

激光熔丝增材制造及其复合制造技术研究进展

黄文¹ 胡红磊² 李雷¹ 刘卫东³

(1. 上海电机学院材料学院, 上海 201306; 2. 上海电机学院机械学院, 上海 201306; 3. 河南理工大学材料科学与工程学院, 焦作 454003)

摘要 激光熔丝增材制造技术在制造复杂几何结构部件、大型装备部件以及实现轻量化生产中显现出独特优势, 具有较高的材料利用率, 推动了绿色化生产, 受到了广泛关注。但该技术在对特殊材料的适应性、缺陷控制及设备稳定性等方面仍然面对重大挑战, 需要不断对工艺参数制定优化策略以保证部件质量。在总结激光熔丝增材制造技术发展现状的基础上, 探讨了复合热源熔丝技术的研究现状, 展望激光熔丝增材制造技术的发展趋势。

关键词 增材制造; 激光熔丝; 激光复合热源

中图分类号 TG146.1; G353.11

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240328

Research Progress in Laser Wire Additive Manufacturing and Its Hybrid Manufacturing Technologies

HUANG Wen¹, HU Honglei², LI Lei¹, LIU Weidong³

(1. College of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306; 2. College of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306; 3. College of Materials and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003)

Abstract: Laser wire additive manufacturing technology exhibits unique advantages in the production of complex geometric structures, large equipment components, and lightweight production, which boasts high material utilization, promotes green production, and has garnered widespread attention in both industrial and academic fields. However, the technology faces significant challenges in adaptability to special materials, defect control, and equipment stability. Continuous optimization of process parameters is essential to ensure component quality. The current state on laser wire additive manufacturing technology was summarized. On this basis, the research status of hybrid heat source wire technology was explored, and the development trends of laser wire additive manufacturing technology was prospected.

Key Words: Additive Manufacturing, Laser Wire, Laser Hybrid Heat Source

收稿日期: 2024-08-19; 修订日期: 2024-11-03

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”资助项目(19511105402)

第一作者简介: 黄文, 男, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: huangwen0620@163.com

通信作者: 李雷, 男, 1975年出生, 教授, E-mail: lilei@sdju.edu.cn

引用格式: 黄文, 胡红磊, 李雷, 等. 激光熔丝增材制造及其复合制造技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10): 1483-1490.

HUANG W, HU H L, LI L, et al. Research progress in laser wire additive manufacturing and its hybrid manufacturing technologies[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1483-1490.

- [19] 段望春, 高佳佳, 董兵斌, 等. 3D打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2895-2900.
- [20] 黄树槐, 张祥林, 马黎, 等. 快速原型制造技术的进展[J]. 中国机械工程, 1997(5): 8-12.
- [21] 樊自田, 黄乃瑜, 罗吉荣, 等. 用快速造型技术生产金属零件的方法及评价[J]. 中国机械工程, 1997(5): 25-26.
- [22] YUN Y, SHI T C, MA Y H, et al. Study and application status of additive manufacturing of typical inorganic non-metallic materials[J]. Materials Science, 2019, 26(1): 58-70.
- [23] 赵锦龙, 左巍, 曲宝福. 激光选区烧结覆膜砂后处理工艺的研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(4): 267-269.
- [24] Le Néel T A, Mognol P, Hascoët J. A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering[J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(8): 1325-1336.
- [25] SONG J L, LI Y T, DENG Q L, et al. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187: 614-618.
- [26] CAREY P R, KERNS K J, SOROVETZ T. European direct shell sand core and mould making rapid prototyping process[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1997, 105: 769-774.
- [27] BEAUDOIN R. Rapid prototyping heads sessions[J]. Modern Casting, 1997(6): 601-605.
- [28] CASALINO G, DE FILIPPIS L A C, LUDOVICO A D, et al. An investigation of rapid prototyping of sand casting molds by selective laser sintering[J]. Journal of Laser Applications, 2002, 14: 100-106.
- [29] CASALINO G, DE FILIPPIS L A C, LUDOVICO A D, et al. A technical note on the mechanical and physical characterization of selective laser sintered sand for rapid casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166: 1-8.
- [30] SALMORIA G V, KLAUSS P, PAGGI R A, et al. Structure and mechanical properties of cellulose based scaffolds fabricated by selective laser sintering[J]. Polymer Testing, 2009, 28: 648-652.
- [31] CHIVEL Y, SMUROV I. On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting[J]. Physics Procedia, 2010, B5: 515-521.
- [32] 周英伟, 樊玉鹏, 于瑞龙, 等. 选择性激光烧结用聚合物复合材料的进展[J]. 材料导报, 2024, 38(19): 23020110-1-9.

(编辑: 张正贺)

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术起源于20世纪80年代初。1984年,有研究者开发了立体光刻(Stereolithography, SLA)技术,这是一种利用紫外线激光固化光敏树脂逐层制造三维物体的方法^[1]。进入21世纪,增材制造技术不断成熟,金属增材制造成为了研究热点,目前可分为两大类:粉末床熔合(PBF)工艺和直接能量沉积(DED)工艺。PBF工艺利用热能选择性熔合粉末,而DED工艺则通过热能熔化材料形成零件。PBF包括选择性激光熔化、选择性激光烧结、直接金属激光烧结、电子束熔化和激光金属熔化。DED包括直接金属沉积、激光工程净成形、激光金属沉积、电弧增材制造和激光熔丝增材制造^[2-3]。迄今,增材制造技术已经被应用到航空航天、医疗、汽车、建筑等领域。复杂零部件的定制生产、功能集成的设计以及生产流程的数字化都受益于增材制造技术的发展。

随着工业4.0的推进和智能制造的兴起,对复杂构件和高性能部件需求的增加,激光熔丝技术在航空航天^[4]、汽车制造^[5]等高端制造领域的应用前景日益广阔。GKN Aerospace的Cell 3激光熔丝增材制造单元,现已能够开发出直径为5 mm的钛部件,用于航空航天关键结构。然而,在展现出巨大的发展潜力的同时,激光熔丝技术本身仍面临着诸多挑战和瓶颈,需要通过持续的技术创新和工艺优化,解决多物理场耦合、工艺参数优化、设备稳定性和可靠性等问题。本综述将从激光熔丝工艺特性和焊接机理两方面,总结激光熔丝增材制造技术的发展现状,并探讨复合热源熔丝工艺的研究进展。

1 激光熔丝技术研究现状

近年来,从传统的钛合金、不锈钢等金属材料,到镍基高温合金、铝合金等难加工的材料,激光熔丝技术取得了重要突破^[6]。

1.1 激光熔丝工艺特性研究

1.1.1 激光加工参数

激光熔丝增材制造过程中,工艺参数的精确控制决定了工件的微观组织、表面质量及力学性能的优劣,其中,激光功率直接影响熔池的热输入,从而决定了金属丝的熔化程度和熔池的稳定性。扫描速度精确调控激光在工件表面停留的时间,从而改变激光对工件的热输入和热影响区,改善残余应力和变形。WANG Q J等^[7]发现扫描速率增加会显著缩短熔池的寿命,同时导致熔体的黏度急剧增加,降低液相的润湿性,使熔体扩散不足,容易产生气孔,并降低成形件的密度。此外,

使用小直径线材和脉冲波来提高精度,可以将沉积物尺寸缩小至微米级^[8]。SYED W等^[9]使用二极管激光器设备,在熔丝过程中尝试了不同的工艺参数,制备的涂层表面平均粗糙度仅为40~60 μm ,而送粉方式下的粗糙度为70~90 μm 。此外,不同材料对激光功率、扫描速率等工艺参数的响应也不同。李慧敏^[10]对激光熔丝单层单道5356铝合金丝材及Ti-6Al-4V钛合金丝材的工艺参数进行了研究,发现在真空环境下,低扫描速度和送丝速度,熔覆层成形效果较好,而钛合金成形质量明显优于铝合金丝材,激光功率为180 W、扫描速率为6 mm/s、送丝速率为6 mm/s、搭接率为36%时为较优的工艺参数组合。CONSTANTIN L等^[11]通过优化工艺参数,在400 mm/s扫描速度和0.12 mm叠距下成功打印出相对密度高达95%、表面粗糙度为18 μm 的无裂纹的铜质散热器。由于材料种类繁多,不同金属材料在激光熔融过程中的行为差异较大,工艺参数的普适性和优化需要进一步深入研究。

1.1.2 轴向送丝策略

除了常见的激光熔丝工艺参数外,送丝方向、送丝角度和丝端在熔池中的位置也会影响沉积层的几何形状和工艺稳定性。在LWAM中,通常从一侧送入金属丝,这种送丝方式成本较低,但受加工方向影响较大,沉积几何形状的灵活性降低。杨鑫等^[12]研究了旁轴送丝角度对单道沉积层成形的影响,指出采用旁轴送丝的方式打印出的熔覆层表面粗糙度较大,且具有方向性缺陷。送丝角度影响了焊丝和基体对激光能量的吸收效率,从而影响了沉积层的尺寸^[13]。为了保障激光束不受遮挡和加工方向不受影响,有研究者提出了两种轴向送丝的新方法,一种是利用3个单激光束对称地放置在金属丝周围^[14],二是使用环形激光束^[15],见图1和图2。这意味着不受加工方向的影响,可以在任何方向上进行沉积,更容易实现多层堆积和构建任意方向的形状。目前,部分商用激光熔覆头已在工业生产中得到应用,如Fraunhofer IWS^[16]的激光熔覆头,其采用同轴方式送入,激光束被分成几束单独的光束,最后聚焦到圆形焦点上。傅戈雁等^[17]在使用环形激光束同轴送丝的试验中发现,同轴送丝焊接具有光丝耦合姿态固定、热源对称、能量分布合理等优势,所得焊缝表面光滑平整,截面形状对称,焊缝质量各向同性。FU J等^[18]采用同轴送丝方式,结合轴对称多激光源法,制备Ti-6Al-4V钛合金零件,发现同轴送丝的方法能够消除传统激光增材制造中的各向异性成形问题,可获得更精细的表面质量。试样主要由细小的网篮纹结构和马氏体组织构成。室温拉伸测试结果显示,试样各向异

性得到了显著改善,但同轴送丝系统控制的复杂度也将随多激光源的加入而增加。这表明全向沉积是可行的,同轴送丝在获得更好的表面质量方面更具优势,而旁轴送丝的路径规划更加困难。

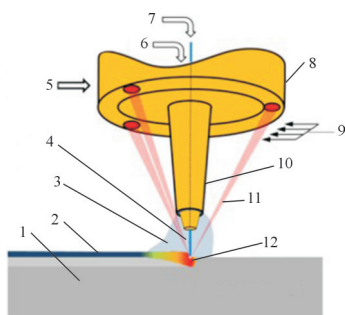


图1 同轴送丝光学系统示意图^[14]

Fig.1 Schematic diagram of CoaxWire optical system^[14]

- 1.基材 2.凝固层 3.熔池保护 4.丝材 5.焊接方向 6.保护气体
7.送丝 8.同轴送丝光学系统 9.横向气流 10.保护气体喷嘴
11.激光束 12.熔池

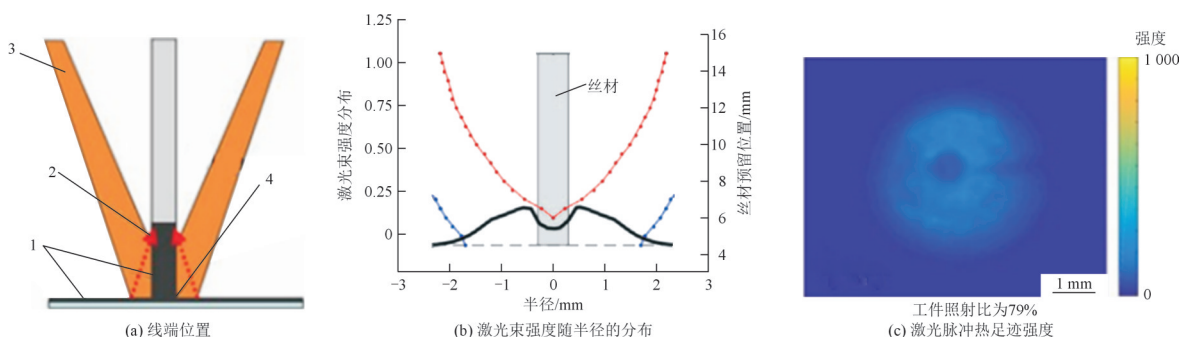


图2 预留位置4.5 mm处的工件照射比^[20]

Fig.2 Workpiece illumination proportion at a reserved position of 4.5 mm^[20]

- 1.石墨涂层 2.反射激光束 3.环形激光束 4.线端

1.1.3 压缩气体辅助

在激光熔丝过程中保护气体显著影响焊丝的沉积速率,同时控制飞溅,保护沉积的材料不受污染,因其能够阻止烟尘粘附在镜片上,有效保护光学镜片免受损伤。保护气体流动不稳定会导致熔池表面不均匀受力,引起金属飞溅,而流量不足或分布不均可能导致大气中的气体进入熔池,增加气孔的形成风险。JURIC I等^[21]使用Ni625丝材作为熔覆材料,比较了在不同的保护气体下制作的成形件的力学性能。结果表明,体积分数为97.5%的Ar和2.5%的CO₂混合气体会使工件截面的硬度增大,工件结构的抗拉强度更高。CABALLERO A等^[22]设计了一种充满Ar气氛的封闭装置,并在熔覆时使用两种不同的保护气体,一种是在Ar中混合体积分数为38%的He和2%的CO₂,另一种是在Ar中混合体积分数为2.5%的CO₂。采用电子背散射衍射图谱分析了两种试样的相组成,发现使用保护气体会导致较高的热输入,减少沉积组织中残留的

轴向送丝过程中,激光能量需要同时加热工件和丝材。过多的能量集中在工件上可能会导致过度熔化或过高的热输入,造成工件变形或熔池过大。而如果能量主要集中在送丝材料上,则可能导致丝材过快熔化或材料飞溅。为了表征施加在工件和丝材上的能量分布,KOTAR M等^[19]提出了一个额外的工艺参数——工件照射比例(WIP)。采用直径为0.6 mm的SS316丝在SS304工件上进行单层沉积,发现熔池不稳定的原因是工件和丝材的能量输入不均匀,这可能导致丝材端部熔化不充分并与工件碰撞,也可能导致熔丝与熔池之间已建立连接断裂,在丝材端部形成液滴。通过测量工件与丝材的加热比例,得出丝材距离工件4.5 mm处时的工件照射比为79%,而在熔覆开始时,将丝材端部置于工件表面,即丝材预留位置为0时,可以实现工件和丝材同时加热,使熔池更加稳定^[20]。

奥氏体含量。在增材制造过程中保护气体的使用不仅改善了金属成形件的质量和性能,同时提升了制造过程的稳定性和安全性。

1.2 激光熔丝技术焊接机理研究

1.2.1 匙孔效应

在激光熔丝过程中,激光束在焊接区域高度聚焦,将大量能量集中在一个小区内,能量不仅使材料熔化,还会使熔池表面层迅速蒸发。蒸发过程产生的蒸气在焊接区域内形成高压。由于蒸发产生的蒸气具有极高的压力,这种反冲压力将熔池内的液态金属向四周推开,形成一个深而窄的深腔,也就是匙孔^[23]。一旦匙孔形成,激光吸收率显著增加,使能量深入材料内部,实现深熔焊接,提高焊缝的深度和强度。

由于激光束的持续加热,蒸气的反冲压力和熔池液态金属的表面张力共同作用下,维持了匙孔的存在。有研究认为,在蒸气反冲压力和表面张力之间的压力

平衡下,金属的蒸发是均匀地发生在锁孔壁上,匙孔处于静止状态。MATSUNAWA A 等^[24]研究发现,金属的蒸发并不是均匀发生的,而是在匙孔前壁上局部发生的。入射光束照射到材料表面,导致在凸起处发生强烈的蒸发,金属蒸气射流的动态压力使匙孔的后壁凹陷,见图 3。这种不均匀的蒸发可能会影响匙孔的稳定性,导致焊缝中产生气孔和裂纹等缺陷。

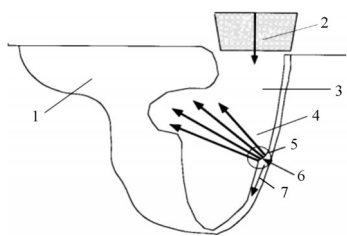


图3 金属在匙孔前壁的蒸发及其对匙孔后壁和熔池影响^[24]

Fig.3 Localized evaporation of metal in the keyhole front wall and its effect on perturbation of keyhole rear wall and molten pool^[24]

1. 熔池 2. 激光束 3. 匙孔 4. 金属蒸气喷射 5. 局部蒸发 6. 驼峰
7. 金属液流动

1.2.2 激光焊接中常见缺陷及抑制方案

激光熔丝过程中,由于金属丝在工件和沉积头之间形成恒定的机械连接,金属丝与激光束的结合可能引发不同类型的缺陷,以气孔及裂纹最为典型。

激光焊接过程中,气孔形成机制各有不同,包括氢致气孔^[25-26]和不稳定匙孔^[27]。材料中的杂质和表面污染物在高温下会分解产生氢,由于熔池的平均温度相当高,从而诱导了气孔增加。此外,材料表面的氧化层是焊缝中产生孔隙的另一个原因,多孔氧化层很容易吸收大气中的水分,在高温熔池中会分解产生氢气,这些氢气被困在焊缝中形成气孔,导致材料缺陷。而匙孔稳定性取决于熔融金属的性质,如表面张力和蒸汽压,匙孔的不稳定使熔池表面振荡而将空气中的气体滞留。裂纹以凝固裂纹最常见,这是由于凝固过程金属液的填充不足引起的。可以从减缓凝固速率和缩短回填距离等方面入手,也可采用复合热源^[28]、增加预热温度^[29]及低频摆动焊接^[30]等方法来减少裂纹产生。气孔可通过来料控制,确保成分均匀及清洗焊缝表面油污来预防,从激光复合焊和采用环形光斑^[15]等方式来保持匙孔稳定性的方向进行优化。

1.2.3 温度场与应力场的数值模拟

随着计算机技术的发展,基于多尺度建模的方法逐渐兴起,通过结合微观和宏观的三维瞬态热传导模型,能够更细致地模拟熔池的形成机制、动态行为、温度分布以及残余应力的产生和演变,从而为工艺参数

优化和缺陷控制提供参考^[31]。

温度场模拟主要集中在激光热源与材料相互作用时的热传导、对流和辐射等传热机制,而应力场的模拟主要关注材料在快速加热与冷却过程中的热应力产生、分布以及残余应力的演变。任朝晖等^[32]利用 ABAQUS 软件建立了激光熔丝完全热力耦合有限元模型,模拟了 Ti-6Al-4V 钛合金单道多层薄壁件的沉积过程,通过分析热循环特性和残余应力的分布,发现沉积成形过程中存在热累积效应,且沉积层整体呈拉应力状态,容易产生裂纹等缺陷。邱艳艳等^[33]通过有限元模拟和试验,发现扫描速度会影响熔池温度和晶粒尺寸。随着扫描速度增加,熔池温度降低,晶粒尺寸减小。这为优化激光熔丝增材制造工艺参数、提高成形件性能提供了参考。张吉平等^[34]通过建立三光束光源的热源模型,利用 ANSYS 软件进行温度场仿真,发现离焦量、激光功率等参数对熔覆层高度和稀释区的形貌特征影响较大,对工艺参数优化后,得到了平整光滑、无缺陷的熔覆层。

1.2.4 激光高反射性材料

金属材料对激光的吸收率受物理和化学性质、表面状态、温度以及激光参数等多种因素的影响。不同金属材料由于其电子结构和表面反射特性,对激光的吸收率有显著差异^[35]。铜合金因其优异的导热性、导电性以及出色的耐腐蚀性等特点而备受关注,在航空航天、船舶建造、电气等领域发挥关键作用。但纯铜对激光的反射率高达 98% 左右^[36],造成激光能量的严重损失与热量输入不足。但仅增加激光功率会降低熔池的稳定性,且会对激光器的使用寿命造成巨大影响。JADHVA S D 等^[37]采用波长为 1 080 nm 的激光照射铜基底 12 h 后,发现激光器的光学元件被损坏。LU B H^[38]发现对于纯铜的焊接,激光功率的增加未能显著提高其成形工件的相对密度,反而容易因熔合不足导致孔隙缺陷。显然,仅提高激光功率以增加热量输入并不能提高工作效率,还可能导致工艺不稳定。

为提高铜合金激光吸收率,研究者做了很多工作。BIRO E 等^[39]发现改变预热温度可提高激光能量吸收率,将纯铜预热温度从 25 °C 提升至 1 085 °C 时,激光能量吸收率从 4.89% 增加到 16.10%。DADRAS S 等^[40]研究了预热温度对激光焊接铜镍合金焊缝熔深的影响,发现对铜基材进行预热可以显著增强激光吸收,加深激光穿透。另一方面,在铜合金中添加金属元素也可改善铜合金激光能量吸收率。申继标^[41]研究发现,Cr 含量为 0.8% 的铜粉激光吸收率比纯铜要高。加入 0.2% 的纳米 TiC 改性后,成形试样的相对密度及力学

性能得到进一步提升。然而,金属元素的加入对所制作丝材的硬度也会产生影响,而丝材的硬度又会影响熔池的稳定。高硬度材料在加热和冷却过程中会产生较大的热应力,这可能导致熔池中的裂纹等缺陷增加,同时熔池内金属流动不均匀,金属堆积在焊缝一侧,形成焊瘤。

为了避免缺陷的产生,激光高反射性材料在熔化和冷却过程中需要保持更均匀的温度场,来促进金属的充分混合,然而,单一的激光热源明显不够,研究者还需开发出一种不仅可以增强熔池的热输入,还能提高熔池的流动性,减少热应力带来的裂纹和缺陷风险的增材制造技术。激光加电弧复合热源技术应运而生,为提高焊接质量和材料性能提供了新的思路。

2 激光复合热源熔丝技术研究现状

随着制造业对更高效、更精确控制以及更广泛材料适应性的需求不断增加,激光复合热源熔丝技术展现出巨大潜力。这种技术将两种及以上热源耦合,共同作用以熔化沉积的金属丝。结合了不同热源的优点,提升加工效率的同时,获得优异的综合性能。目前,采用丝材作为进给材料,且较为成熟的激光复合热源主要包括激光与电弧的复合热源和辅助加热技术。

2.1 激光-电弧复合热源熔丝技术

激光与电弧热源的耦合机制是激光复合热源的核心研究内容,也是在各种激光复合热源增材制造技术中应用最为广泛的一种。20世纪70年代末,研究者首次提出激光-电弧复合焊技术^[42]。通过激光与其他热源的耦合作用,克服各自在增材制造过程的缺点,提高金属对热量的吸收,可以在较小的激光功率条件下,有效利用电弧能量来获得较大的熔深,并提高激光对熔缝间隙的适应性,减少飞溅^[43],以实现高质量的熔覆,见图4。这种复合增材技术将两种热源的优势充分发挥出来,同时又相互弥补了对方的不足,形成了一种高效的热源。目前,激光-电弧复合热源增材制造的协同效应已被众多研究者发现。在交通领域,国内有生产厂家先后完成了高速磁浮长大薄壁铝合金车身中的地板、车顶、侧墙三大部件以及夹层端板组成等中小部件的研制,实现了激光电弧复合焊接技术在600 km/h高速磁浮列车中的开创性应用^[44]。船舶领域,有生产企业现已全部采用激光-电弧复合焊接方法进行轮船的焊接^[45]。航空领域,实现了7 mm厚3CrMnSiA无预热激光-MAG电弧复合焊接,用于航天关键部件,大幅降低了工人劳动强度并提高了焊接生产效率^[46]。

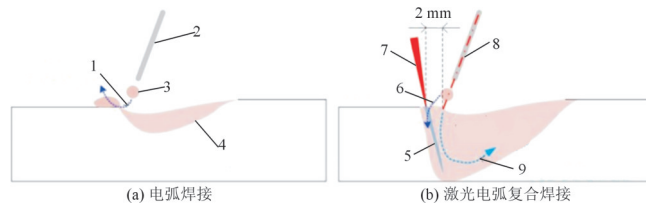


图4 激光-电弧协同效应减少飞溅的机理示意图^[43]

Fig.4 Mechanism diagram of laser-arc synergistic effect to reduce spatter^[43]

1、6.液滴路径 2、8.填充焊丝 3.熔融液滴 4.熔池 5.匙孔
7.激光束 9.熔体流动路径

2.1.1 激光-TIG复合热源

激光-TIG(钨极惰性气体保护焊, Tungsten Inert Gas, TIG)增材制造技术是一种结合了激光高能量密度和TIG电弧高熔敷效率的复合增材制造工艺。激光与电弧两种热源相互耦合,能够有效降低孔隙率,改善纯激光焊接或纯TIG焊接各自的局限性^[47]。激光-TIG增材制造技术可以在较低的激光功率下实现金属材料的熔化,因为TIG焊接的电弧可以帮助维持熔池的稳定,同时TIG焊接的惰性气体保护可以有效地防止熔池中的金属氧化,提高焊缝的质量。此外,精确的激光束和TIG电弧控制实现了高精度的加工,能够实现复杂形状部件的制造,这些部件如果采用传统的减材制造方法,不仅加工难度大,而且成本高昂。因此,激光-TIG增材制造技术在航空航天等高端精密制造业等领域展现出了巨大的应用潜力。

激光-TIG复合热源在增材制造高反射性材料时显现出独特优势。WU D J等^[48]采用激光-TIG混合增材制造技术制造Al-Cu(2219)合金,通过激光与电弧的结合,显著改善了传统增材制造中易出现裂纹和强度差的问题,表现出更细小均匀的晶粒、更好的元素分布及优异的相界面能,制备的Al-Cu合金具有较低的孔隙率,力学性能均高于纯TIG、CMT和SLM制备的试样。吴胜男^[36]通过激光-电弧复合增材制造制备了无裂纹和气孔缺陷的铜合金薄壁件与圆筒构件。对比研究了TIG电弧薄壁件与激光-TIG电弧复合薄壁件的微观组织和力学性能,发现激光-TIG电弧复合薄壁件相对于TIG电弧薄壁件晶粒明显细化,柱状晶长宽比降低,且复合试样内部具有更多均匀分布的析出相(Cr相),成形件具有更高的力学性能。

2.1.2 激光-MIG复合热源

激光-MIG(熔化极惰性气体保护焊, Metal Inert-Gas Welding, MIG)中MIG电弧通常能够提供比TIG电弧更高的金属沉积速率,且设备通常更容易自动化,这对于大规模生产和复杂形状的制造是一个显著的优

势。在激光-MIG 复合热源焊接过程中,通过 MIG 来提高焊缝的搭桥能力,增强激光焊对工件装配误差变化的适应性,激光束则可在熔池中产生小孔,保证在高速焊接条件下获得理想的焊缝熔深和规则的焊缝成形^[49-50]。SUN C S 等^[51]研究了激光辅助 MIG 增材制造 5356 铝合金,指出加入激光后,氢孔数量减少,微观结构变得更细、更均匀,从而提高了抗拉强度。徐鑫^[52]采用激光-MIG 混合焊技术制备 Cu-Cr-Zr 合金部件,发现激光-MIG 方法获得了更细的晶粒和更优的力学性能,但会导致材料的相对密度和电导率下降。ZHANG L J 等^[53]采用激光-MIG 混合热源的方法,实现了 4 mm 厚紫铜的单道全熔透焊接。

2.1.3 激光与电弧位置的影响机制

激光和电弧间的相对位置会显著影响焊缝中的热输入分布。顾思远等^[28]发现,激光与电弧的相对位置对熔池的稳定性影响较大,见图 5。当激光位于前置位置时,熔滴尺寸较大,且在过渡过程中容易发生汽化爆炸,对熔池产生显著冲击,激光的高能量密度提前预热或部分熔化了基材,使得电弧焊接更加稳定。而当电弧处于前置位置时,匙孔能够保持稳定,液态金属顺着孔壁向下流动,从而增加熔池底部的面积。由此来看,热源的相对位置也会改变焊接过程中金属的冷却速率和凝固条件,从而影响晶粒的生长方向和尺寸。张亚亮等^[54]发现当电弧引导激光时,激光与电弧两种热源耦合效果及焊缝成形较好,激光与电弧作用区为明显的等轴树枝晶和细小的等轴晶粒。而当激光引导电弧焊接时,熔池振荡严重,熔滴向爆炸倾向过渡,激光与电弧作用区为等轴细晶结构。

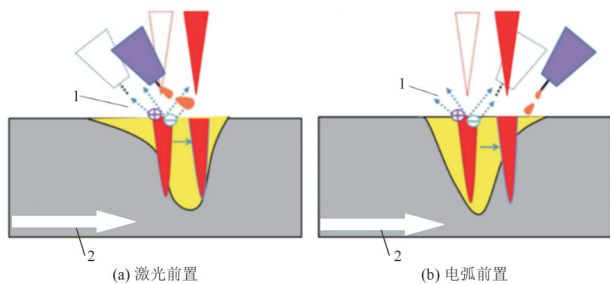


图 5 不同热源位置时金属蒸汽对熔滴过渡的影响^[53]

Fig.5 Effects of metal vapor on droplet transition at different heat source positions^[53]
1. 金属蒸气 2. 焊接方向

不同材料和焊接工况下,激光与电弧的相对位置及工艺参数的改变,可能导致匙孔不稳定、熔池扰动增加,进而产生缺陷。MIAO H B 等^[55]采用孔隙面积分数的概念来评价激光-电弧复合焊接 A7N01 铝合金孔隙缺陷的严重程度,见图 6。焊接速度和电弧电流的改

变对两种引导方式的焊接质量产生了相同的影响趋势。增加焊接速度,孔隙面积分数都逐渐降低,而增加电流,孔隙面积分数增加后又显著下降。

激光与电弧的耦合机制并不是简单地将两种热源叠加在一起,未来,两种热源的协同效应及影响机理仍需不断探索。

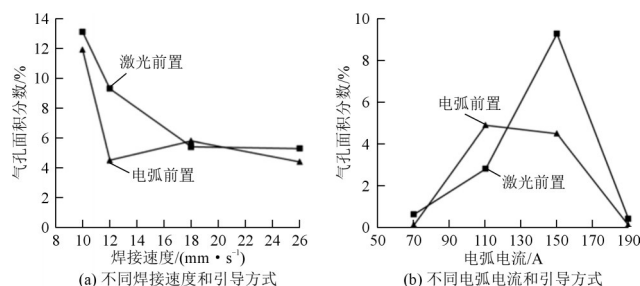


图 6 不同工艺参数下的气孔面积分数^[56]

Fig.6 Area fraction of porosities under different process parameters^[56]

2.2 辅助加热技术

辅助加热主要是对金属丝材和基材的预热。其中,热丝工艺主要分为电阻热丝和电弧热丝。电阻式加热设备简单、可控性强且操作安全性好,但其送丝稳定性较差,当热丝电流较大时,导线容易过度弯曲而无法送丝,不适用于电阻率低材料。而电弧热丝具有加热效率高、成本低、适用性广等特点,受到了广泛关注^[56]。基材通常采用感应加热,利用高频电磁场在基材中产生涡流热,实现快速、均匀的预热效果。感应加热虽然在大面积加热和高温预热方面具有优势,但设备成本较高,且对加热区域的精确控制有一定难度。辅助加热技术的使用可以有效减少激光熔丝过程中的热梯度,使线材到熔池的过渡更加稳定,促进熔池的流动性,提高沉积效率。通过辅助加热技术,可以有效降低成形件内部的残余应力,从而提高构件的尺寸精度和形状稳定性,抑制沉积过程中试样裂纹的产生^[57]。THOMPSON S M 等^[58]将激光热丝熔覆与激光冷丝熔覆工艺进行比较,发现通过电阻加热预热金属丝,有效降低了所需的激光功率,并提高了沉积速率和过程稳定性。与冷丝熔覆相比,热丝熔覆的稀释率更低,沉积速率更高,但微观结构更粗大,硬度略低。YKOY P 等^[59]发现通过预热基板到 140 °C,可将铜质部件内部的孔隙率从 3% 下降到 0.88%。WEN P 等^[60]研究证明,激光热丝熔覆技术在修复高强度、耐腐蚀的马氏体沉淀硬化不锈钢 FV520B 方面具有独特的优势。通过优化工艺参数,可以获得成形质量好、力学性能优良的熔覆层,为修复受损零件提供了一种经济高效的解决方案。

3 结语与展望

(1)对激光熔丝增材制造及其复合制造技术的研究现状进行了综述。激光熔丝技术在航空航天、船舶和汽车制造等高端制造领域已广泛应用,但制备高性能大部件时技术难度较高,工艺参数的优化策略、特殊材料的适应性及缺陷控制等方面仍是未来重点研究的方向。随着对多物理场耦合效应认识的加深,一些先进的模拟技术将被逐步引入,以提供更精确的预测和分析工具。

(2)激光复合热源熔丝技术的应用解决了单一的激光热源在制备高性能大部件时存在热输入不足等问题,现已广泛应用于在大规模工业生产中。但未来研究仍需解决和控制一些技术难题,如激光与电弧能量的控制、制造复杂几何形状的精度保证和大尺寸构件的成形能力等。在实际应用中涉及复杂的多物理场耦合,过程控制变得更加复杂,设备稳定性和可靠性等问题仍需进行大量研究,以适应工业发展需求。

参 考 文 献

- [1] HUANG J G, QIN Q, WANG J. A review of stereolithography: Processes and systems[J]. Processes, 2020, 8(9): 1 138.
- [2] WANG D, LIU L Q, DENG G W, et al. Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2022, 17(2): 329-365.
- [3] ROMETSCH P A, ZHU Y, WU X, et al. Review of high-strength aluminium alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion[J]. Materials & Design, 2022, 219: 110 779.
- [4] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371-392.
- [5] MOHAMMAD A, GUILE N M, BAHAA S, et al. Advancements in laser wire-feed metal additive manufacturing: A brief review[J]. Materials, 2023, 16(5): 2 030.
- [6] 吴悦晨. GH4169D合金激光熔丝修复成形与性能调控技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023.
- [7] WANG Q J, SHAO H J, ZHANG X, et al. Study of thermal behavior and microstructure formation mechanism of CuCrZr alloy melted by laser powder bed fusion[J]. Materials Characterization, 2023, 198: 112 721.
- [8] DEMIR A G. Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 100: 9-17.
- [9] SYED W, PINKERTON A J, LI L. A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping [J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1-4): 268-276.
- [10] 李慧敏. 激光熔丝增材制造工艺特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- [11] CONSTANTIN L, WU Z P, LI N, et al. Laser 3D printing of complex copper structures[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101 268.
- [12] 杨鑫, 韩红彪, 闫晨宵, 等. 送丝角度与方式对激光熔丝单道沉积层成形的影响[J]. 焊接学报, 2024, 45(4): 43-48, 56.
- [13] 韩善果, 杨永强, 蔡得涛, 等. 光丝位置对铝合金激光填丝焊接过程的影响[J]. 激光技术, 2022, 46(4): 481-485.
- [14] CYLOK S, LEICHNITZ M, THIEME S, et al. Investigations on laser metal deposition of stainless steel 316L with coaxial wire feeding [C]//9th International Conference on Photonic Technologies (LANE 2016), Fürth, Germany, 2016.
- [15] WU M J, SHI S H, FU G Y, et al. Process parameters control of deposition of hollow cylindrical part with internal wire feeding through a hollow laser beam[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 419: 305-309.
- [16] SHAKHVERDOVA I, NOWOTNY S, THIEME S, et al. Coaxial laser wire deposition[J]. Journal of Physics, 2018, 1 109(1): 012 026.
- [17] 傅戈雁, 石世宏, 韩学磊. 环形激光光内同轴送丝焊接试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2 080-2 085.
- [18] FU J, GONG L, ZHANG Y F, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by vertical wire feeding with axisymmetric multi-laser source[J]. Applied Sciences, 2017, 7(3): 227-234.
- [19] KOTAR M, GOVEKAR E. The influence of the workpiece illumination proportion in annular laser beam wire deposition process[J]. Procedia CIRP, 2018, 74: 228-232.
- [20] KOTAR M, FUJISHIMA M, LEVY G, et al. Initial transient phase and stability of annular laser beam direct wire deposition[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 233-236.
- [21] JURIC I, GARASIC I, BUSIC M, et al. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625[J]. JOM, 2019, 71: 703-708.
- [22] CABALLERO A, DING J L, GANGULA S, et al. Wire+ Arc Additive Manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268: 54-62.
- [23] 汪任凭, 雷永平, 史耀武. 激光深熔焊中匙孔形成过程的动态模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 38-40, 114-115.
- [24] MATSUNAWA A, KIM J D, SETO N, et al. Dynamics of key-hole and molten pool in laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 247-254.
- [25] HAROONI M, KONG F, CARISON B, et al. Mitigation of pore generation in laser welding of magnesium alloy AZ31B in lap joint configuration[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 3: 919-927.
- [26] KATAYAMA S. Formation Mechanism and Suppression Procedure of Porosity in High Power Laser Welding of Aluminum Alloy [C]//Proc. of ICALEO'98, Orlando, Florida, USA, 1998.
- [27] LIU L M, SONG G, LIANG G L, et al. Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B—Mechanism and remedy[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A390(1-2): 76-80.
- [28] 顾思远, 刘政君, 张培磊, 等. 高速激光电弧复合焊接高强钢焊缝的

- 形貌及成形机理[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 99-107.
- [29] HAROONI M, CARLSON B, STROHMEIER B R, et al. Pore formation mechanism and its mitigation in laser welding of AZ31B magnesium alloy in lap joint configuration[J]. Materials & Design, 2014, 58: 265-276.
- [30] 曹浩, 雷振, 黄瑞生, 等. 激光摆动焊接工艺参数对高强钢气孔率和焊缝成形的影响[J]. 焊接, 2019(4): 39-43, 67.
- [31] SANTI A, BAYAT M, HATTEL J. Multiphysics modeling of metal based additive manufacturing processes with focus on thermo-mechanical conditions[J]. Journal of Thermal Stresses, 2023, 46(6): 445-463.
- [32] 任朝晖, 刘振, 周世华, 等. 钛合金激光熔丝增材制造的温度场与应力场模拟[J]. 东北大学学报, 2020, 41(4): 551-556.
- [33] 邱艳艳, 黄安国, 叶杰. 激光熔丝增材制造过程的温度与组织演变研究[J]. 电焊机, 2022, 51(8): 141-145.
- [34] 张吉平, 石世宏, 蒋伟伟, 等. 三光束光内送丝激光熔覆温度场仿真分析与工艺优化[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 122-129.
- [35] 蔺秀川, 邵天敏. 利用集总参数法测量材料对激光的吸收率[J]. 物理学报, 2001, 50(5): 856-859.
- [36] 吴胜男. 铜合金激光-电弧复合增材制造工艺及性能研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2022.
- [37] JADHAV S D, DADBAKSH S, GOOSSENS L, et al. Influence of selective laser melting process parameters on texture evolution in pure copper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270: 47-58.
- [38] LU B H. Additive manufacturing of copper-based alloy by laser powder bed fusion[D]. Orlando, FL, USA: University of Central Florida, 2020.
- [39] BIRO E, WECKMAN D C, ZHOU Y. Pulsed Nd: YAG laser welding of copper using oxygenated assist gases[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2002, A33: 2 019-2 030.
- [40] DADRAS S, TORKAMANY M J, SABBAGHZADEH J. Spectroscopic characterization of low-nickel copper welding with pulsed Nd: YAG laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10): 769-776.
- [41] 申继标. 铜及铜合金粉末的激光吸收率及其选区激光熔化成形研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [42] 刘黎明, 王继锋, 宋刚. 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金[J]. 中国激光, 2004, (12): 1 523-1 526.
- [43] ZHANG C, GAO M, ZENG X Y. Influences of synergy effect between laser and arc on laser-arc hybrid welding of aluminum alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105 766.
- [44] 符成学, 马照伟, 雷小伟, 等. 激光-电弧复合焊接技术现状及其在钛合金领域的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2021, 36(4): 82-88.
- [45] 施佳慧, 周瀚森. 激光-电弧复合焊接及其标准在邮轮中的应用[J]. 船舶标准化工程师, 2022, 55(3): 26-30.
- [46] 赵耀邦, 成群林, 徐爱杰, 等. 激光-电弧复合焊接技术的研究进展及应用现状[J]. 航天制造技术, 2014(4): 11-14.
- [47] MORADI M, GHOREISHI M, KHORRAM A. Process and outcome comparison between laser, tungsten inert gas (TIG) and laser-TIG hybrid welding[J]. Lasers in Engineering, 2018, 39(3-6): 379-391.
- [48] WU D J, LIU D H, NIU F Y, et al. Al-Cu alloy fabricated by novel laser-tungsten inert gas hybrid additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100 954.
- [49] 秦国梁, 雷振, 王旭友, 等. Nd: YAG 激光+脉冲 MAG 电弧复合热源焊接规范参数对焊缝表面成形的影响[J]. 应用激光, 2006(2): 97-100, 130.
- [50] ZHANG Z D, SUN C S, XU X K, et al. Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminium alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(2): 89-95.
- [51] SUN C S, ZHANG Z D, LIU L M. Effect of laser power on microstructure and properties of 5356 aluminum alloy by laser induced MIG arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 13-18.
- [52] 徐鑫. 激光-MIG 和电子束增材制造 Cu-Cr-Zr 合金的组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [53] ZHANG L J, NING J, ZHANG X J, et al. Single pass hybrid laser-MIG welding of 4 mm thick copper without preheating[J]. Materials & Design, 2015, 74: 1-18.
- [54] 张亚亮, 刘佳, 石岩, 等. 激光-电弧复合焊不同引导方式对其焊接成形质量的影响研究[J]. 应用激光, 2017, 37(2): 229-233.
- [55] MIAO H B, YU G, HE X L, et al. Comparative study of hybrid laser-MIG leading configuration on porosity in aluminum alloy bead-on-plate welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 2 681-2 688.
- [56] SANG Y X, XIAO M Z, ZHANG Z J, et al. Effect of auxiliary heating process on low power pulsed laser wire feeding deposition[J]. Materials & Design, 2022, 218: 110 666.
- [57] 苏荣华, 刘伟军, 龙日升. 不同基板预热温度对激光金属沉积成形过程温度场的影响[J]. 工程设计学报, 2009, 16(1): 44-49, 67.
- [58] THOMPSON S M, BIAN L, 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.
- [59] YKOY P, BAYTIMEROY R, VAULIN S, et al. Selective laser melting of copper by 200 W CO₂ laser[R]. SAE Technical Paper, 2016.
- [60] WEN P, FENG Z H, ZHENG S Q. Formation quality optimization of laser hot wire cladding for repairing martensite precipitation hardening stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 180-188.

(编辑: 彭瑾)