

文章编号 1004-924X(2025)03-0402-14

薄壳元件的磁控磁流变弹性体均匀抛光

薛 勃^{1,2}, 朱力军^{1,2}, 苏 星^{1,2*}, 陈 立^{1,2}, 周 涛^{1,2},
张建飞^{1,2}, 海 阔^{1,2*}, 黄 文^{1,2}

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 四川省精密超精密加工工程技术研究中心, 四川 成都 610200)

摘要:为实现薄壳元件内表面的高质量超精密抛光,基于磁控磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomer, MRE)抛光原理提出了一种均匀抛光方法。该方法通过在薄壳元件外表面施加磁场,精确控制MRE对内表面的压力,从而实现内表面均匀抛光。利用COMSOL Multiphysics软件对MRE进行磁-弹性耦合数值模拟,确定元件表面的抛光压力及其分布,获得抛光区域的速度分布,并基于Preston方程构建抛光去除函数模型。随后对该模型进行离散化采样,推导材料去除量向量,并采用非负最小二乘法计算抛光区域各点的驻留时间。最后,在磁场强度为0.32 T的条件下,使用磁控MRE抛光装置对尺寸为60 mm×60 mm×1 mm的熔石英玻璃工件进行了78 min的抛光实验。实验结果表明,通过控制抛光区域各驻留点的时间,磁控区域的表面材料平均去除深度为84.4 nm,去除深度波动范围为10.9%,实现了表面均匀抛光。由此证明了该方法实现薄壳元件内表面均匀抛光的有效性。

关键词:超精密加工;均匀抛光;薄壳元件;磁流变弹性体;去除深度;磁场

中图分类号:TG664;TB381 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253303.0402 **CSTR:**32169.14.OPE.20253303.0402

Magnetorheological elastomer uniform polishing method for shell components

XUE Bo^{1,2}, ZHU Lijun^{1,2}, SU Xing^{1,2*}, CHEN Li^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2},
ZHANG Jianfei^{1,2}, HAI Kuo^{1,2*}, HUANG Wen^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University,
Harbin 150040, China;

2. Sichuan Precision and Ultra-Precision Machining Engineering Technology Center,
Chengdu 610200, China)

* Corresponding author, E-mail: suxinghit@126.com; haikuo_6s@126.com

Abstract: This study introduces a novel uniform polishing method for the ultra-precision finishing of the inner surfaces of thin-shell components, based on the principles of magnetorheological elastomer (MRE) polishing. The methodology involves the application of a magnetic field to the outer surface of the component, enabling precise control of the MRE pressure on the inner surface, thereby facilitating uniform pol-

收稿日期:2024-11-23;修订日期:2024-12-18.

基金项目:“某装备光束系统关键器件超精密加工制造生产线”项目(No. J0017-2326-QT);国家重点研发计划资助项目(2022YFB3403402);国家自然科学基金资助项目(No. 52105488)

ishing. Magneto-elastic coupling simulations of the MRE were conducted using COMSOL Multiphysics software to determine the polishing pressure, its distribution across the component surface, and the velocity distribution within the polishing area. A material removal function model was developed based on the Preston equation, which was subsequently discretized and sampled to derive the material removal vector. The residence time at each point in the polishing area was calculated using the non-negative least squares method. To validate the proposed approach, a polishing experiment was conducted under a magnetic field of 0.32 T, utilizing a magnetorheological MRE device to polish a fused quartz glass workpiece measuring 60 mm $\times$ 60 mm $\times$ 1 mm for a duration of 78 minutes. The experimental results indicated that controlling the residence time at each point achieved an average material removal depth of 84.4 nm, with a fluctuation range of 10.9%, thereby attaining a uniform surface finish. These findings substantiate the effectiveness of the proposed method in achieving uniform polishing of the inner surfaces of thin-shell components.

Key words: ultra-precision engineering; uniform polishing; thin-shell components; magnetorheological elastomers; material removal depth; magnetic field

1 引言

随着航空航天、深海探测和芯片制造等行业的快速发展,对薄壳元件表面质量与面形精度的加工要求不断提高^[1-3]。保形整流罩、光学球罩等薄壳元件因大进深和低曲率的特点,传统抛光设备容易因尺寸限制发生干涉,影响其内表面的高效、精确加工^[4]。因此,研究高精度的薄壳元件内表面加工技术尤为重要。

均匀抛光是指通过控制加工参数和抛光介质特性,在抛光过程中实现材料的均匀去除,从而确保工件表面粗糙度和面形精度的一致性^[5]。其抛光后的表面均匀性可以通过表面粗糙度、面形精度及去除深度波动等指标进行量化评价。例如,半球谐振子元件的均匀抛光要求为:光学零件表面粗糙度 $R_a \leq 0.005 \mu\text{m}$,面形精度优于 $0.1 \mu\text{m}$ ^[6]。目前,薄壳元件内表面均匀抛光主要有两种方法:一是控制抛光工具沿预定轨迹进行均匀抛光^[7-8];二是利用力流变抛光液的剪切增稠特性实现全口径均匀抛光^[9-10]。Hu等^[11]采用水射流抛光技术对 MgF_2 保形红外整流罩内表面进行抛光,通过调整喷嘴与薄壳间角度,将内表面粗糙度 R_a 降至 $0.0087 \mu\text{m}$ 。然而,该方法受空气扰动和水射流工作距离的影响,材料去除的稳定性仍需改进。刘赫男等^[12]采用小直径永磁球形工具头对半球谐振子内表面进行抛光,通过预定轨迹和多次空间角度回转避免工件干涉,使内表面的面形精度达到 $0.14 \mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 降至

$0.0024 \mu\text{m}$ 。然而,球形永磁抛光工具因不同位置线速度差异,材料去除函数的稳定性受到影响。朱永伟等^[13]采用多永磁体环形排布式磁流变抛光工具对半球谐振子内表面进行抛光,通过分析抛光工具与工件的空间几何关系,优化工艺参数,使内表面粗糙度 R_a 降至 $0.0412 \mu\text{m}$,但表面粗糙度仍有改进空间。袁巨龙等^[14]采用力流变抛光工艺对半球谐振子内表面进行抛光,利用剪切增稠特性,使流体柔性把持磨粒,通过控制抛光液流场与界面剪切应力,将内表面粗糙度 R_a 从 $0.12 \mu\text{m}$ 降至 $0.009 \mu\text{m}$ 。然而,剪切增稠流体的流变行为复杂,材料去除的稳定性仍需优化。

磁控磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomers, MRE)是一种智能材料,由微米级磁性颗粒均匀分散在聚合物基体中固化而成^[15]。在外部磁场作用下,MRE中的磁性颗粒被磁化并产生相互作用力,导致其宏观力学性能(如弹性模量和阻尼能力)发生连续且可逆的变化^[16-17]。因此,MRE广泛应用于磁控抛光工具,以实现工件的超精密加工。Wang等^[18]提出了一种磁场作用下刚性可控的MRE抛光工具,并建立其刚度变化模型。徐志强等^[19-20]采用MRE砂轮对镍基高温合金进行抛光实验,发现增加磁场强度能显著降低表面粗糙度。无磁场条件下,工件表面粗糙度 R_a 由 $0.493 \mu\text{m}$ 降至 $0.267 \mu\text{m}$,而在 0.2 T 磁场作用下进一步降至 $0.219 \mu\text{m}$ 。Chen等^[21]设计一种环状MRE抛光工具,并结合氧化铈抛光液对熔融石英玻璃板进行抛光。与磁流变抛

光相比, MRE 的体积去除率为 $0.049\ 58\ \text{mm}^3/\text{min}$, 高于 MRF 的 $0.038\ 02\ \text{mm}^3/\text{min}$ 。郭磊等^[22]提出一种基于磨料颗粒增强磁流变弹性体材料的磨抛方法, 并对 SiC 材料进行了实验研究。实验结果表明, 在 $0.35\ \text{T}$ 的磁场强度下, 表面粗糙度降至 $0.17\ \mu\text{m}$, 材料去除量达到 $10.82 \times 10^6\ \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。

综上所述, 由于薄壳元件的几何特性, 现有抛光技术在内表面均匀抛光时面临诸多挑战, 如复杂的轨迹规划和剪切增稠流体的流变行为。这些问题导致材料去除稳定性不足, 难以满足薄壳元件日益增长的加工精度和质量要求^[23-24]。为此, 本文基于磁控 MRE 抛光原理提出一种磁控 MRE 均匀抛光方法, 通过深入分析抛光区域的压力和速度分布, 建立了抛光去除函数模型; 通过非负最小二乘法计算抛光区域各点的驻留时间。最后, 通过搭建磁控 MRE 抛光装置, 完成了元件的均匀抛光实验, 为薄壳元件内表面均匀抛光提供了一种适用性强的方法。

2 磁控 MRE 抛光装置设计

在薄壳元件内表面抛光中, 由于元件具有大口径和高陡度的特点, 传统抛光工具的操作空间有限, 容易发生加工干涉问题, 如图 1(a) 所示。因此, 本文在薄壳元件外表面施加磁场, 精确控制 MRE 对内表面的压力, 从而实现内表面的均匀抛光, 如图 1(b) 所示。首先, 根据元件内表面的形状制备与之匹配的 MRE, 并将 MRE 铺设在内表面上。然后, 通过控制元件与 MRE 的相对转动, 实现内表面材料的去除。最后, 调整磁场在外表面各点的驻留时间, 以确保内表面均匀抛

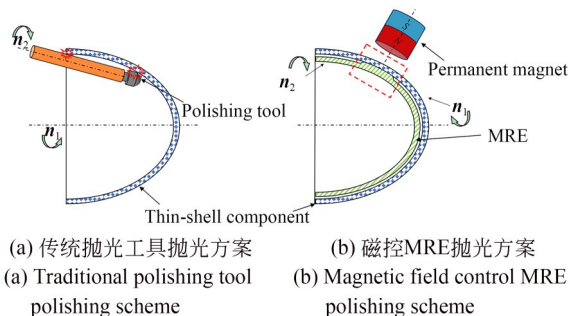


图 1 薄壳元件内表面抛光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inner surface polishing of thin shell components

光。为验证该方法在薄壳元件内表面均匀抛光中的适用性, 本文以尺寸为 $60\ \text{mm} \times 60\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 的熔石英玻璃为加工对象, 开展均匀抛光实验以评估其抛光效果。

2.1 磁控 MRE 抛光原理

在永磁体磁场作用下, MRE 内的铁磁颗粒被磁化, 形成带有磁极的磁偶极子, 磁极产生的磁场方向与永磁体磁场方向一致。根据磁力相互作用原理^[25], MRE 受到永磁体的“吸引力”。由于工件位于 MRE 与永磁体之间, 该“吸引力”转化为施加在工件上的压力。当永磁体的磁场强度较小时, 工件表面压力较小, 材料去除效率较低。随着磁场强度的增加, 工件表面压力增大, 材料去除效率提高。因此, 可以根据薄壳元件的厚度选择适当的磁场强度, 以实现工件材料的高效去除。

磁控 MRE 均匀抛光原理如图 2 所示。当永磁体磁场垂直工件外表面移动时, 抛光区域内各点均受到相同的压力 P 。然而, 由于工件与 MRE 同轴相对转动, 不同位置的线速度存在差异, 导致材料去除量不均。通过调整永磁体在工件下方的驻留时间, 在需更多去除量的区域增加驻留时间, 在需较少去除量的区域缩短驻留时间, 从而精确控制材料去除均匀性, 实现表面的均匀抛光。

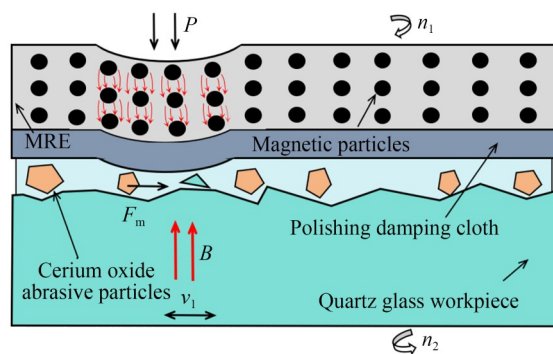


图 2 磁控 MRE 抛光原理

Fig. 2 Principle diagram of magnetic field-controlled MRE polishing

2.2 磁控 MRE 抛光装置设计

为实现薄壳元件内表面均匀抛光, 本文设计了一种磁控 MRE 抛光装置, 如图 3 所示。磁控抛光装置通过在熔石英玻璃工件下表面施加磁场, 实现其上表面的均匀抛光。工件通过热熔胶固

定在厚度为0.3mm的载玻片上,载玻片安装在夹持工具和中空旋转平台上,平台旋转速度为 n_1 。为提高MRE对工件面形变化的适应能力,MRE通过抛光盘与球头轴铰接,球头轴安装在夹持工具和力矩电机上,其旋转速度为 n_2 。永磁体固定在滑台上的铝制夹具中,以避免铁磁性材料对磁场的干扰。通过调整滑台与MRE之间的距离,可以精确控制磁场强度,从而满足不同的抛光需求。

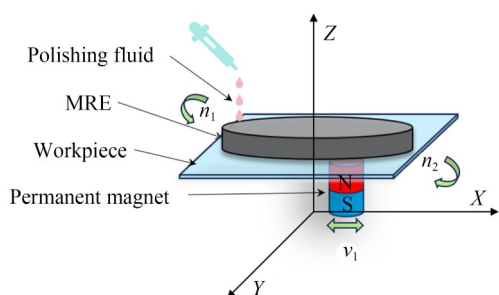


图3 磁控MRE抛光示意图

Fig.3 Schematic diagram of magnetic field-controlled MRE polishing

3 抛光去除函数建模

在抛光过程中,材料去除效率受转速、压力和温度等多种因素的影响。Preston方程是预测工件材料去除的常用模型。基于Preston方程,对磁控MRE均匀抛光进行建模分析,其材料去除速率表达式如下:

$$\frac{dz}{dt} = kp(x, y)v(x, y), \quad (1)$$

式中: dz/dt 为单位时间内工件材料的去除量; k 为Preston系数,由速度和压力以外的其他因素决定; $p(x, y)$ 为抛光接触面处的压力; $v(x, y)$ 为抛光区域内任意点的速度。

3.1 抛光压力及其分布

在外加磁场作用下,MRE受到永磁体的“吸引力”。工件位于MRE和永磁体之间,“吸引力”转化为对工件的压力。同时,MRE中的磁性颗粒在外加磁场作用下被磁化并产生相互作用力,压缩包裹铁磁颗粒的弹性基体,从而引起MRE弹性模量的变化。其弹性模量的变化可能影响压力分布。因此,在磁场作用下,MRE对工件的

抛光压力 P 可以表示为:

$$P = \varphi(P_1 + P_2), \quad (2)$$

式中: P_1 为抛光盘和MRE的重力产生的压力, P_2 为磁场吸引作用下MRE对工件的压力, $\varphi(x)$ 表示MRE弹性模量变化对压力分布的影响。抛光盘和MRE的总质量约为30g,为了探究无磁场作用下抛光盘和MRE对工件表面的压力,使用COMSOL软件对其进行分析。图4显示,在没有磁场的作用下,工件在MRE边缘处压力最大,呈现出“圆环”形状,最大压力值为 $1.1 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ 。根据后文分析,该压力比 P_2 小2个数量级,计算抛光压力时可忽略。

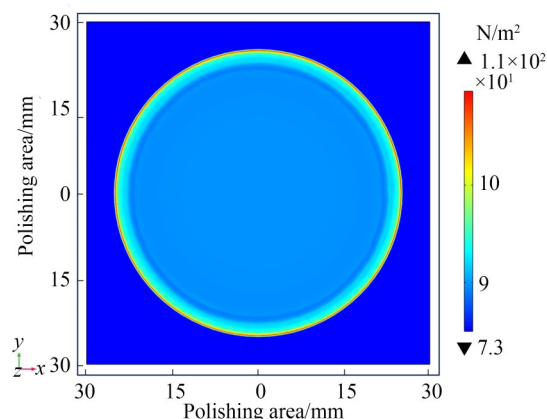


图4 无磁场工件表面的压力云图

Fig.4 Pressure cloud diagram of workpiece surface without magnetic field

为计算MRE对工件的压力及分布,首先利用COMSOL软件对含羟基铁粉链的MRE进行微观磁-弹性耦合数值模拟,得到磁场、应变与弹性模量的关系。然后,将该关系应用于宏观模型,利用COMSOL软件对MRE进行宏观磁-弹性耦合数值模拟,最终确定抛光压力及其分布。

3.1.1 磁场作用下的抛光压力

本研究使用的MRE是一种由羟基铁粉与硅橡胶混合后固化形成的复合材料。在固化过程中,通过施加外加磁场,使羟基铁粉沿磁场线方向排列成链状并完成固化。为模拟质量分数为53.5%的羟基铁粉的链状MRE在压缩状态下磁致模量随磁场强度和应变的变化,在微观层面建立包含空气区域、硅橡胶基体和羟基铁粉的二维Random Vector Excitation(RVE)模型。为简

化模拟,将 MRE 内部的链状羟基铁粉均匀化处理,选取 3 条羟基铁粉链建立 $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ 的二维 RVE 模型,设羟基铁粉颗粒间距和链间距分别为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。在 MRE 边界施加均匀应变条件,如图 5 所示。外加磁场方向与模型中的羟基铁粉链平行,大小分别为 0,0.25,0.5,0.75 和 1 T,空气的相对磁导率设为 1,其他参数见表 1。利用 COMSOL 软件的 AC/DC 模块中“磁场,无电流”接口和结构力学模块下的固体力学模块对模型进行联合分析。

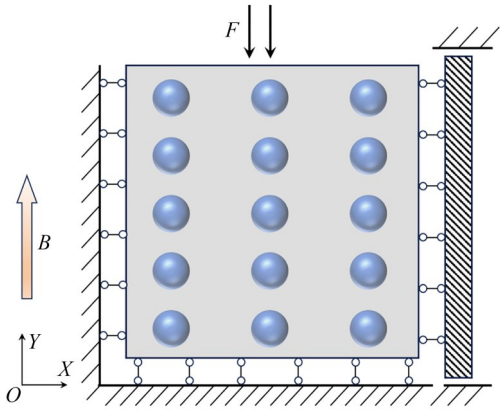


图 5 RVE 边界条件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of RVE boundary conditions

表 1 二维 RVE 模型的相关参数

Tab. 1 Parameters of 2D RVE model

组 分	相对磁导率	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ MPa	泊松比
羟基铁粉	4 000	7 800	2.25×10^5	0.35
硅橡胶	1	930	24.66	0.48

图 6 显示磁场强度为 1 T 时 MRE 材料的压缩应力分布情况。结果表明,应力主要集中在羟基铁粉颗粒之间,而硅胶基体中的应力较低。图 7 为压缩模量与应变的关系曲线。曲线表明,在相同压缩应变下,随着磁场强度的增加,压缩模量逐渐提高。这是由于磁场作用下,MRE 中的羟基铁粉颗粒被磁化并产生相互吸引的作用力。压缩过程中,随着铁粉颗粒间距离的减小,相互吸引的磁力逐渐增强,导致材料的应变低于硅胶基体在相同载荷下的应变,从而表现出压缩模量增大。这表明在一定磁场强度下可改变 MRE 的弹性模量。

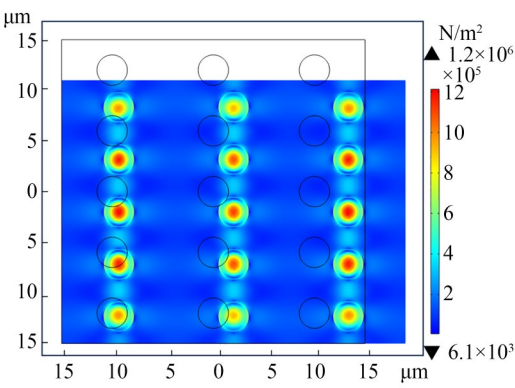


图 6 磁致压缩应力云图

Fig. 6 Cloud diagram of magnetocompressive stress

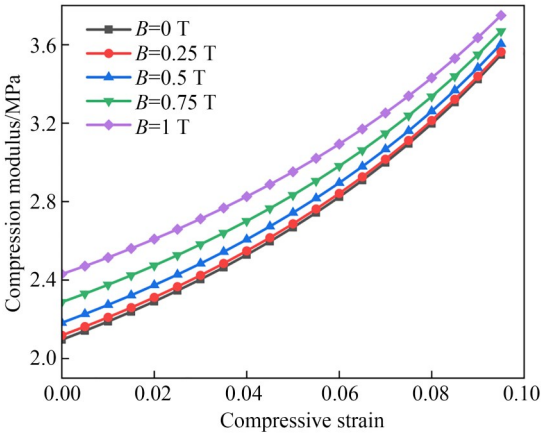


图 7 磁致压缩模量-应变曲线

Fig. 7 Magnetocompressive modulus-strain curves

在进一步的宏观 MRE 磁-弹性耦合数值模拟中,采用图 7 中压缩量为零时的弹性模量,同时使用多物理场接口。将工件底面和 4 个侧边设置固定约束,MRE 底面与工件上表面接触。两个尺寸为 $\Phi 8\times 10\text{ mm}$ 的钕铁硼 N52 永磁体放置在距工件下表面 0.5 mm 的位置,周围为空气包围。模型边界条件设置为磁绝缘体条件,并在细化网格后进行求解。

图 8 显示,在永磁体正上方的压力最大,而在磁场较弱的位置压力较小。该压力与工件下表面的距离有关,因此,需要研究永磁体在不同距离下压力的影响。本文使用的永磁体为钕铁硼 N52,尺寸为 $\Phi 8\times 10\text{ mm}$ 。当永磁体与工件的距离超过 2 mm 时,MRE 产生的抛光压力无法满足需求。为确保永磁体能够在工件下方移动,它与工件的距离应保持在 0.5 mm 以上。因此,研究

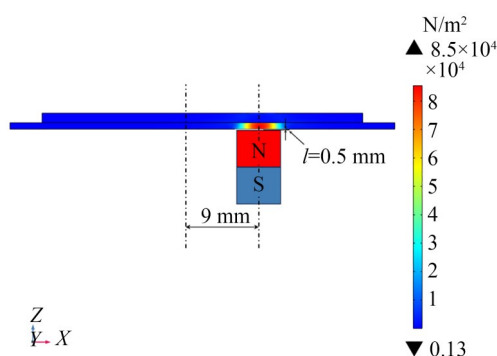


图8 工件表面的压力云图

Fig. 8 Pressure cloud map of workpiece surface

永磁体分别距工件下表面 0.5, 1, 1.5 和 2 mm 4 个位置的抛光压力。图 9 显示永磁体在工件下表面不同距离 l 时工件所受压力的变化情况。随着永磁体与工件外表面距离渐减小, 工件所受压力显著增加。当永磁体距工件外表面 l 为 0.5 mm 时, 磁场强度为 0.32 T, 压力最大值达到 $8.5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 。

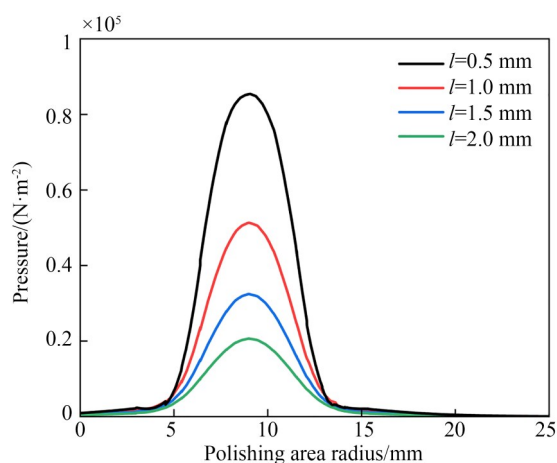


图9 抛光区域的压力曲线

Fig. 9 Pressure curves of polished area

3.1.2 磁场作用下工件压力分布

工件的表面压力直接决定材料去除效率, 而压力分布则影响去除效果。在外加磁场的作用下, MRE 受到永磁体的“吸引力”, 从而形成工件压力分布, 如图 8 所示。此外, 外加磁场会改变 MRE 的弹性模量和硬度, 这可能进一步影响工件压力分布。为探究 MRE 弹性模量变化对工件压力分布的影响, 假设磁场强度恒定, 仅调整宏观模型中的 MRE 弹性模量参数。在此条件下,

弹性模量变化会影响工件压力分布, 但由“吸引力”引起的工件压力分布保持不变。

当外加磁场从 $B=0 \text{ T}$ 增加到 $B=1 \text{ T}$ 时, MRE 的弹性模量从 $2.09 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 增加至 $2.43 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 增幅为 16.27%, 但工件的压力分布未发生变化。将弹性模量增加至 $2.09 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 时, 即增加 10^5 倍, 工件的压力分布范围扩大, 如图 10 所示。这是由于 MRE 的弹性模量小幅增加时, 硬度变化较小, 因此对工件压力分布的影响有限。然而, 当 MRE 的弹性模量急剧增加到接近铁粉弹性模量时, 其硬度也接近铁粉, 从而导致工件压力分布范围扩大。在本研究中, 磁场强度为 0~0.32 T, MRE 弹性模量变化对工件压力分布无显著影响。工件压力分布主要由磁场产生的“吸引力”引起, 故 3.1.1 中的压力结果可表征实际抛光中的压力特性。

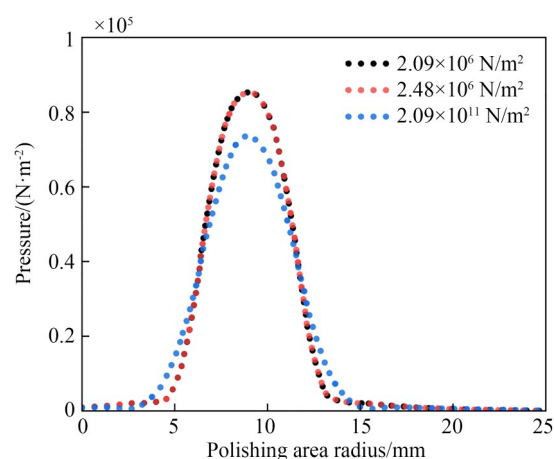


图10 工件表面压力的分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of workpiece surface pressure

3.2 抛光区域速度

在抛光过程中, 工件抛光区域的速度由中空旋转平台和力矩电机的转速共同决定。由于两者同轴相对转动, 抛光区域的速度可以表示为:

$$v = \frac{2\pi r \cdot (n_1 + n_2)}{60}, \quad (3)$$

式中: n_1 表示工件转速, n_2 表示抛光盘转速, r 为抛光盘上某点的抛光半径。使用 MATLAB 对速度式 (3) 进行拟合计算, 可以得到抛光区域内任意点的速度分布, 如图 11 所示。从图中可看出, 抛光区域中心位置的抛光速度最小, 而随着抛光盘径向尺寸的增大, 抛光速度逐渐增大。

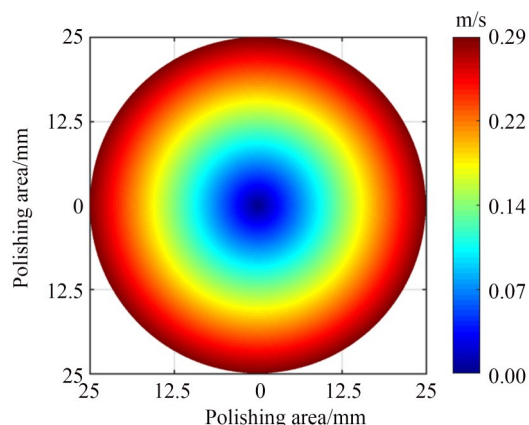


图 11 抛光区域速度分布

Fig. 11 Velocity distribution in polishing area

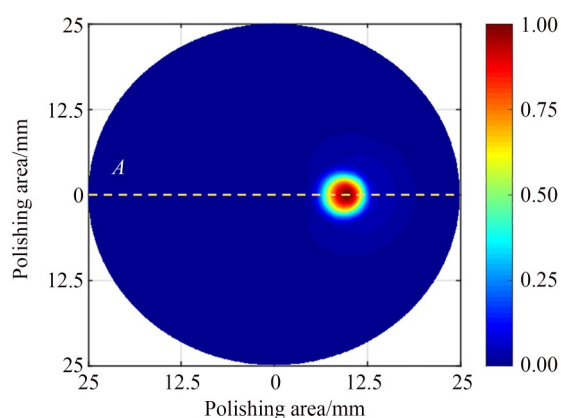


图 12 去除函数的三维特性

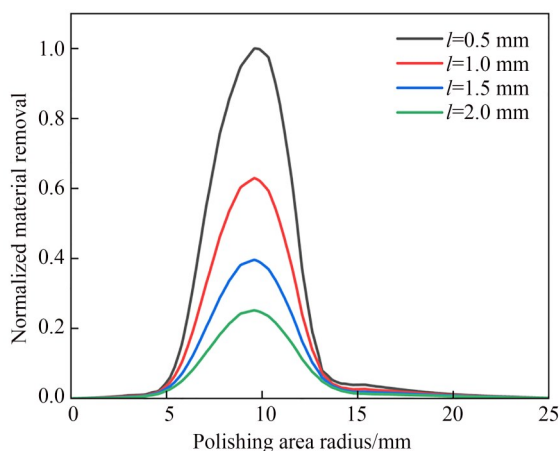
Fig. 12 Three-dimensional characteristic map of removal function

3.3 去除函数模型

去除函数模型中,关键在于去除函数的形状,其中 k 值主要影响函数变化幅度,反映材料去除效率。在数据拟合过程中,通过归一化处理忽略 k 值,从而建立去除函数模型。当磁场强度为 0.32 T 时,选取永磁体在距抛光区域中心 9 mm 处的抛光压力和速度,通过 MATLAB 拟合得到去除函数特性,如图 12 所示。不同磁场强度决定材料的去除效率,而永磁体与工件下表面的距离则影响 MRE 所受的磁场强度。根据前文永磁体在 0.5~2 mm 内对抛光压力影响的研究,分析永磁体距工件下表面 0.5, 1, 1.5 和 2 mm 4 个位置的去除函数,以研究不同磁场强度下的材料去除

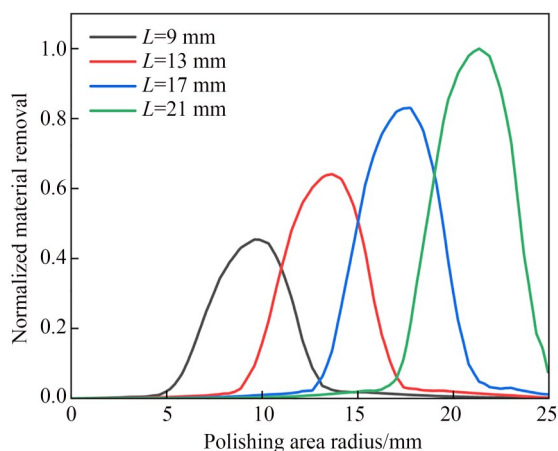
效率。图 13(a)显示去除函数模型中截线 A 处的去除函数分布。结果表明,随着磁场强度的增大,去除函数的峰值升高,材料的去除效率也随之提高。

在恒定磁场强度下,不同速度会导致不同的抛光去除函数,进而影响材料的去除效率。由图 11 可见,抛光区域的速度随着抛光盘径向尺寸的增大而增加,可以通过永磁体与抛光区域中心的距离来描述速度变化。永磁体和夹持工具的半径分别为 4 mm 和 5 mm,永磁体的移动范围 l_2 为 9~21 mm。因此,选择永磁体与抛光区域中心的距离分别为 9, 13, 17 和 21 mm 4 个位置,以简洁地描述该范围内不同速度对材料去除效率



(a) 不同磁场强度的去除函数曲线

(a) Removal function curves at different magnetic field strengths



(b) 不同速度的去除函数曲线

(b) Removal function curves at different speeds

图 13 去除函数曲线

Fig. 13 Removal function curves

的影响。图13(b)为去除函数模型中截线A处的去除函数分布。结果表明,永磁体的位置越远离中心,去除函数的峰值越高。这是因为在永磁体移动过程中,尽管抛光压力保持恒定,抛光区域的速度会随着抛光盘径向距离的增加而提高。速度的增加使去除函数的峰值升高,从而提高了材料的去除效率。

4 抛光驻留时间求解

为实现工件的均匀抛光,可以通过调整去除函数 $f(x, y)$ 并精确控制抛光区域各点的驻留时间 $d(x, y)$,从而实现材料的均匀去除。具体方法是在抛光区域中心增加驻留时间,远离中心的位置减少驻留时间,以精确控制工件的材料去除量。假设工件表面各点的去除量为 $k(x, y)$,抛光后的误差表示为:

$$e(x, y) = k(x, y) - f(x, y) ** d(x, y). \quad (4)$$

为保证加工后工件表面误差 $e(x, y)$ 满足要求,需先确定去除函数 $f(x, y)$ 在抛光区域各点的材料去除向量,随后计算各点的驻留时间。

4.1 材料去除向量

图14显示工件的磁控MRE均匀抛光成型过程。在此过程中,工件与MRE同轴相对旋转,同时永磁体在计算机的控制下沿工件下方的预定路径移动。工件上表面形成一个动态的“抛光

模”,该“抛光模”沿相同路径移动,并在抛光区域各点停留特定时间。该“抛光模”是基于前述拟合的去除函数模型构建的。通过累加“抛光模”在抛光区域内的材料去除量,可以确定抛光区域内各点的去除量。该过程可以用二维卷积描述:

$$Z(x, y) =$$

$$\lim_{\substack{\alpha \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \iint_{\alpha \beta} [f(x - \alpha, y - \beta) d(\alpha, \beta)] d\alpha d\beta = f(x, y) ** d(x, y). \quad (5)$$

由图14所示,在磁控MRE均匀抛光成型过程中,工件表面上的“抛光模”沿工件X轴设定的驻留点进给。由于工件与MRE在驻留点处相对转动整数圈,“抛光模”以环带状完成抛光成型。当“抛光模”在 r_i 点的驻留时间为 T_i 时,工件材料的去除量 $Z_i(r)$ 为:

$$Z_i(r) = R_i(r, \theta) * T_i, \quad (6)$$

式中 $R_i(r, \theta)$ 是“抛光模”驻留在 r_i 点时去除函数。

在加工矩形回转工件时,由于仅需进行一维进给,工件表面上同一半径 r_i 的各点材料去除分布相同,且与 θ 无关。因此,将去除函数 $R_i(r, \theta)$ 沿直径方向投影,得到转换后的函数 $R_i(r)$,表示为:

$$R_i(r) = \frac{1}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_i(r, \theta) d\theta, \quad (7)$$

式中: θ_1 和 θ_2 表示“抛光模”在半径 r 处对工件产生去除效果的角度区间, ω 表示工件与MRE之间的相对速度。因此,式(6)可以转化为以下形式:

$$Z_i(r) = R_i(r) * T_i. \quad (8)$$

为获取离散代数方程,需要对抛光区域进行离散化采样。图15显示离散化“抛光模”在各采样点上的叠加示意图。设采样间距为 λ ,MRE直

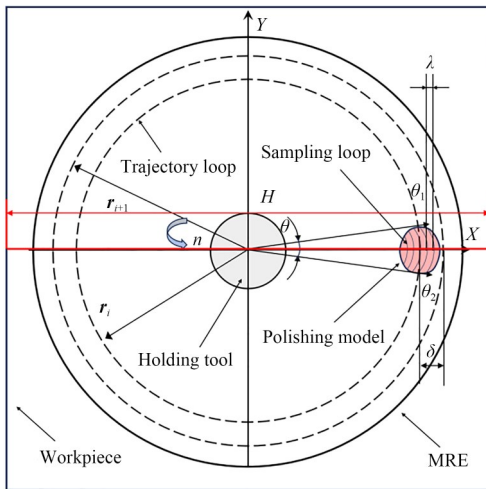


图14 磁控MRE抛光成型示意图

Fig. 14 Schematic diagram of magnetorheological MRE polishing molding

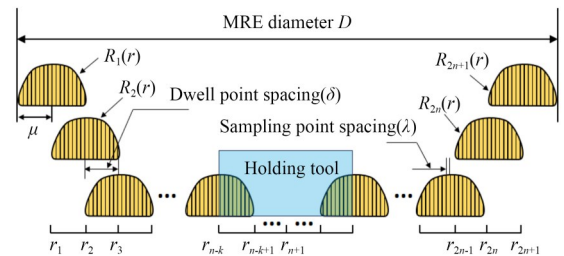


图15 离散化“抛光模”在各个采样点叠加示意图

Fig. 15 Schematic diagram of superimposing discrete polishing models at various sampling points

径 D 内共有 $2m+1$ 个采样点, 则 $\lambda=D/(2m)$ 。“抛光模”驻留点间距为 δ , 在 MRE 直径 D 范围内驻留点总数为 $2n+1$, 则 $\delta=D/(2n)$ 。其中, $m \gg n$, 因此式(7)可以离散表示为:

$$R_i^j = \frac{1}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_i(r_i^j, \theta) d\theta, \quad (9)$$

式中: $j=1, 2 \dots 2m+1$, R_i^j 表示“抛光模”在 r_i 点驻留时, 第 j 个采样点的单位材料去除量。

当“抛光模”在 r_i 点的驻留时间为 T_i , 且 MRE 与工件相对回转 N_i 圈时, 第 j 个点的材料去除量表示为:

$$Z_i^j = R_i^j \cdot T_i. \quad (10)$$

根据式(10), 当“抛光模”驻留于 r_i 位置时, MRE 直径 D 区域内各采样点的材料去除函数向量为:

$$R_i = [R_i^1 \dots R_i^{2m+1}]^T. \quad (11)$$

“抛光模”对 MRE 直径 D 区域完成一次加工后, 第 j 个采样点的累积去除量 Z^j 为:

$$Z^j = \sum_{i=1}^{2n+1} Z_i^j = \sum_{i=1}^{2n+1} R_i^j \cdot T_i = R_1^j \cdot T_1 + \dots + R_{2n+1}^j \cdot T_{2n+1}, \quad (12)$$

其中 $j=1, 2 \dots 2m+1$ 。

通过材料去除函数矩阵 $R_{(2m+1, 2n+1)}$ 与驻留时间向量 T 的乘积, 可以得 MRE 直径 D 区域内所有采样点材料去除总量的向量 Z :

$$Z = [Z^1 \dots Z^{2m+1}]^T = R_{(2m+1, 2n+1)} \cdot T = [R_1 \dots R_{2n+1}] \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{2n+1} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

在抛光过程中, 工件随夹持工具旋转, 同时永磁体沿工件下方的预定轨迹移动。为避免与夹持工具发生干涉, 永磁体在到达驻留点 r_{n-k} 时停止移动。此时, “抛光模”在驻留点 r_{n-k} 处停止移动。因此, 通过计算从 Z^1 至 Z^{n-k} 采样点的材料去除量, 可以确定驻留时间向量 T_s 。因此, 新的材料去除总量向量可以表示为:

$$Z_s = R_s \cdot T = [R_{s1}, \dots, R_{sm-k}] \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{n-k} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\text{式中, } Z_s = \begin{bmatrix} Z^1 \\ \vdots \\ Z^{m-k} \end{bmatrix}, R_{si} = \begin{bmatrix} R_i^1 \\ \vdots \\ R_i^{m-k} \end{bmatrix}.$$

4.2 驻留时间函数求解

为探究式(14)中 T_s 的情况, 将它转化为标准线性方程组形式, 即:

$$Ax = b, \quad (15)$$

式中: A 为 $(m-k) \times (n-k)$ 矩阵, 表示去除函数矩阵 R_s ; x 为 $(n-k) \times 1$ 向量, 表示驻留时间 T_s ; b 为 $(m-k) \times 1$ 向量, 表示采样点去除量 Z_s 。

对“抛光模”进行离散采样时, 由于 m 远大于 n (抛光区域内采样点数较多), 式(15)无精确解。但可找到满足约束条件的最小二乘解, 这是因为去除函数矩阵 R_s 不是方阵, 其逆矩阵不存在。为求得抛光区域内各点驻留时间的最优解, 并最小化采样点去除量 Z_s 的误差, 采用非负最小二乘法求解驻留时间函数。

工件经过 MRE 抛光后, 其表面质量的基本要求是使残余误差的 RMS 和 PV 值满足预定的精度要求。根据向量范数的定义, 残余误差的 2 范数类似于 RMS 值, ∞ 范数类似于 PV 值。因此, 以残余误差的 2 范数作为优化目标, 采用非负最小二乘法计算驻留时间函数为:

$$\begin{cases} \min \|R_s T_s - Z_s\|_2 \\ T_s \geq 0 \end{cases}. \quad (16)$$

5 实验

为验证磁控 MRE 均匀抛光方法的有效性, 这里使用磁控 MRE 抛光装置对熔石英玻璃工件进行均匀抛光实验, 相关装置如图 16 所示。在实验开始前, 使用干涉仪测量工件初始面形。在抛

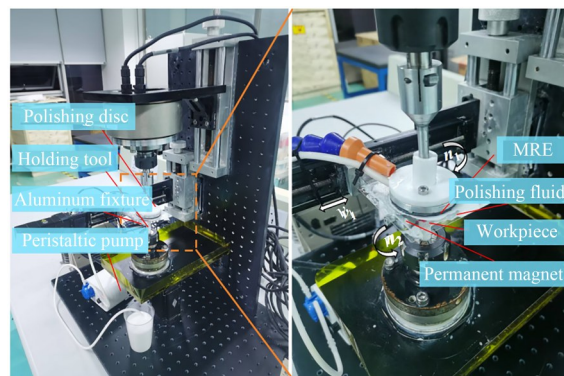


图 16 磁控 MRE 抛光装置

Fig. 16 Magnetron MRE polishing devices

光过程中,永磁体在工件下方 0.5 mm 处往复移动,其路径 l_1 从夹持工具边缘延伸至 MRE 边缘,具体如图 17 所示。永磁体在各点的驻留时间根据式(16)进行计算。蠕动泵向工件表面提供氧化铈浓度为 4% 的抛光液,MRE 抛光面覆盖的沟槽阻尼布确保抛光液充分渗透至抛光区域。其他工艺参数如表 2 所示。实验结束后,用酒精清洗工件表面,待其干燥后,再使用干涉仪测量抛光后的面形。

在无磁场条件下,经过 78 min 的抛光后,工件的表面面形如图 18(a)所示。结果表明,工件表面的材料去除呈现“圆环”形状,主要集中在

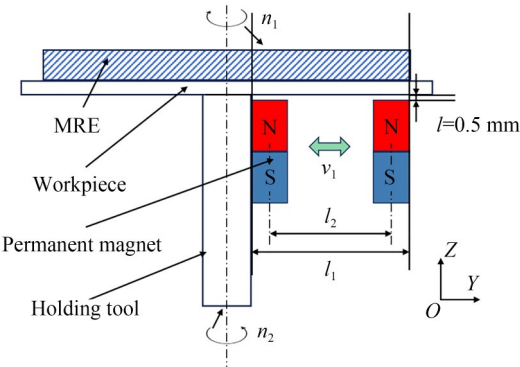
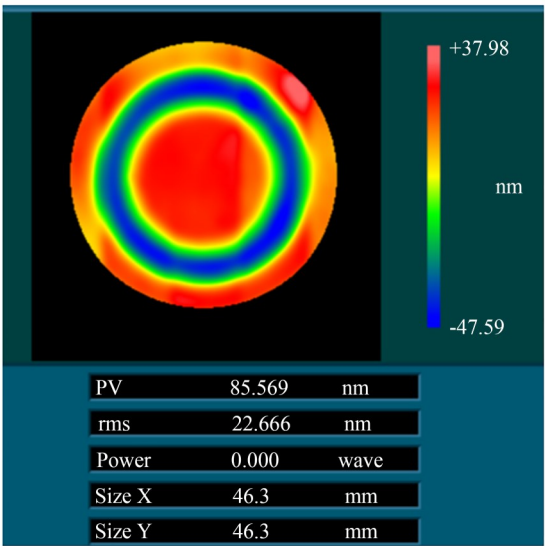


图 17 抛光路径示意图
Fig. 17 Schematic diagram of polishing path

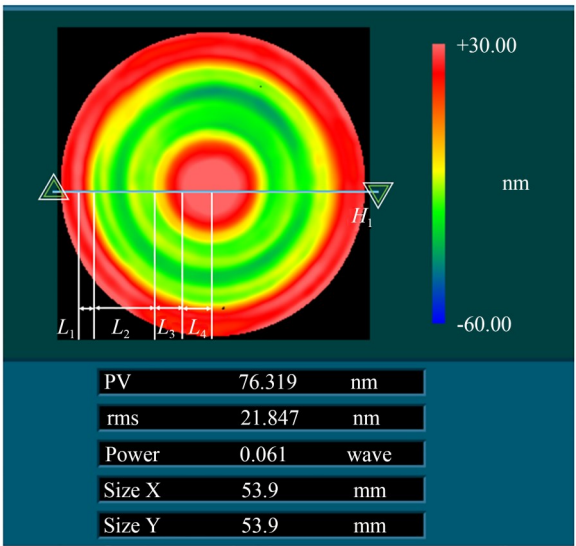
表 2 抛光工艺参数	
Tab. 2 Polishing process parameters	
工艺参数	数值
磁场强度/T	0,0.32
工件转速 $n_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	60
抛光盘转速 $n_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	50
抛光液供速率 $v/(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	19
抛光时间 t/min	78

在 MRE 边缘区域。这是由于在无磁场作用下,工件受到的压力主要集中在 MRE 边缘,形成“圆环”形状,如图 4 所示。随着抛光盘径向尺寸的增大,抛光速度逐渐加快,边缘区域的材料去除量增加,导致工件表面材料去除呈“圆环”形状。

在磁场强度为 0.32 T 的条件下,经过精确控制抛光区域各驻留点的时间后,抛光 78 min 后工件的表面面形如图 18(b)所示。结果表明,抛光区域可以划分为 L_1 至 L_4 四部分。由于 L_4 区域存在夹持工具,导致该区域无材料去除量,因此本文重点讨论 L_1 至 L_3 区域内的材料去除情况。



(a) 无磁场MRE抛光表面面形
(a) Surface morphology of MRE polishing without magnetic field



(b) 磁控MRE抛光表面面形
(b) Magnetron MRE polished surface topography

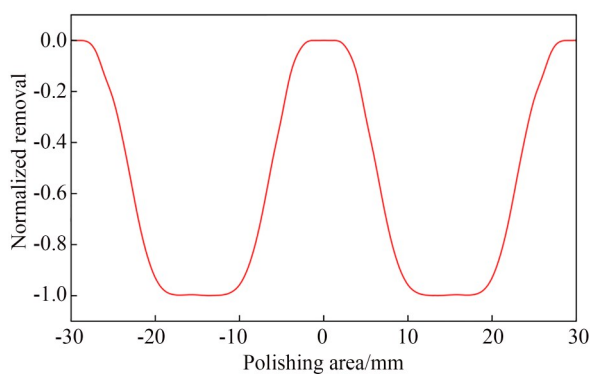
图 18 抛光后工件表面面形
Fig. 18 Surface topography of workpiece after polishing

L_1 区域对应图 15 中驻留点 r_1 左侧的 μ 段, 工件表面材料的最大去除深度为 16.3 nm, 最小去除深度为 0.8 nm。由于受到“边缘效应”的影响, 材料去除量减少。 L_2 区域是“抛光模”从驻留点 r_1 至 r_{n-k} 的移动范围, 工件表面材料的平均去除深度为 84.4 nm, 最大去除深度为 90.8 nm, 最小去除深度为 81.6 nm, 去除深度波动为 10.9%。 L_3 区域是驻留点 r_{n-k} 至 r_{n-k+1} 的范围, 工件表面材料的最大去除深度为 54.2 nm, 最小去除深度为 4.6 nm。由于夹持工具的存在, 永磁铁运动至夹持工具边缘时停止, “抛光模”在驻留点 r_{n-k} 处停止, 其边缘停留在靠近夹持工具的位置。由于受到“边缘效应”的影响, 材料去除量减少。

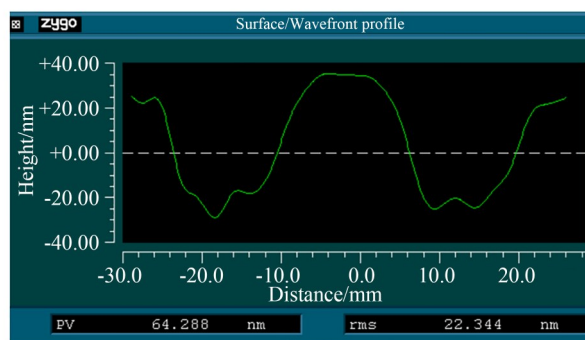
选取图 14 的中心线 H , 通过精确控制“抛光模”在抛光区域内各点的驻留时间, 累积材料去除量, 获得中心线 H 处的仿真去除量。本文研究的磁控 MRE 均匀抛光方法是一种通用方法, 重点在于工件表面材料去除的均匀性, 而非去除效率。因此, 在磁控仿真去除量拟合过程中, 忽略 k 值的具体数值, 通过归一化简化计算, 获得中心

线 H 处的材料去除量, 并绘制径向轮廓曲线, 如图 19(a) 所示。选取图 18(b) 的中心线 H_1 , 绘制实验去除量的径向轮廓曲线, 如图 19(b) 所示。工件表面的磁控抛光区域为 $-25 \sim -5$ mm 和 $5 \sim 25$ mm, 图 18(b) 中 $L_1 \sim L_3$ 区域对应图 19(b) 中磁控抛光区域 $-25 \sim -5$ mm, L_2 区域对应磁控抛光区域 $-19 \sim -11$ mm。由图 19 可知, L_2 区域内的去除量出现小幅波动, 可能由贴有沟槽阻尼布的 MRE 抛光面不平整、抛光液磨粒团聚及运动误差等因素引起。该误差基本属于中低频加工误差, 基于对抛光过程中材料去除深度均匀性的研究^[26-27], 去除波动低于 15% 可满足常规抛光需求, 因此, 该区域的面形精度符合抛光均匀性要求。

本实验的主要目的是研究抛光区域 L_2 内材料去除深度的均匀性。结果表明, 该区域材料去除深度的波动可控制在 10.9%, 能够满足均匀抛光的要求。通过对比施加磁场与无磁场条件下 MRE 的抛光效果, 证明了磁控 MRE 均匀抛光方法在实现薄壳元件内表面均匀抛光方面的有效性。



(a) 磁控仿真去除量曲线
(a) Magnetic control simulation removal curve



(b) 实验实际去除量曲线
(b) Experimental actual removal curve

图 19 去除量的径向轮廓曲线

Fig. 19 Radial profile curve of removal volume

6 结 论

为实现薄壳元件内表面材料的均匀去除, 本文基于磁控 MRE 抛光原理提出一种薄壳元件内

表面均匀抛光方法。利用 COMSOL 软件对 MRE 进行磁-弹性耦合数值模拟, 确定元件表面的抛光压力与速度分布, 并基于 Preston 方程构建抛光去除函数模型。对该模型进行离散化采

样,推导出材料去除向量,采用非负最小二乘法计算抛光区域各点的驻留时间。最后,使用磁控MRE抛光装置对熔石英玻璃工件进行了78 min均匀抛光实验。实验结果表明,在磁场强度为0.32 T时,通过控制抛光区域各驻留点的时间,磁控区域的表面材料平均去除深度为84.4 nm,最大去除深度为90.8 nm,最小去除深度为81.6 nm,去除深度波动为10.9%,满足均匀抛光的要求。结果表明,该方法能够实现薄壳元件内表面均匀抛光。

参考文献:

- [1] ZHAO J B, WANG S, ZHANG C Y, *et al.* Research status and challenges in the manufacturing of IR conformal optics [J]. *Defence Technology*, 2024, 40: 154-172.
- [2] 马传震, 刘赫男, 陈明君, 等. 半球谐振子关键性能及制造工艺研究新进展[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(3): 354-372.
MA CH ZH, LIU H N, CHEN M J, *et al.* Research progress on key property and manufacturing technology of hemispherical resonator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60 (3) : 354-372. (in Chinese)
- [3] 叶斯哲, 王朋, 张昊, 等. 子孔径范成法铣磨半球及超半球光学整流罩[J]. *应用光学*, 2023, 44 (6): 1362-1370.
YE S ZH, WANG P, ZHANG H, *et al.* Sub-aperture generating method for grinding hemispherical and hyper-hemispherical optical dome [J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44 (6) : 1362-1370. (in Chinese)
- [4] CHEN M J, LIU H N, SU Y R, *et al.* Design and fabrication of a novel magnetorheological finishing process for small concave surfaces using small ball-end permanent-magnet polishing head [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5): 823-834.
- [5] 李顺顺. 多曲率弯管内壁抛光均匀性与效果仿真研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2023.
LI SH SH. *Research on Uniformity and Effect Simulation of Polishing for Multi Curvature Bend Pi-pinner Wall* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [6] 刘赫男. 半球谐振子磁流变抛光的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIU H N. *Research on Key Technologies of Magnetorheological Finishing for Hemispherical Resonators* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 王伟明, 李震, 李庆忠. 光学球罩抛光运动轨迹均匀性模拟分析[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2023, 43(3): 386-391.
WANG W M, LI ZH, LI Q ZH. Simulation analysis of uniformity of optical sphere polishing motion trajectory [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2023, 43(3): 386-391. (in Chinese)
- [8] 闫升亲. 光学玻璃超精密射流抛光工艺机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
YAN SH Q. *Research on the Mechanism of Ultraprecision Jet Polishing of Optical Glass* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)
- [9] LIU M Q, WANG J H, HE H C, *et al.* Performance of flexible CeO₂ composite abrasive in force rheological polishing of fused silica glass [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 126: 175-184.
- [10] 陈宇祺, 武俊文, 殷俊荣, 等. 剪切增稠流体机理、影响因素及其应用[J]. *精细石油化工*, 2024, 41(4): 57-63.
CHEN Y Q, WU J W, YIN J R, *et al.* Mechanism, influencing factors and application of shear thickening fluid [J]. *Fine Petrochemical Industry*, 2024, 41(4): 57-63. (in Chinese)
- [11] HU H, DAI Y F, GUAN C L, *et al.* Deterministic manufacturing technologies for polycrystalline magnesium fluoride conformal domes [C]. *5th In-*

作者贡献声明:

薛勃:设计研究方案,论文的构思和修改;
朱力军:抛光实验的设计与实施,论文的撰写;
苏星:抛光方法的提出与实验结果的分析;
陈立:仿真软件的指导与数据管理;
周涛:实验结果的测量与初步分析;
张建飞:提供抛光实验资源;
海阔:论文的审核与编辑;
黄文:资金的获取与项目管理。

- ternational Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. Dalian, China. SPIE, 2010: 7515-7520.
- [12] CHEN M J, LIU H N, CHENG J, *et al.* Model of the material removal function and an experimental study on a magnetorheological finishing process using a small ball-end permanent-magnet polishing head[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5573.
- [13] 汪忠喜. 半球谐振子内表面高效磁流变抛光[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WANG ZH X. *High Efficiency Magnetorheological-polishing of Inner Surface of Hemispherical Harmonic Oscillator* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [14] 王金虎, 袁巨龙, 吕冰海, 等. 石英半球谐振子力流变抛光[J]. *飞控与探测*, 2021, 4(1): 60-66, 4.
WANG J H, YUAN J L, LYU B H, *et al.* Shear rheological polishing of quartz hemispheric resonator[J]. *Flight Control & Detection*, 2021, 4(1): 60-66, 4. (in Chinese)
- [15] YANG G X, PAN J B, WANG D M. A review on the magnetorheological materials and applications[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2024, 75(4): 407-443.
- [16] 李刚, 陈颀, 胡国良, 等. 磁流变弹性体力学性能与磁流变效应研究进展[J]. *磁性材料及器件*, 2023, 54(1): 98-107.
LI G, CHEN Q, HU G L, *et al.* Research progress on mechanical properties and magnetorheological effects of magnetorheological elastomers [J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2023, 54(1): 98-107. (in Chinese)
- [17] 龙浩天, 路家斌, 胡达, 等. 磁流变弹性体制备及其在精密加工应用研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2023, 43(2): 218-232.
LONG H T, LU J B, HU D, *et al.* Preparation of magnetorheological elastomers and their applications in precision machining: a review [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2023, 43(2): 218-232. (in Chinese)
- [18] WANG J, WAN Y J, SHI C Y. Rigidity controllable polishing tool based on magnetorheological effect [C]. *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. Xiamen, China. SPIE, 2012: 8407-8412.
- [19] 徐志强, 易理银, 张高峰, 等. 磁流变弹性体砂轮抛光镍基高温合金 GH4169 表面完整性研究[J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(5): 51-57.
XU ZH Q, YI L Y, ZHANG G F, *et al.* Surface integrity of polishing nickel-based superalloys with magnetorheological elastomer grinding wheel [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(5): 51-57. (in Chinese)
- [20] 易理银. 镍基高温合金磨削及其磁流变弹性体抛光试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
YI L Y. *Experimental Study on Grinding of Nickel Based Superalloys and Polishing of Magnetorheological Elastomers* [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)
- [21] CHEN Y C, HUANG W, ZHANG Y F, *et al.* Novel high efficiency deterministic polishing method using magnetorheological elastomer [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(11): 114008.
- [22] 郭磊, 姬云霄, 马臻, 等. 磨料颗粒增强磁流变弹性体的磨抛应用研究[J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(10): 143-152.
GUO L, JI Y X, MA ZH, *et al.* Study on the grinding and polishing application of abrasive particle-reinforced magnetorheological elastomer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(10): 143-152. (in Chinese)
- [23] HE Z H, HAI K, LI K L, *et al.* Research on the influence of the material removal profile of a spherical polishing tool on the mid-spatial frequency errors of optical surfaces[J]. *Micromachines*, 2024, 15(5): 654.
- [24] 陆政凯, 郭会茹, 吴勇波. 小曲率凹面光学玻璃的磁性混合流体精密抛光[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(9): 1314-1324.
LU ZH K, GUO H R, WU Y B. Magnetic compound fluid polishing of concave optical glass with small curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1314-1324. (in Chinese)
- [25] 瞿川. 钕铁硼永磁体磁力和磁刚度理论及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
QU CH. *Theoretical and Applied Research on Magnetic Force and Magnetic Stiffness of NdFeB Permanent Magnets* [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)

- [26] 金明磊, 金明生, 宋正江, 等. 中心供液弹性研抛工具的材料去除模型研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(9): 1659-1666.
- JIN M L, JIN M SH, SONG ZH J, *et al.* Research on material removal model of elastic polishing tools with centralized fluid supply[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2024, 35(9): 1659-1666.
- (in Chinese)
- [27] 刘青龙. 基于CCOS的抛光轨迹及材料去除优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- LIU Q L. *Research on Polishing Trajectory and Material Removal Optimization Based on CCOS* [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)

作者简介:



薛 勃(1986—),男,黑龙江人,副教授,博士生导师,2018年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微纳米加工及检测、能场辅助制造工艺等方面的研究。E-mail:xuebo@nefu.edu.cn



朱力军(1998—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事磁场辅助抛光的研究。E-mail:zlj199803@163.com