

金属材料的相变动力学与微观结构调控

何勇

天津象屿铝业有限公司, 天津 300000

DOI:10.61369/ME.2026070016

摘 要 : 金属材料最终呈现的各类宏观服役表现,本质上由其内部微观组织特征直接决定,而这些微观组态的形成,是相变过程中热力学驱动作用与动力学演化路径共同作用、彼此适配的结果。本文逐层梳理了扩散类相变和位移类相变的动力学作用原理与可控特征,拆解了热-动力学耦合作用在微观组织定制化设计中的核心地位,梳理了多尺度相场仿真技术的落地应用现状,同时结合增材制造、超快激光轰击、瞬时脉冲电加热等极端非平衡加工场景,阐明了相变动力学在其中不可替代的应用价值。最后梳理了当前领域尚存的研究难点,明确了从“依赖热力学筛选”转向“依托动力学定制”的研究范式迭代,是该领域后续发展的核心方向。

关 键 词 : 相变动力学; 微观结构调控; 热-动力学协同效应; 多尺度模拟; 非平衡加工

Phase Transformation Kinetics and Microstructure Control of Metallic Materials

He Yong

Tianjin Xiangyu Aluminum Co., Ltd. Tianjin 300000

Abstract : The final macroscopic service performance of metal materials is essentially determined by their internal microstructure characteristics, and the formation of these micro-configurations is the result of the interaction and adaptation of thermodynamic driving force and dynamic evolution path in the phase transition process. In this paper, the dynamic principle and controllable characteristics of diffusion phase transition and displacement phase transition are sorted out layer by layer. The core position of thermo-dynamic coupling in microstructure customization design is dismantled. The application status of multi-scale phase field simulation technology is sorted out. At the same time, combined with extreme non-equilibrium processing scenarios such as additive manufacturing, ultra-fast laser bombardment and instantaneous pulse electric heating, the irreplaceable application value of phase transition kinetics is clarified. Finally, the remaining research difficulties in the current field are sorted out, and it is clear that the iteration of the research paradigm from "relying on thermodynamic screening" to "relying on kinetic customization" is the core direction of the follow-up development in this field.

Keywords : phase transition kinetics; microstructure control; thermo-kinetic synergistic effect; multi-scale simulation; non-equilibrium machining

引言

金属材料的性能优化,是在加工环节里,把相变和变形过程催生的各类微观组织给拿捏准、调到位。从钢铁里珠光体、贝氏体、马氏体那些五花八门的形态,到钛合金里 α/β 两相的占比和长什么样,再到镍钛形状记忆合金里全靠马氏体相变撑起来的功能表现,微观结构能有这么多花样,全是相变走的路径和对应的动力学条件不一样带来的。做材料设计,大多是照着相图给的热力学平衡状态信息,照着这个去挑合金成分、定热处理的具体工艺参数。然而,工业实践中的相变过程绝大多数远离平衡态,其最终微观结构不仅取决于热力学允许的相变方向,更受制于相变动力学的具体路径——形核位置、长大速率、扩散系数、界面迁移率等因素共同决定了析出相的尺寸、分布与形态。换言之,“能够发生什么”由热力学决定,而“最终得到什么”则由动力学书写。

这几年原位表征、多尺度仿真还有极端非平衡加工技术一路往前冲,相变动力学这块的基础认知实打实往上迈了一大步。新的实验手段能把相变从开头到收尾的微观结构变化全跟下来,热-动力学协同调控的思路也不再是纸上谈兵,大伙终于搞明白相变和变形根本不是各走各的,是受同一套物理规律管着的耦合体系。这下微观组织设计直接多了新路子:只要把相变的动力学路径调准,在热力学允许范围内,就能做出常规工艺根本搞不定的特殊亚稳组织。这篇文章就把金属相变动力学和微观结构调控这块的核心问题、最新成果捋得明明白白,也把现在研究里卡脖子的地方和以后的发展方向掰扯清楚了。

作者简介:何勇(1982.11-),男,汉族,江西南昌人,本科学历,高级工程师,从事金属压力加工方向的工作和研究。

一、相变动力学的基本理论框架

（一）相变分类与动力学特征

金属材料里的相变，按原子运动的不同模式，能分成扩散型和位移型两大类，二者在动力学表现上有着根本性的不同。扩散型相变全靠原子做长程移动来推进，整体转变速率由原子扩散系数直接决定，随温度的变化规律完全符合阿伦尼乌斯关系式。奥氏体化、珠光体转变、析出沉淀这类转变都属于典型代表。这类相变里新相与母相的界面是非共格或者半共格的，界面往前推进需要原子一个接一个完成跃迁，所以整个动力学过程推进偏慢，受温度和保温时长的影响非常明显。位移型相变以马氏体相变为代表，靠原子集体切变完成晶格重构，原子移动距离不足一个原子间距，全程无需扩散。它以形核-长大推进，长大速度接近声速，自带无扩散、表面浮凸、固定取向关系等特点，转变量主要由降温幅度决定，几乎不受保温时长影响。两类相变之间还存在贝氏体这类兼具双特征的相变，其机制争议至今未消，足见相变动力学的复杂程度。

（二）经典形核-长大理论及其适用边界

平时做扩散型相变动力学分析，最常用的底层经典框架就是形核-长大的 JMAK 模型，它默认形核是在材料里随便均匀撒开的，晶粒从头到尾长的速度都不变，顺着这个思路算出来的转变比例随时间走的曲线，是以往的常用工具。但这套老办法碰到非等温过程、晶界先扎堆形核这种不是随机出核的情况，就有点水土不服了。最近不少研究都发现，好多纳米晶体系里，形核和长大的快慢节奏几乎凑到一块儿了，从头到尾都是俩过程结伴同步发生，经典理论里硬把俩环节拆开各算各的前提，已不能完全贴合实际情况了。

（三）相变动力学的实验研究方法

相变动力学相关研究，核心离不开对相变全程的动态实时追踪。早年常用的测试手段，无非是淬火-回火搭配金相观测、差示扫描量热法（DSC）、热膨胀法这几类。这类方法拿到的都是体系整体的宏观平均数据，根本抓不住相变最早期的形核事件，也没法识别局域区域的不均匀特征。最近，各类原位表征技术的快速迭代，给相变动力学研究带来了极大的推进。高温共聚焦激光扫描显微镜可直接实时观测高温相变过程里的晶粒长大和相界面迁移过程。同步辐射 X 射线衍射能够全程追踪相变过程中的晶体结构演变，时间分辨率可以达到毫秒甚至微秒量级。透射电镜配上原位加热台，还能在原子尺度捕捉相变的动态流程的细节。这些新的方法，给理论探索提供了关键支撑。

二、热-动力学协同效应与微观结构调控

（一）热-动力学相关性的物理内涵

以往大家习惯把热力学驱动力和动力学能垒拆成两个互不干涉的独立要素：前者管相变能不能发生，后者管相变推进得快不快。但近年大量研究证实二者存在深层绑定关联，温度、成分、应力场这类热力学状态的调整，会同步改变扩散系数、界面迁移

率、形核能垒等动力学参数，这种耦合特性就叫“热-动力学协同效应”。

拿析出相生长来说，过饱和固溶体的分解驱动力会跟着过冷度提升同步上涨，但过冷度拉满又会压低原子扩散效率，反过来拖慢析出相长大速度。所以析出强化的峰值效果，往往只对应某一个特定温度区间，这是二者动态博弈的结果，绝非单一要素能决定。更深层的耦合还体现在相变和塑性变形的互动里：变形引入的高密度位错、晶界既存贮了额外变形能给相变加驱动力，又能当异质形核的优先位点改形核节奏，这一点在形变诱发相变和 TRIP 效应里体现得格外充分。

（二）基于协同效应的微观结构设计策略

吃透热-动力学协同效应的逻辑后，微观结构设计就不再只靠调合金成分、改热处理温度来实现，转而能通过多手段联动，同步拿捏热力学驱动力和动力学演化路径。

时效析出强化就是最典型的落地案例：通过精准匹配时效温度和保温时长，就能把析出相的尺寸、数密度、共格状态控到最优区间，拿到最理想的强化收益。近年兴起的“析出-位错”协同设计思路更进一步：靠析出和位错的双向互动，既用析出相钉扎位错拉高材料强度，又借预先引入的位错充当异质形核位点，催生出大量均匀弥散的细析出相，最终实现强韧性同步提升。

放到纳米晶材料体系里，晶界弛豫算得上是独一份的调控路子：晶粒细化到临界尺寸往下时，面心立方金属就会触发晶界弛豫，直接把纳米晶的结构稳定性拉上去一大截。这种从热力学非平衡态往亚稳态转的过程，动力学窗口特别窄，对加工参数敏感到不行，刚好把热-动力学协同效应对微观结构演化的强约束给体现透了。

（三）多尺度相场模拟在机理研究中的应用

相场法本来就天生擅长处理不连续的界面问题，是大家研究相变动力学、看微观结构的核心实用工具。它把界面怎么挪、原子怎么扩散、弹性应变这些物理过程，全给归到同一个热力学框架里，从纳米到微米尺度的组织怎么变，它基本都能模拟出来。

多尺度相场模拟最绝的地方，就是能做到多角度串联：原子层面用第一性原理、分子动力学算出来的结果，能直接拿到相变热力学参数和界面本身的特性；把这些参数往介观相场模型里一输，就能准确预判出微观结构在时间、空间里的变化规律；再跟有限元方法搭到一块儿联动，还能进一步搞明白微观组织对宏观力学性能到底有啥影响。这套完整的方法，给材料设计搭起了从“摸透底层机理”到“提前预判性能”的全链条实用支撑。拿镁稀土合金里析出相和位错的互动举例，相场模拟不光算出了析出相应力场对位错的钉扎效果，还摸清了位错塞积反过来促析出形核的规律，给时效工艺优化、析出相形态定制提供了实打实的理论依据。

三、典型非平衡加工条件下的相变动力学

（一）增材制造中的超快热循环与相变路径调控

激光粉末床熔融（LPBF）这类增材制造工艺，核心特点是

冷却速率能冲到 $10^3 - 10^6$ K/s，还带着反复叠加的复杂热循环路径。这种极端工况下的相变动力学表现，和传统常规加工完全不是一个路数。就拿316L不锈钢作为实例来看，LPBF成形态材料依托超高速冷却过程，生成了胞状亚晶结构和极高的位错密度，这类远离平衡态的特殊组织在后续热处理环节的再结晶演化节奏，和传统塑性变形制备的试样差异显著。已公开研究明确显示，LPBF制备的316L试样再结晶推进速率远低于常规材料，核心诱因锁定在胞壁区域合金元素偏聚对位错运动的强钉扎作用上，为后续工艺优化提供了明确的调控方向。

（二）超快激光冲击诱导的相变与强化

飞秒激光冲击处理（FLSP）是另一类典型极端非平衡加工手段。飞秒激光脉冲在 10^{-15} 秒级的超短时长里把能量注入材料表层，能激发出超100 GPa的冲击压力，压力爬升速度远快于热传导的特征时间，能把热效应和力效应彻底拆解开。这种极端高压环境能直接打断金属键，放出来大量近自由原子，触发局域范围内的超快相变。在304不锈钢试样上，双脉冲飞秒激光冲击成功诱发了马氏体相变，表层硬度涨幅突破20%。机理分析显示，当冲击压力超过原子键合模量时，原有晶格会直接失稳，顺着特定晶体学取向完成相变。这套机制和常规热致相变完全不同，给微观结构调控开辟了非热调控的全新维度。

（三）快速电加热的动力学特征与微观结构响应

快速电加热技术依托焦耳热效应让材料极速升温，升温速率能冲到数百甚至数千K/s，还能靠调整电脉冲的脉宽、电流密度等参数，灵活定制整个热循环曲线的升降温节奏和保温时长。和传统箱式炉热处理比，优势一是超短加热时长直接扼住了原子的长程扩散行为，能把增材制造、冷变形引入的细晶亚结构稳稳保留下来，不会出现常规热处理里常见的晶粒粗化问题；二是电迁移

力、焦耳热催生的微区非均匀温场这类非热效应，会直接改写相变原本的动力学演化路径，催生出常规工艺很难得到的特殊亚稳组织。

拿TC4钛合金举例，快速电加热数秒就能完成 β 转变组织的精准调控，换成传统热处理得花几十分钟甚至几小时。这种效率跃升不只是升温快慢的差别，更是快速加热下相变动力学的特殊表现——晶粒长大的形核和长大过程被大幅抑制，相变全程被压缩在极窄的温度区间里完成，最终得到的双态组织综合力学性能远优于常规热处理试样。

四、结束语

相变动力学是串起合金热力学和微观组织调控的核心纽带，它的理论深度与工程价值，正随研究推进不断刷新认知。本文梳理了扩散、位移两类相变的动力学本征特征，拆解了热-动力学协同效应的底层物理逻辑与微观结构定制的落地路径，结合增材制造、超快激光冲击、快速电加热等主流极端非平衡加工场景，明确了动力学精准调控在先进制造工艺里不可替代的应用潜力。材料最终形成的微观结构，从来不是热力学单一要素就能决定的，而是热力学允许的演化路径和动力学能支撑的推进速率双向适配、协同塑造的结果，二者的深层耦合关联，给我们通过主动调控动力学演化路径，提供了扎实的理论支撑。后续该领域的研究会从高时空分辨原位表征技术、热-动力学协同定量建模框架、多尺度相场与机器学习融合三个方向持续突破，推动金属材料研发彻底从依赖相图的经验试错筛选，转向基于动力学路径定制的理性设计模式，给高性能金属材料的按需开发打开前所未有的广阔空间。

参考文献

- [1] 耦合热-动力学协同效应的多尺度相场模拟辅助金属材料设计[J]. 西安工业大学学报, 2025(05): 719-728.
- [2] In Situ Recrystallization and Phase Transformations in Laser Processing of Metals and Alloys: Microstructure Design and Monitoring[D]. EPFL, 2025.
- [3] 王悦. 塑性变形制备极小尺寸Ti-12Mo合金的细化机制、弛豫机理及相变行为研究[D]. 中国科学技术大学, 2025.
- [4] Ultrafast phase transformation and strengthening mechanisms in alloys induced by femtosecond laser shock[J]. Materials Science and Engineering A, 2025.
- [5] Phase transformation mechanism during heat treatment of Co-free maraging steel produced by twin-roll strip casting[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2025, 32(2): 1-12.
- [6] 刘峰, 黄林科, 陈豫增. 纳米晶金属材料中相变与晶粒长大的共生现象[J]. 金属学报, 2018(11).
- [7] Effect of Rapid Electrical Heating on Microstructure Evolution in TC4 Alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2026, 40(1): 39.
- [8] Kinetic modeling of δ -ferrite to γ -austenite transformation in martensitic stainless steel: microstructure prediction in laser powder bed fusion[J]. Materials and Design, 2025, 259: 114809.
- [9] 姜伟冬, 赵海东, 王果. 在铝液中热循环H13钢的软化行为[J]. 材料研究学报, 2024, 38(8): 593-604.
- [10] 王葛, 王亚杰, 李磊, 等. Cr5钢马氏体的相变塑性和应力对其相变动力学的影响[J]. 材料研究学报, 2018, 32(7): 481-486.