

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.014

基于 DEFORM-3D 的 GCr15 轴承钢 车削残余应力的仿真研究

李鹏阳¹, 曹利平², 何进¹, 刘强¹, 王红新³, 李言¹

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 陕西柴油机重工有限公司 工艺研究所, 陕西 兴平 713105;

3. 陕西柴油机重工有限公司 综合技术管理部, 陕西 兴平 713105)

摘要: 利用 DEFORM-3D 仿真软件对 GCr15 轴承钢的车削外圆工艺进行有限元仿真, 通过改变 5 个切削参数来模拟切削参数对 GCr15 轴承钢车削外圆工艺后残余应力的影响, 得到切削参数对残余应力分布的影响趋势。最后, 对 GCr15 轴承钢进行沿深度方向的残余应力测量实验, 验证了仿真结果的有效性。

关键词: 仿真; 车削; 轴承钢; 残余应力

中图分类号: TH162⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2018)04-0468-07

Simulation analysis of residual stress in turning GCr15 bearing steel based on DEFORM-3D

LI Pengyang¹, CAO Liping², HE Jin¹, LIU Qiang¹, WANG Hongxin³, LI Yan¹

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

China; 2. Institute of Technology, Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Ltd, Xingping 713105, China;

3. Department of Comprehensive Management, Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Ltd, Xingping 713105, China)

Abstract: The DEFORM-3D simulation software is used to simulate the turning process of the GCr15 bearing steel, and to simulate the effect of cutting parameters on residual stresses in the GCr15 bearing steel turning process by changing 5 cutting parameters, with the influence trend of cutting parameters on residual stress distribution obtained. Finally, the experiment on measuring the residual stress along the depth direction of GCr15 bearing steel proves the validity of the simulation results.

Key words: simulation; turning; bearing steel; residual stress

在切削过程中, 由于机械挤压、材料晶格受热处理发生畸变等因素, 会使工件在加工完成后内部存在一定的残余应力^[1]。近年来, 计算机仿真技术的发展越来越成熟, 完全可以用计算机仿真材料的加工成形, 获得工件加工完成后的残余应力分布情况。

关于机械加工残余应力的研究主要集中在实验验证和仿真分析两个方面。Sujit Pawar 等^[2]针对切削速度、进给量和切削深度三个工艺参数, 对 GCr15 轴承钢在车削条件下产生的残余应力进行了研究。Jawahir I S 等^[3]完成了测量各种表面完整

性参数的实验, 是在切削速度等参数不变的情况下测量的。Revel P 等^[4]对不同切削速度和切削深度参数下的残余应力进行了分析。李万钟等^[5]根据热弹塑性有限元理论, 建立了热力耦合的二维正交硬态切削模型, 通过有限元分析计算, 得到了不同切削速度和刀具前角参数下的残余应力仿真结果。常艳艳等^[6]在改变切削速度和背吃刀量的前提下, 对车削后的硬铝合金进行了有限元模拟, 最后用测量数据进行了验证。由此可见, 国内外研究学者大多只是对其中某个或者某几个工艺参数进行了有限元仿

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室基金资助项目(15JS067)

作者简介: 李鹏阳, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为机床结合面微观接触机理、表面接触和摩擦、机械加工状态监测、超声振动加工等。E-mail: lipengyang@xaut.edu.cn

真,参数考虑不够全面。本文考虑了切削速度、进给量、切削深度、刀具前角、刀具后角 5 个参数,而且同时考虑了切削方向和进给方向上残余应力的分布趋势,可以更全面地分析工艺参数对工件残余应力分布的影响规律。

本文采用 DEFORM-3D 软件对柴油机喷油泵中的滚轮(材料为轴承钢 GCr15)进行车削仿真,分析了切削速度、进给量、切削深度、刀具前角和刀具后角对滚轮车削残余应力的影响,最后对滚轮用 X 射线衍射法进行测量,验证了有限元仿真结果的有效性,为生产高质量的工件提供参考依据。

1 材料属性

1.1 材料性能

本文的研究对象为滚轮,该滚轮在 CS6140 车床上精车,采用水基切削液,车削工艺参数为:切削速度 45 m/min,进给量 0.2 mm/r,切削深度 0.5 mm,材料为轴承钢 GCr15。在室温 20 °C 下,该材料机械物理性能参数为:泊松比 0.277,杨氏模量 201 GPa,比热容 3.4×10^2 J/(kg · °C),热传导率 52.5 W/(m · °C),热膨胀系数 11.5×10^{-6} /°C。在温度发生跨数量级变化时,该材料的各项机械物理特性参数也会随之发生较大的变化^[7-8],可根据不同温度时的各项材料性能参数建立轴承钢 GCr15 的材料特性曲线,以适应材料在高温、大变形的车削过程中的性能变化。

1.2 材料本构模型

在金属切削的计算机有限元模型中,可以通过多种方法建立材料的本构模型。由于 Johnson-Cook 本构模型^[9-10]可以很好地描述材料在切削过程中的应力-应变关系,所以本文采用该本构模型,其具体表达式为:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot \left(1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为材料流动应力; A 为条件屈服极限; B 为应变硬化指数; C 为应变率敏感性指数; m, n 为材料常数; $\bar{\epsilon}$ 为平均应变速率; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为应变速率; T 为材料动态温度; T_m 为材料熔点; T_r 为室温。

本文参数参考文献[2]中的数值: $A=2\ 482$ MPa, $B=1\ 498$ MPa, $C=0.027$, $m=0.66$, $n=0.19$, $T_r=25$ °C。

2 车削有限元仿真

2.1 仿真规划

选择切削用量三要素和车刀的主要角度——刀

具前角和刀具后角为影响因素,分别赋予不同的数值,利用单因素控制变量法,分析各个参数对残余应力的影响,仿真规划如表 1 所示^[11]。

表 1 车削仿真规划
Tab.1 Simulation plan for turning

编组	切削速度 v_c /(m/min)	进给量 f / (mm/r)	切削深度 a_p /mm	刀具前角 γ_0 /°	刀具后角 α_0 /°
1	45	0.20	0.50	0	5
2	75	0.20	0.50	0	5
3	100	0.20	0.50	0	5
4	45	0.15	0.50	0	5
5	45	0.20	0.50	0	5
6	45	0.30	0.50	0	5
7	45	0.20	0.20	0	5
8	45	0.20	0.50	0	5
9	45	0.20	0.80	0	5
10	45	0.20	0.50	-5	5
11	45	0.20	0.50	0	5
12	45	0.20	0.50	10	5
13	45	0.20	0.50	0	5
14	45	0.20	0.50	0	8
15	45	0.20	0.50	0	10

2.2 有限元模型的建立和仿真

采用 DEFORM-3D 软件进行车削仿真^[12]:

1) 输入切削用量三要素的数值。

2) 刀具和工件接触的切削区域分为滑动区和粘结区,一般在滑动区域使用库仑摩擦定律,在粘结区域使用常摩擦应力,刀具和工件的剪切摩擦因子设为 0.6。

3) 工件与空气的对流换热系数为 0.02 W/(m² · °C),室温设置为 20 °C,工件与刀具的热传递系数为 45 W/(m² · °C)。对滚轮在 X、Y、Z 三个方向分别进行约束。

4) 选择 CNMA432 车刀,刀具材料为硬质合金。工件类型选弹塑性体,工件模型选择曲线模式。

5) 设定 1 200 步,每 30 步保存一次。

残余应力的有限元仿真过程分为切削阶段、刀具卸载、约束转换和冷却阶段^[13]。图 1 为切削阶段,图 2 为冷却阶段。

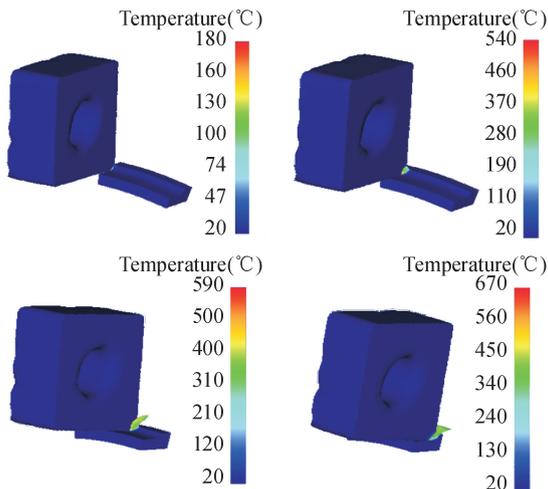


图1 切削阶段
Fig.1 Cutting stage

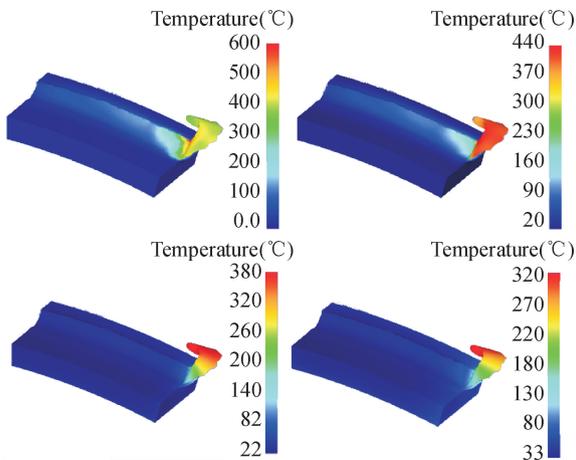


图2 冷却阶段
Fig.2 Cooling stage

3 车削残余应力仿真结果

3.1 切削速度对车削残余应力的影响

研究切削速度对车削残余应力的影响时,其余的切削工艺参数按照表1车削仿真规划中编组1~3的数据进行设定。

对滚轮建立坐标系,Y方向为切削方向,X方向为进给方向,如图3所示。



图3 滚轮坐标系
Fig.3 Roller coordinate system

图4(a)为切削方向切削速度影响车削残余应力的分布趋势。GCr15轴承钢表面出现残余拉应力,表面以下出现残余压应力。当切削速度 v_c 由45 m/min增大到100 m/min时,滚轮表面残余拉应

力也出现增长趋势,这主要是由于切削速度的增大导致切削温度升高,使得切削热引起的热载荷起主要作用;工件表面以下残余压应力数值也变大,这是因为随着深度的递增,热应力对车削残余应力的影响渐渐减弱,使得机械挤压作用对车削残余应力的影响相对增强。滚轮车削残余应力到达表面以下一定深度时趋于稳定状态,这主要是由于到达了材料的基体状态,此时切削速度对残余应力基本没有影响^[14]。

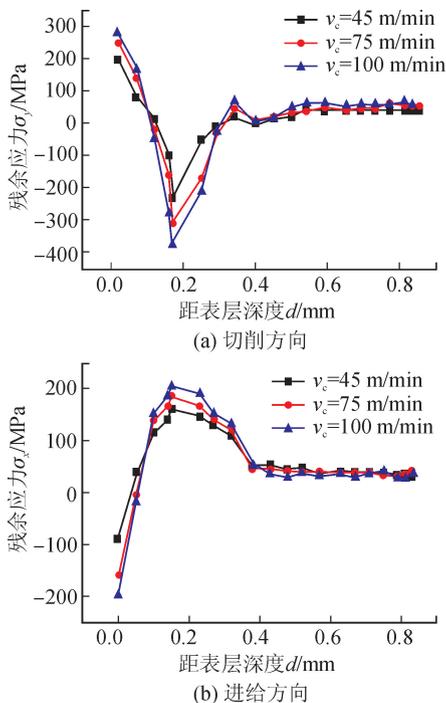


图4 切削速度影响车削残余应力的分布趋势
Fig.4 Distribution trend of cutting speed influence the residual stress in turning

图4(b)为进给方向切削速度影响车削残余应力的分布趋势。与切削方向上不同,滚轮表面出现的是残余压应力,表面以下出现残余拉应力。当切削速度 v_c 由45 m/min递增到100 m/min时,滚轮表面残余压应力数值相应地变大,这主要是由于切削速度逐渐变大时,进给方向上车刀对滚轮的挤压越来越强烈,使得残余压应力变大;滚轮表面以下残余拉应力变大,这是由于随着深度的增加,进给方向上车刀对滚轮的挤压作用渐渐变小,使其热应力作用逐渐占据主导地位。

3.2 进给量对车削残余应力的影响

研究进给量对车削残余应力的影响时,其切削工艺参数按照表1车削仿真规划中编组4~6的数据进行设定。

图5(a)为切削方向上进给量影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面出现了残余拉应力,当进

给量 f 从 0.15 mm/r 递增到 0.30 mm/r 时,滚轮表面的残余拉应力逐渐变大,原因是进给量增大,切削力也变大,相应的切削温度升高,使切削热造成的热应力作用对车削残余应力的影响更加突出,使滚轮表面的残余拉应力随着切削热的增加而变大。自滚轮表面向下深度逐渐增加时,滚轮的残余应力由表面的残余拉应力开始向残余压应力转变,在 0.15 mm 左右达到最大值,之所以出现这种情况,是因为滚轮表面以下的残余应力要与表面存在的残余拉应力达到平衡。因此,在表面以下产生了残余压应力。

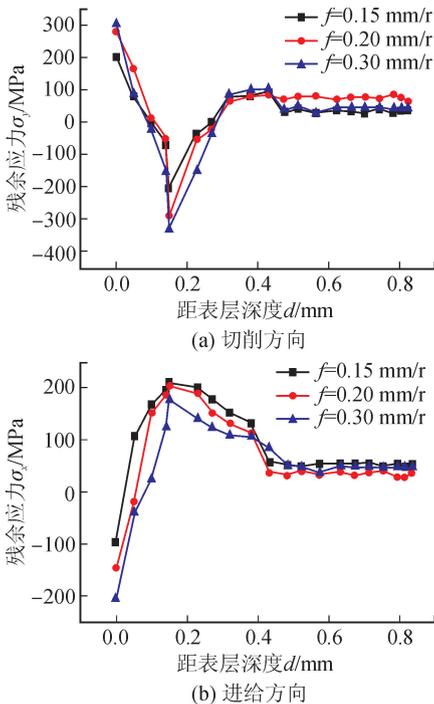


图5 进给量影响车削残余应力的分布趋势
Fig.5 Distribution trend of feed rate influence the residual stress in turning

图5(b)为进给方向上进给量影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面出现了残余压应力,当进给量 f 从 0.15 mm/r 递增到 0.30 mm/r 时,滚轮表面的残余压应力数值逐渐变大,这主要是由于进给量的增大使得进给方向上车刀对滚轮的挤压作用增大,使得滚轮残余压应力逐渐变大。随着深度的延伸,残余压应力逐渐向拉应力过渡且最终趋于稳定。

3.3 切削深度对车削残余应力的影响

研究切削深度对车削残余应力的影响时,其切削工艺参数按照表1车削仿真规划中编组7~9的数据进行设定。

图6(a)为切削方向上切削深度影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面是残余拉应力,切削深度 a_p 的数值由 0.2 mm 递增到 0.8 mm 时,滚轮表面的残余拉应力呈现出缓慢增大的趋势,且增大趋

势并不明显,这主要是由于切削深度增加虽然导致产生的切削热量增加,但是从滚轮上切除的切屑量也相对增大,产生的切屑带走了大量的热量,使得热应力对残余拉应力的影响不是很显著。

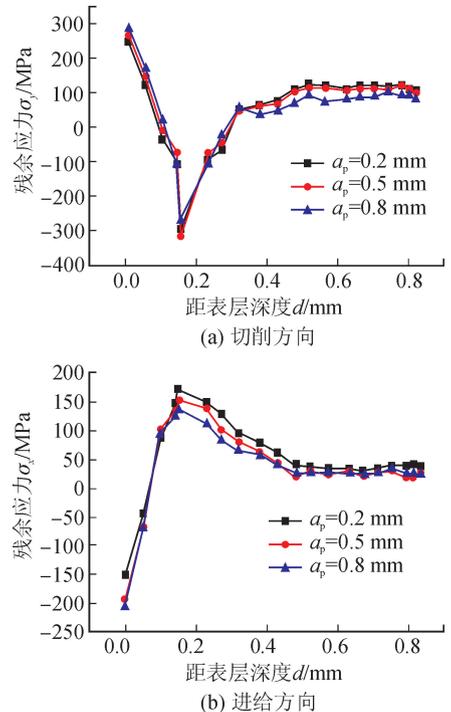


图6 切削深度影响车削残余应力的分布趋势
Fig.6 Distribution trend of cutting depth influence the residual stress in turning

图6(b)为进给方向上切削深度影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面出现了残余压应力,当切削深度 a_p 的数值由 0.2 mm 递增到 0.8 mm 时,滚轮表面的残余压应力数值也开始增大,这主要是由于在进给方向上随着切削深度的增大,车刀对滚轮表面的挤压作用增大,从而使进给方向上的车削残余压应力随之增大。

3.4 刀具前角对车削残余应力的影响

研究刀具前角对车削残余应力的影响时,其切削工艺参数按照表1车削仿真规划中编组10~12的数据进行设定。

图7(a)为切削方向上刀具前角影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面是残余拉应力,当刀具前角 γ_0 增大时,滚轮表面的残余拉应力开始变小,这主要是由于车刀前角的增大使得车刀切除的滚轮表面材料变少,车刀对滚轮的挤压变形也变小,使得产生的切削热减小,进而使滚轮表面残余拉应力降低。

图7(b)为进给方向上刀具前角影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面呈现残余压应力,当刀具前角 γ_0 增大时,滚轮表面的残余压应力数值却出

现递减的态势,在进给方向上出现这种情况的原因和切削方向上类似,车刀后角的增大同样使得车刀对滚轮表面的挤压作用减弱,导致滚轮表面产生的残余压应力变小。

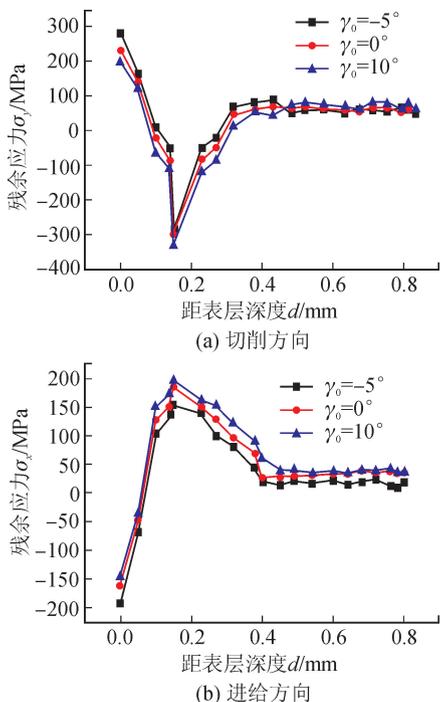


图7 刀具前角影响车削残余应力的分布趋势

Fig. 7 Distribution trend of tool rake angle influence the residual stress in turning

3.5 刀具后角对车削残余应力的影响

研究刀具后角对车削残余应力的影响时,其切削工艺参数按照表1车削仿真规划中编组13~15的数据进行设定。

图8(a)为切削方向上刀具后角影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面是残余拉应力,当车刀后角 α_0 增大时,滚轮表面的残余拉应力反而逐渐减小,这主要是由于车刀后角增大时,滚轮的已加工表面与车刀的刻划摩擦作用减小,使得摩擦引起的热应力对滚轮表面的车削残余应力影响降低,引起滚轮表面残余拉应力的减小。

图8(b)为进给方向上刀具后角影响车削残余应力的分布趋势。滚轮表面出现的是残余压应力,当车刀后角 α_0 增大时,滚轮表面的残余压应力数值变小,这主要是由于车刀后角变大时,车刀对滚轮车削表面的机械挤压程度降低,使机械挤压作用对残余应力的影响降低,从而工件表面的残余压应力相应地变小。

综上所述,利用加工工艺参数来调整滚轮残余应力时,按照以下结论选取车削工艺参数可得到比较理想的效果:

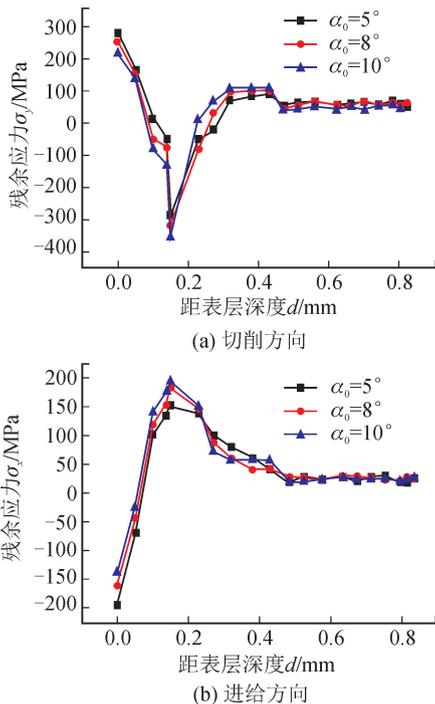


图8 刀具后角影响车削残余应力的分布趋势
Fig. 8 Distribution trend of tool relief angle influence the residual stress in turning

1) 仅考虑残余应力因素时,应该选择较低的切削速度 v_c 和进给量 f ,较低的切削深度 a_p ,在一定刀具角度范围内取较大刀具前角 γ_0 和后角 α_0 ,可在滚轮表层获得较低的残余拉应力,在次表层获得适当的残余压应力;

2) 考虑制造成本因素的情况下,应选择中等或较高的切削速度 v_c ,较低的进给量 f ,较大的切削深度 a_p ,较大的刀具前角 γ_0 和后角 α_0 ,可兼顾到残余应力和加工成本两个方面。

4 实验验证

4.1 实验设备

本次测试采用的设备是X射线应力衍射仪和电解抛光机。图9为型号Xstress 3000 G2的X射线应力衍射仪,图10为型号XF-1的电解抛光机(电解抛光机的采用是为了进行逐层抛光,获得残余应力沿深度方向的分布趋势)。

4.2 实验样品

测量样品为某柴油机油泵中的关键零件——滚轮。该滚轮外径为60 mm,内径为36 mm,厚度为30 mm,对该样品进行了车削外圆工序。图11为电解抛光后的滚轮。

测量主要是测定残余应力沿深度方向的分布状态,故采用了电解抛光机对滚轮进行逐层抛光后逐层测量的方法。在滚轮圆柱表面上取一点,然后对

这个点抛光 9 次(即对这个点测量 10 次)。



图 9 X 射线应力衍射仪
Fig. 9 X ray stress diffractometer



图 10 电解抛光机
Fig. 10 Electrolytic polishing machine



图 11 电解抛光后的滚轮
Fig. 11 Roller after electrolytic polishing

4.3 实验和仿真

图 12(a)为车削残余应力在切削方向的实验测量结果,图 12(b)为车削残余应力在进给方向的实验测量结果。

如图 13 所示,滚轮车削外圆工序后,在切削方向和进给方向上,车削残余应力的数值仿真结果和实验测量结果在趋势上是一致的,数值上的误差是由测量和仿真误差引起的。由此通过实验测量验证了车削残余应力数值仿真的有效性。因此,利用数值仿真结果遴选合理的车削工艺参数,可以有效地控制车削时在滚轮上产生的残余应力,提高滚轮的生产质量。

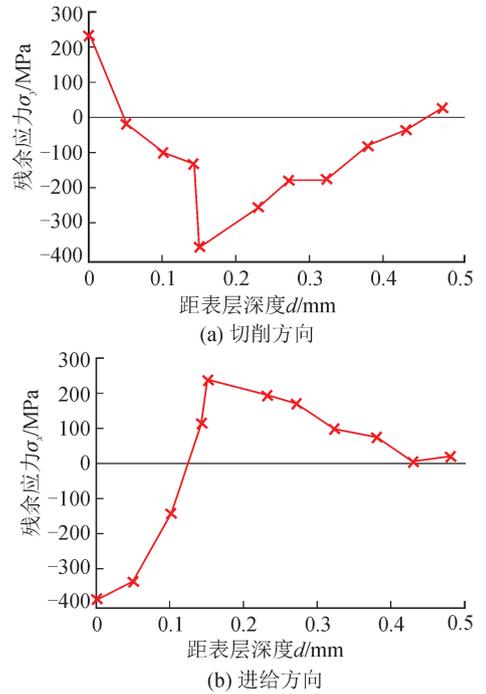


图 12 车削残余应力测量结果
Fig. 12 Measurement results of turning residual stress

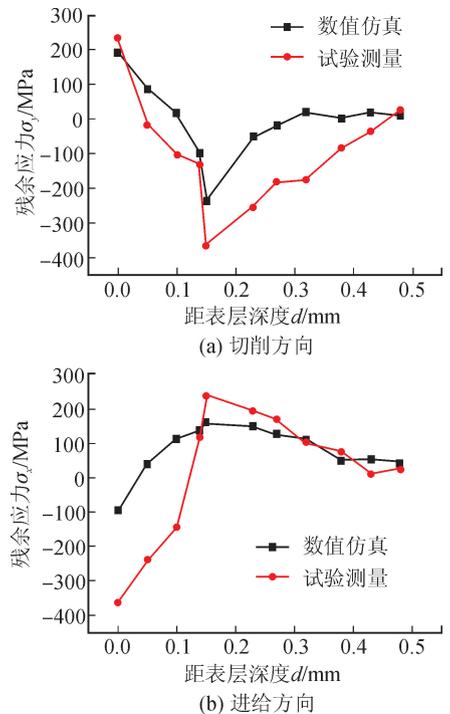


图 13 车削残余应力的数值仿真和实验测量结果对比
Fig. 13 Results comparison of numerical simulation and trial measurement of residual stress in turning

5 结论

本文对滚轮的车削残余应力进行了有限元仿真(滚轮是柴油机喷油泵中的关键零件,材料为 GCr15 轴承钢),利用控制变量法,得出了切削参数对残余应力的影响规律。

1) 切削方向上滚轮表面出现的是残余拉应力, 在进给方向上工件表面出现的是残余压应力。

2) 随着切削速度和进给量的增大, 在切削方向上工件表面的残余拉应力出现增大趋势, 工件表面以下的残余压应力也变大; 在进给方向上滚轮表面残余压应力变大, 表面以下的残余拉应力也变大。但是, 进给量对车削残余应力的影响没有切削速度明显。

3) 切削深度增大, 切削方向和进给方向上滚轮表面及表面以下的残余应力变化程度不显著, 这就表示切削深度使 GCr15 轴承钢车削残余应力的变化不大。

4) 车刀前角和后角增大, 切削方向上滚轮表面的残余拉应力变小, 进给方向上滚轮表面的残余压应力也变小。

5) 切削用量中切削速度对滚轮车削残余应力的影响最大, 进给量次之, 切削深度最小。

参考文献:

[1] 孙雅洲, 刘海涛, 卢泽生. 基于热力耦合模型的切削加工残余应力的模拟及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 187-193.
SUN Yazhou, LIU Haitao, LU Zesheng. Finite element simulation and experimental research of residual stresses in the cutting based on the coupled thermo-mechanical model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 187-193.

[2] PAWAR S, SALVE A, CHINCHANIKAR S, et al. Residual stresses during hard turning of AISI 52100 steel; numerical modelling with experimental validation [C]// 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), The United Kingdom, Materials Today Proceedings, 2017: 2350-2359.

[3] JAWAHIR I S, BRINKSMEIER E, SAOUBI R, et al. Surface integrity in material removal processes: recent advances [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 603-626.

[4] REVEL P, JOUINI N, THOQUENNE G, et al. High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel [J]. Precision Engineering, 2016, 43: 24-33.

[5] 李万钟, 屈健康, 李娜娜, 等. 硬态切削表面残余应力分析研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 475(6): 64-68.
LI Wanzhong, QU Jiankang, LI Nana, et al. Study on surface residual stress of hard cutting [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 475(6): 64-68.

[6] 常艳艳, 孙涛, 李增强. 硬铝合金超精密车削残余应力的仿真及试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 41-46.
CHANG Yanyan, SUN Tao, LI Zengqiang. Simulation and experiments of residual stresses on ultra-precision

turning of hard aluminum alloy [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 41-46.

[7] BAPAT P S, DHIKALE P D, SHINDE S M, et al. A numerical model to obtain temperature distribution during hard turning of AISI 52100 steel [C]// 4th International Conference of Materials Processing and Characterization, The United Kingdom, Materials Today Proceedings, 2015, 1907-1914.

[8] GUO Y B, LIU C R. Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining processes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(1): 1-9.

[9] 刘战强, 吴继华, 史振宇, 等. 金属切削变形本构方程的研究 [J]. 工具技术, 2008, 42(3): 3-9.
LIU Zhanqiang, WU Jihua, SHI Zhenyu, et al. State-of-the-art of constitutive equations in metal cutting operations [J]. Tool Engineering, 2008, 42(3): 3-9.

[10] 徐颖强, 李娜娜, 李万钟, 等. 硬态切削工件表面白层厚度预测方法 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 182-189.
XU Yingqiang, LI Nana, LI Wanzhong, et al. Prediction method of the white layer thickness in hard cutting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 182-189.

[11] 何进. 船舶柴油机喷油泵滚轮切削残余应力分析与研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
HE Jin. Analysis and research of cutting residual stresses of roller in the fuel injection pump of marine diesel engine [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

[12] 赵晶晶, 覃寿同, 林强, 等. 基于 Deform-3D 的 65Mn 硬态切削加工仿真研究 [J]. 机床与液压, 2014, 42(23): 131-133.
ZHAO Jingjing, QIN Shoutong, LIN Qiang, et al. Simulation study on hard cutting machining based on Deform-3D [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2014, 42(23): 131-133.

[13] BRÜNNET H, LYUBENOVA N, MULLER M, et al. Verification and application of a new 3D finite element approach to model the residual stress depth profile after autofrettage and consecutive reaming [J]. Procedia Cirp, 2014, 13(3): 72-77.

[14] 张蓉蓉, 赵先锋, 李长虹, 等. 基于 Deform-3D 的车削残余应力分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, (5): 22-24, 28.
ZHANG Rongrong, ZHAO Xianfeng, LI Changhong, et al. Analysis of the residual stress in the turning cutting based on Deform-3D [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016, (5): 22-24, 28.