

梯度泡沫铝抗爆性能研究进展

万孟霖, 邵 雪

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年7月25日; 录用日期: 2026年8月16日; 发布日期: 2026年8月26日

摘 要

随着现代工业和国防技术的发展, 工程结构在爆炸这种极端载荷下的安全性评估与防护设计变得日益重要。梯度泡沫铝通过在厚度方向上引入密度或孔隙率的梯度变化, 实现冲击波传播过程的主动调控, 从而提高结构抗爆性能, 展现出更高效的抗爆和吸能潜力。本文综述了近年来梯度泡沫铝在抗爆性能领域的研究进展, 探讨了其梯度设计、抗爆机理的影响规律, 并对该领域未来的研究方向进行了展望。

关键词

泡沫金属, 梯度泡沫铝, 爆炸载荷, 梯度设计

Research Progress on Blast Resistance of Gradient Foam Aluminum

Menglin Wan, Xue Shao

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: July 25, 2026; accepted: August 16, 2026; published: August 26, 2026

Abstract

With the development of modern industry and defense technologies, the safety assessment and protective design of engineering structures under extreme loads such as explosions have become increasingly important. Gradient foam aluminum achieves active control of the shock wave propagation process by introducing gradient changes in density or porosity in the thickness direction, thereby enhancing the structural anti-explosion performance and demonstrating more efficient anti-explosion and energy absorption potential. This paper reviews the research progress of gradient foam aluminum in the field of anti-explosion performance in recent years, discusses the gradient design, the influencing laws of anti-explosion mechanism, and looks forward to the future research directions in this field.

Keywords

Foam Metal, Gradient Foam Aluminum, Explosive Load, Gradient Design

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 前言

爆炸冲击波对建筑、车辆、舰船及航空航天器的破坏等具有瞬时性强、破坏力大的特点。理想的抗爆结构需要在保证轻量化的前提下，具备极高的比吸能和较低的载荷传递率。泡沫铝作为一种多孔金属材料，在受压时能通过长时间的恒定平台应力发生大塑性变形，从而吸收大量能量[1]-[3]。近年来，研究人员发现自然界中的生物结构(如骨骼、竹子、贝壳)多呈现梯度多孔结构。受此启发，梯度泡沫铝应运而生[4]-[7]。通过合理设计密度梯度分布，可以主动调控应力波在材料内部的传播路径和结构的变形模式，从而实现抗爆性能的定制化与最优化。

2. 梯度泡沫铝的分类与制备方法

当前针对其抗爆性能的研究，其构型主要涵盖离散层状与连续渐变两大类。层状梯度(如图 1)结构通常利用粘接、焊接或机械紧固等界面连接技术，将多层不同密度的均质泡沫铝叠加而成，因其实施便捷，已成为当前实验测试与数值模拟的主流模型。相比之下，连续梯度泡沫铝(如图 2)的内部密度或孔隙率呈现连续的函数变化，该构型从理论上有效规避了层间阻抗失配诱发的界面应力集中问题，但受限于当前



Figure 1. Layered gradient aluminum foam
图 1. 层状梯度泡沫铝



Figure 2. Continuous gradient aluminum foam
图 2. 连续梯度泡沫铝

成型工艺的复杂性, 其大规模制备仍面临挑战。根据其密度沿冲击波传播方向的分布规律, 该结构进一步细分为正梯度(密度沿迎爆面由低到高)、负梯度(密度沿迎爆面由高到低)以及对称梯度(如“低-高-低”排布)三种典型模式(如图3)。

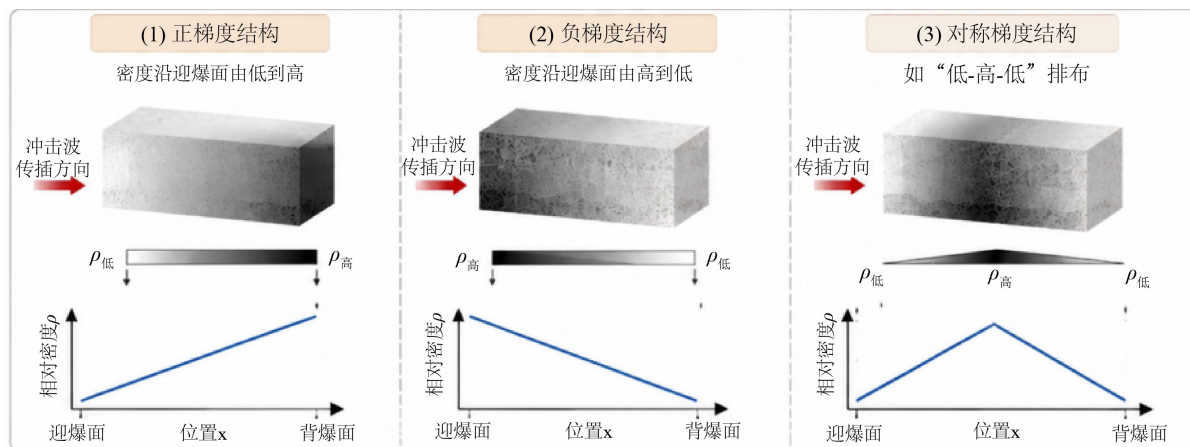


Figure 3. Positive gradient, negative gradient, and symmetrical gradient aluminum foam

图3. 正梯度、负梯度及对称梯度泡沫铝

梯度泡沫铝的制备工艺主要依托于传统发泡技术的延伸与新型成型技术的引入。针对离散层状梯度结构, 目前多采用粉末冶金法[8]-[10]、熔体发泡法[11]以及基础的界面连接工艺(如特种粘接、钎焊等)[12], 将不同孔隙率的均质前驱体或成型板进行物理拼装。其优势在于制备工艺成熟、结构参数易于调节, 可根据目标载荷需求灵活设计密度分布, 且便于工程加工与应用。但由于层间存在明显界面, 冲击波传播过程中容易产生阻抗失配、应力集中和界面脱粘等问题, 限制了其在高应变率极端环境下的性能发挥。另一方面, 由于层间界面的力学薄弱性, 研究人员逐渐将目光转向连续梯度泡沫铝的一体化成型。通过改进传统的渗流法或精确调控熔体内的发泡剂分布, 可在一定程度上实现孔隙率的连续过渡。近年来, 以选区激光熔化(SLM)为代表的增材制造(3D 打印)技术的介入[9], 为复杂连续梯度拓扑结构的高精度、定制化制备开辟了全新路径, 这亦是当前该领域工艺演进的核心趋势。相比离散梯度结构, 其能够减少界面效应, 降低冲击波反射, 提高能量耗散效率, 并实现更精准的波形调控。但连续梯度结构对制备技术要求较高, 传统发泡方法难以实现精确控制, 而增材制造等先进工艺仍面临成本高、尺度受限及缺陷控制等挑战。因此, 未来需结合先进制造与智能设计方法, 实现高精度、可规模化的连续梯度结构制备。

3. 抗爆机理与吸能特性

在爆炸强动载作用下, 结构的防护本质是对高频、高幅值应力波的耗散与重塑。均质多孔材料的应力波衰减主要依赖基体骨架的塑性做功; 而引入梯度设计后, 芯层密度的空间非均匀性赋予了材料波阻抗的演化特征。当初始爆炸应力波穿越具有波阻抗梯度的芯层时, 会在不同密度层的物理界面或属性过渡区发生多重反射与波形弥散。Liang 等[13]的双层梯度实爆试验直观揭示了这种基于“阻抗失配”的界面效应: 应力波在跨越梯度界面时透射幅值被大幅削减, 从而有效降低了传递至背板的峰值载荷。

多孔金属在遭遇爆炸等高速冲击时, 其动态响应显著区别于准静态压缩, 表现出强烈的局部化变形特征, 即“冲击波效应”。在此极端状态下, 芯层的屈服变形不再是整体均匀发生, 而是高度集中于一个以特定速度向前推进的压实波波阵面附近。张豪[14]针对多胞夹芯板的研究指出, 拓扑梯度的引入实质上是对芯层内部局部屈服强度场的重构。在爆炸动能驱动下, 不同密度的强度差异能够主动干预压实波

的萌生位置及推进速率。Liu Xiongfei 等[15]深入剖析了梯度泡沫铝的细观变形失效机理(如塑性铰的形成与孔壁屈曲), 并建立了修正本构模型。其研究证实, 合理的梯度排布能够诱导芯层发生更为理想的“渐进式压溃”, 强制变形带率先在低屈服强度区域起裂, 并以压实波的形式稳定向深层推进, 从而将随机不可控的局部损伤转化为有序可控的整体耗散。

4. 研究进展

近年来, 随着极端工况需求的升级与测试、计算手段的迭代, 梯度泡沫铝及其夹芯结构的抗爆与抗冲击研究已从早期的“宏观现象观测”全面迈向“细观机理剖析”与“多物理场耦合计算”。基于国内外学者的最新研究成果, 本节将从试验测试与数值仿真两个主维度, 对该领域的核心进展进行深度剖析。

4.1. 基于试验测试的宏观响应与机理表征

试验测试是验证梯度多孔结构能量耗散机制的物理基石。相较于早期的准静态压缩或落锤测试, 近年的试验研究高度聚焦于复杂的真实爆炸流场再现、高应变率动态本构测试以及新型组合体系的耦合承载响应。

为了获取精准的材料参数以反哺理论模型, 高航等[16]依托大直径分离式霍普金森压杆(SHPB)装置, 在极高应变率下测定了梯度泡沫铝的动态压缩力学性能, 发现材料的应变率敏感性与微观孔隙的空间排布呈强非线性相关。在近场水下爆炸等极端工况中, 水的不可压缩性会导致冲击波能量的剧烈耦合。Zeyu Jin 等[17]较早开展了近场水下爆炸作用下金属泡沫夹芯球壳的梯度效应研究, 试验揭示了迎爆面密度对流固耦合(FSI)效应的显著影响。随后, 任丽杰[18]针对舰船防护中常见的“水背固支”特殊边界条件, 实施了多孔金属加芯板的动力响应试验。研究表明, 在背面有水体支撑的强约束下, 梯度芯层的厚度配比直接决定了结构整体的塑性大变形模式与能量透射率。在空爆与常规冲击领域, Lin 等[19]与 Liang 等[13]先后对层状梯度金属泡沫夹芯板开展了系统表征。Liang 等[13]的双层梯度实爆试验直观地验证了“应力波衰减假说”: 当爆炸应力波跨越低密度至高密度的物理界面时, 波阻抗失配会导致透射波幅值的大幅削减。同时, 这类试验也暴露出离散层状梯度结构在强剪切力作用下极易发生界面脱粘与分层失效的固有缺陷。

与此同时, 单一的金属夹芯板已难以满足现代国防与土木工程的综合防护需求, 研究热点正向“多材质复合体系”转移。和西民[20]创新性地设计了轻质梯度泡沫铝组合结构, 大幅提升了抗穿透与抗爆综合性能。尹泽香[21]和汤侃[22]则将梯度泡沫铝引入高层建筑与关键基建防护, 连续两年在“钢板混凝土-梯度泡沫铝”组合构件的抗冲击与抗爆性能上取得突破。试验数据表明, 这种“刚-柔-刚”的多级缓冲体系, 利用外层混凝土的高刚度抗击初始波峰, 并依赖内部梯度泡沫铝的渐进式压溃吸收残余动能, 成功避免了背水/背弹面的混凝土震塌剥落现象。吴永魁等[23]则将视角转向管状构件, 其研究证实, 在铝合金复合管中填充梯度泡沫铝, 能够利用内部多孔骨架的侧向支撑力, 有效抑制外部薄壁薄管在侧向冲击下的局部屈曲失稳。

4.2. 基于数值仿真的细观演化与多目标优化

鉴于实爆试验的数据采集瓶颈和高昂成本, 基于非线性动力学理论的有限元数值仿真(FEM)已成为揭示细观演化规律和进行拓扑优化的核心工具。

早期仿真多采用各向同性的宏观均质本构(如 Deshpande-Fleck 模型), 无法反映孔壁的真实断裂。近年来, 基于 3D-Voronoi 技术的细观建模成为主流。Liu Xiongfei 等[24]深入剖析了梯度泡沫铝在冲击载荷下的变形失效机理, 并构建了包含微观孔隙损伤演化的修正本构模型, 大幅提高了仿真精度。在载荷施加与流固耦合处理上, 研究场景愈发苛刻。Ting Li 等[25]和 Wang 等[26]分别针对梯度泡沫铝夹芯管在外

部爆炸和内部爆炸下的动态响应进行了深度仿真。Wang 等[26]的研究突破性地指出, 连续密度梯度能够彻底消除离散层间界面处的应力集中现象; 更重要的是, 在内部爆炸的极端高压下, 高密度芯层靠近爆源的“负梯度”排布反而表现出更优的管壁位移控制能力, 这打破了中低强度载荷下“正梯度最优”的传统认知。此外, 张晓天等[27]将仿真拓展至超高速撞击领域(如空间碎片防护), 揭示了梯度开孔结构在极端应变率下的相变与能量熔化耗散机制。

当前, 仿真计算已从单一的“性能验算”跨越至基于算法的“反向寻优”阶段。Liang 等[28]则将理论扩展至复杂曲面构件。他们推导了梯度金属泡沫芯层圆柱/圆环结构在爆炸载荷下的动态响应理论解析模型, 从能量守恒与动量定理出发, 为航天器及水下圆柱壳体装备的抗爆边界设计确立了严密的数学基础。沙云杰[29]针对梯度泡沫铝填充薄壁方管结构, 将非线性有限元与多目标优化算法(如 NSGA-II)深度结合, 在“结构吸能最大化”与“初始峰值力最小化”的双重约束下, 得出了管壁厚度与芯层密度梯度的最优 Pareto 解集。类似地, 谢毅等[30]将梯度密度泡沫铝引入锥形汽车吸能盒中, 通过数值仿真证明, 锥角几何拓扑与材料空间梯度的逆向协同设计, 能够削平宏观碰撞力曲线的初始波峰, 实现近乎理想的恒定应力吸能平台。张豪[14]与张元瑞[31]的研究则更进一步, 他们依托中国科学技术大学的多孔力学平台, 分别从蜂窝型夹芯板的抗爆机理和爆炸载荷模拟器的多尺度设计出发, 利用参数化建模实现了对多胞材料内部胞元壁厚、孔径沿空间分布的精准定制计算。Bhanu Pratap Sharma 等[32]最新的计算研究也为复杂爆炸波在密度梯度介质中的弥散与耗散提供了更为完备的数值框架, 标志着梯度多孔介质的仿真分析已趋于成熟。

5. 总结与展望

综上所述, 梯度泡沫铝夹芯结构通过芯层物性的空间合理分配, 实现了对应力波的有效衰减与细观渐进式压溃模式的主动引导, 展现出比传统均质结构更卓越的抗爆与吸能效。尽管现阶段在宏观试验表征、流固耦合仿真及理论解析方面已取得显著进展, 但其大规模工程应用仍面临复杂工况适应性与低成本精细化制造等瓶颈。

未来该领域的研究可重点拓展以下方向:

(1) 引入增材制造(3D 打印), 传统泡沫铝制备方法如熔体发泡、粉末冶金等受限于孔结构随机性和梯度调控能力不足, 难以实现复杂连续密度梯度和多尺度拓扑结构的精准构筑。随着金属增材制造技术的发展, 未来有望突破传统工艺限制, 实现从“材料梯度设计”向“结构-材料一体化设计”的转变。然而, 当前增材制造梯度泡沫铝仍存在微观缺陷控制、打印尺度限制以及结构稳定性不足等问题。未来可重点关注如何建立增材制造参数-微观孔结构演化-宏观动态力学性能之间的跨尺度关联机制、如何实现复杂三维连续梯度和多功能拓扑结构的高精度制造

(2) 目前梯度泡沫铝结构设计主要依赖经验参数调整和有限元试错方法, 在密度分布、层间组合以及几何拓扑优化方面仍存在设计效率低、全局优化能力不足的问题。未来人工智能与机器学习技术的发展, 将推动梯度防护结构由“经验设计”向“数据驱动的智能设计”转变。未来需要重点突破如何构建融合材料本构、冲击响应和制造约束的智能设计模型、如何实现抗爆、承载、隔热等多性能目标的协同优化等。

(3) 三是进一步探究其在“爆炸-破片-火灾”等极端多场耦合环境下的动态响应与毁伤机理, 目前关于梯度泡沫铝夹芯结构的研究主要集中于单一冲击或爆炸载荷条件, 而实际防护装备往往同时受到爆炸冲击波、高速破片撞击以及爆炸后高温环境的共同作用。在多场耦合作用下, 材料内部损伤演化、界面失效以及能量耗散机制可能发生显著变化, 现有单场理论模型难以准确描述其服役行为。未来研究应重点关注多物理场耦合作用下梯度泡沫铝的动态失效与能量耗散机制、建立面向实际服役环境的多场

耦合性能评价体系等。

参考文献

- [1] 付条奇, 彭兵, 李明星, 张进成, 李高伟, 王显会. 闭孔泡沫铝力学特性及其复合装甲结构抗浅埋爆炸冲击性能研究[J/OL]. 机械工程学报: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20260507.1517.046>, 2026-08-13.
- [2] Kumar, V., Sankrityayan, R., Verma, P.K., Bhagatji, A., Chawla, A., Mukherjee, S., *et al.* (2026) Assessing Blast Attenuation Response of Aluminium Foam and Honeycomb Sandwich Structures: An Experimental and Numerical Investigation. *International Journal of Impact Engineering*, **214**, Article 105733. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2026.105733>
- [3] 牛杰, 和西民, 曹少俊, 刘雄飞. 泡沫铝夹芯结构在空爆载荷下的变形失效模式[J]. 工程爆破, 2025, 31(6): 8-16.
- [4] Zhang, S., Yin, X., Zhao, J., Tian, L., Guan, S. and Tian, J. (2025) Bamboo-Inspired Functionally Graded Aluminum Foams: Significantly Enhanced Mechanical and Thermal Insulation Properties. *Construction and Building Materials*, **491**, Article 142697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142697>
- [5] 汪凯. 仿生分层泡沫铝的组分优化、结构调控及其压缩性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.
- [6] Zhang, S., Yin, X., Zhao, J., Wang, S., Liu, Y., Tian, L., *et al.* (2026) Bamboo-Inspired Density Gradient Design Confers Favorable Strength-Toughness Matching in Aluminum Foam Sandwich. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **202**, Article 109538. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109538>
- [7] 朱鑫, 叶铃, 焦健. 发展竹缠绕复合材料产业 培育中国式现代化绿色新增量[J/OL]. 世界竹藤通讯, 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/11.4909.S.20260820.1730.001>, 2026-07-21.
- [8] Tavakolian, A.H., Hamzeh, S., Amirian, Y. and Kiasat, M.S. (2025) Development of Functionally Graded Aluminum Foams via Powder Metallurgy: Tailored Properties for Advanced Engineering Applications. *Results in Materials*, **28**, Article 100766. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100766>
- [9] 吴晨曦, 刘凯, 敬霖. 基于二维 Voronoi 模型的密度梯度泡沫铝冲击波传播特性研究[J]. 包装工程, 2025, 46(19): 31-40.
- [10] Huang, W., Liu, G., Li, H., Wang, F. and Wang, Y. (2021) Compressive Properties and Failure Mechanisms of Gradient Aluminum Foams Prepared by a Powder Metallurgy Method. *Metals*, **11**, Article 1337. <https://doi.org/10.3390/met11091337>
- [11] 成莹. 梯度泡沫铝的可控制备及其压缩吸能性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2021.
- [12] Duncan, O., Alderson, A. and Allen, T. (2021) Fabrication, Characterization and Analytical Modeling of Gradient Auxetic Closed Cell Foams. *Smart Materials and Structures*, **30**, Article 035014. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/abdc06>
- [13] Liang, M., Li, X., Lin, Y., Zhang, K. and Lu, F. (2019) Dynamic Compressive Behaviors of Two-Layer Graded Aluminum Foams under Blast Loading. *Materials*, **12**, Article 1445. <https://doi.org/10.3390/ma12091445>
- [14] 张豪. 蜂窝型夹芯板的抗爆炸机理分析与芯层结构设计[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [15] Liu, X., Wang, Y., He, X., Liu, H. and Cao, S. (2024) Deformation Failure Mechanism and Constitutive Model of Gradient Aluminum Foam under Impact Loading. *Composite Structures*, **327**, Article 117684. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117684>
- [16] 高航, 周丰峻, 李锋, 梁庆峰. 高应变率荷载作用下梯度泡沫铝力学性能研究[J]. 防护工程, 2025, 47(2): 6-12.
- [17] Jin, Z., Yin, C., Chen, Y. and Hua, H. (2016) Graded Effects of Metallic Foam Cores for Spherical Sandwich Shells Subjected to Close-In Underwater Explosion. *International Journal of Impact Engineering*, **94**, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.03.013>
- [18] 任丽杰. 近场水下爆炸加载下水背固支多孔金属加芯板动力响应研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [19] Jing, L. and Zhao, L. (2017) Blast Resistance and Energy Absorption of Sandwich Panels with Layered Gradient Metallic Foam Cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, **21**, 464-482. <https://doi.org/10.1177/1099636217695651>
- [20] 和西民. 轻质梯度泡沫铝组合结构设计及抗爆机理研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- [21] 尹泽香. 钢板混凝土-梯度泡沫铝组合板抗冲击与抗爆性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [22] 汤侃. 双钢板混凝土-梯度泡沫铝吸能结构抗冲击与抗爆性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [23] 吴永魁, 高康, 黄慧茵, 邹志强, 何思渊. 梯度泡沫铝填充铝合金复合管抗冲击性能研究[J/OL]. 工程力学: 1-14.

- <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250825.1115.004>, 2026-08-13.
- [24] Jia, T.T., Cheng, X.P., Lu, Y. and Li, T. (2025) Numerical Simulation of Aluminum Foam and Its Composite Structures under Impact Loads: From Geometric Models to Engineering Applications. *Materials & Design*, **259**, 114921-114921. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2025.114921>
 - [25] Li, T., Zhao, J., Yu, X., Wang, A., Chen, S., Ni, N., *et al.* (2024) Dynamic Response of Gradient Aluminum Foam Sandwich Tubes under External Explosive Loads. *Materials*, **17**, Article 4501. <https://doi.org/10.3390/ma17184501>
 - [26] Wang, A., Yu, X., Wang, H., Li, Y., Zhang, J. and Fan, X. (2022) Dynamic Response of Sandwich Tubes with Continuously Density-Graded Aluminum Foam Cores under Internal Explosion Load. *Materials*, **15**, Article 6966. <https://doi.org/10.3390/ma15196966>
 - [27] 张晓天, 王睿青, 陆乘阳, 等. 梯度开孔泡沫材料超高速撞击仿真与特性研究[C]//中国力学学会. 中国力学大会-2021+1 论文集(第一册). 2022: 149-157.
 - [28] Liang, M., Li, X., Lin, Y., Zhang, K. and Lu, F. (2020) Theoretical Analysis of Blast Protection of Graded Metal Foam-Cored Sandwich Cylinders/Rings. *Materials*, **13**, Article 3903. <https://doi.org/10.3390/ma13173903>
 - [29] 沙云杰. 梯度泡沫铝填充薄壁方管结构的力学性能分析及多目标优化设计[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2023.
 - [30] 谢毅, 吴熙蔚, 张建勋. 梯度密度泡沫铝填充锥形汽车吸能盒撞击特性研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(3): 625-634.
 - [31] 张元瑞. 基于梯度多胞材料的爆炸载荷模拟器的多尺度设计研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
 - [32] Sharma, B.P., Gogulapati, A. and Menezes, V. (2026) Computational Investigations of Graded Density Metallic Foams Subjected to Blast Type Loads. *Mechanics of Materials*, **213**, Article 105568. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105568>