

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2014.07.022

# 小切深磨削表面微结构损伤机理及影响

张修铭, 修世超, 史小亮, 刘明贺

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对小切深磨削条件下工件表面微结构损伤, 理论分析了磨削残余应力与磨削微裂纹之间的关系; 运用有限元仿真分析法, 获得不同磨削条件下 45 钢工件表面残余应力的数值及其分布云图, 并分析不同磨削深度和冷却条件对其磨削残余应力的影响. 最后基于不同的磨削条件, 对 45 钢试件进行磨削试验, 通过测量不同试件的表面残余应力, 验证仿真结果的正确性; 同时, 通过观测不同磨削参数下的试件表面 SEM 图, 研究不同磨削表面的微结构损伤. 试验结果表明, 采用适当的磨削参数和条件可以有效减少和避免磨削表面微结构损伤.

**关键词:** 磨削; 表面微结构损伤; 残余应力; 微裂纹; 烧伤

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2014)07-1010-05

## Influence of Small Depth Cut on Grinding Surface Micro-structure Damage and Mechanism

ZHANG Xiu-ming, XIU Shi-chao, SHI Xiao-liang, LIU Ming-he

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Xiu-ming, E-mail: zyzyzhangyong@126.com)

**Abstract:** In view of grinding surface micro-structure damages under small depth cut, the connection between ground residual stress and micro-crack was theoretically analyzed. Surface residual stress and its cloud distribution were simulated under different ground conditions for 45 steel workpieces using finite element analysis, and then effects of grinding depth and cooling conditions on the grinding surface residual stress were discussed. At last, grinding experiments were conducted for 45 steel workpieces under different conditions to verify the simulation results by measuring the specimen surface residual stress. At the same time, the grinding surface micro-structures with different grinding parameters were studied using SEM. The test results show that adopting appropriate grinding parameters and conditions can effectively reduce and avoid the grinding surface micro-structure damages.

**Key words:** surface grinding; surface micro-structure damage; residual stress; micro-cracks; grinding burn

随着机械装备工作性能要求的不断提高, 对零件表面完整性的要求也越来越高. 磨削加工一般是形成零件表面完整性指标的终加工方法, 因此控制小切深条件磨削表面完整性指标具有重要的工程实际意义. 针对磨削加工表面, 工程上通常更关注表面粗糙度、表面硬度等表面完整性指标的形成与控制. 目前在国内, 任敬心、修世超等<sup>[1-2]</sup>对零部件表面完整性开展了相关的研

究工作, 但对磨削表面微结构损伤机理及在不同工作条件下对零部件工作性能影响的研究尚不充分.

目前对零件表面微结构损伤的研究主要集中在表面层残余应力、烧伤和微裂纹等<sup>[3-4]</sup>. 零件表层残余应力的产生主要受磨削温度、塑性变形、挤光作用、比容变化以及金相组织等综合影响, 它们可能同时出现或者以某一方面为主, 并且影响残

余应力沿零件表面层深度的分布规律. 磨削烧伤的本质是由于磨削区温度过高, 凡是与磨削加工时磨削区磨削热的产生和冷却有关的因素, 都在不同程度上影响磨削烧伤. 磨削裂纹的产生也与磨削热有着密不可分的关系. 磨削裂纹与一般淬火裂纹明显不同, 磨削裂纹只发生在磨削表面上, 深度较浅, 且深度基本一致<sup>[5-6]</sup>.

本文针对工件小切深磨削工艺, 结合模拟仿真和试验研究, 分析磨削表面微结构损伤的机理及其影响.

## 1 表面微结构损伤建模与分析

### 1.1 磨削残余应力与裂纹的产生

磨削过程中形成的工件表面残余应力是机械力和切削热产生的应力综合作用(叠加)的结果. 由于产生的条件不同, 叠加后的残余应力将有 3 种分布类型: 残余压应力、残余拉应力以及残余拉应力和残余压应力的混合应力, 如图 1 所示<sup>[7]</sup>.

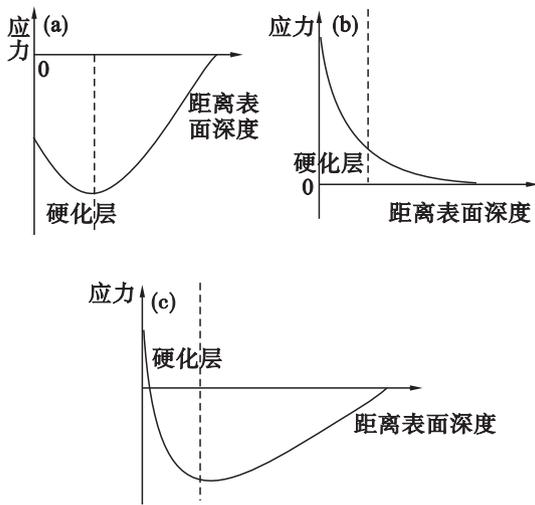


图 1 工件表面残余应力分布类型

Fig. 1 Three types of surface residual stress distribution

(a) —残余压应力; (b) —残余拉应力;  
(c) —残余拉应力和残余压应力的混合应力.

磨削裂纹产生的直接原因是零件表层内应力超过了材料断裂极限, 由于材料的拉伸断裂极限较低, 压缩断裂极限较高, 所以磨削裂纹一般是拉应力过高导致的拉伸断裂. 工件磨削过程中的内应力是工件原有残余应力与磨削应力的叠加, 如果叠加后总的内应力超过断裂极限就会产生裂纹. 磨削应力受磨削参数的影响, 二者对应关系较为复杂. 材料的断裂极限、工件原有残余应力和磨削应力构成了磨削裂纹产生的三要素<sup>[7]</sup>.

磨削应力的综合作用往往在工件磨削方向产生较大拉应力, 因此有 80% 的磨削裂纹呈现垂直磨削方向线状分布特征, 如图 2a 所示, 开裂后裂纹扩展方向会有一些偏移; 对一些拉压断裂极限相差不大的脆性材料, 会出现纵横交错的网状裂纹, 如图 2b 所示; 磨削次表层裂纹如图 2c 所示. 根据应力分布曲线, 磨削机械应力与热应力的叠加结果, 有可能使最大拉应力出现在次表层而不是磨削表面, 因此, 在次表层首先产生磨削裂纹, 并随时间条件变化, 逐渐扩展到表面, 形成磨削后无裂纹, 放置一段时间出现裂纹的假象<sup>[7-10]</sup>.

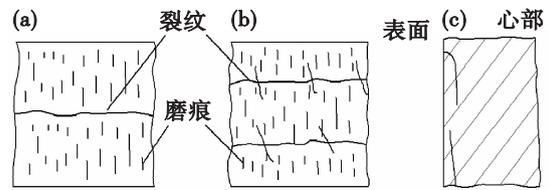


图 2 常见磨削裂纹示意图

Fig. 2 Schematics of common grinding cracks

(a) —线状裂纹; (b) —网状裂纹; (c) —一次表层裂纹.

### 1.2 基于热-力耦合残余应力仿真与分析

综合考虑试验的条件, ANSYS 仿真采用非调质 45 钢材料, 试件尺寸为 100 mm × 50 mm × 12 mm, 砂轮线速度为 37.67 m/s, 逆磨削. 具体仿真模拟工艺参数如表 1 所示.

表 1 仿真工艺参数

Table 1 Technical parameters of simulation

试件 编号	磨削深度 μm	进给速度 m · s <sup>-1</sup>	冷却 方式
1	15	0.03	干磨削
2	50	0.03	干磨削
3	100	0.03	干磨削
4	15	0.03	湿磨削
5	50	0.03	湿磨削
6	100	0.03	湿磨削

通过 ANSYS 仿真, 可以获得残余应力的应力云图, 如图 3 所示.

对比图 3 可以发现: 磨削表面残余应力随着磨削深度的不断加深而增大, 一般在磨削加工表面的中心形成最大残余拉应力区域, 且区域面积随着磨削深度逐步加深而变大, 这对零部件的使用性能和使用寿命是不利的. 但当磨削深度较小时, 由于仿真过程考虑了磨削开始与结束时砂轮与工件之间的碰撞冲击效应, 增加了仿真初始阶段时的加载应力, 由图 3a 和 3b 可以认为, 碰撞冲

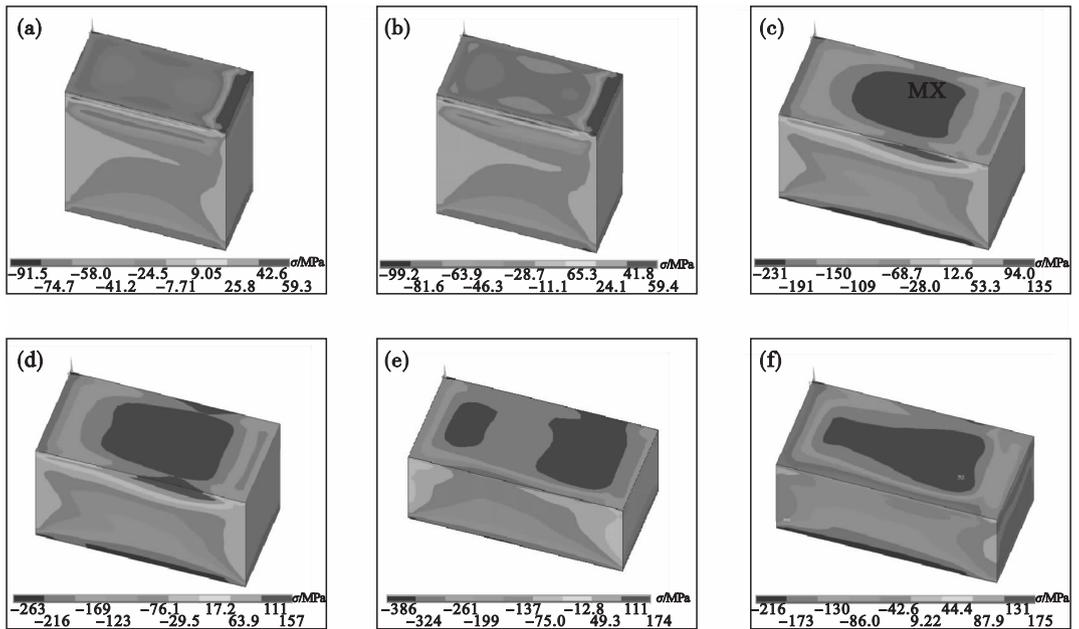


图 3 热-力耦合条件下残余应力 ANSYS 分析结果

Fig. 3 ANSYS analysis results of residual stress under thermal-mechanical coupling conditions

(a)—试件 1; (b)—试件 2; (c)—试件 3; (d)—试件 4; (e)—试件 5; (f)—试件 6.

击效应在磨削深度较小时产生的影响较大,且在磨削切入处产生最大的残余应力.因此,当磨削深度较小时,需要考虑切入切出时砂轮与工件之间产生的碰撞冲击效应对残余应力的影响.结合试件材料的性质,残余应力在工件内部不可能是连续线性变化,而是存在应力性质的突变.从残余拉应力到残余压应力的变化越大,过渡区域越小,且由于作用力叠加的作用,出现磨削裂纹的可能性也越来越高,磨削表面的微结构损伤也越严重.

## 2 试验研究

### 2.1 试验材料、设备及试验方案

根据试验要求和现有条件,试验选用 M7120A 平面磨床,选用粒度号为 F45、直径为 250 mm、陶瓷结合剂的白刚玉砂轮.根据磨床的加工范围,并考虑其余各项参数的测量,试验试件采用 45 钢,其尺寸为 100 mm × 50 mm × 12 mm.同时,为了验证基于热-力耦合 ANSYS 仿真模拟的可行性,试验的具体方案如表 2 所示.

### 2.2 表面残余应力测量

本试验采用切割法测量磨削零件的残余应力,试验结果如表 3 所示.由表 3 可知,随着磨削深度的不断加深,磨削表面剩余的残余拉应力将与磨削深度呈近似线性关系增长.又由于残余拉应力是产生磨削裂纹的主要应力,随着磨削深度

表 2 试验工艺参数

Table 2 Experimental technical parameters

试件 编号	磨削深度 μm	工件速度 m·s <sup>-1</sup>	砂轮线速度 m·s <sup>-1</sup>	冷却 条件
1	15	0.03	37.67	干磨削
2	15	0.03	37.67	湿磨削
3	50	0.03	37.67	干磨削
4	80	0.03	37.67	干磨削
5	100	0.03	37.67	干磨削
6	100	0.03	37.67	湿磨削

表 3 残余应力与磨削深度

Table 3 Residual stress and cut depth

磨削深度 /μm	冷却条件	应变 /μm	残余拉应力 /MPa
15	湿磨削	-41	8.2
50	湿磨削	-52	10.4
80	湿磨削	-54	10.8

的不断增长,磨削表面产生磨削裂纹的可能性也会不断加大.也就是说,随着磨削深度的加深,磨削表面产生的微结构损伤现象越来越严重.由于残余应力检测采用切割法,且测试精度的原因使试验结果与仿真结果在数值上存在一定的误差,但残余应力的增长趋势与仿真结果基本一致.

## 2.3 试件表面微损伤的检测与分析

### 2.3.1 表面波纹

对比图 4 可以看出,图 4a 中的磨削波纹更加明显. 通过对比这两个试件的磨削条件,可以认为:由于缺少磨削液,导致加工试件 1 的砂轮局部受热变形不均匀,同时产生堵塞,加剧了自激振动的再生,进而引起砂轮表面的加工情况更加恶化,使得砂轮和工件表面上的波纹在各自表面上发生再生作用. 因此,如果在磨削过程中选择合适的磨削参数,采用合适的传动结构以及合适的冷却液就可以有效地减少这种因冷却条件恶劣而引起的磨削波纹.

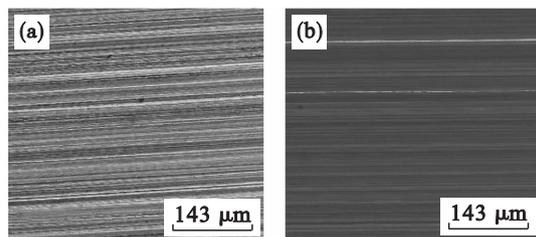


图 4 试件表面磨削波纹对比

Fig. 4 SEM photographs of workpiece with different grinding surfaces

(a) — 试验试件 1; (b) — 试验试件 2.

### 2.3.2 磨削划痕

图 5 为反映试件表面磨削划痕的 SEM 图. 通过图 5 可知,试验试件存在一些与磨削磨痕方向一致的划痕. 这是由于在磨削过程中破落和脱落的磨粒伴随着磨屑停留在工件表面上,它们将夹在砂轮与工件之间一起运动,而且砂轮粒度太粗、修整过细,因而产生了这种划痕,这种划痕是普遍存在的. 通过调整冷却液喷嘴的位置、选用适当的砂轮特性以及经常清洗砂轮罩壳和砂轮夹片,可以有效地控制这类磨削划痕. 图 5b 所示试验试件表面存在一定深度的由磨削表面与较硬物质相撞、产生相对滑动等原因产生的划痕. 保护好磨削表面、防止划碰等可以有效地避免此类划痕.

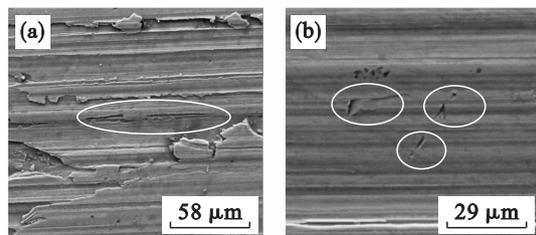


图 5 试件表面磨削划痕 SEM 对比

Fig. 5 SEM photographs of workpiece surface with different grinding scratches

(a) — 试验试件 4; (b) — 试验试件 2.

### 2.3.3 熔融涂覆与磨削烧伤

图 6 为反映试件表面熔融涂覆与磨削烧伤的 SEM 图. 一般所谓的磨削烧伤是指当磨削区温度超过工件材料的相变温度时,工件表层微观组织发生变化,同时生成氧化膜. 由于金属发生相变的温度低于金属熔融温度,当金属发生熔融状态时,一般可以认为金属发生了相变,发生了相变可以认为试件表面产生了一定程度上的磨削烧伤. 由于金属的烧伤无法在 SEM 下进行观察,可通过高温下金属材料熔融涂覆痕迹来说明磨削烧伤. 金属材料熔融涂覆痕迹越明显,则该试件在磨削加工产生的烧伤越严重.

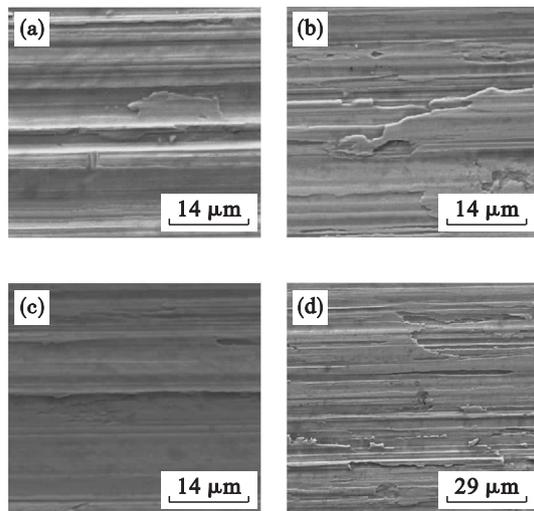


图 6 磨削烧伤 SEM 对比

Fig. 6 SEM comparison for grinding burn

(a) — 试验试件 1; (b) — 试验试件 3;  
(c) — 试验试件 2; (d) — 试验试件 6.

比较图 6a 和 6b 可以发现,图 6b 中发生的金属材料熔融涂覆现象有所增加;比较图 6b 和 6d 可以发现,图 6d 中发生的金属材料熔融涂覆现象更为严重. 由此可见,当磨削深度加深,磨削烧伤现象将明显增加;当试件在冷却条件恶劣的情况下进行磨削,其磨削烧伤现象将明显增加. 因此,在适当选择砂轮特性的同时,控制磨削深度,合理使用磨削液,能够在一定程度上减少磨削烧伤现象.

## 3 结 论

1) 通过理论分析和模拟仿真,以热-力耦合分析为基础,运用 ANSYS 可以获得小切深条件下磨削残余应力的数值和分布云图,同时可以对磨削裂纹产生的可能性及产生区域进行预测.

2) 仿真和试验结果表明,表面残余应力与磨削深度呈近似线性关系增长,且由于作用力叠加

的作用,出现磨削裂纹的可能性增高。

3) 试验结果表明,在小切深磨削过程中采用适当的磨削参数和磨削条件可以有效地减少或避免磨削波纹、磨削裂纹以及磨削烧伤等磨削表面微结构损伤。

#### 参考文献:

- [1] 任敬心,孟庆国. 磨削残余应力的有限元计算[J]. 磨料磨具与磨削,1995(3):31-35.  
(Ren Jing-xin, Meng Qing-guo. Finite element calculation of grinding residual stress [J]. *Abrasives and Grinding*, 1995 (3):31-35.)
- [2] 修世超,蔡光起,李长河. 磨料磨具特性参数的选择技术及其发展构想[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2004,140(1):28-31.  
(Xiu Shi-chao, Cai Guang-qi, Li Chang-he. Selection technique of abrasive tool and grinding parameters [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2004, 140(1):28-31.)
- [3] Li K, Liao T W. Surface/subsurface damage and the fracture strength of ground ceramics [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 57(3/4):207-220.
- [4] Tsuchiida K, Kawada Y, Kodama S. A study on the residual stress distributions by turning [J]. *Bulletin of the Japan*

*Society of Mechanical Engineers*, 1975, 18(8):123-130.

- [5] Ali Y M, Zhang L C. Estimation of residual stresses induced by grinding using a fuzzy logic approach [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63(1/2/3):875-880.
- [6] Liu X, Zhang B. Machining simulation for ceramics based on continuum damage mechanics [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(3):553-561.
- [7] Bogdan W K, Ryszard W. Residual stress in grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109(3):254-257.
- [8] 张文勇,陈亚维. 磨削残余应力与磨削裂纹[J]. 郑州纺织工学院学报,1995,6(1):26-32.  
(Zhang Wen-yong, Chen Ya-wei. Grinding residual stress and grinding cracks [J]. *Journal of Zhengzhou Textile Institute of Technology*, 1995, 6(1):26-32.)
- [9] Chaboche J L, Maire J F. New progress in micromechanics-based CDM models and their application to CMCs [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(15):2239-2246.
- [10] Maire J F, Lesne P M. A damage model for ceramic matrix composites [J]. *Aerospace Science and Technology*, 1997, 1(4):259-266.

(上接第 1009 页)

2) 随着粗糙度增加,轧制界面接触面积比增加,压应力、摩擦力均变大;压下率增加,油膜变薄、界面接触面积比增加,压应力及摩擦应力均增加;高黏度润滑液或高速轧制可以有效降低轧制界面摩擦力及轧制力,增大界面油膜厚度,减小接触面积比。

#### 参考文献:

- [1] Liu L M, Zang Y, Chen Y Y. Hydrodynamic analysis of partial film lubrication in the cold rolling process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 54(5/6/7/8):489-493.
- [2] Mancini E, Sasso M, Amodio D, et al. Surface defect generation and recovery in cold rolling of stainless steel strips [J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133:012202-1-012202-9.
- [3] Wilson W R D, Walowit J A. An isothermal hydrodynamic lubrication theory for strip rolling with front and back tension [C]//Tribology Convention. London, 1971:164-172.
- [4] Lu C, Tieu A K, Jiang Z Y. Modeling of the inlet zone in the

mixed lubrication situation of cold strip rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140:569-575.

- [5] 王桥医,李志华. 金属轧制过程辊缝非稳态混合润滑特性研究[J]. 摩擦学学报,2009,29(3):251-255.  
(Wang Qiao-yi, Li Zhi-hua. Research on the characteristics for unsteady mixed lubrication in metal rolling processes [J]. *Tribology*, 2009, 29(3):251-255.)
- [6] Liu Y J, Tieu A K. A thermal mixed film lubrication model in cold rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130:202-207.
- [7] Tieu A K, Kosasih P B, Godbole A. A thermal analysis of strip-rolling in mixed-film lubrication with O/W emulsions [J]. *Tribology International*, 2006, 39:1591-1600.
- [8] Christensen H, Tonder K. Stochastic models for hydrodynamic lubrication of rough surfaces [J]. *International Journal of Mechanical Engineers*, 1970, 104:1022-1033.
- [9] So H, Liu D C. An elastic-plastic model for the contact of anisotropic rough surface [J]. *Wear*, 1991, 146:201-218.
- [10] 邹家祥. 轧钢机械[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.  
(Zou Jia-xiang. Rolling machine [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.)