

DOI: 10.3901/JME.2022.07.295

# 切向超声振动辅助成形磨削齿轮的切削系数建模与试验研究\*

别文博<sup>1,2</sup> 赵波<sup>1</sup> 高国富<sup>1</sup> 向道辉<sup>1</sup> 赵重阳<sup>1</sup> 唐进元<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454000;

2. 平顶山学院电气与机械工程学院 平顶山 467000;

3. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室 长沙 410083)

**摘要:** 通过对磨粒-工件的运动特性分析,研究了切向齿轮超声成形磨削过程中分离加工机理,建立了超声振动作用下磨粒-工件的切削系数模型,得到了加工参数(砂轮速度、进给速度、超声频率和超声振幅)对切削系数的影响规律。针对切向齿轮超声成形磨削分离加工的特点,进行了齿轮超声成形磨削和普通磨削加工试验,获得不同加工参数对磨削力、磨削温度、残余应力和表面粗糙度的影响规律,并对磨削后表面的微观组织进行分析。试验结果表明:与普通磨削相比,在超声磨削过程中,磨削力、磨削温度和表面粗糙度在一定程度上得到有效的降低。三者的降低幅度随着砂轮转速、进给速度的增加而减小,磨削力、磨削温度的降低幅度随着超声振幅的增加而增大,而表面粗糙度的降低幅度随着超声振幅的增加呈先增加后减小的趋势;同时,齿面的残余压应力得到提高,其增加幅度随着砂轮转速、进给速度的增加而降低,随着超声振幅的增加而增大。此外,超声磨削可以显著改善齿面的纹理状态和表层的显微组织,并实现晶粒的细化。

**关键词:** 齿轮; 超声成形磨削; 切削系数; 磨削力; 磨削温度; 显微组织

**中图分类号:** TG580

## Analytical Modeling and Experimental Investigation on Cutting Coefficient during Tangential Ultrasonic Vibration-assisted Forming Grinding Gear

BIE Wenbo<sup>1,2</sup> ZHAO Bo<sup>1</sup> GAO Guofu<sup>1</sup> XIANG Daohui<sup>1</sup>  
ZHAO Chongyang<sup>1</sup> TANG Jinyuan<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000;

2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000;

3. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083)

**Abstract:** The separated machining mechanism in tangential ultrasonic vibration-assisted forming grinding gear (TUVAFGG) is investigated and the cutting coefficient model of grain-workpiece is erected on the basis of the kinematic analysis of the grain and the workpiece. And the relationship between the processing parameters (grinding wheel speed, feed rate, ultrasonic frequency and ultrasonic amplitude) and cutting coefficient is acquired. The TUVAFGG and conventional forming grinding gear (CFGG) experiment is performed to explore the characteristics of separated machining. A detailed comparative study of grinding force, grinding temperature, residual stress and surface roughness during the both machining methods is conducted to obtain the effect of various parameters on them, and analyze the microstructure of the gear surface. The experimental results presents that compared with CFGG, the grinding force, grinding temperature and surface roughness are effectively reduced to a certain extent with the increase of

\* 国家自然科学基金资助项目(U1604255, 51905157)。20210418 收到初稿, 20210819 收到修改稿

grinding wheel speed, feed rate and ultrasonic amplitude during TUVAFGG. The reduction ratio of the three decreases with an increase of grinding wheel speed and feed rate. The grinding force and grinding temperature reduction ratio increased with an increase of ultrasonic amplitude, however, the surface roughness reduction ratio first increases and then decreases. Simultaneously, the residual compressive stress of the tooth surface is improved, and the increase ratio decreases with the increase of grinding wheel speed and feed rate, while enhance with the increase of ultrasonic amplitude. In addition, under the action of ultrasonic vibration, the surface texture state and microstructure of the surface layer can be significantly improved, and the grain can be refined compared with CFGG.

**Key words:** gear; ultrasonic vibration-assisted forming grinding; cutting coefficient; grinding force; grinding temperature; microstructure

## 0 前言

齿轮是传递运动和动力的传动系统核心关键零件。目前, 高速运载、航空航天、新能源等高端装备的高速发展对传动齿轮的需求越来越大<sup>[1-2]</sup>。齿轮表面对其承载能力、摩擦磨损和使用寿命起着至关重要的作用。随着对齿轮使用性能要求的提高, 齿轮制造技术正经历从高精度“成形”制造向以表面完整性为目标的成形性协调的“抗疲劳制造”转变<sup>[3-4]</sup>。如何制造复杂工况下服役的高性能、长寿命齿轮已成为机械装备创新和高端装备制造业发展面临的重要挑战。

成形法磨齿是齿轮加工的常用方法之一, 在磨削过程中, 由于砂轮与齿面呈复杂的几何与物理多场耦合接触状态, 其磨削行为极为复杂, 二者之间的接触方式不利于磨削过程中热量的散失, 容易导致齿面出现加工缺陷<sup>[5-6]</sup>。因此, 在加工过程中对工艺参数的选取尤为重要, 如能采用新的加工工艺, 改善加工条件, 则对齿轮制造将具有重要的理论意义和应用价值。超声振动辅助磨削作为一种新型的特种复合加工技术, 在加工过程中会产生微分化、刚化、切削刃锋利化、应力和能量集中等效应<sup>[7]</sup>, 能够改变磨屑的形状<sup>[8]</sup>, 有效的降低磨削力和磨削比能<sup>[9]</sup>, 减少砂轮堵塞和磨损<sup>[10]</sup>, 提高材料的去除率和加工表面的完整性<sup>[11-12]</sup>。目前这种加工技术被广泛应用于硬脆材料和难加工材料的加工中<sup>[13-14]</sup>, 然而, 关于齿轮超声成形磨削的报道相对较少。

齿轮超声成形磨削是将超声振动与普通成形磨削相复合而形成的一种加工方法, 将超声振动施加在齿轮上, 利用成形砂轮对渐开线齿轮进行磨削。相对于砂轮而言, 施加于齿轮的振动方向沿砂轮的切向。关于切向超声振动辅助加工, 众多学者开展了相关的研究。TAWAKOLI 等<sup>[15]</sup>沿工件的进给方向施加超声振动, 对 42CrMo4 进行磨削加工, 结果表明磨削力降低约 60%。NIK 等<sup>[16]</sup>通过切向超声振动

磨削对 TC4 进行加工, 与普通磨削相比, 磨削力降低 13.5%~14.2%, 且随着磨削深度和进给速度的增加, 表面质量得以明显的改善。ZHANG 等<sup>[17]</sup>对切向超声振动车削 Ti6Al4V 进行研究, 结果表明, 当工件的进给速度增加时, 切削力明显增加。LANG 等<sup>[18]</sup>对切向超声振动磨削的加工特性进行研究时, 建立临界速度的模型, 并通过实验对模型进行验证。结果表明, 当切削速度小于临界速度时, 磨粒与工件之间的分离特性利于降低磨削力, 并提高表面质量和材料的去除率。以上的研究是对传统的超声振动磨削技术的研究, 在研究过程中主要考虑切削过程中的理论极限速度, 一旦切削速度接近或超过极限速度时, 便会限制超声振动的优势。为了突破超声振动加工极限速度的限制, SUI 等<sup>[19]</sup>提出了高速超声振动切削技术, 并开展了相关的研究。张翔宇等<sup>[20]</sup>采用试验的方法对钛合金的高速超声振动切削的可行性进行研究, 在刀具的振动方向和进给方向平行的条件下, 当切削速度远远超过临界速度时, 刀具与工件仍然可以实现分离, 结果显示可以提升刀具寿命高达 300%, 切削效率提高 90%, 切削力最大降低 50%。

上述的研究均表明, 切向超声振动可以明显的改善加工条件, 并获得较好的加工效果。在切向超声加工过程中, 工具-工件之间存在分离阶段, 为了揭示工具-工件之间的分离特性对加工效果的影响, 切削系数被作为一关键参数对工具-工件的分离特性进行表征<sup>[21-22]</sup>。NATH 等<sup>[23]</sup>从理论上分析超声振动参数和切削速度对超声车削的影响, 并且建立刀具-工件之间的切削系数模型, 并通过实验进行验证。结果表明, 切削系数的减小利于降低切削力, 减缓刀具磨损和提高加工表面质量。NI 等<sup>[24]</sup>基于切向超声振动加工中的断续加工机理, 建立了超声振动辅助铣削刀具-工件的切削系数模型, 并分析了超声振幅和切削速度对切削系数的影响, 并通过试验进行验证。结果表明超声振幅和切削速度的改变, 在一定程度上影响刀具-工件的切削系数, 从而导致

切削力及加工表面形貌发生显著的变化。以上的结果显示刀具-工件之间的切削系数对切削力、刀具寿命和表面质量具有重要的影响。与超声车削和超声铣削相比,磨削过程比较复杂,关于切向超声振动磨削过程中磨粒-工件分离特性理论分析较少,大多是采用试验的方法,并未对实验结果进行定量的分析。因此,有必要对切向超声磨削过程中磨粒-工件之间的切削系数进行理论分析,从而揭示切向超声磨削分离加工的本质。

为了获得齿轮超声成形磨削过程中磨粒-工件之间的分离状态对磨削效果的影响规律,本文首先对齿轮超声成形磨削过程的单颗磨粒的运动特性进行分析;其次,建立磨削过程中磨粒-工件之间的切削系数模型;最后通过试验进行验证,获得切削系数对磨削力、磨削温度、残余应力、表面粗糙度的影响规律,并对磨削后齿面的微观形貌和微观组织进行分析。

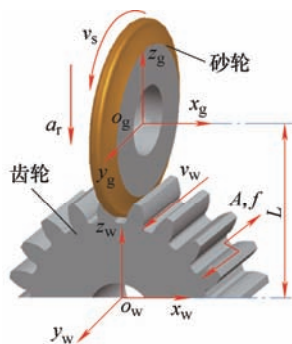
## 1 齿轮超声成形磨削运动特性

### 1.1 齿轮超声磨削几何学

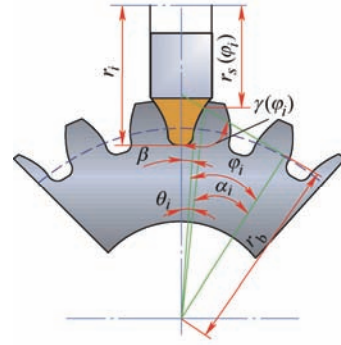
齿轮超声成形磨削的原理如图 1a 所示,在成形磨齿过程中,砂轮的轴线与齿轮的轴线互相垂直,砂轮截形的中心线和被磨齿槽的中心线重合。砂轮绕主轴高速旋转,齿轮沿齿宽方向作进给运动,齿轮在齿面磨削过程中处于静止状态,每磨完一个齿后进入下一个齿的磨削,其砂轮的转速为  $n$ , 齿轮的进给速度为  $v_w$ , 径向磨削深度为  $a_r$ 。

以砂轮与齿轮接触的截面为研究对象,如图 1b 所示,  $\theta_i$  为展角,  $\alpha_i$  为渐开线上任意位置的压力角,  $r_i$  为砂轮修整前的初始半径,  $\varphi_i$  为滚动角,  $\beta$  为基圆齿槽宽对应的圆心角的一半,  $\gamma(\varphi_i)$  为齿轮轮廓上任意点的曲率半径与砂轮中心和齿轮中心连线的夹角。其中滚动角  $\varphi_i$  与压力角  $\alpha_i$  和展角  $\theta_i$  之间存在如下关系

$$\varphi_i = \tan \alpha_i = \alpha_i + \theta_i \quad (1)$$



(a) 运动示意图



(b) 齿轮与砂轮之间的接触关系

图 1 齿轮超声成形磨削运动示意图

由图 1b 可知,沿渐开线方向砂轮的直径时刻发生变化,从而导致沿齿廓方向的砂轮线速度发生改变,砂轮直径和线速度的计算公式如下

$$d_s(\varphi_i) = 2[(r_b + r_i) - r_b \cos(\beta + \theta_i) / \cos \alpha_i] \quad (2)$$

$$v_s(\varphi_i) = \frac{n\pi d_s(\varphi_i)}{60 \times 1000} \quad (3)$$

式中,  $d_s(\varphi_i)$  为沿齿轮渐开线方向砂轮的直径;  $r_b$  为齿轮的基圆半径;  $n$  为砂轮的转速。

### 1.2 齿轮超声成形磨削运动特性

为了对齿轮超声成形磨削的运动特性进行分析,如图 1a 示,分别建立固结在工件上的坐标系  $o_w-x_wy_wz_w$  和固定在砂轮上的坐标系  $o_g-x_gy_gz_g$ 。其中,砂轮固定坐标系的  $x_g$  轴、 $y_g$  轴分别与工件固定坐标系中的  $x_w$ 、 $y_w$  重合,  $z_g$  轴与  $z_w$  轴之间的距离为  $L$ 。

在齿面磨削过程中,需要将砂轮廓形上磨粒的运动轨迹转换至被磨齿面,因此必须获得两个坐标系之间的联系,将位于砂轮固定坐标系中的一点  $P_g(x_g, y_g, z_g)$  转换至齿轮固定坐标系  $P_w(x_w, y_w, z_w)$  时,则转换矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $L=r_b+r_i$ 。

在磨削过程中,为便于分析,对磨削过程作以下假设。

(1) 砂轮表面各磨粒沿同一圆周等距分布。

(2) 在加工过程中超声振动保持稳定状态,即超声振幅、频率保持恒定。

假设在齿轮上施加的超声振动为

$$y' = A \sin(2\pi ft + \varphi') \quad (5)$$

式中,  $f$  为超声频率;  $A$  为超声振幅;  $\varphi'$  为超声振动的初始相位。

在齿轮磨削加工过程中, 渐开线上任一点  $P_w(x_w, z_w)$  坐标为

$$\begin{cases} x_w = r_b \sin(\varphi_i + \beta) - r_b \varphi_i \cos(\varphi_i + \beta) \\ z_w = r_b \cos(\varphi_i + \beta) + r_b \varphi_i \sin(\varphi_i + \beta) \end{cases} \quad (6)$$

当超声振动附加在齿轮工件上时, 则磨削区内点  $P_w$  的运动方程为

$$\begin{cases} x_w = r_b \sin(\varphi_i + \beta) - r_b \varphi_i \cos(\varphi_i + \beta) \\ y_w = A \sin(2\pi ft + \varphi') + (v_s + v_w)t \\ z_w = r_b \cos(\varphi_i + \beta) + r_b \varphi_i \sin(\varphi_i + \beta) \end{cases} \quad (7)$$

根据转换矩阵, 可得到砂轮上磨粒的运动方程为

$$\begin{cases} x_g = r_b \sin(\varphi_i + \beta) - r_b \varphi_i \cos(\varphi_i + \beta) \\ y_g = A \sin(2\pi ft + \varphi') + (v_s + v_w)t \\ z_g = L + r_b \cos(\varphi_i + \beta) + r_b \varphi_i \sin(\varphi_i + \beta) \end{cases} \quad (8)$$

如图 2 所示, 齿轮渐开线的极坐标方程为

$$\begin{cases} r_i = \frac{r_b}{\cos \alpha_i} \\ \theta_i = \tan \alpha_i - \alpha_i \end{cases} \quad (9)$$

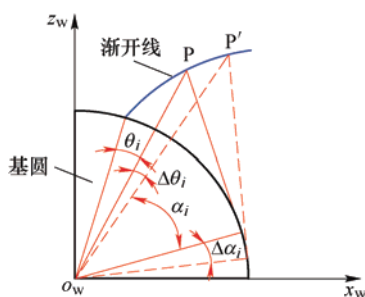


图 2 齿轮渐开线上的移动点

假设渐开线上任一点的渐开角是  $\theta_i$ , 当  $P$  有一个增量  $\Delta\theta_i$  时, 渐开线弧长增量  $\widehat{PP'}$ , 则从渐开线起点到渐开线上任一点之间的弧长

$$\begin{aligned} dl = \widehat{PP'} &= \int_0^{\Delta\theta_i} \sqrt{\frac{r_b^2}{\cos^2 \theta_i} + \frac{r_b^2}{\sin^2 \theta_i}} d(\tan \theta_i - \theta_i) = \\ &= \frac{r_b}{2} \tan^2(\varphi_i - \arctan \varphi_i) \end{aligned} \quad (10)$$

在齿轮磨削过程中, 由于砂轮的径向磨削深度远小于砂轮与齿轮中心之间的距离 ( $a_r \ll d_s$ ), 因此, 可得砂轮上任一点  $P(x_p, y_p)$  沿  $z$  向的线速度

$$v_z(\varphi_i) = 2\pi n(d_s(\varphi_i) - z_p) =$$

$$2\pi n \left\{ 2 \left[ (r_b + r_i) - r_b \cos(\beta + \theta_i) / \cos \alpha_i \right] - \left[ r_b \cos(\varphi_i + \beta) + r_b \varphi_i \sin(\varphi_i + \beta) \right] \right\} \quad (11)$$

对于齿轮成形磨削时, 在超声振动附加的条件下, 磨粒的运动轨迹发生变化, 由于  $x$  方向的速度很小, 故

$$\begin{aligned} v_e &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \approx \\ &= \left\{ \left[ 2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi') + (v_s + v_w) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. (2\pi n)^2 \times \left\{ 2 \left[ (r_b + r_i) - r_b \cos(\beta + \theta_i) / \cos \alpha_i \right] - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left[ r_b \cos(\varphi_i + \beta) + r_b \varphi_i \sin(\varphi_i + \beta) \right] \right\}^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $v_e$  为磨粒的合速度。

在超声振动作用下, 由于磨粒运动方向与主切削方向的夹角很小, 忽略二者之间的夹角对切削速度的影响<sup>[25]</sup>。取  $f = 20 \text{ kHz}$ ,  $A = 4 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $v_w = 0.02 \text{ m/s}$ ,  $d_s = 80 \text{ mm}$ ,  $n = 2000 \text{ r/min}$ , 可以获得单颗磨粒的运动速度曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 在齿轮超声磨削过程中, 在超声振动作用下, 磨削速度呈现周期性的变化, 随着滚动角的增加, 速度呈减小的趋势, 故磨削时的运动弧长为

$$\begin{aligned} l_v &= \int_0^{\Delta t} v_e dt \approx \\ &= \int_0^{\Delta t} \left\{ \left[ 2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi') + (v_s + v_w) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. (2\pi n)^2 \left\{ 2 \left[ (r_b + r_i) - r_b \cos(\beta + \theta_i) / \cos \alpha_i \right] - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left[ r_b \cos(\varphi_i + \beta) + r_b \varphi_i \sin(\varphi_i + \beta) \right] \right\}^2 \right\}^{1/2} dt \end{aligned} \quad (13)$$

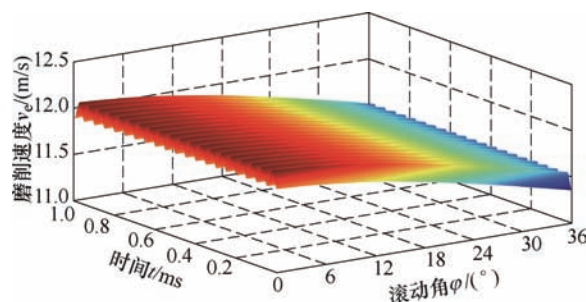


图 3 齿轮超声磨削速度变化

## 2 切向超声振动切削系数模型

### 2.1 超声参数和磨削参数对分离特性的影响

在切向超声振动辅助磨削过程中, 当工件被施加高频振动后, 在加工过程中会出现分离式加工,

实现断续磨削。在一个振动周期单颗磨粒与工件之间的运动情况如图 4 所示。由图 4 可知, 在 1-2 阶段, 磨粒与工件处于接触阶段, 在 2-4 阶段, 磨粒与工件处于分离阶段。主要是由于在磨削过程中磨粒与工件之间的相对速度发生变化, 从而导致磨粒-工件接触状态发生改变。在位置 1 处, 磨粒相对于工件在切削方向上的切削速度大于振动速度时, 磨粒与工件开始接触; 当磨粒达到位置 2 时, 在切削方向上磨粒相对于工件的切削速度等于振动速度, 磨粒即将与工件分离; 在位置 3 时, 由于振动速度大于切削方向上磨粒相对于工件的切削速度, 即沿砂轮旋转的反向, 磨粒与工件分离; 在磨粒与工件分离阶段, 随着振动速度的减小, 存在一时刻使其等于磨粒与工件之间的相对切削速度, 即达到位置 4 时, 磨粒重新与工件接触。因此, 在切向超声磨削过程中, 磨粒的运动方式是回旋式运动。

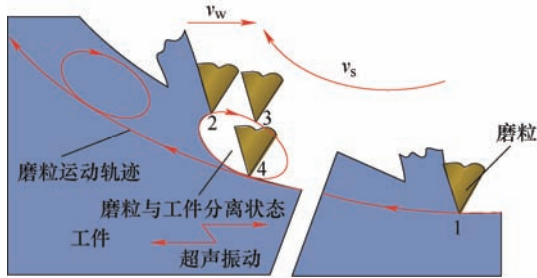


图 4 工件-磨粒分离示意图

取一个振动周期为研究对象, 磨粒的切削过程如图 5 所示, 在磨削过程中, 在一个运动周期内磨粒在  $t=0$  时从原点出发, 当  $t=t_1$  时磨粒与工件接触, 在  $t=t_2$  时刻切削速度小于振动速度, 磨粒与工件分离。因此, 一个周期内磨粒与工件的接触时间  $t_c=t_2-t_1$ 。当磨粒进入下一周期,  $t=t_1'$  和  $t=t_2'$  分别表示磨粒与工件的接触点和分离点。由于工件在振动的同时, 砂轮在高速旋转, 沿切削方向的速度分量增大, 这就导致磨粒与工件的分离时间相对于上一周期延长了  $\Delta t$ 。

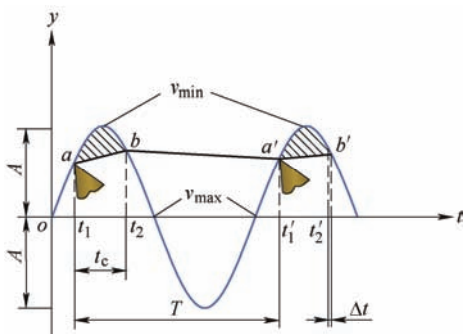


图 5 切向超声振动磨粒切削过程

在实际的磨削过程中, 当工件的进给速度小于振动速度时, 磨粒与工件将出现分离现象。然而, 在砂轮的高速旋转条件下, 磨粒与工件之间的分离特性将会受到砂轮线速度的影响。因此, 有必要对磨削过程中的分离特性进行分析。如图 6 所示, 表示砂轮沿轴线方向上任意截面上单颗磨粒运动速度的分解示意图, 由前述可知, 磨粒的速度主要包括  $y$  方向和  $z$  方向的速度。在实际磨削过程中, 只有  $v_y$  起切削作用, 则

$$v_y = v_s \cos \Theta = \frac{n\pi d_s(\varphi_l)}{1\ 000} \cos \Theta \quad (14)$$

式中,  $\Theta$  单颗磨粒的转动角度。

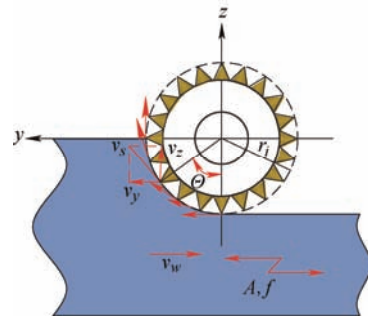


图 6 单颗磨粒运动的速度分解示意图

工件上施加超声振动, 则工件的振动速度为

$$v_y' = 2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi') \quad (15)$$

当超声振动施加在工件上时, 砂轮上单颗磨粒在  $y$  向上的速度包括  $v_y = v_s \cos \Theta + v_w$  与高频振动速度  $v_y'$ 。由于砂轮在对齿面进行加工时, 二者之间是线接触, 任意磨粒对应的滚动角为定值, 因此在分析分离条件时忽略滚动角对分离状态的影响。当磨粒的振动速度与  $y$  方向上的切削速度相等时, 磨粒处于临界分离状态, 即:

$$2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi') = v_s \cos \Theta + v_w \quad (16)$$

令

$$f(\Theta) = v_s \cos \Theta + v_w - 2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi') \quad (17)$$

$f(\Theta)$  表示单颗磨粒在切削方向上相对于工件的切削速度与振动速度之间的关系, 由式(17)可得, 欲实现磨粒-工件之间的分离, 则  $f(\Theta) < 0$ 。假设超声振动的初始相位  $\varphi'=0$ , 根据式(17), 可以得到超声参数(超声振幅、超声频率)和加工参数(砂轮转速、进给速度)对分离加工特性的影响。超声参数对分离特性的影响如图 7 所示, 由图 7a 和 7b 可知, 随着振幅与频率的增加, 实现分离加工的临界转角呈



减小的趋势。由于砂轮的高速旋转,在砂轮与工件接触的过程中,砂轮达到临界转角的时间很短,由此可见在磨削过程中在切削方向上能够实现分离加工。从二者的影响规律来看,振幅对分离特性的影响更加显著。

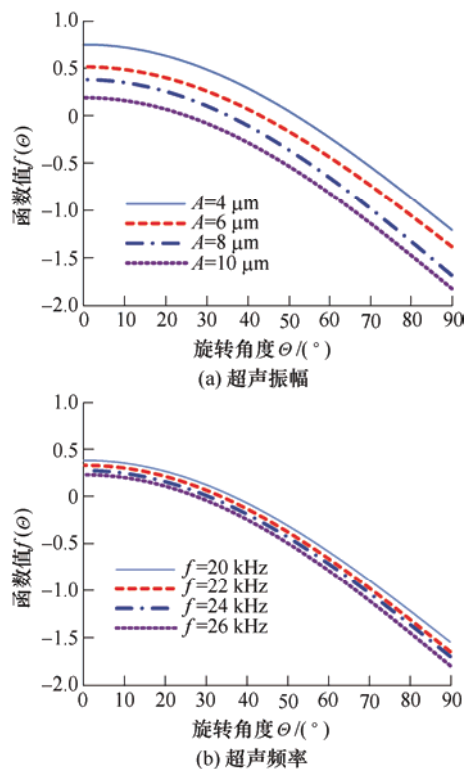
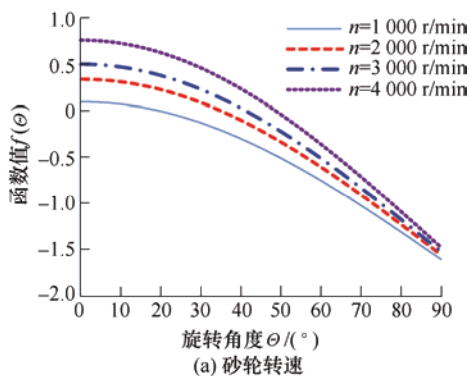
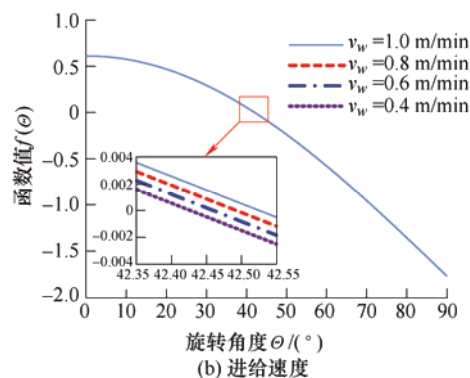


图7 超声参数对分离特性的影响

砂轮转速和进给速度对分离特性的影响如图8所示。由图8a和8b可知,当砂轮转速和进给速度增加时,实现分离的临界转角随之增加。与进给速度相比,砂轮转速对分离特性的影响更加显著。然而针对切向超声振动加工,如果砂轮速度过高,远大于临界速度时,超声振动效果将会弱化,无法达到预期的加工效果,因此可以对超声参数、砂轮转速及进给速度进行控制,从而实现分离加工。



(a) 砂轮转速



(b) 进给速度

图8 砂轮转速和进给速度对分离特性的影响

## 2.2 切削系数模型

在超声磨削过程中,由于超声振动的频率远大于主轴转动的频率,因此磨粒在相邻周期内的始接触点保持不变,由此可以得到以下关系

$$v_s \cos \theta + v_w + 2\pi f A \cos(2\pi f t_2' + \varphi') = 0 \quad (18)$$

$$v_s \cos(\theta - 2\pi f \Delta t) + v_w + 2\pi f A \cos(2\pi f t_2 + \varphi') = 0 \quad (19)$$

由于  $\Delta t = t_2' - (T + t_2)$ , 式(19)可以转化为

$$v_s \cos(\theta - 2\pi f \Delta t) + v_w + 2\pi f A \cos(2\pi f t_2 + \varphi') = 0 \quad (20)$$

当磨粒与工件在  $t_2$  处分离后,在下一个周期的  $t_1'$  处再次接触时,工件运动的路程与磨粒位置变化的路程相等,其关系可以由式(21)来表示。

$$A \sin(2\pi f t_1' + \varphi') - A \sin(2\pi f t_2 + \varphi') = - \int_0^{t_1' - t_2} [v_s \cos(\theta - 2\pi f(t_2' - t_2) + 2\pi f t) + v_w] dt \quad (21)$$

由上述可知,磨粒在磨削过程中与工件存在接触阶段和分离阶段,为了对磨削过程中砂轮转速、进给速度、超声振幅和超声频率对磨粒-工件之间的分离特性进行分析,在超声振动辅助磨削过程中引入切削系数  $\lambda$ ,用来衡量切削阶段所占一个振动周期的百分比,其定义为单颗磨粒在一个振动周期内的净切削时间所占的比例,表达式为

$$\lambda = t_c / T \quad (22)$$

式中,  $t_c = t_2' - t_1' = t_2 - t_1$ ,表示一个振动周期内的净切削时间。

将式(22)代入(21),根据三角函数关系,可得到

$$\begin{aligned} & A \sin(2\pi f t_1' + \varphi') - A \sin(2\pi f t_2 + \varphi') = \\ & 2A \cos[\pi f(2t_2' - T - \Delta t) - \lambda\pi + \varphi'] \times \\ & \sin[\pi f(T + \Delta t) - \lambda\pi] = \\ & - \int_0^{t_1' - t_2} (v_s \cos(\theta - 2\pi f(t_2' - t_2) + 2\pi f t) + v_w) dt \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)可进一步简化为

$$\cos[\pi f(2t_2' - T - \Delta t) - \lambda\pi + \varphi'] \sin[\pi f(T + \Delta t) - \lambda\pi] = \frac{1}{4A\pi f} \left[ v_s [\sin(\Theta - 2\pi f(T + \Delta t)) - \sin(\Theta - 2\lambda\pi)] - 2\pi v_w (f(T + \Delta t) - \lambda) \right] \quad (24)$$

式(24)表示磨粒在磨削过程中磨粒-工件之间的切削系数模型,可以看出磨粒-工件的切削系数与砂轮转速、进给速度、超声频率、超声振幅和转角 $\Theta$ 之间存在一定的关系。超声频率和超声振幅对切削系数的影响如图9所示,图9a表示在不同的砂轮转速下,超声频率对切削系数的影响。

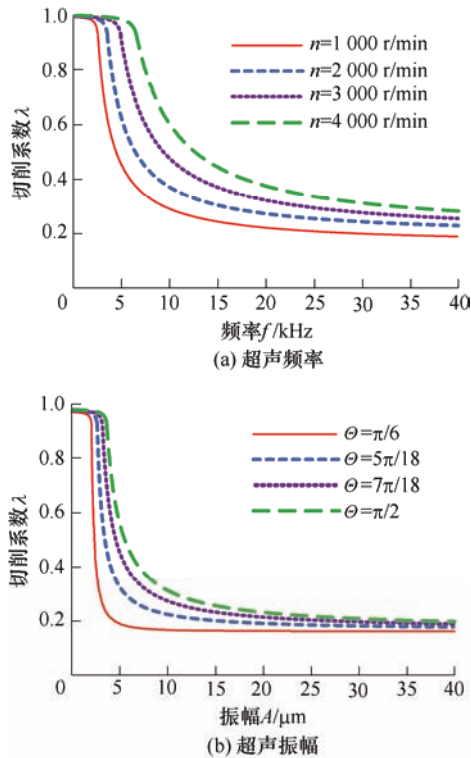


图9 超声参数对切削系数的影响

由图9可知,当砂轮转速保持不变时,切削系数随着超声频率的增加而减小。反之,切削系数随着砂轮转速的增加而逐渐增大。超声振幅对切削系数的影响如图9b所示,保持砂轮速度和超声频率不变的情况下,切削系数随着超声振幅的增加而减小,当振幅增加到一定程度时,切削系数趋于稳定;而随着转角的增加,切削系数逐渐增大,但变化并不明显。

砂轮速度和进给速度对切削系数的影响如图10所示。切削系数随着砂轮速度和进给速度的增大而逐渐变大,受到转动角度的影响,切削速度并不能无限增大。当转动角度不同时,极限磨削速度随之变化。随着转角的增加,临界磨削速度呈现上升的趋势。以上表明,在不同的转角下,当砂轮速

度和进给速度增加到一定值时,切系数趋近于1,表明超声振动的优势逐渐被弱化,超声断续加工变为普通加工。因此,只有当超声频率、振幅和转动角度取值在一定范围内时,才能实现断续加工。

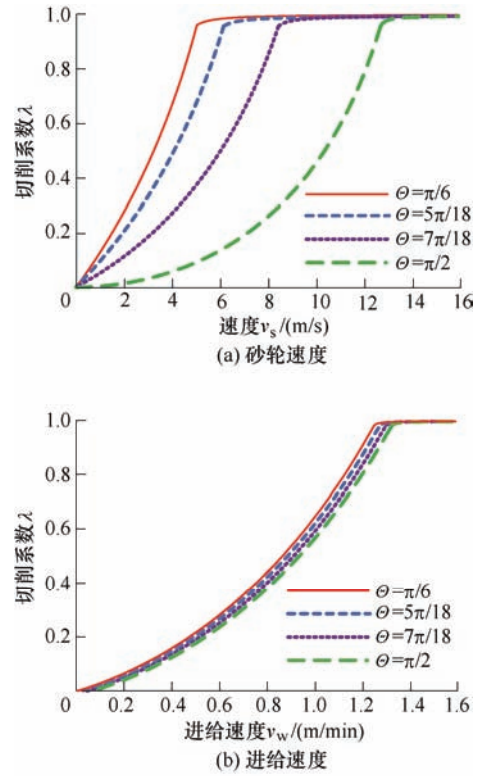


图10 磨削参数对切削系数的影响

### 3 试验设备与试验条件

齿轮超声成形磨削试验平台搭建在 VMC850E 三轴立式加工中心上,整体实验装置如图11a所示,主要包括机床加工系统、超声振动系统、磨削力信号采集系统和磨削温度采集系统四部分。超声振动系统主要包括超声波发生器、换能器、变幅杆和齿轮,如图11b所示。超声电源将高频电信号传递给换能器,通过换能器的逆压电效应将高频电信号转换成高频的机械振动,经变幅杆的放大作用,将机械振动传递至工件齿轮,使齿轮产生纵向振动。

磨削力测量系统主要包括 Kistler9257B 测力仪、电荷放大器(5070A)、数据采集卡和 DynoWare 软件。磨削温度采集系统包括 K 型热电偶和快速响应热电偶采集仪(HR-USB-T008)。

试验选用的砂轮为成形 CBN 砂轮,齿轮为模数 3 mm,齿数 21,齿宽 20 mm 的渐开线圆柱齿轮。为了便于在齿面上布置测温孔,利用线切割每隔 2 个齿切掉 1 个齿,采用电火花在齿面上进行打孔。

由于在磨削过程中, 砂轮同时与一对齿面接触, 因此分别在每个齿面的分度圆位置布置 1 个测温孔, 如图 11b 所示。在实验过程中, 仅对磨削表层的温度进行测量。

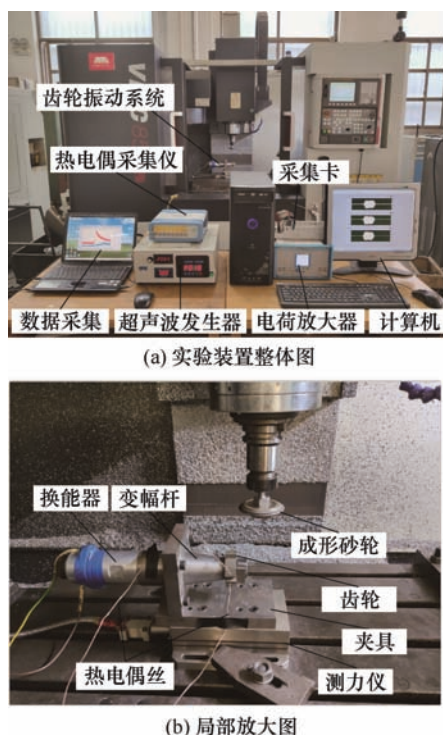


图 11 齿轮超声成形磨削实验装置

在试验设计时, 齿轮振动系统的设计频率为 20 kHz, 实测的谐振频率为 20.36 kHz, 对于振动系统而言, 谐振频率确定后, 在试验过程中将频率作为定量来考虑。因此, 在试验过程中仅改变其他加工参数(砂轮转速、进给速度和超声振幅)。试验过程中通过改变超声电源的功率百分比从而实现超声振幅的改变。齿轮超声磨削的试验条件如表 1 所示。在齿轮超声成形磨削过程中, 关闭超声电源, 即为普通磨削。

表 1 齿轮磨削试验条件与加工参数

类型	参数	内容
砂轮	砂轮直径/mm	80
	砂轮粒度/(#)	400
	径向进给量 $a_r/\mu\text{m}$	30
磨削参数	主轴转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000
	进给速度 $v_w/(\text{m}/\text{min})$	0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2
	冷却方式	无冷却
齿轮	材料	12Cr2Ni4A
超声参数	超声频率 $f/\text{kHz}$	20.36
	超声振幅 $A/\mu\text{m}$	0, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4
加工方法	超声磨削, 普通磨削	

为了分析切削系数对磨削效果的影响, 磨削后

齿面的残余应力采用 X 衍射仪(PROTO-XRD)进行测量, 每组参数测试 3 个点, 取平均值作为试验结果。

加工完成后采用白光干涉仪(BRUKER)对齿面的表面粗糙度进行测量。由于需要研究磨削沟槽之间的起伏程度对表面的影响, 因此仅对垂直于进给方向的表面粗糙度进行测量。采用场发射扫描电子显微镜(Merlin Compact)对加工后的表面微观形貌进行测量。

将试件的横截面经过研磨、抛光处理后, 采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀后, 在金相显微镜(FX41MW)下对其金相组织进行观察。

采用聚焦离子束(FIB)制备用于透射电子显微镜(TEM)观测的试样, 并利用透射电镜(Talos F200S)对横截面的微观结构进行观察, 所用加速电压为 200 kV。

## 4 试验结果与讨论

### 4.1 加工参数对磨削力的影响

图 12 表示在普通磨削和超声磨削过程中, 磨削力随砂轮转速、进给速度和超声振幅的变化规律。为便于描述, 用  $R_F$  表示在相同的条件下超声磨削时磨削力相对于普通磨削时磨削力的降低幅度, 其大小表示超声振动作用对磨削过程的影响程度, 可由下式求得

$$R_F = \frac{F_c - F_u}{F_c} \quad (25)$$

式中,  $F_c$  表示普通磨削的磨削力,  $F_u$  表示超声磨削的磨削力。  $F_{nc}$ 、 $F_{tc}$  和  $F_{nu}$ 、 $F_{tu}$  分别表示普通磨削和超声磨削的法向磨削力和切向磨削力;  $R_{F_n}$ 、 $R_{F_t}$  分别表示法向磨削力和切向磨削力的降低幅度。

由图 12a 可知, 保持径向磨削深度和进给速度不变时, 随着砂轮转速的增加, 普通磨削和超声磨削的法向和切向磨削力均呈减小的趋势。与普通磨削相比, 超声磨削过程中, 随着砂轮转速的增加, 法向磨削力降低 5.3%~29.3%, 切向磨削力降低 4.6%~21.9%。结果表明, 随着砂轮转速的增加, 磨削力的降低幅度减小, 表明超声振动作用减弱。同时, 切削系数增加, 表明磨粒与工件之间的分离作用减弱, 导致磨削力的降低幅度减小。由图 12b 可知, 保持径向磨削深度和砂轮转速不变时, 随着进给速度的增加, 在普通磨削和超声磨削的法向和切向磨削力均呈增加的趋势。与普通磨削相比, 超声磨削过程中, 随着进给速度的增加, 法向磨削力降低 6.1%~28.6%, 切向磨削力降低 4.1%~21.3%。



结果表明, 随着进给速度的增加, 磨削力的降低幅度减小, 表明超声振动作用减弱。主要是由于随着进给速度的增加, 切削系数增加, 表明磨粒与工件之间的分离作用减弱, 导致磨削力的降低幅度减小。由图 12c 可知, 保持径向磨削深度、砂轮转速和进给速度不变时, 随着超声振幅的增加, 法向磨削力和切向磨削力呈减小的趋势, 法向磨削力降低 7.1%~38.6%, 切向磨削力降低 6.2%~36.2%。结果表明, 随着超声振幅的增加, 磨削力的降低幅度增加, 表面超声振动作用增强。这主要归因于随着超声振幅的增加, 切削系数减小, 表明磨粒-工件之间的分离作用增强, 导致磨削力的降低幅度增加。

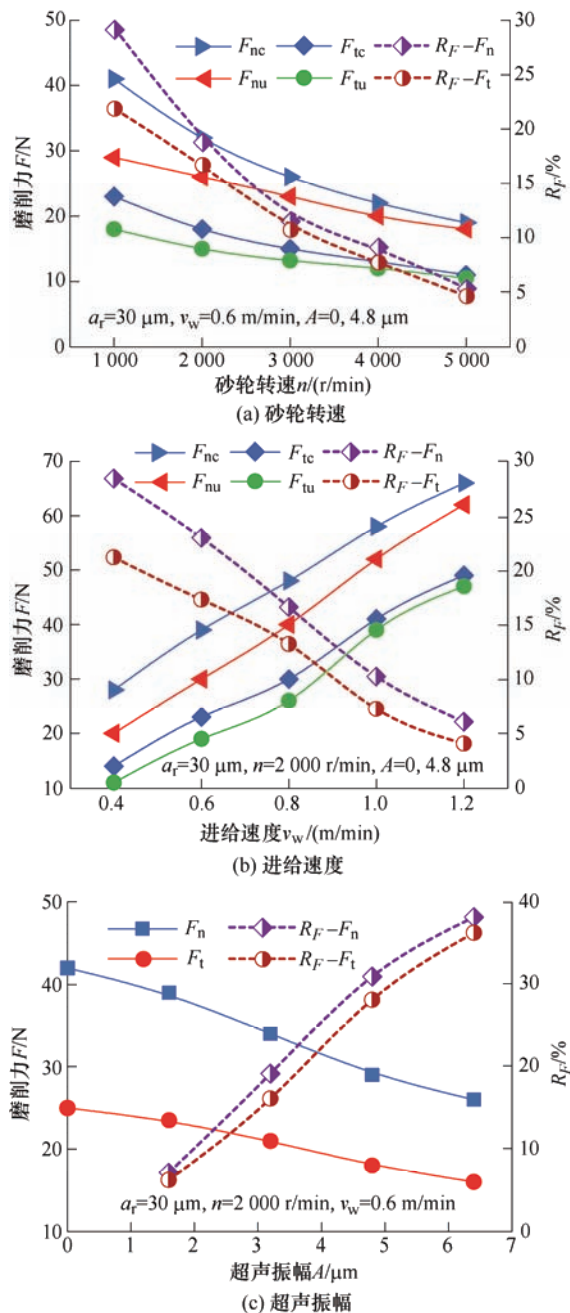


图 12 加工参数对磨削力的影响

## 4.2 加工参数对磨削温度的影响

加工参数对磨削温度的影响如图 13 所示, 图的上方表示与普通磨削相比, 超声磨削过程中, 磨削温度的降低程度。 $T_c$ 、 $T_u$  分别表示普通磨削和超声磨削的温度。由图 13a 和 13b 可知, 随着砂轮转速的增加, 磨削温度呈增加的趋势。与普通磨削相比, 在超声磨削过程中, 磨削温度降低 5.3%~23.4%, 且随着砂轮转速的增加降低幅度减小; 随着进给速度的增加, 磨削温度呈减小的趋势, 在超声磨削过程中, 磨削温度降低 4.8%~21.6%, 且随着进给速度的增加降低幅度减小, 主要是由于随着砂轮转速和进给速度的增加, 切削系数增大, 导致磨粒-工件之间的分离作用减弱, 从而导致磨削温度降低幅度减小。

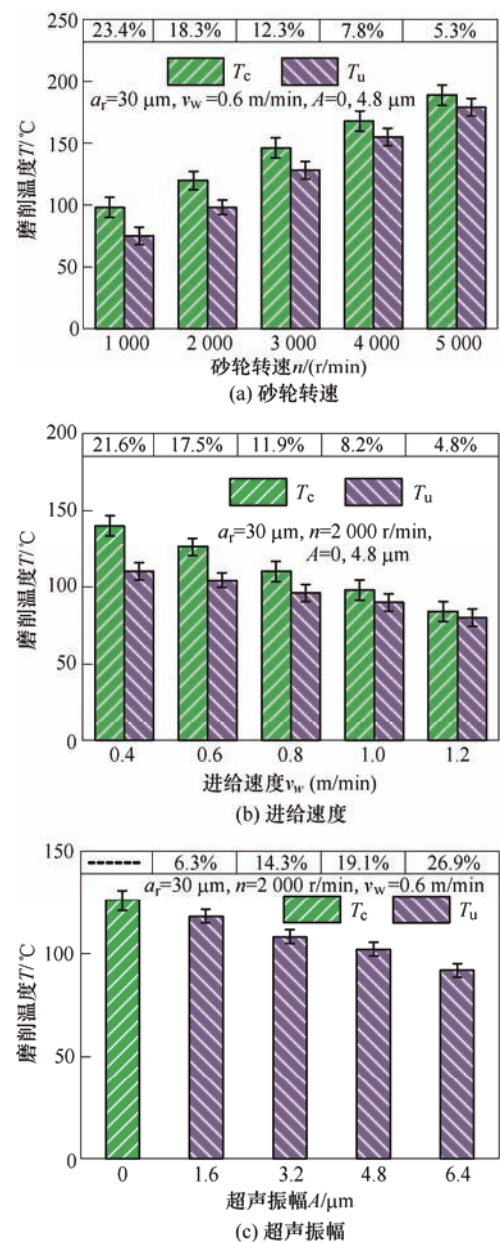


图 13 加工参数对磨削温度的影响

由图 13c 可知,随着超声振幅增加,磨削温度呈减小的趋势。与普通磨削相比,在超声磨削过程中,磨削温度降低 6.3%~26.9%,且随着超声振幅的增加降低幅度增大。

### 4.3 加工参数对残余应力的影响

加工参数对齿面残余应力的影响如图 14 所示。由图可知,在普通磨削和超声磨削过程中,在齿面引入残余压应力。由图 14a 和 14b 可知,随着砂轮转速和进给速度的增加,在两种加工方法下,残余应力分别呈现降低和增加的趋势。与普通磨削相比,超声磨削可以显著提高齿面的残余压应力,随着砂轮转速和进给速度的增加,残余压应力分别增加 4.3%~21.4%和 5.2%~22.9%,其增加幅度随着二者的增加而减小。这主要是由于在切向超声振动作用下,受到相邻磨粒的作用,会增加磨粒对齿面的往复复压效果,从而引起残余压应力的提高。而随着

二者的增加,切削系数随之增加,导致磨粒-工件之间的分离作用减弱,从而使增加幅度有所降低。由图 14c 可知,随着超声振幅增加,残余压应力呈增加的趋势,最大增加约 18.6%。

综上所述,由加工参数对磨削力、磨削温度和残余应力的影响规律可知,随着砂轮转速、进给速度和超声振幅的改变,导致磨粒-工件之间的切削系数发生改变,从而影响加工特性。同时也表明在切向超声磨削过程中,磨粒-工件之间的分离特性对加工有着重要的影响。因此,在磨削过程中,需要合理的选择加工参数。

### 4.4 加工参数对表面粗糙度的影响

加工参数对表面粗糙度的影响如图 15 所示,其中  $R-Ra$  表示超声磨削相对于普通磨削表面粗糙度的减小幅度。如图 15a 和 15b 所示,表面粗糙度随着砂轮转速的增加而降低,随着进给速度的增加而增大。砂轮转速和进给速度对应的  $R-Ra$  分别是 5.5%~21.3%和 5.9%~20.6%。主要归因于切削系数随着砂轮转速和进给速度的增加而增大,导致在较高的砂轮转速和进给速度下表面粗糙度变化不明显。图 15c 表示超声振幅对表面粗糙度的影响, $R-Ra$  为 5.6%~15.3%。表面粗糙度随着超声振幅的增加呈先减小后增加的趋势。虽然切削系数随着超声振幅的增加而降低,但较高的超声振幅会使磨粒对工件产生较大的冲击作用,引起表面粗糙度略有增加。

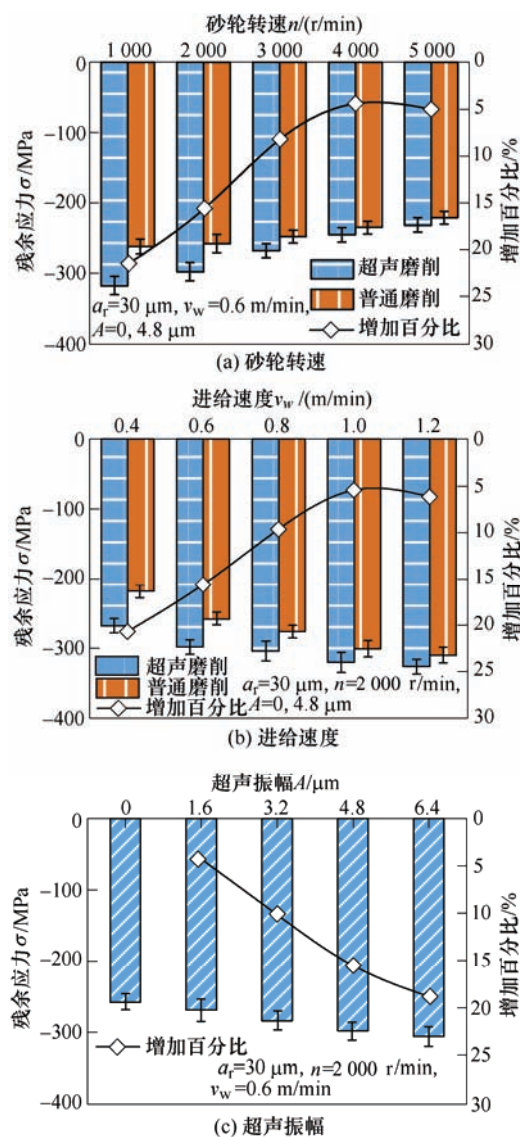
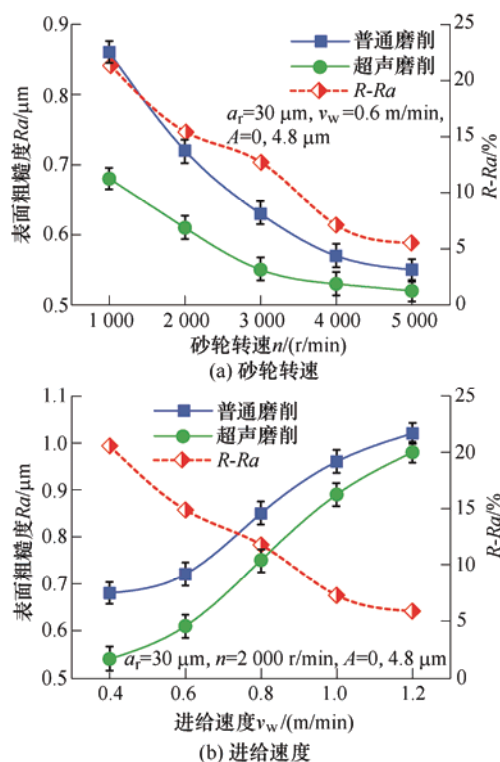


图 14 加工参数对残余应力的影响





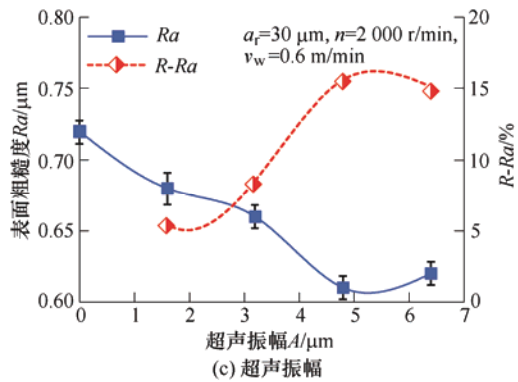


图 15 加工参数对表面粗糙度的影响

图 16 为在普通磨削和超声磨削中齿轮表面的微观形貌。由图 16 可知，超声磨削下齿轮表面的纹理看起来平坦而光滑。在普通磨削加工中，由于有效磨刃之间存在间隔，在平行于磨削方向上，工件表面残留下磨粒未切除的残余材料，呈现出明显的沟槽和隆起现象。然而在超声磨削加工过程中，由于超声振动的存在，改变了工件与砂轮的相对运动关系，在磨削接触区，超声振动导致磨粒对工件存在往复的冲击作用，磨粒对工件材料的超声频率冲击作用会对工件已磨表面产生影响，并改变工件已磨表面的微观几何形貌，导致工件表面形貌变得平整和光滑。

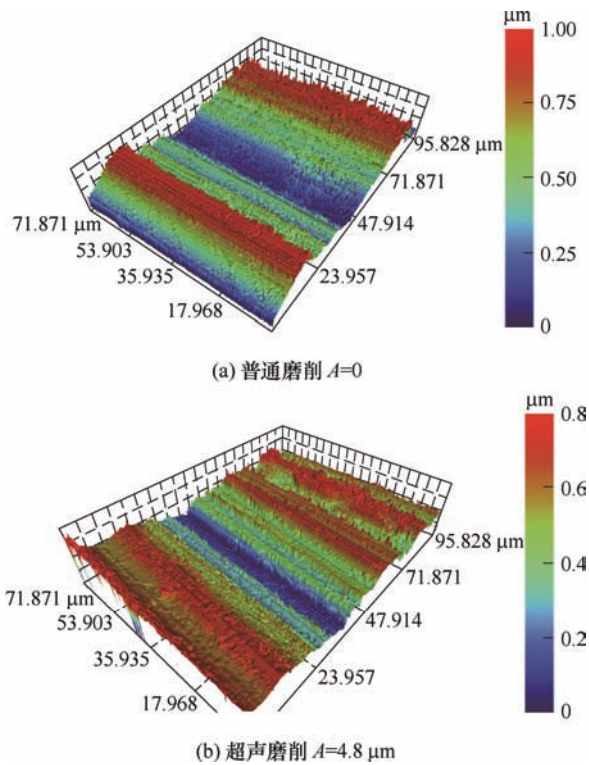
图 16 齿面表面微观形貌  
( $a_r=30\mu\text{m}$ ,  $n=2000\text{ r/min}$ ,  $v_w=0.6\text{ m/min}$ )

图 17 是普通磨削和超声磨削加工的齿面微观形貌。从图 17 中可知，在普通磨削下工件表面磨削沟槽的高度起伏不同，沟槽处存在塑性隆起和堆积，并在沟槽壁上存在崩裂的现象。而在超声磨削作用下，磨削沟槽相对比较平滑、规整，表面可以明显看到往复复压的效果，从而使表面变得光滑，表面纹理更加均匀。

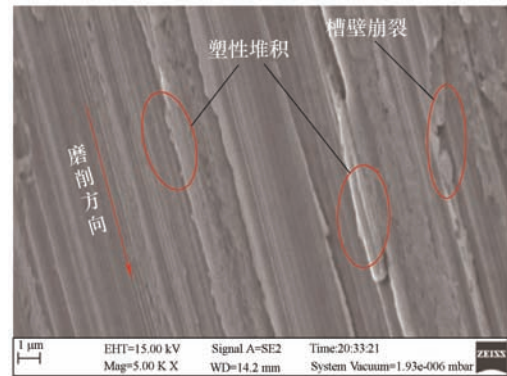
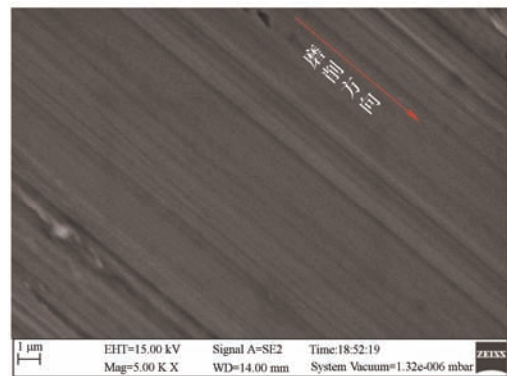
(a) 普通磨削  $A=0$ (b) 超声磨削  $A=4.8\mu\text{m}$ 

图 17 齿面表面 SEM 照片

( $a_r=30\mu\text{m}$ ,  $n=2000\text{ r/min}$ ,  $v_w=0.6\text{ m/min}$ )

#### 4.5 显微组织

普通磨削和超声磨削作用下金相组织的变化如图 18 所示。由图 18 可知，齿轮表面经过磨削后，存在明显的塑性变形，普通磨削和超声磨削的变形层深度分别为  $7.2\mu\text{m}$  和  $8.2\mu\text{m}$ 。与普通磨削相比，超声磨削后的变形层深度提高约 13.8%。主要是由于在磨削过程中，磨粒与工件材料之间的滑擦、耕犁与切削作用，使得磨粒及其周边的工件材料在力热作用下发生强烈的塑性变形。此外，在切向超声振动作用下，根据工件的等效硬度特性，材料在一定程度上被软化<sup>[26]</sup>，导致材料的塑性变形程度增加，从而导致变形深度的提高。

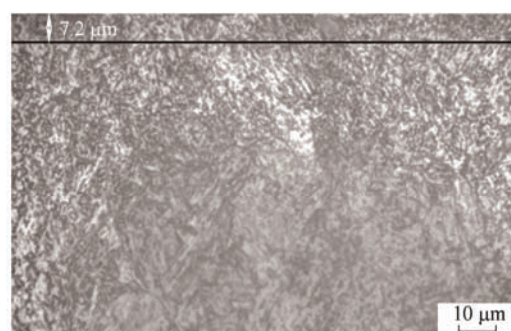
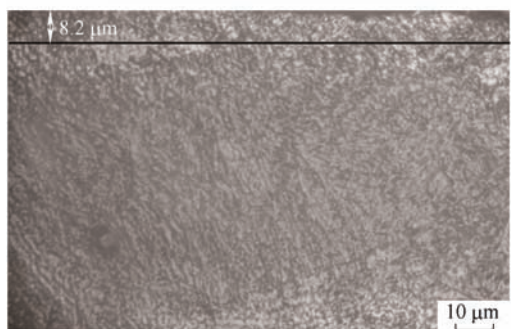
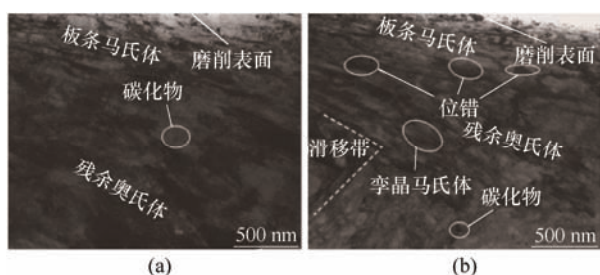
(a) 普通磨削  $A=0$ (b) 超声磨削  $A=4.8 \mu\text{m}$ 

图 18 磨削后的金相组织

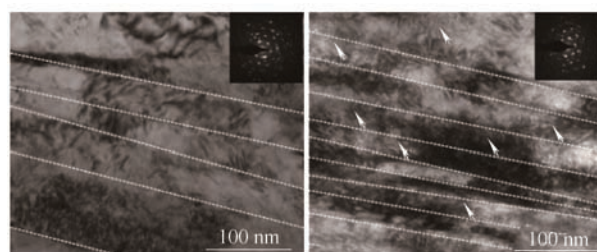
( $a_r=30 \mu\text{m}, n=2000 \text{ r/min}, v_w=0.6 \text{ m/min}$ )

图 19 表示超声磨削和普通磨削后 TEM 图像, 图 19a 和 19b 分别表示普通磨削和超声磨削后的表层的截面 TEM 图像, 可以看出经过磨削后工件的表层发生塑性变形。与图 18 相比, 更能直观的对表层的塑性变形进行解释, 在超声磨削后的表层出现位错和孪晶马氏体。图 19c 和 19d 表示表层以下 500 nm 的微观组织, 从图中可以看出在磨削作用下在表层形成层状纳米晶层。在普通磨削过程中形成宽度在 40~80 nm 之间的层状纳米晶层, 而在超声磨削下的纳米晶层宽度在 20~50 nm 之间, 且在层状纳米晶内部含有大量的孪晶, 如图 19d 白色箭头所示。与普通磨削相比, 超声磨削可以显著改善材料的微观组织, 并使晶粒细化。主要是由于工件在高频振动条件下, 超声能场的作用导致材料的晶粒发生位错、孪晶, 在位错-孪晶的交互作用下导致晶粒细化。



(a)

(b)



(c)

(d)

图 19 普通磨削和超声磨削截面的 TEM 照片

## 5 结论

(1) 切向超声振动的施加改变磨粒-工件之间的接触状态, 实现二者之间的定期分离, 使加工方式由连续磨削转变为断续磨削。磨粒-工件之间的分离特性由砂轮转速、进给速度、超声频率和振幅决定, 并受到砂轮旋转角度的影响。与超声频率和进给速度相比, 超声振幅和砂轮转速对磨粒-工件之间的分离特性影响更为显著。

(2) 切削系数在一定程度上对磨粒-工件之间的分离特性进行表征, 其随着超声频率和超声振幅的增加而减小, 随着砂轮速度和进给率的增加而增加。当砂轮速度和进给速度超过临界速度时, 切削系数趋近于 1, 表明超声振动的效果减弱。

(3) 随着砂轮转速和进给速度的提高, 切削系数随之增加, 导致法向磨削力、切向磨削力、磨削温度、表面粗糙度降低幅度和残余应力的增加幅度逐渐减小, 而随着超声振幅的增加呈现增大的趋势。

(4) 与普通磨削相比, 超声磨削可以显著改善加工效果。随着砂轮转速的增加, 法向磨削力、切向磨削力、磨削温度、表面粗糙度最大降低分别为 29.3%, 21.9%, 23.4% 和 21.3%; 随着进给速度的增加, 最大降低分别为 28.6%, 21.3%, 21.6% 和 20.6%; 伴随超声振幅的增加, 法向力和切向力最大降低分别为 38.6% 和 36.2%, 磨削温度最大降低 26.9%, 表面粗糙度最大减小 15.3%。残余压应力随着砂轮转速、进给速度和超声振幅的增加最大提高分别为 21.4%, 22.9% 和 18.6%。

(5) 超声磨削可以显著改善齿面的微观形貌, 使表面变得光滑, 表面纹理更加均匀。同时, 在超声能场的作用下, 位错-孪晶的交互作用下导致晶粒细化, 并使变形层深度增加约 13.8%。

## 参考文献

- [1] 高玉魁, 赵振业. 齿轮的表面完整性与抗疲劳制造技术



- 的发展趋势[J]. 金属热处理, 2014, 39(4): 1-6.
- GAO Yukui, ZHAO Zhenye. Development trend of surface integrity and anti-fatigue manufacture of gears[J]. Heat Treatment of Metal, 2014, 39(4): 1-6.
- [2] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 119-134.
- GUO Dongming, SUN Yuwen, JIA Zhenyuan. Methods and research progress of high performance manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 184-191.
- [3] 别文博, 赵波, 王晓博, 等. 超声加工在齿轮抗疲劳制造中的研究综述与展望[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 35-51.
- BIE Wenbo, ZHAO Bo, WANG Xiaobo, et al. Overview and expectation on gear anti-fatigue manufacture by ultrasonic-assisted machining[J]. Surface Technology, 2018, 47(7): 35-51.
- [4] KARPUSCHEWSKI B, KNOCH HJ, HIPKE M. Gear finishing by abrasive processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 621-640.
- [5] YI J, JIN T, ZHOU W, et al. Theoretical and experimental analysis of temperature distribution during full tooth groove form grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 101-115.
- [6] WANG Y, LIU Y, CHU X, et al. Calculation model for surface roughness of face gears by disc wheel grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 123: 76-88.
- [7] 隈部淳一郎. 精密加工振动切削基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- KUMABE J. The foundation and application of precision vibration cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [8] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B. Influence of ultrasonic vibration on dry grinding of soft steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(14): 1585-1591.
- [9] 丁凯, 傅玉灿, 苏宏华, 等. 基于单颗磨粒磨削的超声振动参数与磨削参数匹配性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 59-65.
- DING Kai, FU Yucan, SU Honghua, et al. Study on matching performance of ultrasonic vibration and grinding parameters based on a single abrasive grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 59-65.
- [10] YANG Z, ZHU L, ZHANG G, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 156: 103594.
- [11] LIANG Z, WANG X, WU Y, et al. An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 868-876.
- [12] CHEN H, TANG J, SHAO W, et al. An investigation of surface roughness in ultrasonic assisted dry grinding of 12Cr2Ni4A with large diameter grinding wheel[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(6): 929-936.
- [13] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 3-21.
- FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3-21.
- [14] 牛赢, 焦锋, 赵波, 等. 纵扭超声铣削残余应力三维有限元仿真与试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 224-232.
- NIU Ying, JIAO Feng, ZHAO Bo, et al. 3D finite element simulation and experimentation of residual stress in longitudinal torsional ultrasonic assisted milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 224-232.
- [15] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B, RABIEY M. Ultrasonic assisted dry grinding of 42CrMo4[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(9-10): 883-891.
- [16] NIK M G, MOVAHHEDY M R, AKBARI J. Ultrasonic-assisted grinding of Ti6Al4V alloy[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 353-358.
- [17] ZHANG J J, WANG D Z. Investigations of tangential ultrasonic vibration turning of Ti6Al4V using finite element method[J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12: 257-267.
- [18] LANG W F, ZHANG H L. Investigation on machining characteristics for tangential ultrasonic vibration assisted grinding[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 34-35: 282-286.
- [19] SUI H, ZHANG X Y, ZHANG D Y, et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 111-120.
- [20] 张翔宇, 隋嵩, 张德远, 等. 高速超声振动切削钛合金可行性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 120-127.
- ZHANG Xiangyu, SUI He, ZHANG Deyuan, et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 120-127.

- [21] 王立江, 赵继, 谭庆昌. 超声波振动车削的运动学及其加工表面质量[J]. 兵工学报, 1987, 8(3): 24-31.  
WANG Lijiang, ZHAO Ji, TAN Qingchang. Kinematics of ultrasonic vibration-cutting and a study of resulting surface quality[J]. Acta Armamentarii, 1987, 8(3): 24-31.
- [22] XIAO M, KARUBE S, SOUTOME T, et al. Analysis of chatter suppression in vibration cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 1677-1685.
- [23] NATH C, RAHMAN M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48: 965-974.
- [24] NI C, ZHU L, LIU C, et al. Analytical modeling of tool-workpiece contact rate and experimental study in ultrasonic vibration-assisted milling of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 142-143: 97-111.
- [25] XIANG D, ZHOU Z, LIU Z, et al. Abrasive wear of a single CBN grain in ultrasonic-assisted high-speed grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1-4): 1-9.
- [26] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.  
ZHANG Hongli. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- 
- 作者简介:** 别文博, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向精密超精密加工技术与装备。  
E-mail: wenbo187120@163.com
- 赵波(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进制造技术、超声加工技术、精密加工技术及装备。  
E-mail: zhaob@hpu.edu.cn
- 高国富, 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密与特种加工技术、精密检测及表面技术、数字化设计与制造技术。  
E-mail: gaogf@hpu.edu.cn
- 向道辉, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向精密超精密加工技术与装备。  
E-mail: dhxiang@hpu.edu.cn
- 赵重阳, 男, 1985 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向精密超精密加工技术与装备。  
E-mail: zhaocy@hpu.edu.cn
- 唐进元, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为齿轮动力学、数字化制造。  
E-mail: jytangcsu@163.com