

仿形组合磁极研磨增材制造复杂表面工艺研究

孙岩¹, 潘明诗¹, 王杰², 陈燕¹

(1. 辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051;
2. 烟台港股份有限公司联合通用码头分公司, 山东 烟台 264000)

摘要: **目的** 改善零件表面质量, 延长零部件使用寿命。**方法** 应用 Ansys Maxwell 模拟仿真沿盘形磁极圆周开不同形状槽时磁极磁感应强度的分布。以钛合金 (Ti6Al4V) 材料增材制造的成形零件为例, 基于磁粒研磨抛光技术, 利用仿形组合开槽磁极对成形零件沟槽表面进行研磨抛光。**结果** 模拟结果表明, 沿磁极圆周开均布矩形槽时, 磁极的磁感应强度波峰值最大, 波谷值最小, 磁场强度梯度变化最大, 最适合复杂工件表面的磁粒研磨。磁性磨粒粒径、磁极转速和研磨间隙等参数的设置都会影响研磨加工效果, 经模拟和实验获得最佳工艺参数为磁性磨粒粒径 180 μm 、磁极转速 1 000 r/min、研磨间隙 2 mm。设置如上所述的加工工艺参数, 成形零件沟槽表面粗糙度 R_a 由原始的 10.70 μm 降为 0.52 μm , 且其表面缺陷得到有效去除。**结论** 采用仿形组合开槽磁极应用磁粒研磨技术能够实现增材制造复杂零件表面的研磨抛光。

关键词: 增材制造; 磁粒研磨; 表面粗糙度; 仿形组合磁极

中图分类号: TH16 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)06-0361-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.06.032

Technology of Grinding Complex Surfaces Obtained by Additive Manufacturing with Profiling Combined Magnetic Pole

SUN Yan¹, PAN Ming-shi¹, WANG Jie², CHEN Yan¹

(1. University of Science and Technology Liaoning, Liaoning Anshan 114051, China;
2. Yantai Port Co., Ltd., and General Terminal Branch, Shandong Yantai 264000, China)

ABSTRACT: In order to improve the surface quality of parts and prolong their service life, it is necessary to grind and polish the surface of parts. Magnetic abrasive finishing is a branch of the new surface polishing technology in the finishing technology. Magnetic abrasive particles are added between the magnetic pole and the workpiece. Under the action of the magnetic field, the magnetic abrasive particles are arranged along the magnetic line of force to form a magnetic abrasive brush, which is attached to the workpiece surface under the action of the magnetic force. When there is a relative movement between the magnetic pole and the workpiece, the magnetic abrasive particles scratch along the workpiece surface to grind and polish the workpiece surface. The magnetic abrasive particles are attached, rolled and separated on the workpiece surface, which is not limited by the surface

收稿日期: 2022-06-15; 修订日期: 2023-01-30

Received: 2022-06-15; Revised: 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51775258)

作者简介: 孙岩 (1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为精密加工技术。

Biography: SUN Yan (1979-), Female, Master, Lecturer, Research focus: precision machining technology.

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 machining and special machining.

引文格式: 孙岩, 潘明诗, 王杰, 等. 仿形组合磁极研磨增材制造复杂表面工艺研究[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 361-368.

SUN Yan, PAN Ming-shi, WANG Jie, et al. Technology of Grinding Complex Surfaces Obtained by Additive Manufacturing with Profiling Combined Magnetic Pole[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 361-368.

shape. It has good processing flexibility, adaptability, and a wide range of applications. In this paper, ANSYS Maxwell was used to simulate the distribution of magnetic induction intensity of the magnetic pole. When slots of different shapes were opened along the circumference of the disc-shaped axial magnetic pole, and to simulate the change curve of magnetic induction intensity at the same position when slots with different shapes were opened. The simulation results showed that when rectangular slots were evenly distributed along the circumference of the magnetic pole, the peak value of the magnetic induction intensity wave was the largest, the trough value was the smallest, and the gradient change of magnetic induction intensity was the largest, which was the most suitable for magnetic particle grinding of complex workpiece surfaces. The results showed that the magnetic induction intensity at the joint surface and edge of the combined magnetic pole was a little bigger than that at the same part of the overall magnetic pole, which was more suitable for the grinding of the groove surfaces. The setting of parameters such as magnetic abrasive particle size, magnetic pole speed and grinding gap would affect the grinding effect. The optimal process parameters obtained through simulation and experiment were: magnetic abrasive particle size of $180\text{ }\mu\text{m}$, magnetic pole speed of 1000 r/min , and grinding gap of 2 mm . Taking the formed parts made of titanium alloy (Ti6Al4V) as an example, based on the magnetic abrasive polishing technology, the profiling combined the slotted magnetic pole was used to grind and polish the groove surface of the formed parts. The processing parameters were set as described above, and the surface roughness of the groove surface of the formed part was changed from the original $10.70\text{ }\mu\text{m}$ to $0.52\text{ }\mu\text{m}$. And the surface defects were effectively removed. Therefore, the use of profiling combined slotted magnetic poles and the application of magnetic abrasive finishing technology can realize the grinding and polishing of the surface of complex parts made of additive materials.

KEY WORDS: additive manufacturing; magnetic particle grinding; surface roughness; profiling combined magnetic pole

增材制造技术可以创建复杂形状结构零件,激光烧结技术即为增材制造技术的一种。激光烧结的成形原理是将粉末材料逐层铺开而烧结的,成形零件无法避免地会出现阶梯效应,虽然通过改进金属粉末质量、优化铺粉轨迹以及改善烧结工艺参数等可以提高增材制造零件的表面质量,但却无法彻底解决成形过程中阶梯效应带来的零件表面质量差等问题^[1-2]。因此,为提高增材制造零件的表面质量,对零件表面进行研磨抛光是必不可少的。

目前,对增材制造零件表面光整加工的有效技术包括传统的机械手工抛光、激光抛光、电化学抛光、磁粒研磨等^[3-6]。传统的机械手工抛光主要依靠操作者的经验水平,劳动强度较大,抛光时由于对零件表面施加的压力无法保持完全一致,致使零件被抛光表面的质量不均匀,而且抛光复杂型面的零件比较困难。激光抛光技术是利用大功率聚焦激光束的热效应高速扫描物体表面,使金属表面快速平整。通过控制激光的能量与频率,可以对不同的金属表面进行光整加工。激光抛光技术具有较高的灵敏度和能量密度,能实现零件的精密抛光,特别适合于硬脆性材料的精密加工^[7-9],但激光抛光设备昂贵,对复杂零件表面的加工可达性较差。电化学抛光是利用电化学先去除金属零件表面球状颗粒的凸起,再利用电化学抛光技术进一步将表面粗糙度降低,加工后表面光滑,且无内应力,加工可达性好,适合于多孔复杂结构零部件的抛光,但化学抛光液一般具有腐蚀性,增加了操作难度,并会造成环境污染^[10-12]。

磁粒研磨是光整加工技术中新型表面抛光技术的一个分支,具有适应范围广、自适应性强等特点,

特别适合于硬脆材料、增材制造零件复杂表面的加工^[13-16]。焦安源等^[17]、吕兴国等^[18]研究了磁粒研磨法在光整矩形环槽表面的应用,经过磁粒研磨,环槽底面和侧面的表面粗糙度降低,表面质量改善明显。叶恒宇等^[19]、邓曰明等^[20]、梁伟等^[21]、王金龙等^[22]研究了磁极开槽对磁力研磨加工效果的影响,磁极开槽能够改善磁场强度的梯度变化,进而改善研磨加工效果。本文以增材制造的成形零件为研究对象,工件具有“马鞍形”的沟槽结构,传统的规则形状磁极与零件复杂表面形状不匹配。因此,本文在前面研究的基础之上,采用由多个磁极组合而成的仿形开槽组合磁极,使其与工件复杂沟槽结构匹配。应用磁粒研磨法,采用仿形开槽组合磁极研磨增材制造成形零件的沟槽表面,不仅改善了研磨加工质量,还提高了研磨加工效率。

1 仿形组合磁极加工原理

1.1 磁粒研磨加工原理

磁粒研磨的基本原理如图 1 所示。由图 1 可知,工件放在 N、S 磁极之间,磁性磨粒与研磨液的混合物填充在磁极与工件表面之间,磁极表面吸附磁性磨粒。磁性磨粒由铁基体与研磨相构成,研磨相具有切削刃,均布在铁基体中。磁化后的磁性磨粒在磁场力和摩擦力的共同作用下形成“磁粒刷”,并带有柔性和自适应性。当工件与磁极产生相对运动时,“磁粒刷”在压力的作用下对工件表面摩擦,从而达到去除工件表面缺陷、提升表面质量的效果^[23-24]。由于“磁

粒刷”具有很好的柔性和自适应性, 可实现对平面、曲面、槽面等的研磨抛光。

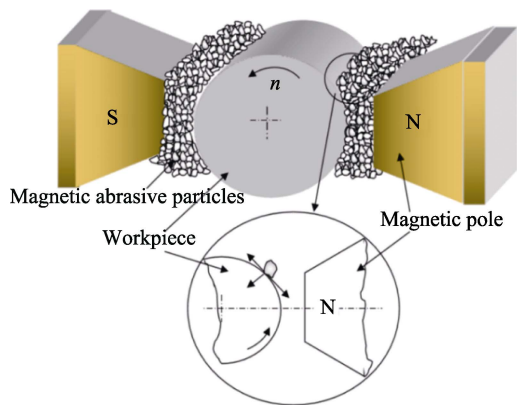


图 1 磁粒研磨的基本原理
Fig.1 Basic principle of magnetic particle grinding

磁粒研磨是磁极利用磁力吸附磁性磨粒对工件表面进行研磨抛光的方法, 其磁感应强度分布是否均匀是影响研磨加工效率的关键。选取 Ti6Al4V 钛合金材料增材制造的成形零件作为实验工件, 实验工件及组合磁极形状如图 2 所示。零件表面是由不同曲面组成的“马鞍形”, 零件上开有半圆形凹槽, 凹槽直径依次为 36、26、36 mm。使用普通磁极无法实现对此零件全部凹槽表面的一次性研磨。若使用单个磁极对零件每个凹槽逐一进行研磨, 会导致两槽之间的棱边处研磨不均匀, 加工精度与研磨效率都比较低。因此, 提出采用组合仿形磁极或整体仿形磁极对零件凹槽复杂表面进行研磨的方案。选用的仿形磁极的形状如图 2b 所示。若为组合仿形磁极, 图中的 3 个磁极的直径依次设定为 35、25、35 mm, 每个磁极的厚度为 5 mm。为了方便固定, 在磁极中心处开一个直径为 5 mm 的孔。磁极材质为钕铁硼 (Nd-Fe-B)。

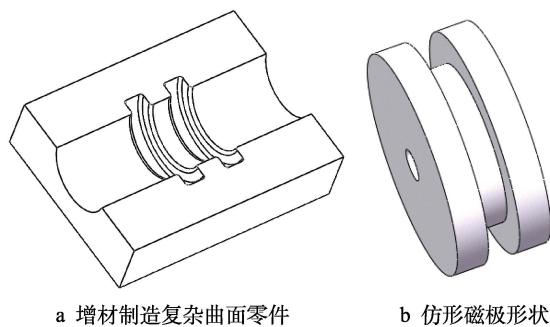


图 2 零件及磁极形状
Fig.2 Shape of part and pole: a) complex curved parts of additive manufacturing; b) profiling pole shape

应用仿形磁极进行磁粒研磨的加工原理如图 3 所示。由图 3 可知, 在研磨加工时, 工件凹槽曲面与磁极外圆周表面需留出一定空间, 以便填充磁性磨粒, 两表面之间的磁性磨粒群被磁化后, 聚集成团, 成为具有一定刚性的研磨工具“磁粒刷”。在磁极与

工件产生相对运动时, 具有良好柔性和仿形性的研磨粒子在工件的表面进行微量磨削加工, 磁性磨粒可以完全贴合工件凹槽底面 (即工件的上下弧面), 并随之变化, 且磨削力小, 不会引起工件的变形和产生新的微裂纹, 只是将前一道加工工序产生的切削纹理和凹凸不平表面的凸出部分去除, 因此可以在保证工件尺寸精度和形状精度的前提下, 完成对工件表面的研磨加工^[25]。同理, 磁极的端面和凹槽的侧面也留有一定间隙, 并且间隙大致相等, 添加磁性磨粒后, 也能实现工件凹槽侧面的研磨抛光。

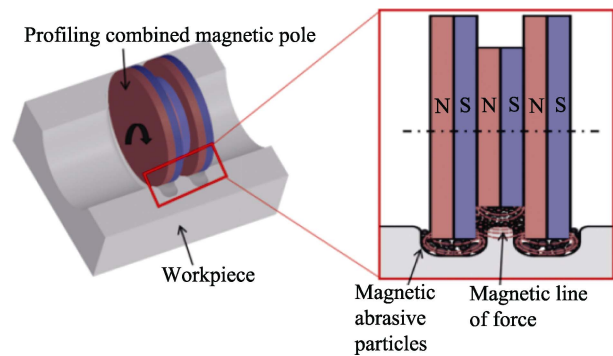


图 3 仿形组合磁极研磨原理
Fig.3 Schematic diagram of profiling combined magnetic pole grinding

1.2 Ansys Maxwell 仿真分析

1.2.1 组合磁极与整体磁极的对比

利用 ANSYS Maxwell 软件对仿形组合磁极和仿形整体磁极的磁感应强度进行仿真。在建模过程中, 整体磁极为 1 个磁极, 组合磁极由 3 个磁极装配而成。模拟结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 仿形组合磁极的最大磁感应强度值略大于仿形整体磁极的最

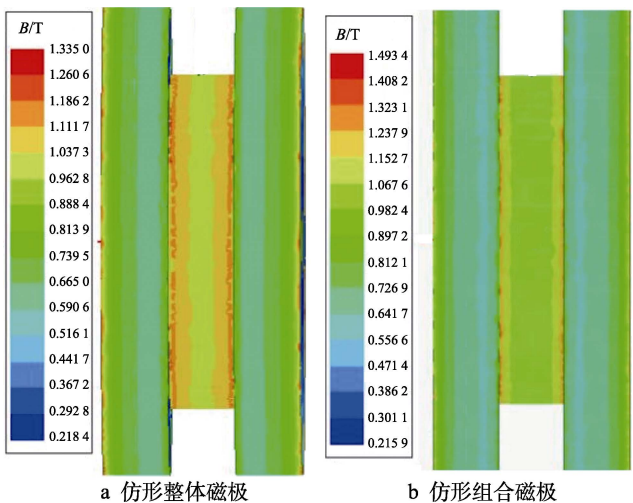


图 4 仿形磁极磁感应强度分布云图
Fig.4 Diagram for magnetic induction intensity distribution of profiling magnetic pole: a) profiling overall magnetic pole; b) profiling combined magnetic pole

大磁感应强度值,且在磁极结合面和棱边处的磁感应强度值较大,更适合零件沟槽表面的研磨抛光。另外,为了实现仿形加工,如果采用整体磁极,需要对圆柱磁极开环形槽。由于磁极是脆硬材料,对圆柱磁极开环形槽比较困难,且容易断裂,加工费用也较高。由 3 个磁极拼接而成的组合磁极,不仅价格便宜,而且容易组装,加工时不需要设计特殊的工装夹具,加工成本比较低。因此,本文实验部分内容均采用仿形组合磁极对增材制造复杂表面进行研磨加工。

1.2.2 不同开槽形状磁极的对比

影响磁粒研磨的因素有磁场强度和磁极形状等,其中最重要的是磁感应强度。不同开槽形状的磁极,磁感应强度分布不同^[19,24],因此在每个磁极圆周开 4 个相同的槽,分别为 60° 的 V 形槽、90° 的矩形槽、135° 的梯形槽,如图 5 所示。

在磁极不开槽和开不同形状槽的情况下,利用

ANSYS Maxwell 软件,对开不同形状槽的单个磁极的磁感应强度变化进行仿真,结果如图 6 所示。由图 6 可知,当磁极轴向充磁时,磁极圆心到棱边的磁感应强度分为 3 个区域:磁极棱边区域、磁极中心孔区域以及中心孔和磁极棱边间的中间区域。磁极棱边区域的磁感应强度较大。中心孔区域的磁力线与磁极外部的磁力线形成闭合磁回路,因此磁极中心孔处的磁力线较为密集,磁感应强度也较大。由于磁力线多为平行排布,所以磁等势面也较为密集。同时,由于仿真软件只能将同一梯度的磁感应强度以面的形式呈现出来,故位于中心孔和磁极棱边之间的中间区域内的磁感应强度最小,其磁场梯度变化不明显,且在磁场梯度变化微小的地方出现空白。

为了探究磁极不同开槽形状时的磁感应强度的变化情况,在磁极厚度为 2.5 mm 处沿着磁极圆弧面画一条 180° 的弧线,测量不同开槽形状时的磁感应强度,结果如图 7 所示。通过模拟磁感应强度变化曲线,

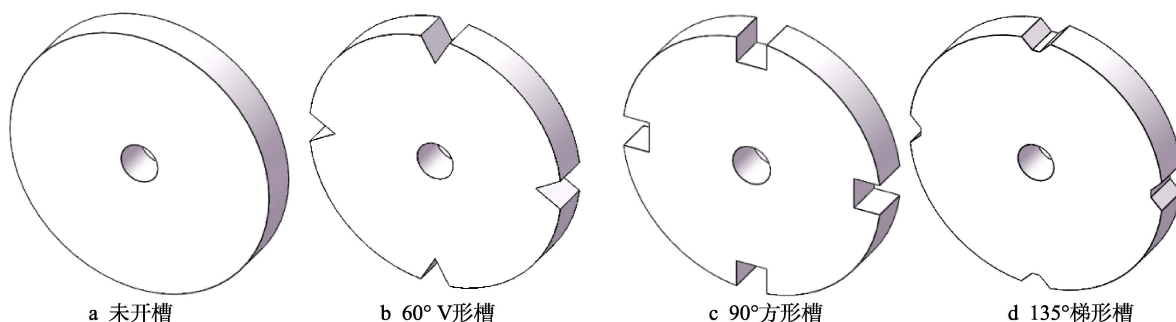


图 5 磁极不同的开槽形状

Fig.5 Different slot shapes of magnetic poles: a) unslotted; b) 60° V-slot; c) 90° square-slot; d) 135° trapezoidal slot

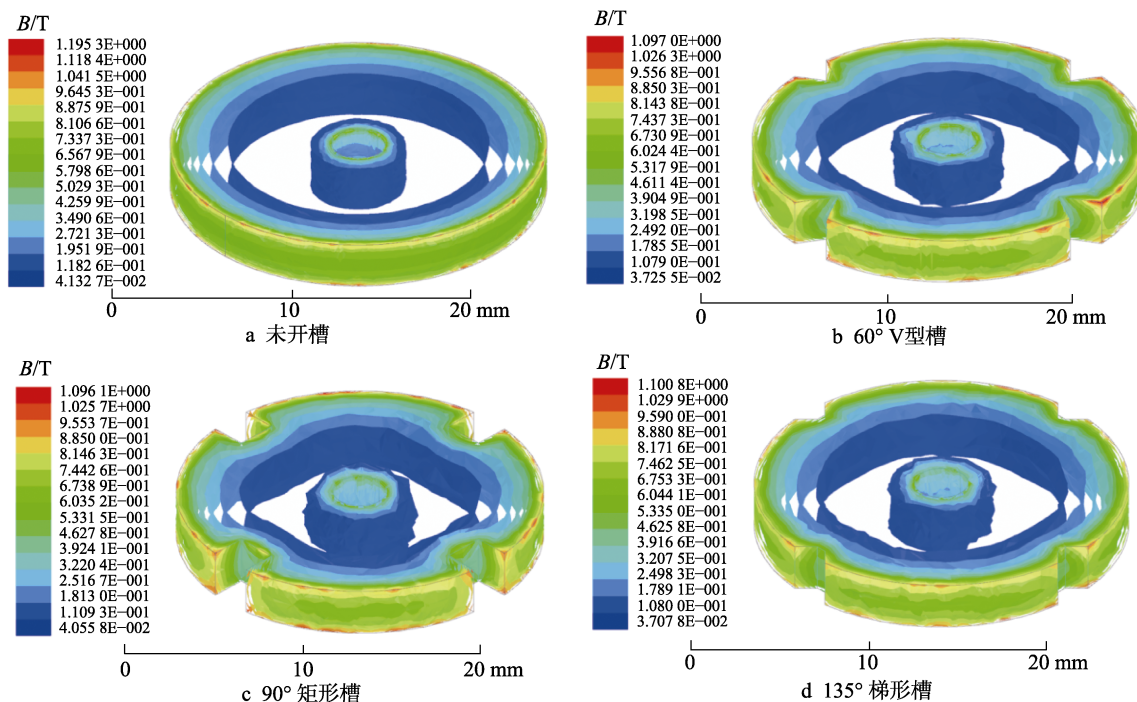


图 6 不同开槽形状的磁极磁感应强度分布云图

Fig.6 Diagrams for magnetic induction intensity distribution of magnetic poles with different slot shapes: a) unslotted; b) 60° V-slot; c) 90° square-slot; d) 135° trapezoidal slot

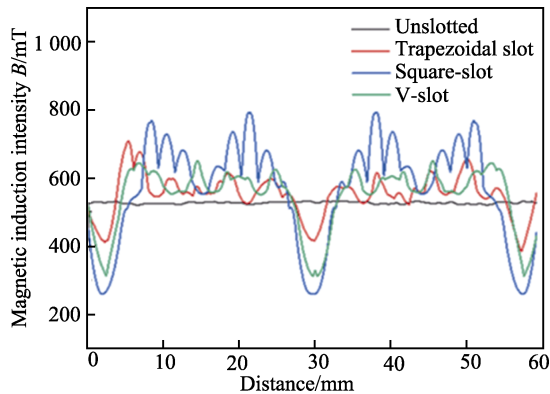


图 7 不同开槽形状磁感应强度
Fig.7 Magnetic induction intensity of different slot shapes

能够更直观地对比不同开槽形状时磁极磁感应强度的差异。由图 7 可知,在测量位置处,未开槽磁极的磁感应强度近似一条直线,约为 525 mT,其波峰波谷较为平缓,无明显起伏,说明磁感应强度梯度变化不大。对比未开槽磁极的磁感应强度,开槽磁极的磁感应强度波峰波谷变化明显,磁感应强度的梯度变化较大。3 种开槽形状的磁极比较而言,矩形开槽磁极的磁感应强度波峰最大,波谷最小,其值分别为 800、250 mT,因此其波峰波谷差值也最大,差值为 650 mT,大于 135°梯形开槽磁极(差值为 300 mT)和 60°V 形开槽磁极(差值为 330 mT)。

由加工区域的磁场仿真可知,开槽角度为 90°时,磁感应强度较强,工件受到的研磨压力较大,研磨效率较高。磁极开槽后,由于边缘效应,磁极凹槽的棱边与中心之间形成了较大的磁场梯度,磁性磨粒更加活跃,促进了磁性磨粒翻滚更新,延长了磁性磨粒的使用寿命。另外,开槽磁极的棱边处被充分填充磁性磨粒,磁性磨粒与加工表面间的研磨压力较高,从而能得到更好的加工表面质量。因此,采用 90°的开槽仿形磁极进行磁粒研磨加工实验。

2 试验

2.1 条件及方法

加工试验装置如图 8 所示。研磨加工时,将工件固定在西马特 SM4 多功能机床工作台上,通过调整机床移动滑台,使工件凹槽位于开槽仿形组合磁极正下方,调整开槽仿形组合磁极与工件的间隙,并在开槽仿形组合磁极与工件加工表面之间添加磁性磨粒-研磨液混合物,准备就绪后,启动机床进行研磨加工。加工后,采用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪测量工件表面原始粗糙度值,并记录,使用 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜观察工件表面形貌。

2.2 试验参数

采用开槽仿形磁极研磨加工增材制造的钛合金

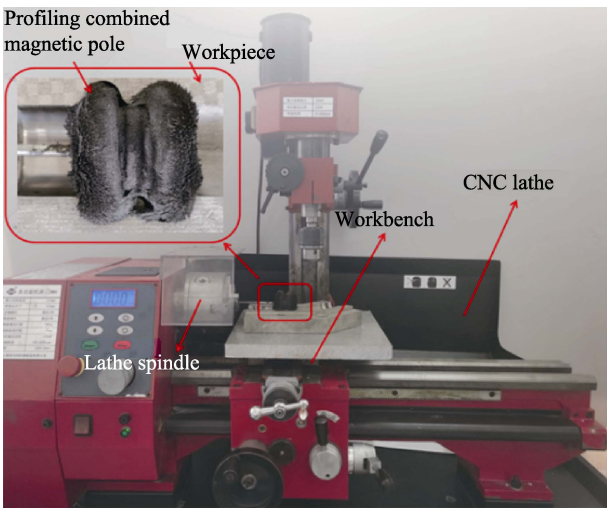


图 8 加工试验装置
Fig.8 Processing experimental device

(Ti6Al4V) 成形零件的试验参数见表 1,工件加工表面如图 2 所示。选取平均粒径为 150 μm 的铁粉与平均粒径为 50 μm 的 α-氧化铝磨料,按质量比 2 : 1 混合,在 1 200 ℃高温条件下烧结成块,经过破碎筛制成磁性磨粒。研磨加工时,选择劳力恩 SR-9911 水基研磨液与磁性磨粒混合使用,起到了润滑降温的作用。为了寻求最优的加工参数,采用响应面法设计了研磨加工试验,试验参数见表 1。

表 1 试验参数
Tab.1 Experimental parameters

Parameter	Type or Value
Spindle speed $n/(r \cdot \min^{-1})$	800, 1 000, 1 200
Magnetic abrasive particle size/ μm	150, 180, 250
Grinding gap/mm	1.0, 2.0, 3.0
Abrasive fluid	Laureon SR-9911 water-based liquid
Abrasive fluid flow $q_v/(m \cdot L \cdot \min^{-1})$	6
Processing time t/min	60

3 结果与讨论

磁极转速与磁性磨粒粒径的交互作用会对工件的表面粗糙度产生影响。磁极转速与磁性磨粒粒径对工件表面粗糙度的交互影响如图 9 所示。由图 9 可知,当磁性磨粒粒径一定时,随磁极转速的增加,磁性磨粒在单位时间内对工件表面的划擦次数增加,工件材料被快速去除,使其表面粗糙度降低;磁极转速继续增加,过高的转速会使磁性磨粒在离心力作用下被甩出研磨区域,磨粒研磨效率下降,工件表面粗糙度上升。当转速一定时,磁性磨粒的粒径过小,会导致工件加工表面所受的压力也变小,切削效率

降低,工件表面粗糙度无明显变化,甚至有所上升;反之,当磁性磨粒粒径过大时,研磨压力增大,磁性磨粒可能嵌入工件表面,形成耕犁而划伤工件,工件表面粗糙度也会上升。由图9还可以看出,当磁性磨粒粒径为 $180\text{ }\mu\text{m}$ 、磁极转速为 $1\text{ }000\text{ r/min}$ 时,工件的表面粗糙度最小。

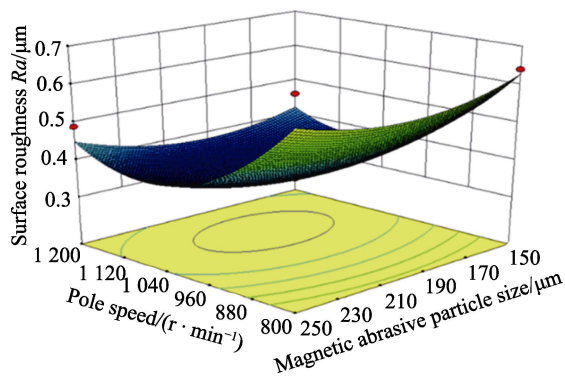


图9 磁极转速与磁性磨粒粒径的交互影响
Fig.9 Interaction between magnetic particle size and magnetic pole speed

磁性磨料粒径与研磨间隙的交互影响如图10所示。由图10可知,磁性磨料粒径一定时,研磨间隙过大,组合磁极上的磁性磨料无法紧贴工件表面,无法进行有效的研磨加工,因而工件的表面粗糙度较大;当研磨间隙过小时,组合磁极上的磁性磨料对工件表面造成过度挤压,甚至导致工件产生塑性变形,研磨过程中损伤工件表面,因而工件的表面粗糙度也较大。磁性磨料粒径为 $180\text{ }\mu\text{m}$,磁极转速为 $1\text{ }000\text{ r/min}$,研磨间隙为 2 mm 时,工件的表面粗糙度最低。

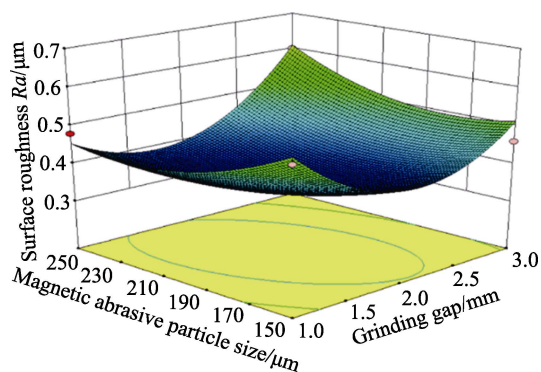


图10 磁性磨料粒径与研磨间隙的交互影响
Fig.10 Interaction between magnetic abrasive particle size and grinding gap

综上所述,最佳加工工艺参数:磁性磨料粒径为 $180\text{ }\mu\text{m}$,磁极转速为 $1\text{ }000\text{ r/min}$,研磨间隙为 2 mm 。

磁性磨料粒径为 $180\text{ }\mu\text{m}$,磁极转速为 $1\text{ }000\text{ r/min}$,加工间隙为 2 mm 时,取工件凹槽底面某点为测量点,工件表面粗糙度随时间变化的曲线如图11所示。由图11可知,随研磨时间的增加,工件的表面粗糙度逐渐下降。在前 20 min ,研磨效率较高,表面粗糙度

下降较快。其因是,原始工件表面凹凸不平,对于凸出的工件表面,加工间隙偏小,研磨压力偏大,表面材料得到优先去除,材料去除效率较高。随着加工时间的延长,工件表面质量逐渐改善,材料去除效率降低,表面粗糙度下降速率也逐渐降低。研磨 50 min 后,表面粗糙度不再降低。

使用超景深显微镜放大 300 倍观测后,得到的钛合金工件加工表面研磨前后的二维表面形貌对比如图12所示。图12a为加工表面的原始形貌,可以看

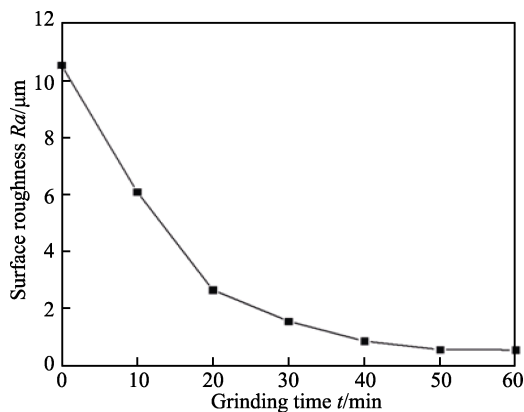


图11 表面粗糙度随时间变化曲线
Fig.11 Surface roughness curve with time change

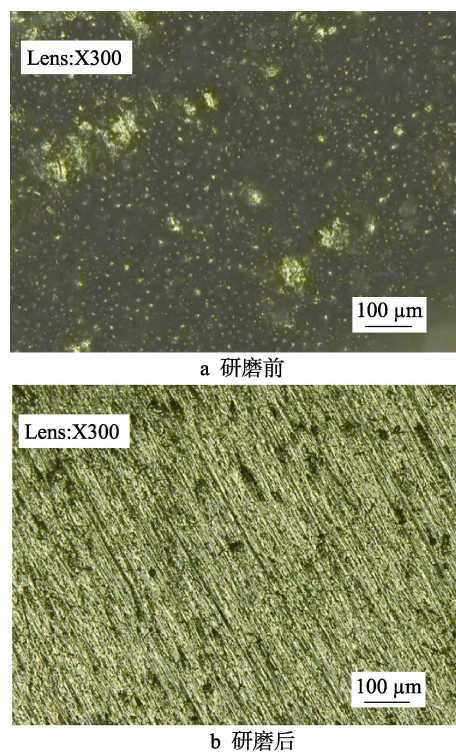


图12 二维微观形貌对比

Fig.12 Comparison of two-dimensional micromorphology: a) before grinding; b) after grinding

出,在过高的温度梯度变化下,金属粉末熔化不充分,金属材料熔凝时,粉末粘附在零件表面,导致其表面覆盖有不均匀的球状颗粒,表面较为粗糙。图12b为

研磨加工后滚道表面的二维表面形貌, 可以看出, 利用仿形组合磁极进行磁粒研磨光整加工后, 滚道表面呈现明显的条状加工纹理。原因在于, 磁极单向旋转, 即使磨粒翻滚, 磨粒的研磨方向大体一致, 研磨加工后, 工件表面不可避免地残留着轻微、均匀的研磨痕迹, 研磨加工后, 工件表面粗糙度 Ra 由原始表面的 $10.70\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.52\text{ }\mu\text{m}$, 表面质量得到大幅度改善, 使得管件内表面在使用过程中不易产生裂纹、凹坑等缺陷, 能够满足使用要求。

工件二维宏观形貌的对比如图 13 所示。图 13a 为研磨前工件的原始形貌, 其表面质量较差, 有明显的凹凸不平缺陷, 且工件表面亮度低。图 13b 为研磨后工件的表面形貌, 工件表面质量有明显改善, 凹凸不平的缺陷得到有效去除, 工件表面亮度明显提升。通过对比工件研磨前后的宏观形貌可知, 研磨抛光后的工件表面质量较为均匀。因此, 利用仿形组合开槽磁极研磨增材制造复杂表面, 能够改善增材制造复杂表面的质量。



图 13 工件二维宏观形貌对比
Fig.13 Comparison of 2D macro morphology of workpiece: a) before grinding; b) after grinding

4 结论

1) 利用仿形组合磁极研磨复杂零件表面, 能够实现多个被加工表面的同时研磨, 不仅能够达到改善加工表面质量的目的, 而且能够提高研磨加工效率。

2) 利用 ANSYS Maxwell 软件, 对开不同形状槽的磁极的磁感应强度变化进行仿真, 对比沿磁极圆周开均布的 4 个 60° V 形槽、4 个 90° 矩形槽和 4 个 135° 梯形槽在相同的位置处测量磁感应强度, 90° 矩形槽的磁感应强度波峰最大、波谷最小、波峰波谷差值也最大, 最适宜研磨加工增材工件的复杂表面。

3) 以钛合金 (Ti6Al4V) 材料增材制造的成形零件的沟槽表面为研磨加工对象, 采用开槽仿形组合磁极磁粒研磨加工沟槽复杂表面, 加工参数设置: 磁性磨粒粒径为 $180\text{ }\mu\text{m}$, 工件转速为 $1\text{ }000\text{ r/min}$, 研磨间隙为 2 mm 。研磨加工 50 min 后, 加工表面的表面粗糙度 Ra 由原始表面的 $10.70\text{ }\mu\text{m}$ 降至加工后的 $0.52\text{ }\mu\text{m}$, 加工表面缺陷得到有效去除, 工件表面光洁度得到有效提高。

参考文献:

- [1] 易果强, 周亚举, 张鹏, 等. 电弧熔丝增材制造 ODS 钢的成型工艺及组织性能[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6): 128-136.
YI Guo-qiang, ZHOU Ya-ju, ZHANG Peng, et al. Forming Process, Microstructure and Properties of ODS Steel Prepared by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(6): 128-136.
- [2] LIU Shun-yu, SHIN Y C. The Influences of Melting Degree of TiC Reinforcements on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Direct Deposited $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V-TiC}$ Composites[J]. Materials & Design, 2017, 136: 185-195.
- [3] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 14-22.
GAO Hang, PENG Can, WANG Xuan-ping. Research Progress on Surface Finishing Technology of Aeronautical Complex Structural Parts Manufactured by Additive Manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 14-22.
- [4] 王宣平, 段合露, 孙玉文, 等. 增材制造金属零件抛光加工技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 1-10.
WANG Xuan-ping, DUAN He-lu, SUN Yu-wen, et al. Advances in the Research of Polishing Technologies for Additive Manufacturing Metal Parts[J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 1-10.
- [5] 李敏, 袁巨龙, 吴喆, 等. 复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 178-191.
LI Min, YUAN Ju-long, WU Zhe, et al. Progress in Ultra-Precision Machining Methods of Complex Curved Parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 178-191.
- [6] BRINKSMEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, et al. Ultra-Precision Grinding[J]. CIRP Annals, 2010, 59(2): 652-671.
- [7] 陈博文, 孙树峰, 王茜, 等. 材料表面激光抛光技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 74-89.
CHEN Bo-wen, SUN Shu-feng, WANG Xi, et al. Research Progress of Laser Polishing Technology for Material Surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 74-89.
- [8] 周浩, 赵振宇, 周后明, 等. 钢材料表面的激光抛光技术及应用[J]. 机床与液压, 2020, 48(23): 184-189.
ZHOU Hao, ZHAO Zhen-yu, ZHOU Hou-ming, et al. Laser Polishing Technology on Steel Surface and Its Application[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(23): 184-189.
- [9] 廖聪豪, 周静, 沈洪. 增材制造 TC4 钛合金在激光抛光前后的电化学腐蚀性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 89-95.
LIAO Cong-hao, ZHOU Jing, SHEN Hong. Electroch-

- emical Corrosion Behaviors before and after Laser Polishing of Additive Manufactured TC4 Titanium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 89-95.
- [10] 张龙龙, 焦安源, 刘新龙, 等. 电解-磁粒复合研磨对 TCTC4 孔棱边毛刺的光整加工[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(10): 1-5.
ZHANG Long-long, JIAO An-yuan, LIU Xin-long, et al. Finishing of Burr of TC4 Hole by Electrolytic-Magnetic Particle Composite Grinding[J]. Plating & Finishing, 2018, 40(10): 1-5.
- [11] CHANG Shuai, LIU Ai-hong, ONG C Y A, et al. Highly Effective Smoothing of 3D-Printed Metal Structures via Overpotential Electrochemical Polishing[J]. Materials Research Letters, 2019, 7(7): 282-289.
- [12] 陈虎, 杨卫英. 电化学抛光对 HR-1 不锈钢表面的影响[J]. 电镀与环保, 2015, 35(2): 37-40.
CHEN Hu, YANG Wei-ying. Influence of Electrochemical Polishing on the Surface of HR-1 Stainless Steel[J]. Electroplating & Pollution Control, 2015, 35(2): 37-40.
- [13] 陈燕, 宋宗朋, 李昌, 等. 磁研磨法抛光 40Cr 钢管件内表面的影响因素[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 62-69.
CHEN Yan, SONG Zong-peng, LI Chang, et al. Influencing Factors on Polishing Inner Surface of 40Cr Steel Pipe Fittings with a Magnetic Grinding Method[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 62-69.
- [14] 丁凯, 傅玉灿, 苏宏华, 等. 基于单颗磨粒磨削的超声振动参数与磨削参数匹配性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 59-65.
DING Kai, FU Yu-can, SU Hong-hua, et al. Study on Matching Performance of Ultrasonic Vibration and Grinding Parameters Based on a Single Abrasive Grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 59-65.
- [15] 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.
- [16] 焦安源, 张龙龙, 刘新龙, 等. 磁粒研磨去除 Al 7075 交叉孔棱边毛刺的试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 302-309.
JIAO An-yuan, ZHANG Long-long, LIU Xin-long, et al. Experimental Study of Deburring in Al₇₀₇₅ Cross Hole Edge Based on Magnetic Particles Grinding[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 302-309.
- [17] 焦安源, 全洪军, 李宗泽, 等. 磁力研磨法同步光整内外矩形环槽表面的应用研究[J]. 现代制造工程, 2016(8): 117-121.
JIAO An-yuan, QUAN Hong-jun, LI Zong-ze, et al. Application Study on Synchronous Polishing Internal and External Rectangle Ring Groove Surface by Magnetic Abrasive Finishing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(8): 117-121.
- [18] 吕兴国, 韩冰, 陈燕. 基于磁力研磨法对微型槽的精密研磨研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(14): 93-96.
LYU Xing-guo, HAN Bing, CHEN Yan. Study on Micro Groove Polishing Based on Magnetic Abrasive Finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(14): 93-96.
- [19] 叶恒宇, 梁存真, 覃寿同. 磁极开槽情况对磁力研磨的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 101-103.
YE Heng-yu, LIANG Cun-zhen, QIN Shou-tong. Effect of Magnetic Pole Groove on Magnetic Abrasive Finishing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 101-103.
- [20] 邓曰明, 赵玉刚, 宋壮, 等. 磁极开槽对磁粒研磨加工镍钛合金血管支架管材内壁表面质量的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 322-330.
DENG Yue-ming, ZHAO Yu-gang, SONG Zhuang, et al. Study on Surface Quality of Inner Wall of Ni-Ti Alloy Cardiovascular Stents by Magnetic Abrasive Finishing by Magnetic Pole Slotting[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 322-330.
- [21] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 磁力光整加工 ZrO₂ 陶瓷材料磁极头设计及仿真[J]. 机床与液压, 2019, 47(15): 94-98.
LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Design and Simulation of Magnetic Pole for Magnetic Abrasive Finishing ZrO₂ Ceramics Material[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(15): 94-98.
- [22] 王金龙, 陈燕, 张泽群, 等. 瓦形磁极对磁粒研磨加工管件内表面的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 158-166.
WANG Jin-long, CHEN Yan, ZHANG Ze-qun, et al. Influence of Tile Type Magnetic Pole on Inner Surface of Magnetic Abrasive Finishing Grinding Pipe Fittings[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 158-166.
- [23] 肖阳, 孙友松, 陈光忠. 永磁场磁力研磨 TC11 钛合金的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 229-234.
XIAO Yang, SUN You-song, CHEN Guang-zhong. Experimental Study of Magnetic Abrasive Finishing of TC11 Titanium Alloy in Permanent Magnetic Field[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 229-234.
- [24] 王杰, 陈燕, 吕旖旎, 等. 开槽仿形磁极在轴承内圈滚道光整中的应用[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(5): 32-37.
WANG Jie, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Application of Slotted Profiling Magnetic Pole in Bearing Inner Ring Groove Finishing[J]. Plating & Finishing, 2020, 42(5): 32-37.
- [25] 陈燕. 磁粒研磨加工技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 5-7.
CHEN Yan. Magnetic Abrasive Finishing Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 2021: 5-7.

责任编辑: 刘世忠