

热处理对激光选区熔化 316H 不锈钢力学性能的影响

严浩东

中国核动力研究设计院

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8922

[摘要] 激光选区熔化技术可实现不锈钢复杂结构件的近终形成形,在核电、化工等高端装备领域具有重要应用价值。316H 型奥氏体不锈钢因其优异的高温强度和耐腐蚀性,已被广泛应用于极端环境中的关键零部件。然而,激光选区熔化过程具有极高的温度梯度和冷却速度,极易导致零件内部产生残余应力、气孔缺陷和各向异性柱状晶结构,导致其力学性能不稳定。热处理作为增材制造过程中组织结构调控和力学性能提升的重要手段,通过合理的热处理工艺可以有效消除残余应力、促进等轴化和优化沉淀相分布。因此,开展热处理对 316 H 不锈钢激光选区熔化力学性能影响规律的系统研究,对促进 316 H 不锈钢在高端装备中的可靠应用具有重要的工程意义和理论价值。

[关键词] 热处理;激光选区熔化;316H 不锈钢;力学性能

The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Laser Selective Melting of 316H Stainless Steel

Yan Haodong

China Nuclear Power Research and Design Institute

[Abstract] Laser selective melting technology enables near-net-shape forming of complex structural components made of stainless steel, offering significant application value in high-end equipment fields such as nuclear power and chemical industries. 316H austenitic stainless steel, due to its excellent high-temperature strength and corrosion resistance, has been widely used in critical components operating under extreme conditions. However, the laser selective melting process involves extremely high temperature gradients and rapid cooling rates, which can easily induce residual stresses, porosity defects, and anisotropic columnar crystal structures within the parts, leading to unstable mechanical properties. Heat treatment serves as a crucial method for controlling microstructure and enhancing mechanical performance in additive manufacturing; appropriate heat treatment protocols can effectively eliminate residual stresses, promote equiaxed grains, and optimize precipitate distribution. Therefore, conducting systematic research on the effects of heat treatment on the mechanical properties of laser selective melting of 316H stainless steel holds important engineering significance and theoretical value for promoting its reliable application in high-end equipment.

[Key words] Heat treatment; Laser selective melting; 316H stainless steel; Mechanical properties

激光选区熔化金属与传统冶金材料有很大区别,熔池快速凝固形成的非平衡组织,晶粒细小而取向集中,层间重熔也会引起组织周期性变化。这种显微组织赋予材料一定的强度优势,但是其塑性和疲劳性能往往受到限制。热处理是实现增材制造构件性能调控的有效手段,可通过对温度历程进行调控来实现材料的回复、再结晶和相变。316 H 不锈钢中碳化物和沉

淀相在高温下的分布状况对其高温力学性能有很大影响。厘清热处理工艺参数-微结构演变-力学性能间的内在联系,是制定增材制造特种材料后处理技术规范的必要前提。

1 热处理对 SLM 316H 不锈钢微观组织演变规律

1.1 沉积态原始组织特征

利用激光选区熔化 (SLM) 技术制备 316 H 不锈钢,利用

其超高冷却速度和逐层熔化凝固机理，形成显著的非平衡微结构系统。沉积态组织主要特征是沿热通量方向择优生长的柱状晶，晶体中存在大量由快速凝固诱发的胞状亚结构和胞状晶界，亚结构细而密集。在快速凝固条件下，合金内部产生大量位错和晶格畸变区域，产生显著形变强化和细晶强化效果；同时，Cr、Mo、C等元素在晶界和胞界处的偏析程度不同，为后续热处理过程中析出相的形核和组织转变提供基本条件^[1]。SLM成形316H不锈钢在获得高强高硬度的同时，存在显著的力学性能各向异性和组织稳定性不足的难题，提出了通过热处理调控组织优化的思路。

1.2 低温退火下组织稳定化行为

SLM 316 H 不锈钢经低温退火后（600–700℃）后，其组织演化主要表现为应力释放、位错恢复和组织稳定。在这个温度区间，原子扩散能力减弱，柱状晶和胞状亚结构基本保持完整，晶粒粗化、晶界迁移和组织重构不明显。随着保温进程的推进，沉积态的残余应力逐渐释放，晶格畸变不断减弱，高密度位错发生滑移、消除和重排，位错密度逐渐降低，位错组态也从无序走向有序。同时，过饱和C元素在晶界、胞界和位错处逐步析出，形成纳米级富Cr碳化物，细化析出相分布均匀，稳定晶界，抑制位错运动。在低温退火条件下，材料整体结构继承度高，非平衡凝固特性没有根本改变，结构稳定性提高，为保持材料高强度提供可靠的组织保证。

1.3 中温退火下组织重构行为

中温退火（800–950℃）可以诱发SLM 316 H 不锈钢组织发生显著的组织重构和均匀化，是实现组织从非平衡向平衡转变的关键温域。随着温度的升高，柱状晶的原子扩散能力显著增强，原有的外延柱状晶在晶界迁移和晶粒融合的作用下逐渐破碎细化，显著弱化了择优生长特性，胞状亚结构逐渐消解消失，晶界形态由曲折走向平直，晶粒尺寸分布趋于均一。这一过程伴随着位错的恢复和再结晶，位错密度大大降低，残余应力得以充分释放，组织内应力分布均匀。随着保温时间的延长，沉积态晶界析出的合金元素逐渐均匀扩散，Cr₂₃C₆型碳化物在

晶界处和晶界处均匀分布，有效抑制晶粒过度生长。中温退火可通过组织重构、应力均匀化、沉淀强化和晶界强化等协同作用，显著提高材料的组织均匀性和各向异性，为综合优化力学性能奠定基础。

1.4 高温固溶处理下组织均化行为

高温固溶处理（1000–1150℃）促使SLM 316 H 不锈钢组织向完全均匀的奥氏体转变，达到完全消除残余应力和稳定结构的目的。随着温度的升高，晶界的迁移速度加快，柱状晶特征基本消失，晶粒逐渐向等轴晶转变，并伴有一定的生长，组织均匀度很高。固溶温度满足碳化物在基体中的固溶条件，使析出的Cr₂₃C₆碳化物逐步回溶到奥氏体基体中，使C元素过饱和固溶于基体，消除了析出相对基体的强化弱化效应^[2]。位错密度下降到很低的程度，晶格畸变也得到很好恢复，残余的低温和中温的非平衡结构特征也基本消失，形成均匀、稳定的单相奥氏体结构。高温固溶处理可使组织均匀化，消除应力，固溶碳化物固溶和晶粒规整化，使材料塑性最大化，但强度和硬度却显著降低，体现微观结构对力学性能的决定性调控作用。

2 热处理对 SLM 316H 不锈钢力学性能调控机制

2.1 对强度与塑性的协同调控

通过热处理工艺调控SLM 316 H 不锈钢的微结构，可实现强塑性差异化调控，高密度位错、细晶强化、晶格畸变与残余应力的协同作用使合金呈现出高强低塑的特点。低温退火（600–700℃）主要消除残余应力，促进位错回复和微量弥散析出，强度指数略有降低，延伸率略有提高，实现强塑稳定匹配。中温退火（800–950℃）通过组织重构、破碎柱状晶、充分释放应力和均匀析出强化，在合理降低屈服和抗拉强度的同时，显著提高延伸率，实现强塑匹配的最佳区间，满足大多数工程结构的强塑性平衡需求。高温固溶处理（1000–1150℃）可完全软化组织，回溶碳化物，均匀生长晶粒，大幅降低强度，实现最大塑性。不同热处理制度下的强塑性反转规律，实质上是强韧化机制在微观结构演化中的竞争机制（如图1所示）。

热处理对SLM 316H不锈钢力学性能调控机制

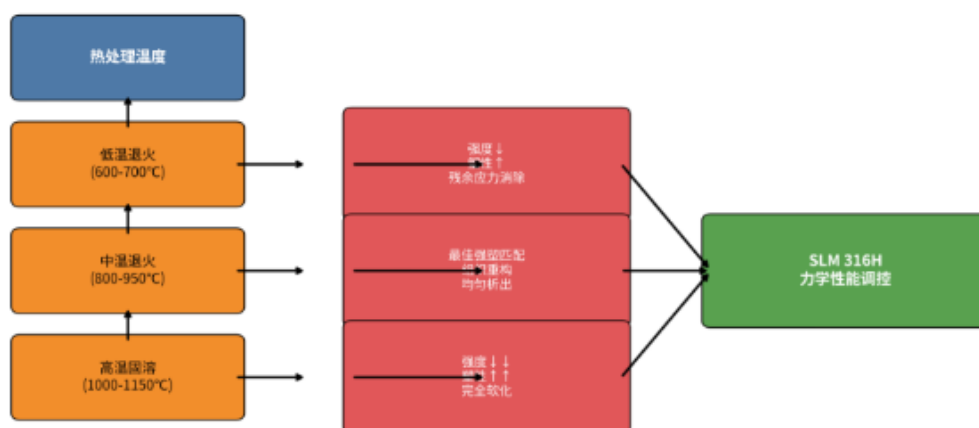


图1 热处理对SLM316H 不锈钢力学性能调控机制

2.2 对硬度的调控规律

在 SLM 316 H 不锈钢中, 硬度的变化直接反映组织结构的转变和强化效果的变化, 这种变化规律与组织的演化高度一致。由于快速凝固过程中产生的高密度位错、晶格畸变、细晶亚结构以及残余应力等因素, 使得沉积态组织具有最高的硬度。在低温退火过程中, 残余应力逐渐消除, 位错密度略有下降, 并伴随有微量纳米碳化物析出, 析出强化作用部分抵消了应力释放引起的硬度降低, 使硬度略有稳定下降, 总体仍保持高硬度^[3]。中温退火阶段, 组织重构、胞状组织消除, 位错密度大幅度降低, 晶界强化效应增强, 使硬度继续下降, 降低幅度比低温阶段更大, 但仍处于合理范围内。经高温固溶处理后, 合金的组织完全软化, 碳化物回溶, 晶粒均匀化, 各种强化效果大为降低, 硬度降至最低。随着热处理温度的升高, 硬度逐渐减小, 这一规律可以作为材料在不同服役条件下性能匹配的直接依据。

2.3 对各向异性的改善机制

SLM 316 H 不锈钢在沉积过程中表现出显著的力学各向异性, 主要表现为沿成形方向择优生长的柱状晶, 层间微观结构和残余应力分布不均匀, 导致不同方向的拉伸强度、屈服强度和延伸率波动较大, 严重影响服役稳定性。低温退火对材料微观结构和晶粒取向的影响有限, 仅能在一定程度上缓解由应力

不均引起的各向异性, 而综合性能的差异仍然突出。中温退火可使柱状晶破碎, 细化晶粒, 使组织均匀化和残余应力得到充分释放, 有效地弱化了由于晶粒取向引起的性能差异, 使各向异性趋近, 各向异性减小。高温固溶处理可以实现等轴晶化, 实现组织均匀化和应力消除, 基本消除成形过程中的各向异性, 实现纵向和横向性能的统一。热处理强化各向异性机理的核心是通过组织重构、晶粒均质化和应力均一化, 打破沉积态取向结构所带来的性能差异, 提高复杂受力条件下的服役可靠性和结构安全性。

2.4 热处理制度匹配力学性能最优区间

低温退火是一种既能保持高强度高硬度, 又能小幅度提高塑性和稳定性的应用场景, 能最大程度地发挥 SLM 成形的强化效果。中温退火 (850–950℃, 保温 1–3 小时) 可实现强度、塑性、硬度、各向异性和组织稳定性的综合平衡, 显著提高材料的塑性, 减小各向异性, 消除残余应力, 是一种兼顾承载力、变形协调和服役安全的优选体系^[4]。高温固溶处理是一种具有高塑性、高韧性和高稳定性的高温固溶处理工艺, 能使变形性能和抗冲击性能最大化。通过合理选择和优化热处理工艺, 实现 SLM 316 H 不锈钢力学性能的定向调控, 满足不同领域个性化服役需求, 如表 1 所示。

表 1 不同热处理状态下 SLM 316H 不锈钢主要力学性能

热处理状态	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)	硬度 (HV)
沉积态	725.46	586.33	28.45	276.50
650 °C/2 h	718.72	579.41	30.16	269.83
900 °C/2 h	658.39	501.26	45.78	221.45
1050 °C/1 h	592.68	427.55	58.63	189.70

2.5 对高温持久及蠕变行为的稳定调控

SLM 316 H 不锈钢经热处理后的组织状态发生显著变化, 进而影响材料的持久强度、蠕变变形和组织稳定性, 是决定其高温长期服役可靠性的关键因素。在高温服役条件下, 残余应力、胞状亚结构、晶格畸变和元素偏析等因素加速微观结构演变, 易诱发位错滑移、晶界迁移和异常粗化, 降低材料的高温承载能力和蠕变变形速率, 难以满足长期高温服役需求。低温退火可以在一定程度上释放残余应力, 稳定位错组态和基体微结构, 维持高温短期强度, 但对晶界强韧和蠕变抗力的提升作用有限, 且长期服役过程中易发生结构失稳。中温退火可促进组织均匀化、碳化物均匀弥散析出, 稳定晶界状态, 抑制位错运动, 减缓晶界滑移和空洞萌生, 显著降低稳态蠕变速率, 提高材料的高温持久寿命和结构稳定性, 最终实现在高温静载荷、长时间服役条件下的尺寸稳定和力学性能。高温固溶处理可以获得纯净、均匀、晶界平整的奥氏体组织, 在一定程度上降低高温强度, 同时提高高温塑性和蠕变塑性, 提高抗形变协调能力, 适用于高温低应力和高塑性要求的高温环境。最终实现 SLM 316 H 不锈钢高温强度、蠕变抗力和组织稳定性的协同优化, 提高其在高温高压长期服役条件下的适应性和安全性, 充分发挥其在高端装备上的应用优势。

结束语

综上所述, 通过合理的工艺设计, 实现强韧性匹配, 可以消除增材制造过程中产生的残余应力和微结构缺陷, 为其工程化应用奠定基础。未来, 可结合原位表征技术和多尺度数值模拟方法, 深入揭示热处理过程微观结构演变的动力学机理, 实现工艺优化由经验试错向精确调控转变, 促进 316 H 不锈钢在能源动力、化工装备等高端制造领域的大规模、可靠应用。

[参考文献]

- [1] 官立超, 姚振华, 林志雄, 谢运祺, 黄松, 陈海龙. 直接时效处理激光选区熔化 Ti-6Al-4V 合金的低周疲劳性能[J]. 机械工程材料, 2026, 50(05): 64–70.
- [2] 黄敏, 张毅, 田德利, 张龙梅, 王瀚, 王艳, 王成, 刘伟. 后处理对激光选区熔化成形 GH4169 高温合金显微组织与力学性能的影响[J]. 现代交通与冶金材料, 2026, 6(03): 96–101+107.
- [3] 鲁仁义, 马国楠, 杨鹏伟, 赵文天, 张会华, 赵枢明, 张群, 钟亮, 杨广, 刘芊莹. 选区激光熔化成形 TC4 钛合金零件支撑结构优化[J]. 热加工工艺, 2026, (09): 167–173.
- [4] 霍文霞, 计云萍, 李一鸣, 郭冬雪. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢温度场分布的模拟[J]. 热处理技术与装备, 2026, 47(02): 1–7+12.