

超声电流变复合抛光试验

张雷¹, 侯汉², 韩艳君¹, 王昕¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 针对模具微结构光整加工, 利用电流变效应对磨料的聚集作用和超声振动对磨料的驱动作用, 提出了超声电流变复合抛光工艺. 开发了超声电流变复合抛光加工系统. 正交试验结果表明超声振动的振幅和施加的电场强度对表面粗糙度的影响最大. 通过单因素试验研究了超声电流变复合抛光工艺参数对抛光后表面粗糙度的影响规律. 试验结果验证了超声电流变复合抛光工艺可行性, 为后续工艺优化和实际应用奠定了基础.

关 键 词: 机械制造; 超声振动; 电流变效应; 抛光; 正交试验

中图分类号: TG 669 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0356-04

Ultrasonic and Electrorheological Integrated Polishing Process

ZHANG Lei¹, HOU Han², HAN Yan-jun¹, WANG Xin¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China. Corresponding author: ZHANG Lei, E-mail: zhanglei@jlu.edu.cn)

Abstract: An ultrasonic and electrorheological integrated polishing process was proposed for finishing micro structures of mold based on both the aggregation of abrasives caused by electrorheological effect and the driving effect of ultrasonic vibration on abrasives. An ultrasonic and electrorheological integrated polishing system was developed. The orthogonal test results showed that the amplitude of the ultrasonic vibration and the applied electric field strength have the greatest influence on surface roughness. The influence of ultrasonic and electrorheological integrated polishing process parameters on the surface roughness after polishing was studied by the single factor test. The experimental results verify the feasibility of the ultrasonic electrorheological integrated polishing process, which lays a foundation for subsequent process optimization and practical application.

Key words: mechanical manufacturing; ultrasonic vibration; electrorheological effect; polishing; orthogonal test

近年来, 微系统产品的需求与日俱增, 微系统产品的核心元件一般具有尺寸亚毫米级(数十到数百微米)的复杂形状微结构. 目前主要利用具有微结构的模具实现微结构批量制备. 微切削^[1]、微细电火花加工^[2]、微细电解加工^[3]、微细激光加工^[4]、聚焦离子束微细加工^[5-6]等制备的模具微结构表面质量将会影响后续成型微结构的质量和使用寿命. 为了提高金属模具微结构的表面质量, 可以通过后续的光整工艺^[7-8], 去除微结构成形过程中的表面缺陷, 提高微结构表面质量.

针对微结构的光整加工技术, 国内外在工艺上取得了一定成果.

电流变液是一种由高介电常数的固体微粒(分散相)和绝缘性能良好的液体(连续相)组成的悬浮液, 它在电场作用下, 发生电流变效应, 表观黏度随着电场强度的增加而增加, 呈现明显的抗剪切屈服能力. 利用电流变效应可以抛光微型非球面透镜及其成形模具、硅片、不锈钢等导体和非导体类工件等^[9-10]. 本文提出将超声振动与电流变效应复合, 利用电流变效应对磨料的聚集作

用和超声振动引起的磨料冲蚀作用对金属模具微结构进行光整加工,提高微结构表面质量.其基本原理是将微细磨料颗粒添加到电流变液中配成电流变抛光液.超声振动工具和具有微结构的金属模具分别作为电场的两极.施加电场作用后,电流变抛光液产生电流变效应,剪切屈服应力增加,微细磨料颗粒在超声振动工具和微结构表面之间产生聚集,形成一个柔性微型锉.超声振动工具沿微结构表面运动,聚集的微细磨料颗粒在超声振动驱动下对微结构表面进行高频摩擦、撞击和冲蚀,实现微结构表面抛光.

1 试验装置与条件

1.1 试验装置

研制的超声电流变复合抛光加工系统如图 1 所示,该系统中超声振子的振动由超声波电源提供,振动频率为 20 kHz,并可以进行小范围的适应性调节,振幅为 0 ~ 10 μm.超声振子工具安装在数控机床的 z 轴上,工件通过夹具浸没固定在装有配置的电流变抛光液的液槽中,液槽固定在提供 x 轴和 y 轴运动的机床工作台上.

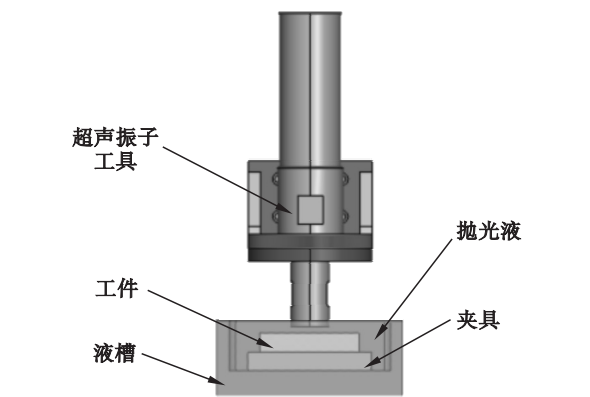


图 1 抛光加工系统

Fig. 1 Schematic diagram of the polishing system

1.2 试验条件

为研究超声电流变复合加工工艺和方法,试件采用铝合金 6061,配置的电流变液连续相为二甲基硅油,常温下运动黏度为 $(100 \pm 20) \text{ mm}^2/\text{s}$,分散相为淀粉,质量分数为 20%. 电流变液体中加入氧化铝磨粒配成电流变抛光液.在工具端部和工件之间施加电场,电压为 500 ~ 2 000 V.

工具作为电场的负极,工件作为电场的正极,在两者之间施加直流电压 1 500 V 后,将工具升到超过液面的位置,施加电压后电流变抛光液黏性增加,在工具与工件之间产生了明显的电流变效应.

2 超声电流变复合抛光正交试验

超声电流变复合抛光中,影响抛光效果的因素很多,主要有磨料粒度、电压 U 、振幅 A 、磨料质量分数 η 、抛光间隙、抛光时间 t .为了验证各因素对抛光后表面粗糙度的影响,选用 7 因素 3 水平的正交表 $L_{18}(3^7)$ 设计了正交试验,通过正交试验将试验次数从 $7^3 = 343$ 次减少到 18 次.因素水平表如表 1 所示.利用前述的试验装置共进行 18 次相关试验,试验方案与结果如表 2 所示.

表 1 各因素水平分布表

Table 1 Level distribution table of various factors

编号	A (粒度) μm	B (电压) V	C (振幅) μm	D(质量 分数) %	E (间隙) mm	F (时间) min
1	1	500	5	5	0.3	3
2	5	750	7.5	10	0.6	5
3	10	1 000	10	15	1	7

表 2 试验方案与结果

Table 2 Test scheme and results

试验 编号	粒度 μm	电压 V	振幅 μm	质量 分数 %	间隙 mm	时间 min	试验 结果 μm
1	1	500	5	5	0.3	3	0.108 2
2	1	750	7.5	10	0.6	5	0.074 5
3	1	1 000	10	15	1	7	0.034 6
4	5	500	5	10	0.6	7	0.122 3
5	5	750	7.5	15	1	3	0.138 1
6	5	1 000	10	5	0.3	5	0.099 7
7	10	500	7.5	5	1	5	0.128 2
8	10	750	10	10	0.3	7	0.064 7
9	10	1 000	5	15	0.6	3	0.109 7
10	1	500	10	15	0.6	5	0.110 2
11	1	750	5	5	1	7	0.158 5
12	1	1 000	7.5	10	0.3	3	0.092 3
13	5	500	7.5	15	0.3	7	0.080 8
14	5	750	10	5		3	0.075 3
15	5	1 000	5	10	1	5	0.092 4
16	10	500	10	10	1	3	0.138 2
17	10	750	5	15	0.3	5	0.103 5
18	10	1 000	705	5	0.6	7	0.108 3

对试验结果进行处理分析,各因素均值为 k ,如表 3 所示.从表 3 可以得出各考察因素对超声电流变复合抛光后表面粗糙度的影响由大到小依次为振幅、电压、间隙、质量分数、时间、粒度,最佳组合为 $C3B3E1D3F3A1$.

表 3 试验结果分析
Table 3 Analysis of test results

<i>k</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>k</i> ₁	0.096 4	0.114 6	0.115 8	0.113 0	0.091 5	0.110 3
<i>k</i> ₂	0.101 4	0.102 4	0.103 7	0.097 4	0.100 0	0.101 4
<i>k</i> ₃	0.108 8	0.089 5	0.087 1	0.096 2	0.115 0	0.094 9
极差	0.012 4	0.025 1	0.028 6	0.016 9	0.023 5	0.015 5

3 超声电流变复合抛光单因素试验

通过改变粒度、电压、振幅、质量分数、间隙、时间等因素进行单因素试验,考察各因素对抛光后表面粗糙度的影响规律. 工件选用铝合金 6061,抛光前表面粗糙度 R_a 达到 $0.19\text{ }\mu\text{m}$. 配制的电流变抛光液中磨料为 Al_2O_3 . 当某一因素改变时,其他因素保持不变,粒度为 W_1 (直径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$),振幅为 $10\text{ }\mu\text{m}$,频率为 20 kHz ,电压为 $1\text{ }000\text{ V}$,间隙为 0.3 mm . 采用不同质量分数磨料或粒度的电流变液进行试验,试验结果如图 2 ~ 图 7 所示.

采用三种质量分数磨料的电流变液进行试验. 从图 2 可以看出随着氧化铝磨料粒度的增加,表面粗糙度增加.

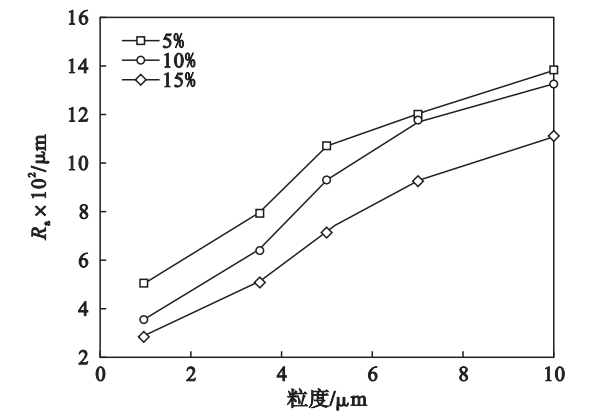


图 2 表面粗糙度随磨料粒度的变化
Fig. 2 Surface roughness changing with abrasive grain sizes

如图 3 所示,随着电压的增加,抛光液黏度变大,电流变效应增强,磨料聚集作用增加,参与抛光的磨料数量增加,表面粗糙度随着电压的增加而降低. 而当电压继续增大时,过强的电流变效应使电流变抛光液黏度增大,影响了超声振动对磨料的驱动作用,使抛光后表面粗糙度的降低效果减弱.

从图 4 中可以看出,随着振幅增加,振动对磨料的驱散作用增加,磨料对工件的冲击增强,抛光

后表面粗糙度降低明显.

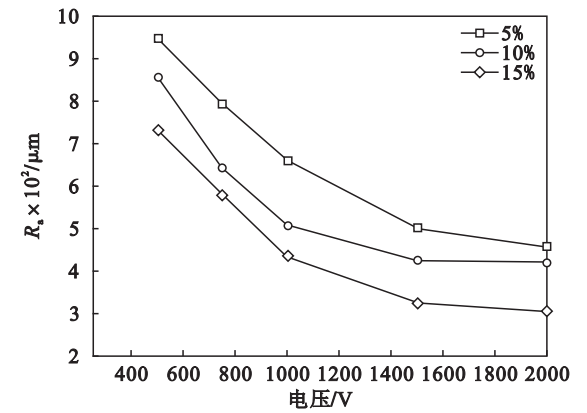


图 3 表面粗糙度随电压的变化
Fig. 3 Surface roughness changing with voltages

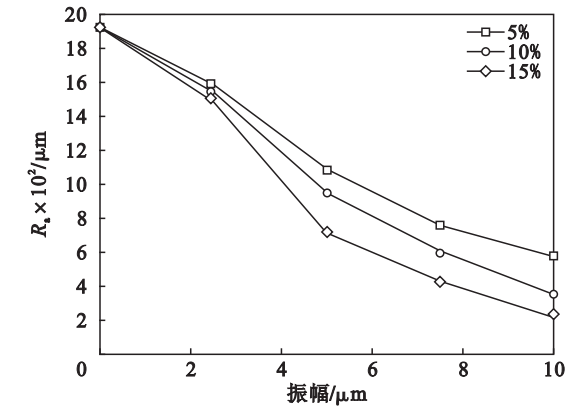


图 4 表面粗糙度随振幅的变化
Fig. 4 Surface roughness changing with amplitudes

如图 5 所示,在超声振动的频率和振幅不变的前提下,磨料浓度增加,超声振动对磨料的驱动作用减弱,参与抛光的磨料对表面的去除作用减弱,抛光后表面粗糙度降低程度有限,表面粗糙度改善效果不明显.

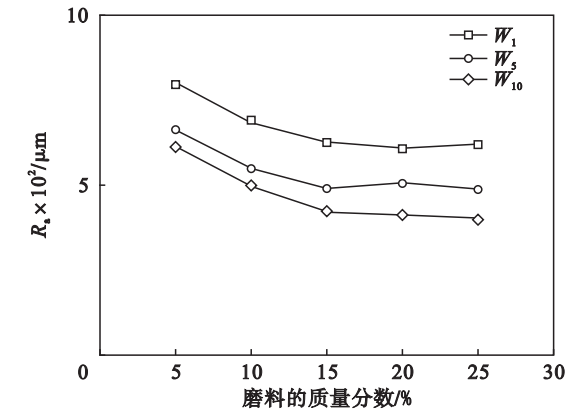


图 5 表面粗糙度随磨料质量分数的变化
Fig. 5 Surface roughness changing with abrasive mass fraction

从图 6 中可以看出,在抛光工具与工件之间施加一定条件下的电压,两者的间隙越小,电场强

度越强,电流变效应越强,电流变效应对磨料的聚集作用越强,参与抛光的磨料数量增加,抛光后表面粗糙度降低明显.

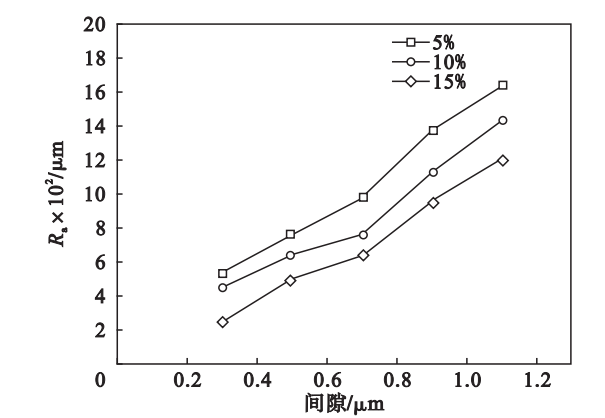


图 6 表面粗糙度随抛光间隙的变化
Fig. 6 Surface roughness changing with polishing gaps

如图 7 所示,在一定时间内随着抛光时间的增加,抛光后表面粗糙度呈下降趋势.随着抛光时间的继续增加,表面粗糙度没有明显的下降.因为达到了该种磨粒的抛光极限,如果需要更好的抛光效果,则需要更小粒度的磨料.

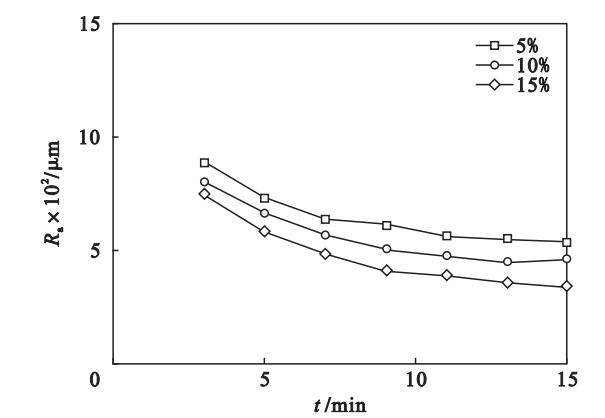


图 7 表面粗糙度随时间的变化
Fig. 7 Surface roughness changing with polishing time

4 结 论

本文提出了利用电流变效应对磨料的聚集作用和超声振动引起的磨料冲蚀作用对金属模具微结构进行超声电流变复合抛光的新工艺. 搭建了

超声电流变复合抛光试验系统,通过正交试验获得了对超声电流变复合抛光后表面粗糙度影响由大到小的工艺因素依次为振幅、电压、间隙、质量分数、时间和粒度.单因素试验结果表明,磨料粒度越小、电压越高、振幅越大、抛光工具与工件的间隙越小、抛光时间越长、抛光后表面粗糙度越低,抛光效果越明显.正交试验和单因素试验的结果验证了超声电流变复合抛光工艺可行性,获得了抛光工艺规律,为后续工艺优化和实际应用奠定了基础.

参考文献:

- [1] Cheng K, Huo D. Micro-cutting: fundamentals and applications[M]. London:Wiley, 2013.
- [2] Mahardika M, Mitsui K. A new method for monitoring micro-electric discharge machining processes [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48 (3): 446 - 458.
- [3] Trimmer A L, Hudson J L, Kock M, et al. Single-step electrochemical machining of complex nanostructures with ultrashort voltage pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3327 - 3329.
- [4] Teixidor D, Ciurana J. Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 209 - 218.
- [5] Nellen P M, Brönnimann R. Milling micro-structures using focused ion beams and its application to photonic components [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17 (5): 943 - 948.
- [6] Romano-Rodríguez A, Hernández-Ramírez F. Dual-beam focused ion beam (FIB): a prototyping tool for micro and nanofabrication [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84 (5/6/7/8): 789 - 792.
- [7] Horsch C, Schulze V, Löhe D. Deburring and surface conditioning of micro milled structures by micro peening and ultrasonic wet peening [J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 12(7): 691 - 696.
- [8] Guo B, Zhao Q L, Hou Y, et al. Ultrasonic vibration assisted grinding of microstructures on binderless tungsten carbide (WC) [J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 625: 475 - 479.
- [9] Zhang L, He X S, Yang H R, et al. An integrated tool for five-axis electrorheological fluid-assisted polishing [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(8): 737 - 740.
- [10] Zhang L, Zhao Y W, He X S, et al. An investigation of effective area in electrorheological fluid-assisted polishing of tungsten carbide [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(3): 295 - 306.