

精密与超精密加工

精密轴承磨削金刚滚轮修整工艺优化研究

迟玉伦, 顾佳健

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 通过对轴承套圈表面修整工艺优化的研究, 实现对轴承套圈表面优质高效的磨削加工。**方法** 首先基于金刚滚轮修整原理和力学原理, 建立修整过程系统简化模型, 根据模型求得系统固有频率, 再根据频响函数曲线图确定主轴最佳转速。然后建立砂轮与滚轮的运动轨迹方程, 根据方程求得曲率半径, 再根据曲率半径求得使砂轮表面粗糙度较低的修整速比。接着引入一个新的物理量干涉角, 根据经验确定一个较优的干涉角, 将修整速比代入, 求得最后的滚轮进给速度。最后通过间接获得的磨削力大小来优化整个修整过程, 若磨削力偏大, 则重新选择主轴转速。**结果** 根据该方法得到优化结果, 选用砂轮转速为 23 994 r/min、滚轮转速为 5473 r/min、修整进给速度为 1.77 mm/min、磨削力为 37.2 N 时, 轴承套圈表面能获得较高的质量。对比优化前后轴承套圈沟形, 由优化前的不合格变为优化后的合格, 有了显著的改善。**结论** 将修整参数运用多个方法进行确定, 并通过磨削力进行最后的优化。根据加工产品表面呈现出的问题, 可以找到对应的参数, 进而对参数进行单独优化, 为企业优化轴承套圈表面质量提供了一套科学有效的方法。

关键词: 精密轴承磨削; 金刚滚轮修整; 频响函数; 修整速比; 干涉角; 工艺优化

中图分类号: TG58; V261.2+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)03-0366-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.03.040

Study on the Optimization of Dressing Process of Diamond Wheel for Precision Bearing Grinding

CHI Yu-lun, GU Jia-jian

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Through the study on the optimization of the surface dressing process of the bearing ring, high-quality and efficient grinding of the bearing ring surface is achieved. Based on the diamond wheel dressing principle and mechanical principle, this paper establishes a simplified model of the dressing process system to obtain the natural frequency of the system and determine the optimal speed of the spindle according to the frequency response function curve; builds the trajectory equation of the grinding wheel and the wheel to obtain the radius of curvature, and the dressing speed ratio that makes the surface roughness of the grinding wheel lower according to the radius of curvature; then introduces a new physical quantity interference angle, determines an optimal interference angle based on experience, and substitutes the dressing speed ratio to obtain the final feed rate of the wheel; finally, optimizes the entire dressing process by the size of the grinding force obtained indirectly, and

收稿日期: 2020-05-04; 修订日期: 2020-07-29

Received: 2020-05-04; Revised: 2020-07-29

作者简介: 迟玉伦 (1982—), 男, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为现代制造技术。邮箱: chiylun@163.com

Biography: CHI Yu-lun (1982—), Male, Doctor, Senior lab master, Research focus: modern manufacturing technology. E-mail: chiylun@163.com

引文格式: 迟玉伦, 顾佳健. 精密轴承磨削金刚滚轮修整工艺优化研究[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 366-375.

CHI Yu-lun, GU Jia-jian. Study on the optimization of dressing process of diamond wheel for precision bearing grinding[J]. Surface technology, 2021, 50(3): 366-375.

reselects the spindle speed if the grinding force is too large. According to the optimization results obtained by this method, when the grinding wheel speed is 23 994 r/min, the wheel speed is 5473 r/min, the dressing feed speed is 1.77 mm/min, and the grinding force is 37.2 N, the bearing ring surface will be in higher quality. Compared with the groove shape of the bearing ring before and after optimization, it is changed from the unqualified before the optimization to the qualified after the optimization, so there is a significant improvement. The dressing parameters are determined by multiple methods, and finally optimized by grinding force. And according to the problems presented on the surface of the processed products, the corresponding parameters can be found, and then optimized individually, which provides a scientific and effective method for the enterprise to optimize the surface quality of the bearing ring.

KEY WORDS: precision bearing grinding; diamond wheel dressing; frequency response function; dressing speed ratio; interference angle; process optimization

轴承套圈是滚动轴承的重要零件,由于套圈加工工序多、工艺复杂、加工精度要求高,因此套圈的加工质量对轴承的精度、使用寿命和性能有着重要的影响^[1]。轴承在加工过程中对其表面质量有着很高的要求,一旦不合格,就不会被允许进入装配环节^[2]。因此,轴承套圈的质量显得尤为重要。磨削是轴承套圈最重要的加工工序,决定着轴承套圈的加工精度和运转性能,套圈磨削受到工具、材料、机床、环境、人员等众多状态参数的影响,从而产生机理复杂的磨削现象,最终形成轴承套圈的工作表面质量^[3]。要想加工出符合质量要求的轴承套圈,砂轮修整技术是整个磨削过程中的关键所在。在修整过程中,由于轴承套圈滚道具有多个沟曲率,因此利用金刚笔修整砂轮时要回转多个沟曲率,这对金刚笔回转的主轴性能提出了较高的要求,通常主轴回转精度难以满足其修整表面质量要求^[4-5]。由于传统的单点金刚笔修整法难以加工复杂表面的工件,而金刚滚轮修整可以更有效地保证加工工件表面质量^[6],所以采用金刚滚轮修整法。但是在实际的加工中,修整过程难度较大,如何合理地选择修整参数进行加工是修整过程中急需解决的问题。

对于砂轮修整过程,国内外学者对其进行了大量研究。陈志军等^[7]在推力角接触球轴承外圈沟道磨削中发现,降低砂轮修整速度,将砂轮双程修整改为单程修整,使金刚笔从外圈非基面侧抬起,有助于消除沟道边缘的直线段,而修整时降低金刚笔下落速度是消除沟道边缘直线段的关键因素。李海林^[8]介绍了数控轴承磨床三位修整器的调试方法,利用 3 支金刚笔来进行砂轮修整。这种三位凹度修整机构结构简单、调整方便,提高了整体的工作效率。A. A. Torrance 等^[9]基于砂砾脆性断裂的统计数据以及砂砾和修整工具之间的几何作用,提出了金刚滚轮和金刚笔修整的新模型,该模型可以成功预测不同方式修整后的砂轮形貌及磨削工件表面粗糙度。虽然金刚笔硬度高,并且可以重复利用,但是其效率较低,而且当加工工件表面复杂时,用金刚笔修整砂轮不能满足最终工件表面质量要求,所以当加工轴承套圈这类对加工精度

要求较高的工件时,应该采用金刚滚轮修整砂轮。杨摩西等^[10]证明了金刚石滚轮修整法可以用于复杂结构轴承滚道磨削,尤其适用于多滚道磨削加工的砂轮修整,在进行金刚滚轮修整后,滚道之间的位置精度和修整效率均有明显提高。J. L. Jiang 等^[11]基于磨削接触区中晶粒与工件之间的微观相互作用机理,建立了二维和三维的表面形貌模型,更稳定地预测表面粗糙度,验证了修整比的选择对表面形貌产生很大的影响。Sun Ho Kim 等^[12]通过涡流传感器和激光位移传感器分别测量滚轮表面负荷和砂轮表面形貌,以此来确定修整滚轮的合适修整间隔和最佳修整深度。用金刚滚轮进行修整,虽然加工效率大大提升,但是很难保证磨削工件表面质量。因此,吴贵生等^[13]利用实验研究了在磨削过程中修整参数对砂轮表面的影响。孙春霞等^[14]利用合适的工艺参数进行金刚滚轮修整来保证加工表面的形状位置精度,从而加工出合格的轮毂轴承内圈。李焕峰等^[15]研究了不同修整深度和轴向速度对磨削工件表面质量的影响,并肯定了金刚石滚轮修整的优越性。上述几篇文献虽然都提到了修整参数对修整过程及磨削工件表面质量的重要影响,但是未提出一套完整且简洁的方法来确定修整参数。

轴承套圈磨削过程中金刚滚轮的修整对后续加工工件表面质量有很大的影响,所以修整参数的确定在这一过程中至关重要。本文提出了一种修整参数的确定方法,其步骤如下:首先,为了消除主轴振动对修整过程的影响,用力锤敲击主轴得到主轴的频响函数,根据频响函数曲线图找出最优的一组频率,再换算成主轴转速;然后,根据砂轮与滚轮的轨迹方程和曲率半径来确定砂轮与滚轮的转速比;再引入干涉角作为修整的综合物理量,将前面得出的主轴转速代入干涉角来确定进给速度;最后,根据磨削力来优化修整过程。由于磨削力很难直接测得,但是磨削功率可以通过功率传感器测得,建立磨削力和磨削功率的数学模型,将测得的磨削功率换算成磨削力。

1 轴承磨削金刚滚轮修整原理

Malkin 提出的砂轮修整过程包括结合剂的断裂

和磨粒的破碎,其中磨粒破碎又可分为磨粒的宏观破碎和微观破碎^[16]。在外力作用下,磨粒与磨粒之间的结合剂产生断裂,已经磨钝的磨粒从砂轮表面脱落,与钝化磨粒相连的尖锐磨粒因此能露出来,开始参加磨削过程。磨粒的宏观破碎指在修整力的作用下,磨粒沿晶面穿晶破裂,而磨粒的微观破碎则是由于磨粒本身的易碎性,使磨粒在修整工具的作用下表面微观破碎产生微切削刃^[17]。砂轮表面的大致形貌是由磨粒的宏观破碎和磨粒与磨粒之间的结合剂所决定的,而砂轮表面的微切削刃状态则由磨粒的微观破碎决定,这直接影响砂轮的磨削效果。相关机理见图1。

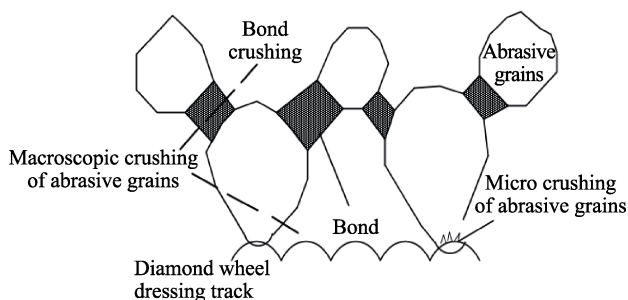


图1 砂轮修整过程中磨粒和结合剂的破碎机理

Fig.1 Crushing mechanism of abrasive grains and bond during grinding wheel dressing

根据砂轮修整机理,磨料表面材料的去除方式主要依靠磨粒与磨粒之间结合剂的破裂从而使磨粒脱落。不同的修整参数使得砂轮表面形貌不同,对后续的磨削加工起着重要的作用。图2a和图2b分别表示粗修整和精修整之后的砂轮形貌及对工件表面形貌的影响。

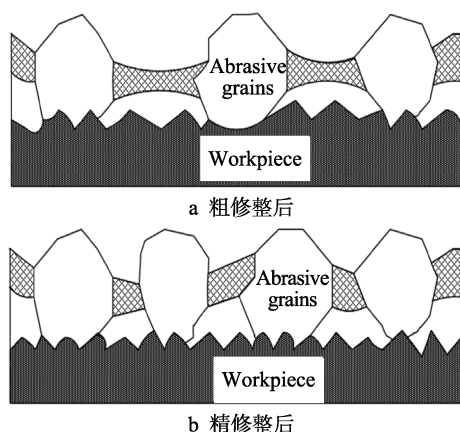


图2 砂轮表面对工件表面形貌的影响

Fig.2 Influence of the surface of the grinding wheel on the surface of the workpiece: (a) after rough dressing, (b) after fine dressing

砂轮形貌及工件表面质量在很大程度上受金刚滚轮修整参数的影响^[18],而在实际修整过程中,金刚滚轮和砂轮的修整速比、滚轮进给速度及砂轮主轴转

速都很难确定。所以,要给出一套完整的理论来确定各个参数,并根据加工情况进行参数优化,从而保证工件表面质量。

2 金刚滚轮修整参数的确定

在实际磨削过程中,修整参数的确定对磨削工件表面质量的影响至关重要,而如何确定修整参数是修整过程的一个难点。下文先基于频响函数确定主轴转速,找出使主轴振动最小的转速;再通过砂轮与滚轮的运动轨迹方程求出曲率半径,根据曲率半径找出使磨削表面质量相对最好的修整速比;接着引入干涉角这个物理量,确定修整进给速度;最后根据磨削力来进行修整参数的优化,进而优化工件表面质量。

2.1 基于频响函数确定主轴转速

主轴是磨床中重要的组成部分,主轴的振动会对修整过程及工件表面加工质量产生重要影响,所以对主轴进行动态分析,确定适当的转速,尽可能避免主轴振动对后续加工过程产生影响。图3为砂轮修整过程中的系统简化模型。

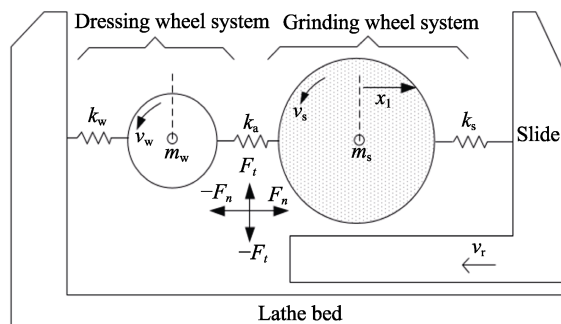


图3 修整过程的系统简化模型

Fig.3 Simplified model of the system for the dressing process

根据金刚滚轮修整砂轮原理及力学原理,可建立 m_s 、 m_w 的运动微分方程,如式(1)所示。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_1 + k_s \dot{x}_1 = k_a (x_2 - x_1) \\ m_w \ddot{x}_2 + k_w \dot{x}_2 = k_a (x_1 - x_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_s 为砂轮和主轴的质量; m_w 为滚轮质量; k_s 为砂轮刚度; k_a 为砂轮与滚轮的接触刚度; k_w 为滚轮刚度; x_1 为砂轮位移; x_2 为滚轮位移。将运动微分方程(1)表示成矩阵的形式,即:

$$M\ddot{X} + KX = \{0\} \quad (2)$$

修整系统的振动特征值问题为:

$$Ku = \lambda Mu \quad (3)$$

式中: λ 为根据固有圆频率变化而变化的参数, $\lambda = \omega^2$, $\omega = 2\pi f$, ω 为固有圆频率, f 为固有频率; u 为模态向量。根据式(1)~(3),经整理后可获得系统的固有频率,有:

$$\lambda^{(i)} = \mathbf{M}_0 \mathbf{K}_0^{-1} + \mathbf{u}_0^{(i)T} \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_0^{(i)} \quad (4)$$

式中: i 为第 i 阶次; \mathbf{M}_0 为质量矩阵 \mathbf{M} 原值; \mathbf{K}_0 为刚度矩阵 \mathbf{K} 原值; \mathbf{u}_0 为模态向量 \mathbf{u} 原值; \mathbf{K}_1 为刚度矩阵 \mathbf{K} 的变化值。为保证主轴在修整过程中产生的振动较小, 其固有频率应尽可能偏离修整系统的固有频率。图 4 为频响函数示意图, 在修整过程中, 主轴上下和前后方向最易影响后续加工。如图 4 所示, 最佳频率一般在 c 到 f 之间取得, 在这之间取一个频率值, 则 3 个方向都有一个对应的幅值, 按照式(5)计算使得 k 最小的横坐标即为最佳频率, 再乘 60 得到最佳主轴转速。

$$k = \sqrt{M^2 + N^2 + P^2} \quad (5)$$

式中: M 为主轴上下方向该频率所对应的幅值; N 为主轴前后方向该频率所对应的幅值; P 为主轴左右方向该频率所对应的幅值。

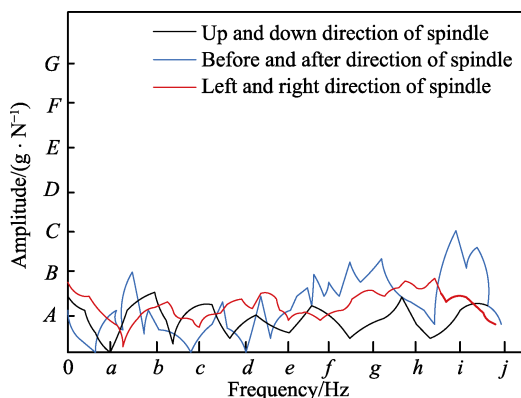


图 4 频响函数示意图

Fig.4 Schematic diagram of frequency response function

2.2 基于修整轨迹确定修整速比

图 5a 为金刚石滚轮的修整示意图^[19]。将滚轮修整模拟成外圆切入磨削。当砂轮以某一个转速旋转时, 可以将砂轮看作静止状态, 而滚轮在自身旋转的同时, 又以砂轮为中心旋转。现考虑滚轮上某一金刚石颗粒 A 相对砂轮的运动轨迹。

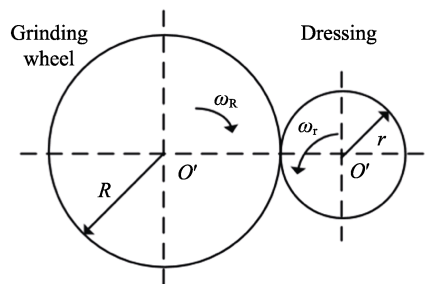
图 5b 为顺修时单颗金刚石颗粒相对砂轮的运动轨迹。根据式(6)~(7), 可得单颗金刚石颗粒顺修时的轨迹方程见式(8)。

$$q = \frac{V_r}{V_R} = \frac{r\omega_r}{R\omega_R} \quad (6)$$

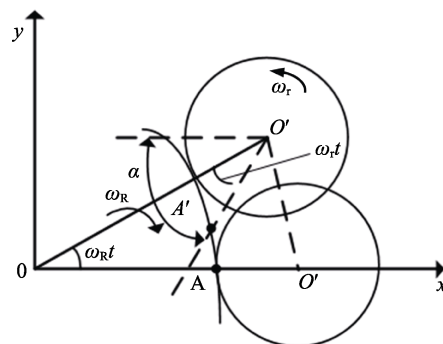
$$\alpha = \omega_R t + \omega_r t = \left(1 \pm \frac{R}{r} q\right) \omega_R t \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_A = (R+r) \cos \omega_R t - r \cos \left(\frac{R}{r} q - 1\right) \omega_R t \\ y_A = (R+r) \sin \omega_R t + r \sin \left(\frac{R}{r} q - 1\right) \omega_R t \end{cases} \quad (8)$$

式中: q 为滚轮与砂轮线速度之比; V_r 为滚轮线



a 金刚石滚轮修整示意图



b 顺修时滚轮修整运动情况

图 5 金刚石滚轮修整及运动状况示意图

Fig.5 Diagram of diamond wheel dressing and movement: (a) schematic diagram of diamond wheel dressing, (b) movement of wheel dressing in the course of repair

速度; V_R 为砂轮线速度; ω_r 为滚轮角速度; ω_R 为砂轮角速度; α 为滚轮相对于砂轮转动的角度。砂轮的形貌对磨削工件表面质量有一定的影响, 而砂轮修整速比与修整出的砂轮表面形貌有很大联系, 不同的修整速比修整出的砂轮表面形貌不同, 影响其后续的磨削过程。对金刚石 A 在 X 方向和 Y 方向的运动轨迹进行二次求导, 并进行转换得到曲率半径, 因此曲率半径的公式为:

$$\rho|_{t=0} = \frac{1}{k}|_{t=0} = \frac{R(1+q)^2}{1-q\left(\frac{R}{r}q-2\right)} \quad (9)$$

$$\frac{2R(1+q)\left[1-q\left(\frac{R}{r}q-2\right)+(1+q)\left(\frac{R}{r}q-1\right)\right]}{\left[1-q\left(\frac{R}{r}q-2\right)\right]^2} = 0 \quad (10)$$

ρ 的曲线形状如图 6 所示, 分别令分子为 0, 分母无限趋近于 0, 得出曲率半径函数, 4 个极值点 1、-1、 q_3 、 q_4 , 并分别求出 4 个极值点对应的极值。无论 $\rho > 0$ 还是 $\rho < 0$, 在 ρ 的绝对值很大的情况下, 砂轮表面的粗糙度较小。所以, 需要一个极大值点, 因为为顺修, 所以取 q_3 , 即要使顺修时砂轮表面粗糙度较小, 砂轮修整速比为:

$$q_3 = \frac{r}{R} + \frac{r}{R} \sqrt{1 + \frac{R}{r}} \quad (11)$$

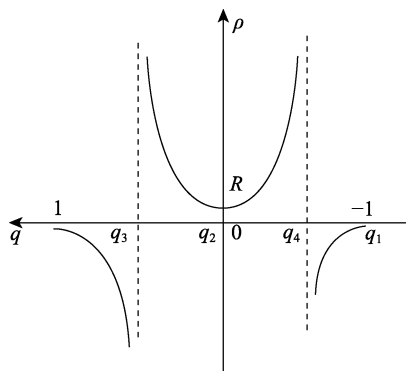


图6 ρ - q 关系图
Fig.6 ρ - q relationship graph

对曲率半径求导, 得出曲率半径和速比的关系, 令 $\frac{d\rho}{dq}|_{r=0} = 0$, 则有:

砂轮表面粗糙度较小容易引起烧伤现象, 所以后续需要根据工件实际表面质量利用磨削力进行参数的优化。磨削工件表面质量不仅与修整速比有关, 还与修整进给量和进给速度等修整参数有关, 所以需要引入一个物理量能包含所需的参数, 以便分析整个修整过程。

2.3 基于干涉角 σ 确定滚轮进给速度

金刚石滚轮修整砂轮时, 砂轮磨料的变形和破碎程度与金刚石切入修整表面的深度有关^[20], 但它不能作为一个综合修整参数来衡量修整状况。需要一个包含所需参数的物理量来作为一个综合指标, 因此采用金刚石滚轮与砂轮的干涉角作为一个综合参数。干涉角 σ 是金刚石滚轮相对于砂轮的运动轨迹与砂轮圆周表面间的夹角, 即:

$$\tan \sigma = \frac{v_{fd}}{v_{sd} - v_{rd}} \quad (12)$$

根据经验, 为保证磨削工件表面质量的稳定性, 干涉角的范围控制在 c 到 d 之间。式(12)中, v_{fd} 表示金刚石滚轮径向进给速度, v_{sd} 表示修整时的砂轮表面线速度, v_{rd} 表示修整时的滚轮表面线速度。在后文 3.2.1 节可确定砂轮主轴转速, 金刚石滚轮的进给速度则可表示为:

$$v_{fd} = \tan \sigma \times \pi \times \left(\frac{n_{sd} \times D - n_{rd} \times d}{60\,000} \right) \quad (13)$$

式中: n_{sd} 为砂轮转速; n_{rd} 为滚轮转速; D 为砂轮直径; d 为滚轮直径。具体含义可参考图 7, 其中, v_{sd} 为砂轮线速度, v_{rd} 为滚轮线速度。干涉角的大小决定了修整时金刚石滚轮的切入姿态。干涉角小, 磨粒变形较大, 破碎较少, 砂轮磨粒顶部出现更多的平面, 因此修整力会减小。相反, 干涉角越大, 修整力也会增大。参数确定流程见图 8。

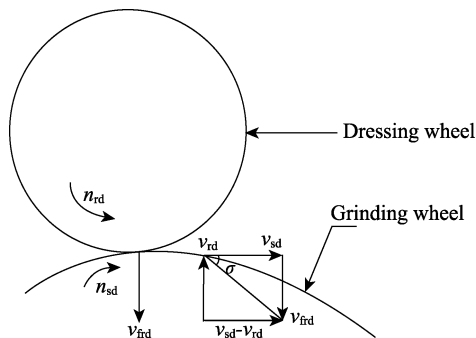


图7 金刚石滚轮与砂轮干涉角 σ
Fig.7 Interference angle σ between the diamond wheel and the grinding wheel

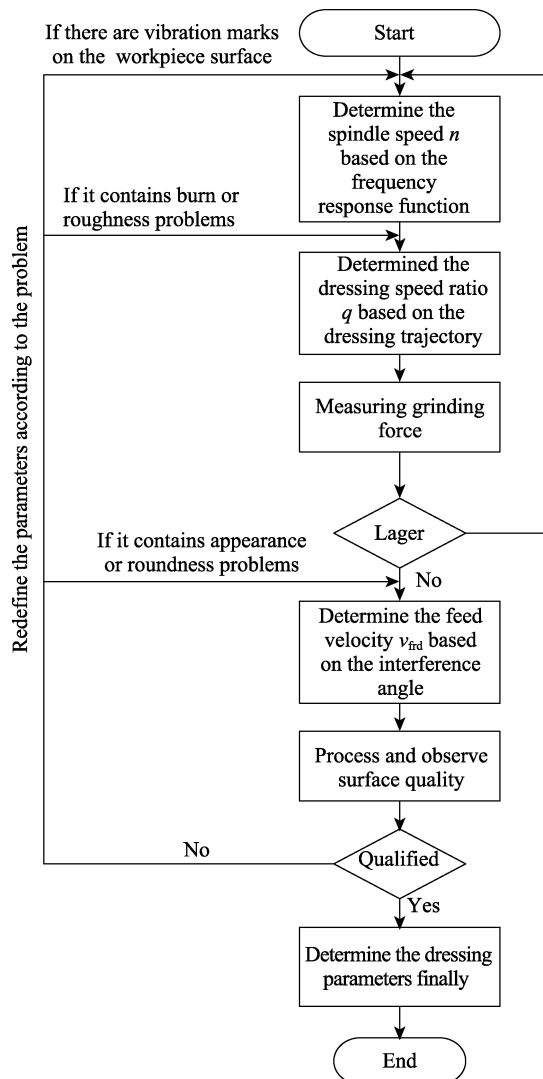


图8 参数确定流程图
Fig.8 Flow chart of parameter determination

2.4 数学模型的建立及参数优化

在磨削加工时, 磨削力增大, 容易产生工件烧伤现象, 但是磨削力过小, 工件表面粗糙度会增大。因为在工厂实际生产线环境下, 机床磨削过程中砂轮轴和工件轴都在转动, 力传感器难以安装, 所以本文采用功率传感器间接测量磨削力。因此, 可以测出磨削功率

来间接得知磨削力的大小。磨削力和磨削功率的关系为：

$$F=k_c\frac{P}{tv}$$

(14)

式中： k_c 为磨削力系数； F 为磨削力(N)； P 为磨削功率(W)； t 为时间(s)； v 为磨削速度(m/s)，本文不做考虑，为已知量。加工完成后，对工件进行检验，观察是否符合质量要求，若不满足要求，则对产生的问题提供相应的优化措施。若工件表面产生振纹或测得磨削力偏大，则要重新选择主轴转速。根据公式(5)，在相应的范围内找出使 k 最小的频率，若产生质量问题，则应该考虑使 k 值略大的相应的主轴频率，进行下一次加工。若工件表面存在烧伤或粗糙度问题，则根据式(11)重新选择砂轮或滚轮的规格来改变修整速比，在改变过程中，根据经验数值，要始终在 $a\sim b$ 范围内；若存在外观或者圆度问题，则要针对进给速度进行优化。2.3 节提到干涉角的范围控制在 $c\sim d$ 之间，在范围内重新选择一个干涉角，代入式(13)中，求得优化后的进给速度，再进行加工。这样根据不同的质量问题，优化对应的修整参数，使得工件表面质量在优化中不断提高，最终达到要求。

3 实验验证

3.1 实验设计

本文使用振动传感器、功率传感器相结合的方法对砂轮修整状态进行监测，以弥补单一传感器信号易受各种外因干扰的缺点。实验机床为 3MZ1410 数控磨床，机床用于加工 6006 的轴承套圈，工件材料为轴承钢 GCr15。实验采用金刚滚轮顺修的修整方式，砂轮直径为 40 mm，宽度为 7 mm，滚轮直径为 110 mm。振动传感器为三向振动传感器，传感器的频率范围为 5~3 kHz，测量范围为 0~50 g，该传感器本身具有很强的磁性，将其吸附在金刚滚轮轴外壳上，使其上表面平行于水平面，用来测量修整过程中金刚滚轮轴外壳 3 个方向的振动情况，振动传感器的安装位置如图 9 所示，修整过程如图 10 所示。

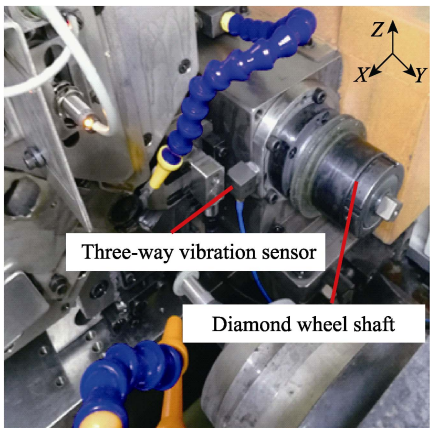


图 9 传感器安装位置图
Fig.9 Sensor installation location diagram

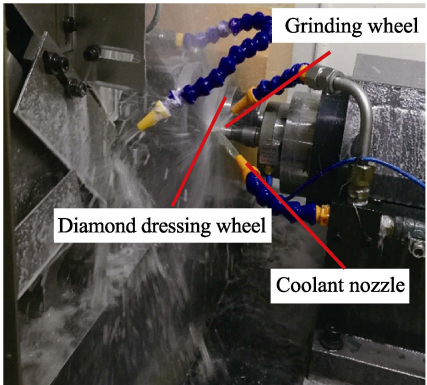


图 10 砂轮修整过程图
Fig.10 Grinding wheel dressing process diagram

在本次实验中，用功率传感器测得主轴电机的功率来间接判断磨削力的大小，该功率传感器频率范围为 10 MHz~18 GHz，功率范围为 1 μW~100 mW，功率传感器的测试原理图如图 11 所示。将功率传感器接入主轴电机，同时电源给功率传感器供电，再将传感器与采集卡通过 BNC 相连，最后将采集卡与电脑通过 USB 接口相连，实现加工状态下主轴功率信号的实时显示。

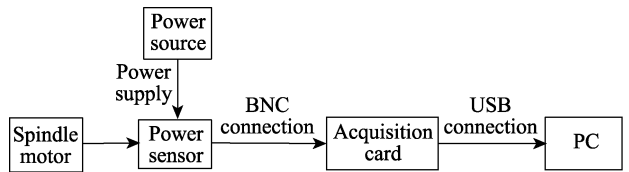


图 11 功率传感器测试原理图
Fig.11 Schematic diagram of power sensor test

3.2 实验验证

3.2.1 主轴动态分析确定主轴转速

为了避免主轴振动对磨削过程产生的影响，在加工前需要选择一个最佳的转速使得加工过程中产生的振动最小^[22]。因此，对主轴进行动态分析，根据频响函数图找出最佳转速。实验采用动态信号分析仪、力锤、加速度传感器来获取频响函数曲线图，所需仪器的型号及规格如表 1 所示。用力锤敲击主轴，将振动信号通过加速度传感器传入动态信号分析仪并显示，由此得出测点 3 个方向的频响函数曲线，实验测量如图 12 所示。

表 1 实验所需仪器

Tab.1 Table of instruments required for the experiment		
Name	Model number	Specification
Dynamic signal analyzer	DP240	4 channels, voltage input
Force hammer	Kistler9722	50 kg force hammer
Acceleration sensor	PCB356A32	50 g range, three-way sensor

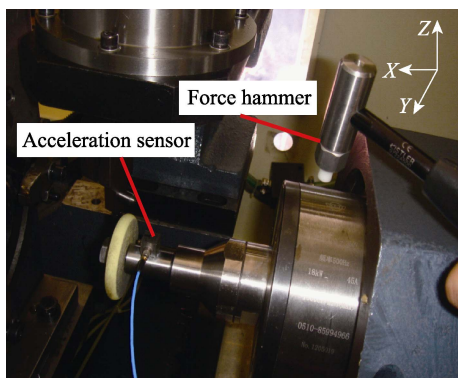


图 12 主轴实验测量图
Fig.12 Measurement diagram of spindle

图 13 为在主轴用力锤敲击得出的频响函数曲线图,其中蓝色曲线为 x 方向,红色曲线为 y 方向,黄绿色曲线为 z 方向。在表 2 确定的频率范围(338~600 Hz)内,每增加 2 Hz 即对相应 3 个方向的幅值利用公式(5)进行计算,求出相应的 k 值,利用该方法将区间内所有 k 值计算出,分析 k 值在整个区间内的大小分布情况,发现在整个频率范围内,350~550 Hz 对应的 k 值相对于区间内其他频率所对应的 k 值最小,即 350~550 Hz 为最佳频率范围。根据计算,在 350~550 Hz 内, k 值最小的频率在 399 Hz 附近,即最佳转速为 23 940 r/min 左右。

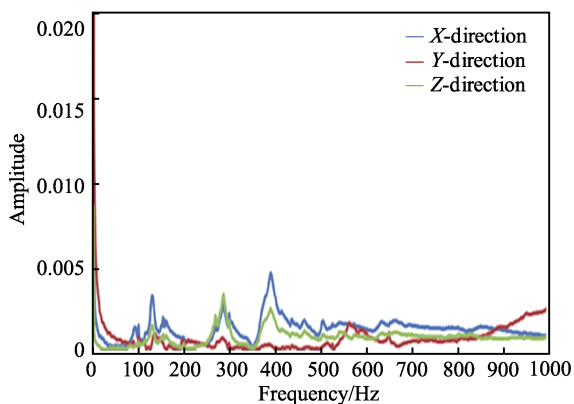


图 13 主轴频响曲线图
Fig.13 Frequency response curve of spindle

表 2 参数最值
Tab.2 Parameter limits

Value	Frequency /Hz	Wheel speed/($r \cdot \min^{-1}$)	Roller speed /($r \cdot \min^{-1}$)	Trim feed rate/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
Maximum	600	36 000	5700	2.16
Minimum	338	20 280	5236	1.77

表 3 优化前后对比

Tab.3 Comparison table of parameters before and after optimization

Wheel speed/($r \cdot \min^{-1}$)	Roller speed/($r \cdot \min^{-1}$)	Trim feed rate/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	Grinding force/N	Groove shape	Roughness/ μm	Workpiece surface condition
27 935	5238	2.16	59	Unqualified	0.33	Burn
23 994	5437	1.77	37.2	Qualified	0.35	No burn

3.2.2 优化修整参数

在磨削加工中,磨削力过大容易产生烧伤现象,但是磨削力过小,工件表面粗糙度达不到要求^[23]。根据上述理论模型,磨削力和工件表面粗糙度都与修整参数有关,所以需要优化修整参数,在保证粗糙度的情况下使磨削力最小,从而避免烧伤现象。图 14 为粗糙度测量图,此实验选用德国马尔 Marsurf CD 120 粗糙度仪,其测量范围为 0~10 μm ,本次实验要求的粗糙度 R_a 为 0.35 μm 。加工完的工件经过如图 14 所示的测量来确定粗糙度是否满足要求。本次实验中,根据磨床本身固有的参数设定,砂轮最高转速为 36 000 r/min,滚轮最高转速为 5700 r/min,本次实验采用的修整深度为 0.01 mm。根据参考文献,设定在修整时允许的修整比范围为 0.4~0.7^[24],干涉角范围为 $(9 \times 10^{-5})^\circ \sim (1.1 \times 10^{-4})^\circ$ ^[25],则砂轮线速度、滚轮线速度、修整进给速度范围如表 2 所示。

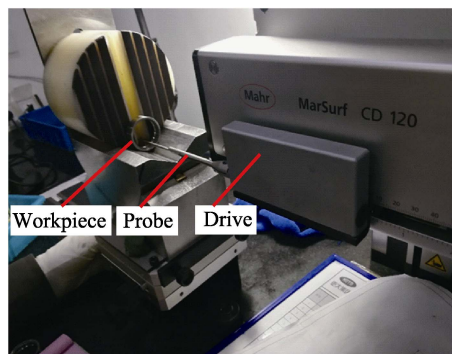


图 14 粗糙度测试现场图
Fig.14 Roughness test site diagram

表 3 为优化前后部分磨削参数和磨削表面质量对比,可知优化前后粗糙度都满足要求,但是优化前存在烧伤现象且沟形不合格。酸洗法是国内外轴承制造业中广泛运用的磨削烧伤判别方法。由于不同显微组织的耐腐蚀性不同,酸洗后呈现的颜色也不同,因而可根据磨削表面经酸腐蚀后的颜色变化来判断有无烧伤。对优化前后磨削工件进行酸洗,表面质量如图 15 所示,图 15a 为烧伤工件表面,图中工件表面呈现暗灰色且出现了斑点;图 15b 为合格工件表面,经酸洗后表面呈现灰色且没有出现斑点。进行优化后,最终确定了磨削参数,包含了磨削过程中各阶段的磨削进给量和进给速度、砂轮尺寸及主轴转速,如表 4 所示。

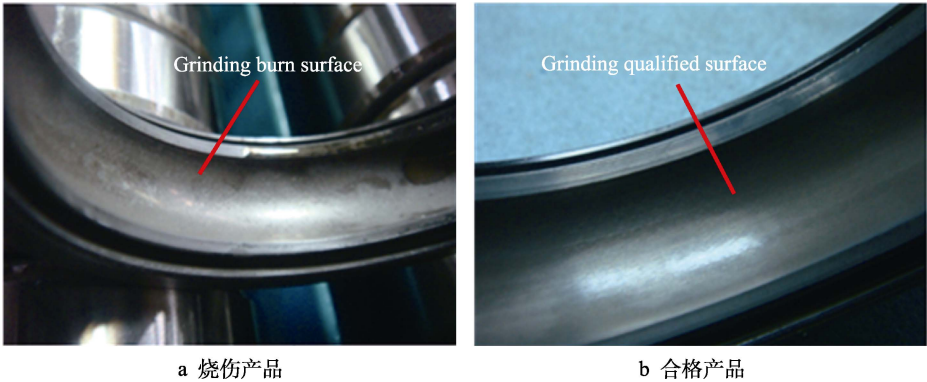


图 15 磨削表面质量图
Fig.15 Grinding surface quality diagram: (a) burn product diagram, (b) qualified product diagram

表 4 优化后磨削参数
Tab.4 Grinding parameters after optimization

Infeed stage	Grinding allowance/mm	Infeed speed/(mm·min ⁻¹)
Rapid infeed	3.5	1000
Approaching speed	0.115	10
Black grinding	0.12	2.4
Roughing	0.07	1.8
Finishing	0.02	1
Spark-out	0.01	0.3

图 16 为优化前后砂轮表面显微镜微观图。参数优化前，切屑较多，如图 16a 中黑点部分所示，容易造成砂轮表面堵塞，使得磨削力过大，影响磨削加工表面质量；优化后，磨削砂轮表面切屑较少，如图 16b 所示，修整出的磨粒切削刃更锋利，有利于提高磨削加工质量。图 17 为加工后合格产品金相图，可见表面金相组织未出现黄、褐、紫、青等烧伤色，且未出现裂纹现象。

根据功率传感器测得磨削加工功率，再根据式 (14)进行磨削力换算，得到磨削力曲线图，如图 18

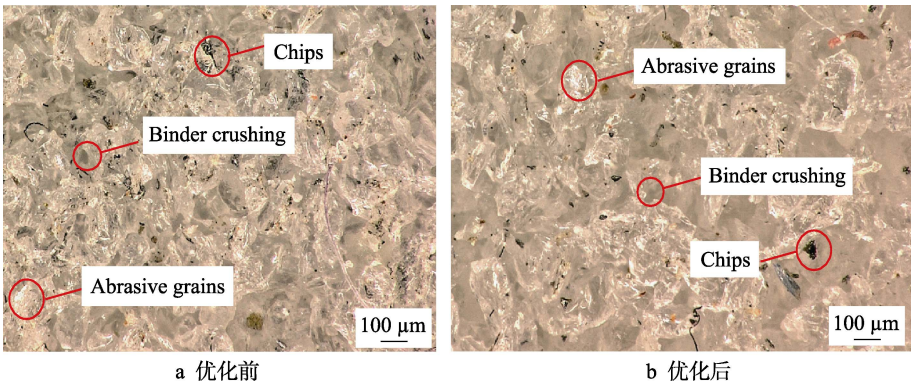


图 16 优化前后砂轮表面形貌
Fig.16 Surface of grinding wheel before and after optimization: (a) before optimization, (b) after optimization

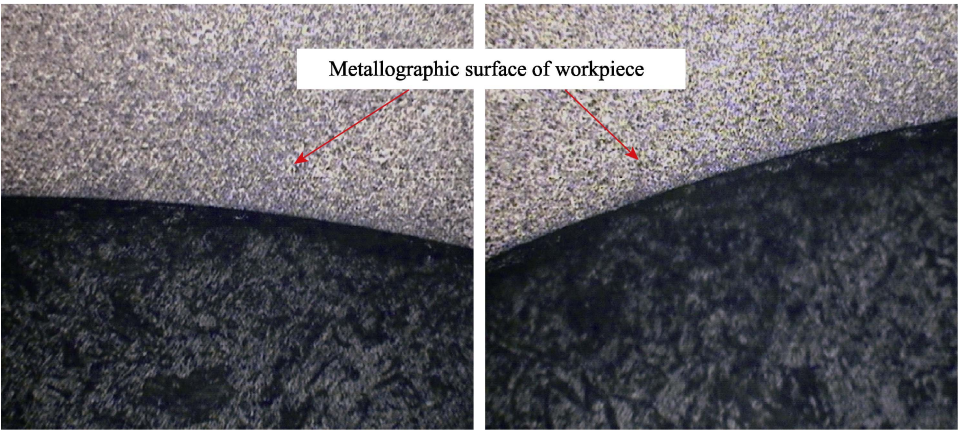


图 17 合格产品金相图
Fig.17 Qualified product metallography

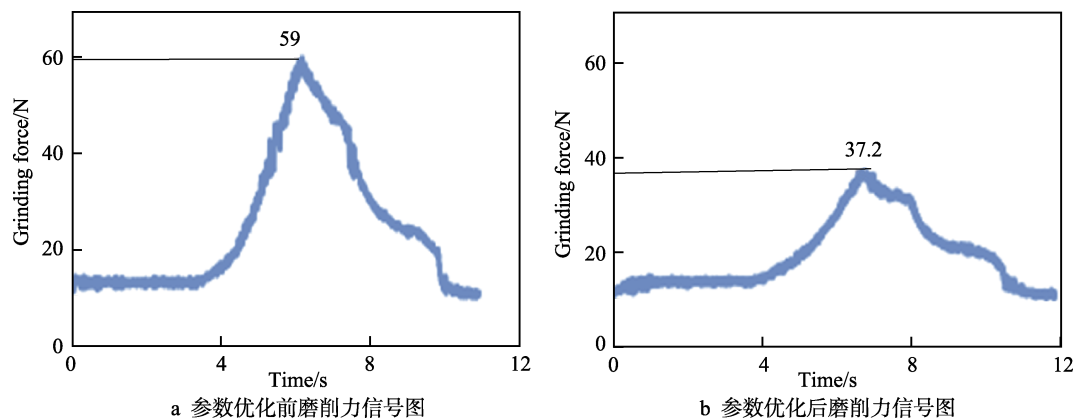


图18 改变参数前后磨削力对比图

Fig.18 Comparison diagram of grinding force before and after changing parameters: (a) grinding force before parameter optimization, (b) grinding force after parameter optimization

所示。原始参数为工厂机床中初始数据,磨削力最大值达到 59 N,加工产品有烧伤缺陷,如图 15a 所示。进行优化后,由于修整比的增加,磨削力明显减小,从原来的 59 N 减小到 37.2 N,如图 15b 所示,加工产品没有烧伤问题。

刮色球法是检查深沟轴承沟形的一种方法,先在待检查的轴承沟道里涂上红色的印泥,然后用符合沟道尺寸要求的钢球刮去轴承沟道里的印泥,如果刮完后沟道两边有淡红色,沟底较干净,那么工件沟形就合格,否则沟形就不合格。

将红色印泥分别涂在优化前后工件的沟道上,再用钢珠刮去,可以发现图 19a 中红色印泥在沟底留下较多,没有刮干净,所以为不合格产品,而图 19b 沟底刮得较干净,只有沟道两边有少量红色,所以为合格产品。经过工件沟形对比,参数优化后加工出的产品沟形较优化前的更符合生产标准。

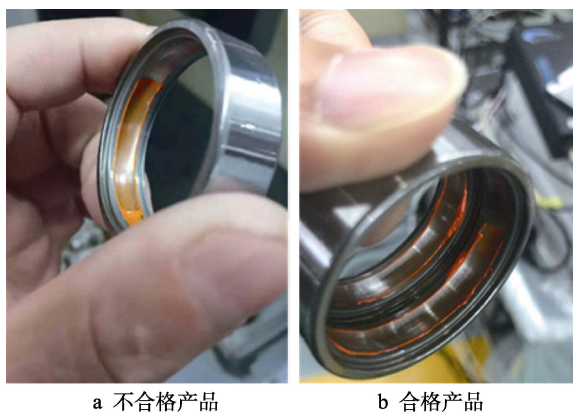


图19 优化前后沟形变化图

Fig.19 Diagram of groove shape before and after optimization: (a) unqualified product, (b) qualified product

4 结论

1)根据修整原理及力学原理,建立修整过程系统简化模型,根据模型求出系统固有频率。通过力锤敲

击主轴获得主轴的频响函数曲线图,经过计算找出最佳频率,换算为主轴转速,使得在修整过程中主轴振动对修整的影响最小。

2)根据砂轮与滚轮的修整轨迹方程,导出修整轨迹与曲率半径的关系,根据曲率半径计算出使得砂轮表面粗糙度较小的修整速比;再引入砂轮与滚轮的干涉角这一物理量,作为修整过程的综合参数,将计算所得的参数代入到干涉角中,确定修整滚轮进给速度。

3)根据加工出的表面质量进行参数优化。若工件表面有振纹或磨削力偏大时,则重新选定主轴转速;若存在烧伤或粗糙度问题时,则重新确定修整速比;若存在外观或圆度问题,则重新确定进给速度。通过这一方法进行优化修整参数,可在加工过程中获得符合质量要求的产品。

参考文献:

- [1] 萧金瑞, 刘晓初, 梁忠伟, 等. 强化研磨微纳加工参数对轴承套圈滚道表面硬度的影响[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 112-117.
XIAO Jin-rui, LIU Xiao-chu, LIANG Zhong-wei, et al. Influence of strengthen grinding micro-nano machining parameters on surface hardness of bearing ring raceway[J]. Journal of netshape forming engineering, 2020, 12(4): 112-117.
- [2] 常舟, 贾谦, 查俊. 考虑轴承沟道表面完整性的磨削效率优化[J]. 哈尔滨轴承, 2018, 39(2): 3-7.
CHANG Zhou, JIA Qian, ZHA Jun. Optimization of grinding efficiency considering surface integrity of bearing raceway[J]. Journal of Harbin bearing, 2018, 39(2): 3-7.
- [3] 侯智, 曾杰. 基于 BP 神经网络的轴承套圈沟道磨削粗糙度识别[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 119-122.
HOU Zhi, ZENG Jie. Roughness identification of bearing ring groove grinding based on BP neural network[J]. Machine design & research, 2019, 35(3): 119-122.
- [4] 王文龙, 张合军. 轴承内圈大圆弧沟道的一种新型磨

- 削方法[J]. 轴承, 2015(12): 26-27.
- WANG Wen-long, ZHANG He-jun. A new method for grinding large circular raceway of bearing inner rings[J]. Bearing, 2015(12): 26-27.
- [5] 王世保. 金刚笔修整位置对轴承套圈沟道影响[J]. 轴承, 2008(1): 17-19.
- WANG Shi-bao. Effect of the diamond pen position on the raceway of bearing ring[J]. Bearing, 2008(1): 17-19.
- [6] 许进, 孙方宏. CBN 砂轮在轴承套圈内圆磨削中的应用[J]. 机械工程师, 2006(11): 44-45.
- XU Jin, SUN Fang-hong. Application of CBN grinding wheel on the inner grinding of bearing rings[J]. Mechanical engineer, 2006(11): 44-45.
- [7] 陈志军, 张旭. 推力角接触球轴承外圈沟道磨削过程中砂轮的修整[J]. 轴承, 2019(11): 21-24.
- CHEN Zhi-jun, ZHANG Xu. Dressing of grinding wheel during grinding of outer raceway of thrust angular contact ball bearings[J]. Bearing, 2019(11): 21-24.
- [8] 李海林. 滚子轴承内圈滚道凸度磨削砂轮的修整[J]. 河南科技, 2016(9): 61-63.
- LI Hai-lin. CNC Bearing grinding wheel dressing three concavity[J]. Journal of Henan science and technology, 2016(9): 61-63.
- [9] TORRANCE A A, BADGER J A. The relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2000, 40(12): 1787-1811.
- [10] 杨摩西, 崔仲鸣, 赫青山, 等. 轴承滚道磨削中金刚石滚轮修整技术的应用[J]. 轴承, 2019(3): 15-19.
- YANG Mo-xi, CUI Zhong-ming, HE Qing-shan, et al. Application of diamond roller dressing technology in grinding of bearing raceway[J]. Bearing, 2019(3): 15-19.
- [11] JIANG J L, GE P Q. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2013(74): 29-40.
- [12] KIM Sun-ho, AHN Jung-hwan. Decision of dressing interval and depth by the direct measurement of the grinding wheel surface[J]. Journal of materials processing technology, 1999, 88(1-3): 190-194.
- [13] 吴贵生, 宋振武. 金刚石滚轮修整参数对砂轮表面锋利性的影响[J]. 磨床与磨削, 1990(1): 45-46.
- WU Gui-sheng, SONG Zheng-wu. Effect of diamond wheel dressing parameters on the surface sharpness of grinding wheel[J]. Grinder and grinding, 1990(1): 45-46.
- [14] 孙春霞, 李斌. 轮毂轴承内圈的成型磨削方法[J]. 制造技术与机床, 2017(4): 82-84.
- SUN Chun-xia, LI Bin. Form grinding of inner ring of car hub bearing[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2017(4): 82-84.
- [15] 李焕锋, 孟逵. 精密内圆磨床陶瓷 CBN 砂轮修整机理及工艺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(4): 81-83.
- LI Huan-feng, MENG Kui. Research on the dressing mechanism and techniques of vitrified CBN grinding wheel for precision inner grinding machine[J]. Diamond & abrasives engineering, 2010, 30(4): 81-83.
- [16] VERKERK J, PEKELHARING A J. The influence of the dressing operation on productivity in precision grinding[J]. Annals of the cirp, 1979, 28(2): 487-495.
- [17] YANG Zhi-bo, ZHANG Shi-yu, HU Jin, et al. Study of material removal behavior during laser-assisted ultrasonic dressing of diamond wheel[J]. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, 2020, 7 (11): 173-184.
- [18] ZHAO Bo, GUO Xing-chen. Surface quality in axial ultrasound plunging-type grinding of bearing internal raceway[J]. Nature, 2020, 106(11): 4715-4730.
- [19] 王明红. 滚轮修整轨迹研究[J]. 中国纺织大学学报, 1997, 23(6): 69-73.
- WANG Ming-hong. Study on wheel dressing trajectory[J]. Journal of China Textile University, 1997, 23(6): 69-73.
- [20] GOPAN V, WINS K L D, SURENDRAN A. An experimental study on the prediction of grinding wheel dressing intervals by relating wheel loading and surface roughness[J]. International journal of abrasive technology, 2019, 9(3): 19-22.
- [21] CHI Yu-lun, GU Jia-jian, LI Hao-lin. Optimization of internal plunge grinding using collaboration of the air-grinding and the material removal model based on the power signal[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 105 (1-4): 247-264.
- [22] MOHAMMED A, GHANIM A D, JASIM B. The impact of vibration response due to rolling bearing components waviness on the performance of grinding machine spindle system[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 2019, 233(3): 747-762.
- [23] GAO Zhe-yu, LIN Jing, WANG Xiu-feng. Grinding burn detection based on cross wavelet and wavelet coherence analysis by acoustic emission signal[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2019, 32(1): 1-10.
- [24] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- REN Jing-xin, HUA Ding-an. Principle of grinding[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [25] 朱欢欢, 李厚佳. 滚珠丝杠磨削成形砂轮修整工艺实验研究[J]. 企业科技创新, 2018(12): 43-45.
- ZHU Huan-huan, LI Hou-jia. Experimental study on grinding wheel dressing process of ball screw grinding forming[J]. Sci-tech & development of enterprise, 2018(12): 43-45.