

预应力加载条件下零件干磨削表面强化层特征

王任胜^{1,2}, 董乐¹, 马良^{1,3}, 修世超¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁科技学院 机械工程学院, 辽宁 本溪 117004;

3. 新疆工程学院 机械工程系, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘 要: 采用预应力复合干磨削加工技术, 对未调质 45# 钢试件在不同预应力加载条件下实施表面磨削淬硬, 观测不同磨削深度和进给速度条件下的试件表层金相组织, 测量并分析试件在不同预应力条件下磨削淬硬层厚度、金相组织的变化状况, 并通过试件截面不同位置硬度测定显示淬硬层厚度及金相成分的变化, 得到试件施加预应力对淬硬强化层厚度的影响规律。研究表明, 预应力淬硬磨削能使工件表面产生强化层, 且大的磨削深度和小的进给速度有利于试件表面发生相变强化以及表层塑性变形的增大。

关 键 词: 预应力淬硬磨削; 位错; 针状马氏体; 加工硬化; 磨削深度; 进给速度

中图分类号: TG 580.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)01-0101-04

Characteristics of Dry Grinding Surface Hardening Layer Under Pre-stressed Loading Conditions

WANG Ren-sheng^{1,2}, DONG Le¹, MA Liang^{1,3}, XIU Shi-chao¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2.

School of Mechanical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830091, China.

Corresponding author: XIU Shi-chao, E-mail: realwrs@163.com)

Abstract: The surface grinding hardening of non-quenched and tempered 45# steel specimens under different pre-stressed loading conditions was carried out by using the pre-stressed hardening grinding process (PSHG). The metallographic structures of the specimens surface under different grinding depths and feed rates were observed, and the thickness of the hardening layer of the specimens and the change of its metallographic structure were measured and analyzed under different pre-stressed conditions. The influence of pre-stress on the thickness of the hardening layer was obtained by measuring the hardness of the specimens section. It was shown that the pre-stressed hardening grinding can make the workpiece surface become a hardening layer, and the larger grinding depth and the lower feed rate will be beneficial to the phase transformation hardening and plastic deformation of the surface layer.

Key words: pre-stressed hardening grinding; dislocation; acicular martensite; work hardening; grinding depth; feed rate

磨削工艺中, 磨削热量一般被认为对零件表面质量不利, 需要冷却剂或设置合理磨削条件抑制其造成的表面热损伤。Brinksmeier 等对回火态 AISI4140 钢 (对应中国的 40CrMnMo 钢) 进行平面磨削试验, 提出把磨削和热处理两种加工工艺集成在一起的磨削淬硬技术 (grinding hardening,

GH), 验证了利用磨削热使表面形成马氏体和碳化物为基本组织的淬硬强化层在实际生产中的可行性^[1-3]。此后, 各国学者对零件表面磨削淬硬加工技术展开研究, 例如澳大利亚的 Zarudi 通过对 AISI4140 钢的磨削试验, 验证了冷却方式、应力状态、位错密度及微粒尺寸几个因素对表面硬化

层相变动力学特征、亚表面层结构具有显著影响^[4-5].

磨削过程中产生表面强化的关键因素是磨削热造成的相变(主导因素)和加工硬化,但磨削深度过大、工件进给速度过快会导致单位时间内工件吸收更多的磨削热,加剧残余拉应力及磨削烧伤,二者均不利于零件表面完整性指标.因此磨削淬硬技术中的热量控制和表面残余应力表现形式至关重要.磨削热量控制方面,文献[6-7]已证实一定范围内控制切深能有效抑制磨削热量的释放;表面残余应力控制方面,已证明预应力磨削(pre-stressed grinding, PSG)技术能够获得有利于疲劳寿命及抗化学腐蚀能力提高的残余压应力^[8];修世超等又提出一种施加一定预应力的淬硬磨削(pre-stressed hardening grinding, PSHG)复合加工技术^[6],把残余应力的性态调整也集成在磨削淬硬加工过程,在对45#钢试件进行的GH和PSHG加工试验的结果表明:预应力控制在100 MPa以下,对宏观形貌三维几何尺寸相差不太大的非薄壁型或狭长条形零件变形无显著影响,其作用更多是改变和控制表面残余应力特征,使同层马氏体组织更细化,小切深加工条件下一定程度上对磨削烧伤有抑制作用,证明PSHG技术可作为表面热处理的有益补充.

但切深与预应力两个控制因素的结合,尤其连贯磨削淬硬加工工艺的表面硬化层试验评估,尚有值得探讨的问题,例如刘菊东等验证了大梯度温度场和机械应力场耦合作用下,40Cr工件表层在马氏体形核发育的同时抑制晶粒增大,工件表层一纵深向淬硬表面强化层呈“细—略粗—细”态分布的针状马氏体相^[9].但切深较小、磨削热受抑制的情况下,加工应力对硬化层金相组织形貌影响的准确描述仍有待研究,尤其在工件主动施加预应力后,磨削温度场与机械加工应力场的耦合关系还会进一步复杂化.为分析在预应力加载条件下小切深磨削加工硬化层影响因素,以PSHG复合加工方法进行预应力加载条件下的表面硬化过程的PSHG试验研究.

1 试样制备与试验方法

1.1 试验条件

预应力淬硬磨削加工过程如图1所示,通过转动专用夹具后部的螺杆,施加预紧力矩获得预应力,预应力大小可依螺栓紧固应力公式计算得到^[10].

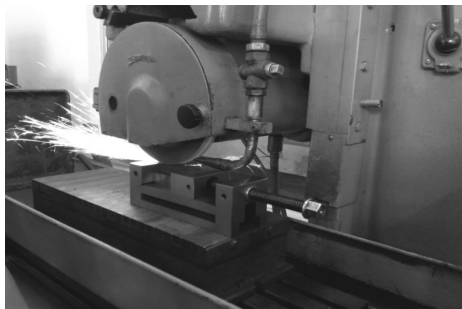


图1 试件与试验系统
Fig. 1 Workpiece & experiment system

试验设备及试件信息如表1所示.

表1 试验设备及试件
Table 1 Equipment and workpiece of test

试验设备或试件	设备或试件详情
磨床	M7120A
砂轮	白刚玉,直径250 mm 粒度F46
磨削方式	顺磨,干磨,磨削宽度15 mm
试件	非调质45#钢 5 mm × 10 mm × 10 mm

1.2 试验方案

因磨削深度和工件进给速度是显著影响表面磨削热量和加工硬化程度的因素,故以这两个参数为变量,在不同转矩,即不同预应力加载条件下完成淬硬磨削试验,测试方案如表2所示.

表2 预应力淬硬磨削加工试验方案与条件
Table 2 PSHG experiment scheme & conditions

编号	磨削深度 μm	进给速度 m/s	砂轮线速度 m/s	预紧力矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	冷却方式	磨削方式
1	100	0.02	37	40	干磨	顺磨
2	100	0.03	37	40	干磨	顺磨
3	200	0.02	37	20	干磨	顺磨
4	200	0.02	37	40	干磨	顺磨
5	200	0.02	37	60	干磨	顺磨

2 结果与讨论

2.1 预应力淬硬磨削强化效果

从图2a中看出:未淬硬试件组织主要由珠光体、铁素体及少量块状碳化物构成,晶粒大小较均匀,铁素体结构单一且与珠光体分界平滑.

距磨削起始点5 mm(切入区),25 mm(中间区)和45 mm(切出区)测基体硬度,取中线及左右两侧各2 mm处三点的维氏硬度.工件切入区

基体硬度为 236.2；中间区基体硬度为 250.2；切出区基体硬度为 239.7。从预应力淬硬磨削工件中切割出 5 mm × 10 mm × 10 mm 试样,做研磨、抛光、清洗和侵蚀处理后,通过 Olympus GX71 倒置式金相显微镜观察表面淬硬层发现:

1) 试件组织中包括:黑色的珠光体、白色铁素体及少量块状碳化物,晶粒排列均匀,铁素体和珠光体界限清晰,预应力作用下试件在淬硬磨削前后铁素体均出现明显被拉伸特征(图 2b)。

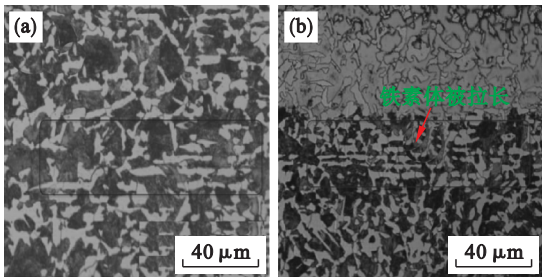


图 2 预应力淬硬磨削前后铁素体分布特征
Fig. 2 Distribution characteristics of ferrite before and after PSHG

(a)—淬硬磨削前;(b)—淬硬磨削后。

2) 经预应力淬硬磨削试件的金相组织有显著的相变与未相变层界限,图 3 中自上至下(由表及里)是完全硬化层、过渡区和基体区。可以发现:完全硬化区和过渡区均大量存在奥氏体转换得到的马氏体;磨削力作用最强,且冷却速度梯度最大的表层马氏体组织致密;过渡区则因温度场的延时传递及较慢的冷却速度导致较多铁素体和马氏体混合物以及一定量的回火索氏体;随磨削力的挤压和冲击效果的削弱,过渡区组织不如完全硬化区致密,但依然属于相变区域;里层基体因温度场无法达到奥氏体化临界温度,不属于相变区域,可认为相变区厚度即为试件强化层厚度。

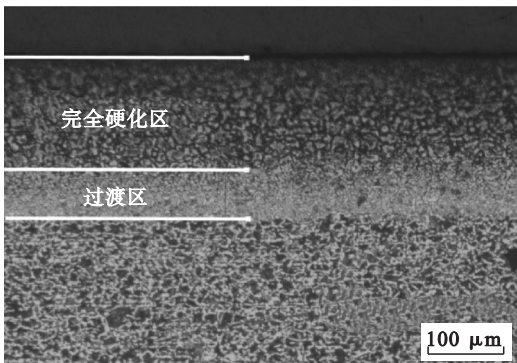


图 3 预应力淬硬磨削试件金相组织
Fig. 3 Metallographic microstructure of the specimens after PSHG

2.2 磨削深度和进给速度对强化层影响

2.2.1 磨削深度对强化层的影响

图 4 为 4 号和 1 号试件表面强化层的马氏体组织金相图。两试件施加预应力值均为 66.7 MPa,进给速度均为 0.02 m/s,但 4 号试件磨削深度 0.2 mm,1 号试件磨削深度 0.1 mm,对比图 2a,图 2b,发现 4 号试件相变层厚度明显大于 1 号试件相变层厚度,且 4 号试件表层马氏体组织更多并致密,塑性变形程度更大。表明磨削深度增加将明显导致试件相变层厚度的增大及细化表层组织,塑性变形程度更加明显。

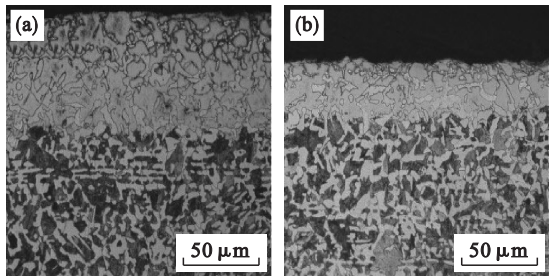


图 4 试件的金相组织
Fig. 4 Metallographic microstructure of the specimens
(a)—4 号试件;(b)—1 号试件。

2.2.2 进给速度对强化层的影响

图 5 依次为 1 号和 2 号试件表层金相组织图。磨削深度相同,均为 0.1 mm,施加预应力值均为 66.7 MPa,1 号试件进给速度 0.02 m/s,2 号试件 0.03 m/s,对比两图发现 1 号试件相变层厚度大于 2 号试件相变层厚度,且 1 号试件表层马氏体组织更多且致密,塑性变形程度更大。说明磨削进给速度的降低导致试件相变层厚度增大,单位时间内磨削弧在工件表面滞留时间更长,导致温度场对表层硬化结果影响程度增大。

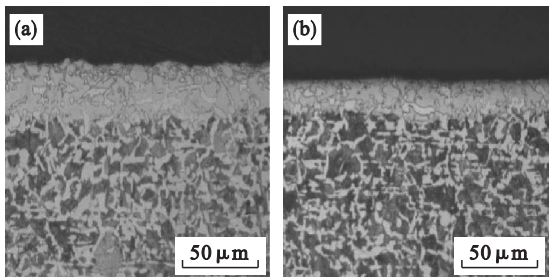


图 5 试件的金相组织
Fig. 5 Metallographic microstructure of the specimens
(a)—1 号试件;(b)—2 号试件。

2.3 预应力对试件硬度影响分析

2.3.1 不同预应力下表面硬度值分布

采用 THV - 5 维氏硬度计,在磨削深度

200 μm 、进给速度 0.022 mm 条件下,对 3,4 和 5 号试件分别施加 20,40 和 60 $\text{N}\cdot\text{m}$ 预紧力矩,获得不同预应力数值,并测量表面硬度,结果如图 6 所示.

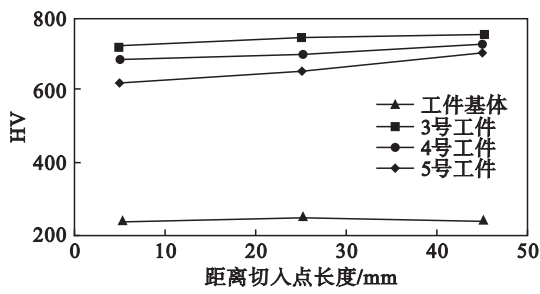


图 6 试件表面硬度分布

Fig. 6 Surface hardness distribution of the specimens

图 6 由左至右从切入区到中间区再到切出区,预应力加载值最小的 3 号试件硬度均为最大,而预应力加载值最大的 5 号试件硬度最小,说明当磨削深度和进给速度不变的情况下,预拉应力会在一定程度降低表面层的硬化效果.这是由于预拉应力造成表层组织拉伸,降低了磨削作用层厚度所造成的.

2.3.2 试件沿深度方向硬度测量结果分析

以 5 号试件为例,对试件截面由上至下每间隔 0.1 mm 测量硬度结果如图 7 所示.

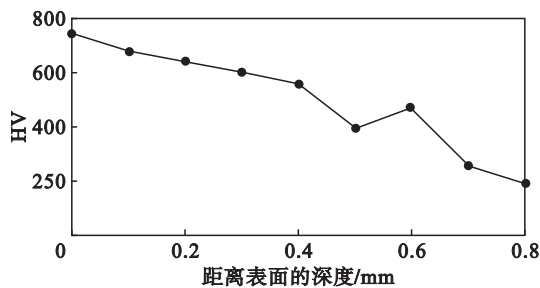


图 7 试件截面硬度分布

Fig. 7 Distribution of hardness on the specimens section

由图 7 得知,试件表面硬度值随距离表面的深度增加而减小,且距离表面深度 $0 \leq h_x \leq 0.6$ mm 以内,硬度递减变化梯度接近常数,当 $0.6 \leq h_x \leq 0.8$ mm 时,硬度降低速度加剧;当 $h_x > 0.8$ mm 后,硬度几乎不再变化,相当于已越过磨削淬硬层进入试件基体.试验从另一方面说明马氏体相变和塑性变形区厚度临界值约位于表面之下 0 ~ 0.6 mm 范围.

3 结 论

1) 磨削深度 200 μm 时,预应力淬硬磨削试验后所有试件相比试件基体,其硬度有明显提高,金相组织显示自表面向下 0 ~ 0.6 mm 范围内较稳定,呈现致密针状马氏体组织.

2) 相同预应力条件下,磨削深度和进给速度显著影响磨削淬硬层厚度的变化,较大的磨削深度和较小的进给速度有利于相变强化层厚度增加.

3) 预应力主要是通过温度、金相组织结构对硬化效果产生一定影响,相比不施加预应力的试件,宏观影响可综合为硬化层硬度数值的轻微下降及对磨削热造成烧伤所具有的一定抑制作用.

参考文献:

- [1] Brinksmeier E, Brockhoff T. Surface heat treatment by using advanced grinding processes [J]. *La Metallurgia Italiana*, 1999, 91(4): 19-23.
- [2] Brinksmeier E, Brockhoff T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 1996, 45(1): 283-286.
- [3] Brinksmeier E, Brockhoff T. Advanced grinding processes for surface strengthening of structural parts [J]. *Machining Science and Technology*, 1997, 1(2): 299-309.
- [4] Zarudi I, Zhang L C. Modeling the structure changes in quenchable steel subjected to grinding [J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(20): 4333-4341.
- [5] Zarudi I, Zhang L C. Mechanical property improvement of quenchable steel by grinding [J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(18): 3935-3943.
- [6] 修世超,白斌,张修铭,等.预应力淬硬磨削复合加工表层硬化试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(1): 86-90.
(Xiu Shi-chao, Bai Bin, Zhang Xiu-ming, et al. Study of the surface hardening in pre-stressed hardening grinding combined machining[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(1): 86-90.)
- [7] Chen X, Rowe W B. Analysis and simulation of the grinding process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(8): 871-906.
- [8] Ye B Y, Peng R T, Tang X Z, et al. Residual stress and surface morphology of pre-stress hard cutting [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2008, 36(4): 6-9.
- [9] 刘菊东,王贵成,陈康敏,等.原始组织对 40Cr 钢磨削硬化层的影响研究[J]. *金属热处理*, 2004, 29(12): 61-65.
(Liu Ju-dong, Wang Gui-cheng, Chen Kang-min, et al. Effect of original structure on the grind-hardened layer of 40Cr steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29(12): 61-65.)
- [10] 吴国志.螺栓紧固应力与紧固扭矩计算[J]. *内燃机与动力装置*, 2012(1): 39-41.
(Wu Guo-zhi. Calculation of tightening stress and torque of bolt [J]. *Internal Combustion Engine & Powerplant*, 2012(1): 39-41.)