

提高盘类零件表面完整性 加工技术

Processing Technology of Improving the Surface Integrity of Disc Parts

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司盘轴加工厂 姜雪梅 陈磊 王莲



姜雪梅

研究员级高级工程师,中航工业发动机盘环类零件加工首席技术专家。主要从事航空发动机盘轴制造技术研究。发表论文有《航空发动机关键转动部件加工技术》、《空心长轴深孔加工工艺研究》、《整体盘轴零件优质高效加工技术》、《新结构涡轮盘机械加工技术》等。

航空发动机中盘、鼓筒等零件是发动机的核心转动部件和关键件,在高温、高压、高转速的恶劣环境下工作。对这类零件表面质量、表面粗糙度、表面完整性要求高,其表面质量的高低直接影响到发动机的使用寿命和安全性。传统的航空发动

本文以涡轮盘零件为载体,采用振动光饰及边缘自动成型加工技术,分别对涡轮盘表面进行振动光饰及榫槽边缘的自动成型加工,大幅度地降低了零件表面粗糙度值,改善了零件表面的应力状态,提高了零件边缘尺寸的一致性,为航空发动机复杂结构盘鼓零件的表面光整加工提供了切实可行的技术方法。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.056

机制造技术是以制造成本、时间、空间等为依据,通过工艺控制,形成满足要求的表面特征的制造技术。其主要关注的是表面机械加工的尺寸、形位、表面形貌、表面裂纹等特征,考虑的是低成本、高效率、高精度,对发动机的寿命和可靠性方面关注不够,不能满足新一代航空发动机高可靠性的需求。

随着航空发动机制造技术的不断进步和发展,盘、鼓筒等转动部件的表面光整加工和表面精细加工技术有了大幅度地提升,从传统的手工操作方式,过多地依赖操作者的经验和技能水平完成加工,转向零件表面自动光整加工、各类边缘机械自动成型加工等自动化、精准化及抗疲劳制造的方向推进和发展,高度关注加工后的表面粗糙度、表面纹理、表面应

力状态、各类边缘尺寸的圆滑转接和尺寸一致性等表面完整性指标,对保证航空发动机安全可靠的工作起到了至关重要的作用。

涡轮盘零件的结构特点及使用要求

涡轮盘结构复杂,表面质量要求高,特别是安装边与轮盘辐板形成半封闭深型腔,敞开性极差,零件结构如图1所示。轮盘二侧辐板、安装边外圆及端面,二侧型腔内表面粗糙度要求严格,均为 $R_a 0.80 \mu\text{m}$,传统的光整加工是在普通车床上使用砂布条、采用手工抛光方式加工,由于涡轮盘型腔敞开性差,手工抛光几乎不可达,粗糙度不易保证,质量不稳定。各类边缘加工如涡轮盘榫槽边缘大多采用锉刀、油石及纱布条手工去除

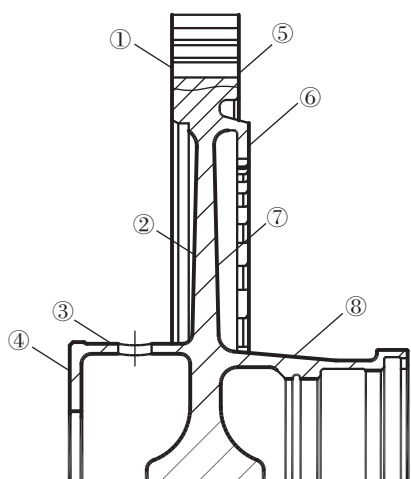


图1 涡轮盘结构示意图

毛刺并抛光的工艺方法完成榫槽边缘加工,加工后边缘尺寸一致性较差。

航空发动机故障统计分析表明,大多数故障为疲劳失效。失效的主要原因因为表面缺陷,如表面粗糙度、加工纹理、加工刀痕及其边缘转接圆角的加工质量等因素都是产生疲劳失效的隐形杀手,特别是对于盘、鼓筒等关键转动部件,由于其工作环境恶劣、受力情况复杂,因此对这类零件的表面质量、表面完整性及表面精细加工提出了严格的要求。振动光饰及边缘自动成型加工技术就是改变传统的手工操作方式,提高零件表面质量和表面完整性的有效途径。

振动光饰加工技术

1 振动光饰加工原理

振动光饰加工通过磨料和零件的相对运动,产生微量的磨削加工作用,去除零件表面的尖边和微小凸起,促使零件表面粗糙度值降低,同时零件表面产生残余压应力,从而提高零件的表面完整性。旋轴式振动光饰机可以正反双向转动,即可绕自身自转,同时围绕主轴中心公转,磨料箱周期性上下往复运动,从而使零件与磨料接触和磨削加快,大面积多方向摩擦,实现高效光整加工。

振动光饰加工时,首先将轮盘一

侧表面朝下通过专用夹具,将盘件安装在机床气动夹盘上,通过主轴系统的升降带动零件进入磨料中,在行星轮系、运动料箱等多方面运动系统的作用下,对涡轮盘零件的外表面、型腔及端面进行光整加工,使磨料与零件表面产生挤压、划擦等运动,实现对零件的微切削高效加工。完成一侧表面振动光饰后,翻转零件,重新安装在机床气动夹盘上,进行另一侧表面的振动光饰加工。

2 加工设备及磨料选择

根据零件的加工要求和轮廓尺寸选择了旋轴式振动光饰机BJG-ZP800,磨料成份主要为刚玉或陶瓷。磨料形状主要根据零件结构、具体加工部位和预计达到的目标而定,可为多边形磨料,三角形磨料或不同直径的圆形磨料。

3 振动光饰加工参数

振动频率:70Hz;磨液:机床专用磨液;磨液喷洒时间:5min;磨液间隔时间:5min;振动光饰时间:80min。

4 振动光饰前后的对比试验

(1)振动光饰前后的表面粗糙度的对比分析。

通过对涡轮盘振动光饰前后的表面粗糙度进行检测和对比,收集和掌握振动光饰后零件表面粗糙度的改善状况,选择对涡轮盘表面①②③④⑤⑥⑦进行粗糙度测量,每个表面沿圆周均布测量4点(见图1)。振动光饰前后表面粗糙度对比曲线如图2所示。

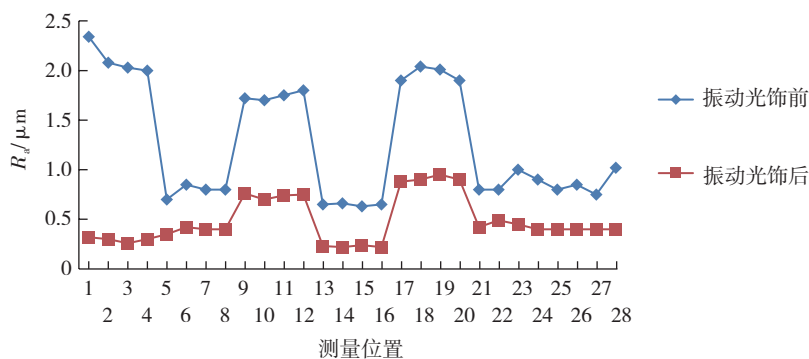


图2 振动光饰前后表面粗糙度对比曲线

由粗糙度测量结果可以看出,振动光饰后各表面的粗糙度值大幅度地降低,由振动光饰前的 $R_a 0.7 \sim R_a 2.3 \mu\text{m}$,改变为振动光饰后的 $R_a 0.22 \sim R_a 0.95 \mu\text{m}$ 之间,其中表面①②④⑥⑦粗糙度值在 $R_a 0.22 \sim R_a 0.49$ 范围内,效果最好,振动光饰后表面质量有极大地改善,完全满足设计图 $R_a 0.80 \sim R_a 1.60$ 的粗糙度要求,取得满意的效果。

(2)振动光饰前后表面残余应力测量及对比分析。

·测定条件。

仪器采用iXRD-X射线应力分析仪;特征谱线和衍射晶面:Mn-K-Alpha, FCC(311);准直管直径 $\phi 2\text{mm}$ 。

按图1所示,测量涡轮盘结构①②③④表面残余应力,每个表面按圆周均布测量4点,应力测试方向为周向。

·振动光饰前后表面残余应力对比。

涡轮盘振动光饰前后表面残余应力对比曲线如图3所示。

由残余应力测试结果看出,振动光饰后表面应力状况有很大地改善,振动光饰前涡轮盘A侧表面残余应力均为拉应力,最大拉应力为700MPa,振动光饰后由拉应力改变为压应力,压应力值在 $-200\text{MPa} \sim -500\text{MPa}$ 之间。这说明振动光饰加工不仅可改变表面粗糙度,而且可以改变零件表面的应力状态和表面完整性,提高零件的疲劳强度。

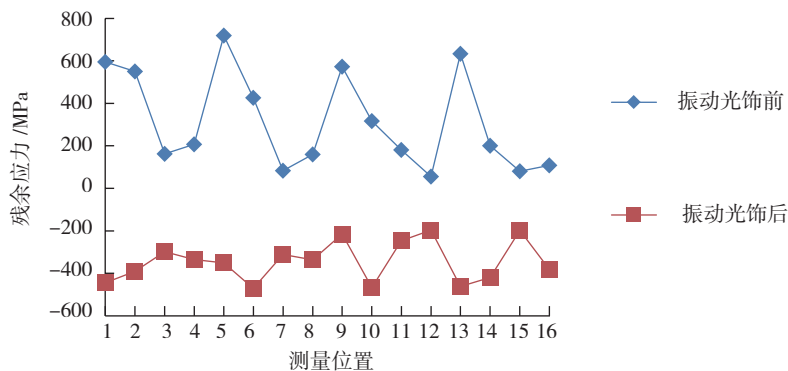
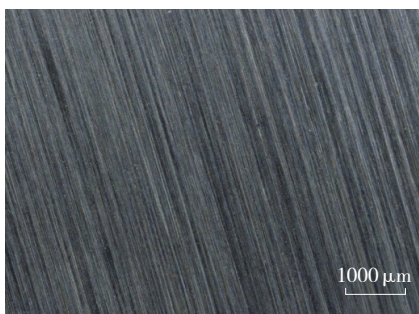
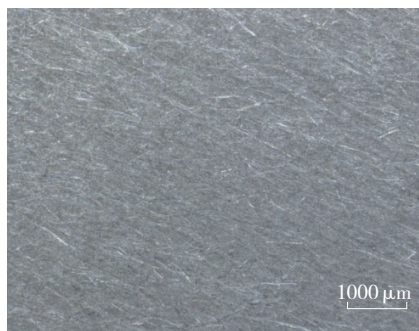


图3 振动光饰前后表面残余应力对比曲线



(a) 振动光饰前表面形貌



(b) 振动光饰后表面形貌

图4 振动光饰前后表面形貌对比

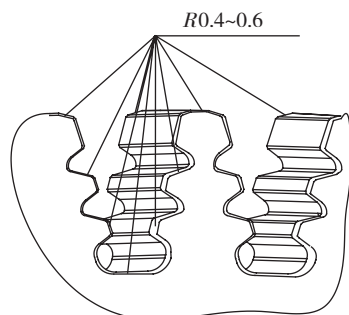


图5 榫槽边缘倒圆示意图

(3) 振动光饰前后的表面形貌对比。

涡轮盘振动光饰前、后的表面形貌(放大 50 倍)如图 4 所示。

由表面形貌对比图可以看出,振动光饰前的涡轮盘表面粗糙度较差,刀痕较明显,纹理粗糙,振动光饰后的零件表面形貌有很大地改观,经放大 50 倍金相检验,表面纹理均匀规整,无明显的走刀痕迹,表面质量得到极大地改善。

榫槽边缘自动成型加工

涡轮盘榫槽边缘与端面过渡圆角设计要求 $R0.4\sim R0.6$, 表面粗糙度为 $R_a0.80\mu m$, 并要求沿榫槽型面倒圆并抛光, 圆滑转接(见图 5)。传统的手工加工方法是采用锉刀、油石及纱布条去除尖边毛刺、抛光, 完成榫槽边缘加工, 按标准样件验收。其加工质量过多地依靠操作者的经验和技能水平, 受人为影响因素大, 加工后表面粗糙度、边缘尺寸精度及尺寸一致性较差。

1 自动倒角机加工原理及主要加工特点

利用自动倒角机设备, 专用倒角铣刀与与机床抛光单元固定刷, 按预

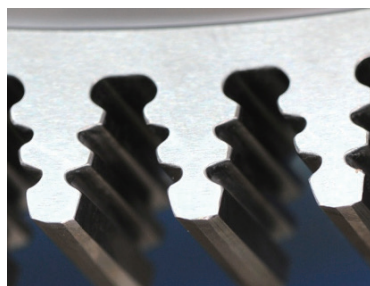
先编制好的数控程序轨迹, 并以一定的切削参数实现对涡轮盘榫槽边缘进行铣削和自动抛光的复合加工方法, 该工艺方法的主要特征是, 去除棱边毛刺, 倒角、倒圆, 保证圆角与相邻表面之间光滑过渡, 提高零件倒圆、倒角尺寸的一致性及尺寸精度, 降低零件表面粗糙度值, 改善零件表面质量, 实现加工过程标准化、规范化。

2 榫槽边缘加工工艺

榫槽边缘的自动成型加工是在自动倒角机上, 采用可调式组合夹具装夹零件, 可满足不同孔径盘件的装夹要求, 应用 $\phi 1\sim\phi 1.2$ 硬质合金球铣刀进行四轴联动铣削圆角, 为了防止刀具干涉, 避免刀具在走轮廓时与榫槽发生碰撞和干涉, 加工前, 采用 VIRCUT 模拟仿真软件, 对加工过程进行模拟仿真, 确认程序正确可行后, 进行零件加工。确定的切削参数为: 铣刀转速 $n=25000 r/min$; 进给量 $f=600 mm/min$; 切削深度 $a_p=0.1mm$, 去除榫槽边缘大部分余量, 然后应用两种标准金刚石粗、细抛光刷, 对铣加工后的边缘进行圆整与抛光, 完成榫槽边缘的复合光整加工, 加工后粗糙度可达 $R_a0.80\mu m$ 。由于采用数控加工, 该工艺方法倒角、倒圆后边缘尺寸一致性好, 不接触和影响拉削后的榫槽表面和尺寸精度, 降低表面粗糙度值效果明显, 2 种工艺方法加工后的榫槽边缘形貌如图 6 所示。

结束语

通过采用振动光整加工, 降低了



(a) 榫槽边缘手工倒圆、抛光形貌



(b) 榫槽边缘机械自动倒圆、抛光形貌

图6 2种工艺方法加工后的榫槽边缘形貌对比

零件表面粗糙度值 1~2 个等级,表面应力状态均为压应力,振动光饰后的表面形貌有很大改观,表面纹理均匀规整,零件表面质量和表面完整性大幅度地提高。榫槽边缘采用数控自动倒角机实现了机械自动成型加工,与传统的手工加工比较,榫槽边缘表面粗糙度好,倒圆尺寸均匀,不

同榫槽之间边缘尺寸一致性达 90% 以上,加工质量大幅度地提高,满足使用性能要求。

以上开展的表面完整性制造技术应用研究,已在涡轮盘零件批量生产中应用,并且通过对工艺参数的优化和固化,已形成了典型加工工艺,实现了产品的优质合格交付。该项

技术研究还需要进一步深入和推广,特别是表面完整性指标对其使用性能和寿命的影响程度需要进行系统研究和试验。通过大力开展表面完整性制造技术的创新和探索,以满足新一代航空发动机高可靠性和长寿命的需求。

(责编 春早)

(上接第 51 页)

[2] GINGER G. Albany engineered composites: weaving the future in 3D, Composites World [EB/OL]. 2014[2014-03-04]. <http://www.compositesworld.com/articles/albany-engineered-composites-weaving-the-future-in-3-d>.

[3] KLAUS S, HANS W. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing processes, What comes after 2000 [EB/OL]. 2000[2000-01-01]. <http://www.mtu.de>.

[4] YOUNG W K, WILFRIED S, JUNPIN L, et al. Gamma titanium aluminide alloys 2014: a collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2014.

[5] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

[6] KOTHARI K. Manufacturing Techniques for Titanium Aluminide Based Alloys and Metal Matrix Composites [D]. PhD Dissertation, College Park, Maryland: University of Maryland, 2010.

[7] KYOKO K, AN C Y, Tadaharu Y, et al. Development of an oxidation-resistant high-strength sixth-generation single-crystal superalloy TMS-238. Super Alloys 2012: 12th International Symposium on Superalloys. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 189-195.

[8] WALSTON S, CETEL A, MACKAY R, et al. Joint development of a fourth generation

single crystal superalloy. NASA Technical Report (NASA/TM-2004-213062), Hanover, MD: NASA, 2004.

[9] PAUCHARD A, SYNOYAY. Precision cutting and grooving with the laser microjet [EB/OL]. 2010[2000-01-01]. <http://www.swissphotonics.net>.

[10] MARINESCU (Eds.) I D. Handbook of advanced ceramics machining. Boca Raton: CRC Press, 2007.

[11] KARRREN L M, PETER F, TORTORELLI, et al. Evaluating environmental barrier coatings on ceramic matrix composites after engine and laboratory exposures. Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, Three Park Avenue, New York: ASME, 2002.

(责编 叶枫)

(上接第 55 页)

以精确描述待加工区域的几何形状,并以此为基础规划刀位轨迹,从而实现精锻叶片的高效精密自适应数控加工。

结论

本文针对航空发动机精锻叶片制造工艺中存在的问题进行分析,对自适应数控加工中装夹方案、数字化检测、配准定位、工艺几何建模等关键技术进行了系统的阐述。此项技术的深入研究与应用不仅可以有效解决精锻叶片加工中存在的技术难题,同时对复合制造工艺背景下叶片类零件的高效精密加工具有一定的指导意义。该技术作为智能加工的重要组成部分,在满足几何自适应的基础上,实现工艺参数的自适应控制,是未来自适应加工技术的发

展方向。

参考文献

[1] 詹梅. 面向带阻尼台叶片精锻过程的三维有限元数值模拟研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2000.

[2] ZHANG D H, ZHANG Y, WU B H. Research on the adaptive machining technology of blisk. Advanced Materials Research, 2009, 69-70: 446-450.

[3] LIM T S, LEE C M, KIM S W, et al. Evaluation of materials of cutter orientations in 5-axis high speed milling of turbine blade. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 30(2): 401-406.

[4] BREMER C. Adaptive machining technology and data management for automated repair of complex turbine components with focus on blisk repair. International Symposium on Air Breathing Engines, 2007, 18: 1-11.

[5] WALTON P. Adaptive machining for turbine blade repair [EB/OL]. [2007-11-02] [2015-10-05]. <http://www.mmsonline.com/>

articles/adaptive-machining-for-turbine-blade-repair.

[6] SULLY M. Delcam adaptive manufacturing: Resolving your manufacturing problems and delivering a global productivity advantage [EB/OL]. [2012-11-2]. http://theoac.ca/Storage/27/2255_Flexible_Mfg_Systems_and_Adaptable_Machining_-_Delcam_-_Nov_2012.pdf.

[7] GAO J, CHEN X, YILMAZ O, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11-12): 1170-1179.

[8] KO K H. Algorithms for three-dimensional free-form object matching [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

[9] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

(责编 春早)