

基于低频交变磁场的陶瓷管内表面磁力研磨加工^{*}

刘文浩 陈 燕 张东阳

(辽宁科技大学机械工程与自动化学院 鞍山 114051)

摘要: 为解决陶瓷管内表面质量问题,提高磨料利用率,寻求低频交变磁场下磁力研磨加工的最佳工艺参数,利用 Maxwell 软件对加工区域进行磁场仿真,采用 Box-Behnken 进行响应面试验设计并优化工艺参数,用 ANOVA 验证表面粗糙度预测模型的合理性。结果表明:低频交变磁场加工区域中磁场强度可达 650.04 kA/m,磁感应强度可达 0.82 T,表面粗糙度预测模型调整后的拟合优度 R_{adj}^2 为 91.65%,经过响应面优化后得到的最佳工艺参数为工件转速 977.78 r/min,铁磁粒子粒径 210.61 μm ,金刚石粒子粒径 3.35 μm ,电流频率 3.01 Hz,使用调整后的工艺参数加工氧化铝陶瓷管内表面 120 min 后,表面粗糙度 R_a 由 2.25 μm 降至 0.34 μm ,使用低频交变磁场进行磁力研磨可以有效提高陶瓷管内表面质量。

关键词: 磁力研磨; 交变磁场; 工艺参数; Al_2O_3 陶瓷; 表面粗糙度; 响应面分析

中图分类号: TG356

Magnetic Abrasive Finishing of Ceramic Tube Inner Surface Based on Low Frequency Alternating Magnetic Field

LIU Wenhao CHEN Yan ZHANG Dongyang

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

Abstract: In order to solve the problem of inner surface quality of ceramic tube, improve the utilization rate of abrasive, and seek the best process parameters of magnetic abrasive finishing under low frequency alternating magnetic field, Maxwell software was used to simulate the magnetic field in the processing area. Box Behnken was used to design the response surface test and optimize the process parameters. The rationality of the surface roughness prediction model was verified by ANOVA. The results show that the magnetic field intensity can reach 650.04 kA/m and the magnetic induction intensity can reach 0.82 T in the low frequency alternating magnetic field processing area. The fitting goodness of surface roughness prediction model adjusted R_{adj}^2 is 91.65%. The optimum process parameters after response surface optimization are as follows: workpiece speed 977.78 r/min, ferromagnetic particle size 210.61 μm , diamond particle size 3.35 μm , current frequency 3.01 Hz. The surface roughness of the inner surface of alumina ceramic pipe is decreased from R_a 2.25 μm to R_a 0.34 μm after 120 min processing with the adjusted process parameters. The inner surface quality of ceramic tube can be effectively improved by using low frequency alternating magnetic field for magnetic abrasive finishing.

Keywords: magnetic abrasive finishing; alternating magnetic field; process parameters; alumina ceramics; surface roughness; response surface methodology

0 前言

陶瓷材料具有高强度、耐磨性和耐腐蚀性等优异的物理化学性能,能够在各种复杂恶劣的环境下

保持优异的性能^[1-2],在航空航天、化工、冶金、生物医疗和电子等领域起着越来越关键的作用,具有十分广阔的应用发展前景^[3-4]。常用的陶瓷零件成型方法是将粉体、粘结剂和可塑剂等按照一定比例混

^{*} 国家自然科学基金(51775258)、辽宁省自然科学基金重点(20170540458)、精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258), Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458), and Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Processing (B201703).

20210425 收到初稿, 20210601 收到修改稿

合后加压烧结制成,因此成型后的陶瓷零件表面较粗糙,表面质量较差,无法应用于对精度要求较高的工作环境,所以需要成型后的陶瓷零件表面进行进一步处理^[5-6]。

传统上对陶瓷零件加工常采用金刚石砂轮磨削的办法,但由于陶瓷本身硬度较高且脆性较大,磨削加工完成后陶瓷表面易出现微裂纹,并且磨削温度较高,砂轮中的金刚石易碳化而降低砂轮使用寿命,频繁更换砂轮会使加工成本升高,因此迫切需要一种新的加工方法对陶瓷零件表面进行加工^[7-9]。马哲伦等^[10]采用激光辅助磨削加工的方法对氧化铝陶瓷零件表面进行加工,通过激光将零件表面进行软化,然后使用金刚石砂轮进行磨削,该加工方法有效延长了砂轮的使用寿命,减少了磨削后工件表面产生的微裂纹,但不适用于加工面积较大的零件。ABDO等^[11]使用旋转超声加工对氧化铝陶瓷表面进行了加工,并使用了多目标遗传算法对工艺参数进行了优化,最终得到了良好的表面质量,但该加工方法对设备有比较高的要求,加工成本较高。

磁力研磨加工是一种利用磁场带动磁性磨料对工件表面进行研磨的特种加工方法,具有自锐性、自适应性、柔性和仿形性等卓越的加工特点,常常应用于工件的精加工中^[12-13]。韩冰等^[14]使用振动辅助磁力研磨的方法对氧化铝陶瓷管内表面进行了加工,形成了独特的网状研磨轨迹,得到了较好的表面质量,但该方法将永磁体内置于管内,磁性磨料得不到更新,磨料使用寿命较短。XIE等^[15]研究了使用交变磁场研磨板类零件的机理,验证了交变磁场作为磁力研磨磁力源的可行性。本文在使用磁力研磨

的基础上,开发一种新型的低频交变磁场产生装置,并使用该装置对氧化铝陶瓷管内表面进行加工,通过设计 Box Behnken 试验方案,探究了工件转速、铁磁粒子粒径、金刚石粒子粒径和电流频率四个主要工艺参数对表面粗糙度的影响规律,并使用响应面优化法对工艺参数进行了优化,得到了最佳工艺参数,根据实际加工情况,调整工艺参数,有效地完成了对陶瓷管件内表面的精密加工。

1 低频交变磁场下磁力研磨加工机理

1.1 磁力研磨加工机理

低频交变磁场下磁力研磨加工机理如图1所示,管件水平放置在磁场中,将由铁磁粒子、金刚石粒子和研磨液混合而成的磨料放置于管件内部,铁磁粒子为金刚石粒子提供牵引力,金刚石粒子主要起研磨管件内壁的作用,在低频交变磁场中,磁性磨料中的铁磁粒子会被磁化,磁化后的铁磁粒子在外加磁场的牵引下有序地排列在管件内部,并且受到磁场力的作用后会挤压金刚石粒子,使金刚石粒子压附在管件内表面,管件发生转动时,磁性混合磨料与管件内表面发生相对运动,对管件内表面进行刻划、摩擦、滚压等作用,完成对管件内表面表层材料的去除,同时,随着交变磁场的周期性变化,磁场方向不断发生变化,磁性混合磨料也会随着磁场方向的改变在管件内部上下运动,从而不断地振动、翻滚,实现混合磨料的自适应更新,最终实现对管件内表面的光整加工^[16-18]。

磁性混合磨料中铁磁粒子在磁场中所受的磁场力可由式(1)~(3)表示^[15]:

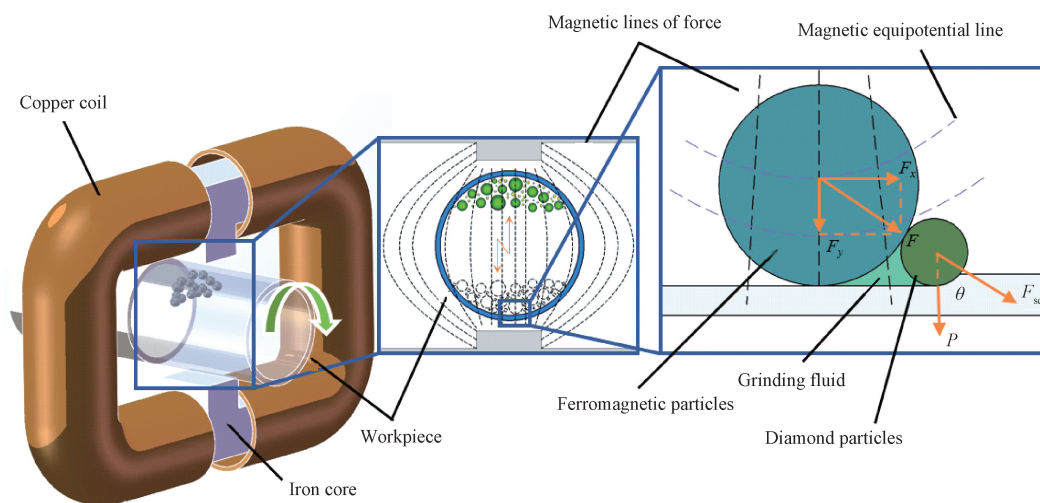


图1 低频交变磁场下磁力研磨加工机理

Fig. 1 Mechanism of magnetic abrasive finishing in low frequency alternating magnetic field

$$F_x = V\chi\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$F_y = V\chi\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$

式中, F 为铁磁粒子在磁场中所受的合力, F_x 为合力 F 在沿磁等势线方向上的分力, F_y 为合力 F 沿磁力线方向的分力, V 为铁磁粒子的体积, χ 为铁磁粒子的相对磁导率, H 为铁磁粒子所处位置的磁场强度, $(\partial H/\partial x)$ 和 $(\partial H/\partial y)$ 分别为磁场强度 H 沿磁等势线方向和磁力线方向上的梯度分量。在磁力研磨加工过程中, 工件表面材料的去除率与研磨压力成正比相关^[19], 研磨粒子对管内壁的研磨压力主要是由铁磁粒子对研磨粒子的挤压提供的, 由于磁场作用力 F 与挤压力 F_s 之间的夹角非常微小, 可认为二者是相等的, 研磨压力 P 的表达式如式(4)所示^[20]:

$$P = F_s \cos \theta = F \cos \theta \quad (4)$$

式中, F_s 为铁磁粒子对研磨粒子的挤压力, θ 为挤压力与研磨压力之间的夹角。假设铁磁粒子和研磨粒子均为理想的球形刚体模型, 由于磁性混合磨料中铁磁粒子和研磨粒子的粒径不尽相同, 二者粒径的不均匀性会使夹角 θ 产生微小变化, 故引入微小量 $\Delta\delta$ 来表示粒径不均匀性对夹角 θ 的影响, 夹角 θ 可由式(5)表示:

$$\theta = \arccos \left(\frac{R - r + \Delta\delta}{R + r + \Delta\delta} \right) \quad (5)$$

式中, R 为铁磁粒子的半径, r 为金刚石研磨粒子的半径, $\Delta\delta$ 为引入的微小量。将式(3)与式(5)代入式(4)可得到最终研磨压力 P 的表达式, 如式(6)所

示, 从中可以看到磁场强度、铁磁粒子半径和金刚石研磨粒子半径是影响研磨压力的主要因素。

$$P = \frac{4\pi R^3 \chi \mu_0 H (R - r + \Delta\delta)}{3(R + r + \Delta\delta)} \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2} \quad (6)$$

1.2 磁场仿真分析

为了进一步探究加工区域中磁场强度对磁性颗粒的影响, 利用 Maxwell 软件对加工区域进行磁场有限元仿真分析。依据实际电磁装置的构造, 使用 Solidworks 软件进行建模, 将建立好的模型导入 Maxwell 中进行仿真, 仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 磁场强度仿真参数

Table 1 Simulation parameters of magnetic field intensity

Parameters	Values
Coil turns/r	1 400
AC effective voltage/V	220
Coil resistance/ Ω	9.2
Maximum element length/mm	20
Frequency/Hz	3
Pole distance/cm	4

模型的仿真示意图如图 2 所示, 从图中可以直观地观察到加工区域的磁场强度要强于非加工区域, 这更有利于磁性磨料在加工区域聚集, 为了进一步量化仿真分析加工区域的磁场强度, 在两个磁极之间作一条直线, 即图 2 中标注为测量区域的黑线, 测定直线上的磁场强度随时间和距离的变化趋势, 测量区域上的磁场强度变化趋势如图 3 所示, 通过分析加工区域处距离与磁场强度的关系, 从图中可以看出加工区域处的磁场强度分布较为均匀, 且最高磁场强度可达 650.04 kA/m。同时, 通过观察仿

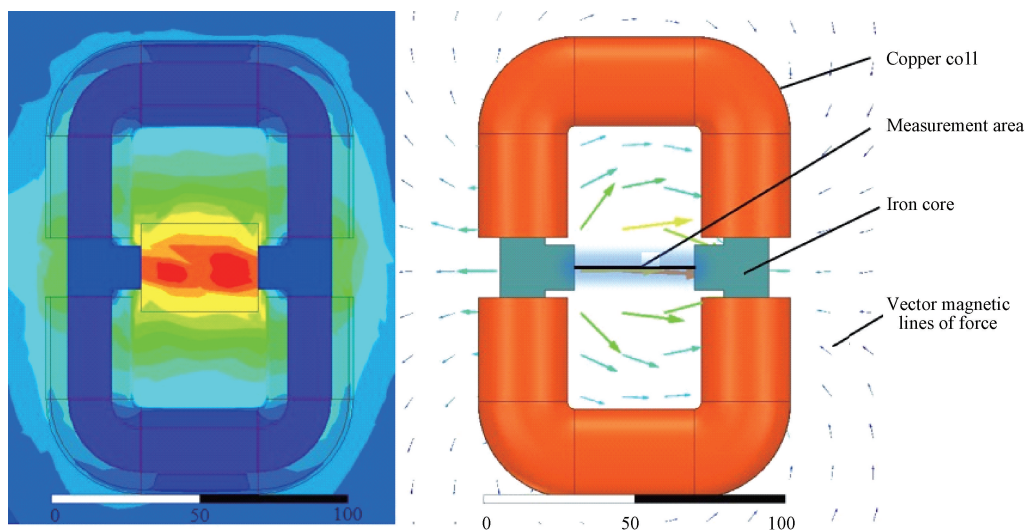


图 2 电磁仿真装置模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic simulation device model

真结果中时间与磁场强度的关系可以发现,加工区域中的磁场强度是随着时间呈周期性变化的,并且随着电流方向的改变,磁场方向每经过半个周期就会发生改变,磁性混合磨料也会随着磁场方向和强度的变化在管件内部上下运动。

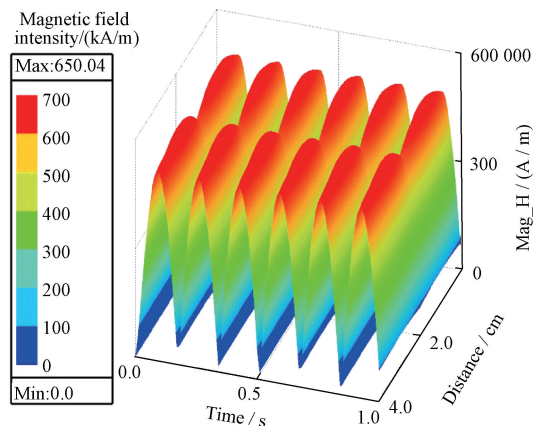


图3 加工区域磁场强度变化趋势图

Fig. 3 Variation trend of magnetic field intensity in processing area

加工区域中的磁场强度与线圈中的电流密切相关,根据霍普金森定律,线圈中电流、磁场强度和磁感应强度三者的周期性变化是相同的,线圈中低频交流电流随时间的周期性变化如图4所示,虽然磁场强度 H 与磁感应强度 B 成正相关,但在实际中常常使用磁感应强度 B 来描述磁场的强弱,为了更好地描述交变磁场中磁感应强度的周期性变化,分别对周期为 $T/4$ 、 $T/2$ 、 $3T/4$ 和 T 时加工区域的磁感应强度进行仿真,结果如图5所示,从图中可以看出在 $T/4$ 和 $3T/4$ 时,磁感应强度最大,且最高可达 0.82 T,从仿真结果可以看出,相较于使用永磁体作为磁力源进行磁力研磨,使用低频交流电作为磁力源也可以很好地满足磁力研磨加工对磁感应强度的要求。

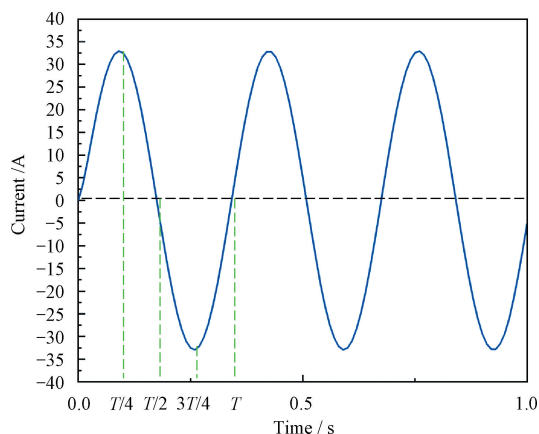


图4 低频交流电波形图

Fig. 4 Oscillogram of low frequency alternating current

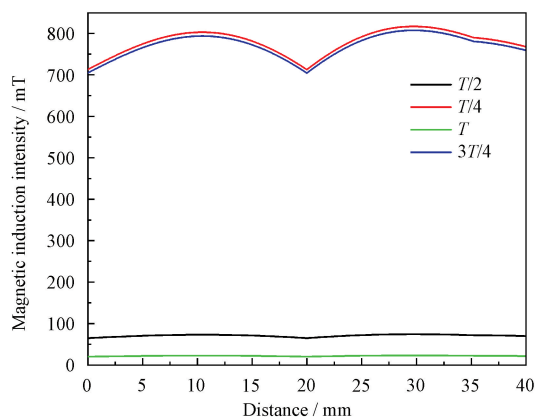


图5 不同周期下磁感应强度的变化

Fig. 5 Variation of magnetic induction intensity in different periods

2 试验

2.1 试验装置

试验所需装置由数控车床和电磁装置组成,如图6所示,电磁装置主要由可调频电源、铜制线圈和铁心组成,通过调节可调频电源中的调频旋钮可设置相应的频率,线圈缠绕方式如图7所示。

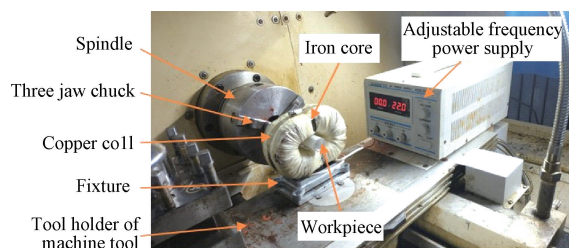


图6 试验装置

Fig. 6 Experimental device

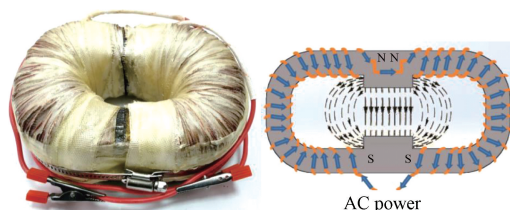


图7 线圈实物图及绕制方式

Fig. 7 Coil physical drawing and winding mode

2.2 试验条件

低频交流电磁力研磨加工的试验条件如表2所示,所加工工件为带一定锥度的氧化铝陶瓷管,陶瓷管两端开口的直径分别为 $\phi 25$ mm 和 $\phi 20$ mm,管长为 142 mm,由于管件材质较硬,研磨过程中易产生大量的热,所以采用散热性较好的水基研磨液,研磨液用量为 10 mL,称取的铁磁粒子质量为 30 g,金刚石磨粒质量为 3 g,为保证磁性混合磨料能够对陶瓷管内表面充分研磨,将加工时间设置为 120 min。

表 2 试验条件

Table 2 Experimental conditions

Name	Specification
Workpiece material	Al ₂ O ₃
Workpiece size/(mm×mm×mm)	φ25×φ20×142
Grinding fluid/mL	10
Processing time/min	120
AC effective voltage/V	220

在研磨加工陶瓷管前,在管中加入由铁磁粒子、金刚石粒子和研磨液三者混合好的磁性磨料,将陶瓷管装夹在车床的主轴三爪卡盘上,保证陶瓷管与主轴的同轴度,同时把电磁装置固定在和机床刀架一体的承载板上,保证装置能和机床刀架一起轴向往复移动,陶瓷管在机床主轴的带动下产生旋转运动,电磁装置随刀架承载板做轴向往复运动,启动可调频电源后,在低频交变磁场的作用下,磁性混合磨料在管件内部作周期性的上下往复运动,促进研磨粒子对管件内表面进行划刻、摩擦和滚压,从而实现对管件内表面的光整加工。

对陶瓷管内壁加工完成后,使用 JB-8E 触针式表面粗糙度仪,将触针伸至管内约 70 mm 处,启动表面粗糙度仪,使触针沿管内壁轴向方向运动,同一位置重复测量 3 次后,将结果取平均值记录下来,然

后使用 3 D 超景深电子显微镜(VHX-500F)对管件内壁表面形貌进行进一步观测。

2.3 工艺参数优化设计

为了对低频交流电磁力研磨加工的工艺参数进行优化,将工件转速、铁磁粒子粒径、金刚石粒子粒径和电流频率作为主要影响因素,并设计了四因素三水平的因素水平表进行试验,试验因素水平表如表 3 所示。表中,工件转速设置为 800 r/min、1 000 r/min 和 1 200 r/min 三水平;铁磁粒子粒径设置为 150 μm、200 μm 和 250 μm 三水平;金刚石粒子粒径设置为 2.5 μm、3.5 μm 和 4.5 μm 三水平;电流频率设置为 2 Hz、3 Hz 和 4 Hz 三水平。

表 3 试验因素水平表

Table 3 Test factor level table

Parameters	Code name	Levels		
		-1	0	1
Rotational speed/(r/min)	X_1	800	1 000	1 200
Ferromagnetic particles size/μm	X_2	150	200	250
Diamond particles size/μm	X_3	2.5	3.5	4.5
Current frequency/Hz	X_4	2	3	4

使用响应面曲面设计中的 Box Behnken 设计创建 27 组试验方案,中心点数为 3,区组数为 1,仿行数为 1,试验方案设计如表 4 所示。

表 4 Box Behnken 试验设计及结果

Table 4 Box Behnken experimental design and results

Exp. No.	Rotational speed/(r/min)	Ferromagnetic particles size/μm	Diamond particles size/μm	Current frequency/Hz	Surface roughness $Ra/\mu\text{m}$
1	1 000	150	4.5	3	0.74
2	800	250	3.5	3	0.60
3	1 200	200	3.5	4	0.76
4	800	150	3.5	3	0.67
5	1200	200	3.5	2	0.68
6	1000	150	3.5	4	0.69
7	1000	150	2.5	3	0.68
8	1 200	150	3.5	3	0.82
9	800	200	3.5	4	0.63
10	1 000	200	3.5	3	0.20
11	1 000	200	3.5	3	0.20
12	1 000	250	4.5	3	0.64
13	1 000	250	2.5	3	0.40
14	1 000	200	4.5	2	0.52
15	800	200	2.5	3	0.58
16	800	200	4.5	3	0.65
17	1 000	250	3.5	2	0.50
18	1 000	200	2.5	2	0.49
19	1 000	200	3.5	3	0.20
20	1 000	250	3.5	4	0.36
21	1 200	200	4.5	3	0.78
22	1 200	250	3.5	3	0.72
23	1 200	200	2.5	3	0.70
24	1 000	200	4.5	4	0.56
25	1 000	150	3.5	2	0.66
26	1 000	200	2.5	4	0.47
27	800	200	3.5	2	0.55

根据试验方案,使用响应面优化器对工艺参数进行优化,优化后的工艺参数为工件转速 977.78 r/min,铁磁粒子粒径 210.61 μm ,金刚石粒子粒径 3.35 μm ,电流频率 3.01 Hz,由于试验条件的限制,无法准确设定为优化后的工艺参数,参考实际的情况,调整优化后的工艺参数,调整后的工艺参数见表(5),并使用调整后的最优工艺参数对陶瓷管内表面进行加工。

表5 调整后的最优工艺参数

Table 5 Optimal process parameters after adjustment

Parameters	Values
Rotational speed/(r/min)	980
Ferromagnetic particles size/ μm	200
Diamond particles size/ μm	3
Current frequency/Hz	3
Grinding fluid/mL	10
Processing time/min	120

3 结果与讨论

3.1 试验结果分析

使用 Box Behnken 设计的 27 组试验方案对管件内表面加工后,工件表面质量得到较大改善,原始表面粗糙度 Ra 约为 2.3 μm ,研磨加工 120 min 后,均降至 0.9 μm 以下,由于磁力研磨属于微量切削加工,加工过程中的材料去除量非常少,使用测量仪器进行材料去除量测量时误差对测量结果的影响较大,所以不宜采用电子天秤等称量方式评价表面材料去除效果。目前,表面粗糙度变化率(ΔRa)是一种评价表面材料去除效果的有效方法^[21], ΔRa 可用式(7)表示:

$$\Delta Ra = \frac{Ra_{\text{initial}} - Ra_{\text{final}}}{Ra_{\text{initial}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, ΔRa 为表面粗糙度变化率, Ra_{initial} 为原始表面粗糙度, Ra_{final} 为加工后表面粗糙度,使用低频交流电磁力研磨加工陶瓷管内表面 120 min 后,最低表面粗糙度 Ra 可降至 0.2 μm , ΔRa 可达 91.3%,材料去除效果显著。

在交流有效电压 220 V 下,使用调整后的最优工艺参数加工 120 min 后,工件 Ra 由 2.25 μm 降至 0.34 μm ,在加工过程中每隔 20 min 测量并记录一次 Ra , Ra 随加工时间的变化如图 8 所示。从图中可以看出,加工时间为 0~40 min 时,管件内表面粗糙度数值下降较快,在 40~80 min 时,表面粗糙度数值下降放缓,在 80~120 min 时,表

面粗糙度数值变化明显较慢,出现这种现象的原因是在开始阶段,由于“尖点效应”的存在,混合磨料会优先去除管件内表面波峰尖点处的材料,而且波峰尖点处材料较少,易于去除,所以表面粗糙度数值下降较快,而越往加工后期,一方面波峰尖点被去除后,波峰根部材料较多,去除缓慢,另一方面混合磨料的微切削刃被磨钝,也会导致加工效率变慢。

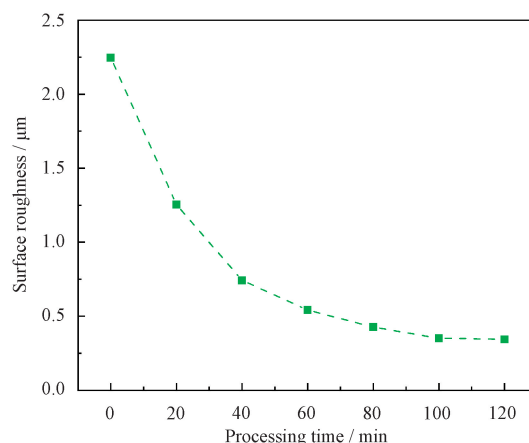


图8 工件表面粗糙度与加工时间的关系

Fig. 8 Variation of surface roughness of workpiece with processing time

加工前管件表面粗糙度及表面形貌如图 9a 所示,在管件表面存在大量波峰波谷和微裂纹,表面较粗糙,加工后的表面形貌如图 9b 所示,波峰和微裂纹基本被去除,工件表面形貌平坦,加工前后管件内表面宏观形貌如图 10 所示。从图 10a 可以看出,加工前陶瓷管内表面反光率非常低,表面暗淡无光泽,而经过磁力研磨加工后,如图 10b,陶瓷管宏观内表面反光率显著提高,达到了镜面效果,表面质量得到极大提升。

3.2 试验工艺参数分析

3.2.1 表面粗糙度预测模型

将表面粗糙度作为响应,使用数据分析软件 Minitab19 中的方差分析构建表面粗糙度的二次线性回归方程,探究各个工艺参数对表面粗糙度的影响效果,建立的线性数学模型如式(8)所示:

$$\begin{aligned} Ra = & 14.63 - 0.01451X_1 - 0.03618X_2 - \\ & 1.467X_3 - 0.717X_4 + 0.000007X_1^2 + \\ & 0.000087X_2^2 + 0.1825X_3^2 + 0.1400X_4^2 - \\ & 0.000001X_1X_2 + 0.000012X_1X_3 - \\ & 0.000001X_1X_4 + 0.000900X_2X_3 - \\ & 0.000850X_2X_4 + 0.0150X_3X_4 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, X_1 为工件转速, X_2 为铁磁粒子粒径, X_3 为金

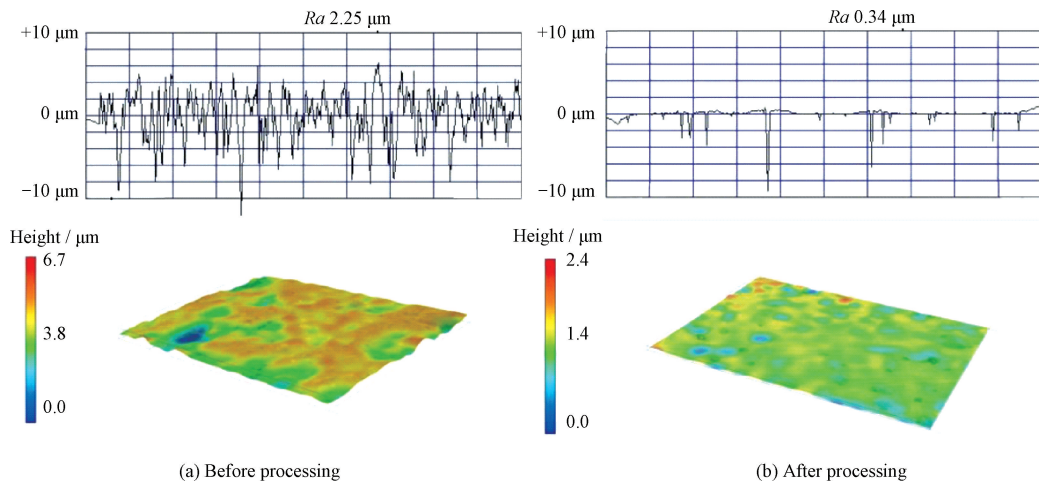
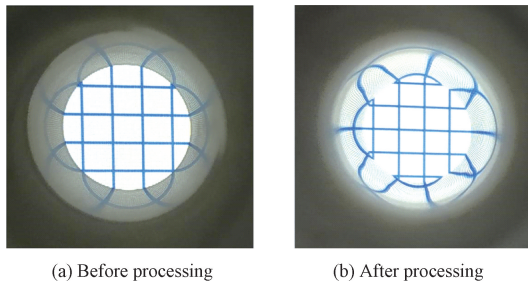


图 9 加工前后表面粗糙度和表面形貌

Fig. 9 Surface roughness and surface topography before and after machining



(a) Before processing

(b) After processing

图 10 加工前后管件内表面宏观形貌图

Fig. 10 Macro appearance of inner surface of pipe before and after process

刚石粒子粒径, X_4 为电流频率, 回归的拟合优度 R^2

为 96.15%, 调整后的拟合优度 R^2_{adj} 降为 91.65%, 二者相差不大且拟合优度 R^2 的值接近 1, 说明该回归模型的拟合效果较好, 模型具有较好的代表性, 模型优化出来的工艺参数合理^[22]。

3.2.2 工艺参数对表面粗糙度的影响

将工件转速、铁磁粒子粒径、金刚石粒子粒径和电流频率作为主要影响因子, 构建因子影响图分析工艺参数对表面粗糙度的影响, 工艺参数对表面粗糙度的影响如图 11 所示, 从图中可以看出工件表面粗糙度随着各个工艺参数数值的增加均呈现先降低后升高的趋势。

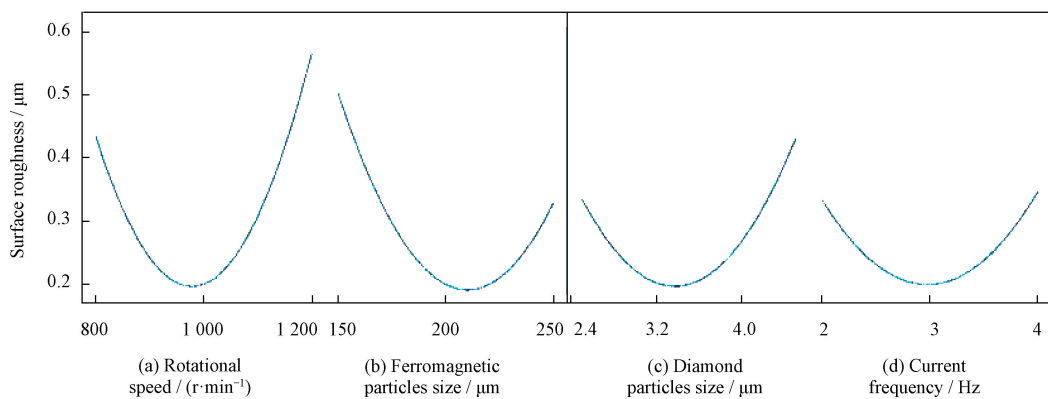


图 11 工艺参数对表面粗糙度的影响

Fig. 11 Influence of process parameters on surface roughness

如图 11a 所示, 从材料去除的研磨机理可以分析得出, 当工件转速在 800 r/min 左右时, 管件的转速相对较低, 而较低的管件转速导致研磨粒子的研磨速度过低, 降低了对管件内表面的材料去除效率, 以至于无法完全去除管件表面的波峰, 无法达到理想的加工效果; 当管件转速提升至 1 200 r/min 左

右, 转速过快时, 随着磁性混合磨料在管内的振动, 金刚石研磨颗粒与管件内表面碰撞更加激烈, 虽然提高了对管件内表面材料的去除效率, 但剧烈的碰撞使管件内表面易出现较深的沟壑, 从而使表面粗糙度升高, 同时, 转速增加使加工区域产生过多的磨削热, 加剧了研磨粒子的磨损。

如图 11b 所示,当铁磁粒子粒径较大时,在磁场中磁化后受到的磁场力最大,导致对金刚石粒子的挤压力过大,使金刚石粒子磨削陶瓷管时的研磨深度最大,在去除材料的同时,也对陶瓷管的内表面产生的划痕最深,最终导致了陶瓷管内表面粗糙度数值过大;当铁磁粒子粒径较小时,产生的效果正好相反,磁化后所受的磁场力最弱,使金刚石粒子进行研磨时的研磨压力过小,金刚石粒子的研磨深度较小,加工效率低下,没有去除陶瓷管内原始表面的突起和纹理,因此加工后效果也不理想,而当铁粒子粒径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 左右时,可以看到相对加工效果最好,陶瓷管内表面粗糙度值较低。

如图 11c 所示,在研磨加工过程中,当铁粒子的粒径和其他条件一定时,金刚石粒子的粒径对管件的表面粗糙度也有很大的影响,当金刚石粒子粒径较大时,铁磁粒子挤压金刚石粒子时的倾角过大,使铁磁粒子对研磨粒子的挤压力与研磨压力之间的夹角 θ 增大,导致研磨压力降低,研磨效率低下,最终陶瓷管内表面粗糙度数值较高;当金刚石粒子粒径较小时,金刚石粒子研磨过程中的研磨深度较小,陶瓷管内表面较大突起和波峰去除困难,影响加工后管件内表面的质量;而金刚石粒子粒径为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右时,研磨过程中,单个铁磁粒子上能裹附更多金刚石粒子,单位时间内,参与研磨加工的金刚石粒子的个数增多,提高了研磨加工效率,最终获得了较好的表面质量。

线圈中交变电流的频率决定了管内研磨粒子的振动频率,如图 11d 所示,当电流频率为 4 Hz 时,由于电流的频率过大,研磨粒子的振动频率过大,虽然可以促进研磨粒子的翻滚和切削刃的更新,让更多的研磨粒子参与研磨加工,但是频率过大,也会降低研磨粒子和管件内壁的接触时间,导致研磨时间过短,最终无法很好地去掉陶瓷管内表面的突起和波峰,导致内表面研磨质量不佳;当电流频率为 2 Hz 时,研磨粒子振动频率过小,使研磨粒子得不到充分的自适应更新,参与研磨管内壁的粒子个数少,且易使研磨粒子过早磨钝,导致材料表面去除量较小,研磨加工效果一般,所以表面粗糙度数值较大。

4 结论

(1) 通过理论分析得到影响研磨压力的主要因素是磁场强度、铁磁粒子半径和金刚石研磨粒子半径,并利用仿真软件对加工区域进行磁场仿真,验证了使用低频交变磁场作为磁力源对陶瓷管件进行磁粒研磨加工的可行性。

(2) 相较于使用永磁体作为磁力源进行磁粒研磨,使用低频交变磁场对陶瓷管内表面进行磁力研磨加工,可以促进混合磨料的翻滚更新,提高磨料的利用率。

(3) 可将响应面法应用于低频交变磁场下磁粒研磨工艺参数的优化,优化后的最佳工艺参数为:工件转速 977.78 r/min ,铁磁粒子粒径 $210.61\text{ }\mu\text{m}$,金刚石粒子粒径 $3.35\text{ }\mu\text{m}$,电流频率 3.01 Hz ,使用调整后的最佳工艺参数对陶瓷管内表面进行加工,最终表面粗糙度由 $2.25\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.34\text{ }\mu\text{m}$,管件内表面获得镜面效果,显著改善了陶瓷管内表面质量。

参 考 文 献

- [1] BAJRAKTAROVA V E, KORUNOSKA S V, KAPUSEVSKA B, et al. Contemporary dental ceramic materials, A review: Chemical composition, physical and mechanical properties, indications for use [J]. Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences, 2018, 6(9): 1742.
- [2] SOFIA D, BARLETTA D, POLETTI M. Laser sintering process of ceramic powders: The effect of particle size on the mechanical properties of sintered layers[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 215-224.
- [3] WEN Y, XUN S, HAOYE M, et al. 3D printed porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering: A review[J]. Biomaterials Science, 2017, 5(9): 1690-1698.
- [4] BABISK M P, AMARAL L F, SILVA R L, et al. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 2186-2195.
- [5] 许兆美. Al_2O_3 陶瓷材料纳秒激光铣削机理与工艺研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
XU Z M. Research on the mechanism and technology of nanosecond laser milling of Al_2O_3 ceramic materials [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [6] 王海豹, 陈凡立, 于莉, 等. 氧化铝陶瓷烧结缺陷的电子探针分析[J]. 枣庄学院学报, 2021, 38(2): 1-5.
WANG H B, CHEN F L, YU L, et al. Analysis on sintering defects of alumina ceramics by using EPMA [J]. Journal of Zaozhuang University, 2021, 38(2): 1-5. (in Chinese)
- [7] 陈彦涛, 段国林. 浆料直写成形 ZrO_2 陶瓷制备及烧结[J]. 中国陶瓷, 2021, 57(2): 24-32.
CHEN Y T, DUAN G L. Preparation and sintering of ZrO_2 ceramics by direct ink writing [J]. China Ceramics, 2021, 57(2): 24-32. (in Chinese)
- [8] 罗娟, 杨科伟, 王萌. 防弹陶瓷的烧结工艺及发展现状[J]. 陶瓷, 2020(9): 24-27.
LUO J, YANG K W, WANG M. Sintering process and development status of bulletproof ceramics [J]. Ceramics, 2020(9): 24-27. (in Chinese)

- [9] 陈大明, 赵世凯, 薛友祥, 等. 两层结构 Al_2O_3 陶瓷平板膜制备及缺陷分析[J]. 现代技术陶瓷, 2020, 41(5): 317-322.
- CHEN D M, ZHAO S K, XUE Y X, et al. Preparation and defect analysis of two-layer Al_2O_3 flat-sheet ceramic membranes [J]. Advanced Ceramics, 2020, 41(5): 317-322. (in Chinese)
- [10] 马哲伦, 于奎东, 董金龙, 等. Al_2O_3 陶瓷的激光辅助磨削机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 541-545.
- MA Z L, YU K D, DONG J L, et al. Laser-assisted grinding mechanism of Al_2O_3 ceramics [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020, 41(4): 541-545. (in Chinese)
- [11] ABDON B M A, EL-TAMIMI A, ALKHALEFAH H. Parametric analysis and optimization of rotary ultrasonic machining of zirconia (ZrO_2) ceramics [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 727(1): 012009.
- [12] 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.
- LIU W H, CHEN Y, LI W L, et al. Research progress of magnetic abrasive finishing technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 47-61. (in Chinese)
- [13] HENG L, KIM Y J, MUN S D. Review of superfinishing by the magnetic abrasive finishing process[J]. High Speed Machining, 2017, 3(1): 42-55.
- [14] 韩冰, 云昊, 陈燕, 等. 振动辅助磁力研磨超硬精密 Al_2O_3 陶瓷管内表面试验研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 169-176.
- HAN B, YUN H, CHEN Y, et al. Experimental study of vibration-assisted magnetic abrasive finishing on inner surface of superhard precise Al_2O_3 ceramic tubes[J]. Tribology, 2016, 36(2): 169-176. (in Chinese)
- [15] XIE H J, ZOU Y H, DONG C W, et al. Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field: investigation of mechanism and applied to aluminum alloy plate [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5-8): 1509-1520.
- [16] CHENG Q, FAN Z H, TIAN Y B, et al. A review on magnetic abrasive finishing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020: 1-16.
- [17] 赵杨, 陈燕, 程森, 等. 电磁场作用下球形磁极辅助研磨弯管内表面研究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(1): 22-26.
- ZHAO Y, CHEN Y, CHENG M. Study on the inner surface finishing of bend pipe by electromagnetic fields drive spherical magnetic Pole [J]. Plating and Finishing, 2020, 42(1): 22-26. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] 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.
- CHEN M, CHEN S, ZHAO Y, et al. Mechanism analysis and experimental study of dual magnetic pole magnetic particle grinding [J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 81-89. (in Chinese)
- [20] LIU Z Q, CHEN Y, LI Y J, et al. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1-4): 631-640.
- [21] MISRA A, PANDEY P M, DIXIT U S, et al. Multi-objective optimization of ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5): 1661-1670.
- [22] 李晓科, 闫富宏, 明五一, 等. 电火花成型加工 304 钢响应建模及工艺参数优化[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 196-199.
- LI X K, YAN F H, MING W Y, et al. 304 EDM response modeling and process parameter optimization [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(10): 196-199. (in Chinese)

作者简介: 刘文浩, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为精密加工与特种加工。

E-mail: liuwh666@126.com

陈燕(通信作者), 女, 1963 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为精密加工与特种加工。

E-mail: laochen412@gmail.com