

# 关联系统动静态特征端面磨削表面创成机理

孙聪, 修世超, 李清良, 邹显楠, 洪远

(东北大学, 沈阳 110819)

**摘 要:** **目的** 关联系统动静态特征, 研究端面磨削表面创成机理。**方法** 以粉末冶金不锈钢 316L 为研究对象, 首先构建关联系统动静态特征的有限元模型, 分析主轴系统动静态特征对砂轮端面各位置位移大小的影响。然后基于端面砂轮表面磨粒的位置和尺寸信息, 建立端面砂轮磨粒三维空间轨迹方程, 推导相邻磨粒运动关系式, 采用轮廓搜索法确定端面磨削表面的动静态创成过程。最后, 结合端面磨削加工实验, 分析端面磨削系统动态、静态特征对加工表面粗糙度与轮廓度的影响规律, 阐释加工表面材料去除不均匀的本质, 并提出创成表面质量的参数化修正方法。**结果** 靠近砂轮边缘的磨粒静态退让量大于靠近砂轮中心部分的磨粒静态退让量, 但不同位置的磨粒动态振动量差异不大。静态退让量随切深的增加而增大, 动态振动量随砂轮转速的增加而增大。**结论** 砂轮表面磨粒的静态退让性是造成加工表面轮廓度误差的重要因素, 同时主轴系统动态振动特征会影响加工表面粗糙度。分析可得, 砂轮转速在 400 r/min 左右, 与之匹配无理数转速比的工件转速和较小的法向切深, 可提高端面磨削表面质量表征。

**关键词:** 动静态特征; 表面创成; 静态退让量; 动态振动量; 轨迹方程; 质量表征

**中图分类号:** TG580.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0035-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.003

## Mechanism of Surface Creation for Dynamic and Static Feature End Grinding of Associated Systems

SUN Cong, XIU Shi-chao, LI Qing-liang, ZOU Xian-nan, HONG Yuan

(Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**ABSTRACT:** Based on main shaft system dynamic-static characteristic of the machine tool, the work aims to study the mechanism on disc grinding surface generation. Taking the powder metallurgy stainless steel 316L as the research object, the element deformation model of correlated to the grinding system dynamic-static characteristic is set up, and the influence of main shaft system dynamic-static characteristic on the displacement of disc wheel arbitrary surface position is analyzed. Afterwards,

收稿日期: 2020-10-09; 修订日期: 2021-12-06

Received: 2020-10-09; Revised: 2021-12-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51775101, 52175383, 52105433); 中央高校基本科研业务专项资金资助 (N2103014); 东北大学博士后基金 (20200326); 辽宁省自然科学基金 (2021-MS-088)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775101, 52175383, 52105433), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (N2103014), the Postdoctoral Foundation of Northeastern University (20200326) and the Natural Science Foundation of Liaoning Province (2021-MS-088)

**作者简介:** 孙聪 (1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为工件变质层参数的特征评价。

**Biography:** SUN Cong (1989—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: feature evaluation of the metamorphic layer's parameters.

**通讯作者:** 修世超 (1958—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机械零部件表面完整性综合设计与控制技术。

**Corresponding author:** XIU Shi-chao (1958—), Male, Doctor, Professor, Research focus: integrated design and control technology of machine parts' surface integrity.

**引文格式:** 孙聪, 修世超, 李清良, 等. 关联系统动静态特征端面磨削表面创成机理[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 35-43.

SUN Cong, XIU Shi-chao, LI Qing-liang, et al. Mechanism of surface creation for dynamic and static feature end grinding of associated systems [J]. Surface technology, 2021, 50(12): 35-43.

based on the wheel abrasive position information and the size information, the three dimensional abrasive trajectory equation is set up. And the arbitrary adjacent two abrasives movement relationship is figured out. The profile search method is applied to analyze the disc grinding dynamic-static surface generation process on the workpiece surface material. Finally, combined with the corresponding disc grinding experiment, the influence regulation of the system dynamic-static characteristic on machining surface profile and surface roughness is investigated. The essence of uneven machining effect on workpiece surface is explained. Moreover, the parametric modified method on the generated surface quality is proposed as well. It shows that the static deformation at the faraway position from the workpiece center is relatively larger than that of the machining workpiece nearby center. However, the difference of the disc grinding system dynamic vibration is relatively smaller. To be specific, the static deformation gets larger with the increase of the feeding depth. And the disc grinding system dynamic vibration increases at the larger wheel rotation speed. It can be concluded that the static characteristic is a key factor to influence the disc grinding surface profile, and the grinding system dynamic characteristic can affect the machining surface roughness as well. Analysis shows that the grinding wheel speed is around 400 r/min. Matching workpiece speed with irrational speed ratio and small normal depth of cut that can improve the disc grinding surface quality characteristic.

**KEY WORDS:** dynamic-static characteristic; surface generation; static deformation; dynamic vibration; trajectory equation; quality characteristic

与传统具有单一刀具的车削、铣削以及钻削相比,磨粒加工技术具有高精度与低损伤等优点<sup>[1-3]</sup>。尤其为了满足具有特定形状(径厚比较大的盘片类零部件)的加工需求,因端面砂轮可以实现零件表面的高效整体去除,覆盖式端面磨削加工技术被逐渐应用于实际生产制造。端面磨削是近些年来发展较快的一种新型磨粒加工新方法,目前在一些批量生产的零件端面加工、半导体硅片加工、阀片加工、硬质合金薄片加工、推力轴承端面加工以及各盘片类零件的表面加工领域已获得广泛应用<sup>[4-6]</sup>。随着行业内对端面磨床的应用越来越广泛,对其工作能力和加工精度的要求也越来越高。

端面砂轮的磨粒随机分布于砂轮基盘表面,端面砂轮与盘片零件的相对运动直接影响零件表面材料的去除效果。系统的运动方式可分为砂轮的法向进给运动、砂轮的自转以及工件的自转,受磨粒分布与相对运动复杂程度的影响,学者们对端面磨削表面材料去除机理展开了深入的研究<sup>[7-9]</sup>。Hu等<sup>[10]</sup>对端面磨削过程单磨粒运动轨迹进行了仿真分析,发现优化加工系统的转速比可一定程度提高加工零件质量表征。然而端面磨削零件表面材料的去除效果是由接触区所有有效磨粒共同去除作用所决定的。Sun等<sup>[11]</sup>基于接触区所有有效磨粒的共同去除作用,研究了加工零件表面去除率分布情况,发现去除率在零件表面呈现区域性分布特征。同时,Wang等<sup>[12]</sup>基于磨粒间的相对运动关系,研究了端面磨削蓝宝石晶体取向与加工零件表面质量的具体关系,这说明端面磨削零件表面质量还与零件自身材料属性关联较大。此后,学者们主要集中于有效磨粒轨迹、磨粒去除效果及材料属性与端面磨削加工工艺参数关系的相关研究,并取得了宝贵的研究成果<sup>[13-16]</sup>。

覆盖式端面磨削过程中,冷却液很难大量进入加工接触区,这使得加工过程具有较强的热力耦合分布特征。J. Sun等<sup>[17]</sup>建立了端面磨削力的解析预测模型,并预测了加工表面零件损伤情况。C. Sun等<sup>[18]</sup>运用有限差分法对端面磨削接触区温度场进行了数值预测,并与有限元模拟结果进行了对比,发现端面磨削温度场也呈现差异性分布特征。此外,Deja等<sup>[19]</sup>通过设计的温度记录仪测量了端面磨削加工温度场的实验温度,并拟合了多因素作用的温度场经验公式。通过以上研究可以看出,目前关于端面磨削主要针对磨粒对零件表面材料去除机理的分析。然而,磨粒与零件表面材料的干涉过程不仅受到热力耦合与磨粒相对运动轨迹的影响,还受加工系统动态特征的直接作用,加工系统通过宏观动态特征来影响磨粒与零件表面材料的微观干涉方式,进而导致端面磨削零件表面加工质量的差异性。Yan等<sup>[20]</sup>研究了外圆磨削中工件偏心质量所导致的摩擦型颤振与再生型颤振,发现摩擦型颤振可以避免,而再生型颤振可等效为准周期振动形式。Liu等<sup>[21]</sup>提出了齿轮磨削过程颤振在线检测方法,可以有效地检测复杂磨削工况的系统振动情况。此外,Cao等<sup>[22]</sup>研究了系统受迫振动对平面磨削表面精度的影响规律,但并未考虑非稳态振动对加工表面质量的影响。上述研究表明,系统动态特征对加工零件表面质量及系统稳定性影响明显,根据端面磨削砂轮与零件相对位置关系及盘片类零件的特殊加工方式,有必要结合主轴系统动静态特征,开展磨粒对零件表面创成过程研究,实现端面磨削加工表面质量的数字化控制。

综上所述,本文就端面磨削系统动静态特征及对零件表面创成过程的影响进行了系统的分析。首先分析了主轴系统动静态特征对砂轮端面各位置位移大小的影响;然后基于端面砂轮表面磨粒的位置和尺寸

信息, 建立端面砂轮磨粒三维空间轨迹方程, 并采用轮廓搜索法确定端面磨削工件表面的动静态创成过程; 最后探究端面磨削系统动态、静态特征对加工表面粗糙度与平面度误差的影响规律, 阐释加工表面材料去除不均匀的本质。

## 1 端面磨削砂轮表面动静态位移分析

端面磨削砂轮端的位移情况直接影响磨粒对工件表面材料的创成过程, 砂轮端的位移分布主要由端面磨床主轴系统动静态特征决定。为了获得端面砂轮动静态位移分布, 结合实际工况, 建立了加工过程主轴系统动静态有限元模型, 如图 1 所示。其中, 选用的磨床为 HMP-108 端面磨床, 配用合作单位自产的内外圆直径分别为 300 mm 与 220 mm 的 CBN 树脂砂轮, 待加工的零件材料为粉末冶金不锈钢 316L。

### 1.1 砂轮表面退让性分析

该端面磨床主要承担汽车阀片类零件的端面磨削加工, 所加工零件具有较大的径厚比, 且多呈现扁平状特征, 因此需将加工零件置于专用夹具中, 以保证其加工中的整体稳定性。该类零件径厚比较大, 尺寸相对较小, 在稳定夹持作用下很难具有大变形退让特征。上述覆盖式加工特点虽保证了加工零件的稳定性, 但很难对加工区域动态热力耦合及变形特征进行

检测。当零件置于上下砂轮端面, 端面砂轮会对盘片类零件进行磨削加工, 砂轮边缘一端由于零件厚度存在而产生翘起, 从而导致砂轮边缘的退让性。因此, 需结合砂轮加工过程动静态特征, 分析端面加工零件表面创成过程, 从而确定加工表面退让程度。退让性的存在会导致端面砂轮表面磨粒的法向运动差异性, 使砂轮上磨粒对加工表面材料呈现不同的切入深度, 甚至有的位置会切削量很小, 如图 2 所示。

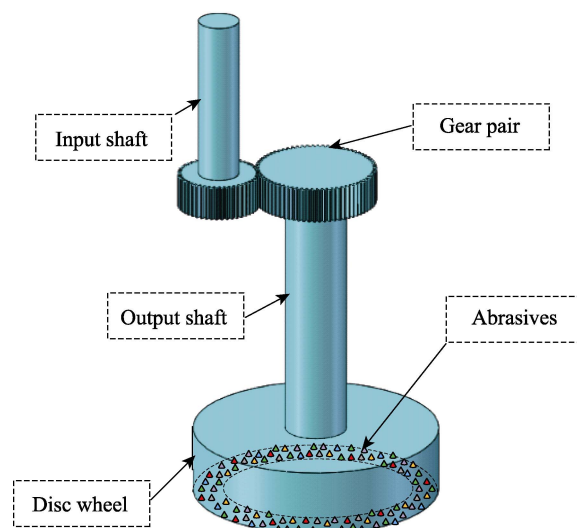


图 1 端面磨削主轴系统动静态有限元模型  
Fig.1 The main shaft system of disc grinding

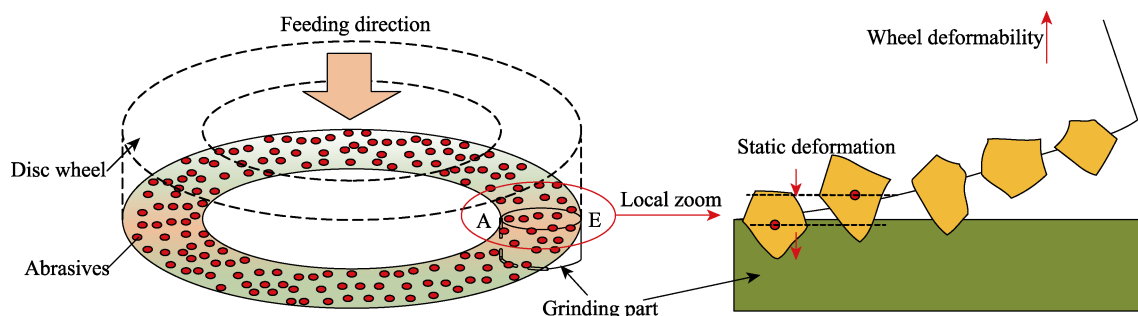


图 2 砂轮表面回弹特性  
Fig.2 Illustration of disc wheel elastic deformability

为了研究该砂轮表面不同位置的退让量, 沿接触区工件直径方向 ( $AE$ ) 作为目标路径, 求得不同法向进给深度下的砂轮表面退让量分布情况, 如图 3 所示。可以看出, 不同位置的砂轮退让量差异明显, 砂轮与工件接触区的退让量随着与砂轮中心距离的增加而增大。这说明在砂轮边缘位置的退让量较大, 且最大变化量可达 0.03 mm。此外, 砂轮表面的退让量随着切深的增加而增大。这主要由于大切深条件下的砂轮与零件表面会产生较大的接触力作用, 而砂轮的刚性并未发生变化, 因此会产生更大的静态退让量。

### 1.2 砂轮表面振动特性分析

加工过程主轴系统动态特征可作为另一个影响

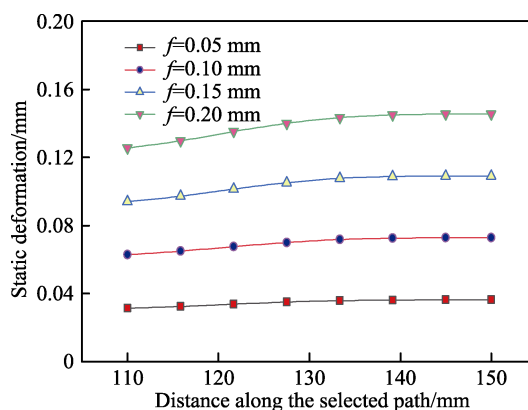


图 3 砂轮表面静态退让量  
Fig.3 The static deformation along the selected path of wheel surface

端面砂轮磨粒法向位移的关键因素,对所建立的转子有限元模型主轴输入端施加转矩,以保证砂轮端主轴转速与实际工况一致(0~1400 r/min)。可以看出,端面砂轮法向位移先逐渐增大、后逐渐稳定。其中,法向位移增大对应于砂轮对加工零件表面的法向进给及材料去除过程,此时砂轮自转并进行法向进给运动来实现零件表面的大去除量粗加工过程;法向位移相对稳定状态对应于加工零件表面的高精度去除过程,此时砂轮仅进行自转,且零件表面材料去除量很小,属于精加工过程。由于实际端面磨削粗加工过程占整个加工周期的比例较小,且后续精加工过程砂轮与加工表面材料干涉较小,系统振动相对稳定,拟选择1 s以内的砂轮与加工零件接触区不同位置A(110,0,0)、B(120,0,0)、C(130,0,0)、D(140,0,0)、E(150,0,0)的振动情况进行分析。不同工况下砂轮表面接触区振动位移情况如图4所示。可以看出,砂轮表面趋于稳定,

这是由材料去除量大小及对应的颤振强弱差异性所决定的。此外,随着砂轮转速的增加,法向振动位移增大明显,主轴转速的增加,会导致砂轮主轴振动及接触区颤振的加剧,从而影响Z方向位移变化规律。砂轮作为刚性结构,其不同位置的振动强度都与主轴振动直接关联,因此各处差异不大,但砂轮表面与主轴中心更近位置的位移变化较明显。

上述分析表明,端面磨削加工过程砂轮表面的法向位移是由静态退让量与动态振动量共同决定的,则对于第*j*颗磨粒任意时刻的法向位移量可以写为:

$$I = \frac{T_j \cdot v \cdot t}{f \cdot 60} + \delta_z \quad (1)$$

式中: $T_j$ 为第*j*颗磨粒在当前位置的静态退让量; $v$ 为端面砂轮对加工零件表面的法向进给速度; $t$ 为当前时间点; $f$ 为端面砂轮对加工零件表面的法向切深; $\delta_z$ 为端面砂轮的法向振动量。

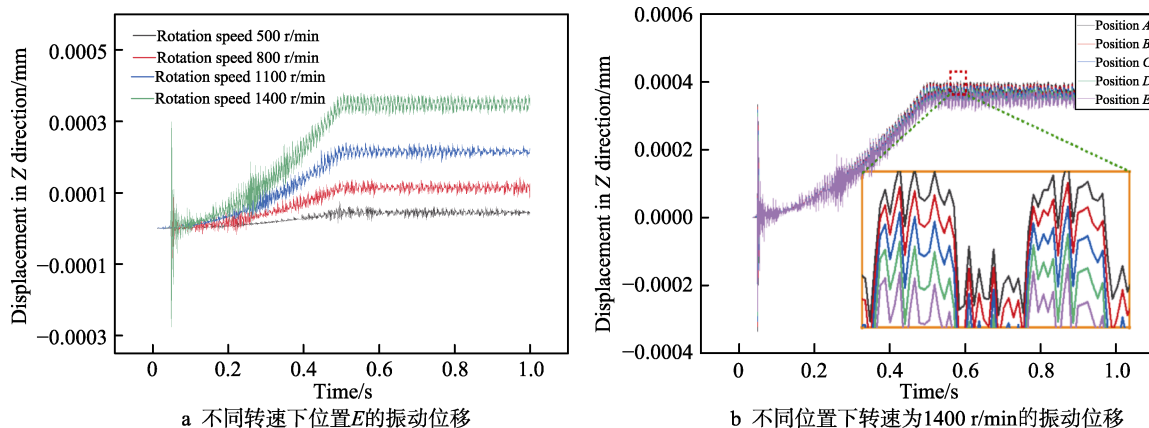


图4 砂轮法向振动位移量

Fig.4 The normal vibration displacement of the wheel surface: a) displacement under different rotation speeds of position E; b) displacement of different positions at rotation speed 1400 r/min

当砂轮法向切深为0.1 mm、砂轮转速为1400 r/min以及砂轮法向进给速度为0.2 mm/min时,接触区位置B的法向位移情况如图5所示。可以看出,随着磨削过程的进行,端面磨削法向总位移量呈增大趋势,且端面磨削系统的静态退让量对接触区砂轮法向位

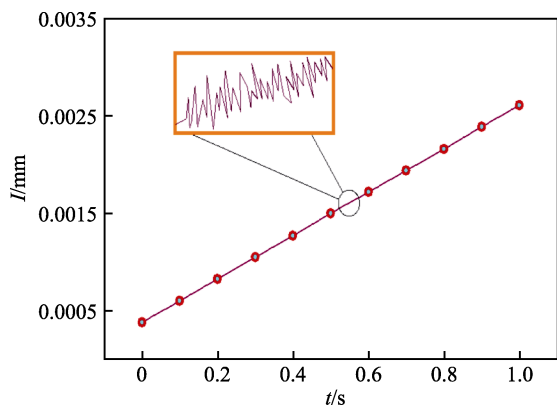


图5 砂轮法向总位移量

Fig.5 The total normal displacement of the wheel surface

移整体变化趋势的影响较大,而端面磨削系统的动态振动量直接影响位移的时域波动。静态退让量反映了端面砂轮接触区静态变形情况,动态振动量反映了端面砂轮加工过程复合振动情况。端面磨削系统动态、静态特征分别在不同数量级上影响砂轮表面磨粒的法向位移,法向位移的变化会直接改变加工零件表面的创成过程。

## 2 基于磨粒空间轨迹的端面磨削加工表面创成过程分析

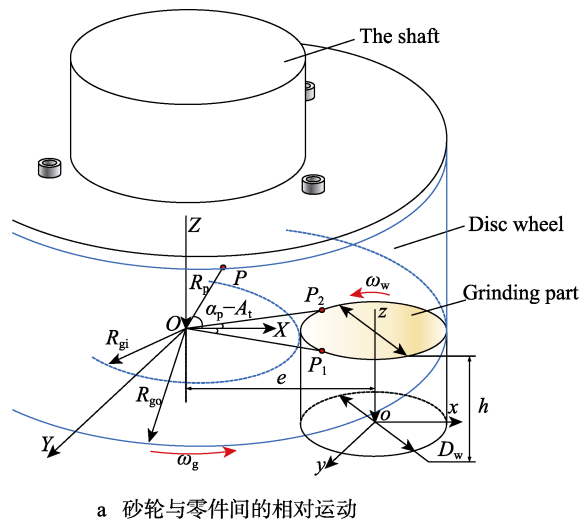
端面加工零件的表面质量高低直接决定其后续使用周期。为提升盘片类零件的质量表征,需结合加工系统的动静态特征,从砂轮表面磨粒对零件表面材料的创成过程进行分析,探究系统动静态特征对加工零件表面质量的影响机理,从本质上提出端面磨削加工质量的宏观控制方法。

磨粒对加工零件表面的去除作用不仅受加工系统的动静态特征影响,还与端面磨削系统各部分空间的相对运动关系相关。图 6a 显示了砂轮与加工零件的相对运动关系,其中,  $R_{g0}$  与  $R_{gi}$  分别为端面砂轮的外径和内径;  $\omega_g$  与  $\omega_w$  分别为端面砂轮与加工零件的转速;  $e$  为砂轮与加工零件中心的水平偏心距离。对于砂轮表面任意磨粒  $j$  所在位置  $P(R_p, \alpha_p, h)$ , 其映射到加工零件表面的空间坐标则可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p \cos(\alpha_p + \omega_g t + \omega_w t) - e \cos(\omega_w t) \\ R_p \sin(\alpha_p + \omega_g t + \omega_w t) - e \sin(\omega_w t) \\ h - \left(1 - \frac{T_j}{f}\right) \frac{v_j t}{60} + \delta_{zj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

结合磨粒在加工空间运动轨迹与图 6b 中磨粒间得相对位置关系,则可确定磨粒  $j$  的空间创成位置信息为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_j \cos(\alpha_1 + \theta + \omega_g t + \omega_w t) - e \cos(\omega_w t) \\ R_j \sin(\alpha_1 + \theta + \omega_g t + \omega_w t) - e \sin(\omega_w t) \\ h + \frac{T_j}{f} \cdot \frac{v_j}{60} \cdot \frac{\theta}{\omega} + \delta_{zj} - \Delta z_j + (g_j - g_1) \end{bmatrix} \quad (3)$$



a 砂轮与零件间的相对运动

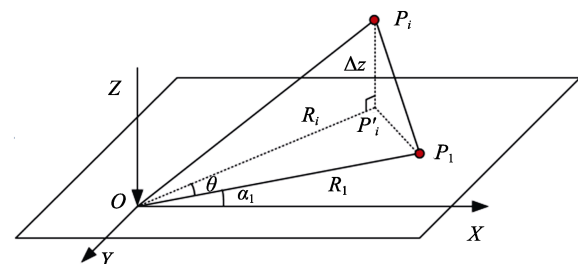
式中:  $g_j$  表示第  $j$  颗磨粒的突起高度;  $\theta$  为相邻两磨粒平均夹角;  $\Delta z_j$  为相邻磨粒法向进给位移变化量, 可以表示为,  $\Delta z_j = v_j \Delta t$ ,  $\Delta t = \theta / \omega_g$ 。

此外,以初始第一颗磨粒为例,其初始相位角与相邻磨粒夹角分别可以写为:

$$\alpha_1 = \begin{cases} \arccos \frac{X_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} & (Y_1 > 0) \\ 2\pi - \arccos \frac{X_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} & (Y_1 < 0) \end{cases},$$

$$\theta = \begin{cases} \arccos \frac{X_1 X_i + Y_1 Y_i}{\sqrt{(X_1^2 + Y_1^2)(X_i^2 + Y_i^2)}} & (Y_i > 0) \\ 2\pi - \arccos \frac{X_1 X_i + Y_1 Y_i}{\sqrt{(X_1^2 + Y_1^2)(X_i^2 + Y_i^2)}} & (Y_i < 0) \end{cases} \quad (4)$$

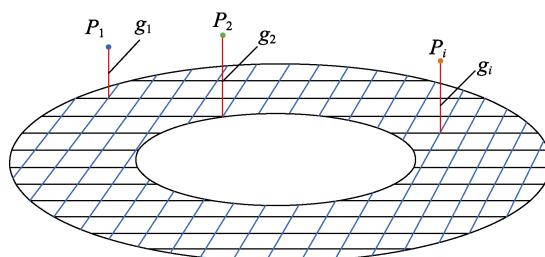
如图 7 所示,磨粒的空间创成运动信息会复刻于加工零件表面,且由于砂轮与加工零件间的相对运动特征,已切削表面可能发生多次材料去除作用,致使加工表面进行多次创成过程。这意味着第一颗磨粒在对零件表面特定位置完成切除作用后,后一颗磨粒会再次对切削后的表面进行再次创成,从而进行一定程度的表面信息覆盖,对每颗磨粒加工后的表面进行搜



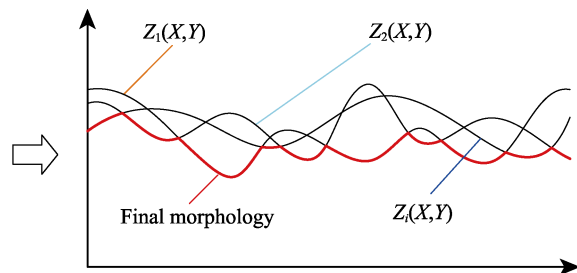
b 磨粒间的相对位置

图 6 磨削系统及磨粒间的相对运动

Fig.6 Illustration for relative movements of the grinding system and interval abrasives: a) relative movement between disc wheel and workpiece; b) relative position between interval abrasives



a 端面砂轮磨粒信息



b 零件表面创成过程

图 7 端面砂轮磨粒对加工零件表面的创成过程

Fig.7 The workpiece surface generation process with wheel abrasives: a) the abrasive information on the disc wheel; b) the workpiece surface generation process



索,寻找凸起高度最低表面,直至加工结束后,即可获得最终的零件表面创成形貌特征。其中,磨粒粒径高度信息由所选砂轮粒度号(140/170)决定,磨粒粒径范围为80~100  $\mu\text{m}$ ,即磨粒粒径满足80~100  $\mu\text{m}$ 的正态分布。

由于零件表面创成形貌特征受到端面砂轮转速、工件转速、进给速度等多因素水平的影响,设置砂轮进给速度为0.05、0.10、0.15 mm/min,分别用A1、A2、A3表示;设置零件转速为100、120、140 r/min,分别用B1、B2、B3表示;设置砂轮转速为800、1100、1400 r/min,分别用C1、C2、C3表示。A1B2C2工况下端磨削后零件表面的创成形貌如图8所示。可以看出,盘片类零件表面去除效果呈现一定的差异性分布,具体表现为零件中心处,形貌呈现一定的凸起,在远离零件中心的位置,形貌高度相对比较均匀。该差异性主要由端面砂轮磨粒对加工零件表面的创成区域性不同所导致的,而砂轮转子系统动静态分布特征决定创成表面的区域差异性。

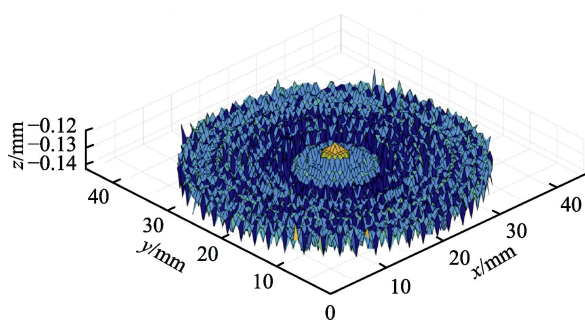


图8 加工后零件表面创成形貌  
Fig.8 The surface profile after disc grinding

基于不同工况下加工零件表面的创成形貌特征,获得图9所示的不同工况下加工表面粗糙度与平面度误差。可以看出,不同工况加工零件表面的粗糙度与平面度误差走势一致,但1、3、6、8组数值明显

高于其他组数值,这几组的砂轮与工件的转速比为有理数。在有理数转速比工况下,磨粒在加工表面的去

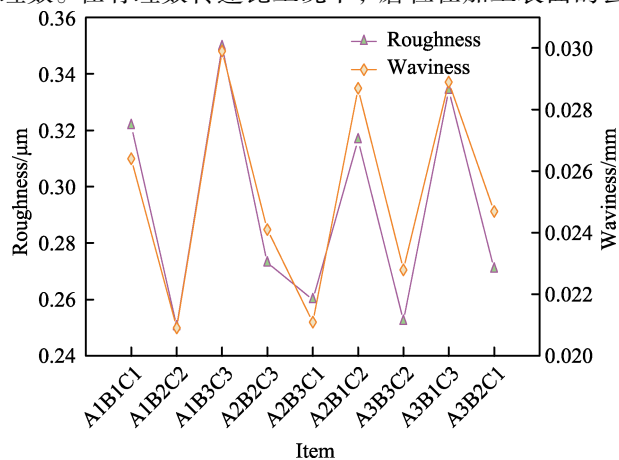


图9 不同组的加工零件表面粗糙度与平面度误差  
Fig.9 The surface roughness and waviness in different items

除轨迹仅在指定区域进行。指定区域指的是砂轮表面任意指定单颗磨粒对加工零件表面的固定有效去除区域,该去除区域与砂轮表面磨粒位置及砂轮与磨粒间的相对运动关系相关。根据之前研究<sup>[11]</sup>,当砂轮转速与零件转速比为有理数时,砂轮表面任意磨粒在零件表面的轨迹均为周期性、重复性的,即每经过转速比次数后,轨迹又重新回到初始轨迹上,这种情况不利于加工表面的均匀性去除。当砂轮与零件转速比为无理数时,磨粒在零件表面的轨迹不会出现重复性去除过程。因此,当转速比为无理数时,磨粒对加工零件呈现非周期性去除效果。

砂轮的静态退让量对加工零件表面质量的影响比较直接,必然会导致加工零件平面度误差的增大,但系统动态特征对加工零件表面质量的影响较为复杂。有理数转速比下,有无系统动态特征的零件表面创成状态对比结果如图10所示。结合之前研究<sup>[11]</sup>,较低的砂轮转速可使加工表面的磨粒运动更为均匀,

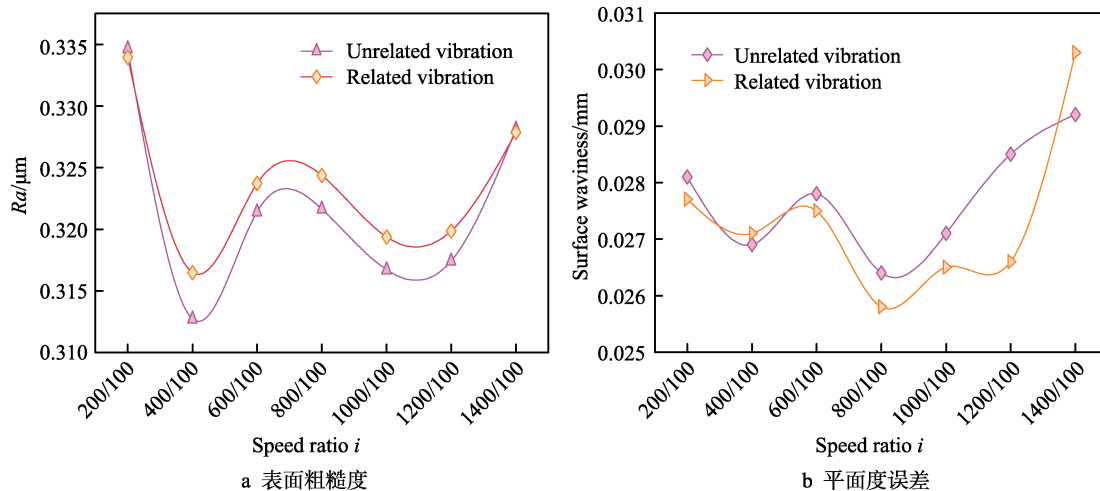


图10 是否关联系统动态特性条件下的零件表面创成状态

Fig.10 The surface generation state including system dynamic characteristic or not: a) the surface roughness; b) the surface waviness

但加工过程中磨粒对加工零件表面创成运动复杂,以及受加工工艺参数匹配影响较大。结合图 10a、b 可以看出,砂轮表面振动量和退让量共同作用下,磨粒的法向位移随转速呈一定非线性变化,一味地降低转速并不能获得足够理想的加工表面。但当砂轮转速在 400 r/min 时,粗糙度达到最低,且平面度误差变化相对平稳,此时可获得较高的端面磨削质量。

3 端面磨削零件质量表征的实验研究

为进一步研究端面磨削主轴系统动静态特性对不锈钢零件创成质量的影响,开展了相应的端面磨削零件质量表征实验研究。采用 HMP-108 立式端面磨床(如图 11 所示)对盘片类零件进行端面磨削实验研究。加工零件材料为粉末冶金 316L 不锈钢,尺寸为  $\phi 40\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,端面砂轮选用 CBN 磨料。运用采样频率为 10 000 Hz 的接触式加速度传感器布置于机床主轴,以监测加工中的加速度振动信号,从而反映砂轮的振动信号。实验主要的控制因素为端面砂轮进给速度、工件转速,以及砂轮转速,分别用 A、B、C 表示。具体方案见表 1。

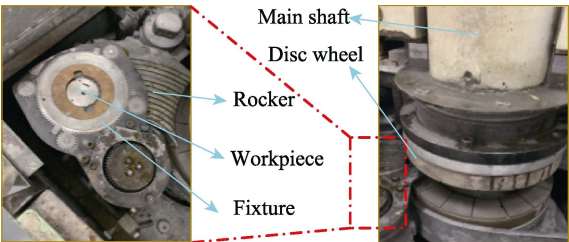


图 11 机床系统的组成  
Fig.11 Composite of machine tool

表 1 试验方案  
Tab.1 Experimental plan

Item	Feeding speed (A)/(mm·min <sup>-1</sup> )	Workpiece rotation speed(B)/(r·min <sup>-1</sup> )	Wheel rotation speed(C)/(r·min <sup>-1</sup> )
1	0.05	100	800
2	0.05	120	1100
3	0.05	140	1400
4	0.10	100	800
5	0.10	120	1100
6	0.10	140	1400
7	0.15	100	800
8	0.15	120	1100
9	0.15	140	1400

针对上述实验方案所测的主轴系统振动情况,进行线性滤波,结果如图 12 所示。可以看出,端面磨削加工主轴振动强弱受砂轮转速影响较大,但受进给速度与零件转速影响较小,过大的振动量作用与加工零件表面,必然会影响加工零件表面质量。不同工况下运用 Leica DVM6 超景深显微镜观测的端面磨削加

工零件沿半径方向的表面形貌分布如图 13 所示。可以看出,零件边缘与中心位置的平面度误差差异性明显,最大可至 30  $\mu\text{m}$ 。这与前文分析所得的静态退让量大小一致,说明端面砂轮静态退让性主要影响加工表面的平面度误差。此外,图 14 对比了 9 个工况下端面磨削加工质量的理论与实验结果,发现无论是加工表面粗糙度,还是加工表面平面度误差,理论计算结果均与实验测得结果具有较好的一致性,这验证了理论模型的准确性。

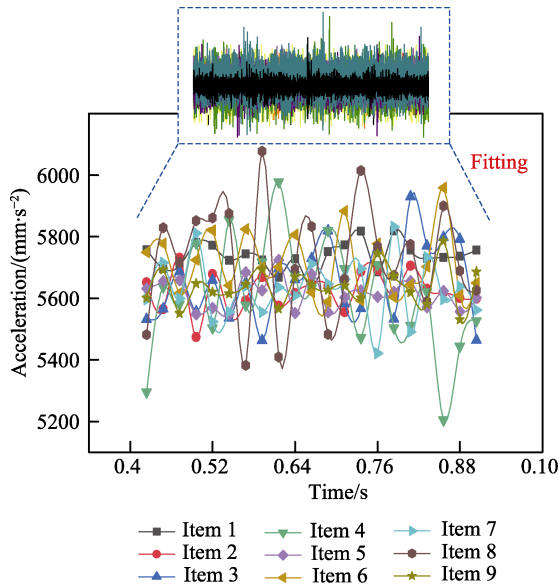


图 12 主轴振动  
Fig.12 Vibration of main shaft

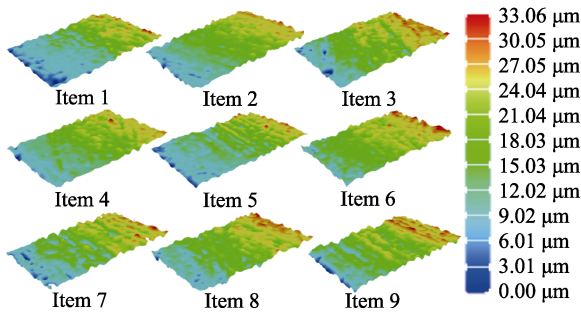


图 13 端面磨削加工零件表面形貌  
Fig.13 Surface topography of disc grinding

为了获得表面粗糙度信息与主轴振动信号的频域响应,需将主轴时域振动信号进行快速傅里叶变换,进而得到主轴系统频域特征,如图 15 所示。以第一组实验为例,在其主轴系统振动信号中,其 0 倍频成分振幅最大。0 倍频对应的砂轮与零件间的相对初始位置,加工中的初始位置并没有在零位置处。磨削开始时,砂轮需对零件表面下移一定位置,即引起相应信号输出,此信号即对应于 0 倍频的振动成分。1 倍频处在 14 Hz 左右,而在第一组实验中,砂轮的转速为 800 r/min( 13.33 r/s ), 1 倍频与主轴转频相等,其他频率成分振幅较小,这说明主轴转频激振特征主

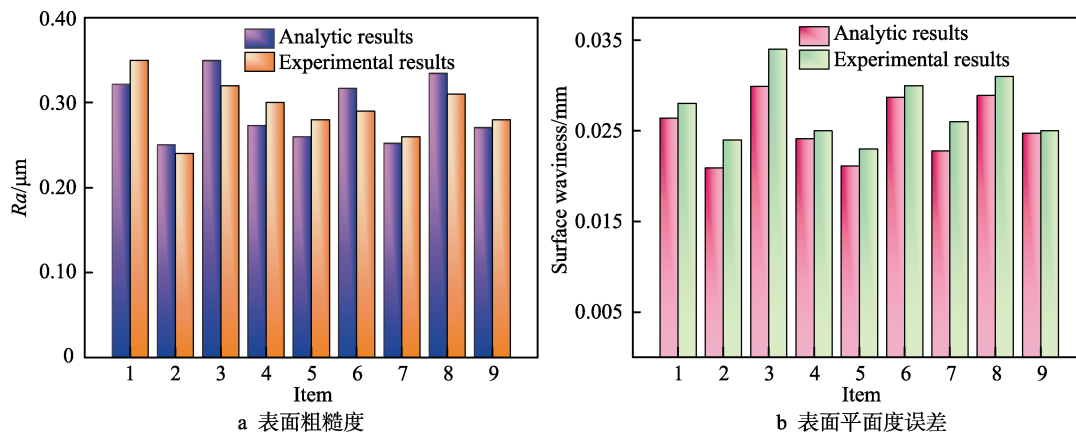


图 14 端面磨削加工质量的理论和实验结果对比

Fig.14 Comparison between analytic and experimental results of disc grinding surface quality: a) the surface roughness; b) the surface waviness

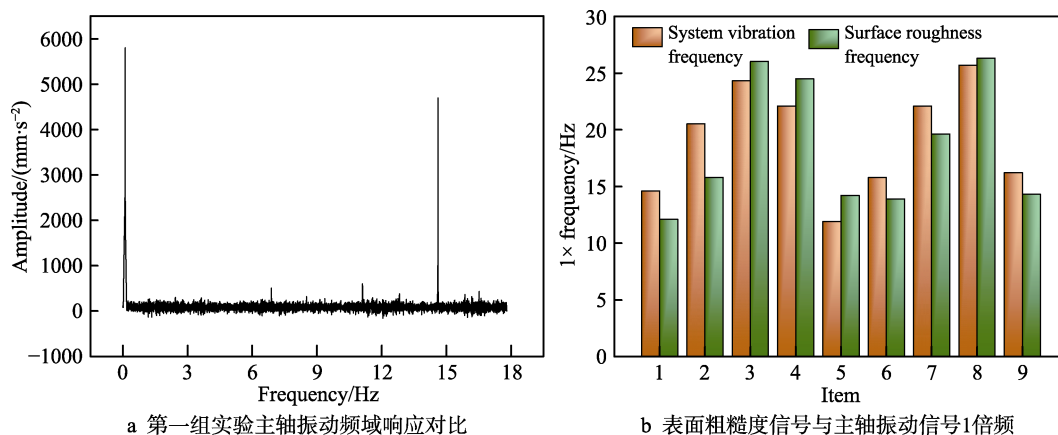


图 15 表面粗糙度信息与主轴振动信号的频域响应

Fig.15 Frequency vibration signal: a) the main shaft vibration frequency response of item 1; b) comparison of surface roughness and vibration for  $1 \times$  frequency

要体现于 1 倍频上。此外,对加工表面粗糙度信号进行采集,并进行快速傅里叶变换,与对应的频域振动信号进行对比,发现不同工况下的加工表面粗糙度信号 1 倍频与主轴振动信号的 1 倍频具有较高的相似度。这说明端面加工主轴振动特性主要影响加工表面的粗糙度,而端面磨削砂轮的静态退让性主要影响加工表面的平面度误差。

## 4 结论

1) 端面磨床主轴系统动态特性引起砂轮表面接触区振动位移在粗加工阶段逐渐增大,并在精加工阶段振动趋于稳定,且随着砂轮转速的增加,增大明显。此外,砂轮与零件接触区振动位移区域的差异性较小,距离砂轮主轴较近位置的振动幅值略高于其他位置的振动幅值。

2) 不同位置的砂轮表面静态退让量差异明显,且随着与砂轮中心距离的增加而增大,最大变化量可达 0.03 mm。此外,砂轮表面的退让量随着切深的增加而增大。

3) 端面加工主轴振动特性主要影响加工表面的粗糙度,而端面磨削砂轮的静态退让性主要影响加工表面的平面度误差。砂轮转速在 400 r/min 左右,并匹配无理数转速比的工件转速与较小的法向切深,可获得较高的端面磨削加工表面质量。

## 参考文献:

- [1] GUO Wei-cheng, WU Chong-jun, DING Zi-shan, et al. Prediction of surface roughness based on a hybrid feature selection method and long short-term memory network in grinding[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2021, 112(9-10): 2853-2871.
- [2] LI Hao-nan, XIE Ke-ge, WU Bo, et al. Generation of textured diamond abrasive tools by continuous-wave  $CO_2$  laser: Laser parameter effects and optimisation[J]. Journal of materials processing technology, 2020, 275: 116279.
- [3] SUN Yao, SU Zhi-peng, GONG Ya-dong, et al. Analytical and experimental study on micro-grinding surface-generated mechanism of DD5 single-crystal superalloy using micro-diamond pencil grinding tool[J]. Archives of



- civil and mechanical engineering, 2021, 21(1): 1-22.
- [4] CHEN Jia-peng, SUN Tao, SU Jian-xiu, et al. A novel agglomerated diamond abrasive with excellent micro-cutting and self-sharpening capabilities in fixed abrasive lapping processes[J]. *Wear*, 2021, 464-465: 203531.
- [5] LAI Zhi-yuan, HU Zhong-wei, FANG Cong-fu, et al. Research on factors affecting wear uniformity of the wheels in the double-sided lapping[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2020, 50: 653-662.
- [6] LI Z C, PEI Z J, FISHER G R. Simultaneous double side grinding of silicon wafers: A literature review[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2006, 46(12-13): 1449-1458.
- [7] LUO Qiu-fa, LU Jing, XU Xi-peng. Study on the processing characteristics of SiC and sapphire substrates polished by semi-fixed and fixed abrasive tools[J]. *Tribology international*, 2016, 104: 191-203.
- [8] ZHANG Zhen-yu, SONG Ya-xing, XU Chao-ge, et al. A novel model for undeformed nanometer chips of soft-brittle HgCdTe films induced by ultrafine diamond grits[J]. *Scripta materialia*, 2012, 67(2): 197-200.
- [9] LI Hao nan, YANG Yue, ZHAO Yong jie, et al. On the periodicity of fixed-abrasive planetary lapping based on a generic model[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2019, 44: 271-287.
- [10] HU Zhong-wei, FANG Cong-fu, DENG Wen-wen, et al. Speed ratio optimization for ceramic lapping with fixed diamond pellets[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2017, 90(9-12): 3159-3169.
- [11] SUN Cong, XIU Shi-chao, LI Qing-liang, et al. Research on the embossment phenomenon of disc grinding by workpiece's removal rate[J]. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2019, 19(3): 739-755.
- [12] WANG Li-juan, HU Zhong-wei, CHEN Yue, et al. Material removal mechanism of sapphire substrates with four crystal orientations by double-sided planetary grinding[J]. *Ceramics international*, 2020, 46(6): 7813-7822.
- [13] FANG Cong-fu, ZHAO Zai-xing, HU Zhong-wei. Pattern optimization for phyllotactic fixed abrasive pads based on the trajectory method[J]. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, 2017, 30(1): 78-85.
- [14] HOCHENG H, TSAI H Y, TSAI M S. Effects of kinematic variables on nonuniformity in chemical mechanical planarization[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2000, 40(11): 1651-1669.
- [15] PAN Ji-sheng, YAN Qiu-sheng, XU Xi-peng, et al. Abrasive particles trajectory analysis and simulation of cluster magnetorheological effect plane polishing[J]. *Physics procedia*, 2012, 25: 176-184.
- [16] WANG Li-juan, HU Zhong-wei, FANG Cong-fu, et al. Study on the double-sided grinding of sapphire substrates with the trajectory method[J]. *Precision engineering*, 2018, 51: 308-318.
- [17] SUN Jing-long, QIN Fei, CHEN Pei, et al. A predictive model of grinding force in silicon wafer self-rotating grinding[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2016, 109: 74-86.
- [18] SUN Cong, LU Yue, XIU Shi-chao, et al. Analysis on the removal mechanism of disc grinding based on dynamic thermal-mechanical coupling[J]. *International journal of mechanics and materials in design*, 2021, 17(4): 831-853.
- [19] DEJA M, LICHTSCHLAG L, UHLMANN E. Thermal and technological aspects of double face grinding of C45 carbon steel[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2021, 64: 1036-1046.
- [20] YAN Yao, XU Jian, WIERCIGROCH M. Influence of workpiece imbalance on regenerative and frictional grinding chatters[J]. *Procedia IUTAM*, 2017, 22: 146-153.
- [21] LIU Yao, WANG Xiu-feng, LIN Jing, et al. An adaptive grinding chatter detection method considering the chatter frequency shift characteristic[J]. *Mechanical systems and signal processing*, 2020, 142: 106672.
- [22] CAO Yan-long, GUAN Jia-yan, LI Bo, et al. Modeling and simulation of grinding surface topography considering wheel vibration[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2013, 66(5-8): 937-945.