

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180711002

超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管

陈 燕, 曾加恒, 胡玉刚, 巫昌海

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 鞍山 114051)

摘 要: 为解决镍基合金 GH4169 异型管内壁难研磨及研磨不均匀问题, 采用超声复合磁力研磨光整加工方法进行试验。分析在超声复合磁力研磨条件下, 主轴转速、加工间隙、超声频率和超声振幅对异形管内壁表面质量的影响。结果表明: 在超声轴向频率为 19 kHz、振幅 19 μm 、主轴转速 1000 r/min, 磁性磨粒平均粒径 250 μm , 加工间隙 2 mm 加工条件下, 加工 30 min 后, 管件内壁表面粗糙度 R_a 由原始的 2.4 μm 降至 0.31 μm 。通过在管件内部添加圆柱形辅助磁极, 使得内外两磁极形成闭合磁场回路, 增加磁场力的作用。辅助磁极连接高频轴向超声振动, 使得吸附在磁极上的磁性磨粒在旋转运动和轴向高频振动复合作用下划擦、研磨管件内表面。由于研磨轨迹发生交叉复杂化, 使得异型管内壁研磨后的表面质量和表面粗糙度得到明显提高; 管件内壁表面残余应力由拉应力+52 MPa 转变为压应力-48 MPa, 表面应力状态得到较好的改善。

关键词: 磁力研磨; 镍基合金; 异形管; 超声复合; 辅助磁极

中图分类号: TG176

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0118-07

Special-shaped Pipe of Nickel Based Alloy GH4169 by Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing

CHEN Yan, ZENG Jiaheng, HU Yugang, WU Changhai

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

Abstract: This investigation aims to solve the problem of difficult and uneven grinding by using ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing (UAMAF) in the nickel-based alloy GH4169 with tube shaped inner wall. The effects of spindle speed, machining gap, ultrasonic frequency and ultrasonic amplitude on the surface quality of the special-shaped tube inner wall were analyzed under the condition of UAMAF. The test was carried out under the processing conditions of ultrasonic axial frequency of 19 kHz, an amplitude of 19 μm an spindle speed of 1000 r/min, an average particle size of 250 μm of magnetic abrasive grain, and 2 mm machining gap. Results show that after 30 minutes of processing, the surface roughness of the inner wall of the pipe was reduced from the original R_a 2.4 μm to R_a 0.31 μm . Addition of a cylindrical auxiliary magnetic pole inside the pipe fitting causes the inner and outer magnetic poles form a closed magnetic field loop thereby increasing the magnetic field force. The vibration from the auxiliary magnetic pole is connected with the high-frequency axial ultrasonic vibration. It causes the magnetic abrasive particle adsorbed on the magnetic pole scratch to grind the inner surface of the pipe under the combined action of the rotary motion and the axial high-frequency vibration. Due to the cross-complication of the grinding trajectory, the surface quality and surface roughness of the inner wall of the tube are significantly improved. The residual stress on the inner wall surface of the pipe changes from tensile stress of +52 MPa to compressive stress of -48 MPa, and the surface stress state is improved.

Keywords: magnetic abrasive finishing; nickel base alloy; heteromorphic tube; ultrasonic assisted; auxiliary magnetic pole

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-12-07

网络出版日期: 2018-12-11 13:25; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181211.1324.004.html>

通信作者: 陈燕(1963—), 女(汉), 教授, 博士; 研究方向: 精密加工; E-mail: laochen412@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(51775258)

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

引用格式: 陈燕, 曾加恒, 胡玉刚, 等. 超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 118-124.

CHEN Y, ZENG J H, HU Y G, et al. Special-shaped pipe of nickel based alloy GH4169 by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 118-124.

0 引言

镍基合金在 650~1000 ℃ 高温下具有良好的高温氧化性和抗腐蚀能力,而且具有较高的强度、蠕变强度和持久强度,以及良好的抗疲劳性能^[1-2]。凭借着优良的机械性能,现今被国内外主要应用于航空航天、环保、能源核工业等重要领域^[3-5]。镍基合金管件作为航空发动机内部重要的零部件之一,在生产制造过程中受到高温、高压和加工工艺的限制,其管件内壁表面出现大量凹坑、凸起和微裂纹,使得管件内表面质量较差;在使用过程中造成管路内部液体压力和流速不均匀,导致发动机发生喘振现象,致使其稳定性降低^[6-7]。因此,对于镍基合金管内表面光整加工越来越受到重视,各相关研究人员对其提出不同的特种加工方法。周金保^[8]等提出通过电镀方法对镍基合金进行表面处理,此方法虽然加工效率较高,电镀后工件表面形貌和表面粗糙度较好,但其电镀过程中使用的化学药品对环境污染极大,对工作人员的身体也存在较大伤害。白阿香^[9]等通过对镍基合金 Incoloy840 表面进行 HNO₃ 钝化、涂覆 SiO₂ 膜两种表面处理来增强合金表面的抗腐蚀能力,具有一定的效果,但工件表面质量并未得到很大改善。韩冰^[10]等在弯管内部添加球形辅助磁极进行磁粒研磨加工,弯管内壁得到较好的表面质量;但由于弯管管道单一,无其他迂回支路,外部磁极的运动不会受到阻碍。试验中异型管存在多处迂回支路,对外部磁极存在干涉作用,此方法无法满足此类异型管的加工要求。

文中试验提出采用超声复合磁力研磨加工方法来加工镍基合金 GH4169 异形管,试验中数控机床的使用降低了系统误差,极大的保证了加工精度和加工稳定性;管内部辅助磁极的加入可以很好的改善磁场回路,增强磁场力,增强磁性磨粒的刚性,提高加工效率。但由于内置辅助磁极磁力研磨加工,单个磁性磨粒运动轨迹较为单一,且存在轨迹间相互叠加现象,使研磨划痕较深,表面粗糙度较大,表面质量较差;为改善表面质量,在管件辅助磁极上添加超声轴向高频振动。在轴向振动的促进下,磁性磨粒将在管内部翻滚自锐,研磨相研磨较为充分,保证加工均匀的同时减短了研磨时间,提高研磨效率。当然在轴向划擦和旋转划擦交叉重叠的作用下,磁性磨

粒研磨轨迹复杂化,管件表面划痕较浅,使得管件内壁表面质量得到有效改善。

1 试验原理

加工原理如图 1 所示,在管件外部固定钕铁硼永磁极形成外部磁场,内部放置圆柱形径向辅助磁极形成内部辅助磁场,内外两磁场相叠形成封闭的磁场回路;磁性磨粒吸附在辅助磁极周围,沿着磁场梯度均匀排列成具有一定刚性的磁力刷;在磁场回路中受磁场力作用仿形压附在管件内壁上^[11-12]。超声波发生器将电信号传递给超声波振子,由振子将电信号转换成轴向机械振动,通过变幅杆放大振动,由细长杆传递到辅助磁极上,使得辅助磁极上的磁性磨粒发生振动,增加磁性磨粒对管件内壁的碰撞作用和自身的翻滚自锐作用;在管件的旋转和超声轴向振动的复合作用下,磁性磨粒对管件内表面进行微量划擦作用,完成对管件内壁和交叉口相贯线处的研磨^[13-15]。

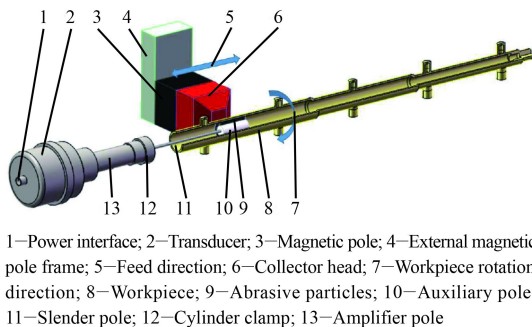


图1 超声复合磁力研磨加工原理图

Fig.1 Working principle diagram of ultrasonic assisted magnetic abrasive machining

2 超声磁粒研磨装置与条件

2.1 试验装置

在内置辅助磁极磁粒研磨加工基础上添加高频超声轴向振动,装置如图 2 所示。将管件通过三抓卡盘安装在卧式车床主轴上,磁极吸附磨料和研磨液的均匀混合物内置于管件内部。在外部磁极与内部辅助磁极磁场力的作用下,磨料仿形压附在管件内壁上。超声波发生器通过直流电源将电信号传递给超声波振子;超声波振子固定在支撑座上,振子将电信号转换成高频轴向振动,并通过前端的变幅杆、细长杆将轴向振动传递到辅助磁极上。在机床主轴的驱动和超声轴向振动

作用下，磁性磨粒将会获得旋转和轴向两大作用。在旋转运动和轴向运动交互作用下，磁性磨粒对管件内壁和交叉口相贯线处进行光整加工。

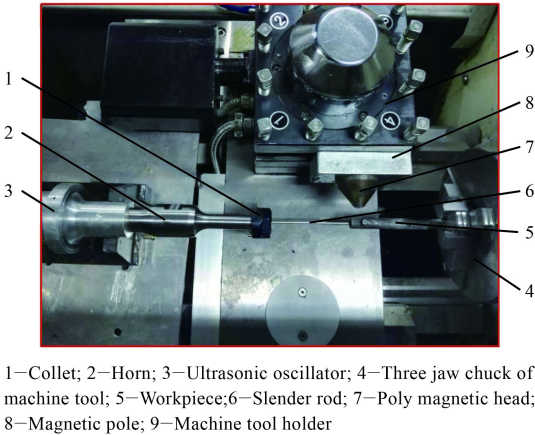


图2 超声复合磁力研磨试验装置图

Fig.2 Testing device graph of ultrasonic assisted magnetic abrasive

2.2 试验条件

采用 GH4169 镍基高温合金异形管为试验对象，该种高温合金具有优良的抗疲劳、抗氧化、耐腐蚀等性能^[16]。采用的内外磁极都为钕铁硼永磁极。加工时将工件夹持在机床主轴上，将吸附和油性研磨液的均匀混合物的辅助磁极至于异形管内部；磁性磨粒由铁基相 (Fe 粉) 和研磨相 (Al₂O₃) 通过质量比 2 : 1 均匀混合、压制成型、烧结、粉碎制成；超声波振幅 12~19 μm，频率 12~19 kHz；启动机床和超声波发生器，设定试验条件 (如表 1 所示)；加工时需每隔 5 min 进行表面状态检测并采集数据；加工前后工件需通过超声波

清洗机清洗并烘干，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。

表 1 复合加工的试验条件

Table 1 Test condition of compound machining

Parameter	Value
Magnetic pole (Nd-Fe-B permanent magnet)	Φ 6 mm×15 mm
Particle size of magnetic abrasive, <i>D</i> / μm	150、250、420
Ultrasonic amplitude, <i>A</i> / μm	12、16、19
Ultrasonic frequency, <i>f</i> / kHz	12、16、19
Spindle speed, <i>v</i> / (r·min ⁻¹)	800、1000、1500
Machining gap, <i>H</i> / mm	2
Processing time, <i>t</i> / min	30
Abrasive fluid, <i>L</i> / mL	3

2.3 外部运动轨迹确定

采用 CKA61361 型卧式数控机床改造完成的磁粒研磨装置，主轴转速范围 500 r/min 至 3500 r/min。由于异形管形状的特殊性，在试验过程中辅助磁极与零件之间的间隙变化在几十微米之间，对研磨效果影响甚微，忽略其变化，使加工间隙稳定在 2 mm。根据管件尺寸进行外部磁极运动轨迹数控仿形编程，模拟出磁极单点加工运动轨迹，如图 3 所示。数控编程控制外部磁极由远及近沿 X 轴向管件移动，稳定在设定的加工间隙条件下进行研磨加工，加工间隙通过文献^[17]得到一般加工间隙在 1~2 mm 即可；在通过 Z 轴的移动，控制外部磁极进行横向进给。当磁极通过

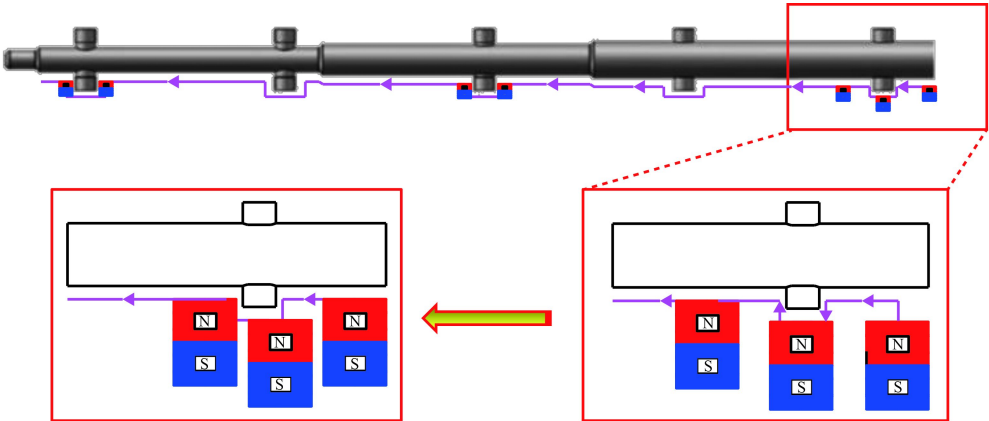


图3 数控编程磁极运动轨迹

Fig.3 Track of magnetic pole movement in numerical control programming

管件阶梯处时, 由 X 轴、 Z 轴组合运动, 保证内外磁极加工间隙的稳定性。在支路位置处, 由于内外磁极间距较大, 使得磁场力较弱, 可控制延长单次研磨时间, 以使得整个加工过程中管件内表面研磨较为均匀。

3 试验因素影响分析

3.1 转速与粒径对管件表面粗糙度的影响

设定超声频率 19 kHz、振幅 19 μm 、磁性磨粒平均粒径 250 μm , 其他加工条件如 2.2 节所示。图 4 所示为主轴转速和磁性磨粒粒径对管件表面粗糙度影响关系。主轴转速为 1500 r/min 时, 管件与磁性磨粒之间相对运动速度较大, 相对运动加剧, 使得磁性研磨过早失去磨削作用, 从而降低磁性磨粒的研磨寿命, 最终为铁基体划擦管件表面; 同时磁性磨粒运动加剧, 研磨区域内的磁性磨粒向周围非加工区域扩散, 使得加工区域内有效研磨粒子数减少, 致使研磨不够充分, 管件内表面粗糙度 R_a 由原始 2.4 μm 降至 0.46 μm 。主轴转速为 800 r/min 时, 转速较低, 单位时间内磁性磨粒对管件内壁研磨、刻划次数较少, 使管件表面粗糙度 R_a 较大, 由原始 2.4 μm 降低至 0.48 μm 。通过试验分析最终得出主轴转速为 1000 r/min 为最佳。

试验加工条件同上, 探究磁性磨粒粒径对表面粗糙度的影响。由于管件原始表面粗糙度较大, 内壁表面存在较大波峰, 磁性磨粒对其表面

材料去除量较大^[18]。粒径为 420 μm 时, 由于粒径较大, 在磁场中所受磁场力较大, 对管件表面的研磨压力较大, 划痕较深, 研磨后管件表面效果不佳。粒径为 150 μm 时, 磁性磨粒所受磁场力较小, 研磨压力变小, 对管件表面研磨作用较差。最终得出磁性磨粒平均粒径 250 μm 时, 研磨效果最好。材料去除率最稳定, 表面粗糙度 R_a 由原始的 2.4 μm 降低到 0.31 μm 。

3.2 超声振动频率和振幅对管件表面粗糙度的影响

设定加工条件: 主轴转速 1000 r/min, 磁性磨粒平均粒径 250 μm , 其它条件如 2.2 节所示。如图 5 所示, 随着振幅的增加, 管件表面粗糙度下降速度加快, 表面粗糙度值较低。因为振幅增大的同时, 单位时间内磁性磨粒对管件的轴向划擦作用增强, 并且横向划擦轨迹与旋转研磨轨迹交叉次数增加, 且更为致密, 使得研磨效果更好。当振幅较大时, 划痕较长, 不利于表面粗糙度的下降。试验得出: 振幅为 19 μm 时加工效果最好, 经 30 min 加工后表面粗糙度 R_a 达 0.31 μm 。

其它条件同上, 调整超声频率为 12、16 和 19 kHz, 通过试验得到最佳超声频率。由图 5 所示, 相同加工条件下, 单位时间内振动频率越高, 对管件表面横向划擦次数越高, 使得两研磨轨迹交叉频率得到提高, 交叉更为致密; 且磁性磨粒与管件内壁碰撞增强, 磁性磨粒翻滚自磁性磨粒锐加强, 无规则运动加强, 使得研磨效率提高; 试验得出频率为 19 kHz 时, 管件表面粗糙度最好。

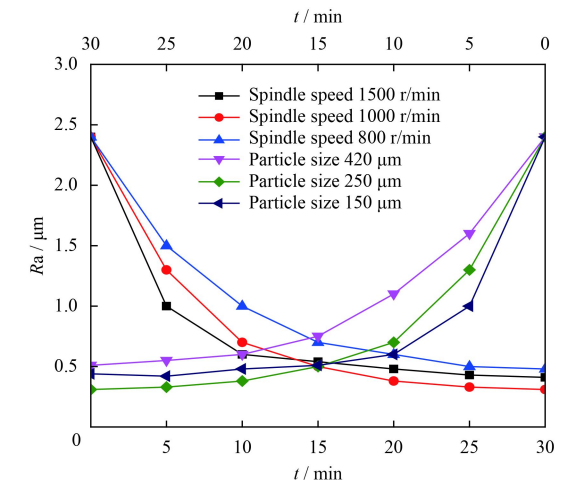


图 4 不同磁极转速和粒径对表面粗糙度影响

Fig.4 Effects of different magnetic pole speed and particle size on surface roughness

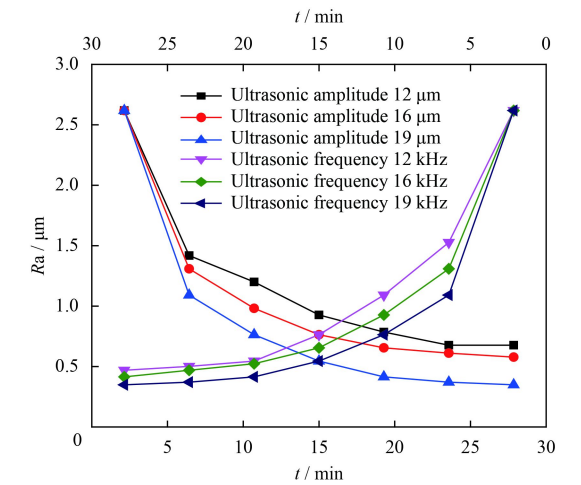


图 5 不同振动频率和振幅对表面粗糙度影响

Fig.5 Effects of different vibration frequencies and amplitudes on surface roughness

4 结果与分析

4.1 不同加工方式对工件表面形貌的影响

图6为内置辅助磁极磁力研磨与添加轴向超声振动复合磁力研磨加工前后管件内壁表面微观形貌和表面粗糙度对比图。由于生产工艺的限制,从图6(a)中可以看出,原始管件表面残留大量凸起、凹坑和微裂纹,表面质量较差^[19]。通过粗糙度测量仪测得表面粗糙度 R_a 为 $2.4\ \mu\text{m}$ 。当采用内置辅助磁极进行研磨加工时,由于内外磁极形成闭合磁回路,增大磁场力,使得磁性磨粒对工件表面研磨压力增大。研磨时,磁性磨粒运动较为单一,粒子自身翻滚、自锐性较差,且研磨划痕出现“叠加”现象,划痕较深,表面粗糙度较大,如图6(b)所示。图6(c)为超声复合磁力研磨加工后表面形貌图。添加轴向高频超声振动使得磁性磨粒轴向划擦管件内表面,使得研磨划痕发

生交叉复杂化;同时加剧磁性磨粒翻滚自锐,使得管件表面研磨划痕较浅且致密,相贯线位置处毛刺也得到有效去除,有效提高管件表面质量。经检测表面粗糙度 R_a 为 $0.31\ \mu\text{m}$ 。

图6(a)研磨前管件原始三维微观形貌图。由于管件相贯线处存在大量毛刺,经检测最大高度差为 $114.7\ \mu\text{m}$;经内置辅助磁极磁力研磨后,管件内壁表面凹坑、凸起被有效去除,如图6(b)所示。因其研磨压力增大,研磨轨迹较为单一,研磨后工件表面出现较为明显的均匀研磨划痕,检测其最大高度差为 $90.9\ \mu\text{m}$ 。图6(c)为超声复合磁力研磨加工后三维形貌图,工件表面划痕致密、均匀,交叉口相贯线位置处毛刺基本去除,最大高度差由 90.9 降至 $83.0\ \mu\text{m}$;毛刺的去除和表面光整度的改善,有效改善了管路内部液体回流、喘振等现象,极大增加了管件的使用稳定性和寿命。

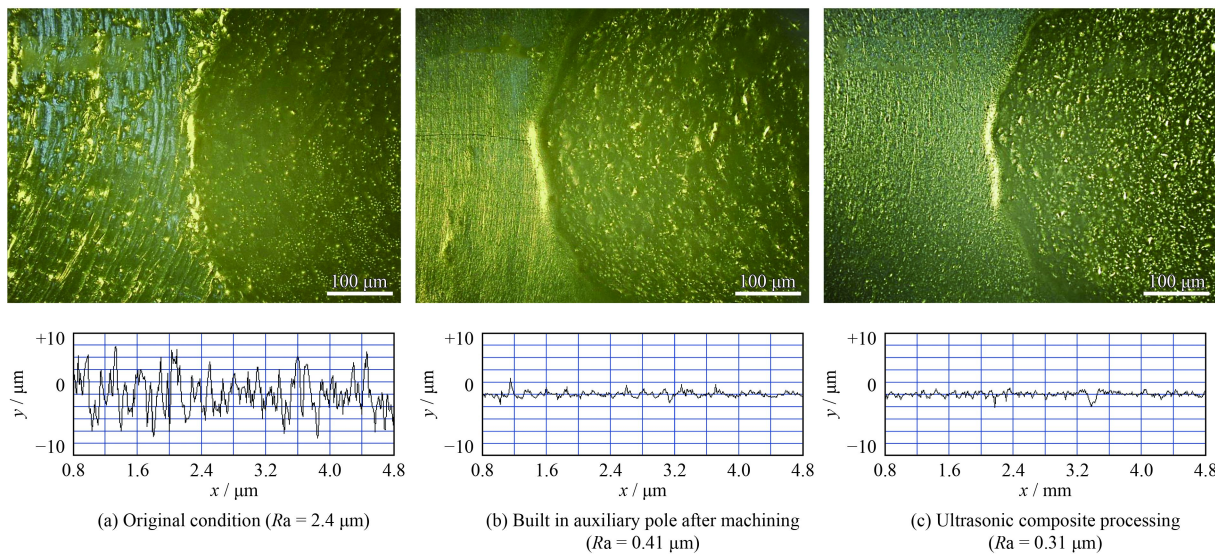


图6 研磨前后工件内表面形貌和粗糙度对比

Fig.6 Surface topographies and roughness comparison of the workpieces before and after grinding

4.2 不同加工方式对表面残余应力分析

试验通过 X 射线干涉仪,分别对原始管件内壁表面、内置辅助磁极磁力研磨 (MAF) 和超声复合磁力研磨 (UAMAF) 加工后管件内壁表面进行应力检测。选定管件表面 6 个点进行拉应力和压应力晶面间距检测,并拟合出相应的直线。如图 7(a)(b)(c) 所示。由式 (1) 计算的出管件内壁表面残余应力值^[20]。根据式 (1) 计算所得结果如图 7(d) 所示。

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

式中: σ_{φ} 为应力, MPa; E 为材料的杨氏模量, GPa; φ 为衍射角; ν 为材料泊松比; ψ 为倾斜角度; d_{ψ} 为倾斜晶面间距, μm ; d_n 为初始倾斜角的晶面材料初始表面由于受到初加工时的塑性变形间距 (μm)。如图 7(d) 所示,根据计算结果表明,管件在生产过程中由于受到高温高压以及材料塑性变形等影响,其内部产生残余应力,检测

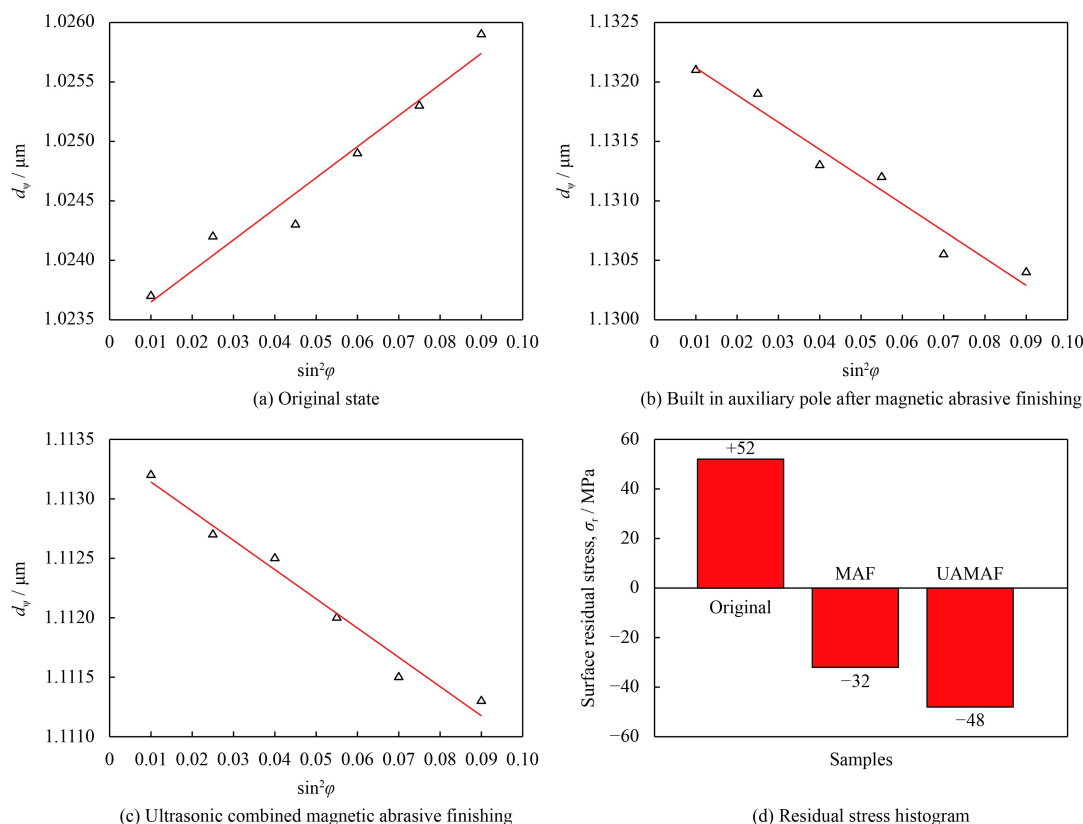


图7 研磨加工前后的表面残余应力

Fig.7 Surface residual stress before and after grinding

其表面为+52 MPa 残余拉应力;由于内置辅助磁极增加了研磨压力,研磨过程中磁性磨粒与管件内表面发生挤压、碰撞、刻划等作用,引入残余压应力,研磨后经检测为-32 MPa 残余压应力。超声轴向振动加剧了磁性磨粒自身翻滚、碰撞作用,使得管件内部残余压应力-32 MPa 增加至-48 MPa。根据相关文献,管件表面残余压应力能够有效的提高管件表面抗腐蚀性、抗蠕变性、抗疲劳性^[21]。

5 结 论

(1) 采用数控编程技术,编译外部磁极行走轨迹,有效控制内外磁极间的加工距离和加工均匀性。在添加内置辅助磁极的基础上添加轴向超声振动,使得磁性磨粒对管件表面产生轴向划擦作用,使得研磨轨迹交叉复杂化,提高管内壁加工质量。

(2) 采用超声复合内置辅助磁极磁力研磨加工方法,主轴转速 1000 r/min,加工间隙 2 mm,超声频率 19 kHz,超声振幅 19 μm 条件下,采用磁性磨粒平均粒径 250 μm,经过 30 min 研磨后,管

件内壁表面粗糙度较低,表面质量最佳。粗糙度 Ra 从原始 2.4 μm 降至 0.31 μm。

(3) 加工前后异形管内壁表面残余应力,由原始残余拉应力+52 MPa 转变为残余压应力-48 MPa,改善其内部应力状态;良好的应力状态可以有效的提高管件的使用寿命。

参考文献

- [1] 镍基超耐热合金在空气中的等温锻造[J]. 精密成形工程, 2009,1(2): 18.
Isothermal forging of nickel based superalloy in air[J]. Precision Forming Engineering, 2009, 1(2): 18 (in Chinese).
- [2] 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, 16(12): 43-46.
YAO J J, GAO L K, DENG B. Technical progress of nickel base superalloy[J]. New Material Industry, 2015, 16(12): 43-46 (in Chinese).
- [3] ADIB A M L, BAPTISTA C A R P, BARBOZA M J R, et al. Air craft engine bleed system tubes: material and failure mode analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8): 1605-1617.
- [4] 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 E H, WANG J Q, WU X Q, 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 (in Chinese).
- [5] 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 D, ZHANG Y Q, LEI W G, et al. Development of manufacturing technology and application for nickel alloys sheets and strips[J]. *Material Guide*, 2015, 29(5): 83-87 (in Chinese).
- [6] 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 H J, HAN B, CHEN Y, 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 (in Chinese).
- [7] LIU G, HE N, MAN Z L, et al. Cutting forces in the milling of inconel718[J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 259/260: 824-828.
- [8] 周金保. 镍基耐蚀合金的表面处理[J]. *电镀与精饰*, 1998, 25(3): 24-26.
- ZHOU J B. Nickel base corrosion resistant alloy surface treatment[J]. *Plating and Finishing*, 1998, 25(3): 24-26 (in Chinese).
- [9] 白阿香, 魏刚, 乔宁. 表面处理对镍基合金加热管腐蚀行为的影响[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 24(3): 228-231.
- BAI A X, WEI G, QIAO N. Influence of surface treatments on corrosion performance of ni-based alloys for heating tube[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2012, 24(3): 228-231 (in Chinese).
- [10] 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 B, DENG C, CHEN Y. The spherical magnet processing of inner surface of bending pipe by magnetic abrasive finishing[J]. *Journal of Tribology*, 2013, 33(6): 565-570 (in Chinese).
- [11] 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 L W, YANG N G, CHEN Y. Influence of magnetic abrasive finishing technology on surface integrity of vane-integrated disk[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(3): 10-14 (in Chinese).
- [12] KANG J, YAMAGUCHI H. Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole-tip system[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(3): 510-516.
- [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 Y, SONG Z P, LI C, 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 (in Chinese).
- [14] 邓超, 韩冰, 陈燕. 磁研磨法对钛合金弯管内表面的抛光研究[J]. *航空制造技术*, 2015, 472(3): 61-63.
- DENG C, HAN B, CHEN Y. Study of inner surface polishing of titanium alloy elbow pipe by magnetic abrasive finishing[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2015, 472(3): 61-63 (in Chinese).
- [15] 杨海吉, 张晓君, 陈燕, 等. 磁力研磨精密抛光 4×150 mm TC4 管内表面的实验研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(12): 259-264.
- YANG H J, ZANG X J, CHEN Y, et al. Polishing of inner surface of $\phi 4 \times 150$ mm TC4 tube by magnetic abrasive finishing[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(12): 259-264 (in Chinese).
- [16] 朱磊, 吴志荣, 胡绪腾, 等. 镍基合金 GH4169 疲劳小裂纹的扩展行为[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(8): 1984-1991.
- ZHU L, WU Z R, HU X T, et al. Small fatigue crack growth behavior of nickel-based alloy GH4169[J]. *Journal of Aeronautics and Dynamics*, 2017, 32(8): 1984-1991 (in Chinese).
- [17] LIU Z Q, CHEN Y, LI Y J, et al. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(1-4): 631-640.
- [18] 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 A Y, QUAN H J, CHEN Y, 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 (in Chinese).
- [19] 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.
- [20] 廖明. 电化学磁力研磨复合加工钛合金试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- LIAO Ming. Research abrasive on the electrochemical magnetic finishing of titanium alloy[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016(in Chinese).
- [21] 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 M, HAN B, CHEN Y, et al. Inner surface of titanium alloy tube by eletrochemical magnetic abrasive compound finishing[J]. *China Surface Engineering*, 2016, 29(3): 123-131 (in Chinese).