

高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状 与发展趋势

汤海波^{1,2,3,4}, 吴宇^{1,2,3,4}, 张述泉^{1,2,3,4}, 刘栋^{1,2,3,4}, 田象军^{1,2,3,4}, 王华明^{1,2,3,4}

- (1. 大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京航空航天大学, 北京 100191;
2. 国防科技工业激光增材制造技术研究应用中心, 北京 100191;
3. 大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心, 北京 100191;
4. 大型关键金属构件激光直接制造北京市工程技术研究中心, 北京 100191)

摘要: 高性能大型金属构件激光增材制造技术, 将“高性能金属激光熔化/快速凝固材料制备”与“大型构件近净成形制造”结合, 为航空、航天、船舶、电力、石化、海洋工程等领域装备中大型难加工金属构件的制造提供了新途径。综述了北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室在钛合金等高性能大型关键承力构件激光熔化沉积增材制造技术方向的主要进展: 突破以“凝固晶粒”、“内部缺陷”及“显微组织”为核心的钛合金大型关键主承力构件激光增材制造“质量性能”控制瓶颈难题; 提出系列激光增材制造工艺新方法, 揭示激光增材制造过程内应力形成机理与演化规律, 初步建立“变形开裂”预防方法; 研制出具有原创核心关键技术的系列化大型激光增材制造工程化成套装备; 自主制定了整套应用技术标准体系。北航团队研究成果在国家大型运输机、舰载机、大型运载火箭等重大装备研制生产中的工程应用, 为解决装备研制生产制造瓶颈难题、提升装备结构设计制造水平、促进装备快速研制等发挥了重要作用, 同时使我国在此领域处于国际领先地位。

关键词: 增材制造; 高性能金属; 主承力构件; 工程应用

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.008

中图分类号: TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0058-06

Research Status and Development Trend of High Performance Large Metallic Components by Laser Additive Manufacturing Technique

TANG Hai-bo^{1,2,3,4}, WU Yu^{1,2,3,4}, ZHANG Shu-quan^{1,2,3,4}, LIU Dong^{1,2,3,4},
TIAN Xiang-jun^{1,2,3,4}, WANG Hua-ming^{1,2,3,4}

- (1. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components and Engineering Research Center, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Research and Application Center of Laser Additive Manufacturing for Defense Industries, Beijing 100191, China; 3. Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Components, Beijing 100191, China; 4. Beijing Engineering Technological Research Center on Laser Direct Manufacturing for Large Critical Metallic Component, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Laser additive manufacturing technique for high performance large metallic components combines “high performance metallic laser melting/rapid set material preparation” and “near-net forming manufacturing of large components”, providing new technical approach to fabricate high-performance large metallic components, which are difficult to be prepared via traditional processing techniques in industries, such as aviation, aerospace, electric power, oil, marine and so on. This paper summarized the major progress and achievements acquired by National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components of Beihang University on laser melting deposition additive manufacturing technique for high perfor-

收稿日期: 2019-07-01

作者简介: 汤海波(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为增材制造。

mance large key load bearing components of titanium alloy, etc. The bottleneck challenges such as "solidification grain", "internal defect" and "microstructure" on "quality performance" of laser additive manufacturing of large key load bearing titanium alloy components was broken through. New laser additive manufacturing technique was proposed. The formation mechanism and involvement rule of internal stress during laser additive manufacturing were revealed. Methods for prevention of "deformation and cracking" were initially developed. Complete equipment for larger laser additive manufacturing engineering of original, core and key techniques was developed. Complete set of technical standard system for application was independently formulated. The engineering application of the research results of the Beihang team in development and production of major national equipment such as large transport aircraft, carrier aircraft and large carrier rocket plays an important role in solving the bottleneck problems in development and production of equipment, improving design and manufacture level of equipment structure, promoting the rapid development of equipment, etc. At the same time, it also makes China be internationally leading in this field.

KEY WORDS: additive manufacturing; high-performance metal; key bearing component; engineering application

高端装备在向大型化、高可靠性和长服役寿命方向发展的过程中,用于装备制造的关键金属构件也日益大型化、复杂化,其制造难度亦随之不断升高。激光熔化沉积增材制造技术(Laser melting deposition, LMD)以金属粉末或丝材为原料,采用高功率激光使原料快速熔化/凝固并逐层堆积,能够快速完成全致密、高性能大型复杂金属结构件的直接近净成形,是一种“变革性”的低成本、短周期、高性能、“控形/控性”一体化、绿色、数字制造技术,可为大中型难加工金属构件的制造提供一种快速、柔性、低成本、高性能、短周期的新方法^[1-2]。

激光增材制造是一个“逐点熔化-逐线扫描-逐层堆积”的循环往复过程,该过程的非平衡物理冶金和热物理变化十分复杂,同时发生着“激光/金属(粉末、固体基材、熔池液体金属等)交互作用”、移动熔池的“激光超常冶金”、移动熔池在超高温梯度强度和强约束条件下的“快速凝固”及逐层堆积三维构件“内部质量演化”、复杂约束长期循环条件下“热应力演化”^[1]。如何解决增材制造过程中“热应力控制和变形开裂预防”及构件“内部质量和力学性能控制”等问题,是激光增材制造高性能大型金属构件发展和应用面临的重大挑战。美国原 AeroMet 公司曾于 2000 年将分别在波音和诺克希德·马丁公司对其激光增材制造的小型钛合金全尺寸机翼构件进行了地面性能试验考核,又于 2002 年制定了“Ti6Al4V 钛合金激光沉积产品”宇航材料标准,并同年在 F/A-18 等飞机上首次实施了激光增材制造钛合金小型、次承力构件的验证考核和装机应用。然而,其激光增材制造钛合金构件的高周疲劳等关键力学性能未达到锻造水平,因此难以应用于飞机关键及主承力构件^[1,3]。

我国从 2000 年开始了对钛合金、镍基高温合金、不锈钢、超高强度钢、难熔合金、耐热钢、金属间化合物等材料的激光增材制造工艺、装备、组织及性能的研究。其中,北京航空航天大学王华明院士领衔的大型金属构件增材制造国家工程实验室团队,瞄准航空、航天、船舶、电力、石化等工业领域重大装备发

展战略需求及高性能材料与先进制造技术学科国际前沿发展方向,得到装备发展部(原总装备部)、科技部、国家自然科学基金委、国防科工局及地方政府的不断支持,坚持“需求牵引”,与航空工业沈阳飞机设计研究所、西安飞机设计研究所、成都飞机设计研究所、沈飞公司、西飞公司、航天科技集团、航天科工集团等高端装备设计制造院所“产学研”紧密合作,历经 20 余年持续研发,在国际上首次全面突破钛合金、超高强度钢等高性能难加工金属大型整体主承力关键构件激光增材制造工艺、成套装备、专用材料及应用关键技术,自主建立了完整技术标准体系,激光增材制造钛合金、超高强度钢大型整体关键构件,在我国舰载机、大型运输机、大型运载火箭、新型战机、卫星、导弹等重大装备研制生产中作为多种关键结构的唯一制造方案,为保障国家重点装备的顺利进展发挥了重要作用,同时也使我国成为目前世界上唯一掌握钛合金、超高强度钢大型整体关键主承力构件激光增材制造技术并成功实现装机工程应用的国家。

1 高性能大型关键主承力金属构件激光增材制造技术进展

进展一:揭示凝固晶粒、内部缺陷和显微结构形成演化机制,建立“内部质量主动控制”方法,解决构件“力学性能控制”瓶颈问题。大型钛合金构件激光增材制造过程冶金和热物理过程十分复杂,零件长期经历高能激光束的周期性、剧烈、非稳态、循环加热和冷却,导致其凝固晶粒形态及显微组织复杂多变,控制难度极大,最终决定着构件力学性能及性能均匀性,因此,以“凝固晶粒”、“内部缺陷”及“显微组织”为核心的“质量性能”控制,被公认是长期制约大型钛合金关键构件激光增材制造发展和应用的两大技术“瓶颈”之一。北航团队提出了移动熔池这一基本单元凝固的 3 种固有形核生长机制:熔池底部高温梯度驱动下垂直于液固界面的“外延生长”、熔池表面气液界面及

粉末喷射入熔池等形成“表面形核”、合金熔体中半熔化/未熔粉末异质形核等“内部形核”,进一步建立构件凝固晶粒形态选择模型和主动控制技术,揭示了“已沉积固态基底表面难熔”的内部缺陷形成根本原因,建立了构件内部缺陷控制与无损检测方法,揭示了激光增材制造钛合金“超细网篮显微组织”形成演化机制,发现后续热处理中钛合金的“特种双态组织”新形态,发展出高强高韧高损伤容限钛合金技术新途径。上述研究结果,在国际上首次解决了激光增材制造大型钛合金关键构件质量性能低和难以用作关键主承力结构的制约性难题,被评价“提高了构件性能”、“带来了减重效果”^[4—11]。不同晶粒形貌 TC11 钛合金形成机理示意图见图 1。

该研究成果应用于镍基高温合金激光增材制造,发展出微细柱晶高温合金激光约束熔化沉积增材制造技

术新途径,成功制备无裂纹、低偏析、枝晶细小且具有良好定向外延生长组织的发动机叶片试样^[12—15]。镍基高温合金激光增材制造工艺优化及最终获得的定向凝固构件见图 2。

同时有关激光增材制造过程“微热处理”行为及其后续固态相变组织调控研究成果也应用于超高强度钢等激光增材制造,发现增材制造超高强度钢高温均匀化后大尺寸碳化物的溶解促进了合金微孔形核及聚集抗力提高,并依据钢中晶粒的演化行为和碳化物的析出特点,建立显微组织-力学性能关联规律,优化热处理工艺制度,使合金强度、塑性、韧性和抗疲劳性能均得到明显提升^[16—25]。增材制造 A100 超高强度钢热处理组织及性能特点见图 3。

进展二:揭示内应力形成演化机理,建立整套零件“变形开裂预防”方法,初步解决了“难以成形大

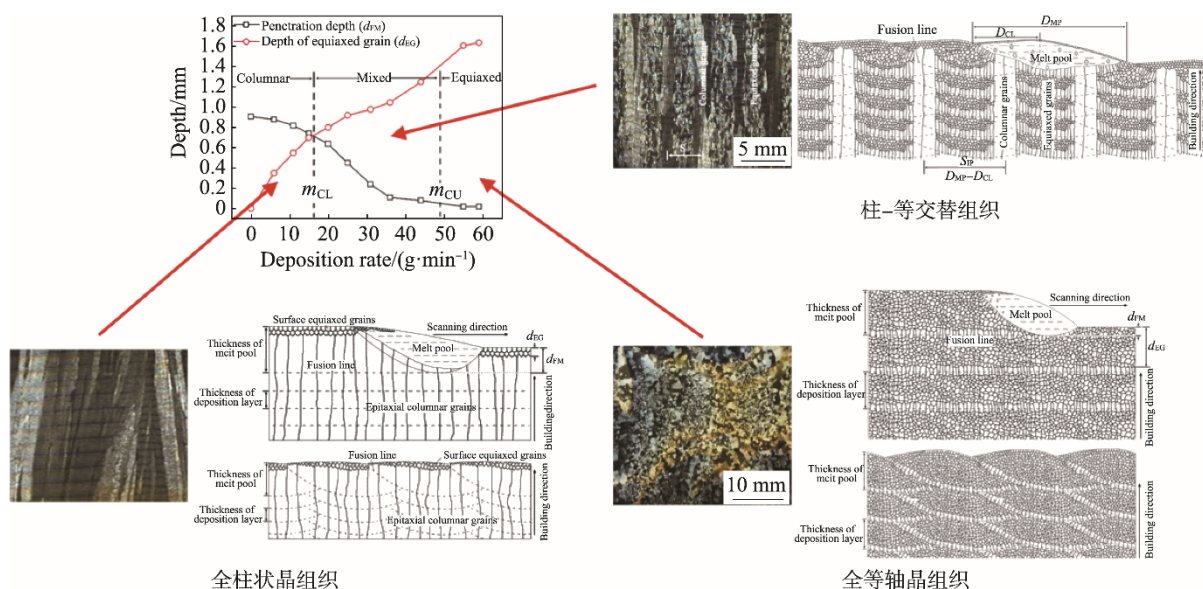


图 1 不同晶粒形貌 TC11 钛合金形成机理示意图

Fig.1 Formation mechanism of TC11 titanium alloy of different grain morphologies

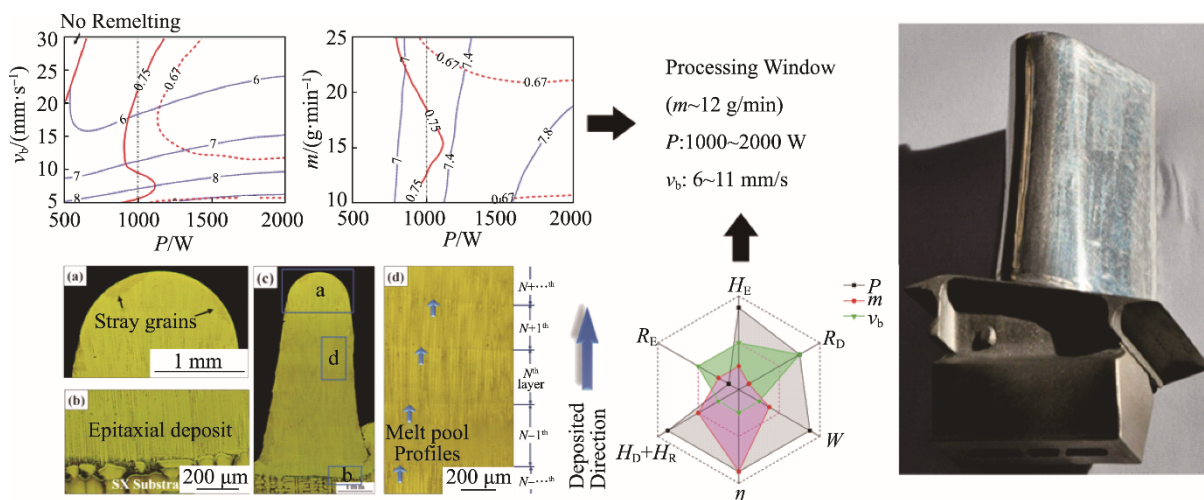


图 2 镍基高温合金激光增材制造工艺优化及最终获得的定向凝固构件

Fig.2 Optimization of processing parameters of LMDed superalloy and fabricated directional solidification component

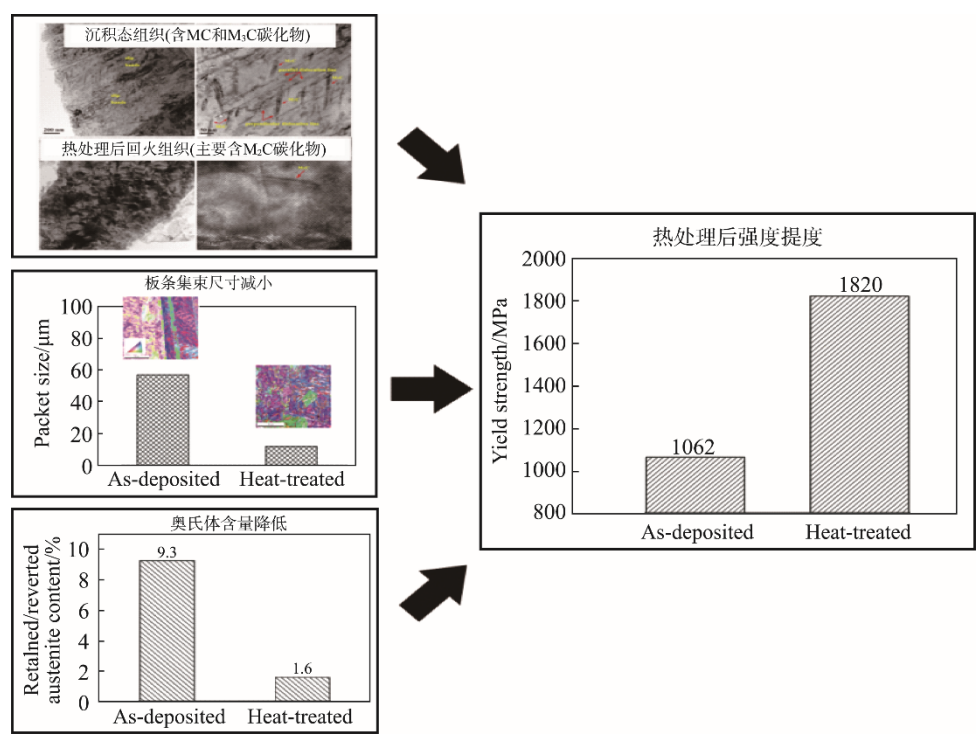


图 3 增材制造 A100 超高强度钢热处理组织及性能特点
Fig.3 Microstructure and mechanical properties of LMDed A100 steel after hear treatment

型构件”的难题。变形开裂预防是国际上长期制约大型金属构件激光增材制造技术发展和应用的另一大技术瓶颈难题。北航团队研究建立大型金属构件激光逐层熔化沉积过程热应力、强约束凝固收缩应力和固态相变组织应力的形成机理、物理模型与演化规律，将数值仿真与试验验证相结合，建立专用工艺软件及过程控制技术，探索出了一条“力学性能”控制方法。

进展三：提出激光增材制造装备系统新原理，初步解决“大型工程成套装备”难题。北航团队提出“外置式”（机械系统均放置于成形真空腔外）的装备新思路，发展出多路沉积“桥式”（机械运动轴全悬挂、可扩展）大型激光增材制造装备新系统（见图 4）、成形腔柔性高效抽排真空新方法，突破多路沉积协调控制关键技术，历经 7 代系列化发展，最新一代装备结构紧凑、运行高效、造价低廉、可扩展新型大型构

件激光增材制造工程化成套装备的制造能力达 7 m×5 m×3 m、钛合金沉积效率达 2 kg/h。

进展四：建立整套应用技术标准体系，解决了工程应用“技术标准”问题。北航团队理论研究、试验验证与工程实践结合，建立了从原材料、工艺、装备到产品的成套大型金属构件激光增材制造技术标准体系，制定相关工艺规范 100 余项。其中，我国首套金属增材制造领域的航空行业标准 5 项，由国家国防科技工业局于 2018 年发布实施（见表 1）。

进展五：“产学研”紧密合作，在重大装备制造业领域进一步扩大成果推广应用和转化。北航团队近年来圆满保障了大型运输机、舰载机、大型运载火箭等国家重大装备研制生产任务，并不断在高性能金属大型关键承力构件激光增材制造“材料-结构-制造”一体



图 4 多路沉积“桥式”增材制造装备
Fig.4 “Bridge type” additive manufacturing equipment with multi deposition paths

表 1 增材制造航空行业标准		
Tab.1 Aeronautical industry standard of additive manufacturing		
序号	标准号	标准中文名称
1	HB 20452—2018	航空钛合金零件激光直接沉积增材制造 制件规范
2	HB 20451—2018	航空钛合金零件激光直接沉积增材制造 粉末规范
3	HB 20453—2018	航空钛合金零件激光直接沉积增材制造 基材规范
4	HB/Z 20065—2018	航空钛合金零件激光直接沉积增材制造 工艺规范
5	HB/Z 20066—2018	航空钛合金零件激光直接沉积增材制造 热处理规范

化融合中创新发展：将某大型承力框梁结构中 10 大锻件、180 余个螺栓的机械连接结构优化为一个高可靠整体大部件；将某大型复杂关键承力接头原 70 多个零件机械连接结构优化为 1 个轻量、高可靠整体结构；利用激光增材制造给某大型运载火箭大型关键主承力结构带来 300 kg 以上的显著减重效果。

2 金属激光增材制造技术发展趋势展望

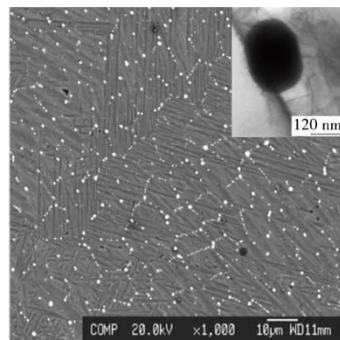
高性能金属构件激光增材制造技术经过近 20 年的快速发展,在航空航天等领域高端装备中的工程应用越来越多,然而目前激光增材制造技术的研究仍主要是面向现有合金材料和结构件的制备技术,未能充分发挥其技术优势。笔者认为未来激光增材制造技术在变革材料冶金和创新结构设计领域具有巨大的发展潜力,是未来高性能金属激光增材制造技术的重要发展方向。

1) 变革材料冶金技术。高性能金属激光增材制造技术过程中具有独特的超高温、强对流、超高温梯度、超快冷却速率、短时小熔池的超常冶金条件,一方面能够实现消除传统铸锭的宏观冶金缺陷和偏析,获得成分均匀、显微组织细小的构件,甚至可实现构件内部组织的逐点设计可控,从而获得高性能梯度组织构件。另一方面,该超常冶金条件能够突破传统冶金材料制备技术的动力学和热力学的局限,为引入常规方法无法同时加入的多元化、强差异元素合金化以及多种强化机制复合提供了可能,从而为发展新一代高性能结构材料提供一条新途径。例如,北航团队通过控制激光超常冶金工艺条件,在增材制造 Ti60 钛合金构件中获得了难熔稀土氧化物纳米弥散分布颗粒相的组织,将传统铸锭中粗大的稀土氧化物有害相转变成强化相,相比传统锻件组织的 Ti60 构件在 600 °C 下的持久寿命提高了 7 倍(见图 5a)。

2) 创新结构设计技术。高性能金属构件激光增材制造的原理是利用二维熔化逐层堆积以实现任意复杂三维结构制造,突破了传统制造技术对结构尺寸和复杂程度的限制,为复杂拓扑化、大型整体化等轻量化结构设计提供了变革性的技术途径,从而可发展出大型/超大型整体结构、复杂/超复杂拓扑优化结构、结构-功能一体化结构等先进高效能轻量化结构。例如,北航团队与商飞北研中心产学研结合,通过开展基于激光增材制造技术的拓扑优化结构设计研究,获得一种变革性的高效能轻量化仿生结构,与传统结构相比实现单件减重 60%以上,为飞机性能提升提供了强大支撑(见图 5b)。

3 结论

大型金属构件激光增材制造技术的发展和工程



a 激光增材制造Ti60钛合金纳米稀土氧化物颗粒相组织^[26]



b 基于激光增材制造技术的拓扑优化仿生钛合金结构件

图 5 北航团队在新材料及结构上的创新

Fig.5 Innovation of Beihang Team in New Materials and Structure

强度钢等高性能难加工金属大型构件制造提供了一条快速、柔性、高性能、低成本、短周期的技术新途径,可提升国家重大装备制造技术水平和能力,促进传统制造业的转型升级和产业模式变革。北航团队在国际上首次全面突破钛合金、超高强度钢等高性能大型整体关键主承力构件激光增材制造技术的“控形”、“控性”关键瓶颈问题,建立成套系列装备和国内首套大型关键金属构件激光增材制造标准规范体系,推广了增材制造在重大装备制造业领域的成果应用和转化。基于高性能金属激光增材制造技术的变革材料冶金技术和创新结构设计技术研究是该领域未来重要发展方向。

参考文献:

- [1] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690—2698.
WANG Hua-ming. Materials' Fundamental Issues of Laser Additive Manufacturing for High-performance Large Metallic Components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690—2698.
- [2] GU D D, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2013, 57(3): 133—164.
- [3] 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—3206.
WANG Hua-ming, ZHANG Shu-quan, WANG Xiang-ming. Progress and Challenges of Laser Direct Manufac-

- turing of Large Titanium Structural Components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204—3206.
- [4] WANG T, ZHU Y Y, ZHANG S Q, et al. Grain Morphology Evolution Behavior of Titanium Alloy Components during Laser Melting Deposition Additive Manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 505—513.
- [5] 卢颖, 汤海波, 王华明. 激光成形 TC4 钛合金亚临界退火组织及形成机制[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(11): 58—62.
- LU Ying, TANG Hai-bo, WANG Hua-ming. Microstructure and Forming Mechanism of a Laser Melting Deposited TC4 Titanium Alloy after Sub-critical Annealing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(11): 58—62.
- [6] LI Z, LI J, LIU J, et al. Structure and Formation Mechanism of α/α Interface in Laser Melting Deposited $\alpha+\beta$ Titanium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657: 278—285.
- [7] LIU C M, TIAN X J, TANG H B, et al. Microstructural Characterization of Laser Melting Deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe Near β Titanium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 572: 17—24.
- [8] ZHU Y, LIU D, TIAN X, et al. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Laser Melting Deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si Titanium Alloy[J]. Materials & Design, 2014, 56: 445—453.
- [9] ZHU Y, TIAN X, LI J, et al. Microstructure Evolution and Layer Bands of Laser Melting Deposition Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si Titanium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 616: 468—474.
- [10] ZHU Y Y, TANG H B, LI Z, et al. Solidification Behavior and Grain Morphology of Laser Additive Manufacturing Titanium Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 777: 712—716.
- [11] JIAO Z, MA C, FU J, et al. The Effects of Zr Contents on Microstructure and Properties of Laser Additive Manufactured Ti-6.5Al-3.5Mo-0.3Si-xZr Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 592—598.
- [12] LIANG Y J, LI A, CHENG X, et al. Prediction of Primary Dendritic Arm Spacing during Laser Rapid Directional Solidification of Single-crystal Nickel-base Superalloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 133—142.
- [13] LIANG Y J, CHENG X, WANG H M. A New Microsegregation Model for Rapid Solidification Multi-component Alloys and Its Application to Single-crystal Nickel-base Superalloys of Laser Rapid Directional Solidification[J]. Acta Materialia, 2016, 118: 17—27.
- [14] LIANG Y J, CHENG X, LI J, et al. Microstructural Control during Laser Additive Manufacturing of Single-crystal Nickel-base Superalloys: New Processing-microstructure Maps Involving Powder Feeding[J]. Materials & Design, 2017, 130: 197—207.
- [15] LIANG Y J, LI J, LI A, et al. Experimental Optimization of Laser Additive Manufacturing Process of Single-crystal Nickel-base Superalloys by a Statistical Experiment Design Method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 697: 174—181.
- [16] RAN X Z, LIU D, LI J, et al. Effects of Microstructures on the Fatigue Crack Growth Behavior of Laser Additive Manufactured Ultrahigh-strength AerMet100 Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 721: 251—262.
- [17] RAN X, LIU D, LI A, et al. Microstructure Characterization and Mechanical Behavior of Laser Additive Manufactured Ultrahigh-strength AerMet100 Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 663: 69—77.
- [18] LI Y, CHENG X, LIU D, et al. Influence of Last Stage Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured AF1410 Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 713: 75—80.
- [19] LIU J, LI J, CHENG X, et al. Microstructures and Tensile Properties of Laser Cladded AerMet100 Steel Coating on 300M Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34: 643—652.
- [20] LIU Y, LI A, CHENG X, et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Properties of Laser Melting Deposited AISI 431 Martensitic Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 666: 27—33.
- [21] LIU J, LI J, CHENG X, et al. Effect of Dilution and Macro-segregation on Corrosion Resistance of Laser Clad AerMet100 Steel Coating on 300M Steel Substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 325: 352—359.
- [22] LIU J, LI J, CHENG X, et al. Microstructural Evolution of AerMet100 Steel Coating on 300M Steel Fabricated by Laser Cladding Technique[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 49: 595—603.
- [23] RAN X Z, LIU D, LI J, et al. Effects of Post Homogeneity Heat Treatment Processes on Microstructure Evolution Behavior and Tensile Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured Ultrahigh-strength AerMet100 Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 723: 8—21.
- [24] 王志会, 王华明, 刘栋. 激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 1—7.
- WANG Zhi-hui, WANG Hua-ming, LIU Dong. Microstructure and Mechanical Properties of AF1410 Ultra-High Strength Steel Using Laser Additive Manufacturing Technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 1—7.
- [25] 刘正武, 程序, 李佳, 等. 激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢的热处理工艺[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 1—8.
- LIU Zheng-wu, CHENG Xu, LI Jia, et al. Heat-processing Technology for Laser Additive Manufacturing of 05Cr15Ni5Cu4Nb Precipitation-hardening Stainless Steels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 1—8.
- [26] 王彬, 张述泉, 王华明. 激光熔化沉积高温钛合金 Ti60 快速凝固组织[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(6): 86—92.
- WANG Bin, ZHANG Shu-quan, WANG Hua-ming. Rapidly Solidified Microstructure of Ti60 Alloy Produced by Laser Rapid Forming Process[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(6): 86—92.