

TC4 表面激光熔覆 Ni60 基涂层温度场 热循环特性数值模拟研究

赵盛举, 祁文军, 黄艳华, 雷靖峰

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830008)

摘 要: **目的** 确定 TC4 钛合金激光熔覆的最优工艺参数, 研究其热循环特性, 分析激光熔覆温度对组织的影响规律。**方法** 采用 3D 高斯热源, 基于 Sysweld 软件平台, 对 TC4 钛合金激光熔覆 Ni60A-50%Cr₃C₂ 粉末过程进行数值模拟仿真, 研究温度场云图及其热循环特性, 模拟计算激光熔覆最高温度、加热速度和冷却速度, 以及熔池最大深度和热影响区宽度, 进行激光熔覆实验验证, 结合熔覆层显微组织扫描电镜 (SEM) 图像, 研究冷却速度对熔覆层组织的影响。**结果** 由仿真可知, 激光熔覆工艺参数中的光斑直径和送粉速度主要影响熔覆层的高度和宽度, 对温度场分布起主要影响作用的是激光功率和扫描速度。激光功率为 500 W, 扫描速度为 4 mm/s 时, 熔覆层区域熔化完全, 与基体结合良好。激光熔覆最高温度为 2700 °C, 最大加热速度约为 2200 °C/s, 最大冷却速度约为 1200 °C/s, 熔池最大深度在 0.33~0.66 mm 之间, 热影响区宽度约为 1.2 mm。模拟与实验得到的熔覆层截面形貌基本一致。不同冷却速度得到的熔覆层组织不同, 随着冷却速度的降低, 显微组织由短小的胞晶和树枝晶逐步转变为柱状晶、胞状晶和平面晶, 最终形成淬火态的针状马氏体。**结论** 最佳工艺参数为: 激光功率 500 W, 扫描速度 4 mm/s。冷却速度是影响熔覆层组织的重要因素, 仿真模型的正确性及方法的可行性得到了实验验证。

关键词: 激光熔覆; TC4 钛合金; Ni60; 热循环; 显微组织; 数值模拟

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0301-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.038

Numerical Simulation Study on Thermal Cycle Characteristics of Temperature Field of TC4 Surface Laser Cladding Ni60 Based Coating

ZHAO Sheng-ju, QI Wen-jun, HUANG Yan-hua, LEI Jing-feng

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

ABSTRACT: The work aims to determine the optimal process parameters of laser cladding of TC4 titanium alloy, study its thermal cycle characteristics and analyze the influence of laser cladding temperature on microstructure. Based on the Sysweld

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-07-13

Received: 2019-04-22; Revised: 2019-07-13

作者简介: 赵盛举 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光熔覆。

Biography: ZHAO Sheng-ju (1994—), Male, Master, Research focus: laser cladding.

通讯作者: 祁文军 (1968—), 女, 教授, 主要研究方向为材料加工领域中的数字化设计与应用。邮箱: wenjuntsi@163.com

Corresponding author: QI Wen-jun (1968—), Female, Professor, Research focus: digital design and application in the field of material processing. E-mail: wenjuntsi@163.com

引文格式: 赵盛举, 祁文军, 黄艳华, 等. TC4 表面激光熔覆 Ni60 基涂层温度场热循环特性数值模拟研究[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 301-308.

ZHAO Sheng-ju, QI Wen-jun, HUANG Yan-hua, et al. Numerical simulation study on thermal cycle characteristics of temperature field of TC4 surface laser cladding Ni60 based coating[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 301-308.

software platform, the numerical simulation of TC4 titanium alloy laser cladding Ni60A-50%Cr₃C₂ powder was carried out with 3D Gaussian heat source. The temperature field cloud map and its thermal cycle characteristics were studied to simulate and calculate the maximum temperature, heating rate and cooling speed of laser cladding as well as the maximum depth of the molten pool and the width of the heat-affected zone, to verify by laser cladding experiments, and the scanning electron microscopy (SEM) images of the cladding layer were combined to study the effect of cooling rate on the microstructure of the cladding layer. It can be seen from the simulation that the spot diameter and the powder feeding speed in the laser cladding process parameters mainly affected the height and width of the cladding layer. The main influence factors of the temperature field distribution were the laser power and scanning speed. When the laser power was 500 W, and the scanning speed was 4 mm/s, the cladding layer was completely melted and well bonded to the substrate; when the maximum temperature of laser cladding was 2700 °C, the maximum heating rate was about 2200 °C/s, the maximum cooling rate was about 1200 °C/s, the maximum depth of the molten pool was between 0.33 mm and 0.66 mm, and the width of the heat-affected zone was about 1.2mm; the cross-section morphology of the cladding layer obtained by the simulation and experiment was basically the same; the microstructure of the cladding layer obtained by different cooling rates was different, and the microstructure was composed of short cell crystals as the cooling rate decreased. And the dendrites gradually transformed into columnar crystals, cell crystals and planar crystals, and finally formed quenched acicular martensite. The optimum process parameters are laser power of 500 W and scanning speed of 4 mm/s. The cooling rate is an important factor affecting the microstructure of the cladding layer. The correctness of the simulation model and the feasibility of the method are verified by experiments.

KEY WORDS: laser cladding; TC4 titanium alloy; Ni60; thermal cycle; microstructure; numerical simulation

TC4 钛合金是一种具有低密度、高比强度、高耐热性能等特点的金属,被广泛应用于航空航天和化学工业等领域^[1-6]。TC4 钛合金因其优良的综合性能,是世界上用量最大的两相钛合金。作为重要结构件的组成材料,TC4 钛合金的缺点也同样明显,表面容易划伤、咬死,耐磨性能差,并缺乏高温耐蚀性^[7-10]。为此,通过激光熔覆的方法在 TC4 钛合金表面熔覆金属粉末,以此来增强 TC4 钛合金的性能。

激光熔覆是一个相对复杂的热力学过程^[11],在熔覆过程中会受到激光功率、扫描速度、光斑直径和送粉速度等多个参数的影响。由于激光熔覆工艺的参数众多,且参数对熔覆质量影响复杂^[12],如果采取实验的方法,往往需要进行大量的实验。通过建立精确的激光熔覆有限元模型,研究激光熔覆工艺参数对熔覆过程温度场的影响,为激光熔覆实验提供理论依据和指导,可减少大量的实验工作,提高研究效率,为激光熔覆的理论研究奠定基础^[13]。

近年来,国内外针对激光熔覆数值模拟已开展一定的研究。Kong 等^[14]通过建立单道二维瞬态数学计算模型,研究了扫描速度、激光功率和送粉量对熔覆层高度的影响。W. C. Tseng 等^[15]综合考虑激光波长、光斑直径、聚焦条件等因素,建立了激光熔覆热源的有限元模型,通过相同条件下的工艺实验,验证了热源模型的可靠性。吴东江等^[16]在 TC4 钛合金表层熔覆 Al₂O₃ 材料,建立精确的有限元模型,探究激光熔覆冷却阶段温度梯度变化规律以及预热对温度梯度的影响,通过比较熔池形貌及测量热电偶温度来验证

仿真模型的可靠性。程成等^[17]在 TC11 钛合金表面熔覆立方氮化硼涂层,建立激光熔覆温度场的有限元模型,分析了激光熔覆工艺参数对温度场的影响,以及温度梯度对涂层质量的影响。王志坚等^[18]运用 ANSYS 的 APDL 语言及生死单元技术对 TC4 钛合金单道熔覆的传热模型进行数值模拟,结合测温实验分析了激光熔池在凝固过程中的热行为,阐述了激光工艺参数对熔池凝固传热过程的影响。段伟等^[19]对钛合金 TC4 激光熔覆过程进行了数值模拟,分析了不同激光功率和扫描速度下激光熔覆过程中的温度场及应力场,综合考虑成形质量和时间成本,确定了最优工艺参数。

前人通过建立精确的有限元模型对激光熔覆过程进行数值模拟,研究激光熔覆各工艺参数对温度场、应力场分布的影响规律,对激光熔覆理论分析具有较强的指导意义,但未见关于激光熔覆热循环特征的研究报道。在实验验证方面,大多以温度场测试为主,验证过程较为复杂,且影响因素较多。本文采用 3D 高斯热源分布模型,基于 Sysweld 软件平台,对 TC4 钛合金单道激光熔覆过程进行数值模拟仿真,确定模拟最优工艺参数方案,研究温度场云图及其热循环特性,提取温度曲线,获得熔池形貌,进行激光熔覆实验验证。在确定模拟结果可靠的情况下,结合 SEM 图,研究了冷却速度对熔覆层组织的影响。本文采用的验证方法简洁直观,缩短了实验周期,降低了实验成本,所研究的模拟方法为激光熔覆过程仿真提供了一种新思路。

1 有限元分析建模

1.1 有限元模型的建立

基体材料为 TC4 钛合金，试样为长 150 mm、宽 70 mm、高 10 mm 的长方体。用 Visual-Mesh 建模，并在基体的中心位置添加熔覆层，熔覆层长度为 70 mm，高度和宽度由送粉速度和光斑直径的参数确定。

1.2 网格划分

在 Visual-Mesh 中进行网格划分，网格划分遵循以下几点要求：1）基体关于熔覆层对称，基体网格对称划分；2）为保证熔覆层及其周围的热集中区域能够得到较为精确的温度分布，在热集中区域划分较密的网格；3）基体采用四边形网格（六面体单元），为保证熔覆层温度分布更加精确，熔覆层采用四边形-三角形网格（六面体-四面体单元）；4）保证网格的连续性。网格划分如图 1 所示（由于基体过大，不易观察网格，只截选熔覆层左右各 10 mm 部分）。

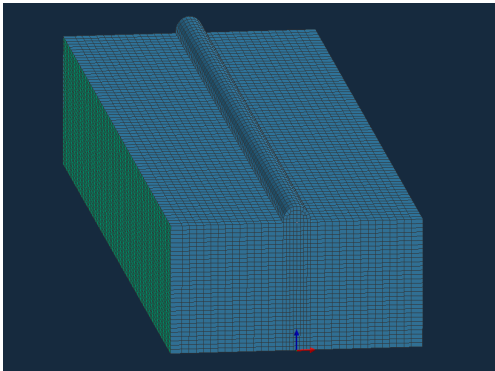


图 1 有限元模型网格划分
Fig.1 Mesh division of finite element model

1.3 组的创建

激光熔覆的过程和焊接过程类似，激光器沿着固定轨迹移动，熔覆粉末及基体。采用 Sysweld 模拟这一加热过程，需要在 Visual-Mesh 中设置熔覆线、参考线、起始点、结束点、起始单元、热交换表面、装夹条件等。设置完成后保存为 ASC 格式的文件。

2 Sysweld 求解

2.1 热源模型的建立

热源模型的建立会影响激光熔覆数值模拟计算结果的准确性，因此本文选择与实际激光器输入能量相同的热源模型。激光熔覆常用的热源模型主要有 2D 高斯热源、3D 高斯热源和双椭球热源。根据实际情况，本文选用 3D 高斯热源，如图 2 所示。分布函数为：

$$q(x,y,z,t)=\frac{3Q}{\pi c^2}e^{\left(\frac{-3x^2}{c^2}-\frac{3(z+v(\tau-t))^2}{c^2}\right)}\tag{1}$$

式中： Q 为能量输入率； $q(x,y,z,t)$ 为 t 时刻在 (x,y,z) 位置的热流量； c 为热源的集中系数； v 为熔覆速度； τ 为热源位置滞后的时间因素。

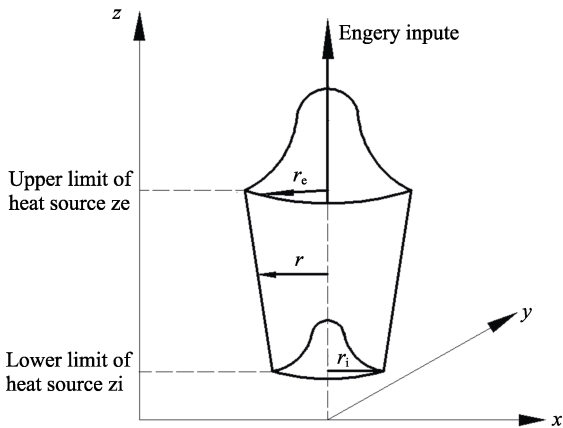


图 2 3D 高斯热源模型
Fig.2 3D gaussian heat source model

2.2 材料库建立

本实验采用的熔覆材料是 Ni60A 和 Cr₃C₂ 的混合粉末，含微量稀土 Y₂O₃。其中 Cr₃C₂ 粉末是 NiCr 包覆的金属陶瓷复合粉末，两种粉末的成分见表 1、2。在热源校核和仿真计算时需要调用相对应的材料数据库，因此根据需要建立 Ni60A-50%Cr₃C₂ 粉末的数据库。利用 Sysweld Toolbox 中提供的针对软件开发的 Material Database Manager 材料库文件生成工具建立材料库。JMatPro 软件可以较为准确地计算出材料的高温物理性能，经验证，误差低于 10%^[20]。将材料的各成分输入到 JMatPro 软件中，软件可根据材料成分生成各项参数（如图 3 所示）。输入 Material Database Manager 所需的参数，最后生成一个 mat 格式的材料库文件。

表 1 Ni60A 粉末的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ni60A powder

Element	Ni	Cr	Si	B	Fe	C
Percentage content/wt%	68.6	17.41	4.8	3.83	4.53	0.83

表 2 Cr₃C₂ 粉末的化学成分
Tab.2 Chemical composition of CR₃C₂ powder

Element	Ni	Cr	Cr ₃ C ₂
Percentage content/wt%	16	4	80

2.3 Welding Wizard 设置

在计算之前，需要设置 Welding Wizard 参数，Welding Wizard 将确定整个模拟过程。先导入已建好

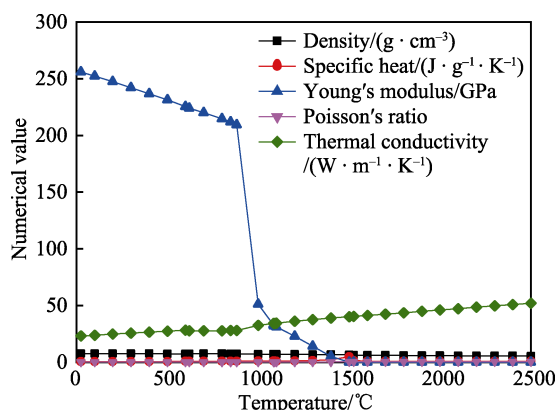


图3 Ni60A-50%Cr₃C₂各项参数
Fig.3 Parameters of Ni60A-50%Cr₃C₂

的ASC格式模型文件,接着导入热源,设置焊接线、参考线、起始单元、起始点、扫描速度、装夹条件、热交换边界等条件。然后运用生死单元法将熔覆层的单元属性设置为空,杀死熔覆层单元,在熔覆过程中再赋予熔覆层材料属性,以此来模拟同步送粉激光熔覆过程,最后保存并计算。

3 数值模拟结果及分析

通过查阅文献[21-22]可知,在激光熔覆主要参数激光功率、扫描速度、光斑直径和送粉速度中,光斑直径和送粉速度主要影响熔覆层的高度和宽度,而对温度场的分布影响很小。在相同的功率和扫描速度下,设置不同的光斑直径和送粉速度,其中光斑直径通过修改热源模型设置,送粉速度通过修改有限元模型设置,进行仿真计算。对比不同光斑直径和送粉速度的温度场云图发现,它们的温度场云图分布基本相同。因此本文不再分析光斑直径和送粉速度对激光熔覆温度场分布的影响,主要分析激光功率和扫描速度对激光熔覆温度场分布的影响。

3.1 温度场分布

通过工艺实验设定熔覆层成形参数,熔覆层高度和宽度分别为1.0 mm和2.4 mm(对应光斑直径为2.4 mm,送粉速度为0.8 r/min)。激光功率分别设置为400、500、600、800、1000 W,扫描速度分别为2、3、4、5 mm/s,熔覆时间由扫描速度决定,冷却结束时间为1000 s。基于以上参数进行仿真模拟实验,对得到的温度场云图分析发现,当功率超过600 W时,模拟得到的温度云图存在熔池深、熔化区域超过熔覆层宽度、最高温度过高等问题,因此舍去600 W以上的实验方案。模拟400、500、600 W功率下对应不同扫描速度的方案,获得了温度云图(如图4所示),并对其进行分析,图中红色区域为熔化区,周围黄色至蓝色渐变为热影响区。

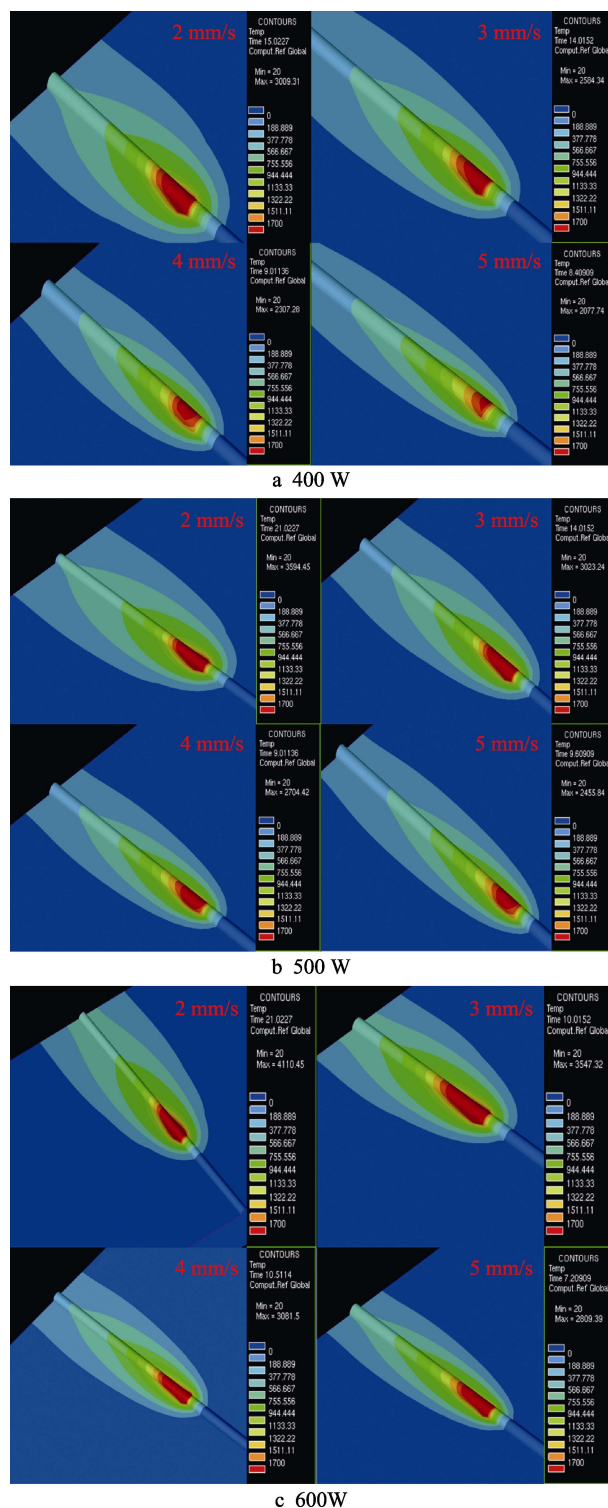


图4 相同功率下不同扫描速度温度云图分布
Fig.4 Cloud distribution of temperature at different scanning speeds under the same power

由图4可知:当激光功率相同时,扫描速度越慢,最高温度越高;扫描速度越快,最高温度越低。当激光扫描速度相同时,激光功率越大,最高温度越高;激光功率越小,最高温度越低。观察图4a发现,当扫描速度为2、3 mm/s时,都存在熔化区域超出熔覆层区域的情况;当扫描速度为4、5 mm/s时,熔化区

域较小,可能造成熔覆层区域熔化不完全、无法与基体完全结合、熔覆层脱落等后果。在图 4b、c 中,部分扫描速度下同样出现上述两种问题。观察图 4c,由于激光功率较大,熔池成形不好,热影响区较大。对比三种功率四种扫描速度的温度云图发现,功率为 500 W、扫描速度为 4 mm/s 时的模拟结果基本未出现上述两种问题,因此拟定此方案为最优模拟参数方案。

3.2 激光熔覆热循环曲线

热循环曲线的研究在热加工领域中有着重要的意义,可为选择材料、制定最佳工艺、消除加工缺陷、提高加工质量等提供重要的指导^[23]。本文根据拟定的最优模拟参数方案,模拟计算得到温度云图,在温度云图的熔覆线截面上沿水平方向和垂直方向各选取一组取样点。为保证提取温度曲线的准确性,熔覆线的起点和终点都不作为取样对象,在熔覆线中心位置选择取样点。

3.2.1 横向热循环曲线

水平方向取点位置及编号如图 5 所示。在熔覆层和基体交界处(结合区)取 1 个点(图 5 中点 4),并向基体方向取 3 个点(图 5 中点 1—3,相邻两点间距为 0.6 mm),向熔覆层方向取 2 个点(图 5 中点 5 和点 6),共 6 点。取点完毕后,在 Sysweld 中提取所选取点的温度曲线,并对其进行分析。

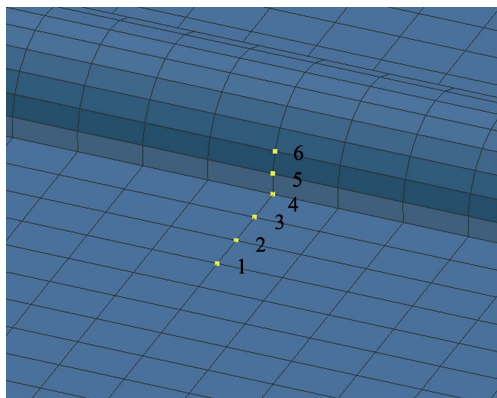


图 5 水平方向取样点位置及编号

Fig.5 Location and number of horizontal sampling points

仿真设置的熔覆层宽度为 2.40 mm,6 个取样点的温度曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,取样点 3、4、5、6 温度在同一时间达到峰值,1、2 点在其后约 1 s 的时间达到峰值。分析其原因是:4 点在结合区,5、6 点在熔覆层上,均在激光扫描的范围内,3 点虽然不在熔覆层上,但和熔覆层距离较小,也受激光辐射影响,所以这 4 个取样点在同一时间温度达到峰值,而 1、2 点所在位置超出了激光辐射影响区域,温度峰值时间稍有滞后。结合区上的 4 点和熔覆层上 5、6 点的温度峰值高于基体和粉末熔点(1700 °C),

基体上 1、2、3 点的温度峰值明显低于 1700 °C,但 2 点的最高温度为 1000 °C,高于 TC4 相变点(995±15) °C)。说明在熔覆过程中,熔覆层完全熔化,基体基本未熔化,点 2 至点 4 之间为热影响区。

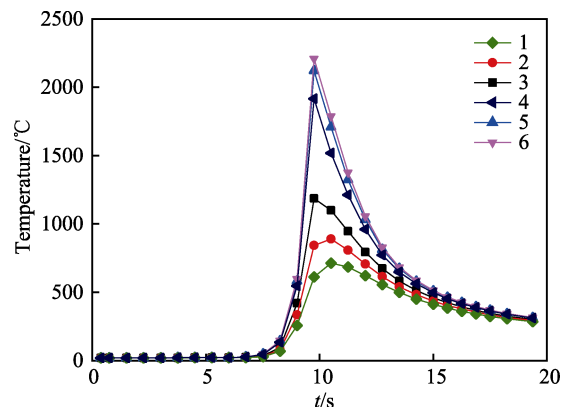


图 6 横向热循环曲线

Fig.6 Transverse thermal cycle curve

从图 6 中可以获得熔覆层 4—6 点的热循环参数:最高温度为 2250 °C,加热速度约 1650 °C/s,冷却速度约 430 °C/s。根据 2—3 点网格间距可知,热影响区宽度约为 1.2 mm。

3.2.2 纵向热循环曲线

垂直方向取样点的位置及编号如图 7 所示。在熔覆层表面中心位置取 1 点(图 7 中点 1),然后沿熔池深度方向向下取 4 个点(图 7 中点 2—5),共 5 个点。取点完毕后,在 Sysweld 中提取所选取点的温度曲线,并对其进行分析。

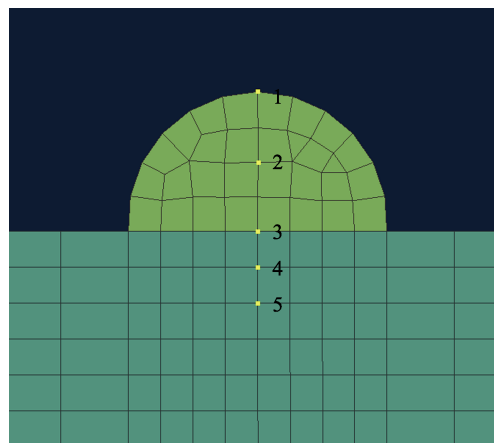


图 7 垂直方向取样点位置及编号

Fig.7 Position and number of vertical sampling points

5 个取样点的温度曲线如图 8 所示。可以看出,5 个取样点的温度在同一时间全部达到峰值,取样点 1—4 的温度峰值高于基体和粉末的熔点(1700 °C),呈熔化状态,而点 5 的温度峰值未达到 1700 °C,未熔化。由此判定 4 和 5 取样点之间为熔化的边界。点 4 已在熔池之内,点 5 在基体上,说明基体部分熔化,

并与熔覆层结合在一起。基体网格模型沿熔池深度方向上的厚度为 0.33 mm/格,可以得到熔池的熔深最大值在 0.33~0.66 mm 之间。结合图 8,可得熔覆层中心线热循环参数,见表 3。

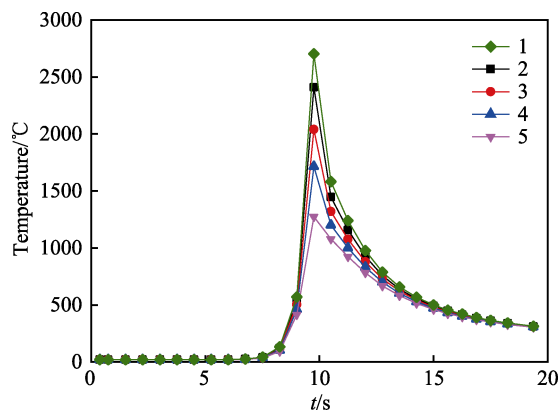


图 8 垂直方向热循环曲线
Fig.8 Vertical thermal cycle curve

表 3 熔覆层中心线热循环参数
Tab.3 Thermal cycle parameters of cladding layer center line

Serial number	The highest temperature /°C	Heating rate / (°C·s ⁻¹)	Cooling rate of above 1500 °C / (°C·s ⁻¹)	Cooling rate of 1500 °C to 750 °C / (°C·s ⁻¹)
1	2700	2200	1200	375
2	2400	1900	900	340
3	2000	1500	500	300

4 实验验证

4.1 截面形貌与熔池深度对比

为了验证模拟结果的正确性,确定模拟结果与实际实验结果的误差范围,用上文拟定的最优模拟参数进行激光熔覆实验。为避免实验的偶然性,使用同一参数进行多次实验,取多次实验结果的平均值,并与模拟结果进行比对。

最优模拟参数方案下,用显微镜观察到的熔覆层的截面形貌如图 9 所示,并测量出熔池的深度、熔覆层宽度和高度。由图 9 可知,实验得到的实际熔池深度约为 0.50 mm,熔覆层宽度约为 2.40 mm,高度约为 1.00 mm。有限元模型设置的熔覆层高度为 1.00 mm,宽度为 2.40 mm,模拟计算得到的熔池深度为 0.33~0.66 mm (当增加网格密度时,该值可以更精确),可见熔覆层深度的实验结果与模拟结果基本吻合。将最优模拟参数方案下模拟计算得到的熔覆层截面图与实际实验进行对比,熔覆层截面形貌基本一致 (见图 10),验证了模拟结果的正确性和方法的有效性。

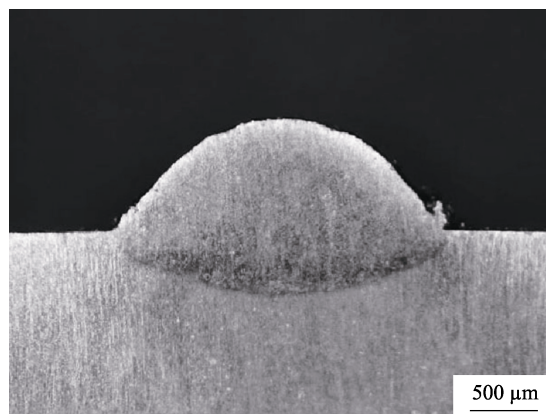


图 9 实际实验熔覆层截面
Fig.9 Cross-section of the actual experimental cladding layer

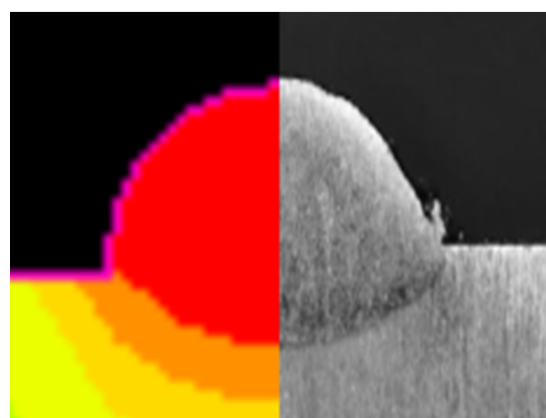


图 10 模拟结果与实验结果对照
Fig.10 Comparison between simulation results and experimental results

4.2 熔覆层在不同冷却速度下的显微组织

由图 8 可以看出,熔覆层不同深度位置的冷却速度也不相同,熔覆层上表面冷却速度较快,深度越深,冷却速度越慢。为了研究冷却速度对显微组织的影响,在熔覆层上表面、熔覆层中部和熔池最底部结合区,用扫描电子显微镜 (SEM) 观察其显微组织,得到的 3 个区域的显微组织如图 11 所示。熔覆层上表面与空气接触,冷却速度快 (冷却速度约为 1200 °C/s),形成短小的胞晶和树枝晶,因此熔覆层上表面组织由短小的胞晶、树枝晶和针状晶组成。熔覆层中部冷却速度变慢 (冷却速度约为 1000 °C/s),使胞晶转变成胞状树枝晶,因此显微组织由胞晶和胞状树枝晶组成。熔覆层与基体结合区组织由垂直于基体的柱状晶、胞状晶和平面晶组成,该处冷却速度约为 500 °C/s。根据凝固理论对结合区进行分析,当激光熔覆熔池开始凝固时,由于基体的温度低,导致温度梯度较大,此时,凝固速度最小,形成平面晶。随着温度梯度减小,凝固速度增大,使成分过冷度增加,在平面晶上长出柱状晶。在热影响区 (冷却速度约为 160 °C/s) 出现大量淬火态的针状马氏体^[24]。

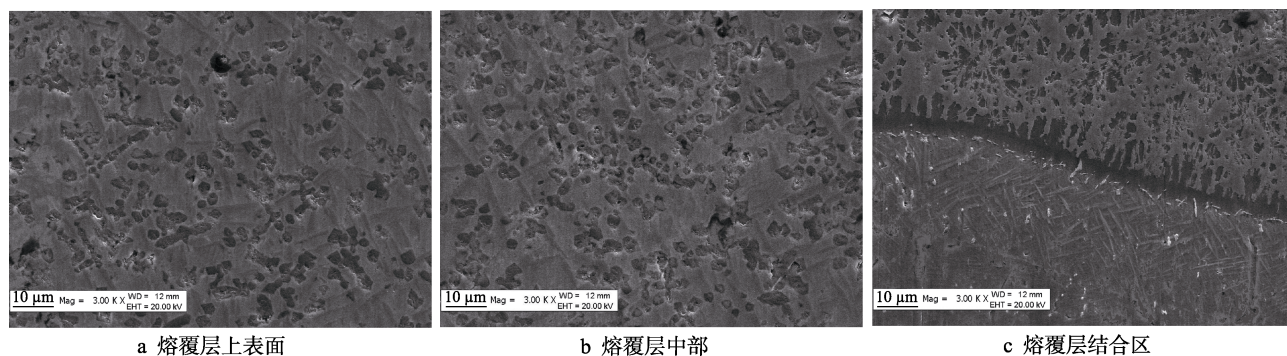


图 11 熔覆层显微组织 SEM 图

Fig.11 SEM images of the cladding layer microstructure: a) upper surface of cladding layer; b) the middle of cladding layer; c) bonding zone of cladding layer

5 结论

1) 对 TC4 钛合金激光熔覆 Ni60A-50%Cr₃C₂ 粉末过程进行数值模拟仿真可知, 最佳工艺参数为: 激光功率 500 W, 扫描速度 4 mm/s。该参数下, 激光熔覆热循环的最高温度约为 2750 °C, 最大加热速度约为 2250 °C/s, 最大冷却速度约 1200 °C/s, 熔池最大深度在 0.33~0.66mm 之间, 热影响区宽度约为 1.2 mm。该参数下激光熔覆实验得到的熔覆层截面图与模拟结果基本一致, 证明了模拟结果的正确性和方法的有效性。

2) 不同的冷却速度得到的熔覆层组织不同: 熔覆层上表面的组织为短小的胞晶和树枝晶; 中部的显微组织由胞晶和胞状树枝晶组成; 熔覆层与基体结合区的组织由垂直于基体的柱状晶、胞状晶和平面晶组成; 在热影响区出现了大量淬火态的针状马氏体。

3) 使用模拟仿真确定最优工艺参数指导激光熔覆实验, 可有效减少实验次数, 缩短实验周期, 降低实验成本。数值模拟与实验相结合是研究激光熔覆及其他热加工过程的一种有效的方法。

参考文献:

- [1] 马永, 朱红梅, 孙楚光, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆掺 Y₂O₃ 复合涂层的显微组织和性能[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 238-243.
MA Yong, ZHU Hong-mei, SUN Chu-guang, et al. Microstructure and properties of Y₂O₃-doped laser cladded composite coating on TC4 titanium alloy[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 238-243.
- [2] DIAO Yun-hua, ZHANG Ke-min. Microstructure and corrosion resistance of TC2 Ti alloy by laser cladding with Ti/TiC/TiB₂ powders[J]. Applied surface science, 2015, 352: 163-168.
- [3] FARAYIBI P K, ABIOYE T E, CLARE A T. A parametric study on laser cladding of Ti-6Al-4V wire and WC/W₂C powder[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87(9-12): 3349-3358.
- [4] 刘丹. TC4 钛合金表面激光熔覆复合涂层及耐磨性能研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
LIU Dan. The research of laser cladding composite coating and wear-resistance on TC4 alloy[D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [5] BAI L L, LI J, CHEN J L, et al. Effect of the content of B₄C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V[J]. Optics and laser technology, 2016, 76: 33-45.
- [6] 安飞鹏, 王其红, 李士凯, 等. 钛合金厚板窄间隙焊接技术的现状[J]. 焊接技术, 2014, 43(12): 1-5.
AN Fei-peng, WANG Qi-hong, LI Shi-kai, et al. Current status of narrow-gap welding technology for titanium alloy thick plates[J]. Welding technology, 2014, 43(12): 1-5.
- [7] 苏科强, 李玉新, 张鹏飞, 等. Ti6Al4V 表面激光熔覆 Ti/TiBCN 复合涂层研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 142-148.
SU Ke-qiang, LI Yu-xin, ZHANG Peng-fei, et al. TiBCN coatings prepared on Ti6Al4V surface by laser cladding[J]. Surface technology, 2018, 47(12): 142-148.
- [8] CAO Sheng, ZHU Su-ming, ZHOU Xi-gen, et al. The mechanism of aqueous stress-corrosion cracking of α+β titanium alloys[J]. Corrosion science, 2017, 125: 29-39.
- [9] 杨闯, 刘静, 马亚芹, 等. Ti6Al4V 钛合金表面真空渗氧处理[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 165-170.
YANG Chuang, LIU Jing, MA Ya-qin, et al. Vacuum oxidation treatment on Ti6Al4V titanium alloy[J]. Surface technology, 2017, 46(5): 165-170.
- [10] 王琳, 孙枫, 王赞, 等. TC4 钛合金的离子渗氮工艺[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 171-175.
WANG Lin, SUN Feng, WANG Yun, et al. Plasma nitriding of TC4 titanium alloy[J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(9): 171-175.
- [11] 张春华, 张宁, 张松, 等. 6061 铝合金表面激光熔覆温度场的仿真模拟[J]. 沈阳工业大学学报, 2007(3):

- 267-270.
ZHANG Chun-hua, ZHANG Ning, ZHANG Song, et al. Simulation of laser cladding temperature field on surface of 6061 Al alloy[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007(3): 267-270.
- [12] 雷靖峰, 祁文军, 谢亚东, 等. U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层工艺参数优化的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 66-71.
LEI Jing-feng, QI Wen-jun, XIE Ya-dong, et al. Optimization of process parameters of laser cladding Ni60-25%WC coating on U71Mn steel[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 66-71.
- [13] 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 153-161.
GUO Wei, LI Kai-kai, CHAI Rong-xia, et al. Numerical simulation and experimental of dilution effect in laser cladding 304 stainless steel[J]. Laser and optoelectronics progress, 2019, 56(5): 153-161.
- [14] KONG F, KOVACEVIC R. Modeling of heat transfer and fluid flow in the laser multilayered cladding process[J]. Metallurgical and materials transactions B, 2010, 41(6): 1310-1320.
- [15] TSENG W C, AOH J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source[J]. Optics and laser technology, 2013, 48: 141-152.
- [16] 吴东江, 吴楠, 杨策, 等. 预热对 Al_2O_3 陶瓷激光熔覆层温度梯度影响的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2039-2042.
WU Dong-jiang, WU Nan, YANG Ce, et al. Simulation of effect of preheating on temperature gradient of laser cladding layer of Al_2O_3 ceramics[J]. Rare metal materials and engineering, 2013, 42(10): 2039-2042.
- [17] 程成. 基于钛合金表面激光熔覆 CBN 温度场及熔池特征分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.
CHENG Cheng. The temperature field and the analysis of molten pool based On CBN film of laser cladding on titanium alloy surface[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2015.
- [18] 王志坚, 王宗园, 宋鸿武, 等. TC4 钛合金激光熔覆熔池凝固传热研究[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 85-88.
WANG Zhi-jian, WANG Zong-yuan, SONG Hong-wu, et al. Study on heat transfer of molten pool in laser cladding of titanium alloy TC4[J]. Machinery design and manufacture, 2018(10): 85-88.
- [19] 段伟, 殷亚军, 周建新, 等. 钛合金 TC4 激光熔覆成形的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(16): 155-159.
DUAN Wei, YIN Ya-jun, ZHOU Jian-xin, et al. Numerical simulation study on laser cladding forming of TC4 titanium alloy[J]. Hot working technology, 2018, 47(16): 155-159.
- [20] 陈晶, 李少华, 颜飞雪, 等. JMatPro 软件在 GH3039 真空扩散焊工艺研究中的应用[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 232-235.
CHEN Jing, LI Shao-hua, YAN Fei-xue, et al. Application of JMatPro software in research of GH3039 vacuum diffusion welding process[J]. Hot working technology, 2018, 47(11): 232-235.
- [21] 刘学林. 激光熔覆镍基复合涂层有限元模拟[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
LIU Xue-lin. Finite element simulation of laser cladding nickel-base composite coatings[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [22] 王丽. 激光熔覆 YSZ@Ni 涂层的温度场和应力场有限元研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
WANG Li. Finite element study of temperature field and stress field of laser cladding YSZ@Ni coating[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [23] 夏佩云, 王春明, 胡席远, 等. 基于 Labview 的激光焊接多点热循环曲线测量技术研究[J]. 电焊机, 2012, 42(1): 59-63.
XIA Pei-yun, WANG Chun-ming, HU Xi-yuan, et al. Detection of thermal cycles of laser welding based on Labview[J]. Electric welding machine, 2012, 42(1): 59-63.
- [24] 周丹丹. TC4 合金激光熔覆耐磨自润滑涂层的组织与性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
ZHOU Dan-dan. Study on microstructure and properties of TC4 alloy laser cladding wear-resistant self-lubricating coating[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.