陶瓷球高效超光滑磁流变柔性抛光新工艺研究

肖晓兰，阎秋生，潘继生，焦竞豪
（广东工业大学 机电工程学院，广州 510006）

摘 要：目的 为实现陶瓷球表面的高效超光滑抛光，提出一种集群磁流变抛光陶瓷球的新工艺。**方法** 在传统 V 型槽抛光陶瓷球的基础上增加集群磁极和上盘旋转动力，配制适当的磁流变抛光液，通过在上下抛光盘的集群磁极，形成磁流变抛光垫包覆陶瓷球，进行研磨抛光加工。然后，基于陶瓷球工件几何运动学和动力学分析得到球体各运动参数的影响关系，利用机械系统分析软件 ADAMS 对成球过程进行动态仿真，可以看出该抛光方法能够主动控制球体的运动，实现球面抛光轨迹的快速均匀全包络。最后，根据仿真结果，通过调整上下抛光盘的转速比、偏心距和加工间隙等参数，控制陶瓷球的自转角，实现球面的快速高效超光滑抛光。**结果** 用自行设计的陶瓷球集群磁流变抛光实验装置，对氮化硅陶瓷球进行抛光 2.5 h，表面粗糙度 *Ra* 从 60 nm 左右下降到 10 nm 左右，球形误差为 0.13 μm，达到了陶瓷球轴承氮化硅球的国家标准（G5 水平）。**结论** 集群磁流变抛光方式可以实现球面抛光轨迹的快速均匀全包络，实现陶瓷球表面的高效超光滑抛光，值得进一步深入探讨研究。

关键词：陶瓷球；集群磁流变抛光；运动轨迹仿真；表面粗糙度；球度
中图分类号：TG14；TP391 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)02-0268-07
DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.038

A Novel Polishing Method for High Precision Ceramic Balls Based on Magnetorheological Polisher

XIAO Xiao-lan, YAN Qiu-sheng, PAN Ji-sheng, JIAO Jing-hao

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to provide a new technology of clustered magneto rheological polishing for ceramic ball to realize the effective and supper-smooth polishing of ceramic ball surface. On the basis of the traditional V-groove polishing ceramic ball, the cluster magnetic pole and rotary motor of the upper plate were increased, and appropriate magnetorheological polishing liquid was prepared. The magnetorheological polishing pad was formed by the cluster magnetic pole of the upper and lower polishing plates for grinding and polishing. Based on geometric kinematics and dynamic analysis of ceramic ball work piece, the influence relation of various motion parameters of the ball was obtained. The ball forming process was simulated dynamically by the analysis software ADAMS in the mechanical system. This polishing method could actively control the motion of the sphere and realize the fast and uniform full envelope of the spherical polishing trajectory. According to the simulation results,

收稿日期：2018-08-07；修订日期：2018-10-16
Received：2018-08-07；**Revised**：2018-10-16
基金项目：国家自然科学基金项目（51375097）；广东省科技计划项目（2016A010102014）；广东省自然科学基金项目（2015A030311044）
Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375097), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2016A010102014) and Guangdong Natural Science Foundation Project (2015A030311044)
作者简介：肖晓兰（1979—），女，博士研究生，主要研究方向为超精密加工与机械设计。
Biography：XIAO Xiao-lan (1979—), Female, Doctor, Research focus: ultra precision machining and mechanical design.
通讯作者：阎秋生（1962—），男，博士，教授，主要研究方向为磨削加工和微细加工技术。邮箱：qsyan@gdut.edu.cn
Corresponding author：YAN Qiu-sheng (1962—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: grinding and micro-machining techniques. E-mail: qsyan@gdut.edu.cn

the rotation angle of the ceramic ball was controlled by adjusting the parameters such as rotation speed, eccentricity and machining gap of the upper and lower polishing plates, so as to achieve fast and efficient super smooth polishing of the spherical surface. The silicon nitride ceramic balls were polished for 2.5 h with the self-designed magnetorheological polishing experimental device. The surface roughness *Ra* decreased from about 60 nm to about 10 nm, and the sphericity error was 0.13 mm, which reached the national standard (level of G5), the national standard for ceramic ball bearings. The clustered magnetorheological polishing method can realize fast uniform full envelope of spherical polishing trajectory, and achieve efficient ultra-smooth polishing on the surface of ceramic balls and can be studied further.

KEY WORDS: ceramic ball; clustered magneto rheological polishing; motion trajectory simulation; surface roughness; sphericity

以氮化硅为代表的新一代陶瓷材料具有高硬度，低密度、热膨胀系数，耐高温、腐蚀，无磁性，高导热，自润滑，优异的抗热震性、抗氧化性，是高性能轴承滚珠的首选材料[1-2]。目前常见陶瓷球的研磨抛光可以通过微细磨粒的机械与化学作用，即在软质抛光工具或化学液、电/磁场等辅助作用下，减少或完全消除加工变质层，以获得光滑或超光滑的陶瓷球表面[3]，但由于陶瓷球的表面能低，抛光介质和磨料附着性差，影响了陶瓷球的加工效率、球表面粗糙度；并且陶瓷球在抛光盘沟道中自转性差，影响其球体形状误差[4]。传统 V 型槽铸铁盘抛光陶瓷球的加工时间长，容易在球体表面造成刮伤、凹坑和微裂纹，在外部载荷的作用下会导致轴承滚珠的突然失效[5-7]。吕冰海等人[8]提出了双转盘研磨技术，通过调节两块下研磨盘的转速组合变化，主动控制球坯自转角的变化，使研磨轨迹能相对快速均匀地覆盖整个球面，提高加工效率。周芬芬等人[9]提出了陶瓷球变曲率沟槽加工方式，通过阿基米德螺线沟槽滚道上任意一点相对于磨盘中心的曲率半径不同且连续变化来作用于球体上，使球体自转和公转的运动特性随沟槽曲率半径的变化而不断改变。该方法能比较精确地控制研磨抛光的速度和压力，但在工艺稳定性和实用化方面还有待进一步提高。Umehara N 等人[10]把具有高去除速率的磁流体研磨方法（MFP，Magnetic Fluid Polishing）进行改进，获得了少/无损伤的抛光陶瓷球体，其加工的表面粗糙度 *Ra* 达到了 4 nm，但因设备复杂和磁流体成本昂贵限制了应用。Childs T H C 等人[11]依靠弹簧调节研磨压力，以廉价的非磁性流体（水与甘油的混合物）代替磁流体，以树脂结合剂金刚石砂轮代替嵌入游离磨粒的研磨抛光盘。该方式的加工效率是传统加工方式的十几倍到几十倍，但是磨削比小于 10，加工成本依然较高。

到目前为止，国内外学者针对氮化硅陶瓷球的研磨抛光已经开展了大量的研究，但在加工效率、加工质量以及加工成本控制等方面还有待进一步提高。广东工业大学阎秋生教授团队[12-14]利用集群磁流变抛光的方法在光学处理领域取得突破性进展，实现了碳化硅等光学陶瓷材料的超光滑无损伤表面的抛光加工。笔者在研究集群磁流变抛光和球坯自转角主动控制方法的基础上，基于 V 沟磨球的基本原理提出了一种陶瓷球集群磁流变抛光的新工艺方法：在集群磁流变效应的作用下，围绕球坯形成磁流变抛光垫包覆在球面，由球面与上下盘接触面形成楔形空间产生磁流变抛光动压力，实现球体在磁流变抛光垫包覆下的均匀滚动，达到球面高效超光滑抛光的目的。本文通过 ADAMS 软件建立集群磁流变抛光球体运动的轨迹模型，分析了球体的集群磁流变抛光过程。研制集群磁流变抛光陶瓷球试验装置并进行了加工试验，通过测量加工后的球体表面过球心的 3 个不同位置的大圆表面粗糙度值和圆度值显示，其表面粗糙度和球形误差均达到陶瓷球轴承氮化硅球的国家标准（G5 水平），验证了新工艺方法的可行性。

1　陶瓷球高效超光滑抛光新工艺

1.1　传统球体加工方式存在的问题

传统 V 形槽铸铁盘抛光陶瓷球的方法基于三点成球原理，加工时形成的轨迹线是三个接触点在球面上形成的 3 个同轴环带，如图 1 所示。由于是三点式刚性接触，3 个同轴环带以缓慢的速度展开，不利于球体均匀快速地加工。球面抛光过程中采用游离磨料，球体凸曲面特点使磨粒与球面不易形成包覆，磨粒与球面的接触路径短，抛光压力、磨粒运动轨迹等难以得到有效控制。同时，由于需要随机改变各球的自转角 θ，搅动时，球体循环进出抛光盘沟槽易产生球坯打滑等现象，以致球面上各点的切削概率不相等，难以提高球体精度的一致性，单批合格率通常只有 30%左右，严重制约了陶瓷球的应用[15-16]。

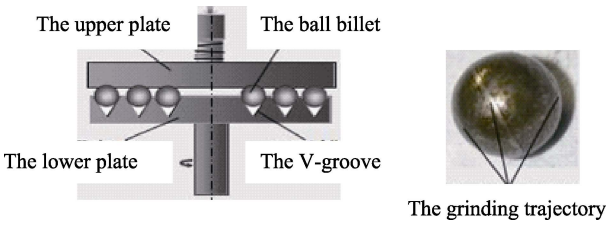


图 1　传统 V 形槽铸铁盘抛光陶瓷球的方法
Fig.1 Traditional polishing method of ceramic balls with V-shaped cast iron plates

1.2　陶瓷球集群磁流变抛光新工艺方法

提高陶瓷球表面精度的关键是要实现工具与球坯接触点的轨迹线在球体表面分布的均匀性，即球体表面上每个质点都有接近相同的加工去除概率[17]。在对 V 形沟槽三点磨球原理及其加工过程深入分析的基础上，基于集群磁流变抛光半固着磨料原理，本文提出了集群磁流变抛光陶瓷球的新工艺方法。如图 2 所示，在上抛光盘和下抛光盘 V 沟两个侧面分别设置分布式磁性体，上下抛光盘之间的间隙通过与上抛光盘相连的运动机构设定。置于下抛光盘 V 形沟槽中的球体与上抛光盘有一定间隙，二者之间“零”刚性压力。将磨料混入磁流变液制成磁流变抛光浆液，则以球坯在上下抛光盘的三个接触点为中心形成磁流变抛光垫，并包覆在球面，通过上下抛光盘相对转动带动球体滚动，由球面与上下盘面形成楔形空间产生磁流变抛光动压力，实现球体在三个磁流变抛光垫包覆下的均匀滚动。本抛光方法通过控制磁场强度、加工间隙和上下抛光盘的偏心距及相对转速来控制抛光压力，实现磨粒与球面的柔性滑擦式接触，进而提高球体抛光效率和表面精度。

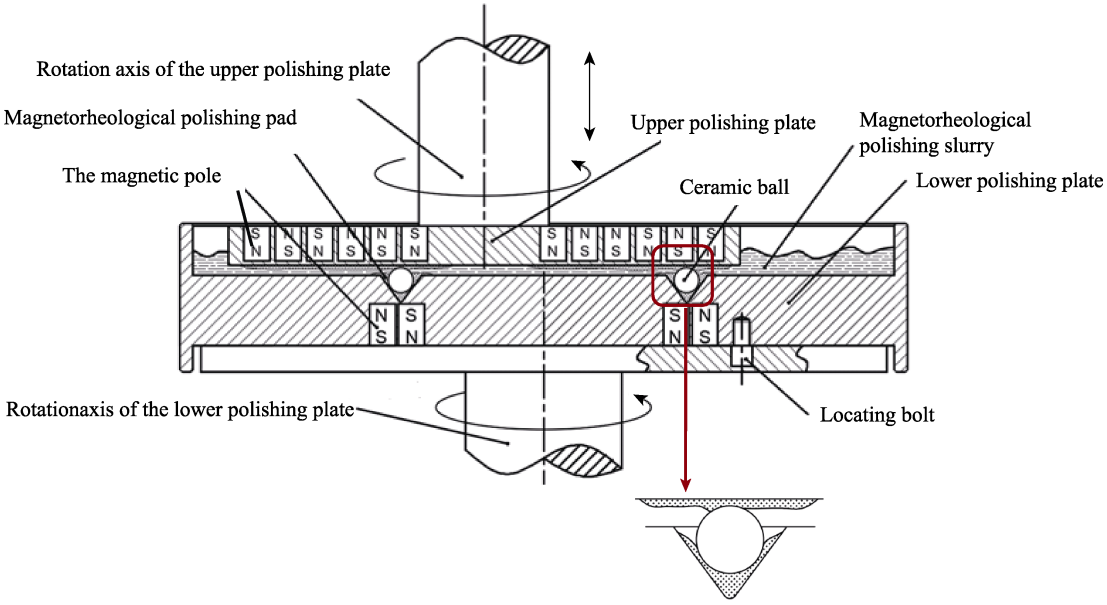


图 2　新方法抛光陶瓷球的原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of ceramic balls polished by new method

2　集群磁流变抛光陶瓷球的运动轨迹及仿真分析

2.1　球体运动模型建立

在进行运动分析前，做如下假设：1）球坯为相同直径的理想球体；2）抛光过程中，各球坯之间无相互碰撞、推挤和摩擦；3）球坯与磁流变抛光垫在接触处无相对滑动，即球坯相对于抛光垫作纯滚动；4）将球坯与磁流变抛光垫之间以接触点为中心的球面接触简化为点接触；5）不考虑抛光垫的接触变形；6）忽略抛光液对球坯的作用。将抛光垫与球坯相接触的三个切削点标记为 A、B、C，上盘抛光垫和球坯的切削接触点为 A，下盘抛光垫和球坯的两个切削接触点分别为 B（左）、C（右）。抛光垫与球坯相接触的三触点驱动模型如图 3 所示。图 3a 为抛光方式的原理简图，图 3b 为俯视图，分别以下抛光盘回转中心 O_1 和上抛光盘回转中心 O_2 为坐标原点，横坐标通过初始时刻某一球坯与上盘抛光垫的切削接触点 A，建立坐标系 $O_1x_1y_1$ 和 $O_2x_2y_2$。偏心距 e 为 O_1、O_2 两点间的距离。设在某一时刻，球坯绕 V 形槽转过的角度为 φ，对上抛光盘抛光垫上 A'点的线速度 $\boldsymbol{V}_A$ 进行正交分解，切向分量为 V^{τ}_A，径向分量为 V^{r}_A，V^{τ}_A 与 $\boldsymbol{V}_A$ 之间的夹角由 λ 表示（根据纯滚动假设，点 A 与点 A'具有相同的速度）。此时，$R_A=O_1A$，$R'_A=O_2A$。图 3c 为定义在球坯中心 O 上的空间坐标系，在抛光时随球坯的运动而运动，其 x 轴始终与下抛光盘的回转轴空间相交。图 3c 中定义了球坯自转角速度 ω_s 及其在 z 轴上和球坯经圆大剖面内的正交分量 ω_z、ω_j，两分量的方位角分别以 θ、γ 表示。图 3d 定义了球坯的运动单元，抛光时三切削点到下抛光盘回转轴的距离分别为 R_A、R_B、R_C，抛光盘转速分别为 ω_A、ω_B、$\omega_C(\omega_B=\omega_C)$，半径为 r_b 的球坯在下抛光盘 V 形槽道内以角速度 ω 公转，同时以角速度 ω_s 自转，V 形槽道的形状由下抛光盘的槽型半角 α 确定。

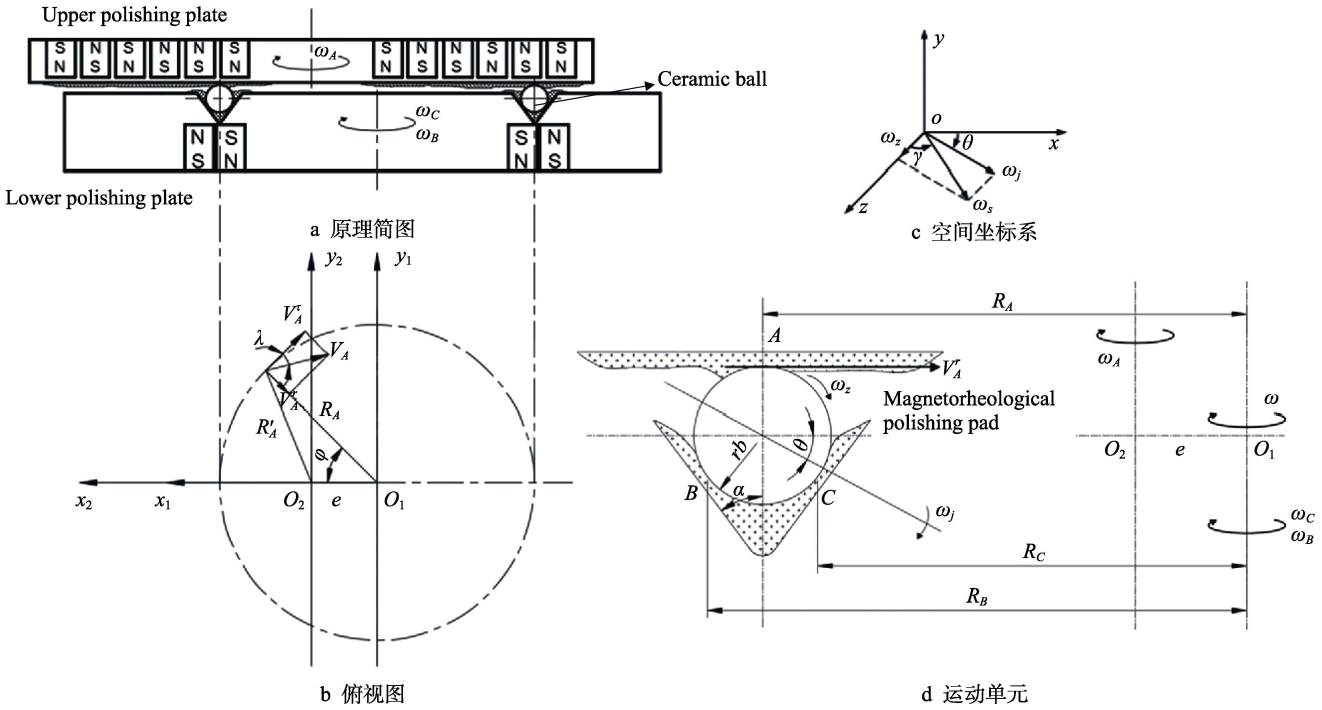


图 3　陶瓷球与抛光垫的驱动模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of driving model of ceramic ball and polishing pad:
a) principle diagram; b) planform; c) space coondinates system; d) kinematic unit

根据假设抛光过程中球坯与抛光垫在接触点处无滑动，由运动学可列出速度方程，如式（1）所示：

$$\begin{cases} V_A^{\tau}\omega_A = R_A\omega\omega_A + r_b\omega_j\omega_B\theta \\ R_B\omega_B = R_B\omega - r_b\omega_j\sin(\alpha+\theta) \\ R_C\omega_C = R_C\omega - r_b\omega_j\sin(\alpha-\theta) \\ V_A^{r} = \omega_z r_b \end{cases} \tag{1}$$

式中：$V_A^{\tau}=V_A\cos\lambda$，$V_A^{r}=V_A\sin\lambda$，$V_A=R'_A\omega_A$，且在 ΔO_1O_2A 中有如下几何关系：

$$R'_A\cos\lambda = R_A - e\cos\phi \tag{2}$$

$$R'_A\sin\lambda = e\sin\phi \tag{3}$$

由式（1）—（3）可解得式（4）、（5）。R_B、R_C 与 R_A 关系见（6）式，则方程（1）可解得式（7）。

$$\begin{cases} \theta = \arctan\dfrac{[R_AR_B\omega_B-(R_A-e\cos\phi)R_B\omega_A]\sin\alpha-[R_AR_C\omega_C-(R_A-e\cos\phi)R_C\omega_A]\sin\alpha-R_BR_C(\omega_C-\omega_B)}{[R_AR_B\omega_B-(R_A-e\cos\phi)R_B\omega_A]\cos\alpha-[R_AR_C\omega_C-(R_A-e\cos\phi)R_C\omega_A]\cos\alpha} \\ \omega_j = \dfrac{R_A(R_B\omega_B+R_C\omega_C)-(R_A-e\cos\phi)(R_B+R_C)\omega_A}{r_b[(R_B+R_C)\cos\theta+R_A\sin(\alpha+\theta)+R_A\sin(\alpha-\theta)]} \\ \omega = \dfrac{(R_A-e\cos\phi)\omega_A\left[\sin(\alpha+\theta)+\sin(\alpha-\theta)\right]+(R_B\omega_B+R_C\omega_C)\cos\theta}{R_A\sin(\alpha+\theta)+R_A\sin(\alpha-\theta)+(R_B+R_C)} \\ \omega_z = e\omega_A\sin\phi/r_b \end{cases} \tag{4}$$

$$\gamma = arctan\left(\frac{\omega_b}{\omega_g}\right) = arctan\left(\frac{R_A(R_B\omega_B+R_C\omega_C)-(R_A-e\cos\phi)\left(R_B+R_C\right)\omega_A}{e\omega_A\sin\phi\left[\left(R_B+R_C\right)\cos\theta+R_A\sin\left(\alpha+\theta\right)+R_A\sin\left(\beta-\theta\right)\right]}\right) \tag{5}$$

$$R_B = R_A + r_b\cos\alpha\ ,\quad R_C = R_A - r_b\cos\alpha \tag{6}$$

$$\begin{cases} \theta = \arctan\dfrac{[R_AR_B\omega_B-(R_A-e\cos\phi)R_B\omega_A]\sin\alpha-[R_AR_C\omega_C-(R_A-e\cos\phi)R_C\omega_A]\sin\alpha-R_BR_C(\omega_C-\omega_B)}{[R_AR_B\omega_B-(R_A-e\cos\phi)R_B\omega_A]\cos\alpha-[R_AR_C\omega_C-(R_A-e\cos\phi)R_C\omega_A]\cos\alpha} \\ \omega_j = \dfrac{(R_B\omega_B+R_C\omega_C)-2(R_A-e\cos\phi)\omega_A}{2r_b(1+\sin\alpha)\cos\theta} \\ \omega = \dfrac{2(R_A-e\cos\phi)\omega_A\sin\alpha+\left(R_B\omega_B+R_C\omega_C\right)}{2R_A(1+\sin\alpha)} \\ \omega_z = e\omega_A\sin\phi/r_b \end{cases} \tag{7}$$

由式（7）可见，在槽型半角 α 一定时，通过改变沟槽的位置半径 R_A、上下抛光盘旋转轴的偏心距 e 以及上下抛光盘的转速 ω_A、$\omega_B(\omega_B=\omega_C)$，可以主动控制球体的运动；另外，装置的磁场强度和加工间隙容易操控，可以很好地控制磁流变抛光力，从而实现球面抛光轨迹的高效均匀全包络。

2.2　球体运动仿真分析

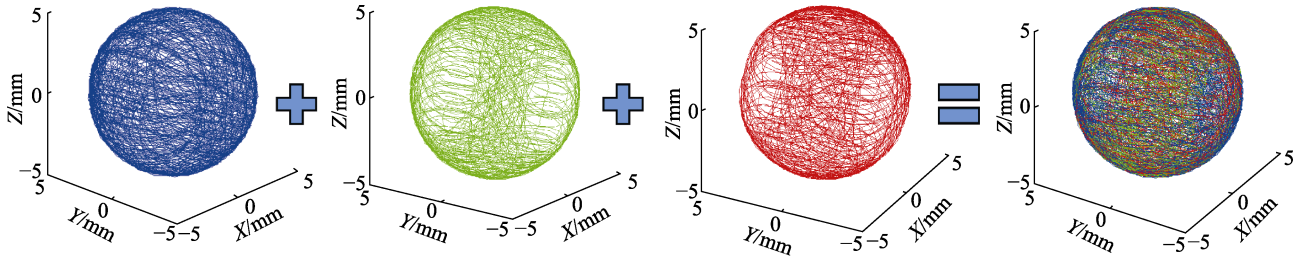
在 ADAMS 中建立抛光机构的动力学模型，取球坯直径为 9.5 mm，下抛光盘中 V 型槽的槽型半角 45°。上下抛光盘绕着各自的转动轴转动，偏心距 10 mm。上抛光盘转速取 20 r/min，转化为弧度则为 2.09 (°)/s；下抛光盘转速 30 r/min，转化为弧度则为 3.14 (°)/s。给抛光盘添加相应的转动副，并给予相应的转动驱动，通过施加接触的方式模拟球坯和集群磁流变抛光垫的实际接触情况。设置仿真时间为 30 s，步长精度为 0.01，抛光盘转速驱动的函数表达式如表 1 所示。

表 1　抛光盘转速函数表达式

Tab.1 Speed function expression of polishing plate

Speed	Function expression
Upper polishing plate 20/(r·min^{-1})	(step (time, 0, 0, 5, 2.09)+ step (time, 5, 0, 100, 0))*time
Lower polishing plate 30/(r·min^{-1})	(step (time, 0, 0, 5, 3.14)+ step (time, 5, 0, 100, 0))*time

基于工件几何运动学和动力学分析得到球体各运动参数，并由此计算出各时刻下，球体与磁流变抛光垫在三个切削接触点位置的坐标。最后，用 ADAMS 仿真的数据结果通过 MATLAB 数值分析软件绘出更加清晰的球坯抛光轨迹的三维分布图，如图 4 所示，从而直观地判断磁流变抛光陶瓷球轨迹的分布情况[18-21]。



a *A*点相对于球心的运动轨迹　b *B*点相对于球心的运动轨迹　c *C*点相对于球心的运动轨迹　d 整个球面的研磨轨迹

图 4　球坯表面的抛光轨迹

Fig.4 Polishing track of the surface of the ball blank: a) trajectory of point A relative to the center of the ball; b) trajectory of point B relative to the center of the ball; c) trajectory of point C relative to the center of the ball; d) polishing trajectory of the ball

3　实验验证与结果分析

为验证新工艺方法对陶瓷球抛光的效果，研制了陶瓷球集群磁流变抛光装置，如图 5 所示。选用粒径为 4 μm 的羟基铁粉（Fe_3O_4）和粒径为 1 μm 的氧化铈（CeO_2）磨料按照一定比例加入甘油、水和防锈剂，配制成 400 mL 的磁流变抛光液。采用上海泛联科技股份有限公司提供的热等静压烧结的氮化硅陶瓷球：球坯直径为 9.5 mm，原始表面粗糙度为 60 nm 左右。根据仿真结果选取最佳工艺参数进行抛光验证实验，具体抛光工艺实验条件如表 2 所示。

实验结束后，随机选取 3 个被加工的球坯，使用 ContourGT-X 白光干涉仪和 Talyrond 585H 圆度仪在加工后的氮化硅陶瓷球表面测量过球心的 3 个不同位置的大圆表面粗糙度值和圆度值，求其平均值作为集群磁流变抛光条件下氮化硅陶瓷球表面的粗糙度值，取圆度最大值作为单球的球形误差，测量结果如表 3 所示。

图 6 为加工前后氮化硅陶瓷球的表面形貌对比。SEM 照片显示，经集群磁流变抛光 2.5 h 后，原始球表面的凹凸不平被消除，得到了超光滑无损伤的球体

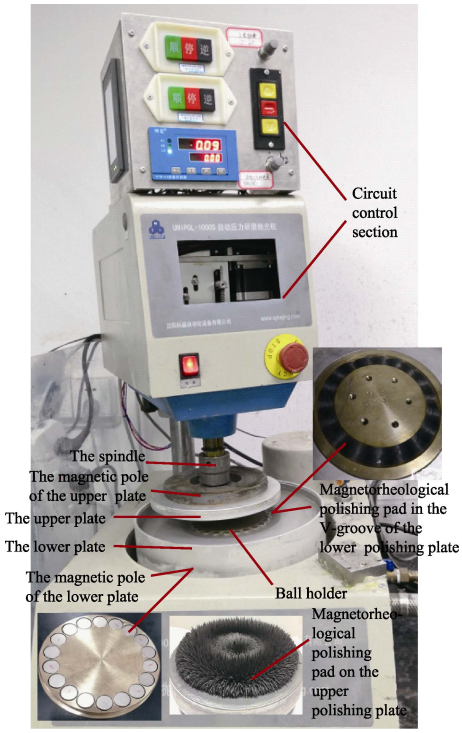


图 5　集群磁流变抛光陶瓷球的实验装置

Fig.5 Experimental device of ceramic balls by clustered magneto rheological polishing

表 2　集群磁流变抛光氮化硅陶瓷球的工艺试验条件

Tab.2 Process parameters of silicon nitride ceramic ball by cluster magneto rheological

Concentration of iron powder/%	Concentration of abrasive/%	The upper polishing plate speed/(r·min^{-1})	The lower polishing plate speed/(r·min^{-1})	Eccentricity/mm	Machining gap/mm	process time/h
16	4	20	30	10	0.4	2.5

表 3　集群磁流变抛光氮化硅陶瓷球的表面粗糙度和圆度测量值

Tab.3 Surface roughness and roundness of silicon nitride balls by clustered magneto rheological polishing

Ball-number	Position 1		Position 2		Position 3		Mean	
	Roughness/nm	Roundness/μm	Roughness/nm	Roundness/μm	Roughness/nm	Roundness/μm	Roughness/nm	Roundness/μm
1	7.9	0.13	8.5	0.12	10.3	0.11	8.9	0.13
2	11.89	0.11	9.74	0.14	10.15	0.13	10.59	0.14
3	9.96	0.13	8.52	0.12	11.13	0.13	9.87	0.13

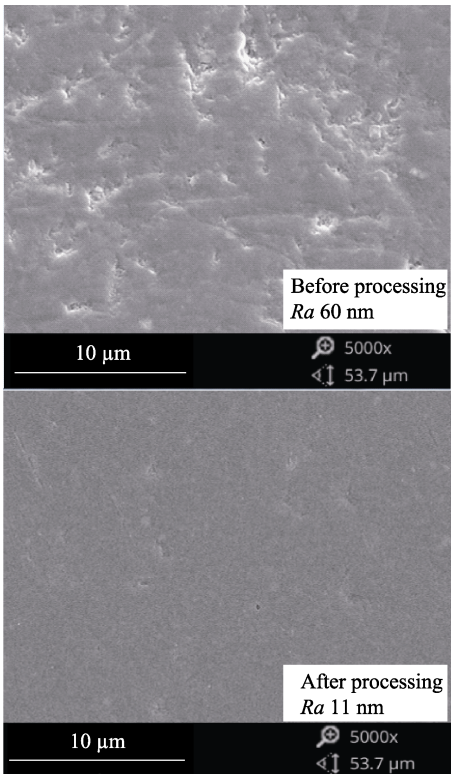


图 6　加工前后的氮化硅陶瓷球表面形貌对比

Fig.6 Comparison of surface morphology of silicon nitride ceramic balls before and after processing

表面。图 7 是在 ContourGT-X 白光干涉仪下的 3D 形貌图，图 8 为在 Talyrond 585H 圆度仪下测量的圆度。实验证明，原始表面粗糙度为 60 nm 左右的氮化硅陶瓷球经集群磁流变抛光 2.5 h 后，在稳定的抛光区域，表面粗糙度 *Ra* 下降到了 10 nm 左右，球形误差 0.13 μm，达到了国家标准（G5 水平），证明了集群磁流变抛光陶瓷球方法的有效性。

集群磁流变抛光方式靠磁流变抛光垫包覆陶瓷球进行加工，因为上抛光盘和球坯上表面之间有一定的间隙，由球面与上下盘面形成楔形空间产生磁流变抛光动压力，并非靠上盘直接施加压力进行研磨抛光，因此消除了一般 V 形沟槽抛光的刚性约束。这种新的抛光方式将传统 V 型槽抛光的三点式刚性接触变成了三个磁流变效应抛光带与球面的柔性接触，大大增加了接触面积，提高了加工效率。另外，集群磁流变抛光方式的磁流变抛光力可控，通过优化上下抛光盘的间距、相对转速、偏心距以及磁场强度等工艺参数，可以有效控制磁流变抛光力，将磁流变抛光垫与球坯接触点的轨迹线均匀分布于球体表面，因此能够在保证球体形状精度的同时快速提高氮化硅陶瓷球的表面精度。

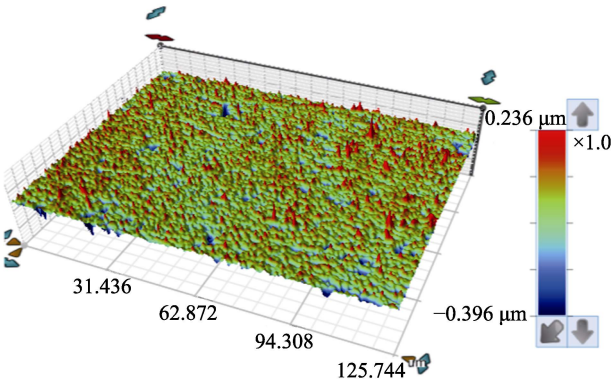


图 7　加工后的氮化硅陶瓷球表面的粗糙度

Fig.7 Roughness of the machined silicon nitride ceramic ball surface

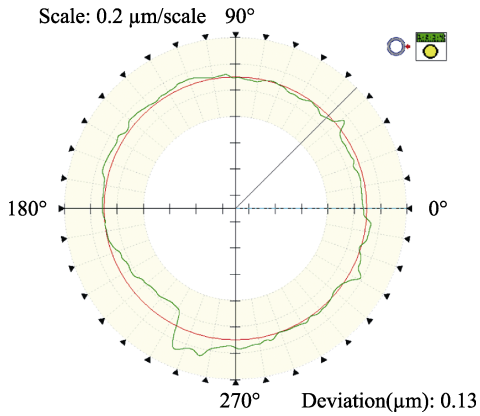


图 8　加工后的氮化硅陶瓷球表面的圆度

Fig.8 Roundness of the machined silicon nitride ceramic ball surface

4 结论

1）基于陶瓷球工件的几何运动学和动力学分析得到了球体各运动参数的影响关系，利用机械系统分析软件 ADAMS 对成球过程进行动态仿真，可以看出，集群磁流变抛光方式可以主动控制球体的运动，实现球面抛光轨迹的快速均匀全包络。

2）研制的陶瓷球集群磁流变抛光实验装置对氮化硅陶瓷球进行集群磁流变抛光 2.5 h，表面粗糙度 *Ra* 从 60 nm 左右下降到 10 nm 左右，球形误差 0.13 μm，达到了陶瓷球轴承氮化硅球的国家标准（G5 水平）。这验证了集群磁流变抛光陶瓷球新工艺的有效性，值得进一步深入探讨研究。

参考文献：

[1] 郭伟明, 古尚贤, 苏国康, 等. 导电 Si_3N_4 基复相陶瓷研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2016, 37(2): 94-106.
GUO W M, GU S X, SU G K, et al. Research progress of electro conductive Si_3N_4-based ceramics[J]. Advanced ceramics, 2016, 37(2): 94-106.

[2] TAPASZTO O, TAPASZTO L, LEMMEL H, et al. High orientation degree of grapheme nan platelets in silicon nitride composites prepared by spark plasma sintering[J]. Ceramics international, 2016, 42(1): 1002-1006.

[3] 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 J L, ZHANG F H, DAI Y F, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 161-177.

[4] 张永乾, 陈志军, 孙永安, 等. 高精度陶瓷球研磨加工[J]. 轴承, 2002(3): 8-11.
ZHANG Yong-qian, CHEN Zhi-jun, SUN Yong-an, et al. High-precision ceramic ball grinding and processing[J]. Bearing, 2002(3): 8-11.

[5] LEVESQUE G, ARAKERE N K. An investigation of partial cone cracks in silicon nitride balls[J]. International journal of solids & structures, 2008, 45(25): 6301-6315.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.
LYU Bing-hai. Research on the grinding method and pelleting mechanism of ceramic ball double disc[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[9] ZHOU F, YUAN J, LV B H, et al. Kinematics and trajectory in processing precision balls with eccentric plate and variable-radius V-groove[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 84(9-12): 1-12.

[10] UMEHARA N, KIRTANE T, GERLICK R, et al. A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si_3N_4) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP)[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2006, 46(2): 151-169.

[11] CHILDS T H C, MOSS D J. Grinding ratio and cost issues in magnetic and non-magnetic fluid grinding[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2000, 49(1): 261-264.

[12] LU J, CHEN R, LIANG H, et al. The influence of concentration of hydroxyl radical on the chemical mechanical polishing of SiC wafer based on the Fenton reaction[J]. Precision engineering, 2018, 52(4): 221-226.

[13] PAN J, YAN Q. Material removal mechanism of cluster magnetorheological effect in plane polishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 81(9-12): 2017-2026.

[14] LIANG H, LU J, PAN J, et al. Material removal process of single-crystal SiC in chemical-magnetorheological compound finishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017, 94(1): 1-10.

[15] 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.

[16] LEE R T, HWANG Y C, CHIOU Y C. Lapping of ultra-precision ball surfaces. Part II. Eccentric V-groove lapping system[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2006, 46(10): 1157-1169.

[17] 聂兰芳, 赵学军. 钢球加工成圆条件及其影响因素探讨[J]. 轴承, 2001(1): 16-18.
NIE Lan-fang, ZHAO Xue-jun. The condition and influencing factors of steel ball processing circle[J]. Bearings, 2001(1): 16-18.

[18] 姚蔚峰. 双盘自转球体研磨方式成球过程的仿真研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
YAO Wei-feng. Simulation study on the process of ball forming by grinding the ball with double disk rotation[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.

[19] 冯凯萍, 周兆忠, 倪成员, 等. 基于双平面方式下陶瓷球抛光均匀性研究[J]. 现代制造工程, 2016(3): 7-12.
FENG Kai-ping, ZHOU Zhao-zhong, NI Cheng-yuan, et al. Research on the polishing uniformity of ceramic balls based on the double plane method[J]. Modern manufacturing engineering, 2016(3): 7-12.

[20] 郑斌. 变曲率沟槽高精度球体循环加工运动方式研究及装置设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
ZHENG Bin. Research on the motion mode and device design of variable precision groove for high precision ball cycle machining[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.

[21] RANJAN P, BALASUBRAMANIAM R, JAIN V K. Analysis of magnetorheological fluid behavior in chemo-mechanical magnetorheological finishing (CMMRF) process [J]. Precision engineering, 2017, 49: 122-135.