

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.06.013

基于响应曲面法的磁力研磨310S不锈钢参数优化

刘宁, 张桂香*, 陈昊鑫, 朱培鑫, 杜嘉静, 刘雪

(山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 采用磁力研磨光整加工技术(MAF)提高310S不锈钢工件的表面质量, 探讨3种工艺参数对其表面粗糙度的影响规律。通过主轴改造后的XK7136C数控铣床作为加工平台, 基于响应曲面方法, 采用雾化快凝法制备的 Al_2O_3 球形磁性磨料对310S不锈钢进行研磨实验研究。以磁力研磨后的表面粗糙度值(R_a)为响应值, 对实验过程中的主轴转速、进给速率和加工间隙进行优化, 在主轴转速为1720 r/min, 进给速度为16 mm/min, 加工间隙为1.8 mm的条件下恒定研磨30 min, 工件的表面粗糙度值由初始的0.350 μm 下降至0.039 μm , 表面粗糙度模型预测值为0.044 μm , 实验实际值与预测值误差为11.3%。残余压应力由初始的-289 MPa增加至-391 MPa, 结果表明: 磁力研磨后工件表面凹坑、毛刺和划痕均被去除, 表面质量得到极大地改进。

关键词: 310S 不锈钢; 响应曲面法; 磁力研磨; 表面质量

中图分类号: TH161

文献标识码: A

Parameter optimization of magnetic abrasive finishing 310S stainless steel based on response surface methodology

Liu Ning, Zhang Guixiang*, Chen Haoxin, Zhu Peixin, Du Jiajing, Liu Xue

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The surface quality of heat-resistant 310 stainless steel workpiece was improved by magnetic abrasive finishing (MAF). The effects of three process parameters on the surface roughness were discussed. The XK7136C CNC milling machine after the spindle transformation was served as a processing platform. Based on the response surface methodology, the magnetic abrasive finishing of 310 stainless steel was carried out with Al_2O_3 spherical magnetic abrasives which were prepared by gas atomization with rapid solidification. The surface roughness (R_a) after MAF was selected as the response value, and the spindle speed, feed rate and machining gap during the experiments were optimized. Under the conditions of spindle speed 1720 r/min, feed rate 16 mm/min and machining clearance 1.8 mm, the workpiece was continuously finished for 30 min. Finally, the surface roughness of the workpiece decreased from 0.350 μm to 0.039 μm , and the predicted value of surface roughness model was 0.044 μm . The error between the actual experiment value and the predicted value was 11.3%. In addition, the residual compressive stress on the surface of the workpiece increased from -289 MPa to -391 MPa. The experimental results showed that the pits, burrs and scratches on the surface were removed after magnetic abrasive finishing. The surface of finished workpiece was very

收稿日期: 2022-03-27

修回日期: 2022-05-30

作者简介: 刘宁(1997—), 男, 在读硕士生, email: 913768695@qq.com

*通信作者: 张桂香(1964—), 女, 博士, 教授, 研究方向: 精密/超精密加工技术、特种加工工艺与装备及表面工程, email: zhanggx@sdut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675316)

smooth and the surface quality had been improved well.

Keywords: 310S stainless steel; response surface methodology; magnetic abrasive finishing; surface quality

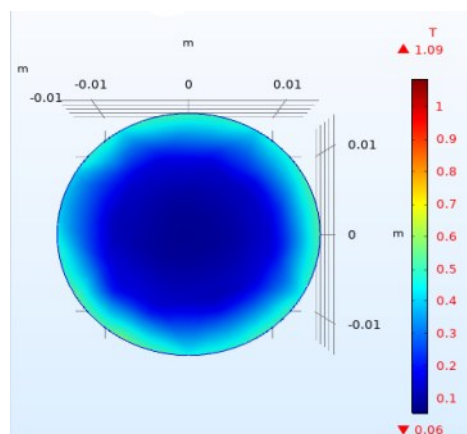
磁力研磨是通过磁性磨料和工件之间的相对运动来实现工件精密加工的一种材料微量去除技术^[1]。这种加工方法具有很多优点,如环保无污染、对复杂工件轮廓的自适应性强以及高效率、高精度和高表面质量,适用于内表面、外表面、自由曲面和复杂曲面的加工^[2-4]。相比普通磨削,磁力研磨是利用磁场对柔性磁性磨粒刷进行控制,与工件表面产生的黏附力小,同时产生较少的热量^[5],不会出现由于高应力而产生表面损伤和不良形貌等情况。

高Cr/Ni含量的310S不锈钢凭借其优良的耐腐蚀性能和良好的蠕变强度,常用于汽轮机、航空航天机械中的零部件,微小叶片不仅轮廓精度和表面精度要求高,其表面质量要求也极高^[6],此外在核工业、石油化工、管道运输、电子等方面也有着美好的应用前景^[7]。不锈钢虽然应用广泛且综合性能优异,但是该类不锈钢零部件加工制造过程最终加工工序的光整加工自动化问题没能得到解决,致使其表面质量差,严重影响其使役性能和寿命。有关磁力研磨工艺参数对耐热不锈钢表面粗糙度影响的数学模型研究较少,通过建立主轴转速、进给速度和加工间隙对表面粗糙度的响应曲面模型,获得研磨参数对表面粗糙度的影响规律及参数之间的交互作用,得出最优研磨参数,为耐热钢系列的磁力研磨工艺参数选择提供理论指导。

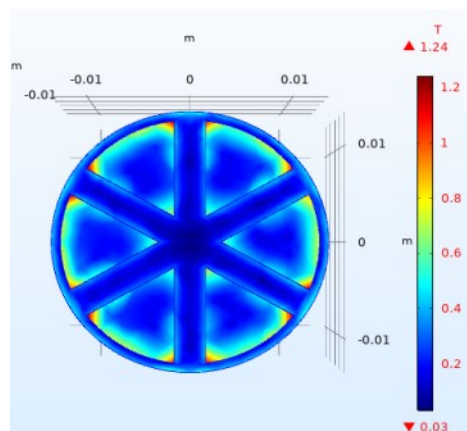
1 钕铁硼永磁极磁场仿真

在磁极研磨表面开槽,可以获得磁场强度梯度,有效地促进了研磨效率的提高以及有助于提高研磨的均匀度^[8-10]。在改变磁场强度梯度分布的同时,也增强了柔性磨粒刷的自锐性,这对磁性磨粒所受的圆周力和工件表面所受的压痕力都会产生影响^[11]。采用Comsol软件对自主研发的米字型矩形槽(槽深与槽宽之比为1:1)永磁极和未开槽平面永磁极做了磁感应强度对比测试,如图1所示。从图1(a)可以看出,在未开槽磁极研磨表面最大磁感应强度出现在圆柱边缘上,而磁极中心部位的磁感应强度较低,在开矩形槽(图1(b))后,不仅在研磨端面棱边

棱角处磁感应强度最高,而且在中心部位沿矩形槽的边处和棱角也获得了较高的磁感应强度^[12],从而更好地带动磨料加工工件。



(a) 磁极研磨表面未开槽



(b) 磁极研磨表面开矩形槽

图1 钕铁硼永磁极开槽与未开槽研磨表面磁感应强度三维对比图

Fig.1 Three-dimensional contrast diagram of magnetic flux density of Nd-Fe-B permanent magnet pole slotted and unslotted finishing surface

2 加工条件

2.1 材料

磁力研磨作为一种精密、微细的抛光技术,工件表面的研磨效果和磁性磨料的选择密切相关^[13],本

实验采用的是由本课题组自主研发的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ 基球形磁性磨料,磨料粒径为80~120目,磨粒相粒径为W7(5~7 μm)。由图2磨料SEM图可以看出,磨料铁基体基本是圆形且磨粒相均匀地嵌入在铁基体上^[14]。

工件材料是轧制耐高温310S不锈钢,尺寸为60 mm×40 mm×4 mm,其主要成分(以质量分数计)为:Cr 24%~26%、Ni 19%~22%、Mn≤2%、Si≤1%、C≤0.08%、S≤0.030%、P≤0.035%。机械性能:抗拉强度520 MPa,屈服强度205 MPa。

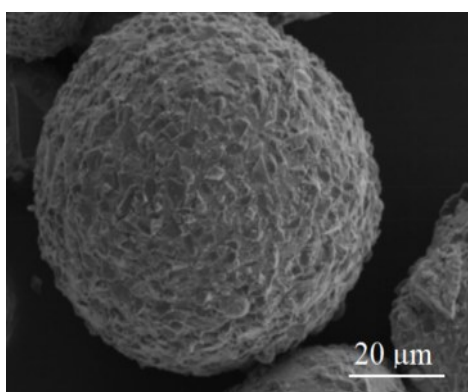


图2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ 基球形磁性磨料颗粒

Fig.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ -based spherical magnetic abrasive particles

2.2 磁力研磨装置

实验采用主轴改造后的XK7136C数控铣床作为加工系统(图3),安装在主轴上的磁极头为牌号N35的钕铁硼永磁极,采用MB132油基类研磨液。

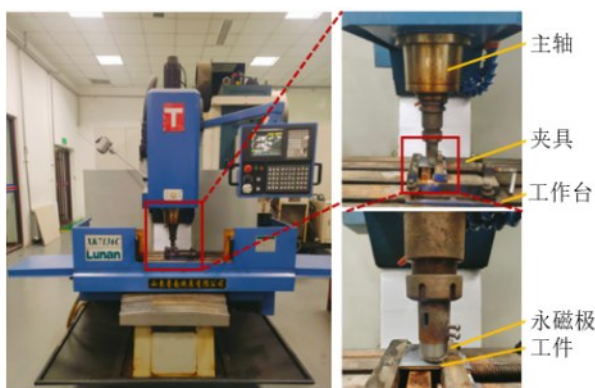


图3 磁力研磨加工设备

Fig.3 Magnetic abrasive finishing equipment

3 实验设计

在实验过程中,采用响应曲面方法中的Box-Behnken分析法^[15]规划了主轴转速、进给速度、加工

间隙自变量因子。将主轴转速(X_1)的零水平确定为1700 r/min,进给速度(X_2)的零水平确定为15 mm/min,加工间隙(X_3)的零水平为1.8 mm。磁力研磨加工参数水平的设定如表1所示。

表1 研磨因素水平及编码值表

Tab.1 Table of factors levels and coding value

影响因子	影响水平及编码		
	-1	0	1
主轴转速/(r·min ⁻¹)	1600	1700	1800
进给速度/(mm·min ⁻¹)	10	15	20
加工间隙/mm	1.5	1.8	2.1

为获得磁力研磨参数(自变量)对表面粗糙度(因变量)的影响规律,需要建立响应曲面方法中目标响应和自变量因子之间的二次线性回归方程^[16],如公式(1)所示。

$$R_a = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \alpha_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

式(1)中: α_0 为常数项; α_i 表示线性影响系数; α_{ii} 表示二次线性影响系数; α_{ij} 表示交互作用影响系数。

4 结果与分析

4.1 表面粗糙度值

采用NDT150型号的手持粗糙度测试仪测量工件表面粗糙度。为提高实验数据的准确性,在工件被加工区域随机选取7个采样点,取其平均值作为该组研磨参数下的表面粗糙度值。在磁力研磨前分别用100#、300#和800#的耐水性砂纸逐级打磨工件,实验数据如表2所示。

根据表2所得到的实验数据及公式(1),借助Design Expert 10.0软件,得到表面粗糙度与各研磨参数之间的二次响应曲面模型的回归方程式:

$$R_a = 0.046 - 0.008637X_1 - 0.002275X_2 + 0.003112X_3 + 0.001275X_1X_2 + 0.004X_1X_3 - 0.001225X_2X_3 + 0.022X_1^2 + 0.002805X_2^2 + 0.006530X_3^2 \quad (2)$$

图4为表面粗糙度值实际值与预测值对比分布,可以看出两者较吻合。图5为表面粗糙度预测值与残差的分布趋势,图中的点分布越无序和未呈现一定的规律性,表明预测值与标准残差不存在关系。

表3中方差分析模型显著度为<0.0001,表明所建立的实验模型是显著的;失拟项显著度为0.5788>0.05,说明失拟项不显著,建立的二次线性回归方程

有效。多元相关系数 $R^2=0.9796$, 调整后相关系数 $R^2_{Adj}=0.9533$, 说明表面粗糙度模型能够解释 95.33 % 的响应值。 X_1 、 X_1^2 在 $P<0.0001$ 水平下高度显著, X_3 、 X_1X_3 、 X_3^2 在 $P<0.05$ 水平下显著。对比 F 值可以得出 3 个主要研磨参数的影响度排序为 $X_1>X_3>X_2$ 。

表 2 表面粗糙度(R_a)实验实测值Tab.2 The measured value of surface roughness (R_a)

序号	主轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	加工间隙/mm	$R_a/\mu\text{m}$
1	-1	-1	0	0.0821
2	1	-1	0	0.0650
3	-1	1	0	0.0730
4	1	1	0	0.0610
5	-1	0	-1	0.0850
6	1	0	-1	0.0570
7	-1	0	1	0.0830
8	1	0	1	0.0710
9	0	-1	-1	0.0521
10	0	1	-1	0.0520
11	0	-1	1	0.0610
12	0	1	1	0.0560
13	0	0	0	0.0435
14	0	0	0	0.0450
15	0	0	0	0.0432
16	0	0	0	0.0470
17	0	0	0	0.0510

表 3 回归模型的方差分析及显著性检验

Tab.3 Analysis of variance and significance test of regression model

项目	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	3.073×10^{-3}	9	3.414×10^{-4}	37.33	<0.0001
X_1	5.969×10^{-4}	1	5.969×10^{-4}	65.26	<0.0001
X_2	4.414×10^{-5}	1	4.414×10^{-5}	4.53	0.0709
X_3	7.750×10^{-5}	1	7.750×10^{-5}	8.47	0.0226
X_1X_2	6.502×10^{-6}	1	6.502×10^{-6}	0.71	0.4270
X_1X_3	6.400×10^{-5}	1	6.400×10^{-5}	7.00	0.0332
X_2X_3	1.260×10^{-6}	1	1.260×10^{-6}	0.71	0.4445
X_1^2	1.952×10^{-3}	1	1.952×10^{-3}	213.39	<0.0001
X_2^2	3.313×10^{-5}	1	3.313×10^{-5}	3.62	0.0987
X_3^2	1.795×10^{-4}	1	1.795×10^{-4}	19.63	0.0030
残差	6.402×10^{-5}	7	9.146×10^{-6}	—	—
失拟项	2.295×10^{-5}	3	7.651×10^{-6}	0.75	0.5788
纯误差	4.107×10^{-5}	4	1.027×10^{-5}	—	—
总和	3.137×10^{-3}	16	—	—	—

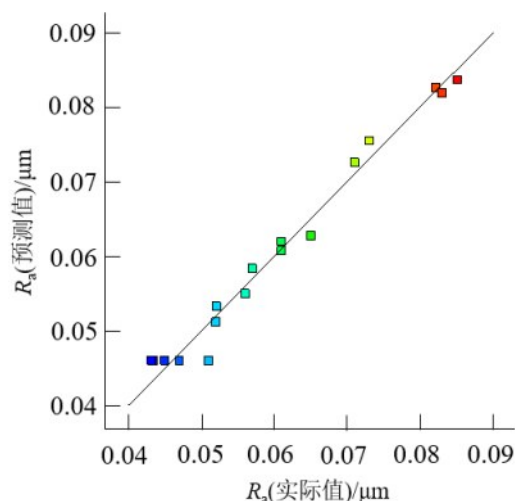


图 4 实际值与预测值对比

Fig.4 Comparison of predicted value with actual value

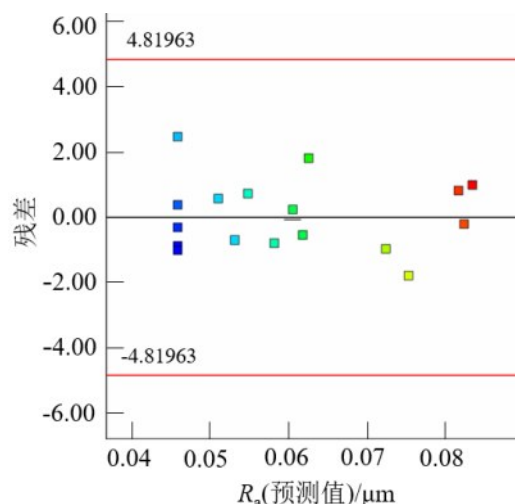


图 5 预测值与残差的变化趋势

Fig.5 Variation trend of predicted values and residuals

图 6(a)展示了主轴转速和进给速度共同影响下工件表面粗糙度变化规律。从图 6(a)可以看出,无论在高或低的进给速度下,表面粗糙度 R_a 随主轴转速的增大呈先减小后增大的趋势。当转速过高时,磁性磨料向心力减小,表面粗糙度反而呈现上升的趋势^[17];当转速过低时,工件凹凸不平面不能被轻易去除,从而导致较差的表面质量和较低的研磨效率。

图 6(b)展示了主轴转速和加工间隙共同影响下工件表面粗糙度值变化规律。加工间隙影响永磁极在加工区域产生的磁力,加工间隙较低时,磁力研磨能力强,可以进行更深的微切削。但加工间隙过小,会影响磁性磨粒刷的自锐性,磁性磨料不能及时

得到翻过和更新,变钝的磨粒继续与工件表面摩擦(不产生切削作用),表面质量改善会变得缓慢,甚至会引起二次划痕等不良影响^[18];加工间隙过大时,虽然能改善磨料的自锐性,但铁基体受到的磁力会减弱,影响加工效率^[19]。

图6(c)展示了进给速度和加工间隙共同影响下工件表面粗糙度值变化规律。进给速度决定了磁性磨料与工件表面的作用时间,在加工小间隙下,选择适当的进给速度比在大间隙下能获得更小的表面粗糙度。

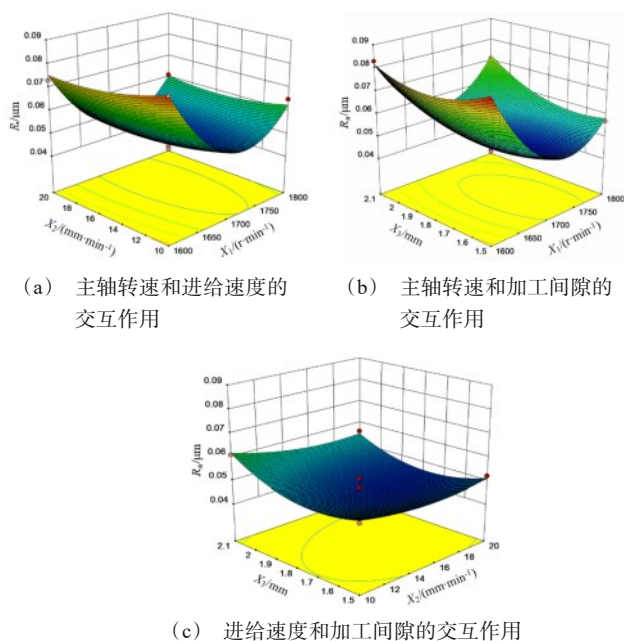


图6 研磨参数对磁力研磨后310S不锈钢表面粗糙度的影响
Fig.6 Effect of finishing parameters on surface roughness of 310S stainless steel after MAF

4.2 研磨前后残余应力对比

残余应力测试设备为芬兰 Stresstech Xstress 3000 G2R 残余应力仪,针对奥氏体不锈钢材质的工件,选用Mn靶材,设置参数为:工作电压30 kV,工作电流6 mA,泊松比0.28,密勒指数111, Ψ 角 $\pm 45^\circ$, Ψ 摇摆角 $\pm 0^\circ$,曝光时间20 s,衍射角 154° 。不同研磨时间段工件表面的残余压应力值如图7所示。

在磁力研磨过程中,工件表面与磁性磨料存在着多种相互作用,使工件表面既受微切削作用,又受挤压,还存在电化学过程,因此工件表面的应力分布状态得到明显的改善^[20]。残余压应力数值的变化也

说明了在本实验优化后的条件下,磁力研磨是降低耐热类不锈钢残余应力值的有效方法之一,对表面完整性起到改善作用。

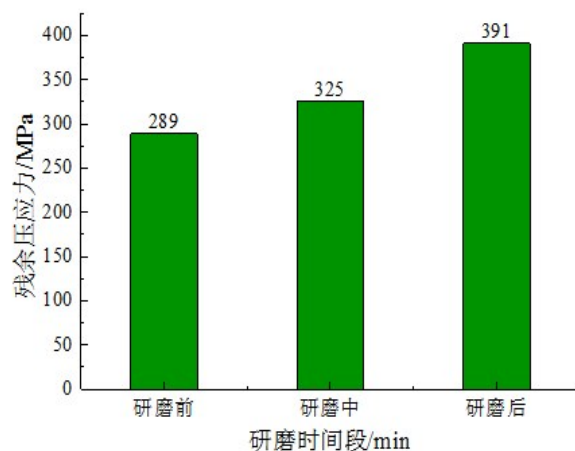


图7 研磨前后工件表面残余应力变化图

Fig.7 Picture of residual stress variation on samples surface before and after finishing

4.3 表面形貌

为了进一步验证响应曲面法优化后的研磨参数组合对310S不锈钢的影响,分别采用MicroXAM-100型号的白光干涉仪和AXIO Lab.A1型号的金相显微镜对研磨不同时间段内310S不锈钢工件进行表面表征,图8~11分别为磁力研磨前后工件表面二维形貌、三维形貌、表面轮廓曲线及外观形貌图。

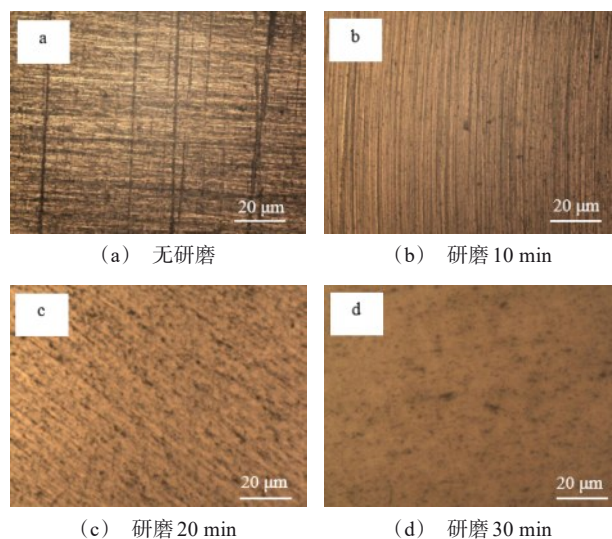


图8 磁力研磨前后工件表面二维形貌变化图

Fig.8 Two-dimensional morphologic change of sample surface before and after MAF

未研磨前,从图8(a)可以看出,用砂纸打磨后,工件表面留下了大量纵横向深浅度不一的划痕。随着加工过程的进行,工件表面经研磨留下的纹理比较清晰,由砂纸留下的加工痕迹已经基本去除;在研磨 20 min 时,磨粒留下的划痕开始变浅变少,但在工件表面还有很多未被去除的深浅不一的划痕;在研磨后期,随着工件表面质量逐步得到改善,单位面

积上同时参与研磨的有效磨粒数增加,最终研磨后的表面质量比较均匀和光滑,无划痕和裂纹的出现。图9变化的三维形貌图展示了工件表面上的划痕和毛刺基本被去除,表面微观形貌得到大幅度改善,图10为表面粗糙度研磨前后对比图,表面粗糙度由初始的 $0.350\ \mu\text{m}$ 降至 $0.039\ \mu\text{m}$,达到表面光整目的。

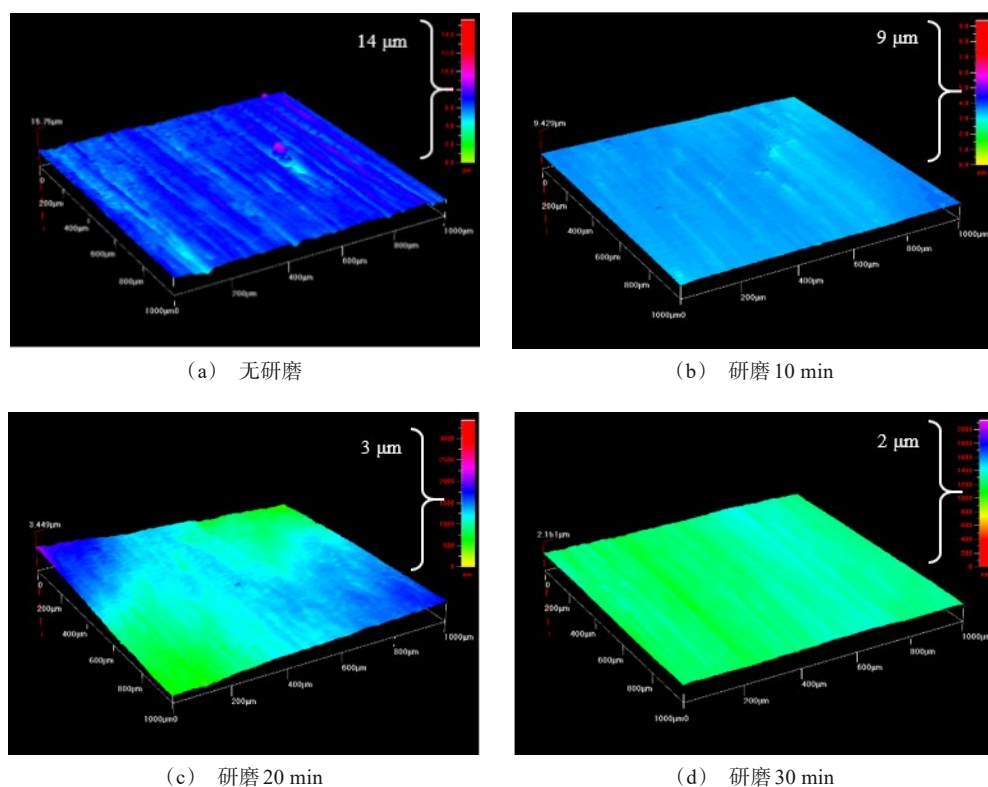


图9 磁力研磨前后工件表面三维形貌变化图

Fig.9 Three-dimensional morphologic change of sample surface before and after MAF

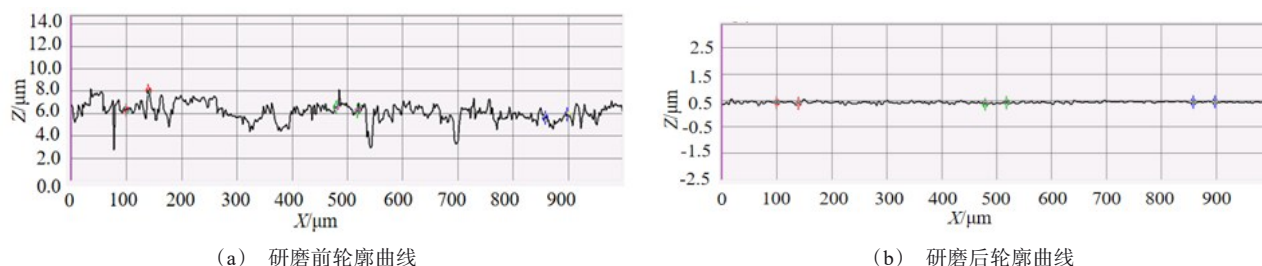


图10 磁力研磨前后工件表面粗糙度轮廓曲线

Fig.10 Surface roughness profile curves before and after MAF



图11 磁力研磨前后310S不锈钢外观

Fig.11 Appearance of 310S stainless steel before and after MAF

5 结语

(1)文中进行了310S不锈钢材料的磁力研磨光整加工实验,说明了此工艺加工不锈钢等难加工材料的优势,并取得了良好的实验效果。

(2)对所建立的回归模型进行了方差分析及显著性检验后得出主轴转速对表面粗糙度 R_a 的影响作用最大,其次是加工间隙,进给速度的影响作用最小。

(3)响应曲面法优化后得到最优的研磨参数组合为:主轴转速1720 r/min,进给速度16 mm/min,加工间隙1.8 mm,磁力研磨后310S不锈钢表面粗糙度 R_a 为0.039 μm ,达到镜面效果。此外工件表面的残余压应力得到进一步提升,很好地延长了其疲劳寿命。

参考文献

[1] Wu J Z, Zou Y H, Sugiyama H. Study on ultra-precision magnetic abrasive finishing process using low frequency alternating magnetic field[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 386: 50-59.

[2] Jain V K, Kumar P, Behera P K, et al. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process[J]. Wear, 2001, 250 (1-12): 384-390.

[3] Wang Y, Hu D J. Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(1): 43-49.

[4] 刘文浩,陈燕,李文龙,等.磁粒研磨加工技术的研究进展[J].表面技术,2021,50(1): 47-61.

[5] 杜嘉静,张桂香,朱培鑫,等.加工间隙对CBN磁性磨料研磨904L不锈钢表面完整性的影响[J].表面技术,2021,50(6): 338-346.

[6] 袁美霞,刘少楠,高振莉,等.微细铣削不锈钢310S表面完整性试验研究[J].表面技术,2017,46(7): 240-244.

[7] 张冠男.高端耐热奥氏体不锈钢310S MIG焊接接头组织及力学性能研究[D].太原:太原科技大学,2020.

[8] 代国义.分布式永磁极的设计及其光整加工不锈钢薄板的实验研究[D].太原:太原理工大学,2016.

[9] 崔运涛,张桂香,崔同磊,等.磁力研磨75°梯形开槽永磁极研究[J].制造技术与机床,2020(8): 109-113.

[10] 陈宇辉.平面磁粒研磨均匀性控制工艺研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2020.

[11] 肖作义,赵玉刚,吴文权.磁极形状对磁粒光整加工的影响[J].机械制造,2003(8): 45-46.

[12] 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, 107.

[13] 孟庆涛.磁力研磨加工实验研究[D].大连:大连理工大学,2006.

[14] 张桂香.雾化快凝磁性磨料制备及其磁力光整加工性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.

[15] 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内壁磁粒研磨工艺参数研究[J].表面技术,2021,50(10): 384-393.

[16] 崔同磊,张桂香,崔运涛,等.响应曲面法优化铜钨合金材料的磁力光整加工参数[J].电镀与涂饰,2020,39(17): 1209-1214.

[17] 梁伟,张桂香,张鹏,等.磁力研磨光整加工 ZrO_2 陶瓷材料试验研究[J].表面技术,2018,47(9): 310-316.

[18] 肖作义.磁力研磨光整加工技术的实验研究[J].模具工业,2004(12): 47-50.

[19] 肖阳,孙友松,陈光忠.永磁场磁力研磨TC11钛合金的实验研究[J].表面技术,2017,46(2): 229-234.

[20] 程肖冰.强永磁材料平面磁极头的开发及其实验分析[D].太原:太原理工大学,2002.