



高精度光学元件控时磨削方法研究

孙梓洲^{1,2,3}, 陈付磊^{1,2,3}, 胡皓^{1,2,3*}, 戴一帆^{1,2,3}, 关朝亮^{1,2,3}, 彭小强^{1,2,3}

1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073;

2. 超精密加工技术湖南省重点实验室, 长沙 410073;

3. 国防科技大学装备综合保障技术重点实验室, 长沙 410073

* E-mail: tiny_hh@139.com

收稿日期: 2023-04-07; 接受日期: 2023-05-04; 网络版发表日期: 2023-07-18

国家自然科学基金重大项目(批准号: 51991371)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 51835083)资助

摘要 高精度、大口径光学元件的需求量与日俱增, 传统铣磨-研抛-修形工艺路线因其较低的加工效率面临挑战. 为提高光学元件制造效率, 使其能快速达到最终修形工序的入口条件, 本文将柔性砂带磨削工具引入光学确定性加工. 通过研究光学元件控时磨削材料去除机理, 提出一种新的材料去除方法, 通过控制关键加工参数, 成功获得了高效可控的去除函数. 根据理论分析搭建了光学元件控时磨削样机, 在一块200 mm×200 mm的平面微晶玻璃上进行控时磨削实验. 结果表明面形误差由2.31 μm PV、0.38 μm RMS收敛至1.76 μm PV、0.27 μm RMS, 过程用时仅53 min, 效率为同尺寸磁流变抛光轮的10倍以上. 控时磨削在修形同时可将微晶玻璃的毛面迅速抛亮, 满足波面干涉测量要求. 结果验证了光学元件高效控时磨削方法误差收敛的可行性, 有望大幅缩短最终修形工艺前的研磨抛光加工周期.

关键词 光学元件, 控时磨削, 确定性修形, 高效率

1 引言

光学元件在民用消费、科学研究、国防装备等领域有广泛应用, 在相机投影仪镜头、显微镜、天文望远镜、激光聚变等系统中均有极大需求. 光学元件根据形状特征可大致分为平面、球面、非球面、自由曲面等. 随着曲面描述变量个数的增加, 光学元件的像差矫正能力更好, 结构可以更加紧凑简化, 但是加工难度也越来越大^[1]. 光学元件的口径没有严格统一的划分标准, 目前大多划分为小口径(0~50 mm)、中口径

(50~200 mm)和大口径(>200 mm).

目前, 光学元件的加工方法主要有传统研抛、模压成型、超精密车削/磨削、基于计算机控制光学表面成形技术(computer controlled optical surfacing, CCOS)原理的确定性光学制造方法等. 以光学元件面形特征进行划分, 平面、球面镜的加工一般使用单/多轴机进行传统研抛, 即可达到较好的加工效果^[2]; 非球面等高次曲面一般使用超精密车削/磨削和确定性光学制造方法制造; 随着光学元件口径的增大, 其加工难度呈现非线性增加, 例如非球面反射镜制造难度与口

引用格式: 孙梓洲, 陈付磊, 胡皓, 等. 高精度光学元件控时磨削方法研究. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1302–1312

Sun Z Z, Chen F L, Hu H, et al. Research on time-controlled grinding methods for fabricating high-precision optical components (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 1302–1312, doi: [10.1360/SST-2023-0135](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0135)

径三次方成正比^[3]。小口径光学元件依靠模压、纳米超精密切削即可基本达到精度要求^[4]，但是传统的超精密机床加工精度随着加工尺寸的增大而降低，在面对大尺寸光学元件时其成形精度难以满足设计需求，因此还需要其他光学加工手段进行进一步的精度收敛。

目前大尺寸光学元件的加工流程一般为：铣磨/磨削开形、研磨抛光和最终的高精度修形。其中前两道工序将数十微米的面形误差收敛至优于 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 后，进入最后一道工序，实现最终的加工。例如中国科学院光电技术研究所研制的 $\Phi 1.05\ \text{m}$ 反射镜，采用“超精密铣磨-小磨头数控研抛-离子束精修”的工艺路线，实现主镜面形误差的确定性去除，最终实现 0.011λ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$) RMS (root mean square, 均方根值) 的面形精度^[5]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于2018年研制成功的 $4.03\ \text{m}$ SiC反射镜，其工艺路线采用“精密铣磨-应力盘抛光+CCOS磨头研抛-磁流变精修”的方案，并采用了并行加工方法提升了加工效率，最终花费18个月完成反射镜的制造，达到了 $15.2\ \text{nm}$ RMS面形精度^[3]。

在当今光学元件高速发展的背景下，大口径光学元件的需求量剧增，现有加工工艺面临巨大挑战。20世纪80年代，研制哈勃太空望远镜 $\Phi 2.4\ \text{m}$ 主镜时，光学制造能力约为 $1\ \text{m}^2/\text{年}$ ，而到如今欧洲极大望远镜项目(European Extremely Large Telescope, E-ELT)，对光学制造能力的要求达到 $>100\ \text{m}^2/\text{年}$ 。目前米级大口径光学元件的超精密磨削成形精度极限约为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ ，例如英国Cranfield精密工程研究所(Cranfield Unit of Precision Engineering, CUPE)研制的Big OptiX (BOX)超精密磨床在 $1.45\ \text{m}$ 口径反射镜上可实现 $5.44\ \mu\text{m}$ PV (Peak to Valley, 峰谷值), $0.87\ \mu\text{m}$ RMS精度^[6,7]；在国内，中国机械科学研究总院研制的UPG60非球面超精密成形磨床，可以在 $530\ \text{mm}\times 530\ \text{mm}$ 的表面上实现优于 $2.75\ \mu\text{m}$ PV的加工效果^[8]。在传统工艺流程中，介于铣磨成形和高精度修形之间的研磨抛光步骤，由于材料去除余量大、材料去除效率较低、误差收敛确定性较差，导致在整个光学元件加工周期内占据了60%~80%的时间，成为高精度、高效光学元件加工的一大阻碍。

砂带磨削作为一种柔性磨削方法，凭借其高材料去除效率、磨削发热低、兼具研磨抛光的复合效应、

形状和材料适应性好等优点，被广泛用于工业生产中。重庆大学、北京交通大学等单位对砂带磨削开展了广泛且深入的研究，在复杂曲面的恒力磨削、姿态控制、轨迹规划、表面质量提升、砂带材料结构等方面取得了一系列进展^[9-13]。将磨削与CCOS可控柔体加工方法相结合，利用磨削高材料去除效率和CCOS加工高确定性收敛比的优点，有望减少光学元件最终高精度修形工序前的加工时间，对实现高效高精度光学元件的加工具有重要意义。本文创新性地将砂带磨削与光学确定性加工方法结合，这种确定性加工方法可以对现有的加工工艺流程进行改良，大幅缩短光学元件的制造周期。

2 光学元件控时磨削加工原理

控时磨削基于CCOS技术^[14]，使用砂带为材料去除工具，通过精确控制砂带接触轮与工件之间的接触环境，形成具备去除效率线性和稳定性的去除函数。在通过准确的面形误差获取和驻留时间解算后，利用机床数控系统控制接触轮在误差低点驻留时间短，去除材料少，误差高点驻留时间长，去除材料多，进而实现面形误差的确定性修正。

与传统的砂带研磨抛光以及近年来广泛研究的超声辅助砂带磨削不同，控时磨削通过精确控制加工参数，使其满足Preston方程^[15]：

$$H = kpvt, \quad (1)$$

式中， H 为材料去除量， p 为接触压力， v 为去除工具与工件之间的相对速度， t 为去除工具在该位置的驻留时间， k 为与环境、介质、材料等因素相关的一个常数。由式(1)可以得出，当控制 k 、 p 、 v 不变时，仅需控制 t 即可实现不同体积的材料去除。控时磨削的加工示意图如图1所示，接触轮表面覆盖有开式砂带，接触轮在恒压气缸的推动下与工件表面沿法向接触，并在特定机构驱动下以设定的频率作轴向振动，用以提高材料去除效率。开式砂带通过卷带轮和放带轮驱动，以及位置反馈和力反馈控制，使砂带具备恒定的线速度和恒定的张力。砂带在卷带轮的驱动下不断更新，砂带上不断有新鲜的磨粒被驱动进入接触区域参与磨削，避免了单一磨粒在往复磨损中出现磨削效率衰减的问题，保证了材料去除过程的稳定性。整个控时磨削装置在数控系统的驱动下，以非匀速运动遍历整个加工表

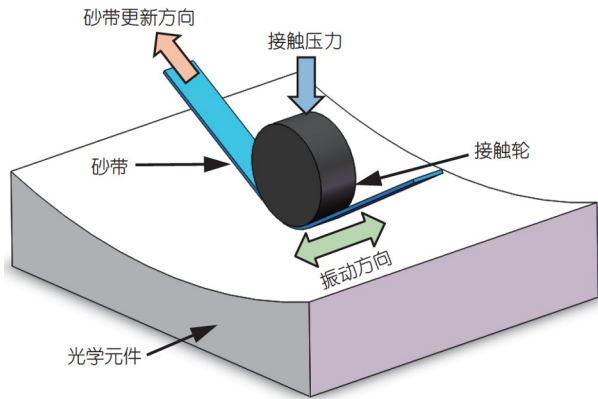


图1 光学元件控时磨削示意图

Figure 1 Schematic diagram of time controlled grinding of optical components.

面, 实现工件表面特定位置的定量去除. 与现有砂带磨削机理相比, 在接触轮与工件的接触方式方面, 现有砂带磨削机构中, 接触轮与磨削装置之间为刚性连接, 通过控制切深 a_p 实现预定厚度的材料去除; 而控时磨削使用压力 p 取代切深 a_p , 接触轮柔性地与工件接触. 在传统加工中, 切深 a_p 直接受到机床运动轴的运动误差影响, 在整个磨削过程中难以保持恒定的切深 a_p , 也就造成了磨削后表面误差的出现, 因此加工精度仍然受机床自身运动精度的制约; 控时磨削使用压力 p 取代切深 a_p 后, 由于气压控制精度很高, 在气缸的运动行程内接触压强均可保持较高稳定性, 此时机床因运动产生的微米级误差可以被气缸的往复位移补偿, 但接触压力却可以保持不变, 因此材料去除量不受影响, 所以控时磨削受机床运动误差的影响极小, 可以实现优于机床运动精度的加工水平. 事实上, 其他的确定性加工方法, 如磁流变抛光(MRF)^[16]、离子束修形(IBF)^[17]等, 均是使用高分辨率的控时方法实现了高精度的材料去除, 达到了亚微米甚至亚纳米级的材料去除. 因此控时磨削虽然去除效率可能略低于现有的砂带磨削, 但是在1 μm 级别的加工精度方面却有显著优势.

3 光学元件控时磨削去除函数获取

实现高精度确定性修形的前提是提取出准确的去除函数, 为此本文从理论和实际角度出发, 对光学元件控时磨削的去除函数进行理论分析和实际提取.

砂带磨削的材料去除过程较为复杂, 包括弹性域

去除、塑性域(延性)去除和脆性域去除. 不同域之间的去除机理不同, 材料去除效率和加工后的表面质量等指标差距也较大, 为保证去除函数效率的恒定, 需要使控时磨削材料去除过程稳定在其中一个去除状态范围内. 影响磨削去除状态的因素多, 其中一个影响材料去除效率的重要因素是切深 a_p . 例如在延性域磨削和塑性域磨削的判别准则方面, 目前基本通过未变形切屑厚度与脆塑转变临界切屑厚度之间的大小关系来评价. Bifano等人^[18]在20世纪90年代提出了延性域磨削临界切削深度模型, 该模型依据断裂力学理论来估算光学元件磨削时脆塑转变临界切屑厚度 h_c , 公式如下:

$$h_c = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2, \quad (2)$$

其中, E 是弹性模量, H 是硬度, K_c 是断裂韧性.

最大未变形切屑厚度的理论计算公式为

$$h_{max} = \left(\frac{4}{Cr} \frac{V_w}{V_c} \sqrt{\frac{a_e}{d_c}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

其中, C 是有效磨粒浓度, r 是平均切屑宽厚比, V_w 是工件线速度, V_c 是砂轮线速度, a_e 是磨削时单位切深, d_c 是砂轮的当量直径^[19].

根据钟曜宇^[20]的研究, 磨粒粒度、切削深度、砂轮线速度、工件转速是影响工件处于脆性域还是延性域磨削的关键因素.

在控时磨削过程中, 砂带粒度、砂带线速度都被精确且稳定地控制, 控时磨削中没有切深 a_p 这一概念, 取而代之的是磨粒与工件的接触压力. 在压痕断裂力学实验中, 磨粒的切深 a_p 是依靠加载在磨粒上的压力 p 实现的, 因此磨粒切深 a_p 和接触压力 p 在磨削过程中的力学效应是具备映射关系的. 所以在磨削过程中, 其余参数如砂带粒度、砂带线速度等不变时, 只要保证砂带与工件之间的接触压力稳定, 就可以维持稳定的材料去除状态, 保证稳定的去除效率.

3.1 去除函数理论建模

根据Preston方程, 控时磨削在材料去除过程中, 材料去除量与接触压力有线性关系. 在控时磨削模型中, 表面覆有砂带的接触轮由铝合金轮毂和橡胶组成, 在本文的模型中, 接触轮为柱面, 半径为50 mm, 宽度为

20 mm. 磨削过程中, 接触轮与工件之间的接触产生分布不均匀的压强, 使得磨削接触区域的磨削效率不均匀, 导致特定轮廓去除函数的生成. 首先根据赫兹接触理论, 在控时磨削方法中, 当接触轮与工件法向接触时, 接触区域内沿接触轮圆周方向的接触压强在理论上呈椭圆形曲线分布, 如图2所示; 最大应力数值计算方法如式(4)所示^[21].

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{F_n \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}{\pi L \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}}, \quad (4)$$

其中, $\sigma_{\max}$ 为接触面上椭圆应力的最大值, ρ_1 , ρ_2 分别为接触轮和工件的曲率半径, 当工件为平面时, ρ_2 为 ∞ . E_1 , E_2 分别为接触轮和工件的弹性模量, μ_1 , μ_2 分别为接触轮和工件的泊松比.

接下来使用 ANSYS Workbench 对控时磨削过程进行二维接触应力分布仿真分析, 预估接触变形区域以及接触面间的去除函数轮廓^[22]. 以 0.3 MPa 气压下的接触为例, 理论产生压力约为 94 N, 装置自重约为 15 N, 压力施加面面积为 100 mm×20 mm, 等效施加压强约为 0.055 MPa. 接触轮材质为 HA70 硬度的橡胶材料, 工件材料为微晶玻璃, 材料相关力学参数如表1所示. 微晶玻璃底面添加了固定支撑, 并对接触轮除 Y 轴以外的方向进行位移约束. 仿真过程与结果如图3

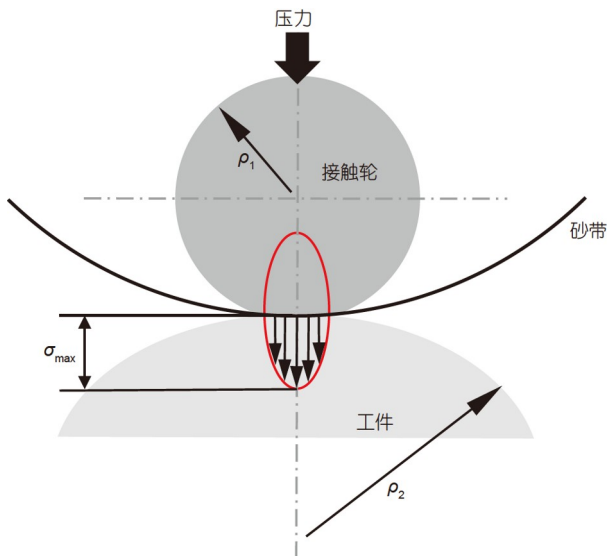


图2 基于赫兹接触模型的接触压强分布示意图

Figure 2 Schematic diagram of contact pressure distribution based on Hertz contact model.

表1 有限元仿真材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials in finite element simulation

材料相关力学参数	对应值
接触轮杨氏模量(MPa)	16
接触轮泊松比	0.4874
工件杨氏模量(MPa)	90229
工件泊松比	0.24

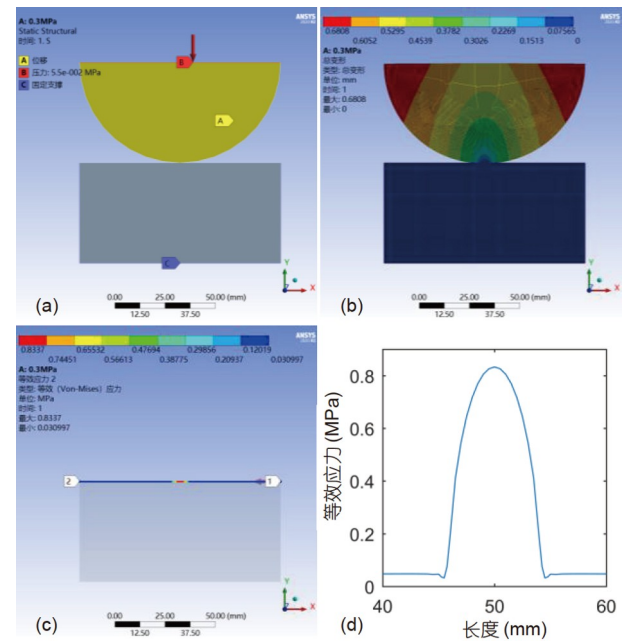


图3 接触模型ANSYS仿真计算结果(0.3 MPa). (a) 载荷施加及边界约束; (b) 整体变形; (c) 微晶玻璃表面线应力分布; (d) 微晶玻璃接触区域线应力分布

Figure 3 ANSYS simulation results of contact model (0.3 MPa). (a) Load settings and boundary constraints; (b) overall deformation; (c) line stress distribution on the surface; (d) line stress distribution in the contact area.

所示.

通过改变载荷压强大小仿真得出, 橡胶接触轮的变形、最大接触压强和接触区域的宽度随着接触压力的增大而增大, 根据仿真分析的结果, 在气缸压强约为 0.3 MPa 时, 接触区域的宽度约为 9~10 mm, 且接触应力分布近似椭圆分布, 与理论公式预测基本一致.

3.2 去除函数实验

本文的实验对象为平面微晶玻璃, 加工面尺寸为 200 mm×200 mm 的毛面, 前道工序为铣磨成形. 初始

加工面形经三坐标仪测量后, 如图4所示, 其面形精度约为 $26.8\text{ }\mu\text{m PV}$, $5.55\text{ }\mu\text{m RMS}$, 粗糙度约为 $0.8\text{ }\mu\text{m Ra}$.

在进行控时磨削修形实验前, 需要首先在其表面进行定点驻留去除函数实验, 如图5所示. 定点驻留去除函数参数如表2所示.

由于微晶玻璃表面质量较差且去除函数位置处的轮廓陡度较大, 无法使用波面干涉仪获取有效的可解析干涉条纹图像; 三坐标仪的测量不确定度($>1\text{ }\mu\text{m}$)无法满足去除函数的提取精度, 因此采用图6所示的自研高精度非接触式坐标轮廓仪进行去除函数表面特征的获取. 非接触式坐标轮廓仪使用光谱共焦传感器作为测头, 可以准确获得测头与工件之间的距离信息, 坐标轮廓仪的X和Y直线运动轴使用了高精度气浮导

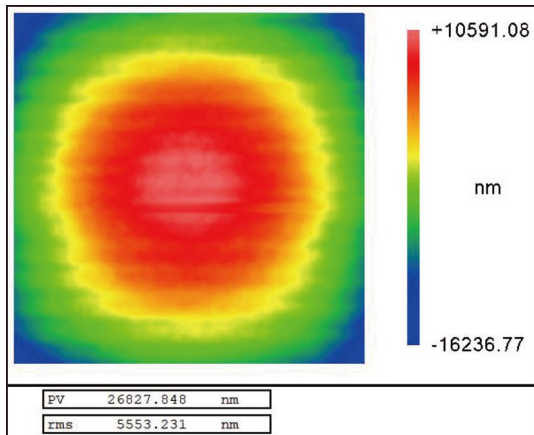


图 4 微晶玻璃镜坯的面形测量数据
Figure 4 Surface measurement data of glass-ceramics blank.

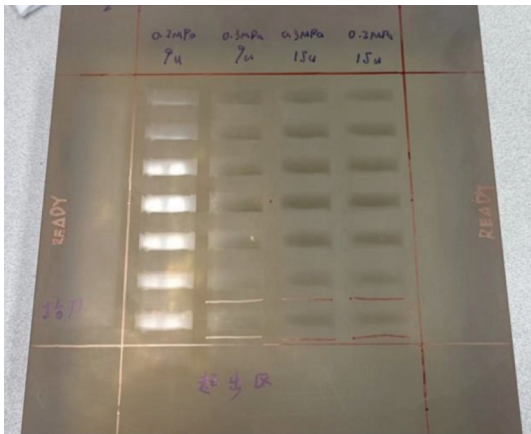


图 5 定点驻留去除函数实验后的微晶玻璃表面
Figure 5 Surface of glass-ceramics after fixed-point removal function experiment.

表 2 去除函数制作参数

Table 2 Experimental parameter of removal function

去除函数制作参数	对应值
磨粒类型	SiC
磨粒粒度(μm)	9, 15
接触轮振动频率(Hz)	9
接触气缸压强(MPa)	0.2, 0.3
砂带更新速度(mm/s)	5

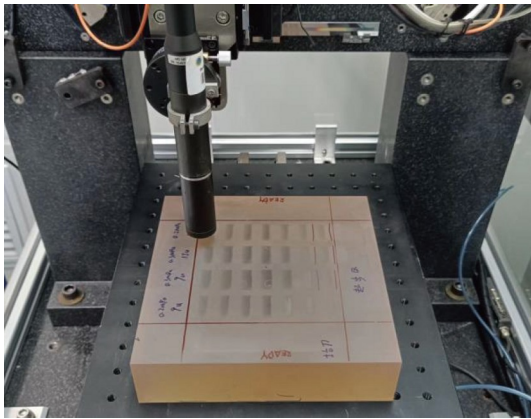


图 6 高精度坐标轮廓测量提取去除函数
Figure 6 Removal function extracted by high precision coordinate profile measuring.

轨, 单次测量的范围为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 52\text{ mm}$. 该测头对于工件表面粗糙度的适应性优于波面干涉仪, 但过于粗糙的表面也会影响到测头数据的准确性, 带来较多噪点. 由图5可以看出, 经过定点去除函数实验后, 微晶玻璃上去除斑点位置的表面粗糙度有了很大改善, 因此使用该轮廓仪进行去除函数轮廓测量时, 平面测量不确定度约为 50 nm , 满足测量精度需求^[23,24].

借助坐标轮廓仪进行面形误差测量可获取每一组加工参数的去除函数轮廓形状特征分布. 其中一组参数的去除函数的测量结果如图7所示.

通过对其中的一个去除函数轮廓进行提取, 分别得到了如图8所示的一个去除函数的二维、三维和沿砂带更新方向的轮廓. 可以看出, 沿着接触轮更新方向的去除函数轮廓接近2.1节中仿真的类似椭圆曲线的分布; 去除函数的二维尺寸约为 $25\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 符合有限元仿真得到的接触区域尺寸, 验证了仿真的可信度.

由于微晶玻璃初始面形精度和表面粗糙度较差, 对去除函数的测量及处理造成了一定影响, 无法准确获取所有加工参数组合下的去除函数. 因此本文选取

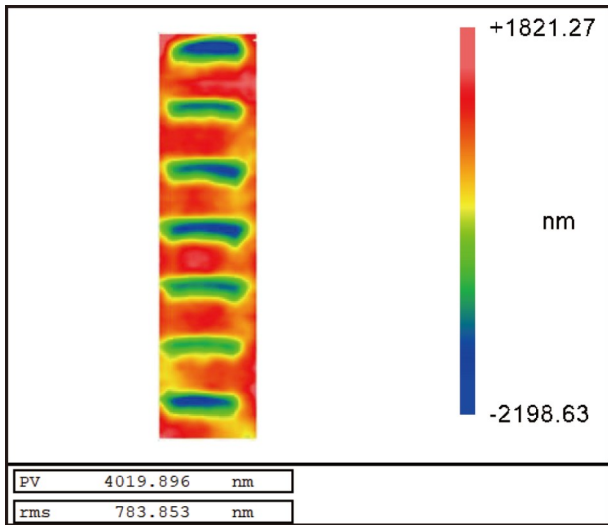


图 7 粒度 $15\ \mu\text{m}$ 、压强 $0.3\ \text{MPa}$ 参数组不同驻留时长的去除函数提取结果

Figure 7 Extraction results of removal function with different dwell times of $15\ \mu\text{m}$ grit size and $0.3\ \text{MPa}$ pressure.

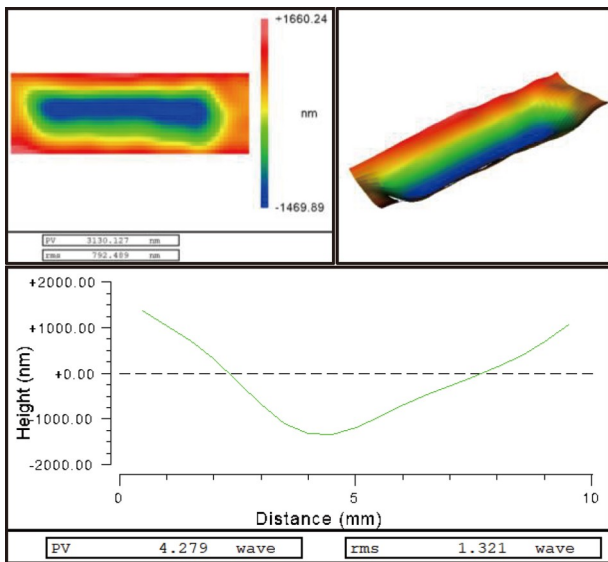


图 8 去除函数二维、三维形貌和砂带更新方向轮廓

Figure 8 2D and 3D morphologies of removal function and surface profile along the renewal direction of abrasive belt.

其中去除效率比较稳定的几组去除函数, 使用该参数进行后续的修形实验。

4 光学元件控时磨削实验平台

根据前文对控时磨削材料去除稳定性的研究, 掌

握了影响光学元件控时磨削材料去除稳定性的关键参数。本文基于其材料去除过程和加工稳定控制, 搭建了控时磨削实验样机进行实验, 装置大致原理如图9所示, 控时磨削样机主要由底座、气缸和弹出滑台组成。底座固定在6轴龙门机床的溜板上, 跟随机床数控系统控制; 气缸连接底座和弹出滑台, 弹出滑台安装在底座上, 可以沿图9中灰色箭头方向滑动, 在气缸的控制上进行往复运动。控时磨削的砂带驱动装置安装在弹出滑台上, 一侧为放带轮, 上面缠有新鲜砂带; 砂带通过接触轮到达另一侧的卷带轮, 上面卷绕加工后的砂带。在实际工作时, 底座在机床运动轴的驱动下移动到距离工件表面 $10\ \text{mm}$ 附近的位置, 随后气缸推动接触轮压在工件表面, 放带轮和卷带轮按照预定的更新速度和张紧力驱动砂带, 整个控时磨削装置在机床溜板的带动下遍历工件表面, 完成加工。

机床床身主体为龙门结构, 具有 X、Y、Z、A、B、C 六个运动轴, 控时磨削装置可以随机床实现除 C 轴以外的运动自由度, 可以满足本实验装置的平面以及后续的非球面光学元件控时磨削实验。

5 光学元件控时磨削实验

5.1 实验前处理

在控时磨削实验开始前, 为了消除前期进行定点去除函数实验时留下的去除斑点, 同时为了减少加工余量, 提高修形效率, 使用超精密光学磨床对微晶玻璃的表面进行一次超精密磨削。通过借助超精密磨床的加工, 首先可以根据加工结果得到超精密磨削的磨削精度水平, 便于后续的评估; 其次是在超精密磨削后的表面上进行实验, 可以进一步验证控时磨削方法是否具备在微米级面形误差的确定性收敛能力。如图

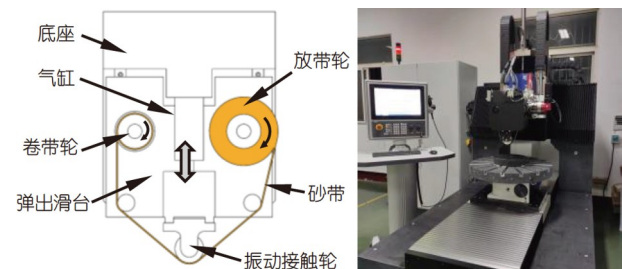


图 9 控时磨削装置示意图及搭载样机的控时磨削机床

Figure 9 Schematic diagram of time-controlled grinding device and corresponding machine tool equipped with prototype.

10所示, Optotech UPG 500 CNC光学超精密磨床被用于对该微晶玻璃进行超精密磨削, 前后共历时6 h.

由于微晶玻璃的材料特性, 经过超精密磨削的微晶玻璃表面粗糙度仍然较大, 若要使用波面干涉仪进行面形测量就必须经过研磨抛亮工序. 如果继续使用前述坐标轮廓仪进行表面误差分布的测量, 磨削后较为粗糙的表面给测量过程带来较多噪点. 因此利用砂带柔性磨削兼具抛光效果的特性, 先在工件表面进行一次匀速进给的控时磨削, 实现对超精密磨削后微晶玻璃表面的快速抛亮, 同时又不会对面形精度造成较大影响. 如图11所示, 在经过24.65 min的预磨削后, 其表面出光, 进入干涉仪可检测的表面粗糙度范围. 随后利用激光波面干涉仪对待加工的微晶玻璃进行了面形测量, 结果如图12所示, 平面的面形误差为2.31 μm PV,



图 10 Optotech UPG 500 CNC超精密磨床磨削过程
Figure 10 Grinding process of Optotech UPG 500 CNC ultra precision grinder.

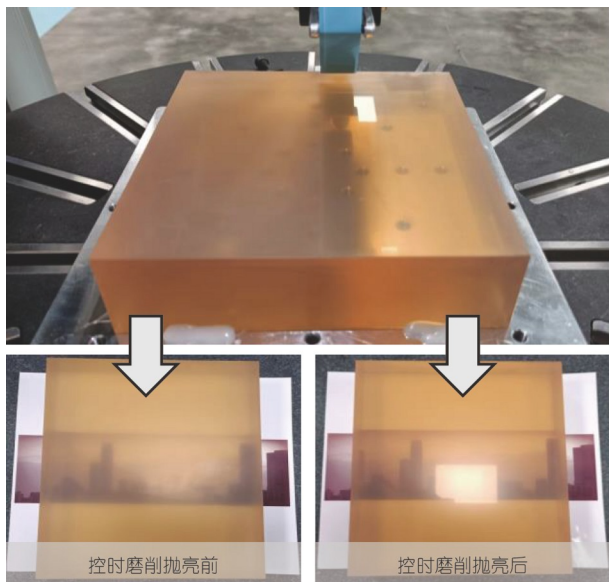


图 11 控时磨削预磨削前后的表面质量对比
Figure 11 Comparison of surface quality before and after pre grinding of time-controlled grinding.

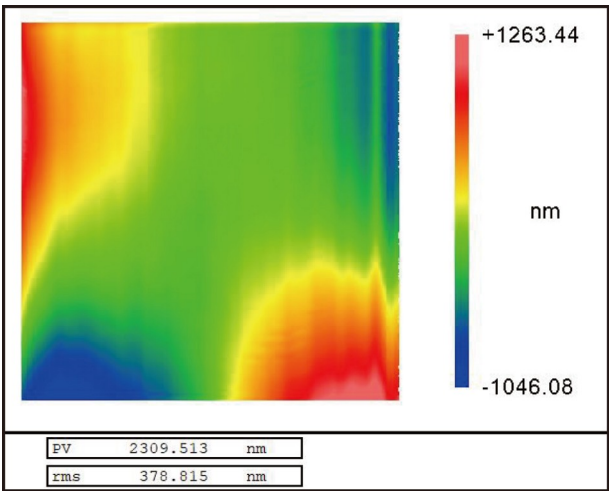


图 12 控时磨削预磨削后的干涉测量结果
Figure 12 Interferometric results after pre-grinding of time-controlled grinding.

0.38 μm RMS.

5.2 仿真加工

在截去去除函数尺寸(25 mm $\times$ 10 mm)和5 mm的补边区域后, 驻留时间解算加工区域为165 mm $\times$ 180 mm. 考虑到现有开式砂带的有效长度无法支撑长时间的单次磨削, 在工艺软件中将单次去除量设为50%; 同时由于控时磨削的去除函数效率过高, 造成误差低点附近位置驻留时间过短的问题出现, 超出了机床动态特性上限, 因此添加0.1 μm 厚的均匀去除层. 选取用于仿真加工的去除函数的参数如表3所示.

经过驻留时间解算, 仿真加工用时为52.98 min, 待去除面形误差分布和驻留时间分布分别如图13所示.

5.3 加工结果与讨论

对经过控时磨削后的微晶玻璃再次使用波面干涉

表 3 仿真加工参数

Table 3 Machining parameter of simulation

仿真加工参数	对应值
磨粒材料	SiC
磨粒粒度(μm)	9
接触轮振动频率(Hz)	9
接触气缸压强(MPa)	0.3
砂带更新速度(mm/s)	5

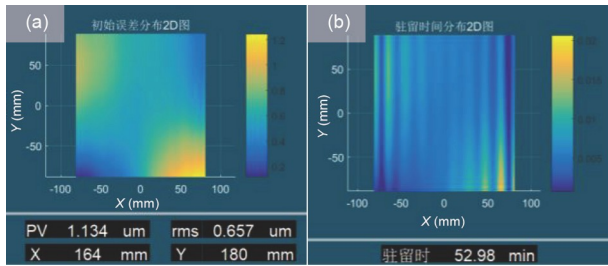


图 13 仿真加工去除余量分布及驻留时间分布. (a) 待去除表面误差分布; (b) 驻留时间分布

Figure 13 Distribution of removal amount and dwell time in simulated machining. (a) Error distribution of the surface to be removed; (b) distribution of dwell time.

仪进行面形测量, 测量数据如图14所示, 平面微晶玻璃的面形误差收敛至 $1.76\text{ }\mu\text{m}$ PV, $0.27\text{ }\mu\text{m}$ RMS.

通过对加工后的表面的进一步分析, 将加工前与加工后的面形误差作差比较, 得到实际的去除量, 如图15所示, 实际去除面形为 $0.86\text{ }\mu\text{m}$ PV, $0.13\text{ }\mu\text{m}$ RMS. 通过计算得到的实际去除百分比约为34%~37%, 与预期50%材料去除百分比存在差异的原因主要源于最初去除函数的提取误差.

为了直观体现控时磨削的材料去除效率, 本文选取同样可用于图16中面形误差修正的磁流变工艺进行对比. 本文将已有的 $\Phi 100\text{ mm}$ 磁流变抛光轮的去除函数和加工前面形误差作为输入解算驻留时间, 结果如图16所示. 可以看出相同的面形误差下, 控时磨削加工效率可达同尺寸的磁流变抛光轮的16.55倍. 若将理论与实际去除百分比之间的差异全部归结于去除函数

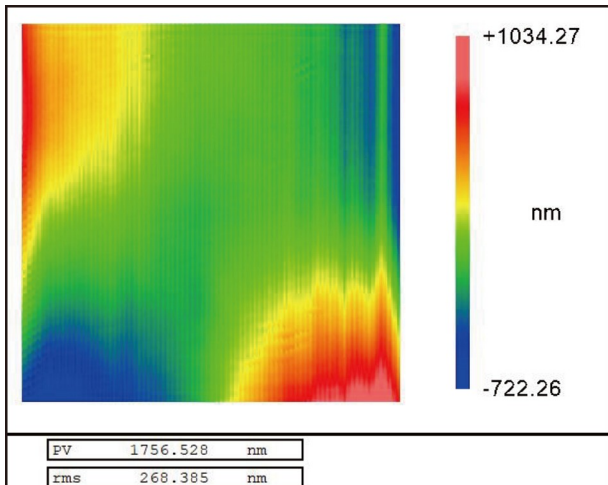


图 14 控时磨削修形后的干涉测量结果

Figure 14 Interferometric results after time-controlled grinding.

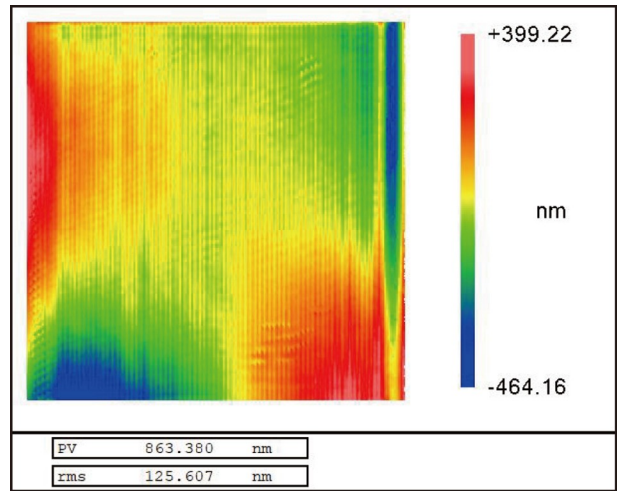


图 15 实际去除误差分布

Figure 15 Error distribution of actual removal.

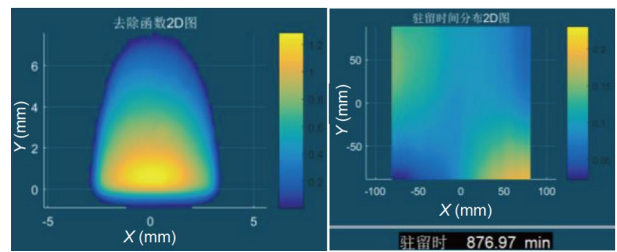


图 16 同等去除余量 $\Phi 100\text{ mm}$ 磁流变抛光轮加工用时

Figure 16 Processing time of $\Phi 100\text{ mm}$ MRF wheel with same removal amount.

提取过程中的误差, 效率比依然可达11.59倍.

6 结论与讨论

为了实现光学元件在微米级面形误差附近的高效确定性收敛, 提升光学元件全周期加工效率, 本文基于CCOS确定性加工思想, 结合柔性砂带磨削工具, 将其成功应用于光学元件的加工. 本文对光学元件控时磨削材料去除原理进行了简要介绍, 获取了具备高去除效率的去除函数, 搭建了控时磨削样机进行了加工实验, 得到的主要结论如下.

(1) 控时磨削方法实现了效率更高且可控的去除函数. 控时磨削方法引入了具备高效去除特性的磨粒磨削方式, 结合基于压力接触的柔性加工方法, 成功提取出了具备稳定性的去除函数. 基于理论分析和多参数实验, 初步得到了控时磨削材料去除效率的影响因素. 目前在微晶玻璃上进行的去除函数实验已达到

了同尺寸磁流变抛光轮5~20倍的加工效率, 这对于提升在微米级面形误差的收敛效率有重要意义。

(2) 控时磨削兼具修形和抛光的特点, 有望取代传统工艺路线中的研磨抛光工序。传统的中、大口径光学元件在铣磨成形后, 表面面形精度差、面形粗糙, 因此往往先要经过长时间的研磨抛光, 才可进入最终的波面干涉测量和高精度修形入口条件。在本文的实验中, 控时磨削利用砂带柔性磨削所具有的磨削、研磨、抛光等作用, 实现了在高效率收敛面形误差的同时, 提升表面质量的效果。

(3) 经过初步修形实验, 验证了控时磨削在微米级水平的面形误差收敛能力。在对方形微晶玻璃进行了50%材料去除实验后, 面形误差由 $2.31\ \mu\text{m PV}$ 、

$0.38\ \mu\text{m RMS}$ 收敛至 $1.76\ \mu\text{m PV}$ 、 $0.27\ \mu\text{m RMS}$ 。加工前后的误差分布没有出现面形破碎的问题, 去除量分布和初始面形误差分布也较为匹配, 在后续实验中有望将误差收敛至亚微米级。

(4) 控时磨削去除效率的提升需要更高动态性能的机床床身。去除效率的上升伴随着控时分辨率的提高, 机床在误差低点的驻留时间必须足够短才能满足材料去除量的准确性。因此控时磨削方法对机床的动态特性提出了较高要求, 现有实验机床的动态特性与控时磨削样机的去除效率还不匹配, 因此不能选用去除效率过高的去除函数, 制约了控时磨削的误差收敛效率。当机床的动态特性得到提高后, 控时磨削工艺的加工效率还可以进一步提升。

致谢 微晶玻璃的加工和测量实验在超精密加工技术湖南省重点实验室陈云、王文华、李吉、匡抗、潘雅玲、荣辉平等人的通力协助下得以顺利实施, 在此深表谢忱。

参考文献

- 1 Pan J H. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces (in Chinese). Suzhou: Soochow University Press, 2004 [潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验. 苏州: 苏州大学出版社, 2004]
- 2 Li J S. Research of lapping and polishing characteristics for fused quartz optical (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015 [李基松. 熔融石英光学玻璃平面研抛加工特性研究. 博士学位论文. 广州: 广东工业大学, 2019]
- 3 Zhang X, Hu H, Wang X, et al. Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror. *Light Sci Appl*, 2022, 11: 310
- 4 Shu C, Dong H, Yin S, et al. Research progress of high precision micro structure glass optical element array molding technology. *Optics Precision Eng*, 2020, 28: 1967–1985
- 5 Hu R, Chen Z Q, Zhang Y Y, et al. Design and manufacture of $\Phi 1.05\ \text{m}$ lightweight mirror (in Chinese). *Opto Electron Eng*, 2020, 10: 047 [胡瑞, 陈志强, 张媛媛, 等. $\Phi 1.05\ \text{m}$ 轻量化反射镜设计与制造. 光电工程, 2020, 10: 047]
- 6 Shore P, Morantz P, Luo X, et al. Big OptiX ultra precision grinding/measuring system. *Proc SPIE*, 2005, 5965: 241–248
- 7 Comley P, Morantz P, Shore P, et al. Grinding metre scale mirror segments for the E-ELT ground based telescope. *CIRP Ann*, 2011, 60: 379–382
- 8 Lin H R, Liu W Z, Gao Y. Research and application of complete sets of equipment for ultra-precision machining of optical components (in Chinese). *World Manuf Eng Mark*, 2022, 1: 67–71 [林鸿榕, 刘文志, 高源. 光学元件超精密加工成套装备的研发与应用. 世界制造技术与装备市场, 2022, 1: 67–71]
- 9 Xiao G J, Liu S, He Y, et al. Defocus control and surface topography of titanium alloy laser belt processing (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2022, 43: 492–502 [肖贵坚, 刘帅, 贺毅, 等. 钛合金激光砂带加工的离焦控制与表面形貌. 航空学报, 2022, 43: 492–502]
- 10 Li F, Chen S L, Cui P B, et al. Trajectory optimization and experiment of robotic belt grinding blisk (in Chinese). *Diam Abras Eng*, 2022, 42: 23–29 [李飞, 陈树林, 崔庞博, 等. 整体叶盘机器人砂带磨削轨迹优化及其实验. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42: 23–29]
- 11 Huang Y, Xiao G J, Zou L. Current situation and development trend of robot precise belt grinding for aero-engine blade (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2019, 40: 53–72 [黄云, 肖贵坚, 邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势. 航空学报, 2019, 40: 53–72]
- 12 Cheng J F. Theoretical study on microscopic contact of grains and material removal for rail grinding using abrasive belt (in Chinese). Dissertation

- for the Master's Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019 [程继发. 钢轨砂带打磨磨粒微观接触与材料去除理论研究. 硕士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2019]
- 13 Xiao L Y, Chen J R, Lin F, et al. Research on grinding performance of CBN abrasive belt (in Chinese). *Diam Abras Eng*, 2017, 37: 50–53 [肖乐银, 陈家荣, 林峰, 等. 立方氮化硼砂带磨削性能的研究. *金刚石与磨料磨具工程*, 2017, 37: 50–53]
- 14 Zhang L, Lin Y X. Research progress in computer controlled optical surfacing (in Chinese). *Mach Build Autom*, 2018, 47: 7–11 [张林, 林有希. 计算机控制小磨头抛光技术研究进展. *机械制造与自动化*, 2018, 47: 7–11]
- 15 Preston F W. The theory and design of plate glass polishing machines. *J Society Glass Technol*, 1927, 11: 214–256
- 16 Xiao Q, Wang J Q, Jin L P. Research progress of key technology and process of magnetorheological finishing (in Chinese). *Mater Rev*, 2022, 7: 65–74 [肖强, 王嘉琪, 靳龙平. 磁流变抛光关键技术及工艺研究进展. *材料导报*, 2022, 7: 65–74]
- 17 Dai Y F, Zhou L, Xie X H, et al. Ion beam figuring technology (in Chinese). *J Appl Opt*, 2011, 32: 753–760 [戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 离子束修形技术. *应用光学*, 2011, 32: 753–760]
- 18 Bifano T G, Dow T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials. *J Eng Industry*, 1991, 113: 184–189
- 19 Kaliszer H. Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. *Int J Machine Tools Manufacture*, 1991, 31: 435–436
- 20 Zhong Y Y. Research on damage precursor characterization and mitigation of high-performance ultra-violet laser irradiated fused silica optics (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2021 [钟曜宇. 熔石英强激光元件制造中损伤前驱体辨识与抑制关键技术研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2021]
- 21 Wu C L, Ding H Y, Chen Y. Research on modeling method of relation between abrasive grain and material removal depth (in Chinese). *China Mech Eng*, 2011, 22: 300–304 [吴昌林, 丁和艳, 陈义. 材料去除深度与磨粒的关系建模方法研究. *中国机械工程*, 2011, 22: 300–304]
- 22 Wang Y J. Precision abrasive belt grinding research based on contact theory (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Chongqing: Chongqing University, 2015 [王亚杰. 基于接触理论的精准砂带磨削基础研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2015]
- 23 Lai T, Peng X, Tie G, et al. Calculation of effect ratio of 21 geometric errors and detection of surface figure error. *Int J Precis Eng Manuf*, 2021, 22: 523–538
- 24 Lai T. Profile coordinate measurement technology of complex optical surfaces (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2021 [赖涛. 光学复杂曲面轮廓坐标测量技术. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2021]

Research on time-controlled grinding methods for fabricating high-precision optical components

SUN ZiZhou^{1,2,3}, CHEN FuLei^{1,2,3}, HU Hao^{1,2,3}, DAI YiFan^{1,2,3}, GUAN ChaoLiang^{1,2,3} & PENG XiaoQiang^{1,2,3}

¹ College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

² Hunan Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, Changsha 410073, China;

³ Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Owing to its low processing efficiency, the traditional milling–polishing–figuring process cannot meet the increasing demand for high-precision and large-diameter optical components. To increase the efficiency related to the manufacturing of optical components and enable the components to rapidly achieve the entrance conditions of the final figuring process, this paper introduces a flexible abrasive belt grinding tool for realizing the deterministic machining of optical components. Based on the material removal mechanism of time-controlled grinding of optical components, a new material removal method is proposed, and an efficient and controllable removal function is successfully obtained by controlling key processing parameters. A time-controlled grinding prototype for fabricating optical components was built according to theoretical analysis, and time-controlled grinding experiments were conducted on a 200×200 mm flat glass ceramic. The results showed that the surface error converged from $2.31 \mu\text{m PV}$, $0.38 \mu\text{m RMS}$ to $1.76 \mu\text{m PV}$, $0.27 \mu\text{m RMS}$ in 53 min. The efficiency of the prototype is >10 times that of a magnetorheological polishing wheel of the same size. Time-controlled grinding can enable the quick polish of the glass ceramic surface while figuring, meeting the laser interferometry requirements. These results verify the feasibility of the error convergence via the time-controlled grinding method of an optical component, which can shorten the grinding and polishing time before the final figuring process.

optical components, time-controlled grinding, deterministic figuring, high efficiency

doi: [10.1360/SST-2023-0135](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0135)