

国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状

董鹏 陈济轮

(首都航天机械公司, 北京 100076)



摘要: 选区激光熔化成形技术具有制造精度高、表面质量好以及能够实现悬空、复杂内腔和型面等复杂构件的整体制造等特点, 是满足航空航天领域中复杂薄壁精密构件高精度、高性能、高柔性 with 快速反应的理想制造方法。本文对国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域的应用以及技术发展方向进行了分析。

关键词: 选区激光熔化成形; 航空航天; 应用现状

Current Status of Selective Laser Melting for Aerospace Applications Abroad

Dong Peng Chen Jilun

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: Selective laser melting can manufacture complex geometries structures with thin walls and hidden voids or channels without tools or mould, for difficult-to-machine materials. It provides a high efficiency, high-quality, flexible manufacturing technique for manufacturing components in aerospace fields. The current status and the trends of of selective laser melting for aerospace applications in abroad were analysed.

Key words: selective laser melting; aerospace; current status of applications

1 引言

金属材料增材制造技术是在航空航天领域关键件研制需求的牵引下诞生的, 由于其特有的技术优势, 使得各国政府和研究结构投入大量的人力、物力、

财力进行该项技术的研究。近些年在航空航天领域迫切需求的牵引以及计算机技术、激光技术以及材料科学等相关基础技术快速发展的推动下, 增材制造技术发展十分迅速。



图1 选区激光熔化成形基本流程^[4]

作者简介: 董鹏 (1983-), 工程师, 光学工程专业; 研究方向: 激光焊接与增材制造。

收稿日期: 2014-03-06

选区激光熔化成形 (Selective laser melting, 简称 SLM) 技术最早由德国 Fraunhofer 激光技术研究所提出, 是一种基于粉床铺粉的金属材料增材制造技术, 其基本成形流程如图 1 所示。首先将零部件 CAD 模型分层切片, 采用预铺粉的方式, 扫描振镜带动激光束在计算机控制下沿图形轨迹扫描选定区域的合金粉末层, 使其熔化并沉积出与切片厚度一致、形状为零件某个横截面的金属薄层, 直到制造出与构件 CAD 模型一致的金属零件。

SLM 技术具有制造精度高 (可达 0.05mm)、质量好, 加工余量很小或无加工余量。采用该技术成形的零件除精密的配合面之外, 一般经喷砂或抛光等后续简单处理就可直接使用。适合于中、小型悬空、复杂内腔和型面等复杂薄壁型腔结构件的高精度整体快速制造。

2 技术装备发展

2003 年底德国 MCP-HEK 推出了世界上第一台 SLM 设备。近年来, 德国 EOS、Concept Laser、SLM Solutions、英国 Renishaw 等技术公司在激光选区熔化成形技术与设备方面取得了长足的进步。SLM 设备采用的激光器几乎都采用高光束质量、维护性好、光电转化效率高的光纤激光器。目前, 国外知名公司研制的金属激光选区熔化成形设备的成形缸面积范围一般为 250mm×250mm, 高度一般在 300mm 左右。如德国 EOS GmbH 公司的 M280 (如图 2 所示), 英国 RENISHAW 公司的 AM250 等, 设备都采用单束激光, 功率一般为 200~400W。



图 2 EOS M280SLM 成形设备^[5]

为了进一步提高激光选区熔化成形的制造尺寸

以及效率, 2012 年 11 月, 德国 SLM-Solutions 公司推出了两台 400W/1000W 激光器配两套扫描振镜组成的双光束激光选区熔化成形系统, 如图 3 所示, 该设备成形缸的尺寸范围为 500mm×280mm×325mm^[6]。这两台激光扫描装置可以单独工作, 也可以同时工作。为满足航空航天等领域大尺寸零件成形的需求, Concept Laser 和 EOS 公司正在研制成形腔体积为 500mm×500mm×500mm 的 SLM 设备。



图 3 SLM-Solution 双光束激光选区熔化成形设备^[6]

3 技术研究与应用

由于选区激光熔化成形技术特有的技术优势, 欧美等发达国家近年来加快了该项技术的研发应用步伐。欧美高校、研究所在欧盟第六、第七框架计划 (European Union Sixth/Seventh Framework Programme)、德国研究基金 (German Research Foundation)、美国国防部、能源部、增材制造创新研究院、英国工程与物理科学研究委员会 (Engineering and Physical Science Research Council) 等国家机构以及波音、洛克希德-马丁、EADS 等大型航空航天企业的资助下比利时鲁文大学、英国利兹大学、英国利物浦大学、日本大阪大学德国亚琛工业大学以及英国 TWI、德国 Fraunhofer 激光技术研究所等科研机构在材料特性、缺陷控制、应力控制等成形技术基础问题以及工程化应用方面开展了大量的研究^[7~16]。

在应用研究方面, 美国 GE 公司在各大型企业中率先成立金属材料激光熔化增材制造研发团队, 并于 2012 年通过收购了 Morris 和 RQM 两家专业从事 SLM 制造技术的公司, 掌握了金属材料 SLM 成形核心技术。图 4 为 GE/Morris 公司采用 SLM 成形技术制造的复杂结构金属零件^[17]。



图 4 采用 SLM 技术试制的复杂薄壁金属零部件

GE 公司计划在 LEAP 喷气发动机中采用 SLM 制造燃油喷嘴，如图 5 所示，每台发动机预计 19 个燃油喷嘴。该型发动机预计 2015 年底到 2016 年初开始组装，GE 公司预计在未来三年内每年生产 25000 个燃油喷嘴^[17]。



图 5 GE Aviation 的 LEAP 喷气发动机

在航天领域，NASA 马歇尔航天飞行中心 (NASA's Marshall Space Flight Center in Huntsville, Ala.) 的研究人员于 2012 年将选区激光熔化成形技术应用于多个型号航天发动机复杂金属零件样件的制造，如图 6 所示。马歇尔中心先进制造团队负责人肯库珀认为：“选区激光熔化成形技术采用激光束逐层按零件二维切片形状熔化金属粉末，实现复杂零件的制造。这种制造工艺可以直接实现计算机辅助设计三维复杂结构件的高性能高精度的整体制造制造。” NASA 认为采用选区激光熔化成形技术可以降低零件

制造时间，可从传统工艺的数月降至数周，降低了零件的制造成本。由于零件采用整体制造，可以提高零件的整体性和结构强度，提高零件的可靠性^[18]。NASA 目前暂定在 2017 年第一次“太空发射系统”飞行试验中使用由激光选区熔化技术制造的零部件。



图 6 NASA 采用 SLM 技术成形技术制备发动机零部件

2013 年 8 月，NASA 对 SLM 制造的 J-2X 发动机喷注器样件进行了热试车，如图 7 所示，结果表明，SLM 制造的零件可完全满足发动机零件的设计使用要求。

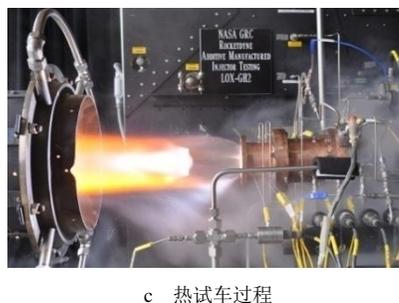


图 7 J-2X 发动机热试车

4 未来技术发展

选区激光熔化成形技术为航空航天构件的制备提供了一种革命性的制造方法,可以用于制造受传统工艺方法无法制备的材料与结构,同时,选区激光熔化成形技术也为结构设计提供全新的思路。

4.1 网状拓扑结构轻量化设计制造

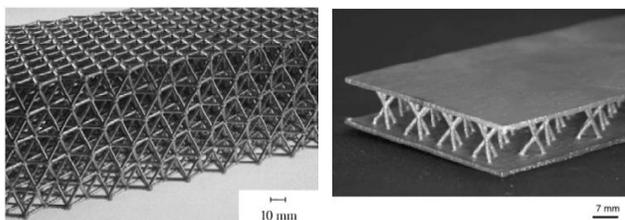
选区激光熔化成形技术的发展使得网状拓扑结构轻量化设计与制造成为现实。连接结构的复杂程度不再受制造工艺的束缚,可设计成满足强度、刚度要求的规则网状拓扑结构,以此实现结构减重。图8为EADS为A380门支架(Door bracket)的优化结构,采用网状拓扑优化后在保持原有强度的基础上实现40%减重。除此之外,采用选区激光熔化成形技术也可以实现海绵、骨头、珊瑚、蜂窝等仿生复杂网状强化拓扑结构的优化设计与制造,达到更显著的减重效果。



图8 拓扑优化的 Airbus A380 门支架(Door bracket)^[5]

4.2 三维点阵结构设计制造

与蜂窝夹层板这种典型的二维点阵结构相比,三维点阵结构可设计性更强,比刚度和比强度、吸能性能经过设计可以优于传统的二维蜂窝夹层结构,图9为三位点阵结构以及点阵夹层结构^[19]。受到制造手段的限制,传统制造方法难以实现三维点阵结构的高质量、高性能制造,而基于粉床铺粉的 SLM 技术较为适宜制造这类复杂的空间结构。制备不同材料、不同结构特征的空间点阵结构是目前 SLM 技术研究的热点之一^[20~22]。



a 三维点阵结构

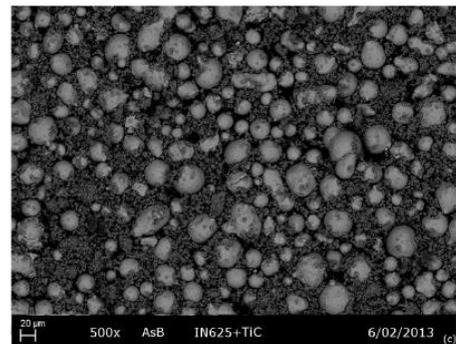
b 点阵夹层结构

图9 三维点阵结构域点阵夹层结构

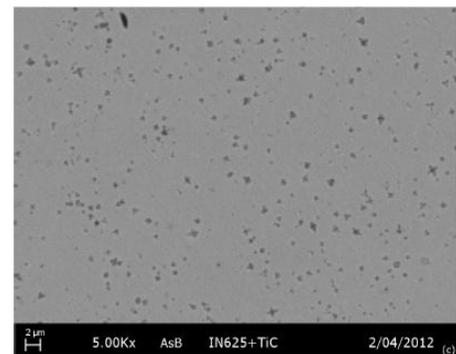
4.3 陶瓷颗粒增强金属基复合材料-结构一体化制

造

陶瓷颗粒增强金属基复合材料具有良好的综合性能。目前,制备方法有很多种,例如粉末冶金、铸造法、熔渗法和自蔓延高温合成法等。但是由于陶瓷增强颗粒与金属基体之间晶体结构、物理性质以及金属/陶瓷界面浸润性差异的影响,采用常规方法容易导致成形过程中增强颗粒局部团聚或界面裂纹。选区激光熔化制备过程中温度梯度大($7 \times 10^6 \text{K/s}$),冷却凝固速度快,可使金属基体中颗粒增强项细化到纳米尺度且在金属基体内呈弥散分布,可以有效约束金属基体的热膨胀变形,克服界面裂纹^[23, 24]。此外,选区激光熔化成形可以在材料制备的同时完成复杂结构的制造,实现材料-结构的一体化制造。



a TiC 与 Inconel625 混合粉末



b SLM 成形态 TiC 增强 Inconel625 显微组织

图10 SLM 制备 TiC 增强 Inconel625 高温合金^[23]

5 结束语

通过对国外 SLM 技术研究应用现状分析表明:

a. 国外在政府以及非盈利机构支持下,以航空航天工程需求为牵引,由大型军工企业集团牵头,联合高等院校、专业研究机构以及设备制造厂商,进行了大量技术基础研究工作,“产、学、研”结合紧密,推动了金属材料 SLM 技术的快速发展。

b. SLM 技术涉及到光-电、材料、数字化等系列技术领域,专业性很强,技术与设备关联紧密,设备制造商除研制 SLM 设备之外,同时需要研究相关的技术,有利于推动该项技术工程化应用进程。

c. 国外 SLM 成形设备发展比较成熟,研制了部分样件并进行了相关试验,但在实现技术的工程化应用方面仍存在许多基础理论问题需要解决。

d. 从发展趋势上看,未来 SLM 设备向多光束,制造向大成形尺寸、高制造效率方向发展。SLM 技术除在钛合金、高温合金材料、工具钢等材料进行研究应用外,未来还将向陶瓷颗粒增强金属基复合材料、高熔点合金(如钨合金、铍钛合金等)以及陶瓷等材料延伸。

参考文献

- 1 陈济轮. 激光快速制造技术在我国航天制造领域的应用展望[J]. 航天制造技术, 2010(6): 2
- 2 杨永强, 吴伟辉, 来克娴, 等. 金属零件选区激光熔化直接快速成形工艺及最新进展[J]. 航空制造技术, 2006(2): 73~76
- 3 李涤尘, 田小永, 王永信, 等. 增材制造技术的发展[J]. 电加工与模具, 2012 (A01): 20~22
- 4 Direct manufacturing Research Center and Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn. Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Innovation Roadmapping of Required Advancements [R]
- 5 <http://www.eos.info/en>
- 6 http://stage.slm-solutions.com/index.php?index_de
- 7 Bourell D L, Beaman J B, Leu M C, et al. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead[C]//US-Turkey Workshop on Rapid Technologies. 2009
- 8 Chlebus E, Kuźnicka B, Kurzynowski T, et al. Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2011, 62(5): 488~495
- 9 Agarwala M, Bourell D, Beaman J, et al. Direct selective laser sintering of metals[J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1(1): 26~36
- 10 Buchbinder D, Schleifenbaum H, Heidrich S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 271~278
- 11 Mumtaz K A, Hopkinson N. Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(2): 279~287
- 12 Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior[J]. Materials & Design, 2012, 34: 159~169
- 13 Lu L, Fuh J Y H, Chen Z D, et al. In situ formation of TiC composite using selective laser melting[J]. Materials Research Bulletin, 2000, 35(9): 1555~1561
- 14 Chlebus E, Kuźnicka B, Kurzynowski T, et al. Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2011, 62(5): 488~495
- 15 Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, et al. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 177~185
- 16 Amato K N, Gaytan S M, Murr L E, et al. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2012, 60(5): 2229~2239
- 17 <http://www.ge.com/about-us/openinnovation>
- 18 Larry Greenemeier (November 9, 2012). "NASA Plans for 3-D Printing Rocket Engine Parts Could Boost Larger Manufacturing Trend". Scientific American. Retrieved November 13, 2012
- 19 Wadley H N G, Fleck N A, et al. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structure[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 2331~2343
- 20 Murr L E, Gaytan S M, Medina F, et al. Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 368(1917): 1999~2032
- 21 Chu C, Graf G, Rosen D W. Design for additive manufacturing of cellular structures[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2008, 5(5): 686~696
- 22 Rehme O, Emmelmann C. Rapid manufacturing of lattice structures with selective laser melting[C]//Lasers and Applications in Science and Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2006: 61070K-61070K-12
- 23 Cooper D E, Blundell N, Maggs S, et al. Additive layer manufacture of Inconel 625 metal matrix composites, reinforcement material evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2191~2200
- 24 Gu D, Hagedorn Y C, Meiners W, et al. Selective Laser Melting of in-situ TiC/Ti 5Si3 composites with novel reinforcement architecture and elevated performance[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(10): 3285~3292