

球形开槽磁极辅助研磨 H63 黄铜弯管内表面

赵杨, 陈燕, 吕旖旎, 李文龙, 陈松

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: **目的** 改善 H63 黄铜弯管内表面质量, 缩短加工周期, 提高使用寿命。**方法** 通过六自由度机械手臂, 拖动磁场发生装置, 带动弯管内辅助磁极进行研磨试验。分别采用球形磁极与球形开槽磁极作为辅助磁极研磨, 并利用 Ansoft 软件, 分析加入两种辅助磁极后, 磨削区磁力线和磁感应强度的变化情况。探究两种光整加工形式的原理及研磨轨迹。使用触针式表面粗糙度测量仪和超景深 3D 电子显微镜, 对两种辅助磁极研磨试验前后的样品进行对比和分析。**结果** 添加球形辅助磁极研磨 60 min, H63 黄铜弯管内表面粗糙度 Ra 由原始的 $0.833\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.238\ \mu\text{m}$, 继续研磨 15 min 后, Ra 降低到 $0.194\ \mu\text{m}$ 。添加球形开槽辅助磁极研磨 60 min, H63 黄铜弯管内表面粗糙度 Ra 由原始的 $0.834\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.172\ \mu\text{m}$, 继续研磨 15 min 后, Ra 变为 $0.176\ \mu\text{m}$ 。球形开槽辅助磁极研磨加工弯管内表面, 效率提高 20%。**结论** 球形开槽辅助磁极磨削弯管内表面的轨迹为致密均匀的双螺旋线, 能够避免球形辅助磁极研磨时产生的尖点效应。同时, 该加工形式促进磁性研磨粒子滑擦弯管内壁时的动态翻滚更新, 进而减缓切削刃钝化, 缩短研磨时间, 解决弯管内壁的原始缺陷问题。

关键词: H63 黄铜弯管; 辅助磁极; 磁粒研磨; 研磨运动轨迹; 研磨效率; 表面形貌

中图分类号: TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)05-0360-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.043

Spherical Magnet with Ring Grooves Assisted Grinding Inner Surface of H63 Brass Bend Pipe

ZHAO Yang, CHEN Yan, LYU Yi-ni, LI Wen-long, CHEN Song

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

ABSTRACT: The work aims to improve the inner surface quality of H63 brass bend pipe, shorten its processing period and improve its service life. A six-degree-of-freedom manipulator was used to drive the magnetic field generator to drive the auxiliary magnet in bending pipe to conduct grinding test. The spherical magnet and spherical with ring grooves magnet were used as auxiliary magnet for grinding, and the Ansoft software was used to analyze the changes of magnetic lines and magnetic

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-07-29

Received: 2019-04-22; Revised: 2019-07-29

基金项目: 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); 辽宁科技大学研究生教育改革与科技创新项目 (LKDYC201806)

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), Postgraduate Education Reform and Science and Technology Innovation Project of University of Science and Technology Liaoning (LKDYC201806)

作者简介: 赵杨 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: ZHAO Yang (1993—), Male, Master, Research focus: precision and special processing.

通讯作者: 陈燕 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工与特种加工。邮箱: laochen412@gmail.com

Corresponding author: CHEN Yan (1963—), Female, Doctor, Professor, Research focus: precision and special processing. E-mail: laochen412@gmail.com

引文格式: 赵杨, 陈燕, 吕旖旎, 等. 球形开槽磁极辅助研磨 H63 黄铜弯管内表面[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 360-367.

ZHAO Yang, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Spherical magnet with ring grooves assisted grinding inner surface of H63 brass bend pipe[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 360-367.

induction intensity in the processing area after two different kinds of auxiliary magnets were added. The principle and grinding track of two different kinds of auxiliary magnets for grinding the inner surface of bending pipe were explored. Two different kinds of auxiliary magnets of grinding test data were compared and analyzed with the stylus surface roughness meter and the ultra depth 3D microscope. When the spherical magnet were used as auxiliary magnet, the grinding time was 60 minutes, the inner surface roughness of H63 brass bend pipe was reduced from $Ra=0.833\ \mu\text{m}$ to $Ra=0.238\ \mu\text{m}$; after continuing grinding for 15 minutes, the surface roughness was reduced from $Ra=0.238\ \mu\text{m}$ to $Ra=0.194\ \mu\text{m}$. When the spherical with ring grooves magnet were used as auxiliary magnet, the grinding time was 60 minutes, the inner surface roughness of H63 brass bend pipe was reduced from $Ra=0.834\ \mu\text{m}$ to $Ra=0.172\ \mu\text{m}$; after continuing grinding for 15 minutes, the surface roughness was changed from $Ra=0.172\ \mu\text{m}$ to $Ra=0.176\ \mu\text{m}$. When the spherical with ring grooves magnet was used as auxiliary magnet, the grinding efficiency was increased by 20%. When the spherical with ring grooves magnet was used as auxiliary magnet, the grinding track of the inner surface of bending pipe is dense homogeneous double helix curve; it can avoid the sharp point effect caused by the grinding of spherical auxiliary magnet. At the same time, it promotes the rolling and updating of magnetic abrasive particles, and then delays blade passivation and shorten the grinding time; it solves the problem of original inner surface quality defect of bend pipe.

KEY WORDS: H63 brass bend pipe; auxiliary magnet; magnetic particle grinding; grinding track; grinding efficiency; surface topography

H63 黄铜可进行焊接、拉丝、轧制、弯曲成形等,是航空、汽车管道系统及卫生洁具的重要基础材料^[1-3]。为满足空间的使用需求, H63 黄铜管通过机加弯曲后,弯曲处内壁易出现褶皱、微裂纹、凹坑等质量瑕疵。当液体流过弯管内表面缺陷处,不断地冲击、冲刷,加剧微裂纹及凹坑等内表面缺陷的扩展,甚至造成湍流喘振现象。内表面粗糙不平,残余液体挂壁严重,聚集到凹坑内部,会造成腐蚀,影响管道的使用寿命^[4-7]。因此,需要解决弯管内表面质量问题,延长其使用期限。国内外对精整 H63 黄铜弯管内表面的研究较少,对管件内表面的研磨和抛光研究较多。Yamaguchi^[8]提出采用磁极绕管件旋转,带动内部磁性磨粒跟随旋转研磨去除材料的方法,此方法研磨压力小,效率低。韩冰等^[9]提出在弯管内添加球形磁极辅助研磨内表面的方法,该方法增大了磁性研磨粒子对管壁的研磨压力,提高了磨削效率,但由于球形辅助磁极与管件内表面为点接触,存在尖点过磨现象。严正伟等^[10]提出用柱形磁极辅助研磨弯管内壁的方法,该方法增大了接触面积,提高了磨削管件的效率,但切割后所形成的柱形磁极不能促进磁性研磨粒子的动态翻滚,不利于切削刃的更新。

文中以 H63 黄铜弯管为研究对象,提出将球形磁极开交叉矩形环槽(沿着 N-S 级交界线及垂直 N-S 交界线,并过研磨切点)后,作为辅助磁极添放至弯管内部。球形开交叉矩形环槽的辅助磁极产生磁场梯度变化,增大参与研磨部位的磁感应强度,能够促进磁性研磨粒子在研磨弯管内表面时的动态更新,使更多磁性研磨粒子的切削刃参与磨削,研磨更充分、均匀。研磨接触形式由单点接触变为多点接触,避免了球形辅助磁极研磨时出现的尖点过磨现象,缩短研磨

时间,有效改善弯曲处内壁的皱波、微裂纹等缺陷。此方法同样可以解决航空发动机、核潜艇等管路系统的内表面质量问题。

1 弯管内表面研磨原理

1.1 加工原理

弯管内表面研磨加工时,将吸附磁性研磨粒子的辅助磁极添加在弯管内部,并与外部旋转磁极形成闭合磁路,磁性研磨粒子沿磁路上磁力线镶嵌排布,组成带有刚性的磁粒刷^[11]。如图 1a 所示,管件外部旋转磁极吸附内部球形辅助磁极,形成闭合磁路,增强了磁性研磨粒子对管件内表面的压覆能力。研磨管件内表面时,球形辅助磁极的 N、S 极交界部分起主要研磨作用。该部分磁力小,磁性研磨粒子附着量少,且贴附的磁性研磨粒子稳定性差。外部磁极旋转时,受磁力及摩擦力作用,导致内部球形磁极易产生尖点效应,将磁性研磨粒子挤到了参与研磨部位的两侧,导致球形磁极与工件出现互磨现象^[12]。两侧的磁性研磨粒子虽然能够沿着磁力线排布,形成磁力刷,但是研磨压力较小,研磨质量差。

如图 1b 所示,球形磁极开交叉矩形环槽槽宽与深度的比例为 1:1^[13-15]。随着外部旋转磁极的转动及球形开槽辅助磁极凹槽处磁场的梯度变化,在磁力和挤压力的共同作用下,使吸附在球形开槽辅助磁极上的磁性研磨粒子在槽底与槽边间不断地挤入与吸出。磁性研磨粒子切削刃得到动态翻滚更新,可减少单颗磁性研磨粒子在单位时间内的使用频率,延长其有效工作时间^[16]。研磨过程中,球形开槽辅助磁极避免了研磨尖点效应,增大了研磨区域,进而提高研磨效率。

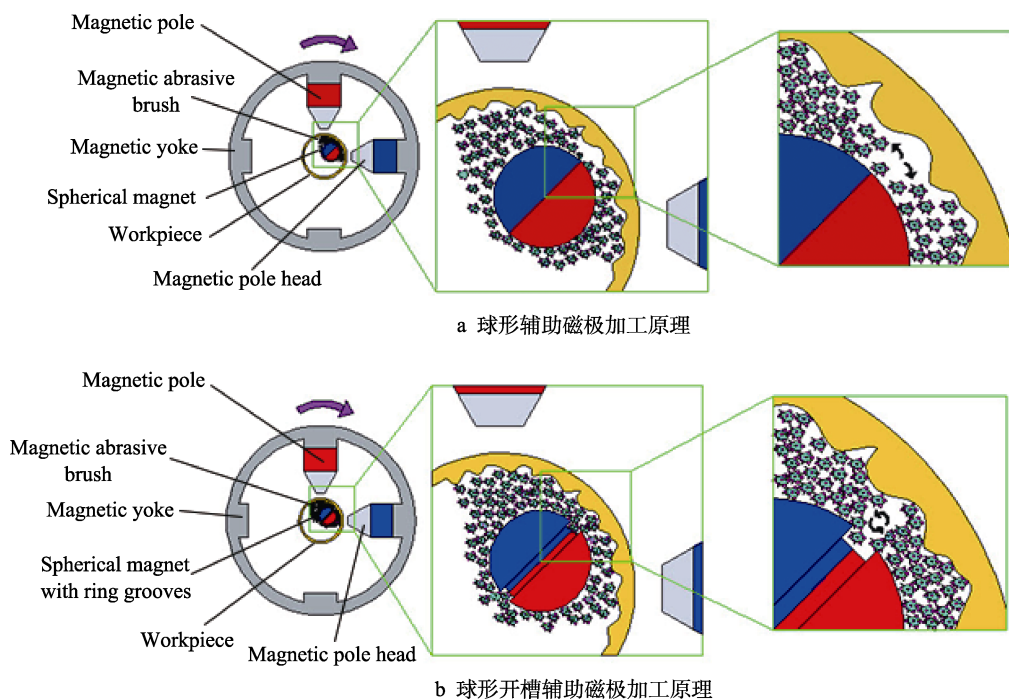


图1 辅助磁极研磨弯管内表面原理

Fig.1 Grinding principle of inner surface of the bend pipe: a) grinding principle of adding spherical auxiliary magnet; b) grinding principle of adding spherical with ring grooves auxiliary magnet

1.2 磁力线及磁感应强度分析

如图2所示,添加辅助磁极形成闭合磁路后,两种辅助磁极与外部旋转磁极形成的磁力线排布基

本一致,但球形开槽辅助磁极的磁力线不能穿过凹槽,使磁力线聚集在凹槽的边缘,产生的磁通量大。这决定了两种辅助磁极的磁力线在研磨加工区排布不同。

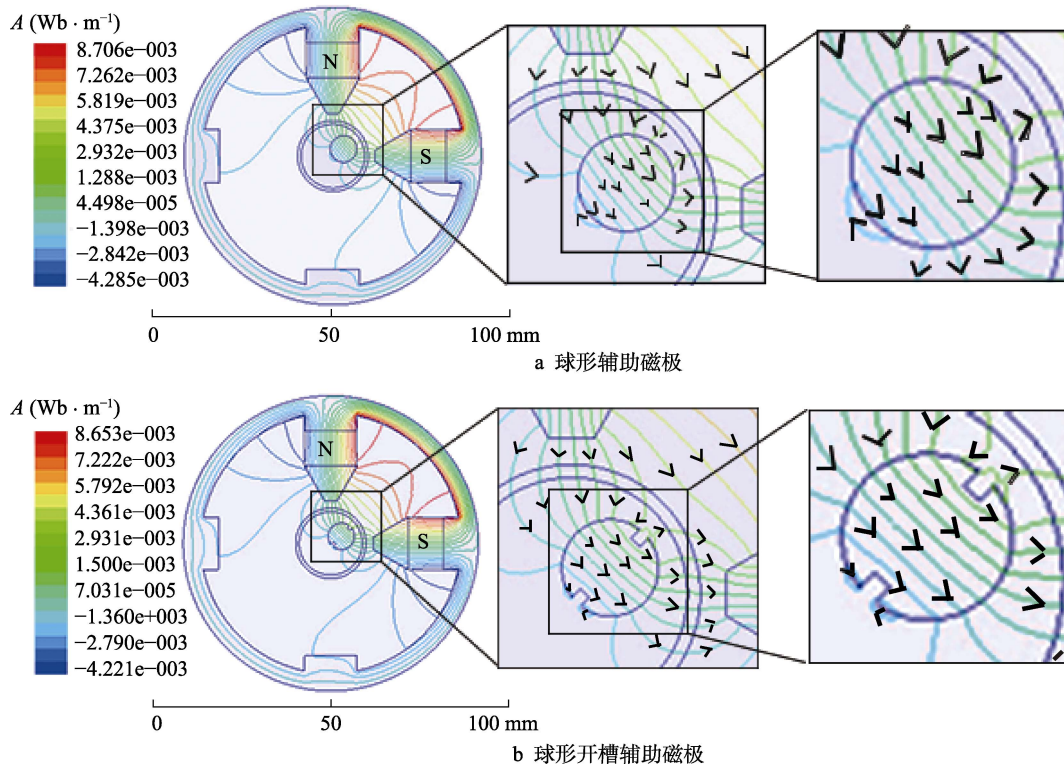


图2 添加辅助磁极的磁力线分布

Fig.2 Cloud map of magnetic lines distribution with auxiliary magnet: a) spherical auxiliary magnet; b) spherical with ring grooves auxiliary magnet

为了解析参与磨削磁粒刷的受力情况, 利用 Ansoft 软件分别对添加球形辅助磁极以及球形开槽辅助磁极的研磨加工区域进行磁感应强度分析。在管件内壁沿 $a-b-c$ 方向作圆弧线, 模拟出该圆弧线上磁

感应强度的变化, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 弯管内添加辅助磁极后, 产生了磁场梯度, 磁粒刷的研磨压力也随之变化。

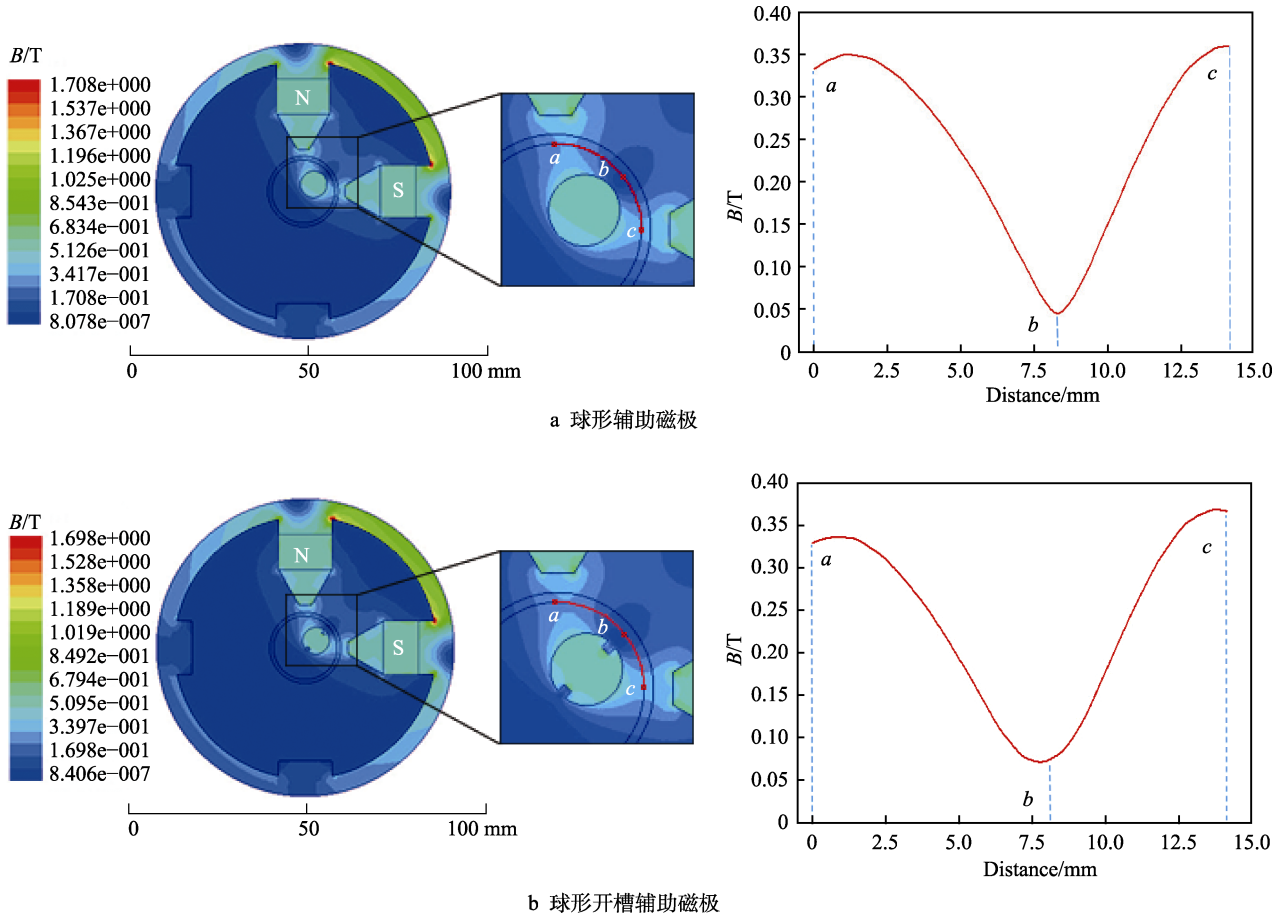


图 3 辅助磁极加工区域的磁感应强度分布云图及变化曲线

Fig.3 Cloud map and variation curve of magnetic induction intensity distribution with auxiliary magnet in the processing area: a) spherical auxiliary magnet; b) spherical with ring grooves auxiliary magnet

单位面积上弯管内表面磁粒刷形成的研磨压力为:

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

式中: P 表示管件内表面磁粒刷形成的研磨压力, N; B 表示研磨加工区域的磁感应强度, T; μ_0 表示无介质填充的空气磁导率, 取 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; μ_m 表示磁性研磨粒子的相对磁导率。

由式(1)可知, 当 μ_0 和 μ_m 恒定时, 研磨压力与磁感应强度的平方成正比。对比图 3a、b 的磁感应强度变化曲线可以看出, a 、 c 两处外部旋转磁极吸附内部辅助磁极, 形成闭合磁路, 其对弯管内表面形成的磁感应强度大。弯管内壁主要磨削区域 b 部分磁感应强度相对较弱。添加球形辅助磁极后, b 部分的磁感应强度曲线存在尖点极值, 为 0.045 T; 而添加球形开槽辅助磁极后, b 部分的磁感应强度曲线变得平缓

均匀, 增大至 0.071 T。

通过研磨工艺的经验公式得:

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

式中: R 表示磨屑在单位时间内的脱落量, mg; K 表示研磨工艺相关的常量; v 表示相对转速, mm/s。

由式(2)可知, 相对转速与研磨压力成正比。当转速一定时, 研磨压力的大小就决定了材料去除量的多少, 进一步决定了研磨效率。

分析球形开槽辅助磁极凹槽部分的磁感应强度, 并添加辅助线, 得出凹槽边缘磁感应强度沿辅助线 $d-e-f$ 方向的变化情况, 如图 4 所示。辅助磁极开槽后, 磁极上凹槽处各点与工件间的距离不等, 进而使磁场产生梯度变化。凹槽边缘辅助线 $d-e-f$ 的磁感应强度高低起伏, 变化明显, 棱边 d 、 f 两处

磁感应强度较大, 槽底 e 处的磁感应强度最弱, 形成不均磁场。

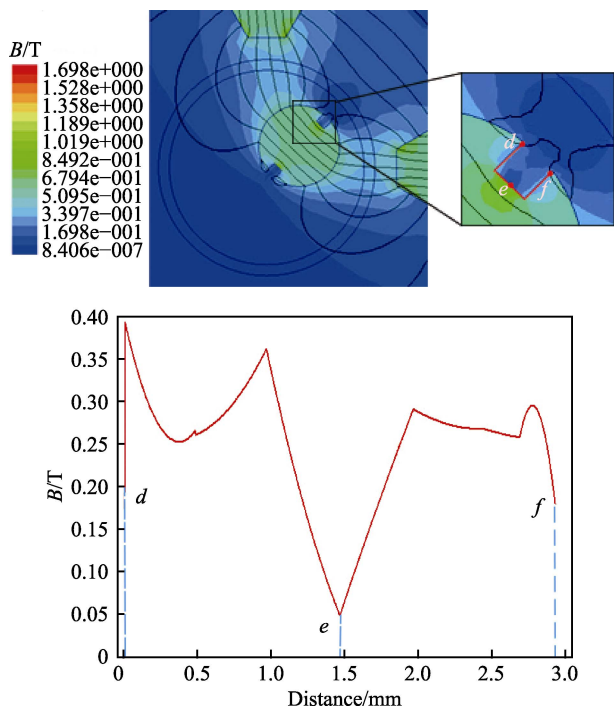


图 4 凹槽边缘的磁感应强度分布云图及变化曲线
Fig.4 Cloud map and variation curve of magnetic induction intensity distribution in edge of groove

1.3 磁粒刷研磨轨迹

磁粒刷研磨轨迹的致密与复杂程度影响其对工件的磨削效率及磨削质量。如图 5a 所示, 在研磨过程中, 弯管内部的球形辅助磁极受外部旋转磁极的磁力作用, 球形辅助磁极与弯管内表面相切, 形成单峰磁粒刷, 研磨轨迹为沿着弯管轴线方向旋转的单一螺旋线。由于研磨部位为球形磁极与弯管内表面的切点处, 经过多次的往复运动后, 参与磨削的磁性研磨粒子的流动性变差, 不利于切削刃的更新, 磨削处轨迹沟槽的波峰波谷较为明显。如图 5b 所示, 球形开槽辅助磁极吸附磁性研磨粒子, 形成双峰磁粒刷, 对弯管内表面的研磨轨迹为双螺旋线。研磨轨迹致密、复杂, 研磨力较为均匀, 且参与研磨的磁性研磨粒子增多。在单位时间内, 加快了磁粒刷对管件内壁的切削频率。在球形开槽辅助磁极的不均匀磁场作用下, 这种双螺旋线运动轨迹使磁性研磨粒子在整个研磨过程中呈动态变化。研磨轨迹上的研磨粒子与弯管内表面的研磨间隙小, 磁性研磨粒子间相互挤压, 增大了磁粒刷对弯管内表面的研磨压力, 研磨效率高。凹槽内的磁性研磨粒子与弯管内表面的研磨间隙大, 磁性研磨粒子间的相互作用力小, 磁性研磨粒子的流动性、滚动性好, 促进了凹槽内部和研磨轨迹上磁性研磨粒子的动态更新^[17]。

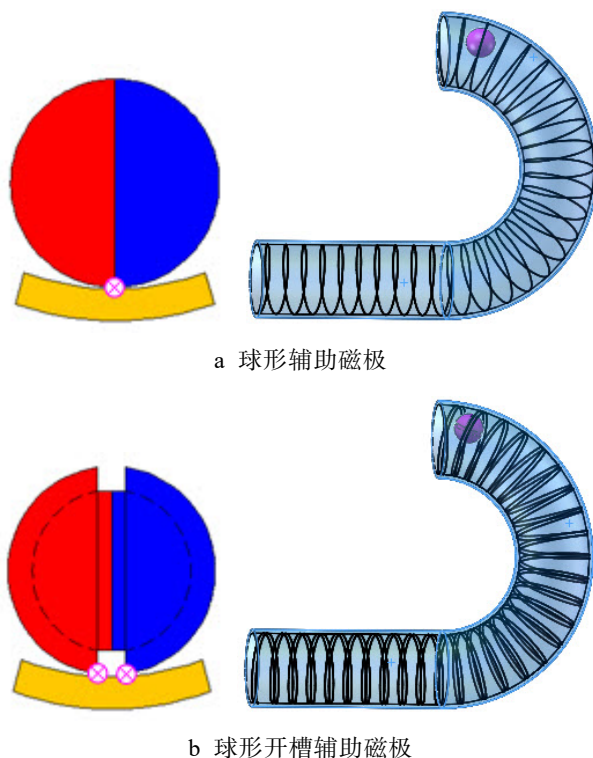


图 5 辅助磁极的磁粒刷研磨运动轨迹
Fig.5 Grinding motion track of auxiliary magnet's magnetic particle brush: a) spherical auxiliary magnet; b) spherical with ring grooves auxiliary magnet

2 试验过程及结果分析

2.1 试验条件

试验条件见表 1。通过表面粗糙度测量仪 (JB-8E 触针式) 对研磨前后弯管内表面的粗糙度进行数据测定采集。利用超景深 3D 电子显微镜 (VHX-500F) 对弯管内表面的微观形貌进行对比检测。

表 1 试验条件
Tab.1 Experimental conditions

Name	Specifications
H63 brass bend pipe	OD: $\phi 20$ mm; ID: $\phi 18$ mm
Auxiliary magnet	Spherical: $\phi 7.5$ mm, Nd-Fe-B Spherical with ring grooves: $\phi 7.5$ mm, Nd-Fe-B
Magnetic pole head	L : 15 mm, W : 15 mm, H : 10 mm, Taper: 25° , Q235
External magnet	Rectangle, L : 15mm, W : 15 mm, H : 10 mm, Nd-Fe-B
Grinding fluid	Water base grinding fluid, 15 mL
Magnetic abrasive	Average particle size: 150 μm , 15 g
Feed speed	6 mm/min
Rotate speed	800 r/min

2.2 试验装置

针对 H63 黄铜弯管内表面缺陷问题, 构建如图 6 所示的试验装置。磁场发生装置上的旋转磁场由带轮作为中间枢纽环节, 伺服电机转动, 传递到磁轭, 带动磁极旋转形成。将弯管穿过磁场发生装置, 并固定在实验平台上。添加吸附磁性研磨粒子的辅助磁极到弯管内部, 并与外部旋转磁场形成闭合磁回路。操纵机械手臂, 调节磁极与管件的研磨间隙, 标定磁场发生装置的位姿, 设定磁极转速及往复移动速度, 生成研磨运动轨迹和工艺参数。伺服电机转动, 六自由度机械手臂拖动磁场发生装置, 沿弯管轴线方向往复移动, 完成对弯管内表面的研磨加工。

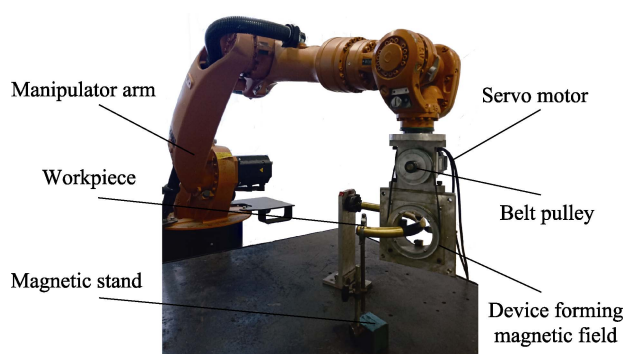


图 6 试验装置
Fig.6 Experimental device

2.3 试验结果

弯管剖切后, 清洗干净, 采用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪对原始内表面粗糙度进行数据采集。分别选取距离剖切部分端面 5、10、15、20、25 mm 处为测量点, 取平均值记为弯管内表面原始粗糙度。利用粘结剂将其复原, 加入吸附磁性研磨粒子的辅助磁极, 对弯管内壁进行研磨。试验过程中, 每研磨 15 min, 对弯管剖切部分内表面进行一次表面粗糙度数据采集, 每次数据采集测量点与采集原始数据的位置及方法相同, 并求平均值进行对比。

不同磁极辅助研磨 H63 黄铜弯管内壁的表面粗糙度变化如图 7 所示。添加球形辅助磁极研磨 15 min, 由于尖点效应, 接触点处研磨压力大, 内表面凸起的波峰能够被快速去除, 表面粗糙度变化迅速。研磨 30 min 后, 球形辅助磁极达到动平衡, 磁性研磨粒子被挤压到研磨部位两侧, 参与研磨的磁性研磨粒子减少, 研磨相钝化, 内表面粗糙度变化曲线呈现出迟缓下降的趋势, 研磨效率低。添加球形开槽辅助磁极, 参与磨削的研磨粒子增多, 磁性研磨粒子不断翻滚更

新, 内表面粗糙度变化曲线呈现出均匀的下降趋势, 研磨速率稳定。添加球形辅助磁极研磨 60 min, H63 黄铜弯管内表面粗糙度 Ra 由原始的 $0.833 \mu\text{m}$ 减小到 $0.238 \mu\text{m}$; 继续研磨 15 min 后, 表面粗糙度降低到 $0.194 \mu\text{m}$ 。添加球形开槽辅助磁极研磨 60 min, H63 黄铜弯管内表面粗糙度 Ra 由原始的 $0.834 \mu\text{m}$ 减小到 $0.172 \mu\text{m}$; 继续研磨 15 min 后, 表面粗糙度变为 $0.176 \mu\text{m}$ 。添加球形开槽辅助磁极研磨时, 研磨 60 min, H63 黄铜弯管内表面粗糙度基本达到稳定状态, 研磨效率提高 20%。

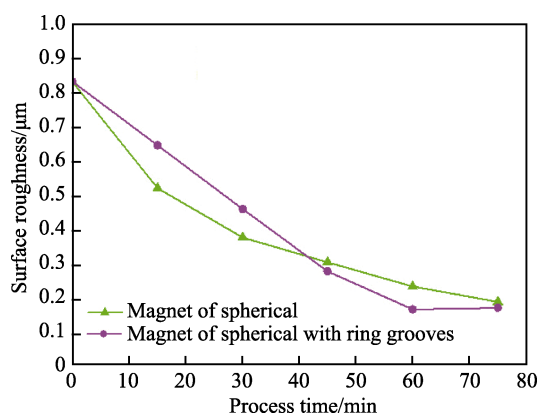


图 7 表面粗糙度的变化
Fig.7 Changes in surface roughness with time

利用超景深 3D 电子显微镜 (VHX-500F) 观测 H63 黄铜弯管内表面微观形貌变化, 如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 沟状纹理、凹坑等原始表面缺陷较为明显, 残余液体易在凹坑处存留挂壁, 导致凹坑周围的腐蚀更为严重, 并伴有明显的铜绿现象。从图 8b、c 可以看出, 球形辅助磁极研磨 15 min 后, 原始沟状纹理基本去除, 表面出现凹坑及犁耕现象; 球形开槽辅助磁极研磨 15 min 后, 锈渍减少, 表面光亮, 部分沟状纹理高度差减小。如图 8d、e 所示, 球形辅助磁极研磨 30 min 后, 表面凹坑等缺陷减少; 球形开槽辅助磁极研磨 30 min 后, 原始缺陷基本去除, 局部存在较为浅小的凹坑。如图 8f、g 所示, 球形辅助磁极研磨 60 min 后, 表面纹理较为均匀, 局部存在犁耕等表面质量缺陷; 球形开槽辅助磁极研磨 60 min 后, 表面较为光整, 研磨纹理较为致密均匀。如图 8h、i 所示, 添加球形辅助磁极研磨 75 min, 原始沟槽、凹坑等缺陷纹理基本去除, 但由于尖点效应, 导致研磨后弯管内表面单个磁性研磨粒子的研磨轨迹较深, 存留少许凹坑; 添加球形开槽辅助磁极研磨 75 min, 表面纹理较为致密均匀。

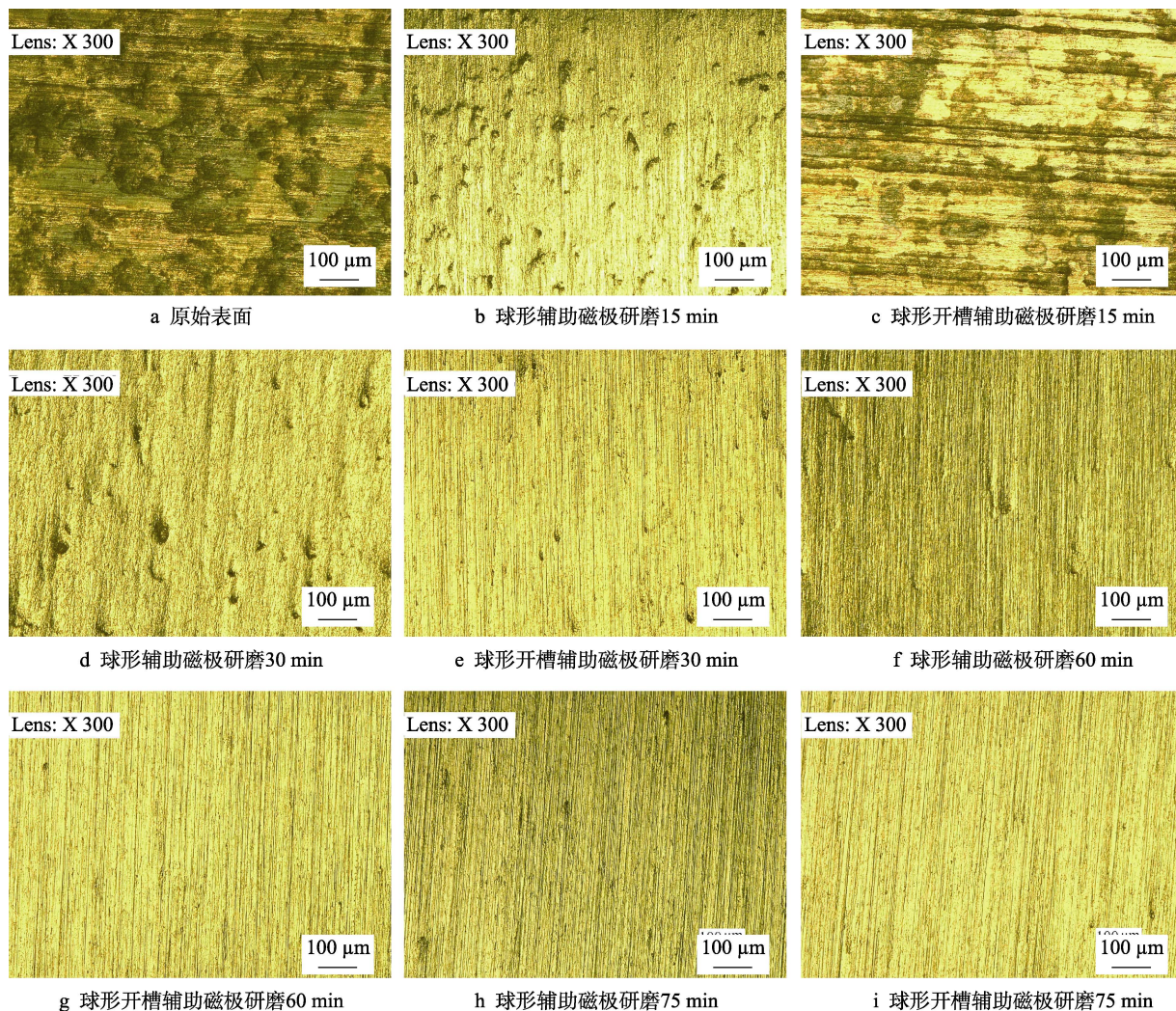


图 8 H63 黄铜弯管内表面的微观形貌

Fig.8 Micro surface topography of the H63 brass bend pipe: a) original surface; b) spherical auxiliary magnet grinding of 15 minutes; c) spherical with ring grooves auxiliary magnet grinding of 15 minutes; d) spherical auxiliary magnet grinding of 30 minutes; e) spherical with ring grooves auxiliary magnet grinding of 30 minutes; f) spherical auxiliary magnet grinding of 60 minutes; g) spherical with ring grooves auxiliary magnet grinding of 60 minutes; h) spherical auxiliary magnet grinding of 75 minutes; i) spherical with ring grooves auxiliary magnet grinding of 75 minutes

3 结论

1) 利用磁粒研磨法能够有效解决弯管内表面质量缺陷问题,减少残液挂壁腐蚀现象,提高使用寿命,增强弯管使用的稳定性。

2) 球形开槽辅助磁极的研磨运动轨迹为致密复杂的双螺旋线,促进了磁性研磨粒子在研磨轨迹上与凹槽内部的动态翻滚更新,减缓切削刃钝化,研磨效率高。

3) 研磨过程中,球形开槽辅助磁极研磨弯管内表面能够避免球形辅助磁极研磨产生的尖点效应,研磨力均匀,且增大了在单位时间内的研磨区域。

参考文献:

[1] 杨文超,杜再翔,张建峰,等. H63 黄铜下水管腐蚀失

效分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(5): 1817-1822.

YANG Wen-chao, DU Zai-xiang, ZHANG Jian-feng, et al. Corrosion failure analysis of H63 brass drain pipe[J]. Journal of Guangxi University (nat sci ed), 2017, 42(5): 1817-1822.

[2] 刘坚锋. 新型耐蚀高锌黄铜的研究[D]. 江西: 江西理工大学, 2010.

LIU Jian-feng. Study on new corrosion resistant high zinc brass[D]. Jiangxi: Jiangxi University of Science and Technology, 2010.

[3] 刘培兴, 刘晓璐, 刘华鼎. 铜合金加工基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 19-21.

LIU Pei-xing, LIU Xiao-tang, LIU Hua-nai. Copper alloy processing basis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 19-21.

[4] 伍超群, 朱峰, 刘英坤. 卫浴黄铜管开裂原因分析[J]. 金属热处理, 2011, 36(S1): 413-415.

WU Chao-qun, ZHU Feng, LIU Ying-kun. Fracture analysis of the brass pipe for bathroom[J]. Heat treatment of metals, 2011, 36(S1): 413-415.

- [5] YU Z H, HAN B, CHEN S, et al. Study on the inner surface finishing of irregular spatial elbow pipe by the centerline reconstruction[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017(6): 1-9.
- [6] 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. Finishing internal surface of 6061 aluminum alloy bend pipe based on rotating magnetic field[J]. China surface engineering, 2018, 31(5): 73-81.
- [7] 苏倩. 全浸海水环境旋转电磁效应对 H63 黄铜的缓蚀机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. SU Qian. Study on inhibition mechanism on H63 in full immersion seawater treated by rotating electromagnetic effect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [8] YAMAGUCHI H, SHINMURA T, SEKINE M. Uniform internal finishing of SUS304 stainless steel bent tube using a magnetic abrasive finishing process[J]. Journal of manufacturing science & engineering, 2005, 127(3): 605-611.
- [9] 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. The spherical magnet processing of inner surface of bending pipe by magnetic abrasive finishing [J]. Tribology, 2013, 33(6): 565-570.
- [10] 严正伟, 陈燕, 宋宗朋. 添加柱形辅助磁极研磨弯管内表面的试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(10): 141-145. YAN Zheng-wei, CHEN Yan, SONG Zong-peng. Study on the polishing of inner surface of bending pipe with the cylindrical auxiliary magnetic pole[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2017(10): 141-145.
- [11] 杨海吉, 韩冰, 陈燕, 等. 自旋转磁极在合金管内表面精密抛光中的应用[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 189-195. YANG Hai-ji, HAN Bing, CHEN Yan, et al. The application of rotating magnetic pole in the polishing of the inner surface of the alloy tube[J]. Tribology, 2018, 38(2): 189-195.
- [12] 宋宗朋. 提高弯管内表面抛光质量及效率的试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016. SONG Zong-peng. Experimental study on improving the polishing quality and efficiency of internal surface of bending pipe[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016.
- [13] 赵玉刚, 江世成, 周锦进. 磁极开槽形状和尺寸对磁场分布和磁粒光整加工能力影响的研究[J]. 中国机械工程, 1999(6): 93-96. ZHAO Yu-gang, JIANG Shi-cheng, ZHOU Jin-jin. Study on the influence of magnetic slotting shape and size on magnetic field distribution and magnetic particle finishing ability [J]. China mechanical engineering, 1999(6): 93-96.
- [14] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形状对磁粒光整加工的影响[J]. 机械制造, 2003(8): 45-46. XIAO Zuo-yi, ZHAO Yu-gang, WU Wen-quan. Study of the different shaped magnetic poles for the magnetic abrasive finishing [J]. Machinery manufacturing, 2003(8): 45-46.
- [15] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形状对磁粒研磨工艺影响的数值分析[J]. 现代制造工程, 2003(10): 10-12. XIAO Zuo-yi, ZHAO Yu-gang, WU Wen-quan. The numerical analyzing for the effects of magnetic pole shape to the process of magnetic abrasive finishing [J]. Modern manufacturing engineering, 2003(10): 10-12.
- [16] 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]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(15): 187-191.
- [17] 张龙龙, 焦安源, 陈燕, 等. 磁粒复合研磨 SUS304 不锈钢孔道的机理与试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 259-266. ZHANG Long-long, JIAO An-yuan, CHEN Yan, et al. Mechanism and experimental study of SUS304 stainless steel hole by magnetic particle compound grinding[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 259-266.

(上接第 359 页)

- [18] 李文辉, 杨胜强, 陈红玲, 等. 高能球磨法制备磁性磨粒的工艺及试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(6): 6-9. LI Wen-hui, YANG Sheng-qiang, CHEN Hong-ling, et al. Preparation and experimental research of magnetic abrasives by energy ball grinding processing[J]. Ordnance material science and engineering, 2013, 36(6): 6-9.
- [19] LIU Z Q, CHEN Y, LI Y J, et al. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2013, 68(1-4): 631-640.
- [20] 陈燕, 张旭. 铁基白刚玉磁性磨料的制备工艺[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(3): 12-16. CHEN Yan, ZHANG Xu. Preparation technology of iron-based white corundum magnetic abrasive grits[J]. Diamond & abrasives engineering, 2013, 33(3): 12-16.
- [21] CHEN Yan, LI Yan-jun, ZHANG Yao-ming, et al. Study on preparation process of magnetic abrasive particles[J]. Materials science forum, 2013, 750: 7-10.
- [22] 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]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(15): 187-191.
- [23] YUN H, HAN B, CHEN Y, et al. Internal finishing process of alumina ceramic tubes by ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 85(1-4): 727-734.
- [24] 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, 26(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, 26(6): 814-817.
- [25] 焦安源, 张龙龙, 刘新龙, 等. 磁粒研磨去除 Al 7075 交叉孔棱边毛刺的试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 302-309. JIAO An-yuan, ZHANG Long-long, LIU Xin-long, et al. Experimental study of deburring in Al 7075 cross hole edge based on magnetic particles grinding[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 302-309.
- [26] 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. The spherical magnet processing of inner surface of bending pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Tribology, 2013, 33(6): 565-570.