

激光增材制造镍基高温合金研究 现状及展望

马金超^{1, 2}, 刘纪德¹, 张志鹏^{2, 3}, 孔祥伟², 李金国¹

1. 中国科学院金属研究所 辽宁沈阳 110016

2. 东北大学机械与自动化学院 辽宁沈阳 110819

3. 东北大学材料科学与工程学院 辽宁沈阳 110819

摘要: 激光增材制造作为一种能够将数据模型直接转化为构件的先进技术, 在高温合金零部件的制造领域具有广阔的应用前景。从激光增材制造技术的基本原理与特点出发, 介绍了其在镍基高温合金工程化应用中的现状及面临的问题。在此基础上, 系统论述了增材用高温合金粉末材料的制备及优化策略、增材样品的微观组织特征以及裂纹缺陷的形成机理与控制方法。此外, 围绕当前激光增材制造在高温合金领域面临的技术挑战, 对其未来的发展方向进行了展望, 旨在为相关领域的进一步发展提供参考和指导。

关键词: 激光增材制造; 镍基高温合金; 粉末材料; 微观组织; 裂纹缺陷

Research developments and prospects of laser additive manufacturing in nickel-based superalloys

MA Jinchao^{1, 2}, LIU Jide¹, ZHANG Zhipeng^{2, 3}, KONG Xiangwei², LI Jinguo¹

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

3. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: Laser additive manufacturing, as an advanced technology that can directly convert data models into components, has great potential for application in the manufacturing of superalloy parts. This paper starts with the basic principles and characteristics of laser additive manufacturing technology and introduces its current status and problems in the engineering applications of nickel-based superalloys. On this basis, the study systematically discusses the preparation and optimization strategies of superalloy powder materials for additive manufacturing, the microstructural characteristics of additive-manufactured samples, and the formation mechanisms and control methods of crack defects. In addition, focusing on the technical challenges currently faced by laser additive manufacturing in the field of superalloys, the paper provides an outlook on its future development directions, aiming to provide reference and guidance for further advancements in related fields.

Keywords: laser additive manufacturing; nickel-based superalloys; powder materials; microstructure; crack defects

基金项目: 国家重点研发计划 (NO.2020YFA0714900)。

通信作者: 刘纪德, 研究员, 主要从事金属材料焊接及修复技术等研究, E-mail: jdliu@imr.ac.cn。

孔祥伟, 教授, 主要从事精密成形及增材制造技术等研究, E-mail: xwkong@me.neu.edu.cn。

1 序言

高温合金是一类以铁、钴、镍为基体，通过添加多种固溶强化和沉淀强化元素，使其能够在600℃以上的复杂环境中长期服役的合金材料^[1]。凭借稳定的微观组织和优异的力学性能，高温合金被广泛应用于航空航天发动机的热端部位。其中，镍基高温合金凭借其卓越的综合性能，在高温合金市场中占据了约80%的份额。随着航空发动机设计性能的持续提升，对高精度、高性能以及复杂形状高温部件的需求不断增长。然而，受加工复杂度、材料利用率、生产周期等因素的限制，传统的生产和加工方式已逐渐难以满足日益严苛的特殊要求。

近年来，增材制造（AM）技术的发展为解决上述问题提供了全新的方案。该技术最早起源于20世纪80年代末的快速成形技术，是一种集材料、结构和功能于一体的先进数字化制造技术，也常被称为3D打印^[2, 3]。增材制造技术按能量源的不同，可以分为激光增材制造（Laser Additive Manufacturing, LAM）、电弧增材制造（Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM）和电子束增材制造（Electron Beam Additive Manufacturing, EBAM）^[4]。这些技术的基本原理相似，均是通过集中热源熔化金属粉末或金属丝材并逐层叠加材料来实现成形。其中，激光增材制造凭借其高能量密度、精确可控性和材料适应性强等特点，成为当前应用最广泛的技术。

国内外科研人员针对镍基高温合金的激光增材制造进行了大量研究。为全面了解该领域的研究现状与发展趋势，本文对相关内容进行了梳理与总结，重点论述了激光增材制造的技术特点与应用、粉末材料的制备工艺、增材样品的组织特征，以及裂纹的形成机理与优化策略，并对该领域的未来发展方向进行了展望。

2 激光增材制造技术

2.1 激光增材制造技术的类型及特点

根据原料供给方式和能量输入方式的不同，激光增材制造技术可进一步分为激光选区熔化（Selective Laser Melting, SLM）与激光定向能量沉积（Laser Directed Energy Deposition, LDED）^[5]。

激光选区熔化技术的原理是预先将金属粉末

均匀地铺设在平台上，在充满惰性保护气的工作箱内，利用激光按照构件每一截面的形状对特定区域的粉末进行选择性地熔化，从而逐层堆积形成构件，如图1a所示。在打印过程中，SLM通常采用微米级的细小激光光斑，因此使得熔池的尺寸更小且更易于控制，从而能够制备出高致密度、高精度和复杂形状的构件，而打印完成的构件经过打磨或喷砂等简单的处理后即可满足使用要求^[6]。然而，SLM技术由于需要逐层铺粉，每层粉末的厚度通常仅为几十至几百微米，这在很大程度上限制了打印速度。特别是在制造尺寸较大的构件时，成形周期会显著增加。此外，SLM工艺仅对特定区域的粉末进行熔化，未熔化的粉末虽然可以回收再利用，但飞溅粉末的掺入会引起粉末性能恶化等问题。

不同于SLM技术的分步打印工艺，激光定向能量沉积（LDED）技术采用激光、粉末和保护气同步移动的方式。其原理是通过喷嘴将金属原料输送至激光作用区，在喷嘴喷出的局部保护气氛下，利用高能激光束熔化输入的原材料并逐层沉积成形，如图1b所示。与SLM相比，LDED不受粉末床尺寸的限制，能够实现较大构件的制造和修复，展现出更高的灵活性与更广泛的应用潜力。由于LDED通常采用毫米级的激光光斑，形成的熔池更宽、更深，因此可以使用粒径较大的粉末，甚至直接采用更大尺寸的熔丝作为原材料，从而达到提高沉积效率的目的。有研究人员指出，LDED的沉积效率比SLM高出1~2个数量级^[7]。然而，更大的熔池也带来了一定的局限性，例如降低了成形精度和表面质量，导致打印件需要经过一系列复杂的后处理才能达到使用要求。此外，LDED在熔池周围引入流动保护气体的方式增加了熔池捕获气体的概率，从而更容易形成孔洞缺陷，进而影响构件的成

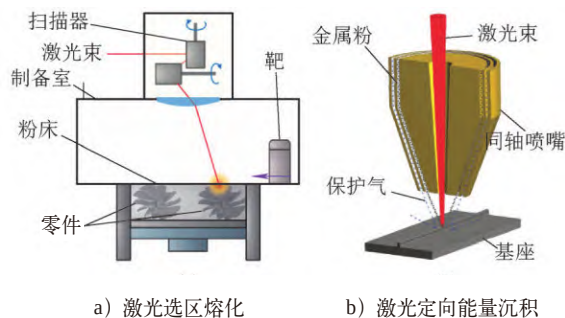


图1 激光增材制造技术原理^[8, 9]

形质量和致密度。激光选区熔化（SLM）与激光定向能量沉积（LDED）的对比见表1。

表1 激光选区熔化（SLM）与激光定向能量沉积（LDED）的对比

类型	SLM	LDED
原材料	小粒径粉末	粉末或熔丝
激光及熔池大小	微米级、熔池较小	毫米级、熔池较大
粉末利用率	存在大量未熔化粉	几乎无未熔化粉
打印件尺寸	受粉末床尺寸限制	几乎不受限制
成形速度及质量	速度慢、精度高、表面质量好	速度快、精度低、表面质量差

2.2 激光增材制造镍基高温合金的工程化应用

目前，国内外在利用激光增材制造技术制备镍基高温合金零部件方面已取得了重要进展。例如，美国宇航局（NASA）、通用电气公司（GE）、德国曼柴油机与透平公司（MAN）、密歇根大学（UM）和美国桑迪亚国家实验室（Sandia）等国外机构，以及中国科学院金属研究所、北京航空航天大学、西北工业大学、西安交通大学、西安铂力特增材技术股份有限公司和上海商用航空发动机制造有限责任公司等国内单位，均围绕镍基高温合金的激光增材制造开展了深入研究，并成功制备了涡轮叶片、叶轮、燃油喷嘴等部件，如图2所示。尽管如此，激光增材制造技术在镍基高温合金的应用中仍面临诸多挑战，部分高温合金部件尚未实现规模化

生产。关键问题在于粉末质量、合金成分以及打印工艺等多方面因素都会对最终构件的成形质量具有决定性影响^[10-13]。在不同工艺下，打印件的微观组织及力学性能都会发生改变，导致构件质量的可控性与稳定性不足，限制了其工程化应用。

3 镍基高温合金粉末原材料的制备

粉末是激光增材制造中广泛应用的主要原材料，其纯净度、球形度、孔隙率、杂质含量及粒径尺寸等特性，都会对打印件的组织与性能产生直接影响。因此，了解合金粉末的常用制备方法，并总结不同制备方法的优缺点，对于优化粉末选材以制备高性能构件具有重要的意义。

3.1 粉末制备技术的类型及特点

目前，制备镍基高温合金粉末的常见方法主要包括气雾化法（如真空感应熔化气雾化法和电极感应熔融气雾化法）以及等离子法（如等离子旋转电极雾化法）^[15, 16]。

真空感应熔化气雾化法（Vacuum Induction Melting Gas Atomization, VIGA）是在惰性气体保护下，通过坩埚加热熔融金属原材，熔体在重力作用下通过坩埚底部喷嘴形成液流，随后被高速惰性气流冲击为细小液滴并冷凝形成粉末，如图3a所示。为了防止熔炼过程中金属与坩埚接触而引入杂质，德国莱宝公司开发了电极感应熔融气雾化法（Electrode Induction Melting Gas Atomization, EIGA）^[17]。该技术的原理是采用成形的合金棒材为电极，在高频感应线圈中直接加热使其熔化，熔体在重力作用下流经喷嘴，最终经气流冲击雾化成粉，如图3b所示。此方法不仅有效避免了熔炼过程中的污染，还缩短了熔体与残余氧、氮的反应时间，从而提高了粉末的纯净度。然而，感应线圈对电极尺寸的要求限制了大尺寸电极材料的雾化制粉，同时熔炼电极的成分偏析也会导致粉末成分的不均匀性。

气雾化法是通过将高速气流的动能转化为粉末的表面能来制备粉末，但高速气流容易诱发“伞效应”，从而导致异常粉末的形成。为了解决这一问题，俄罗斯科学家提出了一种等离子旋转电极制粉法（Plasma Rotating Electrode Process, PREP）^[16]。该方法利用等离子枪产生的等离子体来加热高速旋

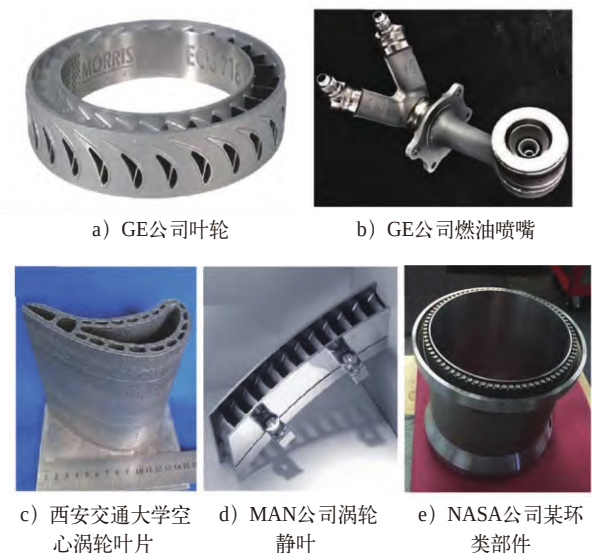


图2 激光增材制造的镍基高温合金零部件^[6, 14]

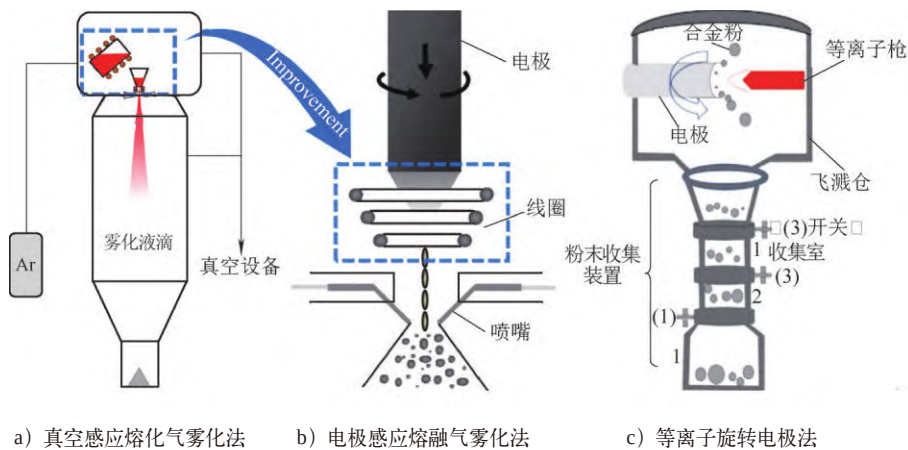


图3 镍基高温合金粉末制备原理示意^[18-20]

转的金属棒端，熔融金属在离心力的作用下从棒端甩出，液滴在表面张力作用下凝固形成球形粉末，如图3c所示。与雾化法相比，PREP方法制备的金属粉末具有更高的综合质量，但存在电极制备成本高和粉末粒径大的问题。

3.2 粉末缺陷的形成及优化

为了满足激光增材制造工艺的要求，粉末需要具备良好的球形度、较窄的粒度分布和较高的松装密度等特性。图4所示为通过雾化法和等离子旋转电极法制备的IN718高温合金粉末的形貌。从图4可看出，等离子旋转电极法制得的粉末具有较高的球形度和表面质量，几乎没有缺陷粉的存在。相比之

下，雾化法制得的粉末形貌较为复杂，出现了较多的卫星粉、异形粉和空心粉，且存在表面粗糙度高和粒径分布区间宽的问题。这一现象在张莹等^[21]、QI等^[22]和CHEN等^[23]的研究中也得到了证实。ZHANG等^[24]进一步研究了两种制粉方法对打印件组织及性能的影响。试验结果表明，相较于等离子旋转电极法，雾化法中空心粉的存在更容易导致打印件内孔洞的形成，从而导致性能的降低。

大量研究表明，缺陷粉末在雾化制粉方法中较为常见，研究人员对雾化制粉过程中缺陷粉末的形成机制进行了深入探究。目前，关于空心粉的形成机制，普遍接受的是RABIN等^[26]提出的“袋式

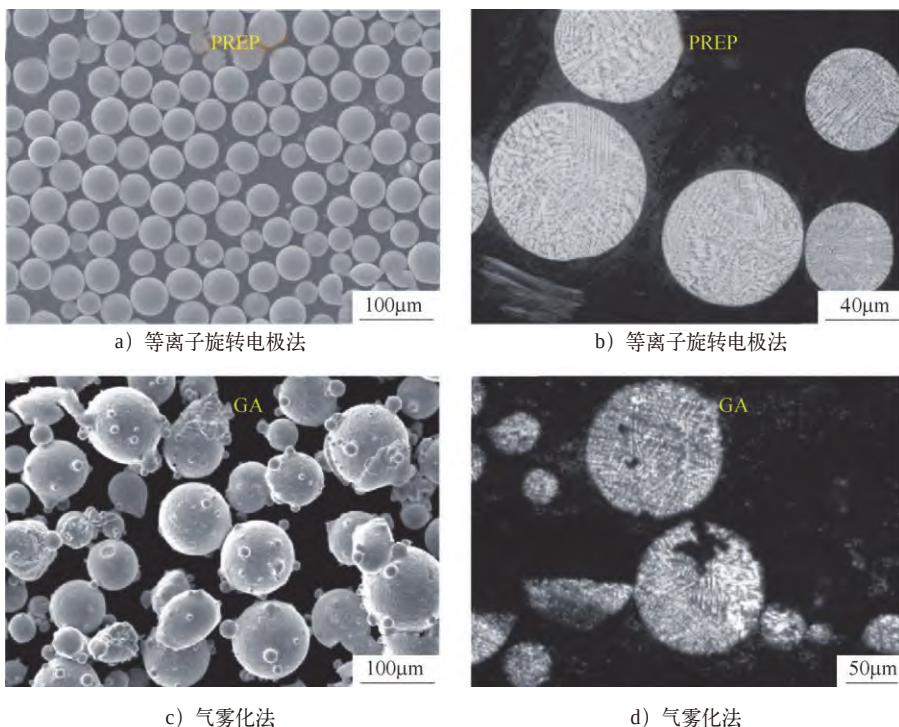


图4 不同工艺制得的IN718高温合金粉末形貌^[25]

破碎机理”，如图5所示。在雾化过程中，高速气流将液滴吹成“袋状结构”。通常情况下，这种“袋状结构”会因气流的冲击而破碎，从而形成不同粒径的粉末。然而，当熔体的黏度较高或气流速度相对较低时，“袋状液滴”可能无法被击碎，导致气体被困在袋中，最终形成空心粉末。而对于卫星粉的形成，王华等^[25]研究发现，与等离子旋转电极法中飞出的液滴具有相同的飞行速度不同，雾化法的高速气流赋予小颗粒更高的速度，而大颗粒的速度相对较低。这种速度差异使得小颗粒在飞行过程中很容易撞击到大颗粒的表面，从而形成卫星粉。由此可见，通过调整气体流速、优化喷嘴设计及布局等方式，可以有效减少空心粉和卫星粉的形成，从而提高粉末质量。

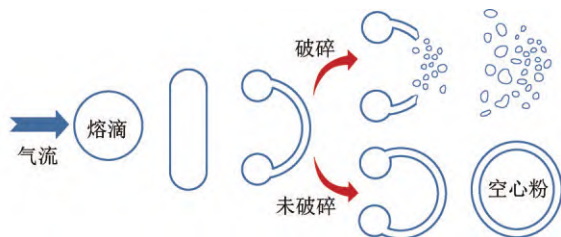


图5 空心粉形成的“袋式破碎”机理示意

张义文等^[27]开展了等离子旋转电极尺寸与转速对粉末粒径影响的研究，发现粉末粒径(d)与转速(ω)、电极直径平方根($D^{1/2}$)成反比，即 $d \propto 1/(\omega \cdot D^{1/2})$ 。因此，针对等离子旋转电极制备粉末尺寸较大的问题，可以通过提升旋转电极的转速和电极尺寸来减小粒径。然而，电极尺寸的增加会受到设备的限制，同时其对粉末粒径的影响远不如转速显著。因此，在实际应用中，通常优先通过提升转速的方式来减小粉末粒径。研究表明，当旋转电极的转速为7500r/min时，制得的高温合金粉末粒度D50超过200 μm ，而当转速提升到15500r/min，粉末粒度D50降低至约120 μm ^[27]。目前，俄罗斯最新一代的Granule 2500型等离子旋转电极设备的转速可以达到约30000r/min，而其制得的粉末粒度D50仅为60 μm 左右^[15]。

4 激光增材制造高温合金的组织特征

4.1 晶粒形态及析出相特点

激光增材制造过程是一个熔化速度和凝固速度极快的非平衡过程，同时熔池周围的凝固区域也会

受到复杂循环热的影响。对于镍基高温合金，较快的冷却速率使得 γ 基体具有较高的过饱和度，而熔池内不同区域凝固速率（枝晶生长速率）和温度梯度的差异，导致枝晶在不同方向上的生长具有明显不同。这些微观组织特性会对力学性能产生直接影响，使得构件的性能与传统制备工艺存在差异。不同方法制备的IN718合金晶粒特征如图6所示。

图6a、b所示为基于SLM制备的IN718合金晶粒形态。从图6a、b可以观察到，沿沉积方向呈现为细长的柱状晶，而垂直于沉积方向则表现为等轴晶。有研究表明^[28]，这种现象主要与温度梯度(G)和凝固速率(R)的比值相关，当 G/R 值逐渐降低时，晶粒的生长模式会从平面生长逐渐过渡到枝晶生长，最终转变为等轴晶，如图6c所示。增材制造工艺的特性决定了温度梯度沿沉积方向较大，推动晶粒外延生长形成柱状晶，而垂直于沉积方向的温度梯度相对较小，导致晶粒更倾向于形成等轴晶。除了不同方向晶粒的形态差异外，CHAUVET等^[29]研究发现，沿沉积方向晶粒尺寸也会发生变化，柱状晶的宽度从底部的约30 μm 增加到顶端的约1mm，其尺寸随着高度增加有逐渐增大的趋势，如图6d所示。图6c中同样也显示了凝固微观结构尺度与 $G \times R$ 值（即冷却速率）的关系。随 $G \times R$ 值的增加，晶粒尺寸减小。而根据YEOH等^[30]的研究，在沉积初期，底部熔池与基板高效的热传导使得初期具有较高的冷却速率，而随着沉积厚度的增加，受热传导效率降低和循环热的影响，冷却速率逐渐降低，导致晶粒尺寸逐渐增加。

与激光增材制造不同，传统铸造与锻造的晶粒均呈现为无方向的等轴晶，如图6f、g所示。TROSCH等^[31]研究了不同制备工艺对晶粒尺寸的影响，发现SLM制备的晶粒尺寸最小，锻造次之，而铸造的晶粒尺寸最大。但也有研究表明^[32, 33]，SLM晶粒尺寸大于锻造态，这种差异可能与增材制造工艺参数及锻造工艺条件的不同有关。

除晶粒特征的差异外，激光增材制造工艺对镍基高温合金中第二相的析出行为也有显著影响。以IN718高温合金为例，在传统铸造工艺中，合金基体中通常可以观察到弥散分布的 γ' 相和 γ'' 相，以及微米级的Laves相和碳化物^[34]。然而，在激光选区熔化工艺中，一般观察不到 γ' 相和 γ'' 相的存

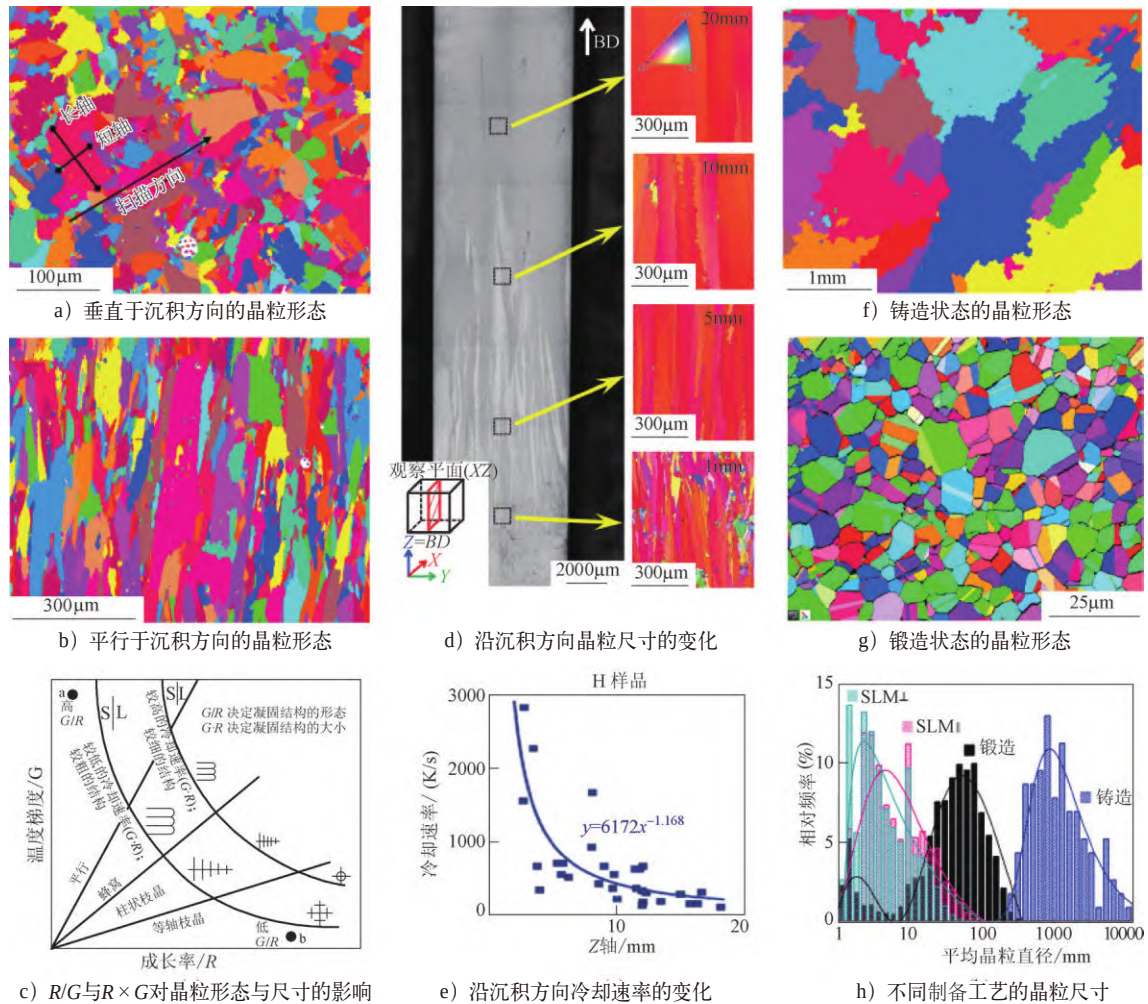


图6 不同方法制备的IN718合金晶粒特征^[28-33]

在，同时Laves相和碳化物的尺寸也显著减小^[35]。这主要是因为增材制造极快的冷却速率使得部分第二相虽然能够析出，但没有充足的时间生长，而另一些则因热力学或动力学条件不足而未能析出。有研究表明，与传统铸造工艺中尺寸较大的碳化物（1~10μm）相比，激光增材制造形成的较小碳化物（0.1~1μm）不仅有效避免了碳化物成为裂纹源的风险，还能显著阻碍位错运动，从而显著提高合金的蠕变性能^[36]。值得注意的是，第二相能否析出也与合金种类和打印工艺等因素有关。例如，WANG等^[37]在CM247LC合金中观察到了 γ' 相的析出，而OTTO等^[11]通过改变扫描策略成功抑制了晶界处 γ' 相和碳化物的析出。

4.2 裂纹的类型及形成机理

受复杂热循环、快速凝固以及材料特性等因素的影响，激光增材制造过程中会产生较大的残余应

力，从而引发各种缺陷的形成。在镍基高温合金这类结构材料中，裂纹是危害最严重的缺陷，其形成不但会显著降低零件的服役性能与寿命，还会严重削弱合金的耐蚀性与结构的完整性。

根据形成机制的不同，增材制造中的裂纹主要可以分为液化裂纹、凝固裂纹和固态裂纹^[38]。图7所示为激光增材制造CM247LC和IN939合金中的3种裂纹形貌。通过对比分析，可以明显看出这3种裂纹在形貌特征上存在显著差异。在液化裂纹中，可以观察到明显的液膜残留和元素偏析特征，部分区域还出现了回填迹象，裂纹沿晶界开裂的趋势较为明显（见图7a）。凝固裂纹则呈现出表面粗糙且不规则的特点，裂缝内可见未完全熔合的枝晶结构，且裂纹具有沿枝晶扩展的趋势，如图7b所示。相比之下，在固态裂纹中，并未出现与熔化或凝固相关的迹象，裂纹的两侧具有较高的形态匹配度。裂纹

长度往往能够贯穿多个熔覆层，其扩展路径呈现出笔直或折角形态，且折角最大可达约90°（见图7c）。

现有的研究表明，镍基高温合金中的液化裂纹主要与枝晶间的低熔点相有关，如Laves相、MC相以及 γ/γ' 共晶相等^[39-41]。在增材制造过程中，受往复循环加热的影响，位于热影响区的低熔点相会发生重熔现象，形成液相薄膜。当液膜无法抵抗周围的残余应力时，就会被撕裂形成裂纹^[42]。由于低熔点相通常在晶界处形成，因此这类裂纹往往沿晶界形成。ZHOU等^[43]在研究激光粉末沉积CSU-B1高温合金裂纹的成因时指出，凝固裂纹主要是由于枝晶和高熔点碳化物的形成所致。在激光熔池内，合金处于固-液共存的状态时，率先凝固的枝晶及高熔点碳化物等会阻碍枝晶间残余熔体的流动，导致凝固后期枝晶间无法获得足够的熔体补充。同时，在凝固收缩拉应力的作用下，薄弱的枝晶间液膜被撕裂，进而形成裂纹。固态裂纹按其形成机制又可分为应变时效裂纹（SAC）与高温失塑裂纹（DDC）。在镍基高温合金体系中，应变时效裂纹的形成主要与热影响区中 γ' 相的析出有关。当热源影响到相邻熔覆层时，残余应力的部分释放会加速 γ' 相的析出。而这一过程不但会降低合金的塑性，还会引起局部应力的增加（即 γ' 相在形核与生长过程中对基体产生的应力）^[44]。在这两种因素的共同作用下，裂纹

便会产生并扩展。截至目前，关于高温失塑裂纹的形成机理尚未达成共识。合金成分、晶粒大小、晶界偏析、晶界相析出、晶粒取向、晶界形貌及环境中氧含量等均被认为是可能导致其形成的因素^[45]。

4.3 裂纹的控制与修复策略

目前，激光增材制造的镍基高温合金大多沿用了传统合金的成分设计思路。然而，激光增材制造快速凝固特性使裂纹敏感性较高的高温合金极易出现裂纹缺陷。因此，优化合金成分成为预防缺陷形成的主要方式之一。有研究表明，适当提高Mo、W的含量，以及减少Mn、Si含量，可以有效降低Hastelloy X合金的裂纹敏感性，从而减少裂纹产生的概率^[47, 48]。YU等^[49]研究了Hf含量对IN738LC合金裂纹行为的影响，发现随着Hf含量的增加，高液相分数范围扩大，而低液相分数范围缩小，这为裂纹的填充提供了充足的熔体，从而避免了凝固裂纹的出现。此外，TANG等^[12]通过调整元素成分，开发了可实现无裂纹打印的ABD-850AM和ABD-900AM新型合金。虽然这两种合金的成分成功避开了高裂纹敏感性区间，但却降低了 γ' 沉淀强化相的占比和溶解温度，导致其在700℃以上的高温强度远低于CM247LC合金。由此可见，尽管优化合金成分被认为是消除裂纹的有效途径之一，但实际应用中仍需综合考虑成形性与性能之间的平衡。

大量研究表明，扫描参数和打印策略等都会对

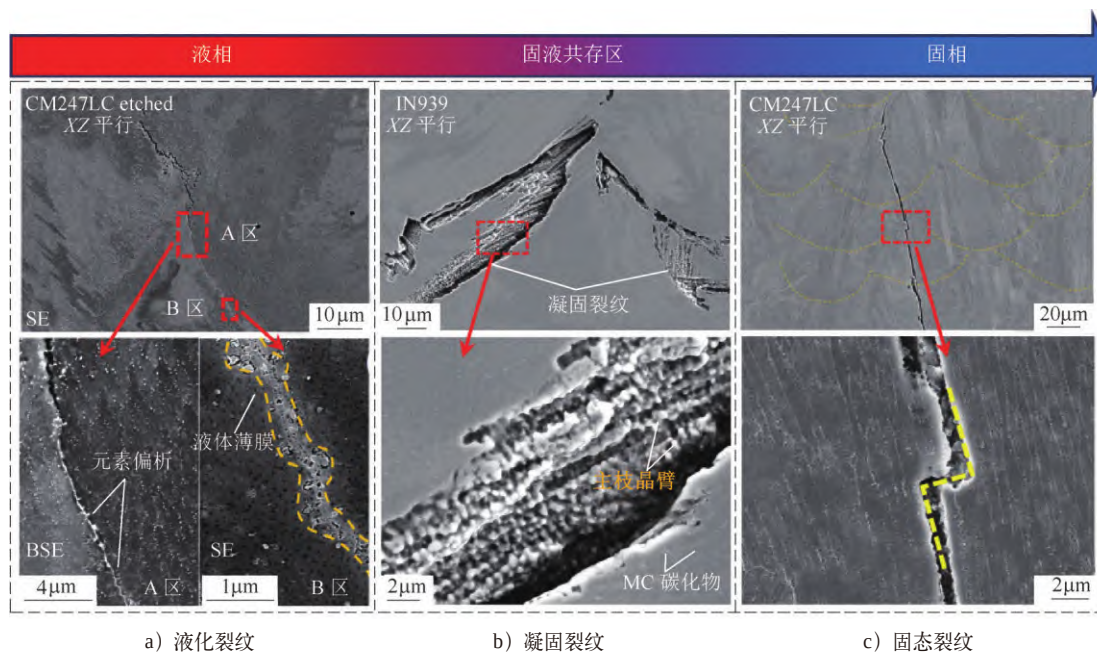


图7 激光增材制造CM247LC与IN939合金中的裂纹形貌^[46]

熔池的凝固行为具有显著影响,从而影响沉淀相的分布和残余应力的状态。因此,优化打印工艺也是一种抑制裂纹的重要手段。张洁等^[50]研究了基板预热对IN625合金裂纹敏感性的影响,发现将基板预热至300℃可以使合金内部的残余应力降低50%以上,从而显著减少了裂纹密度。OTTO等^[11]进一步研究表明,通过基板预热和改变扫描路径,可以有效抑制HAYNES 282合金中诱发裂纹的晶界沉淀析出,缓解了晶界处的应力集中现象,从而成功制备了无裂纹打印件。ENGELI等^[51]则研究了激光参数对高裂纹敏感性CM247LC合金成形性的影响,结果显示,随着激光功率的增加,合金内部的裂纹数量明显降低,但孔洞的数量却随之增加。而GUO等^[52]通过采用脉冲激光束替代连续激光束的策略,成功消除了IN738LC合金中的裂纹,同时将孔隙率控制在仅为0.046%的较低水平。此外,XU等^[53]、ZHANG等^[54]和KONTIS等^[55]的研究也进一步证实,通过优化打印工艺能够有效减少裂纹缺陷的形成。

增材后处理也是消除裂纹和孔洞等缺陷的重要手段,其中热等静压(Hot Isostatic Pressing, HIP)是最常见的后处理技术。该技术通过在高温条件下软化合金,并施加一定的气压,利用压合和原子扩散的作用去除缺陷。王继浩等^[56]研究了热等静压对激光选区熔化GH3230合金组织与微裂纹的影响。结果表明,热等静压处理在消除小尺寸裂纹及气孔的同时,促进了二次碳化物析出,从而显著提升了合金的抗拉强度和伸长率。此外,该技术在改善激光增材制造镍基高温合金组织和性能方面的效果,也在HAN等^[57]、LEE等^[58]和REZAEI等^[59]的研究中得到了验证。虽然热等静压工艺的效果显著,但其仍存在尺寸精度差、处理周期长以及能耗高等方面的不足。近年来,脉冲电流处理(Electro Pulsing Treatment, EPT)作为一种新兴的外场处理技术,在修复孔洞和裂纹等缺陷方面展现出良好的应用前景。ZHENG等^[60]通过脉冲电流处理成功实现了镍板中裂纹的愈合。WANG等^[61]的研究发现,脉冲电流能够促进原子扩散加速,在热压应力的共同作用下使冷轧M50钢的孔洞得到了一定程度的修复。周亦胄等^[62]指出,脉冲电流修复裂纹与孔洞的作用机理主要包括:扩散填充、位错填充与压合填充,而这些机制在金属材料中是具有共性的。由此可见,脉

冲电流处理技术可能成为消除增材制造镍基高温合金构件中缺陷的有效方法之一。

5 现存挑战及展望

5.1 现存挑战

目前,尽管激光增材制造镍基高温合金的研究与应用已取得显著进展,但仍面临诸多技术挑战。例如,在激光增材制造过程中,快速熔化与凝固的特性往往会产生较高的残余应力,从而导致构件变形和开裂。虽然热等静压处理能够在一定程度上愈合裂纹,但其仍存在成本高、工艺复杂以及易导致晶粒粗化等问题。因此,在现有工艺条件下,如何有效减小残余应力的影响是亟待解决的问题。此外,镍基高温合金激光增材制造件的微观组织(如柱状晶、晶界偏析和析出相分布)会显著影响其疲劳性能和蠕变性能。因此,如何实现微观组织的精确调控,以进一步提升材料性能,也是未来研究的重点方向。

5.2 未来展望

在材料适应性方面,需要对传统镍基高温合金的成分进行调整和优化,降低合金的裂纹敏感性,同时提升粉末原材料的质量,以改善其成形能力和冶金质量。在工艺参数优化方面,需要进一步研究增材制造工艺参数对熔体行为和组织演变的影响,建立精准的工艺参数窗口,以实现缺陷的有效控制及组织和性能的综合优化。在质量控制方面,可以基于现有缺陷控制策略,引入实时在线监测、闭环控制和大数据分析,对熔池动态、组织特性及缺陷分布进行全面监控与调节,从而实现对增材制造产品质量的精准控制。在后处理优化方面,针对现有技术的高成本与复杂性,进一步探索更加高效与经济的新型处理方法,以降低成本、简化工艺,并进一步提升构件的力学性能与可靠性。

参考文献:

- [1] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25 (S2): 482-486.
- [2] 方学伟, 杨健楠, 陈瑞凯, 等. 铝合金电弧增材制造技术研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53 (2): 52-67.
- [3] 赵竞杰, 徐婧, 李胜勇, 等. 丝材定向能量沉积增

- 材制造在线监测与过程控制综述[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (9) : 1-14.
- [4] 康国坡, 朱强, 黄建民, 等. 电弧增材制造技术与应用分析[J]. 中国设备工程, 2024 (18) : 231-233.
- [5] 周智翔, 任能, 王一达, 等. 镍基单晶高温合金的增材制造修复研究进展[J]. 精密成形工程, 2024, 16 (10) : 10-27.
- [6] 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 (12) : 26-31.
- [7] 林鑫, 黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展, 2015, 34 (9) : 684-688, 658.
- [8] LU N, LEI Z, HU K, et al. Hot cracking behavior and mechanism of a third-generation Ni-based single-crystal superalloy during directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101228.
- [9] SANCHEZ S, SMITH P, XU Z, et al. Powder bed fusion of nickel-based superalloys: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 165: 103729.
- [10] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40: 2410-2422.
- [11] OTTO R, BRØTAN V, CARVALHO P A, et al. Roadmap for additive manufacturing of HAYNES® 282® superalloy by laser beam powder bed fusion (PBF-LB) technology[J]. Materials & Design, 2021, 204: 109656.
- [12] TANG Y T, PANWISAWAS C, GHOUSSOUB J N, et al. Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2021, 202: 417-436.
- [13] 葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究[J]. 中国激光, 2011, 38 (7) : 119-125.
- [14] 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.
- [15] 陈喜, 王小宇, 刘奇, 等. 镍基高温合金球形粉末制备发展现状[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32 (2) : 96-100.
- [16] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (2) : 245-257.
- [17] HOHMANN M, JÖNSSON S. Modern systems for production of high quality metal alloy powder[J]. Vacuum, 1990, 41 (7-9) : 2173-2176.
- [18] 李保强, 金化成, 张延昌, 等. 3D打印用球形钛粉制备技术研究进展[J]. 过程工程学报, 2017, 17 (5) : 911-917.
- [19] 徐金鑫, 陈超越, 沈鹭宇, 等. 层流气体雾化制粉工艺粉末形貌及雾化机理[J]. 物理学报, 2021, 70 (14) : 134-148.
- [20] TANG J, NIE Y, LEI Q, et al. Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30 (10) : 2330-2337.
- [21] 张莹, 李世魁, 陈生大. 用等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末[J]. 粉末冶金工业, 1998 (6) : 13-18.
- [22] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40: 2410-2422.
- [23] CHEN Y, ZHANG J, WANG B, et al. Comparative study of IN600 superalloy produced by two powder metallurgy technologies: Argon atomizing and plasma rotating electrode process[J]. Vacuum, 2018, 156: 302-309.
- [24] ZHANG Z, LIU J, WANG J, et al. Effects of powder forming method and heat treatment process on the microstructure and mechanical properties of a Ni-based superalloy by laser additive manufacturing: The 75th World Foundry Congress [C]. Sichuan: Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society, 2024.
- [25] 王华, 白瑞敏, 周晓明, 等. PREP法和AA法制取 Inconel 718粉末对比分析[J]. 中国新技术新产品,

- 2019 (19) : 1-4.
- [26] RABIN B H, SMOLIK G R, KORTH G E. Characterization of entrapped gases in rapidly solidified powders[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1990, 124 (1) : 1-7.
- [27] 张义文, 张莹, 陈生大, 等. PREP制取高温合金粉末的特点[J]. *粉末冶金技术*, 2001 (1) : 12-15.
- [28] 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.
- [29] CHAUVET E, KONTIS P, JÄGLE E A, et al. Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting[J]. *Acta Materialia*, 2018, 142: 82-94.
- [30] YEOH Y C, MACCHI G, JAIN E, et al. Multiscale microstructural heterogeneity and mechanical property scatter in Inconel 718 produced by directed energy deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 887: 161426.
- [31] TROSCH T, STRÖßNER J, VÖLKL R, et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting[J]. *Materials Letters*, 2016, 164: 428-431.
- [32] ZHANG D, FENG Z, WANG C, et al. Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective laser melting and casting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 724: 357-367.
- [33] ŠVEC M, SOLFRONK P, NOVÁKOVÁ I, et al. Comparison of the structure, mechanical properties and effect of heat treatment on alloy Inconel 718 produced by conventional technology and by additive layer manufacturing[J]. *Materials*, 2023, 16 (15) : 5382.
- [34] 王立红, 刘子利, 刘希琴, 等. Al、Ti含量对 Inconel 718合金铸造组织和凝固行为的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2016, 34 (2) : 242-247, 264.
- [35] TIAN Y, MUÑIZ-LERMA J A, BROCHU M. Nickel-based superalloy microstructure obtained by pulsed laser powder bed fusion[J]. *Materials Characterization*, 2017, 131: 306-315.
- [36] LIU L R, JIN T, ZHAO N R, et al. Effect of carbon addition on the creep properties in a Ni-based single crystal superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 385 (1-2) : 105-112.
- [37] WANG X, CARTER L N, PANG B, et al. Microstructure and yield strength of SLM-fabricated CM247LC Ni-Superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2017, 128: 87-95.
- [38] 万宏远, 刘壮壮, 韩泉泉, 等. 激光增材制造高温合金抗开裂行为研究进展[J]. *航空科学技术*, 2022, 33 (9) : 26-42.
- [39] GHAEMIFAR S, MIRZADEH H. Precipitation kinetics of niobium carbide (NbC) during homogenization heat treatment of additively manufactured inconel 718 superalloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 1774-1781.
- [40] XIAO H, LI S M, XIAO W J, et al. Effects of laser modes on Nb segregation and Laves phase formation during laser additive manufacturing of nickel-based superalloy[J]. *Materials Letters*, 2017, 188: 260-262.
- [41] XU J, LIN X, ZHAO Y, et al. HAZ liquation cracking mechanism of IN-738LC superalloy prepared by laser solid forming[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49: 5118-5136.
- [42] XU J, LIN X, ZHAO Y, et al. HAZ liquation cracking mechanism of IN-738LC superalloy prepared by laser solid forming[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49: 5118-5136.
- [43] ZHOU Z, HUANG L, SHANG Y, et al. Causes analysis on cracks in nickel-based single crystal superalloy fabricated by laser powder deposition additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 1238-1249.
- [44] MOSTAFAEI A, GHIAASIAAN R, HO I T, et al. Additive manufacturing of nickel-based superalloys: A state-of-the-art review on process-structure-defect-property relationship[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 136: 101108.

- [45] 曹睿, 刘刚, 陈剑虹, 等. 镍基材料焊接中高温失塑裂纹DDC的生成机理及研究进展[J]. 焊接, 2018 (7) : 7-13, 65.
- [46] TANG Y T, PANWISAWAS C, GHOUSSOUB J N, et al. Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2021, 202: 417-436.
- [47] TOMUS D, JARVIS T, WU X, et al. Controlling the microstructure of Hastelloy-X components manufactured by selective laser melting[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 823-827.
- [48] HARRISON N J, TODD I, MUMTAZ K. Reduction of micro-cracking in nickel superalloys processed by selective laser melting: A fundamental alloy design approach[J]. Acta Materialia, 2015, 94: 59-68.
- [49] YU Z, GUO C, HAN S, et al. The effect of Hf on solidification cracking inhibition of IN738LC processed by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 804: 140733.
- [50] 张洁, 李帅, 魏青松, 等. 激光选区熔化Inconel 625合金开裂行为及抑制研究[J]. 稀有金属, 2015, 39 (11) : 961-966.
- [51] ENGELI R. Selective laser melting & heat treatment of γ strengthened Ni-base superalloys for high temperature applications[D]. Switzerland : ETH Zurich, 2017.
- [52] GUO C, ZHOU Y, LI X, et al. A comparing study of defect generation in IN738LC superalloy fabricated by laser powder bed fusion: Continuous-wave mode versus pulsed-wave mode[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 90: 45-57.
- [53] XU J, DING Y, GAO Y, et al. Grain refinement and crack inhibition of hard-to-weld Inconel 738 alloy by altering the scanning strategy during selective laser melting[J]. Materials & Design, 2021, 209: 109940.
- [54] ZHANG X, CHEN H, XU L, et al. Cracking mechanism and susceptibility of laser melting deposited Inconel 738 superalloy[J]. Materials & Design, 2019, 183: 108105.
- [55] KONTIS P, CHAUVET E, PENG Z, et al. Atomic-scale grain boundary engineering to overcome hot-cracking in additively-manufactured superalloys[J]. Acta Materialia, 2019, 177: 209-221.
- [56] 王继浩, 刘凯歌, 张雪峰, 等. 热等静压对激光选区熔化增材制造GH3230高温合金微裂纹与组织的影响[J]. 航空制造技术, 2024, 67 (3) : 55-61.
- [57] HAN Q, MERTENS R, MONTERO-SISTIAGA M L, et al. Laser powder bed fusion of Hastelloy X: Effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 732: 228-239.
- [58] LEE J U, KIM Y K, SEO S M, et al. Effects of hot isostatic pressing treatment on the microstructure and tensile properties of Ni-based superalloy CM247LC manufactured by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 841: 143083.
- [59] REZAEI A, KERMANPUR A, REZAEIAN A, et al. Contribution of hot isostatic pressing on densification, microstructure evolution, and mechanical anisotropy of additively manufactured IN718 Ni-based superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 823: 141721.
- [60] ZHENG X G, SHI Y N, LU K. Electro-healing cracks in nickel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 561: 52-59.
- [61] WANG F, QIAN D, HUA L, et al. Voids healing and carbide refinement of cold rolled M50 bearing steel by electropulsing treatment[J]. Scientific Reports, 2019, 9 (1) : 11315.
- [62] 周亦青, 周本谦, 周本谦, 等. 脉冲电流对45钢损伤的恢复作用[J]. 材料研究学报, 2000 (1) : 29-36.

MW 20241123