

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.004

基于交变磁场辅助磁力研磨中永磁极优化试验

李佳新, 曹睿, 矫彦婷, 韩冰*, 王荟江

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 钛合金是新兴的结构和功能材料, TC4钛合金表面的精密加工依旧是个难题。为提高钛合金表面质量, 在交变磁场磁粒研磨加工中进一步优化了永磁极的排列方式。利用有限元软件分别对未优化的交变磁场以及优化后的交变磁场进行模拟分析对比, 再通过试验对比优化前后的几个交变磁场下, 磁粒研磨加工 TC4钛合金的表面形貌和表面粗糙度的变化情况。研究表明: 在未优化交变磁场下磁粒研磨加工 10 min, 磁粒研磨加工工件的表面粗糙度从 1.28 μm 降至 0.38 μm ; 在优化后磁场强度最大的交变磁场作用下, 磁粒研磨加工工件的表面粗糙度从 1.28 μm 降至 0.13 μm 。在辅助磁粒研磨过程中, 优化后的交变磁场不仅提高了加工区域内的磁感应强度, 而且磁性磨粒研磨轨迹更加复杂, 促进了磁性磨粒的更新, 使加工后工件的表面形貌更加平整。用优化后的交变磁场辅助磁粒研磨 TC4钛合金表面, 提高了研磨效率, 进一步提高了工件的表面质量。

关键词: 交变磁场; 磁粒研磨; TC4钛合金板; 表面粗糙度

中图分类号: TG147

文献标识码: A

Optimization experiment of permanent magnetic pole in magnetic grinding assisted by alternating magnetic field

Li Jiaxin, Cao Rui, Jiao Yanting, Han Bing*, Wang Huijiang

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

Abstract: Titanium alloy is an emerging structural and functional material, and precision machining of TC4 titanium alloy surface remains a challenge. To improve the surface quality of titanium alloy, the arrangement of permanent magnetic poles is further optimized in alternating magnetic field magnetic particle grinding. The unoptimized alternating magnetic field and the optimized alternating magnetic field were simulated and analyzed by finite element software. The changes of surface morphology and surface roughness of TC4 titanium alloy processed by magnetic particle lapping under several alternating magnetic fields before and after optimization were compared through experiments. The results show that after 10 min of magnetic grain grinding, the surface roughness of the workpiece is reduced from 1.28 μm to 0.38 μm without optimizing the alternating magnetic field, and the surface roughness of the workpiece decreases from 1.28 μm to 0.13 μm during the magnetic particle grinding process under the optimized alternating magnetic field with the highest magnetic field strength. The optimized alternating magnetic field has increased the magnetic induction intensity within the processing area during assisted magnetic abrasive machining. During the grinding process with the optimized alternating magnetic

收稿日期: 2023-09-11

修回日期: 2024-01-28

作者简介: 李佳新(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为精密与特种加工, 2582828960@qq.com

*通信作者: 韩冰(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为精密与特种加工, email: hanb75@126.com

field, the trajectory of magnetic abrasive particles becomes more complex, facilitating the renewal of magnetic abrasive particles. This results in a smoother surface morphology of the workpiece after processing. The optimized alternating magnetic field-assisted magnetic abrasive machining on the surface of TC4 titanium alloy increased the grinding efficiency and further improved the surface quality of the workpiece.

Keywords: alternating magnetic field; magnetic particle grinding; TC4 titanium alloy plate; surface roughness

磁粒研磨是一种利用柔性磨粒刷在磁场作用下进行纳米级加工的非传统加工技术^[1]。在磁粒研磨技术中,磁场作为研磨加工的动力源,在磁场作用下磁性磨粒形成了具有一定刚度的“磨粒刷”,通过调整磁场强度可以调整研磨压力^[2-5]。在加工过程中,永磁极研磨面的磁极开槽形状是影响加工质量的重要因素^[6]。一些学者通过数值模拟和实验,研究了磁极不同开槽方式和开槽尺寸对加工区磁场分布、磁粒受力和加工效率的影响^[7]。叶恒宇等^[8]对比了不开槽和开矩形槽的磁极头的加工效果,相较于不开槽,开槽磁极加工的工件表面粗糙度改善率为32.95%。邓曰明等^[9]利用开槽磁极对管材内表面进行加工,结果显示,管材内壁表面粗糙度由加工前的0.50 μm 降至0.11 μm ,下降了78%。朱子俊等^[10]探究了磁粒研磨中复合磁极磁回路对工件表面质量及表面粗糙度的影响,解决了传统平面加工中磨粒受磁力较小而远离加工区域,从而使加工效率变低的问题,表面粗糙度改善率提升了40%。赵杨等^[11]为了改善管件内表面质量,在电磁场作用下添加圆柱形辅助磁极研磨25 min,使得5051铝合金管内的表面粗糙度由原始的0.791 μm 降低到0.153 μm 。钛合金板的表面硬度较高,寻常加工方式存在加工效率低,加工质量差等问题。针对TC4钛合金表面精密加工这个难题^[12-13],采用磁粒研磨作为加工方法。磁力研磨具有切削力度大,加工效率高等优点,可以很好的对TC4钛合金材料进行研磨抛光。为了更进一步提高加工效率,有学者研究了磁极开槽形式、超声波振幅和磨粒粒径加工条件等因素对TC4钛合金板表面加工效率的影响^[14-16]。大量试验证明,磁极开槽会显著提高磁粒研磨的加工效率。为进一步提高加工效率,在磁极开槽的基础上提出了磁极离散化的概念,由数个小磁极代替原本的一整块磁极。研究表明,合理的磁极排布可以有效地

提升磁场强度,提高加工效果^[17-20]。

为提高TC4钛合金的表面质量,本文在磁极离散化基础上对磁极排布方式进一步优化,使用电磁永磁复合的动态磁场磁粒研磨工艺,通过磁场仿真分析,选出磁感应强度最大的磁极排布方式。通过提高磁性磨粒的更新,使研磨轨迹复杂化,进一步降低了工件表面粗糙度,在原有的基础上提高了加工效率。并自行搭建试验平台,验证了在最佳的磁极排布下交变磁场磁粒研磨工艺对TC4钛合金板的研磨加工效果。

1 试验加工原理及方法

1.1 加工原理

在国内外的研究中,已验证了交变磁场辅助的磁性磨粒加工工艺可以实现更高的精加工效率、获得更好的表面质量^[21]。李路杰^[22]基于磁极开槽法,提出用离散化磁极的方法对磁极结构进行优化,由数块小磁极代替原来一整块磁极。这样的替换会使强磁区向中心靠拢,从而使磨粒向中心靠拢,有利于获得更好的研磨均匀性,从而得到良好的表面加工质量和较高的表面粗糙度。利用电磁磁场对TC4钛合金表面进行研磨加工,使永磁极离散化,最终形成的交变磁场辅助磁粒研磨加工的装置原理见图1。

首先通过建模软件建立试验模型,将建好的模型导入仿真模拟软件,在模拟软件中先定义各部分零件的材料,对永磁极的N、S极进行标定,磁场模式选择瞬态场。再对电磁铁线圈匝数以及电流进行设计,线圈匝数为2000匝,通过外电路加载的电流为2 A的正弦电流。然后添加求解步及求解域进行网格划分,最后进行解析模拟得到优化后的磁极排布方式。

加工工件放置在永磁与电磁中央,将磁性磨粒

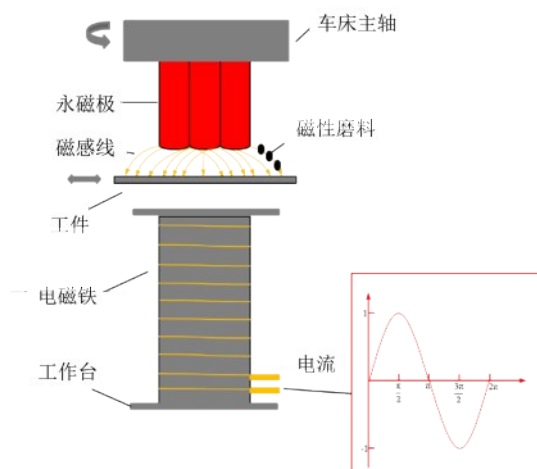


图1 交变磁场辅助磁粒研磨加工原理

Fig. 1 Principle of magnetic particle lapping assisted by alternating magnetic field

吸附于永磁下方。磁性磨粒是由铁粉和三氧化二铝按一定比例烧结而成的固体小颗粒,其中铁粉让磨粒拥有了导磁性,三氧化二铝则作为研磨相对材料进行去除加工^[23]。在磁场中,磁性磨粒会沿磁感线的方向排列,随永磁极一起旋转。当电磁铁通入正弦交流电时,会在加工区域内形成一个磁场,与上方的永磁场叠加。在加工区域,闭合回路可以增大磁感应强度,通入电磁铁的正弦电流可以改变磁感线的分布。磨粒随着磁场旋转,与工件表面产生切向划擦,对工件产生材料去除。

1.2 加工装置

图2为加工装置图。试验装置由炮塔铣床、电磁、电流表和变频器组成。将两个线性滑台平行放置在机床主轴的下方,驱动器中并联接入控制滑台的步进电机,使两个线性滑台可以同步运动。把TC4板固定在滑台上,控制驱动器使工件跟随滑台在水平方向上匀速移动。炮塔铣床的主轴夹持永磁极,磨粒被吸附在永磁极的下方。启动铣床后,永磁极与磨粒一起进行旋转运动,完成对工件表面的研磨。电磁铁放置在滑台下方中间位置,电磁铁线圈的线径为0.8 mm,线圈匝数为2000匝。电磁铁铁芯的中轴线与永磁极的轴线应该处于共线状态,电磁铁芯与变频器组成了试验的电磁装置。变频器相当于电磁的电源,通过调频可为线圈提供2 A、1 Hz的正弦交流电。用电流表实时观测线圈中的电流波动,对线性滑台的控制器进行编程,以控制工件往复运动的距离和速度。

1.3 试验条件及过程

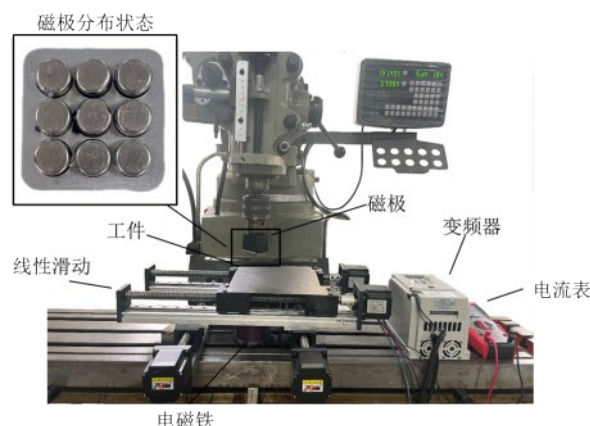


图2 装置图

Fig. 2 Set-up diagram

用NdFeB作为永磁极的材料,加工长、宽、高为200 mm×200 mm×1 mm的TC4钛合金板,交变磁场辅助磁粒研磨的试验条件见表1。将磁性磨粒与研磨液混合搅拌,研磨液可以软化工件表面的氧化膜,有利于磁性磨粒进行研磨去除^[24]。使用JB-8E触针式表面粗糙度仪测量不同加工时间工件表面粗糙度的变化情况。使用VHX-500F型超景深电子显微镜观测原始和磁场优化后工件表面形貌的变化情况。

表1 试验条件

Tab.1 Experimental conditions

磨粒平均粒径/ μm	磁极头形状	磁极参数/ mm	磨削间隙/ mm	磁极转速/ (r·min ⁻¹)	电流/ A	电流频率/ Hz	加工时间/ min
250	半球	φ10×30	1	550	2	1	5 10

2 结果及讨论

2.1 交变磁场的仿真结果

如图3所示,把30 mm×30 mm×30 mm的正方体永磁极分成9个直径为10 mm,高度30 mm的小磁极。离散化的小磁极都具有独立的N、S两极,且磁极同性相斥、异性相吸的特性可以改变磁场分布状态。通过不同N、S极排布形成的永磁极与直径为30 mm的电磁铁结合,组成交变磁场。

模拟出的交变磁场仿真结果见图4。图4(a)为未优化交变磁场的仿真云图,磁极的排列方式见图3。可以看出交变磁场最大的磁感应强度(B)为

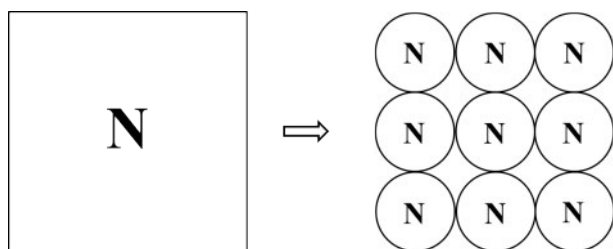
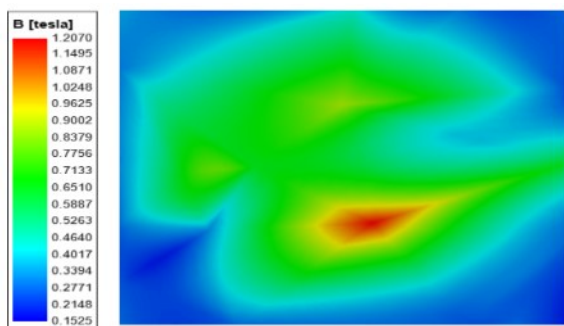
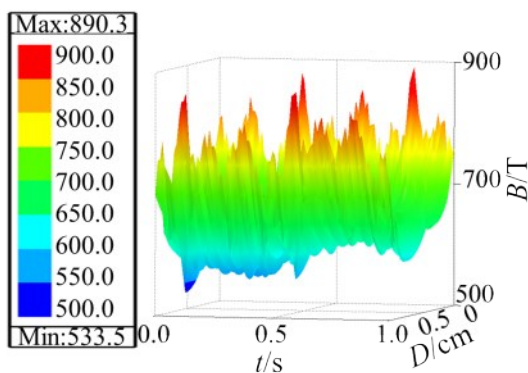


图3 离散化磁极示意图

Fig. 3 Schematic diagram of discretized magnetic poles



(a) 交变磁场仿真云图



(b) 交变磁场加工区域磁感应强度随时间的变化3D图

图4 交变磁场仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of alternating magnetic field

1.2070 T。图4(b)为未优化交变磁场加工区域的磁感应强度随时间变化的3D图,可以看出交变磁场两侧的磁感应强度较大,中间区域磁感应强度较弱,且随时间变化磁感应强度没有太大的变化。因此在中间区域内的粒子运动状态比较稳定,不会发生剧烈的翻滚、划擦运动。

2.2 优化后交变磁场的仿真结果

为了丰富中间区域内的磁场变化,研究了不同组合方式的磁极产生的磁场,利用有限元软件对产生的磁场进行仿真,模拟结果的云图见图5。从图

中可以看出,这5种优化后的交变磁场强度均大于未优化的交变磁场。

图6为对应的不同排布的磁极与电磁结合形成的交变磁场在加工区域内的磁感应强度大小比较。其中0为未改进的加工区域磁感应强度,a~e为5种优化后的加工区域磁感应强度。从图6中可以看出这5种优化后的交变磁场的磁感应强度都高于未优化交变磁场的磁感应强度。其中按e型极向排布方式优化后的交变磁场磁感应强度最高,达到1.7759 T。

图7为不同磁极排布方式下的交变磁场在加工区域随时间变化的3D磁场云图,图中的(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别对应图5中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)的磁极排布方式。如图7所示,电磁装置通入正弦电流后,图a~e磁场的磁感应强度都随着时间的变化呈波浪形波动,而且中间加工区域的磁场变化情况得到了明显改善。从研磨角度分析,按照图5e所示排布的磁极产生的磁场强度最大。排布优化后的永磁极与电磁结合形成的交变磁场,更有利于磁性粒子在加工区域中进行翻滚,有助于切削刃的更新,提高了研磨效率。

2.3 优化前后磁场中磁性磨粒速度及压力分析

图8为优化前后磁场中磁性磨粒的速度变化情况。加工磁场为优化后磁极排布生成的磁场(图5(e)所示)和未优化磁极排布生成的磁场(图3所示)。可以看到,优化后磁场中磨粒的运动速度更快,有利于加工效率的提高。从图8可以看出优化后的交变磁场中磁性磨粒的翻滚速度更快,自锐性更好。

图9为优化前后加工工件表面压力的变化情况。从图9可以看出优化后的交变磁场对工件表面的研磨压力更大,加工效率更高。

2.4 优化前后TC4表面粗糙度对比

分别采用未优化的交变磁场和5种优化后的交变磁场进行试验,加工完成后,通过JB-8E触针式表面粗糙度仪进行测量。图10为不同磁极排布加工工件时,工件表面粗糙度(R_a)的变化情况。图中a、b、c、d、e分别对应图5(a)、5(b)、5(c)、5(d)、5(e)的磁极排布方式。图中0对应未优化的交变磁场。由图中可见,使用未优化的交变磁场研磨10 min后,工件的表面粗糙度从1.28 μm 降至0.38 μm 。采用图5(a)、5(b)、5(c)、5(d)、5(e)对应的磁极排布方式

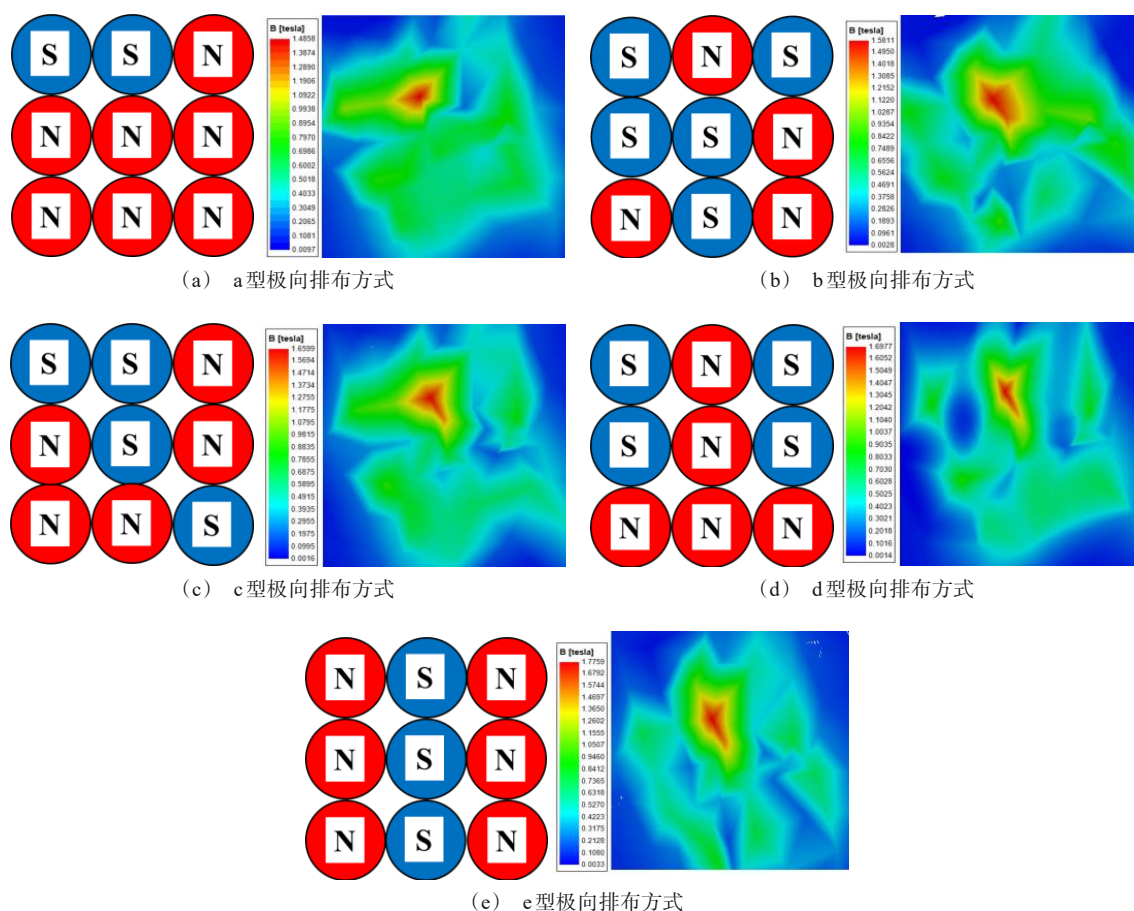


图5 不同磁极排布的交变磁场云图

Fig. 5 Cloud image of alternating magnetic field with different magnetic pole configurations

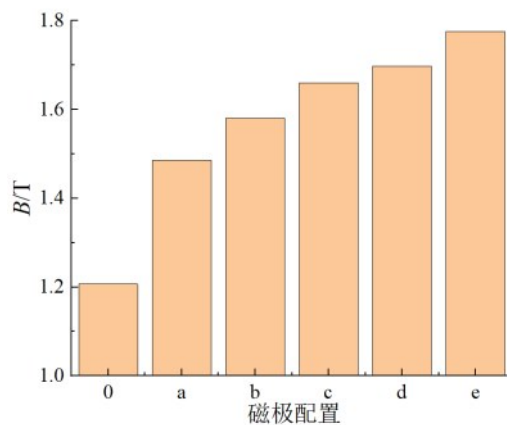


图6 不同磁极排布下交变磁场的最大值

Fig. 6 The maximum value of the alternating magnetic field under different pole arrangements

研磨 10 min 后,工件的表面粗糙度分别为 $0.34\ \mu\text{m}$ 、 $0.31\ \mu\text{m}$ 、 $0.26\ \mu\text{m}$ 、 $0.20\ \mu\text{m}$ 和 $0.13\ \mu\text{m}$ 。从图中可以明显的看到,采用图 5(e) 中的磁极排布方式进行加工效果最好,可以更加高效的获得更好的 TC4 钛

合金表面质量。

图 11 为磁粒研磨前后工件表面微观形貌的变化情况。从图中可以看出,在磁极离散化后的交变磁场加工下,工件表面原始的凹凸纹理大部分被去

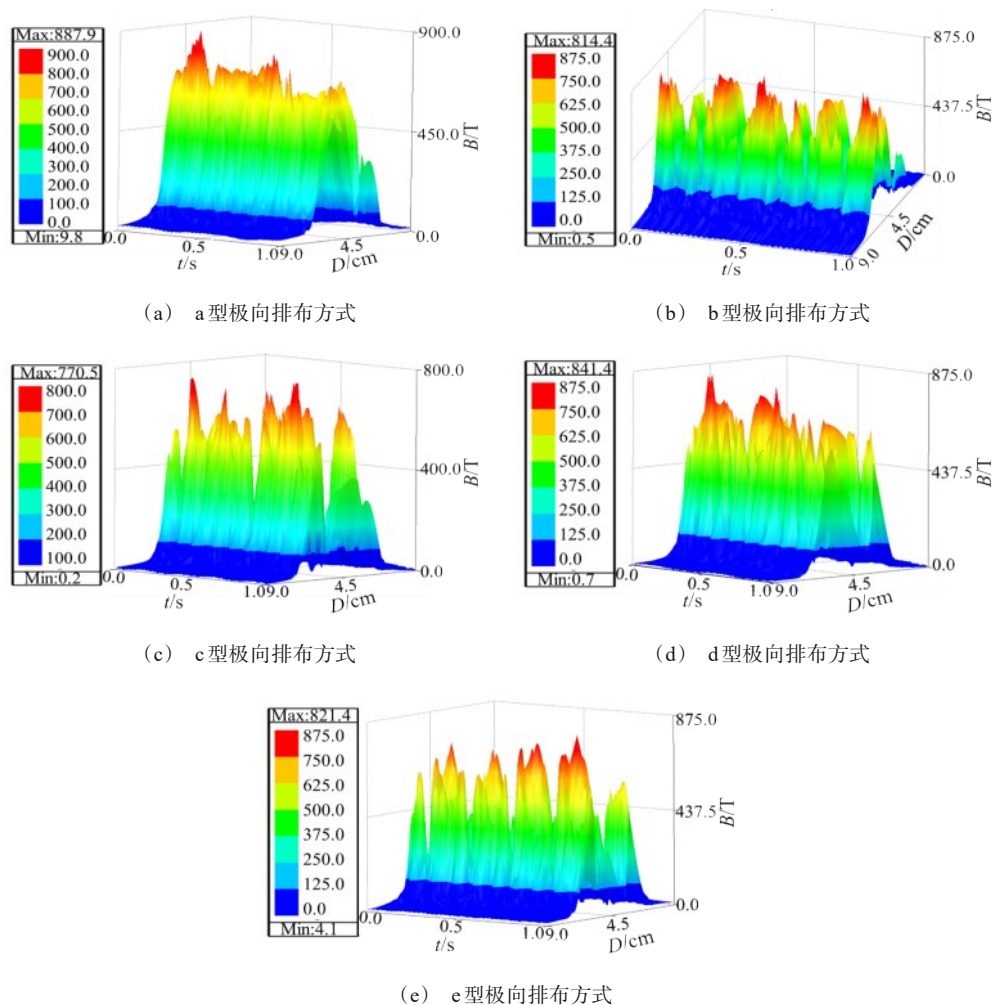


图 7 不同磁极排布方式下的交变磁场在加工区域随时间变化的3D磁场图

Fig. 7 3D magnetic field diagram of the alternating magnetic field changed with time in the processing area under different magnetic pole arrangements

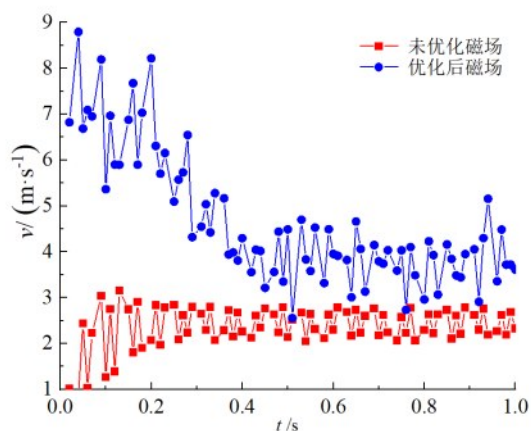


图 8 优化前后磁场中磁性磨粒的速度变化情况

Fig.8 Change of the velocity of magnetic abrasive particles in the magnetic field before and after optimization

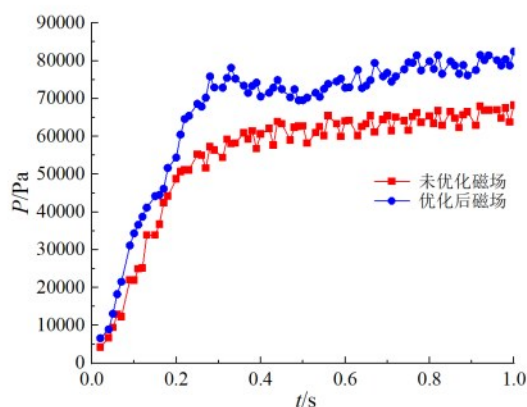


图9 优化前后加工工件表面压力的变化情况

Fig. 9 Changes in surface pressure of the workpiece before and after optimization

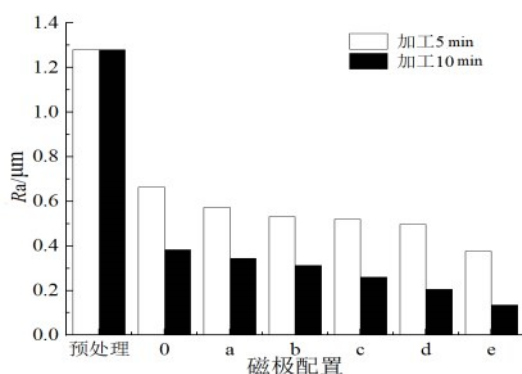


图10 工件表面粗糙度变化

Fig.10 Changes of workpiece surface roughness

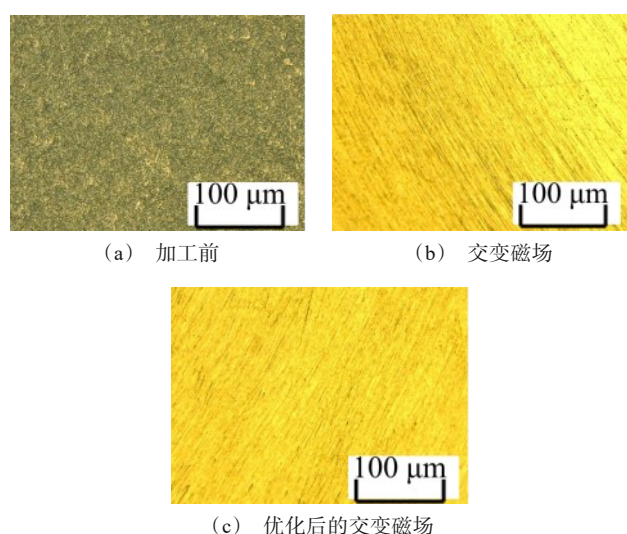


图11 工件研磨前后微观形貌变化

Fig. 11 Changes of micro-morphology of workpiece before and after grinding

除。与未优化交变磁场加工下的工件表面变化情况对比,使用优化后交变磁场加工的工件表面更加平整、光滑。这是因为优化后增加了磁感应强度,使磁场变化更丰富,磨粒运动轨迹更复杂,从而使得加工效率、加工质量都得到了显著的改善。

3 结论

(1)交变磁场中永磁铁的磁极排布会影响加工区域的磁感应强度大小。通过仿真,模拟了5种不同排布的磁极与电磁铁形成的交变磁场的磁感应强度。与未优化交变磁场的磁感应强度对比,优化后交变磁场的磁场强度均大于未优化交变磁场的磁场强度。

(2)在相同条件下进行研磨试验,对比未优化的交变磁场与5种优化后的交变磁场下加工的工件表面粗糙度的变化,磁极排布优化后的交变磁场加工的TC4钛合金板表面粗糙度由原始的 $Ra\ 1.28\ \mu\text{m}$ 降到 $Ra\ 0.13\ \mu\text{m}$ 。观察微观形貌发现原始表面的纹理大部分都被去除,获得了更高的加工质量,提高了加工效率。

参考文献

- [1] 舒坤,孙岩,陈燕. 超声振动辅助磁粒研磨技术的研究进展[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 39-54.
- [2] 邓曰明,赵玉刚,刘广新,等. 基于响应面法的镍钛合金血管支架管材内壁磁粒研磨工艺参数研究[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 384-393.
- [3] Ahmad S, Singari Ranganath M, Mishra R. S. Tri-objective constrained optimization of pulsating DC sourced magnetic abrasive finishing process parameters using artificial neural network and genetic algorithm[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36(7): 843-857.
- [4] Andrii Z, Florian W, Dirk B, et al. Influence of process parameters and initial surface on magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 5(4): 108-108.
- [5] Song Z, Zhao Y G, Liu G X, et al. Surface roughness prediction and process parameter optimization of Ti-6Al-4 V by magnetic abrasive finishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(1): 219-233.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 朱子俊, 韩冰, 陈燕, 等. 复合磁极磁粒研磨平面机理及试验探究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 352-360.
- [10] 赵杨, 陈燕, 李文龙, 等. 电磁铁与永磁铁研磨铝合金管件内表面的对比研究[J]. 现代制造工程, 2020(3): 88-92.
- [11] Panteleenko F I, Maksarov V V, Petrishin G V, et al. Fast magnetic abrasive finishing with diffusionally alloyed powder[J]. Russian Engineering Research, 2023, 43(4): 470-473.
- [12] 杨海吉, 邓祥伟, 韩冰, 等. 超声波辅助磁力研磨 TC4 薄壁细长管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 30-33.
- [13] 朱子俊, 韩冰, 李奎, 等. 超声辅助磁粒研磨 TC4 平面的光整试验研究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(10): 6-11.
- [14] 于克强, 周锟, 陈燕. 超声波辅助磁力研磨整体叶盘试验研究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(7): 42-46.
- [15] 焦安源, 全洪军, 陈燕, 等. 超声磁力复合研磨钛合金锥孔的试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 114-119.
- [16] 刘冬冬, 韩冰, 陈燕, 等. 超声磁粒研磨 Al 6061 管内表面光整试验研究[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(12): 14-19.
- [17] 潘继生, 阎秋生, 路家斌, 等. 集群磁流变平面抛光加工技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 205-212.
- [18] 范增华, 田业冰, 石晨, 等. 多磁极旋转磁场的钛合金表面磁性剪切增稠光整加工特性[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 54-6.
- [19] 张龙龙, 焦安源, 陈燕, 等. 磁粒研磨 Al 2024 细长管的机理及试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 303-309.
- [20] Xie H, Zou Y. 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): 1-13.
- [21] 康璐. 粘结法制备磁性磨粒的工艺及其性能研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 2019.
- [22] 李路杰. 平面磁力研磨中磁极结构优化设计及试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 2022.
- [23] 陈红玲, 张银喜. 磁性磨料磨粒的磨削机理研究[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(5): 562-565.