

航空发动机零件的增材制造

中国航发航材院 黄帅

金属材料增材制造技术，又称3D打印技术、激光快速成型技术，由于能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速、全致密近净成形，成为应对飞机及航空发动机领域技术挑战的最佳新技术途径。该技术主要以金属粉末（尺寸小于1mm的金属颗粒群）、颗粒或金属丝材为原料，通过CAD模型预分层处理，采用高功率激光束熔化堆积生长（“增材制造”），直接从CAD模型一步完成高性能构件的“近终成形”。该技术可分为激光选区熔化（SLM）、激光直接沉积（LMD）、电子束选区熔化（SEBM）、电子束熔丝沉积（EBF）和电弧熔丝沉积（WAAM），如图1所示。

先进飞机的设计、材料与制造技术对于国防工业的发展有关键性的作用，先进航空制造技术是体现一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。为了提高飞机的战技指标或飞行性能以及经济性、可靠性，先进飞机和发动机越来越多地增加钛合金、高温合金、高强铝合金和超高强度钢等高强度合金的用量，且结构越来越复杂，加工精度要求越来越高，对制造工艺提出了更高的要求。此外，通常高强度合金的热加工和力学性能

加工都很困难，飞机及航空发动机中复杂高强度合金构件用量的增加，导致了高强度合金大型复杂整体结构件和精密复杂构件的制造尤为困难，成为制约先进飞机及航空发动机发展的瓶颈之一。

结合目前已有的技术成果以及航空发动机零部件的特点，增材制造技术在航空发动机中的应用优势主要如下：

拓宽设计自由度。航空发动机零部件结构复杂，传统制造需要模具加工而来。增材制造技术则跨越造模这个环节，无需刀具、模具及工装夹具，即可将任意复杂形状的设计方案通过计算机图形数据快速加工生成实体产品，并能对产品设计进行不断优化。

减少产品上市时间。通过增材制造技术制造的每件产品都是单独成形，不需要模具，使复杂的设计不再造成额外成本增加；同时与传统制造技术相比，增材制造技术通过摒弃生产线而降低成本。从产品的全过程分析，增材制造技术使一些产品零部件的库存只需要保留电子文档，而无需制造出来存在仓库，一旦有需要，直接制造即可，从而减少库存和物流工作。

降低材料成本、机加工成本。相比一些传统工艺加工的零部件相比，

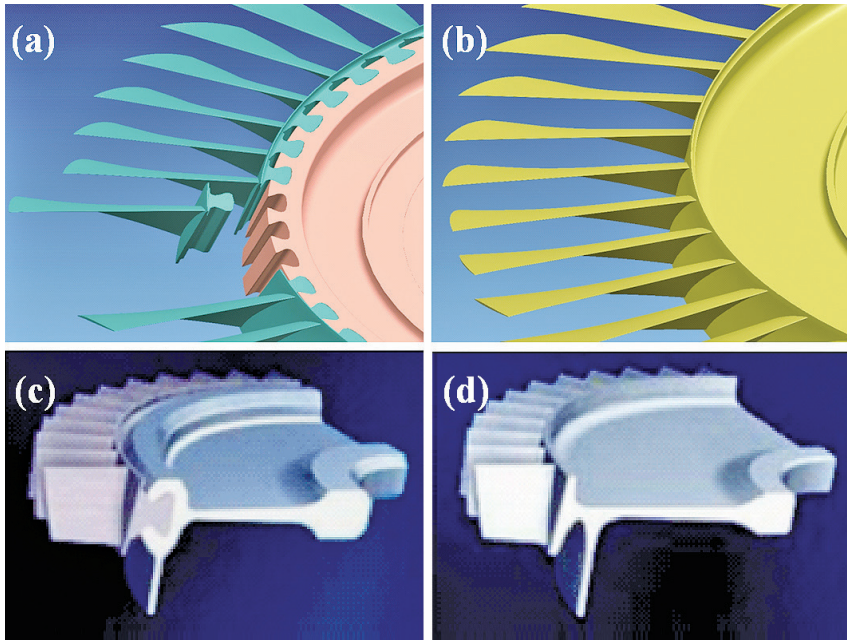


图2 整体叶盘结构示意图。

增材制造技术生产出的零部件加工余量小，加工周期短。

适合整体设计制造，提高结构效能和可靠性。如图2所示将发动机转子叶片与轮盘进行整体设计与制造，与传统结构相比，由于省去了榫头、榫槽和锁紧装置，可使发动机重量减轻20%~30%，零件数量减少50%，结构更加简化，可靠性更高。同时，避免了榫头的气流损失，提高了压气机工作效率。

但同时，增材制造技术也有一定的局限性，主要表现在以下几个方面：工艺制造。增材制造不适于直接制造高精度零件。由于通过增材制造技术制造的零件是一层一层堆积而成，所以每一层都有它的厚度，这就决定了它的表面粗糙度难以企及传统的减材制造方法。同时，由于存在一些难以克服的问题，它很难制造类似轴承、滚珠类的产品。

材料领域。增材制造技术还未形成广泛的工业应用，最主要原因是适用原材料种类有限，许多原材料不能满足设计要求。原材料是用于逐层堆积制作零部件的基础原材料，也是增材制造技术的核心。目前应用于增材制造的原材料种类较少，大量材料的应用潜能也未开发出来。

工艺方法	力学性能	成形尺寸	表面粗糙度	适用范围
激光选区	与铸件性能相当	常规尺寸	最好	成形结构、形状复杂
熔化		250×250×325mm	Ra3.2-12.8μm	杂的非承力零部件
激光直接	优于铸件，接近	最大尺寸可达到	较粗糙	成形大尺寸承力结构件或零部件修复
沉积	锻件	2000mm		
电子束选	优于铸件，接近	最大尺寸	较好	成形结构、形状复杂
区熔化	锻件	350×380mm	Ra25-30μm	杂的非承力零部件
电子束熔	与锻件性能相当	受真空室限制，最大	粗糙	成形大尺寸承力结构件
丝沉积		尺寸在2000mm以内		
电弧熔丝	优于铸件，接近	最大尺寸可达	粗糙	成形大尺寸承力结构件
沉积	锻件	2000mm以上		

图1 各增材制造技术的特点。

智能软材料在航空航天业的应用

智能软材料是一种能感知外部刺激的新型功能材料，具有可承受大变形、具备良好生物亲和性、相容性、轻质廉价等特点。智能软材料及其智能器件有巨大的潜在应用前景，在智能仿生、机械、医疗、军工等领域有广泛的应用。研究人员一直致力于智能软材料在航空航天领域应用的研究。

智能软材料及其分类

软物质是指处于固体和理想流体之间的物质。软物质“小作用，大响应”的特点预示着它对于外部刺激可以具有特定而显著的响应，它的属性中的某些参量可通过一个外部条件而改变，并且这种变化是可逆的，还可以重复多次。将软物质的这些特殊的性质加以研究和利用，就可以制备出具有智能特性的软物质材料。

智能软材料针对外界的刺激（如温度、电场、光、磁场等）能够产生不同程度的形变而体现出活性。作为新型智能软活性聚合物材料的代表，形状记忆聚合物、电致活性聚合物主动软材料、电/磁流变材料以及高分子水凝胶材料将日益显示出巨大的应用前景。

形状记忆聚合物（SMPs）

20世纪80年代以来，形状记忆聚合物及其复合材料在航空航天领域的应用已得到广泛的研究。这些前景光明的智能材料正在空间展开结构、变形结构、智能轴、光学反射镜以及智能纺织面料等特殊领域中得以开发和验证。

空间展开结构：传统的空间展开装置在轨道中的结构形状变化需要通过铰链来实现，铰链中储存有能量单元或马达驱动工具。这些传统设备有其自身缺点，如装配工序复杂、体积庞大以及展开过程中存在副效应。相反，采用SMPs及其复合材料制备的展开设备可以克服上述某些缺点。利用形状记忆聚合物基复合材料（SMPC）设计的铰链，可以驱动太阳能帆板阵列，此连接由2个曲面的SMPC圆壳组成。每个SMPC复合材料的重量远低于传统设备。

变形结构：将航空器设计成多功能型是为了使其在飞行中完成更多任务，如巡航效率更高，机动性更好。当航空器进入不同的飞行包络线时，其性能会快速恶化。为了解决这个问题，研究人员已经提出航空器在飞行过程中的形状实时变化系统。相应地，通过调整具有不同目标特征（如速度、能耗及机动性）的飞行形状，可改善飞行器飞行效率和飞行包络线。因此，寻找不同特定情况下的合适的蒙皮非常重要，而SMPs的弹性模量可以通过外部刺激进行可控改变，在这方面的应用具有更多优势。

可变弯度机翼的变形概念已提出，可变弯度机翼由柔性SMP蒙皮、金属面板及蜂窝结构组成。金属板代替了传统的铰链，并且可以保持弯度变化过程中的表面光滑度。蜂窝结构在一个方向具有高应变变能力，而在垂直于飞机轴向上的方向没有尺寸变化，以支撑柔性蒙皮。柔性SMP机翼蒙皮可以形成光滑的气动表面。

智能芯轴：具有复杂结构的芯轴通常用于模压和纤维缠绕复合材料零件，传统的芯轴工艺多使用多块金属组合或水溶性芯轴材料，耗时切耗能。对于某些异形飞机结构件，如空气导管和瓶状零件，芯轴很难拔出。由于SMPs具有很大的可逆变形的特征，可以用于设计复杂形状的智能芯轴并便于芯轴取出。这种芯轴可以维持像传统芯轴相当的尺寸精度，并且可以快速脱模和重复使用，成本也较低。

将SMP空心芯轴加热到转变温度以上，SMP变成柔性且可在金属模腔的限制下扩展成理想的芯轴形状；然后，SMP再被冷却变回坚硬固态，以精确复制模腔。将纤维缠绕到SMP芯轴上制造复合材料零件，待复合材料固化后，将SMP芯轴重新加热到转变温度以上使芯轴恢复到初始形状利于芯轴拔出。

介电弹性体材料

EAP材料是一种具有重大发展潜力的智能多功能材料，它具有的大变形、高机电转化效率、快速响应、质量轻、极佳柔性和回弹性等的优

点使得介电弹性体材料应用于驱动器浮空器飞艇舵、固态飞行器等方面，在航空航天和机械工程等领域显示出巨大的应用潜力。EAP材料在航空航天领域的应用潜力已经初步显示出来。传统的空间探测器窗口除尘机械刷不仅重量大而且结构复杂，而基于EAP驱动器，可以制成空间用智能除尘刷，具有重量轻、结构紧凑、驱动功率低等优点，可减轻空间探测器的重量。

2007年，瑞士联邦材料测试研究所提出采用介电弹性体制作飞艇舵驱动器，能够控制飞艇的自由转向。从2002年，俄亥俄航天局开始了基于电致活性聚合物材料进行新概念飞行器——固态飞行器SSA研究。

太空碎片已逐渐成为在轨道运行的航天器的重大威胁。而基于介电弹性体的最小能量消耗夹持器，由于其具有重量轻、能耗低等特点，与机械式抓取结构相比具有独特的优势，故已逐渐在抓取空间碎片的方向上做出努力。

电磁流变材料

电磁流变材料是一种特殊流体能够应用到航天航空、机械工程、汽车工程、控制工程和机器人研究领域，用于制造离合器、液压阀、智能控制、减振系统等。

电流变阻器：西北工业大学设计和制作了用于防止飞机操纵面颤振的电流变阻器。理论计算和模型实验结果表明，用电流变阻器作为机翼操纵面的集中阻尼环节，通过改变阻尼铰的阻尼来改变系统阻尼，可使机翼颤振临界速度提高36.3%。

电流变减振器：电流变液体减振器作为一种在一定范围内阻尼力由电场快速无级调节、结构简单、功耗小的新型阻尼可调减振器，是利用电流变液体作为减振器工作液，通过施加外加电场改变电流液体的抗剪应力和粘度，从而获得可变阻尼。电流变减振器两极板之间的电流变液在电场的作用下粘度、抗剪切强度增加。这样的作用可用于抵抗外界的振动以及外力的影响。此种结构可用于振动缓冲器受高压、小

位移的运动情况。

电流变离合器：电流变离合器利用了电流变液体的“液—固”间的瞬时可逆变化的特性，不仅可以避免普通离合器的缺点，且具有结构简单、操作方便、无磨损、噪声低、响应快、无级可调工作可靠等优点，因而是理想的航空航天用离合器。

直升机旋翼磁流变阻器：马里兰州大学的研究人员对直升机旋翼叶片用的磁流变阻器的特性进行了研究，为磁流变阻器的应用奠定了相应的技术基础。美国军队研究实验室资助的“阿帕奇”直升机机关枪磁流变后坐阻尼器项目，针对AH-64“阿帕奇”直升机开发了半主动后坐阻尼系统。该系统使用美国LORD公司开发的磁流变减振器，结合数字控制系统，抑制安装在机身前端的30mm口径炮在发射期间产生的后坐负荷，提高“阿帕奇”直升机的杀伤力60%和命中率80%。

电致动聚合物材料

NASA资助了有关电致动聚合物的研究，利用静电伸缩聚合物和离子聚合物+金属复合材料分别制成了航天除尘器、钳子和机械臂。其中除尘器用离子聚合物+金属复合材料制成，用于清除视窗上的尘埃。另一个应用就是开发微小型机械臂。用静电伸缩聚合物制成的致动器用于伸缩手臂，4个离子聚合物+金属复合材料制成的钳子用来握紧石头或其他物体。在抓取石头的时候，4个钳子活像人类手一样工作。此外，NASA喷气式推进实验室（JPL）研制IPMC作为人工关节多自由度机械手。

智能软材料 航空航天领域应用总结

智能软材料的发展呈现出的复杂性和跨学科性，需要各个学科的协同发展，才能取得突破性进展。智能软材料已经发展了30多年，但是大部分研究成果只是停留在实验室，未能全面推向航空航天领域应用，主要原因是因为智能软材料在应用过程中遇到的问题未能解决，需要制备出高性能的智能软材料，这是当前智能软材料的前沿研究。（高端装备发展研究中心）

无人机系统发展呈现新趋势

垂直起降技术 将应用到新一代无人机系统中

在军用小型无人机系统处于领先地位的制造商 AeroVironment 公司，目前正将垂直起降（VTOL）技术从商用无人机领域整合到其下一代战术无人机系统中。

AeroVironment 与 FlightWave 航空系统公司预计将在 Xponential 展会上宣布达成战略合作伙伴关系，这也是此次展会上的一系列重要合作项目之一。

FlightWave 公司开发了“边缘”混合式三旋翼固定翼无人机，其垂直起降能力能够提供更高的速度、飞行范围和续航能力，而 AeroVironment 公司计划在其 Puma 和 Raven 固定翼无人机的基础上，将垂直起降技术融入未来的小型无人机中。

AeroVironment 公司战术无人机系统副总裁大卫·沙尔宾表示：“FlightWave 公司的‘边缘’无人机系统提供了与我们公司具有创新性的下一代无人机系统系列相匹配的独特功能。通过与 FlightWave 公司的合作，我们可以加速为客户交付具有更强功能的下一代无人机系统。”

无人机系统集成商收购小型发动机制造商逐渐成为新趋势

在另外一项合作中，瑞士—瑞典

旋翼无人机系统开发商 UMS Skeldar 收购了德国小型发动机生产商 Hirth Motors。这不仅为这家瑞士—瑞典公司带来了自主发动机制造能力，还带来了包括德国 EMT、南非 Denel 和美国 Martin UAV 等一系列无人机系统潜在客户。

UMS Skeldar 是最新的一家转向确保发动机供应的无人机系统制造商。Hirth 公司在二冲程活塞发动机领域拥有超过 60 年的经验，而在无人机领域也拥有 30 余年的经验，并已成为 UMS Skeldar 的 500 磅级 V-200 无人直升机提供了动力装置。

UMS Skeldar 公司首席执行官阿克赛尔·卡瓦利—比约克曼表示：“公司一直致力于保持在旋翼无人机系统垂直起降平台中核心的重型燃料发动机领域领导地位，此次合作市公司进一步贯彻公司战略做出的合乎情理的能力延伸。公司将致力于支持所有 Hirth 的客户。”

发动机性能一直是小型战术无人机系统市场的一个顽疾，这也促成了具有领先水平的制造商与供应商合作开发更好的动力装置的趋势。Insitu 公司也转向于澳大利亚的轨道公司合作，为 ScanEagle 公司提供新型发动机。德事隆公司也选择使用其姊妹公司 Lycoming 的发动机为无人机配套。（陈济彬）

华自科技研制“航空发动机叶尖间隙测量装置”

一台重量不超过4千克、笔记本大小的测量装置，却是一架飞机的“心脏”卫士。

这台测量装置是由华自科技研制的“航空发动机叶尖间隙测量装置”，可为航空发动机这一“心脏”部件提供在线智能监测服务。

能让飞机在天上翱翔的发动机叶片，工作时处于1700摄氏度以上高温高压高速的特殊环境中，叶片高速旋转，每分钟可达17000转，而叶尖所承受的离心力，相当于40吨重卡车的拉力。叶尖与机匣之间的间隙，会在复杂环境下发生细微变化，将直接影响航空发动机的安全和油耗。

长期以来，测试航空发动机的叶尖间隙，只有在飞机停下检修时进行。若在飞机飞行时，就能在线监测航空发动机的叶尖间隙，并采取相应的措施，使叶尖与发动机机壳之间一直处于稳定的安全的间隙距离，这无疑为大飞机的“心脏”部件增加一个站岗

的“卫士”。

“可靠的叶尖间隙测量技术及装置，被认为是下一代航空发动机的重要技术标志。我们研发的叶尖间隙测量装置，是华自科技与天津大学合作合作的产学研项目。”华自科技硬件研发部经理桂勇华介绍。

“别看它在你眼前这么小，这个测量装置用来监测叶片运行的安全状态，及时针对叶片与机匣壁发生摩擦情况进行有效预警，同时也可作为评估发动机运行效率的数据依据，未来进一步发展成为可以作为发动机的主动间隙控制技术。”桂勇华说。

目前，这是国内首套用于机载航空发动机的叶尖间隙测量装置，除此之外，还应用于军用民用航空发动机等航空领域，以及能源行业蒸汽轮机、燃气轮机、鼓风机等高速旋转设备。（辛文）

2019年俄海军将获首台俄产船用燃气轮机

5月23日，俄罗斯土星公司表示，首批2019年将交付的船用燃气轮机的

样机生产已按照批准的时间表进行。土星公司发言人表示：“2017年，研发工作已经完成，与此同时，新的生产线已经启动，船用燃气轮机的生产已经开始。”因此，俄罗斯海军的首批系列船用燃气轮机将在2019年开始交付使用。

作为“进口替代”计划的一部分，自2014年俄乌交恶以来，土星公司一直在致力于M90FR、Agregat-DKVP和M70FRU-R三个燃气轮机的研发，并于2017年12月宣布完成了这三个项目的研发工作。新的燃气轮机将安装在22350护卫舰、11356护卫舰、气垫登陆舰“野牛”和其他俄罗斯海军舰船上。

乌克兰曙光—机械设计科研生产联合体（简称曙光公司），与美国通用

电气公司、英国罗罗公司并称世界三大船用燃气轮机厂商，几乎垄断了独联体国家（包括俄罗斯）在内绝大部分军舰的动力系统。2014年俄乌交恶后，由于乌克兰船用燃气轮机“断货”，导致俄多艘新建军舰舰窝，甚至只能低价转卖给印度。

根据发动机技术杂志的主编 Lev Novikov 的说法，土星公司早在2011年的国际海事防务展上展示其设计的船用燃气轮机，并在当时宣称已经做好了投产准备，后来，在2014年再次宣布俄罗斯船用燃气轮机已做好了大规模生产准备，但再次失败。所以，对于土星公司是否真的能在2019年交出质量合格的船用燃气轮机，仍然需要进一步观察其具体行动，毕竟土星公司之前并没有批产燃气轮机的经验。（王小米）

送餐无人机正式投入运营

5月29日，饿了么宣布获准开辟首批无人机即时配送航线，送餐无人机正式投入商业运营。无人机试运营期间，用户从下单开始，平均仅需20分钟即可收到外卖。

据介绍，本次获准飞行的无人机航线共17条，均位于上海金山工业园区内，合计覆盖面积58万平方米，服务外卖商家100多家。配送过程中，无人机将承担配送过程中的点对点干线运输，飞行距离约占配送全程70%，两名骑手则负责将外卖装运上无人机和将餐点送达至消费者手中。这也意味着，每名骑手的行驶路程将只有原来的15%。

对此，饿了么COO康嘉表示，首批无人机航线的启用，标志着“未来物流”战略的落地迈出重要一步，即



时配送行业加快从劳动密集型向技术密集型进化。当前，30分钟内送达已经成为平台的常态，而无人机投入使用后，本地即时配送将进一步进入“20分钟时代”。

以往，出于安全性等因素的考虑，诸如送外卖等无人机商业应用场景一直处于“受限”状态。不过，近几年来，仅从国内市场来看，从京东送快递到饿了么送外卖，无人机的商业应用场景正逐步放开。（钟达）