

# 高速磨削对 18CrNiMo7-6 表面完整性的影响研究

陈鑫, 王栋, 刘昱范

(郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** **目的** 对试件表面粗糙度和残余应力进行分析, 为研究高速磨削齿轮材料表面完整性提供试验依据, 并对齿轮材料高速磨削工艺进行深入探讨。**方法** 选择以平面磨削为主要研究方式, 根据 Salomon 理论和高速磨削理论, 提出以单因素法对齿轮材料 18CrNiMo7-6 进行高速磨削工艺试验, 试验变量为砂轮线速度、磨削深度和工作台速度, 以此得到了高速磨削工艺参数与表面完整性 (主要为表面粗糙度和残余应力) 之间的关系。**结果** 齿轮材料 18CrNiMo7-6 的表面粗糙度随砂轮线速度的增大、磨削深度和工作台速度的降低而得以改善, 用三维粗糙度表征法可以准确地评定工件表面形貌。试验得到砂轮线速度对残余应力的影响最大, 磨削深度次之, 工作台速度的影响较小。除  $V_s=160$  m/s 外, 经高速磨削的渗碳淬火 18CrNiMo7-6 试件表面残余压应力值得到提升。**结论** 通过分析高速磨削对表面完整性的影响, 可得到该研究材料的最优磨削参数组合为:  $V_s=120$  m/s,  $V_w=4$  m/min,  $a_p=0.02$  mm。在此磨削参数下, 试件的残余压应力值最大, 将有利于提高试件表面完整性。

**关键词:** 高速磨削; 齿轮材料; 18CrNiMo7-6; 残余应力; 表面粗糙度; 表面完整性

**中图分类号:** TG58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0259-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.034

## Influence of High Speed Grinding on Surface Integrity of 18CrNiMo7-6

CHEN Xin, WANG Dong, LIU Yu-fan

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze surface roughness and residual stress of specimen, provide a test basis for studying high-speed grinding of gear materials on surface integrity of gears, and thoroughly discuss high-speed grinding process of gear material. Plane grinding was selected as main research method, and single factor method was proposed to be used for high speed grinding of 18CrNiMo7-6 according to Salomon theory and high speed grinding theory. Test variables were grinding wheel linear speed, grinding depth and table speed. As a result, relationship between the high-speed grinding process parameters and surface integrity (mainly surface roughness and residual stress) was obtained. The surface roughness of gear material 18CrNiMo7-6 was improved with the increase of grinding wheel linear speed, and decrease of grinding depth and table speed. The surface roughness could be accurately evaluated in three-dimensional roughness method. The influence of the grinding wheel linear speed on residual stress was the most significant, followed by the grinding depth, and the table speed the least. In addition to  $V_s=160$  m/s, compressive residual stress of the specimen surface on 18CrNiMo7-6 receiving high speed grinding was improved. By analyzing the influence of high speed grinding on surface integrity, the optimal grinding parameters combination for the ma-

收稿日期: 2018-05-27; 修订日期: 2018-07-18

Received: 2018-05-27; Revised: 2018-07-18

基金项目: 国家工信部项目

Fund: National Ministry of Industry and Information Technology

作者简介: 陈鑫 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为抗疲劳制造技术。

Biography: CHEN Xin (1993—), Male, Master, Research focus: anti-fatigue manufacture.

通讯作者: 王栋 (1970—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为抗疲劳制造技术。

Corresponding author: WANG Dong (1970—), Male, Doctor, Professor, Master tutor, Research focus: anti-fatigue manufacture.

terial being studied in the test is  $V_s=120$  m/s,  $V_w=4$  m/min, and  $a_p=0.02$  mm, compressive residual stress value of specimen under the grinding parameters is the maximum, which contributes to better surface integrity of specimen.

**KEY WORDS:** high speed grinding; gear material; 18CrNiMo7-6; residual stress; surface roughness; surface integrity

齿轮作为使用量最大的机械传动件,在机械装备领域中应用广泛。齿轮及齿轮传动装置的设计制造水平将直接影响机械产品的性能和质量。常见的齿轮失效形式有齿根的弯曲疲劳与齿面的接触疲劳,这些失效通常源自齿面或齿根表面,因此齿轮的表面质量显得尤为重要。

磨削加工是齿轮齿面的终加工工艺,高速磨削作为新兴技术,因其较高的磨削去除率和较好的磨削质量,受到广大学者的重视。1931 年德国物理学家 Salomon<sup>[1]</sup>首次提出了“Salomon 假说”——高速切削加工理论,为高速切削可行性提供了理论依据。自此,国内外诸多学者开展了对高速磨削的相关研究。Ichida<sup>[2]</sup>研究了加工表面在超高速(砂轮速度高于 200 m/s)磨削下的磨削机理,证明了表面粗糙度  $Ra$  随砂轮速度的增加而得到改善。陈勇<sup>[3]</sup>在高速磨削条件下对汽车轴类零件材料 20CrMnTi 进行高效磨削实验,得到了高速磨削对 20CrMnTi 表面完整性指标的影响规律。磨削过程是磨削区各个相互独立的磨粒共同参与切削的过程,因此磨削加工是随机性较强的加工工艺。

现有研究多是基于二维粗糙度评价体系来表征磨削参数对各种材料表面粗糙度的影响规律,但二维粗糙度参数并不能全部反映待测表面的特征,也就无法反映表面的功能特性。因此,粗糙度的测量与评定也应该从二维向三维进行转变。于思远等<sup>[4]</sup>从几何和物理特性两方面研究了超精密磨削后表面存在残余应力,但应力数值较小,残余应力从表面向材料内部

迅速减小。Ben Fredj N 等<sup>[5]</sup>研究了研磨液对工件表面完整性的影响,与干磨削、油研磨液相比,低温冷却液能有效降低表面粗糙度,并得到较低数值的残余拉应力。张茜<sup>[6]</sup>使用 X 射线衍射法和电解剥层法,得到了磨削淬硬层与残余应力的关系。此外,Brinksmeier 等人<sup>[7-10]</sup>利用仿真软件模拟了单颗磨粒的切削理论,为残余应力分布的后续研究提供了理论依据。

18CrNiMo7-6 因具有良好的力学性能和机械性能,常用作制造齿轮、轴等重要零件的原材料,广泛应用于各行各业,但目前缺乏对此材料高速磨削后表面完整性的研究。本文根据 Salomon 理论和高速磨削理论,以平面磨削为主要研究方式,提出以单因素法对齿轮材料 18CrNiMo7-6 进行高速磨削工艺试验,以此得到了高速磨削工艺参数与表面完整性之间的关系,为高速磨削齿轮材料表面完整性的研究提供了理论依据,对齿轮材料高速磨削工艺的发展具有较为深远的意义。

## 1 试验

### 1.1 材料

18CrNiMo7-6(对应国标为 17Cr2Ni2Mo)是铬-镍-钼合金渗碳钢,其渗碳淬火后变质层深度为 1.5~1.8 mm,硬度为 58~62HRC。本文采用经过渗碳淬火处理后的 18CrNiMo7-6 试样块进行研究,具体化学成分含量如表 1 所示。

表 1 18CrNiMo7-6 的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6

							wt%
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.15~0.21	0.40	0.50~0.90	<0.035	<0.035	1.50~1.80	1.40~1.70	0.25~0.35

本文围绕表面完整性评价指标中的两个重要指标(表面粗糙度、残余应力)进行研究,以渗碳淬火后的 18CrNiMo7-6 试样块为研究对象,以砂轮线速度、磨削深度、工作台速度为参数变量,通过对高速磨削后三维粗糙度的评定和残余应力的分析,为 18CrNiMo7-6 高速磨削参数的选择提供依据,并为后

续齿轮材料在高速磨削加工工艺下的研究奠定基础。

采用 WDW-2000 微机控制电子万能试验机对 18CrNiMo7-6 标准试样进行拉伸试验,标准试样的制备根据 GB/T 228.1—2010 进行。通过试验,得到此材料的屈服强度、抗拉强度、延伸率等性能参数,具体信息如表 2 所示。

表 2 18CrNiMo7-6 的机械性能  
Tab.2 Mechanical property of 18CrNiMo7-6

Project	Yield strength/(N·mm <sup>-2</sup> )	Tensile strength/(N·mm <sup>-2</sup> )	Ductility/%	Reduction of area ± $\psi$ /%
Experimental value	1016	1200	14.0	68
Standard value	≥800	≥1080	≥8	≥30

1.2 方案

试样块的尺寸为 35 mm× 25 mm× 40 mm，如图 1 所示。*X* 向为垂直砂轮磨削方向，*Y* 向为砂轮磨削方向。

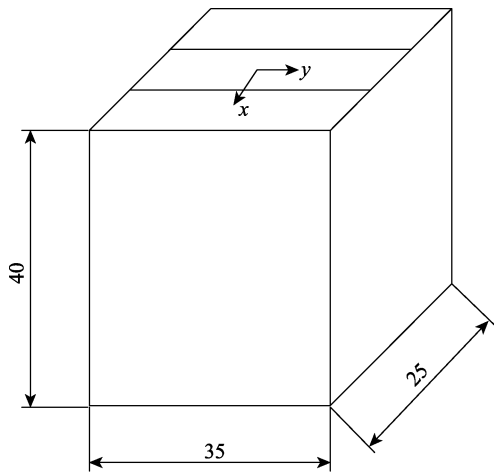


图 1 试样块简图  
Fig.1 Sample block diagram

1.2.1 试验设备

试验使用的高速磨削设备为 MKL7132X8/17 型超高速数控强力成形磨床，最高线速度为 200 m/s，磨削时能实现自动磨削循环，主轴最高转速达到 10 000 r/min，砂轮电动机功率为 50 kW。

1.2.2 试验方案的确定

根据高速试验的条件和目的，设置最高砂轮线速度为 160 m/s。本文选用陶瓷 CBN（立方氮化硼）砂轮，因试验次数较少，且对砂轮的磨损较小，所以不对砂轮进行修整。此外，根据砂轮的具体情况 & 磨削条件，采用 GYSyn256C 磨削液，磨削方式采用逆磨。

试验方案如表 3 所示，分别改变砂轮线速度 60~160 m/s、工作台速度 2~6 m/min 和磨削深度 10~50 μm，通过试验获得各种磨削参数下表面粗糙度的变化 & 残余应力的变化。

表 3 磨削试验  
Tab.3 Grinding test

Group	Grinding speed $V_s/(m \cdot s^{-1})$	Table speed $V_w/(m \cdot min^{-1})$	Grinding depth $a_p/mm$
1	60、80、100、 120、140、160	4	0.02
2	120	4	0.01、0.02、0.03、 0.04、0.05
3	120	2、4、6	0.02

1.3 三维粗糙度的检测及使用仪器

1.3.1 磨削表面三维粗糙度评定参数

$S_a$  是  $Ra$  的三维扩展， $S_a$  数值的可靠性有待考证，

因为  $S_a$  只对表面高度值进行简单的平均化处理，对高度的变化不太敏感。例如，一个  $S_a=0.5 \mu m$  的表面，其幅度的绝对值大部分可能为 0.6~0.7 μm，少部分为 0.1~0.2 μm，也可能都分布在 0.5 μm 左右，如果是 0.6~0.7 μm，那么表面有很大的轮廓峰或者轮廓谷，而在 0.1~0.2 μm 范围，则表明表面比较平坦。因此，评价磨削表面仅知道高度的平均值远远不够，应同时使用  $S_{sk}$ 、 $S_{ku}$  等参数相结合来综合评定磨削表面稳定性的好坏。

表面高度分布的偏斜度  $S_{sk}$ ，能够反映出幅度分布曲线相对基准面的不对称性，是评定区域内轮廓偏距的三次方的平均值与  $S_q$ （表面均方根偏差）三次方的比值，计算式为：

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3 mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \eta_{ij}^3 \tag{1}$$

式中： $\eta_{ij}$  为各个点的轮廓偏距。如果  $S_{sk} < 0$ ，则表示被测表面有较多深谷；如果  $S_{sk} > 0$ ，则表示被测表面有较多尖峰。

表面高度分布的峭度  $S_{ku}^{[11-12]}$ ，用来描述表面高度分布曲线的形状，表示轮廓幅度分布曲线变化的尖锐程度，也是高度分布中孤立波峰波谷数量的度量。 $S_{ku}$  是评定区域内轮廓偏距四次方的平均值与  $S_q$  四次方的比值，计算式见公式(2)。

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4 mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \eta_{ij}^4 \tag{2}$$

如果  $S_{ku}$  接近 3，表示高度分布曲线服从高斯分布；如果  $S_{ku} < 3$ ，表示幅度分布曲线较宽、较平坦；如果  $S_{ku} > 3$ ，幅度分布曲线形状较为陡峭。

1.3.2 表面轮廓仪

本试验使用的非接触式表面轮廓仪 NPFLEX 为布鲁克公司生产的大样品台。该轮廓仪的测量方式为非接触式光学，测量时对试样表面无损伤，能快速准确地测量多个样品，可综合高分辨、高重复性、高速测量、高可靠性等优良特性，应用领域广泛。目前，还未有三维粗糙度取样面积的相关标准。国内外文献常将取样面积控制在 1 mm×1 mm 至 10 mm×10 mm 的范围之内。根据 GB/T 1031—2009<sup>[13]</sup>，在二维粗糙度测量中，当  $Ra$  的测量值在 0.1~2.0 μm 之间时，取样长度为 0.8 mm，评定长度为 4 mm。因此，为使测量结果更加准确，试验将取样面积设置为 4 mm×4 mm。

1.4 残余应力检测

采用加拿大 PROTO 公司残余应力大功率分析仪 LXR D 对试样表面残余应力进行测量。为校准测量仪，通过对标准铁粉进行衍射试验来完成，其应力标准为(−559±35) MPa，其余具体参数见表 4。试验前，试件表面的原始残余应力为−22.03 MPa。

采用加拿大 PROTO 公司电解抛光机对试件进行

剥层,以测量残余应力沿试件深度方向的分布情况。抛光深度由抛光时间、抛光电压和抛光液流量等因素决定。本试验中,采用在最大流量、最大电压条

件下,测量抛光的腐蚀时间和腐蚀深度的关系,如图2所示,可知一定范围内,腐蚀时间和腐蚀深度成正比增长。

表4 LXR D的具体参数  
Tab.4 Specific parameters of LXR D

X-ray tube	Tube voltage/kV	Tube current/mA	Exposure time/s	Exposure number	$\beta$	Diffraction plane	Diffraction angle $2\theta/(^\circ)$
Cr-K $\alpha$	30	25	1	10	7	211	156.4

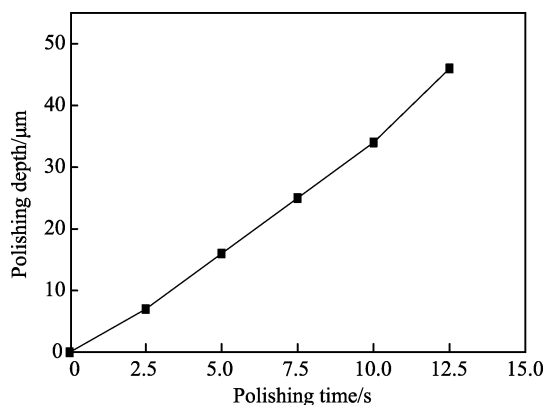


图2 腐蚀时间与腐蚀深度的关系  
Fig.2 Relationship between polishing time and polishing depth

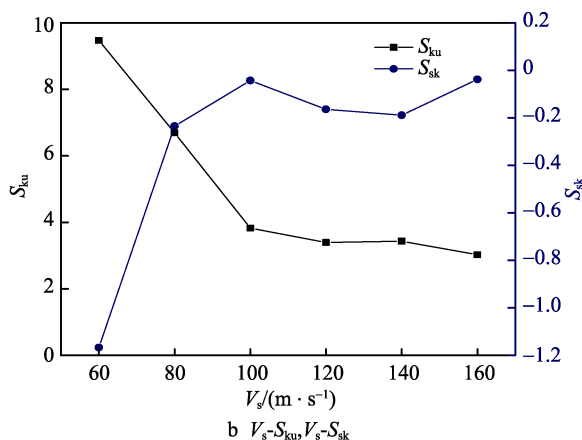
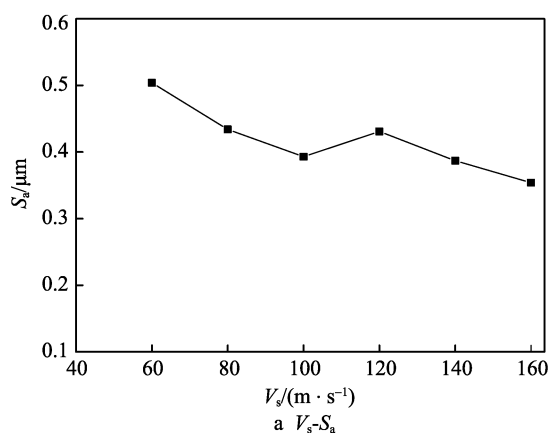


图3 砂轮线速度和表面粗糙度之间的关系  
Fig.3 Relationship between  $V_s$  and  $S_a/S_{ku}/S_{sk}$

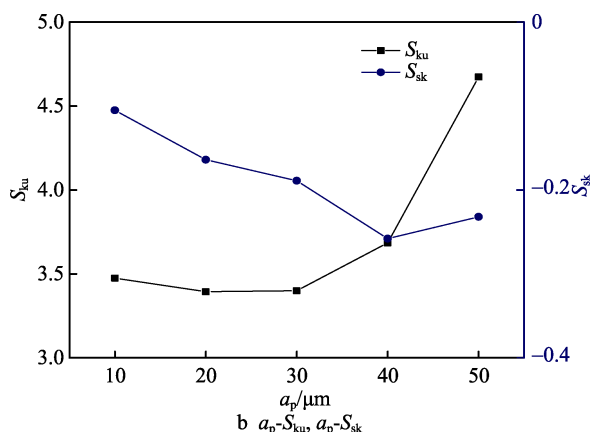
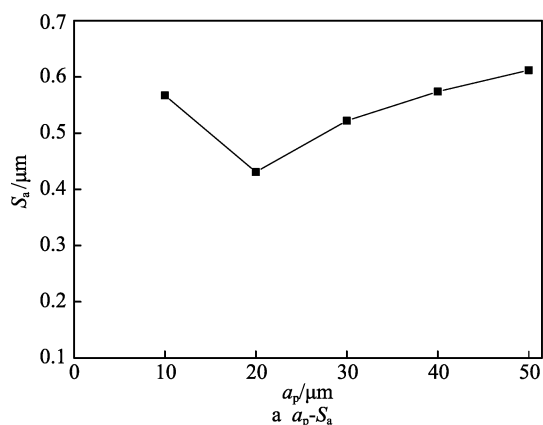


图4 磨削深度和表面粗糙度之间的关系  
Fig.4 Relationship between  $a_p$  and  $S_a/S_{ku}/S_{sk}$

$S_{ku}$  增大,  $S_{sk}$  逐渐减小。试样表面  $R_z$  的实际测量值为  $3.467\ \mu\text{m}$ , 其介于  $1.5\sim 15\ \mu\text{m}$  之间。由于在平面磨削加工中存在深度为  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  的缺陷层, 所以当磨削深度小于  $20\ \mu\text{m}$  时, 试样表面缺陷层未被完全磨除, 使其粗糙度较大。因此, 磨削深度越大, 磨削表面轮廓算数平均偏差越大, 表面深谷越多, 幅度分布越陡峭, 表面质量越差。

### 2.1.3 工作台速度对表面粗糙度的影响

从图 5 可以看出, 随着工作台速度的提高,  $S_a$  增大,  $S_{ku}$  增加的趋势不明显,  $S_{sk}$  呈减小趋势。因此, 工作台速度越高, 磨削表面轮廓算数平均偏差越大, 表面深谷越多, 幅度分布越陡峭, 表面质量越差。

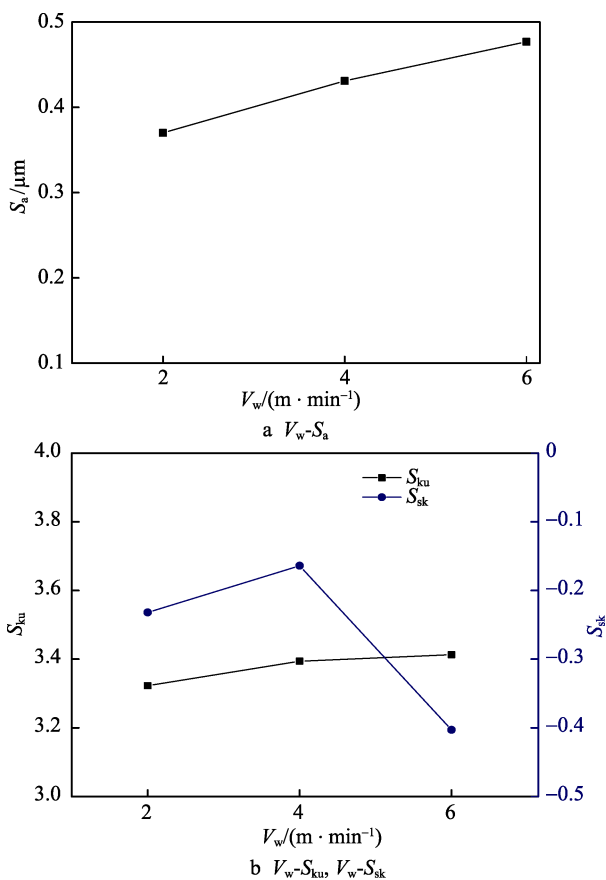


图 5 工作台速度和表面粗糙度之间的关系  
Fig.5 Relationship between  $V_w$  and  $S_a/S_{ku}/S_{sk}$

## 2.2 高速磨削对残余应力的影响

### 2.2.1 砂轮线速度对残余应力的影响

研究砂轮线速度对残余应力的影响时, 保持工作台速度和磨削深度不变, 即  $V_s$  为变量,  $V_w=4\ \text{m/min}$ ,  $a_p=0.02\ \text{mm}$ 。由图 6 可以得到, 砂轮线速度  $V_s$  对残余应力的影响没有明显的单调规律, 随着砂轮线速度的提高, 在  $60\sim 120\ \text{m/s}$  区间内, 残余压应力值逐渐增大, 在  $120\sim 160\ \text{m/s}$  区间内, 残余压应力逐渐减小, 且在  $160\ \text{m/s}$  时, 试件的 Y 向残余应力值由残余压应力变为残余拉应力。

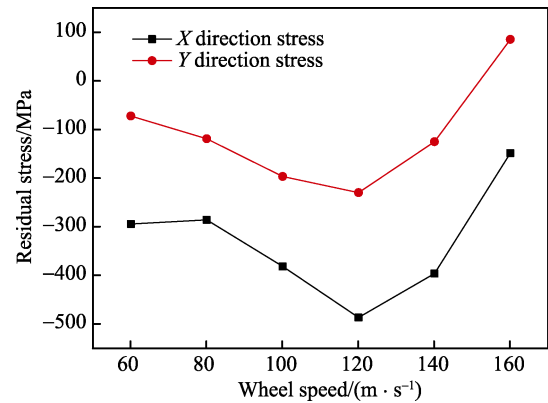


图 6 砂轮线速度对表面残余应力的影响  
Fig.6 Influence of wheel linear speed on surface residual stress

由图 7 可得, 随着距表面深度的增加, 残余应力从压应力快速变为拉应力, 且在  $-20\sim -30\ \mu\text{m}$  区间有最大拉应力值; 随后, 表面深度继续增加, 残余拉应力又逐步变为残余压应力, 最后趋于平稳。在  $60\sim 120\ \text{m/s}$  区间, 残余压应力值随着砂轮线速度的增加而增大, 超过  $120\ \text{m/s}$  后, 残余压应力值有所减小。由此可知, 试件在  $120\ \text{m/s}$  时获得最大内部残余压应力。

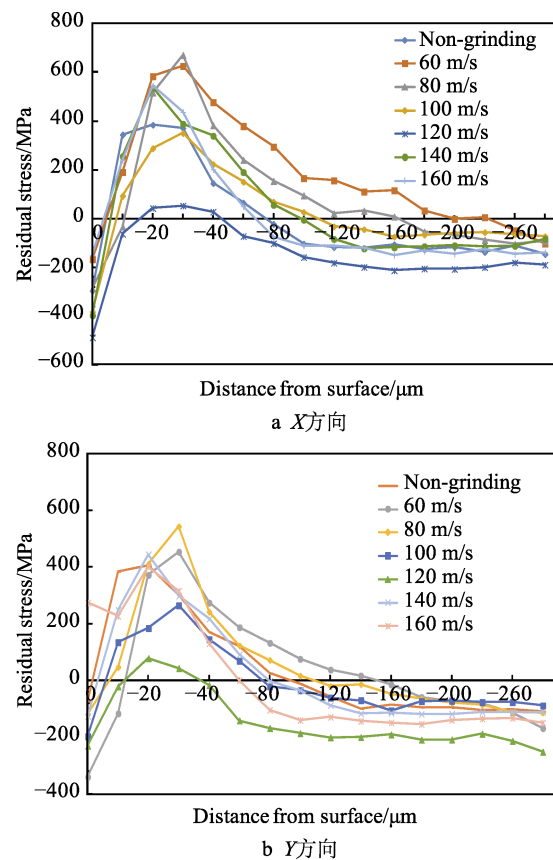


图 7 砂轮线速度对 X、Y 向深度层残余应力的影响  
Fig.7 Effect of wheel linear speed on residual stress of depth layer in (a) X-direction; (b) Y-direction

### 2.2.2 工作台速度对残余应力的影响

研究工作台速度对残余应力的影响时, 保持砂轮

线速度和磨削深度不变 ( $V_w$  为变量,  $V_s=120$  m/s,  $a_p=0.02$  mm)。由图 8 可知, 当工作台速度在 2~4 m/min 范围时, 表面残余应力值的变化不大;  $V_w=6$  m/min 时,  $X$ 、 $Y$  方向应力均变为残余拉应力, 这是由于试件表面出现明显烧伤所致。随着距表面深度的增加, 残余应力从压应力快速变为拉应力, 在  $-20\sim-30$   $\mu\text{m}$  区间内存在最大拉应力值; 随着深度的增加, 残余拉应力又逐步变为压应力, 最后趋于平稳。工作台速度在 2~4 m/min 区间内时, 随着速度的增加, 残余压应力值逐渐增大;  $V_w=6$  m/min 时, 工件由于磨削存在烧伤, 使得表层残余应力为数值较大的拉应力。然而在试件内部, 残余拉应力值有所减小。综上可知, 当工作台速度为 4 m/min 时, 试件获得最大内部残余压应力。

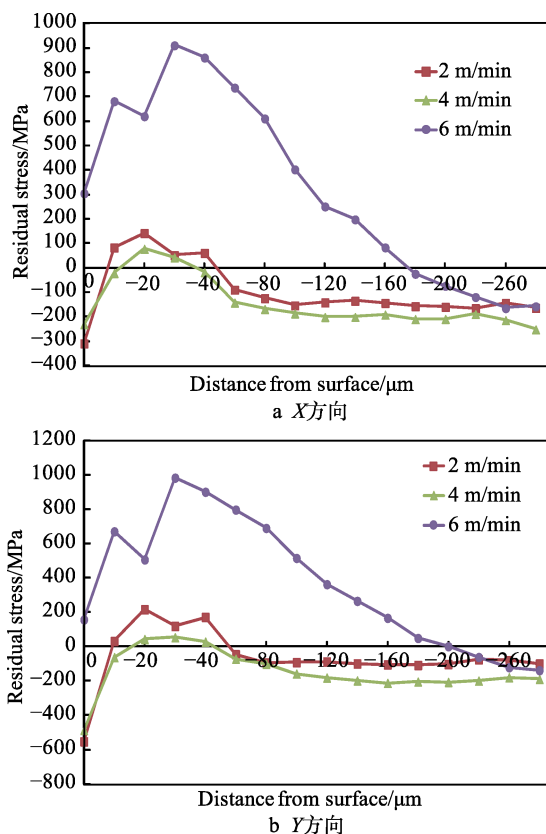


图 8 工作台速度对  $X$ 、 $Y$  向深度层残余应力的影响  
Fig.8 Effect of table speed on residual stress of depth layer in (a)  $X$ -direction; (b)  $Y$ -direction

### 2.2.3 磨削深度对残余应力的影响

研究磨削深度对残余应力的影响时, 保持砂轮线速度和工作台速度不变, 即  $a_p$  为变量,  $V_s=120$  m/s,  $V_w=4$  m/min。由图 9 可知, 表面残余压应力值随着磨削深度  $a_p$  的增大而逐渐减小。因为随着切削深度的增大, 加剧了塑性变形的能力, 使得磨削热增多。在热因素作用占主导地位时, 试件表面层产生拉应力, 使得残余压应力值减小。因切削深度不同, 变质层的深度受到影响, 本试验不考虑深度方向对深度层残余应力的影响。

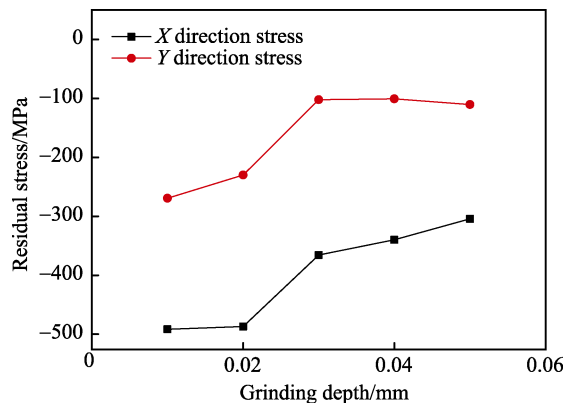


图 9 切削深度对残余应力的影响  
Fig.9 Effect of grinding depth on residual stress

## 3 结论

1) 本文使用了单因素实验法进行高速磨削工艺试验, 试验材料为渗碳淬火后的齿轮材料 18CrNiMo7-6, 最后得到高速磨削工艺参数对试件表面粗糙度和残余应力的影响规律, 为后续研究高速磨削齿轮材料提供基础实验依据。

2) 齿轮材料 18CrNiMo7-6 的表面粗糙度随砂轮线速度的增大、磨削深度和工作台速度的降低而得以改善。使用三维粗糙度进行表征的方法, 可以准确地评定工件的表面形貌。

3) 除  $V_s=160$  m/s 外, 经高速磨削的渗碳淬火 18CrNiMo7-6 试件表面残余压应力值得到提升。

4) 通过分析高速磨削对表面完整性的影响, 得到本文研究材料的最优磨削参数组合为:  $V_s=120$  m/s,  $V_w=4$  m/min,  $a_p=0.02$  mm。

### 参考文献:

- [1] SALOMON C. Verfahren zur bearbeitung von metallen oder bei einer bearbeitung dircxh schneidende werkzeuge sich[J]. Verhaldenden werkstoffen: De, 1931, 71: 961.
- [2] ICHIDA Y, SATO R, MORIMOTO Y. Formation mechanism of finished surface in ultra-high speed grinding with CBN wheels[J]. JSME international journal, 2006, 49(1): 100-105.
- [3] 陈勇. 汽车轴类零件高效磨削实验研究与工艺优化[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [4] CHEN Yong. Process optimization and experimental research on high efficiency grinding of automobile shaft parts[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [5] 于思远, 林彬, 林滨, 等. 工程陶瓷超精密磨削表面质量的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002, 131(5): 12-16.
- [6] YU Si-yuan, LIN Bin, LIN Bin, et al. Study on superfine grinding surface quality of engineering ceramics[J]. Diamond and abrasives engineering, 2002, 131(5): 12-16.
- [7] BEN FREDJ N, SIDHOM H, BRAHAM C. Ground sur-

- face improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling[J]. *Surface and coatings technology*, 2006, 200(16-17): 4846-4860.
- [6] 张茜. 磨削淬硬层残余应力的有限元分析[D]. 济南: 山东大学, 2008.  
ZHANG Qian. Finite element analysis of residual stress in grinding hardened layer[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [7] BRINKSMEIER E, GIWERZEW A. Chip formation mechanisms in grinding at low speeds[J]. *Annals of the CIRP*, 2003, 52(1): 253-258.
- [8] WANG H, SUBHASH G. An proximate model upper bound approach for single grit rotating scratch with conical tool on pure metal[J]. *Wear*, 2002, 252: 911-933.
- [9] 言兰, 姜峰, 融亦鸣. 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(11): 172-181.  
YAN Lan, JIANG Feng, RONG Yi-ming. Grinding mechanism based on single grain cutting simulation[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2012, 48(11): 172-181.
- [10] 王君明, 叶人珍, 汤漾平, 等. 单颗磨粒的平面磨削三维动态有限元仿真[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2009, 173(10): 41-45.  
WANG Jun-ming, YE Ren-zhen, TANG Yang-ping, et al. 3D dynamic finite element simulation analysis of single abrasive grain during surface grinding[J]. *Diamond and abrasives engineering*, 2009, 173(10): 41-45.
- [11] ISO 25178—2012, Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: areal—part 1: Terms, definitions and surface texture parameters[S].
- [12] TAYEBI N, POLYCARPOU A. Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces[J]. *Tribology international*, 2004, 37: 491-505.
- [13] GB/T 1031—2009, 产品几何技术规范(GPS) — 表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值[S].  
GB/T 1031—2009, Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: profile method, surface roughness parameters and their values[S].
- [14] HEDI H, HASSAN Z, JEANMICHEL B. Residual stresses computation in grinding process[J]. *Journal of materials processing technology*, 2004, 147: 277-285.
- [15] DING Zi-shan, LI Bei-zhi, STEVEN Y L. Phase transformation and residual stress of maraging C250 steel during grinding[J]. *Materials letters*, 2015, 154: 37-39.
- [16] BALART M J, BOUZINA A, EDWARDS L. The onset of tensile residual stresses in grinding of hardened steels[J]. *Materials science and engineering A*, 2004, 367: 132-142.