

文章编号 1004-924X(2025)17-2754-11

超声辅助机器人抛光硫化锌材料去除机理 及工艺优化

王志¹, 朱德清², 王雪², 罗皓麒¹, 臧艺凯¹, 刘浩然¹,
马善意¹, 肖峻峰¹, 张建国^{1*}

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院 智能制造装备与技术全国重点实验室,
湖北武汉430074;

2. 中国航空工业集团公司北京航空精密机械研究所, 北京100076)

摘要:为实现硫化锌光学元件高质量抛光,开展了机器人超声辅助抛光的理论建模与实验研究,构建了适用于硫化锌材料的高精高效超声辅助抛光理论与工艺体系。首先,建立机器人超声辅助抛光过程中磨粒-工件接触模型,通过运动学分析超声振动作用下磨粒的三维轨迹特征;其次,基于Preston材料去除理论,引入超声振动产生的动态压力分量与相对速度分量,修正材料去除函数,构建考虑高频振动效应的硫化锌材料去除模型;然后,开展超声辅助驻点抛光实验,揭示抛光预压力和主轴转速对硫化锌材料去除深度(Material Removal Depth, MRD)和材料去除率(Material Removal Rate, MRR)的影响规律,并结合实验数据验证修正去除函数应用的准确性;最后,基于修正的去除函数及优化的抛光工艺参数,开展硫化锌平面超声辅助与非超声辅助抛光对比实验,采用白光干涉仪与轮廓仪对抛光前后的面形精度及表面粗糙度进行定量分析。结果表明:机器人超声辅助抛光下,材料面形精度PV值及表面粗糙度 S_a 均低于非超声辅助机器人抛光。在超声辅助作用下,表面粗糙度 S_a 值由2.632 nm降至1.782 nm,面形精度PV值由0.206 λ (波长为632.8)降低至0.149 λ 。机器人超声辅助抛光技术相较于非超声辅助抛光效果更好,通过超声振动与抛光轨迹的协同作用可以实现硫化锌的高品质加工。

关键词:机器人抛光;超声辅助抛光;硫化锌;去除函数;表面质量

中图分类号:TP242;O426.9 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253317.2754

CSTR:32169.14.OPE.20253317.2754

Material removal mechanism and process optimization of ultrasonic-assisted robot polishing for zinc sulfide

WANG Zhi¹, ZHU Deqing², WANG Xue², LUO Haoqi¹, ZANG Yikai¹, LIU Haoran¹,
MA Shanyi¹, XIAO Junfeng¹, ZHANG Jianguo^{1*}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical
Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Aviation Industry Corporation of China Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry,
Beijing 100076, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangjg@hust.edu.cn

收稿日期:2025-06-13;修订日期:2025-08-02.

基金项目:国防基础科研资助项目(No. JCKY2023205B002)

Abstract: To achieve high-quality polishing of zinc sulfide optical components, this study develops a theoretical and experimental framework for robotic ultrasonic-assisted polishing, with the aim of establishing a high-precision, high-efficiency polishing theory and process tailored to zinc sulfide. A contact model between abrasive grains and the workpiece during robotic ultrasonic-assisted polishing is first established, and the three-dimensional trajectory of abrasive grains under ultrasonic vibration is characterized through kinematic analysis. Based on Preston's material removal theory, the material removal function is modified by introducing a dynamic pressure term and a relative velocity term induced by ultrasonic vibration, thereby constructing a zinc sulfide material removal model that accounts for high-frequency vibration effects. Ultrasonic-assisted stagnation-point polishing experiments are performed to determine the effects of polishing pre-pressure and spindle speed on material removal depth and removal rate for zinc sulfide, and the modified removal function is validated against experimental data. Finally, using the modified removal function and optimized process parameters, comparative experiments between ultrasonic-assisted and conventional robotic polishing of zinc sulfide flats are conducted. Surface form accuracy and surface roughness before and after polishing are quantified by white-light interferometry and profilometry. Results indicate that robotic ultrasonic-assisted polishing yields improvements in both form and roughness relative to non-ultrasonic-assisted polishing: the surface roughness S_a decreases from 2.632 nm to 1.782 nm, and the form error PV decreases from 0.206λ to 0.149λ ($\lambda=632.8$ nm). These findings demonstrate that robotic ultrasonic-assisted polishing, through the synergistic effects of ultrasonic vibration and optimized polishing trajectory, provides superior polishing performance for high-quality processing of zinc sulfide.

Key words: robot polishing; ultrasonic-assisted polishing; zinc sulfide; remove function; surface quality

1 引 言

硫化锌(ZnS)作为一种重要的红外光学材料,凭借优异的宽波段红外透过性能,以及突出的机械强度与化学稳定性,广泛应用于高精度红外窗口、透镜及导弹整流罩等关键部件的制造^[1-2]。然而,由于其硬度低、断裂韧性差的材料特性,传统研磨抛光工艺在加工过程中极易引发磨粒嵌入与亚表层损伤,导致表面粗糙度增加、光学散射加剧,严重影响元件的光学效率与服役寿命^[3-5]。因此,亟需探索高质量抛光方法,提升硫化锌光学元件性能、满足高端应用需求。

超声振动抛光技术凭借高频振动带来的复合作用机制,在提升加工效率、改善表面质量以及拓展材料适应性等方面展现出显著优势,继而在光学元件等精密制造领域备受关注^[6-7]。研究人员在超声加工技术方面开展了诸多研究。Liu等^[8]考虑了超声椭圆振动对抛光垫与工件相互作用的影响,建立了超声椭圆振动辅助化学机械抛光(Ultrasonic Elliptical Vibration-Chemical Mechanical Polishing, UEV-CMP)的材料去除模

型,解释了材料去除率的增加是由于超声椭圆振动促进了抛光液的化学反应效率、磨粒对工件表面的机械冲击效率和垂直方向超声振幅的增加。Meng等^[9]开发了一种超声辅助抛光的多尺度模型,能够预测表面微观形貌和材料去除率,通过分析正交实验结果,确定了工艺参数的完美组合,并通过模拟和实验分析验证了其有效性,错误率低于9.43%。在最佳条件下,抛光实验使表面性能显著提高,表面粗糙度 S_a 从231.8 nm降到15.5 nm。Liang等^[10]研究了超声辅助化学机械抛光工艺参数对加工精度和加工效率的影响,通过优化的工艺参数对大尺寸光学透镜(300 mm)进行高精度(表面粗糙度为8 nm)抛光,该方法为加工大尺寸、高精度光学元件提供了基础理论。

相较于传统抛光技术,机器人抛光具有加工效率高、工作空间灵活和成本低廉等优点,因此在抛光领域的应用越来越多^[11-13]。对于机器人抛光技术,依靠去除函数计算抛光时间是抛光的必要条件^[14],因此,需要依据现有抛光工具建立稳定的材料去除函数。臧艺凯等^[15]建立了M-ZnS

机器人抛光去除函数模型,研究了工艺参数对材料去除率和面形轮廓的影响机制,并优化工艺参数组合开展抛光实验,实验后的抛光面形降低至 $0.229 \mu\text{m}$,粗糙度降低至 2.472 nm 。Lu 等^[16]以 BK7 玻璃为研究对象,在有限元法的基础上建立了机器人双轴轮式抛光工具的去除函数,将仿真与去除函数良好匹配,实验结果发现表面的磨削波纹被完全去除,产生高质量的表面,形状精度为 278.9 nm ,表面粗糙度为 1.40 nm 。Dong 等^[17]以 K9 玻璃为研究对象,建立了机器人行星工具的去除函数模型,实验与仿真结果相比,去除率和去除体积误差均小于 5% 。

目前,研究人员在机器人抛光硫化锌的技术研究方面已经取得显著成果,但是在超声辅助与机器人抛光相结合方面的研究较少,且存在机器人超声辅助抛光的磨粒与抛光材料相互作用探索有限,工艺参数与材料动态响应的匹配机制不明等关键问题。本文以 Preston 材料去除理论为基础,结合超声振动的高频冲击特性,对超声辅助机器人抛光硫化锌的去除模型进行修正,并通过实验验证其可行性,系统探究了抛光预压力、主轴速度等参数对材料去除率和面形轮廓的影响机制,进一步开展硫化锌平面抛光实验,借助白光干涉仪、表面轮廓仪等精密测量手段,对超声辅助与非超声辅助抛光的面形精度与表面粗糙度进行对比分析。研究表明,通过超声振动与机器人抛光轨迹的协同作用,可改善硫化锌表面质量与面形精度,实现了粗糙度的大幅降低和面形精度的显著提升。本研究为高品质硫化锌光学元件的超精密制造提供了理论与技术支撑。

2 原 理

2.1 固结磨粒运动分析

抛光机器人是在机器人末端搭载超声辅助装置,原理如图 1 所示,采用两组正交的电致伸缩元件(Z 方向和 Y 方向的电致伸缩陶瓷片)分别控制平面内两个方向的振动,进而合成椭圆振动^[18],同时使用电机驱动实现抛光垫周期运动。

在微尺度上,抛光头上施加一定的预压力与工件相互接触,而抛光垫的表面不能与工件完全

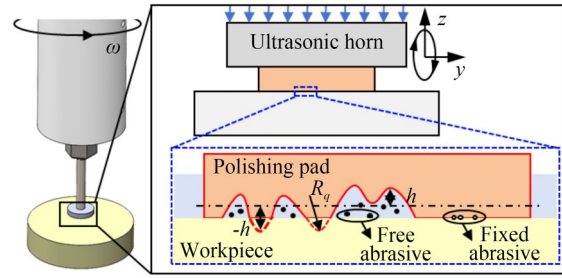


图 1 超声辅助抛光原理

Fig. 1 Principle of ultrasonic assisted polishing

贴合,实际接触区域由微小凹凸表面组成。G. W^[19]提出了一种数学模型来描述粗糙表面的接触问题,将抛光垫上的凹凸简化为相同曲率半径的球体,凹凸面的高度服从正态分布。

$$\phi(z) = \left(\frac{1}{2\pi R_q^2} \right)^{1/2} e^{-\frac{h^2}{2R_q^2}}, \quad (1)$$

其中: h 是高度坐标, $h=0$ 表示抛光垫轮廓的平均高度, R_q 是高度分布的均方根。

在抛光垫与工件间存在嵌入抛光垫的固结磨粒和抛光液中的自由磨粒。固结磨粒跟随抛光垫运动,可根据其抛光垫的运动分析磨粒运动轨迹。在超声椭圆辅助抛光中,固结磨粒的运动轨迹是水平面内高速旋转运动、抛光头进给运动与竖直平面内高频椭圆振动 3 种运动的合成运动。以工件为坐标系,进给速度相对于超声振动头的转速在短时间内忽略。据此,分析抛光中固结磨粒的运动轨迹。

$$\begin{cases} x = R_0 \cos(\omega_0 t) \\ y = R_0 \sin(\omega_0 t) + A_1 \cos(\omega t + \phi) \\ z = A_2 \cos(\omega t) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: R_0 为抛光点到抛光旋转中心的半径, A_1, A_2 分别为两个方向的超声振幅, ω 和 ω_0 分别为主轴旋转角速度和超声振动角速度, ϕ 是两个超声振动相位差。

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt} = -R_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t) \\ V_y = \frac{dy}{dt} = R_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t) - A_1 \omega \sin(\omega t + \phi) \\ V_z = \frac{dz}{dt} = -A_2 \omega \sin(\omega t) \end{cases}. \quad (3)$$

根据仿真计算结果,二维抛光中磨粒的运动相关轨迹如图 2 所示。当进行二维超声抛光时,磨粒的相对运动轨迹在 XY 平面内做圆周

运动,且在竖直方向上做椭圆运动。在抛光头旋转的一个周期内,磨粒的运动轨迹有多次改变,磨粒平面内的运动增加,更有利于材料去除。

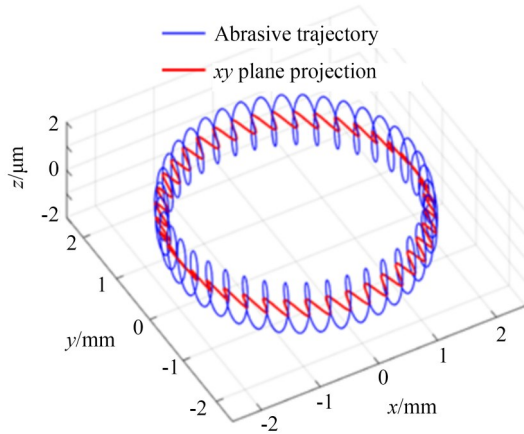


图2 磨粒运动轨迹

Fig. 2 Motion trajectory of abrasive particle

2.2 材料去除理论

在传统抛光中,抛光工具对工件表面的压力和接触区域中的相对速度会产生材料去除。根据 Preston 理论^[20],接触区域的材料去除函数如下:

$$\frac{dh}{dt} = k_p \cdot p(x, y, t) \cdot v(x, y, t), \quad (4)$$

其中: dh/dt 代表材料去除率, k_p 是 Preston 系数,与工件材料、磨粒、温度及环境因素相关, $p(x, y, t)$ 和 $v(x, y, t)$ 是抛光头与工件之间的动态压力分布和相对速度分布。

在超声椭圆辅助抛光中,将超声的作用分解为垂直于工件表面的动态压力作用和平行于工件表面的相对速度作用。垂直方向的动态压力可产生高频微冲击,促使磨粒以更高的瞬时能量切入材料,加速材料的脆性去除或塑性变形,有效提升材料去除率。同时,周期性变化的压力能破坏抛光界面间的吸附层,避免磨粒与工件表面的黏附。而平行方向的相对速度作用,则通过高频振动产生的往复滑移,使磨粒在工件表面形成交错的运动轨迹,显著降低表面划痕深度与粗糙度,尤其利于消除方向性纹理,获得更均匀的表面质量。两种作用协同,可实现材料去除与表面质量的双重优化,为超

声椭圆辅助抛光硫化锌光学元件中材料去除效率提升和亚微米级表面粗糙度控制提供了工艺支撑。

2.3 动态压力分布

施加在工件表面的总压力包括^[21]:动态接触压力 p_w ,抛光液中自由磨粒对工件表面的冲击压力 p_u 和流体压力 p_d 。抛光区域的总动态压力为:

$$p(x, y, t) = p_w + p_u + p_d. \quad (5)$$

根据赫兹接触理论,单个凹凸面于工件表面的接触可以视为半球形与工件表面的接触,单个凹凸面上的动态接触力表示为:

$$F_w(t) = \frac{4}{3\sqrt{R_p}} E^* (h - h_s(t))^{3/2}, \quad (6)$$

其中: $E^* = \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]^{-1}$ 为等效弹性模量, E_1 和 E_2 分别为抛光垫和工件的弹性模量, ν_1 和 ν_2 分别为抛光垫和工件的泊松比。

根据 McCool 等^[22]的接触实验,工件上单个凹凸面的动态接触面积为:

$$S_p(t) = \frac{\pi(h - h_s(t))}{R_p}. \quad (7)$$

超声作用下的动态接触力为:

$$p_w(t) = \frac{4N_p E^*}{3\sqrt{R_p}} \int_{h_s(t)}^{h_{\max}} (h - h_a(t))^{3/2} \Phi(h) dh, \quad (8)$$

其中 N_p 是抛光垫每单位面积的凹凸数。

根据超声冲击衰减作用^[23],动态冲击速度可表示为:

$$v_n = \frac{4f\rho_t A e^{-\alpha h_s(t)}}{\rho_s v_t}, \quad (9)$$

其中: f 为纵向振动的频率, ρ_t 为抛光垫材料密度, α 为超声衰减系数, ρ_s 为抛光液密度, $v_t = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_t}}$ 为超声波在抛光液中的传播速度。

根据赫兹接触理论^[24],单个游离磨粒冲击工件表面的深度可以表示为:

$$p_l = \frac{1}{3} \left(\frac{5\pi\rho_s}{4} \right)^{3/5} E^{2/5} D^2 v_n^{6/5}. \quad (10)$$

超声波振动下的磨粒冲击压力:

$$p_u = \frac{1}{3} N_s \left(\frac{5\pi\rho_s}{4} \right)^{3/5} E^{2/5} D^2 v_n^{6/5}, \quad (11)$$

其中 N_s 为有效抛光磨粒颗粒。

根据 Reynold 方程的量纲分析^[25], 超声波振动下的动态流体压力可表示为:

$$p_d = \frac{4\eta v_{\text{rot}}(x, y) \sqrt{x^2 + y^2}}{h_s^2(t)}. \quad (12)$$

2.4 相对线速度分布

相对速度分布由抛光头的自转和椭圆振动共同决定。自转产生的线速度为:

$$v_{\text{rot}}(x, y) = \omega_0 \cdot r = \omega_0 \cdot \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (13)$$

其中 ω_0 是角速度。

椭圆振动引起的平行于工件的附加速度为:

$$v_y(t) = \frac{dy}{dt} = -A_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \phi). \quad (14)$$

相对线速度可以表示为:

$$v(x, y, t) = \sqrt{[v_{\text{rot}} \cos \theta]^2 + [v_{\text{rot}} \sin \theta - v_y(t)]^2}, \quad (15)$$

其中: $\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ 为点 (x, y) 的极角。

2.5 修正去除函数

将压力 $p(x, y, t)$ 和速度 $v(x, y, t)$ 代入 Preston 方程, 可表示为:

$$\Delta h(x, y, \Delta t) = k_p \cdot p(x, y, t) \cdot v(x, y, t) \cdot \Delta t. \quad (16)$$

采用辛普森积分^[26]计算单周期去除率计算单周期去除量:

$$H(x, y, T) = \frac{\Delta t}{3} \left[\Delta h_1 + 4 \sum_{i=1}^{n/2} \Delta h_{2i-1} + 2 \sum_{i=1}^{n/2} \Delta h_{2i} + \Delta h_n \right], \quad (17)$$

其中 Δh_i 为第 i 个时间步的瞬时去除量。

总去除深度为单周期去除量与周期数的乘积:

$$H_t(x, y, t_{\text{total}}) = \frac{t_{\text{total}}}{T} \cdot H(x, y, T), \quad (18)$$

其中 t_{total} 为总抛光时间, t_{total}/T 为总周期数。

材料去除体积 (Material Removal Volume, MRV) 为去除深度在抛光区域的积分:

$$V_{\text{removal}} = \iint_{r \leq R} |H_t(x, y, t_{\text{total}})| dx dy. \quad (19)$$

数值计算中通过网格求和实现:

$$V_{\text{removal}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |H_t(x_i, y_j, t_{\text{total}})| \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad (20)$$

其中 $\Delta x, \Delta y$ 为网格步长。

材料去除率为去除体积与总时间的比值:

$$MRR = \frac{V_{\text{removal}}}{t_{\text{total}}}. \quad (21)$$

根据修正的材料去除模型, 选定工艺参数来计算表面去除形态, 图 3 显示了二维超声振幅分别为 $4 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$, 相位差为 90° , 抛光垫半径为 4 mm , 预压力为 2 N , 主轴转速为 200 r/min , 抛光时间为 300 s 的条件下模拟的 3D 表面形貌。去除轮廓呈现中间高四周低的形态, 中心区域抛光转速较低, 材料去除率较低, 而远离旋转中心的区域, 磨粒转速较高导致材料去除率增加。

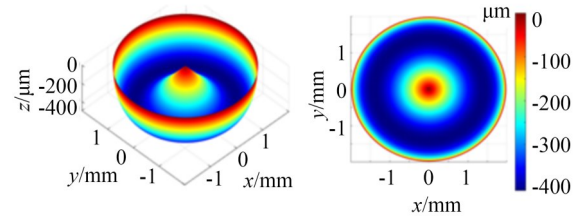


图 3 3D 表面形貌模拟

Fig. 3 Simulation of 3D surface morphology

3 实验条件

本文使用超声辅助机器人抛光系统对硫化锌进行驻点抛光实验和平面抛光实验, 如图 4 所示。实验材料为直径 30 mm 的硫化锌工件, 抛光系统主要包括 KUKA 工业机器人、自研超声辅助抛光工具、力传感器 (JHBM-H1) 及工作台等。抛光工具采用电机驱动振动发生装置自转, 电滑环将激励电压接入超声装置。力传感器固定于工作台上, 待抛光工件与力传感器连接, 通过调节丝杆预设抛光压力。

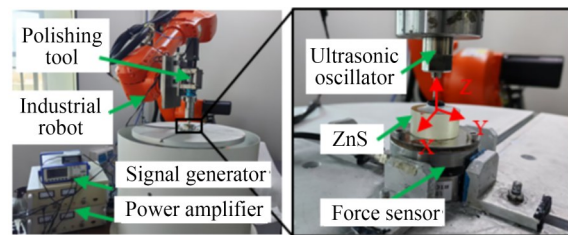


图 4 抛光实验装置

Fig. 4 Polishing experimental devices

实验开始前,使用 Lumphoscan 420HD 型非接触式光学表面轮廓仪(波长为 632.8 nm)测量初始面形,同时,使用 New View™ 9000 型白光干涉仪测量初始表面粗糙度。驻点抛光实验中,需要测量抛光前后材料质量,用以计算材料去除率。在抛光过程中,抛光磨头不仅随振动发生器产生椭圆振动,还同时跟随工业机器人实现预定轨迹运动,向工件表面提供充足氧化铝抛光液,确保抛光液充分渗透至抛光区域,实验中基本抛光条件如表 1 所示。实验结束后,用超声清洗机 and 酒精清洗工件表面,待干燥后,再次使用激光干涉仪和白光干涉仪测量抛光后的表面。

表 1 基本抛光工艺条件

Tab. 1 Basic polishing process conditions

项 目	参 数
超声频率/kHz	20.8
主轴转速/($r \cdot \min^{-1}$)	50, 100, 150, 200
预设压力/N	2, 4, 6, 8
抛光液	氧化铝
抛光垫	沥青
环境温度/ $^{\circ}C$	20

4 实验与结果

4.1 驻点抛光

基于 Preston 材料去除理论,抛光过程中的接触压力与相对运动速度是决定材料去除量的核心要素。为探究关键工艺参数对硫化锌材料去除行为的影响规律,采用单因素驻点抛光实验方法,系统研究抛光主轴转速与接触压力对硫化锌材料去除深度及去除率的影响机制,为后续平面抛光工艺优化提供理论依据。实验选用沥青作为抛光垫材料,该材料具有良好的弹性与磨粒嵌合能力,能够实现稳定的材料去除;抛光液采用粒径为 $1 \mu m$ 的氧化铝磨料,其硬度与粒径参数适配硫化锌材料的加工特性。实验装置采用直径 4 mm 的抛光盘,在硫化锌平面工件表面开展驻点抛光测试,通过精确控制单一变量,量化分析各参数对材料去除性能的独立作用效应。

在不同预设压力和主轴转速下,经过 3 min 的驻点抛光后的材料去除轮廓如图 5 所示。从图中可以看出,抛光去除轮廓存在不对称误差,中心区域欠抛,这是由于磨粒距主轴旋转中心的距离不同,抛光盘中心区域磨粒因受离心力而减少,导致抛光中心区域的磨粒运动速度较

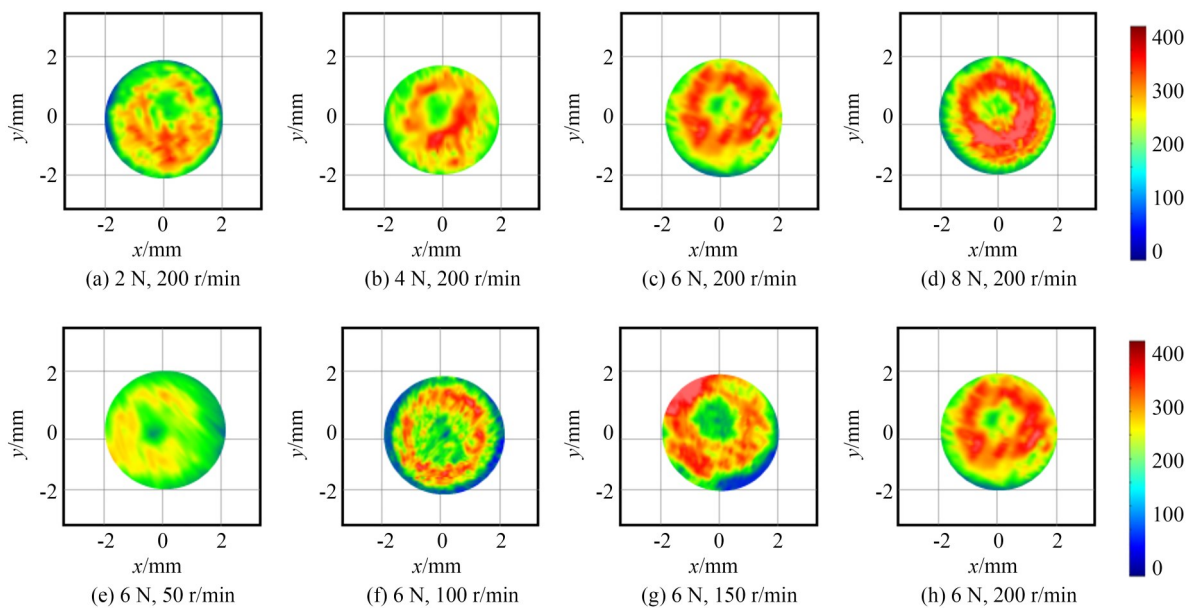


图 5 驻点抛光去除轮廓

Fig. 5 Stationed polishing to remove contours

小,材料去除率较低。这也与修正去除函数生成的三维表面形貌相似。

图 6(a)展示了抛光预压力对材料去除深度和材料去除体积的影响规律。从图中可以看出,随着预压力从 2 N 逐步增加至 8 N,材料去除率和材料去除深度均呈现上升趋势。这表明增大预压力能显著提升材料去除效果,原因在于更高的预压力使抛光工具与材料表面接触更紧密,增强了机械作用,进而提高了材料去除效率。因此,抛光预设压力选择 6~8 N。图 6(b)

为主轴转速对硫化锌材料去除的影响。如图所示,当转速从 50 r/min 提升至 200 r/min 时,材料去除率和去除深度同样逐步上升。在 50~100 r/min 时材料去除率较低,驻点中心区域材料去除率量较少,100~150 r/min 材料去除率增长加快,到 200 r/min 时材料去除效果进一步提升。这是因为转速的提高增加了抛光工具在单位时间内与材料表面的作用次数,从而促进了材料去除。因此,推荐的主轴转速为 200 r/min。

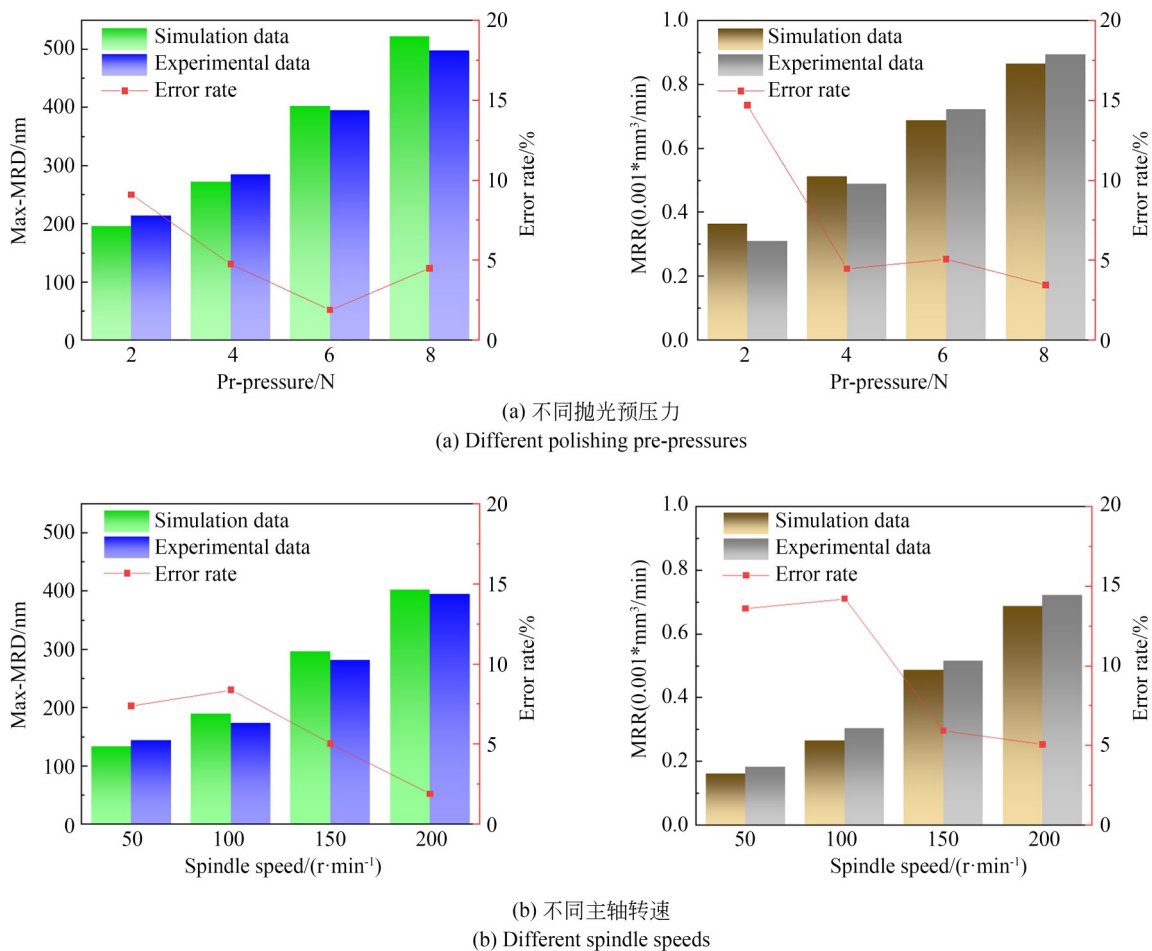


图 6 抛光预压力和主轴转速对材料去除的影响

Fig. 6 Influence of polishing pre-pressure and spindle speed on material removal

通过修正的材料去除模型来计算表面形态,并与一系列机器人超声辅助抛光实验的测试值进行比较,探究修正去除函数的可行性。如图 7 所示,为修正去除函数与实验去除函数

材料去除深度的对比,去除函数模型与实验数据在最大去除深度误差小于 10%,表明修正去除函数可以应用于驻留时间和材料去除率的计算。

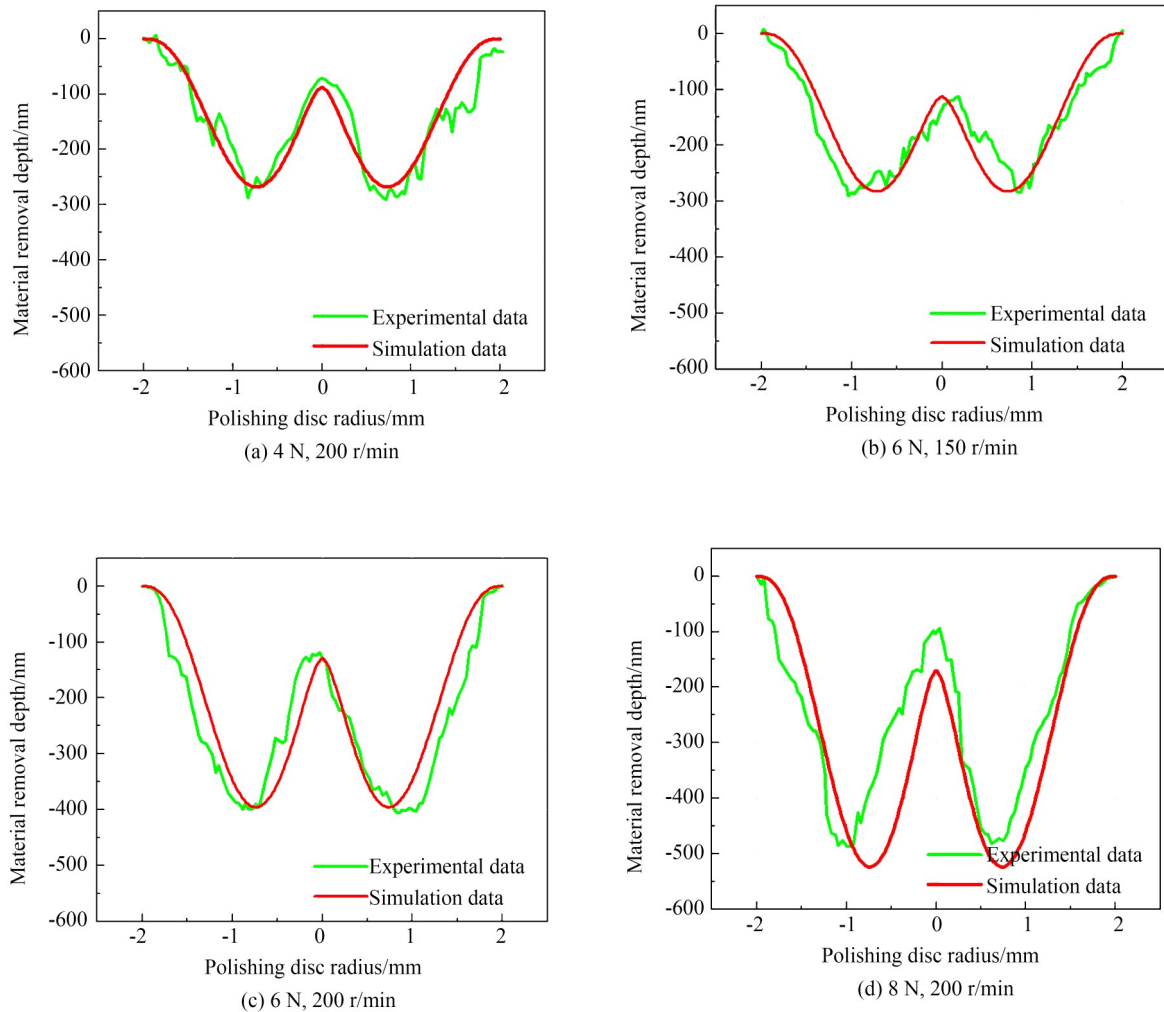


图 7 抛光实验与仿真去除轮廓

Fig. 7 Polishing experiment and simulation of contour removal

4.2 平面抛光

根据定点抛光实验结果和修正的去除函数,本研究设计了 30 mm 直径的硫化锌平面抛光实验,具体流程如图 8 所示。实验前,工件毛坯表面因呈现磨砂状且面型误差显著,难以通过表面轮廓仪直接测量面形。为此,采用单点金刚石车削工艺对其进行预平滑处理,以获取可测量的基准表面。车削后,利用表面轮廓仪与白光干涉仪对工件表面进行精密测量。将面形测量数据导入抛光路径规划软件,选取栅格形抛光轨迹进行工艺仿真,通过计算驻留时间生成优化的抛光路径,并导出 NC 代码至机器人控制系统。实验参数设置如下:超声振动系统频率为 20.8 kHz,抛

光接触压力为 6 N,主轴转速为 200 r/min,抛光液为 $1\ \mu\text{m}$ 氧化铝磨粒悬浊液,沥青抛光垫直径为 4 mm。

超声抛光与非超声抛光实验后,表面质量对比如图 9 所示,超声辅助机器人抛光下,材料面形精度 PV 值及表面粗糙度 S_a 均低于非超声辅助机器人抛光。在超声辅助作用下,表面粗糙度 S_a 值由 2.632 nm 降至 1.782 nm,面形精度 PV 值由 0.206λ 降低至 0.149λ 。实验结果表明,超声辅助机器人抛光技术通过超声振动与抛光轨迹的协同作用,相较于非超声辅助机器人抛光提升了硫化锌光学元件的面形精度与表面质量,实现了其高质量超精密加工。

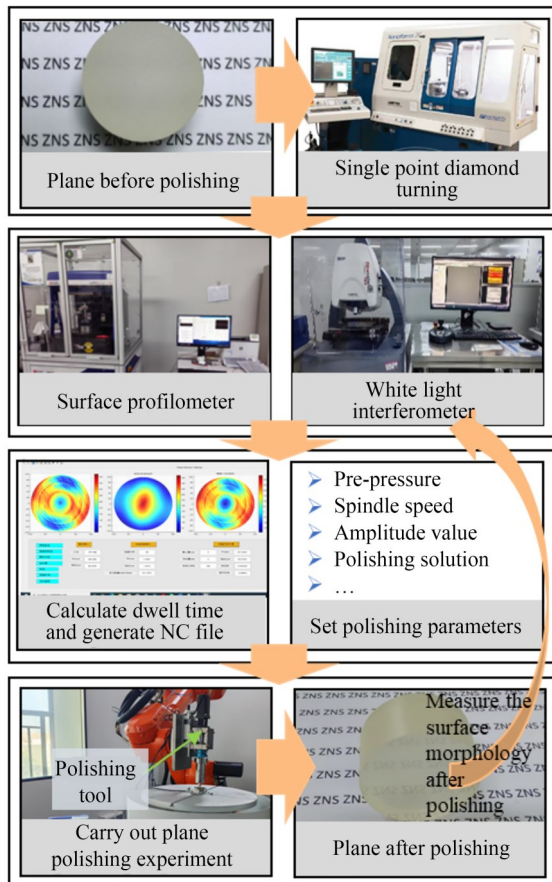


图 8 平面抛光实验步骤

Fig. 8 Experimental steps for uniformity polishing

5 结 论

本文根据 Preston 材料去除理论,通过引入超声振动诱导的动态压力与相对速度分量,构建了超声辅助机器人抛光的材料去除函数模型,修正了超声辅助机器人抛光材料去除函数,并利用驻点抛光实验验证了修正模型对材料去除轮廓的预测准确性,结果表明模型预测值与实验值的相对误差小于 10%。通过单因素驻点抛光实验,系统分析了抛光预压力和主轴转速对硫化锌材料去除深度及去除率的影响规律,确定了优化工艺参数:采用直径 4 mm 的沥青抛光头时,最佳抛光预压力

参考文献:

- [1] 贵畅, 杜叶宣, 闾家亮, 等. ZnS 红外窗口的电磁屏蔽设计及试验验证[J]. 红外, 2023, 44(7): 8-14.

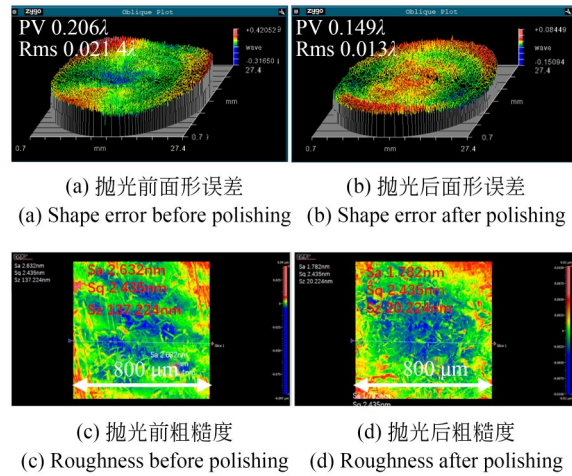


图 9 非超声作用与超声作用抛光结果对比

Fig. 9 Comparison of polishing results between non-ultrasonic and ultrasonic actions

为 6 N, 主轴转速为 200 r/min。基于优化参数开展的超声辅助与非超声辅助平面抛光实验表明,在超声辅助机器人抛光下,硫化锌元件表面粗糙度 S_a 值由 2.632 nm 降至 1.782 nm, 面形精度 PV 值由 0.206λ 降低至 0.149λ。研究结果证实,超声辅助机器人抛光技术通过去除函数修正与工艺参数协同优化,相较于非超声作用,提高了硫化锌元件的表面质量,为硫化锌红外光学元件在航空航天、精密光电等领域的超精密制造提供了理论支撑与工程化解决方案。

作者贡献声明:

- 王志:测量方法的提出,论文构思和撰写;
朱德清:研究方法设计;
王雪:实验数据分析;
罗皓麒:实验数据测量;
臧艺凯:实验资源提供;
刘浩然:实验结果验证;
马善意:研究活动管理和协调;
肖峻峰:研究的策划和执行管理;
张建国:论文审核和编辑写作。

BEN CH, DU Y X, CHUANG J L, *et al.* Electromagnetic shielding design and experimental verification of ZnS infrared window[J]. *Infrared*, 2023, 44(7): 8-14. (in Chinese)

- [2] 吴绍华, 赵劲松, 赵跃进, 等. 硫化锌体材料制备

- 及其光学性能研究进展[J]. 红外技术, 2022, 44(5): 453-461.
- WU SH H, ZHAO J S, ZHAO Y J, *et al.* Review on the fabrication and optical performance of ZnS bulk materials[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(5): 453-461. (in Chinese)
- [3] ZHAO X Q, HU H, CHEN F L, *et al.* Research on the combined polishing technology for high-precision ZnS optical element fabrication[C]. *Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications and Fourth International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (AOMTA and YSAOM 2024)*. July 5-7, 2024. Xi'an, China. SPIE, 2024: 14.
- [4] 张羽斐. 固结磨料研磨硫化锌亚表面损伤的评价与预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- ZHANG Y F. *Evaluation and Prediction of Subsurface Damage in ZnS Grinding with Solid Abrasive* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022. (in Chinese)
- [5] CHEN B, GUO B, ZHAO Q L. Ductile regime grinding aspheric surface of hot-pressed zinc sulfide [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 633-634: 624-627.
- [6] YANG Z C, ZHU L D, ZHANG G X, *et al.* Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 156: 103594.
- [7] VAN LE H, LE H G, DAO T P. Review of vibration-assisted polishing: current situation and prospects [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2025, 1-21.
- [8] LIU D F, YAN R M, CHEN T. Material removal model of ultrasonic elliptical vibration-assisted chemical mechanical polishing for hard and brittle materials [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(1): 81-99.
- [9] MENG F W, CUI ZH J, LIANG Y D, *et al.* Multiscale model of material removal for ultrasonic assisted polishing of cylindrical surfaces [J]. *Tribology International*, 2025, 202: 110383.
- [10] XU W H, LU X C, PAN G S, *et al.* Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(12): 3936-3940.
- [11] 张伟, 余新阳, 张伟中. 复杂曲面机器人磨抛技术研究现状与趋势展望综述[J]. 机电工程, 2024, 41(7): 1240-1250.
- ZHANG W, YU X Y, ZHANG W ZH. Summary of research status and trend prospect of robot grinding and polishing technologies for complex curved surface [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(7): 1240-1250. (in Chinese)
- [12] KE X L, YU Y H, LI K S, *et al.* Review on robot-assisted polishing: status and future trends [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 80: 102482.
- [13] ZHANG J, WANG H. Generic model of time-variant tool influence function and dwell-time algorithm for deterministic polishing [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 211: 106795.
- [14] FAN C, LU Y, WANG K J, *et al.* Surface removal characteristic of computer-controlled dual-rotor polishing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(7): 2189-2199.
- [15] 臧艺凯, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 机器人抛光 M-ZnS 去除函数建模与工艺参数优化 [J]. 光学精密工程, 2024, 32(15): 2387-2400.
- ZANG Y K, ZHU B B, QIN L, *et al.* Modeling of removal function and optimization of process parameters for robotic polishing M-ZnS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(15): 2387-2400. (in Chinese)
- [16] LU A G, JIN T, GUO Z F, *et al.* Characterization of the tool influence function in a dual-axis wheel polishing process to achieve high material removal rates [J]. *Precision Engineering*, 2018, 52: 276-290.
- [17] DONG Z C, CHENG H B, TAM H Y. Modified subaperture tool influence functions of a flat-pitch polisher with reverse-calculated material removal rate [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2455.
- [18] LIN J Q, HAN J G, LU M M, *et al.* Design, analysis and testing of a new piezoelectric tool actuator for elliptical vibration turning [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(8): 085008.
- [19] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B. Contact of nominally flat surfaces [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [20] PRESTON F W. The Theory and Design of Plate

- Glass Polishing Machines [J]. *J. soc. glass Tech*, 1927.
- [21] SHI H, RING T A. CMP pad wear and Polish-rate decay modeled by asperity population balance with fluid effect[J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(11): 2368-2375.
- [22] MCCOOL J I. Comparison of models for the contact of rough surfaces[J]. *Wear*, 1986, 107(1): 37-60.
- [23] LI Z, YU J G, ZHANG X M, *et al.* Study on propagation characteristics of ultrasonic guided wave and detection of the defect in resin bolts[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 195: 108843.
- [24] GREENWOOD J A. Analysis of elliptical hertzian contacts [J]. *Tribology International*, 1997, 30(3): 235-237.
- [25] XIE W X, ZHANG Z Y, WANG L, *et al.* Chemical mechanical polishing of silicon wafers using developed uniformly dispersed colloidal silica in slurry [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 90: 196-203.
- [26] ALI M A, BUDAK H, ZHANG Z Y, *et al.* Some new Simpson's type inequalities for coordinated convex functions in quantum calculus [J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2021, 44(6): 4515-4540.

作者简介:

王 志(2000—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事超精密加工研究。
E-mail: m202370798@hust.edu.cn

通讯作者:

张建国(1985—),男,河北张家口人,博士,教授,2008年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位,2014年于日本名古屋大学获得博士学位,主要从事超精密和智能制造方面的研究。E-mail: zhangjg@hust.edu.cn