



引用格式:贾少澎,祝贺,邹田春,等. 掺杂铝合金激光选区熔化成形研究进展[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 7977-7981

Jia Shaopeng, Zhu He, Zou Tianchun, et al. Research development of selective laser melting of doped aluminum alloy[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 7977-7981

矿冶工程

掺杂铝合金激光选区熔化成形研究进展

贾少澎¹, 祝贺², 邹田春^{2*}, 欧尧²

(1. 中国商用飞机有限责任公司质量适航安全部, 上海 200126;
2. 中国民航大学民航民用航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300)

摘要 激光选区熔化成形(selective laser melting, SLM)是制造轻量化、一体化铝合金结构的潜在方法,因具有材料利用率高、生产周期短和成形精度高等优点在航空航天等领域受到广泛关注。目前实现工程应用的 SLM 成形铝合金种类少,且成形部件力学性能低,已成为制约其发展的主要问题。为进一步提高铝合金性能,掺杂铝合金 SLM 成形已成为中外研究热点。对金属元素和陶瓷颗粒对 SLM 成形铝合金致密度、显微组织和力学性能的影响等方面的研究内容进行总结和分析,对掺杂铝合金 SLM 成形未来发展方向进行展望。

关键词 增材制造; 激光选区熔化成形; 掺杂; 铝合金

中图分类号 TG113.25; 文献标志码 A

Research Development of Selective Laser Melting of Doped Aluminum Alloy

JIA Shao-peng¹, ZHU He², ZOU Tian-chun^{2*}, OU Yao²

(1. Department of Quality & Certification, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200126, China;
2. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] Selective laser melting (SLM) is a potential manufacturing method of lightweight, integrative aluminium alloy parts. It has received wide attention in aerospace and other fields because of its high material utilization rate, short production cycle and high forming precision. The development of SLM is mainly limited by few types of suitable aluminium alloys and poor mechanical properties. And the SLM has become one of the most popular research subjects both home and abroad. In order to improve the properties of aluminium alloys, SLM of doped aluminium alloy was taken into research. Both the effect of metallic elements and ceramic particles on density, and microstructure and mechanical properties of aluminium alloys were summarized and analyzed. Moreover, the development trend of SLM of doped aluminium was also prospected.

[Key words] additive manufacturing; selective laser melting; doping; aluminium alloy

增材制造(additive manufacturing, AM)技术是以离散-堆积思想为基础的一种新型快速成形技术^[1]。AM 技术利用三维模型数据可实现仅用一台设备的直接成形,与传统加工方式相比,极大缩短了产品加工周期,降低了成本,已在航空航天、医疗、军工等领域得到了广泛应用^[2]。激光选区熔化成形(selective laser melting, SLM)是增材制造中最具代表性的成形技术之一,其原理为激光束沿特定路径扫描预制粉末层,使其熔化、逐层堆叠,最终获得高致密度的金属零部件^[3]。SLM 技术有成形精度高、表面质量好等优点,可以实现复杂薄壁件的精密成形,在制造轻量化复杂结构方面具有明显

优势^[4-5]。

铝合金材料具有密度低、比强度高、导电、导热以及耐腐蚀性能良好等优点,是航空工业中最主要的结构材料之一^[6]。随着航空产品对轻量化、一体化复杂铝合金部件需求的增加,铝合金 SLM 成形技术的应用前景日趋广阔^[7]。铝合金 SLM 成形技术研究主要集中于粉末制备、工艺优化和热处理等方面,目前 AlSi10Mg 和 Al12Si 铝合金 SLM 成形较为成熟并已实现工程应用,其他铝合金尚在研究阶段^[8-11]。

掺杂能有效提高铝合金力学性能,因此掺杂铝合金 SLM 成形成为近年中外研究的焦点。结合掺

收稿日期: 2019-08-25; 修订日期: 2019-11-20

第一作者:贾少澎(1970—),男,博士,汉族,上海人,高级工程师。研究方向:飞机结构与强度分析。E-mail:jiashaopeng@comac.cc。

* 通信作者:邹田春(1976—),男,博士,汉族,吉林榆树人,副教授。研究方向:增材制造技术。E-mail:zoutianchun@126.com。

贵金属元素和陶瓷颗粒铝合金的研究现状,综述了 SLM 成形铝合金的致密度、显微组织和力学性能等方面的研究。

1 金属元素掺杂

金属元素掺杂是指在铝合金中加入某些微量金属元素改善其力学性能。目前常用的金属元素有 Zr 和 Sc 两种,其强化作用的主要机理为:Zr 和 Sc 元素在 SLM 过程中形成了细小的 $Al_3(Sc, Zr)$ 颗粒,它们作为 Al 基体的异质形核点,起到了细化晶粒的作用,而分布在晶界处的 $Al_3(Sc, Zr)$ 还起到钉扎作用,稳定晶界,抑制后续晶粒长大,进而提高铝合金的拉伸强度、屈服强度、硬度等力学性能^[12]。

2011 年,欧洲宇航防务集团的 Schmidtke 等^[13]研究了掺杂 0.66% Sc 元素的 Al-Mg 合金(Scalmalloy®) SLM 成形。研究发现,Sc 元素使铝合金力学性能明显提高,拉伸强度、屈服强度和延展率分别达到 530 MPa、520 MPa、14%,强度与高强铝合金相当,且延展性更好。

瑞士增材制造创新中心的 Spierings 等^[14-17]于 2016 年开展了一系列关于 Scalmalloy® 合金粉末的 SLM 成形研究,采用气雾化的球形 Scalmalloy® 合金粉末,在最佳工艺参数下,成形了致密度大于 99% 的试样。结果表明,由于 $Al_3(Sc, Zr)$ 的存在,显微组织呈明显的双相分布,即熔池边界的细晶区(fine grain, FG)及中央的粗晶区(coarser grain, CG),如图 1^[14]所示。随着扫描速度的提高,细晶区晶粒进一步减小,粗晶区无明显变化。 $Al_3(Sc, Zr)$ 的强化作用使铝合金抗拉强度和屈服强度分别超过 400 MPa 和 277 MPa,且各向异性较低。热处理后,铝合金力学性能得到进一步提高,抗拉强度超过 500 MPa,延展率高于 8.6%。

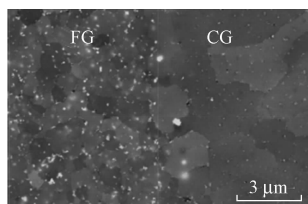


图 1 SLM 成形 Scalmalloy® 合金 SEM 图^[14]

Fig. 1 SEM of SLMed Scalmalloy®^[14]

2017 年,澳大利亚莫纳什大学的 Shi 等^[18]对掺杂 Sc 和 Zr 元素的 Al-Mg 合金 SLM 成形进行了研究,发现了电导率与致密度成线性关系,提出通过电导率可以快速评价成形试样的致密度;中南大学 Li 等^[19]完成了添加 Sc 和 Zr 元素的 Al-6.2Mg 合金的 SLM 成形研究。结果表明,试样致密度及表面质

量随激光能量密度的增加而提高,在激光能量密度为 $139 J/mm^3$ 时获得致密度为 97% 的试样,其力学性能和抗腐蚀性能均较铸件有所提高,硬度达到 93 HV,抗压强度达到 390 MPa。2018 年,南京航空航天大学 Zhang 等^[20]研究了工艺参数对 Al-Mg-Sc-Zr 合金力学性能的影响,研究发现,较低的扫描速度能够促进 $Al_3(Sc, Zr)$ 的形成,使硬度提高至 94 HV,摩擦系数和磨损率降低至 0.61 和 $1.74 \times 10^{-4} mm^3/(N \cdot m)$ 。

张虎等^[21]、Zhang 等^[22]、Nie 等^[23]开展了添加 Zr 元素的 Al-Cu-Mg 合金 SLM 成形研究,采用球磨法制备了 Zr/Al-Cu-Mg 粉末,并在不同工艺参数下进行 SLM 成形。研究发现,Zr 的添加有效抑制成形过程中热裂纹的产生,并使致密度为 99% 时的最佳扫描速度提高了 3 倍,与未掺杂 Zr 元素的合金相比,拉伸强度和屈服强度明显提高,达到 451 MPa 和 446 MPa,但延展率降低至 2.67%。

2 陶瓷颗粒掺杂

与金属掺杂相似,陶瓷颗粒掺杂是指在铝合金中加入少量的陶瓷颗粒,通过细晶强化、晶界强化和弥散强化等机制以改善铝合金的强度、硬度和耐磨性能。目前主要采用原位反应法和机械混合法制备陶瓷颗粒增强铝合金粉末。原位反应法是通过原位反应形成含有增强相的铸态铝合金,再通过雾化方法制备适用于 SLM 的合金粉末,颗粒分布均匀,界面结合良好。机械混合法主要是通过球磨技术制备的粉末,制造成本低。

南京航空航天大学的 Gu 等^[24-25]于 2014、2015 年对掺杂 TiC 的 AlSi10Mg SLM 成形进行了研究,采用球磨法制备了 TiC/AlSi10Mg 混合粉末,成形了致密度大于 98% 的试样。研究发现,在 SLM 成形过程中,形成了图 2^[25]中的沿晶界分布的环状结构 TiC 增强相,抑制了铝基体晶粒的长大,同时强化了晶界。细晶强化和晶界强化的共同作用,使铝合金在保持延展性的同时,提高了强度、硬度和耐磨性,延展率、拉伸强度、硬度、摩擦系数和磨损率分别为 10.9%、486 MPa、188 HV、0.36 和 $2.94 \times 10^{-5} mm^3/(N \cdot m)$ 。

2015 年,南京航空航天大学的 Chang 等^[26]研究了 SiC 初始粒径对 SiC/AlSi10Mg 粉末体系 SLM 成形影响,成形了原位自生 $Al_4SiC_4 + SiC$ 增强的 Al-Si10Mg 试样,致密度达到 97%。研究发现, SiC 的添加提高了混合粉末的激光吸收率,随着 SiC 颗粒粒径减小,硬度和耐磨性能均有提高,硬度和磨损率分别达到 218 HV 和 $2.94 \times 10^{-5} mm^3/(N \cdot m)$ 。

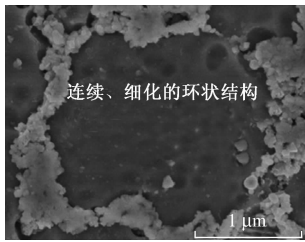


图2 SLM成形TiC/AlSi10Mg中的环状增强相^[25]

Fig.2 Ring-structure reinforcement in SLMed TiC/AlSi10Mg^[25]

这是由于细小的SiC颗粒有助于粉末充分熔化,提高熔池流动性,使熔池铺展更加均匀,致密度和颗粒分布均匀性得到提高。

南京航空航天大学的大Dai等^[27-28]于2016、2018年开展了掺杂AlN的AlSi10Mg SLM成形研究,制备了致密度为97%的AlN/AlSi10Mg纳米复合材料,并采用有限体积方法(finite volume method, FVM)对SLM过程中热对流、迁移行为和增强粒子分布状态进行了建模仿真。研究发现,AlN作为异质形核点促进了晶粒细化,激光能量密度对致密度、AlN分布有显著影响,进而影响试样耐磨性能,激光能量密度为 420 J/mm^3 时磨损率最小,为 $3.4 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。对比仿真与试验结果发现数据拟合良好,该模型可用于其他材料SLM成形过程模拟。

2017年,比利时鲁汶大学的Li等^[29]对原位自生纳米TiB₂颗粒增强的AlSi10Mg合金进行了SLM的成形研究。结果表明,TiB₂能够提高铝合金激光能量吸收率,改善铝合金成形性能,在激光能量密度为 95 J/mm^3 时成形致密度大于99%的试样。TiB₂/AlSi10Mg试样晶粒尺寸约 $2 \mu\text{m}$,较SLM成形Al-Si合金(约 $10 \mu\text{m}$)明显细化,拉伸强度由360 MPa提高到530 MPa。同年,章敏立等^[34]、廉清等^[31]采用混合盐法和雾化技术制备了原位自生的TiB₂/Al-7Si-0.5Mg-Cu复合粉末,开展了SLM成形TiB₂/Al-Si复合材料的研究。结果发现,TiB₂的细晶强化和弥散强化作用使其力学性能较铸件明显提高,抗拉强度和延展率达到435 MPa和11.8%。

Zhou等^[32]于2018年开展了SLM成形Al-15Si/TiC硬度及耐磨性能的研究。结果表明,分布于Al基体中的TiC颗粒可以稳定铝合金显微组织,降低热处理对硬度的负面影响,最终获得致密度97%、硬度为145 HV、摩擦系数为0.42及磨损率为 $2.75 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 的试样。

3 其他材料掺杂

除金属和陶瓷颗粒外,其他材料的掺杂也能起

到强化铝合金力学性能的作用。

美国加州大学的Martin等^[33]于2017年通过静电组装技术制备了掺杂纳米ZrH₂颗粒的7075铝合金粉末,对高强度铝合金的SLM成形进行了研究。研究发现,成形试样晶粒明显细化,且无裂纹,T6处理后,拉伸强度达到383~417 MPa、屈服强度为325~373 MPa、延展率为3.8%~5.4%。

2018年,中北大学的谭乐^[34]开展了掺杂镀铝石墨烯的AlSi10Mg的SLM成形研究。试验采用有机铝化学还原法和真空球磨法制备了铝合金复合粉末,发现球料比为8:1、球磨转速为230 r/min、球磨时间为2 h时石墨烯分散良好。在激光功率为300 W时,获得了石墨烯分布均匀、成形质量良好的试样,显微硬度达到169 HV,较AlSi10Mg高出40%。

同年,李明川等^[35]、Jiang等^[36]开展了掺杂碳纳米管的AlSi10Mg SLM成形研究。采用甲基吡咯烷酮试剂超声分散制备了CNTs/AlSi10Mg的复合粉末,发现当CNTs含量为1.0%,扫描速度为1300 mm/s时,试样致密度最高,达到98%。SLM成形过程中,大部分分布在晶界处的CNTs仍能保持原有结构,阻碍液相在凝固过程中的晶界迁移,促进晶粒细化,使试样显微硬度和拉伸强度均有提高,达到143 HV和499 MPa。

4 结论与展望

随着航空工业对铝合金部件复杂度、轻量化要求的提高,铝合金SLM成形技术受到更多关注。现阶段由于适用于SLM成形技术的铝合金粉末种类少且成形试样性能较差,难以实现广泛应用。

掺杂具有明显提高铝合金性能的作用而成为近年的研究重点,多种掺杂铝合金SLM成形已获得初步成功,目前研究主要集中于掺杂Sc、Zr元素的Al-Mg合金和Al-Cu-Mg合金,以及掺杂TiC和SiC等陶瓷颗粒的Al-Si合金和Al-Si-Mg合金。Sc、Zr元素主要改善铝合金的成形性能,抑制热裂纹的产生。陶瓷颗粒主要提高成形试样的硬度和耐磨性能,部分陶瓷颗粒还能改善铝合金粉末激光吸收率,使成形效率更高。目前对于掺杂材料在SLM过程中的反应情况、强化机制以及掺杂物质与铝基体间的界面结合情况等影响成形试样致密度和力学性能的关键因素尚不完全清楚,是今后此领域研究的主要方向。

参 考 文 献

- 1 李素丽. 不同金属3D打印增材制造技术对比分析[J]. 中国铸造装备与技术, 2016, 51(6): 6-8.
Li Suli. Comparative analysis of different 3D printing technology[J].

- China Foundry Machinery & Technology, 2016, 51(6): 6-8.
- 2 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.
 - 3 杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 26-31.
Yang Qiang, Lu Zhongliang, Huang Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 26-31.
 - 4 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, 55(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, 55(20): 26-31.
 - 5 杜宇雷, 原光, 欧园园, 等. 雾化气体压强对 2A14 铝合金粉末形貌和粒度分布的影响[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2015, 30(1): 9-13.
Du Yulei, Yuan Guang, Ou Yuanyuan, et al. Effects of atomizing Gas pressure on morphology and size distribution of 2A14 aluminum alloy powders[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2015, 30(1): 9-13.
 - 6 朱海红, 廖海龙. 高强铝合金的激光选区熔化成形研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 22-28.
Zhu Haihong, Liao Hailong. Research status of selective laser melting of high strength aluminum alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 22-28.
 - 7 张新明, 邓运来, 张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271.
Zhang Xinming, Deng Yunlai, Zhang Yong. Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(3): 257-271.
 - 8 司朝润, 张贤杰, 王俊彪. 7055 铝合金粉末的氩气低压雾化技术[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(1): 112-117.
Si Chaorun, Zhang Xianjie, Wang Junbiao. Low-pressure argon atomization process of 7055Al alloy powders[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2015, 20(1): 112-117.
 - 9 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.
 - 10 Fiocchi J, Tuissi A, Bassani P, et al. Low temperature annealing dedicated to AlSi10Mg selective laser melting products[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 3402-3409.
 - 11 Lewandowski J J, Seifi M. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties[J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46(1): 151-186.
 - 12 丁惠麟, 辛智华. 实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Ding Huilin, Xin Zhihua. Practical metallographic heat treatment and failure analysis of aluminum, copper and its alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
 - 13 Schmidtke K, Palm F, Hawkins A, et al. Process and mechanical properties: applicability of a scandium modified Al-alloy for laser additive manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 369-374.
 - 14 Spierings A B, Dawson K, Voegtlin M, et al. Microstructure and mechanical properties of as-processed scandium-modified aluminium using selective laser melting[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 213-216.
 - 15 Spierings A B, Dawson K, Heeling T, et al. Microstructural features of Sc-and Zr-modified Al-Mg alloys processed by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2017, 115: 52-63.
 - 16 Spierings A B, Dawson K, Kern K, et al. SLM-processed Sc-and Zr-modified Al-Mg alloy: mechanical properties and microstructural effects of heat treatment[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 701: 264-273.
 - 17 Spierings A B, Dawson K, Uggowitzer P J, et al. Influence of SLM scan-speed on microstructure, precipitation of Al₃Sc particles and mechanical properties in Sc-and Zr-modified Al-Mg alloys[J]. Materials & Design, 2018, 140: 134-143.
 - 18 Shi Y J, Rometsch P, Yang K. Characterisation of a novel Sc and Zr modified Al-Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. Materials Letters, 2017, 196: 347-350.
 - 19 Li R D, Wang M B, Yuan T C, et al. Selective laser melting of a novel Sc and Zr modified Al-6.2 Mg alloy: processing, microstructure, and properties[J]. Powder Technology, 2017, 319: 117-128.
 - 20 Zhang H, Gu D D, Yang J K, et al. Selective laser melting of rare earth element Sc modified aluminum alloy: thermodynamics of precipitation behavior and its influence on mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 1-12.
 - 21 张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成形高强 Al-Cu-Mg 合金研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 84-90.
Zhang Hu, Nie Xiaojia, Zhu Haihong, et al. Study on high strength Al-Cu-Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Laser, 2016, 43(5): 84-90.
 - 22 Zhang H, Zhu H H, Nie X J, et al. Effect of Zirconium addition on crack, microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Al-Cu-Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2017, 134: 6-10.
 - 23 Nie X J, Zhang H, Zhu H H, et al. Effect of Zr content on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Zr modified Al-Cu-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 764: 977-986.
 - 24 Gu D D, Wang H Q, Chang F, et al. Selective laser melting additive manufacturing of TiC/AlSi10Mg bulk-form nanocomposites with tailored microstructures and properties[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 108-116.
 - 25 Gu D D, Wang H Q, Dai D H, et al. Rapid fabrication of Al-based bulk-form nanocomposites with novel reinforcement and enhanced performance by selective laser melting[J]. Scripta Materialia, 2015, 96: 25-28.
 - 26 Chang F, Gu D D, Dai D H, et al. Selective laser melting of *in-situ* Al₄SiC₄ + SiC hybrid reinforced Al matrix composites; influence of starting SiC particle size[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 272: 15-24.
 - 27 Dai D H, Gu D D. Influence of thermodynamics within molten pool on migration and distribution state of reinforcement during selective laser melting of AlN/AlSi10Mg composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 100: 14-24.
 - 28 Dai D H, Gu D D, Xia M J, et al. Melt spreading behavior, microstructure evolution and wear resistance of selective laser melting additive manufactured AlN/AlSi10Mg nanocomposite[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 349: 279-288.

- 29 Li X P, Ji G, Chen Z, et al. Selective laser melting of nano-TiB₂ decorated AlSi10Mg alloy with high fracture strength and ductility [J]. *Acta Materialia*, 2017, 129: 183-193.
- 30 章敏立, 吴一, 廉清, 等. 激光选区熔化成形原位自生 TiB₂/Al-Si 复合材料的微观组织和力学性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(11): 3114-3121.
- Zhang Minli, Wu Yi, Lian Qing, et al. Microstructures and mechanical properties of in-situ TiB₂/Al-Si composite fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(11): 3114-3121.
- 31 廉清, 吴一, 王浩伟, 等. TiB₂ 增强 Al-Si 复合材料激光增材制造工艺及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(22): 113-117.
- Lian Qing, Wu Yi, Wang Haowei, et al. Study on manufacturing processes and properties of TiB₂ reinforced Al-Si composite by laser additive manufacturing[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(22): 113-117.
- 32 Zhou Y, Duan L C, Wen S F, et al. Enhanced micro-hardness and wear resistance of Al-15Si/TiC fabricated by selective laser melting [J]. *Composites Communications*, 2018, 10: 64-67.
- 33 Martin J H, Yahata B D, Hundley J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. *Nature*, 2017, 549: 365-369.
- 34 谭乐. 镀铝石墨烯/铝基复合粉末制备及其选择性激光熔化成形[D]. 太原:中北大学, 2018.
- Tan Le. Preparation of aluminized graphene/aluminum matrix composite powder and the selective laser Melting[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- 35 李明川, 蒋立异, 刘婷婷, 等. 碳纳米管对激光选区熔化成形 Al 基复合材料的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(7): 1889-1896.
- Li Mingchuan, Jiang Liyi, Liu Tingting, et al. Effect of carbon nanotubes on Al matrix composites fabricated by selected laser melting[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(7): 1889-1896.
- 36 Jiang L Y, Liu T T, Zhang C D, et al. Preparation and mechanical properties of CNTs-AlSi10Mg composite fabricated via selective laser melting[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 734: 171-177.