

激光熔覆过程数值模拟研究现状

何 逵¹, 曹知勤¹, 王玥坤², 张雪峰^{1,2*}

(1. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 四川省钒钛产业技术研究院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 激光熔覆是新型的增材制造及表面修复技术, 已成为当今工业领域的研究热点。利用激光熔覆技术制备高性能的合金涂层, 能够显著提高基材的耐磨、耐腐蚀、使用寿命等性能。通过对激光熔覆过程的温度场、残余应力、组织形变等的数值模拟研究进行阐述, 总结了国内外目前针对上述物性参数的分布及演变规律分析所使用的数值模拟方法, 揭示了残余应力、组织形变形成的机理, 为获得高质量的熔覆涂层提供了一定的理论指导基础。展望了数值模拟技术在激光熔覆过程中的未来发展趋势。

关键词: 激光熔覆; 温度场; 残余应力; 组织形变; 数值模拟

中图分类号: TG669, V261.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)03-0172-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.026

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Current research status of numerical simulation for laser cladding process

He Kui¹, Cao Zhiqin¹, Wang Yuekun², Zhang Xuefeng^{1,2*}

(1. Institute of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Sichuan Vanadium & Titanium Industrial Technologies Research Institute, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Laser cladding is a new type of additive manufacturing and surface repair technology, which has become research hotspot in the industrial field. High performance alloy coating prepared by laser cladding technology can significantly improve the wear resistance, corrosion resistance and service life of the substrate. In this paper, the numerical simulation research of temperature field, residual stress and microstructure deformation in laser cladding process had been described. The numerical simulation methods used in analyzing the distribution and evolution of the above physical parameters at home and abroad was summarized. The formation mechanism of residual stress and fabric deformation were revealed, which provided a theoretical basis for obtaining high-quality cladding coating. Finally, the future development trend of numerical simulation technology in laser cladding process was prospected.

Key words: laser cladding, temperature field, residual stress, microstructure deformation, numerical simulation

0 引言

自 20 世纪以来, 我国工业体系的体量与规模处

于全球领先地位, 大量的工业过程由人工操作转为机械自动化, 各种机械设备长期的运转势必会导致部分关键基础零件失效, 从而造成装备故障。初步

收稿日期: 2020-10-15

基金项目: 攀枝花市科技计划项目 (2020CY-G-5); 攀枝花市钒钛产业领军人才集聚攻关计划; 太阳能技术集成及应用推广四川省重点实验室项目 (TYNSYS-2018-Y-04)。

作者简介: 何逵 (1988—), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 讲师, 主要从事激光熔覆数值模拟研究, E-mail: hekuiaaaa@163.com;

*通讯作者: 张雪峰 (1965—), 男, 四川仁寿人, 教授, 主要从事钒钛功能材料研究, E-mail: 532256335@qq.com。

估计此类装备故障的损失占国内 GDP 的 3%~5%, 其中以轴类工件、凸轮连杆、轧辊等表面的磨损、腐蚀、裂纹等失效方式为主^[1-3]。因此, 对此类工件进行必要的表面强化处理, 可以提高工件的耐磨、耐蚀性能从而增加其使用寿命, 极大地降低生产成本, 保证良好的产品质量, 获得巨大的经济与社会效益。激光熔覆技术利用高能量密度的激光作为热源熔化基材与合金粉末, 而后在基材表面快速冷却形成冶金结合覆层, 极大地提高了基材的耐磨、耐腐蚀等性能, 具有效率高、组织致密、熔覆层结合良好、环保等诸多优点^[4]。近十多年来激光熔覆技术受到国内外的格外关注, 诸多的机构及企业开展了大量的研究, 取得了不菲的研究成果^[5]。激光熔覆过程的影响因素众多, 主要包括粉末材料体系、送粉速率、扫描速度、激光功率、光斑直径等; 目前, 主要通过单一因素法、正交试验法来确定最佳的工艺参数, 试验方法的优点是结果直观精确, 但是熔覆过程中的熔池温度、涂层应力、组织相变过程却无法获得, 且试验方法存在成本高昂、周期长等缺点^[6-8]。近年来计算机技术的迅猛发展, 为激光熔覆过程中复杂的物理化学现象研究提供了可靠的数值模拟途径。

王翔宇等^[9]对 T15 高速钢异质材料激光熔覆过程中熔池演变进行了数值模拟研究, 采用多相流理论建立了激光熔覆的物质传输模型, 并结合试验方法获得熔覆层关键形貌参数, 在不同的工艺参数下试验值与模拟值吻合度较高, 验证了此多相流模型可准确揭示激光熔覆过程中熔池内的流场与传质行为。任仲贺等^[10]采用非线性有限元分析方法, 对不同的激光工艺参数下的温度场和应力场进行了数值模拟, 研究激光功率和扫描速度对温度场、应力场分布规律的影响, 结果表明模拟所得的温度场分布与试件金相组织观察到的形貌特征变化一致。激光熔覆是复杂的传热、传质、对流、凝固和相变的多场耦合过程, 熔覆层中的残余应力与变形是产生熔覆裂纹的主要原因。李昌等^[11-12]基于 CALPHAD 法建立了碟片激光器激光熔覆过程多场耦合模型, 获得了熔覆过程中温度场、速度场、应力场的瞬时变化规律, 揭示了熔覆过程中多场耦合演变机理, 为激光熔覆工艺过程中减小并消除残余应力提供了一定的理论指导基础。目前激光熔覆领域内的数值模拟研究主要聚焦于温度场、残余应力场、组织形变等方面。笔者从温度场、残余应力、组织形变等三

个方面总结了激光熔覆过程数值模拟的研究进展, 并展望了数值模拟技术在激光熔覆表面强化处理过程中的发展方向。

1 温度场

激光熔覆过程中温度场的变化是基础, 且会严重影响熔覆层组织的性能, 正确阐述温度场的分布与变化规律, 对激光熔覆过程具有重要的指导意义。影响温度场分布的因素众多, 如激光功率、送粉速率、扫描速度、光斑直径等。激光熔覆过程的温度场数值模拟主要以 ANSYS 等有限元分析软件为主, 采用非线性瞬态热传导方程如公式(1)^[13]所示。

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

式中, C 为材料体系比热容; λ 为导热系数; T 为温度场分布函数; t 为传热时间; ρ 为材料体系密度; Q 为内热源。

激光熔覆过程满足能量守恒定律, 材料从激光束中吸收的能量等于材料吸收的热量、辐射损失的热量与外部对流的热量的总和, 满足式(2)^[14]。

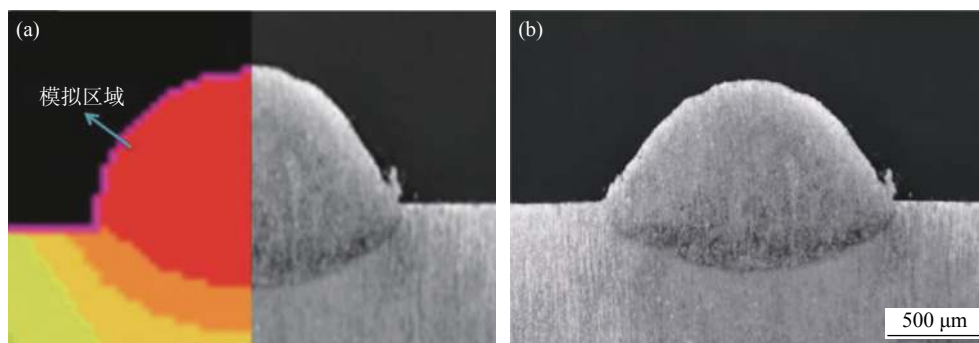
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h(T_s - T_{ext}) + \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_0^4) = -AQ(x, y, t) \quad (2)$$

式中, $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为材料表面外法线方向温度的偏导数; h 为对流传热系数; T_s 为材料表面温度; T_0 为环境温度(通常取 20 °C); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数(通常取值 $1.380\ 650\ 524 \times 10^{-23}$ J/K); ε 为材料表面热辐射系数; A 为材料表面激光光能吸收系数。

激光功率和扫描速率对激光熔覆过程的温度场有着重要的影响。郭卫等^[15]采用有限元软件对 304 不锈钢表面的激光熔覆过程进行了数值模拟研究, 分析了激光功率对温度场的影响, 获得了熔覆层表面 1 mm 深度处的温度-时间曲线, 结果显示温度与激光功率呈正比例关系。温度梯度过大容易诱发激光熔覆的耐磨防腐自润滑涂层产生裂纹, 庞铭等^[16]基于 ANSYS 软件的生死单元法, 结合自润滑相和熔覆粉末材料热物性参数, 从激光熔覆速率、激光功率等因素方面进行了温度场的仿真模拟, 揭示了激光熔覆过程中温度-时间的变化规律, 提出了能够有效降低温度梯度的激光参数范围。曹文琴等^[17]对 ER8 车轮材料与 Ni60 合金粉末激光熔覆过程中的温度场进行了模拟研究, 结果显示激光功率

是主要影响温度分布的因素,其次是扫描速率,并获得了最佳的激光工艺参数。赵盛举等^[18]采用了 Sysweld 软件,对 TC4 钛合金激光熔覆 Ni60A-50%Cr₃C₂ 合金粉末的过程温度场进行了模拟研究,得出了相应的温度场云图、热循环特性、熔覆最高温度、加热和冷却速度,结合扫描电镜图像分析验证了模拟,结果如图 1 所示。其中 a 图颜色深浅代表温度的高

低,红色部分代表高温区域,由图 1 可知试验得到的熔覆层截面形貌与模拟得到的基本一致,说明了此模拟方法的正确与有效性。王涛等^[19]选取了三种不同的激光功率,模拟了 IN718 基材表面熔覆 CoNiCrAlY 的三维瞬态温度场,获得了某一时刻某一截面的温度场分布云图,如图 2 所示。随着功率的增加,相应区域的温度梯度增大。



(a)模拟结果与试验结果对照;(b)实际试验熔覆层截面)

图 1 截面形貌与熔池深度对比^[18]

Fig. 1 Comparison of section morphology and weld pool depth^[18]

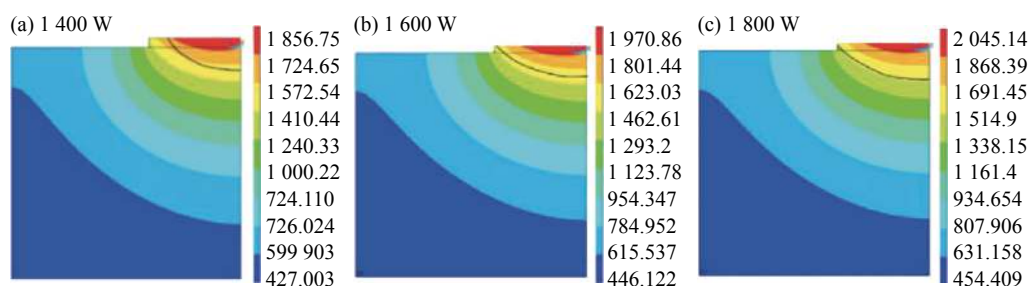


图 2 三种功率下同一截面的温度梯度(K)分布^[19]

Fig. 2 Temperature gradient (K) distribution of the same section under three different kinds of power^[19]

激光熔覆过程中基材与熔覆材料的结合属于冶金结合,基材表面会产生一定量的熔化,此过程会稀释熔覆层,有效地控制稀释率是获得性能优良的熔覆层的关键。郭卫等^[20]开展了不同扫描速度下,304 不锈钢表面的激光熔覆过程温度场数值模拟研究,基于材料的熔点计算出了相应的稀释率,结果显示稀释率与扫描速度呈反比例关系,模拟与试验结果一致。合理区间的激光功率同样能影响熔覆层稀释率,熔覆层的稀释率随着功率的增大而增大,而较小的稀释率是实现良好冶金结合的前提,因此,欲获得宽高比大、稀释率小、形貌较好的熔道,适当大小的激光功率是十分必要的^[21]。

2 残余应力

激光熔覆修复的稳定性是制约此工艺产业化的瓶颈,这里的瓶颈主要是指熔覆层出现的气孔、微裂纹、变形和表面不平整等缺陷,而这其中残余应力和微裂纹是降低工件的稳定性、刚度和使用寿命的主要因素。熔覆过程中加热与冷却速度过快、熔覆层与基材的温度梯度与膨胀系数差异大是引发熔覆层出现不稳定性的内在因素。准确获取并监测熔覆层的应力场是保证熔覆层稳定性的一个重要指标,现有的设备对其的测量与控制是非常困难且高成本的,而数值模拟技术是一种可靠、有效的手段,能实时精确地分析激光熔覆过程中的应力场变化规律,

预测可能出现的裂纹、气孔、夹杂等情况,对于改善熔覆层的组织形貌、性能具有十分重要的指导意义。

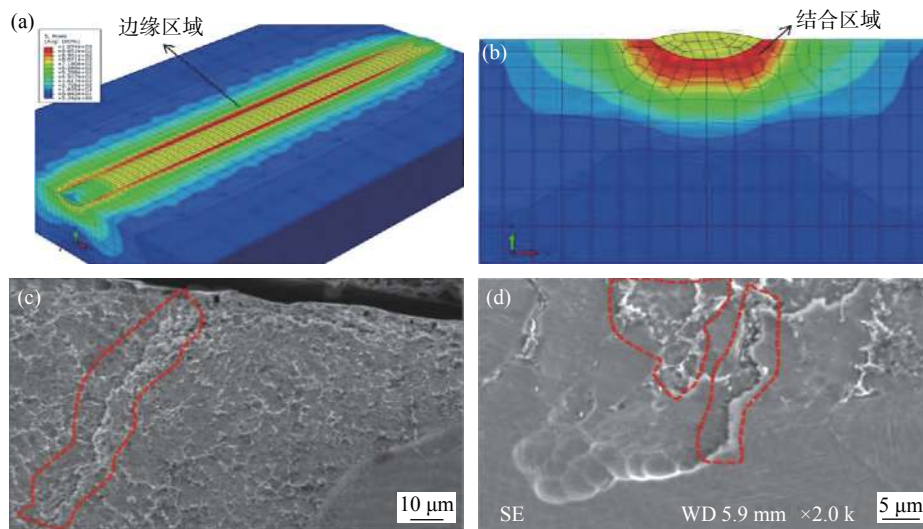
孙德平等^[22]采用 ANSYS 有限元分析软件对 Fe-Mn-Si 记忆合金熔覆层的残余应力分布情况进行了模拟研究,结果表明熔覆层中间区域的横向残余应力属于残余压应力,而基体的两侧区域中的残余压应力逐渐变为残余拉应力,纵向残余应力则为压应力、拉应力的交替变换。

姚晨光等^[23]对激光熔覆修复后的 In718 合金零部件的表面残余应力场进行了模拟研究,从单道、多道两个层面进行了对比分析;单道模拟结果表明最大应力为 770 MPa,基材的底面应力呈带状分布、顶面和垂直面应力呈对称分布,多道模拟的结果与 X 射线检测的结果十分接近:模拟最大值为 266 MPa,测量最大值为 281.01 MPa,准确地预测出了三维材料的各个面的应力分布规律;为此类材料的工业化生产、修复提供了可靠的理论数据支撑。

刘晓东等^[24]采用有限元分析软件对 Q345 钢在激光熔覆过程中的残余应力场进行了模拟研究,结

果表明熔覆层表面应力主要为拉应力,拉应力大小与工件的方位有关,纵向应力>横向应力>厚度方向应力;结合试验测量结果可知,双层交叉熔覆能够增大工件背面的残余应力值,同时残余应力也会随着熔覆层厚度的增加、激光扫描速度的降低而增大,建议采用分区熔覆与工件预弯的方式来降低残余应力值。

张天刚等^[25]采用 ABAQUS 软件对 TC4 基材表面进行了单道 Ni 基激光熔覆层的残余应力场仿真分析,结果如图 3(a)、3(b)所示:熔覆层两侧的边缘区域、结合区属于高应力集中地带,主要是因为熔覆层中心的能量较高而两侧边缘区域形成的熔池冷却过快,熔池搅拌不均,固相与液相之间扩散较慢,形成的合金无法达到完全的平衡状态;结合扫描电镜试验图片 3(c)、3(d)所示,熔覆层边缘出现了明显的斜向贯穿裂纹(图中红色曲线框标记),结合区域出现了明显的交错状裂纹和局部开裂(图中红色曲线框标记);试验结果验证了模型的正确性,为此类基材的激光熔覆涂层的裂纹问题研究提供了一定的理论和试验基础。



(a)表面残余应力分布;(b)横截面残余应力分布;(c)边缘区域裂纹形貌;(d)结合区裂纹形貌

图3 熔覆层冷却后残余应力云图与裂纹形貌^[29]

Fig. 3 Residual stress distribution and crack morphology of cladding layer after cooling^[29]

郝庆坤等^[26]采用 Sysweld 软件对不同厚度基材的激光熔覆应力场分布进行了模拟,结果表明涂层内应力较高,以拉应力为主,热影响区则为压应力;基材的厚度的增加使得涂层表面拉应力增大,当厚度达到 8 mm 后,板厚对于涂层的裂纹敏感性影响较小。

龚丞等^[27]模拟了不同工艺参量下激光增材制造熔覆涂层的残余应力分布规律,研究结果显示熔覆层 x 方向的残余应力与激光功率和送粉量呈正比

例、扫描速率呈反比例关系, y 方向的残余应力与激光功率呈反比例、扫描速率和送粉量呈正比例关系。

韩会等^[28]发现激光扫描路劲对熔覆层的残余应力分布存在一定的影响,当扫描为平行线式的长边螺旋扫描方式时,涂层与基材结合部位的残余应力、热影响区、变形等相对较小,激光熔覆的工艺性能得到明显的改善。

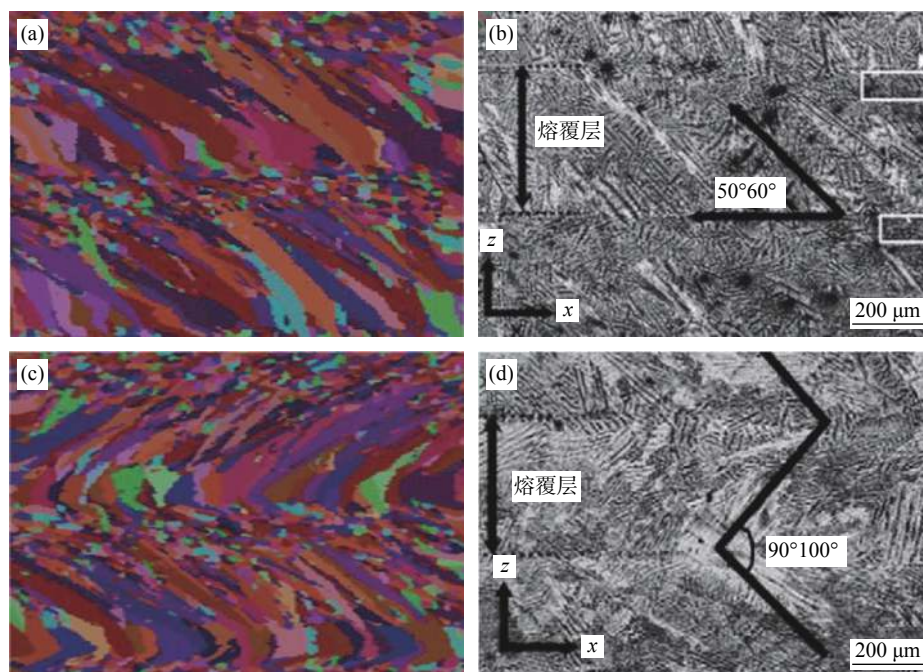
于天彪等^[29]采用数值模拟方法模拟了倾斜基

体(与水平面成 30° 夹角)激光熔覆过程中残余应力的分布规律,结果表明基体的倾斜对熔覆层的残余应力分布产生了一定的影响,沿着基体的三个方向(x, y, z)的应力分布峰值发生了偏移,造成应力分布不对称,建议在进行激光熔覆过程中避免沿着基体倾斜方向进行扫描。

3 组织形变

激光熔覆过程中,激光工艺参数与粉末成分是决定熔覆层组织形态和性能的重要因素,调整加工过程中的工艺参数来获得性能优异的工件是该领域研究的共同目标。为了实现上述目标,有必要对激光增材制造中的微观组织变化、熔池传热传质动态过程进行深入研究,微观组织上的改变会影响材料多尺度上的性能,改变其宏观力学性能、使用寿命和稳定性等。由于激光熔覆是一个典型的多物理场耦合和高度非线性的复杂过程,仅借助于试验方法对其展开研究则是十分困难的。随着计算机技术的发展,已有多数值模拟方法可以较为准确地直接模拟金属合金微观组织生长与熔池传热传质过程,尤其适合以冶金结合方式的激光熔覆过程中凝固组织演变过程的模拟。

目前,微观凝固组织模拟主要有确定性方法、直接模拟方法(相场法(Phase-field method)、水平集方法(Level-set method)和界面跟踪法(Front-tracking method))、随机性方法(元胞自动机法(Cellular automation)、蒙特卡罗法(Monte carlo))。以上方法各有特点,分别被众多研究者成功应用于不同的领域。Gandin 等^[30]提出了一种二维和三维的元胞自动机算法用于模拟液相生长成树枝状颗粒的过程,同时采用解析解验证了上述算法模型。马瑞等^[31]采用元胞自动机与有限差分耦合模型,模拟了镍基合金 TiG 熔覆熔池凝固过程,模拟结果很好的展现了平面晶、胞状晶、树枝晶、等轴晶的形态,与试验结果十分吻合。齐海波等^[32]基于有限元方法与元胞自动机技术建立了多元合金激光熔覆过程中凝固组织的微观形貌演变模型,针对单向和双向两种扫描方式下凝固组织相变进行了仿真,并采用扫描电镜对凝固组织纵截面的形貌进行了监测,对比结果如图 4(a)、4(b)所示,单向扫描时整个熔覆层中的柱状晶与等轴晶呈交替状分布,且柱状晶弯曲方向与激光扫描方向几乎一致,4(c)、4(d)为双向扫描方式下柱状晶组织生长方向也随之发生改变,由此可知试验结果与模拟结果一致。



(a: 单向扫描模拟结果; b: 单向扫描电镜结果; c: 双向扫描模拟结果; d: 双向扫描电镜结果)

图 4 纵截面凝固组织形貌^[32]

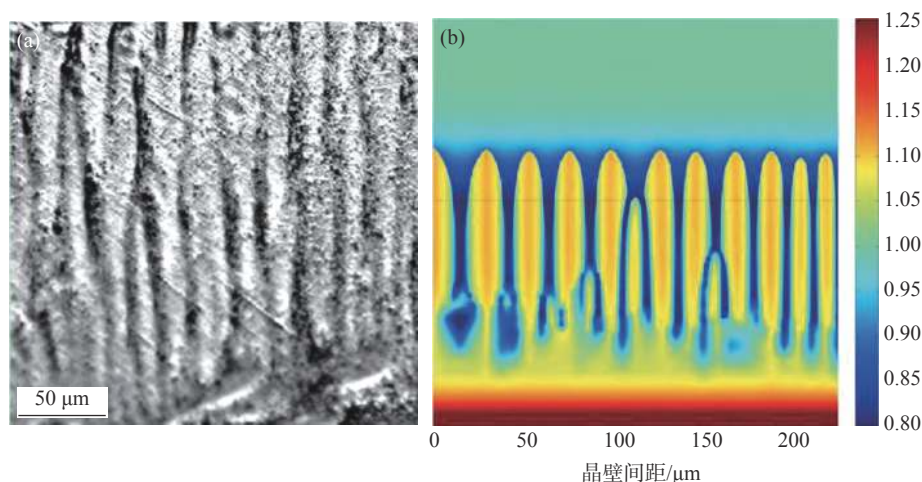
Fig. 4 Morphology of solidification structure in longitudinal section^[32]

Kobayshi^[33]提出采用有限差分法求解二维相场模型至今,相场法被广泛应用于微观组织方面的

模拟。李德英等^[34]采用相场法对激光熔覆过程中增强相颗粒对凝固过程晶粒生长的影响进行了模拟

研究, 研究结果表明增强相颗粒对晶界具有很强的钉扎作用, 颗粒越大效果越明显, 且晶粒的平均半径会显著减小, 该模型能够揭示增强相颗粒对晶粒生长动力学的作用机制。孙道金等^[35]采用相场法对纯镍同轴送粉激光熔覆过程中的熔池底部微观组织形变进行了二维模拟计算, 模拟所得微观组织形貌与试验结果基本吻合, 验证了相场法模拟方法的正确性。Fallah 等^[36]采用相场法模型模拟了 Ti-Nb 激

光熔覆过程中熔池内的合金凝固微观组织的变化, 首先结合有限元法建立了宏观温度场模型, 获得熔池内的温度场分布, 获得温度场中不同点的温度梯度 G 与界面推进速度 V_p , 将 G 、 V_p 代入相场模型中计算得到了熔池内晶粒的生长状态, 并设计了相同的试验验证了该模型, 结果如图 5 所示, 模拟得到的一次晶壁间距值、枝晶生长方向与形态与试验测量结果十分一致。



(a: 试验结果; b: 模拟结果)

图 5 相场法模拟与试验测量得到的 Ti-Nb 合金枝晶图^[36]

Fig. 5 Dendrite diagram of Ti-Nb alloy obtained by phase field simulation and experimental measurement^[36]

4 结语与展望

激光熔覆技术是新型的表面修复技术, 具有应用范围广、效率高、环保、无污染等优点, 近年来受到强烈的关注。众多的研究集中于熔覆粉末的选取、工艺参数的调节, 然而, 激光熔覆过程中的重要物性参数如温度、残余应力、凝固组织形变过程等却难以通过试验方法获得。数值模拟技术的出现为上述参数的获得提供了一条可靠的路径, 其在激光熔覆过程中的研究主要表现在以下几个方面:

1) 温度场是激光熔覆过程中的基础, 温度场的分布会严重影响熔覆涂层的组织性能, 常见的有限元、有限差分等方法可以很好的模拟此熔覆涂层中的温度分布规律, 其中激光功率、扫描速度等是最主要的影响因素, 因此, 通过数值模拟手段可以有效地获取合适的工艺参数, 控制熔覆过程的温度分布, 提高熔覆涂层的性能与质量。

2) 残余应力是导致熔覆层出现裂纹、气孔、不平整的主要内在因素, 合理地预测与控制残余应力场分布可以保证良好的熔覆层质量。通过大量的数

值模拟分析, 揭示了熔覆过程中涂层与基材的残余应力的演变规律, 为实现激光熔覆表面修复技术及产业化提供了一定的理论基础。

3) 熔覆层的宏观力学性能、使用寿命与可靠性主要由凝固组织的演化与微观结构所决定。元胞自动机法、相场法等模拟方法的出现实现了微观凝固组织形变的过程, 并且能够耦合温度场、流场和溶质场等外场数据, 实现了从微观尺度到宏观尺度物理场的转变, 更真实地阐述了实际工程问题; 以较低的成本获得了影响微观组织形变的主要工艺参数, 更好地服务于激光熔覆表面修复工艺。

目前激光熔覆过程的数值模拟研究主要集中于实验室研究, 采用单一因素法开展一系列小型模拟研究, 但是激光熔覆是一个十分复杂的物理、化学过程, 未来开展熔覆过程的模拟要以产业化为目标导向, 需要考虑到现场复杂的环境变量, 同时在自主研发的激光熔覆过程的数值模拟软件方面还需要做巨大的努力。

参考文献

- [1] Trunova O, Beck T, Herzog R, *et al.* Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines-Part I: Experiments[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(20): 5027–5032.
- [2] Wang Y Q, Sayre G. Commercial thermal barrier coatings with a double-layer bond coat on turbine vanes and the process repeatability[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(16): 2186–2192.
- [3] Huang Y L, Liang G Y, Su J Y. A comprehensive model of laser cladding by powder feeding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, 17(1): 21–27.
- [4] 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.
- [5] Laser-assisted fabrication of materials[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] Wang Lilin, Lin Xin, Wang Yonghui, *et al.* Real time observation of solidification structure in laser remelting pool[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(4): 492–498.
(王理林, 林鑫, 王永辉, 等. 激光重熔熔池凝固组织的实时观察研究[J]. *金属学报*, 2015, 51(4): 492–498.)
- [7] Chen Jing, Tan Hua, Yang Hai'ou, *et al.* Evolution of molten pool morphology in laser rapid prototyping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 442–446.
(陈静, 谭华, 杨海欧, 等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 442–446.)
- [8] Lei Jianbo, Yang Xichen, Chen Juan, *et al.* Detection of surface temperature field distribution of laser cladding pool[J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2008, 35(10): 1605–1608.
(雷剑波, 杨洗陈, 陈娟, 等. 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测[J]. *中国激光*, 2008, 35(10): 1605–1608.)
- [9] Wang Xiangyu, Wang Gang, Luo Sheng, *et al.* Multiphase flow model for laser cladding of T15 high speed steel[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(1): 118–123.
(王翔宇, 王罡, 罗升, 等. T15 高速钢异质材料激光熔覆过程的多相流模型[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(1): 118–123.)
- [10] Ren Zhonghe, Wu Meiping, Tang Youhong, *et al.* Numerical simulation and experimental study of laser cladding based on thermal mechanical coupling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 1–10.
(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]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 1–10.)
- [11] Li Chang, Yu Zhibin, Gao Jingxiang, *et al.* Numerical simulation and experiment of thermal elastic plastic flow multi field coupling in laser cladding process[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(1): 125–134.
(李昌, 于志斌, 高敬翔, 等. 激光熔覆工艺热-弹-塑-流多场耦合数值模拟与试验[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(1): 125–134.)
- [12] Li Chang, Yu Zhibin, Gao Jingxiang, *et al.* Multi field coupling simulation and experiment of laser cladding under temperature change of physical parameters[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(6): 1258–1270.
(李昌, 于志斌, 高敬翔, 等. 物性参数温度变化下激光熔覆多场耦合模拟与实验[J]. *兵工学报*, 2019, 40(6): 1258–1270.)
- [13] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 235–240.
(杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 235–240.)
- [14] Parekh R, Buddu R K, Patel R I. Multiphysics simulation of laser cladding process to study the effect of process parameters on clad geometry[J]. *Procedia Technology*, 2016, 23: 529–536.
- [15] Guo Wei, Zhang Yapu, Chai Rongxia, *et al.* Numerical simulation and experimental study of laser cladding 304 stainless steel on 27SiMn Steel[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(1): 35–41.
(郭卫, 张亚普, 柴蓉霞, 等. 27SiMn钢表面激光熔覆304不锈钢数值模拟及实验研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(1): 35–41.)
- [16] Pang Ming, Liu Quanxiu. Numerical simulation of temperature field of laser cladding wear-resistant and corrosion-resistant self-lubricating coating on 300M steel[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(2): 35–42.
(庞铭, 刘全秀. 300M 钢激光熔覆耐磨防腐自润滑涂层温度场数值模拟研究[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(2): 35–42.)
- [17] Cao Wenqin, Shao Xiaofeng, Zhu Haiyan. Numerical simulation of laser cladding Ni based alloy layer on ER8 wheel material[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(24): 98–106.
(曹文琴, 邵晓峰, 朱海燕. ER8车轮材料激光熔覆镍基合金层的数值仿真研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(24): 98–106.)
- [18] Zhao Shengju, Qi Wenjun, Huang Yanhua, *et al.* Numerical simulation of temperature field and thermal cycle characteristics of laser cladding Ni60 based coating on TC4 surface[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 312–319.
(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): 312–319.)
- [19] Wang Tao, Qin Lingchao, Liu Jiaqi. Simulation and experimental verification of laser cladding CoNiCrAlY temperature field based on finite element method[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(18): 154–161.

- (王涛, 秦令超, 刘佳奇. 基于有限元的激光熔覆CoNiCrAlY温度场模拟及实验验证[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 154-161.)
- [20] Guo Wei, Li Kaikai, Chai Rongxia, *et al.* Numerical simulation and experiment of dilution effect of laser cladding 304 stainless steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 161-169.
(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): 161-169.)
- [21] Zhang Jiping, Shi Shihong, Jiang Weiwei, *et al.* Temperature field simulation and process optimization of three beam laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46 (10): 122-129.
(张吉平, 石世宏, 蒋伟伟, 等. 三光束光内送丝激光熔覆温度场仿真分析与工艺优化[J]. 中国激光, 2019, 46 (10): 122-129.)
- [22] Sun Deping, Yuan Haichao, Ju Heng. Numerical simulation of residual stress in laser cladding layer of Fe Mn Si shape memory alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2020, (16): 114-117.
(孙德平, 苑海超, 鞠恒. Fe-Mn-Si记忆合金激光熔覆层残余应力的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2020, (16): 114-117.)
- [23] Yao Chenguang, An Zhibin, Yang Zhufang. Residual stress distribution and numerical simulation analysis of Inconel718 alloy additive manufacturing[J]. *Mechanical Manufacturing and Automation*, 2019, 4(36): 134-136.
(姚晨光, 安志斌, 杨竹芳. Inconel718合金增材制造残余应力分布与数值模拟分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 4(36): 134-136.)
- [24] Liu Xiaodong, Jiang Honglei, Xie Meng. Residual stress analysis of Q345 steel by laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(3): 231-235.
(刘晓东, 姜洪雷, 谢蒙. Q345钢激光熔覆的残余应力分析[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 231-235.)
- [25] Zhang Tian Gang, Zhang Qian, Yao Bo, *et al.* Numerical simulation of temperature field and stress field of Ni based laser cladding layer on TC4 surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 58(3): 31-40.
(张天刚, 张倩, 姚波, 等. TC4表面Ni基激光熔覆层温度场和应力场数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 58(3): 31-40.)
- [26] He Qingkun, Song Lixin. Stress analysis of laser cladding on different thickness substrates[J]. *Journal of Laser*, 2018, 39(1): 60-63.
(赫庆坤, 宋立新. 不同厚度基体激光熔覆应力分析[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 60-63.)
- [27] Gong Cheng, Wang Lifang, Zhu Gangxian, *et al.* Effect of laser additive manufacturing process parameters on residual stress of cladding layer[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(2): 263-268.
(龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造工艺参量对熔覆层残余应力的影响[J]. 激光技术, 2019, 43(2): 263-268.)
- [28] Han Hui, Qi Wenjun, Dang Yuanxiao, *et al.* Influence of path setting on temperature field and stress-strain field of 304 stainless steel laser cladding[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(12): 148-152.
(韩会, 祁文军, 党元晓, 等. 路径设置对304不锈钢激光熔覆温度场及应力应变场的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 148-152.)
- [29] Yu Tianbiao, Qiao Ruozhen, Han Jibiao, *et al.* Numerical simulation of residual stress field in laser cladding of inclined substrate[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (2): 82-86.
(于天彪, 乔若真, 韩继标, 等. 倾斜基体激光熔覆残余应力场的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (2): 82-86.)
- [30] Gandin Ch A , Rappaz M . A 3D cellular automaton algorithm for the prediction of dendritic grain growth[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(5): 2187-2195.
- [31] Ma Rui, Dong Zhibo, Wei Yanhong, *et al.* Simulation and Simulation of solidification structure evolution process of nickel base alloy weld[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(7): 43-46.
(马瑞, 董志波, 魏艳红, 等. 镍基合金焊缝凝固组织演变过程模拟和仿真[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 43-46.)
- [32] Qi Haibo, Zhang Yunhao, Feng Xiaofei, *et al.* Simulation of solidification microstructure evolution in laser additive manufacturing of multicomponent alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(5): 71-77.
(齐海波, 张云浩, 冯校飞, 等. 多元合金激光增材制造凝固组织演变模拟[J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 71-77.)
- [33] Kobayashi R. Modeling and numerical simulations of dendritic crystal growth[J]. *Physica D*, 1993, 63(3-4): 410-423.
- [34] Li De Ying, Zhang Jian, Deng Zhicheng. Phase field study on the effect of reinforced phase particles on the solidification structure of laser melt injection[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(10): 179-182.
(李德英, 张坚, 邓志成. 增强相颗粒对激光熔注凝固组织影响的相场法研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 179-182.)
- [35] Sun Daojin, Liu Jichang, Li Qindong. Phase field simulation of microstructure growth at the bottom of laser cladding pure nickel bath[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 93-98.
(孙道金, 刘继常, 李钦栋. 激光熔覆纯镍熔池底部组织生长的相场法模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 93-98.)
- [36] Fallah V, Amooezaei M, Provatas N, *et al.* Phase-field simulation of solidification morphology in laser powder deposition of Ti-Nb alloys[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(4): 1633-1646.