

激光熔覆温度场和 CeO_2 、 TiO_2 对材料相变的影响

任仲贺^{1,2}, 武美萍^{1,2*}, 崔宸¹, 夏思海¹

¹江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

²江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 针对单道激光熔覆, 利用数值模拟技术得到了激光熔覆过程的温度场; 在 Q235 钢表面制备了 Ni 基激光熔覆层, 基于材料相变理论分析了熔覆层不同深度位置微观组织的形成机理, 并研究了添加 CeO_2 、 TiO_2 纳米颗粒对熔覆层组织的影响。结果表明: 在激光熔覆过程中, 在激光辐照和热传导的共同作用下, 熔覆层和基体不同深度区域因温度变化的差异而发生不同类型的相变, 从而得到不同的微观组织; 在熔覆粉末中添加 CeO_2 、 TiO_2 纳米颗粒, 可以通过影响材料的相变过程而改变熔覆层的化学组成和微观结构, 提高形核率, 得到组织均匀细小的熔覆层。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 数值模拟; Ni 基合金; 相变; 显微组织

中图分类号 TN249; TG156.99

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0802006

Effects of Temperature Field and $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ on Material Phase Transition in Laser Cladding

Ren Zhonghe^{1,2}, Wu Meiping^{1,2*}, Cui Chen¹, Xia Sihai¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract For single laser cladding, the temperature field of the laser cladding was obtained by numerical simulation. Ni-based laser cladding layers were prepared on the surfaces of Q235 steel substrates by laser cladding experiments. Based on the theory of material phase transition, the formation mechanism of the microstructure at different depths of the cladding layer was analyzed, and the effect of adding CeO_2 and TiO_2 nanoparticles on the cladding structure was studied. The results show that in the process of laser cladding, under the combined actions of laser irradiation and heat conduction, the temperature variation characteristics of the cladding layer and matrix at different depths are different. This leads to different types of phase transitions, resulting in different microstructures. The addition of CeO_2 and TiO_2 nanoparticles to the cladding powder can change the chemical composition and microstructure of the cladding structure by influencing the phase transition process of the material, the nucleation rate is improved, and an uniform and fine cladding layer is obtained.

Key words laser technique; laser cladding; numerical simulation; Ni-based alloy; phase transition; microstructure

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 350.3390

1 引 言

激光熔覆作为一种常用的表面强化与再制造修复技术, 具有热影响区小、冶金结合良好和熔覆层组织致密等优点, 但同时也存在一些亟待解决的问题, 其中, 熔覆组织裂纹是影响熔覆质量的主要因素^[1-2]。

在激光辐照和热传导的共同作用下, 熔覆粉末和基体的温度变化情况不同, 且基体不同深度处的温度变化情况也具有较大差异, 从而会发生不同的材料相变, 生成对应的熔覆组织^[3-5]。此外, 粉末的成分对熔覆组织也存在较大影响, 研究表明, 在合金粉末中添加适量的纳米颗粒, 通过影响材料的相变得到较好的熔

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51575237)、装备预研教育部联合基金(6141A0221)、江苏出入境检验检疫局科技计划(2018KJ04)

* E-mail: wmp169@jiangnan.edu.cn

覆效果^[6-8]。熔覆层的组织和性能是决定熔覆质量的主要因素,而熔覆层的组织和性能主要受到熔池以及热影响区材料相变过程的影响,因此,研究激光熔覆温度场和纳米颗粒对材料相变的影响,优化激光熔覆工艺,是提高熔覆质量的有效途径。

在激光熔覆过程中,材料相变主要受温度和材料成分的影响,对此,国内外学者进行了相关研究,并取得了一些成果: Bax 等^[9]通过研究发现,在激光熔覆过程中通常会出现较大的冷却速度,但熔覆组织的晶粒仍然相当粗糙;黄延禄等^[10]建立了对流扩散固液相变统一模型,研究了熔池内温度场特征及其对凝固后微观组织的影响,发现熔池内液体的流动对熔池内温度场的分布具有较大影响,且随着与熔覆层顶部距离的增大,冷却速度减小,温度梯度增大,凝固速度减小;张光耀等^[11]的研究表明,在 Ni 基粉末中添加 CeO₂ 颗粒可以有效减少熔覆层中的孔洞和裂纹,改善熔覆层的组织形态;吴东江等^[12]采用同轴激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 合金基体上制备了 Al₂O₃-13% TiO₂ (其中百分数代表质量分数,下同)涂层,通过优化工艺参数获得了低稀释率、无明显裂纹的涂层。综合已有文献可以看出,温度场特征对熔覆组织具有较大影响,但将熔覆层不同深度处的数值模拟温度数据和试件熔覆组织形貌进行结合分析,探究激光熔覆过程中温度变化对材料相变影响的研究较少。此外,在熔覆粉末中加入纳米颗粒,可以影响材料的相变,提高熔覆层的性能,但是同时加入两种纳米颗粒后的作用机理和效果还有待深入研究。

针对单道激光熔覆,本文基于 ANSYS 软件并采用数值模拟技术得到了激光熔覆的温度场,并采用不同的粉末材料进行了激光熔覆试验。根据试件熔覆层不同深度处熔覆组织的形貌特征,结合该位置对应的温度变化,分析了熔覆材料的相变机理;研究了添加 CeO₂ 和 TiO₂ 纳米颗粒对熔覆层微观组织形貌特征和元素组成的影响。

2 温度场模拟与结果分析

2.1 有限元模型的建立

激光熔覆是一种利用高能激光束熔合金粉末和基体表面,并使二者形成良好冶金结合的先进的表面处理技术,是一个强非线性多物理场耦合的过程,具有熔池小、热量高、变化快的特点,很难得到温度的解析结果^[13-14]。通过对模型进行一定程度的合理简化,利用有限元分析软件对激光熔覆进行数值模拟是研究其温度场特征的有效方法^[15-18]。

模型采用 SOLID70 单元类型,基体材料选用 Q235 钢,熔覆材料为 Ni 基合金粉。基体尺寸为 40 mm×15 mm×10 mm,熔覆层尺寸为 40 mm×3.2 mm×1 mm。为了保证计算的准确性和效率,对熔覆层及其相邻部分的网格进行了细化^[19]。有限元模型、网格划分和笛卡尔坐标系如图 1 所示。

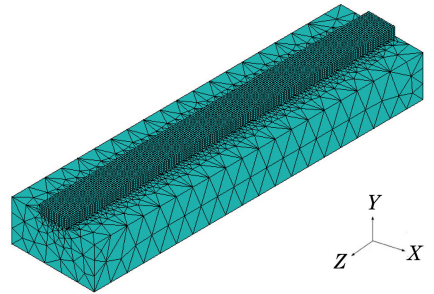


图 1 有限元模型及网格划分

Fig. 1 Finite element model and mesh generation

数值模拟过程采用生死单元技术^[20],在开始加载热源进行计算之前,将所有熔覆层单元均设定为“死”单元,然后根据时间参数和载荷步向前推进,通过 Z 轴坐标值的循环累加逐步将“死”单元“激活”,并纳入计算模型,从而实现对熔覆层随激光光斑移动而逐渐生长的模拟。选择体积生热的方式模拟激光能量的输入^[21],生热率 Q 的计算公式为

$$Q = \frac{\lambda P}{Avt}, \quad (1)$$

式中: λ 为激光能量的利用率; P 为激光输出功率; A 为熔覆层横截面的面积; v 为扫描速度; t 为每个载荷步的时间。关于模型建立过程的更多具体描述和模型可行性分析,可参考文献^[22],这里不再赘述。

2.2 激光熔覆过程的温度场分析

以激光功率为 1000 W,扫描速度为 7 mm·s⁻¹,光斑直径为 3 mm 为例,通过数值模拟得到激光熔覆过程的温度场,如图 2 所示。

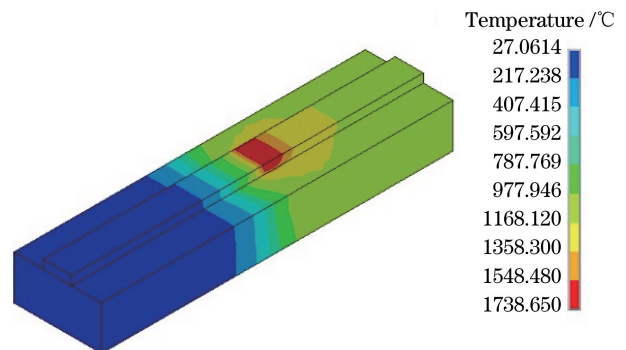


图 2 模拟得到的激光熔覆过程的温度场

Fig. 2 Simulated temperature field in laser cladding processing

由图 2 可见:在熔覆过程中,瞬态温度场最高温度出现在激光辐照位置,此处形成熔池,周围温度在热传导的作用下,根据距离激光辐照位置的远近分别有不同程度的升高;温度场的形貌呈后拖的偏椭圆状,偏向已形成熔覆层的一侧,这是因为熔池前侧温

度较低,高温区域小,温度梯度大,而熔池后侧是熔覆区,经激光辐照后,材料积累了热量,高温区域大,温度梯度小,故熔池前侧比后侧的温度等值线更密集。在激光熔覆模型的激光扫描起始部位和中间部位分别定义 $P_1 \sim P_3$ 点和 $P_4 \sim P_6$ 点,如图 3 所示。

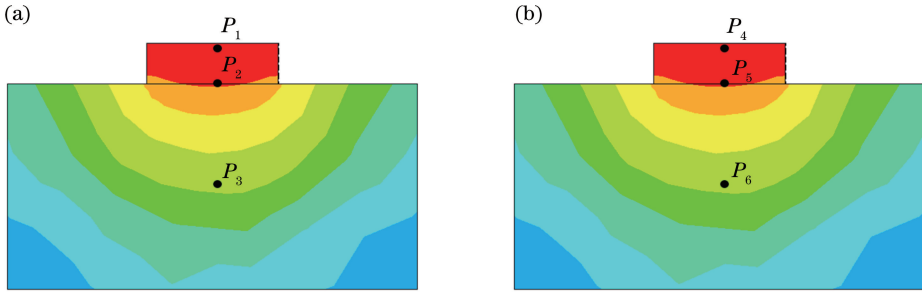


图 3 模型中选取的 6 个点的位置示意图。(a)起始部位;(b)中间部位

Fig. 3 Position diagrams of six points selected in model. (a) Starting position; (b) middle position

提取 $P_1 \sim P_6$ 点在激光扫描(0~10 s)以及之后冷却(10~25 s)过程中温度随时间改变的一系列数据,绘制得到如图 4 所示的模型中不同位置节点的温度时间曲线。

分别对比 P_1, P_2, P_3 和 P_4, P_5, P_6 这两组的温度-时间曲线形态,可以发现,熔覆层上表面的温度峰值最高,熔覆层和基体结合面上的温度峰值比熔覆层上表面低 100 °C 左右。由于激光辐照到基体上表面产生的巨大热量需要通过热传导到达基体内部,因此基体中部表面的升温过程在对应的时间上有一定的延迟,在温度-时间曲线上有明显的表征。由此可见,在激光熔覆加工过程中,能量非常集中,熔覆层材料在激光辐照下发生了瞬间加热和急速冷却的过程,这也是导致熔覆层出现裂纹的一个主要因素。

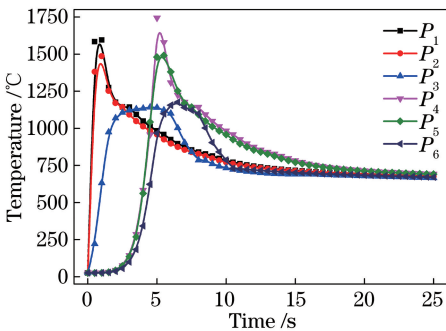


图 4 模型中不同位置节点处的温度-时间曲线

Fig. 4 Temperature-time curves of nodes at different locations in model

由图 4 可见:熔覆层的温度变化历程可划分为由室温升至峰值温度和由峰值温度降至基体整体温度两个阶段;在激光辐照的瞬间,对应位置处形成温度脉冲,在曲线上表现为一个峰值; P_1 和 P_4 两个峰值之间相差两个位置上激光扫描所需的时间;基体的初始温度低,吸热作用强,随着激光熔覆的进行,由于热传导和热量累积,温度逐渐升高,因此同一深度不同位置节点上的温度具有逐渐增大的峰值;升温过程由慢到快,激光辐照瞬间迅速拉升到峰值,在热交换、热传导的作用下,温度迅速降到 1100 °C 左右,到第 10 s 时,激光扫描完毕,之后各个节点的温度缓慢回落为基体的整体温度,并继续逐渐下降。整体上看,升温过程近似直线上升,降温过程近似双曲线的一支。

3 激光熔覆材料的相变分析

3.1 试验材料与方法

基材选用 40 mm×15 mm×10 mm 的 Q235 钢板。试验前,先用砂纸打磨基体表面,并用丙酮将其清洗干净。熔覆材料选用粒径为 45~106 μm 的 Ni60A 镍铬硼硅合金粉末,其成分如表 1 所示。

表 1 Ni60A 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni60A alloy powder

Element	Cr	B	Si	C	Fe	Ni
Mass fraction / %	14-19	3.0-4.5	3.5-5.0	0.5-1.0	≤2.5	Bal.

试验采用 TruDisk 12003 激光器。激光熔覆工艺参数如下:激光功率为 1 kW,光斑直径为 3 mm,扫描速率为 7 mm·s⁻¹,送粉速率为 15 g·min⁻¹。在熔覆过程中,采用氩气对熔池进行保护。完成激光熔覆之后,将样件沿垂直于激光扫描方向进行线切割。对样件横截面进行研磨、抛光和清洗处理,并

用王水均匀腐蚀 3~5 min,然后烘干,采用光学显微镜观察样件的显微组织。

3.2 熔覆过程的热量传递与材料相变

在同轴送粉激光熔覆过程中,当大功率激光束作用于材料时,靶面会吸收大量激光能量而升温,当温度上升到一定程度时,材料就会发生冶金变化。激光功率密度、激光脉宽、激光波长、材料的物理特性以及环境条件等会影响材料对激光能量的吸收。

在吸收激光能量之后,材料因温度迅速升高而发生熔化,然后冷却凝结,这个过程中会发生早期的“液-固相变”和后期的“固-固相变”,其中,“固-固相变”直接决定了材料的最终组织结构和储能方式(弹性应变能、位错能等),对熔覆质量有很大影响^[23-24]。

3.3 熔覆层的显微组织分析

结合激光熔覆的物理性质,根据熔覆层横截面的几何特性,可将熔覆层横截面划分为熔覆区(CZ)、基体熔化区(MZ)、热影响区(HAZ)和基体(SZ)共 4 个区域^[25],如图 5 所示。

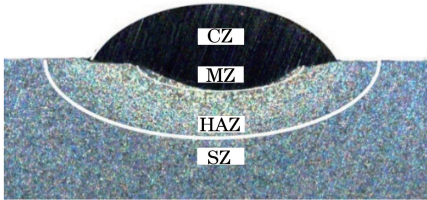


图 5 熔覆层横截面的几何特性示意图
Fig. 5 Cross-section geometry diagram of laser cladding layer

在激光熔覆过程中,熔池内熔体的浓度与温度梯度相互作用产生表面张力梯度,并且有部分未完全熔化的粉末颗粒黏附在熔覆层表面,导致熔覆层表面凹凸不平,如图 6 所示。

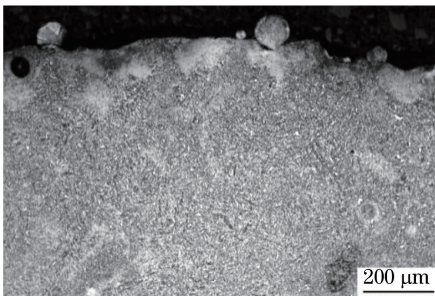


图 6 凹凸不平的熔覆层表面
Fig. 6 Uneven surface of cladding layer

熔覆区中部的显微组织如图 7 所示。由图 4 所示的温度-时间曲线可知,熔覆区升温速度和冷凝速度极快,是温度变化最大的区域。在激光熔覆过程中,在激光辐照下,熔化的粉末落在基体表面,对应

位置的基体表层组织在激光辐照瞬间也迅速升温,形成温度脉冲,熔化的粉末和发生熔化的部分基体组织共同形成熔池,激光辐照之后,由于和外界环境的热交换以及基体本身的热传导作用,熔池温度迅速降低,组织快速冷却,产生“液-固相变”。随着温度进一步降低,凝固的组织发生“固-固相变”,形成的熔覆区主要由粗大的树枝晶、柱状晶以及枝晶间的共晶组织组成,组织较为疏松,结构较为均匀。

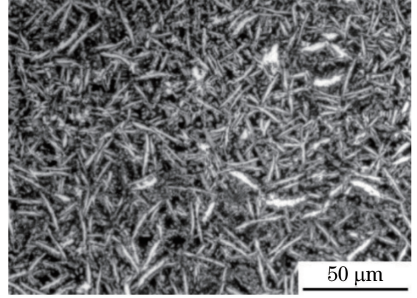


图 7 熔覆区中部的显微组织
Fig. 7 Microstructure of middle of cladding zone

在激光辐照和热传导的共同作用下,基体的温度变化与受激光直接辐照而熔化的粉末有较大差异。在激光辐照的作用下,基体表层部分区域的温度超过了 Q235 钢的液相线,材料熔化形成熔池,发生“固-液-固”的完全相变,实现从熔化到结晶的完整的冶金过程,形成基体熔化区。除此之外,由于热传导的作用,基体中未熔化的部分材料在温度变化的影响下,经历固态相变过程,形成热影响区。基体熔化区与热影响区结合面的显微组织如图 8 所示。

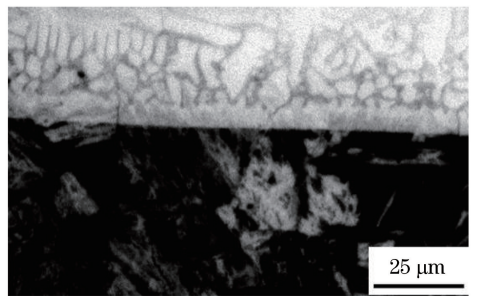


图 8 基体熔化区与热影响区结合面的显微组织
Fig. 8 Microstructure of interface of matrix melting zone and heat affected zone

由图 8 可见,在基体熔化区底部与未熔化基体的结合处有一层大约 10 μm 厚的非枝晶组织。在熔池的凝固过程中,因溶质在界面富集而形成成分过冷,且温度梯度越平缓、凝固速度越快,成分过冷倾向就越大,从而形成了非枝晶组织层;基体熔化区底部的枝晶和未熔化的基体通过这层非枝晶组织紧密连接在一起,从而实现了两层材料的冶金结合。

非枝晶组织层的上面是枝晶组织,其外延生长具有很强的方向性,大多数与基底保持垂直,且同时与温度最大梯度方向保持一致;经过短暂的层间过渡,基体熔化区内出现了大量的柱状晶组织。热影响区中靠近熔池区域和远离熔池区域的显微组织分别如图 9 和图 10 所示。

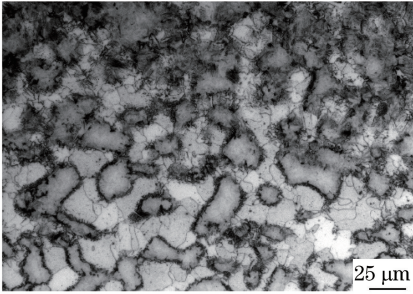


图 9 基体热影响区中靠近熔池区域的显微组织
Fig. 9 Microstructure near molten pool area in matrix heat affected zone

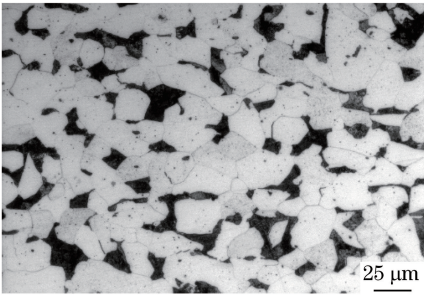


图 10 基体热影响区中远离熔池区域的显微组织
Fig. 10 Microstructure far from molten pool area in matrix heat affected zone

在基体热影响区中熔池的边缘区域,由于温度较高,冷却速度快,发生了马氏体转变,形成了大量板条马氏体和少量残余奥氏体,如图 8 所示。熔池边缘区域下面较深的部位,温度变化相对平缓,未发生马氏体相变,显微组织主要由珠光体和铁素体组成。由于基体材料在加热过程中各点所经历的最高温度不同,故材料的奥氏体化程度不同,从而使得各组分的形态及体积分数不同。奥氏体成形过程一般可分为形核、生长和均匀化三个阶段^[24],随着温度升高,奥氏体的形核开始于珠光体中铁素体与渗碳体的界面,早期相变主要是铁、碳原子的共同扩散,晶核的生长速率先增大后减小,但是由于激光加热的瞬时性,材料相变的时间较短,奥氏体一般在生长阶段就开始冷却,没有时间进行均匀化和扩散,从而制约了奥氏体相的生长。越靠近熔池,材料经历的最高温度越高,奥氏体的形核率越大,相变温度范围越宽,在加热过程中,该区域可以经历一个相对充分

的奥氏体化过程,渗碳体的析出使珠光体更加分散,未完成转化的铁素体也会因渗碳体的切割作用而变得更加疏松,如图 9 所示。在远离熔池的地方,温度较低,热冲击程度较小,在奥氏体化过程中,奥氏体的形核率低,原子扩散距离短,奥氏体的转变程度很小,片状珠光体较致密,无扩张的迹象,整个区域主要是大片的铁素体以及小片的珠光体,如图 10 所示。

4 纳米颗粒对熔覆层显微组织的影响

在 Ni60A 合金粉末中,添加粒度约为 50 nm 的 TiO_2 和 CeO_2 ,得到 99.5% Ni60A + 0.5% CeO_2 和 99.0% Ni60A + 0.5% CeO_2 + 0.5% TiO_2 共两组不同质量分数配比的复合粉末材料。使用南京南大仪器有限公司 QM-3SP4 行星磨将两组合金粉末球磨 2 h,球磨频率为 25 Hz,每隔 0.5 h 正反向交替运行一次;球磨结束后,放置 8 h,使混合均匀的粉末完成弛豫过程,并置于 80 °C 的环境下干燥 2 h^[26]。激光熔覆加工试验过程与未添加纳米 TiO_2 和 CeO_2 粉末时相同。添加纳米颗粒后试件熔覆区的显微组织如图 11 所示。

当粉末成分为 99.5% Ni60A + 0.5% CeO_2 时,粗大的柱状晶体消失,枝晶结构明显得到细化,排列更加紧密,结构生长方向性减弱,成分趋于均匀,组织主要是细小的枝状碳、硼化物多元共晶体和细小的颗粒相以及韧性基体相;当粉末成分为 99.0% Ni60A + 0.5% CeO_2 + 0.5% TiO_2 时,细小的白色树枝晶转变为弥散分布的网状组织,整个组织更加致密。可见,加入 CeO_2 和 TiO_2 等纳米颗粒能明显起到细化组织的作用。

熔覆层的 XRD 衍射图谱如图 12 所示。根据图 12 所示的 X 射线衍射图谱, Ni 基熔覆层中主要含有 $\gamma\text{-Ni}$ 、 Cr_{23}C_6 、 CrB 和 Ni_3Si 等物相;仅添加 0.5% CeO_2 后,熔覆层中出现了含有 Ce 元素的新相 CeNi_{15} 、 CeNi_2 和 $\text{Ce}_3\text{Ni}_6\text{Si}_2$ 等, $\gamma\text{-Ni}$ 的一个衍射峰强度明显减弱,表明 CeO_2 在激光束辐照所形成的高温熔池中发生了分解,释放出活性 Ce 离子, Ce 离子除了可以吸附在晶核原子表面阻止晶核在较大过冷度下的快速生长之外,还可以与 Ni 等元素形成高熔点的金属化合物,作为结晶核心,提高形核率,使组织得到显著细化;添加 0.5% CeO_2 + 0.5% TiO_2 后,熔覆层中出现了含有 Ti 元素的新相 TiC 、 TiB_2 以及未发生反应的 TiO_2 残余颗粒^[27],这表明在激光熔覆过程中部分 TiO_2 在熔池中与 Cr、

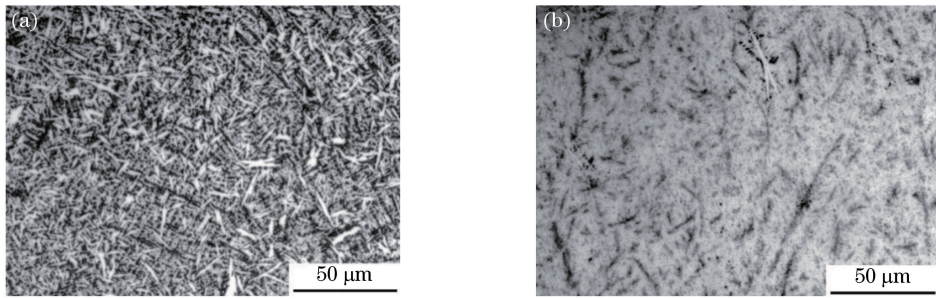


图 11 添加不同纳米颗粒之后熔覆层的显微组织。(a) 99.5% Ni60A + 0.5% CeO₂ ;
(b) 99.0% Ni60A + 0.5% CeO₂ + 0.5% TiO₂

Fig. 11 Microstructures of cladding layers after adding nano-particles. (a) 99.5% Ni60A + 0.5% CeO₂ ;
(b) 99.0% Ni60A + 0.5% CeO₂ + 0.5% TiO₂

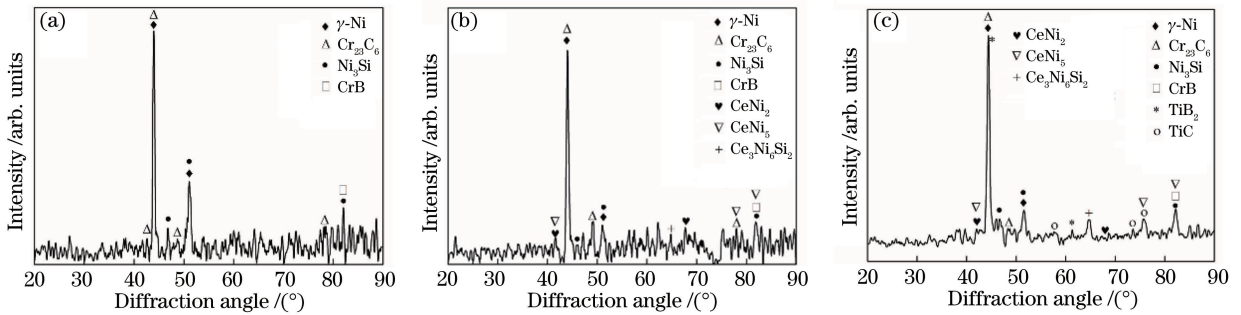


图 12 不同熔覆层的 XRD 衍射图谱。(a) Ni60A; (b) 99.5% Ni60A + 0.5% CeO₂ ;
(c) 99.0% Ni60A + 0.5% CeO₂ + 0.5% TiO₂

Fig. 12 XRD diffraction patterns of different cladding layers. (a) Ni60A; (b) 99.5% Ni60A + 0.5% CeO₂ ;
(c) 99.0% Ni60A + 0.5% CeO₂ + 0.5% TiO₂

Fe 等发生了置换反应, 释放出具有较强细化晶粒作用且与 C、B 等非金属元素有极大亲和力的活性金属元素 Ti 离子, 从而生成 TiC、TiB₂ 等在熔液凝固时容易弥散析出的细小颗粒, 可以提高形核率、细化组织, 减少了 CrB、Cr₂₃C₆ 等粗大块状脆性相。

Ce 元素是一种常见的表面活性元素, 具有较大的原子半径和较低的电负性^[28], 很容易与某些元素发生反应, 使它们变成稳定的化合物, 从而在“液-固”相变过程中有效增加熔池中的形核粒子, 提高形核速率; 晶核表面还会吸附少量 Ce 离子, 使晶粒长大受到阻碍, 从而细化组织; 在熔池凝固过程中, Ce 离子与氧、氢、硫等杂质元素有较强的亲和力, 可以提高溶体的流动性, 抑制组织疏松, 减少成分偏析与孔洞, 使枝晶生长的方向性得到一定程度的减弱, 从而增加组织的均匀性^[29]。加入的 TiO₂ 可作为第二相粒子阻碍晶粒长大。在熔池中, TiO₂ 粒子弥散分布, 可以作为形核核心, 降低体系的吉布斯自由能, 提高形核率, 减小晶粒长大的驱动力, 阻止晶体生长^[30]。此外, 纳米氧化物、稀土元素颗粒的加入还能够降低熔体表面张力, 减小临界形核半径, 有效提

高形核速率。

5 结 论

基于 ANSYS 软件, 通过数值模拟技术得到了激光熔覆过程的瞬态温度场, 绘制了模型不同位置节点的温度-时间曲线; 分析了温度变化对材料相变的影响, 研究了在激光熔覆过程中试件不同深度区域微观组织的形成机理和形貌特征; 研究了在熔覆粉末中添加 CeO₂、TiO₂ 纳米颗粒对熔覆组织化学组成和微观结构的影响。结果表明: 在熔池材料相变过程中, CeO₂ 可以提高形核率, 细化组织, 增大熔体的流动性, 减少成分偏析与孔洞, 增强组织的均匀性; TiO₂ 可以作为形核核心, 降低体系的吉布斯自由能, 减小晶粒长大的驱动力, 得到组织均匀细小的熔覆层。通过研究激光熔覆温度场和纳米颗粒对材料相变的影响, 有助于揭示熔覆层微观组织的形成机理, 对于在基体表面制备添加了纳米颗粒的涂层具有一定的参考意义和应用价值。

参 考 文 献

[1] Xu B S. Remanufacture engineering and its

- development in China [J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(2): 1-6.
- 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(2): 1-6.
- [2] Wei S G, Cheng D B, Sundin E, *et al.* Motives and barriers of the remanufacturing industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94: 340-351.
- [3] Tseng W C, Aoh J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 141-152.
- [4] Li J Z, Li X F, Zuo D W, *et al.* Process test and temperature field simulation of the Al/Ti laser cladding coating above 7050 aluminum alloy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121403.
- 李建忠, 黎向锋, 左敦稳, 等. 7050 铝合金表面 Al/Ti 激光熔覆工艺实验及温度场模拟分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121403.
- [5] Boutalbi N, Bouaziz M N, Allouche M. Influence of temperature-dependent absorptivity on solid surface heated by CO₂ and Nd:YAG lasers [J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(3): 032004.
- [6] Farahmand P, Kovacevic R. An experimental-numerical investigation of heat distribution and stress field in single- and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 154-168.
- [7] Sun L, Wei C Q, Sui X M, *et al.* Effects of SiC particle size on microstructures and properties of TiNi based cladding layers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0502002.
- 孙琳, 位超群, 隋欣梦, 等. SiC 颗粒尺寸对 TiNi 基熔覆层组织与性能的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0502002.
- [8] Xiao Y, Gu J F, Zhang J X, *et al.* Effects of nano-CeO₂ doping on microstructure and wear performance of laser-clad Fe/Cr₃C₂ alloy composite coating [J]. *Materials Review*, 2017, 31(22): 65-69, 84.
- 肖轶, 顾剑锋, 张俊喜, 等. 纳米 CeO₂ 对激光熔覆 Fe/Cr₃C₂ 复合涂层组织与磨损性能的影响 [J]. *材料导报*, 2017, 31(22): 65-69, 84.
- [9] Bax B, Schäfer M, Pauly C, *et al.* Coating and prototyping of single-phase iron aluminide by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 235: 773-777.
- [10] Huang Y L, Wen B X, Huang M. Characteristics of the temperature field and formation of the microstructure for laser cladding processing [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(5): 629-633.
- 黄延禄, 温宝贤, 黄铭. 激光熔覆加工温度场特征与凝固组织形成 [J]. *应用激光*, 2017, 37(5): 629-633.
- [11] Zhang G Y, Wang C L, Gao Y. Mechanism of rare earth CeO₂ on the Ni-based laser cladding layer of 6063Al surface [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(4): 1003-1007.
- 张光耀, 王成磊, 高原. 稀土 CeO₂ 在 6063Al 表面 Ni 基激光熔覆中的作用机制 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(4): 1003-1007.
- [12] Wu D J, Chen Y X, Lu W F, *et al.* Dilution characters of Al₂O₃-13wt% TiO₂ coating by direct laser cladding on titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(12): 2105-2108.
- 吴东江, 陈云啸, 卢卫锋, 等. 钛合金表面直接激光熔覆 Al₂O₃-13%TiO₂ 涂层互熔稀释特性 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(12): 2105-2108.
- [13] Hua L, Tian W, Liao W H, *et al.* Fatigue life evaluation for laser cladding component based on non-linear continuum fatigue damage model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903006.
- 华亮, 田威, 廖文和, 等. 基于非线性连续疲劳损伤的激光熔覆构件疲劳寿命评估 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903006.
- [14] Song J L, Li Y T, Deng Q L, *et al.* Research progress of laser cladding forming technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29-39.
- 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 29-39.
- [15] Liu Q C, Janardhana M, Hinton B, *et al.* Laser cladding as a potential repair technology for damaged aircraft components [J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2011, 2(3): 314-331.
- [16] Fang J X, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0503009.
- 方金祥, 董世运, 徐滨士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503009.
- [17] Dai D P, Jiang X H, Cai J P, *et al.* Numerical simulation of temperature field and stress distribution in Inconel718 Ni base alloy induced by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903005.
- 戴德平, 蒋小华, 蔡建鹏, 等. 激光熔覆 Inconel718 镍基合金温度场与应力场模拟 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903005.
- [18] Li M Y, Cai C B, Han B, *et al.* Numerical simulation of preheating on temperature and stress

- fields by laser cladding Ni-based ceramic coating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(12): 197-203.
李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 197-203.
- [19] Gong X Y, Gao S Y, Xian S Y, *et al.* Warp deformation in single-track laser cladding based on temperature characteristics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101410.
宫新勇, 高士友, 咸士玉, 等. 基于温度特征的单道激光熔覆翘曲变形 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101410.
- [20] Li M Y, Han B, Cai C B, *et al.* Numerical simulation on temperature and stress fields of laser clad Ni-based coating [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 25-28, 32, 114.
李美艳, 韩彬, 蔡春波, 等. 激光熔覆镍基合金温度场和应力场数值模拟 [J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 25-28, 32, 114.
- [21] Liu Y C, Fan C F, Yin X L, *et al.* Temperature and stress analysis of dual-beam laser cladding on gray cast iron surface [J]. Applied Laser, 2014, 34(4): 288-293.
刘衍聪, 范常峰, 尹晓丽, 等. 铸铁表面双光束激光熔覆温度场与应力场分析 [J]. 应用激光, 2014, 34(4): 288-293.
- [22] Ren Z H, Wu M P, Tang Y H, *et al.* Numerical simulation and experimental research of laser cladding based on thermo-mechanical coupling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051404.
任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究 [J]. 激光与光电子学研究进展, 2019, 56(5): 051404.
- [23] Liu S D, Peng C Y, Ma M X, *et al.* Effect of Mn contents on the phase transition of the high entropy alloy prepared by laser cladding [J]. Materials Science Forum, 2016, 849: 64-70.
- [24] Zeng C. A study of thermal damage for laser cladding technology and its detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
曾超. 激光熔覆热损伤评估及其检测研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [25] Pan H, Zhao J F, Liu Y L, *et al.* Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding repair [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.
- [26] Ren Z H, Wu M P, Li G Y, *et al.* Effect of TiO₂/CeO₂ on microstructures and properties of Ni-based laser cladding layers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071402.
任仲贺, 武美萍, 李广阳, 等. TiO₂/CeO₂ 对 Ni 基激光熔覆层组织和性能的影响 [J]. 激光与光电子学研究进展, 2019, 56(7): 071402.
- [27] Shu X Y, Hu L L, Li G F, *et al.* High-temperature oxidation resistance of the Ni60Ti alloy: an experimental and first-principles study [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 706: 297-304.
- [28] Yu X X, Yin D F, Yu Z M, *et al.* Effects of cerium addition on solidification behaviour and intermetallic structure of novel Al-Cu-Li alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(6): 1423-1429.
余鑫祥, 尹登峰, 余志明, 等. Ce 含量对新型 Al-Cu-Li 合金的凝固行为及其相的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(6): 1423-1429.
- [29] Chen R, Xu Q Y, Liu B C. Cellular automaton simulation of three-dimensional dendrite growth in Al-7Si-Mg ternary aluminum alloys [J]. Computational Materials Science, 2015, 105: 90-100.
- [30] Adebisi D I, Popoola A P I. Mitigation of abrasive wear damage of Ti-6Al-4V by laser surface alloying [J]. Materials & Design, 2015, 74: 67-75.