

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

廖煜晖¹, 周宏明¹, 张泽林¹, 陈卓杰¹,
张祥雷¹, 周芬芬², 冯铭^{1*}

(1.温州大学 机电工程学院, 浙江 温州 325035;
2.台州学院 智能制造学院, 浙江 台州 318000)

摘要: **目的** 提高钛合金磁流变抛光的表面质量和抛光效率。**方法** 用 Halbach 磁场阵列强化磁场, 通过载液盘与磁铁反向旋转来增强磁流变抛光效率, 使抛光头拥有更强的恢复性与自锐性。通过仿真模拟和实际测量对比研究 Halbach 阵列与 N-S 阵列的磁场分布和磁场梯度。依照试验结果描述抛光剪切力、表面粗糙度与表面微观形貌随时间的变化规律。采用响应面法优化载液盘转速、磁铁转速和加工间距等 3 个工艺参数, 建立剪切力和表面粗糙度的拟合方程数学预测模型, 并对其中的不显著项进行优化。**结果** 在响应面交互作用分析中, 工艺参数对剪切力的影响的大小顺序为加工间距、磁铁转速、载液盘转速; 对表面粗糙度影响的大小顺序为载液盘转速、磁铁转速、加工间距。根据不同的需求, 确定选定范围内的工艺参数组合, 需要快速去除材料时, 使剪切力趋于最大值的工艺参数组合为载液盘转速 227 r/min, 磁铁转速 64 r/min, 加工间距 0.1 mm, 通过 20 min 抛光后得到了表面粗糙度 S_a 为 34.911 nm 的光滑表面。抛光过程中, 钛合金抛光所受剪切力 τ 为 0.812 N。需要最优表面质量时, 使表面粗糙度值趋于最小值的工艺参数组合为载液盘转速 300 r/min, 磁铁转速 150 r/min, 加工间距 0.1 mm, 通过 20 min 抛光后得到了表面粗糙度 S_a 为 26.723 nm 的光滑表面。抛光过程中, 钛合金抛光所受剪切力 τ 为 0.796 N。**结论** Halbach 阵列拥有较高的磁场强度和富有空间变化的磁感线, 能够使磁流变液中的磁链呈现出更多的姿态变化。根据响应面法优化后的剪切力和表面粗糙度预测模型, 预测结果与验证试验结果相差很小, 预测模型的准确度与可信度较高。

关键词: 磁流变抛光; Halbach 磁场阵列; 钛合金; 响应面法; 剪切力; 表面粗糙度

中图分类号: TG178 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)03-0053-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.03.006

Optimization of Process Parameters for Halbach Array-Enhanced Magnetorheological Polishing of Titanium Alloy Based on Response Surface Method

LIAO Yuhui¹, ZHOU Hongming¹, ZHANG Zelin¹, CHEN Zhuojie¹,
ZHANG Xianglei¹, ZHOU Fenfen², FENG Ming^{1*}

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2024-01-03

Received: 2023-11-08; Revised: 2024-01-03

基金项目: 温州市重大科技创新攻关项目 (ZG2022029); 浙江省自然科学基金 (LQ22E050008, LQ19E050010)

Fund: Major Science and Technology Innovation Project in Wenzhou (ZG2022029); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ22E050008, LQ19E050010)

引文格式: 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 Yuhui, ZHOU Hongming, ZHANG Zelin, 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.

*通信作者 (Corresponding author)

- (1. School of Electromechanical Engineering, Wenzhou University, Zhejiang Wenzhou 325035, China;
2. School of Intelligent Manufacturing, Taizhou University, Zhejiang Taizhou 318000, China)

ABSTRACT: It is a titanium alloy magnetorheological polishing method that uses a Halbach magnetic field array to increase the magnetic field. By changing the magnetic array to a circular Halbach magnetic field and rotating the liquid-carrier disk and magnetic array in reverse, the polishing tool can have stronger resilience and self sharpening without changing the material or number of magnets, thereby improving the magnetorheological polishing efficiency of titanium alloy. The work aims to study the interactive impacts of process factors on Halbach array improved magnetorheological polishing and develop and optimize a mathematical prediction model for shear force and surface roughness by response surface methods.

With size TC4 titanium alloy as the polishing specimen, the test specimen was firstly cross-polished with 10000 grit sandpaper to remove the surface oxide layer. The test specimen was then placed in a sealed bag, the workpiece was soaked in anhydrous ethanol and sealed and subject to 30 minutes of ultrasonic cleaning to eliminate surface contaminants. During the experiment, an appropriate volume of magnetorheological fluid was introduced to the outside of the liquid-carrier disk. The magnetorheological fluid adsorbed on the liquid-carrier disk in the presence of a magnetic field to produce a flexible polishing tool. The liquid-carrier disk rotated at n_c to force the abrasive particles on the surface of the polishing tool to polish the workpiece. To generate a dynamic magnetic field, the Halbach array magnet rotated at a speed of n_m concentric and opposite to the liquid-carrier disk. The shear force was measured with a force measuring device (Kistler 9139AA) and the effect of process parameters on polishing force was examined. After the experiment, the workpiece was soaked in deionized water, sealed in a bag, and subject to ultrasonic cleaning to eliminate any remaining pollutants on the surface. The polishing center with the best polishing quality was selected as the sampling point, the surface morphology of the test specimen sampling point was observed with a laser confocal microscope (OLYMPUS OLS4100), the surface roughness was measured by a roughness meter (Xi'an Wilson DM120), the average of three data was taken as the sampling data, and the impact of process parameters on surface quality and surface roughness was analyzed.

The response surface method was utilized successfully to optimize three process parameters: the rotational speed of the liquid-carrier disk, the rotational speed of the magnet, and the machining spacing. A fitting equation mathematical prediction model for shear force and surface roughness was constructed. In response surface interaction analysis, the order of effect of process parameters on shear force was: the machining spacing, the rotational speed of the magnet speed and the rotational speed of the liquid-carrier disk. The order of effect on surface roughness was: the rotational speed of the liquid-carrier disk, the rotational speed of the magnet and the machining spacing. The combination of process parameters in the chosen range was chosen based on various needs. When material needs to be removed fast, the following set of process parameters tended to cause the shear force to go to its maximum: the rotational speed of the liquid-carrier disk was 227 r/min, the rotational speed of the magnet was 64 r/min, and the machining spacing was 0.1 mm, and a clean surface with a surface roughness S_a of 34.911 nm was attained after 20 min of polishing and the shear force used to polish titanium alloy was 0.812 N. When the best possible surface quality was needed, the following set of process parameters tended to cause the surface roughness to go to its minimum: the rotational speed of the liquid-carrier disk was 300 r/min, the rotational speed of the magnet was 150 r/min, and the machining spacing was 0.1 mm, and a clean surface with a surface roughness S_a of 26.723 nm was attained after 20 min of polishing and the shear force used to polish titanium alloy was 0.796 N.

Halbach array-enhanced magnetorheological polishing can provide a smooth titanium alloy surface with good surface quality under the right process parameters. The primary factors enhancing the surface quality and polishing effectiveness of titanium alloy magnetorheological polishing are the Halbach array and the polishing tool. The magnetic induction lines of the Halbach array exhibit spatial variability and a high magnetic field intensity. More postural changes in the magnetic chain in the magnetorheological fluid can result from the dynamic magnetic field produced by the polishing device's liquid-carrier disk and reverse-rotating magnetic field array.

KEY WORDS: magnetorheological polishing; Halbach magnetic field array; titanium alloy; response surface; shear force; surface roughness

钛合金因其优异的综合性能, 被广泛地用于超导、航空航天和生物医学等领域。在低温环境下, 钛合金有着良好的低温韧性、高比强度、无磁性等优异性能^[1-3]。在高温环境下, 钛合金因其低热膨胀、低热导率、低模量的特点, 依然具有较好的高-低周疲劳强度和耐腐蚀性^[4-6]。相比于合金钢、不锈钢、高温合金等高温材料, 钛合金在满足强度、抗腐蚀性、耐疲劳性等严苛要求的同时, 拥有更低的密度, 可以在被用作结构件时减小材料重量对设备的影响^[7-8], 因此被大量用于航空领域作为飞机发动机叶片等。

传统加工钛合金的抛光方法是依靠磨料在机械力和摩擦力下的微磨作用来去除材料。传统的机械抛光方法主要用于航空发动机中钛合金圆盘和叶片的精加工, 可以消除机加工表面上的铣痕。但钛合金的导热系数低, 冷却液难以降低内部抛光区域的高温。因此, 当局部区域的瞬时温度较高时, 会燃烧钛合金表面, 并改变亚表面微观组织, 特别是会在钛合金的抛光表面和亚表面引起残余拉应力, 同时也会影响使用寿命。为了解决传统工艺中存在的这些问题, 出现了多种新型的表面处理技术。其中, 化学抛光法常使用氢氟酸、铬酸等有毒物质配制抛光液, 加工后会有残余物质附着在合金表面。电解抛光则是将工件浸泡在电解液中, 通过电解反应来去除表面缺陷, 但是, 单一电解抛光所使用的电解液通常呈强酸性或者强碱性, 操作不当容易危害实验人员身体健康。激光抛光技术是一种新兴的表面加工技术, 可以通过激光照射工件来完成表面抛光, 但是激光抛光技术需要昂贵的设备和高精度的控制系统。因此, 需要一种更高效可控的抛光方法来对钛合金进行抛光。

磁流变抛光作为一种柔性抛光方法, 其具有柔性磨头与任意曲面吻合度高、循环的磁流变液使得磨头具有自锐性、亚表面破坏层小、加工适用性广等优点^[9-12], 因此在钛合金制造领域有着广泛的应用前景。阎秋生等^[13]为解决集群磁流变平坦化加工过程的表面粗糙度不均匀性问题, 提出了磁轨迹强度模型, 通过对运动轨迹和磁轨迹强度的数值分析, 发现优化工件与抛光盘的转速比有利于实现加工表面粗糙度的均匀化。王有良等^[14]将 2 个完全一致的环形永磁铁以 N—S—N—S 的顺序叠加, 并将磁铁转盘以一定的偏心距与载液板固定, 使磁铁转动时磁场强度不变, 而磁力线随磁铁的旋转发生周期运动而产生空间动态磁场, 通过抛光试验确立了双磁场抛光装置的最优参数, 提高了磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF) 抛光工具在双磁场下的抛光能力。Feng 等^[15]通过让磁铁以 MCF 载体的轴线为中心进行偏心旋转产生旋转磁场, 促使抛光区域内的羰基铁颗粒 (CIP) 和磨料颗粒 (AP) 通过 MCF 工具的旋转定期刷新, 在一定程度上延长了抛光工具的工作寿命, 提高了抛光效率, 还研究了每种 MCF 浆料成分对抛

光特性的影响。动态磁场能够有效提高抛光效率, 但依旧未满足钛合金的抛光效率要求。

Halbach 阵列 (如图 1 所示) 是一种具有特定磁化模式的特殊磁性结构^[16-20], 其将不同充磁方向的单元体磁铁按照一定的规律排布, 可以将阵列的磁场集中在一侧, 原则上使用最少的磁铁在单侧获得磁场强度最大的磁场, 能充分地利用磁场能量提高磁场梯度, 广泛应用于磁能相关的领域^[21-23]。周琴琴等^[24]设计了 3 种基于电磁铁的磁场发生装置, 从仿真对比和试验分析对磁场发生装置的磁场强度、有效抛光区域进行了研究, 发现环形磁场发生装置的抛光效率高, 抛光效果最好。刘乐等^[25]基于 Halbach 阵列进行了磁场的设计, 获得了理想的磁场强度和最佳的磁场分布, 解决了以往永磁式磁性磨具中磁场强度弱、磁能利用率低的问题, 提高了磁性磨具的加工效率。郭源帆等^[26]提出了一种基于直线型 Halbach 阵列的平面磁流变抛光方法, 提高了平面磁流变抛光效率, 对 K9 光学玻璃的材料去除率可达到 $1.38 \text{ mm}^3/\text{min}$, 在 30 min 抛光后可获得表面粗糙度 Ra 小于 1 nm 的超光滑表面, 证明了 Halbach 阵列的优良励磁性能。现有 Halbach 阵列励磁的磁流变装置采用线型排布的磁场阵列作为固定磁场, 旨在用于平面件的平坦化加工, 但是尚未对平面件以及复杂曲面的子口径可控抛光提出有效方法, 并且磁链在受挤压后无法恢复到初始状态, 因此曲面连续贴合性能较弱, 其抛光效率和抛光效果有待进一步提升。

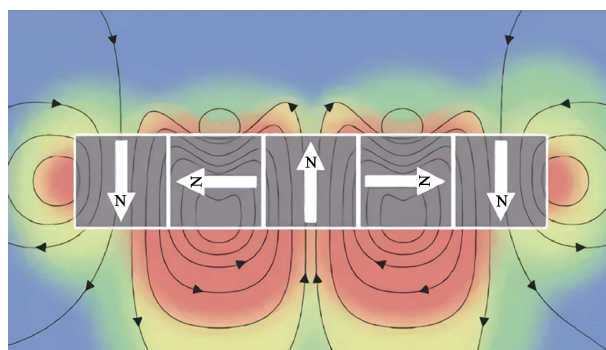


图 1 Halbach 阵列示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Halbach array

本文采用磁流变抛光无亚表面破坏层、抛光精度较高等特点, 结合动态磁力线变化更丰富、磁场强度更高的环形 Halbach 阵列磁场, 通过载液盘与磁铁阵列正反转设计钛合金磁流变抛光装置。通过磁场仿真阐述了环形 Halbach 阵列磁场的特点, 利用响应面法和方差分析法研究了载液盘转速、磁铁转速和加工间距对钛合金抛光剪切力及表面粗糙度的影响顺序, 以及交互作用的影响, 建立了线性回归预测模型, 得到了在一定范围内的最优抛光参数组合。

1 试验

1.1 原理

Halbach 阵列增强的磁流变抛光示意图如图 2 所示。在载液盘外部添加适量体积的磁流变液，磁流变液在磁场作用下吸附在载液盘上，形成柔性抛光头，并使载液盘以 n_c 的转速旋转，驱使抛光头表面的磨粒对工件进行抛光。同时，采用与载液盘同心反向、以转速 n_m 旋转的 Halbach 阵列磁铁产生动态磁场，提高抛光效率。载液盘与工件之间的间距 h 被定义为加工间距。

图 2 右侧展现了磁流变液的内部组成和特性。磁流变液主要由羰基铁粉颗粒和磨粒组成^[27]。在无磁场的情况下，羰基铁粉颗粒和磨粒悬浮在磁流变液中，表现出牛顿流体特性。当磁流变液放置在磁场中时，羰基铁粉颗粒被磁化，沿磁感线方向形成磁链，磁流变液黏度和刚度发生改变，此时表现出非牛顿流体的特性。小部分磨粒被夹持在磁链与磁链之间，跟随磁链运动，大部分磨粒在磁链的作用下顶至磁流变液表面与工件表面接触的区域，并在磁链的夹持下对工件表面施加法向力与切向力，去除工件表面多余材料，从而达到无亚表面破坏层的抛光效果。在磁流变液中加入适量的纤维素，能使沿磁感线方向分布的簇状磁链之间通过纤维素相连接，增加磁链的强度和韧性，使磁链之间变得更加紧凑，更多的磨粒在磁链作用下与工件表面接触，可以有效地提高抛光效率。

本文以磁流变抛光为基础，使用环形 Halbach 阵列替代传统磁铁阵列，并使载液盘与磁铁阵列反向旋转来增强磁流变抛光效率。相比传统的磁铁排布方式，Halbach 阵列磁场拥有更高的磁场强度以及更富有空间变化的磁感线。更高的磁场强度意味着更高的磁场力及更高的材料去除率，富有空间变化的磁感线则能够使磁流变液中的磁链呈现出更多的姿态。由于载液盘和磁铁以相反的方向旋转，磁链根部受到与载液盘转动方向相同的摩擦力，而整个磁链受到与磁铁

转动方向相同的磁场力，方向相反的摩擦力与磁场力使得磁链拥有更为丰富的运动轨迹。磨粒也随着磁链的运动与姿态的改变不断运动，抛光头因此拥有更强的恢复性与自锐性。

1.2 装置

为实现环形 Halbach 磁铁与载液盘的反向旋转，将磁铁以阵列形式嵌入磁铁座当中，由同轴心的 2 个电机分别带动磁铁底座和载液盘以相反的方向旋转。嵌有 Halbach 阵列的磁铁底座旋转时，即产生旋转的 Halbach 阵列动态磁场。将磁流变液添加到载液盘上后，磨粒在磁场与载液盘相反旋转的共同作用下进行周期性变换更新，在保证抛光效率的同时，一定程度上延长了磁流变液的工作寿命。以上整体构成了一个可随工件表面形状改变的磁流变液抛光工具。该试验装置由 2 个电机分别带动嵌有 Halbach 阵列的磁铁底座和载液盘旋转，Halbach 阵列由 16 个 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的 N38 钕硼磁铁组成，试验装置如图 3 所示。

为提高试验过程中工艺参数水平和交互作用对试验结果准确性和可靠性的影响，需要对钛合金试验样件进行预处理和后处理。首先使用 10 000 目的砂纸交叉打磨试验样件，去除表层氧化层。再将试验样件装入密封袋中，使用无水乙醇浸泡工件，并密封，进行 30 min 的超声波清洗，去除表面杂质。最后使用 OLYMPUS OLS4100 激光共聚焦显微镜观测试验样件加工区域的表面形貌，利用粗糙度仪（西安威而信 DM120）对表面粗糙度进行测量。

试验过程中，使用 Kistler 9139AA 测力仪对剪力进行测量，分析加工参数对抛光力的影响。试验完成后，使用去离子水浸泡工件，并装入袋中密封，进行超声波清洗去除表面的残留杂质，之后观测加工区域的表面形貌，并测量粗糙度值。由于抛光中心的抛光质量最优，所以选取抛光中心作为取样点，取 3 次测量数据的平均值作为取样数据，分析各个参数对表面质量的影响。

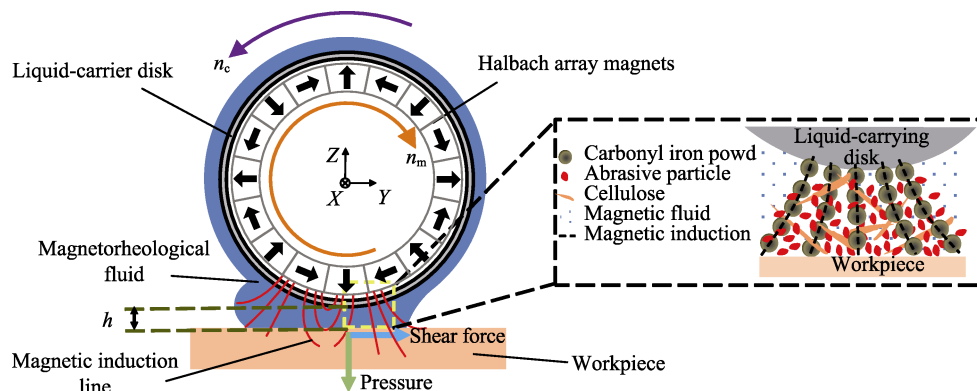


图 2 Halbach 阵列增强的磁流变抛光示意图

Fig.2 Schematic diagram of Halbach array enhanced magnetorheological polishing

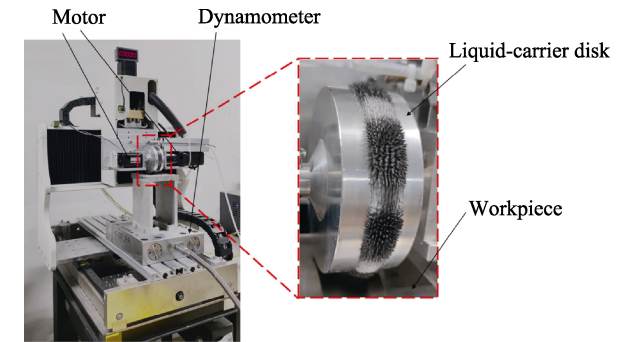


图 3 试验装置
Fig.3 Experimental device

1.3 响应面试验设计

在 Halbach 阵列增强磁流变抛光过程中,以 100 mm×100 mm×5 mm 尺寸的 TC4 钛合金作为抛光试件,工艺参数主要包括载液盘转速、磁铁转速和加工间距等,本试验对这 3 个参数进行优化。响应面法是一种通过实验设计多个因素的水平组合,建立响应曲面模型,预测并优化响应值的方法^[28]。在响应面设计中,中心复合设计 (CCD) 和 Box-Behnken 设计 (BBD) 是常用的 2 种方法。首先, CCD 设计可以适用于多个因素对应多水平的设计,而 BBD 设计的每个因素只有 3 个水平, BBD 的每个因子通常不连续,有助于后续拟合曲面,以实现响应预测和优化。因此, CCD 设计可以灵活地探究不同因素及其水平对响应值的影响,而 BBD 则更适用于较少的因素和水平组合^[29]。根据前期工艺参数的探索,确定了载液盘转速 n_c 、磁铁转速 n_m 和加工间距 h 对实验结果有着明显的影响,并通过单因素实验确定了载液盘转速 n_c 在 200 r/min,磁铁转速 n_m 在 150 r/min,加工间距 h 在 0.30 mm 时有较好的抛光效果和抛光效率^[30]。由于试验因素取值水平不连续,为了得到较好的拟合曲面,采用响应面设计法 (Box-Behnken Design, BBD) 对响应面法试验进行设计。以载液盘转速 $n_c(A)$ 、磁铁转速 $n_m(B)$ 和加工间距 $h(C)$ 作为自变量设计响应面试验。响应面试验因素和水平取值如表 1 所示。为了同时探究各个自变量因素对抛光效率的影响,将抛光时间降为 20 min,这样效率较低参数会因为抛光效率不足而无法达到较好的表面质量,从而反映在表面粗糙度这个指标上。试验所用磁流变液内各组分比例如表 2 所示。

表 1 响应面试验因素和水平取值
Tab.1 Factors and levels of response surface experiment

Level	Factors		
	Rotating speed of liquid-carrying disk	Rotating speed of magnet	Processing pitch
	$n_c(A)/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$n_m(B)/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$h(C)/\text{mm}$
-1	100	50	0.10
0	200	150	0.30
1	300	250	0.50

表 2 试验所用磁流变液组成成分
Tab.2 Composition of magnetorheological fluid for experiment

wt. %			
Carbonyl iron powder	Base liquid	Abrasive grains	Additives
45	43.5	10	1.5

基于 BBD 设计的响应面试验组和试验结果如表 3 所示。对表 3 中的试验数据结果进行分析,以剪切力 $\tau(x)$ 和表面粗糙度 $S_a(y)$ 作为响应值,建立不同响应值 (x, y) 与各个因素 (A, B, C) 之间的多元回归方程模型,重点考虑和分析了各因素之间的二元交互作用,如载液盘转速-磁铁转速 ($A \times B$)、载液盘转速-加工间距 ($A \times C$)、磁铁转速-加工间距 ($B \times C$) 之间的交互作用,建立如下数学预测模型:

$$\begin{aligned} \tau = & 0.678\,816 + 0.001\,179 \times A - 0.006\,141 \times B - \\ & 0.899\,066 \times C - 5.870\,5 \times 10^{-7} \times A \times B - \\ & 0.001\,421 \times A \times C + 0.001\,704 \times B \times C + \\ & 1.416\,87 \times 10^{-6} \times A^2 - 2.122\,58 \times 10^{-6} \times B^2 + \\ & 0.005\,887 \times C^2 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} S_a = & 49.187 - 0.012\,5 \times A - 0.116\,25 \times B - \\ & 31.25 \times C - 0.000\,3 \times A \times B + 0.012\,5 \times A \times \\ & C + 0.15 \times B \times C - 0.000\,037 \times A^2 + \\ & 0.000\,638 \times B^2 + 53.125 \times C^2 \end{aligned} \tag{2}$$

表 3 响应面试验设计方案及试验结果
Tab.3 Design plan and results of response surface experiment

Number	Factors			Results	
	$A/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$B/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	C/mm	x/N	y/nm
1	100	50	0.3	0.465 10	39
2	300	50	0.3	0.679 25	33
3	100	250	0.3	0.151 27	57
4	300	250	0.3	0.341 94	39
5	100	150	0.1	0.432 75	42
6	300	150	0.1	0.779 80	26
7	100	150	0.5	0.138 75	49
8	300	150	0.5	0.372 10	34
9	200	50	0.1	0.791 90	35
10	200	250	0.1	0.387 50	41
11	200	50	0.5	0.335 25	42
12	200	250	0.5	0.067 17	60
13	200	150	0.3	0.426 48	36
14	200	150	0.3	0.401 90	36
15	200	150	0.3	0.400 23	36
16	200	150	0.3	0.431 78	36
17	200	150	0.3	0.421 85	36

2 结果及分析

2.1 磁场仿真

磁场强度的大小直接决定了磁场对碳基铁粉颗粒所施加的磁场力和磁链对磨粒的约束力。为了验证 Halbach 阵列相比于传统 N-S 阵列的优异性和合理性,通过 COMSOL 软件对 Halbach 阵列和 N-S 阵列的磁场进行仿真,并通过测量比对验证仿真的有效性,以便于后续快速得到磁通密度分量沿不同路径的变化,以及磁通密度在不同平面上的分布。2 种磁场阵列的排布方式如图 4 所示。

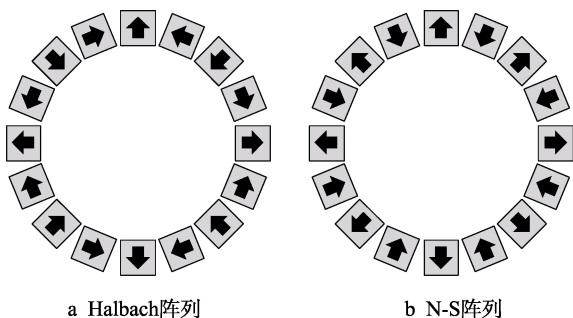


图 4 2 种磁场阵列排布方式

Fig.4 Two types of magnetic field array arrangement: a) Halbach array; c) N-S array

依据实际加工需求,所设计的抛光装置中,磁铁阵列与外侧的载液盘同心反向旋转,载液盘是一个厚度为 1 mm 的铝合金外壳,与磁铁座之间的间隙为 1 mm。工艺参数中的加工间距为工件与载液盘之间的距离,根据前期的单因素试验结果,响应面试验中加工间距的取值水平为 0.1、0.3、0.5 mm。因此,在仿真过程中,对距离磁铁外表面 2.1、2.3、2.5 mm 处的环形区域进行磁通密度模的仿真计算,仿真结果如图 5 所示。由图 5 中的仿真结果可知, Halbach 阵列比 N-S 阵列在抛光区域的磁场整体拥有更高的磁场强度。在加工间距 0.1 mm 处, Halbach 阵列磁铁比 N-S 阵列磁铁的最大磁通密度模要高 55 mT 左右,最小磁通密度模要低 45 mT 左右;随着加工间距增大,

在加工间距 0.5 mm 处, Halbach 阵列磁铁比 N-S 阵列磁铁的最大磁通密度模要高 65 mT 左右,最小磁通密度模要低 30 mT 左右。可以看出,随着加工间距的增大, Halbach 阵列磁铁的磁场衰减程度要明显低于 N-S 阵列, Halbach 阵列磁铁的在空间中有更高的磁场梯度,磁流变液会表现出更强的磁流变效应,可以显著提高抛光效率。

为了验证仿真的有效性,使用 HM100 特斯拉计对抛光区域的磁通密度进行测量,测磁区域大小为 2 mm×2 mm。磁通密度是一个有方向性的矢量,而传感器只能测量垂直于传感区域的分量,该阵列磁场对称分布,垂直对称面方向上的磁通密度分量为 0。因此,为了尽量得到磁铁阵列在空间上各个方向上的分布,使用特斯拉计对阵列磁铁沿圆周方向的切向和径向进行测量,该平面的磁通量密度的大小 $|B|$ 可由其切向分量与径向分量计算得出,如式(3)所示。

$$|B| = \sqrt{B_r^2 + B_t^2} \quad (3)$$

式中: B 为磁通密度矢量; $|B|$ 为磁通密度模; B_r 、 B_t 为 B 在 yOz 平面上以磁铁中心为中心的径向分量和切向分量。仿真结果与测量结果的对比如图 6 所示,模拟值和实测值的 $|B|$ 近乎一致,仿真效果具有较高的准确度和可信度。

2.2 抛光结果

采用磁流变液 3 mL、磨粒粒径 7 μm 、载液盘转速 250 r/min、磁铁转速 150 r/min、加工间距 0.3 mm 的试验条件,对初始面粗糙度为 59 nm 的钛合金工件进行 30 min 抛光试验,每隔 5 min 对表面质量进行一次测量。抛光时间对剪切力的影响如图 7 所示,可以看出,剪切力在合理范围保持基本稳定,不同的抛光时间对抛光过程的剪切力基本没有影响。随着抛光时间的增加,表面粗糙度呈下降趋势,表现质量逐渐变好,但是表现质量变好的速率逐渐降低,如图 8 所示。在抛光 25 min 后,粗糙度已经达到最优值,之后的抛光对表面粗糙度和表面质量几乎没有影响。工件表面凸起处逐渐被去除的过程如图 9 所示。至 30 min 时,凸起基本被去除完毕,并展现出少许抛光痕迹。

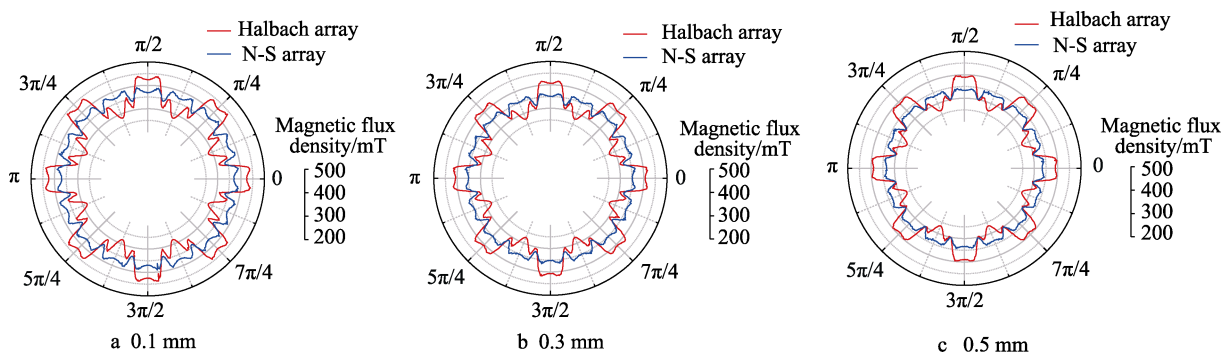


图 5 不同加工间距区域磁场仿真

Fig.5 Simulation of magnetic flux density in different machining spacing regions

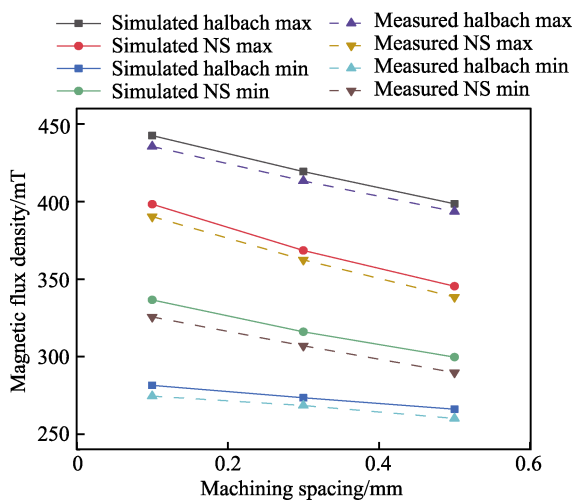


图 6 不同加工间距区域磁场仿真值与实际测量值
Fig.6 Maximum and minimum magnetic flux density of simulated and measured Halbach array and N-S array in different machining spacing regions

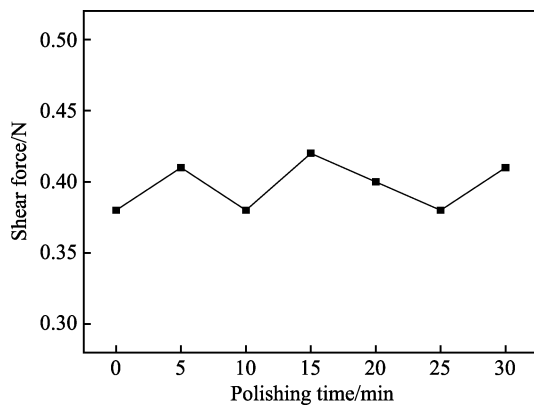


图 7 抛光时间对剪切力的影响
Fig.7 Effect of polishing time on shear force

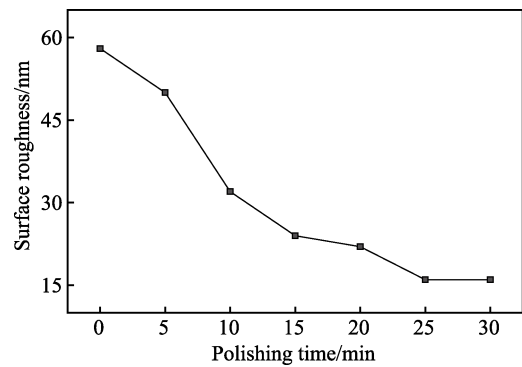


图 8 抛光时间对面粗糙度的影响
Fig.8 Effect of polishing time on surface roughness

结合图 8 和图 9 可以看出,工件初始表面不平整,有很多凸起与凹坑,凸起与凹坑间的高度差越大,表面粗糙度越差。随着磨粒对凸起处材料的剪切抛光,部分高凸起处最先被去除而变成矮凸起,表面质量迅速变好。随着抛光的进行,需要逐步去除更多更矮的凸起,因此表面质量变好的速率降低。

2.3 响应面法分析

2.3.1 剪切力的拟合模型方差分析

剪切力 τ 的拟合方程方差分析结果如表 4 所示。一般通过拟合方程数学预测模型的 P 值来判定拟合方程模型的显著性, $P \leq 0.1$, 即模型在 90% 显著性水平下显著, P 值越小, 表明模型越显著。此外, 为了保证数学预测模型的准确度, 还需要满足失拟项的 $P > 0.05$ 。

表 4 中的方差分析结果表明, 剪切力拟合方程中的 AB 项、 A^2 项、 B^2 项与 C^2 项的 P 值都大于 0.1。这

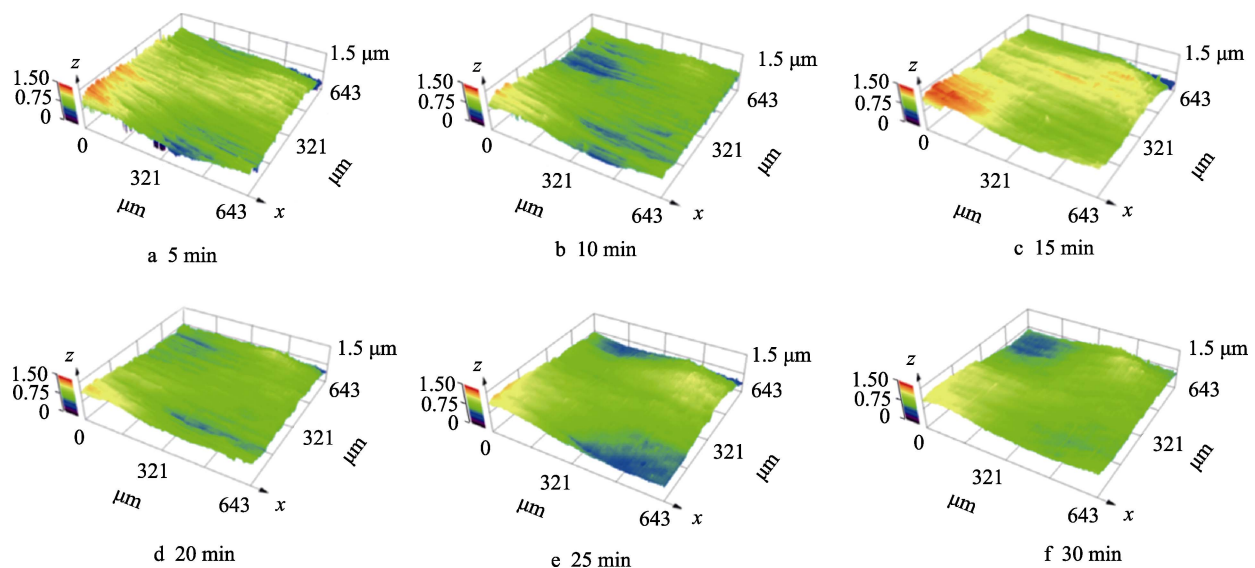


图 9 不同抛光时间后在共聚焦显微镜 20 倍镜下观测到的表面形貌
Fig.9 Surface morphology observed under a confocal microscope at 20 \times for different polishing time

表 4 剪切力拟合方程方差分析
Tab.4 Analysis of variance of the fitted equation for shear force

Source	Sum of squares	F_{df}	Mean square	F	P
Model	0.624 3	9	0.069 4	88.95	<0.000 1
A	0.121 3	1	0.121 3	155.6	<0.000 1
B	0.219	1	0.219	280.85	<0.000 1
C	0.273 3	1	0.273 3	350.5	<0.000 1
AB	0.000 1	1	0.000 1	0.176 8	0.686 8
AC	0.003 2	1	0.003 2	4.14	0.081 2
BC	0.004 6	1	0.004 6	5.96	0.044 7
A^2	0.000 8	1	0.000 8	1.08	0.332 4
B^2	0.001 9	1	0.001 9	2.43	0.162 8
C^2	2.3×10^{-7}	1	2.3×10^{-7}	0.000 3	0.986 7
Residual	0.005 5	7	0.000 8		
Lack of fit	0.004 6	3	0.001 5	7.34	0.042
Pure error	0.000 8	4	0.000 2		
Cor total	0.629 7	16			

是因为剪切力在预设试验条件下基本只与磨粒速度有关,所以这些项对于剪切力拟合方程均不显著,影响了拟合方程的显著性。失拟项的 P 为 0.042, 小于 0.05, 说明该数学预测模型的可信度也不足。

为了得到更准确可靠的拟合方程,去除拟合方程中的 AB 项、 A^2 项、 B^2 项与 C^2 项,再对试验数据进行拟合,得到优化后的剪切力 τ 拟合方程:

$$\begin{aligned} \tau = & 0.683\,770 + 0.001\,658 \times A - \\ & 0.002\,166 \times B - 0.895\,533 \times C - \\ & 0.001\,421 \times A \times C + 0.001\,704 \times B \times C \end{aligned} \quad (4)$$

优化后剪切力拟合方程式的方差分析结果如表 5 所示。结果表明,剪切力模型的 $P < 0.000\,1$, 且模型

表 5 优化后剪切力拟合方程的方差分析
Tab.5 Analysis of variance of the optimized fitted equation for shear force

Source	Sum of squares	F_{df}	Mean square	F	P
Model	0.621 5	5	0.124 3	166.49	<0.000 1
A	0.121 3	1	0.121 3	162.51	<0.000 1
B	0.219	1	0.219 0	293.33	<0.000 1
C	0.273 3	1	0.273 3	366.08	<0.000 1
AC	0.003 2	1	0.003 2	4.33	0.061 6
BC	0.004 6	1	0.004 6	6.22	0.029 8
Residual	0.008 2	11	0.000 7		
Lack of fit	0.007 4	7	0.001 1	5.02	0.069 1
Pure error	0.000 8	4	0.000 2		
Cor total	0.629 7	16			

中所有项的 P 均小于 0.1, 失拟项 P 为 0.069 1, 大于 0.5, 说明根据试验结果构建的数学预测模型的显著性非常好。为了验证回归模型的可信度和准确性,以及拟合方程优化的效果,对相关系数 R^2 、校正相关系数 R_{Adj}^2 、预测相关系数 R_{Pre}^2 、变异系数 (CV)、信噪比 (SNR) 等重要指标进行分析。相关系数 R^2 越接近 1, 说明模型的拟合程度越好; 校正相关系数 R_{Adj}^2 与预测相关系数 R_{Pre}^2 之间的差异小于 0.2, 且差距越小, 说明模型的吻合程度越好; 变异系数 $< 10\%$ 说明模型稳定性良好; 信噪比 > 4 , 说明信号充足, 模型数据的可信度高。剪切力预测模型的可信度分析如表 6 所示。

表 6 剪切力预测模型的可信度分析
Tab.6 Reliability analysis of shear force prediction model

Model	R^2	R_{Adj}^2	R_{Pre}^2	$R_{CV}/\%$	R_{SNR}
Initial	0.991 3	0.980 2	0.880 6	6.76	32.711 1
Optimized	0.987 0	0.981 0	0.949 1	6.61	43.157 7

优化后的相关系数 $R^2 = 0.987$, 说明该模型可以解释 98.7% 的数据, 相关系数 R^2 与校正相关系数 R_{Adj}^2 间的差距, 以及校正相关系数 R_{Adj}^2 与预测相关系数 R_{Pre}^2 间的差距都有所缩小, 说明优化后的模型吻合程度有所提高。变异系数略微降低, 表示模型的稳定性略微增强。信噪比大幅增加, 说明模型数据的可信度变高。综上所述, 该模型与实际拟合情况良好, 可以通过该模型对试验进行分析。

优化后的剪切力拟合模型中, P 的大小表示该因素对响应目标是否显著, F 表示该因素对响应目标的影响程度: F 越大, 该因素对响应目标影响的显著性越大。载液盘转速 n_c 、磁铁转速 n_m 和加工间距 h 的 P 均小于 0.000 1, 三者均是极显著因素; F 分别为 162.51、293.33、366.08, 所以工艺参数对剪切力的影响显著性顺序为加工间距、磁铁转速、载液盘转速。二次项中, AC 交互的 P 大于 BC 交互的 P , 说明在加工间距不变的情况下, 载液盘转速比磁铁转速对剪切力的影响更显著。

2.3.2 表面粗糙度的拟合模型方差分析

表面粗糙度 S_a 的拟合方程方差分析结果如表 7 所示。结果表明, 表面粗糙度拟合方程中的 AC 项与 A^2 项的 P 都大于 0.1。这是由于随载液盘转速减小, 面粗糙度 S_a 单调上升, 故表面粗糙度拟合方程的这些项均不显著。

为了得到更准确的拟合方程, 去除拟合方程中的 AC 项与 A^2 项, 再对试验数据进行拟合, 得到优化后表面粗糙度 S_a 的拟合方程:

$$\begin{aligned} S_a = & 49.690\,7 - 0.023\,75 \times A - 0.115\,658 \times \\ & B - 28.453\,95 \times C - 0.000\,3 \times A \times B + \\ & 0.15 \times B \times C + 0.000\,636 \times B^2 + 52.631\,58 \times C^2 \end{aligned} \quad (5)$$

表 7 表面粗糙度拟合方程方差分析
Tab.7 Analysis of variance of the fitted equation
for surface roughness

Source	Sum of squares	F_{df}	Mean square	F	P
Model	1 145.22	9	127.25	41.92	<0.000 1
A	378.12	1	378.12	124.56	<0.000 1
B	288	1	288	94.87	<0.000 1
C	210.13	1	210.13	69.22	<0.000 1
AB	36	1	36	11.86	0.010 8
AC	0.25	1	0.25	0.082 4	0.782 4
BC	36	1	36	11.86	0.010 8
A^2	0.592 1	1	0.592 1	0.195	0.672 1
B^2	171.12	1	171.12	56.37	0.000 1
C^2	19.01	1	19.01	6.26	0.040 8
Residual	21.25	7	3.04		
Lack of fit	21.25	3	7.08		
Pure error	0	4	0		
Cor total	1 166.47	16			

优化后的表面粗糙度拟合方程式的方差分析结果如表 8 所示。表 5 中的方差分析结果表明, 表面粗糙度模型的 $P<0.000\ 1$, 且模型中所有项的 P 均 <0.1 , 说明根据试验结果构建的数学预测模型的显著性非常好。表面粗糙度预测模型可信度分析如表 9 所示。

表 8 优化后的表面粗糙度拟合方程方差分析
Tab.8 Analysis of variance of the optimized fitted
equation for surface roughness

Source	Sum of squares	F_{df}	Mean square	F	P
Model	1 144.38	7	163.48	66.6	<0.000 1
A	378.12	1	378.12	154.04	<0.000 1
B	288	1	288	117.33	<0.000 1
C	210.13	1	210.13	85.6	<0.000 1
AB	36	1	36	14.67	0.004 0
BC	36	1	36	14.67	0.004 0
B^2	170.53	1	170.53	69.47	<0.000 1
C^2	18.71	1	18.71	7.62	0.022 1
Residual	22.09	1	2.45		
Lack of fit	22.09	1	4.42		
Pure error	0	9	0		
Cor total	1 166.47	5			

优化后的相关系数 $R^2=0.981\ 1$, 说明该模型可以解释 98.11%的数据。相关系数 R^2 、校正相关系数 R^2_{Adj} 和校正相关系数预测相关系数 R^2_{Pre} 间的差距都有所缩小, 且 R^2_{Adj} 与 R^2_{Pre} 更加接近 1, 说明优化后模型拟合的合程度更高。变异系数略微降低, 模型的稳定性略微增强。信噪比增加, 模型数据的可信度变高。综上所述, 该模型对实际的拟合情况良好, 可以通过该模型对试验进行分析。

表 9 表面粗糙度预测模型的可信度分析
Tab.9 Reliability analysis of surface roughness
prediction model

Model	R^2	R^2_{Adj}	R^2_{Pre}	$R_{CV}/\%$	R_{SNR}
Initial	0.981 8	0.958 4	0.708 5	4.38	24.788 5
Optimized	0.981 1	0.966 3	0.876 3	3.93	30.220 5

优化后的表面粗糙度拟合模型中, 载液盘转速 n_c 、磁铁转速 n_m 和加工间距 h 的 P 均 $<0.000\ 1$, 三者均是极显著因素。 F 分别为 154.04、117.33、85.6, 所以工艺参数对表面粗糙度的影响显著性顺序为载液盘转速、磁铁转速、加工间距。在二次项中, AB 交互的 P 与 BC 交互的 P 相等, 说明在磁铁转速不变的情况下, 载液盘转速和磁铁转速对剪切力的影响显著性几乎一致。

2.4 工艺参数的交互影响

2.4.1 对剪切力的影响分析

载液盘转速、磁铁转速和加工间距对剪切力的响应面图如图 10 所示。加工间距为 0.3 mm 时, 载液盘转速和磁铁转速对剪切力的影响不存在交互关系, 都是单纯的线性关系, 如图 10a 所示。载液盘带动磨粒与羰基铁颗粒旋转, 随着载液盘速度的升高, 磨粒与羰基铁颗粒的速度随之升高, 从而导致剪切力增大。因为羰基铁颗粒受载液盘给予的摩擦力与磁铁给予的磁场力的共同作用, 所以随磁铁转速的提高, 会提高给予羰基铁颗粒的反向旋转的力, 导致剪切力降低。

磁铁转速为 150 r/min 时, 在不同加工间距下, 随着载液盘转速的增大, 剪切力的变化速率不同, 如图 10b 所示。加工间距越小, 剪切力随载液盘转速变化的速率越大。说明加工间距越小, 载液盘转速对剪切力的影响越大。这是因为载液盘摩擦力只通过与磁流变液的接触面对磁流变液做功, 而各种阻碍磁流变液运动的力在整个磁流变液内所有位置均做负功, 随着加工间距的增大, 载液盘摩擦力所做功没有变化, 而阻碍磁流变液运动的力所作负功越来越大, 导致提供供给剪切作用的能量降低。

载液盘转速为 200 r/min 时, 不同加工间距下, 随着磁铁转速的增大, 剪切力的变化速率不同, 如图 10c 所示。加工间距越小, 剪切力随磁铁转速变化的速率越大。说明加工间距越小, 磁铁转速对剪切力的影响越大。原因为随着间距变大, 磁场强度降低, 磁场力降低, 导致磁铁转速对剪切力的影响变小。

2.4.2 对表面粗糙度的影响分析

载液盘转速、磁铁转速和加工间距对钛合金表面粗糙度的响应面图如图 11 所示。加工间距为 0.3 mm 时, 在载液盘转速不变的情况下, 随着磁铁转速的增

大,表面粗糙度先降低后增高,如图11a所示。说明随着磁铁转速在低速时逐渐增大,增加了抛光头的自锐性,其对抛光效率的提高幅度大于其因阻碍磨粒运动而导致抛光效率降低的幅度。当磁铁转速超过一定数值时,其提高的抛光效率小于其因阻碍磨粒运动而导致的降低的抛光效率,使得整体抛光效率的下降,表面粗糙度变差。

磁铁转速为150 r/min时,载液盘转速与加工间距之间的交互作用对表面粗糙度的影响如图11b所示。根据前面对剪切力拟合方程方差的分析,载液盘转速和加工间距的交互作用仅在剪切力上较低比例的数值显示,其数值不足以在表面粗糙度上体现出交互作用。随着剪切力的增大,抛光效率的提高,表面粗糙度在有限时间内达到较好之后便很难再提高,因此相比剪切力体现出二阶函数的趋势。

载液盘转速为200 r/min时,在不同加工间距下,达到抛光头最大自锐性所需的磁铁转速不同,如图11c所示。为了达到试验结果的表面粗糙度相近的情况下,加工间距越小,所需的磁铁转速越大。因为加工间距越小,磨粒受到载液盘作用越大,所需的磁铁

作用也需越大。

2.5 验证试验

对响应面预测模型进行分析,使用 Design Expert-13 的 Optimization 模块下的 Numerical 功能分别对剪切力和表面粗糙度进行了参数设置。确定了需要快速去除材料时,使剪切力趋于最大值的工艺参数条件:载液盘转速为227 r/min,磁铁转速为64 r/min,加工间距为0.1 mm。此工艺参数条件下的剪切力 τ 为0.793 N,表面粗糙度 S_a 为33.648 nm。根据实际情况进行验证试验,3次试验的剪切力 τ 平均值为0.812 N,表面粗糙度 S_a 平均值为34.911 nm。还确定了需要最优表面质量时,使表面粗糙度值趋于最小值时的工艺参数条件:载液盘转速为300 r/min,磁铁转速为150 r/min,加工间距为0.1 mm。此工艺参数条件下的剪切力 τ 为0.744 N,表面粗糙度 S_a 为25.976 nm。根据实际情况进行验证试验,3次试验的剪切力 τ 平均值为0.796 N,表面粗糙度 S_a 平均值为26.723 nm。验证试验结果与预测值非常接近,说明该响应面预测模型较为合理。

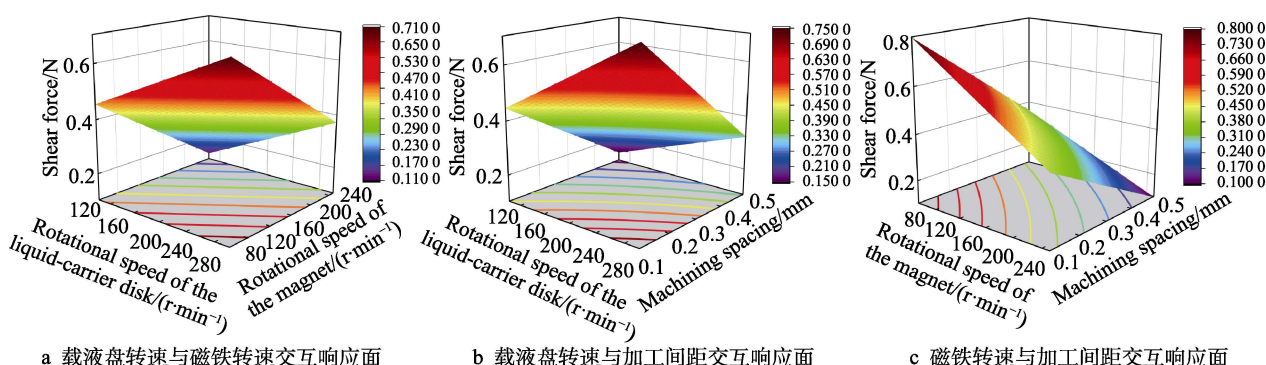


图10 抛光工艺参数对剪切力影响的响应面图

Fig.10 Response surface diagram of the effect of polishing process parameters on shear force: a) rotational speed of the liquid-carrier disk and rotational speed of the magnet; b) rotational speed of the liquid-carrier disk and machining spacing; c) rotational speed of the magnet and machining spacing

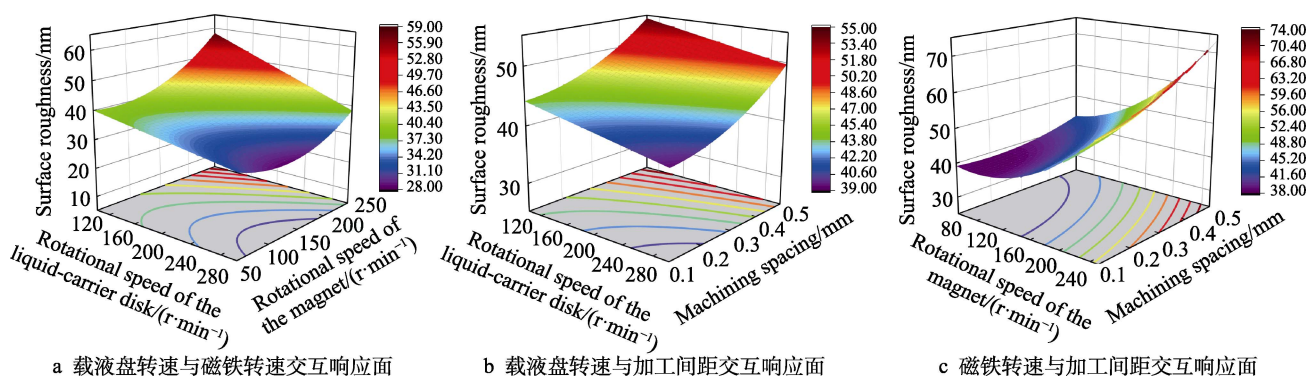


图11 抛光工艺参数对剪切力影响的响应面图

Fig.11 Response surface diagram of the effect of polishing process parameters on surface roughness: a) rotational speed of the liquid-carrier disk and rotational speed of the magnet; b) rotational speed of the liquid-carrier disk and machining spacing; c) rotational speed of the magnet and machining spacing

3 结论

1) 提出了一种 Halbach 阵列增强的磁流变抛光方法, 并将 Halbach 阵列与 N-S 阵列进行了磁场仿真对比研究。结果表明, Halbach 阵列磁场梯度高, 随加工间距的增加, 磁场强度衰减速度变慢, 其通过磁场强度测量证明了仿真结果的准确性和可信度。

2) 通过响应面法进行试验设计, 并采用方差分析法对试验结果进行分析, 去除了抛光力和表面粗糙度数学预测模型的拟合方程中的不显著项。再结合试验结果重新推导拟合方程, 提高了预测模型的可靠性和准确度。

3) 分析了抛光力和表面粗糙度在多个工艺参数因素共同作用下的变化规律, 评价了各个因素对抛光力和表面粗糙度的影响顺序。在响应面交互作用分析中, 工艺参数对剪切力的影响的大小顺序: 加工间距、磁铁转速、载液盘转速; 对表面粗糙度影响的大小顺序: 载液盘转速、磁铁转速、加工间距。

4) 利用线性回归方程对粗糙度与剪切力进行了预测和验证试验。分析预测模型确定了需要快速去除材料时使剪切力趋于最大值时的工艺参数组合, 还确定了需要最优表面质量时使表面粗糙度值趋于最小值时的工艺参数组合。验证试验结果与预测值非常接近, 说明该响应面预测模型较为合理。

参考文献:

- [1] 黄琳, 孙艳, 郭唯明, 等. 当前新材料及所需战略性矿产概述[J]. 中国矿业, 2018, 27(8): 1-8.
HUANG L, SUN Y, GUO W M, et al. Summary of Current New Materials and Necessary Strategic Mineral Resources[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(8): 1-8.
- [2] 黄朝文, 葛鹏, 赵永庆, 等. 低温钛合金的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 254-260.
HUANG C W, GE P, ZHAO Y Q, et al. Research Progress in Titanium Alloys at Cryogenic Temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 254-260.
- [3] 杨佩, 康聪, 李维. TC4 钛合金工艺进展[J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1): 45-47.
YANG P, KANG C, LI W. Progress in TC4 Titanium Alloy Technology[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(1): 45-47.
- [4] GOGIA A K. High-Temperature Titanium Alloys[J]. Defence Science Journal, 2005, 55(2): 149-173.
- [5] EYLON D, FUJISHIRO S, POSTANS P J, et al. High-Temperature Titanium Alloys—A Review[J]. JOM, 1984, 36(11): 55-62.
- [6] 田永武, 朱乐乐, 李伟东, 等. 高温钛合金的应用及发展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 17-20.
- [7] KOIZUMI H, TAKEUCHI Y, IMAI H, et al. Application of Titanium and Titanium Alloys to Fixed Dental Prostheses[J]. Journal of Prosthodontic Research, 2019, 63(3): 266-270.
- [8] ZHU J H, ZHOU H, WANG C, et al. A Review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(1): 91-110.
- [9] 傅茂辉. 半导体晶片磁流变抛光的磁场发生装置设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
FU M H. Design of Magnetic Field Generator for Magnetorheological Finishing of Semiconductor Wafers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [10] 潘文波. 典型手机外壳材料的集群磁流变平面抛光加工研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
PAN W B. Research on the Cluster Magnetorheological Finishing for the Typical Material of Cell Phone Shell[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [11] ZHANG P, DONG Y Z, CHOI H J, et al. Reciprocating Magnetorheological Polishing Method for Borosilicate Glass Surface Smoothness[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2020, 84: 243-251.
- [12] SALZMAN S, ROMANOFKY H J, WEST G, et al. Acidic Magnetorheological Finishing of Infrared Polycrystalline Materials[J]. Applied Optics, 2016, 55(30): 8448-8456.
- [13] 阎秋生, 梁智镔, 潘继生. 集群磁流变抛光加工表面磁轨迹强度建模优化及加工均匀性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(12): 243-254.
YAN Q S, LIANG Z B, PAN J S. Modeling Optimization and Uniformity of Cluster Magnetorheological Polishing via Magnetic Trajectory Intensity in Machining Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(12): 243-254.
- [14] 王有良, 史小锋, 陈秀娟, 等. 基于双磁场磁性复合流体的抛光性能[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 360-372.
WANG Y L, SHI X F, CHEN X J, et al. Polishing Performance of Magnetic Compound Fluid Based on Double Magnetic Field[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 360-372.
- [15] FENG M, WU Y B, WANG Y L, et al. Effect of the Components of Magnetic Compound Fluid (MCF) Slurry on Polishing Characteristics in Aspheric-Surface Finishing with the Doughnut-Shaped MCF Tool[J]. Precision Engineering, 2020, 65: 216-229.
- [16] SHUTE H A, MALLINSON J C, WILTON D T, et al. One-Sided Fluxes in Planar, Cylindrical, and Spherical Magnetized Structures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(2): 440-451.
- [17] ZHU Z Q, HOWE D. Halbach Permanent Magnet Machines and Applications: A Review[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2001, 148(4): 299.

- [18] SONG N, ZHU M, ZHOU G, et al. Design and Optimization of Halbach Permanent Magnet Array with Rectangle Section and Trapezoid Section[J]. *International Journal of Engineering*, 2021, 34(11): 2379-2386.
- [19] 郭保成, 黄允凯, 彭飞, 等. Halbach 阵列盘式永磁电机的解析计算[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(1): 289-295.
GUO B C, HUANG Y K, PENG F, et al. An Analytical Model for Axial Flux Permanent Magnet Machines with Halbach Array[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(1): 289-295.
- [20] 罗成, 张昆仑, 靖永志. 新型 Halbach 阵列永磁电动悬浮系统垂向稳定性[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(2): 101-109.
LUO C, ZHANG K L, JING Y Z. Vertical Stability of Permanent Magnet EDS System with Novel Halbach Array[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(2): 101-109.
- [21] GUO Y F, YIN S H, OHMORI H, et al. A Novel High Efficiency Magnetorheological Polishing Process Excited by Halbach Array Magnetic Field[J]. *Precision Engineering*, 2022, 74: 175-185.
- [22] ZHANG Y, CAO J Y, ZHU H Y, et al. Design, Modeling and Experimental Verification of Circular Halbach Electromagnetic Energy Harvesting from Bearing Motion [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 811-821.
- [23] LUO H, GUO M J, YIN S H, et al. An Atomic-Scale and High Efficiency Finishing Method of Zirconia Ceramics by Using Magnetorheological Finishing[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 444: 569-577.
- [24] 周琴琴, 彭可, 陈永福, 等. 磁流变抛光加工中磁场发生装置的设计与实验[J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 337-344.
ZHOU Q Q, PENG K, CHEN Y F, et al. Design and Experiment of Magnetic Field Generator in Magneto-rheological Polishing Process[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(6): 337-344.
- [25] 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.
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.
- [26] 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.
- [27] ESHGARF H, AHMADI NADOOSHAN A, RAISI A. An Overview on Properties and Applications of Magnetorheological Fluids: Dampers, Batteries, Valves and Brakes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104648.
- [28] KESSAISSIA F Z, ZEGAOUI A, AILLERIE M, et al. Factorial Design and Response Surface Optimization for Modeling Photovoltaic Module Parameters[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 299-309.
- [29] PINHEIRO D R, DE F NEVES R, PAZ S P A. A Sequential Box-Behnken Design (BBD) and Response Surface Methodology (RSM) to Optimize SAPO-34 Synthesis from Kaolin Waste[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, 323: 111250.
- [30] 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. Research on Halbach Array-enhanced Magnetorheological High Efficient Polishing of Titanium Alloy[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2023.