

基于廓形识别的弯管内表面精密磨削试验研究

程淼, 陈松, 徐进文, 张霄烽, 陈燕, 韩冰

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: **目的** 解决弯管内表面磁粒研磨工艺中手动采点所产生的随机误差大、研磨间隙无法保证以及位姿不准确等问题。**方法** 结合工业机器人与工业相机, 设计并实现了弯管廓形中线的快速获取及研磨位姿计算的工艺方法。首先, 分析了弯管内表面磁粒研磨工艺的基本原理, 根据研磨过程中单颗磨粒的受力状态以及对研磨区域的磁场模拟, 得出影响研磨压力的主要工艺参数; 其次, 利用工业相机获取弯管图像, 通过图像处理算法, 得到弯管的廓形中线; 最后, 将中线上的坐标点进行坐标转换、拟合、离散, 并结合磁粒研磨工艺特点, 计算出研磨过程中机器人的运动位姿, 同时与手动采点法的试验结果进行对比分析, 以检验该方法的可行性。**结果** 廓形识别法提取出的研磨轨迹较为平滑, 用时少, 能够保持稳定的研磨间隙且更贴近实际弯管中线。在相同试验条件下, 对具有 180°转角的铜弯管进行研磨, 经廓形识别方法研磨 60 min 后, 表面粗糙度 R_a 由原始的 0.854 μm 降至 0.236 μm , 达到最佳。表面划痕细致且均匀, 无过磨、深度划痕等缺陷, 平均研磨速率比手动采点法提高了约 35.8%, 粗糙度的下降率提高了约 3.8%。**结论** 在弯管内表面磁粒研磨过程中, 廓形识别法能快速准确地获取弯管廓形中线并计算机器人研磨位姿, 在保持正确研磨位姿的同时, 能够维持稳定的研磨间隙, 可有效提高弯管内表面磁粒研磨效率及表面质量。

关键词: 磁粒研磨; 弯管; 廓形中线; 研磨轨迹; 受力状态; 研磨效率

中图分类号: TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)11-0372-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.040

Experimental Research on Precision Grinding of Inner Surface of Elbow Based on Profile Recognition

CHENG Miao, CHEN Song, XU Jin-wen, ZHANG Xiao-feng, CHEN Yan, HAN Bing

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

ABSTRACT: The work aims to solve the problems of large random errors caused by manual point sampling in the magnetic abrasive finishing process of the inner surface of the elbow, the grinding gap cannot be guaranteed, and the inaccurate pose. Combined with an industrial robot and an industrial camera, a process method for quickly obtaining the centerline of the curved pipe profile and calculating the grinding pose was designed and realized. First, the basic principle of the magnetic abrasive

收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-06-07

Received: 2021-01-05; Revised: 2021-06-07

基金项目: 辽宁省教育厅项目 (2020FWDF07, 2020FWDF05); 辽宁省自然科学基金 (2019ZD0275)

Fund: Liaoning Provincial Department of Education Project (2020FWDF07, 2020FWDF05), Natural Science Foundation of Liaoning Province (2019ZD0275)

作者简介: 程淼 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: CHENG Miao (1994—), Male, Master, Research focus: precision machining and special machining.

通讯作者: 陈松 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Corresponding author: CHEN Song (1976—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: precision machining and special machining.

引文格式: 程淼, 陈松, 徐进文, 等. 基于廓形识别的弯管内表面精密磨削试验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 372-382.

CHENG Miao, CHEN Song, XU Jin-wen, et al. Experimental research on precision grinding of inner surface of elbow based on profile recognition [J]. Surface technology, 2021, 50(11): 372-382.

finishing process on the inner surface of the elbow is analyzed. According to the force state of a single abrasive particle during the grinding process and the magnetic field simulation of the grinding area, the main process parameters that affect the grinding pressure are obtained. Secondly, use the industrial camera to obtain the image of the bent pipe, and obtain the profile centerline of the bent pipe through the image processing algorithm. Finally, the coordinate points on the center line are converted, fitted, and discrete, and combined with the characteristics of the magnetic abrasive finishing process to calculate the movement poses of the robot during the grinding process. At the same time, the test results of this method and the manual point collection method are compared and analyzed, to test the feasibility of this method. The finishing trajectory extracted by the profile recognition method is smoother, takes less time, can maintain a stable finishing gap and is closer to the actual center line of the bend. Under the same test conditions, copper elbow with 180° corner was ground. After 60 minutes of grinding by the profile recognition method, the surface roughness R_a decreased from the original $0.854\ \mu\text{m}$ to $0.236\ \mu\text{m}$, reaching the best effect. The scratches on the surface are dense and uniform, without defects such as over-grinding and deep scratches. The average speed is about 35.8% higher than the manual point-taking method, and the roughness reduction rate is enhanced by about 3.8%. The application of the profile recognition method in the magnetic abrasive finishing process of the inner surface of the elbow can quickly and accurately obtain the profile centerline of the elbow and calculate the grinding pose of the robot. It can maintain a stable grinding gap while maintaining the correct grinding position, which can effectively improve the grinding efficiency and surface quality of the magnetic abrasive on the inner surface of the elbow.

KEY WORDS: magnetic abrasive finishing; elbow; profile centerline; grinding track; force state; grinding efficiency

管路系统是机械设备的的重要组成部分,就像血管网一样,遍布设备全身^[1]。弯管因其空间利用率高,在管路系统中得到广泛应用,而其内表面质量是影响设备使用寿命及工作稳定性的重要因素。在众多弯管内表面光整加工工艺中,磁粒研磨法具有良好的柔性和自适应性,对弯折处的应力冲击小,能够较好地改善管件表面应力状态^[2-3]。韩冰等^[4]利用磁粒研磨法对钛合金弯管内表面进行研磨抛光,通过正交试验,对磁极转速、加工间隙、磨料粒径、进给速度等参数进行了分析优化,得出最佳工艺参数,并验证了磁粒研磨法对提高弯管内表面质量的可行性。陈燕等^[5]利用 N-S-S-N 圆周排布永磁极对液压导管进行 45 min 研磨,表面粗糙度 R_a 由 $0.48\ \mu\text{m}$ 降至 $0.12\ \mu\text{m}$,经振动测试,振幅、噪声明显降低,油路稳定性得到显著提高。严正伟等^[6]利用六自由度机器人带动磁粒抛光装置,对钛合金弯管内表面进行研磨加工,经正交试验优化,并对试验参数进行了极差和方差分析,研磨后,工件表面粗糙度 R_a 由 $1.33\ \mu\text{m}$ 降至 $0.12\ \mu\text{m}$,表面质量得到很好的改善。上述试验中,弯管的研磨轨迹均为手动采点所得,即利用示教器控制机器人带动研磨装置沿弯管中线等距移动,同时调整研磨装置与弯管之间的角度,并记录各位置的特征点,对特征点进行插值拟合,进而得到弯管的研磨轨迹。该方法中,手动采点效率低,由于操作人的不同,会产生较大随机误差,使研磨间隙波动,难以保证研磨轨迹的一致性以及相对位姿的准确性。

对于未知几何参数的弯管,如何准确快速地获得弯管研磨轨迹以及保持研磨工具与弯管之间正确的相对位姿,对研磨抛光的效率和质量起关键作用。喻正好等^[7]利用三坐标测量仪,获取离线状态下弯管外

轮廓特征点云,分别以特征点为圆心,以弯管直径为直径作圆,获得三条交线,之后再对三条交线应用三点共圆,获得弯管中心线。该方法中的测量工艺属于离线测量,难以保证测量数据与研磨加工数据的一致性,而且特征点需手动测量,每次测点数较多,当管件被重新装卡后,需再次测量,增加了数据测量的工作量,不适合广泛应用。

为解决以上问题,本文提出基于廓形识别的弯管内表面磁粒研磨轨迹获取方法,以实现在线状态快速准确地获取弯管廓形中线并计算机器人的研磨位姿,保持研磨轨迹的一致性和连续性,避免研磨间隙波动,减小随机误差的影响。该方法的应用可提高弯管内表面磁粒研磨的加工效率,增加磁粒研磨的自动化程度,为该技术的创新发展奠定基础。

1 磁粒研磨系统组成与研磨原理

1.1 系统组成

图 1 为系统的构成。从图 1 中可以看出,弯管被夹持于工作台上,在光源的照射下,通过工业相机捕获研磨状态下的弯管图像,通过图像处理方法计算出图像坐标系下弯管中线上的点坐标,再将其转换到工件坐标系 (O_w) 下。在工件坐标系下,对弯管中线上的点进行三次非有理 B 样条拟合,得到弯管中线函数,之后对其进行等距离散,以获得研磨过程中机器人的位置数据,再根据弯管内表面磁粒研磨的工艺要求,计算出研磨过程中机器人在各位置处的姿态数据。最后,经坐标变换关系将工件坐标系 (O_w) 下的位姿数据转换到机器人基坐标系 (O_B) 下,进而通过

机器人带动研磨装置对弯管进行研磨加工。依据相机与机器人相对位置的不同,可将系统分 eye-to-hand (相机与机器人分离,其位置相对于机器人固定)和 eye-in-hand (相机固定在机器人上,随机器人移动)^[8],本系统采用 eye-to-hand 单目系统。

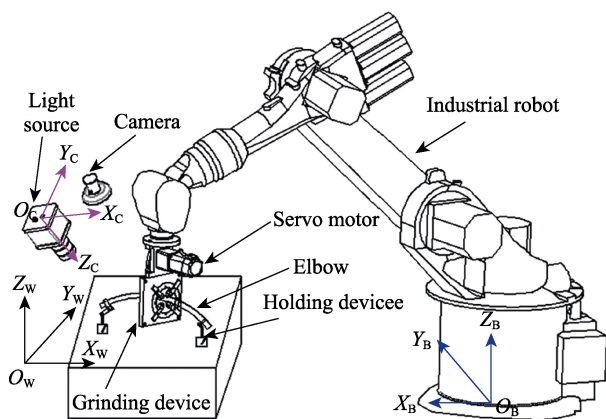


图1 系统构成
Fig.1 System components

1.2 弯管内表面磁粒研磨的基本原理

图2为弯管内表面磁粒研磨原理。一对含有聚磁头的 N-S 永磁极呈 90°排布,固定于磁轭上,形成一

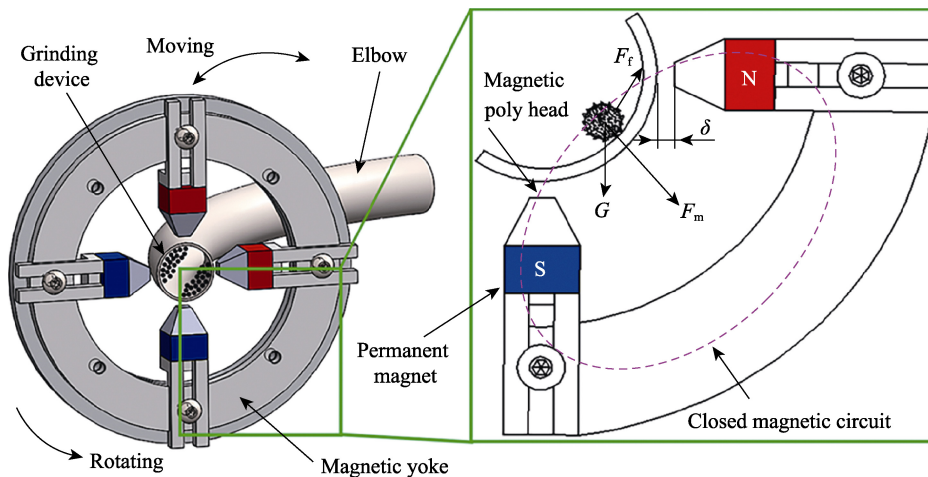


图2 弯管磁粒研磨原理
Fig.2 Principle of magnetic abrasive finishing for bent pipe

磁力是一种非接触的柔性力,当磁力吸引磨粒运动时,存在一定的滞后效应^[12],因为有了滞后效应,才能使磨粒完成正确的磨削加工。为表述滞后效应以及磁轭平面与弯管法平面是否共面对研磨工艺的影响,现对运动状态下的磨粒进行分析。图3为运动状态下对磨粒的受力分析^[13-14]。三维空间中,长方体的左侧面与磨粒所在位置的弯管内表面相切, $OABC$ 面为磨粒处弯管的法平面。由于磨削阻力与磨粒运动状态有关,因此将其分解为切向磨削阻力 F_t 、沿弯管轴

组磁极单元。在磁极单元内部产生闭合磁路,并在研磨区域形成具有一定强度的磁场,处于研磨区域内的铁磁性磨粒被磁场吸引压覆于弯管内表面,产生磨削力。伺服电机带动磁轭以一定速度旋转,机器人牵引研磨装置沿弯管中线缓慢往复运动,从而使磨粒沿螺旋状运动轨迹对弯管内表面进行研磨加工。磨粒在磁场中所受的磁场力 F_m 为^[9-11]:

$$F_m = \frac{B \chi_m \gamma}{\mu_0 (1 + \chi_m)} \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

式中: B 为研磨区域磁感应强度, χ_m 为磨粒的磁化率, γ 为磨粒体积, $\frac{\partial H}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial H}{\partial y}$ 分别为磁场沿磁力线和等磁位线方向的变化率, μ_0 为真空磁导率。

由式(1)可以看出,磁场力 F_m 与磁感应强度 B 成正比,即研磨压力随研磨区域磁感应强度的提高而变大。静止状态下,研磨区域中的磨粒受到重力 G 、磁场力 F_m 以及摩擦阻力 F_f 作用,压覆在弯管内表面。磁场力 F_m 与重力 G 、摩擦阻力 F_f 共平面,磨粒处于受力平衡状态。聚磁头端面与弯管外表面之间的距离 δ 称为研磨间隙,与研磨区域的磁感应强度以及磁场力成反比。因此,保证研磨装置的运动轨迹能最接近弯管实际中线的轨迹,对研磨区域保持稳定的磁场强度以及磁场力至关重要。

向磨削的阻力 F_n ,及磨粒的重力 G 。离心力 F_c 与磨粒转速成正比,且离心力 F_c 与磁场力 F_m 共面。图3a中,磁轭平面与弯管法平面共面。当研磨装置静止时,磁场力 F_m 与离心力 F_c 的夹角为 θ ,磨粒对弯管内壁的研磨压力 F_{p0} 沿 OC 方向,其大小为:

$$F_{p0} = F_c + F_m \cos \theta \quad (2)$$

当研磨装置沿弯管中线缓慢进给时,由于磨削阻力的作用,使磨粒相对于研磨装置产生了微小的滞后现象,滞后角为 α ,磁场力由 F_m 变为 F'_m 。此时磨粒

对弯管内壁的研磨压力变为 F_{p1} , 沿 OC 方向, 其大小为:

$$F_{p1} = F_c + F'_m \times \cos \alpha \times \cos \theta \quad (3)$$

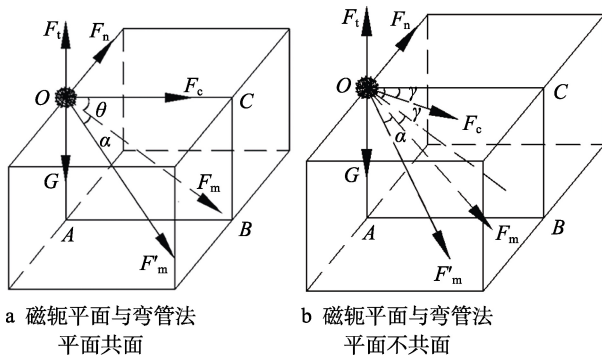


图 3 运动状态下磨粒受力分析

Fig.3 Force analysis of abrasive particles in motion: a) the yoke plane is coplanar with the elbow normal plane; b) the yoke plane is not coplanar with the elbow normal plane

图 3b 为磁轭平面与弯管法平面不共面的情况。当研磨装置不沿弯管中线进给时, 磁场力为 F_m , 磁轭平面相对于弯管法平面偏角为 γ ($0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$), 由于离心力 F_c 与磁场力 F_m 共面, 则离心力 F_c 与弯管法平面夹角仍为 γ 。当研磨装置沿弯管中线进给时,

磁场力变为 F'_m , 滞后角为 α , 此时磨粒对弯管内壁的研磨压力为 F_{p2} , 沿 OC 方向, 其大小为:

$$F_{p2} = (F_c + F'_m \times \cos \alpha \times \cos \theta) \times \cos \gamma \quad (4)$$

比较式 (3)、(4) 可知, $F_{p1} > F_{p2}$, 磨粒对弯管内壁的研磨压力随磁轭平面相对弯管法平面偏角的增大而减小, 当磁轭平面与弯管法平面重合时, 研磨压力达到最大值。因此, 在研磨过程中, 能否保证磁轭平面始终与弯管法平面共面, 将直接影响研磨压力的大小, 进而间接影响研磨效率以及研磨质量。

当实际研磨运动轨迹与弯管中线偏差较大时, 将导致研磨间隙波动, 影响研磨区域的磁感应强度, 从而影响研磨压力。为探究研磨间隙对研磨区域磁感应强度的影响, 利用磁场仿真软件, 对不同研磨间隙下的加工模型进行磁场模拟, 并提取研磨区域的磁感应强度进行对比。图 4 为一对 N-S 永磁极呈 90° 排布的研磨装置在不同研磨间隙下的磁感应强度。将研磨区域分为 a、b、c、d 四部分, 选择研磨间隙分别为 2、4 mm, 对比研磨区域的磁感应强度变化。

从图 4a、4b 可以看出, bc 区域属于磨料填充区域, 该部分的磨料直接参与研磨, 因此 bc 段的磁场强度变化情况将直接影响研磨效果。由图 4c 可以看出, 当研磨间隙由 2 mm 变为 4 mm 时, bc 区域的平

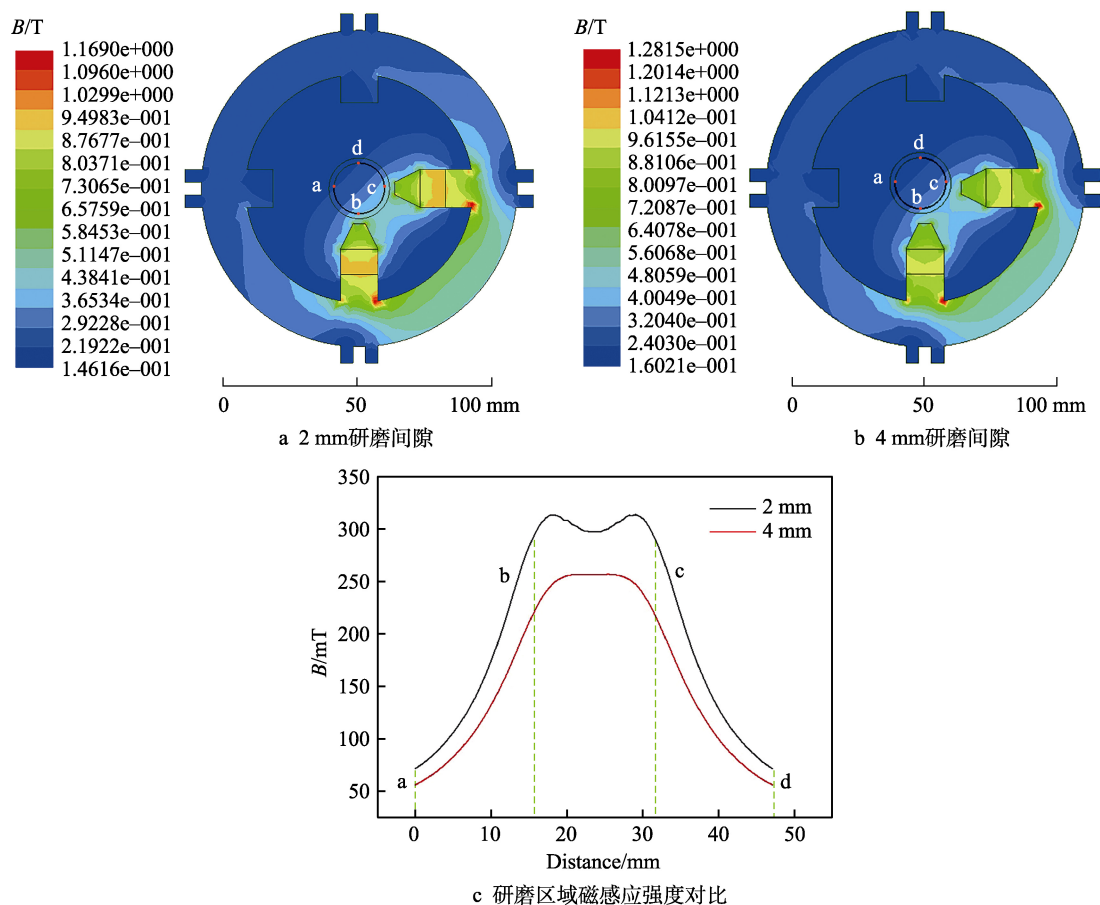


图 4 不同研磨间隙下磁感应强度分析

Fig.4 Analysis of magnetic induction intensity under different grinding clearance: a) 2 mm grinding gap; b) 4 mm grinding gap; c) comparison of magnetic induction intensity of grinding area

均磁感应强度由 304.03 mT 下降至 246.58 mT, 磁感应强度大幅下降。根据式 (1) 可知, 研磨压力与磁感应强度成正比, 与研磨间隙成反比。因此当间隙反复变化时, 研磨压力也随之发生变化, 从而导致材料去除量不均匀, 研磨效果表现为划痕深度不一致, 影响研磨后工件表面质量。

综上可知, 在弯管磁粒研磨过程中, 保证磁轭平面与弯管法平面共面以及保持均匀的研磨间隙是影响弯管磁粒研磨质量的两大关键因素, 将决定该研磨方法能否成功应用。

2 研磨轨迹提取及位姿计算

本试验中, 相机成像模型可看作小孔透视模型^[15-16], 其原理如图 5 所示。 $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系, 单位为 mm, 原点 O_c 为相机的光心, Z_c 轴垂直于成像平面并且穿过成像平面主点与相机光轴重合。 $o-uv$ 为图像的像素坐标系, 单位为像素。 $O-xy$ 为图像的物理坐标系, 单位为 mm, f 为相机焦距, 单位为 mm。 $O_w-X_wY_wZ_w$ 为工件坐标系, 单位为 mm。空间中一点 P , 其在相机坐标系下的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) , 在工件坐标系下的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) , 在图片上的成像点为 p , 物理坐标为 (x, y) , 像素坐标为 (u, v) 。以上坐标系均满足右手定则, 并可利用齐次变换矩阵描述。由该模型可得, 空间点 P 在工件坐标系下的坐标与像素坐标系下坐标的关系为^[17-20]:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \bar{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: f_x 、 f_y 为相机在 x 、 y 方向上的焦距, u_0 、 v_0 为相机成像平面上的主点坐标, s 为相机错切系数, 以上参数均为相机内参数, 由相机性能决定; 矩阵 R 、 T 分别为相机在工件坐标系下的旋转矩阵和平移向量; Z_c 为空间点在相机坐标系下的 Z 轴坐标, 该值在后续计算中可被消掉。

通过式 (5) 可将图像中弯管中线上的像素坐标

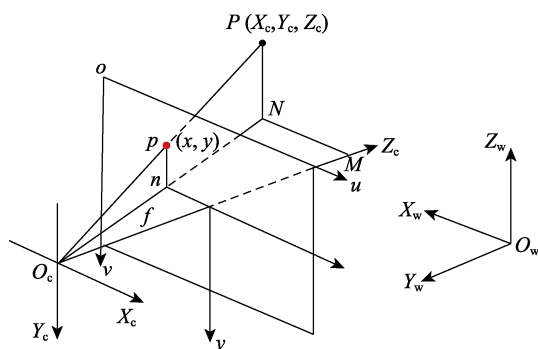


图5 小孔透视模型

Fig.5 Pin-hole perspective model

点转换为工件坐标系下的坐标。机器人带动研磨装置进行研磨, 在此过程中, 需将所有的位姿数据转换到基坐标系下执行。因此需建立弯管中线上的像素点到基坐标系下坐标点的转换关系。图 6 为系统模型中坐标系的变换关系。转换关系建立过程有两种方式, 一种是建立基坐标系与相机坐标系间的关系, 先将像素坐标转换到相机坐标系下, 之后再变换到基坐标系下; 另一种是建立基坐标系与工件坐标系间关系, 先将像素坐标转换到工件坐标系下, 之后再变换到基坐标系下^[21-23]。为便于计算姿态数据, 故选择第二种方式, 通过工件坐标系进行坐标转换, 如式 (6) 所示。弯管中线上某点 P 在基坐标系下的变换矩阵, 等于工件坐标系在基坐标系下的变换矩阵右乘点 P 在工件坐标系下的变换矩阵。

$${}^B_p T = {}^B_w T {}^w_p T \quad (6)$$

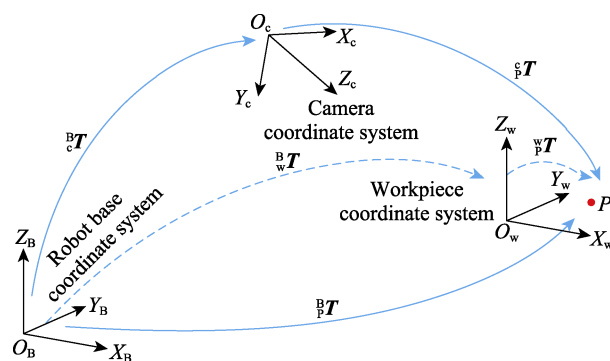


图6 “Eye-to-hand” 单目系统

Fig.6 The relationship of “Eye-to-hand”

对于平面弯管, 中线所在平面即为弯管的投影平面, 即中线上所有点都位于 $Z_w=0$ 的平面。因此通过弯管图像提取出的廓形中线就是弯管的测量中线。利用该原理对弯管图像进行中线提取, 可以较准确地获得平滑的弯管中线, 便于计算研磨位姿。应用过程中, 首先拍摄研磨状态下的弯管图像, 之后对其进行畸变矫正、灰度化、滤波、二值化以及研磨区域选择等数字图像处理, 得到研磨区域的弯管廓形二值化图像, 如图 7 所示。其中, 研磨区域选择过程首先是在图像上选取两像素坐标点 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) , 构成切割直线, 割线方程可由式 (7) 表示。

$$L(u) = \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1} u + \frac{u_2 v_1 - u_1 v_2}{u_2 - u_1} \quad (7)$$

然后去掉该直线下区域中的所有像素点, 将其余部分保留, 处理过程如式 (8)。

$$h(u, v) = \begin{cases} 0, & \min(u_1, u_2) \leq u \leq \max(u_1, u_2) \cap v \leq L(u) \\ f(u, v), & \min(u_1, u_2) > u \cup u > \max(u_1, u_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中: h 为输出图像, f 为输入图像。

利用形态学细化法对研磨区域的弯管廓形图像进行处理^[24-25], 由外到内每次腐蚀掉一个像素点, 直

至不能再腐蚀为止,最终得到弯管研磨区域的廓形中线。由于轮廓边缘并不光滑,所得中线存在部分毛刺分支

支,运用 m 邻接点分支去除方法可去除毛刺分支^[26-28],最终得到光滑的弯管廓形中线,如图 8 所示。

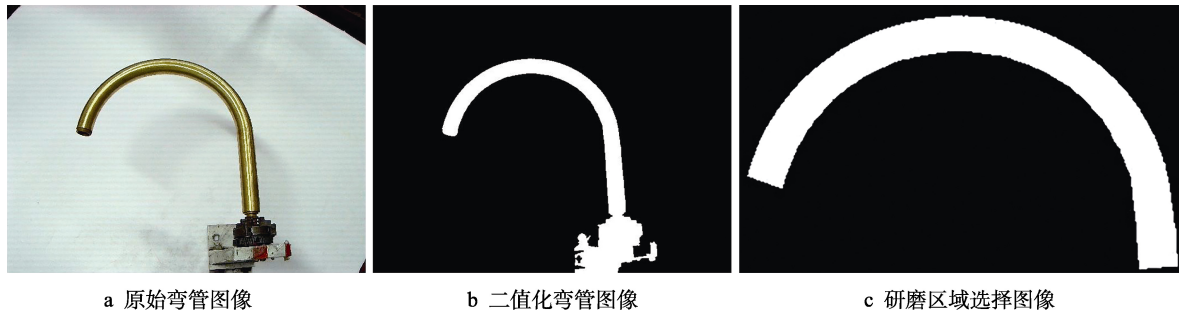


图 7 弯管图像处理过程

Fig.7 Bending pipe image processing process: a) original elbow image, b) binary elbow image, c) grinding area selection image

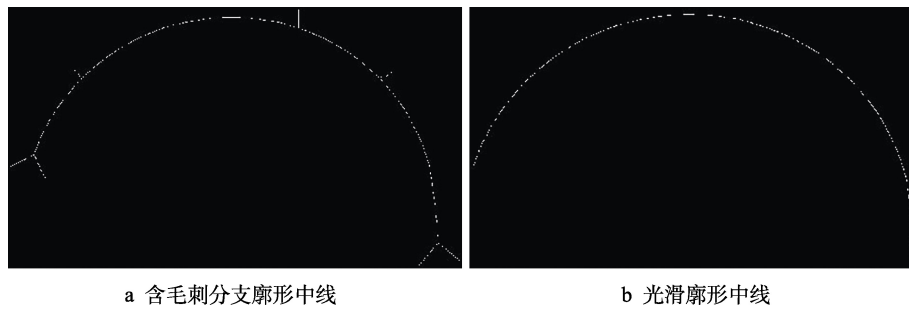


图 8 弯管廓形中线提取

Fig.8 Curved pipe profile centerline extraction: a) midline of branch profile with burrs, b) smooth profile centerline

对弯管廓形中线进行遍历,得到中线上所有点的像素坐标,之后利用式(5)将其转换为工件坐标系下的坐标。将工件坐标系下所有弯管中线上的坐标点作为控制点,利用三次非有理 B 样条^[29-30]进行拟合,并对拟合后的曲线进行等距离散,同时计算离散点处的一阶导矢。各离散点处的一阶导矢方向即为研磨装置工具坐标系的 Y 轴方向,即保证了研磨装置磁轭平面与弯管法平面共面的工艺要求。最后,将得到的工件坐标系下弯管中线上各点的位置及姿态数据通过式(6)变换到基坐标系下,便得到了机器人沿弯管中线进行研磨所需的全部位姿数据。将由该方法计算出的机器人研磨位置数据与手动采点得到的数据进行了对比。从图 9 可以看出,手动采点得到的研磨轨

迹波动较大,即研磨间隙不稳定,而廓形识别采点所得研磨轨迹较为光滑,更好地接近弯管实际中线。

3 试验

3.1 试验装置

试验装置如图 10 所示。弯管被夹持于工作台上,在该场景下,建立基坐标系与工件坐标系间的转换关系,进行相机标定,并计算式(5)及式(6)中的坐标变换矩阵。经计算得到式(5)中的相机内参数分别为 $f_x=2887.455, f_y=2888.305, u_0=1261.996, v_0=966.354, s=1.850$ 。旋转矩阵 R 、平移向量 T 以及式(6)中工件坐标系在基坐标系下的变换矩阵 ${}^B_w T$ 分别为:

$$R = \begin{bmatrix} -0.007 & -0.999 & -0.011 \\ 0.948 & -0.010 & 0.317 \\ -0.317 & -0.008 & 0.948 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T = [68.862 \quad -145.783 \quad 565.107]^T \quad (10)$$

$${}^B_w T = \begin{bmatrix} 0.589 & -0.807 & -0.039 & 1133.043 \\ -0.808 & -0.588 & 0.032 & 258.040 \\ -0.003 & -0.051 & -0.999 & 677.403 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

利用工业相机拍摄弯管图像,并将其传输到计算机中,对弯管图像进行廓形中线提取及工件坐标系下的研磨位姿 (${}^B_p T$) 计算,通过式(6)的计算得到,

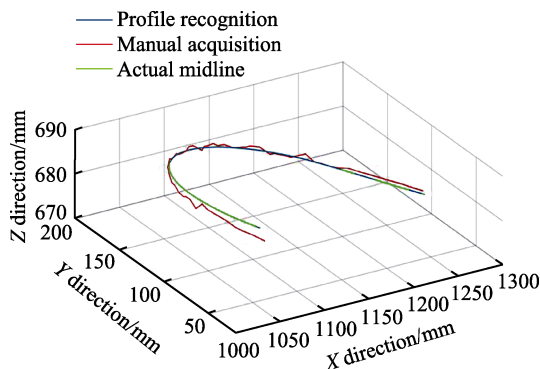


图 9 弯管中线对比

Fig.9 Contrast of bend pipe centerline

研磨过程中机器人的运动位姿 (B_pT)。将运动位姿导入机器人离线仿真软件 (图 11), 检查研磨位姿是否存在奇异, 并将奇异位姿数据剔除, 防止机器人在研磨过程中出现运动干涉, 图 11 中的运动位姿沿弯管中线均匀分布, 无奇异位姿。通过 Socket TCP/IP

通讯方式将检查好的研磨位姿数据逐个传输到机器人控制器中, 从而控制机器人带动研磨装置沿弯管中线往复进给, 同时伺服驱动器驱动研磨装置上的伺服电机旋转, 使之产生旋转磁场, 带动压覆在弯管内表面的磨粒旋转, 实现对弯管内表面的研磨加工。

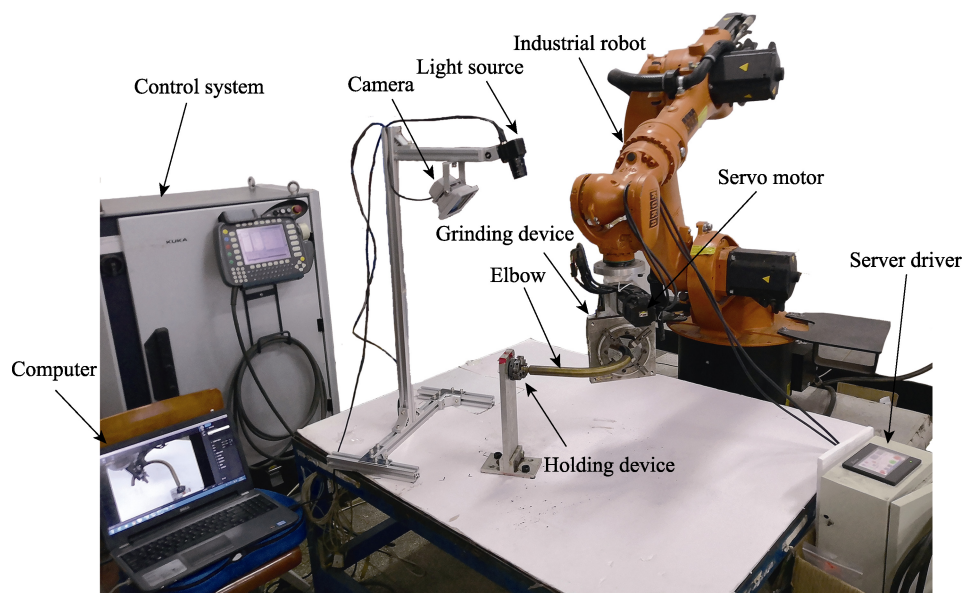


图 10 弯管内表面磁粒研磨试验装置

Fig.10 Magnetic abrasive finishing test device for inner surface of elbow

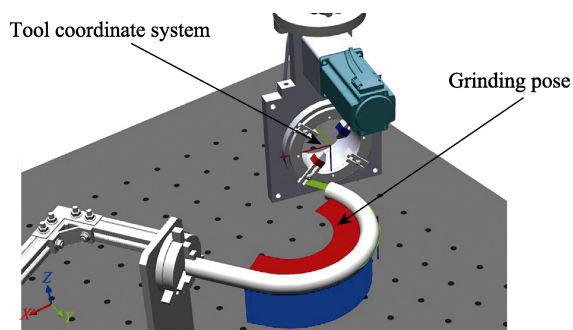


图 11 研磨位姿检查

Fig.11 Inspection of grinding pose

3.2 试验条件

为比较廓形识别采点和手动采点所得的不同研磨轨迹对弯管内表面研磨效果的影响, 对两种采点方式采用相同的试验条件及相同的采样时间, 并找到最佳的研磨效果。同时对比表面形貌、表面粗糙度变化情况, 并比较研磨效率、粗糙度下降率等参数, 找到最优方案。表 1 为弯管内表面磁粒研磨的试验条件。此试验采用添加球形辅助磁极的方式, 选用具有 180° 转角的铜弯管, 所用磨粒为自制的铁磁性磨粒。如图 12 所示, 利用线切割将弯管切开, 并将研磨部位分

表 1 试验条件
Tab.1 Test conditions

Item	Condition
Workpiece	Copper elbow with 180° , $\phi 20 \text{ mm} \times \phi 18 \text{ mm}$
Magnetic abrasive particles	The average particle size: $150 \mu\text{m}$, 20 g
Grinding fluid	Water grinding fluid, 50 mL
External magnet	Nd-Fe-B, rectangle (length, width and height): 15 mm , 15 mm , 10 mm
Poly head	Q235, frustum shape: $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, taper: 20°
Auxiliary magnet	Spherical: $\phi 5 \text{ mm}$
Spinning speed	750 r/min
Feed rate	1 mm/s
Grinding time	100 min

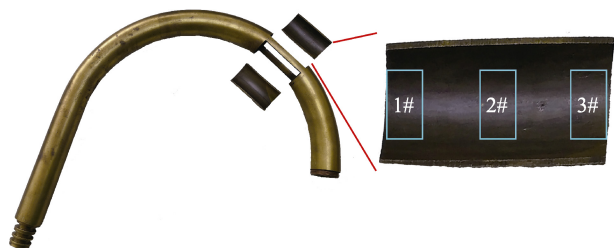


图 12 弯管检测区域划分
Fig.12 Bend pipe inspection area division

为 1#、2#、3# 3 个区域，每间隔 20 min 检测一次各区域的表面粗糙度值及表面形貌，检测仪器分别为 JB-8E 型表面粗糙度仪以及 VHX-500F 型超景深 3D 电子显微镜。

4 结果及分析

4.1 表面粗糙度

图 13 为研磨过程中各区域表面粗糙度的变化趋势。图中 1-1#、1-2#、1-3# 为手动采点法研磨后得到的 3 个区域的表面粗糙度平均值，2-1#、2-2#、2-3# 为廓形识别方法采点研磨后得到的 3 个区域的表面粗糙度平均值。从图中可以看出，研磨前，各区域的原始表面粗糙度 Ra 分别为 0.854、0.841、0.844 μm 。研磨 20 min 后，手动采点法得到的各区域表面粗糙度 Ra 分别为 0.449、0.478、0.482 μm ，与原始表面粗糙度相比，其粗糙度的下降率分别为 47.4%、43.1%、42.8%。而基于廓形识别采点得到的各区域表面粗糙度 Ra 分别为 0.462、0.453、0.459 μm ，与手动采点法相比，表面粗糙度下降率分别为 45.9%、46.1%、45.6%，各区域粗糙度的下降率较均匀。由于管件原始表面凹坑及凸起边缘存在残留液体，使工件表面产生大量腐蚀膜并伴有铜绿现象。质软疏松的腐蚀膜在研磨前期容易被去除，磁粒研磨具有分层去除，且尖点区域优先去除的特性，因此在研磨前 20 min，表面粗糙度去除率较高。手动采点法所得研磨轨迹与廓形

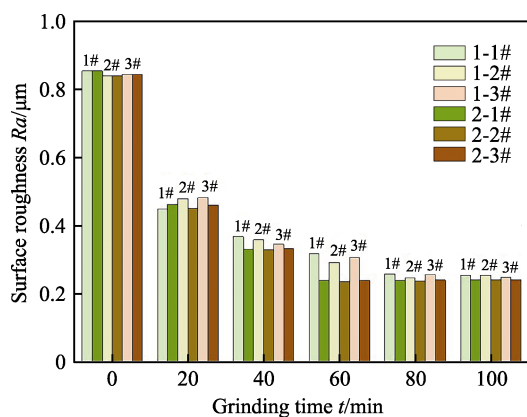


图 13 表面粗糙度的变化趋势
Fig.13 The trend of Surface roughness variation

识别采点法所得轨迹相比波动较大，引起研磨间隙及磁场强度变化不均匀，研磨间隙小、磁场强度大的位置，腐蚀膜去除量大，表面粗糙度值小，因此在前 20 min，1-1#区域的粗糙度平均值小于 2-1#区域。

研磨 40 min 后，经手动采点法得到的各区域表面粗糙度 Ra 分别为 0.368、0.359、0.345 μm ，粗糙度下降率分别为 18.0%、24.9%、28.4%。基于廓形识别采点法得到的各区域表面粗糙度 Ra 分别为 0.331、0.329、0.333 μm ，与手动采点法相比，表面粗糙度下降率分别为 28.4%、27.4%、27.5%，各研磨区域的粗糙度值相差不大，下降率较均匀且均高于手动采点。由于前 20 min 已将表面腐蚀膜及铜绿膜基本去除，且铜基体与腐蚀膜及铜绿膜相比，硬度较高，在手动采点法研磨间隙及磁场强度波动过程中，阶段性的短期研磨，在粗糙度平均值上无明显突变现象，因此对铜基体研磨过程中，其粗糙度值呈现一定规律。

研磨 60 min 后，经手动采点法得到的各区域表面粗糙度 Ra 分别为 0.317、0.292、0.306 μm ，粗糙度下降率分别为 13.8%、18.7%、11.3%。基于廓形识别采点法得到的各区域表面粗糙度 Ra 达到最小值，分别为 0.238、0.236、0.239 μm ，粗糙度下降率分别为 28.1%、28.3%、28.2%。在后续的 80 min 以及 100 min 研磨过程中，表面粗糙度基本在最小值上下浮动，说明基于廓形识别采点的磁粒研磨工艺对弯管内表面加工 60 min 可使表面粗糙度降至最佳值。当手动采点法研磨至 80 min 后，各区域表面粗糙度 Ra 达到最低，分别为 0.257、0.247、0.256 μm 。当研磨 100 min 后，由于手动采点法所得研磨轨迹存在较大偏差，研磨间隙及磁场强度波动，使已得到的微观形貌被破坏，材料去除，划痕深度增加，从而导致表面粗糙度上升，说明利用该方法研磨 80 min 可使管件表面粗糙度达到最佳。

4.2 微观形貌

在测量表面粗糙度的同时，利用超景深 3D 电子显微镜采集研磨区域的表面微观形貌，本文仅展示研磨前以及最低表面粗糙度值时的微观形貌。图 14 为弯管各检测区域研磨前后的表面微观形貌对比。从图 14 中可以看出，工件原始表面较为粗糙，部分区域被残留液体腐蚀并伴有大量铜绿膜，而且沟痕明显，表面平整度较差。经手动采点并研磨后，工件原始表面缺陷虽被基本去除，但各区域表面形貌差别较大，划痕不均匀现象明显，部分区域甚至出现深度划痕、过磨以及细小凹坑等缺陷。这是由于磨粒所受研磨压力不均匀，导致当研磨压力大时，材料去除量大、划痕较深，反之划痕较浅，部分缺陷位置已在图中标出。由于廓形识别采点所得研磨轨迹差异较小，能更好地接近弯管测量中线，使研磨间隙及研磨区域的磁场强度波动小，研磨压力均匀稳定，经该方法采点研磨后，原始表面的锈蚀膜以及凸点、凹坑、沟痕等缺陷基本

被去除,各检测区域的划痕细致且均匀,表面形貌一致性较好,无明显深度划痕及过磨现象,与手动采点研磨后的表面微观相貌形成了鲜明对比。

基于以上试验过程,将经两种研磨轨迹采集方法研磨后的试验数据进行对比,结果如表 2。表中所有

粗糙度值均按照 1#区域数据列出。从表 2 可以看出,基于廓形识别采点所用时间较少,表面粗糙度下降率以及达到最佳表面粗糙度状态时的平均速率均高于手动采点方式,因此该方法在弯管中线获取以及弯管内表面研磨过程中优势明显。

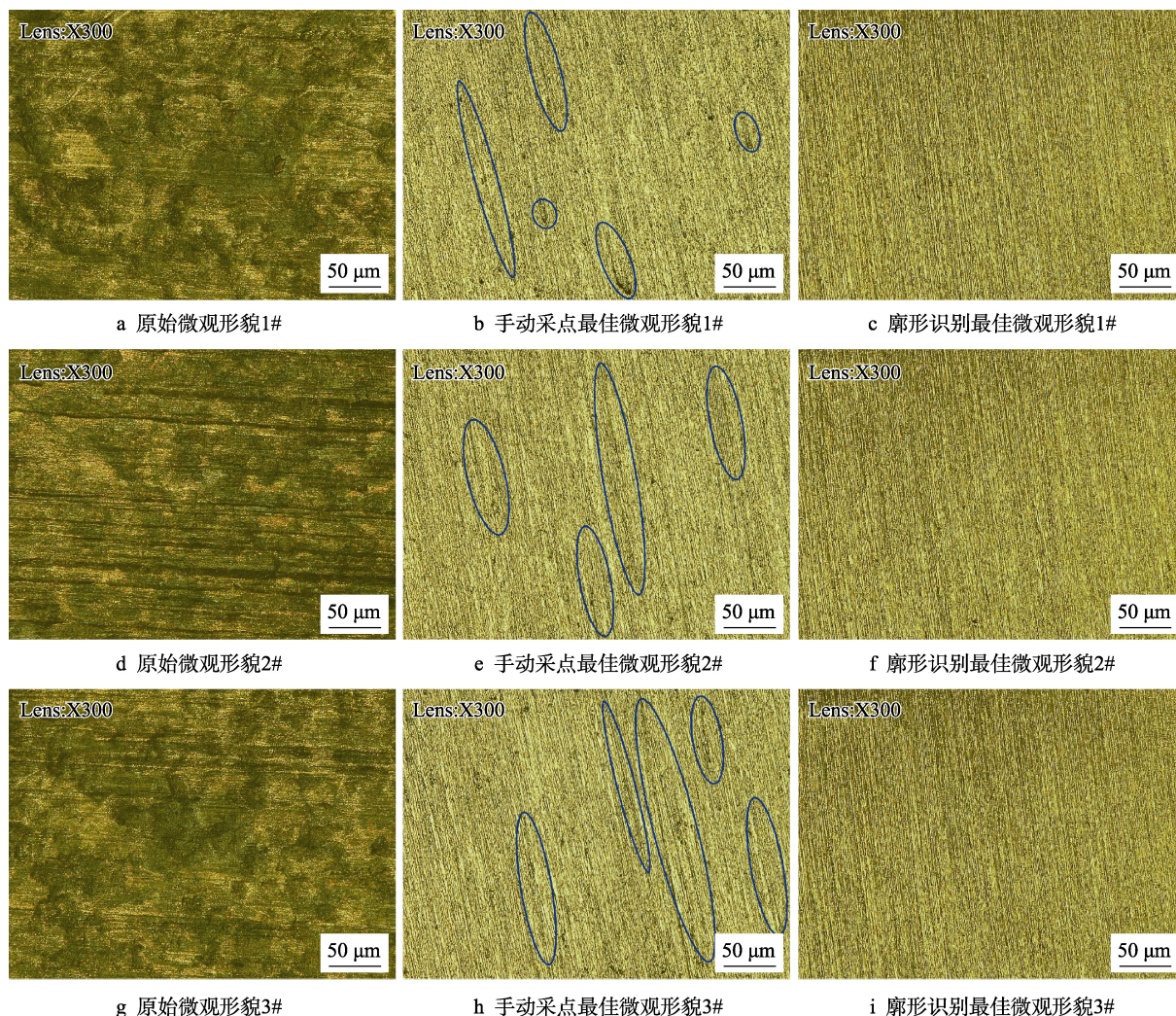


图 14 研磨前后表面微观形貌对比

Fig.14 Comparison of surface micro-morphology before and after grinding: a) original micro-morphology 1#, b) the best micro-morphology of manual sampling 1#, c) the best microscopic morphology of manual sampling 1#, d) original micro-morphology 2#, e) the best micro-morphology of manual sampling 2#, f) the best microscopic morphology of manual sampling 2#, g) original micro-morphology 3#, h) the best micro-morphology of manual sampling 3#, i) the best microscopic morphology of manual sampling 3#

表 2 结果数据对比
Tab.2 Result data comparison

Item	Method of profile recognition grinding	Method of manual acquisition point
Acquisition time/min	20	40
Grinding time/min	60	80
Original surface roughness/ μm	0.854	0.854
Surface roughness after grinding/ μm	0.236	0.257
Roughness reduction rate/%	72.4	69.9
Average rate/ $(\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	0.464	0.298

5 结论

1) 磁轭平面与弯管法平面间的偏角与研磨压力成反比, 研磨间隙与研磨区域磁场强度成反比。因此, 磁轭平面与弯管法平面共面以及研磨运动轨迹与弯管中线能够更好地重合, 是影响弯管内表面研磨质量及划痕均匀性的重要因素。

2) 机器人带动磁粒研磨装置运动过程中, 研磨装置的运动轨迹及姿态将影响磁轭平面与弯管法平面的偏角及研磨间隙, 从而影响研磨压力及质量。当研磨装置的运动轨迹与弯管中线偏差较大时, 将导致研磨间隙及研磨区域磁场强度不稳定, 引起研磨压力大小突变, 表面质量变差, 表现为过磨、划痕较深且稀疏。

3) 基于廓形识别的弯管内表面磁粒研磨方法能够较准确地获取弯管廓形中线并将其函数化, 提高研磨位姿计算的准确性与科学性, 同时也能改善弯管内表面质量, 使研磨轨迹致密且均匀, 可减少弯管内表面液体残存, 提升弯管的使用寿命及稳定性。

参考文献:

- [1] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44-50.
JIANG Zhi-qiang, YANG He, ZHAN Mei, et al. State-of-the-arts and perspectives of manufacturing and application of titanium alloy tube in aviation industry[J]. Journal of plasticity engineering, 2009, 16(4): 44-50.
- [2] 陈燕, 曾加恒, 钱之坤, 等. 超声复合磁力研磨异型管参数优化设计及其分析[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 268-274.
CHEN Yan, ZENG Jia-heng, QIAN Zhi-kun, et al. Parameter optimization design and analysis of ultrasonic composite magnetic abrasive finishing[J]. Surface technology, 2019, 48(3): 268-274.
- [3] 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 Wen-hao, CHEN Yan, LI Wen-long, et al. Research progress of magnetic abrasive finishing technology[J]. Surface technology, 2021, 50(1): 47-61.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 严正伟, 陈燕, 刘顺, 等. 基于正交试验的 Ti8 弯管内表面精密研磨工艺参数研究[J]. 现代制造工程, 2018(11): 95-100.
YAN Zheng-wei, CHEN Yan, LIU Shun, et al. Study on parameters of precise grinding Ti8 elbow inner surface based on orthogonal test[J]. Modern manufacturing engineering, 2018(11): 95-100.
- [7] 喻正好. 基于中心线重构法的空间弯管磁粒研磨试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2018.
YU Zheng-hao. Study on magnetic abrasive finishing of space elbow based on center line reconstruction method [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2018.
- [8] PACHTRACHAI K, ALLAN M, PAWAR V, et al. Hand-eye calibration for robotic assisted minimally invasive surgery without a calibration object[C]// 2016 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). Daejeon: IEEE, 2016: 2485-2491.
- [9] SHINMURA T, AIZAWA T. Study on internal finishing of a non-ferromagnetic tubing by magnetic abrasive machining process[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1988, 54(4): 767-773.
- [10] HENG Li-da, YIN Cheng, HAN S H, et al. Development of a new ultra-high-precision magnetic abrasive finishing for wire material using a rotating magnetic field[J]. Materials, 2019, 12(2): 312.
- [11] 李文龙, 陈燕, 赵杨, 等. 采用神经网络和遗传算法优化磁粒研磨 TC4 弯管工艺参数[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 330-336.
LI Wen-long, CHEN Yan, ZHAO Yang, et al. Optimizing technological parameters of magnetite grinding TC4 elbow by neural network and genetic algorithms[J]. Surface technology, 2020, 49(6): 330-336.
- [12] 王艳, 胡德金, 李学全. 物流管道内表面磁力研磨的数值仿真[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(9): 1442-1447.
WANG Yan, HU De-jin, LI Xue-quan. Numerical simulation of inner surface magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(9): 1442-1447.
- [13] 程森, 陈松, 赵杨, 等. 双磁极式磁粒研磨机理分析及试验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 81-89.
CHENG Miao, CHEN Song, ZHAO Yang, et al. Mechanism analysis and experimental study of dual magnetic pole magnetic particle grinding[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 81-89.
- [14] 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.
- [15] XING Y J, XING J, SUN J, et al. An improved neural networks for stereo-camera calibration[J]. Journal of achiev-

- ements in materials and manufacturing engineering, 2007, 20(1-2): 315.
- [16] YU Liu. Calibration of a 6-DOF space robot using genetic algorithm[J]. Chinese journal of mechanical engineering (English edition), 2008, 21(6): 6.
- [17] CAPRILE B, TORRE V. Using vanishing points for camera calibration[J]. International journal of computer vision, 1990, 4(2): 127-139.
- [18] ZHANG Zheng-you. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]// Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision. Kerkyra: IEEE, 1999: 666-673.
- [19] 解则晓, 辛少辉, 李绪勇, 等. 基于单目视觉的机器人标定方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 35-39.
- XIE Ze-xiao, XIN Shao-hui, LI Xu-yong, et al. Method of robot calibration based on monocular vision[J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(5): 35-39.
- [20] GOSHTASBY A, GRUVER W A. Design of a single-lens stereo camera system[J]. Pattern recognition, 1993, 26(6): 923-937.
- [21] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.
- YANG Shou-rui, YIN Shi-bin, REN Yong-jie, et al. Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems[J]. Optics and precision engineering, 2014, 22(12): 3239-3246.
- [22] 张子森, 王鹏, 孙长库. 单目视觉位姿测量方法及数字仿真[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 440-444.
- ZHANG Zi-miao, WANG Peng, SUN Chang-ku. Position and orientation measurement method with monocular vision and digital simulation[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(5): 440-444.
- [23] ZHUANG Han-qi, MELCHINGER A. Calibration of a hand/eye matrix and a connection matrix using relative pose measurements[J]. Systems, man and cybernetics, part A: Systems and humans, IEEE transactions on, 1998, 28(3): 369-375.
- [24] 曹宇, 应保胜. 基于 CCD 图像的表面裂纹检测[J]. 现代制造工程, 2014(12): 78-81.
- CAO Yu, YING Bao-sheng. Surface crack detection based on CCD image[J]. Modern manufacturing engineering, 2014(12): 78-81.
- [25] 田小静, 冯雨, 郭英杰, 等. 基于小波变换和形态学细化算法的真空电弧形态检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 110-114.
- TIAN Xiao-jing, FENG Yu, GUO Ying-jie, et al. Morphological detection of vacuum switching arc based on wavelet transform and morphology edge thinning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 110-114.
- [26] 郭斯羽, 董红霞, 张翌. 一种用于植物叶片图像骨架提取的去毛刺方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 52-56.
- GUO Si-yu, DONG Hong-xia, ZHANG Yi. Pruning method for skeletonization of plant leaf images[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2013, 27(1): 52-56.
- [27] 孙晨, 金根顺, 何永辉, 等. 一种有效的骨架图毛刺去除算法及其在带钢裂纹检测中的应用[J]. 冶金自动化, 2012, 36(3): 58-62.
- SUN Chen, JIN Gen-shun, HE Yong-hui, et al. An effective burrs removing algorithm and its application in strip steel crack detection and measurement[J]. Metallurgical industry automation, 2012, 36(3): 58-62.
- [28] 王要峰, 崔艳. 基于方向链码去除骨架图像毛刺算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(1): 193-194.
- WANG Yao-feng, CUI Yan. Skeleton blur removing algorithm based on direction chain code[J]. Journal of computer applications, 2013, 33(1): 193-194.
- [29] 黄婷, 许辉, 樊成, 等. 叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 132-141.
- HUANG Ting, XU Hui, FAN Cheng, et al. Robotic grinding process planning for complex blade surfaces[J]. Optics and precision engineering, 2018, 26(1): 132-141.
- [30] 林旭军, 张树有, 王进, 等. 可去除自交且具有可调节光顺的非均匀有理 B 样条等距曲线生成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 1920-1926.
- LIN Xu-jun, ZHANG Shu-you, WANG Jin, et al. Generating method of non-uniform rational B-splines equidistance curves with self-intersection and adjustable smoothness [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(8): 1920-1926.