

# 旋转超声辅助磁力研磨镍基合金 参数优化设计及分析

曾加恒, 陈燕, 张科丙, 刘新龙, 陈宇辉

(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** 针对镍基高温合金进行旋转超声磁力研磨加工试验, 通过响应面法分析主轴转速、超声频率、超声振幅、粒径交互作用对工件表面的影响。**方法** 在磁力研磨基础上添加旋转超声高频轴向机械振动, 通过磁性研磨粒子对工件表面的垂直冲击, 增加研磨压力以及磁性研磨粒子的翻滚动作, 完成旋转超声辅助磁力研磨, 测定表面粗糙度、表面残余应力等性能参数。采用响应面法分析主轴转速、磁性研磨粒子粒径和超声频率的交互作用对试验的影响规律, 拟合出最佳工艺参数条件。**结果** 在试验条件下得出, 主轴转速 1000 r/min、磁性研磨粒子粒径 250  $\mu\text{m}$ 、超声频率 19 kHz、超声振幅 19  $\mu\text{m}$  的加工工艺组合效果最佳, 并与响应面法优化参数后的结果相一致。根据优化参数进行试验, 经过 40 min 研磨加工后,  $R_a$  从加工前的 3.2  $\mu\text{m}$  降至 0.072  $\mu\text{m}$ , 工件表面各位置粗糙度均匀, 表面质量较好。工件内部残余拉应力从 +51 MPa 转变为残余压应力 -121 MPa。**结论** 旋转超声辅助磁力研磨加工后, 工件表面均匀性提高, 原始工件表面的凹坑、凸起、表面微裂纹等缺陷被完全去除, 表面形貌和表面质量较好。该工艺加工效率较高, 工件内部可得到良好的应力状态。

**关键词:** 旋转超声; 磁力研磨; 镍基合金; 响应面法; 参数优化

**中图分类号:** TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0274-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.039

## Optimization Design and Analysis of Ni Based Alloy by Rotating Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing

ZENG Jia-heng, CHEN Yan, ZHANG Ke-bing, LIU Xin-long, CHEN Yu-hui

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

**ABSTRACT:** The work aims to carry out the rotating ultrasonic magnetic abrasive grinding test for nickel base superalloy and analyze the influence of the spindle speed, the ultrasonic frequency, the ultrasonic amplitude and the interaction of the particle size on the work-piece surface by the response surface method. On the basis of magnetic grinding, the rotating ultrasonic high frequency axial mechanical vibration was added and the surface of the work-piece was impacted vertically by the magnetic abrasive particles. The grinding pressure and the rolling motion of the magnetic abrasive particles were increased to complete the rotational ultrasonic assisted magnetic grinding and obtain the surface roughness and the residual stress of the surface. The response surface method was used to analyze the influence of the interaction among the spindle speed, the particle size of mag-

收稿日期: 2018-04-18; 修订日期: 2018-06-12

Received: 2018-04-18; Revised: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51105187)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51105187)

作者简介: 曾加恒 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: ZENG Jia-heng (1989—), Male, Master, Research focus: precision machining.

通讯作者: 陈燕 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工。邮箱: laochen412@gmail.com

Corresponding author: CHEN Yan (1963—), Female, Doctor, Professor, Research focus: precision machining. E-mail: laochen412@gmail.com

netic abrasive particles and the ultrasonic frequency on the test and fit the optimum parameters. In the test conditions, the combination of the spindle speed at 1000 r/min, the magnetic abrasive particle size of 250  $\mu\text{m}$ , the ultrasonic frequency of 19 kHz and the ultrasonic amplitude of 19  $\mu\text{m}$  was the best and accorded with the results after the optimized by response surface method. According to the optimized parameters, after 40 min grinding, the roughness of the workpiece surface before and after the processing was measured by the roughness measuring instrument and decreased from the  $R_a$  3.2  $\mu\text{m}$  to  $R_a$  0.072  $\mu\text{m}$ . The surface roughness of the workpiece was uniform and the surface quality was good. The residual tensile stress of +51 MPa inside the workpiece changed to the residual compressive stress of -121 MPa. The surface uniformity of the work-piece is improved after the rotating ultrasonic assisted magnetic grinding. The defects of the pits, convex and micro cracks on the surface of the original work-piece are completely removed. The quality of the morphology and surface of the work-piece is better, the machining efficiency is higher and the good state of the work-piece is obtained.

**KEY WORDS:** rotating ultrasound; magnetic abrasive finishing; nickel base alloy; response surface method; parameter optimization

Inconel718 主要是以镍元素为基体的镍基高温合金, 此种材料在温度-253~650  $^{\circ}\text{C}$  范围内具有较强的抗腐蚀性 & 较高的抗拉强度、屈服强度、抗氧化性<sup>[1-3]</sup>, 主要被应用在航空航天、核能、电子通讯、石油、化工等领域, 如航空发动机整体叶盘、叶片等结构零件都使用 Inconel718 材料<sup>[4-5]</sup>。近年来, 由于对航天领域的大力开发, 我国对镍基合金的应用越来越多, 同时对相应零部件的要求也越来越高<sup>[6]</sup>。查阅以往有关镍基高温合金 Inconel718 失效的文献得出, 零件在生产制造过程中受到加工工艺等的影响, 其表面粗糙度较高, 表面质量较差, 使得该类特殊零件的失效形式多始发于零件表面<sup>[7-8]</sup>。因此, 对镍基高温合金 Inconel718 进行表面处理非常有必要。燕峰等<sup>[9]</sup>采用电解-磁力复合研磨高温镍基合金, 通过电化学结合磁力研磨方法对其进行加工, 虽然达到良好的加工效果, 但电化学加工对环境污染较大, 且加工过程中对工人身体也有很大损害。陈春增等<sup>[10]</sup>通过磁力研磨镍基高温合金实验研究发现, 通过单一磁力研磨加工方法加工, 会使工件表面质量有所改善, 但也会导致划痕轨迹出现重叠现象, 使得加工后工件表面质量较差, 且加工效率较低。为提高对镍基合金的加工效率, 克服以上加工方法的不足, 本实验提出采用旋转超声辅助磁力研磨加工方法进行加工, 对加工工艺参

数进行响应面法数学建模, 以得出最佳加工方案。

本文打破传统单一特种加工方法的局限性, 提出采用在传统磁力研磨加工基础上添加旋转超声轴向振动辅助加工的方法。传统磁力研磨 (MAF) 具有无污染、自适应性、自锐性、温升小等优点<sup>[11-13]</sup>, 但是在研磨加工时对工件表面研磨压力较小, 磁性研磨粒子相对运动较单一, 使得加工效率较低, 工件表面质量较差。而旋转超声高频轴向振动使得磁性研磨粒子在研磨过程中对工件表面有高频撞击作用, 增加了研磨过程中的研磨压力, 同时加剧了磁性研磨粒子在工件表面翻滚、研磨、划擦的作用, 提高了加工效率和工件表面质量<sup>[14]</sup>。通过两种特种加工方法对镍基高温合金进行复合加工, 能得到较好的表面质量, 并提高加工效率。此外, 通过利用响应面法构建数学模型, 对提出的新方法进行模拟参数优化设计, 分析主轴转速、磁性研磨粒子粒径、超声频率、超声振幅各加工因素之间的交互作用对研磨效率和表面粗糙度的影响关系, 得出优化参数组合<sup>[15]</sup>, 并检测对比加工前后工件表面形貌、粗糙度以及内部残余应力的变化。

## 1 加工原理

图 1 为旋转超声辅助磁力研磨加工原理图。其原

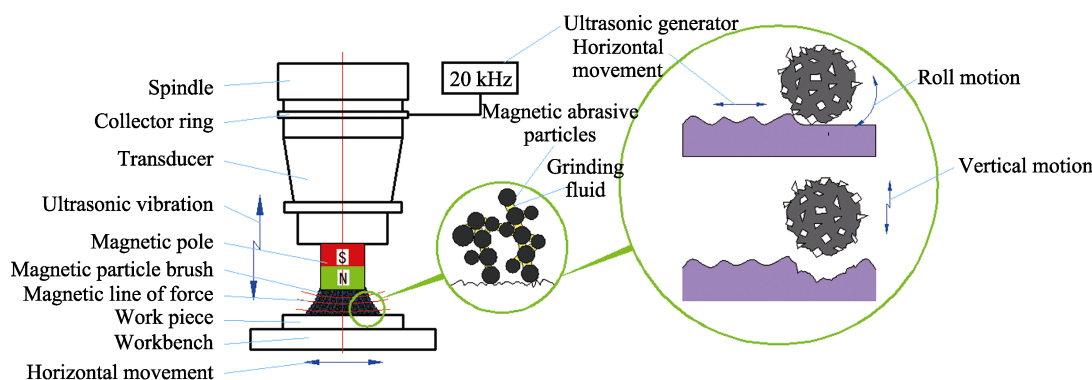


图 1 旋转超声辅助磁力研磨加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of rotary ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

理是：机床主轴上安装旋转超声波振子，将钕铁硼永磁极安装在振子端部，在主轴驱动下进行超声波旋转<sup>[16]</sup>。超声波振子提供的高频轴向振动经变幅杆放大，使磁性研磨粒子对工件表面产生正向撞击，提供了瞬间冲击压力。随着主轴的旋转，使得工件研磨区域的振子振幅变化均匀，同一平面内各研磨粒子压力均匀。在钕铁硼永磁极的磁场力作用下，磁性磨料沿磁力线方向均匀排布在磁极周围，形成具有一定强度、柔性和自锐性的“磁力刷”<sup>[17]</sup>。在磁力研磨和旋转超声两种特种加工复合工艺条件下，磁性研磨粒子对工件表面产生冲击压力、研磨、挤压等复合作用，使工件表面粗糙度、表面形貌以及表面质量得到显著提高。旋转超声辅助磁力研磨加工工艺使工件达到较为理想的试验效果。

## 2 旋转超声辅助磁力研磨试验条件与设计

### 2.1 试验条件

本试验以镍基合金 Inconel718 材料为试验对象，材料成分为：镍 50%~55%，铬 17%~21%，钼 2.8%~3.3%，铌 4.75%~5.50%，剩余为铁及其他微量元素。通过维氏硬度仪测量得到材料硬度为 450 HV。该种合金材料性能优良，但其硬度较高，加工较为困难。

实验装置如图 2 所示，旋转超声波固定在机床主轴上，钕铁硼永磁极安装在变幅杆一端，在磁场力作用下吸附磁性研磨粒子进行研磨加工。由于磁性研磨粒子在不同转速下所受离心力与磁场力的大小不同，本实验采用的主轴转速为 500~1500 r/min，磁性研磨粒子粒径为 150~350  $\mu\text{m}$ 。磁性研磨粒子由铁粉和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  按照质量比为 2:1 均匀混合，加入适量粘结剂，经压力机压制成型、真空干燥炉干燥、烧结炉高温烧结、破碎机破碎以及高频振动筛分机筛分得到。磁极与工件之间间隙为 1 mm，轴向磁极为 12 mm $\times$ 20 mm，轴向超声振动频率为 19 kHz，振幅 19  $\mu\text{m}$ 。

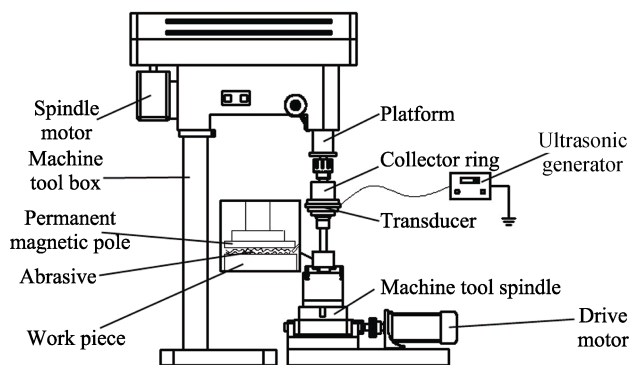


图 2 试验装置  
Fig.2 Test device

使用泰勒-霍普森触针式粗糙度轮廓测量仪 (Form Talysurf Intra, 英国) 测量工件研磨前后的表面粗糙度；使用基恩士超景深 3D 电子显微镜 (VHX-500F, 日本) 测量研磨前后的表面微观形貌；使用 X 射线干涉仪检测研磨前后的工件表面残余应力；使用超声波清洗机清洗工件表面污垢。试验条件由表 1 所示。

表 1 实验条件  
Tab.1 Experimental conditions

Name	Parameter
Magnetic pole	Nd-Fe-B permanent magnet $\phi 10 \times L20$
Work-piece/cm	$L=18, B=12, H=5$
Particle size of magnetic abrasive $D/\mu\text{m}$	350、250、150
Dosage of magnetic abrasive $\text{m/g}$	3
Magnetic pole rotation speed $v/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	500、1000、1500
Machining gap $L/\text{mm}$	1
Processing time $t/\text{min}$	40
Ultrasonic frequency $L/\text{kHz}$	12、15.5、19
Ultrasonic amplitude $A/\mu\text{m}$	16、19、22

### 2.2 试验因素设计

基于响应面法，对旋转声辅助磁力研磨镍基合金进行参数优化设计。试验数据由 Design-Expert 软件进行数学建模分析得出最优工艺参数组合，通过 Box-Behnken 单个插件，采用 4 因素 3 水平设计方法对试验进行分组设计。

设定该试验各因素范围值：主轴转速为 500~1500 r/min，磁性研磨粒子粒径为 150~350  $\mu\text{m}$ ，超声频率为 12~19 kHz，超声振幅为 16~22  $\mu\text{m}$ 。通过响应面法对该 4 因素进行组合，分析主轴转速、磁性研磨粒子粒径、超声频率、超声振幅在试验过程中对工件表面粗糙度的影响。参数如表 2 所示。

表 2 响应面分组参数  
Tab.2 Response surface grouping parameters

Factor	Numerical value		
	Level 1	Level 2	Level 3
Spindle speed $r/\text{min}$	500	1000	1500
Particle size $D/\mu\text{m}$	150	250	350
Ultrasonic frequency $L/\text{kHz}$	12	15.5	19
Ultrasonic amplitude $A/\mu\text{m}$	16	19	22

### 3 结果与分析

#### 3.1 各因素交互作用影响分析

采用响应面分析方法对各实验点的数值进行拟合, 根据 2.2 节的因素设计值进行试验, 利用 Design-Expert 软件进行响应面数学建模, 分析旋转超声辅助磁力研磨镍基合金的影响因素, 对其两两交互作用的结果进行分析, 得出其对工件表面粗糙度的影响规律。图 3 为通过响应面法拟合的实际值与预测值的拟合曲线。线性回归方程如式 (1) 所示。

$$Ra = 0.071 - 0.16A - 0.26B - 0.031C - 0.13D + 0.29AB - 0.045AC - 0.078AD + 0.012BC + 0.27BD - 2.000 \times 10^{-3}CD + 0.52A^2 + 0.64B^2 + 9.983 \times 10^{-3}C^2 - 0.058D^2 \quad (1)$$

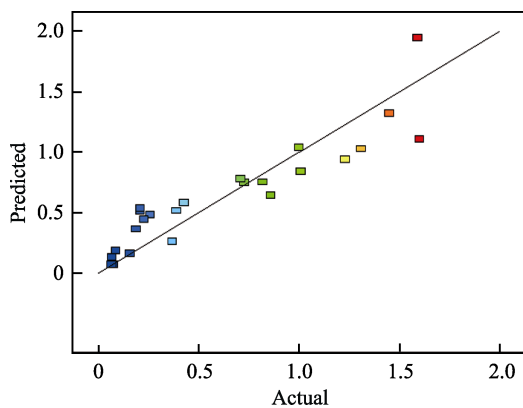


图 3 预测值与实际值 Design-Expert 拟合曲线  
Fig.3 Design-Expert fitting curve between predicted value and actual value

#### 3.2 各因素交互影响分析

图 4 至图 7 为旋转超声振动频率为 19 kHz, 超声振幅为 15~22  $\mu\text{m}$ , 主轴转速为 500~1500 r/min, 磁性研磨粒子平均粒径为 150~350  $\mu\text{m}$  时, 由 Design-Expert 软件进行响应面数学三维建模得出的两因素交互影响三维立体曲面。

由图 4 可得出, 随着磨料粒径的增大, 工件表面粗糙度出现先降低后增加的趋势; 随着主轴转速的增加, 工件表面粗糙度同样出现先降低后增加的趋势。在磨料平均粒径为 250  $\mu\text{m}$ 、主轴转速为 1000 r/min 的交互作用下, 工件表面粗糙度最低。分析交互作用如下:

1) 主轴转速。在平均粒径相同的情况下, 随着主轴转速的增加, 磁性研磨粒子自身翻滚作用以及对工件表面的挤压、划擦等作用增加。当转速达到 1000 r/min 时, 表面粗糙度达到最低。当转速从 1000 r/min 增至 1500 r/min 时, 由于主轴转速增大, 磁性研磨粒子所受离心力增大, 从而克服所受的磁场

力, 飞离加工区域。研磨粒子数量的降低导致单位时间内对工件表面研磨划擦次数降低, 工件表面粗糙度较大。

2) 磨粒粒径。在主轴转速相同的情况下, 磁性研磨粒子粒径越大, 所受磁场力就越大, 对工件表面划擦作用也越大, 导致工件表面出现较深划痕, 表面粗糙度较大。而粒径较小时, 所受磁场力较小, 对工件表面研磨不充分, 表面粗糙度较大。

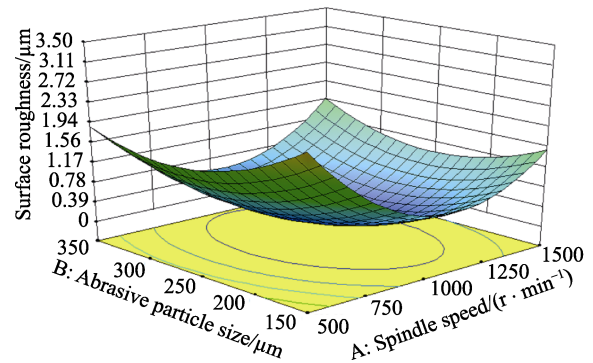


图 4 磨粒粒径与主轴转速交互影响  
Fig.4 Interaction between particle size and spindle speed

图 5 为超声振动频率和超声振幅交互作用的空间三维曲面图。由图 5 可以得出, 随着超声频率的增加, 工件表面粗糙度随之降低; 而随着超声振幅的增大, 工件表面粗糙度出现先下降后增加的现象。超声频率为 19 kHz, 振幅为 19  $\mu\text{m}$  时, 工件表面粗糙度最佳。分析其原因, 一方面, 加工过程中, 随着超声频率的增加, 磁性研磨粒子对工件表面冲击次数、有效研磨、划擦次数增加, 使得工件表面粗糙度降低。另一方面, 超声振幅从 16  $\mu\text{m}$  增加至 19  $\mu\text{m}$  时, 随着振幅的增大, 磁性研磨粒子对工件表面冲击力增大, 使得研磨压力也增大, 研磨粒子之间运动加剧, 且自身翻滚作用加大, 进而提高了研磨效率。但当振幅增加到 22  $\mu\text{m}$  时, 由于振幅过大, 研磨粒子之间相互作用急速加剧, 使得研磨粒子出现破碎现象, 部分研磨相失效, 导致工件研磨后表面粗糙度反而增大。

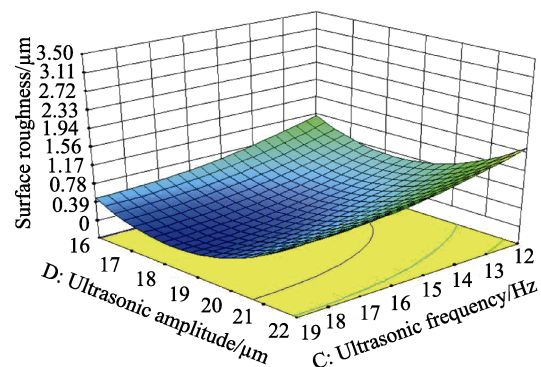


图 5 振动频率和振幅交互影响  
Fig.5 Interaction effect of vibration frequency and amplitude

图6为磁性研磨粒子平均粒径为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 时,主轴转速与超声频率交互作用的空间三维曲面。在相同超声频率下,随主轴转速的增加,工件表面粗糙度先降低后增加,在主轴转速为 $750\sim 1200\text{ r/min}$ 时,工件表面粗糙度变化较小;随着超声频率的增加,工件表面粗糙度下降较快,说明超声振动对工件表面粗糙度影响较大。随着频率的增加,由于磁性研磨粒子对工件表面正向冲击力增加,使得研磨效率提高,同时增强了工件表面的强化作用。

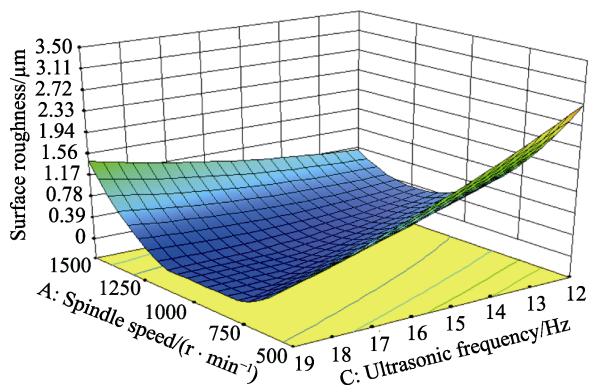


图6 主轴转速与超声频率交互影响  
Fig.6 Interaction between spindle speed and ultrasonic frequency

图7为主轴转速为 $1000\text{ r/min}$ 时,磨粒粒径与超声频率交互作用的空间三维曲面。由图可知,在磁性研磨粒子粒径为 $250\text{ }\mu\text{m}$ ,超声频率为 $19\text{ kHz}$ 时,工件表面粗糙度效果最佳。

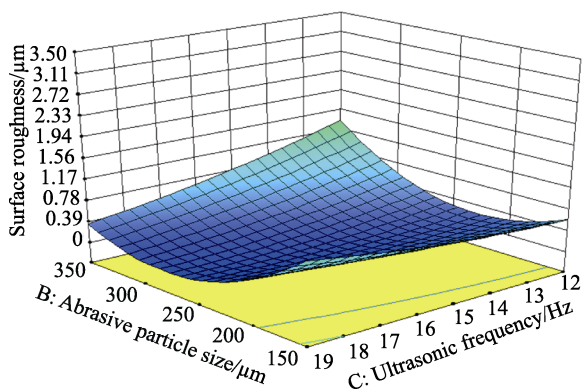


图7 磨粒粒径与超声频率交互影响  
Fig.7 Interaction between particle size and ultrasonic frequency

### 3.3 表面微观形貌

采用日本基恩士生产的VHX-500F超景深3D电子显微镜观测工件研磨前后的表面微观形貌,如图8所示。由工件原始表面形貌(图8a)可知,由于工件生产制造过程中受高温、高压等加工工艺的影响,表面存在较多凹坑、凸起和部分微裂纹。从图中颜色变化可得出,凹坑和凸起的最大高度差为 $100.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

图8b为旋转超声辅助磁力研磨加工后工件表面形貌,由于磁性研磨粒子的研磨作用,工件表面的凹坑、凸起完全被去除,工件表面均匀、平整,仅留下研磨加工的划痕,且研磨后最大高度差降至 $49.6\text{ }\mu\text{m}$ 。

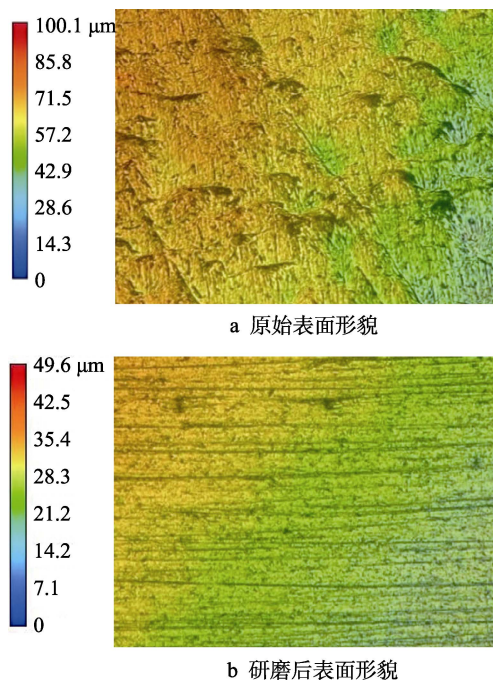


图8 旋转超声辅助磁力研磨前后工件表面三维形貌图  
Fig.8 3D surface topography of workpiece surface before and after rotary ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing: a) original surface morphology; b) surface morphology after grinding

采用英国泰勒-霍普森Form Talysurf Intra触针式粗糙度轮廓测量仪测量工件研磨前后的表面粗糙度变化,如图9所示。如图9a,工件原始表面粗糙度为 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 时,粗糙度曲线有较大波动。经过旋转超

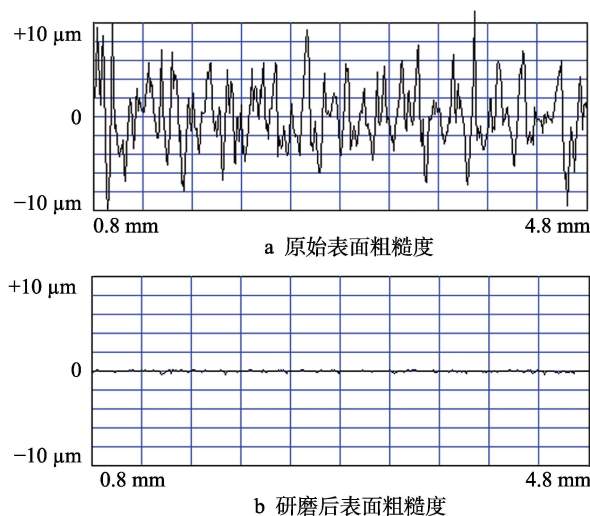


图9 旋转超声辅助磁力研磨前后工件表面粗糙度  
Fig.9 Surface roughness of workpiece before and after rotary ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing: a) original surface roughness; b) surface roughness after grinding

声磁力研磨加工后, 表面粗糙度为  $0.072\ \mu\text{m}$  时, 粗糙度曲线趋于水平, 如图 9b 所示。

### 3.4 残余应力

工件在最初生产制造时受到高温、高压等作用的影响, 内部发生弹塑性变形, 其内部残存部分残余应力, 通过 X 射线干涉仪检测为拉应力 ( $+51\ \text{MPa}$ ), 测量得到的点残余应力拟合曲线如图 10a 所示。旋转超声磁力研磨过程中, 工件表面受到研磨压力、超声

冲击力后, 不仅其表面质量、表面粗糙度得到显著提高, 同时工件内部残余拉应力也转变成压应力<sup>[18-19]</sup>, 最终为压应力 ( $-121\ \text{MPa}$ )。压应力的产生极大地增强了零件表面抗疲劳强度和抗蠕变性能。此外, 良好的压应力状态可以使零件在受力时释放自身的残余压应力, 从而达到保护零件的目的<sup>[9]</sup>。图 10b 为测量的点残余应力拟合曲线。结合图 10a、10b 及测量数据, 由式(2)计算加工前后工件表面残余应力值, 其结果如图 10c 所示。

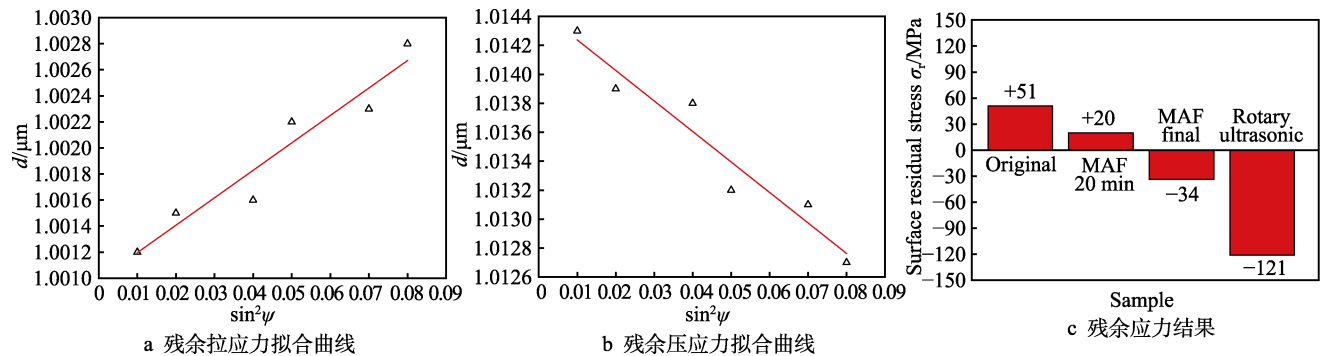


图 10 光整加工前后的表面残余应力

Fig.10 Surface residual stress before and after finishing: a) fitting line of residual tensile stress; b) fitting line residual compressive stress; c) results of residual stress

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi} \left[ \frac{d_{\psi} - d_n}{d_n} \right] \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{\varphi}$  为应力 ( $\text{MPa}$ ,  $\varphi$  为衍射角 ( $^{\circ}$ ));  $E$  为材料的杨氏模量 ( $\text{GPa}$ );  $\nu$  为材料泊松比;  $\psi$  为倾斜角度 ( $^{\circ}$ );  $d_{\psi}$  为倾斜的晶面间距 ( $\mu\text{m}$ );  $d_n$  为初始倾斜角的晶面材料的塑性变形间距 ( $\mu\text{m}$ )。

## 4 结论

1) 通过响应面法对旋转超声磁力研磨参数进行优化设计, 由 Design-Expert 软件进行数学建模分析得出, 主轴转速  $1000\ \text{r/min}$ 、轴向超声振动频率  $19\ \text{kHz}$ 、磁性研磨粒子粒径  $250\ \mu\text{m}$  的加工条件最佳。

2) 在响应面法优化参数下进行旋转超声磁力研磨加工后, 工件表面粗糙度由原始的  $3.2\ \mu\text{m}$  降至  $0.072\ \mu\text{m}$ , 原始表面凹坑、凸起及微裂纹基本去除, 得到良好的表面形貌。

3) 对比加工前后的工件内部残余应力可知, 通过旋转超声磁力研磨, 工件内部由原始残余拉应力 ( $+51\ \text{MPa}$ ) 转变为残余压应力 ( $-121\ \text{MPa}$ ), 不仅改善了其内部应力状态, 还使工件表面抗疲劳性、抗蠕变性得到很大提高。

### 参考文献:

[1] 钟昊玟, 梁家昌, 赵小勇, 等. 强脉冲离子束辐照

GH202 镍基高温合金表面改性[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 7-14.

ZHONG Hao-min, LIANG Jia-chang, ZHAO Xiao-yong, et al. Surface modification of GH202 nickel base superalloy by pulsed ion beam irradiation[J]. China surface engineering, 2018, 31(1): 7-14.

[2] 黄乾尧, 李汉康. 高合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.

HUANG Qian-yao, LI Han-kang. Superalloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.

[3] 杨盛志, 王晓彤, 李艳, 等. 强流脉冲电子束作用下镍基高温合金 GH4169 的微观结构及腐蚀性能[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 50-56.

YANG Sheng-zhi, WANG Xiao-tong, LI Yan, et al. Microstructure and corrosion resistance on the surface of nickel-based superalloy GH4169 treated by high-current pulsed electron beam[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(12): 50-56.

[4] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(S2): 482-486.

WANG Hui-yang, AN Yun-qi, LI Cheng-yu, et al. Research progress of Ni-based superalloys[J]. Material guide, 2011, 25(S2): 482-486.

[5] ONYEWUENYI O A. Alloy 718-alloy optimization for applications in oil and gas production[J]. National association of corrosion engineers, corrosion resistant alloys in oil and gas production, 1996(2): 749-766.

[6] 黄思语, 王水波. 感应熔覆制备镍基合金涂层的研究

- 进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 39-47.
- HUANG Si-yu, WANG Shui-bo. Research progress in preparation of Ni-based alloy coating by induction cladding technology[J]. Surface technology, 2017, 46(9): 39-47.
- [7] KONG Y H, LIU R Y, CHEN G S, et al. Effects of different heat treatments on the microstructures and creep properties of GH4169 superalloy[J]. Journal of materials engineering and performance, 2013, 22(5): 1371-1377.
- [8] 郭龙文, 杨能阁, 陈燕. 磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 10-14.
- GUO Long-wen, YANG Neng-ge, CHEN Yan. Influence of magnetic abrasive finishing technology on surface integrity of vane-integrated disk[J]. China surface engineering, 2013, 26(3): 10-14.
- [9] 燕峰, 谭悦, 陈燕, 等. GH4169 高温镍基合金的电解-磁力复合研磨[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(15): 807-811.
- YAN Feng, TAN Yue, CHEN Yan, et al. Electrolytic-magnetic composite grinding of GH4169 nickel-based superalloy[J]. Electroplating & finishing, 2017, 36(15): 807-811.
- [10] 陈春增, 张桂香, 赵玉刚, 等. 磁力研磨镍基高温合金实验研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(4): 6-9.
- CHEN Chun-zeng, ZHANG Gui-xiang, ZHAO Yu-gang, et al. The experimental research on magnetic abrasive finishing of inconel 718[J]. Electroplating and finishing, 2016, 38(4): 6-9.
- [11] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the taguchi method[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2007, 34(1-2): 122-130.
- [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] 孙岩, 兰勇, 杨海吉, 等. 双向复合振动辅助磁力研磨加工的试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 125-131.
- SUN Yan, LAN Yong, YANG hai-ji, et al. Experimental on bidirectional composite vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 125-131.
- [14] 陈燕, 刘昭前, 王显康. 超声波振动辅助磁力研磨加工研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 293-298.
- CHEN Yan, LIU Zhao-qian, WANG Xian-kang. Ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. Journal of agricultural machinery, 2013, 44(10): 293-298.
- [15] 田腾腾, 陈燕, 谭悦, 等. 电解-磁力研磨钛合金的工艺参数优化[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(1): 27-30.
- TIAN Teng-teng, CHEN Yan, TAN Yue, et al. Optimization of process parameters for electrolytic magnetic abrasive finishing of titanium alloy[J]. Electroplating and finishing, 2018, 40(1): 27-30.
- [16] 芦亚萍, 张军强, 马季, 等. 超声磁粒复合研磨加工工艺参数控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2007(8): 168-172.
- LU Ya-ping, ZHENG Jun-qiang, MA Ji, et al. Study on the control of ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. Journal of agricultural machinery, 2007(8): 168-172.
- [17] 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.
- JIAO An-yuan, QUAN Hong-jun, CHEN Yan, et al. Experimental research of titanium alloy taper hole by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 114-119.
- [18] 廖明, 韩冰, 陈燕, 等. 钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 123-131.
- LIAO Ming, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Inner surface of titanium alloy tube by eletrochemical magnetic abrasive compound finishing[J]. China surface engineering, 2016, 29(3): 123-131.
- [19] 罗玉梅, 任凤章, 张伟, 等. X 射线法测量多晶体材料残余应力[J]. 材料导报, 2014, 28(6): 112-114.
- LUO Yu-mei, REN Feng-zhang, ZHANG Wei, et al. Measuring of resid-ual stress of polycrystalline materials by XRD method[J]. Materials review, 2014, 28(6): 112- 114.