

弯管点云面型识别与磁粒研磨试验

李鑫, 陈松, 李雨龙, 赵耀耀, 李昌龙, 解志文

(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** 解决空间异形弯管折弯处内壁研磨困难, 普遍采用的弯管磁粒研磨工艺存在手动采点误差大、机械手坐标精度低及研磨间隙差异大等问题。**方法** 首先对弯管内壁的研磨原理进行分析, 对管内流体和磁极排布进行仿真模拟, 分析不同研磨间隙下的磁感应强度变化及管件压力和流速的变化, 利用三维光学扫描仪扫描点云数据, 对扫描的数据进行三维重建, 截取折弯处, 提取特征点, 通过主成分分析法构建点云坐标系, 最后将提取到的特征点进行坐标转换, 利用处理后的点云数据进行磁粒研磨弯管内壁, 与手动采点试验后的研磨效果进行对比, 证明其可行性。**结果** 采用点云识别获取弯管中线轨迹更平滑, 在相同条件下, 经过手动采点研磨弯管使其表面粗糙度降至 $0.18\text{ }\mu\text{m}$, 点云面型特征识别弯管将表面粗糙度降至 $0.10\text{ }\mu\text{m}$, 同时其表面形貌效果最佳, 表面凹坑、划痕完全被去除, 研磨痕迹较浅。**结论** 点云面型的识别方法能够快速获取弯管研磨轨迹, 并且经过点云数据处理, 提高了中线采取的准确性, 同时保证了研磨过程的稳定性, 克服了因研磨间隙变化产生的研磨效果不均匀问题。

关键词: 磁粒研磨; 磁场仿真; 流体仿真; 点云; 三维重建; 主成分分析; 位姿

中图分类号: TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0226-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.022

Experiment on Point Cloud Pattern Recognition and Magnetic Particle Grinding of Elbow

LI Xin, CHEN Song, LI Yu-long, ZHAO Yao-yao, LI Chang-long, XIE Zhi-wen

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

ABSTRACT: The robot grinding system is used to process the elbow. The manual sampling point has random gap fluctuations. The centerline point cannot be effectively controlled. In this paper, a method for identifying point cloud surface features of elbows was proposed. The point cloud data of the elbows were scanned by a 3D laser scanner. The grinding trajectory of the center line was accurately planned through point cloud data processing, and the point cloud space coordinates were converted into robot recognizable codes. The grinding gap between the yoke and the elbow was effectively controlled, and the robot

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-10-26

Received: 2022-05-24; Revised: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258); 辽宁省教育厅项目 (2020FWDF05, 2020FWDF07); 辽宁科技大学基金 (2018FW05)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775258); Liaoning Provincial Department of Education Project (2020FWDF05, 2020FWDF07); Fund Project of University of Science and Technology Liaoning (2018FW05)

作者简介: 李鑫 (1996—), 男, 硕士生, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: LI Xin (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: precision and special processing.

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 and special processing.

引文格式: 李鑫, 陈松, 李雨龙, 等. 弯管点云面型识别与磁粒研磨试验[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 226-234.

LI Xin, CHEN Song, LI Yu-long, et al. Experiment on Point Cloud Pattern Recognition and Magnetic Particle Grinding of Elbow[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 226-234.

grinding and elbow system was optimized.

The CFD simulation of the fluid in the tube was carried out to analyze the erosion damage of the inner wall of the tube under different flow rates and pressures, so that the inner wall of the tube could be ground in a targeted manner by changing the grinding gap during grinding. The effect of different magnetic pole arrangements on the grinding area was explored. The gap between the magnetic pole and the workpiece was adjusted according to the direction of the red arrow. And the change trend of the magnetic induction of the pipe was analyzed with a diameter of 30 mm by magnetic field simulation. The grinding gap reasonably controlled the difference of the magnetic induction intensity and the variation range of the magnetic induction intensity to ensure the uniform grinding of the inner wall of the workpiece. The pipe point cloud data was scanned with a 3D laser scanner. The 3D model was reconstructed on the basis of the original point cloud. The point cloud data was segmented. The down-sampling processing was conducted on the intercepted bends. The the principal component analysis method was used to determine the point cloud coordinate system. The point cloud coordinate system was taken as the workpiece coordinate system. The robot's running pose coordinates were solved through coordinate transformation.

The robot flange was connected to the magnetic yoke to control the processing feed speed. The servo motor controlled the magnetic pole speed of the rotating magnetic field. The elbow passed through the rotating magnetic yoke. The internal abrasive particles were adsorbed on the auxiliary magnetic pole. In cooperation with the external rotating magnetic field, a closed magnetic induction line loop was formed. Based on the robot grinding pose generated by coordinate transformation, initial processing parameters were set, and reciprocating processing was performed on the bend of the elbow. A comparative test was carried out on manual point sampling and point cloud surface type recognition. The elbow was ground under the processing parameters of fixed magnetic pole speed of 800 r/min, feed speed of 1 mm/s, machining gap of 5 mm, grinding fluid of 50 mL, and abrasive of 20 g. After 50 minutes, the surface roughness Ra of manual sampling points decreased from 0.41 μm to 0.25 μm , and the surface roughness Ra of point cloud surface recognition decreased from 0.49 μm to 0.19 μm . After 80 minutes, the surface roughness Ra of manual sampling points decreased to 0.18 μm , and the surface roughness Ra of the point cloud surface type identification dropped to 0.10 μm . At the same time, the micro-cracks on the surface morphology of the manually collected points were obviously removed, and there were still groove marks, and the point cloud surface identifying the surface topography as the centerline trajectory was planned, the operating points were guaranteed to be dense and regular, so that the original defects were basically removed, and the surface grinding marks were fine and uniform. Compared with the improvement rate of surface roughness, the manual point collection was 54.4%, and the point cloud surface recognition was 78.4%. Therefore, the point cloud surface recognition saves the point collection time, the surface roughness decreases rapidly, and the surface removal effect is better. There are certain advantages over manual sampling.

KEY WORDS: magnetic particle grinding; magnetic field simulation; fluid simulation; point cloud; 3D reconstruction; principal component analysis; pose

飞机各系统内部遍布不同尺寸类型的导管, 它们起到了传输和保护等作用, 其重要程度不可忽视^[1]。为了节省空间, 弯管被广泛用于航空、汽车等行业, 但弯管折弯处材料的去除是一大难题。由于弯管的弯曲角度不同, 弯管内壁的抛光处理较复杂, 传统的抛光工艺难以满足精度要求, 而磁粒研磨的自适应性能够使弯管内表面抛光更均匀^[2]。

严正伟等^[3]利用正交实验法对弯管研磨的工艺参数进行了分析和优化, 同时进行了极差和方差分析, 可知磁极转速对加工效果的影响最大, 经过加工后弯管内表面的形貌较均匀。陈燕等^[4]利用机械手研磨弯管, 受到折弯角度的影响, 弯管中线与磁场中线偏心, 影响了研磨的均匀性, 通过添加 25°聚磁头和磁极排布改善了研磨效果。上述试验通过手动采点捕捉弯管中线坐标, 由于人工操作不稳定, 存在随机间

隙波动, 导致机器人在加工弯管点位之间形成了研磨差异。

为了准确获取位姿, 缩小研磨间隙波动, 喻正好等^[5]用离线设备三坐标仪测得弯管外轮廓的 3 条曲线坐标, 通过重构中心线得到了机器人研磨轨迹, 解决了机器人采点不准确的问题。程森等^[6]利用廓形识别弯管中线, 实时准确地获取了机器人位姿, 并与手动采点进行对比, 提高了采点效率和内表面质量。上述方法采用外部设备快速获取了管件的坐标数据, 但仍存在数据偏差, 与实际坐标不一致。

为了解决弯管采点不准确、数据处理速度慢等问题, 避免影响加工效率, 文中提出点云面型特征的弯管识别方法, 利用三维激光扫描仪扫描弯管点云, 将点云空间坐标转换成机器人可识别代码, 精准规划中线研磨轨迹, 对研磨间隙进行有效控制, 进一步优化

弯管研磨系统。

1 系统机理

1.1 系统组成

弯管研磨装置如图1所示,在机器人手部位置安装磁轭旋转装置,将管件夹持在工作台上,开启伺服电机,设定初始旋转速度,旋转中的磁轭带动管内磨粒和辅助磁极与外部旋转磁极形成闭合磁路,磨粒在管内依照磁场线排布,组成了具有一定柔性的磁粒刷^[7]。

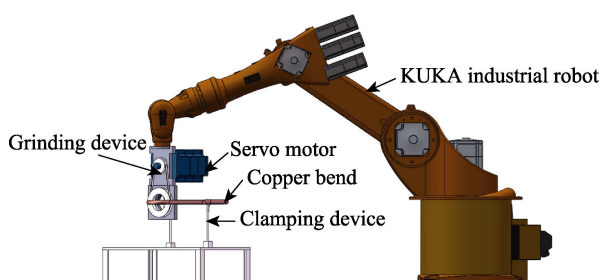


图1 弯管研磨装置
Fig.1 Elbow grinding device

1.2 弯管磁粒研磨原理

磁粒研磨弯管内壁原理示意图如图2所示,伺服电机连接磁轭,磁轭均匀地分布着4个聚磁头和N35永磁极,组成了旋转磁场。在旋转磁场内部形成闭合磁路,且在磁极之间产生了较强作用力的磁场,处在磁场内部的研磨粒子被吸附于管内壁,磁场旋转带动研磨粒子加工内表面。控制机器人以一定速度沿弯管中线进行循环往复运动,进而使磨粒沿螺旋方向加工管内壁。同时对磨粒所受磁场力进行了分析^[8-13], F_x 、 F_y 分别为磨粒沿磁力线和等磁位线所受的力, F_m 为弯管内壁研磨压力,见式(1) — (3)。

$$F_x = V\chi H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$F_y = V\chi H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$F_m = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$

式中: V 为磨粒的体积; χ 为磨粒的磁化率; H

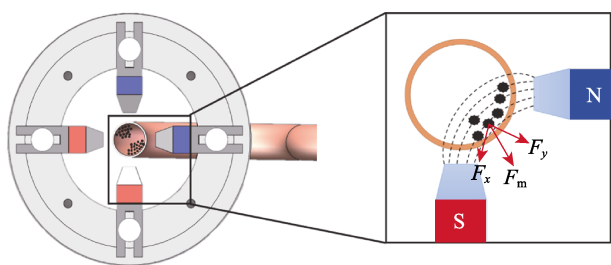


图2 弯管磁粒研磨原理
Fig.2 Magnetic particle grinding principle of elbow

为磁场强度; $\frac{\partial H}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial H}{\partial y}$ 分别为 x 、 y 方向的磁场强度变化率。

1.3 CFD 仿真

流体经过弯管折弯处,由于弯曲角度的变化导致折弯处速度和压力发生变化,容易受到冲蚀效果的影响。不同的速度和压力影响着管件内表面形貌的均匀性,通过 CFD 模拟仿真分析了管内流速和压力变化情况,CFD 设计参数见表1。弯管受到流体运动的影响,寻找经常遭到冲蚀破坏的位置,避免在研磨状态下因弯管受到冲蚀损伤,反而使管件质量不达标的情况出现^[14]。

表1 CFD 设计参数
Tab.1 CFD design parameters

Parameters	Value
Inlet velocity/(m·s ⁻¹)	10
Outlet pressure	One atmosphere
Pipe diameter/mm	25
Boundary condition	Pipe inner wall
Pipe fittings	copper
Pipe surface roughness/ μm	1
Fluid in pipe	H ₂ O

如图3所示,在初始入口流速为10 m/s的情况下,弯管入口流速较均匀,在折弯处开始发生变化,流体在经过管件折弯处时,折弯处内侧半径小于外侧半径。由于受到离心力的作用,在流体靠近折弯处内侧速度增大,外侧速度减小,管内壁形成流速差,弯管出口流速不均匀,影响了设备的稳定性^[15-16]。

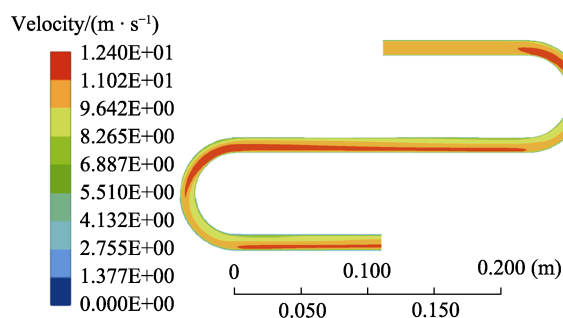


图3 管件内壁流速变化
Fig.3 Variation of flow velocity on the inner wall of pipe fittings

如图4所示,在弯管入口速度相同的情况下,管内流体会受到折弯处离心力的影响,大部分流体经过折弯处流向管外圈内壁,由动能转化为压力势能,从而在外圈内壁压力达到最大值时,压力分布与速度分布呈相反趋势^[17-18]。

管件入口处和出口处的压力较均匀,随着弯曲角度的增大,折弯处外侧所受的压力增大,内侧管壁呈

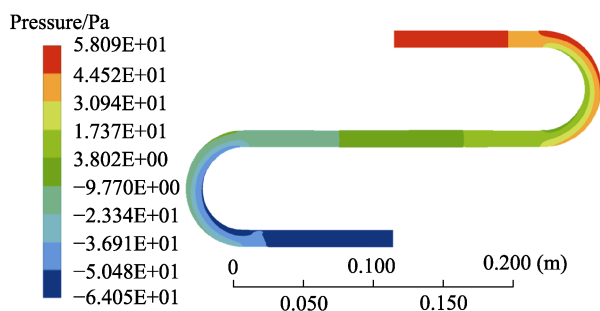


图 4 管内壁压力变化

Fig.4 Pressure change on inner wall of pipe fittings

负压状态, 弯管随着不同弯曲角度的压强分布在经过弯头时均有变化, 内外侧附近压力分布变化较明显。这是由于流体在入口直管段流动至弯头部位时, 边界条件发生了突变, 造成主流与壁面发生脱离, 促使流速分布发生变化, 主流偏向弯管外侧, 弯管内侧出现负压, 流体受到惯性作用, 对管道壁面造成冲击, 外侧管壁受到的压力增大。随着弯曲角度的增大, 弯头处受到压力冲击的面积也变大, 能量损耗增多。主要原因是角度越大, 需要克服流体的惯性力也增大, 需要的能量也更多, 因此在管内壁外侧使用过程中受到冲蚀破坏的影响较大, 在研磨加工时通过改变研磨间隙对管内壁进行针对性研磨。

1.4 磁场模拟分析

在研磨弯管过程中, 研磨间隙是提高研磨效果的变量之一, 磁极间隙的稳定性可以有效提高弯管内壁研磨的均匀性。对于不同弯曲角度的弯管, 在加工过程中其研磨间隙会不断变化, 通过点云数据处理, 可以准确控制磁轭与工件的间隙, 达到提高研磨均匀性的目的。

机器人研磨轨迹与弯管中线出现偏差时, 会使研

磨间隙发生变化, 管内壁磁感应强度无规则波动, 影响研磨压力, 磨粒对管内壁的附着力不断变化。为了探究研磨间隙对研磨区域加工效果的影响, 利用 Maxwell 软件对研磨系统进行磁场模拟, 同时提取不同研磨间隙下加工区域的磁感应强度进行对比分析。

在静磁场下, 磁轭内部不同磁极排布的磁感应线如图 5 所示, 图 5a 为 NSNS 极排布, 磁感应线分布较均匀, 对管件内壁的影响较小。如图 5b 所示, 根据 NNSS 极排布, 其磁感应线形成了磁力线闭合回路, 使磨粒吸附在弯管内壁, 磁感线聚集较密集, 可以有效地提高研磨效率。如图 6 所示, 沿红色箭头方向调整弯管与磁轭之间的研磨间隙, 探究弯管区域磁感应强度的变化情况。

磁感应强度在管件直径为 30 mm 时的变化趋势如图 7 所示, 3 mm 的研磨间隙会使磁感应强度最高达到 268.56 mT, 最低达到 123.78 mT; 4 mm 的研磨间隙会使磁感应强度最高为 244 mT, 最低为 111.3 mT; 5 mm 的研磨间隙会使磁感应强度最高为 225.83 mT, 最低为 107.83 mT; 在 3 mm 的研磨间隙时, 磁感应强度的波动较大, 严重影响了研磨效果; 在 5 mm 的研磨间隙时, 磁感应强度的变化幅度处于合理区间。当间隙反复变化时导致磁感应强度变化较大, 同时研磨压力也跟着变化, 会使工件表面去除不均匀, 内壁形貌呈现划痕大小不一, 从而影响研磨后工件的表面质量。

研磨间隙的不均匀, 使得管内壁磁场出现了梯度变化, 磨粒的运动行为就是从磁感应强度弱的位置流向高的位置, 磁感应强度高的位置存在空间被压缩的现象, 磁轭旋转带动磨粒对管内壁进行研磨, 磨粒此时不会发生交替变化, 导致磨粒的利用率较低, 磨粒的自锐性无法发挥作用, 因此研磨间隙是导致研磨效果不均匀的重要因素^[19]。

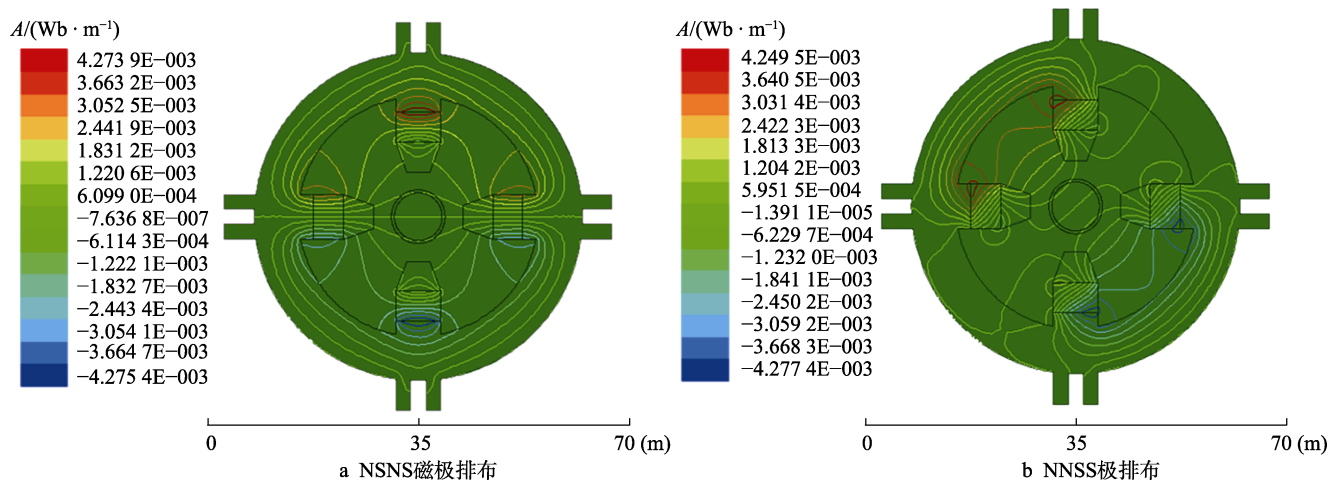


图 5 不同磁极排布磁力线分布

Fig.5 Distribution of magnetic lines of force in different magnetic pole arrangement: a) NSNS pole arrangement; b) NNSS pole arrangement

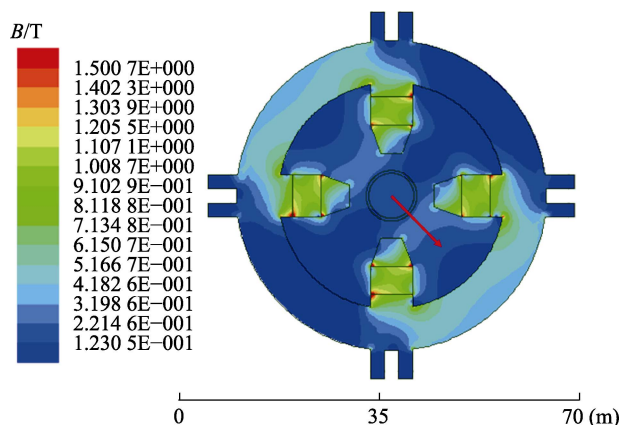


图 6 磁感应强度云图

Fig.6 Cloud diagram of magnetic induction intensity

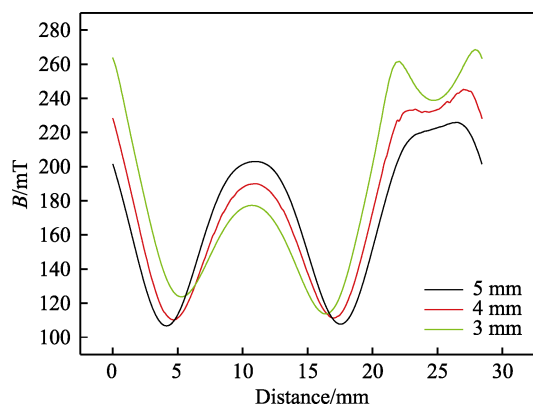


图 7 磁感应强度曲线

Fig.7 Magnetic induction intensity curve

2 点云数据处理

通过三维激光扫描仪扫描弯管得到弯管点云的局部轮廓三维坐标,利用 Imageware 点云处理软件进行三维重建,对点云数据进行降采样,提取出弯管中心线,采用主成分分析法确定点云坐标系,使点云坐标系与工具坐标系重合,控制机器人遍历弯管中心线各点,得到机器人位姿数据。

2.1 三维重建

激光扫描仪采集到的弯管点云模型如图 8 所示。由于弯管模型简单,无明显标记点,扫描系统很难进

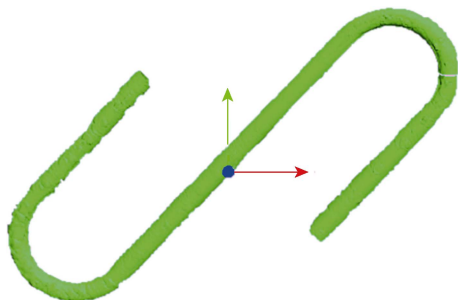


图 8 原始点云

Fig.8 Original point cloud

行识别,因此只能扫描出弯管的局部模型。通过 Imageware 软件进行三维重建,与原始点云进行融合,得到如图 9 所示的完整模型。

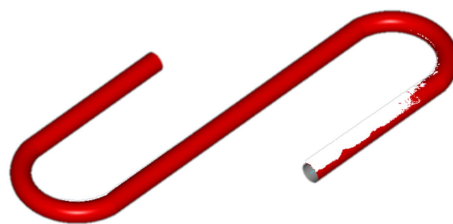


图 9 三维重建模型

Fig.9 3D reconstruction model

2.2 点云数据分割

由于重建后的模型过于冗杂,导致后续的计算量过大,因此对模型进行特征提取,以分割点云数据^[20-21]。点云降采样是在保持点云几何特性的前提下,降低点云的密度,减少点云中点的数量。通过截取重建模型折弯处特征采样,对弯管折弯处轮廓进行点化处理,如图 10 所示。取弯管中线进行点化(如图 11 所示),通过点云数据进行精简处理,以便转换成机器人可识别的位姿数据。

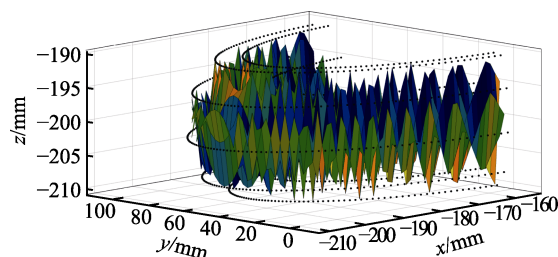


图 10 折弯处点化处理

Fig.10 Spot treatment of bend

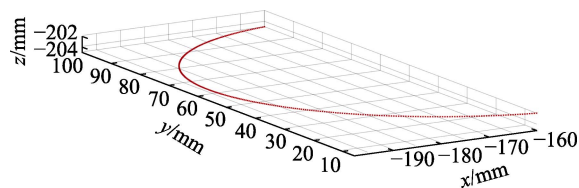


图 11 弯管中线点化处理

Fig.11 Spot treatment of elbow center line

2.3 主成分分析法

2 个变量之间存在相关关系,可以理解为 2 个变量数据存在重叠。主成分分析是去掉所有数据变量的重叠部分,重建为少部分新变量,重建得到的新变量互不相关,新变量存储着原始数据的关键信息。利用较少变量代替大部分变量,将关联性高的变量进行剔除,主要原理是降维,转换后的变量即为主成分。任何主成分都是初始变量的线性集合,且它们之间不存在关联,因此可以解释原始变量的信息。

点云的三维坐标 xyz 在空间分布中具有一定规律, 存在一定的相关性。利用主成分分析思想求取点云的主成分方向, 各主成分方向垂直相关。第 1 坐标轴是点云方差最大的数据方向, 第 2 坐标轴垂直于第 1 坐标轴且方差最大的数据方向, 第 3 坐标轴垂直于第 1 和第 2 坐标轴且方差最大的数据方向, 组成点云 xyz 轴方向^[22]。求点云形心坐标 $o = (o_x, o_y, o_z)$, 见式 (4) — (6)。

$$\left. \begin{aligned} o_x &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\ o_y &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \\ o_z &= \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{k-1} \quad (5)$$

$$S = \begin{Bmatrix} \text{cov}(X, Y) & \text{cov}(X, Y) & \text{cov}(X, Z) \\ \text{cov}(Y, X) & \text{cov}(Y, Y) & \text{cov}(Y, Z) \\ \text{cov}(Z, X) & \text{cov}(Z, Y) & \text{cov}(Z, Z) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中: N 为点云数据点数; x 、 y 、 z 为点云坐标。

协方差矩阵的最大特征值对应的特征向量总是指向方差最大的方向。次最大特征值对应的特征向量正交于最大特征值对应的特征向量, 并指向次最大方差指向的方向。形心坐标 o 为点云的原点, 协方差矩阵 S 的特征向量 V_1 、 V_2 、 V_3 为坐标系 x 、 y 、 z 轴的方向向量。弯管中线坐标与主成分分析法建立的坐标系如图 12 所示。

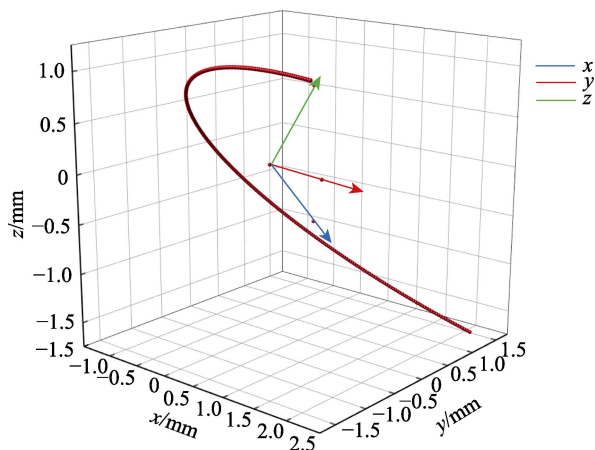


图 12 中线坐标系

Fig.12 Central line coordinate system

2.4 坐标转换

在机器人研磨弯管时首先采集弯管的中线坐标,

通过点云坐标确定机器人研磨过程的位姿, 工具坐标系原点在中线各点的坐标值为位置数据, 工具坐标系的 x 、 y 轴与中线对应点的法线、切线重合, 工具坐标系相对于点云坐标系的偏转角度组成姿态数据。

研磨弯管内壁需要将采集到的弯管点云数据转换为机器人识别代码, 机器人通过代码遍历研磨轨迹路线, 将提取的弯管中线进行点化处理, 将新建的点云坐标系作为工件坐标系, 采用平移的齐次变换将工件与工具坐标系原点重合, 再通过旋转的齐次变换使 x 、 y 、 z 轴重合, 选取中线上的一点, 如图 13 所示, 使工具坐标系原点与此点重合, 工具坐标系 y 轴为中线的切线方向, x 轴为中线的法线方向, 工具坐标系位置即 $P = [x_i, y_i, z_i, 1]^T$, 方向向量 \mathbf{n} 、 \mathbf{o} 、 \mathbf{a} , 以及机器人空间位姿坐标可由式 (7) — (8) 求得^[23-27]。

$$[\mathbf{n} \ \mathbf{o} \ \mathbf{a} \ \mathbf{p}] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \\ \cos \beta &= \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \\ \cos \gamma &= \frac{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}}{\sqrt{o_x^2 + o_y^2 + o_z^2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: α 、 β 、 γ 分别为绕 x 、 y 、 z 轴的旋转角度。

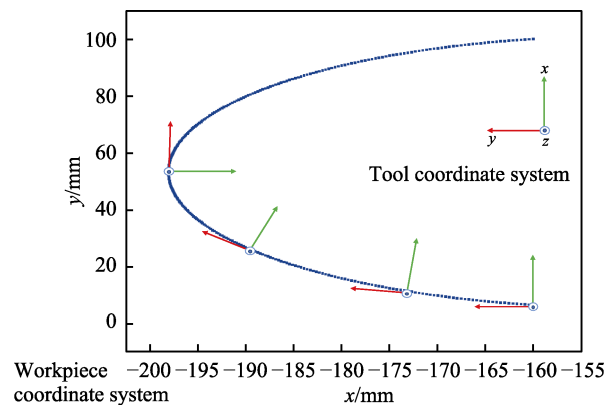


图 13 弯管中线研磨轨迹

Fig.13 Grinding track of elbow center line

3 试验

3.1 装置

机器人系统对其位置的描述和控制以机器人的工具中心点 TCP 为基准, 而工具坐标系建立的目的是将默认的机器人控制点转移至工具末端, 将默认的

工具坐标系变换为自定义工具坐标系,并进行手动控制和编程。在机器人连接磁轭研磨弯管的过程中,工具坐标系的原点与在扫描坐标系下弯管中线的离散点重合,通过点云坐标确定机器人研磨过程的位姿。

研磨装置如图 14 所示,机器人法兰盘连接磁轭控制加工进给速度,伺服电机控制旋转磁场的磁极转速,弯管穿过旋转磁轭,内部的研磨粒子吸附在辅助磁极上,配合外部旋转磁场形成闭合磁感应线回路。通过坐标转换生成机器人研磨位姿,设定初始加工参数,对弯管折弯处进行往复加工。

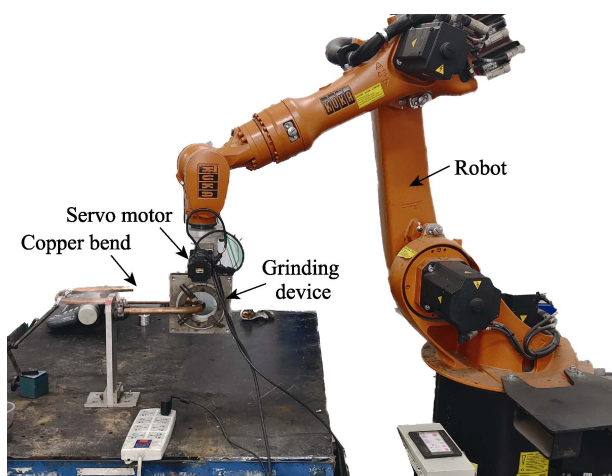


图 14 弯管研磨装置
Fig.14 Elbow grinding device

3.2 条件

采用表 2 的参数,对比图 15 手动采点 1 与点云面型 2 特征识别获得的机器人加工轨迹对弯管内壁加工的影响。实验采用 S 形弯管,2 个位置的折弯角度均为 180° ,加入辅助磁极,磨料为自制研磨粒子,混合水基研磨液。设置相同研究条件,寻找最佳研磨

效果,根据不同加工时间对管内壁形貌、表面粗糙度的影响进行分析。加工管件内壁区域如图 15 所示,利用表面粗糙度仪和电子显微镜,观测初始、50 min 和 80 min 的表面形貌和表面粗糙度。

表 2 加工参数
Tab.2 Processing parameters

Item	Parameter
H63 copper elbow	Diameter $\phi 30$ mm, Bending angle 180°
Permanent magnet	NdFeB, 15 mm \times 15 mm \times 10 mm
Magnetic gathering head	Q235 steel, 15 mm \times 15 mm \times 10 mm, Taper 25°
Auxiliary spherical pole	$\phi 8$ mm
Abrasive particle size	180 μm , 20 g
Grinding clearance	3, 4, 5 mm
Grinding fluid	Water grinding fluid, 50 mL
Pole speed	800 r/min
Grinding time	80 min
Feed speed	1 mm/s



图 15 加工管件
Fig.15 Processing pipe fittings

4 结果分析

由图 16a、17a 可以看出,管内壁的原始形貌较

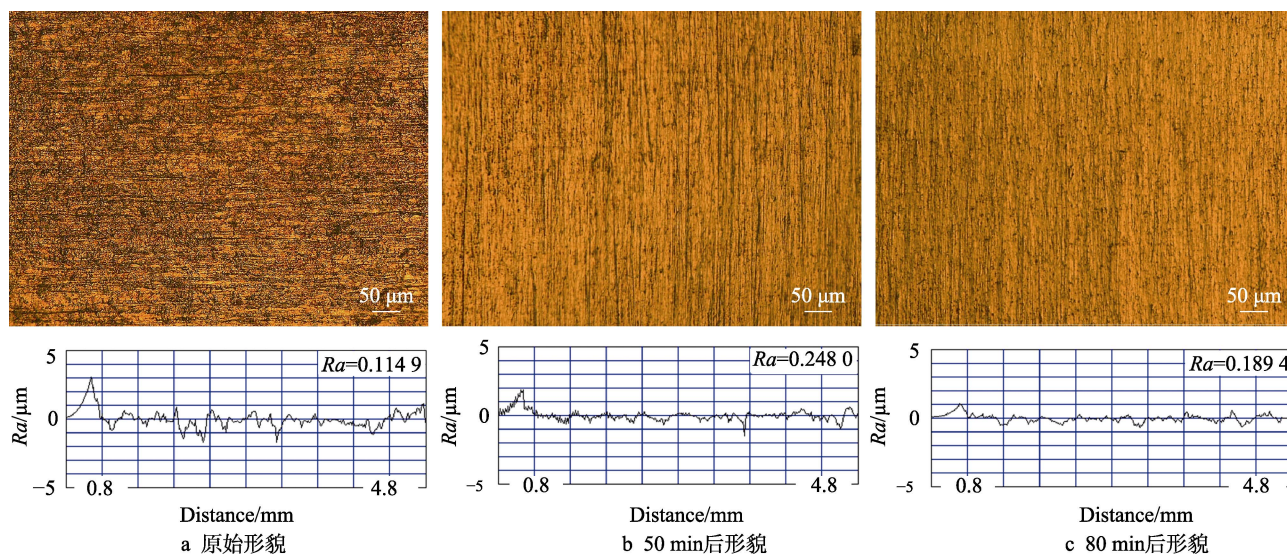


图 16 手动采点

Fig.16 Manual sampling: a) original morphology; b) morphology after 50 min; c) morphology after 80 min

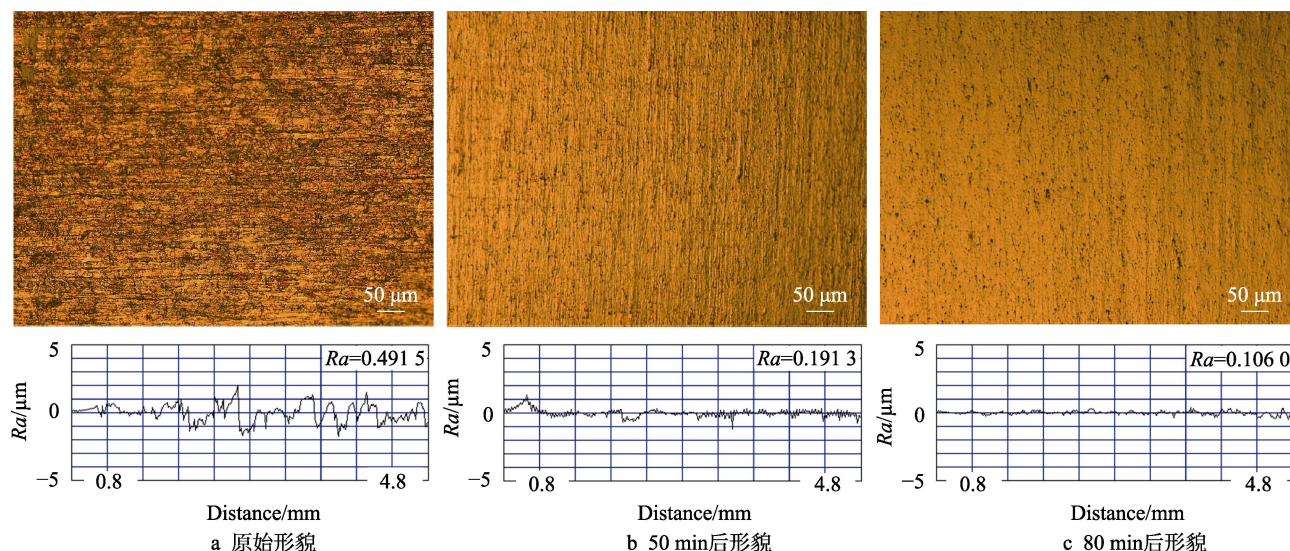


图 17 点云面型识别

Fig.17 Point cloud surface feature recognition: a) original morphology; b) morphology after 50 min; c) morphology after 80 min

粗糙, 流体长期对折弯处进行冲蚀磨损, 导致存在微裂纹、凹凸不平和划痕等质量缺陷。如图 16b 所示, 在加工 50 min 后, 手动采点管内壁微裂纹基本被去除, 凹坑和深度划痕依旧存在。由于手动采点研磨间隙得不到控制, 机器人运行存在点位波动, 形成了深浅不一的划痕 (如图 17b 所示), 点云面型识别管内壁微裂纹和凹凸不平处等缺陷得以改善, 但存在研磨痕迹较深, 机器人通过遍历点云识别中线, 可以有效控制研磨间隙, 管内壁研磨压力均匀, 研磨痕迹整体较均匀。

如图 16c 所示, 在研磨 80 min 后, 手动采点表面微裂纹明显被去除, 但仍存在沟痕。部分区域因研磨间隙变小, 研磨压力陡增, 导致管内壁形成了较深的划痕, 且去除量增大, 管内壁略显不平。从图 17c 中可以看出, 点云面型识别由于机器人运行点位密集且规律, 可以精确控制研磨间隙, 使得原始缺陷基本被去除。同时, 由于研磨压力稳定, 使得管内表面研磨痕迹细致均匀。

采用 2 种采点方式后表面粗糙度改善效果对比如图 18 所示, 手动采点的表面粗糙度改善率为

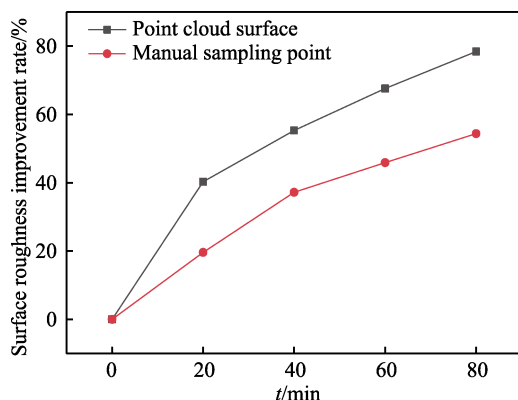


图 18 表面粗糙度改善效果对比

Fig.18 Comparison of surface roughness improvement effects

54.4%, 而采用点云面型识别的表面粗糙度改善率达到 78.4%。点云面型识别与手动采点相比, 节省了采点时间, 表面粗糙度的下降速度更快, 表面去除效果更好, 具有一定优势。

5 结论

1) 利用管内 CFD 仿真, 模拟管件流速和压力的变化, 从而对管内壁冲蚀严重的区域针对性地研磨, 即管内壁外侧冲蚀严重, 选择增大磁轭与管件的研磨间隙, 保证内表面的均匀性。

2) 由磁场仿真可知, 研磨间隙是影响管内壁加工质量和均匀性的重要因素之一, 因此通过点云面型特征识别准确获得加工弯管中线, 可以有效控制研磨间隙。同时可以保证加工过程的稳定性, 防止磁轭经过弯管折弯处时发生划擦。

3) 采用激光点云扫描弯管三维坐标, 通过点云数据处理得到研磨位姿。点云面型识别获取点云坐标精准迅速, 激光点云弯管坐标能够准确控制研磨间隙, 使研磨效果达到理想状态。

参考文献:

- [1] 樊胜宝, 鲍益东, 王雯, 等. 航空导管弯曲成形自动建模与后处理[J]. 航空制造技术, 2018, 61(16): 59-66.
FAN Sheng-bao, BAO Yi-dong, WANG Wen, et al. Automatic Modeling and Post-Processing of Aviation Tube Bending Forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(16): 59-66.
- [2] 陈燕, 李龙邦, 曾加恒, 等. 航空发动机钛合金导管内表面精密研磨试验研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 40-46.
CHEN Yan, LI Long-bang, ZENG Jia-heng, et al. Experi-

- mental Study on Precision Grinding of Titanium Alloy Conduit Inner Surface in Aero-Engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 40-46.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 喻正好, 韩冰, 陈松, 等. 钛合金空间弯管磁粒研磨工艺参数分析[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 183-189.
- YU Zheng-hao, HAN Bing, CHEN Song, et al. Process Parameters for Magnetic Abrasive Finishing of Titanium Alloy Spatial Elbows[J]. Surface Technology, 2018, 47(4): 183-189.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] WANG Liao-yuan, SUN Yu-li, CHEN Fa-yu, et al. Experimental Study on Vibration-Assisted Magnetic Abrasive Finishing for Internal Blind Cavity by Bias External Rotating Magnetic Pole[J]. Precision Engineering, 2022, 74: 69-79.
- [9] 李文龙, 陈燕, 吕旖旎, 等. 聚磁盘形状对磁粒研磨加工管件内表面的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 354-359.
- LI Wen-long, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Influence of Shape of Aggregate Magnetic Iron Plate on Inner Surface of Pipe by Magnetic Abrasive Finishing[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 354-359.
- [10] 李龙邦, 陈燕, 陈松, 等. 基于螺旋交叉磁场的大曲率不规则弯管内表面磁研磨研究[J]. 现代制造工程, 2019(7): 1-5.
- LI Long-bang, CHEN Yan, CHEN Song, et al. Study on Magnetic Abrasive Finishing of Irregular Curved Pipes with Large Curvature Based on Spiral Cross Magnetic Field[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(7): 1-5.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 朱子俊, 韩冰, 陈燕, 等. 复合磁极磁粒研磨平面机理及试验探究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 352-360.
- ZHU Zi-jun, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Mechanism Analysis and Experimental Study of Plane of Compound Magnetic Pole Magnetic Abrasive Lapping[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 352-360.
- [14] 徐进文. 空间弯管磁粒研磨差异化加工工艺试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022: 21-23.
- XU Jin-wen. Experimental Study on Magnetic Particle Lapping Differential Machining Technology for Space Bending Tube[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2022: 21-23.
- [15] DU Xu-zhi, WEI An-ning, FANG Yu-hao, et al. The Effect of Bend Angle on Pressure Drop and Flow Behavior in a Corrugated Duct[J]. Acta Mechanica, 2020, 231(9): 3755-3777.
- [16] 赵盼婷, 王素梅, 文杰. 基于 ANSYS 的多相输油管道弯管内流场数值模拟研究[J]. 石油化工应用, 2022, 41(3): 58-62.
- ZHAO Pan-ting, WANG Su-mei, WEN Jie. Research on Numerical Simulation of Flow Field in Elbow of Oil Pipeline Based on ANSYS[J]. Petrochemical Industry Application, 2022, 41(3): 58-62.
- [17] 王田田, 李金芳, 齐兴赞, 等. 两相流弯管内流场与磨损研究[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(3): 35-37.
- WANG Tian-tian, LI Jin-fang, QI Xing-bin, et al. Study on Flow Field and Wear in Two-Phase Flow Elbow[J]. China Water Transport, 2022, 22(3): 35-37.
- [18] HU Dong-fang, HUANG Zheng-liang, SUN Jing-yuan, et al. Numerical Simulation of Gas-Liquid Flow through a 90° Duct Bend with a Gradual Contraction Pipe[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2017, 18(3): 212-224.
- [19] 程淼, 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.