

目录

三维蠕变断裂与裂纹扩展	01
崔鹏飞 / 南京航空航天大学	
固液界面毛细动力学及其应用	04
方 维 / 清华大学	
非共价界面层状纳米复合材料的多尺度力学与设计	07
何泽洲 / 中国科学技术大学	
基于多目标优化的结构减振与降噪研究	11
和梦欣 / 天津大学	
基于序列近似整数规划的通用高性能离散变量拓扑优化新方法	14
梁 缘 / 大连理工大学	
扑翼自主推进和集群运动的数值研究	18
林星箭 / 南京航空航天大学	
膜基结构的跨尺度力学行为研究及应用	21
刘雁韦 / 北京大学	
数据驱动的折纸结构参数辨识与动力学建模	25
刘作林 / 同济大学	
斜爆轰波面动力学及起爆区波系研究	29
杨鹏飞 / 中国科学院力学研究所	

三维蠕变断裂与裂纹扩展



崔鹏飞

南京航空航天大学
pfcui@nuaa.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2024/05/21/01875798-ac96-44ae-a5ec-f34178dc9822.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

近一个世纪以来，蠕变断裂控制参数和裂纹尖端渐近场的理论研究已经取得了长足的进步，它与数值模拟和试验分析方法结合，使人们能够更加深刻地认识高温工程结构中的蠕变断裂问题，发展高温损伤容限评估技术。但是，由于三维蠕变裂纹的复杂性，当前国内外高温工程结构的剩余寿命设计与评估仍然基于二维蠕变断裂理论的框架，较难实现蠕变寿命的精准预测，这使得人们必须发展三维高温损伤容限设计理论与方法。基于三维蠕变断裂理论，本文对蠕变断裂问题进行详细的理论研究，数值分析和试验验证，建立准确描述三维蠕变裂纹扩展与断裂的统一预测模型，实现从蠕变断裂力学理论研究到实际高温工程应用的跨越。除了绪论（第一章）以及全文总结与展望（第十章）以外，本文从三维弹性 - 蠕变裂纹尖端场（第二章和第三章）、三维弹塑性 - 蠕变裂纹尖端场（第四章、第五章和第六章）以及三维蠕变裂纹断裂和裂纹扩展的统一预测（第七章、第八章和第九章）三个方面开展研究，取得以下进展：

（1）三维线弹性 - 蠕变裂纹尖端场研究：分别基于 $C(t)$ 和 CTOD，发展 $C(t)-T_z-A_T$ 解和 $\delta(t)-T_z$ 解，并给出三维蠕变裂纹端部 T_z 的预测公式。三维有限元结果表明，单参数 $C(t)$ 的有效控制区域较小， $A_2(t)$ 的引入能较好地描述裂纹尖端面内应力分布，考虑 T_z 的理论解能较好地预测离面应力分布；与 $C(t)$ 相比，基于 CTOD 的 $K_{\delta(t)-T_z}$ 控制参数能改善控制参数对厚度的依赖性；对于标准试验以及工程结构常见的含裂纹拉伸试样， $\delta(t)-T_z$ 主奇异解和 $C(t)-T_z-A_T$ 高阶解均能对蠕变裂端的应力分布提供较为精准的预测。

(2) 三维弹塑性 - 蠕变裂纹尖端场研究: 首先对三维裂纹弹塑性变形进行考察分析, 分别提出适用于准静态三维弹塑性裂纹尖端场的高阶 $J-T_z-A_T$ 解和 $\delta-T_z$ 解。在此基础上, 将材料塑性变形引入到三维蠕变裂纹中, 并求解适用于三维弹塑性 - 蠕变裂纹尖端场的 EPC (Ct - T_z) 解。研究表明, 对于三维弹塑性裂纹而言, $K_{\delta-T_z}$ 比 J 更稳定, 可以突破小变形和简单比例加载假设的限制, 除了裂纹尖端钝化附近以外的应力分布均可以被 $J-T_z-A_T$ 解和 $\delta-T_z$ 解精准预测。对于低屈服强度蠕变材料而言, 必须考虑蠕变初始阶段的塑性效应, 本文发展的 EPC (Ct) 参数能够准确考虑塑性变形对蠕变裂纹尖端应力和变形场的影响, 不同几何下含穿透和非穿透裂纹拉伸试样的应力分布预测与三维有限元结果良好吻合。

(3) 三维蠕变裂纹扩展与断裂的统一预测研究: 证明 C^*-T_z 解和 $J-T_z$ 解在三维线弹性 - 蠕变和弹塑性裂纹稳定扩展场中的有效性, 建立了考虑试样几何、裂纹形式、载荷水平和力学性能影响的统一裂纹扩展驱动力模型。考虑微孔洞生长、三维约束和力学性能对裂纹尖端局部状态的影响, 提出了蠕变裂纹尖端材料抗力水平量化模型。最终基于延性耗竭理论, 给出裂纹尖端扩展驱动力和抗力的竞争机制, 预测三维蠕变裂纹扩展与断裂。与从 9 个研究小组获得的 44 组三维蠕变断裂与裂纹扩展试验数据比较分析表明: 本文提出的模型能够预测蠕变裂纹扩展速率的上下极限, 所有断裂寿命的预测结果均在实验结果的三倍误差带以内。

● 关键词

三维裂纹尖端场、线弹性 - 三维裂纹尖端场、线弹性 - 蠕变、弹塑性 - 蠕变、三维蠕变扩展裂纹扩展、理论预测

作者简介 | Biography

崔鹏飞, 南京航空航天大学特聘副研究员, 2015 年于湖南大学获得学士学位, 2018 年于东南大学获得硕士学位, 2021 年于南京航空航天大学获得博士学位。

崔鹏飞聚焦三维疲劳断裂力学理论研究和航空飞行器全生命周期数字样机研制, 对弹性和弹塑性幂硬化蠕变固体中各类三维裂纹的裂端场进行了深入系统的理论和数值模拟分析, 提出了静止和稳态扩展蠕变裂纹尖端场的控制参数体系; 并在三维蠕变裂尖端部场理论基础上, 建立了蠕变裂纹扩展寿命的三维断裂力学预测方法, 进行了几十种材料、工况组合下的蠕变裂纹扩展寿命预测和验证, 为三维裂纹的蠕变失效分析提供先进的理论和方法, 显著提升了高温结构蠕变损伤容限分析和预测能力, 相关成果在《JMPS》《IJSS》《EFM》等 SCI 刊上发表论文 8 篇, 被同行评价为 “significant insight” “更加本质” 等, 参与了 CR929 大飞机等国家重大工程型号装备研发计划。

● 主要研究成果

(1) 建立三维线弹性 - 蠕变裂纹尖端场的 $C(t)-T_z-A_r$ 高阶解, 给出离面应力约束因子的计算公式; 基于裂纹尖端张开位移, 提出蠕变应力强度因子概念, 得到 $\delta(t)-T_z$ 主奇异解。

(2) 建立三维弹塑性 - 蠕变裂纹尖端场的理论解, 揭示塑性变形影响随蠕变时间的变化规律。发展三维弹塑性裂纹尖端场的 $J-T_z-A_r$ 高阶解; 基于裂纹尖端张开位移的弹塑性应力强度因子, 得到 $\delta-T_z$ 主奇异解。

(3) 证明了 C^*-T_z 解和 $J-T_z$ 解在三维线弹性 - 蠕变和弹塑性裂纹稳定扩展场中的有效性, 在此基础上建立三维蠕变裂纹扩展寿命预测模型, 并通过大量试验数据进行验证。

● 代表性论文

[1] Cui PF, Guo WL. A predicting model for three-dimensional crack growth in power-law creeping solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 168(3): 105029.

[2] Cui PF, Guo WL. $J-T_z$ domination of three-dimensional propagating crack border stress fields and fracture in ductile solids. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 279(1): 2023.

[3] Cui PF, Guo WL. Crack-tip-opening-displacement-based description of creep crack border fields in specimens with different geometries and thicknesses. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 188-189: 37-55.

[4] Cui PF, Guo WL. Geometry independent C^*-T_z dominance of three-dimensional quasi-static growing crack-tip fields in creeping solids. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 65: 214611.

[5] Cui PF, Guo WL. Crack tip opening displacement based description of three-dimensional creep crack border stress fields for partially penetrating cracked specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 241: 107425.

[6] Cui PF, Guo WL. Higher order $C(t)-T_z-A_r$ solution for three-dimensional creep crack border fields. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 236: 107203.

[7] Cui PF, Guo WL. Crack-tip-opening-displacement-based description of three-dimensional elastic-plastic crack border fields. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 231: 107008.

[8] Cui PF, Guo WL. Higher order $J-T_z-A_r$ solution for three-dimensional crack border fields in power-law hardening solids. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 222(4): 106736.

固液界面毛细动力学及其应用



方维

清华大学
weifang@tju.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2024/05/23/b4a62a0f-5fc6-4519-9520-ca132ed7e460.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

在自然界及诸多工程领域中存在丰富多彩的固液界面动态毛细现象。对其动力学过程的研究，不仅促进力学与生物学、化学、物理学等多学科的交融和发展，而且能够为农林灌溉、喷墨打印、液滴操纵等工程提供重要指导，在新材料、新能源等领域也具有可观的应用前景。本文结合理论分析和数值模拟方法，研究毛细作用下固、液及界面发生变形和运动的力学机理及其调控机制，并探索其在仿生材料、软体机器人等领域的相关应用。

首先，研究了液滴撞击弹性悬臂梁的动力学过程及固体变形对于液滴形貌和运动的调控机制。通过建立三维双向流固耦合毛细动力学数值模拟方法，复现了液滴撞击弹性悬臂梁的过程。通过建立固液系统的振动力学模型，发现系统固有角频率和无量纲挠度不依赖于液滴撞击速度，预测了液滴离开固体表面前的运动轨迹。基于数值模拟，阐释了弹性结构对于液滴铺展尺寸、形貌、接触时间、固液界面相互作用力等的影响。建立了韦伯数和静置转角等无量纲参数对液滴弹跳方向的调控相图，揭示了液滴弹跳角度的标度律。

其次，研究了液滴撞击固体微图案表面的动力学过程及微图案对于液滴形貌和运动的调控机制。基于三相线受力分析，澄清了固液界面切向粘附力差异造成液滴自切割的力学机制，建立了韦伯数和无量纲条纹宽度对液滴自切割的调控相图。基于数值模拟，揭示了不同微图案表面调控液滴定向弹跳及自旋转新现象的力学机制。通过理论分析，预测了不同微图案对液滴动量及角动量的调控规律，总结了微图案诱导液滴实现三维运动的调控策略。

最后，研究了在液面上固体主动变形对毛细自组装运动的调控机制，分析水面仿生软体机器人定向自组装的光控策略。基于力学建模和数值模拟，分析了软体昆虫变形引起的液面形貌，讨论了系统稳定性。研究了两昆虫间毛细作用场的空间分布和昆虫变形的影响。基于最小势能原理，发现了两昆虫主动自组装和主动自分离的力学机制。受软体昆虫启发，采用光敏结构设计了一种水面仿生软体机器人，阐释了其定向自组装的光控机制和可循环调控策略。

● 关键词

固液界面、毛细动力学、流固耦合、液滴、软体机器人

作者简介 | Biography

方维，男，1993 年生，天津大学机械工程学院力学系副研究员。2016 年在北京理工大学获学士学位；2021 年在清华大学获博士学位；2018 年至 2019 年在美国哈佛大学做访问学者；2021 年至 2023 年在清华大学开展博士后研究；2024 年在天津大学工作至今。

方维主要从事固液接触、表面浸润、生物材料力学和细胞力学研究，在《Nat Commun》《Sci Adv》《Angew Chem》《Adv Mater》《Research》《J Mech Phys Solids》《Phys Fluids》等期刊上发表 SCI 论文 10 余篇，发明专利 1 项，研究成果多次被《Science》《Nature Asia》和人民网等国内外媒体作为研究亮点报道。主持国家自然科学基金青年项目 1 项、中国博士后科学基金特别资助和面上项目各 1 项。曾入选中国力学学会优秀博士学位论文（2022）、清华大学优秀博士学位论文（2021）、清华大学“水木学者”（2021）、北京市优秀毕业生（2016、2021）、全国力学博士生学术论坛优秀报告（2020）、全国徐芝纶力学优秀学生奖（2016）。

● 主要研究成果

（1）毛细自组装力学与仿生

该项研究建立了软体昆虫在液面集群运动的毛细动力学理论，发现了小尺寸可变形固体颗粒在液面主动自组装的物理机制，在微型软体机器人方面取得重要应用。相关成果发表在综合领域期刊《Nat Commun》（2020，共同一作），界面领域期刊《Langmuir》（2018，第一作者）和材料领域期刊《Adv Mater Technol》（2022，主要作者）。

（2）液滴三维运动调控机制

该项研究建立了微图案表面的液滴动力学理论，揭示了液滴自切割、自旋转等新现象的物理机制，实现了液滴三维动力学的精准调控，在液滴能量收集方面取得重要应用。相关成果发表在应用力学期刊《Appl Phys Lett》（2022，第一作者），流体力学期刊《Phys Fluids》（2022，共同一作），综合领域期刊《Nat Commun》（2019，主要作者）和化学领域期刊《Angew Chem》（2020，主要作者）。

(3) 流固耦合的液滴撞击动力学

该项研究建立了双向流固耦合的毛细动力学数值方法, 揭示了生物软材料运动与变形关于液滴撞击动力学的调控机制, 提出了一种精准控制液滴弹跳方向和接触时间的力学策略, 在液滴定向输运方面取得重要应用。相关成果发表在综合领域期刊《Research》(2023, 共同一作) 和《Nat. Commun.》(2021, 主要作者) 以及液滴领域期刊《Droplet》(2023, 第一作者)。

● 代表性论文

[1] Fang W, Hu Z, Li Q, Feng XQ, Lv JA. Optocapillarity-driven assembly and reconfiguration of liquid crystal polymer actuators. *Nature Communications*, 2020,11:5780.

[2] Fang W, Tao R, Wu J, Dou B, Xu W, Zheng Z, Li B, Wang ZK, Feng XQ, Hao C. Rotating surfaces promote the shedding of droplets. *Research*, 2022,6:0023.

[3] Fang W, Guo HY, Li B, Li Q, Feng XQ. Revisiting the critical condition for the Cassie-Wenzel transition on micropillar-structured surfaces. *Langmuir*, 2018,34:3838-3844.

[4] Fang W, Zhang K, Jiang Q, Lv C, Sun C, Li Q, Song Y, Feng XQ. Drop impact dynamics on solid surfaces. *Applied Physics Letters*, 2022,121: 210501.

[5] Fang W, Wang S, Duan H, Tahiri AS, Zhang K, Wang L, Feng XQ, Song M. Target slinging of droplets with a flexible cantilever. *Droplet*, 2023, e072.

[6] Li H, Fang W, Li Y, Yang Q, Li M, Li Q, Feng XQ, Song Y. Spontaneous droplets gyrating via asymmetric self-splitting on heterogeneous surfaces. *Nature Communications*, 2019,10: 950.

[7] Li H, Fang W, Zhao Z, Li A, Li Z, Li M, Li Q, Feng XQ, Song Y. Droplet precise self-splitting on patterned adhesive surfaces for simultaneous multidetection. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2020,59: 10535-10539 .

[8] Sun SY, Zhang H, Fang W, Chen X, Li B, Feng XQ. Bio-chemo-mechanical coupling models of soft biological materials: A review. *Advances in Applied Mechanics*, 2022,55: 309-392 .

非共价界面层状纳米复合材料的多尺度力学与设计



何泽洲

中国科学技术大学
hezezhou@mail.ustc.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2024/05/23/d5943a2d-a0f0-46e1-a1c7-b1eb966baace.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

重大工程应用和可持续发展需求为开发新型绿色环保的高性能结构与功能纳米复合材料提供了战略机遇和挑战。纳米复合材料的优异性质主要来源于其纳米功能单元，而最主要的挑战是如何有效地将功能单元纳尺度突出的特性传递到宏观尺度。此外，如何解决强度和韧性之间的矛盾，实现纳米复合材料的强韧化设计一直是力学与材料前沿交叉研究中的关键科学问题。

生物结构材料因其复杂而精细的层次结构和界面，表现出卓越的力学性能和多功能性。其中，弱界面与微结构协同工作，同时在多个尺度上控制着材料的非弹性变形和增韧机制，实现了材料独特的刚度、强度与韧性的组合，激发了高性能仿生纳米复合材料的发展。非共价界面作为一类弱界面，能在变形过程中动态地断裂和重构，始终保持载荷传递能力，并在界面上允许大的非弹性变形。因此，在材料中引入非共价界面能有效地调控增韧机制，平衡刚度、强度和韧性，从而有望解决纳米复合材料中的主要挑战和关键科学问题。本文围绕着纳米复合材料中非共价界面的多尺度力学框架、基于界面调控的力学优化设计、二维材料的界面力学行为和机理等三个关键科学问题，进行了系统研究。

本文首先通过扩展界面本构关系，提出了一个针对砖块和界面系统自下而上的多尺度理论框架。阐明了由于界面本构关系的周期性，规则界面在不同的界面重叠长度下有均匀、局部化和扭结变形三种变形模式，由此定义了两个临界长度以描述非共价界面变形模式的转变。界面扭结表现为多个拓扑缺陷在界面上成核和扩展，从而同时提高了材料的强度和韧性。对不同界面堆叠构型的分析发现，相称界面的变形行为与规则界面相似，而线性滑动模型能很好地描述非相称和随机界面的变形行为。

当重叠长度足够长时，由于抗滑性随机界面的荷载传递能力会超过规则界面。理论预测和力学框架通过大规模分子动力学模拟得到了验证。由此，结合通用的特征参数，提出了一个变形模式相图，给出了界面变形模式、关键特征尺寸、材料力学性能之间的内在关联，揭示了非共价界面层状纳米复合材料的一般性强韧化机制。

本文接着研究了石墨烯基仿贝壳材料层间强非共价键调控与强韧性优化。考虑层间滑移与结构稳定性的耦合作用，修正了剪滞模型来描述片层拔出过程的增韧效应，明确了石墨烯基仿贝壳材料的强度同时受到界面韧性和剪切强度的影响，而韧性主要由片层拔出过程产生的能量耗散主导。由于三聚氰胺分子与氧化石墨烯之间超强的非共价作用，优选三聚氰胺分子作为层间交联剂。发现了三聚氰胺分子通过反常的氢键作用极大提高了界面剪切应力，增强了层间能量耗散。通过平衡氧化石墨烯面内拉伸强度、层间剪切强度和界面韧性三者之间的竞争，给出了一个同时提高石墨烯基仿贝壳材料强度和韧性的优化策略。进而提出了一个标度律作为评价机制，以联系石墨烯基仿贝壳材料内部非弹性变形与其力学性能，揭示了层间强非共价作用相对于其他交联剂的优势，建立了一种基于界面调控兼顾强度和韧性的材料力学设计理论。

本文最后研究了二维材料组装结构在范德华作用下的力学行为和机理。结合非线性剪滞模型和分子动力学模拟，发现了由于层间范德华吸引力引起的边缘效应，经典的剪滞模型不能准确地描述多层二维材料的面内变形。在剪滞模型框架下，通过引入两个特征常数来描述边缘剪切应力，发展了考虑边缘效应的剪滞模型，定量地揭示了层间滑移、边缘效应剪切应力和二维材料薄片的弹性变形对多层二维材料组装结构变形的贡献。随后，研究了自折叠石墨烯在外力和热激活作用下从基底上的剥离和撕裂行为，明确了由于基底的范德华作用，石墨烯的撕裂锥角关于基底粘附强度遵循不同于宏观尺度的标度律；在热激活作用下，自折叠石墨烯由于层间范德华作用可以通过自剥离和自撕裂的方式在基底上实现自组装。

综上所述，本文结合理论模型和分子动力学模拟，系统地研究了非共价界面层状纳米复合材料的多尺度力学与设计，不仅为力学与材料科学前沿交叉研究中诸多关键科学问题提供了新认识和新理论，还为先进纳米复合材料走向工程应用奠定了理论基础。

关键词

纳米复合材料、仿贝壳材料、非共价界面、多尺度力学、非线性剪滞模型、界面本构关系、强韧化设计、二维材料

作者简介 | Biography

何泽洲，新加坡南洋理工大学博士后研究员。2016年6月于中国科学技术大学获得学士学位，2021年6月于中国科学技术大学近代力学系获得博士学位，导师为吴恒安教授。2021年6月至2023年5月，在中国科学技术大学工程科学学院从事博士后研究，合作导师为张忠教授和吴恒安教授；2023年6月至今，转至新加坡南洋理工大学从事博士后研究，合作导师为高华健教授和 Hortense Le Ferrand 教授。

何泽洲主要从事微纳米力学与先进结构材料力学设计研究，研究工作通过结合理论模型与数值模拟的方法，揭示低维材料、仿生材料等微纳结构材料的多尺度力学行为，建立微观参量与材料宏观力学性能之间的联系，从而指导先进结构材料的力学设计。在《J. Mech. Phys. Solids》(4 篇)《Int. J. Solids Struct.》《Extreme Mech. Lett.》《Nat. Commun.》等期刊上发表论文 20 余篇，并主持国家自然科学基金项目青年项目。

● 主要研究成果

(1) 非共价界面微纳结构材料多尺度力学与设计

解决强度与韧性之间的矛盾是先进材料力学设计中最关键的科学问题之一。生物结构材料以其复杂而精细的微结构和界面展现出卓越的力学性能和多功能性，为高性能先进材料的设计提供了灵感。提出了界面强非共价键相互作用调控仿贝壳材料强韧化设计的概念，发展了耦合界面滑移的剪滞模型，建立了以小分子强非共价键作用调控界面的石墨烯基层状材料力学设计框架。针对非共价界面的共性特征，建立了自下而上的多尺度力学分析框架，揭示了非共价界面变形模式、关键特征尺寸和材料力学性能之间的内在关联，提出了非共价界面层状纳米复合材料强韧化设计的普适性理论。将上述弱氢键界面机制应用于芳纶纳米纤维基复合材料设计，同时提高了纳米纤维复合材料的拉伸强度、韧性和抗冲击性。

(2) 多层范德华材料界面与弯曲力学

多层范德华材料由于层间弱相互作用而呈现出丰富且不寻常的弯曲力学行为，包括失效模式、可变形性和弯曲性质。发展了基于多层堆叠结构中心线模型的连续介质力学理论，以定量描述其力学行为，包括非平截面效应、有效弯曲刚度和离面变形能力。通过构建平截面和非平截面变形行为的判断准则，揭示了有效弯曲刚度的普适标度律，并提出了统一的变形模式相图，直观地展示了多层结构的尺寸与固有材料特性之间的竞争机制。该理论框架不仅为开发和验证多层结构板壳力学行为、几何非线性以及后屈曲等更完善的力学模型提供了一个极具价值的起点，还为基于多层范德华材料器件的设计和 optimization 提供了指导。针对多层二维材料的面内变形，引入了两个特征常数来描述边缘剪应力，并发展了考虑边缘效应的剪滞模型，以定量揭示了层间滑移、边缘剪应力和面内弹性变形对多层二维材料面内变形的贡献。

● 代表性论文

[1] He ZZ, Zhu YB, Wu HA. A universal mechanical framework for noncovalent interface in laminated nanocomposites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 158: 104560.

[2] He ZZ, Zhu YB, Xia J, et al. Optimization design on simultaneously strengthening and toughening graphene-based nacre-like materials through noncovalent interaction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 133: 103706.

[3] He ZZ, Wang F C, Zhu YB, et al. Mechanical properties of copper octet-truss nanolattices. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 101: 133-149.

[4] Huang Z C, He ZZ, Zhu YB, et al. A general theory for the bending of multilayer van der Waals materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2023, 171: 105144.

[5] Hou Y, Zhou J, He Z, et al. Tuning instability in suspended monolayer 2D materials. *Nature Communications*, 2024, 15 (1) : 4033.

[6] He ZZ, Zhu YB, Wu HA. Edge effect on interlayer shear in multilayer two-dimensional material assemblies. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 204: 128-137.

[7] He ZZ, Wu HA, Xia J, et al. How weak hydration interfaces simultaneously strengthen and toughen nanocellulose materials. *Extreme Mechanics Letters*, 2023, 58: 101947.

[8] He ZZ, Zhu YB, Wu HA. Self-folding mechanics of graphene tearing and peeling from a substrate. *Frontiers of Physics*, 2018, 13: 1-12.

基于多目标优化的结构减振与降噪研究



和梦欣

天津大学
mxhe@tju.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2024/05/23/75e6b2d3-7124-4d8f-bd1f-4b7729981eb2.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

结构减振与降噪设计问题广泛存在于航空航天、核工业及船舶重工等领域。工程中振动控制问题往往包含多个设计目标，拥有高维设计变量。通常这些设计目标相互冲突，例如轻量化设计与减振性能、动力吸振器附加质量与吸振效果等。其次，宽频激励、低频振动与噪声控制及非线性振动因素等为结构动力学分析与设计带来了许多困难。面对愈加复杂的工程需求，如何高效地设计结构避免振动与噪声辐射是亟需解决的问题。

本文从弹性梁的振动控制问题入手。首先，以轻量化与降噪设计为优化目标，以梁结构几何参数与物理参数为设计变量，采用传递矩阵法建立动力学模型，通过若干数值结果表明多目标降噪设计的重要性，并总结弹性梁减振设计规律。其次，本文研究声学黑洞梁的非线性动力学特性、与非线性能量阱的耦合作用效果、周期声学黑洞的带隙特性与隔声设计，拓展声学黑洞结构的应用前景。

对于结构优化算法，本文从胞映射算法入手，提出基于粒子群与胞映射的混合优化策略。迭代前期采用粒子群快速收敛，接着采用胞映射细分搜索技术精确搜索。该算法不仅能够快速收敛，而且一定程度上保证最优解的全局性，并应用于弹性梁多目标隔声设计。为了进一步加速结构设计效率，本文采用机器学习建立代理模型，并结合全局数据与局部数据分别建立代理模型，能够在迭代过程中自适应切换。该算法能够再较少力学模型调用次数获得最优解集，应用于周期声学黑洞结构隔声设计与二维超结构板的最优设计。

对于近些年广受关注的超材料振动控制问题，本文将分别研究基于声学黑洞、半正弦型波纹的一维超结构梁，并探讨轻量化设计、结构强

度约束与振动性能设计之间的关系。为了提高结构强度，本文提出一种周期加筋板结构，基于有限元法分析带隙形成机制；通过 3D 打印制作试件，并测量振动传递率验证振动带隙。最后，提出一种基于声学黑洞的超材料板，并通过模态分析揭示其减振机理、展示声学黑洞超结构丰富的局域共振式模态行为。

以上为本文主要研究内容。从弹性梁振动控制问题入手，然后推广至一维超材料梁和二维超材料板。在研究过程中，提出了两种高效的结构多目标优化算法。在后续超材料设计中，数值和实验结果证明了所提算法的高效性及超材料的振动控制能力。本文研究工作将为工程结构振动控制提供高效的分析及优化策略。

● 关键词

减振降噪、多目标优化、数据驱动优化、超材料、声学黑洞

作者简介 | Biography

和梦欣，天津大学机械工程学院博士后，助理研究员。2015 年于燕山大学获得工学学士学位，同年保送至天津大学硕博连读，2022 年获得工学博士学位，获评 2022 年度天津大学优秀博士学位论文，入选 2024 年度香江学者计划。

和梦欣博士主要从事结构振动与噪声控制研究，主要研究方向包括基于声学黑洞构型的减振降噪、结构多功能设计与数据驱动优化等。目前已在《Journal of Sound and Vibration》《Mechanical Systems and Signal Processing》《ASME Journal of Vibration and Acoustics》等动力学与控制权威期刊上发表 SCI 论文 10 余篇。主持国家自然科学基金青年项目、中国博士后科学基金面上项目等。

● 主要研究成果

(1) 弹性梁的声振优化设计

发展了基于粒子群与胞映射的混合优化方法，可以高效解决非均匀梁的减振降噪多目标优化问题，得到了完整、连续的 Pareto 前沿，揭示了振动噪声控制中的优化目标冲突性以及设计变量与优化指标的演化关系；

(2) 声学黑洞结构的非线性振动特性

阐明了声学黑洞梁的主共振行为及其参数影响规律，利用非线性能量阱克服了传统声学黑洞结构低频减振性能不足的局限，采用胞映射方法揭示了减振性能指标与系统参数之间的复杂关联；

(3) 基于声学黑洞构型的减振降噪研究

设计了代理模型自适应切换策略，提出了基于数据驱动的多目标优化方法，提高了结构多功能设计的计算效率和收敛性；揭示了基于声学黑洞构型的力学超材料带隙机制及其阻尼耗散与声振特性，实现了轻质高刚的减振降噪设计，相关成果已成功应用于海上采油平台的振动控制问题。

● 代表性论文

[1] Wei PF, He MX, Ding Q. Vibration and sound radiation of acoustic black hole beams on Pasternak foundation by the Riccati transfer matrix method. *Applied Acoustics*, 2024,217:109840.

[2] Sheng H, He MX, Pueh Lee H, Ding Q. Quasi-periodic sonic black hole with low-frequency acoustic and elastic bandgaps. *Composite Structures*, 2024,337:118046.

[3] Sheng H, He MX, Ding Q. Vibration suppression by mistuning acoustic black hole dynamic vibration absorbers. *Journal of Sound and Vibration*, 2023,542:117370.

[4] He MX, Ding Q. Dynamic analysis and design of metamaterial plates with crossed acoustic black holes for vibration control. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2023,145(1):011013.

[5] He MX, Ding Q. Dynamics analysis and design of metamaterial beams with multiple half-sine waves. *Applied Acoustics*, 2022,186:108448.

[6] He MX, Lyu X, Zhai Y, Tang Y, Yang T, Ding Q. Multi-objective optimal design of periodically stiffened panels for vibration control using data-driven optimization method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021,160:107872.

[7] He MX, Ding Q. Data-driven optimization of the periodic beam with multiple acoustic black holes. *Journal of Sound and Vibration*, 2021,493:115816.

[8] He MX, Sun JQ. Multi-objective structural-acoustic optimization of beams made of functionally graded materials. *Composite Structures*, 2018,185:221-8.

基于序列近似整数规划的通用高性能离散变量拓扑优化新方法



梁缘

大连理工大学
yuanliang@dlut.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2024/05/23/2b09b70d-09c4-444c-b931-523af245d169.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

在诸多高新技术领域对于超轻质、多功能等先进结构需求的强劲推动下, 结构拓扑优化近年来发展迅猛。经典的拓扑优化方法以有限元模型的密度(像素)为设计变量(密度取 0 或 1 分别表示孔洞或材料), 因此拓扑优化的数学本质是大规模非线性 0-1 离散整数规划。为了回避组合复杂性、维度爆炸等困难, 传统的方法是将 0 或 1 的离散变量松弛为 0 到 1 的连续变量, 允许中间密度(灰度)单元。中间密度(灰度)单元尽管可以使用材料插值格式进行惩罚但是依然存在, 因此需要复杂的后处理获得可制造的设计。灰度单元也不利于结构几何/拓扑信息的提取与控制, 也会破坏物理模型的真实性和带来分析困难。事实上, 如何消除非 0-1 中间密度破解灰度难题是拓扑优化领域长期关注的重点挑战性课题。直接求解大规模非线性整数规划可从根本上破解这一难题, 然而该方案长久以来被认为是不可行的。本博士学位论文旨在打破这一瓶颈, 从大规模离散变量拓扑优化的数学本源出发, 通过研究序列近似整数规划算法的理论、方法和程序实现, 构造出通用高性能的离散变量拓扑优化新方法。本论文的主要研究内容为下列四个方面。

(1) 提出了基于离散变量灵敏度和序列近似整数规划(SAIP)的离散变量拓扑优化新方法。回答了序列近似整数规划中一系列理论问题, 成功构造出求解大规模可分离整数规划子问题的正则松弛算法, 其计算效率与连续变量的梯度类算法相当, 并且该方法具有全局收敛性和渐近强对偶性质。提出了两种适合于离散变量的运动极限策略。该方法成功求解了四种以柔顺性为目标的不同约束不同物理场的拓扑优化问题, 优化结果表明该方法统一于数学规划框架下, 可高效求解具有多重非线性约束及大量局部约束的离散变量拓扑优化问题。这些理论推导和算法应用

充分说明了序列近似整数规划可以有效破解灰度难题，突破已有离散变量方法局限性。

(2) 如何处理非单调（灵敏度符号不定）的目标或约束函数是离散变量方法求解复杂非柔顺性拓扑优化问题的阻碍。为此，本文构造了基于信赖域的序列近似整数规划方法，即 SAIP-TR 方法。信赖域约束可直接控制离散设计变量的改变量从而直接控制近似模型的精度，将信赖域约束引入序列近似整数规划可以建立离散变量方法的理性运动极限策略。本文指出了离散变量下信赖域约束是线性约束，构造了基于 merit 函数的动态调整信赖域半径方案。数值算例表明 SAIP-TR 方法可以求解以柔顺机构为典型代表的非单调目标函数拓扑优化问题。然后，在黑白拓扑描述下构造了表示结构材料相和空白相的最小尺寸几何约束，并使用 SAIP-TR 方法成功求解几何约束以消除柔顺机构的点铰和应力集中。最后，SAIP-TR 方法成功求解多工况结构响应约束下的无材料用量约束问题。综上所述，SAIP-TR 方法极大地扩展了离散变量拓扑优化方法的适用范围并且具有优良的程序通用性。

(3) 对于离散变量拓扑优化给出的清晰黑白拓扑结构，给出了仅利用节点密度和节点邻域信息的可编程的 Euler-Poincaré 定理，成功计算了拓扑优化结果的拓扑不变量，即欧拉数和贝蒂数。进一步说明拓扑优化结果的贝蒂数与结构复杂性（孔洞个数）直接相关。结合可编程的 Euler-Poincaré 定理和三种策略（线性松弛结构复杂性控制约束，骨架约束和控制分比下降）给出了可自由控制结构复杂性的可求解列式。最后在序列近似整数规划框架下使用正则松弛算法成功求解了不同初始孔洞个数，不同目标孔洞个数的二维三维结构的复杂性控制问题。这些研究结果解决了复杂结构拓扑不变量的可计算性问题，构建了计算拓扑学与结构拓扑优化之间的桥梁。

(4) 为了应用本文的离散变量方法求解大规模拓扑优化问题，提出了将物理多尺度方法和数值多尺度结合的多分辨率离散变量拓扑优化方法。该方法首先利用扩展多尺度有限元计算出粗网格内的数值形函数，然后利用数值形函数构造出表示粗网格与细网格位移转换关系的投影矩阵，最后结合投影矩阵与数值代数中的多重网格方法得到了基于扩展多尺度有限元的多重网格共轭梯度迭代求解器。该求解器避免了传统多分辨率方法的孤岛结构(QR 模式)，使得本文的离散变量方法可以求解近千万量级自由度的大规模三维拓扑优化问题，获得了具有丰富细节的多分辨率设计。

关键词

拓扑优化、整数规划、序列近似规划、信赖域、拓扑不变量

作者简介 | Biography

梁缘，大连理工大学，力学与航空航天学院，工程力学系，助理研究员，博士后。2016年毕业于大连理工大学获得工学学士学位，在2021年12月于大连理工大学获得工学博士学位，之后继续在大连理工大学从事博士后研究。

梁缘主要研究内容是结构拓扑优化理论，算法与应用研究，尝试从拓扑优化本源 0-1 规划列式，构造基于序列近似整数规划的离散 0-1 变量拓扑优化问题，并应用于多物理场耦合下的，具有复杂目标 / 约束函数的离散 0-1 变量拓扑优化方法。目前已经在计算力学顶级期刊《CMAME》《IJNEM》以及结构优化旗舰期刊《SMO》等以第一作者或通讯作者发表论文 10 余篇。在第 14 届世界结构与多学科优化大会上获得国际结构与多学科优化学会 ISSMO 颁发的“ISSMO/Springer Prize”（杰出青年科学家奖），申请人为此次全球唯一获奖者。ISSMO 执委会（主席美国工程院院士 Wei Cheng 教授、秘书长 H. Alicia Kim 教授）给出的颁奖词“该工作既新颖又有力，值得得到这种非凡的认可（the work was novel and strong, and deserving of this fantastic recognition）”。得到了国际结构与多学科优化学会官方 NEWSLETTER 的整版面报道。博士论文入选 2022 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编。

● 主要研究成果

（1）基于拓扑优化本源 0-1 规划列式，提出了基于序列近似整数规划的离散 0-1 变量拓扑优化方法

该方法完全避免了传统求解框架下对设计变量的连续化策略，可实现大规模离散 0-1 变量拓扑优化问题的直接高效求解。并进一步结合信赖域策略，提出了适用于求解具有复杂目标 / 约束函数以及多物理场耦合问题的离散 0-1 变量拓扑优化方法。作为核心算法之一成功移植进由郭旭院士牵头研发的国产自主可控结构拓扑优化软件 DLUtopt 中。该软件具有完全自主知识产权，已经成功求解多个大规模工业级别拓扑优化问题。结果表明，该软件在优化结果与 CAD 系统集成方面以及缩短研发周期等方面具有显著优势。

（2）在结构拓扑优化的 0-1 规划列式下，构建了拓扑学与结构拓扑优化之间的桥梁

提出了结构拓扑性质（如孔洞个数、连通隧道等）的新度量指标，解决了复杂结构拓扑不变量的可计算性问题。提出并证明了仅利用节点密度和节点邻域结构构型信息的可编程计算的 Euler-Poincaré 定理，避免了拓扑学中通过统计点、线、面个数确认结构拓扑的繁复处理方法。将新拓扑度量指标与所发展的离散 0-1 变量直接拓扑优化方法相结合，实现了对复杂结构拓扑的直接控制。

（3）克服大规模拓扑优化的有限元数值计算瓶颈问题

提出了将物理多尺度与数值多尺度结合的多分辨率框架，只需要粗网格内进行有限元分析，通过迭代矫正消除误差，获得了在细网格上的高分辨率设计。该框架使得所发展的拓扑优化方法成为可以求解近千万量级自由度的高性能算法，也可以与问题无关机器学习技术深度融合构建成物理知识增强的机器学习新范式。

● 代表性论文

[1] Liang Y, Cheng GD. Topology optimization via sequential integer programming and Canonical relaxation algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019,348:64-96.

[2] Liang Y, Cheng GD. Further elaborations on topology optimization via sequential integer programming and Canonical relaxation algorithm and 128-line MATLAB code. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020,61:411-431.

[3] Liang Y, Sun K, Cheng GD. Discrete variable topology optimization for compliant mechanism design via Sequential Approximate Integer Programming with Trust Region (SAIP-TR). *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020,62:2851-2879.

[4] Liang Y, Yan XY, Cheng GD. Explicit control of 2D and 3D structural complexity by discrete variable topology optimization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022,389:114302.

[5] Yan XY, Liang Y, Cheng GD. Discrete variable topology optimization for simplified convective heat transfer via sequential approximate integer programming with trust-region. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2021,122:5844-5872.

[6] Sun K, Liang Y, Cheng GD. Sensitivity analysis of discrete variable topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022,65:216.

[7] Liu HL, Wang C, Zhang YW, Liang Y. Multi-material structural discrete variable topology optimization with minimum length scale control under mass constraint. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024,420:116701.

[8] Sun K, Cheng GD, Liang Y. Topological derivative based sensitivity analysis for three-dimensional discrete variable topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024,429:117151.

扑翼自主推进和集群运动的数值研究



林星箭

南京航空航天大学
xjlinf@163.com

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn/profile//2024/05/23/40b3db26-fa46-40f1-9a22-30131fce0ac3.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

自然界鸟类 / 鱼类的集群运动现象引人入胜、蔚为壮观。长期以来，人们一直关注着涉及其中的三个关键科学问题，分别是：生物的扑翼推进运动具有什么规律？生物集群中的规律队形与个体间流固耦合作用有何关系？生物集群运动对个体推进性能有何影响？针对这三个关键科学问题，本文将自然界鸟类 / 鱼类生物简化为扑翼模型，利用基于简化圆函数的气体动力学格式和浸入边界方法，数值研究了扑翼推进效能的影响因素和变化规律，以及两个和多个扑翼在自主推进运动过程中的集群特性。本文的研究成果有助于进一步理解生物飞行 / 游动及其集群运动的流体力学机理，同时可以为仿生扑翼飞行器 / 潜航器的优化设计和集群控制提供一定的理论参考。本文的主要研究内容和成果如下：

(1) 研究了扑翼在静止流场中自主推进运动的影响因素。首先，比较了纯沉浮运动、纯俯仰运动、沉浮俯仰组合运动等三种不同驱动形式对扑翼推进效能的影响。发现沉浮俯仰组合运动可以使扑翼获得最快的推进速度和最高的推进效率。并且，纯沉浮运动比纯俯仰运动更有利于扑翼获得更大的推进速度和更高的推进效率。此外，总结了扑翼推进效率随雷诺数、沉浮俯仰运动相位差、俯仰轴位置等参数的变化规律，给出了扑翼推进效率最佳的参数设置。

(2) 研究了扑翼自主推进运动的普适标度律。研究发现扑翼在（纵向和横向）双自由度空间中依然可以沿纵向直线推进，同时伴随有横向的被动往复振动。并且，研究还发现了扑翼的推进速度、能量消耗、横向往复振动的普适标度律。该标度律与扑翼的厚度和质量等因素无关，符合自然界多种游动生物的运动实验数据。

(3) 研究了相位差对串列双扑翼集群运动的影响。研究发现相位差会导致双扑翼自发地形成两种集群行为模式，即快速模式和慢速模式。在快速模式中，集群的推进速度显著大于单扑翼，并且个体间距很小。受相位差影响，集群在快速模式中存在着两种流固耦合作用：融合作用和破裂作用。在慢速模式中，集群的推进速度与单扑翼一致，此时，下游扑翼穿涡行进且具有节能优势。集群在慢速模式中的个体间距较大，可以通过相位差量化为整数。此外，研究给出了快速模式和慢速模式在“初始间距 - 相位差”空间的分布范围，以及集群推进速度和效率最佳的参数设置。

(4) 研究了并列双扑翼在（纵向和横向）双自由度空间中的自组织行为。研究发现双扑翼仅通过流体力学作用就可以同时在纵向和横向获得稳定的位置，形成稳定的规律队形。受相位差的影响，集群的流致自组织行为会形成两种不同的规律队形，当双扑翼同步运动时会形成斜排队形，当双扑翼异步运动时会形成并列队形。并且，集群的流致自组织规律队形只与扑翼的拍动频率和振幅相关，不受初始间距和初始队形等小扰动的影响。首次证明了集群的流致自组织规律队形具有（纵向和横向）二维稳定性。进一步地，研究给出了稳定队形的分布范围，并揭示了稳定队形涌现的流体力学机理。

(5) 研究了多扑翼集群的自组织行为。研究发现，对于多个（扑翼数量 $N=5\sim 15$ ）扑翼组成的集群系统，流固耦合作用可以诱导集群自发地形成稳定的连续的密集队形。在密集队形中，相邻个体的间距很小，集群犹如完整的鳗状波动推进体。密集队形的涌现与扑翼集群的个体数量、相位差、初始间距、拍动振幅等参数密切相关，是在较大的参数空间范围内存在的普遍现象。和单扑翼相比，密集队形中的集群同时具有速度优势和节能优势。此外，集群通过流固耦合作用还会形成稀疏队形。受初始间距和相位差等因素的影响，集群的稀疏队形存在多种形式的多层次有序结构。并且，集群在稀疏队形中的推进运动具有“头雁效应”。和稀疏队形相比，密集队形可以使集群获得更快的推进速度，更低的能量消耗和更高的推进效率。

● 关键词

扑翼推进、标度律、集群运动、流固耦合、规律队形、二维稳定性

作者简介 | Biography

林星箭，博士，副教授，硕士生导师，现就职于南京工程学院。2021年毕业于南京航空航天大学流体力学专业，获工学博士学位。博士学位论文入选 2022 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编，江苏省优秀博士学位论文。主要从事计算流体力学数值方法和应用基础研究。数值方法方面，发展了一种基于径向基函数插值的半拉格朗日 - 格子玻尔兹曼方法，实现了不可压缩流动的无网格数值模拟。应用基础研究方面，针对自然界鱼群 / 鸟群的集群运动现象，利用简化扑翼模型，研究了扑翼自主推进及其集群运动的流体力学机理。以第一作者 / 通讯作者身份在《Journal of Fluid Mechanics》《Physics of Fluids》《Physical Review Fluids》等期刊发表 SCI 论文十余篇，授权发明专利 2 项。科研成果获中国空气动力学学会科学技术奖

二等奖 1 项。主持国家自然科学基金青年项目、江苏省自然科学基金青年项目等科研项目，参与国家自然科学基金面上项目、联合基金项目等科研项目。担任《Journal of Fluid Mechanics》《Physics of Fluids》等期刊审稿人。

● 主要研究成果

(1) 提出了扑翼自主推进效能的标度率

系统地研究了扑翼在多维运动参数空间的自主推进效能，揭示了各种参数（包括运动模式、弹性变形、雷诺数等）对扑翼自主推进效能的影响，并阐明了其中的流体力学机理。提出了扑翼推进效能的标度律，给出了多维运动参数的最优解。为仿生扑翼飞行器 / 潜航器的效能评估和优化设计提供了理论参考。

(2) 揭示了扑翼集群自组织行为的流体力学机理

系统地研究了扑翼集群运动在纵向和横向的二维自组织行为，发现了集群自组织行为的多尺度和多模态特征。揭示了相位差、个体数量等多种参数对集群自组织行为的影响，证明了集群自组织规律队形具有（纵向和横向）二维稳定性，阐明了不同规律队形涌现及其对集群推进效能影响的流体力学机理。为仿生扑翼飞行器 / 潜航器的集群运动和队形控制提供了流体力学理论支撑。

● 代表性论文

[1] Lin X, Wu J, Yang L, Dong H. Two-dimensional hydrodynamic schooling of two flapping swimmers initially in tandem formation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 941: A29.

[2] Lin X, Wu J, Zhang T, Yang L. Flow-mediated organization of two freely flapping swimmers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 912: A37.

[3] Lin X, Wu J, Zhang T. Self-directed propulsion of an unconstrained flapping swimmer at low Reynolds number: hydrodynamic behaviour and scaling laws. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 907: R3.

[4] Lin X, Wu J, Zhang T, Yang L. Self-organization of multiple self-propelling flapping foils: energy saving and increased speed. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 884: R1.

[5] Lin X, Wu J, Zhang T. Effect of torsional spring and shape on the performance of bioinspired caudal fin. *Physics of Fluids*, 2021, 33: 071903.

[6] Lin X, Wu J, Zhang T, Yang L. Phase difference effect on collective locomotion of two tandem autopropelled flapping foils. *Physical Review Fluids*, 2019, 4: 054101.

[7] Lin X, Wu J, Zhang T. Performance investigation of a self-propelled foil with combined oscillating motion in stationary fluid. *Ocean Engineering*, 2019, 175: 33-49.

[8] Lin X, Wu J, Zhang T. A mesh-free radial basis function-based semi-Lagrangian lattice Boltzmann method for incompressible flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2019, 91:198-211.

膜基结构的跨尺度力学行为研究及应用



刘雁韦

北京大学
yanwei-liu@pku.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn//profile//2024/05/23/01819067-5942-498a-8a31-f4ec5b9eda60.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

柔性可穿戴设备、微纳米传感器、微纳米柔性场发射器等先进器件的广泛应用极大地促进了社会进步和经济发展。作为上述产品基本组分的膜基结构受到国内外研究人员的重点关注。相关产品的功能性、稳定性和服役寿命与膜基结构的力学行为(如压痕行为、屈曲失稳行为等)息息相关。随着现实工程对基于膜基结构的器件的敏感性和功能性要求越来越高,实际应用于膜基结构中的薄膜也越来越薄,已从宏观尺度进入微纳尺度。此时,不考虑内禀特征长度和表面能影响的传统连续介质力学无法对微纳米薄膜-基底结构的力学行为进行准确描述。为指导膜基结构在现实中的准确应用,本文基于协同考虑应变梯度效应和表面效应的弹性跨尺度唯象理论,建立了膜基结构的跨尺度压痕和屈曲失稳理论模型,研究了微纳尺度下内禀特征长度和表面能对膜基结构力学行为的影响,揭示了高模量比薄膜-基底结构在不同尺度下力学行为不相似的力学机制。基于对膜基结构力学行为的认知,拓展了膜基结构在微纳米薄膜材料、软材料力学参量测量中的应用。本文主要完成的内容如下:

(1) 基于虚功原理,构建了协同考虑内禀特征长度和表面能影响的膜基结构跨尺度压痕行为控制方程,在压痕荷载满足赫兹分布的假设下,结合轴对称荷载下半无限空间表面位移解答,采用积分变换得到了膜基结构跨尺度压痕解析解。基于该解析解,系统地研究了内禀特征长度和表面能对膜基结构压痕行为的影响,并探讨了影响尺度效应的主要因素。结果表明膜基结构压痕行为的尺度效应主要受薄膜特征长度和薄膜表面残余应力的控制,薄膜表面弹性常数引起的膜基结构压痕行为尺度效应可以忽略不计。薄膜模量与基底模量之比的增大会抑制膜基结构压痕行

为的尺度效应，而压头尺寸和泊松比对膜基结构压痕行为的尺度效应无显著影响。基于上述分析，提出了控制膜基结构压痕行为尺度效应的两个重要无量纲参数（无量纲材料特征长度和无量纲表面残余应力），并首次在无量纲抗弯刚度、无量纲材料特征长度和无量纲表面残余应力三者构成的空间中绘制了膜基结构压痕行为尺度效应控制面。并且，设计了相关实验验证了理论模型的有效性。

(2) 结合协同考虑内禀特征长度和表面能影响的薄板控制方程和正弦荷载下半无限空间表面位移解答，解析求解了膜基结构跨尺度屈曲失稳的临界荷载和临界波长。基于上述解答，研究了内禀特征长度和表面能对膜基结构临界屈曲失稳的影响机制。结果显示薄膜特征长度和表面弹性模量对临界屈曲波长和临界屈曲荷载均有显著影响，而表面残余应力仅影响临界屈曲荷载。需要强调的是，由于内禀特征长度和表面能的影响，宏观尺度下膜基结构屈曲失稳的标度律不再适用于微纳米尺度下的膜基结构。此外，基于能量最小化原理求解了膜基结构跨尺度初始后屈曲行为，探究了内禀特征长度和表面能对膜基结构初始后屈曲演化路径的影响。结果显示内禀特征长度会改变膜基结构初始后屈曲失稳路径特征，而表面能对初始后屈曲失稳路径无显著影响。

(3) 传统自支撑压痕实验 (Free-standing indentation) 存在边界条件不确定、样品制备复杂等问题。鉴于此，我们提出了基于膜基结构压痕行为的微纳米薄膜表征新方法。基于该方法表征了滴铸在聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 基底上的氧化石墨烯 (GO) 微纳米薄膜的力学参量，表征结果与前人相符。此外，基于有限元分析，系统地考察了压头大小、薄膜尺寸、膜基比、压入深度和表面粗糙度对表征准确性的影响，据此给出了基于膜基结构压痕行为表征微纳米薄膜力学参量的最佳实验条件。另外，本文初步讨论了采用膜基结构压痕行为表征材料内禀特征长度和表面力学参量的可能性。

(4) 传统的软物质压痕表征法存在应变集中引起的强非线性、针尖易刺破样品、压痕响应荷载小从而易受外界影响等问题。鉴于此，我们提出了基于膜基结构压痕行为的软材料表征新方法。首先，基于对应原理、积分变换和玻尔兹曼叠加原理求解了硬膜 - 软黏弹性基底的压痕解析解，基于解析解研究了该结构在阶跃荷载和准静态荷载下的压痕响应特征。并且，设计了基于膜基结构压痕响应表征硅橡胶黏弹性的实验，表征结果与拉伸试验结果吻合。此外，基于有限元方法考察了新方法的有效性和误差敏感度。并且，基于理论模型分析了当采用膜基结构表征软物质力学行为时由于薄膜厚度的尺度效应可能带来的表征误差。基于上述分析，给出了采用膜基结构压痕行为表征软材料力学性质时的最佳实验条件。

本文的研究内容加深了人们对于高模量比膜基结构跨尺度力学行为的认识，揭示了不同尺度下高模量比膜基结构力学行为不相似性的理论机制，同时拓展了高模量比膜基结构在材料表征中的应用，为科学研究提供了新的表征平台。

● 关键词

膜基结构、跨尺度理论、压痕、屈曲失稳、材料表征

作者简介 | Biography

刘雁韦，男，汉族，现为北京大学工学院博士后，2022 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编入选者。2016 年于中国矿业大学（北京）获工学学士学位，2021 年于北京大学获理学博士学位。曾获北京大学优秀毕业生、北京大学王仁奖学金、北京大学优秀博士后等荣誉，2021 年入选北京大学博雅博士后计划，2022 年入选国家人力资源和社会保障部博士后创新人才支持计划。

主要从事先进材料与结构的跨尺度弹塑性和断裂行为研究，在一般性弹性跨尺度理论、实验表征及应用，多场耦合下材料的跨尺度塑性和断裂方面取得系列成果。目前以第一作者 / 通讯作者身份在 *Compos. Struct.*, *Int. J. Solids Struct.*, *Appl. Math. Model.*, *Tribol. Int.*, *Int. J. Mech. Sci.* 等国际著名期刊发表 SCI 论文 15 篇，授权国家发明专利 2 项。主持国家自然科学基金青年项目 1 项，参与了国家自然科学基金重大项目、重点项目及面上项目等。担任 *Mater. Today Commun.*, *J. Comput. Methods Sci.*, *力学学报* 等期刊独立审稿人。

● 主要研究成果

(1) 一般性弹性跨尺度理论、实验表征及其应用

建立了一般性弹性跨尺度理论，给出了常见跨尺度理论之间的关联；解析求解了硬膜 / 软基结构的跨尺度压痕行为，发现了控制其压痕行为尺度效应的两个关键无量纲量，据此提出了跨尺度力学参量的实验表征新方法；建立了硬膜 / 软基结构跨尺度表面失稳模型，发现了该类结构表面失稳标度律关系的尺度相关性；建立了仿生交错结构复合材料跨尺度剪滞和失稳模型，给出了微观交错结构和宏观力学性质之间的定量关系，解释了该类材料力学行为尺度特性影响的来源。

(2) 多场耦合下材料的跨尺度塑性和断裂

发展了一种力热耦合的应变梯度塑性模型，针对模型中力热耦合方程的强非线性，结合径向返回法和交错求解策略开发了该模型的有限元求解算法，发现了高温下金属的微尺度塑性行为取决于应变梯度强化和热软化的相互竞争；发展了一种考虑损伤演化和断裂的应变梯度塑性模型，给出了直角坐标系和曲线坐标系下该理论模型的一般形式，阐明了应变梯度强化和损伤软化对金属材料中微纳孔洞长大的耦合影响机制，指出了应变梯度在金属材料断裂模式随尺度转变现象中的重要作用。

● 代表性论文

[1] Liu Y, Wei Y, Chen P. Indentation response of soft viscoelastic matter with hard skin. *Soft Matter*, 2019, 15(28): 5760-5769.

[2] Liu Y, Wei Y, Chen P. Characterization of mechanical properties of two-dimensional materials mounted on soft substrate. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 214-221.

[3] Liu Y, Wei Y, Long H. Identifying the viscoelastic properties of soft matter from the indentation response of a hard film-soft substrate system. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63 (4) : 244612.

[4] Liu Y, Ma H, Wei Y, et al. Size effect investigation of indentation response of stiff film/compliant substrate composite structure. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 193: 106-116.

[5] Liu Y, Wei Y. Effect of surface energy on the indentation response of hard nanofilm/soft substrate composite structure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 185: 105759.

[6] Liu Y, Ma H, Long H, et al. Couple effect of surface energy and strain gradient on the mechanical behaviors of the biological staggered composites. *Composite Structures*, 2021, 271: 114133.

[7] Liu Y, Zhang S, Long H, et al. Trans-scale surface wrinkling model and scaling relationship analysis of stiff film-compliant substrate structures. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(11): 2776-2786.

[8] Liu Y, Ma H, Long H, et al. Multi-scale indentation model of stiff film-compliant substrate structures. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, 119: 566-585.

数据驱动的折纸结构参数辨识与动力学建模



刘作林

同济大学
zuolin_liu@fudan.edu.cn

全文链接:

<https://www.cstam.org.cn//profile//2024/05/29/1a16cb09-af3f-41a3-a29f-cc450cd1e18d.pdf>

扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

折纸是一门古老的手工艺艺术，可以将简单的二维平面折叠成复杂的三维构型。近年来，折纸为构造力学超材料提供了一种新的思路。通过设计折痕的排布，许多具有特殊力学性质的折纸超材料被提出，例如可变构型、可编程刚度及多稳态等。由于这种几何设计方式不受材料特性和尺寸限制，因此被广泛应用于小到纳米尺寸的 DNA 折叠，微米尺寸的血管支架，大到宏观尺寸的折叠机器人，以及超大尺寸的太阳帆板等各种领域。折纸结构表现出丰富的力学特性和广泛的应用前景，而可靠的定量描述、精确的响应预测和实际的服务应用都离不开精确化的动力学建模和参数识别。

本文以具有不同力学特性的折纸结构为研究对象，研究了以下四个科学问题：（1）如何提出适用于具有强非线性特征的刚性折叠折纸结构的参数辨识方法，要求方法可以准确识别未知几何和物理参数，从而使建立的动力学模型可以准确预测折纸结构中由折叠诱发的复杂动力学响应；（2）如何提出通用的非刚性折叠折纸结构的数据驱动动力学建模方法，以应对具有不同本构特性的折纸结构，揭示主导非线性形式；（3）如何提出可解释性的神经网络方法，要求可以自动建立具有非光滑特性的自锁折纸结构的动力学模型，同时保留模型的可解释性；（4）如何提出适用于具有时变参数特征的可展开折纸结构的数据驱动动力学建模方法，要求可以同时提取结构的动力学模型并识别其中时变的模型参数。针对这四个问题，本论文的主要工作如下：

（1）通过在时域内应用 B 样条伽辽金有限元方法，提出了适用于全局强非线性的刚性折叠 Miura 折纸结构的参数辨识方法。应用该方法解

决了双稳态折纸结构所呈现出的对测量噪声和对初始条件敏感的辨识难题,识别了结构的几何以及物理参数。基于识别参数,得到了相应的力-位移关系,与基于实验数据重构的回复力曲面对比验证了方法的有效性。

(2) 提出了一套适用于各种非线性形式的数据驱动动力学建模方法,利用该方法建立了双稳态 Miura 折纸结构、三稳态折纸球结构、多胞元串联双稳态 Miura 折纸结构以及横向振动的折纸管等各类非刚性折叠折纸结构的数据驱动动力学模型。通过比较数据驱动动力学模型和实际模型对不同非线性行为的预测,验证了方法的有效性和通用性。

(3) 通过构建物理可解释的模糊神经网络,提出了一般性的分段线性自锁折纸结构的数据驱动动力学建模和参数辨识方法:即分段个数、非光滑点位置以及各分段区间内的线性参数都未知情况下的辨识。应用局部线性优化、嵌套优化以及局部线性模型树优化方法分别识别了结构的线性参数、非线性参数以及模型形式。与传统方法不同,所构造的神经网络具有特定的物理意义:神经元数目与分段个数有关,局部线性模型系数与各分段本构关系参数有关,有效性函数与非光滑点的位置有关。

(4) 基于局部线性模糊神经网络,提出了一种适用于耦合驱动的可展开折纸结构的数据驱动动力学建模方法。利用模糊神经网络优越的逼近能力对未知的时变结构参数进行展开,从而实现对各种非线性和不连续过程的拟合。引入局部线性模型树优化算法来优化网络架构,可以自动确定最少神经元数目和最优的神经元分布,提高结果的可解释性。利用该方法建立了耦合驱动的可展开折纸结构的数据驱动动力学模型并揭示了其受控展开过程中的时变特性。

本文的主要创新点如下:

一、针对刚性折叠双稳态 Miura 折纸结构对测量噪声和初始条件敏感的问题,提出了一种基于 B 样条伽辽金有限元思想的适用于全局强非线性系统的参数辨识方法。首次识别了折纸结构的几何以及物理参数,成功预测了 Miura 折纸结构的非线性动力学行为,为精确化理论建模的参数选取提供了指导。

二、针对非刚性折叠折纸结构本构关系未知的问题,提出了一种基于子集选择的适用于各种非线性特征的数据驱动动力学建模方法。明确了非刚性折叠折纸结构的非线性本构形式,预测了 Miura 结构的双稳态振动、折纸球的三稳态振动以及折纸管的面外振动,为探索折纸结构的动力学性质提供了模型支撑。

三、针对具有刚度跳跃特性的自锁折纸结构的非光滑问题,提出了一种基于可解释性网络的适用于一般分段线性系统的数据驱动动力学建模方法。成功解决了自锁折纸结构模型分段个数、非光滑点位置以及各分段区间内的线性参数均未知情况下的动力学建模问题。实现了网络模型参数和物理结构参数的一一对应。

四、针对耦合驱动的可展开折纸结构的参数时变问题,提出了一种基于模糊网络的数据驱动动力学建模方法。突破了时变参数辨识的两大难点,即自主挑选最简模型形式和自适应各种参数时变过程。成功应用在折纸结构受控展开过程中的频谱分析,为探索相应的动力学现象提供了分析手段。

● 关键词

折纸结构、数据驱动、参数辨识、人工神经网络、动力学建模

作者简介 | Biography

刘作林，复旦大学工程与应用技术研究院智能机器人研究院博士后。2021 年于同济大学获得博士学位，期间(2019-2021)在美国密歇根大学安娜堡校区进行博士联合培养。2021 年入选上海市超级博士后激励计划，2023 年入选中国力学学会青年人才蓄水池项目。博士学位论文入选中国力学学会、上海市力学学会和同济大学优秀博士学位论文。

刘作林博士的主要研究方向为折纸结构力学模型辨识及其机械计算。研究成果以第一作者发表在《Adv. Sci》《J Mech Phys Solids》《IEEE Trans. Fuzzy Sys》《Mech Syst Signal Process》《Neural Networks》等国际重要学术期刊。主持国家自然科学基金（青年）、中国博士后基金（特别资助、面上）等多项课题。

● 主要创新成果

(1) 提出了 B 样条伽辽金、数据驱动子集选择和模糊神经网络等折纸结构参数、力学模型和时变柔性驱动辨识方法，解决了模型挑选、时变参数识别和物理可解释性难题，突破了刚性、部分刚性和非刚性折纸结构的动力学模型辨识；

(2) 提出了多稳态折纸超材料数字化设计方法，揭示了折叠参数与弹性模量之间的力学关系，设计了多种不同力学特性的多稳态超材料，实现了折纸结构拉、压和弯组合多稳态切换，解决了弹性模量可编程调控难题；

(3) 揭示了折纸结构准静态和动力学多稳态切换的物理机制，形成了可编辑多稳态构型切换图，构建了多稳态机械蓄水池计算新框架，实现了机械逻辑门和数字图像识别等计算任务，为实现机械智能计算提供了新途径。

● 代表性论文

[1] Liu Z, Fang H, Xu J, Wang KW. Cellular automata inspired multistable origami metamaterials for mechanical learning. *Adv. Sci.*, 2023:2305146.

[2] Liu Z, Fang H, Xu J. A neuro-fuzzy network modeling method for uncovering the dynamic properties of time-varying systems. *Mech. Syst. Signal Process*, 2023,191:110176.

[3] Liu Z, Fang H, Xu J, Wang KW. Digitized design and mechanical property reprogrammability of multistable origami metamaterials. *J. Mech. Phys. Solids*, 2023,173:105237.

[4] Liu Z, Xu J, Fang H. Extracting inherent model structures and identifying parameters of time-varying systems using local linear Neuro-Fuzzy networks. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2022,30:233-247.

[5] Liu Z, Fang H, Xu J. Identification of piecewise linear dynamical systems using physically-interpretable neural-fuzzy networks: Methods and applications to origami structures. *Neural Networks*, 2019,116:74-87.

[6] Liu Z, Fang H, Wang KW, Xu J. A parameter identification method for continuous-time nonlinear systems and its realization on a Miura-origami structure. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2018,108:369-386.

[7] Liu Z, Fang H, Xu J, Wang KW. Discriminative transition sequences of origami metamaterials for mechanologic. *Adv. Intell. Syst.*, 2023,5:2200146.

[8] Liu Z, Xu J. A Galerkin discretisation-based identification for parameters in nonlinear mechanical systems. *Int. J. Syst. Sci.*, 2018,49:908-919.

斜爆轰波面动力学及起爆区波系研究



杨鹏飞

中国科学院力学研究所
yangpf@imech.ac.cn

● 全文链接:

<https://www.cstam.org.cn//pro-file//2024/05/29/d446ff0b-a9cf-4c29-8865-ec1f58d4f8c0.pdf>

● 扫码阅读:



论文摘要 | Abstract

高超声速飞行器在向更高马赫数和更强机动性发展，基于爆燃燃烧的传统动力技术难以满足这一需求。利用斜爆轰波进行燃烧组织的斜爆轰发动机因具有能量转换迅速、热循环效率高、飞行速域宽广等特点而引起越来越多的关注，是高超声速推进技术的前沿领域。研究人员借助近年来发展的计算流体力学方法，结合有限的实验结果和理论分析，在斜爆轰的流动与燃烧机理认识方面取得了进展。但目前斜爆轰发动机仍处于实验室研制状态，其工程化应用过程中需要关键基础科学理论的支撑。

激波与化学反应的强耦合作用导致爆轰波本身具有极强的不稳定性特征，保证斜爆轰波在发动机燃烧室内稳定燃烧是其工程应用的关键。这涉及到两个关键问题：一是斜爆轰的起爆波系的稳定性特征；二是外界扰动作用下爆轰波面的燃烧组织。前者直接决定斜爆轰能否在燃烧室内驻定，后者则直接影响发动机的推进性能。本文面向斜爆轰波在高超声速推进系统中的应用，针对斜爆轰发动机所涉及到的关键流体力学问题，研究斜爆轰波的起爆结构的失稳特性和波面动态特征，相关的研究成果将为斜爆轰发动机燃烧室的设计和斜爆轰波的调控提供科学依据。

主要研究内容和创新性成果如下：

(1) 针对斜爆轰波起爆结构的多样性，通过引入气动参数、几何参数和化学参数来量化不同因素对起爆波系的影响，发现斜爆轰波起爆结构失稳后伴随着无规则、无衰减的振荡。通过分析爆轰内在失稳特性和化学反应敏感性之间的联系，确认起爆初始阶段形成的强解是低马赫数下斜爆轰起爆结构失稳的关键物理机制。

(2) 针对起爆初始阶段斜爆轰局部流动的非均匀特性，重点分析

起爆区附近强解形成的机理，提出关键特征参数来刻画斜爆轰波局部流动的化学非平衡特征，并结合爆轰极曲线理论建立斜爆轰起爆长度、起爆区波系类型的量化判据。

(3) 针对斜爆轰波面胞格的失稳特性，通过引入功率谱密度分析方法，对波面压力时序信号的频谱特征进行分析，获得波面失稳的两种物理机制，揭示定常来流中斜激波与燃烧的耦合机理。

(4) 针对强迫扰动作用下斜爆轰的波面动力学特征，通过监测波面位置的振荡信号并分析其频率特性，获得外界扰动对波面燃烧的作用规律，揭示强迫扰动作用下波面小尺度波系的演化机理。

● 关键词

斜爆轰、起爆结构、动态特性、非定常流动、稳定性

作者简介 | Biography

杨鹏飞，现任中国科学院力学研究所副研究员。2016 年于南京航空航天大学获学士学位，2021 年于中国科学院力学研究所获工学博士学位，2021-2023 年在北京大学工学院从事博士后研究，获北京大学博雅博士后项目支持。

杨鹏飞博士主要从事高超声速推进技术方面的研究工作，重点关注斜爆轰流动机理及应用、旋转爆轰燃烧特性与调控等。在 *J. Fluid Mech.*, *Combust. Flame*, *Phys. Rev. Fluids*, *AIAA J.* 等流体力学和航空航天领域的重要期刊发表 20 余篇 SCI 论文，研究成果得到同领域杰出专家的正面引用和评述，承担国家自然科学基金青年项目和博士后科学基金项目，参与多项国家自然科学基金委和国防领域项目，获评中国科学院优秀博士学位论文，入选北京市科协青年人才托举工程。

● 主要研究成果

(1) 起爆区类型的量化判据研究

将爆轰极曲线理论和数值仿真结果相结合，分析了起爆区附近弱解、强解的形成机制，并以弱解、强解的分界点作为判据，提出了起爆区长度、起爆区波系类型的量化标准。

(2) 斜爆轰起爆区波系失稳研究

获得定常来流中起爆区波系结构失稳和非定常振荡规律，提出了起爆区波系结构失稳的三个诱导因素，揭示了波系结构失稳的物理机制。相关研究成果能够甄别特定来流条件下斜爆轰波的稳定特征，拓展和调控爆轰发动机的稳定工作范围。

(3) 非定常斜爆轰调控研究

发展非定常斜爆轰波压力信号的分析方法，获得了外界强迫扰动和爆轰波内在失稳的作用规律，揭示了波面小尺度波系的形成机理。相关工作作为斜爆轰的高效稳定燃烧组织方法提供了一种新思路，即利用外界扰动和内在失稳的相互作用实现对爆轰波非定常波系的调控。

● 代表性论文

[1] Sun J, Yang P, Chen Z. Dynamic interaction patterns of oblique detonation waves with boundary layers in hypersonic reactive flows. *Combustion and Flame*, 2024, 271: 113832.

[2] Yang P, Yu D, Chen Z, Teng H, Ng HD. Effects of thermal stratification on detonation development in hypersonic reactive flows. *Physical Review Fluids*, 2024, 9 (8): 083202.

[3] Sun J, Yang P, Tian B, Chen Z. Evolution and control of oblique detonation wave structure in unsteady inflow. *AIAA Journal*, 2023,61: 4808-4820.

[4] Xi X, Teng H, Chen Z, Yang P. Effects of longitudinal disturbances on two-dimensional detonation waves. *Physical Review Fluids*, 2022, 7: 043201.

[5] Yang P, Ng HD, Teng H. Unsteady dynamics of wedge-induced oblique detonations under periodic inflows. *Physics of Fluids*, 2021, 33: 016107.

[6] Yang P, Ng HD, Teng H. Numerical study of wedge-induced oblique detonations in unsteady flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 876: 264-287.

[7] Yang P, Teng H, Jiang Z, Ng HD. Effects of inflow Mach number on oblique detonation initiation with a two-step induction-reaction kinetic model. *Combustion and Flame*, 2018, 193: 246-256.

[8] Yang P, Ng HD, Teng H, Jiang Z. Initiation structure of oblique detonation waves behind conical shocks. *Physics of Fluids*, 2017, 29: 086104.

