

激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状^{*}

张海洲^{1,2}, 白洁², 马瑞², 王栋²

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;
2. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘要: 本文重点介绍了激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 成形钛合金、镍基高温合金、铜合金等材料体系的研究进展, 以及 SLM 装备与工艺新技术; 同时综述了国内外 SLM 技术在航空航天发动机领域的典型应用; 最后在分析现有相关研究和应用的基础上, 讨论了 SLM 技术面临的挑战和未来重点研究方向。

关键词: 激光选区熔化 (SLM); 发动机; 钛合金; 镍基高温合金; 铜合金; 综述

中图分类号: V261 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 03-2206058-16

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2206058

Current Progress and Application of Selective Laser Melting Technology in Aerospace Engine Manufacturing

ZHANG Hai-zhou^{1,2}, BAI Jie², MA Rui², WANG Dong²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The present paper mainly introduced the research progress of selective laser melting (SLM)-ed titanium alloys, nickel-based superalloys and copper alloys material systems, as well as state-of-the art technologies in SLM equipment and processes. The typical applications of SLM at home and abroad in aerospace engines were also reviewed. Finally, the challenges and future research directions of SLM technologies were proposed on the basis of previous studies.

Key words: Selective laser melting; Engine; Titanium alloys; Nickel-based superalloys; Copper alloys; Review

1 引言

航空航天发动机制造技术一定程度上代表了一个国家在高端装备制造方面的能力甚至是整体科技实力。航空航天发动机服役环境苛刻,对零件的材料、结构和性能均有非常高的要求。传统制造技术

在制造航空航天发动机时面临加工难度大、制造周期长、成本高等问题。激光选区熔化成形技术 (SLM) 可直接制造高性能金属零件,是目前研究和应用最多的金属增材制造技术之一。与传统制造技术相比,SLM 具有工艺流程短、材料利用率高和可制造任意复杂结构的突出优势,在航空航天发动机制造领

^{*} 收稿日期: 2022-06-25; 修订日期: 2022-09-14。

作者简介: 张海洲, 博士生, 高级工程师, 研究领域为宇航发动机制造。

通讯作者: 白洁, 博士, 高级工程师, 研究领域为金属材料加工和增材制造。E-mail: begywww@126.com

引用格式: 张海洲, 白洁, 马瑞, 等. 激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状[J]. 推进技术, 2023, 44 (3): 2206058. (ZHANG Hai-zhou, BAI Jie, MA Rui, et al. Current Progress and Application of Selective Laser Melting Technology in Aerospace Engine Manufacturing[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44 (3):2206058.)

域受到了极大关注。目前,SLM 技术可成形的材料非常广泛,用于航空航天发动机制造的主要有钛合金、镍基高温合金和铜合金^[1-3]。此外,SLM 装备与工艺的最新研究主要体现在大尺寸多光束扫描、成形过程在线质量监测以及机器学习和智能化等方面。本文重点阐述 SLM 技术成形上述三种合金的微宏观性能,SLM 装备与工艺新技术进展;综述国内外 SLM 在航空航天发动机制造领域的应用现状;在此基础上,探讨和分析 SLM 技术面临的挑战以及未来重点研究方向。本文为 SLM 技术研发及其在新型高性能航空航天发动机研制上的应用提供有益的借鉴与参考。

2 SLM 成形材料组织及性能研究

2.1 SLM 成形钛合金

钛合金具有密度低、比强度高和耐腐蚀性好等特点,广泛应用于航空航天领域,同时也是增材制造常用的金属材料。目前,SLM 成形钛合金材料体系主要有 TC4,TA15,TC11 和 Ti-Cu 合金等,而 Ti-Cu 合金是目前的研究热点。由于 SLM 过程具有逐层堆叠和快熔速冷的工艺特点,因此 SLM 成形的 TC4 合金其显微组织与锻造态合金存在显著差异。如图 1 所示,沿成形面方向(x - y)由于激光扫描路径影响微观结构呈现“棋盘”状组织特征,沿成形高度方向(z)为近似平行的柱状晶特征;“棋盘”状结构和定向柱状晶结构内部为细小的针状 α' 马氏体组织(图 1(a)~(c))。而铸造和锻造 TC4 合金的显微组织尺寸较大,分别为粗大魏氏组织和双相组织(图 1(d)~(e))^[4-6]。

SLM 成形钛合金形成的细小组织是其力学性能提升的主要原因。通常情况下,SLM 成形沉积态零件

的抗拉强度和屈服强度均高于锻造态零件,但延伸率略低^[7],如图 2 所示。SLM 成形 TC4 沉积态内的细小针状 α' 马氏体导致塑性失配现象。研究表明,改变 SLM 工艺参数可一定程度上改变 α' 马氏体形态,甚至形成少量片状 α 相,但改变程度十分有限,且塑性难以得到大幅提高^[8]。Xu 等^[9]发现调控 SLM 工艺参数,可将 SLM 成形 TC4 中的脆性 α' 马氏体转变为具有高韧性的细小($\alpha+\beta$)组织,后续无需热处理。当成形厚度为 $30\mu\text{m}$ 时,熔池内较高的温度梯度和冷却速度使凝固组织成为 α' 马氏体;当成形层厚为 $60\mu\text{m}$ 和 $90\mu\text{m}$ 时,调控激光焦距可使 α' 马氏体分解,转变为细小($\alpha+\beta$)组织,其试样室温屈服强度可达 1124MPa ,延伸率 12.5% (图 3,其中 S1,S3,S7 分别表示层厚为 $30\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$, $90\mu\text{m}$ 的 SLM 样品)。

另外,适当的热处理工艺是调控 SLM 沉积态 TC4 合金显微组织和性能的有效方法。Vrancken 等^[10]发现经退火处理后针状 α' 马氏体发生分解转变为薄片组织,其宽度取决于退火温度。同时,随着退火温度升高合金强度下降,而塑性则升高。经 $850^\circ\text{C}/2\text{h}$ /炉冷热处理后,抗拉强度可达 1000MPa ,延伸率 12.8% ,高于锻件标准。热等静压也常用于 SLM 沉积态组织和性能的调控。Yu 等^[11]发现热等静压可有效减小或消除 SLM 沉积态 TC4 合金中近圆形气孔和不规则未熔合缺陷,提高合金的致密度和塑性;同时,也可使针状 α' 马氏体转变为粗大的薄片组织,抗拉强度达 1017MPa ,延伸率超过 15% 。

由于 SLM 成形过程中熔池冷却速度较快,且沿沉积方向具有较高的温度梯度,使得钛合金沉积态零件内呈柱状晶结构,导致塑性存在各向异性^[12]。

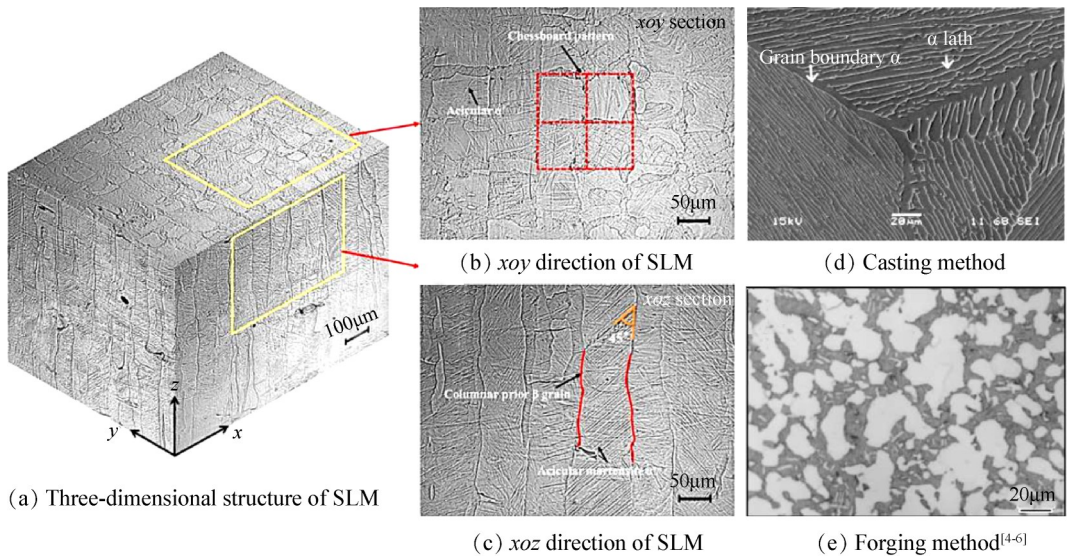


Fig. 1 Microstructure of TC4 alloy

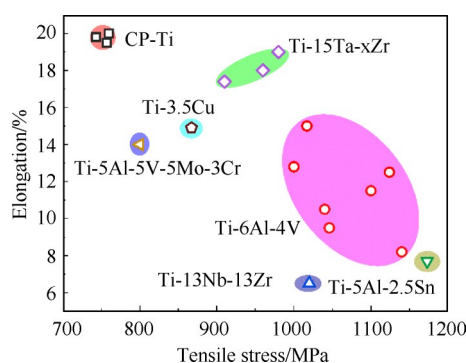


Fig. 2 Tensile properties of SLMed titanium alloys^[7]

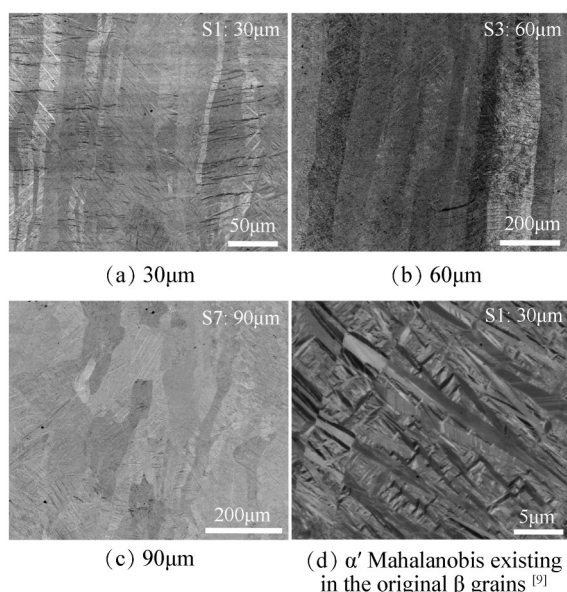


Fig. 3 Microstructures of SLMed TC4 alloy

Zhang 等^[13]将 Cu 加入到钛合金中,使得 SLM 成形的 Ti-Cu 合金柱状晶转变为细小等轴晶粒,且合金内部没有裂纹和空隙等缺陷。晶粒细化的主要原因是 Cu 原子固溶在 β -Ti 基体中,显著地扩大了熔池凝固前沿界面的成分过冷区,结晶倾向等轴晶方式生长。当加入 3.5% 的 Cu 时,SLM 沉积态 Ti-3.5Cu 合金的抗拉强度达 867MPa,延伸率 14.9%。由此可见,SLM 成形的钛合金其力学性能与显微组织关系密切,而显微组织的演变则受控于成形工艺。因此,SLM 成形高性能钛合金需要建立工艺-组织-性能综合调控方法。

在 SLM 成形过程中,激光束快速移动产生极大的冷却速度 ($10^3 \sim 10^8 \text{K/s}$) 和温度梯度,可诱导马氏体相变,但也使零件内部产生较大的残余应力。并且随着加工层数的增加,残余应力逐渐累积,容易导致热裂纹的形成,包括气孔、表面球化和翘曲等缺陷^[14]。上述缺陷积累到一定程度还会导致成形零件开裂,严重影响塑性和韧性。同时,在 SLM 过程中热

流主要沿着平行于制造方向传导,导致体心立方 (BCC) 结构的初生 β -Ti 相沿着散热方向 $\langle 001 \rangle$ 择优生长,并具有很强的外延生长倾向,易形成粗大的柱状晶组织,导致显微组织和力学性能呈现突出的各向异性。

2.2 SLM 成形镍基高温合金

因具有出色的高温服役性能,镍基高温合金在航空航天领域的应用非常广泛,主要用于发动机耐高温部件。SLM 成形镍基高温合金主要包括 Inconel 625^[15]和 Hastelloy X (GH3536)^[16]等固溶合金、Inconel 718^[17]等沉淀强化合金以及 Inconel 738 等不可焊镍基高温合金 (图 4),合金强度在 500~1500MPa,断裂延伸率从百分之几到超过 50%。

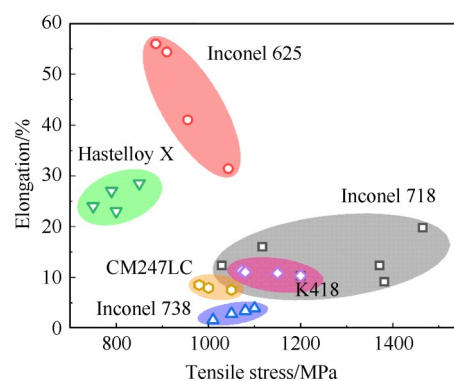


Fig. 4 Tensile properties of SLMed nickel-based superalloys^[17]

与钛合金类似,SLM 成形的高温合金沿成形方向为柱状晶,沿水平方向则为胞状组织。SLM 成形镍基高温合金的组织调控可通过调整工艺参数实现,且通过合适的后处理可实现显微组织、晶粒尺寸、相形态及其含量和分布的调控。Choi 等^[18]指出,SLM 成形 Inconel 718 合金沿 xz 平面均呈等轴晶和柱状晶混合特征,熔池中间部位为 10~30 μm 的柱状晶晶粒,而边界则为平均尺寸 10 μm 的等轴晶粒,具有多种取向 (图 5)。Wang 等^[19]研究了激光扫描策略对 Inconel 718 合金组织形态的影响,发现沿同一方向扫描时层间易形成定向柱状晶,当层间旋转 90° 扫描时等轴晶生长机制显著增加,可获得均匀织构。Zhang 等^[20]研究了 SLM 工艺参数对成形 GH3536 合金组织的影响。结果表明,当以最佳工艺参数成形时,在柱状枝晶周围可观察到明显的熔池边界,随着柱状晶转变为等轴晶后熔池边界逐步消失,但组织内部仍存在气孔和未熔合缺陷。Deng 等^[21]指出,SLM 成形 Inconel 718 合金微观组织织构较弱且枝晶间析出细小 Laves

相,热处理可使部分晶粒发生再结晶并消除残余应力,可改善合金的强度和塑性。Brynk 等^[22]和 Chlebus 等^[23]研究了 Re 元素对 SLM 成形 Inconel 718 合金微观组织和疲劳裂纹扩展的影响,结果表明添加适量 Re 可使 Inconel 718 合金的树枝晶在热处理后变得更细,但过量 Re 会导致 Laves 相和碳化物增加,热处理后易形成微裂纹降低合金的疲劳性能。

镍基高温合金导热系数低,合金液体流动性差,在高能激光束快速移动引起的高温度梯度和冷却速率下具有较大的裂纹倾向,尤其是对于高 Al/Ti 含量

的镍基高温合金裂纹倾向更大。应力为裂纹产生的外因,材料本身低熔点相、合金元素偏析和脆性相等为内因。因此,通过调整工艺参数如降低热量输入、优化扫描策略以及基底预热均可降低 SLM 过程中的应力程度,进而改善 SLM 成形镍基高温合金的裂纹倾向。Tomus 等^[24]研究指出,SLM 成形 GH3536 合金内部热裂纹和冷脆裂纹与合金熔池冷却时收缩内应力有关,且与合金元素(C, Si 等)也有关系。由于 GH3536 合金的热撕裂敏感性,在热循环作用下合金容易形成微裂纹,但在低含量 C, Si 元素时合金的热裂纹敏感性呈下降趋势,裂纹形成率也显著降低。Ting 等^[25]研究了热处理对 SLM 成形 GH3536 合金组织和力学性能的影响。结果表明:热等静压和热处理使合金位错在亚晶界重排发生回复,使得合金的屈服强度降低,且 $M_{23}C_6$ 型碳化物在晶界偏析使延伸率下降(图 6, HIP 为热等静压, HT 为热处理。其中图 6(a)和(b)为热等静压后不同区域的微观组织,分别为 HIP A 和 HIP B)。Sun 等^[16]对 SLM 成形的 GH3536 合金进行热等静压后,消除了内部微裂纹缺陷,但由于晶粒长大强度略微下降,经热等静压和固溶时效两步处理后不但消除了裂纹,而且使强度和延伸率同时提升,特别是 900℃ 高温下的延伸率较

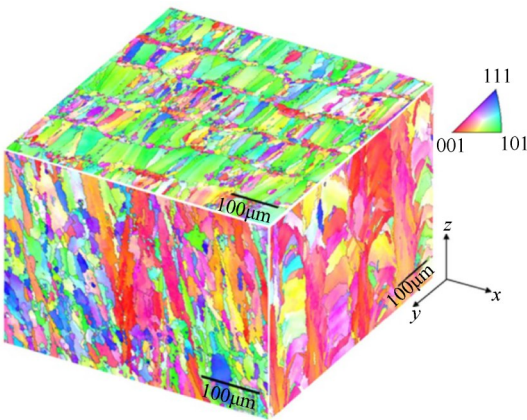


Fig. 5 EBSD pattern of SLMed Inconel 718^[18]

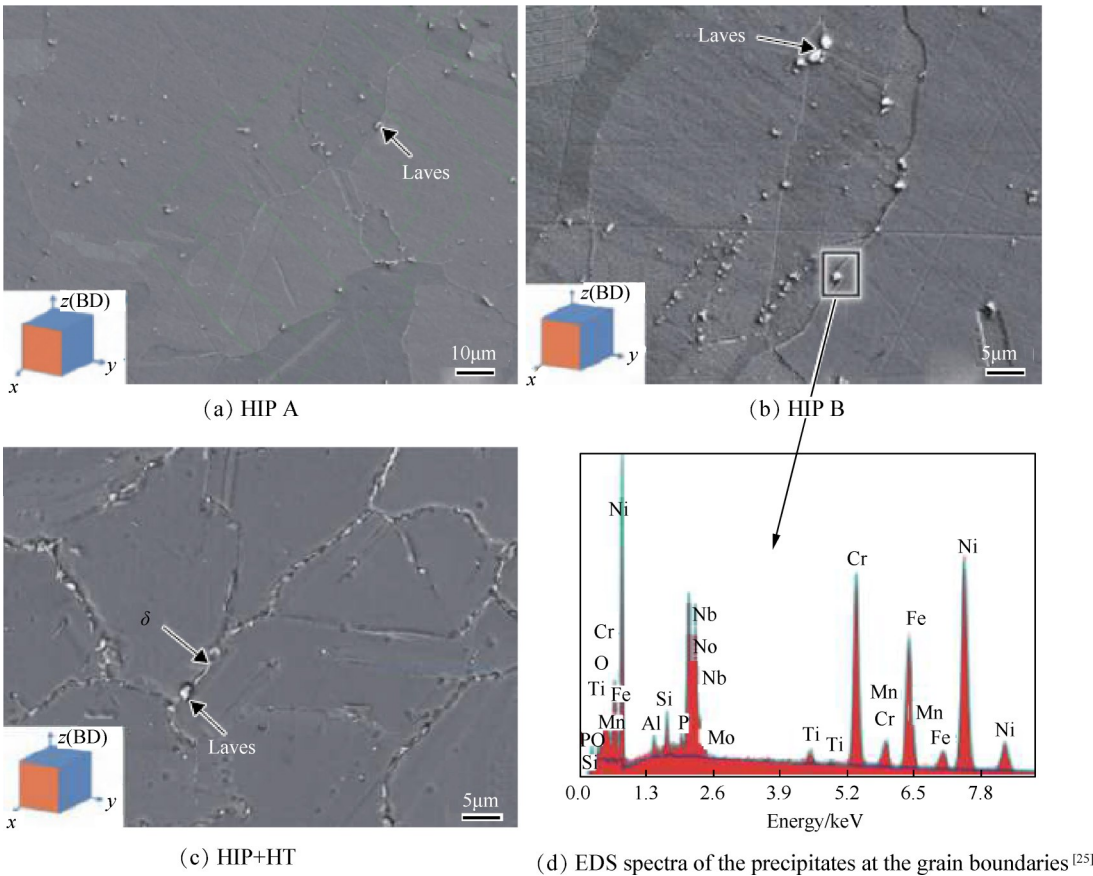


Fig. 6 Microstructures and EDS images

SLM沉积态提高了400%。综上所述,SLM成形的镍基高温合金其晶粒形态、微观组织与合金成分、成形工艺及热处理密切相关,要得到高质量的SLM成形镍基高温合金需综合考虑上述因素的影响。

2.3 SLM成形铜合金

铜合金具有优良的导电、导热和耐蚀性能,在航空航天发动机制造领域的应用也较为广泛。目前,SLM成形铜合金主要有Cu-Cr-Zr合金、Cu-Ni-Sn合金以及Cu-Al-Ni记忆合金等。由于铜合金对激光的吸收率低,导致其在SLM成形过程中容易产生球化、孔洞和微裂纹等缺陷,研究的成熟度较钛合金和镍基高温合金低。Rahman等^[26]利用计算流体动力学模拟了SLM成形Cu-Cr-Zr(C-18150)合金的熔池行为,得到了熔池内温度分布和热导率变化规律,发现因大量Cr固溶在Cu基体中,导致SLM成形沉积态Cu-Cr-Zr合金的电导率和力学性能远不能满足要求。但经热处理后Cr原子可弥散分布在Cu基体中,不仅提高了合金的抗拉强度,同时提高了合金的电导率^[27-28]。

Zhang等^[29]研究了SLM工艺参数对成形Cu-Ni-Sn合金质量的影响,当工艺不适当时容易产生球化、孔隙和裂纹等缺陷,经优化后致密度可达99.4%。Karhik等^[30]研究了扫描策略对SLM成形Cu-13Sn合金组织和性能的影响,通过改变扫描策略可获得粗细交替的异质结构,其内部含有大量小角度晶界和胞状组织,胞内有大量弥散纳米析出相,合金抗拉强度和延伸率可达635MPa和40%,表现出优异的力学性能。Wang等^[31]和Li等^[32]研究发现,SLM成形Cu-15Ni-8Sn合金中有效抑制了Sn的宏观偏析,显微组织由胞状结构和 $(\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x})_3\text{Sn}$ 纳米析出相组成,形成了沿堆积方向晶粒大小呈周期性分布的非均质双峰

结构(细晶-超细晶-细晶),且在胞状区域和析出相边缘位错密度高(图7),为合金的同步强韧化提供了有利条件,性能明显优于同质铸造合金性能。综上所述可知,控制成形参数和采取适当的热处理可有效地解决SLM成形铜合金的气孔和裂纹等缺陷,并获得较佳的组织 and 性能。

3 SLM装备与工艺技术

3.1 大尺寸多激光束扫描

单激光束SLM成形尺寸有限,且成形效率较低,难以满足大尺寸复杂构件的整体化制造需求,因此大尺寸多激光束扫描技术是目前SLM研究和应用的前沿方向之一。但是,随着成形零件尺寸的增大,内应力、裂纹和性能均匀性与稳定性调控均面临较大挑战。Wiesner等^[33]采用四激光束SLM成形了大型气缸盖,证实了通过多激光扫描可有效节省成形时间。Andani等^[34]研究了多激光束SLM扫描面临的飞溅问题,发现由飞溅物沉积到粉末以及凝固层中的未熔区域,会对SLM成形件的机械性能产生严重的危害。刘正武等^[35]研究对比了双激光与单激光SLM成形效果的差异,发现在成形较大尺寸零件时双激光较单激光成形的温度梯度、残余应力及开裂程度更小。

在多激光束SLM成形中各分区的搭接质量会直接影响最终零件的性能。Zhang等^[36]采用多激光束SLM成形AlSi10Mg合金,发现搭接区域的熔池尺寸大于非搭接区域,且搭接区域孔隙较多,搭接区域的性能成为影响最终零件性能的关键因素。余保桢^[37]研究发现,通过优化激光功率和扫描策略,可以调控搭接区域的致密度,进而改善多激光束SLM成形不同搭接区的成形质量(图8)。

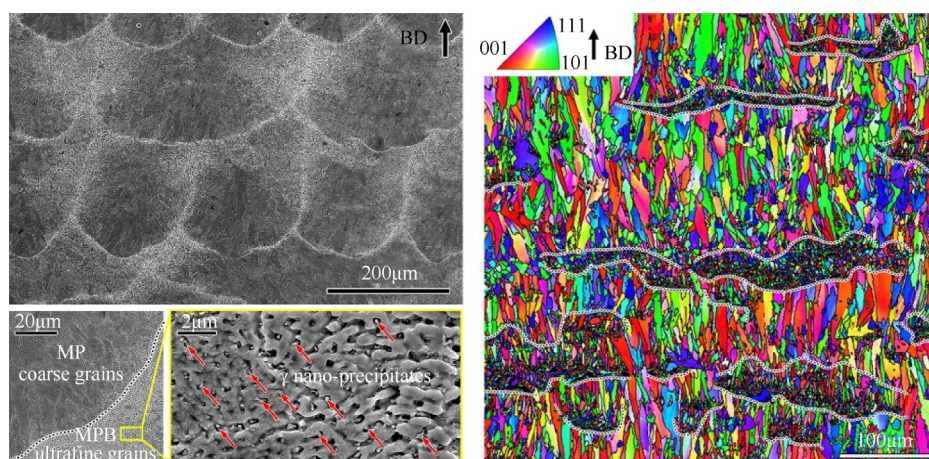


Fig. 7 Microstructures of SLMed Cu-15Ni-8Sn^[31]

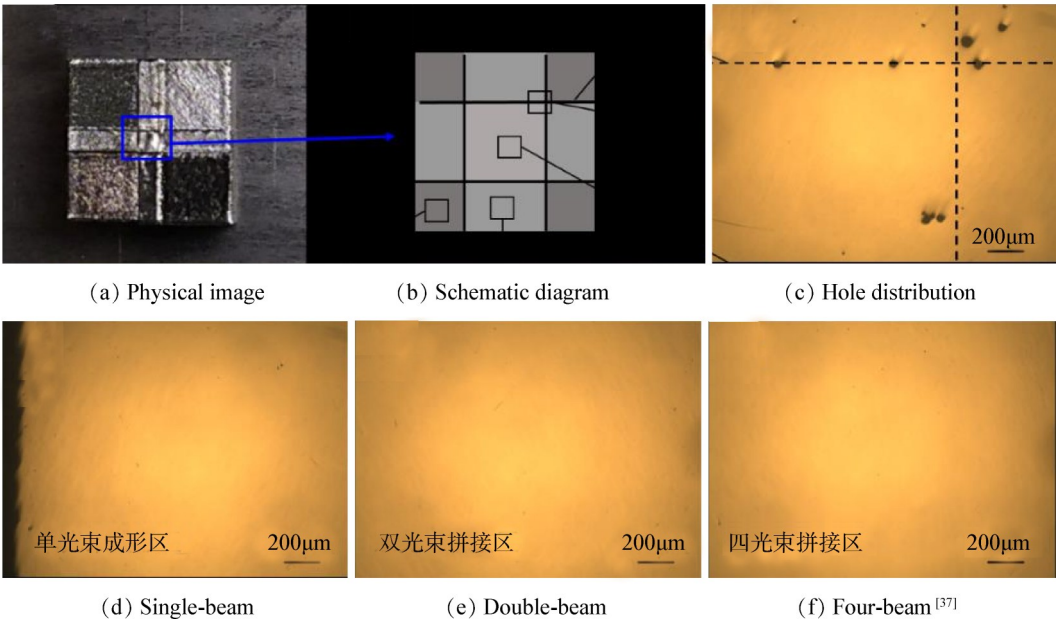


Fig. 8 Physical image and hole distribution of SLM

3.2 SLM 成形过程质量在线监测技术

SLM 成形过程是一个高度复杂的物理冶金过程，微小熔池道道搭接、层层堆积，界面数量多且影响因素复杂，极易形成孔隙、裂纹和元素烧损等缺陷，会极大地影响最终成形零件的质量。而 SLM 过程中复杂的热行为、加工状态不稳定（如激光功率波动等）以及零件结构复杂变化等是造成上述问题的主要原因。为此，实现 SLM 成形过程的在线监测十分有必要，是发现和及时解决 SLM 成形缺陷的有效途径，也是当前 SLM 领域研究和应用的热门方向。

依据光学信号对 SLM 成形过程进行监测可以实时发现粉末床铺粉和成形缺陷^[38-39]，分析测量区域成形零件质量、精度以及是否存在缺陷。Zhang 等^[40]提出了一种利用单目条纹投影的 SLM 原位表面三维形貌测量系统，可实时监测各层高度剖面 and 表面形貌。Li 等^[41]提出了一种双目增强相位测量轮廓方法，可以监测粉末床和熔合区的三维表面形貌，揭示各种缺陷引起的不规则性，并计算出轮廓精度和表面粗糙度（图 9，图中 *STD* 为高度标准偏差值。图中第一行显示了正常铺粉后的形貌，第二行显示了缺粉时的形貌，第三行显示了重涂造成的缺陷形貌，第四行显示了由于小孔造成的缺陷形貌）。

除形貌监测外，温度监测是实施 SLM 成形过程监测的重要方面。Pavlov 等^[42]设计了温度传感与激光束同轴的方式实时采集熔池温度，并分析熔池实时温度值与激光工艺参数的关联性，以此优化工艺从而及时排除熔融异常。Kruth 等^[43]同样采用同轴温

度传感方式，筛选辐射光波提取熔池的形貌信息，有效地侦测出悬空结构成形时产生的球化和 U 形扫描时转角处的“凸包”等缺陷。但是，同轴测温方式系统较为复杂，需要对 SLM 光路进行适当改造，且只能观察到熔池局部温度变化。通过离轴测温如热像仪监测成形区域可实时获得熔池、成形区域以及粉末床的温度变化。Altenburg 等^[44]采用该方法利用热像仪从 SLM 装备观察窗侧向拍摄成形过程中的热像图片，通过识别超出温度阈值区域可实时发现孔隙等缺陷（图 10，其中叉号表示 e 中时间变化的位置，灰圈表示 f 中时间变化的位置。b, c, d 表示三个连续帧的部分）。综上所述，对 SLM 成形过程的形貌和温度监测可以有效地发现成形缺陷，对保证 SLM 成形质量有积极意义。但是，目前 SLM 在线监测主要用于记录成形过程中的相关信息。因此，如何建立在线检测与成形工艺参数之间的质量闭环控制是未来的重点发展方向之一。

3.3 SLM 成形工艺智能化调控技术

SLM 成形质量影响因素众多，单纯依靠经验法和实验试错法不但效率低，而且适用性和普遍性极其有限。因此，结合机器学习等技术，实现 SLM 成形工艺的智能化调控是当前该领域的前沿方向之一。依据工艺参数的优化流程，调控模式可分为开环式与闭环式调控两类。

开环式调控是在开始成形前，将依据成形零件的结构特点、功能需求及材料特性，结合已有经验知识与相应的规则算法，提前确定成形零件不同区域

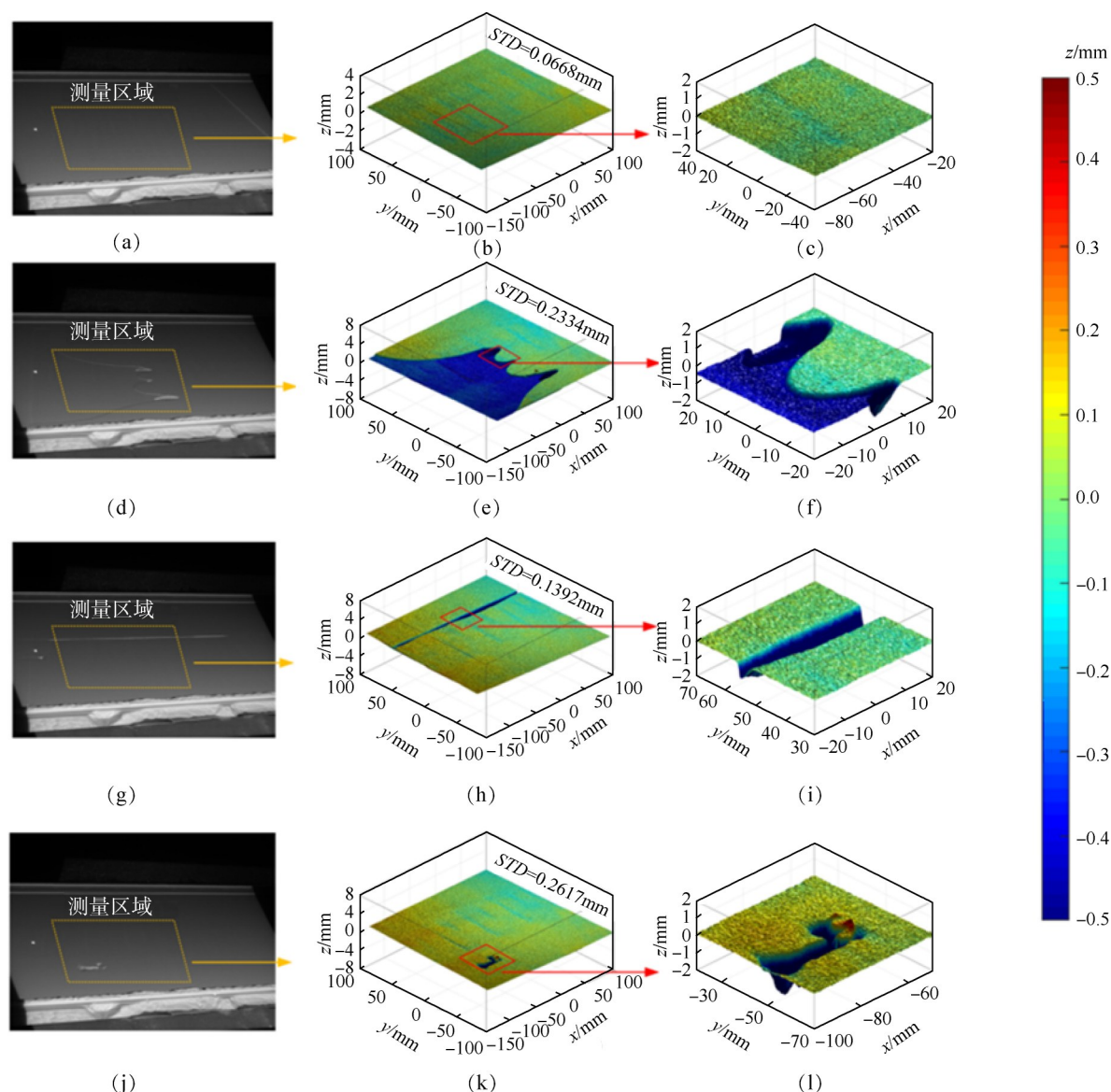


Fig. 9 Measurement results of the powder bed topography using the proposed enhanced PMP framework^[41]

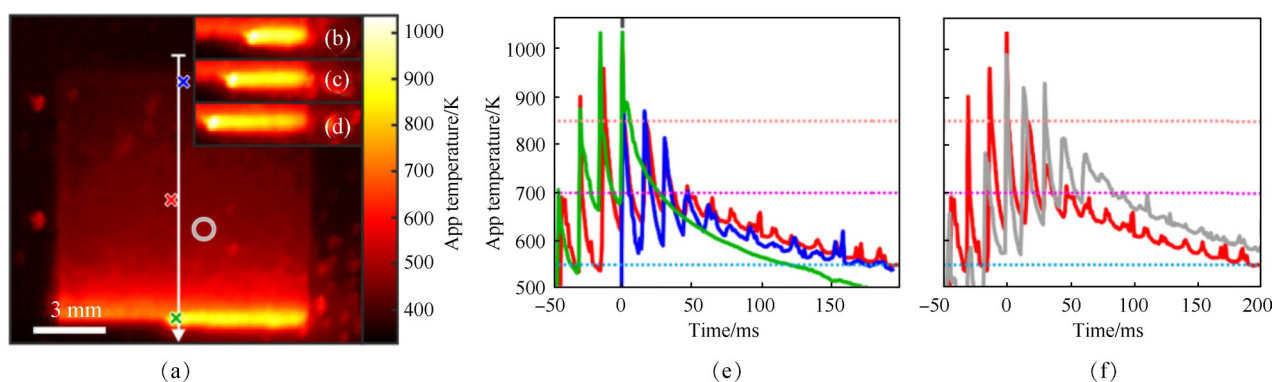


Fig. 10 Thermogram of layer 43 of 100 consisting of 192x176 pixels

采取不同的工艺参数,以满足不同区域的差异化成形需求。如 Yeung 等^[45]提出了“几何热导因子”的概念,依据熔池附近固体和粉末材料占比值进行迭代计算,就可以对复杂几何体中各区域散热环境的差

异性进行定量表征。将这一数值与激光输出功率相关联,可以提出一种新的激光功率控制算法,从而提高悬臂和薄壁等特殊结构的成形质量。Druzgalski 等^[46]提出了复杂几何体中局部扫描向量的工艺参数

优化策略,通过特征提取的方式,对扫描向量的长度、角度,扫描轮廓的表面积、长宽比,以及扫描基底的支撑率等数据进行处理。处理后的数据应用于预先训练好的前馈控制模型中,据此调整扫描各区域时的工艺参数,从而快速优化复杂零件的成形,并利用多路传感器验证优化方案的有效性。Li等^[47]构建了一个前馈反向传播神经网络,对成形零件的固有应变进行预测,从而为任意零件模型的工艺优化提供基础,提高零件成形精度(图11)。

闭环式调控中是在SLM成形过程中监控成形信息,分析当前成形状态并对工艺参数进行实时调控与优化,达到质量闭环控制目标。Renken等^[48]采用同轴温度监测的方式采集熔池温度,将闭环控制策略与前馈控制方法相结合,通过实时调整激光功率来确保熔池的长期稳定性,实时响应时间可以达到46μs。Huang等^[49]采用离轴热像仪监测的方式采集成形面温度,研究了扫描速度与温度分布之间的关系,并据此通过对扫描速率的调整来确保成形面温

度场的均匀性。Vasileska等^[50]提出了一种分层控制策略,通过对熔池面积的测量,来判断当前扫描层工艺参数的优劣,并据此调整下一层的激光功率参数。先在简单模型上进行机器学习的训练过程,记录标准的熔池面积数据,再据此对复杂形状模型成形过程中的熔池数据进行分析,从而针对下一层扫描时的激光功率参数进行针对性的调整,这一策略有效地提高了复杂几何形状零件的成形精度(图12)。闭环式调控对SLM成形零件的质量提升和可重复性具有重要意义,但由于SLM过程中扫描成形速度非常快,因此对于闭环控制的实时性要求很高,需要不断优化机器学习相关算法,提高成形状态分析以及工艺参数调控速度。

4 SLM 成形技术在航空航天发动机领域的应用现状

航空航天发动机上的零部件结构复杂,制造难度大,且工作条件恶劣,需长时间承受大应力、超高

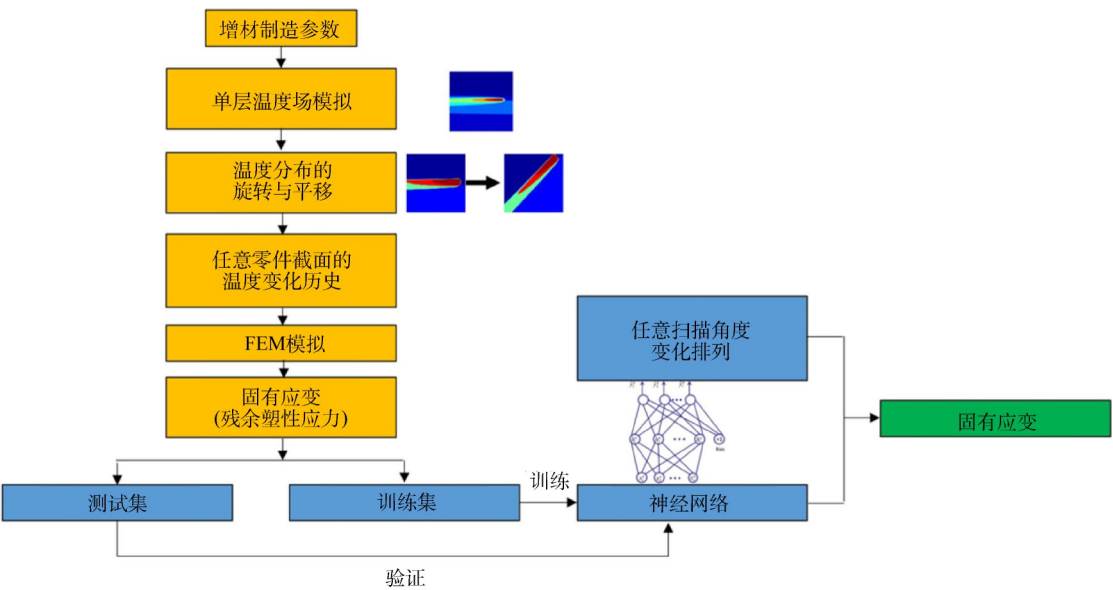


Fig. 11 Inherent strain prediction model^[47]

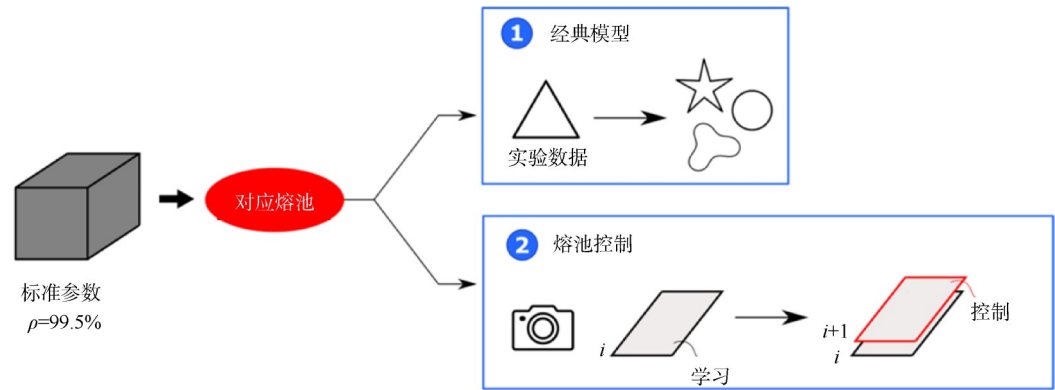


Fig. 12 Schematic diagram of hierarchical control strategy

温、强烈振动、真空和辐射等环境,对零部件的服役性能和使用寿命提出了较高要求。目前使用的传统制造方法对这些零部件都存在工序复杂、涉及工艺技术种类多、生产周期长、难加工等问题,而SLM技术的出现为航空航天发动机上复杂零部件的制造提供了新的解决思路^[51]。目前,已经应用SLM技术制造的航空发动机和航天发动机的零部件如图13所示,这项技术对航空航天发展产生了深远的意义。

4.1 国外应用现状

SLM技术在航天发动机复杂整体构件制造方面具有明显优势,欧美发达国家的航天机构和企业一直致力于开展相关研究工作,并已形成了显著的技术优势。为降低火箭发动机的生产周期和成本,

NASA迄今为止已开展了多个火箭发动机增材制造技术研究项目,其运用SLM技术成形的推力室身部、喷注器等零件已经通过了试车考核。NASA马歇尔航天飞行中心(MSFC)于2012年启动了增材制造验证机项目(Additive Manufacturing Demonstrator Engine, AMDE),设计了一个可以运用SLM技术成形的发动机原型(图14,图中相关零部件的缩写见表1)^[51]。该发动机的零件数量减少80%,焊缝由100余条减少到30条以下,研制周期由7年缩短至3年。表1为主要部件中采用增材制造设计与传统工艺设计所需零件数的对比。

由于SLM成形技术整体成形的特点,在制造航空发动机辅助新产品快速研制方面具有明显优势。



Fig. 13 Application of SLM technology in aerospace engine field^[52]

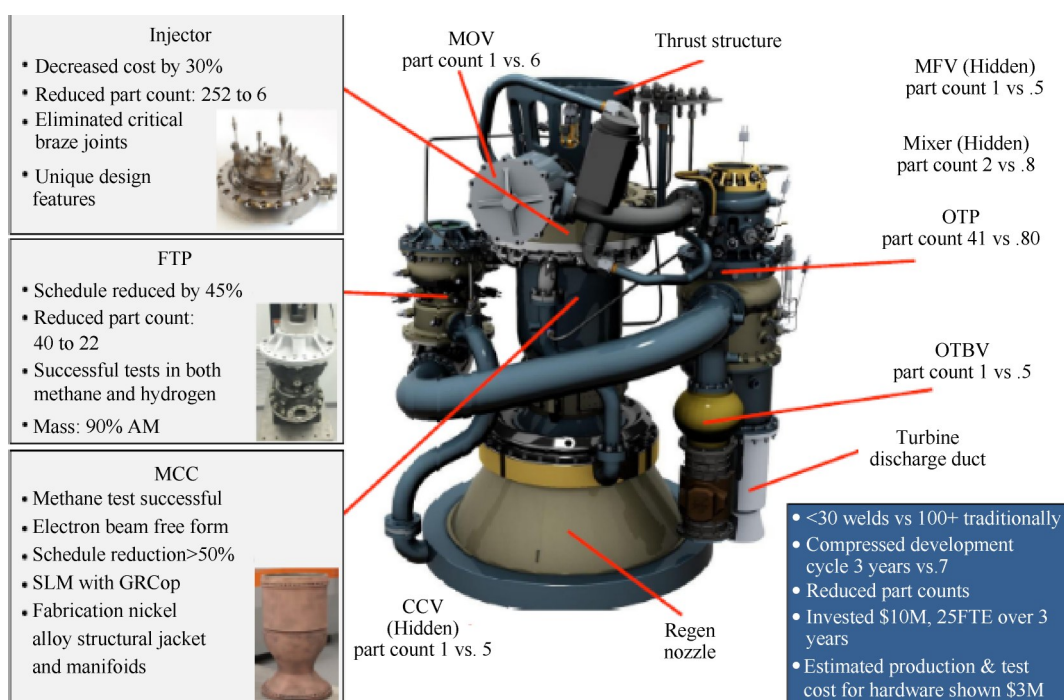


Fig. 14 NASA's Additive Manufacturing Demonstrator (AMDE) designed through additive manufacturing technology^[51]

Table 1 Comparison of the number of key components in the additive manufacturing design scheme in AMDE and the traditional process design scheme

部件名称	增材制造设计	传统工艺设计
主氧化剂阀(MOV)	1	6
喷注器(Injector)	6	252
液氢燃料涡轮泵(FTP)	22	40
燃烧室/喷管冷却夹层(CCV)	1	5
主料阀(MFV)	1	5
混合器(Mixer)	2	8
氧涡轮流量调节(OTBV)	1	5

2013 年,NASA 马歇尔航天飞行中心(MSFC)主导开展低成本推进(Low Cost Upper Stage Propulsion, LCUSP)技术项目研究,开发了增材制造专用的导热性好、高温蠕变性能与强度均较高的析出强化 GRCop-84 铬铌铜(Cu-8at.%Cr-4at.%Nb),大量采用 SLM 技术成形发动机零件。图 15(a)~(d)为 SLM 成形 GRCop-84 铬铌铜和 C18150 铬钴铜推力室身部(需热等静压、固溶+时效强化)^[52-53],分别累积进行了 2365s 和 1443s 的考核试验,均未发生失效。图 15(e)为反应发动机公司(REL)采用 SLM 技术制造的佩刀发动机(Sabre)缩比模型的喷油管,有效降低了制备难度。该模型试验件在 2015 年的点火试验中,成功点火 15 次^[53]。欧洲将 SLM 技术应用于 HEXAFLY 项目中,制备了一系列试验所用飞行器缩比气动模型,显著降低了工艺难度与制备周期。在对试验件进行气动载荷下结构变形程度、结构完整性、制备成本、

制备周期等多项指标进行评估之后认为,该系列试验件均能够满足高超声速气动试验的需求。2020 年,美国航天技术公司 Launcher 采用 EOS 公司开发的 M4K 型 SLM 设备(450mm×450mm×1000mm)完成了 E-2 火箭发动机全尺寸铬铅铜合金燃烧室的研制。该燃烧室高达 1m,是迄今为止世界上最大的单一部分燃烧室(图 15(f)~(h))。除燃烧室采用 SLM 技术制造外,E-2 火箭发动机的喷注器、液氧泵、涡轮泵也采用 SLM 技术制造。截至 2020 年 7 月,该公司采用 SLM 技术制造的涡轮泵已完成 70 多次验证^[52]。

此外,SLM 成形技术的层层叠加,堆积成形的特征也使得其在整体化制造时具有较大的优势。美国在 2015 年发布了高速打击武器(HSSW)项目的技术成熟项目征询公告,公告中透露其将考虑采用 SLM 技术进行部件制造,以期望达到减少零部件数量、降低制造成本、提高后勤保障能力等要求。欧洲航天局(ESA)也启动了膨胀循环技术验证机项目(Expander-cycle Technology Integrated Demonstrator, ETID),开展火箭发动机推力室增材制造技术的研究。在 ETID 项目的资助下,采用 SLM 技术研制了具有冷却通道的铜合金推力室内壁,采用冷喷涂技术在表面制备了高强度的推力室外壁夹套,并于 2020 年 5 月 26 日,对该推力室进行了持续 30s 的热试车试验。GE 航空运用 SLM 技术带来的制造优势,分别设计制造了燃油喷嘴、中框组件、热交换器等发动机部件。新设计的燃油喷嘴由原来的 20 个部件变成了 1



Fig. 15 Application of SLM technology in rapid development of aero-engine^[52-53]

个精密整体,并与其它组件通过钎焊连接,可将喷气燃料通过喷嘴内部的复杂流道实现自身冷却。新喷嘴的质量比上一代喷嘴减轻25%,耐用度提高5倍,成本效益提升30%(图16(a))。运用SLM技术使得中框组件的零件由原来的300个变为1个,无需原来50家供应商的复杂供应体系,也无需原来的7道组装程序,显著实现了轻量化制造(图16(b))。SLM技术制造的热交换器将2000个零件减少为1个零件,体积缩小了70%(图16(c))。GE航空还采用SLM技术制造了第一台商业化的涡轮螺旋桨发动机,使得发动机的零件数量从855个减少到12个,整体性能提高10%,减重5%,节约燃油20%(图16(d))^[54-55]。

SLM成形技术采用激光束快速熔化金属粉末并获得连续的熔道,可以直接获得几乎任意形状、高精度的零部件,已被应用于多种复杂功能部件制造中,能大幅度提高工作效率,减少零件数量从而降低成本。澳大利亚 Monash 大学吴鑫华研究团队采用 SLM 技术制造了世界上第一台燃气涡轮发动机(图17(a)),并为赛峰公司和阿迈罗公司制造了涡轮发动机部件,验证了运用 SLM 技术制造复杂曲面结构航空发动机的可行性^[56]。德国 EOS 公司利用 SLM 技术制造喷射器芯部件(Inconel 718 合金),将零件从248个减少为1个,且功能未发生改变(图17(b))。相较于传统制造工艺,制造过程得以简化,在保证相同效果

的前提下,大幅减小壁厚,质量减轻25%,制造周期缩短50%,成本降低60%^[57]。空中客车公司采用 SLM 技术制造 Airbus A380 飞机的 Liebherr 飞行控制液压组件(图17(c))。与传统技术制造的阀门相比,SLM 技术将10个功能性原件集成到新的阀体中,不再使用具有大量横向孔的管道系统,使得质量减轻35%,生产周期缩短90%^[58]。ITP Aero 公司使用 SLM 技术为第一台 UltraFan 演示发动机设计并制造了尾部轴承座(TBH),与之前的生产工艺相比,制造成本节省了25%。UltraFanTBH的可拆卸消音板也是运用 SLM 技术制造,除尾部轴承座外,UltraFan 发动机的中间压缩机壳也是采用 SLM 技术制造(图17(d))^[59-60]。SpaceX 公司采用 SLM 技术制造了猎鹰系列火箭 SuperDraco 发动机阀体(镍铬合金)(图17(e)~(f))。相较于传统制造工艺,SLM 工艺使得成形件具有更好的材料强度、延伸率、抗断裂韧性和低可变形性,同时采用 SLM 工艺使生产周期从原先的数月缩短至两天,显著缩短了发动机交货周期,降低了生产成本^[61]。Sintavia 公司采用 SLM 技术成形了波浪结构的热交换器,整个组件外部尺寸约40cm×40cm×99cm。与原有热交换器相比,该热交换器的热传递性能提高了2倍,压降提高了3倍,合格率提高了4倍以上,这将推动波浪结构的热交换器在航空航天发动机领域的应用(图17(g))^[61]。



Fig. 16 GE Aviation's part formed using an additive manufacturing process^[54-55]

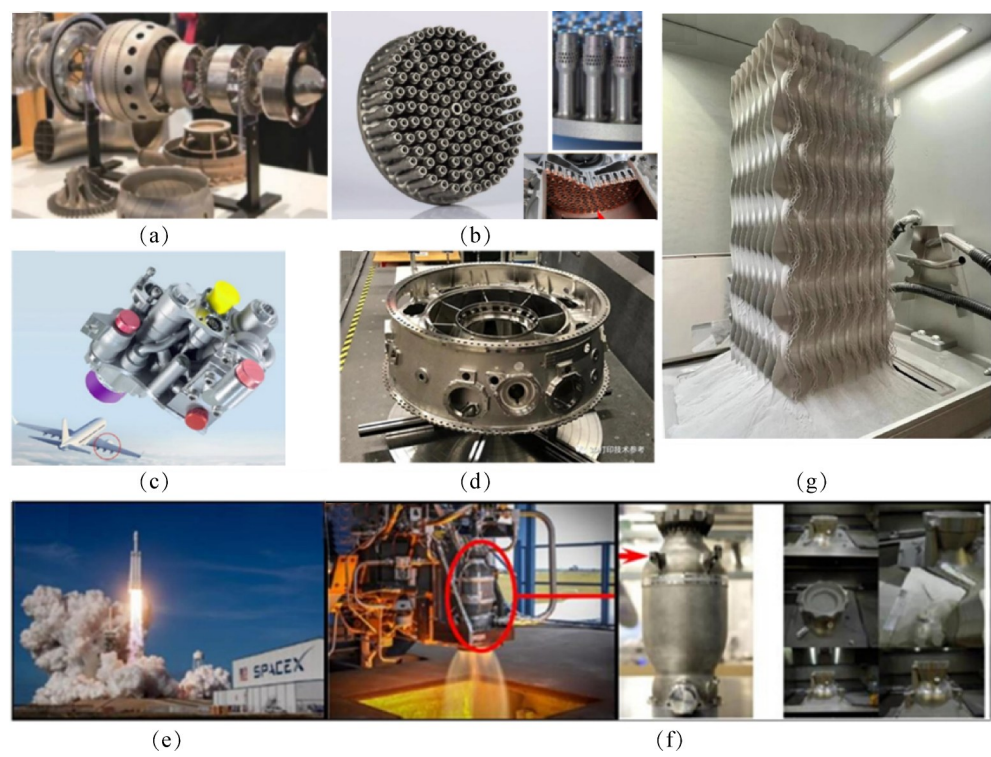


Fig. 17 Application of SLM in the field of complex functional components^[56-61]

4.2 国内应用现状

近年来,SLM 技术在国内航天发动机领域也取得了较快发展。2019 年,航天科技四院 SLM 成形喷管随地面热试车成功,验证了 SLM 成形金属构件在较高压强下的承载性能和工作可靠性,为后续型号试验奠定了坚实的基础。蓝箭航天 TQ-11 和 TQ-12 液氧甲烷发动机均广泛采用 SLM 技术制造,其燃烧室身部采用 SLM 一体成形,大幅降低了研发成本和制造周期,并已成功完成试车考核。深蓝航天与铂力特公司合作,采用 SLM 技术研制出了 LT-5 液氧煤油发动机(5 吨级)喷注器壳体、带冷却流道的推力室身部等零件(图 18),实现国内液氧煤油发动机推力室效率从 95% 到 99% 的技术跨越,该推力室已经通过了长程试车考核^[62]。

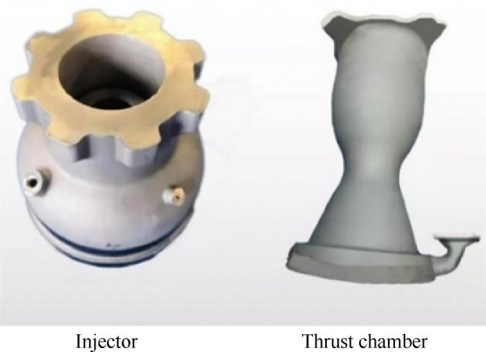


Fig. 18 Application of SLM in engine manufacturing^[62]

航天科技一院 211 厂已开展航天发动机复杂结构的整体化、集成化设计制造研究,实现了轨姿控发动机推力室的结构整体化设计制造(图 19),与传统设计相比,结构减重 23%,性能提升 31%,同时制造周期缩短了 83%。



Fig. 19 Integrated structure of thrust chamber aero-engine manufactured by SLM^[20]

航天科技六院 7103 厂的液体火箭发动机也采用 SLM 技术制造相关零件,其中加强肋构件的成形最具代表性(图 20)。加强肋是发动机隔板夹层内流通道的关键构件,主要用于保证发动机的燃烧稳定性。该产品之前采用熔模精密铸造工艺生产,有 29 个工艺流程,配套设备多且依赖性强,合格率不足 20%。通过 SLM 技术替代熔模精密铸造工艺,加强肋的制

造周期缩短了75%,合格率提升至98%,成本降低30%,且产品多项性能指标接近甚至超过铸造件。

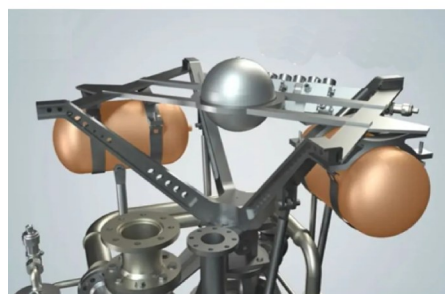
在民用航天领域,云铸三维采用SLM技术制造的火箭姿控动力系统-气瓶组件已圆满完成首飞试验。与原有制造技术相比,SLM成型的气瓶组件省去了所有连接导管,产品减重34.38%,抗冲击性能良好,结构尺寸大幅减小,系统可靠性大幅提高^[63]。2022年,中科宇航自主研发的“玄鸢一号”20吨级液氧煤油火箭发动机通过长程试车考核圆满成功。其中,该火箭发动机的推力室、气瓶等关键组件大量采用SLM成形技术(图21),大幅提高了生产效率,为实现可重复使用提供了有力的技术支撑^[64]。航天星河动力在中大型液体火箭“智神星一号”主动力装置“苍穹”发动机中的涡轮泵、发生器以及主管路等核心部件大量应用SLM成形技术,不仅保证了装配的可靠性,而且大大缩短了制造周期和降低了成本^[65]。



Fig. 20 Gas control power system manufactured by SLM^[63]



(a) Thrust chamber



(b) Gas cylinder^[64]

Fig. 21 Key components manufactured by SLM

5 SLM成形技术面临的挑战及研究方向

SLM技术是增材制造技术的重要分支之一,经过几十年的发展,虽然在航空航天发动机制造领域得到较为广泛的应用,但仍存在诸多关键问题急需解决。

(1)SLM材料的非平衡态物理冶金行为对材料的性能有显著影响,成为制约SLM技术在航空航天发动机应用的瓶颈问题。在SLM成形过程中,构件经历超快熔化、超快凝固和多重局部热处理等非平衡态物理冶金过程,熔池内部流体与熔体、流体与粉末、流体与保护气等的交互作用机制,合金元素的扩散偏析机制,超快凝固和局部热处理对凝固组织元素的重新分布机制等尚不清晰,而这些问题制约了对SLM成形材料组织和性能的进一步研究。同时采用SLM成形的构件存在裂纹、气孔、夹杂等缺陷,也需深入研究解决。

(2)SLM成形设备的尺寸限制了SLM技术在航空航天发动机制造领域的应用范围。目前,航空航天发动机零部件主要集中在中小尺寸范围(成形尺寸小于600mm×600mm×600mm),大尺寸/超大尺寸SLM成形已成为重要发展趋势,急需相应的大尺寸/超大尺寸SLM成形设备,而现有成形设备的大小无法满足需求。因此大尺寸、高效率的SLM成形设备的研制是SLM技术发展的重要方向。而SLM设备的研制涉及到多光束振镜搭接技术、风场均匀性控制技术、铺粉一致性控制技术、高效除尘过滤技术、可靠性应用验证技术等多学科综合技术,上述技术均需进一步的研究和应用验证。

(3)SLM技术的结构功能一体化制造在航空航天发动机制造领域的应用中受到极大限制。目前,航空航天发动机设计多基于传统的“自上而下”设计制造方法,性能/功能的实现是被动的,存在反复试错和优化的过程。而SLM技术可实现材料-结构-功能一体化整体制造,采用这种“自下而上”的材料-结构-制造工艺整体化方法,对发动机的复杂零部件高效制造具有重大意义。因此,为充分发挥SLM技术制造优势,需进一步拓展SLM技术的结构功能一体化设计方法。

(4)SLM技术工业标准体系的缺失,制约了SLM技术在工业生产上的批量化应用。目前,虽然制定了部分增材制造粉末、设备、后处理等相关国家标准和行业标准,但相关的数据库、应用验证考核标准等仍需补充完善。另外,SLM制造仍处于小批量离散生

产模式,距离规模化生产尚有差距,急需建立面向规模化批产的SLM工业标准体系。

致 谢:感谢中国航天科工飞航技术研究院增材制造技术攻关第一批项目的资助。

参考文献

- [1] 杨永强,陈杰,宋长辉,等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011401.
- [2] 金鑫源,兰亮,何博,等. 选区激光熔化成形金属零件表面粗糙度研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3168-3175.
- [3] 姜海燕,林卫凯,吴世彪,等. 激光选区熔化技术的应用现状及发展趋势[J]. 机械工程与自动化, 2019(5): 223-226.
- [4] Yang J, Yu H, Yin J, et al. Formation and Control of Martensite in Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 308-318.
- [5] Gu D, Hagedorn Y, Meiners W, et al. Densification Behavior, Microstructure Evolution, and Wear Performance of Selective Laser Melting Processed Commercially Pure Titanium[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [6] Pederson R, Gaddam R, Antti M L. Microstructure and Mechanical Behavior of Cast Ti-6Al-4V with Addition of Boron [J]. *Central European Journal of Engineering*, 2012, 2(3): 347-357.
- [7] Liu S, Shin Y. Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A Review[J]. *Materials & Design*, 2019, 164: 107552.
- [8] Yang J, Han J, Yu H, et al. Role of Molten Pool Mode on Formability, Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 558-570.
- [9] Xu W, Brandt M, Sun S, et al. Additive Manufacturing of Strong and Ductile Ti-6Al-4V by Selective Laser Melting via in Situ Martensite Decomposition[J]. *Acta Materialia*, 2015, 85: 74-84.
- [10] Vrancken B, Thijs L, Kruth J, et al. Heat Treatment of Ti-6Al-4V Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 541: 177-185.
- [11] Yu H C, Li F, Wang Z, et al. Fatigue Performances of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy: Influence of Surface Finishing, Hot Isostatic Pressing and Heat Treatments[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 120: 175-183.
- [12] Shipley H, McDonnell D, Culleton M, et al. Optimisation of Process Parameters to Address Fundamental Challenges During Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V: A Review [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 128: 1-20.
- [13] Zhang D, Qiu D, Gibson M, et al. Additive Manufacturing of Ultrafine-Grained High-Strength Titanium Alloys [J]. *Nature*, 2019, 576(7785): 91-95.
- [14] Leuders S, Thöne M, Riemer A, et al. On the Mechanical Behaviour of Titanium Alloy TiAl6V4 Manufactured by Selective Laser Melting: Fatigue Resistance and Crack Growth Performance [J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 48: 300-307.
- [15] Li S, Wei Q, Shi Y, et al. Microstructure Characteristics of Inconel 625 Superalloy Manufactured by Selective Laser Melting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(9): 946-952.
- [16] Sun S, Teng Q, Xie Y, et al. Two-Step Heat Treatment for Laser Powder Bed Fusion of a Nickel-Based Superalloy with Simultaneously Enhanced Tensile Strength and Ductility [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102168.
- [17] Shao S, Khonsari M, Guo S, et al. Overview: Additive Manufacturing Enabled Accelerated Design of Ni-Based Alloys for Improved Fatigue Life [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100779.
- [18] Choi J, Shin G, Yang S, et al. Densification and Microstructural Investigation of Inconel 718 Parts Fabricated by Selective Laser Melting [J]. *Powder Technology*, 2017, 310: 60-66.
- [19] Wang H, Zhou Z, Li C, et al. Effect of Scanning Strategy on Grain Structure and Crystallographic Texture of Inconel 718 Processed by Selective Laser Melting [J]. *Journal of Material Science and Technology*, 2018, 34(10): 1799-1804.
- [20] Zhang H, Fan E, Wang C, et al. Investigation on Microstructure and Mechanical Behaviour of One Wrought Nickel-Based Superalloy Obtained by Selective Laser Melting Process [C]. *Shanghai: Proceedings of Shanghai 2017 Global Power and Propulsion Forum*, 2017.
- [21] Deng D, Eriksson R, Peng R, et al. On the Dwell-Fatigue Crack Propagation Behavior of a High-Strength Ni-Base Superalloy Manufactured by Selective Laser Melting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2020, 51: 962-972.
- [22] Brynk T, Pakielka Z, Ludwiczowski K, et al. Fatigue Crack Growth Rate and Tensile Strength of Remodified Inconel 718 [J]. *Materials Science & Engineering A*: 2017, 698: 289-301.
- [23] Chlebus E, Gruber K, Kuznicka B, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Processed by Selective Laser Melting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 639: 647-655.

- [24] Tomus D, Romesch A, Heilmaier M, et al. Effect of Minor Alloying Elements on Crack-Formation Characteristics of Hastelloy-X Manufactured by Selective Laser Melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2017(16): 65–72.
- [25] Ting H, Hou H, Chang Y, et al. Effects of CoAl_2O_4 Inoculants on Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Processed by Selective Laser Melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2020(35): 101328.
- [26] Rahman M, Schilling P, Herrington P, et al. Thermal Behavior and Melt-Pool Dynamics of Cu-Cr-Zr Alloy in Powder-Bed Selective Laser Melting Process[C]. *USA: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2019.
- [27] Zhang S, Zhu H, Zhang L, et al. Microstructure and Properties of High Strength and High Conductivity Cu-Cr alloy Components Fabricated by High Power Selective Laser Melting[J]. *Materials Letters*, 2019, 237: 306–309.
- [28] Uchida S, Kimura T, Nakamoto T, et al. Microstructures and Electrical and Mechanical Properties of Cu-Cr Alloys Fabricated by Selective Laser Melting[J]. *Materials & Design*, 2019, 175: 107815.
- [29] Zhang G, Chen C, Wang X, et al. Additive Manufacturing of Fine-Structured Copper Alloy by Selective Laser Melting of Pre-Alloyed Cu-15Ni-8Sn Powder[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9): 4223–4230.
- [30] Karhik G, Praveen S, Alireza Z, et al. Novel Precipitation and Enhanced Tensile Properties in Selective Laser Melted Cu-Sn Alloy[J]. *Materialia*, 2020, 13: 100861.
- [31] Wang J, Zhou X, Li J, et al. Microstructures and Properties of SLM-Manufactured Cu-15Ni-8Sn Alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100921.
- [32] Li J, Cheng T, Liu Y, et al. Simultaneously Enhanced Strength and Ductility of Cu-15Ni-8Sn Alloy with Periodic Heterogeneous Microstructures Fabricated by Laser Powder Bed Fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 54: 102726.
- [33] Wiesner A, Schwarze D. Multi-Laser Selective Laser Melting[C]. *Erlangen: 8th International Conference on Photonic Technologies Lane*, 2014: 1–3.
- [34] Andani M, Dehghani R, Karamooz M, et al. Spatter Formation in Selective Laser Melting Process Using Multi-Laser Technology[J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 460–469.
- [35] 刘正武, 侯春杰, 王联凤, 等. 多激光束选区熔化成形技术研究[J]. *制造技术与机床*, 2018(1): 56–59.
- [36] Zhang C C, Zhu H H, Hu Z H, et al. A Comparative Study on Single-Laser and Multi-Laser Selective Laser Melting AlSi10Mg: Defects, Microstructure and Mechanical Properties[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 746: 416–423.
- [37] 余保桢. 多光束激光选区熔化成形 TA15 合金的基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [38] Neef A, Seyda V, Herzog D, et al. Low Coherence Interferometry in Selective Laser Melting[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 82–89.
- [39] Kanko J, Sibley A, Fraser J, et al. In Situ Morphology-Based Defect Detection of Selective Laser Melting Through Inline Coherent Imaging[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 488–500.
- [40] Zhang B, Ziegert J, Farahi F, et al. In Situ Surface Topography of Laser Powder Bed Fusion Using Fringe Projection[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 100–107.
- [41] Li Z, Liu X, Wen S, et al. In Situ 3D Monitoring of Geometric Signatures in the Powder-Bed-Fusion Additive Manufacturing Process via Vision Sensing Methods[J]. *Sensors*, 2018, 18(4).
- [42] Pavlov M, Doubenskaia M, Smurov I. Pyrometric Analysis of Thermal Processes in SLM Technology[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 523–531.
- [43] Kruth J, Mercelis P, Van J, et al. Feedback Control of Selective Laser Melting[C]. *Leiria: Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 2007: 521–527.
- [44] Altenburg S, Scheuschner N, Maierhofer C, et al. Thermography in Laser Powder Bed Fusion of Metals: Time over Threshold as Feasible Feature in Thermographic Data[C]. *Porto: 15th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 2020.
- [45] Yeung H, Lane B, Fox J. Part Geometry and Conduction-Based Laser Power Control for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100844.
- [46] Druzgalski C, Ashby A, Guss G, et al. Process Optimization of Complex Geometries Using Feed Forward Control for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101169.
- [47] Li L, Anand S. Hatch Pattern Based Inherent Strain Prediction Using Neural Networks for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 1344–1352.
- [48] Renken V, Freyberg A, Schü K, et al. In-Process Closed-Loop Control for Stabilising the Melt Pool Temperature in Selective Laser Melting[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, 4(4): 411–421.
- [49] Huang X, Tian X, Zhong Q, et al. Real-Time Process Control of Powder Bed Fusion by Monitoring Dynamic Temperature Field[J]. *Advances in Manufacturing*, 2020, 8(3): 380–391.
- [50] Vasileska E, Demir A, Colosimo B, et al. Layer-Wise

- Control of Selective Laser Melting by Means of Inline Melt Pool Area Measurements[J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(2): 022057.
- [51] Elizabeth H. Additive Manufacturing Demonstrator Engine[R]. NASA M16-5376, 2016.
- [52] Gradl P, Protz C, Ellis D, et al. Progress in Additively Manufactured Copper-Alloy GRCOP-84, GRCOP-42, and Bimetallic Combustion Chambers for Liquid Rocket Engines[C]. USA: *Proceedings of the International Astronautical Congress*, 2019.
- [53] 林旭斌, 王晖娟. 深度解析: 3D打印之高超声速技术领域应用[EB/OL]. <https://nanjixiong.com/thread-139112-1-1.html>, 2019-12-24.
- [54] 激光制造网. GE 3D打印燃油喷嘴制造数量突破10万件[EB/OL]. <https://www.laserfair.com/yingyong/202109/01/79719.html>, 2021-09-01.
- [55] 杨胶溪, 吴文亮, 王长亮, 等. 激光选区熔化技术在航空航天领域的发展现状及典型应用[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(2): 1-15.
- [56] 江苏激光联盟. 综述: 航空航天领域的金属增材制造之三[EB/OL]. <https://nanjixiong.com/thread-148821-1-1.html>, 2021-08-27.
- [57] Najmon J, Raeisi S, Tovar A. Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 7-31.
- [58] 罗尔斯罗伊斯. 罗·罗通过3D打印设计制造有史以来最大的航空发动机关键结构[EB/OL]. <https://www.china-aerospace.com/article/show/08306ebe7db6bba169a687179f5b36fc>, 2022-10-22.
- [59] Byron B, Paul G, Glen S, et al. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review[J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110008.
- [60] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- [61] 3DScienceValley. 3D打印大型热交换器, 提升高达2倍的热传递性能和达3倍压降[EB/OL]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=26532/>, 2022-04-06.
- [62] 3D打印技术参考. 铂力特3D打印技术在航空航天领域的四个应用案例[EB/OL]. <https://product.nanjixiong.com/thread-151824-1-1.html>, 2022-01-09.
- [63] 3DScienceValley. 云铸三维助力零壹空间OS-X6B火箭成功发射![EB/OL]. <http://www.3dsciencevalley.com/?p=25495/>, 2022-01-07.
- [64] 中科宇航. 玄鸢一号”20吨级液氧煤油火箭发动机长程试车考核圆满成功[EB/OL]. <http://mtw.so/6xcT9B>, 2022-05-25.
- [65] 3D打印技术参考. 中国民营航天星河动力将3D打印技术用于火箭发动机制造[EB/OL]. <http://mtw.so/5GDCf8>, 2022-03-23.

(编辑:梅 瑛)