

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.03

电弧熔丝增材制造镍基高温合金的研究进展

徐宇航, 孙俊华*

山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101

摘要: 增材制造技术是制造业信息化、数字化、智能化的重要组成内容,而电弧熔丝增材技术在镍基高温合金成形中具有显著的优势。从金属增材制造技术分类、发展历程、标准规范、技术原理等方面,对比分析了不同增材制造技术的优势与局限。重点介绍了镍基高温合金电弧熔丝增材制造工艺过程,从电弧增材工艺、增材件的后热处理和增材成形数值模拟三个方面介绍镍基高温合金电弧增材的优势与存在的问题。总结镍基高温合金电弧增材技术在现阶段的应用情况,通过对熔滴过渡进行改善,使熔滴更加平稳过渡来获得高质量的成形件;将双丝焊接应用于增材制造,提高了增材制造的生产效率;通过后热处理的工艺,有效降低镍基高温合金增材件的残余应力并改善微观组织,提高力学性能;利用数值模拟更加精确地分析逐层沉积过程中熔滴过渡和温度场变化,来控制镍基高温合金增材件的凝固过程的晶粒变化和元素偏析。

关键词: 镍基高温合金; 电弧熔丝增材制造; 热处理; 数值模拟; 双丝焊接

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)05-0020-10

Research Progress on Wire Arc Additive Manufacturing of Nickel-based High-Temperature Superalloys

XU Yuhang, SUN Junhua*

School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China

Abstract: Additive manufacturing is an important component of manufacturing information, digitization and intelligence, and arc additive technology has significant advantages in nickel-based superalloy forming. In this paper, the advantages and limitations of different additive manufacturing technologies are compared and analyzed from the aspects of technology classification, development history, standards and technical principles. The arc additive manufacturing process of nickel-based superalloy is introduced, and the advantages and problems of arc additive manufacturing are introduced from three aspects: arc additive process, post-heat treatment of additive parts and numerical simulation of additive forming. The application of arc additive technology in nickel-based superalloy at the present stage is summarized. By improving the droplet transition and making the droplet transition more stable, high-quality forming parts can be obtained. The double wire welding was applied to additive manufacturing to improve the production efficiency of additive manufacturing. After heat treatment, the residual stress of nickel-based superalloy can be reduced effectively, and the microstructure and mechanical properties can be improved. Numerical simulation is used to more accurately analyze the droplet transition and temperature field changes during layer-by-layer deposition to control the grain changes and element segregation during the solidification process of nickel-based superalloys.

Keywords: nickel-based superalloy; arc additive manufacturing; heat treatment; numerical simulation

引用格式: 徐宇航, 孙俊华. 电弧熔丝增材制造镍基高温合金的研究进展[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 20-29.

Citation: XU Yuhang, SUN Junhua. Research Progress on Wire Arc Additive Manufacturing of Nickel-based High-Temperature Superalloys[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 20-29.

收稿日期: 2024-11-19 修回日期: 2024-12-12

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME152)

作者简介: 徐宇航(1999—),男,硕士研究生,主要从事电弧熔丝增材制造高温合金的研究。

通讯作者: 孙俊华(1979—),女,副教授,主要从事焊接过程控制及数值模拟研究。E-mail:sunjunhua1979@126.com。

0 引言

增材制造技术(Additive Manufacture, AM),亦称3D打印技术,通过逐层累加材料的方式构建三维实体,近年来在制造业中引起了广泛关注。与传统制造方法相比,AM技术具有显著优势:(1)自动化与高设计自由度。AM技术利用自动化机器进行加工,能够通过数字模型制造出设计自由度高的工件,最大限度地减少废料和能源消耗,大大提高了材料利用率^[1-2]。(2)生产效率提升。AM技术在一层层的基础上创建三维加工模型,在零件加工路径设计完成后可进行批量生产,缩短零件生产周期,进一步提高了生产效率^[3]。(3)灵活性与复杂性。与传统铸锻等工艺相比,增材制造无需制造模具,打破了模具生产零件的限制,可以根据需要制造形状更为复杂的零件产品,提高生产零件的灵活性。(4)加工优势。与传统的减材制造相比,增材制造不受加工工艺中刀具形状和加工路径的限制,也无需考虑刀具的磨损与消耗,可以制造内部结构复杂、尺寸细小难以加工的零件,如薄壁零件、复杂曲面零件以及高精度零件,这些零件对加工精度和误差控制要求极高。(5)相对于其他增材制造方法,电弧熔丝增材制造效率高、原材料成本低,在大规模生产方面具有优势^[4]。而且,以金属丝为原料的成本约为粉末原料成本的10%。因此,电弧熔丝增材制造工艺以低成本产生高沉积效率的特点,非常适合使用昂贵的材料制造大规模产品^[5]。

在航空航天、医疗、建筑、汽车等多领域,AM技术的应用潜力日益凸显^[6-8]。特别是在航空航天领域,高温合金因其良好的耐高温性能以及在600℃以上高温服役环境下的长期稳定性而备受关注,同时还需要具备较好的耐腐蚀性、抗氧化性和力学性能。高温合金根据基体元素的不同可分为铁基高温合金、镍基高温合金和钴基高温合金^[9-11]。其中,镍基高温合金是使用最广泛的一类,常用于制造航空发动机和工业燃气轮机中在高温工作环境中服役的零件^[12-13]。电弧熔丝增材制造技术在加工镍基高温合金时,以其制造周期短、设计自由度高、成型尺寸大和材料利用率高等优势,成为制备大尺寸结构件的重要方法,受到了业界的广泛关注^[14-17]。

1 电弧熔丝增材制造技术

电弧熔丝增材制造技术(Wire and Arc Additive Manufacture, WAAM)使用金属丝作为添加材料,通过电弧熔化和沉积金属,根据三维虚拟模型的预编程路径进行操作。相较于激光熔丝沉积和电子束熔丝沉积,WAAM技术具有显著优势,包括:较低的设备购置和维护成本^[18];较大的加工尺寸(几乎不受空间限制^[19],电子束熔丝沉积设备的成型腔尺寸受到限制,不能生产尺寸较大的零件^[20]);更高的瞬时沉积速率,可达10 kg/h,是激光增材的10倍,这使得电弧熔丝增材制造在生产效率上更具优势^[21]。WAAM系统通常由焊机、焊接机器人及成形平台构成,如图1所示^[22]。

电弧熔丝增材制造技术还存在一些问题,如残余应力、变形、气孔等,以及由于不适当的沉积参数和热平衡不良导致的缺陷,如孔洞、热裂纹等^[23-24]。图2是WAAM主要的工艺参数对增材件成形形状的影响,对成形效果影响最大的是焊接电流和送丝速度,其次是电弧电压,这些参数都与热输入相关,说明热输入直接决定电弧增材成形的质量。可以采用增大电弧电压和焊接电流的方式来提高焊丝的熔化效率,但是热输入的提高会影响成形精度,降低成形质量^[25]。

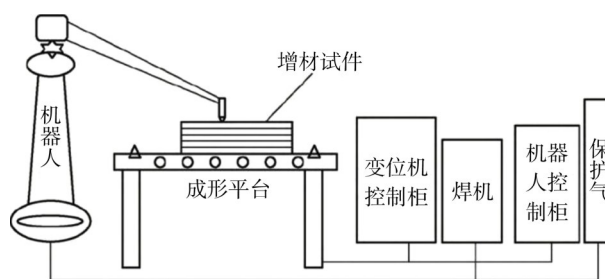


图1 WAAM系统^[22]

Fig. 1 Schematic diagram of Wire and Arc Additive Manufacturing

近年来,研究者们对WAAM技术在材料性能优化、工艺控制、设备开发和数值模拟等方面的研究取得了显著进展,有必要对其进行整合总结,以便为后续研究提供帮助与指导。本文主要对CMT增材制造技术、多丝多弧增材制造、引入磁场或超声的改进方法以及增材制造过程的数值模拟等方面进行分析,重点阐述了WAAM技术如何提高增材成

形效率和零件质量,指出了这些研究的优势与不足,并对未来电弧熔丝增材制造的主要发展方向进行总结与展望。

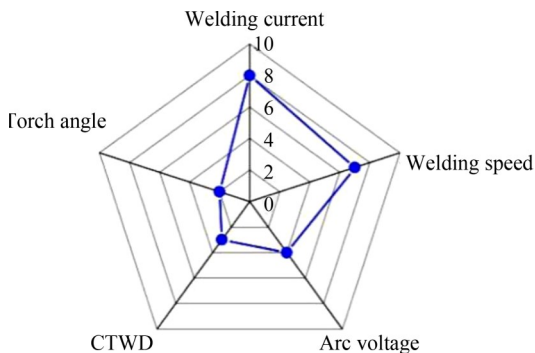


图2 工艺参数对电弧增材成形形状的影响^[25]

Fig. 2 Influence of welding parameters on the weld bead geometry

2 镍基高温合金电弧熔丝增材制造研究现状

WAAM技术本质上是一个利用电弧熔化焊丝进行连续堆焊的过程,成形过程中不同电弧稳定性差异直接影响构件成形质量。目前的WAAM工艺大多是由传统电弧焊工艺演变而来,因此按照传统的焊接工艺将电弧增材制造分为:等离子增材制造(Plasma Additive Manufacturing, PAM)、非熔化极气体保护增材制造(Gas tungsten Arc Additive Manufacturing, GTA-AM)和熔化极气体保护增材制造(Gas Metal Arc Additive Manufacturing, GMA-AM)。WAAM技术与焊接过程类似,在制备镍基高温合金构件时,局部的加热和冷却会引起很大的温度梯度,是一个迅速的非平衡凝固过程,在这个过程中镍基高温合金构件会呈现高约束、高应力的状态,易产生裂纹等问题。可以通过不同镍基高温合金可焊性的差异,来判断该镍基高温合金电弧增材制造工艺的好坏。一般情况下,Al、Ti含量较低的镍基高温合金(如Inconel718、Inconel625等)具有较好的可焊性,如图3所示^[26-27],更适合WAAM工艺;而其他一些高温合金牌号如Inconel738、CM247LC等由于Al、Ti含量更高,材料焊接性差,所以工程应用较少^[28]。

2.1 镍基高温合金CMT电弧增材

冷金属过渡(Cold Metal Transfer, CMT)技术通

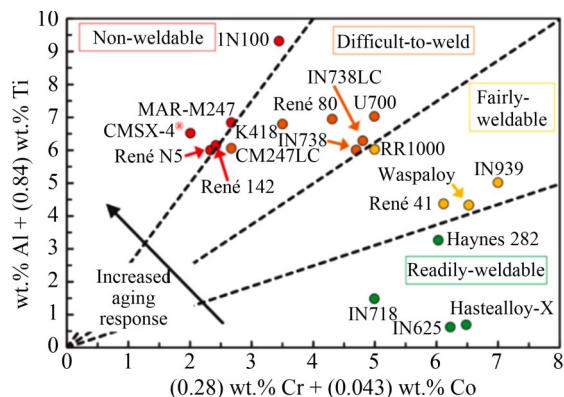


图3 镍基高温合金可焊性与合金元素之间的关系^[26]

Fig. 3 Relationship between weldability and alloying elements of nickel-based superalloys

过精确控制焊丝的送丝与回抽,优化熔滴过渡,减少飞溅,提高焊接质量和效率。相比于传统的MIG/MAG焊接,CMT技术在增材制造中表现出更高的稳定性和更低的变形率。

Novelino^[29]研究了CMT工艺参数对增材壁面几何形状的影响。双向沉积模式通过均匀分布热输入,可以显著提升零件高度和宽度的一致性。然而,焊枪改变方向时,连续沉积区域因热应力集中易形成缺陷,且自然冷却条件下超过50层后成形质量显著下降。这一现象与层间温度梯度及凝固速率不匹配密切相关。

Karmuhilan^[30]对CMT增材Inconel 625的微观结构和力学性能分析表明,试样底部为胞状晶,中间为胞状晶和柱状晶混合,顶部区域则以柱状枝晶为主。力学性能呈现显著各向异性:水平方向屈服强度411 MPa、抗拉强度678 MPa,垂直方向则分别为402 MPa和665 MPa。显微硬度从底部262 HV降至顶部244 HV,与晶粒取向及析出相分布相关。该研究揭示了热输入对晶粒生长方向和相变过程的调控作用。

Kindermann^[31]针对Inconel 718的CMT增材工艺,发现直径1.2 mm焊丝允许的沉积宽度为5.92~13.15 mm,但宽度超过10 mm时电弧稳定性大大降低。对于多层沉积,热输入约为181~1410 J/mm,电弧稳定性为79.2%~96.9%。热输入随沉积速度的减小和送丝速度的增大而增大,而电弧稳定性的变化与之相反。

由于CMT增材制造过程中熔滴的过渡速度较

快,可能会在零件内部形成气孔、夹杂物等缺陷,这些缺陷会降低零件的强度和可靠性。可以研发先进的传感技术和实时监测控制系统,对增材制造过程进行精确控制,如使用红外热像仪对熔滴过渡和熔池进行监测,并反馈到控制系统来调整工艺参数。先进的监测控制系统可以提高增材制造过程的稳定性,提高增材件成形质量。

2.2 镍基高温合金双丝WAAM技术

双丝WAAM技术是在单丝电弧焊接基础上发展起来的,旨在通过增加填充速度和提高生产效率来优化增材制造过程。双丝焊接技术的起源可追溯至双丝埋弧焊的研究,并随着熔化极气保焊接技术的广泛应用,逐渐应用于增材制造领域。双丝WAAM技术通过在金属喷嘴内平行安装两根焊丝,以消耗高压电极焊丝在先、填充焊丝在后,其连接机理类似于双丝弧焊机器人,主焊丝熔化后先形成熔池,而辅焊丝则进入熔池中被熔池加热熔化,从而提高了生产效率,如图4所示^[32]。此外,双丝WAAM技术可以使用不同材料的焊丝,用于制造两种材料复合且成分和结构呈连续梯度变化的功能梯度材料(Functionally Gradient Materials, FGM)。

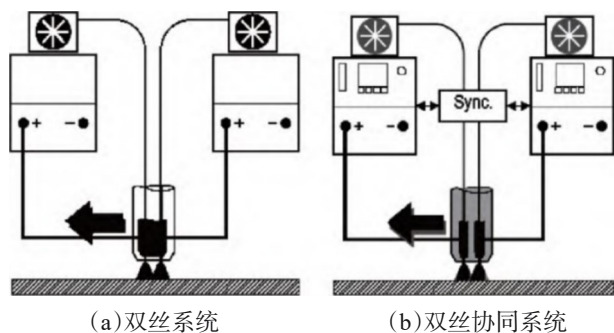


图4 双丝焊接系统原理^[32]

Fig. 4 Schematic diagram of dual wire welding system

Rodrigues^[33]使用双丝WAAM技术制造了316L不锈钢/Inconel 625功能梯度材料。研究发现,在顶部层的直接接口处,微观结构主要由固化为柱状树枝状的Ni基体组成,底部区域为奥氏体和 δ 铁素体的混合,混合区域呈现柱状和等轴树枝状结构,其中包含了分布在树枝间隙区域的偏析物。随着合金中铁含量的增加,Mo和Nb的偏析增加,有利于在树枝间隙区域形成Laves相。由于Ni的作用,固化模式从铁素体向奥氏体转变,并且在接口处没有

观察到 δ 铁素体。直接过渡区和平滑过渡区的断口位置分别位于50 wt.%和65 wt.%的不锈钢区。功能梯度材料试样的直接过渡区平均强度为542 MPa,伸长率高达61.6%。试样的平滑过渡区强度较低,为503 MPa,伸长率为32.4%。在所有拉伸试验中,试样都主要经历了韧性断裂,具有相当大的塑性变形。

Jeong^[34]采用双丝WAAM技术制备了308L不锈钢/Inconel 718功能梯度材料,研究超声处理对材料微观结构与力学性能梯度调控规律。超声处理可以将微观结构从柱状晶粒转变为等轴晶粒,并减小晶粒尺寸,从而提高材料的抗拉强度和硬度。超声处理试样的抗拉强度高于未超声处理试样,伸长率低于未超声处理试样。这是由于超声在柱状晶粒中的作用导致等轴晶粒的变化和晶粒尺寸的减小。随着Inconel 718含量的增加,试样中不锈钢308L部分的硬度逐渐升高,与未经超声处理的试样相比,经超声处理的试样硬度百分比增加了7%~15%。硬度的提高是由于显微组织的变化(柱状相中的等轴晶粒)、固溶强化以及随着Inconel 718含量的增加而引起的Ni、Mo和Nb含量的增加。

Amiri^[35]采用双丝WAAM成功地制备了无气孔、无裂纹等缺陷的316L不锈钢/Inconel 625功能梯度材料薄壁结构。316L不锈钢的显微组织是铁素体-奥氏体(FA)的固态转变,在奥氏体基体中有明显的 δ 铁素体存在。Inconel 625中,凝固过程中Nb和Mo等合金元素的微偏析,枝晶臂之间形成了许多不连续的Laves相。由于层间经历了循环热梯度,构建方向的微观结构特征发生了变化,从而产生了等轴晶和柱状枝晶。Inconel 625、316L不锈钢和碳钢基材的硬度分别为194~257 HV、171~178 HV和159~170 HV。拉伸强度为487 MPa,屈服强度为300 MPa,伸长率为40%。拉伸试样在碳钢一侧失效,表明功能梯度材料界面处抗拉强度较高,两种合金之间的连接良好,断口处有许多细小均匀的韧窝,断裂模式是韧性断裂。

Lu^[36]使用双丝WAAM制备TA1/Inconel 625的功能梯度材料,并分析微观组织和力学性能。如图5所示,当成分组成为70%TA1+30%Inconel 625时,由于Cr和Mo的偏析,形成了一个坚硬的富Cr、Mo

相(Cr,Mo)。NiTi中(Cr,Mo)相以胞状晶和枝晶共同分布。在热积累和Cr、Mo的增加下,(Cr,Mo)相最终成长为近似等轴枝晶。Ni和Ti形成由NiTi+Ni₃Ti组成的白色丝状基体。当成分组成为40%TA1+60%Inconel 625时,大量Cr和Mo在晶界处析出,最终形成细小、致密、圆形的(Cr,Mo)相。当成分组成为30%TA1+70%Inconel 625时,(Cr,Mo)相比40%TA1+60%Inconel 625的组织更致密。当成分分为100%Inconel 625时,少量Ti被重熔并进入到熔覆层中,形成NiTi和Ni₃Ti,通过共晶反应形成Laves相(Cr₂Nb)。试样从TA1到Inconel625的薄壁构件显微硬度范围为171 HV_{0.2}到852.56 HV_{0.2},富Cr相和富Mo相导致显微硬度的升高。试样垂直方向的平均抗压强度为1 762.18 MPa,试样的压缩断裂为脆性断裂。

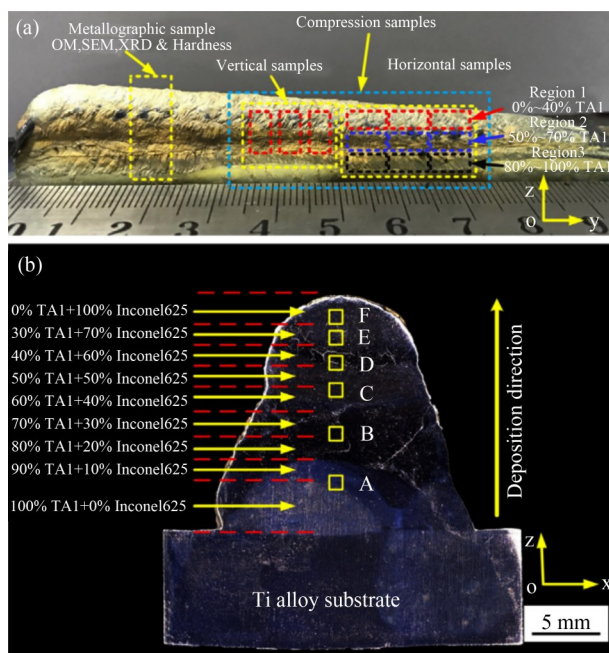


图5 TA1/Inconel 625宏观形貌及截面图^[36]

Fig. 5 Macroscopic morphology and cross-section of TA1/Inconel 625^[36]

在双丝WAAM制备功能梯度材料时,不同材料之间的界面结合强度是一个关键问题。界面结合不良会导致产生裂纹等缺陷,降低了材料的承载能力和使用寿命。应优化功能梯度材料的选择和设计,确保不同材料之间的兼容性。采用适当的预热和后热处理工艺,来减少界面应力,提高材料的强度。

2.3 镍基高温合金WAAM工艺改进

WAAM还可以通过超声振动、外加磁场、添加孕育剂、锤击等手段,改善组织不均匀、细化晶粒、改善粗大的柱状晶,并减少气孔等缺陷,改善增材成形件的力学性能,降低成形件的各向异性。

Chen^[37]通过引入超声波辅助技术,成功实现了采用WAAM方法制造的Inconel 625合金的晶粒细化和力学性能改善。与未加超声试样相比,超声波振动使得材料的屈服强度和抗拉强度显著提高,且各向异性明显减小。超声的空化效应和对流使熔池温度升高,温度梯度减小,导致Laves相中Nb含量显著降低。超声成功地阻断了柱状晶粒的生长,促进了柱状晶粒向等轴晶粒的转变。同时消除了<001>取向的织构,晶粒取向趋于随机分布。晶粒组织的细化显著提高了Inconel 625的屈服强度,在0°方向和90°方向分别提高了13.2%和23.8%,降低了各向异性。

Wang^[38]研究了磁场对通过冷金属过渡增材制造的Inconel 625超合金的显微组织和力学性能的影响。结果表明,磁场可以显著减小Inconel 625合金中的树枝晶尺寸,约为没加磁场时的30%。磁场产生的对流减少了树枝晶之间强化元素(如Nb和Mo)的偏析,提高了沉积的Inconel 625合金试样的力学性能。在磁场下沉积的Inconel 625合金的显微硬度和室温拉伸性能更好。微观结构上加入磁场后晶粒细化,取向更加均匀,并抑制了合金元素的偏析。

2.4 镍基高温合金WAAM后处理

电弧熔丝增材制造后的热处理和电火花加工等后处理工艺对提升沉积件性能的效果明显。镍基高温合金通过进行热处理,从而改变内部显微组织特征和析出相,进而改善增材件的力学性能。这些后处理技术有助于消除残余应力和改善微观组织,从而提高材料的机械性能。

Amit^[39]利用TLBO (Teaching-Learning-Based Optimization)算法辅助电火花加工技术对Inconel 625增材件进行后处理。在单目标和多目标条件下,获得了加工Inconel 625工件表面的最佳电火花加工参数。通过TLBO算法的优化,可以提高电火花加工过程中的加工效率和加工质量,从而实现

Inconel 625 薄结构的精细加工。这一方法为 Inconel 625 材料的后处理提供了一种新的解决方案。

Himanshu^[40]研究了后热处理对于 Inconel 625 增材件的冶金、力学和腐蚀性能的影响。热处理显著影响 Inconel 625 试样的显微硬度,试样水平方向的最大显微硬度达到 248 HV,垂直方向的最大显微硬度达到 245 HV。试样水平和垂直方向的抗拉强度增强,最大抗拉强度分别为 794 MPa 和 790 MPa。经过不同热处理工艺的试样在抗点蚀性能方面存在差异,1 100 °C 水淬热处理显示出更强的耐腐蚀性能。

Xu^[41]探讨了超声辅助电弧熔丝增材制造方法制备的 Inconel 625 试样在热处理后的显微组织和力学性能的变化。研究发现,随着热处理温度的升高,变形晶粒的体积分数减少,再结晶晶粒的体积分数增加。特别是在 1 200 °C 热处理后,试样的再结晶完全发生,晶粒结构几乎被退火孪晶所取代。此外,热处理温度的增加还导致了 Laves 相的消失和碳化物颗粒的体积分数和尺寸逐渐减小。在力学性能方面,屈服强度和显微硬度略微降低,而伸长率明显增加。这是因为热处理温度的增加降低了位错密度,提高了均匀塑性变形能力。

Cipriano^[42]使用等离子弧定向能量沉积(PEAD)技术制备 Inconel 625 合金,并进行后热处理,以获得更细小且取向较差的显微组织。高温(1 100 °C/1 h)热处理诱导了明显的再结晶,导致晶粒细化,织构数量降低,同时部分溶解了有害的 Laves 和 δ 相。低温(980 °C/1 h)热处理对晶粒细化的影响有限,且会在枝晶间区域诱导 Laves 相和 δ 相的析出。结果表明,对等离子弧直接能量沉积法制备的 Inconel 625 进行常规热处理,不利于优化组织特征。

2.5 镍基高温合金 WAAM 数值模拟

数值模拟为研究者提供了一个虚拟的平台,使其能够在不进行实际制造的情况下,预测和优化制造过程,减少实际制造中的试错次数,从而提高制造效率并降低成本。在增材制造过程中,温度场的精确控制对于保证最终产品的质量和性能至关重要。因此,温度场模拟分析成为了解熔滴过渡机制和优化 WAAM 过程的关键工具。

Huan^[43]研究了辅助交变磁场下的电弧熔丝增

材 Inconel 718 合金的微观结构、力学性能和断裂机制。通过使用格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)进行温度场模拟分析,计算出熔滴进入熔池时的温度分布情况。模拟结果显示,在不同的激励电流下,熔滴进入熔池后,熔池的温度梯度方向发生了偏转。这种温度梯度方向的偏转会导致晶粒生长方向的偏离,最终使材料的晶粒取向变得随机。此外,温度场模拟分析还揭示了 WAAM 过程中熔滴的偏转和熔池形状变化对晶粒生长和晶粒尺寸的影响,以及熔池中的强制对流现象如何增加异质成核速率,从而细化晶粒尺寸。

郭钊^[44]研究了在 Q345 钢板上电弧熔丝增材制造 Inconel 625 合金过程中发生的复杂物理化学反应问题。研究者首先通过有限元法构建了增材过程的三维宏观传热模型,对温度场的动态演变过程进行了分析,阐明了增材工艺参数等因素对温度场演变过程的影响规律。通过对比模拟和分析同向增材路径、往复增材路径、不同层间冷却时间对温度场演变过程的影响,确定了最优增材方案和增材工艺参数。进一步的研究基于温度场的计算结果,采用元胞自动机法构建了适用于 Inconel 625 合金的模型,模拟了均匀温度场下等轴晶的生长以及非均匀温度场下柱状晶的生长,分析了凝固过程中的晶粒变化和元素偏析。模拟结果与实验结果的良好吻合证明了模拟结果的较高可靠性。

目前,电弧增材制造的数值模拟仍缺乏多尺度模拟的能力,现有的模拟方式大多集中在宏观尺度上,对微观结构的演化与性能的关系缺乏深入理解。微观结构对于材料机械性能有着显著影响,但宏观模拟往往无法直接预测材料微观上的变化。由于缺乏多尺度模拟能力,难以准确预测增材件的最终性能,无法建立工艺-微观结构-性能之间的定量关系。需要发展多尺度数值模拟技术,建立跨尺度物理模型,这些模型涵盖微观到宏观的多个尺度,将微观结构演化与宏观性能联系起来,实现对材料性能的全面预测。

3 总结与展望

目前,电弧熔丝增材制造技术在制造工艺方

法、工艺参数优化及工艺辅助手段等方面进行了大量研究,取得了很多研究成果。然而,针对镍基高温合金电弧熔丝增材制造技术仍有一些科学问题需要深入研究,实现应用技术的产业化尚需时日。未来,镍基高温合金电弧熔丝增材制造研究主要集中在以下几方面:

(1)完善电弧熔丝增材制造镍基高温合金的理论研究。当前研究主要集中于增材制造工艺与组织性能的关系,但关于镍基高温合金电弧熔丝增材过程中相关热源能量输入的调控模型、熔池冶金动力学行为、熔池的非平衡凝固行为及晶粒形态演化规律、传热传质特性及内部冶金缺陷形成机制等问题有待阐明。

(2)电弧熔丝增材制造镍基高温合金的设计开发。现有镍基高温合金都是基于传统制造工艺研发,导致一些高性能合金不适用电弧熔丝增材制造。新合金的成分设计需考虑多种因素,如基体元素、强化元素和稀土元素的选择与配比。这些元素的添加不仅要提高合金的耐高温性能和抗腐蚀性,还要确保合金的增材稳定性和加工性能。

(3)电弧熔丝增材制造镍基高温合金热处理工艺的优化。热处理是提高 WAAM 构件性能的一种重要手段,但现有热处理方法大多基于以往经验,并不完全适合镍基高温合金的增材件。需优化热处理方法,以实现更均匀的微观结构和改善各向异性性能。

(4)发展免热处理工艺的先进高效电弧熔丝增材制造技术。传统电弧熔丝增材制造制备的工件通常存在较大的残余应力、显著的晶粒粗化及非均匀的微观组织,需要通过后续热处理工艺改善其性能,增加了加工成本和时间。因此,研究免热处理工艺的高效电弧增材制造技术,通过优化合金设计与工艺参数,简化制造流程,提升材料性能,具有极大的工程应用价值和研究潜力。旨在解决电弧热循环经历和热积累效应作用下,微观组织演化有害相析出,严重损伤增材件力学性能的瓶颈问题。

参考文献:

- [1] 张立浩,钱波,张朝瑞,等. 金属增材制造技术发展趋势综述[J]. 材料科学与工艺,2022,30(01):42-52.
- [2] 马志林,高梦迪,王庆阳,等. 基于节能的增材制造工艺参数优化方法研究[J]. 邵阳学院学报(自然科学版),2021,18(03):32-43.
- [3] MA Z L,GAO M D,WANG Q Y,et al. Research on optimization method of additive manufacturing process parameters based on energy saving[J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2021, 18(03):32-43.
- [4] Wu B,Pan Z,Ding D,et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement[J]. Journal of Manufacturing Processes,2018,35:127-139.
- [5] 张兆栋,何胜斌,王奇鹏,等. 电弧增材制造工艺方法、增材焊料及后处理的研究现状[J]. 电焊机,2021,51(08):1-10+176.
- [6] ZHANG Z D,HE S B,WANG Q P,et al. Arc additive manufacturing process, additive solder and the research status of post-treatment[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(08):1-10+176.
- [7] 朱勇,滕树满,周茂涛. Inconel 718 镍基高温合金的电弧增材制造研究进展[J]. 有色金属加工,2022,51(06):1-9.
- [8] ZHU Y,TENG S M,ZHOU M T. Research Progress in Arc Additive Manufacturing of Inconel 718 Nickel-Based Superalloy [J]. Nonferrous Metals Processing, 2022, 51(06):1-9.
- [9] Attallah M M, Jennings R, Wang X, et al. Additive manufacturing of Ni-based superalloys: The outstanding issues[J]. MRS Bulletin,2016,41(10):758-764.
- [10] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
- [11] LU B H,LI D C. Development of the Additive Manufacturing (3D printing) Technology [J]. Machine Building & Automation,2013,42(4):1-4.
- [12] 赵锡朋. 电弧熔丝增材 Ni625 合金的组织及性能[D]. 天津:天津大学,2021.
- [13] ZHAO P X. The microstructure and properties of the Ni625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [14] 张国庆,张义文,郑亮,等. 航空发动机用粉末高温合金及制备技术研究进展[J]. 金属学报,2019,55(09):1133-1144.

- ZHANG G Q, ZHANG Y W, ZHENG L, et al. Research Progress in Powder Metallurgy Superalloys and Manufacturing Technologies for Aero-Engine Application[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 47(08): 60-64.
- [10] 曹伟凡,王瑞,孙宝德,等. 3D打印镍基高温合金研究进展[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(07): 76-95
- CAO Y F, WANG R, SUN B D, et al. Research Progress of Nickel-based Superalloys for 3D Printing[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2024, 16(07): 76-95
- [11] WANG Y, CHEN X. Investigation on the microstructure and corrosion properties of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 106568.
- [12] 宋晓国,胡继旭,林丹阳,等. 航天用镍基高温合金粉末床熔融技术研究进展[J]. *航天制造技术*, 2024(03): 1-14.
- SONG X G, HU J X, LIN D Y, et al. Research Progress on Laser Powder Bed Fusion of Ni-based High-temperature Alloys for Aerospace[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2024(03): 1-14
- [13] 陈娇,罗桦,贺戡,等. 航天用镍基高温合金及其激光增材制造研究现状[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(01): 156-169.
- CHEN J, LUO H, HE J, et al. Research Status of Nickel-based Superalloy for Aerospace Field and Its Laser Additive Manufacturing Technology[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(01): 156-169.
- [14] Tanvir A N M, Ahsan M R U, Ji C, et al. Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additive manufacturing (WAAM)—part 1: microstructural characterization[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(9-12): 3785-3798.
- [15] Marchese G, Parizia S, Rashidi M, et al. The role of texturing and microstructure evolution on the tensile behavior of heat-treated Inconel 625 produced via laser powder bed fusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 769: 138500.
- [16] 李文清,郭纯,吴随松,等. 电弧增材制造研究及发展现状[J]. *兰州工业学院学报*, 2023, 30(03): 15-20.
- LI W Q, GUO C, WU S S, et al. Current Research and Development of Arc Additive Manufacturing[J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2023, 30(03): 15-20.
- [17] 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(02): 52-67.
- FANG X W, YANG J N, CHEN R K, et al. Research Progress of Wire Arc Additive Manufacturing Technology for Aluminum Alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(02): 52-67.
- [18] 杨永强,魏宏鸣. 激光增材制造设备现状及发展[J]. *电焊机*, 2021, 51(01): 17-22+119
- YANG Y Q, WEI H M. Present situation and development of laser additive manufacturing equipment[J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(01): 17-22+119.
- [19] Calignano F, Manfredi D, Ambrosio E P, et al. Overview on additive manufacturing technologies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(4): 593-612.
- [20] 杨广宇,汤慧萍,刘楠,等. 粉床型电子束增材制造 W-Nb 合金的缺陷及显微组织[J]. *材料导报*, 2021, 35(S2): 448-451.
- YANG G Y, TANG H P, LIU N, et al. Defect and Microstructure of W-Nb Alloy Fabricated by Selective Electron Beam Melting[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(S2): 448-451.
- [21] 王庭庭,张元彬,谢岳良. 丝材电弧增材制造技术研究现状及展望[J]. *电焊机*, 2017, 47(08): 60-64.
- WANG T T, ZHANG Y B, XIE Y L. Status and development prospects of the wire arc additive manufacture technology[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(08): 60-64.
- [22] 乔柳平,王玉华,邹楠,等. MIG增材制造 Al6CuMg 合金薄壁构件的组织及力学性能研究[J]. *金属加工(热加工)*, 2023(10): 6-13.
- QIAO L P, WANG Y H, ZOU N, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Al6CuMg alloy thin-walled members fabricated by MIG additive manufacturing[J]. *MW Metal Forming*, 2023(10): 6-13.
- [23] 李岩,苏辰,张冀翔. 电弧熔丝增材制造综述:物理过程、研究现状、应用情况及发展趋势[J]. *焊接*, 2020(09): 31-37+63.
- LI Y, SU C, ZHANG Y X. Summary of arc fuse additive manufacturing: physical process, research status, application and development trend[J]. *Welding & Joining*, 2020(09): 31-37+63.
- [24] 陈国庆,树西,张秉刚,等. 国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J]. *焊接学报*, 2018, 39(8): 123-128+134.
- CHEN G Q, SHU X, ZHANG B G, et al. Current devel-

- opment of additive manufacturing technology for electron beam fuse deposition at home and abroad [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8):123-128+134.
- [25] 田根,王文字,常青,等. 电弧增材制造技术研究现状及展望[J]. 材料导报, 2021, 35(23):23131-23141.
TIAN G, WANG W Y, CHANG Q, et al. Research Progress and Prospect of Wire and Arc Additive Manufacturing [J]. Materials Reports, 2021, 35(23):23131-23141.
- [26] 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.
- [27] 袁战伟,常逢春,马瑞,等. 增材制造镍基高温合金研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(03):206-214.
YUAN Z W, CHANG F C, MA R, et al. Research Progress of Additive Manufacturing of Nickel-based Superalloys [J]. Materials Reports, 2022, 36(03):206-214.
- [28] 张宁波,温斯涵,张景琪,等. 镍基高温合金增材制造技术及其在航天领域应用进展[J]. 航天制造技术, 2024(02):7-15.
ZHANG N B, WEN S H, ZHANG J Q, et al. Additive Manufacturing Technologies of Nickel-based Superalloys and Their Application in Aerospace [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2024(02):7-15.
- [29] Novelino A L B, Carvalho G C, Ziberov M. Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry [J]. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2022, 5:100105
- [30] Karmuhilan M, Kumanan S. Location-dependent microstructure analysis and mechanical behavior of inconel625 using Cold Metal Transfer (CMT) based wire and arc additive manufacturing [J]. Vacuum, 2023, 207:111682
- [31] Kindermann M R, Roy M, Morana R, et al. Process response of Inconel 718 to wire + arc additive manufacturing with cold metal transfer [J]. Materials Design, 2020, 195:109031.
- [32] 蒋凡,杨迪,张国凯,等. 电弧熔丝增材制造控形技术研究现状与展望[J]. 机械制造与自化, 2024, 53(02):1-10.
JIANH F, YANG D, ZHANG G K, et al. Current Status and Outlook of Wire Arc Additive Manufacturing Shape-control Technology [J]. Machine Building & Automation, 2024, 53(02):1-10.
- [33] Rodrigues T A, Farias F W C, Zhang K P, et al. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel/Inconel625 functionally graded material: development and characterization [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21:237-251.
- [34] Jeong T W, Cho Y T, Lee C M, et al. Effects of ultrasonic treatment on mechanical properties and microstructure of stainless steel 308L and Inconel718 functionally graded materials fabricated via double-wire arc additive manufacturing [J]. Materials Science Engineering A, 2024, 896:146298.
- [35] Amiri V, Moosavy N H. Wire arc additive manufacturing of functionally graded carbon steel-stainless steel 316L-Inconel625: Microstructural characterization and mechanical behavior [J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2024, 9:100194.
- [36] LU L Z, TIAN Y B, CAI Y C, et al. Microstructure and mechanical properties of a functionally graded material from TA1 to Inconel 625 fabricated by dual wire+arc additive manufacturing [J]. Materials Letters, 2021, 298:130010.
- [37] CHEN Y H, XU M F, ZHANG T M, et al. Grain refinement and mechanical properties improvement of Inconel625 alloy fabricated by ultrasonic-assisted wire and arc additive manufacturing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 910:164957.
- [38] WANG Y F, CHEN X Z, SHEN Q K, et al. Effect of magnetic Field on the microstructure and mechanical properties of inconel625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64:10-19.
- [39] Amit M, Krishna P V, Yogesh P, et al. Post-processing of wire arc additive manufactured Inconel-625 thin structure by electro-discharge machining with TLBO assistance [J]. Materials Letters, 2023, 348:134672.
- [40] Himanshu S, Jonny S, Vikrant S, et al. Influence of post heat treatment on metallurgical, mechanical, and corrosion analysis of wire arc additive manufactured inconel625 [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27:5910-5923.
- [41] XU M F, CHEN Y H, ZHANG T M, et al. Effect of post-heat treatment on microstructure and mechanical properties of nickel-based superalloy fabricated by ultrasonic-assisted wire arc additive manufacturing [J]. Materials Science Engineering A, 2023, 863:111548.

- [42] Farias F W C, Duarte V R, Felice I O, et al. In situ inter-layer hot forging arc plasma directed energy deposition of Inconel625: microstructure evolution during heat treatments [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 952: 170059.
- [43] HUAN P C, WEI X, WANG X N, et al. Comparative study on the microstructure, mechanical properties and fracture mechanism of wire arc additive manufactured Inconel 718 alloy under the assistance of alternating magnetic field [J]. *Materials Science Engineering A*, 2022, 854: 143854.
- [44] 郭钊. Inconel625合金电弧熔覆温度场及组织演变数值分析[D]. 西安:西安理工大学, 2022.
- GUO Z. Numerical analysis of temperature field and microstructure evolution of Inconel 625 alloy by arc cladding [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第19页

- WANG H D, ZHANG H, XU J N. Coordinated control strategy for wheeled autonomous mobile welding robot [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004 (03): 4-6+129.
- [12] Haviland J, Sunderhauf N, Corke P. A Holistic Approach to Reactive Mobile Manipulation [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 3122-3129.
- [13] 方乃文, 黄瑞生, 闫德俊, 等. 低镍含氮奥氏体不锈钢激光-电弧焊电弧特性及组织性能 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(01): 70-75+102.
- FANG N W, HUANG R S, YAN D J, et al. Effect of welding heatinput on microstructure and properties of MAG welded joint for low nickel high nitrogen austenitic stainless steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(01): 70-75+102.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>