

磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响^{*}

郭龙文¹, 杨能阁², 陈 燕¹

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 中航工业西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

摘 要: 针对铣削加工对整体叶盘零件表面完整性控制不能满足使用要求的难题, 利用磁力研磨所特有的柔性、自适应性、可控性等优点, 研发了一种基于机器人的自由曲面磁力研磨装置, 对整体叶盘零件进行加工试验。试验结果表明: 经过磁力研磨后零件的表面粗糙度数值大幅度降低; 铣削加工残留下来的加工纹理基本去除; 原始表面上的微裂纹减弱或彻底消除; 近表层原始显微组织中的变质层被部分去除; 残余应力也明显减小。由此表明磁力研磨加工工艺能够提高整体叶盘的表面完整性, 从而可以提高零件的疲劳强度和使用寿命。

关键词: 磁力研磨; 整体叶盘; 表面完整性

中图分类号: TG668

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)03-0010-05

Influence of Magnetic Abrasive Finishing Technology on Surface Integrity of Vane-integrated Disk

GUO Long-Wen¹, YANG Neng-Ge², CHEN Yan¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning; 2. Avic Xi'an Aero-engine (GROUP) Ltd., Xi'an 710021)

Abstract: To solve the problem that the surface integrity control of vane-integrated disk in the milling process does not satisfy the working requirements, a free-form surface magnetic abrasive finishing equipment based on robot manipulator was developed to perform the vane-integrated disk experiment which has the advantages of flexibility, adaptability, controllability, and so on. The results show that after magnetic abrasive finishing, the surface roughness value is significantly reduced, the milling machining leave of processing texture is removed, the original surface micro-crack decreases or is thoroughly eliminated, the original micro-structure of near surface damaged layer is partly removed, and the residual stress value is obviously reduced. From above all, it is indicated that the magnetic grinding processing can improve the surface integrity of the vane-integrated disk, and the fatigue strength and service life of work piece are improved.

Key words: magnetic abrasive finishing; vane-integrated disk; surface integrity

0 引 言

航空发动机中压气机转子里的整体叶盘, 是新一代航空发动机实现结构创新与技术跨越的关键部件。整体叶盘主要采用五坐标加工中心直接铣削成形, 加工的最后一道铣削工艺则决定了工件的表面质量和加工精度^[1]。国内外的研究表

明, 整体叶盘在加工过程中存在着一些不足之处:

①铣削整体叶盘使用的高速球头铣刀的结构和刀刃形状会对加工表面的粗糙度以及表面形貌有很大的影响, 形成具有鳞片状的加工纹理; ②整体叶盘零件大多使用钛合金等高性能材料, 存在切削温度高、单位面积上的切削力大、刀具易磨损等问题, 整体叶盘在铣削过程中刀具与切屑之间以及

收稿日期: 2013-03-27; 修回日期: 2013-05-09; 基金项目: * 国家自然科学基金(51105187)

作者简介: 郭龙文(1988—), 男(汉), 河南焦作人, 硕士生; 研究方向: 精密加工技术

网络出版日期: 2013-05-17 10:37; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130517.1037.012.html>

引文格式: 郭龙文, 杨能阁, 陈燕. 磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 10-14.

刀具与工件之间的接触区产生很高的切削温度和接触压力,并对工件表面挤压、撕裂,从而在加工表面形成微裂纹;③由于高温、高压和塑性变形的影响,工件表层材料的组织、结构和力学性能产生变化,对显微组织、残余应力、加工硬化等都会产生影响。这些影响因素会直接影响整体叶盘的工作性能和使用寿命^[2-3]。

通过对整体叶盘的失效现象进行综合分析和反复验证研究表明,失效的根源发生于表面,或者是从表面开始。主要起因都是零件已加工表面层的状态不良所致^[4]。所谓表面层的状态不仅是表面形貌、表面粗糙度等外在加工质量,而且还包括显微硬度、显微组织结构、晶界塑性变形、残余应力等内在指标,这些指标统称为表面完整性表征参数。这些参数既影响零件的初次寿命,也影响零件的扩展寿命,是描述、鉴定和控制加工过程在加工表面层内可能产生的各种变化及其对该表面工作性能影响的技术指标^[5]。

为消除或减少铣削加工对整体叶盘零件的表面完整性的影响,需要增加研磨光整加工工艺。但是由于整体叶盘形状复杂,空间狭小,目前对整体叶盘的光整加工主要是通过手工研磨方式,劳动强度高,工作环境恶劣,且受工人的技术等级和熟练程度影响,加工效率低,质量不稳定。因此设计一种磁力研磨加工装置对整体叶盘进行光整加工,通过调整加工中的工艺参数,以考察对整体叶盘零件表面完整性的影响是非常有必要的。

1 磁力研磨的加工机理

磁力研磨是一种非传统的光整加工工艺,工作原理如图1所示,其中 V 为研磨速度(mm/s), F_t 为切线方向切削力(N), F_n 为法向压力(N), a_p 为切削深度(μm)。由于磁场的作用,无数个颗粒状的磁性磨粒聚集成具有柔性、自适应性和仿形性的磁力研磨刷。在磁极和工件之间施加相对运动,磁力研磨刷中的磁性磨粒将仿形贴附在工件表面,对工件的表面进行挤压、摩擦、切削,从而实现磁性磨粒对工件表面的光整加工^[6]。

在实际磁力研磨加工中,因磁力研磨刷包含大量的磁性磨粒,且每个磁性磨粒的表面上又有多个一定硬度的研磨粒子(如图1),研磨粒子的粒径很小,一般小于 $70\mu\text{m}$,所以当有法向压力存在时,研磨粒子对工件表面的单位压力很大。且

在加工过程中研磨粒子与工件实际的接触面很小,磨粒可以近似的认为是点接触,故可在法向压力 F_n 的作用下产生一定的切削深度(a_p)。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,在工件表面不易形成变质层,得到的表面粗糙度值很小。当磁极旋转时,磁力研磨刷随着磁极位置的变化而变化,并且在工作间隙中翻转、变形,仿形贴附在工件表面,拥有很好的柔性、自适应性、可控性等优点,可以很好地与数控机床、加工中心和机器人相结合,实现对复杂型面、球面、复杂型腔内表面的光整加工。

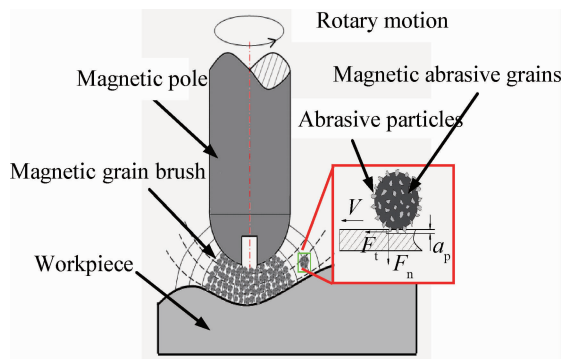


图1 磁力研磨加工示意图

Fig. 1 Diagram of magnetic grinding processing

2 加工试验过程

为了验证磁力研磨对零件表面完整性的影响,针对整体叶盘的结构特点,研发了一种基于机器人的曲面磁力研磨装置,加工装置简图和加工现场如图2所示。

试验使用的整体叶盘材料为2017硬质铝合金,加工区域为叶片背部。采用 $\Phi 6\text{ mm}$ 磁极作为研磨头,工作区域内的磁感应强度在 $200\sim 300\text{ mT}$ 之间。设定磁极端部与工件表面之间的加工间隙为 2 mm ,磁极转速为 $2\ 000\text{ r/min}$,加工时间为 30 min 。所用烧结法制备的磁性磨料为 80 g ,粒径在 $150\sim 180\mu\text{m}$ 之间,研磨液为水基研磨液。通过控制机器人的运动和姿态,使磁极在叶片之间形成无干涉的研磨加工轨迹。利用与计算机相连的伺服电机,通过软轴实现磁极的高速旋转,从而完成对整体叶盘零件表面的光整加工。

为了解析磁力研磨对表面完整性的影响,根据零件的结构特点,截取叶片加工区域上 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的样品,从表面粗糙度、微观形貌、

微裂纹、显微组织、残余应力 5 个方面对磁力研磨加工前后的整体叶盘进行对比试验。

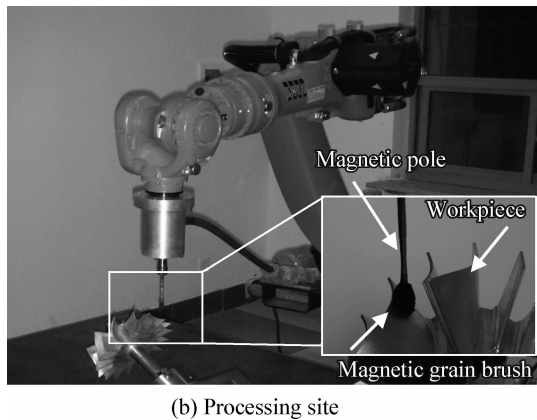
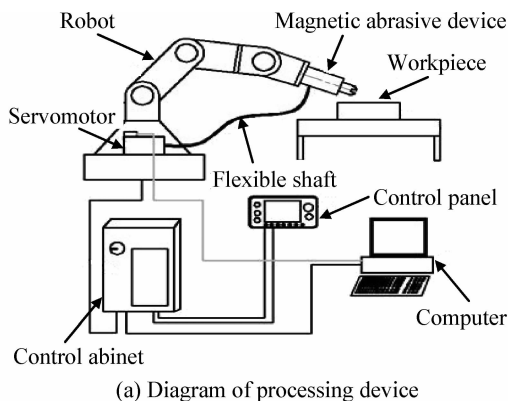


图 2 加工装置简图和加工现场

Fig. 2 Diagrams of processing device and processing site

3 结果与分析

3.1 表面粗糙度

表面粗糙度能够定量表征加工表面的微观不平度,一直都是表面完整性研究的重要一环。在铣削加工过程中由于切屑与工件表面分离产生的撕裂作用和切削过程中刀具的微小变化,会导致工件表面凹凸不平;表面粗糙度值较大;而且极易产生微裂纹,影响其疲劳寿命^[7]。磁力研磨加工由磁极吸引的磁性磨粒形成磁力研磨刷仿形压向工件表面,起磨削作用。磁性磨粒粒径很小,在研磨液的影响下,磁性磨粒在工作间隙中不断翻滚、变形,对零件表面摩擦、切削,快速降低表面粗糙度。

通过使用精密粗糙度测量仪测得磁力研磨加工后表面粗糙度 R_a 由原来的 $2.325\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.429\ \mu\text{m}$,如图 3 所示。表面粗糙度的降低,对叶盘零件的抗腐蚀性、疲劳强度、接触刚度、振动

和噪声等起到很大的改善作用,可以提高零件的使用寿命和性能^[8]。

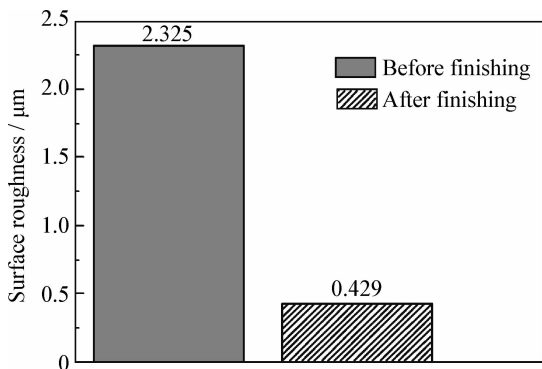


图 3 磁力研磨前后试样的表面粗糙度

Fig. 3 Surface roughness of the samples before and after magnetic abrasive finishing

3.2 表面微观形貌

整体叶盘在铣削加工中,由于机械振动、刀具温度变化、材料变形等诸多随机因素综合作用,对叶盘表层材料有一定范围的温升和变形(弹性变形和塑性变形),球头铣刀切削工件在表面形成明显的鱼鳞状表面加工纹理,如图 4(a)所示。而材料的疲劳性能对表面微观形貌极其敏感,不同的表面状态会对材料表面形成集中的微应力,对疲劳强度影响非常大^[9]。经过磁力研磨加工后,叶盘表面微观形貌发生明显变化,如图 4(b)所示。原始的鳞片状铣削纹理全部去除,表面平整光滑。这是由于磁力研磨加工中磁力研磨刷具有很好的柔性和自适应性,能够根据叶盘曲面的变化而产生法向最大压力,去除工件表面原始形貌。表面形貌的改善能够减少整体叶盘微应力集中现象并且增强材料的疲劳性能。

3.3 表面微裂纹

整体叶盘在铣削加工过程中,由于刀具对工件表面有金属撕裂、粘附和挤压等作用,会在零件表面形成微小裂纹,如图 5(a)所示。在显微镜下将叶盘表面放大 500 倍,能够看到沿着叶片表面沟纹处呈现出很多无规则的微小裂纹,直接影响着叶盘零件的疲劳强度和服役寿命。微裂纹的形成不仅与具体的加工方式和加工条件有关,而且还与机床结构的动力学特性、刀具与工件的材料和力学特性有关,因此在铣削过程中微裂纹的出现就很难避免^[10]。

采用磁力研磨加工的方法,磁极的高速旋转,磁力研磨刷中大量的磁性磨粒在叶盘表面不断的挤压、摩擦,达到去除表面微小裂纹的目的。如图

5(b)所示,磁力研磨加工可以对叶盘表面层进行均匀的磨削,因此可以将原始的近表层微小裂纹基本去除。

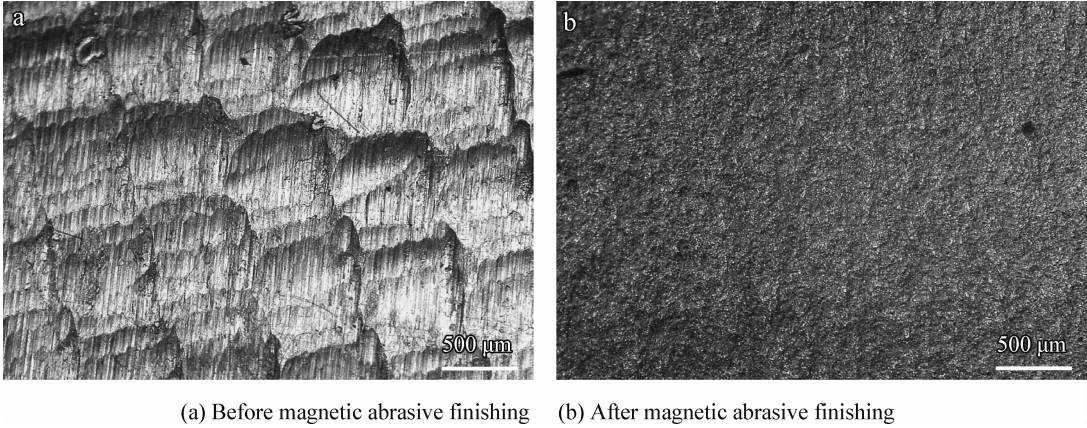


图 4 磁力研磨前后试样的表面形貌
Fig. 4 Surface morphologies of the samples before and after magnetic abrasive finishing

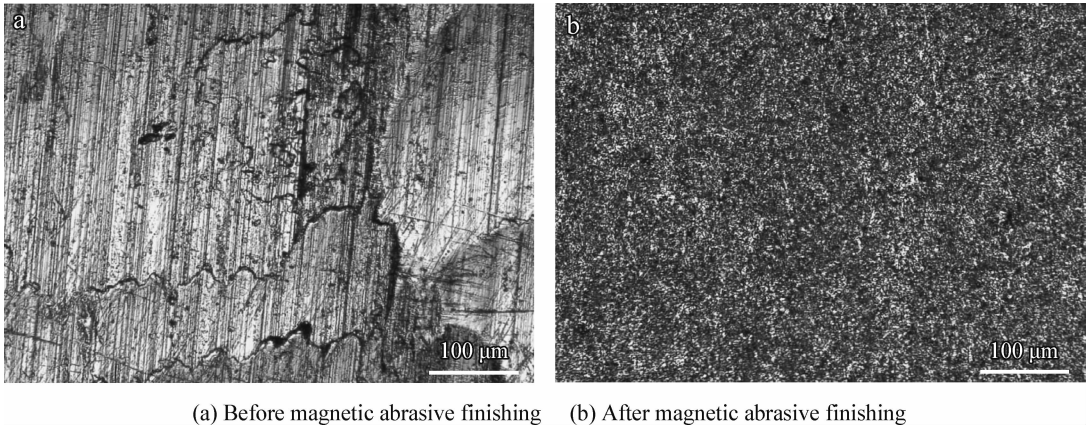


图 5 磁力研磨前后试样的微裂纹
Fig. 5 Surface micro-cracks of the samples before and after magnetic abrasive finishing

3.4 近表层显微组织

为对比磁力研磨加工前后显微组织结构的变化,配置金相试样,经过研抛腐蚀处理后,能够看出研磨前整体叶盘由于高速铣削过程中剧烈的刀具和工件之间的摩擦、高速变形和切削热的作用,使表面材料内部晶粒受压缩滑移而发生拉长、扭曲、破碎等变化,如图 6(a)所示。在叶盘表面形成和基体材料不同的变质层。磁力研磨加工属于微量切削,切削热很小,基本没有变质层产生,还能够把铣削加工表面上形成的一层物理、化学性能、组织结构等都不同于工件材料原性质的表面变质层部分去除,使表层材料更接近工件的基体,还原叶盘表面原有的材料性能,如图 6(b)所示。

3.5 近表层的残余应力

整体叶盘在铣削过程中由于刀具对材料表面的切削、撕裂综合作用会在材料表面形成残余拉应力。利用 X 射线干涉仪,分别对磁力研磨加工前后的样品表面进行应力测量。测量时,调整 X 射线入射角 θ ,使其在 0° 到 30° 逐渐变化,取其中的 9 条检测曲线,记录折射角 $2\theta_\psi$ 的大小。

根据 X 射线衍射 $\sin^2\psi$ 应力分析法,可得应力计算方程:

$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\mu)} \cot\theta_0 \frac{\pi}{180} \frac{\partial(2\theta_\psi)}{\partial(\sin^2\psi)} \tag{1}$$

在公式(1)中, σ 为残余应力值, E 为弹性模量(GPa), μ 为泊松比, $2\theta_\psi$ 为 X 射线衍射角。根

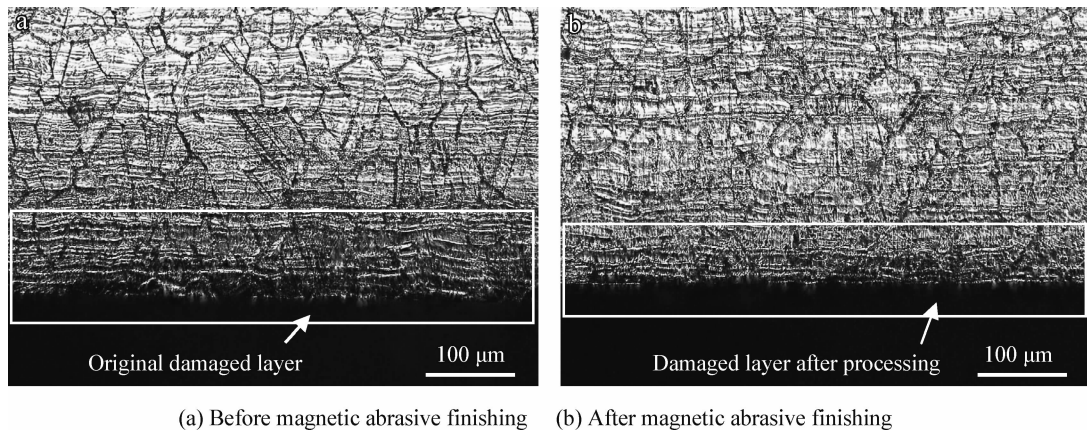


图 6 磁力研磨前后试样的截面微观组织

Fig. 6 Cross section microstructure of the samples before and after magnetic abrasive finishing

据材料性质取 $E=70 \text{ GPa}$, $\mu=0.3$, 并求出 X 射线角 ϕ 方向对应的衍射角 $2\theta_\phi$ 与 $\sin^2\phi$ 直线关系的斜率, 代入公式(1)中能够算出, 整体叶盘原始表面残余应力值为 $+185 \text{ MPa}$, 加工后表面残余应力值为 $+28 \text{ MPa}$ 。残余应力值的减小是由于磁力研磨加工属于微量切屑加工, 本身在加工过程中的切削力相对很小, 基本不会引入残余应力。工件的表面始终被磁力刷底层的磁性磨粒群压附, 研磨粒子不断的摩擦、翻滚、碰撞, 会释放表层的残余拉应力, 使残余应力值降低。

4 结 论

(1) 整体叶盘在磁力研磨加工过程中, 由于磁粒刷拥有很好的柔性、自适应性、可控性等优点, 能够随着工件形状的变化而变化, 而且属于微量切屑加工, 切削热和切削力都很小, 因此可以改善整体叶盘在铣削过程中产生的表面完整性缺陷。

(2) 自行设计的磁力研磨装置与机器人的腕部相连, 由外部伺服电机提供主运动, 通过在磁极端部添加磁性磨料, 从而形成具有切削力的磁力研磨刷, 能够实现基于机器人的整体叶盘磁力研磨加工。通过设计合理的工艺条件, 对叶盘表面进行高效的光整加工处理。

(3) 磁力研磨光整加工后的叶盘表面完整性得到了明显的改善, 从表面粗糙度、表面微观形貌、微裂纹、显微组织、近表层残余应力 5 方面检测分析, 表面粗糙度 R_a 值降低, 表面原始微观形貌消失, 微裂纹去除, 近表层原始显微组织中的变质层被部分去除, 残余应力有所减小。

参考文献

- [1] 杨振朝, 张定华, 姚倡锋, 等. TC4 钛合金高速铣削参数对表面完整性影响研究 [J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(4): 538-543.
- [2] 刘国良. 航空发动机零部件表面完整性对使用性能的影响 [C]. 陕西省机械工程学会理化检验分会第八届年会论文集, 2009: 149-152.
- [3] 王贵成, 洪泉, 朱云明, 等. 精密加工中表面完整性的综合评价 [J]. 兵工学报, 2005, 26(6): 820-824.
- [4] 曾泉人, 刘更, 刘岚. 机械加工零件表面完整性表征模型研究 [J]. 中国机械工程学报, 2010, 21(24): 2995-9.
- [5] Durul Ulutan, Tugrul Ozel. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 27(2): 1-31.
- [6] 陈燕, 巨东英. 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.
- [7] Chen L, El-Wardany T I, Harris W C. Modeling the effects of flank wear land and chip formation on residual stresses [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 95-98.
- [8] Sharman A R C, Hughes J J, Ridgway K. Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718 nickel based superalloy [J]. Machining Science and Technology, 2004(3): 399-414.
- [9] 孟波, 郭万林. 表面微观形貌对疲劳强度影响的定量分析 [J]. 机械工程材料, 2006, 30(5): 26-29.
- [10] 李航月, 胡奈赛, 何家文. 残余压应力场中裂纹扩展的闭合模型 [J]. 金属学报, 1998, 34(8): 847-851.

作者地址: 辽宁省鞍山市千山中路 185 号

114051

辽宁科技大学先进磨削技术研究所

Tel: (0412) 5928 113 (陈燕)

E-mail: laochen412@gmail.com