

DOI: 10.11973/jxgccl201906010

超声振动辅助磨削 GCr15 轴承钢的表面残余应力

栗育琴¹, 肖 罡^{2,3,4}, 李 涛³

(1. 泸州职业技术学院, 泸州 646000; 2. 湖南大学, 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

3. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 株洲 412001;

4. 湖南科技大学, 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

摘 要: 对 GCr15 轴承钢进行了超声振动辅助磨削和未施加超声振动的普通磨削, 测试了磨削表面的残余应力, 研究了超声振动以及进给深度($5\sim 30\ \mu\text{m}$)和砂轮线速度($2\sim 12\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)对表面残余应力的影响。结果表明: 两种方式磨削后的表面均形成了残余压应力, 且超声振动辅助磨削的表面残余压应力较大; 随着进给深度的增大或砂轮线速度的减小, 两种方式磨削加工后的表面残余压应力总体上均呈增大趋势; 随着砂轮线速度的增大, 施加超声振动前后表面残余压应力的差值减小, 说明超声振动对表面残余压应力的提高作用减弱。

关键词: 超声振动辅助磨削; GCr15 轴承钢; 残余应力

中图分类号: TH16

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)06-0050-03

Surface Residual Stress of GCr15 Bearing Steel by Ultrasonic Vibration Assisted Grinding

LI Yuqin¹, XIAO Gang^{2,3,4}, LI Tao³

(1. Luzhou Vocational & Technical College, Luzhou 646000, China; 2. State Key Laboratory of

Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China; 4. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Ultrasonic vibration assisted grinding and conventional grinding without ultrasonic vibration were conducted on GCr15 bearing steel, and then the grinding surface residual stresses were measured. The effects of ultrasonic vibration as well as grinding depth ($5\sim 30\ \mu\text{m}$) and linear speed of grinding wheel ($2\sim 12\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) on the surface residual stress were studied. The results show that the residual compressive stresses were generated on the surfaces grinded by the two methods. The surface residual compressive stress obtained by the ultrasonic vibration assisted grinding was relatively high. With increasing feed depth or decreasing linear speed of grinding wheel, the surface residual compressive stresses by the two methods both generally increased. With increasing linear speed of grinding wheel, the difference value between the surface residual compressive stresses with and without ultrasonic vibration was reduced, indicating that the improvement effect of the ultrasonic vibration on the surface residual compressive stress was weakened.

Key words: ultrasonic vibration assisted grinding; GCr15 bearing steel; residual stress

收稿日期: 2018-12-27; 修订日期: 2019-04-09

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3178); 湖南科技大学博士科研启动基金资助项目(E51783); 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室开放基金资助项目(E21751); 泸州职业技术学院质量工程资助项目(ZYKC-201603)

作者简介: 栗育琴(1983—), 女, 山西长治人, 讲师, 硕士

通信作者: 肖罡高级工程师

0 引 言

滚动轴承是非常重要且应用广泛的工业基础零部件。轴承滚道表层的残余应力是影响其服役性能及可靠性的重要因素之一。磨削是滚动轴承制造的最终加工工序。若能通过优化磨削加工工艺, 使滚道表层形成一定幅度的残余压应力, 则可有效抑制

疲劳裂纹的萌生与扩展,从而显著提高轴承的疲劳寿命^[1]。近年来,超声辅助磨削技术在精密加工硬脆难加工材料领域受到了广泛关注^[2]。在磨削加工过程中,超声振动及其他磨削参数均会对磨削表面的残余应力产生显著影响。UHLMANN 等^[3]在磨削加工陶瓷材料过程中,通过增强径向超声振动而在磨削表面获得了更大的残余压应力。赵明利^[4]在采用单颗金刚石磨粒超声辅助磨削加工纳米氧化锆陶瓷时发现,随着超声频率的增大,磨削表面的残余应力呈现出先增大后减小的抛物线演变规律。薛进学等^[5]在进行二维超声辅助磨削纳米复相陶瓷时发现,在相同磨削参数下,加载二维超声辅助后磨削表面的切向残余拉应力明显降低、法向残余压应力增大,此外磨粒尺寸的减小会进一步降低切向残余拉应力。姚建国等^[6]采用二维超声辅助磨削系统对工程陶瓷进行了磨削加工,发现超声辅助磨削与普通磨削后磨削表面的残余应力均为压应力,但超声辅助磨削形成的残余压应力较大;两种磨削方式形成的表面残余压应力均随磨削深度的增加而减小,但超声辅助磨削的减小幅度较小。目前,有关超声振动辅助磨削与残余应力关系的研究主要集中在陶瓷等非金属硬质难加工材料上,在金属材料上的研究相对较少。为此,作者对 GCr15 轴承钢进行了超声振动辅助磨削和普通磨削加工,研究了超声振动以及进给深度、砂轮线速度等磨削参数对表面残余应力的影响,为优化滚动轴承滚道磨削加工工艺、改善其表面残余应力提供试验基础。

1 试样制备与试验方法

试验材料为市售 GCr15 轴承钢,正火态。在磨削试验开始前,对尺寸为 20 mm×10 mm×10 mm 的 GCr15 轴承钢试样进行退火处理,以消除初始残余应力,退火工艺为 800 °C 保温 1 h,随炉冷至 690 °C,再空冷至室温。

使用装有超声振动装置的磨削试验平台(如图 1 所示)进行超声振动辅助磨削和未施加超声振动的普通磨削加工试验。超声振动装置由超声变幅杆和超声换能器组成,试样安装在超声变幅杆末端;采用立方氮化硼(CBN)砂轮,直径 100 mm、宽度 10 mm,表面磨粒粒径为 250 μm,砂轮线速度分别为 2,4,6,8,10,12 m·s⁻¹,试样进给速度为 500 mm·min⁻¹,进给深度分别为 5,10,15,20,25,30 μm;当需要施加超声振动时,开启超声振动装置,振动频率为 25 kHz,振幅为 5 μm。为了避免冷却液耗散磨

削热而影响分析结果的有效性,所有磨削试验均采用干磨削方式。

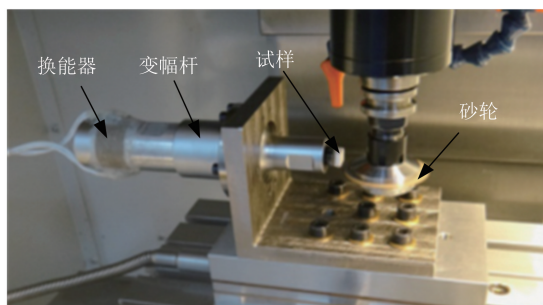


图 1 超声振动辅助磨削装置

Fig.1 Ultrasonic vibration assisted grinding setup

磨削试验结束后,使用 iXRD 型便携式高速残余应力分析仪测试磨削表面残余应力,在待测表面中间位置、垂直于磨削方向测 3 个等间距点,取平均值作为最终测试结果。

2 试验结果与讨论

2.1 进给深度对表面残余应力的影响

由图 2 可知:无论是否施加超声振动,磨削加工后试样的表面残余应力均为压应力,且残余压应力总体上随进给深度的增加而增大;超声振动辅助磨削加工后试样的表面残余压应力比普通磨削加工后的高 10~50 MPa。

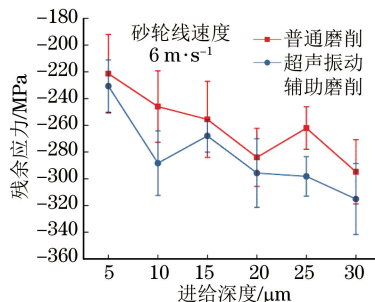


图 2 超声振动辅助磨削和普通磨削后试样表面残余应力随进给深度的变化曲线

Fig.2 Surface residual stress vs feed depth curves of specimens after ultrasonic vibration assisted grinding and conventional grinding

材料表层的残余应力状态取决于磨削加工所产生的力/热耦合作用^[1]:由磨削力产生的机械作用使表层形成残余压应力,由磨削热产生的热胀冷缩效应使表层形成残余拉应力,二者的代数和即为表层残余应力。由磨削加工理论可知:随着进给深度的增加,磨削力增大,导致磨削表面残余压应力提高;同时材料去除率增大,导致加工过程中热流密度增大。然而,CBN 砂轮的散热性能较好,且试验时的

线速度相对较小,在磨削加工中磨削热的形成和聚集速率相对较低,耗散速率相对较大。因此,相较于磨削力,磨削热对残余应力的影响程度较小;二者的综合作用导致磨削表面形成了残余压应力。此外,超声振动可有效降低磨削热^[7-8],抑制磨削表面残余拉应力的产生,形成较大的残余压应力;同时在超声振动作用下,磨粒的切削轨迹会由定圆弧线变为不规则的空间三维曲线,其切削弧长较未施加超声振动磨削时的显著增大。切削弧长越长,切削周期越长,磨粒与工件表面的冲击次数越多^[9],这就形成了超声振动冲击效应,从而强化了磨削力产生的机械作用,使得磨削表面形成更大的残余压应力。

2.2 砂轮线速度对表面残余应力的影响

由图3可知: 无论是否施加超声振动,磨削加工后试样的表面残余应力均为压应力,残余压应力总体上均随着砂轮线速度的增大而减小;超声振动辅助磨削加工后试样的表面残余压应力高于普通磨削加工后的,二者差值随着砂轮线速度的增大而减小,说明超声振动作用对残余压应力的提高作用减弱。

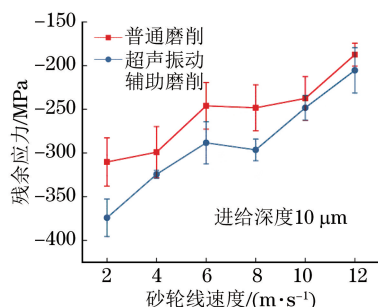


图3 超声振动辅助磨削和普通磨削后试样表面残余应力随砂轮线速度的变化曲线

Fig.3 Surface residual stress vs linear speed of grinding wheel curves of specimens after ultrasonic vibration assisted grinding and conventional grinding

随着砂轮线速度的增大,磨削力减小,单位时间内参与磨削的磨粒数量增多,导致形成不断强化的热效应^[10]。因此,由机械作用效应主导的表面残余压应力呈现出减小趋势,而由磨削热效应主导的残余拉应力表现为增大趋势。此外,砂轮线速度的增大缩短了磨粒从切入工件至切出工件的运行时间,减少了由超声振动诱发的磨粒对工件表面的冲击次数,降低了由超声振动冲击效应主导形成的残余压应力;同时,砂轮线速度的增大也削弱了超声振动对

磨粒切削轨迹的影响程度^[9],导致磨粒的切削弧长逐渐趋近于普通磨削条件下的。因此,随砂轮线速度的增大,超声振动对表面残余压应力的提高作用减弱,施加超声振动前后表面残余压应力的差值减小。

3 结 论

(1) 超声振动辅助磨削加工和未施加超声振动普通磨削加工后,GCr15 轴承钢试样的磨削表面均形成了残余压应力,且施加超声振动时的表面残余压应力相对较大。

(2) 随着进给深度的增大或砂轮线速度的减小,两种方式磨削加工后的表面残余压应力总体上均呈增大趋势;随着砂轮线速度的增大,施加超声振动前后表面残余压应力的差值减小,说明超声振动对表面残余压应力的提高作用减弱。

参考文献:

- [1] 胡忠辉,袁哲俊. 磨削残余应力产生机理的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1989, 21(3): 51-60.
- [2] GUO B, ZHAO Q L. Ultrasonic vibration assisted grinding of hard and brittle linear micro-structured surfaces[J]. Precision Engineering, 2017, 48: 98-106.
- [3] UHLMANN E, SPUR G. Surface formation in creep feed grinding of advanced ceramics with and without ultrasonic assistance[J]. CIRP Annals, 1998, 47(1): 249-252.
- [4] 赵明利. 多频率超声辅助磨削纳米氧化锆陶瓷表面/亚表面损伤机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [5] 薛进学,赵波,吴雁. 二维超声磨削纳米复相陶瓷表面残余应力研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 636-640.
- [6] 姚建国,宁欣,王占奎,等. 超声辅助磨削后纳米 ZrO₂ 陶瓷的表面残余应力[J]. 机械工程材料, 2014, 38(2): 90-92.
- [7] ZAHEDI A, TAWAKOLI T, AKBARI J. Energy aspects and workpiece surface characteristics in ultrasonic-assisted cylindrical grinding of alumina-zirconia ceramics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 90: 16-28.
- [8] 张立丽,赵波,卞平艳. 纳米复相陶瓷超声振动平面磨削温度的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(3): 76-79.
- [9] CHEN H F, TANG J Y, SHAO W, et al. An investigation of surface roughness in ultrasonic assisted dry grinding of 12Cr2Ni4A with large diameter grinding wheel [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(6): 929-936.
- [10] 何玉辉,周剑杰,周群,等. 超声磨削表面残余应力工艺实验与回归分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 612-617.