

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

范增华, 田业冰, 石晨, 孙志光, 钱乘

(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: **目的** 探究多磁极旋转磁场下钛合金 (Ti-6Al-4V) 表面磁性剪切增稠光整加工特性。**方法** 设计不同磁极排布的多磁极旋转磁场, 通过仿真分析和实验测量, 分析 N-S-N、N-S-N-S 和 N-S 等 3 种磁极排布下的磁场特性。基于研制的磁性剪切增稠光整介质, 构建光整加工实验装置, 探究磁极排布、主轴转速、旋转平台转速和加工间隙对工件表面粗糙度的影响规律, 并通过扫描电子显微镜对加工前后的工件表面微观形貌进行对比分析。**结果** 在 N-S-N 磁极排布下, 加工区域的磁场强度较大, 磁力线闭合回路较多, 能够形成刚性较大和数量多的磁力刷。在 N-S-N 磁极排布、主轴转速 600 r/min、旋转平台速度 160 r/min、加工间隙 0.7 mm 的实验条件下, 光整加工效果最优, 工件表面粗糙度下降趋势明显, 表面粗糙度由初始的 1.2 μm 下降至 67 nm, 表面光洁度提高 94%。通过扫描电子显微镜观测, 工件表面的划痕显著去除, 仅残留磨粒切削造成的微细划痕。**结论** 调控多磁极旋转磁场的磁极排布可以有效控制光整加工效率, 配合磁性剪切增稠光整介质和加工工艺参数优化, 钛合金表面能够实现纳米级光整, 表面质量显著改善。

关键词: 多磁极; 磁极排布; 磁性剪切增稠; 光整; 钛合金; 表面粗糙度

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0054-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.005

Finishing Characteristics of Magnetorheological Shear Thickening Finishing for Titanium Alloy Using Multi-pole Rotating Magnetic Field

FAN Zeng-hua, TIAN Ye-bing, SHI Chen, SUN Zhi-guang, QIAN Cheng

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

ABSTRACT: This work aims to explore the finishing characteristics of magnetorheological shear thickening finishing for

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-09-27

Received: 2021-07-29; **Revised:** 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875329, 51905323); 山东省泰山学者工程专项 (tsqn201812064); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2017MEE050); 山东省重点研发计划资助项目 (2018GGX103008); 山东省高等学校青创科技项目 (2019KJB030); 淄博市重点研发计划项目 (2019ZBXC070)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875329, 51905323), Taishan Scholar Special Foundation of Shandong Province (tsqn201812064), Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2017MEE050), Shandong Province Key R&D Project (2018GGX103008), Scientific Innovation Project for Young Scientists in Shandong Provincial Universities (2019KJB030) and Key R&D Project of Zibo City (2019ZBXC070)

作者简介: 范增华 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面光整加工技术、微操作机器人。

Biography: FAN Zeng-hua (1986—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface finishing technology and micromanipulation robot.

通讯作者: 田业冰 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工、智能监控及大数据分析。

Corresponding author: TIAN Ye-bing (1979—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision machining, intelligent monitoring and big data analysis.

引文格式: 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): 54-61.

FAN Zeng-hua, TIAN Ye-bing, SHI Chen, et al. Finishing characteristics of magnetorheological shear thickening finishing for titanium alloy using multi-pole rotating magnetic field[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 54-61.

titanium alloy (Ti-6Al-4V) using multi-pole rotating magnetic field. Multi-pole rotating magnetic fields with different magnetic pole arrangements were designed. The magnetic field characteristics under three magnetic pole arrangements of N-S-N, N-S-N-S and N-S were analyzed based on simulation approaches and experimental measurements. Experimental setup for the surface finishing of titanium alloy (Ti-6Al-4V) was established to investigate the influence of the magnetic pole arrangement, spindle speed, rotary table speed and working gap on the surface roughness of the workpiece. Comparative analysis of the surface micro-topography before and after finishing was conducted based on scanning electron microscope. A large magnetic field intensity and a large number of closed loops of magnetic field lines were obtained in the finishing region under the N-S-N magnetic pole arrangement, which led to form more rigid and a large number of magnetic brushes under the employed magnetic field action. It was observed from the experimental results that the N-S-N magnetic pole arrangement exhibited a good finishing efficiency. The developed finishing media was effective for surface finishing of titanium alloy (Ti-6Al-4V). The surface roughness of 67 nm was achieved from the initial value of 1.2 μm , which improved by over 94%, under the experimental conditions of the N-S-N magnetic pole arrangement, spindle speed of 600 r/min, rotary table speed of 160 r/min, and working gap of 0.7 mm. Surface observations showed that a smooth surface without obvious scratches was obtained. The surface quality was significantly improved. The cutting marks were left on the finished surface because of the scratch of abrasive particles. Regulating the magnetic pole arrangement of multi-pole rotating magnetic field can effectively control the photofinishing processing efficiency, and with the optimization of magnetic shear-thickening photofinishing media and processing process parameters, the surface of titanium alloy can achieve nano-level photofinishing and significant improvement of surface quality.

KEY WORDS: multi-pole; magnetic pole arrangements; magnetorheological shear thickening; finishing; titanium alloy; surface roughness

光整加工是在保证加工零件尺寸精度的基础上,通过对零件的再次加工,提高表面质量。如改善表面的耐磨性、抗腐蚀性、流体流动性等,常作为精密加工的终端环节。磁场辅助光整加工方法利用磁场作用下形成的磁力刷作为加工工具^[1-2],具有良好的柔性和仿形性,能够进入常规机械光整加工方法无法达到的加工区域。

新型光整加工介质、良好特性的磁场分布是满足高效、高质量加工的关键,成为磁场辅助光整加工的研究焦点。G. Parameswari 等^[3]探究了磁流变液中磨料浓度和工件表面初始粗糙度对 Ti-6Al-4V 光整加工的影响规律,通过优化配置实现 49 nm 粗糙度表面的光整加工。面向具有不同斜面的铁磁性工件加工,Anant Kumar Singh 等^[4]研制了具有球形端面的磁流变光整加工装置,通过电磁线圈控制磁流变液的流变性能,经过 60 个加工行程,30°斜面工件的表面粗糙度由初始的 1.4 μm 下降至 30.4 nm,实现了纳米级光整。Li Wenhui 等^[5]研制了一种融合聚合物基液、增塑剂、磁性粒子和磨料的新型光整加工介质,聚合物基液由聚乙烯醇、硼酸和瓜尔豆胶组成,探究了所研制介质的加工特性和材料去除率,可将 6061 铝合金圆管的表面粗糙度改善 96.67%,材料去除率达到 1.916 mg/s。Anwesa Barman 等^[6]研究了钛合金表面纳米光整加工时,两种磁流变液的加工特性,添加氢氟酸和硝酸的磁流变液可实现 10 nm 表面粗糙度的加工,加工后的表面呈现良好的亲水性。面向磁力研磨光整加工,Zhang Jiong 等^[7]针对增材制造 316L 不锈

钢表面进行了磁力研磨光整加工,获取了不同倾斜角对表面粗糙度和材料去除率的影响规律,加工后的表面粗糙度值下降了 75.7%。马付建等^[8]建立了超声辅助磁力研磨钛合金曲面的材料去除率模型,获取了工件曲率半径、驻留时间和加工角度对去除深度的影响规律,并进行了实验验证。针对磁场发生装置的磁场特性优化方面,Guo Jiang 等^[9]提出了一种旋转-振动的磁力研磨光整加工方法,实现双层内管面的高效加工,获取进给速度、旋转速度等工艺参数对增材制造镍 718 工件的加工特性,工件的表面粗糙度由初始的 7 μm 下降至 1 μm ,且没有亚表面变形和损伤。赵杨等^[10]设计了球形开槽磁极,辅助磁力研磨 H63 黄铜弯管内表面,相比较于未开槽磁极,光整加工效率提高了 20%。程森等^[11]设计了双磁极研磨装置,解决研磨中压力不均匀的问题,采用自制的铁磁性磨粒对 SUS304 不锈钢平板进行光整加工,工件表面粗糙度由初始的 0.25 μm 下降至 0.16 μm ,加工效率比传统的“铣削式”研磨方法提高了 80%。曾加恒等^[12]设计了四磁极对称布置的磁力研磨光整加工装置,对增材制造的镍基合金 GH4169 航空发动机喷油管进行加工,内管面的表面粗糙度由初始的 5.8 μm 下降至 0.47 μm 。Fan Zenghua 等^[13]设计了角度可调的四磁极光整加工装置,在进给速度、主轴转速和加工间隙参数优化下,Ti-6Al-4V 工件的表面粗糙度由初始的 1.12 μm 下降至 46 nm。刘乐等^[14]基于海尔贝克阵列进行磁场设计,通过理论和仿真分析获取最优磁场分布,提高加工区域的磁场强度,在 30CrMnSi 平板表

面获取 $0.129\ \mu\text{m}$ 的表面粗糙度。

综上所述,国内外学者通过探究改进光整介质和磁场排布来提高光整加工效率,提供了宝贵的经验。山东理工大学田业冰课题组^[15-20]提出了磁性剪切增稠光整新方法(magnetorheological shear thickening finishing, MSTF),研发了新型的磁性剪切增稠光整介质和多磁极旋转磁场光整加工装置,提高了光整加工效率和工件表面质量,但是,基于磁性剪切增稠光整介质的多磁极旋转磁场光整加工特性方面,尚需要进一步深入研究。本文基于前期课题组自制的磁性剪切增稠光整介质,构建了3种磁极排布的多磁极旋转磁场,开展 Ti-6Al-4V 工件的光整加工实验,探究磁极排布、主轴转速、旋转平台转速和加工间隙对光整加工特性的影响规律。

1 光整加工原理

多磁极旋转磁场的光整加工原理如图1所示。圆槽盘内具有64个磁极放置孔,分3圈排布,放置不同极性的磁极,创造出不同的作用磁场。挡板放置在圆槽盘内,用以盛放光整加工介质,避免光整介质与磁极直接接触,便于清理、更换不同的光整介质。光整介质在磁场的作用下,沿着磁力线分布,形成柔性磁力刷。加工工件安装在主轴上,圆槽盘固定在旋转平台上,主轴和圆槽盘的旋转使磁力刷与工件表面相对运动,进行光整加工。剪切增稠基液、铁粉和磨料配制的光整介质,在与工件表面微凸峰相对运动接触时,由于剪切增稠效应,产生粒子簇集中,增强切削能力,提高材料去除效率。工件表面微凸峰以切屑的形式光整去除。

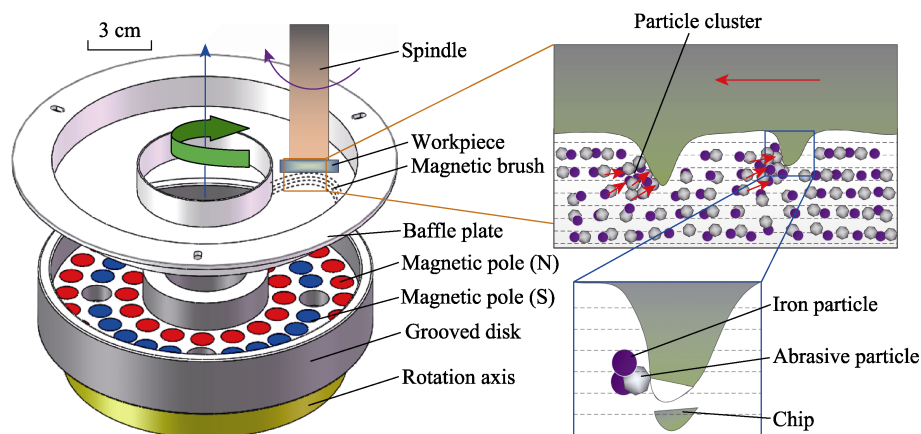


图1 多磁极旋转磁场光整加工原理

Fig.1 Finishing principle of multi-pole rotating magnetic field

2 磁场分析

在 Ansys Maxwell 仿真环境下,对多磁极磁场发生装置进行有限元仿真,圆槽盘的材料为45号钢,磁极材料为钕铁硼 N38。三维磁感应强度分布如图2所示,磁极排布为 N-S-N,即中间圈的磁极为 S 极,内、外圈的磁极为 N 极。三维仿真结果表明,最大磁感应强度分布在磁极顶端。为验证仿真分析的有效

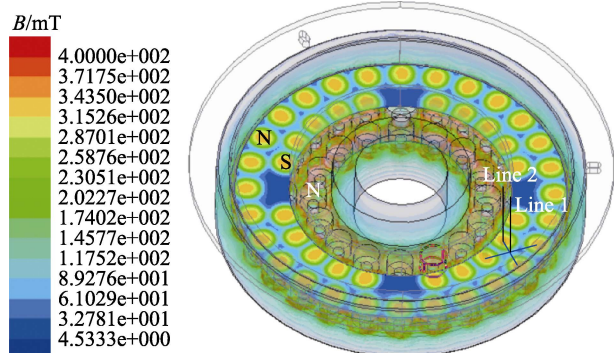


图2 三维磁场强度仿真

Fig.2 3D simulation of magnetic field intensity

性,在多磁极形成的磁场区域,选择两条路径,利用高斯计(型号:GM500)进行实验测量,验证仿真结果。考虑挡板厚度下,一条路径的起点为内圈和中间圈四磁极对角线的交点,即图2所示 Line 1 的下端点;另一条路径(Line 2)的起点为内圈磁极的顶点。

两条路径下,磁场强度的仿真与实验对比结果如图3所示,实验采样点距离为 $0.5\ \text{mm}$ 。随着相对于

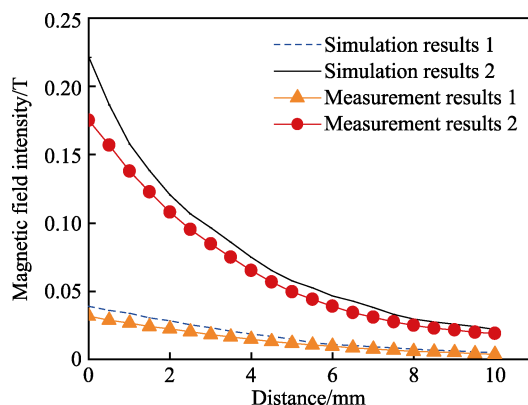


图3 仿真结果与实验测量比较

Fig.3 Comparison of simulation results with experimental measurements

起点距离的增加,两条路径下的磁场强度均逐渐减小,趋近于 0,且在初始阶段,磁场强度衰减较快。在路径 1 的起点处,磁场强度的仿真结果为 0.039 T,实验测量磁场强度为 0.031 T。在路径 2 的起点处,磁场强度的仿真结果为 0.22 T,实验测量结果为 0.17 T。由于空气漏磁,实验测量结果均低于仿真结果。实验与仿真结果的一致性验证了所采用仿真策略的有效性。

针对不同磁极排布下光整加工区域的磁场特性分析,在 Ansys Maxwell 仿真环境下,设计了 3 种磁极排布,二维磁力线的分布如图 4 所示。图 4a 为 N-S-N 磁极配置下的磁力线分布,内、外圈放置 N 极,中间圈放置 S 极。图 4b 为 N-S-N-S 磁极配置下的磁力线分布,将磁极区域划分为 4 个区域,按照图示标

注进行 N-S-N-S 磁极配置。图 4c 为 N-S 磁极配置下的磁力线分布,将磁极区域划分为 2 个区域,左侧放置 N 极,右侧配置 S 极。3 种配置下的磁力线结果表明,磁力线经由空气和圆槽盘,在 N 极和 S 极之间形成闭合回路。N-S-N 磁极配置下具有较多的磁力线闭合回路,有助于较多磁力刷的形成,提高加工效率。

为进一步分析 3 种磁极排布下的磁场特性,在距离挡板 1 mm 高度处,以图 4a 所示的起点,沿着圆周顺时针进行磁场强度测量,结果如图 5 所示。测量区域为磁力刷形成的区域,测量结果表明,在 20 个测量点中,N-S-N 磁极排布方式下具有较大的磁场强度。N-S-N、N-S-N-S 和 N-S 等 3 种配置下的最大磁场强度分别为 30.2、25、20 mT。综上所述,3 种磁极配置下,N-S-N 磁极排布方式最优,可在加工区域

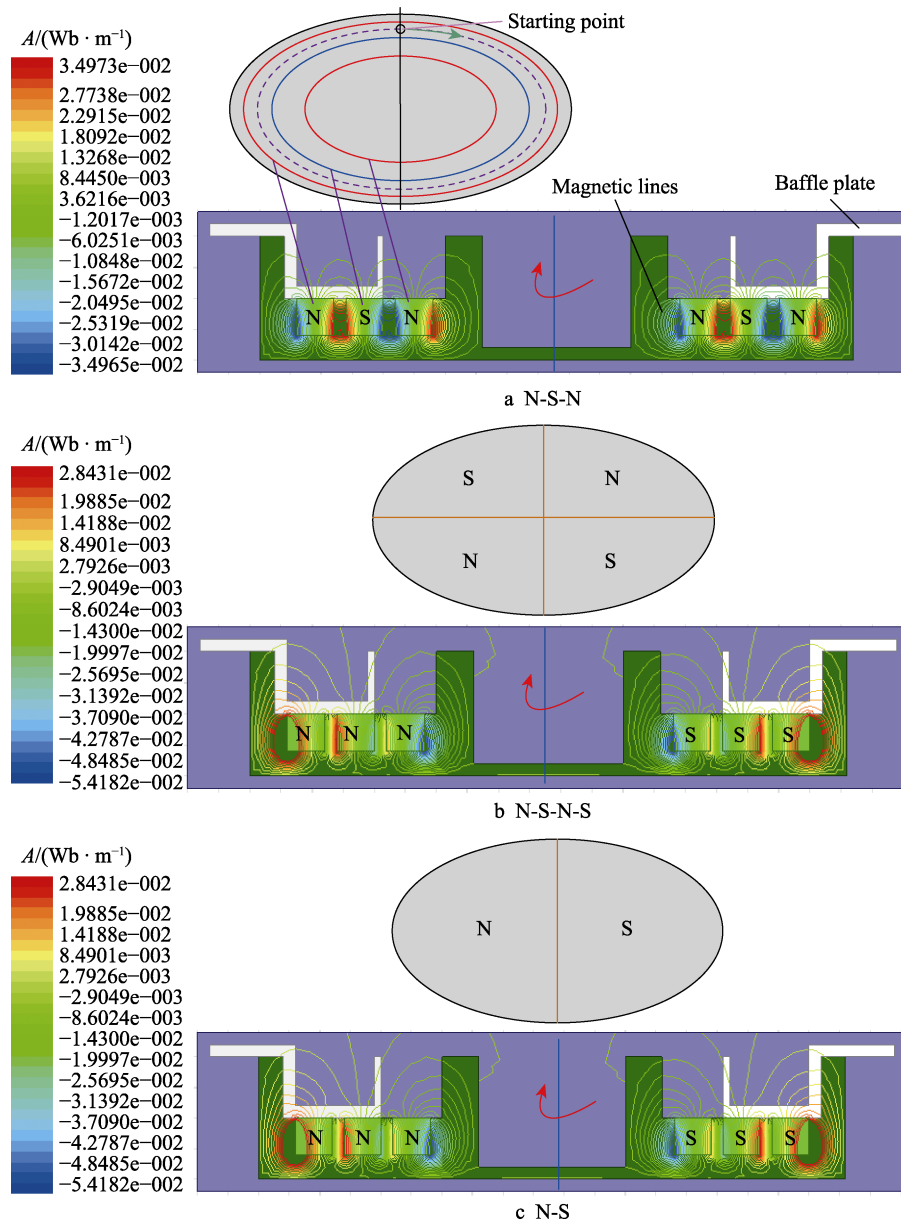


图 4 不同磁极配置下磁力线分布

Fig.4 Magnetic field line distributions with different magnetic pole configurations

形成较大的磁场强度,有助于增强磁力刷的刚度,提高光整效率。

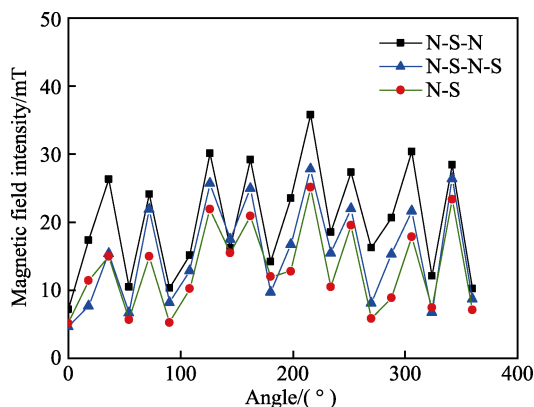


图5 3种磁极配置下的磁场强度

Fig.5 Magnetic field intensity with three magnetic pole configurations

3 实验

3.1 光整介质

光整介质是光整加工的“刀具”,在外源磁场作用下,光整介质沿磁力线分布,形成磁力刷。本文基于剪切增稠基液制备了磁场剪切增稠光整介质,配制流程如图6所示。将7~40 nm SiO_2 与PEG-200按照

3:17的质量比混合,使用搅拌器(PJ450-D)搅拌1 h,获取剪切增稠基液。将羰基铁粉加入剪切增稠基液中,质量比为1:2,搅拌15 min。继续加入SiC磨粒,质量比为1:3,搅拌15 min。将配制后的介质在真空干燥箱内放置12 h,去除介质中的气泡,最终获取磁性剪切增稠光整介质。

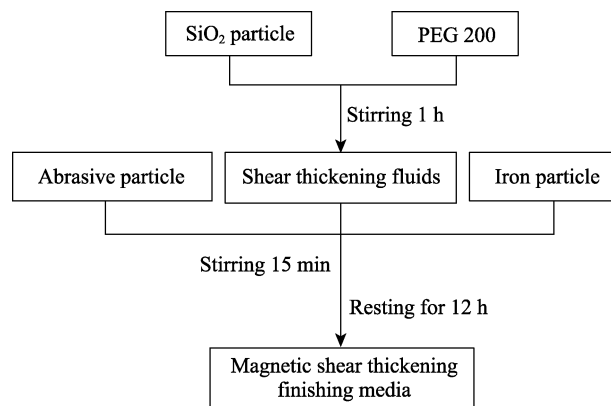


图6 光整介质配制流程

Fig.6 Preparation processes of finishing media

通过场发射扫描电子显微镜(FEI Sirion 200)观测的光整介质SEM微观形态如图7所示。羰基铁粉与SiC磨粒分散在剪切增稠基液中, SiC磨粒棱角鲜明,作为切削刃,有助于工件表面的材料去除,实现高效光整加工。

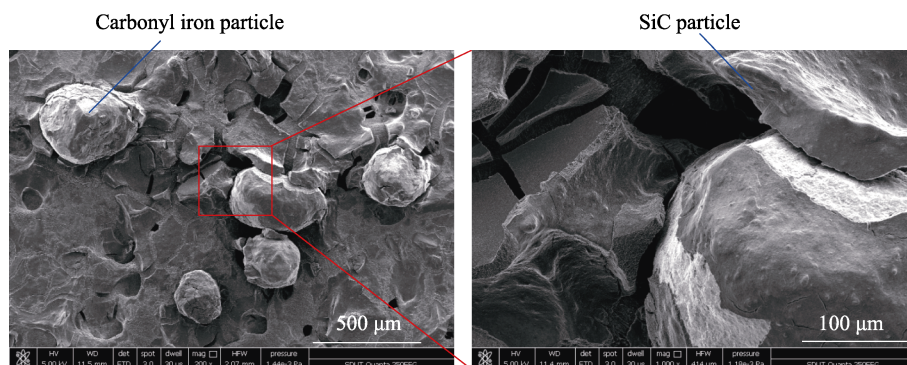


图7 光整介质
Fig.7 Finishing media

3.2 实验装置

将研制的多磁极圆槽盘集成至四轴高速钻攻铣加工中心(VKN640)^[20],构建光整加工实验装置,如图8所示。工件固定在加工中心主轴上,可以通过控制主轴在竖直方向的运动,调整工件与挡板槽底面的距离,创造合适的光整加工间隙。作为光整加工的“刀具”,磁性剪切增稠光整介质在挡板槽内沿着磁力线分布,形成柔性磁力刷凸起。主轴带动工件做旋转运动,旋转平台带动多磁极圆槽盘旋转,在两者复合运动作用下,使工件表面与光整介质发生相对摩擦,实现工件表面材料去除。

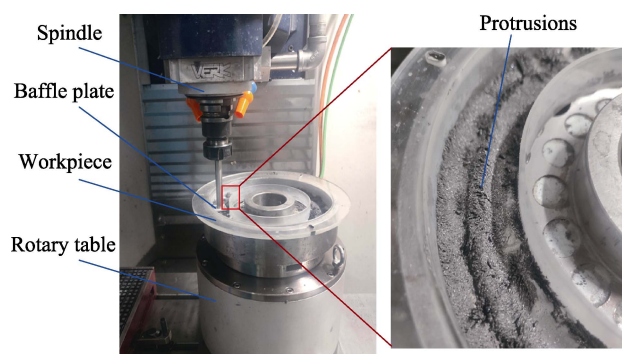


图8 实验装置
Fig.8 Experimental setup

3.3 实验条件

为获取多磁极旋转磁场下磁性剪切增稠介质的光整加工特性，选用 Ti-6Al-4V 作为加工试件，尺寸为 20 mm×7 mm×3 mm。配制 SiO₂ 质量分数为 15% 的剪切增稠基液，添加羰基铁粉的粒径为 250 μm，SiC 磨粒的粒径为 150 μm，剪切增稠基液的质量分数为 10.8%。针对主轴转速、旋转平台转速和加工间隙对 Ti-6Al-4V 工件表面的光整加工规律，分别选择 3 个参数开展光整加工实验（见表 1），并通过粗糙度仪（TR200）测量表面粗糙度。

表 1 光整加工参数
Tab.1 Finishing parameters

Items	Parameters
Spindle rotational speed	300, 600, 900 r/min
Rotary table speed	80, 120, 160 r/min
Working gap	0.7, 1.1, 1.5 mm
Silica mass fraction	15%
STFs mass fraction	10.8%
Carbonyl iron particle size	250 μm
SiC particle size	150 μm
Mass ratio (CIP: SiC)	3 : 1

4 结果及分析

4.1 磁极排布对表面粗糙度的影响

面向多磁极旋转磁场的磁极排布，变换 N-S-N、N-S-N-S、N-S 等 3 种磁极排布，3 种磁极排布下表面粗糙度随时间的变化如图 9 所示。本次实验中，钛合金工件的初始表面粗糙度为 0.2 μm，羰基铁粉的粒径为 6.5 μm，SiC 磨粒的粒径为 18 μm，其配比与表 1 参数一致，主轴转速选为 300 r/min，旋转平台转速选为 50 r/min，加工间隙选为 1 mm。随着加工进程，表面粗糙度逐渐下降，且在初始阶段下降较快，然后

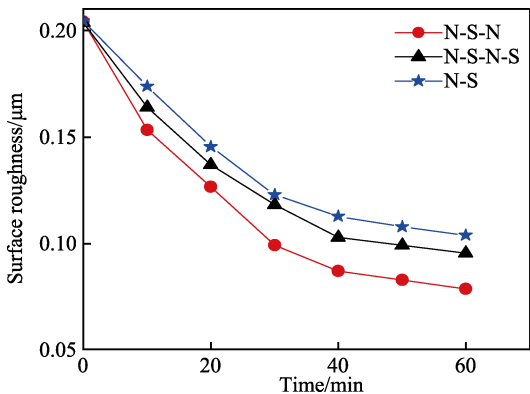


图 9 不同磁极排布下表面粗糙度随时间变化曲线
Fig.9 Variation curve of surface roughness with processing time at different magnetic pole configurations

趋于平缓。在加工 10 min 时，N-S-N、N-S-N-S 和 N-S 排布下的粗糙度值分别下降至 0.15、0.16、0.17 μm。加工 60 min 后，表面粗糙度值分别降至 79、96、104 nm，并趋于稳定。N-S-N 磁极排布下加工效率最高，且最终的表面粗糙度值最小。因为仿真和实验测量表明，在 N-S-N 排布下的磁场强度较大，磁力线回路较多，能够形成刚性较大、数量较多的磁力刷，进而有助于材料去除，表面粗糙度值下降显著，光整加工效率得到有效提高。

4.2 主轴转速对表面粗糙度的影响

在 N-S-N 的最优磁极排布下，进一步探究主轴转速、旋转平台转速和加工间隙对表面粗糙度的影响规律。Ti-6Al-4V 工件的初始表面粗糙度为(1.2±0.05) μm。不同主轴转速下表面粗糙度随时间的变化曲线如图 10 所示，旋转平台转速为 160 r/min，加工间隙为 0.7 mm，其他加工参数见表 1。主轴转速为 300、600、900 r/min 的条件下获得的最终表面粗糙度值分别为 137、67、93 nm，主轴转速对表面粗糙度的影响不呈现单调关系。主轴转速为 300 r/min 时，单位时间内磨粒与工件表面的接触时间短，且低转速下工件表面划痕大，进而材料去除率低、表面质量差、光整效率低。主轴转速为 900 r/min 时，单位时间内磨粒与工件表面的接触时间长，光整次数增加，但是过高的转速使加工区域的光整介质受到较大的离心力，使其沿着工件旋转的切线方向移动，光整介质难以在加工区域形成稳定的状态，磁场力的作用被削弱，加工效率低下。主轴转速为 600 r/min 时，光整加工效率最高，工件表面质量最高，由初始的 1.2 μm 下降至 67 nm。

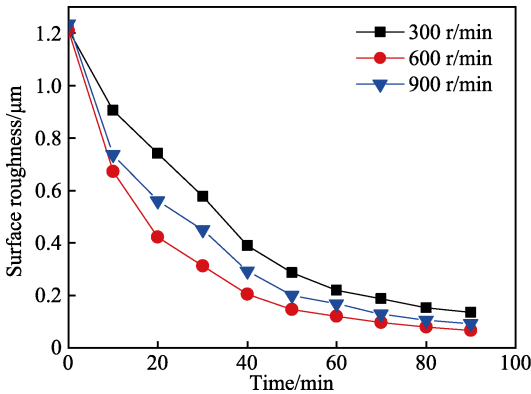


图 10 不同主轴转速下表面粗糙度随时间变化曲线
Fig.10 Variation curve of surface roughness with processing time at different spindle rotational speeds

4.3 旋转平台速度对表面粗糙度的影响

在 N-S-N 磁极排布、主轴转速 600 r/min、加工间隙 0.7 mm（其他参数见表 1）的加工条件下，进一步实验分析旋转平台转速对表面粗糙度的影响规律，如图 11 所示。旋转平台转速由 80、120、160 r/min

依次变化时,加工后工件的粗糙度由初始的 $1.2\ \mu\text{m}$ 分别降至 215、157、67 nm。在初始阶段,随着旋转平台速度的提高,表面粗糙度值下降趋势增大,加工效率高。光整加工 10 min 后,80、120、160 r/min 3 种旋转平台速度下对应的粗糙度值分别为 0.95、0.93、0.67 μm 。旋转平台速度增加,单位时间内磨粒与工件表面的接触时间长,且由 Preston 方程可知,工件表面与磨粒的相对速度越大,材料去除率越大。

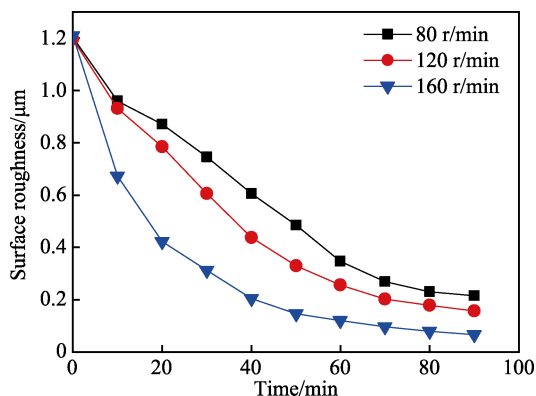


图 11 不同旋转平台速度下表面粗糙度随时间变化曲线
Fig.11 Variation curve of surface roughness with processing time at different rotary table speeds

4.4 加工间隙对表面粗糙度的影响

在 N-S-N 磁极排布、主轴转速 600 r/min、旋转平台速度 160 r/min(其他参数见表 1)的实验条件下,分析多磁极旋转磁场下加工间隙对表面粗糙度的影响规律,如图 12 所示。随着加工间隙的增大,最终获得的表面粗糙度值越大,表面越粗糙。0.7、1.1、1.5 mm 的加工间隙下,工件的表面粗糙度分别降至 67、146、255 nm。由磁场仿真和磁场强度测量可知,随着加工间隙的增大,磁场强度逐渐减小。因而,磁力随着加工间隙的增大逐渐衰减,对介质的把持能

力越来越弱,形成磁力刷的刚度越来越小,表面粗糙度的下降趋势缓慢,加工效率低。在所述实验条件下,对比磁极排布、主轴转速、旋转平台转速和加工间隙对表面粗糙度的影响规律,旋转平台转速和加工间隙的变化对工件加工质量的影响较大。

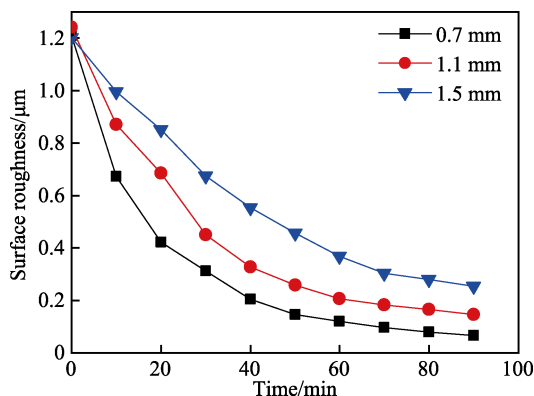


图 12 不同加工间隙下表面粗糙度随时间变化曲线
Fig.12 Surface roughness change curve with time at different working gaps

4.5 表面形貌观测

在 N-S-N 磁极排布、主轴转速为 600 r/min、旋转平台速度为 160 r/min、加工间隙为 0.7 mm 的实验条件下,观测加工前后的表面微观形貌。将待观测钛合金工件通过丙酮、无水乙醇和去离子水依次清洗,利用场发射扫描电子显微镜(FEI Sirion 200)对加工前后的工件进行表面形貌观测,分析加工前后表面质量的变化,如图 13 所示。图 13a 为工件加工前的形貌,未加工表面存在大量划痕,粗糙不平,表面粗糙度大。光整加工后,表面的划痕能够有效去除,仅出现微细的磨粒切屑划痕,如图 13b 所示。表面粗糙度由初始的 $1.2\ \mu\text{m}$ 下降至 67 nm,表面光洁度提高 94%,表面质量得到显著提高。

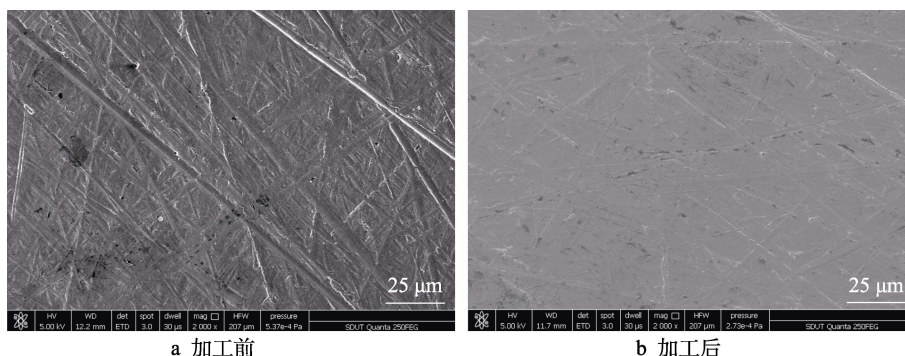


图 13 加工前后 SEM 图片
Fig.13 SEM (a) before and (b) after finishing

5 结论

1) 基于设计的多磁极旋转磁场和磁性剪切增稠

光整介质,带动磁力刷与工件表面发生相对运动,能够对钛合金(Ti-6Al-4V)工件进行纳米级光整加工,提高了工件表面质量。

2) 调控多磁极旋转磁场的磁极排布、主轴转速、

旋转平台转速和加工间隙,能够控制钛合金(Ti-6Al-4V)工件的光整加工效率和表面粗糙度。

3) 在 N-S-N 磁极排布下,加工区域的磁场强度较大,磁力线闭合回路较多,能够形成刚性大和数量多的磁力刷,钛合金(Ti-6Al-4V)工件的表面粗糙度下降趋势明显,加工效率高。

4) 在 N-S-N 磁极排布、主轴转速为 600 r/min、旋转平台速度为 160 r/min、加工间隙为 0.7 mm 的实验条件下,光整加工效果较好,钛合金(Ti-6Al-4V)工件的表面粗糙度由初始的 1.2 μm 下降至 67 nm,表面光洁度提高 94%。

5) 光整加工后,钛合金(Ti-6Al-4V)工件表面的划痕显著去除,会残留磨粒切削的微细划痕。

参考文献:

- [1] FAN Zeng-hua, TIAN Ye-bing, ZHOU Qiang, et al. Enhanced magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using shear thickening fluids additives[J]. Precision engineering, 2020, 64: 300-306.
- [2] QIAN Cheng, FAN Zeng-hua, TIAN Ye-bing, et al. A review on magnetic abrasive finishing[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2021, 112(3-4): 619-634.
- [3] PARAMESWARI G, JAIN V K, RAMKUMAR J, et al. Experimental investigations into nanofinishing of Ti6Al4V flat disc using magnetorheological finishing process[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 100(5-8): 1055-1065.
- [4] KUMAR SINGH A, JHA S, PANDEY P M. Nanofinishing of a typical 3D ferromagnetic workpiece using ball end magnetorheological finishing process[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2012, 63: 21-31.
- [5] LI Wen-hui, LI Xiu-hong, YANG Sheng-qiang, et al. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 260: 20-29.
- [6] BARMAN A, DAS M. Nano-finishing of bio-titanium alloy to generate different surface morphologies by changing magnetorheological polishing fluid compositions[J]. Precision engineering, 2018, 51: 145-152.
- [7] ZHANG Jiong, CHAUDHARI A, WANG Hao. Surface quality and material removal in magnetic abrasive finishing of selective laser melted 316L stainless steel[J]. Journal of manufacturing processes, 2019, 45: 710-719.
- [8] 马付建, 姜天优, 刘宇, 等. 钛合金曲面超声辅助磁性磨料光整加工材料去除规律及去除函数[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 290-299.
MA Fu-jian, JIANG Tian-you, LIU Yu, et al. Material removal rule and removal function for ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of titanium alloy curved surface[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 290-299.
- [9] GUO Jiang, AU K H, SUN Chen-nan, et al. Novel rotating-vibrating magnetic abrasive polishing method for double-layered internal surface finishing[J]. Journal of materials processing technology, 2019, 264: 422-437.
- [10] 赵杨, 陈燕, 吕旖旎, 等. 球形开槽磁极辅助研磨 H63 黄铜弯管内表面[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 360-367.
ZHAO Yang, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Spherical magnet with ring grooves assisted grinding inner surface of H63 brass bend pipe[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 360-367.
- [11] 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.
- [12] 曾加恒, 陈燕, 谭悦, 等. 基于 3D 打印航空发动机燃油管磁力研磨试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 296-302.
ZENG Jia-heng, CHEN Yan, TAN Yue, et al. Magnetic abrasive finishing of aero engine fuel injection tube based on 3D printing[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 296-302.
- [13] FAN Zeng-hua, TIAN Ye-bing, LIU Zhi-qiang, et al. Investigation of a novel finishing tool in magnetic field assisted finishing for titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of manufacturing processes, 2019, 43: 74-82.
- [14] 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 Le, LI Xiu-hong, LI Wen-hui, et al. Magnetic field design and experimental research based on halbach array in magnetic abrasives finishing[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 47-54.
- [15] 周强, 田业冰, 范增华, 等. 磁性剪切增稠光整介质的制备与加工特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 367-375.
ZHOU Qiang, TIAN Ye-bing, FAN Zeng-hua, et al. Study on preparation and processing characteristics of magnetic shear thickening finishing media[J]. Surface technology, 2021, 50(7): 367-375.
- [16] 田业冰, 范增华, 刘志强, 等. 一种微细结构化表面光整加工方法、介质及装置: 中国, 106584218B[P]. 2019-01-01.
TIAN Ye-bing, FAN Zeng-hua, LIU Zhi-qiang, et al. Micro-fine structuralization surface finish machining method, medium and device: China, 106584218B[P]. 2019-01-01.
- [17] 田业冰, 范增华, 刘志强, 等. 一种自动化磁场辅助光整加工装置及方法: 中国, 108687573B[P]. 2020-04-24.
TIAN Ye-bing, FAN Zeng-hua, ZHOU Qiang, et al. Automated magnetic field-aided finishing machining device and method: China, 108687573B[P]. 2020-04-24.

(下转第 93 页)