DOI：10.11973/jxgccl202311014

相场法模拟增材制造及焊接过程中显微组织的研究进展

王丽芳[1]，谢光耀[2]，朱刚贤[2]
（苏州大学 1.工程训练中心，2.机电工程学院，苏州 215137）

摘　要：增材制造以及焊接过程都是多物理场耦合的复杂过程，难以采用试验方法直接观测熔池显微组织的演变过程。随着计算材料学和数值模型的快速发展，从数值模拟出发研究凝固过程中的显微组织演变成为可能。对比分析了几类常用的显微组织模拟方法，其中相场法在晶粒形貌模拟准确性上具有独特的优势。综述了相场法在增材制造及焊接领域模拟显微组织的应用现状，并对未来的研究方向进行了展望。

关键词：增材制造；焊接；相场法；显微组织
中图分类号：TG111.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-3738(2023)11-0081-06

Research Progress on Microstructure Simulation by Phase Field Method in Additive Manufacturing and Welding Process

WANG Lifang[1], XIE Guangyao[2], ZHU Gangxian[3]
(1. Engineering Training Center, 2. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215137, China)

Abstract: The processes of additive manufacturing and welding are both complex processes with multiple physical field coupling, and it is difficult to directly observe the evolution of the microstructure of the molten pool by experimental methods. With the rapid development of computational material science and numerical models, it is possible to study the microstructure evolution during solidification by numerical simulation. Several commonly used microstructure simulation methods are compared and analyzed, among which the phase field method has a unique advantage in the accuracy of grain morphology simulation. The application status of phase field method in the microstructure simulation in additive manufacturing and welding fields is reviewed, and the research direction in future is prospected.

Key words: additive manufacturing; welding; phase field method; microstructure

0　引　言

金属凝固过程是一个复杂的过程，涉及到高温、组织相变以及熔体与基体材料之间的相互影响。随着计算机技术及数值模型的快速发展，通过数值模拟方法研究增材制造以及焊接熔池的凝固过程成为可能。近年来，学者们通过数值模拟方法积极探索凝固过程显微组织的演变规律，以实现对材料（零件）力学性能和物理性能的预测，获取工艺调控凝固组织的理论依据，并建立工艺参数与组织演变的关系。目前，对凝固过程中显微组织进行数值模拟的常用方法有确定性方法、蒙特卡洛法、元胞自动机法和相场法。

增材制造（additive manufacturing，AM）是一种利用计算机辅助设计逐层堆积材料的零件成形技术[1]，具有周期短、可成形复杂结构零件、力学性能优异等特点，广泛用于航空航天、汽车船舶、武器装备等领域高端装备的制造[2]。增材制造过程中熔池的凝固行为影响诸如溶质偏析、裂纹、气孔等缺陷的形成，同时也会影响熔池组织的尺寸和形态，最终决

收稿日期：2023-02-19；修订日期：2023-10-07
基金项目：苏州市科技计划项目（SYC2022143）；国家重点研发计划项目（2016YFB1100300）
作者简介：王丽芳（1979—），女，陕西渭南人，实验师，硕士
通信作者：谢光耀

定零件的性能。通过传统试验方法能够获得工艺参数对熔池组织、气孔、裂纹等的影响规律，实现优化工艺、改善构件质量的目的。然而，大量的试验不仅耗时耗力，而且由于增材制造过程中熔池体积小、凝固速率快，采用试验方法难以对熔池内部凝固过程进行观测，无法获得完整凝固组织的形成过程，只能解决宏观层面的问题。有效控制显微组织演变，进而提高材料性能是增材制造技术的发展方向之一[3]。同样，焊接熔池的凝固过程类似于激光增材制造熔池的凝固过程。为了给相关研究人员提供参考，作者对常用显微组织模拟方法的优缺点进行了对比，综述了相场法模拟增材制造和焊接过程中显微组织演变的研究现状，并对其未来研究方向进行了展望。

1 常用的显微组织模拟方法

确定性方法[4]是以晶核和生长物理模型为起点，利用确定的微观运动方程描述系统状态，以经典凝固动力学理论为基础的一种方法。确定性模型指在给定时刻和一定体积内，晶粒的形核密度和生长情况均为确定的函数，但这些函数需要通过试验才能得到。由此可知，确定性方法具有真实的材料组织演变的物理基础，并且使用该方法能够构建出符合系统物理本质的数学模型且能够精确预测特定系统的组织特征。

元胞自动机(cellular automaton，CA)法[5]是在20世纪40年代后期提出的，这种数值算法常用于处理和描述复杂系统在空间和时间上的演化规律。CA法的基本思想如下：将凝固过程所需时间分解为相同的时间周期(时间步)，将所需计算的凝固区域分解为一定尺寸的元胞(计算单元)，每个元胞与其相邻元胞相互作用，并赋予每个元胞温度以及溶质浓度等物理量；定义一套演化规则，将被赋予元胞的物理量作为变量并且放之整个计算域皆成立，其中的每个元胞可转变为多种状态；在达到一定条件后，状态之间可以互相转换，在单个时间步内，以演变规则为基础对元胞各种物理量进行计算，再判断元胞状态，每个时间步完成一次循环，最终在一段时间内实现物理过程的模拟[6]。

蒙特卡罗(Monte Carlo，MC)法[7]是随机统计数学中的一种方法，最早应用于复杂的数学问题。蒙特卡罗法基于某种抽样或者试验得到对特定事件的期望值。有关学者将其引入到组织演变仿真中，其原因是MC法具有良好的物理基础。MC法的基本思路如下：将模拟区域(这里只表明空间)离散为按照规律进行分布的格点并且对每个格点赋予一个随机数Q，Q所代表的物理意义是这个格点的晶粒生长取向；如果相邻格点间的随机数Q相等，则表示2个格点属于同一个晶粒，反之则属于不同的晶粒，并形成界面；界面存在一定的界面能，在界面能的驱动下界面实现迁移，即进行晶粒生长过程中的界面迁移。MC模型只适用于固态晶粒的生长，例如再结晶和第二相沉淀。

相场(phase field，PF)法[8]以Ginzburg-Landau理论为基础，通过微分方程反映相变过程扩散、有序化势及热力学驱动力的综合作用，是模拟相变过程组织演变的理想方法。在扩散界面处，相场参数φ连续地从-1变化到1；相对应地，自由能密度函数$f(\varphi)$呈现出先增大后减小的趋势。当实时温度T与材料熔点T_m相同时，固相和液相的自由能密度相等；当$T<T_m$时，固相的自由能密度小于液相。根据实际物理过程，可以建立其对应的自由能密度函数。相场法能够在界面平衡的情况下描述新相从母相中生长的复杂过程以及凝固过程中固/液界面的演变情况。相场法最大的优势在于避免了复杂的固/液界面追踪，通过外部场与相场的结合使微观与宏观模型相结合，从而可直接模拟宏观相场作用下的显微组织演变，并且可以定量地研究热力学扰动、组织各向异性以及不同材料参数对显微组织演变的影响。相场法在模拟熔池显微组织生长过程方面具有广阔的应用前景。

表1列出了确定性方法、MC法、CA法、相场法的优缺点。可知：相对于MC法，相场法的物理意义更加明确，并且与CA法相比，其模型的合理性不需要真实物理现象来决定；确定性方法的模拟结果与试验结果吻合较差。因此，相场法是模拟凝固过程中显微组织演变的理想方法。

2 相场法在显微组织模拟中的研究现状

2.1 发展及应用

1977年，HONHENBERG等[9]提出了相场模型的雏形“Model C”。随后，COLLIONS等[10]和CAGINALP等[11]将相场序参量的概念引入到凝固过程的描述中。FIFE等[12]通过大量的数学分析证明了相场模型在界面厚度趋于0时与尖锐界面模型的一致性。1993年，KOBAYASHI[13]建立了二维系

表 1 几种常用显微组织模拟方法的优点和缺点[4-8]

Table 1 Advantages and disadvantages of several commonly used microstructure simulation methods[4-8]

名称	优点	缺点
相场法	相场与多种物理场耦合能够准确地模拟凝固过程中晶粒形貌的变化，还可以模拟材料凝固过程中固/液界面的形态和运动情况	部分参数的确定方法受到质疑；计算区域有限制，计算效率较低并且求解量大
MC 法	模拟数值相对稳定，具有较好的收敛性；基于随机概率性的统计学原理，无需假设凝固界面的晶粒情况	缺乏凝固理论基础，无法定性定量地给出各种因素对显微组织演变的影响，无法反映真实的凝固过程
确定性方法	研究历史较长，在研究方法以及理论基础方面都比较完善；以凝固动力学理论为基础，可以反映晶粒生长的物理原理	不能反映金属凝固过程中晶粒生长的随机性，因此难以反映显微组织演变过程中枝晶形貌的变化，计算结果与试验结果吻合度不高
CA 法	可精确地模拟介观和微观显微组织的演变；以真实的凝固理论为基础结合了随机性思想，具有明确的理论基础	模型的合理性取决于计算结果与试验结果是否吻合

统中纯金属凝固过程枝晶生长的相场模型，该模型考虑了材料的各向异性，计算得到了复杂的枝晶形貌，模拟结果与实际的凝固组织相似。尽管当时 KOBAYASHI 的工作仍处于定性模拟阶段，但相场法已引起了学术界的广泛关注。随着研究的深入，相场法的应用正在由纯物质微观模拟逐渐向二元单相、多元单相及多元多相系统微观模拟转变。WHEELER 等[14]提出了二元合金 WBM 相场模型，并模拟了二元合金等温凝固过程中等轴枝晶形貌的演变。1999 年，KIM 等[15]对 WBM 相场模型中的自由能密度函数进行重新定义，提出了用于模拟二元合金凝固过程的 KKS 相场模型，并利用该模型模拟了 Al-Si 二元合金等温凝固的溶质扩散过程。2000 年，张玉妥等[16]利用显示有限差分来求解相场方程，采用相场模型模拟了纯物质凝固时金属镍枝晶包括一次枝晶臂和二次枝晶臂生长过程中的形貌演变，以及在枝晶生长过程中会出现的竞争生长。2001 年，于艳梅等[17]用相场法模拟了过冷纯物质中枝晶的演变过程，深入探讨了界面动力学、各向异性、热扩散、界面能等对枝晶生长的影响，发现：随着各向异性程度的增大，枝晶尖端的生长速率增大，生长半径减小；当界面动力学系数小于 0 时，枝晶尖端的生长速率降低，但尖端生长半径增大；热噪声会促使侧枝晶形成，但不会对枝晶尖端的稳态行为产生影响。2005 年，朱昌盛等[18]利用相场模型模拟了 Al-Cu 合金的非等温凝固过程，发现枝晶是以等轴晶的形式生长的，并对液态金属的流动对枝晶生长的影响进行了分析。

2.2 在增材制造领域的应用

ECHEBARRIA 等[19]在 Karma 模型的基础上提出了一种适用于定向凝固的定量相场模型，后被很多学者应用于金属增材制造领域[20]；凝固过程中的温度场定义为

$$T(Z,t)=T_0+G(t)\left[Z-Z_0-\int_0^t V_P(t')\mathrm{d}t'\right] \tag{1}$$

式中：$T(Z,t)$为温度，是位置坐标 Z 和时间 t 的函数；T_0 为参考温度；$G(t)$为熔池内温度梯度；Z 为平行于枝晶生长方向的坐标；Z_0 为参考点坐标；$V_P(t')$为 t'时刻下固/液界面推移速度。

将式(1)代入相场方程，并把相场方程和浓度场方程耦合，得到定量相场模型的最终表达式[19]为

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}\left[1-(1-k)\frac{Z-\int_0^t V_P(t')\mathrm{d}t'}{l_T}\right]\tau=W_0^2\nabla^2\varphi+\varphi-\varphi^3-\lambda(1-\varphi^2)^2\left[U+\frac{Z-\int_0^t V_P(t')\mathrm{d}t'}{l_T}\right] \tag{2}$$

$$\left(\frac{1-k}{2}-\frac{1-k}{2}\varphi\right)\frac{\partial U}{\partial t}=\nabla\cdot\left\{D\frac{1-\varphi}{2}\nabla U+\frac{1}{2\sqrt{2}}[1+(1-k)U]\frac{\partial\varphi}{\partial t}\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}\right\}+[1+(1-k)U]\frac{1}{2}\frac{\partial\varphi}{\partial t} \tag{3}$$

$$l_T=|m|(1-k)c_0/G \tag{4}$$

式中：l_T 为热毛细长度；λ 为耦合系数；W_0 为固/液界面宽度；τ 为弛豫时间；D 为溶质在液相中的扩散系数；k 为溶质在固相和液相中的平衡分配系数；m 为液相线斜率；c_0 为凝固过程中液相的溶质浓度；U 为无量纲浓度。

2018 年，XIAO 等[21]利用激光增材制造熔池凝

固过程显微组织演变的相场模型研究了 Inconel 718 镍基高温合金激光增材制造过程中枝晶的演变规律。GENG 等[22]利用激光熔覆熔池凝固过程显微组织演变相场模型模拟了铝铜合金在电弧熔覆增材制造过程中其熔覆层底部枝晶的生长过程，发现枝晶的生长过程由线性生长阶段、竞争生长阶段和稳定阶段组成：在凝固开始时熔池枝晶生长处于线性生长阶段，在该阶段枝晶以平面晶的形貌进行生长，并且扩散界面形态保持不变，但是扩散界面前端的液相溶质浓度持续增大，即过冷度增大，当过冷度增大到某一临界值，界面开始失稳并产生大量细小的枝晶；当扩散界面离初始位置稍远时枝晶进入竞争生长阶段，此时枝晶的形貌主要由竞争生长过程决定，一些生长方向与温度梯度方向一致并且尖端生长速率较快的枝晶会吞噬周围的细小枝晶，最终生长成更加粗大的枝晶；在稳定阶段，一次枝晶间距基本保持稳定，不会发生较大的变化，并且枝晶之间基本不出现竞争生长。WU 等[23]利用激光增材制造熔池凝固过程显微组织演变的相场模型模拟了增材制造 Ti-6Al-4V 合金的枝晶凝固过程，发现：温度梯度、扫描速度和冷却速率越大，枝晶间距越小，枝晶生长速率越快；模拟得到的枝晶形态和枝晶间距与试验结果吻合较好。WANG 等[24]使用相场法结合有限元法模拟 IN718 合金增材制造过程中显微组织的演变，发现大取向角的凝固部位可以在凝固过程中形成较高的溶质浓度，但形成连续长链 Laves 相颗粒的可能性较小。GENG 等[25]采用基于自适应计算域扩展方法的定量相场模型来研究熔覆增材制造中材料显微组织的演变，其中自适应计算域扩展方法是在相场仿真过程中开发的，可以使仿真过程跳过液体区域，将仿真时间缩短约 50%，并且模拟得到的柱状枝晶形貌与光学显微镜下观察到的结果相吻合。ZHANG 等[26]采用熔池凝固过程显微组织演变的相场模型研究了激光选择性熔化钛合金的组织演变规律，发现：枝晶沿着热流方向生长；在枝晶形成过程中可以观察到微偏析现象，在枝晶尖端附近和枝晶臂之间存在溶质富集现象；温度梯度和扫描速度与主枝晶间距呈反比关系。CHU 等[27]用相场法研究了不同工艺参数下电子束增材制造熔池在凝固过程中的显微组织演变规律。

2.3 在焊接领域的应用

由于增材制造过程与焊接过程类似，因此用相场法来模拟增材制造显微组织演变与模拟焊接显微组织演变所用的微观模型是一致的，区别在于选用的宏观模型以及宏观模型与微观模型之间耦合方法不同。相场法在模拟焊接方面的应用比模拟增材制造方面的应用起步早且成熟，这对于模拟增材制造显微组织演变方面具有重要意义，也给相场模拟增材制造的发展指明了方向。

相场法可以对焊接过程中的裂纹问题进行研究。GENG 等[28]采用相场模拟和多步计算策略研究了镁反扩散条件对铝镁合金液相通道偏析和枝晶形貌以及凝固裂纹敏感性(SCS)的影响，发现：镁反扩散条件能有效地降低液相通道偏析程度，促进枝晶结合，使得 SCS 指数显著降低；增大固体扩散系数或分配系数均能增强镁的反向扩散，促进枝晶的结合。YU 等[29]采用修正的解析模型和定量相场模型研究发现，表面张力和各向异性强度对铝合金气体钨极弧焊焊缝金属凝固过程中的界面稳定性影响不大，且模拟结果与试验结果基本一致。XIONG 等[30]应用相场模型研究了铝铜合金在激光焊接过程中的柱状→等轴晶转变过程，发现成核过冷对柱状→等轴晶转变的发生有显著影响，成核密度影响柱状→等轴晶转变后等轴晶粒的大小。

在利用相场法研究激光焊接纵截面凝固过程中，一般将激光焊接熔化过程看作一个理想过程，即假设其熔化后的凝固界面为一个平面晶，因此凝固过程中枝晶的取向角都是相同的。实际上，激光焊接熔化过程并不理想，其熔化过后的凝固界面由多个晶粒构成，在显微组织演变过程中从各个晶粒上生长出来的枝晶取向角是不相同的，因此有学者提出了多元相场来解决这个问题。GENG 等[31]应用多元相场研究了铝合金激光焊接熔池凝固过程中的组织演变规律，发现：在平面晶向胞晶的转变过程中，初始的平面不稳定性主要是由生长速率的快速变化造成的；表面张力各向异性对初始平面不稳定性有显著影响；随着不利取向角的增大，界面刚度增大，从而增强了表面张力的稳定效果，使固/液界面越来越稳定；在胞状晶向枝晶转变过程中，第三树状枝晶的形成及尖端劈裂导致初始枝晶间距减小；在熔池凝固过程中存在 2 种晶粒的生长竞争机制，表现为有利取向(FO)晶粒的横向扩张阻塞不利取向(UO)晶粒的生长，以及 FO 晶粒在晶界处消除 UO 晶粒；在激光焊接过程中熔池显微组织演变过程为初始界面先发生界面失稳产生大量胞状晶，随着凝固的进行，胞状晶之间相互吞噬并生长转变为树枝

晶，树枝晶相互之间竞争生长直到凝固结束。在激光焊接过程中熔池凝固开始时凝固界面上各个晶粒的形貌是无法预测的，必须通过试验获得，因此模型的准确性需要由试验结果来判断，背离了相场法可不通过试验来判断模型准确性的初衷。然而，多元相场的提出使得相场法模型能够更加准确地预测激光焊接熔池横截面的显微组织演变过程，其原因是横截面为半椭圆形，凝固界面晶粒对于枝晶生长取向角的影响可忽略不计。XIONG 等[32]考虑柱状→等轴晶转变以及晶粒取向和异相形核，建立了 Al-Cu 合金激光焊接熔池横截面的相场模型，通过模拟发现：不论晶粒取向如何，树枝晶均向熔合区中心生长；等轴晶先于柱状枝晶生长，并在柱状枝晶前沿逐渐形成带状，从而阻止柱状枝晶生长；熔池截面上边缘的等轴晶粒数量最多，这是由于此处固/液界面推进速度最快；在凝固过程中形成了非均匀晶核，当柱状枝晶前沿的过冷度足够大时非均匀晶核开始长大；随着凝固时间的延长，非均匀晶核数量增加，等轴晶尺寸减小。

相场法预测激光焊接过程中组织演变时使用的是二维模型，而实际上显微组织的演变是发生在三维空间中的，这会导致模拟结果与试验结果之间存在一定的偏差。BAILEY 等[33]建立了 6061 铝合金激光焊接过程中枝晶生长和组织演变的三维相场模型，发现与二维模拟结果相比，考虑了三维扩散的三维模拟结果中的枝晶生长速率更快，二次枝晶间距更小，与试验结果更吻合。虽然三维模拟结果比二维模拟结果更准确，但是相场法并未向三维模型进一步发展，主要原因是计算量过大，计算效率下降。

随着相场法的发展，相场模型所模拟结果的精度要求越来越高，因此就需要考虑其他变量和影响因素，从而提高模拟结果的准确性。TAKAKI 等[34]将计算流场的 LBM 模型与相场模型耦合在一起，在自然对流条件下对二维自由枝晶的生长进行模拟，研究了计算域大小以及重力及其方向对枝晶形貌的影响，发现随着重力的增加，树枝晶的形态发生了显著的变化，并且即使在低重力条件下，在大的计算域内，树枝晶的形貌也会发生显著变化；随着重力方向的改变，枝晶间距会发生显著变化。耦合流场在相场模型中的意义是不仅可提高模拟结果的准确性，还可以通过其他物理场对耦合流场的影响来对显微组织的演变过程产生影响。CAO 等[35]成功建立了存在磁场情况下熔池内枝晶定向凝固生长的相场模型，通过模拟发现：洛伦兹力驱动的熔体流动集中在固/液界面附近，导致溶质在下游区域局部分布不均匀，而熔融金属流动抑制了富溶质区枝晶的生长，从而形成了弯曲的凝固前沿；由于枝晶两侧生长不均匀，树枝状树干呈倾斜状；在枝状网络中，流动的流体受到侧支和主臂的限制，形成了涡旋，从而影响了侧支的形态；在磁场辅助定向凝固过程中，凝固前沿弯曲、初生树干倾斜是其独特的现象；磁场能改变自然对流，设计合理的磁场可以减少自然对流造成的缺陷。随着技术的发展，为了提高相场法模拟焊接和增材制造过程中熔池显微组织演变的精度，在相场模型中耦合流场将会是必然趋势。

3 结束语

相场法已被应用于模拟增材制造以及焊接过程中显微组织演变研究，研究方向主要包括焊接以及增材制造过程中裂纹的问题、利用多元相场以及三维相场模型研究显微组织演变、在相场模型中耦合流场来提高模型的准确性。在利用相场法模拟增材制造以及焊接过程中显微组织时存在问题以及未来的研究方向主要集中在：(1) 相场法只能预测纯金属、二元合金或三元合金增材制造和焊接过程中显微组织的演变，因此需要对相场模型进行修正，使之能够应用多元合金的组织预测；(2) 相场模型的运算效率低，很难完成显微组织的大范围仿真，因此需要优化相场模型数值解析法，提高运算效率；(3) 增材制造以及焊接过程中存在重熔现象，即已经凝固的下层材料在上层材料熔化时会被重新熔化，因此需要在相场模型中考虑重熔因素；(4) 增材制造以及焊接时熔池具有十分复杂的冶金动力学行为以及非平衡凝固行为，如何将这种行为与相场模型紧密结合，建立适合增材制造以及焊接工艺过程的相场模型是提高模拟准确性的关键；(5) 增材制造以及焊接一般都会产生缺陷，这些缺陷是伴随着组织演变中的微观应力/应变的变化而产生的，因此需要对现有的相场模型进行扩展，在相场或溶质场方程中耦合微观应力/应变场。

参考文献：

[1] 朱忠良，赵凯，郭立杰，等. 大型金属构件增材制造技术在航空航天制造中的应用及其发展趋势[J]. 电焊机，2020，50(1)：1-14.
ZHU Z L，ZHAO K，GUO L J，et al. Application and development trend of additive manufacturing technology of large-scale metal component in aerospace manufacturing[J].

Electric Welding Machine，2020，50(1)：1-14.

[2] TEPYLO N，HUANG X A，PATNAIK P C. Laser-based additive manufacturing technologies for aerospace applications [J]. Advanced Engineering Materials，2019，21(11)：1900617.

[3] 肖文甲. 激光增材制造镍基高温合金枝晶生长的机理研究[D]. 长沙：湖南大学，2019.
XIAO W J. Study on dendritic growth mechanism of nickel-based superalloy made by laser additive[D]. Changsha：Hunan University，2019.

[4] WANG C Y，BECKERMANN C. Prediction of columnar to equiaxed transition during diffusion-controlled dendritic alloy solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A，1994，25(5)：1081-1093.

[5] 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 Y. Modeling and simulation of microstructure in solidification process of Al-Li alloy laser welding pool[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2018.

[6] 黄超. 基于CA-FE法TIG焊下TC4合金焊缝微观组织数值分析[D]. 西安：西安理工大学，2020.
HUANG C. Numerical analysis of microstructure of TC4 alloy weld under TIG welding based on CA-FE method[D]. Xi′an：Xi′an University of Technology，2020.

[7] 陈满骄. 铝/钢异种金属焊接接头界面形成机理研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2016.
CHEN M J. Study on interface formation mechanism of aluminum/steel dissimilar metal welded joints[D]. Lanzhou：Lanzhou University of Technology，2016.

[8] 任博. Stellite 6合金焊接熔池凝固行为的相场模拟[D]. 上海：上海交通大学，2020.
REN B. Phase field simulation of solidification behavior of welding pool of Stellite 6 alloy[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2020.

[9] HOHENBERG P C，HALPERIN B I. Theory of dynamic critical phenomena[J]. Reviews of Modern Physics，1977，49(3)：435-479.

[10] COLLINS J B，LEVINE H. Diffuse interface model of diffusion-limited crystal growth[J]. Physical Review B，1985，31(9)：6119-6122.

[11] CAGINALP G，FIFE P C. Dynamics of layered interfaces arising from phase boundaries[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics，1988，48(3)：506-518.

[12] FIFE P C，GILL G S. The phase-field description of mushy zones[J]. Physica D：Nonlinear Phenomena，1989，35(1/2)：267-275.

[13] KOBAYASHI R. Modeling and numerical simulations of dendritic crystal growth [J]. Physica D：Nonlinear Phenomena，1993，63(3/4)：410-423.

[14] WHEELER A A，BOETTINGER W J，MCFADDEN G B. Phase-field model for isothermal phase transitions in binary alloys[J]. Physical Review A，1992，45(10)：7424-7439.

[15] KIM S G，KIM W T，SUZUKI T. Phase-field model for binary alloys[J]. Physical Review E，1999，60(6)：7186-7197.

[16] 张玉妥，李殿中，李依依，等. 用相场方法模拟纯物质等轴枝晶生长[J]. 金属学报，2000，36(6)：589-591.
ZHANG Y T，LI D Z，LI Y Y，et al. Simulation of equiaxed dendritic growth of a pure material using phase field method [J]. Acta Metallrugica Sinica，2000，36(6)：589-591.

[17] 于艳梅，杨根仓，赵达文，等. 过冷熔体中枝晶生长的相场法数值模拟[J]. 物理学报，2001，50(12)：2423-2428.
YU Y M，YANG G C，ZHAO D W，et al. Numerical simulation of dendritic growth in undercooled melt using phase-field approach[J]. Acta Physica Sinica，2001，50(12)：2423-2428.

[18] 朱昌盛，王智平，荆涛，等. 二元合金非等温凝固相场法模拟[J]. 稀有金属材料与工程，2005，34(10)：1565-1568.
ZHU C S，WANG Z P，JING T，et al. Phase-field simulation of non-isothermal dendritic growth of binary alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2005，34(10)：1565-1568.

[19] ECHEBARRIA B，FOLCH R，KARMA A，et al. Quantitative phase-field model of alloy solidification[J]. Physical Review E，2004，70(6)：061604.

[20] KUNDIN J，RAMAZANI A，PRAHL U，et al. Microstructure evolution of binary and multicomponent manganese steels during selective laser melting：Phase-field modeling and experimental validation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2019，50(4)：2022-2040.

[21] XIAO W J，LI S M，WANG C S，et al. Multi-scale simulation of dendrite growth for direct energy deposition of nickel-based superalloys[J]. Materials & Design，2019，164：107553.

[22] GENG R W，DU J，WEI Z Y，et al. An adaptive-domain-growth method for phase field simulation of dendrite growth in arc preheated fused-coating additive manufacturing[J]. Journal of Physics：Conference Series，2018，1063：012077.

[23] WU L M，ZHANG J. Phase field simulation of dendritic solidification of Ti-6Al-4V during additive manufacturing process[J]. JOM，2018，70(10)：2392-2399.

[24] WANG X，LIU P W，JI Y，et al. Investigation on microsegregation of IN718 alloy during additive manufacturing via integrated phase-field and finite-element modeling [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2019，28(2)：657-665.

[25] GENG R W，DU J，WEI Z Y，et al. Multiscale modeling of microstructural evolution in fused-coating additive manufacturing [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2019，28(10)：6544-6553.

[26] ZHANG Y，JUNG Y G，ZHANG J. Phase field modeling of microstructure evolution in selective laser melting-manufactured titanium alloy[M]//Multiscale Modeling of Additively Manufactured Metals. Amsterdam：Elsevier，2020：141-154.

（下转第95页）

[45] LIU C, LI X, SHU S, et al. Numerical investigation on flow process of liquid metals in melt delivery nozzle during gas atomization process for fine metal powder production[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(10): 3192-3204.

[46] 张梦醒，王长军，陈清明，等. 气雾化参数对PH13-8Mo钢粉末特性的影响[J]. 金属热处理，2019，44(12)：112-115.
ZHANG M X, WANG C J, CHEN Q M, et al. Effects of processing parameters of gas atomization on characteristics of PH13-8Mo steel powders[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(12): 112-115.

[47] GAO C F, XIAO Z Y, ZOU H P, et al. Characterization of spherical AlSi10Mg Powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 374-384.

[48] LI X Y, DU J J, WANG L C, et al. Effects of different nozzle materials on atomization results via CFD simulation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(2): 362-368.

[49] 郭快快，刘常升，董欢欢，等. 导管伸出长度对气雾化制备TC4粉末特性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2018，39(6)：797-802.
GUO K K, LIU C S, DONG H H, et al. Effect of extension length of catheter on properties of TC4 powder prepared by electrode induction melting gas atomization[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(6): 797-802.

[50] ZHANG M, ZHANG Z M, ZHANG Y Q, et al. Effects of gas flow field on clogging phenomenon in close-coupled vortical loop slit gas atomization[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(6): 1003-1019.

[51] THOMPSON J S, HASSAN O, ROLLAND S A, et al. The identification of an accurate simulation approach to predict the effect of operational parameters on the particle size distribution (PSD) of powders produced by an industrial close-coupled gas atomiser[J]. Powder Technology, 2016, 291: 75-85.

[52] 王军峰，夏敏，吴嘉伦，等. 真空感应熔炼气体雾化过程中钢包喷嘴堵塞：导流管几何形状的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2022，51(9)：3214-3222.
WANG J F, XIA M, WU J L, et al. Ladle nozzle clogging in vacuum induction melting gas atomization: Influence of delivery-tube geometry[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(9): 3214-3222.

[53] 李洪喜. 超声激振喷嘴雾化数值模拟研究[D]. 太原：太原理工大学，2018.
LI H X. Numerical simulation of atomization of ultrasonic excited nozzle[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

[54] 徐金鑫，陈超越，沈鹭宇，等. 层流气体雾化制粉工艺粉末形貌及雾化机理[J]. 物理学报，2021，70(14)：134-148.
XU J X, CHEN C Y, SHEN L Y, et al. Atomization mechanism and powder morphology in laminar flow gas atomization[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(14): 134-148.

[55] 杨军，王晓峰，葛正浩. 气雾化法制备3D打印金属粉末的技术研究进展[J]. 粉末冶金工业，2022，32(1)：69-77.
YANG J, WANG X F, GE Z H. Study on the technology of gas atomization for production of 3D printing metal powders[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(1): 69-77.

(上接第86页)

[27] CHU S, GUO C W, ZHANG T X, et al. Phase-field simulation of microstructure evolution in electron beam additive manufacturing[J]. The European Physical Journal E, 2020, 43(6): 35.

[28] GENG S N, JIANG P, SHAO X Y, et al. Effects of back-diffusion on solidification cracking susceptibility of Al-Mg alloys during welding: A phase-field study[J]. Acta Materialia, 2018, 160: 85-96.

[29] YU F Y, JI Y Z, WEI Y H, et al. Effect of the misorientation angle and anisotropy strength on the initial planar instability dynamics during solidification in a molten pool[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 204-214.

[30] XIONG L D, WANG C M, WANG Z M, et al. The interaction between grains during columnar-to-equiaxed transition in laser welding: A phase-field study[J]. Metals, 2020, 10(12): 1647.

[31] GENG S N, JIANG P, GUO L Y, et al. Multi-scale simulation of grain/sub-grain structure evolution during solidification in laser welding of aluminum alloys[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119252.

[32] XIONG L D, ZHU G L, MI G Y, et al. A phase-field simulation of columnar-to-equiaxed transition in the entire laser welding molten pool[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 858: 157669.

[33] BAILEY N S, HONG K M, SHIN Y C. Comparative assessment of dendrite growth and microstructure predictions during laser welding of Al6061 via 2D and 3D phase field models[J]. Computational Materials Science, 2020, 172: 109291.

[34] TAKAKI T, ROJAS R, SAKANE S, et al. Phase-field-lattice Boltzmann studies for dendritic growth with natural convection[J]. Journal of Crystal Growth, 2017, 474: 146-153.

[35] CAO L C, LIU D H, JIANG P, et al. Multi-physics simulation of dendritic growth in magnetic field assisted solidification[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118673.