

文章编号:1671-6833(2022)05-0059-06

硬态车削工艺对 18CrNiMo7-6 钢表层 硬度及微观组织的影响

张银霞, 刘修武, 原少帅, 郜伟, 刘治华

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为了探究 18CrNiMo7-6 钢硬态车削工艺参数对加工硬化及金相组织的影响,采用 PCBN 刀具对 18CrNiMo7-6 钢漏斗形疲劳试样硬态车削圆弧段时的主轴转速 n 、背吃刀量 a_p 和进给速度 v_f 进行了单因素实验研究。运用显微硬度计和超景深三维显微系统表征了试样在不同工艺条件下的表层硬度、加工硬化影响深度及微观组织。研究表明:硬态车削为漏斗形疲劳试样的圆弧段造成了一定的加工硬化,硬化影响层深度为 120~200 μm ,加工硬化程度为 4.31%~8.27%。在试验条件下,随着 n 的增大,试样的硬化程度先增大后减小,硬化影响层深变化不大;随着 a_p 增大,试样的硬化影响层深和硬化程度都逐渐增大; v_f 对试样的加工硬化程度先增大后减小,对硬化影响层深没有明显规律;随着径向深度的增加,试样金相组织发生变化,且硬度值逐渐下降,车削工艺参数对试样表层金相组织的影响很小;当 n 、 a_p 及 v_f 分别为 1 200 r/min、0.15 mm、50 mm/min 时,试样表层出现软化现象,高碳马氏体转化为硬度较低的回火屈氏体。该研究为 18CrNiMo7-6 淬硬钢的硬态车削工艺制定提供了参考依据。

关键词: 18CrNiMo7-6 钢; 硬态车削; 工艺参数; 加工硬化; 金相组织

中图分类号: TG519.1

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.05.004

0 引言

在工程设备中,构件因疲劳而造成的破坏高达 70%~90%^[1],材料的表面质量是决定其使用寿命的重要因素^[2]。在试件进行机械加工时,试件表面及亚表面会发生明显的塑性变形,进而在试件表面产生加工硬化和残余应力,并在亚表面形成明显的变质层。而在表面塑性变形产生的这些指标中,加工硬化、残余应力和变质层深度对零件的疲劳性能都有非常重要的影响^[3]。

在成形磨削时,由于要保证工件形状公差,需经常对砂轮进行修整,这样会导致效率低且磨削加工成本高,并且在加工过程中需要使用大量的切削液^[4]。与磨削相比,干式硬态车削具有加工效率高、符合绿色制造、加工柔性好以及能获得良好的整体加工质量等优点^[5],因此硬态车削技术作为一种新的加工工艺已部分取代淬硬钢精加工中的磨削工艺^[6-7]。Martell 等^[8]分析了加工淬硬钢 AISI 1053 车削和磨削残余应力的变化,指出在沿切削

方向硬态车削的表面压应力值优于磨削;Kundrak 等^[9]分析了硬态车削和磨削的表面粗糙度,指出两种工艺的平均表面粗糙度值差异不大,在一些情况下硬态车削的加工质量甚至超过了磨削工艺;唱佳林等^[10]使用硬质涂层刀具对 42CrMo 合金结构钢进行车削加工,指出随着切削速度的减小,加工表面粗糙度和表面硬化程度增大;Schubnell 等^[11]发现增大工件的加工硬化会增加其疲劳寿命。

18CrNiMo7-6 钢为欧洲标准的一种优质表面渗碳钢,经渗碳淬火热处理工艺后,材料表面硬度高、耐磨性好。由于其优越的力学性能,该材料被用于锻造大型部件(如直升机轴)等诸多领域^[12-13]。王栋等^[14]以 18CrNiMo7-6 钢圆柱形旋转弯曲疲劳试样为对象,研究了磨削工艺下表面粗糙度与纹理方向对试样疲劳寿命的影响,指出适度的表面加工硬化使试件表面产生塑性变形,且硬度增加,可以阻止位错线向表面伸出,进而阻止已有裂纹的扩展和新裂纹的产生,提高零件的疲劳强度^[15]。

目前,对 18CrNiMo7-6 钢疲劳试样的成形精

收稿日期:2021-12-16;修订日期:2022-03-18

基金项目:国家自然科学基金联合项目(U1804254)

作者简介:张银霞(1974—),女,河南长垣人,郑州大学副教授,博士,主要从事抗疲劳制造技术和精密加工技术研究,E-mail:zhangyinxia@zzu.edu.cn。

加工工艺多为磨削加工,对其硬态车削的相关研究相对较少。原少帅^[16]研究表明,18CrNiMo7-6 钢干式硬态车削工艺可引入-600~-750 MPa 的轴向残余压应力,表面粗糙度可达 0.174~0.253 μm,能够实现以车代磨的目的。本文采用了 PCBN 刀具对 18CrNiMo7-6 淬硬钢漏斗形疲劳试样进行干式硬态车削,通过单因素试验探究了主轴转速 n 、背吃刀量 a_p 和进给速度 v_f 对圆弧段的硬态车削加工硬化和微观组织的影响,为实际生产中疲劳试样以车代磨加工工艺的制定提供参考依据。

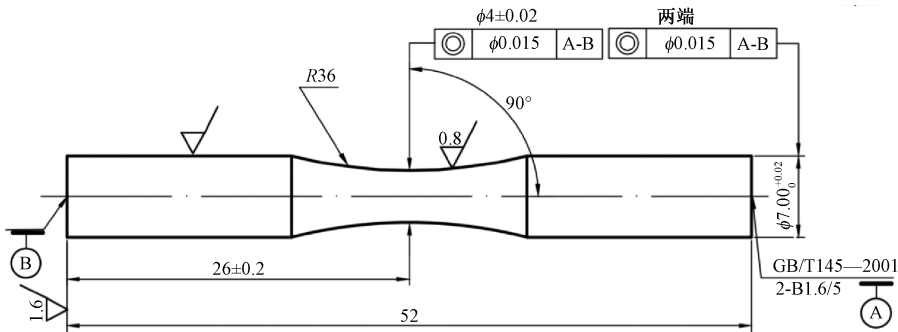


图 1 漏斗形疲劳试样图 (mm)

Figure 1 Diagram of funnel fatigue specimen (mm)

该材料渗碳淬火后化学成分及材料的力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 18CrNiMo7-6 材料化学成分

Table 1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 material

元素名称	质量分数/%	元素名称	质量分数/%
C	0.15~0.21	Cr	1.50~1.80
Si	0.15~0.40	Ni	1.40~1.70
Mn	0.60~0.90	Mo	0.25~0.35
P	<0.02	Fe	<96.00

表 2 18CrNiMo7-6 力学性能

Table 2 Mechanical properties of 18CrNiMo7-6

项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 σ /MPa	延伸率 δ /%	断面收缩率 Ψ /%
试验值	1 220	1 016	14.0	68
标准值	≥ 800	$\geq 1 080$	≥ 8	≥ 30

1.2 试验设备与条件

在 CAK4085 数控车床上进行硬态车削试验,采用干式切削方式,刀具选取 PCBN 刀片,牌号为 BN-H10 VNGA160412-2S,主偏角为 93°。此试验旨在研究干式硬态车削的工艺参数对 18CrNiMo7-6 渗碳钢疲劳试样加工硬化程度及微观组织的影响,选取 n 、 a_p 和 v_f 开展单因素试验,工艺参数设置如表 3 所示。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料与试件

试件为 18CrNiMo7-6 渗碳钢材质的漏斗形试样,如图 1 所示,其工艺路线为普通车削加工,然后热处理,最后干式硬态车削。热处理时的表面硬度为 40 HRC 左右,经热处理工艺:880 ℃ 渗碳,650 ℃ 高温回火,835 ℃ 淬火,零下 60 ℃ 深冷,140 ℃ 低温回火后,经抛光去掉其氧化皮后检测试样表面硬度为 58 HRC 左右,其渗碳层厚度约为 0.7 mm。热处理后试样的加工余量为单边 0.3 mm。

表 3 硬态车削单因素试验表

Table 3 Single factor test table of hard turning

序号	主轴转速 n / ($r \cdot \min^{-1}$)	背吃刀量 a_p /mm	进给速度 v_f / ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
1	900、1 050、1 200、 1 350、1 500	0.15	30
2	1 200	0.05、0.10、0.15、 0.20、0.25	30
3	1 200	0.15	10、20、30、 40、50

1.3 硬度与金相组织检测

依据 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》^[17]制样,将试样从中间圆弧段截取长 5 mm 的圆柱体,经过镶嵌,一系列砂纸研磨及 W1.5 金刚石抛光剂处理,得到粗糙度小于 0.02 的试样,然后使用体积浓度为 4% 的硝酸酒精溶液对抛光后的试样截面进行腐蚀,最终通过超声波清洗机用无水乙醇清洗得到金相试样。

使用 HVW-1000Z 型微机全自动显微硬度计对试样沿径向的表层硬度进行检测,硬度检测类型为洛氏硬度(HRC),加载力为 0.5 N,加载时间为 15 s。沿试样径向方向 0~100 μm 每 10 μm 测量一个点,100~200 μm 每 20 μm 测量一个点,200 μm 以后每 30 μm 测量一个点,每个试样选取

3 个不同位置测量,最后选取平均值。再通过 VHX-2000E 型超景深三维显微系统对试样的金相组织进行观测,选用 500 倍进行宏观组织的观测,微观组织的观测选用 1 000 倍。

2 结果与讨论

2.1 主轴转速对表层硬度的影响

当 $a_p = 0.15\text{ mm}$, $v_f = 30\text{ mm/min}$ 时,车床的主轴转速 n 对表层硬度的影响如图 2 所示,随着表层沿径向深度的增加,试样的硬度值逐渐减小,最终趋近于原始表面硬度。不同的主轴转速 n 对硬化层深度影响不大,处于 $120\sim 140\text{ }\mu\text{m}$ 。随着 n 的增大,表层硬化程度先增大后减小,在 n 为 $1\ 350\text{ r/min}$ 时,其硬化程度最大,达到 6.55% ;当 n 为 $1\ 500\text{ r/min}$ 时,其硬化程度下降到 5.34% 。由分析可知,随着切削速度的增大,刀尖上的切削力随之增大,造成表层的冷作硬化程度增大,但是随着切削速度的进一步增大,切削温度也随之升高,表层加工硬化程度有所减弱。

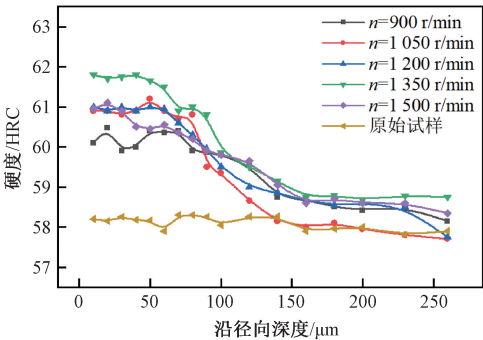


图 2 主轴转速对表层硬度的影响
Figure 2 Influence of spindle speed on surface hardness

2.2 背吃刀量对表层硬度的影响

当 $n = 1\ 200\text{ r/min}$, $v_f = 30\text{ mm/min}$ 时,背吃刀量 a_p 对表层硬度的影响如图 3 所示,随着背吃刀量 a_p 的增大,硬化程度和加工硬化对试样的影响层深逐渐增大, a_p 对工件的硬化层深影响在 $120\sim 160\text{ }\mu\text{m}$ 之间,且当 a_p 为 0.25 mm 时,硬化程度最大为 6.89% ,加工硬化影响层深为 $160\text{ }\mu\text{m}$ 。分析认为随着背吃刀量的增大,切削力增大,刀尖和后刀面对工件表面的挤压作用升高,塑性变形变大导致硬化程度增大。

2.3 进给速度对表层硬度的影响

当 $n = 1\ 200\text{ r/min}$, $a_p = 0.15\text{ mm}$ 时,进给速度 v_f 对表层硬度的影响如图 4 所示。随着 v_f 的增大,表层加工硬化程度整体呈现减小趋势,加工

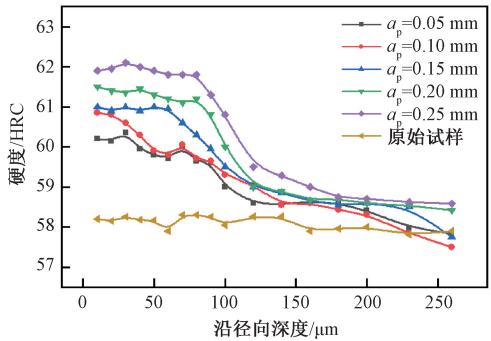


图 3 背吃刀量对表层硬度的影响
Figure 3 Influence of turning back on the surface hardness

硬化影响层深没有明显变化规律,当 v_f 为 20 mm/min 时,硬化程度最大,为 8.27% ,加工硬化影响层深在 $120\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 。随着进给速度的增大,刀尖与工件的相对接触时间减小,刀尖和后刀面对工件的犁耕和挤压作用减小。工件材料和刀具的硬度都比较大,本次实验选取的刀尖圆角 r 为 1.2 mm ,与第 3 变形区的接触面大,造成径向力和轴向力都比较大,切削力变大。 v_f 的增大使单位时间内的材料去除量增加,工件与刀具间的摩擦磨损作用增大,热量不能及时随切屑传导出,产生的切削热增加,导致切削温度升高,使表层的加工硬化程度有所减弱。

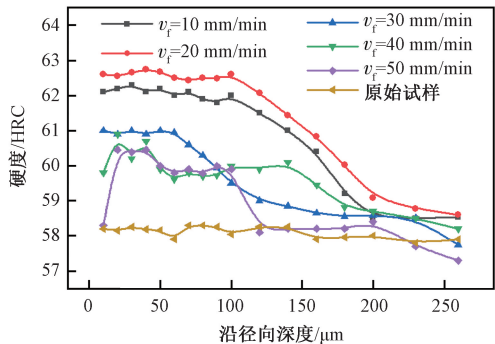


图 4 进给速度对表层硬度的影响
Figure 4 Effect of feed rate on surface hardness

2.4 工艺参数对金相组织的影响

图 5 为不同工艺参数下的试样。与原始试样相比,硬态车削试样的金相图中均发现了 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右厚度的白层,这是由于干式硬态切削过程中存在着高温、高压、高应变及极高的应变率,所以在试样表面极易发生相变,生成细小的马氏体组织,这种组织很难被腐蚀,在光学显微镜下呈现白色。除去试样表层硬度出现软化的试样,其余试样的金相组织相差不大。

图 6 为试样金相组织图,图 6(a)为在 1 000 倍下硬态车削工艺参数 $n = 1\ 050\text{ r/min}$, $a_p =$

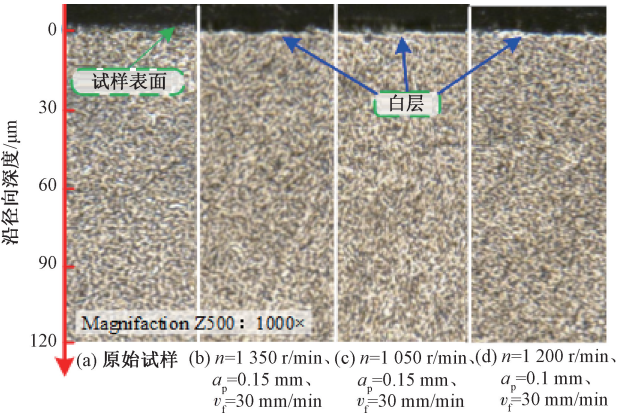


图5 不同工艺下试样表层金相组织

Figure 5 Surface microstructure of samples under different processes

0.15 mm、 $v_f=30$ mm/min 时的金相图,试样表层主要由黑色片状组织、白色组织和白色小颗粒组成,当碳质量分数小于 0.2% 的钢淬火后一般得到的为针状高碳马氏体及残余奥氏体,且渗碳体不易受硝酸酒精溶液的腐蚀,在显微镜下呈白亮色。这说明在此工艺参数下干式硬态车削过程中产生的切削热没有达到相变温度,这和其表层硬度曲线也一致,所以在此工艺条件下加工硬化区金相组织主要为高碳马氏体、粒状碳化物和残

余奥氏体。

如图 6(b)所示,对车削参数 $n=1\ 200$ r/min、 $a_p=0.5$ mm、 $v_f=50$ mm/min 的试样金相图进行观察,与图 6(a)对比发现其颜色更深,且黑色片状组织针状形态不明显,更容易腐蚀呈现黑色,出现了回火屈氏体。因为回火屈氏体的硬度比高碳马氏体有所下降,所以加工的试样表层硬度比原始试样有所下降,造成表层硬度软化。

2.5 组织相对对硬度的影响

选择工艺参数 $n=1\ 200$ r/min、 $a_p=0.25$ mm、 $v_f=30$ mm/min 的试样,对试样沿径向深度为 1 500 μm 的硬度值进行分析。从图 7(a)曲线图可以看出:试样在 0~180 μm 深度为加工硬化区;在 180~350 μm 深度为表层区,硬度值从 62 HRC 经过一段平稳区域然后较快逐渐降低到 58 HRC,硬度值稳定在 58 HRC 左右,与原始试样硬度一致;在 350~1 300 μm 深度为过渡区,其硬度逐渐均匀下降;在 1 300 μm 深度后为心部区,硬度值稳定在 40 HRC 左右。热处理后的工件表面渗碳层为 0.7~0.9 mm 左右,经过硬态车削的成形加工后,工件表面剩余的渗碳层深度约为 0.6 mm 左右,这与图中宏观组织和硬度梯度的变化基本吻合。

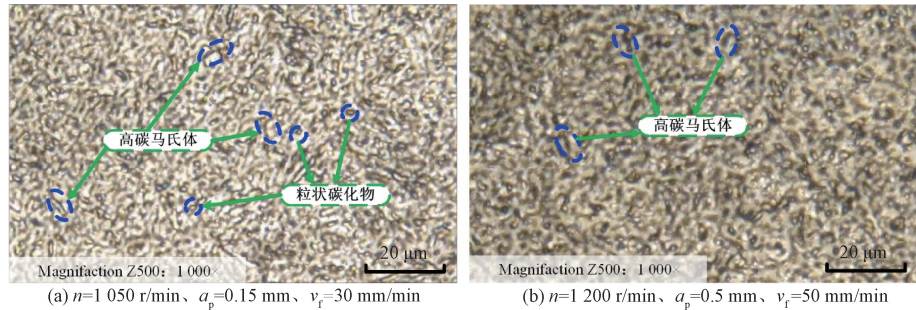


图6 优选试样金相组织放大图

Figure 6 Magnification of preferred sample metallographic structure

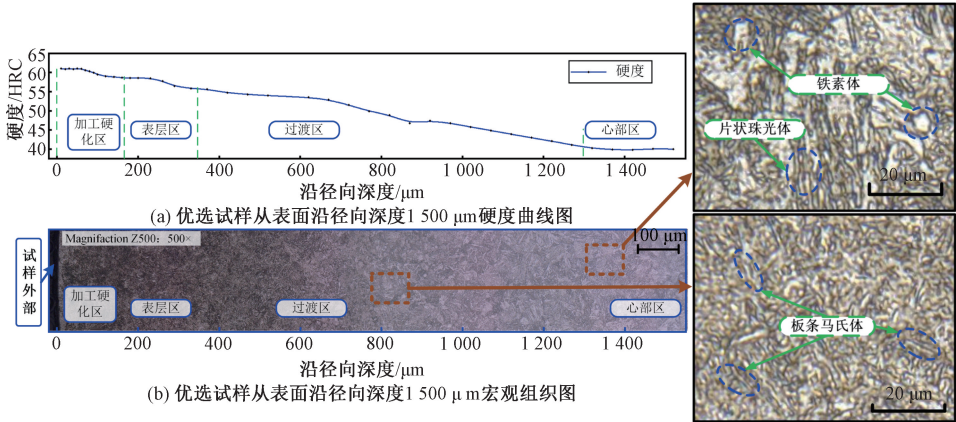


图7 优选试样的硬度曲线图及宏观组织结构的光学图像

Figure 7 Hardness curve and optical image of macroscopic microstructure of preferred sample

对优选试样从表面到心部区的硬度曲线和宏观组织图进行分析。如图 7(b)宏观组织图所示,试样从表面沿层深方向可分为加工硬化影响区、表层区、过渡区及心部区。当加工硬化区没有发生相变时,其金相组织一般与表层区一致,表层区主要由高碳马氏体、粒状碳化物和残余奥氏体组成。图 7(b)右下所示,在过渡区由于含碳量的减少,淬火后主要由板条状的低碳马氏体粒状碳化物和残余奥氏体组成;图 7(b)右上所示,心部区主要由片状珠光体和铁素体组成。且只有在高碳钢和渗碳钢渗碳高温淬火后,奥氏体才能残留在马氏体的间隙中,其金相组织由于不易受侵蚀而呈白色,碳含量越高,其残余奥氏体越少,铁素体在腐蚀后也呈现暗白色,故造成试样不同深度下的宏观组织颜色不同。

3 结论

(1)硬态车削为 18CrNiMo7-6 疲劳试样引入了 100~200 μm 的加工硬化层,硬化程度在 4.31%~8.27%。当车削参数 $n = 1\ 200\ \text{r/min}$ 、 $a_p = 0.15\ \text{mm}$ 、 $v_f = 20\ \text{m/min}$ 时,硬态车削对试样引入的加工硬化程度最大为 8.27%。

(2)随着主轴转速 n 的增大,加工硬化影响层深没有明显变化,加工硬化程度先增大后减小;随着背吃刀量 a_p 的增大,硬化程度和加工硬化影响层深逐渐增大;随着 v_f 的增大,硬化程度先增大后减少, v_f 对加工硬化影响层深没有明显影响规律。

(3)硬态车削加工后出现厚度约为 2 μm 的白层,工艺参数对试样表层金相组织的影响较小,当车削参数 $n = 1\ 200\ \text{r/min}$ 、 $a_p = 0.15\ \text{mm}$ 、 $v_f = 50\ \text{m/min}$ 时加工的试样表层出现软化现象,高碳马氏体转化为硬度较低的回火屈氏体。

(4)在一定的车削工艺参数下,干式硬态车削不会破坏试样表层的金相组织并可以引入一定程度的表面硬化层,对试样表面有一定强化作用,并且具有较好的表面光洁度和较大的残余压应力。因此,具有加工柔性好、效率高、环保等优点的硬态车削工艺在一定程度上可以实现 18CrNiMo7-6 淬硬钢的以车代磨加工。

参考文献:

[1] 袁熙,李舜酩. 疲劳寿命预测方法的研究现状与发展[J]. 航空制造技术, 2005, 48(12): 80-84.
YUAN X, LI S M. Research status and development

of forecast method of fatigue life[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2005, 48(12): 80-84.
[2] BOUZID W, TSOUMAREV O, SAÏ K. An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2004, 24(1/2): 120-125.
[3] 周永鑫. 切削加工表面塑性变形对试件疲劳寿命的影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
ZHOU Y X. Research on the influence of surface plastic deformation of machining on fatigue life of specimens [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.
[4] 李伯民,赵波. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
LI B M, ZHAO B. Modern grinding technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
[5] 岳彩旭,刘献礼,姬生园,等. 硬态切削技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(18): 26-29.
YUE C X, LIU X L, JI S Y, et al. Hard cutting technology[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2008, 51(18): 26-29.
[6] KARPUSCHEWSKI B, SCHMIDT K, BEŇO J, et al. Measuring procedures of cutting edge preparation when hard turning with coated ceramics tool inserts[J]. Measurement, 2014, 55: 627-640.
[7] TANG L H, GAO C X, HUANG J L, et al. Experimental investigation of surface integrity in finish dry hard turning of hardened tool steel at different hardness levels[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 77(9/10/11/12): 1655-1669.
[8] MARTELL J J, LIU C R, SHI J. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, 74(9/10/11/12): 1381-1392.
[9] KUNDRÁK J, GYANI K, BANA V. Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2008, 38 (1/2): 110-119.
[10] 唱佳林,李安海. 42CrMo 钢多工步车削加工表面完整性研究[J]. 工具技术, 2021, 55(7): 49-53.
CHANG J L, LI A H. Surface integrity of 42CrMo steel in multi-step turning[J]. Tool engineering, 2021, 55(7): 49-53.
[11] SCHUBNELL J, PONTNER P, WIMPORY R C, et al. The influence of work hardening and residual stresses on the fatigue behavior of high frequency mechani-

cal impact treated surface layers [J]. International journal of fatigue, 2020, 134: 105450.

[12] SPRINGER P, PRAHL U. Characterisation of mechanical behavior of 18CrNiMo7-6 steel with and without nb under warm forging conditions through processing maps analysis[J]. Journal of materials processing technology, 2016, 237: 216-234.

[13] 张银霞, 原少帅, 王子乐, 等. 18CrNiMo7-6 钢高速外圆磨削残余应力和硬度的试验分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(1): 65-70.

ZHANG Y X, YUAN S S, WANG Z L, et al. Experimental analysis of residual stress and hardness of 18CrNiMo7-6 steel in high speed cylindrical grinding [J]. Diamond & abrasives engineering, 2021, 41(1): 65-70.

[14] 王栋, 律谱, 陈真真. 三维表面粗糙度对 18CrNiMo7-6 钢旋转弯疲劳寿命的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 283-289.

WANG D, LYU P, CHEN Z Z. Effect of three-dimensional surface roughness on rotating bending fatigue life of 18CrNiMo7-6 steel[J]. Surface technology, 2019, 48(11): 283-289.

[15] JOSEFSON B L, STIGH U, HJELM H E. A nonlinear kinematic hardening model for elastoplastic deformations in grey cast iron[J]. Journal of engineering materials and technology, 1995, 117(2): 145-150.

[16] 原少帅. 高速外圆磨削表面完整性与疲劳试样机加工工艺研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.

YUAN S S. Study on surface integrity of high-speed cylindrical grinding and machining technology of fatigue specimens [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.

[17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属显微组织检验方法: GB/T 13298—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection methods of microstructure for metals; GB/T 13298—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

Impact of Hard Turning Process on Surface Hardness and Microstructure of 18CrNiMo7-6 Steel

ZHANG Yinxia, LIU Xiuwu, YUAN Shaoshuai, GAO Wei, LIU Zhihua

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to explore the impact of hard turning process parameters of 18CrNiMo7-6 steel on work hardening and metallographic structure, PCBN tool was used to hard turning of the arc section of the 18CrNiMo7-6 steel funnel-shaped fatigue sample. The spindle speed n and the turning back a_p and feed rate v_f were carried out a as single factor experimental study. The surface hardness, work hardening depth of influence and microstructure of the samples under different process conditions were characterized by a microhardness tester and super depth of field 3D microscopy system. The research results showed that hard turning introduced a certain amount of work hardening to the arc segment of the funnel-shaped fatigue specimen, the depth of the hardened layer was 120~200 μm , and the degree of work hardening was 4.31%~8.27%. In the experiment conditions, with the increase of n , the degree of hardening of the sample first increased and then decreased, and the depth of the hardened layer did not change much; with the increase of a_p , the depth of the hardened layer and the degree of hardening of the sample increased gradually; v_f increased the degree of work hardening of the sample first and then decreased, and there was no obvious rule for the depth of the hardened layer; with the increase of the radial depth, the metallographic structure of the sample changed, and the hardness gradually decreased, and turning parameters had little effect on the metallographic structure of the surface of the sample; when n , a_p and v_f were 1 200 r/min, 0.15 mm and 50 mm/min, respectively, the surface of the sample softens, and the high-carbon martensite is transformed into a lower hardness tempered troostite. The finding of this study costed extra light on the formulation of hard turning process for 18CrNiMo7-6 hardened steel.

Keywords: 18CrNiMo7-6 steel ;hard turning; process parameters; work hardening; metallographic structure