

激光熔覆温度场数值模拟分析

赵骋飞, 王晓飞

天津科技大学机械工程学院, 天津

收稿日期: 2024年5月8日; 录用日期: 2024年6月22日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

激光熔覆, 亦称激光熔敷或激光包覆, 是一种新的表面改性技术。它通过在基材表面添加熔覆材料, 并利用高能密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝的方法, 在基层表面形成冶金结合的添料熔覆层。采用ANSYS的热力学模块对15组单道激光熔覆参数进行数值模拟, 研究了高斯移动热源模型下温度场中等值线的分布特点以及整个熔覆过程中最高温度变化, 分析了激光参数对整个熔覆系统温度的影响以及在几何模型中心位置横截面上温度从熔覆层顶端到基材方向温度的变化情况。

关键词

激光熔覆, ANSYS, 热源模型, 温度场模拟

Numerical Simulation Analysis of Laser Cladding Temperature Field

Chengfei Zhao, Xiaofei Wang

College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin

Received: May 8th, 2024; accepted: Jun. 22nd, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

Laser Cladding, also known as laser cladding or laser cladding, is a new surface modification technology. It forms a metallurgically bonded additive cladding layer on the surface of the base material by adding cladding material to the surface of the base material and using a high-energy-density laser beam to fuse it with a thin layer on the surface of the base material. The thermodynamics module of ANSYS was used to numerically simulate 15 sets of single-pass laser cladding parameters. The distribution characteristics of the temperature field isolines under the Gaussian moving heat source model and the maximum temperature change during the entire cladding process were studied. The effect of the laser parameters on the entire cladding process was stu-

died, and the influence of the temperature of the cladding system and the change of temperature in the cross-section at the center of the geometric model from the top of the cladding layer to the direction of the substrate was analyzed.

Keywords

Laser Cladding, ANSYS, Heat Source Model, Temperature Field Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

激光熔覆的过程中热量集中, 温度梯度的变化非常大, 升温快、冷却快的过程。激光熔覆温度的影响因素包含: 激光功率、激光扫描速度、离焦量和送粉率等, 不同参数的组合会导致不同的热输入, 对激光熔覆的温度场产生显著影响, 进而影响熔覆层的表面形貌、组织形貌和力学性能等, 若通过实验的方式对熔覆层温度进行测量是极为困难的, 基于此, 本文激光熔覆过程的温度场数值模拟采用 ANSYS 软件的热力学模块进行分析, 进而对激光熔覆的整个过程更加全面、深入的了解。

2. ANSYS 热力学理论基础

ANSYS 有限元软件将一个大的整体分割成若干个小单元, 若干个小单元之间相互联系, 最后综合求解。前处理、加载与求解和后处理是 ANSYS 有限元分析软件处理问题得三个步骤, 前处理模块中十分方便地进行有限元模型的建立及网格的划分; 加载与求解模块中对模型构件施加载荷以及对分析步进行设定; 在后处理模块中则是对求解结果以图形、图表的形式进行输出, 便于用户对求解结果进行分析。

2.1. 热分析的分类

ANSYS 热分析主要分为两种: 稳态热分析和瞬态热分析, 两者的区别是系统的温度是否随温度的变化而变化。若随着时间的变化而系统的温度不变化, 则称为稳态传热; 若随着时间的变化而系统的温度发生变化, 则称为瞬态传热。

稳态热分析稳定的热载荷对整个系统或者系统某个部件的影响, 进而计算、确定稳定热载荷引起的热梯度、热流密度以及温度等参数。在三维稳态温度场中, 热平衡的微分方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q} = 0 \quad (1-1)$$

式中: λ 为导热系数; T 为温度场分布函数; \ddot{q} 为内热源。

有限元平衡方程可表示为:

$$(K)\{T\} = \{Q\} \quad (1-2)$$

式中: (K) 为热传导矩阵; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点的热流率向量。

瞬态热分析用来计算整个系统的温度场与时间的变化关系, 在瞬态热分析中时间并不是只用来计数而是有了确定的物理含义。激光熔覆是一个极热骤冷的过程, 材料的热物性能随着时间的变化而变化, 激光熔覆温度场数值模拟是非线性瞬态热传导问题。在三维稳态温度场中, 非线性瞬态热平衡的微分方

程表示为:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q} \quad (1-3)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热容; t 为传热时间。

对于非线性瞬态热分析矩阵形式控制方程为:

$$(C(T))\{\dot{T}\} + (K(T))\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (1-4)$$

式中: (C) 比热容矩阵; $(C)\{\dot{T}\}$ 为热存储项。

2.2. 初始条件与边界条件的定义

在求解热平衡微分方程的解时, 需要知道初始条件和边界条件。所谓的初始条件指的是最开始时工件的温度, 本论文初始温度为室温。

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_{env} = 25^{\circ}\text{C} \quad (1-5)$$

激光熔覆的过程中, 在熔覆层以及上表面和其他几个侧面以对流和热辐射的方式进行热量的交换, 由于激光熔覆的过程中热辐射与热对流是跟随温度的改变而发生变化的, 也就是说在模拟温度场的过程之中存在着极大的非线性特性。为了简化计算, 本文中在数值模拟中设定一个综合表面散热系数来考虑对流与散热[1]。

$$q_c = h_c(T - T_m) + \sigma\xi(T^4 - T_m^4) \quad (1-6)$$

式中: σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; h_c 为换热系数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$); T_m 为环境温度($^{\circ}\text{C}$); ξ 为发射率。

2.3. 热源模型的选择

热源模型的选择是在热力学数值模拟过程中起着十分重要的核心问题, 不同的热源模型决定了热源能量不同的分布形式, 进而影响了激光熔覆熔池内部温度场的结果与准确性。传热学中, 经常使用的热源模型分为: 集中热源模型、面热源模型和体热源模型三种[2] [3] [4]。

(1) 集中热源模型: 把激光器的热源当成是某一个点、某一条线或者是某一个平面, 其模型被称为 Rosenthal 解析模型。

当热源模型为点热源时, 称之为三维温度场。

$$T = \frac{2Q}{c\rho(4\pi t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{D^2}{4\alpha t}\right) \quad (1-7)$$

式中: T 为热源瞬时给工件的热能; Q 为热量; c 为比热容; ρ 为密度; t 为热源作用的时间; D 为距离点热源的距离, $D = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$; α 为热扩散率

当热源模型为线热源时, 称之为二维温度场。

$$T = \frac{Q}{4\pi\alpha ht} \exp\left(-\frac{d^2}{4\alpha t}\right) \quad (1-8)$$

式中: d 为距离线热源的距离, $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$

当热源模型为面热源时, 称之为二维温度场。

$$T = \frac{Q}{c\rho F(4\pi\alpha t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \quad (1-9)$$

式中: F 为截面面积; x 为距离热源的距离

Rosenthal 解析模型是假定材料的物性参数不变, 对焊件的形状的要求看作是无量大、无限薄、无限长, 在数值模拟焊件距离激光光源较远的距离时是较为准确的, 但是当焊件距离激光光源较近的距离时, 数值模拟的结果误差较大, 尤其是熔合区和热影响区的误差更大, 况且这些区域是极其关键的部分[5]。

(2) 体热源模型: 主要有半球状/椭球形/双椭球/旋转高斯体热源模型。激光热源高能束应该把束流的穿透作用考虑进去, 半球状热源模型更适合进行温度场的模拟, 但是这种热源模型把熔池看成球对称形式, 与实际情况存在一定的差异, 为了突破这种局限, 引进了较为准确的椭球形热源模型。椭球形热源模型在热源中心前面的温度梯度偏小, 在热源中心后面的热源梯度偏大, 对于大功率激光熔覆来说, 椭球形热源模型也不能真实反应熔覆过程, 因为在实际情况下, 热源中心前面区域比后半部分的温度梯度大。Goldak 提出双椭球热源模型来进行解决这个问题, 该模型规定体热源的前半部分为 1/4 的椭球, 后半部分为另 1/4 的椭球, 双椭球热源模型的公式如下:

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1\pi^{3/2}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[y+v(\tau-t)]^2/c_1^2} \quad (1-10)$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_2\pi^{3/2}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[y+v(\tau-t)]^2/c_2^2} \quad (1-11)$$

式中: a_1, b, c 为前 1/4 椭球 x, y, z 方向的半轴长度, a_2, b, c 为后 1/4 椭球 x, y, z 方向的半轴长度; Q 为热量; v 为热源的移动速度; t 为激光加热持续时间; τ 为与时间相关的延长因子; f_f 为双椭球模型后部分的能量分布系数; f_r 为双椭球模型前部分的能量分布系数。

双椭球模型中的特征参数 a_1, a_2, b, c 可以控制热源中热源分布和热流强度, 进而影响了熔池的形状, 其取值应当与试验测定的熔池形状相吻合[6], 现实中, 不同的激光器可能熔池不相同, 并且熔池形状测量起来有一定的难度。

(3) 面热源模型: 主要有平面高斯热源模型(如图 1 所示)。高斯热源模型的热量分布呈现出非均匀性特点, 即热量分布中心多而边缘少, 按照高斯函数分布在一定半径的圆内, 其公式如下:

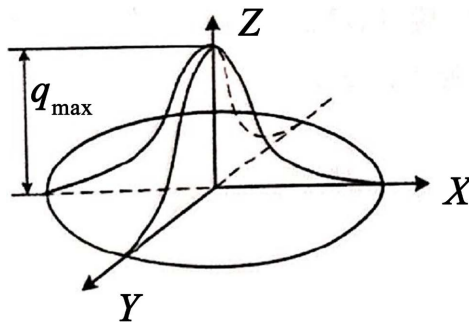


Figure 1. Gaussian heat source model
图 1. 高斯热源模型

$$q(r) = q_m e^{-\frac{3r^2}{R^2}} \quad (1-12)$$

$$q_m = \frac{\eta q}{\pi R^2} \quad (1-13)$$

$$r = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (1-14)$$

式中: q_m 为加热斑点中心的最大的热流密度; r 为距离激光光斑中心距离; R 为距离激光光斑中心距离; η 为热源集中系数; R 为光斑的半径; q 为有效激光功率。

激光熔覆的过程中, 激光能量的分布也是不均匀的, 近似正态分布, 光斑中心的热流密度大于两边, 并且本实验过程中是单层的激光熔覆, 激光熔覆涂层相对较薄、功率相对较小, 激光的穿透作用并不明显, 基于此, 本实验过程选择高斯热源模型作为数值模拟的模型。

2.4. 基材与粉末热物性能的确定

激光熔覆的激光束照射到粉末与材料表面后, 会使其温度升高, 进而使热物性能发生改变, 如果忽略掉热物性能的变化, 会导致计算结果与实际情况差异过大, 因此确定热物性能在不同温度下的热物性能(密度、热导率、比热容)是激光熔覆数值模拟前必不可少的步骤。

本文采用 JmatPro 软件对基材和粉末的热物性能进行计算, JmatPro 软件是被用来计算金属材料的多种性能, 由英国 Sente Software 公司开发, 简单而直觉式的图形用户截面设计, 用起来十分简单、方便。利用 JmatPro 软件计算基材和复合粉末的密度、热导率、比热容, 首先把基材和粉末的主要化学元素含量分别输入到软件中, 然后再选择出需要计算的热物性能的类型, 软件便可以计算, 等计算完毕后显示出热物性能随温度变化趋势的曲线, 图 2 为基材的热物性能变化曲线, 图 3 为粉末的热物性能变化曲线, 然后把热物性能数据导出到 Excel, 最后导入 ANSYS 软件。

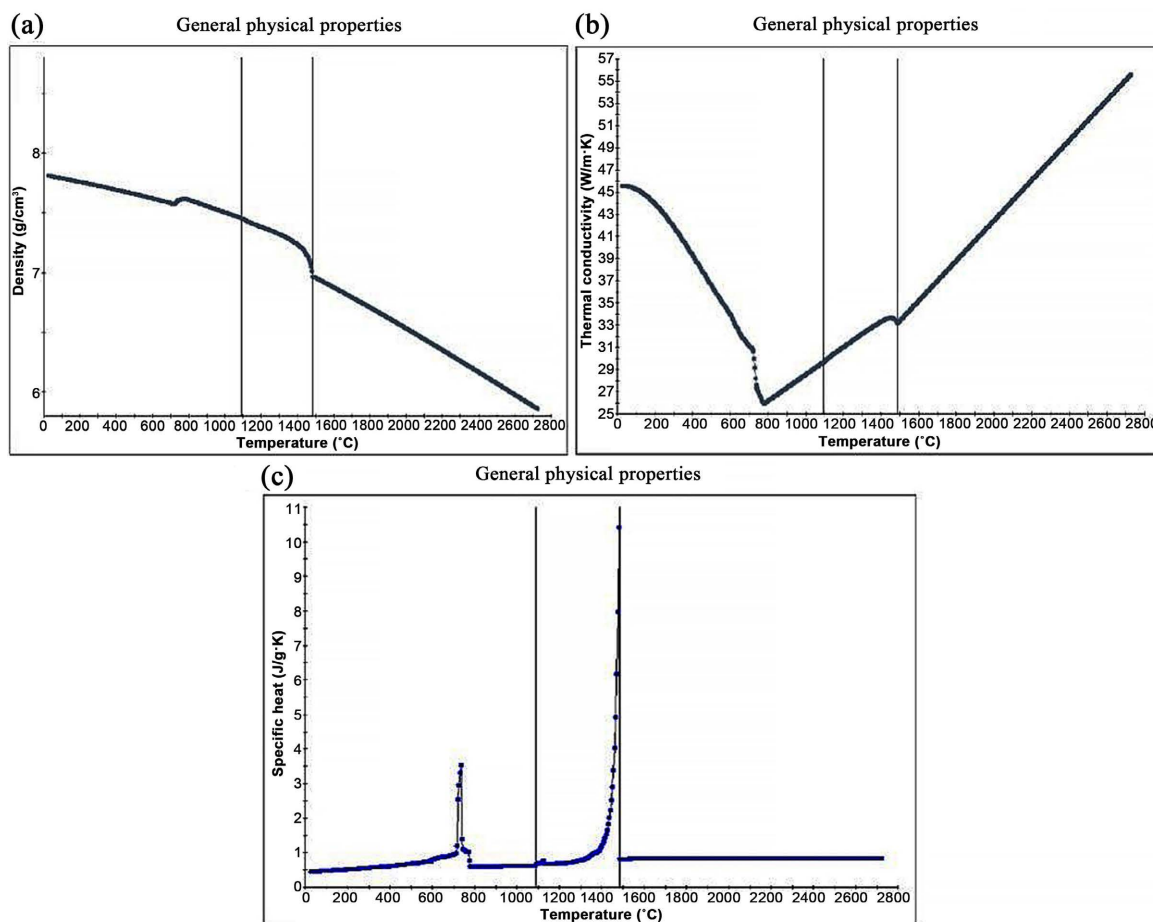


Figure 2. Thermal properties of substrates: (a) Density; (b) Thermal conductivity; (c) Specific heat
图 2. 基材的热物性能: (a) 密度; (b) 热导率; (c) 比热容

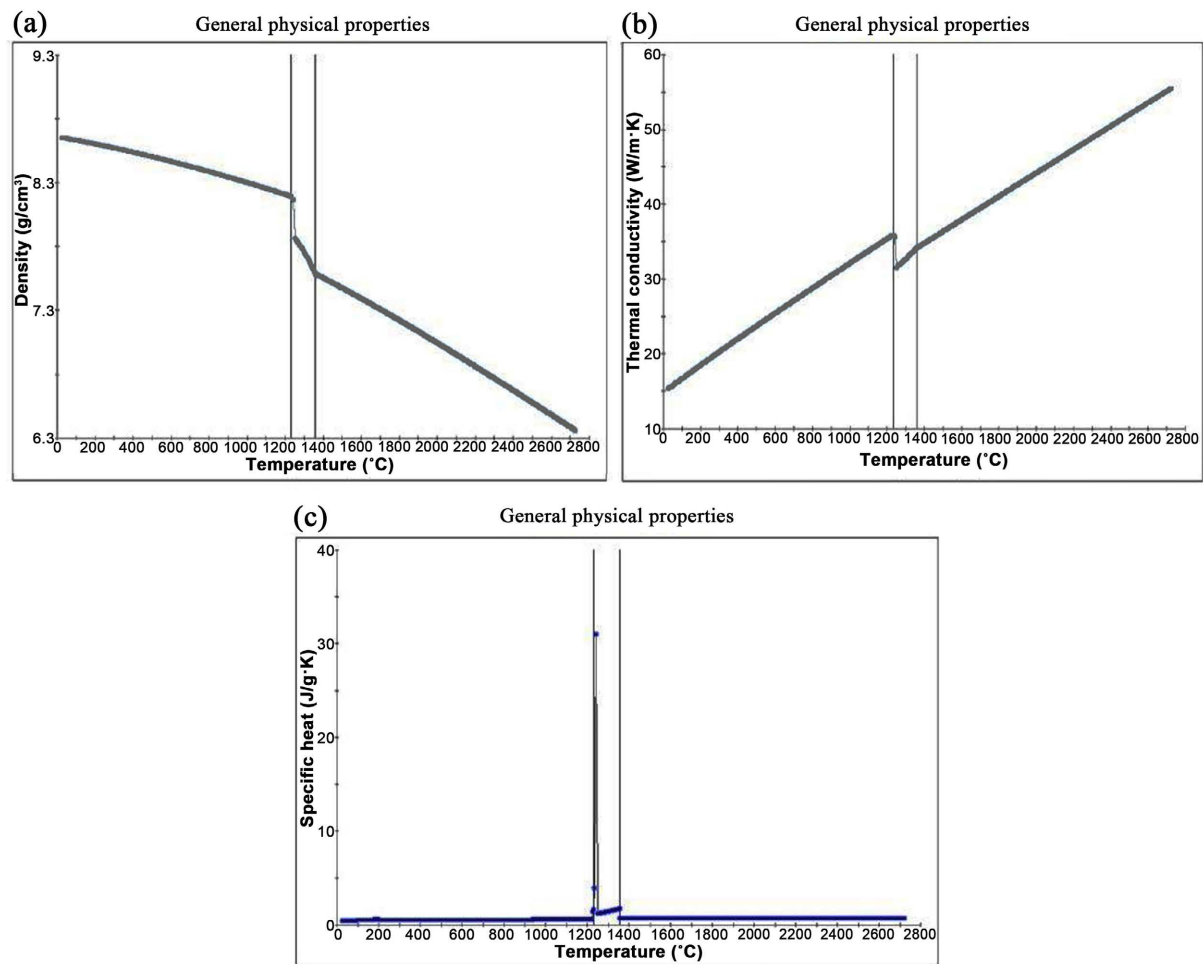


Figure 3. Thermal properties of Stellite20 powder: (a) Density; (b) Thermal conductivity; (c) Specific heat
图 3. Stellite20 粉末的热物性能: (a) 密度; (b) 热导率; (c) 比热容

3. 有限元模型的建立以及热源的施加

3.1. 模型的假定及其简化

激光熔覆的过程会存在热传导、热对流、热辐射，并且还会存在局部熔池流动等多种因素，如果把所有因素都考虑进去，会导致模型变得更为复杂。在保证模拟结果在合理误差的前提下，尽可能减少计算量，来对模型进行简化。

基于此，本模型的假设如下：

- (1) 基材与涂层材料为各向同性，除了热物性中的密度、热导率和比热容外其他的参数都是不随温度变化的；
- (2) 不考虑熔池液体的流动对温度场的影响；
- (3) 工件的室温为 25°C；
- (4) 不考虑在熔覆过程中的汽化作用。

3.2. 几何模型的建立及网格划分

本文选取 SolidWorks 软件进行激光熔覆数值模拟建模，基材的长度、宽度和高度分别为 $40 \times 40 \times 17$

mm, 熔覆涂层为半径为 1 mm 的半圆柱。坐标原点位置为激光熔覆的起点位置, 熔覆方向沿着 Z 轴的负方向。确定后的几何模型需要导入到 ANSYS 软件中, 然后对网格进行划分。

网格的划分是激光熔覆数值模拟过程中十分重要的一步, 因为网格划分的质量会一定程度影响到计算结果的精度。当网格划分精度低的话, 虽然计算耗时会降低, 但是计算结果误差太大, 网格精度划分的越细, 计算的结果精度也就越高, 但是精度越高也会导致占用计算机过大的内存, 增加了计算耗时, 对计算机配置的要求也会增加。因此, 进行网格划分时需要将网格大小控制在合理的范围, 一方面既保证了数值模拟的精度, 另一方面也提高了计算精度。考虑到激光熔覆的实际情况, 当激光热源照射到基材表面后, 热源覆盖范围下的区域会进行熔化, 其他区域下热源对基材的热影响很小。基于此, 本实验采用的网格划分方式为熔覆层进行局部加密的方式, 也就是说越靠近熔覆层区域网格越细, 离网格越远网格越稀疏, 几何模型如图 4 所示。

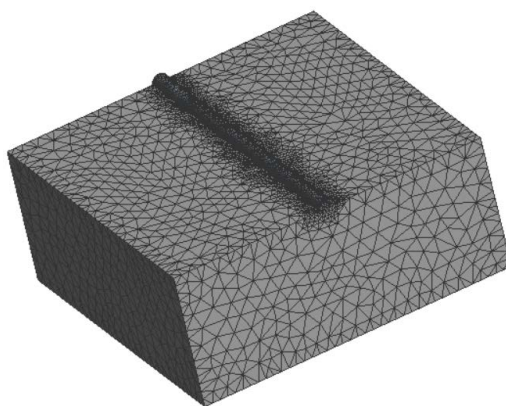


Figure 4. Finite element model
图 4. 有限元模型

3.3. 热源模型的添加

热源模型的热源随着时间移动, 为了保证激光熔覆数值模拟的准确性, 需要解决出时间与模型空间之间的位置关系, 在模拟过程中利用 APDL 热源模型命令流的添加。以激光功率 $P = 2000 \text{ W}$, 扫描速度 $v = 11 \text{ mm/s}$ 为例, 对热源模型的添加过程进行详述。首先计算出高斯热源密度 $2.9\text{e}8 \text{ (w/m}^2\text{)}$, 然后把 $2.9\text{e}8 * \exp(-3 * ((\{X\})^2 + (\{Z\} + 0.008 * \{\text{TIME}\})^2) / 0.0014^2)$ 输入到 Mechanical ADPL, 通过软件读取出命令流后, 导入到 ANSYS Workbench 的命令流中。

4. 温度场模拟结果与分析

激光熔覆数值模拟分别对扫描速度为 5 mm/s、8 mm/s、11 mm/s, 激光功率为 800 W、1100 W、1400 W、1700 W、2000 W 的工艺参数进行组合, 共计 15 组。图 5 是以激光功率 $P = 2000 \text{ W}$, 扫描速度 $v = 11 \text{ mm/s}$ 时, 初始时刻 $t = 0 \text{ s}$, 中间时刻 $t = 1.8 \text{ s}$, 最后时刻 $t = 3.6 \text{ s}$ 时温度场分布云图。

图 6(a) 为中间时刻的温度场分布云图的轮廓图模式, (b) 为云图的等值线模式。激光熔覆其温度场有一个显著特点——极热骤冷, 从图 6(b) 可以看出, 温度场中等值线呈现出椭圆状, 激光光斑中心位置, 温度最高, 激光光斑中心越远, 温度越低; 等温线的密集程度随着距离激光光斑中心距离发生变化, 距离激光光斑中心越近, 等温线越密集, 距离激光光斑中心越远, 等温线越稀疏; 激光光斑中心前后, 等温线的密集程度也有所不同, 激光光斑中心前半部分, 等温线较为密集, 激光光斑中心后半部分, 等温线较为稀疏。

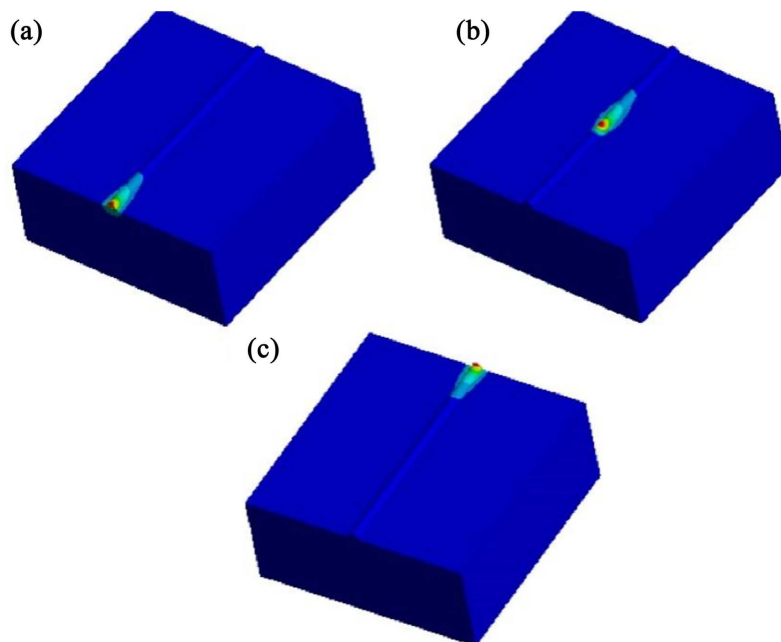


Figure 5. Cloud map of temperature field distribution at different moments: (a) $t = 0$ s; (b) $t = 1.8$ s; (c) $t = 3.6$ s
图 5. 不同时刻温度场分布云图: (a) $t = 0$ s; (b) $t = 1.8$ s; (c) $t = 3.6$ s

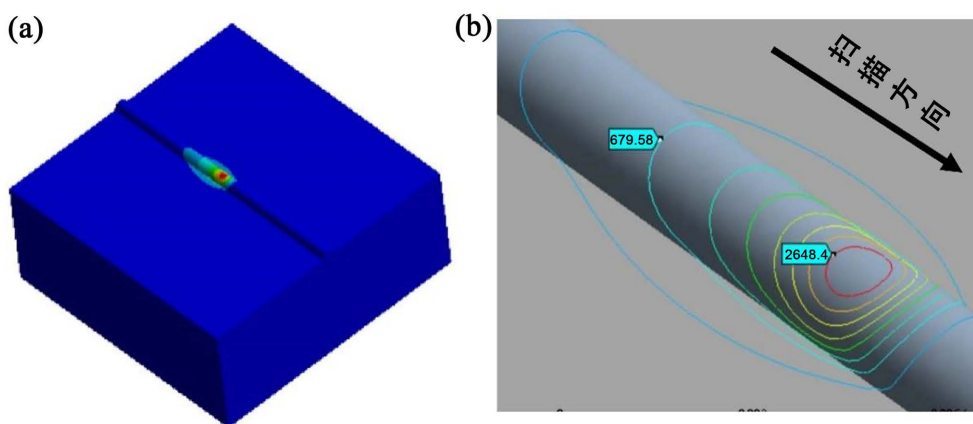


Figure 6. Temperature field cloud map: (a) Profile mode; (b) Contour mode
图 6. 温度场云图: (a) 轮廓图模式; (b) 等值线模式

主要原因有两个方面: 一方面的原因是高斯热源模型热量分布是不均匀的, 激光能量按照高斯函数分布在一定半径的圆内, 呈现出中心多而边缘少的热量分布; 另一个方面的原因是熔覆区域材料的导热系数要比未熔覆区域材料的导热系数, 因此热量更容易在已经熔覆的区域积累。

图 7 为激光功率 $P = 2000$ W, 扫描速度 $v = 11$ mm/s 时, 激光熔覆整个过程中最高温度的变化趋势。在观察整个过程激光熔覆的曲线时, 发现整个熔覆体系在激光的照射下基材和熔覆粉末快速吸收能量, 温度升高快速; 当温度提高至一定的数值后, 整个熔覆体系会形成一个准稳态温度场, 整个熔覆体系的温度在小范围内波动; 当熔覆过程将要结束时, 可以明显的看出温度突然升高, 造成这种现象的原因可能是熔覆层边缘的边界条件存在差异, 并且在基材边缘附近进行热传导的体积比非边缘处要小很多, 导致当熔覆过程将要结束时, 熔覆层的温度突然升高, 这种现象也被称为激光熔覆过程中的端部效应[7]。端部效应的存在对激光熔覆过程产生不利的影响, 例如粉末过烧、试样局部变形过大等, 因此在激光熔

覆过程中应当避免端部效应。激光熔覆避免端部效应的方法主要有两种：外接材料方案和预留方案[8]。外接材料方案是在基材的边界处搭接一块和基材高度一样且最好与基材材料一样的式样块；预留方案是熔覆涂层距离边界一定的距离，这种方法比较简单、方便，但是这种方法的缺点是基材有一部分不存在涂层。

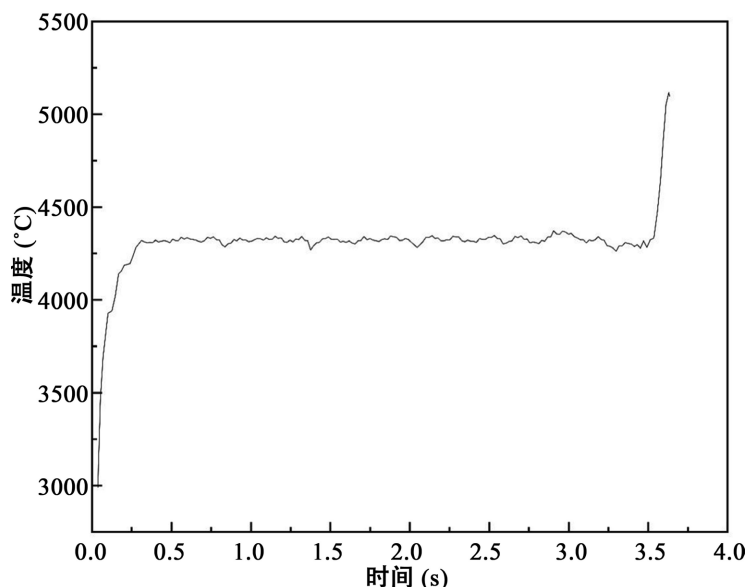


Figure 7. Maximum temperature change during the entire cladding process
图 7. 整个熔覆过程中最高温度变化

从图 7 中可以看出当温度升高至一定的数值后，整个熔覆体系会形成一个准稳态温度场，整个熔覆体系的温度在小范围内波动，选取中间时刻整个熔覆体系的最高温度探究温度与激光参数的关系，图 1~8 为熔覆体系的最高温度与激光功率和扫描速度的关系。

从图中可以看出，当激光的扫描速度不变时，功率的增加熔覆体系最高温度也会随之增加。扫描速度为 5 mm/s 时，功率为 800 W 下熔覆层的最高温度为 2600°C，当功率上升至 2000 W 时，熔覆体系的最高温度为 4700°C；扫描速度为 8 mm/s 时，功率为 800 W 时，熔覆体系的最高温度为 2436°C，当功率上升至 2000 W 时，熔覆层的最高温度为 4514°C；扫描速度为 11 mm/s 时，当功率为 800 W 时，熔覆体系的最高温度为 2290°C，当功率上升至 2000 W 时，熔覆层的最高温度为 4250°C。由公式(1-13)可知，当激光功率增加后，加热斑点中心的最大的热流密度也会提高，使整个高斯热流密度增加，进而使整个熔覆体系的温度升高。当激光功率不发生变化时，随着扫描速度的增加熔覆层最高温度随之减小，激光功率为 800 W 时，当扫描速度为 5 mm/s 时熔覆层的最高温度为 2609°C，当扫描速度上升至 11 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 2290°C，温度降低了将近 300°C；光功率为 1100 W 时，当扫描速度为 5 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 3174°C，当扫描速度上升至 11 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 2807°C，温度降低了将近 350°C；光功率为 1400 W 时，当扫描速度为 5 mm/s 时熔覆层的最高温度为 3679°C，当扫描速度上升至 11 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 3299°C，温度降低了将近 400°C；光功率为 1700 W 时，当扫描速度为 5 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 4305°C，当扫描速度上升至 11 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 3853°C，温度降低了将近 450°C；光功率为 2000 W 时，当扫描速度为 5 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 4764°C，当扫描速度上升至 11 mm/s 时，熔覆层的最高温度为 4250°C，温度降低了将近 500°C；这是由于当扫描速度增加时，高斯热流密度减小，进而使整个熔覆体系的温度降低。

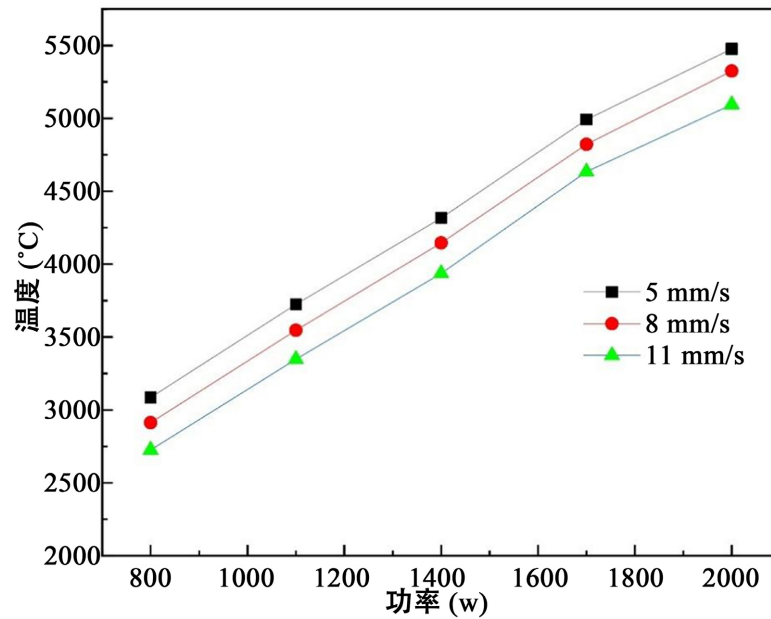


Figure 8. Temperature variation with laser parameters
图 8. 温度随激光参数变化

图 9 为激光功率为 2000 W, 扫描速度为 11 mm/s 时激光熔覆实验截图与数值模拟模型截图, 从前文中可知, 激光熔覆过程中粉末和基材都会熔化, 进而形成一定的冶金结合。已知 40Cr 的熔点为 1400°C, 若基材能够熔化, 基材处的温度需要达到其熔点。为了探究各组涂层与基材温度的变化情况, 截取几何模型中心位置的横截面, 在熔覆层顶端到基材方向添加一段路径, 探究在激光熔覆的光源移至中心位置处时, 温度从熔覆层顶端到基材方向的变化(a)~(b)。

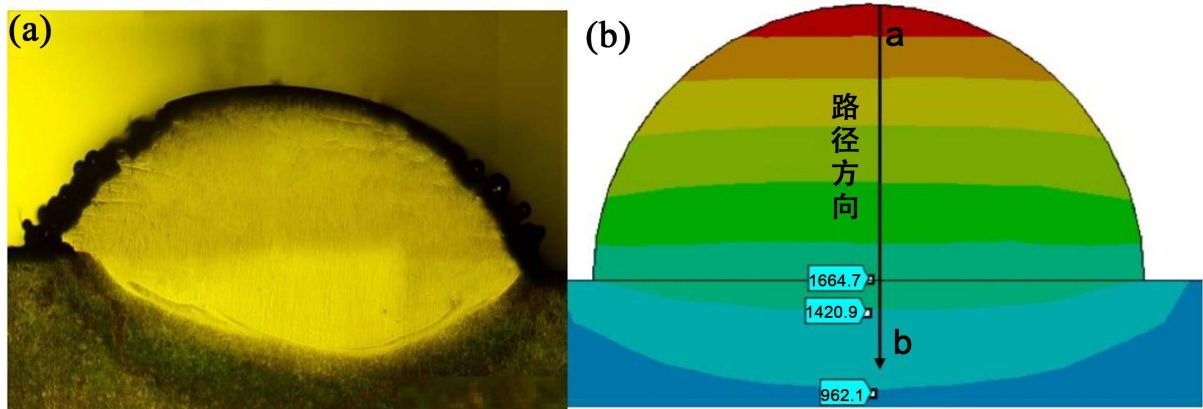


Figure 9. Cross-sectional temperature field cloud: (a) Physical picture; (b) Model picture
图 9. 横截面温度场云图: (a) 实物图; (b) 模型图

图 10 为激光扫描速度分别为 5 mm/s、8 mm/s、11 mm/s, 激光功率为 800 W、1100 W、1400 W、1700 W、2000 W 时所组成的 15 组实验组, 其中(a)为扫描速度为 5 mm/s 时, 不同激光功率下温度从熔覆层顶端到基材方向的变化, (b)为扫描速度为 8 mm/s 时, 不同激光功率下温度从熔覆层顶端到基材方向的变化, (c)为扫描速度为 11 mm/s 时, 不同激光功率下温度从熔覆层顶端到基材方向的变化。三张图中都分别含有一条水平和一条垂直的线, 其中水平的线对应的纵坐标的数值为 1400°C (基材的熔点), 垂直的线对应

的横坐标的数值为 1.0 mm (基材与涂层的交界处), 垂直线右部分和水平线上部分, 说明达到了基材的熔化温度。

从图中可以看出, 温度从 a-b 呈下降趋势, 图(a)中, 当扫描速度为 5 mm/s, 激光功率为 800 W 时, 基材与涂层的交界处小于 1400°C, 并未达到基材的熔点, 随着激光功率的提高, 激光功率为 1100 W、1400 W、1700 W、2000 W, 基材与涂层的交界处都大于 1400°C, 达到了基材的熔点; 当扫描速度为 8 mm/s, 激光功率为 800 W 和 1100 W 时, 基材与涂层的交界处小于 1400°C, 并未达到基材的熔点, 随着激光功率的提高, 激光功率为 1400 W、1700 W、2000 W, 基材与涂层的交界处都大于 1400°C, 达到了基材的熔点; 当扫描速度为 11 mm/s, 激光功率为 800 W、1100 W 和 1400 W 时, 基材与涂层的交界处小于 1400°C, 并未达到基材的熔点, 随着激光功率的提高, 激光功率为 1700 W、2000 W, 基材与涂层的交界处都大于 1400°C, 达到了基材的熔点。

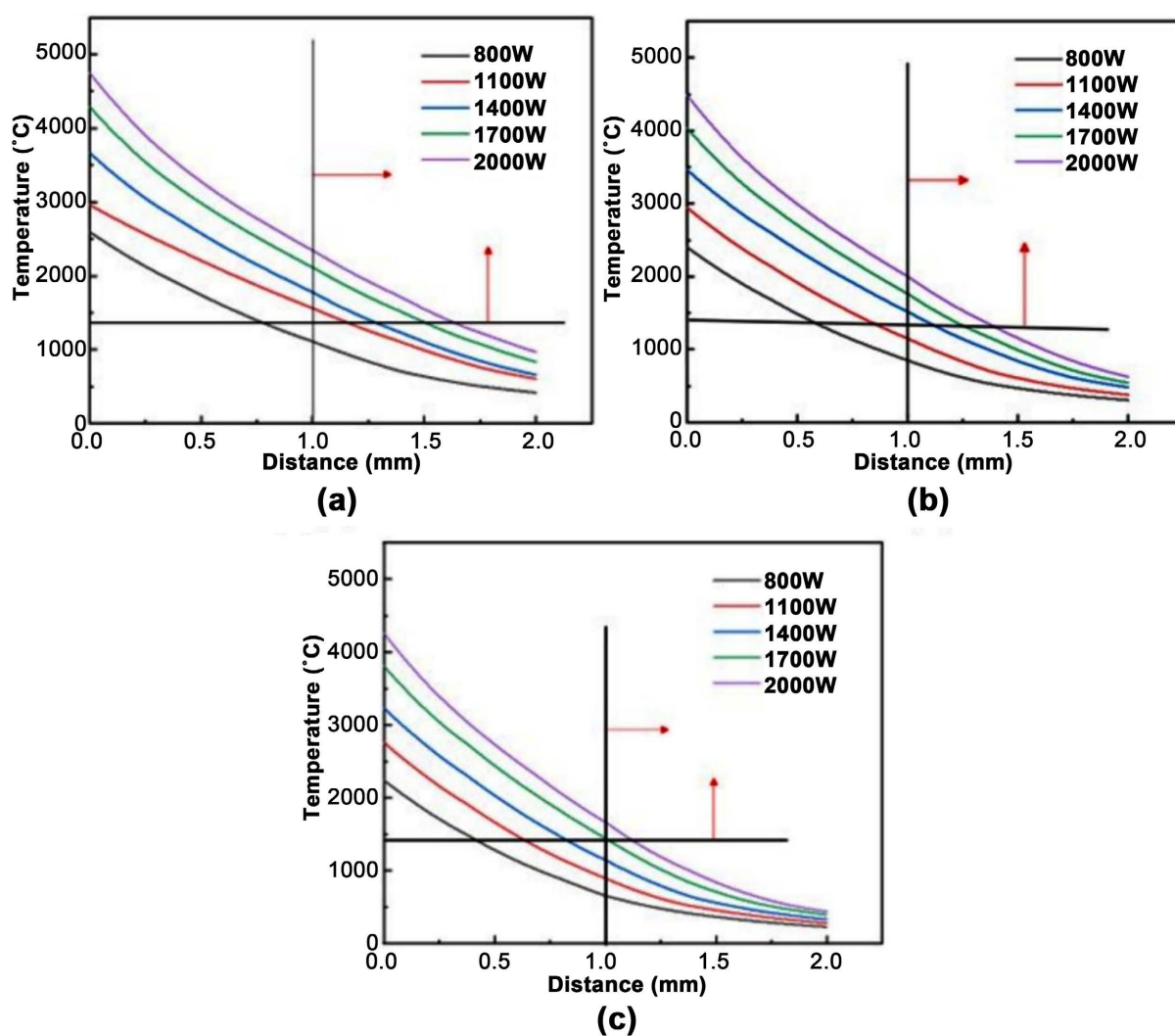


Figure 10. Temperature distribution curve of a-b path: (a) 5 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 11 mm/s

图 10. a-b 路径的温度分布曲线: (a) 5 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 11 mm/s

通过对激光熔覆实验试样的截面进行研究, 发现当扫描速度为 5 mm/s, 激光功率为 800 W 时实验试样基材并未熔化; 当扫描速度为 8 mm/s, 激光功率为 800 W 时实验试样基材并未熔化, 激光功率为 1100

W时,实验试样只有在涂层与基材结合处的中部位置有些许熔化,两边并未熔化;当扫描速度为11 mm/s,激光功率为800 W和1100 W时基材并未熔化,功率为1400 W时,实验试样基材有些许熔化,与数值模拟的结果有些出入,但是经过测量熔化深度为0.19 mm,数值模拟结果和实验结果还较为符合。

5. 总结

采用 ANSYS 的热力学模块对 15 组单道激光熔覆参数进行数值模拟,研究了高斯移动热源模型下温度场中等值线的分布特点以及整个熔覆过程中最高温度变化,分析了激光参数对整个熔覆系统温度的影响以及在几何模型中心位置横截面上温度从熔覆层顶端到基材方向温度的变化情况,主要内容有:

(1) 建立了激光熔覆温度场数值模拟的几何模型,并且完成了温度场计算的一些前期工作,如:初始条件与边界条件的建立,热源模型的选取以及和粉末材料热物性能的确定,并且利用 ANSYS 软件的 Mechanical ADPL 对热源模型命令流进行添加,进而实现了激光热源的移动。

(2) 分析了激光熔覆温度场分布情况,分析表明温度场中等值线呈现出椭圆状,激光光斑中心位置,温度最高,激光光斑中心越远,温度越低;距离激光光斑中心越近,等温线越密集,距离激光光斑中心越远,等温线越稀疏;激光光斑中心前半部分,等温线较为密集,激光光斑中心后半部分,等温线较为稀疏。

(3) 研究了不同激光功率和激光扫描速度对熔覆系统温度的影响,结果表明,当激光功率增加后,使整个高斯热流密度增加,进而使整个熔覆体系的温度升高;当扫描速度增加时,使整个熔覆体系的温度降低。几何模型中心位置横截面上温度从熔覆层顶端到基材方向温度逐步降低,通过分析基材与涂层交界处的温度预测基材是否熔化,和实验结果较为吻合。

参考文献

- [1] 段松. 盾构机滚刀刀圈材料激光熔覆镍基硬质合金的研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- [2] 李陈晨. 盾构机滚刀表面梯度涂层的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2020.
- [3] 王宇轩. TBM 支撑推进系统的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
- [4] 张森. 复合地质下 TBM 刀盘裂纹萌生寿命研究及刀具涂层实验[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [5] 江志强. TBM 盘形滚刀热处理工艺的数值模拟与刀圈材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [6] 刘海成. 基于相似性原理的 TBM 盘形滚刀刀圈摩擦磨损研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- [7] 贾连辉, 尚勇, 龙伟民, 等. TBM 滚刀刀圈材料合金成分对组织和耐磨性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2730-2738.
- [8] 赵兴明, 刘学红, 闫光立, 等. WC 颗粒增强盾构机滚刀刀圈的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2022(7): 43.