

超声复合磁力研磨异型管参数优化设计及分析

陈燕, 曾加恒, 钱之坤, 赵杨, 陈宇辉

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: **目的** 改善镍基合金异型管表面质量, 降低表面粗糙度。**方法** 在内置辅助磁极磁力研磨基础上添加轴向超声振动, 促使磁力研磨粒子对管内内表面进行轴向划擦、刻划作用。采用响应面法对试验进行 3 因素 3 水平方法设计, 建立参数优化三维数学模型, 分析超声频率、超声振幅、主轴转速在两因素交互作用下, 对异型管内壁表面质量、表面粗糙度的影响, 并得出试验最佳参数组合。**结果** 响应面法优化设计在超声频率 19 kHz、超声振幅 19 μm 、主轴转速 1200 r/min 条件下的加工效果最佳。在优化工艺参数下进行超声复合磁力研磨试验, 加工 30 min 后, 管件内壁表面粗糙度由原始 2.4 μm 降至 0.31 μm , 管件内表面残余拉应力由 +49 MPa 转变为残余压应力 -47 MPa。**结论** 在内置辅助磁极磁力研磨基础上添加超声轴向振动, 使得研磨粒子翻滚加剧, 研磨轨迹复杂化, 有效改善了管件内壁表面粗糙度和表面加工质量。响应面法能够对试验结果进行优化参数数学建模设计, 拟合出了最佳的加工参数组合, 良好的应力状态有效地提高了工件的疲劳强度。

关键词: 磁力研磨; 超声复合; 响应面法; 镍基合金; 异型管

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0268-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.036

Parameter Optimization Design and Analysis of Ultrasonic Composite Magnetic Abrasive Finishing

CHEN Yan, ZENG Jia-heng, QIAN Zhi-kun, ZHAO Yang, CHEN Yu-hui

(University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface quality of nickel based alloy special-shaped tubes and reduce the surface roughness by machining the nickel based alloy special-shaped tubes with ultrasonic combined magnetic abrasive finishing and investigate the effects of ultrasonic frequency, ultrasonic amplitude and spindle speed on the inner wall surface quality and surface roughness of special-shaped tubes by response surface methodology. The axial ultrasonic vibration was added on the basis of the built-in auxiliary magnetic pole magnetic abrasive to promote the magnetic abrasive particles to scratch and carve the inner surface of the tube. The response surface method was used to design the 3-factor and 3-level method, and the three-dimensional mathematical model was set up to analyze the effects of ultrasonic frequency, ultrasonic amplitude and spindle speed on the surface quality and surface roughness of the inner wall of the special-shaped tube under two factors to obtain the best combination of parameters. The optimum design of response surface method was the best in the condition of ultrasonic frequency 19 kHz, ultrasonic amplitude 19 μm and spindle speed 1200 r/min. Under the optimized process parameters, the ul-

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-09-23

Received: 2018-07-16; Revised: 2018-09-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775258)

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

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

trasonic composite magnetic grinding test was carried out. After 30 min processing, the surface roughness of the inner wall of the pipe was reduced from original $Ra\ 2.4\ \mu\text{m}$ to $Ra\ 0.31\ \mu\text{m}$. The residual tensile stress $+49\ \text{MPa}$ of tube was changed to residual compressive stress $-47\ \text{MPa}$. The ultrasonic axial vibration is added on the basis of the auxiliary magnetic pole magnetic grinding, which makes the grinding particle roll up and the grinding track complicated and effectively improves the surface roughness of the inner wall of the pipe and the surface processing quality. The response surface method can optimize the mathematical modeling design of the test results and fit the best combination of the processing parameters. The good stress state effectively improves the fatigue strength of the workpiece.

KEY WORDS: magnetic abrasive finishing; ultrasonic composited; response surface method; nickel based alloy; special-shaped tube

随着科技的迅速发展,镍基合金的应用越来越广泛。由于其在 $650\sim 1000\ ^\circ\text{C}$ 下的耐腐蚀性强、抗蠕变强度和抗疲劳强度较高,同时具有良好的热稳定性和抗热疲劳等性能^[1-2],所以被广泛应用于航空、航天、石油、环保、核工业、能源等领域^[3-4],用于制造航空发动机空间弯管、异型管,大型石油设备和化工设备中的管路。由于管状零部件的加工工艺为压力机热挤压和斜扎穿孔两种,加工后管材内部存在一定的残余拉应力,且内表面存在大量凹坑、凸起、微裂纹,严重影响管件的综合性能^[5-6]。因此,改善异型管内表面应力状态和微裂纹缺陷,降低表面粗糙度,提高表面质量,就显得格外重要。科研人员提出了各种特种加工工艺。磁粒研磨作为一种特种加工方法,具有自适应性、自锐性、温升小、无刀具补偿等优点,被广泛应用在空间弯管、复杂曲面、内外圆表面光整加工等方面^[7-8]。韩冰等^[9]提出在空间弯管内部添加球形辅助磁极进行光整加工,为克服磁性研磨粒子在管件内部研磨压力小的问题,在管件内部添加辅助磁极,增大磁场力,提高研磨压力,加工后管件表面质量较好。但此方法使得磁性研磨轨迹较为单一,出现研磨划痕相互叠加的情况,使得研磨划痕较深,不利于获得理想的表面质量^[10]。杨海吉等^[11]提出采用自旋转磁极磁力研磨加工方法对合金管进行光整加工,得到较好的表面质量,但在管件内部添加自旋转磁极适用于较大直径的管件,不能加工直径较小的管件。针对以上不足,本文提出采用超声复合磁力研磨加工方法,将超声轴向高频振动添加到内置辅助磁极上,使得磁性研磨粒子对管件内壁碰撞、划擦加剧,并进行轴向划擦运动。磁性研磨粒子在周向运动和轴向运动的复合作用下完成研磨加工,利用响应面法对超声复合作用进行参数优化设计,通过数学模型分析各因素两两之间交互作用对管件表面粗糙度和研磨效率的影响,得出各加工条件的最佳参数。

1 实验

1.1 实验原理

图 1 为超声复合磁力研磨异型管加工原理,将吸附有磁性研磨粒子的圆柱形径向永磁极置于管件内

部,外部安装对应异性永磁极,使得内外磁极形成闭合磁场回路,增大磁场力,提高研磨压力^[12]。磁性研磨粒子在磁场力的作用下沿径向圆柱形辅助磁极磁场线方向规律排列成刷状,仿形压附在管件内壁表面^[13-15],当管件旋转时,磁力刷与管件发生相对运动。超声波发生器通过直流电源将电信号传递给超声波振子,由换能器将电信号转换成高频机械轴向振动,经过端部变幅杆放大振动,并由细长杆传递给圆柱辅助磁极,使得辅助磁极上的磁性研磨粒子与管件内表面碰撞、研磨加剧,并发生轴向划擦运动。在周向运动和轴向运动的复合作用下,研磨轨迹交叉复杂化,研磨划痕变浅,使得管件表面粗糙度和表面质量得以改善。

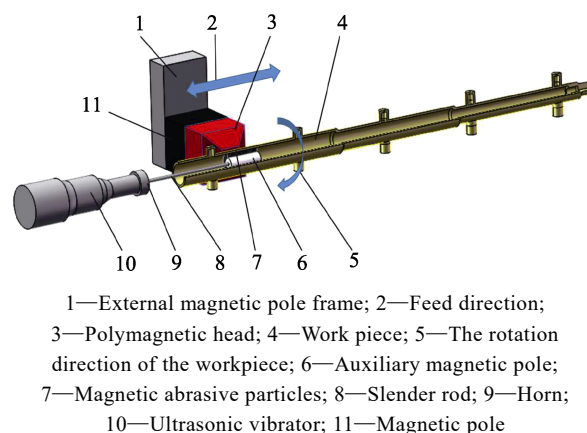


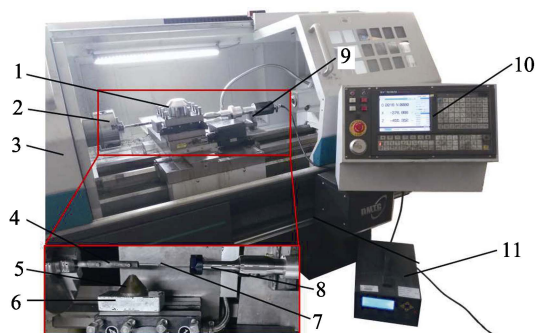
图 1 加工原理图

Fig.1 Machining principle diagram

1.2 试验装置及条件

试验装置如图 2 所示。所使用的是由沈阳机床厂生产的卧式数控加工中心,将管件固定在机床主轴上,内部放置吸附有磁性研磨粒子的圆柱形径向辅助磁极,外部永磁极固定在 X 轴方向进给刀架上,并通过数控主屏编译外部磁极运动轨迹程序控制其运动轨迹。超声波发生器通过直流电源将电信号传递给超声波振子,超声波振子装置在 Z 轴方向进给的台架上。试验过程中所用磁性研磨粒子由铁基相(铁粉)和研磨相(Al_2O_3)按质量比 2:1 均匀混合、压制、烧结、破碎、筛分制得,选用平均粒径为 $250\ \mu\text{m}$ 的磁

性研磨粒子。超声波振幅为 16~22 μm , 超声频率为 13~19 kHz。启动机床和超声波发生器, 设定试验条件 (如表 1 所示), 加工时每隔 5 min 对表面状态进行检测并采集数据。



1—Machine tool holder; 2—Spindle; 3—Work piece;
4—Workpiece; 5—Poly magnetic head; 6—Magnetic pole;
7—Slender rod; 8—Horn; 9—Ultrasonic oscillator;
10—Programming panel; 11—Ultrasonic generator

图 2 试验装置

Fig.2 Test device

表 1 实验条件

Tab.1 Experimental conditions

| Parameter | Values |
|--|--|
| Magnetic pole | Nd-Fe-B permanent magnet $\phi 6 \times 15$ mm |
| Particle size of magnetic abrasive $D/\mu\text{m}$ | 250 |
| Ultrasonic amplitude $A/\mu\text{m}$ | 13、16、19 |
| Spindle speed $v/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 900、1200、1500 |
| Ultrasonic frequency f/kHz | 16、19、22 |
| Processing time t/min | 30 |
| Machining gap H/mm | 2 |

1.3 加工效果表征方法

采用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪测量研磨前后管件表面粗糙度。采用 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜观测管件研磨前后表面微观形貌。采用 X 射线衍射仪检测研磨前后管件表面残余应力, 靶类型 Cu, 管电压为 40 kV, 管电流为 40 mA, 扫描速度为 0.025 ($^\circ$)/s, 扫描步长 0.1 $^\circ$, 材料杨氏模量 204 GPa, 材料泊松比 0.31。通过 $\sin^2\psi$ 应力分析法^[16], 在研磨前后管件内表面衍射角范围内选取 6 个点测定晶面间距 (d) 并拟合成直线, 通过公式 (1) 计算表面残余应力。

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

式中: σ_φ 为应力 (MPa); E 为材料的杨氏模量; φ 为衍射角 ($^\circ$); ν 为材料泊松比; ψ 为倾斜角度 ($^\circ$); d_ψ 为倾斜的晶面间距 (μm); d_n 为初始晶面材料表

面初加工时的塑性变形间距 (μm)。

2 响应面法方案设计及预测

为探究超声振动对磁力研磨的辅助作用, 以超声振动频率、超声振幅、主轴转速作为主要影响因素进行响应面分析。设计 3 因素 3 水平试验研究方案, 磁性研磨粒子粒径选用 250 μm 。设定各因素的范围值: 超声振动频率 16~22 kHz, 超声振幅 13~19 μm , 主轴转速 900~1500 r/min。分组参数如表 2 所示。

表 2 响应面分组参数

Tab.2 Response surface grouping parameters

| Spindle speed (A)/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) | Ultrasonic amplitude (B)/ μm | Ultrasonic frequency (C)/kHz |
|--|--|-------------------------------------|
| 900 | 13 | 16 |
| 1200 | 16 | 19 |
| 1500 | 19 | 22 |

由 design-Expert 软件进行响应面数学建模, 通过线性回归方程 (2) 计算, 得出两两因素交互式影响关系, 分析超声振动频率、超声振幅、主轴转速对管件表面粗糙度和表面质量的影响。图 3 为通过响应面法拟合的实际值与预测值拟合点, 拟合点越靠近直线, 说明实际值与预测值越接近。

$$R_a = 0.33 - 0.035 \times A - 0.00625 \times B + 0.00125 \times C - 0.015 \times A \times B + 0.000 \times A \times C + 0.0075 \times B \times C + 0.14 \times A^2 + 0.039 \times B^2 + 0.089 \times C^2 \quad (2)$$

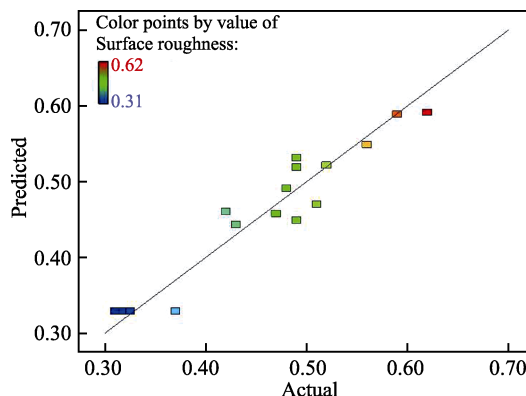


图 3 预测值与实际值 Design-Expert 拟合曲线

Fig.3 Fitting curve between predicted value and actual value Design-Expert

3 响应面法交互影响分析

3.1 超声频率和主轴转速交互影响

图 4 为超声振幅为 19 μm 时, 超声频率和主轴转速交互作用下所形成的交互影响。由图 4 可以看出, 超声频率和主轴转速的变化趋势都出现先降低后增加的现象, 这主要是由于主轴转速为 900 r/min 时,

单位时间内磁性研磨粒子对管内壁研磨、划擦的次数相对较少, 且速度较低时, 研磨粒子之间的相对运动较低, 不利于研磨粒子的翻滚、挤压作用, 致使表面加工质量较差; 当主轴转速增至 1500 r/min 时, 主轴转速过高, 磁性研磨粒子在单位时间内对相同位置处的划擦次数增加, 使得研磨轨迹重复叠加加剧, 研磨划痕较深, 致使表面粗糙度较高。最终测得在 1200 r/min 加工转速时, 研磨效果最佳。

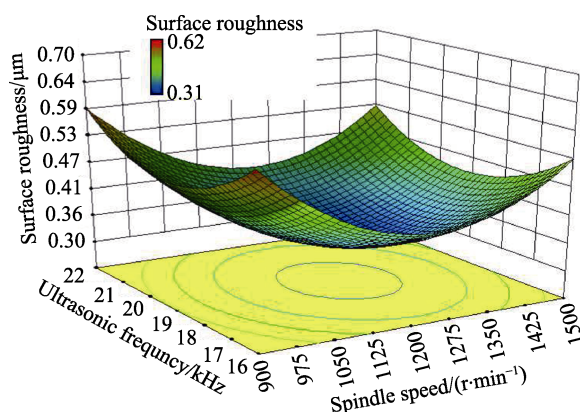


图 4 频率和转速交互影响

Fig.4 Interaction between frequency and speed

随着超声频率的增加, 管件表面粗糙度值降低, 在 19 kHz 时达到最佳, 由 16 kHz 增至 19 kHz 时, 单位时间内磁性研磨粒子的横向划擦次数增加, 使得研磨轨迹交叉密集, 表面粗糙度值降低; 由 19 kHz 增至 22 kHz 时, 磁性研磨粒子之间的相互作用较严重, 使得研磨相缺损, 研磨效果降低; 部分磁性研磨粒子的横向瞬态速度较大, 能克服磁场力的束缚作用飞离加工区域, 使得研磨粒子数减少, 从而使表面粗糙度值较高^[17]。

3.2 超声振幅和主轴转速交互影响

图 5 为超声频率为 19 kHz 时, 超声振幅和主轴转速交互作用下所形成的交互影响。由图 5 可知, 超

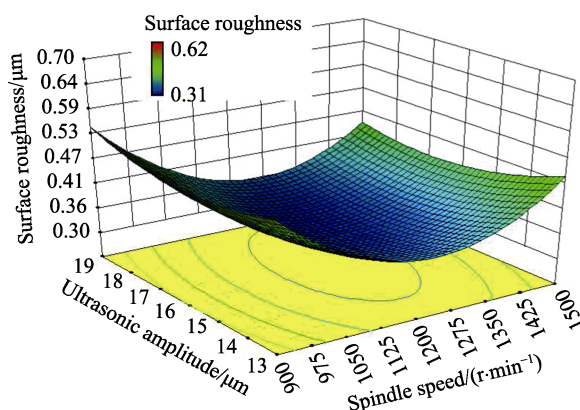


图 5 振幅和转速交互影响

Fig.5 Interaction effects of amplitude and speed

声振幅的拟合曲面影响发生变化, 在 900~1500 r/min 转速下, 随着振幅的增加, 磁性研磨粒子对管件内壁的轴向划痕变长, 其与周向圆周运动的划痕交叉更加致密, 有助于表面粗糙度的降低。但相同频率下, 随着振幅的增加, 磁性研磨粒子的轴向研磨划痕过长, 周向划痕与轴向划痕之间的交互作用减弱, 致密性降低, 使得表面粗糙度较高。

3.3 超声频率和超声振幅交互影响

图 6 为主轴转速为 1200 r/min 时, 超声振幅和超声频率交互作用下所形成的三维形面图。在超声频率和超声振幅的影响下, 管件内壁表面粗糙度先降低后增加。分析图 6 得出, 两因素对管件表面粗糙度的影响相当; 振动频率和振幅直接影响其轴向划痕的长短和划擦次数, 从而影响表面粗糙度。交互作用对表面粗糙度的影响值约为 0.31~0.45 μm, 较 3.1、3.2 节的影响范围低。

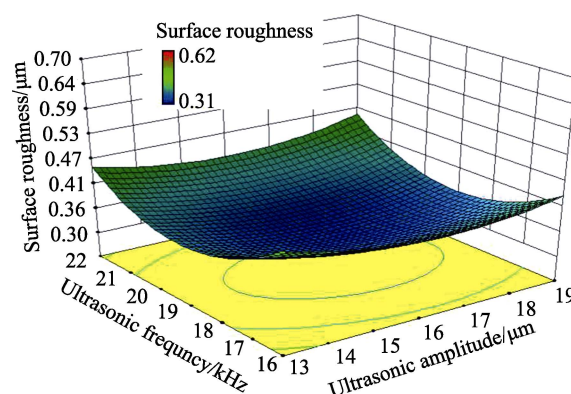


图 6 频率和振幅交互影响

Fig.6 Interaction between frequency and amplitude

综合以上条件, 得出各因素最佳条件: 主轴转速 1200 r/min, 超声频率 19 kHz, 超声振幅 19 μm。

4 结果与讨论

4.1 表面粗糙度和表面形貌

管件表面粗糙度和表面形貌如图 7 所示。管件在制造过程中由于工艺等问题, 使得管件交叉口相贯线处有大量毛刺, 内表面有大量凹坑、凸起, 经过测量其表面粗糙度值为 2.4 μm, 如图 7a 所示。图 7b 为采用内置辅助磁极磁力研磨后表面粗糙度和表面形貌。内置辅助磁极增大了磁性研磨粒子的研磨压力, 提高了研磨效率。由于磁性研磨粒子的运动轨迹单一, 且出现研磨轨迹相互叠加的现象, 导致研磨后管件表面划痕较深, 表面粗糙度为 0.41 μm, 但交叉口毛刺基本去除。图 7c 为在内置辅助磁极的加工条件下, 添加超声轴向高频振动, 提高了磁性研磨粒子自身翻滚和对管件内壁的研磨作用, 同时研磨粒子与管件内表

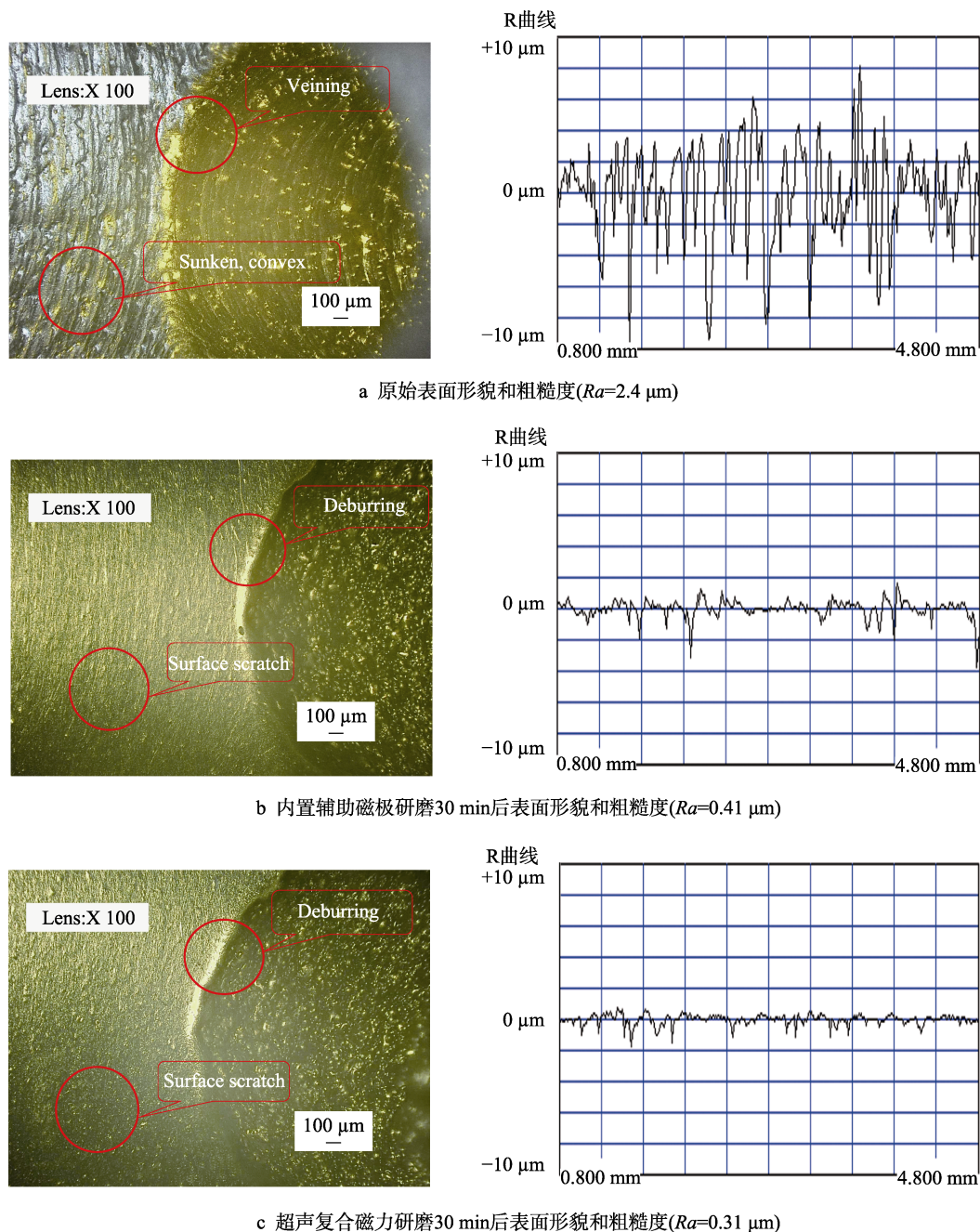


图7 管件表面形貌和粗糙度对比图

Fig.7 Contrast diagram of surface morphology and roughness of pipe fittings: (a) Original surface morphology and roughness ($Ra=2.4\ \mu\text{m}$); (b) Surface morphology and roughness after grinding for 30 min with auxiliary magnetic poles ($Ra=0.41\ \mu\text{m}$); (c) Surface morphology and roughness of after ultrasonic composite magnetic abrasive finishing for 30 min ($Ra=0.31\ \mu\text{m}$)

面发生轴向划擦作用。在旋转运动和轴向振动复合作用下,使得研磨轨迹交叉复杂化,管件内表面划痕较浅且致密,研磨后表面粗糙度为 $0.31\ \mu\text{m}$ 。

4.2 三维微观形貌

图8为不同加工方法下,经过30 min加工后,管件三维微观形貌。图8a为管件原始三维微观形貌,由于管件内壁表面粗糙度较大,交叉口处存在大量毛刺,通过3D超景电子显微镜观察其三维形貌高度差为 $114.7\ \mu\text{m}$ 。通过内置辅助磁极加工方法进行加工

后,管件内部粗糙度明显降低,毛刺基本被去除,管件表面较平整,使得三维形貌较均匀,交叉口位置处较平整。如图8b所示,其最大高度差由原始的 $114.7\ \mu\text{m}$ 降至 $90.9\ \mu\text{m}$ 。通过超声复合磁力研磨加工后,管件三维微观形貌如图8c所示,管件内壁研磨划痕明显降低,呈现出均匀致密状态,测得其最大高度差为 $83.0\ \mu\text{m}$;交叉口处进一步平整。毛刺的去除和表面平整度的改善,有效改善了管路内部液体回流、喘振等现象,极大地增加了管件的使用稳定性和使用寿命。

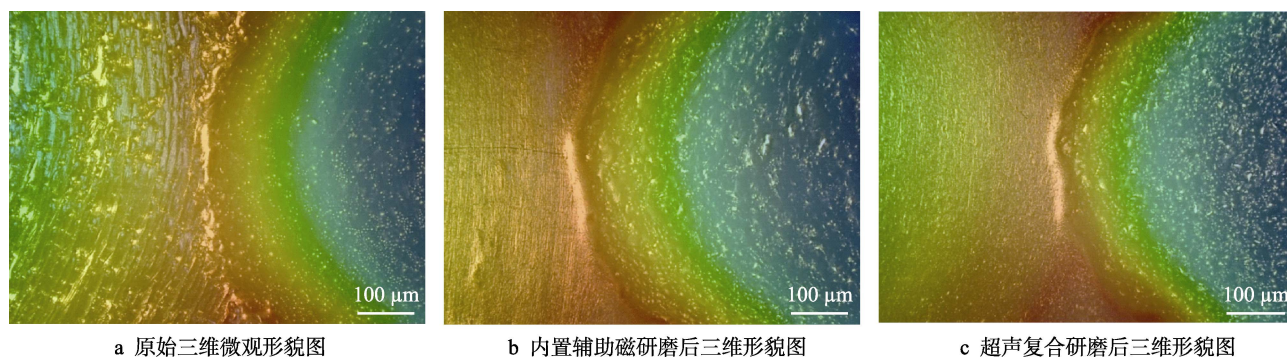


图 8 相贯线位置处研磨前后工件 3D 微观形貌图

Fig.8 3D micrograph of workpiece at intersecting line before and after grinding: (a) Original 3D micrograph; (b) 3D micrograph after built-in auxiliary magnetic grinding; (c) 3D micrograph after ultrasonic assisted grinding

4.3 应力分析

图 9 为在优化参数下, 通过不同磁力研磨加工方式加工过后, 采用 X 射线衍射仪检测加工前后管件表面残余应力。由 1.3 节方法拟合出的应力线图如图 9a、b、c 所示。通过公式 (1) 计算得出的残余应力柱状图, 如图 9d 所示。分析得知, 异型管表面由于在生产过程中受到材料塑型变形和温度的影响, 其表面残余拉应力为 +49 MPa; 在内置辅助磁极磁力研磨

加工条件下, 内外磁极形成闭合磁场回路, 增大了磁场力, 磁性研磨粒子对管件内壁的挤压、刻划等作用增强, 使得内部残余拉应力转变为残余压应力, 经测量为 -31 MPa; 在内置辅助磁极上添加高频轴向振动, 不仅使磁性研磨粒子发生轴向划擦作用, 而且加剧了磁性研磨粒子的翻滚、碰撞作用, 进一步提高了管件表面残余压应力 (-47 MPa)。根据相关文献, 管件表面残余压应力能够有效地提高管件表面抗腐蚀性、抗蠕变性、抗疲劳性^[18]。

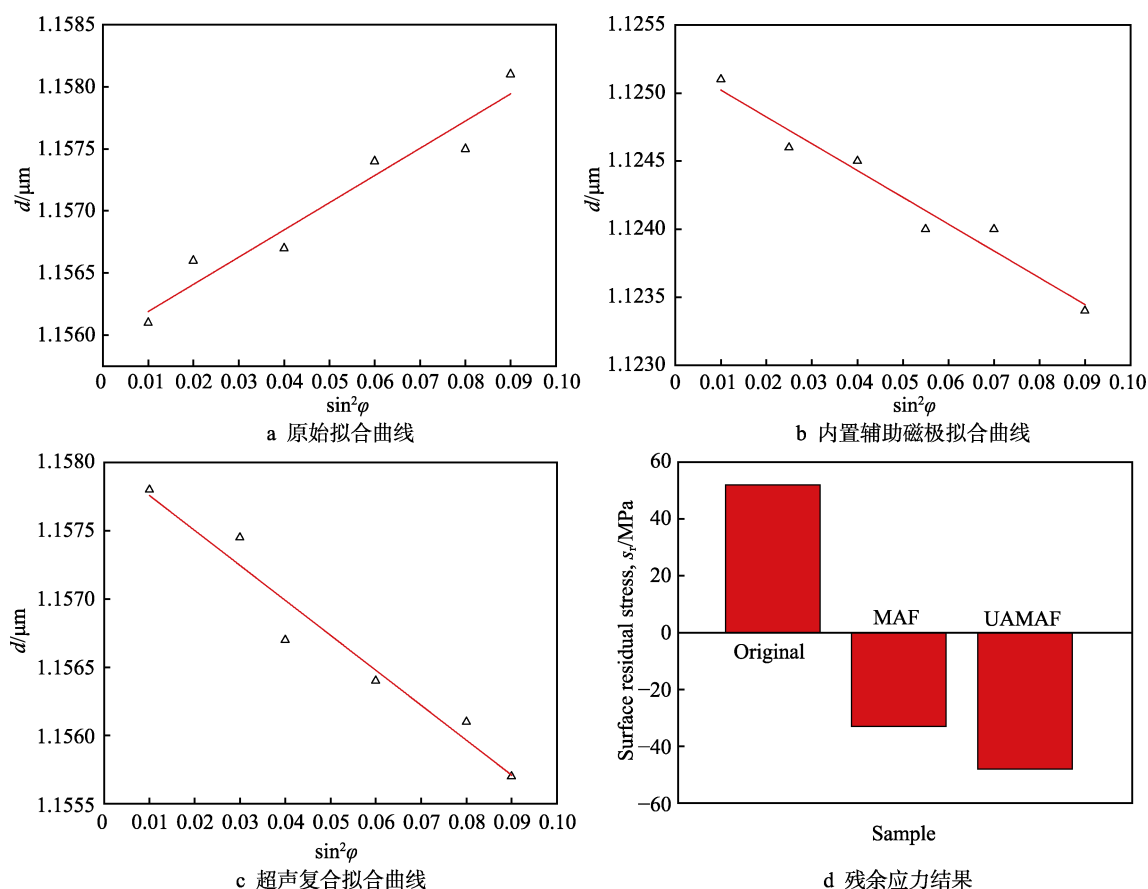


图 9 光整加工前后的表面残余应力

Fig.9 Surface residual stress before and after finishing: (a) Original fitting curve; (b) Built-in auxiliary magnetic pole fitting curve; (c) Ultrasonic auxiliary fitting curve; (d) Results of residual stress

5 结论

1) 采用响应面法对超声复合磁力研磨异型管进行试验优化设计,通过 design-Expert 软件对超声磁力研磨进行数学建模,分析出试验最优参数:主轴转速 1200 r/min, 超声频率 19 kHz, 振幅 19 μm 。

2) 在内置辅助磁极磁力研磨基础上,添加轴向超声高频振动,使得研磨划痕交叉重叠且复杂化。在主轴转速为 1200 r/min、超声频率为 19 kHz、超声振幅为 19 μm 、磁性研磨粒子平均粒径为 250 μm 的条件下,经过 30 min 研磨后,管件内壁表面粗糙度从原始的 2.4 μm 降至 0.31 μm 。

3) 通过超声复合磁力研磨加工后,异型管内壁表面残余拉应力 (+49 MPa) 转变为残余压应力 (-47 MPa),有效证明了超声复合磁力研磨加工能够使管件内壁得到良好的应力状态。

参考文献:

- [1] 姚进军,高联科,邓斌. 镍基高温合金的技术进展[J]. 新材料产业, 2015(12): 43-46.
YAO Jin-jun, GAO Lian-ke, DENG Bin. Technical progress of nickel base superalloy[J]. New material industry, 2015 (12): 43-46.
- [2] 王庆仓,张晓东,苏建修,等. SiC 单晶片化学机械研磨试验研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 137-140.
WANG Qing-cang, ZHANG Xiao-dong, SU Jian-xiu, et al. Experimental study on chemical mechanical lapping of SiC single crystal wafer[J]. Surface technology, 2015, 44(4): 137-140.
- [3] 韩恩厚,王俭秋,吴欣强,等. 核电高温高压水中不锈钢和镍基合金的腐蚀机制[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1379-1390.
HAN En-hou, WANG Jian-qiu, WU Xin-qiang, et al. Corrosion mechanism of stainless steel and nickel based alloys in high temperature high pressure water[J]. Acta metals sinica, 2010, 46 (11): 1379-1390.
- [4] 韩栋,张永强,雷文光,等. 镍基合金板带加工技术及应用发展现状[J]. 材料导报, 2015, 29(5): 83-87.
HAN Dong, ZHANG Yong-qiang, LEI Wen-guang, et al. Development of manufacturing technology and application for nickel alloys sheets and strips[J]. Material guide, 2015, 29(5): 83-87.
- [5] 庞继明,肖雅静,曲恒磊,等. 不同方法制备的钛及钛合金管坯组织与性能研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(4): 34-36.
PANG Ji-ming, XIAO Ya-jing, QU Heng-lei, et al. Study on microstructure and properties of titanium and titanium alloy tube blanks manufactured by different methods[J]. Titanium industry progress, 2010, 27(4): 34-36.
- [6] 江志强,杨合,詹梅,等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44-50.
JIANG Zhi-qiang, YANG He, ZHAN Mei, et al. State and prospective of manufacturing and application of titanium alloy tube in aviation industry[J]. Journal of plasticity engineering, 2009, 16(4): 44-50.
- [7] 韩冰,刘立鑫,陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 814-817.
HAN Bing, LIU Li-xin, CHEN Yan. Optimization of process parameters on magnetic abrasive finishing to inner surface of bending pipe [J]. Chinese mechanical engineering, 2015, 26 (6): 814-817.
- [8] 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.
- [9] 韩冰,邓超,陈燕. 球形磁铁在弯管内表面磁力研磨中的应用[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(6): 565-570.
HAN Bin, DENG Chao, CHEN Yan. The spherical magnet processing of inner surface of bending pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Journal of tribology, 2013, 33(6): 565-570.
- [10] PAN J, YAN Q, XU X, et al. Abrasive particles trajectory analysis and simulation of cluster magnet orheological effect plane polishing[J]. Physics procedia, 2012, 25(22): 176-184.
- [11] 杨海吉,韩冰,陈燕,等. 自旋转磁极在合金管内表面精密抛光中的应用[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 189-195.
YANG Hai-ji, HAN Bing, CHEN Yan, et al. The application of rotating magnetic pole in the polishing of the inner surface of the alloy tube[J]. Journal of tribology, 2018, 38(2): 189-195.
- [12] 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.
- [13] LIU Z Q, CHEN Y, LI Y J. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2013, 68(1-4): 631-640.
- [14] PEATEEK K, PULAK M P, GIRISH C V, et al. Understanding flexible abrasive brush behavior for double disk magnetic abrasive finishing based on force signature[J]. Journal of manufacturing processes, 2017.
- [15] PEATEEK K, PULAK M P. Comparison of finishing characteristics of two paramagnetic materials using double disc magnetic abrasive finishing[J]. Journal of manufacturing processes, 2015, 17(1): 63-77.
- [16] FERREIRA N G, ABRAMOF E, CORAT E J, et al. Residual stresses and crystalline quality of heavily boron-oped diamond films analysed by micro-Raman spectroscopy and X-ray diffraction[J]. Carbon, 2003, 41 (6): 1301-1308.
- [17] 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.
- [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.