

电化学机械加工对轴承滚子表面质量及凸度的影响

魏泽飞¹, 李蕾¹, 余东生¹, 徐文骥²

(1.渤海大学, 辽宁 锦州 121013; 2.大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘 要: **目的** 在提高轴承滚子表面质量的基础上获得具有一定凸度的表面轮廓。**方法** 将自主搭建的电化学机械加工 (electrochemical mechanical machining, ECMM) 平台用于轴承滚子的表面加工, 采用中性 NaNO_3 水溶液作为电解液, 设计了 $L_9(3^4)$ 的正交实验, 使用表面粗糙度测量仪对实验前后轴承滚子的表面粗糙度 R_a 、轮廓最大高度 R_z 和轮廓凸度进行测量和分析, 并利用实验数据分析影响表面粗糙度和凸度的各因素和水平。**结果** 经过 ECMM 加工后, 轴承滚子表面粗糙度 R_a 值由加工前的 $0.0874 \mu\text{m}$ 降低至 $0.0247 \mu\text{m}$, 轮廓最大高度 R_z 值由加工前的 $0.772 \mu\text{m}$ 降低至 $0.238 \mu\text{m}$, 轮廓凸度由原来的平直表面增加到最大值 $43.3 \mu\text{m}$ 。对于表面粗糙度, 电流密度的影响最显著, 各因素最佳水平为: 电流密度 5 A/cm^2 , 机械作用压力 0.20 MPa , 运动速度 0.24 m/s , 磨具号数 $1000^\#$ 。对轮廓凸度, 电流密度的影响最显著, 各因素最佳水平为: 电流密度 5 A/cm^2 , 运动速度 0.21 m/s , 磨具号数 $2000^\#$, 机械作用压力 0.20 MPa 。**结论** ECMM 加工方法适用于轴承滚子的加工, 可在一次加工中同时提高滚子的表面质量并获得一定凸度的表面轮廓。加工参数对表面质量和凸度影响最大的因素是加工电流密度, 优先选择较大加工电流密度的同时要合理选择其他加工参数。

关键词: 电化学机械加工; 轴承滚子; 表面粗糙度; 轮廓最大高度; 凸度; 正交实验

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0119-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.016

Effect of Electrochemical Mechanical Machining on Surface Quality and Convexity of Bearing Rollers

WEI Ze-fei¹, LI Lei¹, SHE Dong-sheng¹, XU Wen-ji²

(1.Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2.Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface quality and obtain a certain surface convexity of bearing rollers. The self-built electrochemical mechanical machining (ECMM) platform was used for the surface processing of bearing rollers, the neutral NaNO_3 aqueous solution was used as the electrolyte and the orthogonal experiment of $L_9(3^4)$ was designed for the experiment. Then the surface roughness, the maximum height of profile and the profile convexity of the bearing rollers before and after the experiment were measured and analyzed by Talysurf CLI2000 instrument. On the basis, the factors and levels affecting surface roughness and profile convexity were analyzed through the experimental data. After ECMM processing, the surface roughness

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-04-11

Received: 2018-01-31; Revised: 2018-04-11

基金项目: 辽宁省博士科研启动项目 (201601346); 辽宁省教育厅科学研究项目 (LZ2016001)

Fund: Supported by the Ph. D. Startup Fund of Liaoning Province (201601346) and the Education Department Research of Liaoning Province (LZ2016001)

作者简介: 魏泽飞 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为超精密及特种加工技术。

Biography: WEI Ze-fei (1981—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: ultra-precision and non-traditional machining technology.

R_a value of the bearing roller decreased from $0.087\ \mu\text{m}$ to $0.0247\ \mu\text{m}$, the maximum height R_z value of profile decreased from $0.772\ \mu\text{m}$ to $0.238\ \mu\text{m}$ and the surface profile convexity increased from $0.63\ \mu\text{m}$ to $43.3\ \mu\text{m}$. The effect of current density on the surface roughness was the most significant indicator. The best level of each factor was: the current density of $5\ \text{A}/\text{cm}^2$, the mechanical pressure of $0.20\ \text{MPa}$, the speed of workpiece of $0.24\ \text{m/s}$ and the abrasive number of $1000^\#$. For profile convexity, the effect of current density was also the most significant indicator. The best level of each factor was: the current density of $5\ \text{A}/\text{cm}^2$, the speed of workpiece of $0.21\ \text{m/s}$, the abrasive number of $2000^\#$ and the mechanical pressure of $0.20\ \text{MPa}$. ECMM is suitable for the bearing roller machining and it can improve the surface quality of bearing rollers and obtain a certain convexity degree in one process. The factor that significantly affects the surface quality and convexity among the machining parameters is the current density. Other machining parameters should be reasonably chosen when the larger machining current density is selected preferentially.

KEY WORDS: electrochemical mechanical machining (ECMM); bearing roller; surface roughness; maximum height of profile; profile convexity; orthogonal experiment

轴承作为一种大量应用的基础零部件,广泛应用于电机、机床、机车等设备中。机械装备的精度、性能、寿命等指标与轴承的性能密切相关^[1-4]。根据摩擦磨损和失效机理,轴承的失效形式主要为疲劳磨损和磨粒磨损^[5-7]。随着现代机械装备向大型化、超大型化以及微型化发展,不但对轴承加工精度和表面质量的要求越来越高,而且还要求轴承内外滚道/滚子具有一定的凸度形状,以降低应力集中的影响,提高其使用性能和寿命^[8]。

轴承内外滚道/滚子加工的主要工序为:毛坯成形—车削—软磨精整—热处理—磨削凸度—超精研磨^[9-11]。在整个加工过程中,由于 GCr15 轴承钢的硬度高,因而在批量磨削加工过程中,刀具/砂轮磨损严重,需要不断调整砂轮的进给,从而补偿砂轮磨损,不但加工效率低,磨削液消耗量大,粉尘和废液污染严重,而且严重影响轴承的磨削质量。随着加工技术的进步,目前出现了一些其他加工方式,如超精密车

削^[12]、高速 CBN 砂轮磨削^[13]、在线电解修整磨削^[14]为代表的复合磨削技术,开始应用于轴承的加工中,起到了提高生产率、加工精度和表面质量的作用。但是这些技术并不能完全代替传统加工,主要是由于这些技术在轴承加工中的加工质量不稳定且设备价格昂贵,这限制了其应用范围。电化学机械加工 (Electrochemical mechanical machining, ECMM) 由于其独特的加工原理和加工方式,在难加工材料的成形及光整加工领域具有一定优势。因此,本文将 ECMM 加工工艺应用于轴承滚子的加工,研究 ECMM 各加工参数如何影响轴承滚子的表面粗糙度和凸度。

1 实验设计

1.1 ECMM 机理

如图 1 所示, ECMM 是一种将电化学加工和机械加工相结合的复合加工技术^[15-16]。它兼具有电化学

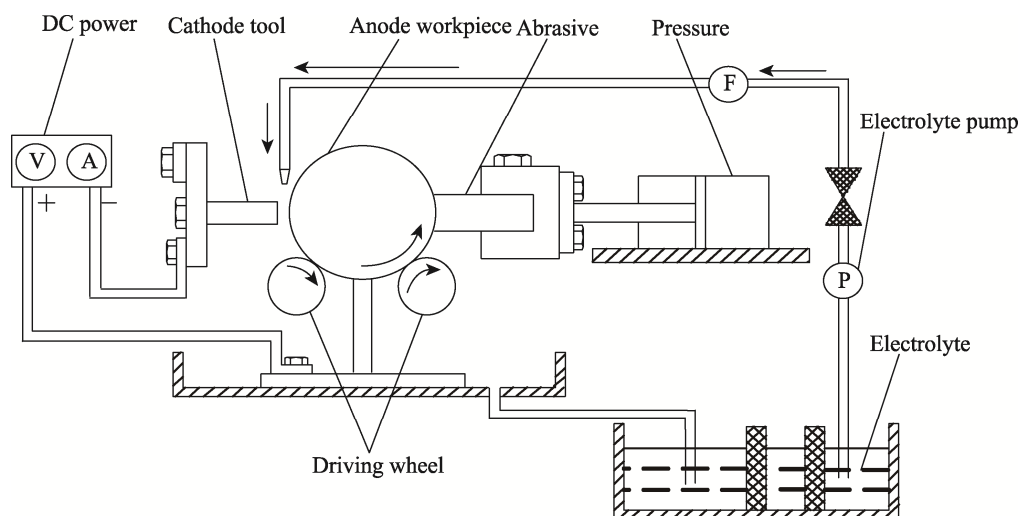


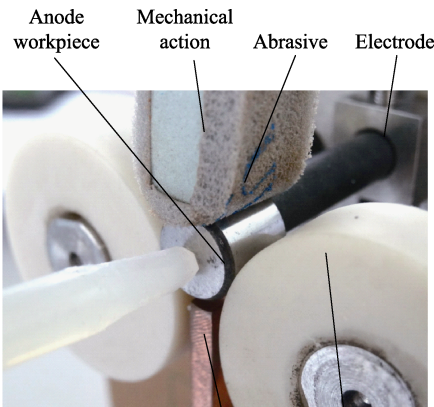
图 1 电化学机械加工机理示意图
Fig.1 Schematic diagram of the ECMM

加工和机械加工的优点，如不受材料硬度限制、凡导电材料均可加工、无加工热影响区等，因此在光整加工领域受到广泛关注。机械零件经传统机械加工（如车、铣、磨削等）后，表面均存在不同程度的刀痕，这些细微刀痕造成零件表面质量下降，在长期疲劳应力的作用下，容易产生裂纹，影响其使用性能。

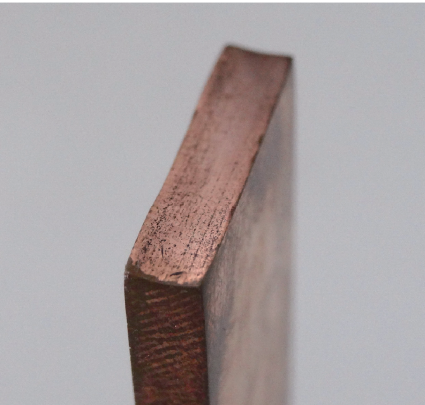
ECMM 首先利用电化学的“阳极溶解”特性，使零件表面尖端凸起优先溶解，进而在零件表面形成一层钝化膜，这层钝化膜阻碍电化学进一步作用，利用机械磨削方式将其去除，露出新鲜工件表面，这样电化学-机械交替作用，直到最终工件表面被整平。与传统机械加工不同的是，电化学机械加工中的机械作用仅仅去除电化学作用产生的钝化膜，并不去除零件金属基体材料。

1.2 实验装置、参数及条件

图 2 为加工装置和工具阴极的实物图，驱动电动机通过同步带带动驱动轮并以一定速度旋转，驱动轮支撑并带动轴承滚子旋转。通过石墨电极使阳极接通电源正极。砂带以一定压力作用在阳极工件上。阴极采用紫铜材料，末端加工出与试件相同曲率半径的圆弧，以保证加工中的极间间隙一致。



a ECMM加工装置



b 工具阴极

图 2 加工装置和工具阴极
Fig.2 ECMM device (a) and cathode tool (b)

阳极工件采用 NJ212M 型轴承滚子，尺寸为 $\phi 12\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ ，材料为 GCr15 轴承钢。经丙酮溶液清洗除油—干燥—去离子水清洗—干燥—无水乙醇溶液清洗—干燥，备用。电解液采用 20%（质量分数）的 NaNO_3 水溶液，流量为 10 L/min，温度为室温（25℃）。

由于影响 ECMM 加工效果的因素较多，根据电化学加工经验，本文设计了 $L_9(3^4)$ 的正交实验，选取工件速度 v 、机械作用压力 p 、电流密度 J 、磨具号数等四个参数作为评价影响工件表面质量和凸度的主要因素。具体加工参数如表 1 所示。加工前后轴承滚子表面粗糙度和凸度采用英国泰勒公司的 Talysurf CLI2000 型多测头三维形貌轮廓仪测量。

表 1 ECMM 加工参数
Tab.1 Processing parameters of ECMM

Parameter	Value
Applied voltage U/V	5~12
Processing time t/s	120
Interlectrode gap $\delta/\mu\text{m}$	0.5
Current density $J/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	3、4、5
Workpiece speed $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.18、0.21、0.24
Mechanical pressure p/MPa	0.1、0.15、0.2
Abrasive number	1000 [#] 、2000 [#] 、3000 [#]

2 结果与分析

2.1 实验结果

表 2 为 ECMM 实验结果。其中 0 号数据为加工前轴承滚子的表面粗糙度及凸度数据，1—9 号为正交实验不同因素水平下的实验结果数据。图 3 为实验前后轴承滚子实物对比图。

2.2 加工参数对表面粗糙度的影响

由表 2 可知，经 ECMM 加工后，滚子表面粗糙度显著降低，即表面质量提高， R_a 值由加工前的 0.0874 μm 降低至 0.0247 μm ，表面质量提高近 3 倍。由图 3 的 ECMM 前后实物对比图也可看出，加工后，轴承滚子表面明显光滑，光洁度提高。图 4 为 ECMM 前后轴承滚子表面粗糙度，可知加工前，轴承滚子表面的波峰波谷比较密集且差值较大，而加工后表面变得很平滑。

利用极差法对表 2 中的表面粗糙度数据进行分析，得到图 5 的各因素极差分析图。分析图 5 可知，因素 A（电流密度）对表面粗糙度的影响最大，极差为 0.026；其次是因素 B（机械作用压力），极差为 0.015；影响最小的为因素 C（运动速度）和因素 D（磨具号数），极差均为 0.011。造成这种结果的主要原因是：ECMM 的加工机理为电化学阳极溶解，

表2 ECMM 正交实验结果
Tab.2 Orthogonal experiment results of ECMM

No.	Mechanical pressure p/MPa	Current density $J/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	Workpiece speed $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Abrasive number	Surface roughness $Ra/\mu\text{m}$	Maximum height of profile $R_z/\mu\text{m}$	Profile convexity μm
*0					0.0874	0.772	0.63
1	0.10	3	0.18	1000 [#]	0.0552	0.431	6.40
2	0.10	4	0.21	2000 [#]	0.0490	0.421	18.1
3	0.10	5	0.24	3000 [#]	0.0398	0.342	41.6
4	0.15	3	0.21	3000 [#]	0.0700	0.467	26.9
5	0.15	4	0.24	1000 [#]	0.0262	0.294	19.9
6	0.15	5	0.18	2000 [#]	0.0264	0.238	38.3
7	0.20	3	0.24	2000 [#]	0.0439	0.314	19.6
8	0.20	4	0.18	3000 [#]	0.0295	0.245	35.2
9	0.20	5	0.21	1000 [#]	0.0247	0.313	43.3

*before ECMM

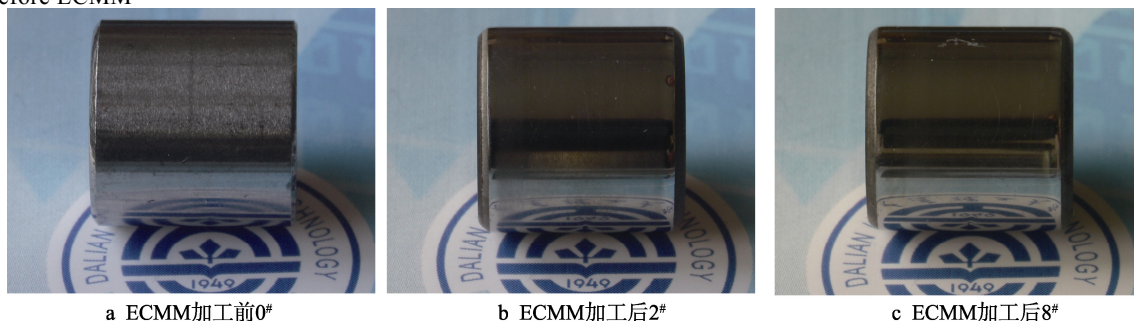


图3 ECMM 前后轴承滚子实物对比图

Fig.3 Physical contrast of bearing rollers before and after ECMM: (a) No.0[#] before ECMM, (b) No.2[#] after ECMM, (c) No.8[#] after ECMM

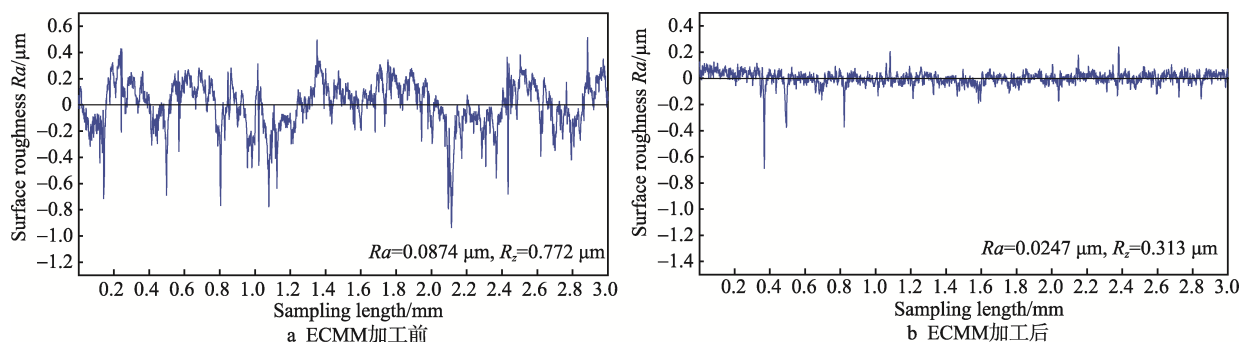


图4 ECMM 前后轴承滚子表面粗糙度

Fig.4 Surface roughness of bearing rollers before (a) and after ECMM (b)

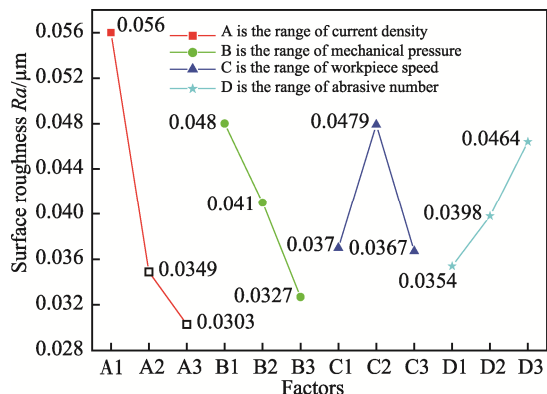


图5 表面粗糙度极差分析

Fig.5 Range analysis of surface roughness

阳极表面波峰位置的“尖端效应”造成波峰位置优先溶解,形成钝化膜,接着机械作用去除钝化膜,再溶解,再去除。对最后形成光滑的表面来说,电化学作用是主要因素,机械作用是辅助因素。电流密度越大,材料去除越多,越容易形成光滑表面。对于机械作用压力来说,压力越大,钝化膜越快被去除,对下一步的电化学作用越有利。

从图5各因素的三个水平对表面粗糙度影响的趋势看,电流密度越大、机械作用压力越高及低磨具号数,越容易形成光滑表面。但是其作用效果有一个极限,电流密度过高会造成工件表面其他部位也被腐蚀;压力过大不仅会去除钝化膜,还会去除金属基体

材料; 而磨具号数过高, 即磨粒越细, 则钝化膜不容易去除, 反而不利于电化学作用。

综上分析, 对于表面粗糙度来说, 合理的 ECMM 加工参数为 $A_3B_3C_3D_1$, 即电流密度为 5 A/cm^2 , 机械作用压力为 0.20 MPa , 运动速度为 0.24 m/s , 磨具号数为 $1000^\#$ 。

2.3 加工参数对轮廓凸度的影响

由表 2 可知, ECMM 加工前, 轴承滚子的凸度为 $0.63 \mu\text{m}$, 近似为平直轮廓, 经 ECMM 加工后, 滚子凸度有了明显的增加, 可达 $40 \mu\text{m}$, 故 ECMM 可用于轴承滚子凸度加工。图 6 为 ECMM 加工前后滚子凸度的测量结果, 可知经过 ECMM 加工后, 轴承具有了一定的凸度, 凸度位于轴承边缘处, 形状符合轴承滚子边缘凸度的加工要求。

图 7 为加工各因素对凸度影响的极差分析, 可知对凸度影响最大的是因素 A (电流密度), 极差为 22.57; 其次为因素 C (运动速度), 极差为 12.6; 接着为因素 D (磨具号数), 极差为 10.93; 最后为因素 B (机械作用压力), 极差 4.73。造成这种现象的原因是: ECMM 加工机理为电化学作用阳极溶解去除金属, 机械作用去除钝化膜, 所以形成凸度而去除金属的是电化学作用, 机械作用辅助去除钝化膜。

分析图 7 四个因素的三个水平对凸度的影响趋势可知, 随着电流密度的增加, 轮廓凸度值明显上升, 即较大的电流密度可形成较大的凸度。随着运动速度和磨具号数的增加, 凸度值先上升后下降, 分析产生此现象的原因为: 电化学作用和机械作用之间的复合运动存在一个最佳的匹配速度和去除钝化膜的磨具号

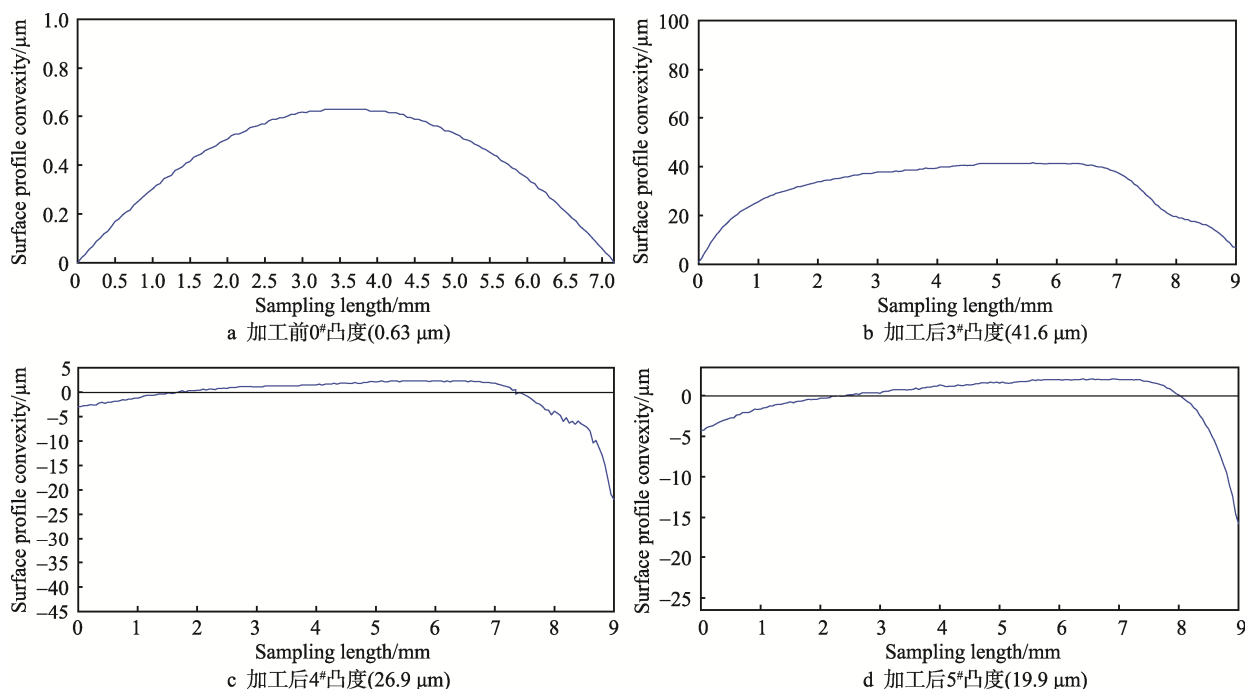


图 6 加工前后圆柱滚子凸度

Fig.6 Surface convexity of bearing rollers before and after ECMM: (a) No.0 surface convexity before ECMM ($0.63 \mu\text{m}$); (b) No.3 surface convexity after ECMM ($41.6 \mu\text{m}$); (c) No.4 surface convexity after ECMM ($26.9 \mu\text{m}$); (d) No.5 surface convexity after ECMM ($19.9 \mu\text{m}$)

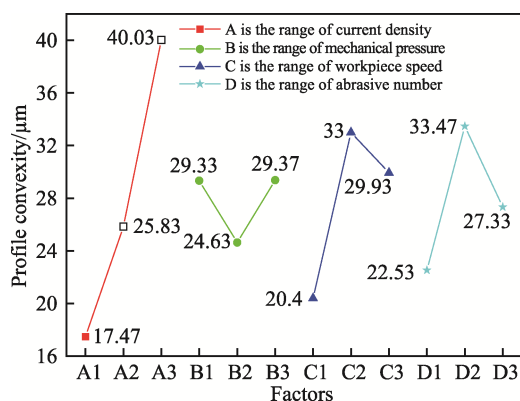


图 7 轮廓凸度极差分析

Fig.7 Range analysis result of profile convexity

数, 在此速度和号数下, 机械作用仅仅去除刚刚形成的钝化膜, 有利于电化学机械作用的持续进行。

由于同型号的轴承滚子凸度值受轴承尺寸、载荷、润滑以及速度等因素的影响, 并不存在一个固定值, 而是在一个区间范围, 通常轴承滚子合适的凸度值为 $5 \sim 40 \mu\text{m}$ 。由于本研究希望找出能够高效地加工轴承凸度的加工参数, 即以快速达到大凸度值为目标, 因此合适的 ECMM 加工参数为 $A_3C_2D_2B_3$, 即: 电流密度 5 A/cm^2 , 运动速度 0.21 m/s , 磨具号数 $2000^\#$, 机械作用压力 0.20 MPa 。

综合分析加工参数对表面粗糙度和轮廓凸度的影响发现, 要获得表面质量高 (表面粗糙度数值低) 和

较大的凸度值,加工中需要优先选择较大的电流密度。

3 结论

1)利用自主搭建的ECMM加工轴承滚子实验装置进行轴承滚子的加工,发现ECMM适用于滚子的加工,可在大幅提高轴承滚子表面粗糙度的基础上,获得具有一定凸度轮廓的轴承滚子表面。

2)ECMM可将轴承滚子表面粗糙度 R_a 值由 $0.0874\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $0.0247\text{ }\mu\text{m}$,轮廓最大高度 R_z 值由 $0.772\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $0.238\text{ }\mu\text{m}$,同时可将轴承滚子由原来的平直轮廓最大加工到 $43.3\text{ }\mu\text{m}$ 的凸度轮廓。

3)电流密度对表面粗糙度及凸度的影响最显著,即要获得高表面质量的同时具有一定凸度值的滚子表面,在优先选择较大电流密度的同时,要合理选择磨削压力、磨削速度和磨具号数。

参考文献:

- [1] NEAGU-VENTZEL S, CIOC S, MARINESCU I. A Wear Model and Simulation of Superfinishing Process: Analysis of the Superfinishing of Bearing Rings[J]. *Wear*, 2006, 260: 1061-1069.
- [2] 张亚军, 张雨奇. 轴向载荷下圆柱滚子轴承滚子端面与挡边接触位置的多目标模糊优化设计[J]. *轴承*, 2017(3): 5-8.
ZHANG Ya-jun, ZHANG Yu-qi. Multi-objective Fuzzy Optimization Design of Contact Position between Roller End Face and Rib for Cylindrical Roller Bearings under Axial Load[J]. *Bearing*, 2017(3): 5-8.
- [3] 梁志强, 张玲, 王玉杰, 等. 国外轧机滚子轴承原材料及热处理质量分析[J]. *金属热处理*, 2016, 41(10): 202-205.
LIANG Zhi-qiang, ZHANG Ling, WANG Yu-jie, et al. Analysis of Raw Material and Heat Treatment Quality for Roller of Foreign Mill Bearing[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(10): 202-205.
- [4] 刘巍, 王安麟, 单学文, 等. 外啮合高压齿轮泵圆柱滚子轴承应用分析研究[J]. *机械设计*, 2014, 31(9): 20-25.
LIU Wei, WANG An-lin, SHAN Xue-wen, et al. Application Analysis and Research of Cylindrical Roller Bearing in External Gear High Pressure Pump[J]. *Journal of Machine Design*, 2014, 31(9): 20-25.
- [5] ASCIONE F, FEO L, MACERI F. An Experimental Investigation on the Bearing Failure Load of Glass Fibre/Epoxy Laminates[J]. *Composites: Part B*, 2009, 40: 197-205.
- [6] CHAUHAN A, SEHGAL R, SHARMA R K. Thermo-hydrodynamic Analysis of Elliptical Journal Bearing with Different Grade Oils[J]. *Tribology International*, 2010, 43: 1970-1977.
- [7] FERREIRA J L A, BALTHAZAR J C, ARAUJO A P N. An Investigation of Rail Bearing Reliability under Real Conditions of Use[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2003(10): 745-758.
- [8] 孙浩洋. 凸度滚子的稳态热弹流设计和动态等温特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2005.
SUN Hao-yang. A Study on the Steady Thermal EHL Design and Transient Iso-thermal EHL Characteristics of Profiled Rollers[D]. Shanghai: Shanghai University, 2005.
- [9] YALLESE M A, CHAOUI K, ZEGHIB N, et al. Hard Machining of Hardened Bearing Steel Using Cubic Boron Nitride Tool[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 1092-1104.
- [10] 熊晓晨, 燕怒, 韩晓琪. 轴承钢磁控溅射 TiN 涂层工艺参数对其性能的影响[J]. *表面技术*, 2014, 43(1): 67-70.
XIONG Xiao-chen, YAN Nu, HAN Xiao-qi. Influence of Magnetron Sputtering Parameters on Surface Properties of TiN-coated Bearing Steel[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(1): 67-70.
- [11] 韩文, 孔达, 吕建英. 滚子加工工艺分析及改进[J]. *轴承*, 2006(1): 21-23.
HAN Wen, KONG Da, LYU Jian-ying. Analysis and Improvement of Bearing Roller Processing[J]. *Bearing*, 2006(1): 21-23.
- [12] UMBRELLO D, HUA J, SHIVPURI R. Hardness-based Flow Stress and Fracture Models for Numerical Simulation of Hard Machining AISI 52100 Bearing Steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 374(1-2): 90-100.
- [13] KIM J J, OH S H, SO B M. Grinding Ability and Characteristics in Normal QT Heat Treatment vs. Carbo-Nitriding Heat Treatment Bearing Steel under CBN Wheel Grinding Process[C]// International Conference on Grid and Distributed Computing. Berlin: Grid and Distributed Computing, 2011: 148-154.
- [14] QIAN J, LI W, OHMORI H. Cylindrical Grinding of Bearing Steel with Electrolytic In-process Dressing[J]. *Precision Engineering*, 2002, 24(2): 153-159.
- [15] XU W J, WEI Z F, SUN J, et al. Surface Quality Prediction and Processing Parameter Determination in Electrochemical Mechanical Polishing of Bearing Rollers[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, 2012, 63(1-4): 129-136.
- [16] 王建业, 徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
WANG Jian-ye, XU Jia-wen. The Principle and Application of Electrochemical Machining[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.