

航空发动机及燃气轮机用关键材料的激光增材制造研究进展

陈超越, 王江*, 王瑞鑫, 朱雄劲, 赵旺, 蔡嘉楠, 任忠鸣

上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 材料科学与工程学院, 上海 200444

摘要 增材制造技术可以突破传统工艺的加工和设计局限, 实现高性能复杂结构零件的一体化直接成形, 在航空发动机及燃气轮机(两机)领域有着巨大的应用潜力。针对镍基高温合金、钛基合金和高强度钢等3类合金, 综述了激光工艺参数、成分改性以及外场作用下的微观组织特点和调控方法; 比较分析了室温和高温条件下的典型力学性能特征, 以及增材制造合金的工艺参数—微观结构—力学性能映射关系, 并总结了上述材料在两机领域关键构件的增材制造应用现状和典型案例; 展望了面向两机领域关键构件的新型增材制造技术、微观组织调控技术、专用合金体系以及增材制造过程稳定性研究, 进一步推动增材制造技术在两机关键领域的推广和应用。

关键词 增材制造; 航空发动机; 燃气轮机; 微观组织; 力学性能

航空发动机被称为飞机的心脏, 其发展水平是一个国家工业水平高低的标志之一。如今随着航空发动机发展的日趋成熟, 对新一代发动机的高温强度、抗氧化抗腐蚀、抗疲劳和抗蠕变性能的要求越来越高, 零件结构趋于复杂化, 从而导致工序变多, 生产量和生产效率低。传统的铸造、锻造等方

法由于存在无法制造复杂结构零件、生产周期过长等缺点难以满足当今对航空发动机的性能要求。航空发动机和燃气轮机的关键部件主要由高强钢、镍基高温合金和钛合金组成(图1)。由于高价值零件的高混合低批量生产、集成复杂零件几何结构和简化制造工作流程的巨大需求, 航空航天是增材

收稿日期: 2022-12-06; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3702502); 国家自然科学基金项目(52001191); 上海市科委基础研究项目(20511107700, 20511107700); 中国重燃项目(F035); 上海青年科技启明星计划项目(20QA1403800); 广东省现代表面工程技术重点实验室开放课题(2020B1212060049)

作者简介: 陈超越, 副教授, 研究方向为激光增材制造和电磁冶金等, 电子信箱: cchen1@shu.edu.cn; 王江(通信作者), 教授, 研究方向为增材制造及电磁冶金, 电子信箱: jiangwang@i.shu.edu.cn

引用格式: 陈超越, 王江, 王瑞鑫, 等. 航空发动机及燃气轮机用关键材料的激光增材制造研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 34-48; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.004

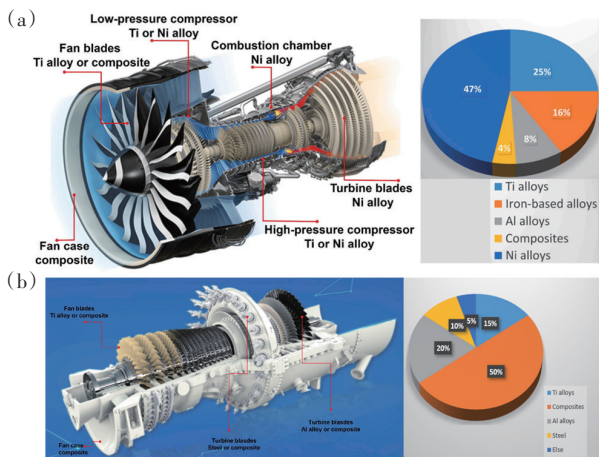
(a) 波音787飞机中GE-CF6涡轮发动机^[1];(b) 重型燃气轮机^[2]

图1 航空发动机和燃气轮机中关键材料分布

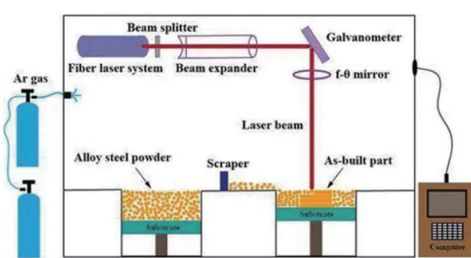
制造(additive manufacturing, AM)发展的关键市场驱动力。航空发动机材料的激光增材制造(laser additive manufacturing, LAM)取得了显著进展,包括先进的高强度钢、镍基高温合金和钛基合金。

1 增材制造技术分类

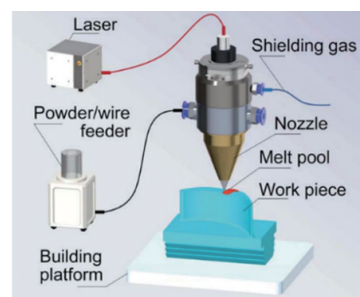
增材制造技术作为一种新兴技术打破了传统制造的观念,它可通过激光、电子束或电弧等作为能量来源,将粉末、金属丝或薄板等原料材料固化为致密金属零件,在整个过程中可添加超声波、磁场等来辅助零件得到更好的性能^[3]。最早增材制造技术只应用于制造产品的外观模型,这是因为当时

技术不成熟以及材料的限制,生产出的产品达不到性能要求,随着技术人员的研究,实现了金属零件的直接制造,相对于传统铸造而言,增加了零件设计的自由度,精确复杂的零件图可以一步完成,节约了大量的产品开发时间。随着新材料新工艺的不断发展,增材制造金属加工的组成技术取得了重大进展,其中常见的增材制造技术有粉末床(powder bed fusion, PBF)和定向能量沉积(direct energy deposition, DED)等^[4]。

粉末床熔化增材制造技术主要以激光和电子束为能量源,以金属粉末为原材料,通过逐层堆叠成形制备复杂构件,主要包括激光粉末床熔化(laser powder bed fusion, LPBF)或激光选区熔化(selective laser melting, SLM),以及电子束粉末床熔化(electron beam powder bed fusion, EB-PBF)或电子束选区熔化(selective electron beam melting, SEBM),如图2(a)所示^[5]。LPBF和EB-PBF能制备出组织精密、致密性高、表面质量及综合性能良好的构件,并且该技术材料利用率高、生产周期短、一体化成形等优点。其中,定向能量沉积技术是在激光熔覆技术的基础上发展而来,也是利用高能量密度的激光、电子束或电弧等作为热源,对粉末材料或金属丝材进行熔融,通过路径规划软件,选取合适的路径策略,将其转换成所需的程序代码,机械结构按照规划完的路径带动激光头进行运动,高能激光束不断熔融粉末材料,层层加工,最终得到所需零件,如图2(b)所示^[6]。



(a) 激光粉末床熔化(LPBF)



(b) 激光定向能量沉积(LDED)

图2 典型激光增材制造技术原理示意

2 增材制造镍基高温合金及其应用

在航空发动机及重型燃气轮机不断提高推重比和功率的情况下,涡轮入口温度也随之不断升高,这对高温合金叶片的性能提出了越来越严苛的要求。镍基高温合金以 γ 相为基体, γ' 相为强化相,具有高强度、强抗氧化及耐腐蚀的优势,是高温部件的重要材料^[7-9],已经广泛应用于航空航天和燃气轮机的热端部件^[10-11]。随着凝固技术的发展,镍基高温合金经历了从锻造等轴晶、柱状晶到单晶的变化,也带来了更优异的高温性能。由于叶片需要长期工作于高温高压、高腐蚀、高负荷的极端工作环境下,合格发动机叶片的研发和生产成本越来越高。为了降低航空发动机的制造成本,镍基高温合金应向低成本生产工艺、短生产周期的方向发展;同时,对于在长期严苛服役环境下出现表面缺

陷的镍基高温合金叶片,相应的修复技术也应该得到大力发展,进一步降低叶片的成本^[12]。由于激光增材制造对材料的热影响区小,且高功率密度;同时,激光增材制造可以获得高达 $10^5\sim 10^7$ K/m的温度梯度,能够保证修复过程中的材料单晶性完整性,是镍基单晶高温合金叶片修复和延寿的理想方法^[13-15]。

2.1 微观组织及力学性能特征

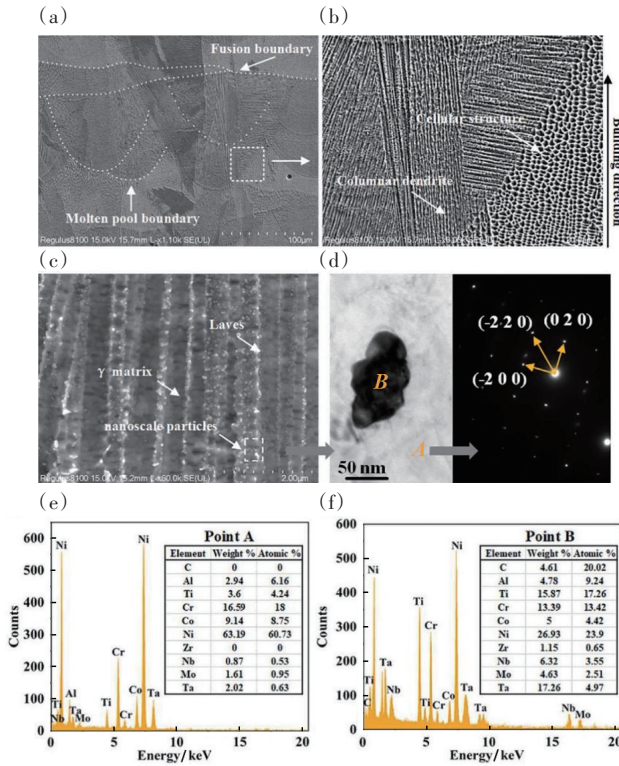
在镍基高温合金的SLM制造中,各工艺参数作用对样品性能会产生显著的影响。由SLM工艺成形的镍基高温合金材料经过不同后处理工艺,如热等静压(hot isostatic pressing, HIP)、固溶处理(solution treatment, ST)、时效处理(aging treatment, AT)后,改善了材料的显微组织,材料的综合性能有了较大的提升。表1总结了SLM工艺制备的不同镍基高温合金经后处理的力学性能参数^[16]。

表1 不同SLM打印镍基高温合金经后处理的力学性能参数

后处理工艺		Hastelloy X	IN718	K4202	IN625	IN738LC
SLM	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	630±10	668±16	722	700±40	786±4
	σ_i/MPa	700±10	1011±27	948	1011±30	1162±35
	$\delta/\%$	8±1	22±2	19	36±5	11±2
HIP	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	440±10	645±6	—	420	932±4
	σ_i/MPa	800±10	1025±14	—	940	1350±22
	$\delta/\%$	40±1	38±1	—	59	14±1
ST	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	400±10	875±11	901	386	—
AT	σ_i/MPa	660±10	1153±4	1224	910	—
	$\delta/\%$	21±1	17±2	27.3	54.4	—
ST+AT	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	—	723±55	878	480	981±12
	σ_i/MPa	—	1117±45	1264	950	1450±16
	$\delta/\%$	—	16±3	18.3	53	14±1

刘泽程等^[17]在SLM成形镍基高温合金过程中,通过响应曲面法对激光功率、扫描速度和扫描间距进行了工艺优化,并探究了各参数之间的关系,发现扫描间距对试样相对密度的影响效果最大,其次是激光功率和扫描速度,通过等高线图的结果发现扫描速度与扫描间距的交互作用对于试样相对密度也有比较显著的影响。Wang等^[18]探索了不同扫描速度和成形方向对采用SLM工艺制备的Inconel 718零件的组织、力学性能和织构的影响。结果表明,随着激光扫描速度的增加,单个熔池的宽深比增大,外延生长受到限制,导致<001>织构强度降

低,力学性能各向异性降低;扫描速度的提高诱发了晶粒细化进一步削弱了力学性能的各向异性,为SLM加工提供了高激光扫描速度的潜在指导,有利于获得更均匀的微结构和更高的生产效率。此外,在镍基高温合金中添加微量元素(Ta、Nb、Zr和稀土元素等)可以增强其在极端环境下的性能。Zhang等^[19]研究了SLM制备的IN738合金在不同热处理前后的组织演变、相变和力学性能,如图3所示,其结果表明由于冷却速率高,试样的微观组织以柱状组织为主,胞晶排列方向沿着打印方向。



(a)~(c) 不同放大倍数下 IN718 组织形貌; (d) 析出碳化物 TEM 结果; (e)~(f) 取点 A、B 的 EDS 结果^[19]

图3 SLM 打印 IN738 组织形貌

2.2 缺损修复技术

除复杂构件的一体化直接成形, 损伤高温合金零件的直接修复是激光增材制造技术另一个主要研究和应用方向。在激光修复镍基单晶高温合金过程中, 激光熔覆可以使单晶基材通过外延生长获得具有与基体相同取向的柱状枝晶结构, 但在修复过程中, 需要注意的是避免出现杂晶、抑制 CET 转变 (columnar to equiaxed transition)、OMT 控制 (oriented to misoriented transition)^[20-23]。杂晶的出现会导致合金的高温性能恶化, 还会形成晶界导致凝固裂纹的出现, 因此需要在修复过程中控制局部凝固前沿热梯度 (G) 和凝固速度 (V)。此外, 在激光修复过程中, 熔池几何形状演变和熔体对流会对杂晶的形成产生影响。Lu 等^[24]采用定向能量沉积技术, 以第三代镍基高温合金粉末 (CMSX-10) 对第二代国产镍基高温合金基材进行修复实验, 并通过理论计算, 揭示了在熔体对流作用下激光熔池几何形状的演变机制, 并阐述了在这一过程中杂晶的

形成规律, 并通过熔体池中 Marangoni 对流所产生的独特的热、质传递, 揭示了柱状枝晶生长方向出现偏差的原因。Liu 等^[25]研究了定向凝固高温合金激光表面重熔过程中的外延生长行为和基体杂晶形成机制, 发现在重熔过程中, 由于元素偏析导致碳化物和共晶相的液化, 杂晶会出现在沿熔合线分布的碳化物和共晶组织周围, 但是通过将热输入量降低到 50 J/mm 可以抑制杂晶的发生。

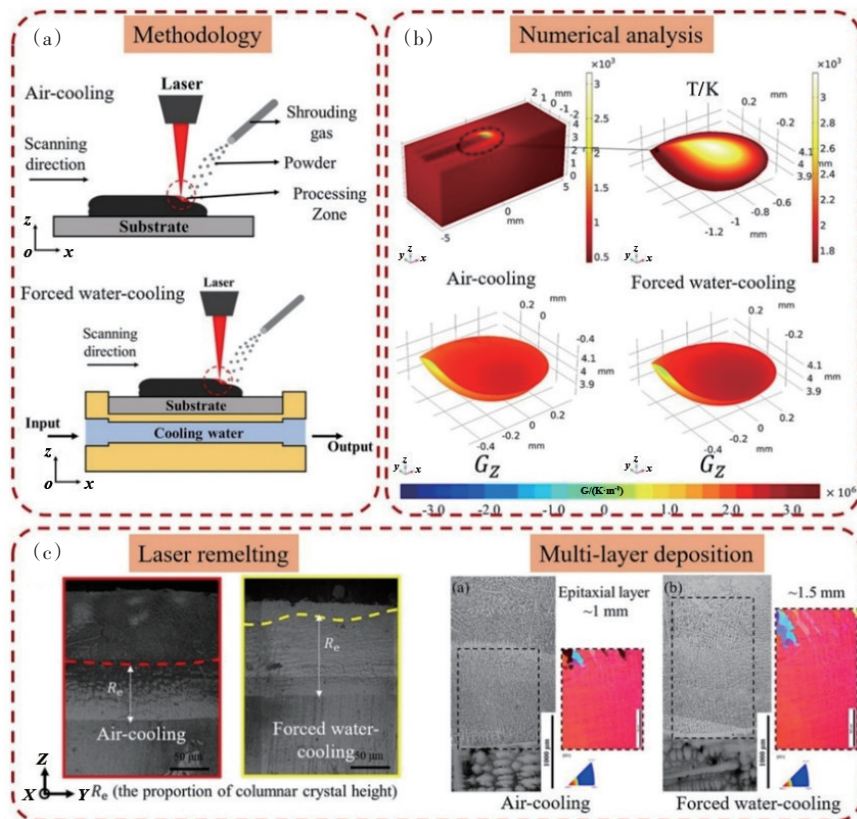
在激光修复过程中, 较低的激光功率和较快的扫描速度可以产生较高的温度梯度, 从而有利于柱状枝晶的生长。但为了避免等轴杂晶的出现, 对激光凝固过程中的柱状晶向等轴晶转变 (CET) 需要严格控制, 这就需要阐明在凝固过程中形核和生长竞争关系。1984 年, Hunt^[26]提出了用于描述稳态柱状晶和等轴晶生长的解析模型, 成功定性揭示了合金成分、形核密度和冷却速率对 CET 的影响情况。Gäumann 等^[27]则在 Hunt 的模型基础上, 结合定向凝固的 Kurz-Giovanola-Trivedi (KGT) 模型和过冷熔体生长的 Lipotn-Kurz-Trivedu (LKT) 模型, 建立了考虑快速凝固非平衡效应的、更完备的 CET 模型并将其成功运用于外延激光金属成型单晶的研究中。在激光外延修复过程中, 基体温度会对 CET 位置产生影响, 基体的预冷有利于柱状晶的生长, 能够细化柱状枝晶臂间距。Nie 等^[28]在单晶 René N5 基底上进行了单道、多道的定向能量沉积, 并对基底进行了强制水冷。结果发现, 强制水冷沉积样中柱状晶区比风冷沉积样中高 21.33%, 电子背向散射衍射 (EBSD) 的晶粒结构图表明, 外延生长高度从风冷样品的 1 mm 增加到水冷样品的 1.5 mm, 显著提高了激光修复的外延生长高度。

2.3 典型应用案例

激光熔覆修复技术因其显著缩短成型时间、降低制造成本、制造件性能优异、后续加工量少等优点, 是目前航空航天工业维修再延寿行业中研究的一大热点。增材制造技术潜在的商业应用价值和性能优势首先被用于制造可焊高温合金, 如 IN718 镍基高温合金, 然后逐步扩展到难以焊接高温合金的制造, 以及定向凝固和单晶高温合金的制造。德国 EOS 公司、法国 Safran 公司等通过激光增材制造

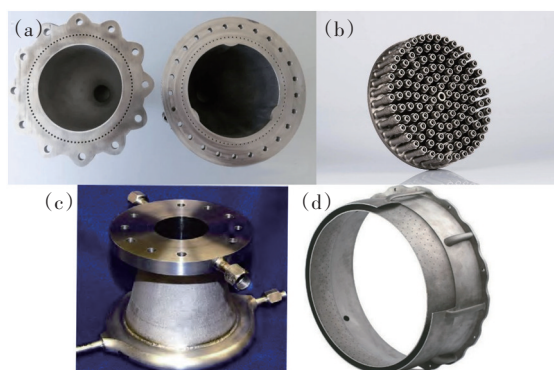
技术创造了极大的经济价值。2001年, Gäumann等采用激光定向能量沉积(LDED)技术在单晶基底上沉积了如图4所示的单晶结构, 这一进展证明了利用增材制造技术修复甚至直接制造单晶叶片的潜力。美国的Los Alamos国家实验室针对镍基高温合金材料进行了大量的激光金属直接成形研究, 所制

造的金属零件不仅形状复杂, 且其力学性能接近甚至超过传统锻造技术制造的零件。如图5所示, 增材制造技术已被应用于制造具有复杂形状和独特设计的各种镍基高温合金组件中(IN718, IN625, CM247LC, Hastelloy-X和IN738LC)^[29-30]。



(a) René N5定向能量沉积工艺; (b) 激光熔覆过程数值模拟; (c) 激光重熔及多层熔覆结果

图4 LDED工艺制备René N5镍基单晶高温合金



(a) SLM成形IN718镍基高温合金Icus-II火箭发动机部件; (b) SLM成形IN718镍基高温合金火箭发动机喷嘴头; (c) IN625液体火箭通道壁喷嘴; (d) SLM成形IN718镍基高温合金发动机机匣

图5 增材制造镍基高温合金零件

3 增材制造钛合金及其应用

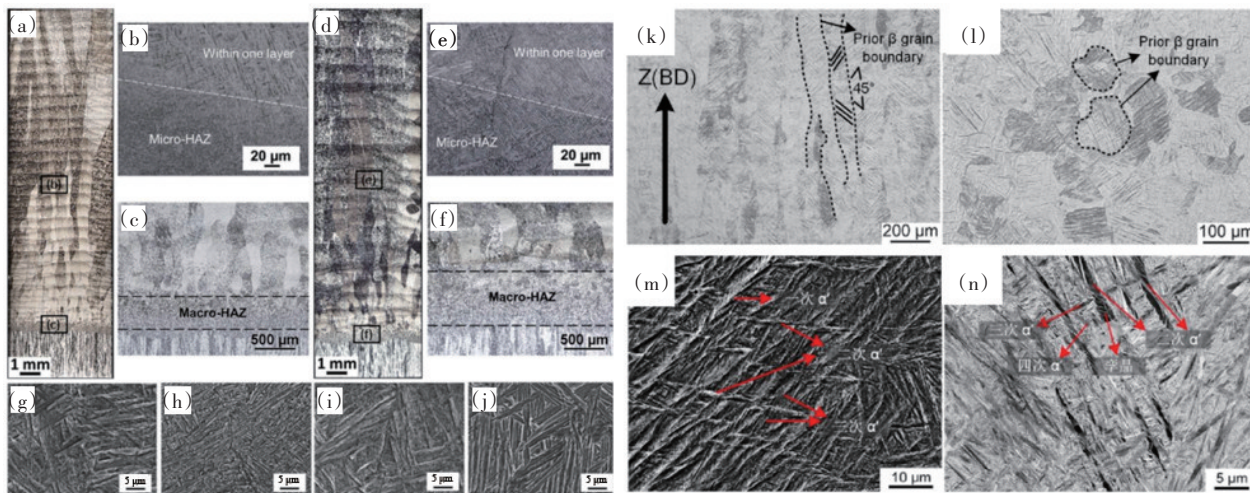
钛合金具有较高的比强度、良好的韧性、耐腐蚀性、耐高低温性、抗辐射等性能^[31-33], 是航空发动机重要的原材料之一, 主要应用在压气机盘/机匣/压气机叶片/高压气机转子等部件^[34]。近年来, 钛合金在航空发动机中的用量越来越多^[35], 不同牌号的钛合金, 根据相应的力学性能和服役温度, 在航空发动机机匣、风扇、高低压压气机等部分零件服役^[36-38]。传统铸造/锻造+机械加工的方法虽然实现了盘、叶片类零件的高精度加工, 但加工周期长、成本高、材料利用率低; 且由于机械加工技术存在一

定的局限性,零件结构形式的设计受到了限制^[35,39]。而增材制造技术可实现不规则型面(包括外部内部的构件加工),实现无模具小余量的零件加工,大大缩短了零件的试制周期,提高了材料的利用率,减少了零件的试制成本^[40]。此外,增材制造技术可实现设计引导制造、功能性优先设计、最优化设计等,大大提升了零件设计的自由度。因此,增材制造钛合金技术可广泛应用于航空发动机中的空心风扇叶片、空心风扇轮盘、涡轮叶片等零件研制。

3.1 微观组织特征

激光增材制造成形钛合金是一种典型的极端非平衡凝固过程,其中快速熔化和快速凝固行为完全偏离了常规制备工艺的平衡/近平衡凝固过程。因此,激光增材制造中存在非均匀的热塑性,非均匀的显微组织及相变等,容易在零件中形成 α' 、 α'' 、 ω 等亚稳态相。如图6(a)~(j)所示,LDED激光增材制造钛合金的沉积态组织中。基材与沉积物结合处除了存在明显较大范围的热影响区,如图6(c)、(f);还存在较小的热影响区,如图6(b)、(e);

其特征是沿沉积方向生长的初生柱状 β 晶粒,如图6(a)、(d);其高度可达10个熔覆层^[34]。在初生柱状 β 晶粒内,由于冷却速度快,熔池底部形成针状的 α' 组织,如图6(g)、(i);而在增材区顶部附近形成片状的 $\alpha+\beta$ 两相组织,如图6(h)、(j)。 β 晶界内有细小的针状马氏体 α' 组织,呈现一定的网篮组织形态。因此,激光成形钛合金的沉积态组织主要为柱状的初生 β 晶粒,晶内为细小针状的马氏体 α' 相,最终成品零件的显微组织高度依赖于沉积过程中的热循环和随后的热处理,可以通过控制固溶和时效温度、冷却速度等,并结合适当的热变形加工可以获得传统钛合金的等轴、双态、魏氏或网篮等典型显微组织。图6(k)~(n)是LPBF成形的TA15沉积态的显微组织^[41],钛合金LPBF沉积态组织是外延生长的柱状 β 晶粒,随激光扫描路径的变化,柱状晶的方向也会发生少许变化; β 晶粒内是细小针状的 α' 马氏体组织,这是 β -Ti在快速冷却速率时发生马氏体相变时产生的,如图6(m)、(n)所示。



低激光功率(a)、(c)、(g)、(h)和高激光功率(d)、(f)、(i)、(j)下LDED成形Ti-6Al-4V零件宏观及微观结构^[34];

纵/横截面的OM照片(k)、(l)和LPBF成形的TA15零件宏观及微观结构(m)、(n)^[41]

图6 LDED和LPBF成形钛合金零件宏观及微观结构

3.2 力学性能特征

激光增材制造工艺的快速熔化及快速凝固特性,可以获得细化及均匀化的微观结构、抑制成分偏析、形成较高的位错密度,进而有利于提高材料性能。但增材过程中非均匀的热塑性、非均匀的显

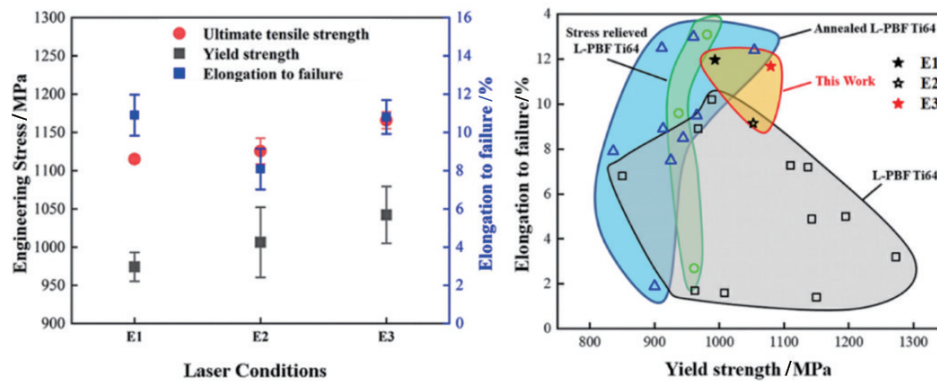
微组织以及相变等同时存在使材料存在较大的残余应力,又为增材制造过程中的质量控制带来了困难,表2^[42-43]分别列出了采用LPBF和LDED制备Ti-6Al-4V与传统锻造和铸造Ti-6Al-4V的力学性能。由表2可知,相较于传统锻件、铸件而言,采用

表2 激光增材制造钛及钛合金的力学性能

材料	工艺	显微结构	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Ti-6Al-4V	LPBF	α'	1140±10	8.2±0.3
Ti-6Al-4V	LPBF	$\alpha+\beta+\alpha'$	1046±6	9.5±1
Ti-6Al-4V	LPBF	$\alpha+\beta$	1040±30	12.5±0.5
Ti-6Al-4V	LPBF	Refined $\alpha+\beta$	1024	11.5
Ti-6Al-V4	LDED	Needlelike α'	1099±2	4.9±0.1
Ti-6Al-4V	Wrought	$\alpha+\beta$	≥895	≥10
Ti-6Al-4V	Cast	$\alpha+\beta$	835	5

LPBF 和 LDED 制备 Ti-6Al-4V 的抗拉强度优秀于铸件及锻件性能,伸长率优于铸件性能,接近甚至优于锻件性能。唐思熠等^[44]采用 LPBF 技术制备 Ti-6Al-4V 钛合金试样,并对微观组织、力学性能和致密化行为进行了分析研究。结果发现,激光功率从 360 W 增加到 400 W 时,致密度提高明显;在 400 W 后继续增加功率,致密度受激光扫描速度的影响较大,最优工艺参数下的试样质量远高于锻件标准。左士刚^[45]利用 TA15 钛合金球形粉末采用 DED 技术进行了 TC17 钛合金增材修复制造过程研究,研究了修复件组织特性与力学性能影响规律。结果表明,采用 DED 技术增材修复后的 TA15/TC17 修复件无焊接缺陷,修复件抗拉强度为 1029MPa。Zhao 等^[46]研究了体能量密度对采用 LPBF 工艺制备

Ti-6Al-4V 合金组织和力学性能的影响,拉伸试验结果表明,屈服强度、极限拉伸强度和断裂伸长率均随激光功率和速度的线性增加而增加,参数优化后,屈服强度约为 1042.2±37.1 MPa,总伸长率约为 10.8%±1.1%,两者之间达到了良好的平衡(图 7)。Liu 等^[47]使用 XCT 研究了 LPBF 制造的 Ti-6Al-4V 样品孔隙缺陷的空间分布和形态特征,深入讨论了工艺参数对孔隙缺陷的影响以及形成机理,并研究了 LPBF 制造的 Ti-6Al-4V 合金的体能量密度 (VED) 与力学性能之间的相关性。Mahamood 等^[48]采用 DED 技术进行了 Ti-6Al-4V/TiC 的功能梯度材料研究,研究结果表明,采用优化后工艺参数制造的功能梯度材料拥有更高的性能,硬度是基体硬度的 4 倍,高达 1200HV。



(a) 拉伸性能对比散点图

(b) LPBF Ti-6Al-4V 的室温拉伸性能与屈服强度的比较^[46]

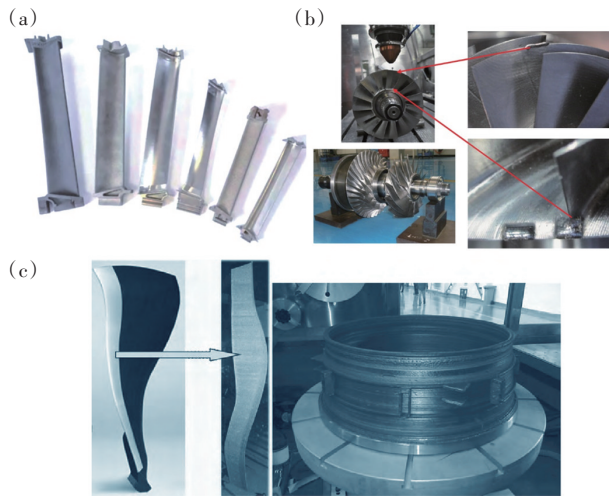
图7 LPBF成形Ti-6Al-4V拉伸性能

3.3 典型应用案例

高性能钛合金增材制造技术在航空航天领域的应用最早开始于美国 AeroMet 公司^[49],该公司是世界上第一家掌握钛合金构件激光增材制造并成功实现装机应用的企业,并于 2001 年开始小批量

为波音公司生产钛合金飞机零件。自“十五”开始,中国多个研究机构开展了激光增材制造钛合金的应用研究,包括工艺研究、力学性能控制、成套装备研发及工程应用关键技术,并取得了较大进展。GE 公司的子公司 Avio 公司利用电子束选区熔融成

形技术成功制造了TiAl航空发动机低压涡轮叶片,如图8(a)所示,在800℃屈服强度可达480 MPa,具有良好的抗蠕变性能^[50]。中国自“十五”开始,多个研究机构开展了DED工艺研究、力学性能学性能控制、成套装备研发及工程应用关键技术攻关,并取得了较大进展。中航工业北京航空制造工程研究所对某型号航空发动机钛合金斜流整体叶轮损伤部位进行了修复,如图8(b)所示,目前已顺利通过试车考核^[51]。图8(c)显示了GE公司依托西北工业大学LSF技术所制造的GE 90发动机复合材料宽弦风扇叶片钛合金进气边和高温合金机匣。其中,钛合金进气边长1000 mm,壁厚0.8~1.2 mm,最终加工变形仅0.12 mm,通过了GE公司的测试^[52]。



(a) Avio公司制造的TiAl基航空发动机空心叶片^[50]; (b) 采用DED修复的钛合金整体叶轮^[51]; (c) 西北工业大学为美国GE公司生产的钛合金进气边和高温合金机匣

图8 增材制造钛合金零件

4 增材制造高强钢及其应用

高强钢具有高的强度及韧性,被广泛应用于航

空、航天、动力冶金等领域。大型关键重载构件存在锻造难度大、对热加工要求高等问题,限制了其进一步发展和应用。增材制造技术可以实现金属构件的高性能精确快速成形,为高强度钢的制造提供了一条新途径。从节约能源、降低材料生产成本的方面考虑,利用增材制造技术制造高强钢仍然是未来的一个重要研究方向。高强钢可以大概被分为4个类别:高强不锈钢、低合金高强度钢、中合金高强度钢和高合金高强度钢。高强不锈钢中,较为代表的有沉淀硬化不锈钢、马氏体不锈钢和马氏体时效钢^[53],如表3所示。17-PH作为典型的沉淀硬化不锈钢,凭借第二相析出的强化作用,有着高强度、高耐腐蚀等优良性能,常见其应用在航空发动机各种精密零件上;马氏体不锈钢作为一种传统的可硬化铸造钢,例如Cr-Ni钢在经过淬、回火等热处理工艺后,可拥有良好的耐腐蚀性、高强度和高耐磨性,广泛应用于汽轮机叶片、大型发动机叶片和耐磨件等领域;对于马氏体时效钢,以18Ni300为例,其优异的强度、韧性、硬度、耐腐蚀性和耐磨损性,主要来源于固溶强化、相变强化和时效强化,在火箭和导弹的发动机及诸多领域都可见其应用。但高硬高强也同样为传统铸造工艺带来了不便,而增材制造技术则为该高强钢提供了一条新路径。

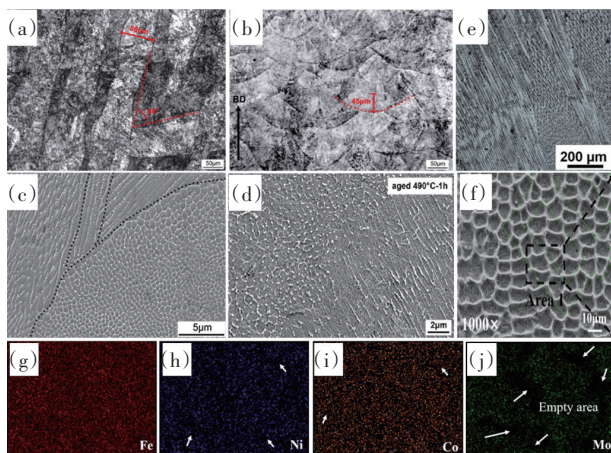
4.1 组织特点

增材制造具有与传统加工工艺不同的成形原理,其逐点、逐线、逐层的成形过程使得熔池在极短的时间内完成快速加热和冷却,因此具有非平衡凝固的特点,其组织特征也不同于传统的铸锻件。例如,由于激光增材制造技术的高冷却速度(LPBF: 为 $10^6\sim 10^8$ K/s^[54], LDED: $10^3\sim 10^5$ K/s^[55]),其制备的高强钢往往具有细化且均质化的微观组织特点。

表3 高强钢分类与其典型钢种

高强钢分类	高强不锈钢			低合金高强钢	中合金高强钢	高合金高强钢
	马氏体不锈钢	沉淀硬化不锈钢	马氏体时效钢			
典型钢种	2Cr13	15-5PH、17-4PH	18Ni300、M350	300M、AISI4140	H11、H13	A100、AF1410
用途	燃气轮机叶片	航空发动机紧固件 燃气轮机压气机叶片	航空发动机壳体	飞机起落架 航空高强螺栓	热作工具钢 航天工业部件	飞机起落架 外筒

图9(a)~(j)分别为LPBF和LDED制造的18Ni300样品微观结构图^[56],LDED下增材制造18Ni300的熔池尺寸明显更大,如图9(e)所示^[57]。较大的熔池尺寸以及较低的激光扫描速度,有利于在较低的冷却速率下凝固^[58]。LPBF铺粉打印样品中的微观结构(图9(c))比LDED处理样品中的微结构(图9(f))精细得多^[59]。对于打印态马氏体时效钢试样,SLM制造18Ni300呈现出非常致密的结构,几乎没有微缺陷。从图9(c)和(d)可以看出,SLM马氏体时效钢在不同时效时间下的微观结构显示出相似的模式,显示出具有非连续边界的晶胞结构。沉积态18Ni300的EDS面扫结果如图9(g)~(j)所示。Fe元素作为合金中的主要元素在所选区域分布均匀,在胞状晶与胞状晶枝晶壁上均无明显偏析。图9(h)~(j)EDS没有表现出Ni、Co、Mo等元素的偏析特征,说明其分布均匀。



(a)~(d)铺粉打印(LPBF)制造的18Ni300的光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)显微形貌^[56]; (e)送粉打印(LDED)制造的18Ni300的OM成像形态^[57]; (f) LDED制造的18Ni300的SEM显微形貌; (g)~(j) LDED处理18Ni300中的EDS面扫获得的元素分布图^[60]

图9 增材制造高强钢的典型微观结构形态和EDS图谱

高强钢主要依靠元素富集相和金属间化合物起到强化作用,例如 ϵ -Cu和 Ni_3Ti 等,这些相的尺寸很小,通常在 $10(\pm 2)$ nm,但在增材制造高温梯度下,这些强化相快速大量析出并分布弥散在各个区域^[53, 61]。如图10(a)所示,王海霖等^[62]在对SLM成形17-4PH析出相的扫描电镜结合能谱分析中发现,析出主要为球状含Cr为主的碳化物及少量Cu析出, ϵ -Cu多为纳米级颗粒。而 ϵ -Cu一般在时

效处理过程中形成,但SLM打印过程的热传递效应起到了类似时效处理的作用,促成了 ϵ -Cu的形成。如图10(b)和10(c)所示,Yan等^[63]在使用透射电子显微镜观察纳米结构和沉淀物分布时,发现了大量纳米颗粒,而这些纳米颗粒有利于固定位错线并提高SLM打印部件的强度。如图10(d)和10(f)所示,门正兴等^[65]在研究SLM成形18Ni300的冲击韧性发现,熔池在快速冷却下会产生大量黑色析出相斑点(Ni_3Mo 或 Ni_3Ti 等),随着激光扫描速度的增加而增多,并在载荷作用下阻碍晶界滑移,进而影响冲击韧性。对于马氏体不锈钢2Cr13,该材质制汽轮机叶片在通过LDED修复之后,其外观与表面质量都与原本无异甚至更佳。观察其显微组织发现,修复层由过饱和固溶体枝晶(Fe,C,Cr)和枝晶间碳化物(CrC)组成,合金强化后,修复层组织为过饱和固溶体枝晶(Fe,C,W,Cr)、网络状(Fe,C,W)共晶以及 Fe_3C 、 WC 和 W_2C 组成^[64]。这种修复层组织使得叶片修复后耐磨性能较修复前提高了不少,也变相提高了该叶片的使用寿命。

4.2 力学性能

经典马氏体不锈钢,以2Cr13为例,其良好的力学性能主要表现在良好的耐蚀性和耐磨损性能上,正如上文所提及的,在应用到增材制造领域后,其耐磨性能还有进一步提升^[64]。对于强化机制相似的沉淀硬化不锈钢和马氏体时效钢,其力学性能主要体现在高屈服强度和高抗拉强度上。作为第一代高强度不锈钢的典型钢种15-5PH和17-4PH,不论是铸态还是打印态,都有较为不错的屈服强度和极限拉伸强度^[66-68]。马氏体时效钢主要依靠在超低碳铁镍马氏体基体上析出金属间化合物沉淀相进行强化,具有非常优异的综合力学性能与加工工艺性能。其中18Ni300和M350由于其超高强度、超高韧性、优异的冷热加工性能和焊接性能,成为中美两国在军事、航天、核电和精密模具制造的主要用钢。Yan等^[63]研究了不同后处理对SLM成形C-X沉淀硬化不锈钢的力学性能的影响,固溶时效热处理将SLM不锈钢C-X钢样品的强度和硬度分别从343 HV0.2和1043 MPa提高到510 HV0.2和1610 MPa。Wei等^[69]在探究不同热处理对

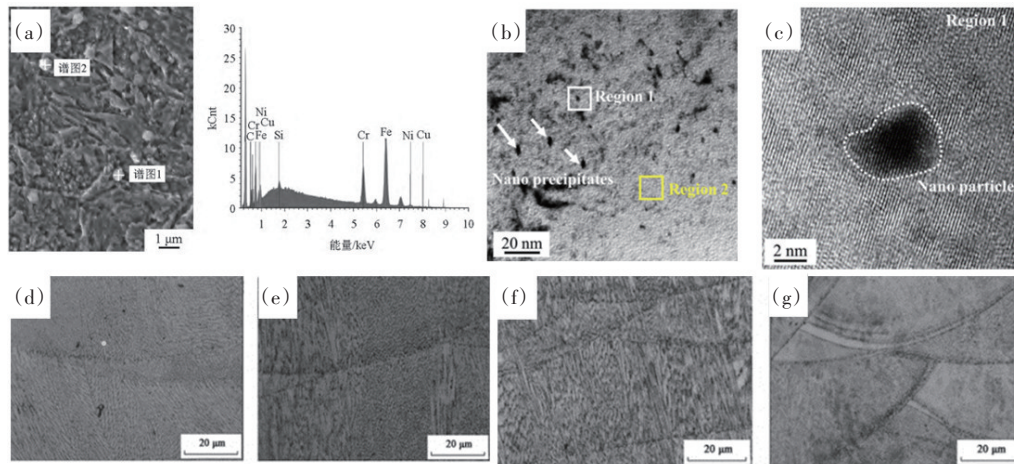


图 10 增材制造高强钢析出相微观组织图像

打印态 M350 力学性能影响时,得到了打印态对比热处理态的平均维氏硬度值和工程应力应变图。Yin^[56]等研究了时效温度和时效时间对 SLM 成形 18Ni300 的力学性能影响和摩擦性能影响。在 390°C 时效下欠时效和在 590°C 温度上过时效导致极限拉伸强度 (UTS) 降低。UTS 在时效 3 h 达到峰

值后降低,UTS 的增加伴随着延展性的降低。相比之下,延伸率 (EI) 呈现出相反的趋势,随着时效时间和时效温度的降低而减少。表 4 为不同增材制造工艺制造的打印态对比热处理态下沉淀硬化不锈钢和马氏体时效钢的屈服强度 (YS)、极限抗拉强度和延伸率。

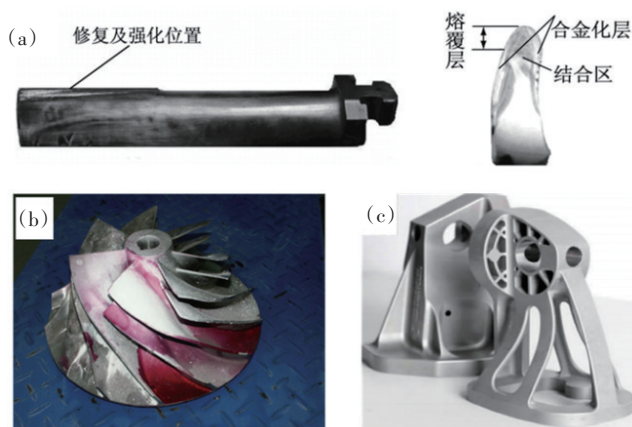
表 4 各钢种不同增材制造工艺制造的不同状态的马氏体时效钢的屈服强度、极限抗拉强度和延伸率

钢种类	制造工艺	状态	YS/MPa	UTS/MPa	EI	研究单位	文献
18Ni300	LPBF	As-fabricated	1214	1290±114	13.3%±1.9%	Katholieke Universiteit, Belgium	[70]
		Heat-treated	1998±32	2217±73	1.60%±0.26%		
18Ni300	DED	As-fabricated	—	959.2±20.2	0.8%—1.6%	Harbin Institute of Technology, China	[57]
		Heat-treated	—	1561.7±16.5	0.06%—0.12%		
15-5PH	SLM	As-fabricated	625	1143	21.5%	University of Science and Technology Beijing	[66]
		Heat-treated	1317	1496	14.4%		
15-5PH	DED	As-fabricated	—	1149	6.75%	University of Sheffield	[67]
		Heat-treated	—	969	13.66%		
17-4PH	SLM	As-fabricated	857	906	16.0%	西安建筑科技大学冶金工程学院	[68]
		HIP-SHT	1405	1419	16.0%		
M350	LPBF	As-fabricated	1159±15	1213±18	8.1±1.2%	Nanyang Technological University	[69]
	Solution-aging	2382±28	2443±33	2.1±0.3%			

4.3 典型应用

将拓扑优化技术与增材制造技术相结合,可以在保证结构材料优异综合性能的同时减轻其内部重量,进而实现飞机航空发动机和燃气轮机关键部

件的综合性能提升。例如,张伟等^[64]选用激光增材制造技术对汽轮机进行修复和强化,修复后的外观一致且表面质量更高,如图 11(a)所示。图 11(b)为中国西北工业大学凝固加工重点实验室^[71]利用



(a) 利用增材制造技术修复、强化汽轮机叶片^[64]; (b) 利用增材制造技术修复的 17-4PH 叶轮^[71]; (c) 增材制造的 A380 客机不锈钢支架^[72]

图 11 增材制造高强钢在两机领域的实际应用

增材制造技术修复的 17-4PH 叶轮,与原始材料相比,激光修复区不仅具有相似的显微硬度值(35~40 HRC),并且没有微孔和微裂纹。而且该部件能通过转速为 2 万 r/min 的旋转测试,并再次在使用中运行良好。增材制造技术在民用飞机零部件的构型优化更改方面也具备非常强的优势。欧洲宇航防务集团公司(EADS)将拓扑优化技术与增材制造技术相结合,为空客 A380 打印的高强不锈钢支架质量比传统铸件少约 40%,如图 11(c)所示,可实现单架机年运营费用等成本降低数万美元^[72]。

5 结论

航空发动机和燃气轮机的发展水平是一个国家综合国力、工业基础和科技水平的集中体现之一,更是国家安全和强国地位的重要战略保障。更高的航空发动机推重比以及燃气轮机单机功率也对内部结构件提出了更高的性能要求,这也为材料成形和加工工艺带来了更多的难题。增材制造技术结合拓扑结构优化方法,可以实现航空发动机及燃气轮复杂结构件的一体化快速成形,突破传统工艺的成形结构限制。其独特的增材工艺使材料利用率相对传统减材工艺大大提高,无模具性又缩短了制造周期,大大降低了制造成本,在国内外航空制造加工领域具有巨大的发展潜力,对航空工业的

发展具有重要的价值和意义。在近年国内外研究成果基础上,总结各类金属材料增材制的共性科学问题如下:

1) 新型增材制造技术。尽管增材制造技术在制备复杂结构件上有着独特的优势,增材制造技术依旧存在组织调控以及最终力学性能上的不足。为此,亟需对于现有增材制造设备进行优化和革新,包括激光光源、辅助能场以及与传统减材加工方法相结合等方面。

2) 增材制造微观组织调控。金属增材制造本质上是多个“逐点扫描—熔化—逐线搭接—逐层堆积”的长期循环往复过程。该过程包括微熔池的非稳态快速凝固,以及长时堆积过程中的多周期剧烈加热和冷却的短时热历史。这也直接导致了增材制造金属构件的独特显微组织结构,不同成形方向和区域内的组织均匀性及其综合力学性能。因此,亟需针对增材制造过程中微熔池在极端凝固条件下的组织及晶粒形态演化规律、在非稳态热循环机制下的微观组织演化及形成规律等现象开展深入研究。

3) 增材制造专用合金体系。如前文所述,增材制造合金独特的快速熔化及快速凝固过程可以获得异于传统工艺组织细化和成分均质化效果,进而获得优异的综合力学性能。目前商用增材制造用粉末均采用传统铸造、锻造及粉末冶金的合金元素成分,无法适用于增材制造的快速熔化凝固过程和非平衡成形过程。例如,大量铸造镍基高温合金和高强钛合金极易在增材制造过程中产生原因各异的微裂纹,进而影响其成形和力学性能。因此,亟需针对增材制造独特的高冷却速度、温度梯度以及非平衡热循环等特点,开发兼具可成形性和最终力学性能的增材制造专用合金粉末。

4) 增材制造过程稳定性。目前,增材制造成型零件的质量及其稳定性阻碍了其进一步开展实际工业应用。例如,在粉末床增材制造技术中,用高能激光束扫描熔化金属粉末产生残余应力记忆引起金属件的翘曲变形,最终影响成型金属件的尺寸精度及强度等性能。这也使得增材制造过程的材料—工艺—组织—性能关系往往难以准确把握,

形性的主动、有效调控较难实现。因此,基于人工智能技术,发展形性可控的智能化增材制造技术和装备、构建完备的工艺质量体系是未来增材制造面临的挑战之一。

参考文献(References)

- [1] Mouritz A P. Introduction to aerospace materials[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [2] Schafrik R, Sprague R. Gas turbine materials[J]. *Advanced Materials & Processes*, 2004, 162(5): 29–34.
- [3] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112–224.
- [4] 夏丹. 增材制造技术的发展与挑战[J]. *现代农机*, 2022(5): 122–124.
- [5] Volpato G M, Tetzlaff U, Fredel M C. A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of inconel superalloys[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102871.
- [6] 王艺锰. 定向能量沉积激光头一体化设计及3D打印制造[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [7] Long H B, Mao S C, Liu Y N, et al. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys—A review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 203–220.
- [8] Xia W S, Zhao X B, Yue L, et al. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 44: 76–95.
- [9] Li Y, Liang X, Yu Y, et al. Review on additive manufacturing of single-crystal nickel-based superalloys[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1(1): 100019.
- [10] Ikeda A, Goto K, Osada T, et al. High-throughput mapping method for mechanical properties, oxidation resistance, and phase stability in Ni-based superalloys using composition-graded unidirectional solidified alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 193: 91–96.
- [11] Xiao J H, Jiang W G, Han D Y, et al. Evolution of crystallographic orientation and microstructure in the triangular adapter of grain continuator of a 3rd-generation single crystal superalloy casting during directional solidification[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 898: 162782.
- [12] Tan C L, Weng F, Sui S, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 170: 103804.
- [13] Aprilia A, Wu N E, Zhou W. Repair and restoration of engineering components by laser directed energy deposition[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022: 206–211.
- [14] Gong G H, Ye J J, Chi Y M, et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: A review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 855–884.
- [15] Moeinfar K, Khodabakhshi F, Kashani-bozorg S F, et al. A review on metallurgical aspects of laser additive manufacturing (LAM): Stainless steels, nickel superalloys, and titanium alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 16: 1029–1068.
- [16] 王迪, 钱泽宇, 窦文豪, 等. 激光选区熔化成形高温镍基合金研究进展[J]. *航空制造技术*, 2018, 61: 49–60.
- [17] 刘泽程, 王国伟, 肖祥友, 等. 选择性激光熔化镍基高温合金的工艺优化[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(1): 81–88.
- [18] Wang R, Chen C Y, Liu M Y, et al. Effects of laser scanning speed and building direction on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 superalloy[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30: 103095.
- [19] Zhang L, Li Y T, Zhang Q D, et al. Microstructure evolution, phase transformation and mechanical properties of IN738 superalloy fabricated by selective laser melting under different heat treatments[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 844: 142947.
- [20] Hang P Y, Zhou X, Zhang W Q, et al. Effects of melt-pool geometry on the oriented to misoriented transition in directed energy deposition of a single-crystal superalloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 60: 103253.
- [21] Basak A, Acharya R, Das S. Epitaxial deposition of nickel-based superalloy René 142 through scanning laser epitaxy (SLE)[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 665–671.
- [22] Chen H, Huang G S, Lu Y Y, et al. Epitaxial laser deposition of single crystal Ni-based superalloy: Variation of

- stray grains[J]. *Materials Characterization*, 2019, 158: 109982.
- [23] Chen Z G, Li W J, Wang L, et al. Investigation on the hot crack sensitivity of a nickel-based single crystal superalloy fabricated by epitaxial laser metal forming[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 931: 167436.
- [24] Lu N N, Lei Z L, Yu X F, et al. Effects of melt convection on stray grain formation in single crystal superalloys during directed energy deposition[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 48: 102429.
- [25] Liu G, Du D, Wang K M, et al. Epitaxial growth behavior and stray grains formation mechanism during laser surface re-melting of directionally solidified nickel-based superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157325.
- [26] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic[J]. *Materials Science and Engineering*, 1984, 65: 75-83.
- [27] Gäumann M, Trivedi R, Kurz W. Nucleation ahead of the advancing interface in directional solidification[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, 228: 763-769.
- [28] Nie J W, Chen C Y, Liu L T, et al. Effect of substrate cooling on the epitaxial growth of Ni-based single-crystal superalloy fabricated by direct energy deposition[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 62: 148-161.
- [29] 陈娇, 罗桦, 贺戩, 等. 航天用镍基高温合金及其激光增材制造研究现状[J]. *精密成型工程*, 2023, 15(1): 156-169.
- [30] 张红梅, 顾冬冬. 激光增材制造镍基高温合金构件形性调控及在航空航天中的应用[J]. *电加工与模具*, 2020 (6): 10-24.
- [31] Biffi C A, Lecis N, Previtali B, et al. Fiber laser micro-drilling of titanium and its effect on material microstructure[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54: 149-160.
- [32] Zaefferer S. A study of active deformation systems in titanium alloys: Dependence on alloy composition and correlation with deformation texture[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 344 (1/2): 20-30.
- [33] 张新, 刘鸿羽, 车昶, 等. 钛合金低成本成形技术研究进展[J]. *铸造*, 2021, 70(10): 1141-1148.
- [34] Tan C, Weng F, Sui S, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application*, 2021, 170: 103804.
- [35] 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(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2009, 36 (12): 3204-3209.
- [36] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. *稀有金属*, 2006(6): 850-856.
- [37] 毛小南, 赵永庆, 杨冠军. 国外航空发动机用钛合金的发展现状[J]. *稀有金属快报*, 2007, 26(5): 1-7.
- [38] 刘书惠. 航空用钛合金的失效及其预防[J]. *稀有金属快报*, 2003, 22(10): 3.
- [39] 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.
- [40] 刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2014 (10): 62-67.
- [41] 蒋军杰. 激光选区熔化成形TA15钛合金工艺、组织演变与力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [42] 张婷, 陈素明, 刘焕文. TC4钛合金激光选区熔化制作与传统锻铸件的对比[J]. *科技创新导报*, 2020, 17(36): 91-93.
- [43] 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): 32-55.
- [44] 唐思熠, 房立家, 孙兵兵, 等. 激光选区熔化Ti6Al4V的工艺参数优化与显微组织[J]. *焊接*, 2019(10): 1-6.
- [45] 左士刚. TA15/TC17异质材料激光增材修复组织与性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [46] Zhao R, Chen C, Wang W, et al. On the role of volumetric energy density in the microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion Ti-6Al-4V alloy [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 51: 102605.
- [47] Liu W, Chen C, Shuai S, et al. Study of pore defect and mechanical properties in selective laser melted Ti6Al4V alloy based on X-ray computed tomography[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 797: 139981.
- [48] Mahamood R M, Akinlabi E T. Laser Metal deposition of Ti6Al4V/TiC composites using optimized process parameters[J]. *Lasers in Engineering*, 2016, 35(1/2/3/4): 139-150.

- [49] 梁朝阳, 张安峰, 梁少端, 等. 高性能钛合金激光增材制造技术的研究进展[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 452-458.
- [50] 孙世杰. 增材制造方法生产的TiAl合金零件将被应用于飞机发动机涡轮叶片[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(1): 65-66.
- [51] 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.
- [52] 王强, 孙跃. 增材制造技术在航空发动机中的应用[J]. 航空科学技术, 2014, 25(9): 6-10.
- [53] 张超, 苏杰, 梁剑雄, 等. 超高强度不锈钢沉淀行为研究进展[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 48-61.
- [54] Kürsteiner P, Wilms M B, Weisheit A, et al. Massive nanoprecipitation in an Fe-19Ni-xAl maraging steel triggered by the intrinsic heat treatment during laser metal deposition[J]. Acta Materialia, 2017, 129: 52-60.
- [55] Wang L, Felicelli S D, Craig J E. Experimental and numerical study of the LENS rapid fabrication process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(4): 041019.
- [56] Yin S, Chen C Y, Yan X C, et al. The influence of aging temperature and aging time on the mechanical and tribological properties of selective laser melted maraging 18Ni-300 steel[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 592-600.
- [57] Yao Y Z, Huang Y H, Chen B, et al. Influence of processing parameters and heat treatment on the mechanical properties of 18Ni300 manufactured by laser based directed energy deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 171-179.
- [58] Tan C, Li S, Essa K, et al. Laser powder bed fusion of Ti-rich TiNi lattice structures: Process optimisation, geometrical integrity, and phase transformations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 141: 19-29.
- [59] 金玉花, 金赞, 卢学天, 等. 热处理对选区激光熔化18Ni300成形组织性能的影响[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 394.
- [60] 郑步云, 陈鑫, 雷剑波, 等. 热处理对激光熔化沉积18Ni300马氏体时效钢微观组织和力学性能的影响[J/OL]. 表面技术, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20220513.1045.013.html>.
- [61] 刘振宝, 梁剑雄, 苏杰, 等. 高强度不锈钢的研究及发展现状[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 549-557.
- [62] 王海霖, 赵占勇, 白培康, 等. SLM成形17-4PH高强钢组织与性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 41(12): 1559-1563.
- [63] Yan X C, Chen C Y, Chang C, et al. Study of the microstructure and mechanical performance of C-X stainless steel processed by selective laser melting (SLM)[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 781: 139227.
- [64] 张伟, 姚建华, 董辰辉, 等. 汽轮机叶片冲蚀区的激光修复与强化[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 967-971.
- [65] 门正兴. 工艺参数对激光选区熔化成形18Ni300钢冲击韧性的影响[J]. 锻压技术, 2022, 47(8): 123-129.
- [66] Kim K S, Yang S, Kim M S, et al. Effect of post heat-treatment on the microstructure and high-temperature oxidation behavior of precipitation hardened IN738LC superalloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 76: 95-103.
- [67] Tapoglou N, Clulow J, Patterson A, et al. Characterisation of mechanical properties of 15-5PH stainless steel manufactured through direct energy deposition[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2022, 38: 172-185.
- [68] 刘世锋, 魏钢, 王岩, 等. 增材制造17-4PH马氏体不锈钢研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(6): 15-25.
- [69] Wei S, Kumar P, Lau K B, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 2.4 GPa grade maraging steel fabricated by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2022, 59: 103190.
- [70] Kempen K, Yasa E, Thijs L, et al. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 255-263.
- [71] Huang W D. Research and development of laser additive manufacturing in northwestern polytechnical university [C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Orlando: Laser Institute of America, 2009: 240-247.
- [72] 常坤, 梁恩泉, 张韧, 等. 金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3176-3182.

Research progress and prospect of additive manufacturing of key materials for aeroengines and gas turbines

CHEN Chaoyue, WANG Jiang, WANG Ruixin, ZHU Xiongjin, ZHAO Wang, CAI Jianan, REN Zhongming

State Key Laboratory of Advanced Special Steels, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract Additive manufacturing technology can break through the processing and design limitations of traditional processes and realize integrated forming of high-performance parts with complex structures. It has great application potential in aero engines and gas turbines. In this paper, for three types of alloys, including nickel-based superalloys, titanium-based alloys, and high-strength steels, the microstructure characteristics and control methods of laser processing parameters, composition modification, and external field are reviewed at first. Then the typical characteristics and comparison of mechanical properties are summarized, which provide an in-depth understanding of the mapping relationship between process parameters-microstructure-mechanical properties of additive manufacturing alloys. Finally, the application status and typical cases of additive manufacturing of the above materials in key components are introduced. In addition, this paper also looks ahead at the new additive manufacturing technology, microstructure control technology, special alloy composition, and research on the process stability for key components in the field of aero engines and gas turbines, which can further promote the application of additive manufacturing technology.

Keywords additive manufacturing; jet engine; gas turbine; microstructure; mechanical property ●



(责任编辑 卫夏雯)