

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.001

## 数控内齿珩轮强力珩齿珩削力的预测

韩江<sup>1,2</sup>, 许孕博<sup>1,2</sup>, 田晓青<sup>1,2</sup>, 夏铤<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省智能数控技术及装备工程实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章建立了内齿珩轮强力珩齿珩削力的预测模型。首先推导珩齿加工啮合过程中接触线和切削厚度数学模型,并基于此模型将珩磨轮的磨削刃离散为微元磨削刃;然后由平面磨削模型构建珩磨轮的微元磨削刃模型,建立珩齿珩削力预测模型,并分析珩削力随工艺参数的变化规律;最后结合 Fassler HMX-400 数控内齿珩轮强力珩齿机及其内置的 Kistler 力传感器进行珩齿珩削力测量实验。实验结果表明,预测的珩削力的数值和变化趋势与实验测量结果相符,该珩削力预测方法有效。

**关键词:**内啮合强力珩齿;珩削力;平面磨削模型;磨削

**中图分类号:**TG618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)06-0721-07

## Prediction of honing force of CNC internal gear power honing

HAN Jiang<sup>1,2</sup>, XU Yunbo<sup>1,2</sup>, TIAN Xiaoqing<sup>1,2</sup>, XIA Lian<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Engineering Laboratory of Intelligent CNC Technology and Equipment, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper established the prediction model of honing force of internal gear power honing. Firstly, the mathematical model of contact line and cutting thickness in honing meshing process was derived, and the grinding edge of honing wheel was separated into micro-element grinding edge based on this model. Then, the micro-element grinding edge model of honing wheel was established based on the plane grinding model, the honing force prediction model was established, and the variation law of honing force with process parameters was analyzed. Finally, based on Fassler HMX-400 CNC internal gear honing machine and its built-in Kistler force sensor, the honing force measurement experiment was carried out. The experimental results show that the numerical value and variation trend of the predicted honing force agree with the experimental measurement results, which verifies the validity of the method.

**Key words:** internal gear power honing; honing force; plane grinding model; grind

齿轮在机械传动中是非常重要的基础部件,广泛应用在各个领域。随着制造业的不断发展,对齿轮传动零部件的精度、强度和噪声都提出了更高的要求。内啮合强力珩齿工艺加工后齿面具有较高的齿面质量和残余应力,且在工件齿面产生一种“人”字形的特殊纹理,能够降低齿轮传动过程中的噪声,因此被广泛地应用在齿轮加工工

艺过程中<sup>[1]</sup>。

相较于其他齿轮硬精加工工艺,珩齿加工过程中前道工序加工质量的微小偏差,如几何形状偏差或表面硬度,对工艺系统稳定性的影响比蜗杆砂轮磨削和成型磨削更大。工艺系统不稳定不仅会使被加工齿轮的质量不合格,还会加剧珩磨轮磨损,甚至报废。珩削力较高是珩齿工艺鲁棒

收稿日期:2022-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075142)

作者简介:韩江(1963—),河南洛阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

夏铤(1964—),四川乐山人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail: xia\_nian@126.com.

性较低的主要原因,由于在加工过程中被加工工件和珩磨轮之间的接触条件不断变化,珩削力在方向和大小上也不断变化。这些不断变化的珩削力会导致自激振动,而再生激励的作用使其难以达到所要求的质量<sup>[2]</sup>。文献[3]通过珩磨实验证明,珩磨加工过程中珩削力是不断变化的,且仅考虑平均珩削力对珩齿工艺系统的影响是不够的。因此,建立珩削力的数学模型对工艺系统稳定性优化、切削参数优化、避免切削颤振具有重要意义。

文献[4]将工件与刀具之间的可变接触条件转化为局部平稳过程,将局部磨削过程类比为外圆磨削,依据实验建立了经验解析力模型,并通过数值仿真将局部力转移到了整个珩齿中;文献[5]通过实验分析了进给珩削方式对于珩削力的影响,认为采用力控制法进给方式有利于提高磨削质量;文献[6]研究了工件直径对接触条件的影响,分析了不同工件直径下珩齿接触线随转角的变化,推导出不同接触比和不同啮合状态下产生的加工力引起的波动;文献[7]通过有限元仿真过程得到了珩削区域的单位珩削力,并结合珩削数学模型,计算出单条接触线上珩削力的大小;文献[8]通过对滚齿切削过程的几何仿真,基于微分离散的思想,将滚刀看作多个微小的切削刃的集合,构建了滚齿的切削力模型。综上所述,目前国内研究直接对珩削力进行数学建模的研究较少,大多是通过实验或仿真对珩削力进行建模,对珩削力形成机理的研究较少。本文从珩齿加工机理出发,结合珩齿加工啮合过程,建立珩削力数学模型,对不同工艺参数加工下的珩削力进行预测。

本文通过对珩齿啮合运动分析,建立珩齿加工过程中的接触线数学模型。将珩齿加工过程中的啮合区域离散化,珩磨轮的离散为微元磨削刃,每个微元磨削刃上的磨削力通过投影的方式累加到珩磨轮上,建立珩齿珩削力预测模型;并在瑞士 Daetwyler 公司生产的型号为 Fassler HMX-400 数控内齿珩轮强力珩齿机上进行珩削力测量实验,以验证该珩削力预测模型的有效性。

## 1 内啮合珩齿接触线和切削厚度建模

### 1.1 内啮合强力珩齿加工原理

内啮合强力珩齿是一种常见的齿轮精加工工艺,其加工过程中工件与内齿珩轮以确定的传动比进行强制啮合运动,形式上与交错轴斜齿轮啮合运动相似,如图 1 所示。

工件表面金属在强制啮合过程中,与内齿珩轮表面的磨粒产生相互挤压、滑移,被磨掉一层极薄的金属,并通过径向和轴向进给完成整个齿面加工。加工过程机床的运动主要有工件齿轮轴  $C_1$  和珩磨轮轴  $C_2$  强制啮合运动、径向进给运动、珩磨轮沿轴向的往复运动。

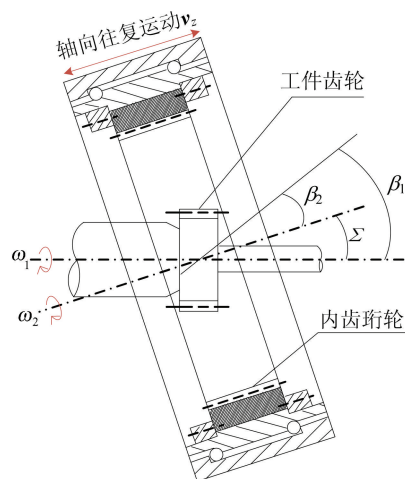


图 1 内啮合珩齿加工示意图

### 1.2 齿面接触线数学模型

为建立珩削力预测模型,需要先对珩削力啮合过程进行分析。首先建立珩削接触线模型,根据珩齿加工工艺中珩磨轮与工件之间的位置关系建立珩齿空间坐标系,如图 2 所示。

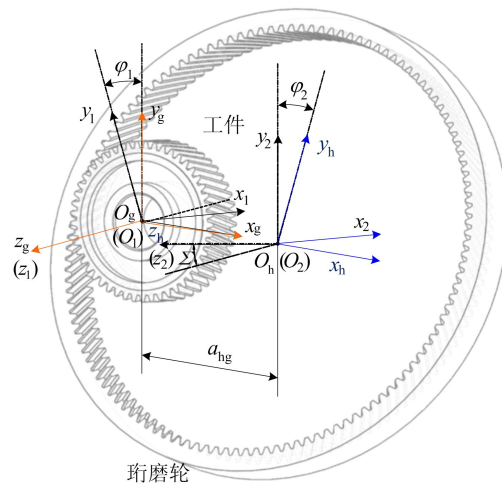


图 2 珩齿空间坐标系

坐标系  $O_g-x_g y_g z_g$  为工件齿轮固定坐标系,是工件初始位置处对应的坐标系; $O_1-x_1 y_1 z_1$  为工件齿轮运动坐标系,跟随工件绕工件轴同步转动; $O_h-x_h y_h z_h$  为珩磨轮固定坐标系,与珩磨轮初始位置处对应; $O_2-x_2 y_2 z_2$  为珩磨轮运动坐标系,

跟随珩磨轮绕珩磨轮轴同步转动。

图2中: $a_{hg}$ 为珩磨轮与工件之间的中心距; $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 分别为工件和珩磨轮的转角; $\Sigma$ 为珩磨轮轴与工件轴之间的夹角。 $\Sigma$ 的计算公式为:

$$\Sigma = \beta_2 - \beta_1 \quad (1)$$

其中: $\beta_1$ 为工件螺旋角; $\beta_2$ 为珩磨轮螺旋角。

珩齿加工工艺中,被加工齿面一般为标准螺旋渐开面,齿面方程在工件运动坐标系( $O_1-x_1y_1z_1$ )下的表达式为:

$$\begin{cases} x_1 = r_{bl} \cos(\sigma_0 + \theta + \lambda) + r_{bl} \lambda \sin(\sigma_0 + \theta + \lambda), \\ y_1 = r_{bl} \sin(\sigma_0 + \theta + \lambda) - r_{bl} \lambda \cos(\sigma_0 + \theta + \lambda), \\ z_1 = \theta p \end{cases} \quad (2)$$

其中: $r_{bl}$ 为基圆半径; $\sigma_0$ 为渐开线起始角度; $\lambda$ 为渐开线展开角度; $\theta$ 为渐开线旋转角; $p$ 为螺旋线的螺旋参数。

在工件齿轮与内齿珩磨轮的啮合接触过程中,根据齿轮啮合原理<sup>[9]</sup>,2个齿面共轭接触过程中在啮合接触点处的相对滑动速度在两曲面的公法线方向的分量为0。因此,内齿珩磨轮齿面与工件齿面在啮合点处应满足的条件为:

$$\mathbf{v}_{12} \times \mathbf{n} = 0 \quad (3)$$

其中: $\mathbf{v}_{12}$ 为任意接触点处工件齿面与内齿珩磨轮相对运动速度; $\mathbf{n}$ 为工件齿面在接触点上的法向量。

工件齿轮与珩磨轮分别绕其转动轴 $z_1$ 、 $z_2$ 以角速度 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 转动,根据图2所示坐标系,可以推出在工件固定坐标系中,任意啮合点处相对运动速度<sup>[10]</sup>为:

$$\mathbf{v}_{12} = \omega_1 \begin{bmatrix} -y + (y \cos \Sigma + y \sin \Sigma) / i_{12} \\ x - (x + a) \cos \Sigma / i_{12} \\ -(x + a) \sin \Sigma / i_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由(2)式可得,齿面上任一点处工件齿面的法向量在工件运动坐标系中( $O_1-x_1y_1z_1$ )中可表示为:

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \lambda} \times \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{r}_1$ 为齿面上任一点的位置矢量。将相对速度方程(4)和齿面法向量方程(5)代入(3)式中,化简并整理得到珩齿共轭啮合条件为:

$$\begin{aligned} & (ap \cos \Sigma - r_{bl}^2 \sin \Sigma) \cos(\sigma_0 + \theta + \lambda + \varphi_1) + \\ & (\theta p^2 - \lambda r_{bl}^2) \sin \Sigma \sin(\sigma_0 + \theta + \lambda + \varphi_1) + \\ & (p \cos \Sigma - a \sin \Sigma - i_{12} p) r_{bl} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式含有 $\theta$ 、 $\lambda$ 、 $\varphi_1$ 3个变量,可简记为:

$$f(\theta, \lambda, \varphi_1) = 0 \quad (7)$$

在任意转角 $\varphi_1$ 处,工件齿面与珩磨轮齿面上

保持共轭的接触点应满足(7)式所示共轭啮合条件,则齿面方程(2)与共轭啮合条件(7)式联立可以得到工件齿面上的接触线方程,即

$$\begin{cases} x_1 = r_{bl} \cos(\sigma_0 + \theta + \lambda) + r_{bl} \lambda \sin(\sigma_0 + \theta + \lambda), \\ y_1 = r_{bl} \sin(\sigma_0 + \theta + \lambda) - r_{bl} \lambda \cos(\sigma_0 + \theta + \lambda), \\ z_1 = \theta p, \\ f(\varphi_1, \theta, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

对任意转角 $\varphi_1$ ,求解方程(8)即可得到另外2个参数 $\theta$ 、 $\lambda$ 。通过求解发现,在给定转角 $\varphi_1$ 处有一组 $\theta$ 、 $\lambda$ ,即珩齿加工过程中的接触线。

在工件运动坐标系( $O_1-x_1y_1z_1$ )下,工件齿轮上各齿面可以看作由基础齿面旋转得到,因此相邻齿面的变换矩阵由图2所示坐标系可得,即

$$\mathbf{M}_{O_1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & -\sin \varphi_0 & 0 \\ \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\varphi_0$ 为齿轮的齿距角,即端面齿距所对应的圆心角。由于珩齿加工过程中重叠系数一般大于2,即存在多对齿轮同时啮合,由啮合运动过程可知,前一个齿轮的接触与后一个齿轮接触状态相同,仅有一个齿距角的相位差,即

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{i-1}(\varphi) &= \mathbf{M}_{O_1} \mathbf{r}_i(\varphi - \varphi_0) \\ \mathbf{v}_{i-1}(\varphi) &= \mathbf{M}_{O_1} \mathbf{v}_i(\varphi - \varphi_0) \\ \mathbf{n}_{i-1}(\varphi) &= \mathbf{M}_{O_1} \mathbf{n}_i(\varphi - \varphi_0) \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $\mathbf{r}_i$ 为当前齿的接触线矢量坐标; $\mathbf{r}_{i-1}$ 为后一个齿的接触线矢量; $\mathbf{v}_i$ 、 $\mathbf{v}_{i-1}$ 为前、后齿面接触点的相对速度; $\mathbf{n}_i$ 、 $\mathbf{n}_{i-1}$ 为前、后齿面接触点法向量。

联立(8)~(10)式求解可以得到珩齿过程中同时啮合的接触线分布,如图3所示。图3中标号1~标号4为左齿面接触线,标号5~标号7为右齿面接触线。

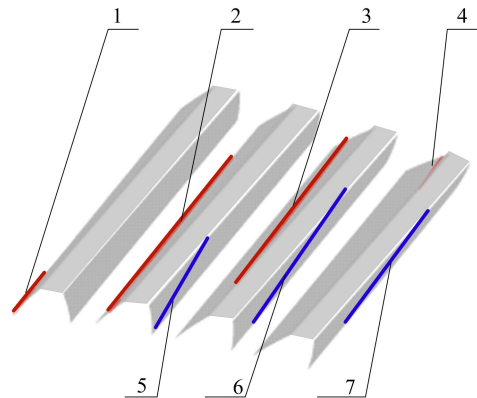


图3 齿面啮合接触线分布

### 1.3 珩磨过程中切削厚度计算

在珩齿实际加工过程中,珩磨轮做径向进给时,进给方向为珩磨轮固定坐标系( $O_h-x_h y_h z_h$ )的 $x_h$ 轴正向,而工件不做移动,为方便计算将其等效为珩磨轮不做移动而工件沿工件固定坐标系( $O_g-x_g y_g z_g$ )的 $x_g$ 轴正向进给。由 1.2 节可知,珩齿加工过程中啮合线上的各点在齿面上的不同位置处,因此各点处的切削厚度是不同的。

$x_g$  方向进给量  $f_x$  和端截面法向进给量  $f_1$  示意图如图 4 所示。

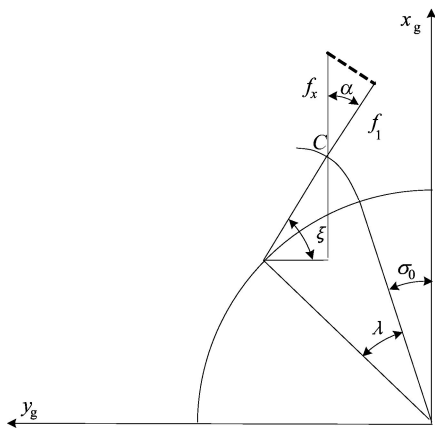


图 4  $x_g$  向进给量  $f_x$  和端截面法向进给量  $f_1$  示意图

由图 4 可知,在某一接触点  $C$  处,沿  $x_g$  轴正向的进给量  $f_x$  与端截面法向的进给量  $f_1$  之间的关系为:

$$f_1 = f_x \cos \alpha \quad (11)$$

其中, $\alpha$  为渐开线起始角  $\sigma_0$  与  $C$  点对应的渐开线展角  $\lambda$  之和的余角,即

$$\alpha = \pi/2 - \xi = \pi/2 - (\lambda + \sigma_0) \quad (12)$$

因为工件和珩磨轮均为弹性体,所以端截面法向进给量  $f_1$  并不是实际的切削厚度。在接触点处将工件与珩磨轮简化为串联的弹簧模型,以工件在接触位置的形变量作为实际切削厚度  $f_1'$ ,如图 5 所示。

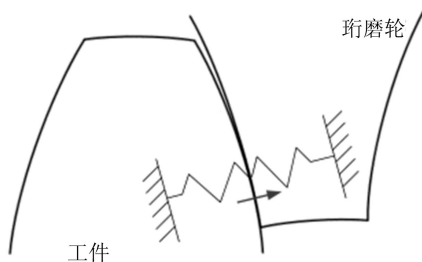


图 5 工件和珩磨轮的端面接触

由图 5 可知,接触点  $C$  处的实际切削厚度  $f_1'$  可表示为:

$$f_1' = f_1 \frac{E_H}{E_H + E_W} \quad (13)$$

其中, $E_H$ 、 $E_W$  分别为工件和珩磨轮的弹性模量。

## 2 珩削力预测模型

### 2.1 平面磨削力模型

珩齿珩削过程本质上就是珩磨轮上的磨粒与工件之间发生的磨削过程,因此在建立珩削力预测模型之前,需要先建立磨削力模型。以往学者们所提出的磨削力模型大多忽略了犁耕和变摩擦系数的影响,认为犁耕的影响与切屑形成力相比非常小。但珩齿加工过程中进给量较小,因此犁耕力的影响必须要考虑进去。

本文采用文献[11]建立的 Werner 磨削力模型,以此模型为基础建立一种新的磨削力模型。该模型考虑了犁耕力和变摩擦系数的影响,其单位长度磨削力公式<sup>[11]</sup>为:

$$F_n' = K \frac{V_w}{V_c} a + \frac{K_1 V_w}{V_c} \left( \frac{a}{d_c} \right)^{1/2} + K_4 \left( \frac{V_w}{V_c} \right)^{a_0} d^{b_0} a^{c_0} C_s (ad_c)^{1/2} \quad (14)$$

$$F_t' = K' \frac{V_w}{V_c} a + \left( K_2 + \frac{K_3 V_w}{d_c V_c} \right) (ad_c)^{1/2} + K_5 \left( \frac{V_w}{V_c} \right)^{a_0} d^{b_0} a^{c_0} C_s (ad_c)^{1/2} \quad (15)$$

其中: $F_n'$  为单位长度法线磨削力; $F_t'$  为单位长度切线磨削力; $K$ 、 $K'$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_5$ 、 $C_s$  为磨削参数,与工件和砂轮的性质有关; $V_w$  为进给速度; $V_c$  为磨削相对速度; $a$  为磨削深度; $d_c$  为砂轮当量直径; $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$  为犁耕力模型常数。

### 2.2 珩削力离散化建模

因为珩齿加工切削过程比较复杂,无法通过数学建模的方式直接对珩削力进行求解,所以本文采用 2.1 节中介绍的文献[11]中建立的磨削力模型,将珩齿接触过程看作多个平面磨削过程的集合。珩磨过程离散示意图如图 6 所示,将接触线离散成一系列的微元切削刃,每个微元磨削刃的磨削视为单独的平面磨削过程,则每个微元所受到的珩削力与单位长度的磨削力公式为:

$$dF_n(k, i) = F_n' dl \quad (16)$$

$$dF_t(k, i) = F_t' dl \quad (17)$$

其中: $dF_n(k, i)$ 、 $dF_t(k, i)$  分别为珩磨轮第  $k$  个齿的磨削刃上第  $i$  个微元磨削刃的法向和切线磨削力; $F_n'$  为该微元磨削刃单位长度法向磨削力大

小,由(14)式求得; $F_t'$ 为微元磨削刃单位长度切向磨削力大小,由(15)式求得; $dl$ 为该微元磨削刃的长度。

珩磨过程离散示意图如图 6 所示。每个微元磨削力的方向不相同,这与参与磨削的微元磨削刃的位置有关,微元磨削刃受到的法向力沿着该离散线段的法向量方向,微元磨削刃的切向力沿着工件和珩磨轮的相对速度方向。因此可以将微元磨削力分解到珩磨轮固定坐标系中,即

$$d\mathbf{F}(k, i) = (F_n' dl) \mathbf{n}_i + (F_t' dl) \mathbf{v}_{12i} \quad (18)$$

其中,  $\mathbf{n}_i$ 、 $\mathbf{v}_{12i}$  分别为微元磨削刃的法向量和相对速度单位矢量,可由(10)式求出。

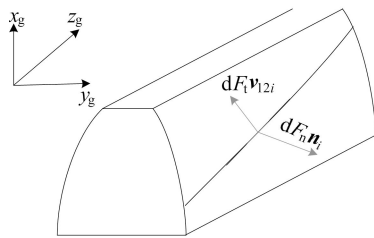


图 6 珩磨过程离散示意图

将珩齿加工过程中的接触线离散成许多的微小切削刃,在每个切削刃上其相对速度(由(10)式可得)、进给速度( $z$ 轴的轴向往复速度)、等效砂轮直径(齿面上的曲率半径)和切削厚度(由(13)式求得)看作是不变的,将每个离散线段处的等效磨削参数代入到(16)、(17)式中,即可求出该微元磨削刃上的单位长度磨削力。沿着接触线对每个微元上的磨削力按照(18)式所示分解并累加求和,求出该接触线上产生的珩削力,将  $m$  个参与磨削的珩磨磨削刃进行累加求和,可以得到整个珩磨轮在工件固定坐标系下的珩削力,即整个珩磨轮所受的珩削力的矢量可表示为:

$$\mathbf{F} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n d\mathbf{F}(k, i) \quad (19)$$

### 3 仿真与实验分析

#### 3.1 仿真与实验参数

为验证所建立的珩齿珩削力模型的有效性,本文进行了相关的数值计算和珩削实验。数值计算和实验所采用的珩磨轮和工件齿轮的几何参数以及切削参数见表 1 所列。其中: $z_1$ 、 $z_2$  分别为工件齿轮和珩磨轮齿数; $m_1$ 、 $m_2$  分别为工件齿轮和珩磨轮模数; $\alpha_{n1}$ 、 $\alpha_{n2}$  分别为工件齿轮和珩磨轮法向压力角; $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为工件齿轮和珩磨轮螺旋

角; $b_1$ 、 $b_2$  分别为工件齿轮和珩磨轮齿宽; $E_w$ 、 $E_H$  分别为工件齿轮和珩磨轮弹性模量。

表 1 加工工件珩磨轮相关参数

工件齿轮参数	数值	珩磨轮参数	数值
$z_1$	73	$z_2$	123
$m_1$	2.25	$m_2$	2.25
$\alpha_{n1}/(^{\circ})$	17.5	$\alpha_{n2}/(^{\circ})$	17.5
$\beta_1(^{\circ})$	33	$\beta_2(^{\circ})$	41.722
$b_1/\text{mm}$	27	$b_2/\text{mm}$	30
$E_w/\text{GPa}$	207	$E_H/\text{GPa}$	70

#### 3.2 珩削力实验设计

本文采用瑞士 Daetwyler 公司生产的 Fassler HMX-400 数控内齿珩轮强力珩齿机进行珩削力测量实验。测力装置是珩齿机床内部自带的 Kistler 力传感器,无需外加传感器,珩齿加工过程中的径向力(即  $x$  方向珩削力)可由机床面板直接读出。Fassler HMX-400 主要技术性能参数和加工范围参见表 2 所列。实验加工现场如图 7 所示。

表 2 Fassler HMX-400 主要技术性能

技术性能	数值
模数范围/mm	0.5~8.0
工件直径/mm	20~270
工件宽度/mm	$\leq 400$
珩轮宽度/mm	20, 30, 40, 50, 60, 80
工件轴转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	800~1 800



图 7 Fassler HMX-400 数控珩齿机现场加工图

#### 3.3 结果分析

按照上述珩削力预测模型和实验方案进行分析和实验。在珩齿加工工艺中,主轴转速  $n_2$ 、珩轮径向进给量  $f_x$  是影响珩削力的主要工艺参数,实验选取  $n_2$ 、 $f_x$  为实验变量,珩磨轮的轴向往复速度保持不变,取为 60 mm/min。

为了便于分析,取珩齿加工过程中一个周期的径向珩削力的均方值作为分析对象,将珩削力的模型预测值与实验值进行对比,结果如图 8、图

9 所示。

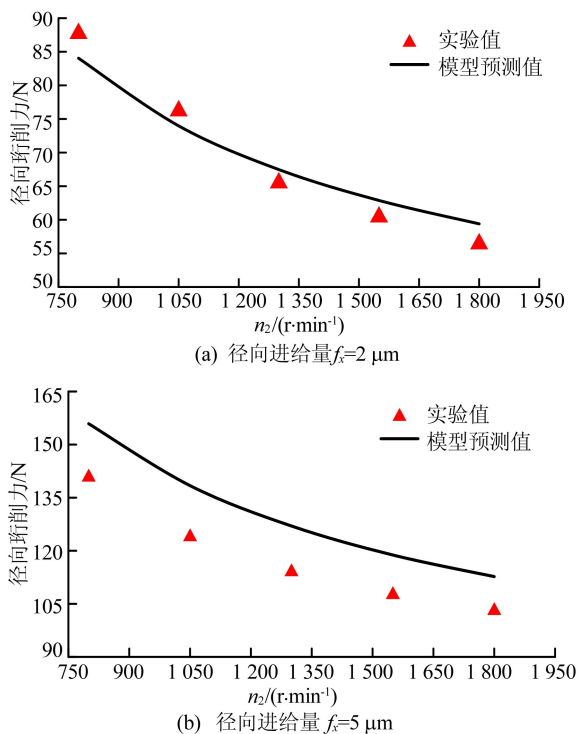


图 8 珩削力与转速关系

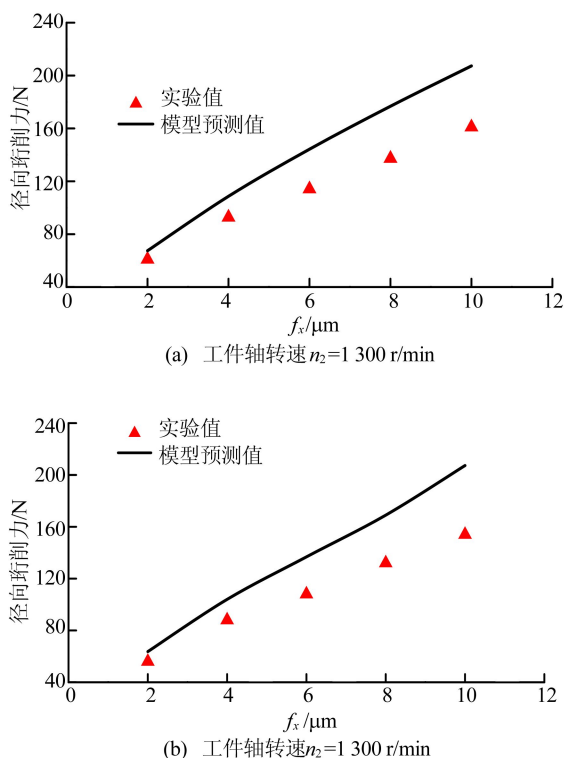


图 9 珩削力与进给量关系

从图 8、图 9 可以看出,珩削力的模型预测值与实验值在数值和随工艺参数的变化趋势上基本一致。随着进给量的增大, $x$  向珩削力线性增加;

随着转速的增大,珩削力不断减少,与转速大致成反比例趋势。

由图 8 可知,当其他工艺参数一致时,随着工件径向进给量  $f_r$  的增加,径向珩削力预测值与实验值之间的误差逐渐增大。这主要是由于随着进给量的变化,珩磨轮和工件齿轮的材料性质发生变化,使得弹性模量发生改变,导致变化规律不能线性表达。

由图 9 可知,当其他工艺参数一致时,随着工件轴转速的增加,模型预测值与实验值的偏差基本不变。这说明该预测模型对工件转速的建模较为准确。

由图 8b、图 9 可知,模型预测值较实验值偏大。这主要是由于径向进给量增大后,实际切削厚度比模型预测值大,使得整体模型预测值偏大。

总体来看,珩削力实验值与模型预测值吻合良好,证明了本文珩削力预测模型的有效性 with 准确性。

## 4 结 论

(1) 本文通过对内啮合强力珩齿加工过程的分析,基于珩齿加工共轭啮合条件推导了珩齿加工接触线方程和珩磨的切削厚度模型,建立了珩齿加工过程中的接触几何模型。

(2) 基于文献[11]建立平面磨削模型,将珩齿加工过程离散为多个平面磨削过程的集合,珩磨轮的磨削刃离散为微元磨削刃,每个微元磨削刃上的磨削力通过投影的方式累加到珩磨轮上,从而推导出珩齿珩削力预测模型。

(3) 通过 Fassler HMX-400 数控内齿珩轮强力珩齿机及其内置的 Kistler 力传感器对不同工件转速和进给量下的珩削力进行测量,并与本文仿真模型预测值进行对比。实验结果表明,本文提出的预测模型能够很好地拟合珩齿加工过程中的珩削力及其随加工参数的变化规律。

## [参 考 文 献]

- [1] HAN J, YUAN B, WU L, et al. Mechanism study on gear tooth surface texture in power honing process[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2017, 12(2): 212-224.
- [2] WEGENER K, BLEICHER F, KRAJNİK P, et al. Recent developments in grinding machines[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(2): 779-802.

(下转第 731 页)

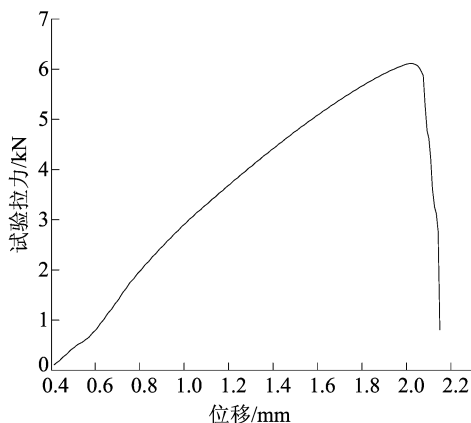


图 6 参数优化后的拉力曲线

## 4 结 论

本文采用 S600 铝合金 1.5 mm 厚的板材进行试验,研究了激光功率、焊接速度、激光光束摆动频率对铝合金激光深熔焊焊缝成形及焊接质量的影响;通过正交试验分析了在一定参数范围内这 3 个因素对熔深、深宽比的影响趋势,并根据拉力测试结果对焊接质量进行评估,得到以下结论:

(1) 激光功率、焊接速度、激光光束线性摆动频率对焊缝成形均有一定的影响。正交试验结果表明,激光功率的增加有利于焊接熔深和深宽比的增加;随着焊接速度和激光光束线性摆动频率的增加,焊接熔深和深宽比会有一定的减少。

(2) 根据正交试验结果的极差  $R$  值计算及方差分析可得,3 个因素对焊接熔深的影响大小依次为焊接速度、线性摆动频率、激光功率。

(3) 根据正交试验结果对工艺参数进行优化,选取激光功率 3 250 W、焊接速度 80 mm/s、

激光光束线性摆动频率 80 Hz 为参数优化结果。在该优化参数下,焊接样件熔深为 0.92 mm,熔宽为 1.82 mm,拉力测试峰值为 6.12 kN,与正交试验表中拉力最高的第 7 组拉力 5.65 kN 相比,拉力性能提升 8.32 %。

本文研究工作可为汽车轻量化全铝车身连接中的激光焊接提供一定的参考。

## [参 考 文 献]

- [1] 张大文. 铝合金激光焊接工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [2] 周英才, 高士友, 刘迪, 等. 6016 铝合金激光焊接接头性能[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(7): 205-212.
- [3] 陈亚斌, 徐世兴, 谭淑芹, 等. 铝合金激光焊接技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(8): 36-37.
- [4] 胡裕祺, 徐晓东, 王少鹏. 铝合金激光焊接研究[J]. 南方农机, 2019, 50(14): 261.
- [5] 陶武, 杨上陆. 铝合金激光焊接技术应用现状与发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2021(2): 1-4.
- [6] 崔丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154-159.
- [7] 王志宇. 激光-MIG 电弧复合焊接基础研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [8] 李翠, 周丹, 孟晓明, 等. 不锈钢板激光光束摆动叠焊工艺研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(11): 1359-1366, 1377.
- [9] CAI C, PENG G C, LI L Q, et al. Comparative study on laser welding characteristics of aluminium alloy under atmospheric and subatmospheric pressures[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 547-553.
- [10] 张奇奇. 铝合金激光深熔焊温度场数值模拟及改善方案研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.

(责任编辑 胡亚敏)

## (上接第 726 页)

- [3] KLOCKE F, BRUMM M, KAMPKA M. Process model for honing larger gears [C]//International Gear Conference 2014 26th-28th. [S. l. : s. n. ], 2014: 118-128.
- [4] THOMAS B. Cutting force model for gear honing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67(1): 53-56.
- [5] BSHRE D, SCHMITT C, MOOS U. Analysis of the differences between force control and feed control strategies during the honing of bores [J]. Procedia Cirp, 2012, 1(1): 377-381.
- [6] KLOCKE F, VASILIOUS G V. Analysis of the influence of gear dimensions on cutting speed and contact conditions during the gear honing process[J]. Production Engineering, 2009, 3(3): 255-259.
- [7] 陈鹏. 内齿珩轮强力珩齿珩削接触特性仿真及珩轮修磨技

术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.

- [8] 张荣闯, 黎柏春, 张景强. 圆柱齿轮滚齿切削力的预测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(7): 980-985.
- [9] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 145-147.
- [10] 韩江, 赵飞虎, 张魁榜, 等. 基于 Matlab 的内齿珩轮齿面建模及珩削特性分析[J]. 机械传动, 2016, 40(11): 140-143, 175.
- [11] DURGUMAHANTI U, SINGH V, RAO P V. A new model for grinding force prediction and analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(3): 231-240.

(责任编辑 胡亚敏)