

引用本文格式 丁新隆, 王芳, 王飞跃. 多孔结构材料发展及研究现状[J]. 农业工程, 2023, 13(4): 77-82. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.04.014.
DING Xinlong, WANG Fang, WANG Feiyue. Development and research status of porous structural materials[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(4): 77-82.

多孔结构材料发展及研究现状

丁新隆^{1,2}, 王芳², 王飞跃³

(1. 天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津交通职业学院, 天津 300110;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 讨论和分析了各种典型的周期性多孔结构、非周期性多孔结构和复合多孔结构材料的性质与应用现状, 介绍了多孔结构材料在农业领域的应用。

关键词: 多孔结构; 周期性多孔结构; 非周期型多孔结构; 复合多孔结构

中图分类号: TB383 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2023)04-0077-06

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2023.04.014

Development and Research Status of Porous Structural Materials

DING Xinlong^{1,2}, WANG Fang², WANG Feiyue³

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Transportation Technical College, Tianjin 300110, China; 3. China Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Properties and application status of various typical periodic porous structures, irregular porous structures, and composite porous structures materials were discussed and analyzed, and application of porous structural materials in agricultural field was introduced.

Keywords: porous structure, periodic porous structure, irregular porous structure, composite porous structure

0 引言

长期以来, 人造材料大多是完全致密的, 试图避免和消除孔隙等多孔结构的形成, 以赋予材料更好的承载能力, 却忽视了多孔结构的优良性能。随着工业、科学技术和信息技术的发展和进步, 人们逐渐认识并开始制备各种多孔结构, 以获得具有特定功能的材料。多孔结构普遍存在于自然界, 如蜘蛛网、蜂巢、木材、骨头和海绵。在航空航天、国防、汽车和医疗领域, 轻质多孔结构由于其显著的高刚度质量比和大致密化应变而得到广泛应用^[1]。这些材料的机械性能主要受其基本成分的性质, 以及其所表现的几何特征(如晶格大小、晶格拓扑结构和相对密度)的驱动^[2]。近年来, 随着增材制造(AM)技术的快速发展, 可以制造一系列具有复杂几何形状的多孔结构。目前研究的多孔结构包括周期性多孔结构、非周期性结构及复合多孔结构等。多孔结构被证明是非常可靠的材料结构,

可广泛用于航空、生物、医药、环境和农业等领域。然而, 对其显示的形态和不可避免的工艺相关缺陷的有限控制为其广泛应用带来了许多挑战, 限制了这些多孔结构材料的实际应用^[3]。本文通过讨论各种多孔结构(包括周期性多孔结构、非周期性多孔结构及复合多孔结构)的应用现状, 分析其应用前景。

1 周期性多孔结构

天然晶格结构激发了研究人员设计工程晶格结构的灵感, 其最显著的特点是在保持抗压性的同时, 可最大限度地减少材料并降低生产成本。多孔结构是一种非常可靠且坚固的材料, 广泛应用于轻质结构、热管理、减振和膨胀绝缘等领域。

1.1 蜂窝结构

如果蜂窝夹层结构承受外部载荷, 在保证抗弯刚度与相同材料和厚度的实体结构不存在差异的情况下, 可减轻 70%~90% 的质量, 非常适用于要求轻型结构

收稿日期: 2022-10-22 修回日期: 2023-01-09

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(16JCZDJC38200)

作者简介: 丁新隆, 博士, 副教授, 主要从事机械设计制造研究 E-mail: tjdxlong@126.com

在线投稿
www.d1ae.com

的领域。蜂窝结构还在运输、包装和个人防护等许多领域用作缓冲和吸能材料^[4-5]。

蜂窝体结构已被广泛研究，特别是针对轻型蜂窝结构^[6]。它们在自然界中起着重要的保护作用，可用于生物医学、交通、建筑和航空航天等领域^[7-9]。与实体结构相比，这些结构的优点是在压力载荷下具有良好的能量吸收性能、强大的隔热和隔音性能及高强度比^[10]。自然界中有效控制结构力的多孔结构较多，如骨骼、泡沫、蜂窝、格子和木材^[11-12]。最常用和最著名的仿生蜂窝材料是蜂窝。据报道木材由于其自然设计的自支撑优化系统而具有最重要的蜂窝结构^[13-15]。木材的独特行为归因于其潜在的细胞结构，其几何形状因物种而异。蜂窝和木材具有相似的微观结构，导致相似各向异性行为。因此，它们的强度差异必定与密度有关。对木材细胞结构的研究仅限于假设所有类型的木材都具有统一的六边形细胞形状。因此，木材细胞结构的研究必须模仿原始木材的各种几何形状，这包括气管径向壁上的一个底层凹坑。

近年来，许多研究人员对蜂窝结构进行了研究。INGROLE A 等^[16]重点研究了人造橡胶和混合蜂窝结构，结果发现，各种设计原则将提供有关具有自定义属性的蜂窝结构设计空间的信息，可以通过添加或移除单个支柱或通过更改组件的形状来组织单元结构。KUCEWICZ M 等^[10]对单轴压缩下的 3D 打印蜂窝结构进行建模和表征，模拟了不同网格大小和单元类型的影响，以评估不同单元拓扑的模型。

1.2 三周期极小表面

三周期极小表面 (TPMS) 可以定义为两个主曲率相同但每个点符号相反的曲面，即所有点的平均曲率为零。“极小表面”并不是指给定单元尺寸结构的最小总面积；TPMS 结构可以数学建模。它们可以在垂直于形状几何的 3 个方向上重复。TPMS 可以通过改变参数来精确地设计和适应结构。TPMS 的多孔结构内部结构光滑且相互连接紧密。一些经典的 TPMS 结构最初由 Schwarz (Black Primitive 和 Black Diamond) 提出。SCHOEN A^[17]提出了其他几种 TPMS 架构，其中最著名的是 Schoen gyroid、Schoen i-graph 和 i-wp。在许多应用中，TPMS 结构已被证明优于传统柱状拓扑结构。

一般来说，大多数关于 TPMS 的研究都集中在机械性能上。AL-KETAN O 等^[18]研究证明，TPMS 的机械性能优于具有相同相对密度的 Octett trus 网格。相对密度定义为多孔体积与固体体积之比。对于具有相同拓扑结构的多孔结构，相对密度对弹性模量有直接影响。因此，弹性模量可以通过调节相对密度借助标度定律来控制^[19]。以多孔骨植入物为例，植入物的弹性模量应尽可能靠近人体骨骼，否则由于应力屏蔽，植

人物将在界面处失效^[20]。通过选择合适的参数和测试压力负荷，可以开发具有所需弹性模量的多孔植入物。然而，大多数多孔结构是各向异性的，并且在不同方向具有不同的弹性模量。因此，必须同时控制植入物的宏观弹性模量和各向异性。在一些方向均匀加载的特殊情况下，植入物甚至必须具有各向同性的特性。此外，各向异性被认为对多孔吸能材料有害。如果多孔各向异性吸收体受到不同方向的撞击，其薄弱部分可能会破裂或失效，需要开发可靠的各向异性控制方法和各向同性多孔构造方法^[21]。

随着 CAE 技术的飞速发展，一些研究人员开始讨论晶格结构的各向异性。CASTRO A 等^[22]使用均质化理论研究了立方晶格的各向异性，使用舒适的映射选择合适的参数生成具有不同弹性和各向异性行为的网格。SREEDHAR N 等^[23]分析了各种泡沫和晶格结构的比例与齐纳各向异性比的关系，还构建了具有最大各向同性弹性刚度的立方八元泡沫复合材料结构。在此基础上，研究者们提出了各向异性控制策略，可以通过调整网格列的几何参数来控制各向异性。AL-KETAN O 等^[24]开发了一种由空心体制成的特殊晶格结构。各向同性网格可以通过设置相应的内外管直径比来实现。

关于 TPMS 的各向异性的研究，LU Y 等^[25]讨论了 TPMS 多孔结构的各向异性弹性行为。然而，有两种 TPMS 拓扑结构，包括网络和片状 TPMS 多孔结构。板式 TPMS 结构可以获得更好的性能。参数对 TPMS 结构特性的影响也比较复杂。CHEN Z 等^[26]尝试通过组合不同的 TPMS 结构或泡沫单元来设计各向同性的 TPMS 结构。

多孔结构的各向异性反映了多孔结构的强弱方向。如果可以将不同晶格的强弱方向结合起来，就可以获得各向同性的特性。XU S 等^[27]基于两个不同元件的组装和棒直径比研究适应的各向异性控制方法，还用 4 个钻石立方体建造了一个新单元，也可以通过改变棒的尺寸比来实现各向同性。类似地，TANCOGNE-DEJEANT 等^[28]通过组合简单立方晶格 (SC)、体心立方晶格 (BCC) 和角晶格 (FCC) 来设计各向同性晶格，开发设计图用于选择不同单元类型的适当部分，以创建具有所需各向异性的晶格。除了这些方法，CHEN W 等^[29]还使用拓扑优化来生成刚性各向同性晶格。

这样做会破坏 TPMS 结构的许多原有优势。设计各向同性 TPMS 结构是控制各向异性特性的一个特殊且困难的例子。这项工作的重点是基于薄板 TPMS 的各向同性多孔结构的设计；系统地研究参数与相对密度之间的关系。在此基础上，利用数值均匀化理论和有限元分析方法对薄板 TPMS 的各向异性和弹性模量进行了分析。此外，还提出了两种用于设计各向同

性结构的各向异性控制方法。对于实际各向异性接近各向同性的 TPMS 单元, 根据参数的影响设置曲线壁厚 (CW)。

针对部分 TPMS 结构单元的实际特性与各向同性特性相去甚远的事实, 提出了一种复合 TPMS 结构设计方法来生产具有光滑特性的各向同性 TPMS 结构。通过这种方式, 可以对多孔 TPMS 结构进行各向同性和弹性调制。

研究还集中在 TPMS 结构的构建上。MELCHELS F P W 等^[30] 使用 k3 dsurf 软件生成 TPMS 结构并通过向 TPMS 添加方程的 Z 值系数来设计尺寸梯度孔隙。TPMS 支撑结构的机械性能由材料类型和孔隙结构决定。YOO D J^[31] 提出了一种用距离场和径向基函数建模的算法, 以使内部结构的变化更平滑、更自然。CAIS 等^[32] 借助坐标插值和有限元形式将 TPMS 结构映射到设计域中。还有学者使用 sigmoid 函数和高斯径向基函数来创建非固有多孔框架。然而, 上述创建和设计 TPMS 结构的方法并不能很好地控制多孔结构的拓扑和形状。此外, 使用传统的有限元方法和启发式方法来分析和重新设计多孔结构既费时又容易出错。

2 非周期性多孔结构

非周期性多孔结构具有周期性多孔结构的吸能阻尼、散热性好、连通性好等优良特性, 在此基础上设计的孔隙更自然, 与周围结构的弹性模量相差不大, 即有利于应力转移。

2.1 Voronoi 结构

Voronoi 结构设计方法中, 基于 Voronoi 框架的多孔结构通常模仿规则的多孔结构处理方法。当正常单元格 (如四面体或六面体) 共享复杂的几何形状或变形较大的区域以确保边界时, 往往需要过度试穿, 或通过切割、合并、分裂及自适应变形。

与四面体划分类似, 如果使用足够数量的 Voronoi 图, 边界可以更接近, Voronoi 镶嵌的结果具有更高的精度。值得注意的是, 在创建第 1 个 Voronoi 图时, 一种方法是通过四面体网格划分然后对偶得到第 1 个 Voronoi 单元。然而, 虽然四面体可以确定 Voronoi 图, 但是生成鲁棒四面体非常困难, 生成的 Voronoi 图还有待裁剪。另一种方法是切割法, 以 Voro++ 库为代表, 将一个网站的空间域进行多条平分线切割, 最终得到完整的 cell。

FORTUNE S^[33] 1987 年提出了 Voronoi 图的经典扫描线算法, 是一种非常快速有效的 Voronoi 图生成方法。MERIGOT Q 等^[34] 提出了 Delaunay 和 Vorono 图的随机增量构造, 可以用作 2D 和 3D 中许多类似问题的模型, 它还解释了这种构建 Voronoi 图的方法如

何避免需要为最近邻查询创建自己的精确结构。AURENHAMMER F 等^[35] 提出了一种简单的在线随机增量算法来计算高性能 Voronoi 图, 该结构支持在一组飞机位置中进行 k 个最近邻查询、插入和删除, 并且不会比当前的 order-K Voronoi 图占用更多的内存空间。SENECHAL R B M^[36] 使用普通 Voronoi 图的数值鲁棒算法来近似不同类型的广义 Voronoi 图。广义 Voronoi 图包含了 Voronoi 图、加权 Voronoi 图、黎曼平面上的 Voronoi 图和为了避免碰撞而在最短路径上的 Voronoi 图。这些通用 Voronoi 图的构造被简化为普通 Voronoi 图的构造。所提出的方法可以节省大量时间。JOE B 等^[37] 对约束 Voronoi 图和 Delaunay 三角剖分的对偶性进行研究, 介绍了包含 n 个顶点或图的线段被视为障碍物的约束 Voronoi 图, 显示了该图的扩展是约束 Delaunay 三角剖分的对偶, 并用于构造扩展约束 Voronoi 图的 $O(N \log N)$ 算法。BAREQUET G 等^[38] 给出了一种用于构造多边形场景的 Voronoi 图的并行算法, 并在 CREW PRAM 模型中使用 $O(N)$ 处理器以 $O(\log 2N)$ 时间算法运行。

对于 Voronoi 结构, 多数研究者使用 Voronoi 有限元分析方法, 其最大优点是可归因于该方法构造的高计算效率。每个元素都能准确地描述夹杂物与基体界面附近的应力集中及各位置附近的应力。

罗吉祥等^[39] 调查了基体中的裂纹损伤。GUO R 等^[40] 研究了裂缝闭合问题, 并对疲劳损伤的发展和蔓延进行了调查。XU J L 等^[41] 计算了 Voronoi 元和等参元混合模型。GUO J 等^[42] 实现了宏观结构有限元的跨尺度模拟和 Meso Voronoi 元损伤模拟。黄永霞等^[43] 研究了颗粒增强复合材料的等效模量。ZHANG R 等^[44] 提出了多孔单元, 给出具有应力奇异性的应力混合有限元。HAN N 等^[45] 考虑到裂纹尖端的特殊性, 提出了具有内压的孔隙单元, 并模拟多孔材料的渗透破坏分析。

2.2 发泡结构

泡沫是由热塑性有机聚合物发展而来的, 它因其相互连接的三维微观结构和低密度、可调节的热导率和电导率、耐高温和高机械强度等性能而备受关注。

其中氧化铝和氧化锆泡沫陶瓷广泛应用于照明元件、高温隔热、耐火板等技术领域。对于孔隙率在 95% 以上的泡沫陶瓷, 机械性能是最重要的性能之一, 因为孔隙率的进一步增加显著降低了高孔隙率泡沫陶瓷的抗压强度, 从而限制了它们在某些领域的应用。因此, 提高泡沫陶瓷的机械强度以满足特定应用领域的要求非常重要^[46]。

泡沫陶瓷材料的强度受孔隙形态和成分的影响。即使是没有缺陷的闭孔结构通常也具有良好的强度^[47]。目前已采用多种方法来提高泡沫陶瓷的力学性能。直

接发泡是制备孔隙结构相对均匀、孔隙率高的泡沫陶瓷的一种通用而简单的方法。它是直接向陶瓷悬浮液中添加气体。作为一种有前景的直接膨胀方法,颗粒稳定泡沫在泡沫陶瓷的制造中具有许多优点,包括高孔隙率、高强度/密度比、环保、成本低和路线简单,尤其是由于陶瓷粒子集合体,空气/液体界面的稳定性极佳,因此无需添加有机或无机黏合剂^[48]。

微孔纳米复合泡沫因其低介电常数、高刚度、高韧性和高热稳定性而被视为高分子材料的一个重要分支,具有较大的应用潜力,对于电磁干扰屏蔽(EMI)应用非常重要。理想的电磁波吸收体的设计有一定的要求,包括质量轻、导电率高、环境稳定性好、吸收频率可调和机械性能提高等。带有导电填料的聚合物复合微孔泡沫是理想的选择之一。

近年来,对泡沫结构电子屏蔽的研究受到了研究者的极大青睐。与传统的金属电磁干扰屏蔽剂相比,导电高分子复合材料(CPC)由于具有质量轻、耐腐蚀、加工性好、导电率可调和吸收范围广等突出优点,在电磁干扰屏蔽领域得到了广泛的研究。CPC的EMI屏蔽通常取决于导电填料的固有导电性、渗透性、分散性和负载。碳纳米纤维因其显著的结构、机械和电气特性而被认为是流行的引导材料,如更小的直径、更大的纵横比、更高的导电性和强度。

在用于EMI屏蔽的导电泡沫中,研究集中在泡沫复合材料优于非泡沫复合材料的样品上。ZHANG H B等^[49]研究表明,泡沫中的空气提高了脆性石墨烯PMMA纳米复合材料的韧性和拉伸强度,石墨烯PMMA泡沫在8~12 GHz的频率范围内具有高导电性和良好的EMI屏蔽效率。TRAN M P等^[50]制备了PMMA/MWCNT纳米复合泡沫,并表明增加纳米复合泡沫的泡孔密度会提高电导率。MA H L等^[51]通过化学改性的氧化石墨烯改善了聚碳酸酯/石墨烯纳米复合泡沫的泡孔结构和导电性,然而,泡沫形态对介电常数和EMI屏蔽的影响非常有限。

3 复合多孔结构

复合多孔结构一般结合两种或者两种以上的孔结构,对于单一孔结构某些自身无法改变的特点,复合多孔结构可以很好地解决这一问题。另外,复合多孔结构可以针对孔结构进行拓扑优化,提高结构性能。很多孔结构灵感来自于自然界中,如树干细胞的结构、莲藕结构、蜂窝结构和陶瓷等。

研究者针对3D打印单元结构提出了一种新的细胞结构误差建模方法,该方法是在3D打印技术的帮助下产生的^[52]。DUAN S等^[53]对具有可变厚度蜂窝边缘的三维印刷方形和六边形蜂窝进行了类似的研究,以评

估其平面和能量吸收能力。由于生产具有高重复性和准确性的此类样品的固有挑战,关于增材制造技术的多孔生物特征细胞结构的研究报告很少^[54-55]。目前,只有少数研究致力于受实木微观结构启发的额外制造的多孔结构的机械性能。

WEN P等^[56]采用水热法和还原法制备了具有三维IG维刺猬状微观结构的Z型复合异质结ZnO/Au/g-C₃N₄光催化剂,并将其用于还原光阴极进行析氢,制备的三维纳米结构可以有效防止组分的团聚并提供更多的活性位置,为设计高性能光电极的水分解以进一步应用于环境保护和能源领域提供了新的见解。SUN C等^[57]制备的磁性微壳 γ -Al₂O₃/ZnFe₂O₄材料用于吸附染CR溶液,适用于分离回收。KANG W等^[58]采用原位置换法制备MoSe₂/MoO₃异质结以提高钠离子电池电极材料的电化学性能。YAN T等^[59]在微球多孔In₂S₃上实现了Ag₃PO₄的超低负载,以提高光催化性能。

4 多孔结构材料在农业领域的应用

4.1 生物炭多孔材料

生物炭可以从农业废弃物中产生,其多孔结构具有优异的吸附能力。大的表面积为土壤微生物提供了广泛的附着点^[60]。稳定的碳结构使其成为可长期使用的理想碳封存材料。生物炭已成为一种双赢的选择,因为它既可以作为碳汇,也可以作为土壤改良剂,以改善土壤质量(肥力)和持水能力,防止土地退化^[61]。热解需要大量的工艺和反应器技术,温度和加热速率表征了产生生物炭、气体和石油产品的不同混合物的热解类型^[62]。随着热解温度的升高,生物炭产率降低,但碳含量和生物炭的芳香缩合物增加。

4.2 光催化剂气凝胶

光催化驱动利用太阳能来解决能源危机和环境污染引起了极大的关注,特别是考虑到其在污染物降解和去除、消毒、水分解、CO₂和CH₄转化、氨合成和有机合成等方面的广泛应用。随着材料合成、分析表征和理论调制领域的不断进步,主要涉及光吸收和激发、载流子分离和迁移,以及半导体光催化剂上的表面氧化还原反应的复杂光催化反应已被深入理解。

TiO₂被广泛用作光催化剂来处理废水中的有害物质,由于纯TiO₂气凝胶网络强度较差,并且存在易团聚、难回收、易失性等弊端,限制了其光催化性能的应用。然而,有一种新型轻质纳米多孔材料——SiO₂气凝胶,其孔隙率高、比表面积大且强度较高。有学者提出,制备TiO₂-SiO₂复合气凝胶多孔材料,有望结合TiO₂的光催化活性、SiO₂的高热稳定性和优良的机械性能,以及多孔材料的高吸附性,具有广阔的市场前景和使用价值。

5 结束语

多孔结构性能的研究前景非常广阔。规则的周期性多孔结构可以通过数学表达式清楚地表达几何形状, 这种结构最显著的特点是其低成本和高刚性。相对而言, 非周期性多孔结构具有结构模型易调节、比表面积大、质量轻等特点, 非周期性多孔结构在各个领域中具有广泛的吸引力。

参考文献

- [1] NGUYEN-VAN V, WU C, VOGEL F, et al. Mechanical performance of fractal-like cementitious lightweight cellular structures: Numerical investigations[J]. *Composite Structures*, 2021, 269: 114-050.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids (structure and properties) [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1997. DOI: 10.1017/CBO9781139878326.014.
- [3] HAN S C, LEE J W, KANG K. A new type of low density material: shellular[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(37): 5506-5511.
- [4] LU G, YU T X. Energy absorption of structures and materials[J]. *Energy Absorption of Structures and Materials*, 2003. DOI: 10.1533/9781855738584.references.
- [5] ZHANG Q, YANG X, LI P, et al. Bioinspired engineering of honeycomb structure: using nature to inspire human innovation[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 332-400.
- [6] UFODIKE C, JACKSON S, BOLDEN N, et al. Synthesis and characterization of extruded cellulosic fibrils for enhanced reinforced/filamentary textiles[J]. *Textile Research Journal*, 2018, 88(5): 520-531.
- [7] COMPTON B G, LEWIS J A. 3D-printing of lightweight cellular composites[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34): 5930-5935.
- [8] GIBSON L J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, 9(76): 2749-2766.
- [9] AHANGAR P, COOKE M E, WEBER M H, et al. Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1713.
- [10] KUCEWICZ M, BARANOWSKI P, MALACHOWSKI J, et al. Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures[J]. *Materials & Design*, 2018, 142: 177-189.
- [11] WU Q, YANG C, OHRNDORF A, et al. Impact behaviors of human skull sandwich cellular bones: theoretical models and simulation [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 104: 103669.
- [12] GENOVESE K. Three-dimensional microscopic deformation measurements on cellular solids[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 60: 78-92.
- [13] WEGST U G K. Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2011, 4(5): 744-755.
- [14] ZHAO C, REN L, SONG Z, et al. A study on the tubular composite with tunable compression mechanical behavior inspired by wood cell [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 89: 132-142.
- [15] KAI J, ZHAO Q, BUEHLER M J. Molecular deformation mechanisms of the wood cell wall material[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2015, 42: 198-206.
- [16] INGROLE A, HAO A, LIANG R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement [J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 72-83.
- [17] SCHOEN A. Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections[J]. *Technical Note*, 1970.
- [18] AL-KETAN O, ROWSHAN R, AL-RUB R A. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 167-183.
- [19] DONG J Y. Porous scaffold design using the distance field and triply periodic minimal surface models[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(31): 7741-7754.
- [20] KAPFER S C, HYDE S T, MECKE K, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(29): 6875-6882.
- [21] AFSHAR M, ANARAKI A P, MONTAZERIAN H, et al. Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 62: 481-494.
- [22] CASTRO A, PIRES T, SANTOS J, et al. Permeability versus design in TPMS scaffolds[J]. *Materials*, 2019, 12(8): 1313.
- [23] SREEDHAR N, THOMAS N, AL-KETAN O, et al. 3D printed feed spacers based on triply periodic minimal surfaces for flux enhancement and biofouling mitigation in RO and UF[J]. *Desalination*, 2018, 425: 12-21.
- [24] AL-KETAN O, ALI M, KHALIL M, et al. Forced convection CFD analysis of architected and 3D printable heat sinks based on triply periodic minimal surfaces[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2020, 13(2): 1-33.
- [25] LU Y, ZHAO W, CUI Z, et al. The anisotropic elastic behavior of the widely-used triply-periodic minimal surface based scaffolds [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 99: 56-65.
- [26] CHEN Z, XIE Y M, WU X, et al. On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 108109.
- [27] XU S, SHEN J, ZHOU S, et al. Design of lattice structures with controlled anisotropy[J]. *Materials & Design*, 2016, 93: 443-447.
- [28] TANCOGNE-DEJEAN T, MOHR D. Elastically-isotropic truss lattice materials of reduced plastic anisotropy[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 138: 24-39.
- [29] CHEN W, WATTS S, JACKSON J A, et al. Stiff isotropic lattices beyond the Maxwell criterion[J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaaw1937.
- [30] MELCHELS F P W, BERTOLDI K, GABBRIELLI R, et al. Mathematically defined tissue engineering scaffold architectures prepared by stereolithography[J]. *Biomaterials*, 2010, 31(27): 6909-6916.
- [31] YOO D J. Heterogeneous minimal surface porous scaffold design using

- the distance field and radial basis functions[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2012, 34(5): 625-639.
- [32] CAI S, XI J. A control approach for pore size distribution in the bone scaffold based on the hexahedral mesh refinement[J]. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(10/11): 1040-1050.
- [33] FORTUNE S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams[J]. *Algorithmica*, 1987(1-4): 153-174.
- [34] MERIGOT Q, OVSJANIKOV M, GUIBAS L J. Voronoi-based curvature and feature estimation from point clouds[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2011, 17(6): 743-756.
- [35] AURENHAMMER F, SCHWARZKOPF O. A simple on-line randomized incremental algorithm for computing higher order Voronoi diagrams[J]. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 1992, 2(4): 363-381.
- [36] SENECHAL R B M. Spatial tessellations: concepts and applications of voronoi diagrams by atsuyuki okabe, barry boots, kokichi sugihara [J]. *College Mathematics Journal*, 1995, 26(1): 79-81.
- [37] JOE B, WANG C A. Duality of constrained Voronoi diagrams and Delaunay triangulations[J]. *Algorithmica*, 1993, 9(2): 142-155.
- [38] BAREQUET G, GOODRICH M T D T. Voronoi diagrams for convex polygon-offset distance functions[J]. *Discrete & Computational Geometry*, 2001.
- [39] 罗吉祥, 唐春, 郭然. 纤维增强复合材料界面脱层和基体裂纹的模拟分析[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(6): 201-209.
LUO Jixiang, TANG Chun, GUO Ran. Simulation analysis of interface delamination and matrix cracks in fiber reinforced composite materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(6): 201-209.
- [40] GUO R, ZHANG W Y, TAN T, et al. Modeling of fatigue crack in particle reinforced composites with Voronoi cell finite element method [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 31: 288-296.
- [41] XU J L, GUO R, GAI W H. VCFEM method mixed with finite element method calculation of numerical simulation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 444-445: 103-109.
- [42] GUO J, GUO R, GAI W H. Simulation of particle reinforced composite materials in macro- and meso-scales[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 444-445: 37-44.
- [43] 黄永霞, 郭然, 李伟. 颗粒增强复合材料有效模量的 Voronoi 单元有限元法分析[J]. *重庆大学学报*, 2016(5): 63-72.
HUANG Yongxia, GUO Ran, LI Wei. Finite element method based on Voronoi cell for the effective modulus of particle reinforced composites[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)*, 2016(5): 63-72.
- [44] ZHANG R, GUO R. Determination of crack tip stress intensity factors by singular Voronoi cell finite element method[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 197: 206-216.
- [45] HAN N, GUO R. Two new Voronoi cell finite element models for fracture simulation in porous material under inner pressure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 211: 478-494.
- [46] HA J H, AHM AD R, SONG I H. A novel method of coating a particle-stabilized alumina foam on a porous alumina substrate[J]. *Materials Letters*, 2012, 88: 40-42.
- [47] SCHEFFLER M, COLOMBO P. Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications[J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2006(9): 8.
- [48] BINKS B P. Particles as surfactants: similarities and differences[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2002, 7(1/2): 21-41.
- [49] ZHANG H B, YAN Q, ZHENG W G, et al. Tough graphene-polymer microcellular foams for electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(3): 918-924.
- [50] TRAN M P, DETREMBLEUR C, ALEXANDRE M, et al. The influence of foam morphology of multi-walled carbon nanotubes/poly(methyl methacrylate) nanocomposites on electrical conductivity [J]. *Polymer*, 2013, 54(13): 3261-3270.
- [51] MA H L, ZHANG H B, LI X, et al. The effect of surface chemistry of graphene on cellular structures and electrical properties of polycarbonate nanocomposite foams[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(12): 4697-4703.
- [52] HUNTER T N, PUGH R J, FRANKS G V, et al. The role of particles in stabilising foams and emulsions[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2008, 137(2): 57-81.
- [53] DUAN S, TAO Y, LEI H, et al. Enhanced out-of-plane compressive strength and energy absorption of 3D printed square and hexagonal honeycombs with variable-thickness cell edges[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 18: 9-18.
- [54] KUCEWICZ M, BARANOWSKI P, MALACHOWSKI J. A method of failure modeling for 3D printed cellular structures[J]. *Materials & Design*, 2019, 174: 107802.
- [55] DIXON P G, MUTH J T, XIAO X, et al. 3D printed structures for modeling the Young's modulus of bamboo parenchyma[J]. *Acta Biomaterialia*, 2018, 68: 90-98.
- [56] WEN P, SUN Y, LI H, et al. A highly active three-dimensional Z-scheme nO/Au/g-C₃N₄ photocathode for efficient photoelectrochemical water splitting[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 263.
- [57] SUN C, TIAN P, TIAN J, et al. Magnetic mesoporous gamma-Al₂O₃/ZnFe₂O₄ micro-bowls realizing enhanced adsorption, separation and recycle performance towards waste water[J]. *Microporous & Mesoporous Materials: the Official Journal of the International Zeolite Association*, 2018, 270: 120-126.
- [58] KANG W, WANG Y, CAO D, et al. In-situ transformation into MoSe₂/MoO₃ heterogeneous nanostructures with enhanced electrochemical performance as anode material for sodium ion battery[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 410-418.
- [59] YAN T, TIAN J, GUAN W, et al. Ultra-low loading of Ag₃PO₄ on hierarchical In₂S₃ microspheres to improve the photocatalytic performance: the cocatalytic effect of Ag and Ag₃PO₄[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 207: 84-94.
- [60] YRJALA K, LOPEZ-ECHARTEA E. Structure and function of biochar in remediation and as carrier of microbes[J]. *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, 2021, 7: 263-294.
- [61] ARNETH A, BARBOSA H, BENTON T, et al. Summary for policymakers: in IPCC special report on climate change and land[M]. *Climate Change and Land*, 2019.
- [62] TRIPATHI M, SAHU J N, GANESAN P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 467-481.