DOI: 10.3901/JME.2019.09.183

基于偏心式变曲率沟槽的高精度球体加工 理论与试验研究*

郭伟刚^{1,2} 袁巨龙¹ 周芬芬³ 项震¹ 赵萍¹ 吕冰海¹

(1. 浙江工业大学超精密加工研究中心 杭州 310014;

2. 杭州职业技术学院 杭州 310018;

3. 台州学院机械工程学院 台州 318000)

摘要: 提出基于偏心式变曲率沟槽的高精度球体批量加工方法, 加工过程中球体运动状态随磨盘沟槽曲率半径的变化而变化, 送料机构将球体从磨盘外沿的出料口依序送至磨盘中心的入料口进行循环加工。基于纯滚动运动假设, 建立单颗球体几何运动学模型, 通过旋转坐标变换计算并仿真球面加工轨迹。在自主研发的偏心式变曲率沟槽加工系统上进行加工试验, 对球体运动的宏观验证试验结果与仿真结果一致, 证明了所建的运动学模型的有效性。在加工试验研磨阶段球体的批直径变动量、球度偏差及表面粗糙度偏差均得到明显改善并逐渐收敛, 抛光阶段后得到单颗球体最好的球度值为 $0.114\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度 R_a 为 $9\ \text{nm}$ 。
关键词: 运动学; 加工轨迹; 一致性; 偏心式变曲率沟槽; 精密球

中图分类号: TH145; TH140

Theoretical and Experimental Research on Processing Balls with Eccentric Variable-radius V-groove

GUO Weigang^{1,2} YUAN Julong¹ ZHOU Fenfen³ XIANG Zhen¹ ZHAO Ping¹ LÜ Binghai¹

(1. Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

2. Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018;

3. School of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000)

Abstract: A new batch processing method for precision balls with eccentric variable-radius groove plate (EVGP) is proposed. In this method the motion state of ball is continuously changed with the variation of the groove radius as the ball moving along the groove. Balls can be one by one from the outlet along processing plate edge to the inlet in the center of plate by employed cycling feeding transporter. Based on the assumption of pure rolling motion, the geometric kinematic model of a single ball is built, and then the processing trajectory on the spherical surface can be obtained by rotation coordinate transformation. Processing experiment is carried out on the EVGP equipment which is self-manufactured. The experimental results of observation are agreement with simulation results. Thereby the kinematic model is proved to be valid. There are three stages which are fine lapping, super fine lapping and polishing in processing experiment. In the lapping stage, the variation of ball lot diameter, sphericity and the deviation of surface roughness R_a have been improved significantly and gradually to be convergence. After the final polishing stage, the best polishing results of a single ball achieved are surface roughness R_a of $9\ \text{nm}$ and sphericity of $0.114\ \mu\text{m}$.

Key words: kinematics; processing trajectory; consistency; eccentric variable-radius v-groove; precision balls

0 前言

球体作为高精度轴承、滚珠丝杠及直线导轨中的关键元件常成组使用, 一批球的精度一致性将直

接影响这些零件的运动精度、噪音及寿命, 进而影响整个加工设备及装置的性能^[1-3]。超精密研磨抛光是获得高精度球体的最终加工环节^[4]。目前, 球体批量加工主要采用同心圆沟槽盘球体加工方法, 该方法由日本学者 INAGAKI 等^[5]于 1976 年首次提出, 其基本原理为球体置于两块磨盘之间, 其中一块磨盘上加工出同心圆 V 形槽, 另一块为平盘。球体在磨盘旋转驱动下沿同心圆沟槽运动, 在研磨液的作

* 国家自然科学基金(U1401247, U1604254, 51375455)和浙江省公益公用技术应用性(2017C31113)资助项目。20180309 收到初稿, 20180916 收到修改稿

用下实现球面材料去除。ZHANG 等^[6-7]基于运动学原理对该方式下的球面加工轨迹进行了分析,其理论和实验结果均显示加工轨迹是固定圆环,无法形成球面。在实际加工中,通过添加搅动或外循环装置来随机改变球体被加工的滚道位置,加工路径不可控,使得球面概率成形,难以保证球体批量加工的精度和尺寸一致性。

日本学者提出三转盘加工方法即将传统V形槽加工方式中的沟槽盘于V形槽处分割开,使整个机构由三块可独立转动的磨盘组成,加工过程中三块盘同时旋转驱动球体自转并公转^[8-11]。袁巨龙等^[12-15]基于机构运动学原理分析三转盘加工方法后得出该装置中的一个驱动是冗余的,于是并结合研磨盘转速变化的过程控制,提出了双自转球体加工方法。三转盘和双自转加工方式中加工轨迹均能够全包裹整个球面^[16-17],球体加工精度高,但是加工装置装球量少造成批加工效率较低。

针对上述问题,袁巨龙等^[18]提出一种变曲率沟槽球体加工方法,以变曲率沟槽盘取代同心圆沟槽盘,使球体运动状态随沟槽曲率半径的变化而变化,实现了与三转盘加工方式相同的加工轨迹均匀包裹球面效果。同时,由于该加工方法采用了多沟道形式,在批加工能力上和同心圆沟槽盘球体加工方法相当,比只有单个沟槽的三转盘方式有了极大的提高完全可以满足工厂的批量生产需求;机械结构方面,三转盘加工设备内外盘的同轴度要求非常高,且动力源多,而该加工方法仅需一个动力源,结构简单,易保证精度要求。采用该方法的明显优势是每颗球体的加工路径一致能够保证高一致性,但是由于所采用的变曲率沟槽形状是螺旋槽,曲率变化小,对球体自转角的影响范围小,在此基础上本文作者提出了偏心式变曲率沟槽加工方法。

本文首先阐述偏心式变曲率沟槽球体加工的基本原理。随后,基于纯滚动运动的假设条件,建立单颗球体的几何运动学模型,并将几何运动学分析结果结合旋转坐标变换,仿真球面加工轨迹分布。最后搭建实验平台,对所建立的球体运动学模型进行验证,并对一批球体进行了加工试验研究。

1 偏心式变曲率沟槽加工基本原理

偏心式变曲率沟槽加工方法的基本原理如图1所示。该装置主要由平盘(下盘)、变曲率沟槽盘(上盘)、加压装置、驱动装置组成。以阿基米德螺旋线作为变曲率沟槽滚道的线型,其极坐标表达式为

$$\rho = a\varphi(t)$$

式中, ρ 为极径; $\varphi(t)$ 为随时间变化的极角; a 为沟槽间距系数。变曲率沟槽的中心与磨盘中心存在偏心距 e 。

图1 偏心式变曲率沟槽加工原理

加工过程中,下盘旋转驱动球体依序沿变曲率沟槽向外运动,同时不断自转并绕旋转主轴公转,上盘实现对球体的精密加压,在研磨液的作用下实现球面材料的去除。球体从磨盘入球口经过整个变曲率沟槽路径至磨盘出球口完成单个加工周期,再由送料机构从磨盘外沿的出球口依序送至沟槽中心的入球口实现循环加工。因此,单个加工周期的球体运动状态是分析的关键,此后均为该周期的不断叠加。

2 球体几何运动学分析

基于纯滚动运动理论分析,首先作如下假设。

(1) 工件均为理想球体,忽略加工过程中球与球之间的推挤摩擦等相互作用。

(2) 球体与平盘接触点处为纯滚动,与沟槽接触点处为切向纯滚动。

(3) 球与磨盘均为刚体,不考虑接触变形。

选取单颗球体进行几何运动学分析,如图2所示。球体与上下盘三接触点为A、B、C,以加工盘主轴中心为坐标原点建立球-盘相对运动分析的全局坐标系 O_1XYZ ,坐标原点在主轴中心 O_1 ,盘面上为X轴和Y轴,Z轴垂直于盘面。 O_a 为任意时刻球心所在沟槽滚道位置的瞬时曲率中心,沿着该曲率中心的方向,接触点A、B、C在一条直线上。沿着该直线方向将球体切开,从垂直于该直线的方向观察如图2b所示。局部坐标系建立在球心与该时刻变曲率中心连线的方向上,以球心 O_b 为原点,形成局部坐标系 O_bxyz 如图2c所示,为便于计算,以球心的两个速度分量为计算坐标系 $O_b\tau n$ 。图2中各参数

含义如表 1 所示。

表 1 几何运动学的符号及定义

符号	定义	符号	定义
r_b	球体半径	V_{ObO2}	球心的速度矢量
ω_1, ω_2	下、上盘转速	ω_s	球体自转角速度
l_B, l_C, l_A	磨盘上接触点至磨盘中心的距离	ω	球心相对于沟槽中心的瞬时公转速度
α, β	沟槽半角	ω_g	ω_s 在 Y 轴上的正交分量
φ_1	面 AO_aO_b 与面 AO_bO_2 间的夹角	ω_b	ω_s 在球体经圆大剖面内的正交分量
V_{BO2}, V_{CO2}	盘上接触点的速度矢量	θ	自转角速度分量 ω_b 的方位角
V_{AO1}	沟槽中心相对于磨盘中心的速度矢量	γ	自转角速度分量 ω_g 的方位角

(a) 沿 Z 方向的俯视图

(b) 沿 τ 方向的正视图

(c) 球心局部坐标系

图 2 几何关系及坐标系统

基于纯滚动运动的假设条件, 速度矢量分析方法用来分析三接触点在全局坐标系内的运动关系, 将图 2 中的速度矢量关系提取出来, 形成图 3 中各个接触点的速度矢量图。则可得三接触点处的速度矢量方程如式(1)~(3)。

$$V_{AOb} + V_{ObO2} + V_{O2O1} = V_{AO1} \quad (1)$$

$$V_{BOb} + V_{ObO2} + V_{O2O1} = V_{BO1} \quad (2)$$

$$V_{COb} + V_{ObO2} + V_{O2O1} = V_{CO1} \quad (3)$$

(a)

(b)

(c)

图 3 接触点 A、B、C 速度矢量分析

如图 2a 所示, AO_aO_b 面和 AO_bO_2 面是分析接触点速度矢量的两个关键面, φ_1 为面 AO_aO_b 与面 AO_bO_2 间的夹角。变曲率线型中球心 O_b 、瞬时曲率中心 O_a 及沟槽轨道形状起始点 O_2 之间的关系可根据相关数学知识求得。

球心 O_b 在坐标系 O_1XY 中的投影方程如式(4)、

(5)所列。

$$X_{Ob} = \rho \cos \varphi \quad (4)$$

$$Y_{Ob} = \rho \sin \varphi \quad (5)$$

瞬时曲率中心 O_a 的坐标 (ε, η) 方程如式(6)、(7)所列。

$$\varepsilon = X_{Ob} - \frac{Y_{Ob}'(1 + Y_{Ob}'^2)}{Y_{Ob}''} \quad (6)$$

$$\eta = Y_{Ob} + \frac{1 + Y_{Ob}'^2}{Y_{Ob}''} \quad (7)$$

此时, 变曲率线型中球心 O_b 、瞬时曲率中心 O_a 及变曲率沟槽中心 O_2 三点间的长度关系可根据余弦定理求得如式(8)。

$$\cos \varphi_1 = \frac{O_a O_b^2 + O_2 O_b^2 - O_2 O_a^2}{2 \cdot O_2 O_b \cdot O_2 O_b} \quad (8)$$

根据三角函数关系即可得式(9)。

$$\sin \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \varphi^2}} \quad (9)$$

V_{ObO2}^{τ} 和 V_{ObO2}^n 为 V_{ObO2} 在 τ 方向和 n 方向上的两个分量, 则可得

$$|V_{ObO2}^{\tau}| = \rho \omega \quad (10)$$

$$|V_{ObO2}^n| = \tan \varphi_1 \rho \omega = 1/\varphi \rho \omega \quad (11)$$

V_{O2O1}^{τ} 为 V_{O2O1} 在 τ 方向分量, 根据几何关系可得

$$|V_{O2O1}^{\tau}| = e \omega_2 \cos \varphi \quad (12)$$

接触点 A 在 τ 、 n 方向的分量

$$|V_{AO1}| \cos \tau_A = |V_{AO1}^{\tau}| = \omega_1 (\rho + e \cos \varphi) \quad (13)$$

$$|V_{AO1}| \sin \tau_A = |V_{AO1}^n| = \omega_1 e \cos \varphi \quad (14)$$

V_{BO1} 和 V_{CO1} 在 τ 方向分量如下式

$$|V_{BO1}^{\tau}| = |V_{BO1}| \cos \tau_B = \omega_2 l_B \cos \tau_B \quad (15)$$

$$\omega = \frac{\omega_2 \rho (\cos \alpha + \cos \beta) - \omega_2 (l_3 + l_1 \cos \varphi) (\cos \beta - \cos \alpha) + e (\omega_1 - \omega_2) \cos \varphi \sin(\alpha + \beta) + \omega_1 \rho \sin(\alpha + \beta)}{\rho (\cos \alpha + \cos \beta) + \rho \sin(\alpha + \beta)} \quad (25)$$

$$\omega_g = \frac{e (\omega_1 - \omega_2) (\cos \varphi \sin \varphi_1 - \sin \varphi \cos \varphi_1) + \omega_1 \rho \sin \varphi_1}{r_b} \quad (26)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\rho \omega_2 (\sin \beta - \sin \alpha) - \rho \omega (\sin \beta - \sin \alpha) - \omega_2 (l_3 + l_1 \cos \varphi) (\sin \alpha + \sin \beta)}{\rho (\omega_2 - \omega) (\cos \alpha + \cos \beta) - \omega_2 (l_3 + l_1 \cos \varphi) (\cos \beta - \cos \alpha)} \right) \quad (27)$$

$$\omega_b = \frac{\rho \omega_2 (\sin \beta - \sin \alpha) - \rho \omega (\sin \beta - \sin \alpha) - (l_3 + l_1 \cos \varphi) (\sin \alpha + \sin \beta)}{r_b \sin \theta \cos \varphi_1 \sin(\beta + \alpha)} \quad (28)$$

$$\gamma = \arctan \omega_b / \omega_g = \arctan \left(\frac{\rho \omega_2 (\sin \beta - \sin \alpha) - \rho \omega (\sin \beta - \sin \alpha) - \omega_2 (l_3 + l_1 \cos \varphi) (\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin \theta \cos \varphi_1 \sin(\beta + \alpha) (e (\omega_1 - \omega_2) (\cos \varphi \sin \varphi_1 - \sin \varphi \cos \varphi_1) + \omega_1 \rho \sin \varphi_1)} \right) \quad (29)$$

$$|V_{CO1}^{\tau}| = |V_{CO1}| \cos \tau_C = \omega_2 l_C \cos \tau_C \quad (16)$$

根据图 4 所示球-盘接触点 B、C 处的几何关系可得

$$l_B \cos \tau_B = (\rho - l_3) + (e - l_1) \cos \varphi \quad (17)$$

$$l_C \cos \tau_C = (\rho - l_4) + (e + l_2) \cos \varphi \quad (18)$$

由图中几何关系可得 $l_1 = l_2$, $l_3 = l_4$ 根据正弦定理有

$$l_1 = r_b \cos \alpha \sin \varphi_1 / \sin \varphi \quad (19)$$

$$l_3 = r_b \cos \alpha \sin(\varphi - \varphi_1) / \sin \varphi \quad (20)$$

图 4 球-盘接触点 B、C 处几何关系

将方程式(1)~(20)联立, 可得偏心式变曲率沟槽加工系统总的几何运动学方程组如下

$$\omega_b r_b \cos \theta \cos \varphi_1 + \omega_g r_b \sin \varphi_1 + \rho \omega + e \omega_2 \cos \varphi = \omega_1 l_A \cos \tau_A \quad (21)$$

$$\omega_g r_b \cos \varphi_1 - \omega_b r_b \sin \varphi_1 - 1/\varphi \rho \omega - e \omega_2 \sin \varphi = -\omega_1 e \sin \varphi \quad (22)$$

$$-\omega_b r_b \sin(\alpha + \theta) \cos \varphi_1 - \omega_g r_b \sin \alpha \sin \varphi_1 + \rho \omega + e \omega_2 \cos \varphi = \omega_2 l_B \cos \tau_B \quad (23)$$

$$-\omega_b r_b \sin(\beta - \theta) \cos \varphi_1 - \omega_g r_b \sin \beta \sin \varphi_1 + \rho \omega + e \omega_2 \cos \varphi = \omega_2 l_C \cos \tau_C \quad (24)$$

解方程式(21)~(24)可得偏心式变曲率沟槽加工系统中球体自转角速度、自转角的关系如下

由式(25)~(29)可知,表征球体运动规律的自转角速度和自转角 ω_g 、 ω_b 、 θ 和 γ 与球径、V形槽半角、磨盘转速、变曲率沟槽滚道极径和偏心距等因素均有关。为避免不同球径影响使模型的适应性,式子右边的分子分母均除以球体半径 r_b ,使得表达式与 ρ/r_b 和 e/r_b 相关。

3 加工轨迹

3.1 轨迹点仿真流程

加工轨迹分布规律的分析是研究工件几何轮廓成形过程和预测形状精度的重要手段^[11-12]。球面加工轨迹包络整个加工球面且轨迹重复几率小是精密球体成形的理论前提条件,根据第 2 部分球体运动学分析,球面加工轨迹点计算流程如图 5 所示,利用旋转坐标变换计算每时刻加工轨迹点的坐标。

图 5 球面加工轨迹点计算流程图

3.2 加工轨迹点的坐标计算

以球心为原点建立坐标系,参考图 2c 所示球体自转系统的定义,球体在变曲率沟槽运动的过程中,球面与盘面接触点的位置不断变换,首先假定三接触点的初始坐标为

$$\mathbf{P}_A = [0 \quad r_b \quad 0]^T \quad \mathbf{P}_B = [-r_b \cos \alpha \quad 0 \quad -r_b \sin \alpha]^T$$

$$\mathbf{P}_C = [r_b \cos \beta \quad 0 \quad -r_b \sin \beta]^T$$

将 $\mathbf{P}_A$ 、 $\mathbf{P}_B$ 和 $\mathbf{P}_C$ 统一到一个矩阵 $\mathbf{P}_0$ 中, $\mathbf{P}_0 = [\mathbf{P}_A \quad \mathbf{P}_B \quad \mathbf{P}_C]$ 。三接触点关于三个坐标轴的角速度分别为 $-\omega_b \cos \theta$ 、 ω_g 、 $\omega_b \sin \theta$, 则该时刻绕三坐标轴的旋转角度如式(30)~(32)。

$$\psi_x(i) = -\omega_b(i) \cos \theta(i) \Delta t \quad (30)$$

$$\psi_y(i) = \omega_g(i) \Delta t \quad (31)$$

$$\psi_z(i) = \omega_b(i) \sin \theta(i) \Delta t \quad (32)$$

式中, $\psi_x(i)$ 、 $\psi_y(i)$ 、 $\psi_z(i)$ 表示该时刻的旋转角度; i 为采样点; Δt 为采样间隔。

假定初始旋转角度为零,则下一时刻旋转角度可表示为

$$\Psi_x(i+1) = \Psi_x(i) + \psi_x(i) \quad (33)$$

$$\Psi_y(i+1) = \Psi_y(i) + \psi_y(i) \quad (34)$$

$$\Psi_z(i+1) = \Psi_z(i) + \psi_z(i) \quad (35)$$

式中, $\Psi_x(i)$ 、 $\Psi_y(i)$ 和 $\Psi_z(i)$ 表示任意时刻绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角度。

根据坐标变换的原理,得绕每个轴旋转矢量为

$$\mathbf{X}_{rot} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Psi_x(i+1) & -\sin \Psi_x(i+1) \\ 0 & \sin \Psi_x(i+1) & \cos \Psi_x(i+1) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{Y}_{rot} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_y(i+1) & 0 & \sin \Psi_y(i+1) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Psi_y(i+1) & 0 & \cos \Psi_y(i+1) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{Z}_{rot} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_z(i+1) & -\sin \Psi_z(i+1) & 0 \\ \sin \Psi_z(i+1) & \cos \Psi_z(i+1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

则可得每时刻球面加工轨迹点的旋转坐标值

$$\mathbf{P}_A(i+1) = \mathbf{Y}_{rot} \cdot \mathbf{X}_{rot} \cdot \mathbf{Z}_{rot} \cdot \mathbf{P}_A(i) \quad (39)$$

$$\mathbf{P}_B(i+1) = \mathbf{Y}_{rot} \cdot \mathbf{X}_{rot} \cdot \mathbf{Z}_{rot} \cdot \mathbf{P}_B(i) \quad (40)$$

$$\mathbf{P}_C(i+1) = \mathbf{Y}_{rot} \cdot \mathbf{X}_{rot} \cdot \mathbf{Z}_{rot} \cdot \mathbf{P}_C(i) \quad (41)$$

根据实际经验设置仿真参数,仿真条件如表 2 所示。

表 2 仿真条件

参数	参数
轨迹方程/mm	$\rho = a \cdot \varphi$; $a = 1.5$, $\varphi \in (0, 32\pi)$
球体半径 r_b /mm	2.5
偏心距 e/r_b	4
槽型半角 α 、 β (°)	45
平盘转速 ω_1 (r/min)	15
沟槽盘转速 ω_2 (r/min)	0.001
采样间隔 Δt /s	0.04

单个加工周期后球面加工轨迹的分布如图 6 所示,三接触点处的球面加工轨迹能够包络整个球面,且轨迹形态呈现多方向性。仿真结果从理论上说明了偏心式变曲率沟槽球体加工的可行性。

图 6 单个加工周期后球面加工轨迹的分布

4 加工试验

偏心式变曲率沟槽球体加工试验装置如图 7 所示, 该试验平台转速和压力可控。磨盘材料性能和几何尺寸如表 3 所示。首先进行单周期球面加工轨迹分布的验证试验, 将钢球置于硫酸铜溶液中, 使球体表面产生易于与原来球体颜色区分的黄色铜。为便于观察, 验证试验采用平盘表面贴上 1200#的 SiC 砂纸对表面附着铜的球体进行干磨, 如图 8 所示, 磨盘转速为 8 r/min, 压力为 5 N/Ball。

表 3 磨盘材料性能和几何尺寸

参数	数值	参数	数值
磨盘材料	球墨铸铁	盘径/mm	300
密度/(g/cm ³)	7.3	沟槽角度/(°)	45
耐磨性	良好	沟槽宽度/mm	8.8
硬度/HB	130~220	球体露出高度/mm	6.138
弹性模量/GPa	154	沟槽间距/mm	9.42
泊松比	0.26	偏心距/mm	15

图 7 偏心式变曲率沟槽加工球体的试验场景

图 8 平盘表面贴砂纸

球体加工试验分精研(8 h)、超精研(12 h)和抛光(4 h), 加工条件如表 4 所示, 抛光液^[14]采用清华大学科研人员研发的针对轴承钢的化学机械抛光液, 配比如表 5 所示。加工过程中, 直径 8.5 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球作为标记球, 不承受加工载荷, 每隔约 2 h, 选取该标记球后 10 粒球, 对其直径变动量、圆度、表面粗糙度 R_a 进行检测。球体质量检测采用 SI-234 精密天平, 其精度为 0.1 mg; 球体表面粗糙度 R_a 采用三丰(Mitutoyo)的 SJ-410 型表面粗糙度仪(采样

长度 0.48 mm), 每粒球体表面测量 3 个位置; 球度误差采用三丰(Mitutoyo)的 RA-1500 型圆度仪, 对每粒球体 3 个相互垂直方位的圆度进行检测, 取最大值作为该球的球度误差。

表 4 加工试验条件

参数	工序		
	精研	超精研	抛光
压力(N/Ball)	2.5	1	0.5
磨盘转速/(r/min)	20	15	10
磨粒	8000#(~2μm)Al ₂ O ₃	15000#(~1μm)Al ₂ O ₃	硅溶胶
研磨液配比	磨料: 水: 切削液: 清	磨料: 水: 切削液: 清	化学机械
(质量分数)	洗剂=40: 100: 2: 1	洗剂=50: 100: 20: 1	抛光液
加工时间/h	8	12	6

表 5 轴承钢化学机械抛光液的各组分配比(质量分数)

化学成分	功能	质量分数(%)	pH 值
硅溶胶 colloidal silica	机械去除	4.0	4.0
氨基乙酸 glycine	腐蚀剂	0.75	
双氧水 H ₂ O ₂	氧化剂	1.0	
硅溶胶 colloidal silica	机械去除	0.12	

5 加工结果与讨论

5.1 球面加工轨迹仿真模型验证

如图 9 所示为偏心式变曲率沟槽单周期加工前后球面的对比照片, 加工前钢球表面附着有均匀的铜层, 经过单周期加工后球面的铜层全部去除, 表明球-盘接触点遍历了整个球面, 进而宏观上验证了偏心式变曲率沟槽球体加工中球面加工轨迹能够包络整个球面的仿真结果, 说明了球体几何运动学分析的有效性。

图 9 单周期加工前后球面对比

5.2 加工质量及其影响因素分析

利用精密天平测量出球体质量, 通过质量转换成球体直径。图 10 为球体直径随加工时间的变化, 可以看出球体平均直径逐渐减小, 精研、超精研的平均材料去除率分别为 1.25 μm/h、0.85 μm/h, 抛光阶段材料去除量很小, 此阶段主要提升工件表面质量。图 10 中偏差为该时刻所检测球体的批直径变动量 V_{DWL} , 即最大球与最小球的平均直径之差。随着加工进程的推进, V_{DWL} 逐渐减小, 从初始 1.08 μm 降至最终的 0.25 μm, 说明球体在直径上逐渐趋于一

致, 其中超精研阶段 V_{DWL} 变化最快。

图 10 球体直径随加工时间的变化

图 11 所示为各加工阶段的球度误差平均值及其偏差, 精研阶段的球度误差平均值收敛较快, 从初始的 $0.237 \mu\text{m}$ 降至 $0.184 \mu\text{m}$, 经历超精研及抛光后, 最终获得的球度误差平均值为 $0.122 \mu\text{m}$ 。球度误差偏差从初始的 $0.043 \mu\text{m}$ 降至最终的 $0.014 \mu\text{m}$ 。

图 11 球度及其偏差随加工时间的变化

最终得到的最好球度值 $0.114 \mu\text{m}$, 如图 12 所示。

圆度: $0.114 \mu\text{m}$

图 12 球度误差测量图

图 13 所示为各加工阶段的球体表面粗糙度 R_a 平均值及其偏差, 由于初始球体采用的是已抛光的成品球, 经过精研后 R_a 平均值增大, 经过超精研和抛光, R_a 从平均值 26 nm 降至 11 nm 。初始球体 R_a 偏差较大为 15 nm , 精研后尽管平均粗糙度值上升, 但其偏差相较初始降至 6 nm , 之后的超精研和

抛光 R_a 平均值下降较明显, 其中抛光阶段表面粗糙度的改善最明显, 但粗糙度偏差变化不大, 最终的 R_a 偏差值为 4 nm 。图 14 所示为单个球体最终球面 R_a 达到的最小测量结果及其显微图片。图 15 所示为最终加工完成的工件照片。

图 13 表面粗糙度(R_a)及其偏差随加工时间的变化

图 14 球面抛光后的显微图片(100x)

图 15 最终加工完成的工件照片

试验结果主要测试分析了球体平均直径及其偏差、球度误差、表面粗糙度均值及其偏差的变化, 均值的逐渐改善证明该加工方法有利于改善球体精度, 偏差的收敛表明该加工方式有利于改善球体批量加工的批一致性。因此, 基于偏心式变曲率沟槽球体加工方法能够获得高加工精度和批一致性的球体。

6 结论

(1) 基于纯滚动运动假设条件, 以几何运动学为理论基础, 应用速度矢量法建立了单颗球体在偏心式变曲率沟槽加工系统中的几何运动学模型, 推导出球体各运动参数的表达式。

(2) 根据球体运动状态, 结合坐标变换原理建立了球面加工轨迹点的计算方法。利用仿真及试验证实了该加工方法单周期加工后球面加工轨迹能够包络整个球面。

(3) 进行了球体批量加工试验, 并对加工后球体的直径、球度及表面粗糙度进行检测。结果得出: 球体的批直径变动量、球度偏差及表面粗糙度 Ra 偏差均得到改善并逐渐收敛, 得到最好的球度为 $0.114\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度 Ra 为 $9\ \text{nm}$ 。

参 考 文 献

- [1] ZHUO Y, ZHOU X, YANG C. Dynamic analysis of double-row self-aligning ball bearings due to applied loads, internal clearance, surface waviness and number of balls[J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(23): 6170-6189.
- [2] BARZDAITIS V, BARZDAITIS V V, MASKVYTIS R, et al. New deep groove ball bearings high frequencies vibration testing[J]. Mechanika, 2014, 20(3): 287-293.
- [3] NOGUCHI S, HIRUMA K, KAWA H, et al. The Influence of location of balls and ball diameter difference in rolling bearings on the nonrepetitive runout (NRRO) of retainer revolution[J]. Precision Engineering, 2005, 29(1): 11-18.
- [4] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifang, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [5] INAGAKI K, ABE K. Evaluation of performance of minute sphere grinders prepared for trial [R]. Sendai : Tohoku University, 1976, 25, 1, 49-65.
- [6] ZHANG B, NAKAJIMA A, NAKAJIMA A. Spherical surface generation mechanism in the grinding of balls for ultraprecision ball bearings[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology, 2000, 214(4): 351-357.
- [7] LEE R T, HWANG Y C, CHIOU Y C. Lapping of ultra-precision ball surfaces. Part I. Concentric V-groove lapping system[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(10): 1146-1156.
- [8] 黑部利次. ヤラミックスの球超精密研磨[J]. 機械と工具, 1990, 34(2): 43-49.
KUROBE T. Super precision polishing of YARA mix ball. [J] Machine and Tool, 1990, 34(2): 43-49.
- [9] KUROBE T, KAKUTA H, ONODA M. Spin angle control lapping of balls (1st report) - theoretical analysis of lapping mechanism[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1996, 62(12): 1773-1777.
- [10] KUROBE T, KAKUTA H, ONODA M. Spin angle control lapping of balls (2st report) - theoretical analysis of lapping mechanism[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1997, 63(5): 726~730.
- [11] KUROBE T, MORITA T, TSUCHIHASHI N. Super fine finishing of Si_3N_4 ceramic ball using spin angle controlled machining method[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering Contributed Papers, 2004, 70(11): 1392-1396.
- [12] 吕冰海. 陶瓷球双转盘研磨方式及成球机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
LÜ Binghai. Research on the rotated dual-plates lapping mode of ceramic ball and sphere-shaping mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [13] 冯铭. 螺旋式沟槽磨盘加工高精度球体的探索研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
FENG Ming. A basis exploration on processing high-precision balls by spiral groove lapping plate[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [14] 郁炜, 吕冰海, 姚蔚峰, 等. 基于 ADAMS 的球体双自转研磨方式下研磨盘转速优化研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 866-872.
YU Wei, LÜ Binghai, YAO Weifeng, et al. Speed optimization for lapping plates in RDP lapping mode based on ADAMS[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 866-872.
- [15] YUAN J L, CHEN L N, ZHAO P, et al. Study on sphere shaping mechanism of ceramic ball for lapping process[J]. Key Engineering Materials, 2004, 259-260: 195-200.
- [16] CHENG X, LIN F, SUN X, et al. Lapping motion trajectory analysis on sphere rotor of electrostatic gyroscope[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009, 30(9): 90-93.
- [17] LIU D, DENG Q F, LV B H, et al. Simulation and analysis for spin angle track of the ball machined by dual rotation plates lapping method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 37-38: 1148-1152.
- [18] ZHAO P, GUO W, FENG M, et al. A novel lapping method for high precision balls based on variable-radius v-groove[J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2013, 1(4): 041007.

作者简介: 郭伟刚, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 教授。主要研究方向为超精密加工技术及装备。
E-mail: guoweigang2004@126.com
袁巨龙, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密加工技术及装备。
E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn
赵萍(通信作者), 女, 1963 年出生, 副教授。主要研究方向为超精密加工技术及装备。
E-mail: zhaoping@zjut.edu.cn