

不锈钢物流管道内表面磁力研磨的回转磁场设计*

王 艳 胡德金

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要：分析了不锈钢物流管道内表面磁力研磨运动轨迹和速度的要求，研究了各种励磁方法及其研磨运动轨迹，提出了同时产生回转磁场和往复磁场的励磁方法，设计了能实现复杂研磨轨迹的一种新型回转磁场装置，该回转磁场通过磁极轴向分布产生波浪形研磨条纹，同时完成磁性磨料对工件的周向回转和轴向往复运动，最后用 316L 管道进行了回转磁场的材料去除试验。

关键词：物流管道 磁力研磨 回转磁场 往复磁场

中图分类号：TG669

0 前言

随着科学技术的发展，对半导体产业、原子能产业、航空航天产业、生物化学行业、医疗器械行业以及食品机械行业的输送流体的管道都提出了更高的要求。如在半导体产业中，输送高纯度气体的容器及管道，原子能产业中输送超纯水的高清洁度管道，均要求内壁表面粗糙度 R_a 小于 $0.2 \mu\text{m}$ ，在生化行业、医疗器械行业、食品机械行业的输送流体的管道要求高清洁度的管道，其中内表面粗糙度 R_a 要求小于 $0.2 \mu\text{m}$ 。这些要求都是轧制管道及非装饰性焊接管道难以满足的，必须增加加工工序，对内表面实施加工。

1 内表面磁力研磨简介

磁力研磨的示意图如图 1 所示。把磁性磨粒放入磁场中，磁性磨粒在磁场中将沿着磁力线的方向

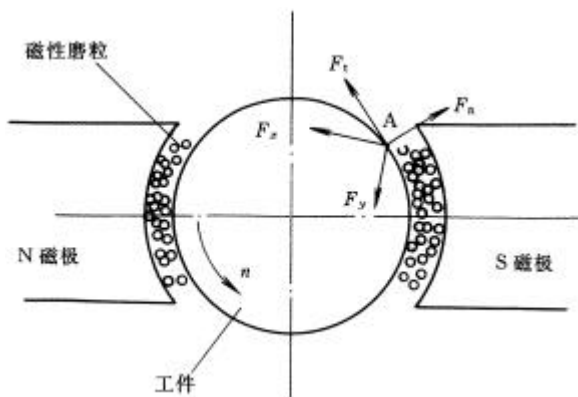


图 1 磁力研磨示意图

有序地排列成磁力刷。把工件放入磁场中间，并使工件相对 N 极和 S 极保持一定距离，当工件相对磁极作相对运动时，磁性磨粒将对工件表面进行研磨。

在研磨过程中，磁性磨粒的受力状态见图 1。磨粒 A 是在加工区中靠近工件表面的一颗磁性磨粒。在磁场作用下，磁性磨粒受到沿磁力线方向的作用力为 F_x ，沿磁等位线方向的作用力为 F_y 。同时，磁性磨粒与工件表面接触，产生沿工件表面法向的切削抗力为 F_n ，磨粒与工件表面的相对运动产生的切向抗力为 F_t 。 F_y 可以防止磨粒向加工区域外流动，这样就保证了研磨加工的正常进行^[1]。磁场作用力可表示为^[2]

$$F_x = c_m V H \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

$$F_y = c_m V H \frac{\partial H}{\partial y} \quad (2)$$

式中 V ——磁性磨粒的体积

H ——A 点的磁场强度

c_m ——磁性磨粒的磁化率

$\frac{\partial H}{\partial x}$, $\frac{\partial H}{\partial y}$ ——在 x 和 y 方向上的磁场梯度

x, y ——由磁力线和磁等位线决定的坐标

由式(1)和(2)可看出，磁场作用力 F_x 和 F_y 正比于磁粒的体积、磁粒的磁化率、磁场的强度及磁场梯度。

2 研磨运动的要求

研磨运动包括轨迹和速度两个方面。研磨运动的轨迹是决定被研磨工件表面粗糙度的重要因素之一。仅实现单调研磨轨迹的磁力研磨在工件内表面会产生周向圈纹，其次不能充分利用选择性材料去除，更加经济地获取所需表面质量，再次，磁力研

* 国家教委博士点专项科研基金资助项目(97023834)。20040226 收到初稿，20040913 收到修改稿

磨的工艺能力可达 $R_a < 0.05 \mu\text{m}$ ，但不能满足 $R_y < 0.2 \mu\text{m}$ 的工艺要求。因此，研究可实现复杂研磨轨迹的励磁机构，充分发掘磁力研磨的工艺能力是完全必要的。

本课题使用的管道是 316L 不锈钢管材，轧制管道内原始表面粗糙度 $R_a = 1.0 \mu\text{m}$ 左右， $R_y = 6.5 \mu\text{m}$ 左右，管长为 6 m 或 12 m。由于 316L 不锈钢属于非磁性材料，它与铁磁性材料加工相比，因间隙尺寸大，内表面加工磁回路中的磁阻要大得多，要在研磨区获得高磁感应强度，采用体积重量都较小的永磁励磁机构是不能胜任的，必须采用电磁线圈励磁。因此，整个励磁装置的体积和重量都比较大；其次，管道是薄壁细长零件，高速旋转会因质量偏心而产生的离心力造成管道挠曲、振动、噪声，使加工不能正常进行^[3]。从以上分析可知，管道及励磁装置都不宜作高速回转，那么研磨所需要的磁性磨粒与工件表面之间的相对运动必须通过另外方式提供。用电磁方式产生回转磁场励磁装置原理图见图 2^[4]，回转磁场的励磁机构类似于三相电动机的定子结构，只不过每相绕组不再是周向多槽分布，而是集中绕制在铁心外围，6 个磁极均布在同一圆截面上。该回转磁场仅提供了相对周向运动，无法产生复杂无方向性的研磨轨迹，只好采用曲柄滑块机构提供轴向往复运动。至今管道内表面磁力研磨的研磨轨迹这一问题尚未很好解决，用电磁方式励磁实现磁性磨粒与工作表面的复杂相对运动，这方面的研究工作是很有意义的。

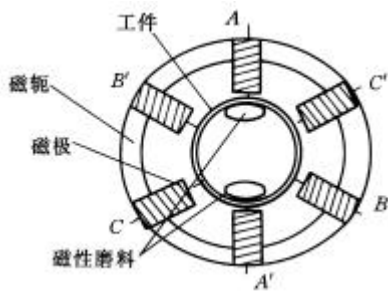


图 2 回转磁场励磁机构示意图

将工件固定、磁极做往复运动，发现磁极相对工件往复运动的幅度，与磁力刷相对工件运动的幅度是不一致的。当磁极往复运动的幅度小于一定值 A_1 ，磁力刷没有与工件产生相对运动；当磁极往复运动的幅度 A_2 是一相对大的值，磁力刷与工件产生相对运动，但幅度 A_3 小于磁极运动的幅度。这一性质类似于磁滞回线，见图 3，即当 $A_2 > A_1, A_3 = 0$ ；当 $A_2 < A_1, A_3 = A_2 - A_1$ 。

磁极与磁力刷的相对位移量决定了磁导变化率。当相对位移量较小时，磁导变化率决定的磁驱

动力不足以克服摩擦力驱动磁力刷，磁力刷表现为静止不动，当相对位移量足够大时，磁驱动力能克服摩擦力，从而驱动磁力刷，磁力刷表现为跟随。这种滞后现象的实质是磁阻驱动，磁导变化率决定磁驱动力。滞后量 A_1 与磁极轴向尺寸有关，约为轴向尺寸的 $1/3 \sim 1/2$ ，这一点对实现复杂研磨轨迹是很重要的，决定磁极往复运动幅度必须考虑这一因素^[2]。

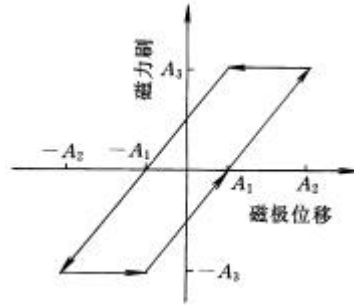


图 3 磁极与磁力刷位移之间的关系

研磨运动的速度是研磨运动的重要方面之一。它不仅对研磨工作的效率，而且对研磨工件的质量都有极大的影响，因而对研磨运动的速度提出如下要求。

- (1) 研磨运动的速度应当是匀速的，即使不是匀速的，也应使其最大和最小速度的差值尽可能的小。
- (2) 研磨运动的速度不宜过高，过高会导致系统温升过高并使运动的平稳性变差。生产实践证明，在相同工艺条件下，被研磨工件所获得的表面粗糙度随研磨运动速度增加而降低。

圆柱面的运动轨迹总是由周向的旋转运动和轴向的往复直线运动合成。当往复直线运动的频率小于周向旋转频率，其研磨运动轨迹是螺旋角周期性变化的螺旋线，在工件表面上形成的研磨条纹为如图 4a 所示的两个方向互相交错的螺旋线。为了使工件获得良好的表面粗糙度，两个方向上的螺旋线交角应尽量接近 90° 。当往复直线运动的频率大于周向旋转频率，其研磨运动轨迹将是如图 4b 所示的波浪式曲线^[3]。这种类似超精加工互相交错的波浪曲线，可以获得很好的表面粗糙度。利用磁阻驱动使磁力刷产生类似图 4b 所示的研磨运动轨迹，省却了实现轴向往复运动的机构装置，研磨运动的实现完全借助于电磁方式。

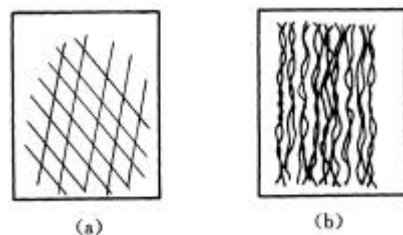


图 4 研磨条纹示意图

3 回转磁场的设计

3.1 回转磁场的作用原理

回转磁场设计时要借鉴的是定子、转子结构类似开关磁阻电动机的高速大步距的磁阻式步进电动机^[5]。图 5 示出一台三相大步距磁阻式步进电动机原理示意图。定子的绕组采用隔极为相邻相，相邻极为异性极的布置方式。采用“三相双三拍”的供电方式为 $AB-BC-CA-AB-\dots$ ，每次有两个绕组通电，转向为逆时针方向，步距角仍为 60° ，若按 $AC-CB-BA-AC-\dots$ 顺序通电，电动机的旋转方向相反。

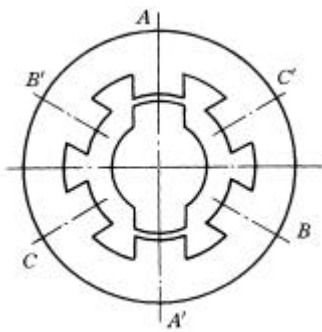


图 5 磁阻步进电动机示意图

用非铁磁的管道及磁性磨料替换图中的两齿转子，见图 6，采用“三相双三拍”的供电方式，通电的相邻极互为异性极，主磁通回路将选择周向。这样就实现了沿周向形成局部磁通密集区，随着绕组通电的变化，局部磁通密集区沿周向步进，这就是研磨所需要的圆周方向的旋转运动。

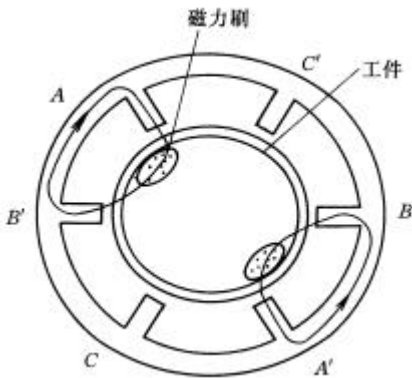


图 6 用于内表面研磨的回转磁场示意图

3.2 实现复杂轨迹的回转磁场

上面所讨论的励磁机构，磁极分布在同一圆截面上，所以磁力刷仅作圆周方向的运动，受直线电机结构的启发，萌发磁极在轴向错位分布的想法^[3]。6 个磁极分布在相距一定距离的两圆截面上， ABC

三磁极在一截面上， $A'B'C'$ 在另一截面上。轴向距离约为 $0.1\pi D$ (D 为工件的外径)。励磁原理见图 6。 AA', BB', CC' 采用三相脉冲电源励磁。此磁极布置周向展开图如图 7 所示。可见磁力刷沿内表面圆周方向回转一周，轴向往复三次。忽略轴向进给运动，为在工件表面形成交叉研磨条纹，工件在周向最佳进给速度(频率)应为磁场回转频率的 $1/6$ 左右，这里的左右是跟工件进给旋转运动与回转磁场运动的方向有关，方向相同，应小于 $1/6$ ；方向不同，应大于 $1/6$ 。最佳进给速度是指磁力刷在表面某一点每一转产生研磨条纹方向与下一转的研磨条纹方向不同，重复的区域最小。

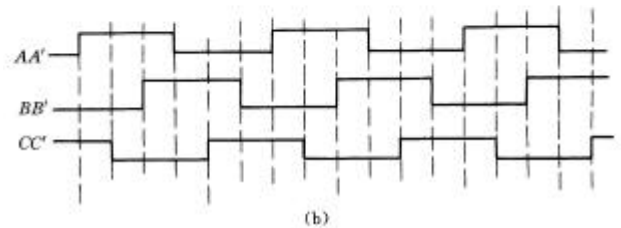
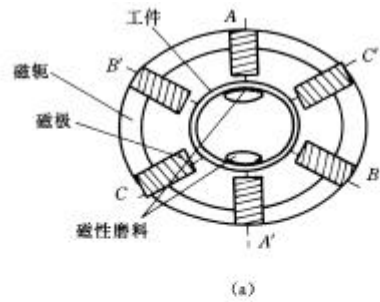


图 7 往复磁场励磁机构示意图

下面对“三相双三拍”和“三相六拍”励磁方式对磁力刷的轨迹的影响进行讨论。

(1) “三相双三拍”。通电方式为 $AB-BC-CA-AB-\dots$ ，步距角为 60° ，每相接通电源两次后，磁力刷回转一圈，两个磁力刷轨迹是一致的。见图 8。因磁力刷滞后的原因，每一步磁力刷都位于两极的后一极。产生的轨迹波高约为截面距离的一半，波长不变。但两个方向性的轨迹夹角变小。假设励磁脉冲电压频率为 f_p ，回转磁场的频率 f_r 为 $f_p/2$ 。磁力刷周向回转频率 f_c 为 $f_p/2$ ，轴向往复运动频率 f_a 为 $3f_p/2$ 。

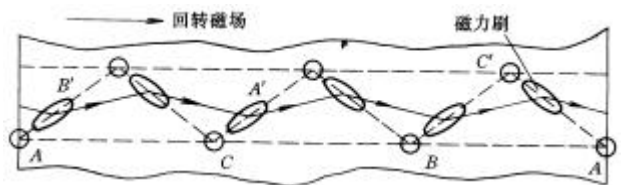


图 8 磁力刷轨迹示意图

(2) “三相六拍”。通电方式为 $A-AB-B-BC$

- C - CA - A...，步距角为 30°，同样，每相接通电源两次后，磁力刷回转一圈，两个磁力刷轨迹是一致的。因每双相之间存在单相节拍，产生的轨迹如图 9 所示，轨迹的波高与“三相双三拍”相同，但更接近波浪形，轨迹夹角未变。回转磁场及磁力刷运动的频率与“三相双三拍”相同。

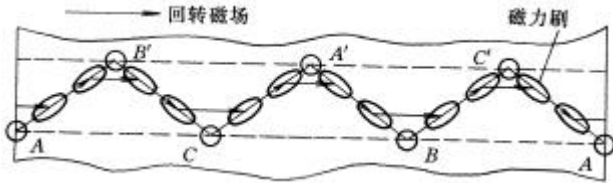


图 9 磁力刷轨迹示意图

以上讨论都是针对三相励磁，在管径尺寸比较大时，为减少磁极间高磁阻路径的长度，或为改善运动稳定性可使用更多相数。

4 试验结果

用永久磁钢励磁在加工区所获得的磁感应强度仅为 0.3 T 左右，所以采用电磁线圈^[6]在加工区产生高磁感应强度，相邻两磁极夹角为 60°。磁极和线圈铁心采用电工钢片叠压而成。磁通方向磁极、心铁截面面积分别为 8 cm²、12.5 cm²，线圈采用 f1 mm 的铜漆包线绕制，采用直流电源供电。试验对于非磁性材料的磁力研磨，两磁极间是一大磁阻间隙，要获得与磁性材料相当的场强是很难的。实际设计中，对计算做了许多假设：不考虑强磁泄露，即处处磁通相等。空气磁隙的截面积为磁极末端的两倍，且为均匀磁场。采用图 10 所示的励磁电路，最大输出电压为 250 V，最大电流输出为 3 A。

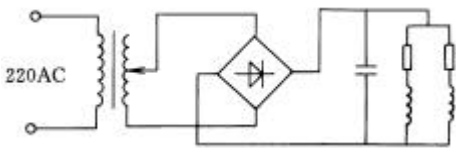


图 10 励磁电路原理图

装置照片如图 11 所示。试验在 CA6140 车床上进行，管道穿过回转磁场励磁机构。工件为 316L 不锈钢轧制管道，外径为 32 mm，内径为 30 mm，加工间隙 1 mm，励磁电流 6 A，加工区磁感应强度 0.6 T，空气介质，磁性磨料用量为 3 mL，研磨液 5 mL，表面粗糙度以及材料去除量随时间的变化分别见图 12、图 13 所示。用 KEYENCE VH—8000 高分辨率数字 HD 显微镜观察加工前后表面微观形貌分别见图 14、15 所示。工件内表面轮廓曲线由哈尔滨量具刀具厂制造的 2205 型表面粗糙度测量仪测得。

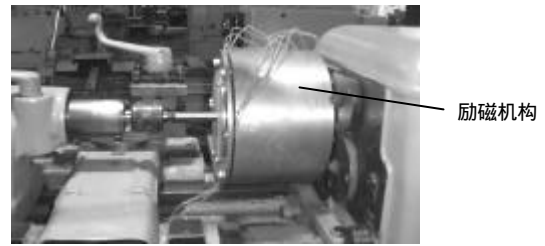


图 11 回转磁场磁力研磨试验装置实物照片

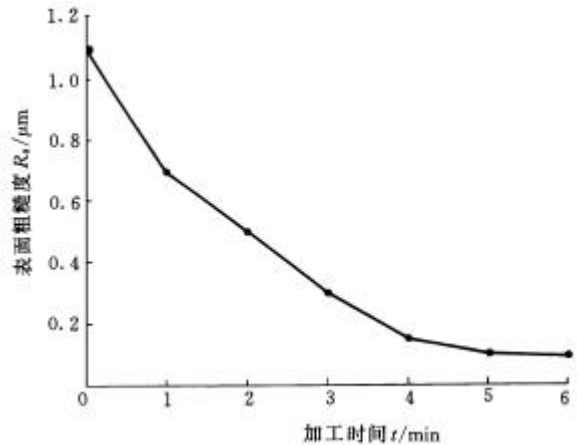


图 12 表面粗糙度与加工时间关系图

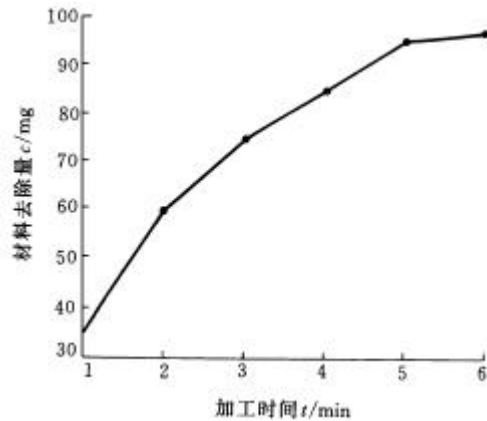
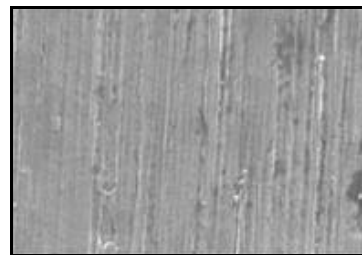
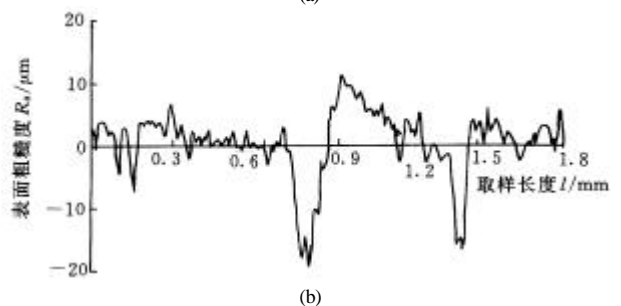


图 13 材料去除量与加工时间关系图



(a)



(b)

图 14 磁力研磨前表面微观形貌及表面轮廓曲线

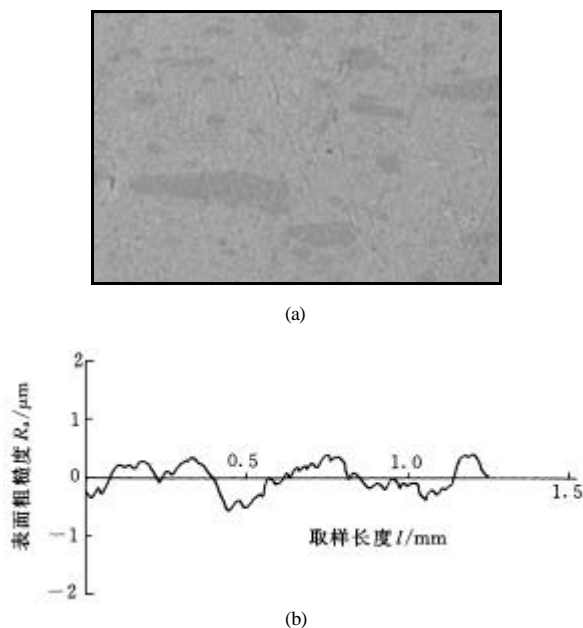


图 15 磁力研磨 5 min 后表面微观形貌及表面轮廓曲线

5 结论

由于管道内表面研磨的特殊性，管道及励磁机构都不宜作高速旋转运动，而电磁励磁产生的回转磁场提供了非机械方式产生相对运动的途径。介绍了回转磁场的设计原理即磁阻式步进电动机的基本作用原理，设计了能实现复杂研磨轨迹的一种新型回转磁场，该回转磁场通过磁极轴向分布产生波浪形研磨条纹，同时完成磁性磨料对工件的周向回转和轴向往复运动。最后用 316L 管道进行了回转磁场磁力研磨试验。

参 考 文 献

- 1 余承业. 特种加工新技术. 北京：国防工业出版社, 1995
- 2 Shinmura T, Takazawa K, Hatano E Study of magnetic abrasive finishing. *Annals of the CIRP*, 1990, 31(1): 325 ~ 328
- 3 李学全. 物流管道内表面磁力研磨机理及技术研究：[博士学位论文]. 上海：上海交通大学，2001

- 4 Shinmura T, Hatano E, Takazawa K The development of magnetic abrasive finishing and its equipment by applying a rotating magnetic field. In : *Transaction Japanese Society Mechanic Engineering*, 1986, 52(476) : 1 462 ~ 1 468
- 5 海微电机研究所. 微特电机. 上海：上海科学技术出版社，1983
- 6 林其王, 赵佑民. 磁路设计原理. 北京：机械工业出版社，1983

DESIGN OF ROTATING MAGNETIC FIELD ABOUT INTERNAL FINISHING OF STAINLESS STEEL TUBE

Wang Yan Hu Dejin

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract : The needs of motion trace and speed of stainless steel tube internal finishing are analysed. Several kinds of exciting magnetic field and finishing motion trace are researched, the exciter which realized rotating magnetic field and reciprocating magnetic field at the same time is proposed. A new type of rotating magnetic field equipment which can complete complex motion trace is designed. The rotating magnetic field produces wavy finishing stripe by distributing the magnetic poles along axial direction. It also makes magnetic abrasive particles move along circumferential direction and axial direction of the tube at the same time. The 316L tube material removal test is carried out by the rotating magnetic field setup.

Key words : Tubing Magnetic abrasive finishing

Rotating magnetic field

Reciprocating magnetic field

作者简介：王艳，女，1969 年出生，副教授。主要研究方向为磁力研磨加工、激光加工和电火花加工等特种加工技术的研究。

E-mail : account909@sjtu.edu.cn