

引文格式: 潘新, 张英伟, 刘艳梅, 等. 金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障浅析[J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 34-43.

PAN Xin, ZHANG Yingwei, LIU Yanmei, et al. Applications of metal additive manufacturing technology in maintenance and support for military aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 34-43.

金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障浅析*

潘新, 张英伟, 刘艳梅, 毛剑锋, 王静, 殷俊

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

[摘要] 金属增材制造技术的发展为军用飞机维修保障提供了一条数字化、定制化、高性能、短周期的技术新途径, 可提升军用飞机维修保障的技术水平和能力。本文综述了军用飞机维修保障的国内外现状, 指出了金属增材制造技术的应用优势, 介绍了军用飞机零件的典型损伤形式、不同增材制造工艺的适用性及修复工艺选取方案, 分析了所涉及的逆向建模、结构优化、智能机器人等关键技术, 详述了目前存在的技术成熟度与可靠性不高、修复原则不明确、标准规范不统一等主要问题及解决措施, 指出了增材制造技术在军用飞机维修保障领域未来的发展方向和趋势, 并给出了具体的应用建议。

关键词: 军用飞机; 金属增材制造; 维修保障; 结构优化; 激光熔化沉积; 冷喷涂

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.034



潘新

研究员级高级工程师, 主要从事航空智能制造及装配研究, 航空工业特级技术专家, 辽宁省优秀专家, 辽宁省“百千万人才工程”百层次人选, 沈阳市领军人才, 先后获得专利 8 项, 荣获各级科技成果 12 项, 主持国家及国防重大科研项目 8 项。

对于民用飞机而言, 其维修与保障的首要目标是实现经济价值的最大化, 而军用飞机维修与保障的首要目标是实现作战能力的最大化, 其次是在此基础上寻求经济性的最优化^[1]。因此, 从实战的角度出发, 军用飞机在服役使用过程中, 要恢复、保持和提高其作战能力, 必须要有相应的维修与保障工作与之匹配。

目前, 随着各种新型军用飞机的服役, 越来越多的新材料、新结构和新技术应用于飞机零部件的制造过程中, 这给飞机的维修保障工作带来了新的挑战。尤其近年来, 金属增材制造技术在国内外日益受到重视, 其关键技术不断取得突破, 并已经实际应用于飞机关键零部件的

研发和试制^[2-6]。金属增材制造技术一般可分为广义和狭义两大类, 狭义金属增材制造主要指激光选区熔化成形、激光熔化沉积(激光熔覆)成形、电子束选区熔化成形、电子束熔丝成形、电弧/等离子弧熔丝成形 5 类基于高能束流的成形技术, 广义金属增材制造还包括热喷涂、冷喷涂、气相沉积等技术, 每一类技术的优势和特征各不相同^[7-12], 所以, 如果能充分发挥金属增材制造的技术优势, 将其应用于军用飞机的维修和备件应急保障中, 则既可以实现快速、精准、高效的保障目标, 又能够有效降低备件的库存量, 同时也满足现代战争对战地实时维修保障的实际需求。

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104000)。

军用飞机维修保障现状

飞机在使用过程中,需要定期进行维护保养,更换易损件和失效零部件。在日常的维修保障中,一个零部件的供应不及时甚至会导致整个飞机无法正常服役,停飞很长时间。在战备演习训练或实际作战情况下,飞机的抢修保障就显得更为重要,由于保障不足会导致作战时机的错失,甚至会直接决定一场战争的胜负。

对于一般故障零部件的维修,目前多数采用向飞机制造商采购原产零部件进行更换的方式,对于严重故障零部件的维修,甚至需要将飞机整体运输至制造商工厂进行全面维修,这类维修保障模式主要存在两个方面的问题。

1 维修保障需求和保障供给能力不匹配

维修保障的需求有差异,是个性化的,而保障供给是通用的。这种不匹配主要表现在两个方面。

(1) 零部件供给不足。一般军用飞机的零部件数量都在一万件以上,高性能军用飞机零部件数量甚至更多。这些零部件形状各异,材料种类繁多,且随着科技进步,新材料、新工艺和新结构的新型零部件大量涌现,各类零部件出现故障的概率各不相同,尤其新型零部件在实际应用过程中总会不可避免地出现许多意想不到的故障。战时状态下,各类飞机零部件损伤的情况更加难以估计和预测,而制造商不可能把所有零部件都当作备件进行大批量实物生产,这样会占用大量的人力、物力、财力资源,这就导致飞机维修急需的零部件制造商可能没有库存或备件。

近年来,我国航空工业取得了飞跃式发展,各类新型飞机不断服役,飞机更新换代速度加快,制造商的生产线不断更新换代,一些老旧型号的飞机生产线已经停用或报废,相对应

的零部件生产单元已无法恢复,且随着工艺水平提升,一些老旧工艺已经淘汰,这也间接导致个别常规备件无库存的情况。

(2) 零部件供给过剩。飞机制造商一般会对一些常用的易损件进行一定数量的备件生产,跟这些备件相关的图纸、工艺装备、实物备件等大量封装存放在库房中等待使用,而一旦飞机退役,跟它相关的零备件也会随之报废。在飞机服役到退役的有限时间里,大量备件甚至从未得到过使用,造成了资源的极大浪费。

2 维修保障需求和保障供给效率不匹配

维修保障需求具有及时性、便捷性,而零部件备件的生产制造是需要周期的,且可能是跨地域协作。飞机零部件数量巨大,种类繁多,使用现场不可能存放所有的零部件备件。如果飞机的某个零部件出现故障,而使用现场又找不到备件进行更换维修,在影响飞行安全的情况下,飞机如不能实现转场维修,那就只能等待备件运送至使用现场。飞机制造商在批生产过程中,一直面临着科研型号任务和维修保障任务冲击和占用批生产资源的矛盾,这种矛盾在近些年新型号不断研发和老旧型号陆续将要退役的背景下表现得尤为突出,有的时候不得不将维修备件的生产任务延后,这使得飞机维修周期无法得到有效保障。在老旧生产线已经停用或生产工艺已经更新换代的情况下,为了生产某个特定的备件,需要重新启用专用制造设备,有的甚至需要专用的工具和工装夹具或者需要采购特定的原材料,以保证备件整套制造工艺和使用性能与原件相同。飞机制造商在这种情况下,在具体组织实施过程中需要克服非常大的困难,调动和协调的资源价值有时候远远超过了备件本身,间接导致了生产成本的增加。

金属增材制造应用于军用飞机维修保障的技术优势

金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障中可有效解决传统维修保障模式存在的问题,具有独特的技术优势。

1 数字化敏捷制造

数字化敏捷制造解决了传统备件生产周期长、效率低、需要大量辅助配套设施和资源的问题,避开了焊接、组装、夹持固定等繁琐工序,简化了复杂的制造流程,因此极大地缩短了生产周期。增材制造的数据源是零件的三维工艺模型文件,原材料是金属粉末或丝材,设备相对精小,可实现设计、加工、后处理、检测全流程的数字化控制。对于中小尺寸的备件,从三维工艺数模设计到精加工完成,整个生产周期一般小于一周,有的甚至十几个小时就能得到成品。因此,增材制造备件的复杂程度对生产制造周期的影响不大,与传统制造相比,对于一些特别复杂异形结构件的制造,采用增材方式后其生产周期反而会更加明显地缩短。

2 定制化制造

定制化制造解决了传统备件供给不足或供给过剩的问题。增材制造以三维数模为驱动,只要有急需备件的三维模型就可以实时生产,因此,备件生产和库房库存可以实现有效的动态平衡,减少对大量库存的依赖程度。无论是某个单件的制造需求还是一定数量的小批量制造需求都会得到快速满足,且不会因为备件数量的多寡增加生产周期或成本。

3 修复再制造

修复再制造解决了军机维修成本高的问题。飞机在服役过程中每个零部件的工况条件和受力状态各不相同,零部件受到各种突发、非正常工况及其他一些因素的作用,待修复区的形状和位置千差万别,且修复加工的费用必须低于新制零件的

费用,否则修复就失去了批量应用价值。增材修复再制造可以将失效件、磨损件或缺损件的局部区域重新修复到原厂零部件的形状、尺寸精度和性能状态,同时满足每个零件个性化的修复需求。即使不同材料的多个零件也可以根据每个零件的具体修复形状和位置自由调整修复方案,无需频繁改变辅助条件,修复可完全实现个性化,并且不会增加制造成本。此外,增材修复再制造降低了传统加工工艺对大面积厂房库等资源的依赖程度,甚至整套生产设备可以放置到特制的交通工具上,实现车载、舰载、机载等远距离机动运输,成为移动工厂。如我国和美国均研制了“移动零件医院(MPH)”方舱^[13-15],通过增材制造和数控加工技术实现了损伤零件的现场修复或重制,并已经实际应用于军事战场,该类型增材制造方舱设备如图1^[14-15]所示。未来战争必然是快节奏的高技术战争,维修人员和装备也必须紧随作战部队进行大规模机动转场,该类方舱装备恰好符合极强战场机动性的要求,有助于战时快速反应、快速部署及快速维修能力的实现。因此,利用增材制造来修复飞机缺损零件是一种经济且高效的方法。基于增材制造技术的军机零件修复应用实践,已从最初的发动机叶片损伤修



图1 “移动零件医院(MPH)”方舱
Fig.1 Mobile parts hospital shelter

复逐步发展到飞机框、梁、摇臂、支架、起落架活塞杆等各类零件的表面缺陷及损伤修复^[16-18]。

综合上述分析,金属增材制造应用于军用飞机维修保障的技术优势可以概况为:无需大量备件,突发保障能力强,前线修复能力足,后方修复或重新制造新零件周期短且方式多。

金属增材制造应用于军用飞机维修保障的典型工艺方案

1 可修复性评估和分类

可修复性是指通过一定的技术手段修复失效零部件使其恢复自身使用性能,甚至使其使用性能超过新制造零部件的能力。当军用飞机零部件使用性能劣化或失效后,首先要对其可修复性进行评估和分类。零部件使用性能劣化或失效可分为表

面涂层类、内部材料强度类、形状尺寸超限类3类,各类别典型损伤表现形式及可修复性见表1^[19]。

一般而言,综合考虑经济性和修复周期,增材修复表面涂层类和形状尺寸超限类损伤效果较好,修复部位与基体冶金结合良好,修复后失效零部件的各项性能可基本恢复至原有性能甚至有所提升。而对内部材料强度类损伤,有时修复并不经济,故本着安全从严的原则,可采用增材制造方式新制零件予以更换。

2 维修工艺方案选取

军用飞机金属构件大致可分为机身、起落架、机翼、平尾垂尾、发动机等5个部位,各部位零件类型、材料和劣化失效类别有所不同,所采用的增材修复或新制工艺也有所差异,如图2所示。

由于铺粉类固有的工艺特征决

表1 飞机零件典型损伤形式和其可修复性

Table 1 Typical damage failure pattern and reparability assessment of aeroplane parts

性能劣化或失效类别	典型损伤表现形式	可修复性及措施
表面涂层类	划伤、擦伤、浅表点蚀、氧化变色等	较强,增材修复
内部材料强度类	断裂、压裂、疲劳裂纹、剥离、缺损、分层、深度腐蚀烧蚀等	弱,增材新制
形状尺寸超限类	磨损、变形、卡滞、间隙超差、密封泄露、局部凹坑等	较强,增材修复



图2 不同部位零件损伤形式及维修工艺

Fig.2 Typical damage failure pattern and maintenance technologies of different components

定了它只适用于金属零件全新制造,不适合用于受损零件的修复,其他几类技术既可用于零件制造,也可用于受损零件的修复。此外,在成形效率、精度、尺寸、环境要求、安全性等方面各类增材工艺也有所不同,如表 2^[20]所示,需要根据失效零件的损伤类别和典型特征综合选取合适的维修工艺方案。

基于金属增材制造的军用飞机维修保障关键技术

1 逆向建模技术

金属增材制造必须以三维模型为制造数据源,而三维模型的获取方式主要有原始三维软件设计和逆向建模两种。对于一些老旧型号飞机而言,其零件一般是以二维图纸、模线样板或专用模具为依据进行制造的,随着生产线拆除和样板模具的报废,已经很难通过原始图样来精准构建维修零件的三维整体设计数模,这时就必须采用逆向建模技术。逆向建模的工艺流程一般是借助一定

的数据采集技术获得零件的空间三维点云数据,然后再使用专业建模软件将点云转化为网格,再由网格拟合重建生成光顺的曲面、平面、实体等特征,最后将特征拟合重构成三维高精度实体模型。目前主要的数据采集技术包括常规测量、三坐标测量、三维扫描测量、激光跟踪测量、工业 CT 测量等,各技术的应用特征及局限性见表 3^[21]。三维模型获得后的应用主要分两种情况:(1)增材成形全新零件。针对没有三维数模的老旧零件或经过评估已经失去维修价值的零件,可在新模型基础上进行标准模型修正,再选取合适的增材制造技术来生产全新的零件,用以替换受损的零件。(2)增材修复零件。即利用逆向建模方法获取的模型与原始的标准模型做比对,找出缺陷部位、类型及尺寸分布特征并构建精准的三维缺陷模型,根据缺陷模型规划增材修复的方式、材料、路径、工艺参数及运动程序等,最后驱动设备对零件的缺陷依次进行修复成形。

表 2 不同增材制造工艺的适用性

Table 2 Applicability of different additive manufacturing technologies

工艺类别	成形效率	成形精度	成形尺寸	环境要求	安全性	零件失效类别	零件典型特征
铺粉类	中	高	小	高	低	内部材料强度类	小而精,复杂异形
同步送粉类	高	低	大	高	中	形状尺寸超限类	大而简,机加可达
高压喷粉类	低	高	大	低	低	表面涂层类	浅表局部,异质
同步送丝类	高	低	大	中	高	形状尺寸超限类	大而简,机加可达

表 3 逆向数据采集技术的应用特征对比

Table 3 Characteristic comparisons of different data acquisition methods based on reverse technique

技术类别	综合精度	获取速度	内部特征	外形特征	成本
常规测量	0.5mm	慢	严重受限	严重受限	低
三坐标测量	0.5 μ m	慢	严重受限	无限制	高
三维扫描测量	40 μ m	快	严重受限	无限制	适中
激光跟踪测量	20 μ m	慢	严重受限	受限	较高
工业 CT 测量	30 μ m	较慢	无限制	无限制	高

2 定向能量沉积技术

定向能量沉积技术中的激光熔化沉积成形技术是国内外关注和研究最多,也是最成熟的一种增材制造技术,它在航空航天领域的最典型应用就是对受损零件的修复。在修复过程中,通常采用增减材复合制造手段,即首先对受损件进行全尺寸三维扫描测量,通过和原始设计数模的精准对比确定零件的受损部位和程度,进而针对某单一零件进行个性化的修复方案制定。其次利用激光熔化沉积技术对受损区域进行同种金属的增材填充成形,然后结合数控加工减材技术,去除增材后的余量材料,最后为保证修复的尺寸精度需再次进行修复部位的三维测量。在未来,开发集成高精度测量定位、缺陷域模型重建、增减材制造路径自动规划等于一体的辅助制造软件或系统,将有助于复杂几何结构零件的快速自动化修复,尤其对于外形轮廓性很强且受损较严重的零件,增材修复将比换新件更加经济高效。

3 面向增材制造的结构优化技术

在某些情况下,军用飞机的磨损零件修复的意义已经不大,必须更换全新的零件。这时主要有两种情况:一种是基于传统设计方案,只是采用增材制造方式来制造全新的零件;另一种是面向增材制造工艺的结构功能一体化优化设计方案,即在充分利用增材制造工艺特征优势的基础上,面向功能需求重新设计零件。与第 1 种方案相比,第 2 种方案更符合未来主流的修复技术发展方向和应用趋势。

由于增材制造技术本身受制造工艺约束较少,因此在重新设计零件时可将传统基于“工艺优先”的设计模式向基于“性能优先”的设计模式转变,在兼顾生产效率与经济性的同时,采用拓扑优化结构、蜂窝点阵结构等更优的创新构型设计思路,通过结构空间上的复杂性和多样性实现

功能上的集成和使用性能上的综合最优^[22-27]。飞机上一些如接头类、支架类零件经拓扑优化后,在保证高性能的同时较传统结构可减重 30% 以上,且新的零件构造也更加体现了结构设计和制造中的艺术美感,如图 3^[28]所示。

4 智能机器人技术

智能机器人有别于传统的工业机器人,它具有感知、识别、推理和判断的能力,可以根据外界条件和环境的变化,在一定范围内通过自主学习来修正执行程序,通过总结经验来获得优化程序。在飞机零件增材制造修复过程中,由于零件外形尺寸、受损部位和程度千差万别,不可能仅仅依靠一套标准程序和参数完成各类零件的修复,且修复过程中大量的测量、示教编程、数据分析、轨迹规划等工作如果全部依赖人工来完成,将极大降低维修效率,增加维修周期和成本。因此,未来智能化机器人技术和数字化增材制造技术紧密结合,恰好满足了飞机单一零件个性化高精度修复的应用需求,在损伤零件大面积区域的缺陷检测和图像处理、局部修复区的精准识别和定位、复杂曲面的自动化编程和轨迹参数优化等方面将大大提升飞机零件增材制造修复技术的灵活性和应用空间。美国 GE 公司已经将机器人辅助的冷喷涂技术应用于飞机零件的修复中,如图 4^[29]所示。

5 基于增材工艺的模拟仿真技术

增材修复过程涉及一系列复杂变化的瞬态力热耦合过程,且待修复零件的缺陷位置和大小不尽相同,因此,需要结合增材修复工艺针对具体零件开展工艺模拟仿真分析。增材工艺模拟仿真应针对整个增材设计制造链的各个环节,包括拓扑优化设计、工艺参数调整验证、成形工艺过程、后处理过程等,借助模拟仿真达到零件宏观精准控形和微观稳定控性的目的,减少工艺试错,解决宏观

上的翘曲、变形、开裂及微观上的气孔、熔合不良等问题,保证修复质量稳定性,提升一次修复合合格率。

金属增材制造在军用飞机维修保障方面存在问题及应对建议

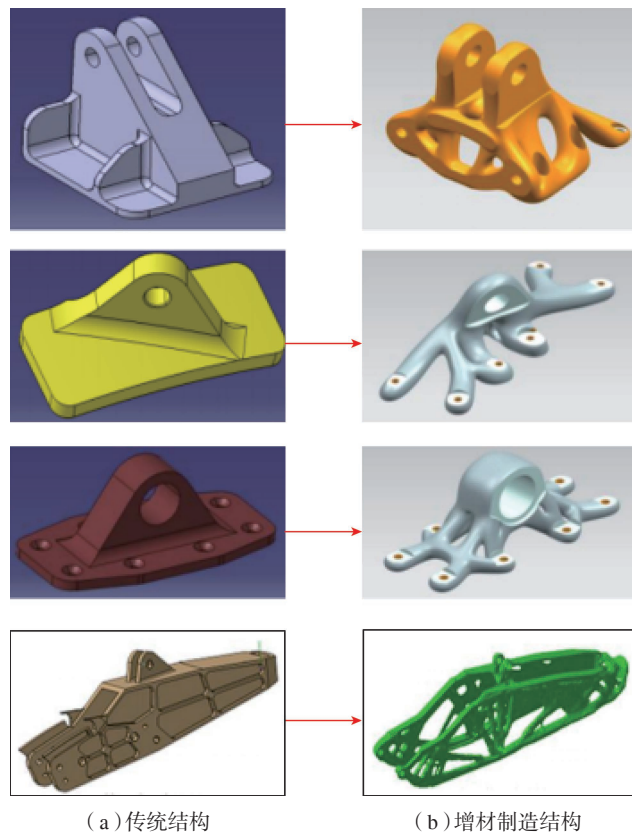
1 存在的问题

目前,金属增材制造技术在飞机

维修保障方面虽然已经取得了很多重大的进展,但是相对于工业革命后积累了上百年研究、应用和发展经验的近代传统制造技术而言,金属增材制造依然存在着许多的问题和不足,主要体现在 3 个方面。

1.1 技术成熟度与可靠性的问题

金属增材制造技术经过几十年的发展,虽然技术成熟度不断提升,



(a) 传统结构 (b) 增材制造结构

图 3 传统结构与增材制造结构对比

Fig.3 Comparison of traditional structures with additive manufacturing structures



图 4 机器人辅助的冷喷涂技术应用于飞机零件修复

Fig.4 Maintenance of aeroplane parts based on robot-assisted cold spraying additive manufacturing technology

但对于航空产业来说,任何新技术的应用都必须遵循循序渐进的原则。材料、工艺、装备、检测、质量控制等环节,都要经过严格的考核和可靠性认证,在被确认是成熟的且具有高可靠性的技术后才会被允许装机应用。从这个角度来看,金属增材制造的备件离真正的规模化装机应用还有很长的路要走。增材制造的备件无论在制造商工厂还是战时抢修现场,虽然可以快速完成备件制造或修复,但该备件的可用性和可靠性在程序上有待验证确认,这种备件不能直接装机使用,而必须经过严格测试或多轮评审,证明其与原始零件具有完全可替换性,才被允许装机使用,这种情况在关键部件和主承力部件上体现得更加明显。目前,金属增材制造的备件或维修件应用研究的对象主要是非关键部件和非结构部件,因为这些零部件风险性更小,即使在使用过程中发生损伤或失效,飞机也不至于坠毁,不会对飞行安全造成威胁,这也反映出金属增材制造零部件应用在飞机维修方面,其安全性和可靠性是面临的最大挑战。美国空军给出的增材制造零部件绝对安全可靠的参考标准是万分之一以下的不合格品率或故障率,即在10000个金属增材制造零部件中不能找出多于一个的不合格品,或在10000个金属增材制造零部件使用过程中不能出现大于一次的失效或故障情况^[30]。因此,美国空军在飞机维修方面也处于谨慎使用金属增材制造零部件的阶段。

1.2 修旧如旧还是修旧如新的问题

飞机维修需要更换的零部件多数是采用传统制造技术生产的,而备件制造希望通过增材制造技术生产,在这个过程中,零件的结构形式和材料类别等都没有变化,只不过是制造方式发生了改变,即采用新技术制造“旧”零件。这个“旧”不是指零件是旧的零件,而是指零件的设计理念

和结构形式是基于传统制造技术的,是“旧”的。而增材制造技术真正的潜力在于创新设计理念,增强工艺实现能力,满足精准构型和整体功能需求,而不是简单的制造方式或方法的替代,这也是有些零部件采用增材制造优势并不明显的内在原因。目前,在新机研制过程中,利用增材制造技术,实现了随形内流道、复杂薄壁、复杂内腔、镂空点阵、多部件集成等复杂结构形式零件的制造及应用,但在飞机备件制造和维修方面,却还在修旧如旧的道路上徘徊不前。因此,飞机维修和备件保障不应该继续采用逆向工程或图纸精准复制原物以实现简单替代的旧道路上发展前进,而是应该开辟一条修旧如新的新道路,即采用增材制造技术,结合零部件的具体结构形式和功能需求,重新精准设计、优化和制造,以实现精准维修和整体综合性能的提升。例如,可依据损伤零件的部位和损伤特征,基于增材制造技术制备具有梯度复合结构特性的备件,如图5^[31]所示。这类梯度复合结构在力学性能上有别于同质结构,可显著提高结构减重效率

及疲劳寿命,具有承载、耐热、抗蚀等多功能特性^[31-32]。点阵轻量化结构、异形内流道结构和拓扑优化结构等新构型也正在被越来越多地研究,以期未来能慢慢应用到备件领域,如图6^[22]所示。俄罗斯的苏霍伊设计局甚至构想飞机机身大部段乃至整机机身结构都采用拓扑优化构型,以期更好地减重和扩大作战半径,如图7所示。当然,这种新结构在实际应用过程中会产生维修成本增加、风险增大等一系列具体的困难和问题,这些都是需要逐一克服和解决的。

1.3 标准化的问题

标准化是增材制造技术成熟的主要标志,也是其规模化应用的基础和前提。在飞机维修和保障方面,增材制造的标准化困境主要表现在3个方面。

(1) 原材料未成体系。

粉体或丝材等原材料是金属增材制造的“粮食”,研究开发出更高质量的原材料是增材制造广泛应用的首要条件。相对于传统金属材料上千个牌号而言,目前适用于金属增材制造的材料牌号仅仅数十种,尤其

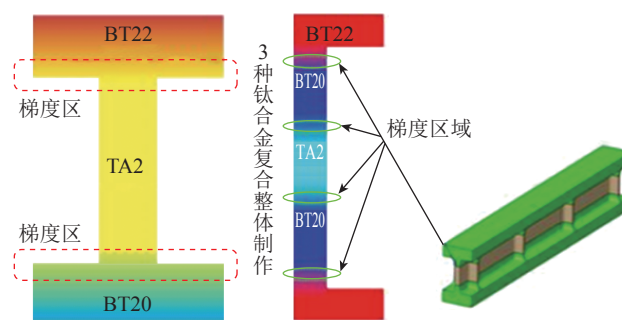


图5 梯度复合结构

Fig.5 Material graded structure

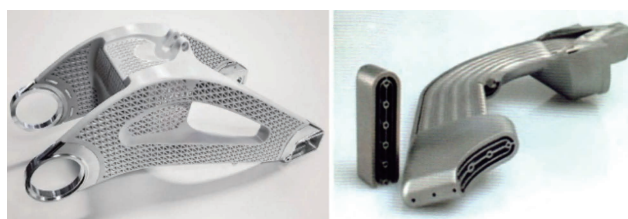


图6 点阵轻量化结构与异形内流道结构

Fig.6 Lightweight lattice structure and inner flow channel structure

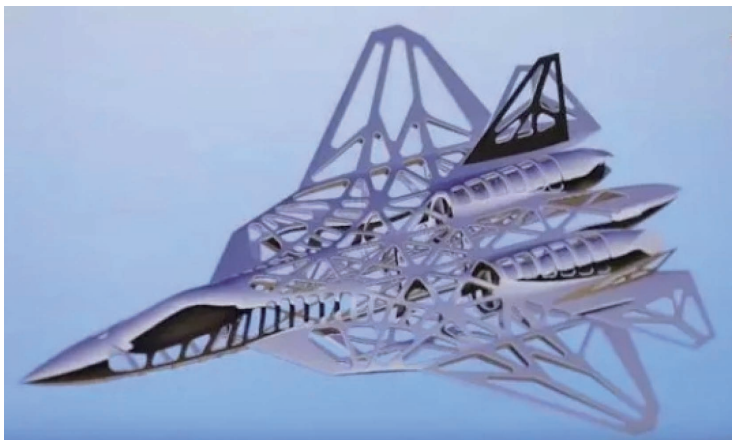


图7 飞机机身结构拓扑优化设计
Fig.7 Topology optimization in aircraft fuselage structures

缺少基于工艺特征的对现有材料改性的材料或新开发的材料,这使得材料基础性能数据匮乏,导致可用于飞机零部件维修的材料种类有限。在工艺和装备逐渐趋于成熟的条件下,原材料体系的不健全对应用端的限制和制约越来越明显,如果材料供应商不加大新合金材料和多工艺复合低成本制粉/制丝技术的研发投入,飞机维修保障面临的“粮荒”问题很难在短期内得到有效解决。

(2) 设备不统一,工艺不通用。

目前,虽然主流的金属增材制造设备的基本组成结构大体相同,但每个制造商的设备都有自己的独特之处,在成形尺寸、能量源功率和束径、送粉/送丝方式、成形精度、预热温度等方面都不相同,甚至原材料、工艺软件和工艺参数也都是各自开发。原材料、设备和工艺紧密绑定,没有相关标准来对其兼容性和质量要素进行规范,这使得同一个飞机零部件若在不同厂家的设备上制造,其工艺不一定通用,必须开展工艺适应性试验和验证,这无疑导致了生产周期的延长和成本的增加。

(3) 性能评价与认证体系不完善。

增材制造零件和传统锻造或铸造零件在成形工艺、显微组织、力学性能、缺陷类型、检测方法等方面是有差异的^[33],一项增材制造零部

件是否能够安全可靠地使用,需要通过一系列力学性能指标和无损检测方法来评价。力学性能表征需要建立材料的全面力学性能数据库,但目前所研究和使用的材料牌号较少,积累的力学性能数据也很有限,性能数据库并不完善,且各制造商的材料性能数据并不直接共享,一些新研材料甚至没有性能数据指标。此外,由于增材制造件组织和缺陷存在不均匀性和各向异性等特征,超声检测、射线照相检测、工业CT检测、荧光渗透检测等方法与标准不能直接沿用,否则易出现识别和界定增材制件的缺陷类型、尺寸、数量、分布等特征不到位或存在检测盲区等问题^[34-36]。目前,采用什么标准方法、什么规定设备能有效识别不同类型缺陷,采用常规方法检测不准或无法检测的缺陷又怎样判定等一系列问题还缺少统一的评价标准和认证规范。

2 应对措施及建议

针对以上存在的问题,应对措施的核心是建立面向重点行业企业的国家重大装备领域的应用示范体系,通过应用示范的带动效应牵引全产业链条的发展,促进技术成熟度的提升及应用标准规范体系的建立和完善。现阶段要鼓励和引导航空航天等企业从源头上挖掘增材制造技术

的应用空间,从结构设计、制造工艺、制件后处理、质量检测、性能验证、应用及评价6个方面加强科研院所与应用企业的协作创新,防止各立山头,单打独斗,同时支持和鼓励国家级行业协同创新平台的建立,通过不断扩大的应用市场带动整个产业链的发展和相关问题的解决。

金属增材制造在军用飞机维修保障方面的应用方向与建议

1 军用无人机大胆应用

无人机是由人为操纵的不载人飞机,主要用于完成特殊的军事侦察或作战任务。未来无人机将主要分为3大类,即高空长航时无人机、高速机动无人机和低成本无人机,其任务和用途也会从主要用于侦察逐步发展到通信中继、电子对抗、后勤补给和空中打击等领域。这要求无人机在有限的体积内要具有更轻的质量、更好的力学性能以及实现更大的任务载荷的能力。有些无人机甚至要将78%~80%的机体质量让渡给燃油、武器和隐身补偿等系统^[37],这使得无人机的零部件朝着轻量化、整体化、拓扑化、结构功能一体化方向发展。一些特异形状和结构的零部件一旦损伤,采用传统的制造方法制造成本很高甚至难以实现,而采用增材制造技术生产这类零部件在缩短制造周期的情况下几乎不会增加额外成本。因此时效性和经济性是无人机维修保障时选择增材制造技术的首要因素。此外,增材制造技术应用于无人机维修和保障的风险性相对更小,一些小型无人机在损伤的情况下甚至可以整体更换外部构件,这可以显著提升作战效率,降低作战装备成本,具有真正的实战应用意义。

2 军用有人机由点及面有序推进

有人机维修保障中,使用零部件的高可靠性和保障人的绝对安全性是首要的考虑因素,因此未经过全面

考核验证的零部件是不能直接装机使用的。飞机零部件一般可分为关键件、重要件和一般件,对于一般性的零件,其损伤后对飞行安全是不会造成影响的,因此,采用增材制造生产的备件可先从一般性零件开始尝试应用,逐步考核验证,有序推进,慢慢应用到关重零件上。例如,对于接近退役的飞机,其零部件早已停产,在库存备件已经用完的情况下,其升级改造过程可尝试使用增材制造技术生产一些非关键零部件,且可以有效结合逆向工程和结构优化技术制造轻量化和整体化类型的零件,这样可以有效延长其服役期,提升作战飞机的可用性和出勤率,在此过程中,逐步考核验证其零件的可靠性和稳定性。在长期积累的大量数据和实践经验的基础上,将增材制造的备件逐步应用到现役飞机和关重零部件上。

3 地面随机保障设备和工具可全面应用

军用飞机离不开地面保障,随着飞机型号和种类越来越多,保障设备和工具的规模也越来越大,而保障设备和工具本身也是需要维修和备件的,这类设备和工具的通用性程度一般不高,存在大量的专用设备和维修工具。战场环境下这类设备和工具的使用与平时有很大不同,突出表现为使用频率大、强度高、磨损快、换新时效性高。此外,在实战中,地面保障设备很容易成为敌方攻击的目标,一旦遭到摧毁或损伤,就会使飞机失去所依赖的保障条件,因此,地面保障设备和工具也应考虑机动作战要求,提升快速维修效率,降低转场携带的数量和规模。增材制造技术在这方面恰恰有其独特优势,特别是战损时能够实现本地化生产和快速修理,数模可通过逆向工程或远程网络传输获得,这将大大提高备件更换的时效性,缓解地面保障装备和工具的发展滞后于军用飞机装备

发展的矛盾。

金属增材制造在军用飞机维修保障领域的发展趋势

随着军用飞机从三代、四代向五代、六代发展,大量的在役飞机需要维修和保障,金属增材制造技术在飞机维修保障领域的应用时间比较短,但应用空间是巨大的。随着金属增材制造技术体系的不断发展,上下游技术产业的不断完善,金属增材制造在飞机维修保障领域未来的发展趋势主要体现在3个方面。

(1) 技术能力的提升与融合。目前增材制造技术在成形效率、成形精度、材料种类及表面质量等方面还有很大的提升空间,一些新技术如多能量源或复合能量源大幅域成形技术、过程在线监测与数据分析技术、粉末自动筛分循环技术、4D增材技术等不断涌现和发展,各技术之间的交叉融合与优势互补性逐步加强,未来增材制造的技术能力会有大幅提升。

(2) 技术装备的智能化、复合化与模块化。人工智能、5G通讯、大数据等技术将越来越多地融入增材制造装备中,未来装备的智能化程度会越来越高,装备拥有自主的推理、判断和决策能力,甚至通过人机对话就能实现增材制造过程。一台装备可以复合多种增材制造工艺,如增减材复合一体化、激光熔覆与冷喷涂复合一体化等,且装备可以模块化组装与拆分,方便战场状态下的运输与维护。

(3) 原材料的系列化、复合化与安全性。未来增材制造专用的原材料将逐渐标准化和系列化,一些复合材料如金属-陶瓷复合粉体、纳米增强复合丝材等应用会越来越广泛,且粉体会更加安全,适合携运且没有爆炸等危险。

结论

针对军用飞机维修保障存在的保障供给能力不足和供给效率较低等问题,利用金属增材制造的快速响应敏捷制造、定制式制造和维修再制造等独特优势,提高金属增材制造的技术应用成熟度,不断完善无人机、有人机和地面随机保障等军用飞机产品的金属增材制造维修保障体系,提升保障供给能力,提高保障供给效率,推动金属增材制造技术在军用飞机维修保障领域应用的广度和深度。

参考文献

- [1] 何宇廷,张腾,崔荣洪.基于作战效能的军用飞机维修与保障[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(1):1-6.
HE Yuting, ZHANG Teng, CUI Ronghong. Maintenance and support for military aircraft based on the combat effectiveness[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 1-6.
- [2] 苏亚东,吴斌,王向明.增材制造技术在航空装备深化应用中的研究[J].航空制造技术,2016,59(12):42-48.
SU Yadong, WU Bin, WANG Xiangming. Research on further application of additive manufacturing technology on aviation equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 42-48.
- [3] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等.3D打印技术研究现状和关键技术[J].材料工程,2016,44(2):122-128.
ZHANG Xuejun, TANG Siyi, ZHAO Hengyue, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122-128.
- [4] 黄卫东,林鑫.激光立体成形高性能金属零件研究进展[J].中国材料进展,2010,29(6):12-27,49.
HUANG Weidong, LIN Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27, 49.
- [5] 汤海波,吴宇,张述泉,等.高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势[J].精密成形工程,2019,11(4):58-63.
TANG Haibo, WU Yu, ZHANG Shuquan,

et al. Research status and development trend of high performance large metallic components by laser additive manufacturing technique[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 58-63.

[6] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.

WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.

[7] 关桥. 焊接/连接与增材制造(3D打印)[J]. 焊接, 2014(5): 1-8, 73.

GUAN Qiao. Welding/joining technologies and additive manufacturing(3D printing)[J]. Welding & Joining, 2014(5): 1-8, 73.

[8] 耿海滨, 熊江涛, 黄丹, 等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J]. 焊接, 2015(11): 17-21, 69.

GENG Haibin, XIONG Jiangtao, HUANG Dan, et al. Research status and trends of wire and arc additive manufacturing technology[J]. Welding & Joining, 2015(11): 17-21, 69.

[9] 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂技术在增材制造和修复再制造领域的应用研究现状[J]. 焊接, 2016(4): 2-8, 73.

LI Wenya, ZHANG Dongdong, HUANG Chunjie, et al. State of the art of cold spraying additive manufacturing and remanufacturing[J]. Welding & Joining, 2016(4): 2-8, 73.

[10] LI W Y, LIAO H L, LI C J, et al. On high velocity impact of micro-sized metallic particles in cold spraying[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2852-2862.

[11] SINGH H, SIDHU T S, KALSI S B S. Cold spray technology: Future of coating deposition processes[J]. Frattura Ed Integrità Strutturale, 2012, 6(22): 69-84.

[12] 陈玮, 李志强. 航空钛合金增材制造的机遇和挑战[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 30-37.

CHEN Wei, LI Zhiqiang. Additive manufacturing of aerospace titanium alloys: Opportunities and challenges[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 30-37.

[13] 李岳彬, 魏世丞, 盛忠起, 等. 方舱技术发展综述[J]. 机械设计, 2019, 36(4): 5-11.

LI Yuebin, WEI Shicheng, SHENG Zhongqi, et al. Summary of the development of shelter technology[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(4): 5-11.

[14] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 16-22.

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, et al. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 16-22.

[15] 张连重, 李涤尘, 崔滨, 等. 战场环境3D打印维修保障系统—装备快速保障利器[J]. 现代军事, 2017(4): 110-112.

ZHANG Lianchong, LI Dichen, CUI Bin, et al. 3D printing system for maintenance and support in battle field environment—The most effective and powerful tools of military equipment[J]. Conmilit, 2017(4): 110-112.

[16] 曹强, 程宗辉, 张志强. 激光熔覆技术在飞机修理中的应用[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2015, 15(1): 39-42.

CAO Qiang, CHENG Zonghui, ZHANG Zhiqiang. The application of laser cladding on aircraft repair[J]. Journal of Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, 2015, 15(1): 39-42.

[17] 郭双全, 钱磊, 谢京, 等. 微束等离子弧增材制造技术在航空发动机维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2015, (8): 75-76.

GUO Shuangquan, QIAN Lei, XIE Jing, et al. Application for micro plasma arc additive manufacturing technology in aero-engine maintenance[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015, (8): 75-76.

[18] 秦仁耀, 张学军, 于波, 等. 飞机端颈轴的激光3D熔覆维修[J]. 航空维修与工程, 2015, (9): 125-126.

QIN Renyao, ZHANG Xuejun, YU Bo, et al. 3D laser cladding repair of aircraft end journal[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015, (9): 125-126.

[19] 龚群甫, 安小慧. 增材制造修复技术在飞机大修中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2020, (3): 49-53.

GONG Qunfu, AN Xiaohui. Application of additive manufacturing repair technology in aircraft overhaul[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2020, (3): 49-53.

[20] 马振书, 陈广森, 马东玺, 等. 面向装备应急保障的金属增材制造技术[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(6): 119-124.

MA Zhenshu, CHEN Guangsen, MA Dongxi, et al. Metal additive manufacturing technologies used in equipment emergency support[J]. Ordnance Material Science and

Engineering, 2016, 39(6): 119-124.

[21] 闫超. 基于激光选区熔化快速制造的零件模型重构与结构再设计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.

YAN Chao. Research on model reconstruction and structure redesign rapid manufacturing method of metal parts based on selective laser melting[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.

[22] 朱继宏, 何飞, 张卫红. 面向增材制造的飞行器结构优化设计关键问题[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 16-21.

ZHU Jihong, HE Fei, ZHANG Weihong. Key optimization design issues for achieving additively manufactured aircraft and aerospace structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 16-21.

[23] ORME M, MADERA I, GSCHWEITL M, et al. Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware[J]. Designs, 2018, 2(4): 51.

[24] SONG B, ZHAO X, LI S, et al. Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2015, 10(2): 111-125.

[25] LIU J K, GAYNOR A T, CHEN S K, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2457-2483.

[26] MEZZADRI F, BOURIAKOV V, QIAN X P. Topology optimization of self-supporting support structures for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 666-682.

[27] LEARY M, MERLI L, TORTI F, et al. Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures[J]. Materials & Design, 2014, 63: 678-690.

[28] 朱胜利, 郭超, 寇廷清. 拓扑优化技术在整体结构件上的应用[C]//2017 Altair技术大会论文集. 南京: 澳汰尔工程软件有限公司, 2017.

ZHU Shengli, GUO Chao, KOU Yanqing. Application of topology optimization technology in monolithic components[C]//Proceedings of 2017 Technology Conference on Altair. Nanjing: Altair Engineering, Inc, 2017.

[29] ALEX DERBER, 李璇. 数字化时代的发动机维修[J]. 航空维修与工程, 2019(12):

22-24.

ALEX Derber, LI Xuan. Engine repair in the digital age[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(12): 22-24.

[30] 朱丽娅, 刘劲华, 陈宇. 美国空军利用 3D 打印解决航空维修中的部件短缺问题[J]. 航空维修与工程, 2016, (10): 22-24.

ZHU Liya, LIU Jinhua, CHEN Yu. The utilization of 3-D printer in US airforce's aircraft part maintenance[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016, (10): 22-24.

[31] 王向明, 崔灿, 苏亚东, 等. 飞机高能束增材制造结构研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 16-21.

WANG Xiangming, CUI Can, SU Yadong, et al. Aircraft structures technology based on power beam additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 16-21.

[32] 王向明, 苏亚东, 吴斌. 增材技术在飞机结构研制中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 16-20.

WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin.

Application of additive manufacturing technology on aircraft structure application of additive manufacturing technology on aircraft structure Development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 16-20.

[33] 郝晓宁. 激光增材制造毛坯与传统锻件铸件差异性分析[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 82-86.

HAO Xiaoning. Difference analysis between laser additive manufacturing and conventional forging and casting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 82-86.

[34] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.

YANG Pinghua, GAO Xiangxi, LIANG Jing, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13-21.

[35] CERNIGLIAD, SCAFIDIM, PANTANO A, et al. Inspection of additive-manufactured

layered components[J]. Ultrasonics, 2015, 62: 292-298.

[36] 胡婷萍, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 70-75, 87.

HU Tingping, GAO Limin, YANG Hainan. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 70-75, 87.

[37] 刘磊, 刘柳, 张海鸥. 3D 打印技术在无人机制造中的应用[J]. 飞航导弹, 2015, (7): 11-16, 49.

LIU Lei, LIU Liu, ZHANG Hai'ou. Application of 3D printing technology in UAV manufacturing[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015, (7): 11-16, 49.

通讯作者: 张英伟, 高级工程师, 硕士, 研究方向为增材制造技术的航空应用及其标准规范体系, E-mail: saczyw@163.com。

Applications of Metal Additive Manufacturing Technology in Maintenance and Support for Military Aircraft

PAN Xin, ZHANG Yingwei, LIU Yanmei, MAO Jianfeng, WANG Jing, YIN Jun
(AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] The development of metal additive manufacturing technology provides a new way on the research of digitization, personalized customization, high-performance and short period for the maintenance and support of military aircraft, which can improve the technical level and ability of military aircraft maintenance and support. In this paper, the current situation of military aircraft maintenance and support at home and abroad is summarized and the application advantages of metal additive manufacturing technology are pointed out. The typical damage forms of military aircraft parts, the applicability of different additive manufacturing processes and the selection scheme of repair process are introduced and the key technologies such as reverse modeling, structural optimization and intelligent robot are analyzed. The main problems as well as the solutions of low technology maturity and reliability, unclear repair principle and inconsistent standards and specifications are described in detail. The paper also points out the future development direction and trend of additive manufacturing technology in the field of military aircraft maintenance and support and gives specific application suggestions.

Keywords: Military aircraft; Metal additive manufacturing; Maintenance and support; Structural optimization; Laser melting deposition; Cold spraying

(责编 雷松)