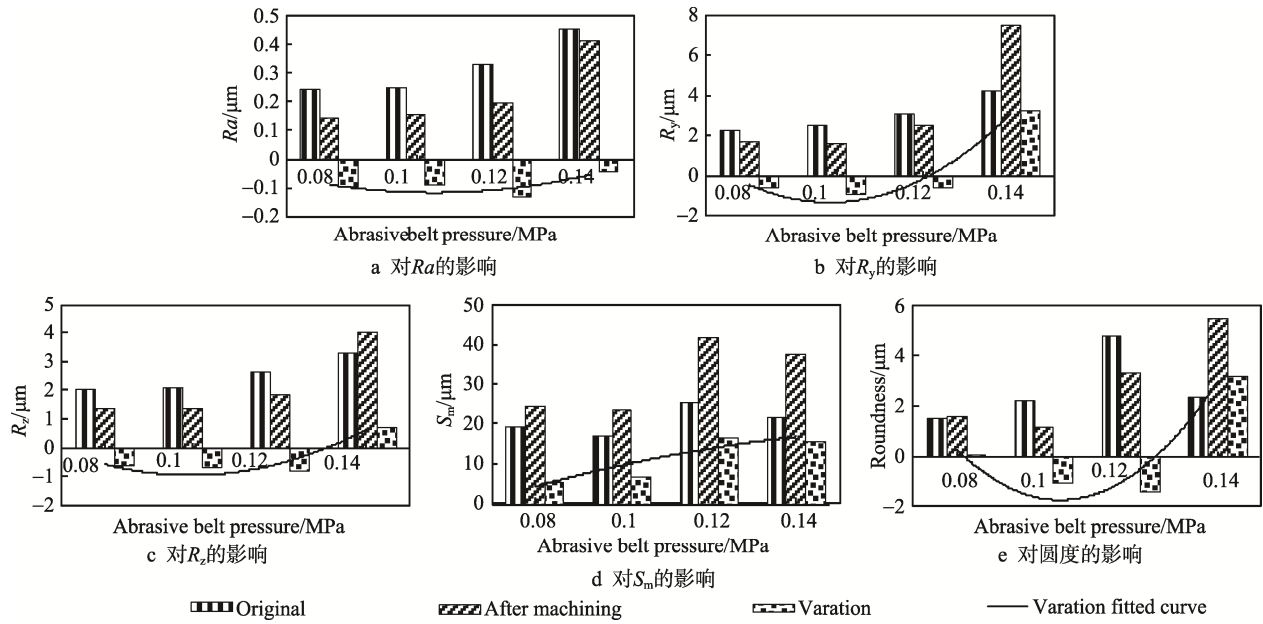


图 9 砂带压力对轮廓参数的影响

Fig.9 Influence of abrasive belt pressure on profile parameters: a) influence on Ra , b) influence on Ry , c) influence on Rz , d) influence on S_m , e) influence on roundness

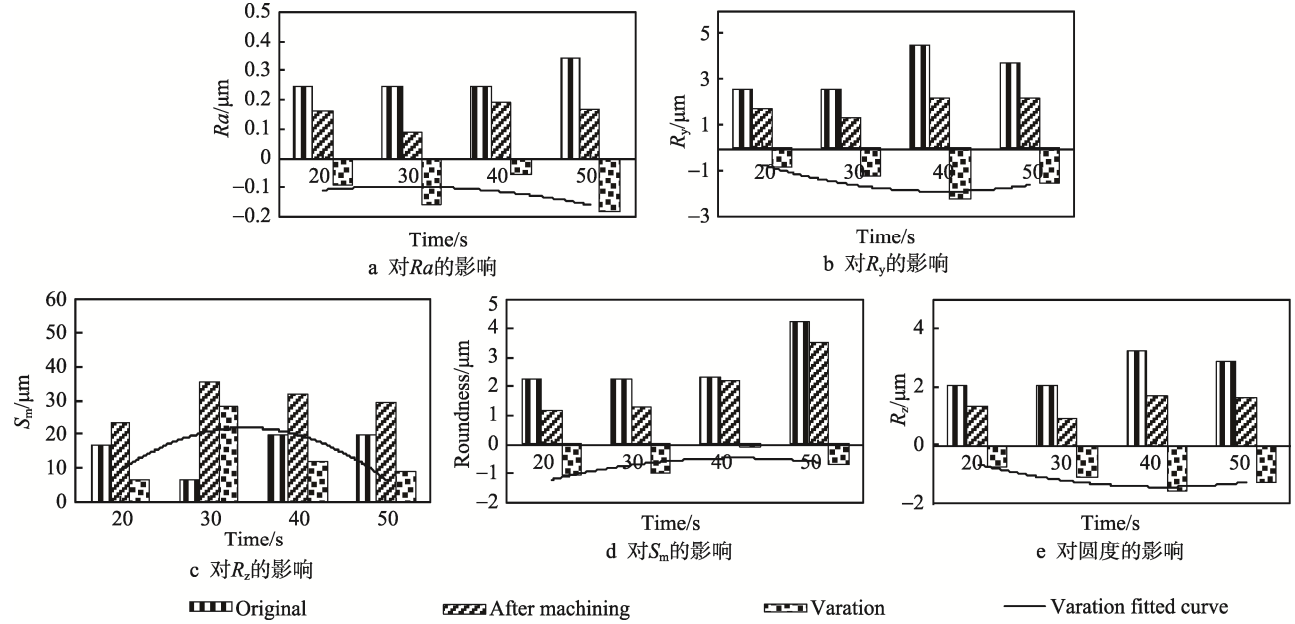


图 10 加工时间对轮廓参数的影响

Fig.10 Influence of machining time on profile parameters: a) influence on Ra , b) influence on Ry , c) influence on Rz , d) influence on S_m , e) influence on roundness

3.3 工艺参数对加工效果的影响——正交实验

3.3.1 实验设计

实验发现，超过一定时间后，加工时间对圆度值

和粗糙度值的影响不再明显，故只对加工电流、加工间隙、砂带压力、试件转速四个参数进行正交实验。采用 $L_9(3^4)$ （四因素三水平）的正交表，各因素水平等距取值，如表 4 所示。

表 4 正交实验因素水平
Tab.4 Factors and levels of orthogonal experiment

Level	Machining current/A	Machining gap/mm	Revolving speed of workpiece/(r·min ⁻¹)	Abrasives pressure/MPa
1	20	0.10	200	0.10
2	30	0.15	400	0.15
3	40	0.20	600	0.20

3.3.2 结果分析

实验结果见表 5。以加工前后 Ra 值的相对变化量作为评价表面粗糙度的指标,对 Ra 值的相对变化量进行极差分析,结果见表 6。各工艺参数对表面粗糙度影响的重要性排序为:砂带压力>试件转速>加工电流>加工间隙。可以看出,机械作用对表面粗糙度的影响程度要大于电化学作用,且砂带压力为主要因素。对加工前后圆度值的相对变化量进行极差分析,结果见表 7。各工艺参数对圆度影响的重要性排序为:加工电流>加工间隙>砂带压力>试件转速。可以看出,电化学作用对圆度的影响程度要大于机械作用,且加工电流为主要因素。

产生这一结果的原因可能是:对粗糙度而言,由

于砂带无轴向运动,砂带压力直接影响磨粒在试件表面的复映效果;对于圆度而言,由于阴极覆盖范围比较大,强化了电化学作用影响电化学和机械作用之间匹配效果的敏感性。

3.4 优化条件下的加工实例

为得到面向表面粗糙度和圆度两个指标的工艺参数综合优化取值范围,根据正交实验结果,按各因素在两个指标中起主要作用的最优取值,来确定工艺参数的最佳组合,即砂带压力和试件转速按照表面粗糙度的优化取值,加工电流和加工间隙按照圆度的优化取值,加工时间取 20 s,得到表 8 所示的工艺条件。

表 5 正交实验数据
Tab.5 Data of orthogonal experiment

Serial number	Working current /A	Machining gap/mm	Revolving speed of workpiece /(r·min ⁻¹)	Abrasives pressure /MPa	$Ra/\mu\text{m}$			$R_y/\mu\text{m}$		
					Original	After machining	Variation	Original	After machining	Variation
1	20	0.20	400	0.15	0.384	0.287	0.097	4.451	2.907	1.544
2	20	0.15	600	0.10	0.248	0.159	0.089	2.571	1.696	0.875
3	20	0.10	200	0.20	0.344	0.215	0.129	3.683	2.149	1.534
4	30	0.20	600	0.20	0.402	0.203	0.199	4.500	2.332	2.168
5	30	0.15	200	0.15	0.420	0.301	0.119	3.733	5.412	-1.670
6	30	0.10	400	0.10	0.228	0.147	0.081	2.427	1.540	0.887
7	40	0.20	200	0.10	0.247	0.145	0.102	2.900	1.633	1.267
8	40	0.15	400	0.20	0.383	0.250	0.133	3.599	3.258	0.341
9	40	0.10	600	0.15	0.216	0.100	0.116	2.974	1.444	1.530

Serial number	$R_z/\mu\text{m}$			$S_m/\mu\text{m}$			Roundness/ μm		
	Original	After machining	Variation	Original	After machining	Variation	Original	After machining	Variation
1	3.260	2.301	0.959	19.5	24.8	-5.3	2.26	2.14	0.12
2	2.052	1.343	0.709	16.9	23.6	-6.7	2.23	1.15	1.08
3	2.917	1.867	1.050	20.0	28.6	-8.6	4.21	3.63	0.58
4	3.393	1.922	1.471	19.5	34.3	-14.8	1.76	1.63	0.13
5	3.179	2.765	0.414	20.2	29.3	-9.1	3.63	3.23	0.40
6	1.930	1.215	0.715	17.3	22.8	-5.5	1.49	0.39	1.10
7	2.138	1.253	0.885	17.2	18.9	-1.7	1.45	3.23	-1.78
8	3.083	2.157	0.926	19.6	28.4	-8.8	3.11	3.35	-0.24
9	1.967	1.086	0.881	16.8	21.8	-5.0	3.33	3.44	-0.11

表 6 表面粗糙度的极差分析
Tab.6 Extreme difference analysis of surface roughness %

Factor	Working current	Machining gap	Revolving speed of workpiece	Abrasives pressure
1	32.3	41.6	34.7	37.7
2	38.0	33.5	31.4	32.6
3	41.5	38.6	46.8	16.7
Range	9.20	8.1	15.4	21.0

表 7 圆度的极差分析
Tab.7 Extreme difference analysis of roundness %

Factor	Working current	Machining gap	Revolving speed of workpiece	Abrasives pressure
1	0.24	17.3	7.9	21.3
2	23.70	13.8	14.3	3.0
3	-26.90	-27.9	15.0	5.0
Range	50.60	45.2	7.1	18.3

表 8 优化的工艺条件
Tab.8 Optimized machining conditions

Parameters	Value
Working current/A	20
Machining gap/mm	0.15
Abrasives pressure/MPa	0.12
Revolving speed of workpiece/(r·min ⁻¹)	600
Machining time/s	20

加工前后的粗糙度和圆度轮廓见图 11、图 12，对应的参数值见表 9。根据表 9 所示，表面轮廓高度参数值显著降低，宽度参数 S_m 值提高，表面圆度值显著降低。

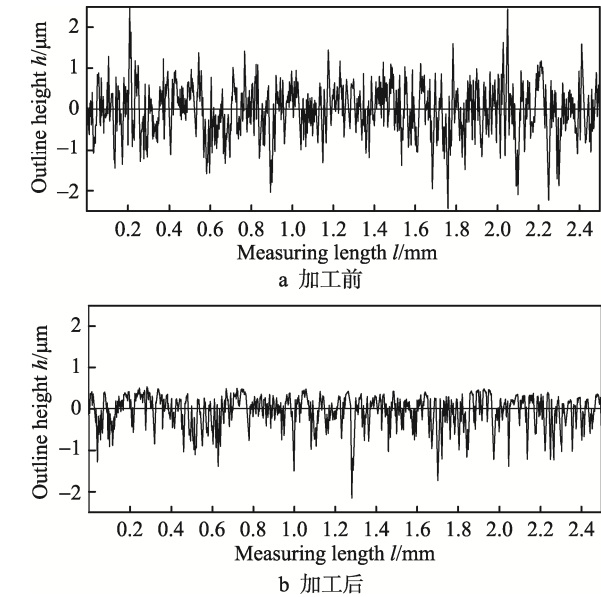


图 11 试件加工前后的表面粗糙度轮廓
Fig.11 Surface roughness profile before and after machining:
a) before machining, b) after machining

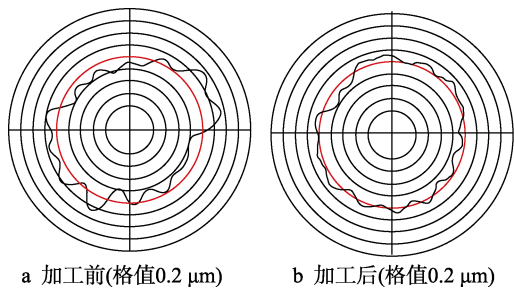


图 12 试件加工前后的表面圆度轮廓
Fig.12 Surface roundness profile before (a) and after (b) machining

表 9 加工前后轮廓参数对比
Tab.9 Comparison of profile parameters
before and after machining

Parameters	R_a	R_y	R_z	S_m	Roundness
Before machining/ μm	0.490	4.907	3.951	20.600	3.090
After machining/ μm	0.267	2.698	2.231	24.600	2.210
Variation/ μm	-0.223	-2.209	-1.720	4.000	-0.880
Amplitude of variation/%	46	45	44	-19	28

4 结论

1) 采用电化学砂带复合加工技术，在砂带无轴向运动条件下，对回转表面上的沟槽结构进行加工，能显著改善沟槽表面粗糙度和圆度，是一种有效的精整加工方法。磨具无轴向运动条件下的表面整平机理是选择性阳极溶解、尖峰电力线集中和轮廓侧向溶解效应的共同作用，其中电力线尖峰集中效应和轮廓侧向溶解效应对整平效果的影响较之磨具有轴向运动条件时更为显著。

2) 加工电流、加工间隙、试件转速、砂带压力和加工时间对表面粗糙度和表面圆度都存在合适的工艺参数取值范围，但针对二者的最优取值区间不完全一致。本实验条件下，机械作用参数对表面粗糙度的影响程度要大于电化学作用参数，砂带压力为主要因素；而电化学作用参数对圆度的影响程度要大于机械作用参数，加工电流为主要因素。

参考文献:

[1] 张展. 机械设计通用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
ZHANG Zhan. General Purpose Handbook of Machine Design [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.

[2] 杨世春. 表面质量与光整加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
YANG Shi-chun. Surface Quality and Finishing Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000.

[3] 刘新红, 曲伟星. 优化轴承滚道工作性能的工艺探讨[J]. 哈尔滨轴承, 2010, 31(1): 31-33.
LIU Xin-hong, QU Wei-xing. Discussion on Technology of Optimization of Bearing Raceway Working Properties [J]. Harbin Bearing, 2010, 31(1): 31-33.

[4] 周锦进, 王晓明, 庞桂兵. 非传统光整加工技术研究[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(1): 51-56.
ZHOU Jin-jin, WANG Xiao-ming, PANG Gui-bing. Research on Non-traditional Finishing [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(1): 51-56.

[5] MILAN K D, KAUSHIK K. Optimization of Surface Roughness and MRR in Electrochemical Machining of EN31 Tool Steel Using Grey-Taguchi Approach[J]. Procedia Materials Science, 2014(6): 729-740.

[6] 庞桂兵, 徐文骥, 周锦进. 电化学机械精准光整加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(19): 2589-2593.
PANG Gui-bing, XU Wen-ji, ZHOU Jin-jin. Study on Electrochemical Mechanical Precision Finishing Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(19):

- 2589-2593.
- [7] 徐文骥, 魏泽飞, 孙晶, 等. 轴承滚子电化学机械光整加工表面质量预测与加工参数选择[J]. 中国机械工程, 2012, 23(5): 525-530.
- XU Wen-ji, WEI Ze-fei, SUN Jing, et al. Surface Quality Prediction and processing Parameters Determination on Electrochemical Mechanical Finishing of Bearing Roller[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 525-530.
- [8] 王小明. 脉冲电化学及其复合光整加工机理和表面特性的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2002.
- WANG Xiao-ming. Pulsed Electrochemical and Its Composite Finishing Process and Surface Characteristics of the Study[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [9] 周锦进, 阿达依·谢尔亚孜旦, 安晓刚. 电化学机械加工在碳钢管内孔光整中的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 145-148.
- ZHOU Jin-jin, Aday·Xieyazidan, AN Xiao-gang. Research and Application of ECMM in Inner Surface Finishing of the Carbon-steel Pipe [J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2005, 36(10): 145-148.
- [10] 庞桂兵, 阿达依·谢尔亚孜旦, 徐文骥, 等. 展成式电化学机械光整加工圆柱齿轮的齿面质量与精度特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 163-167.
- PANG Gui-bing, Aday·Xieyazidan, XU Wen-ji, et al. Surface Quality and Accuracy Characteristics of the Cylindrical Gears by Generative Electrochemical-Mechanical Finishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 163-167.