

粉末冶金齿轮模具成形磨齿砂轮的廓形计算方法*

周玉山 邵 明

(华南理工大学机械工程学院 广州 510640)

摘要：为解决目前粉末冶金齿轮模具制造精度不高的问题，采用盘形砂轮 CNC 内齿成形磨齿技术以提高模具精度。提出了截线式数值模拟包络计算模型，将已知齿形按相对位置关系转换到计算平面后用数值模拟包络法进行砂轮廓形计算。编制了砂轮廓形计算处理及误差分析软件，并利用该软件进行了计算验证和误差分析。对齿数 $z=44$ ，法面模数 $m_n=1.5\text{ mm}$ ，压力角 $\alpha=20^\circ$ ，分度圆螺旋角 $b=30^\circ$ 的螺旋齿轮模具计算实例表明，计算误差可控制在 0.0001 mm 以内，达到高精度齿轮模具制造的要求。

关键词：粉末冶金 成形磨齿 数值模拟

中图分类号：TG580

0 前言

目前粉末冶金齿轮模具，尤其是精密斜齿模具难以达到所需的精度要求，成形的齿轮烧结后须磨齿以提高精度。如能通过模具磨齿精加工提高成形精度，使烧结后的齿轮直接达到使用精度，便可大幅度降低生产成本，充分发挥粉末冶金技术生产效率高，近终成形的优点。现有磨齿技术及设备主要用于外齿轮磨齿，要对粉末冶金齿轮模具进行磨齿则必须研制开发新技术与新装备。

介绍了使用盘形砂轮的 CNC 成形磨齿方法，并对砂轮廓形的数值模拟计算方法进行了研究。

1 磨齿方法及设备

1.1 磨齿方法

粉末冶金齿轮模具是一个内齿轮，由于成形时的装粉高度约为成品齿轮厚度的 3 倍，所以模具的长径比较大。粉末冶金齿轮的直径因受成形设备限制不可能很大，齿轮模具磨齿的工艺性较差。

经过对各种磨齿方法的分析比较，选用盘形砂轮 CNC 成形磨齿的方法对粉末冶金模具进行磨削。CNC 成形磨齿是采用磨齿机的 CNC 系统修整成形砂轮廓形，利用砂轮和工件(齿轮模具)间的数控相对运动进行磨齿的方法，具有磨齿效率高、可降低磨齿成本、可磨削各种齿形且可进行修形和误差补偿等优点，适用于各种齿轮模具的磨齿^[2]。

1.2 磨齿设备

磨齿设备简图见图 1，由三轴数控机床附加数

控回转工作台组成。加工斜齿时，工作台在 z 方向进给的同时，回转工作台转动形成螺旋齿槽。

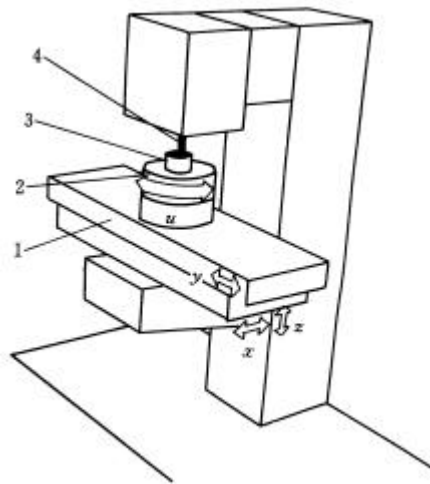


图 1 CNC 成形磨齿机床

1.磨床工作台 2.回转工作台 3.工件 4.磨头

内齿成形磨头结构如图 2 所示，砂轮轴线可根据安装角的大小和方向倾斜安装，用于加工螺旋齿槽。

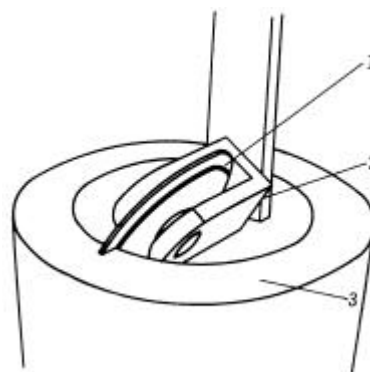


图 2 磨头结构

1.砂轮 2.磨头 3.工件

* 国家自然科学基金资助项目(50135020)。20040409 收到初稿，20041020 收到修改稿

2 廓形计算方法

已知工件齿形及加工过程中工件与砂轮的相对运动计算砂轮廓形，可以理解为工件齿形对砂轮的反滚切过程，模拟工件齿形在相对运动关系下切削砂轮的过程便可进行计算。

为了验证计算精度，还需进行根据砂轮廓形计算所加工出的工件齿形的逆向计算，然后以已知工件齿形为基准，与逆向计算得出的工件齿形相比较进行误差分析。通过分析误差分布情况，可发现是否存在根切与顶切及干涉现象，并通过调整加工参数进行改善或消除。

为减少计算量，数值模拟包络计算在计算平面内进行，工件齿形计算时选取工件一个端截面为计算平面，砂轮廓形计算时选取砂轮轴截面为计算平面，其空间位置见图 3。图中， $O_p x_p y_p z_p$ 为工件坐标系， $O_p z_p$ 轴是工件轴线， $O_w x_w y_w z_w$ 是砂轮坐标系， $O_w x_w$ 轴是砂轮轴线。 $O_w x_w$ 轴绕 $O_w y_w$ 轴转动形成砂轮安装角，工件与砂轮的中心距为 a 。

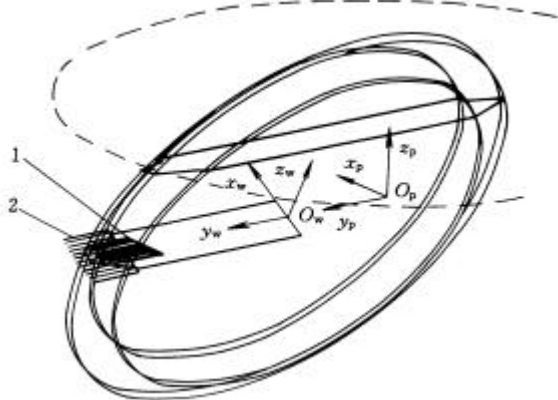


图 3 计算平面的空间位置

1. 砂轮廓形计算平面 2. 工件齿形计算平面

2.1 计算工件齿形在砂轮计算平面上的对应齿形

为了计算砂轮廓形，需先计算出工件齿形在砂轮平面上的对应齿形，然后在砂轮计算平面上采用数值模拟包络算法计算出砂轮廓形，计算步骤如下。

(1) 计算工件齿面上轴向位置不同(z 不同)时的工件齿形。已知工件齿形上一点的坐标值为 $(x_{p0}, y_{p0}, 0)$ ，在不同的轴向位置 z ，工件齿形的计算公式为

$$\begin{cases} x_{w1} = x_{p0} \cos f - y_{p0} \sin f \\ y_{w1} = x_{p0} \sin f + y_{p0} \cos f \\ z_{w1} = z \end{cases} \quad (1)$$

式中 z —— 轴向位置参数
 f —— 工件齿形转角

工件齿形转角 f 与轴向位置 z 成正比例，比例系数与工件分度圆螺旋角 b 有关，其计算公式为

$$f = \frac{z \tan b}{r} \quad (2)$$

式中 b —— 工件分度圆螺旋角

r —— 工件分度圆半径

(2) 将工件齿形从工件坐标系转换到砂轮坐标系。利用齐次坐标转换方法进行平移及旋转变换，计算公式为

$$\begin{cases} x_{w2} = x_{w1} \cos G - z_{w1} \sin G \\ y_{w2} = y_{w1} - a \\ z_{w2} = x_{w1} \sin G + z_{w1} \cos G \end{cases} \quad (3)$$

式中 a —— 中心距

—— 砂轮安装角

(3) 计算砂轮计算平面上的对应齿形。将转换到砂轮坐标系内的齿形绕砂轮轴线旋转进入砂轮计算平面，计算公式如下

$$\begin{cases} x_w = x_{w2} \\ y_w = \sqrt{y_{w2}^2 + z_{w2}^2} \\ z_w = 0 \end{cases} \quad (4)$$

在 z 的计算范围内，以很小的间距 Δz 计算不同轴向位置的工件齿形在计算平面上的对应齿形，在计算平面上用这些齿形进行数值模拟包络计算便可计算出砂轮廓形。

2.2 计算砂轮廓形在工件计算平面上的对应廓形

在根据砂轮廓形逆算工件齿形时，需计算出砂轮廓形在工件计算平面上的计算廓形，然后再进行包络计算。

(1) 计算砂轮回转面上转角不同(q 不同)时的砂轮廓形。已知砂轮廓形上一点的坐标值为 $(x_{w0}, y_{w0}, 0)$ ，在不同的砂轮转角 q 的情况下，砂轮廓形的计算公式为

$$\begin{cases} x_{p1} = x_{w0} \\ y_{p1} = y_{w0} \cos q \\ z_{p1} = y_{w0} \sin q \end{cases} \quad (5)$$

(2) 砂轮廓形从砂轮坐标系转换到工件坐标系。利用齐次坐标转换方法进行平移及旋转变换，计算公式为

$$\begin{cases} x_{p2} = x_{p1} \cos G + z_{p1} \sin G \\ y_{p2} = y_{p1} + a \\ z_{p2} = -x_{p1} \sin G + z_{p1} \cos G \end{cases} \quad (6)$$

(3) 计算出计算平面上的对应廓形。将转换到工件坐标系内的齿形绕工件轴线作下降螺旋运动，

计算公式如下

$$\begin{cases} x_p = x_{p2} \cos f + y_{p2} \sin f \\ y_p = -x_{p2} \sin f + y_{p2} \cos f \\ z_p = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$f = \frac{z_{p2} \tan b}{r} \quad (8)$$

在 q 的计算范围内,以很小的间距 Δq 计算不同转角时砂轮廓形在计算平面上的对应廓形,在计算平面上用这些廓形进行数值模拟包络计算,便可得出用于误差分析的计算工件齿形。

2.3 数值模拟包络算法

将已知齿形转换到计算平面后需进行数值模拟包络计算,前述两类计算的算法是相同的。采用截线式计算模型对加工过程进行计算,该算法简单,数据结构合理,可计算任意曲线的齿形。

截线式计算模型如图4所示。模型由一系列在计算平面上平行排列的线段组成。模拟计算时,求出第2.1节、第2.2节计算出的齿形与线段的交点,仅保留交点以下的部分。

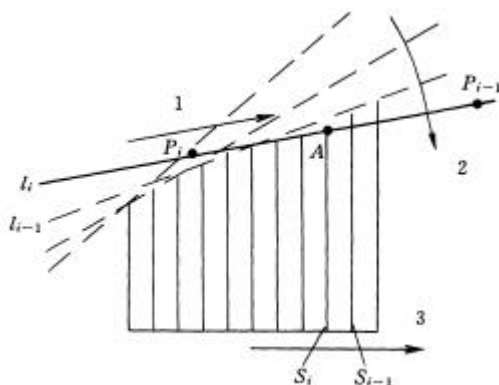


图4 截线式计算模型及包络计算方法
1.数据点循环 2.相对运动循环 3.毛坯截线循环

包络算法由三重嵌套循环组成,图中所示为对第 n 次齿形转换至计算平面的 l_n 进行处理时的情况,程序判断各线段与 l_n 是否相交,若相交则将线段截断。对整个啮合过程进行计算,模拟真实加工过程。计算完成后,所有线段的上端点组成计算齿形的列表曲线。

3 计算软件及计算实例

3.1 计算软件

应用上述计算方法,使用图形化编程工具编制了粉末冶金齿轮模具 CNC 成形磨齿砂轮廓形计算处理及误差分析软件。已知廓形和计算结果廓形坐

标集以标准文本文件格式输入输出,所有加工参数和计算参数均可独立调整。计算点数越多,砂轮进给步距越小则计算精度越高,但计算时间会相应增加^[3]。为消除根切,砂轮安装角 G 一般比分度圆螺旋角小 $0.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 。可利用软件进行试算,以确定不发生根切的砂轮安装角。

3.2 计算实例

以成形磨削压制渐开线斜齿轮的模具为例进行计算验证。齿轮参数为:齿数 $z=44$,法面模数 $m_n=1.5$ mm,压力角 $\alpha=20^\circ$,齿顶高 $h_{ap}=1$ m,齿根高 $h_{fp}=1.25$ m,分度圆螺旋角 $b=30^\circ$ 。利用软件将齿形渐开线离散为点集坐标并输入程序,图形见图5a。

输入加工参数并初步确定计算参数后进行试算(见图5b),并根据试算调整计算参数。调整完成后,确定所需包络计算范围,即截线计算模型的范围(见图5c)。

图5d为计算出的砂轮廓形。本例计算参数为:砂轮安装角 $G=28^\circ$,已知齿形点数为200点,工件轴向位移步长 $\Delta z=0.01$,计算齿形点数为200点。

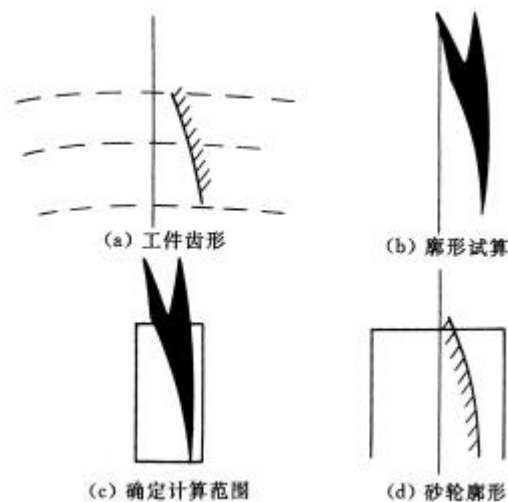


图5 已知工件齿形计算砂轮廓形

3.3 计算精度分析

根据计算所得砂轮廓形,逆向计算工件廓形以验证计算精度。图6为计算过程。计算参数为:砂轮转角步长 $q=0.1^\circ$,计算廓形点数为200点。

经过两次计算后,以已知工件齿形为基准,计算出计算齿形上各点到基准齿形的法向距离,再利用开发的廓形计算处理软件的误差分析模块对工件齿形计算结果进行误差分析,图7为误差分析结果,最大误差为 $1.354\ 487\ 65 \times 10^{-5}$ mm。计算误差在 $0.000\ 1$ mm以内,满足砂轮廓形计算的精度要求。

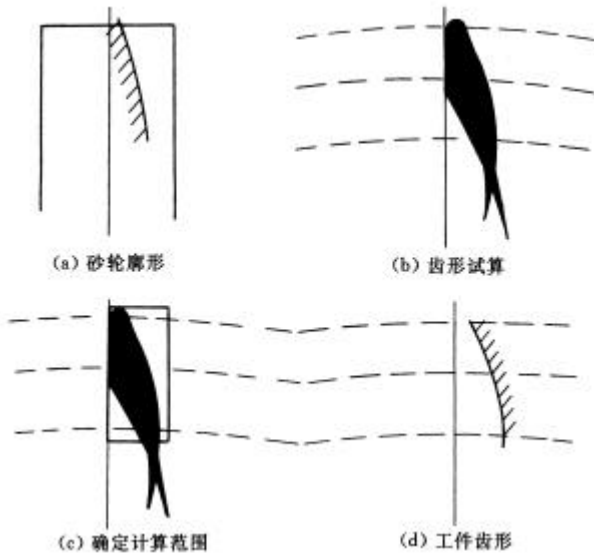


图 6 已知砂轮廓形计算工件齿形

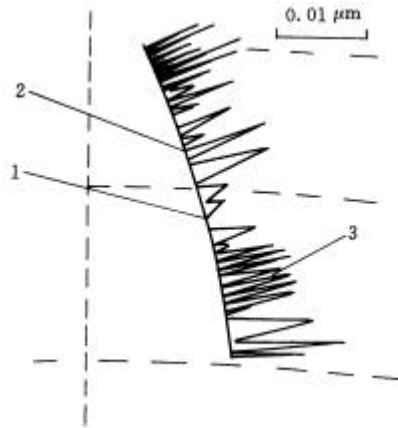


图 7 计算误差分析

1.已知廓形 2.计算廓形 3.计算误差

4 结论

实际计算和误差分析结果表明，提出的盘形砂轮 CNC 内齿成形磨齿技术数值模拟砂轮廓形计算方法正确，廓形计算处理软件计算精度满足使用要求。

进一步的研究工作拟从以下两方面进行。

(1) 提高计算软件的智能化程度，将计算软件与知识系统相结合，使软件能自动选择避免根切与顶切的加工参数。

(2) 研制磨头及改造磨削设备，进行磨齿试验。

参 考 文 献

- 1 《齿轮制造手册》编辑委员会. 齿轮制造手册. 北京：机械工业出版社，1998
- 2 梁锡昌，邵明，吉野英弘，等. 齿轮及其刀具制造的研究. 重庆：重庆大学出版社，2001
- 3 邵明，周玉山，汪志峰. 插齿刀齿形数值模拟新算法及计算软件的开发. 现代制造工程，2002(9)：69~70

- 4 王红利. 从 CIMT2003 上看数控齿轮加工机床的发展方向. 制造技术与机床，2003(9)：19~20
- 5 刘献忠. 非圆齿轮数控加工过程的计算机仿真研究. 机械工程师，2003(2)：8~10
- 6 肖志瑜，李元元. 摩托车粉末冶金齿轮的研究. 汽车工艺与材料，1999(2)：27~28
- 7 Suh S H, Jih W S, Hong H D, et al. Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(6)：833~850
- 8 Sfakiotakis V G, Vaitsis J P, Anifanis N K. Numerical simulation of conjugata spur gear action. Computer and Structure, 2001, 79(12)：1153~1160
- 9 Bair, Wen B. Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(2-3)：139~147
- 10 Litvin, Donno F L, De M, et al. Integrated computer program for simulation of meshing and contact of gear drives. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 181(1-3)：71~85

FORM GRINDING TECHNOLOGY FOR THE MOLD OF POWDER METALLURGY GEARS

Zhou Yushan Shao Ming

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract : In order to increase the precision of the mold for powder metallurgy gears, use the CNC form grinding technique with a plate-shaped grinding wheel to produce the mold. A line-cutting model for calculation is put forward for the profile calculating. After transferring the known profile to the plane for calculation, use a numerical simulation method to calculate the profile of the grinding wheel. A profile calculating, profile editing and error analyzing software is also programmed. The calculating and error analyzing example of a mold that z is 44, m_n is 1.5 mm, a is 20° and b is 30° using this software shows that the calculating error can be under 0.000 1mm and the method is precise enough to meet the requirements of high quality gear molds.

Key words : Powder metallurgy Form grinding Numerical simulation

作者简介：周玉山，男，1975 年出生，博士研究生。主要研究方向为复杂零件的高精度制造技术。

E-mail : zain@21cn.com