

环形抛光中方形元件塌角控制方法的理论分析

张慧方*, 顿爱欢, 徐学科, 陈军, 吴福林, 吴伦哲

中国科学院上海光学精密机械研究所精密光学制造与检测中心, 上海 201800

摘要 全口径环形抛光中方形元件的材料去除率存在从中心到边角位置越来越大的现象, 致使抛光工件出现塌角的面形, 影响了方形光学元件的面形质量。基于 Preston 方程, 通过改变元件的多种运动轨迹, 计算了方形光学元件全口径的材料去除率分布。通过分析发现: 使方形光学元件在保持原有自转的同时沿抛光模径向或与径向有一定夹角的方向摆动, 且附加在元件整个抛光面上的运动速度保持一致时, 可使方形元件的材料去除率分布得更均匀。通过附加这种运动方式可以有效控制方形元件的塌角现象。

关键词 光学制造; 抛光; 面形; 材料去除率

中图分类号 TB133

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402001

Analysis of Square Element Collapse Angle Surface Profile Control in Annular Polishing

Zhang Huifang*, Dun Aihuan, Xu Xueke, Chen Jun, Wu Fulin, Wu Lunzhe

Precision Optical Manufacturing and Metrology Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In full-aperture annular polishing, material removal rate increases from the center toward the edge of square optical, which leads to a collapse angle surface profile and affects the precision of the final surface. Several types of element motion trajectories were studied herein, and the material removal rate distribution of a full-aperture surface was calculated based on the Preston equation. Results show that the square optical element moves along the radial direction or in direction of a certain angle with respect to the radial direction while maintaining its original rotation, and the additional speed of individual points on the entire polishing surface remains consistent, making the material removal rate distribution of square optical element more uniform. Therefore, the collapse angle surface profile of the square optical element can be effectively controlled by the additional motion trajectories of elements.

Key words optical fabrication; polishing; surface profile; material removal rate

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.6700

1 引 言

大口径高精度光学元件在空间光学、高功率激光装置中有广泛应用, 环形抛光(以下简称“环抛”)因去除效率高和全频谱收敛而成为加工大口径光学元件的重要方式之一。目前, 采用环抛加工大口径光学元件很大程度上仍依赖于操作人员的经验, 缺乏有效的理论指导。

Suratwala 等^[1-3]对全口径抛光进行了相关研究, 根据 Preston 方程计算了工件/抛光模相互作用

过程中抛光模的磨损。他在计算过程中将 Preston 系数、摩擦因数、压强视为常数, 根据计算的磨损曲线, 针对方形工件设计了一种补偿抛光模磨损的隔板, 使抛光模沿径向的磨损量为常数, 从而使工件面形快速收敛(称为收敛抛光)。Fan 等^[4-5]研究了方形及圆形工件自由放置于工件环中的运动情况, 认为降低工件环的转速可以提高工件的均匀材料去除率。曹冲等^[6]、Wang 等^[7]分别通过研究得出了以下结论: 工件与抛光模的转速比越接近于 1:1, 偏心距越大, 工件的材料去除

收稿日期: 2019-09-14; 修回日期: 2019-10-24; 录用日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605228)

* E-mail: hfzhang@siom.ac.cn

率越均匀。尹进等^[8-9]以 Preston 方程和 Winkler 假定为基础建立了抛光模型,认为系统存在一个平衡状态,在此状态下无需调整校正盘即可获得具有高精度平面的工件,并通过对抛光液进行改性获得了更高的表面质量。一般情况下,当方形元件在加工过程中出现塌角的面形后,就会增大偏心距,使边角在抛光过程中漏出抛光模而不被磨削,称为漏边。通过减少边角的抛光时间可以降低磨削量,但是漏出的边角面积是依靠经验判定的,存在极大的不确定性。

实际的加工经验表明,依靠调整偏心距及转速比来控制方形元件的塌角不能保证加工效率。因此,本文在工件保持原有自转的基础上附加了几种运动方式(包括工件沿抛光模径向、法向的运动以及与半径有一定夹角的斜向运动),研究了工件的材料去除率分布及塌角程度。

2 数学模型

本文主要分析方形工件与抛光模二者所组成的系统,以 Preston 方程计算工件的材料去除率。Preston 方程为

$$\frac{dh}{dt} = kpv, \quad (1)$$

式中: $dh/(dt)$ 表示某点的材料去除率; p 表示某点的压强; v 表示工件上某点相对于抛光模的相对速率; k 为系数,表示分子量级的微观因素对材料去除率的影响。本文在计算过程中假定工件抛光面上任意一点的压强 p 、系数 k 均相等,并取 $p = 1000 \text{ Pa}$, $k = 1 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$,主要研究工件在不同运动方式下的材料去除率分布,通过提高材料的均匀去除率来减小方形元件的塌角程度。

在保持抛光模、工件原有自转的基础上,对工件附加一种运动方式,附加的运动方式包括:1)工件沿抛光模径向的摆动,如图 1(a)所示;2)工件沿抛光模法向的摆动,如图 1(b)所示;3)工件沿与抛光模径向呈一定夹角的方向作斜向摆动,如图 1(c)所示。在以下分析中定义两个直角坐标系,以抛光模中心为原点建立直角坐标系 OXY ,以工件中心为原点建立直角坐标系 oxy ,坐标系 OXY 始终固定不动,坐标系 oxy 的中心随工件运动,即坐标系 oxy 的中心始终位于工件中心,但 ox 轴与 oy 轴的方向始终保持不变,即 OX 轴与 ox 轴始终平行, OY 轴与 oy 轴始终平行。

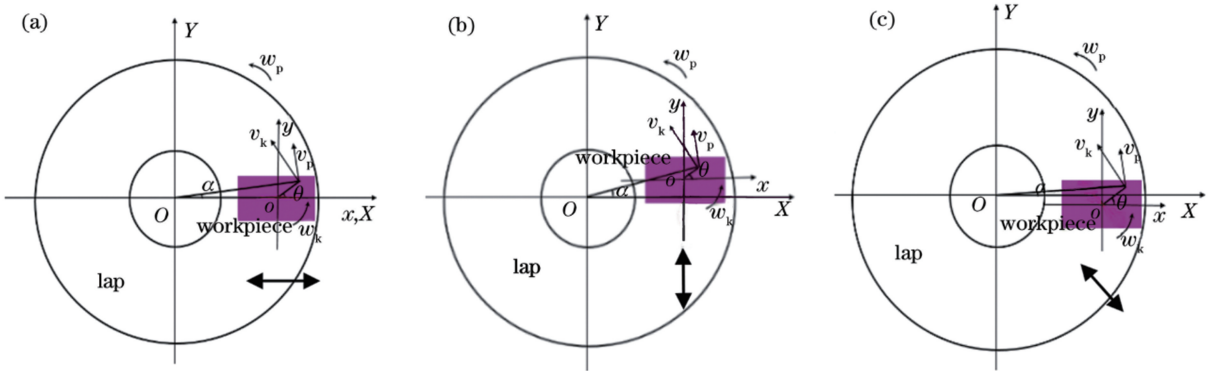


图 1 工件和抛光模的位置关系及运动方式示意图。(a)径向运动;(b)法向运动;(c)斜向运动
Fig. 1 Schematics of position relationship and motion types between workpiece and polishing lap.
(a) Radial motion; (b) normal motion; (c) oblique motion

工件沿抛光模径向运动时,工件抛光面上任一点的坐标设为 (x, y) ,该点相对于抛光模的速度可通过(2)~(10)式计算。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \omega_k t, \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_k = (\omega_k r \cos(\theta + \pi/2) + v_j, \omega_k r \sin(\theta + \pi/2)), \quad (4)$$

$$X = r \cos \theta + X_0 + \int v_j dt, \quad (5)$$

$$Y = r \sin \theta, \quad (6)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right), \quad (7)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_p = (\omega_p R \cos(\alpha + \pi/2), \omega_p R \sin(\alpha + \pi/2)), \quad (9)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_p, \quad (10)$$

式中: r 表示工件上的一点距坐标系 oxy 原点的距离; θ 表示该点与工件中心点的连线与 ox 轴的夹角; t 表示时间; R 表示工件上一点距坐标系 OXY 原点的距离; α 表示该点与抛光模中心点的连线与

OX 轴的夹角; ω_k 表示工件的自转角速率; ω_p 表示抛光模的自转角速率; X, Y 表示点 (x, y) 相对应的在坐标系 OXY 中的坐标; X_0 表示初始时刻工件原点在坐标系 OXY 上的横坐标; v_k, v_p 分别表示该点在工件、抛光模上的线速度; v 表示工件上该点相对于抛光模的线速度; v_j 为工件沿径向的摆动速率, 工件沿 OX 轴正向运动时 v_j 为正值, 沿 OX 轴负向运动时 v_j 为负值, 其大小保持不变。由(2)~(10)式即可得到工件径向摆动时各点相对抛光模的速度, 将其代入(1)式即可得到材料去除率分布。

当工件的附加运动方式为沿抛光模切向摆动时, 如图 1(b) 所示, 则工件上任一点的线速度可表示为

$$v_k = (\omega_k r \cos(\theta + \pi/2), \omega_k r \sin(\theta + \pi/2) + v_f), \quad (11)$$

式中: v_f 为工件沿切向的摆动速率, 工件沿 OY 轴正向运动时 v_f 为正值, 沿 OY 轴负向运动时 v_f 为负值, 其大小保持不变。该点在坐标系 OXY 上的坐标为

$$X = r \cos \theta + X_0, \quad (12)$$

$$Y = r \sin \theta + \int v_f dt, \quad (13)$$

由(1)~(3)式、(7)~(13)式可求得工件沿切向摆动时的材料去除率分布。

如图 1(c) 所示, 当工件的附加运动方式为沿与 OX 轴有一定夹角的方向作斜向摆动时, 工件上任一点的线速度为

$$v_k = (\omega_k r \cos(\theta + \pi/2) + v_j, \omega_k r \sin(\theta + \pi/2) + v_f), \quad (14)$$

式中: v_j 为工件的附加运动沿 ox 轴的速度分量; v_f 为工件的附加运动沿 oy 轴的速度分量, 速度分量的正负号规定与上述相同。由(1)~(3)式、(5)式、(7)~(10)式、(13)式、(14)式可求得工件沿与 OX 轴有一定夹角的方向摆动时的材料去除率分布。

为更量化地表征塌角效应的程度, 定义无量纲物理量非均匀材料去除率^[10] N_{mrr} 为

$$N_{mrr} = \frac{h_m - h_n}{h_m}, \quad (15)$$

式中: h_m 为抛光面上各点中最大的材料去除量; h_n 为最小的材料去除量。 N_{mrr} 越小, 塌角程度就越小, 反之, 塌角程度越大。

3 仿真结果分析与讨论

3.1 径向摆动对塌角的影响

对于工件在保持原有自转的基础上沿抛光模径向摆动情况, 分别取径向摆动速率为 0, 30, 40, 50 mm/s, 工件同时保持着自转, 自转速率为 0.05 rad/s, 抛光模转速的大小为 0.04 rad/s, 抛光模内径为 200 mm, 外径为 1400 mm。将这些参数代入(1)~(10)式即可求得工件的材料去除率分布, 计算结果如图 2(a)~(d) 所示, 所对应的非均匀材料去除率 N_{mrr} 分别为 0.0052、0.0028、0.0020、0.0015。分析结果表明, 工件沿抛光模径向的摆动

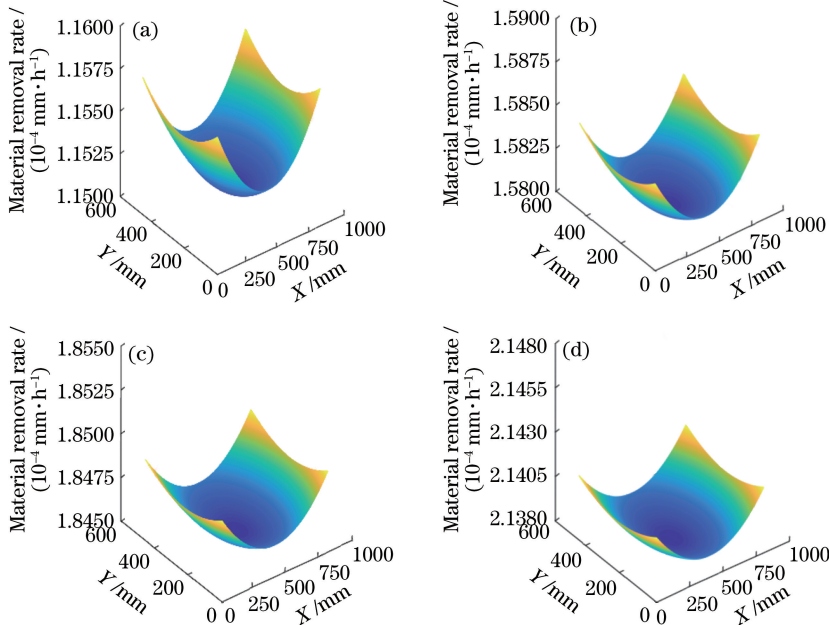


图 2 不同径向摆动速率下的材料去除率分布。(a) 0; (b) 30 mm/s; (c) 40 mm/s; (d) 50 mm/s

Fig. 2 Material removal rate distributions at different radial velocities. (a) 0; (b) 30 mm/s; (c) 40 mm/s; (d) 50 mm/s

速率越大,非均匀材料去除率 N_{mrr} 就越小,即塌角程度越小。通过分析发现,这种运动情况下的工件非均匀材料去除率 N_{mrr} 的变化规律比较单一,即随着摆动速率的增大而减小,因此更便于实际加工操作。

3.2 切向摆动对塌角的影响

当工件在自转的同时沿抛光模切向有摆动时,其材料去除率的变化规律与径向摆动有所不同。本文分别取切向摆动速率为 0, 40, 51, 65 mm/s, 偏心距为 900 mm。由(1)~(3)式、(7)~(13)式可求得材料去除率分布如图 3(a)~(d)所示,所对应的非均匀材料去除率 N_{mrr} 分别为 0.0041、0.0162、

0.0041、0.0018。当切向速率为 40 mm/s 时,非均匀材料去除率相较于无附加运动时增大了,即加剧了塌角现象;当切向摆动速率为 51 mm/s 时,非均匀材料去除率和无附加运动时相同,即塌角效应没有得到控制;当切向摆动速率为 65 mm/s 时,非均匀材料去除率比无附加运动时减小了,即塌角程度减小了。故在工件在自转的基础上附加具有沿抛光模切向摆动的运动时,材料去除率的变化存在一个临界值。当切向摆动速率小于临界值时,非均匀材料去除率比无摆动时大,塌角程度加剧;当切向摆动速率大于临界值时,非均匀材料去除率逐渐减小,塌角程度逐渐降低。

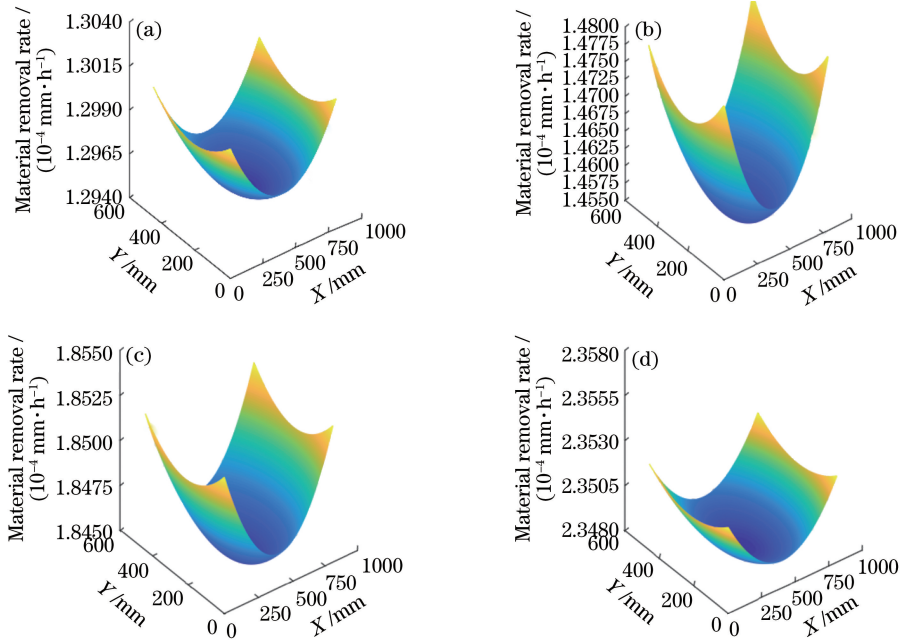


图 3 不同切向摆动速率下的材料去除率分布。(a) 0; (b) 40 mm/s; (c) 51 mm/s; (d) 65 mm/s

Fig. 3 Material removal rate distributions at different normal velocities. (a) 0; (b) 40 mm/s; (c) 51 mm/s; (d) 65 mm/s

为进一步研究切向摆动存在临界摆动速率的规律,本文分析了一系列切向摆动速率所对应的非均匀材料去除率,分析结果如图 4 所示。图 4 横坐标表示切向摆动速率,纵坐标为非均匀材料去除率,可见:非均匀材料去除率随着切向摆动速率的增大而逐渐增大到一个最大值,之后随着切向摆动速率的增大而逐渐减小。

3.3 斜向摆动对塌角的影响

此外,本文还分析了工件沿与抛光模径向有一定夹角的方向作斜向摆动时,工件的材料去除率分布及塌角程度。为了计算方便,将该附加运动速度沿 ox 轴与 oy 轴分解为 v_j 和 v_f , 分别取 $v_j = 30$ mm/s 和 $v_f = 30$ mm/s, $v_j = 30$ mm/s 和 $v_f = 60$ mm/s, $v_j = 30$ mm/s 和 $v_f = 90$ mm/s, $v_j =$

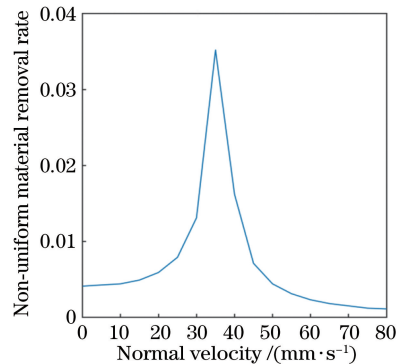


图 4 不同切向摆动速率下的非均匀材料去除率

Fig. 4 Non-uniform material removal rate at different normal velocities

40 mm/s 和 $v_f = 30$ mm/s, $v_j = 50$ mm/s 和 $v_f = 30$ mm/s, $v_j = 60$ mm/s 和 $v_f = 30$ mm/s 共 6 组运

动参数,运动方向与 ox 轴的夹角由 v_j 和 v_f 的比值确定,与 ox 轴的夹角分别为 45° 、 63° 、 72° 、 37° 、 31° 、 27° ,取抛光模内径为 200 mm,外径为 1400 mm,6 组参数所对应的非均匀材料去除率 N_{mrr} 分别为 0.0027、0.0014、0.00067、0.0019、0.0014、0.0011,材

料去除率分布如图 5(a)~(f)所示。结果表明:非均匀材料去除率 N_{mrr} 随速度分量 v_j 或 v_f 的增大而减小,即塌角程度随速度分量 v_j 或 v_f 的增大而减小。这说明速度分量 v_j 对速度分量 v_f 的作用进行了调制,从而没有出现切向摆动速度存在临界值的现象。

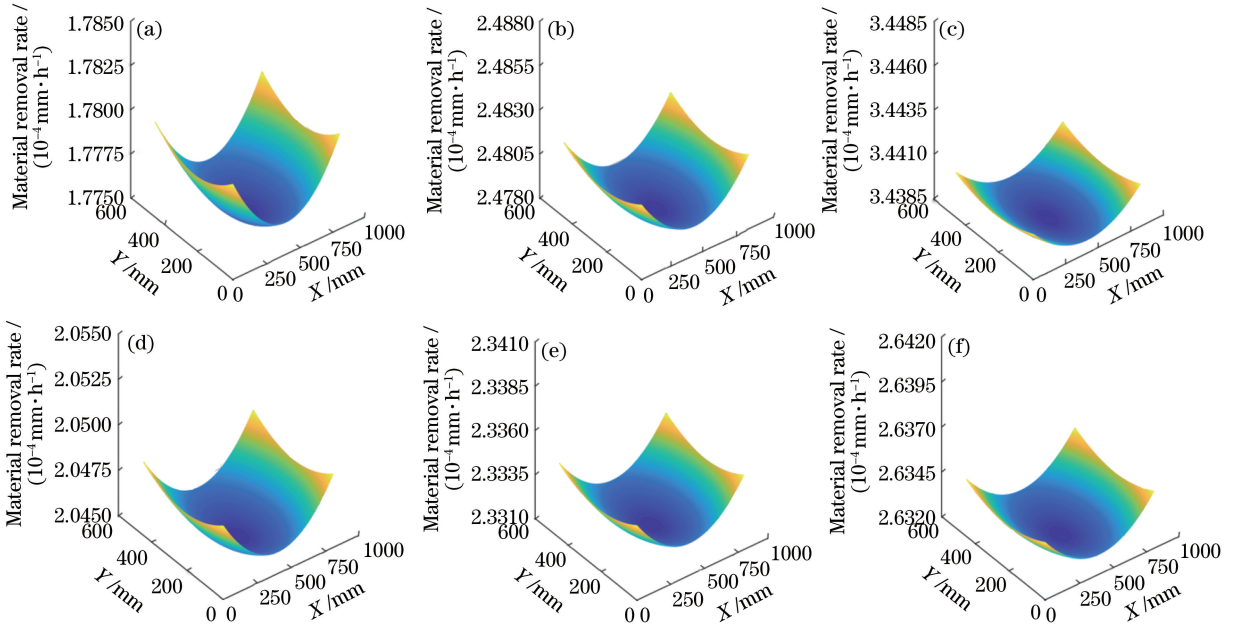


图 5 不同斜向摆动速率下的材料去除率分布。(a) $v_j=30$ mm/s 和 $v_f=30$ mm/s; (b) $v_j=30$ mm/s 和 $v_f=60$ mm/s; (c) $v_j=30$ mm/s 和 $v_f=90$ mm/s; (d) $v_j=40$ mm/s 和 $v_f=30$ mm/s; (e) $v_j=50$ mm/s 和 $v_f=30$ mm/s; (f) $v_j=60$ mm/s 和 $v_f=30$ mm/s

Fig. 5 Material removal rate distributions at different oblique velocities. (a) $v_j=30$ mm/s and $v_f=30$ mm/s; (b) $v_j=30$ mm/s and $v_f=60$ mm/s; (c) $v_j=30$ mm/s and $v_f=90$ mm/s; (d) $v_j=40$ mm/s and $v_f=30$ mm/s; (e) $v_j=50$ mm/s and $v_f=30$ mm/s; (f) $v_j=60$ mm/s and $v_f=30$ mm/s

4 结 论

本文主要是通过提高方形元件材料去除率的均匀性来降低塌角程度。根据上述对附加运动的分析发现,当附加运动的方向沿抛光模的径向或与径向有一定夹角但不垂直于径向时,塌角程度随附加运动速率的增大而减小,当附加运动的方向垂直于抛光模的径向,即沿抛光模切向时,塌角程度先增大后减小,故沿切向的运动是不易于工艺操作的。本文为控制方形元件的塌角提供了一种新思路。

参 考 文 献

[1] Suratwala T, Steele R, Feit M, et al. Convergent pad polishing of amorphous silica[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2012, 3(1): 14-28.
 [2] Suratwala T I, Feit M D, Steele W A. Toward deterministic material removal and surface figure

during fused silica pad polishing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 93(5): 1326-1340.
 [3] Cooke F, Brown N, Prochnow E. Annular lapping of precision optical flatware[J]. Optical Engineering, 1976, 15(5): 155407.
 [4] Fan Q T, Zhu J Q, Zhang B A. Effect of the geometry of workpiece on polishing velocity in free annular polishing[J]. Chinese Optics of Letters, 2007, 5(5): 298-300.
 [5] Fan Q, Zhu J, Zhang B, et al. Motion simulation of annular polishing[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2007, 29(2/3/4): 159-162.
 [6] Cao C, Feng G Y, Yang L M, et al. Calculation and simulation for the factors affecting relative grinding removal in ultra-precision continuous polishing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(4): 67-71.
 曹冲, 冯国英, 杨李茗, 等. 影响超精密环抛相对磨削量因素的计算模拟[J]. 光电工程, 2004, 31(4): 67-71.

- [7] Wang L, Shen Z, Ji Y. Calculation and simulation of the uniformity of grinding removal in ring polishing [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7655: 76552I.
- [8] Yin J, Zhu J Q, Jiao X, et al. Method of steady-state deterministic polishing based on continuous polishing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (11): 1102001.
尹进, 朱健强, 焦翔, 等. 基于环形抛光的稳态确定性抛光方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102001.
- [9] Liang S J, Tang W L, Jiao X, et al. Effect of modified polishing agent on polishing quality of optical glass[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (12): 1203001.
梁尚娟, 汤文龙, 焦翔, 等. 改性抛光剂对光学玻璃抛光质量的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1203001.
- [10] Fang G S, He H Y. Statistics [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2017: 43-75.
方国松, 何海燕. 统计学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2017: 43-75.