

# 高能束流增材制造技术引领 飞行器结构设计新变革

## Transformation of Air Vehicle Structural Design Led by High Energy Beam Manufacturing Technology

中航工业成都飞机设计研究所 柏林 黄建云 吉芬 赵志国  
中航工业北京航空制造工程研究所 李怀学



柏林

毕业于南京航空航天大学,现任中航工业成都飞机设计研究所材料与连接设计师,长期从事航空材料及制造工艺的应用研究工作。已发表论文 20 余篇。

钛合金因其比强度高、热稳定性好、耐腐蚀性能优异等特点,成为了航空航天领域重要结构的主选材料<sup>[1-2]</sup>。其应用水平已是衡量飞行器先进性的重要标志之一。如波音 787 大型客机钛合金用量已超过机体结构重量的 15%,美国第四代战机 F-22 钛合金用量更是高达 41%<sup>[3]</sup>。

高能束流增材制造技术不受模具、刀具、夹具等限制,可制造任意复杂形状结构件。该技术使复杂零件的制造问题迎刃而解,大大开阔了设计思维,必将改变飞行器的设计和制造,引领飞行器结构设计新变革。

近年来,航空航天装备更加注重追求轻质化和可靠化,越来越多地采用整体结构件。因此,单个结构件的尺寸和复杂性不断增加,对结构件加工制造要求日趋苛刻。然而,钛合金高熔点、高韧性的特点,使得复杂整体结构件和精密复杂结构件的制造尤其困难。特别是越来越多的异形结构,传统的锻造、铸造、焊接、机加等成形工艺已无法满足结构件的设计要求。对于设计员来说,传统制造工艺过多的条件要求也严重限制了他们的设计思维,许多理想的结构形式由于无法实现而放弃,严重影响了飞行器结构设计的创新,成为航空航天装备进一步发展的瓶颈。因此,研究开发能够解决航空航天整体复杂钛合金结构件难以加工、甚至无法加工问题的制造技术途径,已成为先进

制造技术的重要发展方向和前沿热点课题<sup>[4-5]</sup>。

### 高能束流增材制造技术

高能束流增材制造技术是一种从三维数模概念设计到三维实体柔性制造一体化的高新技术,它以离散/堆积增材制造的成形思想为基础,综合利用高能束热源、计算机、数模、数控、冶金和新材料等多学科交叉融合的一项高新的先进制造技术。

该技术突破了传统制造工艺的变形成形和去除成形的常规思路,可直接根据零件三维数模,利用金属粉末(或丝材)直接获得任意复杂形状的实体零件或只需要进行少量加工的毛坯,易于实现“近净成形”的材料加工新理念,特别适用于制造具有复杂结构的难加工钛合金零件;并

且制造过程无需任何工装夹具和模具,具有高活性、高材料利用率、高效率以及低成本等优势。由于材料及切削加工的节省,其制造成本可降低 20%~40%,生产周期也将缩短 80%<sup>[6]</sup>;从材料性能角度,该技术制造的结构件具有微细、均匀的快速凝固组织、各项同性及优异的综合性能。特别适用于航空航天领域限量订单需求或特别定制化的要求。

随着高能束流增材制造技术的应用不断扩大,该技术在不同应用领域进一步发展,形成了 3 种各具特点的直接成形技术,即激光近净成形技术、激光精密成形技术、电子束快速制造技术,如表 1 所示<sup>[7]</sup>。目前,以上 3 种技术已发展到金属原型直接制造阶段,尤其是在钛合金材料上的

成功应用将对航空工业产生非常重要的影响。

### 1 激光近净成形技术

激光近净成形技术是基于快速原型技术和同步送粉激光多层熔覆技术基础上发展起来的。该技术根据零件三维数模,利用激光熔化同步供给的金属粉末形成熔凝组织,通过多层熔覆制造三维实体零件,实现高性能难加工金属零件的快速、无模具“近净成形”,如图 1 所示。

钛合金激光近净成形技术主要以粒径为 90~350 $\mu\text{m}$  的钛合金粉末为原材料,如图 2 所示。成形过程中为提高成形效率,实现较大的粉末供给速度,激光束一般具有较大的能量,形成较深的熔池和较厚的沉积层。因此,该技术具有较快的制造速

“锻造、板材或棒材 + 机加”相比,大大减少了机械加工过程,材料利用率从 5% 左右提高到 60% 以上。另外,该技术不需使用模具,不受原材料毛料尺寸的限制,适合制造尺寸较大的整体钛合金结构件,达到减少机械连结和焊缝,减少零件数量,减轻结构重量,提高结构整体刚度的效果。

### 2 激光精密成形技术

激光精密成形技术,又称选区激光熔化成形技术,也是以原型制造技术为基本原理发展起来的一种先进的高能束流制造技术。根据零件三维数模,利用高能量激光束逐层熔化金属粉末,通过逐层铺粉、逐层熔化凝固堆积的方式,制造三维实体零件。该技术可实现高性能的结构异常复杂的金属零件的快速、无模具“净”成形<sup>[8]</sup>,如图 3 所示。

与激光近净成形技术相比,激光精密成形技术精度更高,表面质量更优异,能够直接制成终端零件,不需要后续加工,属于“净”成形。对于钛合金,该技术通常采用粒径  $< 50\mu\text{m}$  的超细粉末为原材料,如图 4 所示,使用光斑很小的激光束,通常铺粉厚度  $< 100\mu\text{m}$  (最薄铺粉厚度可达  $20\mu\text{m}$ ),成形的零件具有很高的尺寸精度(可达  $0.1\text{mm}$ )以及优异的表面质量(粗糙度可达  $R_a 30\sim 50\mu\text{m}$ )<sup>[9-10]</sup>,图 5 为选区激光熔化成形 TC4 钛合金表面形貌。该技术尤其适合制造传统工艺,如锻造、铸造、焊接等传统工艺无法成形的、内部有异常复杂异形结构的零件。然而,较小的进给速度必然导致成形效率较低,另外还受到铺粉工作箱的限制,不适合制造大型的整体零件。图 6 为采用该技术制造的内部

表1 高能束流制造技术特点比较

制造方法	零件尺寸	复杂程度	表面质量	后续加工	制造效率	专用模具	力学性能
激光近净成形技术	大中	较复杂	较差	少量加工	较高	无	较好
激光精密成形技术	中小	极端复杂	优异	零加工	中	无	较好
电子束快速制造技术	大中	较复杂	较差	少量加工	高	无	较好
铸造	任意	较复杂	优异	零加工	较低	有	较差
锻造 + 机加	任意	简单	优异	大量加工	低	有	优异



图 1 激光近净成形过程示意图

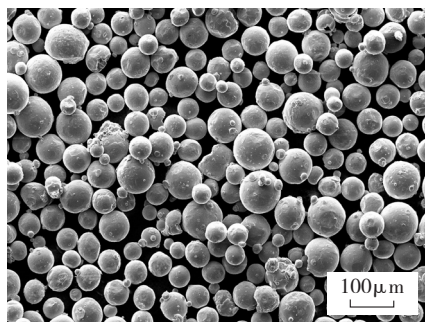


图 2 激光近净成形用TC4钛合金粉末

度,但较厚的沉积层也导致了较低的成形精度和粗糙的表面,因此激光快速成形技术属于“近净成形”制造,零件还需要一定的后续加工,但与

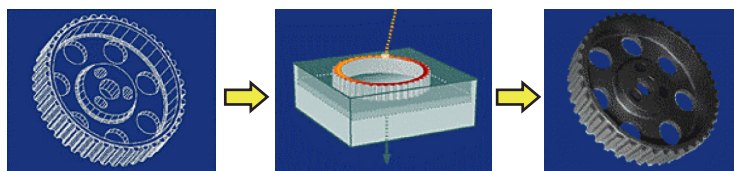


图 3 激光精密成形过程示意图

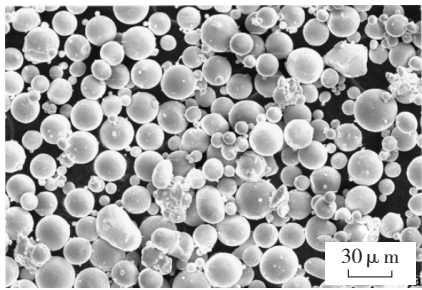


图4 激光精密成形用TC4超细粉

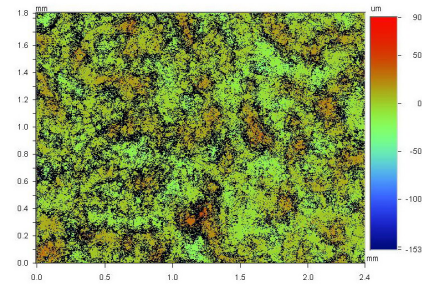


图5 选区激光熔化成形TC4钛合金表面形貌



图6 点阵夹芯结构

含有复杂的点阵夹芯的结构件。

### 3 电子束快速制造技术

电子束快速制造技术在激光成形技术基础上发展而来,以高能量密度和高能量利用率的电子束作为加工热源,当高速电子轰击金属粉末时,其动能立即转化成热能,使材料快速完全融化并形成三维实体零件。与激光成形不同的是电子质量远大于光子,相对于激光束电子束动能更大。当高速电子束轰击金属粉末时,易出现吹粉现象,即预制松散粉末在电子束的作用下被推离原位。吹粉现象会导致粉末在熔化前偏离原来位置,影响成形质量。电子束熔丝快速制造技术采用丝材替代粉末为原材料避免了吹粉问题。该技术具

有成形速度快、材料利用率高、无反射、能量转化率高等特点,成形环境为真空,特别利于大中型钛合金等高活性金属零件的成型制造,但该技术精度较差,需要后续表面加工。

综上所述,高能束流快速制造诸多技术各有优缺点,关键是如何充分发挥其独特的优势,抑制其劣势。尤其是成形速度与精度之间不可调和的矛盾,为了提高精度,需采用更薄的分层、更小直径的喷头、更小的激光光斑和电子束斑等;对于固定零件来说,单元尺寸略微降低,就会导致成形时间大大增长,效率显著降低。精度高的精密制造过程复杂、效率较低,但能够制造形状复杂的薄壁空心异形零件,实现“净”成形;效率高的快速制造成本低,过程简单、效率较高,但加工精度低,零件达到使用状态还需要进一步精加工,不适用于高度复杂无法再加工的零件。因此,设计员应基于钛合金零部件的类型、服役条件、制造方法经济可承受性,选择合适的快速制造技术。

## 高能束流增材制造技术发展现状

目前,美、欧发达国家具备完善的粉体原材料制备技术、先进的激光(电子束)技术以及成形设备等,在该领域处于领先地位<sup>[11]</sup>,并将该技术首先应用于航空领域。美国 AeroMet 公司采用激光近净成形技术为 F-22 歼击机生产的两个全尺寸 Ti6Al4V 合金接头满足疲劳寿命的两倍要求;为 F/A-18E/F 舰载机的生产机翼翼根吊环满足疲劳寿命 4 倍要求,以及用于降落杆的连接杆寿命超出要求 30%,并满足飞行试验要求。到 2005 年为止该公司采用激光成形制造的合金零件实现了在 F/A-18E/F 和 F-22 等飞机上装机应用。

早在 2002 年,美国航空宇航局 Langley 研究中心、Lockheed Martin 公司等研究单位对航空航天钛合金

电子束快速制造技术开展了大量工作,最大成形速度超过 3500cm<sup>3</sup>/h,较之激光快速成形技术,效率提高了数十倍<sup>[12]</sup>。目前,美国西雅基公司利用该项技术完成了 F-22 战斗机 AMAD 钛合金支座的制造,并通过了两个周期的最大载荷全谱疲劳测试,并未发现永久变形。

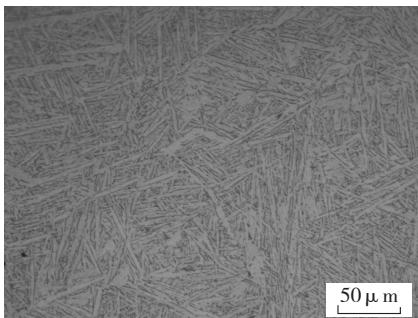
我国从 1998 年开始了钛合金高能束流增材制造技术的研究工作,在国家自然科学基金、973、863 计划,总装“十五”、“十一五”预研等项目的支持下,西北工业大学、北京航空航天大学、高能束流加工技术国防科技重点实验室等研究机构陆续开展了激光快速成形、选区激光熔化精密成形以及电子束快速制造等方面的研究,并在成形设备、制造工艺、过程控制、工艺稳定性等关键技术方面取得了显著进展,实现了多种钛合金材料复杂形状零件的立体成形<sup>[13-16]</sup>。总体来说,国内快速制造技术研究水平无论是在硬件系统、工艺特性和成形件力学性能,还是在理论水平上都已达到或接近国际先进水平。西北工业大学黄卫东课题组采用激光快速制造技术成形的 TC4 钛合金的高温拉伸力学性能,断裂韧性值  $K_{IC}$  都达到了锻件退火态的标准,低周疲劳寿命与退火态锻件的性能基本相当。高能束流加工技术国防科技重点实验室开发了国内首台可成形尺寸为 200mm × 150mm × 150mm 零件的电子束快速制造设备及配套的专用电子束快速成形分层处理软件,并研究了 TC4 合金的力学性能,其强度、塑性及疲劳性能可达到锻件水平<sup>[17-18]</sup>。我国已将激光成形技术成功应用于飞机及发动机钛合金零部件的修复和小尺寸复杂钛合金结构件的制造。目前,正在大力发展大型整体钛合金结构件的激光成形。

表 2 列出了我国高能束流增材制造技术成形 TC4 钛合金的强度、塑性性能,均可达到熔模精密铸件和

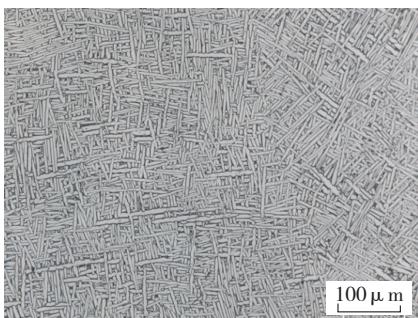
表2 激光立体成形钛合金的室温力学性能

材料	成形工艺及状态		$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%
TC4 (Ti-6Al-4V)	激光近净成形	沉积态	955 ~ 1000	890 ~ 955	10 ~ 18
		热处理态	1040 ~ 1130	920 ~ 1080	13 ~ 15
	美国 AeroMet 公司激光成形		896 ~ 999	827 ~ 896	9 ~ 12
	选区激光熔化精密成形	热处理态	1040 ~ 1065	920 ~ 1030	8 ~ 15
	电子束快速制造技术		890 ~ 985	855 ~ 924	12 ~ 15
	锻造退火态标准 (HB 5432-89)		$\geq 895$	$\geq 825$	$\geq 10$
ZTC4	钛及钛合金熔模精密铸件规范 (GJB 2896-2007)		$\geq 890$	$\geq 820$	$\geq 5$

锻件水平。图7显示TC4钛合金经激光成形和电子束成形后得到的组织为典型的片层组织。与等轴组织和双态组织相比,片层组织对于提高材料的断裂韧度和疲劳裂纹扩展抗力等损伤容限性能有益。



(a) 激光成形



(b) 电子束成形

图7 激光成形与电子束成形TC4钛合金显微组织

### 发展趋势与展望

目前,许多零件因形状复杂,现有制造技术无法成形,而不得不分段制造,这就导致了零件数量大量增加。同时这些零件之间的链接,大大

延长了生产周期和造成大量安全隐患。综上所述,高能束流增材制造技术不受模具、刀具、夹具等限制,可制造任意复杂形状结构件。该技术使复杂零件的制造问题迎刃而解,大大开阔了设计思维,必将改变飞行器的设计和制造,引领飞行器结构设计新变革。

近年来,高性能钛合金高能束流增材制造技术研究及应用上取得了显著的进展,并在航空航天领域显示出良好的发展前景。虽然该技术还存在冶金缺陷可检性和稳定可控性等问题,但由于其独特的优势,可以放宽零件结构设计受加工条件的限制,开阔设计思维,使得具有高强度,轻质量的内部点阵空腔结构成为现实,该技术必将对航空航天结构件设计及制造产生中重要的影响。

另外,我国高能束流增材制造技术使用的钛合金原材料大多是适合锻、铸、焊等传统制造技术的材料,这些钛合金的成分不一定完全适合快速制造技术,因此应加强原材料钛合金粉末的制备技术研究,开发适用于快速制造专用优质钛合金粉体。

### 参考文献

[1] 朱知寿. 航空结构用新型高性能钛合金材料技术研究与发展. 航空科学技术, 2012(1): 5-9.  
 [2] Cotton J D, Clark L P. Titanium alloys on the F-22 fighter airframe. Advanced Materials

& Processes, 2002(5): 25-28.

[3] 颜鸣皋,吴学仁,朱知寿. 航空材料技术的发展现状与展望. 航空制造技术, 2003(12): 19-25.

[4] 任晓华. 航空制造技术发展趋势. 航空科学技术, 2010(3): 2-5.

[5] 王文理,陈树巍,康永锋,等. 新型复杂航空结构件数控加工技术. 航空制造技术, 2010(9): 34-37.

[6] Cleveland B A. Laser-formed titanium parts certified for aerospace. Advanced Materials & process, 2000(11): 15-18.

[7] Ruffo M. Metal rapid manufacturing: laser VS electron beam technology. RAPID conference, 2009.

[8] Kruth J P, Froyen L, Vaerenbergh J V, et al. Selective laser melting of iron-based powder. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1-3): 616-622.

[9] Santos E C, Shiomu M, Osakada K. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. International Journal of Machine Tools and manufacture, 2006, 46(12/13): 1459-1468.

[10] Gmbh E O S. The Product Instruction of EOSINT M270. Germany: E. O. S. Gmbh, 2005:8-21.

[11] 张海鸥,王超,胡帮友,等. 金属零件直接快速制造技术及发展趋势. 航空制造技术, 2010(8): 43-46.

[12] Brice C A, Hcan D S, Siedal D S. Rapid prototyping and freeform fabrication via electron beam welding deposition. Proceedings of Welding Conference, 2002.

[13] 杨健,黄卫东,陈静,等. TC4钛合金激光快速成形力学性能. 航空制造技术, 2007(5): 73-76.

[14] 管林,陈静,林鑫,等. 激光快速成形TC21钛合金沉积态组织研究. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(4): 612-616.

[15] 王华明,李安,张凌云. 激光熔化沉积快速成形TA15钛合金的力学性能. 航空制造技术, 2008(7): 26-29.

[16] 娄军,锁红波,刘建荣,等. 电子束快速成形TC18钛合金柱状晶组织的拉伸性能. 材料热处理学报, 2012, 33(6): 110-115.

[17] 巩水利,李怀学,锁红波,等. 高能束流加工技术的应用研究与发展. 航空制造技术, 2009(14): 34-39.

[18] 锁红波,陈哲源,李晋炜. 电子束熔融快速制造Ti-6Al-4V的力学性能. 航天制造技术, 2009(6): 18-22.

(责编 深蓝)