

高精度轴承套圈超精密加工技术的现状与发展

关佳亮,胡志远,张好,戚泽海,孙晓楠,路文文

北京工业大学

摘要: 综述了高精度轴承套圈超精密加工技术的发展现状,对在线电解修整(ELID)技术在高精度轴承套圈超精密加工中的应用展开详细介绍,同时展望了高精度轴承套圈超精密加工技术的发展。

关键词: 轴承;超精密;ELID;高精度

中图分类号: TG580.612;TH161.14

文献标志码: A

Present Situation and Development of Ultra-precision Machining Technology for High Precision Bearing Rings

Guan Jiali, Hu Zhiyuan, Zhang Yu, Qi Zehai, Sun Xiaonan, Lu Wenwen

Abstract: This paper summarizes the development status of ultra precision machining technology of high precision bearing rings, and introduces the application of ELID technology for ultra precision machining of high precision bearing rings. It also prospects the development of the ultra precision machining technology for high precision bearing rings.

Keywords: bearing; ultra precision; ELID; high precision

1 引言

轴承作为机械工业中一种精密且难加工的机械基础件,广泛应用于工业、农业、交通运输、国防、航空航天等各个领域。高精度轴承是重大设备及精密装备的核心部件,据有关研究分析表明,大约有30%的机械故障是由旋转部件中的轴承失效所导致^[1]。

表1为失效轴承的数据统计^[2],检测结果显示,约80%的轴承是由于接触疲劳而失效。

表1 失效的轴承数据统计

轴承失效形式	内圈失效	外圈失效	滚子失效	显微疲劳	氧化	其它
百分比(%)	13.0	58.0	3.0	4.0	5.0	17.0

影响轴承疲劳寿命的因素除轴承材料外,轴承表面质量也是重要的影响因素,所以对轴承进行超精密加工,改善其表面质量十分重要。轴承套圈包括外圈和内圈,外圈滚道的加工属于内圆成形加工,较其它部件来说对其进行超精密加工会更加困难,且根据统计数据可知外圈的失效更为普遍,所以轴承套圈是轴承组成的关键部件,其加工质量对于轴承成品的影响较大。因此,通过改善套圈滚道的表面加工质量进而提高轴承的工作性能和使用寿命具有重要意义。

2 轴承套圈超精密加工技术现状

2.1 轴承套圈的超精磨技术

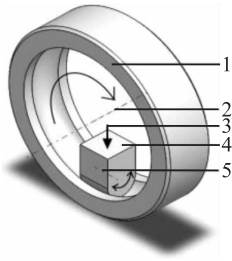
超精磨的原理是使用高质量、细粒度的砂轮对加工表面进行磨削,实现光整加工。超精磨磨削砂轮线速度为15-18m/s。高质量、细粒度砂轮经过精修整后具有很好的等高性和微刃性,对加工表面进行微量切削和适当接触压力的摩擦抛光,可以获得较好的表面加工质量,加工后表面粗糙度可达 $R_a 0.10 - 0.012 \mu\text{m}$ ^[3]。

由于超精磨加工线速度低,能避免加工表面因磨削热而产生的变质层,可以改善加工工件的尺寸精度和形状精度,但不能很好地降低表面波纹度,在实际生产中加工效率低。

2.2 轴承套圈的油石超精研技术

目前轴承超精密加工中广泛采用油石超精研加工,轴承滚道油石超精研加工见图1,其原理是用低压弹性将细粒度磨料的油石压在工件加工表面上,工件做旋转运动,油石在垂直于工件旋转方向上按一定规律做快速往复摆动,并提供良好的润滑与冷却条件,降低加工表面粗糙度,提高几何精度^[3,4]。油石超精研加工中,油石加工轨迹是正弦曲线,有利于消除油石的形状误差。油石在滚道表面的摆动见图2。对于加工后的表面质量,采用国产设备可以达到 $R_a 0.1 \mu\text{m}$ 左右,采用进口设备可以达到 $R_a 0.04 \mu\text{m}$,甚至更低^[5];李颂华等^[6]对氮化硅轴承外圈滚道进行油石超精研加工,得到滚道的表面质

量为 $R_a 0.0344 \mu\text{m}$ 。



1. 轴承外圈 2. 外圈滚动轴线 3. 外界施加压力
4. 油石 5. 油石摆动轴线

图1 轴承外圈超精研加工

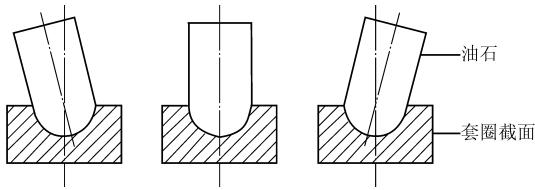


图2 油石在滚道表面摆动

油石超精研加工具有加工精度高等优点,但其机床结构复杂,调整费时,工人劳动强度大,并且油石易堵塞,最关键的是油石超精研加工会影响轴承滚道的轮廓度,进而影响轴承的疲劳寿命。

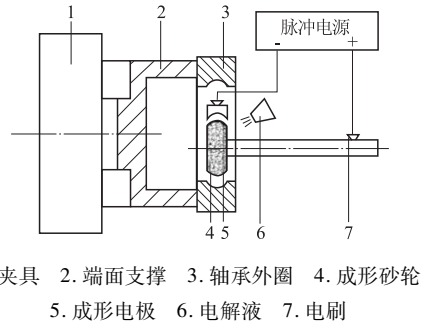
2.3 轴承套圈的 ELID 磨削加工技术

在线电解修整 (ELID) 磨削技术是近年来金属结合剂超硬磨料修整技术的一项新成就,具有加工精度高、效率高、表面质量好、装置简单以及适应加工材料范围广等特点,广泛应用于各种金属和非金属材料的磨削加工中^[7]。目前 ELID 磨削技术已经成功地应用到内圆表面的超精密加工中,并且能够很好地解决内圆磨削中由于磨削条件差而导致的砂轮极易阻塞等问题。孙凯等^[8]采用 W10 粒度的 CBN 砂轮对轴承外圈进行 ELID 磨削正交试验,获得表面粗糙度为 $R_a 0.04 - 0.08 \mu\text{m}$ 。

(1) ELID 磨削加工的原理

图3为 ELID 成形磨削的原理图,ELID 磨削系统由脉冲电源、电解液、铸铁基砂轮、修整电极等组成。砂轮采用具有导电性的铸铁结合剂金刚石 (CBN) 砂轮,砂轮与 ELID 专用直流脉冲电解电源的正极相连,作为阳极;与砂轮形状相匹配的电极与电源负极相连,作为阴极。在电极和砂轮之间留 $0.1 - 0.3 \text{mm}$ 的间隙,往间隙中喷 ELID 专用电解磨削液,形成闭合回路。ELID 磨削加工过程中,砂轮作为阳极发生溶解效应,表面的金属结合剂不断溶解,露出内部锋利的磨粒,实现对砂轮的在线修锐。溶解的金属变成阳离子与磨削液中的阴

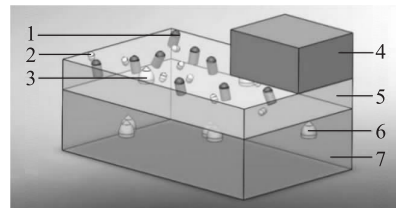
离子结合,在砂轮表面形成一层氧化膜,覆盖在砂轮加工表面,阻碍内部金属结合剂过度电解,氧化膜还可以对加工表面起到研磨的作用。随着磨削的进行,磨粒被磨掉,氧化膜便开始被磨削去除,原本被氧化膜包裹的铸铁基体继续被电解,砂轮就会重新被修锐^[9]。循环进行以上过程,砂轮就会保持锋利的磨削性能。



1. 夹具 2. 端面支撑 3. 轴承外圈 4. 成形砂轮
5. 成形电极 6. 电解液 7. 电刷

图3 ELID 成形磨削

图4为 ELID 精密镜面磨削机理图。ELID 可以实现超精密加工,是因为在光磨阶段,由于阳极的电解作用,在砂轮表面会形成一层致密且具有一定强度的弹性氧化膜,氧化膜的厚度大于细粒度砂轮中磨粒的出刃高度。氧化膜除了可以防止砂轮过度电解还可以容纳一些电解下来的微小磨钝的磨粒,形成如图4所示的形貌。氧化膜中拥有磨削、研磨和抛光磨粒,可以对工件进行研磨与抛光进而实现精密镜面加工,因此氧化膜的厚度及质量的优劣直接关系到被加工工件的表面质量^[10,11]。



1. 研磨磨粒 2. 抛光磨粒 3. 磨削磨粒 4. 工件
5. 氧化膜 6. 固着磨粒 7. 金属结合剂

图4 ELID 精密镜面磨削机理

(2) ELID 磨削技术在轴承套圈的应用

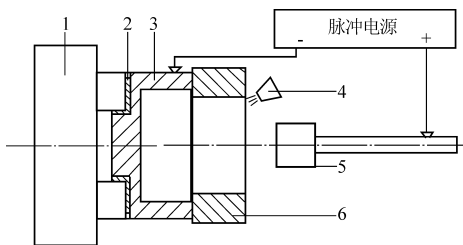
① ELID 成形磨削

由轴承外圈滚道传统加工工序(车削—热处理—磨削—超精研磨)可知,在热处理后,对滚道加工还需两道工序,工件则需进行两次装夹,不仅会增大误差,难以保证被加工工件的形状精度,还会减缓生产效率。ELID 成形磨削利用金属结合剂砂轮形状精度保持性好的特点,将砂轮的形状修整成与工件工作的形面形状完全吻合的反形面,然后用修整后的砂轮切入磨削工件,图5为 ELID 成形磨削的

示意图。因为金属结合剂砂轮与普通砂轮相比硬度和强度很高,且电解修锐(ELID)是微观状态下的去除,所以砂轮在长时间磨削可以保证形状精度,故ELID成型磨削具有加工精度高、加工表面质量好、砂轮廓型保持性好等特点,可以在一道工序内对轴承外圈滚道进行超精加工,替代磨削—超精研磨两道工序,提高了加工效率和形状精度,保证加工表面质量,还降低了成本。Fathima K.等^[12]采用W2.5粒度的金属结合剂CBN砂轮对轴承外圈进行ELID成形磨削,获得表面粗糙度 $R_a 0.027\mu\text{m}$,表面波纹度 $W_a 0.0734\mu\text{m}$ 。

②工件电极 ELID 磨削

对于一些导电的难加工材料,为了简化ELID磨削系统、提高加工效率,利用导电工件作为阴极取代专用的阴极装置,如图5所示。砂轮和导电工件之间形成导电通路产生电解氧化反应,在砂轮表面生成氧化膜,达到在线电解修整砂轮的目的,从而实现ELID磨削加工。同时,为了避免砂轮和导电工件之间可能发生的放电现象,采用半导体结合剂的砂轮能够实现稳定的ELID磨削,使加工表面达到镜面要求^[13]。杨黎健^[11]采用工件电极ELID磨削技术,用W10铸铁基CBN砂轮加工出表面粗糙度 $R_a 0.0354\mu\text{m}$ 、表面波纹度 $W_a 0.2617\mu\text{m}$ 的轴承外圈表面。



1. 夹具 2. 绝缘垫 3. 端面支撑 4. 电解液 5. 砂轮 6. 导电工件

图5 工件电极 ELID 磨削

在工件电极ELID磨削中,使用工件作为阴极代替了传统意义上的电极装置,该技术可应用于小砂轮且加工空间很小、不利于安装电极装置的情况。

③主动控制氧化膜状态的 ELID 磨削

砂轮表面氧化膜状态对于磨削的效率和质量有着重要作用,对氧化膜状态的监测和控制十分重要。研究发现,当磨削参数、脉冲电源参数和结合剂材料一定时,不同氧化膜的状态会对应不同的电解电流数值,在ELID磨削过程中,氧化膜的状态可以用电解电流来进行表征。氧化膜较厚、致密性较好时,电解电流较小;氧化膜较薄、致密性较差时,电解电流较大,并且其状态主要由机加工参数和电解修整参

数决定,因而可以通过改变上述磨削参数和电解参数调整氧化膜状态,从而主动控制ELID磨削^[14]。袁立伟等^[15]基于电解电流表征氧化膜状态的构想,编制模糊控制程序对磨削过程中氧化膜的状态进行实时监测与控制,从而主动控制ELID磨削加工。宁生科等^[16]总结影响氧化膜生长的几个主要因素之间的关系,研究了氧化膜生长厚度与电压之间的关系,应用循环结构编程实现对ELID磨削加工的主动控制。

3 轴承套圈超精密加工技术的展望

目前,轴承关键部件超精密加工技术已取得一定的成绩,不过仍在继续发展中,主要呈现出以下几个发展趋势:

(1) 加工精度、加工效率不断提高

随着先进技术的发展,加工精度不断提高,目前有很多超精密加工技术可以加工出亚微米级甚至是纳米级的轴承关键部件,虽然可达到很高的表面质量但大多以牺牲加工效率为代价,所以今后要探索能兼顾效率和精度的超精密加工技术。

(2) 在线检测,实现加工测量一体化

目前轴承套圈超精密加工技术有很多,但都不够完善,特别是在线检测技术。考虑到实际生产时,有很多道工序,进行每一道工序之前都需要相应的检测,在离线检测过程中会浪费很多时间,还会影响装夹精度,进而影响加工精度。所以从生产角度来讲,实现在线检测技术对于提高产品质量和加工效率都很重要。

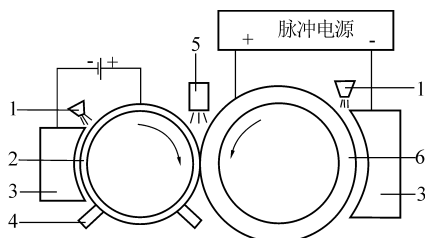
(3) 复合加工,形成新的组合工艺

随着科学技术的发展,多种加工技术可以相互复合,弥补各自的不足,形成复合加工技术,产生新的组合工艺。

①双电解磨削加工技术

双电解磨削加工技术是在线电解修整(ELID)磨削及电化学磨削技术(ECG)的结合。图6为双电解加工的示意图,电化学磨削(ECG)原理与ELID磨削相似,工件连接正极,电极连接负极,工件表面发生阳极溶解效应,形成一层氧化膜,然后迅速被砂轮的机械作用所去除,露出新的表面,继续被电解,如此循环。金属的去除主要是靠电化学作用,机械作用主要是去除阳极氧化膜,不对工件的基体材料进行磨削。同时,ELID磨削技术可以保证在加工过程中砂轮始终保持磨粒的等高性和锋利性,弥补了电化学磨削加工砂轮易磨钝、堵塞等缺点。电化学

作用和去除氧化膜的磨削作用交替进行,可以在一道工序之内大幅降低工件的表面粗糙度。双电解磨削加工技术具有加工精度高、表面质量好、效率高等特点。孙磊等^[17]采用#4000金属—树脂结合剂CBN砂轮,通过双电解加工技术加工出表面粗糙度 $R_a 5\text{nm}$ 的外圆工件。

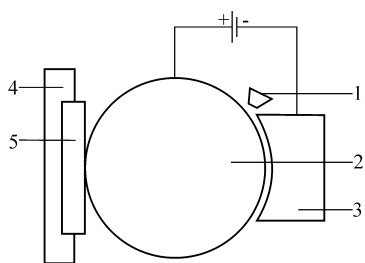


1. 电解液 2. 工件 3. 电极 4. 支撑 5. 磨削液 6. 砂轮

图6 双电解加工

②电化学机械光整加工技术

电化学机械光整加工结合了电解加工和磨削加工两种技术。其加工原理如图7所示,首先,工件与直流电源的正极相连,作为阳极;工具电极与直流电源负极相连,作为阴极,工具电极与工件之间留有 $0.01 - 0.1\text{mm}$ 的间隙,加工时通直流电源,并向间隙内注入钝化作用的电解液,电解作用开始。工件作为阳极表层金属发生电化学溶解作用,同时工件表面还发生钝化效应,在其表面形成一层氧化膜覆盖到工件表层,将工件和电解液阻隔,阻碍电解加工继续进行,电流密度逐渐减小,阳极金属的溶解速度逐渐降低。生成的氧化膜具有一定的强度和硬度,但相比金属要软很多,且厚度很薄,可以用磨削加工轻易去除。此时让磨具在低压力条件下对工件表面进行磨削,去除薄的氧化膜,然后金属基体重新露出,阳极开始继续发生电解作用。生成氧化膜和去除氧化膜的过程不断交替进行,工件表面在磨具的磨削下被迅速去除,实现光整加工。张建龙^[18]利用电化学机械光整加工技术,在最佳工艺参数下分别先后采用1000#、2000#粒度的磨具,获得表面粗糙度 $R_a 0.04\mu\text{m}$ 的内圈滚道。



1. 电解液喷头 2. 工件 3. 工具电极 4. 磨头夹具 5. 磨头

图7 电化学机械光整加工

(4)智能化、自动化,实现定制加工

建立依托数据库为基础的数字化、信息化、网络化的智能专家系统,以智能化系统和自动化设备降低加工结果对人工经验的依赖。同时依据智能化系统的参数设计定制加工出客户要求的加工精度,实现定制化加工。

4 结语

轴承作为一种精密且难加工的机械基础件,具有广泛的应用,特别是在高铁行业,所以轴承套圈的超精密加工很关键。虽然我国在此领域取得了很大的进步,但在总体上与国外差距明显,且国外很多装备及技术都对我国封锁,所以,需要通过技术和发展方式的创新,推动我国轴承超精密加工技术的进步。

参考文献

- [1]李兴林,张仰平,曹茂来,等.滚动轴承故障监测诊断技术应用进展[J].工程与试验,2009,49(4):1-5.
- [2]J L A Ferreira, J C Balthazar A, P N Araujo. An investigation of rail bearing reliability under real conditions of use[J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(6): 745-758.
- [3]夏新涛,马伟,颜谭成.滚动轴承制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [4]李悦凤.滚锥轴承套圈沟道超精工艺参数的选择[J].组合机床与自动化加工技术,2007(10):79-82.
- [5]张宏友,吴鸣宇.滚动轴承套圈及滚子滚道超精研发展现状[J].机械工程与自动化,2015(6):220-221.
- [6]李颂华,秘文博,吴玉厚,等.氮化硅轴承套圈沟道的超精研工艺实验研究[J].机械与电子,2017,35(2):32-35.
- [7]龚庆寿,宁立伟,黄菊生,等.ELID精密镜面磨削技术及其应用研究[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2003,13(3):45-47.
- [8]孙凯,张洛平,刘成甫.轴承套圈ELID磨削参数研究[J].机械设计与制造,2016(6):93-95.
- [9]关佳亮,郭东明,袁哲俊.ELID镜面磨削中砂轮生成氧化膜特性及其作用的研究[J].机械工程学报,2000,36(5):89-92.
- [10]周曙光,关佳亮,郭东明,等.ELID镜面磨削技术综述[J].制造技术与机床,2001(2):38-40.
- [11]杨黎健.基于氧化膜状态主动控制的磨削及其应用研究[D].天津:天津大学,2011.
- [12]Fathima K, Senthil Kumar A, Rahman M, et al. A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding[J]. Wear, 2003, 254(12): 1247-1255.

二维图像测量系统设计综述

刘力双,吕勇

北京信息科技大学

摘要: 首先论述了二维图像测量系统的硬件组成和选型办法;然后在图像采集与预处理、调焦定位、系统标定、颜色识别、边缘检测与亚像素定位等方面对二维图像测量系统的图像处理软件算法进行了综述,并根据测量图像的特点给出了算法设计建议;最后分析了图像测量技术的发展趋势。

关键词: 图像测量;标定;调焦;颜色识别;边缘检测;亚像素定位

中图分类号: TG80;TH701;TP391.41

文献标志码: A

Review of 2D Image-based Measurement System Design

Liu Lishuang, Lv Yong

Abstract: The hardware composition and selection method of 2D image-based measurement system are presented. Then, the algorithms related to 2D image-based measurement system, such as image acquisition & preprocessing, focusing & location, system calibration, color recognition, edge detection, sub-pixel location are summarized and the recommendations on algorithm selection according to the images' characteristics are provided. Finally, the development trend of image-based measurement technology is analyzed.

Keywords: image-based measurement system; calibration; focusing; color recognition; edge detection; sub-pixel location

1 引言

视觉测量技术是指通过采集被测物的图像,通过处理被测图像进而获得所需参数的一种测量技术,随着电子、计算机和光学技术的飞速发展,视觉测量技术得到了突飞猛进的发展。视觉测量技术以其精度高、非接触的特点越来越多地应用在工业、农业等领域。工业领域中,如汽车白车身、各种机械零件、印刷电路板、印刷品、纺织品、瓷砖、玻璃、药品等产品的在线检测^[1-4];农业领域主要是蔬菜水果的分拣,如番茄、橙子、芒果等的缺陷、类别及等级检测^[5-7]。近年来,从事视觉测量相关的企业发展迅速,视觉类产品在各种光电产品展会中所占的比例

越来越大。目前,国外从事视觉测量的公司主要有加拿大的 Dalsa 公司、美国的 Cognex 公司和 Coreco Imaging 公司、日本 CCS 公司、德国 AVT 公司等;国内从事视觉测量的公司主要有大恒图像、凌云光视、三宝兴业、嘉恒中自等。

视觉测量系统按照测量原理主要分为三维视觉测量系统和二维图像测量系统。随着视觉测量技术研究的不断深入,相关的图像处理算法越来越多。本文对二维图像测量系统的硬件设计和图像处理软件算法进行了综述,并根据测量图像的特点给出了算法设计建议。

2 二维图像测量系统硬件组成

如图 1 所示,二维图像测量系统的硬件主要包括照明光源、成像光学系统、相机、处理器。

照明光源的作用是对被测物进行主动照明,以

基金项目:北京市自然科学基金(7172035)
收稿日期:2017年8月

- [13] 尹韶辉,曾宪良,范玉峰,等. ELID 镜面磨削加工技术研究进展[J]. 中国机械工程,2010(6):750-755.
- [14] 张开飞. 球轴承套圈沟道 ELID 成形磨削试验研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [15] 袁立伟,任成祖,舒展. ELID 超精密镜面磨削钝化膜状态变化的研究[J]. 航空精密制造技术,2006,42(1):5-8.
- [16] 宁生科,柯镭. ELID 磨削工艺控制研究[J]. 机械研究与应用,2014(1):60-61,64.

- [17] 孙磊,董晨晨,吕冰海,等. 基于双电解作用的表面磨削设备[P]. 浙江:CN203495765U,2014-03-26.

- [18] 张建龙. 轴承滚道电化学机械光整加工试验研究[D]. 济南:山东大学,2013.

第一作者:关佳亮,博士后,教授,北京工业大学,100124北京市

First Author: Guan Jiali, Postdoctoral, Professor, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China