

电火花加工表面完整性研究在大飞机发动机制造中的重要性

Importance of EDM Surface Integrity Research for Large Aircraft Aeroengine Manufacturing

中航工业北京航空制造工程研究所 韩野 张志金 崔海军



韩野

1996年毕业于北京航空航天大学,现为中航工业北京航空制造工程研究所高级工程师。长期从事电火花工艺技术的研究和电火花及检测设备的研制,先后负责多项电火花工艺技术方面的科研课题,并完成多种型号航空发动机中多种零部件的研制,多次获得国防和集团公司科技进步奖。

能够满足目前各种军用和民用大型飞机使用要求的航空发动机主要为大涵道比涡扇发动机,其基本特点表现为高安全可靠、长寿命、节能环保、良好的维修维护性能等。随

表面完整性技术可以作为控制、评价和改进包括电火花工艺技术在内的多种特种加工技术的指导,也是向“抗疲劳制造”技术发展的必要基础。对于强调高安全性、长寿命、低全寿命周期成本的大飞机发动机的制造尤为重要,是制造技术在航空发动机的应用中不可缺少的重要环节。

着飞机各项性能的不断提高,对大涵道比航空发动机也提出了更高的要求。各种新结构、新材料和复杂形状的精密零部件大量应用于航空发动机中,显著增加了航空发动机的制造难度。

电火花加工又称放电加工(Electrical Discharge Maching,简称EDM),是一种直接利用电能和热能进行加工的新工艺。电火花加工与金属切削加工的原理完全不同,在加工过程中,工具和工件并不接触,而是靠工具和工件之间不断的脉冲性火花放电,产生局部、瞬时的高温,把金属材料逐步蚀除掉或堆积上,以达到对工件的尺寸、形状及表面质量预定的加工要求^[1]。一般情况下,根据电火花加工方式和作用原理的不同,

通常将电火花加工分为电火花成形加工(EDM)、线切割加工(WEDM)、电火花合金化(亦称为电火花沉积,ESD),本文主要针对电火花成形加工的相关内容进行了阐述。

电火花加工由于具有可加工任意导电材料,不受材料硬度、脆性、韧性、熔点的限制;加工时无明显的机械切削力,适用于加工结构特殊、形状复杂及薄壁结构的零件;脉冲参数可调,加工范围大,在一台机床上可连续进行粗、精加工等特点,在大涵道比涡扇发动机的冷端和热端零部件的特征结构加工中,得到了广泛的应用。典型的应用包括涡轮叶片上的冷却气膜孔加工、火焰筒和隔热屏上群孔的加工、挡板和机匣的槽和腔等特征结构的加工等^[2]。

同时由于电火花加工为脉冲放电的热熔加工,在加工过程中,会在零件表面形成表面变质层,并且因为加工环境和参数的不同,可能会在零件表面形成烧蚀、裂纹等缺陷,会对零件的疲劳寿命等使用性能造成一定程度的影响。图1即为采用目前较高性能的电火花机床加工的典型模具钢的金相照片,标示的变质层包括了再铸层和热影响区,是烧蚀、裂纹等缺陷最易产生的区域。

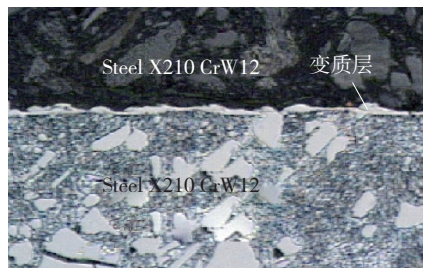


图1 模具钢电火花加工后的金相照片(X1000)

因为航空发动机中采用电火花工艺技术加工的零部件分别属于不同的单元体,既有热端部件,又有高速运动件,还有支撑件和受力件等,这些关重件的疲劳寿命直接影响着航空发动机的使用性能、安全性和全寿命周期成本。因此,评价和把握电火花工艺技术对这些零部件疲劳性能的影响程度和电火花工艺技术是否适用于其他零部件的制造,对于航空发动机,尤其是大飞机的大涵道比涡扇发动机的制造来说,极为重要。

根据目前国际上的研究现状和发展,开展针对性的表面完整性技术研究,完全可以甄别、鉴定、评价和规范电火花工艺技术在航空发动机关重件上的应用效果,并为电火花工艺技术的改进和发展明确方向。

电火花加工表面完整性研究 简述

表面完整性是描述、鉴定和控制零件加工过程在其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^[3],就其应用

目的而言,也可视作控制加工工艺形成的无损伤或强化的表面状态^[4]。

零件加工的表面完整性是由加工过程中作用在零件表面上的力载荷、热载荷、化学载荷3种载荷共同决定的^[5]。只有少数的几种加工过程可以认为是单个载荷决定的,其中电火花加工(EDM)就是由热载荷这一单一载荷决定的,力载荷和化学载荷所起的作用在研究过程中可以忽略。表面完整性好坏受多种因素的制约,所以对表面完整性的评价不能从某一个侧面来衡量。

就电火花加工技术而言,按照国际上通行的表面完整性广义数据组(根据衡量指标的全面程度,由简到繁依次分为最小数据组、标准数据组和广义数据组)的规定,较为全面地衡量其加工后表面完整性好坏的指标主要包括:几何形状误差(如表面粗糙度测量值和更进一步的表面微观形貌图,以及表面纹理组织数据等)、微观组织(如表面缺陷、残渣沉积、扫描电子显微镜拍摄的微观组织结构、金相组织的变化、微观裂缝、变质层的影响、再铸层的沉积状况等)、热影响层、加工后表面显微硬度的变化、棱边质量(加工边缘部分的微观形貌)、物理力学性能试验(如表面残余应力的大小、方向和分布情况,以及疲劳强度和极限强度等强度试验)、特定环境下的应力腐蚀试验、各种补充机械试验数据(如裂纹扩展试验、蠕变试验、应力破坏试验、低频疲劳试验、抗拉试验、扭矩试验等)^[6]。

电火花加工表面完整性的各项评价指标均与电火花加工的全过程有关,必须详细地将电火花加工过程中的各项主要因素进行分析。掌握各项主要因素对表面完整性各项评价指标的影响程度和规律,经试验产生大量的支撑数据后^[7],形成全面的电火花加工表面完整性评价体系,从而指导、控制和改善电火花工艺技术在航空发动机中的应用。

针对航空发动机,尤其是大飞机用大涵道比航空发动机中采用电火花工艺加工的关键和重要零部件,开展电火花加工表面完整性研究概括来说,主要包括2方面的内容:

(1) 电火花加工工艺对表面完整性的影响规律研究和提高电火花加工表面完整性的方法研究,即研究电火花加工全过程中主要因素(如机床、工艺参数、电极、加工介质、零件状况等)对表面完整性各项评价指标的影响,并摸索出能够减少电火花加工对表面完整性损害的工艺实施方法。

(2) 后续强化技术对电火花加工表面完整性的影响状况,即研究在电火花加工后,采用某一种或多种复合的后续强化技术^[8](如喷砂、喷丸、激光冲击强化、振动光饰等)能够有效地提高电火花加工后的表面完整性,或减少电火花加工对表面完整性的损害。

国外的研究情况

自1964年由美国金属切削研究协会在一次技术座谈会上首先引用表面完整性的概念后,以美国、欧洲和日本为代表的西方国家一直着力于开展表面完整性方面的系统研究,并在20世纪90年代形成了一系列全面、系统和深入的相关表面完整性规范和标准。以罗·罗公司和通用电气公司为代表的航空发动机制造商,也从20世纪70年代起将表面完整性引入了航空发动机零件的制造和质量规范中,从而大幅提高了航空发动机的生产质量和使用寿命。

针对电火花加工表面完整性的研究,国外主要分4个层次进行,同时也反应出了国外对电火花加工表面完整性的重视程度。

(1) 大学和研究机构主要开展电火花工艺技术对表面完整性影响的机理方面的研究,提供各种试验测试数据,进行理论指导^[9]。

(2) 电火花机床生产厂商主要开展通过工艺参数和工艺方法的调整,提高电火花加工表面完整性的工艺试验和测试,以增加电火花加工机床的适用范围,提高机床的加工品质,并为机床的改进和发展提供技术基础。

(3) 产品专业制造厂商主要根据研究机构和机床生产厂商提供的电火花加工表面完整性的数据,制定能够满足产品技术要求的制造方案,包括采用何种电火花加工机床、何种工艺参数,以及采用何种后续强化处理工艺技术等内容。

(4) 开发部门、主承包商和评估机构则根据各个层次和机构提供的电火花加工表面完整性的广义数据组的各种数据,以及产品的使用需求,确定产品关于电火花加工的技术要求,并制定相应的工艺和质量规范。

在航空发动机零部件的电火花加工表面完整性的研究方面,美、欧、日等经过持续数十年的深入研究,取得了很大的进展,并获得了多项应用于实际生产的技术成果,已将表面完整性技术融入电火花工艺技术研究各个环节,成为了改进和提高电火花工艺技术的核心。这些国家在电火花加工表面完整性方面的研究特点主要表现为以下6个方面:

(1) 系统性。注重了对表面完整性广义数据组中各项衡量指标的研究,特别重视电火花加工工艺过程中各项因素对表面完整性的影响规律,并根据各项因素相同的变化量对不同零件表面完整性中主要的性能指标^[10](如疲劳寿命为大多数航空发动机零件最重视的性能)的影响程度,设定各项因素的权重,从而实现表面完整性的数值化评价。

(2) 规范性。在电火花加工表面完整性的研究中,严格按照表面完整性的影响规律开展研究,从加工全过程中的各项影响因素入手,研究各项因素对表面形貌、微观结构、显微

硬度等表面完整性中的几何、物理、化学特性的影响,再进一步研究几何、物理、化学特性对零件的疲劳强度等应用性力学性能的影响,从而获得电火花加工全过程中各项因素对零件主要力学性能的影响规律,并形成针对典型零件的表面完整性工艺和质量规范或标准^[11]。

(3) 深入性。经过数十年电火花加工表面完整性的研究,积累了大量的试验数据和技术基础,相关的表面完整性研究更加深入和详细,逐步渗透至电火花加工过程的各项细节中,如在研究电火花加工用电极材料对表面完整性的影响时,已经从只考虑电极材料和电极加工面积的影响,发展至就加工过程中电极材料中元素转移到零件的数量对表面完整性的影响进行研究^[12],技术分解得越细,研究就越深入,表面完整性的评价也就越具有权威性。

(4) 全面性。在电火花加工表面完整性的研究中,不仅仅针对表面完整性广义数据组中的各项衡量指标,还针对检测这些衡量指标的检测设备 and 检测方法开展研究^[13],甚至于针对不同零部件上取样部位、尺寸和频率开展研究,确定能够最准确地反映检测结果的试验数据,从而保证电火花加工表面完整性基础试验数据的真实性和可重复性。

(5) 实用性。除了应用于模具制造行业的通用性较强的电火花加工表面完整性技术研究外^[14],针对航空发动机中采用电火花工艺技术加工的工作环境不同、技术要求不同、材料不同的关键和重要零部件,均开展了侧重于检验应用效果的表面完整性研究。通过大量的工艺试验、微观分析、性能检测、成品试验,确保了工艺实施的稳定性和表面完整性规范的正确性,对于电火花工艺技术在航空发动机零部件制造中的应用具有重要的意义。

(6) 先进性。在电火花加工表

面完整性的研究中,逐步采用了数字建模技术和加工过程仿真技术^[15],通过对电火花加工过程中各项影响因素的深入研究和数据积累,已可实现部分工作状态下的全过程的虚拟制造,可对电火花加工后的表面形貌、物理和化学性能,以及疲劳性能等力学性能进行预估。经试验验证,其预估结果具有相当的合理性。正是由于这些先进的研究方法和手段的采用,缩短了电火花加工表面完整性的研究周期,降低了研究成本。

国内情况及存在的差距

随着我国整体制造技术的不断进步,我国的电火花加工工艺和装备技术也得到了快速的发展。在航空发动机零部件电火花加工技术相关的表面完整性研究方面,目前取得的进展主要包括以下3个方面:

(1) 西北工业大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、清华大学、湖南大学等高等院校已经开展了电火花加工工艺参数和加工方式对高温合金、钛合金、高强钢等材料表面完整性的影响研究,在电火花加工对表面形貌、变质层厚度、显微硬度等表面完整性评价指标的影响方面,取得了一定的成果^[14]。

(2) 北京航空制造工程研究所、西安航空发动机公司、沈阳黎明航空发动机公司等航空集团公司所属的研究所和主机厂,针对航空发动机中采用电火花工艺技术制造的关键和重要的零件,如叶片、火焰筒等,开展了电火花工艺参数、电极、机床加工方式等对零件表面完整性影响的研究,重点在于电火花加工后的变质层(再铸层和热影响区的综合)厚度和形貌的控制、电火花加工过程中避免缺陷(最为关键的是微裂纹)产生的方法、适合于不同零件特征结构加工的电火花加工方法(如采用电极直接成形的方法或成形电极轨迹加工的方法等)和机床(如有质量要求时,

采用电火花成形机床优于采用高速电火花小孔机床等)等方面,积累了相当的工艺经验,并已应用于航空发动机零部件的研制和生产过程中。

(3) 生产电火花设备的厂商(如北京阿奇夏米尔公司、安德建奇数字设备有限公司、北京电加工研究所等)为了适应电火花加工设备在航空发动机制造中应用日趋广泛的情况,主动开展了针对一些航空发动机常用材料(如典型的钛合金和高温合金等)的基础性工艺试验,建立了针对各自厂家的不同型号电火花成形机床的工艺数据库,为使用这些设备的客户提供了一些面向应用的基础性的表面完整性数据。

在正视电火花加工表面完整性在我国取得进展的同时,必须承认我国在航空发动机关键和重要零部件的电火花加工表面完整性研究方面,由于起步晚、投入不足、重视程度不够等原因,与国外还存在着巨大的差距,在技术层面上,主要表现为以下几点:

(1) 缺乏关于电火花加工表面完整性研究的指导性规范,各研究单位只能凭借各自对表面完整性的理解开展研究,造成某些方面研究重复,某些方面研究缺失的现象。

(2) 目前大部分研究只停留在微观结构和微观形貌的研究层次上,即只停留在表面完整性的最小数据组和标准数据组的层次上,还没有进行充分的研究,更未涉及到残余应力、疲劳极限和其他机械力学性能测量,研究的深入程度和研究内容远远不能满足表面完整性的需求。

(3) 尚未掌握电火花加工表面完整性研究所需的各种试验、测试的方法,对于电火花加工后残余应力的分布、梯度等指标的测量方法和仪器,以及各种所需试验的次数和方法等内容,均处于探索和简化替代的阶段,形成的表面完整性数据的通用性和可重复性不足。

(4) 没有针对航空发动机中采用电火花加工的关键和重要零部件开展系统的表面完整性研究,对于不同的电火花加工方法的适用性和应用效果缺乏评价依据和使用指导,使得不适合航空发动机热端或运动零部件加工的电火花加工方法还在应用(如用高速小孔机制孔),而正确的电火花加工方法却受到影响(如电火花成型技术)。

(5) 对于电火花加工后所采取的能够提高表面完整性水平的强化工艺技术(如喷砂、喷丸、激光冲击强化等)缺乏研究。目前尚不能确定针对不同材料和不同结构的零部件在电火花加工后,采用某种或某几种复合强化工艺技术,能否改善或提高电火花加工的表面完整性,从而影响了电火花工艺技术的推广和应用。

结论和建议

表面完整性技术可以作为控制、评价和改进包括电火花工艺技术在内的多种特种加工技术的指导,也是向“抗疲劳制造”技术发展的必要基础。对于强调高安全性、长寿命、低全寿命周期成本的大飞机发动机的制造尤为重要,是制造技术在航空发动机的应用中不可缺少的重要环节。根据表面完整性技术在国内、外的发展状况和差距,特提出以下建议:

(1) 加大对电火花加工技术等特种加工技术的表面完整性研究的支持力度,在基础研究和工程应用基础研究方面提供充足的人力、物力和财力的支持,保证特种加工的表面完整性研究能够持续和深入的发展。

(2) 开展针对采用电火花加工技术制造的典型航空发动机关键件(如采用电火花制孔的压气机导向叶片)的表面完整性应用研究和验证试验,对表面完整性研究所取得的技术成果进行实际应用考核,在此基础上,制定出针对典型航空发动机关键件的表面完整性技术规范或标准,对

电火花加工技术和表面完整性技术的推广进行技术支持。

(3) 针对多种能够提高电火花加工后表面完整性的强化工艺技术(如喷丸、喷砂、磨粒流、振动光饰等),开展系统的对比和复合研究,确定不同的提高表面完整性的工艺技术的适用范围和实施效果,并为这些强化工艺技术的应用提供相应的规范或标准。

参考文献

- [1] 刘晋春. 特种加工. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册·特种加工分册. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [3] Davim J P. Surface integrity in machining. Berlin: Springer, 2012.
- [4] 赵振业. 高强度合金应用与抗疲劳制造技术. 航空制造技术, 2007(10): 30-33.
- [5] 曾泉人, 刘更, 刘岚. 机械加工零件表面完整性表征模型研究. 中国机械工程, 2012(24): 2995-3008.
- [6] 王贵成, 洪泉, 朱云明, 等. 精密加工中表面完整性的综合评价. 兵工学报, 2005(11): 820-824.
- [7] 赵少汗, 王忠保. 抗疲劳设计: 方法与数据. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [8] Marinescu N I. Solutions for technological performances in creasing at ultrasonic aided electrodischarge machining. International Journal of Material Forming, 2009, 2(1): 681-684.
- [9] Descoeudres A. Characterization of electrical discharge machining plasmas[D]. Lausanne: EPFL, 2005.
- [10] Abbas N M, Solomon D G, Bahari M F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7-8): 1214-1228.
- [11] Hascalik A, Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). Applied Surface Science, 2007, 253(22): 9007-9016.

本文共有参考文献 15 篇, 因篇幅所限未能一一列出, 如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 亦非)