



浙江大学台州研究院
TAIZHOU INSTITUTE OF ZHEJIANG UNIVERSITY

2025

第六届相场法及集成计算材料工程论坛

会议手册

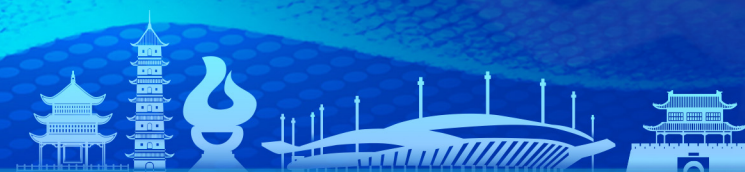
主办单位：

浙江大学台州研究院
全省先进固态储能技术及应用重点实验室

协办单位：

北京科技大学 中北大学 北京理工大学
西北工业大学 东南大学 中南大学 湘潭大学 浙江大学

2025年6月13-15日
中国·台州



目 录

第六届相場法及集成计算材料工程论坛	1
会议组委会.....	2
交通提示.....	3
日程安排.....	4
报告摘要.....	8



第六届相场法及集成计算材料工程论坛

当前，相场法及集成计算材料工程蓬勃发展。相场法及集成计算材料工程揭示材料在复杂服役环境下的结构、性质、力学性能、服役、腐蚀、失效、多铁性材料、介电击穿等，为形成从材料到结构件的全流程完整研究链、实现从“实验寻优”向“系统寻优”转变起到重要作用，构成材料基因工程范畴内的重要内容。

论坛已于 2017 年（西北工业大学）、2018 年（东南大学）、2019 年（中北大学）和 2023 年（北京理工大学）、2024 年（中南大学）连续举办了五届，深受领域内人士关注。为继续推动相关技术在材料与制造领域的应用，诚邀领域内专家、研究生、企业人士等于 2025 年 6 月 13 日~6 月 15 日相约浙江台州，共同探讨相场法及集成计算材料工程技术的最新进展与应用前景。

主办单位：浙江大学台州研究院

全省先进固态储能技术及应用重点实验室

协办单位：北京科技大学、中北大学、北京理工大学、西北工业大学、东南大学
中南大学、湘潭大学、浙江大学



会议组委会

名誉主席：

陈龙庆（美国宾州州立大学）

王云志（美国俄亥俄州立大学）

吴勇军（浙江大学/浙江大学台州研究院）

大会共同主席：

洪子健（浙江大学/浙江大学台州研究院）

赵宇宏（北京科技大学/中北大学）

张利军（中南大学）

黄厚兵（北京理工大学）

邢 辉（西北工业大学）

孙东科（东南大学）

刘运牙（湘潭大学）

唐 赛（中南大学）

组织委员会：

洪子健（浙江大学）

张利军（中南大学）

黄厚兵（北京理工大学）

邢 辉（西北工业大学）

孙东科（东南大学）

唐 赛（中南大学）

刘运牙（湘潭大学）

赵宇宏（北京科技大学/中北大学）

黄玉辉（浙江大学）

马 颀（浙江大学）

杜管诗涵（浙江大学）

陈周萍（浙江大学）

汲大力（浙江大学台州研究院）

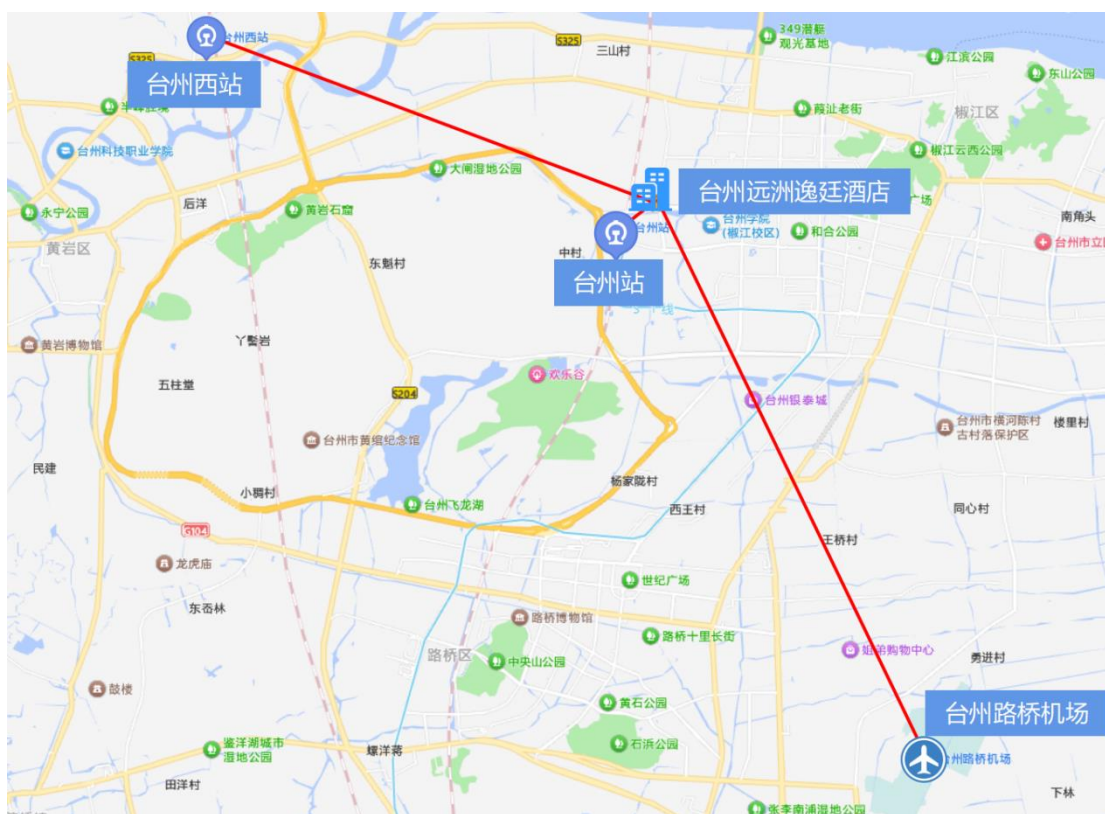
朱慧萍（浙江大学台州研究院）

闫玉芬（浙江大学台州研究院）

王小菊（浙江大学台州研究院）

交通提示

本次会议酒店为台州远洲逸廷酒店，地址为浙江省台州市市府大道西段 618 号。会场设在浙江大学台州研究院主楼一楼会议室，从酒店到会场步行约 5 分钟。本次会议不安排接送，台州一共有大型高铁站两个：台州站和台州西站，机场一个：台州路桥机场。会议酒店离台州站步行约 15 分钟，到台州西站打车约 20 分钟，到台州路桥机场打车约 40 分钟。请合理安排好您的行程。



联系方式

洪子健 (会务): 15958124084

马 飒 (会务): 18975136169

朱慧萍 (注册): 13736546732

会议邮箱: pfm_icme_2025@163.com



日程安排

2025 年 6 月 13 号 (地点: 台州远洲逸廷酒店)	
时间	内容
14:00-20:00	注册、报到
18:00-20:00	自助晚餐 (远洲逸廷酒店一楼零点餐厅)
2025 年 6 月 14 号 (地点: 台州研究院主楼一楼会议室)	
07:00-08:30	自助早餐 (远洲逸廷酒店一楼零点餐厅)
开幕式 (主持人: 洪子健研究员)	
08:30-08:40	吴勇军院长代表主办方致辞
08:40-08:50	赵宇宏教授代表大会主席团致辞
大会报告 (主持人: 洪子健研究员)	
时间	报告人/报告题目
08:50-09:35	报告人: Long-Qing Chen 院士 题 目: Thermodynamics of Irreversible Materials Processes
09:35-10:05	报告人: 王 杰 教授 题 目: 铁电材料的相场摄动法及其应用
10:05-10:35	报告人: 黄厚兵 教授 题 目: 原子尺度相场模拟铁电材料相变动力学
10:35-10:50	合影、茶歇
10:50-11:20	报告人: 张利军 教授 题 目: 定量相场模拟与材料设计
11:20-11:50	报告人: 柳文波 教授 题 目: 快中子堆金属燃料堆内微观组织结构演变的相场模拟
12:00-13:20	自助午餐 (远洲逸廷酒店一楼零点餐厅)

青年学者论坛（主持人：王杰教授）	
时间	报告人/报告题目
13:20-13:40	报告人：施荣沛 教授 题 目： The Influence of Particle Size and its Distribution on Microstructure Evolution and Densification Kinetics during Sintering - a Phase-Field Simulation Study
13:40-14:00	报告人：柯小琴 副教授 题 目： 2:17 型 Sm-Co 永磁体胞状结构形成机制的相场模拟研究
14:00-14:15	报告人：吴晓科 博士后 题 目： 有限界面耗散相场模型在定量高效描述镍基高温合金制备及服役过程微结构演变中的应用
14:15-14:25	报告人：安家托 题 目： A phase-field lattice Boltzmann model for thin-wall counter gravity casting supported by Graphics Processing Unite
14:25-14:35	报告人：张展鹏 题 目： EuTiO_3 薄膜的力电磁多场耦合对多热性能的机制分析
14:35-14:45	报告人：郑芊宸 题 目： 基于第一性原理机器学习构建钨合金热力学数据库
14:45-14:55	报告人：金衍成 题 目： 基于 P2D 模型与实测参数实现锂离子电池倍率充放电过程的定量数值模拟
14:55-15:05	报告人：和志坚 题 目： 通过可解释机器学习发现具有不同热导率的钙钛矿氧化物
15:05-15:15	报告人：张傲喆 题 目： Modulation of flux-closure polar state for enhanced storage unit and thermal conductivity via dual-probe excitation
15:15-15:30	茶 歇
青年学者论坛（主持人：柳文波教授）	
15:30-15:40	报告人：梁晨光 题 目： 基于相场法的激光选区熔化多场耦合建模研究
15:40-15:50	报告人：王书扬 题 目： 相场格子玻尔兹曼混合法模拟电场对下落液滴的影响规律
15:50-16:00	报告人：齐昭铭 题 目： Al-Si-Mg-Mo 四元系热力学数据库及其在 Mo 改性铸造铝合金中的应用



时间	报告人/报告题目
16:00-16:10	报告人：杜鑫磊 题 目：物理气相沉积薄膜生长的相场模拟研究
16:10-16:20	报告人：林 静 题 目：基于失配应变的 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.15}\text{Ti}_{0.85})\text{O}_3$ 薄膜多相共存调控
16:20-16:30	报告人：许 可 题 目：相场模拟反铁电畴调控和物理性能
16:30-16:40	报告人：牟信鹏 题 目： HfO_2 基铁电薄膜电畴结构和极化翻转机制研究
16:40-16:50	报告人：李源博 题 目：相场模拟拓扑压电性能
16:50-17:00	报告人：李欢庆 题 目：通过锯齿状晶界调控抑制纯 Mg 微裂纹扩展：晶体相场研究
17:00-17:10	报告人：孙哲韬 题 目：面向物理化学不均一性的二维恒流固态电池模型
17:10-17:20	报告人：钱 博 题 目：粘性烧结过程中微观结构演化的相场—细观力学研究
17:20-17:30	报告人：张纯彪 题 目：多层陶瓷电容结构电热响应分布及结构优化研究
17:30-17:40	报告人：何 超 题 目：基于自适应 BDF2 方法的粘性烧结相场模型高效数值模拟
17:40-17:50	报告人：付文杰 题 目：固态烧结过程中微观结构演化的相场细观力学研究
17:50-18:00	报告人：曹津铭 题 目：基于高通量相场模拟的 $\text{K}_{1-x}\text{Na}_x\text{NbO}_3$ (KNN) 薄膜平面内畴/畴壁竞争机制研究
18:00-18:10	报告人：张振辉 题 目：力热耦合疲劳断裂相场模型
18:10-18:20	报告人：谢雨航 题 目：离子辐照与退火处理对 HZO 铁电薄膜铁电性能调控的机理研究
18:10-18:30	报告人：刘思琴 题 目：连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印过程横晶演化规律的相场模拟研究
18:30-20:00	自助晚宴（远洲逸廷酒店一楼零点餐厅）

2025 年 6 月 15 号 (地点: 台州研究院主楼一楼会议室)	
07:00-08:30	自助早餐 (远洲逸廷酒店一楼零点餐厅)
邀请报告 (主持人: 黄厚兵教授)	
时间	报告人/报告题目
08:20-08:40	报告人: 王宇佳 研究员 题 目: 铁电薄膜中极性拓扑畴结构的发现
08:40-09:00	报告人: 陈伟津 教授 题 目: 铁酸铋薄膜极性微结构的力电操控实验与相场模拟
09:00-09:20	报告人: 杨天南 副教授 题 目: 铁电材料多功能的多物相调控
09:20-09:40	报告人: 易 敏 教授 题 目: 非等温相场模型及其热力学自治的思考
09:40-10:00	报告人: 杨庆成 教授 题 目: 面向增材制造烧结的相场-细观力学与深度学习计算力学方法
10:00-10:20	报告人: 李永胜 教授 题 目: 热力学预测驱动相场模拟设计 γ' 相强化 CoNi 基高温合金
10:20-10:30	茶 歇
邀请报告 (主持人: 杨天南副教授)	
10:30-10:45	报告人: 山东良 副教授 题 目: 铁电材料电卡效应理论计算及局域尺度直接实验表征
10:45-11:00	报告人: 张 洋 副教授 题 目: 铁电介电纳米复合薄膜介电储能的相场优化设计
11:00-11:15	报告人: 刘 泓 副教授 题 目: Mg-Y-Nd 合金中 $\beta_1\beta'$ 耦合结构的多尺度模拟研究
11:15-11:30	报告人: 董祥雷 副教授 题 目: 相场法模拟在区熔提纯与非平衡凝固过程中的应用
11:30-11:45	报告人: 彭金霖 讲师 题 目: 铁电材料电滞回线反演热力学能量系数的机器学习方法
11:45-11:55	报告人: 杜管诗涵 题 目: 铁电材料中的量子化涡旋及边缘钉扎效应
12:00-14:00	自助午餐 (远洲逸廷酒店一楼零点餐厅)
	离 会

报告摘要

铁电材料的相场摄动法及其应用

郑斯峥, 王杰*

浙江大学航空航天学院

(*Email: jw@zju.edu.cn)

铁电材料的微观畴结构对其宏观弹性、介电、压电和热导等特性具有决定性影响。在力电载荷作用下, 畴结构会发生演化, 从而显著改变材料的宏观物理特性。尽管现有理论模型能较好描述畴结构的准静态演化, 但在刻画其弹性动力学特性和稳定性方面仍有明显不足。因此, 构建畴结构弹性动力学特性和稳定性的定量分析模型, 对于铁电材料及其器件的性能研究与设计具有重要意义。本研究基于铁电相场模型与线性摄动理论, 提出了一种预测畴结构弹性动力学特性及稳定性的相场摄动模型 (PFPM)。该模型需与相场模型耦合使用, 二者关系类似于密度泛函微扰理论 (DFPT) 与密度泛函理论 (DFT)。首先利用相场模型获取平衡态畴结构作为参考态, 进而推导出极化相关的空间分布材料系数 (如弹性模量、压电系数和介电刚度), 将其代入 PFPM, 即可高效求解畴结构的色散曲线、等频曲线及谱响应等动力学特性。

基于 PFPM, 我们揭示了在 $[(\text{PbTiO}_3)_m(\text{SrTiO}_3)_n]_p$ 超晶格中, 极性涡旋的面外振动模式在临界外延应变或温度下会发生软化。这种模式软化在涡旋核心形成轴向极化, 从而引发手性相变。深入分析表明, 局部负介电常数在相变邻近处轴向极化的增强振动中起关键作用。该发现不仅阐明了极性涡旋手性相变的本源, 更为铁电系统拓扑结构与拓扑相变的动力学行为提供了重要新见解。采用 PFPM, 研究进一步揭示铁电块体材料中存在显著的 SV 波带隙, 其源于相邻畴壁间扩散畴壁的负剪切模量。在铁电薄膜中, 扩散畴壁处的局域剪切振动会引发多重带隙, 通过调节畴壁间距可有效调控带隙。这一结果不仅阐明了扩散畴壁对铁电材料弹性波传播的关键作用, 更为基于铁电周期畴结构设计主动可调的亚太赫兹声学超材料提供了新思路。

References

- [1] S. Zheng, J. Zhang, A. Li, J. Wang*, Origin of Chiral Phase Transition of Polar Vortex in Ferroelectric/Dielectric Superlattices, *Nano Letters* (2025)25:1397–1403.
- [2] S. Zheng, C. Liu, Y. Zhang, S. Shi, T. Xu, T. Shimada, J. Wang*, Giant Shear-vertical Wave Bandgaps Induced by Diffuse Domain-walls in Ferroelectrics. *International Journal of Mechanical Sciences* (2025) 294: 110239

本研究受到国家自然科学基金重点项目 (12432007) 的资助。

定量相场模拟与材料设计

张利军^{1,*}, 张童弟¹, 杨胜兰¹, 马飒¹

¹ 中南大学, 粉末冶金全国重点实验室, 长沙, 410083

[†]通讯作者: lijun.zhang@csu.edu.cn

摘要: 材料“成分-工艺-组织-性能”的定量关系是进行材料设计的核心。当前, 相场方法已广泛应用于不同材料在制备和服役过程中微观组织演化的模拟。然而, 当前大多数相场模拟远未达到定量水平, 从而阻碍了其在后续材料设计中的应用。

实现定量相场模拟的三个关键因素为: 建立定量相场模型、获取可靠的材料参数输入以及进行关键的实验验证。报告首先概述了近年来课题组在多元合金微结构演变定量相场模拟方面的尝试。随后, 展示了基于定量相场模拟在材料设计中取得的一些成功应用实例。最后, 将提出当前面临的挑战性问题, 并展望未来的发展方向。



快中子堆金属燃料堆内微观组织结构演变的相场模拟

柳文波教授

西安交通大学

在反应堆中使用高密度的金属燃料是提高核燃料利用率和降低乏燃料后处理成本的一种有效路径。但 U-Zr 金属燃料存在严重的辐照肿胀问题，造成这一现象的根本原因是不同相区的裂变气泡形核长大动力学截然不同，而金属燃料低燃耗下就出现的组分重分布、相分离及由此产生的大量界面是无法避免的。因此，研究金属燃料的裂变气泡形核长大及辐照肿胀行为具有重要的工程意义。然而，传统的速率理论无法处理不同相区和界面对裂变气泡形核长大及辐照肿胀的影响。基于相场理论在处理非均匀场形貌演化方面的优势，本工作将建立快中子堆金属燃料堆内微观组织结构演变的介观尺度理论模型，研究金属燃料的组分重分布、相分离及不同相区裂变气泡的形核长大及辐照肿胀行为。

The Influence of Particle Size and its Distribution on Microstructure Evolution and Densification Kinetics during Sintering - a Phase-Field Simulation Study

Lianghua Jiang¹, Yanchen Luo¹, Rongpei Shi^{1,2*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, 518055, China

²Institute of Materials Genome & Big Data, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, 518055, China

*Corresponding Author: Rongpei Shi. Email: shirongpei@hit.edu.cn

ABSTRACT: Most sintering models deal with ideal systems where particles of a constant size are uniformly packed and thus pores of the same size are uniformly distributed. The particle packing and distribution are an important parameter determining the sintering kinetics and resulting microstructure of real powder compacts. Although prior work confirms a connection among packing density, particle size distribution and densification kinetics, details of the underlying relationship remain poorly dened. Herein, we aim to de-convolute the underlying relationship by combining theoretical model for particle packing and a three-dimensional phase-field model for sintering that considers simultaneously mass transport along different paths and microstructure evolution (including neck growth, pore rounding and shrinkage) as well as the cooperative rigid body motions of particles as they fuse. Using green compacts consisting of bimodal mixture of spheres as an example, the sintering process is studied by varying the particle size ratio and the volume fractions of small particles. It is found that a higher packing density in green body with bi-disperse mixture is achieved compared with monosized spheres. However, the densification kinetics slows down when spheres of two different were mixed. In particular, the degree of slow-down increases with the size differences. The underlying mechanism is sought through the analysis of microstructure evolution, including grain growth and pore shrinkage/coarsening and their interplay.

2:17 型 Sm-Co 永磁体胞状结构形成机制的相场模拟研究

柯小琴，田奔

西安交通大学

2:17 型 Sm-Co 永磁体由于其具有优秀的高温磁能积性能而备受关注。经过研究发现，2:17 型 Sm-Co 永磁体优异的磁能积性能是源于其在时效过程中发生相分离过程形成的胞状结构，该胞状结构由 1:5H 相作为胞壁相形成基体，由 2:17R 相作为胞内相分散在基体中间，并且有意思的是，作为基体相的 1:5H 相的体积分数一般小于 40%，最低可达 18%。尽管胞状结构对 2:17 型 Sm-Co 永磁体的磁能积性能非常重要，但是目前对于 Sm-Co 永磁体为什么能够形成胞状结构仍不清楚。本工作中，我们通过建立相场模型去模拟 2:17 型 Sm-Co 永磁体的时效过程，成功模拟得到了和实验相符的胞状结构。我们发现 2:17R 相比较多的变体数是 2:17 型 Sm-Co 永磁体形成胞状结构的主要因素。并且，我们进一步研究了初始相有序度，以及 1:5H 相和 2:17R 相之间弹性模量差对 Sm-Co 永磁体胞状结构形成的影响。这些结果揭示了 Sm-Co 永磁体的形成机制，并为进一步优化 2:17 型 Sm-Co 永磁体的磁能积性能提供了新的视角。

有限界面耗散相场模型在定量高效描述镍基高温合金制备及服役过程微结构演变中的应用

吴晓科¹, 塔娜², 钟静³, 彭鹏^{1,*}, 张利军^{3,*}

¹ 兰州大学, 材料与能源学院, 甘肃, 兰州, 730000

² 北京科技大学, 材料科学与工程学院, 北京, 海淀, 100083

³ 中南大学, 粉末冶金国家重点实验室, 湖南, 长沙, 410083

*通讯作者: pengp@lzu.edu.cn, lijun.zhang@csu.edu.cn

摘要: 镍基高温合金以其优异的高温力学性、抗蠕变、抗氧化等性能广泛应用于航空航天发动机和涡轮叶片。但镍基高温合金组元众多,且制备过程涉及定向凝固、固溶和时效等,微结构跨尺度演变极为复杂,在服役过程还受到塑性载荷的影响,发生复杂筏化,实现其制备和服役过程微结构演变的高效定量描述难度大。

本文首先基于哈希表技术,构建 CALPHAD 类型数据通用耦合格式,发展了一种相场模拟的新型耦合方法,并开发了 C++接口程序实现了 CALPHAD 数据与有限界面耗散相场模型的高效耦合。经严格的基准测试其准确性和通用性后,实现了 Ni-Al-Ta 合金定量凝固过程的高效相场模拟,定量预测了冷却速率、温度梯度与微结构、一次枝晶间距、溶质偏析等的关系。随后,集成通用耦合方法、本工作发展的新型形核模型和并行加速技术,耦合两种类型镍基高温合金热力学数据库,实现了 Ni-Al 合金和 Ni-Al-Cr-Re 合金时效过程微结构演变的定量相场模拟。随后,耦合弹塑性有限界面耗散相场模型,模拟了 Ni-Al-Cr 合金服役过程在外加塑性载荷下的定向筏化行为,并讨论了拉/压载荷对 γ' 相形貌演变的影响。本文成功实现镍基高温合金制备和服役过程微结构演变的定量高效相场模拟,将为镍基高温合金制备工艺的优化和新型镍基高温合金的设计提供有力支撑。

关键词: 镍基单晶高温合金, 定向凝固, 固溶, 时效, 形核, 相场法, 服役

A phase-field lattice Boltzmann model for thin-wall counter gravity casting supported by Graphics Processing Unite

Abstract: Counter gravity casting (CGC) methods are good at fabricating thin-wall castings, which are broadly used in many industry aspects. However, few systematic studies have been done on the solidification mechanisms of CGC methods, which are important to practical industry production. By coupling the phase-field method (PFM) and multi-relaxation time lattice Boltzmann method (MRT-LBM), the effects of cooling rate, temperature gradient, thin-wall thickness, and forced convection on the dendritic morphologies and primary dendrite arm spacing (PDAS) were studied with single Graphics Processing Unite (GPU) (NVIDIA Tesla V100-SXM2). When the temperature gradient (G) was 4 K/mm, and the cooling rate (VL) increased from 1 K/s to 2 K/s, the development degree of secondary dendrites increased, and the average PDAS would decrease from $530.364 \pm 120.473 \mu\text{m}$ to $516.369 \pm 111.416 \mu\text{m}$. When the cooling rate was 1 K/s, and the temperature gradient increased from 2 K/mm to 20 K/mm, the secondary dendritic morphologies had few changes, the average PDAS decreased from $712.316 \pm 123.004 \mu\text{m}$ to $473.016 \pm 14.815 \mu\text{m}$. When $G=4$ K/mm, $VL=1.2$ K/s, and the thin-wall thickness decreased from 3 mm to 0.5 mm, due to the restrained growing space, the secondary dendrites vanished. With the increase of the pressure gradient, the deflection angles of directional dendrites increased from $3.372 \pm 1.19^\circ$ to $11.16 \pm 0.495^\circ$. Later, the convection strengths would decrease, and the deflection degrees would decrease too. This systematical study can be meaningful for understanding the solidification process of CGC and can provide some guidance to practical thin-wall CGC experiments.

Keywords: Counter gravity casting (CGC), phase-field method (PFM), multi-relaxation time lattice Boltzmann method (MRT-LBM), Graphics Processing Unite (GPU), primary dendrite arm spacing (PDAS)

EuTiO₃ 薄膜的力电磁多场耦合对多热性能的机制分析

张展鹏^{1*}, 刘运牙¹

(1.湘潭大学材料学院, 湘潭 411105)

*Email: 201905720114@smail.xtu.edu.cn;

摘要: 多铁性材料因具备耦合效应在多种前沿领域展现出巨大应用潜力, 然而, 多场耦合效应诱导多热效应的内在机制仍不明晰, 限制了多铁性材料的深度应用与拓展, 特别是多铁性材料 EuTiO₃。基于非线性热力学分析, EuTiO₃ 薄膜材料的电场、应力场、磁场、电磁场、电力场、力磁场和力电磁场在居里温度附近的相变、温变被探究。我们发现多外场同时施加产生的温变会产生不同于单个外场分别施加产生的效果, 具体会产生 $1 + 1 > 2$, $1 + 1 < 2$, $1 + 1 = 2$, $1 + 1 + 1 > 3$, $1 + 1 + 1 = 3$, $1 + 1 + 1 < 3$ 的效果。进一步分析原因, 由于耦合项的存在, 外加场对所有序参量都有影响, 而不同的序参量对温变的强弱影响不同, 因此总体上就造成了 $1 + 1 > 2$ 等的效果存在, 我们提供了一种多外场增强多热效应的新途径。

关键词: 多铁性材料, 多场耦合, 非线性热力学, 多热

基于第一性原理机器学习构建钨合金热力学数据库

郑芊宸，唐赛，马运柱，刘文胜

中南大学轻质高强结构材料国家级重点实验室，湖南省长沙市，410083

摘要：传统钨基合金由硬质纯钨颗粒与延展性 γ 相（W-Ni-Fe）黏结相组成，是国防军工领域具有战略意义的金属材料。基于硬脆钨相与塑性 γ 相的协同强化机制，典型商用 90W、93W 及 95W 合金成功实现了强度-塑性的优化匹配。然而该材料体系自 1960 年代发明以来，其力学性能已进入停滞期，难以满足现代超高速侵彻武器对材料极端服役性能的需求。合金化方法是突破性能瓶颈的重要途径，但热力学数据库的缺失严重制约了合金的成分优化。传统热力学数据库构建依赖大量扩散偶实验，而钨合金体系固有的难熔特性（熔点 $>3400^{\circ}\text{C}$ ）导致实验周期漫长，实验难度高。采用电子密度泛函理论计算方法可以在缺乏大量实验数据的前提下构建数据库。然而通过第一性原理计算建立基础热力学参数，构建数据库所需的计算量随着体系元素的增加而呈指数式提升，引入机器学习方法可以大幅度减少计算量。本研究利用机器学习模型构建了七元钨基合金体系的热力学数据库。相比单纯通过第一性原理计算，计算量大幅减少了约 80%。最终形成的热力学数据库与合金已有理论数据和实验相图吻合较好，并可为钨基合金的成分与烧结工艺设计，包括合金元素配比优化、液相烧结温度窗口确定等方面，提供有效的理论和数据支撑。

关键词：钨合金；热力学数据库；机器学习；第一性原理计算

基于 P2D 模型与实测参数实现锂离子电池倍率充放电过程的定量数值模拟

金衍成¹, 杨静¹, 唐晓伟², 康盼¹, 江幸松¹, 张利军^{1,*}

¹ 中南大学, 粉末冶金全国重点实验室, 长沙, 410083

² 江西赣锋锂电科技股份有限公司, 新余, 338000

*通讯作者: lijun.zhang@csu.edu.cn (L.Z.)

摘要: 随着人们对电池容量需求的日益增长, 现有锂离子电池 (LIBs) 的能量密度已逐渐无法满足需求, 亟需实现锂离子电池能量密度的提高。论文基于伪二维 (P2D) 模型, 考虑质量守恒与电荷守恒, 建立了锂离子电池充放电过程的离子传递模型, 采用数值模拟方法描述了电池在充、放电瞬态过程中的锂浓度、电压和电流密度的变化, 以分析电池内部的电化学反应行为, 最终构建了描述电极结构与电芯容量、直流内阻、析锂边界和充放电曲线等电化学性能间定量关系的物理模型。

在上述搭建模型的基础上, 基于恒压间歇滴定法 (PITT)、小电流测试法、对称电极法 (eSCM) 等表征方法, 定量获取了磷酸铁锂 (LFP)-石墨电芯体系的电极嵌锂状态 (SOL)-平衡电势 (OCV) 曲线、电芯结构参数 (电极厚度、孔隙率、迂曲度等) 与动力学参数 (锂离子扩散系数、电极电导率、电极反应速率常数等), 并输入到模型中进行电化学模拟, 与实验结果对比发现, 所搭建的模型能够精准预测不同电芯体系的电化学性能, 预测平均误差仅 0.75 %, 最大误差仅 4.56 %。

此外, 模型还能够输出 LIBs 充放电过程任意时刻的锂浓度分布及电势分布, 能够帮助深入理解阳极镀锂过程及厚电极动力学过程, 是实现倍率性能优异且具有高能量密度的 LIBs 制备的关键。后续拟考虑电极表面 SEI 膜的形成过程等电极副反应, 实现电芯循环过程容量衰减的预测, 并结合机器学习方法, 构建厚电极制备工艺-电极结构-电芯性能间的定量关系, 实现电芯结构与电极制备工艺的优化。

关键词: 锂离子电池, 倍率性能, P2D 模型, 定量模拟

通过可解释机器学习发现具有不同热导率的钙钛矿氧化物

和志坚^{a,*}, 刘运牙^{a,*}^a 湘潭大学材料科学与工程学院

*邮箱: 201921001360@smail.xtu.edu.cn, yyliu@xtu.edu.cn

摘要: 钙钛矿氧化物(ABO_3)结构因其具有优异的物理性能在电子器件、能源转换等领域均是备受关注的候选材料。热导率作为直接影响钙钛矿氧化物热损坏和热能量转换的关键参数,且不同应用对其热导率需求的高、低往往不一样,迫切需求新方法预测 ABO_3 的热导率。为此,本工作收集了 ABO_3 型钙钛矿热导率实验数据,建立了预测其热导率的机器学习模型。通过 SHAP 方法解释机器学习模型的预测结果,发现容忍因子(t)、 ABO_3 的相对分子质量(m)与 B 位元素相对原子质量(m_B)是影响 ABO_3 型钙钛矿热导率的前三位特征。此外,还发现提升钙钛矿热导率的方法:选择相对分子质量在一定数值范围内,提高容忍因子和降低 B 位离子半径;反之,则可以降低其热导率。通过建立的机器学习模型预测了搜索空间中 ABO_3 型钙钛矿的热导率,发现了具有高热导率潜力的 $SrGeO_3$ ($10.85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) and $CeAlO_3$ ($10.48 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)以及低热导率潜力的 $BaNpO_3$ ($0.92 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)。通过第一性原理解释了它们具有高、低热导率的原因。本工作为探索不同热导率 ABO_3 型钙钛矿材料提供了新途经。

关键词: 钙钛矿氧化物; 热导率; 机器学习; 解释

Modulation of flux-closure polar state for enhanced storage unit and thermal conductivity via dual-probe excitation

Aozhe Zhang^{a,*}, Yunya Liu^{a,*}, Chihou Lei^{a,*}

^a Key Laboratory of Low Dimensional Materials and Application Technology of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

*E-mail addresses: 202321551558@smail.xtu.edu.cn (A. Zhang), yyluu@xtu.edu.cn (Y. Liu), chihou.lei@scranton.edu (C. Lei)

Abstract: Ferroelectric topological structures hold significant promise for high-density information storage by enabling long-term data retention through topological protection. However, severe power consumption and thermal effects associated with high-density integration often lead to device failure, making the synchronous achievement of high-density storage and thermal management a critical challenge. Addressing the limited exploration of oxygen-vacancy-mediated domain control in existing studies and the inability of single-probe excitation to drive flux-closure-to-skyrmion transitions, this work integrates phase-field simulations with multi-probe scanning probe microscopy (SPM). By modulating electric field uniformity, we simultaneously enhance storage density and thermal conductivity in PbTiO_3 (PTO) thin films. Further, synergistic regulation of uniform and localized electric fields, combined with oxygen vacancy engineering, enables controlled domain transformation. Key findings include: (1) dual-probe excitation promotes bidirectional in-plane flux-closure polarization states, increasing storage density and closure domain density while reducing domain wall density, (2) both double-staircase and paddle-like domain configurations exhibit large storage units and high thermal conductivity under dual-probe excitation; (3) oxygen vacancy engineering induces cyclic domain reconfiguration wherein flux-closure domains sequentially convert to double-staircase domains and subsequently to skyrmions, ultimately recovering the flux-closure phase. This study provides critical guidance for synergistically optimizing memory performance and thermal management in topological ferroelectric devices through multi-probe excitation and defect engineering.

Keywords: Dual-probe excitation; Thermal conductivity; Flux-closure domains; Topological domains.

基于相场法的激光选区熔化多场耦合建模研究

梁晨光¹, 易敏^{1,*}

1. 南京航空航天大学航空学院, 江苏, 南京 210016

摘要: 激光选区熔化是金属增材制造技术的一种典型代表, 制造过程中多物理场耦合特征显著, 涉及材料传热传质、相变、晶粒形核生长等复杂的物理现象, 对此我们采用相场法进行高保真建模研究。首先我们推导了满足热力学自洽的非等温气液两相流相场模型, 然后拓展到考虑熔化、凝固以及蒸发相变的气液固三相流体系。通过平直气液界面、气泡、液滴等案例的验证, 该模型具有良好的模拟效果, 并可以重现粉末尺度增材制造过程中的熔池行为, 特别是马兰戈尼效应、蒸汽反冲压力引起的熔池剧烈运动。在此基础上, 结合相场烧结模型, 用多组序参量进一步建立了热-流-微结构强耦合的相场模型, 不仅可以模拟熔池的流动, 还可以同时预测非平衡凝固过程中微结构演化。我们提出的非等温相场模型可以为激光选区熔化过程复杂物理现象的理解、微结构演化预测以及工艺参数优化, 提供有力支撑。

关键词: 相场法; 激光选区熔化; 熔池; 微结构演化

相场格子玻尔兹曼混合法模拟电场对下落液滴的影响规律

王书扬 邢辉*

西北工业大学

摘要: 液滴在电场作用下的动力学行为是自然界和工业技术中普遍存在的现象, 其研究对于大气环境、微流控技术、生物医学、能源环保等领域具有重要意义。传统液滴操控技术存在局限性, 而电场操控因其非接触、高精度和高灵活性的特点, 成为当前研究的热点。本文通过相场-格子玻尔兹曼方法构建二维全域模型, 结合 GPU-CUDA 并行计算技术, 系统研究了垂直和水平电场对液滴下落行为的影响, 揭示了电场强度与液滴形变、运动轨迹的关联机制。

研究首先建立了基于 Cahn-Hilliard 方程的相场模型和格子玻尔兹曼模型, 通过耦合电场力、表面张力和重力, 实现了多物理场的高效模拟。在垂直电场作用下, 液滴被显著拉伸为长条形, 其形变程度随电场强度增加而非线性增大; 水平电场则导致液滴扁平化, 尾部凹痕加深。数值结果表明, 电场通过改变液滴形状间接影响其运动速度: 垂直电场初期加速液滴下落, 但高电场强度下因阻力增大导致速度拐点提前; 水平电场则因液滴正面面积增大而显著减缓下落速度。此外, 研究还量化了液滴轴比与电场强度的关系, 发现液滴形变在临界电场强度后急剧加剧, 与已有实验结果相符。

本研究不仅为电场操控液滴提供了理论依据, 还展示了相场-格子玻尔兹曼方法在多相流模拟中的优势, 为相关工业应用和相关学科的研究提供了新思路。

关键词: 下落液滴; 电流体动力学; 相场模拟; 格子玻尔兹曼方法; GPU-CUDA 并行计算

Al-Si-Mg-Mo 四元系热力学数据库及其在 Mo 改性铸造铝合金中的应用

齐昭铭¹, 易旺¹, 金衍成¹, 张利军^{1,*}

1 中南大学, 粉末冶金国家重点实验室, 长沙, 410083

通讯作者: lijun.zhang@csu.edu.cn

摘要: “双碳”战略纵深推进背景下, 汽车产业正经历以轻量化为核心的绿色技术革命。Al-Si-Mg 铸造铝合金是汽车薄壁件中应用最广泛的轻量化材料。研究表明, Mo 是 Al-Si-Mg 合金中的一种优良变质剂, 具有变质长效性和高温稳定性等特点。因此, 构筑 Al-Si-Mg-Mo 合金体系精准的热力学数据库对揭示 Mo 改性铸造铝合金的凝固组织具有重要意义。论文拟以 Al-Si-Mg-Mo 四元系为研究对象, 采用相图计算 (CALPHAD) 方法辅以关键实验构筑 Al-Si-Mg-Mo 四元系热力学数据库。首先, 统一了体系中所有边界二元系热力学参数, 结合第一性原理计算和热力学优化方法获得了 Al-Mg-Mo 三元系热力学描述, 采用热力学外推方法构筑了 Al-Si-Mg-Mo 四元系热力学数据库, 并结合文献实验数据对其进行可靠性验证。基于构筑的热力学数据库, 采用非平衡 Scheil-Gulliver 模型预测了不同 Mo 含量下 Al-Si-Mg 和 Al-Mg-Si 铸造合金的凝固行为, 并分析了 Mo 添加对 Al-Si-Mg 合金和 Al-Mg-Si 合金凝固路径和凝固微结构的影响规律。

关键词: 铸造铝合金; Mo 改性; CALPHAD; Scheil-Gulliver 凝固模拟; 微结构

物理气相沉积薄膜生长的相场模拟研究

杜鑫磊, 邢辉*

西北工业大学

摘要: 作为一种重要的表面处理技术, 物理气相沉积在半导体、光电材料、涂层和纳米材料等领域具有重要的应用。在物理气相沉积过程中, 气相输送、表面粘附与扩散以及亚表面微观结构动力学之间相互作用复杂, 共同决定薄膜的最终表面粗糙度、形貌以及晶粒尺寸、形状、孔隙率、相分布等关键特性。这些微观结构特征直接决定了薄膜的性能, 并受到具体沉积条件的影响。相场方法基于 Ginzburg-Landau 相变理论用于模拟相变和其他过程中微观结构和界面的演变, 是一种直观且有效的研究物理气相沉积复杂过程的数值模拟手段。本文建立了基于 Cahn-Hilliard 方程的相场模型, 结合平滑界面法, 研究了物理气相沉积过程中薄膜生长的动力学过程研究了动力学参数对二元难混溶合金薄膜生长的影响。研究表明, 气-固界面失稳导致了薄膜生长过程中表面产生的小突起的形成, 在薄膜生长过程中自组织复合结构形貌调制随着沉积速度的增加发生了横向组分调制构型、垂直组分调制构型与随机组分调制构型的转变, 揭示了初始膜层的厚度对自组织复合结构形貌调制的影响规律, 证实了物理气相沉积薄膜生长的历史相关性。利用耦合平滑界面法的描述多晶薄膜生长的相场模型, 研究了多晶 TiN 阻隔层在刻蚀坑中沉积生长的动力学过程。结果表明, 刻蚀坑的几何形貌与生长动力学参数在多晶 TiN 阻隔层薄膜孔隙率调控中扮演着重要的角色, 对多晶薄膜孔隙率产生较大影响。发现较小的沉积速度将会生成较光滑的 TiN 阻隔层薄膜, 而较高的气体冲击速率有利于气相成分的补充, 使 TiN 阻隔层薄膜更为致密。

关键词: 物理气相沉积; 数值模拟; 相场法; 难混溶合金; TiN 阻隔层

基于失配应变的 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.15}\text{Ti}_{0.85})\text{O}_3$ 薄膜多相共存调控林静^a, 刘一宏^a, 刘运牙^{a,*}^a湘潭大学材料科学与工程学院

*邮箱: yylu@xtu.edu.cn

摘要: 铁电材料凭借其独特的极化特性,在力、电、热等多物理场耦合方面展现出巨大潜力,为其在固态制冷、存储器、传感器及热开关等领域的应用展现出了广阔的应用前景。近年来,多相共存成为调控铁电性能的重要策略之一。通过施加外场,可在铁电材料内部引入四方、正交、单斜等多相的共存结构。这种结构不仅开辟了亚稳态极化转换的新通道,更使得铁电材料的极化状态对温度或电场的响应更为敏感和剧烈,从而显著增强了其对外部刺激的耦合响应。 BaTiO_3 基固溶体在特定组分和制备条件下,天然倾向于形成多相共存结构。基于此,本以 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.15}\text{Ti}_{0.85})\text{O}_3$ 薄膜作为研究对象。通过相场法模拟了室温条件下,不同失配应变与电学边界条件下 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.15}\text{Ti}_{0.85})\text{O}_3$ 薄膜的畴结构演化,观察了各晶相体积分数随失配应变变化的演化趋势。研究结果显示,在不同电边界条件下,材料的相变行为差异显著。在短路状态下,由于极化可自由调节,促使晶相之间更为剧烈的转变,因此相变过程集中在一个较窄的应变范围内。相反,在开路状态下,极化受到电位限制,这使得系统倾向于形成低极化状态或极化分布不均的复杂结构,从而导致在更宽应变范围都能观察到多相共存的现象。这一现象揭示了应变和电边界条件对铁电薄膜多相共存结构稳定性的重要调控作用。

关键词: 铁电材料, 相场模拟, 多相共存

相场模拟反铁电畴调控和物理性能

报告人：许可 通讯作者：黄厚兵

单位：北京理工大学材料学院

以锆酸铅体系为代表的反铁电体具有区别于铁电体的反平行极化构型。在低电场强度下的线性极化响应和接近于零的剩余极化，使其在电介质储能领域具有潜在的应用价值。从畴尺度层面深入理解多物理场作用下的反铁电相变动力学过程，进而揭示畴翻转的物理机制，是设计具备高储能性能反铁电材料的关键。

本研究采用相场法引入次近邻极化相互作用，构建了反铁电相场模型。该模型能够通过调控梯度能系数比值，实现反平行偶极子周期数的调控，研究公度与非公度反铁电极化构型。针对陶瓷块体材料，重点研究了均匀应变，晶粒尺寸，缺陷偶极子等因素对储能性能的影响。基于多尺度反铁电畴调控方案，可使有效储能密度提升约 2.3 倍，效率提升约 2.6 倍。此外，在锆酸铅基薄膜体系中，深入研究了薄膜厚度和衬底失配应变因素。揭示了薄膜厚度减小伴随畴尺寸减小，降低损耗能量密度和拉伸应变提升相变电场等物理机制，多因素调控下的最高储能效率达到 98%。本研究为实验层面调控反铁电畴结构，设计高储能性能器件提供了理论基础。



HfO₂ 基铁电薄膜电畴结构和极化翻转机制研究

牟信鹏，杨琼*

(湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

*Email: 15675285950@163.com

摘要：铁电电子器件的高密度和低成本需求，要求铁电薄膜具有较好可微缩性和与半导体工艺的兼容性。近年，与 CMOS 工艺兼容、小尺寸下具有较好铁电性的 HfO₂ 基铁电材料的出现，有望突破铁电器件的发展瓶颈。我们针对 HfO₂ 基铁电薄膜的极化起源机理不明确的问题，主要基于第一性原理和分子动力学研究方法，研究和预测了 HfO₂ 铁电的多类型电畴结构，揭示了 HfO₂ 铁电的极化翻转和电畴演化机制。研究结果较好地解释了实验规律，对理解新型 HfO₂ 基铁电薄膜的铁电性起源和调控机理、推动新型高密度铁电器件的发展具有重要意义。

关键词：HfO₂ 铁电；电畴结构；极化翻转；第一性原理；分子动力学

相场模拟拓扑压电性能

李源博

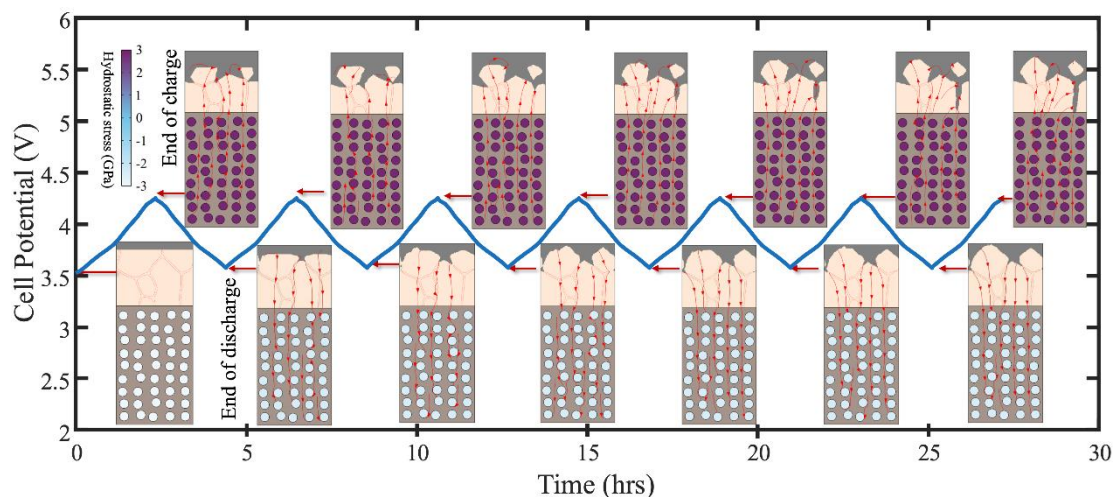
摘要: 铁电拓扑涡旋畴因其独特的物理性质和在下一代电子设备中的潜在应用而备受关注。然而,广泛的研究主要集中在低维纳米结构上,而涡旋畴在体铁电体中的作用知之甚少。这项研究首次提出了块状弛豫铁电晶体(即 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT)) 中涡流畴的直接实验证据。通过结合相场模拟,我们不仅确定了这些拓扑结构,还建立了涡核与压电性能之间的直接联系。值得注意的是,我们开发出了一种简单易行且可扩展的方法——机械辅助电极化——在 $[001]$ 方向的 PMN-PT 晶体中设计涡流畴密度。我们的方法包括在直流电极化过程中施加 6 兆帕的压应力,从而将涡核密度从传统极化样品中的 $\sim 0 \mu\text{m}^{-2}$ 提高到 $\sim 20 \mu\text{m}^{-2}$ 。这种受控畴工程可显著改善压电响应,这主要归功于涡核周围的局部应变场。这项研究标志着我们在了解块状铁电体拓扑结构方面迈出了重要一步,弥补了早期薄膜研究的空白,同时也为未来设备应用领域的创新开辟了一条设计高性能铁电材料的实用途径。



面向物理化学不均一性的二维恒流固态电池模型

孙哲韬, 薄首行*

摘要: 固态电池中, 由锂枝晶生长和颗粒体积变化等现象引起的显著力学化学应力等物理化学异质性, 在恒电流循环条件下从颗粒到电极的传播, 极大地决定了电池性能。然而, 由于传统模型 (如 P2D、单颗粒模型) 常假设均匀性, 这使得精确模拟在计算上极具挑战性。我们提出了一个基于电极自适应策略的真实二维(R2D)全电池模型, 包含物理化学异质性。在负极侧采用多晶相场方法描述枝晶演化 (耦合力、电、化学及界面物理), 在正极侧采用尖锐界面法追踪颗粒膨胀。同时, 针对恒流条件下电化学相关的非线性电流-电位响应, 我们通过泊松方程弱形式的数值处理方法, 整合电流约束, 从而提高迭代效率。该模型使我们能够高效模拟多周期充放电过程, 并量化多物理场耦合的影响。R2D 模型揭示了正极颗粒中 GPa 级的应力差, 以及枝晶如何优先沿异质晶界生长、不完全剥离并最终导致短路。作为首个针对异质性固态电池的动态演化模型, R2D 显著提升了建模效率, 为精确的全电池模拟和深入理解其衰退机制提供了新途径。



粘性烧结过程中微观结构演化的相场—细观力学研究

钱博¹, 杨庆成^{1,*}

1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海, 200070

摘要: 非晶聚合物颗粒的烧结行为主要由表面张力驱动的粘性流动主导, 其形貌演化过程复杂, 亟需借助系统的理论分析方法进行表征。为此, 本研究提出了一种具备热力学一致性的改进型粘性烧结相场模型, 用于揭示烧结过程中多物理量的时空演化规律。该模型基于能量变分原理构建, 通过预定义的自由能函数推导出控制方程, 满足自由能耗散条件, 从而确保动力学演化过程符合热力学第二定律。为准确区分颗粒与周围介质, 模型采用一个守恒序参量 C 来隐式表征玻璃态颗粒在烧结过程中的微观结构演化。颗粒的形貌演变由修正的 Cahn-Hilliard 方程描述, 而粘性流动则通过包含表面张力效应的 Stokes 方程加以刻画。为验证模型的有效性, 我们将其模拟结果与两圆柱模型烧结的解析解、ABS 颗粒烧结实验数据以及烧结过程图像进行了对比, 并进一步结合变温烧结实验对模型的预测能力进行了评估。在此基础上, 研究深入分析了颗粒接触半径与应变的演化规律、颗粒尺寸对烧结行为的影响以及烧结过程中的压力分布变化等关键特征量。这些演化特征的揭示, 有助于深入理解粘性烧结机制, 并为工业中高性能多孔材料的精准设计与制备提供理论支撑。

关键词: 相场模型, 粘性烧结, 表面张力, 微观结构演化



多层陶瓷电容结构电热响应分布及结构优化研究

张纯彪^a, 谢龙城^a, 山东良^{a,*}, 刘运牙^{a,*}

^a 湘潭大学 材料科学与工程学院, 湘潭市 411105

*邮箱: dlshan@xtu.edu.cn; yyliu@xtu.edu.cn

摘要: 多层陶瓷电容(MLCC)结构在电热制冷器件中展现出巨大的应用潜力, 这主要得益于其内部电极和电介质交错的结构。然而, 在电热效应发生以后, 其内部电极和电介质上的电热温变及热流分布尚不清楚, 制约了 MLCC 电热制冷性能的提升。因此, 我们采用有限元方法(FEM)研究了 MLCC 内部电热效应响应分布及热流传递情况, 揭示了在端子-端子方向内电极作为主要传热通道, 其总输运热量达 70%以上, 并通过扫描热显微镜(SThM)对 MLCC 剖面局域尺度的电热效应进行了定量表征, 验证了模拟结果。基于此结论, 通过有限元模拟优化了 MLCC 内部电极结构, 使其与外界热交换能力提升了 130%。进一步地, 我们采用有限元方法系统研究了电极层厚度、电介质层厚度、有效区面积及总厚度对多层铁电结构的电热制冷性能的影响, 为增强 MLCC 电热制冷能力提供了参考。

关键词: 多层陶瓷电容结构, 电热效应, 有限元模拟, 热传导

基于自适应 BDF2 方法的粘性烧结相场模型高效数值模拟

何超¹, 杨庆成^{1,*}

1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海, 200070

摘要: 粘性烧结是材料加工中的关键工艺, 其过程涉及高温下颗粒的粘性流动与致密化, 微观形貌的演变对材料力学性能具有决定性影响。相场法通过引入连续序参量来表征多相界面, 已成为模拟烧结过程中复杂微结构演变的重要工具。然而, 粘性烧结中的高度非线性控制方程 (如 Cahn-Hilliard 方程) 具有明显的刚性, 传统的显式或固定步长数值方法在稳定性和计算效率上存在不足。为提升求解精度和计算效率, 本报告引入了一种自适应时间步长二阶后向差分法。该方法利用 BDF2 在刚性适应性和高精度方面的优势, 能够有效处理相场模型中的非线性项及动态时间尺度变化; 同时, 通过能量变化率估计动态调整时间步长, 在演化剧烈阶段采用较小步长以确保精度, 在平缓阶段适当增大步长以降低计算成本。基于热力学一致的粘性烧结相场模型, 报告利用自适应 BDF2 方法对颗粒系统烧结过程进行了快速而高精度的数值模拟, 并通过相关数值算例验证了该方法在稳定性与效率方面的显著优势。

关键词: 相场法; 粘性烧结; 误差估计; 自适应时间步长; 二阶后向差分法 (BDF2)



固态烧结过程中微观结构演化的相场细观力学研究

付文杰¹, 杨庆成^{1,*}

1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海, 200070

摘要: 固态烧结作为粉末冶金与增材制造等生产技术中的关键工艺, 涉及离散金属或陶瓷粉末等颗粒在低于熔点温度下通过热传输形成致密体的过程, 深入了解微观结构的演变对于制造定制产品至关重要。现有的各种相场模型虽然能够模拟固态烧结中的微观结构演化过程, 但在正确纳入由晶粒运动所驱动的致密化机制上仍然存在挑战性。本报告引入了一种热力学一致的固态烧结相场模型, 用于模拟固态烧结过程中微观结构的动态演变。该方法通过变分原理推导强形式与弱形式的控制方程, 系统量化了扩散、晶粒运动及晶界生长迁移过程中的能量耗散, 消除了现有模型可能发生的虚假能量扩散, 确保了模型的热力学一致性。该相场模型通过理论和数值基准验证了其正确性: 在保持热力学平衡状态的捕获了应力分布、颈部生长, 颗粒收缩应变等参数, 模型结果与已有实验结果非常吻合。同时, 基于该热力学一致的固态烧结相场模型模拟了不同大小形状的多颗粒体系固态烧结, 有效揭示颗粒形状与粒径分布对烧结动力学与最终微观结构的显著影响, 为制造具有精确控制微观结构的高性能陶瓷和金属制品提供了潜在的应用。

关键词: 相场法; 固态烧结; 热力学一致性; 微细观力学; 晶粒运动

力热耦合疲劳断裂相场模型

张振辉¹, 易敏^{1,*}

1. 南京航空航天大学航空学院, 江苏, 南京 210016

摘要: 本文建立了一种热力耦合疲劳断裂相场模型来研究脆性材料在循环热力载荷下的疲劳行为, 通过引入随累积应变能衰减的疲劳退化函数和耦合损伤的传热方程来描述力热耦合的疲劳问题, 并在模型中引入温度相关的疲劳阈值和断裂韧性参数来描述温度相关的疲劳响应。一些数值示例揭示了该模型在模拟热力耦合疲劳断裂过程中的能力。首先进行了均匀单轴疲劳响应的基准模拟, 以验证模型的准确性并揭示模型的基本特征。随后进行了单边缺口试样和紧凑拉伸试样在热力耦合载荷下疲劳裂纹扩展模拟, 揭示了该模型在预测非均匀温度场下循环载荷作用的疲劳裂纹路径以及在非均匀温度场下复现 Paris 理论的能力。最后模拟了 V 型缺口试样在循环热载荷下的疲劳断裂行为, 展示该模型预测热疲劳裂纹扩展行为的能力。

关键词: 相场模型; 脆性断裂; 疲劳; 热力耦合; 循环热载荷



离子辐照与退火处理对 HZO 铁电薄膜铁电性能调控的机理研究

蒋丽梅，谢雨航

湘潭大学，材料科学与工程学院，411105

摘要：氧化铪(HfO_2)基铁电材料能很好地弥补传统铁电材料中出现的尺寸效应及与 CMOS 工艺不兼容等问题。但氧化铪基材料处于多相共存状态，因此铁电性不稳定。研究表明氧空位是稳定和控制氧化铪基铁电薄膜铁电相和铁电畴翻转行为的关键因素。本文提出从离子辐照诱生氧空位的角度出发来优化薄膜的铁电性。本文对实验制得的 HZO 薄膜样品进行了离子辐照实验并得到了相关性能数据，同时我们以辐照氧空位缺陷为桥梁将 SRIM 和相场模拟联系并建立了考虑离子辐照氧空位缺陷的多相共存 HZO 铁电薄膜模型并将模型数据同实验表征结果进行了对比。本文利用该模型研究了辐照条件对薄膜中诱生氧空位的影响、离子辐照条件对 HZO 薄膜铁电性的影响、辐照离子类型对薄膜铁电稳定性的影响。本工作阐明了离子辐照优化 HZO 薄膜铁电性能的基本原理，并给出合适的辐照条件，为离子辐照优化改性方面实验提供理论支持。

关键词：离子辐照；氧空位；氧化铪基薄膜；蒙特卡罗计算；相场理论

连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印过程横晶演化规律的相场模拟研究

刘思琴^{1*}, 易敏², 燕鑫¹

¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京, 100191

²南京航空航天大学航空学院, 南京, 210016

摘要:近年来, 3D 打印技术的飞速发展极大地推动了连续纤维增强热塑性复合材料在工程领域的广泛应用。然而, 在 3D 打印过程中, 纤维的引入会在热塑性树脂基体中引发复杂的结晶行为, 特别是在纤维表面形成横晶层, 这一现象对打印部件的机械性能具有极为关键的影响。尽管如此, 目前对于横晶生长演化规律的研究仍相对不足, 这在一定程度上限制了复合材料性能的进一步优化。本文开发了一种基于相场理论的数值模型, 用于模拟 3D 打印过程中半结晶聚丙烯复合材料的结晶过程。研究发现, 纤维表面特性、温度场分布以及纤维间距等关键因素的协同作用共同决定了横晶层的厚度和结晶时间。本研究不仅为优化晶体形态提供了重要的理论依据, 还为合理设计打印参数提供了切实可行的策略。

关键词: 连续纤维, 热塑性复合材料, 3D 打印, 横晶演化



铁电薄膜中极性拓扑畴结构的发现

王宇佳

摘要：铁电材料具有外场可控的极化，如何通过调控铁电极化，构筑具有新结构、新特性的功能基元，是铁电材料领域面临的基础性科学难题。铁电材料中的极性拓扑畴结构具有尺寸小，稳定性高等优点，有望应用于信息存储、传输等电子器件中。然而，极性拓扑畴结构要求的连续极化旋转使得它们很难被制备。本报告将介绍我们团队近年来利用应变调控手段，结合像差校正透射电镜与相场模拟等方法，在铁电材料中发现系列极性拓扑畴结构的工作，包括通量全闭合畴结构（*Science* 2015）、半子晶格（*Nature Materials* 2020）、布洛赫点（*Nature Communications* 2024）、斯格明子晶格（*Nature Nanotechnology* 2025）等。

报告人简介：王宇佳，中国科学院金属研究所研究员，博士生导师。2006 年本科毕业于华中科技大学，2012 年于中国科学院金属研究所获工学博士学位，2015 年至 2016 年在美国华盛顿大学做访问学者。已经发表 100 余篇学术论文，其中第一/通讯作者论文有 *Nature Materials*、*Nature Communications*、*Nano Letters*、*Acta Materialia* 等；主持国家自然科学基金委优秀青年基金、中国科学院青年创新促进会会员等项目；获得 2020 年辽宁省自然科学一等奖(4/5)、“兴辽英才计划”青年拔尖人才、中科院金属所师昌绪青年科技人才基金等荣誉。

铁电材料多功能的多物相调控

杨天南

上海交通大学机械与动力工程学院

铁电材料中的极化、应变、电子等序对外场的共同响应决定着材料的力、热、电学基本性质，是材料多功能的来源。其中，在具有两个或多个物相共存的铁电材料中，通过对材料多个稳定相与亚稳定相的能量进行精准控制，改变物相之间的相对稳定性，可有效调制材料序构对外场的响应，实现材料多功能宏观物性的关键调控。本工作中，我们利用相场模型方法，结合实验合作，展开了通过构造介观尺度多物相共存调控铁电材料多功能物性的研究，揭示了材料压电性质、电卡效应等材料物性的多物相调控的微结构机制。模拟了铌酸钠薄膜中反铁电-铁电相共存结构的形成与演化对力电耦合的作用，厘清了铁性相竞争大幅提升体系电致应变的作用规律，阐明了相变行为影响压电效应的原理；模拟了多种铁电相共存的钛酸钡基铁电材料的电卡效应，计算了多相共存形成的纳米极化团簇与极化界面对材料极化熵的贡献，揭示了通过纳米尺度极化结构设计提升体系电卡效应的热力学机制。本工作为利用多物相共存的微结构构造实现铁电材料的物性调控与性能优化设计提供了深入理解。

关键词：铁电材料，压电效应，电卡效应，物相调控，相场模型



非等温相场模型及其热力学自洽的思考

易敏

南京航空航天大学

非等温相场模型及其热力学自洽性是当前材料科学、凝聚态物理和工程热力学领域的重要研究方向，尤其在模拟相变、微观组织演化、强非平衡问题、热力耦合过程中具有关键作用。本报告将分享报告人对于非等温相场模型的思考，从热力学自洽的角度分析现有模型的特点，分别从 AC 方程、CH 方程、LLG 方程的模型构建、热力学自洽性及挑战等方面展开讨论。

面向增材制造烧结的相场-细观力学与深度学习计算力学方法

杨庆成^{1,*}, Arkadz Kirshtein², 武频³

1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海, 200070

2. Department of Mathematics & Statistics, Texas A&M University, Corpus Christi, Texas, 78412, USA

3. 上海大学计算机工程与科学学院, 上海, 200444

摘要: 在增材制造中, 准确模拟介观尺度的形貌演化对于预测烧结组件的性能和优化工艺参数至关重要。烧结过程涉及黏性流动、固态扩散等多机制耦合传质, 其致密化与收缩过程伴随复杂的形貌演化及显著的界面变形, 这给传统基于尖锐界面 (sharp-interface) 的计算模型带来了重大挑战。在本研究中, 我们提出了一种基于相场细观力学的新型计算框架, 用于模拟增材制造中的烧结过程。通过采用统一的能量形式和变分原理, 我们推导出控制微观结构演化的方程, 驱动力由表面张力和晶界张力显式表征。该热力学一致性方法确保系统向自由能最小化方向演化, 并通过与经典解析解及实验测量结果的对比验证了其有效性。为了提高计算效率, 我们提出了一种深度学习代理模型—SimGate。该模型利用初始短时数据预测烧结过程中粉体颗粒的长期形貌演化, 并展现了对未知微观结构的强外推能力。SimGate 将单次模拟的计算时间从传统相场方法的数小时缩短至数秒, 同时保持约 90% 的预测精度。此外, 误差分析结果显示, SimGate 相比传统的长短时记忆网络 (LSTM), 平均精度提升了 12.41%, 展现了其在计算力学和增材制造领域的应用潜力。

关键词: 相场法; 细观力学; 烧结模拟; 增材制造; 深度学习; 计算力学

热力学预测驱动相场模拟设计 γ' 相强化 CoNi 基高温合金

李永胜*, 宋俊鹏, 单野, 王晟龙

高端装备铸造技术全国重点实验室

先进金属及金属间化合物材料技术工信部重点实验室

南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京, 210094

*Email: ysl@njust.edu.cn

高温合金作为先进动力系统的材料, 其显微组织演变与力学性能的关联机制一直是材料设计的研究重点。近年来, 基于 $L1_2$ 有序 γ' 相强化的 CoNi 基合金体系因其优异的高温性能及较低的密度, 成为极具潜力的新型高温合金。本研究通过集成热力学计算、相场动力学模拟与实验验证, 研究合金元素对 γ' 相稳定性、组织演化动力学及力学性能的调控规律。

通过 Thermalcalc 和 JMatPro 设计具有 $\gamma+\gamma'$ 两相区的 CoNi 基合金, 实验验证预测成分和微观组织性能, 通过相场 (Phase-field) 模拟拓展成分区, 获得系列成分合金的微观组织、演化动力学规律。结果表明: γ' 相的析出过程呈现典型的形核-生长-粗化三阶段特征, 其动力学行为受成分依赖的界面能和弹性应变能共同调控。随着关键合金元素含量的变化, γ' 相的尺寸分布、体积分数及 γ/γ' 两相晶格错配度发生显著改变, 这种微观组织演变直接影响了合金的力学性能。通过建立热力学-动力学耦合模型, 揭示了溶质元素在 γ/γ' 两相间的分配行为及其对相稳定性的影响机制。实验表征结果验证了模拟预测的显微组织特征, 证实了相场模型在描述共格析出相演化过程中的可靠性。

本研究阐明了合金成分-微观组织-力学性能之间的构效关系, 证明了相场模拟作为定量预测工具在高温合金设计中的有效性。研究成果不仅为理解 γ' 相强化机制提供了理论基础, 更为开发新型高性能 CoNi 基高温合金提供了多尺度研究方法学指导, 对推进计算材料学在合金设计中的应用具有重要意义。

关键词: CoNi 基高温合金; γ' 相强化; 相场模拟; 组织演化; 多尺度设计

铁电材料电卡效应理论计算及局域尺度直接实验表征

山东良¹, Chihou Lei², 刘运牙¹

1.湘潭大学 材料科学与工程学院, 湘潭市 411105

2. Department of Physics and Engineering, University of Scranton, Scranton, PA 18510, USA

摘要: 基于铁电材料电卡效应的固态制冷技术显示出巨大的应用潜力,但目前常规铁电材料在室温难以获得大电卡效应,且微观结构与电卡效应间的关联还不明确,以及缺乏在局域尺度直接表征电卡效应的实验手段,这极大制约了电卡制冷技术的发展。基于此,我们通过考虑力学加载和外电场的非线性热力学方法,预测了力学调控下铁电外延薄膜的电卡效应,研究了化学成分、失配应变和应力对薄膜材料的相结构、相变温度以及电卡效应的影响。优化了力学加载下获得最佳电卡响应的调控参数,进一步提升了材料的电卡性能。基于相场方法研究了畴结构和畴壁对电卡效应的影响,发现随着畴壁密度的增加,材料的电卡效应得到显著提升。我们基于扫描热显微技术,发展了直接表征局域电卡效应的实验方法,在开放环境下对铁电单晶的电卡效应进行了表征研究,在获得局域尺度的电卡效应温度变化的同时得到了电致应变的信息,电卡效应与电致应变随温度变化趋势高度吻合,揭示了所研究的负电卡效应是由铁电-铁电相变引起的。为分析铁电材料复杂的电卡效应机理提供了新的途径。

关键词: 电卡效应; 铁电材料; 扫描热显微技术; 直接测量

铁电/介电纳米复合薄膜介电储能的相场优化设计

张洋

南京航空航天大学物理学院

zhangyang919@nuaa.edu.cn

摘要：介电电容器因具备超快充放电速率与超高功率密度，成为高脉冲储能系统的核心组件，但其较低的储能密度严重限制了进一步应用。本研究聚焦制约介电储能性能的关键矛盾——极化强度与击穿场强的内禀倒置关系，通过相场模拟方法系统研究铁电/介电自组装纳米复合薄膜的微结构设计与其性能调控机制。以 $\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3\text{-MgO}$ (PZT-MgO) 自组装树枝状纳米复合薄膜为模型体系，构建多种相场模型，定性或定量揭示了树枝状纳米结构的多重功能机制。研究发现，结构-界面-物相的协同调控显著提升了体系的储能密度、储能效率、击穿场强和抗辐照能力。通过相场模拟计算，优化设计后的纳米复合结构在储能密度和效率上均显著提高，与实验原型的结果高度吻合[1,2]，验证了模拟方法的可靠性。该工作加深了对铁电/介电纳米复合结构中结构与界面协同机制的理解，相场模拟所揭示的调控规律也为设计高性能储能电容器提供了新思路。

参考文献

- [1] *Science* 388, 211 (2025).
- [2] *Nature Communications* 16, 3882 (2025).

On the evolution of β_1/β' coupled-structures in Mg–Y–Nd alloys: A simulation study

Hong Liu

Shanghai Jiao Tong University
hong.liu@sjtu.edu.cn

Abstract: In magnesium alloys based on the Mg–Y–Nd system, the key strengthening precipitate phases, β_1 and β' , often form coupled-structures, with β' precipitates invariably attached to both ends of the β_1 . A question here is how the attached β' precipitates evolve as the β_1 lengthens within the solid magnesium matrix. To investigate this, this study uses a multi-scale model based on a three-dimensional phase field approach to simulate the evolution of β_1 and β' precipitates in a β_1/β' coupled-structure. The simulation results reveal that, during the evolution process, the β_1 precipitate lengthens, while the attached β' precipitates grow only at the side located along the direction of β_1 extension and dissolve at the opposite side. This results in a visual effect where the β' precipitates appear to “move” within the solid matrix. This phenomenon is governed by the interplay between chemical free energy and elastic strain energy. Chemical free energy promotes uniform growth of the β' precipitates. However, the elastic strain energy, generated by the β' precipitates and the stress field concentrated at the end of the β_1 plate to which they are attached, favours growth of only one side of the β' precipitates while causing dissolution at the other side. When the evolution of a coupled-structure is influenced by neighbouring coupled-structures, the evolution of β' precipitates is strongly driven by the minimization of elastic strain energy. In general, the β' precipitates tend to grow under tensile stress fields and dissolve under compressive stress fields.

Mg-Y-Nd 合金中 β_1/β' 耦合结构的多尺度模拟研究

刘泓

上海交通大学

Hong.liu@stu.cqupt.edu.cn

摘要: 在基于 Mg–Y–Nd 体系的镁合金中, 关键的强化析出相 β_1 和 β' 通常形成耦合结构, 其中 β' 析出相总是附着在 β_1 的两端。这里的一个问题是, 随着 β_1 在固态镁基体中延长, 附着的 β' 析出相如何演变。为了研究这一问题, 本研究采用基于三维相场方法的多尺度模型, 模拟了 β_1/β' 耦合结构中 β_1 和 β' 析出相的演变过程。模拟结果表明, 在演变过程中, β_1 析出相延长, 而附着的 β' 析出相仅在沿 β_1 延伸方向的一侧生长, 并在相反的一侧溶解。这导致了一种视觉效果, 即 β' 析出相似乎在固态基体中“移动”。这一现象由化学自由能和弹性应变能之间的相互作用所控制。化学自由能促进 β' 析出相的均匀生长。然而, 由 β' 析出相及其所附着的 β_1 板末端集中的应力场产生的弹性应变能, 仅有利于 β' 析出相一侧的生长, 同时导致另一侧的溶解。当耦合结构的演变受到邻近耦合结构的影响时, β' 析出相的演变强烈受到弹性应变能最小化的驱动。总体而言, β' 析出相倾向于在拉应力场下生长, 并在压应力场下溶解。



相场法模拟在区熔提纯与非平衡凝固过程中的应用

董祥雷

本研究以多元碲合金为对象，基于跨尺度方法来阐明结构演变与杂质分离效率之间的关联，揭示界面结构和晶粒竞争驱动下晶体择优取向的转变规律，为开发有针对性的深度提纯技术提供理论指导；以镍基高温合金为对象，探究快速凝固过程中非平衡组织的形成与演变规律，阐明带状结构的组织形态、成分偏析受到凝固条件的调控规律，为增材制造过程中的组织缺陷控制提供理论依据；以铜银基合金为对象，研究横向磁场、流场等多场耦合作用下非平衡组织的演变规律，阐明横向磁场对合金固/液界面形态，枝晶生长方向选择等的调控作用，为揭示枝晶在复杂外场条件下的非平衡凝固行为提供理论支持。

铁电材料电滞回线反演热力学能量系数的机器学习方法

彭金霖^{1,2*}, 和志坚², 张展鹏², 刘运牙²

1.湖南城市学院, 湖南, 益阳 413000

2.湘潭大学, 湖南, 湘潭 411105

摘要: 作为铁电材料理论研究的有力方法, 朗道-德文希尔热力学唯象理论的核心在于准确获取能量函数系数并构建可靠的热力学势。然而, 传统通过人工拟合获取能量系数的方法效率低下, 针对这一问题, 本研究提出了一种结合电滞回线特征提取与多层感知机(MLP)的机器学习方法, 成功实现了一维热力学能量系数的快速反演与性能预测。通过提取铁电、反铁电和顺电三相的电滞回线特征, 机器学习方法反演并构建的热力学势能准确预测材料的相结构、极化及介电常数, 且预测结果与实验数据展现出极佳的一致性, 验证了该方法的可靠性。若能将当前一维热力学势的预测框架拓展至三维体系, 将有望为铁电材料的多相态设计与性能优化提供强有力的数据驱动工具, 推动铁电材料理论研究与工程应用的协同发展。

关键词: 铁电材料; 朗道理论; 机器学习; 热力学系数

铁电材料中的量子化涡旋及边缘钉扎效应

杜管诗涵

拓扑相及其在铁电异质结构中的转变因其在新一代电子应用中的潜力而受到广泛关注。本工作研究了在 DyScO_3 (DSO) 衬底上外延生长的受限 $\text{PbTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ (PTO/STO) 异质结构中，量子化极化涡旋的形成与调控。通过打破 PTO/STO 超晶格的传统周期性边界条件，在受限的 PTO 层中诱导出有限数量的偶数涡旋，表现出量子化行为。这一现象得到了理论计算与实验观察的共同支持。能量分析表明，偶数涡旋数量的稳定性源于 Landau 能、弹性能、电静能和梯度能等多种能量成分之间的相互作用。在外加电场作用下的开关动力学研究表明，涡旋的手性与旋转方向可以通过电场方向加以控制，并且由于拓扑边缘钉扎效应，涡旋表现出显著的稳定性。这些发现为在铁电系统中实现极化拓扑结构的可控构筑提供了新思路，为实现极化态精确调控的纳米电子器件开辟了前景。

中国材料基因工程高通量计算平台（CNMGE）

平台网址：<http://mathtc.nsc-tj.cn/>



国家超级计算天津中心等10家单位依托国家重点研发计划“材料基因工程关键技术与支撑平台重点专项”打造了中国材料基因工程高通量计算平台（CNMGE）。CNMGE平台的主要特点：自动流程、高通量、多尺度。技术上，实现了跨互联网环境、云平台环境和超级计算环境的安全访问，搭建了中间传输层，自主开发了包括web端代码、工作流引擎、数据可视化、统一资源接口等一整套软硬件一体化系统。功能上，平台主要包括两大部分：高通量计算工作流和材料数据管理与应用系统。对用户 提供如下11项功能：信息总览、工具超市、高通量计算、登陆Shell、管理数据、材料数据库、共享数据库、势函数库、材料智能预测、数据可视化、国产自主软件社区。

HPC[1-3]	Intel Xeon E5-2690 v4, 2.60GHz, 28 cores,128GB
HPC3N	Intel Xeon E5-2697A v4, 2.60GHz,32 cores,128GB
HPC4	Intel Xeon Gold-6240, 2.60GHz, 36cores, 256GB
TH-eX	Intel Xeon Gold-6348 2.60GHz, 56cores, 256GB Intel Xeon Gold-6354 3.0GHz, 36cores, 256GB
TH-3F/3M	国产自主飞腾芯片, 64 cores, 128GB 国产自主飞腾芯片, 16 cores, 64GB
TH-1A	Intel Xeon X5670 2.93GHz , 12 cores, 24G/48G
人工智能系统	CPU: 2*Intel Xeon E5-2690 v4 主频2.6GHz, 28cores GPU: 2*K80, 单卡显存12G
	CPU: 2*Intel Xeon CPU Gold 6354 @3.0GHz 36cores GPU: 2*A100, 单卡显存80G
	CPU*2 Intel Xeon Platinum 8358 , 主频2.60 GHz, 64cores 8-GPU模组, NVIDIA HGX A100 8-GPU模组, 显存640GB, 支持第三代NVLink、第二代NVSwitch, GPU间互联带宽600GB/s, 聚合总带宽4.8TB/s

试用： 扫码在线填写信息，即可获取免费试用资源（一个月）；



官方公众号



李工程师

联系人： 李淑宁

电话： 022-65375591

手机： 17812015815

邮箱： lisn@nsc-tj.cn

DeepSeek全模型上线

产品形态多样 | 资源配置丰富 | 环境开箱即用

上市品牌 | 海量算力 | 按需使用 | 性能极致 | 十八年积累 | 数万用户选择

资源丰富

H20、H800、A100
5090、昇腾910C
12,000卡+GPU资源

性能极致

基于大模型应用运行特征
选型和优化
极致发挥计算性能

省钱

低至1.3元
每卡时

专业省心

专家团队、5分钟响应
7×24小时在线服务

服务规模

70万核+
自有算力资源

12,000卡+
GPU资源

10,000+
付费用户

200款+
应用软件SaaS化

20+
行业

300+
科研机构

400+
高校

500+
企业

算力服务 就选并行

已服务大模型客群（部分）



扫码关注并行科技

并行科技服务热线 400-092-0593

总部：北京市海淀区厢黄旗东路1号院清控银杏科技园2号楼4层 www.paratera.com

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]