

文章编号:1000-8055(2016)01-0010-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2016.01.002

金属增材制造技术在航空发动机领域的应用

张小伟

(中国航空工业集团公司 发展研究中心, 北京 100029)

摘 要: 从增材制造技术的基本概念出发,研究了适用于金属材料的定向能量沉积(DED)技术和粉末熔覆(PBF)技术的基本原理、技术内涵以及技术发展,重点分析了增材制造技术在开发燃油喷嘴和低压涡轮叶片等商业化零部件的应用,以及对涡轮叶片、整体叶轮和齿轮等航空发动机部件的修复.研究表明,金属增材制造技术广泛适用于钛合金、镍基合金、钛铝合金等金属材料的航空发动机部件,在设计、制造和经济可承受性等方面具有优势.

关 键 词: 增材制造; 定向能量沉积; 粉末熔覆; 金属材料; 航空发动机

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Application of metal additive manufacturing in aero-engine

ZHANG Xiao-wei

(Development Research Center of China,

Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100029, China)

Abstract: Additive manufacturing (AM), as one of the most competitive manufacture technologies around the world, was investigated for the application of metal parts in aero-engine. The principles, connotations and development of typical AM technologies applied for metal materials' direct energy deposit (DED) and powder bed fusion (PBF), were analyzed in emphasis. Furthermore, the applications of AM in the development of commercialized aero-engine parts, such as fuel nozzle and low pressure turbine blade, and in the repairing of aero-engine parts, such as turbine blade, whole blisk and gear, were summarized. It is indicated that metal AM technology is suitable for aero-engine parts made from metal material, such as titanium alloy, nickel-based alloy, titanium-aluminium (Ti-Al) alloy, etc. AM technology shows the advantages in design, manufacture and affordability, which are important for the future development of aero-engine industry.

Key words: additive manufacturing; direct energy deposit; powder bed fusion; metal material; aero-engine

增材制造(AM)技术是基于微积分的思想,通过计算机辅助设计(CAD)的设计数据将材料逐层累加来制造实体零件的技术,相对于传统的材料去除(切削加工)技术,是一种“自下而上”材料累加的制造方法.增材制造技术不同于传统的加工过程,是基于材料的增量制造(MIM)^[1],将

材料(一般指粉体材料)一层一层地任意制造出工件,因此,增材制造技术是一种固体无模成形技术、数字化制造技术以及智能制造技术^[2].自 20 世纪 80 年代增材制造技术出现并用于模型制造和快速成型以来,目前已经经历了将近 30 多年的发展,并成为世界快速发展的先进制造技术

收稿日期:2014-05-21

作者简介:张小伟(1984—),男,湖北广水人,副研究员,博士,主要从事航空发动机科技战略研究与管理咨询方面的研究.

之一^[3-5].

近几年,增材制造技术正在快速改变传统的生产方式^[6],而世界各国也相应纷纷制定了发展和推动增材制造技术的国家战略和规划.美国在推进增材制造技术发展方面扮演者重要的角色,在提出发展美国振兴制造业计划后,于 2012 年 8 月成立了国家增材制造创新机构(NAMII)(于 2013 年更名为“美国制造”),强调了通过改善增材制造材料、装备及标准,实现创新设计的小批量、低成本数字化制造,以夺回制造业霸主地位.欧盟在基础研究设施、研发组织和政府支持方面也始终处于前列,并成立了英国的增材制造创新中心,而欧盟在第六框架计划下也开展了大型航空航天组件快速生产项目 Rapolac 以及航空航天 SMD(shaped metal deposition)技术等^[7].另外澳大利亚、日本等也先后成立增材制造领域的研究机构,通过持续加大增材制造技术的研发投入来推动增材制造技术应用和标准方面的发展.

在增材制造技术的标准化方面,美国汽车工程师协会(SAE)于 2002 年发布了第一个增材制造技术标准——宇航材料规范 AMS4999《退火 Ti-6Al-4V 钛合金激光沉积产品》^[8].同时,美国材料与试验协会(ASTM)和国际标准化组织(ISO)还成立了专门的增材制造技术委员会,下设术语、试验方法、设计、材料和工艺、人员等分委员会/工作组,并开展增材制造标准方面的合作,已经并正在制定一些增材制造技术标准方法^[9].增材制造技术标准工作的日趋活跃,标志着增材制造技术已经从实验室发展到实际产品应用,尤其是在航空航天领域的应用.

美国《时代》周刊将增材制造列为“美国十大增长最快的工业”,英国《经济学者》杂志则认为它将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”^[10].

1 金属零件增材制造技术的发展

近年来,为了满足航空航天、汽车行业等的苛刻要求,国内外增材制造技术的研究主要集中在形状复杂的功能性金属材料(包括金属、合金和金属基复合材料)的增材制造技术^[11-15]. Wohlers 协会在 2013 年度报告^[16]中指出,2012 年增材制造设备与服务全球直接产值 22.04 亿美元,其中在航空航天领域的应用已经增长到了 10.2%.在飞行器高性能、高可靠性、长寿命和低成本需求日益增长的背景下,金属增材制造技术将成为复杂金

属结构件制造的关键技术之一.

依据美国试验材料学会(ASTM)定义,金属增材制造技术分为定向能量沉积(DED)和粉末熔覆(PBF)两类,其原理如图 1 和图 2 所示.其中,定向能量沉积(DED)技术方面,Dave 和 Taminger 等以及王华明等国内外学者对电子束自由成形制造技术(EBFFF)^[17-19]和激光近净成形技术(LENS)^[20-23]开展了大量的研究,并重点集中于制造工艺、力学性能及工程应用关键技术等方面.粉末熔覆(PBF)技术方面,电子束熔化技术(EBM)^[24-27]、直接金属激光烧结(DMLS)^[28]、激光选区烧结(SLS)^[29-38]、激光熔化(LM)及激光选区熔化(SLM)^[39-44]等获得了国内外学者的广泛关注,并用于钛合金、钴基合金、镍基合金和钛铝金属间化合物等材料,同时,形成了原材料研制、工艺和设备关键技术研发等较完整的技术体系,并研制出了一些典型的航空金属构件.

随着光纤激光器的出现和激光增材制造设备的发展,增材制造在航空发动机领域的研究迅速在全球发展起来.德国慕尼黑工业大学评估了增材制造技术在未来航空发动机压气机设计中的潜

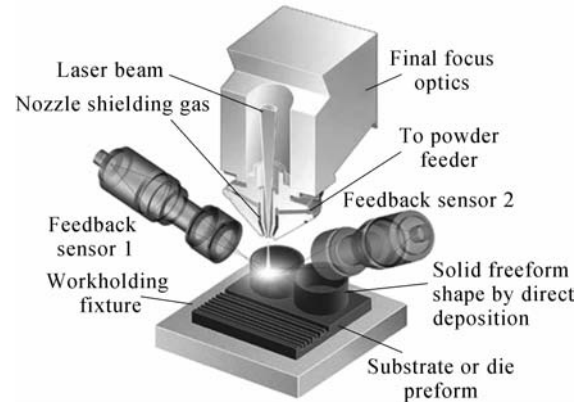


图 1 定向能量沉积原理图^[45]

Fig. 1 Principle diagram of direct energy deposit^[45]

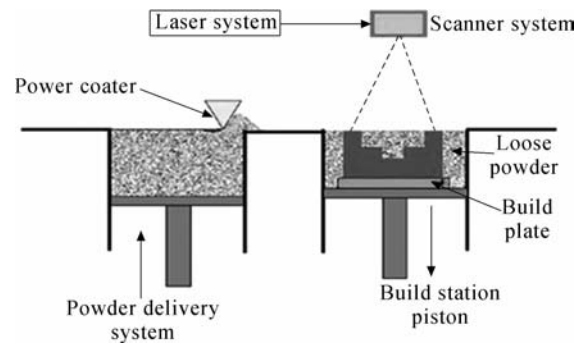


图 2 粉末熔覆原理图^[45]

Fig. 2 Principle diagram of powder bed fusion^[45]

在应用^[46],并通过增材制造技术开发了双壁压气机机匣设计新方法,讨论了设计所面临的挑战^[47].当今世界领先的激光烧结系统制造商德国EOS(Electro Optical System)公司采用选区熔化机制形成了航空发动机的燃烧室和涡轮叶片,如图3所示为增材制造的涡轮叶片.瑞典Arcam公司研发了EBM设备用于航空发动机多联叶片、整体叶盘、机匣、增压涡轮等结构的制造,俄罗斯应用该设备研制出了TC4发动机机匣,意大利也研制出了 γ -TiAl合金叶片.同时,对于在航空发动机高温部件上广泛使用的镍基高温合金,也大量开展了激光增材制造方面的研究和应用,主要集中在镍基高温合金增材制造的工艺特性^[48-56]、成形件组织性能^[57-61]以及热处理^[62-64]对组织和性能的影响方面,并探索了增材制造技术在单晶叶片的修复技术^[65].



图3 增材制造的涡轮叶片

Fig. 3 Turbine blade made by additive manufacturing

2 增材制造技术在航空发动机领域的发展

高性能航空发动机对零件结构的复杂程度要求越来越高,给传统的制造工艺带来了很大难度.随着金属零件的增材制造技术的日益成熟,获得了航空领域的广泛关注^[66-67],航空发动机制造商和零部件供应商已经将增材制造技术用于开发了商业化的零部件,不断扩大在航空发动机上的应用.然而,我国在航空发动机增材制造方面至今仍处于理论研究阶段,技术成熟度水平仍较低,距实际应用还有很长的距离.

GE公司采用金属增材制造技术研发燃气涡轮发动机的飞行关键、高的循环热应力的高温部件.自2004年开始与斯奈克玛公司合作,研发激光烧结增材制造的燃油喷射部件,并制造了首台Leap发动机的生产型燃油喷嘴,如图4所示.该

部件的传统制造方法是多片部件经过铸造、机加工和组装制成,成本较高,GE公司采用增材制造技术将传统工艺的20片部件组装或焊接的结构制造为一个部件,而且由于材料熔化迅速、局部加热和冷却等工艺步骤,使得在恰当热处理情况下,这种方法得到的制件具有接近锻造的材料性能.增材制造避免产生变形和形成微裂纹,实现了燃油喷射系统寿命提高4倍,质量降低25%,研制成本进一步降低,到2020年能够通过50~100个增材机械实现每年生产40000个喷嘴,这一生产率将能够确保每月175台发动机的交付量.另外,GE公司预计,随着技术的进步以及下一代发动机采用增材制造技术设计,能够在10~20年内实现发动机质量的大幅降低.



图4 Leap发动机的燃油喷嘴

Fig. 4 Fuel nozzle of Leap engine

普惠公司采用增材制造技术生产了超过10万件部件和原型件,包括铸模、设备工具以及试验台架硬件等,其中有超过2000件增材制造的发动机金属原型件.普惠公司采用增材制造技术用于发动机的镍基合金和钛合金部件的研制,结果显示,可以获得与当前材料一致的性能,并能够节省大量的时间,提升复杂几何结构的制造精度.同时,相比传统的锻造或铸造工艺,增材制造技术能够降低原材料消耗达50%,将发动机的BTF比(生产部件的原材料质量与部件最终质量之比)从传统工艺的20:1降低到2:1以下,这对降低部件质量和制造成本是大有裨益的.普惠公司在PW1100G和PW1500G发动机的部件设计中,采用增材制造技术极大地减少了部件的研制时间以及原材料和成本的浪费,发动机单个零件的制造速度提高4~8倍,相比锻造,部分零部件减少最多90%的浪费,研制的特定部件的成本降低

30%。另外,普惠公司还在 2013 年与康涅狄格大学共建了普惠增材制造创新中心,以实现设计、制造和经济可承受性上的创新,为下一代发动机的研制做技术储备。

MTU 公司采用 SLM 技术生产了 PW1100G-JM 发动机的内窥镜轮毂,形成了涡轮机匣的一部分,允许叶片在磨损和损伤的指定间隙使用内窥镜进行检查。目前,MTU 公司正在“净洁天空”计划下使用 SLM 技术制造密封托架,其整体蜂窝结构的内环将安装在高压压气机内。未来,MTU 公司始终致力于削减零部件的研制时间和成本,还将采用 SLM 技术生产部件来取代现有部件,如车间使用的喷射喷嘴和磨砂轮,并将重新设计、生产系列轻型部件。图 5 所示为 MTU 公司网站上给出的增材制造的发动机部件。



图 5 MTU 公司采用增材制造的部件
Fig. 5 Engine parts of MTU made by additive manufacturing

另外,增材制造技术的一个最好的应用领域是对部件损伤的修复,包括涡轮叶片、外壳、轴承和齿轮等^[45],能够用于重建各种部件所损失的材料^[68],并保持结构的完整性,如图 6 所示。Kelbassa 等^[69]回顾了增材制造技术用于高压压气机叶盘结构、高压涡轮导向器和叶片、高压涡轮衬套以及燃烧室旋流器等部件维修技术的研究。例如,采用增材制造技术,对 BR715 发动机的 Ti-6Al-4V 和 Ti-6246 钛合金高压压气机前轮的阻

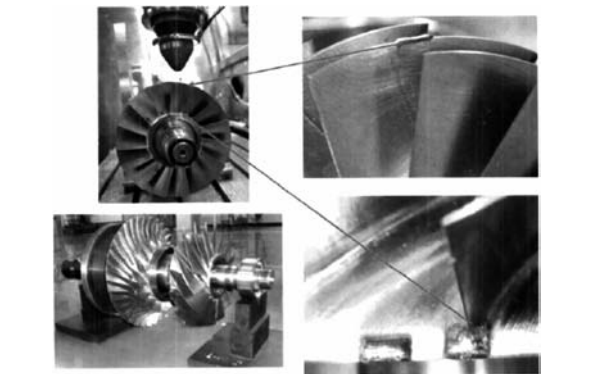


图 6 采用增材制造技术修复的钛合金整体叶轮
Fig. 6 Titanium alloy blisk repaired by additive manufacturing

尼线槽的槽壁局部翻新(图 7),以及对镍基合金制成的高压涡轮机匣通过一层一层的镍基金属粉末沉积进行维修(图 8),几乎完全避免了部件的变形;Optomec Design 公司^[45]采用增材制造技术开展 T700 发动机零件的磨损修复,如图 9 所示。普惠公司预测,未来车间的维护、修理和大修(MRO)将通过增材制造技术来“打印”部件,将加速维修任务并降低库存量。

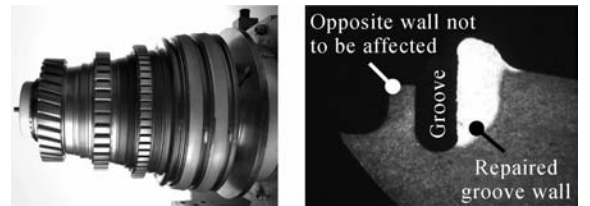


图 7 BR715 发动机高压压气机前轮及阻尼线槽壁横截面^[69]

Fig. 7 Front wheel of high pressure compressor of BR715 engine and cross section of damping groove wall^[69]

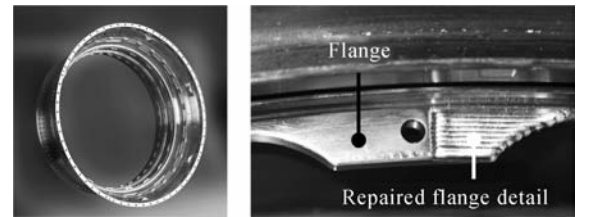


图 8 BR715 发动机高压涡轮机匣及其肋片维修部分^[69]
Fig. 8 High pressure turbine casing and repaired flange detail of BR715 engine^[69]

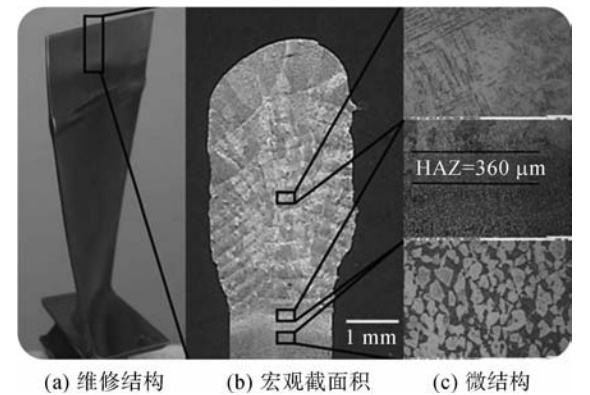


图 9 维修的涡轮导向器叶片^[45]
Fig. 9 Repaired turbine guide vane^[45]

3 结 论

增材制造技术将材料科学、机械加工和智能技术集合为一体,是现代制造业的一个重要变

革^[70],真正意义上实现了数字化、智能化加工.由于增材制造技术具有加工柔性高、无需模具、工序少、加工周期短、可加工任意形状、尺寸适应性好、加工成本低且成形件物理化学性能优异等优点^[71],而且钛合金、铬合金、镍基合金等航空发动机领域广泛使用的材料均适用于增材制造技术,因此,增材制造已经并将继续扩大在航空发动机领域的应用.

虽然金属增材制造仍然面临着表面质量、固定和支撑、国际标准、部件的适航取证等方面的挑战,但是随着金属增材制造技术的发展,未来通过增材制造可以直接制造力学性能优异的复杂结构金属零件,并通过组织和结构的一体化制造进一步提高精度和性能,同时向陶瓷零件的增材制造技术和复合材料的增材制造技术发展.

参考文献:

- [1] Chua C K, Leong K F, Lim C C S. Rapid prototyping: principles and applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010.
- [2] Venuvinod P K, Ma W. Rapid prototyping: laser-based and other technologies [M]. Richmond, TX, USA: Springer, 2003.
- [3] Doubrovski Z, Verlinden J C, Geraedts J M P. Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges [C] // Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2011-48131. Washington DC, USA: ASME, 2011: 635-646.
- [4] Beaman J J, Barlow J W, Bourell D L, et al. Solid free-form fabrication: a new direction in manufacturing [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [5] Gibson I, Rosen D W, Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing [M]. New York, USA: Springer, 2010.
- [6] Fink C W. An overview of additive manufacturing: Part I [J]. AMMTIAC Quarterly, 2009, 4(2): 7-11.
- [7] 吴复尧, 刘黎明, 许沂, 等. 3D 打印技术在国外航空航天领域的发展动态 [J]. 飞航导弹, 2013(12): 10-15.
- [8] SAE International. AMS4999A Titanium alloy direct deposited products Ti-6Al-4V annealed [S]. Warrendale PA, USA: SAE International, 2011.
- [9] ASTM International. ASTM F2792-12a Standard terminology for additive manufacturing technologies [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2012.
- [10] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4. (in Chinese)
- [11] Choi J, Chang Y. Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4): 597-607.
- [12] Mueller D H, Mueller H. Experiences using rapid prototyping techniques to manufacture sheet metal forming tools [C] // Proceeding of ISATA Conference. Dublin, Ireland: Citeseer, 2000: 1-9.
- [13] Whitney T J, Gibson T, Lafdi K, et al. A hybrid metal-to-composite joint fabricated through additive manufacturing processes [C] // ASME Proceedings of Design, Materials, and Manufacturing, IMECE2012-89540. Houston, Texas, USA: ASME, 2012: 929-932.
- [14] Peter C C. A combinatorial approach to the development of composition-microstructure-property relationships in titanium alloys using directed laser deposition [D]. Columbus, OH: The Ohio State University, 2004.
- [15] Vayrea B, Vignat F, Villeneuve F. Designing for additive manufacturing [R]. Felix Grenoble, France: 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2012: 632-637.
- [16] Wohlers T T. Wohlers report 2013: additive manufacturing and 3D printing state of the industry, annual world-wide progress report 2013 [R]. Colorado, USA: Wohlers Associates Inc., 2013.
- [17] Dave V R, Matz J E, Eagar T W. Electron beam solid free-form fabrication of metal parts [C] // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. East Hartford, USA: Pratt & Whitney, 1995: 64-71.
- [18] Taminger K M B, Hafley R A. Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process [C] // Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference. Troy, MI: Society of Plastics Engineer, 2003: 9-10.
- [19] Taminger K M B, Hafley R A. Characterization of aluminum produced by electron beam freeform fabrication [C] // Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX: University of Texas, 2002: 482-489.
- [20] 王华明, 张凌云, 李安, 等. 高性能航空金属材料激光快速成形与激光表面改性研究进展 [C] // 2005 年中国机械工程学会年会第 11 届全国特种加工学术会议论文集. 重庆: 中国机械工程学会特种加工分会, 2005: 390-392.
- [21] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战 [J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209. (in Chinese)
- [22] 李延民, 李建国, 杨海欧, 等. 金属零件激光直接成形 [J]. 应用激光, 2002, 22(2): 140-144.
LI Yanmin, LI Jianguo, YANG Haiou, et al. Laser direct forming of metal components [J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 140-144. (in Chinese)
- [23] 费群星, 张雁, 谭永生. 镍基合金激光直接制造的显微组织与缺陷分析 [J]. 热加工工艺, 2006, 35(19): 1-4.
FEI Qunxing, ZHANG Yan, TAN Yongsheng. Investigation

- on microstructure and defect of Ni-based alloys fabricated by laser direct manufacturing (LDM)[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(19): 1-4. (in Chinese)
- [24] Shen N G, Chou K. Simulations of thermo-mechanical characteristics in electron beam additive manufacturing[C] // Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Texas, USA: ASME, 2012: 67-74.
- [25] Shen N G, Chou K. Thermal modeling of electron beam additive manufacturing process-powder sintering effects[C] // Proceedings of the ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Indiana, USA: ASME, 2012: 287-295.
- [26] Vayre B, Vignata F, Villeneuve F. Identification on some design key parameters for additive manufacturing: application on electron beam melting[J]. Procedia CIRP, 2013, 7: 264-269.
- [27] Ladani L, Roy L. Mechanical behavior of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam additive fabrication[R]. Madison, WI: ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2013-1105, 2013.
- [28] Hussein A, Hao L, Yan C Z, et al. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1019-1026.
- [29] Kerbrat O, Mognol P, Hascoet J Y. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing [J]. Computers in Industry, 2011, 62(7): 684-692.
- [30] Beaman J J, Deckard C R. Selective laser sintering with assisted powder handling, US, 4938816[P]. 1990-07-03.
- [31] Yih P, Chung D D. Powder metallurgy fabrication of metal matrix composites using coated fillers[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1995, 31(4): 335-340.
- [32] Agarwala M, Bourell D, Beaman J, et al. Direct selective laser sintering of metals [J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1(1): 26-36.
- [33] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2006, 46(12): 1459-1468.
- [34] Khaing M W, Fuh J Y H, Lu L. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1/2/3): 269-272.
- [35] Kruth J P, Mercelis P, Vaerenbergh J V, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- [36] 赵晓, 魏青松, 刘颖, 等. 激光选区熔化技术成形 S136 模具钢研究[C] // 第 15 届全国特种加工学术会议论文集: 下集. 南京: 中国机械工程学会特种加工分会, 2013: 304-308.
- [37] 刘锦辉, 史玉升, 陈康华, 等. 选择性激光烧结复合粉末法制造合金零件[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 83-85.
- LIU Jinhui, SHI Yusheng, CHEN Kanghua, et al. Fabrication of alloy parts by composite powders via selective laser sintering[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2006, 34(5): 83-85. (in Chinese)
- [38] 孙健峰. 激光选区熔化 Ti6Al4V 可控多孔结构制备及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- SUN Jianfeng. Research on fabrication and forming mechanism of controllable porous structure of Ti6Al4V based on selective laser melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [39] Gong X B, Chou K. Characterization of sintered Ti-6Al-4V powers in electron beam additive manufacturing [R]. ASME Paper MSEC2013-1131, 2013.
- [40] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013(13): 66-71.
- GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huaixue. Development and application of metal additive manufacturing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(13): 66-71. (in Chinese)
- [41] Keicher D M, Miller W D, Smugeresky J E, et al. Laser engineered net shaping (LENSTMS) beyond rapid prototyping to direct fabrication [C] // Proceedings of the 12th TMS Annual Meeting. Texas, USA: Mineral, Metals and Materials Society, 1998: 369-377.
- [42] 郭朝邦, 胡丽荣, 胡冬冬, 等. 3D 打印技术及其军事应用发展动态[J]. 战术导弹技术, 2013(6): 1-4.
- GUO Chaobang, HU Lirong, HU Dongdong, et al. 3D printing technology and recent application in military fields [J]. Tactical Missile Technology, 2013(6): 1-4. (in Chinese)
- [43] 李怀学, 巩水利, 孙帆, 等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. 航空制造技术, 2012(20): 26-31.
- LI Huaixue, GONG Shuili, SUN Fan, et al. Development and application of laser additive manufacturing for metal component [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(20): 26-31. (in Chinese)
- [44] 颜永年, 张人佶, 林峰. 激光快速成形技术的新进展[J]. 新技术新工艺, 2006(9): 7-9.
- YAN Yongnian, ZHANG Renji, LIN Feng. New development of laser rapid prototyping technique [J]. New Technology & New Process, 2006(9): 7-9. (in Chinese)
- [45] Dutta B, Froes F H. Additive manufacturing of titanium alloys[J]. Advanced Materials & Processes, 2014, 2: 18-23.
- [46] Rockel D, Hupfer A, Kau H P. An evaluation of the potential of additive manufacturing technologies in future aero engine design[R]. AIAA 2013-3617, 2013.
- [47] Rockel D, Weihard S, Hachmann A, et al. Numerical investigation of an additively manufactured compressor casing: the effect of auxetic structures on the tip clearances[R]. ASME Paper GT2013-95736, 2013.
- [48] LI Peng, YANG Taiping, LI Sheng, et al. Direct laser

- fabrication of nickel alloy samples[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(11): 1288-1294.
- [49] Tobar M, Amado J, Lamas J, et al. Effect of processing parameters in manufacturing of 3D parts through laser direct metal deposition[C]//Proceedings of the 36th International MATADOR Conference. London: Springer, 2010: 451-454.
- [50] Dinda G P, Dasgupta A K, Mazumder J. Texture control during laser deposition of nickel-based superalloy [J]. Scripta Materialia, 2012, 67(5): 503-506.
- [51] Tabernero I, Lamikiz A, Martinez S, et al. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 465-470.
- [52] Acharya R, Bansal R, Gambone J J, et al. Modeling of solidification and microstructure evolution in the scanning laser epitaxy (SLE) process for additive manufacturing with nickel-base superalloy powders [R]. ASME Paper IMECE2013-66807, 2013.
- [53] 刘奋成, 林鑫, 杨高林, 等. 不同气氛激光立体成形镍基高温合金 Inconel 718 的显微组织和力学性能[J]. 金属学报, 2010, 46(9): 1047-1054.
- LIU Fencheng, LIN Xin, YANG Gaolin, et al. Microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel base superalloy Inconel 718 prepared in different atmospheres[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(9): 1047-1054. (in Chinese)
- [54] Zhu G X, Li D C, Zhang A F, et al. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(2): 349-356.
- [55] Pi G, Zhang A F, Zhu G X, et al. Research on the forming process of three-dimensional metal parts fabricated by laser direct metal forming[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9): 481-487.
- [56] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微观结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.
- LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/micro-structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-135. (in Chinese)
- [57] Aizenberg J, Muller D A, Grazul J L, et al. Direct fabrication of large micro patterned single crystals[J]. Science, 2003, 299: 1205-1208.
- [58] 张亚玮, 张述泉, 王华明. 激光熔化沉积定向快速凝固高温合金组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(1): 169-172.
- ZHANG Yawei, ZHANG Shuquan, WANG Huaming. Microstructure and mechanical properties of directional rapidly solidified Ni-base superalloy Rene95 by laser melting deposition manufacturing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(1): 169-172. (in Chinese)
- [59] 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[J]. 航空学报, 2002, 23(5): 473-478.
- WANG Huaming. Research progress on laser surface modifications of metallic materials and laser rapid forming of high performance metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(5): 473-478. (in Chinese)
- [60] Fujita Y, Saida K, Nishimoto K. Laser epitaxial cladding of Ni-based single crystal superalloy [J]. Materials Science Forum, 2008, 580: 67-70.
- [61] 张永忠, 石力开, 章萍芝, 等. 激光快速成形镍基高温合金研究[J]. 航空材料学报, 2002, 22(1): 22-25.
- ZHANG Yongzhong, SHI Likai, ZHANG Pingzhi, et al. Research on laser direct deposition of nickel base superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(1): 22-25. (in Chinese)
- [62] Tabernero I, Lamikiz A, Martinez S, et al. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding[J]. International Journal of Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 465-470.
- [63] Qi H, Azer M, Ritter A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2009, 40(10): 2410-2422.
- [64] Liu F, Lin X, Yang G, et al. Recrystallization and its influence on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel base superalloy Inconel 718[J]. Rare Metals, 2011, 30(1): 433-438.
- [65] Gaumann M, Bezencon C, Canalis P, et al. Singlecrystal laser deposition of superalloys: processing-microstructure maps[J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1051-1062.
- [66] Wohlers T. Rapid prototyping, tooling and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report [M]. Fort Collins, CO: Wohlers Associates, Inc., 2006.
- [67] 柏林, 黄建云, 吉芬, 等. 高能束流增材制造技术引领飞行器结构设计新变革[J]. 航空制造技术, 2013(21): 26-29.
- BO Lin, HUANG Jianyun, JI Fen, et al. Transformation of air vehicle structural design led by high energy beam manufacturing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(21): 26-29. (in Chinese)
- [68] Dutta B, Palaniswami S, Choi J, et al. Rapid manufacturing and remanufacturing of DoD components using direct metal deposition[J]. AMMTIAC Quarterly, 2011, 6(2): 5-9.
- [69] Kelbassa I, Albus P, Dietrich J, et al. Manufacture and repair of aero engine components using laser technology [C]//Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2008. Beijing: [s. n.], 2008: 208-212.
- [70] Lu L, Fuh J, Wong Y S. Laser-induced materials and processes for rapid prototyping[M]. New York: Springer Science-Business Media, 2001.
- [71] 王红霖. 3D 打印技术制造业发展新趋势[J]. 现代工业经济和信息化, 2013(5): 23-25.