

金刚石刀具低温硬车削轴承钢的表面残余应力研究

吴茂宁,赵威,何宁

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:应用 CVD 金刚石刀具,在低温 CO_2 冷却下,进行 GCr15 轴承钢的低温硬车削试验,分析 GCr15 轴承钢加工表面残余应力的分布规律,探讨切削速度、进给量以及切削深度等切削参数对表面残余应力的影响。结果表明:在试验参数范围内,GCr15 轴承钢的加工表面残余应力均为残余压应力,随着切削速度和进给量的增大,周向和轴向最大残余应力幅值均呈现出随之增大的变化趋势;随着切削深度的增加,周向最大残余应力幅值随之增大,但轴向最大残余应力幅值无明显变化。研究结果为 GCr15 轴承钢切削参数的选择和加工表面残余应力控制提供数据支撑。

关键词:CVD 金刚石刀具; 低温硬车削; GCr15 轴承钢; 残余应力

中图分类号:TH123+.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0010-03

Research on Surface Residual Stress of Bearing Steel GCr15 in Cryogenic Hard Turning with CVD Diamond Cutting Tools

WU Maoning, ZHAO Wei, HE Ning

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The hard turning experiment of bearing steel GCr15 was carried out with CVD diamond tool under cryogenic CO_2 cooling. The distribution of surface residual stress of bearing steel GCr15 was analyzed, and the influence of cutting parameters such as cutting speed, feed rate and depth of cut on surface residual stress was discussed. The results show that the surface residual stresses of bearing steel GCr15 are compressive stresses under the given range of cutting parameters. With the increase of cutting speed and feed rate, the amplitudes of maximum circumferential and axial residual stress tend to increase. With the increase of depth of cut, the amplitude of maximum circumferential residual stress increases, but the amplitude of maximum axial residual stress does not change obviously. The results provide necessary data support for the selection of cutting parameters and the control of surface residual stress of bearing steel GCr15.

Keywords: CVD cutting tool; cryogenic hard turning; bearing steel GCr15; surface residual stress

0 引言

薄壁轴承套圈是现代工业机器人用薄壁轴承中的重要构成部件,主要采用轴承钢制造。由于其兼具高强、高硬、薄壁等典型特征,因而加工质量、加工效率等问题一直是轴承制造业亟待解决的难题。对该类高硬度金属材料的精密机械加工,常采用磨削加工方式,但磨削加工具有材料去除率低、污染重等缺点^[1]。因此,随着超硬刀具材料的研制和应用,以加工硬度较高金属材料(硬度在 42~65 HRC 之间)为特征的硬切削技术亦随之兴起并得以推广应用。目前,“以车代磨”在精密切削加工领域得到了广泛的应用^[2]。

硬切削技术的核心优势不仅体现在能够大幅提升高硬材料零件的加工效率、降低因使用切削液带来的环境污染,还体现在能够有效提升该类材料零件的表面完整性及

其使用性能。其中,表面残余应力则是衡量表面完整性的重要参数之一。通常表面残余应力主要是工件在切削过程中发生热塑性变形引起的,与加工参数、刀具参数、材料参数等因素密切相关^[3-4]。近年来,许多研究者致力于研究如何控制硬切削残余应力的产生,以提高产品的疲劳寿命。何少杰等^[5]研究了切削参数、刀具参数、工件材料参数等对切削残余应力的作用,并对残余应力与疲劳寿命之间的关系进行了分析。刘彦臣等^[6]通过试验研究,分析了不同切削参数下切削 34CrNiMo6 钢时的残余应力与疲劳寿命的关系,发现残余应力对疲劳寿命起主要作用并且压应力对疲劳寿命有益。此外,HUANG K 等^[7]研究了基本切削变量对残余应力的影响,并分析了刀具前角与残余应力的关系,结果表明残余应力幅值随刀具前角的增大而增大。PAWAR S 等^[8]借助有限元分析软件预测了硬车削 AISI52100 的表面残余应力分布,发现当切削速度和进给量升高时残余应力均随之升高。

基金项目:国家自然科学基金广东省联合基金重点项目(U1601204)

第一作者简介:吴茂宁(1994—),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为先进切削技术。

目前,针对轴承钢材料的硬态精密切削刀具选择方面,细晶粒硬质合金刀具具有较高的性价比,但刀具磨损过快问题仍较突出,并且表面质量与传统磨削相比并不具备优势。此外,PCBN 刀具可以高效、高质量加工轴承钢材料^[9],但加工成本相对较高。随着 PCD、CVD 等金刚石刀具技术的发展,已有研究表明金刚石刀具在低温冷却条件下可以用来加工模具钢等黑色金属材料^[10-11],且具有较高的性价比。为此,本文尝试选用 CVD 金刚石刀具在低温 CO₂ 冷却下进行低温硬车削 GCr15 轴承钢材料,重点探讨低温硬切削表面残余应力的分布规律和切削参数对其影响规律,以期为该类材料的精密硬切削提供新的途径。

1 试验条件及测量方法

1.1 试验条件

工件材料为 GCr15 轴承钢,工件直接选用 NU211 圆柱滚子轴承内圈(硬度 62 HRC);工件尺寸:外圆直径 66 mm,内圆直径 55 mm,环宽 21 mm。刀具为 CNMA120412-2N 型 CVD 金刚石刀具,刀具前角 -6°,后角 6°,刀尖圆弧半径 1.2 mm。试验用机床为 EMAG VL2 立式数控车床;夹具为 ABSIS01 型膨胀芯轴;切削参数如表 1 所示。此外,为抑制金刚石刀具切削轴承钢时的刀具磨损,利用羊角管喷射低温 CO₂ 进行冷却,试验采用单因素试验法。

表 1 单因素试验参数表

切削速度/(m/min)	进给量/(mm/r)	切削深度/mm
100	0.05	0.03
150		
200		
250		
200	0.02	0.03
	0.05	
	0.08	
	0.10	
200	0.05	0.02
		0.03
		0.05
		0.08

1.2 测量方法

为了测量距离工件表面不同深度下的残余应力,应用 X-350A 型 X 射线应力分析测量仪先对工件已加工表面测量,然后利用电腐蚀装置对工件进行一层层腐蚀,每腐蚀完 1 层测量 1 次,残余应力测量仪和电腐蚀装置如图 1 所示。其中,逐层测量时,沿轴承周向等间隔选取 3 个点,分别测量周向和轴向残余应力,为使结果更可靠取平均值作为评价分析数据。

2 结果与讨论

2.1 切削速度对表面残余应力的影响

图 2 为当进给量为 0.05 mm/r、切削深度为 0.03 mm 时切削速度对表面残余应力的影响。从图 2 可以看出,在机械应

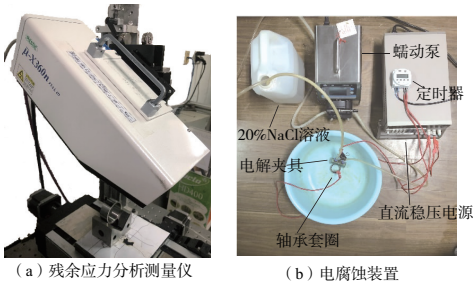


图 1 残余应力测试装置

力和热应力的耦合作用下,GCr15 轴承钢加工表面层的周向和轴向残余应力均为残余压应力;周向残余应力幅值表现为先增大再减小进而趋于稳定的分布状态,而轴向残余应力幅值增大幅度不明显。与此同时,周向和轴向最大残余应力幅值主要出现表面层下 5~10 μm 处。

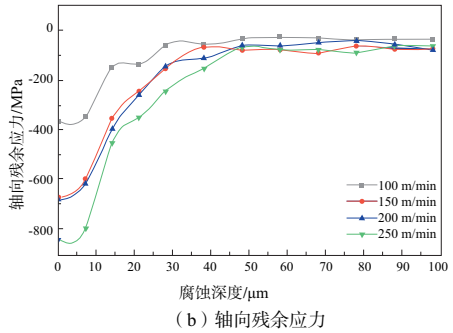
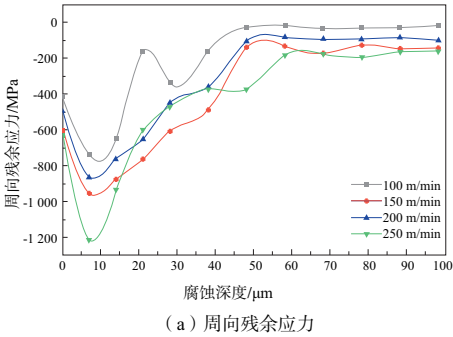


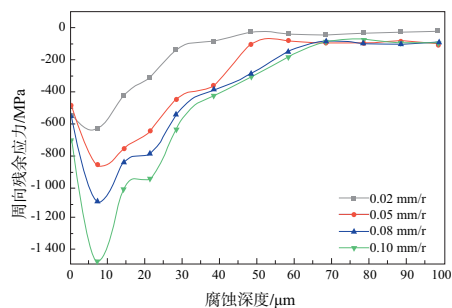
图 2 切削速度对表面残余应力的影响

此外,从图 2 还可以看出最大残余应力幅值随切削速度增大呈现出增大趋势,但 150 m/min 切削速度下的周向残余应力幅值大于 250 m/min 切削速度下的数值。这主要是因为切削区材料同时承受因挤压变形带来的压应力和因切削热带来的拉应力的共同作用,而挤压变形作用相对更大,所以加工表面呈现压应力状态。随着切削速度的增大,因挤压变形相比切削温度升高带来的影响更加显著,因此表面残余压应力幅值亦随之增大。而在 150 m/min 切削速度下出现了轻微颤振,因此周向残余应力幅值大于 200 m/min 速度下的幅值。

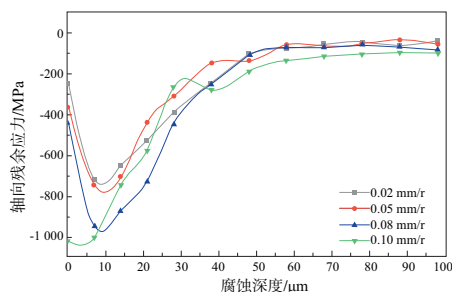
2.2 进给量对表面残余应力的影响

图 3 为切削速度为 200 m/min、切削深度为 0.03 mm 时进给量对表面残余应力的影响。从图 3 可见,不同进给量下的周向和轴向残余应力幅值同样表现为先增大再减

小进而趋于稳定的分布状态,周向和轴向最大残余应力幅值亦主要出现在表面层下 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 处。此外,周向和轴向残余应力均为压应力,且应力幅值随着进给量的增大而增大。这是因为刀具挤压变形带来的压应力增量大于热应力带来的拉应力增量,并且进给量的增大加大了刀具-切屑之间的接触面积,散热条件变差,刀具挤压变形增多,因此最大残余应力幅值逐渐增大。



(a) 周向残余应力

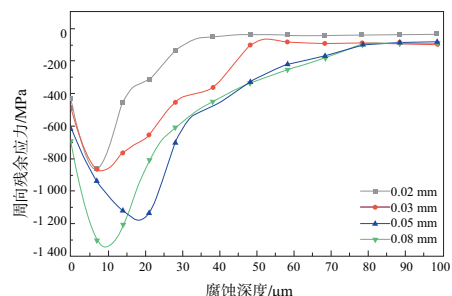


(b) 轴向残余应力

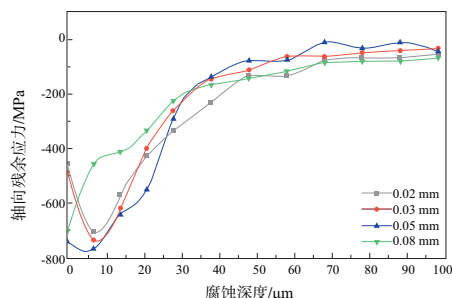
图3 进给量对表面残余应力的影响

2.3 切削深度对表面残余应力的影响

图4为切削速度为 200 m/min 、进给量为 0.05 mm/r 时,切削深度对表面残余应力的影响。可以发现不同切削深度下的表面残余应力均为压应力,同样表现为先增大再减小进而趋于稳定的分布状态。除个别数据点外,周向和轴向最大残余应力幅值亦主要出现在表面层下 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 处。当切削深度增大时,周向最大残余应力幅值随之升高,而轴向最大残余应力增幅较小。这主要是因为切削深度变大会使刀具对加工工件的挤压作用变大、单位时间内生热变多,同时刀具-切屑之间接触面积变大,使得散热条件改善,从而降低了切削热引起的拉应力,并且切削时切削深度的增大在工件的周向上带来更大的作用。综合上述作用最大残余压应力幅值随之升高,且周向最大残余应力幅值变化明显。



(a) 周向残余应力



(b) 轴向残余应力

图4 切削深度对表面残余应力的影响

3 结语

开展了 CVD 金刚石刀具低温硬车削 GCr15 轴承钢的试验,对切削速度、进给量和切削深度与周向和轴向残余应力之间的影响关系进行分析,在试验参数范围内得到结论如下:

1) GCr15 轴承钢的加工表面残余应力均为残余压应力;残余应力幅值沿表面层深度方向呈先增大再减小进而趋于稳定的分布状态,最大残余应力幅值主要出现在表面层下 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 处;最大周向残余应力幅值略大于最大轴向残余应力幅值。

2) 当切削速度和进给量增大时,周向和轴向最大残余应力幅值均呈现出随之增大的趋势;而当切削深度增加时,周向最大残余应力幅值随之增大,但轴向最大残余应力幅值呈无明显变化趋势。

参考文献:

- [1] 李新宁. 硬车削加工的特点及应用研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(8): 103-106.
- [2] 文东辉. PCBN 刀具硬态切削机理及技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [3] 唐林虎. 淬硬工具钢精密干式硬态车削机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [4] 徐明. PCBN 刀具车削镍基高温合金表面完整性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [5] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, (6): 120-126, 132.
- [6] 刘彦臣, 庞思勤, 王西彬, 等. 表面完整性对高强度钢疲劳寿命影响的试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(6): 759-764.
- [7] HUANG K, YANG W. Analytical analysis of the mechanism of effects of machining parameter and tool parameter on residual stress based on multivariable decoupling method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 128/129: 659-679.
- [8] PAWAR S, SALVE A, CHINCHANIKAR S, et al. Residual stresses during hard turning of AISI 52100 steel: numerical modelling with experimental validation [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 2350-2359.
- [9] 单远. 薄壁轴承套圈精密硬车削研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [10] 阎丹. 黑色金属金刚石切削刀具磨损及表面质量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] 黄亮. 模具钢金刚石切削时冷却润滑条件对刀具磨损影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

收稿日期: 2020-05-06