

预应力淬硬磨削复合加工表面粗糙度试验

王雨时¹,宋建伟²,邢 韵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. 中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司,辽宁 沈阳 110043 ;
3. 中国科学院 沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016)

摘 要:以预应力淬硬磨削条件下试件表面粗糙度变化规律为研究对象,通过对45钢试件进行预应力淬硬磨削试验并进行表面粗糙度测量,分析了预应力淬硬磨削工艺参数(预应力、磨削深度、进给速度等)对试件表面粗糙度的影响机制.结果表明,粗糙度在试件表面分布并不均匀,其数值基本上都是从切入区到切出区逐渐增大的,适当增加预拉应力数值可以降低工件表面粗糙度,有效抑制试件表面微观裂纹的扩展,降低磨削温度,改善试件表面质量,预应力淬硬磨削中磨削深度和进给速度对表面粗糙度的影响与普通磨削一致,即随着磨削深度和进给速度增加表面粗糙度数值逐渐增大.

关 键 词:预应力淬硬磨削;表面粗糙度;微观形貌;复合加工;磨削深度

中图分类号: TG 580.6 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)09-1278-05

Experiment of Surface Roughness in Pre-stressed Hardening Grinding Compound Machining

WANG Yu-shi¹, SONG Jian-wei², XING Yun³, XIU Shi-chao¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China ;
2. AVIC Shenyang Liming Aero-Engine(Group) Co., Ltd., Shenyang 110043, China ;3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China. Corresponding author : XIU Shi-chao, E-mail : wys222511@163.com)

Abstract : Taking change law of specimen surface roughness under pre-stressed hardening grinding conditions as study object, 45 steel pieces were measured to analyze the influence mechanism of process parameters (pre-stress, grinding depth and feed speed) on the surface roughness. The experimental results show that the roughness is nonuniform and its value gradually increases from cut-in area to cut-out area. The increase of pre-stress value can decrease the surface roughness, inhibit surface microcosmic crack, reduce grinding temperature, and improve the surface quality of specimen. As same as to general grinding, the surface roughness gradually increases with the increase of grinding depth and feed speed.

Key words : pre-stressed hardening grinding ; surface roughness ; microstructure ; compound machining ; grinding depth

在机械加工中,加工表面完整性是衡量零件加工质量的重要指标之一.已加工零件表面完整性会直接影响零件的工作性能和使用寿命.机械零件表面完整性指标(表面粗糙度、残余应力、微结构损伤和表面硬化层特征等)对机械零件使用中的强度、摩擦学特性及耐磨性、抗疲劳性能、耐腐蚀性能和寿命等具有显著的影响.磨削加工通

常是保证零件表面完整性指标的重要机械加工工艺.它是通过砂轮表面的磨粒与工件表面材料相互干涉与切削来形成零件的终加工表面,特别是可以获得较低的表面粗糙度数值^[1-2].随着对机械产品性能与工艺绿色度要求的不断提高,通过先进磨削加工技术来实现零件表面完整性综合控制已越来越受到人们的关注.德国 Bremen 大学

Brinksmeier 等于 1994 年提出了磨削淬硬工艺^[3],即在磨削过程中直接利用磨削产生的热量对加工表面进行淬火. 2002 年,澳大利亚的 Zarudi 等对回火态 AISI 4140 钢进行磨削淬硬试验,分析了淬硬层产生机理^[4-5]. 国内葛培琪等在磨削淬硬形成机理及磨削工艺参数控制等方面开展了理论与试验研究^[6-8]. 修世超等结合点磨削工艺对小切深条件下工件表面强化层机制开展了试验研究^[9]. 这些工作从不同工艺角度揭示了磨削表面的硬化与表面完整性控制机理.

预应力淬硬磨削(pre-stressed hardening grinding , PSHG)是将预应力加工与磨削淬硬相融合而形成的一种绿色度较高的新型复合磨削加工新工艺^[10],预应力淬硬磨削过程就是在预拉伸应力条件下对零件实施磨削淬硬加工,因此集成了预应力加工和磨削淬硬的特点,实现了零件磨削表面层残余应力控制与零件表面淬硬. 加工过程中采用控制磨削液或干磨削方式来完成对工件的磨削加工并使零件表面产生一定厚度的淬火层,最终实现对零件的磨削淬硬与残余应力控制.

1 预应力淬硬磨削试验

1.1 试验条件

试验采用平面磨削方式,机床型号为 M7120A,砂轮采用磨料粒度为 F46 的陶瓷结合剂白刚玉砂轮,机床参数如表 1 所示.

表 1 M7120A 平面磨床的主要技术参数 Table 1 Main technical parameters of M7120A surface grinder	
技术指标	参数值
砂轮转速/(r·min ⁻¹)	2 880
主电机功率/kW	2. 8
总容量/kW	4. 02
砂轮直径/mm	250

试件材料为 45 未调制钢,基体硬度 230 HV. 试件的加工段尺寸为 50 mm × 22 mm × 10 mm,试件与试验加工过程如图 1 所示.

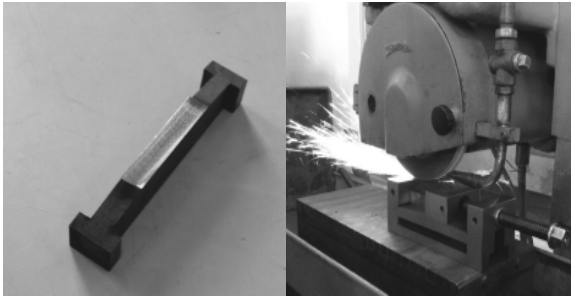


图 1 试件与预应力淬硬磨削试验过程
Fig. 1 Specimen and experiment process of pre-stressed hardening grinding

1.2 预应力的计算及试验方案设计

预应力采用施加预紧力矩方式实现. 预紧力矩与预应力之间的关系可表示为^[11]

$$M = \frac{1}{2} Q_p \left[d_2 \tan(\psi + \varphi_v) + \frac{2}{3} f_c \frac{D_0^3 - d_0^3}{D_0^2 - d_0^2} \right]. \quad (1)$$

式中: M 为预紧力矩; Q_p 为预紧力; d_2 为预应力夹具螺纹中径, $d_2 \approx 0.9 d$; ψ 为螺纹升角; φ_v 为螺旋副的当量摩擦角; d_0 为螺栓孔直径, $d_0 \approx 1.1 d$; f_c 为螺母与支承面间的摩擦系数, $f_c = 0.15$; D_0 为螺母环形支承面的外径, $D_0 \approx 1.5 d$. 预应力可按下式计算:

$$\sigma = \frac{Q_p}{A}, \quad (2)$$

其中 A 为试件加工段横截面积.

预应力淬硬磨削试验采用干磨削方式,对预应力淬硬磨削表面粗糙度影响的因素主要有工件进给速度、砂轮线速度、磨削深度和预应力施加的大小. 砂轮线速度按普通磨削设置,取 $v_s = 37$ m/s. 采用正交试验,1 2 3 号试件针对进给速度对表面粗糙度的影响,5 6 7 号试件针对预应力对表面粗糙度的影响,2 4 5 号试件针对磨削深度对表面粗糙度的影响,设计试验方案如表 2 所示.

表 2 预应力淬硬磨削试验方案 Table 2 Experimental plan of pre-stressed hardening grinding							
编号	预应力(σ)	磨削深度(a_p)	进给速度(v_w)	砂轮线速度(v_s)	磨削宽度	冷却方式	磨削方式
	MPa	μm	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	mm		
1	57	100	0.01				
2	57	100	0.02				
3	57	100	0.03				
4	57	150	0.02	37	10	空冷	顺磨
5	57	200	0.02				
6	28	200	0.02				
7	85	200	0.02				

2 试验结果与分析

加工后的试件表面如图 1 所示 ,采用 TR300 粗糙度形状测量仪来测量表面粗糙度. 对每一个

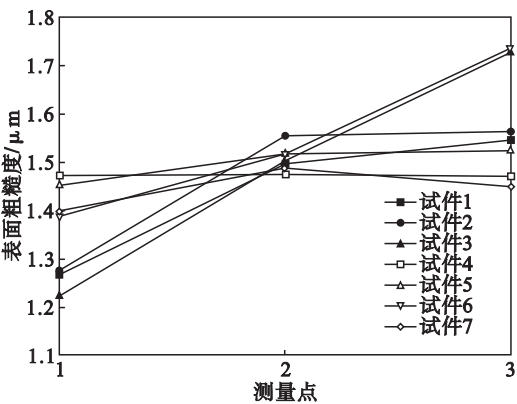
试件的已加工表面分别取切入区域、中间区域和切出区域进行测量 ,每一个区域测量 5 次 ,结果取平均值 ,最后对 3 个区域取平均值得出表面粗糙度值. 表 3 是表面粗糙度的最终测量结果.

表 3 试件表面粗糙度的最终测量结果
Table 3 Final measurement results of specimens' surface roughness

试件	预应力 (σ)/MPa	磨削深度 (a_p)/ μm	进给速度 (v_w)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	切入区均值 (R_{a1})/ μm	中间区均值 (R_{a2})/ μm	切出区均值 (R_{a3})/ μm	粗糙度均值 (R_a)/ μm
1	56	100	0.01	1.272	1.495	1.548	1.438
2	56	100	0.02	1.275	1.558	1.566	1.466
3	56	100	0.03	1.223	1.506	1.728	1.486
4	56	150	0.02	1.473	1.473	1.473	1.473
5	56	200	0.02	1.452	1.517	1.526	1.498
6	28	200	0.02	1.388	1.517	1.737	1.547
7	84	200	0.02	1.397	1.490	1.453	1.447

2.1 不同区域表面粗糙度分布特征

从粗糙度测量结果可以看出 ,粗糙度在试件表面分布并不均匀 ,表面粗糙度数值基本上都是从切入区到切出区逐渐增大的 ,如图 2 所示.



1—切入区 ;2—中间区 ;3—切出区.

图 2 不同试件切入区、中间区、切出区的粗糙度
Fig. 2 Roughness of the cut-in area , intermediate region and cut-out area for different specimens

由于在切入区砂轮与工件表面接触较均匀 ,切削作用稳定 ,磨削热聚集不充分 ,塑性变形较小 ,磨粒的切削作用较强 ,表面粗糙度值较低. 在中间区、切出区 ,由于随着磨削力与磨削热的增加 ,材料塑性变形程度增加 ,磨粒的切削作用减弱 ,特别是在末端磨削过程即切出区 ,磨粒迅速离开工件表面 ,移出磨削区 ,磨粒对工件材料的干涉速度产生突变 ,对切出区末端材料形成一定冲击 ,会使磨削过程产生振动 ,导致表面粗糙度数值出现逐渐增大趋势.

2.2 磨削工艺参数对表面粗糙度的影响

2.2.1 预应力对表面粗糙度影响

图 3 为试件表面粗糙度随预应力的变化曲线 ,由图可知随着预应力的增加 ,试件表面粗糙度值逐渐减小. 这是由于预应力的增加会使表面残余压应力增大 ,而这种增加的长程内应力会导致表面位错密度的升高 ,位错密度和晶粒尺寸直接相关(在磨削中随着表层材料塑性变形 ,表面首先产生滑移带 ,之后生成杂乱的位错缠结 ,最后会形成位错胞. 而当变形量增大 ,位错进一步移动和增殖 ,位错胞数量会增加 ,同时位错胞体积减小 ,胞壁上的位错数量增大 ,会将原晶胞分割 ,形成亚晶 ,最终的结果导致晶粒体积减小). 但预应力值不宜过大 ,否则会引起表面褶皱 ,反而增加表面粗糙度的值.

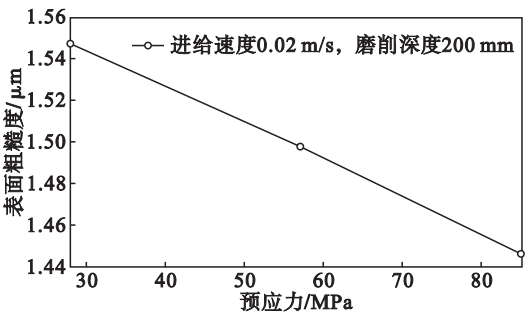


图 3 试件表面粗糙度随预应力变化曲线
Fig. 3 Specimen surface roughness curve with pre-stress

2.2.2 磨削深度和进给速度对表面粗糙度影响

图 4 是表面粗糙度随磨削深度和进给速度的

变化曲线 ,由图可知 随着磨削深度和进给速度的增加 ,表面粗糙度值在逐渐增大. 这是由于磨削深度和进给速度的增加 ,都会使单颗磨粒未变形磨

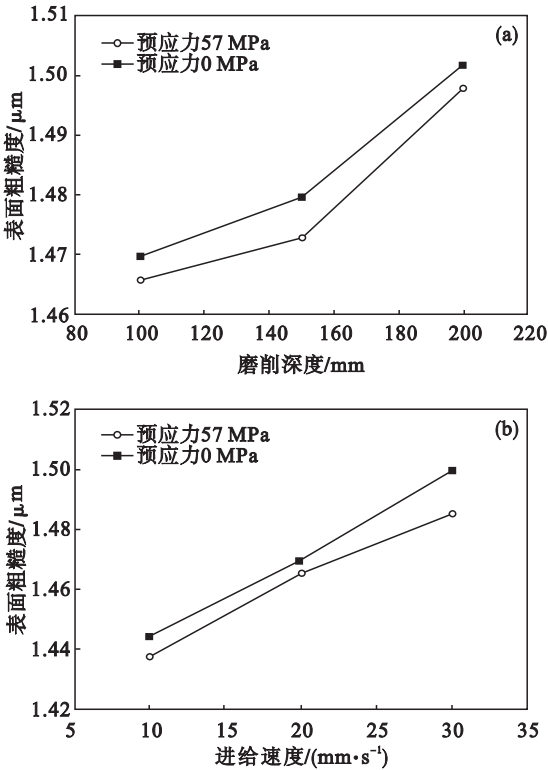


图 4 磨削深度和进给速度对表面粗糙度的影响
Fig. 4 Effects of grinding depth and feed speed on surface roughness
(a)— $v_w = 0.02 \text{ m/s}$; (b)— $a_p = 100 \text{ }\mu\text{m}$.

屑厚度增大 ,在试件表面留下的磨痕深度增大 ,同时磨削力与磨削热随之增加 ,材料塑性变形程度也会随之增大 ,因此试件表面粗糙度值增加. 在相同的磨削深度和进给速度条件下预应力淬硬磨削和普通磨削比 ,其粗糙度较低 ,这是因为预应力淬硬磨削与普通磨削相比多了预应力的影响 ,可以更好地控制表面粗糙度.

3 试件表面微观形貌分析

图 5 和图 6 分别为不同预应力下的试件在放大倍数为 2 000 和 500 时的表面微观形貌 SEM 图. 图 5a 中可以观测到有多条显微裂纹存在 ,即存在一定的微结构损伤. 裂纹的产生主要是由于磨削力和磨削热引起的塑性变形和由于相变作用表层奥氏体转化为马氏体 ,体积膨胀等 ,在它们的共同作用下 ,试件表层产生残余拉应力 ,当残余拉应力超过材料的强度极限时就会产生一定的显微裂纹. 而在图 5b 和 5c 中 ,随着预应力的施加 ,表面裂纹已经不明显 ,相比于图 5a ,裂纹的数量和长度减少 ,说明由于预应力作用 ,试件表面产生残余压应力 ,使晶粒得到细化. 由于细晶粒金属中的裂纹不易产生也不易扩展 ,所以预应力淬硬磨削不仅可以降低表面粗糙度 ,还可以抑制表面裂纹的产生和扩展.

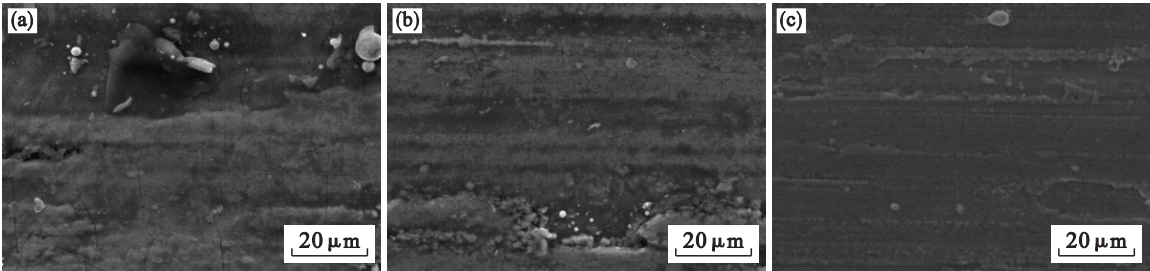


图 5 不同预应力下试件表面形貌 SEM 图
Fig. 5 SEM morphology of the specimens surface under different pre-stress
(a)— $\sigma = 28 \text{ MPa}$; (b)— $\sigma = 56 \text{ MPa}$; (c)— $\sigma = 84 \text{ MPa}$.

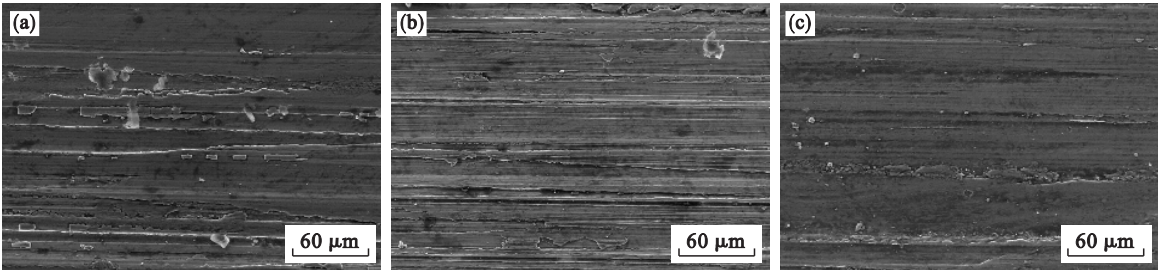


图 6 不同预应力下试件表面形貌 SEM 图
Fig. 6 SEM microscopy of the specimens surface under different pre-stress
(a)— $\sigma = 28 \text{ MPa}$; (b)— $\sigma = 56 \text{ MPa}$; (c)— $\sigma = 84 \text{ MPa}$.

分析图 6a 可知在预应力 $\sigma = 28\text{ MPa}$ 下 ,表面不光整 ,磨削纹理较粗大 ,表面存在粘着、凹坑和烧伤等缺陷。凹坑是因为磨粒与磨削表面较硬物质相撞、摩擦等原因造成 ,粘着是因为磨削过程中产生大量的热使脱落下来的磨粒与磨屑粘着在工件表面 ,使表面形成粘附和烧伤现象 ,烧伤是因过高的磨削力和磨削温度共同作用下使试件表层发生一系列物理、化学变化 ,形成变质层。随着预应力的施加 ,表面磨削纹理逐渐变浅 ,当预应力 $\sigma = 84\text{ MPa}$ 时 ,如图 6c 所示表面划痕、烧伤以及粘着现象比图 6a 明显得到改善 ,这是由于当预应力增大时晶粒尺寸减小 ,金属的晶界面积增多 ,使试件塑性变形时晶粒扩散更迅速 ,扩散带走部分磨削所产生的热量使热量不能积聚 ,因此预应力的增加可以有效抑制磨削温度的升高 ,改善试件表面质量。

4 结 论

1) 预应力淬硬磨削复合加工表面粗糙度分布存在不均匀现象 ,表面粗糙度数值沿试件的切入区到切出区有逐渐增大趋势。

2) 预应力淬硬磨削中随着预应力的增加 ,工件表面粗糙度数值呈逐渐减小趋势 ,适当增加预应力有利于减小工件表面粗糙度数值 ;随着磨削深度与进给速度的增加 ,表面粗糙度数值增大。

3) 预应力可以抑制表面裂纹的生长同时可以抑制磨削温度 ,减少粘着、烧伤等表面缺陷 ,使工件表面质量得到改善。

参考文献 :

[1] Zhou X ,Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2002 ,42(8) 969 - 977.

[2] Bigerelle M ,Najjar D ,Iost A. Relevance of roughness parameters for describing and modeling machined surfaces

[J]. *Journal of Materials Science* ,2003 ,38(11) :2525 - 2536.

[3] Brinksmeier E ,Brockhoff T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process[J]. *Annals of the CIRP* ,1996 ,45(1) 255 - 260.

[4] Zarudi I ,Zhang L C. Modelling 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) 35 - 43.

[6] 葛培琪 ,孙建国 ,刘镇昌. 磨削淬硬——磨削加工与表面淬火集成制造技术[J]. *工具技术* 2001 ,35(1) 7 - 10.

(Ge Pei-qi , Sun Jian-guo , Liu Zhen-chang. Grinding hardening—grinding and surface hardening integrated manufacturing technology[J]. *Tool Engineering* ,2001 ,35(1) 7 - 10.)

[7] Liu J D ,Wang G C ,Wang Z ,et al. Experimental research on grinding-hardening of 65Mn steel[J]. *Materials Science Forum* 2006 ,505(7) 787 - 791.

[8] 张建华 ,葛培琪 ,张磊. 磨削淬火技术的研究现状与展望[J]. *工具技术* 2006 ,40(11) 3 - 5.

(Zhang Jian-hua ,Ge Pei-qi ,Zhang Lei. Research status of grind-hardening technology and prospect [J]. *Tool Engineering* 2006 ,40(11) 3 - 5.)

[9] Xiu S C ,Li C H ,Cai G Q. Study on surface finish mechanism in quick-point grinding[J]. *International Journal of Computer Applications in Technology* ,2007 ,29(2) : 163 - 167.

[10] 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.)

[11] 孙志礼 ,冷兴聚 ,魏延刚 ,等. 机械设计[M]. 沈阳 :东北大学出版社 2000 33 - 35.

(Sun Zhi-li ,Leng Xing-ju ,Wei Yan-gang ,et al. Mechanical design[M]. Shenyang :Northeastern University Press ,2000 : 33 - 35.)