

引文格式:徐连波,周金龙,贵永亮,等. 激光熔覆涂层微观组织形成的数值模拟研究进展[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(2): 39-50.

XU Lianbo, ZHOU Jinlong, GUI Yongliang, et al. Research progress on numerical simulation of microstructure formation of laser cladding coatings[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 39-50.

激光熔覆涂层微观组织形成的数值模拟研究进展

徐连波, 周金龙, 贵永亮, 龙海洋, 马占山

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063000)

[摘 要] 激光熔覆技术在提高材料的高温耐受性、抗腐蚀性和耐磨性, 以及实现材料的再利用方面, 表现出明显优势。然而, 熔池内部瞬态演化过程的实验观测存在困难, 制约了对微观组织形成过程的深入理解, 数值模拟技术在该领域展现出明显优势。热物理参数(如温度梯度与冷却速率)对晶粒的几何特征(尺寸、形貌)具有调控效应, 而熔池内流体动力学行为通过影响溶质再分布及枝晶择优生长取向, 进一步塑造微观组织形貌。此外, 熔池的非平衡凝固过程诱发晶粒结构的竞争性演化, 其形态演变、尺寸分布及晶体取向直接关联涂层力学性能与功能特性的各向异性。特别地, 枝晶生长前沿的拓扑形貌演变不仅决定材料微观结构特征(如位错密度、相界面特性), 更通过跨尺度效应影响宏观服役性能。本文综述了数值模拟中多尺度的计算模型, 揭示了激光熔覆过程中熔池凝固动力学行为, 重点解析了热质传输耦合作用, 晶粒拓扑结构演变、溶质场非平衡分配及枝晶形貌等核心问题, 提出未来该领域的研究应关注多物理场精细耦合模型、微观组织与宏观性能间的耦合及多元合金体系建模, 逐步迈向高分辨率、多维度和数据驱动的数字模拟, 为高性能涂层材料的开发与工艺控制提供支撑。

[关键词] 激光熔覆; 熔池凝固; 微观组织; 数值模拟; 温度场; 晶体生长; 枝晶形貌

[中图分类号] TG174.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0039-12

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.005

0 引言

激光熔覆技术因其具有稀释度小、组织致密、涂层与基体结合强度高等特点, 在材料表面改性、修复与再制造、精密激光加工技术及复杂结构部件制造等领域具有显著优越性和广泛应用前景。熔覆过程中, 熔池内的微观组织演变对涂层的力学性能起着重要作用。

然而, 激光熔覆作为一种瞬态极端热加工工艺, 熔池内部常伴随多物理场的强耦合作用, 包括热传导、流体动力学行为以及质量传输过程, 使微

观组织的演化机制更加复杂且难以捕捉。在熔池动态过程研究方面, 传统实验手段主要包括基于 CCD 的高速成像技术^[1,2]、红外热成像系统^[3,4]及粒子图像测速法(PIV)^[5]等。这些方法可在一定程度上实现对熔池表面温度分布、流动行为及形貌变化的观测, 但受限于空间分辨率和时间响应能力, 难以准确解析熔池内部三维结构及其快速动态演化规律, 从而限制了其在微观尺度凝固行为研究中的应用。近年来, X 射线原位成像技术为高分辨、非接触式观测金属熔体凝固行为提供了全新手段。该技术利用高能 X 射线束穿透金属材料, 由探测器实时捕捉成像信号, 具备微米级空间分辨率与毫秒级时间分辨率, 能够完整记录合金凝固过程中枝晶形貌演化、柱状晶择优生长、柱-等轴晶转变(CET)及等轴晶形核等典型过程^[6]。例如, Khail 等^[7]成功捕获了 Al-Cu 合金定向凝固过程中的柱-等轴晶转变过程, Xu 等^[8]则通过该技术揭示了 Al-7Si 合金凝固

[收稿日期] 2025-11-10 [修订日期] 2025-12-14

[录用日期] 2025-12-17 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 徐连波(1990—), 河北唐山人, 硕士, 讲师。

[通信作者] 贵永亮(1979—), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为炼铁工艺与技术、冶金固废利用与环保、金属构件修复与再制造等。

[基金项目] 中央引导地方科技发展资金项目(246Z1019G)。

初期的形核机制。相关研究表明,该技术在定向凝固和合金凝固动力学研究中具有重要应用价值^[9,10]。然而,X射线成像的实验条件通常需在较低冷却速率和低温梯度环境下实现,尚难满足激光熔覆所特有的快速凝固与强对流耦合的极端加工条件。因此,现有实验手段在捕捉熔池瞬态演变特征及揭示微观组织形成机制方面仍存在显著局限,成为限制熔覆组织调控精度与性能优化的关键瓶颈。在此背景下,数值模拟技术发挥关键作用,特别是在仿真熔池内微观组织的动态演变方面,如晶粒结构的演变、溶质的扩散、枝晶形貌的变化以及温度梯度和流体流动等,为突破实验观测局限提供了理论支撑,并为预测和分析工艺参数对熔覆层微观结构的影响提供了有效手段。

1 熔池温度场与流场的数值模拟

在激光熔覆过程中,熔池内的温度场和流场直接影响微观组织的形成与演变^[11]。温度梯度和冷却速率等热条件决定了晶粒的尺寸和形貌,而熔池内的流体流动行为则影响溶质分布和枝晶生长方向。因此,准确模拟熔池内的温度场和流场对于微观组织预测与组织调控至关重要。Lee等^[12]通过流体体积函数(Volume of Fluid, VOF)方法^[13-16]对熔覆过程中的物质传输现象进行了数值模拟。其构建的模型能够有效预测熔池内的温度分布与流速场,并揭示了熔池自由表面形貌的动态演变特征,尤其在重熔过程中展现出显著的瞬态行为。研究指出,熔池的半球形自由表面及其与前层凸起形貌的耦合作用,会增强流体动力学效应,进而推动熔池底部由平坦向凸起结构的转变。进一步研究中,Song等^[17]同样采用VOF方法探讨熔池形貌演化机制,揭示了在熔池膨胀阶段,液态金属沿侧壁向底部区域流动的规律;而在收缩阶段,流体运动方向发生反转,表现为从底部向表层的逆向迁移。这种周期性体积变化引发的流体脉动效应被认为与熔覆层中孔隙类缺陷的形成密切相关。

尽管VOF方法在界面追踪方面具有一定优势,但仍存在一些固有限制。例如,非结构网格划分导致求解过程复杂性提升,且低阶差分格式易引发数值震荡^[18]。此外,该方法通常假设恒定表面张力,未能充分考虑Marangoni效应等关键物理机制^[19]。为克服上述不足,Wirth等^[20]引入任意拉格朗日欧拉

(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法^[21-25]构建了三维有限元模型。该方法允许网格随界面形貌自适应变形,更贴近实际熔池形貌特征。所建立的模型综合考虑了传热、流动、表面张力及自由表面演化等多种物理机制(图1),模拟结果在热输入参数预测方面与实验数据高度一致,展现出良好的精度与稳定性。此外,Jie等^[26]也采用ALE动网格方法构建了稳定的数值模型,模拟了对流流体行为与气-液界面处的表面张力平衡。针对三种截面构型,模拟所得热梯度方向与EBSD分析得到的晶体取向高度吻合,预测偏差均控制在10%以内,进一步验证了模型的可靠性。值得注意的是,ALE方法虽然具有较高的计算效率,尤其在无需构建空气域模型的情况下优势显著,但在处理动态拓扑结构变化方面仍存在不足,导致如汽化诱发的熔池飞溅现象难以有效捕捉^[27]。

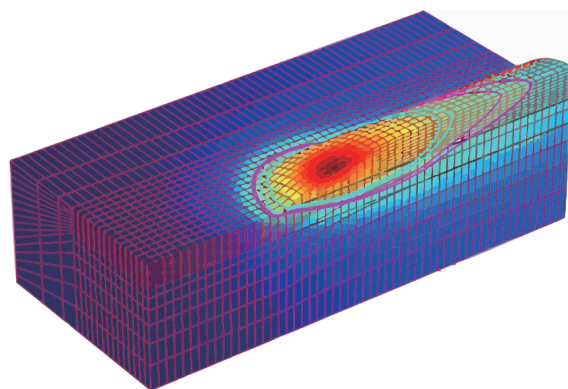


图1 ALE模拟计算结果^[20]

Fig. 1 Simulation calculation results of ALE^[20]

在界面追踪方法方面,Xu团队^[28]采用Level-set方法^[29,30]研究熔池内的溶质扩散行为(图2)。该方法通过求解隐式界面函数实现自由界面形貌的动态捕捉,具备较强的表面曲率演化能力,尤其适用于微纳尺度界面问题的数值模拟。在层流条件下,Level-set方法对表面张力效应的处理表现出良好的物理一致性和数值稳定性。

此外,齐欢等^[31]开发了三维多物理场耦合模型,系统模拟了共基体合金在激光直接沉积过程中的热行为、流动特征、凝固动力学及多组分溶质传输机制。通过热场分析获得了凝固组织的温度梯度与生长速率,从而实现了微观组织形态与尺寸的预测与调控。戴东华等^[32-34]则构建了耦合辐射传递

与热扩散的优化三维物理模型,用于分析不同激光功率与扫描速度条件下的温度场分布、W颗粒在熔池中的受力状况及熔池内流场的动态演化。Liu等^[35]采用“生死单元”技术^[36,37]建立了三维瞬态数值模型,重点分析了温度梯度分布、冷却速率及凝固

速率的动态演变(图3)。该研究揭示了激光功率密度与扫描速度之间的耦合关系对熔池瞬态热行为的影响,进一步阐明了工艺参数对凝固条件(如晶粒尺寸与生长方向)及相组成分布的调控机制,为优化激光熔覆组织性能提供了理论依据。

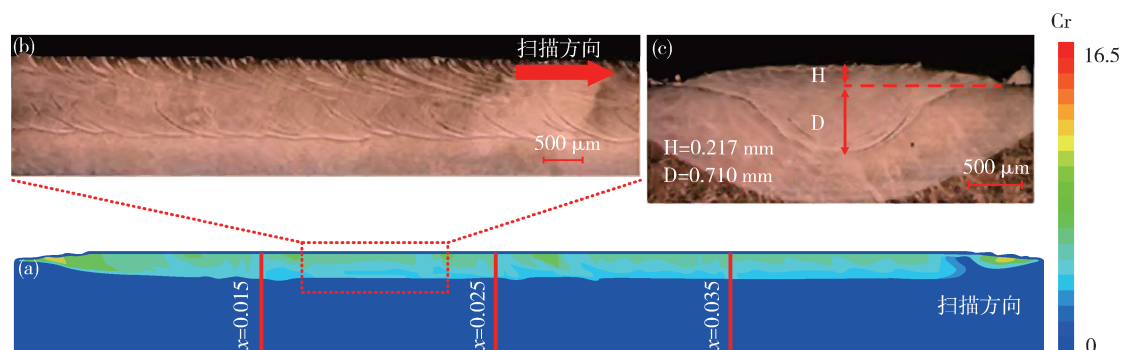


图2 Level-set模型计算熔池元素扩散^[28]

Fig. 2 Numerical simulation of element diffusion in weld pool using the level set method^[28]

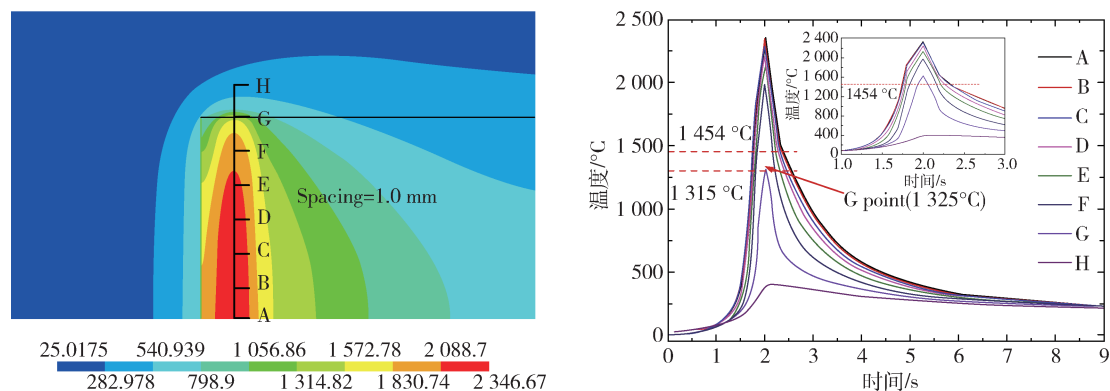


图3 矩形光斑熔覆层温度^[35]

Fig. 3 Temperature of rectangular laser spot clad layer^[35]

表1对VOF方法、ALE方法以及Level-set方法的优缺点、适用场景及关键特性进行了系统对比,为激光熔覆模拟中数值模型的合理选择提供了理论依据与方法指导。若研究重点在于熔池大尺度几何变化(如塌陷、涌动等现象),推荐使用VOF法以保持质量守恒与形貌稳定性;若需耦合热流场并精确追踪界面(如局部熔池凝固界面位置),则ALE法是较为理想的选择;而当模拟对象聚焦于微观界面行为(如枝晶形貌、溶质再分布、界面形核机制等),Level-set法凭借其灵活的界面处理能力,更适合用于细节尺度的高精度模拟。

2 晶粒形成和长大过程模拟

在激光熔覆过程中,熔池的快速凝固使得晶粒

结构发生复杂的演变,其形态、尺寸及取向对最终涂层的性能具有重要影响。为深入理解这一过程,已有大量研究采用数值模拟方法探索晶粒的形成与生长机制。

在晶粒形成与长大的模拟方面,Wei等^[38,39]基于CFD框架下构建了热-流场耦合模型,利用获得的热历史数据驱动蒙特卡洛(MC)模型,模拟微观组织的演化过程,并进一步分析了工艺参数与晶粒尺寸之间的相关性。在后续研究中,Wei等^[40]还探讨了多层激光熔覆中反复加热与冷却效应对Inconel718合金非均匀晶粒生长的影响,重点分析了局部温度梯度、凝固生长速率、沉积几何形态以及熔池形状与尺寸等关键因素的作用。Theron M^[41]在模拟晶粒生长过程中进一步考虑了熔池形貌、外

表1 3种常用热流耦合模型数值方法的优缺点和适用场景

Table 1 Comparative analysis of three mainstream numerical methods for thermal-fluid coupled models - strengths, weaknesses, and recommended application scenarios

方法	优点	缺点	适用场景与特点
VOF	①可处理大变形界面(如熔池膨胀、收缩);②保守体积分数,适合模拟多相流动;③适配现有CFD软件(如ANSYS Fluent)较方便	①接口扩散问题较严重,界面不够清晰;②对于表面张力和Marangoni效应捕捉能力较弱;③非结构网格下计算复杂度较高	①多相流动;②熔池界面大尺度演化;③强对流主导的熔覆过程
ALE	①网格随界面运动自适应变形,提高模拟精度;②界面追踪清晰,适合复杂自由表面模拟;③不需构建空气域,计算效率较高	①网格拓扑变化处理能力弱;②难以模拟飞溅、破碎等剧烈拓扑变化现象;③实现复杂编程和数值稳定性要求高	①稳态或准稳态界面;②追踪光滑界面变化;③精确控制网格质量
Level-set	①界面表示为隐式函数,数学处理简洁;②易于处理界面拓扑变化,如合并与断裂;③曲率与法向量计算方便,适合表面张力主导过程	①不保守体积,存在质量损失问题;②需频繁重初始化界面函数,增加计算开销;③对流控制难度较大	①微细界面变化;②层流、表面张力主导;③精确分析枝晶、元素扩散过程

部温度梯度以及扫描策略等多重因素,从而提升了模拟的精确度。Sunny等^[42]则在KMC框架下开展了大尺度模拟,预测激光熔覆IN625合金熔池凝固过程中晶粒结构的演化规律,有效捕捉了组织演变的随机特性,尤其对熔池(MP)和热影响区(HAZ)的尺寸与演变过程进行了动态追踪。

蒙特卡洛法^[43-45]是一种基于随机采样机制和概率统计理论构建的数值方法,通常假设具有不同属性的质点间存在界面能差异(例如异质晶粒或固液相界面),其界面迁移行为遵循最小界面能原理。已有研究表明,该方法在晶粒拓扑演化模拟中具有良好的数值稳定性与收敛性^[46,47]。然而,该方法存在两方面的局限:一是未能建立枝晶尖端的生长动力学方程,影响其定量预测能力;二是微观组织演化的物理机制阐释不够明确,限制了模型的物理可解释性与预测精度。

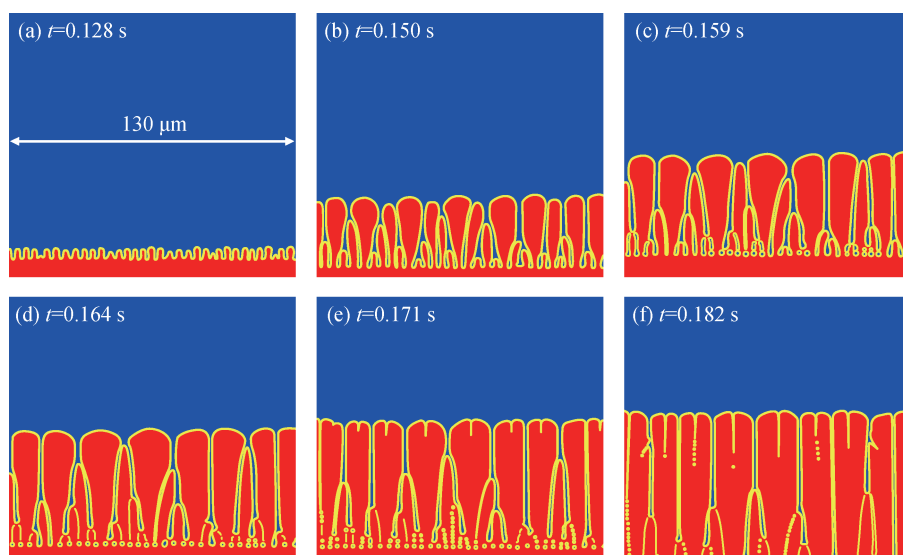
为模拟晶粒结构演变中的复杂现象,Gandin等^[48,49]提出元胞自动机(CA)法,尤其适用于金属材料的晶粒生长、相转变及微观结构演变的模拟。李玉斌^[50]在此基础上融合了晶粒生长与能量和曲率的相互作用机制,成功模拟出等温条件下的晶粒生长过程;在形核模拟方面,通过定义局部规则,描述形核和晶粒长大的动力学行为。该模型在模拟形核位置、晶粒生长形态以及再结晶过程方面表现出色,且具备较高的计算效率。Lian等^[51]进一步开发了三维CA模型,系统研究了定向能量沉积工艺参数对显微组织演化的影响机制;Teferra^[52]则基于并行计算架构优化后的三维CA模型,探讨了多种扫

描策略对晶粒结构调控的效果,验证了其在在大尺度模拟中的可行性。

此外,Dey等^[53]进一步扩展了CA模型在不同冷却速率条件下的适用性,成功模拟了晶粒结构的动态演变。基于上述理论框架,陈泽坤团队^[54]结合镍基高温合金718与316L不锈钢材料,在三维条件下实现了激光熔覆晶粒形核与生长过程的动态追踪,为激光熔覆工艺优化提供了理论依据。

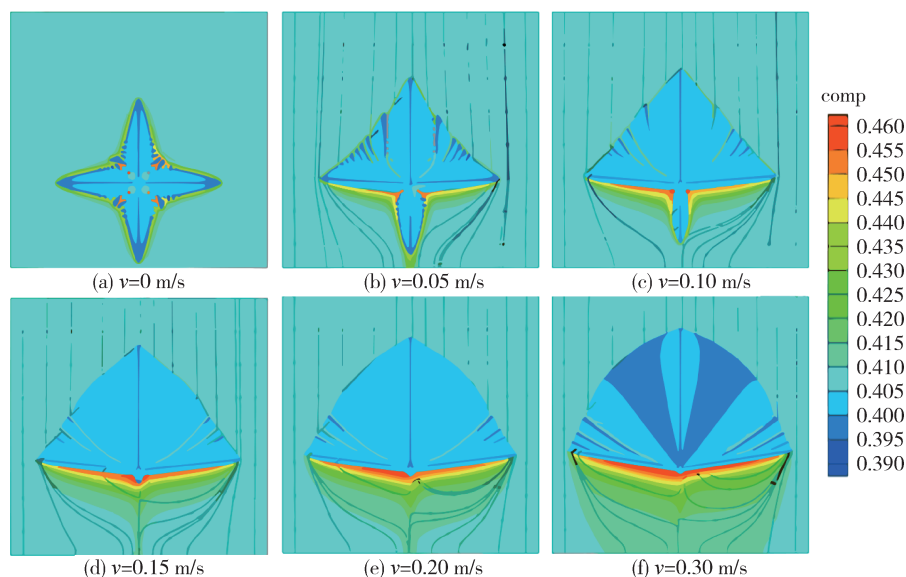
元胞自动机(CA)法作为一种独特的动力学建模方法,在时间、空间及状态维度上均采用离散化处理^[55]。该方法融合了随机模拟与确定性分析的优势,以形核微观物理机制及晶体生长动力学理论为基础,精准刻画了相变过程中微观组织形貌的动态演变^[56]。该模型不仅可定量评估过冷度与溶质浓度对相变行为的影响,还具备模型结构简洁、计算效率高等显著优点^[57]。但在高精度捕捉气-液界面变化方面仍存在挑战,对网格拓扑结构及尺度设置较为敏感,易受各向异性误差影响,可能导致晶粒沿特定方向非物理性生长。

Wang等^[58]采用相场法^[59,60]模拟了熔池初始界面失稳后的微观组织演变过程。模拟结果显示,初期界面呈平稳形态,生长速度相对缓慢;随着系统失稳,溶质边界层破裂,胞状尖端加速生长(图4)。该模拟不仅揭示了微观组织随时间的演变规律,还模拟出多个相间复杂交互作用的系统,如液-固-气三相共存体系以及共析反应等,描绘了不同晶粒间的竞争与协作行为,尤其适用于探究多晶材料的形核过程、晶体生长机制以及晶界迁移等复杂现象。

图4 尖端分裂过程的相场模拟^[58]Fig. 4 Phase-field simulation of dendrite tip splitting process^[58]

2018年, Du等^[61]采用二维对流耦合相场模型, 针对Ni-40.8%Cu合金在强制对流条件下的凝固动力学行为开展了数值模拟研究。模拟结果(图5)表明, 晶粒形态随流速增加呈现显著变化, 其机制源于流体动力学诱导的溶质场非对称分布, 导致固液界面过冷度分布不均。Yang等^[62]进一步提出了三维相

场模型, 系统分析了选择性激光熔化过程中晶粒的形核、竞争生长、外延生长以及热影响区的粗化行为。与MC和CA方法相比, 相场法在物理可解释性与模拟精度方面优势明显。然而, 其计算复杂度随网格分辨率呈指数增长, 在三维大尺度模拟中计算成本高昂, 限制了其在大范围复杂工况下的应用。

图5 晶粒生长过程中的浓度分布^[61]Fig. 5 Concentration distribution during grain growth process^[61]

3 枝晶形貌与微观组织演变模拟

枝晶的形貌与生长方向直接决定了材料的微

观结构和宏观性能^[63]。通过数值模拟研究枝晶形貌演变过程, 尤其是在复杂浓度场下枝晶的生长特性, 对于优化激光熔覆工艺和提升最终材料的综合

性能具有重要意义^[64]。

Nastac^[65]对Fe-0.6%C、Al-7%Si等二元合金的枝晶形态演变进行了模拟。在该过程中能够较准确地描述枝晶的生长机制,并成功再现了柱状晶到等轴晶转变(CET)现象。然而,该模型存在一些显著的缺陷,尤其是强烈的网格各向异性问题,导致枝晶只能沿着坐标轴方向生长^[66],这极大地限制了其应用范围。为了克服此局限,Hong等^[67]在扩散界面型相场模型中引入“形状因子”算法,基于邻位网格状态,有效地减弱了网格各向异性对模拟结果的负面影响。与此同时,朱鸣芳等^[68]构建了一种改进的元胞自动机模型(MCA),在固相体积分数演化中引入关键几何参数Gibbs-Thomson系数。该系数不仅系统考量了邻近固相对相界面网格固相分数增长的影响,还通过区分邻近网格的层级效应差异,赋予不同邻域网格差异化的权重系数,从而显著提升了凝固过程模拟的准确性。该模型为复杂凝固过程的精确模拟提供了新方法。

在模拟激光熔覆领域,熔池局部区域内枝晶形貌的演变过程中,Karma相场模型因其对界面动力学的高分辨率描述能力^[69]同样得到了较早的应用。Fallah等人^[70]率先将该模型用于模拟TiNb合金激光沉积过程中熔池局部枝晶演化。为增强模拟结果的精确度,融入了反溶质固态偏析的机制。然而,由于可视化激光熔覆过程中所诱发的固态偏析现象方面,该模型难以精确捕捉溶质浓度场的细致分

布特征,这在一定程度上制约了其应用的广泛性与深入性。Wheeler等人基于热力学守恒定律,通过WBM相场模型^[71,72],准确描述了在高凝固速率下,溶质固态偏析现象的演化过程。Acharya等^[73]将该模型应用于IN718合金的凝固模拟中,通过耦合热传导与非克第二定律,以及为了量化非平衡凝固条件下溶质偏析的信息,引入连续生长模型(CGM)^[74],借助其关系式计算溶质偏析系数,从而确定了液相与固相中溶质原子的浓度,并据此对溶质偏析程度进行了有效评估。定量预测了溶质分布与枝晶演化过程(图6)。

此外,Wang等^[75,76]将凝固界面溶质再分布与熔体溶质运输机制耦合进元胞自动机模型,实现了复杂凝固现象的高效模拟。Han等^[77]构建了宏-微观耦合模型体系,结合三维热流耦合模块与CA模型,整合非平衡凝固机制,成功再现了柱状晶择优生长、等轴晶形核及CET转变等典型特征,其模拟结果与实验数据高度吻合。朱鸣芳等^[78]运用溶质平衡方法,将枝晶生长动力学模拟从二维空间拓展到三维空间。该研究以固液界面处的平衡浓度与实际浓度差作为界面演变的驱动机制,在低Péclet数流动条件下实现了枝晶生长三维形态的精确捕捉,并定量描述了枝晶从非稳态向稳态的演化过程。该研究为三维凝固行为的深入研究提供支撑。Zhang等^[79]则将改进的形状函数引入CA-FD模型,实现了DD6高温合金定向凝固枝晶生长的大尺度三维模型。

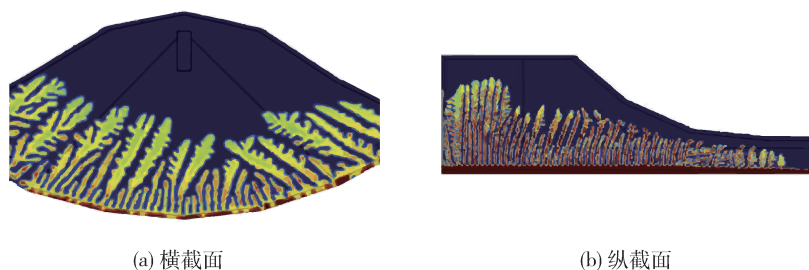
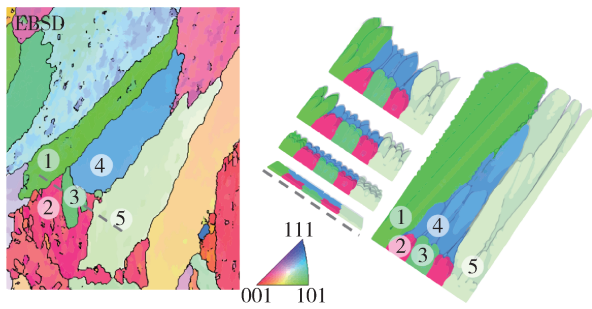


图6 横纵截凝固组织生长模拟^[73]

Fig. 6 Simulation of Solidification Microstructure Growth in Longitudinal Section and Cross Section^[73]

Park等^[80]为突破数值模拟在二元合金上的限制,提出基于多相场理论的新型建模框架^[81],实现了激光粉床熔化(LPBF)工艺中多元合金AlSi10Mg熔池局部三维枝晶形貌的动态预测(图7)。模拟结果表明,凝固过程中晶粒生长取向与实验观测数据

高度一致,揭示出初生晶粒对后续晶粒生长取向的显著影响。该多相场模型能够精确描绘不同晶粒间的竞争与协作行为,尤其适用于探究多晶材料的形核过程、晶体生长机制以及晶界迁移等复杂现象。此外,Xu等^[82]采用优化的元胞自动机理论框

图7 相场模拟的区域^[80]Fig. 7 Domain of phase-field simulation^[80]

架,模拟了 Al-Si-Mg 三元合金体系中 α -Al 枝晶生长行为,系统解析冷却速率与枝晶形貌之间的协同机制。

表2系统对比了模拟微观组织动态演变的三种常用方法:①若追求计算效率与拓扑演化趋势分析,可优先考虑蒙特卡罗法;②若需要在精度、效率和结构演化可视化之间取得平衡,适合选择元胞自动机法;③若目标是深入刻画界面动力学、溶质迁移和复杂相变行为,则相场法更具优势,尤其适用于需要高物理精度的模拟研究。

表2 3种常用微观组织模拟方法的优缺点以及适用场景

Table 2 Comparative evaluation of three mainstream microstructure simulation methodologies—merits, limitations, and optimal implementation domains

方法	建模特点	适用场景	优点	局限性
MC	基于统计力学与能量驱动机制,使用概率规则控制晶粒演化	快速模拟晶粒拓扑结构变化,适合开展大尺度、多参数演化趋势分析	算法简单、计算效率高、收敛性强,适合模拟晶粒合并、形貌粗化等过程	缺乏真实物理变量支撑,无法直接模拟枝晶尖端生长动力学,物理解释性较弱
CA	基于规则驱动的离散模型,模拟形核、生长、晶界迁移等动力学行为	平衡计算效率与精度,适合大尺度晶粒演化模拟及微观组织形态可视化	可结合热-流-浓度场进行多物理场耦合建模,模型结构灵活、计算效率高	对网格拓扑结构依赖性强,易引发晶体异常择优生长,气-液等界面描述能力有限
PF	基于热力学与连续介质力学理论,使用相场变量连续描述界面	精确模拟枝晶尖端演化、溶质偏析、相变动力学等复杂界面行为	描述能力强,物理机制完整,适合捕捉非平衡凝固、三相界面、共晶组织等复杂现象	模型参数多,计算复杂度高,对网格精度与时间步长要求高,不适合大尺度快速模拟

4 结论及展望

本文系统综述了激光熔覆过程中微观组织演变的数值模拟研究进展,围绕温度场与流场耦合模拟、晶粒结构的形成与演化、枝晶生长行为建模等关键内容进行了深入梳理与分析。近年来,随着计算能力的提升与多物理场建模技术的发展,该领域已取得以下显著进展。

1)建模精度与物理一致性显著提升。通过引入相场法、元胞自动机法以及多尺度建模框架,研究者已能够较为真实地再现微观组织从形核、生长到转变的全过程,显著增强了界面动力学与组织演化过程的物理可解释性。

2)多物理场协同模拟取得初步突破。部分研究已将温度场、流场、溶质场甚至应力场耦合进入组织演化模型,揭示了复杂物理过程之间的交互作用,为深入理解熔覆过程提供了新的理论依据。

3)数值模拟与实验手段逐步融合。EBSD、X射线断层扫描(XCT)和原位观测等实验技术已逐步被

引入,用于验证模拟结果与实际组织演化的一致性,增强了模型的可信度与工程适用性。

尽管该领域已有大量成果,当前仍存在一些关键挑战亟待进一步突破,本文归纳如下,并提出未来发展方向。

1)多物理场精细耦合模型仍待进一步发展。尽管已有模型考虑了热场、流场与溶质场的联合作用,但在高时空分辨率条件下对非稳态界面演化机制的描述仍不够完善。未来亟需发展更高效、稳定的耦合算法,并引入数据驱动模型或机器学习方法,提升边界条件处理与参数预测能力。

2)微观组织与宏观性能间的耦合尚不充分。现有晶粒演化模型多聚焦于形貌、取向等几何特征,对其与宏观缺陷(如裂纹、孔洞)之间的演化关系探讨不足。建议将微观组织演变与力学场协同建模,引入热应力、相变应变等因素,探索微观结构对宏观性能的本构关联。

3)多元合金体系建模复杂性高。当前模拟主要集中在单一或二元合金体系,对高熵合金、复合

材料等复杂成分体系的组织演化模拟仍处于探索阶段。建议依托热力学数据库与 CALPHAD 技术,发展通用的多组分数值模型,提升复杂合金体系模拟的准确性与预测能力。

综上所述,激光熔覆过程中微观组织演变的数值模拟研究已在建模精度、物理机制揭示与实验验证方面取得显著进展,逐步迈向多物理场耦合、高分辨率、多维度和数据驱动的方向。未来研究应继续围绕跨尺度模拟、高通量验证、多元合金适应性以及模拟-实验一体化展开,推动激光熔覆工艺从经验设计向理论驱动与智能优化转型,为高性能涂层材料的开发与工艺控制提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1] SUN Z, GUO W, LI L. Numerical modelling of heat transfer, mass transport and microstructure formation in a high deposition rate laser directed energy deposition process [J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101175.
- [2] MENG L, SHENG P, ZENG X. Comparative studies on the Ni60 coatings deposited by conventional and induction heating assisted extreme-high-speed laser cladding technology: formability, microstructure and hardness [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1732-1746.
- [3] WANG L, ZHANG D, CHEN C, et al. Multi-physics field coupling and microstructure numerical simulation of laser cladding for engine crankshaft based on CA-FE method and experimental study [J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 438: 128396.
- [4] YAN Z, LIU W, TANG Z, et al. Effect of thermal characteristics on distortion in laser cladding of AISI 316L [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 309-318.
- [5] WIRTH F, ARPAGAU S, WEGENER K. Analysis of melt pool dynamics in laser cladding and direct metal deposition by automated high-speed camera image evaluation [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 369-382.
- [6] MURPHY A G, MIRIHANAGE W U, BROWNE D J, et al. Equiaxed dendritic solidification and grain refiner potency characterised through in situ X-radiography [J]. Acta Materialia, 2015, 95: 83-89.
- [7] ABOU-KHALIL L, SALLOUM-ABOU-JAOUDE G, REINHART G, et al. Influence of gravity level on columnar-to-equiaxed transition during directional solidification of Al - 20 wt. % Cu alloys [J]. Acta Materialia, 2016, 110: 44-52.
- [8] XU Y, CASARI D, MATHIESEN R H, et al. Revealing the heterogeneous nucleation behavior of equiaxed grains of inoculated Al alloys during directional solidification [J]. Acta Materialia, 2018, 149: 312-325.
- [9] DONG Y, SHUAI S, ZHENG T, et al. In-situ observation of solid-liquid interface transition during directional solidification of Al-Zn alloy via X-ray imaging [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 39: 113-123.
- [10] CAO F, YANG F, KANG H, et al. Effect of traveling magnetic field on solute distribution and dendritic growth in unidirectionally solidifying Sn - 50 wt% Pb alloy: An in situ observation [J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 450: 91-95.
- [11] 胡保珠, 杜小妮, 曹鹏, 等. 17-4PH 不锈钢激光熔覆镍基碳化钨涂层数值模拟研究 [J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 500-504.
HU Baozhu, DU Xiaoni, CAO Peng, et al. Numerical simulation study of laser cladding nickel-based tungsten carbide coating on 17-4PH stainless steel [J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 500-504.
- [12] LEE Y, FARSON D F. Simulation of transport phenomena and melt pool shape for multiple layer additive manufacturing [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(1): 012006.
- [13] SONG B, YU T, JIANG X, et al. Development of the molten pool and solidification characterization in single bead multilayer direct energy deposition [J]. Additive Manufacturing, 2022, 49: 102479.
- [14] PANWISAWAS C, PERUMAL B, WARD R M, et al. Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: Experimental and modelling [J]. Acta Materialia, 2017, 126: 251-263.
- [15] WU D, HUA X, HUANG L, et al. Numerical simulation of spatter formation during fiber laser welding of 5083 aluminum alloy at full penetration condition [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 157-164.
- [16] HUANG L, HUA X, WU D, et al. Numerical study of keyhole instability and porosity formation mechanism in laser welding of aluminum alloy and steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 421-431.
- [17] SONG B, YU T, JIANG X, et al. Evolution and convection mechanism of the melt pool formed by V-groove laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107443.
- [18] 杨树. 倾斜基体激光熔覆工艺过程数值模拟研究 [D]. 中国矿业大学, 2023.
YANG S. Numerical Simulation Research on Laser Cladding Process of Inclined Substrate [D]. China University of Mining and Technology, 2023.
- [19] 陈嘉伟, 熊飞宇, 黄辰阳, 等. 金属增材制造数值模拟 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(9): 104-128.
CHEN J W, XIONG F Y, HUANG C Y, et al. Numerical simulation of metal additive manufacturing [J]. Chinese Science: Physics, Mechanics and Astronomy, 2020, 50(9): 104-128.
- [20] WIRTH F, WEGENER K. A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process [J]. Additive

- Manufacturing, 2018, 22: 307–319.
- [21] Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An arbitrary Lagrangian–Eulerian computing method for all flow speeds [J]. *Journal of Computational Physics*, 1974, 14(3): 227–253.
- [22] GAN Z, YU G, HE X, et al. Numerical simulation of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co–base alloy on steel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 104: 28–38.
- [23] WIRTH F, WEGENER K. A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 307–319.
- [24] GAN Z, YU G, HE X, et al. Surface–active element transport and its effect on liquid metal flow in laser–assisted additive manufacturing [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 86: 206–214.
- [25] HAN X, LI C, CHEN X, et al. Numerical simulation and experimental study on the composite process of submerged arc cladding and laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 439: 128432.
- [26] SONG Jie, CHEW Youxiang, BI Guijun, et al. Numerical and experimental study of laser aided additive manufacturing for melt–pool profile and grain orientation analysis – ScienceDirect [J]. *Materials and Design*, 2018, 137: 286–297.
- [27] 金康宁. 激光熔覆熔池热–流场与微观组织演变的多尺度模拟研究 [D]. 北京科技大学, 2024.
- JIN Kangning. Multi–scale simulation of heat and fluid flow in laser cladding melt pool and evolution of microstructure [D]. University of Science and Technology Beijing, 2024.
- [28] GE H, XU H, WANG J, et al. Investigation on composition distribution of dissimilar laser cladding process using a three–phase model [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 170: 120975.
- [29] ZHAO J, WANG G, WANG X, et al. Multicomponent multiphase modeling of dissimilar laser cladding process with high–speed steel on medium carbon steel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148: 118990.
- [30] HAN L, LIOU F W. Numerical investigation of the influence of laser beam mode on melt pool [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2004, 47(19–20): 4385–4402.
- [31] 刘朝阳, 齐欢. 激光熔覆单晶材料过程中的晶体生长的数值模拟 [J]. *APPLIED LASER*, 2013, 33(2): 144–149.
- LIU Chaoyang, QI Huan. Numerical simulation of crystal growth in laser cladding of single–crystal materials [J]. *Applied Laser*, 2013, 33(2): 144–149.
- [32] 戴冬华, 顾冬冬, 李雅莉, 等. 选区激光熔化 W–Cu 复合体系熔池熔体运动行为的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 82–90.
- DAI Donghua, GU Dongdong, LI Yali, et al. Numerical simulation of melt pool flow behavior in selective laser melting of w–cu composite system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 82–90.
- [33] DAI D, GU D. Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi10Mg powder [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 88: 95–107.
- [34] DEVESE W, DE BAERE D, GUILLAUME P. Modeling of laser beam and powder flow interaction in laser cladding using ray–tracing [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2).
- [35] LIU H, LI M, QIN X, et al. Numerical simulation and experimental analysis of wide–beam laser cladding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100: 237–249.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] WEI H L, ELMER J W, DEBROY T. Crystal growth during keyhole mode laser welding [J]. *Acta Materialia*, 2017, 133: 10–20.
- [39] WEI H L, ELMER J W, DEBROY T. Three–dimensional modeling of grain structure evolution during welding of an aluminum alloy [J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 413–425.
- [40] WEI H L, KNAPP G L, MUKHERJEE T, et al. Three–dimensional grain growth during multi–layer printing of a nickel–based alloy Inconel 718 [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 25: 448–459.
- [41] RODGERS T M, MADISON J D, TIKARE V. Simulation of metal additive manufacturing microstructures using kinetic Monte Carlo [J]. *Computational Materials Science*, 2017, 135: 78–89.
- [42] SUNNY S, YU H, MATHEWS R, et al. Improved grain structure prediction in metal additive manufacturing using a dynamic kinetic Monte Carlo framework [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101649.
- [43] 刘芸. 铝锂合金激光焊接熔池凝固过程微观组织建模与仿真研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- LIU Yun. Microstructure modeling and simulation of solidification process in laser welding melt pool of aluminum–lithium alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [44] 耿韶宁. 铝合金薄板激光焊接熔池凝固组织演变的多尺度模拟研究 [D]. 华中科技大学, 2020.
- GENG Shaoning. Multi–scale simulation of microstructural

- evolution during solidification of laser welding melt pool in aluminum alloy thin plates [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [45] SPITTLE J A, BROWN S G R. Computer simulation of the effects of alloy variables on the grain structures of castings[J]. *Acta Metallurgica*, 1989, 37(7): 1803–1810.
- [46] ANG L. Phase field investigation on microstructure evolution in the laser welding pool of 2A14 aluminum alloy [D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [47] HUANG Y. The microstructure analysis of welded joints of titanium alloy used for high-speed train in laser welding [D]. Hunan: Central South University, 2022.
- [48] RAPPAZ M, GANDIN C A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes [J]. *Acta Metall Mater*, 1993, 41: 345–360.
- [49] GANDIN C A, RAPPAZ M. A 3D cellular automaton algorithm for the prediction of dendritic grain growth [J]. *Acta Mater*, 1997, 45: 2187–2195.
- [50] LI Y B. Study of beryllium laser weldability and microstructure simulation of the welding process [D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2009.
- [51] LIAN Y, GAN Z, YU C, et al. A cellular automaton finite volume method for microstructure evolution during additive manufacturing [J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107672.
- [52] TEFERRA K, ROWENHORST D J. Optimizing the cellular automata finite element model for additive manufacturing to simulate large microstructures [J]. *Acta materialia*, 2021, 213: 116930.
- [53] DEY I, SCHÄTTI N, GERSTGRASSER M, et al. CA single track simulation of laser conduction welding with stainless steel 316L(1.4404) [J]. *Procedia CIRP*, 2022, 113: 301–306.
- [54] 陈泽坤, 李晓雁. 金属增材制造过程中材料微观组织演化的模拟研究 [J]. *力学进展*, 2022, 52(2): 397–409.
- CHEN Zekun, LI Xiaoyan. Simulation of microstructural evolution during metal additive manufacturing [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(2): 397–409.
- [55] 顾超, 李积武. 金属材料成形工艺对机械性能的影响研究 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2024, 59(3): 133–136.
- GU Chao, LI Jiwu. Research on the effect of metal forming processes on mechanical properties [J]. *Forging and Stamping Equipment and Manufacturing Technology*, 2024, 59(3): 133–136.
- [56] Succi S. Lattice boltzmann 2038 [J]. *Europhysics Letters*, 2015, 109(5): 50001.
- [57] 林嘉华. 铝合金凝固过程空间界面传热与枝晶生长数值模拟的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIN Jiahua. Numerical Simulation of Spatial Interfacial Heat Transfer and Dendritic Growth during Aluminum Alloy Solidification [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [58] WANG Z, MA S, SUN W, et al. Cellular tip splitting instability during transient growth [J]. *Computational Materials Science*, 2018, 155: 364–372.
- [59] STEINBACH I. Why solidification? Why phase-field? . *JOM*, 2013, 65: 1096–1102
- [60] 辜诚. 铝合金激光焊接三维微观组织及冶金气孔形成与演变模拟 [D]. 南京航空航天大学, 2017.
- GU Cheng. Three-dimensional microstructure and simulation of metallurgical porosity formation and evolution in aluminum alloy laser welding [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [61] DU L, ZHANG P, YANG S, et al. Phase-field simulation on dendritic to semi-circular morphology transition induced by forced liquid flow [J]. *Applied Physics A*, 2018, 124: 1–6.
- [62] YANG M, WANG L, YAN W. Phase-field modeling of grain evolutions in additive manufacturing from nucleation, growth, to coarsening [J]. *Npj Computational Materials*, 2021, 7(1): 56.
- [63] 肖帕尔, 德罗兹, 祝玉学, 等. 物理系统的元胞自动机模拟 [M]. 清华大学出版社, 2003.
- XIAO Pal, DROZ Michel, ZHU Yuxue, et al. Cellular automata modeling of physical systems [M]. Tsinghua University Press, 2003.
- [64] 崔朝兴, 董世运, 胡效东, 等. 激光熔化沉积成形过程数值模拟研究现状 [J]. *材料导报*, 2022, 36(2): 136–141.
- CUI Zhaoxing, DONG Shiyun, HU Xiaodong, et al. Current status of numerical simulation of laser melting deposition forming process [J]. *Materials Review*, 2022, 36(2): 136–141.
- [65] NASTAC L. Numerical modeling of solidification morphologies and segregation patterns in cast dendritic alloys [J]. *Acta Materialia*, 1999, 47: 4253–4262.
- [66] 柳百成. 铸造工程的模拟仿真与质量控制 [M]. 机械工业出版社, 2001.
- LIU Baicheng. Simulation and Quality Control in Casting Engineering [M]. China Machine Press, 2001.
- [67] HONG Y H, HONG C P. Modeling of dendritic growth with convection using a modified cellular automaton model with a diffuse interface [J]. *ISIJ International*, 2002, 42: 359–367.
- [68] 朱鸣芳, 陈晋, 孙国雄, 等. 枝晶生长的数值模拟 [J]. *金属学报*, 2005, 6: 583–587.
- ZHU Mingfang, CHEN Jin, SUN Guoxiong, et al. Numerical simulation of dendritic growth [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 6: 583–587.
- [69] RAMIREZ J C, BECKERMANN C, KARMA A, et al. Phase-field modeling of binary alloy solidification with coupled heat and solute diffusion [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(5 Pt 1): 051607.
- [70] FALLAH V, AMOOREZAEI, 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.
- [71] WHEELER A A, BOETTINGER W J, MCFADDEN G B. Phase-field model for isothermal phase transitions in binary alloys. *Physical Review A*, 1992, 45(10): 7424–7439.
- [72] WHEELER A A, BOETTINGER W J, MCFADDEN G B. Phase-field model of solute trapping during solidification. *Physical Review E*, 1993, 47(3): 1893–1909.
- [73] ACHARYA R, SHARON J A, STAROSELKY A. Prediction of microstructure in laser powder bed fusion process [J]. *Acta Materialia*, 2017, 124: 360–371.
- [74] AZIZ M J, KAPLAN T. Continuous growth model for interface motion during alloy solidification [J]. *Acta Metallurgica*, 1988, 36(8): 2335–2347.
- [75] WANG W, LEE P D, MCLEAN M. A model of solidification microstructures in nickel-based superalloys: predicting primary dendrite spacing selection [J]. *Acta materialia*, 2003, 51(10): 2971–2987.
- [76] DONG H B, LEE P D. Simulation of the columnar-to-equiaxed transition in directionally solidified Al – Cu alloys [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(3): 659–668.
- [77] HAN R, LI Y, LU S. Macro-micro modeling and simulation for the morphological evolution of the solidification structures in the entire weld [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 1345–1355.
- [78] 朱鸣芳, 汤倩玉, 张庆宇, 等. 合金凝固过程中显微组织演化的元胞自动机模拟 [J]. *金属学报*, 2016, 52(10): 1297–1310.
- ZHU Mingfang, TANG Qianyu, ZHANG Qingyu, et al. Cellular automata simulation of microstructural evolution during alloy solidification [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(10): 1297–1310.
- [79] ZHANG H, XU Q. Multi-scale simulation of directional dendrites growth in superalloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 132–141.
- [80] PARK J, KANG J H, OH C S. Phase-field simulations and microstructural analysis of epitaxial growth during rapid solidification of additively manufactured AlSi10Mg alloy [J]. *Materials & Design*, 2020, 195: 108985.
- [81] STEINBACH I, PEZZOLLA F, NESTLER B, et al. A phase field concept for multiphase systems [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1996, 94(3): 135–147.
- [82] TAN Y, ZHAO H, XU Q. Numerical simulation of solidified microstructure of ternary Al-Si-Mg alloy using an improved cellular automaton method [J]. *Science China Materials*, 2024, 67(4): 1150–1159.

Research progress on numerical simulation of microstructure formation of laser cladding coatings

XU Lianbo, ZHOU Jinlong, GUI Yongliang, LONG Haiyang, MA Zhanshan

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, China)

Abstract: Laser cladding technology has demonstrated remarkable advantages in enhancing materials' high-temperature resistance, corrosion resistance, wear resistance, and enabling material recycling. However, experimental observation of transient evolution processes within the molten pool remains challenging, which hinders in-depth understanding of microstructure formation mechanisms. Numerical simulation techniques have emerged as powerful tools to address this limitation. Thermophysical parameters, such as temperature gradients and cooling rates, play a critical regulatory role in determining grain geometric characteristics including size and morphology. Concurrently, hydrodynamic behaviors within the molten pool influence solute redistribution and preferred dendrite growth orientations, further shaping the microstructure. The non-equilibrium solidification process during laser cladding triggers competitive evolution of grain structures, with morphological evolution, size distribution, and crystallographic orientations being closely correlated with the anisotropic mechanical properties and functional characteristics of the coatings. Notably, topological morphology evolution at the dendrite growth front not only determines microscopic structural features like dislocation density and phase boundary characteristics but also exerts cross-scale effects on macroscopic service performance. This review systematically examines multi-scale computational models in numerical simulations, elucidating the solidification dynamics during laser cladding processes. It particularly focuses on analyzing core issues such as coupled thermal-mass transport, grain topological structure evolution, non-equilibrium solute distribution, and dendrite morphology development. Future research in this field should place greater emphasis on refined multiphysics coupling, the integration of

microstructural evolution with macroscopic performance, and the modeling of multicomponent alloy systems. Numerical simulation is expected to advance toward higher resolution, multidimensional characterization, and data-driven approaches, thereby providing stronger support for the development of high-performance coating materials and the optimization of processing parameters.

Key words: laser cladding; melt pool solidification; microstructure; numerical simulation; temperature field; crystal growth; dendritic morphology

有色金属行业高比例绿电消纳专题研讨会召开

4月17日,有色金属行业高比例绿电消纳专题研讨会在安徽合肥成功召开。本次会议由中国有色金属行业环境产品声明平台主办,阳光电源股份有限公司承办。会议紧扣国家“双碳”目标纵深推进要求,聚焦有色金属行业绿电高质量应用与高比例消纳核心议题,为行业绿色低碳高质量发展建言献策。

中国有色金属工业协会科技部副主任王怀国表示,国家围绕绿电高质量发展出台了一系列顶层设计与专项政策,为有色行业绿色低碳转型明确了路径。本次研讨会旨在搭建行业交流平台,集中研讨绿电应用的发展趋势、实践经验与现存痛点,为全行业探索可复制、可推广的绿电消纳解决方案凝聚共识、汇聚力。

在主旨报告环节,国家发展改革委能源研究所新能源中心副主任陶冶以《绿电直连政策实施进展及展望》为题,系统解读当前绿电直连相关政策的落地情况、实施成效与未来发展方向,为行业企业把握政策导向、合规推进绿电应用提供指引。阳光电源股份有限公司微电网及电网技术解决方案中心总监夏彦辉作题为《矿山能源变革:高可靠、高收益的智慧微网解决方案》的报告,分享源网荷储一体化项目的技术路径、落地案例与实践价值,为行业企业提升绿电消纳能力提供了实践参考。

在专题研讨环节,与会代表围绕三大核心议题展开深度研讨:一是有色金属行业绿电应用的中长期发展趋势;二是电解铝等重点细分领域企业绿电消纳、源网荷储项目建设的实践经验与现存难点问题;三是铜、镍、钴等有色金属品种海外项目绿电保障的实践做法与面临的挑战。来自中国铝业股份有限公司、信发集团有限公司、杭州锦江集团、重庆旗能电铝有限公司、江西铜业集团有限公司、魏桥环境保护监督管理公司、伊电集团河南豫港龙泉铝业有限公司、内蒙古蒙泰集团有限公司、金川集团镍钴股份有限公司、铜陵有色金属集团控股有限公司、重庆工商大学等单位的代表,结合企业实践,分享了绿电应用成果、介绍了区域绿电资源配套政策,并从技术创新、政策研究层面提出专业建议。中国有色金属工业协会环境产品声明平台办公室主任邵朱强主持此环节。

(资料来源:中国有色金属报)