

金属材料增材制造技术在直升机中的应用发展研究



温学,何志平

中国直升机设计研究所,江西 景德镇 333001

摘要: 本文分析了金属材料增材制造技术的发展现状,包括金属材料增材制造工艺的分类及特点、原材料、主要设备供应商和研发方向、增材制造工件所需的主要后处理方法;回顾了增材制造技术在直升机中的应用现状,提出增材制造技术尚未用于制造直升机机体承力部件的主要原因(存在疲劳强度较低、成形精度较差、成本较高等问题);展望金属增材制造在直升机结构拓扑优化设计、结构整体化设计、结构功能一体化设计及维护保障中的应用前景;提出增材制造技术在直升机应用的三个阶段。

关键词: 先进制造技术;直升机;金属零件;增材制造;应用;航空领域

中图分类号:TF306

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.09.007

增材制造技术又称3D打印技术,是一种通过三维CAD设计数据,采用材料逐层累加原理制造实体零件的技术,本质是焊接技术^[1]。相比传统的材料去除成形技术,增材制造技术对原材料的利用率更高,可以降低钛合金材料零部件的成本;同时,增材制造支持个性化设计和复杂结构的成形制造,可以满足结构减重需求。因此,增材制造概念自20世纪80年代被提出以来,迅速受到航空航天、医疗器械等行业的重视并不断发展,目前已实现多种金属材料、树脂材料、复合材料等零部件的增材制造^[2]。高质量、高效率、低成本逐渐成为增材制造领域的热点研究方向,业界越发关注增材制造零件的尺寸精度、表面粗糙度、力学性能;对于致密零件会关注致密度、抗拉强度、延伸率;对于多孔零件会关注孔隙率和抗压强度。直升机与其他飞行器的显著区别在于旋翼系统及其带来的全机动力学设计问题,不断有改进的新构型被研发出来以满足运输、反潜、预警、通信、搜救、消防等领域的需求,增材制造技术为直升机复杂精密的零部件轻量化设计和制造提供了实现途径。

1 金属材料增材制造技术发展现状

1.1 金属材料增材制造技术的分类

金属材料增材制造技术于20世纪90年代进入我国,到

2017年金属材料增材制造产值约为23亿元,约占增材制造产业的31%^[3],目前金属材料增材制造技术的热源主要有激光、电子束、电弧等。

金属材料增材制造技术按工艺不同可以分为:(1)粉床熔融工艺,包括激光选区熔融法(SLM)、直接金属激光烧结法(DMLS)、激光束熔融法(LBM)、激光选区烧结法(SLS)、金属黏合剂喷射成形法(MBJ)、电子束熔融法(EBM)等;(2)直接能量沉积工艺,包括激光直接沉积工艺(DLMD)、电弧熔丝增材制造(WAAM)、喷墨液态金属法、冷喷涂沉积法等。

其按原材料物理状态不同可以分为:(1)基于粉末的激光粉末床熔融工艺、电子束粉末床熔融工艺、送粉式激光能量沉积工艺、冷喷涂工艺、金属激光烧结工艺等;(2)基于丝材的等离子弧沉积工艺、电弧沉积工艺、电子束沉积工艺、送丝式激光沉积工艺、金属熔融沉积成形工艺;(3)融合电阻焊、搅拌摩擦焊等工艺的复合增材制造技术,基于焊棒的液体金属打印工艺,基于分散剂的纳米粒子喷射工艺,基于金属颗粒的金属熔融沉积成形工艺等。

每种工艺都有其固有的优缺点,如金属直接沉积法中的激光熔化沉积技术,其原理是同轴送粉、激光熔覆,优点在于成形尺寸较大,但是成形精度低、残余应力大的问题较

收稿日期:2022-05-18;退修日期:2022-06-20;录用日期:2022-07-16

引用格式:Wen Xue, He Zhiping. Application and development of additive manufacturing technology in helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(09):58-65. 温学,何志平. 金属材料增材制造技术在直升机中的应用发展研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(09):58-65.

为突出。而电子束熔丝成形(EBF)工艺,原理是金属丝材的电子束融化和层层堆积,其优点是沉积速率高(20kg/h)、成形尺寸大,缺点是成形尺寸精度低。因此,需要根据零件的结构特征和服役特点选择较为适合的增材工艺。

1.2 原材料

金属增材制造的原材料研制一直是国际级难题,也是增材制造技术发展的“瓶颈”。金属增材制造技术所用的原材料主要为合金粉末和合金丝材,金属粉末的形状、粒度、氧含量、杂质成分、松装密度等因素对材料成形的质量有较大影响^[4];丝材的直径均匀度和元素含量波动度对成形中熔融沉积的稳定和整体化学元素的均匀分布有明显影响。高质量、多种类的原材料制备技术一直是增材制造领域的热点研发方向。

1.3 设备

增材制造技术的主要工艺都集成在设备中,因此设备的性能直接影响增材制造零件成品的质量。一台增材制造设备通常会集成多项关键技术,因此设备研发生产难度较大,国内外只有少数厂家拥有完全自主知识产权的增材制造设备。以我国的激光融化沉积设备为例(见图1),其硬件主要包括光学系统、粉末系统以及保护系统三大部分,其主要控制参数包括扫描速度、扫描路径、激光功率、铺粉厚度等。设备的主要成本来自激光器的价格,且主要元器件均为进口。由于相关技术理论还不成熟,最优增材制造工艺参数主要通过大量试验获得,而能否提供丰富的材料成形数据库也是衡量增材制造设备是否成熟的重要标识。控制系统也是设备的主要难点,烧结路径的不同对零件残余应力分布、零件致密度等主要性能都有重要影响。



图1 激光融化沉积系统

Fig.1 System of laser metal deposition

目前国产化设备主要存在设备批次稳定性较难控制的问题,与进口设备相比,打印尺寸、效率、精度等还存在技术差距^[5],缺乏打印过程的质量监控系统。

国内外知名企业也在不断推出速度更快、成形质量更

好、成形尺寸更大、价格更低的设备,增材制造设备的研发逐渐向着较少后处理量、低能源消耗、产品零残余应力方向发展。内部缺陷的控制、成形过程中的变形开裂预防、产品的质量一致性等方面有待进一步提升。

1.4 后处理

增材制造虽然是一种“近终形”成形工艺,但目前还很难实现工件成形后直接应用,往往还需要一些后处理辅助工序。如在成形后首先需要采用线切割等方法去除基板和支撑;对于成形工件表面粗糙、尺寸精度不够的问题,往往还需要对工件进行机械加工;对于工件存在孔隙等微观组织缺陷问题,需要采用热等静压(HIP)技术降低工件的孔隙率,提升工件的机械性能;对于熔覆顺序带来的工件组织力学性能不一致问题,需要对工件进行热处理;对疲劳性能有特殊要求的工件,在对工件进行机械加工后还需进行喷丸等表面强化处理,引入有益于工件疲劳强度的表面残余压应力^[6]。后处理工序会显著增加制造时间和成本,因此缩减甚至取消后处理工序是增材制造技术未来的发展方向之一。

1.5 产品检测与性能评价

金属增材制造的本质是焊接,气孔、夹杂、未熔合、裂纹等焊接缺陷几乎不可避免,由于增材制造工件多为复杂结构,无损检测难度大。常见的无损检测方法可以分为离线检测与在线检测两类。离线检测的特点是制造与检测过程分离,传统的超声波探伤、X射线探伤、涡流探伤等都是常用的离线检测方法。随着金属增材制造技术的不断进步,增材制造零件逐渐呈现出复杂化、精细化的特点,这对无损检测技术提出了更高的要求,CT检测技术和激光超声检测技术也开始应用于成形件的无损检测。

为了降低成本、提高成材率,研究机构和企业已经开始寻求金属增材制造过程中的无损检测方法,简称在线检测技术。它通过实时监控成形过程中的组织变化、缺陷产生等现象,随时做出工艺调整。目前,国外公司(如美国国家航空航天局(NASA)、英国焊接研究所(TWI)、德国的MTU公司等)已经开展增材制造过程在线检测方法的研究工作,国内相关工作目前还未见报道。

在增材制造产品检测的标准化方面,国内虽然开展了相关无损检测标准的制定工作,但尚未形成完整的标准体系。国外在这方面的工作进展较大,目前AMS 4999A标准中对3D打印TC4钛合金的无损检测验收要求做出明确规定,但并未详细说明如何实施,而是直接引用了AMS2631、ASTM E1742等通用的金属制件检测方法。美国NIST正在制定标准ASTM WK47031《航空用增材制造金属制件无

损检测指南》,ASTM还制订了增材制造产品无损检测系列标准研究计划。

金属增材制造产品的力学性能评价方面,主要进行了拉伸、蠕变、疲劳及其与传统工艺生产的锻件的对比等力学性能方面的研究。研究表明,金属增材制造产品的熔融沉积态性能呈现各向异性,具体表现为平行于沉积方向抗拉强度低而塑性好,垂直于沉积方向抗拉强度高而塑性差。经过适当的热处理后,在成形参数设置合适时,材料的力学性能与疲劳寿命可以与锻件相当。因此,在进行金属增材制造产品的力学性能测试时,可以依据常规金属材料的力学性能测试标准(如GB/T 228.1、GB/T 4161、GB/T 2039、GB/T 3075)进行。

2 金属增材制造在直升机零件制造中的应用现状和技术难点

2.1 应用现状

(1) 辅助型号设计定形

在型号研制阶段,经常会遇到一个零件多种设计构型的选择问题,这时需要将设计构型的实物制造出来进行考核验证,如果采用传统的制造工艺,则要考虑原材料加工、模具准备等工序,经济和时间成本较高,而采用增材制造技术,可以快速完成多个构型试验件生产,缩短试验件加工周期,从而保证型号研制进度。

(2) 制造机体结构的非承力部件

俄直公司将增材制造技术用于制造通风系统部件、内部装饰设备、多媒体系统的固定装置等;米里直升机厂应用增材制造技术制造了符合人机工程学的米-38直升机控制杆,如图2所示。



图2 3D打印的控制杆

Fig. 2 3D printing lever

(3) 发动机组件的制造

2017年赛峰直升机引擎公司推出的AW189K直升机用Aneto-1K发动机,其燃烧室由增材制造部件组成,且其导向叶片为增材制造;黑鹰直升机民用版机型发动机A-CT7中段部分通过采用增材制造技术,制造工人由原来的60人减少到1人,将300个零部件整合成了一个零件。

2.2 直升机承力零件增材制造应用技术难点

(1) 疲劳性能较低

增材制造技术之所以尚未大范围用于制造直升机机体的承力部件,主要是因为存在三个方面的技术难点。首先,力学性能方面,直升机零部件的耐疲劳性能是设计人员关注的重要指标之一,而增材制造产品的疲劳强度一般低于传统工艺(如锻造加工制造的产品)。这是因为增材制造技术逐层累加成形过程中存在“台阶效应”,如果不经后续机械加工处理,增材制造产品的表面通常比较粗糙,粗糙的表面通常被认为是疲劳裂纹萌生的位置。但也有研究表明,经过机械加工处理的钛合金增材制造试件可以与传统锻压工艺钛合金试件有相当的疲劳强度^[7]。另外,增材制造系统包含大量的变量,这些系统变量会在零件中引发气孔等缺陷^[8],降低零件的力学性能,目前尚未全部研究清楚这些系统变量对产品微观组织和力学性能的影响,而如何降低这些变量引发缺陷的概率,从而提高增材制造产品的力学性能,也需要进一步研究探讨。

(2) 尺寸调控难度较大

成形精度方面,直升机零部件有严格的尺寸精度要求和装配精度要求,但是目前增材制造零件的成形精度还很难实现一次成形就尺寸达标^[9-10],打印设备、成形方向、材料性能、工艺参数、后处理过程都会对增材制造零件的尺寸精度产生影响^[11-12],因此成形后往往还需要进行机械加工以保证产品尺寸满足设计要求。另外,金属材料由熔融态到凝固成形,材料状态变化引起的尺寸收缩会使零件产生内部应力,导致被打印零件可能出现形变弯曲问题^[13],且打印零件的尺寸越大则变形控制难度越大。

(3) 成本较高

成本控制方面,成本是直升机尤其是民用直升机考虑的主要因素之一,而目前增材制造零件存在成本较高的问题。主要原因有:(1) 高质量原材料的成本较高,如钛合金粉末的价格高达7000元/kg,而普通钛合金材料的价格只要每千克几百元^[14];(2) 增材制造设备较贵,尤其是进口工业级设备的售价可以达到每台2000万元,而且零件采用传统增材制造工艺成形效率较低;(3) 前后处理步骤也会增加增材制造零件的时间和经济成本。

3 金属增材制造在直升机中的应用前景和应用策略

3.1 应用前景

(1) 结构拓扑优化设计

结构拓扑优化设计技术,又称创成式设计技术,经过几

十年的发展,已经被证实是一种高效的结构设计方法,在航空航天结构轻量化、高性能设计领域具有广阔应用前景,但受限于现有加工技术,其实际应用面临巨大挑战。郭文杰^[15]等对某型无人机翼梁结构开展刚度拓扑优化设计,优化后的结构满足强度、刚度设计要求,同时减重达到6%。胡添翼^[16]等对飞机典型双耳结构连接件进行拓扑优化设计,如图3所示,优化后的双耳结构连接件满足强度设计要求,且可减重26.8%。柴象海^[17]等对航空发动机风扇叶片进行拓扑优化设计,优化后叶片空心率提高到45%以上,并基于增材制造技术试验验证了优化后风扇叶片的抗冲击性能有显著提升。

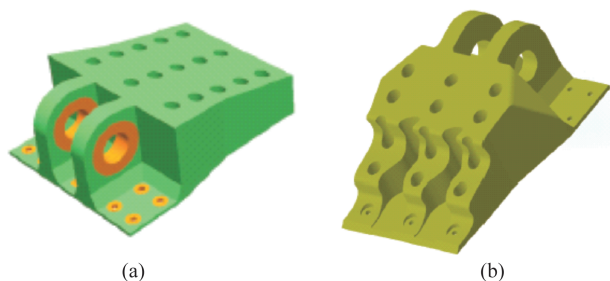


图3 典型双耳接头结构

Fig.3 Double-ear joint of aircraft

拓扑优化设计后结构往往会变得复杂,很难应用传统的加工工艺精确制造,这严重制约了直升机零部件的最优化设计。而增材制造技术可以比较容易实现复杂结构的制造,使直升机设计人员不需要顾虑零件加工难度,可以按最优方案完成直升机设计。

(2) 结构整体化设计

主体框架与结构整体化是工业产品形态的趋势之一,是指将由多个零件连接而成的装配组件变成单件整体结构,实现结构效率最优化。结构整体化设计可以大幅减少工业产品零部件的数量,并随之带来可观的经济效益。如一辆传统汽车的零部件数量大约为20000个,而美国Local Motors公司采用结构整体化设计的两座家用汽车——斯特拉提,整个车身仅由40个部件组成,且重量大幅降低^[18]。再如GE公司生产的LEAP燃油喷嘴,如图4所示,采用结构一体化设计后,部件数量由20个缩减为1个,同时减重25%,成本降低30%,部件寿命提升5倍。

直升机零部件数量众多,通常为15000个以上,受限于目前的加工制造技术,结构整体化设计尚未得到推广应用。目前,这些零件通过装配、焊接、铆接、胶结等多种方法连接起来构成直升机的部件。而接头部位由于存在几何应力集

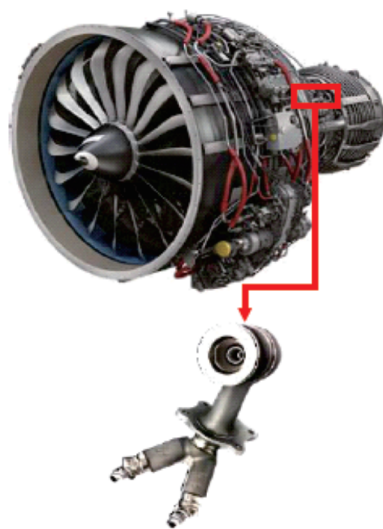


图4 LEAP发动机燃油喷嘴

Fig.4 Fuel nozzle of LEAP engine

中和连接工艺引入的缺陷和残余应力,往往是结构承载时优先发生破坏的位置。而增材制造技术可以实现结构的一体化成形,从而大幅减少直升机零部件数量,进而有效降低结构在接头部位失效的风险,同时也减少了设计人员和零件加工制造人员的工作量,缩短直升机交付周期。如“黑鹰”直升机民用版机型发动机A-CT7中断结构采用增材制造一体成形技术,将300个零部件整合成1个零件,实现减重超过4.5kg,如图5所示。

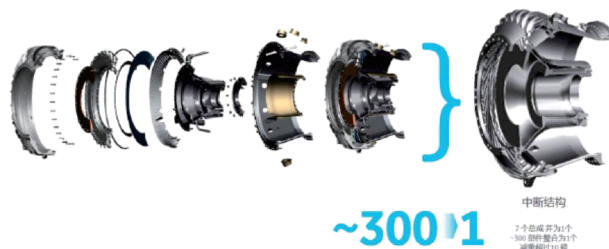


图5 “黑鹰”发动机A-CT7中断结构

Fig.5 Interruption structure of A-CT7

(3) 结构功能一体化设计

结构功能一体化设计,通常是指将功能元件嵌入平台结构中形成既可作为力学承载结构,同时又可以实现某些功能的结构。如结构功能一体化天线将集成微带天线阵列的射频功能件嵌入武器平台结构中,既可以作为力学承载的蒙皮结构,又可作为收发电磁波的微波天线,还能够满足结构轻量化、武器装备隐蔽性的需求。

结构功能一体化设计在直升机中应用前景广阔,如直升机的抗坠毁、抗冲击能力对于飞行员生命保障有着非常

重大的意义,但是增加过多的吸能设备会增加直升机重量,反而不利于直升机的战场生存能力,而结构功能一体化设计可以在不增加重量甚至减重的情况下满足结构抗冲击的需求。如直升机的缓冲器/压溃支撑部件如果采用孔隙结构或者格栅结构,可大幅提高其抗冲击吸能性能。但是结构功能一体化设计的零部件由于结构复杂很难通过传统工艺制造出来,而增材制造技术能够解决这一问题,实现复杂结构直接制造,促进结构设计创新,如增材制造的空间点阵夹芯结构,重量轻、刚性好,而且散热性能优异,可以同时满足装备减重和散热的需求,如图6所示。

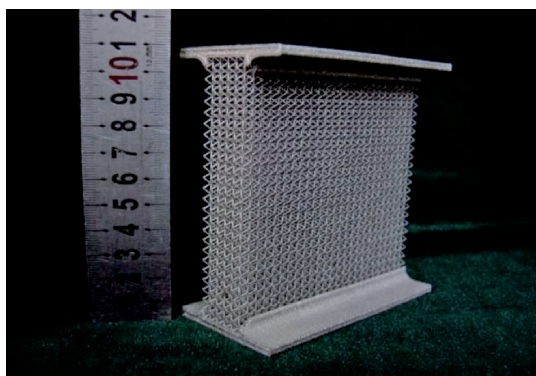


图6 空间点阵夹芯结构

Fig.6 Space lattice sandwich structure

(4) 直升机维护保养

直升机由于技术复杂、零部件繁多,加之战损机理多变,其对维修保养技术的要求较高。现代战争的突发性要求军队具备快速反应和强机动能力,这同时要求军事装备维修保养能力必须与战争的迫切需要相适应,不断向快速化、自动化、综合化方向发展。应用增材制造技术可以实现直升机部件的即用即打,修复发动机叶片、整体叶盘、框架、钛合金桨毂等高价值零件,在降低维修成本的同时提高直升机的战场效能,从而顺应装备维修保养能力的发展趋势。另外,随着直升机型号的不断更新,老型号的直升机生产线逐渐被改装拆除,可能导致老型号直升机的零部件无法供应,而增材制造技术可以解决这一问题,并且显著缩短零件供应周期、降低生产成本。

同时,在保障物资运输环节,增材制造技术优势明显。娄颖达^[19]等以维护保养中的保障物资运输环节为例,通过对比分析应用增材制造技术情况下,摆放方向约束等物资装载约束条件相较传统约束条件的大幅简化,以及所带来的构件物资配置算法的复杂度的大幅减小,证明了在现有集装箱总装载容积一定的前提下,以打印原材料的运输替

代传统保障中的成品备品备件运输,可以将箱容率从78%提高到90%以上,运输效率显著提升,便于军事装备维修保障部门以最短时间将平时积聚的保障力量转化成战时保障能力。

利用增材制造技术省时、节约、高效率的优势,BAE系统公司预测未来前线特种部队甚至可以在执行任务途中使用便携的,在任务结束后这些无人机可以快速溶解回收的原材料^[20]。

3.2 应用策略

充分考虑目前增材制造技术的成熟度以及直升机零部件的结构特征和服役工况,增材制造技术在直升机上的应用分为三个阶段。

(1) 夯实技术基础

针对直升机现有的采用传统铸、锻工艺制造的零件,探索拓扑优化设计加增材制造成形技术,实现零件减重的目标。需要型号设计单位和国内增材制造优势单位通力合作,在突破关键技术问题过程中,力争在原材料、设备、后处理、检测与性能评价等基础研究领域有所突破,为增材制造进一步的型号应用打好技术和理论基础。

(2) 实现直升机一般承力件的增材制造

针对直升机机体结构上有一定疲劳性能要求的金属零部件,根据材料和特征结构的疲劳裂纹萌生扩展特性,探索增材制造加表层微锻造(表面强化技术)加表面改性(激光熔覆技术)等技术对成形件疲劳性能的改善效果,实现疲劳性能优于传统工艺制造的零部件,从而在型号上推广应用。

(3) 实现直升机重要承力件的增材制造

对于旋翼系统对疲劳性能有苛刻要求的金属零部件,结构特征更为复杂,服役环境更为多样,需要在前两步工作的研究基础上,视技术成熟情况,适时推进型号应用。

4 结论与展望

增材制造技术是直升机先进构型设计制造和高效维护保养能力的重要支撑技术之一,因此俄直公司预测未来10年,增材制造技术在直升机零部件制造市场具有广阔前景,或将用于制造机体、旋翼的承力部件,并计划从增材制造技术角度对各零部件进行重新设计,对其进行耐久性试验以确定增材制造零部件的性能与被替换的类似零部件具有等同或者更优秀的性能。据Asiatimes网站2020年10月19日报道,美国陆军正对“黑鹰”直升机约20000个结构零件进行增材制造产品替换评估,这种按需打印零件可以使一线部队摆脱后勤挑战,并使其更具机动性。

但也要清楚地看到,增材制造技术在直升机零件制造领域还存在制件疲劳强度低、成形精度差、成形效率不高,以及旧粉的利用率较低等技术问题,这些技术问题的根源在于原材料质量控制^[21-22]、设备工艺控制^[23-24]、产品后处理技术及产品检测与性能评价等基础研究领域的研究还不够深入,而解决这些问题将是增材制造领域未来的发展方向。目前,国内外已经有很多公司和研究机构开展相关方向的研究工作,如针对增材制造零件精度较低、需要机械加工、次品率较高、成形效率较低的问题,有研究人员提出集成更先进的打印精度控制算法^[25-26],从而减少后处理步骤,降低后处理难度,提升制造效率;也有人提出将数控加工等后处理步骤集成到增材制造系统中,实现“打印—加工”一体化^[18],从而缩短增材制造与后处理流程间的时间。

此外,亟须开展面向直升机增材制造工件的在线缺陷检测、综合性能评价、结构考核验证、损伤评估与修复等技术研究工作,并制定相关工艺规范,形成典型结构件和配套材料、工艺、装备和适航技术标准体系^[27-30],为增材制造在直升机设计、制造、维护中的应用推广提供技术支撑。

AST

参考文献

- [1] 杨延华. 增材制造(3D打印)分类及研究进展[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 309-318.
Yang Yanhua. Analysis of classifications and characteristic of additive manufacturing(3D printing) [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 309-318. (in Chinese)
- [2] 褚威, 李欣, 牛思源, 等. 3D打印技术在无人机生产制造中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020(2): 142-144.
Chu Wei, Li Xin, Niu Siyuan, et al. Application of 3D printing technology in UAV manufacturing [J]. Computer and Multimedia Technology, 2020(2): 142-144. (in Chinese)
- [3] 万志远, 陈银平. 金属增材制造技术的研究概况[J]. 模具技术, 2020(1): 59-63.
Wan Zhiyuan, Chen Yinping. A survey on the metal additive manufacturing technology[J]. Die and Mould Technology, 2020(1): 59-63. (in Chinese)
- [4] 倪晓晴, 孔德成, 温莹, 等. 3D打印金属材料中孔隙率的影响因素和改善方法[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(3): 163-183.
Ni Xiaoping, Kong Decheng, Wen Ying, et al. Influence factors and improvement methods on the porosity of 3D printing materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, 37(3): 163-183. (in Chinese)
- [5] 关彦齐, 王芳芳. 浅析3D打印的现状与前景[J]. 科学技术创新, 2020(18): 78-79.
Guan Yanqi, Wang Fangfang. Current situation and prospect of 3D printing[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(18): 78-79. (in Chinese)
- [6] 杨鑫, 王婉琳, 范亚卓, 等. 3D打印金属零件后处理研究现状[J]. 功能材料, 2020, 51(4): 05043-05052.
Yang Xin, Wang Wanlin, Fan Yazhuo, et al. Research status of post-processing of 3D printed metal parts[J]. Functional Materials, 2020, 51(4): 05043-05052. (in Chinese)
- [7] Darin T, Greg S. Additive manufacturing for the aerospace industry[C]. American Helicopter Society 68th Annual Forum, Fort Worth, Texas, 2012.
- [8] Zhao Cang, Parab N D, Li Xuxiao, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [9] 李刚. 3D打印激光烧结技术误差原因分析[J]. 生产技术, 2020(6): 44-46.
Li Gang. Error analysis of 3D printing laser sintering technology[J]. Production Technology, 2020(6): 44-46. (in Chinese)
- [10] 孙振军. 3D打印技术在零件制造中精度及质量控制方法研究[J]. 山东工业技术, 2019(5): 65.
Sun Zhenjun. Research on precision and quality control method of 3D printing technology in part manufacturing[J]. Shandong Industrial Technology, 2019(5): 65. (in Chinese)
- [11] 章彬. 3D打印件几何精度误差的成因分析[J]. 装备制造技术, 2020(7): 128-148.
Zhang Bin. Cause analysis of geometric accuracy error of 3D printed parts[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(7): 128-148. (in Chinese)
- [12] 吴卫东, 王晓丹. 工艺参数对并联3D打印机成形精度影响分析[J]. 机械工程师, 2020(1): 15-19.
Wu Weidong, Wang Xiaodan. Influence analysis of process parameters on molding accuracy of parallel 3D printer[J]. Mechanical Engineer, 2020(1): 15-19. (in Chinese)
- [13] 张继光. 基于3D打印零件精度及质量控制方法探究[J]. 冶金管理, 2020(11): 65-66.
Zhang Jiguang. Research on precision and quality control method of parts based on 3D printing[J]. Metallurgical

- Management, 2020(11): 65-66. (in Chinese)
- [14] 柳建, 孟凡军, 殷凤良, 等. 3D打印批量制造的可行性及模式思考[J]. 电加工与模具, 2016(2): 50-53.
- Liu Jian, Meng Fanjun, Yin Fengliang, et al. Feasibility and model ponderation for volume production of 3D printing[J]. Electromachining & Mould, 2016(2): 50-53. (in Chinese)
- [15] 郭文杰, 聂小华, 王立凯, 等. 大展弦比无人机翼梁结构刚度优化设计[J]. 航空科学技术, 2018, 29(12): 8-13.
- Guo Wenjie, Nie Xiaohua, Wang Likai, et al. Stiffness optimization design of a high aspect-ratio UAV wing beam[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(12): 8-13. (in Chinese)
- [16] 胡添翼, 向佳杰, 邓屿, 等. 面向3D打印技术的飞机连接件结构优化设计[J]. 成都工业学院学报, 2020, 23(2): 9-14.
- Hu Tianyi, Xiang Jiajie, Deng Yu, et al. Optimum design of aircraft connector structure for 3D printing technology[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2020, 23(2): 9-14. (in Chinese)
- [17] 柴象海, 张执南, 阎军, 等. 航空发动机风扇叶片冲击加强轻量化设计[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(2): 187-192.
- Chai Xianghai, Zhang Zhinan, Yan Jun, et al. Lightweight design for improving aeroengine fan blade impact resistance capability[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(2): 187-192. (in Chinese)
- [18] 侯利业. 3D打印技术对工业产品形态的影响分析[J]. 包装工程, 2019, 40(14): 41-44.
- Hou Liye. Influence of 3D Printing technology on industrial product form[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(14): 41-44. (in Chinese)
- [19] 娄颖达, 张玺栋, 张恒. 3D打印在直升机维护保障中的优化应用[C]. 第三十届全国直升机年会, 2014.
- Lou Yingda, Zhang Xidong, Zhang Heng. Application of 3D printing in helicopter maintenance support[C]. Proceedings of the 30th National Helicopter Annual Conference, 2014. (in Chinese)
- [20] 王咏梅. 无人机制造业的现状与未来[J]. 直升机, 2016(4): 39-42.
- Wang Yongmei. Current situation and future of UAV manufacturing industry[J]. Helicopter, 2016(4): 39-42. (in Chinese)
- [21] 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. (in Chinese)
- [22] 李长富, 任皓显, 步佳硕, 等. 增材制造的含硼Ti-6Al-4V钛合金的组织与性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 129-137.
- Li Changfu, Ren Haoxian, Bu Jiaqi, et al. Study on microstructure and properties of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy with Boron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 129-137. (in Chinese)
- [23] 关桥, 邵亦陈. 航空特种焊接/连接技术体系的形成和发展: 中航工业北京航空制造工程研究所建所55周年纪念[J]. 航空制造技术, 2012, 55(13): 34-39.
- Guan Qiao, Shao Yichen. Formation and development of the system of non-conventional welding/joining techniques for aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(13): 34-39. (in Chinese)
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 缪晓宾, 裴江红. 基于激光技术的复杂曲面3D打印精度控制研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(6): 171-174.
- Mao Xiaobin, Pei Jianghong. Research on 3D printing accuracy control of complex curved surface based on laser technology[J]. Laser Journal, 2020, 41(6): 171-174. (in Chinese)
- [26] 石立伟, 陈兴, 王军伟, 等. 基于自适应分层的3D打印成形方向优化[J]. 计算机应用研究, 2020, 38(4): 1139-1144.
- Shi Liwei, Chen Xing, Wang Junwei, et al. Optimization of 3D printing forming direction based on adaptive layering[J]. Application Research of Computers, 2020, 38(4): 1139-1144. (in Chinese)
- [27] 卢秉恒, 侯颖, 张建勋. 增材制造国家标准体系建设与发展规划[J]. 金属加工(冷加工), 2022(4): 1-4.
- Lu Bingheng, Hou Ying, Zhang Jianxun. Construction and development planning of national standard system for additive manufacturing[J]. Metal Working(Metal Cutting), 2022(4): 1-4. (in Chinese)
- [28] 王向明. 飞机新概念结构设计与工程应用[J]. 航空科学技术,

- 2020,31(4):1-7.
- Wang Xiangming. New concept structure design and engineering application of aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology,2020,31(4):1-7. (in Chinese)
- [29] 孙诗誉,栗晓飞.增材制造零件适航审定路径分析及启示[J]. 航空科学技术,2021,32(10):42-48.
- Sun Shiyu, Li Xiaofei. Analysis and inspiration of airworthiness certification path for additive manufacturing parts [J]. Aeronautical Science & Technology,2021,32(10):42-48.(in Chinese)
- [30] 周梅萍,王中兴,赵云,等.航空领域增材制造技术专利态势分析[J].航空科学技术,2020,31(1):44-51.
- Zhou Meiping, Wang Zhongxing, Zhao Yun, et al. Analysis on patent situation of additive manufacturing technology in aeronautic field[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(1):44-51.(in Chinese)

Application and Development of Additive Manufacturing Technology in Helicopter

Wen Xue, He Zhiping

China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China

Abstract: The development status of Additive Manufacturing Technology(AMT) is first summarized, including the classification and characteristics of AMT process, preparation technology and existing problems of raw material, suppliers and R&D directions of equipment, and main post-processing methods. Then the application of AMT in manufacturing parts of helicopter is summed up, and the reason why AMT has not been used to manufacture load-bearing parts is because of low fatigue strength, poor molding accuracy and high cost. Finally the demand for AMT of advanced design methods and maintenance capabilities of helicopter structures was analyzed; "Three steps" strategy of application of AMT in helicopter is proposed.

Key Words: advanced manufacturing technology; helicopter; metal parts; additive manufacturing; application; aviation