

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.01.005

电磁场作用下球形磁极辅助研磨弯管内表面研究

赵 杨, 陈 燕*, 程 森, 陈 松, 喻正好

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 弯管弯曲成形后, 在弯折处易产生微裂纹、褶皱等表面质量缺陷问题。本文通过采用六自由度机械手拖动电磁场发生装置沿加工轨迹往复运动, 电磁场发生装置驱动球形辅助磁极绕管件内壁转动, 实现了对弯管内表面的光整加工。在此基础上, 通过对弯管轮廓采集及曲线拟合, 重新构建了弯管中心线并转换为新的研磨加工轨迹。采用超景深3D电子显微镜和触针式表面粗糙度测量仪对研磨试验前后弯管内表面的形貌和粗糙度进行了对比分析。结果表明, 通过重新构建研磨加工轨迹, 试验装置有效解决了研磨弯折处的干涉与研磨不均匀等问题。研磨55 min后, 表面粗糙度由原始的 $0.713\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.194\ \mu\text{m}$, 铜合金弯管内表面原始质量缺陷基本去除, 表面纹理较为致密均匀。该方法有效避免了未规划研磨轨迹时出现的犁耕等纹理缺陷, 提高了弯管的服役可靠性。

关键词: 弯管; 电磁场; 磁粒研磨; 轨迹构建; 研磨效率; 表面形貌

中图分类号: TG176

文献标识码: A

Study on the Inner Surface Finishing of Bend Pipe by Electromagnetic Fields Drive Spherical Magnetic Pole

ZHAO Yang, CHEN Yan*, CHENG Miao, CHEN Song, YU Zhenghao

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

Abstract: Surface quality defects such as microcracks and folds are easy to occur at the bending point after bending of bend pipe. In this paper, by using a six-degree-of-freedom manipulator to drive the electromagnetic field generator to move back and forth along the processing path, and the electromagnetic field generator to drive the spherical auxiliary magnetic pole to rotate around the inner wall of the tube, the inner surface finishing of the bend pipe is realized. On this basis, the center line of the bend pipe is reconstructed and transformed into a new grinding path by collecting the outline of the bend pipe and fitting the curve. The morphology and roughness of bend pipe before and after grinding test were compared and analyzed by using super depth-of-field 3D electron microscope and stylus surface roughness measuring instrument. The results show that by reconstructing the grinding trajectory, the experimental device effectively solves the problems of interference and uneven grinding at the grinding bend. After grinding

收稿日期: 2019-06-25

修回日期: 2019-07-22

通信作者: 陈燕, email: laochen412@gmail.com

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)

for 55 min, the surface roughness decreased from $0.713\ \mu\text{m}$ to $0.194\ \mu\text{m}$. The original quality defects on the surface of copper alloy bend pipes were almost removed, and the surface texture was compact and uniform. This finishing method effectively avoids the texture defects such as ploughing when the grinding trajectory is not planned, and improves the service reliability of bend pipe.

Keywords: bend pipe; electromagnetic field; magnetic particle grinding; trajectory rebuild; grinding efficiency; surface morphology

随着装备制造业的快速发展,不仅对技术提出新要求,而且对材料也提出了更高的要求。铜合金因具有良好的耐腐蚀性及优异的换热系数,其以管材的形式在航空航天、海洋工程、卫生洁具等行业扮演着愈发重要的角色^[1-2]。为了合理的利用空间,各种设备装置中的输送管道通常被设计成不同曲率的弯管。由于弯管受加工工艺的限制,在其弯曲成形时,弯折处易出现微裂纹、褶皱等表面质量缺陷。弯管在高压下输送油、液、气的过程中,会加剧微小裂纹的扩展,严重影响弯管输送的均匀性及稳定性^[3-5]。因此,需要对弯管内表面进行光整加工。Yamaguchi 等^[6-7]提出在管件内部添加导磁不锈钢丝,增大研磨压力。韩冰等^[8]提出磨削弯管时,添加球形磁极辅助磨削,增加磨削压力,提高磨削效率。结果表明,这些方法能够解决弯管内表面缺陷问题,但在实际研磨过程中,增大了研磨压力,磁性研磨粒子没有得到更新,易出现犁耕等质量缺陷。没有对弯管加工轨迹路线进行规划也会导致出现研磨不均等现象。李龙邦等^[9]提出基于旋转进给的电磁场来研磨弯管内表面,但该方法驱动内部辅

助磁极研磨弯管内表面时,存在研磨间隙死角。

本文通过单片机控制电磁场在脉冲信号的变化下,带动弯管内部球形磁极沿弯管内壁公转的同时完成自转,既可增大研磨压力,又能保证磁性研磨粒子的更新,有效提高研磨效率。此外,通过对弯管轮廓线测量得到空间点云,重新构建弯管中心线,计算优化得到研磨运动轨迹,采用六自由度机械手拖动磁场发生装置完成对弯管内表面的光整加工,获得了更为理想的研磨效果。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

为解决弯管内表面质量问题,构建如图 1 所示的试验装置。将工件固定在实验平台上,添加吸附磁性研磨粒子的球形磁极至弯管内部,通过外部单片机控制磁场发生装置上电磁铁的通电时间及形成磁极极性,进一步形成旋转磁场,带动球形磁极沿弯管内壁旋转,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运动^[10],从而带动磁粒刷沿弯管内壁作往复螺旋线状的研磨运动轨迹。

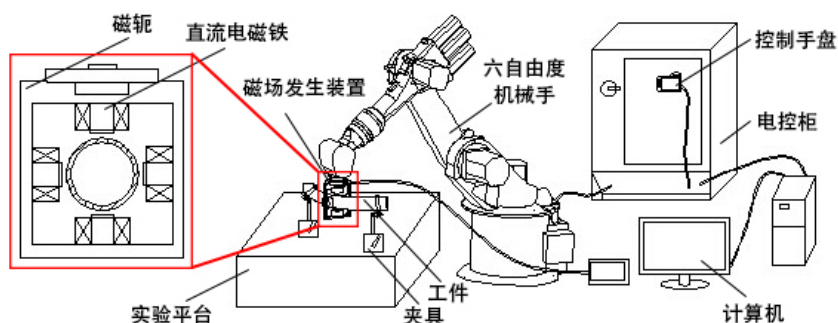


图1 试验装置图

1.2 试验方法

为了确保球形辅助磁极沿弯管内壁旋转,外部磁场发生装置上的四个电磁铁依次通入脉冲信号,见图2。

电磁铁 N-S 极交互作用形成旋转电磁场,弯管

内部球形辅助磁极受外部旋转电磁场作用实现自转的同时并沿弯管内壁完成公转运动,如图3所示。球形辅助磁极的自转运动能够搅拌磁性研磨粒子,促使新的磁性研磨粒子参与研磨的同时,不断更新磁性研磨粒子参与研磨的切削刃^[11-13],避免

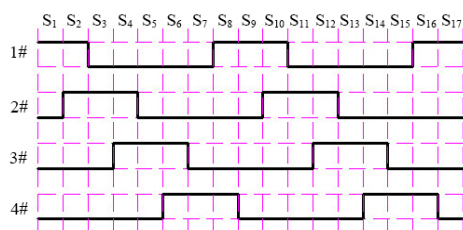


图2 电脉冲控制时序

球形磁极与弯管内壁产生互磨现象;吸附磁性研磨粒子的球形辅助磁极沿弯管内壁的公转运动,能够促使磁性研磨粒子不断对弯管内表面进行滑擦,完成对弯管内壁皱波等缺陷的微量去除。机械手臂拖动磁场发生装置沿弯管轴线方向往复运动,实现

对弯管内表面的光整加工。

2 构建研磨运动轨迹

2.1 曲线的采集拟合

空间弯管表面通过三坐标测量仪扫描取样后,将扫描获得的点云进行数据化处理,为了保持待求参数准确性,则对数据中各个节点处数值进行平滑处理,平滑后的值由原值线性迭加而成^[14],即:

$$\{P_v\}(v=\dots,-1,0,1,\dots) \quad (1)$$

$$\{P_n\}=\sum_{v=-\infty}^{+\infty} P_v L_{n-v} \quad (2)$$

式中: $\{L_v\}$ 是权因子, $\{L_v=L_v\}$ 是偶系列。

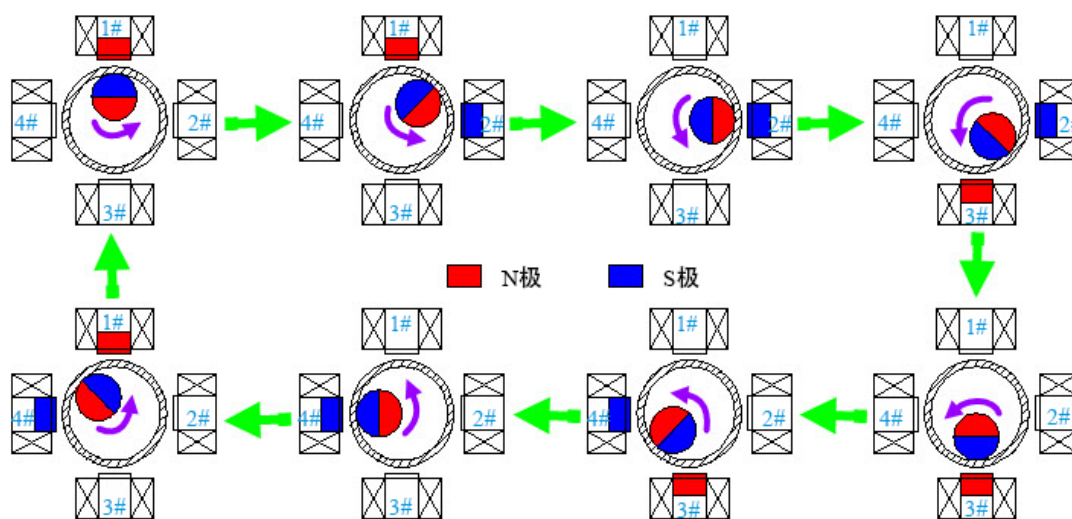


图3 辅助磁极研磨弯管内壁的姿态图

为了使得处理后的数据 $\{P_n\}$ 比 $\{P_v\}$ 平滑,同时能够较好的保持原数据的形貌,还需要其两组数据“偏离”不大,选用高斯(Gaussian)滤波算法进行运算。

弯管中心线的生成是利用拟合的外部轮廓线通过截面相交的方法生成。理想状态的截面交线如图4(a)所示相交于一点,但由实际测量等因素会导致存在一定的误差,截面交线如图4(b)所示为三条交线。三条交线构成的几何图形的外心即为弯管在此截面上的圆心。通过积分的形式对若干个圆心进行拟合,所得曲线即为弯管中心线。

2.2 拟合曲线与加工轨迹的转换

对拟合所得弯管中心线进行点的离散化处理,各点坐标即为机械手执行到该点时所处的当前坐标,将若干坐标位置点导入六自由度机械手控制系

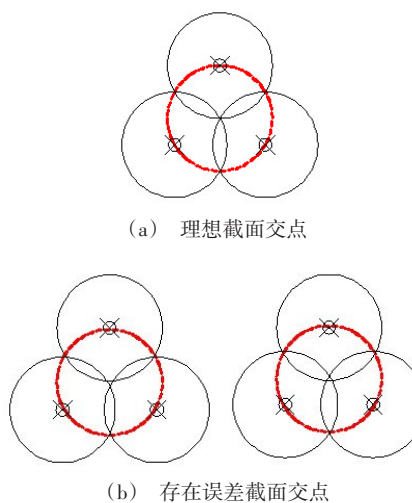


图4 辅助磁极研磨弯管内壁的姿态图

统并转换为机器代码^[15-16]。如图 5 所示,通过旋转、平移对位置坐标进行齐次转换,将工件坐标转换为机器坐标,完成拟合曲线与加工轨迹的转换。

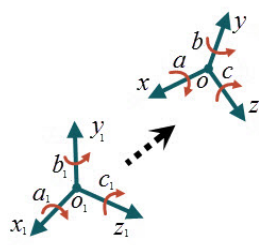


图 5 坐标转换示意图

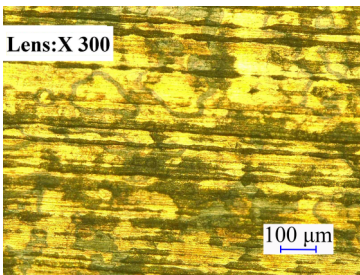
3 试验结果

本文研究对象为铜合金弯管,试验条件如表 1 所示。

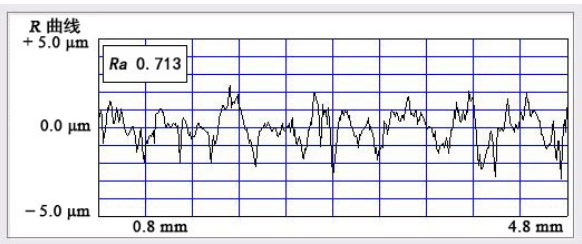
表 1 试验条件

试验因素	参数
工件	铜合金弯管: 外径 $\Phi 22\text{ mm}$; 内径 $\Phi 20\text{ mm}$
外部磁极	直流电磁铁: $\Phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ (圆柱形)
辅助磁极	钕铁硼: $\Phi 6.5\text{ mm}$ (球形)
磁性研磨粒子	平均粒径: $187.5\text{ }\mu\text{m}$, 质量: 15 g
研磨液	水基研磨液, 15 mL
磁场旋转速度	$800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$
移动速度	$6\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

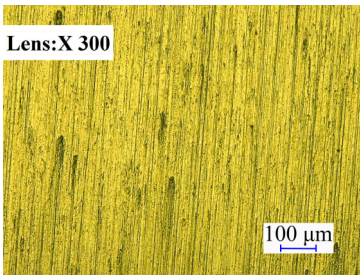
利用 VHX—500F 超景深 3D 电子显微镜和触针式表面粗糙度测量仪对铜合金弯管内表面研磨前后的微观形貌变化和表面粗糙度进行表征分析,测试结果如图 6(a)所示。



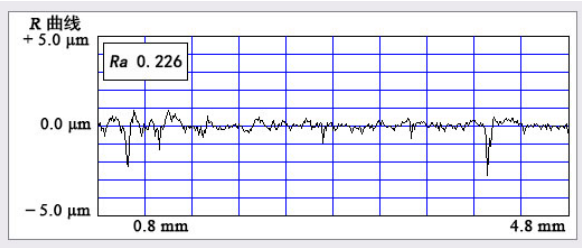
(a) 原始表面微观形貌



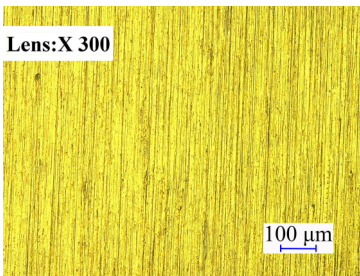
(b) 原始表面粗糙度测试曲线



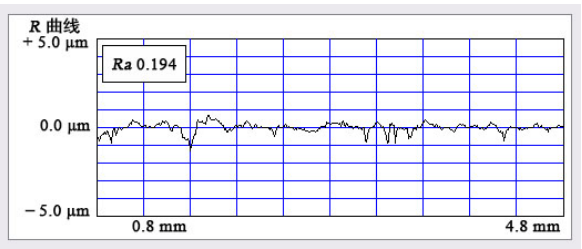
(c) 未轨迹规划研磨后的微观形貌



(d) 未轨迹规划研磨后粗糙度测试曲线



(e) 轨迹规划研磨后的微观形貌



(f) 轨迹规划研磨后粗糙度测试曲线

图 6 铜合金弯管内表面的微观形貌及表面粗糙度

弯折处原始内表面有较明显的沟状纹理、微裂纹等表面质量缺陷,液体长期对弯折处冲击、冲刷,会加剧微裂纹的延展,且沟状纹理易存留残余液体,对内表面会造成腐蚀破坏。由图6(b)可知,原始内表面粗糙度为 $0.713\ \mu\text{m}$ 。如图6(c)所示,未规划研磨加工轨迹,研磨55 min后,原始沟状纹理及表面腐蚀缺陷得到有效去除,但是由于部分研磨轨迹偏移,造成局部研磨力不均匀,铜合金弯管内表面出现犁耕缺陷;研磨后的表面粗糙度降低到 $0.226\ \mu\text{m}$ (见图6(d))。如图6(e)所示,通过对弯管轮廓曲线的采集拟合,重新构建研磨加工轨迹后,在电磁场作用下,弯管内部添加球形磁极辅助研磨55 min,可发现弯管中的原始沟槽、凹坑等缺陷纹理基本去除,表面纹理较为致密均匀。表面粗糙度减小到 $0.194\ \mu\text{m}$ (见图6(f))。

4 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,去除由于弯折造成的微裂纹、褶皱等缺陷。

(2)添加球形磁极辅助电磁场研磨弯管内表面时,保证球形磁极沿弯管内壁公转的同时产生自转,有效避免了球形磁极辅助研磨时与弯管内壁产生互磨,促进磁性研磨粒子的翻滚更新,提高研磨效率。

(3)通过轮廓曲线的拟合与加工轨迹的转换,六自由度机械手能够拖动磁场发生装置沿弯管轴线往复运动,完成对弯管内表面的光整加工。

(4)通过重新构建研磨加工轨迹,有效解决了研磨弯折处的干涉与研磨不均匀等问题,研磨55 min后,表面粗糙度可由原始的 $0.713\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.194\ \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 孙宗琳, 邢振华, 张孟昀, 等. 输油管道90°弯管冲蚀磨损数值模拟研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(2): 47-51.
- [4] 闫宏伟, 崔子梓, 焦彪彪, 等. 基于ADAMS螺旋驱动行走机构的弯管通过性能研究[J]. 机械设计, 2017, 34(12): 32-36.
- [5] 程康, 李振斌, 李威. L型输流弯管自由模态分析[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(4): 30-34+54.
- [6] 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.
- [7] Yamaguchi H, Kang J, Hashimoto F. Metastable austenitic stainless steel tool for magnetic abrasive finishing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 339-342.
- [8] 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.
- [9] 李龙邦, 陈燕, 陈松, 严正伟. 基于旋转进给电磁场的不规则弯管内表面磁研磨研究[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 284-289.
- [10] 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.
- [11] Wang Y, Hu D. Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(1): 43-49.
- [12] 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.
- [13] Kim J D. Polishing of ultra-clean inner surfaces using magnetic force[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(2): 91-97.
- [14] 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.
- [15] 吕美凤, 钱玮. 基于MATLAB的六自由度机械手的运动分析与仿真[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 324(7): 71-73.
- [16] 肖振楠, 申毅, 倪辰旖. 六自由度机械手的运动轨迹规划与仿真[J]. 机床与液压, 2018, 465(15): 65-70.