

金属零件激光增材制造技术的发展及应用

Development and Application of Laser Additive Manufacturing for Metal Component

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 李怀学 巩水利 孙帆 黄柏颖



李怀学

博士,中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术实验室高级工程师。主要从事激光快速成形和修复方面的研究工作,目前承担及完成课题近10项,已发表论文20余篇,申请专利3项。

随着制造业全球化及市场的激烈竞争,产品快速开发已成为竞争的重要手段之一。为满足制造业日益变化的客户需求,制造技术必须具有高柔性,能够以小批量甚至单件生产迎合市场。传统金属零件去材或受迫成形制造方法往往工序多、工模

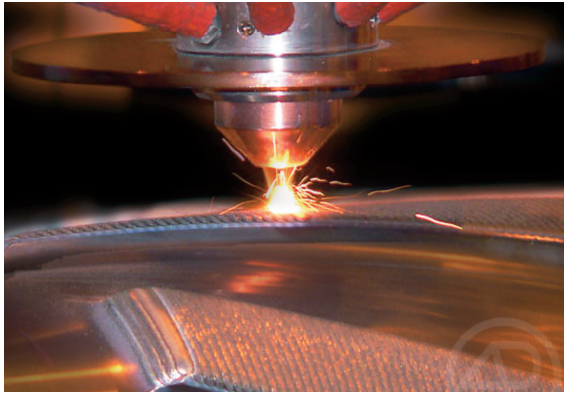
激光选区熔化技术与选择性激光烧结技术的不同之处在于后者粉末材料往往是一种金属材料与另一种低熔点材料的混合物,成形过程中,仅低熔点材料熔化或部分熔化把金属材料包覆粘结在一起,其原型表面粗糙、内部疏松多孔、力学性能差,需要经过高温重熔或渗金属填补空隙等后处理才能使用;而前者利用高亮度激光直接熔化金属粉末材料,无需粘结剂,由3D模型直接成形出与锻件性能相当的任意复杂结构零件,其零件仅需表面光整即可使用。

具成本高、从设计到零件制造周期长,且对具有复杂内腔结构的零件往往无能为力,难以满足新产品的快速响应制造需求。20世纪90年代以来,随着激光技术、计算机技术、CAD/CAM技术以及机械工程技术的发展,金属零件激光增材制造技术在激光熔覆技术和快速原型技术基础上应运而生,迅速成为快速成形领域内最有发展前途的先进制造技术之一。本文将主要从激光熔覆和快速原型技术基础上阐述金属零件激光增材技术的技术原理及特点,并综述其国

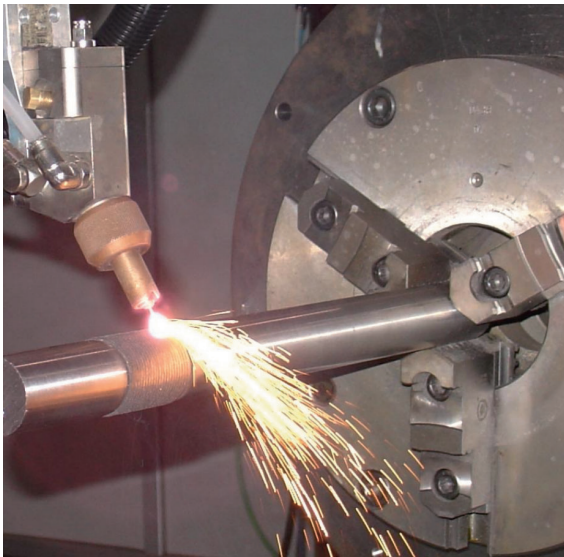
内外发展和应用。

技术原理和特点

激光熔覆技术是利用激光束将合金粉末与基体表面迅速加热并熔化,快速凝固后形成稀释率低、呈冶金结合的表面涂层,从而显著改善基体表面的耐磨、耐蚀等性能的表面改性技术,其材料供应方式分预置法和同步送粉法2种。图1为侧向和同轴送粉实例^[1-3]。该技术具有热影响区小、可获得具有良好性能的支晶微观结构、熔覆件变形比较小、过程易



(a) 同轴



(b) 侧向

图1 激光熔覆同步送粉方式

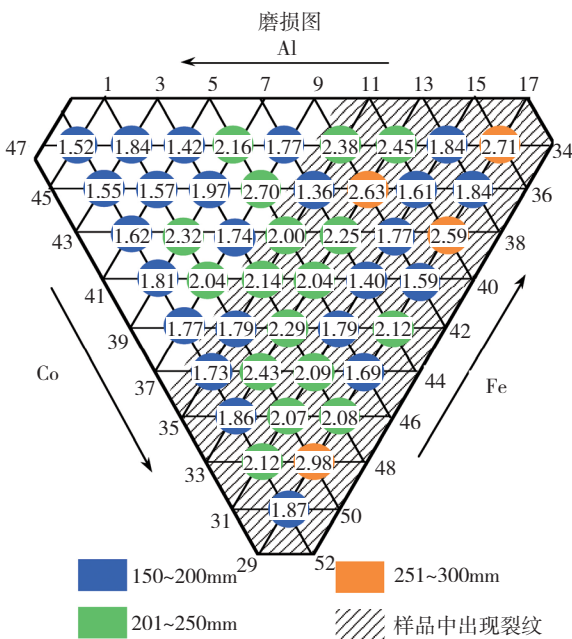


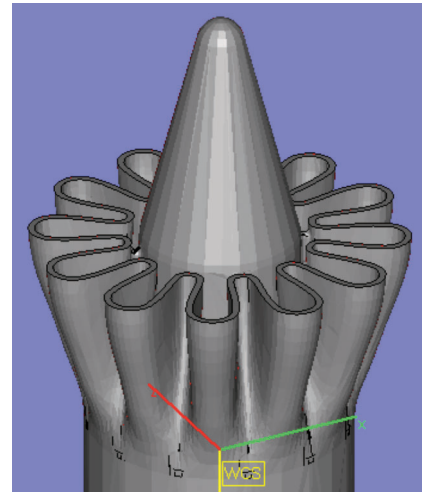
图2 激光熔覆制备Fe-Co-Al合金的耐磨性

于实现自动化等优点,已广泛应用于耐磨涂层和新材料制备(见图2)^[4]。若同种金属材料多层熔覆,熔覆层间仍属于良好的冶金结合,这为制造和修复高性能致密金属零部件提供了可能性。

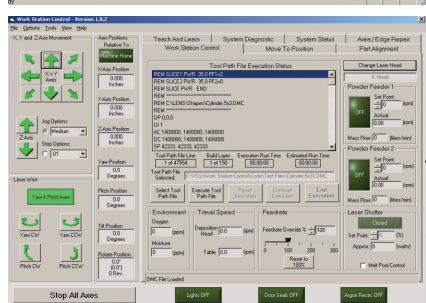
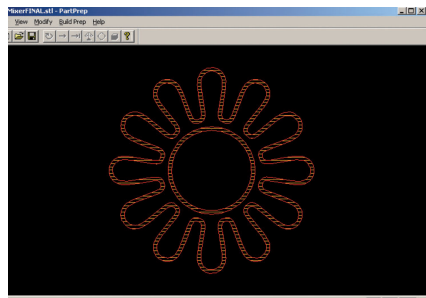
快速原型技术是一种基于离散/堆积成形思想的新型制造技术,是集成计算机、数控、激光和新材料等最新技术而发展起来的先进产品研究与开发技术。其基本过程是将三维模型沿一定方向离散成一系列有序的二维层片;根据每层轮廓信息,进行工艺规划,选择加工参数,自动生成数控代码;成形机制造一系列层片并自动将它们联接起来,得到三维物理实体^[5-6]。

这样将一个物理实体的复杂三维加工离散成一系列层片的加工,大大降低了加工难度,且成形过程的难度与待成形的物理实体形状和结构的复杂程度无关。该技术的主要特点有:高柔性,可以制造任意复杂形状的三维实体;CAD模型直接驱动,设计制造高度一体化;成形过程无需专用夹具或工具;无需人员干预或只需较少干预,是一种自动化的成形过程;成形全过程的快速响应,适合现代激烈的产品市场。快速原型技术有20多种,其典型技术包括立体印刷(Stereo Lithography

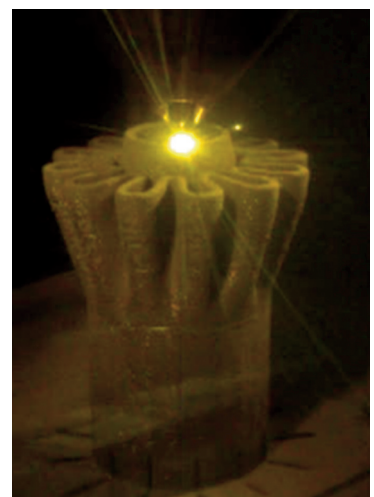
Apparatus, SLA)、叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing,



(a) CAD模型



(b) 分层及扫描路径规划



(c) 沉积



(d)零件

图3 金属零件激光增材制造的典型过程

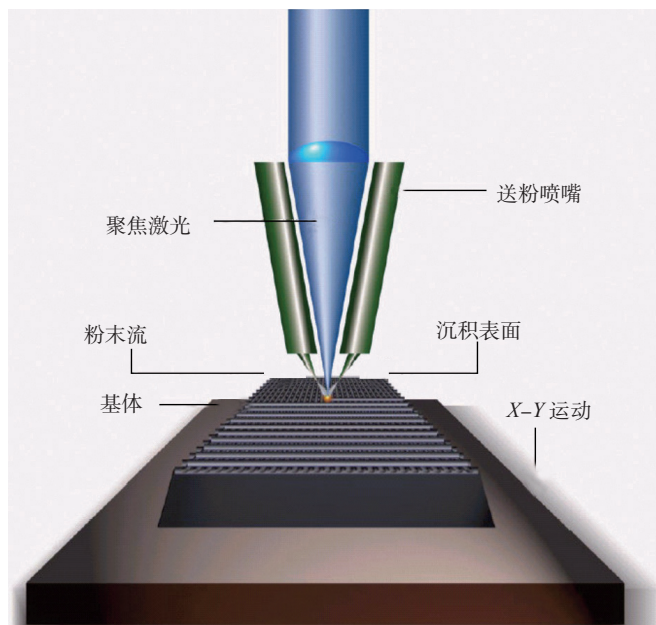
LOM)、熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)、选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)等。然而,受成形原理与工艺设备的制约,早期快速原型技术存在着致命的局限性,即只能制造出少数几种材料的原型,如光敏树脂、塑料、纸、特种蜡及聚合物包覆金属粉末等,这些材料在密度和性能上与所需求的金属功能零件差距甚远,一般只能作为原型看样和对设计、装配进行验证,还不能作为最终功能性零件或模具直接使用,这大幅削弱了制造业采用该技术“缩短新产品开发周期、节省开发费用、降低产品开发风险”的原始初衷和动机,大大限制了其在现代装备制造业中的推广应用。

金属零件激光增材制造技术以高功率或高亮度激光为热源,逐层熔化金属粉末或丝材,直接制造出任意复杂形状的零件,其实质就是CAD软件驱动下的激光三维熔覆过程,其典型过程如图3所示。该技术具有如下独特的优点:(1)制造速度快,节省材料,降低成本;(2)不需采用模具,使得制造成本降低15%~30%,生产周期节省45%~70%;(3)可以生产用传统方法难于生产甚至不能生产的形状复杂的功能金属零件;

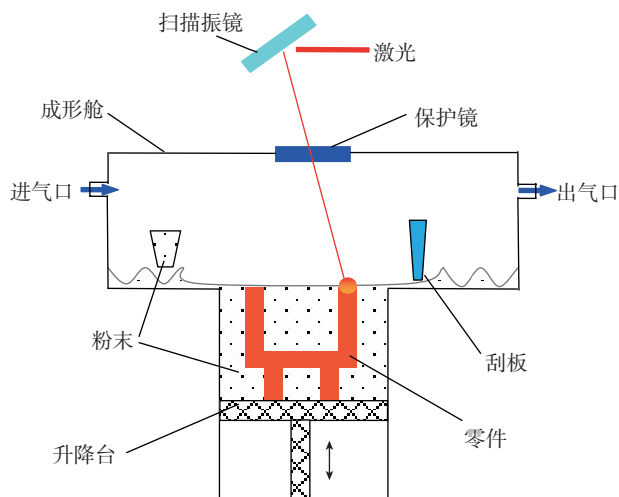
(4)可在零件不同部位形成不同成分和组织的梯度功能材料结构,不需反复成形和中间热处理等步骤;(5)激光直接制造属于快速凝固过程,金属零件完全致密、组织细小,性能超过铸件;(6)近成形件可直接使用或者仅需少量的后续机加工便可使用。

根据材料在沉积时的不同状态,金属零件激光增材制造技术可以分为两大类:(1)金属材料在沉积过程中实时送入熔池。这类技术以激光近净成形制造(Laser Engineered

Net Shaping, LENS)、金属直接沉积(Direct Metal Deposition, DMD)技术为代表,由激光在沉积区域产生熔池并高速移动,材料以粉末或丝状直接送入高温熔池,熔化后逐层沉积,被称为激光直接沉积增材制造技术(见图4)^[7]。该技术只能成形出毛坯,然后依靠数控加工达到其净尺寸。(2)金属粉末在沉积前预先铺粉。这类技术以金属直接激光烧结(Direct Metal Laser-Sintering, DMLS)、选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)



(a)直接沉积



(b)选区熔化

图4 金属零件激光增材制造技术原理

为代表,粉末材料预先铺展在沉积区域,其层厚一般为 20~100 μm,利用高亮度激光按照预先规划的扫描路径轨迹逐层熔化金属粉末,直接净成形出零件,其零件表面仅需光整即可满足要求,被称为激光选区熔化增材制造技术。

发展现状及应用

1 激光直接沉积增材制造技术

该技术可追溯到 20 世纪 70 年代末期的激光多层熔覆研究,但直到 20 世纪 90 年代,国内外众多研究机构才开始对同轴送粉激光快速成形技术的原理、成形工艺、熔凝组织、零件的几何形状和力学性能等基础性问题开展大量的研究工作^[8-15]。

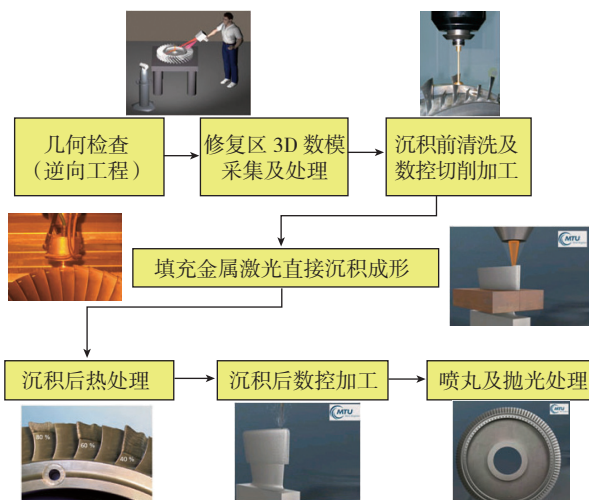
激光直接沉积技术为航空航天大型整体钛合金结构制造提供一种短周期、高柔性、低成本手段。为了提高结构效率、减轻结构重量、简化制造工艺,国内外飞行器越来越多地采用了大型整体钛合金结构。譬如,美国 F-22 飞机钛合金用量已高达 41%,其中机身 4 个整体承力隔框采用整体大型钛合金锻件最大投影面积达到 5.53m²,锻件毛坯重达到 1897~2976kg,最终机械加工后零件重量仅为 83.7~143.8kg,材料利用率达到 2.92%~4.90%,单件零件机械切削加工时间长达 6 个月以上。与锻压-机械加工传统制造技术相比,激光直接沉积增材制造技术具有以下特点:无需零件毛坯制备,无需锻压模具加工,无需大型或超大型锻铸工业基础设施及相关配套设施;材料利用率高,机加工量小,数控机加工时间短;生产制造周期短;工序少,工艺简单,具有高度的柔性 with 快速反应能力;采用该技术还可根据零件不同部位的工作条件与特殊性能要求实现梯度材料高性能金属零件的直接制造。由于上述独特优势,1995 年以来,美国国防部先进计划署和海军办公室先后实施了一系列专门研

究计划,支持金属构件激光增材制造技术的研究。约翰霍普金斯大学、宾州大学和 MTS 公司通过 3 年的钛合金激光增材制造技术研究,开发出一项以大功率 CO₂ 激光熔覆沉积成形技术为基础的“钛合金的柔性制造”技术,并于 1997 年成立 AeroMet 公司。该公司的目标就是实现具有高性能、大体积钛合金零件的制造,尤其是大型整体加强筋结构钛合金零件的快速成形。截止到 2005 年,AeroMet 公司先后获得波音、格鲁曼、洛克·马丁公司、美国空军、美国国防部后勤局等单位经费支持,主要进行机身钛合金结构件的快速成形研发,飞机和舰船上钛合金件修复。这一方面降低了钛合金零件的制造成本,另一方面也使得海、空军部队革新了技术储备。此外,金属构件激光增材制造技术在航天领域也取得较广泛应用。美国 Sandia、Los Alamos 国家实验室和密西根大学 J. Mazumder 教授研究组分别提出了技术原理相类似的激光近净成形制造技术(LENS)、激光直接制造技术(Directed Laser Fabrication, DLF)和金属直接沉积技术(DMD)。Sandia 国家实验室采用 LENSTM 技术实现了某卫星 TC4 钛合金零

件毛坯的成形,成形过程需要 64h,完成零件的最终热处理,整个加工工序耗时 1 周。而此零件采用传统机械加工的方法则需要 11 周。美国铼公司则采用 DLF 技术实现了 SM3 导弹三维导向和姿态控制系统中铼零件的快速制备,与传统技术相比,可降低成本 50%,同时缩短 50%的制造周期。经过十几年发展,国外激光直接沉积增材制造系统典型代表包括德国 Trumpf 和美国 POM 公司 DMD505、美国 Huffman 公司 HP-205、美国 Optomec 公司 Lens850 等。国外利用这些商业化的技术及设备



(a) 内壁修复



(b) 整体叶盘修复

图5 激光直接沉积技术典型应用

已经取得了实质性的成果,可制备叠层材料、功能复合材料、裁缝式地制成“变成分”材料或研制零件整体叶盘、框、梁等关键构件,且其力学性能达到锻件的水平。该技术相关成果已在武装直升机、AIM 导弹、波音 7X7 客机、F/A-18E/F、F22 战机等方面均有实际应用,已成为美国航空航天国防武器装备金属结构件的核心制造新技术之一。近期,美国专门成立了国家增材制造技术中心,拟加快增材制造技术推广应用。

激光直接沉积技术为航空航天、工模具等领域高附加值金属零部件的修复提供一种高性能、高柔性技术。由于工作环境恶劣,飞机结构件、发动机零部件、金属模具等高附加值零部件往往因磨损、高温气体冲刷烧蚀、高低周疲劳、外力破坏等因素导致局部破坏而失效。另外,零件制造过程中误加工损伤是其被迫失效的另一重要原因。若这些零部件被迫报废,将使制造厂方蒙受巨大的经济损失。与传统热源修复技术相比,激光直接沉积技术因激光的能量可控性、位置可达性高等特点逐渐成为其关键修复技术。激光直接沉积技术的典型应用如图 5 所示。

自“十五”开始,国内激光直接沉积增材成形技术获得总装预研计划、国家“973”计划、国防基础科研计划、国家自然科学基金委员会等重点项目支持。北京航空航天大学、西北工业大学、中航工业北京航空制造工程研究所、北京有色金属研究总院等国内研究机构先后开展激光快速成型与修复技术及其设备开发研制,并取得一定成果。其中,北京航空航天大学在飞机大型整体钛合金主承力结构件激光快速成形及装机应用关键技术研究方面取得突破性进展,研制出某型号飞机钛合金前起落架整体支撑框、C919 接头窗框等金属零部件;中航工业北京航空制造工程研究所成功修复了某型号 TC11

钛合金整体叶轮,并通过试车考核。

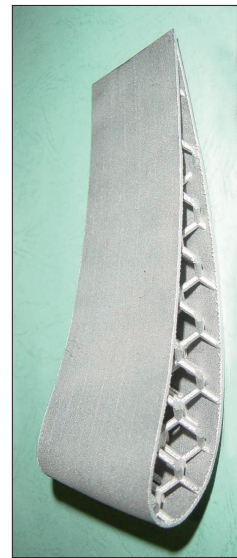
2 激光选区熔化增材制造技术

激光选区熔化技术是由德国 Fraunhofer 研究所于 1995 年最早提出,在金属粉末选择性烧结基础上发展起来的。2002 年该研究所在激光选区熔化技术方面取得巨大成功,可一次性地直接制造出完全致密性的零件^[16-19]。

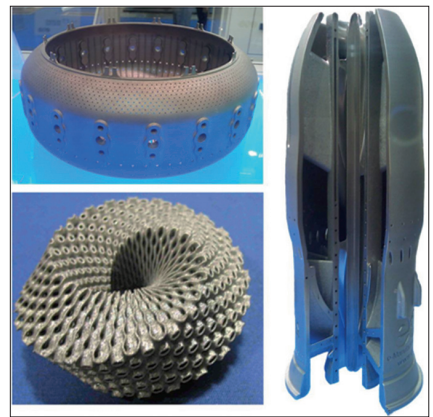
激光选区熔化技术与选择性激光烧结技术的不同之处在于后者粉末材料往往是一种金属材料与另一种低熔点材料的混合物,成形过程中,仅低熔点材料熔化或部分熔化把金属材料包覆粘结在一起,其原型表面粗糙、内部疏松多孔、力学性能差,需要经过高温重熔或渗金属填补空隙等后处理才能使用;而前者利用高亮度激光直接熔化金属粉末材料,无需粘结剂,由 3D 模型直接成形出与锻件性能相当的任意复杂结构零件,其零件仅需表面光整即可使用。

随着高亮度光纤激光的出现,国外金属粉末选区熔化激光精密增材成形技术发展突飞猛进。譬如,德国 EOS GmbH 公司新开发的激光选区熔化设备 EOSINT M280 采用束源质量高的 Yb 光纤激光器,将激光束光斑直径聚焦到 100 μm,大幅提高激光扫描的速度,减少成形时间,其成形零件性能与锻件相当,其典型应用如图 6 所示。

激光选区熔化技术可直接制成终端金属产品,省掉中间过渡环节;零件具有很高的尺寸精度以及好的表面粗糙度(R_a 为 10~30 μm);适合各种复杂形状的工件,尤其适合内部有复杂异型结构、用传统方法无法制造的复杂工件;适合单件和小批量复杂结构件无模、快速响应制造。目前,复杂金属零件的研究引人注目,在航空航天、医疗等行业尤其如此。激光选区熔化精密成形技术可解决复杂金属构件的难



(a) 点阵夹芯结构

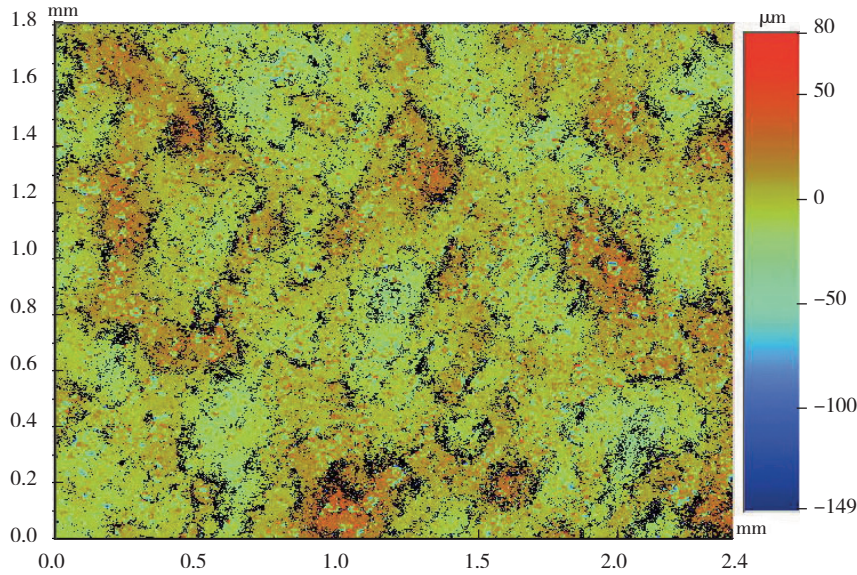


(b) 燃烧室、蜂窝及燃油喷嘴

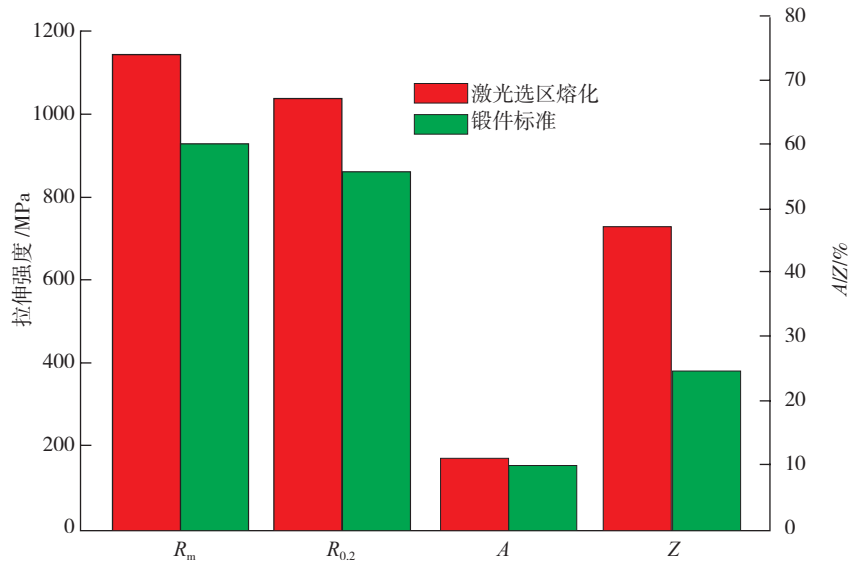
图6 激光选区熔化技术典型应用

加工、周期长、成本高等技术难题,可以加工出传统制造方法无法加工的复杂金属零件,特别适合空间点阵夹芯结构、复杂薄壁结构件直接制造,实现了材料-结构-功能一体化设计和制造。近几年来,英国、德国、法国、美国、瑞典等国外发达国家先后开发了 GH4169、AlSi10Mg、CoCr、TC4 等合金金属复杂结构的激光选区熔化增材制造商业化设备,并开展应用基础研究。国外著名企业罗·罗、GE、普惠、MTU、波音、EADS、空客等在航空航天武器装备上已利用此技术开发商业化的金属零部件^[20]。

国内激光选区熔化增材制造技术仍处于起步阶段,虽然华中科技大学大



(a) 表面粗糙度



TC4 钛合金室温拉伸性能
(b) 室温拉伸

图7 激光选区熔化TC4钛合金的表面粗糙度与拉伸性能

学、中航工业北京航空制造工程研究所、华南理工大学等单位曾在设备和工艺方面开展了大量基础理论研究^[21-22],但该技术工程化应用基础研究非常薄弱。2009年以来,中航工业北京航空制造工程研究所通过与国际著名激光粉末烧结设备制造商——德国EOS公司的技术交流,自主开发建立激光选区熔化增材制造技术平台,研制出一些典型金属结构件,其TC4钛合金力学性能与锻

件相当(见图7),但仍受到层片扫描轨迹优化设计、应力及变形协调控制等基础问题制约。

结束语

激光增材制造技术不仅可实现激光熔覆制备耐磨涂层和功能梯度材料,而且可修复高附加值的金属件和直接制造任意复杂结构的金属零部件。随着其成形工艺和装备不断地成熟和提高,成形材料从钛合金、

镍基合金、不锈钢、钴铬合金等成熟材料种类,不断推出新材料。通过拓扑优化设计结构,激光选区熔化技术可制造出大幅减轻重量的航空航天金属结构件。目前,金属零件激光增材技术面临的主要挑战包括成形过程应力及变形、材料组织及性能控制、质量检测及标准建立等。

产品创新是我国制造行业可持续发展的基础,而快速成形技术对新产品的开发速度和质量将起到十分重要作用。金属零件激光增材制造技术开创了一个崭新的设计、制造概念。它以相对低的成本、高速造型、可修改性强的特点,独特的工艺过程,为提高产品的设计质量、降低成本、缩短设计及制造周期,为将产品尽快推向市场提供了有效的方法,尤其适合于形状复杂的零件。

参考文献

- [1] Birger E M, Moskvitin G V, Polyakov A N, et al. Industrial laser cladding: current state and future. *Welding International*, 2011, 25 (3):234-243.
- [2] Jonnalagadda A. Nozzle technology and applications in laser cladding. *LAM 2009*.
- [3] Sexton L. Laser cladding: repairing and manufacturing metal parts and tools. *Proceedings of SPIE*, 2003: 462-469.
- [4] Watkins K G. Achieving the potential of direct fabrication with lasers. *International conference on laser assisted net shaping*, 2001:25-38.
- [5] 颜永年, 张人佶, 林峰. 激光快速成形技术的新进展. *新技术新工艺*, 2006(9):7-9.
- [6] 颜永年, 齐海波. 快速制造的内涵与应用. *航空制造技术*, 2004(5):26-29.
- [7] Hedges M, Calder N. Near net shape rapid manufacture & repair by LENS. *AVT-139/RSM-019:1-12*.
- [8] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006(46):1459-1468.

本文共有参考文献22篇,因篇幅有限,未能全部列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛 亦非)