

# 基于旋转进给电磁场的不规则弯管内 表面磁研磨研究

李龙邦, 陈燕, 陈松, 严正伟

(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** 将磁力研磨与单片机控制电磁场结合, 提高不规则弯管内表面的质量与使用性能。**方法** 根据静态磁场工艺理论及磁粒运动轨迹模型, 通过电流控制电磁场, 设计最佳磁路轨迹, 进而形成旋转进给磁场, 以提高电磁研磨效率。螺旋式分布电磁铁形成磁粒的螺旋加工轨迹, 避免磁轭支撑旋转进给加工空间弯管的干涉问题, 并且可多段同时加工以提高加工效率。通过静态磁场理论对磁路轨迹分析, 研究弯管磨削径向辅助磁极的螺旋磨削进给轨迹。**结果** 针对 SUS304 水龙头内腔表面抛光实验, 当磨粒的平均粒径为  $250\ \mu\text{m}$  时, 研磨液的用量为 8 mL, 转速在 800 r/min 内, 经过 50 min 的研磨, 工件内表面的粗糙度值由  $Ra\ 1.1\ \mu\text{m}$  降至  $Ra\ 0.38\ \mu\text{m}$ 。**结论** 基于旋转进给电磁场下辅助磁极的磁力研磨, 对改善弯管内表面质量, 提高使用寿命有明显作用。

**关键词:** 磁粒研磨; 不规则弯管; 旋转进给磁场; 研磨效率; 磁路轨迹; 辅助磁极

**中图分类号:** TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0284-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.043

## Magnetic Abrasive Finishing on Internal Surface of Irregular Bend Pipe Based on Rotating Feeding Electromagnetic Field

LI Long-bang, CHEN Yan, CHEN Song, YAN Zheng-wei

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

**ABSTRACT:** The work aims to combine magnetic abrasive finishing with single chip microcomputer control electromagnetic field to improve quality and service performance of internal surface irregular bend pipe. According to theory of static magnetic field and model of magnetic particle trajectory, the optimum magnetic path was designed by controlling electromagnetic field through current and the rotating feed magnetic field was formed to improve the electromagnetic grinding efficiency. The spiral machining track of the magnetic particle was formed by spiral distributed electromagnet to avoid the interference on the elbow bent in rotating feeding process space of magnetic support and improve the processing efficiency by processing in multiple stages. The track of magnetic track was analyzed by the theory of static magnetic field and the feed path of the spiral grinding of the auxiliary magnetic pole in radial direction of bend pipe was studied. For internal surface polishing of SUS304 faucet, when

收稿日期: 2018-02-08; 修订日期: 2018-04-10

Received: 2018-02-08; Revised: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51401201); 辽宁省教育厅基金 (2016HZZD02)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51401201), Liaoning Education Fund (2016HZZD02)

作者简介: 李龙邦 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: LI Long-bang (1993—), Male, Master, Research focus: precision machining.

通讯作者: 陈松 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为精密加工。

Corresponding author: CHEN Song (1976—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: precision machining.

the average particle size was 250  $\mu\text{m}$ , the amount of grinding fluid was 8 mL and the speed was within 800 ~ 1000 r/min. After grinding of 50 min, the roughness value on internal surface of workpiece dropped to  $Ra$  0.38  $\mu\text{m}$  from  $Ra$  1.1  $\mu\text{m}$ . The magnetic grinding based on the auxiliary magnetic pole under the rotating feeding electromagnetic field has obvious effects on improving the internal surface quality of the bend pipe and the service life.

**KEY WORDS:** magnetic abrasive finishing (MAF); irregular bend; rotating feed magnetic field; grinding efficiency; magnetic path; auxiliary pole

航空航天、汽车、医疗器械等领域的发展,对空间弯管的复杂程度提出了更高的要求,为满足器械内部复杂空间的使用要求,常采用占空率小、不规则的空间弯管。但由于弯管形状非常复杂,传统加工工艺难以保证零件表面质量达到精加工要求,且在其弯曲内表面处会产生褶皱、凹坑。内腔表面粗糙不平会导致液体或气体流过时产生湍流、振动、腐蚀,从而使弯管机械性能下降,机械工作不稳定,工作功率下降<sup>[1-3]</sup>。

传统抛光方法难以对复杂空间弯管内表面进行抛光。选取较好的精密加工方法对空间弯管进行抛光,是国内外专家学者长期以来关注的热点。磁力研磨法(MAF)由于具有较好的自适应性,目前已能较好地应用于复杂曲面、平面、内外圆表面<sup>[4-6]</sup>的加工。现阶段加工空间弯管通常采用六自由度机械手拖动永磁抛光装置,手动标点的方式<sup>[7]</sup>,此方法有效,但存在以下缺点:设备昂贵;前期需要大量时间对弯管轨迹进行采集与模拟,准备工作复杂;抛光时只能沿单一轨迹加工,影响加工效率;旋转磁极易与工件外壁发生干涉。

本文提出了一种不规则空间弯管加工的新方法——旋转进给电磁场磁力研磨法。该方法利用单片机控制电流形成螺旋状磁场来带动弯管内辅助磁极与磁性磨料对工件内表面进行抛光,从而提升弯管内表面质量和性能,以解决永磁抛光装置旋转导致的磁极头与不规则空间弯管外壁干涉问题。

## 1 电磁研磨加工弯管内表面机理

电磁研磨加工空间弯管内表面机理如图 1 所示。在加工空间弯管时,工件固定不动,电磁铁通过皮带连接形成螺旋状,并缠绕在弯管外表面,不需要磁轭等辅助元件的支撑。在单片机的控制下,通过控制电流的方向和频率产生电磁场,利用电磁极的螺旋线式排布,将磁场沿螺旋方式运转起来,最终形成旋转进给电磁场。利用磁力线可以穿透非磁性材料的特点,在磁场力的作用下,磁性磨粒沿磁力线方向有规律排布,形成具有研磨作用的“磁粒刷”,并压附在工件表面<sup>[8-12]</sup>,加工区的磁性磨粒在磁场的变换下,随磁场的旋转做螺旋状复合运动。由于没有磁轭,可加工曲率半径更小、形状更不规则的空间弯管内表面。

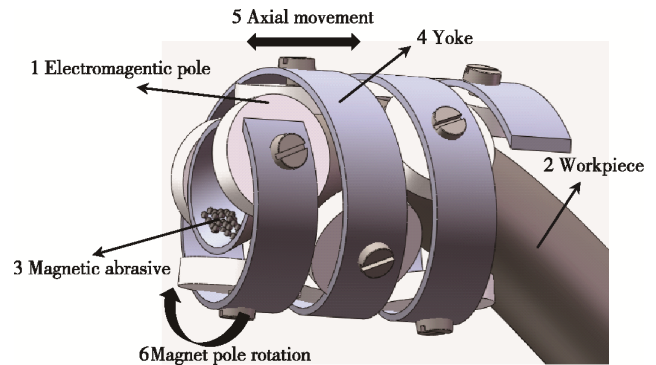


图 1 电磁研磨加工弯管内表面机理图

Fig.1 Principle diagram of magnetic abrasive finishing on internal surface of bend pipe

磁场中单颗磁性粒子的受力如图 2 所示。设沿磁力线方向为  $X$ , 与磁力线的垂直方向为  $Y$ 。单个磁性粒子在磁场中受到磁力 ( $\Delta F_x$ 、 $\Delta F_y$ )、离心力 ( $F_c$ )、重力 ( $mg$ ) 的共同作用而完成对弯管内表面的加工。

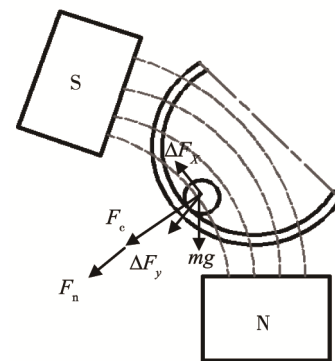


图 2 单颗磨粒受力分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of analysis of force on single particle

磁性粒子受到  $\Delta F_x$ 、 $\Delta F_y$  的作用,其公式如式(1)和式(2)所示。

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

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

式中:  $V$  为磨粒的体积,  $\text{m}^3$ ;  $\chi$  为磨粒的磁化率;  $H$  为磨粒在磁场中所处位置的磁场强度,  $\text{A/m}$ ;  $\frac{\partial H}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial H}{\partial y}$  分别为沿  $x$ 、 $y$  方向磁场强度的变化率。

连续磁场作用下磁性粒子受到的磁场力  $F_n$  见式(3)。

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

研磨过程中产生的磁压力  $P$  见式(4)。

$$P = \frac{H^2}{2} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) = \frac{B^2}{2\mu_0} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (4)$$

式中:  $B$  为磁场与导磁材料作用面处的磁感应强度,  $H$  为磁场与导磁材料作用面处的磁场强度,  $\mu_m$  为磁性磨料的相对磁导率,  $\mu_0$  为空气的相对磁导率。

通过式(4)可以看出, 磁感应强度的平方与研磨压力成正相关。为了提高磁感应强度, Yamaguchi H、Zou Y H、陈燕等人分别利用不同的辅助抛光工具(即经过热处理分段导磁的奥氏体不锈钢丝、V形磁铁、180°开槽磁铁)进行实验<sup>[13-15]</sup>, 结果均表明通过向管内加入辅助磁极, 形成了内外两个磁场, 从而增大了磁感应强度<sup>[16]</sup>, 以此提高了研磨效率。这也很好地避免了单纯使用磁性磨料进行研磨时, 出现磨料粘附或堆积在工件弯曲处导致研磨效率降低的情况<sup>[17-18]</sup>。因此选用径向圆柱磁极作为加工过程中的辅助磁极, 而且对于电磁研磨而言, 还可以通过改变磁路轨迹和加大电流来增大磁场强度。

## 2 旋转进给磁场磁路分析

### 2.1 静态电磁场分析

为了对上述磁路轨迹运转方式进行分析, 对其装置进行简化模型处理。由于径向圆柱磁极的加入会对磁感应线的分布产生影响, 所以通过 Ansoft Maxwell 软件对磁路运转过程中的某一瞬时进行针对性静态磁力线分布有限元模拟, 含有辅助磁极的通电两磁极在某一时刻的有限元分析图如图3所示。当两个磁极同时通电形成异性磁极时, 磁力线将会分布于两磁极之间, 且在辅助磁极周围分布密集, 这将有利于磁性磨粒在此集聚。当通电顺序有序转变时, 磁力线将会三个磁极间交替分布, 工作区将形成一个连

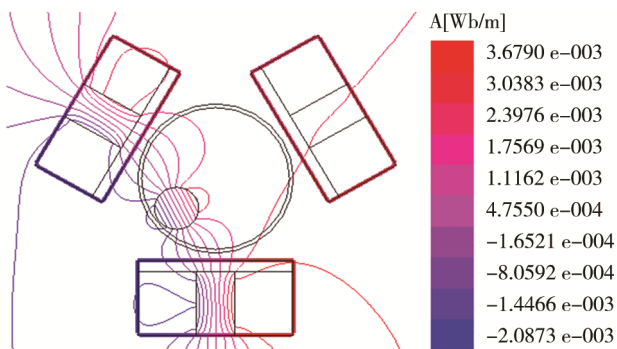


图3 磁力线强度分布云图

Fig.3 Cloud image of distribution of magnetic line strength

续的旋转进给磁场, 辅助磁极将会带动集聚的“磁刷”在旋转进给磁场中旋转, 最终实现对工件的抛光。通过分析可知, 辅助磁极的加入能够使磨料所处区域的磁场强度增大, 研磨压力提高, 研磨效率增强。同时, 辅助磁极还可带动磨料灵活地翻滚, 更好地完成切削刃自锐, 避免加工纹理的频繁出现, 从而保证了较好的加工质量。

### 2.2 电磁场磁路设计

利用电磁研磨来加工不规则空间弯管内表面, 关键在于磁路轨迹的设计。不同的磁路轨迹会决定加工区域的磁场强度以及磁力线的分布, 继而影响磁性磨料在磁场中的受力大小和运转方式, 最终影响工件的加工质量和加工效率。磁路轨迹的形成由电流来控制, 而电流有交流和直流之分。其中, 交流电所产生的交流磁场在工作中存在交变性和磁滞性, 使产生的磁路轨迹变得无规律和不可控, 处于交流磁场中的电磁铁将会发热严重, 导致加工时灼伤工件表面。直流电则凭借其瞬时通电、零功耗等特点被运用到磁路设计中, 通过直流电源的通电顺序和电磁极的摆放方式来设计磁路轨迹。

实验表明螺旋状的加工轨迹能够更好地保证表面质量, 利用螺旋式皮带将磁场设计成螺旋状, 如图4所示。图中数字1—8代表的是电磁极的排布位置, 磁极呈螺旋状缠绕在空间弯管外表面。随着弯管直径

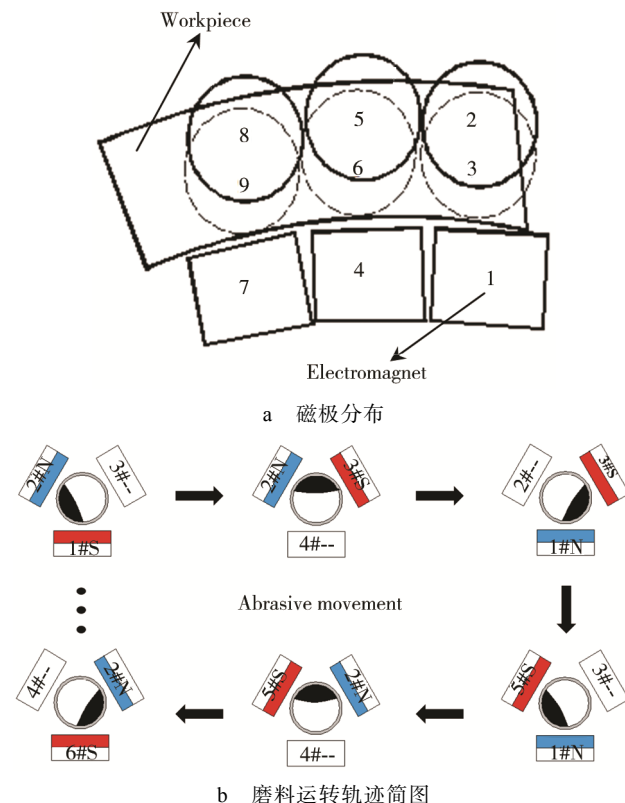


图4 磁极分布与弯管内表面磨料运转简图

Fig.4 Diagram for magnetic pole distribution and abrasive rotation on internal surface of bend pipe: a) magnetic pole distribution, b) magnetic abrasive trajectory diagram



的变化,磁极数量增加,从而保证磨料有足够的研磨压力来完成螺旋运动。

为了简化实验,本文选取了具有代表性的一个闭环上的三个磁极进行实验。选取单片机来控制电流,将该电流通入螺旋状排布的电磁极,并交替通断电流来保证每一瞬时只产生一对异性磁极,电磁场依次运转,最终在加工区域形成连续的旋转进给磁场。处在磁场中的磁性磨料在磁场力的作用下被压覆在管壁上,沿着螺旋状轨迹运动,完成划擦挤压作用,最终去除管壁上的加工缺陷。

3 实验

3.1 实验条件

本文中所抛光的工件为高端水龙头,材料为 SUS304 不锈钢。该材料具有外观光泽、耐腐蚀、耐磨损、强度高等优点,被广泛应用于现代工业的各个领域。但其弯管折弯处内表面的切削加工困难,易产生凹坑、褶皱,导致使用性能下降。

表 1 为加工实验条件。实验中使用的磁性磨粒由铁和氧化铝按质量比 2:1 自制而成,此配比的磁性磨粒在磁场中能够获得较好的研磨压力,并带动氧化铝参与研磨,以保证最优的研磨效果。同时,使用 8 mL 的油性研磨液浸润磁性磨粒,使加工后的表面附着一层油膜,以防止氧化和使表面的光泽性更好。弯管内表面粗糙度的检测采用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪(广州市广精精密仪器有限公司)测定,表面微观形貌通过 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜(日本基恩士公司)观察。

表 1 加工实验条件  
Tab.1 Machining experimental conditions

Parameters	Values
Workpiece	SUS304(OD: $\phi 22$ mm, ID: $\phi 20$ mm) Finished length: 80 mm
Magnetic pole	External: DC cylindrical electromagnet 24 V Inside: Cylindrical radial auxiliary pole
Magnetic abrasive	$m_{\text{Fe}}: m_{\text{Al}_2\text{O}_3}=2:1, 5\text{ g}$
Abrasive particle size	250 $\mu\text{m}$
Oily grinding fluid	8 mL
Magnet revolution	800 r/min
Processing time	50 min
Test temperature	25 $^{\circ}\text{C}$

3.2 实验装置

图 5 为不规则弯管内表面的加工装置。加工弯管内表面时,工件固定不动,电磁极通过皮带连接,并

以螺旋状缠绕于弯管之上。向弯管内投入包裹着磁性磨粒和研磨液的辅助磁极。在单片机的控制下,通过控制电流的通电顺序形成可控的磁路轨迹,磁性磨粒在磁场作用下随磁场的旋转做螺旋状复合运动,完成弯管内表面加工。使用电磁研磨降低了以往采用传统工业机器人加工时设备的昂贵成本,大大减轻了对不规则空间弯管加工轨迹的采集与模拟,避免了因抛光装置过大而产生干涉。此外,加工装置由皮带缠绕而成,可以对已经在使用中以及无法移动的不规则空间弯管进行抛光,加工更加灵活。

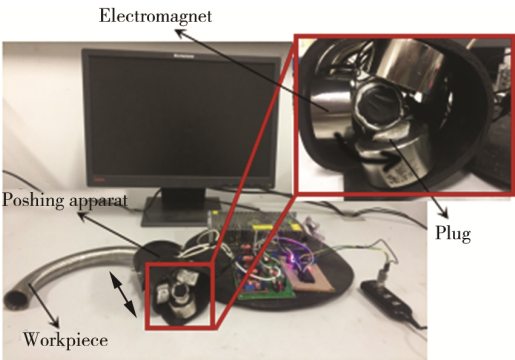


图 5 电磁研磨抛光实验装置  
Fig.5 Experimental device for electromagnetic abrasive polishing

3.3 实验结果分析

图 6 为工件的原始内表面和经过 50 min 研磨后

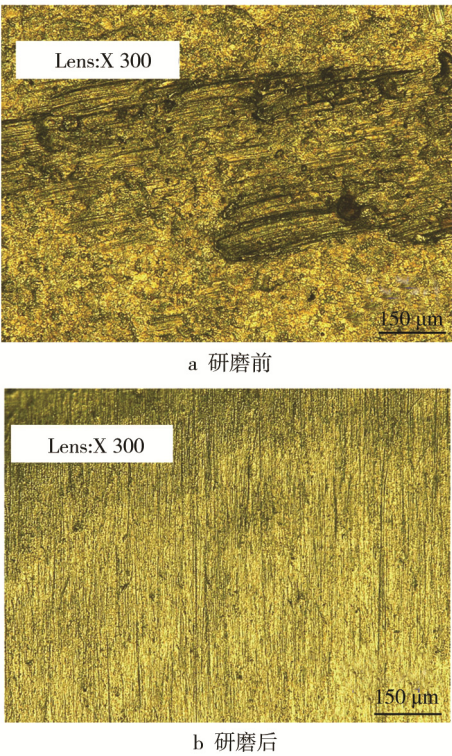


图 6 研磨前后工件表面微观形貌  
Fig.6 Microstructure of workpiece surface before (a) and after (b) grinding

内表面微观形貌。通过对比看出,工件经研磨后,其原始表面纹理及凹坑被去除,新的表面裸露了出来,说明抛光后的不锈钢管内表面质量有所提高。这是因为磁力研磨法本身具有柔性 and 尖点效应,磨料会随着外部磁场在弯管内表面进行旋转进给抛光,从而将表面隆起部分优先去除,使波峰被抹平与波谷保持一致,表面加工纹理得到明显改善。内表面变得更加均匀光滑,可以基本消除湍流、振动等问题,使弯管的使用性能和使用寿命得到提高。

图7为不锈钢水龙头弯管内表面的粗糙度值。由图可知,表面粗糙度  $Ra$  由原来的  $1.1\ \mu\text{m}$  降到了  $0.38\ \mu\text{m}$ ,符合企业提出的  $Ra$  达到  $0.6\ \mu\text{m}$  的工业使用要求。

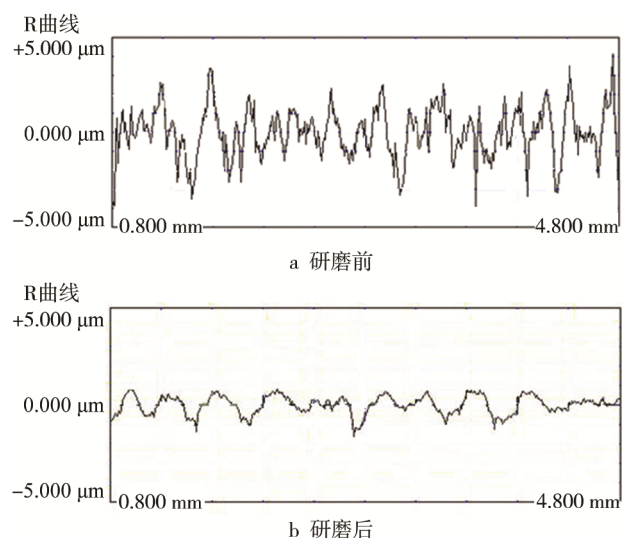


图7 研磨前后弯管  $Ra$  值

Fig.7  $Ra$  value of bend pipe before and after grinding

图8为工件经50 min研磨前后的表面形貌对比图。可以看出,未抛光前,工件的待加工表面有明显加工纹理,弯折处表面凹凸不平;抛光后,工件加工区域较为光亮,加工纹理已被去除,表面变得致密、均匀。

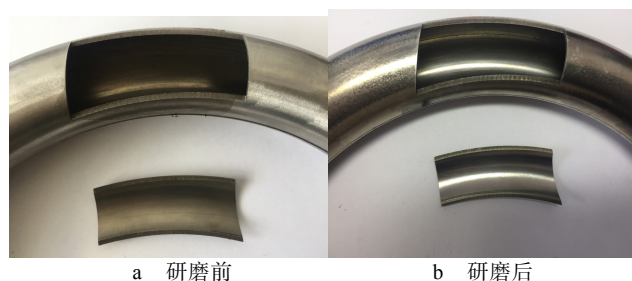


图8 研磨前后工件表面效果对比图

Fig.8 Contrast chart of workpiece surface before (a) and after (b) grinding

## 4 结论

1) 结合了旋转进给电磁场的磁研磨技术能够很

好地去除空间异形水龙头内表面褶皱、凹坑缺陷,降低了管内表面的粗糙度,使表面变得光亮平整,表面质量得到了改善,使用寿命得到了延长,满足工业使用要求。

2) 电磁铁通电顺序的优化实现了磁场回路的闭合,使处在磁场中的磁性磨粒获得了较大的研磨压力,提高了弯管研磨的加工效率,同时使磁场有序排布。磁性研磨粒子能够在可控有序磁场中沿弯管轴线旋转进给轨迹加工,以避免因加工轨迹不可控产生交错划痕使弯管表面质量下降。

3) 在旋转进给电磁场中加入辅助磁极,增强了工件内表面的磨削磁场强度,增强了磨料的自锐更替,避免了磨料在弯管弯折处长时间堆积而造成的工件过磨,保证了弯管磨削加工均匀性。

## 参考文献:

- [1] DU Z W, CHEN Y, ZHOU K, et al. Research on the Electrolytic-magnetic Abrasive Finishing of Nickel-based Superalloy GH4169[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2015, 81(5-8): 897-903.
- [2] 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 Prospectives of Manufacturing and Application of Titanium Alloy Tube in Aviation Industry[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 44-50.
- [3] SHINMURA T, SHINBO Y, IIZUKA T. A New Internal Finishing Process of Non-ferromagnetic Tubing by Applying a Rotating Magnetic Field[J]. The Japan Society for Precision Engineering, 1993, 59(6): 945-951.
- [4] 廖明, 韩冰, 陈燕, 等. 钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 123-131.  
LIAO Ming, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Inner Surface of Titanium Alloy Tube by Electrochemical Magnetic Abrasive Compound Finishing[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 123-131.
- [5] 邓超, 韩冰, 陈燕. 磁研磨法对钛合金弯管内表面的抛光研究[J]. 航空制造技术, 2015(3): 61-63.  
DENG Chao, HAN Bing, CHEN Yan. Study of Inner Surface Polishing of Titanium Alloy Elbow Pipe by Magnetic Abrasive Finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(3): 61-63.
- [6] 陈燕, 张广彬, 韩冰, 等. 磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 131-137.  
CHEN Y, ZHANG G B, HAN B, et al. Experimental Investigation of Magnetic Abrasive Finishing for Super

- Precision Polishing of Inner Surface of the Ceramic Tube[J]. Tribology, 2015, 32(2): 131-137.
- [7] 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(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.
- [8] SHINMURA T, YAMAGUCHI H. Study on a New Internal Finishing Process of a Non-ferromagnetic Tube by the Application of a Linearly Traveling Magnetic-field-on the Process Principle and the Behaviors of Magnetic Finishing Tool[J]. International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1994, 28(1): 29-34.
- [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, 26(6): 814-817.  
HAN Bing, LIU Li-xin, CHEN Yan. Optimization of Process Parameters for Machining in Ternal Surface of Elbow by Magnetic Abrasive Method[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 814-817.
- [10] 陈燕, 周锟, 牛凤丽, 等. 航空发动机整体叶盘磁力研磨光整实验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2323-2330.  
CHEN Yan, ZHOU Kun, NIU Feng-li, et al. Aeroengine Blisk Magnetic Abrasive Finishing Experiment[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30 (10): 2323-2330.
- [11] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Study on a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining(2nd Report, Effects of Magnetic Field Distribution on Magnetic Force Acting on Magnetic Abrasives)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1994, 60(578): 3595.
- [12] YAMAGUCHI H, SRIVASTAVA A K, TAN M A, et al. Magnetic Abrasive Finishing of Cutting Tools for Machining of Titanium Alloys[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2012, 61(1): 311-314.
- [13] 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.
- [14] ZOU Y H, SHINMURA T. Study on Magnetic Field Assisted Machining Process Using Magnetic Machining Jig-application to Internal Finishing of Thick Stainless Steel Tubing[J]. Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 2004, 48(8): 444.
- [15] 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 SU304 Tubing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 187-191.
- [16] TIAN Lu-lin, YANG Xiao-ping, LI Yan. Study of Analytical Magnetic Force Model for Permanent Magnetic and Permanent Magnetic Bearings[J]. Tribology, 2008, 28(1): 73-77.
- [17] 孙岩, 陈燕, 兰勇. 磁力研磨法在航空密封圈模具研磨抛光中的应用[J]. 制造技术与机床, 2014(7): 37-40.  
SUN Yan, CHEN Yan, LAN Yong. Application of Magnetic Abrasive Finishing in the Mould of Aviation Sealing Ring[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2014(7): 37-40.
- [18] KANG J, YAMAGUCHI H. Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing Using a Multiple Pole-tip System[J]. Precision Engineering, 2012, 36(3): 510-516.