

激光直接制造技术及其在飞机上的应用

Direct Laser Fabrication and Its Application in Aircraft

中航工业第一飞机设计研究院 杨健
西北工业大学凝固技术国家重点实验室 黄卫东



杨健

2004年毕业于西北工业大学材料学院,工学硕士;主要从事飞机标准材料设计、新材料和新工艺应用研究工作;先后发表科技论文10余篇。

激光直接制造是基于“离散/堆积”成形原理的快速制造技术领域,发展最为迅速的一种金属零件快速制造技术,该技术综合利用激光、计算机、CAD/CAM、材料等学科的高新技术,通过熔覆沉积金属粉末直接制造金属零件,是一种将“高性能材料制备”与复杂零件“近净成形”有机融为一体的无模具、柔性、数字化先进制造技术^[1-3]。

36 航空制造技术·2009年第7期

激光直接制造具有无模具、短周期、低成本及高品质等特点,能够解决钛合金传统加工存在的问题,实现复杂构件的直接近净成形,同时激光快速熔凝特点使零件具有致密的组织和良好的综合性能,从而可以更大限度地发掘材料性能潜力。

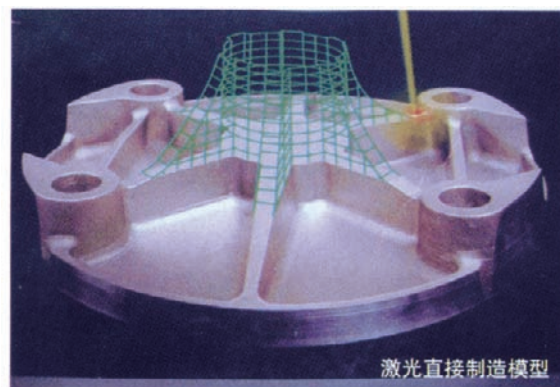
激光直接制造具有无模具、短周期、低成本及高品质等特点,能够解决钛合金传统加工存在的问题,实现复杂构件的直接近净成形,同时激光快速熔凝特点使零件具有致密的组织和良好的综合性能,从而更大限度地发掘材料性能潜力。该技术将为先进飞机关键结构件的研制及生产开辟一条快速、经济、高效的途径,满足现代武器装备多品种、变批量及快速响应的要求。

目前,激光直接制造技术已经在美国F-22、F/A-18E/F和F-35等先进军用飞机上得到实际应用^[4],应用材料以钛合金、不锈钢为主,有大型薄壁结构件、空间取向异型结构件、空腔结构件和复杂加筋结构件,应用部位从次承力结构到主

承力结构,主要包括接头、连接杆、翼根吊环、壁板和隔框等机体构件,制造的最大零件投影面积已达10m²。利用该技术制造的零件达到近净形,综合性能好,材料利用率可达70%以上,缩短了制造周期,降低了综合成本,有显著的军事效益。

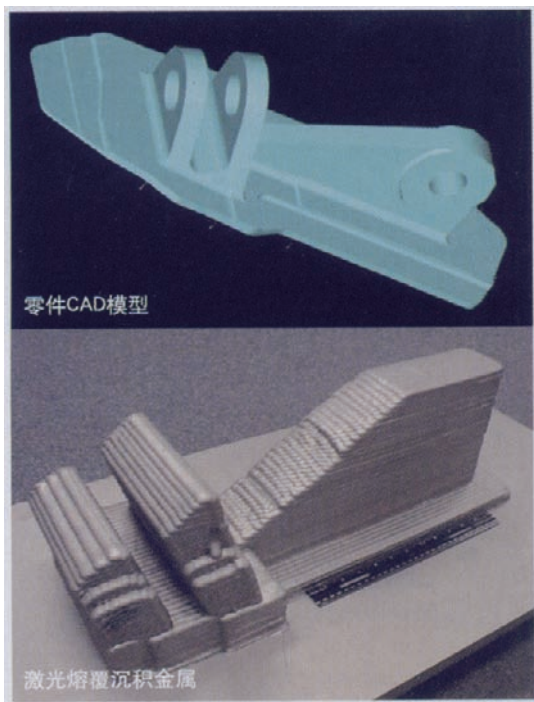
原理及特点

激光直接制造的原理是:首先根据零件CAD模型,将零件的3D



激光直接制造模型

数据按一定厚度分层离散成一系列 2D 轮廓数据,经过处理传给数控系统,形成数控驱动程序;然后在驱动程序的控制下,通过激光熔覆沉积金属粉末,按照 2D 轮廓数据实现材料的逐层沉积;最终获得组织致密、性



能优异的“近净形”零件。

激光直接制造技术在原理上一反传统的“去材或变形”加工思想,而采用全新的增材制造原理成形零件,在制造方面具有柔性好(无需专用工装)、对零件的复杂程度(形状和尺寸)基本没有限制等特点,应用该技术将为工程设计提供更大的自由度。

此外,该技术以高能激光束作为加工热源,具有以下优点:

(1) 材料的力学和耐腐蚀性能全面提高。利用激光束与材料相互作用时的快速熔化和凝固过程,获得致密组织,消除成分偏析的不利影响,从而提高材料的力学和耐腐蚀性能。值得一提的是,材料致密的组织可以同时提高其强度和塑性,从而解决常规手段所导致的“鱼与熊掌不可兼得”的矛盾。表 1 是几种材料的力学性能数据,从中可以看出,激

光直接制造零件的力学性能与传统技术相当或更为优越。

(2) 制造速度快、节省材料和降低成本。激光直接制造技术使用粉末材料制造零件,后续的机械加工量很小,极大地节省了材料,并省去了模具制造的周期和费用,大幅度缩短了加工周期,尽管大功率激光加工本身的成本较高,但在航空领域高性能零件的制造中,其综合成本仍然能够有较大幅度的降低。

(3) 根据实际使用环境控制零件不同部位的成分和组织,合理控制零件的性能。激光直接制造技术采用熔覆的方法堆积材料,可以很方便地在零件的不同部位得到不同的成分,特别是采用自动送粉熔覆的方式进行加工时,通过精确控制送粉器,原则上可以在零件的任意部位获得所需要的成分,实现零件各部分材质和性能的最佳搭配。这是传统的铸造和锻造技术所无法实现的。

发展及应用

自 20 世纪 90 年代开始,随着计算机技术的飞速发展,激光直接制

AeroMet 公司、GE 公司、瑞士洛桑理工学院、英国伯明翰大学等对该技术进行了深入研究,包括制造机理、制造精度、组织及性能控制等方面。美国 AeroMet 公司将该技术用于航空领域钛构件的制造,并开展了零件修复的商业服务。

Sandia 国家实验室对多种材料的激光直接制造工艺进行了深入研究,材料包括镍基高温合金、钛合金等,其成形零件性能相比于锻件,无论是强度还是塑性均有显著的提高。该技术的加工精度在 X-Y 方向已达到 0.05mm, Z 方向精度为 0.4mm,且零件的表面粗糙度已经达到 $6.25 \mu\text{m}$ 。同时,他们采用该技术根据零件的实际需要改变其各部分的成分和组织,实现零件各部分材质和性能的匹配,为设计提供了更大的自由度。

AeroMet 公司主要面向航空领域开展飞机钛构件的激光直接制造,该系统单层沉积厚度达 4mm,单道沉积宽度达 13mm。由于沉积速率的提高,使该公司采用这一技术进行较大体积零件的制造成为现实,产品达到近净形,且成分和性能已经达到 ASTM 标准。AeroMet 公司采用钛合金制造了诸如法兰盘、飞机骨架中的一些结构件等零件。

表1 激光直接制造(LDF)零件力学性能数据

材料	Ti6Al4V		316L		Inconel 625	
	锻造	LDF	锻造	LDF	锻造	LDF
$\delta_{0.2}/\text{MPa}$	830 ~ 860	830 ~ 900	241	448	400	634
δ_b/MPa	900 ~ 950	900 ~ 1000	586	792	834	930
$\delta/\%$	10	9 ~ 12	50	66	37	38

造技术逐渐成为制造领域研究的热点,并迅速进入高速发展阶段。在这一时期,世界上众多科研机构和航空企业纷纷进入该领域,开展该技术的理论研究和应用研究。如美国 Los Alamos 和 Sandia 国家实验室、

据报道, AeroMet 公司用该技术生产的钛合金零件满足飞机设计要求,已装机使用,这表明该技术已进入工程实际应用。生产的零件包括 F-22 飞机的一个接头件、F/A-18E/F 飞机机翼翼根吊

环及一个用于降落的连接杆。其中,翼根吊环是关键零件,尺寸为900mm×300mm×150mm。F-22上的2个全尺寸接头满足疲劳寿命2倍要求,F/A-18E/F的翼根吊环满足疲劳寿命4倍要求,随后静力加载到225%也未破坏,而降落用连接杆满足飞行试验要求,寿命超出要求30%。结果表明,这些钛合金零件不仅性能优于传统工艺制造的零件,同时由于材料及后续加工的节省,其制造成本降低20~40%,生产周期也缩短80%。

目前,该公司采用激光直接制造技术制造出投影面积约10m²的特大型整体复杂薄壁钛构件(后机身隔框,分析可能是F-35飞机用的),既显著降低了飞机的制造成本,又突破了传统锻造技术受设备限制而无法制造特大型零件的瓶颈。

国内最早从1998年开始该技术的研究工作,近几年这一技术成为航空材料和制造领域的研究热点。“十五”期间,国家对激光直接制造技术的研究非常重视,并给予大力支持,先后安排了973计划、863计划和总装“十五”预研等项目^[5-6]。在这些项目的支持下,目前各研究单位均已取得阶段性成果,如西北工业大

学、北京航空航天大学 and 北京有色金属研究总院分别建立了一套激光加工系统,并采用不同合金制成了具有一定形状的激光成形件。

飞机钛合金构件 激光直接制造的优越性

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性和耐热性好等特点,良好的综合性能使其广泛用于航空领域,多用于制造飞机机体和发动机中要求重量轻、强度高且耐热性好的重要零部件,以提高飞机结构效率和可靠性。现代航空武器装备的发展要求其制造技术能够多满足品种、变批量且快速响应的需求。但长期以来,传统制造技术在钛构件的制造中由于存在材料利用率低、加工困难、周期长等缺点,使钛合金的应用受到了限制。同时,随着航空工业的发展,对钛合金使用性能的要求不断提高,显然传统的加工方法已经很难达到满足要求。

激光直接制造技术的原理和特点不同于传统加工方法,该技术是基于激光熔覆的快速近净制造技术,能够很好地解决钛合金利用率低、加工难和周期长等问题,同时,高能激光的快速加热冷却为材料加工提供了常规手段无法实现的极端非平衡条

件,使制造零件具有致密组织和优异的综合性能,从而可以更大限度地发掘钛合金的性能潜力。

激光直接制造航空钛合金构件除了自身的原理优势和特点外,还在于能够实现飞机减重和降低制造成本,主要表现为:(1)适用于制造空腔(心)结构零件,对零件的复杂形状几乎没有限制;(2)适用于制造大型整体薄壁类零件,材料利用率大大高于传统数控切削加工;(3)能够根据需要在同一零件的不同部位采用不同的材料,即可制造双性能盘以提高发动机的推重比。

随着激光直接制造技术和设备研究的不断加强,以及理论研究的进一步深化,必将更加准确地把握其内在机理和过程控制,获得理想的组织与性能,使制造精度和速率达到合理匹配,达到最佳制造效果。随着现代飞机钛合金应用的不断扩大,激光直接制造技术必将发挥其独特作用。

参考文献

- [1] Keiche D M. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model. SPIE, 2293:91-97.
- [2] Gaumann M. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation. Materials Science & Engineering A. 1999, A271:232-241.
- [3] Arcella F G, Froes F H. Titanium alloy structures for airframe application by the laser forming process. AIAA, Structural Dynamics & Materials Conference. 2000:1465-1473.
- [4] David Abbott, Frank Arcella. Laser forming titanium components. Advanced Materials & Processes. 1998, 5: 29-30.
- [5] 黄卫东,林鑫,陈静,等.金属零件的激光立体成形技术.材料工程.2002,3:40-43.
- [6] 章萍芝,张永忠,石力开,等.金属零件的激光直接成形研究.稀有金属材料与工程.2001,2:25.
- [7] 王华明.金属材料激光表面改性与高性能金属零件激光快速成形技术研究进展.航空学报.2002,5:23.

(责编 淡蓝)

