

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.008

# 磁研磨法抛光 40Cr 钢管件内表面的影响因素<sup>\*</sup>

陈 燕, 宋宗朋, 李 昌, 韩 冰

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘 要:** 针对磁研磨法抛光铁磁性管件内表面时的磁屏蔽问题, 研制出一套磁力光整加工装置。对 4 种形状的磁极模型进行有限元分析, 研究磁极形状、磁极转速及运动状态对抛光效果的影响, 并以 40Cr 钢为材料进行试验验证, 利用扫描电子显微镜观察加工前后工件的微观表面形貌。结果表明: 磁极为环形磁极且与工件反向旋转、磁极转速为 2 000 r/min 时加工效果好、加工效率较高; 表面粗糙度值可降到 Ra 0.25  $\mu\text{m}$  以下; 工件内表面的微裂纹、凹坑等表面缺陷基本被去除, 表面质量得到明显改善。由此表明, 利用磁极内置的方法可以很好的解决磁屏蔽问题, 并获得良好的表面加工质量。

**关键词:** 磁力研磨法; 铁磁性管件; 磁极转速; 旋转磁场; 表面抛光

中图分类号: TG175

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)04-0062-08

## Influencing Factors on Polishing Inner Surface of 40Cr Steel Pipe Fittings with a Magnetic Grinding Method

CHEN Yan, SONG Zong-peng, LI Chang, HAN Bing

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

**Abstract:** To solve the magnetic shielding problem on the polishing inner surface of ferromagnetic pipe fittings with a magnetic grinding method, a magnetic abrasive finishing equipment was developed. Four types of magnetic pole models were analyzed by finite element analysis. The influence of the shape, speed and movement state of the magnetic pole on polishing effect were studied. 40Cr steel was taken as the experimental material for experimental verification, and the surface morphologies before and after processing were observed by using a microscope. The results show that the processing effect is better and the machining efficiency is higher when the magnetic pole is annular, the rotate direction of the pole and workpiece is opposite, and the magnetic pole rotate speed is 2 000 r/min. The surface roughness of the workpiece decreases below 0.25  $\mu\text{m}$ . The micro cracks and potholes on the inner surface of the workpiece are perfectly removed and the quality of the workpiece surface is obviously improved by comparing the surface morphology before and after processing. The magnetic shielding problem can be effectively solved using the poles built-in method and better processing surface can be obtained.

**Keywords:** magnetic abrasive finishing; magnetic circular pipe; speed of the magnetic pole; rotating magnetic field; surface polishing

## 0 引 言

磁力研磨光整加工技术是一种新的光整加

工工艺, 可有效提高工件的表面质量。磁力研磨法与传统的研磨方法相比, 具有自适应性好、自

收稿日期: 2015-01-12; 修回日期: 2015-04-20; 基金项目: \* 国家自然科学基金(51105187)

通讯作者: 陈燕(1963-), 女(汉), 教授, 博士; 研究方向: 精密加工技术; Tel: (0412) 5928 113; E-mail: laochen412@gmail.com

网络出版日期: 2015-06-23 15:32; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1532.001.html>

引文格式: 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.

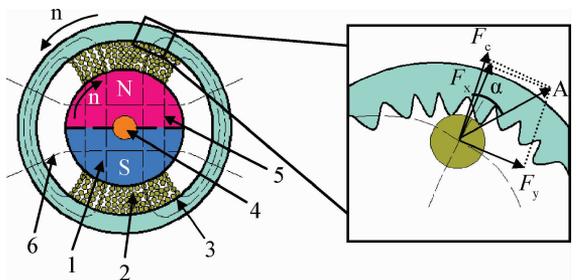
锐性强、温升小及无需进行工具磨损补偿等优点,现已成功应用于平面、复杂曲面、外圆表面及内圆表面等场合<sup>[1-4]</sup>。

磁力研磨法抛光非铁磁性薄壁管件内表面时,通常在管件外部按一定角度放置一对或几对磁极,管件内部填入磁性磨粒<sup>[5-6]</sup>,外部磁场产生的磁力线可以像X射线一样穿透非磁性材料到达管件的内表面,磁性磨粒在磁场中被磁化,在磁场力的作用下压附在管件内表面。当管件或磁极旋转产生相对运动时,磁性磨粒就在磁力和离心力以及摩擦力的作用下,实现对管件内表面的抛光处理。但若使用同样的方法抛光铁磁性管件,由于铁磁性物质磁屏蔽的作用,外部磁极传递到管件内表面的磁场强度几近于零,使得磁性磨粒对管件内表面的压力很小,无法有效地实现对管件内表面的抛光处理。为此,提出磁极内置的加工方案,实际操作时把磁极伸入管件内部,管件在磁场中被磁化形成另一个新磁极,磁极与管件之间形成封闭磁回路。因此磁极的形状、磁极的运动状态、磁场的强度以及加工间隙等都会影响抛光效果。通过ANSOFT软件模拟分析和试验结果分析的方法对影响加工效果的主要因素进行了研究。

### 1 磁力研磨圆管内表面工作机理

#### 1.1 加工原理

图1为磁力研磨工作原理图。磁极固定在连接杆上并伸入到工件内部,因工件选用的40Cr钢为导磁性材料,则磁极与工件之间形成封闭磁性回路。当把磁性磨粒填入工件内表面与磁极的



1—Magnetic pole                      2—Magnetic grain brush  
3—Workpiece                          4—Connecting rod  
5—Line of magnetic force          6—Magnetic equipotential line

图1 磁力研磨工作原理图

Fig. 1 Machining principle of the magnetic abrasive finishing

间隙中,磁性磨粒在磁场力作用下沿磁力线方向形成“磨粒刷”并紧紧压附在工件内表面上。加工时,磁极旋转并沿工件轴线往复移动,磁性磨粒在磁场力和离心力作用下仿形压附在工件表面上,并随着磁极的运动在工件内表面上滑擦、切削,实现对材料的微量去除,降低表面粗糙度,解决难加工表面微裂纹、凹坑、凸起等表面质量问题。

#### 1.2 研磨压力与速度分析

图1(b)为单个磨粒的受力情况,磨粒在磁场中受沿磁力线方向和等磁位线方向的磁力 $F_x$ 、 $F_y$ 的作用,二者的合力为 $F$ 。由磁研磨理论可知:

$$F \propto D^3 kH \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

式(1)中, $F$ 为等磁位线方向的磁力 $F_y$ 和磁力线方向的磁力 $F_x$ 的合力,N; $D$ 为磁性磨粒的直径, $\mu\text{m}$ ;  $K$ 为磁性磨粒的磁化率; $H$ 为磁场强度,A/m; $\frac{\partial H}{\partial x} / \frac{\partial H}{\partial y}$ 为磁场强度变化率。

磁性磨粒在磁场力作用下对工件内表面有挤压的作用即研磨压力,且研磨压力与磁性磨粒的直径、磁化率、磁场强度及磁场强度变化率成正比。

由研磨抛光等加工工艺的数学模型Preston经验公式可得:

$$R = KPv \quad (2)$$

式(2)中, $R$ 为柔性磁性研磨粒子与工件接触区域某点单位时间内材料去除量,mg; $K$ 为磁性研磨粒子与加工有关的比例常数; $V$ 为磁性研磨粒子与工件之间的相对旋转速度,mm/s; $P$ 为柔性磁性研磨粒子与工件间的研磨压力,N。

由式(2)可知,材料去除量与研磨压力、相对旋转速度成正比。因此,若要提高材料的去除量,提高加工效率,可以通过两个方面来实现:①提高工件与磁极的相对旋转速度;②增大研磨压力。

在磁力研磨加工中,研磨压力为<sup>[7]</sup>:

$$P_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (3)$$

式(3)中, $B$ 为磁感应强度,T; $\mu_0$ 为空气磁导

率,  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ;  $\mu_m$  为磁性磨粒的相对磁导率。

由式(3)可知, 研磨压力  $P_m$  与外部磁场、磁导率有关且与磁感应强度  $B$  的平方成正比。但无论采用哪种磁性磨料制备工艺, 所得到的磁性磨料的相对磁导率是有限的<sup>[8]</sup>。所以, 当磁性磨粒的相对磁导率达到最佳时, 通过提高磁性磨粒相对磁导率的方法来提高研磨压力, 从而提高磁力研磨加工效率有局限性<sup>[9]</sup>。因此, 在抛光磁性材料管件内表面时若要提高研磨压力只能通过施加外部压力或增大磁感应强度才能进一步提高工件材料的去除率, 从而提高研磨效率。而磁极旋转形成机械旋转磁场不仅可以提高工件与磁极的相对旋转速度, 还可以使磁性磨粒受离心力而对工件内表面产生瞬时压力, 此时:

$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad (4)$$

式(4)中,  $m$  为磁性磨粒质量,  $\text{mg}$ ;  $v$  为磁性磨粒线速度,  $\text{mm/s}$ ;  $R$  为磁性磨粒旋转半径,  $\text{mm}$ 。

所以研磨过程中, 总的研磨压力即为法向的磁场力和旋转时的离心力之和:

$$P = F_c + F \cos \alpha \quad (5)$$

由式(5)可知, 使磁极旋转形成旋转磁场可以增大研磨压力, 且与磁性磨粒线速度成正比, 从而提高材料去除率和研磨效率。

## 2 磁场强度理论分析

由上述分析可知, 在抛光磁性材料管件内表面时若要提高研磨压力, 可以通过施加外部压力或增大磁感应强度来实现。

图2所示为4种形状的磁极模型图。研究表明, 磁极表面开槽后可以增加磁性磨粒与管壁的接触面积, 并产生了磁场梯度, 能够促进磁性磨粒在磁极边缘的搅拌更替, 提高抛光效率<sup>[10]</sup>, 且所开凹槽为矩形槽, 槽深与槽宽的比值为1:1时<sup>[4]</sup>, 磁力研磨加工效率最高。为了探究磁极形状对加工区域磁感应强度的影响, 用 ANSOFT 软件对4种形状的磁极模型进行了有限元分析, 并在加工区域靠近管壁一侧添加半圆形的辅助曲线, 绘出此时管内表面的磁感应强度  $B$  的变化曲线。

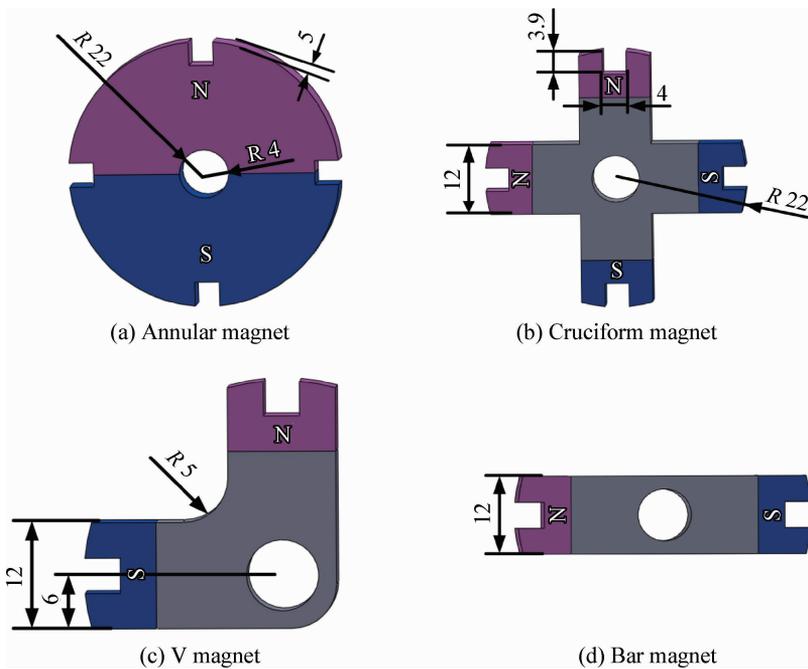


图2 磁极的形状及尺寸

Fig. 2 Shape and size of the magnetic poles (Unit: mm)

图3为磁感应强度分布云图及变化曲线。由图3可看出, 磁极为环形磁极时, 加工区域(半圆弧 A-B-C 的辅助曲线处)的磁感应强度最大,

最大值达到了 0.8 T 左右, 且磁感应强度在 0.35 T 以上的长度区间最大, 达到了 50 mm 左右, 而图3(b)~(d)中加工区域磁感应强度的最大值不

足 0.35 T。由式(3)可知,研磨压力与磁感应强度的平方成正比,磁感应强度越大,研磨压力越大;由式(2)可知,材料去除量与研磨压力成正

比,因此研磨压力越大,材料去除量越大,则加工效率越高,因此理论上来说磁极形状为环形时加工效率最高。

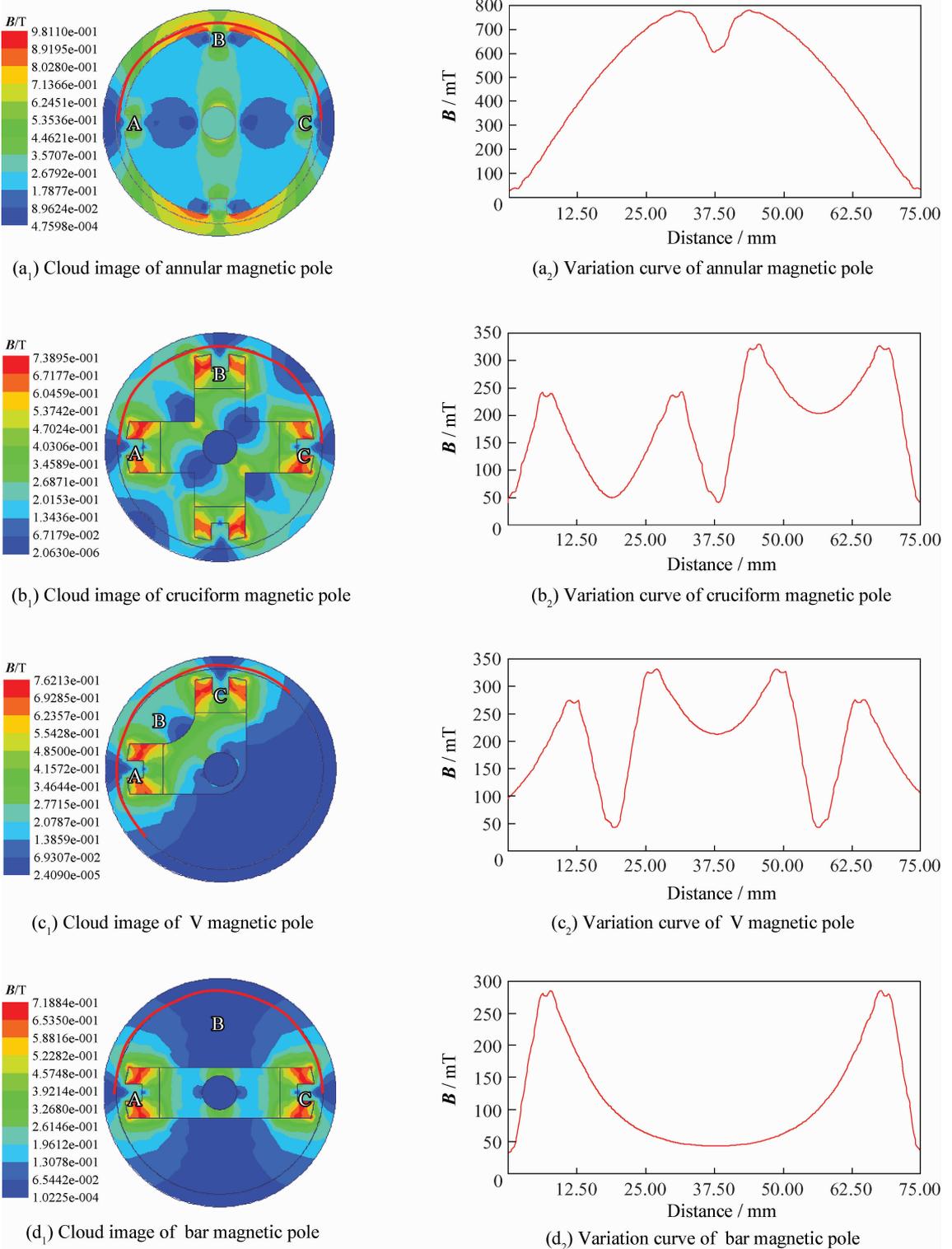


图 3 4 种不同磁极形状的磁感应强度分布云图及变化曲线

Fig. 3 Magnetic flux density cloud images and variation curves of four different magnetic pole shapes

### 3 试验过程及数据分析

从上述分析可知:引入旋转磁场、磁极形状定为环形都可以提高材料去除效率。但材料去除量与加工质量没有必然的因果关系,因此为了研究磁极形状、加入机械旋转磁场对加工质量的影响,探究最佳的磁极转速,在车床上改装并研制的一套磁力研磨试验装置(如图4所示)。工件固定在车床三爪卡盘上,磁极固定在连接杆上,连接杆通过联轴器与伺服电机的主轴相连,伺服电机固定在车床溜板上,移动车床的大溜板使磁极伸入到工件内部,加工时,把磁性磨粒填入工件内表面与磁极之间(每间隔10 min添加一次),伺服电机带动磁极旋转,同时使工件旋转,改变磁极形状、磁极的转速及磁极运动状态,观察试验现象及各种情况下的加工效果。

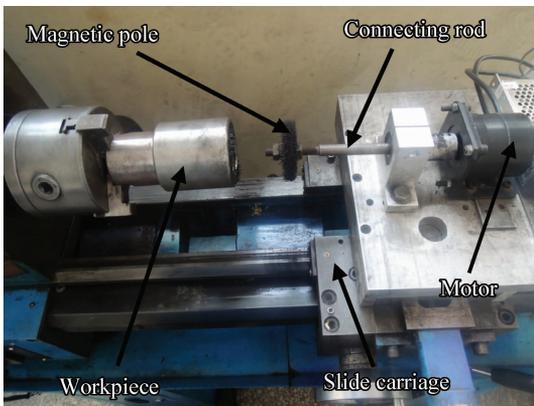


图4 试验装置图

Fig. 4 Photograph of the experiment

#### 3.1 试验条件

试验时选用4种不同形状的订制钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁极,其主要由稀土元素钕(Nd)、铁(Fe)、硼(B)组成,其中以Fe元素为主,同时含有质量分数约35%Nd、1%B,钕铁硼永磁极是当代磁体中性能最强的磁极,不仅具有高剩磁、高矫顽力、高磁能积,而且容易被加工成各种尺寸;工件材料为40Cr钢,尺寸为 $\phi 51\text{ mm} \times \phi 48\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ ;所用磁性磨粒由Fe粉和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 烧结而成;加工间隙的大小与磁回路间的磁感应强度大小有密切关系,加工间隙过大导致磁感应强度减弱,研磨压力减小,而加工间隙过小会使磁感应强度增大,易划伤工件表面,研究表明加工间隙在1~3 mm时加工效果最佳<sup>[11]</sup>,因此文中取加

工间隙为2 mm;研磨液为劳力恩SR-9912水溶性研磨液(大连盛瑞贝尔化工有限公司),该研磨液的散热性能优良,可以起到散热及润滑的作用。具体试验条件见表1。试验前后,用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪检测加工区域的表面粗糙度、用VHX-500F超景深3D显微镜观测工件的表面微观形貌。

表1 试验相关参数

Table 1 Related parameters of the experiment

Parameters	Values
Size of magnetic abrasive particles/ $\mu\text{m}$	250
Size of Fe/ $\mu\text{m}$	200-250
Size of $\text{Al}_2\text{O}_3$ / $\mu\text{m}$	40-50
$m_{\text{Fe}} : m_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	2 : 1
Sintering time/h	6
Sintering temperature/ $^{\circ}\text{C}$	1 100
Working gap/mm	2
Lubricant/mL	5
Magnet revolution/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	0, 1 500, 2 000, 2 800
Workpiece revolution/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	600
Feed speed/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1
Processing time/min	60

#### 3.2 磁极形状的影响

为了验证不同磁极形状对加工效率的影响,设定工件转速为600 r/min,磁极转速为2 000 r/min进行一系列试验,结果如图5所示。

相同的加工时间(60 min)内,环形磁极时工件表面粗糙度值由 $R_a 4.5\ \mu\text{m}$ 下降到 $R_a 0.25\ \mu\text{m}$ , $\Delta R_a$ 为 $4.25\ \mu\text{m}$ ,而另3种形状磁极加工后工件表面的粗糙度较高。这是由于环形磁极时加工区域磁感应强度大,因此磁性磨粒对工件表面的压力大,提高了工件材料的去除率,进而提高了加工效率。

加工过程中磁性磨粒受到工件表面施加的摩擦力,特别是在加工初期工件表面粗糙不平,摩擦力较大,一些磁性磨粒刷在摩擦力和磁吸引力的共同作用下断裂,加工区域产生游离的磁性磨粒,这部分磨粒被旋转的磁极重新吸引组成磨粒刷,如同磨粒在磁极表面不断流动。对于环形

磁极,磁极吸附磨粒的弧面是一个连续的圆面,因而磁性磨粒可以在磁极上不断流动,促进磨粒的更替,提高加工效率。而对于另外3种形状的磁极,磁极吸附磨粒的弧面是不连续的,磨粒在流动过程中逐渐向磁极的边缘积累,积累到一定程度后被吸附到磁极的侧面,造成磁性磨粒流失、加工效率降低。而且相对于另外3种形状的磁极,使用环形磁极时磁性磨粒与管壁的接触面积大,对管壁的加工频率高,因此加工效率较高。综上所述,抛光导磁性圆管内表面时边缘开槽的环形磁极为最佳选择。

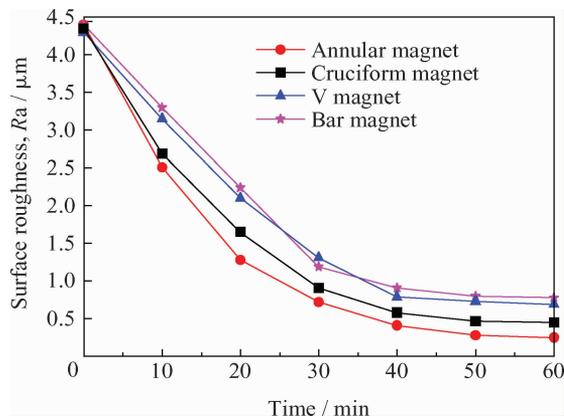


图5 磁极形状不同时表面粗糙度值随加工时间的变化  
Fig. 5 Variation of the surface roughness with finishing time in different magnet shapes

### 3.3 磁极运动状态及转速的影响

由上述试验及分析可知,当磁极选用边缘开槽的环形磁极时加工效果最好,为进一步探讨旋转磁场对加工效果的影响,提高加工效率,设定工件的转速为600 r/min,磁极的转速分别为0、1 500、2 000和2 800 r/min,进行一系列试验。

磁极的运动状态有磁极静止和磁极旋转两种,磁极旋转又可以有磁极与工件同向旋转、磁极与工件反向旋转两种情况,这两种情况的区别仅在于磁极与工件相对速度的不同,因此文中只考虑了磁极与工件反向旋转的情况。图6所示为不同磁极转速下,工件的表面粗糙度及材料去除量在60 min加工时间内的变化曲线。

由于磁力研磨工艺中存在着“尖点”效应,即表面凸起的的地方磁场强度高,优先被研磨加工<sup>[2]</sup>,因此前10 min加工时间内,不同磁极转速下工件表面粗糙度的变化相差不大,但在后续的加工中,随着工件表面的“尖点”被逐渐的磨钝,

尖点的顶部成为微小的平台,需要去除的材料增多,因此磁极静止状态下表面粗糙度值的变化较为缓慢,而磁极旋转使得研磨压力变大、摩擦力增大,并且在相同加工时间内磁性磨粒磨削工件内表面某一位置的次数增加,因此磁极旋转时工件的材料去除量增多,加工效率提高<sup>[12-13]</sup>。但加工过程中存在最佳磁极转速,当磁极转速小于最佳转速时,研磨压力过小、摩擦力减小导致材料去除量降低,因此研磨效率会下降。

随着磁极转速的增加,磁性磨粒及研磨液所受到的离心力会相应增大,因此摩擦力就越大,当摩擦力过大时,会在表面留下划痕且导致一部分磁性磨粒携带研磨液迸溅出加工区域<sup>[14-15]</sup>,另一部分磁性磨粒贴附在工件内表面上随工件旋转,致使参与切削的磁性磨粒、参与润滑及降温的研磨液减少,因此需要在研磨过程中不断添加磁性磨粒及研磨液,造成资源的浪费、加工效率的降低。

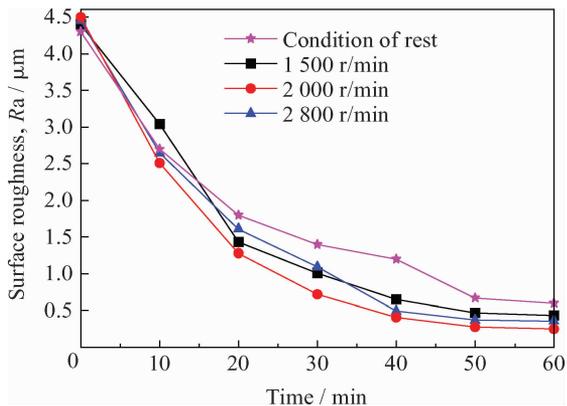


图6 磁极转速不同时表面粗糙度值随加工时间的变化  
Fig. 6 Variation of the surface roughness with finishing time in different rotation speeds of magnet

图7为工件转速一定、磁极转速不同时,研磨前后工件内表面的微观形貌变化及R曲线的变化情况。如图7(a)所示研磨前工件的内表面存在很多沟壑、凸起及微裂纹等缺陷,表面粗糙度达到了 $Ra\ 4.5\ \mu\text{m}$ ,用磁力研磨法研磨60 min后工件内表面的表面缺陷明显被去除,解决了工件表面凹凸不平的问题,表面粗糙度由 $Ra\ 4.5\ \mu\text{m}$ 降到 $Ra\ 0.4\ \mu\text{m}$ 左右,特别在2 000 r/min的磁极转速下,表面粗糙度由 $Ra\ 4.5\ \mu\text{m}$ 降到 $Ra\ 0.25\ \mu\text{m}$ ,且工件表面变得平滑,沟壑、微裂纹等表面缺陷已基本被去除。

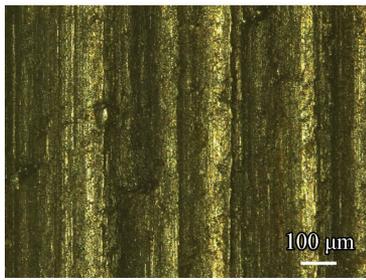
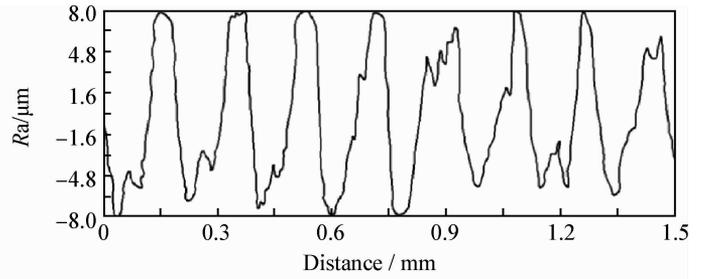
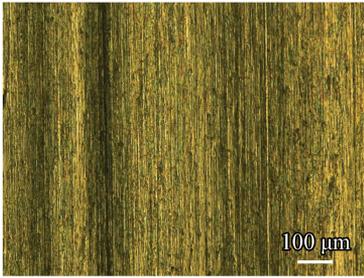
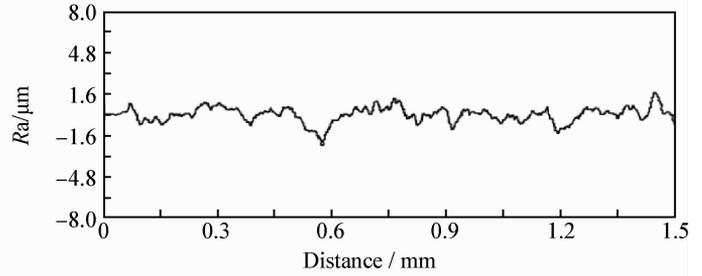
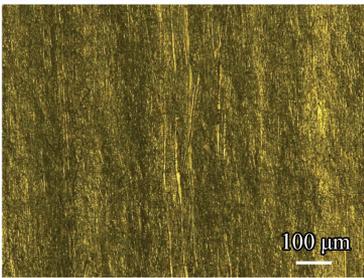
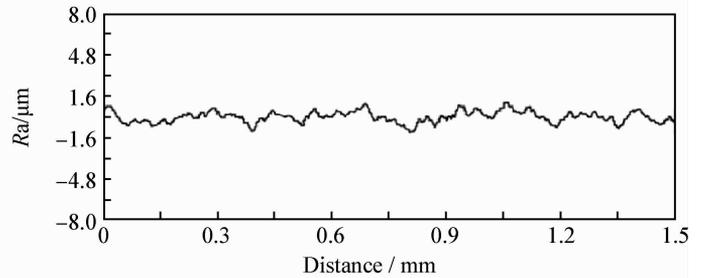
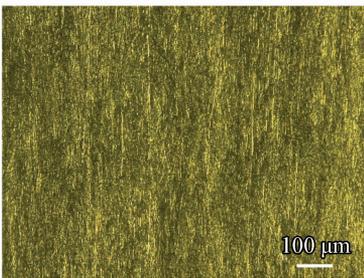
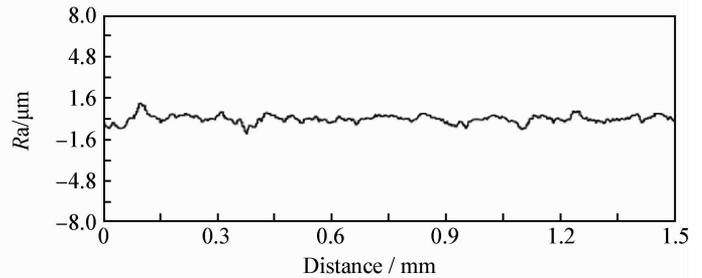
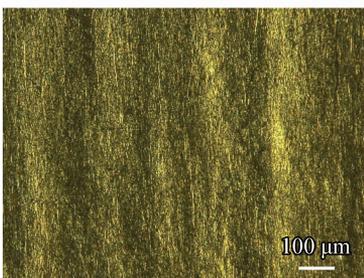
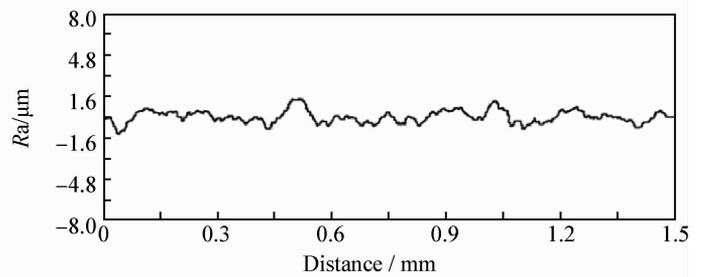
(a<sub>1</sub>) Original surface morphology(a<sub>2</sub>) Original Surface roughness:  $Ra\ 4.5\ \mu\text{m}$ (b<sub>1</sub>) 0 r/min, surface morphology(b<sub>2</sub>) 0 r/min, Surface roughness:  $Ra\ 0.46\ \mu\text{m}$ (c<sub>1</sub>) 1 500 r/min, surface morphology(c<sub>2</sub>) 1 500 r/min, Surface roughness:  $Ra\ 0.36\ \mu\text{m}$ (d<sub>1</sub>) 2 000 r/min, surface morphology(d<sub>2</sub>) 2 000 r/min, Surface roughness:  $Ra\ 0.25\ \mu\text{m}$ (e<sub>1</sub>) 2 800 r/min, surface morphology(e<sub>2</sub>) 2 800 r/min, Surface roughness:  $Ra\ 0.41\ \mu\text{m}$ 

图7 工件转速 600 r/min,磁极转速不同时研磨前后的表面微观形貌及表面粗糙度

Fig. 7 Surface morphologies and surface roughness before and after processing in different rotation speeds of magnet with workpiece revolution of 600 r/min

## 4 结 论

(1) 磁力研磨法抛光铁磁性管件内表面时,采用磁极内置、引入机械旋转磁场的方法可以增大研磨压力,提高抛光效率,得到较好的表面质量。

(2) 有限元分析及试验结果表明,抛光磁性材料管件内表面时磁极的形状会影响加工效率及加工质量,选用环形磁极时加工区域的磁感应强度最大,磁性磨粒对工件表面的研磨压力大,加工效率最高。

(3) 当引入旋转磁场抛光铁磁性圆管内表面时,工件与磁极间存在着最佳相对转速,在此转速下得到的加工效果最佳。

## 参考文献

- [1] 刘海山,赵玉刚,吕晓倩. 铁磁材料内表面的磁力研磨研究[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(1): 110-112.  
Liu H S, Zhao Y G, Lv X Q. Study on magnetic abrasive finishing to the inner surface of ferromagnetic material [J]. Machine Building and Automation, 2008, 37(1): 110-112 (in Chinese).
- [2] Yamaguchi H, Shinmura T. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process [J]. Precision Engineering, 2004, 28(2): 135-142.
- [3] Yamaguchi H, Shinmura T. Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system; discussion of the characteristic abrasive behavior [J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 237-244.
- [4] 肖作义,赵玉刚,吴文权. 磁极形状对磁力光整加工的影响[J]. 机械制造, 2003, 41(8): 45-46.  
Xiao Z Y, Zhao Y G, Wu W Q. Study of the different shaped magnetic poles for the magnetic abrasive finishing [J]. Machinery Manufacturing, 2005, 41(8): 45-46 (in Chinese).
- [5] Nteziyaremye V, Wang Y C, Li W, et al. Surface finishing of needles for high-performance biopsy [J]. Procedia Cirp, 2014(14): 48-53.
- [6] 尹绍辉. 磁场辅助超精密光整加工技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2009.  
Yin S H, Magnetic field assisted super precision polishing technology [M]. Changsha: Hunan University Press, 2009 (in Chinese).
- [7] Chang G W, Yan B H, Hsu R T. Study on clindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives [J]. International journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(5): 575-583.
- [8] 芦亚萍,马季,蔡军伟,等. 模具自由曲面磁力超精研磨控制系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 163-166.  
Lu Y P, Ma J, Cai J W, et al. Study of intelligent control system in magnetic abrasive finishing on molds free surface process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Magchinery, 2006, 37(7): 163-166 (in Chinese).
- [9] 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 Y, Liu Z Q, Wang X K. Ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Magchinery, 2013, 44(10): 294-298 (in Chinese).
- [10] 陈燕,张耀明,邓超,等. V型磁铁在SUS304管内表面抛光中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 187-191.  
Chen Y, Zhang Y M, et al. Application of V-shaped magnet in polishing the inner surface of the SUS304 tubing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 187-191 (in Chinese).
- [11] 王显康,陈燕,周锟. 磁力研磨法在微小凹槽表面光整加工中的应用[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 243-245.  
Wang X K, Chen Y, Zhou K. Application research on magnetic abrasive finishing method to the finishing machining of micro-groove [J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(2): 243-245 (in Chinese).
- [12] Kang J, George A, Yamaguchi H. High-speed internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing [J]. Procedia Cirp, 2012(1): 414-418.
- [13] 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.
- [14] 张桂香,赵玉刚,赵东标,等. 大壁厚内圆槽磁力光整加工装置设计[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 861-864.  
Zhang G X, Zhao Y G, Zhao D B, et al. Design of a magnetic-abrasive finishing device for inner surface groove of thick tubing [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 861-864 (in Chinese).
- [15] Shinmura T, Shinbo Y, Iizuka T. A new internal finishing process of non-ferromagnetic tubing by applying a rotating magnetic field [J]. The Japan Society for Precision Engineering, 1993, 59(6): 945-951.

(责任编辑:常青)