

文章编号: 1008-9357(2026)03-0263-18

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20251225001

3D 打印抗冲击高分子材料的研究进展

蒋晨宇¹, 孙 旭¹, 崔晨晖², 徐海升¹, 焦 佼², 张彦峰²

(1. 西安石油大学化学化工学院, 西安 710065; 2. 西安交通大学化学学院,
西安市可持续高分子重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 在当前工业制造与科技快速发展的环境下,对兼具轻量化与高抗冲击性能的材料需求日益迫切。抗冲击高分子材料作为载荷结构的关键组成部分,其设计与制备技术的突破对提升产品的安全性及可靠性具有重要意义。3D 打印技术凭借其高精度与高度定制化的特点,能够制造出传统成型工艺难以实现的复杂结构,通过该技术制备具有优异能量耗散特性的高分子微结构,可有效提升终端产品的冲击防护性能。本文综述了 3D 打印抗冲击高分子材料的研究进展,介绍了可用于增材制造的抗冲击高分子材料的主要类别与性能特征,并探讨了主流 3D 打印技术在提升材料抗冲击性能方面的工艺优势。在此基础上分析了 3D 打印抗冲击高分子材料在汽车工业、航空航天、电子以及生物医药等领域中的应用前景。最后指出 3D 打印高分子材料在应用方面展现出显著潜力的同时仍存在一些技术挑战,这些问题的解决需要多个学科的深入探索和持续创新。

关键词: 3D 打印; 抗冲击; 高分子材料; 复合材料; 增材制造

中图分类号: TQ322.4

文献标志码: A

Research Progress in 3D Printed Impact-Resistant Polymer Materials

JIANG Chenyu¹, SUN Xu¹, CUI Chenhui², XU Haisheng¹, JIAO Jiao², ZHANG Yanfeng²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Sustainable Polymer Materials, School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the current environment of rapid industrial manufacturing and technological development, there is an increasingly urgent demand for materials that combine lightweight properties with high impact resistance. As a key component of load-bearing structures, the design and preparation technology of impact-resistant polymer materials plays a significant role in enhancing the safety and reliability of products. 3D printing technology, with its high precision and customizability, can produce complex structures unattainable through traditional molding processes. By using this technology to fabricate polymer-based structures with high energy absorption properties, the impact resistance of final products can be further enhanced. We review the research progress in 3D printed impact-resistant polymer materials, outline the basic types and characteristics of such materials suitable for additive manufacturing, and discuss the manufacturing advantages of mainstream 3D printing technologies in achieving material impact resistance. Furthermore, we analyze the application

收稿日期: 2025-12-25

基金项目: 国家自然科学基金 (U2530222; 52403167; 52473080)

作者简介: 蒋晨宇(2000—),男,陕西西安人,硕士,主要研究方向为抗冲击 3D 打印高分子材料。E-mail: jiangchenyu2011@163.com

通信联系人: 徐海升, E-mail: xhs74@xsyu.edu.cn; 张彦峰, E-mail: yanfengzhang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 蒋晨宇, 孙 旭, 崔晨晖, 徐海升, 焦 佼, 张彦峰. 3D 打印抗冲击高分子材料的研究进展 [J]. 功能高分子学报, 2026, 39(3): 263-280.

Citation: JIANG Chenyu, SUN Xu, CUI Chenhui, XU Haisheng, JIAO Jiao, ZHANG Yanfeng. Research Progress in 3D Printed Impact-Resistant Polymer Materials [J]. Journal of Functional Polymers, 2026, 39(3): 263-280.

prospects of 3D printed impact-resistant polymer materials in fields such as the automotive, aerospace, electronics, and biomedical sectors. Finally, we point out that while 3D printed polymer materials demonstrate significant potential in practical applications, certain technical challenges remain. Addressing these issues requires in-depth exploration and continuous innovation across multiple disciplines.

Key words: 3D printing; impact resistance; polymer material; composite material; additive manufacturing

随着现代工业的飞速发展,在航空航天、汽车安全、精密电子及生物医疗等重要领域,对具备缓冲、减震、阻尼等性能的抗冲击材料提出了轻量化、高强度与高韧性兼备的严苛要求。传统抗冲击材料经历了从金属、皮革等天然材料到合金、橡胶等合成材料,再到如今纤维/颗粒增强复合材料、凝胶和超分子材料的演进过程^[1-5]。这些材料虽经长期发展,但在结构一体化、设计自由度和性能可控性方面仍面临局限,难以完全满足前沿领域的需求。在此背景下,兼具轻量化、高力学强度和优异抗冲击性能的高分子材料受到广泛关注,然而,如何实现其复杂结构与性能的可控制备,仍是关键挑战。3D 打印技术的兴起为该类材料的制备提供了新路径,并逐渐成为研究热点。与传统方法相比,3D 打印不但能够实现复杂几何结构高精度制造,而且支持多材料集成与梯度设计,从而为制备高性能、轻量化、功能定制的抗冲击高分子材料开辟了新的途径。

目前,针对 3D 打印抗冲击高分子材料的研究主要集中于材料体系研发优化、3D 打印工艺调控及打印材料性能提升等方面,4 种主流的 3D 打印技术为熔融沉积成型(FDM)、立体光刻(SLA)/数字光处理(DLP)、选择性激光烧结(SLS)和直写成型(DIW)^[6,7]。虽然对于 3D 打印抗冲击高分子材料的相关研究较多,但仍然存在不少难题,如在提高材料抗冲击性能的同时兼顾材料可打印性、耐热性和耐久性的优化等问题。本文通过系统梳理适用于 3D 打印的多种抗冲击高分子材料体系,以及 4 种目前主流的高分子材料 3D 打印技术,探讨了不同材料特性与特定打印工艺之间的匹配关系及其面临的挑战。期望此文为研究人员系统理解面向抗冲击应用的 3D 打印高分子材料设计提供参考,并指出通过跨尺度协同创新实现性能突破的可能路径。

1 抗冲击高分子材料的分类

当前,适用于增材制造的高分子材料体系发展迅速、种类繁多。本文根据材料本征抗冲击特性和打印工艺适应性对主流的热塑性高分子(聚丙烯(PP)、聚碳酸酯(PC)、热塑性聚氨酯(TPU)),热固性高分子(环氧树脂(EP)、聚双环戊二烯(PDCPD)和热固性聚氨酯(PU)),超分子聚合物材料及水凝胶类材料等进行综述。这些材料本身具备或在改性后可呈现突出的抗冲击性能(表 1)^[7-14],并且已有较充分的 3D 打印工艺研究作为支撑。目前,有关聚醚酰亚胺(PEI)、聚醚醚酮(PEEK)等高性能工程塑料的 3D 打印技术也已取得显著进展,而针对其抗冲击性能的 3D 打印特异性优化,尚未形成系统性的研究总结,因此未将其作为独立章节展开详述,该研究方向兼具理论价值与应用潜力,可作为后续综述的核心议题进行深入探讨。

1.1 热塑性高分子

热塑性高分子材料因其可熔融加工、易回收及性能可调等特点,在 3D 打印抗冲击体系中具有重要地位,尤其适用于 FDM 等增材制造工艺,体现出良好的成型适应性和应用前景。在应用方面,不同类别的热塑性材料具有不同的功能特征。PC 具有优异的韧性与耐热性,适用于制造高负荷结构件;TPU 则以其高弹性和能量吸收能力,常用于柔性缓冲与防护部件;PP 凭借良好的韧性和抗疲劳性能,适用于需反复形变的卡扣、铰链等场合。此外,在高温、高力学负荷等极端环境下,PEEK 和 PEI 等高性能工程塑料表现出卓越的综合性能(包括高强度、高耐热性与抗疲劳性),可用于航空航天、医疗植入等领域的承载部件。聚甲基丙烯酸甲酯

表 1 不同种类高分子材料的抗冲击性能对比
Table 1 Comparison of impact resistance properties of different types of polymer materials

Sample	Impact strength/(kJ·m ⁻²)
TPU	0.03~12 ^[7]
PP	2~2.5 ^[8-9]
PC	53~60 ^[10-11]
EP	3~28 ^[12-13]
PDCPD	2~13 ^[14]
PU	1~8

(PMMA)等材料也可通过复合增强等方式改善其抗冲击性能,从而拓展其适用范围。总体而言,热塑性高分子在实现轻量化、定制化、高性能抗冲击构件方面发挥着关键作用。

1.1.1 PP PP是一种由丙烯单体通过聚合反应制得的热塑性树脂,属于聚烯烃材料中最主要的品种之一,其分子结构规整,具有良好的化学稳定性、电绝缘性、低密度和易加工等特性。由于PP本身为线性分子结构,其耐热性、机械强度和抗蠕变性能在高温或长期受力环境下仍显不足。通过交联改性可显著提高PP材料的力学性能。PP的交联改性方法主要有辐射交联法(利用高能射线的能量来引发PP分子链间的交联反应)和化学交联法(通过添加特定的化学试剂,在加热条件下引发PP的交联反应),然而,上述交联过程较繁琐,成本较高,且会降低材料的透明度及熔融状态下的流动性。

1.1.2 PC PC是分子链含有碳酸酯基的高聚物,具有优异的抗冲击性能、高透明度、优良的耐热性以及尺寸稳定性,然而,PC存在分子链刚性强、熔体流动性差、加工温度高、制品易产生内应力等缺点,容易出现应力开裂等问题。为克服这些缺陷,提升PC的综合力学性能,程慧强等^[15]采用碳纳米管、纳米二氧化硅等无机刚性粒子或聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)等有机粒子进行共混改性,这也是常用的增韧途径,它们在提高韧性时可以协同增强刚性、耐热性或流动性。改性后的PC具有轻质、高强、高韧的特点,被广泛应用于高端制造中,并在FDM中得到了应用,为制造复杂结构的功能性工程部件开辟了新途径。

1.1.3 TPU TPU是一种线性嵌段共聚物,结合了橡胶的高弹性和塑料的易加工性,凭借高强度、高弹性、良好的柔韧性和冲击吸收能力,在3D打印缓冲材料中拥有巨大市场。

1.2 热固性高分子

热固性高分子材料通过不可逆交联形成三维网络结构,具备优异的力学强度、耐热性和尺寸稳定性,在高端抗冲击应用中具有重要价值。以EP、PDCPD和PU为代表,该类材料可通过橡胶增韧、动态共价键引入、纳米复合等方式改善其脆性并增强能量耗散能力。在3D打印方面,热固性材料主要适配直写成型(DIW)和光固化工艺,但交联特性也为其打印过程带来了流动性控制、层间结合与难以回收等挑战。当前研究正致力于发展可重塑、可回收的智能热固性体系,推动其向绿色化、功能集成化方向演进^[16-18],以满足航空航天、电子封装等领域对高性能与可持续性兼具的抗冲击部件的需求。

1.2.1 EP EP是一类分子中含有2个或2个以上环氧基团的热固性高分子预聚物的统称,通常由环氧氯丙烷与醇/酚类物质反应制得。固化后的环氧树脂以优异的力学性能、出色的黏附力、良好的绝缘性、耐腐蚀性及加工性能而著称^[19-21],但固有的质脆、耐候性一般等缺陷限制了其进一步应用,因此对EP增韧改性成为研究核心。在3D打印方面,通过DIW工艺,加入纳米碳纤维或石墨烯等填充物,协同调控流变及性能,即可得到具有多级孔结构的轻质高强型部件以改善其电磁屏蔽性能^[21-22]与力学性能,也可以获得具有形状记忆、导电、导热等功能材料,赋予材料对外界刺激产生反应的“智能”。此外,还可以通过将粉碎后废弃制品作为打印原料来实现可循环的3D打印^[23-24],这样不仅能实现产品自身的性能要求,还能减少环境污染,并且还能使产品得以循环使用。

1.2.2 PDCPD PDCPD是一种通过双环戊二烯(DCPD)的开环易位聚合制得的热固性工程塑料。该材料凭借其高刚性、高韧性、低密度、优异的耐化学腐蚀性和良好的介电性能,在汽车大型部件、工程机械罩体等领域已有一定的应用基础。然而,PDCPD的表面疏水性强、阻燃性差、热稳定性不足以及固化后难以回收和存在残留气味等问题,限制了其在高性能领域的应用^[25-30]。为了突破以上限制,通过对PDCPD共聚改性、复合增强以及工艺优化,赋予PDCPD其他优异功能。在力学性能调控方面,吕泉泉^[26]通过与石竹烯等单体共聚,可实现材料性能从高强高韧到高弹性的可设计性转变(图1(a))。这一转变与其网络结构的变化密切相关:随着石竹烯含量增加,材料的玻璃化转变温度(T_g)明显下降(图1(b)),这主要是由于网络中引入的力响应基团在受力时能产生非破坏性的动态响应,从而有效耗散能量,实现增韧,然而当石竹烯含量较低或DCPD含量过高时,网络结构变化有限,增韧效果则不明显^[26]。静态拉伸实验结果表明,当石竹烯的体积分数高于30%时,材料表现出显著的弹性特征,断裂伸长率可升至1160%(图1(c))。

1.2.3 PU PU是一类通过不可逆化学反应固化成型的高分子材料,兼具优异的力学性能、耐磨性、耐高温性与耐化学腐蚀性,已被广泛应用于建筑、电子封装、汽车制造及医疗器械等诸多领域^[31-35]。然而,该材料的制备依赖化石基原料,且交联结构稳定不可回收,由此引发了显著的资源消耗与环境污染问题。针对上述

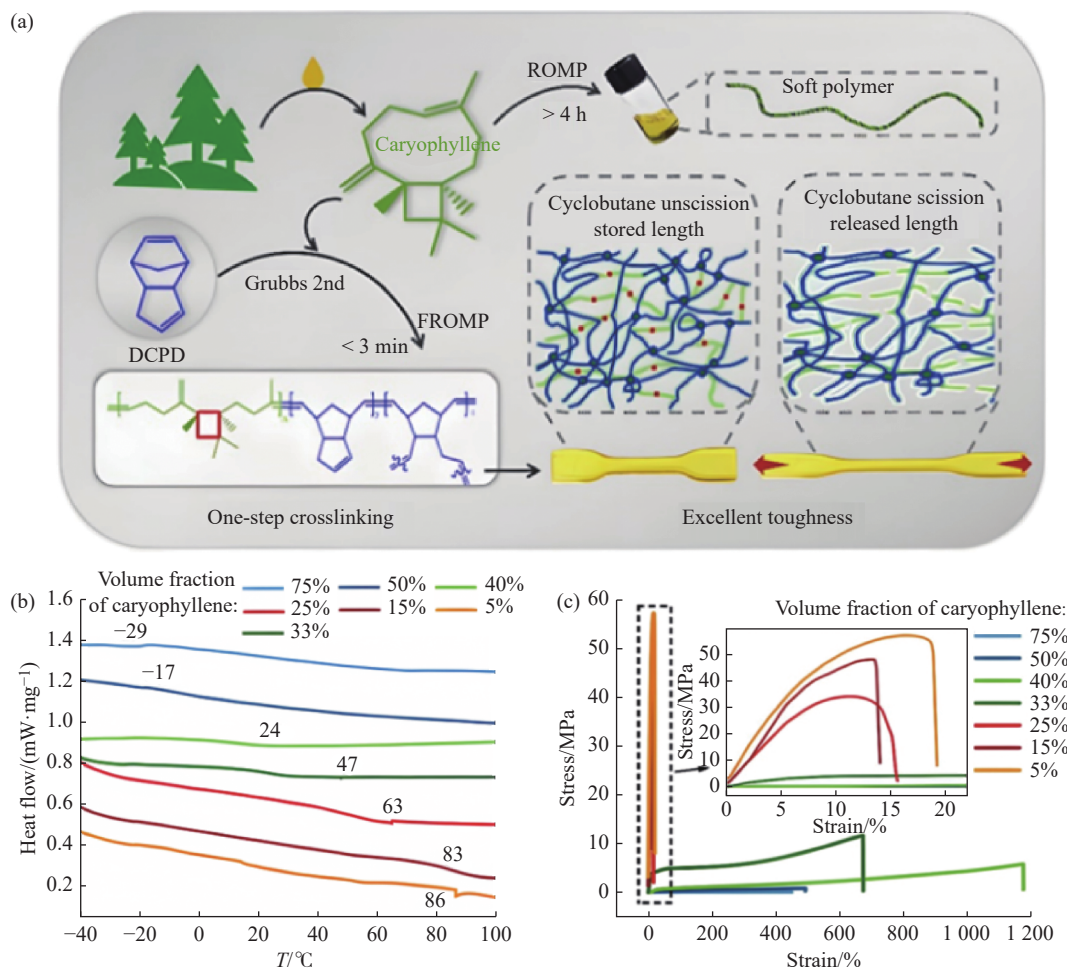


图 1 (a) 含力响应基团的增韧 PDCPD 材料的制备; (b) 通过 DSC 测试共聚物的 T_g ; (c) 石竹烯含量对力学性能的影响^[26]
 Fig. 1 (a) Preparation of toughened PDCPD materials incorporating force-responsive moieties; (b) T_g of copolymers determined by DSC; (c) Effect of caryophyllene content on mechanical properties^[26]

瓶颈,当前相关研究主要围绕绿色化与可循环化两大方向展开,在结构设计层面,通过引入动态共价键构建可逆交联网络,从而有效解决 PU 材料难以降解与回收的难题。研究人员围绕 PU 主链中的氨基甲酸酯键,利用其动态可逆的化学特征、动态网状结构以及可控性的特点来制备适用于抗冲击的防护材料。该体系通过调控硬段嵌入比例,可获得从高弹性到高硬度的连续性能,其内部丰富的氢键网络在外部冲击载荷下通过可逆断裂有效耗散能量,而微相分离形成的硬域则能诱导裂纹偏转与塑性变形,协同提升材料的抗冲击韧性。基于氨基甲酸酯键动态交换的特点,PU 兼具热重塑与自修复功能,可显著延长防护材料的使用寿命。结合闭环回收理念,该类材料为构建高性能、长寿命、可循环的先进抗冲击防护体系,提供了一种优异的解决方案。

1.3 超分子聚合物材料

超分子聚合物材料依托氢键、配位键等动态非共价作用构建,其核心优势在于通过动态键的可逆断裂与重组高效耗散冲击能量,并赋予材料应变率敏感行为与自修复能力,该领域已发展出基于多重氢键、离子键、配位键、硼酸酯键、盐桥作用的聚合物体系^[36-41],并通过多键协同策略构建环境自适应智能材料,实现了抗冲击材料从被动抵抗向主动适应的转变。然而,这一优势也带来了环境敏感性的固有挑战:氢键易受湿度干扰,配位键强度受温度调控,且动态网络存在蠕变倾向,这些因素均会影响材料性能的长期稳定性。在实际应用时,特别是在 3D 打印等制造工艺中,如何通过分子设计协同调控动态键的响应动力学与材料流变行为,成为将材料本征优势转化为具备实际应用价值制品的关键。

1.3.1 基于多重氢键的动态交联聚合物 由于超分子聚合物材料中存在动态可逆的非共价作用力,其呈现出较强的刺激响应性和力学适应能力。上海交通大学颜徐才课题组^[42]通过聚丙二醇-聚乙二醇-聚丙二醇(PPG-PEG-PPG)柔性三嵌段共聚物与四重氢键(UPy)二聚体的长程堆叠组装作用,开发出一种具有软硬可切换能力的新型仿生材料。它模仿了海参真皮层的结构,实现了优异的抗冲击防护性能。在未来智能防护服、人机

交互系统以及电子产品防护领域,该仿生材料具有重要的应用价值。然而,这种材料也有一些不足之处,作为主要依靠动态非共价键作用的软材料,其绝对力学强度仍无法与刚性工程材料媲美。核心的四重氢键单元对湿度、温度等环境因素较为敏感,可能影响其在复杂工况下的长期稳定性与性能表现。

1.3.2 聚硼硅氧烷(PBDMS) PBDMS 是一类在硅氧主链中引入硼原子的特殊高分子材料。该材料在低应变率下呈现类流体行为;在高应变率或冲击载荷下则发生冲击硬化,模量大幅增加,从而提升能量吸收与冲击防护能力。该特性源于其分子链中硼(B)与氧(O)之间形成的动态可逆配位键(B:O)及可逆的硼酸酯交换,这类动态键合在受到高频剪切或冲击时存在着因弛豫时间不匹配而导致的网络瞬时强化,表现出显著的应变率敏感性,这种动态网络赋予了 PBDMS 卓越的抗冲击性能,为设计新一代冲击防护材料提供了原理验证。

提高体系中三元硼酸酯含量可增强其网络稳定性与耐水解性,但交联密度存在饱和阈值,超过后模量增长趋缓,且可能减弱其固-液转变幅度^[43]。在剪切稀化中,随着剪切速率增加,流体中的颗粒在流动方向排列更为有序,形成层状结构,使流动阻力降低、黏度下降;而在剪切增稠中,当剪切速率超过临界值,颗粒之间的水力作用占主导,形成瞬时的“水簇”结构,颗粒流动路径受阻,导致流体黏度急剧上升、迅速硬化^[44](图 2(a))。Lee 等^[45]研究了一种基于动态共价键的聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料,其在冲击波能量耗散方面表现出卓越性能。研究表明,通过硼酸酯键构建的动态聚合物网络(图 2(b)),其能量耗散效率与动态键密度呈正相关,最佳样品可使冲击波峰值压力降低 80%~90%,显著优于传统聚脲(PUrea)材料(图 2(c, d))。该性能源于冲击载荷下动态共价键的可逆断裂与重组过程,这一机制不仅实现了高效的能量耗散,还赋予材料室温自修复能力和可重复使用的特性。

聚硼硅氧烷凭借其动态可逆键合机制、可调控的松弛行为及其在复合材料中的界面增强作用,在柔性防护、减震及能量管理领域具有一定的应用潜力^[46],但其纯材料力学性能较低,且性能易受环境(湿度、温度)

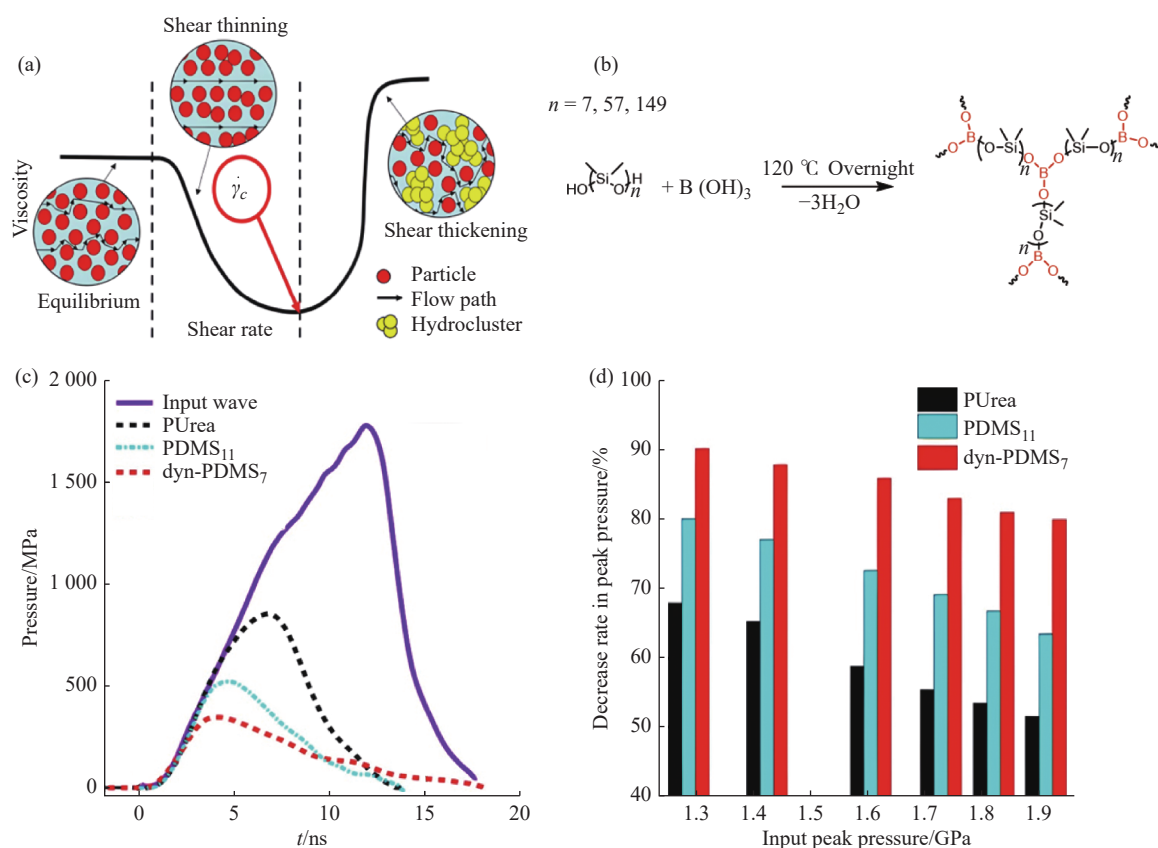


图 2 (a) 剪切增稠和剪切变稀机理^[44]; (b) 一种通过硼酸-二醇络合形成的、由 PDMS 链段与动态键构成的动态网络化学结构^[45]; (c) 动态 PDMS 橡胶的冲击波耗散性能^[45]; (d) 动态 PDMS 与 PUrea 的峰值压力降低率对比^[45]

Fig. 2 (a) Mechanisms of shear thickening and shear thinning^[44]; (b) Chemical structure of a dynamic network with PDMS strands and dynamic bonds made via boric acid-diol complexation^[45]; (c) Shock wave energy dissipation performance of dynamic PDMS rubber^[45]; (d) Comparison of peak pressure reduction rate between dynamic PDMS and PUrea^[45]

影响;其剪切增稠效应有速率阈值,对极高速(如弹道)冲击的防护效能可能较为有限。

1.4 水凝胶类材料

水凝胶是一类具有三维网络结构的亲水性高分子材料,由于其力学性能可调,因此在许多领域得到广泛应用。施晓文团队^[47]受珍珠母与骨骼等天然材料的启发,通过巧妙的仿生设计,开发了一种基于牺牲胶束辅助取向组装的高性能抗冲水凝胶薄膜。该研究利用定向冷冻技术引导胶束与聚合物形成高度有序的各向异性网络,同时引入可逆的牺牲胶束作为能量耗散单元,使材料在受力时能有效缓冲并耗散冲击能量,从而同时实现了远超传统水凝胶的强度、韧性及抗疲劳性。这一特性使其在软体机器人、生物电子及生物医学等领域展现出巨大潜力^[48]。

南方科技大学刘吉课题组^[49]受天然珍珠母等生物材料的启发,提出了一种巧妙而高效的仿生策略。他们以聚乙烯醇(PVA)溶液为原料,通过双向冷冻铸造技术,成功构建出具有高度有序、紧密堆叠的二维片层结构,这种结构使水凝胶获得了高强度和韧性(图3(a))。当承受高速冲击时,其片层结构能通过层间滑动、氢键网络的动态断裂与重组等协同机制,高效地耗散大量冲击能量,从而展现出卓越的抗冲击性能(图3(b))。他们对比了二维聚乙烯醇/氧化石墨烯(2D PVA/GO)水凝胶、龙虾壳及常规坚韧水凝胶在多项关键力学与功能性能上的表现。结果表明,2D PVA/GO水凝胶在抗弹道冲击、韧性、机械强度、抗疲劳性及穿刺能量吸收等

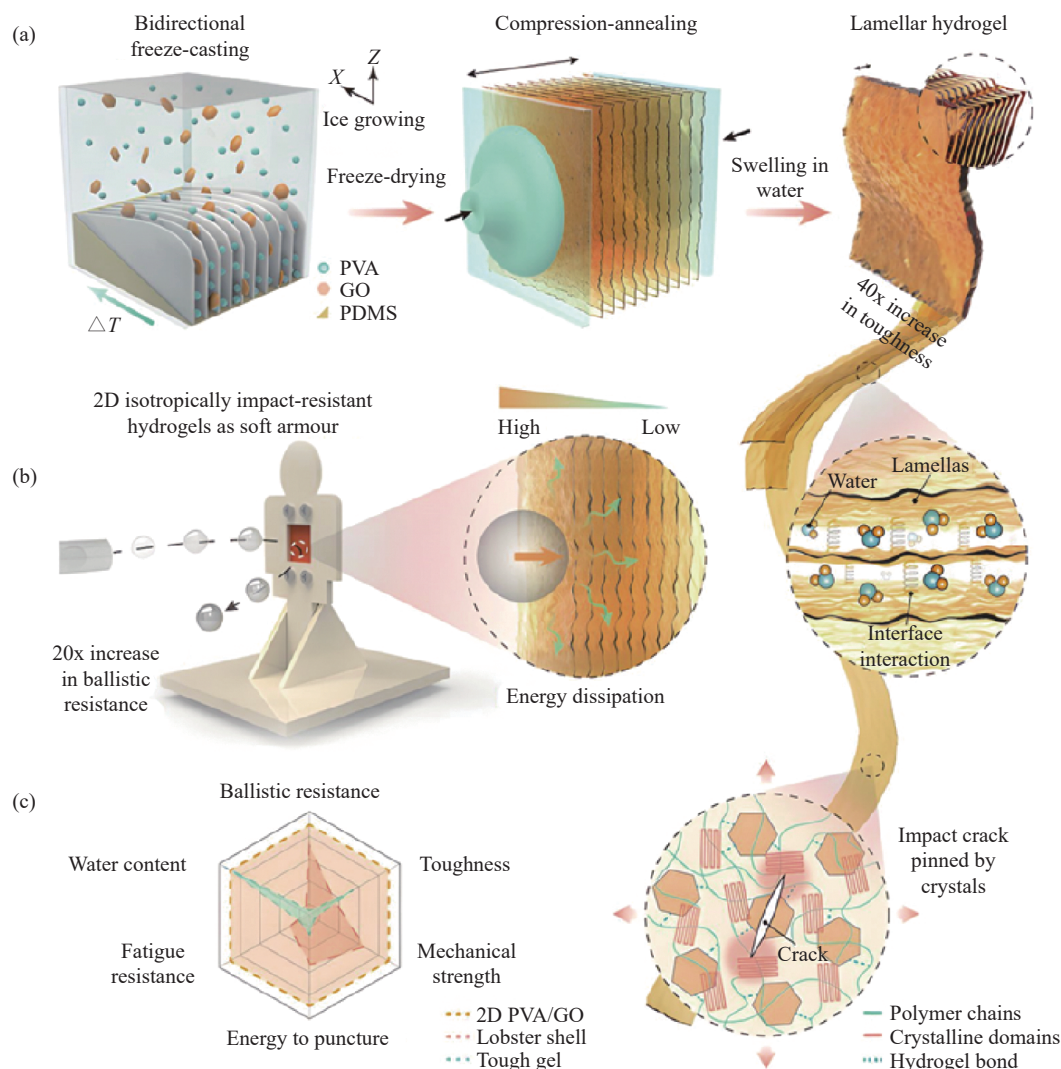


图3 (a) 采用两步法制备具有二维层状结构水凝胶的示意图; (b) 二维层状水凝胶潜在的软装甲防护应用示意图; (c) 二维 PVA/GO 水凝胶、龙虾壳和坚韧水凝胶的雷达对比图^[49]

Fig. 3 (a) Schematic showing the fabrication of hydrogels with 2D lamellar structure deploying a two-step approach; (b) Schematic illustrating the potential soft armour-like protection application of 2D lamellar hydrogels; (c) A radar map comparing the performance parameters of 2D PVA/GO hydrogels, lobster shell and tough hydrogel samples^[49]

方面均展现出显著优势,其雷达图覆盖面积远大于龙虾壳和传统坚韧凝胶,说明该材料具有更均衡且突出的综合性能,充分证明了该仿生策略在制备综合性能卓越的抗冲击水凝胶方面的有效性(图3(c))。

溶剂在凝胶内和凝胶外的动态转移容易引起凝胶的干湿失水和溶胀,严重影响其稳定性,成为凝胶等高分子材料难以大规模应用的障碍。目前,研究人员已经提出多种策略来改善凝胶的稳定性,但是凝胶中溶剂含量偏离聚合物平衡溶胀状态,溶剂转移难以避免,要有效控制凝胶的溶剂含量并保持凝胶的高稳定性,核心问题是抑制溶剂转移的动力学过程^[50]。张彦峰课题组^[51]利用溶剂分子与交联网络结构的体积不匹配导致的体积阻碍来限制溶剂转移的凝胶材料,成功限制了内部溶剂在凝胶中的迁移。当材料受到冲击时,这种效应能极大限制并延缓溶剂分子在聚合物网络中的迁移,迫使冲击能量无法通过溶剂的快速泄出而释放,转而从溶剂分子与网络之间剧烈的黏性摩擦和网络的弹性形变被高效地耗散为热能。这种“锁住溶剂”的策略使该材料获得了卓越的抗冲击性能。

1.5 树脂基复合材料

树脂基复合材料以有机聚合物树脂为连续相(基体),通过引入纤维或颗粒等作为分散相(增强体)复合而成,其核心优势在于通过增强相的协同作用实现性能的超越与定制化。在纤维增强体系中,高强度、高模量的纤维作为主要承载体嵌入树脂基体,通过高效的应力传递与分散效应,可显著提升材料的比强度、比刚度及抗冲击性能^[52],使其成为航空航天主承力结构和弹道防护装甲的关键材料。然而,在颗粒增强体系中,主要依托微纳米尺度的颗粒填料对基体进行改性,以此改善材料的硬度、耐磨性、导热性或阻燃性。该增强机制的核心在于阻碍基体内部的位错运动与裂纹扩展,因此颗粒增强复合材料常被应用于耐高温部件、耐磨涂层及功能化电子封装材料的制造。

纤维增强复合材料的吸能机制主要通过拉伸变形实现。赵云等^[53]研究表明,纤维增强复合材料的抗冲击性能依赖于纤维的拉伸断裂与层间分层的协同,大部分冲击动能主要由纤维的宏观拉伸变形与断裂吸收,而伴随产生的层间分层这一关键损伤模式,虽表现为破坏,实则能有效消除应力集中,促使更大范围的材料参与背凸变形,从而协同耗散能量(图4(a, b))。此外,合理的增强体结构设计对于调控上述损伤模式、提高

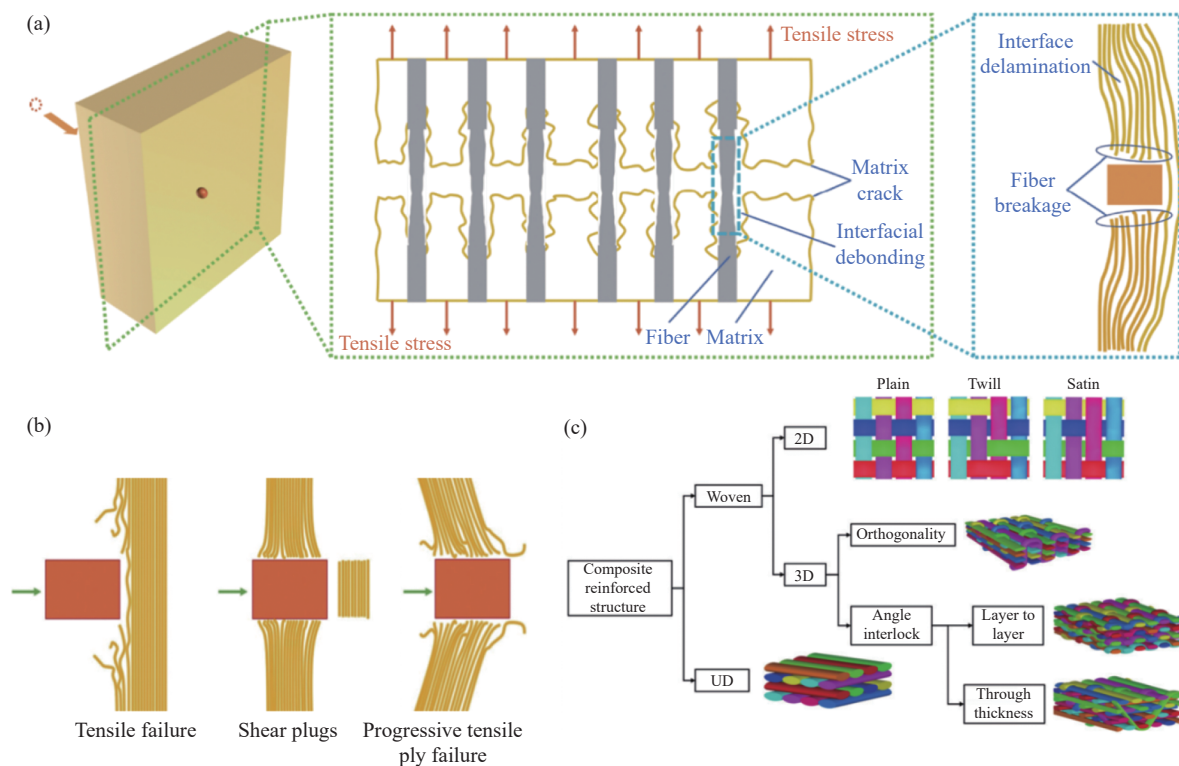


图4 (a) 连续纤维增强环氧树脂基复合材料的冲击破坏示意图; (b) 纤维增强复合材料的3种失效机制示意图; (c) 常用复合材料纤维增强体结构分类^[53]

Fig. 4 (a) Schematic diagram of impact damage of continuous fiber-reinforced epoxy resin matrix composites; (b) Three failure mechanisms of fiber-reinforced composites; (c) Classification of common composite material fiber reinforcement structures^[53]

材料的抗冲击能力至关重要。增强体结构是决定复合材料整体性与失效形式的核心因素。单向铺层织物能最大化面内力学性能与应力波传递效率,但层间性能弱,易发生大面积分层;二维编织织物通过纱线交织提升了层内整体性,改善了抗分层能力;而三维编织织物则通过引入厚度方向的纤维连接,极大地增强了层间性能,能最有效地抑制有害分层,使结构在冲击下保持最佳完整性(图4(c))。这些结构特性直接影响材料的最终性能表现。

谈丽姿等^[54]研究表明,连续纤维增强热塑性复合材料的抗冲击性能受纤维排布方式影响显著。当纤维以 0° 方向填充时,抗冲击强度可达 197.54 kJ/m^2 ,约为 90° 填充方式的5倍。在叠层顺序方面,包裹式堆叠的抗冲击性能最优,强度达到 230.56 kJ/m^2 ,较均匀分布试样提高16.7%。同时,纤维垂直堆叠方向的表现普遍优于水平方向,最高强度为 282.76 kJ/m^2 。这说明通过优化纤维排布可有效提高材料韧性,但高性能纤维密度较大,会增加整体质量,且对纤维排列与树脂浸润的控制要求较高,使得加工工艺更为复杂。

在基体材料中添加颗粒填料,能够有效改善其耐磨性、抗冲击性、硬度及耐高温性等综合性能。王晓芳等^[55]在树脂基材料中添加了二氧化硅(SiO_2)陶瓷颗粒,通过调整 SiO_2 的质量分数(0%、2%、4%、6%),系统测试了不同配方下材料的摩擦系数、磨损率、硬度及冲击强度等性能。适量添加 SiO_2 颗粒能显著提高材料的高温摩擦稳定性、降低磨损率(图5(a, b)),并在一定程度上提高其硬度和抗冲击性能,其中 SiO_2 质量分数为4%时材料的综合性能最优,摩擦系数保持在0.32以上,平均磨损率较低,为新型高性能摩擦材料的开发提供了实验依据和配方参考。在抗冲击性能方面,通过摆锤冲击试验测定了不同试样的冲击强度。未添加 SiO_2 陶瓷颗粒的基础试样的平均冲击强度为 0.762 kJ/m^2 ;随着 SiO_2 用量的增加,洛氏硬度提高(图5(c)),冲击强度也呈现升高的趋势(图5(d))。这表明 SiO_2 陶瓷颗粒的引入有效增强了树脂基摩擦材料的韧性,其冲击强度随颗粒含量增加而逐步升高,反映出材料抗动态载荷能力的提升。

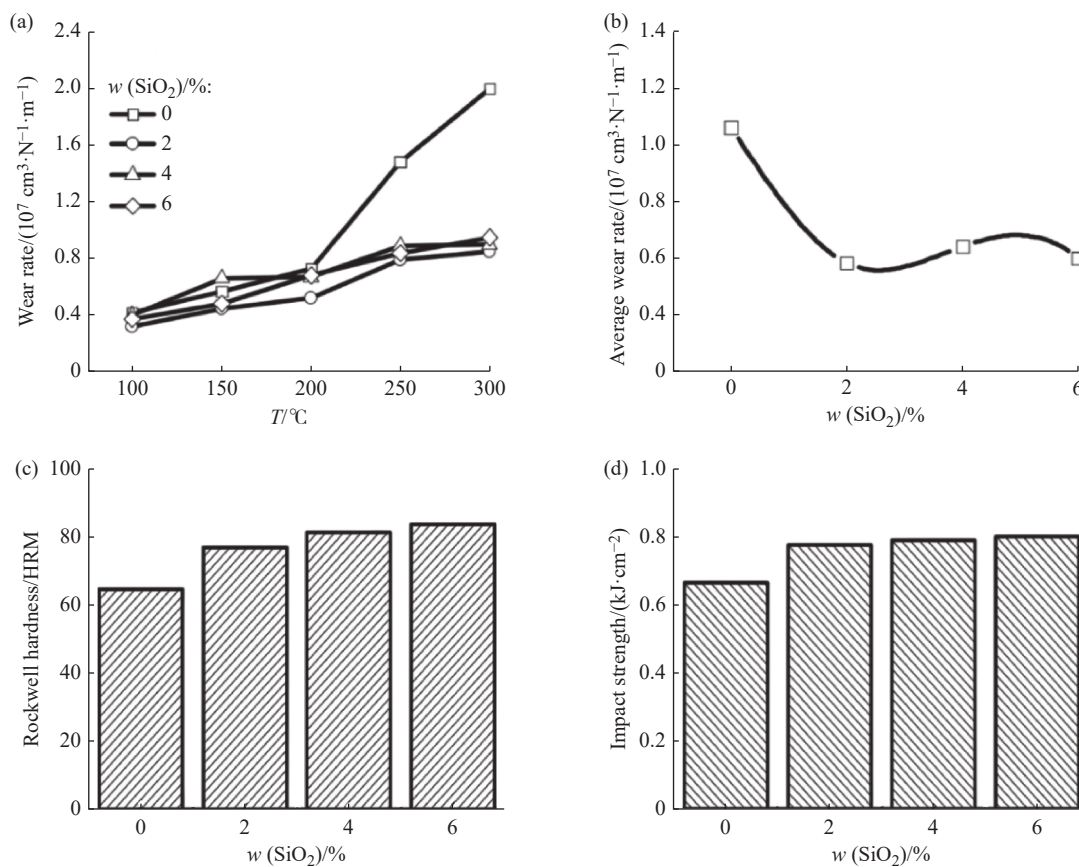


图5 (a) 试样磨损率随温度的变化曲线; (b) 平均磨损率随 $w(\text{SiO}_2)$ 的变化曲线; (c) 洛氏硬度随 $w(\text{SiO}_2)$ 的变化关系; (d) 抗冲击强度随 $w(\text{SiO}_2)$ 的变化关系^[55]

Fig. 5 (a) Variation curves of wear rate with temperature for samples; (b) Variation curve of average wear rate with $w(\text{SiO}_2)$; (c) Relationships between rockwell hardness with $w(\text{SiO}_2)$; (d) Relationships between impact strength with $w(\text{SiO}_2)$ ^[55]

科研人员也将复合材料与 3D 打印技术相结合来提升材料性能。通过向基体中引入增强相(如纤维颗粒、纳米填料、弹性体等),可进一步提高材料的力学性能;或在改善抗冲击性能的同时,赋予材料导电、自修复或环境响应等功能特性^[30, 56]。这都有利于拓展 3D 打印高分子材料的应用范围,也为高性能结构件和智能材料的制备提供了新途径。

2 3D 打印技术在高分子材料中的应用

根据不同的 3D 打印原理与材料特性,目前主流的高分子打印材料主要包括工程塑料、光敏树脂、热塑性弹性体以及生物医用材料等^[57-60],这些材料的适用性与打印成品的最终性能,与其所适配的 3D 打印工艺密切相关。目前,主流 3D 打印技术的打印工艺原理如图 6 所示。

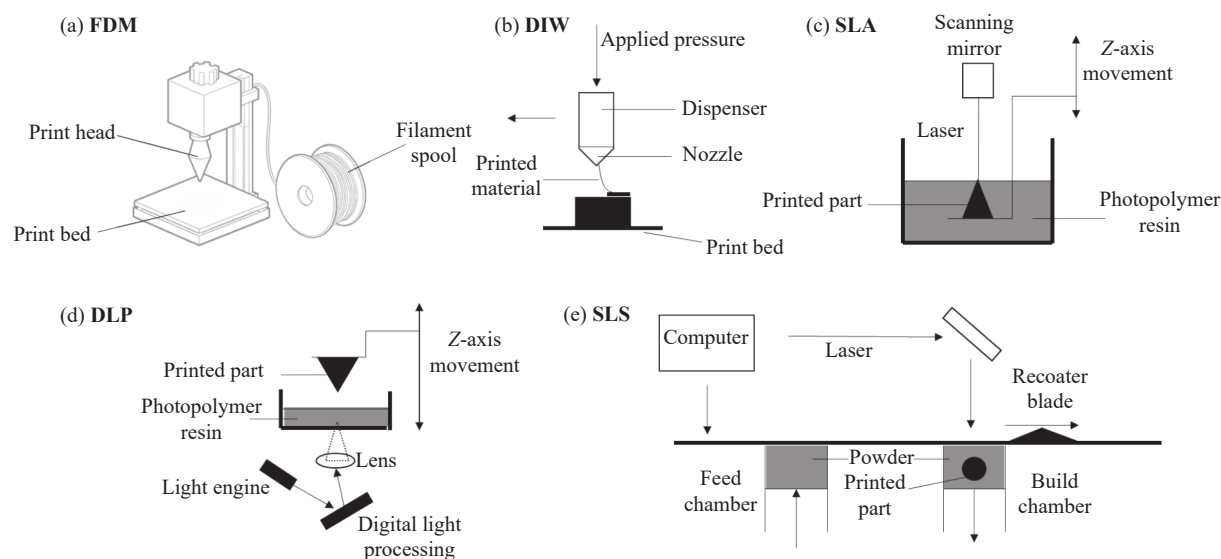


图 6 不同 3D 打印工艺原理的示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of different 3D printing operating principles

2.1 FDM

FDM 的原理是将热塑性材料以丝状供给,在打印头内被加热熔化,计算机控制打印头沿零件截面轮廓和填充轨迹运动,同时将熔融材料挤出并沉积在成型平台或前一沉积层上,挤出的材料迅速冷却固化,并与周围材料黏结,通过逐层堆积的方式最终形成三维实体。该工艺适用的材料有 ABS、PC、TPU 等。在成型过程中,对于悬垂结构需要设计与工件一体成型或可剥离的支撑结构。

李莎莎^[6]针对 PEEK 和 PEI 的 FDM 打印工艺,对打印温度、打印方向等参数进行了优化,还通过有限元仿真模拟了打印过程中材料的流动行为和温度场分布,合理的喷头设计可以提高材料流动性,降低内部缺陷,从而改善抗冲击性能。总体而言,FDM 技术由于设备成本低、操作简便而成为 3D 打印中应用最广泛的方法之一。然而,FDM 打印面临诸多挑战,包括高温打印需求、材料流动性控制以及成形件力学性能优化等问题。

2.2 DIW

DIW 的核心是利用具有特定流变性能的“墨水”,通过喷嘴逐层堆积成型。该工艺对材料的关键要求是具备“剪切变稀”行为(挤出时降低黏度以顺利通过喷嘴)以及快速的结构恢复能力(能迅速固化或凝胶化以保持形状),其优势在于材料体系广泛,特别适用于环氧树脂、光敏树脂及其复合材料,并且可以在温和条件下加工。通过灵活调控喷嘴直径、挤出压力、打印路径等参数,DIW 能够实现从复杂结构到功能梯度材料的精密制造。

在提升高分子材料抗冲击性能方面,DIW 工艺主要通过材料复合与结构设计来实现。韩羽菲等^[60]通过在环氧树脂等基体中引入碳纤维、碳化硅晶须或纳米黏土等增强填料,可以显著提高复合材料的强度、模量及疲劳寿命,从而增强成型件抵抗冲击破坏的能力。周依莎等^[22]对于光敏或热敏性材料,采用紫外光辅助固化或光-热双固化策略,在打印中实现墨水的即时固化,减少层间缺陷,并通过形成互穿网络等结构有效提升

材料的断裂韧性和能量吸收效率。此外,通过优化打印路径并设计仿生结构,可调控冲击载荷下的能量耗散机制。总体而言,DIW 工艺为制备高性能的抗冲击高分子材料提供了一个灵活的平台。通过填料增强、固化方法创新、优化结构等多种手段来提高材料的韧性。未来的发展将致力于平衡墨水流变性与最终性能,强化层间结合,以推动其在航空航天、柔性防护等对抗冲击有严苛要求领域的更广泛应用。

2.3 SLA/DLP

SLA/DLP 是一类基于光致聚合原理、通过选择性固化液态光敏树脂来构造三维实体的增材制造工艺^[61],主要有两种典型技术路径:一是采用激光作为能量源的 SLA 成型,该技术通过计算机控制紫外激光束在树脂液面进行逐点扫描,使照射区域的树脂发生光聚合反应并固化,未扫描部分保持液态,逐层累积后形成工件;二是以面光源为能量源的 DLP 技术,其与 SLA 的点扫描方式不同,通过将每一层的截面图形一次性投射至树脂槽底部,实现整层同步快速固化^[62]。立体光固化通常使用液态光敏树脂作为原材料,常用树脂为(甲基)丙烯酸酯类树脂。该工艺具有成型尺寸精度高、表面质量好等优点,尤其适用于结构复杂、特征精细的模型制造^[63];其主要局限在于,对部分悬空或大倾角结构需添加支撑结构以防止打印失败,且原始成型件往往强度不足,需经过后固化处理以提升力学性能。

由于具备优异的成型精度和表面光洁度,光固化 3D 打印技术在精密零件、医疗器械、电子封装及珠宝设计等领域已得到广泛应用。然而,传统光固化材料往往因交联密度较高而表现出脆性大、抗冲击性能不足等问题。为此,研究人员提出了多种增韧改性策略,主要包括分子结构设计、核壳粒子(CSP)增韧、活性稀释剂体系优化以及纳米填料复合等。

活性稀释剂的优化同样为改善光固化材料韧性提供了可行途径。Cheng 等^[64]开发了一种可用于光固化 3D 打印的超高韧性弹性体,打印出的晶格结构即使经历极大压缩变形,也能完全回弹,展现出优异的弹性(图 7(a))。研究进一步表明,仅通过改变同一种材料的晶格构型,即可在循环压缩中实现差异化的力学响应(图 7(b)),充分体现了 3D 打印在实现材料结构一体化性能设计方面的独特优势,成功克服了传统光固化材料难以兼顾高机械强度与动态功能的问题,使得 3D 结构具备优异的韧性和回弹性,且同种打印材料的不同晶格构型可呈现不同的力学性能。

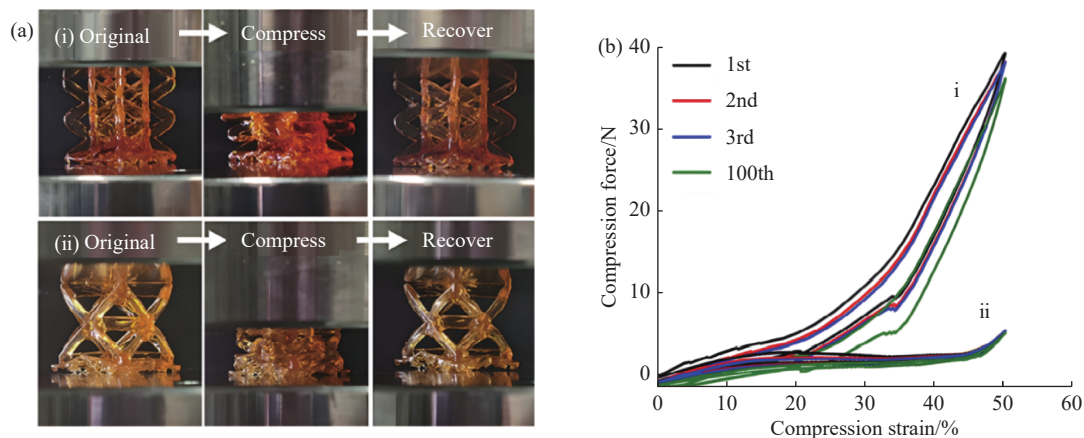


图 7 (a) 光固化 3D 打印样品压缩测试照片; (b) 不同晶格循环压缩 100 次的力学性能^[64]

Fig. 7 (a) Compression test photos of photosensitive 3D printed samples; (b) Mechanical property of different lattice structures after 100 cycles of compression^[64]

综上,通过引入核壳粒子、优化活性稀释剂体系或添加纳米填料等策略,可有效提升光固化材料的抗冲击与综合力学性能,从而拓展其在柔性电子、高性能结构件、个性化医疗器械等领域的应用潜力。未来可进一步探索新型增韧机理与多功能添加剂的开发,持续提升光固化材料的产品性能与应用广度。

2.4 SLS

SLS 是一种重要的粉末床熔融 3D 打印技术^[65-68],其工艺过程如下:首先通过计算机将三维实体模型切片,生成一系列二维截面轮廓数据;然后,在密闭成形舱内,由铺粉辊将微细粉末材料铺展为均匀薄层,高精度激光束依据当前截面轮廓进行选择性的扫描;最后,粉末吸收激光能量后迅速升温,颗粒表面熔融并相互黏结,形成致密的固态层片。每完成一层烧结,成形平台下降一个层厚,供粉平台上升并推送新粉,经铺粉辊再

次铺设平整,激光继续扫描下一层轮廓,如此逐层累积,最终获得三维实体零件。

SLS 技术具有成型自由度大、无需支撑结构、材料适用范围广等突出优点。早期主要采用聚苯乙烯(PS)等材料制作原型,而当前应用最广泛的是聚酰胺(PA)系列聚合物粉末,因其具有良好的烧结窗口、均衡的力学性能及较为宽松的工艺条件。为进一步拓展该技术的应用领域,近年来针对高性能聚合物(如 PEEK)、生物可降解材料(如聚己内酯)以及柔性材料(如 TPU)的 SLS 工艺研究日益活跃。

目前, SLS 技术已从原型制作逐步走向直接制造终端产品。然而,该技术仍存在若干局限:其一,设备及专用粉末成本较高,且能同时满足高精度与高效率烧结要求的材料体系仍较为有限,高端粉末市场长期由国外企业主导;其二,成形过程中因热传导导致的“次级烧结”现象,易使薄壁结构与精细特征尺寸精度下降^[68];其三,成形件表面通常较粗糙,常需后续抛光或渗树脂等处理才能满足使用要求;其四,在工艺机理深入解析、在线过程监测与闭环控制、粉体循环利用及工艺自动化等方面,仍有诸多技术难题亟待攻克。

3 常用的抗冲击性能表征方法

常用的抗冲击性能表征通过落球、摆锤或霍普金森杆等装置来实现^[69](图 8)。在高应变率条件下对材料或构件施加瞬态冲击载荷,用以模拟实际工况中的冲击、碰撞等动态环境。此类表征重点评估材料在高速变形下的能量吸收特性、断裂抗力及失效行为,主要输出指标包括冲击强度、冲击吸收功、动态破坏阈值及动态应力-应变响应,为样品在冲击载荷下的安全设计与可靠性评价提供依据。

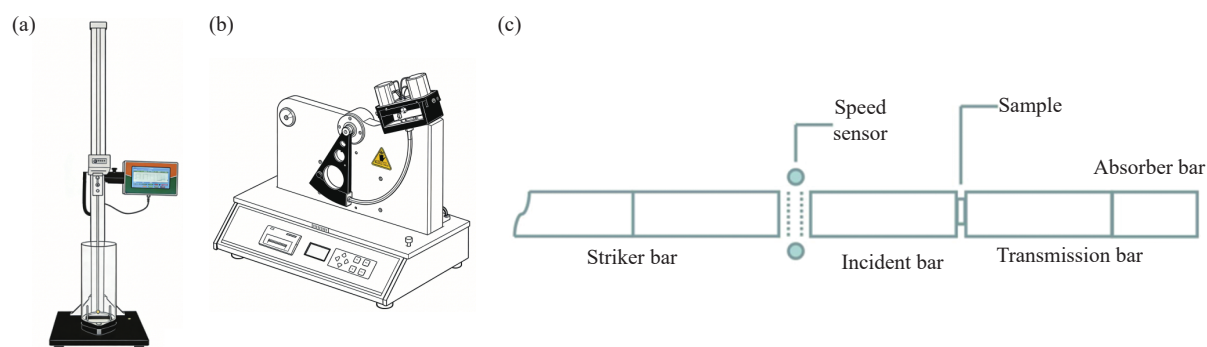


图 8 (a)落球冲击装置示意图; (b)摆锤冲击试验装置示意图; (c)霍普金森压杆系统示意图^[69]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of the ball drop impact device; (b) Schematic diagram of the pendulum impact test device; (c) Schematic diagram of the split Hopkinson pressure bar system^[69]

落球冲击实验通过释放已知质量的冲击体,使其从设定高度自由下落并垂直撞击试样表面。通过观测试样发生破裂、穿孔或产生特定尺寸裂纹的临界高度或能量阈值,可对其耐撞击能力进行定性或半定量评价。该方法因装置简单、操作直观,常作为规范性试验用于产品的质量控制和性能筛选。

摆锤冲击实验通过释放预先抬升至特定高度的摆锤,将其重力势能转化为冲击动能,使摆锤在运动轨迹最低点对带有特定缺口构型的标准试样施加瞬时冲击载荷。

霍普金森杆实验分为霍普金森压杆实验和拉杆实验,两者的实验原理相同,均以一维应力波理论为基础,通过记录和分析弹性杆中传播的入射、反射与透射波来研究材料的高应变率力学性能。霍普金森压杆主要用于材料的动态压缩实验,重点获取材料在高应变率下的应力-应变响应及应变率敏感性;霍普金森拉杆则专门用于动态拉伸实验,揭示材料在高速拉伸下的应力-应变关系、动态强度及断裂韧性等失效行为参数。

4 应用前景

4.1 汽车领域

当前,高抗冲高分子材料在汽车领域的应用正从通用部件制造转向基于性能需求的定制化解决方案。其中,基于 TPU 的 FDM 缓冲结构设计,以及高韧性 PC 的 FDM 打印技术,展现出明确的近期应用价值。以 TPU 材料为例,通过调整其中空层数与孔径,能够主动调控缓冲垫的静态与动态力学响应^[7],这为汽车个性化

座椅缓冲与专用工具减震包装提供了直接依据。借助 FDM 技术,可快速制造出与使用者体型或产品形状匹配且具有优化能量吸收曲线的缓冲部件,实现从功能到结构的一体化定制,克服了传统发泡工艺的局限。另一方面,适用于 FDM 的改性 PC 通过弹性体增韧^[15],在保持高强度的同时提升了抗冲击性,解决了纯 PC 打印易开裂的问题,使得打印高耐热、高抗冲的汽车灯具支架、连接器等复杂结构件成为可能。这种材料与工艺的结合,可替代部分金属嵌件或需要复杂模具的工程塑料件^[70](图 9(a)),在实现轻量化与部件整合的同时,也支持快速原型验证。

4.2 航空航天领域

在航空航天领域,对减重、可靠性和复杂构件一体化的要求极为严苛。连续纤维增强热塑性复合材料的 FDM 打印与高性能光敏树脂的 DLP 打印是两条最具工程化潜力的技术路径。在复合材料 FDM 打印领域^[54],通过优化纤维取向与铺层顺序,可使构件抗冲击强度显著提升至 280 kJ/m^2 以上。该技术能将承载纤维精确排布于载荷路径,实现结构效率最大化,并能制造出传统工艺难以完成的复杂内部拓扑点阵结构,已成功应用于无人机舱体、卫星天线支架等次承力部件,在保证刚度与抗冲击性的同时有效减重。对于发动机原型件、轻量化雷达罩等具有极端复杂内腔或精细特征的部件,基于 DLP 技术的高韧性光敏树脂则展现出独特优势^[64]。经 CSP 增韧的丙烯酸酯树脂,其冲击强度可提升约 150%。DLP 工艺的高精度与材料的优异韧性相结合,能够一次性成型出兼具良好表面光洁度、复杂几何形状和可靠抗冲击性能的构件。近期的突破关键在于开发出耐高温且高韧的光固化树脂体系,以切实满足发动机周边等严苛热环境对材料的性能要求^[71](图 9(b))。

4.3 柔性电子领域

随着电子产品向高集成度与柔性化发展,其防护材料需同时具备抗冲击、电磁屏蔽甚至主动传感等功能。基于 DIW 的环氧树脂基多功能复合材料和光固化 3D 打印的柔性封装材料是两大前沿方向。在复合材料 3D 打印领域,经 DIW 工艺制备的环氧树脂-石墨烯材料能够实现结构防护与电磁屏蔽的一体化^[25],通过一体成型替代传统的多部件组装方案,已成功应用于电路板^[72](图 9(c))、5G 基站天线罩、服务器外壳等场景。与此同时,光固化聚氨酯弹性体通过纳米改性工艺优化,在柔性电子防护方面展现出显著潜力,其良好的韧性、抗撕裂性与动态弯折适应性,使得智能手表表带、传感器外壳等可穿戴设备部件能兼顾缓冲保护与使用耐久。未来发展的关键,在于进一步实现材料性能的自由调控与平衡,以满足从刚性功能结构到柔性弹性防护等愈发差异化的应用需求。

4.4 医疗领域

3D 打印抗冲击高分子材料也已逐步应用于医疗领域。为提升器械的抗冲性能与整体性能,业界通过改进材料配方、优化打印工艺等手段,推动了医疗器械向更高性能、更多功能的方向发展。对于踝足矫形器(AFO)等体外辅助器械,碳纤维增强聚乳酸(PLA)的 FDM 打印已展现出明确的性能可控性^[73]。将打印温度从 225°C 提升至 240°C ,可使制件的抗冲击强度提升约 5.93%,疲劳寿命提升至 2.7 倍。这为临床定制高性能、轻量化且耐用的个性化矫形器提供了精准的工艺参数指导,其应用价值在于通过简单的工艺参数调节,即可为不同体重、不同活动强度的患者“打印”出具有相应力学承载能力的矫形器^[74](图 9(d))。

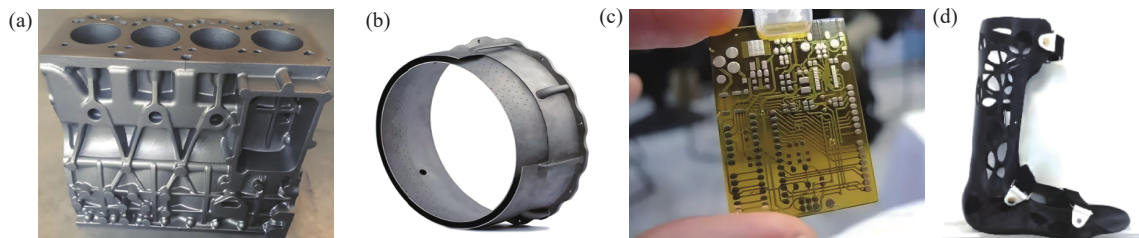


图 9 (a) 3D 打印的四缸发动机缸体^[70]; (b) 3D 打印的多层薄壁部件^[71]; (c) Nano Dimension 公司打印的小型电路板^[72]; (d) 3D 打印的踝足矫形器^[74]

Fig. 9 (a) 3D printed four-cylinder engine block^[70]; (b) Multi-layer thin-walled components by 3D printing^[71]; (c) Small circuit boards printed by Nano Dimension company^[72]; (d) 3D printed barefoot orthosis^[74]

在承重骨植入物领域,对材料的强度、韧性及生物相容性有更高要求。Masood 等^[75]通过纳米二氧化硅增强复合材料,使其抗拉强度大幅提升,可达 147.3 MPa 。对 PEEK 这类高性能植入材料,Guo 等^[76]致力于通过分区控性 3D 打印技术,在单个植入物内实现刚度的梯度变化,从而模拟天然骨的力学性能,这种仿生设计

能更有效地分散冲击载荷,并显著提升植入体的抗疲劳和抗冲击表现。

5 总结与展望

目前,以 FDM、DIW 与 SLA/DLP 为代表的增材制造技术已能够支撑高能量耗散结构的精准制备,并可实现抗冲击高分子材料形态的按需定制。其核心在于,3D 打印技术作为一个集成制造平台,将高分子本征的材料性能和打印结构的耗能作用相融合,从而实现性能的协同提升,为航空航天、柔性电子及医疗等领域提供了创新且可行的解决方案。

当前,3D 打印抗冲击高分子材料研究的核心挑战在于贯通从分子结构设计、打印参数调整到加工成型的全流程技术,以实现跨领域的高效协同。该挑战难点在于材料的本征抗冲击性能、打印工艺对流变与固化行为的约束,以及宏微观防护结构设计,这三者之间存在着复杂而紧密的耦合与制约关系。具体而言,在提升冲击韧性的同时需要保持打印适配性与尺寸稳定性,克服逐层制造导致的层间弱结合与性能各向异性,实现从微观组分分布到宏观力学响应的精准调控。这些问题的解决需依托于对打印过程中相态转变、界面行为及损伤机理的深入理解。

针对以上挑战,随着智能高分子材料的开发、仿生防护构型设计以及新一代 3D 打印等关键技术的发展,3D 打印抗冲击高分子材料的研究正在由单一静态的结构仿制,向集成化、多尺度协同与智能响应一体的功能系统演进。展望未来,关于 3D 打印抗冲击高分子材料的研究有望在三个方面引发深刻变革:

(1)聚焦动态高分子材料开发。在分子网络中引入动态键,使其能在打印后或受力时发生键交换与网络重排。这不仅能通过界面动态愈合直接增强层间结合,还可通过化学键可逆解离高效地耗散冲击能量,提升冲击韧性。进一步引入刺激响应机制可赋予材料自修复、形状记忆等智能自适应能力,而材料的可逆特性也为实现循环利用与可持续制造提供了可能。

(2)实现多材料集成与梯度结构的精准制造。借助多喷头、微流控共挤出等先进增材工艺,可将刚性、柔性及能量耗散异质材料按仿生原理在三维空间内进行可控排布与连续过渡。这种按需构建的梯度或界面结构,能够有效引导应力分散,促进裂纹偏转与分支,从而在宏观上实现更优的冲击能耗散,推动抗冲击部件向性能定制性与功能一体化的方向发展。

(3)制造过程的在线监测与智能化调控。通过集成传感技术与机器学习算法,实时分析打印过程中的温度场分布、流变行为等关键工艺参数,系统自动反馈并优化工艺设置和能量输入,构建从材料、工艺到性能的数字化模型,从而主动抑制制造缺陷,提升构件一致性与可靠性,为规模化制备提供关键工艺与质量控制支撑。

通过发展多尺度协同机制、智能化制造方法与智能可持续材料体系,3D 打印抗冲击高分子材料有望在高端装备、柔性电子及生物医药等领域实现更可靠、更智能的应用,最终成为支撑下一代工程技术发展的重要物质基础。

参考文献:

- [1] CHEN J L, LI S T, MA S, CHEN Y Q, LIU Y, TIAN Q W, ZHONG X T, SONG J X. The anti-penetration performance and mechanism of metal materials: A review [J]. [Engineering](#), 2024, 40: 131-157.
- [2] 郑堃. 功能性皮革在专业运动护具中的性能优化与应用研究 [J]. [皮革与化工](#), 2025, 42(5): 19-21.
ZHENG K. Research on performance optimization and application of functional leather in professional sports protective gear [J]. [Leather & Chemical Engineering](#), 2025, 42(5): 19-21.
- [3] 安斌鑫, 姜静, 毕广利, 李元东, 陈体军, 蒋春宏, 赵李斌. 半固态触变 Al-8Si 合金的显微组织及抗冲击韧性 [J]. [特种铸造及有色合金](#), 2025, 45(12): 1844-1851.
AN B X, JIANG J, BI G L, LI Y D, CHEN T J, JIANG C H, ZHAO L B. Microstructure and impact toughness of semi-solid thixotropic Al-8Si alloy [J]. [Special Casting & Nonferrous Alloys](#), 2025, 45(12): 1844-1851.
- [4] 李仙花, 蒋方新, 任超杰, 刘畅, 李宁, 张明林. 聚硫橡胶增韧改性环氧复合材料的力学性能 [J]. [热固性树脂](#), 2025, 40 (5): 21-25.
LI X H, JIANG F X, REN C J, LIU C, LI N, ZHANG M L. Mechanical properties of epoxy composites toughened by polysulfide

- rubber [J]. *Thermosetting Resins*, 2025, 40 (5): 21-25.
- [5] 魏朋丽, 赵致锦, 韩森森. PBO 纤维增强聚脲复合材料抗冲击防护性能研究 [J]. *涂层与防护*, 2025, 46(9): 49-56.
WEI P L, ZHAO W J, HAN S S. Research on impact protection performance of PBO fiber-reinforced polyurea composites [J]. *Coatings & Protection*, 2025, 46(9): 49-56.
- [6] 李莎莎. 耐热性树脂 FDM-3D 打印机研制及制备工艺与材料性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
LI S S. Development of a heat-resistant resin FDM-3D printer and study on its preparation process and material properties [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [7] GONÇALVES V P D, PEREIRA A C, SIMONASSI N T, VIEIRA C M F, LOPES F P D. Additive manufacturing of sports mouthguards: Mechanical performance and impact validation [J]. *Dental Traumatology*, 2025, 42(3): 388-398.
- [8] 白丰铭, 马应霞, 谢昕, 张定军. 抗冲聚丙烯的增韧机理和增韧方法研究进展 [J]. *应用化工*, 2022, 51(2): 563-566, 573.
BAI F M, MA Y X, XIE X, ZHANG D J. Research progress on toughening mechanism and methods of impact polypropylene [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(2): 563-566, 573.
- [9] LI J, WANG H, SHEN X, MEI W, CHEN G, ZHOU F. Carbon tube-gypsum reinforced polypropylene: Impact resistance, thermal stability [J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(18): 17268-17279.
- [10] 郭垠, 张璐, 吴召伟, 宋力, 董海鹏, 钱富娟. 聚碳酸酯失效模式影响因素 [J]. *塑料*, 2024, 53(4): 61-66.
GUO Y, ZHANG L, WU Z W, SONG L, DONG H P, QIAN F J. Influencing factors of polycarbonate failure modes [J]. *Plastics*, 2024, 53(4): 61-66.
- [11] GARCIA-LEON R A, RODRIGUEZ-CASTILLA M, QUINTERO-QUINTERO W. Impact behavior of polycarbonate and nylon+carbon fiber specimens fabricated by fused deposition modeling [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(7): 4842-4850.
- [12] CHENRAYAN V, SHAHAPURKAR K, KIRAN M C, NGARAJAN B, ARUNACHALAM K P, WEISS A D, FOUAD Y, ALMEHMAIDI F A, SOUDAAGAR M E M. Leverage of aluminium oxynitride on the impact resistance of Kevlar-impregnated epoxy composites: Experimental and numerical evaluation under low-velocity impact [J]. *Polymer Composites*, 2024, 44(5): 17061-17074.
- [13] REIS R H M, GARCIA FILHO F C, NUNES L F, CANDIDO V S, SILVA A C R, MONTEIRO S N. Impact resistance of epoxy composites reinforced with Amazon Guaruman fiber: A brief report [J]. *Polymers*, 2021, 13(14): 2264.
- [14] REN H Y, HE Z L, LI D L, ZHANG L, CHEN L N, LU Y W, XU M D. Synergistic enhanced yield strength, tensile ductility and impact toughness of polydicyclopentadiene nanocomposites by introducing low loadings of di-functionalized silica [J]. *Polymer*, 2023, 284: 126296.
- [15] 程慧强, 向阳, 潘洋, 吴宏, 郭少云. 聚碳酸酯/聚对苯二甲酸丁二醇酯交替层状复合材料的制备和冲击性能提升 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(7): 123-130.
CHENG H Q, XIANG Y, PAN Y, WU H, GUO S Y. Preparation and impact performance improvement of polycarbonate/polybutylene terephthalate alternating layered composites [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2023, 39(7): 123-130.
- [16] CUI C H, AN L, ZHANG Z L, JI M K, CHEN K, YANG Y X, SU Q, WANG F, CHENG Y L, ZHANG Y F. Reconfigurable 4D printing of reprocessable and mechanically strong polythiourethane covalent adaptable networks [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(35): 2203720.
- [17] XU T, CHEN K X, HE Z Y, ZHANG C Z, LI X Y, ZHANG Z Y, FAN W B, CUI C H, ZHANG Y F. 4D printing of reprocessable thiocyanate covalent adaptable networks with reconfigurable shape memory ability [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2025, 36(9): 111295.
- [18] LI Z, ZHANG C Z, HUANG W H, CUI C H, CHEN K, HE Z Y, XU T, TENG H Q, GE Z S, MING X Q, ZHANG Y F. 3D-printable room temperature phosphorescence polymer materials with on-demand modulation for modulus visualization and anticounterfeiting applications [J]. *Chem & Bio Engineering*, 2024, 1(2): 133-140.
- [19] 王钧正. 改性环氧树脂增强玻纤复合材料性能提升研究 [J]. *流程工业*, 2025(11): 76-78.
WANG J Z. Study on performance improvement of glass fiber reinforced composites by modified epoxy resin [J]. *Process Industry*, 2025(11): 76-78.
- [20] 李星, 申连华. 环氧树脂的改性研究进展及发展趋势 [J]. *云南化工*, 2017, 44(6): 13-15.

- LI X, SHEN L H. Research progress and development trend of epoxy resin modification [J]. Yunnan Chemical Technology, 2017, 44(6): 13-15.
- [21] 王海涛, 张杰, 张云鹏, 罗晓琳, 何宁, 王林杰. 环氧树脂性能的研究 [J]. 科技与创新, 2025(7): 151-153, 157.
- WANG H T, ZHANG J, ZHANG Y P, LUO X L, HE N, WANG L J. Study on the properties of epoxy resin [J]. Science and Technology & Innovation, 2025(7): 151-153, 157.
- [22] 周依莎, 邓鑫, 焦晓岚, 郑玲. 直写式 3D 打印环氧树脂复合材料的研究进展 [J]. 热固性树脂, 2021, 36(6): 48-52.
- ZHOU Y S, DENG X, JIAO X L, ZHENG L. Research progress in direct ink writing 3D printing of epoxy resin composites [J]. Thermosetting Resins, 2021, 36(6): 48-52.
- [23] 华晨曦, 张涛, 徐势轩, 刘衍均, 宋欣雨, 刘禹, 王震宇. 多级孔结构环氧树脂复合材料的 3D 打印制备与性能 [J]. 塑料工业, 2025, 53(5): 172-178.
- HUA C X, ZHANG T, XU S X, LIU Y J, SONG X Y, LIU Y, WANG Z Y. 3D printing preparation and properties of epoxy resin composites with hierarchically porous structure [J]. China Plastics Industry, 2025, 53(5): 172-178.
- [24] PEERZADA M H, ABBASI S A, LAU K A, HAMEED N. Additive manufacturing of epoxy resins: Materials, methods, and latest trends [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(14): 6375-6390.
- [25] 郭松, 胡贵宝, 杨维成, 段高坤, 乔拟春, 刘建, 罗勇. 聚双环戊二烯的共聚改性及其性能调控 [J]. 精细化工, 2022, 39(3): 548-553, 568.
- GUO S, HU G B, YANG W C, DUAN G K, QIAO N C, LIU J, LUO Y. Copolymerization modification and property regulation of polydicyclopentadiene [J]. Fine Chemicals, 2022, 39(3): 548-553, 568.
- [26] 吕泉泉. 聚双环戊二烯功能改性材料的制备及研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- LYU X X. Preparation and study of functional modified materials based on polydicyclopentadiene [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [27] 丁立冉, 王婷, 鹿伟, 胡敬坤, 崔丽荣, 王建, 高军亮, 张文文, 李辉阳, 王斌, 荣卫锋, 黄昊飞, 崔广军. 改性聚双环戊二烯 (PDCPD) 材料的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2025, 53(12): 46-52.
- DING L R, WANG T, LU W, HU J K, CUI L R, WANG J, GAO J L, ZHANG W W, LI H Y, WANG B, RONG W F, HUANG H F, CUI G J. Research progress on modified polydicyclopentadiene (PDCPD) materials [J]. New Chemical Materials, 2025, 53(12): 46-52.
- [28] 吴飞扬, 陈琦, 陈宸, VERPOORT F. 低负载锆基 MOF 增强聚双环戊二烯纳米复合材料 [J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(4): 50-57, 65.
- WU F Y, CHEN Q, CHEN C, VERPOORT F. Low-loading zirconium-based MOF reinforced polydicyclopentadiene nanocomposites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(4): 50-57, 65.
- [29] 张婷婷, 刘东立, 许宁, 刘畅. 改性聚双环戊二烯在免充气轮胎中的应用潜力探究 [J]. 橡胶科技, 2022, 20(11): 540-542.
- ZHANG T T, LIU D L, XU N, LIU C. Exploration of the application potential of modified polydicyclopentadiene in non-pneumatic tires [J]. Rubber Science and Technology, 2022, 20(11): 540-542.
- [30] 翟好聃, 李恺琳. 热固性聚氨酯改性材料的制备及其耐磨性能研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(10): 26-28.
- ZHAI H D, LI K L. Preparation of thermosetting polyurethane modified material and study on its wear resistance [J]. Petrochemical Technology, 2024, 31(10): 26-28.
- [31] 田佳. 基于氨基甲酸酯键动态交换的热固性聚氨酯化学降解及再利用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- TIAN J. Chemical degradation and reutilization of thermosetting polyurethane based on dynamic exchange of urethane bonds [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2025.
- [32] 马清杰, 李亮, 张彦峰, 耿云鹏, 李军. 含硫动态高分子的研究进展 [J]. 功能高分子学报, 2024, 37(1): 66-81.
- MA Q J, LI L, ZHANG Y F, GENG Y P, LI J. Research progress in sulfur-containing dynamic polymers [J]. Journal of Functional Polymers, 2024, 37(1): 66-81.
- [33] 陈兴幸, 钟倩云, 王淑娟, 吴宥伸, 谭继东, 雷恒鑫, 黄绍永, 张彦峰. 动态共价键高分子材料的研究进展 [J]. 高分子学报, 2019, 50(5): 469-484.
- CHEN X X, ZHONG Q Y, WANG S J, WU Y S, TAN J D, LEI H X, HUANG S Y, ZHANG Y F. Research progress in dynamic covalent bond polymer materials [J]. Acta Polymerica Sinica, 2019, 50(5): 469-484.

- [34] 成建强, 张燕, 张勇, 陈从棕, 石燕萍. 聚氨酯弹性填充材料的研究进展 [J]. 弹性体, 2025, 35(3): 59-63.
CHENG J Q, ZHANG Y, ZHANG Y, CHEN C Z, SHI Y P. Research progress on polyurethane elastic filling materials [J]. China Elastomerics, 2025, 35(3): 59-63.
- [35] QIAO H Y, WU B H, SUN S T, WU P Y. Entropy-driven design of highly impact-stiffening supramolecular polymer networks with salt-bridge hydrogen bonds [J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146: 7533-7542.
- [36] ZHAO Y X, WANG Z H, LIU Y, LIU Y, WANG Z L, ZHANG Y, YANG Y, LIU J. Highly stretchable and self-healable strain sensors formed by liquid metal and graphene [J]. Advanced Materials, 2023, 35(12): 2209581.
- [37] WU T H, JIANG H, ZHENG Y J, ZHAO C Y, SHI K Y, XU K C, LI X D, ZOU M S. Superior impact resistance in bionic nanocellulose composite supramolecular elastomers via multiple hydrogen bonding interactions [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 35(4): 2414221.
- [38] ZHOU X, YIN J F, CHEN C, CHI Y J, CHEN J D, LIU F W, YANG J S, LONG S C, TANG L Q, YAO X H, YIN P C. Hierarchical supramolecular aggregation of molecular nanoparticles for granular materials with ultra high-speed impact-resistance [J]. Advanced Science, 2024, 11(36): 2405285.
- [39] MA J F, JIANG S X, TAN X, TIAN Y K, DONG S Y, WANG F. Tough supramolecular glasses enabled by frustrated non-covalent complexation [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64(50): e202519907.
- [40] GUO R, ZHANG Q, WU Y S, CHEN H B, LIU Y H, WANG J J, DUAN X L, CHEN Q, GE Z S, ZHANG Y F. Extremely strong and tough biodegradable poly(urethane) elastomers with unprecedented crack tolerance via hierarchical hydrogen-bonding interactions [J]. Advanced Materials, 2023, 35(19): 2212130.
- [41] CHEN X X, ZHONG Q Y, CUI C H, MA L, LIU S, ZHANG Q, WU Y S, AN L, CHENG Y L, YE S B, CHEN X M, DONG Z, CHEN Q, ZHANG Y F. Extremely tough, puncture-resistant, transparent, and photoluminescent polyurethane elastomers for crack self-diagnose and healing tracking [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12: 30847-30855.
- [42] YAN X, ZHANG S, ZHANG W, DU F S, LI Z C, QIAN G Y, YU W, GU G Y, CHEN Y, JI Y. Biomimetic impact protective supramolecular polymeric materials enabled by quadruple H-bonding [J]. Journal of the American Chemical Society, 2021, 143(2): 1162-1170.
- [43] 范伟, 李峰, 武超, 刘晨阳, 李慧. PBDMS 改性双组分硅胶的动态力学及抗冲击性能研究 [J]. 化工新型材料, 2020, 48(5): 125-129.
FAN W, LI F, WU C, LIU C Y, LI H. Study on dynamic mechanical and impact resistance properties of pbdms-modified two-component silicone rubber [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(5): 125-129.
- [44] PINTO F, MEO M. Design and manufacturing of a novel shear thickening fluid composite (STFC) with enhanced out-of-plane properties and damage suppression [J]. Applied Composite Materials, 2017, 24(3): 643-660.
- [45] LEE J, JING B B, PORATH L E, SOTTOS N R, EVANS C M. Shock wave energy dissipation in catalyst-free poly(dimethylsiloxane) vitrimers [J]. Macromolecules, 2020, 53(12): 4741-4747.
- [46] 熊艺慧, 钱立军. 聚硼硅氧烷的研究进展与应用 [J]. 中国塑料, 2025, 39(11): 32-40.
XIONGYI H M, QIAN L J. Research progress and application of polyborosiloxane [J]. China Plastics, 2025, 39(11): 32-40.
- [47] ZHANG J X, SHI X W, ZHAO Z T, WANG M Y, DENG H B, DU Y M. Hydrogel films with impact resistance by sacrificial micelle-assisted-alignment [J]. Advanced Science, 2024, 11(45): 2409287.
- [48] WANG R Y, XU T, YANG Y X, ZHANG M Y, XIE R L, CHENG Y L, ZHANG Y F. Tough polyurethane hydrogels with a multiple hydrogen-bond interlocked bicontinuous phase structure prepared by *in situ* water-induced microphase separation [J]. Advanced Materials, 2025, 37(6): 2412083.
- [49] LIANG X Y, CHEN G D, LEI I M, ZHANG P, WANG Z Y, CHEN X M, LU M Z, ZHANG J J, WANG Z B, SUN T L, LAN Y, LIU J. Impact-resistant hydrogels by harnessing 2D hierarchical structures [J]. Advanced Materials, 2023, 35(1): 2207587.
- [50] CHENG J, FU S, MA S, ZHANG Z H, MA C, ZHANG G L. Sterically hindered organogels with self-healing, impact response, and high damping properties [J]. Advanced Materials, 2022, 34(6): 1181-1189.
- [51] WU Y S, ZHANG Y F. Mechanically interlocked network cross-linked by molecular brakes for controlling solvent migration in gels [J]. Advanced Materials, 2022, 34(12): 2107823.
- [52] FENG B Y, ZHONG J M, FU Y C, HUANG W, LIANG X D, RITCHIE R O, LI Z, BAO J H, WANG Y T. Energy absorption

- strategy in biological and bioinspired tubular and lamellar structures [J]. *Matter*, 2024, 7(8): 101024.
- [53] 赵云, 杨波, 陶子伟, 宁慧铭, 程业红, 胡宁, 赵丽滨. 纤维增强树脂基防弹复合材料吸能机制及损伤模式研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9): 4606-4627.
- ZHAO Y, YANG B, TAO Z W, NING H M, CHENG Y H, HU N, ZHAO L B. Research progress on energy absorption mechanism and damage mode of fiber-reinforced resin-based bulletproof composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2024, 41(9): 4606-4627.
- [54] 谈丽姿, 聂祥樊, 罗楚养, 胡晓安, 蒯诗韵, 於琳涛. 3D 打印连续纤维增强尼龙复合材料冲击性能 [J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(12): 64-71.
- TAN L Z, NIE X F, LUO C Y, HU X A, LIN S Y, YU L T. Impact properties of 3D printed continuous fiber reinforced nylon composites [J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(12): 64-71.
- [55] 王晓芳, 徐子山, 何宇阳, 朱文婷. 陶瓷颗粒增强树脂基摩擦材料的制备及性能研究 [J]. *化学工程师*, 2022, 36(9): 101-103, 110.
- WANG X F, XU Z S, HE Y Y, ZHU W T. Preparation and performance study of ceramic particle reinforced resin-based friction materials [J]. *Chemical Engineer*, 2022, 36(9): 101-103, 110.
- [56] 汪传生, 李光超, 边慧光. 3D 打印玻璃纤维/热塑性聚氨酯共混材料的性能研究 [J]. *橡胶工业*, 2019, 66(8): 596-601.
- WANG C S, LI G C, BIAN H G. Property study of 3D printed glass fiber/thermoplastic polyurethane blend material [J]. *China Rubber Industry*, 2019, 66(8): 596-601.
- [57] 周中涛. 3D 打印复合材料的研究进展 [J]. *山东化工*, 2022, 51(21): 110-112.
- ZHOU Z T. Research progress of 3D printed composites [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(21): 110-112.
- [58] 唐林川. 3D 打印高分子材料的研究进展 [J]. *当代化工研究*, 2016(8): 102-103.
- TANG L C. Research progress of 3D printed polymer materials [J]. *Modern Chemical Research*, 2016(8): 102-103.
- [59] 韩淑芬, 陈伟伟, 于洁. 3D 打印高分子材料研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(10): 146-150.
- HAN S F, CHEN W W, YU J. Research progress of 3D printed polymer materials [J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(10): 146-150.
- [60] 韩羽菲, 王大鑫, 房晓彤, 胡晶. 紫外光固化树脂在三维直写成型中的应用研究现状 [J]. *中国塑料*, 2025, 39(3): 118-124.
- HAN Y F, WANG D X, FANG X T, HU J. Application research status of UV-curable resins in three-dimensional direct ink writing [J]. *China Plastics*, 2025, 39(3): 118-124.
- [61] 刘晓妹, 黄关薇, 马昊, 林敏捷. 几种用于 3D 打印的高分子材料的性能对比 [J]. *塑料*, 2020, 49(1): 129-133.
- LIU X M, HUANG G B, MA H, LIN M J. Performance comparison of several polymer materials for 3D printing [J]. *Plastics*, 2020, 49(1): 129-133.
- [62] 吴海波, 沈琪力, 何懋沂, 庄展航, 李淑娟, 强娜, 罗青宏, 莫烨强, 刘珠, 方岩雄. 基于巯基-烯光交联 3D 打印有机硅弹性体研制 [J]. *塑料工业*, 2025, 53(6): 44-54.
- WU H B, SHEN Q L, HE M Y, ZHUANG Z H, LI S J, QIANG N, LUO Q H, MO Y Q, LIU Z, FANG Y X. Development of 3D printed silicone elastomer based on thiol-ene photocrosslinking [J]. *China Plastics Industry*, 2025, 53(6): 44-54.
- [63] 王世崇, 朱雨薇, 吴瑶, 向洪平, 刘晓暄, 彭忠泉, 容敏智, 章明秋. 光固化 3D 打印技术及光敏树脂的开发与应用 [J]. *功能高分子学报*, 2022, 35(1): 19-35.
- WANG S C, ZHU Y W, WU Y, XIANG H P, LIU X X, PENG Z Q, RONG M Z, ZHANG M Q. Development and applications of UV-curing 3D printing and photosensitive resin [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2022, 35(1): 19-35.
- [64] CHENG J, FU S, MA S, LIU Z, YUAN B, XIAO Z, ZHANG L, WU M, CHEN L. Spatially hindered organogel with self-healing, impact-responsive, and high damping properties [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36: e2411700.
- [65] 马旭东. 选择性激光烧结在 3D 打印中的应用 [J]. *工程技术研究*, 2016(7): 71.
- MA X D. Application of selective laser sintering in 3D printing [J]. *Engineering Technology Research*, 2016(7): 71.
- [66] 李志超, 甘鑫鹏, 费国霞, 夏和生. 选择性激光烧结 3D 打印聚合物及其复合材料的研究进展 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(10): 170-174.
- LI Z C, GAN X P, FEI G X, XIA H S. Research progress on selective laser sintering 3D printed polymers and their composites [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(10): 170-174.
- [67] 甘鑫鹏, 王金志, 费国霞, 周星红, 夏和生. 选择性激光烧结 3D 打印粉体材料研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2020, 48(8): 27-

31,41.

GAN X P, WANG J Z, FEI G X, ZHOU X H, XIA H S. Research progress on powder materials for selective laser sintering 3D printing [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(8): 27-31,41.

- [68] 张瀚, 蒋国璋, 段现银. 选择性激光烧结 3D 打印参数对成型精度影响研究 [J]. *现代制造工程*, 2019(5): 77-82.

ZHANG H, JIANG G Z, DUAN X Y. Study on the influence of selective laser sintering 3D printing parameters on forming accuracy [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(5): 77-82.

- [69] 陈凤. 冲击防护用 Kevlar 织物复合材料的结构设计及多功能特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2024.

CHEN F. Research on structural design and multifunctional characteristics of Kevlar fabric composites for impact protection [D]. Chongqing: Chongqing University, 2024.

- [70] 玉河, 高燕. 3D 打印在汽车零部件行业的应用研究 [J]. *时代汽车*, 2024(11): 130-132.

YU H, GAO Y. Research on the application of 3D printing in the automotive parts industry [J]. *Times Auto*, 2024(11): 130-132.

- [71] 赵天宇. 3D 打印技术在航空航天行业中的应用 [J]. *中国科技信息*, 2025(21): 13-15.

ZHAO T Y. Application of 3D printing technology in the aerospace industry [J]. *China Science and Technology Information*, 2025(21): 13-15.

- [72] 张磊, 田东斌, 伍权. 3D 打印技术及其在电子元器件领域的应用 [J]. *电子元件与材料*, 2019, 38(6): 20-25.

ZHANG L, TIAN D B, WU Q. 3D printing technology and its application in electronic components [J]. *Electronic Components and Materials*, 2019, 38(6): 20-25.

- [73] ALHARBI N, ALHARBI W, ALSHAMMARI B A, ALSHAMMARI B M, BAFAIL A, BAFAIL O, ARIF S, ZAKARIA M Y, EL-BAGORY T M A A. Effect of printing temperature on fatigue and impact performance of 3D printed carbon fiber reinforced PLA composites for ankle foot orthotic device[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 60(3): 549-560.

- [74] 宁天亮, 王坤, 王领彪, 韩鹏飞, 闫超伟, 李方祺. 基于逆向工程和 3D 打印的踝足矫形器产品设计 [J]. *塑料科技*, 2024, 52(2): 106-111.

NING T L, WANG K, WANG L B, HAN P F, YAN C W, LI F Q. Product design of ankle-foot orthosis based on reverse engineering and 3D printing [J]. *Plastic Science and Technology*, 2024, 52(2): 106-111.

- [75] AEZHISAI V M S, MUGILAN T, SRIDHAR N. Exploring the material and mechanical characteristics of 3D printed composites utilizing nSiO₂-particulate-reinforced PLA/HDPE filaments with potential applications in the medical field [J]. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2025, 30(2): 155-176.

- [76] GUO X Y, SU Y W, WU Z X, WU Z D, LIU K L, YUE J Y, QU Y N, WANG K Z, HE J K, MA R, YANG P. Dual-functional 3D-printed polyetheretherketone scaffolds with immunomodulatory nano-calcium silicate/interleukin-4 coating synergistically enhance osteogenesis through macrophage M2 polarization and NF- κ B pathway suppression[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 525: 170004.

(责任编辑: 王吉晶)