

磁力研磨法去除航空发动机涡轮轴内 表面积碳的试验分析

徐会^{1,2}, 康仁科¹, 刘冬冬², 陈燕²

(1.大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2.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** 解决航空发动机大尺寸涡轮轴内表面积碳去除的难题。**方法** 运用 SEM 分析涡轮轴内壁积碳的表面形貌特征、成分组成, 为积碳去除方法的确定和工艺研究奠定基础。针对涡轮轴的特殊材质和清洗要求, 提出磁力研磨技术去除积碳的方法。通过 Solidworks 和 Workbench 软件分析研磨区域的磁感应强度和磨粒受力情况, 搭建涡轮轴径向添加辅助磁极和数控机床复合的磁力研磨装置, 选取平均粒径为 185、250、375 μm 的磨粒, 在工件转速分别为 600、800、1000 r/min 的条件下进行对比试验。**结果** 在试验中, 当磁性磨料粒径为 250 μm , 工件转速为 800 r/min, 外部磁极与工件外壁的加工间隙为 5 mm, 研磨时间为 60 min 时, 涡轮轴内表面积碳完全去除, 表面粗糙度下降幅度大, 研磨后表面粗糙度 R_a 为 1.47 μm 。**结论** 采用数控磁力研磨设备, 可以有效去除航空发动机大尺寸涡轮轴内表面积碳, 去除效率高, 去除后涡轮轴内表面粗糙度 R_a 达到 1.47 μm , 满足工件使用要求。

关键词: 航空发动机; 大尺寸涡轮轴; 积碳; 磁力研磨; 表面粗糙度

中图分类号: V232.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0336-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.040

Experimental Analysis of Removing the Carbon Deposition by Magnetic Grinding from the Inner Surface of an Aero-engine Turbo-shaft

XU Hui^{1,2}, KANG Ren-ke¹, LIU Dong-dong², CHEN Yan²

(1.Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2.School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the problem of removing the carbon deposition from the inner surface of a large-sized aero-engine turbo-shaft. SEM was used to analyze the micro topography and the components of the carbon deposition to lay a foundation for determining the carbon removal method and process. Considering the special material and cleaning requirements

收稿日期: 2019-05-11; 修订日期: 2019-09-20

Received: 2019-05-11; Revised: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (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)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258); Key Project of Natural Science Foundation of Liaoning Province (20170540458); Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Processing (B201703)

作者简介: 徐会 (1981—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: XU Hui (1981—), Female, Doctoral student, Research focus: precision machining.

通讯作者: 陈燕 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工。邮箱: laochen412@gmail.com

Corresponding author: CHEN Yan (1963—), Female, Doctor, Professor, Research focus: precision machining. E-mail: laochen412@gmail.com

of the turbo-shaft, magnetic grinding technology was proposed to clear carbon deposition. By the means of Solidworks and Workbench, the magnetic induction intensity and the forces on the grinding granules in the grinding area were analyzed. And magnetic grinding equipment which is composed of a CNC and auxiliary poles along the radial direction of the turbo-shaft was set up. Three kinds of average granule diameter, 185, 250, 375 μm , were selected to conduct the comparative experiments under the condition of the rotational speed of the workpiece being 600, 800, 1000 r/min respectively. During experiment, when the granule diameter was 250 μm , the rotational speed of the workpiece was 800 r/min, the grinding time was 60 min, and the machining gap between the external poles and the workpiece surface was 5 mm, the carbon deposition on the inner surface of the turbo-shaft was removed completely with a large removal amount and the surface roughness decreased substantially to Ra 1.47 μm . CNC magnetic grinding equipment can effectively remove the carbon deposition from the inner surface of a large-sized aero-engine turbo-shaft with high efficiency. The surface roughness of the inner surface of the turbo-shaft can reach Ra 1.47 μm which meets the working requirements of the workpiece.

KEY WORDS: aero-engine; large-sized turbo-shaft; carbon deposition; magnetic grinding; surface roughness

航空发动机涡轮轴是航空发动机低压涡轮部分的重要组成零件,也是航空发动机主要的传动部件。航空发动机涡轮轴的结构具有航空发动机大型零部件的共同特点,既有薄壁盘类型部分,也有传动长轴类型部分。在发动机装配要求中,对该类零件的表面洁净度要求较高。航空发动机涡轮轴在高温环境工作过程中,由于表面质量和毛刺等原因,在涡轮轴内表面流动的燃油容易在内表面生成积碳。积碳的产生,导致燃油内掺杂积碳颗粒物,可能使后续的流道堵塞,造成严重影响^[1]。因此,需要定期对航空发动机涡轮轴进行拆洗,除去积碳或其他杂质。

目前,研究人员对积碳的机理和去除方法进行了一系列研究。蒋晶等^[2]分析了发动机积碳产生的影响与危害问题,介绍了积碳产生机理,提出了高纯氢除积碳处理技术及试验效果。柳炽伟等^[3]分析了汽油发动机气门积碳的成因和积碳形成机理,提出了优化发动机设计和应用中减少积碳生成的措施。王兴等^[4]分析了汽车发动机气门杆上积碳的微观形貌和形成机理,并通过熔盐清洗对积碳进行了有效去除。针对航空发动机涡轮轴,某企业采用强碱溶液浸泡后,人工用砂轮磨削去除积碳。这种清洗积碳的方法效果差、效率低、污染环境、工人工作环境恶劣,且容易对工件表面产生划痕和损伤。由于航空发动机的涡轮轴结构复杂、尺寸较大,最小尺寸为 $\phi 110\text{ mm} \times 930\text{ mm}$,表面的积碳成分复杂,分布范围广,以上所述方法并不适合航空发动机的大尺寸涡轮轴内表面积碳去除,无法满足航空发动机涡轮轴实际生产和维护的需要。

磁力研磨作为一种特种加工方法,具有自适应性高、自锐性强、温升小以及无刀具补偿等优点,被广泛应用在空间弯管、复杂曲面、内外圆表面光整加工等方面。陈燕等^[5]提出利用六自由度机械手臂驱动 N-S-S-N 四磁极圆周排布所形成的旋转磁场,完成对 6061 铝合金弯管内表面的光整加工。直管处表面粗糙度 Ra 由 0.48 μm 下降到 0.12 μm ,管件弯折处表面粗糙度由 0.67 μm 降低至 0.13 μm ,加工后液压导管

的使役可靠性显著提高。韩冰等^[6]针对普通磁力研磨超硬精密陶瓷管内表面加工效率低且纹理不均匀的问题,采用曲柄滑块振动机构和超声振动机构辅助磁力研磨,通过改变磁粒刷的运动轨迹,实现对陶瓷管内表面的高效精密加工。吴金忠等^[7]通过利用低频交变磁场下产生的变动磁力,改善传统磁力研磨加工中磁力刷变形、磨料结块、磨料利用率低等问题,实现平面超光滑、纳米级加工。Pandey 等^[8]研究了超声波振动辅助磁力研磨 UAMAF(Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing) 技术的加工机理,通过引入超声波振动辅助磁力研磨工艺进行抛光,使表面加工效率得到了显著提升。

鉴于上述情况,本文通过分析航空发动机涡轮轴内表面积碳的形貌和成分,并根据涡轮轴的材料和结构特性,采用磁力研磨的方法对涡轮轴内表面积碳进行去除加工。

1 积碳表征

1.1 微观形貌分析

在德国蔡司场发射 SIGMA HD 扫描电子显微镜不同的放大倍数下,积碳表面的微观形貌如图 1 所示。图 1a 中,可以清晰地看出,积碳以黑色块状和片状结构为主,表面分布大量的裂纹。进一步放大可以看出,在块状结构及积碳上,其表面凹凸不平,分布大量微小裂纹,并且不均匀地分布着不规则形状的白色发亮固体颗粒,如图 1b、c 所示。放大到 3000 倍(如图 1d 所示),颗粒之间是无规则状、互相镶嵌地堆积在一起。由于形状各异,分布不规则,在表面沉积的过程中出现间隙,因而形成缝隙和凹坑。无规则的缝隙和凹坑增加了新的积碳附着和沉积的机会,从而使积碳结焦逐渐恶化^[9]。因此,在制造和清洗涡轮轴的时候,应降低其表面粗糙度,从而抑制积碳的生成。

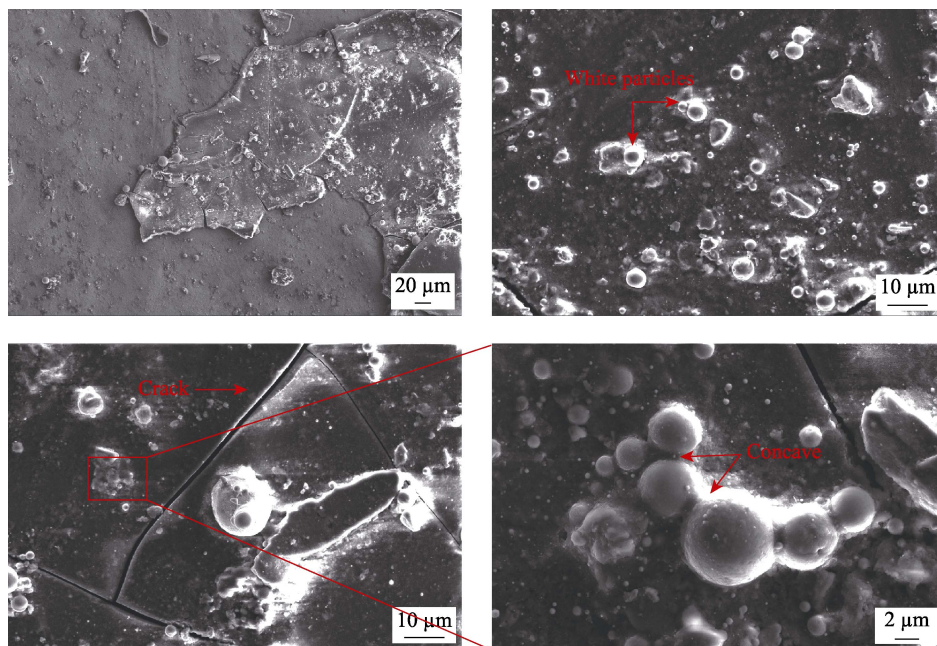


图1 积碳的微观形貌

Fig.1 Micro topography of carbon deposition

1.2 积碳成分

通过扫描电镜检测积碳的元素分布,如图2所示。积碳元素构成比较复杂,分布也不均匀。其中,C和O元素含量很高,特别是C元素,质量分数达到65%。根据文献[10]可知,此时的碳和石墨具有相同的六边形结构。这表明积碳的形成是以C和O元素为主的芳烃和环烷烃类物质在涡轮轴内表面经过氧化→裂化→热解→焦化→聚合等一系列过程形成的。同时,积碳成分中含有Al、Si、Ti等金属元素,和涡轮轴基体材料所含元素相同,说明在高温环境下,燃料在裂解时,积碳在涡轮轴内表面形成,并沉积。随着反应的不断进行,积碳逐渐沉积,并向基体的金属层渗透,导致基体表层中的部分金属原子迁移到积碳中。

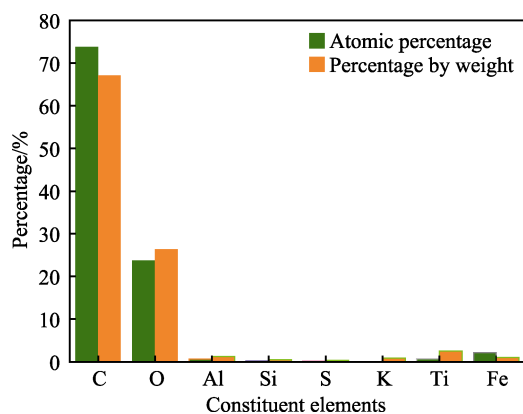


图2 积碳所含元素含量

Fig.2 The carbon content of the containing element

2 磁力研磨法去除积碳

2.1 基本原理

磁力研磨法加工机理如图3所示。可以看出,涡轮轴内腔放置包裹有磁性磨料的圆柱形辅助磁极,与涡轮轴外部的永久磁铁形成闭合的磁回路^[11]。在磁场作用下,磁性磨料被磁化形成有一定刚性的“磨粒刷”,以一定的压力贴附在涡轮轴内表面。涡轮轴转动的同时,外部磁铁沿着涡轮轴轴向往复运动,两种运动的叠加,使涡轮轴内腔的磁性磨粒追随磁极在工件内表面做螺旋状复合运动的同时滑擦工件内表面,从而达到研磨抛光的效果。辅助磁极受到了磁场力、摩擦力和离心力的作用,自身还做旋转运动。辅助磁极的运动带动磁性磨料产生自发搅拌现象,避免了磁性磨料的堆积,有利于磨粒刷的变形和磨削刃的更替,研磨质量和加工效率均得到了提高^[12]。

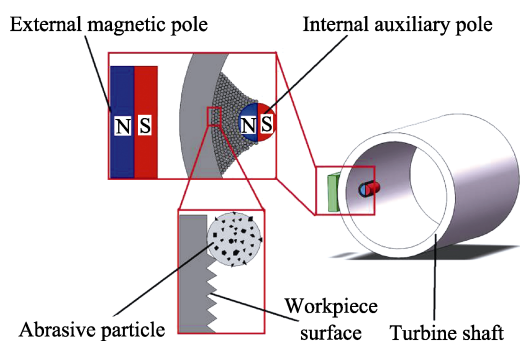


图3 磁力研磨机理

Fig.3 Schematic diagram of mechanism of magnetic grinding

2.2 研磨效率影响因素

研磨抛光中的普林斯顿公式为^[13-14]:

$$R = kvpt \quad (1)$$

式中: k 为磁性研磨粒子与加工有关的比例常数; R 为磨粒刷在加工区域处的材料去除量, g ; v 为磁力研磨粒子与工件之间的相对速度, m/s ; p 为研磨压力, Pa ; t 为研磨时间, s 。

将处于平衡状态的磨粒介质划分为 n 个等元, 试图求得该过程的材料去除量。第 i 个单元如图 4 所示, h_i 为介质单元厚度, $\theta \cdot h_i$ 为作用面积。相对转速 $v = \omega \cdot r$, ω 为工件的角速度, r 为工件半径。可得如下公式:

$$\partial R = \frac{F_i}{r \cdot \partial \theta \cdot h_i} \cdot k \cdot \omega \cdot r \cdot t \cdot \frac{\partial \theta}{2\pi} \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 个单元加工区域处的研磨压力, 并且与磁感应强度 B_i 和接触面积成正比; $\frac{\partial \theta}{2\pi}$ 是考虑分布材料在整个圆周上的移动。

第 i 个单元的去除量为:

$$\partial R = B_i \cdot k \cdot \omega \cdot r \cdot t \cdot \frac{\partial \theta}{2\pi} \quad (3)$$

进一步整理得出:

$$R = \sum_i^n B_i \cdot k \cdot \omega \cdot r \cdot t \cdot \frac{\partial \theta}{2\pi} \quad (4)$$

$$\partial \theta = \frac{|\theta_{i_1} - \theta_{i_2}|}{n} \quad (5)$$

$$R = \frac{|\theta_{i_1} - \theta_{i_2}|}{2\pi n} \cdot k \cdot \omega \cdot r \cdot t \cdot \sum_i^n B_i \quad (6)$$

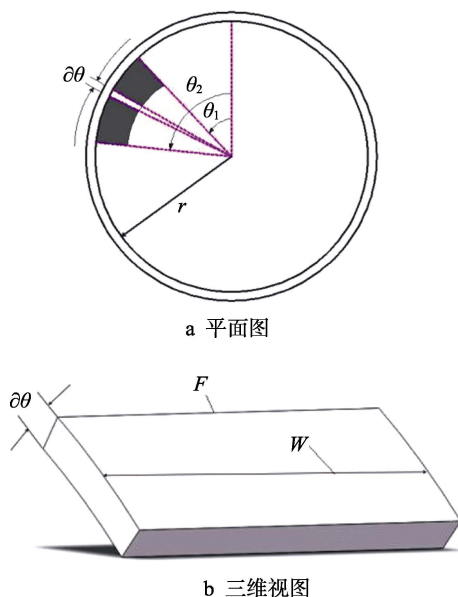


图 4 平衡态介质第 i 单位示意

Fig.4 Schematic diagram of element i of the media in the equilibrium state: a) floor plan; b) 3D view

R 为磁力研磨材料去除量, 它与磁感应强度、磁导率、磁铁几何形状、工件与磁性磨粒的相对转速、研磨时间等因素有关^[15]。由式 (6) 得知, 增加磁力研磨过程中材料去除量的方法有两种: 一是提高加工区域的磁感应强度; 二是增加工件内表面与磁性磨料之间的相对运动速度。当工件的转速太高, 离心力大于磁力时, 磁性磨料会飞离工作区域而无法参加研磨, 所以转速受到限制。在工件内腔添加辅助磁极后, 内外磁铁形成封闭磁回路, 可以加大加工区域的磁感应强度, 从而提高材料去除量和研磨效率^[16]。

2.3 磁场仿真对比分析

为了分析磁性磨粒在磁场中的受力情况, 需要对比工件内添加辅助磁极前后磁感应强度的变化情况, 利用 Maxwell 磁场模拟软件进行有限元分析。依据辅助磁极的几何尺寸, 在模拟结果中, 截取涡轮轴下内表面中心线的线段, 对比分析磁感应强度, 如图 5 所示。未加辅助磁极时, 研磨区域处的最高磁场强度最大为 210 mT, 最低为 190 mT。在涡轮轴内部添加辅助磁极后, 加工区域的磁感应强度提高至 270~330 mT 之间, 整体提高了 1.4 倍左右。磁感应强度增加, 研磨压力增大, 研磨效率得到大大提高^[17]。

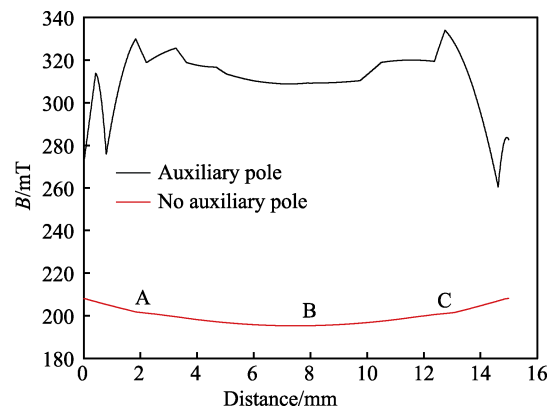


图 5 磁感应强度曲线

Fig.5 Curves of magnetic induction intensity

选择粒径为 250 μm 的磁性研磨粒子作为分析对象, 通过 Solidworks 软件建立磁性研磨粒子和涡轮轴模型, 并导入 Workbench 分析软件中, 采用多区域网格划分方法进行网格划分。通过计算, 可得磁性研磨粒子的应力。添加辅助磁极前后, 单个磁性研磨粒子受到的法向压应力如图 6 所示。由图 6 可知, 和未添加辅助磁极相比, 添加辅助磁极后, 磁性磨粒的法向压应力得到很大提高。这是因为在闭合磁回路中, 由于磁极间距的减小, 磁感应强度增大, 所以磁场力, 即磁性磨粒的法向压应力也增强。在工件转速恒定的条件下, 添加辅助磁极后的磨粒由于所受法向压应力增大, 不容易被甩飞, 增大了切向切削应力, 研磨效率得到大幅提高。

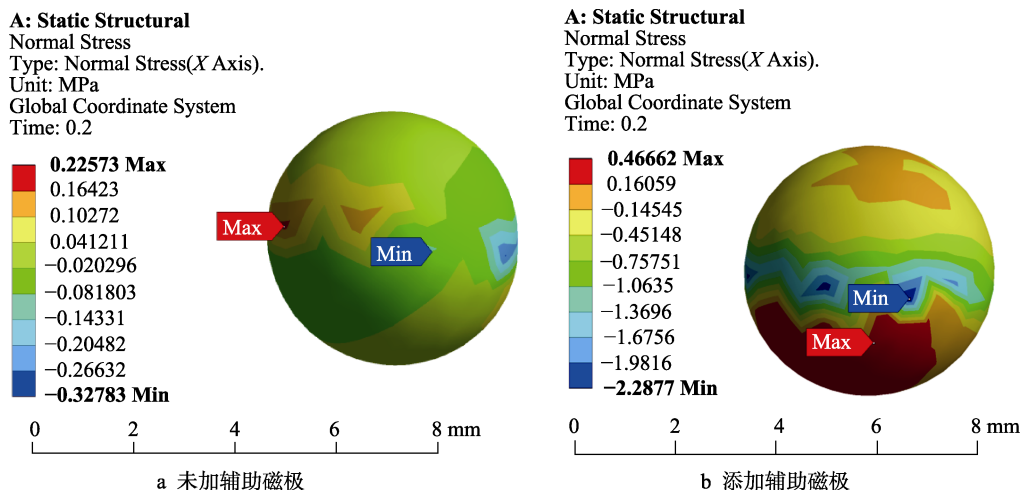


图 6 磁性研磨粒子法向正压力对比

Fig.6 Contrast diagrams of normal positive pressure of magnetic abrasive particles:
a) without auxiliary poles; b) with auxiliary poles

3 试验研究

3.1 试验装置及条件

以航空发动机钛合金涡轮轴为研究对象,磁力研磨去除涡轮轴内表面积碳试验装置如图 7 所示。试验中所用永磁铁为强磁性材料钕铁硼。涡轮轴内部放置磁性磨料、研磨液和辅助磁极,两端分别由卡盘和顶尖固定在数控机床上。外部磁极固定于刀架上,且与涡轮轴保持 5 mm 的加工间隙。在启动数控机床带动工件旋转的同时,外部磁极随刀架做轴向平移往复运动,从而实现了对涡轮轴内表面积碳的去除。

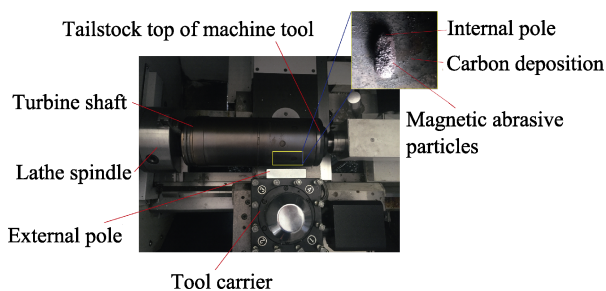


图 7 磁力研磨试验装置

Fig.7 Picture of the magnetic grinding tester

影响研磨效果的因素有磁性磨粒的粒径、工件转速、外部磁极轴向运动速度、磁性磨料的填充量以及外部磁极与工件外壁的加工间隙等^[18-20]。其中,提高外部磁极轴向运动速度可以有效地提高工件表面质量,但速度不是越高越好。根据工件的尺寸及以往试验经验,确定外部磁极的轴向速度为 2 mm/s。磁性磨料的填充量一般为覆盖涡轮轴体积的 2/3 为最佳。填充量过多,部分磨料就会因受到的磁场力小于离心力的作用而在运动中溢出槽外,产生飞散,同时也不利于磁性磨料的自我搅拌更新。填充量过少,实际参与切削的磨料数量过少,最终导致切削能力下

降,工件表面粗糙度降低的速度变慢。外部磁极与工件外壁的加工间隙影响磁场力的大小,一般取 2~3 mm。考虑到涡轮轴的变径和凸起,确定加工间隙为 5 mm。

为达到去除涡轮轴内表面积碳的目的,同时提高工件的表面质量,优化工艺参数,实验采用的主轴转速分别为 600、800、1000 r/min,磁性研磨粒子粒径为 185、250、375 μm ,每 5 min 记录一次,且每个点测量 10 次,取平均值。由于涡轮轴原始内表面积碳层很厚,表面质量很差,无法测量表面粗糙度,所以在研磨 10 min 后开始检测。试验所用的磁性研磨粒子采用烧结法自制,由 Al_2O_3 和铁粉按照质量比为 1:2 均匀混合,加入粘结剂后,经压制、干燥、高温烧结、破碎和筛分得到。其中烧结炉烧结温度 1200 $^{\circ}\text{C}$,烧结时间为 3 h。试验参数见表 1。

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Test parameters

Parameters	Values
Workpiece material	Titanium alloy
Auxiliary magnetic pole	$\phi 10 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$
External magnetic pole	50 mm \times 30 mm \times 20 mm
Workpiece feed	2 mm/s
Rotational speed	600, 800, 1000 r/min
Magnetic grinding particles	185, 250, 375 μm
Grinding fluid	Water-based grinding fluid
Grinding time	60

3.2 工件转速对研磨效果的影响

在添加辅助磁极的试验装置中,工件转速分别为 600、800、1000 r/min 的工况下,涡轮轴内表面粗糙度和材料去除量的变化曲线如图 8 所示。分析可知,随着工件转速的增加,单位时间内磁性磨粒的更替更

加频繁,磁性磨粒与工件表面摩擦更激烈。切削次数增加,工件的材料去除量和表面粗糙度变化明显。

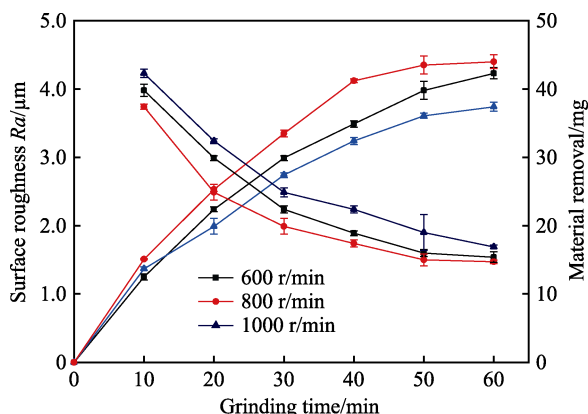


图 8 不同转速对工件表面粗糙度和材料去除量的影响
Fig.8 Influence on surface roughness and material removal amount of workpiece by different rotational speeds

如图 8 所示,当工件转速为 800 r/min 时,工件内表面的研磨质量最好,600 r/min 次之,1000 r/min 最差。这是因为工件转速是影响研磨效果的重要因素之一。转速提高,磁性磨粒受到的离心力增大,接触到工件本身的研磨压力增强,表面粗糙度下降趋势较快,工件材料的去除量增大。当工件的转速过大,反而会使加工效率降低。这是因为磁性磨粒克服磁力产生的向心力而被甩出加工区域,起不到研磨作用。当工件转速过低时,大部分磁性磨粒会聚集在加工区域,起不到研磨工件内表面的作用,表现为粗糙度下降趋势较慢,工件的材料去除量也减少。

3.3 磁性磨料的粒径对研磨效果的影响

为了优化试验参数,确定最佳的磁性磨粒参数,在工件转速为 800 r/min 的试验条件下,选取平均粒径为 185、250、375 μm 的磁性磨粒进行分组试验,对工件表面粗糙度和材料去除量的对比如图 9 所示。在研磨前 30 min 内,三种粒径对应的工件表面粗糙度值下降都很快,并且磁性磨粒粒径越大,对应工件的表面粗糙度下降得越快。这是因为在磁场中,磁性磨粒所受的磁场力与其粒径成正比。磁性磨粒的粒径越大,受到的磁场力越大,对工件表面的切削力也就越大,从而材料去除量越大,粗糙度下降越快。

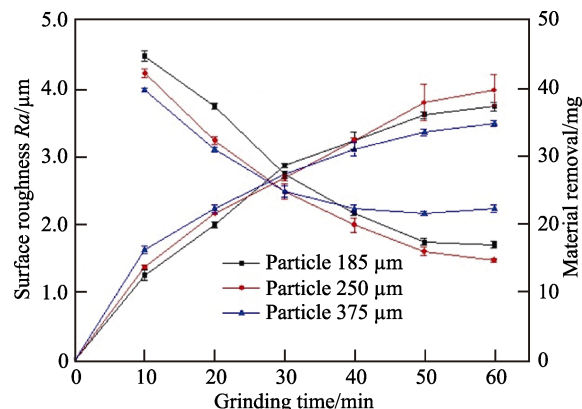


图 9 不同磨粒粒径对工件表面粗糙度和材料去除量的影响

Fig.9 Influence on surface roughness and material removal amount of workpiece by different abrasive particle sizes

研磨 30 min 后,三种粒径对应的表面粗糙度下降缓慢。其中 375 μm 的磨料对应的表面粗糙度下降最慢,并且在研磨后期呈现出表面粗糙度上升的现象。其次是粒径 185 μm 的磨料,粒径 250 μm 磨料对应的表面粗糙度下降最快。这是因为在研磨后期,工件的表面粗糙度趋于稳定,粒径对工件表面粗糙度和材料去除量的影响很大。粒径过大,会导致与工件表面的划擦磨削作用加剧,甚至产生新的划痕;粒径过小,划擦磨削作用不足,研磨效果不明显。同时,三种粒径的材料去除量也发生变化。粒径 375 μm 的磨料的材料去除量最小,粒径 185 μm 的磨料其次,粒径 250 μm 的磨料最大。这是因为在研磨后期,粒径过大的磨粒组成的磨粒刷翻滚更替下降,对工件表面的磨削能力变弱;粒径过小的磨料对表面材料切削力不足,导致去除量下降。因此综合考虑研磨效率和表面质量,当工件转速为 800 r/min 时,确定磁性磨料的平均粒径为 250 μm,研磨效果最佳。研磨 60 min 后,表面粗糙度稳定在 1.47 μm,材料去除量为 39.6 mg。

3.4 辅助磁极对工件研磨后表面形貌的影响

采用日本基恩士生产的 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜进行工件表面形貌观测,添加辅助磁极前后,工件研磨后表面形貌的对比如图 10 所示。图 10a

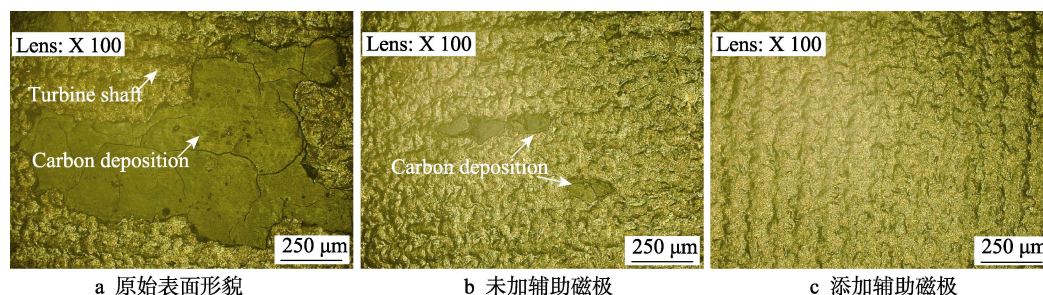


图 10 涡轮轴内表面研磨前后的形貌

Fig.10 Topography of the inner surface of the turbo-shaft before and after grinding:
a) original surface; b) without auxiliary magnetic poles; c) with auxiliary magnetic poles

为研磨前涡轮轴内表面积碳原始表面,可以看出,涡轮轴原始表面凸凹不平,积碳很厚,且不均匀,划痕明显,无法测量表面粗糙度。研磨 60 min 后,未添加辅助磁极的涡轮轴内表面形貌如图 10b 所示。金属基体明显显现,大部分积碳已被去除,但还有少量积碳未去除,表面粗糙度 Ra 为 $2.16\ \mu\text{m}$ 。添加辅助磁极研磨 60 min 后,涡轮轴内表面的形貌如图 10c 所示。工件内表面完全呈现出金属光泽,积碳完全去除,表面粗糙度为 $1.47\ \mu\text{m}$,满足研磨后表面粗糙度小于 $1.6\ \mu\text{m}$ 的要求。

4 结 论

1) 针对航空发动机大尺寸涡轮轴内表面积碳高效低损伤去除问题,提出了磁力研磨技术方案。在磁场力的作用下,磁性研磨粒子群翻滚变形,同时压附工件表面,从而完成对工件表面的光整加工,达到去除积碳的目的,提高了工件表面质量,满足工件使用要求。

2) 利用 Maxwell 磁场模拟软件分别对添加辅助磁极的工件内表面的磁感应强度进行有限元分析,利用 Solidworks 和 Workbench 软件对添加辅助磁极前后的单个磨粒进行受力分析。结果验证了添加辅助磁极后,切削区域的磁感应强度增大,切削力增大,材料去除率增大,研磨效率提高。

3) 采用数控磁力研磨设备,对航空发动机涡轮轴内表面积碳进行去除试验。当工件转速为 $800\ \text{r/min}$,磁性磨料粒径为 $250\ \mu\text{m}$,加工间隙为 $5\ \text{mm}$,研磨时间为 60 min 时,去除效果最佳,表面粗糙度 Ra 达到 $1.47\ \mu\text{m}$,满足工件使用要求。

参考文献:

- [1] 杨薇. 某型航空发动机停车冒黑烟故障研究分析[J]. 西安航空学院学报, 2014(5): 19-22.
YANG Wei. Study and analysis on black smoke failure of shutdown of an aero-engine[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2014(5): 19-22.
- [2] 蒋晶, 申会明, 何依航. 汽车发动机积碳处理新技术方法的探讨[J]. 装备制造技术, 2017(4): 155-157.
JIANG Jing, SHEN Hui-ming, HE Yi-hang. The discussion of carbon deposition treatment new technology method about car engines[J]. Equipment manufacturing technology, 2017(4): 155-157.
- [3] 柳炽伟, 王俊, 林跃华. 直喷汽油机气门积碳的成因与对策研究[J]. 内燃机, 2014(3): 54-57.
LIU Chi-wei, WANG Jun, LIN Yue-hua. Study on the causes and countermeasures of intake valve deposit of gasoline direct injection engine[J]. Internal combustion engines, 2014(3): 54-57.
- [4] 王兴, 贾秀杰, 李方义, 等. 再制造发动机积碳形成机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 69-75.
WANG Xing, JIA Xiu-jie, LI Fang-yi, et al. The research on formation mechanism of carbon deposition in remanufacturing engines[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(5): 69-75.
- [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, 2008, 31(5): 73-81.
- [6] 韩冰, 云昊, 陈燕. 振动辅助磁力研磨超硬精密 Al_2O_3 陶瓷管内表面试验研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 169-176.
HAN Bing, YUN Hao, CHEN Yan. Experimental study of vibration-assisted magnetic abrasive finishing on inner surface of superhard precise Al_2O_3 ceramic tubes[J]. Tribology, 2016, 36(2): 169-176.
- [7] 吴金忠, 邢百军, 邹艳华, 等. 低频交变磁场超精密平面磁力研磨加工研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 291-299.
WU Jin-zhong, XING Bai-jun, ZOU Yan-hua, et al. Ultra-precision surface magnetic grinding by low frequency alternating magnetic field [J]. Surface technology, 2018, 47(11): 291-299.
- [8] MULIK R S, PANDEY P M. Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2011, 55(5-8): 501-515.
- [9] 黄艳斐, 朱岳麟, 熊常健, 等. 航空发动机喷嘴结焦积碳的性质[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(6): 753-756.
HUANG Yan-fei, ZHU Yue-lin, XIONG Chang-jian, et al. Coking properties of aircraft engines' nozzles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(6): 753-756.
- [10] 谢文杰, 方文军, 李丹, 等. 超临界条件下正庚烷的裂解与结焦[J]. 化学学报, 2009, 67(15): 1759-1764.
XIE Wen-jie, FANG Wen-jun, LI Dan, et al. Pyrolysis and coking of n-heptane under supercritical conditions[J]. Acta chimica sinica, 2009, 67(15): 1759-1764.
- [11] 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.
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.

(下转第 355 页)

- 8(4): 374-379.
- [11] SHANBHAG P M, FEINBERG M R, SANDRI G, et al. Ion-beam machining of millimeter scale optics[J]. Appl optics, 2000, 39(4): 599-611.
- [12] LI Sheng-yi, JIAO Chang-jun, XIE Xu-hui, et al. Stitching algorithm for ion beam figuring of optical mirrors[J]. Science in China series E: Technological sciences, 2009, 52(12): 3580-3586.
- [13] DUMAS P R, HALLOCK R W, PLSARSKI A. Applications and benefits of "perfectly bad" optical surface[M]. [s. l]: SPIE, 2008.
- [14] 罗丽丽, 何建国, 王亚军, 等. 计算机控制光学表面成形中大规模驻留时间求解[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3207-3212.
- LUO Lili, HE Jian-guo, WANG Ya-jun, et al. Large-scale dwell time solution in computer controlled optical surface forming[J]. High power laser and particle beams, 2011, 23(12): 3207-3212.
- [15] 武建芬. 离子束加工技术研究[D]. 长春: 中科院长春光机所, 2010.
- WU Jian-fen. Research on the ion beam figuring technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2010.
- [16] 湛贵阳, 解旭辉, 周林, 等. 光学加工射频离子源的去除函数与稳定性研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(5): 19-22.
- CHEN Gui-yang, XIE Xu-hui, ZHOU Lin, et al. Removal function and stability study of RF ion source for optics figuring[J]. Aviation precision manufacturing technology, 2016, 52(5): 19-22.
- [17] WU Jian-fen, LU Zhen-wu, ZHANG Hong-xin, et al. Dwell time algorithm in ion beam figuring[J]. Applied optics, 2009, 48(20): 3930-3937.
- [18] 周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- ZHOU Lin. Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.

(上接第 342 页)

- [12] 陈燕, 曾加恒, 胡玉刚, 等. 超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 118-124.
- CHEN Yan, ZENG Jia-heng, HU Yu-gang, et al. Special-shaped pipe of nickel based alloy GH4169 by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing[J]. China surface engineering, 2018, 31(6): 118-124.
- [13] GUO Jiang, AU Ka-hing, SUN Chen-nan, et al. Novel rotating-vibrating magnetic abrasive polishing method for double-layered internal surface finishing[J]. Journal of materials processing technology, 2019, 264: 422-437.
- [14] WU Jin-zhong, ZOU Yan-hua, SUGIYAMA H. Study on ultra-precision magnetic abrasive finishing process using low frequency alternating magnetic field[J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2015, 386: 50-59.
- [15] 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.
- [16] LEE Yi-hsun, WU Chung-ting, BAI Chen-yuan, et al. Planetary motion combined with two-dimensional vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 76(9-12): 1865-1877.
- [17] MULIK R S, PANDEY P M. Mechanism of surface finishing in ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process[J]. Advanced manufacturing processes, 2010, 25(12): 1418-1427.
- [18] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process[J]. Precision engineering, 2004, 28(2): 135-142.
- [19] WANG D, SHINMURA T, YAMAGUCHI H. Study of magnetic field assisted mechanochemical polishing process for inner surface of Si_3N_4 ceramic components: Finishing characteristics under wet finishing using distilled water[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2004, 44(14): 1547-1553.
- [20] ZOU Yan-hua, LIU Jiang-nan, SHINMURA T. Study on internal magnetic field assisted finishing process using a magnetic machining jig for thick non-ferromagnetic tube[J]. Key engineering materials, 2011, 325(6): 530-535.