

基于结构-制造一体化的增材制造 典型缺陷工程抑制方法

伏 宇, 张少平, 陈玉龙, 田 伟, 郭沛怡

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 增材制造技术以逐层堆积实现复杂结构近净成型的优点, 在航空发动机领域具有广阔的应用前景。随着增材制造燃油喷嘴在航空发动机中得到持续的应用验证, 不同尺度和类型的制造缺陷引发的的问题日益凸显, 如微观尺度的孔隙缺陷超标、介观尺度的裂纹导致的荧光线性显示、宏观尺度的表面粗糙引发的高周疲劳开裂等。系统分析了增材制造工艺过程, 发现增材制造缺陷的产生与成型过程中的温度场、应力场和物质运动场密切相关。增材制造工艺参数的优化应降低温度梯度、缓解应力集中、限制物质运动, 以减少制造缺陷产生。剖析了多种增材制造燃油喷嘴缺陷工程抑制措施, 发现零件结构锁定状态下的制造参数优化对缺陷抑制的效果不佳, 而以设计为主导的结构-制造一体化方法是实现增材制造零件缺陷抑制从“可用”向“好用”转变的重要工程手段。为此, 在零件结构设计中即应考虑增材制造温度场发展过程、应力场影响因素、物质运动驱动来源等; 通过优化零件结构细节、设置关键后处理工艺需求结构窗口、调整打印支撑方案等结构-制造一体化方法, 可显著提升零件的制造工艺性, 大幅降低缺陷发生率, 提升增材制造零件的工程可用性。

关键词: 航空发动机; 增材制造; 结构-制造一体化; 典型缺陷; 物理场

中图分类号: V261; V232.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)03-0001-13

DOI: 10.3724/j.GTER.20260021

An engineering approach to suppress typical defects in additive manufacturing based on structure-manufacturing integration

FU Yu, ZHANG Shaoping, CHEN Yulong, TIAN Wei, GUO Peiyi

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: Additive manufacturing (AM) technology, with advantage of achieving near-net-shape fabrication of complex structures through layer-by-layer material deposition, holds broad application prospects in the field of aero-engines. As additively manufactured fuel nozzles continue to be applied and verified in aero-engines, issues arising from manufacturing defects with various scales and types have become increasingly prominent. Examples include excessive porosity at the micro-scale, fluorescent linear indications caused by cracks at the meso-scale, and high-cycle fatigue cracking induced by surface roughness at the macro-scale. With systematic analysis of the AM process, it is found out that the formation of defects is closely related to the temperature field, stress field, and material flow field during the forming process. Optimization of AM process parameters should aim to reduce temperature gradients, alleviate stress concentrations, and constrain material movement to minimize defects. Analysis of multiple engineering cases involving defect suppression in additively manufactured fuel nozzles reveals that optimizing manufacturing parameters under a fixed part structure often yields limited results. In contrast, a

收稿日期: 2026-01-29

基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2023-024)

作者简介: 伏 宇(1973-), 男, 四川阆中人, 研究员, 硕士, 主要从事航空发动机设计与研究。

引用格式: 伏 宇, 张少平, 陈玉龙, 等. 基于结构-制造一体化的增材制造典型缺陷工程抑制方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2026, 39(3): 1-13. FU Yu, ZHANG Shaoping, CHEN Yulong, et al. An engineering approach to suppress typical defects in additive manufacturing based on structure-manufacturing integration[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(3): 1-13.

design-led structure-manufacturing integration approach was identified as a critical engineering method to transfer AM parts from being “usable” to “highly reliable”. Therefore, considerations such as the evolution of the temperature field during additive manufacturing, influencing factors of the stress field, and driving sources of material movement should be incorporated into the structural design phase. Through methods such as optimizing structural details, defining structural windows for key post-processing requirements, and adjusting support strategies, the manufacturability of parts can be significantly enhanced, the defect occurrence rate can be substantially reduced, and the engineering applicability of additively manufactured components can be improved.

Key words: aero-engine; additive manufacturing; structure-manufacturing integration; typical defects; physical field

0 引言

增材制造技术因其具有结构可达性高、对复杂结构设计响应灵活等特点,在航空航天领域应用日益广泛^[1-4]。激光粉末床熔融增材制造技术是目前航空发动机制造领域应用最广泛的技术之一,在以发动机燃油喷嘴为典型代表的复杂薄壁和内部流道结构件成型方面具有显著优势^[5]。近年来,以拓扑优化为代表的先进结构设计方法快速发展,结合增材制造独特的工艺优势,在航空发动机领域逐渐兴起结构功能一体化的研发理念,推动了增材制造技术在发动机中的应用,从单一的结构件和功能件向结构功能一体化构件拓展,进一步促进了增材制造技术在航空发动机中的工程应用^[6-9]。然而,随着增材制造技术在航空发动机领域中的应用日益广泛,工程实践表明逐层堆积成型方式易产生缺陷,对制件性能和服役可靠性带来显著的不利影响,并已成为制约增材制造构件工程应用的关键问题之一。

本文从增材制造过程典型物理场势角度出发,围绕成型过程中金属熔化凝固、熔池流动、构件应力等多物理场耦合过程进行分析,归纳增材制造典型缺陷产生的核心物理场势机理;结合增材制造燃油喷嘴的缺陷抑制工程实例,分析研讨增材制造缺陷产生的物理场势特征及其工程抑制方法。研究结果以期对增材制造技术的工程应用提供支撑。

1 增材制造典型缺陷产生的核心物理场势

1.1 增材制造过程的关键物理场势

增材制造技术在航空发动机领域中的应用,具体包括以涡轮叶片为典型代表的结构件、以燃油喷嘴为典型代表的功能件以及抗冲击点阵结构风扇叶片等结构功能一体化构件。图1示出了增材制造技术在航空发动机领域的应用趋势。

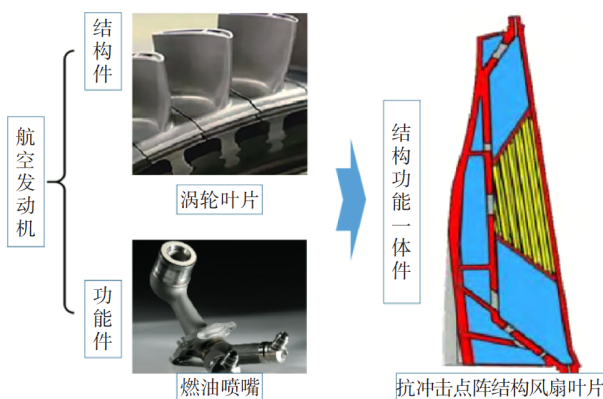


图1 增材制造技术在航空发动机领域的应用趋势

Fig.1 Application prospects of additive manufacturing in aero-engines

燃油喷嘴作为航空发动机中应用增材制造技术最早的复杂零件,因制造缺陷引发了多起问题,包括薄壁结构位置易出现未熔合等孔隙类缺陷、结构转接位置易出现裂纹缺陷、悬垂面的原始增材表面粗糙度较差等,如图2所示。针对这些缺陷,制造方开展了大量制造工艺参数优化研究,但仍无法显著降低缺陷发生率。分析发现,上述典型缺陷的出现与燃油喷嘴的局部结构特征高度关联,这引发了结构设计人员对当前单向的结构设计理念的反思,开始探索零件功能性能需求与制造工艺性相融合的结构-制造一体化设计方法。

在增材制造过程中,金属粉在极短时间内经历熔化与凝固过程,涉及复杂且剧烈的能量转化、传递及场势相互作用等物理过程^[10]。以激光粉末床熔融增材制造为例,成型过程的物理过程包括能量吸收与热传递、粉末颗粒熔化、熔池蒸发气化反冲、颗粒运动与液滴飞溅、熔池流动与凝固、固态区冷却收缩等^[6]。上述复杂物理过程可进一步归纳为温度

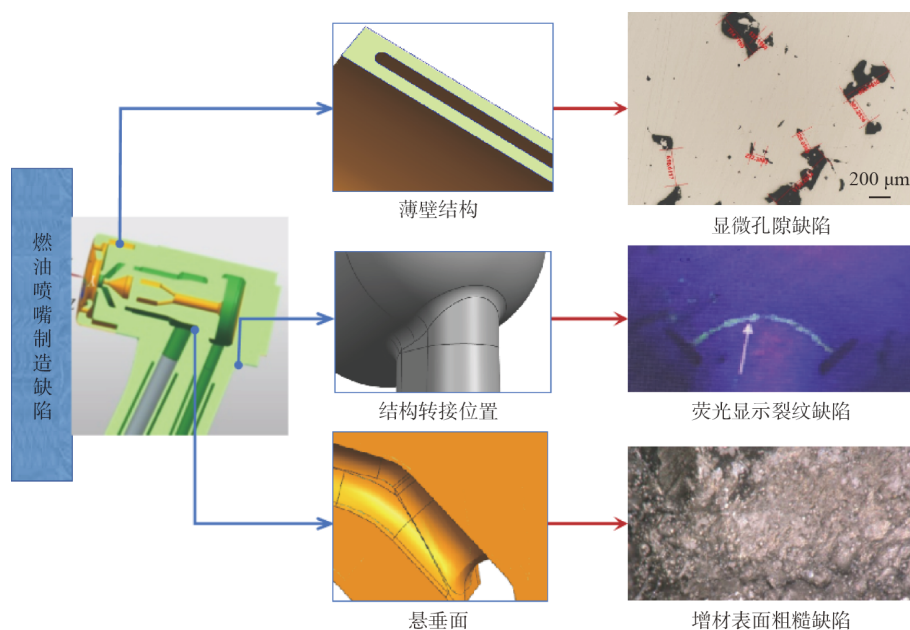


图2 增材制造燃油喷嘴中的缺陷与局部结构特征

Fig.2 Defects and local structural features in an additively manufactured fuel nozzle

场、应力场和物质运动场等典型物理场势。这些物理场在成型过程中相互耦合、共同演化,最终导致增材制造构件内部形成气孔等微观缺陷以及裂纹、层间开裂等介观缺陷,同时也可能引发构件表面粗糙、翘曲变形等宏观缺陷^[11],如图3所示。

温度场是增材制造中最主要的物理场之一。激光束、电子束等热源作用于材料时,可使局部区域在极短时间内迅速升温,形成高温熔池,随后经历快速冷却与凝固过程。温度场的空间分布及其随时间的演化特征,直接影响材料的熔化、凝固和析出行为,进而决定最终构件的成型质量和服役性能。应力场是增材制造过程中由于温度梯度大且分布不均,引起构件非均匀热收缩而在内部形成的残余应力场。

应力场的存在是导致零件翘曲变形、开裂等缺陷的直接原因之一。物质运动场是增材制造过程多因素耦合作用下最复杂的物理场,如熔池流动、颗粒/液滴喷射、气泡运动等物质运动现象。这些物理场在增材制造过程中相互关联、耦合作用,并直接受到增材制造工艺的影响。若工艺选取不当,将导致制造过程熔池流动稳定性恶化、制件内应力积累加剧,从而引发制件内部产生不同尺度和类型的缺陷^[7,12-20],如图4所示。

1.2 孔隙缺陷的核心物理场势

常见的孔隙类缺陷包括气孔和未熔合孔。在增材制造制件成型过程中,孔隙类缺陷的形成与熔池动态行为密切相关,其产生与演化在很大程度上受

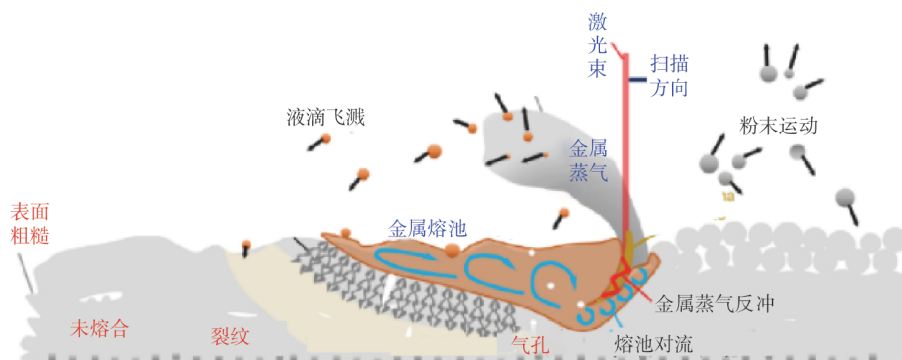


图3 增材制造过程的物理过程与缺陷

Fig.3 Physical processes and defects in additive manufacturing

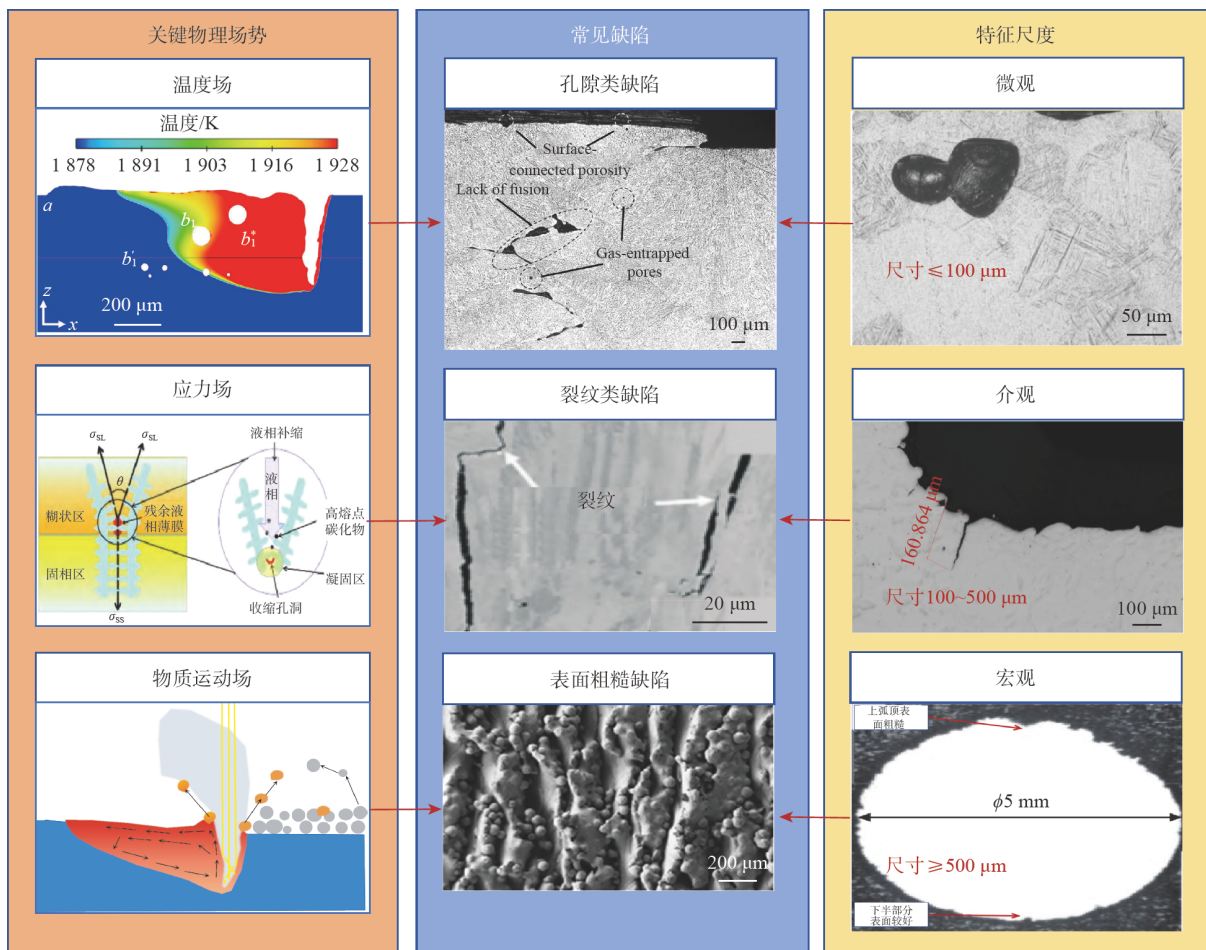


图4 金属增材制造常见缺陷与物理场势

Fig.4 Common defects and physical field potentials in metal additive manufacturing

熔池形态稳定性和瞬态行为特征的影响^[21-23]。熔池温度场发展变化速率高达100 000 K/s,熔池形成至凝固时间为毫秒量级。金属粉末表面吸附的环境气体或空心粉末中包含的气体在粉末熔化后聚集在熔池中形成气泡,当气体逃逸不及时而被凝固前沿捕获时,就会在构件中形成冶金气孔。匙孔气孔是增材制件中另一种常见的气孔缺陷^[16-19]。在增材制造过程中,激光束处于持续移动状态,前行扫描激光使得匙孔表面反冲压力呈现前匙孔壁压力高、后匙孔壁压力支撑不足的非稳定状态。在此条件下,前匙孔壁由于更高的蒸气压力形成“迷你匙孔”突起;后匙孔壁由于蒸气压力降低不足以支撑熔池,导致壁面向前坍塌,坍塌区域与前壁“迷你匙孔”突起合并,形成新生匙孔,同时包裹气体在熔池中生成气泡。匙孔气泡位于熔池底部,形态不一、体积较大,尺寸约为10~50 μm ^[7],如图5所示。未熔合缺陷主要成因是能量束功率不足,熔池区域金属粉末未完

全熔融;或者扫描路径之间熔池重叠不足、熔池深度不够,导致层间出现未熔合区域形成缺陷。

在增材制造过程中,孔隙类缺陷的产生与能量输入下的熔池形态密切相关。具体而言:熔池的宽度和深度由温度场中的固液相线决定;金属蒸发反冲压力由激光能量吸收和蒸发散热过程决定;匙孔状态由反冲压力和受温度直接影响的表面张力之间的动态平衡决定;熔池流动由不同区域温度梯度引起的马兰戈尼效应驱动;熔池中气泡运动受到熔池流场的直接控制。从上述分析可以得出,增材制造孔隙缺陷的形成虽然受到能量输入、熔体流动、气体行为等多物理场耦合作用影响,但在多数关键演化过程中温度场起主导作用,是孔隙类缺陷产生的核心物理场势。

温度场动态失衡会导致熔池中温度和流动行为不稳定,引起熔池波动、飞溅等现象,进而导致孔隙类缺陷产生。由熔池能量守恒方程可知,激光能量

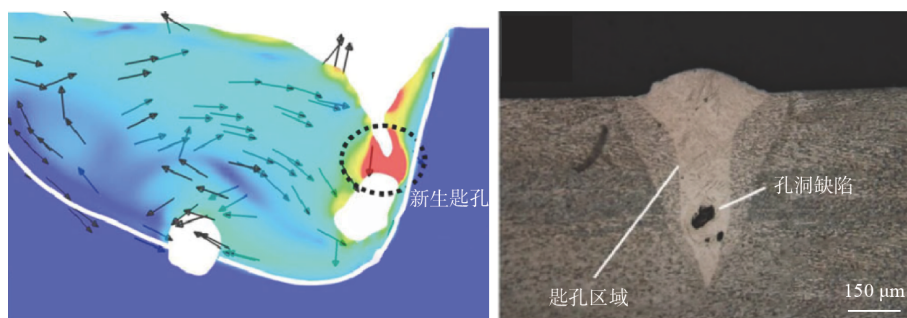


图5 温度场引发的孔隙类缺陷

Fig.5 Porosity defects induced by the temperature field

输入和瞬态熔池热交换边界条件是维持瞬态熔池温度场动态稳定的关键因素。激光能量输入主要通过控制激光能量密度和扫描速率等制造工艺参数,使熔池能够稳定维持对激光能量的吸收。熔池热交换边界条件则与熔池周边物性状态密切相关,未固化的粉末状态和已固化的实体状态对熔池热量散失作用差异巨大。因此,当熔池周边的物性发生突变(如打印制件边缘区域),瞬态熔池温度场易发生动态失稳而产生孔隙缺陷。图6给出了在增材制造密集薄壁结构中,结构边缘和分支连接处气孔缺陷大量出现的实例。该实例共统计了636个气孔,最小尺寸约为4 μm ,最大尺寸约为100 μm ,平均尺寸约为15 μm ,平均截面深度为200 μm 。气孔多为近圆形或不规则多边形,呈现非均匀分布特征,具有局部聚集、整体弥散的特点。

在工程实际中,应从制造工艺参数优化和制件结构优化两方面提出孔隙类缺陷的抑制措施。在结构设计上,应尽量避免大量薄壁区域连续出现,减少制备中熔池边界条件的变化频率。若因构件功能性能需求而必需的薄壁结构,也应结合增材制造过程中参数优化和成型实际情况进行结构-制造一体化设计,寻求设计需求与工程可实现性的平衡。

1.3 裂纹缺陷的核心物理场势

激光增材制造过程中的裂纹形成是材料本征特性与极端非平衡工艺条件下多物理场耦合作用的结果。以激光粉末床熔融增材制造为例,成型过程中持续、快速的多层热循环会导致构件内部应力不断积累,当材料在相应温度与组织状态下的开裂抗力不足以抵抗内部拉应力时,便会产生裂纹缺陷。材料开裂抗力降低与温度场及成型过程中材料的微观组织状态密切相关。在增材制造过程中,熔池凝固

或近凝固的高温阶段是材料开裂抗力显著降低的关键阶段,在该阶段产生的裂纹称为热裂纹^[24-25];冷却至较低温度后,甚至在制造完成后的存放或热处理过程中出现的裂纹通常称为冷裂纹。冷裂纹具有一定的延迟特性,主要包括氢致裂纹和再热裂纹/应变时效裂纹^[26-27]。构件内部应力的形成与成型过程中的热历史叠加以及构件结构形式密切相关。一般而言,新沉积层的应力状态以拉应力为主,而位于其下方的沉积层的应力状态以压应力为主。随着多层成型过程的不断叠加,最终易导致制件及基板翘曲变形,尤其是薄壁结构变形倾向最大,如图7所示^[28]。在增材制造工程应用中,一般采用添加辅助支撑的方式限制成型过程中的结构变形。然而,不合适的辅助支撑也可能导致结构内应力进一步增大,加大裂纹缺陷产生的概率。

无论是热裂纹还是冷裂纹,增材制造裂纹缺陷产生的内在本质是材料开裂抗力与构件内部应力之间的失衡。当局部拉应力超过相应温度与组织状态下的开裂抗力时,裂纹便会萌生并扩展,因此应力场是裂纹类缺陷产生的核心物理场势。增材制造过程中的应力场包括不均匀温度场引起的热应力以及结构约束应力等。在工程实际中,通过制造摆放角度优化、基板预热、适当的支撑接触面积设计,可降低制造过程的温度梯度并减缓冷却速度,从而降低热应力^[29]。此外,合理的支撑在兼顾制件成型性和变形控制的需求下,可进一步调控成型过程中的结构约束应力,减少裂纹缺陷产生。构件结构优化是减小成型过程应力的另一种措施。研究表明,热应力在结构突变处及支撑连接处高度集中^[30]。因此,结构设计人员应在结构突变处设计合适的转接结构,并在设计要求中明确对增材制造支撑结构的可接受

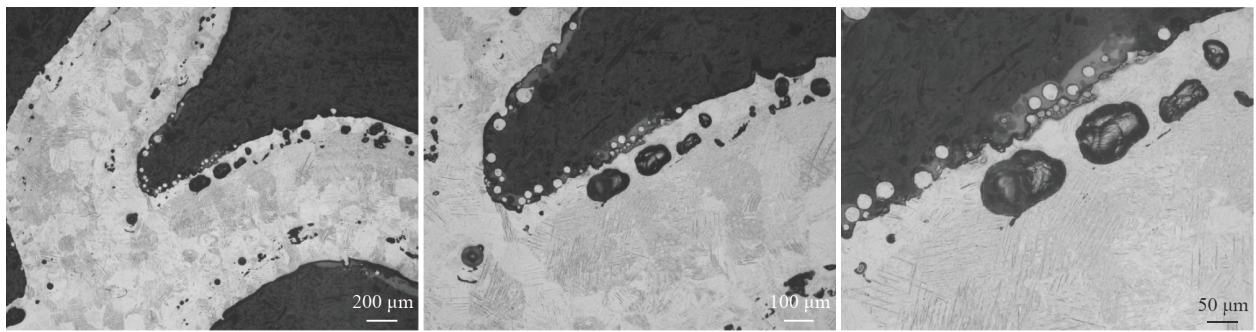


图6 薄壁结构近表面密集分布的匙孔气孔缺陷

Fig.6 Densely distributed keyhole porosity defects near the surface of a thin-walled structure

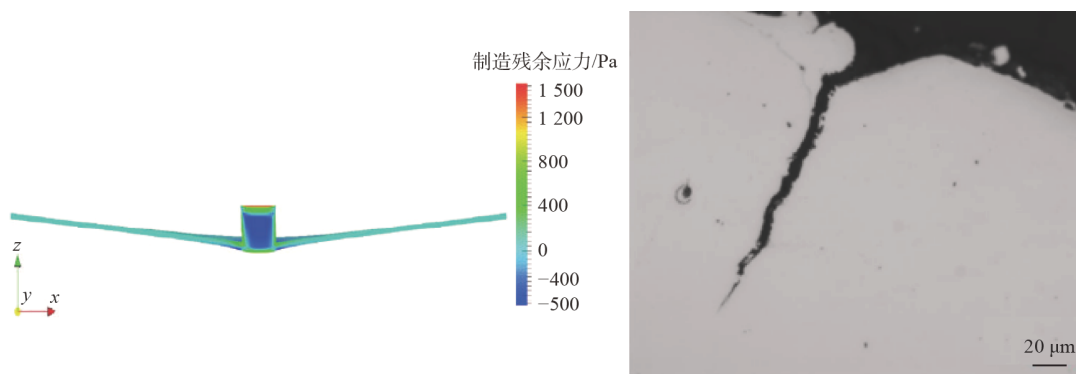


图7 应力场导致的裂纹缺陷

Fig.7 Crack defects induced by the stress field

要求,实现构件的结构-制造一体化设计。

1.4 表面粗糙缺陷的核心物理场势

在工程应用中,增材制造构件在成型完成后通常需要通过机械加工来实现零件的最终服役状态。因此,制件表面往往存在难以或无法进行后续加工的原始成型表面。对于燃油喷嘴等具有复杂内流道结构的航空发动机关键构件,其内部流道表面受结构尺寸和空间约束限制,往往无法采用常规机械加工手段进行有效处理,其表面形貌和粗糙度水平直接由增材制造成型过程决定。在增材制造过程中,由于熔池流动、液滴飞溅以及粉末运动等物质运动行为复杂且具有较强瞬态特征,易在制件表面形成黏粉、熔道球化和台阶效应等典型表面粗糙缺陷^[31-33],如图8所示。

构件结构特征同样会对成型表面质量产生显著影响。其中,表面倾斜角是影响表面粗糙度水平的关键几何因素之一。表面倾斜角指零件表面切面外侧与水平面之间的夹角,如图9所示。在不同倾斜角条件下,成型表面的粗糙度特征存在明显差异。研

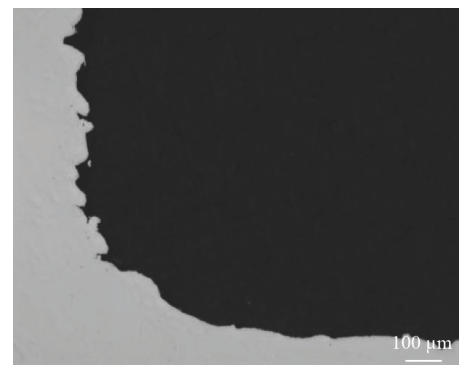


图8 增材制造中的原始表面粗糙度
Fig.8 As-fabricated surface roughness
in additive manufacturing

究表明,当倾斜角小于 45° 时,表面粗糙度随倾斜角减小而急剧上升^[34]。对于燃油喷嘴等流路类构件,其内流道内壁及横向孔等部位普遍存在“上弧顶”区域。该区域在增材制造过程中属于典型的小倾斜角甚至近似悬垂表面,成型后表面粗糙度显著增大。相反,当倾斜角大于 45° 时,熔池在层间具备更充分的实体支撑条件,层间熔合质量明显改善,成型表面

粗糙度显著降低。倾斜角对表面粗糙度的影响机理主要源于,不同倾斜角条件下熔池边界所处的物质约束条件存在本质差异。在制件表面成型过程中,熔池下方的边界物质主要由松散粉末层和已成型实体共同构成。其中,松散粉末层对熔池形态演化几乎不提供有效约束,而实体固-液界面对熔池具有一定的几何与热学约束作用。当倾斜角较小时,熔池下层主要由松散粉末支撑,熔池处于弱约束甚至近似无约束状态,在表面张力作用下形成最小表面的球形状态,引起表面球化,进而造成表面粗糙度恶化^[18];同时,熔池在重力和毛细作用下向下渗漏至粉末层中,黏附未熔化粉末,进一步加剧表面黏粉缺陷的形成,如图9所示。

增材制造件表面粗糙缺陷的产生与成型工艺参数和制件结构特征密切相关。无论是液滴飞溅后的二次沉积,还是粉末浮空迁移、熔池球化以及液态金属向粉末层渗漏,其本质均表现为成型过程中熔池及周围物质在弱约束条件下发生的非受控运动行为。因此,尽管表面粗糙缺陷的表征形式多样,但其

直接成因均可归结为金属液滴、粉末及熔池在形态演化过程中所涉及物质运动过程,如图10所示。基于此,可以认为物质运动场是增材制造表面粗糙缺陷产生的核心物理场势。

对表面粗糙缺陷的抑制,也应从控制增材制造过程中的熔池流动稳定性以及液滴飞溅、粉末迁移等物质运动行为的角度进行探讨。可通过降低激光功率、减小激光束尺寸及采用较小粒径粉末等工艺参数优化手段,降低熔池内瞬时能量波动幅度,从而获得更加稳定的熔池流场和更加温和的粉末运动状态,进而缓解外表面分散分布的飞溅和黏粉缺陷的形成。

燃油喷嘴等流路类零件的内流道区域在结构上不可避免地存在成型倾斜角极小甚至近似悬垂的区域。这类区域在增材制造过程中处于典型的弱约束成型状态,易发生粉末黏附和熔池球化等表面粗糙缺陷。基于前文对表面粗糙缺陷物质运动场主导机理的分析,针对上述区域,仅通过常规工艺参数优化手段对表面粗糙度进行改善的效果通常较为有限。

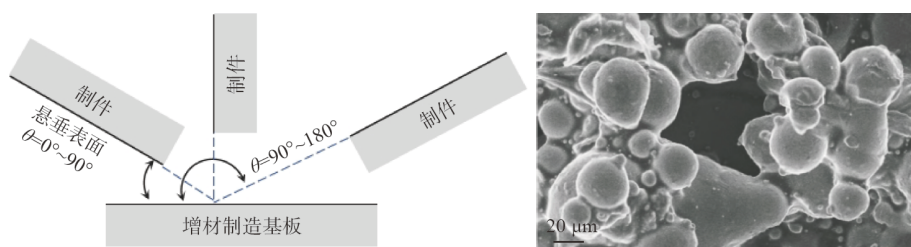


图9 激光选区熔化悬垂表面示意及形貌

Fig.9 Schematic and morphology of overhanging surface in selective laser melting

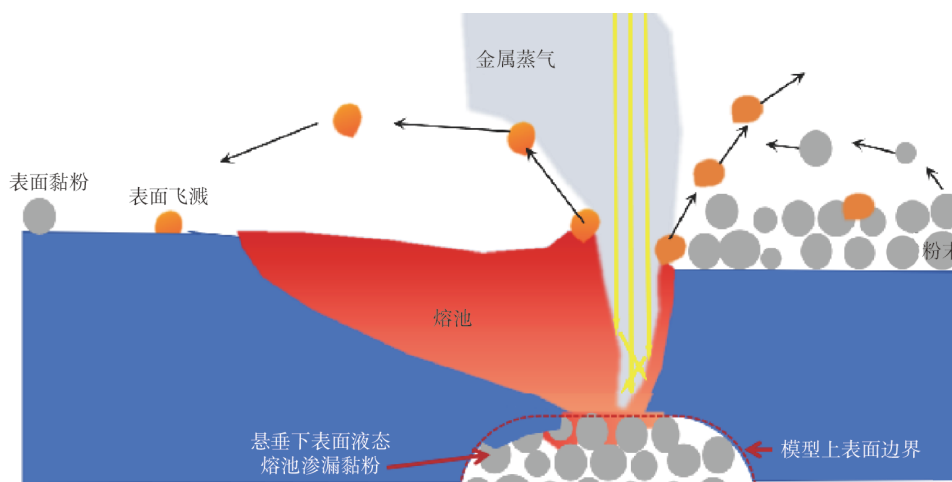


图10 物质运动场导致的表面粗糙缺陷

Fig.10 Surface roughness defects induced by the material flow field

因此,在工程实践中,通常需要采用磨粒流等内流道后处理工艺对表面质量进行进一步改善。此外,从结构设计源头对内流道型面进行优化,同样是抑制表面粗糙缺陷的有效途径。例如,将圆形内流道上半部分改为倾斜角约为 45° 的异形截面,可显著减少极小倾斜角区域的面积,从而降低弱约束成型区域的比例,缩小表面粗糙缺陷的分布范围,最终改善制件的整体成型质量。

2 缺陷工程抑制方法实例

2.1 制造支撑结构优化抑制裂纹缺陷

对某增材制造燃油喷嘴制件开展荧光检测,喷嘴头部与杆部转接倒圆区域出现线性荧光显示,如图11所示。针对该位置进行解剖取样并开展金相检查,确认转接倒圆区域存在裂纹缺陷。

为剖析断口位置自由表面弱连接产生的机理,采用数值仿真对燃油喷嘴成型过程中应力场进行分析。结果表明:裂纹所在区域存在显著的残余应力集中,其最大残余应力约为793 MPa,高应力区域沿表面向内延伸深度约为0.5 mm,如图12所示。该应力水平已接近材料成型态的抗拉强度,因此该位置出现裂纹的概率极大。进一步分析发现,该区域高残余应力的形成与喷嘴的打印支撑设计密切相关。由于喷嘴头部下方采用了刚度偏大的实体支撑,且该支撑在较长范围内未与制件本体连接,在逐层成型与冷却收缩过程中,制件本体与支撑结构的伸长量不匹配,使喷嘴头部受到支撑的强拉伸约束,在头部与杆部转接倒圆区域产生较大的残余拉应力,导致开裂,如图13所示。

为解决该燃油喷嘴头部与杆部转接倒圆区域制

造裂纹缺陷问题,采用了优化制造支撑结构、加大头部与杆部转接倒圆角的结构优化手段。支撑方案由大长度实体支撑改为斜角度小尺寸支撑,支撑刚度明显弱化,且支撑连接部位调整到头部下方,降低支撑与制件之间的热失配,进而降低制造过程中的应力。对优化之后的制造方案开展成型过程应力场仿真分析,发现应力较优化前整体降低约100 MPa,无开裂风险。采用荧光探伤方法对优化后制件进行检测,发现裂纹缺陷已消除,如图14所示。

2.2 结构工艺优化改善表面粗糙缺陷

某增材制造燃油喷嘴为带隔热盲腔的双层结构,采用工业CT检测其内部质量,发现内侧喷嘴头部与杆部转接倒圆区域存在裂纹,如图15所示。对该区域进行解剖取样并开展金相检查发现,转接倒圆区域的原始成型表面极为粗糙,表面附着大量未熔化及半熔化的原始粉末颗粒,且颗粒之间还形成不规则孔洞等典型表面粗糙缺陷。进一步观察该区域表面形貌,可见大量球形凸起及不规则孔隙,并伴有明显的粉末颗粒附着特征,如图16所示。分析该喷嘴成型过程发现,裂纹位于制件内部盲腔表面,增材制造成型过程中存在不少于3处表面倾斜角约为 0° 的区域,属于典型的悬垂下表面,如图17所示。该制件内部盲腔在成型后未进行任何表面后处理,为增材制造直接成型的原始表面。其悬垂下表面存在大量粉末黏附、球化凸起等表面粗糙缺陷,与前述小倾斜角、弱约束成型条件下易发生黏粉和球化的表面粗糙机理高度一致。

为解决该增材制造燃油喷嘴内部盲腔悬垂下表面粗糙缺陷,基于前期增材制造摆放角度,对盲腔内部结构进行优化,尽量减少表面倾斜角小于 45° 的区

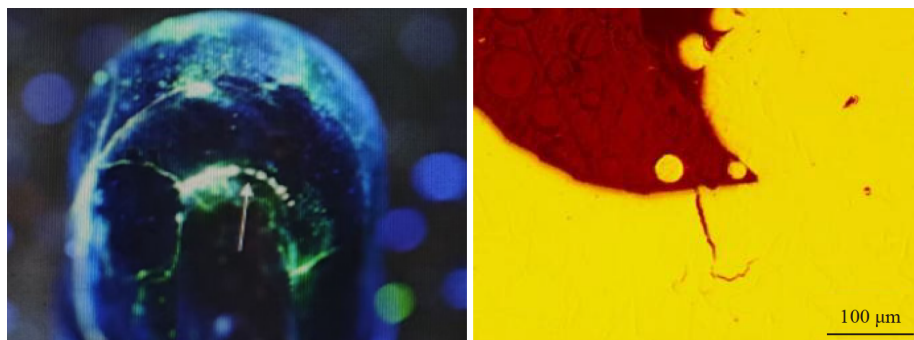


图11 增材制造喷嘴裂纹

Fig.11 Nozzle cracks in additive manufacturing



图12 喷嘴头部与杆部转接倒圆区域残余应力
Fig.12 Residual stress analysis at the junction
of nozzle head and shaft

域,特别是悬垂下表面面积,如图18所示。优化后,小倾斜角区域大幅减少,但受到喷嘴盲腔结构的功能力需求限制,仍存在1处小面积悬垂下表面,如图18所示。对于喷嘴而言,表面粗糙缺陷极易成为疲劳源区、导致疲劳开裂,甚至引发进一步的破坏。为此,该位置的悬垂下表面在成型后的表面粗糙问题依然需要解决。但该位置位于盲腔结构内部,常规

加工方式不可达,常用于微细流路表面处理的磨粒流工艺因没有磨料出口而无法进行。分析发现,图18中红圈位置允许设置磨粒流工艺出口,形成箭头所示磨料运动路径,可在磨粒流处理内表面改善粗糙度后,再对出口进行焊接封堵。工艺试验结果表明,增材制造喷嘴经磨粒流处理后,其表面粗糙度得到明显提升,最高达到 $R_a 3.7$ (R_a 为表面粗糙度),如图19所示。具体数值见表1。

3 结论

增材制造技术在航空发动机研制中发挥着重要作用,但其逐层堆积、快速熔凝等工艺特征也使制件在成型过程中不可避免地产生各类缺陷,成为制约其工程应用可靠性的关键问题。围绕增材制造过程中的典型缺陷问题,从物理场势角度分析了缺陷形成与抑制机理;结合增材制造燃油喷嘴缺陷抑制工程实例,探讨了基于结构设计一体化方法的增材制

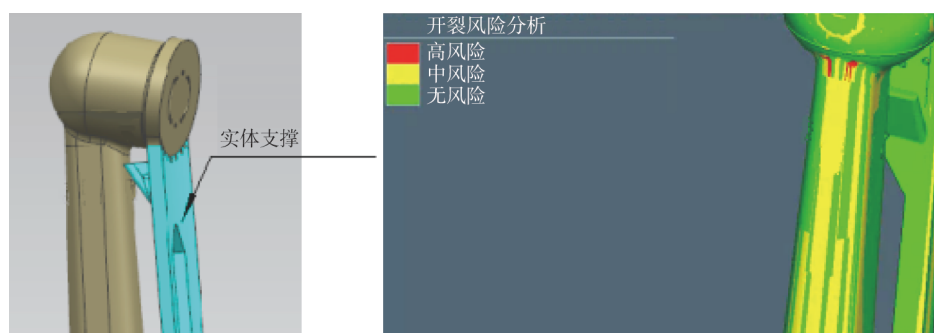


图13 喷嘴头部实体支撑与开裂风险仿真
Fig.13 Solid support and cracking risk simulation at the nozzle head

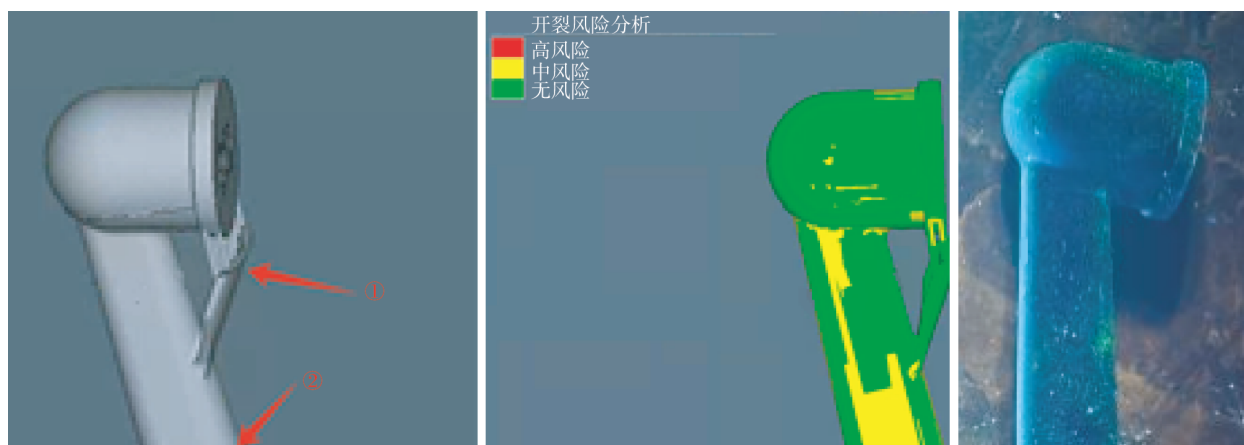


图14 优化制造支撑和喷嘴结构后的开裂风险分析与制件检测
Fig.14 Cracking risk analysis and component inspection after optimized manufacturing support and nozzle structure

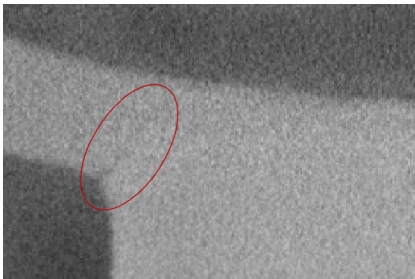


图15 增材制造喷嘴头部与杆部转接位置的CT裂纹
Fig.15 CT-detected crack at the transition zone between nozzle head and shaft in additive manufacturing

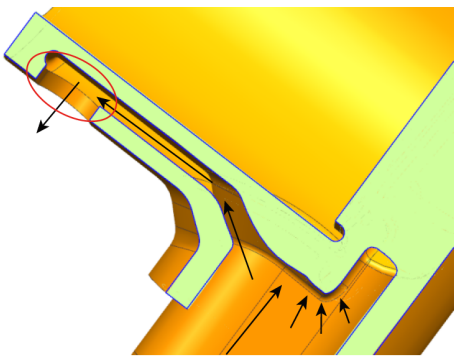


图18 增材制造喷嘴内部结构优化
Fig.18 Internal structure optimization of the additively manufactured nozzle

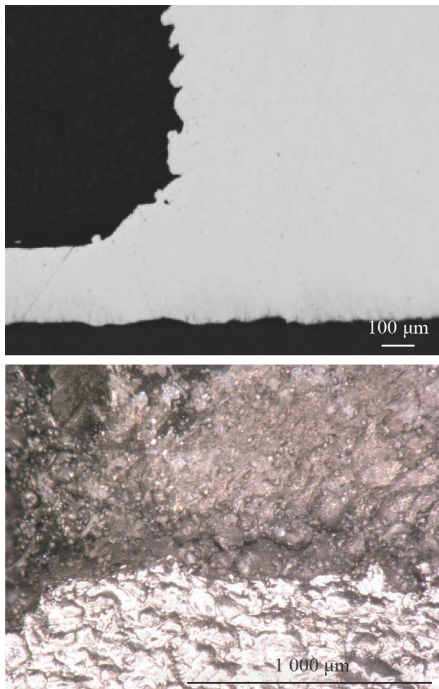


图16 增材制造喷嘴转接倒圆区域金相与表面状态
Fig.16 Metallographic and surface characterization of the additively manufactured nozzle transition fillet

工艺	上部	中部	下部
未处理			
磨粒流			

图19 增材制造喷嘴悬垂面表面状态
Fig.19 Surface state of overhanging faces of the additively manufactured nozzle

表1 增材制造喷嘴磨粒流处理后的表面粗糙度
Table 1 Surface roughness of the additively manufactured nozzle after abrasive flow processing

工艺	$R_a/\mu\text{m}$		
	上部	中部	下部
未处理	8.128	8.712	16.628
磨粒流	3.337	3.705	9.281

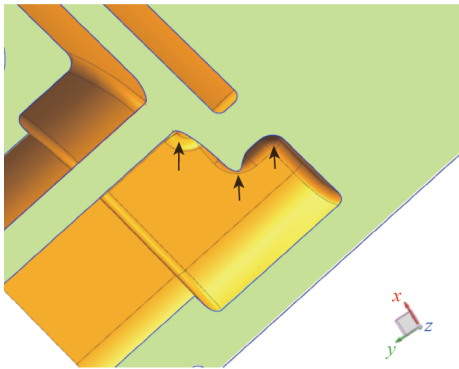


图17 增材制造喷嘴悬垂表面位置
Fig.17 Overhanging surface position of the additively manufactured nozzle

造缺陷工程抑制措施。主要结论如下：

- (1) 增材制造成型过程主要涉及温度场、应力场和物质运动场3类关键物理场势,其在成型过程中相互耦合、相互制约。
- (2) 增材制造3类物理场关键物理场势分别对不同类型缺陷的产生起主导作用。孔隙类缺陷产生的核心物理场势为温度场,温度场不稳定性易引发孔隙类缺陷;裂纹类缺陷产生的核心物理场势为应力场,成型应力超过材料局部开裂抗力时易引发裂纹缺陷;表面粗糙缺陷产生的核心物理场势为物质运动场,物质运动在弱约束成型条件下易导致表面

粗糙缺陷。增材制造工艺参数的优化应降低温度梯度、缓解应力集中、限制物质运动,以减少制造缺陷产生。

(3) 以设计为主导的结构设计一体化方法是增材制造件缺陷工程抑制措施的重要手段。基于增材制造工艺特点,在结构设计中考虑增材制造温度场发展过程、应力场影响因素、物质运动驱动来源等,采用结构方案优化、容许后处理工艺窗口、改善打印支撑方案等结构-制造一体化方法,可大幅降低缺陷发生率,提升增材制造零件工程可用性。

(4) 未来,增材制造缺陷控制应从单向的制造工艺参数调节向以设计为主导的结构-制造一体化工程调控方向发展。通过在设计之初系统考虑后续制造过程的需求和约束,在结构设计、成型工艺及后处理策略之间建立协同优化机制,可在保证复杂构件成型能力的同时,实现对增材制造缺陷的有效抑制,为航空发动机等高端装备关键构件的工程应用提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] THOMPSON S M, BIAN Linkan, SHAMSAEI N, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part I: transport phenomena, modeling and diagnostics[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 36–62.
- [2] 张少平, 郭会明, 高彤, 等. 基于先进激光加工技术的下一代航空发动机跨尺度整体式承力薄壁构件设计方法与应用[J]. *航空学报*, 2024, 45(13): 156–168.
ZHANG Shaoping, GUO Huiming, GAO Tong, et al. Design and manufacturing method of multi-scale integrated load bearing thin-walled structure for application in next-generation aeroengine based on advanced laser processing technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(13): 156–168. (in Chinese)
- [3] 孙晓峰, 宋巍, 梁静静, 等. 激光增材制造高温合金材料与工艺研究进展[J]. *金属学报*, 2021, 57(11): 1471–1483.
SUN Xiaofeng, SONG Wei, LIANG Jingjing, et al. Research and development in materials and processes of superalloy fabricated by laser additive manufacturing [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(11): 1471–1483. (in Chinese)
- [4] 吴宇, 陈冰清, 刘伟, 等. 增材制造镍基高温合金在航空发动机与燃气轮机中的研究应用进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(1): 31–45.
WU Yu, CHEN Bingqing, LIU Wei, et al. Progress in research and applications of additively manufactured nickel-based superalloy in aero-engines and gas turbines [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(1): 31–45. (in Chinese)
- [5] 司瑞, 陈勇. 民用飞机增材制造技术应用发展趋势[J]. *航空学报*, 2024, 45(5): 529677.
SI Rui, CHEN Yong. Application trends of additive manufacturing technology for civil aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(5): 529677. (in Chinese)
- [6] 田伟, 刘砚飞, 张少平, 等. 点阵材料在航空发动机中的研究进展与应用探索[J/OL]. *航空学报*, 1–20 [2026-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20250620.1658.008>.
TIAN Wei, LIU Yanfei, ZHANG Shaoping, et al. Application of lattice materials in advanced aero engines [J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1–20 [2026-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20250620.1658.008>. (in Chinese)
- [7] 柴文伟, 潘鹤, 褚小云, 等. 拓扑优化技术在复杂内流道壳体轻量化设计中的应用研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2023, 36(5): 49–55.
CHAI Wenwei, PAN He, CHU Xiaoyun, et al. Research on the application of topology optimization technology in lightweight design of complex internal flow channel shells[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2023, 36(5): 49–55. (in Chinese)
- [8] 张学宝, 王全奇, 周成华, 等. 基于航空发动机吞砂能力提升的中介机匣优化设计与研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2024, 37(4): 18–22.
ZHANG Xuebao, WANG Quanqi, ZHOU Chenghua, et al. Optimization of intermediate case based on sand ingestion capability improvement of the aero-engine[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2024, 37(4): 18–22. (in Chinese)
- [9] 伏宇, 刘砚飞, 田伟, 等. 结构-材料-制造一体化技术在未来航空发动机中的应用探索[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2025, 38(2): 13–19.
FU Yu, LIU Yanfei, TIAN Wei, et al. Exploration of the application of integrated structural-material-manufacturing technology in future aero-engines[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2025, 38(2): 13–19. (in Chinese)
- [10] PANWISAWAS C, TANG Y T, REED R C. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2327.
- [11] 李杰, 万杰, 李金山, 等. 金属激光粉末床熔融成形缺陷及其原位表征研究进展[J]. *铸造技术*, 2024,

- 45(3):228–248.
- LI Jie, WAN Jie, LI Jinshan, et al. Research progress on defects in metals fabricated via laser powder bed fusion and their in situ characterization[J]. *Foundry Technology*, 2024, 45(3):228–248. (in Chinese)
- [12] WANG Hongze, ZOU Yu. Microscale interaction between laser and metal powder in powder-bed additive manufacturing: conduction mode versus keyhole mode [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 142:118473.
- [13] HUANG Yuze, FLEMING T G, CLARK S J, et al. Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. *Nature Communications*, 2022, 13:1170.
- [14] CHOWDHURY S, YADAVIAH N, PRAKASH C, et al. Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20:2109–2172.
- [15] WANG Lu, ZHANG Yanming, CHIA H Y, et al. Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing[J]. *npj Computational Materials*, 2022, 8:22.
- [16] SANAEI N, FATEMI A. Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: a state-of-the-art review[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 117:100724.
- [17] 陈泽坤, 蒋佳希, 王宇嘉, 等. 金属增材制造中的缺陷、组织形貌和成形材料力学性能[J]. *力学学报*, 2021, 53(12):3190–3205.
- CHEN Zekun, JIANG Jiayi, WANG Yujia, et al. Defects, microstructures and mechanical properties of materials fabricated by metal additive manufacturing [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(12):3190–3205. (in Chinese)
- [18] 石 岩, 魏登松. 激光粉末床熔融增材制造未熔合气孔缺陷形成机理研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(20):139–151.
- SHI Yan, WEI Dengsong. Lack-of-fusion porosity defects formation mechanism in laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(20):139–151. (in Chinese)
- [19] BRENNAN M C, KEIST J S, PALMER T A. Defects in metal additive manufacturing processes[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(7):4808–4818.
- [20] ZHANG Yanming, WU Shiwei, GUO Zixu, et al. Defects caused by powder spattering and entrainment in laser powder bed fusion process: high-fidelity modeling of gas, melt pool and powder dynamics[J]. *Acta Materialia*, 2025, 288:120816.
- [21] 邓鸿文, 张 仪, 权澳冬, 等. 同步辐射及中子衍射技术在增材制造领域的应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(19):1902002.
- DENG Hongwen, ZHANG Yi, QUAN Aodong, et al. Application of synchrotron radiation and neutron diffraction technologies in additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19):1902002. (in Chinese)
- [22] RENZO D A, CROCCO M C, MALETTA C, et al. X-ray computed μ -tomography analysis to evaluate the crack growth in an additive manufactured Ti-6Al-4V alloy sample stressed with in-phase axial and torsional loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 175:107727.
- [23] WU Ziheng, TANG Guannan, CLARK S J, et al. High frequency beam oscillation keyhole dynamics in laser melting revealed by *in-situ* X-ray imaging[J]. *Communications Materials*, 2023, 4:5.
- [24] DE LIMA M S F. Phase transformations during laser processing of aerospace metallic materials[J]. *Advanced Materials Research*, 2016, 1135:179–201.
- [25] WANG Xiaojie, LU Fenggui, WANG Huiping, et al. Mechanical constraint intensity effects on solidification cracking during laser welding of aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 218:62–70.
- [26] 杨小康. 镍基高温合金IN738选区激光熔化成形中裂纹形成影响因素及其抑制手段[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- YANG Xiaokang. Influencing factors and restraining methods of crack formation in selection laser melting forming nickel-based superalloy IN738[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [27] LIM L C, YI J Z, LIU N. Mechanism of post-weld heat treatment cracking in Rene 80 nickel based superalloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2022, 18(4):407–412.
- [28] DENLINGER E R, GOUGE M, IRWIN J, et al. Thermomechanical model development and *in situ* experimental validation of the Laser Powder-Bed Fusion process[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16:73–80.
- [29] TANG Huiping, YANG Guangyu, JIA Wenpeng, et al. Additive manufacturing of a high niobium-containing titanium aluminide alloy by selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 636:103–107.
- [30] 孙闪闪. 激光选区熔化成形GH3536合金微裂纹及组织性能调控研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.

- SUN Shanshan. Study on the regulation of microcrack, microstructure and properties of GH3536 fabricated by selective laser melting[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [31] PARRY L, ASHCROFT I A, WILDMAN R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 1–15.
- [32] MISHRA A K, UPADHYAY R K, KUMAR A. Surface wear anisotropy in AlSi₁₀Mg alloy sample fabricated by selective laser melting: effect of hatch style, scan rotation and use of fresh and recycled powder[J]. Journal of Tribology, 2021, 143(2): 021701.
- [33] GU Dongdong, XIA Mujian, DAI Donghua. On the role of powder flow behavior in fluid thermodynamics and laser processability of Ni-based composites by selective laser melting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 137: 67–78.
- [34] 张学军, 陈冰清. 航空典型金属材料增材制造组织、缺陷、表面、构型研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 1–14.
- ZHANG Xuejun, CHEN Bingqing. Research progress on microstructure, defects, surface and configuration of additive manufactured typical aviation metals[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(1): 1–14. (in Chinese)