

文章编号 1004-924X(2025)18-2868-14

多光谱硫化锌高表面质量 CMP 工艺参数优化研究

任佳瞳¹, 秦琳², 朱蓓蓓², 蔡根¹, 楚建宁¹, 张楚鹏¹, 陈肖^{1*}

(1. 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要:针对多光谱硫化锌难以在化学机械抛光中获得高表面质量的问题, 本文围绕抛光过程中样品平面度与表面粗糙度的协同优化开展实验研究。首先通过单因素实验确定抛光时间、磨粒种类、抛光盘转速与抛光压力的合理取值及范围, 在此基础上采用响应曲面法设计实验, 引入灰色关联法分析各参数及其交互作用对表面形貌的影响。实验结果表明: 抛光盘转速是影响表面质量的主导因素, 其次为抛光压力和磨粒粒径。通过模型优化确定最优工艺参数为: 磨粒粒径 0.5 μm , 抛光盘转速 55 r/min, 抛光压力 16 N。在此条件下进行工艺验证, 工件表面平面度 PV 达 112.49 nm, 粗糙度 Sa 降至 1.11 nm, 表面形貌均匀且缺陷较少。通过优化 CMP 工艺参数可实现多光谱硫化锌表面高精度与高质量的协同控制, 为其在高性能光学器件中的应用提供技术支持。

关键词: 多光谱硫化锌; 化学机械抛光; 响应曲面法; 高表面质量; 灰色关联度分析法

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253318.2868

CSTR: 32169.14.OPE.20253318.2868

Optimization of process parameters of multi-spectral ZnS CMP with high surface quality

REN Jiatong¹, QIN Lin², ZHU Beibei², CAI Gen¹, CHU Jianing¹, ZHANG Chupeng¹, CHEN Xiao^{1*}

(1. Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering in Hubei Province,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: chenxiao1987jz@163.com

Abstract: In order to solve the problem that it was difficult to obtain high surface quality of multi-spectral ZnS in chemical-mechanical polishing (CMP), this paper focused on the synergistic optimization of flatness and surface roughness to carry out experimental research. Through single-factor experiments, the optimal values and ranges for polishing time, abrasive type, rotational speed of the polishing disc, and polishing pressure were determined. Subsequently, response surface methodology was employed to design the experimental framework, and grey relational analysis was introduced to investigate the influence of these parameters and their interactions on surface morphology. The results show that the speed of polishing disk is the dominant factor affecting the surface quality, followed by polishing pressure and grain size. The opti-

收稿日期: 2025-07-10; 修订日期: 2025-07-29.

基金项目: 硬脆光学元件激光辅助超精密加工机理与工艺 (No. IMETKF2023008); 现代制造质量工程湖北省重点实验室开放基金资助 (No. KFJJ-2022006); 博士科研启动基金 (No. XJ2024001101)

mum process parameters were determined by model optimization: abrasive grain size of $0.5\ \mu\text{m}$, polishing disc speed of 55 r/min, and polishing pressure of 16 N. Under these conditions, the process was validated, and the surface flatness of the workpiece reached 112.49 nm, the roughness was reduced to 1.11 nm, and the surface morphology was uniform with fewer defects. The synergistic control of high precision and high quality of multi-spectral ZnS surfaces can be achieved by optimizing the CMP process parameters, providing technical support for its application in high-performance optical devices.

Key words: multi-spectral ZnS; Chemical Mechanical Polishing (CMP); response surface method; high surface quality; grey relational analysis

1 引言

多光谱硫化锌(ZnS)是一种广泛应用于红外光学领域的关键材料,它具有优异的光谱透过性、良好的化学稳定性及较高的机械强度、抗热冲击性能等优点^[1-2],因此被广泛用于热成像、航空航天探测和红外制导等高性能光学系统^[3-4]。

传统的 ZnS 超精密加工手段主要包括单点金刚石车削、超精密磨削及研磨抛光等方法。但研究表明,单点金刚石车削在加工大口径光学元件时存在刀具磨损严重、切削粉尘污染等问题^[5-6];机械研磨与磨削过程中,由于 ZnS 硬度低且晶体各向异性显著,易出现表面划痕、亚表面损伤及形貌误差累积,难以满足高质量加工需求^[7];而传统的研磨抛光过程多以机械去除为主,难以兼顾表面光洁度与结构完整性,容易引入新的表面缺陷和应力损伤^[8]。

化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)作为一种集化学反应与机械去除于一体的精密加工技术,其原理是通过化学反应在工件表面形成软化层^[9-10]。随后利用磨粒与抛光垫的机械作用实现材料微量去除,兼顾表面粗糙度控制与亚表面损伤抑制,从而获得超光滑且无损伤的样品表面,是实现 ZnS 高质量加工的有效手段^[11-12]。

目前已有学者对 CMP 工艺参数对 ZnS 的表面粗糙度或平面度的影响开展了初步探索。长春理工大学陈琦等人^[13]采用单点金刚石切削,研究了进刀速率和切削深度对表面粗糙度的影响,同时考察了不同抛光盘和抛光液组合的抛光效果。在优化后的工艺条件下,加工出的硫化锌表面粗糙度低于 1 nm 的光滑表面。哈尔滨工业大学陈冰等人^[14]采用金刚石砂轮对热压硫化锌进行磨削实验,结果显示,随着磨削深度的增加,表面光洁

度逐渐降低,存在明显的粗糙度恶化现象。湖北工业大学蔡根等^[15]采用离子束技术对多光谱硫化锌晶体进行抛光,通过正交实验分析各工艺参数对体积去除率的影响,并优化出适用于大、小束径的参数组合。最终采用束径复合加工方法,在提升抛光效率的同时,实现了 PV 为 71.506 nm 的面形精度。哈尔滨工业大学饶志敏等人^[16]基于超精密机床开发轮式工具抛光系统,研究了工具表面结构特征及抛光压力施加方式对硫化锌加工效率与表面质量的影响规律。通过优化轮式工具压力与工件转速,有效抑制了中心凹陷缺陷,最终使多光谱硫化锌非球面的面型精度达到 PV $0.31\ \mu\text{m}$ 。近年来,国内多所高校开始聚焦于化学作用机制优化的研究。Nelson 等人^[17]对多光谱 CVD 硫化锌进行了系统研究,结果表明,不同晶型氧化铝磨粒配制的抛光液在不同 pH 条件下呈现出显著的材料去除率差异。南京航空航天大学黄建东等人^[18]探讨了酸性与碱性抛光液对硫化锌晶体固结磨料抛光性能的影响,发现柠檬酸抛光液最适用于硫化锌抛光,最终在优化工艺参数条件下,实现了材料去除率 391 nm/min、表面粗糙度 Sa 为 2.7 nm 的抛光效果。此外,已有研究对抛光液种类^[19]、分散剂类型^[20]、抛光垫硬度^[21]及 CMP 工艺组合^[22]等进行了系统分析,但仍存在如下问题:当前关于 ZnS CMP 的研究多数聚焦于单一表面性能指标,缺乏对粗糙度与平面度协同优化的系统性探索。同时,工艺参数与多性能指标之间的复杂耦合关系仍不明确,缺乏多因素、响应优化模型的理论指导。

针对上述问题,本文以多光谱硫化锌为研究对象,通过单因素实验法对主要工艺参数进行初步筛选,确定抛光时间、磨粒种类、抛光压力及转速的合理取值范围。进而选取磨粒粒径、抛光压

力、转速为三个关键变量。在多参数抛光中,磨粒粒径、压力和转速等变量存在交互作用,单因素法难以揭示,正交试验缺乏预测能力。响应曲面法可建立多因素及交互作用模型,优化工艺参数^[23]。故基于响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)构建粗糙度和平面度响应模型,明确各因素与表面质量之间的定量关系;随后基于极差分析法对各参数重要性进行初步排序,在此基础上引入灰色关联度分析法(Grey Relational Analysis, GRA),进一步揭示各参数对表面质量影响的关联程度及敏感度,最终实现兼顾表面粗糙度和平面度的最优CMP工艺参数组合。本文的研究将为多光谱 ZnS 等软脆材料的高质量加工提供系统的工艺优化方法与理论支持。

2 CMP 实验设置及工艺参数优化

2.1 CMP 实验设置及测量表征

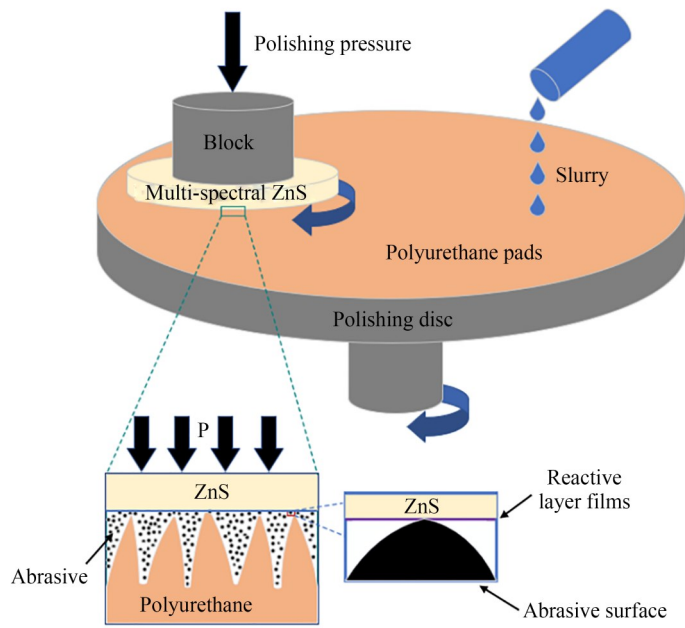
在室温下,将直径 100 mm、厚度为 8 mm 的多光谱硫化锌样品压在聚氨酯抛光垫上进行抛光实验。本实验所用试样为北京中材人工晶体研究所生产的多光谱硫化锌晶体,经过预先粗抛

处理,其性能参数如表 1 所示。在化学机械抛光过程中,抛光设备采用 QJP25 气压精密研磨抛光机,来自无锡锡斌光电设备有限公司。聚氨酯抛光垫选用由美国环球光学有限公司生产的 LP-26 型。抛光液以去离子水为溶剂,采用柠檬酸溶液将 pH 调节至 4,氧化剂选用 0.5wt% H_2O_2 溶液。所有实验均在温度为 22 ℃ 的超净室环境中进行。所用 ZnS 样品在抛光前均经过相同的粗抛工艺处理,其初始平面度(PV)范围为 670.21 nm 至 756.97 nm,表面形貌基本一致。为确保实验条件的一致性与抛光效果的重复性,在每组实验结束后用去离子水(DI)冲洗除去上组实验残留的抛光液,在每组抛光实验开始前均对抛光垫进行 5~10 min 的修整,以恢复其初始表面状态。抛光实验所采用的设备如图 1 所示。抛光完成后,

表 1 多光谱硫化锌的性能参数

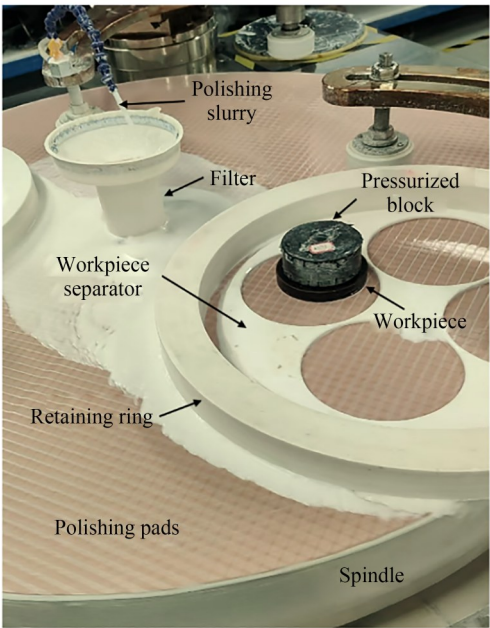
Tab. 1 Performance parameters of multi-spectral ZnS

Parameter	Value
Density/($g \cdot cm^{-3}$)	4.09
Hardness/($kg \cdot mm^{-2}$)	250
Fracture toughness/($Mpa^{1/2}$)	1.0
Thermal conductivity/($W \cdot cm^{-1} K^{-1}$)	6.8



(a) 实验原理示意图

(a) Schematic diagram of experimental principle



(b) 实验设备图

(b) Diagram of the experimental equipment

图 1 化学机械抛光实验原理

Fig. 1 Experimental principle of chemical-mechanical polishing

样件经超声清洗 5~10 min,再采用压缩空气干燥,最后对样件进行平面度和表面粗糙度的检测与评估。采用泰勒霍普森 Lumphoscan 420HD 型非接触式光学表面轮廓仪测量抛光后多光谱硫化锌的面形精度 PV,测试口径为直径 98 mm,基本覆盖整个工件表面。采用白光干涉仪 ZYGO NewView™ 9000 检测工件表面粗糙度 Sa,扫描视场为 200 nm×200 nm。采用金相显微镜 Ax-iocam 208 color 检测工件表面形貌。测量时对每个工件从中心到边缘随机进行 5 点取样,以平均值作为最终粗糙度的测量结果。

2.2 实验设计

本实验分为两个阶段进行:首先采用单因素实验法对主要工艺参数的作用趋势和合理取值范围进行初步筛选;随后引入响应曲面法(RSM),系统评估多因素条件组合下的综合效果,对关键工艺参数进行优化设计。

单因素实验中选择抛光时间、磨粒种类、抛光压力和抛光盘转速四个典型工艺参数作为考察对象如表 2 所示。实验过程中每次仅改变其中一个因素,其他变量保持恒定,以观察该参数对多光谱硫化锌晶体表面加工状态的独立影响。抛光时间的设定用于评估材料去除量与表面质量的时间依赖性,将后续抛光研究的时间范围控制在最佳范围内;磨粒种类包括多种不同成分与硬度的氧化物,用以比较化学反应与机械去除的协同效果,初步对比结果后,得到综合性能表现更优的磨料用于后续抛光研究。抛光压力作为影响接触载荷和材料变形行为的直接参数,其设定需兼顾面形控制与加工稳定性;转速则涉及抛光盘与工件之间的相对滑动速度,对切削力分布及流体环境有显著影响。通过此阶段的实验,可明确各参数的敏感区域和有效工作区间,为后续多因素实验提供边界条件。

表 2 多光谱硫化锌化学机械抛光单因素实验工艺参数

Tab. 2 Single factor experimental parameters of multi-spectral zinc sulfide chemical-mechanical polishing

Variable	Values	Fixed parameters
Polishing time/h	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5	Al ₂ O ₃ , 55 r/min, 15 N
Abrasive type	Al ₂ O ₃ , CeO ₂ , Si ₂ O ₃	3.0 h, 55 r/min, 15 N
Polishing disc speed/rpm	10, 25, 40, 55, 70	Al ₂ O ₃ , 3.0 h, 15 N
Polishing pressure/N	5, 10, 15, 20, 25	Al ₂ O ₃ , 55 r/min, 3.0 h

在此基础上,实验对参数中的典型变量进行多水平组合测试。RSM 是一种结合统计回归与实验设计的多因素分析方法,能够有效评估多个变量之间的交互作用,并构建目标函数的预测模型,从而实现工艺参数的协同优化。选取磨粒粒径(A)、抛光盘转速(B)与抛光压力(C)三项关键工艺参数作为自变量,分别设定三个水平;以表面粗糙度(Sa)和平面度(PV)为响应指标,构建三因素三水平的 Box-Behnken 响应面设计模型。

通过设计共 17 组实验,进行灰色关联度分析。该方法可通过对各工艺参数组合的结果进行无量纲归一化处理,式(1)为所用归一化公式^[24]:

$$x_i'(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)}, \quad (1)$$

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \zeta \Delta_{\max}}, \quad (2)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), \quad (3)$$

其中: $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i'(k)|$ 为差异绝对值; $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$ 分别为所有差异中的最小值和最大值; ζ 为分辨系数,取值区间为 $[0, 1]$,一般取 $\zeta = 0.5$ 。

进一步由式(2)和式(3)计算灰色关联系数与灰色关联度(Grey Relational Grade, GRG),最终对各实验组的综合优劣程度进行排序,灰色关联度值越大,表示该实验方案的整体性能越接近最优^[25]。据此寻优获得最优参数组合,用以指导后续抛光实验与结果验证。

3 单因素实验结果分析

3.1 抛光时间的影响

图 2 展示了抛光时间对工件平面度(PV)和

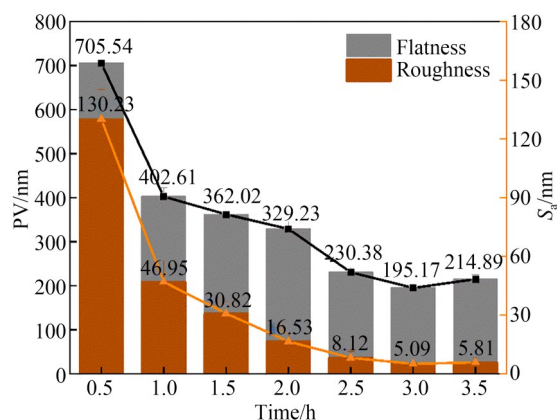


图2 工件平面度及表面粗糙度随抛光时间的变化规律

Fig. 2 Variation of workpiece flatness and surface roughness with polishing time.

表面粗糙度 (S_a) 的影响规律。

随着抛光时间由 0 h 增加至 3 h, 工件的平面度与表面粗糙度均逐渐下降。在 0~1 h 抛光初期, 由于工件表面轮廓起伏较大, 凸起部位最先与抛光垫接触, 而抛光垫与工件间较宽的间隙又便于抛光液中游离磨粒进入并加速材料去除, 因而平面度和粗糙度改善速度较快; 在 1~3 h 时段随着高点被削平, 接触面积扩大、间隙缩小, 局部载荷与磨粒富集程度下降, 此阶段平面度改善速度放缓, 但仍保持温和下降。当抛光时间延长至

3~3.5 h, 平面度趋于稳定; 在 2.5~3.5 h 区间, 表面粗糙度亦趋于稳定。综合考虑抛光效率与表面质量, 可将多光谱硫化锌的最短抛光时间确定 3 h, 此时平面度优化至 195.17 nm, 表面粗糙度降至 5.09 nm。

3.2 抛光液磨粒种类的影响

图 3 展示了不同磨粒种类对工件平面度 (PV) 和表面粗糙度 (S_a) 的影响规律。

采用 Al_2O_3 作为磨粒时, 工件的平面度可控制在 195.15 nm, 为三种磨粒中最佳。这是由于

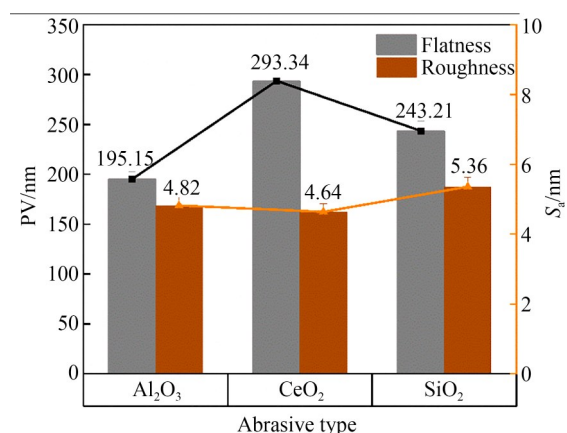


图3 不同磨粒获得的工件平面度及表面粗糙度

Fig. 3 Workpiece flatness and surface roughness obtained by different abrasive particles

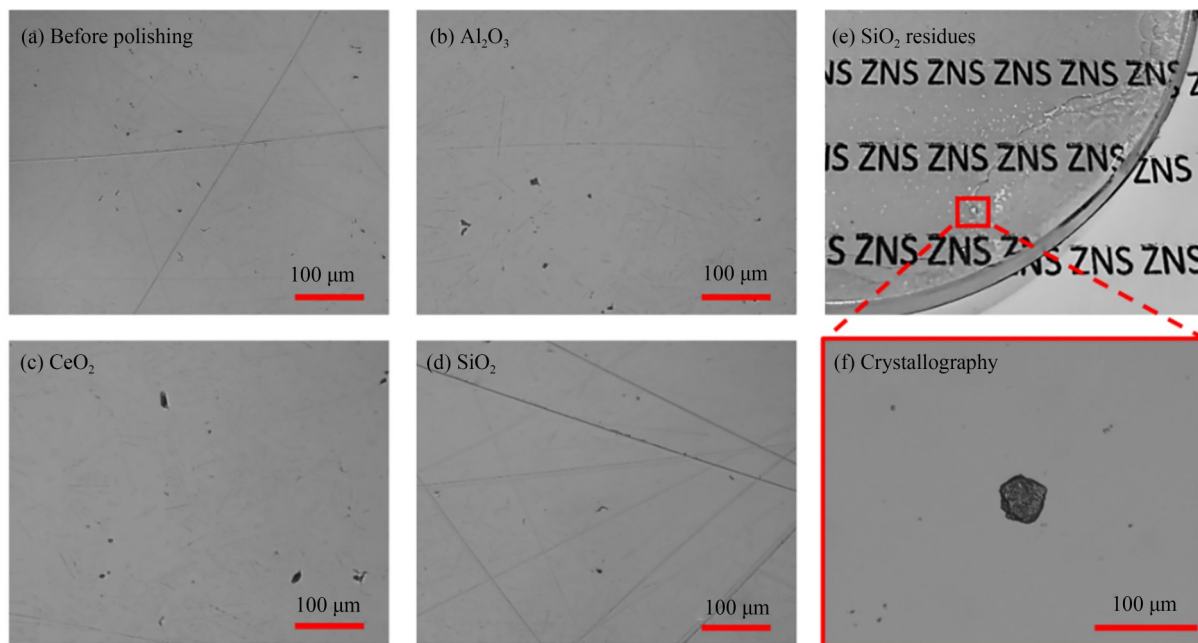


图4 不同磨粒抛光后工件的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of the workpiece after polishing with different abrasive grains.

Al_2O_3 硬度高 (Mohs 9), 远高于 CeO_2 和 SiO_2 (Mohs 7), 这意味着其能在 ZnS 表面实现稳定、均匀的机械去除作用, 有利于平面度控制^[26]。相比之下, 使用 CeO_2 与 SiO_2 抛光机械磨削作用较弱, 所得试样的平面度 (PV) 值较高, 表明面型误差较大。

图 4 中进一步展示了不同磨粒抛光后的表面形貌演变。图 4(a) 展示了抛光前的工件表面, 此时存在较多不规则的点状缺陷及明显的深划痕。图 4(b-d) 显示: 由于 Al_2O_3 和 CeO_2 颗粒结构稳定, 抛光后表面主要为浅划痕与微小凹坑, 未见明显深划伤; 而 SiO_2 抛光后表面出现密集交叉划痕及缺陷聚集, 形貌劣化严重。这主要归因于 SiO_2 在抛光液中易发生团聚^[20], 形成大颗粒团在抛光中容易黏附或嵌入镜面微结构中, 造成磨粒残留和表面损伤, 如图 4(e)~4(f) 所示。结合表面粗糙度进一步分析, Al_2O_3 和 CeO_2 抛光后的粗糙度分别为 4.82 nm 和 4.64 nm, 数值接近且较低, 而 SiO_2 抛光后的粗糙度为 5.36 nm, 显著高于前两者, 反映出其较差的抛光质量。

综上, Al_2O_3 磨粒在兼顾抛光效率、面形控制能力与表面形貌方面具有显著优势。因此本文最终选择 Al_2O_3 作为最优磨粒, 开展后续多参数优化实验, 以进一步提升 ZnS 晶体的抛光质量。

3.3 抛光盘转速的影响

图 5 展示了抛光盘转速对工件平面度 (PV) 与表面粗糙度 (S_a) 的影响规律。

由图 5 可知, 当转速由 10 r/min 增加至约 55

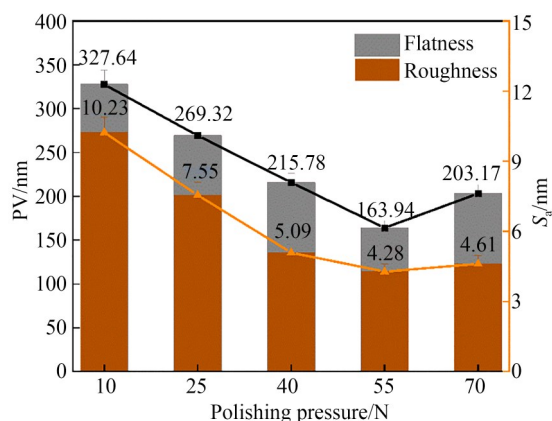


图 5 工件平面度及表面粗糙度随抛光盘转速的变化规律
Fig. 5 Variation of workpiece flatness and surface roughness with Polishing disc speed

r/min 时, 工件的平面度和表面粗糙度同步降低。原因在于相对线速度提升后, 磨粒与工件间的有效切削轨迹增多, 单位时间内材料去除率 (MRR) 增大, 工件凸起部位被更快削平。同时, 抛光垫弹性变形与流体润滑效应共同增强, 使平坦化能力提高, 表面位相差持续减小。当转速继续升至 70 r/min 时, 材料去除反而减缓, 工件的平面度和表面粗糙度随抛光盘转速的增加而上升。抛光盘转速为 55 r/min 时出现了实测的最优点, 工件平面度最优达到 163.94 nm, 工件表面粗糙度最优达到 4.28 nm, 实现了平面度与粗糙度的协同最小化。为了使多光谱硫化锌可在保证足够材料去除的同时, 避免因热效应带来的面型劣化, 转速选择区间应该设置在 45~65 r/min 范围内。

3.4 抛光压力的影响

图 6 展示了抛光压力对工件平面度 (PV) 与表面粗糙度 (S_a) 的影响规律。

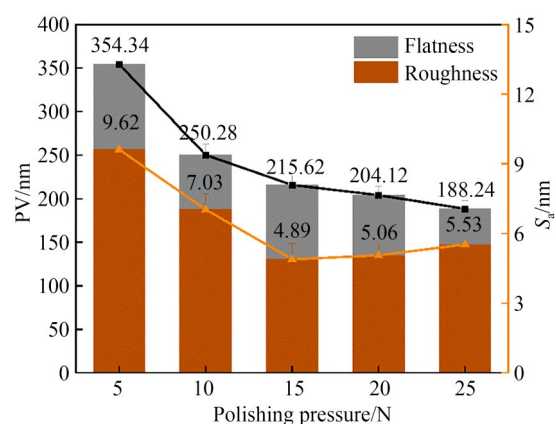


图 6 工件平面度及表面粗糙度随抛光压力的变化规律
Fig. 6 Changes of workpiece flatness and surface roughness with polishing pressure.

随着抛光压力由 5 N 提升至 25 N, 工件的平面度呈单调下降趋势, 在最高压力 25 N 时 PV 降至 156 nm。而表面粗糙度则先降后升, 在 15 N 达到最小值 4.89 nm, 随后随着压力进一步增大而回升。这是由于较高的抛光压力增强了工件与抛光垫的贴合度, 增大了界面摩擦力与切削轨迹密度, 并因摩擦热的积累使抛光液中的化学反应加剧, 共同提高了材料去除和表面平坦化。当抛光压力在 5~15 N 时, 抛光压力的增大使得机

械磨削作用增强,化学反应生成的软质层被去除,表面粗糙度得到改善。然而,当抛光压力超过约 15 时,磨粒的切入深度随载荷叠加显著增加,机械刻画占主导,导致微观凹坑和划痕加剧, S_a 反弹升高,表面粗糙度逐渐增大。基于平面度与粗糙度的协同优化,后续实验将抛光压力设定在 12~20 N 区间。

4 响应曲面实验结果与分析

4.1 响应曲面实验设计及方差分析

通过单因素实验可知,抛光时间、磨粒种类、抛光压力和抛光盘转速都会对多光谱硫化锌的抛光效果有显著影响。抛光时间固定为 3 h,采用 Al_2O_3 磨粒,抛光盘转速区间在 45~65 r/min,抛光压力区间在 12~20 N 时能达到较好的抛光效果。为系统分析多因素及其交互作用对抛光后表面质量的影响,基于 RSM 模型设计多因素组合实验,以 PV 和 S_a 作为评价指标,探究各个因素对实验结果的影响程度,探究磨粒粒径、抛光盘转速和抛光压力 3 因素 3 水平下对实验结果的影响。实验设计及结果见表 3。

为评估响应曲面法分析结果的准确性,对上述实验数据进行方差分析,结果如表 4 和表 5 所示。表 4 中 A,B,C 分别代表 Al_2O_3 磨粒粒径、抛光盘转速及抛光压力, F 为分布检验统计量, P 为模型可靠性统计检验值。通常来说,数学预测模型的 P 值越小代表对应的模型项越显著, P 值小于或等于 0.05 代表显著,同时失拟项的 P 值在 0.05 以上,表明数学预测模型具有可靠性, F 值直接反映各因素对响应值的影响程度。表 4 中的方差分析结果表明,工件平面度模型的 P 值小于 0.001,表明模型高度显著^[23]。模型决定系数 $R^2=0.988\ 0$,修正拟合系数 $R^2_{Adj}=0.972\ 6$;表面粗糙度模型的 P 值小于 0.000 1,表明模型高度显著。模型决定系数 $R^2=0.982\ 1$,修正拟合系数 $R^2_{Adj}=0.950\ 6$;说明所建立模型的拟合程度较好,预测值与实际值之间具有较高的相关性,该模型可较好地优化抛光工艺参数。各因素对多光谱硫化锌工件平面度的影响程度从大到小依次为:抛光盘转速、抛光压力、磨粒粒径;对多光谱硫化锌表面粗糙度的影响程度从大到小依次为:抛光盘转速、磨粒粒径、抛光压力。进一步通过 Design-Expert 软件对实验数据进行拟合分析,

表 3 响应曲面实验设计及结果

Tab. 3 Response surface experimental design and results.

Number	Abrasive size/ μm	Disc speed/($r \cdot min^{-1}$)	Pressure/N	Flatness/nm	Roughness/nm
1	0.1	65	16	179.81	4.59
2	1	45	20	192.64	4.42
3	0.5	55	12	188.54	3.91
4	1	55	20	166.45	4.76
5	0.5	55	16	170.16	3.71
6	1	65	12	185.82	4.62
7	0.5	65	16	173.36	4.78
8	1	65	16	168.23	4.88
9	0.5	45	12	214.28	3.64
10	0.1	45	20	209.36	4.07
11	0.1	45	12	227.84	3.03
12	0.1	55	20	174.48	4.28
13	0.1	55	12	194.26	3.36
14	0.5	45	16	203.39	3.41
15	0.5	55	20	168.25	4.62
16	1	45	12	201.37	3.85
17	1	65	20	164.52	4.91

表 4 工件平面度回归模型的方差分析结果
Tab. 4 Results of analysis of variance of workpiece flatness regression model.

Source of variance	Square sum	Degree of freedom	Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
Model	6 607. 71	9	734. 19	64. 21	<0. 000 1
A	626. 26	1	626. 26	54. 77	0. 000 1
B	2 292. 30	1	12	200. 47	<0. 000 1
C	663. 35	1	20	58. 01	0. 000 1
AB	87. 50	1	16	7. 65	0. 027 8
AC	86. 18	1	12	7. 54	0. 028 7
BC	3. 67	1	3. 67	0. 321 1	0. 588 6
A ²	22. 04	1	22. 04	1. 93	0. 307 6
B ²	691. 51	1	691. 51	60. 48	0. 000 1
C ²	14. 22	1	14. 22	1. 24	0. 201 6
Residual	80. 04	7	11. 43		
Cor Total	6 687. 76	16			

表 5 表面粗糙度回归模型的方差分析结果
Tab. 5 Results of analysis of variance of surface roughness regression model.

Source of variance	Square sum	Degree of freedom	Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
Model	5. 36	9	0. 5960	15. 47	<0. 000 1
A	0. 379 7	1	626. 26	9. 86	0. 001 4
B	2. 46	1	2. 46	63. 90	<0. 000 1
C	1. 02	1	1. 02	26. 60	0. 016 3
AB	0. 088 9	1	0. 088 9	2. 31	0. 172 4
AC	0. 094 8	1	0. 094 8	2. 46	0. 028 7
BC	0. 017 3	1	0. 017 3	0. 448 8	0. 524 4
A ²	0. 028 5	1	0. 028 5	0. 740 7	0. 417 9
B ²	0. 267 2	1	0. 267 2	6. 94	0. 033 7
C ²	0. 213 8	1	0. 213 8	5. 55	0. 050 6
Residual	0. 269 6	7	0. 038 5		
Cor Total	5. 63	16			

可得出工件平面度和表面粗糙度所对应的实际数学预测模型如式(4)和式(5)所示:

$$\begin{aligned} X= &+173.97-8.30 \times A-16.26 \times B-8.95 \times C+3.80 \times A B+ \\ &3.58 \times A C-0.8270 \times B C+2.59 \times A^2+14.07 \times B^2+2.29 \times C^2, \end{aligned} \quad(4)$$

$$\begin{aligned} Y= &+3.90+0.2045 \times A+0.5329 \times B+0.3518 \times[C-0.1212 \times A B-0.1188 \times A C- \\ &0.0567 \times] B C-0.0932 A^2+0.2765 \times B^2+0.2805 \times C^2, \end{aligned} \quad(5)$$

其中: X 为抛光后表工件平面度值; Y 为抛光后表面粗糙度值。

4.2 表面质量的响应曲面法分析

为进一步揭示抛光参数对多光谱硫化锌表面质量的影响机制,以表面粗糙度(S_a)与平面度(PV)为响应值,分别构建了磨粒粒径、抛光盘转速及抛光压力之间的两两交互作用响应面模型。图中设定其中一个因子固定在中心水平,通过三维响应曲面图分析各参数对表面质量的影响趋势。图 7 展示了 PV 与各因素之间的交互响应关系。图 7(a)显示,当粒径较小且转速较低时,得到的面形最差。而当粒径缩小至 0.1~0.5 μm 且盘速提升至 55~60 r/min 区间时,PV 降至约 140~150 nm,为面形最优区域。图 7(b)显示,当转速提高、压力从 12 N 增加至 20 N 时,PV 呈持续下降趋势,这是由于两因素共同提高了单位时

间的有效磨削与抛光液作用,表现出较强的协同平面控制效果。图 7(c)表明随着压力与粒径增

大, PV 显著降低,显示出更强的面型修整能力,有助于提高面型修整效率。

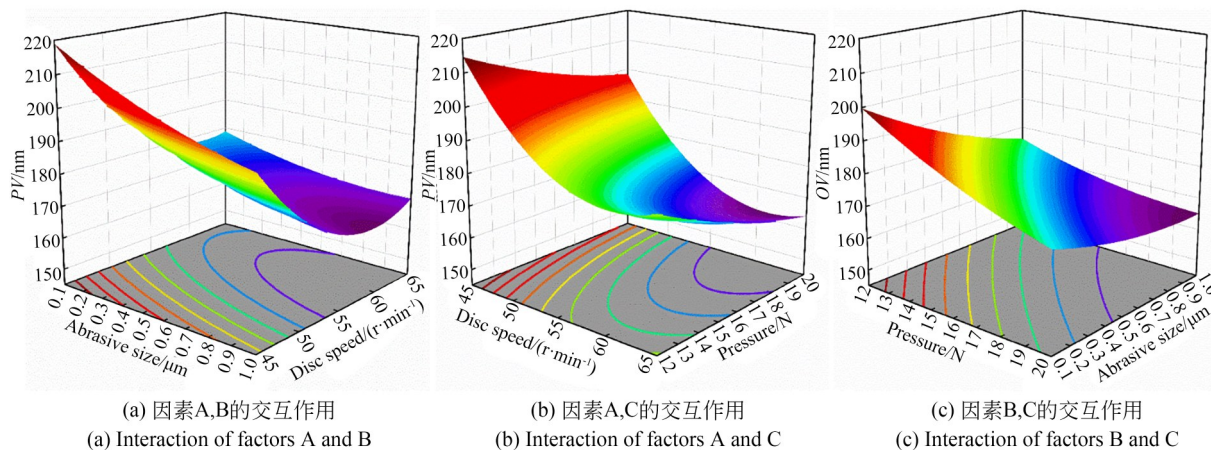


图 7 因素间交互作用对 PV 的响应曲面图

Fig. 7 Plot of inter-factor with PV response surfaces

图 8 显示了 S_a 随抛光参数的变化趋势。图 8 (a) 可见,随着磨粒粒径增大和抛光盘转速提高, S_a 呈显著上升趋势。当粒径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 且抛光盘转速维持在中等区间 ($45 \sim 55 \text{ r/min}$) 时, S_a 值处于较低水平。这表明大粒径磨粒更易在表面产生微切削痕迹,且高转速下,材料去除速率虽然提升,但磨粒冲击加剧了表面损伤。图 8(b) 显示,在中低压力 ($15 \sim 20 \text{ N}$) 与适当转速组合条件下, S_a 最小。这是由于高转速和高压力会增强单颗磨粒切入深度与划伤风险,但在适中区间,两者形成协同平滑效应,有利于降低表面粗糙度。图 8(c) 展示了在小粒径 ($0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$) 与中等压力组合下, S_a 最低;而随着粒径与压力的进一步

增加, S_a 呈非线性上升趋势。这说明在过高压力条件下,大粒径磨粒的压入深度加剧,易形成凹坑与划痕,而小粒径配合适中压力能增强柔性研磨,达到最优粗糙度。

为进一步验证响应曲面优化结果的抛光效果,选取每组交互响应面图中对应表面粗糙度 (S_a) 或平面度 (PV) 最低点处的参数组合进行实验,并对抛光后工件表面进行形貌观察与对比分析。实验基于初始表面形貌如图 4(b) 所示的样品开展,可观察到其存在明显的沟槽与少量不均匀划痕。实验结果如图 9 所示,六组最优响应点对应的表面形貌优于其他区域参数且呈现出一定差异性:图 9(a)~9(c) 展示了以 PV 最小点参

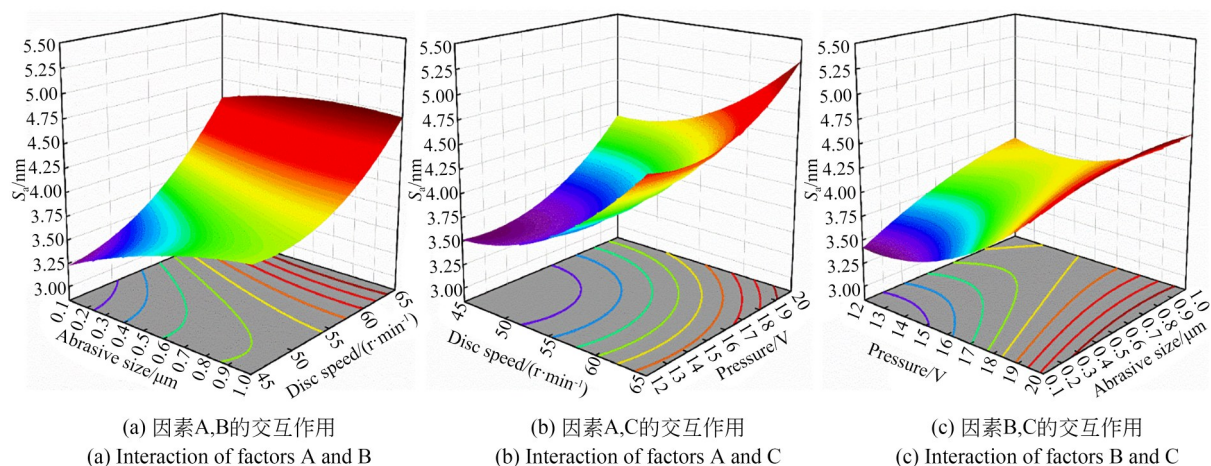


图 8 因素间交互作用对 S_a 的响应曲面图

Fig. 8 Plot of inter-factor with S_a response surfaces

数组组合表面局部出现轻微压痕现象,仍存在较多密集的凹坑;而在 S_a 最小点参数下抛光后的表面则表现为微凹坑少、表面颗粒残留较少,整体粗糙度低,如图 9(d)~9(f)所示。这表明表面粗糙

度更依赖于小粒径与中等工艺参数的柔性研磨机制,而平面度则更依赖于大粒径、高压和高转速组合下的快速平整作用。因此,在优化过程中需权衡 S_a 与 PV 的响应特性。

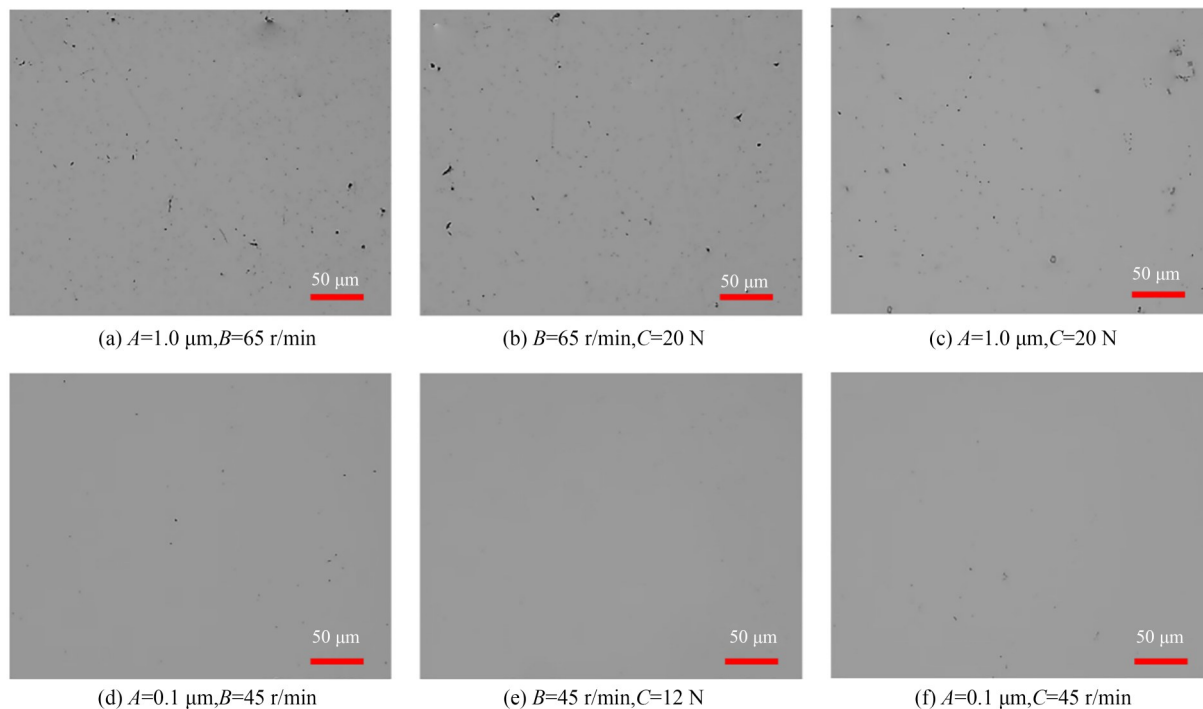


图 9 PV 和 S_a 响应曲面图最低点处参数组合的表面形貌

Fig. 9 Surface morphology of parameter combinations at the lowest point of the PV and S_a response surface maps.

4.3 优化条件验证

通过响应曲面模型对各个因素在材料去除机制、缺陷控制能力和表面调平效率方面作用机理的综合分析,小粒径 Al_2O_3 ($0.1\sim0.5\mu m$)、中高转速($55\sim65\text{ r/min}$)以及中等至偏高抛光压力($15\sim20\text{ N}$)构成了一组能够协同优化表面粗糙度(S_a)与平面度(PV)的优选参数组合。小粒径磨粒切削轨迹细密,有利于降低划痕深度并显著降低局部应力集中带来的凹坑风险。中高转速增强了材料去除效率,在搭配小粒径磨粒时,避免了因磨粒惯性过大而产生局部冲击。而适中压力有助于改善磨粒嵌入工件表面的稳定性,在此压力范围内,材料去除过程受到适度增强,有利于消除凸起区域的几何突起,提高整体平面度;而压力若进一步增大,则会导致单颗磨粒切入深度过深,反而加剧划痕与缺陷生成,不利于保持低粗糙度。

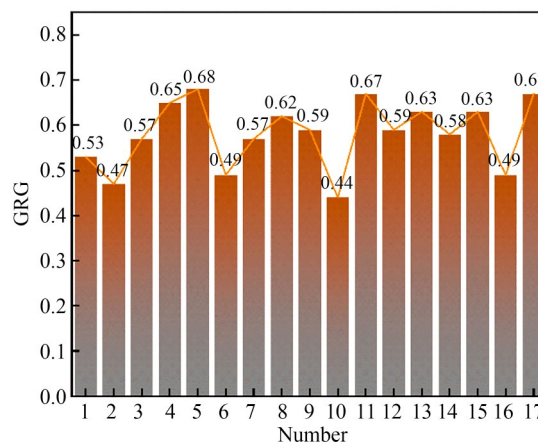


图 10 17 组实验结果灰色关联度分析

Fig. 10 Grey relational analysis of experimental results from 17 groups

图 10 展示了 17 组实验方案在响应曲面设计基础上,通过对平面度与粗糙度指标归一化后进

行灰色关联分析所得到的灰色关联度结果。结果表明,第5组实验(磨粒粒径为 $1.0\text{ }\mu\text{m}$,抛光压力为 16 N ,转速为 55 r/min)的实验在平衡平面度与表面粗糙度方面表现最优,灰色关联度最高,为 0.68 ,表明其在多目标协同优化中具备较强综合优势,为本研究中的最优参数组合。选用该参数对多光谱硫化锌的表面粗糙度与平面度进行协同优化,在降低表面粗糙度的同时,也保障了大范围面形控制的能力,是实现高表面质量的最优工艺窗口。

为验证响应曲面法分析所得最优参数组合的有效性,选取粒径为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 抛光液,配合抛光盘转速 55 r/min 和抛光压力 16 N 进行实验验证。实验结果如图10和图11显示,工件平面度PV由 492.12 nm 显著降低至 112.49 nm 。同时,表面粗糙度 S_a 显著优化,由 3.03 nm 继续降至 1.11 nm ,达到镜面级别的抛光效果。该结果明显优于单因素最优区域中的 S_a 或PV极小值,表明在多因素协同控制下,该组合实现了多光谱硫化锌高表面质量的协同优化。

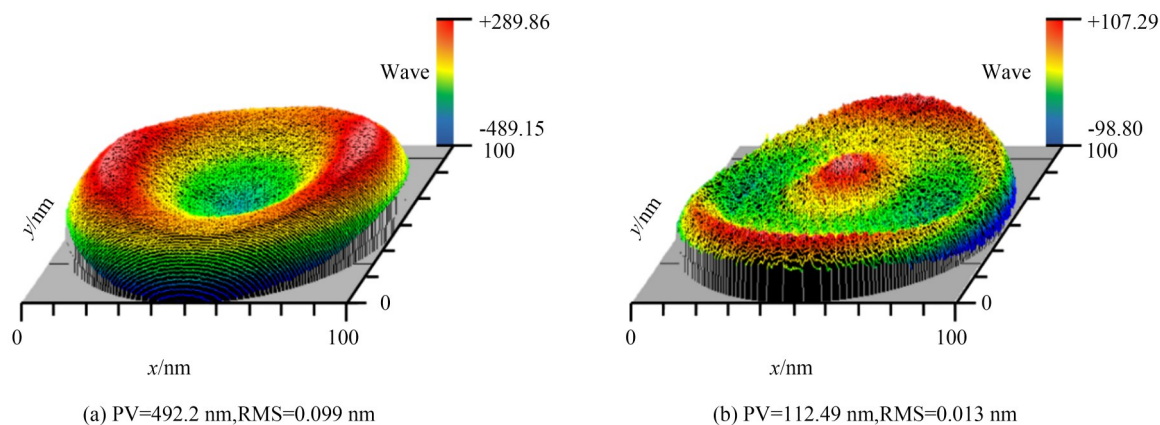


图 11 多光谱硫化锌工件平面度抛光前后对比

Fig. 11 Multi-spectral ZnS workpiece flatness comparison before and after polishing.

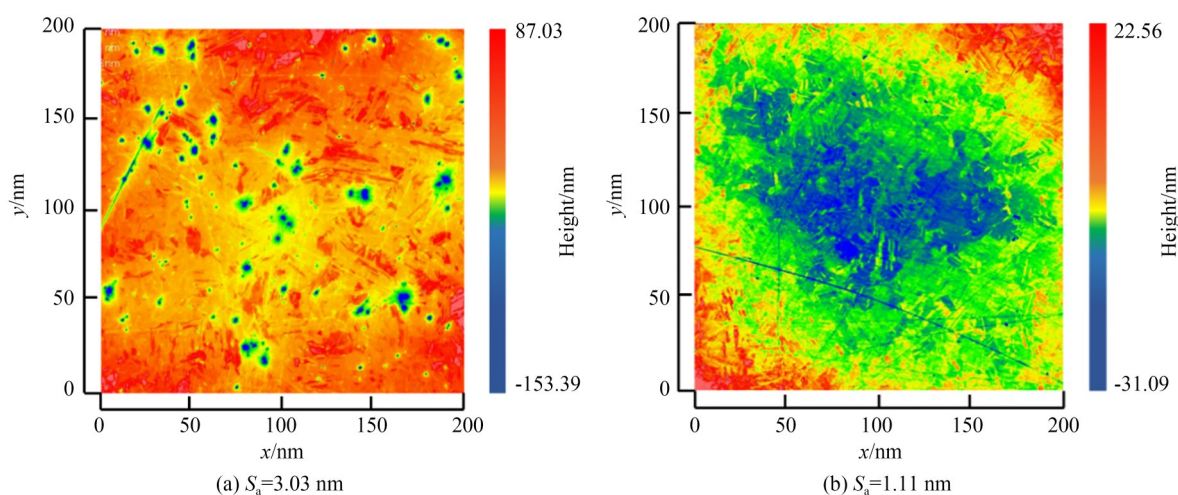


图 12 多光谱硫化锌表面粗糙度抛光前后对比

Fig. 12 Multi-spectral ZnS surface roughness comparison before and after polishing.

5 结 论

本文围绕多光谱硫化锌晶体的化学机械抛光(CMP)工艺,开展了以表面平面度与粗糙度为核心指标的表面质量优化研究。通过单因素实验明确了磨粒粒径、抛光盘转速及抛光压力对抛光效果的基本影响规律,并以此为基础,采用响应曲面法设计实验,系统探讨了三因素及其交互作用对表面质量的协同影响。研究得出以下结论:

(1)抛光盘转速是影响多光谱硫化锌表面平整度与粗糙度的主导因素,其次为抛光压力和磨粒粒径。适当提升转速和压力有利于材料去除与表面调平,但过高则可能引起表面损伤。

(2)RSM 响应曲面法表明,较小粒径(0.1~0.5 μm)的 Al_2O_3 磨料配合中高转速(55~65

rpm)和中等至偏高压力(15~20 N)可实现表面粗糙度和面形误差的协同优化。

(3)通过灰色关联度分析法,在优化参数组合(0.5 μm Al_2O_3 , 55 rpm, 16 N)下进行实验验证,获得的工件平面度 PV 为 112.49nm,表面粗糙度 S_a 降至 1.11 nm,显著优于初始工艺结果,验证了模型的可靠性与优化策略的有效性。

作者贡献说明:

任佳瞳:测量实验的设计,论文构思和撰写;

秦琳:测量方法的提出,实验结果检测;

朱蓓蓓:数据分析及实验验证;

蔡根:论文构思和编辑写作;

楚建宁:形式分析及方法论;

张楚鹏:调查研究及写作指导;

陈肖:实验支持及论文审。

参考文献:

- [1] 王敦青,焦秀玲,陈代荣. 硫化锌性质、用途及制备方法概述[J]. 山东化工, 2003, 32(2): 12-15.
WANG D Q, JIAO X L, CHEN D R. Brief introduction on properties, synthesis and applications of zinc sulfide [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2003, 32(2): 12-15. (in Chinese)
- [2] 罗贞礼. 红外光学材料硫化锌概览[J]. 新材料产业, 2012(8): 41-44.
LUO Z L. Overview of infrared optical material zinc sulfide [J]. *Advanced Materials Industry*, 2012 (8): 41-44. (in Chinese)
- [3] 刘珂,李丽娟. 空空导弹与红外导引系统发展评述[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 5-10.
LIU K, LI L J. Development analysis of air to air missile and infrared guidance[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 5-10. (in Chinese)
- [4] 刘蒙,张伟科,黄立,等. 高超声速飞行器红外波段及窗口选择(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 74-80.
LIU M, ZHANG W K, HUANG L, et al. Infrared waveband and window selection for hypersonic vehicle (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 74-80. (in Chinese)
- [5] 谢晋,耿安兵,熊长新,等. 红外线聚光非球面透镜的单点金刚石镜面切削方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 566-569.
XIE J, GENG A B, XIONG C X, et al. Single-point diamond mirror turning of infrared aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 566-569. (in Chinese)
- [6] ZONG W J, CAO Z M, HE C L, et al. Theoretical modelling and FE simulation on the oblique diamond turning of ZnS crystal[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 100: 55-71.
- [7] 黄金库,李军,黄建东,等. 不同粒径金刚石固结磨料抛光硫化锌晶体研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 13-15.
HUANG J K, LI J, HUANG J D, et al. Research on diamond fixed polishing abrasive size for ZnS crystal [J]. *Machine Building & Automation*, 2017, 46(2): 13-15. (in Chinese)
- [8] 李标,李军,高平,等. 游离磨料和固结磨料研磨后亚表面裂纹层深度研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 895-898, 905.
LI B, LI J, GAO P, et al. Study on depth of sub-surface crack layer by free and fixed abrasive lapping [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(7): 895-898, 905. (in Chinese)
- [9] ZHANG Y N, LIN B, LI Z C. An overview of recent advances in chemical mechanical polishing (CMP) of sapphire substrates [J]. *ECS Transactions*, 2013, 52(1): 495-500.
- [10] GUO W J, TONG Y, JIN Y Z, et al. Research

- of annular polishing asymmetric ZnS plane window [C]. *8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. Suzhou, China. SPIE, 2016.
- [11] ZHAO D W, HE Y Y, WANG T Q, *et al.* Wafer bending/orientation characterization and their effects on fluid lubrication during chemical mechanical polishing [J]. *Tribology International*, 2013, 66: 330-336.
- [12] KIM H J, JEONG H D, LEE E, *et al.* Pad surface characterization and its effect on the tribological state in chemical mechanical polishing [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 257: 383-388.
- [13] 陈琦, 付秀华, 贾宗合, 等. 硫化锌晶体加工工艺技术研究 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(S2): 120-123, 119.
- CHEN Q, FU X H, JIA Z H, *et al.* Study on processing technology of zinc sulfide crystal [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36 (S2): 120-123, 119. (in Chinese)
- [14] 陈冰, 郭兵, 赵清亮, 等. 热压硫化锌的超精密磨削加工 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2109-2116.
- CHEN B, GUO B, ZHAO Q L, *et al.* Ultra-precision grinding of hot-pressed zinc sulfide [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (8): 2109-2116. (in Chinese)
- [15] 蔡根, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 多光谱硫化锌光学窗口离子束抛光工艺研究及参数优化 [J]. 光学精密工程, 2024, 32(14): 2247-2255.
- CAI G, ZHU B B, QIN L, *et al.* Ion beam polishing process parameters optimization and polishing experiment of ZnS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(14): 2247-2255. (in Chinese)
- [16] 饶志敏. 轮式工具抛光硫化锌非球面关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- RAO Z M. *Research on Key Technology of Polishing Zinc Sulfide Aspheric Surface with Wheeled Tools* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] DEGROOTE-NELSON J, DRUCKER J A, HAEFNER A A, *et al.* Varying electro-kinetic interactions to achieve predictable removal rates and smooth surfaces on ZnS [C]. *Optical Manufacturing and Testing VIII*. San Diego, CA. SPIE, 2009.
- [18] 黄建东. 硫化锌晶体固结磨料抛光研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- HUANG J D. *Study on Consolidation Abrasive Polishing of Zinc Sulfide Crystal* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [19] 李军, 朱镛, 陈创天. LBO 晶体超光滑表面抛光机理 [J]. 人工晶体学报, 2007, 36(1): 18-21.
- LI J, ZHU Y, CHEN C T. Mechanism of super smooth surface polishing for LBO crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36 (1): 18-21. (in Chinese)
- [20] CHU J N, REN J T, LIU C L, *et al.* The performance of a novel nano-SiO₂ dispersion solutions for the chemical-mechanical polishing of sapphire [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 709: 163831.
- [21] 李岩, 康仁科, 高航, 等. 碲锌镉晶体高效低损伤 CMP 工艺研究 [J]. 人工晶体学报, 2009, 38(2): 416-421.
- LI Y, KANG R K, GAO H, *et al.* High-efficiency and low-damage chemical mechanical polishing process of CdZnTe crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2009, 38(2): 416-421. (in Chinese)
- [22] 王占银, 孔勇发, 陈绍林, 等. 大直径铌酸锂晶片的化学机械抛光研究 [J]. 人工晶体学报, 2006, 35(1): 99-103.
- WANG Z Y, KONG Y F, CHEN S L, *et al.* Study on the chemical mechanical polishing of large diameter lithium niobate wafer [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35 (1): 99-103. (in Chinese)
- [23] 郭江, 徐海俊, 杨哲, 等. 6061 铝合金近原子尺度化学机械抛光工艺优化 [J]. 光学学报, 2024, 44(5): 189-200.
- GUO J, XU H J, YANG Z, *et al.* Optimization of chemical mechanical solution for close-to-atomic scale polishing of 6061 aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44 (5): 189-200. (in Chinese)
- [24] 罗党, 刘思峰. 灰色关联决策方法研究 [J]. 中国管理科学, 2005, 13(1): 101-106.
- LUO D, LIU S F. Study on the method for grey incidence decision-making [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2005, 13(1): 101-106. (in Chinese)

- [25] 彭得兵,唐海,李呈祥,等. 灰色关联法在剩余油分布研究中的应用[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(3): 133-136.

PENG D B, TANG H, LI C X, *et al.* Application of grey association analysis to the study of remaining oil distribution[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(3): 133-136. (in Chinese)

- [26] 陈杨,陈建清,陈志刚,等. 纳米磨料对硅晶片的超精密抛光研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 332-335.

CHEN Y, CHEN J Q, CHEN Z G, *et al.* Study on ultra-precision polishing of silicon wafer by nano-sized abrasives[J]. *Tribology*, 2004, 24(4): 332-335. (in Chinese)

作者简介:



任佳瞳(2000—),女,山西晋中人,湖北工业大学机械工程学院研究生在读,主要从事超精密加工与装备研究。
E-mail: rjiatong89@163.com

通讯作者:



陈肖(1987—),男,湖北荆州人,博士,教授,硕士生导师,2011年、2014年于华中科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事超精密制造方面的研究。E-mail: chenxiao1987jz@163.com