研磨工艺对 18CrNiMo7-6 钢表面粗糙度和残余应力的影响

张银霞，王文广，郜伟，于鑫，杨鑫

（郑州大学 抗疲劳制造技术河南省工程实验室，郑州 450001）

摘 要：目的 探究研磨工艺参数对 18CrNiMo7-6 钢渗碳前后工件表面粗糙度和残余应力的影响规律，从而为降低研磨加工工件表面粗糙度，提高表面质量提供依据。**方法** 分别采用三维表面轮廓仪和 X 射线残余应力分析仪对工件研磨前后的表面粗糙度和残余应力进行检测，通过单因素试验研究研磨垫粒度、研磨压力、研磨速度及研磨时间等研磨工艺参数对工件表面粗糙度和残余应力的影响规律。**结果** 随着研磨垫粒度从 400#到 3000#，渗碳前后工件表面粗糙度值均减小，*Ra* 可达 15~17 nm。渗碳前后工件表面残余应力值均增大，渗碳前表面表现为残余压应力，渗碳后表面可由较大的残余压应力升至残余拉应力。当研磨垫粒度为 400#时，渗碳前后工件残余应力分别为–506.54 MPa 和–587.29 MPa。研磨垫粒度为 800#时，随着研磨压力、研磨速度及研磨时间的增大，渗碳前后工件表面粗糙度值均减小，且表面残余压应力值增大。**结论** 相同研磨条件下，渗碳后工件的表面粗糙度普遍小于基体件，而渗碳件的表面残余应力普遍大于基体件。18CrNiMo7-6 钢渗碳后，硬度、耐磨性得到极大提高，其研磨过程中塑性变形程度减弱是导致上述现象的重要原因。

关键词：研磨；18CrNiMo7-6 钢；渗碳；表面粗糙度；残余应力

中图分类号：TG580.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)01-0343-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.041

Effect of Lapping Process on Surface Roughness and Residual Stress of 18CrNiMo7-6 Steel

ZHANG Yin-xia*, *WANG Wen-guang*, *GAO Wei*, *YU Xin*, *YANG Xin

(Henan Key Engineering Laboratory of Anti-fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the influences of lapping parameters on the surface roughness and residual stress of the workpiece before and after carburizing of 18CrNiMo7-6 steel to provide a basis for reducing the surface roughness of the workpiece and improve the surface quality. The surface roughness and residual stress of the workpiece before and after lapping were detected by three-dimensional surface profiler and X-ray residual stress analyzer. The influential rules of lapping parameters such as particle size, lapping pressure, lapping speed and lapping time on the surface roughness and residual stress of

收稿日期：2019-04-18；**修订日期：**2019-07-04

Received: 2019-04-18; **Revised:** 2019-07-04

基金项目：国家自然科学基金重点项目（U1804254）；国家留学基金委项目（201907045070）；中国博士后科学基金项目（2015M580635）

Fund: Supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (U1804254); Study Abroad Foundation Project of China(201907045070); China Postdoctoral Science Foundation (2015M580635)

作者简介：张银霞（1974—），女，博士，副教授，主要研究方向为抗疲劳制造技术和精密超精密加工技术。邮箱：zhangyinxia@zzu.edu.cn

Biography: ZHANG Yin-xia (1974—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: anti-fatigue manufacturing technology and precision ultra-precision machining technology. E-mail: zhangyinxia@zzu.edu.cn

the workpiece were studied by single factor test. With the particle size of the lapping pad increasing from 400# to 3000#, the surface roughness value of the workpiece before and after carburizing decreased, reaching *Ra* 15~17 nm. The surface residual stress value of the workpiece increased before and after carburizing. The residual pressure stress rose to the residual tensile stress after carburizing. When the particle size of the lapping pad was 400#, the residual stress of the workpiece before and after carburizing was –506.54 MPa and –587.29 MPa respectively. When the particle size of the lapping pad was 800#, with the increase of lapping pressure, lapping speed and lapping time, the surface roughness value of the workpiece before and after carburizing was reduced, and the surface residual compressive stress value increased. Under the same lapping conditions, the surface roughness value of the workpiece after carburizing is generally smaller than that of the substrate, and the residual stress value of the carburized surface is generally larger than that of the substrate surface. The hardness and wear resistance of 18CrNiMo7-6 steel after carburizing are greatly improved, and the weakening of plastic deformation during lapping is an important cause of the above phenomenon.

KEY WORDS: lapping; 18CrNiMo7-6 steel; carburizing; surface roughness; residual stress

作为一种精密超精密加工方法，研磨加工具有加工精度高、加工质量优的特点[1]，被广泛应用于金属零部件、石英玻璃以及蓝宝石等的表面精加工[2-4]。在研磨加工过程中，工件表面的加工质量取决于研磨工艺参数的合理选择，加工质量的好坏直接关系到零部件的使用性能和整机设备的安全可靠性。

表面粗糙度和残余应力作为评价工件表面质量的两大重要指标，得到重要关注[5]。原一高等[6]通过W9Mo3Cr4V 高速钢的散料研磨试验指出，随磨料粒度的增大，工件材料去除率、表面粗糙度及残余应力均增大。陈建等[7]研究了研磨工艺参数对 W9Mo3Cr4V 高速钢工件表面粗糙度及残余应力的影响，指出研磨压力和磨料粒度对工件表面粗糙度影响较为显著，研磨速度影响较弱，工件表面残余压应力随研磨压力、磨料粒度及研磨速度的增大而增大。

18CrNiMo7-6 钢是一种低碳合金钢，其材料性能在渗碳前后有很大差异。经渗碳淬火后，表面硬度高，且耐磨性好，心部韧性好。由于其优越的力学性能，该材料被广泛应用于高速重载齿轮等领域[8]。陈鑫等[9]对 18CrNiMo7-6 钢进行了高速平面磨削试验，得到了高速磨削工艺参数对残余应力和表面粗糙度的影响规律。吴政协等[10]探讨了不同后混合水射流喷丸工艺对 18CrNiMo7-6 钢表面性能的影响，得到了喷丸工艺参数对其表面粗糙度、残余应力及显微硬度等的影响规律。目前尚未见到关于 18CrNiMo7-6 钢研磨加工工艺参数的研究报道。

本文基于平面研磨的特点和加工原理[11]，通过单因素试验，探讨了磁性树脂基金刚石研磨垫粒度、研磨压力、研磨速度及研磨时间等工艺参数对 18CrNiMo7-6 钢工件渗碳前后表面粗糙度和残余应力的影响，为其合理选择和安排研磨工艺提供依据。

1 研磨加工原理

平面研磨的加工原理如图 1 所示[12]。研磨试验以 UNIPOL-1200M 自动压力研磨抛光机为实验平台，将磁性树脂金刚石研磨垫通过磁力片吸附固定在磨抛盘上，磨抛盘和载样盘均可以不同速度正反转运行。将工件试样置于载样盘盘孔内，在气体压力作用下进行研磨工艺试验。试样尺寸为 ϕ22 mm×11 mm，每组工艺参数组合下布置3个试样。研磨垫局部如图2所示。

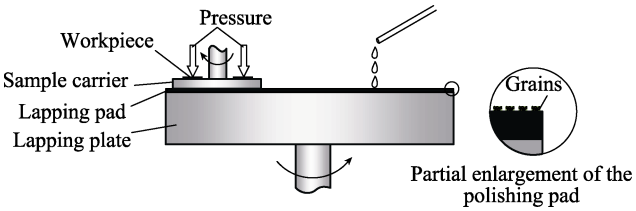


图 1 研磨加工原理

Fig.1 Schematic diagram of lapping

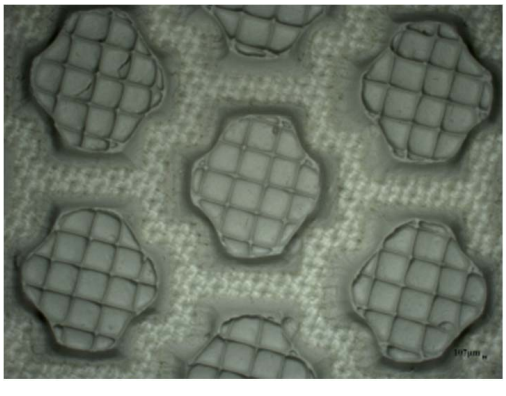


图 2 研磨垫局部

Fig.2 Local map of abrasive pad

2 研磨工艺试验

2.1 材料

试验材料为 18CrNiMo7-6 合金钢，工件经线切割后，采用 100#—120#砂轮进行磨削预处理，再用金刚石研磨垫开展研磨试验。经磨削处理后，渗碳前

后工件表面粗糙度 *Ra* 为 0.3~0.4 μm，渗碳面硬度为 59.6~62.8HRC，残余拉应力为 41.53 MPa。基体面硬度为 39.0~41.0HRC，残余拉应力为 254.39 MPa。

2.2　试验方案

采用单因素试验方案[13-14]进行 18CrNiMo7-6 钢工件的研磨工艺试验，旨在探讨磁性树脂基金刚石研磨垫粒度、研磨压力、研磨速度及研磨时间等工艺参数对渗碳前后工件表面粗糙度和残余应力的影响。研磨单因素试验方案见表 1。研磨前用无水乙醇对工件进行超声波清洗，用水平仪对磨抛盘表面进行校准。研磨过程中实时观察压力值和水流速度等设备状态，以保证研磨工艺系统的稳定可靠性[15]。采用 NPFLEX 三维表面轮廓仪对工件研磨前后的表面粗糙度进行测量，每个工件表面测 3~5 个点，取平均值。采用高速 X 射线残余应力分析仪对工件研磨前后的残余应力进行测量，每个工件表面测 3~5 个点，取平均值。

表 1　研磨单因素试验方案
Tab.1 Single factor test scheme for lapping

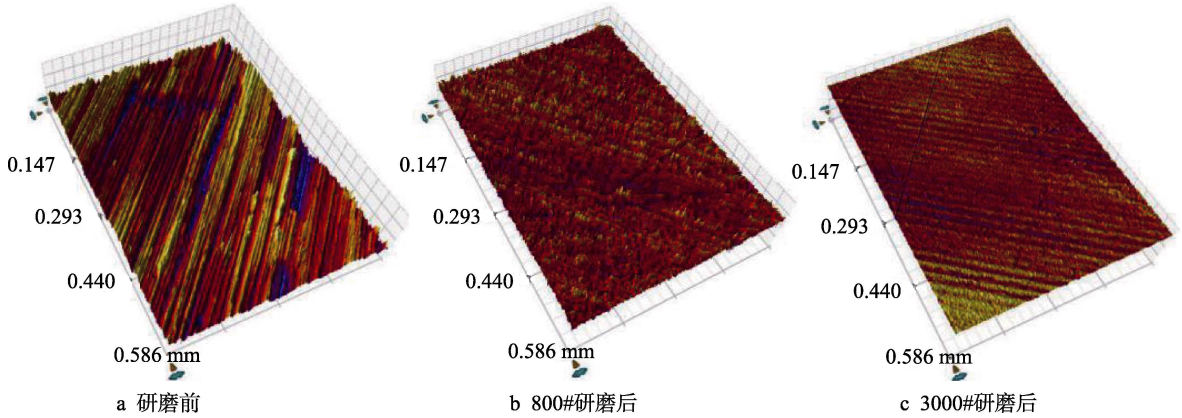
No.	Process parameters			
	Fixed lapping abrasive pad mesh A	Lapping pressure B/MPa	Lapping speed C/(r·min^{-1})	Lapping time D/min
1	400#	0.2	40	10
2	800#	0.2	40	10
3	1500#	0.2	40	10
4	3000#	0.2	40	10
5	800#	0.1	40	10
6	800#	0.15	40	10
7	800#	0.2	40	10
8	800#	0.3	40	10
9	800#	0.2	10	10
10	800#	0.2	20	10
11	800#	0.2	30	10
12	800#	0.2	40	10
13	800#	0.2	40	5
14	800#	0.2	40	10
15	800#	0.2	40	15
16	800#	0.2	40	20

3　分析与讨论

3.1　研磨垫粒度对工件表面粗糙度和残余应力的影响

研磨垫粒度对研磨加工过程有很大影响，不仅对研磨加工过程的摩擦力、磨削温度有影响，还对工件已加工表面质量有较大影响。渗碳工件研磨前后的表面形貌如图 3 所示，研磨垫粒度对渗碳前后工件表面粗糙度的影响如图 4 所示。可以看出，工件已加工表面粗糙度随着研磨垫粒度的增大而减小。当磨粒尺寸较大时，工件研磨后表面有比较粗且深的划痕沟槽存在；而磨粒尺寸较小时，单颗磨粒的有效切深较小，不易引起大的变形，因此工件研磨后表面粗糙度较低，表面质量较好。工件表面硬度、耐磨性在渗碳热处理后均有所提高，渗碳面表面粗糙度要低于基体面。3000#研磨垫研磨后，渗碳面和基体面表面粗糙度 *Ra* 分别为 15 nm 和 17 nm。

研磨垫粒度对工件表面残余应力的影响规律如图 5 所示。可以看出，随着研磨垫磨料粒度的增大，18CrNiMo7-6 钢渗碳前后工件表面的残余应力值均逐渐增大，但基体表面残余应力的增大幅度小于渗碳表面。基体表面残余应力均为压应力，而当粒度为 1500#和 3000#时，渗碳表面会呈现残余拉应力。



a 研磨前　　b 800#研磨后　　c 3000#研磨后

图 3　渗碳工件研磨前后的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of carburized workpiece before and after lapping: a) before lapping; b) lapping with 800#; c) lapping with 3000#

当研磨垫粒度为 400#时，基体面残余压应力值最大可达–506.54 MPa。在研磨加工过程中，磨粒作为刀具，具有较大的负前角，导致磨粒在工件表面刻划产生较大的塑性变形和压应力，不均匀的塑性变形残留在工件表面，进而形成残余压应力。当磨粒尺寸较大时，同时作用在工件表面的磨料数量则相对较

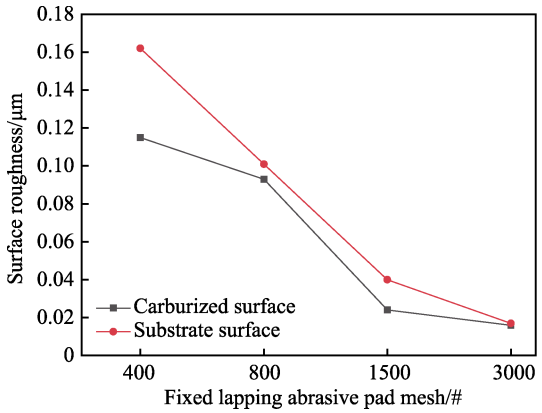


图 4　研磨垫粒度对工件表面粗糙度的影响

Fig.4 Effect of fixed lapping abrasive pad mesh on surface roughness of workpiece

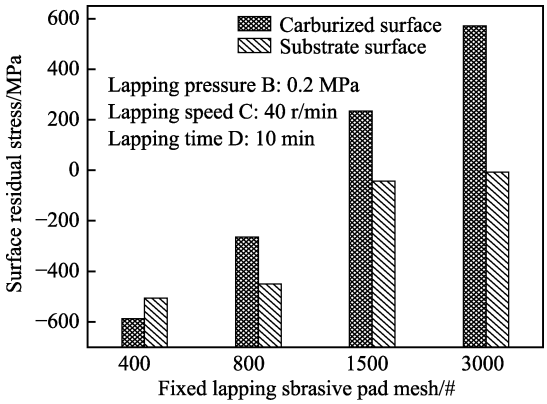


图 5　研磨垫粒度对工件表面残余应力的影响

Fig.5 Effect of fixed lapping abrasive pad mesh on surface residual stress of workpiece

少，单个磨粒的作用力变大，磨粒在工件表面刻划出的划痕和沟槽更加明显，工件表面不均匀的塑性变形也较为显著，致使残余压应力较大。

渗碳面由于其渗碳淬火的热处理工艺，表面硬度较大，耐磨性较好，热塑性变形引起的拉应力占据主导优势。细粒度的磨料参与研磨后，不足以抑制热塑变形效应，使得工件表面呈现出残余拉应力。研磨垫粒度为 400#时，残余压应力为–587.29 MPa。当研磨垫粒度较大时，工件表面表现为残余拉应力，粒度为 3000#时，拉应力值为 571.74 MPa。

3.2　研磨压力对工件表面粗糙度和残余应力的影响

研磨压力作为研磨工艺参数中的主要因素，对工件表面粗糙度和残余应力均有较大的影响。研磨压力对渗碳前后工件表面粗糙度的影响规律如图 6 所示。从图 6 可知，随着研磨压力的逐渐增大，工件已加工表面粗糙度逐渐减小。这是由于随着研磨压力的不断增大，实际参与研磨的有效磨粒数量相对增多，固结于树脂结合剂中的磨粒逐渐出刃，参与磨削，研磨初期较大的划痕和沟槽逐渐被后来出刃高度低的磨粒加以修整，进而降低已加工表面粗糙度。

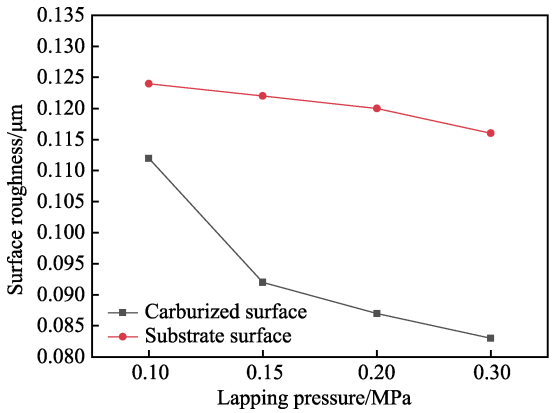


图 6　研磨压力对工件表面粗糙度的影响

Fig.6 Effect of lapping pressure on surface roughness of workpiece

从图 7 可知，相同研磨条件下，渗碳后表面粗糙度值小于渗碳前，且压力越大，粗糙度差值越大。研磨压力为 0.1 MPa 时，渗碳前后表面粗糙度 *Ra* 分别为 0.124 μm 和 0.113 μm；研磨压力为 0.3 MPa 时，渗碳前后表面粗糙度 *Ra* 分别为 0.116 μm 和 0.083 μm。研磨压力增大时，工件与磨粒的接触面积变大，同时参与研磨的磨粒数量相应增多，单颗磨粒的平均切深减小，工件表面粗糙度值较小，表面质量较好。

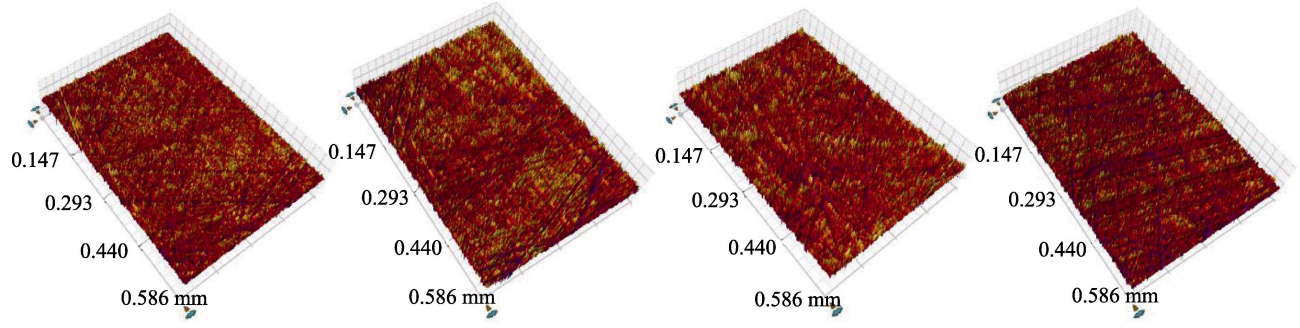


图 7　不同压力下渗碳前后工件研磨加工表面形貌

Fig.7 Surface morphology of workpiece before and after carburizing under different lapping pressures: a) carburized surface after 0.1 MPa; b) substrate surface after 0.1 MPa; c) carburized surface after 0.3 MPa; d) substrate surface after 0.3 Mpa

从图 8 可知，随着研磨压力的增大，工件表面的残余压应力增大。由于研磨压力的增大，相应地增大了磨粒对工件表面的压应力，导致工件表面的塑性变形程度变大，使得工件表面残余压应力值增大。基体材料由于未经过热处理，随着压力的增大，其塑性变形程度较大，因此基体面的残余应力值高于渗碳面。研磨压力为 0.1 MPa 时，渗碳前后表面残余应力分别为–343.71 MPa 和–175.01 MPa；研磨压力为 0.3 MPa 时，渗碳前后表面残余应力分别为–369.90 MPa 和–311.68 MPa。

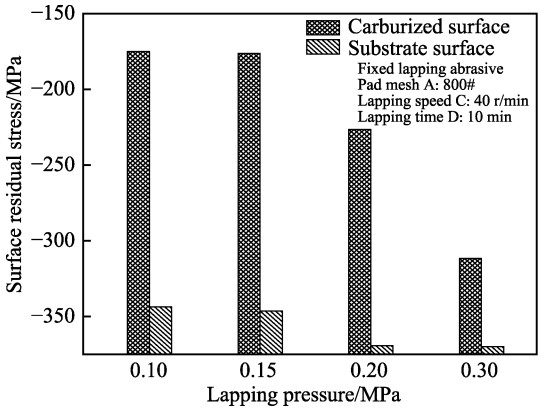


图 8　研磨压力对工件表面残余应力的影响

Fig.8 Effect of lapping pressure on surface residual stress of workpiece

3.3　研磨速度对工件表面粗糙度和残余应力的影响

研磨速度对渗碳前后工件表面粗糙度的影响规律如图 9 所示。从图 9 可知，随着研磨速度的逐渐增大，工件表面粗糙度逐渐减小。在研磨初期，工件表面凹凸不平，材料去除不均匀，随着研磨速度的增大，工件与磨粒的接触次数增多，单位时间内作用在工件表面的磨粒数增加，随着磨粒和工件表面的接触变得充分，初期的磨削变得均匀，工件表面质量逐步得到改善。研磨速度为 10 r/min 时，渗碳前后表面粗糙度 *Ra* 分别为 0.129 μm 和 0.116 μm；研磨速度为 40 r/min 时，渗碳前后表面粗糙度 *Ra* 分别为 0.105 μm 和 0.083 μm。

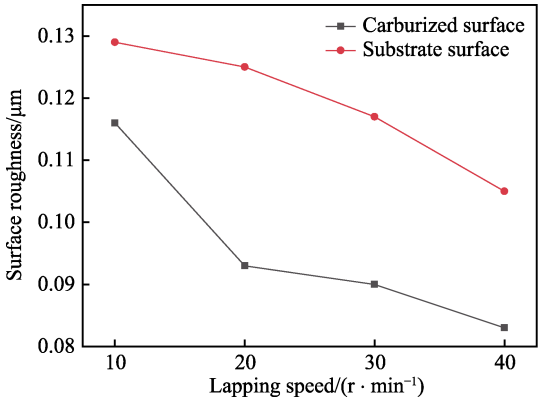


图 9　研磨速度对工件表面粗糙度的影响

Fig.9 Effect of lapping speed on surface roughness of workpiece

研磨速度对渗碳前后工件表面残余应力的影响规律如图 10 所示。从图 10 可知，工件表面残余压应力值随研磨速度的提高而增大。提高研磨速度，增加了工件和磨粒的接触次数，工件表面的塑性变形程度相对变大。因此，随着研磨速度的提高，残余应力值增大。研磨速度为 10 r/min 时，渗碳前后表面残余应力分别为–343.01 MPa 和–197.01 MPa；研磨速度为 40 r/min 时，渗碳前后表面残余应力分别为–429.42 MPa 和–322.0 MPa。

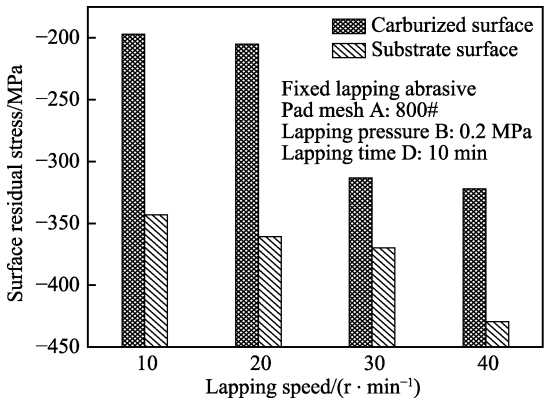


图 10　研磨速度对工件表面残余应力的影响

Fig.10 Effect of lapping speed on surface residual stress of workpiece

3.4　研磨时间对工件表面粗糙度和残余应力的影响

研磨时间作为衡量研磨效果的一项关键因素，其长短对工件表面粗糙度和残余应力有不可忽略的影响。研磨时间对渗碳前后工件表面粗糙度的影响规律如图 11 所示。从图 11 可知，随着研磨时间的延长，工件表面粗糙度呈现出下降趋势。当其他参数固定不变时，通过延长研磨时间，可以降低工件表面粗糙度，但当研磨时间达到一定时限，表面粗糙度变化会逐渐减小。

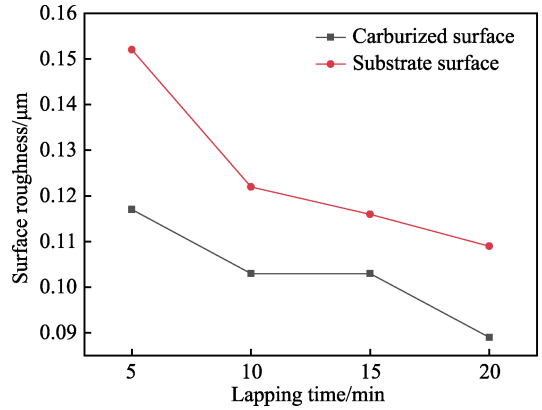


图 11　研磨时间对工件表面粗糙度的影响

Fig.11 Effect of lapping time on surface roughness of workpiece

研磨时间对渗碳前后工件表面残余应力的影响规律如图 12 所示。从图 12 可知，工件表面的残余压

应力值随研磨时间的延长而增大。研磨初期，磨粒较为锋利，磨粒切深较大。随着时间的推移，磨粒不断钝化，磨粒与工件接触面积变大，磨粒切深较小，但又有新的磨粒出刃，进一步划擦、磨削工件，加快了工件的塑性变形，引起残余压应力的增大。研磨时间为 5 min 时，渗碳前后表面残余应力分别为–382.93 MPa 和–245.05 MPa；研磨时间为 20 min 时，渗碳前后表面残余应力分别为–430.34 MPa 和–371.68 MPa。

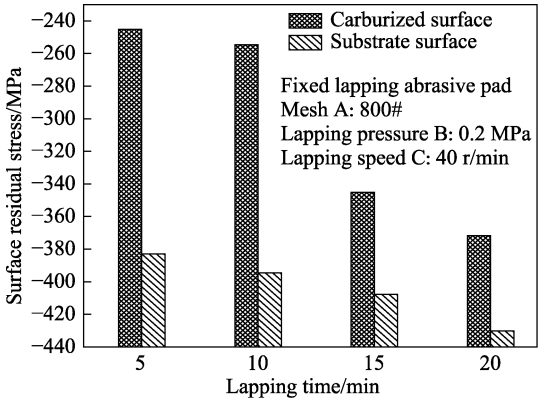


图 12　研磨时间对工件表面残余应力的影响

Fig.12 Effect of lapping time on surface residual stress of workpiece

4　结论

1）对于 18CrNiMo7-6 钢渗碳前后的工件，随着研磨垫粒度的增大，加工表面粗糙度值减小，研磨垫粒度为 3000#时，渗碳件和基体件表面粗糙度 *Ra* 分别为 15 nm 和 17 nm。

2）随着研磨垫粒度的增大，残余应力值增大。当研磨垫粒度为 3000#时，渗碳件表面可增大至残余拉应力 571.74 MPa，而基体件表面仍然呈现残余压应力–7.37 MPa；当研磨垫粒度为 400#时，均呈现较大的残余压应力，渗碳前后分别为–506.54 MPa 和–587.29 MPa。

3）研磨垫粒度为 800#时，随着研磨压力、研磨速度及研磨时间的增大，渗碳前后工件表面粗糙度值均减小，且表面残余压应力值增大。优化后研磨工艺参数组合为：研磨垫粒度 800#，研磨压力 0.2 MPa，研磨速度 40 r/min，研磨时间 10 min。此工艺能够得到较小的表面粗糙度值和较大的表面残余压应力。

4）在同样的研磨加工条件下，由于渗碳处理后工件表面硬度高，耐磨性较好，并且研磨过程中产生的塑性变形较小，所以渗碳件研磨加工表面粗糙度值小于基体件表面粗糙度，且渗碳件表面残余应力值大于基体件表面残余应力。

参考文献：

[1] 杨建东, 田春林. 高速研磨技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
YANG Jian-dong, TIAN Chun-lin. High speed lapping technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.

[2] SHUN Z L, HONG L M O, ZHONG X W, et al. Effect of abrasive sizes on processing characteristics of fixed diamond aggregations pad lapping quartz glass[J]. Diamond & abrasives engineering, 2017, 37(5):12-18.

[3] 孙磊, 郭伟刚, 袁巨龙, 等. 超薄石英晶片超精密抛光实验的研究[J]. 机电工程. 2013, 30(9): 1055-1058.
SUN Lei, GUO Wei-gang, YUAN Ju-long, et al. Experimental study on ultra-precision polishing for ultrathin quartz substrates[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2013, 30(9): 1055-1058.

[4] WANG J B, LI Z, ZHU Y W, et al. Effect of abrasive particle size on lapping of sapphire wafer by fixed abrasive pad[J]. Key engineering materials, 2018, 764: 106-114.

[5] HOFFMEISTER H W, HAHMANN W C. Influence of machining with lapping foils on surface integrity of hardened steel[J]. Procedia engineering, 2011, 19: 144-149.

[6] 原一高, 畅晓振, 朱世根. 散料研磨工艺对工件表面质量及材料去除率的影响[J]. 制造技术与机床, 2011(8): 166-169.
YUAN Yi-gao, CHANG Xiao-zhen, ZHU Shi-gen. Influence of loose abrasive lapping craft on workpiece surface quality and material removal rate[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2011(8): 166-169.

[7] 陈建, 原一高, 吴贺龙, 等. 研磨工艺对工件表面粗糙度及残余应力的影响[J]. 工具技术, 2009, 43(5): 16-18.
CHEN Jian, YUAN Yi-gao, WU He-long, et al. Effect of lapping process on surface roughness and residual stress of part[J]. Tool engineering, 2009, 43(5): 16-18.

[8] 张银霞, 陈欢, 郜伟, 等. 18CrNiMo7-6 钢渗碳淬火过程的数值研究[J]. 热加工工艺, 2017(18): 238-241.
ZHANG Yin-xia, CHEN Huan, GAO Wei, et al. Numerical research on carburizing and quenching process of 18CrNiMo7-6 steel[J]. Hot working technology, 2017(18): 238-241.

[9] 陈鑫, 王栋, 刘昱范. 高速磨削对 18CrNiMo7-6 表面完整性的影响研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 259-265.
CHEN Xin, WANG Dong, LIU Yu-fan. Influence of high speed grinding on surface integrity of 18CrNiMo7-6[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 259-265.

[10] 吴政协, 马泳涛, 龚军振, 等. 后混合水射流喷丸工艺对 18CrNiMo7-6 渗碳钢表面性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 147-152.
WU Zheng-xie, MA Yong-tao, GONG Jun-zhen, et al. Effects of post-mixed water jet shot peening process on surface properties of 18CrNiMo7-6 carburizing steel[J]. Surface technology, 2017, 46(9): 147-152.

[11] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
YUAN Zhe-jun, WANG Xian-kui. Precision and ultra-precision machining technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.

[12] OZTURK S, AYDIN L, KUCUKDOGAN N, et al. Optimization of lapping processes of silicon wafer for photovoltaic applications[J]. Solar energy, 2018, 164: 1-11.

[13] ZHENG X F, YUAN J L, WEN D H, et al. Parameters optimization on the lapping process of 9Cr18 with taguchi method[J]. Key engineering materials, 2008, 359-360: 158-161.

[14] BARYLSKI A, PIOTROWSKI N. Non-conventional approach in single-sided lapping process: kinematic analysis and parameters optimization[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 100(1/4): 589-598.

[15] ZHANG C J, JIAO F, ZHAO B. Experimental study on removal characteristics of ceramic materials in ultrasonic aided high efficiency lapping[J]. Advanced materials research, 2014, 1027: 123-126.