

中国表面工程
China Surface Engineering
ISSN 1007-9289, CN 11-3905/TG

《中国表面工程》网络首发论文

题目：仿形磁极头对电磁研磨管件内表面形成的影响
作者：潘明诗，陈燕，张东阳
网络首发日期：2022-08-30
引用格式：潘明诗，陈燕，张东阳. 仿形磁极头对电磁研磨管件内表面形成的影响 [J/OL]. 中国表面工程. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20220830.0946.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289. 20220119001

仿形磁极头对电磁研磨管件内表面形成的影响*

潘明诗 陈燕 张东阳

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

摘要：针对 304 不锈钢管内表面的氧化膜难加工以及加工后表面存在沟状纹理、微裂纹、凹坑等质量问题，采用磁粒研磨法去除 304 不锈钢管内表面氧化膜。通过设计不同锥度的磁极头并结合模拟仿真探究加工区域磁场强度和研磨压力变化规律，最后通过研磨试验与仿真进行对比。结果表明：随着磁极头锥度增大，磁场强度呈先增大后减少的趋势，研磨压力受磁场强度的影响较大也呈先增大后减小趋势。当磁极头锥度为 80°时磁场强度最强，研磨压力最大，研磨后管件内表面粗糙度由原始 Ra 3.06 μm 降至 Ra 0.23 μm ，表面最大高度差由原始 47.4 μm 降至 19.6 μm ，内表面的氧化膜均被去除呈现出均匀的研磨痕迹。磁性磨粒运动受力仿真以及研磨试验均表明，采用 80°仿形磁极头进行加工可以有效提高 304 不锈钢管内表面质量。

关键词：仿形磁极头；磁粒研磨；交变磁场；研磨压力；304 不锈钢管；表面质量

中图分类号： TG356

Effect of Profiling Magnetic Pole Head on the Inner Surface of Electromagnetic Finishing Pipe Fittings

Pan Mingshi Chen Yan Zhang Dongyang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Anshan 114051, China)

Abstract: In view of the difficulty in processing the oxide film on the inner surface of the 304 stainless steel tube and the quality problems such as groove-like texture, micro-cracks and pits on the surface after processing, the magnetic abrasive finishing method was used to remove the oxide film on the inner surface of the 304 stainless steel tube. The variation law of magnetic field intensity and lapping pressure in the processing area is explored by designing magnetic pole heads with different taper and combined with simulation. Finally, the finishing test is compared with simulation. The results show that with the increase of the taper of the magnetic pole head, the magnetic field strength increases first and then decreases, and the lapping pressure increases first and then decreases under the influence of magnetic field strength. When the taper of the magnetic pole head is 80°, the magnetic field strength is the strongest and the lapping pressure is the largest. After finishing, the inner surface roughness of the pipe fitting is changed from the original Ra 3.06 μm down to Ra 0.23 μm . The maximum height difference of the surface is changed from the original 47.4 μm down to 19.6 μm . The oxide film on the inner surface is removed, showing uniform lapping marks. The force simulation of magnetic abrasive particle movement and finishing test show that the machining with 80° profiling magnetic pole head can effectively improve the inner surface quality of 304 stainless steel pipe.

Keywords: profiling magnetic pole head; magnetic abrasive finishing; alternating magnetic field; lapping pressure; 304 stainless steel pipe; surface quality

* 国家自然科学基金(51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金 (B201703)
Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258); Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458); Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Processing (B201703)

0 前言

304 不锈钢材料自身具有强度高、耐腐蚀性好等优点，且其机械加工性较好可以获得较高的表面光洁度，所以常用不锈钢制成零件应用于航空航天、医疗等领域^[1-2]。目前，我国无缝不锈钢管主要利用穿孔机、轧管机、定径机、张力减径机和扩径机等设备进行制作^[3-4]。无缝不锈钢管经过高温固溶处理其内外表面都会牢固结合一层坚硬且较厚的氧化膜，传统加工方法去除氧化膜较为困难且加工后表面存在沟状纹理、微裂纹、凹坑等缺陷，严重影响液体流速稳定性且易使管件在使用过程受到腐蚀，降低管件的使用寿命。针对 304 不锈钢管外表面抛光的研究较多而对内表面的精密加工依旧是个难题。

磁粒研磨法广泛应用于管件内表面加工领域，具有自锐性、自适应性、柔性和仿形性等优点^[5-6]。张二朋等^[7]在管外放置四个永磁铁形成四组闭合磁感线吸引内部磁性磨粒进行加工，研磨过后表面质量得到改善，但由于磁性磨粒始终吸附在工件表面不能及时更新导致研磨效率相对较低且磨粒使用寿命较短。XIE 等^[8]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粒研磨磁力源的可行性，虽然有效地解决了磨粒更新问题但磁场强度较弱，研磨压力较小。王栋等^[9]在利用永磁铁对 V 形槽进行加工时，通过对永磁铁磁极头形状进行设计，有效地提高了加工区域的磁场强度，验证了通过改变磁极头形状提高磁场强度的可行性。该文在磁粒研磨的基础上，使用电磁装置形成交变磁场对管件进行研磨加工，解决磁性磨粒更新问题，通过设计仿形磁极头的形状尺寸，进一步提高研磨区域的磁场强度和研磨压力，最终高效去除 304 不锈钢管件内表面的氧化膜完成光整加工。

1 新型磁粒研磨头及装置的原理与设计

1.1 磁场发生装置原理

为了在加工区域产生交变磁场，选用电磁发生装置对 304 不锈钢管进行磁粒研磨，通过对铁芯进行设计，最终选用四个 E 型硅钢片铁芯和两个连接块进行拼接形成一个完整的闭合铁芯，将 E 型铁芯分成三个区域利用一根漆包线对 E 型铁芯的三个区域进行缠绕，如图 1 所示。

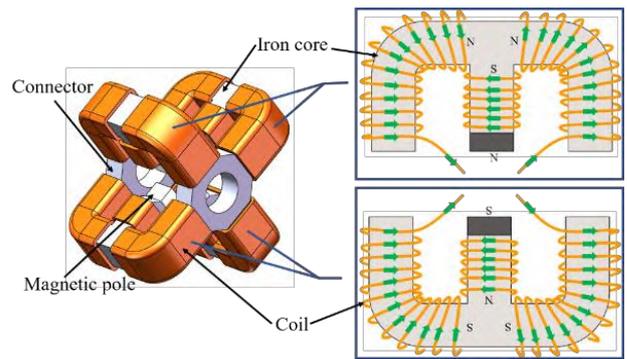


图1 电磁铁原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnet

在每个 E 型铁芯上利用一根漆包线进行缠绕，缠绕完成后依次连接。当通入电流时由于铁芯两端区域的线圈分别沿相反方向缠绕，因此可以形成同极磁场对冲现象^[10]，且由于极性相同的两磁极头发散出来的磁感线相互排斥，从而使得更多的磁感线向两侧发散，在铁芯中间区域缠绕线圈可以聚集发散出来的磁感线，磁感线越密集所形成的磁场越强。将管件水平放置于电磁铁中央时，E 型铁芯中部端面与管件内表面的距离过大使得电磁铁漏磁严重，此时管件研磨区域的磁场强度较小导致研磨压力过小而不能有效去除材料表面的缺陷。为了解决磁场强度过低的问题，在 E 型铁芯中部端面上加装磁极头，对铁芯散发出来的磁感线起到了聚集承接的作用，同时缩短了铁芯与管件内表面的距离，提高了研磨区域磁场强度。

1.2 磁粒研磨加工机理

采用磁粒研磨法加工 304 不锈钢管的加工原理如图 2 所示，管件置于电磁铁中央，四个磁极头之间夹角 90° 沿管件圆周方向排布，将磁性磨粒放置于管件内部，磁性磨粒是烧结法制成的固体小颗粒，基体材料为铁保证了磁性磨粒的导磁性，表面固结着三氧化二铝研磨相起到了去除材料的作用^[11]。磁性磨粒遇到磁场时会被磁化，磁化后的磁性磨粒沿着磁场的磁感线方向排列，由于磁极头置于管件外部，因此磁性磨粒受到磁场力的作用紧紧地仿形贴附于管件内表面。当电磁铁的线圈中通入正弦电流时，便形成了周期性变化的交变磁场。此时，置于磁场中的磁性磨粒沿管件内表面不断震动并进行滑移滚动，从而使磁性磨粒的切削刃实现自适应更新。在进行加工时，管件内部的磁性磨粒受到磁极的吸引与磁极保持相对静止状态，数控机床夹持工件进行匀速旋转，磁性磨粒与管件内表面发生相对运动并在磁场力、摩擦力和离心力的共同作用下对管件内表面进行刻划、摩擦、滚压等作用，最终实现对

管件内部的光整加工^[12-14]。

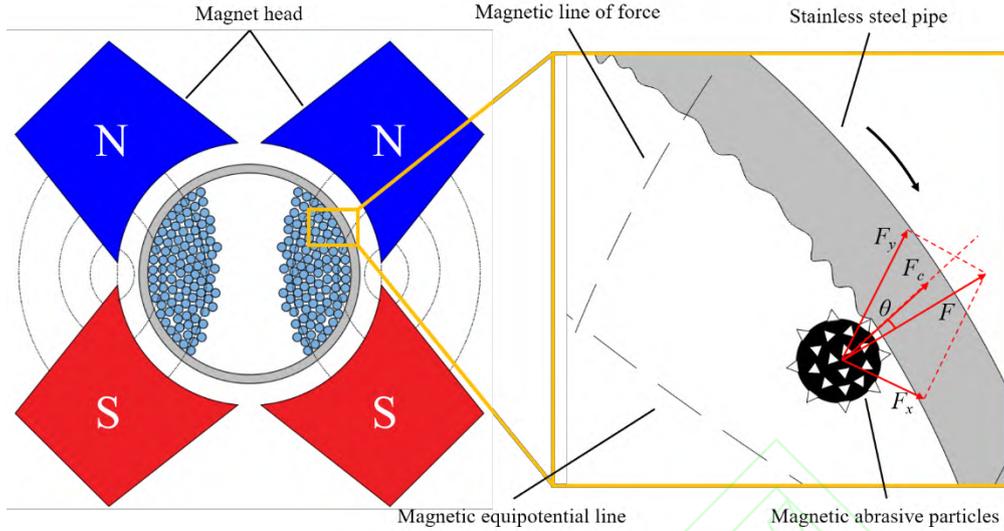


图2 加工原理图

Fig. 2 Machining schematic diagram

采用磁粒研磨法加工时，研磨压力的大小决定加工效果的好坏。因此，对磁场中的单颗磨粒进行受力分析，如图2所示，管件所受的研磨压力主要与磁场力和离心力有关，磁场力公式如(1)所示^[8]。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= V\chi\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \\ F_y &= V\chi\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \\ F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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量； F_y 为合力 F 沿磁力线方向的分量； 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。

化简可得：

$$F = V\chi\mu_0 H \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2} = \frac{V\chi B}{\mu_0^2} \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y} \right)^2} \quad (2)$$

式中： $B = \mu_0 H$ ， μ_0 为空气的相对磁导率。

管件在旋转时，不仅在磁性磨粒和管件内表面之间产生较大的相对移动速度，而且会使磁性磨粒对管件内表面产生一个瞬时离心力^[15]。离心力 F_c 的表达式如公式(3)所示。

$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad (3)$$

式中： m 为磁性磨粒的质量； v 为磁性磨粒对于管件的相对速度； R 为管件内径。

由上述分析可得，研磨压力 P 为磁场合力 F 对于管件的法向分量与离心力之和^[16]，如公式(4)所示。

$$P = F \cos \theta + F_c = \frac{V\chi B}{\mu_0^2} \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y} \right)^2} \cos \theta + m \frac{v^2}{R} \quad (4)$$

式中： θ 为合力 F 与管件法线方向的夹角。

从公式(4)分析可知，可以通过增强磁场强度或增加相对速度的方法增大研磨压力，增大相对速度的同时增大了磁性磨粒的瞬时离心力，当离心力足够大时会使磁性磨粒挣脱磁场的束缚，随管件进行同步转动从而失去加工能力。因此，当相对速度一定时，通过对电磁装置的磁极头进行设计，改善加工区域的磁通密度以增强磁场进而达到增大研磨压力的目的。磁通量计算公式如(5)所示。

$$\phi = BS \quad (5)$$

式中： B 为磁感应强度； S 为与磁力线方向垂直的面积； ϕ 为穿过面积 S 的磁通。

电磁铁原理是电流的磁效应，当电磁铁所缠绕的线圈匝数固定不变时，线圈中通入定值电流，在铁芯内部所产生的磁通量 ϕ 是固定不变的。由公式(5)可以看出当磁通量 ϕ 固定时，为了提高磁感应强度 B 可以减小磁感线发散处的截面积 S 。基于以上分析为了增大磁感线强度 B ，对磁极头进行优化。

2 模拟仿真分析与研磨试验

为了探究不同形状的磁极头对管件加工区域磁场的影响，利用Maxwell软件对加工区域的磁场进行有限元仿真分析。首先根据所设计的电磁铁利用Solidworks软件进行实体建模，然后将模型导入Maxwell软件中分析不同形状的磁极头所产生的磁场，以寻求加工区域的最优磁场。

2.1 低频交变磁场仿真分析

陈燕等^[17]对永磁铁磁极头进行优化并对不同形状的磁极头进行仿真,当采用上窄下宽锥度为 25° 的梯形磁极头时,在加工区域能够获得较强的磁场更有利于磁粒研磨加工。而电磁铁所产生的磁场在

空气中漏磁严重,因此通过优化磁极头的形状来提高其磁场强度时,不能单纯的以永磁铁磁极头的理论进行探究,为此设计了三种不同形状的磁极头,如图3所示。

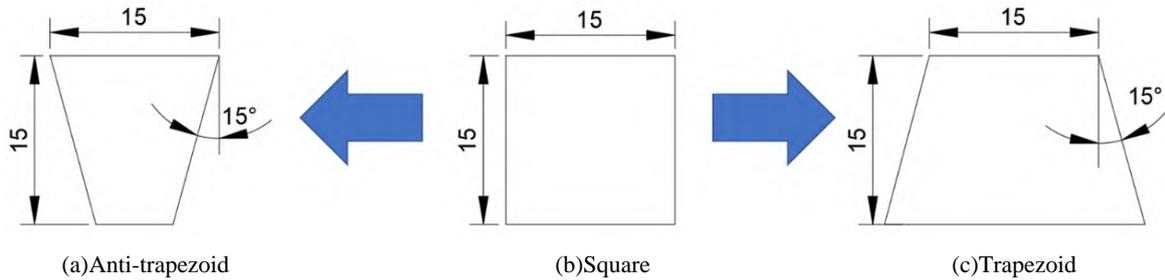


图3 不同形状磁极头

Fig. 3 Magnetic pole heads with different shapes

选用直径为 0.77 mm 的漆包线,在E型铁芯的两端分别缠绕450匝线圈,中间区域缠绕180匝线圈,磁场模拟参数如表1所示。

表1 磁场强度仿真参数

Table 1 Simulation parameters of magnetic field intensity

Parameters	Values
Total number of turns of coil /r	4 320
AC effective voltage/V	72
Coil resistance/ Ω	24
Frequency/Hz	3

采用表1的磁场模拟仿真参数对图3中三种不同形状的磁极头进行磁场仿真,取圆管内表面加工区域的一周为测量点,从仿真结果中提取 0.25 s 即 $3T/4$ 电流最大时加工区域的磁场强度曲线,如图4所示。

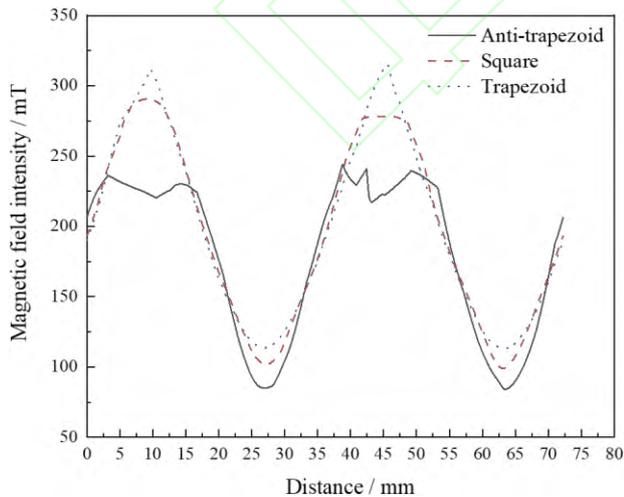


图4 不同形状磁极头磁场强度曲线

Fig. 4 Magnetic field intensity curves of magnetic pole heads with different shapes

从图4中可以看出,用三种不同形状的磁极头

进行磁场模拟时,在加工区域所形成的磁场在圆管内表面圆周方向上所覆盖的范围大小一致,但是三者的最强磁场强度略有不同,在 0.25 s 时,反梯形磁极头的电磁铁所产生的最强磁场可以达到 0.25 T ,方形磁极头的电磁铁所产生的最强磁场能够达到 0.3 T ,梯形磁极头的电磁铁所产生的最强磁场可以达到 0.32 T ,造成这种差异的原因是由于四个磁极头在管件外部沿着圆周方向均匀分布,当磁极头形状从反梯形到方形再到梯形时N、S磁极头之间的距离越来越小,大幅减少漏磁,并使较多的磁感线沿着磁极头尖端的狭窄区域发散出来,一定程度上减小了磁感线发散处的截面积 S ,两个磁极之间形成了较强的磁场,因此辐射到加工区域的磁场强度也有所增强。

参考上述仿真结果及分析,由于磁场在发散过程中有尖端效应,且为了减少磁极之间的距离,设计了带弧度的仿形磁极头,针对磁极头锥度从 60° 到 90° 每 5° 取一个磁极头模型进行探究,磁极头形状如图5所示。

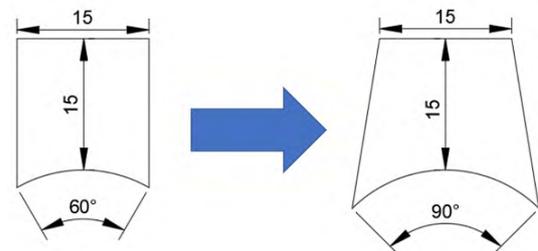
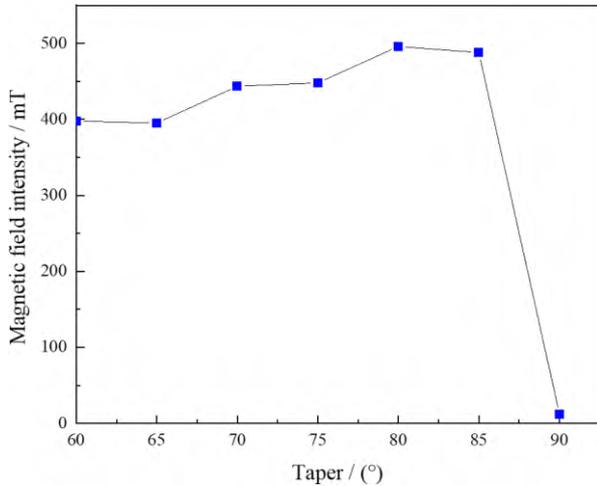


图5 磁极头锥度变化图

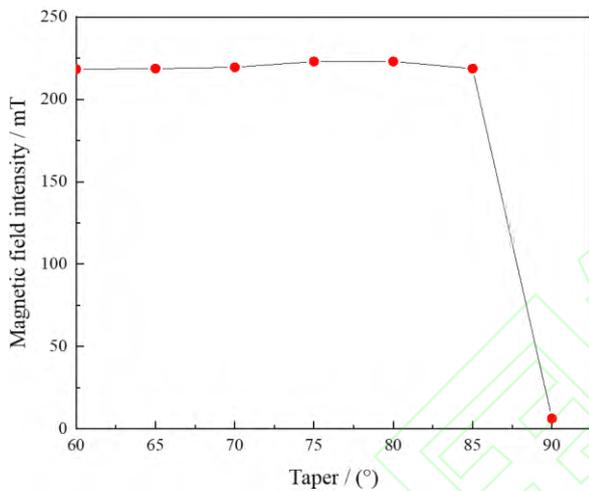
Fig. 5 Variation diagram of magnetic pole head taper

从图5中可以看出,随着磁极头锥度不断增大磁极头的体积不断增大,这就导致了两个磁极头在尖端的间距越来越小,当磁极头锥度达到 90° 时,两个磁极头的尖端相互接触形成了一个整体。对每种

磁极头进行磁场仿真，仿真结果如图 6 所示。



(a) Strongest magnetic field



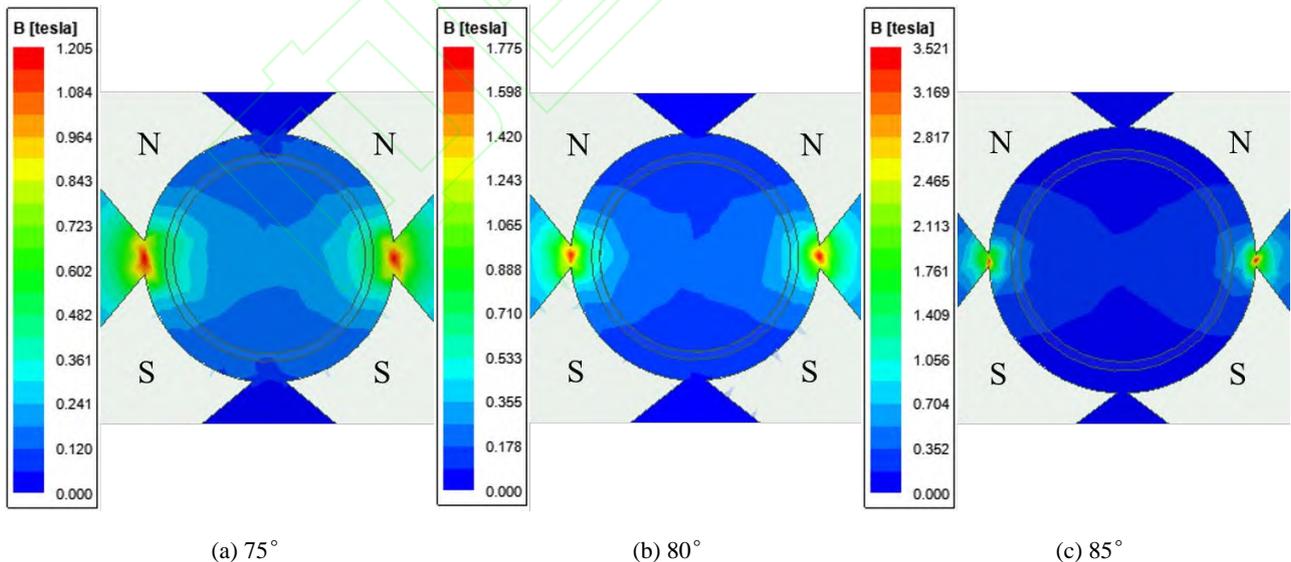
(b) Average magnetic field

图6 不同锥度磁极头磁场强度曲线图

Fig. 6 Magnetic field intensity curve of magnetic pole head with different taper

从图 6a 可以看出，60° 仿形磁极头在方形磁极头的基础上改变了其端面弧度，磁场强度由 0.35 T 提升至 0.39 T，且随着磁极头锥度不断增大在加工区域形成的磁场先增强后减弱。当磁极头的锥度为 80° 时在加工区域所产生的磁场最强，继续增大磁极头的锥度直至达到 90° 时，磁极头两两相接触，电磁铁所产生的磁感线会在铁芯内部形成闭合回路，只有极小部分的磁感线在空气域中形成闭合回路导致加工区域的磁场强度急剧衰减。加工区域的总体磁场强度可以用其平均磁场强度来衡量，观察图 6b 可知，随着磁极头的锥度不断增大平均磁场强度不断增强在磁极头锥度为 80° 时达到最强，继续增大磁极头锥度平均磁场强度不断减弱在锥度为 90° 时达到最弱，不考虑磁极头锥度为 90° 时的平均磁场，可以明显看出其他锥度的磁极头所产生的平均磁场强度相差无几。

综上所述，当磁极头锥度为 80° 时产生的磁场最强利于磁粒研磨加工，但是在磁粒研磨加工时，磁场梯度变化和磁场覆盖面积也一定程度上影响着加工效果。因此，选取了锥度为 80° 时的磁极头以及 75°、85° 的磁极头做进一步的模拟分析，探究其磁场分布规律寻求最优磁场。



(a) 75°

(b) 80°

(c) 85°

图7 不同锥度磁极头磁场云图

Fig. 7 Magnetic field nephogram of magnetic pole head with different taper

通过观察75°、80°、85°三种不同锥度的磁极头所形成的磁场云图，可以看出随着磁极头锥度不断增大，相邻两磁极间的距离越来越小所形成的磁场越来越强，但是磁场辐射的范围也有所下降。

为了更好地探究加工区域磁场强度的具体数值以及磁场覆盖范围，对加工区域的磁场分布进行参数化处理，图8为三种不同锥度磁极头在3T/4时所形成的磁场强度曲线图。

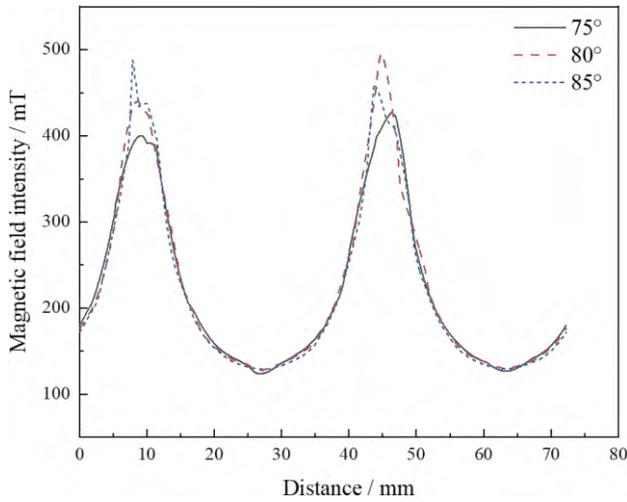
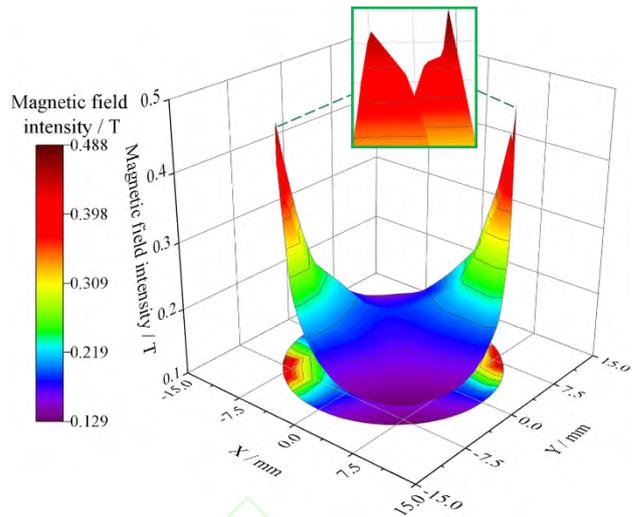


图8 不同锥度磁极头磁场强曲线图

Fig. 8 Magnetic field intensity curve of magnetic pole head with different taper

从图 8 可以看出三条曲线整体上紧密的交叉在一起，线与线之间存在着较小间隙，这说明三种不同锥度的磁场辐射到加工区域内的磁场强度大部分一致，进一步观察曲线的形状特征，可以明显地看出磁极头锥度为 85°、80° 时所形成的最强磁场高于 75° 时的磁场。为了对磁场进行优化设计，对锥度为 80° 和 85° 的磁极头进行空间磁场模拟如图 9 所示。

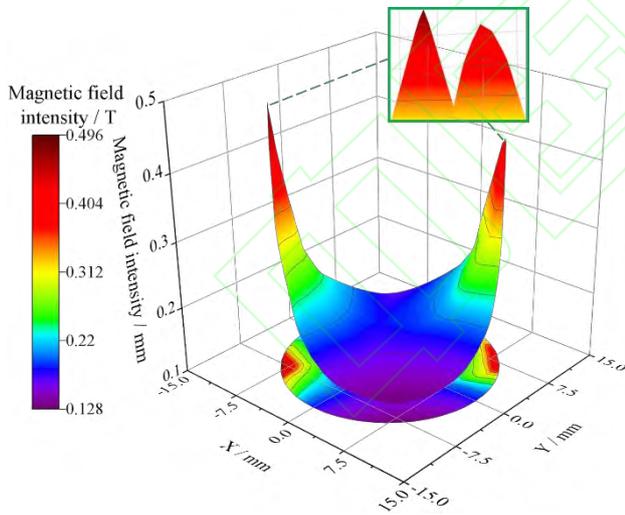


(b) 85°

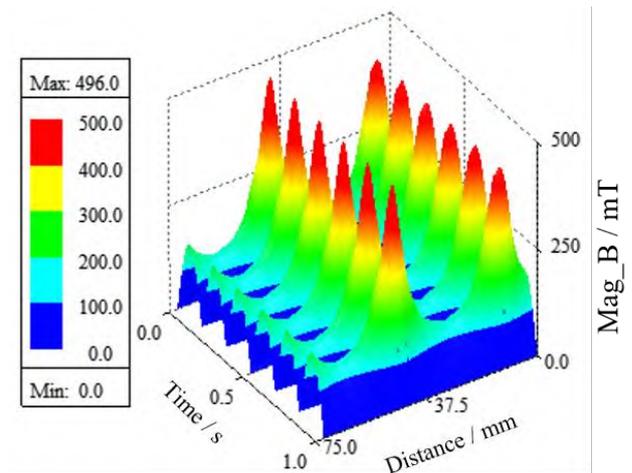
图9 加工区域磁场强度的空间分布图

Fig.9 Spatial distribution of magnetic field intensity in processing area

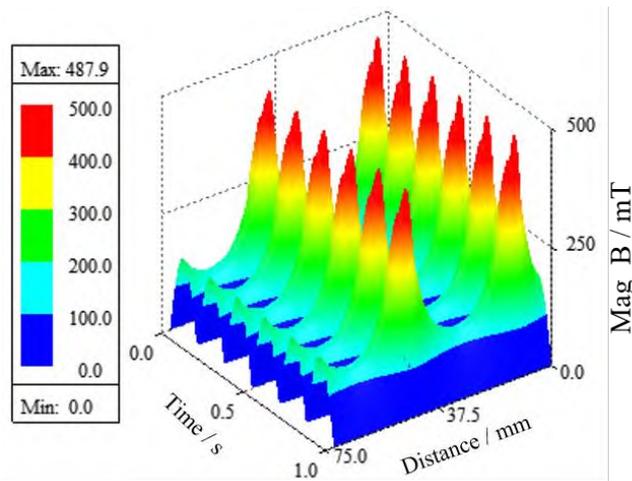
从图9看出锥度为85° 时磁极头过于尖锐，强磁场覆盖范围更为狭窄，这就说明相较于锥度为85° 的磁极头，采用锥度为80° 的磁极头进行加工时，会有较大的加工区域处于0.41 T以上的磁场中。80° 仿形磁极头在整个加工区域所形成的最强磁场为 0.496 T，最弱的磁场为0.128 T，磁场变化梯度为 $\Delta 0.366$ T； 85°仿形磁极头在整个加工区域所形成的最强磁场为0.488 T，最弱的磁场为0.129 T，磁场变化梯度为 $\Delta 0.359$ T。因此，当二者的磁场梯度变化相差不大时，采用80° 锥度的磁极头会有较大的加工区域处于强磁场中，研磨效果更好。



(a) 80°



(a) 80°



(b) 85°

图10 加工区域磁场强度的时间波动图

Fig. 10 Time fluctuation diagram of magnetic field intensity in processing area

图10为加工区域随时间变化的3D磁场图。通电后磁场强度随着时间变化呈波浪状波动，最弱磁场强度均为0，由于80°仿形磁极头在加工区域所形成的磁场最强为0.496 T强于85°仿形磁极头形成的磁场，磁场梯度变化更大。因此，采用80°仿形磁极头更有利于磁性磨粒翻滚更新。

综上所述，从磁场角度分析：80°仿形磁极头与原始的方形磁极头相比磁场强度有了较大的提升，但对于85°仿形磁极头而言优势较小，因此，对

80°、85°仿形磁极头进行磁性磨粒运动分析。

2.2 低频交变磁场下磁性磨粒运动分析

采用正弦电流进行磁粒研磨加工时，电磁线圈通入的电流为3 Hz的正弦电流，电流波形如图11所示。

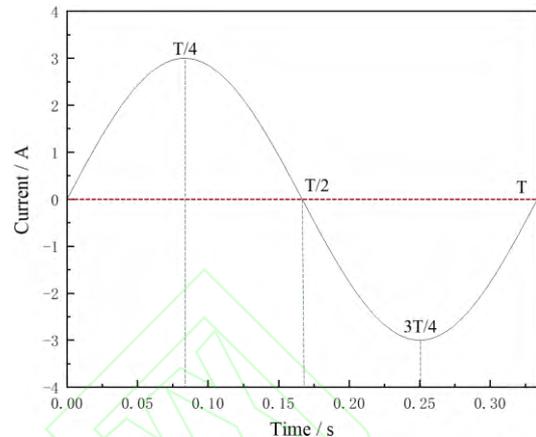


图11 单周期电流波形图

Fig. 11 Single cycle current waveform

在加工过程中电流值呈周期性正负变化，即通电方向不断改变，当线圈反向通电时磁极头的极性将发生改变，形成周期性变化的交变磁场。以80°仿形磁极头为例，探究了单周期内不同时刻所对应的磁场矢量变化如图12所示。

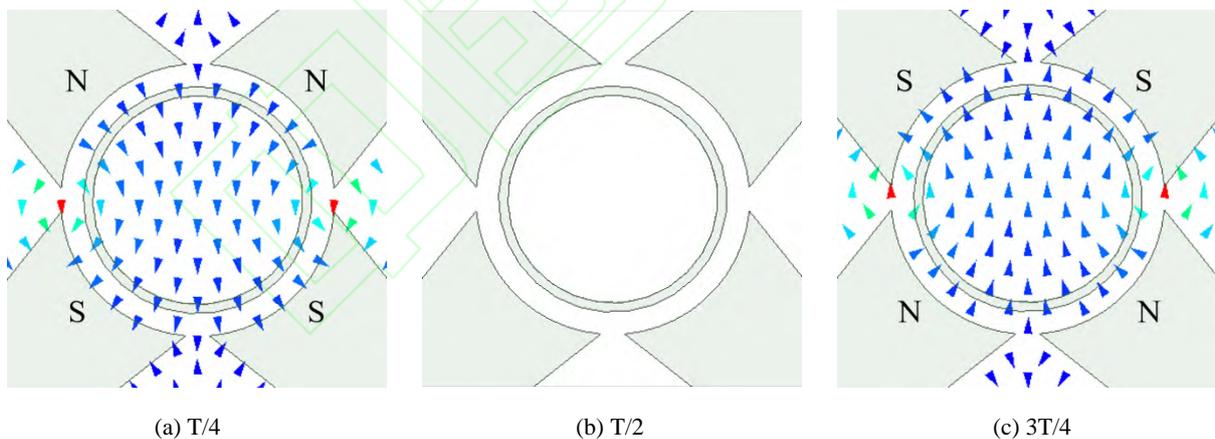
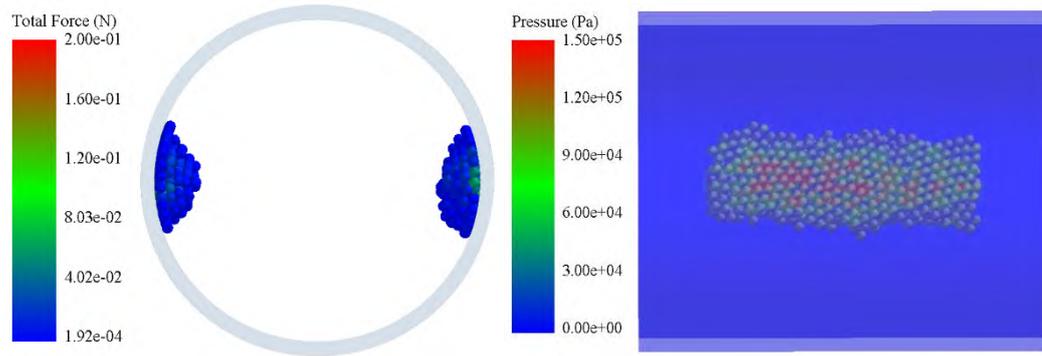


图12 单周期下的磁场矢量图

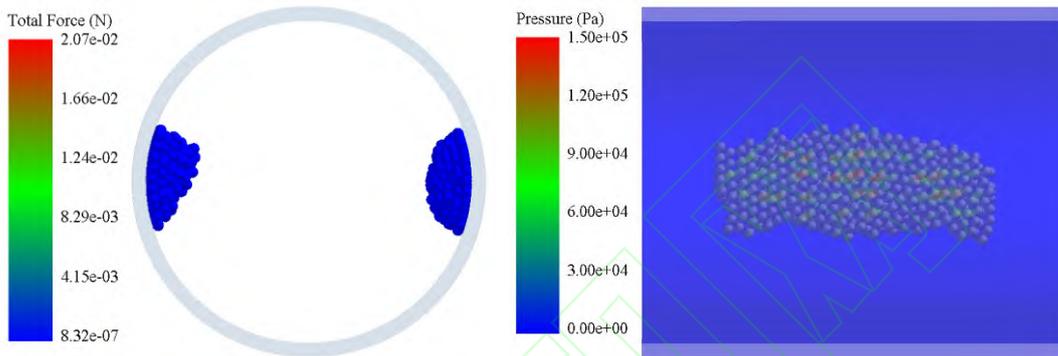
Fig. 12 Magnetic field vector diagram under single period

从图12可以看出，缩短两磁极头之间的距离，产生的闭合磁感线曲率较大。在T/2时电流为0，磁场的有无及闭合磁感线方向不断的变化，导致管件内部的磁性磨粒将不断地重组更新。为了

更加直观地表现出加工时管件中的磁性磨粒的分布状态，采用Edem软件对采用80°、85°仿形磁极头加工时，低频交变磁场下的磁性磨粒团进行运动仿真，磁性磨粒及管壁的受力如图13所示。



(a) 80 °profiling magnetic pole head



(b) 85 °profiling magnetic pole head

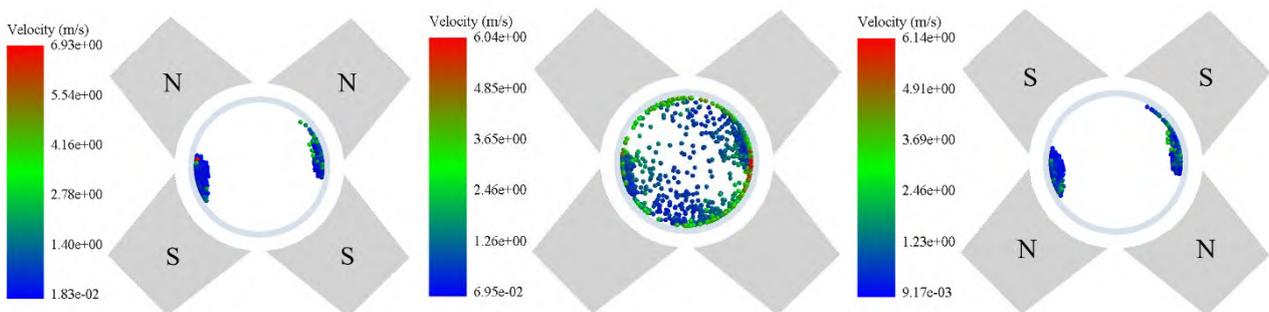
图13 磁性磨粒及管壁受力图

Fig. 13 Stress diagram of magnetic abrasive particles and pipe wall

研磨加工时,磁性磨粒在磁场中沿磁感线分布,由于磁感线的曲率较大导致管中的磁性磨粒在磁场力的作用下相互堆叠形成“山”状磁性磨粒团。当磁极头的锥度不断增大,相邻两磁极头的距离越来越小, N-S 极之间所形成的磁感线曲率越来越大,因此,与 80° 仿形磁极头相比, 85° 仿形磁极头吸引形成的“山”状磁性磨粒团更加高耸如图 13 所示。

观察图 13 中管件内表面受力云图可知:采用 80° 仿形磁极头研磨时,磁性磨粒团对管件内表面的研磨压力较大,中心区域的研磨压力均在 0.12 MPa 之上,边缘区域的研磨压力在 0.03 MPa~0.12 MPa 之间;采用 85° 仿形磁极头研磨时,磁性磨粒团对管件内表面的研磨压力较小,中心区域的研磨

压力均在 0.03 MPa~0.12 MPa 之间,仅有少量磁性磨粒的研磨压力在 0.12 MPa 之上;边缘区域的研磨压力低于 0.03 MPa。研磨压力主要由磁场力提供,当磁性磨粒相互堆叠时,内部磁性磨粒受到磁场力作用为管件内表面处的磁性磨粒提供压力,使研磨压力进一步增大,这就导致磁性磨粒团中心区域研磨压力大于边缘区域。由于 85° 仿形磁极头所形成的磁场强度峰值以及强磁场覆盖面积均小于 80° 仿形磁极头所形成的磁场,所以磁性磨粒团中心区域仅有部分研磨压力在 0.12 MPa 以上,且磁性磨粒团对管件的研磨压力较小。对磁性磨粒进行运动分析如图 14 所示。



(a) T/4-80°

(b) T/2-80°

(c) 3T/4-80°

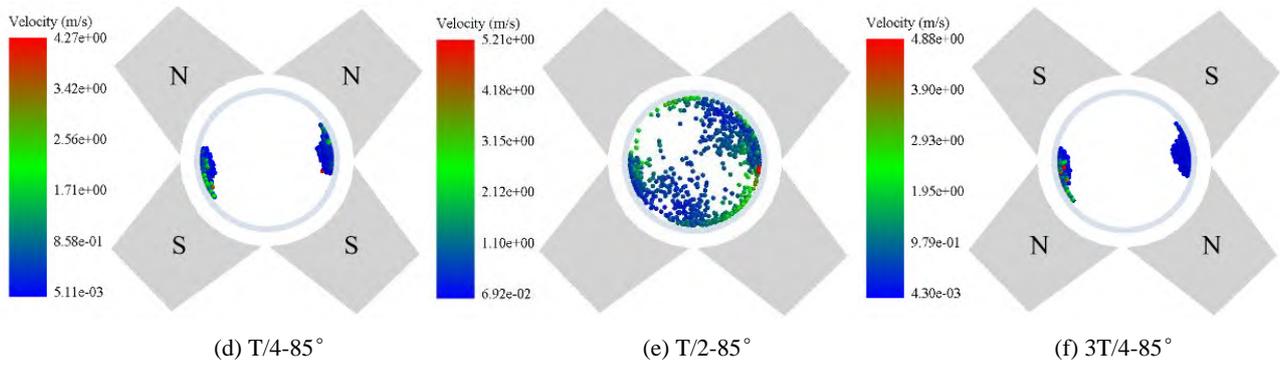


图14 单周期不同时刻下的磁性磨粒运动图

Fig. 14 Motion diagram of magnetic abrasive particles at different times in a single cycle

从图 14 a c d f 可以看出，在磁场最强时，磁性磨粒团稳定贴附于管件内表面，随着管转动磁性磨粒团仍能保持“山”状，且在摩擦力的作用下，其内部的磁性磨粒翻滚速度较慢从而不断地挤压外部的磁性磨粒进行研磨加工，外部区域的磁性磨粒不断翻滚更新。当交变电流的电流值为 0 A 时加工区域磁场消失如图 14 b e 所示，此时在管件旋转的带动下内部磁性磨粒散乱分布，当电流增大时磁性磨粒团将重新组合被吸附于管件内表面，完成了研磨相的更新延长了磁性磨粒的使用寿命，而且这一阶段 80° 仿形磁极头吸引磁性磨粒的平均速度比 85° 仿形磁极头快 15.9%，可快速完成磁性磨粒重组，增大了有效研磨时间，进一步提高研磨加工的效率。

2.3 研磨试验

2.3.1 试验装置

试验装置如图 15 所示，主要由数控机床、电磁装置、电流表、接触式温度计组成，电磁装置由电磁铁和变频器组成。变频器调频降压为线圈提供 72 v3 Hz 的交流电。由于采用电磁铁进行研磨加工，因此通过电流表实时观测线圈中的电流波动，电磁铁在进行工作时由于电流不断变化不可避免地会在铁芯内部产生涡流，进而导致电磁铁发热^[18]，因此通过接触式温度计对电磁铁的温度进行监测防止过热烧毁线圈。工作时，将整套设备置于数控车床的移动刀架上进行往复进给运动，304 不锈钢管由车床主轴的三爪卡盘夹持放置于电磁铁中心处并带动旋转。

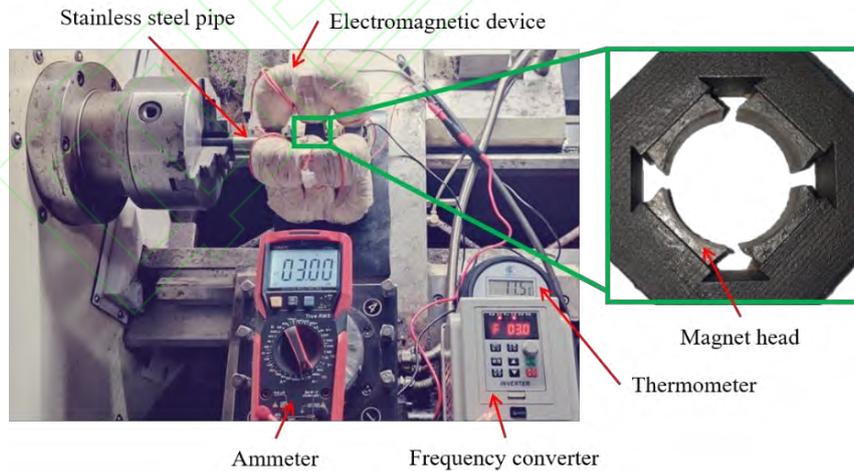


图15 试验装置图

Fig. 15 Experimental device diagram

2.3.2 试验设计

为了验证模拟仿真分析并探究磁极头的研磨效果，选取磁场强度较为接近的80°、85°的磁极头进行磁粒研磨对比试验。工件为外径25 mm厚度1 mm的304不锈钢管，试验所截取的管长为200 mm。加工时选用散热

性能较好的水基研磨液，鉴于304不锈钢内表面氧化膜硬度较大，因此先采用250 μm的磁性磨粒进行粗磨随后利用185 μm的磁性磨粒进行精磨^[19]，往复移动速度设置为40 mm/min。磁粒研磨具体加工试验条件如表2所示。

表 2 试验条件

Table 2 Experimental conditions

Name	Specification
Workpiece material	304 stainless steel
Workpiece size/mm	pipe ∅ 25×1×200
Magnetic pole head material	DT4
Taper of magnetic pole head/°	80, 85
Processing time/min	105
Magnetic abrasive particles size/μm	250、185
Amount of grinding fluid per stage/ml	10
Quality of magnetic abrasive particles in each stage/g	25
Spindle speed/r/min	500

3 结果与讨论

研磨完成后使用 JB-8E 触针式表面粗糙度仪测量，表面粗糙度值随加工时间的变化如图 16 所示。

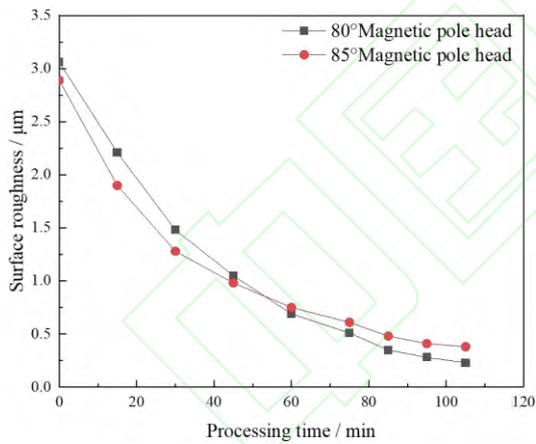


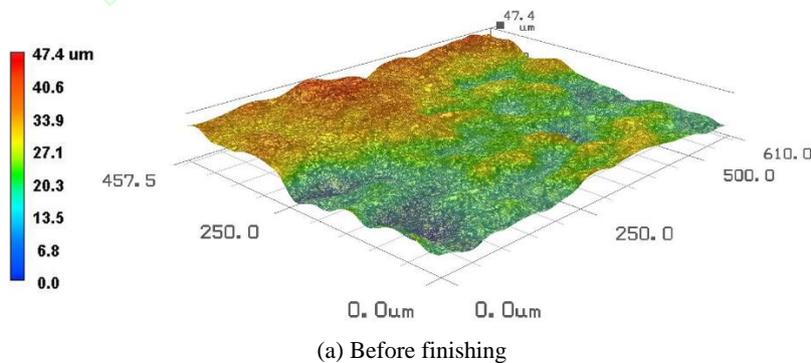
图16 表面粗糙度随时间变化图

Fig. 16 Variation of surface roughness with time

分别采用 80°、85° 仿形磁极头进行研磨试验，工件内表面粗糙度变化如图 16 所示。可以看出二者的粗糙度变化趋势一致，且粗糙度变化曲线相互交织在一起。采用 80° 仿形磁极头粗磨 75 min 后，管件内表面粗糙度从 $Ra\ 3.06\ \mu\text{m}$ 降至 $Ra\ 0.51\ \mu\text{m}$ ；采用 85° 仿形磁极头粗磨 75 min 后，管件内表面粗糙度从 $Ra\ 2.89\ \mu\text{m}$ 降至 $Ra\ 0.61\ \mu\text{m}$ 。从二者曲线斜率可以看出在前 30 min 表面粗糙度值下降速度较快，在后 45 min 中 85° 仿形磁极头的表面粗糙度下降速度与 80° 仿形磁极头相比开始变缓，这是由于粗磨采用 250 μm 磁性磨粒粒径较大且在研磨初始阶段存在“尖点”效应材料去除量较大，而在后 45 min 中由于 85° 仿形磁极头的研磨较小导致研磨效率下降。

在研磨 75 min 后表面粗糙度得到了有效地改善，此时更换粒径 185 μm 的磁性磨粒对工件内表面进行精磨，研磨 30 min 后，采用 80° 仿形磁极头研磨的管件内表面粗糙度从 $Ra\ 0.51\ \mu\text{m}$ 降至 $Ra\ 0.23\ \mu\text{m}$ ；采用 85° 仿形磁极头研磨的管件内表面粗糙度从 $Ra\ 0.61\ \mu\text{m}$ 降至 $Ra\ 0.38\ \mu\text{m}$ 。可明显看出精磨阶段由于管件内表面粗糙度得到改善，“尖点”效应越来越弱导致研磨速度大幅下降，且 85° 仿形磁极头的研磨压力小的缺陷越来越突出导致研磨效率更低。

使用 3D 超景深电子显微镜(VHX-500F)在 500 倍镜头下观察研磨前后管件内表面的微观形貌，如图 17 所示。



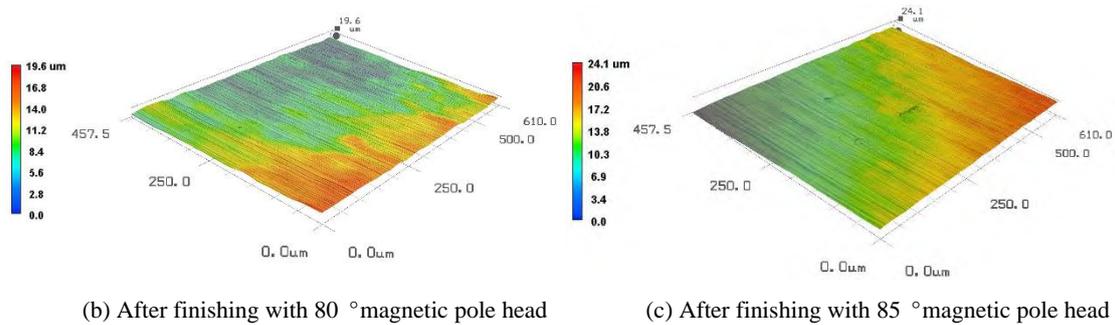


图17 管件内表面研磨前后3D微观形貌

Fig. 17 Three dimensional micro morphology of inner surface of pipe fittings before and after finishing

通过观察工件内表面3D微观形貌图可以看出，研磨前在镜头可视范围内管件内表面最大高度差可达47.4 μm 如图17 a所示。由于工件为管状，在观察时存在一定的高度差，且工件内表面存在较多颗粒状凸起导致表面凹凸不平进一步增大了管件内表面高度差。采用80°仿形磁极头加工105 min后，管件内表面的高度差降为19.6 μm ，可以明显看出工件表面的氧化膜和其他表面缺陷均已去除如图17 b所示，管件内表面质量大幅度提高；采用85°仿形磁极头加工105 min后，管件内表面的高度差降为24.5 μm ，工件内表面的氧化皮去除不彻底，仍存有微量凸起如图17 c所示。通过对比试验进一步验证了：80°仿形磁极头研磨所产生的磁场加工效率更高加工效果更好。

4 结论

通过有限元磁场仿真结合离散元磨粒运动受力仿真，研究了仿形磁极头锥度对304不锈钢管内表面氧化皮磁粒研磨效果的影响，主要结论如下：

(1)随着磁极头锥度不断增大，加工区域磁场强度及磁场变化梯度呈先增大后减少的趋势，锥度为80°时磁场最强可达0.496 T。

(2)研磨压力受磁性磨粒堆叠高度和磁场强度影响，其中磁场强度为主要影响因素。磁极头锥度越大磁性磨粒堆叠越高，磁性磨粒团中心区域的研磨压力越大，但受磁场强度限制呈先增大后减小的趋势，锥度为80°时磁性磨粒团中心区域研磨压力最大均在0.12 MPa以上。

(3)仿真及试验结果均表明采用80°仿形磁极产生的磁场较强，研磨压力较大，可以高效去除管件内表面的氧化膜，加工后工件内表面粗糙度降为 Ra 0.23 μm ，表面仅存有均匀研磨痕迹无其他表面缺陷。

参 考 文 献

- [1] 李德念, 杨玉丽, 董明景. 奥氏体不锈钢管道点蚀泄漏的失效分析及预防措施[J]. 日用电器, 2021(6): 55-59.
LI Niande, YANG Yuli, DONG Mingjing. Failure analysis and preventive measures of pitting corrosion leakage of austenitic stainless steel pipeline[J]. Electrical Appliances, 2021(6): 55-59. (in Chinese)
- [2] 朱立群, 李敏伟, 王辉. 不锈钢表面高温热处理氧化皮的常温去除机理研究[J]. 材料热处理学报, 2007, (4): 116-121.
ZHU Liqun, LI Minwei, WANG Hui. Study on removal mechanism of oxide scale on stainless steel surface after high temperature heat treatment at room temperature[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, (4): 116-121. (in Chinese)
- [3] 付新彤, 管志杰. 我国不锈钢钢管发展情况[J]. 冶金经济与管理, 2018, (1): 32-35.
FU Xintong, GUAN Zhijie. Development of stainless steel pipe in China[J]. Metallurgical economy and management, 2018, (1): 32-35. (in Chinese)
- [4] 朱建平. 无缝不锈钢管的生产工艺分析[J]. 中国高新技术, 2019, (15): 107-109.
ZHU Jianping. Production process analysis of seamless stainless steel pipe[J]. China High-Tech, 2019, (15): 107-109. (in Chinese)
- [5] 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 Wenhao, CHEN Yan, LI Wenlong, et al. Research progress of magnetic abrasive finishing technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 47-61. (in Chinese)
- [6] HENG L, KIM Y J, SANG D M. Review of Superfinishing by the Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. High Speed Machining, 2017, 3(1): 42-55.

- [7] 张二朋, 姚新改, 吕曼乾, 等. 长圆管内表面磁力滚压技术[J]. 工具技术, 2017, 531(11): 109-112.
ZHANG Erpeng, YAO Xingai, LV Manqian, et al. Magnetic rolling technology for inner surface of long tube[J]. Tool Engineering, 2017, 531(11): 109-112. (in Chinese)
- [8] XIE Huijun, ZOU Yanhua, DONG Chaowen, 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.
- [9] 王栋, 王哲, 马少奇, 等. 磁力研磨18CrNiMo7-6钢V型缺口试样工艺试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 567(5): 137-140,145.
WANG Dong, WANG Zhe, MA Shaoqi, et al. Experimental study on magnetic grinding process of 18CrNiMo7-6 steel V-notch specimen[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, 567(5): 137-140,145. (in Chinese)
- [10] 刘文浩, 陈燕, 张东阳. 基于低频交变磁场的陶瓷管内表面磁力研磨加工[J]. 中国表面工程, 2021, 34(5): 146-154.
LIU Wenhao, CHEN Yan, ZHANG Dongyang. Magnetic abrasive machining of ceramic tube inner surface based on low frequency alternating magnetic field[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(5): 146-154. (in Chinese)
- [11] 康璐. 粘结法制备磁性磨粒的工艺及其性能研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
KANG Lu. Study on technology and properties of magnetic abrasive particles prepared by bonding method[D]. Anshan: Liaoning University of science and technology, 2019. (in Chinese)
- [12] QIAN Cheng, FAN Zenghua, TIAN Yebing, et al. A review on magnetic abrasive finishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 112: 1-16.
- [13] 赵杨, 陈燕, 程淼, 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 Yang, CHEN Yan, CHENG Miao, et al. Study on spherical magnetic pole assisted grinding of inner surface of elbow under electromagnetic field[J]. Plating and Finishing, 2020, 42(1): 22-26. (in Chinese)
- [14] Anjaneyulu K, Venkatesh G. A Review on Experimental Investigation of Magnetic Abrasive Finishing process[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1145(1): 012066.
- [15] 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 Zongpeng, LI Chang, et al. Influencing factors of polishing inner surface of 40Cr steel pipe by magnetic grinding[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 62-69. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 陈燕, 赵杨, 陈松, 等. 基于旋转磁场的6061铝合金弯管内表面光整加工[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 73-81.
CHEN Yan, ZHAO Yang, CHEN Song, et al. Inner surface finishing of 6061 aluminum alloy elbow based on rotating magnetic field[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 73-81. (in Chinese)
- [18] 张传兵. 对变压器铁芯涡流热功率问题的探讨[J]. 物理教师, 2021, 42(6): 64-66.
ZHANG Chuanbing. Discussion on eddy current thermal power of transformer core[J]. Physics Teacher, 2021, 42(6): 64-66. (in Chinese)
- [19] JIAO Anyuan, ZHANG Guofu, LIU Binghong, et al. Study on improving hole quality of 7075 aluminum alloy based on magnetic abrasive finishing[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(6): 1-14.

作者简介: 潘明诗, 男, 1997 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: 97042371@qq.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: 精密加工与特种加工。

E-mail: laochen412@gmail.com