

文章编号 1004-924X(2025)20-3214-14

基于 Halbach 阵列的 K9 玻璃磁流变抛光方法研究

靳淇超¹, 袁 潇^{1,2}, 芦顺利³, 吕 雷^{1,2}, 钟太阳¹,
刘 瑾¹, 郭 磊^{1,2}, 陈瑛贤^{1*}

- (1. 长安大学 道路施工技术装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 西安交通大学 精密微纳制造技术全国重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 通用技术集团机床工程研究院有限公司, 北京 100102)

摘要: 为提升磁流变抛光的励磁性能及加工质量, 提出一种基于 Halbach 阵列的永磁体排列方式, 并分析工艺参数对 K9 玻璃抛光性能的影响规律。通过磁场仿真对比 Halbach 阵列与传统 N-S 极交替阵列及内外交替阵列的磁场强度、磁通密度模、梯度分布及碳基铁粉受力情况; 结合单因素实验, 探讨工件转速、磁场转速、工作间隙及励磁间隙对表面粗糙度和材料去除率的影响规律。Halbach 阵列扩大磁场有效作用面积, 保持良好均匀性, 提高磁场强度及磨粒受力, 展现优越励磁性能; 工件转速、磁场转速和工作间隙增加时, 表面粗糙度呈先降后升, 材料去除率先升后降; 励磁间隙增大则导致粗糙度持续升高、材料去除率下降。在工件转速 650 r/min、磁场转速 70 r/min、工作间隙 1.2 mm、励磁间隙 4 mm 及抛光 30 min 条件下, K9 玻璃表面粗糙度达到 0.029 7 μm , 材料去除率为 51.928 nm/min。Halbach 阵列励磁方式及其抛光工艺有效提升了磁流变抛光性能。

关键词: 磁流变抛光; Halbach 阵列; K9 玻璃; 表面粗糙度; 材料去除率

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253320.3214

CSTR: 32169.14.OPE.20253320.3214

Study on magnetorheological polishing method for K9 glass utilizing Halbach array

JIN Qichao¹, YUAN Xiao^{1,2}, LU Shunli³, LÜ Lei^{1,2}, ZHONG Taiyang¹,
LIU Jin¹, GUO Lei^{1,2}, CHEN Zhenxian^{1*}

- (1. MOE Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment,
Chang'an University, Xi'an 710064, China;
 2. State Key Laboratory For Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710054, China;
 3. General Technology Group Machine Tool Engineering Research Institute, Beijing 100102, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhenxian_chen@chd.edu.cn

Abstract: To enhance the excitation performance and processing quality of magnetorheological polishing, a Halbach array-based permanent magnet arrangement is proposed, and the influence of process parame-

收稿日期: 2025-07-24; 修订日期: 2025-08-14.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51805044); 陕西省自然科学基金(No. 2025JC-YBMS-389); 中国博士后科学基金(No. 2024M762450)

ters on the polishing performance of K9 glass is investigated. Magnetic field simulations were conducted to compare the Halbach array, traditional N-S pole alternating array, and inner-outer alternating array in terms of magnetic field strength, magnetic flux density magnitude, gradient distribution, and the force acting on carbonyl iron particles. Combined with single-factor experiments, the effects of workpiece rotation speed, magnetic field rotation speed, working gap, and excitation gap on surface roughness and material removal rate were systematically studied. The results indicate that the Halbach array expands the effective acting area of the magnetic field, maintains good uniformity, and enhances both magnetic field strength and abrasive particle force, thereby exhibiting superior excitation performance. With increasing workpiece rotation speed, magnetic field rotation speed, and working gap, the surface roughness decreases initially and then increases, while the material removal rate increases at first and then decreases. As the excitation gap increases, the surface roughness keeps rising and the material removal rate declines. Under the conditions of a workpiece rotation speed of 650 r/min, magnetic field rotation speed of 70 r/min, working gap of 1.2 mm, excitation gap of 4 mm, and a polishing duration of 30 min, the surface roughness of K9 glass reaches $0.0297\text{ }\mu\text{m}$, and the material removal rate is 51.928 nm/min . The Halbach array excitation method and its corresponding polishing process effectively improve the performance of magnetorheological polishing.

Key words: magnetorheological polishing; Halbach array; K9 glass; surface roughness; material removal rate

1 引 言

K9 玻璃因其优异的机械强度和化学稳定性,被广泛应用于航空航天、光电子及科研医疗等领域^[1]。作为典型的硬脆材料,K9 玻璃在加工过程中易产生微观裂纹和残余应力,导致亚表面损伤,进而影响其性能与可靠性^[2-3]。传统抛光技术在加工 K9 玻璃时,容易引发划痕和亚表面缺陷,且难以保证加工精度和一致性,难以满足其对高质量表面的严格要求^[4]。

磁流变抛光作为一种超精密加工技术,具备加工质量高、无亚表面损伤、材料去除过程稳定且可控等优势^[5]。随着该技术及新型复合抛光技术的不断发展,K9 玻璃等硬脆光学材料的高精度、高质量加工需求得到了有效满足^[6-7]。其中,励磁装置作为磁流变抛光系统的核心组成部分,其磁极排列方式直接影响抛光区域内磁场的强度、分布及方向,进而影响磁流变液的磁流变效应和柔性抛光头的形态特征,最终决定材料去除效率与加工质量,是实现高效稳定抛光的关键因素。Pan 和 Nie 等^[8-9]通过设计由多个磁体单元组成的磁极阵列,优化了磁场分布,显著扩展了抛

光区域面积,提升了磁流变液的响应效果,从而大幅提高了加工效率和表面质量。Liu 等^[10]进一步探讨了不同磁极排列方式对工件表面质量的影响,揭示了排列方式对工件表面平整度的显著作用。Zhai 等^[11]则创新性地将磁极排列拓展至三维空间,采用半球内交叉渐开线和交叉堆叠两种阵列设计,系统分析了磁极数量及排列方式对蓝宝石半球磁流变抛光性能的影响,并通过仿真与实验验证了其优越性。

Halbach 阵列通过将磁体单元按照 90° 有序旋转排列,实现磁通量向目标区域的定向集中,同时减弱非目标区域的磁通量,从而形成单侧强磁场。这种结构有效提升了磁场强度与梯度,优化了磁场能量的利用效率^[12-14]。刘乐等^[15]基于 Halbach 阵列优化磁场设计,显著增强了磁场的强度和均匀性,有效解决了传统永磁磁性磨具存在的磁场强度不足及磁能利用率低的问题,从而显著提升了工件表面的加工效率。Xie 等^[16]建立了基于 Halbach 阵列的动态励磁装置设计方法与数学模型,结合仿真与实验对磁场布局进行了优化,验证了该装置在磁流变抛光中实现了更高的磁场强度及梯度变化,大幅提升了磁场利用效

率。Guo 等^[17-18]提出了一种基于 Halbach 阵列励磁的平面磁流变抛光技术,通过对比不同磁极阵列的磁场分布及抛光性能,验证了该技术在高效抛光 K9 光学玻璃方面的优越性。Duy 等^[19-20]设计了一种结合改良 Halbach 磁极阵列与滑块曲柄机构的磁流变抛光系统,实现了磁场的均匀分布与高度集中,显著提升了工件的抛光效率与表面质量。

本文针对平面磁流变抛光系统,提出了一种基于 Halbach 阵列的非圆周对称全局励磁方案。该方案在 z 向永磁体内外圈增设同向永磁体,并将阵列周期数增加至 8,实现了磁场分布与抛光盘尺寸的匹配,提升了磁场有效面积及加工区域覆盖率。该排列方式不仅有助于调控磁流变液行为,还有利于抛光装置更为紧凑的布局设计。基于此,本文通过磁场仿真,系统对比了该阵列与传统 N-S 极交替阵列及 N-S 极内外交替阵列的磁场强度、磁通密度模、碳基铁粉磁性颗粒受力状态及磁场梯度特性等方面的差异,进行了综合评价。并进一步结合 Halbach 阵列励磁装置,研究了工件转速、磁场转速、工作间隙及励磁间隙等关键工艺参数对 K9 玻璃表面粗糙度及材料去除率的影响规律。

2 磁流变抛光原理与励磁装置

2.1 磁流变抛光原理与装置

磁流变抛光的原理示意如图 1 所示。该抛光装置主要由夹具、工件、磁流变液、抛光盘及励磁装置等组成。抛光盘与励磁装置采用一体化设计,二者以相同转速 n_2 实现同步旋转。工件通过加热软化的石蜡固定于夹具上,工件以转速 n_1 旋转运动。待加工工件表面与抛光盘表面之间的

$$F_i^m = \sum_{j \neq i} \left[\frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^5} (m_i \cdot m_j - 5m_{ir} m_{jr}) r_{ij} + \frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^4} (m_{ir} m_j + m_{jr} m_i) \right], \quad (2)$$

其中: μ_0 为真空磁导率, r_{ij} 为铁粉颗粒 i 和铁粉颗粒 j 间的相对位置矢量,方向由 j 指向 i , m_{ij} 和 m_{ji} 分别为铁粉颗粒 i 和铁粉颗粒 j 的磁矩在 r_{ij} 方向上的分量大小,磁矩表达式为:

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \chi H, \quad (3)$$

其中: R 为铁粉颗粒半径, χ 为磁流变液磁导率, H 为外加磁场的磁场强度。

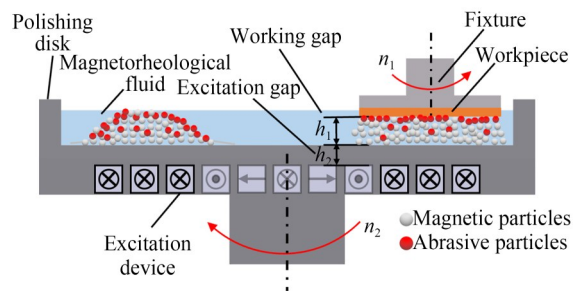


图 1 磁流变抛光原理图

Fig. 1 Principle diagram of magnetorheological polishing

距离 h_1 称为工作间隙,可通过工件的上下移动实现精确调节。抛光盘表面与励磁装置上表面之间的间隙 h_2 为励磁间隙。

磁流变液由基载液、铁粉颗粒、磨粒颗粒及添加剂等组成。其工作原理为:在励磁装置产生的梯度磁场作用下,铁粉颗粒被磁化并形成链状结构,同时夹持析出的磨粒颗粒。在抛光过程中,磁流变液被压入工作间隙 h_1 ,磨粒颗粒在铁粉颗粒链的约束下与工件表面产生相对剪切运动,实现材料的有效去除。

2.2 铁粉颗粒运动方程

铁粉颗粒在磁流变液链化过程中,主要受到磁力、基液黏性阻力以及颗粒间排斥力的共同作用,其他力的影响相对较小^[21]。基于牛顿第二定律,铁粉颗粒的动力学方程可表示为:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F_i^m + F_i^v + F_i^r, \quad (1)$$

其中, F_i^m , F_i^v , F_i^r 分别为铁粉颗粒所受磁力、黏性阻力和排斥力。

磁力是促使铁粉颗粒形成链状结构的主要原因,其促进颗粒间的相互运动并使其有序排列。基于磁偶极子理论,铁粉颗粒 i 受到的磁力^[22]为:

铁粉颗粒在运动过程中,由于与基液间存在速度差,会受到黏性阻力的作用。假设基液为不可压缩流体,且铁粉颗粒近似球体,则其在链化过程中的黏性阻力可由 Stokes 公式^[23]表示:

$$F_i^v = -6\pi R \eta \frac{dr}{dt} = -6\pi R \eta v, \quad (4)$$

其中: η 为基液的黏性系数, R 为铁粉颗粒半径, v 为颗粒的速度矢量。

磁粉颗粒间的排斥力在防止磁流变液中颗粒团聚和沉降方面起到至关重要的作用。对于任一磁性颗粒,其受到的来自周围其他颗粒的排斥力之和可表示为^[24]:

$$F_i^r = \sum_{j \neq i} F_0 \exp \left[-\beta \left(\frac{r_{ij}}{2R} - 1 \right) \right] \hat{r}_{ij}, \quad (5)$$

其中: β 为排斥力随颗粒形变增加而指数递增的快慢程度, F_0 为两颗粒沿外磁场方向刚接触时的排斥力大小,表示为:

$$F_0 = \frac{3\mu_0 m^2}{32\pi R^4}. \quad (6)$$

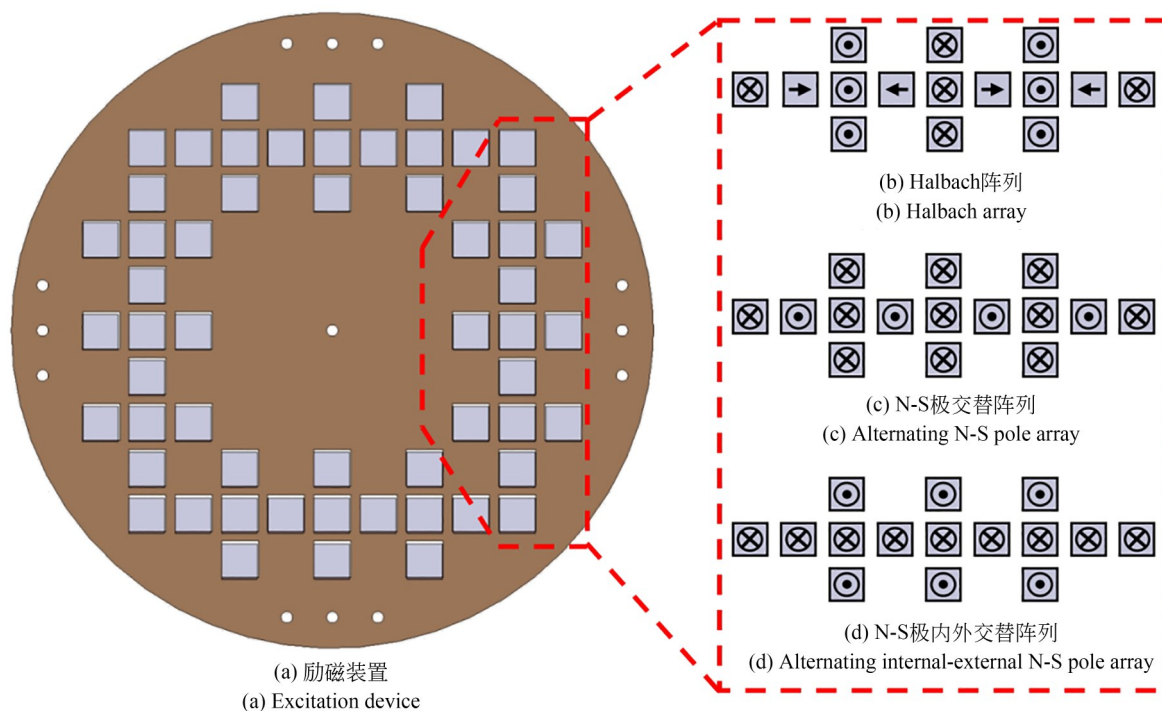


图2 磁极阵列

Fig. 2 Magnetic pole arrangement

3 磁极阵列仿真对比研究

本研究采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics®,对 Halbach 阵列、N-S 极交替阵列及 N-S 极内外交替阵列的磁场分布进行了有限元仿真分析。分析内容主要包括磁场强度、磁通密度模、羰基铁粉磁性颗粒的受力状态及磁场梯度等四个关键参数,旨在深入探讨三种不同磁极阵列的磁场特性。

2.3 磁极阵列对比

在磁流变抛光过程中,磁极排列方式对抛光区域内磁场的分布特性具有显著影响。不同磁极阵列导致磁场强度及其分布模式存在明显差异,进而影响抛光效率及工件表面质量。如图 2 所示,分别为励磁装置、Halbach 阵列、N-S 极交替阵列及 N-S 极内外交替阵列。上述阵列由边长为 10 mm 的立方体 N35 永磁体按图中的磁极方向依次排列组成。各永磁体之间保持 2.55 mm 的间隙,以便于装配并保证磁场分布的均匀性。

仿真过程中,关键参数设定如下:磁流变抛光液与磁极阵列之间的距离为 4 mm,磁流变抛光液厚度为 5 mm,以确保工件能够完全浸没于抛光液中;磁流变抛光液的相对磁导率设定为 4.5 H/m。

3.1 磁通密度模分布

本研究探讨了高度为 15.2 mm 处的磁通密度模分布,该位置位于磁流变抛光液内部,对应于工件加工表面。三种不同磁极阵列在该位置的磁通密度模分布结果如图 3 所示。

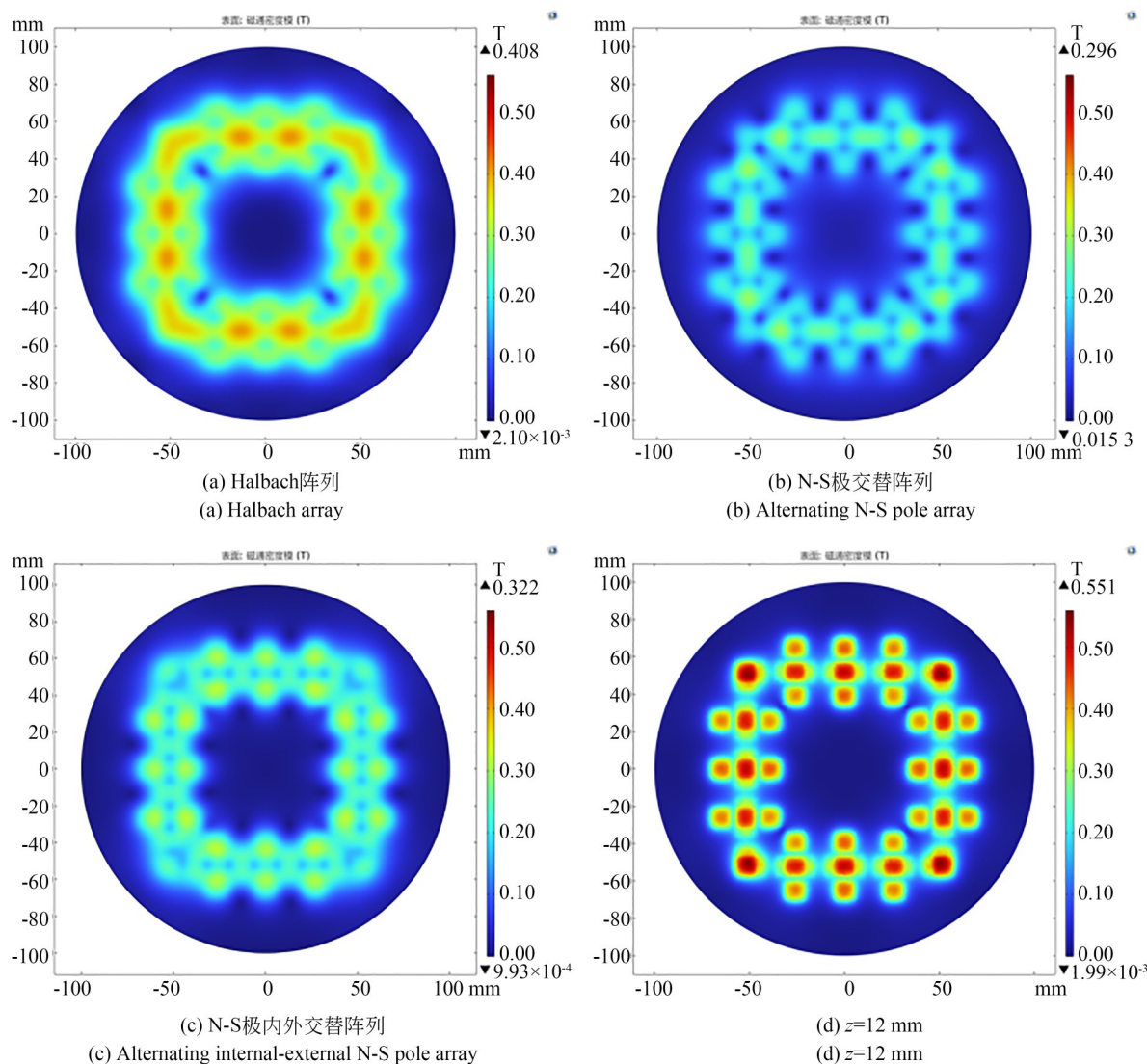


图3 磁通密度模分布

Fig. 3 Distribution of magnetic flux density magnitude

Halbach阵列的磁通密度模最大可达0.408 T, 显著高于内外交替阵列的0.322 T, 交替阵列的磁通密度模最低, 仅为0.296 T。在磁场分布均匀性方面, 交替阵列表现较差, 仅在 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ 方向形成较强磁场区域, 其余区域磁通密度模相对较低。内外交替阵列的磁通密度模分布均匀性略逊于Halbach阵列, 表现为磁通密度模较强的区域大致对应磁极阵列的内外边长范围, 且在正方形区域内呈现中部较低、两侧较高的分布特征。相比之下, Halbach阵列中磁通密度模较强区域分布更为均匀, 形成12个磁场集中区, 均匀分布于以磁极阵列内外边长为直径的环形区域内。该分布特征使Halbach阵列的高磁通

密度模区域较其他两种阵列更加均匀且覆盖面积更广, 有利于提升磁流变抛光过程中的磁场作用效果, 进而优化抛光性能。

如图3(a)所示, 在Halbach阵列中, 磁通密度模的最大值出现在沿X和Y轴方向的单元磁体位置。这种现象与磁通密度定义相关, 即垂直于磁场方向单位面积内通过的磁感线条数。如图4所示, 在沿Z轴方向的单元磁体中, 截面上的磁感线随着与磁体距离的增加而逐渐减少, 导致单位面积上通过的磁感线条数降低。相反, 沿X和Y轴方向的单元磁体, 其截面沿Z轴移动并不会显著改变垂直于磁场方向的磁感线分布。因此, 本研究截取了高度为12 mm的平面以分析磁通

密度模的分布。如图 3(d)所示,磁通密度模较大的区域依旧位于沿 Z 轴方向,这与 Halbach 阵列的理论相符。

如图 4(a)所示,在 Halbach 阵列中,磁感线从沿 Z 轴方向排列的单元磁体发出,穿过相邻沿 X 轴和 Y 轴方向排列的单元磁体,并在其上方的抛光区域形成弧形磁感线。整个磁场中共存在四条磁感线闭合回路,与沿 X 轴和 Y 轴方向单元磁体的数量相对应。图 4(b)显示,交替阵列的磁感线由单元磁体发出,与相邻磁体共同形成闭合磁路,在磁体交界处上方形成八个弧形磁感线区域。图 4(c)中,内外交替阵列的磁感线在中部单元磁体处呈现对称分布,最终汇聚于一点。

三种阵列的磁感线分布与磁通密度模分布呈现出一致的特征。在 Halbach 阵列和交替阵列中,磁感线闭合回路的形成对应于磁通密度模较高的区域,且磁感线回路数量的增多与磁通密度模值的提升呈正相关。对于内外交替阵列,其磁感线分布表现为在交叠正方形区域中心磁通密度模较低,而两侧相对较高的分布模式。此外, Halbach 阵列中磁体上方的磁感线数量明显多于下方,有效增强了抛光区域的磁场强度及梯度,进而有助于提升磁流变抛光过程的效率。

3.2 磁场强度

磁场强度为矢量,其分布特性与截面高度无关,因此沿 Z 轴方向的磁场强度更能准确反映三

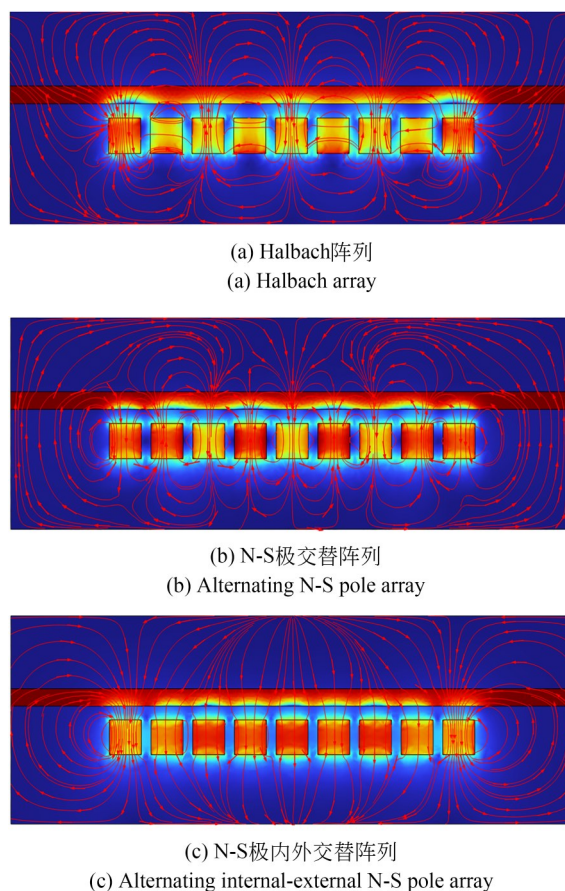


图 4 磁感线分布
Fig. 4 Distribution of magnetic field lines

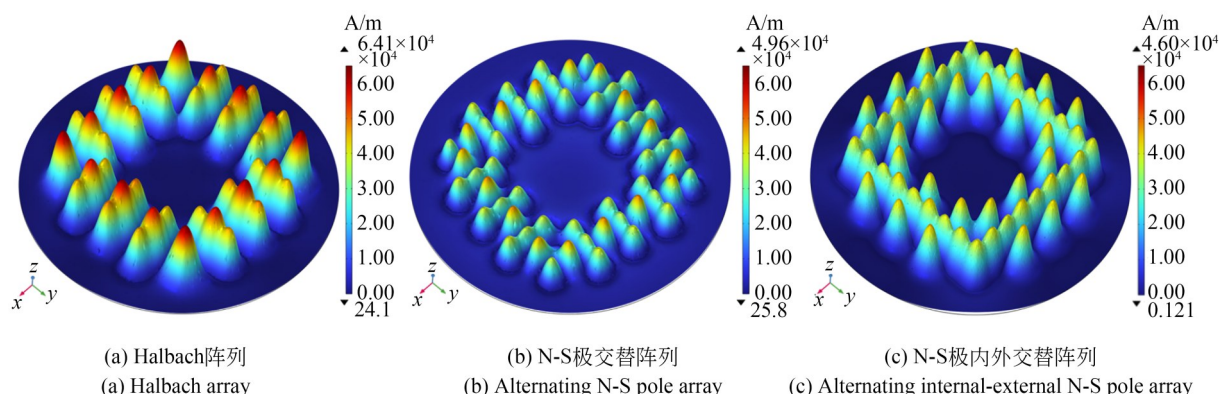


图 5 磁场强度分布

Fig. 5 Distribution of magnetic field intensity

Halbach 阵列在磁场强度性能方面表现出显著优势,其最大磁场强度可达 6.41×10^4 A/m,明显高于其他两种阵列。交替阵列与内外交替阵

种磁极阵列对磁流变抛光效果的影响。三种磁极阵列的磁场强度分布情况如图 5 所示。

列的最大磁场强度相差不明显,分别为 4.96×10^4 A/m 与 4.6×10^4 A/m。在磁场强度分布方面, Halbach 阵列的峰值区域覆盖面积显著大于

交替阵列和内外交替阵列。与其他阵列相比, Halbach阵列的峰值分布较为分散且均匀,遍布整个圆形区域,共形成16个峰值。四个角落的峰值较低,可能由于这些区域未受到 Halbach阵列磁场叠加效应的影响所致。内外交替阵列的磁场强度峰值分布表现出较强的连续性,主要集中于正方形区域内,周边散布若干较小峰值,形成与内部正方形区域间的不连续分布。交替阵列在内外两圈中沿Z轴方向各磁极均表现出明显峰值,但中圈区域存在磁场强度的凹陷。尽管该阵列形成的峰值数量最多,但其磁场强度相对 Halbach阵列较低,表明其所产生的剪切应力较

小,难以有效去除硬脆材料。综上所述,基于磁场强度分布的分析, Halbach阵列在磁流变抛光过程中展现出更优异的性能,更有利于提升抛光效率。

3.3 磁场梯度

磁场梯度的快速变化有助于磁流变液在磁场作用下实现更高效的流动与旋转^[25]。通过对三种磁极阵列磁通密度模的数值进行比较,发现在半径为 $R=49.5\text{ mm}$ 处,磁通密度模达到峰值,且该位置的磁通密度变化梯度显著。基于此,选取 $R=49.5\text{ mm}$ 处的圆周进行分析,三种阵列在该位置的磁通密度模梯度变化如图6所示。

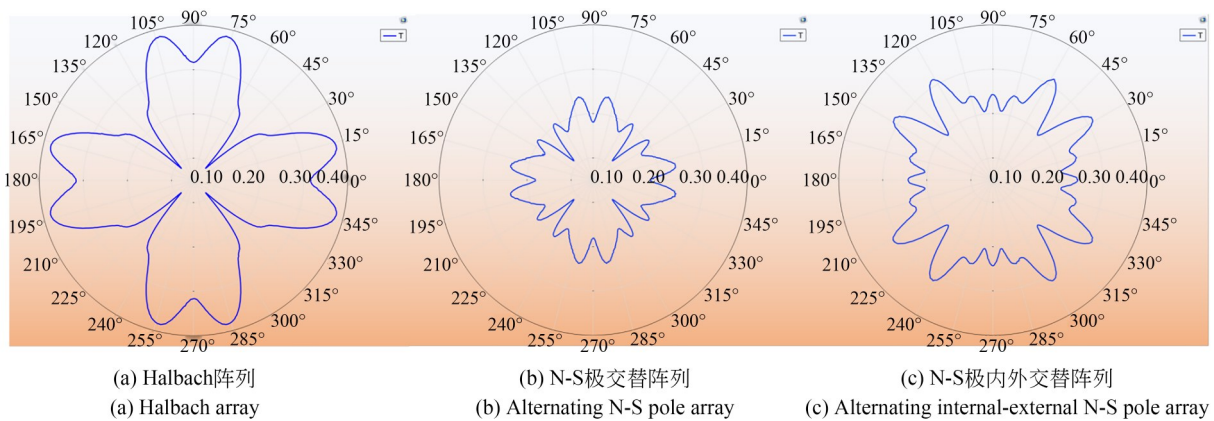


图6 三种阵列的磁通梯度变化

Fig. 6 Magnetic flux gradient variations of three array configurations

Halbach阵列的最大值出现在 $(77.12, 0.3838)$,全局最小值位于 $(135.14, 0.0883)$,而最近的局部最小值出现在 $(45.05, 0.0884)$,其变化率为76.97%,变化速率为0.528 T/rad。交替阵列的最大值位于 $(170.09, 0.2410)$,全局最小值为 $(45.05, 0.1111)$,而最近的局部最小值出现在 $(135.14, 0.1113)$,其变化率为53.82%,变化速率为0.213 T/rad。内外交替阵列的最大值和最小值分别位于 $(58.38, 0.3166)$ 和 $(45.05, 0.1932)$,变化率为38.98%,变化速率为0.530 T/rad。三种阵列的磁通密度模梯度变化趋势如图7所示。

Halbach阵列在磁通密度模的变化率方面显著优于其他两种阵列结构,其中内外交替阵列的变化率最低。Halbach阵列与内外交替阵列在磁通密度模的变化速率方面差异不大,而交替阵列的变化速率最小。上述结果表明,交替阵列对应的磁流变液流变性能相对较差,导

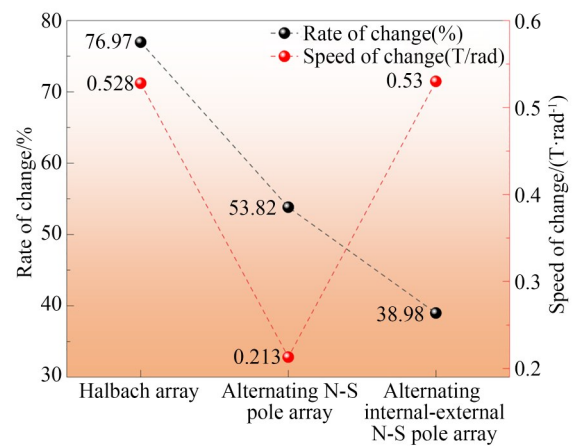


图7 三种阵列的梯度变化趋势

Fig. 7 Trend of gradient changes in three array configurations

致在抛光过程中消耗的抛光液无法得到及时补充,从而显著降低了抛光效率。相比之下, Halbach阵列凭借其优异的流变性能,能够有效保障磁流变液的持续补充,进而实现抛光加工的

连续性和稳定性。

3.4 铁粉受力分析

铁粉颗粒在磁场梯度作用下沿磁力线定向排列,逐渐形成链状及簇状结构。随着磁场强度在 Z 方向梯度的增加,羰基铁粉受到的磁场力增强,颗粒更牢固地附着在抛光垫表面,并在链状、簇状结构之间有效夹持磨粒,显著提升磨粒在与工件表面相对运动过程中的稳定性,促使磨粒能够持续参与材料的高效去除,从而提高了整体抛光效率与表面质量。本文对磁场强度在 Z 方向的梯度分量进行了分析,三种磁极阵列下羰基铁粉所受力分布如图 8 所示。

三种阵列中羰基铁粉的受力情况与其磁场强度分布基本一致。在磁场均匀性方面,内外交替阵列表现最佳,Halbach 阵列次之,而交替阵列的均匀性较差。在羰基铁粉受力强度方面,Halbach 阵列显著优于其他两种阵列,受力水平约为其他阵列的 1.5 倍。因此,Halbach 阵列有助于促

进羰基铁粉聚集成簇,并增强其携带磨粒的能力,形成更加稳固且粗壮的簇状结构。该结构在抛光过程中显著提升了磁流变抛光液的屈服应力,从而有利于抛光操作的高效进行。

仿真结果表明,内外交替阵列在磁场均匀性方面表现最佳,但在磁通密度模、磁场强度及羰基铁粉受力等指标上存在明显不足。相比之下,Halbach 阵列虽在均匀性方面略逊于内外交替阵列,却在其他性能指标上表现出明显优势。这种优势主要得益于本研究对传统 Halbach 阵列的改进,通过在内外圈增加额外的单元磁体,不仅扩大了磁场的有效作用面积,同时以适度牺牲均匀性为代价实现了性能的整体提升。在传统 Halbach 阵列中,磁场均匀性与内外交替阵列相当。而交替阵列在所有性能指标上均不及另外两种阵列,因而不适合作为抛光加工的励磁方案。因此,改进后的 Halbach 阵列被视为磁流变抛光中更具优势的励磁装置。

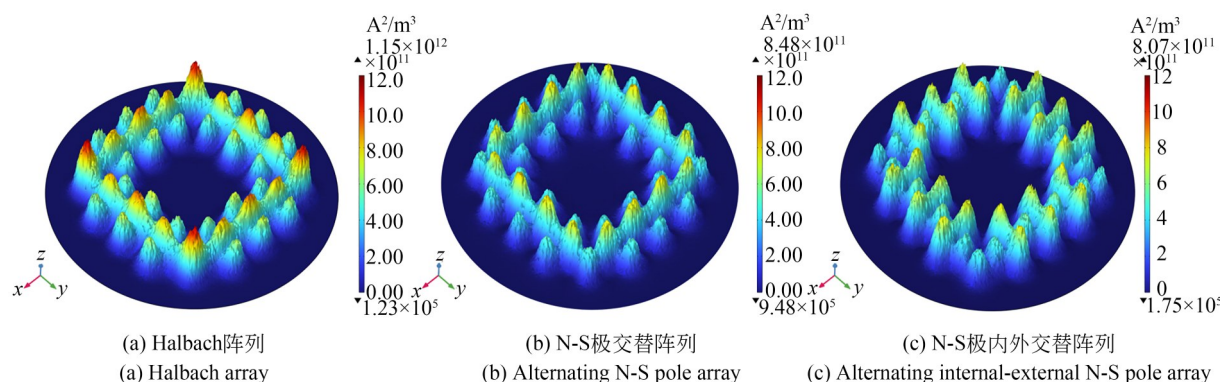


图 8 三种阵列的羰基铁粉受力情况

Fig. 8 Mechanical forces on carbonyl iron powder under three array configurations

4 Halbach 阵列的抛光实验

4.1 实验装置

K9 玻璃的磁流变抛光实验在改装的抛光装置上进行。该装置主要由工件运动模组、装有磁流变抛光液的抛光盘以及磁极阵列运动模组组成。工件通过加热后的石蜡与夹具固定,随后安装在三轴滑台模组上,实现 X 、 Y 、 Z 三个方向的平移运动及自转运动。抛光盘与励磁装置采用一体化设计,固定于转台上实现旋转运动。实验装置如图 9 所示。

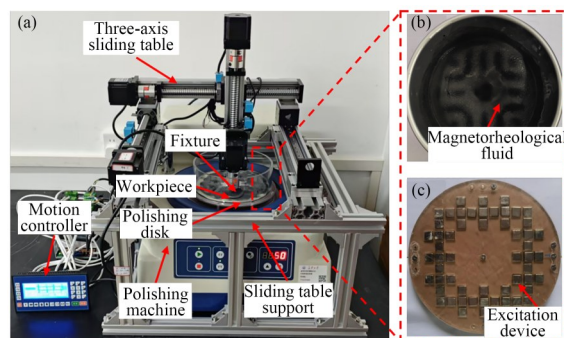


图 9 磁流变抛光装置

Fig. 9 Magnetorheological polishing device

4.2 实验条件

4.2.1 实验条件

实验研究了磁场转速、工件转速、工作间隙及励磁间隙等工艺参数对 K9 玻璃抛光性能的影响。所选待抛光工件为直径 50 mm、厚度 2 mm 的 K9 光学玻璃,初始表面粗糙度约为 $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ 。K9 的物理机械性能参数如表 1 所示,工艺参数如表 2 所示。

表 1 K9 玻璃物理机械性能参数

Tab. 1 Physical and mechanical properties of K9 glass

Properties	Value
Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.55
Moh's hardness	7
Elastic modulus/(GPa)	82
Poisson's ratio	0.21

表 2 磁流变抛光工艺参数表

Tab. 2 Magnetorheological polishing process parameters

Process parameters	Value
Polishing time t/min	30
Workpiece speed $n_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	350~800
Magnet rotational speed $n_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	50~80
Working gap h_1/mm	1~1.6
Excitation gap h_2/mm	4~10

4.2.2 抛光液配置

本实验配制了一种磁流变抛光液,其组分及体积分数分别为:去离子水 60%、羰基铁粉 28%、二氧化铈颗粒 8%、无水碳酸钠 2% 及聚乙烯吡咯烷酮 2%。各组分混合后,采用玻璃杯搅拌 30 min,以确保充分均匀混合,最终制备出总体积为 130 mL 的磁流变抛光液。其中,聚乙烯吡咯烷酮与无水碳酸钠作为添加剂,能够有效抑制颗粒沉降、调节溶液 pH 值并防止氧化反应,从而延长抛光液的使用寿命。

4.2.3 励磁装置设置

本研究选用牌号为 N35 的单元磁体,其相对磁导率为 1.04 T。磁铁安装支架采用亚克力材料制成,槽深为 10 mm。亚克力板圆周均匀分布有 8 个直径为 6 mm 的螺纹孔,便于抛光盘的安装与固定,从而实现抛光盘与磁极阵列的同步旋转运动。

4.2.4 表面粗糙度与表面形貌

采用表面粗糙度轮廓仪对工件表面粗糙度进行了定量测量。如图 10 所示,测量过程中,在工件表面的九个不同区域(编号 1~9)各重复测量三次,取各区域测量值的平均值作为该区域的表面粗糙度表征指标,以提高数据的准确性和代表性。同时,利用共聚焦显微镜对抛光前后工件表面的微观形貌进行了观察与分析,从微观结构层面评估抛光工艺对表面质量的改善效果。

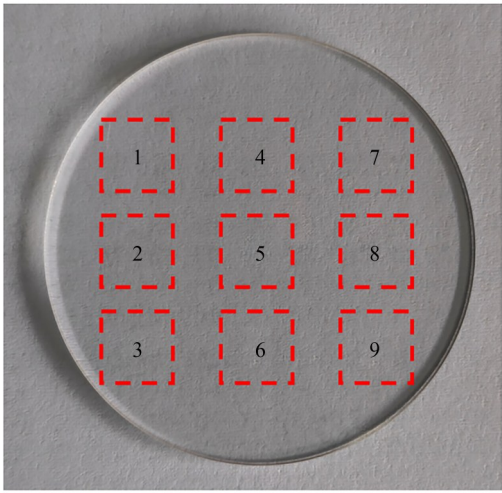


图 10 K9 玻璃表面粗糙度测量点分布

Fig. 10 Distribution of surface roughness measurement points on K9 glass

4.2.5 材料去除率

抛光前后,分别采用无水乙醇和去离子水对玻璃工件进行超声清洗,清洗时间均为 10 min。随后,使用精密电子天平称量工件抛光前后的质量。工件材料去除率(MRR)的计算公式如式(7):

$$MRR = \frac{\Delta m}{\rho s t} \times 10^7, \quad (7)$$

其中: Δm 为抛光前后质量变化量, g; ρ 为工件材料密度, g/cm^3 ; s 为 K9 工件表面积, cm^2 ; t 为抛光时间, min。

5 结果与分析

5.1 磁场分布情况

图 11 展示了 Halbach 阵列下磁流变抛光液的磁场分布情况。高磁场区域出现明显的簇状结构,而低磁场区域呈现空白,表明羰基铁粉仅

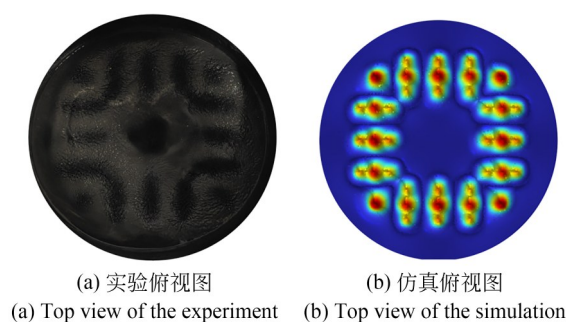


图 11 磁场分布

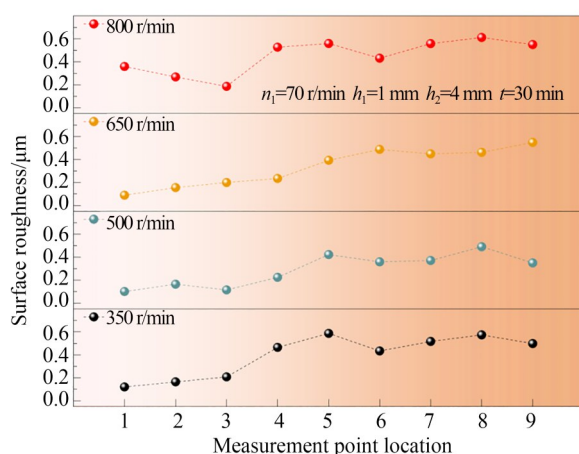
Fig. 11 Distribution of magnetic field

聚集于磁场作用明显的区域。磁场分布基本对称,包括四个角落的圆形区域和中央的椭圆形区域。由于羰基铁粉数量有限,两个相邻椭圆区域

合并形成“L”形结构,交界处颜色较浅,反映该处磁场强度低于其他区域;四个角落的圆形区域颜色较深,显示磁场强度较大。整体磁场分布与仿真结果基本一致,以下为实验与仿真中磁流变液的磁场分布对比。

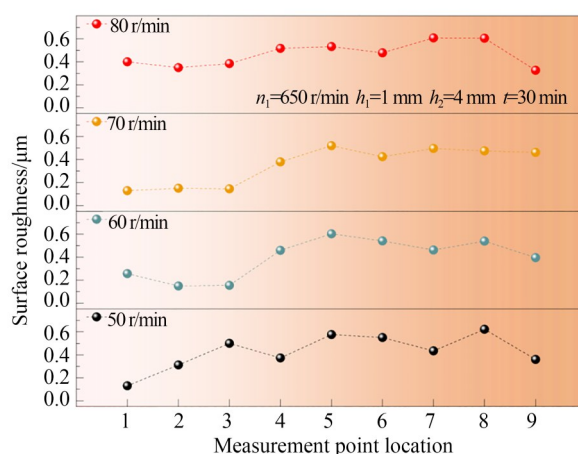
5.2 表面粗糙度

磁流变抛光实验中工件转速、磁场转速、工作间隙及励磁间隙对 K9 玻璃表面粗糙度的影响规律如图 12 所示。在不同工艺参数条件下,经 30 min 抛光后,K9 玻璃表面粗糙度呈现出明显的空间分布特征。具体表现为:工件左侧区域(区域 1,2,3)的表面粗糙度显著低于中部区域(区域 4,5,6)和右侧区域(区域 7,8,9),且表面粗糙度



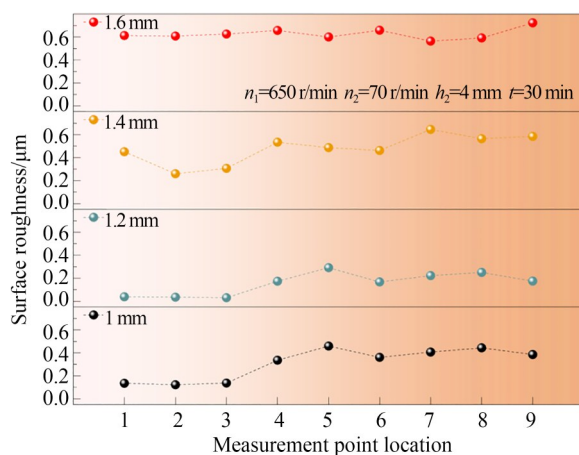
(a) 不同工件转速下的表面粗糙度

(a) Surface roughness under different workpiece rotational speeds



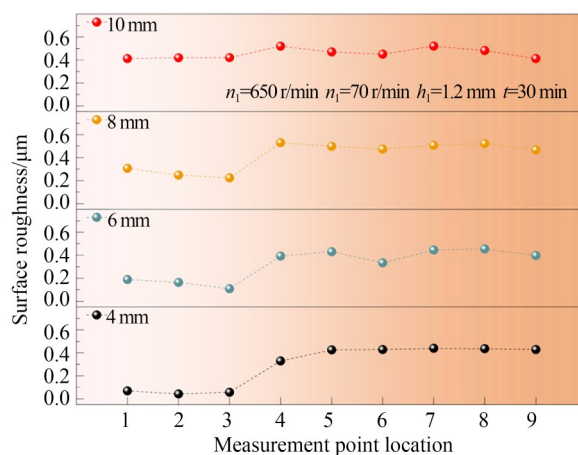
(b) 不同磁场转速下的表面粗糙度

(b) Surface roughness under different magnetic field rotational speeds



(c) 不同工作间隙下的表面粗糙度

(c) Surface roughness under different working gaps



(d) 不同励磁间隙下的表面粗糙度

(d) Surface roughness under different excitation gaps

图 12 不同工艺参数下的表面粗糙度

Fig. 12 Surface roughness under different process parameters

的最大值通常分布在工件中心位置(区域5)。造成上述现象的主要原因在于铁粉颗粒在工件下方的永磁体交界处形成多处抛光模,并在工件表面对应位置产生两个大小不一的高压区域。在抛光过程中,较高压力区域内的磨粒由于受到更高的压力,能够更充分地嵌入工件表面,从而加剧了材料的去除速率,使该区域表面粗糙度得以有效降低。相比之下,工件中心区域(区域5)位于两个高压区之间的过渡地带,该区域的压力相对较低,同时中心位置的速度最小,致使磨粒对表面的作用减弱,材料去除效率降低,最终导致该区域表面粗糙度最大。虽然工件自转有助于改善工件表面的受力均匀性,但由于其与非圆周对称磁场的相对运动,以及工件表面存在较大的压力梯度,均匀化效果受到限制。因此,工件一侧在高压区域下的受力时长高于其他区域,导致工件表面粗糙度呈现出阶梯状的空间分布特性。

图 12(a)展示了工件转速对表面粗糙度的影响。随着工件转速的增加,工件中部及左侧区域的表面粗糙度先缓慢降低后逐渐升高,而右侧区域表面粗糙度呈现缓慢上升的趋势,且当工件转速达到 650 r/min 时,区域 1 的表面粗糙度达到最低值 $0.0893\ \mu\text{m}$ 。图 12(b)分析了磁场转速对表面粗糙度的影响,结果显示随着磁场转速的提升,左侧区域的表面粗糙度呈现先降低后升高的趋势,而中间及右侧区域的表面粗糙度变化较为平缓,磁场转速为 70 r/min 时,区域 1 的表面粗糙度最低,为 $0.129\ \mu\text{m}$ 。图 12(c)进一步揭示了工作间隙对表面质量的调控效应,随着工作间隙的增大,工件表面整体粗糙度先缓慢下降后快速回升,当工作间隙为 1.2 mm 时,工件表面粗糙度达到最佳水平,其最低值出现在区域 3,约为 $0.0297\ \mu\text{m}$ 。图 12(d)探讨了励磁间隙变化对表面粗糙度的影响,结果表明,励磁间隙增大导致工件左侧表面粗糙度整体升高,中部及右侧的表面粗糙度缓慢变化,当励磁间隙调整至 4 mm 时,表面粗糙度表现最佳,其最低值出现在区域 2,约为 $0.0417\ \mu\text{m}$ 。

5.3 材料去除率

磁流变抛光实验中工件转速、磁场转速、工作间隙及励磁间隙对 K9 玻璃材料去除率的影响规律如图 13 所示。

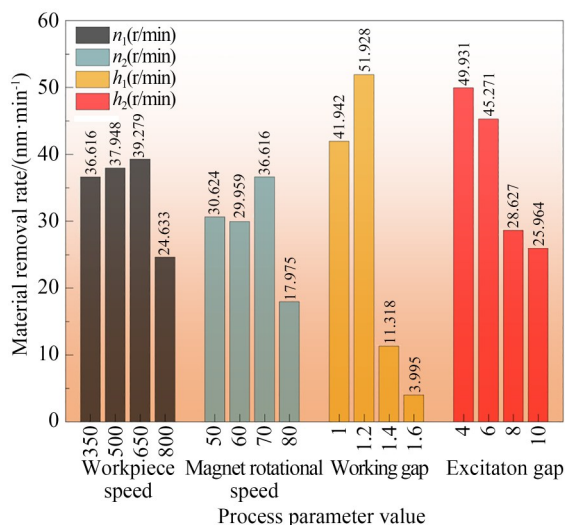


图 13 不同工艺参数下的材料去除率

Fig. 13 Material removal rate under different process parameters

在不同工件转速、磁场转速、工作间隙及励磁间隙条件下,材料去除率表现出显著差异。依据 Preston 方程,材料去除率与作用压力及相对运动速度密切相关,抛光区域内磨粒速度及受力的提升显著促进了材料的去除。

工件转速的提升能够增加工件与抛光垫之间的相对运动速度,同时增强流体动压力,从而提高材料去除率。然而,当转速达到某一临界值时,磁流变液会发生剪切稀化现象,导致磁链结构被破坏,磨粒所受磁链的夹持作用减弱,抛光力随之减小。因此,材料去除率在较低转速范围内变化不明显,但当转速达到 800 r/min 时出现显著下降的现象。磁场转速的增加强化了铁粉颗粒间的相互作用力,颗粒能够快速聚集并形成磁链。这一过程促进了磨粒向磁流变液抛光垫表层的有效迁移,并增加了磨粒与工件表面间的相对速度,使材料去除率进一步提升。然而,当磁场转速过高时,离心力显著增强,上层铁粉颗粒易脱离磁链,磁链对磨粒的夹持能力减弱,磨粒向抛光盘边缘迁移,加工区内的有效磨粒数量大幅减少,最终引起材料去除率的迅速下降。工作间隙对材料去除率的影响呈现出先升高后迅速下降的趋势。这主要源于间隙增大时,工件表面磁场强度减弱,磁链对磨粒的夹持能力降低。同时,流体动压力亦随间隙增大而快速降低,两者共同导致材料去除率快速降低。相反,当工作

间隙过小时,外部磁链难以充分渗透至抛光区域,导致磁链结构不稳定,磨粒分布不均且易于聚集无序,不仅可能损坏抛光工具,还会引发表面粗糙度升高及材料去除率下降。励磁间隙的增大同样导致工件处磁场强度减弱,磁链随之变短、变细,磁链对磨粒的夹持能力进一步降低,进而引发材料去除率的下降。

5.4 表面形貌变化

图14(a)和(b)分别为K9玻璃工件抛光前后的实物图。当工件转速为650 r/min、磁场转速为70 r/min、工作间隙为1.2 mm、励磁间隙为4 mm时,经过30 min的抛光处理后,工件表面由原先的磨砂质感显著转变为光滑且具有高透明度的表面,显示出抛光工艺对表面质量的显著提升作用。图14(c)和(d)为该组参数下工件区域3的表面形貌扫描图,进一步揭示了抛光前后表面微观结构的变化。抛光前,工件表面呈现均匀分布的凸起与凹陷,表现出明显的微观不平整性,导致表面粗糙度较高。经过30 min的磁流变抛光,抛光过程中磨粒在剪切力作用下有效去除表面的微观凸起部分,使工件表面逐渐趋于平整光滑。最终,该区域的表面粗糙度 R_a 显著降低至 $0.0297\text{ }\mu\text{m}$,显示出高质量的加工效果。

6 结 论

(1) 提出一种基于Halbach阵列励磁的磁流变抛光方法,并将其与传统的N-S极交替阵列及N-S极内外交替阵列励磁方式进行了磁场仿真对比。结果表明,Halbach阵列扩大了磁场的有效作用面积,并保持了优异的磁场均匀性。在磁场强度、磁通密度模、磁场梯度变化以及羰基铁粉受力等关键指标方面,Halbach阵列均展现出明显的优势,证明其在磁流变抛光励磁设计中的优越性。

(2) 分析了各工艺参数对K9玻璃磁流变抛光效果的影响规律。实验结果显示,随着工件转速、磁场转速及工作间隙的增大,工件表面粗糙

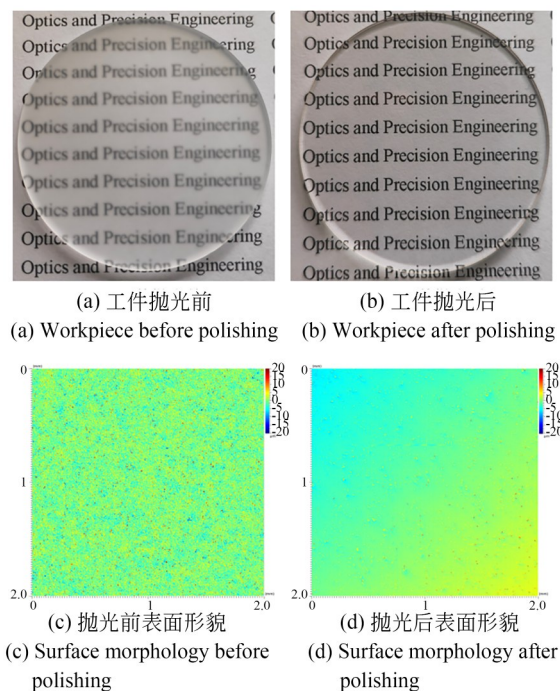


图14 K9玻璃磁流变抛光前后对比

Fig. 14 Comparison of K9 glass before and after magnetorheological polishing

度呈现先降低后升高的趋势,而材料去除率则表现为先上升后下降的变化;励磁间隙的增加导致表面粗糙度持续升高,且材料去除率显著下降。

(3) 在单因素实验条件下,当工件转速为650 r/min、磁场转速为70 r/min、工作间隙为1.2 mm、励磁间隙为4 mm,且抛光时间为30 min时,K9玻璃表面粗糙度从 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $0.0297\text{ }\mu\text{m}$,材料去除率达到 51.928 nm/min 。

作者贡献声明:

靳淇超:论文构思和修改;
袁 潇:抛光实验设计与实施,论文撰写;
芦顺利:提供资源与指导;
吕 雷:实验数据的测量与分析;
钟太阳:磁场仿真的建模与分析;
刘 瑾:数据管理与可视化呈现;
郭 磊:论文的审核与编辑;
陈填贤:实验指导。

参考文献:

[1] ZHU T Y, JIN M S, DONG X X, *et al.* Design of

a novel fixed abrasive petal-shaped lapping tool and material removal uniformity experiments on K9 glass [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023,

- 90: 204-215.
- [2] MANEA H, CHENG X, LING S Y, *et al.* Model for predicting the micro-grinding force of K9 glass based on material removal mechanisms[J]. *Micro-machines*, 2020, 11(11): 969.
- [3] GUO L, DUAN Z C, GUO W J, *et al.* Machine vision-based recognition of elastic abrasive tool wear and its influence on machining performance [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024, 35(8): 4201-4216.
- [4] ZHAO J, WANG W B, QIU X W, *et al.* Material removal profile model simulations and experiments on the non-contact shear thickening polishing of K9 glass [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 134: 435-451.
- [5] XU C, SONG J T, LIU X H, *et al.* Precision and ultra-precision machining with elastic polishing tools: a review [J]. *Surface Science and Technology*, 2025, 3(1): 9.
- [6] AMIR M, MISHRA V, SHARMA R, *et al.* Development of magnetic nanoparticle based nanoabrasives for magnetorheological finishing process and all their variants[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(4): 6254-6261.
- [7] GUO L, SONG J T, XU C, *et al.* Retention and interfacial failure mechanism of single diamond grains in resin-bonded grinding tools[J]. *Diamond and Related Materials*, 2024, 150: 111681.
- [8] ZHU Z H, HUANG P, ZHU W L, *et al.* Planar oscillation-enabled deterministic magnetorheological micro-polishing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 124: 174-186.
- [9] PAN J S, YU P, YAN Q S, *et al.* An experimental analysis of strontium titanate ceramic substrates polished by magnetorheological finishing with dynamic magnetic fields formed by rotating magnetic poles[J]. *Smart Material Structures*, 2017, 26(5): 055017.
- [10] NIE M, CAO J G, LI J Y, *et al.* Magnet arrangements in a magnetic field generator for magnetorheological finishing[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161: 105018.
- [11] LIU Z B, LI J Y, NIE M, *et al.* Modeling and simulation of workpiece surface flatness in magnetorheological plane finishing processes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(9): 2637-2651.
- [12] ZHAI Q, ZHAI W J, GAO B. Effects of quantities and pole-arrangements of magnets on the magneto-rheological polishing (MRP) performance of sapphire hemisphere[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 584: 152589.
- [13] 廖煜晖, 周宏明, 张泽林, 等. 基于响应面法的钛合金 Halbach 阵列增强磁流变抛光工艺参数优化 [J]. *表面技术*, 2024, 53(3): 53-64.
- LIAO Y H, ZHOU H M, ZHANG Z L, *et al.* Optimization of process parameters for halbach array-enhanced magnetorheological polishing of titanium alloy based on response surface method [J]. *Surface Technology*, 2024, 53(3): 53-64. (in Chinese)
- [14] 张祥雷, 陈卓杰, 廖煜晖, 等. 医用钛合金海尔贝克磁场阵列化学磁流变抛光研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(4): 90-98.
- ZHANG X L, CHEN Z J, LIAO Y H, *et al.* Study on chemical magnetorheological polishing of medical titanium alloy by halbach magnetic field array [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2024, 51(4): 90-98. (in Chinese)
- [15] 倪俊杰, 陶锡越, 夏炜斌, 等. 脉冲海尔贝克阵列磁场辅助磁流变抛光的工艺参数对钛合金抛光质量影响规律研究 [J]. *表面技术*, 2025, 54(18): 86-96.
- NI J J, TAO X Y, XIA W B, *et al.* Influence of parameters of pulsed halbach array magnetic field assisted magnetorheological polishing on polishing quality of titanium alloy [J]. *Surface Technology*, 2025, 54(18): 86-96. (in Chinese)
- [16] 刘乐, 李秀红, 李文辉, 等. 磁性磨具光整加工中基于 Halbach Array 的磁场设计与实验研究 [J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 47-54, 73.
- LIU L, LI X H, LI W H, *et al.* Magnetic field design and experimental research based on halbach array in magnetic abrasives finishing [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(4): 47-54, 73. (in Chinese)
- [17] XIE M L, AN Z J, ZHUANG J. Design and experimental research of dynamic magnetic field device based on Halbach array in magnetorheological polishing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(9): 5807-5822.
- [18] GUO Y F, YIN S H, OHMORI H, *et al.* A novel high efficiency magnetorheological polishing pro-

- cess excited by Halbach array magnetic field [J]. *Precision Engineering*, 2022, 74: 175-185.
- [19] 郭源帆, 尹韶辉, 黄帅. Halbach阵列与不同励磁方式的磁流变抛光特性及机理研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(15): 341-353.
- GUO Y F, YIN S H, HUANG S. Study on machining characteristic and its mechanism of magnetorheological polishing with halbach array and other excitation modes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(15): 341-353. (in Chinese)
- [20] DUY T N, QUANG N M, VAN QUE N. Surface quality and material removal via viscosity-controlled Magnetorheological finishing Ti-6Al-4V using $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ abrasives and Halbach array [J]. *Results in Engineering*, 2025, 26: 105089.
- [21] TIEN D H, THOA P T T, VAN QUE N, *et al.* Developing material removal rate from polishing force modeling via magnetorheological finishing using an improved Halbach array with a slider crank mechanism for Ti-6Al-4V alloy [J]. *Materials Today Communications*, 2025, 45: 112360.
- [22] 陆雯. 磁流变液链化机理研究与试验分析[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2017.
- LU W. *Research and Experimental Analysis on Chain Mechanism of Magnetorheological Fluid* [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2017. (in Chinese)
- [23] 牛天荧. 磁场与流场复合作用下磁流变抛光液的微观结构模型及力学特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- NIU T Y. *Study on Microstructure Model and Mechanical Properties of Magnetorheological Polishing Solution under The Combined Action of Magnetic Field and Flow Field* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020. (in Chinese)
- [24] 曹顺涛. K9玻璃的磁流变抛光关键技术及单磨粒划擦仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- CAO S T. *Key Technology of Magnetorheological Polishing of K9 Glass and Simulation Study on Single Abrasive Scratch* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [25] 张泽林. 海尔贝克阵列增强的磁流变钛合金高效抛光研究[D]. 温州: 温州大学, 2023.
- ZHANG Z L. *Study on High Efficiency Polishing of Magnetorheological Titanium Alloy Strengthened by Helbeck Array* [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2023. (in Chinese)
- [26] 解明利. 基于永磁阵列的平面磁流变抛光方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- XIE M L. *Study on Plane Magnetorheological Polishing Method based on Permanent Magnet Array* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023. (in Chinese)

作者简介:



靳淇超(1986—),男,陕西汉中,人,博士,高级工程师,硕士生导师;2010年在长安大学获工学学士学位,分别于2013年和2018年在西北工业大学获得工学硕士和工学博士学位,主要从事精密制造技术与工艺方面的研究。
E-mail:jinqichao@chd.edu.cn

作者简介:



袁潇(2000—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事精密与超精密加工研究。 E-mail: 2023125043@chd.edu.cn