

激光熔覆 Ni60AA 中熔覆层热应力和裂纹分布的数值和实验研究

张丹阳, 丁 鹏, 魏新龙, 柴 青

(扬州大学机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 为了深入研究激光熔覆应力场的演化过程, 本文建立了三维热力学模型。模型结合传热和固体力学耦合时材料热弹性效应, 计算了熔覆层的温度场和热应力分布。研究扫描速度对激光熔覆 Ni60AA 过程中熔覆层温度分布和应力演变的影响。在仿真计算中, 分析并比较了不同扫描速度下应力的演化和分布, 讨论了快速加热与冷却过程中温度场和应力场的联系。在实验中, 采用 X 射线衍射法进行残余应力测量, 并观察了熔覆层裂纹的分布。结果表明, 横向残余应力 (σ_x) 明显低于纵向的残余应力 (σ_y), 熔覆层中更容易产生横向裂纹。不同扫描速度下, 模型对应力分布的计算结果与实验结果呈现出相同的趋势。本研究可为模拟激光熔覆应力场和预测熔覆层裂纹分布提供新的方法。

关键词: 激光熔覆; 热传递; 应力场; 裂纹分布; 数值模型

中图分类号: TH142.2 **文献标志码:** A

1 引言

激光增材制造技术在工业领域已实现跨行业规模化工程应用, 其核心优势在于通过熔池冶金效应在异质基体表面构筑强化覆层, 赋予工件表面体系多维防护性能(耐磨/蚀/抗氧化), 显著提升关键零部件的服役周期并降低全寿命周期运维成本^[1-2]。相较于传统机加工工艺, 该技术具备更高的成形精度和三维复杂形貌控制能力, 可为机床核心运动副构件进行材料表面改性。机床导轨工作面经激光熔覆改性后, 界面结合强度得到提升, 精度衰减率降低, 设备综合使用效率提高。

激光熔覆是快速升温 and 降温条件下进行加工的复杂

过程^[3-4]。在熔覆过程中, 激光束的能量集中于激光照射区域从而导致温度场不均匀^[5]。温度场对熔覆层中的残余应力具有极其显著的影响。熔覆产生的残余应力会增加熔覆层的开裂趋势^[6]。部件中残余应力过大, 则有很大可能熔覆层表面出现裂纹, 从而影响熔覆层的微观组织和性能, 并大大降低熔覆件的质量。减少激光熔覆裂纹对机床的意义主要体现在综合性能、经济效益和长期发展三个层面。裂纹的产生不仅直接影响工件的质量(如强度、耐磨性下降), 还会因加工异常振动、熔渣飞溅等对机床结构造成隐性损伤, 加速精密部件磨损, 增加维护成本。同时, 频繁的返工或参数调整会降低加工效率, 削弱机床在连续生产中的稳定性。

Tian^[7]等研究了应力与固相变之间的关系,为了减少包层中残余应力的产生。他们建立了三维热力学数值计算模型。总结激光熔覆过程中 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金涂层的应力演化过程发现横向和纵向残余应力显著降低,该研究提供了一种模拟应力和应变分布的可行方法。为了降低残余应力并提高纳米压痕硬度, Fang^[8]等在 Stellite6 的涂层中添加 La₂O₃。他们发现添加的 La₂O₃ 可以细化晶粒并将部分枝晶转化为等轴晶体。La₂O₃ 的分散分布和晶粒细化使熔覆层的纳米压痕硬度得到改善并且显著降低了熔覆层的残余应力。Li^[9]等通过制备低膨胀包层合金,降低了球墨铸铁在激光熔覆过程中的残余应力。通过减小包层的收缩来减少残余应力和裂纹。最后,利用低膨胀系数复合材料 (NiCu/Fe-36Ni) 制备了无明显裂纹的熔覆层。Qi^[10]等系统分析了覆层裂纹和气孔的形成机理。他们发现,适当的磁场可以显著提高包层的性能并减少缺陷。基于磁致伸缩效应并通过适当调整磁化诱导激光熔覆的工艺参数,可以降低材料的热膨胀和热应力且减少裂纹。

现有的研究为提高熔覆层的性能和减少缺陷提供了许多方法。目前,仅通过优化工艺参数很难完全消除熔覆层中的裂纹。预处理、后处理和添加缓冲层也会在熔覆过程中产生大量的时间和金钱成本。消除裂纹的基础是系统地了解熔覆加工中裂纹的产生机理^[11-13]。Ghorashi^[14]等利用非线性运动学硬化行为,将循环塑性纳入分析并建立了热机械模型。Tamanna^[15]等研究了拉伸残余应力形成的关键因素。Yu^[16]等对直接激光熔覆的工艺参数和性能测试进行了研究。Rong^[17]等提出了一种结合热力学固相变的残余应力有限元模型,研究了固相相变对材料性能和应变的影响,然后根据温度梯度计算残余应力。

尽管已经对降低熔覆层的残余应力进行了许多研究,但熔覆层中的裂纹无法完全消除。由于激光熔覆过程中温度和应力分布的瞬态变化,通过实验方法全面监测应力演变是不可行的^[18]。因此,本文通过建立激光熔覆的三维热力学模型,分析激光熔覆过程中快速加热和冷却引起的温度应力,来模拟并比较激光熔覆过程中不同位置的应力变化,研究不同扫描速度下的温度和应力分布,建立应力场与裂纹产生的关系。该模型可为裂纹分布的预测奠定基础。

2 方法与实验

通过对激光熔覆的物理过程分析和数学模型的构建,阐述激光熔覆工艺过程中材料相态变化机理,为激光熔覆过程的温度传递规则构建提供理论基础。在温度场模型基础上,结合弹-塑性分析理论,对激光熔覆应力场进行模拟分析。

激光熔覆加工中的热量传递主要涉及两种相态界面(气体-熔融态/固态)的能量吸收过程,同时伴随着对流换热与辐射散热效应。在材料内部区域,热量的扩散主要表现为遵循傅立叶定律的导热机理,其能量输运特征由材料的导热系数梯度决定。在激光热源照射到材料表面时,材料吸收能量转化为内能,此时该部分边界元胞存在外部热源,且存在对流换热与热辐射。因此根据能量守恒定律激光热源条件下的能量边界条件为^[19]

$$q_s = \frac{2P\eta a^2}{\pi r^2} \exp\left(-2\frac{i^2 + j^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

$$q_s = q_{\text{conv}} - q_r = c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, q_s 为空间位置为 (i, j) 处边界元胞激光功率, P 为激光输出功率, a 为元胞尺寸, η 为材料的激光吸收率, r 为激光光斑半径, c 代表比热容, ρ 代表密度。

数值模拟以激光辐照边界作为温度场演化的初始条件,在热源加载前设定基底材料具有与环境平衡的初始温度分布,待热流边界激活后通过介质导热实现能量输运。

在激光熔覆过程中,加热和冷却不均匀及相变不均匀引起的热应力会在成型零件中产生残余应力。残余应力会降低成型零件的疲劳强度和韧性,并导致包层开裂^[12]。采用顺序耦合数值策略进行激光熔覆热力学耦合仿真时,通过分步式跨场数据传递机制,将热力学计算获得的热历史数据映射为结构力学求解的边界激励条件,从而构建起热-力多物理场耦合的数值体系。应力场对温度场的影响很小,间接耦合分析可以获得理想的仿真结果。在加工过程中基体与熔覆层受热不均匀,产生较大温差,又由于材料热膨胀系数不同在其中形成热应力公式可以表示为^[20]

$$\sigma_T = \frac{E_c E_s \delta_c (\alpha_c - \alpha_s) \Delta T}{(1 - \mu)(E_s \delta_s + E_c \delta_c)} \quad (3)$$

式中, σ_T 为所产生的热残余应力, E_c 、 E_s 表示熔覆层和基体的弹性模量, α_c 、 α_s 表示熔覆层和基体的热膨胀系数, ΔT 为涂层与室温之间的温度差, δ_c 、 δ_s 为熔覆层和基体

的厚度, μ 表示泊松比。

熔池区域中的金属在激光熔覆过程中处于液态。在何种状态下, 材料将进入零应力状态, 其应力和应变将消失。在构建热-力耦合本构模型时, 针对材料相变过程实施热软化效应的数值表征: 当温度达到固液相变阈值时, 通过对屈服强度与弹性模量进行调控, 使熔池区在热力耦合计算中呈现类液态应力松弛效应, 从而准确反映熔融金属的准流变力学响应特征^[21]。

为验证模型计算结果的准确性, 对 Ni60AA 粉末进行实验。粉末粒度范围在 45~105 μm 之间。激光熔覆实

验设备是激光加工中心, 最大功率为 3 000W, 激光器的波长为 985nm, 光束半径为 1mm。选择 316L 不锈钢板作为基底。激光功率 P 为 1 300 W, 送粉速率 F 为 1.0 r/min, 以不同的扫描速度 (300mm/min、600mm/min) 进行熔覆实验。然后, 使用 X 射线衍射法测量熔覆层的残余应力。

3 结果与讨论

空间分布温度场如图 1 所示, 其中图 1b、1c 是激光移动到 0 点时不同扫描速度下的应力分布。

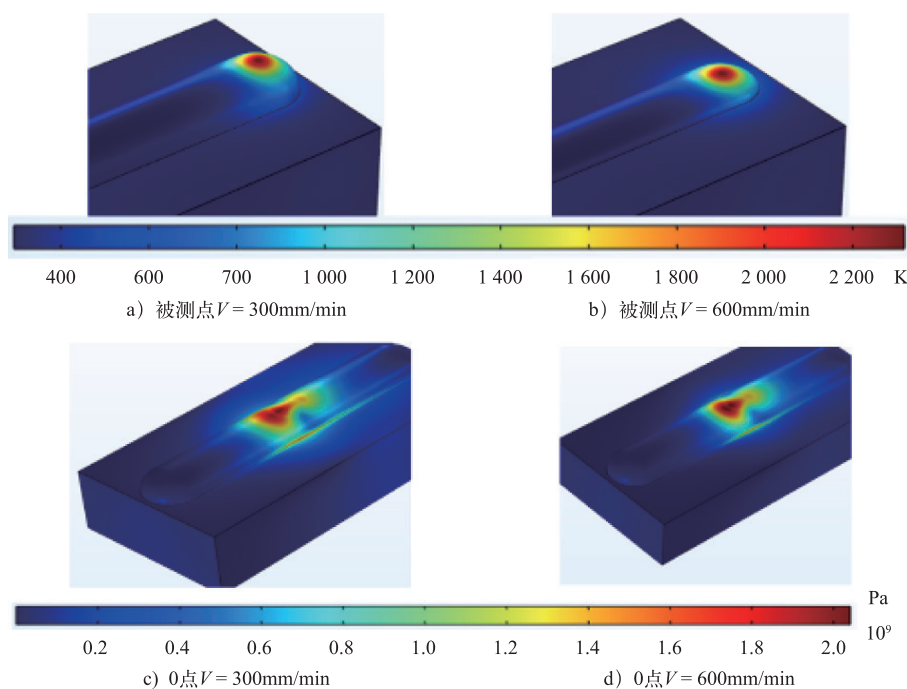


图 1 空间分布温度场

更快的扫描速度缩短了激光加热时间并减少了材料吸收的热量。扫描速度越高, 被测点的最高温度越低。随着激光扫描速度变快, 激光束接近被测点的速度也变快。因此, 在高速和低吸热的情况下, 被测点的温升仍然非常快。从图 1 可以看出, 在高速低吸热和低速高吸热条件下, 被测点的温度变化相似。

在激光加热过程中, 热量不断输入, 这使得熔覆层膨胀。基板的温升比包层慢, 膨胀速度也慢。包层的膨胀受到基体的阻碍, 导致包层中的压应力。如图 1 所示, 基体上表面的温升比基体底面的温升快, 基体的上表面也受到压应力的影响。从包层中心到基体两侧, σ_x 和 σ_y (X 和 Y 方向的应力) 都从压应力变为拉伸应力。在包层

与基体之间的接触边界处, 由于应力集中, 会产生较大的压应力。从图 1c 和 d 可以看出, 包层区域的压应力随着扫描速度的增加而增大。这个结果是因为较低的扫描速度引起的包层的温度变化缓慢地更快。

激光照射到 0 点时, 熔覆层表面在 X 轴上的温度分布如图 2 所示, 可以发现, 激光束照射的区域温度较高, 最高温度点出现在激光光斑的中心。熔池前面的温度变化更剧烈, 而熔池后面的温度变化缓慢。前一个加热区域对后一个加热区域具有预热作用, 导致热在熔池后面积聚。因此, 熔池前的温度梯度较大, 熔池后的温度梯度较小。

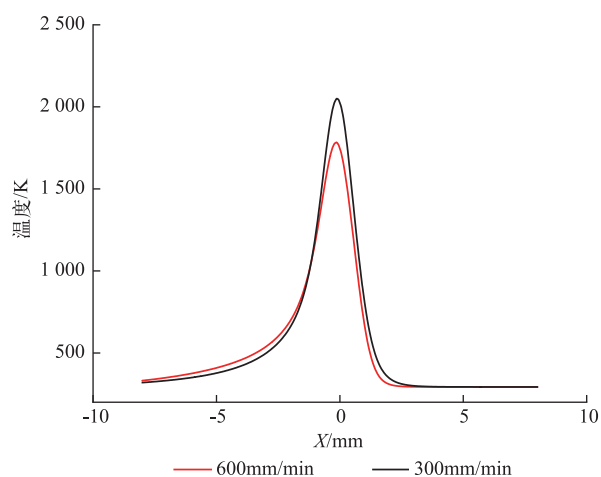


图2 激光照射到0点时,熔覆层表面在X轴上的温度分布

激光加热时,热量不断输入,使得熔覆层受热膨胀。基底升温比熔覆层慢,膨胀速度也较慢。熔覆层膨胀受到基底的阻碍,在熔覆层中产生压应力。基底上表面升温比基底底面快,基底上表面也受到压应力的作用。从

熔覆中心到基底两侧, σ_x 和 σ_y 都由压应力向拉应力转变。熔覆过程中与熔覆结束的应力分布如图3所示。从图3a、3c可以看出,熔覆区域的压应力随着扫描速度的增大而增大。这个结果是因为较低的扫描速度引起的熔覆层的温度变化略快。在熔覆层和基底的接触边界处,由于应力集中的原因,产生了较大的压应力。

在冷却时,熔覆层体积较小冷却快,体积收缩较大,基底体积较大冷却慢,体积收缩较小。由于熔覆层的收缩受到基底的阻碍,熔覆层由压应力状态向拉应力状态转变。基底上表面与熔覆层接触,冷却速度比下表面慢。因此,基底上表面的应力状态也由压应力向拉应力转变也受到拉应力的作用,如图3b和3d。在熔覆层和基底的接触边界处,由于应力集中的原因,产生了较大的拉应力。

高温状态下,熔融金属发生塑性变形,固态熔覆层受热膨胀(弹性变形、开裂),弹性变形冷却后恢复。由于熔覆层相对基底尺寸较小,冷却速度快,体积收缩

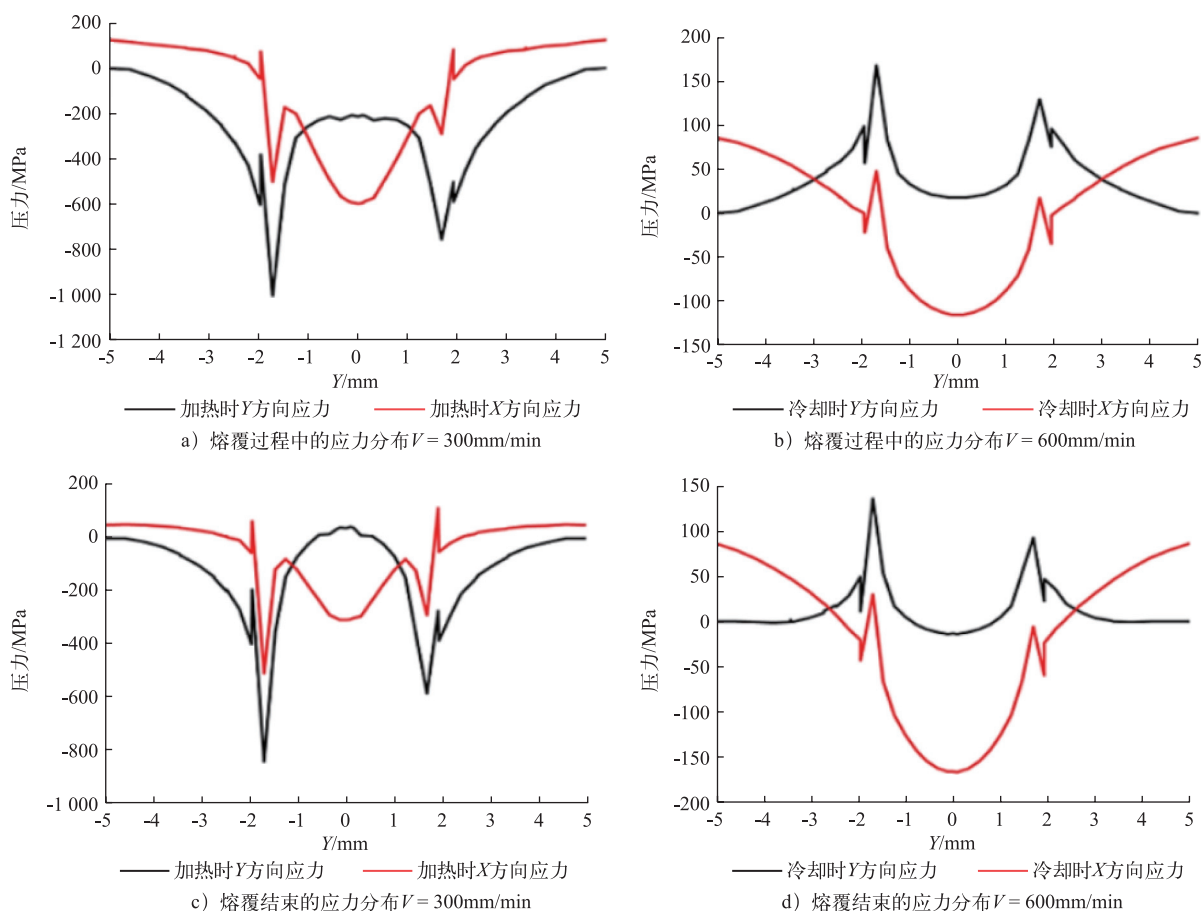


图3 熔覆过程中与结束的应力分布曲线图

的就比基底快。熔覆层受到基底的拉应力。当拉应力大到超过熔覆层的屈服极限时，熔覆层发生开裂。

不同扫描速度下 Ni60AA 样件表面残余应力分布如图 4 所示，Ni60AA 熔覆层的残余应力 σ_x 一般大于 σ_y 。模型中，激光束的扫描方向沿 X 方向。基板表面 X 方向产生的热量大于 Y 方向产生的热量。因此， X 方向的温度梯度较大。裂纹具有沿着扫描方向横向产生和传播的倾向^[20]。将扫描方向的应力 (σ_x) 与 X 射线测量的应力进行比较，发现模型计算的应力值 (σ_x) 是比较准确的。

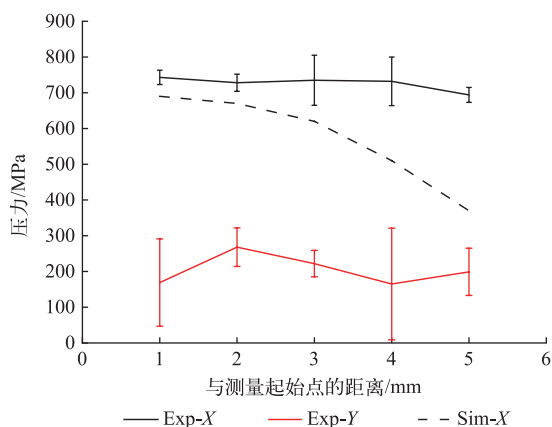


图 4 不同扫描速度下 Ni60AA 样件表面残余应力分布
($V=300\text{mm/min}$, $V=600\text{mm/min}$)

4 结论

本文通过对激光熔覆物理过程的分析 and 数学模型的构建，建立了激光熔覆的温度传递规律。模拟并比较激光熔覆过程中不同位置的应力变化。实验结果表明，沿扫描方向对基体的拉应力较大，横向残余应力较小。与 X 射线测量的应力相比，模型计算的应力值 (σ_x) 相对准确。该激光熔覆裂纹预测模型能够在制造的前期阶段就对可能出现的裂纹问题进行预判。通过构建熔池多物理场耦合模型可精准解析覆层中残余应力分布特征及微裂纹萌生扩展机理，为优化机床导轨与主轴等核心部件的抗疲劳制造工艺提供理论支撑。减少裂纹能推动机床工艺智能化升级，拓展其在高端材料加工领域的应用场景，从而提升市场竞争力。此外，稳定的无裂纹加工还能降低材料与能源浪费，减少安全隐患，符合制造业绿色化、高可靠性的发展趋势，最终为机床制造商和用户创造更大的技术价值与经济回报。

参考文献

- [1] 熊立贵, 蔡昭华, 冯青, 等. 新一代激光技术产业在智能制造中的价值与前景研究 [J]. 智能制造, 2024, 31 (5): 95-98.
- [2] 王佐, 杜平, 朱丽君, 等. 基于 Magics 的镂空点阵结构设计案例研究 [J]. 智能制造, 2021, 28 (6): 74-77.
- [3] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018 (92): 112-224.
- [4] ZHUANG D D, DU B, ZHANG S H, et al. Effect and action mechanism of ultrasonic assistance on microstructure and mechanical performance of laser cladding 316L stainless steel coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2022 (433): 128122.
- [5] TAO Y F, LI J, LV Y H, et al. Effect of heat treatment on residual stress and wear behaviors of the TiNi/Ti2Ni based laser cladding composite coatings[J]. Optics & Laser Technology, 2017 (97): 379-389.
- [6] RONG Y M, XU J J, LEI T, et al. Magnetism aided mitigation of deformation and residual stress in dissimilar joint 316L with EH36[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018 (259): 23-32.
- [7] TIAN J Y, XU P, LIU Q B. Effects of stress-induced solid phase transformations on residual stress in laser cladding a Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy coating[J]. Materials and Design, 2020 (193): 108824.
- [8] FANG Y, CUI X, CAI Z, et al. Influence of La_2O_3 addition on nano indentation hardness and residual stress of Stellite6 coating prepared by plasma cladding[J]. Journal of Rare Earths, 2018 (36): 873-878.
- [9] LI Y, DONG S, YAN S, et al. Deep pit repairing of nodular cast iron by laser cladding NiCu/Fe-36Ni low-expansion composite alloy[J]. Materials Characterization, 2019 (151): 273-279.
- [10] QI K, YANG Y, SUN R, et al. Effect of magnetic field on crack control of Co-based alloy laser cladding[J]. Optics and Laser Technology, 2021 (141): 107129.
- [11] ROY T, PARADOWSKA A, ABRAHAMS R, et al. Residual stress in laser clad heavy-haul rails

- investigated by neutron diffraction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019 (278) : 116511.
- [12] SILVIA B, GERALD W, THOMAS A, et al. Residual stress and microstructure evolution in steel tubes for different cooling conditions - Simulation and verification[J]. Materials Science & Engineering, 2019 (747) : 73-79.
- [13] LOURENCO J M, SUN S D, SHARP K, et al. Fatigue and fracture behavior of laser clad repair of AerMet 100 ultra-high strength steel[J]. International Journal of Fatigue, 2016 (85) : 18-30.
- [14] GHORASHI M S, FARRAHI G H, MOVAHHEDY M R. Considering cyclic plasticity to predict residual stresses in laser cladding of Inconel 718 multi bead samples[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019 (42) : 149-158.
- [15] TAMANNA N, CROUCH R, KABIR I R, et al. An analytical model to predict and minimize the residual stress of laser cladding process[J]. Applied Physics A, 2018 (124) : 202.
- [16] YU T B, ZHAO Y, SUN J, et al. Process parameters optimization and mechanical properties of forming parts by direct laser fabrication of YCF101 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018 (262) : 75-84.
- [17] RONG Y M, LEI T, XU J J, et al. Residual stress modelling in laser welding marine steel EH36 considering a thermodynamics-based solid phase transformation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018 (146-147) : 180-190.
- [18] ZHU L D, XUE P S, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review [J]. Optics and Laser Technology, 2021 (138) : 106915.
- [19] CHAI Q, FANG C, HU J Y, et al. Huang, Cellular automaton model for the simulation of laser cladding profile of metal alloys[J]. Materials and Design, 2020 (195) : 109003.
- [20] YU T, DENG Q L, ZHANG W, et al. Crack formation mechanism of laser cladding NiCrBSi alloy coating[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46 (7) : 1043-1048.
- [21] HUANG H, TSHUTSUMI S, WANG J D, et al. High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301 L stainless sheets[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2017 (135) : 1-10.
- [22] NAZEMI N, URBANIC J, ALAM M. Hardness and residual stress modeling of powder injection laser cladding of P420 coating on AISI 1018 substrate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017 (93) : 3485-3503.

收稿日期: 2025-02-28