

往复运动对轴套式球面滚子研磨表面创成的影响

丁嘉豪^{1,2} 陈光^{1,2*} 苏涌翔^{1,2} 孙永泉^{1,2} 任成祖^{1,2}

1.天津大学天津市装备设计与制造技术重点实验室,天津,300354

2.天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津,300354

摘要:为揭示轴套式球面滚子研磨新工艺中研具往复运动对球面滚子几何精度的影响规律,建立球面滚子运动学模型进行仿真计算,并基于 Preston 方程建立了材料去除模型,推得球面滚子周向各角度的材料去除和滚动面纹理分布,然后开展球面滚子研磨试验。结果表明:相对滑动率与仿真值的误差为 8.79%~12.29%;极差百分比与滑动率修正的仿真值误差为 11.2%~17.1%,且研磨后球面滚子的圆度误差最小值为 0.78 μm ;滚动面纹理方向偏角存在差异分布并与表面粗糙度成正相关。试验结果证实了运动学仿真分析的准确性,对提高轴套式球面滚子研磨工艺的圆度误差和表面粗糙度具有指导意义。

关键词:轴套式研磨工艺;球面滚子;运动学分析;往复运动;表面创成机制

中图分类号:TH161; TG580.1; TP391.9

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Reciprocating Motions on Surface Formation Mechanism of Axial Sleeve Typed Lapping of Spherical Rollers

DING Jiahao^{1,2} CHEN Guang^{1,2*} SU Yongxiang^{1,2} SUN Yongquan^{1,2} REN Chengzu^{1,2}

1.Tianjin Key Laboratory of Equipment Design and Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin, 300354

2.Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, 300354

Abstract: In order to reveal the influence laws of reciprocating motions of lapping tools on geometrical accuracy of spherical rollers in new axial sleeve type spherical roller lapping processes, a spherical roller kinematics model was established for simulation calculation, and a material removal model was set up based on Preston's equation, which was used to deduce material removal of spherical roller at each angle of circumferential direction and distribution of texture of rolled surfaces, and then carried out the tests of spherical roller lapping. The results show that the errors between relative sliding rate and simulated value are as 8.33%~10.94%. The errors of the simulated values for percentage of polar deviation and sliding rate correction are as 11.2%~17.1%, and the roundness errors of ground spherical rollers reach a minimum value of 0.78 μm . The rolling surface texture direction angle is differentially distributed and positively correlated with the surface roughness. The test results validate the accuracy of kinematics simulation analysis, which is instructive for improving the roundness error and surface roughness of the new process.

Key words: axial sleeve lapping process; spherical roller; kinematics analysis; reciprocating motion; surface formation mechanism

0 引言

调心滚子轴承因具有承受重载、自动调心和承受双向载荷等优点,广泛应用于风电、造纸、动力传输及船舶等领域^[1-2]。调心滚子轴承的核心部件是球面滚子,高精度的球面滚子受限于轴截面廓形精度无法保证而难以量产。球面滚子的轴

截面廓形影响调心滚子轴承中球面滚子与滚道接触区域的载荷分布及应力分布,进而影响轴承运转稳定性和使用寿命^[3-6]。

目前,球面滚子的加工以无心磨削为主,是决定球面滚子精度的核心工艺^[7]。许多学者对滚动体无心磨削设备的改进开展了研究。刘琦等^[8]提出了新型全自动球面滚子超精机专利,采用交流变频技术带动振荡设备对球面滚子表面进行超精加工,大幅提高了加工后的表面几何精度。陈运

生^[9]提出了切入式滚子全能超精装置及工作方法,实现了在同一台机床上对圆锥、圆柱及球面滚子的外径超精加工,设备具有结构简单、准确度高等优点。张占峰等^[10]分析了大圆弧砂轮加工球面滚子修整装置存在的问题,优化了修整器的结构,减小了修整器误差对滚子形状的影响。贾松阳^[11]提出了一种球面滚子凸度轮廓的多圆弧拟合设计方法,建立了修正对数曲线以提高加工精度。然而,上述加工方法的核心为母性加工原理,球面滚子滚动面尺寸精度依赖机床等设备精度^[12],难以实现批量化生产高轴截面廓形精度的球面滚子^[13]。

为研究磨削参数对滚动体加工的影响规律,大量学者采用运动学、动力学方法对滚动体磨削过程进行了研究。刘兆红等^[14]使用了运动学方法对圆锥滚子无心磨削过程进行分析,探明了磨削工艺参数对滚子几何精度及表面质量的影响规律,指导了加工参数的合理选择。崔奇^[15]通过计算无心磨削机床与工件成圆之间的运动学联系,得到了基本成圆方程并建立了切入式无心磨削的动力学模型,降低了磨削过程中关键部件动态变形和工件最终圆度误差。苏佳^[16]对双平面研磨圆柱滚子的几何运动进行分析,研究了圆柱滚子的滚动角度变化规律,有效提高了加工后圆柱滚子的形状精度。YAO 等^[17-18]开发了一种圆柱滚子无心精加工工艺,考虑三体磨料磨损模式,对圆柱滚子的圆度形成机理及材料去除行为进行了分析。LIU 等^[19]针对圆柱滚子研磨,提出了一种圆柱滚子双盘圆弧接触研磨工艺,分析了圆柱滚子研磨的成圆条件,试验表明该工艺能够有效降低椭圆度误差和棱圆度误差。BRECHER 等^[20]基于切入式无心磨削过程提出了一种时域内数值模拟算法,利用该算法从运动学、动力学角度对工件圆度误差的产生机制进行了分析。目前,国内外学者对球面滚子研磨加工过程的运动、动力学分析研究较少,亟待探明加工参数对球面滚子圆度误差和表面粗糙度的影响规律。

为改善球面滚子轴截面廓形精度等问题,任成祖等^[21]提出了一种用于轴承滚子的滚动表面精加工的轴套式研具及研磨设备。该设备通过研磨条组件驱动球面滚子绕组件轴线公转并提供研磨载荷,研磨环套往复运动驱动球面滚子绕自身轴线自转。在研磨过程中,球面滚子与研具工作面对研,实现对滚动面的材料去除。

研磨环套驱动球面滚子做往复运动时,在转向位置附近存在变速运动,结合研磨材料去除原

理^[22]可知,变速运动将导致滚动面材料去除不一。由“高点多去除,低点少去除”的圆度成形原理^[23]可知,滚动面的材料去除差异将直接影响圆度误差。球面滚子运动速度变化将影响滚动面的纹理分布。研磨环套往复运动过程的变速运动对球面滚子圆度误差和滚动面纹理分布的影响机理尚不明确,为揭示研磨环套往复运动对研磨球面滚子的影响机制,本文采用运动学方法对球面滚子研磨过程进行仿真分析并结合材料去除模型,研究研具往复运动周期对球面滚子圆度误差和表面粗糙度的影响规律。通过轴套式球面滚子研磨试验,验证了运动学模型的准确性,为合理选择加工参数提供理论依据。

1 轴套式球面滚子研磨表面运动创成

1.1 轴套式球面滚子研磨原理

轴套式球面滚子研磨系统主要包含研磨环套、直线沟槽组件、套筒和球面滚子,如图 1 所示。在研磨过程中,直线沟槽对球面滚子施加载荷,同时套筒带动直线沟槽组件绕自身自转轴做回转运动,研磨环套沿轴线方向做往复运动。球面滚子受直线沟槽与研磨环套驱动进行研磨,做绕自身轴线自转和绕直线沟槽组件回转轴公转的运动,结合研磨液中的游离磨料对球面滚子滚动面进行材料去除。

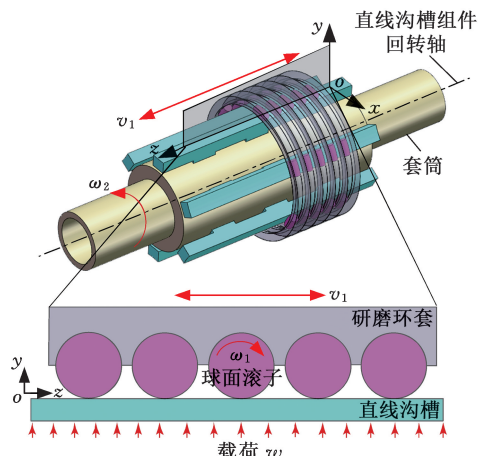


图 1 轴套式球面滚子研磨原理

Fig.1 Principle of axial sleeve type lapping of spherical rollers

1.2 球面滚子运动滑动率仿真

由于研磨过程中存在球面滚子与研磨环套的相对滑动,为了研究研磨环套往复运动周期对球面滚子相对滑动的影响规律,通过 Adams 软件对球面滚子运动过程进行仿真分析。

轴套式球面滚子 Adams 模型保留单个直线沟槽并施加径向力作为研磨载荷进行仿真,过程

不考虑重力,模型如图 2 所示。套筒自转角速度为

$$\omega_2 = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ \pi & 0.5 \leq t < 0.5 + T \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为仿真时间; T 为往复运动周期。

研磨环套往复直线运动速度为

$$v_1 = 50\sin(2\pi t/T) \quad (2)$$

设置直线沟槽与套筒导向孔的摩擦因数为 0.2, 球面滚子与直线沟槽和研磨环套的摩擦因数分别为 0.28 和 0.13^[24]。

模型中研具及工件的材料属性见表 1。

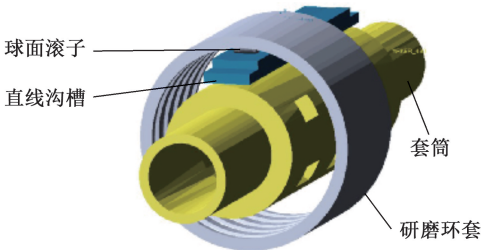


图 2 轴套式球面滚子研磨运动学模型

Fig.2 Kinematic model of axial sleeve type lapping of spherical rollers

表 1 研具及工件的材料属性^[24]

Tab.1 Material properties of grinding tools and workpieces^[24]

零件名称	材料名称	密度 / (kg · mm ⁻³)	弹性模量 / (N · mm ⁻²)	泊松比
研磨环套	球墨铸铁	7.30 × 10 ⁻⁶	1.48 × 10 ⁵	0.25
球面滚子	GCr15	7.81 × 10 ⁻⁶	2.06 × 10 ⁵	0.30
其他	45 钢	7.85 × 10 ⁻⁶	2.00 × 10 ⁵	0.30

通过 Adams 仿真球面滚子运动过程,提取球面滚子质心的自转速度与研磨环套的往复运动速度,如图 3 所示。研磨环套采用正弦波形的往复运动驱动球面滚子做同波形的自转运动。图 3 中 A(A′)、B(B′) 和 C(C′) 为往复周期的等分点,是计算球面滚子运动相对滑动率的标定点。球面滚子与研磨环套的相对滑动率为

$$\epsilon = (1 - \omega_1 r / v_1) \quad (3)$$

式中: r 为球面滚子最大截圆半径,取 9.15 mm; ω_1 为球面

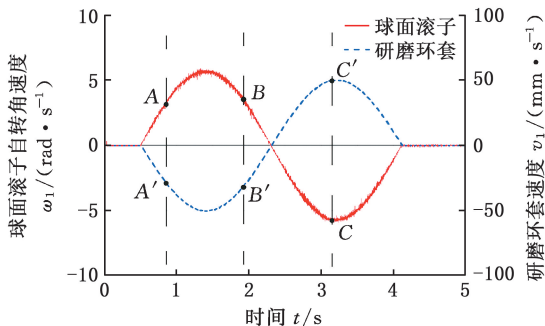


图 3 球面滚子自转角速度及研磨环套速度仿真结果

Fig.3 Simulation results of spherical roller rotational angular velocity and lapping sleeve velocity

滚子自转的角速度。

改变研磨环套往复运动周期,通过式(3)计算图 3 中 A(A′)、B(B′)、C(C′) 的球面滚子与研磨环套的相对滑动率,对三点数据取均值并计算误差得出相对滑动率随往复周期的变化规律,如图 4 所示,球面滚子的相对滑动率随着研磨环套往复运动周期的增加有明显减小,相对滑动率由 1.15% 减小至 0.43%。

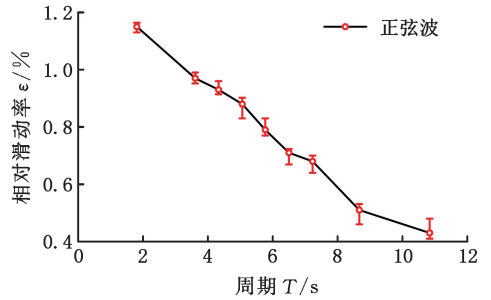


图 4 往复运动周期与球面滚子滑动率关系图

Fig.4 Reciprocating motion period plotted against spherical roller sliding rate

1.3 球面滚子运动学分析

为了研究研磨环套往复运动对球面滚子运动轨迹的影响规律,开展了对球面滚子研磨过程的运动学分析。球面滚子的材料去除主要发生在与研磨环套接触的滚动面上,且球面滚子轴截面廓形半径与研磨环槽最大半径相等,接触形式近似为线接触,十字交叉线如图 5 所示。接触线 1 是球面滚子与环套接触的母线,接触线 2 是球面滚子与研磨环套接触的最大截圆,点 P 是接触线 1 上任一点。材料去除主要发生在接触线 1 和接触线 2 上。在研磨过程中,端部截圆圆度与最大截圆处圆度相互影响,逐渐趋近并最终达到一致。因此,本文重点分析接触线 1 和点 P 的空间轨迹和运动状态。

由于球面滚子与研磨环套的相对运动产生的

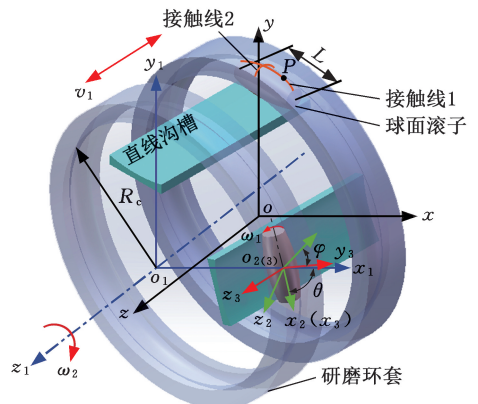


图 5 轴套式研磨设备坐标系分布

Fig.5 Coordinate system distribution of axial sleeve lapping equipment

材料去除在滚动面的分布差异,影响球面滚子圆度的形成过程,通过建立球面滚子的运动学模型反映其运动状态和运动轨迹,分析研磨过程中球面滚子的整体和点 P 的位置,以计算其速度方向、轨迹及材料去除的位置。为分析球面滚子的位置和运动,将单个球面滚子作为研究对象,以球面滚子滚动面最大截圆圆心为原点 o_3 ,建立随球面滚子运动的动坐标系 $o_3x_3y_3z_3$,绕自转轴旋转角度 φ 后得到坐标系 $o_2x_2y_2z_2$,再绕公转轴旋转角度 θ 并平移得到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$,沿着公转轴平移得到研磨环套静坐标系 $oxyz$ 。各坐标系分布如图 5 所示。

研磨环套往复运动驱动球面滚子往复自转。为研究往复运动对研磨过程的影响,采用正弦波往复运动驱动球面滚子自转。为保证研磨环套均匀磨损,直线沟槽组件公转速度固定。

自转角度 φ 与自转角速度 ω_1 的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \int_0^t \omega_1 dt \\ dt &= \int_0^t \frac{(1-\varepsilon \times 10^{-2})v_1}{r} dt \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

利用几何关系可得点 P 在球面滚子动坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 中的位置:

$$\mathbf{P} = \left(l - \frac{L}{2}, \sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c \cos \alpha}, \sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c \sin \alpha} \right) \quad (5)$$

式中: R_c 为球面滚子滚动面的轴截线廓形的曲率半径; l 为球面滚子滚动面轴向长度; L 为球面滚子滚动面轴向长度; α 为 P 点与 y_3 正方向的夹角。

球面滚子在空间中的螺旋运动可通过坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 与坐标系 $oxyz$ 间的坐标变换描述。坐标系之间的变换关系为

$$S_3 \xrightarrow{\mathbf{R}_3^2(\varphi)} S_2 \xrightarrow{\mathbf{R}_2^1(\theta)} S_1 \xrightarrow{\mathbf{P}_1^0(\theta)} S \quad (6)$$

式中: S, S_1, S_2 和 S_3 分别表示坐标系 $oxyz, o_1x_1y_1z_1, o_2x_2y_2z_2$ 和 $o_3x_3y_3z_3$; θ 为运动参数; \mathbf{R} 为旋转矩阵; \mathbf{P} 为平移矩阵。

动坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 中的球面滚子滚动面在静坐标系 $oxyz$ 中运动形成的轨迹方程通过两者间的坐标变换表示为

$$\mathbf{r}^{(0)}(u, v, \theta) = \mathbf{R}_2^1(\theta) \cdot \mathbf{R}_3^2(\varphi) \cdot \mathbf{r}^{(3)}(u, v) + \mathbf{P}_1^0(\theta) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{r}^{(0)}(u, v, \theta)$ 为球面滚子滚动面某一点的空间轨迹, u, v 为球面滚子滚动面上某一点位置参数, $\mathbf{r}^{(3)}(u, v)$ 为球面滚子某一点位置,上标表示所属坐标系; $\mathbf{R}_3^2(\varphi)$ 为坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 到坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 的旋转变换矩阵; $\mathbf{R}_2^1(\theta)$ 为坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 的旋转变换矩阵; $\mathbf{P}_1^0(\theta)$ 为坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 到坐标系 $oxyz$ 的平移

变换矩阵。

式(7)中的变换矩阵分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_3^2(\varphi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_2^1(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{P}_1^0(\theta) &= \begin{bmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ p\omega_2(t_e - t_0) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: p 为螺旋系数; t_0 为起始时间; t_e 为结束时间。

由以上矩阵,式(7)可展开为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi \\ \sin \theta & -\cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ p\omega_2(t - t_0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将球面滚子滚动面任一点 P 的位置方程(式(5))代入式(9)得出点 P 在静坐标系中做螺旋运动所形成空间轨迹方程:

$$\left. \begin{aligned} x &= \left(l - \frac{L}{2} \right) \cos \theta - \left[\sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c^2} \right] \cos \varphi - \left[\sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c^2} \right] \cos \varphi \sin \theta + R_c \cos \theta \\ y &= \left(l - \frac{L}{2} \right) \cos \theta - \left[\sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c^2} \right] \cos \varphi - \left[\sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c^2} \right] \cos \varphi \cos \theta + R_c \sin \theta \\ z &= - \left[\sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c^2} \right] \sin \varphi + p\omega_2(t_e - t_0) + \left[\sqrt{R_c^2 - \left(l - \frac{L}{2} \right)^2 + r - R_c^2} \right] \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

通过式(10)求解球面滚子滚动面点 P 的空间轨迹,其中包含接触线 1 的空间轨迹,进而反映球面滚子的运动状态。为描述球面滚子的空间运动,将部分参数代入式(10),得到点 P 的空间轨迹如图 6 所示。直线沟槽驱动球面滚子公转一周,同时研磨环套往复运动驱动球面滚子变速自转, P 点轨迹的疏密与球面滚子自转速度正相关。当 P 点处于左右端部的转向区间时,球面滚子自转速度减小, P 点轨迹分布密集。通过对 P 点的空间运动轨迹分析,得出球面滚子截圆在周向不同角度的速度大小及方向,为后续计算周向不同角度的材料去除和纹理方向提供理论支撑。

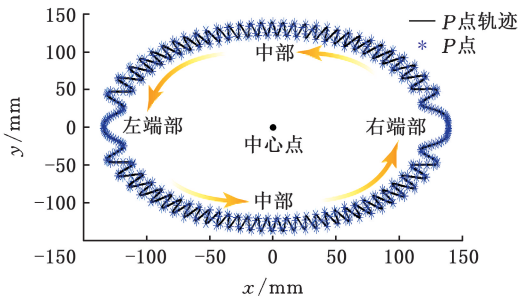


图6 球面滚子滚动面P点的空间轨迹图

$$(R_c = 135 \text{ mm}, \omega_1 = 100 \text{ sint rad/s},$$

$$\omega_2 = 1 \text{ rad/s}, t = 2\pi \text{ s})$$

Fig.6 Space trajectory map of spherical roller rolling surface P point

$$(R_c = 135 \text{ mm}, \omega_1 = 100 \text{ sint rad/s},$$

$$\omega_2 = 1 \text{ rad/s}, t = 2\pi \text{ s})$$

2 轴套式球面滚子研磨表面创成机制研究

2.1 轴套式球面滚子研磨材料去除模型

本文使用研磨加工领域广泛应用的 Preston 材料去除模型。在研磨过程中,研磨液的游离磨料颗粒进入相对运动中的研磨环套与球面滚子的表面间隙时,在研磨压力的作用下,磨粒在球面滚子滚动面上进行微量切削,使滚动面上发生微小起伏的塑性流动,进而产生微量材料去除。由于磨料的硬度远大于球面滚子以及研磨环套的材料硬度,因此可将磨粒简化为刚体,根据压痕理论,平均半径为 R_s 的磨粒与球面滚子、研磨环套接触示意图见图7。

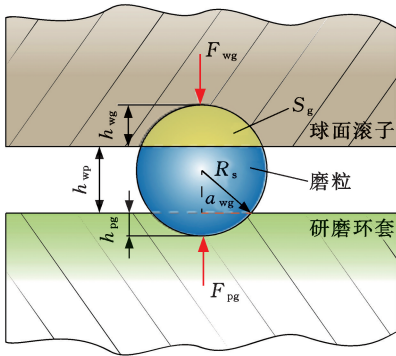


图7 单颗磨粒接触模型

Fig.7 Contact model of a single abrasive particle

单颗磨粒与球面滚子、研磨环套的接触压力分别为^[25]

$$F_{wg} = K_g H_w h_{wg}^2 \quad (11)$$

$$F_{pg} = K_g H_p h_{pg}^2 \quad (12)$$

式中: H_w 、 H_p 分别为球面滚子与研磨环套的硬度; h_{wg} 、 h_{pg} 分别为磨粒压入球面滚子、研磨环套表面的平均压入深度; K_g 为磨粒的形状系数。

由式(11)和式(12)可知,当材料属性确定后,球面滚子平均压入深度的平方与所受压力成

正比,此时球面滚子与研磨环套间的间隙为

$$h_{wp} = 2R_s - h_{wg} - h_{pg} \quad (13)$$

球面滚子带动单颗磨料的相对于静止坐标系的运动速度为

$$v_g = \sqrt{(\omega_1 r)^2 + (\omega_2 R_c)^2} \quad (14)$$

部分磨粒在研磨载荷与研磨速度的作用下对球面滚子滚动面进行材料去除,将这部分磨粒称为有效磨粒^[26]。为计算有效磨粒数,进行如下假设^[27]:

1) 研磨液中所有游离磨料均匀分布,分布于研磨环套表面的游离磨料的颗粒面积密度与研磨液中的颗粒面积密度相等。

2) 游离磨料颗粒的几何形状为球体。

游离磨料的总质量为 m_{gt} , 研磨液的总质量为 m_{lt} , 则游离磨料的体积浓度 C_g 和球面滚子与研磨环套接触线上有效磨粒数 N_e 分别为

$$C_g = \frac{m_{gt}\rho_l}{m_{lt}\rho_g} \quad (15)$$

$$N_e = l_b \left(\frac{3m_{gt}\rho_l}{4\pi R_s^3 m_{lt}\rho_g} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{l_b}{R_s} K_L \quad (16)$$

式中: l_b 为接触线长度; ρ_g 、 ρ_l 分别为磨粒密度与研磨液密度; K_L 为研磨液中磨粒浓度相关系数。

假设研磨压力 p 由 N_e 个有效磨粒均匀分担, 则单个磨粒受到的接触力为

$$F_{wg} = F_{pg} = \frac{p}{N_e} = \frac{pR_s}{l_b K_L} \quad (17)$$

由几何关系可知,通过磨粒压入球面滚子滚动面部分的截圆半径 a_{wg} 可计算磨粒压入的截圆面积 S_g , 从而推导单颗磨粒材料去除量。磨粒压入球面滚子滚动面部分的截圆半径 a_{wg} 和截圆面积 S_g 分别为

$$a_{wg} = \sqrt{R_s^2 - (R_s - h_{wg})^2} = \sqrt{2R_s h_{wg} - h_{wg}^2} \approx \sqrt{2R_s h_{wg}} \quad (18)$$

$$S_g = R_s^2 \arcsin\left(\frac{a_{wg}}{R_s}\right) - a_{wg}(R_s - h_{wg}) = R_s^2 \left[\frac{a_{wg}}{R_s} + \frac{1}{6} \left(\frac{a_{wg}}{R_s}\right)^3 + o\left(\frac{a_{wg}}{R_s}\right)^3 \right] - a_{wg}(R_s - h_{wg}) \approx \frac{2a_{wg}^2}{3R_s} \quad (19)$$

由式(17)可知,磨粒压入球面滚子和研磨环套的平均深度分别为

$$h_{wg} = R_s \sqrt{\frac{p}{K_g H_w l_b K_L}} \quad (20)$$

$$h_{pg} = R_s \sqrt{\frac{p}{K_g H_p l_b K_L}} \quad (21)$$

由式(14)和式(19)可得单位时间单颗磨粒材料去除体积

$$R_{MRg} = S_g v_g = \frac{2a_{wg}^2}{3R_s} \sqrt{(\omega_1 r)^2 + (\omega_2 R_c)^2} \quad (22)$$

研磨总材料去除体积是单个磨粒材料去除体积与有效磨粒的乘积。轴套式研磨球面滚子的单位时间材料去除体积模型如下：

$$R_{MRR} = R_{MRRg} N_e = v_g l_b \frac{2a_{wg}^2}{3R_s} \left(\frac{3m_{gt}\rho_l}{4\pi R_s^3 m_{1t}\rho_g} \right)^{\frac{1}{3}} = K_{MRR} d^{\frac{2}{3}} C_g^{\frac{1}{3}} H_w^{-\frac{3}{2}} v_g = K_{MRR} K_0 v_g \quad (23)$$

式中： K_{MRR} 为材料去除模型的修正系数； K_0 为研磨压力、游离磨粒体积浓度和球面滚子硬度组合的系数。

由式(23)可知，当材料选型及磨粒浓度固定，研磨压力稳定时，材料去除体积与研磨运动速度正相关，便于计算球面滚子滚动面材料去除体积。

2.2 球面滚子角速度及滚动面纹理对圆度的影响机制

2.2.1 球面滚子角速度对圆度的影响机制

为研究往复运动加工策略对研磨球面滚子滚动面材料去除的影响，结合实际研磨环境，作以下假设：

- 1) 研磨过程中，球面滚子有稳定的绕自身轴线自转和绕研磨条回转轴公转。
- 2) 球面滚子受到的应力稳定且所受应力不会使球面滚子发生明显变形。
- 3) 球面滚子运动过程中与研具及磨粒的接触是稳定的。

在研磨过程中，球面滚子滚动面的材料去除分散在圆周上各个角度，不同角度的材料去除分布影响球面滚子的截圆圆度。假设球面滚子某一圆周角度与研磨环套接触 n 次，以滚动面与研磨环套初次接触的圆周角度为起点，记为 0° ，自转转过的角度记为 β ，如图 8 所示，计算球面滚子圆周上各个角度的平均速度如下：

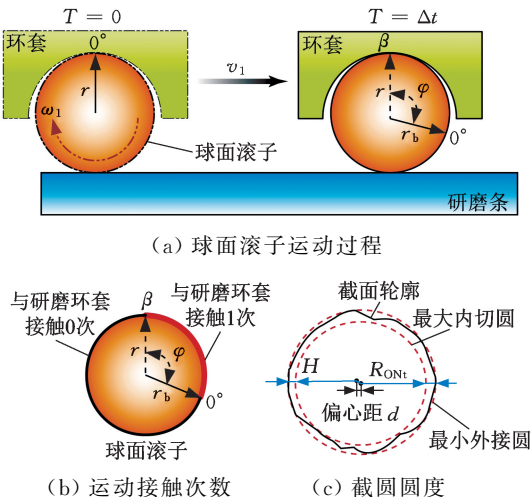


图 8 球面滚子运动接触及截圆圆度

Fig.8 Spherical roller motion contact and truncation roundness diagram

$$\bar{v}_\beta = \begin{cases} \frac{\sum_1^{N_t} v_\beta}{n} = \frac{\sum_1^{N_t} \omega_{1\beta} r}{n} = \sum_1^{N_t} \bar{\omega}_{1\beta} r & n > 0 \\ 0 & n = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中： N_t 代表 t 时刻对应的圆周角度位置。

将式(24)代入式(23)可知在截圆圆周方向上角度 β 处的材料去除体积 $R_{MRR\beta}$ 为

$$R_{MRR\beta} = \begin{cases} K_{MRR} K_0 (|\bar{v}_\beta + \omega_2 R_c|) n & n > 0 \\ 0 & n = 0 \end{cases} \quad (25)$$

由单颗磨粒材料去除的几何关系可知，材料去除量与研磨后截圆半径的关系如下：

$$r_b = r - \frac{R_{MRR\beta}}{K_t} \quad (26)$$

式中： K_t 为比例系数； r_b 为研磨后截圆半径。

由球面滚子自转角度可得单向自转周数 R 为

$$R = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (27)$$

球面滚子运动时存在与研磨环套的相对滑动，则实际自转角速度与理论自转角速度的差值为

$$Q = v_1 \epsilon \times 10^{-2} / r \quad (28)$$

根据式(28)计算单向自转周数 R 为 0.5、1.0 和 2.0 时圆周不同角度有无相对滑动率修正的角速度差值，如图 9 所示。随着单向自转周数的增加，圆周各角度的差值逐渐减小。

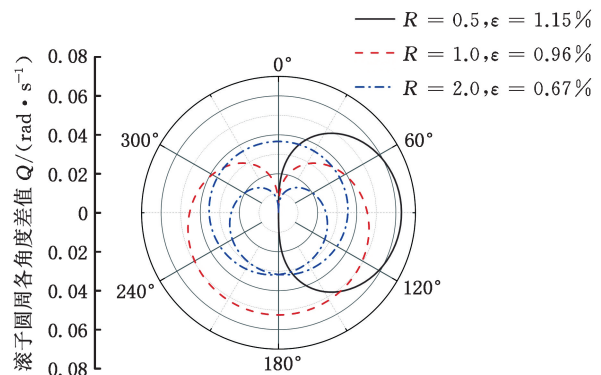


图 9 球面滚子圆周各角度差值分布

Fig.9 Distribution of difference at each angle of spherical roller circumference

结合式(25)和式(26)得出圆周角度研磨后的半径分布，如图 10 所示。当单向自转周数为 0.5 时，不同角度研磨后的半径间差距在其他周数中最大，差值为 0.11 mm。随着单向自转周数的增加，球面滚子截圆轮廓逐渐趋近标准圆，说明在往复运动的加工策略下，可通过选择不同参数大小等方法减小往复运动带来的球面滚子滚动面材料去除的差异。

通过增加自转周数改善研磨球面滚子圆度的方法，本质是单向自转周数的增加使各个圆周角度分散往复运动转向带来的角速度变化。往复运

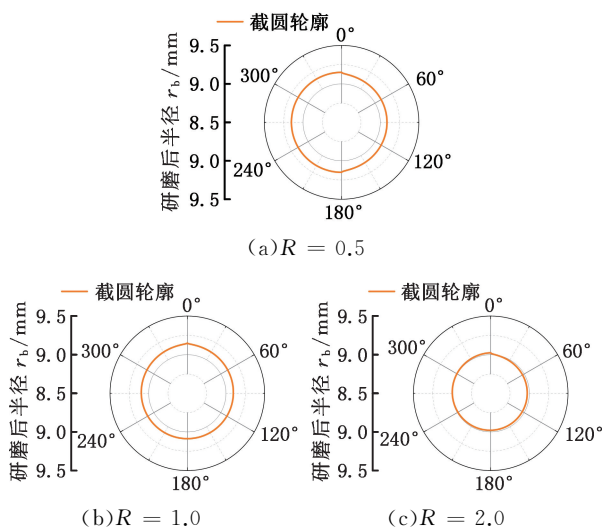


图 10 球面滚子截圆轮廓 ($K_{MRR}K_0 = 0.02$)

Fig.10 Spherical roller truncated circle profile

($K_{MRR}K_0 = 0.02$)

动策略的优点是将角速度发生改变的区间分散, 以达到较小的圆度误差, 但不同运动参数的分散程度有所不同。本文采用最小外接圆法来计算圆度 R_{ONt} 。球面滚子的截圆曲线半径极差为

$$H = r_{max} - r_{min} \quad (29)$$

式中: r_{max} 、 r_{min} 分别为截圆曲面的最大半径与最小半径。

通常圆度 R_{ONt} 与截圆半径极差 H 的关系如图 8c 所示。由于球面滚子滚动面精加工研磨过程是微米级的材料去除, 故可忽略最大内切圆和最小外接圆之间的偏心距 d 。此时, 圆度 R_{ONt} 与截圆半径极差 H 成正相关。

将球面滚子周向均分为 $k + 1$ 份, 对应的角度记为 i_k , 则该截圆下研磨后平均半径为

$$\bar{r}_b = \sum_0^k \frac{r_b i_k}{k + 1} \quad (30)$$

当单向自转周数小于 1.0 时, 球面滚子存在未研磨区域, 截圆不同角度的研磨后半径间差距最大, 此处极差记为 H_0 。其他周数的研磨后截圆半径极差与 H_0 的比值记为极差百分比 Ω :

$$\Omega = (r_{max} - r_{min}) / H_0 = \frac{R_{ONt}}{H_0} \quad (31)$$

极差百分比 Ω 表示在同一幅值不同单向自转周数下所得到的研磨后截圆半径极差 H 占该幅值下能产生的最大研磨后截圆半径极差的比重。

将不同单向自转周数下各角度的研磨后半径代入式(31), 得出极差百分比的变化规律, 如图 11 所示。

非整数单向自转周数使球面滚子滚动面速度改变区间错位分布, 减小了不同圆周角度上平均速度的差异, 降低了该周数对应的极差百分比, 其

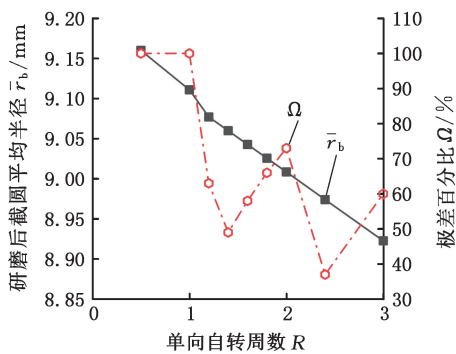


图 11 Ω 和 \bar{r}_b 随 R 的变化

Fig.11 Changes of Ω and \bar{r}_b with R

中周数为 2.4 的减小效果最为突出, 仅为初始的 38.4%。随着单向自转周数的增加, 极差百分比整体呈下降趋势, 且在整数周数局部上升。

2.2.2 球面滚子滚动面纹理疏密对圆度影响机制

球面滚子滚动面纹理的疏密与球面滚子滚动面接触环套的次数有关, 与研磨环套接触次数越多的区域留下的纹理越密集。纹理疏密指数 G 以单向回转周数为 1.0 时产生的纹理疏密程度为基准, 疏密指数越大说明纹理越密集, 即

$$G = \frac{n}{n_0} \quad (32)$$

式中: n_0 为 $R = 1.0$ 时纹理的疏密。

由于纹理疏密与接触次数 n 正相关, 并且接触次数由单向回转周数决定, 因此, 球面滚子滚动面纹理的疏密与单向回转周数正相关。极差百分比随着纹理疏密指数 G 变化的趋势如图 12 所示。当纹理疏密指数从 1.0 增至 8.0 时, 极差百分比从 100% 降至 37.64%, 说明纹理疏密指数与极差百分比成负相关, 表明球面滚子滚动面表面纹理越密集球面滚子的圆度误差越小。因此, 可通过观察球面滚子滚动面纹理疏密程度的变化间接判断圆度有无改变, 为寻找合适的加工参数提供便捷。

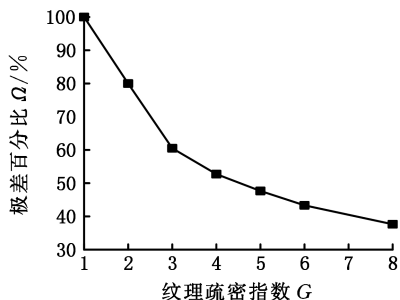


图 12 Ω 随 G 值变化的趋势

Fig.12 Trend of Ω with G value

2.3 运动参数对球面滚子滚动面纹理方向及滚动面精度的影响机制

研磨环套往复运动影响球面滚子的自转, 运

动端部转向过程的自转速度与运动中部的自转速度不同。研磨过程中,磨粒在球面滚子滚动面相对运动方向由球面滚子自转速度和公转速度的合速度方向决定,引入磨粒划痕方向与球面滚子轴线的偏角 γ_0 :

$$\gamma_0 = \arctan \frac{\bar{\omega}_1 r}{\omega_2 R_c} \quad (33)$$

不同单向自转周数条件下,滚动面纹理方向偏角分布如图 13 所示。

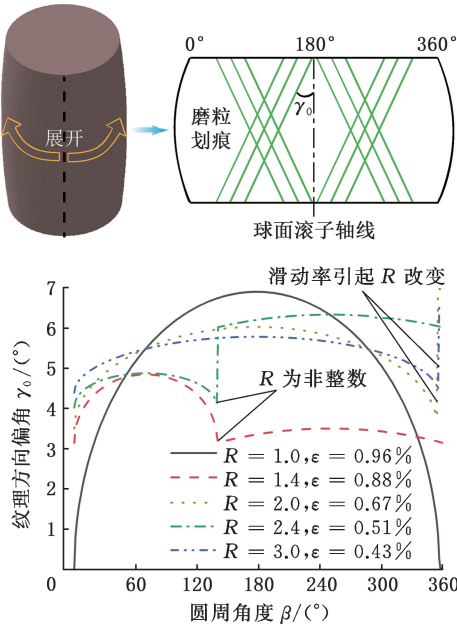


图 13 纹理方向偏角在球面滚子滚动面上的分布
Fig.13 Distribution of the texture direction angle on the rolling surface of a spherical roller

由于部分单向自转周数为非整数,在 144° 处偏角发生突变,此外相对滑动率影响滚子实际自转周数,导致在 360° 处产生偏角改变。随着球面滚子单向自转周数从 1.0 增至 3.0,球面滚子滚动面纹理方向极差从 6.91° 降到 2.18° 。当单向自转周数分别为 2.0、2.4 和 3.0 时,滚动面平均纹理方向分别为 5.51° 、 5.64° 及 5.49° ,说明整数自转周数下纹理方向分布更均匀。

在轴承领域,表面粗糙度影响轴承使用寿命和可靠性。目前,表面粗糙度最广泛使用的评定参数为轮廓算术平均偏差 Ra :

$$Ra = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} |Y(x)| dx \quad (34)$$

式中: $Y(x)$ 为基于中线的表面轮廓高度; L_c 为取样长度。

各磨粒受研磨载荷压入球面滚子表面深度 h_{wgi} 使用瑞利分布表示,概率密度函数^[28] 为

$$f(h_{wgi}) = \begin{cases} \frac{h_{wgi}}{\delta^2} \exp(-\frac{1}{2}(\frac{h_{wgi}}{\delta})^2) & h_{wgi} > 0 \\ 0 & h_{wgi} \leq 0 \end{cases} \quad (35)$$

式中: δ 为与研磨参数、材料特性等有关参数。

假设各磨粒与球面滚子表面相对滑动后产生的划痕相互独立,以垂直于纹理方向作为测量方向,将其测量结果为基准记为 Ra_s ,则不同纹理方向的表面粗糙度 Ra_γ 为

$$Ra_\gamma = \frac{\sin \gamma_0}{L_c} \int_0^{L_c} |h_{wgi} - h_c| dx = Ra_s \sin \gamma_0 \quad (36)$$

式中: h_c 为微观轮廓中心线深度。

由式(36)可知,当偏角小范围变动时,滚动面纹理方向与表面粗糙度近似成正相关。

3 轴套式球面滚子研磨表面创成试验

3.1 试验系统和条件

轴套式球面滚子研磨样机实物如图 14 所示。采用 30 个滚动面无明显凹痕、最大截圆半径相近的球面滚子作为研磨试样。试验过程中,研磨液通过循环装置不断浸润研磨空间,水基研磨液的主要成分(用质量分数表示)为 10% 平均粒度为 $1 \mu m$ 的 Al_2O_3 磨粒;直线沟槽组件回转速度为 30 r/min;研磨环套往复运动幅值为 50 mm/s,周期为 3.61~10.84 s;研磨时间为 3 h。

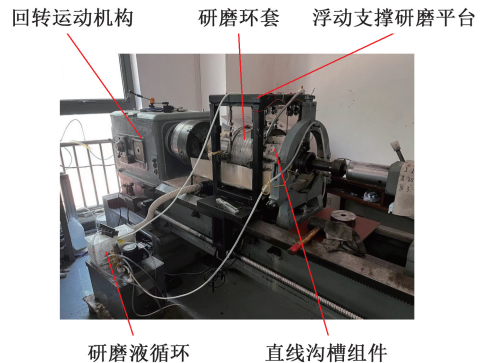


图 14 轴套式球面滚子研磨样机实物图
Fig.14 Sleeve type spherical roller lapping sample machine physical drawing

研磨平台做往复运动和直线沟槽组件做回转运动,使球面滚子做绕自身轴线的自转运动和绕直线沟槽组件轴线的公转运动。试验所用球面滚子材料及尺寸参数见表 2。

表 2 球面滚子材料及尺寸参数

Tab.2 Spherical roller material and size parameters

名称	材料	轴向长度/ mm	最大截圆 直径/mm	轴截面廓形 曲率半径/mm
球面滚子	GCr15	30.0	18.3	130.0

3.2 试验过程及测量

1) 在挑选的 30 个球面滚子中随机选择其中 4 个球面滚子分别测量最大截圆处附近的圆度误差,并观测滚动面初始纹理。

2) 设置研磨环套往复运动周期分别为 3.61 s、

5.06 s、6.50 s、8.67 s 和 10.84 s,依次进行轴套式球面滚子研磨试验。单次研磨试验在研磨液润滑条件下持续 1 h,随后将球面滚子从样机中取出清洁表面后再以同一姿态随机放回,共重复 3 次上述操作。

3)试验完成后取出试验前选择的 4 个球面滚子,再次测量试样最大截圆处附近圆度误差和观测试样滚动面纹理并记录。

4 轴套式球面滚子研磨试验结果

4.1 球面滚子运动相对滑动率及研磨修正系数

考虑当直线沟槽组件回转速度过快导致球面滚子角速度难以测量,降低其回转速度至 1、2 和 3 r/min,以验证运动学模型的正确性。研磨环套往复运动采用梯形波,速度幅值为 100 mm/s。在球面滚子滚动面上粘贴标记物,录制球面滚子运动过程并进行分析,观察球面滚子转动一周的时间以计算其运动的角速度。假设球面滚子自转一周的时间为 t_m ,则球面滚子与研磨环套的相对滑动率为

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_1 r}{v_1} = 1 - \frac{2\pi r}{t_m v_1} \quad (37)$$

为得到球面滚子自转一周的时间,使用帧率 60 s⁻¹的摄像机对球面滚子转动状态进行拍摄。通过视频的图像信息,得到标记物出现在同一位置的时间间隔,测量的关键帧如图 15 所示。

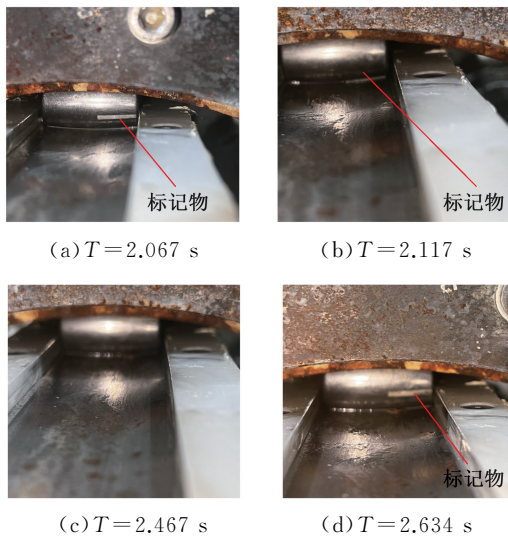


图 15 球面滚子自转周期测量

Fig.15 Spherical roller rotation period measurement

以相同的直线沟槽组件回转速度和研磨环套往复运动速度对球面滚子运动进行 Adams 仿真,仿真所得的球面滚子自转角速度与试验结果对比见表 3。由表 3 可得,试验结果和仿真结果的相对误差在 8.79%~12.29%,误差均小于 15%,说

表 3 试验与仿真结果对比

Tab.3 Comparison of test and simulation results

编号	$n_{rot}/(r \cdot \min^{-1})$	角速度 $\omega_1/(rad \cdot s^{-1})$			ϵ 均值/%
		第一次	第二次	第三次	
试验组 1	1	11.63	10.98	9.39	2.39
仿真组 1	1	10.82	10.57	10.68	2.18
试验组 2	2	9.66	11.59	10.94	1.79
仿真组 2	2	10.76	10.58	10.79	2.01
试验组 3	3	11.09	9.81	11.42	1.43
仿真组 3	3	10.52	10.64	11.12	1.56

明仿真结果较为准确,进一步证实运动学仿真模型的准确性。

研磨试验完成后,测量球面滚子研磨前后的质量变化。当研磨环套往复运动周期分别为 3.61、5.06、6.50、8.67、10.84 s 时,对应材料去除量分别为 10.12、9.86、9.75、11.21、10.79 mg。将上述材料去除量分别代入式(23)推得研磨修正系数 K_{MRR} ,其均值为 0.4107。

4.2 球面滚子单向自转周数对圆度的影响规律

对单向自转周数为 1.0 和 2.4 的研磨后球面滚子,利用 Talyrond131 圆度仪测量滚动面各部分的圆度误差,如图 16 所示。当单向回转周数为 1.0 时,球面滚子始终在特定圆周角度区间上发生转向,在该区间滚动面平均自转速度远小于其他区间,进而材料去除量小于其他角度区间,最终在该角度区间形成一定凸起。对比球面滚子滚动面各个部分可知,在 21°~43°区间对应的截圆轮廓存在高度近似的凸起,说明往复运动的转向区间滚动面材料去除较少,不利于圆度误差的改善。当单向自转周数为 2.4 时,不存在明显的截圆轮廓凸起,各部分的圆度误差比较接近,说明周数的增加可减小往复运动转向过程带来的滚动面材料去除分布的差异。

分析圆度误差与单向自转周数关系,对比理论分析中极差百分比随单向自转周数的变化趋势,如图 17 所示。对比未研磨的最大截圆处圆度为 1.54 μm ,当单向自转周数为 2.4 时,最大截圆处圆度最小值为 0.78 μm ,说明轴套式加工方法可有效改善球面滚子滚动面圆度。研磨试验所得极差百分比的变化趋势与理论分析一致。在考虑研磨过程中球面滚子运动存在滑动现象后,极差百分比理论值与试验值的误差由未修正的 32.9%~68.1%减小至修正后的 11.2%~17.1%。对比球面滚子运动有无滑动时,相同的研磨环套往复运动周期下无滑动率的单向自转周数更大,分散运动变速区间的的能力更强,球面滚子滚动面材料去除越均匀,因此研磨后圆度误差更小,极差百分比

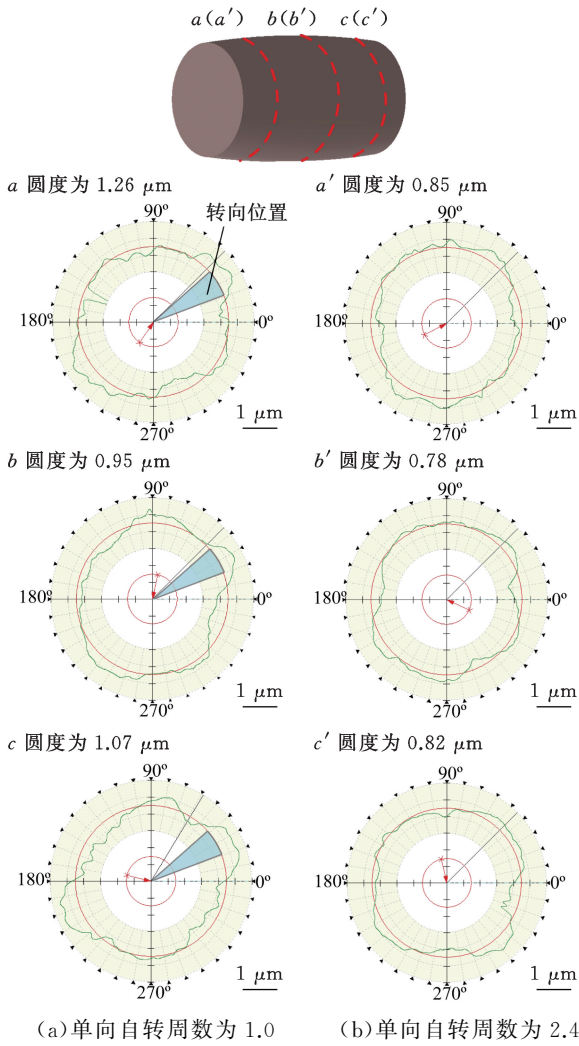


图 16 滚动面各部分圆度

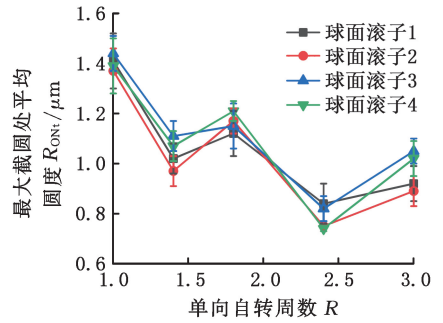
Fig.16 Roundness of rolling surface parts

也更小。上述结果表明,适当增加球面滚子的单向自转周数或是采用非整数的周数进行球面滚子研磨,可以提高分散运动变速区间的能力,有效减小球面滚子的圆度误差。

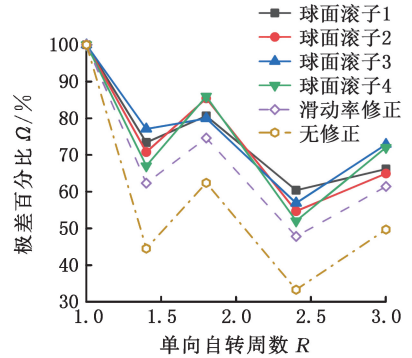
分析极差百分比理论值与试验值的误差,考虑除运动过程中的滑动现象外,球面滚子在实际研磨过程在转向区间还存在窜动现象,降低球面滚子运动的连续性,影响了滚动面材料去除的均匀性,从而影响研磨后截圆圆度,导致试验结果与理论分析的误差。

4.3 滚动面纹理方向对表面粗糙度的影响规律

通过对球面滚子滚动面不同圆周角度下纹理方向的观测,验证了理论分析中滚动面纹理方向的差异分布,部分圆周角度对应的纹理方向如图 18 所示。未研磨的球面滚子滚动面存在无规律的划痕和凹痕,研磨后的滚动面存在有明显趋向的纹理。当单向自转周数为 1.0 时,球面滚子长时间在某一角度区间附近转向,此时磨粒运动方向为球面滚子公转方向,在 0°附近留下与滚子轴



(a) 最大截圆处平均圆度



(b) 极差百分比

图 17 不同单向自转周数的圆度与极差百分比

Fig.17 Roundness and percentage of polarization for different unidirectional rotational cycles

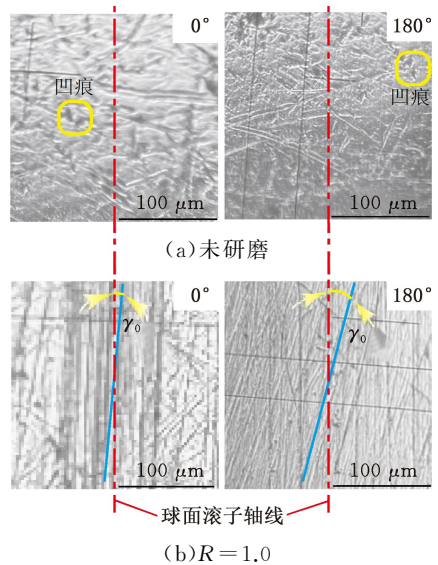


图 18 不同单向自转周数下滚动面纹理分布

Fig.18 Texture distribution of rolling surface with different unidirectional rotational cycles

线几乎平行的纹理方向。

通过 Form Talysurf PGI NOVUS 表面轮廓仪测量了球面滚子滚动面不同角度的表面粗糙度,选择总体最小二乘圆法进行校平,L 滤波器选择 0.25 mm,测量方向为母线方向。对比未经轴套式研磨的球面滚子与研磨后的球面滚子滚动面的表面粗糙度,如图 19 所示。未加工滚动面表面

粗糙度 Ra 值为 $0.0869 \mu\text{m}$, 加工后的滚动面的表面粗糙度 Ra 值为 $0.0512 \mu\text{m}$, 说明轴套式研磨加工方法可有效降低球面滚子表面粗糙度。

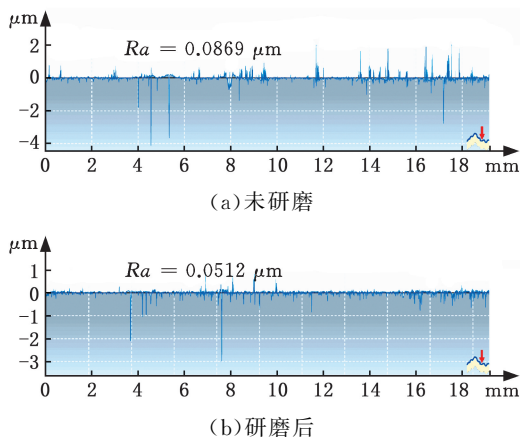


图 19 研磨加工前后球面滚子表面粗糙度

Fig.19 Surface roughness of spherical roller before and after lapping process

将球面滚子滚动面各角度的纹理方向与表面粗糙度对比, 如图 20 所示。当纹理方向从 0.6° 增至 8.7° 时, 对应的表面粗糙度由 $0.0277 \mu\text{m}$ 增至 $0.0617 \mu\text{m}$, 与 2.2 节中分析得到滚动面纹理方向随圆周角度的变化关系基本一致, 表面粗糙度与纹理偏角成近似正相关。当单向自转周数为 3.0 时, 球面滚子滚动面不同角度的纹理方向偏角差值最小, 仅为 1.3° , 滚动面的表面粗糙度分布最均匀, 最小值为 $0.0426 \mu\text{m}$ 。上述结果表明, 研磨过程中适当增加球面滚子的单向自转周数可增加不同角度纹理方向的一致性, 有利于滚动面表面粗糙度的均匀分布。球面滚子滚动面不同角度纹理方向的差异分布验证了球面滚子运动学模型的正确性, 明确了纹理方向与表面粗糙度的关系, 为合理选择往复运动参数提供了依据。

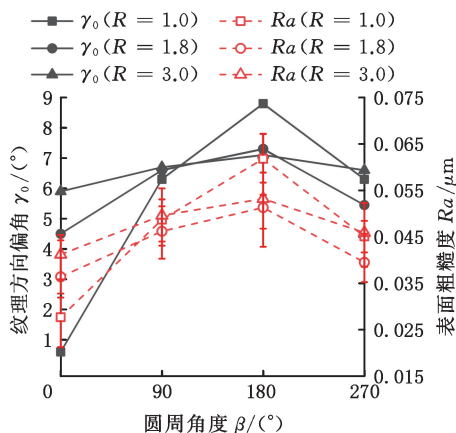


图 20 滚动面纹理方向偏角与表面粗糙度分布

Fig.20 Distribution of texture direction angle and surface roughness of the rolling surface

5 结论

1) 轴套式球面滚子研磨新工艺中研具的往复运动对工件加工质量有重要影响。本文采用运动学模型对轴套式球面滚子研磨过程进行分析, 建立了基于 Preston 方程的材料去除模型, 定量分析了研具往复运动对球面滚子圆度和表面粗糙度的影响规律。

2) 球面滚子相对滑动率随研磨环套周期的增加而减小。由低公转转速验证试验可知, 试验所得相对滑动率与仿真值相对误差为 $8.79\% \sim 12.29\%$, 说明运动学模型仿真较为准确。

3) 球面滚子滚动面截圆圆度误差随球面滚子单向自转周数的增大而减小, 且非整数周数所得圆度小于相邻整数所得。考虑滑动率修正后, 极差百分比理论值与试验值的误差由未修正的 $32.9\% \sim 68.1\%$ 减小至修正后的 $11.2\% \sim 17.1\%$ 。当研具驱动球面滚子单向自转 2.4 周时, 球面滚子滚动面最大截圆处圆度误差由 $1.54 \mu\text{m}$ 降低至 $0.78 \mu\text{m}$ 。

4) 球面滚子滚动面纹理方向偏角差值随球面滚子单向自转周数的增大而减小, 进而影响滚动面表面粗糙度的分布。当研具驱动球面滚子单向自转 3.0 周时, 滚动面不同角度的纹理方向偏角差值最小为 1.3° , 滚动面表面粗糙度分布最均匀, 表面粗糙度 Ra 值由 $0.0869 \mu\text{m}$ 下降至最小值 $0.0426 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] CUI Lingli, WANG Xin, XU Yonggang, et al. A Novel Switching Unscented Kalman Filter Method for Remaining Useful Life Prediction of Rolling Bearing[J]. Measurement, 2019, 135:678-684.
- [2] 刘静. 球面滚子超精机的研制[J]. 轴承, 2004(11): 16-17.
LIU Jing. Development on Spherical Roller Superfinishing Machine[J]. Bearing, 2004(11):16-17.
- [3] HARRIS T A, KOTZALAS M N. Essential Concepts of Bearing Technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [4] TIWARI R, WAGHOLE V. Optimization of Spherical Roller Bearing Design Using Artificial Bee Colony Algorithm and Grid Search Method[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2015, 16(4): 221-233.
- [5] CHEN Guanci, MAO Fanhai, WANG Baokun. Effects of Off-sized Cylindrical Rollers on the Static

- Load Distribution in a Cylinder Roller Bearing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2012, 226(8):687-696.
- [6] ZANTOPULOS H, RUSSELL J Z. A Fatigue Life Comparison of Two-row Tapered Roller Bearings and Spherical Roller Bearings[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(4):917-921.
- [7] XU W, WU Y, SATO T, et al. Effects of Process Parameters on Workpiece Roundness in Tangential-feed Centerless Grinding Using a Surface Grinder [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(5):759-766.
- [8] 刘琦, 侯亚新, 陈宪, 等. 全自动球面滚子超精机: 中国, 200410060558.5[P]. 2006-04-05.
LIU Qi, HOU Yaxin, CHEN Xian, et al. Automatic Spherical Roller Superfinishing Machine: CN, 200410060558.5[P]. 2006-04-05.
- [9] 陈运生. 切入式滚子全能超精装置及工作方法: 中国, 201110324497.9[P]. 2012-02-22.
CHEN Yunsheng. Plunge-type Roller All-around Superfinishing Device and Working Method: CN, 201110324497.9[P]. 2012-02-22.
- [10] 张占锋, 刘阳. 球面滚子磨削用大圆弧砂轮修整装置[J]. 轴承, 2010(10):23.
ZHANG Zhanfeng, LIU Yang. Grinding Wheel Dresser with Large Arc for Spherical Roller Grinding[J]. Bearing, 2010(10):23.
- [11] 贾松阳. 滚子凸度轮廓的多圆弧拟合设计方法[J]. 轴承, 2020(11):1-5.
JIA Songyang. Multi Arc Fitting Design Method for Crown Profile of Rollers[J]. Bearing, 2020(11):1-5.
- [12] 梁磊, 陈光, 张婧, 等. 圆锥滚子双盘研磨工作面求解与形面分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13):252-261.
LIANG Lei, CHEN Guang, ZHANG Jing, et al. Theoretical Solution and Profile Analysis of Working Surface for Double-disk Grinding of Tapered Roller [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13):252-261.
- [13] 戴永镇. 无心磨削成圆理论分析及常见缺陷排故分析[J]. 中小企业管理与科技, 2019(1):145-146.
DAI Yongzhen. Analysis on the Theory of Centerless Grinding into a Circle and the Troubleshooting of Its Common Defects[J]. Management & Technology of SME, 2019(1):145-146.
- [14] 刘兆红, 林润磊, 宫传伟. 圆锥滚子无心磨削运动学和切削力学分析[J]. 哈尔滨轴承, 2021, 42(4):22-26.
LIU Zhaohong, LIN Runlei, GONG Chuanwei. Analysis of Kinematics and Cutting Mechanics for Centerless Grinding of Tapered Rollers[J]. Journal of Harbin Bearing, 2021, 42(4):22-26.
- [15] 崔奇. 高精度无心磨削成圆过程解析及其虚拟加工系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
CUI Qi. Analysis of Rounding Process of High Precision Centerless Grinding and Research on Its Virtual Machining System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [16] 苏佳. 圆柱滚子一致性及其检测方法的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
SU Jia. Research on Consistency of Cylindrical Roller and Its Detection Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [17] YAO Weifeng, LYU Binghai, WANG Chengwu, et al. Modeling, Simulation, and Experimental Verification on Material Removal and Rounding Process of Centerless Cylindrical Finishing with Free Abrasives and Soft Pad[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(5):1443-1455.
- [18] YAO Weifeng, LIU Junwei, HUANG Jian, et al. Improvement of Roundness in Centerless Finishing of Bearing Steel Rollers by Taguchi Method in Experiments and Simulation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(9):2853-2872.
- [19] LIU Weifeng, REN Chengzu, CHEN Guang, et al. Rounding Mechanism of a Novel Double-disc Arc-contact Lapping for High-precision Rollers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(11):5571-5589.
- [20] BRECHER C, HANNIG S. Simulation of Plunge Centerless Grinding Processes[J]. Production Engineering, 2008, 2(1):91-95.
- [21] 任成祖, 孙永泉, 魏长旭, 等. 用于轴承滚子的滚动表面精加工的轴套式研具及研磨设备: 中国, 202311102330.7[P]. 2023-11-17.
REN Chengzu, SUN Yongquan, WEI Changxu, et al. Sleeve Type Grinding Tools and Grinding Equipment for Rolling Surface Finishing of Bearing Rollers: CN, 202311102330.7[P]. 2023-11-17.
- [22] 杜祥雷. 棒销式转子影响小型卧式砂磨机研磨效果的分析与研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
DU Xianglei. Analysis of Grinding Effect of the Pin-type Rotor Structure on Horizontal Small Sand Mill[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
- [23] 曹麟祥, 王丙甲. 圆度检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
CAO Linxiang, WANG Bingjia. Roundness Measurement and Verification Techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(16):2929-2939.

- [9] ZHAO H C, CHEN J N, XU G H. Design Methodology and Characteristic Analysis of High-order Mutil-segment Deformed Eccentric Non-circular Gear[J]. Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering, 2024, 22(2):217-234.
- [10] XU Hao, FU Tianwen, SONG Peng, et al. Computational Design and Optimization of Non-circular Gears[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(2):399-409.
- [11] 叶军, 陈建能, 赵雄, 等. 一种新型类偏心圆非圆齿轮设计及其应用[J]. 中国机械工程, 2018, 29(5):565-571.
YE Jun, CHEN Jianneng, ZHAO Xiong, et al. Design and Applications of Generalized Eccentric Noncircular Gears[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(5):565-571.
- [12] 陶德华, 王英, 陈建能, 等. 脉动血流发生器非圆齿轮-曲柄滑块式驱动机构设计与分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(16):1914-1920.
TAO Dehua, WANG Ying, CHEN Jianneng, et al. Design and Analysis of Non-circular Gear Slider-crank Mechanisms Used as Driver for Pulsating Blood Flow Generators[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(16):1914-1920.
- [13] 赵宏平, 郭彩芬. 一种匀变非圆齿轮设计方法及其传动特性研究[J]. 机械传动, 2021, 45(11):109-

115.

- ZHAO Hongping, GUO Caifen. Research of a Design Method of Uniform Non-circular Gear and Its Transmission Characteristic [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(11):109-115.
- [14] 郝壮壮, 张庆春, 胡云波, 等. 齿面摩擦和几何偏心对含变位直齿齿轮啮合刚度的影响研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(23):2812-2823.
HAO Zhuangzhuang, ZHANG Qingchun, HU Yunbo, et al. Research on Influences of Tooth Friction and Geometric Eccentricity Errors on Mesh Stiffness of Profile Shifted Spur Gear Pairs [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(23):2812-2823.
- [15] DOONER D B, MUNDO D. Unloaded Transmission Error and Instantaneous Gear Ratio for Non-circular Gears with Misalignments[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 170:104728.

(编辑 王旻玥)

作者简介:陶德华*,男,1993年生,讲师。研究方向为异性齿轮传动技术。E-mail:taodehua@zjnu.edu.cn.

本文引用格式:

陶德华,王英,曹振新,等.多段变性 Pascal 蜗线齿轮传动特性分析[J].中国机械工程,2025,36(3):475-482.

TAO Dehua, WANG Ying, CAO Zhenxin, et al. Analysis of Transmission Characteristics of Multi-stage Denatured Pascal Worm Gears[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):475-482.

(上接第 474 页)

- [24] SU Yongxiang, CHANG Yuchong, CHEN Guang, et al. Study on Friction and Wear Properties of Cast Iron Material in Line Contact Condition Based on Free Abrasive Grinding Experiment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(10):3275-3292.
- [25] EVANS C J, PARKS R E, RODERICK D J, et al. Rapidly Renewable Lap: Theory and Practice [J]. CIRP Annals, 1998, 47(1):239-244.
- [26] 刘静莉. 考虑工件-磨料-抛光垫接触状态的硬质合金化学机械抛光机理研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2020.
LIU Jingli. Study on Chemical Mechanical Polishing Mechanism of Cemented Carbide Considering the Contact State of Workpiece-abrasive-polishing Pad[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [27] ZHAO Yongwu, CHANG L. A Micro-contact and Wear Model for Chemical-mechanical Polishing of Silicon Wafers[J]. Wear, 2002, 252(3/4):220-

226.

- [28] HECKER R L, LIANG S Y. Predictive Modeling of Surface Roughness in Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(8):755-761.

(编辑 王旻玥)

作者简介:丁嘉豪,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为球面滚子滚动面精密研磨。E-mail:1158119750@qq.com. 陈光*

(通信作者),男,1983年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为轴承滚动物体精密加工,航空材料加工机理及工艺。E-mail:guangchen@tju.edu.cn.

本文引用格式:

丁嘉豪,陈光,苏涌翔,等.往复运动对轴套式球面滚子研磨表面创成的影响[J].中国机械工程,2025,36(3):463-474.

DING Jiahao, CHEN Guang, SU Yongxiang, et al. Effects of Reciprocating Motions on Surface Formation Mechanism of Axial Sleeve Typed Lapping of Spherical Rollers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):463-474.