

轻巧-承力-功能一体化超结构:概念、设计及应用*

康瑞^{1,2,3}, 李雪^{1,2,3}, 孟晗^{2,3}, 高金翎^{2,3},
邓健^{2,3}, 姜永烽^{2,3}, 林国兴¹, 卢天健^{2,3}

- (1. 洛阳船舶材料研究所(中国船舶集团有限公司第七二五研究所), 河南 洛阳 471023;
2. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016;
3. 南京航空航天大学 多功能轻量化材料与结构工信部重点实验室, 南京 210016)

(我刊青年编委孟晗、编委卢天健来稿)

摘要: 高端装备在极端环境下的适应性和机动性是国防安全的核心保障,具有重要战略意义.提高主承载结构的轻量化水平与功能性,是推动高端装备升级换代的关键环节.高端装备在多场耦合极端环境下工作,对主承载构件的轻量化和多功能性提出了严苛要求.现有装备的承力结构与功能(减振降噪、抗弹防爆、冲击吸能、散热隔热、吸波等)分离,造成结构和重量冗余,性能难以提升.因此,亟需开发轻巧-承力-功能一体化超结构,推进高端装备的升级换代.该文首次提出轻巧-承力-功能一体化超结构的概念并给出了明确的定义,然后结合实际工程应用需求对多种超结构的设计方案开展综述,最后对超结构未来的发展方向进行了展望.

关键词: 轻巧-承力-功能一体化超结构; 轻量化; 多功能; 设计; 应用

中图分类号: O34 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450196

Ultralight, Compact, and Load-Bearing Multifunctional Metastructures: Concept, Design and Applications

KANG Rui^{1,2,3}, LI Xue^{1,2,3}, MENG Han^{2,3}, GAO Jinling^{2,3},
DENG Jian^{2,3}, JIANG Yongfeng^{2,3}, LIN Guoxing¹, LU Tianjian^{2,3}

- (1. *Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang, Henan 471023, P.R.China;*
2. *State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R.China;*
3. *MIIT Key Laboratory of Multi-Functional Lightweight Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R.China)*

(Contributed by MENG Han, M.AMM Youth Editorial Board & LU Tianjian, M.AMM Editorial Board)

Abstract: The adaptability and mobility of high-end equipment in extreme war environments guarantee national defense security and are of great strategic significance. To advance the upgrading of such equipment, a key step is to improve the lightweight level and functionality of the main load-bearing structures. The high-end equipment

* 收稿日期: 2024-07-03; 修订日期: 2024-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(12032010;12202188;52361165626)

作者简介: 康瑞(1994—),男,工程师,博士(E-mail: kangrui0403@163.com);

孟晗(1989—),女,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: menghan@nuaa.edu.cn);

卢天健(1964—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: tjl@nuaa.edu.cn).

引用格式: 康瑞,李雪,孟晗,高金翎,邓健,姜永烽,林国兴,卢天健.轻巧-承力-功能一体化超结构:概念、设计及应用[J].应用数学和力学,2024,45(8):949-973.

working under the extreme coupled multi-field environment puts forward high demands on lightweight and multifunctionality of the main load-bearing components. The separation of load-bearing structures and functional components (e.g., vibration and noise reduction, bullet and explosion resistance, impact energy absorption, heat dissipation, and wave absorption parts, etc.) in existing equipment, results in structure and weight redundancy, making it difficult to further improve the operational performances. Therefore, there is an urgent need to develop ultralight, compact, load-bearing, and multifunctional metastructures. Herein, the concept of ultralight, compact, and load-bearing metastructures was proposed for the first time and a clear definition was given. A series of design schemes for prototype metastructures were summarized in combination with practical engineering application requirements. Future development directions of metastructures are also envisioned.

Key words: ultralight, compact, and load-bearing metastructure; lightweight; multifunctionality; design; application

0 引言

近年来,国际局势动荡不安,世界百年未有之大变局加速演进,为应对时代大变局,以适应不断变化的战争环境和新型威胁,我国“十四五”规划中明确提出“加速武器装备升级换代”,并在《国防科技发展报告》中提出高端国防装备的轻量化需求。

自21世纪伊始,材料科学和结构工程技术持续革新,极大地促进了各类装备的发展。传统装备在材料选择上多依赖于金属材料,如钢、铝合金等,它们因其优良的力学性能和加工性能而得到广泛应用,但在重量上往往不能满足现代装备对轻量化的苛刻要求。为解决这一问题,复合材料以其独特的轻质、高强、耐腐蚀等特性,逐渐成为替代传统金属材料的优选。碳、玻璃等纤维增强复合材料的广泛应用,不仅显著降低了装备的重量,还改善了其耐久性和环境适应能力。例如,宽体客机波音787机体结构中的复合材料占比高达50%^[1-2],相较于传统的铝合金设计重量减轻了约20%。在航空航天、车辆、船舶、高速列车等高端装备领域,“一代材料,一代装备”已成为装备技术升级的真实写照,而新型轻质高强材料的涌现,对高端装备研发起着至关重要的作用。

然而,通过开发新材料提升高端装备的性能逐渐进入了新的瓶颈:多场耦合极端环境对装备承力构件的轻量化和多功能性提出了更为严苛的要求。例如,被称为“陆战之王”的坦克类装甲车辆(图1(a)),其面临的威胁包括地雷、反坦克导弹、无人机、巡飞弹等武器产生的爆炸波、超高温金属射流以及破片群的联合毁伤。尽管新一代披挂装甲和防雷底板可有效提高装甲车辆的防护性能^[3-6],但结构重量和体积的增加,使其机动性和作战能力均明显下降。再例如,基于复合材料打造的武装直升机,其具有更轻的机身结构以及更高的机动性,但其防弹性能和抗冲击性能相对较弱^[7-8],故需在驾驶舱、引擎舱和其他关键区域额外配备轻型装甲(图1(b))^[9-10]。虽然采用轻质高强钛合金和复合材料可有效降低大型运输机(图1(c))承力结构的重量,但却无法解决诸如减振降噪、隔热保温、冲击防护等问题,需在承力结构之上附加其他功能性材料^[11],导致结构重量和体积增加。此外,由于承力结构尚未实现与功能件的有机结合,卫星、探测器、着陆器、空间站等航天器结构,目前普遍存在“重”“大”“粗”等问题(图1(d))。

如上,现代高端装备所面临的环境极端严酷,不仅要求其承力结构质轻、体小(即轻巧),还要求其具备减振降噪、抗弹防爆、冲击吸能、散热/隔热、电磁波吸收等多种附加功能,但传统的装备设计思路往往将其承力结构与功能分离。例如,在承力结构上添加额外的减振器、隔热层、吸能器、披挂装甲等,这不仅造成了重量和体积的冗余,也限制了装备性能的进一步提升。因此,推动装备升级换代的终极挑战在于如何仿效多功能生物结构(即“道法自然”),针对多场耦合极端环境带来的几何大变形、塑性变形、断裂、损伤等强非线性约束,将高性能材料和优秀的结构设计有机结合,构建集质轻、体小、承力、多功能等要素于一体的超级结构。为便于与传统的单一功能装备结构进行区分,本文将这类新型结构定义为轻巧-承力-功能一体化超结构(简称超结构)。例如:早在2001年,Lu(卢天健)等便基于形状记忆合金和点阵夹芯结构,提出了一种可自主变形的超轻承力结构^[12],该结构被视为最早的轻巧-承力-可重构超结构;2013年,Ni(倪长也)、Lu(卢天健)等提

出在金属点阵中添加陶瓷柱和界面黏接剂,构建了新型陶瓷/点阵金属混杂夹芯结构^[13],相较于传统的披挂式装甲,可以在减重和承载的同时,承受不同弹丸的多次打击,是一种优良的轻巧-承力-抗多次侵彻超结构;2024年6月25日,探月工程嫦娥六号任务取得圆满成功,其返回器的大面积隔热结构采用轻质蜂窝增强夹芯结构,该结构可同时实现重量轻且烧蚀隔热效果优异等特性,是一种先进的轻巧-承力-热防护超结构,它解决了结构轻量化与长时复杂气动加热的矛盾,为保护内部月壤成功返回地面起到决定性的作用。

轻巧-承力-功能一体化超结构为装备设计提供了全新的视角,其总体目标是瞄准国家重大战略需求,突破传统设计方法的局限,建立轻巧多功能承力结构的跨尺度力-热-声-光-电-磁理论和技术体系,系统应用于航空航天、国防等重大重点工程,整体提升我国在这一前沿领域的国际竞争力。轻巧-承力-功能一体化超结构的构建涉及多层次、多目标、多约束、多材料、多物理场耦合以及强非线性约束等关键科学问题,需要从设计理念、设计方法、制备技术、测试评估、人才培养等多个方面进行升级换代。



图 1 高端装备

Fig. 1 High-end equipment

1 轻巧-承力-功能一体化超结构:概念的提出

在英国剑桥大学王后学院内矗立着一座木桥(图 2(a)),名为数学桥(The Mathematical Bridge),又叫 Newton 桥。相传,这座桥是由大科学家 Newton 运用数学和力学原理设计建造的,整座桥上没有使用一根钉子。有一年,王后学院的学生认为 Newton 的这个设计似乎不太可能,于是趁着夜色偷偷把桥拆了,却无法在不用钉子的情况下把桥恢复成原样。虽然这个故事无法被证实,但以现在的眼光来看,数学桥采用几何形式巧妙的点阵多孔结构,以最少的材料实现了质量超轻和承力大的目标,已经初步具备了轻巧-承力-功能一体化超结构的某些基本特征,而这种在结构设计上使材料利用率达到极致(即最轻重量设计)的科学思维,一直影响着后续的科研人员。著名材料学家、英国两院院士、剑桥大学教授 Michael F. Ashby 被誉为现代设计工程学科的奠基人之一(图 2(b)),其最著名的贡献就是提出“材料利用效率”的概念^[14],即在结构设计过程中,如何最大限度地利用材料以达到最优的性能和成本效益。他提出的基于材料利用效率的设计方法,被称为“Ashby 图”或“材料利用效率图”,能够对比不同材料的多种性能,以此在设计过程中选择最优的材料。如图 3 所示的导热系数-热扩散系数 Ashby 图^[14],相比于非金属材料,金属材料同时具有较高的导热系数和热扩散系数,故在散热/导热结构设计中应优先选用铜、铝等金属材料。目前,Ashby 图在多个学科领域发挥着不可替代的作用,每一种新材料或新结构的发现,都可在 Ashby 图中呈现为一个前人未曾实现的点,或一个未曾有人踏足的区域。



(a) 数学桥

(a) The Mathematical Bridge

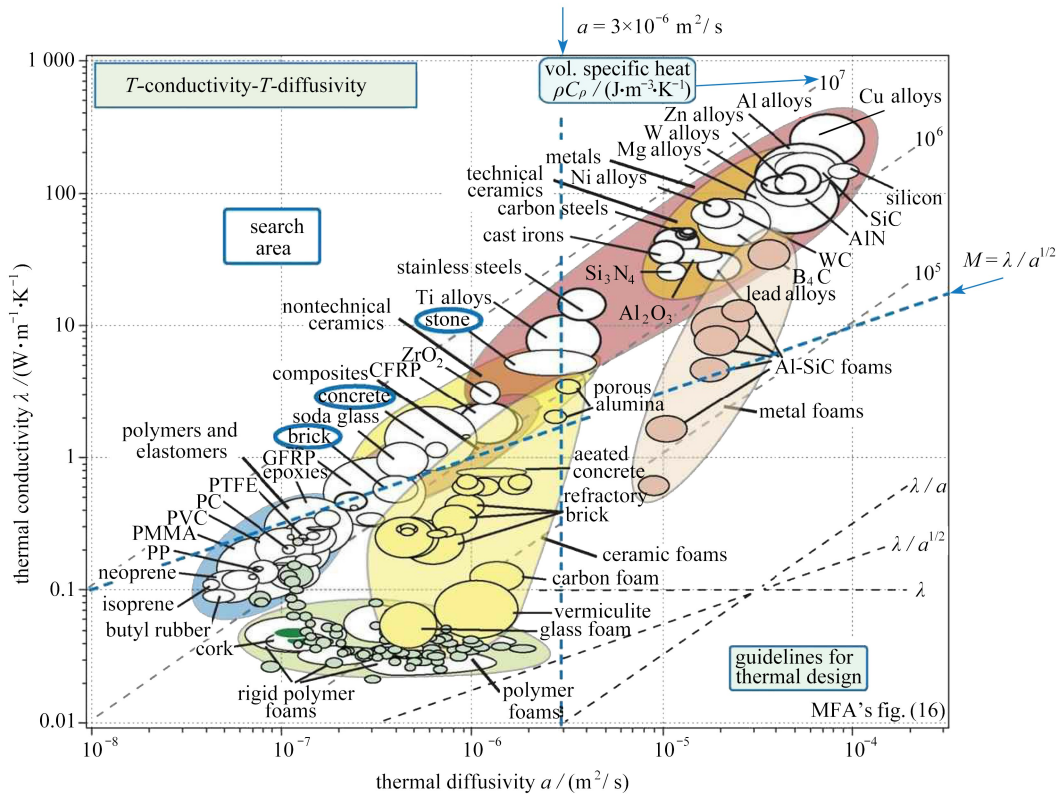


(b) Michael F. Ashby 教授

(b) Professor Michael F. Ashby

图2 数学桥与 Michael F. Ashby 教授

Fig. 2 The Mathematical Bridge and professor Michael F. Ashby

图3 导热系数-热扩散系数 Ashby 图^[14]Fig. 3 The Ashby selection map of thermal conductivity and thermal diffusivity^[14]

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

随着近现代工业的发展,人们发现仅通过材料性能的优选已无法完全满足工程需求,进而开始探索如何在材料选定及保证特定功能的基础上,通过创新的结构设计实现更高的承载效率和更低的重量。在这一背景下,类似于数学桥的超轻多孔结构迅速崭露头角,成为了实现装备结构轻量化的有效途径。1996年,著名材料学家、美国三院院士、哈佛大学教授 Anthony G. Evans(图4(a))牵头,联合哈佛、剑桥、麻省理工等著名高校,成功争取到由美国国防高等研究署(DARPA)和海军研究局(ONR)共同资助的有关超轻多孔金属的大型项目(支持力度达1000万美元),主要研究闭孔及通孔泡沫金属的制备、性能及应用^[15],目标是为新型号高速大型水面舰艇的主承力结构设计提供优选母材。很快,德国、英国、日本、加拿大等先进国家也纷纷立项支持多孔金属研究,与美国以军事应用为首要目标不同,这些国家的研究重点是实现多孔金属在汽车、建筑、能源等领域的工程应用。因此,1996年在国际上被普遍视为超轻多孔金属研究的元年。同一时期,中国的超轻

多孔金属研究较为零散,缺乏重点项目支持,应用目标也不明确。

作为国际材料学领域的先驱人物之一,Evans 教授对材料科学和工程领域做出了杰出贡献,包括探索先进陶瓷、陶瓷基复合材料、热障涂层、多孔金属、智能结构等,其中有关泡沫金属的研究成果为后续超轻多孔结构设计奠定了基础,与 Ashby 教授共同撰写的《Metal Foams: a Design Guide》^[16] 被广泛引用,成为该领域的经典。直到 2009 年去世,以所发表论文的引用率为参照,Evans 教授一直是国际材料学界的翘楚。

1995 年,卢天健获得哈佛大学博士学位后,先师从 Evans 教授和 Hutchinson 教授(著名固体力学家、美国三院院士、卢天健的博士生导师,图 4(b)) 做博士后研究,一年后加盟剑桥大学工程系,任讲师。除了 Ashby 教授,课题组还有一位著名固体力学家、英国两院院士、国际理论与应用力学联盟(IUTAM)主席 Norman Fleck 教授,他们二位鼓励卢天健参与到泡沫金属的研究工作中。此时,国内外学者针对泡沫金属宏观力学行为的理论和实验系统研究刚刚起步,尚未深入分析孔尺度及形貌影响泡沫金属力学行为的机制,缺乏目标牵引下的工程化研究。卢天健和 Fleck 共同指导博士后陈常青“自下而上”建立创细观力学模型,克服了以前理论模型的严重不足,总结了制备过程中产生的七大类孔结构几何缺陷,量化了这些缺陷对泡沫金属宏观屈服行为的不同影响^[17],发现在静水压力下,孔结构缺陷的存在促使孔壁的变形机制从拉压向弯曲转化。该结果在多孔金属研究历史上的地位突出:揭示了孔结构无序泡沫金属的承载能力受孔壁制备缺陷严重制约,进而提出发展承载能力更强的孔结构有序的多孔金属结构(即规则多孔结构)新方向。除了在剑桥大学工程系任教,卢天健还在王后学院任学术导师,每天都要经过数学桥,渐渐地,通过研究数学桥采用的点阵结构(lattice structure)及其设计原理,他开始将其应用到超轻多孔金属结构的研发中。

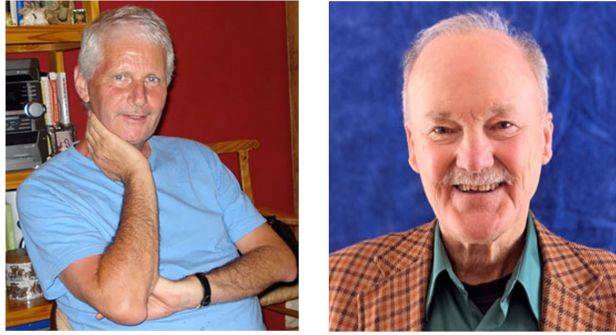
除了研究超轻多孔结构的承力特性,卢天健还接受 Evans 和 Ashby 的建议,立足力学,走学科交叉之路,研究超轻多孔结构的冲击吸能、散热、吸声等功能。研究表明,超轻多孔结构的密度仅为实体材料的 10% 或更轻,不同的孔隙形貌和孔隙尺寸对其力学及其他物理特性有显著影响,使其具备了不同的功能,例如:对流换热、噪声吸收、电磁辐射屏蔽、冲击能量吸收、阻尼减振等。1997 年至今,卢天健带领团队,提出了从随机/周期到胞状/纤维状孔拓扑、从骨架尺度离散化模拟到均质假设、“自下而上”结合“自上而下”研究超轻多孔结构的新途径,克服了基于均匀化/连续介质假设经典理论的局限和传统细观力学模型的弊端,系统揭示了孔的体积占比、迂曲度、联通/闭合、梯度/均匀空间排布、孔壁形状和尺寸等孔形貌参数影响其承载、吸能、传热、流动传质和吸声等宏观行为的机理,创建了超轻多孔结构跨尺度细观和唯象力/热/声理论体系。

例如,超轻多孔结构的三维联通骨架结构、高孔隙率等特点,使其具有不同于传统多孔介质(如堆积颗粒)的传热、流动传质等特性,需要分别从骨架的导热、辐射和流体流动的对流、相变等复杂物理现象分别建立数学描写,并建立考虑流体与骨架流-固耦合效应的理论模型。卢天健首先考虑了随机多孔结构的孔形貌特点,在国际上率先建立了强迫对流耦合多孔骨架导热的立方胞元模型^[18](被国际同行称为“卢氏立方胞元模型”,还被 Ashby、Evans、Hutchinson、Fleck 等合著的《Metal Foams: a Design Guide》^[16] 收录),发展了随机多孔结构内辐射和导热耦合的谱方法;随后,针对规则多孔结构,首次提出了导热-对流换热耦合肋片模型,系统测定了对流传热随 Reynolds 数及孔隙结构(孔隙率、孔径等)参数的变化规律;此外,还创新地提出了基于传热效率的孔隙构型选择方法和图谱,据此在国际上首次发现高孔隙率通孔泡沫金属作为紧凑散热器的最优孔径(~ 1 mm),并对随机及规则多孔金属换热器设计的试验关联式进行了系统分类。

针对减振降噪,卢天健带领团队,率先将高孔隙率多孔结构中的声传播简化为平行直纤维束绕流的声传播问题,并对其进行理论求解,为直接利用孔隙结构的特点解决纤维多孔材料中的声传播问题提供了理论基础,据此提出了优化纤维多孔材料构型的设计准则,首次发现其孔径在 ~ 0.1 mm 时,对日常噪声具有最优的吸声效果;此外,团队还建立了规则多孔结构流-固耦合与声振耦合动力学理论,解决了流场与声场联合作用下复杂周期结构动力学的精确建模难题^[19]。

进一步的研究发现,在超轻多孔结构两侧增加坚固的金属或复合材料面板可使其力学性能显著提高,而这种具有轻质夹芯和坚固面板的形似“三明治”的结构被称为三明治结构或者轻质夹芯结构。由于其卓越的比强度和比刚度等特性,轻质夹芯结构很快在工程领域得到广泛应用,早期主要应用于飞机结构组件,如机翼、尾翼等关键部位。

进入21世纪初,Evans与Ashby、Hutchinson、Fleck、Vikram Deshpande和Haden Wadley在内的众多科学家合作研究,极大地推动了轻质夹芯结构领域的发展^[20-23]。与此同时,卢天健继续与Evans开展合作,详细分析了二维多孔金属夹芯结构的热传导性能^[24],并对周期多孔夹芯结构的主动冷却性能进行了系统的研究^[25],阐明了多孔金属夹芯结构在紧凑散热冷却方面的潜在应用价值。值得一提的是,Evans不断突破自己的研究领域,首次在夹芯结构抗爆设计方面开展研究。早在“9·11”袭击事件发生之前,美国军方资助机构就开始了建筑物的抗爆研究计划,而Evans带领团队成功地提出了采用金属夹芯结构增强抗爆性的设计方案。与Evans的早期研究有所不同,针对结构防爆的研究更加注重工程结构设计而非材料科学,且当时全金属夹芯结构是一个新概念,而Evans却轻松地将研究拓展到了防护工程界并做出了重要贡献^[26]。



(a) Anthony G. Evans 教授 (b) John W. Hutchinson 教授
(a) Professor Anthony G. Evans (b) Professor John W. Hutchinson

图4 Anthony G. Evans 教授和 John W. Hutchinson 教授

Fig. 4 Professor Anthony G. Evans and professor John W. Hutchinson

同时期,立足固体力学,Hutchinson教授和Fleck教授对材料和结构设计也做出了许多重要的贡献。例如,Hutchinson发现夹芯结构的抗爆能力明显优于等质量的实心或板筋结构,并剖析了其力学机理^[27]: ①多孔芯体充分压溃以耗散爆炸冲击能量; ②夹芯结构拥有优异的塑性弯曲强度; ③流-固耦合效应减弱了传递至夹芯结构的冲量载荷(水下爆炸尤为如此)。为便于在实验室内安全实现爆炸加载,博士生Radford和Fleck等^[28]创新提出了以闭孔泡沫铝子弹撞击结构模拟压力脉冲载荷的实验技术方法。基于这一方法,Fleck领导团队,系统深入地研究了泡沫铝、蜂窝、波纹、金字塔点阵等芯体的典型金属夹芯结构在爆炸载荷下的动态力学行为,并揭示了相应的变形失效机理^[29-34]。另外,基于一维Taylor流-固耦合理论与理想刚塑性梁变形理论,Fleck等^[35]首次提出了金属夹芯梁的三阶段解耦响应模型,将结构的动态塑性响应拆分为三个独立过程。虽然该模型的理论预测与实验观测存在些许误差,但它基于一个具有物理意义的崭新视角,便于研究人员更好地审视金属夹芯结构的抗爆性能^[36]。这些开创性的研究,初步揭示了轻质夹芯结构在抗爆领域的应用前景,奠定了该领域的理论基础与发展前沿。

2004年,卢天健决定放弃剑桥大学讲席教授职位,全职回国发展。回国不到一年,他牵头申报的国家重点基础研究发展计划(973计划)项目就获批立项,旨在针对超轻多孔材料和结构创新构型的多功能化开展基础研究,这是中国力学界的第一个973项目,引发了国内对超轻多孔材料和结构的研究热潮。2006年,卢天健瞄准轻质材料和智能结构的若干基础力学问题,联合剑桥大学Ashby院士、Fleck院士等一起申报的高等学校学科创新引智计划(111计划)项目获批立项,这也是中国力学界的第一个111项目。

自1996年之后的十年,国内外有关超轻多孔材料和结构的研究主要集中于孔结构无序的泡沫材料和孔结构有序的点阵结构。在噪声控制^[37-38]、电磁波屏蔽/吸收^[39-41]、高效散热^[42-48]、冲击吸能^[49-55]等诸多领域,通过内部孔隙构型的合理设计,均可采用多孔材料及结构得到行之有效的解决方案。但是,在以刚度和强度为标志的力学性能方面,泡沫材料和点阵夹芯结构却有着显著差异,前者在压缩载荷作用下具有优异的抗压和能量吸收能力,可作为工程上急需的轻质吸能器,但在拉伸、剪切、弯曲等载荷作用下会因为随机分布的孔隙缺陷引起失效,导致刚度和强度大幅降低;反之,后者通过微观结构的有序排布和主动调控,解决了孔隙随机分布带来的弊端,使其刚度和强度得到有效提高。随着应用领域的不断扩展,由于孔隙拓扑构型相对单

一,传统的轻质多孔夹芯结构无法兼顾多种不同载荷工况下的力学性能,以及复杂应用环境下的多功能需求。有鉴于此,卢天健团队提出混杂多孔夹芯结构的基本概念,发展了泡沫-波纹、蜂窝-波纹、陶瓷-点阵等多种混杂多孔夹芯结构的创新构型^[13,56-60],并系统建立了其表征方法与设计理论,使轻质多孔夹芯结构的承载、能量吸收、抗弹防爆、减振降噪等性能获得大幅提高。

长期以来,卢天健团队系统开展超轻多孔结构的基础与应用研究,建立了随机多孔、规则多孔、混杂多孔三大类超轻多孔材料和结构的多功能跨尺度设计理论、性能表征方法和制备技术,攻克了空间、重量和强非线性约束下实现结构承载暨高效吸能、散热隔热、减振降噪、抗弹防爆等多样化功能的设计难题,并将建立的设计理论与方法成功应用于解决重点型号工程急需,从根本上改变了我国在相关领域分散和跟踪的研究状态,还将其拓展到脑组织、皮肤、牙齿、肝脏、水凝胶、试纸等生物及仿生含液多孔介质。

进入 21 世纪,装备结构的多功能轻量化紧迫需求,对超轻多孔材料及结构的性能提出了更高的要求,其应用范围进一步扩大。在航空航天领域,超轻多孔夹芯结构不仅应用于构建飞机的结构部件,还开始应用于航天器和卫星的关键部件。例如,美国 NASA 的火星探测器和月球车等设备,就采用了超轻点阵夹芯结构作为其支撑结构和壳体材料。此外,超轻多孔夹芯结构还在舰船、高铁、能源、建筑等领域实现了广泛应用。在这些领域的机械运载系统,除了最初的轻量化和小体积设计要求外,其承力结构的发展趋势正逐渐向多功能一体化方向发展。例如,针对深空、深海、极地等环境的探测需求,在装备结构轻量化设计中,需考虑极端冲击、极端压力、极端温度等特殊载荷,从而对其抗冲击、承载、热控等功能提出更高要求。现有装备的承力结构大多与功能材料(结构)分离,造成结构、重量及体积的冗余,性能难以进一步提升。

为解决装备结构多功能轻量化设计的瓶颈难题,本文在轻质多孔夹芯结构的基础上,同时兼顾质量轻、体积小、承力大与多功能一体化等要素,提出了轻巧-承力-功能一体化超结构新概念,其设计关键是引入具有多种优势(如质轻、体小、高比刚度、高比强度、耐冲击、隔热散热、减振降噪、功能多样化等特点)的多尺度人造多孔材料或智能材料,创造出新一代人工复合或变异的超结构,使其具有与传统结构迥异的超常特性。下文将重点介绍超结构的研究思路和典型案例。

2 轻巧-承力-功能一体化超结构:研究思路

不同于单一目标牵引下的传统结构设计思路,轻巧-承力-功能一体化超结构的设计具有多元化的目标牵引,设计时需充分考虑服役环境、功能需求、性能指标、制备工艺、维修保养以及使用寿命等诸多要素,进而通过清晰的目标导向,更好地把握超结构设计的关键方向。在多元化目标牵引下,针对轻巧-承力-功能一体化超结构开展的相关研究,呈现了“装备→设计→制造→实验→终试→服役→装备”不断迭代升级的过程。多元化目标导向,增加了超结构研究的复杂性。目前,在超结构的设计、制造、评价三个领域,可大致归结亟需解决的关键科学问题,如图 5 所示。

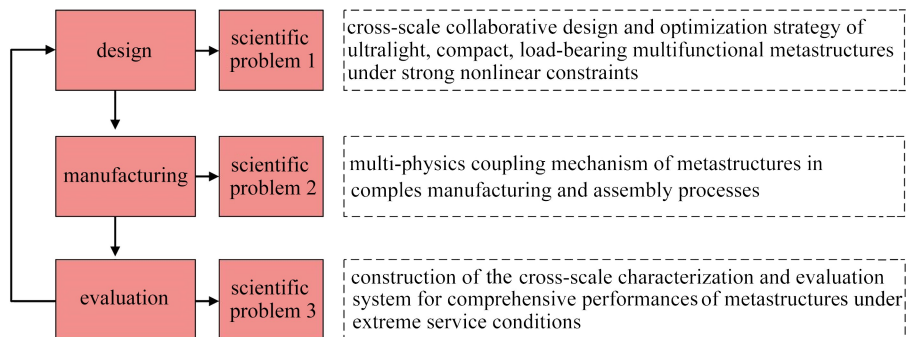


图 5 轻巧-承力-功能一体化超结构的研究思路

Fig. 5 Scientific problems of ultralight, compact, and load-bearing multifunctional metastructures

1) 设计阶段中的科学问题:强非线性约束下跨尺度协同设计与优化策略

该问题要求在设计阶段,从细观理论出发,综合考虑组份材料和微结构的特性,系统建立超结构力-热-

声-电-磁等多物理场耦合本构关系以及跨尺度模型,揭示微结构对超结构宏观性能及失效模式影响的机理,进而提出“自下而上”的超结构设计及强非线性优化方法,并在此基础上构建超结构的拓扑型谱及功能数据库,为超结构设计的选材选型提供参考(图6)。

作为超结构设计的基础,轻质多孔结构展现出了由随机多孔到周期多孔再到混杂多孔的发展脉络.针对随机多孔结构,Gan 和 Chen(陈常青)等^[61]建立三维 Voronoi 模型,研究了线弹性通孔泡沫的宏观力学行为,揭示了微观结构缺陷对泡沫材料性能的影响,并指出了弹性屈曲是导致泡沫压缩失效的主要机制.对于通孔金属泡沫输运性质的研究,卢天健开创性地提出了理想化立方单元,成功建立了微观孔隙结构与宏观输运性质之间的紧密联系^[62].随着分形几何理论快速发展,卢天健敏锐地洞察到分形几何在描述随机分布孔隙方面的显著优势.基于这一理论,他指导学生研究了包括金属泡沫^[63]、金属纤维^[64]和石墨泡沫^[65]等多种多孔介质的输运性质.特别是,立方单元与分形几何理论结合,为多孔介质输运特性的研究提供了一种新的视角和方法.Zhao 等^[43,66]使用低成本的烧结法制备了不同孔径的高孔隙率 Fe-Cr-Al-Y(钢基高温合金)开孔金属泡沫,随后通过实验方法测试了其热辐射特性.结果表明,在孔隙率固定的情况下,所制备的开孔金属泡沫的有效辐射导热系数随单元胞尺寸的增加而提升.此外,温度的升高也会导致有效辐射导热系数的提升.Meng 和 Ren 等^[67-70]针对烧结金属纤维多孔材料建立了微观纤维丝-规则/非规则胞元-宏观声学性能的跨尺度表征模型,揭示了纤维多孔材料中声波的耗散机理,设计了具有宽频吸声性能的跨尺度梯度纤维多孔材料,并开发了基于遗传算法的吸声材料设计策略。

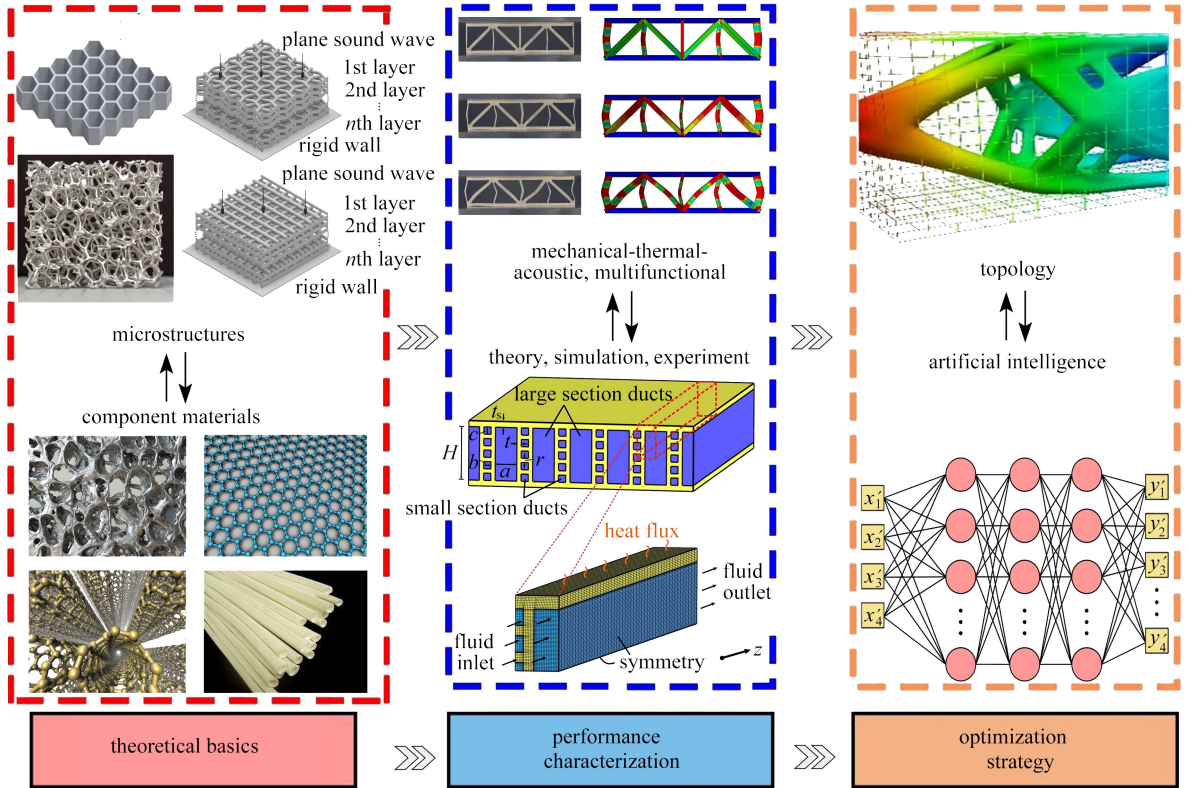


图6 设计阶段的科学问题

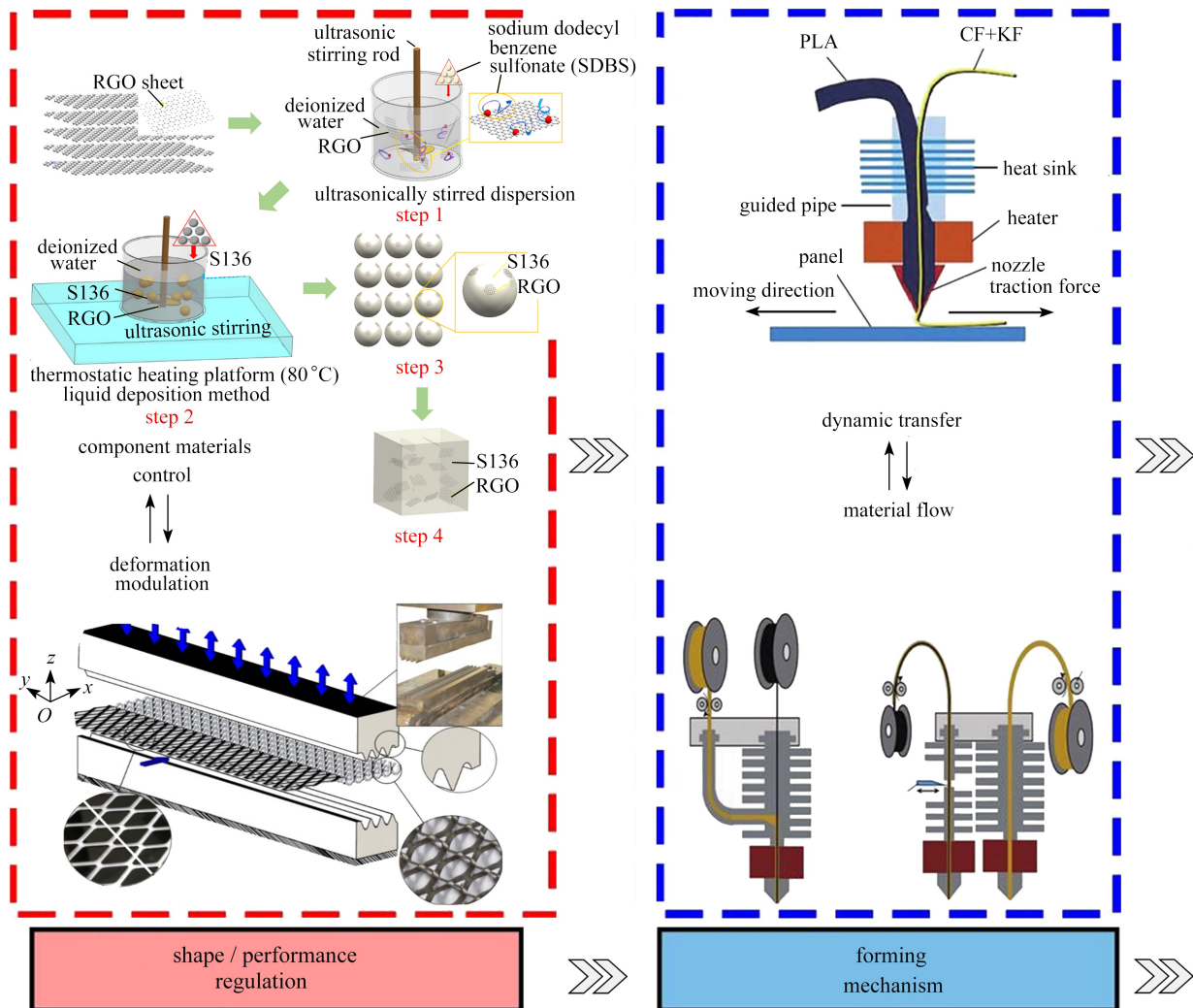
Fig. 6 Scientific issues in design processes

针对周期多孔结构,Chen(陈常青)等^[71]研究了孔洞和刚性夹杂物对规则蜂窝结构在双轴加载下的弹性模量和屈服强度的影响,且考虑了蜂窝结构的边界条件、孔洞和夹杂物的尺寸效应.研究发现,刚性夹杂物对蜂窝的刚度和强度只有较小影响,主要效应是增加蜂窝的质量,从而降低其比刚度和比强度,而孔洞的存在会导致蜂窝的体积模量和静压屈服强度大幅下降.该研究能够从更基础的层面上理解材料的破坏机制、弹性常数和失效行为,并将这些微观层面的理解扩展到材料的宏观应用中,为设计具有特定力学性能的多孔材料提供了理论基础和指导.Gu 等^[24]从细观和宏观两个尺度建立了二维金属蜂窝结构的褶皱壁模型和有效

介质模型,来分析不同细胞形态和排列方式对热传递效率以及承载特性的影响.研究发现,在轻量化前提下,规则六边形细胞结构在热传递效率上表现最佳,而三角形细胞结构在结构刚度上更为优越;通过优化分析确定了在给定泵送功率和重量限制下,实现了最佳传热和结构性能的细胞形态和排列方式.这项研究为航空航天、汽车和电子冷却等需要散热承载一体化设计的领域提供了重要参考.杨茂^[72]、苏鹏博^[73]从基本褶皱单元出发,基于超叠单元理论建立了圆柱壳和圆锥壳点阵夹芯结构的平均压溃力理论模型,然后对结构的压溃过程、变形模式以及能量吸收特性等进行了详细研究.将点阵结构的局部褶皱行为与整体结构的宏观压溃响应联系起来,为轻质高强结构设计提供了重要的理论支持.卢天健和文婷等^[74]通过理论分析及实验测试等方法,研究了二维有序多孔金属材料、三维有序金属多孔桁架材料及编织结构的三维有序多孔金属材料的流体流动特性及传热性能,揭示了在强制对流条件下轻巧-承力-功能一体化多孔金属超结构的传热机理. Kim 等^[44-45]通过数值及实验研究,证实了三角形桁架结构的传热性能优于常见的散热器,在以散热和承载能力为迫切需求的工程应用场景中具备独特的优势.

针对混杂多孔结构, Tang 等^[75]从细观角度使用微管道流体理论考虑结构微穿孔内流体的黏性效应,利用电声类比方法建立了微穿孔蜂窝-波纹复合夹层结构的声阻抗理论模型,并结合声吸收系数、弯曲刚度和比质量提出了一个综合指数,以评估微穿孔蜂窝-波纹复合夹层结构的多功能潜力.更进一步,巧妙地将波纹板和通孔金属泡沫有机结合,开发了轻巧-承载-散热一体化超结构^[76].

依据上述跨尺度模型,借助优化设计理论和前沿优化算法,国内外学者也开展了针对超结构的跨尺度多功能性能设计优化工作,如 Sun 等^[77]、Jiang 等^[78]提出了基于模拟退火算法及蚁群算法的均匀/梯度多孔泡沫及混杂点阵结构的力、声、热多功能性能优化策略,为多种轻量化多孔超结构的应用奠定了基础.



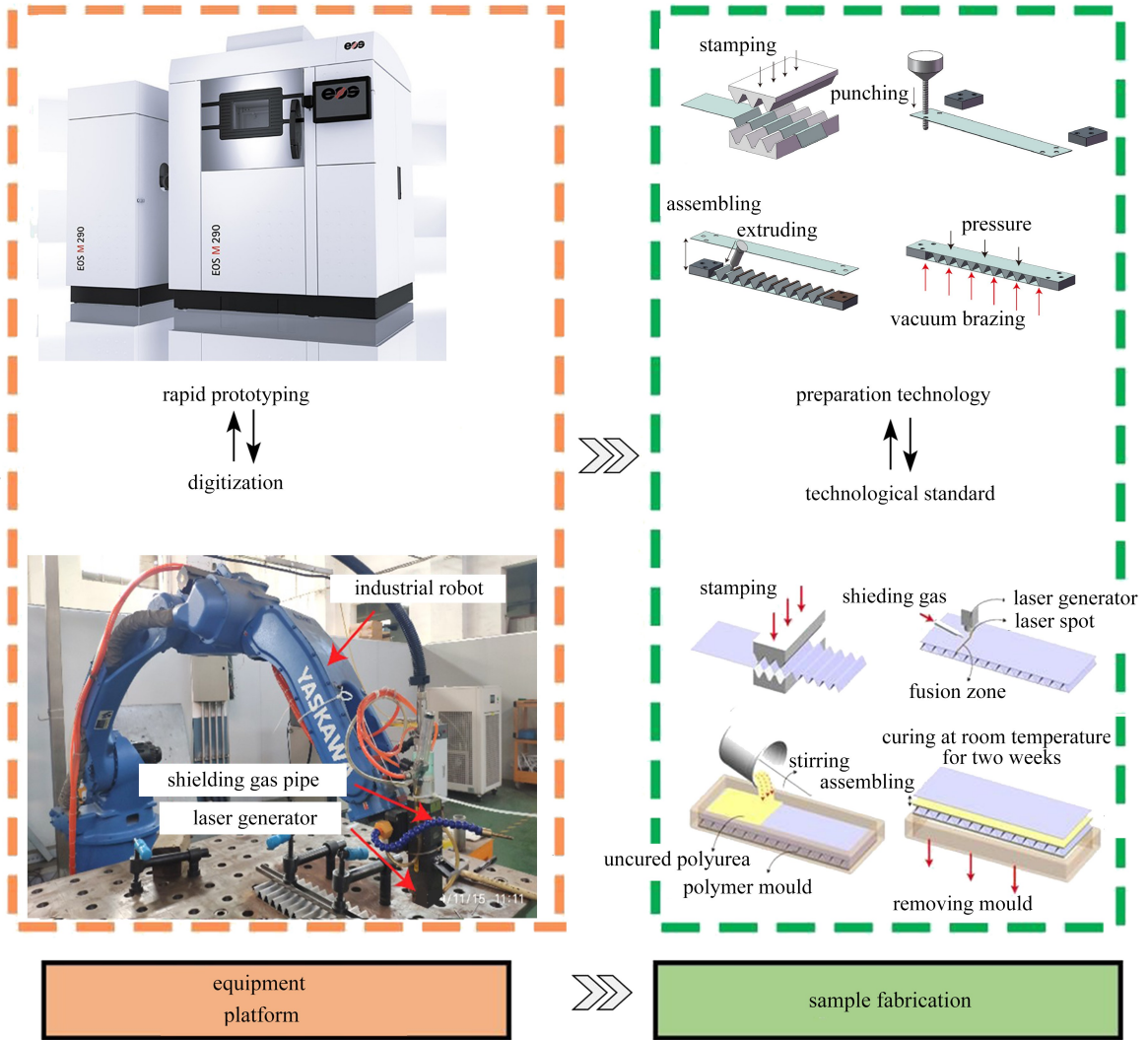


图7 制造阶段的科学问题

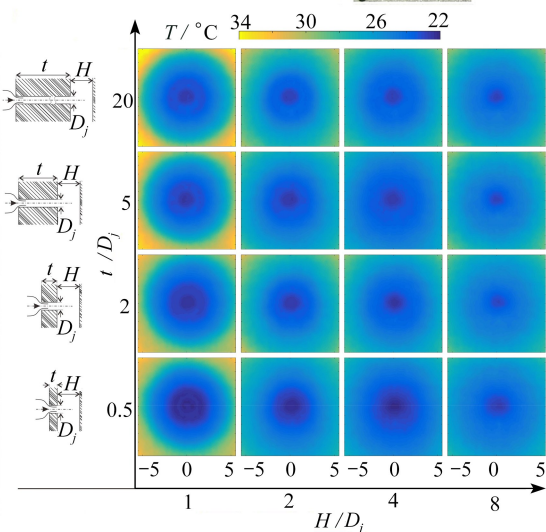
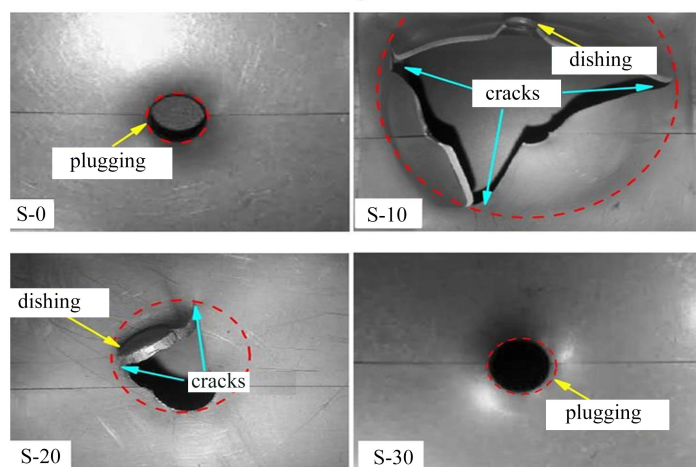
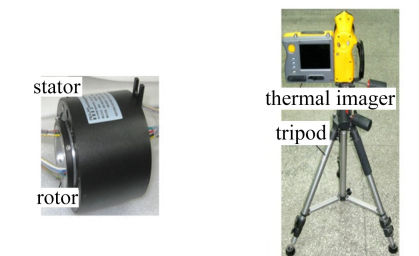
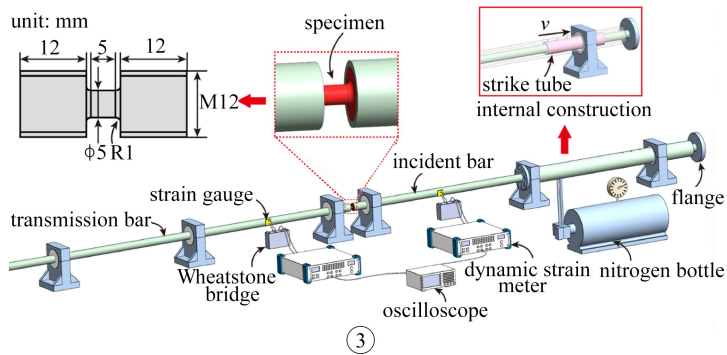
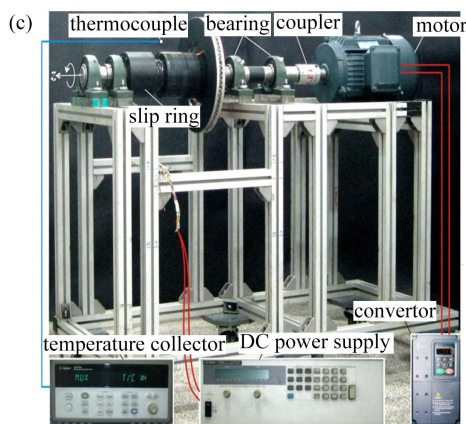
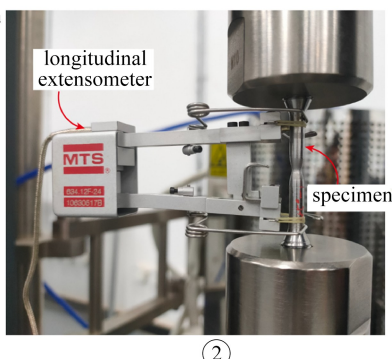
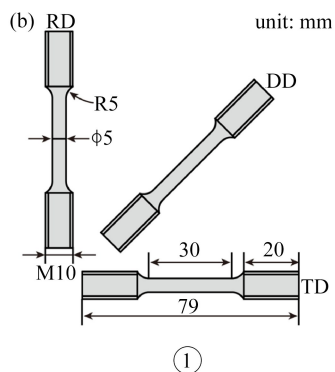
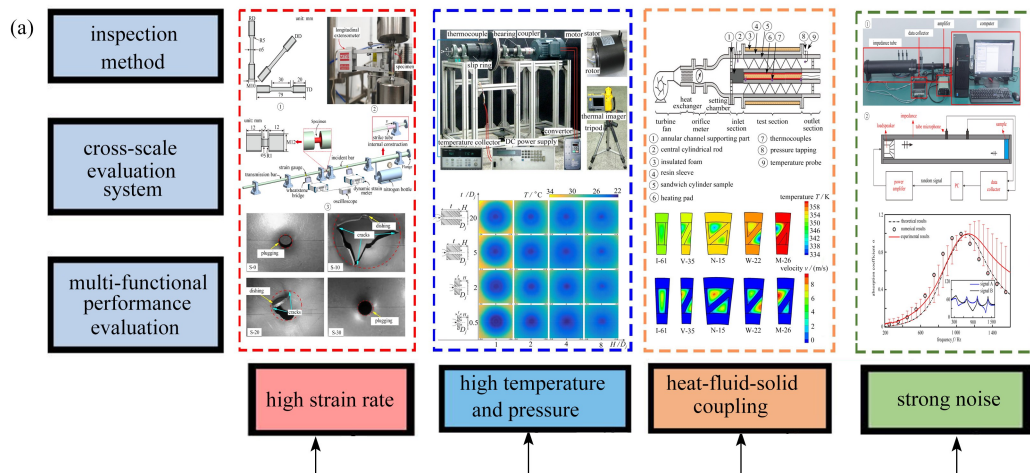
Fig. 7 Scientific issues in manufacturing processes

2) 制造阶段中的科学问题:超结构复杂制造与装配过程中多物理场的耦合作用机制

超结构是在一定结构层次基础上,结合功能材料(或结构)创造出的人工复合或变异结构.鉴于超结构通常由结构特征和物理特性迥异的不同组分构成,其装配及复合过程往往伴随着多物理场耦合的现象.例如,采用激光焊接等传统方法制备金属类超结构时,激光焊接的高能激光束聚焦会在焊接区域引入高温,这种快速加热会导致焊接材料的局部膨胀,造成温度梯度和热应力;不同材料的热膨胀系数往往也不同,导致超结构在冷却过程中出现残余应力或变形,最终影响其成型精度和力学性能.目前,随着先进装备结构对多功能构件的需求不断增加,多尺度多材料多拓扑孔隙构型超结构的精细化增材制造成为重要趋势.多材料增材制造,需解决材料交互作用复杂、梯度材料成分精确控制难、形变调控难等难题^[79-80],尤其是梯度材料高精度复合增材制造,面临非平衡原位冶金条件下高熔差梯度材料的界面演化与组织演变规律不明晰、可控化策略不明确等核心工艺难题.

以碳纤维增强树脂基体复合材料为代表的先进复合材料,具有轻质高强、性能可调控、可整体制造等优势,被广泛应用于航空航天、交通运输、能源化工、建筑纺织和体育医疗等领域,对现代科学技术的发展和高端装备的升级换代,起到了重要的作用.采用复合材料构建创新超结构,是当下的国际研究热点.复合材料类超结构制备中的固化,是一个复杂的热、物理/化学和机械性能急剧变化的过程,且成型过程中形变与性能变化共存.如何刻画加工过程中材料初始及新生缺陷的演化规律,明确多物理场作用下材料的动态转移机制、大应变/高应变速率材料流动机理,进而实现高性能、高可靠性、成本可控的加工技术及其理论体系,是复合

材料超结构制造所面临的重要挑战^[81-83].



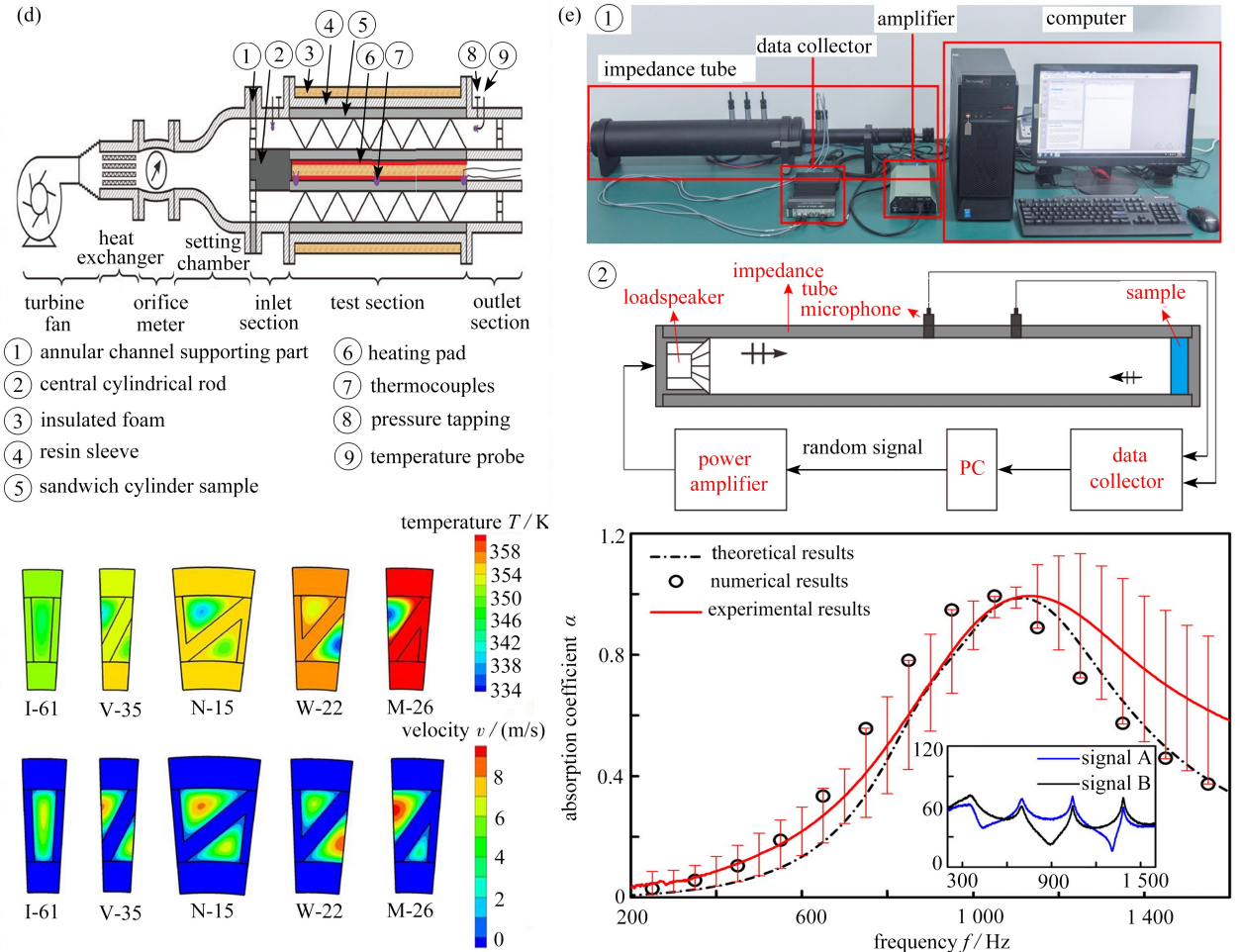


图8 评价体系的科学问题

Fig. 8 Scientific issues in evaluation processes

可见,无论是金属还是复合材料类超结构,均需充分研究其制造与装配过程中的多物理场耦合作用机制,突破多组分、多相一体化的结构形性精确调控技术,揭示成型过程中的形性调控机理,优化工艺参数,进而搭建超结构数字化三维装备制造平台,最终形成相关的规范和工艺标准(图7)。

3) 评价体系中的科学问题:极端服役工况下超结构综合性能跨尺度表征与评价体系构建

在传统的装备结构评价体系中,承力结构的测试评估主要围绕其刚度、强度等力学指标展开,而功能材料(结构)的性能评价往往不能充分考虑其受力特性.轻巧-承力-功能一体化超结构应运而生后,现有的评价体系已无法充分评估其所包含的性能特征,需开发高应变率、高/低温、高压、热-流-固、高噪声等极端服役环境下的多物理性能表征技术,形成从宏观到微观的跨尺度综合性能评价方法(图8,图8(b)—8(e)是图8(a)中4个框图的局部放大图)。

基于 Fleck 等开发的测试技术, Li 等^[84-85]、Wang 等^[58]采用一级轻气炮发射泡沫铝子弹,模拟爆炸和冲击载荷的联合作用,进而评估了液体填充点阵夹芯结构、聚脲涂层强化复合结构的动态力学性能.针对复合材料类超结构, Gao 等^[86-88]、Wang 等^[89]采用跨尺度实验力学方法,分别在微观尺度对纤维和纤维/树脂界面、在介观尺度对纱线和复合材料带、在宏观尺度对复合材料梁/板和结构进行了全面的力学性能评估,包括强度、冲击吸能、振动性能等.另外,鉴于复合材料类超结构的不均匀性和各向异性,其在使用及维护过程中会不可避免地产生材料损伤(例如,以纤维断裂、纤维束-基体界面脱黏和基体开裂为主的层内损伤,以及以分层失效为主的层间损伤),从而影响结构的承载能力与安全性.此外,实际应用过程中,复杂的载荷情况和结构形式,可能诱发多种损伤的耦合效应和多向行为,从而加快复合材料的失效,对结构承载能力产生严重影响.因此,复合材料类超结构构件在使用和服役过程中性能的准确评估与分析方法的建立,是装备寿命评

估和预测的基础,而深入研究复合材料类超结构力学行为和失效机理,建立有效可靠的强度理论、损伤分析方法和预测模型,是提高超结构安全性、发展健全复合材料类超结构的关键因素^[81-82,90]。

目前,针对金属及非金属类超结构的性能开展评估,大多采用非标试验,缺乏适用面广、可靠性强的标准体系。如何突破实验技术的制约,对超结构在多种极端物理场耦合作用下的力学及多功能特性进行系统评价,是当前的研究难点。

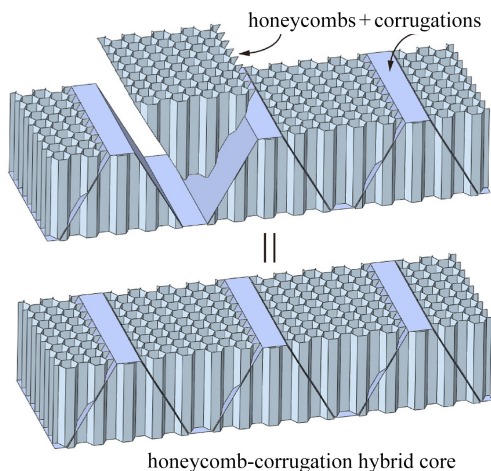
3 轻巧-承力-功能一体化超结构:设计及应用案例

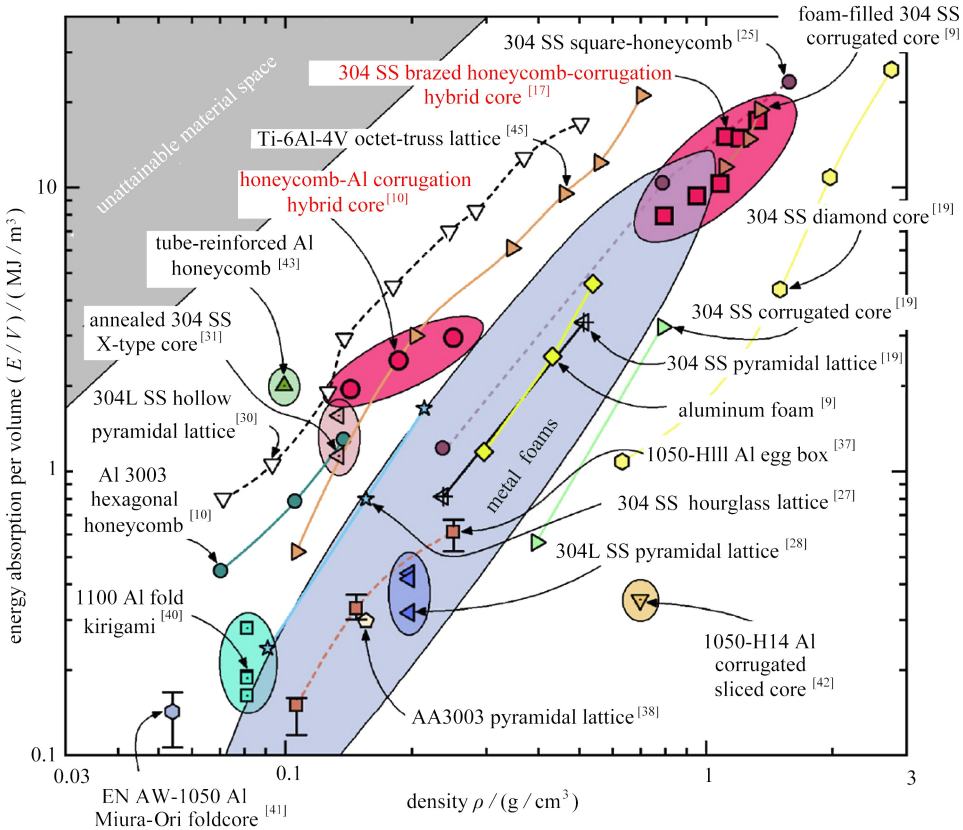
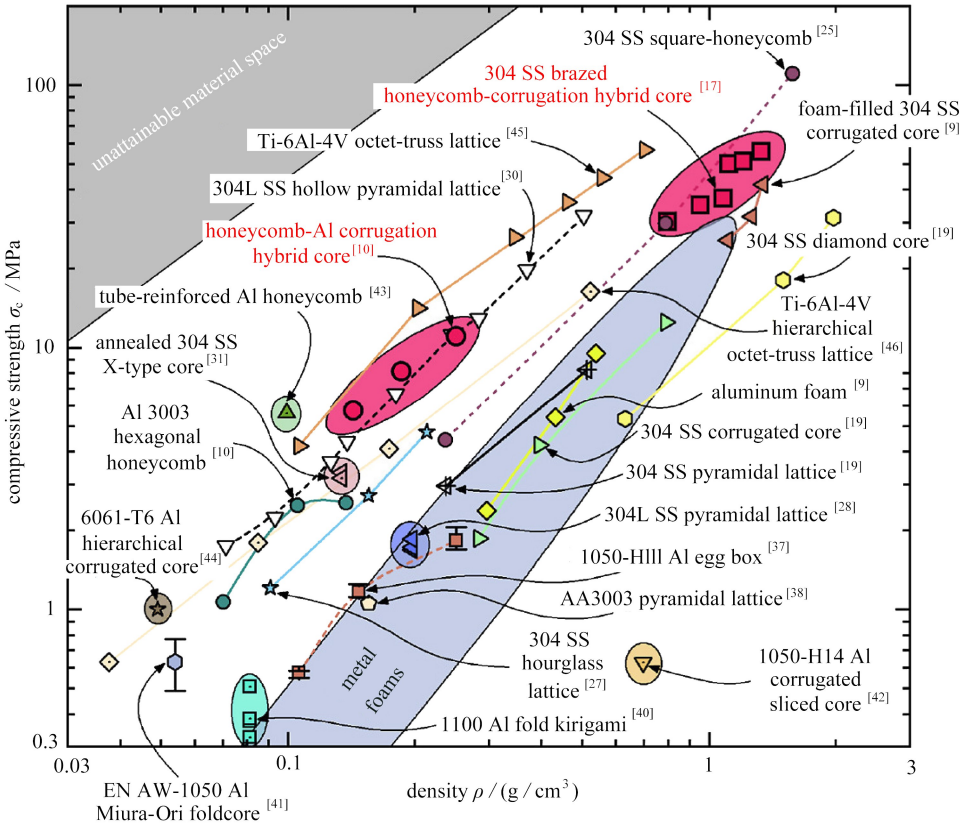
3.1 轻巧-承力-降噪超结构

随着现代航空航天工业对飞行器运载能力和飞行经济性等需求的不断提高,飞行器结构的轻量化与多功能一体设计成为未来飞行器设计的主要发展方向,而传统的轻质结构,如波纹、蜂窝等夹芯结构,难以继续作为主承载构件在飞行器结构中大面积使用。基于 Ashby 提出的材料强化设计思路,将蜂窝填入波纹夹芯结构的孔隙,可形成一种新型的波纹-蜂窝混杂夹芯结构^[91],既克服了波纹夹芯结构面外抗压性能(刚度及强度)差、蜂窝芯体与面板连接性能差的缺陷,又弥补了二者面外剪切刚度及强度低下的短板。本质上,蜂窝与波纹均为超轻的二维周期点阵,二者混杂后形成超轻的三维周期点阵(混杂点阵),而蜂窝与波纹在变形过程中的相互约束,使得这类混杂点阵具有更优异的比刚度和比强度。因此,相较于同质量的波纹夹芯结构和蜂窝夹芯结构,波纹-蜂窝混杂夹芯结构具有更高的固有频率^[92]。此外,在面外压缩、面外剪切、三点弯曲以及泡沫子弹冲击等多种载荷工况导致的大变形过程中,由于波纹与蜂窝之间的强耦合作用,波纹-蜂窝混杂夹芯结构呈现出远优于同质量其他轻质结构的承载、吸能等力学性能(图 9)^[60]。

值得注意的是,图 9 仅仅比较了金属类多孔夹芯结构。我们的进一步研究发现,采用纤维增强复合材料构建的波纹-蜂窝混杂夹芯结构,实现了比刚度和比强度的大幅提升。

基于波纹-蜂窝混杂夹芯结构,通过在面板和波纹板上分别布置稀疏排列的微穿孔,形成微穿孔波纹-蜂窝混杂夹芯超结构(图 10),可在保持其优异的力学性能之外,实现吸声功能^[93]。不同于仅在面板打孔的蜂窝结构,微穿孔波纹-蜂窝混杂结构拥有多种不同形态的共振子单元;与仅在面板穿孔但未在波纹板上穿孔的波纹-蜂窝结构相比,微穿孔波纹-蜂窝混杂结构既有单层微穿孔吸声结构子单元,也有双层微穿孔吸声结构子单元,这种子单元的差异性,使结构拥有更多的共振频率,进而显著拓宽结构的吸声带宽。图 11 采用不同频率下的吸声系数(定义为入射声波被结构吸收的能量与入射声波所携带的总能量之比),描述了三种结构的吸声性能。结果表明,相较于纯蜂窝或波纹芯体未布置微穿孔的波纹-蜂窝混杂结构,微穿孔波纹-蜂窝混杂夹芯结构能够拓宽结构的吸声频谱宽度,使其拥有更为优异的低频宽带吸声性能。同时,由于穿孔数量及直径(一般为亚毫米级别,0.1~1 mm)均较小,该超结构依然拥有前文所描述的高比刚度、高比强度及高比吸能的明显优势。





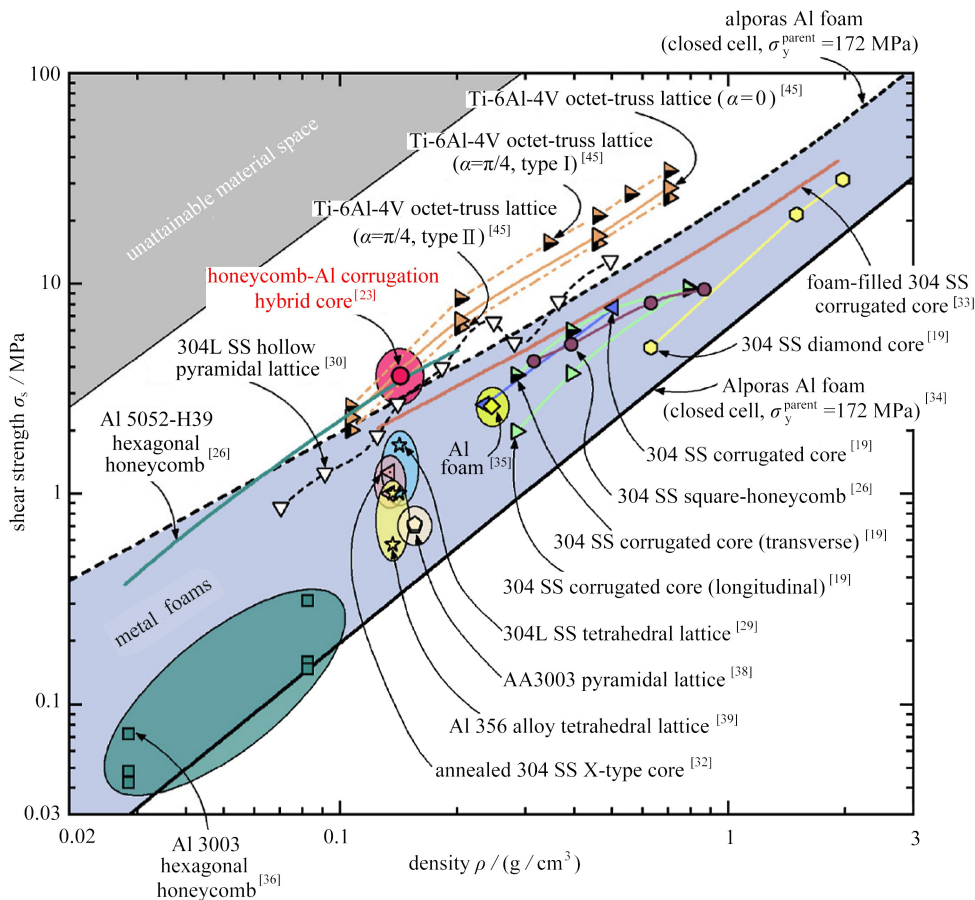


图 9 轻质多孔金属夹芯结构的 Ashby 图 [60]

Fig. 9 The Ashby plot of lightweight porous metallic sandwich structures [60]

微穿孔波纹-蜂窝混杂夹芯超结构具备轻巧、承载、抗冲击、降噪、动力学性能好等诸多优点,有望应用于各类飞机、运载火箭、卫星、空间站等飞行器的结构设计中,从而实现飞行器承力结构的轻质多功能一体化设计.现有研究主要关注金属基混杂夹芯结构的性能,但金属的密度较大,很难通过结构设计进一步降低整体重量.相比于金属,复合材料具有更高的比刚度和比强度,在航空航天、高铁等对重量有严苛限制的领域中逐步取代了金属材料,成为新一代轻质结构设计的优选.因此,可采用复合材料构建一种新型的微穿孔波纹-蜂窝混杂夹芯超结构,以进一步降低飞行器结构重量,提升其承载、冲击吸能及减振降噪性能.

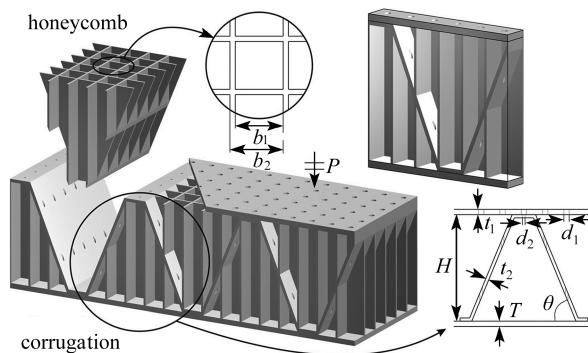


图 10 微穿孔波纹-蜂窝混杂结构示意图

Fig. 10 Schematic of microperforated corrugated-honeycomb hybrid structure

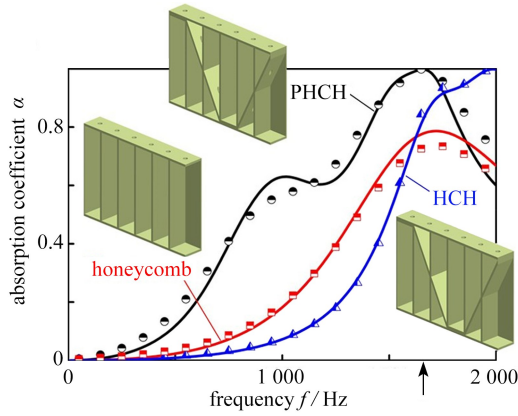


图 11 微穿孔波纹-蜂窝混杂芯体超结构 (PHCH) 与传统微穿孔蜂窝芯体结构 (honeycomb) 及波纹未穿孔混杂芯体超结构 (HCH) 的吸声性能对比

Fig. 11 Comparison of sound absorption performance between the microperforated corrugated-honeycomb hybrid metastructure (PHCH) and the conventional microperforated honeycomb structure and the hybrid-cored metastructure with microperforated corrugation only (HCH)

3.2 轻巧-承力-极端防护超结构

除了前述在准静态/低速撞击作用下的超结构设计,现代战争中,军用车辆、舰船等武器装备面临着来自常规带壳装药爆炸性武器如地雷、导弹战斗部等的重大威胁,这些武器产生的爆炸冲击波和破片群成为主要的毁伤因素。

近年来,有学者通过实验手段考察了空心金字塔点阵金属夹芯板在球形弹丸冲击作用下的抗侵彻性能^[94],发现与等重量单质连续体钢板比较,点阵金属夹芯结构的抗侵彻性能有所提高,但提高的幅值有限。为了提供更有效的抗爆炸冲击防护,可将陶瓷、混凝土、砂粒等材料填充到点阵金属夹芯结构的孔隙中,依靠各材料的不同防护性能,实现集轻质、承载、抗爆、抗弹等要素于一体的超结构防护设计方案。例如,卢天健团队^[13]在点阵金属网架中添加陶瓷材料及高分子材料,构造出新型点阵金属混杂夹芯结构,实现了大幅提高结构抗侵彻性能的目的。陶瓷具有低密度、高压缩强度以及高硬度等独特特性,逐渐成为高性能装甲系统中的关键材料。陶瓷在受力时表现出较高的压缩强度,而其拉伸强度相对较低,通常呈现出脆性的断裂方式。弹体冲击陶瓷层时,在陶瓷发生碎裂的同时,弹体自身也会发生破碎,即弹丸被陶瓷销蚀。与此同时,陶瓷的高硬度和高压缩强度可有效阻碍弹丸的侵彻过程(图 12),使得此混杂结构能够有效抵御不同弹丸/破片的侵彻。需要强调的是,卢天健团队的实验及数值仿真结果表明,单发弹丸的侵彻不足以破坏该混杂点阵金属夹芯结构的完整性,故可在继续承载的同时,承受新一轮弹丸的打击,从而在车辆防护装甲领域具有很大的应用潜力。

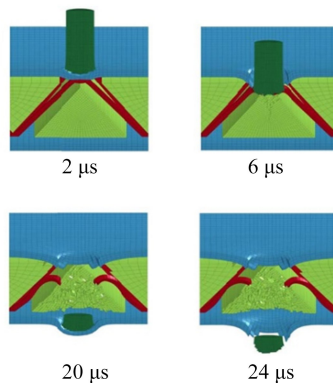


图 12 弹丸以 1 700 m/s 速度侵彻陶瓷-金字塔金属混杂夹芯结构的过程(有限元模拟)^[13]

Fig. 12 A projectile penetrating into a ceramic prism-filled metallic pyramid hybrid sandwich at 1 700 m/s (finite element simulation)^[13]

相较于陶瓷材料,混凝土可直接浇筑成型,制备简单且成本低,不仅在建筑领域得到广泛应用,在防护工程领域也受到极大重视。有鉴于此,卢天健团队向金属波纹夹芯板内填充钢纤维增强的高性能混凝土,实验研究了混凝土-波纹混杂结构的抗侵彻性能^[95]。结果表明,弹丸的能量主要通过前后金属面板、金属芯体的变形及破坏,以及混凝土破碎、纤维拔出、裂纹扩展等方式耗散。此外,颗粒材料如砂粒,具有很好的抗爆抗侵彻性能,能够通过颗粒间孔隙的密实、颗粒间的摩擦、颗粒破碎来吸收耗散能量,衰减爆炸冲击波和吸收破片的动能。颗粒材料还具有一定的流动性,易于填入点阵芯体或从点阵芯体中回收。卢天健团队提出沙粒-点阵混杂夹芯结构的创新构型^[59],制备试样,并开展了相关实验和数值模拟研究,发现该结构融合了点阵金属的结构优势和颗粒的抗爆抗侵彻性能,相较于未填充颗粒的点阵夹芯结构,能够有效抵抗爆炸波及破片的高速冲击,减小结构的最终挠度。这种超结构设计可用于机库大门、地下工程等防护设施,抵御爆炸波及破片的联合打击。

除了改进多孔芯体的拓扑构型,轻巧-承力-极端防护超结构的另一种设计思路是对轻质夹芯结构的面板进行改进。例如,卢天健团队^[96-97]提出采用聚脲作为波纹夹芯结构面板的涂层,以提高其抵抗极端载荷的能力。泡沫铝子弹冲击测试发现,聚脲涂层有效减小了金属面板中心区域的凸起,显著缓解了金属面板沿固支边界的剪切撕裂失效,使整体结构的抗爆性能得到明显提升。同时,弹道冲击测试发现,聚脲涂层还能有效提升结构的弹道极限速度与穿孔能阈值,使整体结构的抗侵彻性能有显著提高。聚脲涂层的存在,能同时提升金属夹芯结构的塑性弯矩与塑性膜力,扩大其塑性屈服面,进而强化了结构的抗爆性能。此外,高速侵彻载荷产生的高应变会诱导聚脲发生力学行为的硬化,使其呈现自闭合的韧性失效模式,提升了其能量吸收能力,进而提高了整体结构的抗侵彻能力。与此同时,Zhang 等^[98]提出采用超高分子量聚乙烯纤维-金属层合板(FML)作为面板,以增强轻质蜂窝夹芯结构的抗侵彻性能(图 13)。实验及仿真结果表明,与面密度相同的全金属蜂窝夹层结构相比,用超高分子量聚乙烯-金属层合面板代替全金属面板,可使结构的能量吸收率提高 23%以上:弹丸的动能主要通过弹丸和面板的变形来吸收,金属层会先于纤维层失效,而相邻层之间的相互作用显著提高了金属层的能量吸收效率。此外,在冲击波与破片复合作用下,Qiang 等^[99]研究了具有超高分子量聚乙烯-金属层合面板的波纹夹芯结构的力学行为,发现该结构的抗破片侵彻性能比全金属夹芯结构提升了 15%以上。这类面板增强型轻巧-承力-极端防护超结构为舰船舱壁、野外方舱等提供了新的设计思路。

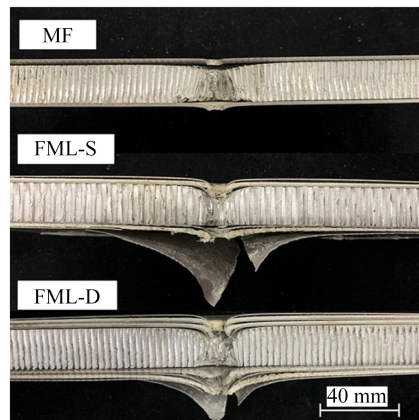


图 13 蜂窝夹芯板的侵彻失效模式:面板种类的影响^[98]

Fig. 13 A penetration failure mode of the honeycomb sandwich panel; influence of the face sheet type^[98]

3.3 轻巧-承力-吸收/传输电磁波超结构

为了提高飞机、巡飞弹等作战装备的突防能力,降低雷达反射面积,吸收/传输集成的电磁超材料成为国内外的研究热点。但是,作为一类功能材料,现有的电磁超材料通常不具备承载能力,且能够吸收电磁波的频谱普遍较窄,故亟需一种轻巧-承力-吸收/传输电磁波一体化的超结构,以减小作战装备的重量冗余,提升其作战效率。Jiang 等^[100]提出了一种基于复合材料波纹通道的微波吸收/传输集成夹芯超结构,如图 14 所示。复合材料波纹板采用环氧树脂和玻璃纤维制备,并在其表面布置梯度金属丝;与此同时,在波纹通道中填充聚

合物泡沫,以提高夹芯结构的力学性能.初步研究结果表明,该结构可在 5.74~7.84 GHz 频段,实现吸收率大于 80%的吸收带,并在 8.96~12.45 GHz 频段,实现透射率大于 80%的传输带(图 15).此外,通过面外压缩实验,发现填充聚合物泡沫不仅可显著提高结构的抗压强度,还可减少在载荷作用下的结构损伤,使其抗压性能优于许多金属夹芯结构(图 16).

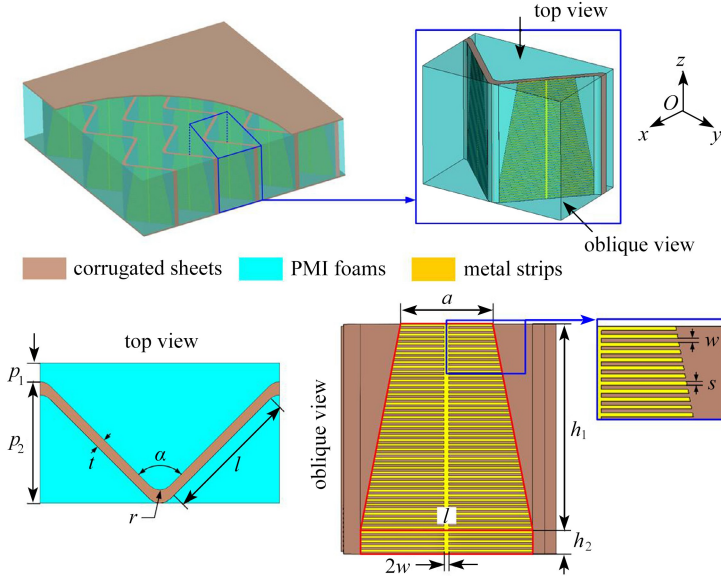


图 14 微波吸收/传输集成夹芯超结构^[100]

Fig. 14 The microwave absorption/transmission integrated sandwich metastructure^[100]

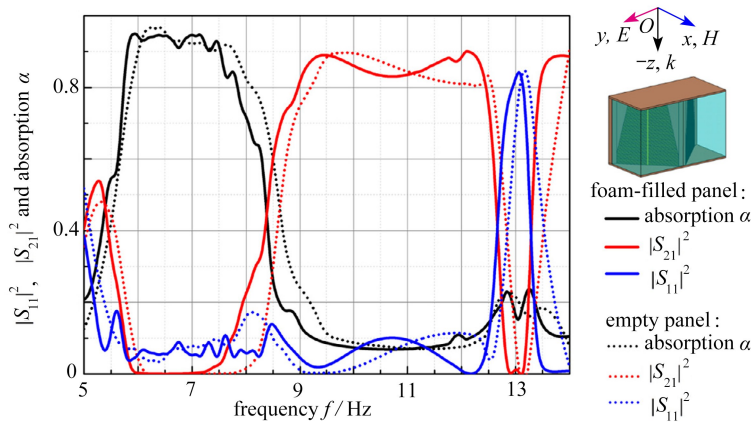


图 15 不同夹芯结构的微波吸收/传输特性对比^[100]

Fig. 15 Comparison of microwave absorption/transmission characteristics among different sandwich structures^[100]

为进一步提高夹芯结构的多角度电磁吸收和面外压缩性能,Cheng 等^[101]提出了一种基于复合材料方形蜂窝结构(SHS)的承力-功能一体化超结构设计方案.利用碳纤维的电磁特性,通过在正交蜂窝壁上缠绕连续的碳纤维导线,可构建一种新型的电磁波吸收超结构,如图 17 所示.数值模拟和实验验证表明,SHS 电磁波吸收超结构可针对来自各个方向的电磁波,实现宽带(5~20 GHz)、多角度(0°~70°)和高效(平均超过 90%)的吸收性能^[101].此外,将聚甲基丙烯酸酰胺(PMI)泡沫插入 SHS 的空隙,形成 PMI 泡沫填充的新型 SHS 结构,可进一步提高其力学性能.面外压缩实验表明,由于蜂窝壁与 PMI 泡沫之间的耦合作用,新型 SHS 结构的比刚度和比抗压强度分别提高了 42%和 121%.基于其优异的电磁波吸收性能和承载性能,SHS 电磁波吸收超结构在飞行器结构的电磁隐身设计中具有独特的竞争优势.

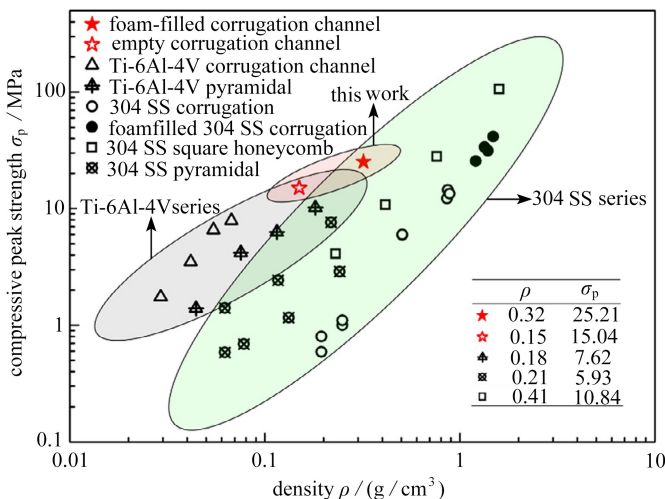


图 16 典型夹芯结构的面外压缩强度 Ashby 图^[100]

Fig. 16 The Ashby plot of out-of-plane compressive strengths of selected sandwich structures^[100]

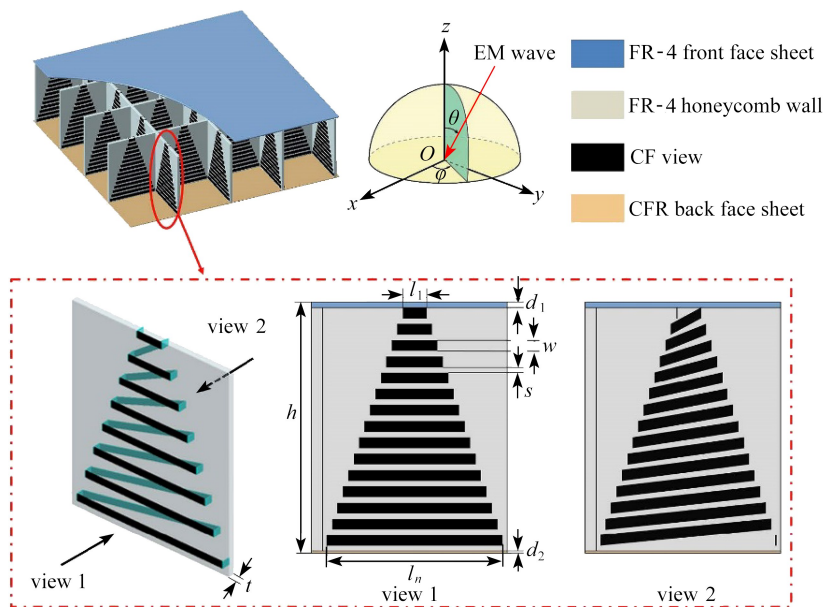


图 17 兼具轻巧、承载及电磁波吸收能力的复合材料超结构^[101]

Fig. 17 The ultralight composite honeycomb metastructure for simultaneous load-bearing and electromagnetic wave absorption^[101]

4 总结与展望

轻巧-承力-功能一体化超结构是一种新兴的技术,通过多孔夹层结构基础上引入多功能人造多孔材料,实现轻巧、承载和多功能一体化的特性.这种超结构不仅具有质轻、体小和承力的基本特点,还在冲击吸能、抗爆防弹、减振降噪、散热隔热、可重构、隐形等多个方面,展现出巨大的潜力和广阔的应用前景.在可预见的未来,这一领域将呈现出一系列值得关注的发展态势:

1) 超结构的概念内涵逐步清晰且应用领域快速扩展.当前,对于超结构和超材料,学术界尚未形成统一的定义,易将两者混淆.超材料一般是指人工设计的、具有天然材料不具备的超常物理性能的复合材料与结构,其基本结构单元通常在介观尺度,通常是仅具有单一功能的非承力结构,且设计时并未考虑质量和体积的限制.轻巧-承力-功能一体化超结构是质轻、体积小、可承力且兼具其他功能的跨尺度结构,具有与传统结

构迥异的超常特性,以及区别于传统超材料的显著特征和应用优势。随着军事斗争向深海、太空、电磁等领域拓展,对新域新质作战装备需求显著提升,进而对轻巧-承力-功能一体化超结构的发展提出了新的要求,如轻巧-承力-太空防护超结构、轻巧-承力-可重构超结构等,具备自组装、可编程、形性重构等性能,以应对装备服役环境突变等。

2) 超结构在自适应智能化方面的发展是未来的关键研究方向之一。随着先进合成方法的发展,一系列具有智能特性的材料正不断涌现。这些材料能够感知外部环境的变化,并做出相应的响应。就超结构而言,这意味着更先进的传感器和智能元件的整合,使其能够感知压力、温度、湿度、流场、声波等环境因素,并根据这些信息做出调整。例如,在飞机机翼上采用能感知气流状态的智能材料,可实现对空气动力学性能的实时优化。此外,自适应系统的引入使得超结构能够在不同工况下实现最优性能,而这包括整合智能传感器、控制系统和人工智能算法,使超结构能够根据外部环境和内部结构状态的变化,做出实时调节。例如,基于超结构的自适应系统,可以调整飞行器的形态以适应不同的飞行条件,提高燃油效率和飞行性能。这种发展方向也将推动超结构在自动驾驶、低空飞行、智能建筑、智能制造等领域的广泛应用。

3) 集成化与模块化设计是超结构设计的必然趋势。为满足不同应用领域的需求,超结构势必朝着更加集成化和模块化的设计方向发展。这将有助于提高制造效率,降低成本,并使超结构更容易定制和维护。通过集成化和模块化设计,还可促使超结构在更广泛的应用中实现标准化。此外,数字制造与4D打印技术的不断进步,将为超结构的发展提供更多的可能性。数字制造技术的成熟,使得生产过程更加灵活、高效,而4D打印技术则使得超结构能够在特定条件下实现结构形态的自主变化,从而为超结构制造带来更大的灵活性、高效性和精确性,有助于降低其制造成本,加速产品开发周期,并推动超结构的快速创新。

立足力学,交叉融合物理学、化学、材料学、传热学、声学、机械工程等多个学科,通过不断的探索和创新,有望在可预见的未来,实现轻巧-承力-功能一体化超结构的重大突破和提升,为航空航天、交通、能源、国防等重点领域关键装备的升级换代,带来更多的具有中国创新特色的解决方案。

参考文献(References):

- [1] 胡记强,王兵,张涵其,等.热塑性复合材料构件的制备及其在航空航天领域的应用[J].宇航总体技术,2020,4(4):61-70.(HU Jiqiang, WANG Bing, ZHANG Hanqi, et al. Fabrication of thermoplastic composite components and their application in aerospace[J]. *Aeronautical Systems Engineering Technology*, 2020, 4(4): 61-70.(in Chinese))
- [2] MARSH G. Boeing's 787: trials, tribulations, and restoring the dream[J]. *Reinforced Plastics*, 2009, 53(8): 16-21.
- [3] 吕竹文,吴越,付建平,等.W型、N型反应装甲对聚能射流干扰性能研究[J].火炮发射与控制学报,2019,40(2):57-61.(LÜ Zhuwen, WU Yue, FU Jianping, et al. A study of jamming performance of W-type and N-type reaction armor to shaped jets[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2019, 40(2): 57-61.(in Chinese))
- [4] 房凌晖,郑翔玉,马丽,等.坦克装甲车辆装甲防护发展研究[J].四川兵工学报,2014,35(2):23-26.(FANG Linghui, ZHENG Xiangyu, MA Li, et al. Armor protection development of tank & armored vehicle[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2014, 35(2): 23-26.(in Chinese))
- [5] 张杜江,赵振宇,褚庆国,等.浅埋爆炸下考虑乘员安全的防雷底板设计理论模型[J/OL].应用力学学报,2024:1-11[2024-07-24].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.o3.20221124.1404.006.html>.(ZHANG Dujiang, ZHAO Zhenyu, CHU Qingguo, et al. Theoretical model of armored vehicle bottom plate subjected to detonation of shallow-buried explosives with occupant safety considered[J/OL]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2024: 1-11[2024-07-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.o3.20221124.1404.006.html>.(in Chinese))
- [6] 赵振宇,任建伟,金峰,等.V形防护结构研究综述[J].应用力学学报,2020,37(6):2527-2534.(ZHAO Zhenyu, REN Jianwei, JIN Feng, et al. Investigation process on V-shape protective structures[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(6): 2527-2534.(in Chinese))
- [7] 石卿.卡-50复合材料直升机的防弹能力[J].航空制造工程,1994(5):12-13.(SHI Qing. Bulletproof capability of Ka-50 composite helicopter[J]. *Aeronautical Manufacturing Engineering*, 1994(5): 12-13.(in Chinese))

- [8] 周鑫,陈庆童,马子广,等. 复合材料层合板低速冲击损伤与剩余强度分析[J]. 直升机技术, 2023(2): 33-38. (ZHOU Xin, CHEN Qingtong, MA Ziguang, et al. Low-velocity impact damage and residual strength analysis of composite laminates[J]. *Helicopter Technique*, 2023(2): 33-38. (in Chinese))
- [9] 武岳,王旭东,刘迪,等. 直升机陶瓷复合装甲发展现状及新型材料应用前景[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 34-44. (WU Yue, WANG Xudong, LIU Di, et al. Development and application analysis of ceramic composites armor for helicopter[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(5): 34-44. (in Chinese))
- [10] 胡净哲,李向东,周兰伟,等. 武装直升机在杀爆弹打击下的易损性及防护策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1214-1220. (HU Zhengzhe, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Vulnerability and defense strategy for gunship against HE munition[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(6): 1214-1220. (in Chinese))
- [11] 韩峰,何立燕,李晨曦. 多孔纤维材料对飞机壁板结构隔声性能的影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(4): 167-172. (HAN Feng, HE Liyan, LI Chenxi. Effects of porous materials on the sound insulation performance of aircraft sidewalls[J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, 40(4): 167-172. (in Chinese))
- [12] LU T J, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Optimal design of a flexural actuator[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, 49(9): 2071-2093.
- [13] NI C Y, LI Y C, XIN F X, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: numerical and experimental assessment[J]. *Composites (Part A): Applied Science and Manufacturing*, 2013, 46: 69-79.
- [14] ASHBY M F, CEBON D. Materials selection in mechanical design[J]. *Le Journal de Physique IV*, 1993, 3(C7): 1-9.
- [15] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 517-535. (LU Tianian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(4): 517-535. (in Chinese))
- [16] ASHBY M F, EVANS A G, FLECK N A, et al. *Metal Foams: a Design Guide*[M]. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [17] CHEN C, LU T J, FLECK N A. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1999, 47(11): 2235-2272.
- [18] LU T J, STONE H A, ASHBY M F. Heat transfer in open-cell metal foams[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(10): 3619-3635.
- [19] LU T J, HESS A, ASHBY M F. Sound absorption in metallic foams[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(11): 7528-7539.
- [20] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Cellular metals[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1998, 3(3): 288-303.
- [21] VALDEVIT L, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(18/19): 5105-5124.
- [22] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(3/4): 309-327.
- [23] WADLEY H N G, FLECK N A, EVANS A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(16): 2331-2343.
- [24] GU S, LU T J, EVANS A G. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(11): 2163-2175.
- [25] LU T J, VALDEVIT L, EVANS A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. *Progress in Materials Science*, 2005, 50(7): 789-815.
- [26] WEI Z, DHARMASENA K P, WADLEY H N G, et al. Analysis and interpretation of a test for characterizing the response of sandwich panels to water blast[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(10): 1602-1618.
- [27] HUTCHINSON J W, XUE Z. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(4/5): 545-569.
- [28] RADFORD D D, DESHPANDE V S, FLECK N A. The use of metal foam projectiles to simulate shock loading

- on a structure[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, **31**(9): 1152-1171.
- [29] RADFORD D D, FLECK N A, DESHPANDE V S. The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, **32**(6): 968-987.
- [30] RATHBUN H J, RADFORD D D, XUE Z, et al. Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under shock loading[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, **43**(6): 1746-1763.
- [31] RADFORD D D, MCSHANE G J, DESHPANDE V S, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, **43**(7/8): 2243-2259.
- [32] MCSHANE G J, RADFORD D D, DESHPANDE V S, et al. The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading[J]. *European Journal of Mechanics A: Solids*, 2006, **25**(2): 215-229.
- [33] RUBINO V, DESHPANDE V S, FLECK N A. The dynamic response of clamped rectangular Y-frame and corrugated core sandwich plates[J]. *European Journal of Mechanics A: Solids*, 2009, **28**(1): 14-24.
- [34] RUBINO V, DESHPANDE V S, FLECK N A. The dynamic response of end-clamped sandwich beams with a Y-frame or corrugated core[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, **35**(8): 829-844.
- [35] FLECK N A, DESHPANDE V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, **71**(3): 386-401.
- [36] QIU X, DESHPANDE V S, FLECK N A. Impulsive loading of clamped monolithic and sandwich beams over a central patch[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, **53**(5): 1015-1046.
- [37] WANG X, LU T J. Optimized acoustic properties of cellular solids[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, **106**(2): 756-765.
- [38] DUPERE I D J, DOWLING A P, LU T J. The absorption of sound in cellular foams[C]//*ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Anaheim, California, USA: IMECE, 2004: 123-132.
- [39] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪. 碳化硅网眼多孔陶瓷的微波吸收特性[J]. *无机材料学报*, 2002, **17**(6): 1152-1156. (ZHU Xinwen, JIANG Dongliang, TAN Shouhong. Microwave absorbing property of SiC reticulated porous ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2002, **17**(6): 1152-1156. (in Chinese))
- [40] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**: 77-79.
- [41] 邢丽英. 隐身材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. (XING Liying. *Stealth Materials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [42] ZHAO C Y, KIM T, LU T J, et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2004, **18**(3): 309-317.
- [43] ZHAO C Y, LU T J, HODSON H P. Thermal radiation in ultralight metal foams with open cells[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**(14/16): 2927-2939.
- [44] KIM T, ZHAO C Y, LU T J, et al. Convective heat dissipation with lattice-frame materials[J]. *Mechanics of Materials*, 2004, **36**(8): 767-780.
- [45] KIM T, HODSON H P, LU T J. Contribution of vortex structures and flow separation to local and overall pressure and heat transfer characteristics in an ultralightweight lattice material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(19/20): 4243-4264.
- [46] ZHAO C Y, LU T J, HODSON H P. Natural convection in metal foams with open cells[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(12): 2452-2463.
- [47] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. Forced convection in high porosity metal foams[J]. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **122**(3): 557-565.
- [48] CALMIDI V V, MAHAJAN R L. The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal forms[J]. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, **121**: 466-471.
- [49] ZHU F, WANG Z, LU G, et al. Some theoretical considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, **37**(6): 625-637.
- [50] 敬霖. 强动载荷作用下泡沫金属夹芯壳结构的动力学行为及其失效机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012. (JING Lin. The dynamic mechanical behavior and failure mechanism of sandwich shells with metallic foam

- cores under intensive loading[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.(in Chinese)
- [51] KARAGIOZOVA D, LANGDON G S, NURICK G N, et al. The influence of a low density foam sandwich core on the response of a partially confined steel cylinder to internal air-blast[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, **92**: 32-49.
- [52] QIN Q, WANG M, WANG Z, et al. A yield criterion and plastic analysis for physically asymmetric sandwich beam with metal foam core[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2013, **5**(4): 1350037.
- [53] WANG T, QIN Q, WANG M, et al. Blast response of geometrically asymmetric metal honeycomb sandwich plate: experimental and theoretical investigations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, **105**: 24-38.
- [54] ZHOU X, JING L. Deflection analysis of clamped square sandwich panels with layered-gradient foam cores under blast loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, **157**: 107141.
- [55] LI X, KANG R, LI C, et al. Dynamic responses of ultralight all-metallic honeycomb sandwich panels under fully confined blast loading[J]. *Composite Structures*, 2023, **311**: 116791.
- [56] HAN B, QIN K K, YU B, et al. Design optimization of foam-reinforced corrugated sandwich beams[J]. *Composite Structures*, 2015, **130**: 51-62.
- [57] HAN B, QIN K, YU B, et al. Honeycomb-corrugation hybrid as a novel sandwich core for significantly enhanced compressive performance[J]. *Materials & Design*, 2016, **93**: 271-282.
- [58] WANG X, YU R P, ZHANG Q C, et al. Dynamic response of clamped sandwich beams with fluid-filled corrugated cores[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, **139**: 103533.
- [59] YU R P, WANG X, ZHANG Q C, et al. Effects of sand filling on the dynamic response of corrugated core sandwich beams under foam projectile impact[J]. *Composites (Part B): Engineering*, 2020, **197**: 108135.
- [60] YUE Z, WANG X, HE C, et al. Elevated shock resistance of all-metallic sandwich beams with honeycomb-supported corrugated cores[J]. *Composites (Part B): Engineering*, 2022, **242**: 110102.
- [61] GAN Y X, CHEN C, SHEN Y P. Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, **42**(26): 6628-6642.
- [62] YANG X, LU T J, KIM T. An analytical model for permeability of isotropic porous media[J]. *Physics Letters A*, 2014, **378**(30/31): 2308-2311.
- [63] XIAO T, YANG X, HOOMAN K, et al. Analytical fractal models for permeability and conductivity of open-cell metallic foams[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, **177**: 121509.
- [64] XIAO T, GUO J, YANG X, et al. On the modelling of heat and fluid transport in fibrous porous media: Analytical fractal models for permeability and thermal conductivity[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, **172**: 107270.
- [65] XIAO T, YANG X, HOOMAN K, et al. Conductivity and permeability of graphite foams; analytical modelling and pore-scale simulation[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, **179**: 107706.
- [66] ZHAO C Y, LU T J, HODSON H P. Measurements of thermal radiation in ultralight metal foams with open cells[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part C): Journal of Mechanical Engineering Science*, 2004, **218**(11): 1297-1307.
- [67] MENG H, AO Q B, REN S W, et al. Anisotropic acoustical properties of sintered fibrous metals[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, **107**: 10-17.
- [68] MENG H, YANG X H, REN S W, et al. Sound propagation in composite micro-tubes with surface-mounted fibrous roughness elements[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, **127**: 158-168.
- [69] REN S, XIN F, LU T J, et al. A semi-analytical model for the influence of temperature on sound propagation in sintered metal fiber materials[J]. *Materials & Design*, 2017, **134**: 513-522.
- [70] REN S, AO Q, MENG H, et al. A semi-analytical model for sound propagation in sintered fiber metals[J]. *Composites (Part B): Engineering*, 2017, **126**: 17-26.
- [71] CHEN C, LU T J, FLECK N A. Effect of inclusions and holes on the stiffness and strength of honeycombs[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, **43**(2): 487-504.
- [72] 杨茂. 波纹夹芯圆锥壳及其改进型结构的耐撞性研究与优化设计[D]. 西安: 西安交通大学, 2021.(YANG Mao.

- Crashworthiness analysis and optimized design of truncated conical sandwich shells with corrugated cores and its improved structures[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021.(in Chinese))
- [73] 苏鹏博. 金属波纹及其复合增强型夹芯圆柱壳耐撞性能及抗爆性能研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2021.(SU Pengbo. Crashworthiness and anti-blast performance of corrugated and composite reinforced corrugated sandwich cylindrical shells[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021.(in Chinese))
- [74] 卢天健, 徐峰, 文婷. 周期性多孔金属材料的热流性能[M]. 北京: 科学出版社, 2010.(LU Tianjian, XU Feng, WEN Ting. *Heat Flow Properties of Periodic Porous Metal Materials*[M]. Beijing: Science Press, 2010.(in Chinese))
- [75] TANG Y, LI F, XIN F, et al. Heterogeneously perforated honeycomb-corrugation hybrid sandwich panel as sound absorber[J]. *Materials & Design*, 2017, **134**: 502-512.
- [76] XIAO T, LU L, PENG W, et al. Numerical study of heat transfer and load-bearing performances of corrugated sandwich structure with open-cell metal foam[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, **215**: 124517.
- [77] SUN S, SHENG Y, FENG S, et al. Heat transfer efficiency of hierarchical corrugated sandwich panels[J]. *Composite Structures*, 2021, **272**: 114195.
- [78] JIANG Y, SHEN C, MENG H, et al. Design and optimization of micro-perforated ultralight sandwich structure with N-type hybrid core for broadband sound absorption[J]. *Applied Acoustics*, 2023, **202**: 109184.
- [79] WEN S, CHEN K, LI W, et al. Selective laser melting of reduced graphene oxide/S136 metal matrix composites with tailored microstructures and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2019, **175**: 107811.
- [80] NAZIR A, GOKCEKAYA O, BILLAH K M M, et al. Multi-material additive manufacturing: a systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials[J]. *Materials & Design*, 2023, **226**: 111661.
- [81] DENG J, XUE P, YIN Q Z, et al. A three-dimensional damage analysis framework for fiber-reinforced composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2022, **286**: 115313.
- [82] 邓健, 肖鹏程, 王增贤, 等. 基于黏聚区模型的 ENF 试件层间裂纹扩展分析[J]. 应用数学和力学, 2022, **43** (5): 515-523.(DENG Jian, XIAO Pengcheng, WANG Zengxian, et al. Interlaminar crack propagation analysis of ENF specimens based on the cohesive zone model[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(5): 515-523.(in Chinese))
- [83] 贾振元, 赖一楠, 王福吉, 等. 复合材料构件制造关键基础科学问题: 第 248 期“双清论坛”学术综述[J]. 中国科学基金, 2021, **35**(5): 764-773.(JIA Zhenyuan, LAI Yinan, WANG Fuji, et al. Key basic scientific questions in composite material parts manufacturing: an academic review of the 248 Shuangqing Forum[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, **35**(5): 764-773.(in Chinese))
- [84] LI L, ZHANG Q C, ZHANG R, et al. A laboratory experimental technique for simulating combined blast and impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, **134**: 103382.
- [85] LI L, HAN B, HE S Y, et al. Shock loading simulation using density-graded metallic foam projectiles[J]. *Materials & Design*, 2019, **164**: 107546.
- [86] GAO J, GUO Z, HERNANDEZ J A, et al. Transverse impact by RCCs on S-glass and Kevlar[®] FRC strips[J]. *Composites (Part A): Applied Science and Manufacturing*, 2021, **146**: 106425.
- [87] GAO J, KIRK C D, KEDIR N, et al. A method for characterization of multiple dynamic constitutive parameters of FRCs[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, **203**: 108607.
- [88] GAO J, LIM B H, ZHAI X, et al. Failure behaviors of single high-performance fibers under transverse dynamic cut[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, **144**: 103660.
- [89] WANG X, LI X, YU R P, et al. Enhanced vibration and damping characteristics of novel corrugated sandwich panels with polyurea-metal laminate face sheets[J]. *Composite Structures*, 2020, **251**: 112591.
- [90] DENG J, HONG Z, YIN Q, et al. A physically-based failure analysis framework for fiber-reinforced composite laminates under multiaxial loading[J]. *Composite Structures*, 2020, **241**: 112125.
- [91] 韩宾. 波纹强化复合型多孔材料的力学行为研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2015.(HAN Bin. Mechanical behaviors of reinforced corrugated composite cellular materials[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2015.(in

- Chinese))
- [92] KANG R, SHEN C, LU T J. A three-dimensional theoretical model of free vibration for multifunctional sandwich plates with honeycomb-corrugated hybrid cores[J]. *Composite Structures*, 2022, **298**: 115990.
- [93] 唐宇帆. 微穿孔蜂窝-波纹复合夹层结构的吸声性能研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018. (TANG Yufan. Investigation on sound absorption performances for micro-perforated honeycomb-corrugation hybrid sandwich structures[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [94] YUNGWIRTH C J, WADLEY H N G, O'CONNOR J H, et al. Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, **35**(8): 920-936.
- [95] XIA H, HOU R, ZHANG Q, et al. Ballistic resistance of metal corrugated sandwich plates filled with high performance concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, **42**(8): 1025-1031.
- [96] WANG X, HE C, YUE Z, et al. Shock resistance of elastomer-strengthened metallic corrugated core sandwich panels[J]. *Composites (Part B): Engineering*, 2022, **237**: 109840.
- [97] WANG X, YUE Z, XU X, et al. Ballistic impact response of elastomer-retrofitted corrugated core sandwich panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, **175**: 104545.
- [98] ZHANG R, HAN B, ZHOU Y, et al. Ballistic performance of ultralight multifunctional cellular sandwich plates with UHMWPE fiber metal laminate skins[J]. *Composite Structures*, 2023, **304**: 116390.
- [99] QIANG L, ZHANG R, ZHAO C, et al. Dynamic performance of ultralight corrugated sandwich plate with FML face-sheets impacted by FSP-foam composite projectile[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, **188**: 110875.
- [100] JIANG W, MA H, YAN L, et al. A microwave absorption/transmission integrated sandwich structure based on composite corrugation channel; design, fabrication and experiment[J]. *Composite Structures*, 2019, **229**: 111425.
- [101] CHENG L, SI Y, JI Z, et al. A novel linear gradient carbon fiber array integrated square honeycomb structure with electromagnetic wave absorption and enhanced mechanical performances[J]. *Composite Structures*, 2023, **305**: 116510.