

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.005

激光熔覆的数值模型研究进展^{*}

卢彩彬, 李新梅, 赵海洋

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:针对激光熔覆工艺参数选择及数值模型建立的问题,对激光熔覆各个阶段的数值模型进行了研究。对主要过程中的粉末流体动力学模型、熔池模型和熔覆层模型的建立进行了归纳,提出了考虑不同因素条件下各个模型的发展进程,利用激光熔覆过程各个阶段之间的作用关系,在输入、输出参数和输出精度上对熔覆层及其性能进行了评价分析。研究结果表明:各个阶段的数值模型都需要在选择合适的工艺参数和考虑综合因素下建立稳定的模型,可为激光熔覆实验研究和后续相关模型以及预置粉末系统的数值模型研究提供参考依据;该结果对激光熔覆过程中缺陷的在线检测具有一定的实用意义。

关键词:激光熔覆;数值模型;粉末流体动力学模型;熔池模型;熔覆层模型

中图分类号:TH16;TG174.4

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1151-07

Research progress in numerical modeling of laser cladding

LU Cai-bin, LI Xin-mei, ZHAO Hai-yang

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi, 830047, China)

Abstract: Aiming at the problem of parameters selection and the establishment of the numerical model in laser cladding process, numerical model of laser cladding were studied at various stages. The main process of powder fluid dynamics model, the molten pool model and the cladding layer model were summarized, the development process of each model was proposed under the condition of considering various factors. The performance of laser cladding layer was evaluated and analyzed on the basis of input and output parameters and output precision. The results indicate that the numerical model of each stage needs to establish a stable model under the consideration of appropriate process parameters and comprehensive factors, the favorable model can provide a reference basis for the experimental study of laser cladding and the numerical model study of preset powder system, and it has a certain practical significance to detect the defects of laser cladding process online by numerical simulation.

Key words: laser cladding; numerical modeling; powder fluid dynamics model; molten pool model; cladding layer model

0 引 言

激光熔覆成形是一种集快速原型制造和激光熔覆表面改性于一体的新型先进制造技术,因具有低热输入、高凝固速率、良好的冶金结合、功能梯度材料的沉积以及对均匀结构的快速成型等特点,使其成为了一种独特且广泛应用的热镀膜工艺^[1],主要并广泛应用于表面技术,如重要零件表面的涂层、修复和复杂形状零件的成型等各种材料加工行业^[2-4]。

近年来有不少学者对激光熔覆的数值模拟展开了研究。大多数学者通过建立温度场、应力场的三维有限元模型,并应用参数化编程进行了数值化模拟,进而获得激光熔覆成型过程的温度场分布、冷却速率和温度梯度来反映激光熔覆的物理、动态和冶金现象等过程。综合各位学者的研究,激光熔覆过程主要分为 3 个阶段:粉末流体动力学、熔体池和熔覆层性能。因此,笔者综述了粉末流动动力学模型、熔池模型和熔覆层模型 3 个不同阶段的数值模拟研究进展。

收稿日期:2020-01-07

基金项目:国家自然科学基金(51865055);新疆自治区天山英才计划资助项目(201720025)

作者简介:卢彩彬(1994-),女,甘肃定西人,硕士,主要从事材料表面改性激光熔覆方面的研究。E-mail:1920436097@qq.com

在目前的研究中,大多学者采用 ANSYS 对激光熔覆过程进行数值模拟,然后采用参数化设计语言 (APDL) 和“生与死”单元法进行建模和编程,进而研究高能激光热源的运动和送粉条件下的瞬态温度场分布。同时,为了提高模拟计算的精度,研究人员采用了网格细分技术,使熔覆层与基体界面附近的网格更小、更细,并用八节点六面体等参元对模型进行了离散。通过数值模拟仿真,可以获得激光熔覆成形过程的温度场分布、冷却速率和温度梯度等。大多研究者研究了激光功率、扫描速度及光斑直径等参数对熔覆层温度梯度的变化和冷却速率的影响,为解释微观组织形成机理、裂纹敏感性和参数选择及优化提供了理论依据。研究者通过把模拟得到的参数应用到激光熔覆实验中,结合数值模拟的结果来分析熔覆层的性能。激光熔覆是粉末流动行为、粒子与喷嘴、激光与基体的相互作用,以及传热和熔池特性等相互影响的复杂过程。由于实验操作过程并不能完全体现出此复杂过程,大多学者都通过建立了不同的分析模型^[5-6]和数值模拟应用于激光熔覆的 3 个阶段。

然而,现阶段对激光熔覆的研究在实验操作方面偏多^[7-9]。因此,笔者主要对激光熔覆的 3 个阶段的数值模型技术进行总结概括。

1 粉末流体动力学数值模型发展

在大多数研究中,研究者采用不同的方法来模拟激光熔覆的运动、粉末流动轮廓、粉末与激光系统的相互作用等,从而用来优化工艺参数,如计算流体动力学 (CFD) 技术、CFD-ACE、Fluent 和 ANSYS 等软件^[10]。在较多的数值模拟研究中,粉末的形状被设定为球形粉末。但是,球形颗粒粉末高估了粉末流动的峰值浓度,因而,把粉末形状设定为非球形粉末,能更好地与实验结果吻合^[11]。

在激光熔覆数值模拟中,许多学者也针对喷嘴与粉末的相互作用作了相关的研究。如研究了同轴进料喷嘴的粉末流结构的三维数值模型,和同轴喷嘴中颗粒的碰撞行为,以及粉末浓度分布的影响,得出颗粒直径和恢复系数对喷嘴出口处的速度矢量以及喷嘴下方的粉末流收敛特性有很大影响,也证明了建立三维模型是一种优化同轴激光熔覆粉末流的实用方法。

SRDJA 等^[12]在忽略了粒子碰撞、粒子与激光束的相互作用和激光衰减的基础上,利用 FLUENT 软件和采用径向对称喷嘴,模拟了激光熔覆 H13 工具钢的三维气-粉流动模型;TABERNEO 等^[13]在不考虑粉末与喷嘴壁、激光束和基体的相互作用下,结合 CFD

FLUENT 建立了考虑粉末进料率和粉末粒度的通用三维模型;JUANSETHI 等^[14]忽略了粉料与喷嘴壁的碰撞、载气流速、载气种类和材料效应,建立了考虑激光与基体相互作用的粉末流动数值模型;KOVALEVA 等^[15]建立了不同轴喷嘴金属粉末颗粒气体射流输送的三维物理和数学模型,用数值方法获得了基体上的三维质量和定量粉末流,进而对气粉流参数进行了研究。

针对以上忽略喷嘴与粉末的相互作用的情况,PAN 等^[16]在考虑粉末与喷嘴壁相互作用的情况下,建立了三维的非球形粉末流动的数值模型。ZHANG 等^[17]研究了环境压力、真空效应和不同载气对粉末流动分布的影响,并结合 ANSYS 建立了三维数值模型。WEN 等^[18]提出了一个综合的数值模型来预测同轴粉体流动的全过程,包括喷嘴内和喷出后的颗粒流和激光-颗粒相互作用的过程;在考虑颗粒温度演化的同时,通过求解颗粒与气相耦合动量传递方程,完整地模拟了多颗粒的动力学和热行为,该模型能够在考虑真实粉末样品中颗粒形貌和粒度分布的同时,预测整个过程中粉末的流场结构和随着液体分数演化的多相颗粒相变过程;并在此研究基础上,又提出了一种考虑激光粒子相互作用、质量加入、传热、流体流动、熔融和凝固等物理行为的同轴激光直接沉积过程的三维自洽综合瞬态模型^[19],建立了计算区域内不同相(气、液、固、泥)的连续介质模型。HAN 等^[20]建立了一种模拟激光熔覆过程的数学模型,包括激光-基体、激光-粉末和粉末-基体相互作用。该模型考虑了大多数相关现象:如熔体、凝固、蒸发、自由表面演化和喷粉等,研究了以马朗戈尼剪切应力和颗粒碰撞为主要驱动力的熔池内流体流动,以及液-汽界面和固-液界面的能量平衡;在计算温度分布时,将粉末加热和粉末云引起的激光功率衰减纳入模型,通过对喷粉和不喷粉两种情况的比较,预测了喷粉对熔池形状、熔深和流动规律的影响,模拟了熔池的动态行为和熔覆层的形成。

2 熔池模型的模拟发展

近年来,大多熔池模型的研究主要集中在热传导、熔池几何形状、熔池形状和流体流动速度等方面;为了对激光熔覆过程中熔池的各种现象进行数值模拟,采用的方法有水平集成法、流体体积法、有限元法和有限差分法等,并用 ANSYS、FLUENT、ANSYS-CFD、ABAQUS、COMSOL 等软件来实现分析。

LEE 等^[21]采用流体体积法对多层单轨激光加工过程中的输运现象进行了三维数值模拟,预测了连续沉积过程中,温度和流体流动速度分布、熔池流体边界

形状和重熔的瞬态变化、以及凝固形成的几何形状。激光熔覆过程中,激光与材料相互作用会产生非均匀、快速的热流,而固有地包含多尺度、高度非线性和非平衡输运现象。CAO 等^[22]利用相场法研究了激光熔覆过程凝固微观结构演化的过程模型,并对相场模型的数值解进行了分析,研究了宏观过程与凝固组织演化的关系,及熔体过冷和各向异性对凝固组织的影响;除此之外,采用自洽的方法建立了同轴喷粉激光熔覆过程的三维瞬态模型,模拟了熔池内的传热、熔体和凝固相的变化、质量的增加和流体的流动等物理现象^[23]。

也有学者采用时变有限元法对激光熔覆熔池进行了数值模拟,用二维有限元模型计算了熔体熔池在不同熔覆时间下的稀释度和熔池形状^[24]。YA 等^[25]结合粉末效率,建立了基于质量和能量平衡的激光熔覆过程的二维热模型,结合 COMSOL MULTIPHYSICS 软件详细分析了熔覆工艺条件对粉末效率的影响,预测了激光熔覆过程中的熔覆层几何形状和热循环。

KONG 等^[26]通过数值模拟和实验验证,研究了 H13 工具钢激光多层熔覆层的传热传质过程,建立了包括衬底和固化包层的固相区、熔化包层材料的液相区,和周围空气的气相区等熔池内液相温度场和流动速度的多相瞬态模型。KUMAR 等^[27]建立了三维传热模型,模拟了瑞利-贝纳德对流作用下熔覆过程的传热、相变、粉末颗粒的加入和流体流动等物理现象,通过改变扫描速度和马朗格尼数,改变了熔池大小和对流强度,研究了对流强度对熔覆层几何形状、稀释程度、最大和平均熔池温度以及凝固层轨道组织形式和尺度的影响。HAO 等^[28]建立了 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金激光熔覆温度场的三维热有限元模型,该模型使用逆建模方法,通过构造一个自适应熔覆层和移动热源模型,实现了温度分布对不同组合的激光熔覆工艺参数。

GUO 等^[29]在考虑了粉末与基体之间的热接触电阻的情况下,模拟了移动热源条件下包层区域的三维热场,建立了基于有限元法的激光熔覆层温度场的数值模型,并利用大功率钕钇铝石榴石激光器,在镁合金上对 Al-12% Si 合金的激光熔覆进行了验证实验。LEI 等^[30]建立了 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金高功率激光熔覆 TiC/NiCrBSiC 复合涂层的三维模型,研究了基体的温度分布、不同节点上的温度曲线、熔融区、熔池和热影响区的三维形状和尺寸。MICHAEL 等^[31]提出并验证了将热对流引入激光熔覆有限元分析的综合方法,研究了有限元对流模型中考虑网格表面演化的必要性。

2.1 激光热源的模拟发展

在已经比较成熟的热模型研究中,模拟熔池温度

分布一般都先确定激光热源,而激光热源主要分为脉冲和连续热源两种形式。大多文献中主要采用高斯热源^[32]。因考虑到激光光源的束径、波长、模型和聚焦长度等物理特性,进而采用 Tailor 热源,可在熔覆层和基体之间产生高能量,并以热传导和辐射为边界条件,预测瞬态温度分布。

LEI 等^[33]利用工业有限元分析软件,以 TiC、NiCrBSiC 合金和 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金为试样材料,建立了一种新的三维模型,来模拟 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金表面的高功率激光包覆 TiC/NiCrBSiC 复合涂层;通过计算得到了不同入射激光功率下基体的稀释率、熔池和热影响区,并与涂层的微观结构进行了比较。为了对激光热源做进一步的改进,TSENG 等^[34]在综合考虑了光束的波长、光束半径和聚焦条件等基础上,提出了一种激光熔覆过程有限元分析的激光热源模型,并将该模型集成到一个 SYSWELD 包中,预测了预置钴粉层激光熔覆过程中的温度分布和熔覆层形貌;其通过改变瞬变电磁法模式、聚焦条件、波长和扫描速度,对熔覆工艺参数进行了评价,建立了单模和自适应多模温度混合激光束的仿真模型。

EHSAN 等^[35]利用生死单元技术建立了有限元模型来模拟温度分布,能够预测不同激光功率、扫描速度和粉末进给速度下的温度分布。PARISA 等^[36]建立了一种可以计算随预热温度变化的冷却速率模型。ZHU 等^[37]模拟了生物陶瓷涂层在不同条件下的激光熔覆温度场,并对工艺参数进行了优化。NIE 等^[38]基于欧拉模型建立了载气和载粉两相流动方程,研究了喷嘴喷粉流浓度场的数值模拟;利用 Fluent6.0 软件对粉体流中浓度场进行了计算机数值模拟,并结合数字粒子图像测速技术(DPIV),对气体、粉体流的浓度场进行了数值模拟,得到了二维浓度场图及其参数,并得到了与实验数据相吻合的结果。

2.2 熔池几何模型的模拟发展

大多文献中,常从熔池的温度分布曲线和熔池形状的解析函数^[39-41]来预测熔池的几何形状。影响熔池几何形状的参数有激光粉末的相互作用、激光功率、粉末进给速度和激光扫描速度。

KNUT 等^[42]研究了激光功率和集粉效率等参数对高速激光熔覆的影响,预测了熔池的几何形状,随着粉末集粉效率的增加,改变了导热过程,从而改变了熔池的形状。NAVID 等^[43]利用稳态热分析方法建立了稳态热循环模型,但忽略了流体流动对温度分布的影响。MASOOMI 等^[44]利用多道激光系统建立了热模型,但没有考虑液体和固体的润湿行为及固相成核和

孔隙的生成。上述研究没有考虑流体流动、材料间的相互反应和相变,及熔化潜热对熔覆过程的影响,但这些因素在整个数值模拟过程中起着重要的作用。

为此,HOADLEY 等^[45]在软钢表面熔覆钴基合金研究中,建立了同时考虑激光功率和激光扫描速度的热模型。CHEIKH 等^[46]通过采用 Heaviside 函数计算材料性能,建立了熔池几何形状的热模型。NIE 等^[47]预测了瞬态温度分布计算热循环热模型并考虑了液态金属对流的影响。基于以上模型的发展,业界逐渐提出了一种考虑粉体流密度和粉体效率的热模型分布,用于预测熔覆层的几何形状;同时,提出了可以用抛物线形状函数计算熔覆层的几何形状的方法。

HOFMAN 等^[48]通过描述物理效应的平衡方程的数学变换,建立了激光熔覆层几何形状和稀释度的确定模型,并对熔覆速度、激光功率分布和衬底温度的不同组合进行了仿真,得出结论:熔池宽度与稀释度呈高度相关,且几乎不受工艺设置和衬底温度的影响,与实验结果比较具有较高的一致性。PALUMBO 等^[49]建立了用来分析热循环、稀释度的变化和熔池形状的热模型和力学模型;通过三维形变场有限元模型和力学有限元模型,分析了激光熔覆的温度分布和激光熔覆结束时的应力、应变分布,并利用所测得的熔覆层形貌和熔池尺寸对热铁模型进行了标定。KIM 等^[50]采用一个时间相关的三维热-力学有限元模型,来模拟激光熔覆下的温度场、熔池形状和横向截面上的稀释(模型没有考虑横截面外的热流),并采用自适应网格技术,避免了熔覆层形状变化引起的单元变形过大问题,实现了热-应力的顺序耦合分析;另外还研究了传热机理和应力分布。

3 熔覆层的模拟发展

熔覆层方面的模拟研究主要集中于熔覆层相变、组织、硬度、残余应力等性能的模拟。基于 Kurz-Fisher 和 Trivedi 理论^[51],研究者模拟了树枝状组织的凝固过程,结果表明:随着冷却速率的增加,凝固速率逐渐增大,直至达到临界值;超过冷却速率的临界值后,由于原子不能扩散,原子核的生长受到阻碍,即使在较高的冷却速率下,核的生长也会变慢。

TRICARICO 等^[52]通过使用 FORTRAN 子程序,将热负荷和表面热流分配给被激活的包层单元,作为节点到激光高斯能量分布中心的距离的函数,对激光熔覆过程进行了连续耦合热应力分析,模拟了稳态和瞬态过程中发生在熔覆层与基体界面的复杂热相互作用。

用。HUANG 等^[53]提出了一种新的熔覆层演化预测模型,并采用朗伯-比尔定理和米氏理论对熔覆层与激光的相互作用进行了研究;采用连续介质模型和熔-孔隙度法和 PHOENICS 软件,对固液两相体系中的流体流动和热传递进行了数值模拟;完成了对钢表面钨铬钴合金包层的数值计算,所得结果与实验结果基本吻合。

4 模型分析

基于以上 3 种模型,笔者下面主要从模型的适用性、输入输出参数及输出精度几个方面进行比较分析。

4.1 适用性分析

贾文鹏等^[54]通过建立激光熔覆过程中保护气与粉末流、熔池与粉末的交互作用以及温度场的复合模型,不仅实现了熔池的动态模拟,还结合 Lagrangian 粒子追踪模型实现了对粉末颗粒的跟踪。黄铭^[55]通过数值模拟研究凹陷、结疤、夹杂等缺陷对熔覆层的影响,根据这些缺陷对熔覆层温度场的影响,实现了对熔覆层表面宏观缺陷的在线的检测。张安峰等^[56]应用粉末流体模型,计算了粉末流体的流场浓度分布规律及汇聚特性,验证了同轴送粉喷嘴的焦点浓度近似地服从高斯分布,并选出了最优参数,为同轴送粉喷嘴的设计和结构优化提供了参考。

4.2 参数分析

综上所述,研究人员所建立的激光熔覆熔池二维模型是在假定熔覆层自由表面始末两点位置为输入参数的基础上,迭代计算出了熔覆层自由表面形状,通过三维模型研究了激光功率、扫描速度、粉末沉积速率、Marangoni 数,在改变熔池尺寸和对流强度等输入参数的情况下,对输出参数(如熔覆层几何结构、稀释率、熔池最高和平均温度)及熔覆层凝固轨迹的组织形式和尺度的影响。

HUANG^[57]在考虑激光功率、激光半径、螺旋扫描角、颗粒半径、颗粒密度、扫描速度等输入参数的同时,将粉末颗粒的温度分布和激光光斑在工件表面的能量分布作为输入数据,利用建立的熔池模型,计算输出了不同螺旋扫描角下的工件表面激光强度和粒子温度的分布等参数;根据 4.1 中所述的模型,通过实验选择出了激光功率、预置粉末厚度、扫描速度等工艺参数,进而在模型中加入了边界条件、热源等输入参数,再通过模拟计算得到了熔池的温度分布规律、冷却速度、温度梯度等参数,进而分析了熔池凝固过程的组织形成,再通过材料分析方法检测了熔覆层的性能。

4.3 精度分析

根据以上学者的研究可知,激光熔覆过程输出的精度主要体现在熔覆层组织及其性能方面,故应通过选择优化适宜的工艺参数,确保熔覆层的温度梯度、冷却速度等输出参数的精确性,以达到提高熔覆层性能的工艺要求。

以上研究表明:粉末在表面的具体分布很难用任何精度来确定,因而采用熔覆层横向宽度的粉末沉积速率来阐述熔覆层的质量平衡。当 Marangoni 系数为正时,熔覆层横截面底部的组织细小;反之为负时,稀释率随 Marangoni 数增大而减小。因熔覆层横截面顶部的组织细小,扫描速度较高时容易形成细小的凝固组织;激光功率过高,熔覆层的孔隙率会增大,甚至会导致变形严重或开裂;激光功率过低,熔覆层材料不能完全融化,降低了结合强度及熔覆层性能^[58]。同理,当预置层厚度偏低时,熔覆层易出现气孔和粗糙不平等现象;反之,预置厚度过高,熔覆层成型差,易出现局部未熔透或裂纹等情况。在以上两者参数不变的情况下,激光扫描速度过大,熔覆层会出现未熔透、速度过小等问题,并会导致熔覆层出现裂纹。因此,选择合适的工艺参数是确保输出性能良好的基本条件。

5 结束语

围绕国外学者对激光熔覆过程各个阶段的数值模拟,笔者综述了激光熔覆过程中,粉末流体动力学模型、熔池模型和熔覆层模型的数值模拟,分析了其工艺参数、粉末流动行为、粒子与喷嘴、激光与基体的相互作用,及传热和熔池特性等对激光熔覆各个阶段模型的影响,主要结论如下:

(1)与传统工艺相比,激光熔覆工艺虽然适用于多种材料,但不同的材料具有不同的流动特性,因此在流体运动方面的研究还有所欠缺,对微观组织结构及生长规律方面的模拟研究也不够成熟;

(2)考虑各阶段和各工艺参数的完整模型及综合性因素,由于程序和非稳态问题的复杂性,导致目前的模拟状态与实验中真实状态还有一定的差距;

(3)相对粉末流体动力学模型和熔池阶段的模型,熔覆层阶段的建模不够完善,在现有的研究中,对同轴送粉系统的建模研究较多,而对预置粉末系统的建模研究还比较少;

(4)可通过数值模拟过程,研究凹陷、结疤、夹杂等缺陷对熔覆层及其质量的在线检测。

参考文献 (References):

- [1] VILAR R M. Laser cladding[C]//International Conference on Advanced Laser Technologies. 2003.
- [2] LIN Y, LEI Y, LI X, et al. A study of TiB₂/TiB gradient coating by laser cladding on titanium alloy [J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2016(82):48-55.
- [3] WANG W, WANG M, JIE Z, et al. Research on the micro-structure and wear resistance of titanium alloy structural members repaired by laser cladding [J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2008,46(11):810-816.
- [4] LIU J, YU H, CHEN C, et al. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: a review[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2017(93):195-210.
- [5] ZHANG Z, FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high power direct diode laser[J]. **Materials & Design**, 2016(109):686-699.
- [6] HUANG Y, KHAMESEE M B, TOYSERKANI E. A comprehensive analytical model for laser powder-fed additive manufacturing[J]. **Addit Manuf**, 2016(12):90-99.
- [7] WENG F, CHEN C, YU H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: a review [J]. **Materials & Design**, 2014(58):412-425.
- [8] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A S M A, et al. A review to the laser cladding of self-lubricating composite coatings[J]. **Lasers Manuf Mater Process**, 2016(3):67-99.
- [9] LIU H, HE X L, YU G. Numerical simulation of powder transport behavior in laser cladding with coaxial powder feeding[J]. **Science China: Physics, Mechanics & Astronomy**, 2015,58(10):34-43.
- [10] TAMANNA N, CROUCH R, NAHER S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2019(122):151-163.
- [11] ZHU G X, LI D C, ZHANG A F, TANG Y P. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition[J]. **Optics and Laser Technology**, 2010, 43(1):106-113.
- [12] ZEKOVIC S, DWIVEDI R, KOVACEVIC R. Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser based direct-metal deposition[J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2007, 47(1):112-123.
- [13] TABERNERO I, LAMIKIZ A, UKAR E, et al. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2010,210(15):2125-2134.

- [14] IBARRA-MEDINA J, PINKERTON A J. PINKERTON A J. A CFD model of the laser, coaxial powder stream and substrate interaction in laser cladding[J]. **Physics Procedia**, 2010(5):337-346.
- [15] KOVALEVA I, KOVALEV O, ZAITSEV A, et al. Numerical Simulation and Comparison of Powder Jet Profiles for Different Types of Coaxial Nozzles in Direct Material Deposition[J]. **Physics Procedia**, 2013(41):870-72.
- [16] PAN H, LIOU F. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2005, 168(2):230-244.
- [17] ZHANG B C, CODDET C. Numerical study on the effect of pressure and nozzle dimension on particle distribution and velocity in laser cladding under vacuum base on CFD[J]. **Journal of Manufacturing Processes**, 2016(23):54-60.
- [18] WEN S Y, SHIN Y C, MURTHY J Y, et al. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2009, 52(25):5867-5877.
- [19] WEN S Y, SHIN Y C. Modeling of transport phenomena in direct laser deposition of metal matrix composite[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2010(108):1-9.
- [20] HAN L, PHATAK K M, LIOU F W. Modeling of laser cladding with powder injection[J]. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 2004(35):1139-1150.
- [21] LEE Y S, FARSON D F. Surface tension-powered build dimension control in laser additive manufacturing process[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2016(28):12-18.
- [22] CAO Y, CHOI J. Solidification microstructure evolution model for laser cladding process[J]. **J. Heat Transfer**, 2007, 129(7):852-863.
- [23] QI H, MAZUMDER J, KI H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition[J]. **J Appl Phys**, 2006(100):1-11.
- [24] KIM J P, PENG Y. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2000, 104(3):284-293.
- [25] YA W, PATHIRAJ B, LIU S J. 2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2016(230):217-232.
- [26] FANRONG K, KOVACEVIC R. Modeling of Heat Transfer and Fluid Flow in the Laser Multilayered Cladding Process[J]. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 2010(41):1310-1320.
- [27] AMITESH K, SUBHRANSU R. Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding[J]. **Computational Materials Science**, 2009, 46(2):495-506.
- [28] HAO M Z, SUN Y W. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy using an inverse modeling approach[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2013(64):352-360.
- [29] GUO L F, YUE T M, MAN H C. A finite element method approach for thermal analysis of laser cladding of magnesium alloy with preplaced Al-Si powder[J]. **Journal of Laser Applications**, 2004(16):229-236.
- [30] LEI Y W, SUN R L, YING T, et al. Numerical simulation of temperature distribution and TiC growth kinetics for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings[J]. **Optics and Laser Technology**, 2012, 44(4):1141-1147.
- [31] MICHAEL F G, JARRED C. Heigel, Panagiotis Michaleris, et al. Modeling forced convection in the thermal simulation of laser cladding processes[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015(79):307-320.
- [32] ALIMARDANI M, TOYSERKANI E, JAN P. Huissoon. A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2007, 45(12):1115-1130.
- [33] LEI Y W, SUN R L, LEI J B, et al. A new theoretical model for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings on $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloys[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2010, 48(9):899-905.
- [34] 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.
- [35] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. 3D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2004, 41(6):849-867.
- [36] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding assisted with an induction heater (LCAIH) of Ni-60% WC coating[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2015(222):244-258.
- [37] ZHU W D, LIU Q B, LI H T, et al. A simulation model for the temperature field in bioceramic coating clad by wide-band laser[J]. **Materials and Design**, 2006, 28(10):2673-2677.
- [38] PULIN N, OJO O A, ZHUGUO Z G. Modeling analysis of

- laser cladding of a nickel-based superalloy[J]. **Surface & Coatings Technology**, 2014(258):1048-1059.
- [39] YANG Xi-chen, JIN Xiao-shu, YANG Nan. Numerical Simulation of the Concentration Field of Powder Stream in Coaxial Laser Cladding[C]//Proceedings of The Fifth International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing, 2007.
- [40] 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 and Laser Technology**, 2014(63):154-168.
- [41] LIU Hua-ming, QIN Xun-peng, HUANG Song, et al. Geometry Characteristics Prediction of Single Track Cladding Deposited by High Power Diode Laser Based on Genetic Algorithm and Neural Network[J]. **International Journal of Precision Engineering and manufacturing**, 2018, 19(7):1061-1070.
- [42] PARTES K. Analytical model of the catchment efficiency in high speed laser cladding[J]. **Surface & Coatings Technology**, 2009, 204(3):366-371.
- [43] NAZEMI N, JILL R, URBANIC R. A numerical investigation for alternative toolpath deposition solutions for surface cladding of stainless steel P420 powder on AISI 1018 steel substrate[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2018, 96(9-12):4123-4143.
- [44] MOHAMMAD M, THOMPSON S M, NIMA S. Laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V parts: Thermal modeling and mechanical implications[J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2017(118):73-90.
- [45] HOADLEY A F A, RAPPAZ M. A thermal model of laser cladding by powder injection[J]. **Metallurgical Transactions B**, 1992, 23(5):631-642.
- [46] HUSSAM EI C, BRUNO C, SAMUEL B, et al. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2011, 50(3):413-422.
- [47] PULIN N, OJO O A, ZHUGUO Z G. Modeling analysis of laser cladding of a nickel-based superalloy[J]. **Surface & Coatings Technology**, 2014(258):1048-1059.
- [48] HOFMAN J T, LANGE D F, PATHIRAJ B, et al. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2010, 211(2):187-196.
- [49] PALUMBO G, PINTO S, TRICARICO L. Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2004(155):1443-50.
- [50] JAE-DO K, PENG Y. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding[J]. **Journal of Materials Processing Tech**, 2000, 104(3):284-293.
- [51] YOUSUB L, NORDIN M, BABU S S, et al. Effect of Fluid Convection on Dendrite Arm Spacing in Laser Deposition[J]. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 2014, 45(4):1520-1529.
- [52] TRICARICO L. Finite Element Thermo Mechanical Analysis of the One-Step Laser Cladding Process[M]. DAAAM International Scientific Book, 2003(53):607-622.
- [53] HUANG Y L, LIANG G Y, SU J Y. A Comprehensive Model of Laser Cladding by Powder Feeding[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing Xi'an ICPNS'2004.
- [54] 贾文鹏,陈静,林鑫,等. 激光快速成形过程中粉末与熔池交互作用的数值模拟[J]. **金属学报**, 2007, 43(5):546-552.
- [55] 黄铭. 激光熔覆过程温度场数值模拟及其应用[D]. 广东:华南理工大学机械与汽车工程学院, 2013.
- [56] 张安峰,周志敏,李涤尘,等. 同轴送粉喷嘴气固两相流流场的数值模拟[J]. **西安交通大学学报**, 2008, 42(9):1169-1173.
- [57] HUANG Yan-Lu. Effects of Powder Feeding Rate on Interaction between Laser Beam and Powder Stream in Laser Cladding Process[J]. **Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science**, 2004(4):69-72.
- [58] KUMAR A, ROY S. Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding[J]. **Computational Materials Science**, 2009, 46(2):495-506.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

卢彩彬,李新梅,赵海洋. 激光熔覆的数值模型研究进展[J]. **机电工程**, 2020, 37(10):1151-1157.LU Cai-bin, LI Xin-mei, ZHAO Hai-yang. Research progress in numerical modeling of laser cladding[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020, 37(10):1151-1157.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>