

表面质量控制及检测

基于单转盘变曲率沟槽研磨方法的
球体加工试验研究郭伟刚^{1,2}, 袁巨龙¹, 项震¹, 周芬芬¹, 吕冰海¹, 赵萍¹

(1. 浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014;

2. 杭州职业技术学院友嘉机电学院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 针对传统 V 形槽研磨方球体时自转角恒定、加工轨迹不能均匀包络整个球面而影响产品一致性的问题, 提出一种单转盘变曲率沟槽球体研磨加工方法, 使球体运动状态随沟槽曲率的变化而变化。**方法** 基于纯滚动假设条件, 通过几何运动学分析建立自转角与运动轨迹的关系模型, 并自主研发了变曲率沟槽循环研磨机床, 在该平台上对 G16 级 GCr15 钢球进行加工试验, 改变研磨液、载荷、转速与研磨盘等工艺参数, 经过粗磨、精磨和抛光三道工序, 以球体圆度、粗糙度与批内一致性测量结果指标, 对单转盘变曲率沟槽的研磨效果进行评价。**结果** 仿真结果表明, 通过优化变曲率轨迹参数能实现球体表面加工轨迹的均匀全包络, 轨迹均匀性标准差 SD 达到 0.1986。球体抛光后, 圆度均值为 0.095 μm , 表面粗糙度均值为 0.011 μm , 一致性达到了 0.17 μm , 加工精度达到 G5 级球要求。**结论** 沟槽滚道曲率的变化可使球体自转角在 0°~90°之间持续变化, 改变球体的运动姿态, 获得全包络研磨轨迹, 进而实现球体高效高一致性的加工, 具有较强的工程应用价值。

关键词: 单转盘; 变曲率; 全包络; 高效; 高精度; 高一致性

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0252-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.038

Spheroidal Machining Test Based on Variable Turning
Curvature Grinding Method with Single TurntableGUO Wei-gang^{1,2}, YUAN Ju-long¹, XIANG Zhen¹, ZHOU Fen-fen¹, LYU Bing-hai¹, ZHAO Ping¹

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

2. Fair Friend Institute of Electromech, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: Square sphere cannot be enveloped evenly by machining trajectory since the ball is processed in the traditional V-groove grinding method at a constant rotation angle. As a result, consistency of product batches is always affected. The work aims to propose a ball grinding processing method of variable turning curvature with single turntable, and motion state of the ball can be changed with curvature of groove. Based on pure rolling motion hypothesis, a relational model was developed for

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-14

Received: 2018-04-05; Revised: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1604254, U1401247); 国家自然科学基金资助项目 (51375455); 浙江省公益公用技术应用性项目 (2017C31113); 精密与特种加工教育部重点实验室开放基金 (JMTZ201803); 浙江省重点实验室开放基金资助项目 (EM2016070102)

Fund: Supported by the Key Program of the National Science Foundation of China (U1604254, U1401247), Natural Science Foundation of China (51375455), Science and Technology Department of Zhejiang (2017C31113), Open Fund of Key Laboratories of the Ministry of Education for Precision and Special Processing (JMTZ201803), Open Fund of Key Laboratory of Zhejiang Province (Zhejiang University of Technology) (EM2016070102)

作者简介: 郭伟刚 (1980—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事超精密加工技术及装备研究。

Biography: GUO Wei-gang (1980—), Male, Ph. D. candidate, Associate professor, Research focus: ultra-precision machining technology.

通讯作者: 袁巨龙 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超精密加工技术及装备研究。

Corresponding author: YUAN Ju-long (1962—), Male, Ph. D., Professor, Director of doctor, Research focus: ultra-precision machining technology.

self-rotation angle and trajectory through kinematics analysis. G16 GCr15 steel ball was tested on the platform of a self-developed variable curvature grooved circular grinding machine. Process parameters such as slurry, load, rotation speed and grinding plate were changed. With roundness, roughness and batch consistency as indicators, the effects of single turntable variable curvature groove grinding were evaluated after rough grinding, fine grinding and polishing. Simulation results showed that uniform full envelope of trajectory on the ball could be achieved by optimizing parameters of the variable curvature trajectory. SD of trajectory symmetry reached 0.1986, average roundness was $0.095\ \mu\text{m}$, average surface roughness was $0.011\ \mu\text{m}$ and consistency reached $0.17\ \mu\text{m}$, and final processing accuracy met requirements for G5 ball. Changes in groove raceway curvature enable self-rotation angle to change continuously between $0^\circ\sim 90^\circ$, further affects movement posture of ball and a fully-enveloped grinding trajectory is available. The grinding method can realize efficient and consistent ball processing, and accordingly, it has a high value of engineering application.

KEY WORDS: single turntable; variable curvature; full envelope; high efficiency; high precision; high consistency

高精度球体是高端球轴承的关键组部件, 广泛应用于许多精密机械领域, 其几何精度、表面质量和批一致性直接影响轴承的运动性能、工作寿命以及设备的工作性能。研究和开发适用于高精度球体高效批量加工的新方法、新工艺, 对提升我国高端轴承制造水平, 促进高端装备制造业的自主发展, 具有重要的理论意义和工程应用价值^[1-3]。

目前, 球体批量加工主要采用同心圆沟槽盘研磨加工方法, 该方法于 1976 年由日本学者 Inagaki 首次提出^[4], 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, 在研磨液的作用下实现球面材料去除。Bo Z 等^[5]学者基于运动学原理对该方式下的球面加工轨迹进行分析, 理论和实验结果均显示加工轨迹是固定圆环, 无法实现全包裹(均匀全面)覆盖球面加工。在实际生产加工中, 虽然可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, 但加工路径不可控, 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 KUROBE Toshiji 等人^[6]提出一种三转盘加工方法, 将传统 V 形槽加工方法中的沟槽盘于 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。浙江工业大学吕冰海等人^[7-11]基于机构运动学原理对三转盘加工方法进行了分析, 认为该方法中有一个驱动是冗余的, 在此基础上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法中加工轨迹均能够全包裹整个球面, 球体加工精度高, 但是加工装置的装球量少, 造成加工效率低。

针对高端轴承球形滚动体加工对高精度、高一一致性的技术需求, 本研究提出一种单转盘变曲率沟槽球

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持续发生变化, 实现球面轨迹全包裹加工。该方式的优势是装球量大, 且每颗球体的加工路径一致, 能够同时保证加工的高效率和高一致性。

1 基本原理及运动学分析

1.1 基本原理

单转盘变曲率沟槽研磨方法的基本原理为: 待加工球体依序由磨盘中部沿变曲率沟槽逐渐向外做自转角连续变化的研磨运动, 变曲率沟槽研磨盘结构如图 1a 所示, 在单个研磨周期(从磨盘进料口经过整个变曲率沟槽路径至磨盘出料口)内实现研磨轨迹在球面上的均匀包裹, 并可通过循环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实现循环加工, 设备结构如图 1b 所示。

1.2 运动学分析

运动学分析基于理想条件假设进行, 包括: 1) 加工时, 球坯的各个物理参数一致, 且均为理想球体; 2) 球坯和机构都视为刚体, 不考虑运动过程中的接触变形; 3) 球坯与研磨盘接触点处无相对滑动, 只有纯滚动; 4) 不考虑各个球坯之间的相互作用力, 忽略研磨液对球坯运动产生的作用力。

图 2 为单转盘变曲率沟槽研磨方法的运动学分析示意图, 球体与下盘接触点为 A, 与上盘接触点为 B、C, r_b 为球直径, ω_0 为 V 形槽角速度, ω 为球自转角速度, ω_1 为下盘角速度, R_A 、 R_B 、 R_C 分别为球与盘接触点的半径(半径指当前点到旋转中心的直线距离), R_A 同时表示当前螺旋线轨迹上的点与旋转中心的直线距离, 工程中 $\alpha=\beta$ 。在直径一定的磨盘上,

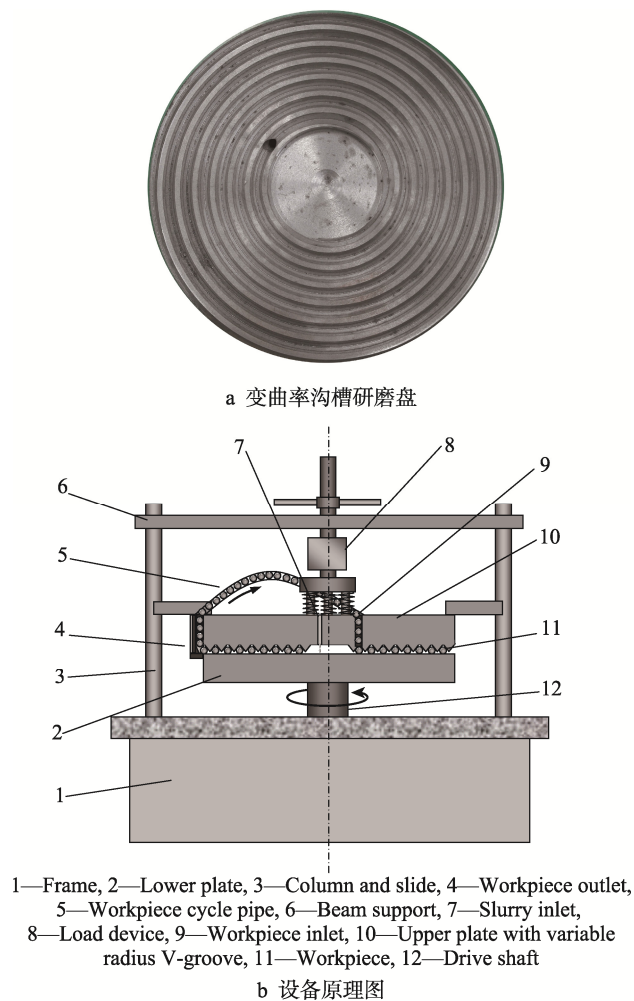


图1 实验设备结构图

Fig.1 Structure chart of experimental equipment: (a) plate with variable radius v-groove, (b) principle diagram of equipment

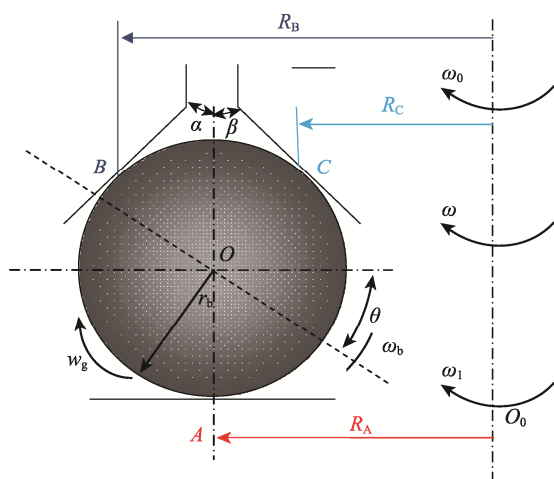


图2 单转盘变曲率沟槽研磨方式运动分析示意图
Fig.2 Schematic diagram for motion analysis of variable turning curvature grinding method with single turntable

球体在运动过程中的运动状态均衡,变曲率沟槽轨迹曲线的行程刚好满足单个研磨周期球体表面轨迹均匀覆盖,故采用等螺距螺旋线,几何关系如图3所示。

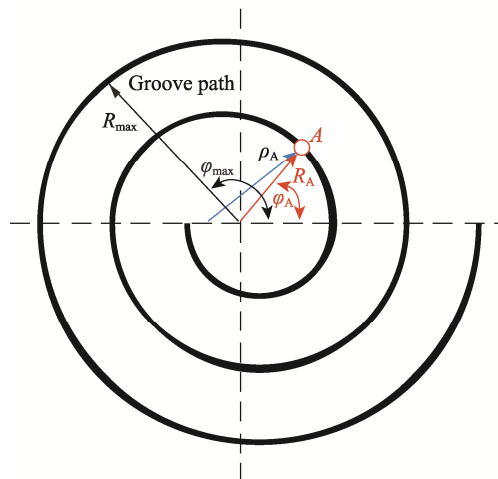


图3 变曲率沟槽轨迹几何关系示意图
Fig.3 Schematic diagram for relationship between variable curvature groove trajectories

假设球体做纯滚动,由速度平衡方程可得:

$$\begin{cases} \omega_1 R_A = R_A \omega + \omega_b r_b \cos \theta \\ \omega_0 R_B = R_B \omega - \omega_b r_b \sin(\beta - \theta) \\ \omega_0 R_C = R_C \omega - \omega_b r_b \sin(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (1)$$

解方程组(1)可得:

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(-\frac{r_b \sin \alpha}{R_A}\right) \\ \omega = \frac{\omega_1 \sin \alpha}{1 + \sin \alpha} \\ \omega_b = \frac{R_A \omega_1}{r_b \cos \theta (1 + \sin \alpha)} \end{cases} \quad (2)$$

分析自转角 θ 与变曲率沟槽曲率之间的关系,极坐标系下变曲率轨迹上一点 A 的坐标可表示为 $R_A = f(\varphi_A)$, R_A 为当前点的极径, φ_A 为当前点的极角。直角坐标系下,点 A 的坐标表达式为:

$$\begin{cases} x_A = R_A \cos(\varphi_A) = f(\varphi_A) \cos(\varphi_A) \\ y_A = R_A \sin(\varphi_A) = f(\varphi_A) \sin(\varphi_A) \\ \varphi_A \in (0, \varphi_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可见,点 A 的坐标 (x_A, y_A) 均为关于 φ_A 的函数,则点 A 的曲率半径为:

$$\rho_A = \frac{\left(1 + \left(\frac{dy_A}{dx_A}\right)^2\right)^{3/2}}{\frac{d^2 y_A}{dx_A^2}} = g(\varphi_A) \quad (4)$$

由公式(4)可知,曲率半径 ρ_A 也是关于 φ_A 的函数。同时可将公式(4)改写为 $\varphi_A = g^{-1}(\rho_A)$,则 R_A 亦可表示成 $R_A = f(g^{-1}(\rho_A)) = h(\rho_A)$,由公式(2)可知:

$$\theta = \arctan\left(-\frac{r_b \sin(\alpha)}{R_A}\right) = \arctan\left(-\frac{r_b \sin(\alpha)}{h(\rho_A)}\right) \quad (5)$$

式 (5) 表明自转角 θ 是关于 ρ_A 的函数, 随着 ρ_A 的改变而改变, 且 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ)$, 最终自转角的变化规律主要取决于变曲率轨迹的类型及参数。本研究提出的单转盘变曲率沟槽研磨方式可使自转角 θ 连续变化, 通过调节变曲率轨迹的类型及参数, 即可实现单个研磨周期内球面研磨轨迹的均匀包络。

1.3 仿真验证

基于运动学力学分析, 将研磨一圈前后曲率半径的差值作为选取变曲率沟槽的标准, 采用 MATLAB

软件对沟槽轨迹与自转角变化规律之间的关系以及球面研磨迹线分布进行了仿真, 流程如图 4 所示, 仿真条件如表 1 所示。图 5 为自转角变化的仿真结果, 表明变曲率沟槽轨迹线能获得最优自转角变化。图 6 为变曲率沟槽研磨轨迹仿真结果, 采用变曲率沟槽加工球坯表面被三个触点所形成的研磨轨迹全面覆盖^[12-15], 在该条件下的轨迹均匀性标准差 SD 为 0.1986。由图 7 轨迹点密度分布梯形图可知, 各网格区域的轨迹点密度百分比皆大于零, 实现了球体表面加工轨迹的全包络。

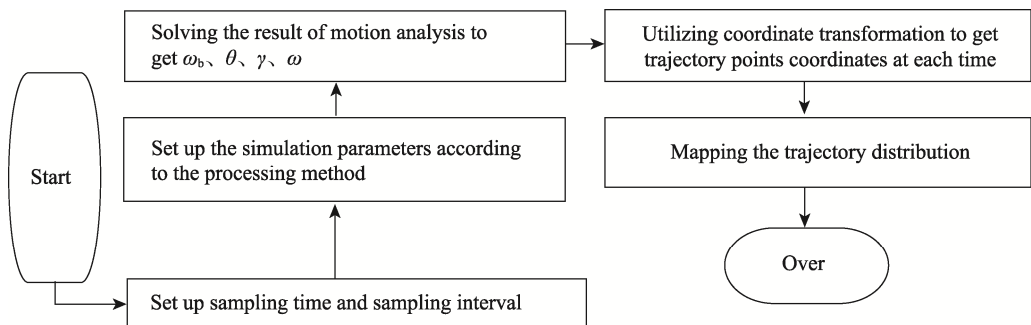


图 4 研磨轨迹计算仿真流程
Fig.4 Simulation flow of grinding trajectory calculation

表 1 仿真条件 Tab.1 Simulation conditions	
Project	Condition
Variable-radius V-groove trajectory	$R_A = -150 \left(\frac{\varphi_A}{20\pi} \right), \varphi_A \in (0, 20\pi)$
V-groove angle	$\alpha=45^\circ$
Ball diameter/mm	$D_b=8.731$

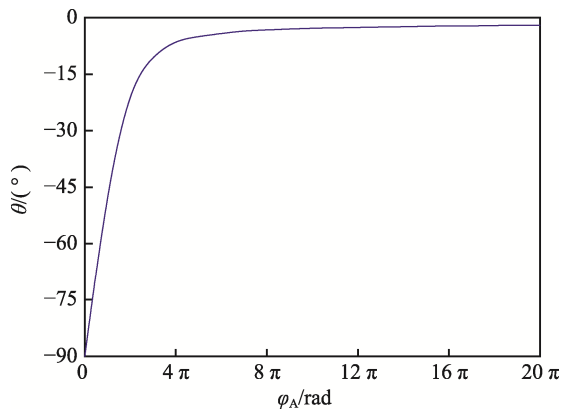


图 5 自转角仿真结果
Fig.5 Simulation results of self-rotation angle

从仿真结果可见, 在表 1 条件下, 采用变曲率沟槽研磨方法使自转角不断变化, 研磨盘中每颗球的加工条件都一致, 保证了加工质量和精度的一致性, 实现了研磨轨迹的全包络, 并在后续以该条件作为磨盘参数。

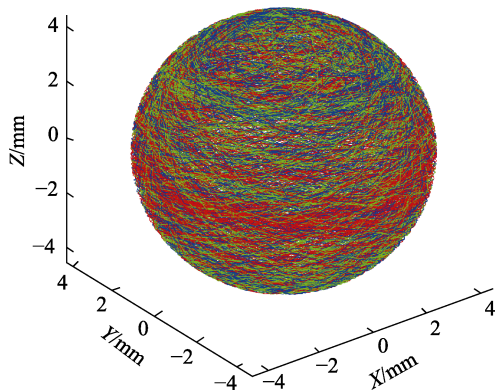


图 6 研磨轨迹仿真
Fig.6 Grinding track simulation

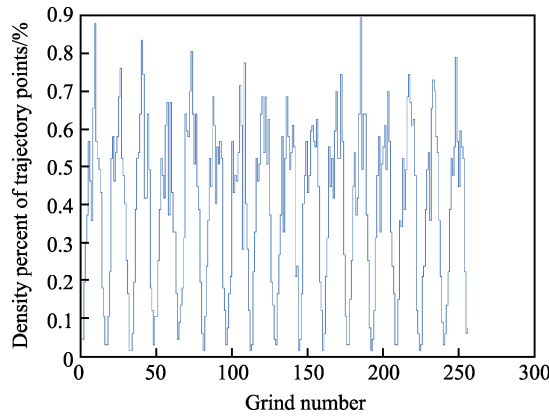


图 7 球面加工轨迹密度分布梯形图
Fig.7 Ladder diagram for density distribution of spherical processing tracks

2 试验

2.1 试验设备

图 8 为变曲率沟槽循环研磨实验装置,上研磨盘的加压及控制系统实现弹性载荷加载,采用测力仪检测载荷大小,下研磨盘由无极调速电机控制转速。

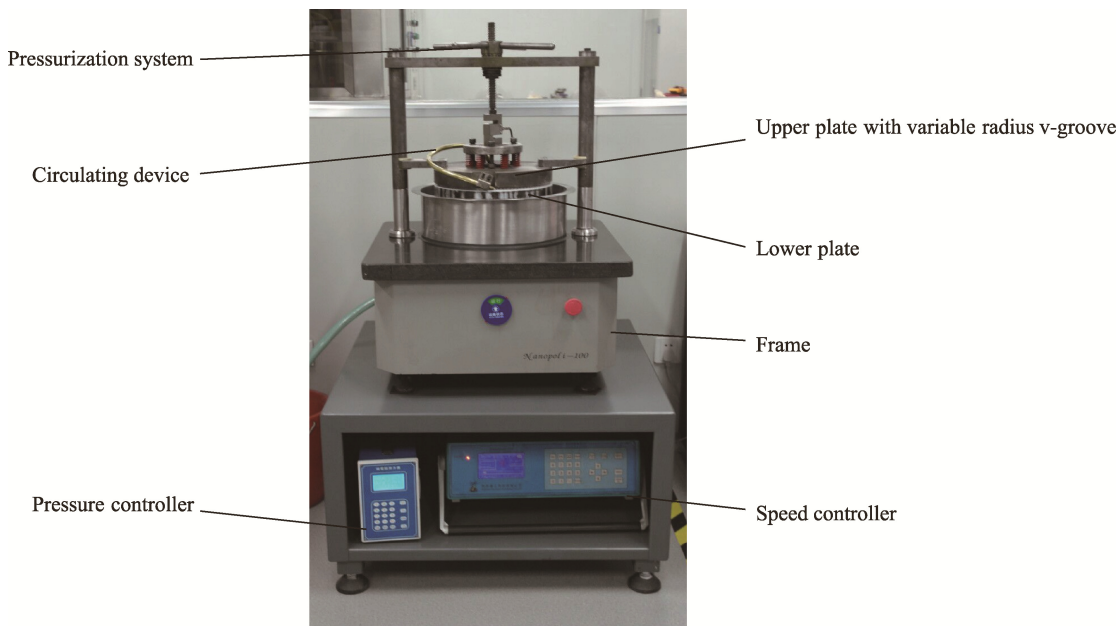


图 8 变曲率沟槽球体加工方式实验装置

Fig.8 Experimental device for variable curvature groove ball machining

表 2 加工条件

Tab.2 Processing conditions

Steps	Abrasive material	Base fluid	Abrasive concentration/wt%	Load/N	Plate speed/(r·min ⁻¹)	Plate material	Time/h
Coarse lapping	Diamond (W1.5)	Kerosene	15	700	30	Cast iron	4
Fine lapping	Diamond (W1.5)	Kerosene	10	350	15	Copper	3
Polishing	Diamond (W0.5)	Kerosene	5	175	5	Copper	3

3 结果及分析

球形圆度、表面粗糙度以及球批直径变化量分别由接触式 Taylor Hobson 表面粗糙度仪和德国 Mahr-MMQ 400 球形误差测量仪分析测试,通过分析加工后的球体圆度、表面粗糙度与球径的结果分布(图 9),可以得出:

1) 由图 9a 可知,球坯经过粗磨后,其圆度在 0.25 μm 以下,已优于 G10 级球的圆度。经精磨后,圆度均值达到了 0.15 μm 左右,最后通过抛光使其圆度达到了 0.013 μm 以下,优于 G5 级球的圆度。由于粗磨和精磨阶段球坯所受载荷较大,转速较快,造成磨粒过大的切削深度,材料去除量较大,其表面会产

2.2 加工条件

加工对象为 G16 级钢球,材料为 GCr15,数量为 350 颗,试验分为粗磨、精磨和抛光三个步骤进行。每阶段随机抽取 10 颗球进行圆度、表面粗糙度以及一致性的测量。粗、精磨阶段采用粒度相同的金刚石作为磨料,其余详细试验条件如表 2 所示。

生划痕等缺陷,而图 9c 表明抛光阶段的载荷与转速均较小,只是去除了球体表面的损伤层,材料去除量较小,能够显著改善球体表面质量。

2) 在图 9b 中,经粗磨后,球表面粗糙度在 0.035~0.045 μm 之间,高于 G16 级球表面粗糙度要求(0.025 μm)。这是由于钢球在粗磨过程中,磨粒切削深度较大,单位磨粒时间内切削次数多,使材料去除率较高,表面粗糙度略微变差,但球体的圆度变更好。精磨过程中,虽然磨粒粒度不变,但磨料浓度、载荷以及研磨盘材料和转速发生变化,球体表面粗糙度下降至 0.02 μm 左右。抛光工序的磨料粒度与浓度减小,球坯所受载荷小,该工序去除研磨阶段产生的损伤层,控制表面粗糙度在 0.013 μm 以下。

3) 图 9c 中,球坯经过粗研阶段,其一致性达到

了 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 已经达到了 G5 级球的精度要求, 表明在该研磨方式下, 球坯迅速获得均匀研磨表面, 精研后其一致性达到 $0.17\text{ }\mu\text{m}$, 说明该研磨方式对改善球坯一致性具有一定优势。

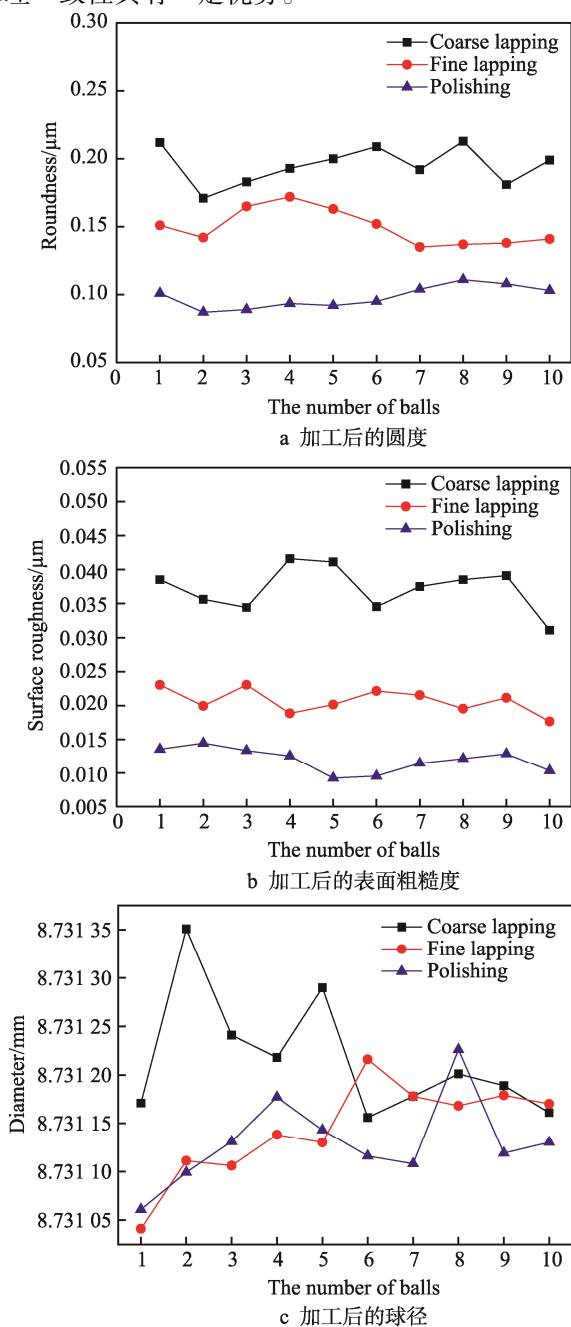


图 9 加工后的球参数

Fig.9 Parameters of processed ball: (a) roundness results, (b) surface roughness results, (c) diameter variation results

经过三个阶段的加工, 球坯最终达到的圆度均值为 $0.095\text{ }\mu\text{m}$, 表面粗糙度均值为 $0.011\text{ }\mu\text{m}$, 一致性达到了 $0.17\text{ }\mu\text{m}$, 已达到了 G5 级球的精度要求。

4 结论

1) 基于变曲率沟槽研磨方法, 对球体加工过程

进行运动学分析, 建立了球体运动中自转角和 V 形槽曲率的数学关系模型, 通过仿真证明该研磨方式能使球体的自转角在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间连续变化, 使球体产生均匀全包裹的研磨轨迹。

2) 进行一批初始精度为 G16 级的钢球加工试验, 球体的最终加工精度达到 G5 级球, 圆度均值为 $0.095\text{ }\mu\text{m}$, 表面粗糙度均值为 $0.011\text{ }\mu\text{m}$, 一致性达到了 $0.17\text{ }\mu\text{m}$, 表明该加工方法能实现高精度球体高一致性加工。

3) 采用变曲率沟槽球体加工方法粗磨后的球坯一致性降至 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 达到了 G5 级精度要求, 表明该加工方法能保证研磨过程球坯运动状态一致性, 实现加工轨迹均匀全包裹, 具有较强的工程应用价值。

参考文献:

- [1] ZHUO Yao-bin, ZHOU Xiao-jun, YANG Chen-long. 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] ARTURAS T, BARZDAITIS V, BARZDAITIS V V, 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 Non-repetitive Run out (NRRO) of Retainer Revolution[J]. Precision Engineering, 2005, 29 (1): 11-18.
- [4] INAGAKI K, ABE K. Evaluation of Performance of Minute Sphere Grinders Prepared for Trial[J]. Science and Measurement Research, 1976, 25: 49-65.
- [5] ZHANG B, UEMATSU T, NAKAJIMA A. High Efficiency and Precision Grinding of Si_3N_4 Ceramic Balls Aided by Magnetic Fluid Support Using Diamond Wheels [J]. JSME International Journal, 1998, 41(3): 499-505.
- [6] KUROBE T, KAKUTA H, ONODA M. Spin Angle Control Lapping of Balls (2nd Report) Lapping of Silicon Nitride Ball[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1997, 63(5): 726-730.
- [7] 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.
- [8] 汤科锋. 双自转研磨方式下研磨成球机理的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.

TANG Ke-feng. Study on the Mechanism of Milling into

- Balls under Double Rotation Grinding[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [9] 黄建平. 精密陶瓷球双自转研磨方式下表面质量的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.
- HUANG Jian-ping. Research on Surface Quality of Precision Ceramic Balls in Double Rotation Grinding[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007.
- [10] 陈佳杰. 双自转研磨成球机构对球度影响的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- CHEN Jia-jie. Study on the Effect of Double-rotating Grind Balling Mechanism on Sphericity[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [11] 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, LYU Bing-hai, YAO Wei-feng, et al. Study on Optimization of Grinding Wheel Rotation Speed Based on ADAMS-based Double Rotation Grinding Method[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 866-872.
- [12] 周芬芬, 袁巨龙, 姚蔚峰, 等. 陶瓷球成球过程的建模与仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 128-132.
- ZHOU Fen-fen, YUAN Ju-long, YAO Wei-feng, et al. Modeling and Simulation of Ceramic Ball Formation Process[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2016, 44(2): 128-132.
- [13] 李帆, 周芬芬, 李兴林, 等. 精密轴承钢球圆度测量误差分离技术研究现状[J]. 轴承, 2015(6): 50-55.
- LI Fan, ZHOU Fen-fen, LI Xing-lin, et al. Study on the Separation Technology of Precision Ball Bearing Roundness Measurement Error[J]. Journal of Bearings, 2015(6): 50-55.
- [14] 李帆. 变曲率沟槽加工方式下成球均匀性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- LI Fan. Study on Uniformity of Ball Formation under Variable Curvature Groove Processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [15] 郑斌, 袁巨龙, 赵萍, 等. 变曲率沟槽精密球研磨加工优化实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 214-219.
- ZHENG Bin, YUAN Ju-long, ZHAO Ping, et al. Experiment of Optimized Grinding of Precision Ball with Variable-radius Groove[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 214-219.