

目录

几类点阵材料的结构设计及其力学性能表征	01
陈雪岩 / 哈尔滨工业大学	
三维条带与多孔状薄膜结构及器件的变形与失效行为研究	04
程 旭 / 清华大学	
空间轨道博弈模型拓展与深度强化学习方法	07
李振瑜 / 国防科技大学	
金属循环塑性与晶界裂纹萌生的理论模型	10
刘文斌 / 北京大学	
增材制造点阵结构力学性能各向异性研究	13
王书恒 / 西北工业大学	
三维微纳米点阵材料的构筑设计、制备与力学性能研究	17
王宇嘉 / 清华大学	
多胞超材料的波动特性优化研究	20
吴 昆 / 南京航空航天大学	
扭转范德华层状材料界面滑移行为研究	23
严炜东 / 武汉大学	
活性软物质的力化生耦合理论	26
尹思凡 / 清华大学	
大涡的发生与发声：亚音速自由剪切湍流中相干结构的非线性动力学和低频声辐射	29
张钟毓 / 天津大学	

几类点阵材料的结构设计及其力学性能表征



陈雪岩

哈尔滨工业大学
chenxueyan@hit.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2025/02/25/857405d5-02d3-474f-ac88-5c2c8ead9bf6.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

近些年来, 点阵材料因其卓越的力学性能受到人们的广泛关注。在点阵材料中, 杆件与杆件连接处存在几何构型复杂的节点。节点的存在必然会对点阵材料的力学性能产生影响。由于传统的线性模型对高相对密度实心点阵材料的力学性能预报过低, 且低相对密度空心点阵材料对缺陷高度敏感。有必要建立高密度点阵材料的力学分析模型, 全面评估节点效应对点阵材料力学性能的影响, 并基于节点效应, 进行新型轻质功能型点阵材料设计。

首先, 考虑节点处材料重合效应和杆件的弯剪耦合效应, 引入等效长度的概念, 提出一种适用于高相对密度八角点阵结构的理论预测模型, 用以预报其相对弹性模量和相对强度。理论预报结果与实验和模拟结果吻合较好, 验证了模型的准确性。研究结果表明: 相对压缩刚度和强度不仅取决于相对密度, 而且还与节点效应、弯曲和剪切力的影响有关。杆件节点处的材料重叠效应和剪力与弯矩的耦合效应将提高结构的相对弹性模量和相对强度。其次, 通过将空心球状节点引入到体心对称立方空心点阵结构中, 设计了类能吸收大量冲击能量的拉伸主导低密度点阵材料。本文列出了一些体心立方点阵材料的例子, 证明了其中薄壳点阵材料具有最佳的减震力学性能: 它们在低相对密度下具有高刚度、高强度和高吸能效率。

再次, 基于增强杆件抵抗弯剪变形能力和充分利用节点效应的设计理念, 通过将实心杆件替换为空心杆件, 提出了一类具有有限加载方向依赖、高力学性能和稳定非线性响应的简单立方封闭管状点阵材料。借助微尺度的激光直写技术成功的制备出了几何构型复杂的实验样件。实

验和模拟结果均表明：无论荷载方向如何，简单立方封闭管状结构的弹性模量和屈服强度均显著大于简单立方桁架结构。当相对密度为 0.1 时，封闭管状结构在 [100] 和 [110] 方向上吸收的应变能分别是桁架结构的 4.45 倍和 6.14 倍。另外，它的平均归一化杨氏模

量和屈服强度分别比同等质量的最优秀的开口薄壳超材料大 28% 和 53%。封闭管状材料的这些优异的力学性能使得它在承载和能量吸收方面具有广阔的应用前景。

然后，通过利用简单立方框架结构代替体心立方结构的中心连接节点，提出了一类新型轻质弹性各向同性的弯曲主导桁架点阵材料。并基于理论和数值预报结果，报道了它们的弹性模量和破坏强度。数值模拟结果表明：所提出的结构不仅表现出弹性各向同性响应，还具有近似各向同性的非线性响应。特别是在相对密度低于 1% 的情况下，本文所提材料的泊松比几乎达到了各向同性材料理论的上限 0.5。之后的单轴压缩试验证实了我们的设计，试验结果表明：与传统的体心立方桁架结构相比，所制备的材料具有 2 倍的相对模量、1.6 倍的相对失效强度和比能量吸收效率。这使得该材料在吸能和变换弹性动力学领域有潜在的应用前景。

最后，提出了一类新型的具有弹性各向同性性质的可重复使用的类软木点阵材料。它是从一类具有复杂节点形式的混合胞元优化而来，具有接近于零的各向同性泊松比。优化设计是通过基于有限元仿真结果的椭圆基函数神经网络和多目标遗传算法来实现的。使用激光直写技术制备的点阵材料的单元尺寸为 $300\mu\text{m}$ 。实验和模拟均表明：该材料具有近似各向同性的力学性能，它在所有方向上的泊松比均小于 0.08。在经过施加应变超过 20% 的压缩试验后，样件仍然可以恢复原来高度的 96.6%。

● 关键词

点阵材料、轻质、弹性模量、强度、能量吸收

作者简介 | Biography

陈雪岩，哈尔滨工业大学，副教授。2021 年毕业于哈尔滨工业大学工学，获得工学博士学位，入选 2023 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编，2022 年入选第一届黑龙江省青年人才托举计划。主要从事轻质点阵材料结构设计与力学行为表征研究，在点阵材料力学行为调控及机制分析等方面取得了一系列成果。目前，以第一作者 / 通讯作者身份在《J Mech Phys Solids》《Acta Mater》《Int J Solid Struct》《Extreme Mech Lett, Int J Mech Sci》等力学和材料顶刊发表 SCI 论文十余篇，并获得国家发明专利授权 5 项。主持国家自然科学基金青年项目及部委项目各 1 项，参与科技部重点国际合作项目和国家自然科学基金面上项目等。

● 主要创新成果

(1) 建立了等效长度模型, 预测了高相对密度实心八角点阵材料的弹性模量和压缩强度, 并实验确定了压缩响应由剪切模式向无屈曲模式转变的相对密度空间, 获得了节点效应和剪弯效应对压缩刚度和强度的响应规律。

(2) 设计并制备了具有高刚度、高强度和高比吸能的体心立方开口薄壳点阵材料和简单立方闭口管状点阵材料, 给出了最优性能对应的几何参数范围。

(3) 提出了利用节点效应设计各向同性材料的方法, 实现了一种具有近似各向同性非线性力学行为的弹性点阵材料的设计和一种泊松比接近于零的力学超材料优化设计。

● 代表性论文

[1] Chen X, Ji Q, Martinez J A I, et al. Closed tubular mechanical metamaterial as lightweight load-bearing structure and energy absorber. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 167: 104957.

[2] Chen X, Moughames J, Ji Q, et al. 3D lightweight mechanical metamaterial with nearly isotropic inelastic large deformation response. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 169: 105057.

[3] Chen X, Yu P, Ma H, et al. A class of elastic isotropic plate lattice materials with near-isotropic yield stress. *Acta Materialia*, 2024: 120085.

[4] Yu P, Zhang P, Ji Q, Yang F, Tan H, Chen X, Vincent L, Muamer K. A multi-step auxetic metamaterial with instability regulation. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 305: 113040.

[5] Chen X, Moughames J, Ji Q, et al. Optimal isotropic, reusable truss lattice material with near-zero Poisson's ratio. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 41: 101048.

[6] Chen X, Ji Q, Wei J, et al. Light-weight shell-lattice metamaterials for mechanical shock absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 169: 105288.

[7] Chen X Y, Tan H F. An effective length model for octet lattice. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 140: 279-287.

[8] Zhang P, Yu P, Zhang R, Chen X, Tan H. Grid octet truss lattice materials for energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 259: 108616.

三维条带与多孔状薄膜结构及器件的变形与失效行为研究



程旭

清华大学
xucheng@nus.edu.sg

● 全文链接：
<https://www.cstam.org.cn/profile/2025/02/25/73374ca5-38d7-4ffc-8f63-4643701d46f6.pdf>

● 扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

三维柔性电子器件是一类融合三维柔性细微结构与先进功能材料的新型器件。区别于传统柔性电子器件的平面物理架构，三维柔性电子器件具备更丰富的结构形态，从而可与环境进行更加多样的交互，在智能传感、能量收集和生物医疗等领域展现出广阔的应用前景。三维柔性电子器件显著的三维几何特征使其在服役中承受多样、复杂的力学载荷作用，因此其力学可靠性和器件性能稳定性问题显得尤为突出。本文聚焦于三维条带与多孔状薄膜细微结构的变形与失效行为，系统剖析其在典型力学载荷作用下的非线性变形模式、模式转变机制与失效行为，并基于此发展三维柔性电子器件的新设计策略。本文的主要研究内容和结论包括：

(1) 阐明了典型三维带状细微结构的压缩变形模式与失效机制，并提出了一种适用于三维带状柔性电子器件的抗疲劳设计策略。基于拱桥型带状结构的压缩大变形理论模型，构建了由面内、面外压缩应变和摩擦参数控制的变形相图；发现了螺旋型带状结构的五种新变形模式，并揭示了初始圆心角和粘附缺陷参数对其非对称变形模式的影响规律；进一步提出了一种可显著提高带状柔性电子器件寿命的抗疲劳设计策略，揭示了三维带状结构在循环压缩载荷作用下的聚合物主导失效机制。

(2) 提出了一种适用于三维高延展柔性电子器件的两步封装方法。通过剖析典型可延展带状结构在固态软封装材料中的约束变形模式，揭示了预拉伸对提升螺旋型及蛇形/分形带状结构弹性延展率的影响机制；在此基础上，研制了一种高延展的三维柔性天线，可应用于植入式生物电子器件的无线供能。

(3) 提出了一种基于仿生多孔策略的三维细微曲面定制化设计与制备方法。建立了中心对称型三维细微曲面定制化设计的解析理论模型，

揭示了多孔薄膜在面内压缩载荷作用下的离散变形机制，以及孔隙率分布和平均单胞尺寸对其变形模式的影响规律，并基于此实现了三维扭转型细微曲面手性的定制化设计。

(4) 通过三个应用实例阐释了所发展的新设计策略在多功能传感、健康监测等领域的应用潜力。设计并制备了一种仿生笼型多功能传感器件，通过优化三维多层笼型微结构的关键几何参数调控其压缩变形行为，实现了多级承载、抗塌陷粘附和力热解耦测量等功能；疲劳寿命均超十万次的双面解耦温度传感器件和低频振动传感器件则展示了抗疲劳策略对实现高力学可靠性三维柔性电子器件的重要作用。

● 关键词

三维柔性电子器件、非线性变形、疲劳失效、带状结构、多孔曲面

作者简介 | Biography

程旭，新加坡国立大学博士后研究员。2017 年 6 月于南京航空航天大学获得学士学位，2022 年 6 月于清华大学航院获得博士学位。博士学位论文指导教师为黄克智教授与张一慧教授，该论文入选 2023 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编，2023 年北京市优秀博士学位论文和 2022 年清华大学优秀博士学位论文。获评 2023 年瑞士乔诺法 Chorafas 青年研究奖。

程旭的主要研究方向为柔性结构与器件力学研究，在三维柔性结构的非线性变形理论、定制化设计方法与新型三维微电子器件研制方面取得了系列成果。目前以通讯作者、第一作者或共同第一作者身份在《Science》《J. Mech. Phys. Solids》《Nat. Sci. Rev.》《Adv. Mater.》（3 篇）《Adv. Funct. Mater.》《Mech. Res. Commun.》《Extreme Mech. Lett.》等学术期刊上发表 SCI 论文 12 篇，所研制的柔性器件获得 4 项中国发明专利授权。研究成果多次入选期刊封面文章，并得到同领域杰出专家的正面引用和评述。

● 主要创新成果

(1) 三维柔性结构的压缩变形理论与抗疲劳方法

该部分工作研究了典型三维带状结构的压缩变形模式与模式转变机制，建立了拱桥型带状结构的压缩变形理论模型，构建了由面内、面外压缩应变和摩擦参数控制的变形相图；提出了一种新型抗疲劳设计策略，揭示了三维带状结构在循环压缩载荷作用下的聚合物主导失效机制，并基于此建立了该类结构疲劳寿命的预测方法。该抗疲劳设计方法在高力学稳定性三维柔性传感器件的研制中取得重要应用。

(2) 三维柔性结构的两步封装方法与延展性增强机制

该部分工作提出了一种适用于三维高延展柔性电子器件的两步封装方法，其通过在软封装过程中引入预拉伸实现了远超传统一步封装方法的弹性延展率。研究了典型可延展结构的封装约束变形模式，揭示了顶部扭转变形和拉伸屈曲变形对增强螺旋型和蛇形 / 分形结构弹性延展率的作用机制，并在超大应变载荷条件下的无线供能器件中实现重要应用。

(3) 三维柔性细微曲面结构的定制化设计方法

该部分工作提出了一种仿生微点阵设计方法以精细调控二维薄膜的刚度分布特征,并基于逆向设计理论模型与计算方法构建三维曲面曲率与微点阵孔隙率的映射关系,实现了数十种三维复杂细微曲面的定制化设计与制备。进一步的,提出了一种基于双层条带网络的三维独立曲面设计方法,构建了三维独立曲面曲率与双层条带网络应变参数的解析映射关系。研制出集成光刺激-消融-传感功能的三维心脏器件,仿生双模驱动器件和仿视网膜电子细胞支架,在生物电子学、微机器人等领域取得重要应用。

● 代表性论文

[1] Cheng X, Fan Z, Yao S, Jin T, Lv Z, Lan Y, Bo R, Chen Y, Zhang F, Shen Z, Wan H, Huang Y, Zhang YH. Programming 3D curved mesosurfaces using microlattice designs. *Science*, 2023, 379: 1225-1232.

[2] Cheng X, Zhang F, Bo R, Shen Z, Pang W, Jin T, Song H, Xue Z, Zhang YH. An anti-fatigue design strategy for three-dimensional ribbon-shaped flexible electronics. *Advanced Materials*, 2021, 33: 2102684.

[3] Cheng X, Zhang YH. Micro/Nanoscale 3D assembly by rolling, folding, curving and buckling approaches. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1901895.

[4] Cheng X, Xu S, Jin T, Shen Z, Zhang YH. Bifurcation and mode transition of buckled ribbons under oblique compressions. *Mechanics Research Communications*, 2023, 131: 104145.

[5] Cheng X, Liu Z, Jin T, Zhang F, Zhang H, Zhang YH. Bioinspired design and assembly of a multilayer cage-shaped sensor capable of multistage load bearing and collapse prevention. *Nanotechnology*, 2021, 32: 155506.

[6] Li K, Cheng X, Zhu F, Li L, Xie Z, Luan H, Wang Z, Ji Z, Wang H, Liu F, Xue Y, Jiang C, Feng X, Li LM, Rogers JA, Huang Y, Zhang YH. A generic soft encapsulation strategy for stretchable electronics. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29: 1806630.

[7] Shen Z, Hu X, Tang Z, Xiao Y, Wang S, Cheng X, Zhang YH. Curvature programming of freestanding 3D mesostructures and flexible electronics based on bilayer ribbon networks. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2024, 191: 105766.

[8] Cheng X, Zhang YH. Nonlinear compressive deformations of buckled 3D ribbon mesostructures. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 42: 101114.

空间轨道博弈模型拓展与深度强化学习方法



李振瑜

国防科技大学
lyz19940218@126.com

全文链接：

<https://www.cstam.org.cn/profile/2025/02/25/52324602-2ced-495a-a35c-c1106396b16a.pdf>

扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

太空是国家安全和利益决胜的新空间。当前我国在轨航天器正面临侦察监视、抵近操控等诸多严峻威胁，亟需解决天基态势感知博弈问题、追逃拦截或交会博弈问题以及卫星集群部署带来的多航天器博弈问题等。但考虑目标机动逃脱、任务多约束限制、态势感知延迟、轨道不连续机动等因素后，解决这些问题将同时面临模型构建和求解两方面的难题，例如脉冲机动下的轨道博弈超出传统微分博弈的可微模型范畴、多航天器间复杂的合作 / 对抗博弈关系使得模型难以构建和求解等，亟需理论突破。本文综合轨道动力学、博弈论、人工智能等方法，针对上述典型轨道博弈问题的建模和求解方法进行研究，主要的内容和成果总结如下：

(1) 提出了航天器在轨光学成像博弈模型和 ε -false 纳什均衡求解方法。当前国际上缺乏对光学成像博弈问题的系统研究，本文以光学成像博弈为场景，建立了包含距离、阳光角、角速度、线速度的多因素成像博弈模型，设计了能同时处理多个因素边界约束的近似开关型支付函数，推导了纳什均衡解的必要条件，引入了 ε -false 纳什均衡的近似解概念并证明了其存在性。进一步，提出了求解 ε -false 纳什均衡的协态优化方法。经仿真对比，本文的多因素博弈模型相比单因素博弈模型和加权二次型多因素模型在策略效果上具有明显优势；所提协态优化方法在求解精度 ε -false 和效率上均超越了现有的纳什均衡解法。

(2) 提出了航天器脉冲机动拦截博弈模型和斯坦伯格均衡的求解方法。现有微分博弈理论仅能解决连续机动博弈问题，缺乏脉冲机动博弈模型，如果进一步考虑态势感知延迟的影响，博弈模型将更加复杂。为解决该问题，本文分析了态势感知时延和脉冲机动间隔的关系，建立了同时决策型、序列决策型和自由决策型脉冲博弈模型，在原有纳什均衡

概念基础上,引入斯坦伯格均衡和多阶段斯坦伯格均衡的概念,并推导了三种均衡解的必要条件。进一步,结合逆向归纳法、Lambert 算法和打靶法,给出了均衡的求解方法。此外,还分析了霍曼转移下的博弈规律。仿真验证了所得脉冲机动策略的最优性,同时发现:追踪器的预期拦截点需要避开态势感知盲区,否则会出现结果不连续的现象;当态势延迟与脉冲间隔之比较大时,追踪器很难成功拦截逃逸器。

(3) 提出了一种可收敛至博弈纳什均衡的深度强化学习算法(分布并行深度确定性策略梯度算法)。博弈问题不同于单边优化问题,是目标相互矛盾的双边对抗优化问题,直接应用现有学习算法会使博弈双方的策略同时变化而存在收敛问题。为解决该问题,本文在现有的分布并行深度确定性策略梯度算法基础上,设计了一种博弈双方价值共享—策略独立的学习结构,并将辛梯度的思想融入到学习算法的策略梯度计算中,推导了辛策略梯度定理,最终形成一种面向博弈问题的分布并行深度确定性策略梯度算法。经测试,该算法可收敛至博弈的纳什均衡解,相比原算法的收敛效率和精度更高,且能适应哈密顿博弈等特殊情况。

(4) 提出了多航天器合作围捕博弈的深度强化学习方法。由于轨道运动的非线性特征,多航天器合作博弈是微分博弈等传统方法较难解决的问题。本文将围捕分解为“包围”和“抓捕”两个问题,采用深度强化学习方法分别学习。首先,引入机动可达域理论建立轨道“包围”的关系,利用可达域间的交并关系作为学习算法的终端条件,训练多智能体在动态追逃中形成包围的能力。然后,在绕飞包围的初始构型下,训练多智能体的收缩抓捕能力。为适应多航天器的特点,对现有的分布并行确定性策略梯度算法进行了去中心化决策的改造,实现了多智能体间的无通信的高效协同控制。经训练测试,追踪和逃逸智能体分别学会了合作围捕能力和多目标逃逸能力,且策略效果可超越传统的非合作博弈策略。

综上,本文面向光学成像博弈、脉冲拦截博弈和多航天器围捕博弈问题展开了研究,综合传统微分博弈理论和新兴的人工智能方法,攻克了这些博弈问题在建模和求解上的难题,获得了航天器的最优博弈策略,发展了航天器智能博弈方法,揭示了轨道博弈的内在规律。本文的研究可有效拓展现有的轨道博弈理论,为未来开展轨道博弈对抗实践提供有力的技术支撑。

关键词

空间安全、轨道博弈、航天器追逃、微分对策、人工智能。

作者简介 | Biography

李振瑜,男,现为北京跟踪与通信技术研究所助理研究员,从事航天工程总体论证设计研究。2023 年获国防科技大学工学博士学位,2019 年获国防科技大学工学硕士学位,2017 年获南京航空航天大学学士学位。博士主要研究方向为空间轨道博弈技术,以第一作者在人工智能领域《IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems》、航天领域《Journal of Guidance, Control, and Dynamics》国际顶

级期刊上发表 SCI 论文 10 余篇，撰写专著 1 部，申请 / 授权专利 10 项，博士论文入选 2023 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编，主持国家自然科学基金青年项目、科技创新项目等 3 项。作为团队主要成员获得国际空间轨道设计竞赛冠军、全国空间轨道设计竞赛亚军、任务规划大赛二等奖等。

主要创新成果

(1) 提出了航天器光学成像博弈的多因素博弈模型和对应的 ε -false 纳什均衡策略，解决了多因素博弈中纳什均衡不存在、难于高效求解的问题，为各类复杂过程性博弈问题的建模和求解提供了范式。

(2) 提出了航天器脉冲机动博弈的同时决策型、序列决策型和自由决策型三种博弈模型和对应的纳什均衡策略、斯坦伯格均衡策略、多阶段斯坦伯格均衡策略，得到了两航天器脉冲机动博弈的理论最优策略。

(3) 提出了一种面向两 / 多航天器博弈的人工智能算法（分布并行深度确定性策略梯度算法），采用确定性策略梯度定理和共享价值—策略独立的学习框架，解决了采用深度强化学习算法同时训练博弈对抗双方出现的策略不稳定、不收敛问题，可用于集群围捕等复杂协同控制问题。

代表性论文

[1] Li ZY, Luo YZ. Deep reinforcement learning for Nash equilibrium of differential games. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2025, 36(2): 2747-2761.

[2] Li ZY, Zhu H, Luo YZ, et al. Saddle-point of orbital pursuit-evasion game under J2-perturbed dynamics. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2020, 43(9): 1733-1739.

[3] Li ZY, Zhu H, Luo YZ. Orbital inspection game formulation and epsilon-Nash equilibrium solution. AIAA Journal of Spacecraft and Rocket, 2024, 61(1): 157-172.

[4] Li ZY, Luo YZ. Orbital impulsive pursuit-evasion game formulation and Stackelberg equilibrium solutions, AIAA Journal of Spacecraft and Rocket, 2024, early access.

[5] Li ZY, Zhu H, Luo YZ. An escape strategy in orbital pursuit-evasion games with incomplete information. Science China Technological Sciences, 2021, 64(3): 559-570.

[6] Li ZY, Zhu H, Luo YZ, et al. A dimension-reduction solution of free-time differential games for spacecraft pursuit-evasion, Acta Astronautica, 2019, 163: 201-210.

[7] Li ZY, Chen S, Zhou CH, et al. Orbital multi-player pursuit-evasion game with deep reinforcement learning. The Journal of the Astronautical Sciences, 2025, 72(1): 1-29.

[8] Li ZY, Zhu H, Yang Z, et al. Optimization of multiple-impulse perturbed cooperative rendezvous for spacecraft. 27th International Symposium on Space Flight Dynamics, Melbourne, Australia, 2019.

金属循环塑性与晶界裂纹萌生的理论模型



刘文斌

北京大学
liuwb@pku.edu.cn

● 全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile/2025/02/25/1aed72be-b86d-493b-a239-db26d9fc47b4.pdf>

● 扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

金属疲劳破坏作为工程结构失效的主要原因之一，一直受到力学和材料领域的广泛关注，抗疲劳性能是评估系统可靠性和服役寿命的关键因素。金属的疲劳研究涉及到复杂的微观机制以及微 - 宏观的尺度跨越，目前工程应用中仍主要通过唯象或经验模型来评估疲劳损伤。探究金属疲劳的物理机制，建立具有物理意义的理论模型有重要意义。通常认为金属疲劳失效起始于循环变形和裂纹萌生，这两个过程对金属的疲劳性能有着重要影响。本文通过理论建模和数值计算研究了金属循环塑性和晶界疲劳裂纹萌生行为，并揭示了微观结构的影响以及内在物理机制。具体完成了如下工作：

(1) 针对多晶金属中晶界对位错运动的阻碍，本文建立了考虑位错穿越和位错源激活相互竞争的位错 - 晶界相互作用模型。分别推导了与晶界取向差和晶粒尺寸相关的位错穿越和位错源激活临界应力，并分析了不同晶界取向差下位错穿越和位错源激活的竞争行为。同时，基于竞争思想建立了考虑位错运动和位错源激活竞争的屈服强度尺寸效应模型，刻画了屈服强度尺寸相关到尺寸无关的转变行为。

(2) 通过考虑晶界阻力的空间非均匀性，本文首次提出了位错塞积极化机制，揭示了金属循环变形的包辛格效应（随动硬化）的内在机理。结合位错动力学模拟阐明了晶界阻力空间非均匀性引起的极化效应在背应力演化中的关键作用。在此基础上建立了位错塞积极化模型，无需引入其他假设，该模型能够合理地解释包辛格效应以及应变相关的 Hall-Petch 效应。

(3) 基于位错的短程运动机制 (位错链运动与位错塞积), 本文提出了金属微塑性模型。结合晶体塑性理论和弹粘塑性自洽理论建立了考虑微塑性的金属多尺度本构模型, 刻画了变形时弹性 - 微塑性 - 宏观塑性的转变。该模型被用于描述金属在循环变形时塑性应变幅的演化, 成功地预测了受辐照马氏体钢滞回曲线随循环周次增加从弹性到弹塑性变形的转变。

(4) 基于驻留滑移带 - 晶界的相互作用, 本文建立了晶界疲劳裂纹萌生模型。理论分析了位错穿越和晶界裂纹萌生行为, 以及两种机制的竞争行为。揭示了位错穿越晶界引起的塞积位错释放对晶界裂纹萌生的抑制作用。阐明了循环变形下驻留滑移带生长引起的晶界损伤对晶界疲劳裂纹萌生的关键作用, 在此基础上确定了与晶界取向差和晶粒尺寸相关的晶界裂纹萌生的临界循环周次。

● 关键词

金属材料、疲劳性能、循环塑性、裂纹萌生、理论建模

作者简介 | Biography

刘文斌, 香港城市大学博士后。2017 年于兰州大学获理学学士学位, 2022 年于北京大学获得理学博士学位。曾获北京市优秀博士论文、北京大学优秀博士论文、北京市优秀毕业生、北京大学工学院“学术十杰”等荣誉。

刘文斌博士主要从事金属变形破坏的物理机制、力学理论和模拟方面的研究。研究成果以第一作者在《Phys. Rev. Lett.》《J. Mech. Phys. Solids》《Int. J. Plast.》等主流学术期刊发表论文 8 篇, 入选《PRL》“编辑推荐”。

● 主要创新成果

(1) 建立了位错 - 晶界相互作用模型, 刻画了位错运动和位错源激活的竞争关系, 提出了屈服强度尺寸效应的统一模型, 为理解金属变形和强度尺寸效应提供了理论基础。

(2) 提出了位错塞积极化理论, 揭示了金属随动硬化可涌现自晶界的空间分布不均匀性, 从微观层面为经典现象“包辛格效应”提供新理解。

(3) 构建了考虑微塑性的金属多尺度本构框架, 分析了位错短程运动机制, 刻画了弹性 - 微塑性 - 宏观塑性的转变, 填补了经典理论在微塑性描述方面的空白。

(4) 建立了关联微结构的晶界裂纹萌生模型, 阐明了驻留滑移带引起的晶界损伤对裂纹萌生的关键作用, 为金属裂纹萌生的定量描述和抗疲劳材料的设计提供了基础。

● 代表性论文

[1] Liu W, Liu Y, Cheng Y, Chen L, Yu L, Yi X, Duan H. Unified model for size-dependent to size-independent transition in yield strength of crystalline metallic materials. *Physical Review Letters*, 2020, 124 (23), 235501.

[2] Liu W, Chen L, Cheng Y, Yu L, Yi X, Gao H, Duan H. Model of nanoindentation size effect incorporating the role of elastic deformation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 126, 245-255.

[3] Liu W, Liu Y, Sui H, Chen L, Yu L, Yi X, Duan H. Dislocation-grain boundary interaction in metallic materials: Competition between dislocation transmission and dislocation source activation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 145, 104158.

[4] Liu W, Yu L, Liu Y, Sui H, Fan H, Duan H. Dislocation pile-up polarization model for mechanical properties of polycrystalline metals based on grain boundary resistance variability. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 160, 104793.

[5] Liu W, Cheng Y, Sui H, Fu J, Duan H. Microstructure-based intergranular fatigue crack nucleation model: Dislocation transmission versus grain boundary cracking. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2023, 173, 105233.

[6] Liu W, Yu L, Sui H, Cheng Y, Duan H. A constitutive framework for micro- to macro-plasticity of crystalline materials under monotonic and cyclic deformation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2023, 179, 105383.

[7] Liu W, Li G, Lu J. Modeling solidification cracking: A new perspective on solid bridge fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2024, 188, 105651.

[8] Liu W, Chen L, Yu L, Fu J, Duan H. Continuum modeling of dislocation channels in irradiated metals based on stochastic crystal plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2022, 151, 103211.

增材制造点阵结构力学性能各向异性研究



王书恒

西北工业大学
shuhengwang@mail.
nwpu.edu.cn

● 全文链接：

<https://www.cstam.org.cn/profile/2025/02/25/e620e3b2-5557-4ba3-bb49-92f9e160cd3e.pdf>

● 扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

国家重大工业装备及其极端服役环境对高性能、轻量化的材料和结构提出了迫切需求。在众多轻量化材料和结构中，点阵结构因其多功能特性和可设计性而广受关注。增材制造技术的出现，解决了复杂点阵结构的制备问题，但也带来了一些挑战，如增材制造材料的各向异性。在材料各向异性约束下实现复杂点阵结构的高效设计是亟待解决的关键科学问题。

本文考虑增材制造工艺的影响，对桁架点阵结构力学性能各向异性的预测方法、控制策略与设计思路进行了研究工作，主要的研究内容和成果如下：

(1) 提出了能对拉伸主导型桁架点阵结构弹性各向异性进行预测与控制的解析均匀化方法。在数值代表体元法 (RVE) 和渐近均匀化的创新实现 (NIAH) 方法的基础上，发展了这两种方法的解析实现方法，并获得了拉伸主导型桁架点阵结构任意方向上弹性性能的解析表达式。该方法兼具解析方法和数值方法的优点，能灵活地调整点阵结构的几何参数、材料性能和加载方向。与 Gibson 和 Ashby (G-A) 的细观力学法对比，该方法不仅能获得相同的结果，还可有效地预测具有多材料和复杂微结构的点阵结构的弹性性能。此外，基于该解析方法，还能推导出桁架点阵结构弹性各向同性条件的显式表达式。

(2) 提出了桁架点阵结构等效弹性性能高效计算方法和弹性等效结构设计方法。结合解析均匀化公式和数值仿真，研究并对比了单胞结构的旋转对称性和参与计算个数对 RVE 方法和 NIAH 方法计算结果的影响，解释了代表体元法计算结果呈现尺寸效应的原因。提出了能高效计算点

阵结构等效弹性性能的两节点方法。该方法继承了 RVE 方法实现简单的特点，同时只需一个单胞参与计算便能得到与 NIAH 方法相同的计算结果，具有准确且高效的特点。此外，通过研究发现，将单胞结构内部的杆件进行分割、平移或合并等操作，不会改变单胞结构弹性性能，因此，通过该方法，理论上能获得无数个具有相同弹性性能的“弹性等效”点阵结构。

(3) 研究并对比了两类弹性等效组合 (BCS-I 和 BCS-II) 桁架点阵结构在不同相对厚度下的各向异性力学性能。采用解析方法对它们的各向异性力学性能进行了研究和比较，包括它们的弹性性能、初始屈服强度、弹性屈服强度和失效机制。研究表明，这两类组合桁架点阵结构在任意方向上具有相同的弹性性能和初始屈服强度，BCS-I 桁架点阵结构具有较好的抗屈曲性能，其弹性屈服强度始终不低于 BCS-II 桁架点阵结构。BCS-I 桁架点阵结构的临界相对密度始终不大于 BCS-II 桁架点阵结构，它们之间差距取决于相对厚度的值。因此，合理使用 BCS-I 桁架点阵结构代替 BCS-II 桁架点阵结构，对于许多桁架系统力学性能的提高具有重要意义。

(4) 考虑增材制造工艺参数的影响，建立了增材制造聚合物材料各向异性弹塑性本构模型。研究并揭示了熔丝制造 (FDM) 和光固化成形 (SLA) 技术工艺参数对成形材料力学性能的影响机理。基于横观各向同性假设和正交各向异性假设，结合实验建立了增材制造聚合物材料各向异性弹塑性本构模型，推导出了材料在不同方向上弹性模量和拉伸强度的理论预测公式，并通过实验进行了验证。研究表明，熔丝制造工艺参数对聚乳酸 (PLA) 材料力学性能的影响要大于光固化成形技术对光敏树脂材料力学性能的影响。且熔丝制造 PLA 材料的各向异性程度较大，建议采用正交各向异性模型描述其力学行为。光敏树脂材料的各向异性程度较小，采用横观各向同性模型即可准确描述其力学行为。理论上，研究中所采用的本构模型和理论预测公式对其它增材制造聚合物材料也适用。

(5) 提出了具有最优刚度弹性各向同性桁架点阵结构的设计方法，并设计出了考虑材料各向异性的弹性各向同性点阵结构。设计方法包括弹性等效结构设计方法、节点连接数增加设计方法和由二维到三维结构的旋转组装方法。根据 Hashin - Shtrikman 理论推导出了二维和三维各向同性桁架点阵结构弹性性能的理论上界。针对熔丝制造 PLA 点阵结构，考虑材料的正交各向异性，并据此来改变点阵结构中的尺寸约束。结合解析均匀化公式和 PLA 材料的正交各向异性弹性模型实现了点阵结构的弹性各向同性设计。研究表明，当母体材料的各向异性较强时，基于材料各向同性假设得到的理论计算结果和弹性各向同性条件不再准确，在预测与设计熔丝制造 PLA 点阵结构的力学性能时不能忽略母体材料的各向异性。通过本文提供的设计方法，对于部分点阵结构，即使材料是各向异性的，也能实现其弹性各向同性设计。

● 关键词

桁架点阵结构、增材制造、各向异性、等效力学性能、弹性各向同性设计、本构模型

作者简介 | Biography

王书恒，男，西北工业大学机电学院副教授。2018 年 6 月获西北工业大学工学学士学位，2022 年 6 月获西北工业大学工学博士学位，导师为邓子辰教授；2022 年 7 月至 2025 年 3 月在清华大学航天航空学院从事博士后研究，合作导师为张一慧教授。

王书恒博士的主要研究方向为先进材料与结构优化设计、增材制造工艺力学。研究成果以第一作者 / 通讯作者身份在《Additive Manufacturing》《International Journal of Mechanical Sciences》《Journal of Manufacturing Processes》《European Journal of Mechanics-A/Solids》等力学与增材制造领域的权威期刊上发表学术论文 10 篇，获得了丹麦科技大学 Ole Sigmund 教授、挪威科技大学 Odd Sture Hopperstad 教授和华北理工大学张福成教授等院士的正面引用和评述，单篇论文最高他引 290 余次。博士学位论文入选 2023 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编、陕西省优秀博士学位论文、西北工业大学优秀博士学位论文。

主要创新成果

- (1) 揭示了增材制造弹塑性材料工艺 - 材料 - 力学性能的影响机理并构筑了其各向异性本构模型。
- (2) 提出了高效预测复杂构型、多材料增材制造点阵结构力学性能的均匀化方法。
- (3) 建立了基于相对厚度 / 相对横截面积的点阵结构力学各向异性与性能调控方法。
- (4) 建立了增材制造点阵结构力学性能的材料 - 结构一体化设计方法。

代表性论文

[1] Wang S, Ma Y, Deng Z, Zhang K, Dai S. Implementation of an elastoplastic constitutive model for 3D-printed materials fabricated by stereolithography. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101104.

[2] Wang S, Ma Y, Deng Z, Wu X. Two elastically equivalent compound truss lattice materials with controllable anisotropic mechanical properties. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 213(3): 106879.

[3] Wang S, Ma Y, Deng Z. Stretching-dominated truss lattice materials: elastic anisotropy evaluation, control, and design. Composite Structures, 2023, 2022, 298: 116004.

[4] Wang S, Ma Y, Deng Z, Zhang S, Cai J. Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. Polymer Testing, 2020, 86: 106483.

- [5] Wang S, Ma Y, Deng Z. Two-node method for the effective elastic modulus of periodic cellular truss materials and experiment verification via stereolithography. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2021, 87: 104201.
- [6] Wang S, Wang Z, Wang B, Liu Z, Li Y, Lai W, Jiang S, HuangYA. Experimental study of solid-liquid origami composite structures with improved impact resistance. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2024, 14(2): 100508.
- [7] Dai S, Zhu K, Wang S, Deng Z. Additively manufactured materials: A critical review on their anisotropic mechanical properties and modeling methods. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 141, 789-841.
- [8] 王书恒, 戴时, 吴鑫伟, 马永彬, 邓子辰. 考虑材料各向异性的熔丝制造 PLA 点阵结构弹性各向同性设计. *力学学报*, 2022, 54(5): 1291-1302.

三维微纳米点阵材料的构筑设计、制备与力学性能研究



王宇嘉

清华大学

wangyujia13@tsinghua.
org.cn

全文链接：

<https://www.cstam.org.cn//pro-file//2025/02/25/f7500ae7-8e37-4d3b-ac2c-bcc25e564f72.pdf>

扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

作为一种新兴的力学超材料，三维微纳米点阵材料具有低密度、高模量、高强度、高能量吸收率和良好的可恢复性等优异的力学性能，极大地拓展了已有材料的性能空间。如何通过拓扑结构设计调控力学性能，最终获得综合力学性能优异的三维微纳米点阵材料是固体力学领域的研究热点。本文构筑设计并制备了三种新型微纳米点阵材料，通过原位力学实验、有限元模拟和理论分析相结合的方法，研究了这些点阵材料的力学性能和变形机制以及它们与几何结构的关联。

借鉴数学及生物中的极小曲面，构筑设计了基于 I-WP 和 Neovius 极小曲面的曲壳点阵结构。有限元分析表明，I-WP 曲壳结构在压缩变形中具有比桁架结构更均匀的应变能分布。利用面投影微立体光刻技术和双光子光刻技术制备了相应的聚合物曲壳微米点阵材料，利用双光子光刻和高温热解技术制备了热解碳曲壳纳米点阵材料。原位压缩力学测试表明，I-WP 微纳米点阵材料具有比桁架点阵及平板点阵更高的模量和强度。I-WP 热解碳纳米点阵材料的压缩强度在 $0.53\sim 0.80\text{ g/cm}^3$ 的密度范围内达到了材料强度的理论极限，最高强度达 3.52 GPa ，对应的比强度高达 $4.42\text{ GPa g}^{-1}\text{ cm}^3$ ，优于目前所有三维微纳米点阵材料。其高强度的原因可以归结为：优异的拓扑结构、高强度的热解碳组分材料以及纳米尺度的特征尺寸。

基于生物启发的多层级设计策略，构筑设计了基于不同类型的桁架和平板单胞的混合多层级点阵结构。利用面投影微立体光刻技术制备了杆-板混合多层级微米点阵和自相似 octet 桁架微米点阵。有限元模拟及压缩实验表明，相比于已有的各向异性的自相似 octet 桁架多层级点阵，

杆-板混合多层级点阵在相同相对密度下具有更高的模量和强度，并且可以达到期望的弹性各向同性。通过理论推导获得了杆-板混合多层级点阵杨氏模量的解析表达式，并给出了其失效模式与各层级结构几何参数之间的关联，理论预测结果与有限元模拟及实验结果一致。

构筑设计了一种曲壳双稳态胞元，并基于机器学习方法对其进行了结构几何参数优化。利用面投影微立体光刻技术制备了相应的多稳态阵列结构，力学测试结果表明，相比于其他大变形可恢复的中空管状桁架点阵结构，该结构在相同强度下具有更高的单位体积能量吸收，并且具有可重复使用的优点。进一步基于这一双稳态胞元及 Schwarz P 极小曲面胞元构筑设计并制备了在三个方向具有多稳态特性的三维轻质多稳态点阵材料。

关键词

三维微纳米点阵、增材制造、多层级结构、力学性能、变形机制

作者简介 | Biography

王宇嘉，新加坡南洋理工大学博士后研究员。2017 年于清华大学钱学森力学班获学士学位，2022 年于清华大学工程力学系获博士学位，2022 至 2024 年任新加坡科技研究局（A*STAR）研究员。主要从事微纳结构材料和力学超材料相关研究，致力于通过力材料学原理构筑具有优异性能的新型材料，代表性研究成果以第一/共同第一作者发表在《Nature Materials》《PNAS》《Science Advances》《Nature Communications》《Small》等国际期刊，获授权发明专利 2 项。博士论文入选 2023 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编。

主要创新成果

(1) 基于极小曲面的概念，设计并制备了具有优异力学性能的新型微纳米点阵材料，发现极小曲面热解碳纳米点阵材料的强度可以接近多孔材料的理论上限，并揭示了其力学性能与拓扑结构、组分材料以及特征尺寸之间的关系；

(2) 理论分析了混合多层级微米点阵材料的杨氏模量及失效模式与各级拓扑结构的关系，据此设计并制备了具有弹性各向同性的混合多层级微米点阵材料；

(3) 基于机器学习方法对曲壳双稳态胞元的几何结构进行了优化设计，并制备了可重复使用且具有高能量吸收特性的多稳态点阵结构。

● 代表性论文

[1] Wang Y, Wu K, Zhang X, Li X, Wang Y, Gao H. Superior fracture resistance and topology-induced intrinsic toughening mechanism in 3D shell-based lattice metamaterials. *Science Advances*, 2024, 10(35): eadq2664.

[2] Wang Y, Zhang X, Li Z, Gao H, Li X. Achieving the theoretical limit of strength in shell-based carbon nanolattices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(34): e2119536119.

[3] Wang Y, Xu F, Gao H, Li X. Elastically Isotropic Truss-Plate-Hybrid Hierarchical Microlattices with Enhanced Modulus and Strength. *Small*, 2023, 19(18): 2206024.

[4] Wang Y, Li X. Built from connected nested tubes. *Nature Materials*, 2021, 20(11): 1453 – 1454.

[5] Li Z, Wang Y, Ma M, Ma H, Hu W, Zhang X, Zhuge Z, Zhang S, Luo K, Gao Y, Sun L, Soldatov A V, Wu Y, Liu B, Li B, Ying P, Zhang Y, Xu B, He J, Yu D, Liu Z, Zhao Z, Yue Y, Tian Y, Li X. Ultrastrong conductive in situ composite composed of nanodiamond incoherently embedded in disordered multilayer graphene. *Nature Materials*, 2023, 22(1): 42 – 49.

[6] Sun Y, Wang Y, Wang E, Wang B, Zhao H, Zeng Y, Zhang Q, Wu Y, Gu L, Li X, Liu K. Determining the interlayer shearing in twisted bilayer MoS₂ by nanoindentation. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3898.

[7] Zhang X, Wang Y, Ding B, Li X. Design, fabrication, and mechanics of 3D micro-/nanolattices. *Small*, 2020, 16(15): e1902842.

[8] Zeng Y, Zhang Q, Wang Y, Jiang J, Xing H, Li X. Toughening and Crack Healing Mechanisms in Nanotwinned Diamond Composites with Various Polytypes. *Physical Review Letters*, 2021, 127(6): 066101.

多胞超材料的波动特性优化研究



吴昆

南京航空航天大学
kunwu@tju.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile/2025/02/25/3eeb0d0d-31f2-4856-8d16-99ae6245ecc5.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

弹性波 / 声波超材料是通过微结构设计实现波动调控并满足相应波动功能的人工材料和复合结构。其研究涉及包括波动力学、振动控制、智能结构设计和先进成型制造等诸多课题,近二十年来受到广泛的关注,并在弹性波调控、地震波防护、结构低频振动抑制等方面展现出重要的应用前景。与此同时,现有的超材料弹性波动研究还存在很多问题值得关注,包括以弹性波动属性为设计导向的超材料优化、低频区间的弹性波带隙拓展以及非线性弹性波动特性的探索等。本文采用波动频散分析、波动传递率分析、动响应数值计算和振动实验测试的研究方法,对粘弹性超材料、多胞周期超材料、非周期超结构和刚度非线性超材料的波动响应及波动性能参数优化进行研究,主要内容如下:

(1) 研究了一维周期性粘弹性超材料的波动特性。针对光敏树脂类材料的粘弹性力学性质,建立了粘弹性局域共振型超材料模型,并设计了对应的超材料实验件构型。振动实验测试了简谐波和随机波在粘弹性超材料中的传播情况,验证了频散分析中带隙区的弹性波衰减特性。分析了粘弹性参数对波动频散关系和波动幅值传递率的影响,根据弹性波衰减带宽和衰减程度的目标需求选取了合适的粘弹性材料。将粘弹性超材料实验件应用于空间桁架结构的低频振动抑制,实验结果表明在指定频率区间可使位移激励的振动幅值大幅降低。

(2) 针对超元胞中含多个局域共振单元的周期超材料,提出了一种可实现低频连续宽带及强波动衰减的超材料优化设计方案。通过参数分析,研究不同约束条件下内弹簧刚度分布对超元胞能带结构的影响,将获取连续弹性波动衰减区间、拓宽带隙频段、增强弹性波衰减程度和向

低频方向迁移带隙区间作为优化子目标。考虑平衡弹性波的衰减频域宽度和衰减幅值程度,制定实现低频连续宽带波动衰减区间的优化路径。波动响应的数值计算表明,多胞周期超材料的优化设计表现出良好的宽频波动衰减特性。针对含多频段激励信号和组合激励形式的振动来源,提出多带隙区间的多目标优化方法,实现超材料在多个激励频率区间内的弹性波衰减。

(3) 提出了基于遗传算法的非周期超结构单元内质量分布的参数优化方法。得到了一维非周期超结构的波动响应解,根据末端单元振动幅值传递率选择波动衰减程度的上临界值,提出了一种高效的基于遗传算法的超结构内质量分布优化方法。优化结果表明,非周期超结构的局域共振单元越多,优化所得的带隙区间越宽;选择的波动衰减上临界值越大,优化带隙区间内的弹性波的阻断性能越好。同时,在结构内质量总和相等的情况下,优化后超结构的带隙区间比周期超材料能够拓宽了近一倍。考虑到弹性波在一维非周期超结构中的传播对称性缺失,优化设计依次实现了超结构的定向波动衰减和双向波动衰减。最后,振动实验验证了非周期超结构在低频宽带区间对正弦和随机形式弹性波的阻断效果,优化后的实验构型展现出比周期超材料更好的双向宽带振动抑制性能。

(4) 分析了由刚度三次非线性项引起的含高阶谐波成分的非线性弹性波动响应,并基于参数优化方法对非线性波动现象和特性进行优化设计。借鉴非线性振动中的直接摄动法和谐波平衡法,推导了非线性波动响应的近似理论解,并采用数值计算非线性波动方程的方法验证了非线性波动假设解的可靠性。在超结构的非线性波动响应中发现了波传播的非互易性,表现为将激励和响应位置交换后频响函数相应发生变化。对非线性超结构的局域共振内质量分布进行参数优化,依次实现了非线性波动的带隙区间拓宽、幅值相关的波动衰减设计和弹性波的单向传输。

● 关键词

超材料 / 超结构、弹性波动、参数优化、波动分析、带隙拓宽、非互易性、多目标优化

作者简介 | Biography

吴昆,天津大学机械工程学院博士后,助理研究员。2015 年于南京航空航天大学获得学士学位,2022 年于南京航空航天大学获得工学博士学位,博士学位论文入选中国力学学会和南京航空航天大学优秀博士学位论文汇编。

吴昆主要从事弹性波超材料优化设计与结构振动控制研究,目前研究方向包括非线性多胞超材料波动优化、准零刚度超材料减振设计等。研究成果发表在《Nonlinear Dynam》《Int J Mech Sci》《P Roy Soc A-Math Phy》等国际重要学术期刊。主持国家自然科学基金青年项目、国家重点研发计划项目子课题等科研项目。

● 主要创新成果

(1) 多胞超材料波动衰减与振动抑制优化设计

针对周期多胞超材料和非周期多胞超结构, 提出了基于遗传算法的多目标参数优化设计方案, 实现超材料的低频、连续、宽带及强波动衰减; 研究粘弹性超材料阻尼耗散对波动带隙的影响, 应用于空间桁架结构低频振动抑制。

(2) 非线性多胞超材料波动机理分析与非线性波动性能调控

建立发展一种综合直接摄动法和谐波平衡法的近似解析方法, 揭示了非线性刚度对多频高次谐波响应的影响规律, 在此基础上提出非线性多胞超材料优化设计思路, 实现了非线性波动带隙拓宽、幅值相关波动衰减和弹性波单向传输等性能调控。

● 代表性论文

[1] Wu K, Hu HY, Wang LF. Experimental study on wave propagation in one-dimensional viscoelastic metamaterial. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2021, 34(5): 597-611.

[2] Wu K, Hu HY, Wang LF. Optimization of a type of elastic metamaterial for broadband wave suppression. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2021, 477(2250): 20210337.

[3] Wu K, Hu HY, Wang LF, Gao YQ. Parametric optimization of an aperiodic metastructure based on genetic algorithm. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 214: 106878.

[4] Wu K, Hu HY, Wang LF. Nonlinear elastic waves in a chain-type of metastructure: Theoretical analysis and parametric optimization. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111: 11729-11751.

[5] 吴昆, 高玉强, 王立峰, 金栋平, 胡海岩. 多胞局域共振型超材料的减振实验研究, *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(5): 908-914. (南航建校 70 周年校庆专刊邀稿)

[6] Yang LY, Wang LF, Wu K, Gao YQ. Splitting of waves in rotor-in-rotor nonlocal metamaterials by internal rotor coupling. *Materials & Design*, 2022, 221: 110921.

[7] Gao YQ, Wang LF, Sun W, Wu K, Hu HY. Ultrawide bandgap in metamaterials via coupling of locally resonant and Bragg bandgaps. *Acta Mechanica*, 2022, 233(2): 477-493.

[8] Yu X, Wang LF, Wu K, Gao YQ. Wave propagation in chiral stiffness metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(2): 025105.

扭转范德华层状材料界面滑移行为研究



严炜东

武汉大学
isyanwd@163.com

全文链接：

<https://www.cstam.org.cn//pro-file//2025/02/25/fb90c7e7-586a-4ffd-8848-ba7cb4186dc9.pdf>

扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

范德华层状材料通过简单的层间扭转即可获得奇特的物理力学性能，如：结构超润滑、魔角石墨烯超导等现象。研究发现层间扭转形成的摩尔超晶格对这些奇异的物理力学现象起着显著的调控作用。然而，现有的方法对于二维层状材料奇异物理特性的研究存在局限性：纳米尺度的摩尔超晶格单胞超出了第一性原理的计算范围；分子动力学的计算尺度仍与实验存在着数量级的差别；已有的理论模型没有考虑扭转角相关的摩尔超晶格的影响。在此背景下，本文围绕层状材料界面滑移行为，构建能描述摩尔超晶格的连续介质模型，主要研究内容及结论如下：

(1) 基于频谱分析方法，推导了圆形双层扭转石墨烯层间势能随扭转角的解析表达式，进而获得了层间滑移势垒关于尺寸及扭转角的标度律；定义了一个基于摩尔超晶格的摩尔边界，该边界把非完整摩尔超晶格中的原子界定为边缘原子，证明了界面摩擦力由所界定的边缘原子而非传统的几何边界原子所主导；

(2) 建立了任意形状石墨烯滑片的界面摩擦理论模型，在摩尔超晶格对界面摩擦的短程调控之外，发现石墨烯滑片的形状对于界面摩擦具有一个长程的周期调制作用，且不同的形状以及裁剪方式会造成不同的标度律。具体地，当几何形状由圆形过渡为多边形时，长周期的摩擦标度率由与尺寸的开根号成正比转变为与尺寸无关，据此提出了通过滑片形状调控界面摩擦的新方法；

(3) 通过将摩尔超晶格相关的原子集体变形模式引入到经典热力学模型，建立了能够反映层间扭转效应的双层石墨烯的热力学模型；发现并量化了由于扭转导致层间原子堆垛改变引起的构型熵变，并提出了层

状材料结构超滑运动下的一种可能耗散机制。进而通过把完整摩尔超晶格视为“粗颗粒”，建立了扭转范德华层状材料的粗粒化等效力学模型。

本文基于摩尔超晶格对层状材料界面滑移行为的相关研究为实现大尺度结构超润滑提供了思路。

● 关键词

二维材料、摩尔超晶格、界面摩擦、尺寸效应、约化模型

作者简介 | Biography

严炜东，男，现为武汉大学土建学院博士后，2023 年于武汉大学获固体力学博士学位，2023 年武汉大学工学部优秀博士学位论文，2023 年入选国家资助博士后研究人员计划，2023 年中国力学学会优秀博士学位论文汇编入选者。

主要从事表界面力学方向研究，围绕范德华层状材料的界面摩擦行为及摩尔超晶格效应开展研究，以第一作者于《J. Mech. Phys. Solids》(3 篇)，《Int. J. Solids Struct.》等期刊发表论文十余篇。参与国家自然科学基金重大项目、联合基金项目等科研项目。担任《Physica Scripta》等期刊审稿人。

● 主要创新成果

(1) 建立了范德华层状材料圆形接触界面的摩擦模型，并解析获得摩擦力关于尺寸和扭转角的标度率；揭示了有限尺寸范德华层状材料滑片边缘效应来源于边缘非完整云纹区域，由此定义了“摩尔边界”以区别于传统的几何边界；

(2) 建立了任意范德华层状材料的正多边形接触界面摩擦模型，发现摩擦关于尺寸的标度率显著依赖于接触界面的几何形状，当几何形状由圆形过渡为多边形时，长周期的摩擦标度率由与尺寸的开根号成正比转变为与尺寸无关，据此提出了通过接触界面形状调控界面摩擦的新方法；

(3) 通过引入摩尔超晶格中原子的集体变形模式，建立了考虑扭转效应的范德华层状材料热力学模型，发现并量化了范德华层状材料界面扭转过程中由于原子堆垛改变引起的构型熵变，提出了结构超滑态下的一种能量耗散机制；基于摩尔超晶格的相似性将完整摩尔超晶格视为“粗颗粒”，建立了扭转范德华层状材料的粗粒化等效力学模型。

● 代表性论文

- [1] Yan W, Gao X, Ouyang W, Liu Z, Hod O, Urbakh M. Shape-dependent friction scaling laws in twisted layered material interfaces. *J. Mech. Phys. Solids*, 2024,185:105555.
- [2] Yan W, Liu J, Ouyang W, Liu Z. Moiré superlattice effects on interfacial mechanical behavior: A concise review. *Interdisciplinary Materials*, 2024:1-15.
- [3] Yan W, Ouyang W, Liu Z. Origin of frictional scaling law in circular twist layered interfaces: Simulations and theory. *J. Mech. Phys. Solids*, 2023,170:105114.
- [4] Yan W, Shui L, Ouyang W, Liu Z. Thermodynamic model of twisted bilayer graphene: Entropy matters. *J. Mech. Phys. Solids*, 2022,167:104972.
- [5] Shui L, Yan W, Zhang Y, Xu L, Gao E, Liu Z, Zheng Q. Peeling mechanics of film-substrate system with mutually embedded nanostructures in the interface. *Int. J. Solids Struct.*, 2022,251:111737.
- [6] Yan W, Han J, Zheng W, Wang G, Wu T. Establishment of friction model and calculation of size factor in micro/meso forming processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018,98:3061.
- [7] Liu J, Yang X, Fang H, Yan W, Ouyang W, Liu Z. In Situ Twistrionics: A New Platform Based on Superlubricity. *Adv. Mater.*, 2023:2305072.
- [8] Han G, Wu Y, Yan W, Shui L, Jia X, Gao E, Jiang M, Liu Z. Controlled fabrication of gold nanotip arrays by nanomolding-necking technology. *Nanotechnology*, 2020,31:144001.

活性软物质的力化生耦合理论



尹思凡

清华大学
syin@pks.mpg.de

● 全文链接：

<https://www.cstam.org.cn/profile/2025/02/25/4908ac9c-7d10-4dfb-9498-d465b97eee7d.pdf>

● 扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

活性物质所代表的非平衡系统在生命现象中扮演着重要角色，它们通过将外界环境或存储的能量转化为自身动能，引起系统整体的变形和运动。生物活性软物质的自组织形貌和化学斑图的形成与演化是一个力学、化学、生物学相互耦合、共同调控的过程。本文结合理论与模拟方法对活性软物质生长和主动变形过程中的力化生耦合调控过程进行研究。

首先，建立了力化生耦合活性壳的一般理论，引入生化信号通路作用于生物活性壳结构产生主动收缩力的分子机制。通过线性稳定性分析，揭示了活性壳自组织形貌发生中的 Hopf 分岔和叉形分岔机制，并讨论了力学反馈、几何形状、生化调控和扩散率对形貌形成的影响。对描述活性物质多场耦合的强非线性方程，开发了同时求解实验中所观察到的力学场和化学场的数值算法。并以细胞皮质的力化生耦合变形为例，再现了海星卵母细胞中协同产生的表面收缩波与生化蛋白波。

其次，基于力化生耦合活性壳的一般理论，研究了力学因素对活性球壳形成复杂三维形貌和生化斑图的调控作用。通过稳定性分析，揭示了生化信号单脉冲螺旋波、连续行波、靶波和全局振荡形成和转变中的全局失稳和叉形分岔机制，并讨论了力学反馈和几何形状对形貌形成的影响。对于引起系统产生螺旋波的生化信号反应扩散方程，力学负反馈使得系统稳定地产生连续行波。以爪蟾卵母细胞的卵裂为例，模拟了力化生耦合调控下生化信号螺旋波和卵裂形貌的协同演化。

此外，发展了力化生耦合的多孔弹性组织生长的有限元计算方法，模拟了组织生长、化学物质运输和力学变形相互作用的软组织的力化生

耦合的生长过程。该方法不仅可以模拟力化生耦合的软组织生长过程，而且还可追踪其形貌失稳和演化。以多血管的屈曲失稳和演化为例，揭示了由肿瘤生长导致其内部血管坍塌的机制。

最后，建立了热力学驱动力与细胞主动力耦合的双相活性软组织模型，揭示了软骨预形成的相分离机制。发现组织弹性和主动收缩力的竞争会促进相分离形成，并引起动态的形貌演化。通过线性稳定性分析，建立了形貌相图。通过数值模拟，探讨了一维和二维的形貌形成和演化过程，并讨论了周期性边界、力学载荷边界和区域几何对不同相分离图案形成的影响。

● 关键词

活性软物质、力化生耦合、失稳、形貌形成、斑图

作者简介 | Biography

尹思凡，德国马克斯·普朗克复杂系统物理研究所博士后研究员。2016年6月于清华大学获得学士学位，2022年1月于清华大学航天航空学院工程力学系获得博士学位。2022年5月至2024年4月，在美国哈佛大学工程与应用科学学院应用数学系从事博士后研究。2024年5月至今，在德国马克斯·普朗克复杂系统物理研究所任博士后研究员，获得欧盟“玛丽·居里学者”。

研究成果发表在《PNAS》《PRL》《JMPS》《IJSS》《Nature Physics》《Developmental Cell》等国际知名期刊上，其中独立一作5篇，共同一作1篇，得到了国内外学术界的广泛认可和好评。

● 主要创新成果

活性物质的形貌形成对于生命系统的发育和演化具有重要意义。该论文聚焦力化生耦合调控下活性软物质自组织形貌动力学：

建立了力化生耦合的活性壳理论，揭示了活性壳轴对称形貌、复杂三维形貌和生化斑图形成的力化生耦合失稳规律，阐释了力学反馈和几何形状对形貌演化的调控机制，为海星卵母细胞表面收缩波和生化蛋白波的形成、爪蟾和海星卵母细胞螺旋波与三维形貌的协同演化提供了新的理解。

发展了力化生耦合的多孔弹性组织生长的有限元计算方法，模拟了含有血管的肿瘤生长过程，揭示了肿瘤内部血管坍塌的变形机制。

建立了热力学驱动力与细胞主动力耦合的双相活性软组织模型，揭示了小鼠气管软骨形成的相分离机制，阐明力学载荷和几何约束调控相分离形成和演化的规律。

● 代表性论文

- [1] Yin S, Li B, Feng X-Q. Three-dimensional chiral morphodynamics of chemomechanical active shells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022,119(49):e2206159119.
- [2] Yin S, Mahadevan L. Contractility-induced phase separation in active solids. *Physical Review Letters*, 2023,131(14):148401.
- [3] Yin S, Li B, Feng X-Q. Bio-chemo-mechanical theory of active shells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021,152:104 419.
- [4] Yin S, Xue S-L, Li B, Feng X-Q. Bio – chemo – mechanical modeling of growing biological tissues: Finite element method. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2019,108: 46 – 54.
- [5] Yin S, Li B, Cao Y-P, Feng X-Q. Surface wrinkling of anisotropic films bonded on a compliant substrate. *International Journal of Solids and Structures*, 2018,141:219 – 231.
- [6] Gill HK, Yin S, Lawlor JC, Huycke TR, Nerurkar NL, Tabin CJ, Mahadevan L. The developmental mechanics of divergent buckling patterns in the chick gut. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024:e2310992121.
- [7] Xue SL, Yin S, Li B, Feng X-Q. Biochemomechanical modeling of vascular collapse in growing tumors. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018,121:463 – 479.
- [8] Chakrabarti A, Michaels TC, Yin S, Sun E, Mahadevan L. The cusp of an apple. *Nature Physics*, 2021,17(10):1125 – 1129.

大涡的发生与发声：亚音速自由剪切湍流中相干结构的非线性动力学和低频声辐射



张钟毓

天津大学
zyzhang_14@tju.edu.cn

全文链接：

<https://www.cstam.org.cn//pro-file//2025/02/25/5ddfd8af-9b93-44f7-89b1-173d3e5af91d.pdf>

扫码阅读：



论文摘要 | Abstract

大尺度相干结构存在于自由剪切湍流中，是流致噪声的主要声源。本研究以亚声速平面混合湍流和轴对称环形湍射流为例，将相干结构的动力学和声辐射视为一个统一的物理过程，基于大雷诺数渐近分析方法进行描述。

很多研究表明，相干结构可以用以湍流平均流为基本流的“伪层流”中的不稳定波或不稳定波包来刻画。通过对湍流三项分解，即将瞬时湍流流动分为平均流、（有周期性的）相干运动和小尺度脉动，可压缩自由剪切流中的相干结构可以通过密度加权的相位平均提取出来，并可以进一步通过临界层理论推导出控制其非线性演化的动力学控制系统。由于剪切层快速发展，流动的非平行性强，必须作为影响演化的首阶因素加以考虑。同时，该动力学控制系统通过带有相位弛豫的相干雷诺应力模型来刻画小尺度脉动的影响。理论分析得到分别适用于流动中不同模态组合和（针对于射流的）不同流动区域的非线性演化—调制系统。对于平面混合层中的二维相干结构和轴对称环射流中的轴对称（环形）模态相干结构，控制系统是强非线性的，由幅值方程和临界层温度、涡量方程及其自洽的初边值条件组成。对于多个环形—螺旋模态组成的相干结构，控制系统从极近喷口区到完全发展区由强非线性转为弱非线性，重要的标志量是剪切层厚度与其中心位置（或喷口直径）之比。当该比值的量级不大于相干结构的线性增长率的量级时，控制系统是强非线性的，控制系统除了对于环形模态的三方程外还需增加临界层周向速度的方程及其初边值条件。在这个区域的下游，控制系统是弱非线性的，其数学描述由耦合方程组简化成单独的幅值方程。波包型相干结构的行为可以由频率边带共振的机理描述，流场中将出现波包包络尺度的低频成分，并增长到显著幅值，这正是低频声波的物理声源。

通过分析相干结构的远场渐近行为,可基于第一性原理确定其辐射的声场。对于亚声速传播的相干结构,其基本波和谐波的主要部分被限制在剪切层中,是非线性相互作用在主剪切层和临界层中产生随时间和流向空间缓慢变化的平均流修正向外辐射低频声波。数学上的等效声源即可基于上述观点推导得到,针对流场中模态组成和流动区域特征的不同,等效声源由不同的成分组成。有趣且深刻的是,对于平面混合层和射流的极近喷口区,分别有上、下和内、外两个声学区域,等效声源无法在求解声场前预先得到,必须同声场一同求解,这体现了声场对声源反作用。需要提出的是,除了射流的完全发展区,直接影响非线性演化的平均流修正并不直接辐射声波,辐射最重要声波的是次重要的平均流修正。这种辐射机理产生的辐射与高频声辐射(频率尺度与基本波、谐波相当)具有相当的强度,但在不同辐射方向上有不同的相对重要性,低频声辐射在上游方向和侧向更显著。此外,为更好应用于实践,需要适用于射流所有流动区域的非线性动力学控制系统和声辐射理论,一致有效理论由此导出。

计算结果可以刻画相干结构的非线性增长、饱和、起伏和衰减,波包包络随时空缓慢演化,流动频谱的拓宽以及条纹结构的生成。此外,强非线性理论还能描述大涡的卷起现象。离散和连续频带的波包型相干结构所辐射低频声波的指向性和频谱也由近场动力学的数值结果给出,其预测的声场特性与实验测量基本吻合。

关键词

相干结构、亚声速自由剪切湍流、流动稳定性理论、非线性动力学、渐近分析气动声学、低频声辐射

作者简介 | Biography

张钟毓,2023年1月于天津大学获流体力学学科工学博士学位,现任天津大学博士后、特聘副研究员,硕士生导师,获选国家人社部博管办第8批“博士后创新人才支持计划”(“国资计划”A档)资助。

张钟毓博士主要从事基于高雷诺数渐近理论的流动稳定性和气动声学理论研究。主持国家自然科学基金青年科学基金1项,主持全国博士后“博新计划”科研基金、面上资助、国(境)外学术交流项目各1项,主持天津大学科技领军创新人才培养项目1项,获评“国资计划”博士后科研业绩评估考核C类,入选天津市第一批博士后创新岗位。

主要创新成果

自由剪切湍流中的相干结构是混合的重要层次和流动噪声的重要来源,其产生和演化可以用平均流的不稳定特征描述。本部学位论文以理论分析为主,配合必要的数值求解和对比验证,通过求解流动的动力学控制方程刻画流动的物理现象并揭示其机理,并由此描述声波产生和辐射的精巧物理过程,是基于“第一性原理的”,展现了深刻的理论性、逻辑性和完备性。

(1) 在动力学方面, 论文针对流动失稳的关键位置, 即控制方程奇点的附近做精细的渐近分析。系统全面地考虑多方面控制和影响要素, 针对性质各异的不同流态、流域、速域的不同模态相干结构, 分别导出了其非线性动力学控制系统, 并从理论层面指出了不同理论的适用范围和参数影响趋势。配合适当的数值求解和与实验测量的定性定量对比, 验证了该理论的正确性和适用性。

(2) 在气动声学方面, 完全不同于声比拟方法和计算气动声学, 论文基于“第一性原理”, 完善并发展了渐近分析气动声学理论。将该思想应用于以上各型相干结构中, 指出了真实辐射声波的物理声源, 描述了声波从产生到辐射的物理过程和流动的近远场渐近结构, 指出了可测量的等效声源。通过与实验测量的对比, 定性甚至定量地预测了不同机理下辐射出声场的指向性与频谱特征。

(3) 通过对不同类型相干结构分别构造其动力学—声学理论, 论文总结提炼出并严格地证明了适用于混合层和圆形湍射流中二维三维相干结构的一致有效理论, 可以自动地、准确地根据工况渐近地转化为各型特殊理论。这是理论层面的创新型集成, 也是方法层面的创新型应用, 更为其的进一步应用化发展打下了坚实的理论基础, 有机会更加有力地指导工程实践。

● 代表性论文

[1] Zhang ZY, Wu XS. Nonlinear dynamics and acoustic radiation of coherent structures consisting of multiple ring – helical modes in the near-nozzle region of a subsonic turbulent circular jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023c,973: A8 (pp. 1 – 54). DOI:10.1017/jfm.2023.597.

[2] Zhang ZY, Wu XS. A unified theory for the envelope radiation of ring-mode coherent structures in the very-near-nozzle and developed regions of a circular jet. *Physics of Fluids*, 2023b,35: 014113 (1 – 28). DOI:10.1063/5.0134063.

[3] Zhang ZY, Wu XS. Generation of sound waves by nonlinearly evolving ring-mode coherent structures on a turbulent subsonic circular jet: a comparative study of two mechanisms. *Acta Mechanica Sinica*, 2023a, 39: 322272 (1 – 18). DOI: 10.1007/s10409-022-22272-x.

[4] Zhang ZY, Wu XS. Nonlinear evolution and low-frequency acoustic radiation of ring-mode coherent structures on subsonic turbulent circular jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022,940: A39 (1 – 53). DOI: 10.1017/jfm.2022.252.

[5] Zhang ZY, Wu XS. Nonlinear evolution and acoustic radiation of coherent structures in subsonic turbulent free shear layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020,884: A10 (1 – 67). DOI: 10.1017/jfm.2019.909.

[6] Wu XS, Zhang ZY. First-principle description of acoustic radiation of shear flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering*

Sciences, 2019,377: 20190077 (1 – 18). DOI: 10.1098/rsta.2019.0077.

[7] Zhang ZY, Wu XS. Inner sound field generated by large-scale coherent structures of ring mode in the near-nozzle region of a subsonic circular jet: an asymptotic description of aeroacoustics. 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024), Rome, Italy, 2024:2024-3090(1 – 17). DOI: 10.2514/6.2024-3090.

[8] Zhang ZY, Wu XS. Nonlinear evolution of multiple helical modes in the near-nozzle region of subsonic circular jets: a weakly nonlinear critical-layer theory. The International Union for Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM) Symposium on Laminar – Turbulent Transition, 2019, London, U.K. (Springer International Publishing, ISBN: 978-3-030-67902-6), 2021:137 – 147. DOI: 10.1007/978-3-030-67902-6_11.