

激光熔覆涂层裂纹形成机理及数值模拟研究现状

孙 戩^{1, 2, 3}, 朱 毅², 漆小虎¹, 赵小惠^{2, 3},
林 何^{2, 3}, 刘 晖^{2, 3}, 严 彦^{2, 3}, 成小乐^{2, 3}

(1. 二重(德阳)重型装备有限公司, 四川德阳 618000; 2. 西安工程大学机电工程学院, 陕西西安 710048;
3. 西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西西安 710048)

摘要: 激光熔覆涂层技术广泛应用于表面改性和修复领域, 但在制备和使用过程中涂层易出现裂纹, 对其性能和可靠性产生不良影响。因此, 研究激光熔覆涂层裂纹形成机理及有限元数值模拟具有重要意义。本文重点阐述了激光熔覆涂层裂纹形成机理以及激光熔覆涂层与裂纹扩展数值模拟的研究进展。通过深入理解裂纹形成机理, 优化涂层制备工艺, 以及利用有限元分析等数值模拟方法, 有助于提高激光熔覆涂层的性能和可靠性, 为相关研究和实际应用提供有力支持。

关键词: 激光熔覆; 裂纹; 数值模拟; 有限元

作者简介:

孙戩(1984-), 男, 副教授, 主要从事结构完整性评价、增材制造、工程中的有限元法等研究工作。E-mail: sunjian@xpu.edu.cn。

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

04-0418-10

基金项目:

国家自然科学基金青年科学基金项目(51805402); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目一般项目-面上项目(2022JM-362); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-QN-0154); 湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题项目(KDTL2023001; KDTL2023002)。

收稿日期:

2024-08-09 收到初稿,

2024-10-25 收到修订稿。

激光熔覆是一种通过激光束将表面材料熔化, 并在其上添加额外材料以生成一种新的、改进表面层的技术。这种技术常被用于提高材料的耐腐蚀性、耐磨性或热稳定性。激光熔覆技术自发展至今, 积累了丰富的相关研究经验和数据, 然而, 在实际工程应用中仍存在诸多问题, 因此该技术尚未得到广泛应用。其中, 熔覆涂层易产生裂纹是限制激光技术大规模应用的主要因素之一。

激光熔覆是一种快速加热与冷却的过程, 其典型特点是会产生内应力, 这些应力可能导致裂纹的形成。热应力由温度梯度引起, 并因基材与涂层之间热膨胀系数的不匹配而加剧。熔池的温度梯度导致结晶时共晶组织的方向不一致, 引起微观应力, 可能演变为微裂纹。这些裂纹在残余应力影响下可能扩张, 并在达到材料承受极限时导致熔覆层开裂。

在对基体材料熔覆涂层过程中, 当涂层用于高强度磨损环境时, 涂层材料硬度通常需要达到HRC55以上。大面积熔覆这种硬脆材料难以避免在熔覆过程中发生开裂, 使涂层与基体不得不带裂纹运行, 因而大规模熔覆必然会产生裂纹。当这种涂层应用在高温承压的实际工况下, 由于涂层与基体冶金结合, 裂纹具有向基体扩展的趋势, 此时危害基体的服役安全。当涂层中存在裂纹时, 在长期服役过程中腐蚀介质会通过裂纹对基体造成腐蚀^[1-2], 也包括裂纹向基体扩展破坏基体的完整性, 甚至在激光熔覆过程中裂纹就向基体扩展^[3]。可以预见, 当熔覆层表面出现裂纹时, 裂纹尖端的腐蚀会加速裂纹扩展, 进而对熔覆基体的安全构成巨大威胁。

涂层裂纹的形成涉及复杂的热应力和残余应力耦合作用, 以及涂层与基体的界面相互作用。热应力主要由激光熔覆过程的快速加热与冷却导致的温差和热应变不一致引起, 而残余应力是因涂层冷却收缩和基材限制而形成的。此外, 涂层的组织演化、晶粒生长和相变等因素也会对裂纹形成起到重要影响, 因此, 数值模拟成为研究裂纹形成机理和预测裂纹行为的关键工具。有限元数值模拟和相场模型等数值方法被广泛用于建立模型, 模拟涂层的热传导、应力分布及裂纹扩展过程。通过数值模拟, 可以定量分析裂纹形成的过程和机制, 预测裂纹的分布和扩展趋势, 为激

光熔覆工艺参数的优化和熔覆涂层裂纹生成机理提供依据。

1 激光熔覆涂层裂纹分类

由于残余应力、熔覆工艺等因素的影响,导致在激光熔覆涂层中产生不同类型的裂纹。通过将不同类型的裂纹从不同的方面进行分类,进而从不同裂纹类型各自的角度去考虑如何预防或减少这些裂纹的产生,提高激光熔覆涂层在使用过程中安全可靠,延长熔覆涂层及基体的使用寿命。

1.1 从裂纹产生部位分类

在激光熔覆涂层中,裂纹的形成位置可以划分为界面基体裂纹、熔覆层裂纹以及搭接区裂纹三种类型。其中,界面基体裂纹^[4]是这三种裂纹中最为普遍的一种,其主要形成机制与基体和熔覆层之间存在显著差异的热膨胀系数和杨氏模量有关^[5]。涂层凝固和冷却时,较大的温度梯度会产生热应力,此外,在激光熔覆过程中,熔融金属在热膨胀和冷却收缩时受到基材约束。在热应力和约束应力的共同作用下,熔覆层与

基体之间的界面发生开裂,并逐渐扩展到熔覆层表面^[6],形成界面基体裂纹。

熔覆层裂纹^[7]的产生是由于在激光熔覆融合区,如图1(b)的金属凝固过程中,熔化的金属液体快速冷却凝固而产生的热应力引起的裂纹。熔覆层材料混合不均匀或存在杂质而导致的应力分布不均匀也会导致熔覆层开裂^[8]。熔覆层裂纹可在表面或内部形成,可能扩展至基体,并常在深度上出现分层断裂。

搭接区裂纹^[9],如图1(c)所示,即发生在两条临近的熔覆涂层搭接结合部分与基体材料交接位置形成“三角区”,如图1(d)从而产生的裂纹,该类型裂纹的形成原因是由于熔覆搭接率的选择不合理而导致^[10]。不合理的搭接率使搭接区的热量积累,融合区的温度梯度增加,导致热应力的增大,延长了熔覆材料晶粒生长时间,使晶粒变得更粗,并形成气孔或杂质,这些产生的气孔和杂质在各种应力的作用下形成裂纹^[11]。由于熔覆材料的屈服强度和拉伸速率较低,使熔覆材料在复合应力作用下更容易开裂,因此,搭接区裂纹一旦形成,往往会扩展到整个熔覆层^[12]。

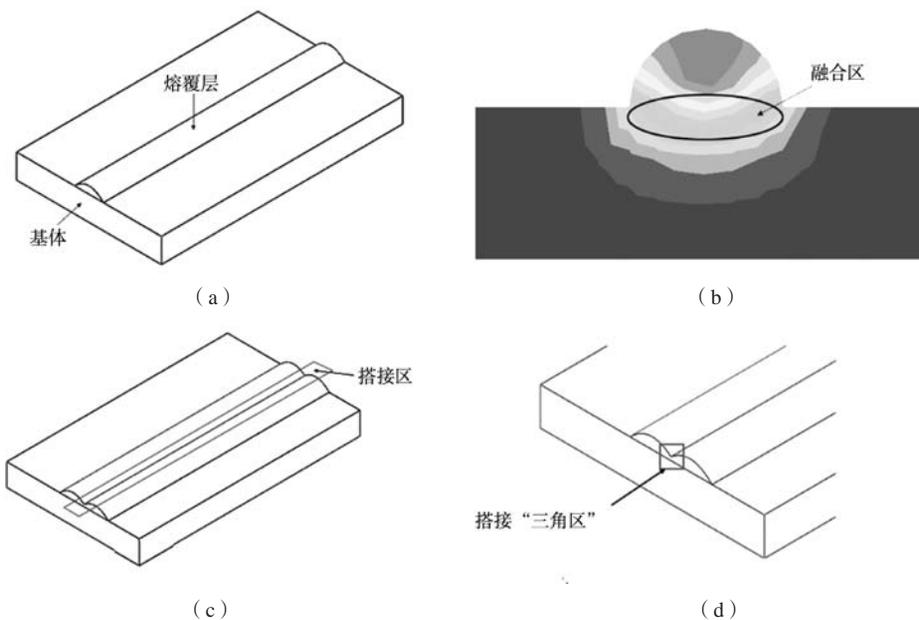


图1 激光熔覆涂层区域

Fig. 1 Laser cladding coating area

1.2 从裂纹形成理论分类

按裂纹成因分类,激光熔覆层裂纹分为冷裂纹^[13]和热裂纹^[14]。热裂纹在凝固或其后的的高温阶段形成;冷裂纹则在熔覆后低温或室温下出现。通常可通过高温退火^[15]减少冷裂纹的残余应力。因此,相关研究主要聚焦于热裂纹。

热裂纹主要发生在温度高于熔覆凝固温度时。热裂纹断面氧化色明显,无金属光泽^[16]。热裂纹由热应力产生,易受显微组织的影响,大多数熔体层中常见的裂纹类型,都是热裂纹。由于激光熔覆熔池中的液态金属具有非常高的温度,因此在低熔点的粗共晶组织处形成较大的拉应力,拉应力将凝固组织沿晶界部

分拉伸, 导致没有足够的液相填充组织间隙, 从而产生裂纹^[17], 因此热裂纹大多表现出沿晶粒方向的开裂特征^[18]。

冷裂纹主要发生在温度低于熔覆凝固温度时。冷裂纹断裂截面较为光滑, 具有金属光泽^[19], 如镍基合金粉末涂层通常会出现冷裂纹^[20]。冷裂纹通常包含二次裂纹的产生, 这是由于发生脆性断裂所导致, 熔覆工艺参数选择不当和熔池温度梯度过大是导致冷裂纹形成的主要因素。熔覆材料与基体材料热物性参数的差异, 加上冷却和凝固过程中导致残余热应力产生, 当这些残余热应力超过材料的抗拉强度极限时, 就会发生冷裂纹^[21]。因此, 冷裂纹通常表现出通过晶体结构发生的裂纹扩展^[22]。

1.3 从裂纹源进行分类

根据裂纹源的不同, 激光熔覆涂层裂纹可分为四种类型。随着熔覆面积和厚度的增加, 这些裂纹易发生扩展, 最终可能导致涂层失效或使用寿命降低^[23]。

第一种类型是热裂纹, 由熔覆层晶界和非金属氧化物夹渣的聚集形成^[24]。熔覆层中的晶界和夹渣会导致此类裂纹的形成。减少熔覆粉末中非金属成分可以降低该类型裂纹的生成。第二种类型是组织偏析引起的裂纹^[25]。这种裂纹源于组织偏析处。通过控制激光熔覆时熔覆粉末的均匀度, 如延长搅拌时间、减小粉末粒度等方法, 可以控制此类型裂纹的形成。第三种类型是由热应力引起的熔覆层裂纹^[26]。这种裂纹发生在熔覆层与基体结合区域, 如图1(b)。降低熔覆层中的热应力可以减少裂纹的形成。最后一种类型是由熔覆层中陶瓷相破碎导致的裂纹^[27]。这种裂纹源于破碎的陶瓷颗粒处, 选择适当的加工工艺可以减少对熔覆层中陶瓷相的破坏, 从而控制此类型裂纹的形成。

2 激光熔覆涂层裂纹生成机理

在充分了解不同裂纹类型的分类依据及其分类原则后, 通过对裂纹生成机理进行研究, 理解在激光熔覆涂层形成过程中, 各种应力如何影响熔覆涂层产生裂纹等缺陷, 对于如何减少、预防裂纹产生及优化激光熔覆工艺从而得到更优质的熔覆涂层有重要意义。裂纹在激光熔覆涂层中的生成主要受多种因素影响, 其中内部残余应力是关键因素之一。这些残余应力可被归类为热应力、组织应力和约束应力三种类型^[28]。正因为这些残余应力的影响导致在熔覆层中产生不同类型的裂纹, 因此, 如何调节激光熔覆涂层过程中的热应力、组织应力和约束应力, 最大限度地减少这些应力的单独或交互作用, 乃是研究的重要方向。

2.1 热应力引起的裂纹

热应力(图2)由基材与熔覆材料间弹性模量和热膨胀系数的差异引起, 造成它们在温度变化下的膨胀和收缩速度不同。这种差异造成了基体与熔覆层之间的应力, 即热应力^[29]。热应力容易导致材料开裂, 特别是当其超过材料的屈服极限时, 裂纹便会产生。熔覆层的热应力可通过以下公式^[30]计算:

$$\sigma_T = \frac{E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu} \quad (1)$$

式中: E 为熔覆层弹性模量, $\Delta\alpha$ 为熔覆层与基体热膨胀系数差, ΔT 为熔覆层与室温差值, ν 为泊松比, 由公式(1)可以看出, 熔覆层中热应力随熔覆层与基体热膨胀系数差的增大而增大。因此在实践中, 基体材料固定, 若与熔覆材料的热膨胀系数差值过大, 会导致热应力增大, 增加涂层开裂风险^[31]。

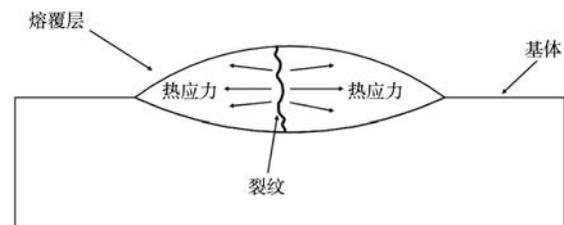


图2 熔覆层热应力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal stress in the cladding layer

2.2 组织应力引起的裂纹

组织应力(图3)源于熔覆粉在基体表面不均匀分布, 在激光扫描过程中引起偏聚或结构变化, 进而产生相变应力^[32]。整个激光熔覆过程包含熔覆材料与基材表面的熔化、液态转固态结晶以及熔覆层冷却凝固, 这些步骤导致的组织结构不均产生组织应力。在相变中, 由于相间及相内部在体积、弹性特性、热膨胀系数和温度场上的差异, 形成的组织应力可能引发裂纹^[33]。随着热循环的进行, 组织应力持续积累, 直到超过材料的屈服极限。这种应力的积累会导致组织损伤、微观缺陷的形成, 进而引发微裂纹的发生和扩展, 最终导致脆性断裂^[34]。

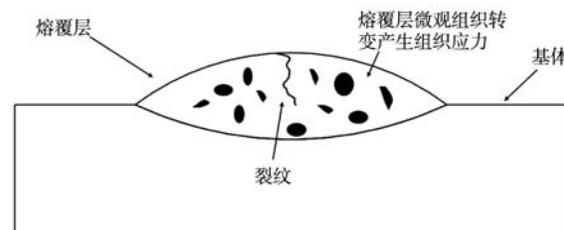


图3 熔覆层组织应力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microstructure and stress in the cladding layer

2.3 约束应力引起的裂纹

在激光熔覆过程中，熔覆层的熔液经过加热膨胀或冷却收缩时，未熔化部分产生的阻碍应力通常被称为约束应力^[35]（图4）。约束应力包含两类：第一类为激光快速加热导致的熔池及边缘金属膨胀，被附近未膨胀冷金属限制而产生压应力；第二类是熔池快速冷凝导致熔覆层收缩，而周边较大体积材料无法相应收缩，引发在冷却凝固熔覆层上的拉伸应力^[36]。

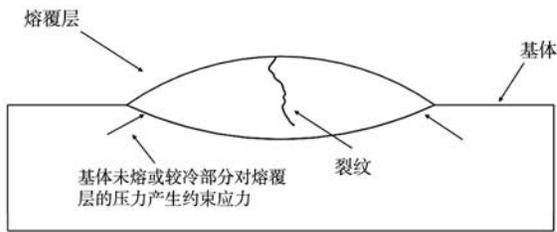


图4 熔覆层约束应力

Fig. 4 Constrained stress of cladding layer

约束应力主要来自基体的约束，因此熔覆层边缘处的约束应力相对较小，不易开裂。研究表明，在熔覆层的中间部分由于热积累和散热面积有限，导致该部位容易开裂，可通过适当的热处理工艺来帮助降低约束应力^[37]。在实际激光熔覆过程中，激光熔覆池的熔化和冷却行为非常复杂，约束应力很难完全消除。尤其是在熔池具有明显温度梯度或熔池与基体在热膨胀系数和弹性模量上有较大差异时，约束应力对熔覆层造成更严重的负面效果^[38]。

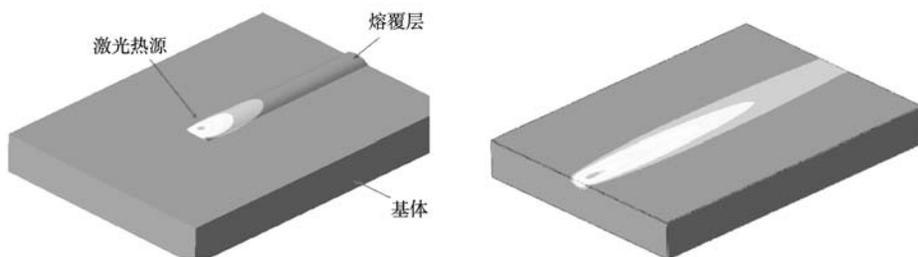


图5 激光熔覆温度场分布

Fig. 5 Temperature field distribution of laser cladding

激光熔覆工艺参数提供重要依据。

(1) 数值模拟热源对温度场的影响。激光熔覆的数值模拟主要基于数学热源模型，如表面高斯热源、旋转曲面高斯体热源和表面双椭球热源等（图6）。这些模型各具特点，可根据模拟需求选择。如GAO J等使用高斯热源模型预测了熔覆的温度场和几何结构^[39]；TSENG W C等探讨了激光波长和光束形状对熔覆的影响^[40]；PANT P等通过有限元法分析了熔池的传热行

3 激光熔覆涂层数值模拟分析

在充分了解激光熔覆涂层裂纹类型及形成机理后，如何预防、减少或消除裂纹成为重要研究课题。通过数值模拟深入研究激光熔覆涂层的熔覆过程、实际工况及裂纹的形成与扩展，已被证明是一种有效的方法。近年来，激光熔覆过程的数值模拟受到广泛关注，能够有效描述温度和应力分布及其变化，对熔覆过程的优化具有重要意义。通过数值模拟，研究人员能够全面理解熔池内的复杂现象，优化熔覆工艺，并通过温度、应力和流场的耦合行为提供可行解决方案。现有研究已分析了熔池流动、熔覆过程中温度和应力及流场、以及不同工艺参数对涂层开裂行为的影响。同时，基于数值模拟提出的裂纹预测模型，有助于激光熔覆涂层裂纹的检测与识别，从而有效预测和减缓裂纹的形成与扩展，推动了激光熔覆涂层裂纹探测技术的发展。

3.1 温度场数值模拟

激光熔覆是一个多场耦合的动态过程，其温度分布受激光功率、送粉速率、扫描速度和光斑直径等因素的影响。通过数值模拟软件如ANSYS、ABAQUS，可以便捷地研究不同工艺参数下的温度场分布（图5），这一过程对于理解熔覆层的宏观和微观结构及其物理冶金特性至关重要。熔覆效果及缺陷的生成受温度分布、温度梯度和熔池边缘冷却速率的显著影响。数值模拟中的温度变化能够准确反映熔覆过程，为理解熔覆层的生长趋势及裂纹生成提供指导，并为优化

为，显示出彗星状结构^[41]；HAO M等通过逆向建模验证了Ti6Al4V合金的熔覆模型^[42]；FALLAH V等展示了有限元模型在预测熔池尺寸演变中的应用^[43]；马立杰等研究了熔池形态与温度梯度^[44]；HOCINE S等比较了不同热源模型在熔池数值模拟中的表现，揭示了各模型的优势^[45]。通过这些研究，激光熔覆温度场的数值模拟不仅验证了模型构建的准确性，还分析了激光参数（如波长和光束形状）对熔覆过程的影响，及其对

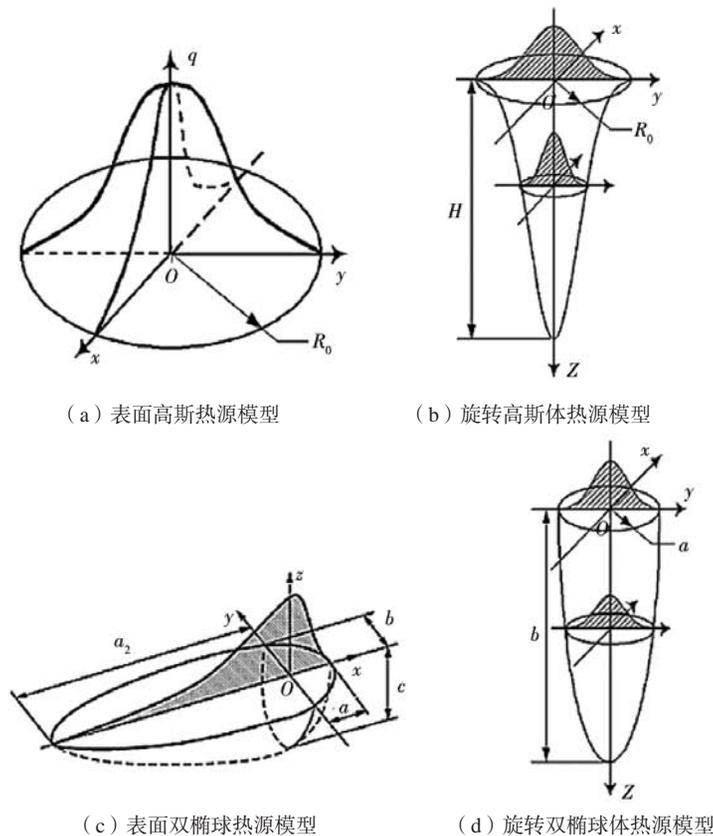


图6 激光热源模型

Fig. 6 Laser heat source models

熔池形态和内部传热行为的控制。特别是高斯热源模型在温度场和几何结构预测中的应用，展示了高精度数值模拟在工程中的重要性。研究还通过有限元法等技术揭示了熔池的传热机制，如彗星状结构，为理解和控制激光熔覆过程提供了理论依据。

除了外来激光热源，工件本身的熔化和凝固过程对温度场也有显著影响，尤其是潜热的释放和吸收。常用的潜热处理方法包括固定熔点法、温度区间法、显式相变模型和热弹塑性耦合模型。固定熔点法^[46]假设材料在熔化和凝固过程中温度保持在固定熔点，计算简单，但在处理非等温效应时精度有限。温度区间法^[47]通过引入熔化和凝固温度区间，并在该区间内采用温度依赖的显热处理潜热，适合模拟复杂的相变过程。显式相变模型^[48]通过跟踪固液界面变化，精确模拟熔化和凝固界面的演变，适用于相变的高精度数值模拟，但计算复杂度较高。热弹塑性耦合模型^[49]通过多物理场耦合，将潜热作为温度变化的一部分，结合热弹塑性模型来计算工件的变形和残余应力，提高了复杂温度场分布下数值模拟的准确性。

(2) 数值模拟工艺参数设置对温度场的影响。马俊峰等通过有限元法分析了激光功率对复合涂层温度场的影响，发现激光功率提升会导致熔池峰值温度、

深度和热影响区扩大^[50]。王志坚等使用ANSYS分析了TC4钛合金球形粉末的激光熔覆，结果表明激光功率对熔池热传递的影响大于扫描速率^[51]。刘旭波等构建了Q235钢表面激光熔覆的三维温度场模型，分析了熔覆层温度变化与成形质量^[52]。段伟等研究了激光功率和扫描速率对TC4钛合金熔池深度和宽度的影响，发现激光功率增大导致熔池深度增加，而扫描速率增大则减小熔池深度^[53]。王涛等通过数值模拟研究了IN718基体表面激光熔覆CoNiCrAlY的过程，获得了良好的熔覆层^[54]。LIU H M等分析了宽带激光熔覆过程中熔池温度场的变化，考量了激光功率和扫描速率对温度、温差、凝固和冷却速度的影响^[55]。王帅等对Ni-Cr-Fe-B合金的激光熔覆温度场进行了数值模拟，探讨了扫描速率和喷粉速率对熔覆层形态的影响，并验证了计算结果的准确性^[56]。以上研究表明，激光功率和扫描速率显著影响温度场、熔池形态及热影响区，进而影响熔覆层的成形质量和性能；提高激光功率会增大熔池峰值温度、深度及热影响区域，而增加扫描速率则降低熔池深度；这些发现为激光熔覆工艺的优化提供了有价值的参考。

(3) 数值模拟中的温度场变化。研究人员利用不同数值模拟软件深入研究了激光熔覆过程。龚丞等建

立了316L不锈钢的激光熔覆温度场模型,发现Z方向的温度梯度明显大于X和Y方向,突显了沿基板向下的传热速率^[57]。李美艳等通过SYSWELD模拟分析,指出在快速加热和冷却过程中,熔覆层中心点的温度峰值可达2 589 ℃,并逐渐向外降低^[58]。于天彪等采用ANSYS模拟钛合金激光熔覆修复,显示扫描方向前方的表面温度低于后方,且等温线密集,表现出显著的温度梯度^[59]。LEI Y W等采用建立的模型研究了Ti6Al4V合金表面激光熔覆TiC/NiCrBSiC复合涂层,验证了模型的准确性^[60]。田美玲等研究表明,在中空激光内同轴送粉熔覆过程中,随着熔覆层高度增加,温度显著变化,且与激光束距离基板和熔覆层表面的距离有关^[61]。这些研究通过数值模拟为激光熔覆过程的优化提供了重要指导,有助于预测和控制熔覆过程中温度变化,从而提高涂层质量和性能,减少裂纹和缺陷,增强耐磨性和耐腐蚀性。激光熔覆温度场的数值模拟能够真实反映热源类型、温度变化、传热速度和熔池动态,具有重要的指导意义。但仍存在需要深入研究的问题,如熔覆层模型形貌、激光热源完善、材料

参数完整性等,未来应继续探索非稳态温度场等问题。

3.2 应力场数值模拟

在激光熔覆过程中,温度场引起的应力场(图7)对熔覆层的微观结构和残余应力分布具有重要影响。这些应力可能导致气孔、微裂纹、变形和表面不均匀等缺陷,显著降低零件的稳定性、强度和使用寿命。熔覆层的不稳定性主要由快速热处理、基材与熔覆层之间的温度梯度及热膨胀系数差异引起。然而,目前精确测量和控制这些残余应力的技术仍面临挑战且成本较高。为改善激光熔覆中的问题,需进一步研究和开发新的技术以测量和控制残余应力,从而提高熔覆层的质量、性能和工件质量的稳定性。此外,通过优化工艺参数、改进材料选择和设计结构等手段,可减少残余应力的产生,并降低缺陷风险。数值模拟作为分析和预测应力场、裂纹、气孔和夹杂等缺陷的有力工具,在研究应力分布、预判熔覆层缺陷(如裂纹、气孔和层间结合问题)方面发挥着关键作用。

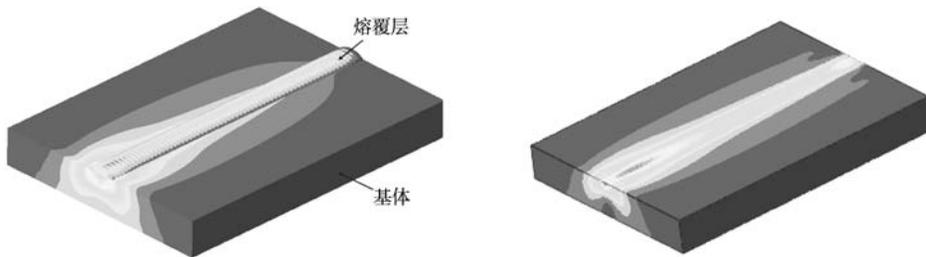


图7 激光熔覆应力场分布

Fig. 7 Stress field distribution in laser cladding

(1) 应力场下残余应力分布。李勇等通过构建单层多道激光熔覆三维有限元模型分析了纵向和横向残余应力的变化及其对翘曲变形和热应力随时间变化的影响^[62]。刘晓东等研究了Q345钢激光熔覆过程中的残余应力场,揭示熔覆层表面主要受拉应力影响,并探讨了这些应力与工件方位的关系^[63],为减轻残余应力,他们提出了双层交叉熔覆和分区熔覆方法。方金祥等建立了考虑马氏体相变的热力耦合数值模型,验证了通过固态相变调控降低残余应力的可行性^[64]。孙德平等使用ANSYS对Fe-Mn-Si记忆合金熔覆层内残余应力分布进行了计算,发现熔覆层横向为残余压应力,基体两侧呈残余压应力至拉应力变化^[65]。姚晨光等通过数值模拟分析了In718合金激光熔覆修复后的表面残余应力,发现单道和多道熔覆的数值模拟结果与X射线检测一致,揭示了应力分布模式^[66]。郝庆坤等对不同厚度基体的单道激光熔覆应力场进行了数值

模拟,结果显示基底厚度增加会提高涂层表面的拉应力,但当基底厚度达到8 mm时,对裂纹的敏感度开始减少^[67]。于天彪等研究发现,倾斜基体对熔覆层残余应力分布有影响,建议避免沿基体倾斜方向扫描,以减少应力分布不对称^[59]。上述研究深入分析了残余应力的变化规律、翘曲变形和热应力,探讨了影响残余应力分布的关键因素,如熔覆层厚度、基材方向、激光扫描速度及基材厚度等。研究提出了减轻残余应力的方法,包括分区熔覆、双层交叉熔覆及避免沿基体倾斜方向扫描,为减少激光熔覆过程中的残余应力提供了不同的研究思路。

(2) 数值模拟工艺参数设置对残余应力的影响。FARAHMAND P等开发了瞬态热力耦合模型,分析了激光熔覆单道和多道过程中的残余应力及热影响,发现较慢的扫描速度和较大的熔覆区域会导致更高的残余应力^[68]。该模型的数值模拟结果与AISI H13工具钢在

软钢基板上的实验数据相符。黄国顺等利用Simufact Welding软件研究了熔覆过程中的温度和应力场,发现激光功率影响涂层宽度,送粉量影响涂层高度,扫描速度与涂层高度成反比^[69],涂层的最大残余应力主要为拉应力,沿扫描方向分布,且基材的残余应力在涂层两侧呈对称分布。丁林等构建了Co基金属激光熔覆应力场的有限元分析模型,研究表明,降低扫描速度有助于减少熔覆层内的应力集中,从而提升涂层性能^[70]。开佳伟等计算了平面多道激光熔覆Mo2NiB2的残余应力分布,发现最大残余应力集中在熔覆层与基材结合处的边缘^[71]。龚丞等探讨了激光增材制造中熔覆涂层残余应力分布与加工参数的关系,发现熔覆层的残余应力在X方向与激光功率和送粉速率正相关,而在Y方向上与激光功率呈负相关^[57]。韩会等的研究表明,采用平行线式扫描路径可以减少涂层与基材结合部的残余应力和热影响区的变形,从而提高熔覆性能^[72]。

以上相关研究通过建立各种模型和实验验证,探讨了影响熔覆区域和残余应力的因素,例如扫描速度、激光功率、送粉量以及扫描路径。主要发现包括扫描速度的减慢会导致熔覆区增大和残余应力上升,激光功率和送粉量分别影响涂层的宽度和高度,而特定的扫描路径可以有效减少残余应力和热影响区的变形,从而提高熔覆层的质量。这些研究结果对于优化激光熔覆工艺,减轻残余应力,提升涂层性能具有重要意义。

(3) 应力场下熔覆层的裂纹预测。裂纹扩展和安全性评估一直是工程研究的挑战。采用激光熔覆技术能够实现涂层与基材的冶金结合,但在复杂的使用环境中,熔覆层内的裂纹可能扩展至基材,影响材料的安全性能。数值模拟作为一种高效解决方案,因其准确性和广泛适用性,已成为分析裂纹扩展的首选方法。随着计算机技术的进步,数值模拟在裂纹扩展研究中的作用日益凸显。目前,主流的数值模拟技术包括常规有限元法(FEM)、内聚力模型(CZM)、虚拟裂纹闭合技术(VCCT)和扩展有限元法(XFEM),这些方法已发展成解决裂纹问题的核心技术框架。

近年来,激光熔覆过程的数值模拟得到了广泛研究,重点分析熔池的流场、温度场、应力场,并探讨不同工艺参数下的开裂行为。研究人员提出了涂层裂纹预测模型,对检测和识别激光熔覆涂层的裂纹具有重要价值。例如,BRUCKNER F等研究了熔覆层开裂机理并预测了裂纹位置^[73];顾建强等发现熔覆层内的残余拉应力是开裂的主要原因^[74];姜秋月等通过动态数值模拟确定了裂纹高发区^[75];任忠等的数值模拟与试验一致,显示了应力集中现象^[76];刘衍聪等发现双

光束激光熔覆可以减小残余应力,抑制裂纹生成^[77];张天刚等和LI R等通过ANSYS数值模拟验证了模型准确性,指出应力集中增加了裂纹形成的易感性^[78-79];KRZYZANOWSKI M等的数值模拟预测结果与实验观察一致,较好地预测了裂纹生成位置^[80]。

考虑到激光熔覆过程的复杂性,现有的数值模型尚需完善,导致数值模拟结果可能与实际情况存在偏差。因此,优化激光熔覆应力场的数值模拟仍是必要的。包括深入研究激光热源的不同形式(如面热源、体热源及其组合热源)及其对应力场的影响,有助于使数值模型更加贴近实际操作,提高数值模拟的准确性和可靠性。

4 总结与展望

激光熔覆技术作为一种先进的表面强化手段,通过在基材表面熔化冶金结合额外材料,形成具备优异耐磨性、耐腐蚀性和热稳定性的涂层,在多个领域得到广泛应用。然而,裂纹的产生仍然是限制其性能和可靠性的关键问题。裂纹的形成受到多重因素影响,包括热应力、残余应力、温度梯度及材料相变等,因此深入研究裂纹形成机制并通过数值模拟优化制备工艺是提升涂层品质的重要手段。数值模拟技术在激光熔覆过程中起着至关重要的作用。通过有限元分析等方法,研究涂层形成及裂纹扩展行为,为工艺优化提供理论支持和实践指导。未来,随着技术进步,数值模拟的应用将更为广泛,帮助我们更深入地理解涂层熔覆过程中的裂纹行为并提升其预测能力。尽管如此,现阶段仍面临一些挑战。未来的研究可从以下几个方面着手:

(1) 激光熔覆涂层的裂纹形成涉及复杂的物理和化学因素。基材与熔覆材料的性能差异、熔覆层的微观结构等都会对裂纹产生影响。因此,需要通过试验和理论分析,深入探索裂纹形成的机理,为数值模拟提供更精确的参数支持。

(2) 现有的数值模拟技术仍需提高其在多尺度和多物理场耦合问题上的处理能力。未来的研究应结合试验验证,不断优化模拟模型,以更准确地预测裂纹行为。

(3) 通过深入研究熔覆涂层的断裂行为与裂纹扩展路径,优化涂层设计与制备工艺,以提升其性能与使用寿命。同时,随着新材料和新工艺的发展,激光熔覆技术将有更广阔的应用前景。未来的研究应注重绿色环保工艺的应用,推动技术向可持续发展方向迈进。

参考文献:

- [1] OKSA M, VARIS T, RUUSUVUORI K, et al. Performance testing of iron based thermally sprayed HVOF coatings in a biomass-fired fluidised bed boiler [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 251: 191–200.
- [2] LIU C, LIU Z, GAO Y, et al. Investigation on the corrosion behavior of Ni-Cr-Mo-W-xSi laser cladding coating in H₂S corrosion environment [J]. *Applied Surface Science*, 2022, 578: 152061.
- [3] YANG Z, HAO H, GAO Q, et al. Strengthening mechanism and high-temperature properties of H13+WC/Y₂O₃ laser-cladding coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126544.
- [4] 于承雪, 景财年, 李怀学, 等. 激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法 [J]. *航空制造技术*, 2012 (4): 75–79.
- [5] 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. 金属基体激光熔覆陶瓷基复合涂层的裂纹成因及控制方法 [J]. *材料导报*, 2013, 27 (11): 60–63.
- [6] ZHANG Z, ZHAO Y, CHEN Y, et al. The role of the pulsed-wave laser characteristics on restraining hot cracking in laser cladding non-weldable nickel-based superalloy [J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109346.
- [7] 徐家乐. 电磁超声复合能场辅助激光熔覆钴基合金涂层组织及性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [8] 魏金龙, 于爱兵, 施晨淳, 等. 工艺参数对激光熔覆裂纹缺陷的影响 [J]. *激光杂志*, 2016, 37 (4): 7–10.
- [9] 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2010, 29 (6): 12–27.
- [10] DESALE G R, PAUL C P, GANDHI B K, et al. Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel [J]. *Wear*, 2009, 266 (9–10): 975–987.
- [11] WANG K, LIU B, WANG Q, et al. Macrostructures and mechanical properties in laser melting deposited titanium alloy plate at different thickness positions [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 832: 142433.
- [12] WANG K, BAO R, LIU D, et al. Plastic anisotropy of laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 746: 276–289.
- [13] ZENITANI S, HAYAKAWA N, YAMAMOTO J, et al. Development of new low transformation temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12 (6): 516–522.
- [14] 姚成武, 徐滨士, 黄坚, 等. 铁基合金激光熔覆层裂纹控制的组织设计 [J]. *中国表面工程*, 2010, 23 (3): 74–79.
- [15] 黄祖凤, 张冲, 唐群华, 等. 退火对激光熔覆FeCoCrNiB高熵合金涂层组织结构与硬度的影响 [J]. *表面技术*, 2013, 42 (1): 9–13.
- [16] 陈静, 杨海鸥, 李延民, 等. 激光快速成形过程中熔覆层的两种开裂行为及其机理研究 [J]. *应用激光*, 2002, 22 (3): 300–304.
- [17] 张磊, 陈小明, 刘伟, 等. 激光熔覆Ni基合金裂纹的形成机理及敏感性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56 (11): 111401.
- [18] FU F, ZHANG Y, CHANG G, et al. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors [J]. *Optik*, 2016, 127 (1): 200–202.
- [19] 张俊华, 刘云韬, 贾谦, 等. 不同预热温度下马氏体钢焊接性及力学性能研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2023, 46 (4): 86–93.
- [20] 上官绪超, 赵运才, 徐颖, 等. 激光功率对WC颗粒增强铁基复合涂层摩擦学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2018, 43 (3): 56–61.
- [21] ZHANG N, LIU W, DENG D, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the pore distribution in laser cladding process [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 247–254.
- [22] ZHAI L L, BAN C Y, ZHANG J W. Investigation on laser cladding Ni-base coating assisted by electromagnetic field [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 114: 81–88.
- [23] 祝柏林, 胡木林, 陈俐, 等. 激光熔覆层开裂问题的研究现状 [J]. *金属热处理*, 2000 (7): 1–4.
- [24] 刘海青, 葛超, 王志文, 等. 激光熔覆复合涂层裂纹控制研究进展 [J]. *金属热处理*, 2018, 43 (8): 228–232.
- [25] 王冉, 王玉玲, 姜芙林, 等. 基体预热对激光熔覆制备Al₂O₃-ZrO₂陶瓷涂层裂纹敏感性的影响 [J]. *表面技术*, 2022, 51 (3): 342–352.
- [26] 曾维华. 不锈钢表面多道激光熔覆Ni基涂层的应力场分析及数值模拟 [D]. 昆明: 明理工大学, 2011.
- [27] 毛怀东. 激光熔覆层裂纹控制方法与实践 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [28] 钟敏霖, 刘文今. Stellite和NiCrSiB合金激光送粉熔覆裂纹倾向的比较研究 [J]. *中国激光*, 2002, 29 (11): 1031–1036.
- [29] 宋武林, 朱蓓蒂, 张杰, 等. 激光熔覆层热膨胀系数对其开裂敏感性的影响 [J]. *激光技术*, 1998 (1): 35–37.
- [30] 邹小斌, 尹登科, 谷建军. 关于激光熔覆裂纹问题的研究 [J]. *激光杂志*, 2010, 31 (5): 44–45.
- [31] 陈静, 林鑫, 王涛, 等. 316L不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2003, 32 (3): 183–186.
- [32] 邓德伟, 马云波, 孙奇, 等. 316L不锈钢激光熔覆层的应力状态研究 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51 (12): 80–84.
- [33] 周嘉利, 程延海, 陈永雄, 等. 激光熔覆工艺参数对铁基双层涂层组织和残余应力的影响 [J]. *中国机械工程*, 2022, 33 (12): 1418–1426.
- [34] 吴侯, 马朋召, 白文倩, 等. 不同扫描策略下316L/AISI304激光熔覆过程中温度场-应力场的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2021, 48 (22): 18–29.
- [35] 安相龙, 王玉玲, 姜芙林, 等. 搭接率对42CrMo激光熔覆层温度场和残余应力分布的影响 [J]. *中国激光*, 2021, 48 (10): 95–106.

- [36] 邓德伟, 常占东, 马云波, 等. 工艺参数对316L激光熔覆层组织性能及残余应力的影响 [J]. 应用激光, 2021, 41 (1): 83-88.
- [37] 侯锁霞, 任呈祥, 吴超, 等. 激光熔覆层裂纹的产生和抑制方法 [J]. 材料导报, 2021, 35 (S1): 352-356.
- [38] 魏金龙, 于爱兵, 施晨淳, 等. 工艺参数对激光熔覆裂纹缺陷的影响 [J]. 激光杂志, 2016, 37 (4): 7-10.
- [39] GAO J, WU C, HAO Y, et al. Numerical simulation and experimental investigation on three-dimensional modelling of single-track geometry and temperature evolution by laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106287.
- [40] 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 (4): 141-152.
- [41] PANT P, CHATTERJEE D. A multi-physics way to investigate some aspects of melt pool during laser sub-strate interaction in laser metal deposition process [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74 (11): 2843-2852.
- [42] HAO M, SUN Y. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 352-360.
- [43] FALLAH V, ALIMARDANI M, CORBIN S F, et al. Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition [J]. Computational Materials Science, 2011, 50 (7): 2124-2134.
- [44] 马立杰. AISI316激光熔覆成形过程数值模拟研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [45] HOCINE S, VAN SWYGENHOVEN H, VAN PETE-GEM S. Verification of selective laser melting heat source models with operando X-ray diffraction data [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101747.
- [46] REN N, XIA K, WANG H, et al. Transient thermal analysis for circular laser hole-cutting in stable stainless steel sheets using a novel rotational pulsed-laser heat source model [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107041.
- [47] XU Y, ZHANG X, SHEN J, et al. Temperature behavior of metal surface with moving annular hollow laser heat source [J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32 (4): 042014.
- [48] YANG C, HUANG H, LIU W, et al. Phase transitions: explicit dynamics of diffuse interface in phase-field model [J]. Advanced Theory and Simulations, 2021, 4 (1): 2170001.
- [49] JIANG H J, XU W L, GAO N H, et al. 3D thermoelastoplastic study of FML structure under the action of a moving Gaussian-distributed laser heat source [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 179: 109759.
- [50] 马俊峰, 王骏, 唐立平, 等. 钛合金表面激光熔覆碳化硼/钴基复合涂层的温度场模拟及试验研究 [J]. 应用激光, 2021, 41 (4): 732-737.
- [51] 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, 52 (10): 85-88.
- [52] 刘旭波, 揆顺森, 李学文, 等. 3D激光熔覆铁基合金温度场模拟及其试验 [J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38 (3): 439-444.
- [53] 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.
- [54] 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): 154-157.
- [55] LIU H M, LI M B, QIN X P, et al. Numerical simulation and experimental analysis of wide-beam laser cladding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100 (1): 237-249.
- [56] 王帅, 李川, 吴海涛, 等. 激光熔覆Ni-Cr-Fe-B合金涂层的熔池温度场模拟研究 [J]. 应用激光, 2015, 35 (3): 282-287.
- [57] 龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造316L不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究 [J]. 应用激光, 2018, 38 (3): 402-408.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] LEI Y W. Numerical simulation of temperature distribution and TiC growth kinetics for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings [J]. Opt. Laser Technol, 2012, 44: 1141-1147.
- [61] 田美玲, 石世宏, 傅戈雁, 等. 中空激光光内送粉熔覆技术的熔池流场与温度场模拟 [J]. 电加工与模具, 2013 (6): 62-66.
- [62] 李勇. 高频锻造对激光熔覆层应力场的影响 [D]. 衡阳: 南华大学, 2012.
- [63] 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.
- [64] 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): 1-8.
- [65] 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.
- [66] 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): 34-136.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 黄国顺, 金康宁, 陈平. 激光熔覆IN718合金温度场和应力场数值模拟 [J]. 润滑与密封, 2022, 47 (11): 75-81.
- [70] 丁林, 朱修传, 蒋红云. 激光熔覆Co基合金应力场的数值模拟 [J]. 陕西理工学院学报, 2013 (6): 16-24.
- [71] 开佳伟, 尹莉, 胡肇炜, 等. 激光熔覆Mo2NiB2熔覆层温度场与应力场仿真研究 [J]. 陶瓷学报, 2021, 42 (6): 1064-1071.

- [72] 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.
- [73] BRUCKNER F, LEPSKI D, BEYER E. Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16 (2): 245-260.
- [74] 顾建强. 激光熔覆残余应力场的数值模拟 [D]. 浙江: 浙江工业大学, 2010.
- [75] 姜秋月. 多道激光熔覆应力场的模拟分析 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (3): 124-139.
- [76] 任忠, 王东东, 白培康, 等. 金属粉末选区激光熔化单道扫描热应力场的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (15): 173-175.
- [77] 刘衍聪, 范常峰, 尹晓丽. 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, 35 (4): 288-293.
- [78] 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.
- [79] LI R, QIU Y, ZHENG Q, et al. Finite element simulation of temperature and stress field for laser clad nickel-based amorphous composite coatings [J]. Coatings, 2018, 8 (10): 1-12.
- [80] KRZYZANOWSKI M, BAJDA S, LIU Y, et al. 3D analysis of thermal and stress evolution during laser cladding of bioactive glass coatings [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 59: 404-417.

Research Status on the Mechanism and Numerical Simulation of Crack Formation in Laser Cladding Coatings

SUN Jian^{1,2,3}, ZHU Yi², QI Xiao-hu¹, ZHAO Xiao-hui^{2,3}, LIN He^{2,3}, LIU Hui^{2,3}, YAN Yan^{2,3}, CHENG Xiao-le^{2,3}

(1. China Erzhong Group(Deyang) Heavy Industries Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract:

Laser cladding coating technology is widely used in the fields of surface modification and repair, but the coating is prone to cracking during preparation and use, which negatively affects its performance and reliability. Therefore, studying the mechanism of crack formation in laser cladding coatings and finite element numerical simulation is of great significance. The paper focuses on the mechanisms of crack formation in laser cladding coatings and the research progress on the numerical simulation of laser cladding coating and crack propagation. By deeply understanding the crack formation mechanism, optimizing the coating preparation process, and using numerical simulation methods such as finite element analysis, it is possible to improve the performance and reliability of laser cladding coatings, providing strong support for related research and practical applications.

Key words:

laser cladding; cracks; numerical simulation; finite element analysis