

# 低频交变磁场超精密平面磁力研磨加工研究

吴金忠, 邢百军, 邹艳华, 郑菲

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** **目的** 通过利用低频交变磁场下产生的变动磁力, 改善传统磁力研磨加工中磁力刷变形、磨料结块、磨料利用率低等问题, 实现平面超光滑、纳米级加工。**方法** 在电磁线圈中通入频率为 3 Hz 的交流电流, 产生低频交变磁场。利用磁通密度测量仪 (EMIC Gauss Meter GM 4002) 对加工区域磁感应强度进行测定, 考察低频交变磁场的磁场强度分布状况。设计组装一套研磨压力测量系统, 利用数据记录处理软件对比分析低频交变磁场和直流磁场所产生的研磨压力, 深入研究研磨工具 (磁簇) 在低频交变磁场作用下的变化规律。研制一套低频交变磁场平面磁力研磨加工装置, 以 SUS304 不锈钢板为加工对象, 并与直流磁场进行对比实验, 验证利用低频交变磁场进行磁力研磨的可行性及加工性能。**结果** 低频交变磁场中各点磁感应强度均在峰值与谷值之间不断变化, 其变化规律近似于正弦分布。在磁极边缘 ( $R=7.5\text{ mm}$ ), 产生最大峰谷值; 从磁极半径 ( $R=6\text{ mm}$ ) 到磁极中心 ( $R=2\text{ mm}$ ), 磁场强度逐步减弱。低频交变磁场下研磨压力值呈周期性变化, 且研磨压力的平均值大于直流磁场下的值。磁簇在低频交变磁场作用下产生周期性振动。磁簇呈收缩状态时, 磁性粒子带动磨料上浮于磁簇前端。当磁场方向改变时, 磁簇先呈发散状态, 然后收缩, 此过程中磨料颗粒与磁性粒子再次混合。如此循环更新, 不仅解决磁簇与工件接触后产生的变形问题, 而且提高了磨料的利用率, 保证研磨工具稳定。分别使用低频交变磁场和直流磁场对 SUS304 不锈钢板进行研磨, 使用油基研磨液, 主轴转速为  $350\text{ rad/min}$ , 交流电流有效值为  $1.9\text{ A}$ , 频率为  $3\text{ Hz}$ 。第一阶段选择平均粒径为  $30\text{ }\mu\text{m}$  的电解铁粉和 WA#10000 的磨料颗粒, 经过  $60\text{ min}$  研磨, 表面粗糙度值分别为  $35.28\text{ nm}$  和  $81.36\text{ nm}$ ; 第二阶段选择平均粒径  $6\text{ }\mu\text{m}$  的羰基铁粉和  $1\text{ }\mu\text{m}$  的金刚石粉, 研磨时间  $60\text{ min}$ , 最终表面粗糙度值分别达到  $4.51\text{ nm}$  和  $17.58\text{ nm}$ 。**结论** 利用低频交变磁场能够实现研磨工具 (磁簇) 的循环更新, 提高磨料利用率。与直流磁场相比, 利用低频交流磁场磁力研磨法所获得的加工表面均匀、无划痕, 实现了平面超光滑纳米级加工。

**关键词:** 磁力研磨; 低频交变磁场; 纳米级加工; 研磨压力; SUS304 不锈钢

**中图分类号:** TG147 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0281-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.040

## Ultra-precision Surface Magnetic Grinding by Low Frequency Alternating Magnetic Field

WU Jin-zhong, XING Bai-jun, ZOU Yan-hua, ZHENG Fei

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

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problems of magnetic brush distortion, caking of abrasive particles and lower utiliza-

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-06-22

**Received:** 2018-04-27; **Revised:** 2018-06-22

**基金项目:** 辽宁省教育厅基金 (2016TsPY04); 辽宁科技大学校青年基金 (2016QN14)

**Fund:** Supported by the Liaoning Province Department of Education Fund (2016TsPY04), Youth Fund of University of Science and Technology Liaoning (2016QN14)

**作者简介:** 吴金忠 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密加工、磁场辅助加工。邮箱: wjz.0926@163.com

**Biography:** WU Jin-zhong (1985—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: precision machining, magnetic field assisted machining. E-mail: wjz.0926@163.com

tion of abrasive particles by the variable magnetic force from the low frequency alternating magnetic field, so as to obtain ultra-smooth and nanoscale polishing surface. Alternating current with frequency of 3Hz was connected in the electromagnetic coil to generate the low frequency alternating magnetic field. The magnetic flux density of the processing area was measured by the EMIC Gauss Meter GM 4002 to investigate the magnetic field intensity distribution of the low frequency alternating magnetic field. A set of grinding pressure measurement system was designed and assembled and the KYOWA PCD-300A data recording and processing software was used to compare and analyze the magnetic force produced by the low frequency alternating magnetic field and the direct magnetic field. The change law of the grinding tool (magnetic particle cluster) under the action of low frequency alternating magnetic field was deeply studied. A set of plane magnetic grinding machine at low frequency alternating magnetic field was developed. The SUS304 stainless steel plate was used as the processing workpiece, and compared with direct magnetic field to verify the feasibility and processing performance of low frequency alternating magnetic field during the magnetic grinding. The magnetic flux density of each point in the low frequency alternating magnetic field changed continuously between peak value and valley value and, the law of change approximated to the sinusoidal distribution. The maximum value was generated at the pole edge ( $R=7.5$  mm) and the magnetic intensity gradually decreased from the magnetic pole radius ( $R=6$  mm) to the magnetic pole center ( $R=2$  mm). The change law of grinding pressure was periodic change under low frequency alternating magnetic field, and the average value of grinding pressure was larger than that of direct magnetic field. Periodic vibration of magnetic cluster was produced under low frequency alternating magnetic field. When the magnetic cluster was at contraction state, the magnetic particles drove the abrasive particles to the front of the magnetic cluster. When the direction of the magnetic field changed, the magnetic cluster was divergent first, and then contracted. the abrasive particles and magnetic particles were mixed again. This cycle and update not only solved the deformation problem caused by the contact between the magnetic cluster and the workpiece, but also improved the utilization rate of the abrasive particles and ensured the stability of the grinding tool. Low frequency alternating magnetic field and direct magnetic field were used to grind SUS304 stainless steel plate respectively with oily grinding fluid, spindle speed at 350 rad/min, alternating current at 1.9 A (average value) and frequency at 3 Hz. In the first stage, the electrolytic iron powder with an average diameter of 30  $\mu\text{m}$  and the abrasive particles of WA#10000 were selected, and the surface roughness values were improved to 35.28 nm and 81.36 nm after 60 min grinding. In the second stage, the carbonyl iron powder with average particle diameter of 6  $\mu\text{m}$  and diamond powder of 1  $\mu\text{m}$  were selected, the surface roughness reached 4.51 nm and 17.58 nm respectively after 60 min grinding. MAF process by low frequency alternating magnetic field can cycle and update the grinding tool (magnetic cluster) and improve the utilization ratio of the abrasive particles. Compared with the direct magnetic field, the surface obtained by MAF at low frequency alternating magnetic field is uniform and free from scratch, thus realizing the processing of ultra-smooth and nanoscale plane.

**KEY WORDS:** magnetic abrasive finishing; low frequency alternating magnetic field; nano processing; grinding pressure; SUS304 stainless steel plate

磁力研磨 (MAF) 是一种先进的加工技术, 它利用磁力线的透过作用, 通过对磁力刷与工件间施加相对运动, 从而实现材料去除。磁力刷具有良好的柔性与弹性, 加工对象适应性强, 可以研磨平面、曲面以及复杂形状零件的内外表面<sup>[1-4]</sup>。陈燕等<sup>[5]</sup>利用 MAF 工艺对 40Cr 钢管件内表面进行抛光, 表面粗糙度值由 4.5  $\mu\text{m}$  下降到了 0.25  $\mu\text{m}$ 。杨海吉等<sup>[6]</sup>使用旋转磁极对 SUS304 管内表面进行精密抛光, 最终表面粗糙度值达到 0.2  $\mu\text{m}$ 。谭悦等<sup>[7]</sup>通过超声振动辅助对 TA18 管内表面进行 MAF 抛光, 表面粗糙度值从原始的 1.20  $\mu\text{m}$  降至研磨后的 0.07  $\mu\text{m}$ 。韩冰等<sup>[8]</sup>采用曲柄滑块振动机构辅助 MAF 工艺对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷管内表面进行抛光, 表面粗糙度值由平均 1.1  $\mu\text{m}$  降至 0.15  $\mu\text{m}$  以下, 加工效率提高约 60%。MAF 作为机械研磨加工形式的一种, 能够强化工件表面的电学性能, 改变

应力分布状态, 提高工件表面的机械物理性能<sup>[9-10]</sup>。然而, 在加工过程中, 磁性颗粒的凝聚、非磁性磨粒分布不均匀、磁力研磨刷与工件接触后的变形不仅阻碍了高质量表面的获得, 还降低了加工效率。尤其是在加工沟槽和棱角时, 磨料无法充分布满整个加工面, 进而影响表面加工均匀性。针对此问题, 一些专家提出了利用外加辅助振动以及高频脉冲直流电磁场的加工方式来改善磁力刷形态, 以提高表面质量和加工效率<sup>[11]</sup>。Yin 等<sup>[12-13]</sup>提出了三种振动辅助 MAF 工艺, 用于抛光复杂微细曲面。Pandey 等<sup>[14-16]</sup>研究了 UAMAF 技术的加工机理, 通过引入超声波振动辅助 MAF 工艺进行抛光, 使表面加工效果得到了显著提升。陈燕等<sup>[17]</sup>利用超声波振动辅助 MAF 加工对 SUS304 不锈钢板进行加工, 使其表面粗糙度值降至 0.06  $\mu\text{m}$  左右。V. K. Jain 等人<sup>[18]</sup>使用高频脉冲直流电

磁场对预处理后的合金钢板 (C 0.35~0.45%, Mn 0.45%~0.60%, Ni 1.31%~1.81%, Cr 0.20%~0.30%, Si 0.10%~0.30%) 进行研磨, 脉冲频率在 40~320 Hz 之间。实验结果表明, 频率为 320 Hz 时, 磨削力更大, 加工效果更好, 但会造成工件表面划伤, 最终工件表面粗糙度值从初始的  $0.31\ \mu\text{m}$  下降到  $0.22\ \mu\text{m}$ 。上述加工法虽能有效地改善表面质量, 但很难实现纳米级表面加工。其原因在于, 外加辅助振动以及使用高频脉冲直流电磁场的方式会对工件本身产生一种冲击力, 其适用于高硬度材料加工, 但很容易对普通硬度材料造成加工表面划痕。而且磁力刷刷头部分磨料损耗严重, 根部磨料无法被输送至磁力刷刷头, 导致磨料利用率低。

为解决上述问题, 本文提出利用低频交变磁场进行超精密磁力研磨。通过利用低频交变磁场下产生的变动磁力, 促使磁簇在加工区域内产生分散、收缩式循环振动。该振动不仅促进磁性颗粒和磨料的分散, 也解决了磁簇产生变形后难以自行恢复原始形态的问题, 磨料的循环和更新更加充分, 研磨工具更加稳定。文中还考察了低频交变磁场的研磨压力和磁场强度的分布情况、研究了研磨工具 (磁簇) 在低频交变磁场作用下的变动特性。另外, 通过自主研制的低频交变磁场平面磁力研磨加工装置对 SUS304 不锈钢板进行研磨。通过与直流磁场进行对比, 验证低频交变磁场磁力研磨加工的可行性及加工性能。

## 1 加工原理

### 1.1 低频交变磁场磁力研磨加工原理

图 1 为低频交变磁场超精密磁力研磨装置原理图, 托盘中装有磁性磨浆 (由研磨液、铁粉和磨料颗

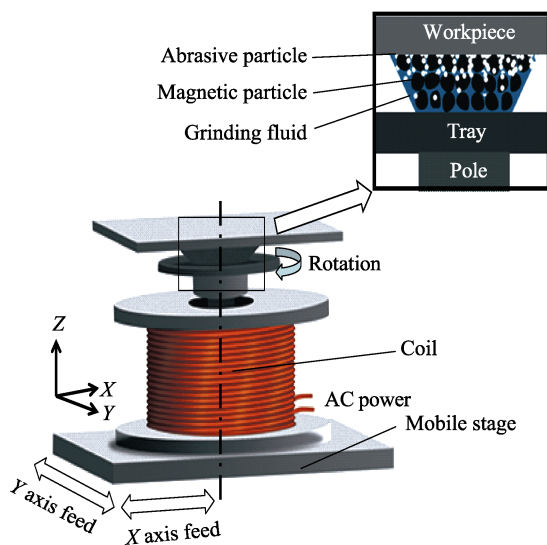


图 1 低频交变磁场超精密磁力研磨装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of the ultra-precision magnetic grinding device by low frequency alternating magnetic field

粒按一定配比组成)。托盘固定在磁极上, 随磁极转动。当线圈通入频率为 3 Hz 的交流电后, 磁极产生低频交变磁场。托盘中的磁性磨粒浆在低频交变磁场的作用下, 形成周期性振动的磁簇。在托盘旋转运动、磁簇振动以及滑台水平进给运动的共同作用下, 实现对工件表面的研磨加工。

### 1.2 交变磁场下磁性微粒受力分析

图 2 为交变磁场中磁性粒子受力分析图, 磁性粒子受到沿磁等势线方向产生的力  $F_x$  与沿磁力线方向产生的力  $F_y$ , 计算公式为<sup>[19]</sup>:

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

其中:  $V$  为单个磁性粒子中所含铁粉的体积;  $\chi$  为单个磁性粒子的磁化系数;  $\mu_0$  为单个磁性粒子的磁导率;  $H$  为磁场强度;  $\partial H/\partial x$ 、 $\partial H/\partial y$  分别为磁场强度在  $x$ 、 $y$  方向上的变化率。

如图 2a 所示, 当交变磁场力向上时, 在合力  $F$  的作用下, 磁簇成收缩状。当交变磁场力方向改变时, 磁簇先呈发散状态 (如图 2b 所示), 然后呈收缩状态。

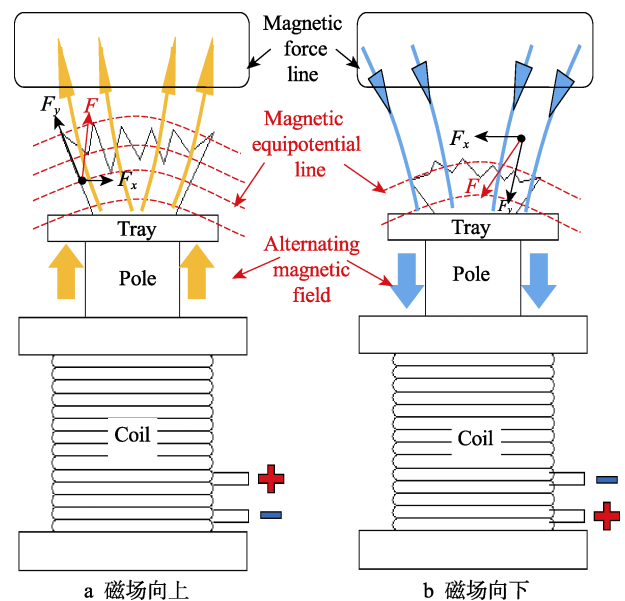


图 2 交变磁场中磁性粒子受力分析图

Fig.2 Force analysis of magnetic particle in alternating magnetic field: a) magnetic field is upward; b) magnetic field is downward

### 1.3 交变磁场下磁束密度分布

磁场强度分布对磁力研磨加工中研磨力及研磨特性具有重要影响, 因此必须清楚交变磁场下加工区域的磁场分布。磁感应强度峰值  $B_p$  可通过公式 (2) 估算<sup>[20]</sup>, 由公式 (2) 可知, 磁感应强度的峰值  $B_p$  随着励磁电流  $I$  的增加而增加。

$$B_p = \mu_0 \frac{N}{L} I \quad (2)$$

其中： $\mu_0$ 为真空导磁率； $N$ 为线圈匝数； $L$ 为磁路路径的平均长度； $I$ 为励磁电流。

## 2 实验装置

### 2.1 加工装置

图3为低频交变磁场超精密磁力研磨装置图,其包括水平进给装置、交变磁场发生装置、研磨装置、支架。通过电机Ⅱ驱动水平进给装置,进而实现滑台水平向的移动。交变磁场发生装置由交流电源、线圈及磁极组成。线圈线径为1 mm、2000匝,交流电源可以提供电压1~300 V、频率1~999 Hz的交流电,也可根据实验需要自行选择电流和频率。线圈底座固定在水平进给装置的滑台上,主轴和磁极旋转电机Ⅰ安装于线圈底座内部。容纳磁性磨粒浆的托盘固定在开槽磁极上,随磁极转动。支架高度用来调整加工间隙。

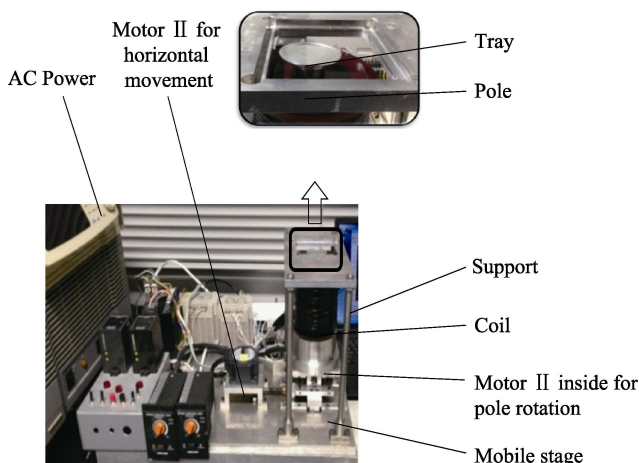
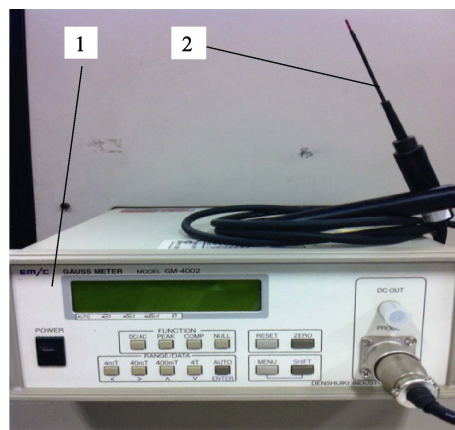


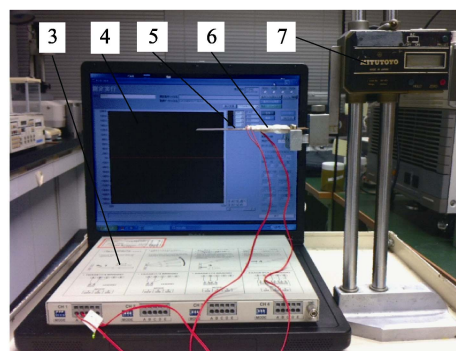
图3 低频交变磁场超精密磁力研磨装置  
Fig.3 Ultra-precision magnetic grinding device by low frequency alternating magnetic field

### 2.2 测量装置

如图4a所示,磁感应强度测量仪型号为EMIC Gauss Meter GM 4002 Ver. 2.10,探针型号为T-402(爱美克,日本)。如图4b所示,研磨压力测量装置由数显高度尺(Mitutoyo,日本)、c5210p磷青铜片、两片KFN-2-350-C9-11抗磁性应变片以及KYOWA PCD-300A数据记录处理器(协和工业,日本)组成。其中磷青铜片固定在数显高度尺上,两片抗磁性应变片对称粘在磷青铜片根部的上下表面,通过PCD-30A数据记录处理软件对采集的信号进行分析。表面测量仪器选择Veeco Wyko NT1100M非接触型光学轮廓仪(维易科,美国)。



1—Measuring instrument(GM-4002); 2—Measuring probe(T-402)  
a 磁感应测量装置



3—Sensor interface (PCD-300A); 4—Data record processor (PCD-30A);  
5—Measuring plate(c5210p); 6—Strain gauges; 7—Height regulator  
b 磨削力测量装置

图4 测量装置图

Fig.4 Measuring devices: a) measuring device of magnetic induction; b) measuring device of grinding force

## 3 实验方法及条件

### 3.1 磁感应强度测量

图5为加工区域磁感应强度测量方法示意图。开

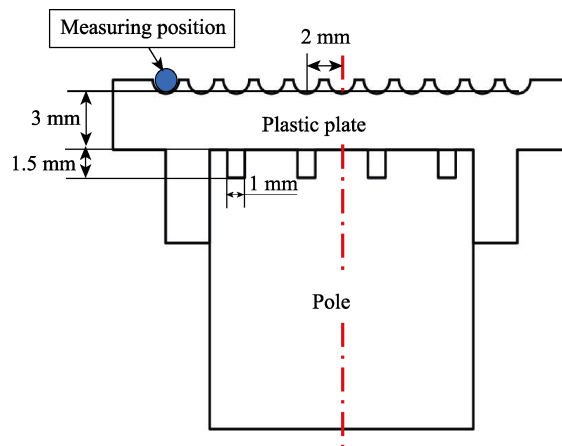


图5 加工区域磁感应强度测量方法示意图  
Fig.5 Schematic diagram for measuring method of magnetic flux density over the processing region



槽磁极材料为 SS400，直径 15 mm（4 个十字槽，宽度 1 mm，深度 1.5 mm）。本实验选用正弦波形交流电，电流峰值为 3 A，平均电流为 1.9 A，频率为 3 Hz。由于研磨加工时工件与磁极距离为 3 mm，为了准确测量加工区域磁感应强度的分布，制作一块塑料板固定在开槽磁极上。塑料板表面设有 11 格测量槽（中心距 2 mm）且槽底距离磁极上表面 3 mm，即从中心到边缘每间隔 2 mm 进行一次磁感应强度的测量。

3.2 研磨压力测量

在其他条件相同的情况下，分别对电流有效值相同的低频交变磁场（Type1）和直流磁场（Type2）的

研磨压力进行测量，测量条件如表 1 所示。电流为 1.9 A，交流电频率为 3 Hz，磁性粒子的平均粒径分别为 30  $\mu\text{m}$  和 6  $\mu\text{m}$ 。

3.3 低频交变磁场与直流磁场的加工对比试验

如表 1 所示，实验分为两个阶段。第一阶段选择平均粒径为 30  $\mu\text{m}$  的电解铁粉和 WA#10000 的磨料颗粒，便于提高加工效率；第二阶段选择平均直径 6  $\mu\text{m}$  的羰基铁粉和平均直径 1  $\mu\text{m}$  的金刚石粉，以便实现超精密加工。各阶段研磨时间均为 60 min，每 10 min 进行一次测量。

表 1 测量及实验条件  
Tab.1 Measuring & experimental conditions

Project		Test conditions
Measuring plate		Brass plate C5210P, 115×33 mm, thickness: 0.6 mm
Work-Pole tip clearance		3 mm
Finishing time	First stage	60 min
	Second stage	60 min
Magnetic particles	First stage	Electrolytic iron powder (mean dia): 30 $\mu\text{m}$ ; Weight: 1.2 g
	Second stage	Carbonyl iron powder (mean dia): 6 $\mu\text{m}$ ; Weight: 1.2 g
Abrasives	First stage	WA#10000 (mean dia): 0~1 $\mu\text{m}$ ; Weight: 0.3 g
	Second stage	Diamond powder (mean dia): 0~1 $\mu\text{m}$ ; Weight: 0.3 g
Finishing fluid		Oily grinding fluid (Honilo 988): 0.8 mL
Feed speed of mobile stage		260 mm/min
Rotation speed of magnetic pole		350 rad/min
Workpiece		SUS304 stainless steel plate , size: 80 mm×90 mm×1 mm
Magnetic field		Type 1: Alternating magnetic field
		Alternating current 1.9 A (average value), Frequency 3 Hz
		Type 2: direct magnetic field direct current: 1.9 A

4 结果及分析

4.1 加工区域磁感应强度

图 6 为交变磁场加工区域内磁感应强度分布图。

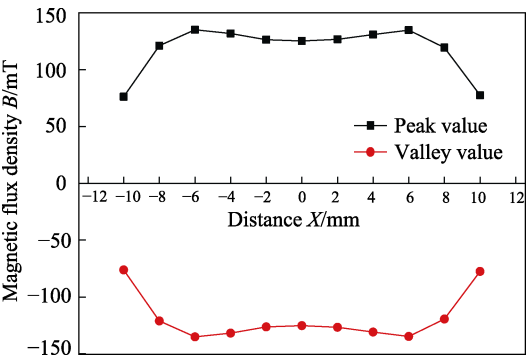


图 6 交变磁场加工区域内磁感应强度分布图  
Fig.6 Distribution of magnetic flux density over the processing region of alternating magnetic field

从图中可以看出，磁感应强度值从磁极半径（ $R=6\text{ mm}$ ）到磁极中心（ $R=2\text{ mm}$ ）逐步减少。通过进一步测量，发现在磁极边缘（ $R=7.5\text{ mm}$ ）产生最大值。由于磁极边缘的磁感应强度值最大，所以在磁极边缘处能产生最大磨削力。每个测量点的测量值在峰值与谷值之间呈周期性变化，其中，峰值与谷值绝对值相等。这是因为线圈内通入正弦交流电，而交流电呈周期性变化，所以根据公式（2）可以得出在同一测量点磁感应强度峰值与谷值的对称分布。

4.2 研磨压力

图 7 为低频交变磁场和直流磁场研磨压力测量图。在直流磁场中，如图 7a 所示，当磁性颗粒平均粒径为 6  $\mu\text{m}$  时，研磨压力值在  $P=0.072\text{ N}$  附近轻微波动；当磁性颗粒平均粒径为 30  $\mu\text{m}$  时，研磨压力值在  $P=0.115\text{ N}$  附近轻微波动。从测量结果可以看出，在直流磁场下，研磨压力值在恒定值附近轻微波动。这是因为当线圈通入直流电时，产生直流磁场，直流

磁场方向恒定,磁感应强度值相对稳定,所以研磨压力近似为恒定值。

如图 7b 所示,在低频交变磁场中,研磨压力发生较大波动,与直流磁场相比,其研磨压力更大。而且,当磁性微粒平均粒径为  $30\text{ }\mu\text{m}$  时,研磨压力值与波动幅度均比磁性微粒平均粒径为  $6\text{ }\mu\text{m}$  时更大。这

是因为  $30\text{ }\mu\text{m}$  磁性粒子中含铁粉更多,根据公式(1)可得出,在交变磁场中,研磨压力的大小和波动幅度随着磁性粒子粒径的增加而逐步增大。所以由 Preston 方程可以推断出,其他实验条件相同的情况下,低频交变磁场作用下形成的磁簇比在直流磁场作用下形成的磁簇具有更高的研磨效率。

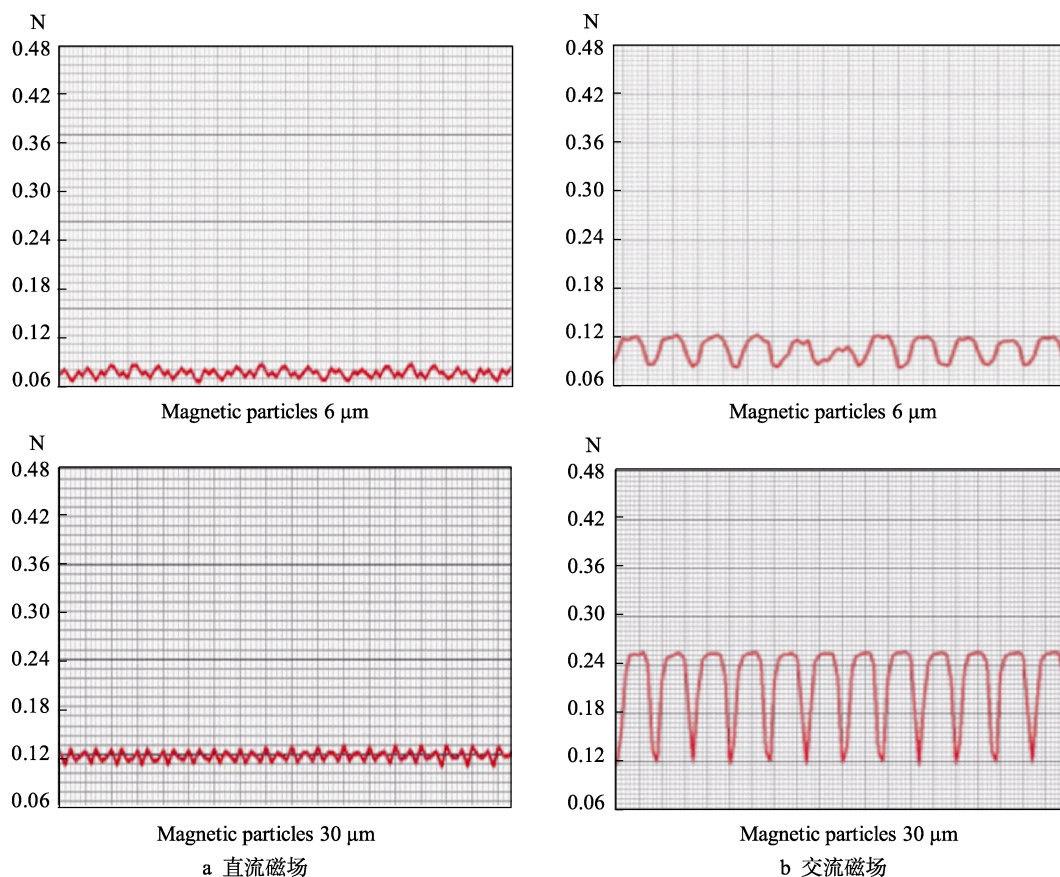


图 7 低频交变磁场和直流磁场研磨压力测量图

Fig.7 Grinding pressure measurement of low frequency alternating and direct current magnetic field:  
a) DC magnetic field; b) AC magnetic field

### 4.3 磨料运动特征

图 8 为低频交变磁场下的磁簇形态图。在低频交变磁场作用下,磁簇呈周期性振动。当磁簇形态呈收缩状(如图 8a 所示)时,磁性粒子带动磨料上浮于磁簇前端。当加工区域内交变磁场方向改变时,磁簇先呈发散状(如图 8b 所示),然后收缩。当磁簇呈发散状态时,磨料与磁性颗粒再次混合,如此循环更新,不仅解决了磁簇与工件接触后产生变形的问題,也提高了磨料的利用率,保证研磨工具稳定。

图 9 为交变磁场磁簇与直流磁场磁簇加工前后的对比图。在直流磁场下,磁簇经过 10 min 的研磨后,出现颗粒凝聚现象,如图 9a 所示。在低频交变磁场下,经过 10 min 的研磨后,磁簇形态变化不大,磨料消耗量小,并未出现颗粒凝聚现象,磁簇形态较好,依旧保持周期性振动,如图 9b 所示。

这是因为在直流磁场下进行磁力研磨,磁簇处于相对静止状态,刷头部分磨料消耗量大,根部磨料无法被输送至刷头,所以磨料利用率低。经过长时间研磨后,磁簇容易出现凝聚现象,而且磁簇在研磨过程中一旦发生变形则需要停机调整,无法自行恢复至原始形态。而在低频交变磁场作用下,磁簇产生周期性振动。这种振动使磨料粒子浮托于磁性颗粒上方,而且散布更加均匀。磨料的混合、循环与更新更加充分,且利用率高,研磨过程中无需更新磨料,不易产生凝聚现象。周期性振动的磁簇在研磨过程中即使发生变形,也可在下一个振动周期自行恢复至初始状态,无需停机调整。与直流磁场相比,在低频交变磁场下形成的磁簇与加工面贴合更加紧密,研磨压力更大。所以利用低频交变磁场进行磁力研磨,对平面、复杂微细曲面及沟槽的研磨效果更佳。



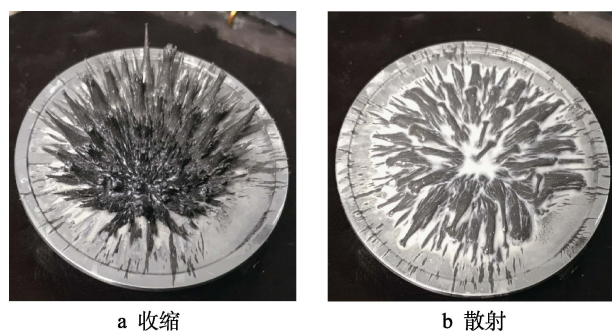
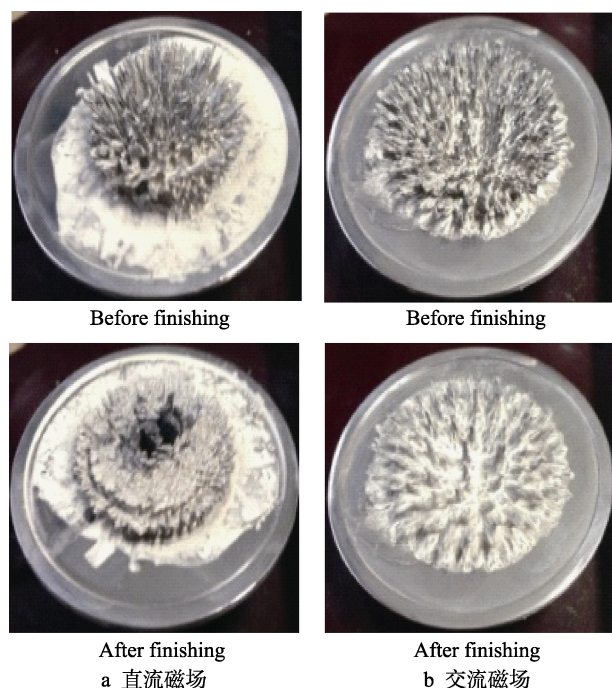


图 8 低频交变磁场下磁簇形态图

Fig.8 Morphology of magnetic cluster in low frequency alternating magnetic field: a) contraction; b) scatter

图 9 交变磁场磁簇与直流磁场磁簇加工前后对比图  
Fig.9 Contrast diagram of alternating magnetic field cluster and direct magnetic field cluster before and after grinding: a) DC magnetic field; b) AC magnetic field

#### 4.4 实验加工结果分析

图 10 为表面粗糙度值对比图。如图 10a 所示, 在第一阶段研磨前 10 min, 表面粗糙度值下降较快, 其中低频交变磁场下表面粗糙度值下降速度明显高于直流磁场下的下降。这是因为工件的初始表面粗糙, 且低频交变磁场形成的磁簇研磨压力更大, 使磨料颗粒与工件表面碰撞更剧烈, 所以材料去除量较大, 进而导致表面粗糙度值下降速率更快。研磨 10 min 后, 表面粗糙度值下降变缓, 但低频交变磁场作用下的下降速率仍略高于直流磁场下的下降速度。这是因为经过前 10 min 的研磨后, 其表面形貌得到改善, 磨料颗粒与工件表面碰撞相对缓和, 但由于低频交变磁场下研磨压力更大, 所以下降速率仍高于直流磁场。而且在第一阶段研磨的后期, 由于直流磁场下磁簇的凝聚现象加剧, 刷头部分磨料消耗严重, 导致研

磨效率下降。经过第一阶段的研磨后, 低频交变磁场下工件表面粗糙度值为 35.28 nm, 直流磁场下工件表面粗糙度值为 81.36 nm。

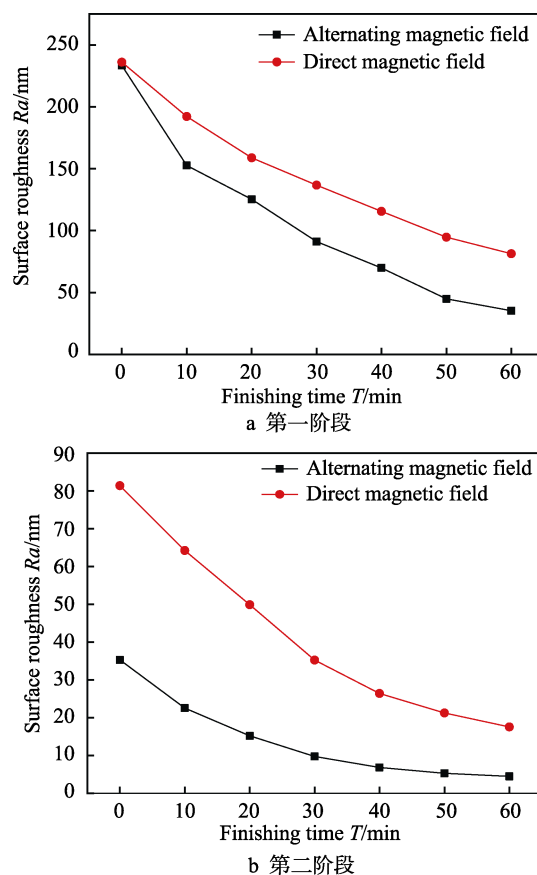


图 10 表面粗糙度值对比图

Fig.10 Contrast diagram of surface roughness value: a) first stage; b) second stage

如图 10b 所示, 在第二阶段研磨前 30 min, 直流磁场下表面粗糙度值下降较快。这是因为当第二阶段更新磁性磨粒浆后, 磁簇形态较好, 磨料颗粒的切削刃锋利, 工件表面相对粗糙, 所以研磨效率较高。最终低频交变磁场下工件表面粗糙度值达到 4.51 nm, 直流磁场下工件表面粗糙度值下降到 17.58 nm。从二者曲线的变化率来看, 低频交变磁场下曲率变化较为平缓, 而直流磁场下变化较大。这是因为在低频交变磁场下, 磁簇的周期性振动使得磨料的循环、更新更加充分, 研磨工具相对稳定, 所以曲率变化较为平缓。而在直流磁场下形成的磁簇处于相对静止状态, 磨料循环更新不够充分, 所以 30 min 的研磨效率明显低于前期, 曲线曲率变化较大。

图 11 为 3D 形貌图对比。通过对比图 11a、b 形貌可知, 经过两个阶段的加工, 在低频交变磁场下进行研磨的 3D 形貌明显优于直流磁场下的形貌。低频交变磁场下表面形貌均匀, 无划痕。而直流磁场下, 工件表面较深的沟壑无法被有效去除。

图 12 为 SUS304 不锈钢板加工效果对比图。从图中可以看出, 利用低频交变磁场磁力研磨加工法所获得的加工表面更加光滑, 无划痕, 达到镜面效果。

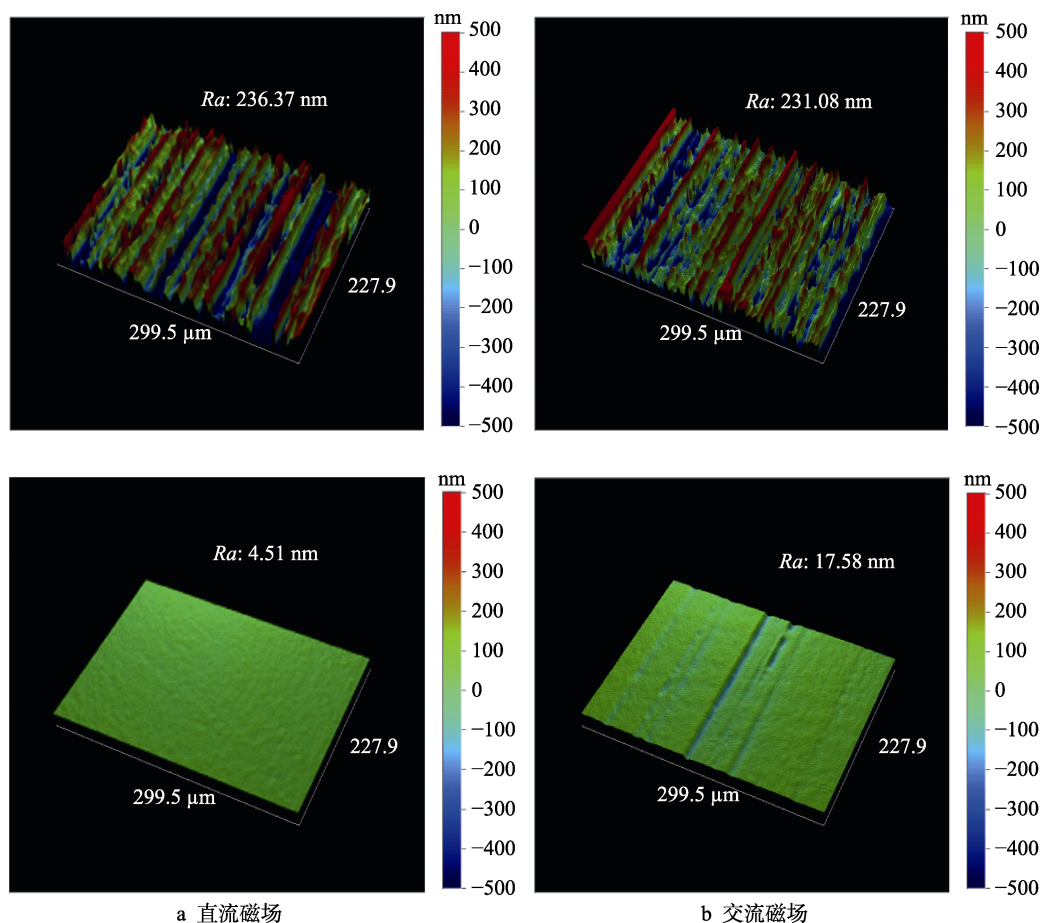


图 11 3D 形貌图对比

Fig.11 Contrast diagram of 3D morphology: a) DC magnetic field; b) AC magnetic field

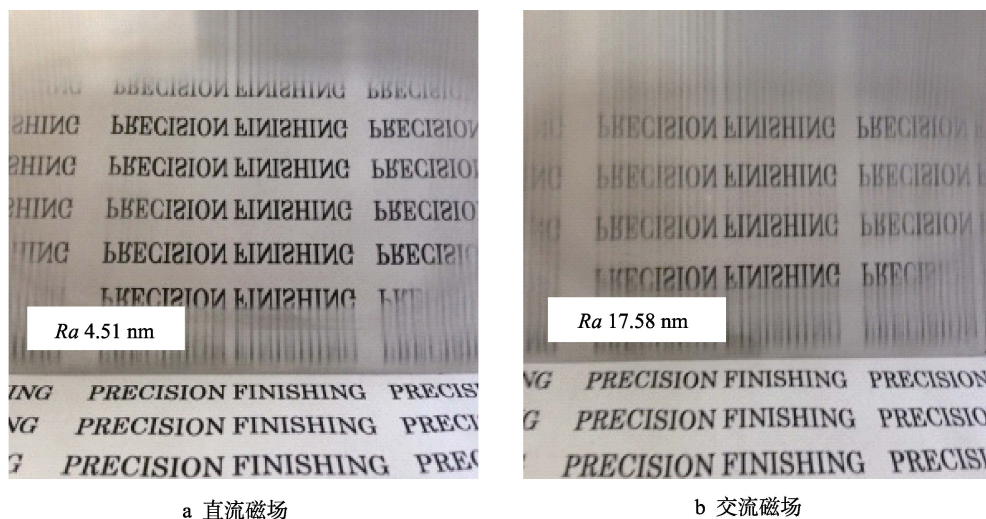


图 12 SUS304 不锈钢板加工效果对比图

Fig.12 Contrast diagram of processing effects of SUS304 stainless steel plate: a) DC magnetic field; b) AC magnetic field

## 5 结论

1) 低频交变磁场中各点磁感应强度均在峰值与谷值之间不断变化,其变化规律近似于正弦分布。在磁极边缘 ( $R=7.5\text{ mm}$ ),产生最大峰谷值;从磁极半径 ( $R=6\text{ mm}$ )到磁极中心 ( $R=2\text{ mm}$ ),磁场强度逐

步减弱。

2) 低频交变磁场下研磨压力呈周期性变化,且研磨压力的平均值大于直流磁场下的值。

3) 磁簇在低频交变磁场作用下产生周期性振动。磁簇呈收缩状态时,磁性颗粒带动磨料上浮于磁簇前端。当磁场方向改变时,磁簇先呈发散状态,然后收



缩, 磨料与磁性颗粒再次混合。如此循环更新, 不仅解决磁簇与工件接触后产生的变形问题, 而且提高了磨料的利用率, 使得研磨工具更加稳定。

4) 使用低频交变磁场对 SUS304 不锈钢板表面进行磁力研磨, 当使用油基研磨液, 主轴转速为 350 rad/min, 交流电流有效值为 1.9 A, 频率为 3 Hz 时, 获得了最佳加工效果。工件表面粗糙度值最终达到 4.51 nm, 所获得的加工表面均匀、无划痕, 实现了平面超光滑纳米级加工。

#### 参考文献:

- [1] SHINMURA T, TAKAZAWA K. Study on magnetic abrasive process (process principles and finishing possibility)[J]. Bull of the JSPE, 1985, 19(4): P289.
- [2] YIN S, SHINMURA T. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2004, 44: 1297-1303.
- [3] 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.  
LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Experimental research on magnetic abrasive finishing for  $ZrO_2$  ceramic materials[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 310-316.
- [4] ZOU Y, SHINMURA T. Study on a new plane magnetic abrasive finishing process by application of a constant-pressure magnetic brush[J]. Journal of the Japan society for abrasive technology, 2009, 53: 31-34.
- [5] 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.
- [6] 杨海吉, 韩冰, 陈燕, 等. 旋转磁极在 SUS304 管内表面精密抛光中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(9): 118-121.  
YANG Hai-ji, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Application of rotating magnet in precision polishing of inner surface of SUS304 tube[J]. Modular machine tool and automatic processing technology, 2017(9): 118-121.
- [7] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 超声磁力复合研磨对 TA18 管内表面光整加工[J]. 电镀与涂饰, 2017(16): 870-873.  
TAN Yue, CHEN Yan, ZENG Jia-heng, et al. Finishing machining of inner surface of TA18 pipe by ultrasonic-magnetic composite grinding[J]. Electroplating & finishing, 2017(16): 870-873.
- [8] 韩冰, 云昊, 陈燕, 等.  $Al_2O_3$  陶瓷管内表面高效精密研磨试验研究[J]. 机械设计与制造, 2016(1): 154-157.  
HAN Bing, YUN Hao, CHEN Yan, et al. Experimental study of high efficiency and low damage grinding on the inner surface of  $Al_2O_3$  ceramics tube[J]. Mechanical design and manufacture, 2016(1): 154-157.
- [9] 韩宝军, 何琼, 杨妙. 机械研磨工艺对 AZ91D 镁合金显微结构的影响[J]. 表面技术, 2015(2): 78-82.  
HAN Bao-jun, HE Qiong, YANG Miao. Effects of surface mechanical attrition treatment technique on microstructure of AZ91D magnesium alloys[J]. Surface technology, 2015(2): 78-82.
- [10] 耿其东, 李春燕. 磁力研磨加工 K9 光学玻璃的实验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 112-118.  
GENG Qi-dong, LI Chun-yan. Experimental study on magnetic abrasive finishing K9 optical glass[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 112-118.
- [11] 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.
- [12] YIN S, SHINMURA T. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2004, 44: 1297-1303.
- [13] YIN S, SHINMURA T. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2004, 44: 383-390.
- [14] MULIK R S, PANDEY P M. Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel[J]. International journal of advanced manufacturing, 2011, 55: 501-515.
- [15] MULIK R S, PANDEY P M. Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives[J]. International journal of refractory metals & hard materials, 2011, 29: 68-77.
- [16] KALA P, PANDEY P M. Comparison of finishing characteristics of two paramagnetic materials using double disc magnetic abrasive finishing[J]. J manuf process, 2015, 17: 63-77.
- [17] 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): 294-298.  
CHEN Yan, LIU Zhao-qian, WANG Xian-kang. Ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2013, 44(10): 294-298.
- [18] JAIN V K, SINGH D K, RAGHURAM V. Analysis of performance of pulsating flexible magnetic abrasive brush (P-FMAB)[J]. Machining science and technology, 2008, 12: 53-76.
- [19] NASTUME M, SHINMURA T. Study on the mechanism of plane magnetic abrasive finishing process-elucidation of normal force characteristics[J]. The Japan society of mechanical engineers, 2008, 74(737): 212-218.
- [20] JOHN B. Electrical and electronic principles and technology[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003: 71.