

磁粒研磨 Al 2024 细长管的机理及试验研究

张龙龙, 焦安源, 陈燕, 钱之坤

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

摘 要: **目的** 探究磁粒研磨过程中外部磁极的不同排布方式对 Al 2024 细长管内表面研磨质量的影响, 寻求一种最佳的磁极排布方式。**方法** 首先, 在理论上分析了磁粒研磨细长管的基本原理; 其次, 利用 ANSYS 软件的磁场模块对磁极的三种排布方式进行模拟, 得出不同的磁感应强度曲线, 通过分析曲线的变化规律来探讨磁极排布方式对研磨效果的影响; 再次, 设计了试验装置, 对理论和有限元仿真结果进行了验证试验, 通过观测内表面粗糙度值和微观形貌, 对比了试验效果。**结果** 随着磁极夹角从 90°增大到 180°, 磁感应强度逐渐减小, 有效磁场区域逐渐减小。较小的磁感应强度使得磁性磨粒在磁场中受到的研磨压力变小, 磁性磨粒易于受离心力作用甩出加工区域, 参与研磨的数量变少, 研磨质量降低; 变小的有效磁场区域使得磁性磨粒受力区域减小, 被磁化的数量减少, 参与研磨的数量减少, 研磨质量较差。研磨时间 10 min 后, 从试验结果中可以看出, 当磁极 90°分布时, 表面粗糙度值下降最大, 从原来的 0.66 μm 降至 0.12 μm , 表面的凹坑和纹理缺陷被去除, 表面形貌均匀且光泽度较好。**结论** 磁粒研磨 Al 2024 细长管内表面时, 调整磁极排布可以提高加工区域的磁感应强度和增大有效磁场区域面积, 继而提高磁性磨粒的作用效果, 促进研磨的有效进行, 保证较好的研磨质量。

关键词: 磁粒研磨; Al 2024 细长管; 磁极排布; 表面粗糙度; 表面纹理

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0303-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.040

Mechanism and Experimental Study of Al 2024 Slender Tube by Magnetic Particle Grinding

ZHANG Long-long, JIAO An-yuan, CHEN Yan, QIAN Zhi-kun

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

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of different magnetic pole arrangement ways of external magnetic poles on grinding quality of internal surface on Al 2024 slender tube during magnetic particle grinding, so as to seek the best way of magnetic pole arrangement. Firstly, basic principle of magnetic particle grinding for slender tube was analyzed theoretically; secondly, magnetic field module of ANSYS software was used to simulate three magnetic pole arrangement ways and obtain different magnetic induction intensity curves. The influences of magnetic pole arrangement ways on grinding effect were investigated by analyzing variation of the curves; thirdly, experimental device was designed, and verification test was applied to the

收稿日期: 2018-03-15; 修订日期: 2018-06-04

Received: 2018-03-15; **Revised:** 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258); 辽宁省教育厅基金项目 (2016HZPY10)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775258), Liaoning Provincial Education Department Fund Project (2016HZPY10)

作者简介: 张龙龙 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: ZHANG Long-long (1992—), Male, Master, Research focus: precision machining.

通讯作者: 焦安源 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机械设计与表面工程。

Corresponding author: JIAO An-yuan (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: mechanical design and surface engineering.

theory and finite element simulation results. The test results were compared by observing roughness and micromorphology of the internal surface. As the angle between the magnetic poles increases from 90° to 180° , the magnetic induction intensity decreased and effective magnetic field areas decreased gradually; the magnetic induction intensity was smaller, so grinding pressure sustained by magnetic particles in magnetic field was smaller, magnetic particles were easily flung out of processing area under the action of centrifugal force. The number of magnetic particles involved in grinding was decreased and grinding quality was reduced. Under the effects of smaller effective magnetic field area, stressed area of magnetic particles was decreased, quantity of magnetized particles was reduced, number of magnetic particles involved in grinding was reduced, and grinding quality was degraded. While the magnetic pole was arranged at the angle of 90° , the result of 10 min grinding test showed that surface roughness decreased most sharply from the original $Ra\ 0.66\ \mu\text{m}$ to $Ra\ 0.12\ \mu\text{m}$, surface pits and texture defects were removed, surface morphology was uniform, and glossiness was better. During magnetic particle grinding of internal surface on Al 2024 slender tube, adjusting magnetic pole arrangement can improve magnetic induction intensity and effective magnetic field area of the processing area, and then improve the effect of magnetic abrasive particles, promote effective grinding and guarantee better grinding quality.

KEY WORDS: magnetic particle grinding; Al 2024 slender tube; magnetic pole arrangement; surface roughness; surface texture

Al 2024 细长管具有较高的强度、较小的密度、较轻的质量等优势,被广泛应用于较高精度的仪器、仪表和电子等工业部门中,管路内径仅为 4 mm。大量运用 Al 2024 管作为传输管路,可以很好地减轻整个设备的质量,但是内表面的疲劳裂纹会直接影响油路运输或气体传动的稳定性和可靠性^[1]。管内液体或者气体进行传输时,整个管路会处于一个微振动的状态,Al 2024 细长管内表面的疲劳裂纹将会呈现曲折性的扩展,最终会沿着扩展的裂纹逐渐渗透^[2-4],这将造成 Al 2024 细长管内表面表层材料脱落,材料耐腐蚀性能下降,最终引起油污阻塞以及气压波动,从而使发动机工作不稳定,降低了安全系数。因此提高管内表面的质量显得尤为重要^[5-6]。

传统的光整方式很难使刀具和细长管内表面进行直接接触,而磁粒研磨法作为一种非传统的表面加工工艺,对于内表面研磨光整有着独特的优势,且具有自适应性和自锐性较高、加工温升小的优势^[7-8]。通过外部磁极构成的磁场来束缚磁性磨粒,使之形成具有一定切削能力的柔性磁粒刷,磁粒刷压覆在工件内表面,当其与工件相对运动时,实现对管内表面的加工^[9-12]。在磁粒研磨细长管的过程中,由于管径较

小,很难通过增加管内辅助磁极的方式来提高研磨压力,因此拟通过探究细长管外部磁极的空间分布来寻求最佳的研磨压力,从而提高研磨质量和效率^[13-14]。本文以外径 5 mm、壁厚 0.5 mm 的 Al 2024 细长管为研究对象,基于磁粒研磨机理,着重分析磁极排布方式对于研磨效果的影响。基本思路为:利用磁粒研磨理论对去除机理进行分析,并结合 ANSYS 软件对各种排布方式的磁极进行磁感应强度模拟仿真,制定验证试验方案,最终找出提高研磨质量和效率的最佳磁极排布方式。

1 磁粒研磨加工机理及理论分析

1.1 磁粒研磨加工机理

图 1 为磨粒研磨管内表面原理图,轴向磁极被固定在细管之外,外部磁极在沿着工件轴向运动的同时绕工件进行转动,磁性磨粒在外部磁极构成的磁场环境中,其运动方式与外部磁极一致。工件内的磁性磨粒在磁场力、离心力等的共同作用下,会不断挤压摩擦工件的内表面,实现工件内表面的研磨加工。磁性

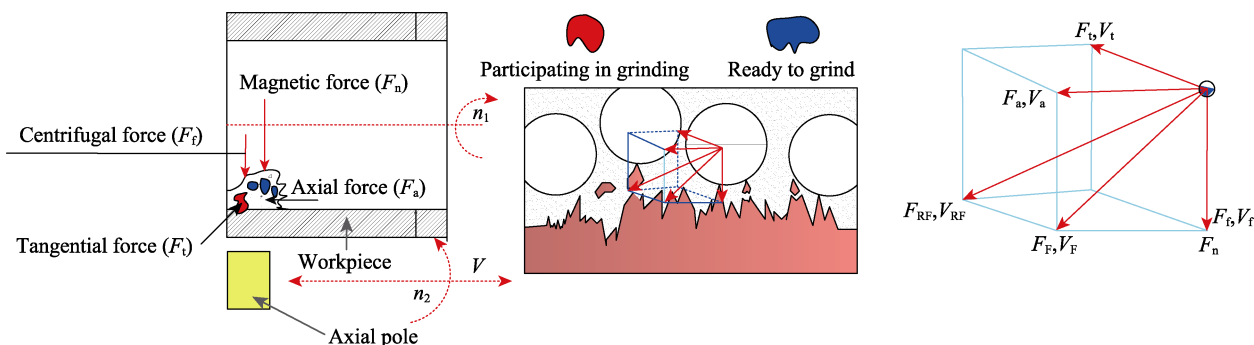


图 1 磨粒研磨内表面原理
Fig.1 Principle of magnetic particle grinding for internal surface

磨粒在旋转的同时会不断地交替更新,使得参与研磨的切削刃始终保持最优切削状态,保证了加工的质量和效率。

由研磨加工的普林斯顿方程可知:

$$M = KPVt \quad (1)$$

式中: M 为材料去除量; K 为去除因数; P 为研磨压力; V 为相对运动速度; t 为研磨时间。由试验可知,材料内表面原始形貌的去除有利于改善表面质量,去除量的提高有利于缩短加工时间,提高加工效率。从公式 (1) 可知,材料去除量 M 与研磨压力 P 、相对运动速度 V 以及研磨时间 t 呈正比,但研磨时间的延长会直接影响研磨效率的提高,相对速度越高,磁性磨粒在加工区域内将会受到较大的离心力,从团聚的磁粒刷中甩出,无法参与有效研磨。因此要想较好地提高材料去除量,提高研磨压力是最直接的方式。磁性磨粒在加工时受到的研磨压力可用公式 (2) 表示^[15]。

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

式中: P 为研磨压力; B 为研磨表面处的磁感应强度; μ_0 为空气磁导率; μ_m 为磨粒团的相对磁导率。由公式 (2) 可以看出,相对磁导率和加工区域内的磁感应强度直接影响研磨压力,由于磁性磨粒的相对体积分量恒定,加工区域内的相对磁导率不变,所以研磨压力只与磁感应强度有关。磁感应强度由磁极产生,当磁极不变时,磁极空间排布的相对位置将会影响磁感应强度的大小,从而影响研磨压力的大小,最终影响研磨效率,因此对磁极排布的分析显得尤为重要。

1.2 磁场模拟

为了能够直观地看出磁极在不同排布方式下管内表面磁场的相对状态,利用 ANSYS 软件的磁场模块分别对磁极分布夹角为 90° 、 150° 、 180° 的三种排布方式进行磁场模拟分析。工件为非导磁性的 Al 2024 细长管,磁极和工件之间的间隙过大时,加工区域的磁感应强度将会减小,磨粒受力较小,不利于研磨;间隙过小时,磨粒受到强磁场力吸引会紧贴在工件内表面,不利于磨粒的翻滚,导致研磨效率低下。因此,为了较好地研磨加工,参照以往的经验,选用磁极和工件之间的间隙为 1.5 mm。为便于看出磁感应强度的变化规律,在细管内 225° 圆周上选定均布的六个点,如图 2 所示。

图 3 为磁极不同排布方式下的磁感应强度云图和变化曲线,从图 3 可知,自 A 点波谷起始,随着磁极排布夹角的递增,磁感应强度曲线也逐渐变化,不同的磁极排布形式对应的磁感应强度虽然各有增减,但具体数值和分布规律却截然不同。若有效磁场覆盖范围相应减小,磁性磨粒所受的磁场作用范围会减

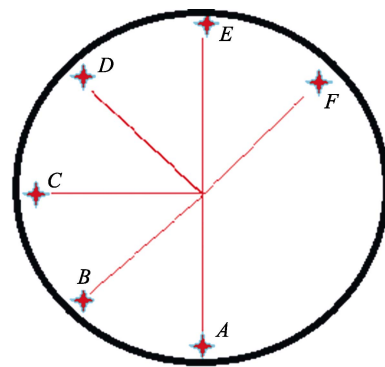


图 2 均布点域位置

Fig.2 Measured position of uniformly distributed point field

小,进而有效研磨压力减小,吸附的磁性磨粒数量减少,研磨效果将会变差。当磁极排布夹角为 90° 时,从云图中可以看出,磁感应强度变化曲线呈“抛物线”状,波峰值介于 $D-E$ 之间, $A-D$ 为上升区间, $E-F$ 区域的值逐渐减小为下降区间,曲线最终出现在波谷。两磁极间(曲线 $C-F$ 区域)的磁感线比较密集,磁感应强度较大,最大值约为 430 mT,在该处工件表面受到的研磨压力较大。磁性磨粒在研磨时能够团聚在 $C-F$ 区域 (135°),该区域磁感应强度值约为 350 mT 以上,同步研磨的区域较大。当磁极排布夹角为 150° 时,磁感应强度变化曲线呈“M”状,磁感线在 $C-D$ 、 F 后区域内较密集,磁感应强度曲线处在较高的位置,且最高点有两处,分别出现在 $C-D$ (45°) 之间和 F 后 (45°),磁感应强度最大值约为 350 mT,磁性研磨粒子在该区域聚集,该区域磁感应强度值约为 325 mT 以上。相比于 90° 时,磁感应强度的减小幅值为原来的 18.6%,有效磁场区域面积变小的幅值为原来的 33.3%,团聚的磁性磨粒数量减少,工件表面受到的研磨压力较小。当磁极间呈 180° 放置时,磁感应强度变化曲线呈“正弦”状,磁感线密集区出现在两磁极之间,磁感应强度的最大值约为 340 mT,在三者中处于最低,磁感应强度值减小幅度为 20.9%。此时,磁场的有效区域与 150° 接近,都比较小,磁性磨粒受到的研磨压力较小。因此,磁极成 180° 分布与 90° 分布比较而言,研磨压力和研磨有效区域也都没有优势。

2 试验装置及条件

2.1 试验装置

图 4 为 Al 2024 细长管内表面的研磨装置示意图。将工件夹持在主轴卡盘上,工件尾部由尾部支座支撑。磁极支架装夹磁极于工件外部,磁极距离工件外表面 1.5 mm。加工时,主轴电机启动后带动工件做顺时针旋转,磁极在伺服电机的带动下做逆时针旋转,处在磁极间的磁性磨粒在磁场力的作用下贴附在

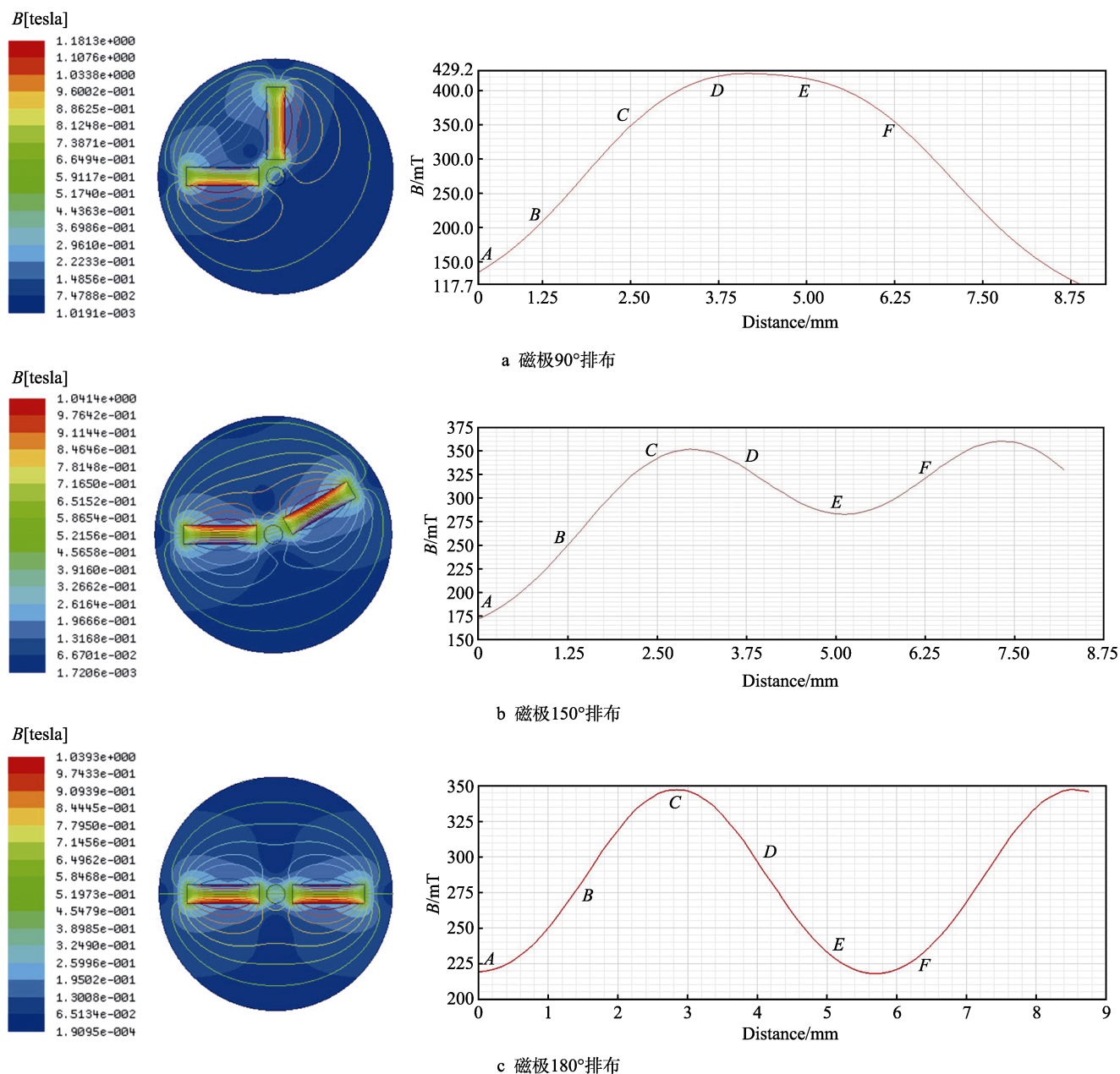
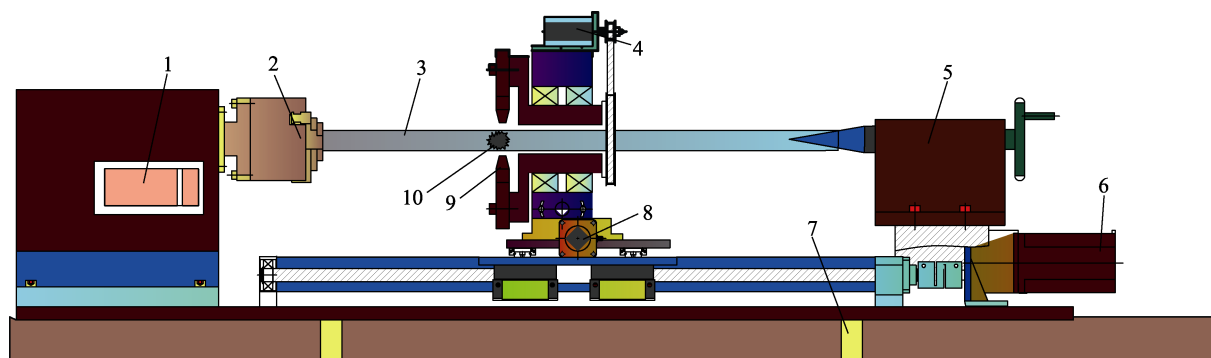


图3 磁感应强度模拟曲线云图

Fig.3 Simulation curve cloud chart of magnetic induction density: (a) 90° arrangement of magnetic pole, (b) 150° arrangement of magnetic pole, (c) 180° arrangement of magnetic pole



(1—Control panel; 2—Chuck; 3—Workpiece; 4—Servo motor1; 5—Tail support; 6—Servo motor2; 7—Limit switch; 8—Servo motor3; 9—Magnetic pole group; 10—Magnetic particle)

图4 研磨装置

Fig.4 Grinding device

工件内壁，跟随磁极和工件相对转动而运动。另外，磁性磨粒彼此之间也存在相对运动，在研磨的同时实现了磁性磨粒的更新变换，保证了研磨的均匀性，同时在丝杠的带动下沿着工件轴向移动，磨粒在转动和移动的复合运动之下，最终完成对整个管内壁的研磨。

2.2 试验条件

表 1 为磁粒研磨 Al 2024 细长管内表面的试验条件，所用的磨粒为辽宁科技大学先进技术磨削研究所自制的磁性研磨粒子，其材料构成为铁粉与 Al₂O₃ 质量比 2：1，经混合烧结后筛分而成。试验中选取粒

径为 150 μm 的磁性磨粒，选用轴向矩形钕铁硼磁极，磁极和工件外表面的距离为 1.5 mm，这样可以保证磁性磨粒在磁场中较好地受力，有利于提高加工效率。研磨液的加入能够更好地降低加工区域的温度，同时对工件表面有一定的化学腐蚀作用，在工件表面形成一种易于切削的钝化膜。研磨后，工件经过线切割剖开，使用超声波清洗机清洗干净，并用吹风机吹干，再使用广州市广精精密仪器有限公司生产的 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪测定表面粗糙度值，最后使用日本基恩士生产的 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜观测表面微观形貌。

表 1 试验条件
Tab.1 Test conditions

Item	Condition
Workpiece	Al 2024 slender tube (external diameter 5 mm, wall thickness 0.5 mm)
Size of magnetic abrasive particles	150 μm
Workpiece speed	1000 r/min
Rotated speed of magnetic pole	600 r/min
Distance of magnetic pole and workpiece	1.5 mm
Axial movement speed of slide table	2 mm/s
Magnetic pole type	Axial rectangular pole Nd-Fe-B
Grinding fluid type	Laoli'en SR.9911 grinding fluid

3 实验结果与分析

在表 1 的加工条件下，经过 10 min 研磨后的工

件表面形貌如图 5 所示。从图 5a 中可以看出，原始表面存在较多的凹坑、刮痕和较深的铣削痕迹。从图 5b 中可以看出，当磁极排布为 90°时，表面的原始加

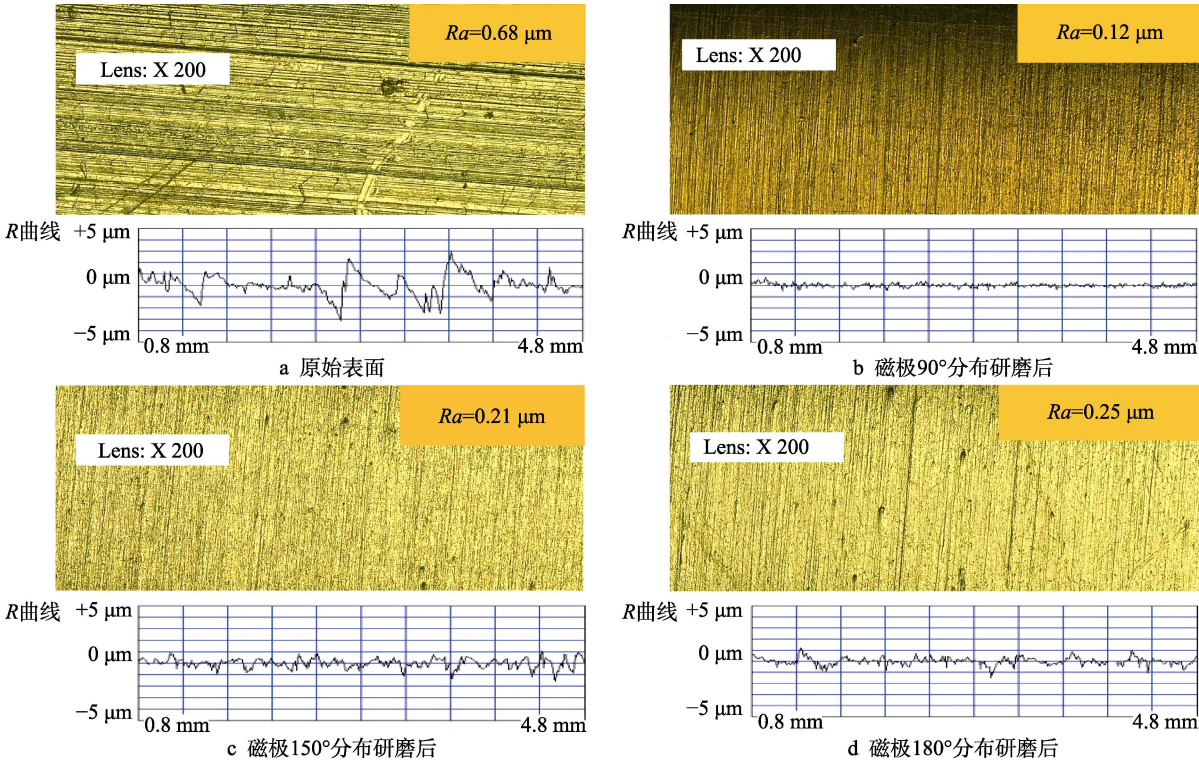


图 5 研磨前后的表面质量

Fig.5 Surface quality before and after grinding: (a) Original surface quality, (b) Surface grinding quality of magnetic pole being arranged at 90°, (c) Surface grinding quality of magnetic pole being arranged at 150°, (d) Surface grinding quality of magnetic pole being arranged at 180°

工缺陷被完全去除,表面粗糙度值从原来的 $0.68\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.12\ \mu\text{m}$,粗糙度的减小幅值为原来的 82.3%。此时,加工区域内的磁感应强度较大,研磨压力较大,使得磁性磨粒较好地附着于工件内表面。磨粒转动时,磁性磨粒不易受离心力作用而飞出加工区域,较

大的磁场作用区域使得被吸附的磁性研磨粒子数量较多,工件内表面得到充分研磨,研磨后的表面质量较好。研磨前后的对比效果可从图 6 中看出,未被研磨的表面呈现暗色且表面存在刮痕,研磨后表面光泽度增加,表面缺陷被去除,表面质量得到极大改善。



图 6 研磨前后效果图

Fig.6 Effect picture before (a) and after (b) grinding

当磁极夹角增大到 150° 时,由于磁感应强度减小,相应的磁性磨粒的受力变小,吸附的磁性磨粒数量相应减少。从图 5c 中可以看出,研磨后的表面出现少许较深的凹坑,工件表面仍然有少许的加工痕迹,表面粗糙度值降低到 $0.21\ \mu\text{m}$,粗糙度的减小幅值为原来的 69.1%。

磁极夹角为 180° 时,从磁感应强度云图和变化曲线中可以看出,加工区域内的磁感应强度减小,磁场有效区域减小。因此在磁场中的磁性磨粒受力较小,研磨压力较小,而参与研磨的磨粒数量因有效磁场覆盖区域的变小而减少,所以材料的去除量变小,工件表面研磨不充分。从图 5d 中可以看出,表面的原始划痕和凹坑无法去除,表面的加工质量较差,表面粗糙度值降低到 $0.25\ \mu\text{m}$,粗糙度的减小幅值为原来的 63.2%。

4 结论

1) 基于磁粒研磨法对 Al 2024 细长管进行研磨时,外部磁极的空间排布方式能够影响加工区域的磁感应强度大小,进而影响研磨压力,最终影响研磨效果。

2) 利用 ANSYS 磁场模块对磁极的三种排布方式进行磁场模拟,随着磁极夹角的增大,磁感应强度逐渐减小,有效区域范围逐渐变小。在磁极 90° 分布时,磁场的有效区域范围最大,磁感应强度最大,有利于磁性磨粒较多地聚集。

3) 由研磨试验可知,加工时间为 10 min、磁极 90° 分布时,较大的研磨压力和较多的磨粒切削刃使得研磨后的表面粗糙度值由原始 $0.66\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.12\ \mu\text{m}$,表面原始缺陷基本被去除,表面纹理均匀且光泽度较好。

参考文献:

[1] 丘平,乐敏. 石油化工装置中不锈钢钢管的应用[J]. 石

油化工设备技术, 2013, 34(2): 50-53.

QIU Ping, LE Min. Application of stainless steel pipe in petrochemical plant[J]. Petrochemical technology & equipment, 2013, 34(2): 50-53.

[2] 李海雄. 2024 铝合金高周疲劳性能及机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

LI Hai-xiong. Research on high-cycle fatigue properties and mechanism of the 2024 aluminum alloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[3] 胡海涛, 李玉龙, 索涛, 等. 2024 铝合金振动疲劳特性及断口分析[J]. 航空材料学报, 2013, 33(4): 78-83.

HU Hai-tao, LI Yu-long, SUO Tao, et al. Vibration fatigue and fracture performance of aluminum alloy 2024[J]. Journal of aeronautical materials, 2013, 33(4): 78-83.

[4] 李晓宁. 2024 高强度航空铝合金耐蚀性及断裂行为数值模拟研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.

LI Xiao-ning. Numerical simulation of corrosion resistance and fracture behavior of 2024 aerospace aluminum alloy[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.

[5] 马慧娟, 顾艳红, 车俊铁, 等. 表面纳米化对 2024 铝合金耐磨性能的影响[J]. 材料保护, 2016, 49(7): 56-59.

MA Hui-juan, GU Yan-hong, CHU Jun-tie, et al. Effect of surface nanocrystallization on wear resistance of 2024 aluminum alloy[J]. Materials protection, 2016, 49(7): 56-59.

[6] 董佳怡. 表面纳米化对金属材料耐磨性的影响[J]. 新材料新装饰, 2014(7): 119-123.

DONG Jia-yi. Influence of surface nanocrystallization on wear resistance of metallic materials[J]. New materials new decoration, 2014(7): 119-123.

[7] 陈燕, 张耀明, 邓超, 等. V 形磁铁在 SUS304 管内表面抛光中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 187-191.

CHEN Yan, ZHANG Yao-ming, DENG Chao, et al. Application of V-shaped magnet in polishing the inner surface of the SUS304 tubing[J]. China mechanical engineering, 2014, 50(15): 187-191.

[8] 陈燕, 宋宗朋, 李昌, 等. 磁研磨法抛光 40Cr 钢工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. Influenc-

- ing factors on polishing inner surface of 40Cr steel pipe fittings with a magnetic grinding method[J]. China surface engineering, 2015, 28(4): 62-69.
- [9] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2015(6): 814-817.
HAN Bing, LIU Li-xin, CHEN Yan. Optimization of process parameters on magnetic abrasive finishing to inner surface of bending pipe[J]. China mechanical engineering, 2015(6): 814-817.
- [10] ZOU Y H, JIAO A Y, AIZAWA T. Study on plane magnetic abrasive finishing process-experimental and theoretical analysis on polishing trajectory[J]. Advanced materials research, 2010, 126-128: 1023-1028.
- [11] JIAO A Y, QUAN H J, LI Z Z, et al. Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015: 1-11.
- [12] 张琳, 赵吉宾, 李论. 复杂曲面磁粒研磨加工方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(1): 129-131.
ZHANG Lin, ZHAO Ji-bin, LI Lun. Magnetic abrasive finishing method research of complex curved surface[J]. Machinery & automatic manufacturing technology, 2014(1): 129-131.
- [13] KIM S O, KWAK J S. Magnetic force improvement and parameter optimization for magnetic abrasive polishing of AZ31 magnesium alloy[J]. The Chinese journal of non-ferrous metals, 2008, 18(s1): 369-373.
- [14] 韩冰, 邓超, 陈燕. 球形磁铁在弯管内表面磁力研磨中的应用[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(6): 565-570.
HAN Bing, DENG Chao, CHEN Yan. Spherical magnet processing of inner surface of bending pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Tribology, 2013, 33(6): 565-570.
- [15] CHANG G W, YAN B H, HSU R T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2002, 42(5): 575-583.