

高氮不锈钢激光选区熔化成形过程的氮气行为控制研究

苏双军¹, 刘宏霄²

¹ 开封平煤新型炭材料科技有限公司 河南开封

² 本钢板材股份有限公司炼铁总厂 辽宁本溪

【摘要】高氮不锈钢因其优异的力学性能和耐腐蚀性,在高端制造领域具有广泛应用前景。激光选区熔化成形(SLS)技术为复杂结构零件的高效制造提供了新路径,但在成形过程中氮气行为控制仍面临挑战。本文围绕高氮不锈钢在SLS过程中的氮气行为展开研究,探讨不同工艺参数对氮气释放与保留的影响机制,提出优化控制策略以提升成形质量与材料性能。通过实验与模拟分析相结合的方法,揭示了气氛调控与粉末特性对氮含量变化的关键作用,为实现高氮不锈钢增材制造的稳定性和可控性提供理论支持和技术依据。

【关键词】高氮不锈钢;激光选区熔化;氮气行为;成形控制;增材制造

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250274

Research on nitrogen behavior control during selective laser melting of high-nitrogen stainless steel

Shuangjun Su¹, Hongxiao Liu²

¹Kai Feng Ping Mei New Carbon Materials Technology co., Ltd, Kaifeng, Henan

²Benxi Iron and Steel Plate Co., Ltd. Ironmaking Plant, Benxi, Liaoning

【Abstract】High-nitrogen stainless steel (HNSS) has broad application prospects in high-end manufacturing due to its excellent mechanical properties and corrosion resistance. Selective laser melting (SLM) technology provides a new path for efficient manufacturing of complex structural parts, but nitrogen behavior control during the forming process still faces challenges. This paper focuses on the nitrogen behavior of HNSS during SLM, investigates the influence mechanism of different process parameters on nitrogen release and retention, and proposes optimized control strategies to improve forming quality and material properties. Through a combination of experimental and simulation analyses, the key role of atmosphere regulation and powder characteristics in nitrogen content variation is revealed, providing theoretical support and technical basis for achieving stability and controllability in additive manufacturing of HNSS.

【Keywords】High-nitrogen stainless steel; Selective laser melting; Nitrogen behavior; Forming control; Additive manufacturing

引言

高氮不锈钢是一类以氮元素为主要合金化元素的高性能材料,具有高强度、良好耐蚀性和无磁性等优点,广泛应用于航空航天、医疗器械及化工设备等领域。然而,其传统加工方法受限于成分偏析与成形难度大等问题,难以满足复杂结构件的一体化制造需求。激光选区熔化成形作为一种典型的金属增材制造技术,具备高精度、高自由度和近净成形优势,为高氮不锈钢的应用拓展提供了新思路。然而,在高温熔融与快速冷却过程中,氮气易逸出或分布不均,影响最终材料性能。深入研究SLS过程中氮气的行为规律及其控制方法,成为推动该材料在增材制造中应用的关键问题。本研究旨在揭示关键工艺参数对氮气行为的影响机制,并提

出有效的调控策略,为后续工程实践提供理论支撑。

1 高氮不锈钢激光选区熔化成形的技术难点

高氮不锈钢因其优异的力学性能与耐腐蚀性,在高性能结构件中展现出良好的应用前景。然而,采用激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术进行成形时,面临着诸多技术挑战。由于高氮不锈钢粉末在高温激光作用下极易发生氮元素的挥发与再分布,导致最终成形件中氮含量难以稳定控制,影响材料的组织均匀性与力学性能^[1]。该类材料通常具有较高的热裂敏感性和较差的流动性,进一步增加了成形过程中的工艺窗口控制难度。尤其在多层叠加制造过程中,熔池动态行为与凝固组织演化复杂,若工艺参数匹配不当,易出现未熔合、气孔及残余应力集中等缺陷,制约了其

在增材制造中的工程化应用。

从材料特性来看, 高氮不锈钢粉末的制备与保存对后续成形质量具有重要影响。当前常用的气体雾化法制备的粉末存在球形度不高、氧含量偏高等问题, 进而影响铺粉质量与致密度。氮元素在熔融状态下的溶解度变化较大, 若在成形腔体内缺乏有效的气氛调控手段, 容易造成氮气逸出形成气泡或内部夹杂, 降低零件致密度与疲劳强度。在 SLM 成形过程中, 必须结合粉末特性优化扫描策略与保护气氛配置, 以实现氮元素行为的有效控制。

为提升高氮不锈钢在激光选区熔化中的成形稳定性, 需综合考虑能量输入、扫描速度、层厚及环境气体成分等关键参数之间的耦合效应。高能激光束快速加热与冷却的特点使得材料经历极端非平衡凝固过程, 加剧了氮元素的迁移与析出行为。建立基于氮气行为调控的工艺优化模型, 成为解决当前成形难题的关键路径之一。通过引入高纯氮气或混合气体保护系统, 并结合原位监测手段, 有助于实现对熔池形态与氮含量分布的精准调控, 从而提升成形件的整体性能与可靠性。

2 氮气行为在成形过程中的演变机制

在激光选区熔化成形高氮不锈钢的过程中, 氮气行为的演变机制极为复杂, 涉及粉末加热、熔池形成、凝固再结晶等多个物理阶段。由于氮元素在高温下的挥发性较强, 在激光束作用瞬间, 粉末材料迅速熔融, 导致部分氮元素以气态形式逸出熔池, 造成局部成分偏析。熔池冷却速度极快, 熔体中的氮溶解度急剧下降, 进一步加剧了氮气泡的形成倾向, 影响致密度与微观组织均匀性。该过程受热传导、对流及界面张力等多重因素调控, 其演化路径具有高度非线性特征。

从冶金反应角度分析, 氮在熔池中的存在形式主要包括固溶态、析出态和气态三类。在快速加热过程中, 粉末颗粒表面氧化物或吸附气体可能作为异质形核点, 促进氮气泡的成核与长大。而在后续冷却阶段, 若冷却速率过高, 氮来不及扩散至晶界或夹杂物处聚集, 易在晶内形成弥散分布的小气孔, 降低成形质量^[2]。熔池流动行为也显著影响氮的分布状态, 激光扫描速度与功率密度的变化会改变熔池深度与停留时间, 从而影响氮的蒸发损失率与再分布模式。理解熔池动态演化与氮元素迁移之间的耦合关系, 是实现氮气行为精准控制的基础。

实际工艺中, 成形气氛的种类与纯度对氮气行为具有决定性影响。通常采用高纯氮气或氩气作为保护

气氛, 以抑制氮的进一步流失并促进其回溶。研究表明, 在一定压力和温度条件下, 氮可通过熔池表面重新溶入金属液, 形成“反向扩散”现象。然而, 若气氛中氧含量偏高, 易生成稳定的氮氧化物或氧化夹杂, 反而阻碍氮的有效保留。必须通过优化气氛控制策略, 结合原位监测手段, 实时调节气体流量与成分, 以实现氮行为的动态管理, 从而提升高氮不锈钢激光选区熔化成形的稳定性和可控性。

3 工艺参数对氮气释放与保留的影响分析

激光选区熔化成形过程中, 工艺参数对高氮不锈钢中氮气的释放与保留行为具有显著影响。激光功率、扫描速度、扫描间距及层厚等关键参数直接决定了熔池的形成特征与热输入状态, 进而影响氮在高温下的溶解、扩散与逸出行为。当激光功率过高或扫描速度过低时, 熔池温度升高且停留时间延长, 导致氮元素更易从金属熔体中挥发, 造成成分损失; 反之, 若能量输入不足, 则粉末未能充分熔融, 熔池流动性差, 氮难以均匀分布, 易形成气孔缺陷。合理匹配激光与扫描参数, 是实现氮气有效控制的前提。

在实际成形条件下, 保护气氛的种类和流量同样对氮气行为起着决定性作用。通常采用高纯氮气或惰性气体(如氩气)作为保护气体, 以减少氧化并促进氮的回溶。研究表明, 在一定压力下, 增加氮气氛中的分压有助于抑制氮的蒸发, 并促进其在熔池中的再溶解, 从而提高最终材料中的氮保留率。然而, 若气体流速过大或分布不均, 可能引起熔池扰动加剧, 反而促进氮气泡的逸出, 甚至引入外来夹杂物。必须结合成形腔体结构与气体动力学特性, 优化气体供给方式, 确保熔池处于稳定可控的气氛环境中。

粉末的粒径分布、形貌特征以及初始氮含量等因素在激光选区熔化成形过程中对氮气行为具有显著影响。细粉比例过高时, 由于其比表面积大, 表面活性增强, 导致在激光加热初期氮元素更容易发生表面蒸发, 造成成分损失; 而粗粉则因球形度较差、流动性不佳, 影响铺粉均匀性, 进而导致熔池形成不稳定, 出现局部未熔合或孔洞缺陷, 使氮元素分布不均。粉末中原始氮含量的波动会直接影响熔池凝固后氮在材料中的最终浓度, 降低成形质量的一致性与可控性^[3-7]。在实际工艺设计中, 必须将粉末特性与激光功率、扫描速度、气氛控制等关键参数进行协同优化, 构建基于氮气释放与保留机制的多因素调控模型, 从而实现高氮不锈钢增材制造过程的高精度与高稳定性。

4 基于氮气行为调控的成形质量优化策略

在高氮不锈钢的激光选区熔化成形过程中, 氮气的行为的调控直接关系到成形质量与材料性能的稳定性。由于氮元素在高温下的挥发性强、溶解度变化大, 其在熔池中的分布状态极易受到工艺条件的影响, 进而引发气孔、成分偏析及组织不均匀等缺陷。基于对氮气释放与保留机制的理解, 构建以氮气行为为核心的成形质量优化策略, 成为提升该类材料增材制造性能的关键路径。通过精确控制热输入参数、优化保护气氛配置, 并结合粉末特性的匹配设计, 可实现对氮元素迁移过程的有效干预, 从而改善成形件的致密度、微观组织均匀性与力学性能。

针对激光能量输入与扫描路径的调控是优化氮气行为的重要手段之一。合理设定激光功率与扫描速度的配比, 能够在确保充分熔合的前提下, 避免过高的熔池温度和过长的驻留时间, 从而减少氮的过度蒸发。采用分区域扫描策略或变能量输入方式, 可在不同结构区域实现差异化的氮保留效果, 满足复杂构件的功能梯度需求。层厚与扫描间距的调整也对熔池形态和冷却速率产生显著影响, 较薄的铺粉层有助于加快凝固速度, 抑制氮气泡的长大, 而适当的扫描间距则可增强相邻熔道之间的重叠融合, 提高整体致密性。这些工艺参数的协同优化, 为实现氮气行为的可控演化提供了有效途径。

除了工艺参数的调控, 成形环境的气体管理同样至关重要。通过引入高纯度氮气或混合气体保护系统, 可以在熔池凝固初期建立有利于氮回溶的局部气氛环境, 从而提升最终材料中的氮保留率。研究表明, 在一定压力条件下, 适当提高成形腔体内氮气的分压, 可有效抑制氮的逸出趋势, 并促进其在金属基体中的再溶解^[8]。气体流量与流场分布的均匀性控制也不容忽视, 需结合成形舱体结构优化气体导入方式, 避免因局部湍流导致熔池扰动加剧, 从而引发氮气泡的异常析出。结合原位监测技术, 如高速摄像、红外测温与质谱分析, 可实现对熔池动态与氮气行为的实时反馈, 进一步提升工艺控制精度与成形稳定性。通过多维度的协同调控策略, 能够有效解决高氮不锈钢在激光选区熔化中面临的氮气行为不可控问题, 推动其在高性能结构件

制造中的工程化应用。

5 结语

本研究围绕高氮不锈钢在激光选区熔化成形过程中的氮气行为控制展开, 系统分析了成形过程中氮气的释放、迁移与保留机制, 并探讨了工艺参数对氮元素分布的调控作用。通过优化激光能量输入、扫描策略及保护气氛配置, 有效提升了氮的利用率与材料组织均匀性。研究表明, 实现氮气行为的可控演化是提高成形质量的关键。未来应进一步结合多场调控与在线监测技术, 推动高氮不锈钢在增材制造领域的工程化应用。

参考文献

- [1] 赵定国,孙世泽,孙鑫,等.常压激光选区熔化制备高氮不锈钢[J/OL].粉末冶金工业,1-10[2025-06-23].
- [2] 丁建祥,张伟,程远,等.高氮不锈钢光纤同轴激光增材组织与性能研究[J].电焊机,2024,54(11):105-112.
- [3] 刘吉猛,李皓,王书桓,等.时效处理工艺对海工用高氮不锈钢耐蚀性的影响[J].中国冶金,2023,33(10):50-59.
- [4] 任建彪,赵定国,孙鑫,等.过配粉末激光选区熔化制备高氮不锈钢研究[J].粉末冶金工业,2023,33(03):13-22.
- [5] 任建彪.医用高氮不锈钢 SLM 制备基础研究[D].华北理工大学,2023.
- [6] 吕源.高氮不锈钢选区激光熔化成形工艺及其性能研究[D].南京理工大学,2023.
- [7] 张晓丹,刘志文,徐海峰,等.电解抛光质量对高氮不锈钢析出相原子力显微镜形貌表征的影响[J].物理测试,2022,40(06):11-17.
- [8] 吕源,李涛,刘捷,等.选区激光熔化成形高氮不锈钢组织与力学性能研究[J].中国激光,2022,49(22):236-244.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

