

# 基于 Hilbert 曲线磁粒研磨轨迹均匀性实验研究

张志鹏, 陈燕, 潘明诗, 吴炫炫, 高慧敏

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** **目的** 改善传统平面磁粒研磨中轨迹均匀性较差、材料去除不均匀等问题。**方法** 首先, 基于 Hilbert 分形曲线加工平面, 对 Hilbert 分形曲线进行几何特征的修改, 进一步改善研磨轨迹的均匀分布; 其次, 传统磁粒研磨平面时采用圆柱磁极, 其半径方向线速度的差异会导致材料出现去除量不一致等问题, 使用环形磁极进行研磨, 对不同长径比环形磁极进行三维静磁场模拟仿真, 对比不同长径比的磁感应强度和 1 mm 处的磁场强度曲线, 选取最佳的长径比进行研磨, 在一定程度上保证材料的均匀去除; 最后, 利用 ADAMS 软件进行单个磨粒运动轨迹的仿真, 建立笛卡尔坐标网格划分, 利用离散系数  $C_v$  进行轨迹密度的数值分析, 对研磨轨迹均匀性进行评价。**结果** 长径比为 3:4 的环形磁极的磁感应强度最大, 可达 300 mT 左右。在相同条件下, 分别沿传统直线往复路径、Hilbert 曲线和改进的 Hilbert 曲线进行仿真, 经离散系数  $C_v$  的评定, 沿改进 Hilbert 曲线的研磨轨迹均匀性显著提高, 离散系数  $C_v$  为 0.407, 较传统往复式的离散系数提高了约 43.2%, 较 Hilbert 曲线路径的离散系数提高了约 10.7%。沿改进的 Hilbert 曲线的 9 个检测点的表面粗糙度降幅基本一致, 降幅曲线平缓。原始表面的加工纹理、缺陷被完全去除, 研磨后表面形貌均匀平坦。**结论** 沿改进的 Hilbert 加工路径进行研磨, 研磨轨迹复杂多样, 且分布相对均匀, 确保了表面材料去除量的均一性, 表面质量较好。

**关键词:** 磁粒研磨; 研磨轨迹; Hilbert 分形曲线; 轨迹均匀性; 磁场仿真; 表面形貌  
**中图分类号:** TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0408-10  
**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.037

## Experimental Study on Magnetic Particle Grinding Uniformity Based on Hilbert Curve

ZHANG Zhi-peng, CHEN Yan, PAN Ming-shi,  
WU Xuan-xuan, GAO Hui-min

(School of Mechanical Engineer and Automation, University of Science and  
Technology Liaoning, Liaoning Anshan 114051, China)

**ABSTRACT:** Planar magnetic particle grinding technology is a special processing technology that uses magnetic force to carry

收稿日期: 2021-10-14; 修订日期: 2021-12-23

Received: 2021-10-14; Revised: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目 (20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金 (B201703)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775258); Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458); Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Processing (B201703)

作者简介: 张志鹏 (1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: ZHANG Zhi-peng (1997-), Male, Master, Research focus: precision and special processing.

通讯作者: 陈燕 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Corresponding author: CHEN Yan (1963-), Female, Doctor, Professor, Research focus: Precision and special processing.

引文格式: 张志鹏, 陈燕, 潘明诗, 等. 基于 Hilbert 曲线磁粒研磨轨迹均匀性实验研究[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 408-417.

ZHANG Zhi-peng, CHEN Yan, PAN Ming-shi, Experimental Study on Magnetic Particle Grinding Uniformity Based on Hilbert Curve[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 408-417.

out mechanical grinding. With the development of science and technology, magnetic particle grinding technology is constantly applied to the processing of products in the such fields as high-precision machinery, instrumentation and aerospace, where the requirements for the machining accuracy and surface quality of workpieces are becoming more and more stringent. The surface quality of the workpiece, especially the grinding uniformity, is an important indicator to evaluate the quality of processing, and the uniformity of the grinding trajectory is directly related to the selection of the processing path. Thus far, in the planar magnetic particle grinding process, most of the traditional linear reciprocating processing path, this processing method exists in such issues as the workpiece surface can not be uniform grinding, grinding track repetitive, part of the grinding stripes easy to deepen. In response to these problems, the Hilbert curve is proposed as the grinding path, which is different from the traditional linear reciprocating type of planar magnetic particle grinding.

This paper aims to optimize the geometrical features of the Hilbert fractal curve and compare the magnitude of magnetic induction at the end face of the toroidal pole with different length-to-diameter ratios to find the suitable pole size, and modify the geometrical features to improve the uneven distribution of the trajectory caused by the direct adoption of the Hilbert fractal curve. Under the same conditions, single grain grinding trajectories were simulated using ADAMS along the conventional linear reciprocating path, the Hilbert curve and the modified Hilbert curve, and the workpiece grid was divided to count the coordinate points of the grinding trajectories. The coefficient of dispersion is 0.407, with an improvement of approximately 43.2% compared to the conventional reciprocating type and approximately 10.7% compared to the Hilbert curve path. Secondly, most conventional planar magnetic particle grinding is carried out with cylindrical axial poles, but the cylindrical poles have an "edge effect", the magnetic induction is higher at the edges and weaker in the center, resulting in an uneven distribution of magnetic particles. In order to improve the surface quality and eliminate the "edge effect" and the difference in linear velocity when the pole rotates, an axially magnetized circular permanent magnet with an outer diameter of 20 mm and a wall thickness of 2 mm is selected to machine the workpiece. Furthermore, in order to examine the effect of different L/D ratios on the magnetic induction of the toroidal pole, four types of toroidal pole models with L/D ratios of 1 : 4, 1 : 2, 3 : 4 and 1 : 1 were established using Maxwell software, and the three-dimensional static magnetic field simulations were carried out in a row. In addition, the optimum length-to-diameter ratio was chosen for the grinding to ensure a certain degree of uniform material removal, and it was verified that the annular pole with a length-to-diameter ratio of 3 : 4 had a maximum magnetic induction of approximately 300 mT.

When a  $\phi 20 \text{ mm} \times \phi 16 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  axially magnetized permanent magnet pole was selected and the SUS304 stainless steel flat plate ( $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ) was ground along a modified Hilbert curve as the grinding path, the surface roughness of the nine inspection points in different areas of the workpiece surface was reduced at nearly the same rate with a gentle reduction curve compared to the conventional linear reciprocating path. What's more, the processing texture and defects of the original surface were basically removed, the surface shape after grinding was uniform and flat, and the grinding trajectory was complex and diverse yet relatively evenly distributed, ensuring uniformity in the amount of material removed from the surface as well as better surface quality uniformity.

**KEY WORDS:** magnetic abrasive finishing; grinding trajectory; Hilbert fractal curve; trajectory uniformity; simulation of magnetic field; surface appearance

目前, 随着科学技术的发展, 磁粒研磨技术被广泛应用于高精密机械、仪器仪表和航空航天等领域的产品加工, 这些领域对工件的加工精度和表面质量的要求越来越严格<sup>[1-3]</sup>。工件的表面质量, 尤其是研磨均匀性, 是评判加工质量优劣的重要指标, 而研磨均匀性以研磨轨迹均匀性为主要的表现形式<sup>[4]</sup>。研磨轨迹的均匀性与加工路径的选择有着直接的关系。传统的直线往复平面磁粒研磨加工技术存在研磨不均匀、材料去除量不一致等问题。由于传统的平面磁粒研磨只是磁极的旋转和单一方向的直线进给运动, 这样加

工时研磨轨迹的重复性较强, 部分研磨条纹易深化, 不易获得良好的表面粗糙度<sup>[5]</sup>。

刘清等<sup>[6]</sup>针对传统的直线往复式研磨的轨迹覆盖不均匀等问题, 建立了  $x$ - $y$  联动的平面研磨轨迹模拟仿真, 并选取了最佳的组合参数, 验证了  $x$ - $y$  联动平面研磨方法的有效性, 但是针对研磨轨迹均匀性的评定没有提出准确数值化的衡量标准。焦安源等<sup>[7]</sup>通过在磁极自转的基础上施加公转的运动方式优化“磁粒刷”的运动轨迹, 并进行了实验研究, 结果表明, 优化后研磨轨迹的均匀性较传统的平面磁粒研磨方

法有所提升。该研究仅针对加工研磨路径进行了初步探讨,未进行深入的优化改进,与传统的研磨方法一样,也存在加工范围有限等问题。

针对上述问题,区别于传统的直线往复式的平面磁粒研磨,文中采用 Hilbert 曲线作为研磨路径进行加工。直接采用 Hilbert 分形曲线进行研磨会造成研磨轨迹分布的不均,对 Hilbert 分形曲线进行几何特征的修正,通过将 Hilbert 研磨路径与修正后的 Hilbert 研磨路径进行对比分析,建立笛卡尔坐标系,将工件表面划分为 5 mm×5 mm 的小网格,采用离散系数  $C_v$  来评估修正后 Hilbert 曲线的研磨轨迹均匀性。

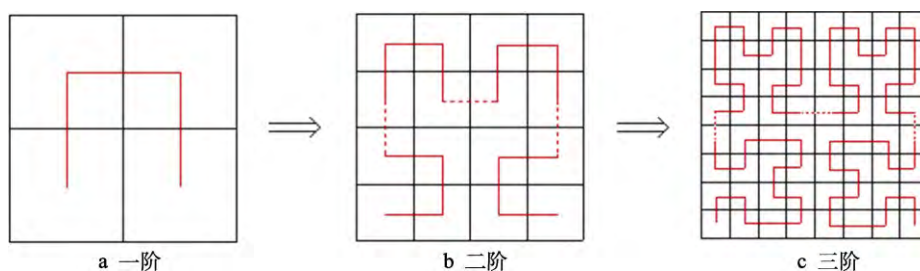


图 1 Hilbert 曲线生成过程

Fig.1 Hilbert curve generation process: a) first order Hilbert curve; b) second order Hilbert curve; c) third order Hilbert curve

## 1.2 Hilbert 曲线几何特征优化

理想的平面研磨轨迹应满足以下要求:加工工件应尽可能平行移动,运动速度尽可能均匀;研磨工具的运动轨迹应遍及整个加工表面;研磨工具在工件表面的研磨轨迹应分布均匀;研磨轨迹应避免过早地出现周期性重复现象;研磨轨迹运动方向应在每个时刻都会改变。实际上,一阶的 Hilbert 分形曲线不可能规则地遍布整个平面,一定存在相交点或间隙<sup>[9-10]</sup>。

若直接采取原始的 Hilbert 曲线进行研磨,则在工件表面产生的研磨轨迹存在覆盖不均匀等问题。如图 2 所示,在原始的 Hilbert 曲线的 4 个拐角处,产生的研磨轨迹存在密集区域。该区域内工件的材料去除量将会相对较大,造成过度研磨,而在 Hilbert 曲线中间区域,其研磨轨迹相对稀疏,该区域的材料去除量将会较小,这将会出现工件表面材料去除分布不均匀的现象。由此,文中对原始的 Hilbert 曲线进行几何形状改进,以达到研磨方向多变且研磨轨迹均匀分布的目的,从而获得均匀的表面质量。

因为原始 Hilbert 曲线的研磨轨迹不能实现工件表面的均匀覆盖,所以在原始 Hilbert 曲线的基础上对其几何特征进行了修正。将研磨轨迹密集区域向研磨轨迹疏松区域扩展,以改善研磨轨迹的分布。由于 Hilbert 曲线内部的空间较大,在上述基础上,连接线(二阶 Hilbert 曲线虚线部分)又做出了一个内凹的几何变化。通过对 Hilbert 曲线的几何特征进行修正,以改善研磨轨迹的分布。

## 1 Hilbert 曲线优化

### 1.1 Hilbert 曲线

Hilbert 曲线是一种空间填充曲线。首先把一个正方形等分为 4 个小正方形,依次从左下角的正方形中心点出发往左上角正方形中心点,再往右到右上角的正方形中心点,再往下的右下角正方形中心点,此为一次迭代。若对这 4 个小正方形不断地划分为更小的 4 个小正方形,一直迭代,将其中心点连接起来,最终就可以得到一条可以填充整个正方形的曲线,这就是 Hilbert 分形曲线<sup>[8]</sup>,其大致过程如图 1 所示。

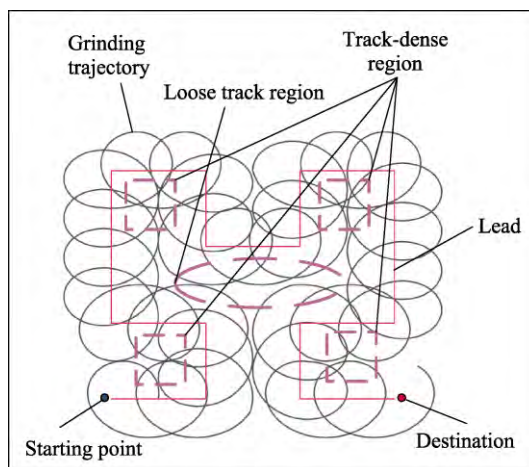


图 2 原始 Hilbert 曲线研磨轨迹  
Fig.2 Original Hilbert curve grinding trajectory

如图 3 所示,在一阶 Hilbert 曲线的直线  $D_1-D_2$  下侧增添一个新点  $D_{12}$ ,直线  $D_2-D_3$  左侧增添一个新点  $D_{23}$ ,直线  $D_3-D_4$  上侧增添一个新点  $D_{34}$ ,这样既对拐角处的轨迹进行了分散化,又向曲线内部增加了研磨轨迹的密度。

按照初步修改的 Hilbert 曲线进行研磨轨迹仿真,如图 4 所示。由图 4 可以看出,研磨轨迹密集和疏松区域的轨迹分布不均等问题均有所改善。

虽然对原始 Hilbert 曲线进行了初步改进,这对研磨轨迹均匀性分布有着积极的作用,但在 Hilbert

中间区域仍存在轨迹疏松区域, 如图 4 所示。由此, 需要对 Hilbert 曲线进一步进行修改, 以控制研磨轨迹向 Hilbert 曲线内部延展, 具体修改如图 5 所示。在初步修改 Hilbert 曲线的基础上对其连接线部分进行了修改, 连接线  $P_1-Q_1$  右侧增添一个新点  $P_{11}$ , 连接线  $P_2-Q_2$  下侧增添一个新点  $P_{22}$ , 连接线  $P_3-Q_3$  左

侧增添一个新点  $P_{33}$ 。

如图 6 所示, 经过进一步修改的 Hilbert 曲线研磨轨迹, 在工件表面不仅满足了研磨轨迹复杂化和研磨方向多变的需求, 而且研磨轨迹的分布明显优于原始的 Hilbert 曲线, 避免了研磨工件表面时造成的欠研磨和过度研磨现象的出现。

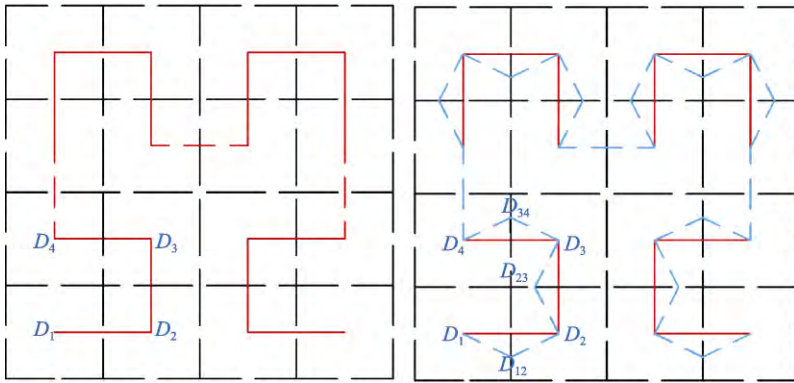


图 3 Hilbert 曲线初步改进  
Fig.3 Hilbert curve preliminary improvement

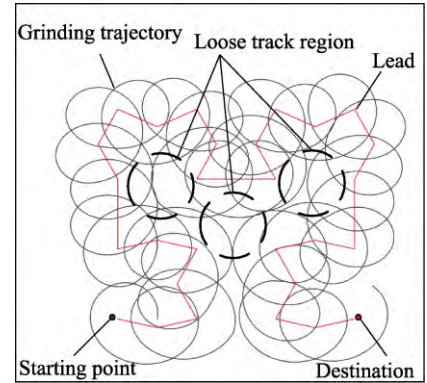


图 4 初步改进的 Hilbert 曲线研磨轨迹  
Fig.4 Initial improved Hilbert curve grinding trajectory

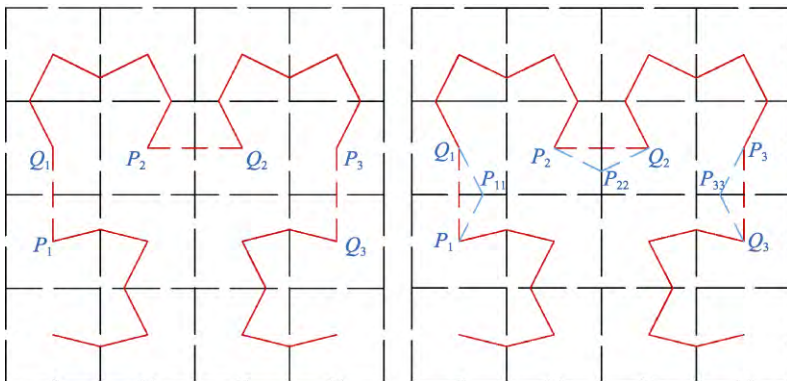


图 5 Hilbert 曲线的最终改进  
Fig.5 Hilbert curve eventual improvement

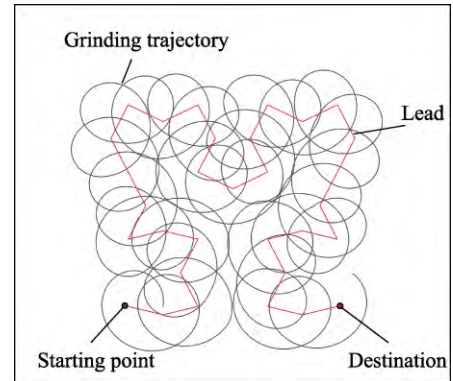


图 6 最终改进的 Hilbert 曲线研磨轨迹  
Fig.6 Ultimate improved Hilbert curve grinding trajectory

## 2 平面磁粒研磨基本原理

### 2.1 磁粒研磨原理

平面磁粒研磨是一种利用磁力来进行机械研磨的特种加工技术, 将工件 (SUS304) 置于强磁场中, 在磁场中填充磁性磨粒。磁性磨粒在磁场的作用下对工件表面产生研磨压力, 保持一定的间隙。当工件相对磁场存在相对运动时, 磁性磨料会对工件表面产生研磨光整作用<sup>[11]</sup>。该过程如图 7 所示, 磁性磨料中的铁基体被磁极磁化, 磁粒沿着磁力线排布, 形成“磁粒刷”, 磁性磨粒吸附在磁极端部由机床主轴驱动旋转。将工件固定在铣床移动平台上, 完成二维的进给运动, 实现磁极与工件的相对运动<sup>[12-14]</sup>。

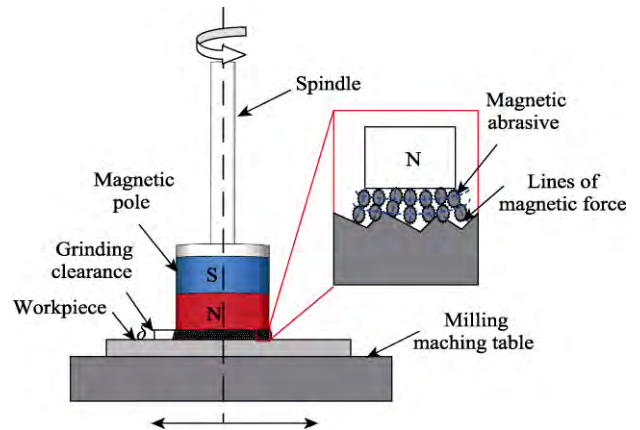


图 7 磁粒研磨原理  
Fig.7 Schematic diagram of magnetic particle grinding principle

## 2.2 磁粒的相对运动分析

在机械研磨过程中,工件表面材料的均匀去除是评价研磨加工效果的关键。根据 Preston 机械研磨抛光材料数学模型,材料去除量的计算见式(1)。

$$M = K_p p v t \quad (1)$$

式中:  $M$  为材料去除量;  $K_p$  为去除系数;  $p$  为研磨压力;  $v$  为研磨粒子相对于加工表面的运动速度;  $t$  为研磨时间。

在磁场中,磁性磨粒聚集形成的“磁粒刷”具有一定刚度,可以在整个磁粒研磨过程中保持与工件表面的仿形接触<sup>[15]</sup>。研磨压力  $p$  与磁场强度  $B$ 、研磨间隙  $\delta$  有关。在磁感应强度  $B$ 、研磨间隙  $\delta$ 、研磨粒子的粒径和研磨液种类恒定时,材料的去除量主要取决于研磨粒子相对于加工表面的运动速度  $v$  和研磨时间  $t$ 。

磁性磨粒的运动包括相对于工件的旋转运动和进给运动,单个磨粒的运动如图8所示,其中  $v_t$  是相对于加工表面磨粒的进给速度,  $\omega$  是圆周运动的角速度,  $r_1$  是环形磁极的内半径,  $r_2$  是环形磁极的外半径,则最外侧的单个磨粒做圆周运动的运动速度为  $\omega r_2$ , 单个磨粒的运动速度  $v$  是进给速度  $v_t$  与圆周速度  $\omega r_2$  的矢量和,见式(2)。在精密加工中,研磨工具的角速度  $\omega$  非常大,可以达到每分钟上千转。相对来说,进给速度  $v_t$  非常小,圆周速度  $\omega r_2$  远远大于进给速度  $v_t$ , 则进给速度  $v_t$  可以忽略不计。由此,将  $v \approx \omega r_2$ , 即在相同时间内,影响材料去除量的最主要的因素是圆周速度  $\omega r_2$ 。

$$\vec{v} = \vec{v}_t + \vec{\omega r_2} \quad (2)$$

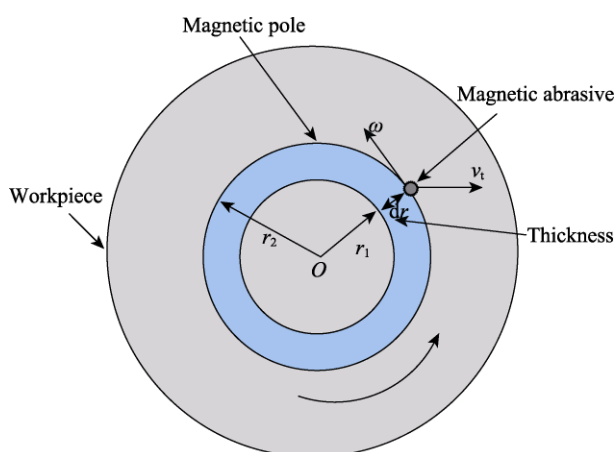


图8 单个磁性粒子的相对运动分析

Fig.8 Relative motion analysis of single magnetic particle

## 2.3 不同长径比磁场强度分析

磁感应强度在磁粒研磨精加工中起着关键作用。由式(3)可知,研磨压力  $p$  与加工区域磁感应强度

$B$  成正比,即磁感应强度越强,磁场对磁粒的约束作用越大;反之,约束作用减小。在研磨过程中,当增大磁极转速时,吸附在磁极表面的磁性磨料会受到离心力的影响,致使磁性磨粒向远离磁场的方向脱落,导致大量磁性粒子不能参与有效的研磨加工。由此可见,选取一个具有较大磁感应强度的磁极是完成磁粒研磨的一个重要前提。

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0 N} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (3)$$

式中:  $B$  为磁感应强度;  $N$  为磁性磨粒的总数;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\mu_m$  为磁性磨粒的相对磁导率。

传统平面磁粒研磨大多采用圆柱轴向磁极进行加工,但是圆柱磁极存在“边缘效应”,即边缘处的磁感应强度较高,中心区域的磁感应强度较弱,导致磁性磨粒的分布不均匀。为了提高表面质量,消除磁极的“边缘效应”和磁极旋转时线速度的差异<sup>[16-20]</sup>,选择外直径为 20 mm、壁厚为 2 mm 的轴向充磁的环形永磁极来加工工件,已知环形磁极的磁感应强度  $B$  与其长径比密切相关。为了检验不同长径比对环形磁极磁感应强度的影响,利用 Ansoft Maxwell 软件建立长径比为 1:4、1:2、3:4 和 1:1 等 4 种环形磁极模型,在仿真时,保持环形磁极的外直径(20 mm)和壁厚(2 mm)不变,环形磁极的长度  $L$  依次从 5、10、15、20 mm 开始叠加,并进行三维静磁场模拟仿真。如图9所示,对环形磁极正上方高 1 mm 参考面进行仿真分析,磁感应强度最大的区域主要集中在环形磁极的正上方,磁场分布也相对均匀。通过对比磁场强度云图可知,长径比为 3:4 的磁极端面处的磁感应强度较强,说明磁极端面的磁力线分布较密集,与其他模型相比更加集中,向外扩展的趋势更小。由图9e可知,环形磁极的磁感应强度曲线呈对称分布,环形磁极的磁感应强度并不随着长径比的增大而变大,而是存在某个临界值,若超过临界值,其磁感应强度随之减小。长径比为 3:4 的环形磁极在半径方向的磁感应强度比其他长径比的环形磁极大,达到 300 mT 左右,且磁场梯度也较大。由此,选取长径比为 3:4 的环形磁极进行研磨,使工件在移动过程中磁性磨粒始终保留在高磁场区域,增强磁极对磁性磨粒的束缚作用,有助于提高研磨效率。

## 2.4 ADAMS 平面研磨轨迹均匀性

在 ADAMS 软件中建立运动机构模型,添加机构运动的运动副,编写程序实现 Hilbert 曲线研磨路径,设置机构的运动参数(如仿真时间、步数、旋转速度、进给速度等),仿真参数如表1所示。在仿真结束后,选取磁极模型圆周上的一点作为标记点,记录其在运动过程中的行走轨迹,即永磁极相对于工件表面单颗磁性磨粒的研磨轨迹。目前,常用的网格划分方式主要有笛卡尔坐标网格和极坐标网格等,两者各有优

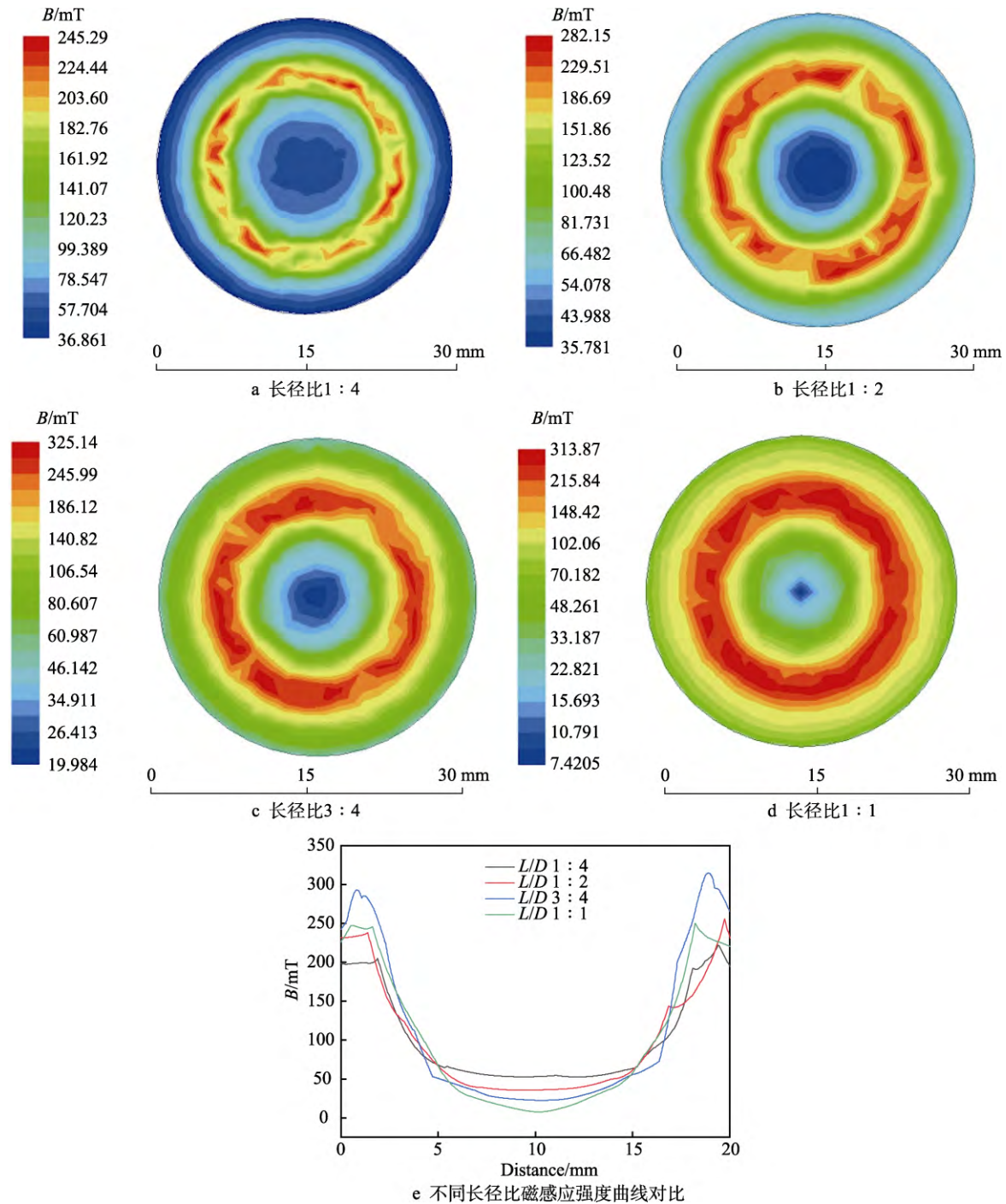


图 9 不同长径比磁感应强度曲线

Fig.9 Magnetic induction intensity curves with different aspect ratio: a) aspect ratio of annular magnetic poles is 1 : 4; b) aspect ratio of annular magnetic poles is 1 : 2; c) aspect ratio of annular magnetic poles is 3 : 4; d) aspect ratio of annular magnetic poles is 1 : 1; e) comparison of magnetic induction intensity curves with different aspect ratio

劣。研磨区域的形状大多为圆形，使用笛卡尔坐标网格划分就会出现边界部分失真的现象，影响研磨轨迹均匀性的评定。这里的研磨区域为方形，工件表面边缘区域为有效研磨区域，对均匀性评价的精度影响较小。由此，采用笛卡尔坐标网格划分来评定研磨轨迹的均匀性。

笛卡尔网格划分示意图 10 所示。将加工表面划分为若干个  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的小网格，并计算每个网格内轨迹点的数量。利用笛卡尔网格划分方法，可以通过统计研磨轨迹在工件上的通过次数来评判研磨轨迹的均匀性。先计算网格内轨迹点的平均数和标准差，然后求出离散系数。

表 1 仿真参数  
Tab.1 Simulation Parameters

Simulation Parameters	Parameter
The magnetic rotation speed/(r·min <sup>-1</sup> )	1 000
Number of meshes	144
Feed speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	2
Step size	0.01
Simulation time/s	150

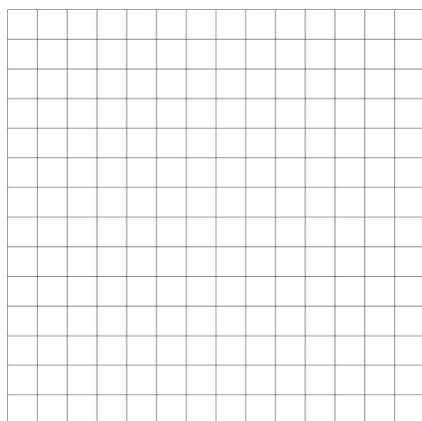


图 10 工件网格划分示意图  
Fig.10 Schematic diagram of workpiece meshing

## 2.5 加工表面轨迹均匀性数值分析

离散系数  $C_v$  是一个无量纲量，是体现概率分布离散程度的归一化量。在比较 2 组量纲不同或均值不同的数据时，应该使用离散系数  $C_v$  而不是标准差  $\sigma$  来评价，因此利用离散系数  $C_v$  来检验研磨轨迹线的均匀性。

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中： $\sigma$  为通过划分网格轨迹点的数量的标准差； $\bar{x}$  为通过划分网格轨迹点的平均数。

通过网格内轨迹点的数目如图 11 所示，传统直线往复式研磨路径的标准差为 22.998，平均数为 32.139，离散系数  $C_v$  为 0.716；Hilbert 曲线的标准差为 29.032，平均数为 63.583，离散系数  $C_v$  为 0.456；初步改进的 Hilbert 曲线的标准差为 29.829，平均数为 66.514，离散系数  $C_v$  为 0.448；最终改进的 Hilbert 曲线的标准差为 26.489，平均数为 65.083，离散系数  $C_v$  为 0.407。可见，最终改进后 Hilbert 曲线的离散系数  $C_v$  更小，较初步改进 Hilbert 曲线的研磨轨迹均匀性提高了约 9.2%，较 Hilbert 曲线的研磨轨迹均匀性提高了约 10.7%，较传统往复式的研磨轨迹均匀性提高了约 43.2%，轨迹分布更均匀。

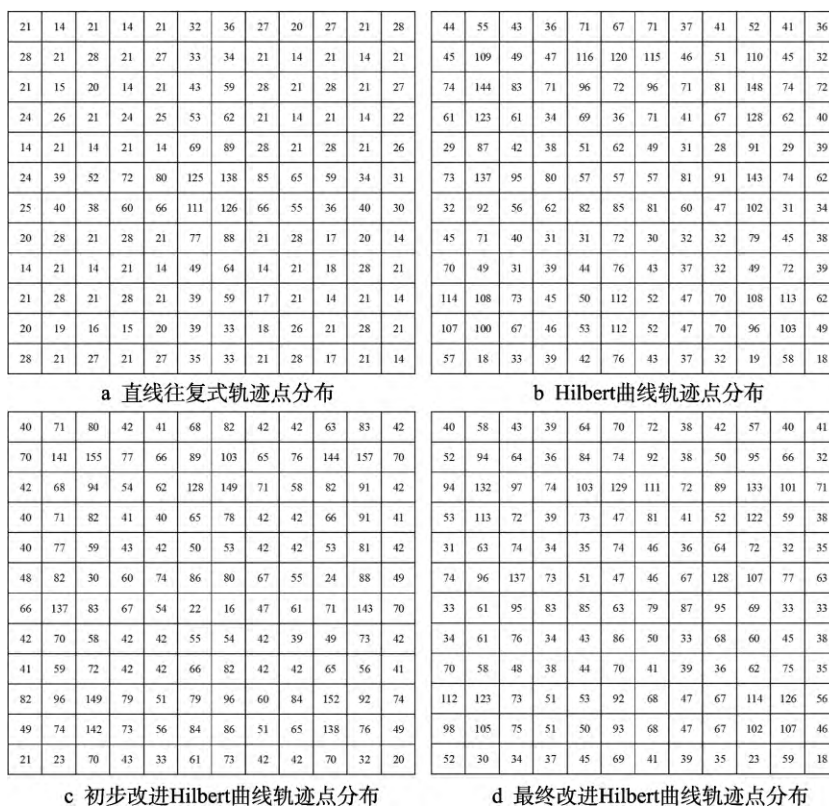


图 11 网格内轨迹点分布  
Fig.11 Distribution of track points in grid: a) linear reciprocating trajectory point distribution; b) Hilbert curve trajectory point distribution; c) preliminary improvement of Hilbert curve trajectory point distribution; d) finally improve the trajectory point distribution of Hilbert curve

### 3 实验

#### 3.1 实验装置

平面磁粒研磨装置见图 12, 将环形磁极装夹在铣床主轴上, 调节铣床主轴位置, 使磁极下端面距离加工表面保持约 2 mm 的间隙。将  $x$ - $y$  移动滑台放置在铣床工作台上, 将工件固定在  $x$ - $y$  十字滑轨的固定架上, 通过控制器来驱动  $x$ - $y$  十字滑轨联动, 完成复杂的研磨路径。在精加工时, 磁性磨料在磁场的作用下形成具有一定刚度的柔性“磁粒刷”覆盖在加工表面, 并对其施加一定的压力, 机床主轴驱动环形磁极做回转运动, 使磁极以一定速度做自转运动, 同时  $x$ - $y$  十字滑台缓慢进给, 磁性磨粒在电机旋转和滑台移动的复合运动下对工件表面进行加工, 从而有效地实现了材料的去除。

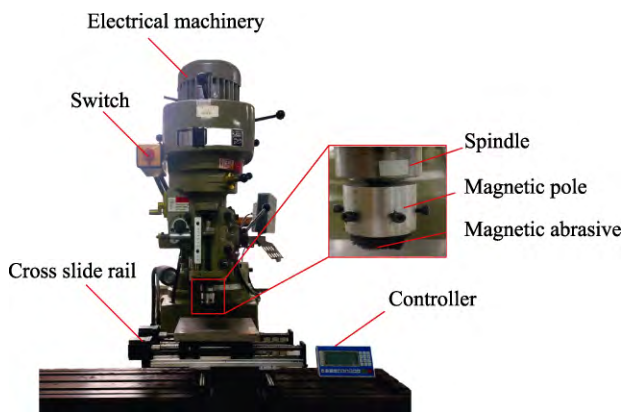


图 12 磁粒研磨加工实验装置

Fig.12 Experimental set-up of magnetic abrasive finishing

#### 3.2 实验条件

此实验选取 SUS304 不锈钢平板 (100 mm×100 mm×3 mm) 作为试件, 选取工件上的 9 个点作为检测位置, 如图 13 所示。测量点 0 为工件的中心区域, 测

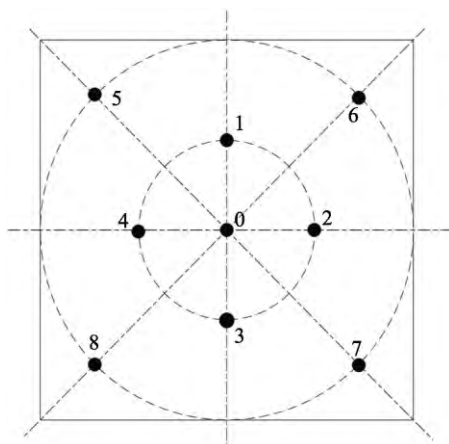


图 13 工件表面测量点

Fig.13 Workpiece surface measuring point

量点 1、2、3、4 位于距离工件中心较近的中部区域, 测量点 5、6、7、8 位于距离工件中心较远的边界区域。比较这些具有代表性的测量点的表面粗糙度的降幅来验证研磨效果的均匀性。

环形磁极选用  $\phi 20$  mm× $\phi 16$  mm×15 mm 轴向充磁的永磁极, 材质为具有高磁能积、高矫顽力的钕铁硼永磁材料, 使用的磁性磨粒由铁粉和氧化铝粉末 (质量比为 2 : 1) 烧结而成, 选取的平均粒径为 150  $\mu$ m。每间隔 15 min 添加 1 次研磨液, 添加研磨液能够对金属表面氧化膜起到软化作用, 使其易于从表面研磨去除, 从而提高了研磨效率。其中, 油性研磨液的蒸发速度比水溶性研磨液的低, 有利于抑制研磨热量向加工区域传导, 减少热膨胀, 工件的尺寸精度会有所提高。研磨前后利用超声波清洗机来清洁工件表面, 具体实验参数如表 2 所示。

表 2 实验条件

Tab.1 Experimental condition

Item	Parameter
Workpiece	SUS304 stainless steel plate 100 mm×100 mm×3 mm
Magnetic pole	Ndfe35 $\phi 20$ mm× $\phi 16$ mm× 15 mm
Magnetic abrasive particles	Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 150 $\mu$ m
Machining gap	2 mm
Magnetic pole rotation speed	1 000 r/min
Feed speed	2 mm/s
Grinding fluid	Oil abrasive fluid 10 mL

### 4 结果及分析

#### 4.1 表面粗糙度

采用 JB-8E 触针式表面粗糙度仪测量直线往复式和最终改进的 Hilbert 曲线研磨的工件表面的表面粗糙度, 检测方式是对工件加工表面进行区域划分, 分别测量具有代表性的 9 个检测点附近的 3 处, 取其平均值。研磨 30 min 后, 将测量的数据与原始的表面粗糙度值进行对比, 绘制出工件表面粗糙度的降幅曲线, 如图 14 所示。直线往复式工件中心区域和中部区域降幅较小, 边缘区域表面粗糙度变化较大, 降幅曲线呈现上升趋势, 且整体变化剧烈, 说明直线往复式加工工件存在加工质量不均匀问题。采用最终改进的 Hilbert 曲线研磨路径的工件表面的不同检测位置得到的表面粗糙度降幅数值近似, 降幅曲线变化平稳, 降幅基本稳定在 0.09  $\mu$ m 左右, 可见通过改进的 Hilbert 曲线加工的工件表面材料去除量的均匀性较好。

#### 4.2 表面形貌分析

使用 VHX-500F 超景深 3D 显微镜拍摄不同研磨



路径的工件表面形貌,在200倍镜下,观测工件表面的二维表面形貌和3D表面轮廓云图,如图15所示。由图15a可知,在加工前,工件表面存在较多的拉丝成形痕迹,且存在部分凹坑,工件表面3D云图变化剧烈,平面的最大高度差为31.4 μm。由图15b可知,经直线往复研磨30 min后,表面成形纹理基本被去

除,遗留了一些较深的凹坑,但表面轮廓云图高度变化不均匀,说明采取直线往复式研磨方法存在去除量不一致的问题,研磨后表面不平整。从图15c可以看出,工件沿改进的Hilbert曲线研磨,原始的加工纹理、沟槽缺陷基本被去除,获得的工件表面光滑平整,表面轮廓变化较缓,获得了相对均匀的表面质量。

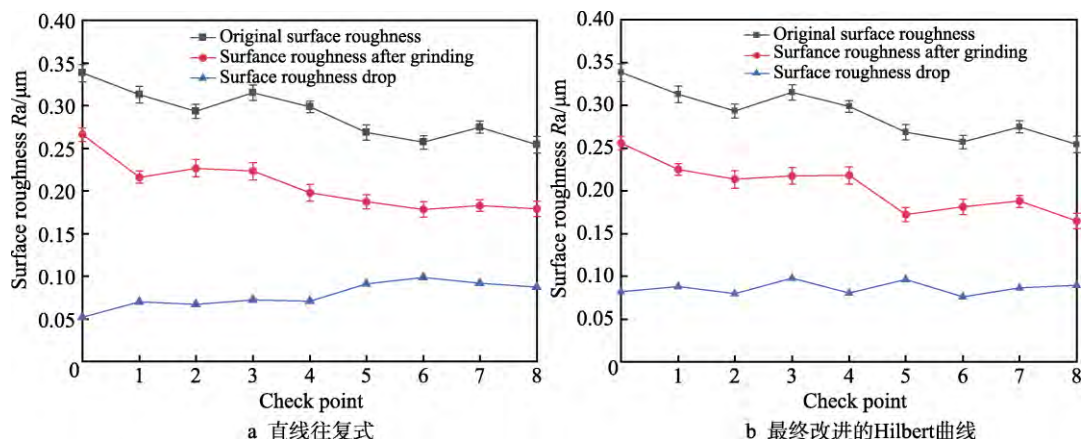


图14 表面粗糙度降幅变化  
Fig.14 Variation diagram of surface roughness drop: a) linear reciprocation; b) ultimate improved Hilbert

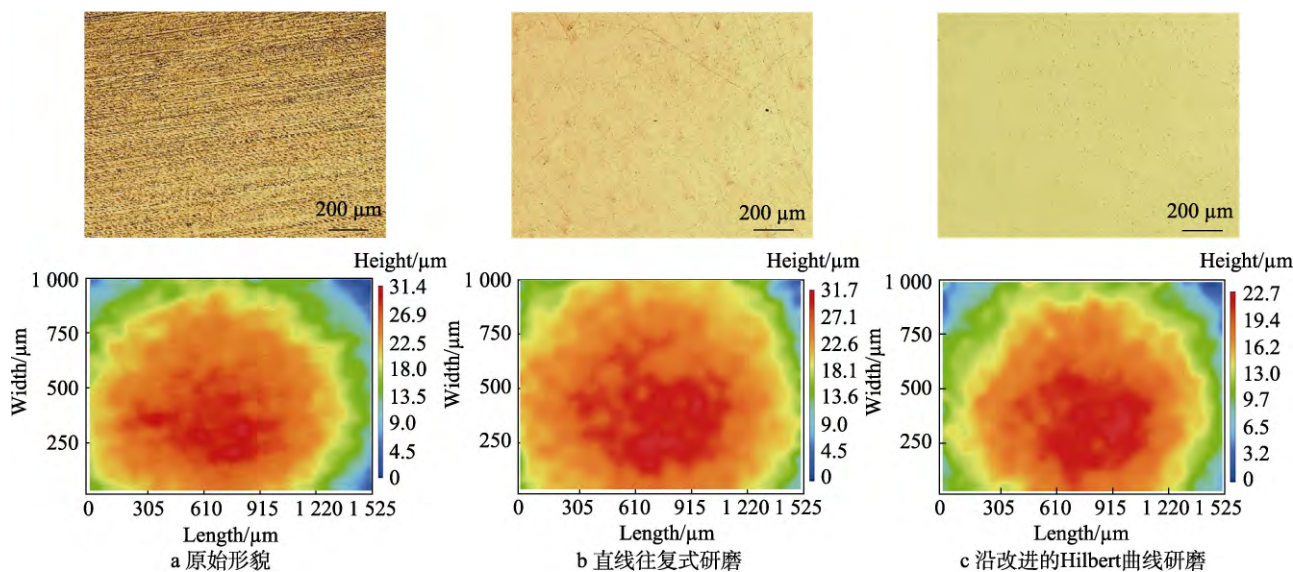


图15 不同研磨路径的工件表面微观形貌对比  
Fig.15 Comparison of workpiece surface microtopography with different lapping paths: a) original appearance; b) linear reciprocating grinding; c) grind along modified Hilbert curve

## 5 结论

1) 首次将 Hilbert 曲线应用到磁粒研磨中,并对其几何形状进行了修改,改进的 Hilbert 曲线能够满足理想的平面研磨的实际要求,离散系数  $C_v$  由 0.716 降至 0.407,研磨轨迹的均匀分布得到提高。

2) 使用环形磁极解决了相对线速度差异造成的材料去除不均匀问题,工件表面在研磨前后的表面粗糙度的降幅对比结果表明,降幅曲线平缓,可见使用

环形磁极可以实现材料的均匀去除。

3) 沿 Hilbert 曲线研磨可以扩大研磨的区域。由于研磨路径复杂且方向多变,使工件表面的研磨纹理无方向性,有助于提高工件的表面质量,改善其表面形貌。

### 参考文献:

[1] SAI CHAITANYA KISHORE D, JAMEEL BASHA S M.

- Optimization of Process Parameters in Surface Finishing of Al6061 by Using Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 3365-3370.
- [2] 姜林志, 张桂香, 秦璞, 等. 磁力研磨  $ZrO_2$  材料轨迹一致性(均匀性)试验研究[J]. *制造技术与机床*, 2019(3): 124-128.  
JIANG Lin-zhi, ZHANG Gui-xiang, QIN Pu, et al. Experimental Study on Trajectory Uniformity of  $ZrO_2$  Ceramic Materials by Magnetic Abrasive Grinding[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019(3): 124-128.
- [3] 耿其东, 李春燕. 磁力研磨加工 K9 光学玻璃的实验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 112-118.  
GENG Qi-dong, LI Chun-yan. Experimental Study on Magnetic Abrasive Finishing K9 Optical Glass[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(7): 112-118.
- [4] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(1): 35-48.  
YUAN Ju-long, WANG Zhi-wei, WEN Dong-hui, et al. Review of the Current Situation of Ultra-Precision Machining[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 35-48.
- [5] 赵萍, 陶黎, 王志伟, 等. 平面研磨抛光轨迹研究[J]. *航空精密制造技术*, 2009, 45(2): 1-6.  
ZHAO Ping, TAO Li, WANG Zhi-wei, et al. Review on Trace of Plane Lapping/Polishing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2009, 45(2): 1-6.
- [6] 刘清, 张广鹏, 高智学, 等.  $X-Y$  平面联动的平面研磨轨迹分析与研磨实验[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(6): 903-909.  
LIU Qing, ZHANG Guang-peng, GAO Zhi-xue, et al. Experimental Study of  $X-Y$  Linkage Plane Lapping Track[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(6): 903-909.
- [7] 焦安源, 全洪军, 邹艳华. 平面研磨中磁粒刷运动轨迹规划的试验研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(10): 84-87.  
JIAO An-yuan, QUAN Hong-jun, ZOU Yan-hua. Experimental Study on Planning the Trajectory of Magnetic Abrasive Brush in Plane Finishing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(10): 84-87.
- [8] 王笋, 徐小双. Hilbert 曲线扫描矩阵的生成算法及其 MATLAB 程序代码[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(1): 119-122.  
WANG Sun, XU Xiao-shuang. A New Algorithm of Hilbert Scanning Matrix and Its MATLAB Program[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(1): 119-122.
- [9] 张迪, 尚春民. 不定偏心平面研磨中固结磨具的均匀磨损[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(2): 55-60.  
ZHANG Di, SHANG Chun-min. Uniform Wear of Solid Abrasives in Uncertain Eccentricity Plane Lapping[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2019, 39(2): 55-60.
- [10] 杨建东, 田春林, 王长兴. 纳米级高速研磨技术[J]. *中国科学(E 辑: 技术科学)*, 2007, 37(9): 1214-1223.  
YANG Jian-dong, TIAN Chun-lin, WANG Chang-xing. Nano-Scale High-Speed Grinding Technology[J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2007, 37(9): 1214-1223.
- [11] 焦安源, 张龙龙, 陈燕, 等. 磁粒研磨 TC4 孔棱边毛刺的机理及试验研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(3): 283-290.  
JIAO An-yuan, ZHANG Long-long, CHEN Yan, et al. Mechanism and Experimental Study of TC4 Hole Burr by Magnetic Particle Grinding[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(3): 283-290.
- [12] 朱子俊, 刘顺, 韩冰, 等. 超声振动复合研磨 K9 光学玻璃工艺研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 74-80.  
ZHU Zi-jun, LIU Shun, HAN Bing, et al. Study on Hybrid Technology of Ultrasonic Vibration Assisted Abrasive Lapping K9 Optical Glass[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(4): 74-80.
- [13] 程森, 陈松, 赵杨, 等. 双磁极式磁粒研磨机理分析及试验研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 81-89.  
CHENG Miao, CHEN Song, ZHAO Yang, et al. Mechanism Analysis and Experimental Study of Dual Magnetic Pole Magnetic Particle Grinding[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(4): 81-89.
- [14] 刘新龙, 陈燕, 张国富, 等. 电解-旋转超声磁粒复合对 TC4 板抛光的研究[J]. *电镀与精饰*, 2019, 41(10): 13-16.  
LIU Xin-long, CHEN Yan, ZHANG Guo-fu, et al. Study on Polishing of TC4 Plate by Electrolysis-Rotating Ultrasound Magnetic Particle Composite[J]. *Plating & Finishing*, 2019, 41(10): 13-16.
- [15] 刘文浩, 陈燕, 李文龙, 等. 磁粒研磨加工技术的研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 47-61.  
LIU Wen-hao, CHEN Yan, LI Wen-long, et al. Research Progress of Magnetic Abrasive Finishing Technology[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 47-61.
- [16] 赵传营, 赵玉刚, 刘宁, 等. 基于神经网络遗传算法的磁粒研磨 TC4 材料工艺参数优化[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 316-321.  
ZHAO Chuan-ying, ZHAO Yu-gang, LIU Ning, et al. Optimization of Process Parameters of Magnetic Abrasive Finishing TC4 Material Based on Neural Network and Genetic Algorithm[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 316-321.
- [17] 严振, 方从富, 刘冲. 偏摆式平面研磨抛光轨迹的理论研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38(4): 77-82.  
YAN Zhen, FANG Cong-fu, LIU Chong. Theoretical Study on Trajectory of Swinging Plane Lapping and Polishing[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2018, 38(4): 77-82.
- [18] XIE Hui-jun, ZOU Yan-hua. Study on the Magnetic Abrasive Finishing Process Using Alternating Magnetic Field—Discussion on the Influence of Current Waveform Variation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(7): 2471-2483.
- [19] 韩冰, 云昊, 陈燕, 等. 振动辅助磁力研磨超硬精密  $Al_2O_3$  陶瓷管内表面试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(2): 169-176.  
HAN Bing, YUN Hao, CHEN Yan, et al. Experimental Study of Vibration-Assisted Magnetic Abrasive Finishing on Inner Surface of Superhard Precise  $Al_2O_3$  Ceramic Tubes[J]. *Tribology*, 2016, 36(2): 169-176.
- [20] ZOU Yan-hua, XIE Hui-jun, ZHANG Yu-long. Study on Surface Quality Improvement of the Plane Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(7): 1825-1839.

责任编辑: 彭颖