

激光功率对 TiC 增强 316L 不锈钢的温度场熔池的数值模拟研究

牛九川¹, 牛晓峰², 杨帅³, 黄志伟⁴, *张佳宁

太原理工大学

*通讯作者: 张佳宁, zhangjianing0504@163.com

摘要: 本文基于 ANSYS Fluent 软件对 TiC 增强 316L 不锈钢的激光选区融化 (SLM) 过程进行数值模拟, 通过 EDEM 软件进行粉床构建, ICEM 进行物理模型的建立, 最终导入 Fluent 进行模拟实验, 选定激光热源半径为 0.75mm, 扫描速度为 10mm/s 以及 TiC 浓度为 10% 为固定变量, 以不同的激光功率 (800w, 1000w, 1200w) 为实验变量, 针对材料熔池的变化进行数值模拟研究。研究表明, 激光功率较低时, 由于粉末颗粒分布不均匀会出现球化现象, 随着激光功率增加, 球化现象减少, 熔池宽度增加。激光功率继续增加, 由于 Marangoni 效应导致飞溅现象的发生。

关键词: ANSYS Fluent TiC 316L 不锈钢

1 引言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 的雏形可追溯至 20 世纪 80 年代。1986 年, 美国科学家 Charles Hull 发明立体光固化 (Stereolithography, SLA) 技术, 首次提出“分层制造”理念。随着近几十年的发展, 增材制造技术不断优化, 已成为发展最为迅速并且具有极高发展潜力的先进制造技术之一^[1]。SLM 技术是增材制造的一项分支技术, 也是最具有发展前景的一项 3D 打印技术。在 SLM 成形过程中, 粉未经高能激光束产生的极高热量快速熔化并再结晶。该技术实际上是选区激光烧结 (SLS) 技术的分支^[2]。SLM 技术与 SLS 技术原理几乎相同, 而二者之间的差异在于 SLM 中的高能激光束能够完全将粉末熔融, 使得相邻堆叠层发生良好的冶金结合并在层与层之间完成搭接, 从而得到致密性高、力学性能优秀的成形件^[3]。

316L 不锈钢, 凭借其卓越的抗腐蚀性、高温稳定性、蠕变阻力、优异韧性和无磁特性, 在化工, 航天, 汽车等多个领域得到了广泛的使用^[4-6]。但是, 随着科技不断发展, 各个领域对 316L 不锈钢的各项性能的需求也逐渐提高^[7]。通过引入陶瓷颗粒或其他类型的增强材料制备金属基复合材料, 可以显著提升 316L 不锈钢的性能。例如, SiC 颗粒增强的 316L 不锈钢复合材料被用于制造耐高温和高强度

的工业部件^[8]。通过添加碳化钛 (TiC) 颗粒制备 TiC 增强 316L 不锈钢复合材料, 可显著提升材料的硬度、耐磨性和高温性能, 但激光加工过程中复杂的物理化学变化 (如熔池动力学、温度梯度演化及 TiC 分布行为) 对最终成形质量具有决定性影响。

激光功率作为激光增材制造的核心工艺参数, 直接影响能量输入、熔池形貌及温度场分布, 进而调控 TiC 颗粒的溶解-析出行为、界面结合状态以及可能的气孔、裂纹等缺陷的形成。目前, 针对 TiC 增强 316L 不锈钢的激光加工研究多集中于实验层面的工艺优化, 而对激光功率作用下熔池动态行为与温度场演变机制的数值模拟研究仍存在不足。传统实验方法难以实时观测微秒级熔池动态过程, 而数值模拟可通过多物理场耦合方法揭示熔池演化规律, 为工艺参数优化提供理论依据。

鉴于此, 本文将激光功率作为实验变量, 运用 Fluent 软件对 SLM 过程的模拟, 对熔池的变化进行细致的分析, 探究激光功率对 TiC/316L 不锈钢的具体影响。

2 试验过程

2.1 Fluent 软件介绍

Fluent 软件广泛应用于流体建模中, 主要原因是这个软件可以使用多种网格, 并且能够使得模拟

流体在复杂物理模型中的传热和流动成为可能，可以说 Fluent 是目前 CFD 应用最广泛的软件。

Fluent 可以针对二维、三维问题中的多种不同网格，如三维中的楔形、多面体、四面体网格，二维中的四边形和三角形网格等，更可以同时使用多种网格。更重要的是，Fluent 自身带有自适应的特点，可以根据模拟结果来优化网格。CFD 软件基本都还有 3 个相同的主要功能：后处理、前处理和求解器。前处理根据模型的不同物理特性和特点生成网格的一种程序；求解器是根据模型的控制方程而编译的计算机程序；后处理是根据之前所得到的计算结果，进行输出和分析的计算机程序。

ANSYS Fluent 作为全球领先的计算流体动力学 (CFD) 仿真工具，其功能覆盖从基础流动到复杂多物理场耦合的广泛场景。在流体流动与传热分析方面，软件支持层流、湍流（包括 k-ε、SST k-ω、LES 等模型）以及可压缩和不可压缩流体的模拟，涵盖亚音速至高超音速范围（马赫数 0.3 至 5.0 以上）。Realizable k-ε 模型可精准捕捉旋转机械内的涡旋分离现象。

在网格的基础上，CFD 软件利用各种数值方法（如有限差分法、有限体积法、有限元法等）来求解控制方程（通常是 Navier-Stokes 方程）。这一步骤需要大量的计算资源，因为它涉及到在每个网格单元上迭代求解方程直到达到预设的收敛标准。

纳维-斯托克斯方程:

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dt} &= -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2-1) \\ \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}^{(s)} \quad (2-2) \\ \frac{de}{dt} &= \frac{\sigma}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2-3)\end{aligned}$$

公式中各符号含义：ρ 为密度，v 为速度，∇·v 为速度散度，P 为流体静压，∇² 为运动粘度系数，F^(s) 为表面张力与马兰戈尼剪切力的合力，σ 代表总应力张量，e 为能量^[9]。

2.2 试验材料及步骤

本研究采用基体材料为 316L 不锈钢，涂层为 316L/TiC (TiC10wt%) 材料，各项热物性参数如下表 1，在构建粉床模型时颗粒直径分别选取 316L 合金粉末粒径 75μm-150μm，TiC 不规则粒径为 75μm-150μm^[8]。316L 不锈钢的化学成分如下表 2，

本研究采用 ANSYS Fluent 软件进行模拟实验，首先使用 EDEM 软件构建粉床，如图 2-1，其中紫色颗粒为 316L 不锈钢，黄色为 TiC 增强颗粒。

表 1 316L 不锈钢与 TiC 混合粉末热物理性质参数

热物理性质	基体 (316L 不锈钢)	316L/TiC (TiC10wt%)
固态密度 ρ _s (kg/m ³)	7340	6920
液态密度 ρ _l (kg/m ³)	7120	6340
固相线 T _s (K)	1893.15	1500
液相线 T _l (K)	1983.41	2080.74
固态比热容 CP _s (J/(kg·K))	810	1020
液态比热容 CP _l (J/(kg·K))	780	860
固态导热系数 k _{solid} (W/(m·K))	32.92	28.24
液态导热系数 k _{liquid} (W/(m·K))	30.13	37.75
相变潜热 L(J/g)	173.90	356.43
粘度 μ(Pa·s)	7.83×10 ⁻³	3.07×10 ⁻³

表 2 316L 不锈钢化学成分表

元素	Fe	Ni	Mn	C	Si	Mo
Wt%	Bal.	10.0~14.0	≤2.00	≤0.03	≤1.0	2.0~3.0

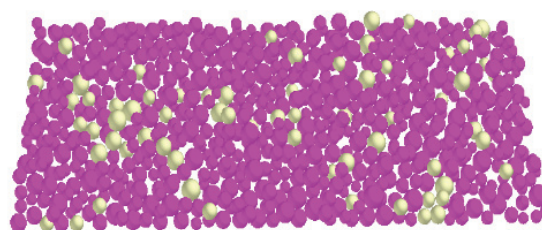


图 2-1 EDEM 粉床建立

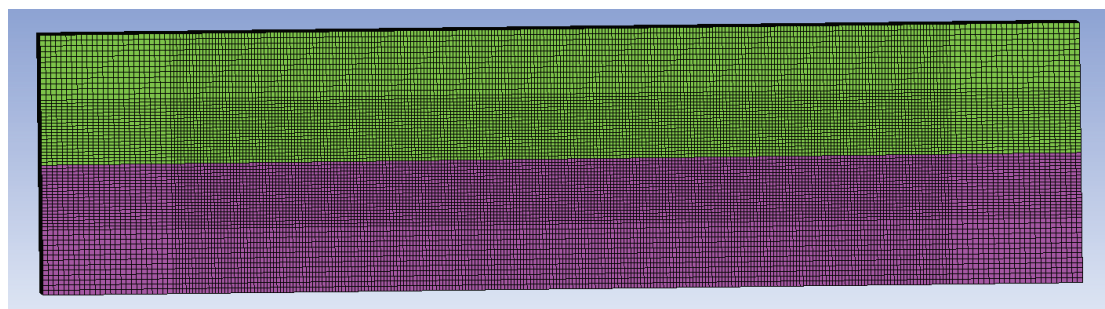


图 2-2 ICEM 网格划分

使用 ANSYS 自带的 ICEM 软件构建物理模型，对整体物理模型进行网格划分如图 2-2，为了模拟计算收敛对计算域进行更加细致的网格划分。将物理模型导入 Fluent 软件，使用二次开发的 udf 代码进行参数设置。并对模拟实验进行初始和边界条件进行设置，为了求解数值模型中的控制方程，初始条件可以描述为：

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0 \# (3-2)$$

式 (3-2) 中， T_0 是基体和粉末床的初始温度，一般为室温， $T_0=293.15\text{K}$ 。流体域中流体速度初始值为零^[8]。如下表。

表 3 初始条件设置

初始条件	参数设置
扫描速度	10mm/s
理想气体常数	8.314 J/(mol · K)
蒸发温度	3133K
激光热源半径	0.00075m

3 实验结果及分析

本研究将激光功率作为研究对象，激光功率对于激光熔覆过程起着至关重要的作用，合适的激光功率不仅可以形成稳定、致密的熔池还减少球化，飞溅等缺陷的发生。因此，本研究将固定扫描速度为 10mm/s，激光热源半径为 0.75mm，分别以 800w, 1000w, 1200w 为实验组，分别模拟熔池形状，选择出最合适的激光功率。如下图，分别为三组不同功率的熔池，图所示 800w 功率的熔池出现了球化现象，产生的原因是激光功率较低时，颗粒直径分布不均匀，导致小颗粒受热后形成新的小型熔池影响到周围的颗粒，而周围颗粒吸热不均匀，从而会导致球化现象的发生。图二为激光功率 1000w 的熔池，球化现象明显减少，且熔池形状相比激光功率 800w 的熔池形状更为平整，宽度比 800w 的熔池更宽。随着激光功率的增加如图三，熔池宽度进一步拓宽，但是出现了飞溅现象，产生原因是激光功率较大时，会导致熔池产生 Marangoni 对流现象，导致金属液体飞溅到熔池周围，导致球化现象，影响工件的表面质量。

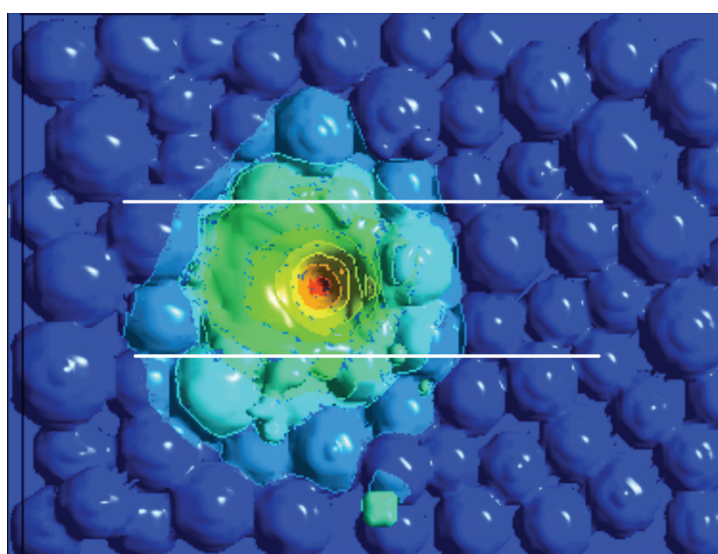


图 a 激光功率 800w

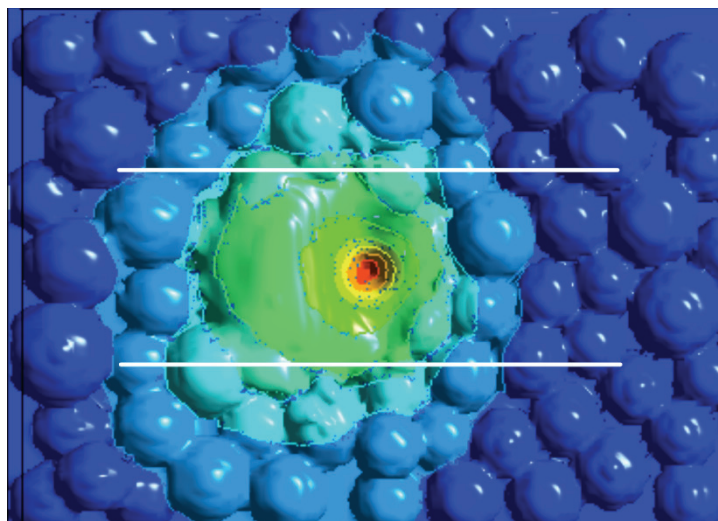


图 b 激光功率 1000w

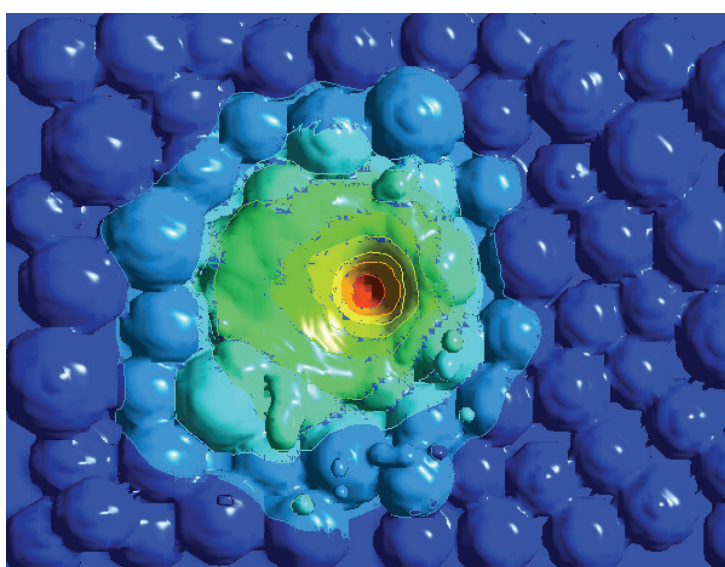


图 c 激光功率 1200w

4 结论

本研究基于 Fluent 软件，对 316L/TiC (TiC10wt%) 复合材料进行模拟实验，对实验结果的熔池形状进行对比实验，观察激光功率对熔池形状的影响，在激光功率 800w 时，容易出现球化现象，在激光功率 1000w 时，球化现象减少，熔池平整，在激光功率 1200w 时，飞溅现象出现，综上所述，激光功率 1000w 时，得到的工件性能最好，缺陷最少，熔池最为平整。

参考文献:

[1] 蒯立群,鲁干,鲁金忠,等.退火热处理对不同构建方向上激光选区熔化 316L 不锈钢的各向同性增强机理[J].激光与

光电子学进展,2024,61(23):325-339.

[2] SEBASTIAN BREMEN, WILHELM MEINERS, ANDREI DIATLOV. Selective Laser Melting A manufacturing technology for the future?[J]. Laser Technik Journal,2012,2012(2):33-38.

[3] KAMRAN AAMIR MUMTAZ, POONJOLAI ERASENIHIRAN, NEIL HOPKINSON. High density selective laser melting of Waspaloy[J]. Journal of Materials Processing Technology,2008,195(1-3):77-87.

[4] 杨永强,罗子艺,苏旭彬,等.不锈钢薄壁零件选区激光熔化制造及影响因素研究[J].中国激光,2011,38(01):60-67.

[5] 陈继民,窦阳,晏恒峰,等.选区激光熔化 316L 不锈钢粉多道搭接工艺的研究[J].应用激光,2017,37(06):787-792.DOI:10.14128/j.cnki.al.20173705.787.

[6] 田宗军,顾冬冬,沈理达,等.激光增材制造技术在航空航天领



- 域的应用与发展[J]. 航空制造技术,2015,(11):38-42.DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.038.
- [7] 巩水利,锁红波,李怀学.金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术,2013,(13):66-71.DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2013.13.007.
- [8] 王金鹏.激光熔覆 TiC 增强 316L 不锈钢微观组织形貌研究[D].辽宁工程技术大学,2024.DOI:10.27210/d.cnki.glnju.2024.000658.
- [9] 韩伟,肖中云,郭永恒,等.基于 CFD/CSD 弱耦合方法的后掠尖旋翼气弹响应分析[J]. 机械设计与制造,2023,(04):114-117.DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20230222.006.