

航空发动机钛合金导管内表面 精密研磨试验研究*

陈 燕,李龙邦,曾加恒,康 璐,韩 冰

(辽宁科技大学机械工程及自动化学院,鞍山 114051)

[摘要] 航空发动机外部导管大都是钛合金弯管,弯管在冷弯过程中产生的内表面缺陷用传统的研磨方法难以去除,是一个技术瓶颈问题。利用磁力研磨加工方法可以实现钛合金弯管内表面的研磨抛光。从航空发动机内部钛合金导管的应用案例出发,解析了磁力研磨钛合金弯管内表面的基本原理,同时分析在设计研磨装置过程中的关键技术问题,在磁场发生源和磁极运动轨迹构成以及磁极形状设计等方面,加以理论解剖和有限元模拟分析,得到了一套较完善的工艺方案,试验结果表明磁力研磨加工方法对弯管内表面缺陷去除起到良好的作用。

关键词:钛合金弯管;磁力研磨;磁极运动轨迹;磁极形状;有限元模拟

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.040



陈 燕

工学博士、教授、辽宁科技大学先进磨削技术研究所所长。从事光整技术与表面完整性控制理论、精密加工与精密测量相关的教学与科研工作。作为首席科学家主持完成了中国人民解放军总装备部下达的国家重点专项研究课题1项;主持国防973科研项目的子课题及省科研项目多项,获得省科技进步三等奖和市科技进步一等奖。获得发明专利和实用新型专利20多项。

在航空发动机外部设有数以百计的导管,由于空间狭小,导管都设计成各种曲率半径不同的弯管(图1),而且航空发动机外部导管又是燃油、润滑以及油气混合物的传输载体,连接航空发动机的各个附件,工作可靠性要求较高,实际工况下,弯管处压力载荷分布的不均匀性加剧了弯管的应力集中。针对弯管,国内外学者主要从理论分析、试验研究和数值模拟方面开展了研究工作。

目前,冷弯方式作为一种比较常用的管材弯曲方法,能够满足对塑性成形产品多方面的要求,达到质量轻、强韧度高、耗能低,而且是一种高效且精确的加工工艺,同时可以节省材料,具有较好的成形加工性能。航空发动机外部导管由于曲率的影响,

其受力状况较为复杂,往往是管道的应力集中部位,在制造过程中的冷弯工艺会造成管材应力分布不均现象,在工作运行过程中,复杂的工作环境还会导致其产生应力腐蚀裂纹,造成管道承载能力下降,从而成为管道系统的最薄弱环节之一。参考国外最新的航空发动机所使用的导管材料,大都采用密度较低的钛合金导管,而且管内表面加工质量很高。在我国由于加工工艺的原因,管材在弯曲过程中,在力矩的作用下,外侧受到拉应力作用,材料延展产生微裂纹,在交变应力作用下容易产生微裂纹扩展、断裂,破坏导管的疲劳寿命;内侧受到压应力作用,材料压缩在弯管内侧产生褶皱,内表面粗糙而且伴有浅度裂纹,严重影响了流场的均匀性,引发流量、流速、压力的不稳定性;同时,浅度裂纹还会引发应力集中而产生疲劳断裂,极大地降低了管路的工作可靠性。另外,管路外部在制造和使用过程中常会出现划伤,钛合金材

*基金项目:国家自然科学基金项目(51105187);辽宁省自然科学基金计划重点项目(20170540458);精密/特种加工及微制造技术教育部重点实验室(B类)开放课题基金(B201703)。

料对表面缺口和裂纹非常敏感,划伤部位也容易引起疲劳断裂和损伤,如何修理是一个比较突出的问题^[1]。

由于导管各个部位的曲率半径不同,内表面的抛光处理加工比较复杂,很难达到精度要求,特别是细长弯管内表面,普通工具无法探入,甚至无法加工。以上问题成为航空发动机外部导管的技术瓶颈。第四代发动机的研制过程中就这个问题一直在探索较好的解决方案。经过大量试验研究证明,利用磁研磨法可以较好地解决这个问题。

磁研磨法的特点

如图2所示,磁性研磨粒子沿着磁力线排列并依靠磁力结合在一起

形成“磁粒刷”,通过改变磁力的大小、方向可以使“磁粒刷”变形、分离、再结合。利用“磁粒刷”的这种柔性和磁力线能像X射线一样透过物体的特性,可在眼睛看不见,普通工具无法进入的特殊加工领域完成高精密的镜面研磨加工^[2-9]。在磁场中,由于磁性研磨粒子群所特有的仿形性和柔性加工中可以不受工件表面形状的限制,特别是那些用传统工具无法进入的复杂表面的处理,更显示出它独特的优越性。如弯管的内表面的处理、不规则螺旋轴、微型阶梯轴、自由曲面模具等工件^[10-19]。并且磁研磨法属于柔性加工技术,对加工设备的精度要求不高,具有较高的推广价值。

磁性研磨粒子是由导磁相和研磨相微粉粒子组成,切入工件表面的切痕深度一般不超过 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$,属于微量切削,产生的切屑很小,工件的变质层极薄,残余应力也很小,可以得到的表面粗糙度 R_a 值很小,可以达到 $0.01\mu\text{m}$ 。磁研磨法的加工原理如图2所示。

在分析磁场特性和各种内表面光整加工特点的基础上,对于航空发动机外部的钛合金导管,利用磁力线可以像X射线一样透过非导磁材料的特点,将磁性研磨粒子从端部投放到管内,在外部设置磁极。在外部磁极的作用下,磁性研磨粒子仿形贴在工件表面,完成对弯管内表面的抛光处理,特别是针对导管弯曲所出现的褶皱和微小裂纹部位,经过抛光处理,减少或消除褶皱量和微小裂纹,保证流场的稳定性,提高弯管的工作可靠性^[20-24]。

导管内表面研磨装置设计关键技术

如图3所示,磁研磨加工是在弯管外部配置的永磁铁所产生的强磁场的作用下,使填充在弯管内的磁性磨料沿着磁力线的方向排列起来,吸附在弯管内表面形成磨料刷,并对工件表面产生一定的压力。当由连接在电机的软轴驱动磁极转盘转动,所形成的旋转磁场带动弯管内部的磁性研磨粒子也随之旋转、翻滚,与静止的弯管内表面产生相对运动和摩擦,从而完成对工件表面的抛光、去毛刺的精密光整加工。同时,在机械手的牵引下,磁极转盘与工件之间保持一定的间隙沿着弯管中心线移动,从而实现对整个弯管内表面的光整加工。

根据磁研磨的加工原理,以及研磨加工的工件类型和加工部位,确定磁性研磨装置必须满足以下几个要求:工件固定且定位可靠;磁极旋转速度可调;加工域的间隙可调;加工

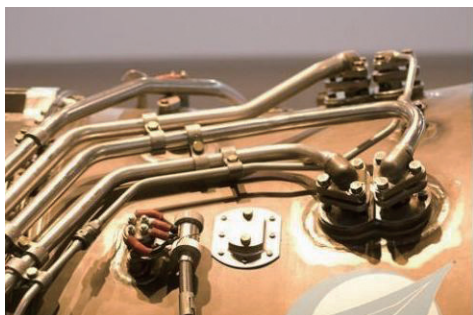


图1 航空发动机外部导管结构图

Fig.1 Aero-engine external tube structure diagram

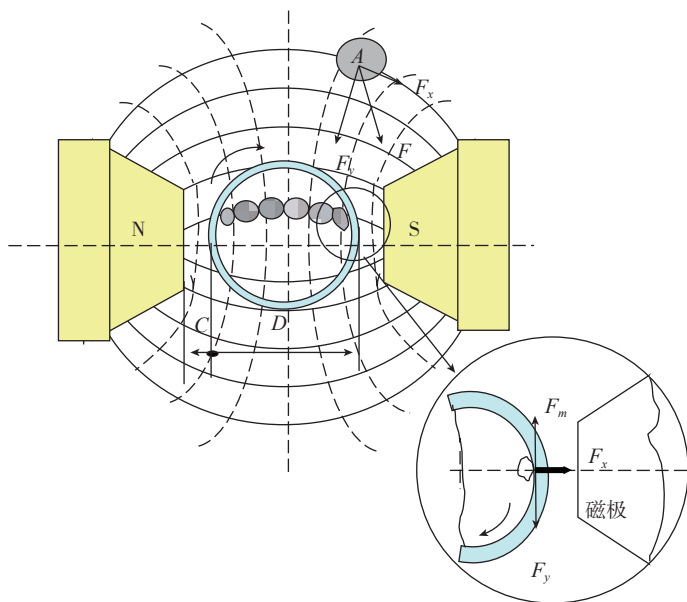


图2 内孔表面磁研磨加工原理

Fig.2 Principle of magnetic abrasive finishing on the surface of the inner hole

区域的磁场强度可调;可沿弯管中心轴线往复移动。

1 磁场发生源设计

磁研磨磁场发生源主要有电磁场和永磁材料两种形式。永磁材料是磁化状态较难改变的磁性材料,它能预先储存磁能,在特定的工作空间产生一个持久的作用磁场,而且,体积小,重量轻。电磁铁可以通过改变电流的大小改变电磁铁的磁场强度,控制方便,但是体积大,重量大。本研究依据航空发动机上弯管的直径和尺寸,选择永磁铁作为磁场发生源。

常用的稀土永磁有稀土钴和钕铁硼,二者都是高剩磁、高矫顽力、高磁能积的永磁材料,但钕铁硼的磁性能高于钴永磁,剩余磁感应强度 B_r 可达 1.47T,磁感应矫顽力 H_{cb} 可达 992kA/m,最大磁能积达 397.9kJ/m³。综合上述各种材料的性能,考虑到旋转磁场光整加工中需要产生强磁场的作用以及磁极的形状,试验装置设计过程中选择 N35 稀土钕铁硼永磁材料,其材料性能如表 1 所示。

在磁力研磨中,研磨压力由磁场产生。改变永久磁石的结构和大小、改变工件与磁极的间隙、改变磁场工作空间的结构等,都可以影响研磨压力的大小。当磁石一定时,研磨压力在一定程度上,取决于磁极头的外形和两磁极之间的空间尺寸,因此磁极头的外形设计就显得非常重要。磁粒研磨是依赖磁极头和工件之间的磁性磨料对工件表面摩擦进行加工,磁极头的形状决定了磁极头与工件之间的磁场梯度的变化。磁极头几何形状一般情况下是根据工件的形状而决定的,要求磁极头形状要使磁通向工件集中,并保证磁性磨料不向工作区域外转移或飞散。设计磁极头的形状非常重要,不仅会使磁场的梯度发生变化,而且还会改变磁性磨料的受力

状态,直接影响到磁研磨加工的效率 and 研磨质量。磁场强度可以通过磁极形状和大小改善,而且磁极间隙可以通过调整螺钉调节。

2 磁极转动机构设计

弯管内表面的加工装置中运动机构有磁极的回转运动^[25]和为实现整个工件内表面加工的沿弯管中心线所走的往复运动。

动力源采用伺服电动机,由计算机控制的伺服驱动器驱动,加工过程中主要克服摩擦损失,额定功率

750W,额定转速 3000r/min。将电动机的回转运动传递给磁极的运动方式很多,考虑到机器人负载以及磁极装置工作稳定性,设计时将伺服电机置于平台底端地面,通过联轴器和驱动软轴将动力送给磁极转动装置,磁极的回转减速运动采用带传动实现,保证转速的稳定可靠,如图 4 所示。

工作过程中磁极的振动直接影响到加工效果和试验数据的可靠性,试验装置的设计中考虑到加工过程中动载荷的影响,初步设计的磁极转

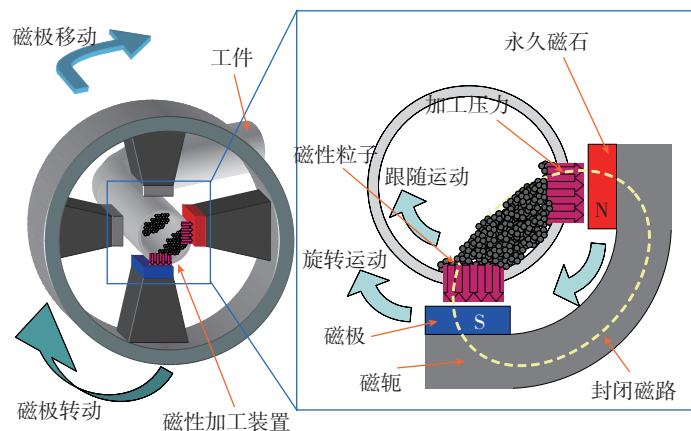


图3 弯管内表面加工原理

Fig.3 Machining principle of the inner surface of the bend pipe

表1 钕铁硼产品性能表

材料牌号	剩磁感应强度 B_r/T (kGs)	矫顽力 $H_{cb}/(kA \cdot m^{-1})$ (kOe)	内禀矫顽力 $H_{ci}/(kA \cdot m^{-1})$ (kOe)	最大磁能积 $BH_{max}/(kJ \cdot m^{-3})$ (MGOe)	工作温度 $T/^\circ C$
N35	1.17~1.21 (11.7~12.1)	860~915 (10.8~11.5)	≥ 955 (≥ 12)	263~279 (33~35)	≤ 80

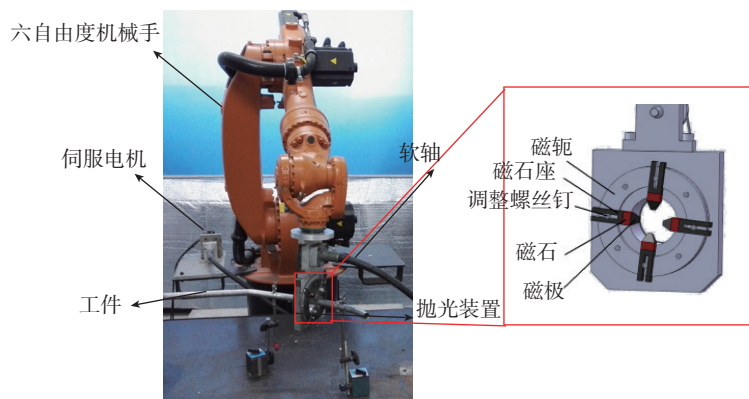


图4 磁极转动机构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the rotating mechanism of the magnetic pole

速不能太高,控制在 1500r/min 以下,加工过程中转速的变化通过伺服驱动器来调速控制。

3 研磨轨迹规划设计

弯管内表面的研磨抛光成功与否,取决于抛光装置的运动轨迹是否连续,即抛光装置与弯管外表面加工间隙固定的情况下能够顺利通过弯管完成研磨抛光,并在加工过程中抛光装置与弯管外表面不出现干涉。所以机械手的运动轨迹成为抛光弯管内表面重要条件。

在对空间弯管轨迹确定时,首先要对弯管的中心线进行确定,即通过测量弯管外表面轮廓线,生成外轮廓空间点云,通过对点云进行数据处理,删除奇异点,对点云进行拟合生成工件外部的轮廓线,然后使用外轮廓线截面相交的方法生成该工件的中心线。将空间弯管的中心线进行等步长点化,即可获得此时机械手臂每步运动的位置坐标,通过对位置坐标的齐次转换,将工件坐标系到工具坐标系进行转化,最终可确定机械手的位置与姿态如图 5 所示。

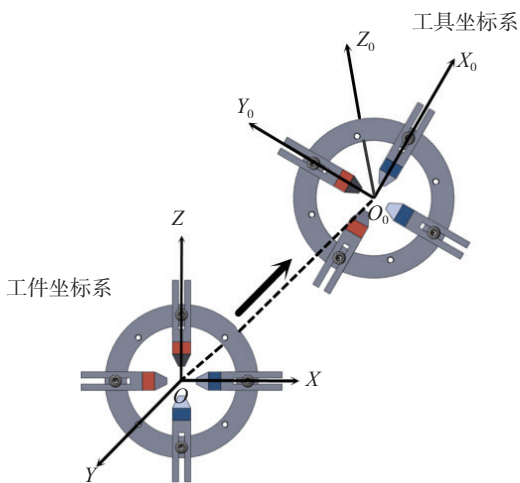


图5 机械手位姿转化图

Fig.5 Manipulator position transformation diagram

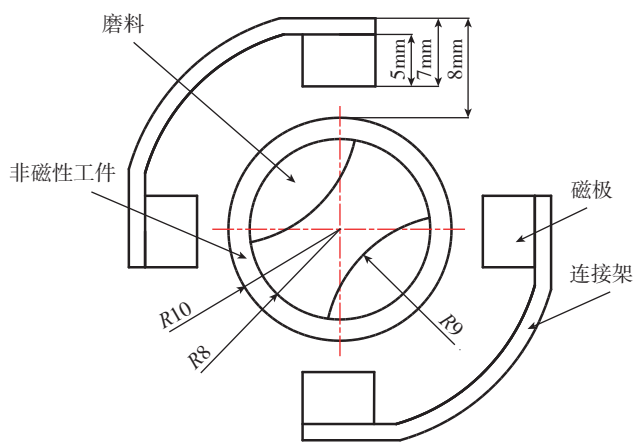


图6 弯管内表面加工模型

Fig.6 Machining model of inner surface of bend pipe

4 磁回路设计

设定弯管工件材料是钛合金(非磁性工件),磁极配置在弯管工件的外部,其他各部位具体尺寸如图 6 所示。

本研究通过改变磁极形状,分别用 ANSYS 软件进行静态二维有限元模拟,进而对不同磁极形状下的磁力线、磁场强度进行对比,选择最优方案。下面以规则的方形磁极为例建立模型,如图 7 所示。

对模型中各种材料设置属性,具体见表 2 所示。

对面积进行网格划分时,首先对磁极部分进行控制,将每个磁极的分别分割为 20 份,然后采用映射法对磁极进行映射划分,对其余部分面积采用自由划分方法,生成有限元模型如图 8 所示,整体划分网格完成后共

表2 材料属性及单元类型

材料	材料号	导磁率 / ($H \cdot m^{-1}$)	矫顽力 / ($A \cdot m^{-1}$)	单元号	单元类型
钕铁硼磁极	1	5000	8.7×10^5	1	PLANE13
空气	2	1.0	—		
铁架	3	2000	—		
Fe+SiC 磨料	4	2500	—		
钛合金工件	5	1.0	—		

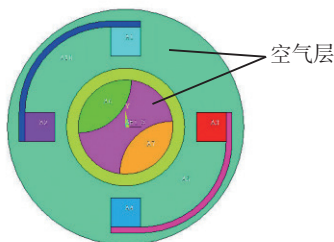


图7 几何模型图

Fig.7 Geometric model diagram

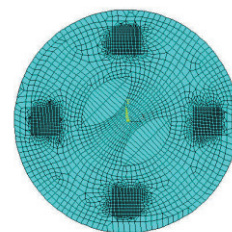


图8 网格划分单元

Fig.8 Grid division unit

生成 3782 个单元,3842 个结点。

经过 ANSYS 软件的有限元分析和计算,本模型中得到磁力线分布图、磁场强度分布图,如图 9、图 10 所示。

从图 9 可以看出,磁力线集中在在两对磁极附近,磨粒沿着磁力线形成两个对称磁刷,提高了加工效率;从图 10 可以看出磁极附近磁场强度较大,工件中心处磁场强度较小,磨粒在磁场中的受力较大,说明加工效果良好。将磁极形状改变为如图 11 所示 3 种情况,并分别进行有限元分析。

各种形状磁极所形成的磁力线见图 12 所示。

各种形状磁极所形成的磁场强度结果对比如图 13 所示。

从图 12 看出,磁极开槽后,沿着圆周方向磁阻发生变化,磁力线从磁阻小的地方通过,因而,在磁极两端磁力线比较密集,磁刷集中在磁极两端附近。

从图 13 的对比结果进行分析得知,开槽后磁极两端磁场强度峰值增大,尤其当开三角形槽时磁场强度最大值最大,达到 $3.59 \times 10^6 \text{ A/m}$,因而磨粒在磁场中的受力也较大。尽管由于开槽会引起加工面积减少,但磁极开槽引起的磁场不均匀性有助于改善加工效果和加工效率。

试验研究

根据以上的分析做出试验装置并进行试验,试验条件如表 3 所示。磁力研磨 15min 后,钛合金导管内表面纹理如图 14 所示。通过比较看出,由于磁力研磨法本身存在柔性以及尖点效应,磨粒会随着弯管的内表面进行抛光并将表面突起部分优先去除,使波峰被抹平与波谷高度一致,表面加工纹理得到明显改善。内表面变得更加均匀细致,能够基本消除湍流、振动等问题,使其使用性能和使用寿命得到提高。弯管内表面粗

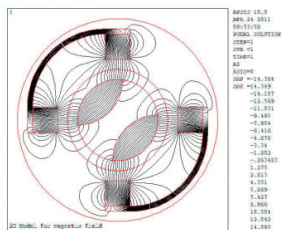


图9 磁力线

Fig.9 Magnetic line of force

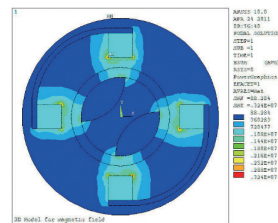


图10 磁场强度

Fig.10 Magnetic field strength

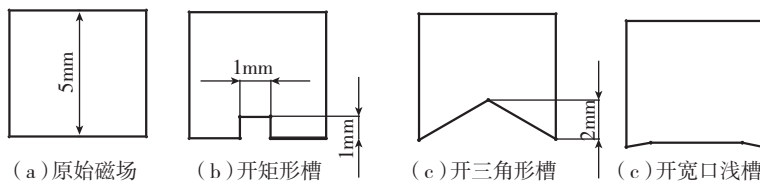


图11 设计磁极的各种形状

Fig.11 Design the various shapes of magnetic pole

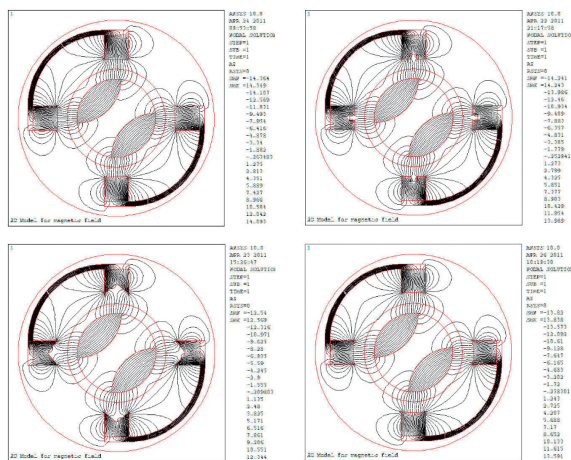


图12 各种状态的磁力线对比结果

Fig.12 Contrast results of magnetic line of force in various states

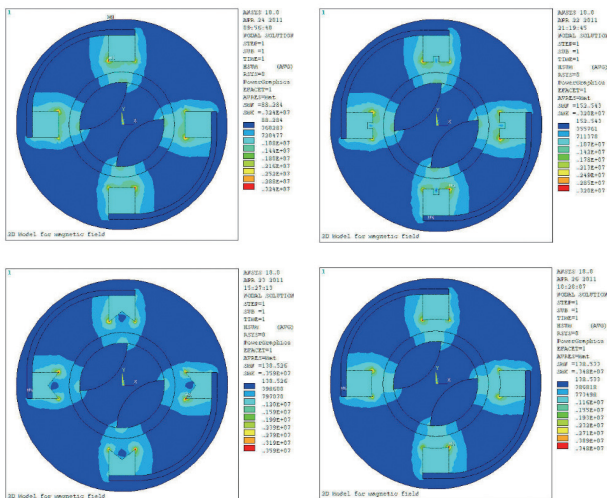
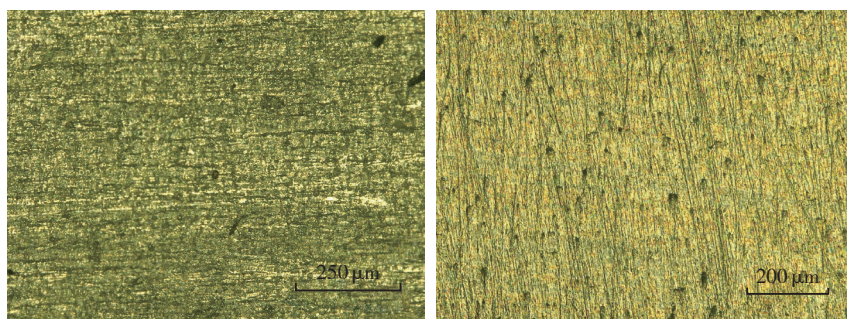


图13 弯管磁场强度对比结果

Fig.13 Contrast results of magnetic field strength in a curved pipe

表3 试验条件

名称	参数
工件	钛合金 Ti8 ($\Phi 20\text{mm}$, 壁厚 1mm)
磨粒粒径	200 μm , 5g
磁极形状	三角形
磁极间隙	2mm
润滑油	5mL
磁极转速	800r/min
加工时间	15min



(a) 研磨前钛合金管内表面纹理

(b) 研磨 15min 后钛合金管内表面纹理

图14 研磨前后弯管内表面纹理变化情况

Fig.14 Microstructure changes of workpiece surface before and after grinding

糙度 R_a 值也由 $0.33 \mu\text{m}$ 降到 $0.1 \mu\text{m}$ 以下。

结论

(1) 针对航空发动机外部弯管内表面抛光加工难题,利用旋转磁场带动管内部的磁性磨粒旋转与工件表面产生相对运动,可以实现去除弯管内表面缺陷的目的。

(2) 在空间有限条件下,使用钕铁硼永磁铁作为磁场发生源,利用 6 自由度机械手可以实现弯管加工所需的运动轨迹,磁极开槽可以提高研磨效率。

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 Zhiqiang, YANG He, ZHAN Mei, et al. Development of titanium alloy tube and its application in the field of aviation and its prospect [J]. Journal of Plastic Engineering,

2009, 16(4): 44-50.

[2] 韩冰, 邓超, 陈燕. 球形磁铁在弯管内表面磁粒研磨中的应用[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.

[3] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁粒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 Lixin, CHEN Yan. Optimization of processing parameters of inner surface of bending pipe by magnetic particle grinding method[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 814-817.

[4] 陈燕, 张广彬, 韩冰, 等. 磁粒研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的实验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 131-137.

CHEN Yan, ZHANG Guangbin, HAN Bing, et al. Experimental research on ultra precision polishing technology of inner surface of ceramic tube by magnetic particle grinding method[J]. Tribology, 2015, 35(2): 131-137.

[5] CHEN Y, ZHANG M M, LIU Z Q. Study on sintering process of magnetic abrasive

particles[J]. Advanced Materials Research, 2011, 337: 163-167.

[6] 高玉龙. 磁粒研磨光整加工及磁性磨料制备技术的研究与应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.

GAO Yulong. Research and application of magnetic abrasive finishing and magnetic abrasive preparation[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009.

[7] 尹韶辉. 磁场辅助超精密光整加工技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2009.

YIN Shaohui. Magnetic field assisted ultra precision finishing technology[M]. Changsha: Hunan University Press, 2009.

[8] 李学全, 刘仁茂, 胡德金, 等. 磁性磨粒制备技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1999(5): 20-22.

LI Xuequan, LIU Renmao, HU Dejin, et al. Magnetic abrasive particle preparation technology[J]. Diamond and Abrasive Engineering, 1999(5): 20-22.

[9] 李学全, 李骏. 磁力研磨技术[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(1): 53-54.

LI Xuequan, LI Jun. Magnetic abrasive grinding technology[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2000, 29(1): 53-54.

[10] 陈燕, 巨东英. 磁研磨法对微型阶梯轴表面的抛光处理[J]. 模具制造, 2004(12): 48-50.

CHEN Yan, JU Dongying. Polishing treatment of micro stepped shaft surface by magnetic abrasive grinding[J]. Die & Mould Manufacture, 2004(12): 48-50.

[11] 陈燕, 巨东英. 磁研磨法在复杂形状轴类零件加工中的应用[J]. 机械制造, 2005, 43(3): 53-55.

CHEN Yan, JU Dongying. Application of in mechanical manufacturing complex shape shaft machining in magnetic grinding method[J]. Machinery, 2005, 43(3): 53-55.

[12] 陈燕. 磁研磨法在自由曲面模具型腔抛光中的应用[J]. 模具制造, 2004(7): 61-63.

CHEN Yan. Application of magnetic abrasive method to mould cavity polishing of free-form surface[J]. Die & Mould Manufacture, 2004(7): 61-63.

[13] 陈燕, 巨东英. 应用磁研磨法对细长管内表面的抛光处理[J]. 模具制造, 2004(10): 48-50.

CHEN Yan, JU Dongying. Polishing treatment of inner surface of slender tube by magnetic grinding[J]. Die & Mould Manufacture,

2004(10): 48-50.

[14] 孙奕澎. 基于五自由度并联机床的曲面磁力研磨研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.

SUN Yipeng. Research on the surface magnetic abrasive grinding based on five degrees of freedom parallel machine tool[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004.

[15] 王春仁. 基于单片机的旋转磁场磁力研磨加工的计算机仿真与系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

WANG Chunren. Computer simulation and system design of magnetic force grinding of rotating magnetic field based on single chip microcomputer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.

[16] 张雷, 周锦进. 磁力研磨加工技术[J]. 电加工, 1998(1): 38-43.

ZHANG Lei, ZHOU Jinjin. Magnetic abrasive machining technology[J]. Electrical Processing, 1998(1): 38-43.

[17] 贾世福, 姜阳. 不锈钢内外圆磁力研磨的试验研究[J]. 磨床与磨具, 1999(2): 41-42.

JIA Shifu, JIANG Yang. Experimental research on internal and external magnetic abrasive grinding of stainless steel[J]. Grinder and Abrasives, 1999(2): 41-42.

[18] 王慧敏, 铁维麟. 内圆磁力研磨新工艺的试验研究[J]. 机械设计与制造, 1999(2): 48-49.

WANG Huimin, TIE Weilin. Experimental study on the new technology of inner circle magnetic abrasive[J]. Machinery Design & Manufacture, 1999(2): 48-49.

[19] 王琰, 百万民, 刘宾. 磁极表面开槽对磁力研磨加工影响的数值分析[J]. 机械工程与自动化, 2005(6): 39-41.

WANG Yan, BAI Wanmin, LIU Bin. Numerical analysis of the influence of magnetic pole surface slotting on magnetic abrasive machining[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2005(6): 39-41.

[20] 百万民, 陈显文, 王琰, 等. 磁屏蔽对内圆磁力研磨加工影响的研究[J]. 机械制造, 2005, 43(6): 42-44.

BAI Wanmin, CHEN Xianwen, WANG Yan, et al. Research on the influence of magnetic shielding on the grinding of internal magnetic force[J]. Machinery, 2005, 43(6): 42-44.

[21] KUROBE T, YAMADA Y, YAMAMOTO K. Development of high speed slurry flow finishing of the inner wall of stainless steel capillary: Polishing and gas flow characteristics of various size of capillaries[J]. Precision Engineering, 2001, 25(2): 100-106.

[22] 杨建桥, 班朝磊. 不锈钢管内表面电化学抛光技术的研究[J]. 陕西科技大学学报, 2003(21): 29-31.

YANG Jianqiao, BAN Chaolei. Study on the electrochemical polishing technology of inner surface of stainless steel tube[J]. Journal of Shaanxi University of Science, 2003(21): 29-31.

[23] 卑喜敏, 王劲松, 张同. 钛合金磨削加工技术[J]. 硅谷, 2012(18): 34-35.

BEI Ximin, WANG Jinsong, ZHANG Tong. Titanium alloy grinding technology[J]. Silicon Valley, 2012(18): 34-35.

[24] WANG Y, HU D J. Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing[J]. Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 43-49.

[25] 王艳, 胡德金. 不锈钢物流管道内表面磁力研磨的回转磁场设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 102-106.

WANG Yan, HU Dejin. Design of the magnetic field of the inner surface of the stainless steel logistics pipeline[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 102-106.

通讯作者: 陈燕, E-mail: laochen412@gmail.com。

Experimental Study on Precision Grinding of Titanium Alloy Conduit Inner Surface in Aero-Engine

CHEN Yan, LI Longbang, ZENG Jiaheng, KANG Lu, HAN Bing

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

[ABSTRACT] Most of the external tubes of aero-engines are titanium alloy bends. The inner surface defects caused by the bending process in the cold bending process are difficult to be removed by traditional grinding methods, which is a technical bottleneck. The grinding and polishing of the inner surface of the titanium alloy elbow can be achieved by the magnetic abrasive finishing. From the case of the application of the titanium alloy catheter inside the aero-engine, the basic principle of the inner surface of the magnetic grinding titanium alloy elbow is analyzed. At the same time, the key technical problems in the process of designing the grinding device is analyzed. Through theoretical anatomy and finite element simulation analysis of the magnetic field source and magnetic pole shape and trajectory design, a set of relatively complete process plans is obtained. Experimental results show that the magnetic abrasive machining method has good effect on the internal surface of the elbow defect removal.

Keywords: Titanium alloy elbow; Magnetic abrasive finishing; Track of magnetic pole motion; Magnetic pole shape; Finite element simulation

(责编 大漠)