

基于 Bouligand 结构的抗冲击性能研究

王一凡¹, 刘冰^{2*}, 杜浩然¹, 杨文娟¹, 刘真真¹, 于婷婷¹, 石鹏程¹, 王明¹,
邓华夏², 梁鑫^{1*}

1. 合肥大学 能源材料与化工学院, 安徽 合肥; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽 合肥

摘要 | Bouligand 结构是一种广泛存在于甲壳类外骨骼、鱼鳞及骨组织等天然材料中的典型螺旋层状结构, 具有优异的抗冲击性能和损伤容限。可有效调控冲击载荷作用下的应力传递规律, 改变裂纹扩展路径, 实现结构高效耗能增韧。本文系统综述了 Bouligand 结构的天然原型、基本构型及人工构筑方法, 重点分析层间旋转角、螺距、层厚、界面性能及材料组分等关键因素对结构冲击响应和损伤演化行为的影响规律, 并总结了裂纹偏转、裂纹扭转、界面分层、纤维桥联及纤维拔出等主要耗能增韧机制。梳理了 Bouligand 结构在低速冲击、高速冲击及防护复合材料领域中的研究进展, 归纳了现阶段研究存在的问题, 并从梯度化、层级化、多功能化及计算辅助优化设计等方面展望了未来发展趋势, 为高抗冲击仿生结构材料的设计与性能优化提供参考。

关键词 | Bouligand 结构; 仿生材料; 抗冲击; 损伤演化; 增韧机制

Copyright © 2026 by the author(s).

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



引言

随着航空航天、轨道交通、汽车工程及个体防护等领域对轻量化和高安全性的要求不断提高, 材料在冲击、碰撞及高速侵彻等动态载荷下的失效问题受到广泛关注。目前, 常用的抗冲击结构主要包

括蜂窝与夹芯结构^[1, 2]、点阵结构^[3, 4]、负泊松比结构^[5]及各类仿生结构^[6, 7]。其中, 蜂窝和夹芯结构具有具备轻质、高比刚度、吸能效率优异等优势, 但局部冲击下易发生面板压痕、芯层压溃及界面脱粘等失效问题; 点阵和负泊松比结构具有较高的几何可设计性和比吸能, 但其性能对拓扑参数、加载方向及制造精度较为敏感, 工程应用存在一定的局限性。相比而言, 自然界中的仿生层状结构能够通过

作者简介: 王一凡, 合肥大学, 研究生, 主要从事 Bouligand 结构和剪切增稠胶的结合方向研究; 梁鑫 (通讯作者), 合肥大学, 教授, 主要从事室温钠硫电池、锂硫电池等高比能电池体系正极材料的微纳结构设计及应用等方向研究; 刘冰 (通讯作者), 中国科学技术大学, 特任副研究员, 主要从事智能材料, 特别是激励响应型智能材料的研发、机理研究和应用等方向研究。

文章引用: 王一凡, 刘冰, 杜浩然, 杨文娟, 刘真真, 于婷婷, 石鹏程, 王明, 邓华夏, 梁鑫. 基于 Bouligand 结构的抗冲击性能研究[J]. 应用科技研究, 2026, 1 (4): 156-164.

<https://doi.org/10.68070/myhfjx37>

多尺度构型和界面协同有效调控裂纹扩展与能量耗散, 展现出优异的抗冲击韧性。

Bouligand 结构是一种典型的螺旋层状结构, 其内部纤维或片层沿厚度方向呈连续旋转排列, 能够实现冲击载荷在不同取向层间逐步传递并向更大范围扩散^[8]。同时, 结构取向的连续渐变特性可诱导裂纹发生偏转、扭转及层间分层, 并伴随纤维桥联和拔出等耗能过程, 从而延长裂纹扩展路径, 提高材料的损伤容限和抗冲击能力^[9]。近年来, Bouligand 结构逐渐向梯度化、层级化和多材料复合方向发展, 在轻质防护结构领域展现出广阔的应用前景。因此, 本文系统梳理 Bouligand 结构的关键构型参数、动态冲击响应特性及耗能增韧机制, 总结现有研究进展与现存问题, 为高性能仿生抗冲击结构的构型设计、性能优化及工程应用提供理论支撑与技术参考。

1 Bouligand 结构的基本原理和分类

1.1 自然界的结构材料设计思想

自然界中的骨、贝壳、甲壳类外骨骼和鱼鳞等结构材料, 虽然由性能有限的有机、无机组分构成, 却可凭借独特的层级化、梯度化及各向异性结构设计, 实现强度、韧性和抗冲击性能^[10-13] (图 1)。

其核心机制在于利用纤维取向、界面滑移及多尺度结构协同作用, 调控应力传递和裂纹扩展行为, 使裂纹发生偏转、分叉或扭转^[14], 从而增加能量耗散并提高损伤容限。Bouligand 结构正是这种天然结构增韧思想的典型代表, 其通过纤维或片层沿厚度方向的连续旋转排列, 实现载荷扩散与损伤路径调控, 为轻质高韧仿生材料设计提供了重要思路。



图 1 自然界中天然的 Bouligand 结构^[10-12, 15]

Fig. 1. Naturally occurring Bouligand structures in nature.

1.2 Bouligand 结构的基本几何特征

Bouligand 结构是一种典型的螺旋层状构型, 其核心特征是多层高度取向的纤维层或片层沿厚度方向逐层旋转堆叠。单层内纤维近似平行排布, 相邻层之间维持固定取向差, 使得纤维方向随厚度增加

连续变化, 最终形成类似“扭曲胶合板”的三维螺旋结构。相较于传统单向铺层或 $0^\circ/90^\circ$ 正交铺层结构, 该构型中纤维取向以较小角度逐层旋转, 空间分布具备更强的连续性。(图 2)

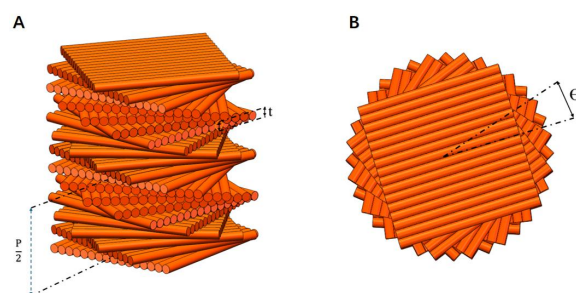


图 2 Bouligand 基本几何结构

(A) Bouligand 结构侧面图, (B) Bouligand 俯视图

Fig. 2. Bouligand geometry: (A) Side view; (B) Top view.

Bouligand 结构的几何特征主要由层间旋转角 θ 、单层厚度 t 和螺距 P 共同控制, 相关参数定义如图 2 所示。层间旋转角 θ 表示相邻纤维层之间的取向差, 若将首层纤维取向定义为 0° , 后续各层的方位角可依次表示为 θ 、 2θ 、 3θ 等。旋转角越小, 实现同等总转角所需层数越多, 纤维取向的变化越平缓; 随着旋转角增大, 纤维方向的变化则更加强烈^[14]。单层厚度 t 表示相邻纤维层在厚度方向上的间距, 该参数与旋转角共同决定结构的几何尺度。层厚越小, 单位厚度内包含的铺层数量越多, 螺旋取向的连续性越明显。

螺距 P 用于描述纤维取向沿厚度方向完成一个完整旋转周期所对应的距离。现有文献对螺距存在两种定义方式: 部分研究以纤维旋转 360° 对应的厚度作为完整螺距, 另一些研究考虑纤维轴 0° 与 180° 的几何等价性, 将 180° 对应厚度作为一个结构周期。因此, 在跨文献对比分析时, 需明确螺距的具体定义。总体而言, 旋转角、层厚和螺距共同决定 Bouligand 结构的取向演化速率与特征周期尺度, 是解析该结构载荷传递、损伤演化和抗冲击性能的重要几何基础。

2 Bouligand 结构性能与抗冲击原理

Bouligand 结构是一种典型的仿生层状螺旋结构, 其独特的空间取向特征赋予材料优异的抗冲击性能。相较于传统单向纤维增强结构或简单层状复合材料, Bouligand 结构通过纤维方向的连续旋转, 实现外部冲击载荷在三维空间中的传递和扩散, 从而有效抑制裂纹快速扩展, 并激活多种能量耗散机制协同作用。该结构优异的力学性能主要来源于裂纹偏转、层间滑移、纤维断裂以及结构变形等多种损伤模式的耦合效应。

2.1 裂纹/损伤机制

在外部载荷冲击作用下，材料内部将形成复杂的应力场，并在局部应力集中区域引发裂纹萌生与扩展。传统纤维增强复合材料的纤维取向多为单向排布，裂纹扩展过程易受到纤维方向与层间界面的限制，导致出现图 3 (A) 所示的裂纹沿纤维方向快速延伸或层间贯穿失效，最终结构整体破坏。与之相比，Bouligand 结构采用纤维取向连续旋转的螺旋

层状构型，能够有效调控裂纹扩展路径，显著提升材料的损伤容限和断裂韧性。

Bouligand 结构特有的连续取向变化特征，能够诱导裂纹发生偏转、扭曲和分叉等复杂扩展行为。图 3 (B) 为冲击载荷下 Bouligand 结构的裂痕偏转示意图。当裂纹扩展至纤维取向不同的相邻层时，纤维排布方向的转变将重构裂纹尖端附近的应力场，使裂纹难以沿原始方向稳定延伸，被迫偏离最短扩展路径。

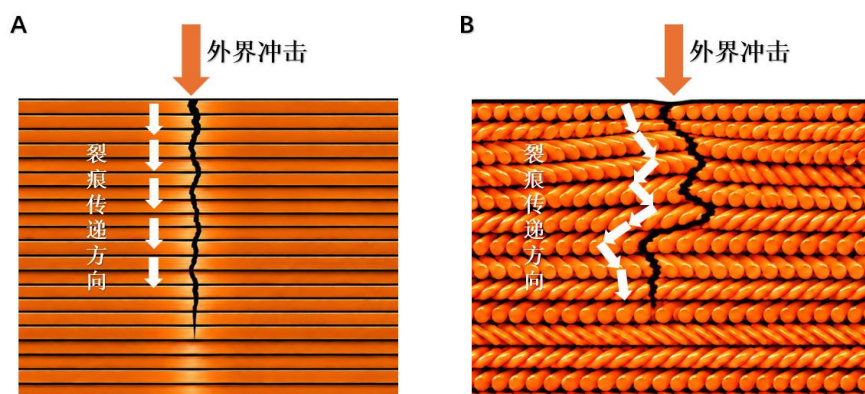


图 3 传统层压板和 Bouligand 结构传递裂纹示意图

(A) 传统层压板裂纹传递模式, (B) Bouligand 结构诱导裂纹示意图

Fig. 3. Schematic of crack propagation in conventional laminates and Bouligand structures: (A) Crack propagation in conventional laminates; (B) Crack deflection in Bouligand structures.

此外，Bouligand 结构中的多层螺旋排布特性，可有效诱导损伤区域分散开来。在冲击载荷作用下，材料内部首先形成局部微裂纹，受层间取向差异及结构约束的共同作用，裂纹的扩展被显著抑制，使材料失效模式转变为多微裂纹协同演化的渐进式损伤机制^[16]。与传统复合材料中单一主裂纹快速贯穿导致的灾难性破坏不同，该分散化损伤机制能够降低局部应力集中程度，维持材料整体结构稳定性，最终显著提高材料的抗冲击性能。

2.2 能量耗散机制

材料的抗冲击性能本质上由体系对外部输入能量的吸收、传递与耗散能力决定。Bouligand 结构依靠其独特的螺旋层状构型，可实现裂纹扩展、界面滑移、纤维变形与结构协同变形等多种耗能机制的耦合，使冲击能量能够在多个尺度范围内逐步释放，从而表现出优异的能量吸收特性。

在冲击过程中，裂纹扩展行为是 Bouligand 结构实现能量耗散的重要途径之一。受螺旋层状构型调控，裂纹传播路径持续发生偏转与延展；相较于传统材料中近直线式的裂纹扩展，Bouligand 结构内裂纹沿复杂路径扩展需要消耗更高的断裂能。与此同时，裂纹分叉和多级裂纹网络的形成进一步扩大了损伤区域，提高了材料对冲击能量的耗散效率。

除裂纹扩展耗能外，层间相互作用也是 Bouligand 结构吸收冲击能量的另一重要机制。由于相邻纤维层之间存在一定旋转角度，冲击载荷作用下不同取向纤维层会产生相对滑移，并通过层间摩擦将机械能转化为热能。与此同时，纤维层之间的界面脱粘、界面摩擦以及局部塑性变形等过程能够持续消耗外部输入能量，减缓冲击载荷向材料内部的传递，抑制局部损伤快速演变为整体结构失效。

3 生物性 Bouligand 结构研究进展

3.1 Bouligand 结构改进

随着对 Bouligand 结构研究的持续推进，其结构设计理念已逐步由传统单一材料体系向多材料复合化和多尺度层级化方向发展。在材料体系优化层面，研究者通过引入不同组分材料构建具有协同效应的多材料 Bouligand 结构，以进一步提升其力学性能。例如，聊城大学吴海龙团队通过构筑陶瓷骨架，成功制备了陶瓷-树脂复合 Bouligand 结构，该结构兼顾陶瓷材料的高强度与树脂基体的高韧性优势，实现材料抗弯平均强度提升 12.2%，断裂韧性提升 62.4%^[17] (图 4 (A))。此外，四川大学的唐玉璐等在水凝胶内部诱导高分子链形成类 Bouligand 有序排布，实现了材料内部微观结构调控，

从而显著增强了水凝胶的抗冲击性能^[18], 图 4 (B) 展示了其杨氏模量和其他材料的比较。河北工业大学安玉敏等进一步构建了具有 Bouligand 结构特征

的陶瓷材料, 在冲击载荷下展现出图 4 (F) 所示的裂纹偏转效应, 为高强韧陶瓷结构设计提供了新的思路^[19]。

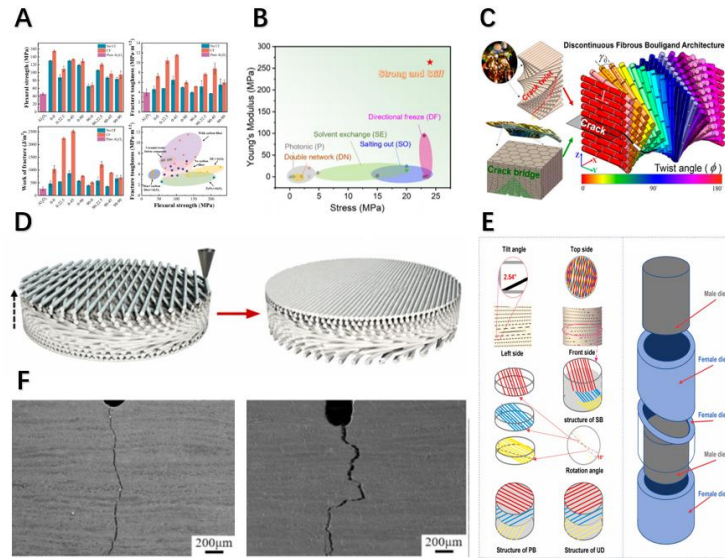


图 4 Bouligand 结构改进展示

(A) 具有不同初始角和旋转角的 Bouligand 结构陶瓷材料的力学性能^[17], (B) 具有 Bouligand 结构水凝胶和其他材料的杨氏模量对比^[18], (C) Bouligand 结构和仿珍珠结构的结合示意图^[20], (D) 纤维密度梯度排列的 Bouligand 结构, (E) Bouligand 空间结构的搭建方式, (F) 具有 Bouligand 结构的陶瓷对裂纹的偏转作用示意图^[19]

Fig. 4. Advances in Bouligand structures

(A) Mechanical properties of Bouligand-structured ceramic materials with different initial and rotation angles; (B) Comparison of the Young's modulus of Bouligand-structured hydrogels and other materials; (C) Schematic of the combination of Bouligand and nacre-like structures; (D) Bouligand structure with a gradient fiber-density arrangement; (E) Construction of a three-dimensional Bouligand architecture; (F) Schematic of crack deflection in Bouligand-structured ceramics.

除材料体系创新外, 研究者还通过优化 Bouligand 自身几何构型, 实现力学性能的进一步提升。例如, 中国科学技术大学俞书宏团队将 Bouligand 结构与仿珍珠层结构相结合, 构筑了具有多级协同增强效应的复合结构, 通过层间有序排列与界面调控提高了材料的强韧化能力, 为新型仿生结构设计提供了重要参考^[20] (图 4 (C))。在此基础上, 该团队进一步提出了 Bouligand 结构的空

疏密梯度设计策略, 建立如图 4 (D) 所示的 Bouligand 结构, 通过调控不同层级的纤维排列密度, 优化冲击载荷作用下的应力传递路径, 提升结构对峰值冲击载荷的抵抗能力^[21]。此外, 陕西科技大学的朱志鹏等突破了传统平面 Bouligand 结构的二维限制, 通过引入层间空间角度变化构建三维空间 Bouligand 结构, 并系统揭示了纤维数量及空间取向参数对结构抗压性能的影响机制^[22] (图 4 (E))。

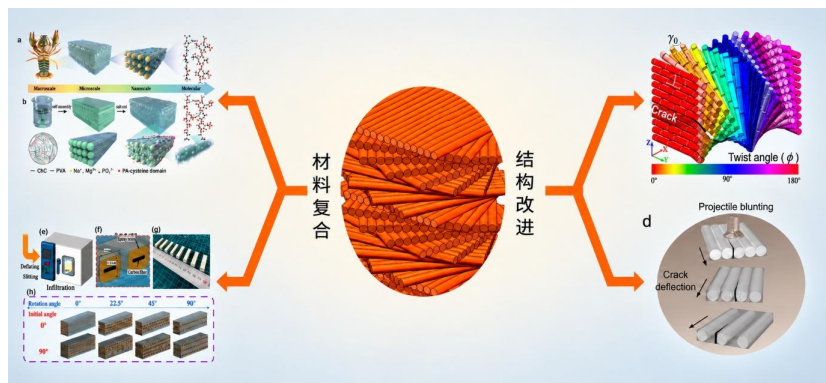


图 5 Bouligand 结构的应用改变^[15-17, 20]

Fig. 5. Applications of Bouligand structures.

总体来看, Bouligand 结构的研究已由早期单一螺旋层状构型, 逐步发展为多材料复合、多尺度协同以及三维空间调控的新型仿生结构体系, 且主要以材料复合和结构改进两种体系为主(图 5)。未来, 结合材料组分优化、几何参数调控与多尺度耦合设计, 有望进一步推动 Bouligand 结构在极端冲击防护、高性能复合材料及工程应用领域中的进一步拓展。

3.2 微观Bouligand结构构建

Bouligand 结构与刺激响应材料的结合, 为环境条件下的力学调节、受载状态感知及可编程变形提供了新的设计途径, 推动了螺旋层级结构向多功能防护材料的拓展。

在环境响应方面, Lee 等通过微弹道回弹实验, 结果如图 6(A) 所示, 研究了玻璃基底支撑的纤维素纳米晶(CNC)薄膜在不同湿度条件下的冲击行为^[23]。相较于 15%相对湿度, 45%相对湿度下薄膜的弹丸回弹速度降低, 归一化动能损失增加。结合

声波模型分析, 研究将这一变化与吸湿软化及剪切波速降低相联系, 表明环境湿度的改变能够影响特定基底约束下 Bouligand 薄膜的冲击耗能, 为环境响应型防护设计提供了实验依据。在功能拓展方面, 美国北得克萨斯大学的 Pawale 等利用化学图案化表面引导胆甾相液晶形成类 Bouligand 层级螺旋结构, 实现了电场和应变诱导的可逆光学调制^[24], 图 6(B)展示了在不同电压下的聚合形态; 武汉纺织大学的李琼雅团队则通过氢键重构与取向重排制备 CNC/聚乙二醇光子水凝胶, 在获得较高延展性与韧性的同时, 实现力致变色和电学传感, 具体变色情况如图 6(C) 所示, 并通过微控制器集成完成压力分布的可视化定位^[25]。俄勒冈州立大学的 Bischoff 等则将磁场辅助取向与数字光处理(DLP)3D 打印相结合, 构筑具有逐层旋转取向的仿 Bouligand 液晶弹性体^[26], 实现受热后的收缩与扭转, 并利用有限元逆向设计指导目标形变构型的构筑。这些研究分别从光学调制、光电感知及热驱动变形等方面, 拓展了 Bouligand 结构的响应功能。

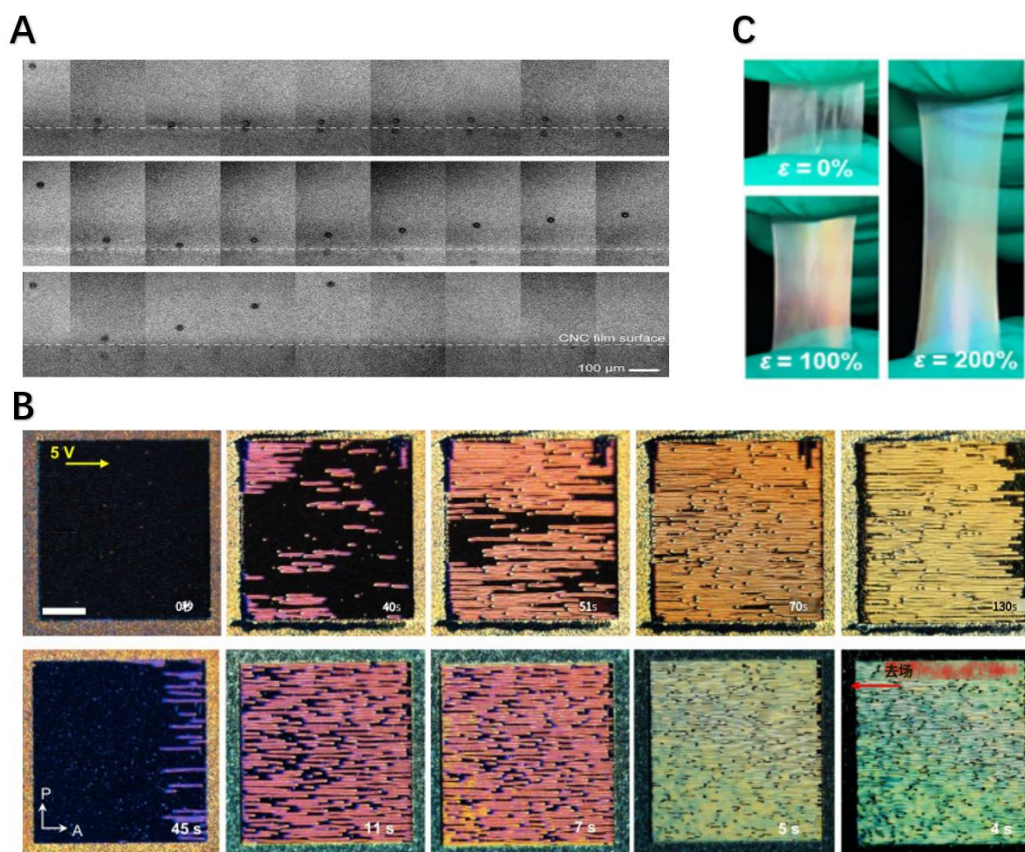


图 6 Bouligand 智能响应案例^[23-25]

(A) 8 μm、20 μm 和 40 μm 厚 CNC 薄膜的微弹丸冲击代表性图像序列, (B) 在 5 V 恒定直流电压下以及移除电场后的 POM 图像, (C) 外力使水凝胶变色示意图

Fig. 6. Examples of intelligent responses in Bouligand structures: (A) Representative image sequences of microprojectile impacts on CNC films with thicknesses of 8, 20, and 40 μm; (B) POM images under a constant DC voltage of 5 V and after removal of the electric field; (C) Schematic of hydrogel color change induced by external force.

相关研究已为 Bouligand 结构的环境响应与功能集成提供了基础,但光电信号输出和热致形变尚不能直接等同于抗冲击性能提升。其向智能防护应用的转化,仍需建立材料状态变化、响应信号与冲击耗能及损伤演化之间的定量联系。

3.3 Bouligand 结构应用现状

近年来,随着仿生设计理念和先进制造技术的发展,Bouligand 结构的研究由天然生物原型逐步拓展至人工复合材料领域,并在抗冲击防护材料和高性能结构设计中展现出重要应用价值^[12, 18, 27]。在纤维增强复合材料方面,研究人员通过构建螺旋铺层结构,使纤维取向沿厚度方向连续旋转,有效改善传统层合材料中易出现的层间分层和裂纹快速扩展问题,提高材料的损伤容限和冲击性能^[16]。例如,

Bouligand 型碳纤维增强复合材料能够通过裂纹偏转、裂纹桥接以及渐进式损伤模式实现更高的能量吸收效果。

此外,Bouligand 结构在增材制造与陶瓷基复合材料领域同样具备广阔的应用前景。借助 3D 打印技术,可精准构筑复杂的螺旋层状构型,使材料兼具轻量化和高吸能特性,图 7 展示了 3D 打印技术在 Bouligand 结构制备中的应用效果^[21]。针对陶瓷气凝胶等脆性材料,引入 Bouligand 结构能够通过裂纹扭转和多尺度应力耗散机制,有效改善脆性材料固有韧性差、易损伤的缺陷,显著提升其断裂韧性与抗损伤性能。现阶段,该结构已成为航空航天、防护装甲、交通运输以及轻质高强复合材料领域的重要设计策略,但其大尺度制造、结构参数优化以及工程化应用仍需进一步深入研究。

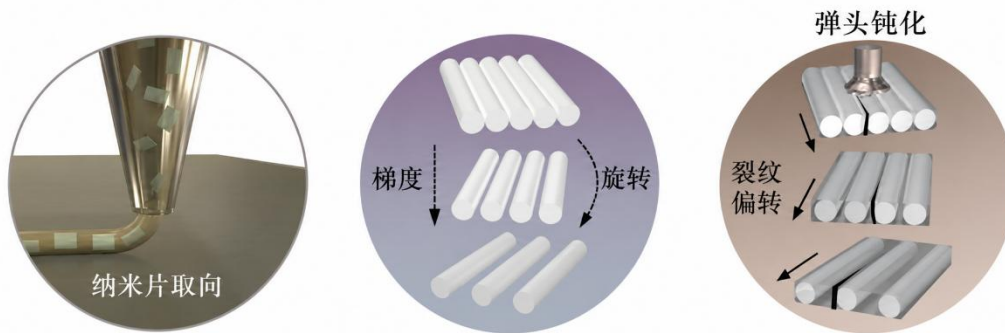


图 7 通过 3D 打印技术实现 Bouligand 结构^[21]

Fig. 7. Fabrication of Bouligand structures using 3D printing technology.

同时计算辅助仿真也为 Bouligand 结构的力学机制解析与构型优化提供了重要手段。前文中提到 Bischoff 等便通过有限元逆向设计,调整液晶弹性体的取向分布与几何参数,以获得预期的热致形变,展示了由目标响应反推结构设计的思路,提供了响应导向的设计方法^[26];同样中国科学技术大学的文韶萌也使用结合有限元模拟与冲击实验,揭示了组分梯度与双扭转构型协同改善冲击响应的机制,其中应力分散与塑性耗能在不同加载速度下发挥重要作用^[28]。利用计算辅助仿真将参数化建模、性能优化与实验验证相结合,有助于明确结构参数的作用及适用范围,为面向吸能效率和损伤容限的 Bouligand 结构设计提供依据。

4 结论

Bouligand 结构由多层内部纤维同向排列的单层结构沿厚度方向逐次旋转堆叠形成。其优异的抗冲击特性主要得益于螺旋铺层对载荷传递与损伤演化的精准调控:层间纤维取向的连续变化能够诱导裂纹偏转、扭转及分叉,延长裂纹扩展路径,促进损

伤分散;同时,层间滑移、界面脱粘等过程进一步耗散冲击能量,从而延缓整体失效并提高损伤容限。

Bouligand 结构的抗冲击性能受到几何构型、材料组成及界面特性共同决定。其中,单层厚度、层间旋转角和螺距是描述其几何特征的关键参数,三者相互耦合,共同决定纤维取向沿厚度方向的变化规律。当前的性能强化策略主要分为材料复合与构型优化两类:前者以一种材料构筑螺旋骨架,再引入另一种材料形成复合体系,依靠不同组分的性能互补及界面效应实现协同增韧;后者通过耦合其他仿生结构,或引入梯度分布、空间取向等设计变量,进一步调控载荷传递与损伤演化行为。两类策略亦可协同使用,为 Bouligand 结构抗冲击性能的优化提供更丰富的设计思路。

5 目前挑战和未来展望

Bouligand 结构在抗冲击与损伤容限方面展现出显著潜力,但其性能优化与工程应用仍面临挑战。单层厚度、层间旋转角及螺距等参数相互耦合,梯度化、三维化与多材料复合进一步增加了机理分析

难度。结构参数的作用具有工况依赖性,特定载荷下的最优方案仍需开展跨工况验证,并兼顾防护性能、轻量化需求与制造成本。

制造精度与工艺稳定性是工程应用的重要制约。复杂螺旋铺层及多材料界面对取向控制、层间结合和缺陷抑制提出较高要求。未来应结合 3D 打印等先进制造技术,将成形偏差、材料适配性与性能波动纳入优化过程,提升大尺寸构件的制备效率和一致性。在设计方法上,可通过刚性螺旋骨架与韧性组分复合,结合界面调控发挥材料互补优势,并探索微观界面、中观铺层与宏观梯度构型的协同作用。结合实验表征、数值模拟与优化算法,识别关键参数及其适用范围,开展兼顾多工况载荷和制造约束的协同优化,减少缺乏明确性能收益的复杂设计。

刺激响应改变结构参数的方式可为可调防护提供新途径。引入响应性组分有望调节微观取向、基体黏弹性或界面相互作用,但需明确材料状态变化与冲击耗能机制的关联,验证调控的可逆性、重复性及环境稳定性。通过光学或电学信号监测变形与损伤,可支持冲击后损伤评估及后续载荷前的防护状态调整;冲击过程中的实时调控则需满足信号采集、控制执行和材料响应与冲击历时相匹配的要求。

性能验证应在统一可比的条件下,综合评价吸能能力、损伤演化及冲击后剩余承载能力,并考察重复冲击、多向加载和环境变化下的稳定性。对功能化结构,还应评估信号可靠性、响应时效及功能集成对承载性能的影响,明确适用边界,推动 Bouligand 结构面向实际服役需求的工程化设计。

致谢

感谢以下项目对该工作的资金支持:国家自然科学基金(批准号:52302085、22608108、22409049、12302250、12372187),中国博士后科学基金(批准号:2023M733388),中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:WK2090000075、WK2480000010),安徽省科技创新攻坚计划项目(批准号:202423h08050005),安徽省高校科学研究重点项目(批准号:2024AH051531、2025AHGXZK40345、2023AH052202、2024AH051529),安徽省高校协同创新项目(批准号:GXXT-2023-024),安徽省学科(专业)带头人培育项目(批准号:DTR2023043),合肥大学人才科研基金项目(批准号:24RC39、25RC18),以及合肥大学引进人才项目(批准号:23RC29)。

参考文献

[1] Hazizan M A, Cantwell W J. The low velocity impact response of an aluminium honeycomb

sandwich structure[J/OL]. *Composites Part B: Engineering*, 2003, 34(8): 679-687. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00089-1).

[2] Sun Guangyong, Huo Xintao, Wang Hongxu, et al. On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact[J/OL]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 216: 108881. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108881>.

[3] Hunt C J, Morabito F, Grace C, et al. A review of composite lattice structures[J/OL]. *Composite Structures*, 2022, 284: 115120. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115120>.

[4] Ozdemir Z, Hernandez-Nava E, Tyas A, et al. Energy absorption in lattice structures in dynamics: experiments[J/OL]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 89: 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.10.007>.

[5] Ren Xin, Das R, Tran P, et al. Auxetic metamaterials and structures: a review[J/OL]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 023001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>.

[6] Wegst U G K, Bai Hao, Saiz E, et al. Bioinspired structural materials[J/OL]. *Nature Materials*, 2015, 14(1): 23-36. <https://doi.org/10.1038/nmat4089>.

[7] Yin Zhen, Hannard F, Barthelat F. Impact-resistant nacre-like transparent materials[J/OL]. *Science*, 2019, 364(6447): 1260-1263. <https://doi.org/10.1126/science.aaw8988>.

[8] Grunenfelter L K, Suksangpanya N, Salinas C, et al. Bio-inspired impact-resistant composites[J/OL]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(9): 3997-4008. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.03.022>.

[9] Suksangpanya N, Yaraghi N A, Pipes R B, et al. Crack twisting and toughening strategies in Bouligand architectures[J/OL]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 150: 83-106. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.06.004>.

[10] Sharma V, Crne M, Park J O, et al. Structural origin of circularly polarized iridescence in jeweled beetles[J/OL]. *Science*, 2009, 325(5939): 449-451. <https://doi.org/10.1126/science.1172051>.

[11] Chen Si-Ming, Wen Shao-Meng, Zhang Si-Chao, et al. Biological and bioinspired Bouligand structural materials: recent advances and perspectives[J/OL]. *Matter*, 2024, 7(2): 378-407. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.11.013>.

[12] Vignolini S, Rudall P J, Rowland A V, et al. Pointillist structural color in Pollia fruit[J/OL].

- Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(39): 15712-15715.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1210105109>.
- [13] Zimmermann E A, Gludovatz B, Schaible E, et al. Mechanical adaptability of the Bouligand-type structure in natural dermal armour[J/OL]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2634.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3634>.
- [14] Ouyang Wenting, Gong Bowen, Wang Huan, et al. Identifying optimal rotating pitch angles in composites with Bouligand structure[J/OL]. *Composites Communications*, 2021, 23: 100602.
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100602>.
- [15] Wu Jinrong, Qin Zhao, Qu Liangliang, et al. Natural hydrogel in American lobster: a soft armor with high toughness and strength[J/OL]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 88: 102-110.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.01.067>.
- [16] Guo Pengfei, Su Lei, Jia Shuhai, et al. High-strength and damage-resistant ceramic nanowire Bouligand architectures[J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 514: 162817.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162817>.
- [17] Wu Hailong, Guo Anfu, Kong Dekun, et al. Preparation of Bouligand biomimetic ceramic composites and the effect of different fiber orientations on mechanical properties[J/OL]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 132: 789-801.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.031>.
- [18] Tang Yulu, Lu Canhui, Xiong Rui. Biomimetic mechanically robust chiroptical hydrogel enabled by hierarchical Bouligand structure engineering[J/OL]. *ACS Nano*, 2024, 18(22): 14629-14639.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.4c02677>.
- [19] An Yumin, Wan Kun, Yang Yi, et al. Fabrication method and mechanical properties of biomimetic Cf/ZrB₂-SiC ceramic composites with bouligand structures[J/OL]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(2): 283-290.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.017>.
- [20] Wu Kaijin, Song Zhaoqiang, Zhang Shuaishuai, et al. Discontinuous fibrous Bouligand architecture enabling formidable fracture resistance with crack orientation insensitivity[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(27): 15465-15472.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2000639117>.
- [21] Wen Shao-Meng, Chen Si-Ming, Gao Weitao, et al. Biomimetic gradient Bouligand structure enhances impact resistance of ceramic-polymer composites[J/OL]. *Advanced Materials*, 2023, 35(21): 2211175.
<https://doi.org/10.1002/adma.202211175>.
- [22] Zhao Xueni, Zhu Zhipeng. A facile strategy for constructing biomimetic continuous fiber reinforced biocomposites with spatial Bouligand structure[J/OL]. *Composites Communications*, 2025, 56: 102351.
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2025.102351>.
- [23] Lee S R, Evans K M, Woodcock J W, et al. Controlling impact mitigation via Bouligand nanostructures[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2025, 122(20): e2425191122.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2425191122>.
- [24] Pawale T, Swain J, Anwasi M, et al. Directed self-assembly of chiral liquid crystals into biomimetic bouligand structures in thin film[J/OL]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 9295.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-64332-y>.
- [25] Li Qiongya, He Chenchen, Qian Yi, et al. Highly robust cellulose photonic hydrogels with reconfigurability and mechanochromism[J/OL]. *Materials Today*, 2025, 83: 252-262.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.01.008>.
- [26] Bischoff A, Jamshididana S, Miller Z, et al. Spatially tailorable liquid crystalline elastomer alignment during digital light process 3D printing[J/OL]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(33): e22676.
<https://doi.org/10.1002/adfm.202522676>.
- [27] Guo Pengfei, Su Lei, Peng Kang, et al. Additive manufacturing of resilient SiC nanowire aerogels[J/OL]. *ACS Nano*, 2022, 16(4): 6625-6633.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.2c01039>.
- [28] Wen Shao-Meng, Gao Weitao, Zhang Si-Chao, et al. Gradient double-twisted Bouligand structural design for high impact resistance over a wide range of loading velocities[J/OL]. *Science Advances*, 2025, 11(23): eadv2169.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adv2169>.

Study on Impact Resistance of Bouligand Structures

Wang Yifan¹, Liu Bing^{2*}, Du Haoran¹, Yang Wenjuan¹, Liu Zhenzhen¹, Yu Tingting¹, Shi Pengcheng¹, Wang Ming¹, Deng Huaxia², Liang Xin^{1*}

1. School of Energy, Materials and Chemical Engineering, Hefei University, Hefei Anhui; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

Abstract: Bouligand structures are helicoidal layered architectures widely found in natural materials, including crustacean exoskeletons, fish scales, and bone, and are characterized by excellent impact resistance and damage tolerance. By regulating stress transfer under impact loading and redirecting crack propagation, these architectures promote efficient energy dissipation and toughening. This review systematically examines the biological prototypes, fundamental configurations, and fabrication strategies of Bouligand structures. Particular emphasis is placed on the effects of key parameters, including interlayer rotation angle, helical pitch, layer thickness, interfacial properties, and constituent composition, on impact response and damage evolution. The principal energy dissipation and toughening mechanisms, including crack deflection, crack twisting, interlayer delamination, fiber bridging, and fiber pull-out, are summarized. Advances in the behavior of Bouligand structures under low- and high-velocity impact, together with their applications in protective composites, are reviewed. Current research challenges are identified, and future directions involving graded architectures, hierarchical design, multifunctionality, and computationally assisted design optimization are discussed. This review provides guidance for the design and performance optimization of bioinspired structural materials with enhanced impact resistance.

Keywords: Bouligand structure; bioinspired materials; impact resistance; damage evolution; toughening mechanisms