

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201606002



# 齿轮钢缓进给深磨的工艺可行性分析

栾晓圣, 姜峰, 言兰

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以齿轮钢 40CrNiMo 为研究对象, 保持金属去除率一定, 改变磨削深度和工件进给速度, 测量磨削力, 计算磨削力比和磨削比能. 观察磨削表面微观组织变化, 测量磨削表面粗糙度、表层亚表层微硬度变化、磨削表面残余应力, 探讨深切缓进给磨削在齿轮钢磨削过程中的工艺可行性. 缓进给深磨对比试验表明: 在等金属去除率条件下, 缓进给深磨的磨削表面质量较好, 加工效率高, 利用缓进给深磨加工齿轮钢进行去余量加工具有很高的可行性; 由于缓进给深磨热影响区较大, 不适合于齿轮钢精密成形加工, 必须增加精磨工序.

**关键词:** 齿轮钢; 缓进给深磨; 磨削力; 磨削表面

**中图分类号:** TG 5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)06-0667-04

## Feasibility Analysis of Creep Feed Grinding Gear Steel

LUAN Xiaosheng, JIANG Feng, YAN Lan

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In this paper creep feed grinding experiment of gear steel 40CrNiMo was conducted under variable grinding depths and feed speeds, and constant metal removal rates. Grinding force ratio and specific grinding energy have been calculated to analyze the machinability of gear steel during creep feed grinding process. Surface integrity, including surface roughness, micro-hardness and residual stress, has been investigated to study the feasibility of creep feed grinding gear steel. The results reveal that the grinding surface quality is acceptable with high material removal rate and working efficiency, so the creep feed grinding process is an excellent choice to remove the machining allowance rapidly. However, it is not suitable for the final precision machining of gear due to large residual stress from high temperature grinding.

**Keywords:** gear steel; creep feed deep grinding; grindability; surface quality

齿轮钢材料种类繁多, 综合力学性能要求高, 通常采用磨削加工. 然而, 在齿轮钢磨削加工过程中, 磨削温度高、砂轮磨损快、加工硬化趋势强, 往往导致磨削加工效率低、表面质量差, 进而导致生产成本大幅度提高<sup>[1-3]</sup>. 缓进给深磨是一种磨削深度大、切削弧线长、进给速度低的高效磨削加工方式. 它不仅能够保持传统磨削加工精度高的优势, 而且具备刀具切削加工效率高的特点, 可针对不同材料调整工艺参数, 实现良好的加工表面质量<sup>[4]</sup>. 同时, 由于缓进给深磨磨削深度进一步增大, 导致磨削力增大, 磨削消耗的能量大部分转化为热能, 使磨削区温度升高, 产生砂轮磨损加剧、工件表面容易发生烧伤、金相组织发生变化等不利影响<sup>[5-6]</sup>. 众多学者在不同试验条件下对不同材料的缓进给深磨进行了相关研

**收稿日期:** 2015-12-07

**通信作者:** 姜峰(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事精密与超精密加工的研究. E-mail: jiangfeng@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51405168, 51235004); 福建省高校杰出科研人才培养计划(JA14013); 华侨大学中青年教师科研提升资助计划项目(13J0521); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1511303015)

究<sup>[7-15]</sup>. 基于此, 本文测量磨削力, 综合评价磨削表面质量, 进而判断齿轮钢缓进给深磨的工艺可行性.

# 1 磨削试验设计

## 1.1 试验条件

齿轮钢 40CrNiMo, 热处理后硬度为 HRC52-57, 其化学成分 C, Si, Mn, Cr, Mo, Fe 的质量分数分别为 0.35%~0.45%, 0.15%~0.40%, 0.40%~0.70%, 1.00%~1.50%, 0.50%~0.80%, 余量. 齿轮钢 40CrNiMo 的抗拉强度  $\sigma_a$  为 2 000 MPa, 屈服强度  $\sigma_b$  为 1 800 MPa, 断面收缩率  $\psi$  为 35%, 弹性模量  $E$  为 206 MPa, 泊松比  $\nu$  为 0.25~0.30. 平面磨削试样尺寸为 30 mm×15 mm×10 mm. 其中, 10 mm 为砂轮宽度方向, 30 mm 为工件进给方向, 15 mm 为磨削深度方向.

磨削试验采用 BLOHM-Planomat HP408 型高速精密平面成型磨床(德国 Schleifring 公司). 机床的主轴功率为 24.5 kW, 主轴转速为 0~8 000 r·m<sup>-1</sup>(无级调速), 最大砂轮(直径×宽度×孔径)为 400 mm×80 mm×127 mm, 磨削面积为 800 mm×400 mm, 工件进给速度的可调范围为 30~40 000 mm·min<sup>-1</sup>.

磨削试验使用砂轮(江西省南昌精益磨料磨具有限公司)的最大线速度为 35 m·s<sup>-1</sup>. 每进行一组试验前, 需对砂轮进行修整. Kistler9257BA 型三向动态压电晶体测力仪(瑞士 Kistler Instrumente AG-Winterthur 公司)由测力平台、电荷放大器、数据采集卡、微型计算机等元件组成.

根据实际试验参数, 采样频率设置为 10 000 Hz, 测量的所有信号均经模数转换后存储入 PC 机, 利用 DEVE 软件采集、观察和记录. 磨削力测量的原理图, 如图 1 所示.

## 1.2 磨削工艺参数

缓进给深磨试验工艺方案, 如表 1 所示. 表 1 Fig. 1 Principle diagram of grinding force measurement 中:  $a_p$  为磨削进刀量;  $f$  为工作台进给速度;  $v_s$  为砂轮线速度.

表 1 缓进给深磨工艺方案  
Tab. 1 Creep feed grinding parameters

工艺方案	$a_{p,顺}/mm$	$a_{p,逆}/mm$	$f/mm \cdot min^{-1}$	$v_s/m \cdot s^{-1}$
1	0.01	-0.5	10 000	35
2	0.10	-0.5	1 000	35
3	1.00	-0.5	100	35

# 2 结果与分析

## 2.1 缓进给深磨的磨削力、磨削力比和磨削比能

缓进给深磨对比试验的磨削力( $F$ ), 如图 2(a)所示. 由图 2(a)可知: 在等金属去除率条件下, 随着磨削深度的增加, 磨削力增大. 缓进给深磨对比试验的磨削力比( $F_y/F_x$ )和磨削比能( $U$ ), 如图 2(b), 2(c)所示. 由图 2(b), 2(c)可知: 在等金属去除率条件下, 随着磨削深度的增加, 磨削力比减小, 而磨削比能有明显的升高. 因此, 缓进给深磨的磨床需具有足够的功率. 然而, 仅从磨削力、磨削力比和磨削比能方面难以证明缓进给深磨的工艺可行性, 还需对磨削表面质量进行分析.

## 2.2 表面粗糙度

采用白光干涉仪(德国 ZYGO 公司)进行粗糙度测量, 分别测量不同磨削工艺条件下得到的已加工表面, 取样面积为 3.09 mm×1.42 mm. 其中, 3.09 mm 为工件进给方向, 1.42 mm 为砂轮宽度方向. 物镜 10 倍, 测量模式为 VSI, 全解析度, 平行于测量表面横向分辨率为 1.1  $\mu$ m, 垂直于测量表面方向分辨率为 0.001 nm, 拼接区域重合度为 10%.

结果显示: 磨削深度为 0.01 mm, 工件进给速度为 10 000 mm·min<sup>-1</sup>, 得到的磨削表面粗糙度  $R_a$

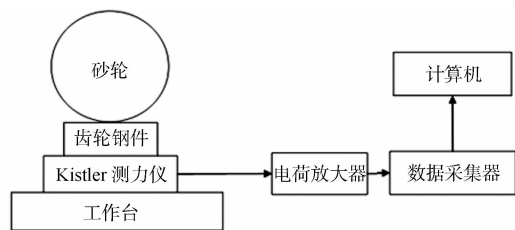


图 1 磨削力测量的原理图

图 1 Principle diagram of grinding force measurement

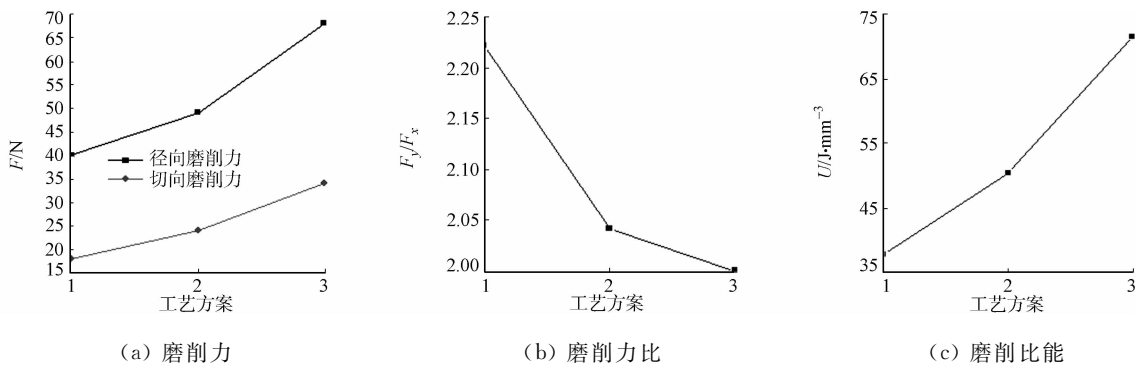


图 2 缓进给深磨对比实验的磨削力、磨削力比和磨削比能变化  
Fig. 2 Grinding force, grinding force ratio and specific grind energy of creep feed deep grinding experiments

最小为  $1.384 \mu m$ ;磨削深度为  $0.10 mm$ ,工件进给速度为  $1\,000 mm \cdot min^{-1}$ ,得到的磨削表面粗糙度  $R_a$  最大为  $1.842 \mu m$ ;磨削深度为  $1 mm$ ,工件进给速度为  $100 mm \cdot min^{-1}$ ,得到的磨削表面粗糙度  $R_a$  为  $1.492 \mu m$ ,表明缓进给深磨的磨削表面粗糙度较好.观察磨削表面的三维形貌可以发现:缓进给深磨得到的磨削表面一致性最好,波谷波峰间距最小.因此,缓进给深磨可达到已加工表面质量的要求.

### 2.3 磨削表层/亚表层的维氏硬度变化

利用离磨削表面不同深度的维氏硬度量磨削表面的变质情况,测点分布如图 3 所示.图 3 中:前 5 个点间隔  $30 \mu m$ ,后 10 个点间隔  $60 \mu m$ ;加载载荷为  $0.5 N$ ;加载时间为  $15 s$ ;测量 3 个位置取平均值.

缓进给深磨比较试验组的磨削亚表层硬度的变化,如图 4 所示.图 4 中: $HV$  为维氏硬度; $d$  为亚表面层深度.由图 4 可知:缓进给深磨的热影响区较大,磨削变质层约为  $1 mm$ ;磨削变质层以软化层为主,并没有出现明显的硬化层,说明磨削温度的分布比较均匀,梯度较小.其他等金属去除率的 2 组参数得到的磨削变质层较小,但磨削深度为  $100 \mu m$ ,工件进给速度为  $1\,000 mm \cdot min^{-1}$  的试验组出现了明显的硬化层.因此,只要磨削液系统有足够的冷却能力,缓进给深磨的磨削变质层可以得到很好地控制.如果将其应用到精密成形加工,因为变质层的存在,需要配合一道精磨工序.

### 2.4 磨削残余应力

X 射线衍射应力测试使用  $Cr$  靶,电压为  $20 kV$ ,电流为  $5 mA$ ,衍射晶面为  $\{211\}$ ,弹性模量为  $210 GPa$ ,泊松比为  $0.3$ ,无应力衍射角为  $156.4^\circ$ , $\psi$  选用  $0^\circ, \pm 25^\circ, \pm 35^\circ, \pm 45^\circ$ .测量 2 个方向的残余应力, $x$  方向测得工件进给方向的残余应力, $y$  方向测得磨削宽度方向的残余应力.采用互相关法确定 X 射线衍射峰的位置,计算峰偏移和残余应力.残余应力的测量位置,如图 5 所示.在磨削宽度方向上等距测量 5 个点的残余应力.缓进给深磨对比试验得到的工件进给方向和磨削宽度方向的残余应力( $p$ ),如图 6 所示.

由图 6 可知:在等金属去除率情况下,缓进给深磨表面工件进给方向的残余应力略大于其他 2 个磨削工艺参数条件下的残余应力,而磨削宽度方向的残余应力和其他

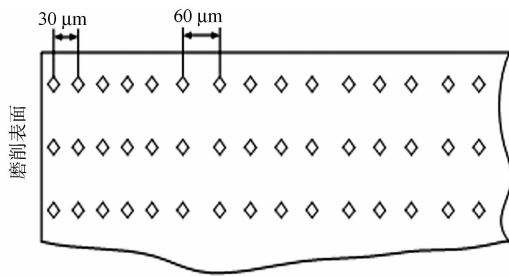


图 3 测点位置示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of observation points

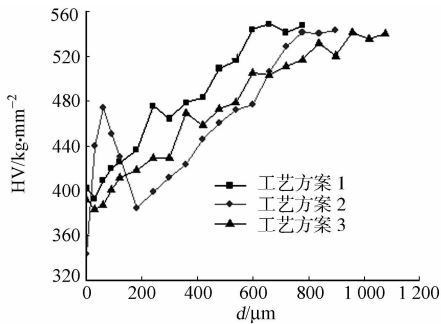


图 4 缓进给深磨比较试验组的磨削亚表层硬度变化  
Fig. 4 Sub-surface Vickers hardness of creep feed grinding comparative experimental



图 5 残余应力测量位置  
Fig. 5 Residual stress measurement of ground surface

2 个磨削工艺参数条件下的残余应力相差不大. 此外, 在缓进给深磨条件下, 磨削表面残余应力的一致性明显优于其他 2 个磨削工艺参数条件下残余应力的一致性. 因此, 从残余应力控制角度而言, 缓进给深磨有一定的可行性.

3 结束语

通过缓进给深磨对比试验发现, 在等金属去除率条件下, 缓进给深磨的磨削表面质量较好, 加工效率高. 因此, 利用缓进给深磨加工齿轮钢进行去余量加工具有很高的可行性. 然而, 缓进给深磨热影响区较大, 磨削后表面存在一定厚度的变质层, 不适合于精密成形加工, 必要时需配合一道精磨工序.

参考文献:

[1] KLOCKE E H F, KUCHIE A. The Machinability of various materials[M]. Berlin:Springer, 2009:73-111.

[2] LI Xinmin, OLOFSSON U. FZG gear efficiency and in-on-disc frictional study of sintered and wrought steel gear materials-springer[C]//STLE Tribology Frontiers Conference, Chicago:[s. n. ], 2014:1573-1586.

[3] ZARUDI I, ZHANG L C. Mechanical property improvement of quenchable steel by grinding[J]. Materials Science, 2002, 37(18):3935-3943.

[4] PARENTE M P L, NATAL J R M, AGUIAR V A, et al. Experimental and numerical study of the temperature field during creep feed grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(1/2/3/4):127-134.

[5] 蔡光起, 赵恒华, 高兴军. 高速高效磨削加工及其关键技术[J]. 制造技术与机床, 2004, 28(2):42-45.

[6] WANG S B, KOU H S. Selections of working conditions for creep feed grinding. Part(I): Thermal partition ratios [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(9/10):700-706.

[7] 毕雪峰, 杨承三, 景璐璐. 深切缓进给磨削烧伤实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(3):303-306.

[8] STEPHENSON D J, JIN T, CORBETT J. High efficiency deep grinding of a low alloy steel with plated CBN wheels [J]. CIRP Annals, 2002, 51(1):241-244.

[9] SUNARTO, ICHIDA Y. Creep feed profile grinding of Ni-based superalloys with ultrafine polycrystalline CBN abrasive grits[J]. Precis Eng, 2001, 25(4):274-283.

[10] ASHOFTEH R, RASTKERDAR A, KOLAHDOUZ S. The effects of depth of cut and dressing conditions on the surface integrity in creep feed grinding of inconel 792-5A[J]. Sustainable Manufacturing, 2012, 2(6):89-93.

[11] DING Weifeng, XU Jiuhua, CHEN Zhenzhen, et al. Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(4):501-510.

[12] WANG S, KOU H. Selections of working conditions for creep feed grinding. Part( II ): Workpiece temperature and critical grinding energy for burning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(1/2):38-44.

[13] WANG S, WU C. Selections of working conditions for creep feed grinding. Part( III ): Avoidance of the workpiece burning by using improved BP neural network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(1/2):31-37.

[14] 陈凯. CSS-42L 合金钢的磨削加工性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013:29-47.

[15] 康仁科, 任敬心, 王西彬. 难加工材料磨削技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011:33-86.

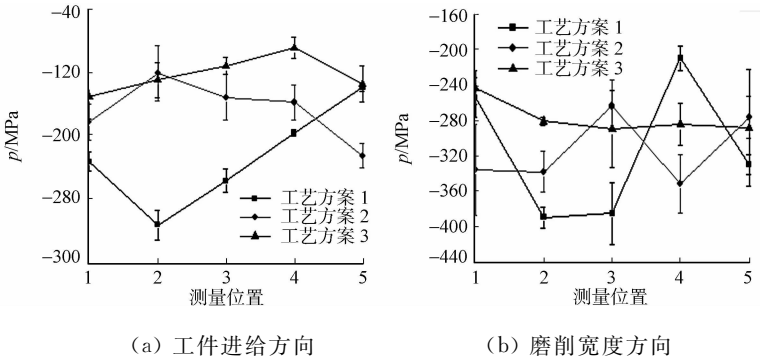


图 6 磨削深度对工件进给方向与磨削宽度方向的残余应力影响  
Fig. 6 Influence of depth of grinding on residual stress in feed direction and grinding width direction