金属增材制造技术在航空发动机中的应用展望

宋文清　李晓光　曲伸　杨润石

增材制造技术主要是利用计算机技术进行CAD软件的三维建模、分层抽取、自动路径规划以及模拟仿真修正，并输送到快速成形设备上形成汇编机器语言，利用高能束热源将粉末或丝材分层沉积到基体上，最终实现原始尺寸恢复或沿成形基面快速成形制造。增材制造技术可用于直接成形制造和修复航空发动机零件，采用高能束快速成形方法使得沉积层组织快速凝固，可获得非平衡态过饱和固溶体及组织均匀致密的金相组织，几乎达到或超过锻件水平，同时，有效避免了基材过热问题，对新型材料（如高Al、Ti合金、ODS合金以及单晶合金）增材制造及修复也具有极高的应用价值，并在零件尺寸精度上实现了微变形甚至无变形。

根据高能束热源种类的不同可分三种类型：激光增材工艺、电子束增材工艺和等离子增材工艺；根据材料在沉积时的不同状态可分为两种类型：金属材料在沉积过程中实时送入熔池（送粉或送丝）；金属粉末预先进行铺层，待单层熔积成形后再进行下一步的铺粉工序。

1. 增材制造国内外发展现状

（1）国外现状　德国弗劳恩霍夫研究所在激光同轴送粉工艺方面，采用10kW盘形激光器和共轴电源递送系统的DMD 设备，能够在不到2min时间内生产出一个单独的整体叶盘叶片。瑞士洛桑理工学院利用其开发的LMF技术，开展了单晶涡轮叶片修复技术研究，图1为单晶涡轮叶片实物修复及检测对比。修复区界面的电子背散射衍射晶粒结构图显示沉积层具有定向外延生长特征。另外MTU公司也利用激光同轴送粉工艺对单晶高涡叶片进行修复研究，对低涡工作叶片进行“Z”型齿阻尼面耐磨层制备（见图2）。

美国Optomec公司应用LENS技术修复传统焊接方法无法修复的零件。图3为采用LENS 技术修复的发动机高温合金和钛合金叶片，修复的部分具有近终型轮廓，性能优于原始材料的性能。图4为采用LENS技术修复的T700一级涡轮整体叶盘，在60 000r/pm的循环应力作用下，顺利通过50 000次低周疲劳测试，抗腐蚀性、拉伸性能、冶金性能均符合修理标准要求。

在激光铺粉工艺方面，德国EOS公司开发的DMLS 技术，在工艺研发和设备方面处于世

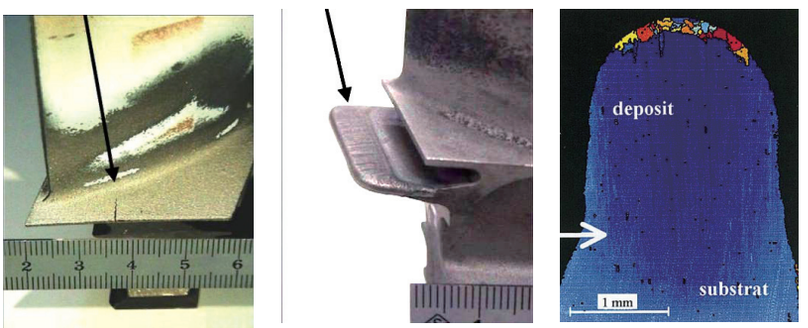


图1　采用LMF技术修复的单晶涡轮叶片

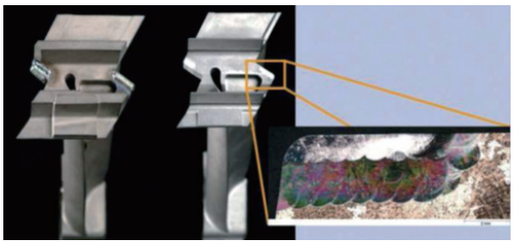
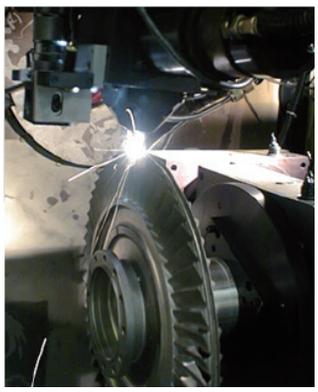


图2　采用激光同轴送粉工艺制备耐磨层

界领先地位。该公司开发出的Titanium Ti64 是Ti6AlV4 合金的细粉末形式，非常适用于无人机发动机等组件的制造。图5为采用DMLS技术制造的薄壁小型火焰筒零件，其最大直径可达254mm。德国MTU公司应用SLM技术制造了多联体涡轮导向叶片（见图6，左为毛坯件，右为抛光件）。

瑞典Chalmers 工业大学与Arcam 公司合作开发了EBM技术，美国波音公司、美国GE公司、CalRAM公司、意大利Avio公司应用EBM技术开展了发动机喷管、涡轮叶片增材制造技术研究。图7为意大利Avio公司采用EBM技术制造的发动机涡轮叶片，材料为TiAl 合金，重量约为0.5kg，单个叶片耗时7h。

（2）国内现状　国内在金属增材制造技术方面开展研究工作的有西北工业大学、北京有色金属研究总院、清华大学、北京航空航天大学、华中科技大学、装甲兵工程学院与北京航空制造工程研究所等单位，许多高新企业通过设备引进和联合开发也加入了开展增材制造技术开发和应用的热潮中。通过近10年增材制造技术的发展，国内增材制造技术已经在飞机非承力结构件上得到了应用，但在航空发动机上还处于工艺试验和基础验证阶段。目前，金属零件增材制造技术在航空发动机应用研究的焦点主要集中在预研型号小型非承力复杂构件制造，大修零件的增材制造修复，受限于复杂工作条件和质量评定体系，需开展项目繁多的尺寸数据检测、组织性能评定、



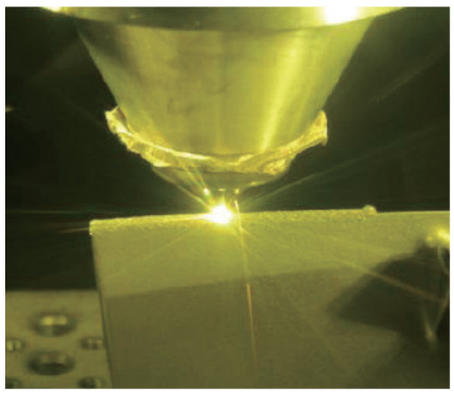
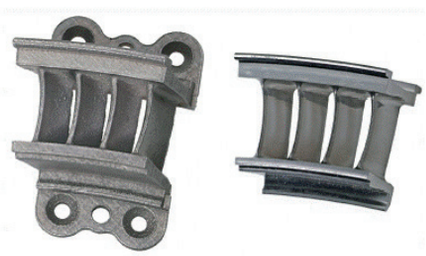


图3　采用LENS技术修复的发动机叶片

图4　采用LENS技术修复的整体叶盘

图5　采用DMLS技术制造的发动机火焰筒零件



（a）毛坯件　（b）抛光件

图6　采用SLM技术制造的多联体导向叶片

系统功能测试和试车考核等，形成了航空发动机的增材制造技术进展缓慢的现状。但随着增材制造技术研究的不断深入，针对航空发动机高技术附加值、高性能储备值，国内各研究机构已经投入大量技术资源开展航空发动机增材制造技术的研发工作，并取得了一定研究成果（见图8和图9）。

2. 应用需求与展望

第一，尺寸和复杂性需求。传统锻造制造大型或超大型金属锻坯十分困难，且高昂的模具费用和较长的制造周期仍难满足型号的快速、低成本研制的需求。

第二，制造和大修件精密修复需求。随着发动机服役时间延长，部分零件的性能大幅下降，特别是到服役期后段，针对焊接修复的某些构件，修复难度越来越大，同时修复后的变形问题也使得大修业务面临更多挑战。

第三，设计与制造一体化需

求。目前，在航空发动机行业内已经普遍应用了信息化系统和设计制造一体化系统，但设计单位往往受限于现有工艺水平，不得不以损失设计性能为代价。而增材制造技术有助于促进设计-生产过程从平面思维向立体思维的转变。增材制造的最终目标是解放零件制造对设计者的思想束缚，使设计人员将精力集中在如何更好实现功能的优化，而非零件的制造工艺上。

因此，根据航空发动机行业特点和不同增材制造工艺的适用范围，提出今后增材制造专业需要重点开展的应用研究方向。

第一，激光同轴送粉工艺侧重以整体叶盘、钛合金叶片和高涡、高导叶片修复为目标载体，通过对数控执行机构、环形送粉装置、充氩室或真空室、成形工艺性和关键特征参数、工艺缺陷控制、闭环过程控制以及组织性能评定等开展系统研究和合作开发，实现整体叶盘、钛合金叶片、单晶叶片的损伤修复，并兼顾其他大型整体构件的增材制造与修复。

第二，激光铺粉工艺侧重以结构复杂、小批研制以及常规工艺实现困难的构件为目标载体，通过对粉末材料物理特性、高精度铺粉机构、激光扫描特征、成形工艺参数、工艺缺陷控制、闭环过程控制以及组织性能评定等开展系统研究和合作开发，实现小批、小型、复杂和高精度零件的增材制造。

第三，电子束铺粉工艺受系统设备、使用范围和应用条件等方面的限制，现阶段应密切掌握最新技术发展，以成套设备引进和成形零件应用为主导思想。

第四，电子束/等离子送丝工艺侧重以各类型的零件精密修复为主，利用现有设备的送丝功能并补充一定配套来开发此项技术，重点开展工艺验证和组织性能评定等研究，实现在典型零件特别是薄壁机匣件的精密修复。

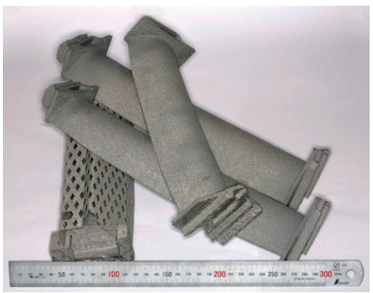


图7　意大利AVIO公司采用EBM技术制造γ-TiAl涡轮叶片

图8　增材制造的钛合金进气边（包边）

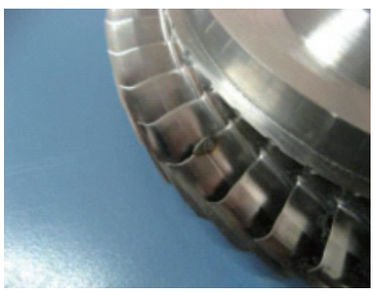


图9　激光成形修复叶轮和叶盘

3. 结语

以数字化分层制造和高能束流加工为主要特征的增材制造技术，从根本上摆脱了传统冷热加工的限制，使更多、更优的设计思路以直观表现呈现在世界的面前，增材制造技术作为一项国家战略已客观的摆在我们面前，但面对全世界范围内增材制造技术热潮，我们还必须冷静思考、夯实基础，在工艺过程控制、系统平台建设、材料特性研究、可靠性评定、工程应用测试等方面深挖潜力、下足功夫。因此，作为航空发动机行业，在增材制造技术发展上应立足于型号复杂件研制、关重件修复，以稳批产和保型号为主旨，加强与国内外高校和科研院所的合作，共同开展增材制造技术的应用研究，可以预见以增材制造技术为主要特征的工业革命必将引领我国航空发动机产业跻身世界前列。

参考文献：

[1] 曲伸，等.先进航空焊接技术[J].航空制造技术，2013(11)：32-35.

[2] 黄秋实，李良琦，高彬彬.国外金属零部件增材制造技术发展概述[J]. 国防制造技术，2012(5)：26-29.

作者简介：宋文清等，沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司。

MW 20160112