

激光熔覆过程组织转变及性能预测研究综述

程一凡, 李峰光, 郭睿, 廖露海, 顿亚鹏, 刘建永, 杨伟

湖北汽车工业学院材料科学与工程学院 湖北十堰 442002

摘要: 激光熔覆技术具有稀释率低、熔覆组织致密、涂层与基体结合性好、适合熔覆的材料多等特点。然而, 激光熔覆技术的工艺参数决定着熔覆层的力学性能及组织结构, 但很多工艺参数之间相互影响、相互制约, 很难精确控制。激光熔覆实验研究周期长、考虑因素单一, 只能从最终结果考虑热源参数对熔覆层的影响而无法对熔覆过程中材料的相变过程进行定量化表征。采用数值模拟软件可以对熔覆过程进行仿真分析, 探讨熔覆过程的组织转变规律。近几年, 采用机器学习、人工神经网络等智能化手段与工艺优化相结合来对熔覆结果进行预测逐渐兴起。归纳了目前国内外针对激光熔覆过程中的温度场、应力场等方面的数值模拟研究及所采用的有限元软件, 概括目前对于激光熔覆性能预测的研究现状, 并提出了目前存在的问题和有待解决的问题。(本文工作得到湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(批准号: D20221801)与汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室(湖北汽车工业学院)项目(批准号: ZDK12023B06支持)

关键词: 激光熔覆; 数值模拟; 性能预测; 参数优化

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.11.003

激光熔覆技术是一种先进的金属材料表面改性技术, 通过使用高能量密度的激光束作为热源, 结合惰性气体保护, 并按照预设的扫描路径, 将激光束照射到同步送出或已经预先涂覆在基体表面的材料上面(主要是粉末材料), 实现熔覆材料和基体表层的高速熔化和迅速凝固, 最终形成具有冶金结合特性的功能性涂层^[1]。20世纪80年代以来, 激光熔覆技术得到了国内外的广泛重视, 并在众多工业领域中获得应用, 其中, 许多国家已将激光熔覆技术应用在汽车工业领域当中并取得重要成果, 以提高汽车零件的工作性

能, 减少材料的使用成本。

但在实际应用中, 仍存在许多实际问题无法解决。激光熔覆技术的工艺参数决定着熔覆层的力学性能及组织结构, 工艺参数之间相互影响、相互制约, 很难精确控制^[2]。在激光熔覆实验过程中难以实时地对熔池形状、熔池及熔覆层温度分布、冷却率等进行测量, 因而常规的实验方法难以对激光熔覆过程中的组织转变过程、熔覆层性能等进行定量化表征, 因此激光熔覆技术目前仍存在工艺参数选择困难、熔覆后材料组织及性能难以预测的问题。

目前随着有限元软件的快速发展,利用数值仿真技术可以准确的监测熔覆过程中的温度场、应力场和流场分布,并且有效地预测熔覆层的裂纹、气孔、夹杂以及层间的粘结力^[3]。通过实验验证进一步研究激光熔覆技术的最佳方案,优化工艺参数,提高激光熔覆的组织与性能。此外,众多科研人员采用数值分析及神经网络的方法,实现了对激光熔覆结果的性能预测,对探明激光熔覆过程中激光热源各项参数对熔覆过程转变及熔覆层性能的影响规律,对激光热源参数的合理选择,有效节省前期试验及参数选择的成本,对促进激光熔覆技术的进步具有重要意义。

激光熔覆过程组织转变数值模拟研究现状

目前随着各大有限元软件的发展,众多研究者采用数值模拟的方法对激光熔覆过程展开研究,激光熔覆过程是快速熔化和快速凝固的过程,在熔化和凝固时主要有温度场、应力场、流场等物理场。其中温度场和应力场是众多研究者最重视的地方,通过对温度场和应力场结果的分析,能够较为准确模拟实验结果,对实验过程具有重要的指导意义。通过数值模拟技术得到精度更好的激光熔覆各项参数。下面将通过不同的有限元软件在激光熔覆上的实际应用,分析激光熔覆数值模拟技术的发展现状。

1.ANSYS应用现状

ANSYS是目前应用广泛的有限元软件之一。Parisa Farahmand等^[4]利用ANSYS建立了一种非线性瞬态热模

型,通过改变预热温度预测对熔覆过程温度场和组织转变的影响。不同预热温度下熔池的实际熔池与模拟熔池温度场的对比如图1^[5]所示,从温度分布中提取熔池形状和尺寸,并在实验结束后,对熔覆轨迹高度、热影响区高度及稀释度进行了熔池质量分析。

ANSYS提供丰富的材料模型和热传导模型,能够准确地模拟材料的热传导行为,具有强大的后处理功能,支持多物理场的耦合分析,可以同时考虑激光热源、熔池流动以及固态相变等多个因素,但是ANSYS也存在一些缺点,复杂的用户界面和操作流程,需要一定的培训才能熟练使用,对于激光熔覆过程中的液态金属流动,需要通过耦合其他软件来实现。

2.Marc应用现状

Marc在激光熔覆数值模拟具有广泛的应用。海渊^[5]采用Marc分析激光熔覆Ni基WC涂层开裂的组织结构和力学因素,对激光熔覆涂层温度场和应力场进行模拟,计算分析熔覆过程中温度场的热循环作用,以及对熔池尺寸、冷却速度的变化规律,分析熔覆后残余应力分布特征,分析残余应力对涂层裂纹的影响,垂直扫描路径上的应力分布状态如图2^[6]所示。

Marc具有专业的焊接模块,针对焊接过程中的各种复杂现象进行了专门的优化和设计,使得焊接仿真结果更加准确可靠,并且Marc提供了开放式的用户环境,极大的扩展了Marc的分析能力,对于激光熔覆仿真中特定的分析和优化需求非常有用。但是Marc相较于其他有限元软件,建模能力较弱,增加了激光熔覆仿真过程中的建模复杂性和难度。

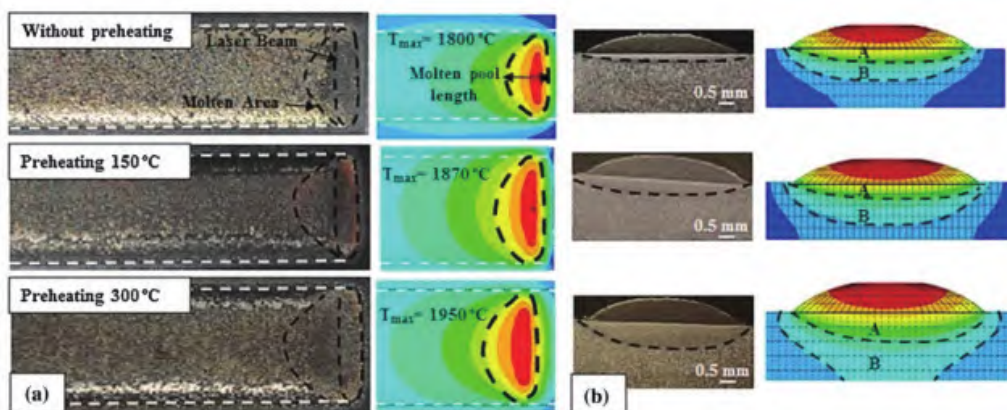


图1 实际熔池及模拟熔池温度场对比图

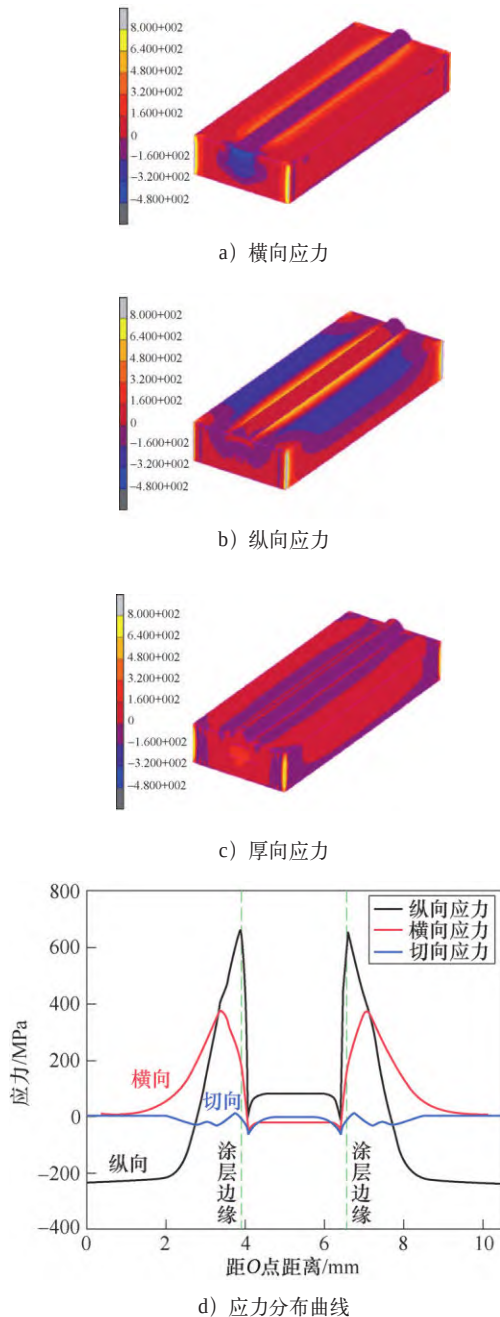


图2 垂直扫描路径上的应力分布状态

3. Simufact welding应用现状

Simufact welding是以MSC Marc为基础研发出来的仿真模拟软件，专门用于材料加工及热处理工艺仿真的软件。黄国顺等^[6]基于实验所得工艺参数，利用Simufact welding建立热力耦合模型，通过数值模拟分析熔覆过程中的温度场和应力场分布，分析发现熔池出现“彗尾”现象，激光热源前端的温度梯度大，热源后端的温度梯度小，远离涂层的基板温度变化较

小，基板上的最大残余应力为沿扫描方向的拉应力，对称分布在涂层两侧涂层与基板结合处，基板上表面垂直于扫描方向的拉应力是引起基板变形的主要原因，模拟受拉应力影响下的激光熔覆变形云图如图3^[7]所示。

Simufact welding能够准确模拟激光熔覆过程中的温度场、应力场等关键物理场，从而提供可靠的仿真结果，还可以越策不同工艺参数对激光熔覆结果的影响，帮助用户优化工艺参数，提高熔覆质量。但是Simufact welding的用户界面对于某些用户来说不够直观友好，这可能会增加用户在使用过程中的操作难度和错误率。

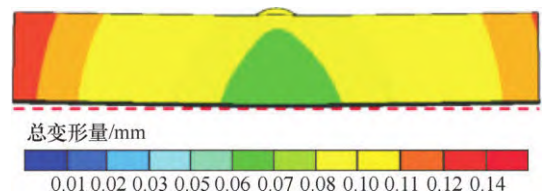
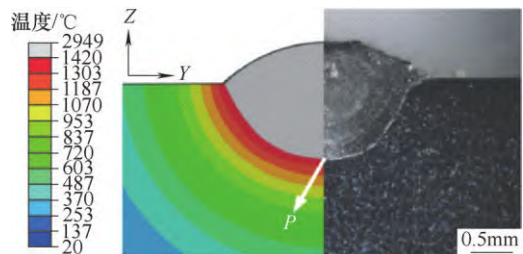


图3 激光熔覆常温下变形云图

4. ABAQUS应用现状

吴昊等^[7]利用ABAQUS软件建立复合热源模型，对单向扫描和往复扫描两种扫描策略下多层多道熔覆的温度场、应力场进行模拟，如图4所示，模拟熔池形态与试验熔池形态的对比图，左侧为模拟的熔池温度场，灰色部分为熔池，其与右侧试验熔覆层的截面形状吻合得较好，验证了热源模型的可靠性。

ABAQUS允许对多个工艺参数进行分析和比较，有助于分析个参数在不同条件下的影响及综合效果，且建立的模型准确率相对较高，合理可靠。


图4 模拟与实验熔池的对比^[8]

近些年来，各种有限元软件的发展，模型不断改进、完善，模拟的结果越来越接近真实结果，在实际生产试验之间进行计算机模拟，能够很大程度地帮助

优化工艺参数和减少前期试错成本，节约时间、财力和人力的投入，因此计算机模拟在激光熔覆中应用的越来越广泛。结合以上几种有限元软件在激光熔覆方面数值模拟仿真的结果来看，各软件都对使用者设立了学习门槛，需要有一定的工程背景和相关知识，并且均存在仿真计算时间较长的问题。目前众多研究者已不满足数值模拟仿真，他们希望对熔覆结果进行预测，帮助更好的优化工艺参数的选择。

激光熔覆层性能预测研究现状

目前，国内外学者针对激光熔覆技术中的熔覆层调控性，已经形成了较为成熟的理论方法,有部分学者提出，可以在实验的基础上通过数学方法建立工艺参数与熔覆层形貌性能之间的关系模型，对熔覆层形貌和性能进行预测以快速确定工艺参数；在机器学习、人工神经网络等智能化手段与工艺优化相结合上也做出了很多成功的尝试。

回归分析作为一种常见的数据处理方法，从数学理论上分析待考查因素对熔覆层性能的影响。M. Ansari等^[8]基于镍基高温合金上的 NiCrAlY 粉末同轴激光熔覆实验数据，利用回归分析和经验统计模型预测了激光熔覆主要加工参数与熔覆层几何特征之间的关系，并通过相关系数验证了模型的有效性。

神经网络具有强大的多元、非线性信息并行处理能力，在复杂非线性系统的工程建模中得到了广泛应用，尤其是利用神经网络建立输入参数与输出参数之间的关系模型，从而优化工艺参数。温海骏等^[9]采用神经网络和遗传算法，对激光熔覆工艺参数进行多目标优化，BP神经网络预测值与实际值之间的对比如图5所示，由表1可以看出，最终试验值与预测值误差不超过3%，说明预测模型达到了较高的网格识别度。

综上所述，对于熔覆结果的预测，目前大多数研究者采用神经网络方法进行预测，回归分析法的误差相对较高，适合精度要求较低的场合进行预测，可以直观地获得各工艺参数与熔覆层之间的关系。虽然神经网络可以高精确性的进行激光熔覆结果预测，但是神经网络对于数据的需求量大，需要大量样本参数进行训练，并且参数的质量对预测结果的准确性有很大影响。每种方法都存在自身的优缺点，根据不同材料、不同方式的激光熔覆选择何种方法进行分析还需

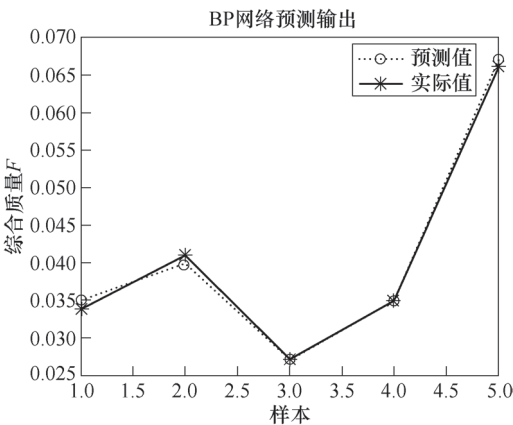


图5 BP神经网络预测值与实际值对比^[10]

表1 BP神经网络预测值与实际值误差^[10]

样本	激光功率 /kW	送粉量 / (g/min)	扫描速度 / (mm/s)	综合质量F的预测值	综合质量F的实际值	相对误差 (%)
1	3.5	60	6	0.035	0.034	2.86
2	3.5	40	4	0.040	0.041	2.50
3	3.0	50	6	0.027	0.027	0
4	4.0	50	5	0.035	0.035	0
5	4.0	50	4	0.067	0.066	1.49

进一步的分析。

结语

当前激光熔覆技术作为一种先进的金属材料表面改性技术，在金属材料领域应用广泛。数值模拟和性能预测均是为了探明激光熔覆过程中激光热源参数对熔覆过程转变及熔覆层性能的影响规律，指导对激光热源参数的合理选择和精确预测激光熔覆效果，对促进激光熔覆技术的进步具有重要意义，但是目前还存在以下几点问题。

1) 目前的研究对于激光熔覆工艺参数的选择和熔覆层组织转变过程的定量化表征仍存在较大困难，在探明激光热源参数对熔覆过程组织转变规律的研究方
(下转第45页)

6. 经验总结

项目结束，需要对项目进行经验总结，并分享到其他产品和工艺中。该项目总结结论是需要对成车考核数据进行日常监控，根据过程工艺质量，当稳定性时，进行预警，对在线测量系统参数修正。该经验可以应用于在线所有车型。

结语

本文深入探讨了Deltalyze1方法在有效解决产线前大灯高度超差问题中的创新应用，系统而详尽地剖析了该方法从启动至实施的每一个关键环节，以及其中所运用的核心工具与技术手段的具体操作方式与成效展现。Deltalyze1方法以其敏捷的反应机制、科学的分

析逻辑和高效的问题解决能力脱颖而出，其有效性已在一系列广泛而深入的实践案例中得到了充分验证。

此方法不仅为制造类企业提供了一套行之有效的问题解决范式，更是在提升生产精度、优化工艺流程、增强质量控制能力等方面展现出了非凡的潜力与价值。它不仅是技术进步的体现，更是企业转型升级、迈向智能制造的重要助力，对推动整个制造行业的持续健康发展具有深远的指导意义。技术难点主要来自Cubing的技术要求、基准要求、安装方法和检测方法等，由于前期数模的设计和链接结构设计均在德国完成，在组装前就需要依据数模推演和分析，从而制定合理的组装方案。**AUTO1950**

（上接第38页）

面仍需要较大进步。

2) 多数激光熔覆研究采用的均是平板基体作为实验基板或模型，实际工业加工中出现的并非全是平面基板，对于非平面基体激光熔覆成形的实验研究与数值模拟需要进行进一步的研究。

3) 激光熔覆数值模拟大多针对温度场和应力场仿真，针对流体仿真的较少。

4) 激光熔覆过程涉及的因素众多，模型预测的结果与实际实验结果还有一定的偏差，并且对于激光熔覆结果的预测多为形貌尺寸，对于力学性能的预测较少。

参考文献：

- [1] 陈冠秀，安立周，王硕，等. 激光熔覆技术的研究概况及其发展趋势[J].2022, 35 (5) : 15-18, 41.
- [2] 赵宇擎，赵作福，潘忠旭，等. H13钢表面激光熔覆的研究现状[J].2023, 43 (1) : 11-14.
- [3] 顾建强. 激光熔覆残余应力场的数值模拟[D]. 浙江工业大学, 2010.

- [4] Parisa Farahmand, Radovan Kovacevic. Laser cladding assisted with an induction heater (LCAIH) of Ni-60%WC coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 244-258.
- [5] 海渊. 激光熔覆Ni基WC涂层裂纹形成机理研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [6] 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, 147.
- [7] 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.
- [8] Ansari M, Razavi R S, Barekat M. An empirical-statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 86: 136-144.
- [9] 温海骏，孟小玲，许向川，等. 基于神经网络和遗传算法的激光熔覆工艺参数多目标优化[J].2019, 39 (5) : 734-740.**AUTO1950**