

增材制造在燃油调节器中的应用分析

Application Analysis of Additive Manufacturing for Fuel Regulator

■ 刘菁 冯刚 胡守信 徐璐 郑健/中国航发北京航科

随着技术的发展，增材制造（3D打印）在燃油调节器中的应用条件日渐成熟，不仅会对传统生产制造方式带来变革，也会对传统设计方法产生重大影响。

传统制造方式为“减材制造”，即基于毛坯通过铣削等物理加工方式，去除多余部分得到目标零件。而相对的增材制造（3D打印）技术以三维建模辅助设计（CAD）数字模型为基础，采用高能量的束源或者其他方式提供能量，将液体、粉末、丝、片等材料逐层堆积黏结，通过叠加的方式直接构成三维实体^[1]。

自面世以来，增材制造技术引起了广泛的重视，各国相继对该技术的研究与发展予以了大力的扶持。2018年11月26日，国家统计局发布了《战略性新兴产业分类（2018）》（国家统计局令第23号），大量的关于增材制造的内容（包括增材制造装备、金属增材制造专用材料、医疗增材制造专用材料、增材制造设计等）入选其中，以文件形式指明了增材制造未来发展方向。

燃油调节器是航空发动机燃油控制系统重要组成部分。长期以来，由于其“小批量，多品种”的特点，使得燃油调节器单件生产成本高且周期长，严重制约了燃油调节器设计、研制工作的发展。随着科学技术的发展，应用增材制造或可为燃油调节器研制工作打开全新的局面。

燃油调节器的生产特点

燃油调节器的主要功能是根据电子控制器（ECU）指令为燃烧室输运燃油，少数还具备为导叶作动筒（IGV）供油的功能。燃油调节器主要组成部分包含壳体、电气成附件（如电液伺服阀、电磁阀）、泵头（如离心泵、齿轮泵或组合泵）、阀门组件（如压差阀、计量阀）、传动机构（如杠杆、凸轮）等，是典型的机电一体化产品。

燃油调节器生产制造具备显著的“小批量、多品种”特点。随着产品技术要求的演进，往往一个型号研制迭代过程中会衍生出更多改进型号，这也是基于成本和研制进度控制的考虑，但带来的问题是单个型号批量小、制造成本较高且周期长，无法发挥批量制造优势。

一架起飞质量达65t的波音737飞机，每减轻450g（约1lb），每年可节省数十万美元燃油成本，因此航空零部件轻量化设计十分必要^[2]。基于“轻量化、长寿命”目标，燃油调节器设计过程不仅需要考虑功能可靠性，还需要尽可能地减轻质量。减轻质量的首要目标通常是燃油调节器的壳体，因为壳体质量往往占到总质量的一半或更高，且其

加工难度是最大的、周期也是最长的。燃油调节器壳体属于复杂薄壁高压铝合金壳体，具有孔系特征多、内部油路纵横交错、铸造表面形状复杂等特点。大量的减轻质量的设计，进一步提高了零件的材料去除率（约80%），极大地增加了壳体变形和强度不足的风险；产品高度集成化的要求，使得部件结构更加紧凑，壳体空间结构以及内部油路孔分布上变得更加复杂，壳体孔壁厚度最小达到2.5mm。同时，为保证壳体零件的设计强度，需要严格控制孔壁厚度，要求壳体外形、内腔、油路孔、结构孔等结构特征的空间位置和尺寸精度更高。

当前，燃油调节器的制造面临多方面的困难。首先，在原材料采购的环节就受到制约，例如，某牌号钢材原料仅需要200kg，但钢厂的材料需要数吨才能起订，不得不采用代料方式解决。其次，为保证产品进度，生产中往往采用“铸造改机加”的方式，对原材料的利用率不高且加工周期长，部分零件原材料利用率甚至不到十分之一，成本控制十分困难，例如，图1所示零件是用棒料毛坯加工得到成品，需要切削掉80%以上，“浪费”严重。最后，即使根据拓扑优化



图1 燃油调节器零件的三维示意图

得到了最优设计，但难以通过机加方式实现，例如，有些壳体为了减轻质量，会有内部空腔设计，这种设计只能通过铸造手段实现，但铸造毛坯制备周期长，为了赶进度只能通过修改设计采用机加方式，相对“落后”的加工方式限制了优秀的设计，现有的加工方式制造周期也越来越难跟上设计迭代的速度。

增材制造技术可行性分析

虽然增材制造技术距大范围推广条件不够成熟，但用燃油调节器进行试点还是可行的，因为燃油调节器自身特点规避了部分限制条件，使开展应用的必要条件逐渐成熟。

成本考虑

燃油调节器总质量一般在几千克至数十千克范围内，如果仅考虑壳体应用增材制造技术，其质量会相对更轻，这样可以很好地规避增材制造成本高、打印设备不足的缺点^[6]。事实上，图2所示的零件如果采用增材制造技术，经估算，即使增材制造原料价格比毛坯高，但由

于材料利用率高，后期补充加工花费少，所以两者的综合成本相差无几，再考虑加工周期可缩短至原来的1/5，增材制造技术优势会更明显。

标准趋于完善

目前虽然缺乏增材制造技术通用性质量控制标准，但这种情况在逐渐得到改变。近期，国际汽车工

程师学会（SAE International）增材制造航空航天材料规格委员会（AMS-AM）发布了第一套航空材料规格和工艺规范（AMS7000 ~ 7003），涵盖：激光-粉末床融合（L-PBF）生产镍合金部件的耐腐蚀耐热性能、应力消除、热等静压和固溶退火规范；增材制造粉末（62Ni-21.5Cr-9.0Mo-3.65Nb）耐腐蚀耐热性能标准；生产用于增材制造航空航天零件的金属粉末原料工艺规范；激光-粉末床融合工艺规范。这表明，增材制造技术标准将逐渐完善，将逐步扫清缺乏应用标准的障碍。

材料范围扩大

早期只能对少数合金开展可靠的增材制造，其中并不包括燃油调节器常用的铝合金材料，这是因为对大部分增材制造金属粉末而言，成形过程中由于温度梯度的存在，粉末从熔池底部边界以柱状晶方式生长，凝固末期枝晶间液相因凝固收缩和热收缩而产生空洞和热裂纹，

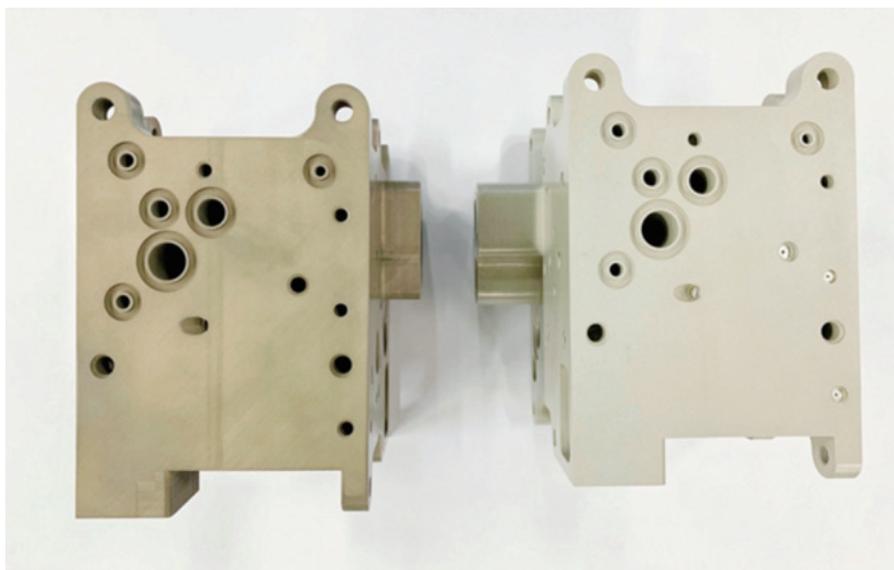


图2 增材制造（右）与传统加工工艺（左）生产的壳体

最终形成存在裂纹的柱状晶微观组织。但美国加州大学圣巴巴拉分校的约翰·马丁(John H. Martin)团队近日在Nature杂志上发表论文称,通过在粉末表面添加纳米细化剂,采用激光熔化(SLM)方法,可实现耐高温裂敏感性的高强度铝合金(Al7075和Al6061)的增材制造,获得的合金材料试件内部无裂纹缺陷,强度与锻造材料相当。该技术表明燃油调节器壳体增材制造将成为可能。

材料数据库更加完备

目前航空航天领域增材制造材料数据库已经出现,例如,GRANTA MI数据库中的Senvol Database就是增材制造材料和打印机械的数据库,包含了欧洲航空航天结构用金属材料强度统计数据,以及材料疲劳曲线、应力应变曲线、蠕变曲线、强度-温度和曝光时间曲线,为开展相关增材制造仿真提供了前提条件。

有待解决的问题

加工成功率问题

在增材制造过程中因支撑断裂、



图3 增材制造中的开裂问题

零件翘曲等造成生产中断,抑或是经长时间打印后发现零件其实早就已开裂失效的现象也屡见不鲜(如图3所示)。其根本原因在于,增材制造,尤其是基于金属粉末的增材制造是一个快速凝固的过程,其制造过程中产生的大量残余应力将致使零件发生失效、翘曲、开裂等问题。由于缺乏增材制造工艺的标准与规范,现阶段粉末床增材制造仍然沿用传统的“试错”模式,一次成功实现零件制造的概率非常低,极大地浪费了材料、机器时间以及劳动力。特别是在制造航空零部件时,“试错”的增材制造模式更是显示出其低效率、高成本的局限性。

在产品制造过程中需要考虑通过对零部件的增材制造过程进行仿真模拟分析,以有效地解决打印过程中零件存在的失效、翘曲、开裂等技术难题,为增材制造工艺工程师提供了缩短工艺开发时间,并有助于提高零件质量的解决方案。将有限元仿真技术应用于粉末增材制造将带来几项变革:在零件制造前可提供精确的零件变形和残余应力结果,降低成形风险,提高成功率;可对构造方向(水平、垂直或者其他方向)进行测试,甄别最优打印方案;对不同的支撑方案进行“无成本”检查,无须“试错”就能验证支撑方案的可行性;此外,还可以进一步处理工艺链的问题,研究构造零件过程中所采取步骤的顺序,极大地缩短研发周期、提高机器/人工利用率、减少材料和能源消耗。

加工精度问题

虽然增材制造技术相对于传统机加方式优势明显,但也有不足之

处,其中首要问题是精度。例如,燃油调节器精密配合面的粗糙度最低需达到 $Ra0.05$ 或更低,配合间隙需要精确到 μm 级别,这是目前增材制造技术无法达到的,需要用传统机加方式补充加工。未来很长一段时间内增材制造技术与传统机加方式将产生互补,推进制造技术前进。

结束语

随着科学技术发展,增材制造在燃油调节器设计生产制造领域应用条件日渐成熟。增材制造技术是一种先进的制造技术,为产品的生产制造提供了一种新的方法,具有广阔的应用前景,应给予重视,做好相关技术储备工作。

航空动力

(刘菁,中国航发北京航科,高级工程师,主要从事航空发动机燃油与控制系统产品设计、仿真工作)

参考文献

- [1] 李勇,巴发海,许鹤君.3D打印技术的发展和挑战[J].理化检验:物理分册,2018,54(11):799-804.
- [2] 杨恩泉.3D打印技术对航空制造业发展的影响[J].航空科学技术,2013(1):13-17.
- [3] 谭立忠,方芳.3D打印技术及其在航空航天领域的应用[J].战术导弹技术,2016(4):1-7.
- [4] 刘铭,张坤,樊振中.3D打印技术在航空制造领域的应用进展[J].装备制造技术,2013(12):232-235.
- [5] 李璇.航空部件的3D打印制造推进速度正在加快[J].航空维修与工程,2018(7):26-27.
- [6] 梁欣宜.基于专利分析和SAO结构挖掘的航空航天领域3D打印技术演进研究[D].广东:华南理工大学,2016.