

# 预应力时效性对磨削强化表面应力的影响

牛艺静, 孙 聪, 庞 刚, 修世超

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了获得不同预应力卸载时间的磨削硬化层残余应力值及马氏体含量,进行了预应力淬硬磨削实验.对预应力磨削进行仿真,得到了工件表层的温度变化情况及预应力卸载时间对表面机械热应力的影响.结合实验数据和仿真模拟,讨论了预应力时效性对相变和相变应力的影响.结果表明:在7s内,预应力具有一定的时效性;随着卸载时间的增加,晶体内部晶界伸长,马氏体含量有所增加,加工表面残余压应力增加.

**关 键 词:** 预应力磨削;卸载时间;相变;残余应力;有限元仿真

中图分类号: TH 164

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)04-0546-05

## Effect of Pre-stress Time-Characteristics on Grinding Strengthened Surface Stress

NIU Yi-jing, SUN Cong, PANG Gang, XIU Shi-chao

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: NIU Yi-jing, E-mail: 358716263@qq.com)

**Abstract:** In order to obtain the residual stress value and martensite content of the hardened layer with different pre-stress unloading times, a pre-stress hardening grinding experiment was carried out. The pre-stress grinding was simulated to obtain the temperature change of the surface layer of the workpiece and the influence of the pre-stress unloading time on the surface's mechanical thermal stress. Combining the experimental data and simulation, the effects of pre-stress time-characteristics on phase transformation and phase transformation stress were discussed. The results showed that the pre-stress has certain time-characteristics in 7 seconds. With the increase of unloading time, the grain boundary of the crystal is elongated, the content of martensite increases, and the residual compressive stress of the machined surface increases.

**Key words:** pre-stress grinding; unloading time; phase transformation; residual stress; FEM simulation

磨削淬硬 (grind-hardening, GH) 是一种新型技术,它利用工件表层在磨削加工中产生的大量热,使表层温度超过材料的相变温度,进而发生马氏体相变的过程<sup>[1-3]</sup>.磨削淬硬提高了工件的硬度、强度和抗冲击性能,以及工件的耐磨性、耐腐蚀性等<sup>[4-5]</sup>.

预应力强化磨削 (pre-stress hardening grinding, PSHG) 是在磨削加工时对工件施压预应力,其结合了磨削淬硬的优点,又能够通过工件加工表层的弹性变形,减少工件加工表层的残余拉应力并获得了残余压应力,提高表面质量,延长

接触疲劳寿命<sup>[6-8]</sup>.

本文通过研究预应力时效性,试图找出使工件表层获得高抗磨损、高接触疲劳强度的最佳预应力卸载时间.为了研究预应力时效性对表面残余应力和表面完整性的影响,选择不同预应力和卸载时间进行预应力磨削淬硬实验.同时为研究机械热应力及表面温度变化,采用有限元法 (FEM) 进行磨削淬硬过程温度的收集.通过对温度曲线的研究,选择3个时间节点来卸载预应力.最后,结合模拟和实验结果,对相变应力进行了研究.

1 实验研究

1.1 实验条件和参数

实验选用了德国 BLOHM 保宁 ORBIT 36P 平面成型磨床,见图 1. 实验条件和工件参数如表 1 所示. 实验前先对工件进行磨削,冷却后再加载预应力进行磨削淬硬. 磨削深度为 0.15 mm 时,实验参数见表 2.

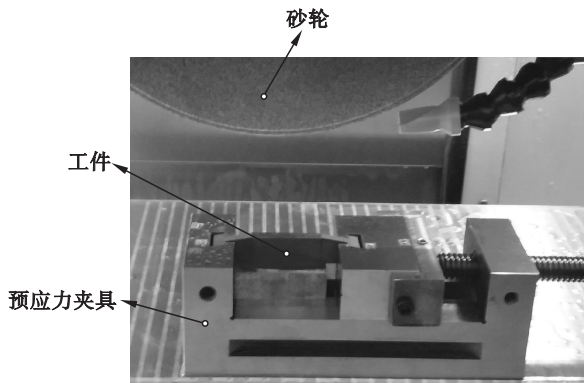


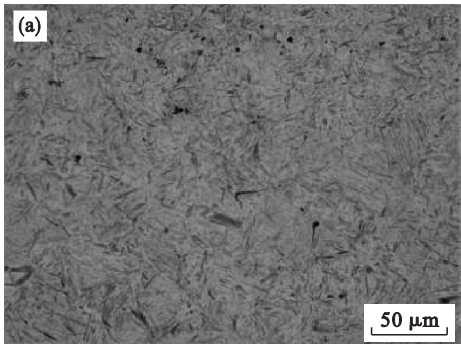
图 1 PSHG 实验  
Fig. 1 Experiment process of PSHG

表 1 实验条件和工件参数  
Table 1 Experimental conditions and workpiece

实验条件	参数
磨削方式	干磨削,顺磨
磨削轮	白刚玉
磨削轮的粒度	F46
磨削轮直径/mm	350
磨削轮速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	30
工件	45 钢, $50\times 10\times 20$
工件进给速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3.3

1.2 实验结果及分析

磨削淬硬实验后通过盲孔法测得残余应力,预应力卸载时间对残余应力的影响如图 2 所示,残余应力为压应力. 随着预应力卸载时间的增加,



残余压应力逐渐增加.

表 2 磨削参数  
Table 2 Grinding parameters

编号	预应力 $\sigma/\text{MPa}$	卸载时间 $t_u/\text{s}$
1	25	1
2	25	3
3	25	7
4	41	1
5	41	3
6	1	7
7	75	1
8	75	3
9	75	7

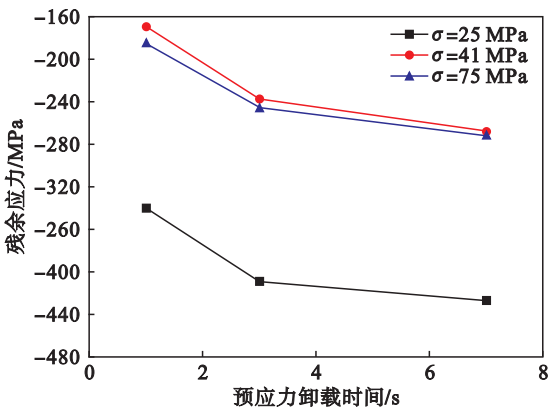


图 2 预应力卸载时间对残余应力的影响  
Fig. 2 Effect of pre-stress unloading time on residual stress

残余压应力可以提高实际疲劳强度,压力值越大,实际疲劳强度越高. 残余压应力在一定程度上也会减缓零件的磨损,压应力值变化对零件磨损性能影响很小.

通过奥林巴斯金相显微镜观察试件的金相组织,再对金相组织进行了二值化处理. 图 3 为二值化处理前后的金相组织,图中的白色区域为马氏体,黑色区域为残余奥氏体和未溶碳化物.

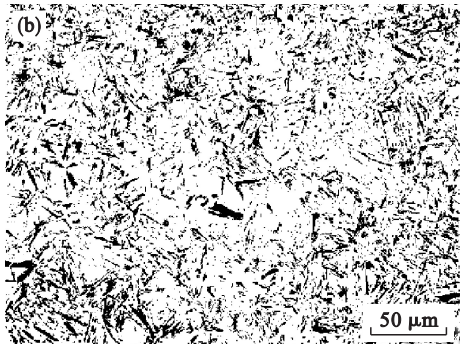


图 3 二值化处理前后的金相组织  
Fig. 3 Metallographic organization before and after binarization  
(a)—处理前; (b)—处理后.

马氏体面积分数随卸载时间的变化曲线如图 4 所示。随着预应力卸载时间的增加,马氏体面积分数逐渐增加。这是由于在 1 s 时过早卸载预应力,此时温度很高,奥氏体还没有发生马氏体转变,预应力只对奥氏体有作用,使奥氏体晶粒变细,晶界拉长,有利于马氏体的形成。当在 3 s 卸载预应力时,施加的预应力作为一种补充机械应力,使马氏体相变提前发生,此时发生“应力促进马氏体相变”现象,促进马氏体的相变,生成的马氏体数量增多。在 7 s 卸载预应力,此时在“应力促进马氏体相变”发生的基础上,预应力使得晶体内部晶界伸长,也有利于马氏体形核,马氏体的面积分数会有少量增加。

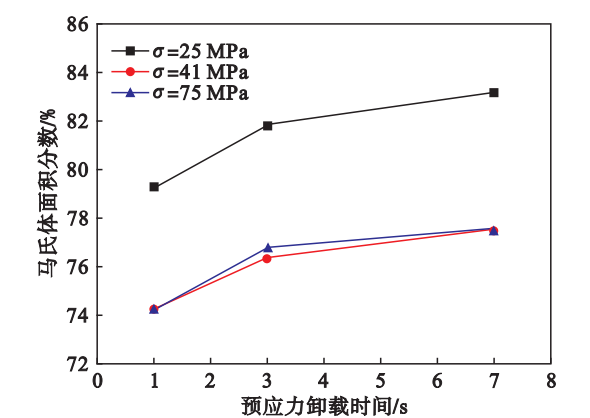


图 4 马氏体面积分数随预应力卸载时间的变化曲线  
Fig. 4 Martensite content as a function of pre-stress unloading time

## 2 仿真研究

### 2.1 模型建立

为更好地模拟预应力磨削,本文选用 ANSYS 进行温度场仿真模拟。热源的加载采用抛物线热源模型。砂轮的切向磨削力  $F_t$  可由经验公式获得<sup>[9]</sup>:

$$F_t = 0.5 \times 28\,282 \times (a_p)^{0.86} (v_s)^{-1.06} (v_w)^{0.44}. \quad (1)$$

式中:参数解释见表 3。

由切向磨削力计算得出磨削区域的总热流密度  $q$  为

$$q = \frac{F_t (v_s - v_w)}{bl_g}. \quad (2)$$

式中: $b$  为磨削宽度; $l_g$  为磨削弧长:

$$l_g = \sqrt{a_p d_s}. \quad (3)$$

由热分配比  $\varepsilon$  可计算出流入工件的热流强度:

$$q_w = \varepsilon q. \quad (4)$$

仿真选用 SOLID70 单元进行分析<sup>[10]</sup>,它既可以进行热分析也可以转为结构分析,是三维实体单元,具有三维热传导能力,有 8 个节点,每个节点上只有一个温度自由度,可以用于三维瞬态的热分析。主要仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数  
Table 3 Simulation parameters

磨削工况	参数
工件材料	45 钢
磨削方式	顺磨
冷却方式	空冷
预应力 $\sigma$ /MPa	25, 41, 75
砂轮直径 $d_s$ /mm	350
砂轮速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	30
进给速度 $v_w/(m \cdot s^{-1})$	0.003
磨削深度 $a_p/\mu m$	150
磨削宽度 $b$ /mm	10
室温/ $^{\circ}C$	20
热分配比 $\varepsilon$	0.4

预应力淬硬磨削过程的仿真是一个热力耦合的过程,首先根据初始条件和边界条件,对温度场进行加载。工件的边界条件如图 5 所示:在工件的  $\Gamma_1$  边界上设定初始温度为  $20^{\circ}C$ ,在  $\Gamma_2$  边界上设定流入工件的热流密度,即抛物线分布热流密度,在  $\Gamma_3$  边界上设定空气对流换热条件。具体加载过程为对接触弧区及接触弧区内的热流密度进行离散。同时,进行热流密度的固定加载,在下一个时间内,把上次的计算结果作为初始条件,对下一个区域进行热流密度的加载,通过循环加载得到淬硬磨削加工的瞬态温度场。在温度场有限元分析中,将热源的移动过程进行离散化,经过有限次的迭代循环,得到仿真温度场。

### 2.2 仿真结果

图 6 为 20 载荷步的温度变化曲线。温度在 3.1 s 左右达到最高点,此时温度超过  $1\,000^{\circ}C$ 。当温度升至  $727^{\circ}C$  ( $A_{c1}$ ) 时,珠光体、铁素体开始转变为奥氏体。升至  $770^{\circ}C$  ( $A_{c3}$ ) 时,相变结束,所有组织转变为奥氏体。在空冷过程中,由于冷却速度较快,当温度降至  $300^{\circ}C$  左右时,奥氏体直接转变为马氏体,如图 7 所示。根据马氏体相变点  $M_s$  选择了 3 个时间节点卸载预应力:卸载时间为磨削后 1 s 时,马氏体相变还没有开始;卸载时间为磨削后 3 s 时,相变刚刚开始;卸载时间为磨削后 7 s 时,温度约  $200^{\circ}C$ ,马氏体相变发生了一段时间。利用这些卸载预应力的时间节点,研究了磨削过

程中预应力时效性对工件的影响。

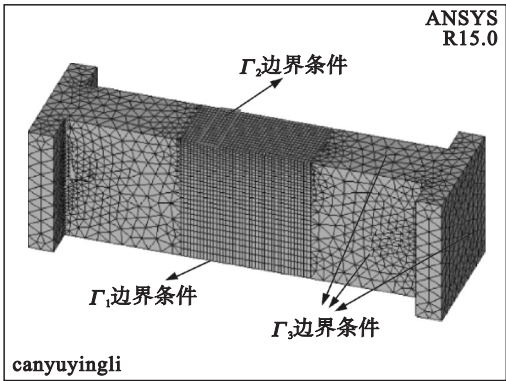


图 5 边界条件  
Fig. 5 Boundary conditions

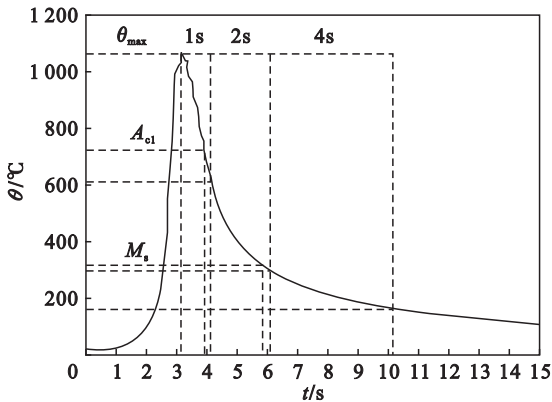


图 6 20 载荷步温度随时间的变化曲线  
Fig. 6 Temperature versus time curve at 20 loading steps

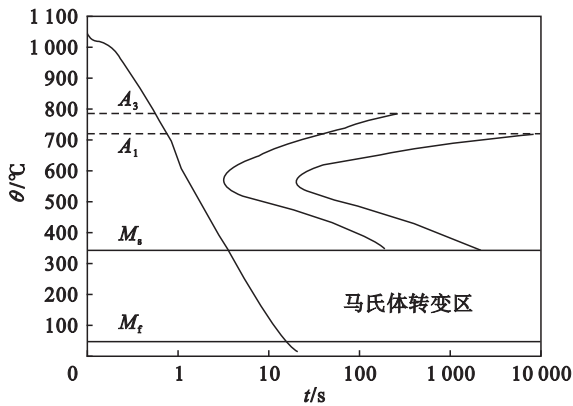


图 7 连续冷却相变图  
Fig. 7 Continuous cooling phase transformation diagram

在相同的预应力作用下,随着预应力卸载时间的增加,表面的机械热应力逐渐减小,如图 8 所示。这是因为磨削的瞬间高温会导致表面膨胀。当预应力卸载时,由于表面温度高,热应力仍起作用;内层温度低,内层由于预应力卸载首先开始收缩。表面温度高,冷却快,表面收缩速率大于内部收缩速率。因此,表面残余拉应力较大,表面机械热应力也较大。随着卸载时间的推移,表面温度急

剧下降,表面和内部的温差也随之降低。热应力的作用减弱,内部、表面收缩差减小。内层的弹性恢复引起表面的残余压应力抵消了热应力引起的残余拉应力。

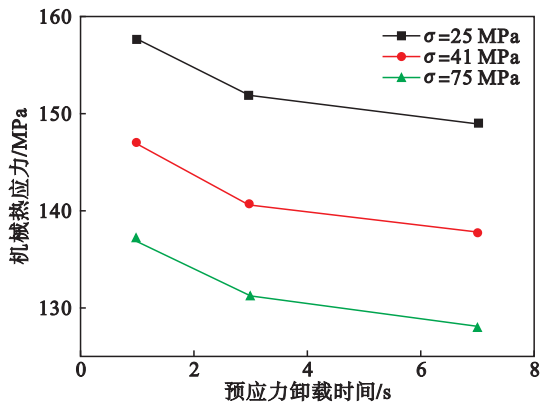


图 8 机械-热应力随卸载时间的变化曲线  
Fig. 8 Mechanical-thermal stress as a function of unloading time

### 3 卸载时间对相变应力的影响

残余应力是加工表层热应力、机械应力和相变应力综合作用的结果。相变应力是残余应力形成过程中的一个重要环节。相变应力可以用预应力磨削的残余应力和机械热应力来计算,得到的相变应力值为负,即相变压应力<sup>[1]</sup>。不同的金相组织密度是不同的,当工件材料在不同组织间发生变化时产生相变应力。当低密度组织转变为高密度组织时,会产生相变拉应力。反之,相变则会产生压应力。在冷却过程中,随着奥氏体转变为马氏体,体积增大,产生相变压应力。图 9 表明,随着卸载时间的增加,相变压应力增加。相变压应力的变化趋势与图 7 中的马氏体面积分数变化一致,证明了相变应力的计算合理性。

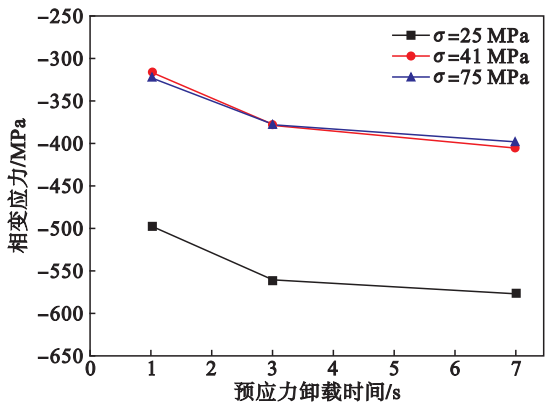


图 9 相变应力随预应力卸载时间的变化曲线  
Fig. 9 Phase transformation stress under different pre-stress unloading time



4 结 论

- 1) 本文通过磨削淬硬实验研究了预应力时效性对残余应力的影响. 实验测得残余应力为压应力,随着卸载时间的推移,残余压应力增大.
- 2) 通过对金相组织图进行二值化处理,可知随着预应力卸载时间的增加,马氏体面积分数增加.
- 3) 采用有限元模拟方法研究了机械热应力,机械热应力为拉应力,其值随卸载时间的增加而减小.
- 4) 相变应力由机械热应力和残余应力计算得到,为压应力. 随着预应力卸载时间的延长,相变的压应力增大. 相变压应力的变化与图 7 中的马氏体面积分数变化趋势一致.

参考文献:

[ 1 ] Brinksmeier E,Brockhoff T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process[ J ]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,1996,45( 1 ):283 – 286.

[ 2 ] 刘菊东,王贵成,陈康敏,等. 45 钢磨削硬化的试验研究[ J ]. *材料科学与工艺*,2005,13( 3 ):326 – 328.

( Liu Ju-dong, Wang Gui-cheng, Chen Kang-min, et al. Experimental studies of grind-hardening for AISI1045 steel [ J ]. *Material Science & Technology*, 2005, 13 ( 3 ): 326 – 328. )

[ 3 ] Salonitis K,Kolios A . Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 steel [ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

*Technology*,2015,79(9/10/11/12):1443 – 1452.

[ 4 ] Zhang L, Ge P Q, Zhang J H, et al. Experimental and simulation studies on temperature field of 40Cr steel surface layer in grind-hardening [ J ]. *International Journal of Abrasive Technology*,2007,1( 2 ):187 – 197.

[ 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 ] Zhou N,Peng R L, Pettersson R. Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations[ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 294 – 304.

[ 7 ] 叶邦彦,彭锐涛,唐新姿,等. 预应力硬态切削的残余应力及表面形态[ J ]. *华南理工大学学报( 自然科学版)*,2008,36( 4 ):6 – 9.

( Ye Bang-yan, Peng Rui-tao, Tang Xin-zi, et al. Residual stress and surface morphology of pre-stress hard cutting[ J ]. *Journal of South China University of Technology ( Natural Science Edition)* ,2008,36( 4 ):6 – 9. )

[ 8 ] Guo C,Wu Y, Vargheseb V, et al. Temperatures and energy partition for grinding with vitrified CBN wheels [ J ]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,1999,48( 1 ):247 – 250.

[ 9 ] 史小亮,刘明贺,张修铭,等. 预应力淬硬磨削下强化层金相组织的转变机理[ J ]. *东北大学学报( 自然科学版)*,2016,37( 2 ):208 – 212.

( Shi Xiao-liang, Liu Ming-he, Zhang Xiu-ming, et al. Transformation mechanism of microstructure in hardening layer under the PSHG[ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)* ,2016,37( 2 ):208 – 212. )

[ 10 ] Shi X L,Xiu S C,Zhang X M, et al. A study of PSHG and its characteristic mechanism of residual stress within a hardened layer[ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2017,88( 1/2/3/4 ):863 – 877.

( 上接第 545 页 )

参考文献:

[ 1 ] 田欣利,李富强,张保国,等. 工程陶瓷的激光加热辅助切削技术[ J ]. *现代制造工程*,2012( 8 ):5 – 11.

( Tian Xin-li, Li Fu-qiang, Zhang Bao-guo, et al. Laser heating assisted cutting technology for engineering ceramics [ J ]. *Modern Manufacturing Engineering*,2012( 8 ):5 – 11. )

[ 2 ] 张勤河,张建华,高军. 工程陶瓷材料的应用[ J ]. *现代技术陶瓷*,1998,19( 4 ):22 – 25.

( Zhang Qin-he, Zhang Jian-hua, Gao Jun. Application of engineering ceramics [ J ]. *Modern Technology Ceramics*, 1998,19( 4 ):22 – 25. )

[ 3 ] Stinton D P. Assessment of the state of the art in machining and surface preparation of ceramics[ J ]. *Oak Ridge National Laboratory*,1988,45:23 – 41.

[ 4 ] Wobker H G, Tonshoff H K. High efficiency grinding of structural ceramics [ J ]. *National Institute of Science and*

*Technology Special Publication*,1993,847:455 – 463.

[ 5 ] Li H N,Xie K G, Wu B, et al. Generation of textured diamond abrasive tools by continuous-wave CO<sub>2</sub> laser; laser parameter effects and optimization[ J ]. *Materials Processing Technology*,2020,275:116279.

[ 6 ] Li H N,Yang Y,Zhao Y J,et al. On the periodicity of fixed-abrasive planetary lapping based on a generic model [ J ]. *Manufacturing Processes*,2019,44:271 – 287.

[ 7 ] 鄢铨. 激光加热辅助切削 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 工程陶瓷理论与试验研究[ D ]. 长沙:湖南大学,2008.

( Yan Cuo. Theoretical and experimental study of laser assisted cutting Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> engineering ceramics[ D ]. Changsha: Hunan University,2008. )

[ 8 ] 吴雪峰. 激光加热辅助切削氮化硅陶瓷技术的基础研究[ D ]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

( Wu Xue-feng. Basic research on laser heating assisted cutting silicon nitride ceramics[ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2011. )