

·综述·

轻质橡胶材料的构筑策略、结构调控与应用进展

孙佳乐¹ 荣明明^{1,2*} 牛丽红³ 李小红¹ 张治军¹

(河南大学¹纳米科学与工程研究院²化学与分子科学学院³纳米科学与材料工程学院 开封 475001)

摘要: 轻质橡胶材料通过结构轻质化设计与低密度填料复合, 在实现密度降低的同时保持橡胶的弹性、耐久性 & 多功能特性, 已成为汽车、航空航天、建筑等领域的重要研究方向。本综述围绕轻质橡胶材料的构筑策略、结构调控机制与工程应用进展, 系统综述了近年来相关研究成果。首先, 介绍了化学发泡、物理发泡 (尤其是超临界 CO₂/N₂ 发泡)、低密度填料复合、气凝胶/纳米骨架混成以及 3D 打印等典型构筑路径, 比较分析了不同策略的结构特征与密度调控能力。其次, 从泡孔结构演化、界面应力传递及密度-性能耦合关系等方面, 阐述了轻质化对力学、热学及声学性能的影响机制。进一步梳理了轻质橡胶材料在汽车密封与减振、电池隔热、航空航天防护以及建筑隔热隔声等领域的应用现状, 并分析了规模化制备中面临的力学性能衰减、结构稳定性与工艺一致性等关键问题。最后, 从多尺度结构设计、结构-功能一体化与绿色可持续制备等方面展望了未来发展方向。本文旨在为高性能轻质橡胶材料的结构设计及工程应用提供理论依据及技术参考。

关键词: 轻质橡胶; 构筑策略; 密度调控; 性能-密度耦合; 工程应用

Construction Strategies, Structural Regulation and Application Progress of Lightweight Rubber Materials

SUN Jia-le¹, RONG Ming-ming^{1,2*}, NIU Li-hong³, LI Xiao-hong¹, ZHANG Zhi-jun¹

(¹Research Center for Nanoscience and Engineering, ²College of Chemistry and Molecular Sciences, ³College of Nanoscience and Materials Engineering, Henan University, Kaifeng 475001)

Abstract: Lightweight rubber materials, through structural lightweight design and compounding with low-density fillers, can reduce density while maintaining the elasticity, durability, and multifunctional properties of rubber, and have become an important research direction in the automotive, aerospace, and construction industries. This paper systematically reviews the relevant research results in recent years, focusing on the construction strategies, structural regulation mechanisms, and engineering application progress of lightweight rubber materials. First, it introduces typical construction paths, such as chemical foaming, physical foaming (especially supercritical CO₂/N₂ foaming), low-density filler compounding, aerogel/nano-skeleton hybridization, and 3D printing, and comparatively analyzes the structural characteristics and density regulation capabilities of different strategies. Second, it elaborates on the influence mechanism of lightweighting on the mechanical, thermal, and acoustic properties from the aspects of cell structure evolution, interfacial stress transfer, and density-performance coupling relationship. Furthermore, this review presents the application status of lightweight rubber materials in automotive sealing and vibration reduction, battery heat insulation, aerospace protection, and building heat and sound insulation, and analyzes the key issues in large-scale preparation, such as mechanical property attenuation, structural stability, and

河南大学高分子研究专辑; 2026-04-03 收稿, 2026-04-28 录用, 2026-06-17 网络出版

基金项目: 河南省科技攻关项目(项目号 252102230042), 河南大学重大科技任务协同创新团队重大工程项目

* 通信联系人: 荣明明, E-mail: mingming.rong@henu.edu.cn

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.083

process consistency. Finally, it looks forward to the future development directions from the aspects of multi-scale structural design, structure-function integration, and green and sustainable preparation. This review aims to provide a theoretical basis and technical reference for the structural design and engineering applications of high-performance lightweight rubber materials.

Keywords: Lightweight rubber; Construction strategy; Density regulation; Performance-density coupling; Engineering application

引用:孙佳乐, 荣明明, 牛丽红, 李小红, 张治军. 轻质橡胶材料的构筑策略、结构调控与应用进展. 高分子通报, 2026, 39(7), 1108–1127.

Citation: Sun, J. L.; Rong, M. M.; Niu, L. H.; Li, X. H.; Zhang, Z. J. Construction strategies, structural regulation and application progress of lightweight rubber materials. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(7), 1108–1127.

随着汽车轻量化、航空航天装备高性能化以及建筑节能需求的不断提升,低密度高性能材料成为材料科学领域的重要发展方向。橡胶材料因其优良的弹性、耐磨性及耐候性特点,在密封防护、减振降噪、隔热保温及缓冲吸能等工程领域具有不可替代的作用。然而,传统橡胶材料密度通常处于 $0.9\sim 1.5\text{ g/cm}^3$ 范围,在新能源汽车、航空航天、武器装备、便携电子设备等对质量高度敏感的应用场景中,其质量负担逐渐成为性能优化与系统集成的制约因素^[1]。

在实际工程应用当中,橡胶部件的轻量化不仅有助于降低系统整体质量,还可带来多方面的综合效益。在航空航天及高端装备领域,结构与功能材料的轻质化可提升有效载荷能力与系统机动性;在新能源汽车中,对悬挂系统、密封件以及减振部件进行轻量化设计,有助于降低整车能耗并提升续航水平^[2]。与此同时,从资源利用与环境保护的角度出发,减少石油基橡胶及高密度填料的用量,亦符合绿色制造与可持续发展的要求^[3]。因此,开发“轻质化–高强度–多功能”兼顾的橡胶材料已成为当前橡胶材料领域的重要研究方向。

然而,橡胶材料的轻质化往往伴着力学性能衰减、结构稳定性下降以及功能性能削弱等问题。如何在显著降低密度的同时,实现力学性能、热学性能及声学性能的同步优化,构成轻质橡胶材料设计中的核心科学问题。围绕这一问题,近年来国内外研究者逐步形成了多种结构构筑与性能调控策略。

一种方法是通过化学发泡或物理发泡构筑多孔结构,以较高的孔隙率实现密度降低。传统化学发泡工艺成熟、发泡效率较高,但泡孔结构可

控性有限,易导致力学性能衰减。相比之下,超临界 CO_2 或 N_2 等物理发泡技术可对成核行为和泡孔生长行为进行精细调控,获得微米甚至纳米尺度的泡孔结构,在降低材料密度的同时更有利于力学性能的保持^[4]。另一类策略是引入空心玻璃微球、热膨胀微球等轻质填料,利用其内部空腔结构实现体积替代与轻质化,并在一定程度上改善材料的尺寸稳定性^[5]。此外,将气凝胶或纳米多孔骨架与橡胶基体复合,构建多尺度连续孔结构,可在低密度条件下实现隔热与隔声性能的提升^[6,7]。近年来,受自然界多级结构设计理念的启发以及梯度结构的构建与应用,为复杂结构设计及多功能一体化集成提供了全新路径^[8]。

基于此,本文围绕轻质橡胶材料的构筑策略、结构调控机制及工程应用进行系统综述。重点分析不同结构设计路径对密度–性能耦合关系的影响,并讨论当前规模化制备与工程应用面临的关键技术挑战,以期为高性能轻质橡胶材料的结构设计与产业化应用提供理论依据与技术参考。

1 轻质橡胶材料的制备技术

1.1 发泡橡胶

发泡橡胶是实现橡胶材料轻质化的典型技术路径,其核心思路是通过在橡胶基体中引入气相构筑多孔结构,以气体体积分数替代实体材料体积分数,从而实现密度降低。然而,孔结构的引入降低密度的同时也会影响材料的连续承载路径,导致力学性能衰减^[9]。因此,如何在生成泡孔结构的同时维持橡胶基体的弹性与结构稳定性,是发泡橡胶中亟需解决的关键问题。

发泡橡胶的密度主要由孔隙率(通常为 $30\%\sim 90\%$)决定^[10],而其宏观力学性能则受到泡

孔尺寸、闭孔率/开孔率、泡壁厚度以及基体交联密度等参数的共同影响。其中,泡孔结构参数决定了有效承载面积与应力传递路径,基体交联密度直接影响泡壁的变形与回弹能力。因此,发泡橡胶的性能优化本质上是对孔结构与橡胶基体的共同调控。

按气体来源与发泡机理不同,发泡方法可分为化学发泡与物理发泡2类,其中超临界流体发泡(如 scCO_2 发泡)属于典型物理发泡方法^[11]。不同发泡路径在泡孔成核机制、结构可控性及对基体网络扰动程度等方面存在显著差异,从而形成不同的密度-性能演化规律。

得益于结构可调控带来的优异综合性能,发泡橡胶凭借轻质、高弹性、柔韧性、低温抗变形、耐磨、高比强度、抗冲击与能量吸收等优异特性,在汽车、交通、航空航天、建筑等领域应用前景广阔。从发展历程来看,泡沫聚合物的商业化应用始于1914年开发的橡胶泡沫,其最初制备是以天然橡胶(NR)胶乳为基体,通过复配发泡剂(早期称为产气化合物)实现^[12],常用的发泡剂包括碳酸钠、碳酸铵及聚硫酸钠等^[13]。已有研究表明,合理控制泡孔结构与基体交联参数,能在密度明显降低的情况下,同时维持材料优异的回弹性与疲劳寿命。

1.1.1 化学发泡

化学发泡是最早实现橡胶轻质化的技术路径^[12],其基本原理是在材料成型或加工过程中加入化学发泡剂,使其在一定温度或条件下发生热分解释放气体,在材料内部形成大量气泡(孔隙)。该方法工艺成熟,适用范围广泛,但其对密度-性能耦合关系的影响高度依赖于发泡剂分解行为与基体硫化过程的匹配程度。

从密度调控角度看,发泡剂的产气效率与分解温区直接决定泡孔体积分数;从性能保持角度看,若发泡剂分解速率与基体交联速率不匹配,往往会导致泡孔并合、塌陷或泡壁破裂,从而显著削弱材料的力学性能。因此,化学发泡体系优化的关键在于发泡动力学与硫化动力学的同步调控。

Kmetty等^[14]在聚乳酸挤出发泡研究中指出,放热型偶氮类发泡剂在加工温度范围内具有更高的有效产气能力,可形成孔隙率约50%以上的均匀泡沫结构,使基体密度降低至约 0.53 g/cm^3 。然而,吸热型发泡剂因分解效率不足,难以实现稳

定发泡。这一规律在橡胶体系中同样适用,发泡剂分解行为与硫化条件的不匹配往往导致泡孔并合或塌陷。在此基础上,研究者进一步通过引入助剂来调控化学发泡剂的热分解行为。例如,Afrinaldi等^[15]研究了 ZnO 可作为发泡助剂显著调控偶氮二甲酰胺(ADC)在聚乙烯/乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(PE/EVA)体系中的热分解行为,并加快气体释放速率,提高发泡效率并改善泡孔均匀性。但 ZnO 过量会导致气体释放过快,不利于泡孔稳定。这说明化学发泡体系中气体释放速率必须与基体黏弹特性相匹配,才能在降低密度的同时维持结构完整性。

除分解行为调控外,发泡剂类型本身对泡孔结构及性能同样具有决定性影响。Valentini等^[16]对比了热膨胀微球型发泡剂Expancel 909DU80和化学分解型发泡剂Hostatron P0168对泡沫结构与性能的影响。结果表明,Expancel发泡的材料具有更高的闭孔率和更低密度,有利于力学性能和潜在隔热性能;而Hostatron发泡体系因气体分解形成的开孔结构,在热能储存效率上表现更优,表明泡孔结构在材料的密度-性能耦合关系中起到关键影响作用。在天然橡胶体系中,Theerawat等^[17]系统研究比较了2种有机化学发泡剂(二亚硝基五亚甲基四胺DPT和偶氮二甲酰胺ADC)在不同用量及固化温度条件下对天然橡胶泡沫结构与力学性能的影响。研究发现,随着发泡剂用量和固化温度的提高,泡沫密度进一步降低,而压缩永久变形增大,说明性能衰减开始显现。相比ADC,DPT在适宜条件下可形成更小且更均匀的泡孔结构,从而显著提高泡沫的能量吸收能力,其中DPT用量为3 phr、固化温度为 160°C 时表现出最优的缓冲与吸能性能。值得注意的是,无机化学发泡剂在橡胶胶乳体系中的作用机理存在一定差异。Syahrin等^[18]研究采用碳酸氢钠(NaHCO_3)作为无机化学发泡剂,通过调节其用量研究其对天然橡胶胶乳泡沫结构与压缩性能的影响。结果表明,随着 NaHCO_3 用量的增加,泡沫中产生的泡孔尺寸明显减小,泡孔分布趋于均匀,同时泡沫的相对密度和压缩强度均有所提高。这表明 NaHCO_3 在胶乳体系中主要通过细化泡孔结构、增强泡壁完整性来改善泡沫的承载与抗压性能,通过结构细化可以部分突破密度-强度的负相关关系。Suethao等^[19]进一步以钾皂(potassium oleate)

作为化学发泡剂,通过Dunlop法制备天然橡胶泡沫,改变发泡剂用量以调控泡孔结构(图1)。结果表明,化学发泡剂浓度对泡沫的微观形态具有显著影响:随着发泡剂用量降低,泡孔尺寸明显减小、泡孔密度显著增加,而整体孔隙率变化不大;然而,在宏观压缩性能方面,不同发泡剂浓度制备的橡胶泡沫表现出相近的弹性行为。这表明,当泡孔结构处于合理调控区间时,可在保持整体弹性行为基本不变的前提下实现密度调节。

类似策略也适用于三元乙丙橡胶(EPDM)体系中,Wen等^[20]提出了一种以引入硅橡胶(SR)增强EPDM基体强度的共混途径。通过借助SR与EPDM共混,利用二者交联温度的不同,在EPDM预交联阶段形成SR完整交联网络,弥补无后交联造成的强度缺陷。调整SR的含量、发泡压力和温度,得到的泡沫密度低至约 0.35 g/cm^3 ,泡孔尺寸最小 $2.75\text{ }\mu\text{m}$,泡孔密度达 $1.39\times 10^{10}\text{ cells/cm}^3$ 。在相同密度下,SR/EPDM泡沫的拉伸强度和压缩强度较纯EPDM泡沫而言,分别提升461%和283%,最大拉伸强度 3.58 MPa 、压缩强度 0.59 MPa ,为生产低密度高性能EPDM泡沫提供了有效制备手段。该研究表明,共混增强基体强度与超临界物理发泡的相互作用,可以有效缓解低密度带来的力学衰减。在上述研究的基础上,化学发泡逐渐突破“单纯降低密度”的技术路径,开始与功能填料及多尺度结构设计相结合,形成“轻质化-功能化”耦合调控的新方向。Xie等^[21]以NR为基体,采用可膨胀聚合物微球作为化学发泡剂,成功制造了一种具有典型“海·岛结构”的发泡橡胶体系,从而在NR泡沫内部形成了复杂的三维网络结构。进一步引入体积分数2.04%的碳纳米管(CNT),在密度为 0.50 g/cm^3

的条件下形成连续导电路径。测试结果表明,该材料的热导率为 $0.048\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,电导率达到了 36.6 S/m ;在更低密度条件下,所制得的NR泡沫材料的热导率最低可降至 $0.02\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,显示出优异的热绝缘性能。该研究一方面通过泡孔结构的引入显著降低了固相连续度,从而抑制热传导路径,实现低热导率;另一方面,CNT在“海-岛结构”中的选择性分布形成局部导电网络,使电学性能在较低填料含量下仍可维持。换言之,通过结构设计与填料分布调控,可以在一定程度上打破“密度降低必然导致功能性能衰减”的传统认识,实现密度-功能性能的同步优化。

总体来看,化学发泡橡胶的研究重心从通过调控发泡动力学、硫化动力学以及填料网络以实现相对密度与性能的同步提升,转向通过将导电填料、隔热填料或电磁屏蔽组分引入多孔结构体系,使发泡橡胶在轻质化基础上兼具导电、隔热及电磁屏蔽等多功能特性,显著拓展了其应用边界^[21~23]。这种向“结构-性能一体化设计驱动”的转变,标志着化学发泡橡胶研究进入多功能轻质材料设计阶段。

1.1.2 物理发泡

物理发泡法是指在材料加工过程中,借助外加物理气体(如 CO_2 、 N_2 等)在高压条件下溶解或渗入高分子基体中,随后通过降压、升温或剪切诱导使气体析出并膨胀,从而在材料内部形成多孔结构的一种发泡方式。与化学发泡法依赖分解反应产生气体不同,物理发泡过程中不涉及化学副反应产生,气体来源于物理溶解与释放,因此具有无残留物、环境友好、泡孔尺寸可控性较高等优势^[24]。并且,物理发泡过程中,泡孔的成核行为、气体扩散速率和泡孔生长过程均可通过压力、温

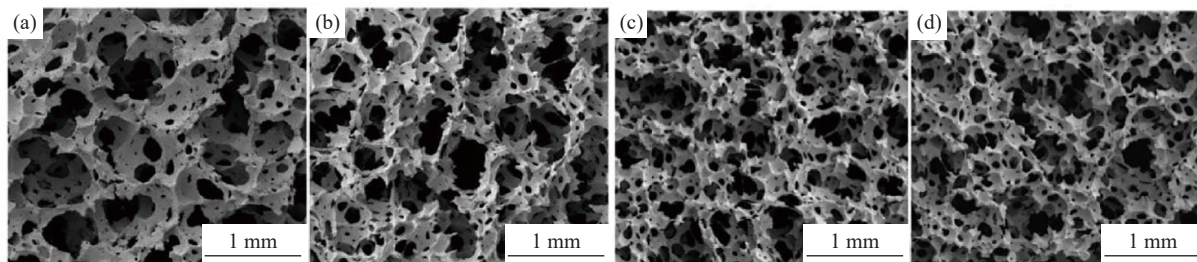


图1 不同浓度化学发泡剂的天然橡胶泡沫SEM图像:(a)对照泡沫;(b) 15%;(c) 30%;(d) 45%^[19] (开放获取,2021 作者版权许可)

Figure 1 SEM images of natural rubber foam with different concentrations of chemical foaming agents: (a) Control foam; (b) 15%; (c) 30%; (d) 45% (Reprinted with permission from Ref. [19]; Open Access, Copyright (2021) The Authors)

度和气体种类进行精细控制,在理论上更有利于材料密度和性能的协调调控。

在基于超临界流体的物理发泡研究中,超临界 CO_2 因其较高溶解度而被广泛用于橡胶和弹性体发泡。然而,气体的高溶解度往往存在较强的塑化效应,降低基体模量会导致泡孔塌陷。因此,基体的强度调控成为超临界发泡体系中实现低密度与高强度协同的关键。Shi等^[25]研究了超临界 CO_2 发泡技术制备功能化石墨烯(FG)增强硅橡胶(VMQ)泡沫的性能,重点探究基质强度对泡沫密度等特性的影响。相较于化学还原石墨烯(rGO),3-氨基丙基三乙氧基硅烷功能化的FG与VMQ分子链相容性更佳、相互作用更强,使基质强度提升约6倍,有效抑制泡孔壁收缩,如图2所示。在相同发泡条件下,VMQ/FG泡沫泡孔尺寸更大、孔隙率更高,当FG为1 wt%时,泡沫密度低至 0.19 g/cm^3 ,仅为VMQ/rGO泡沫的1/3,且兼具更优的拉伸强度、压缩性能及变形恢复能力。研究表明,通过功能化纳米填料调控橡胶基体流变与强度,可增强泡孔壁抗收缩能力,在较低密度下材料仍保持结构完整性。

在泡孔尺度调控方面,Xiang等^[26]采用超临界 CO_2 物理发泡技术,首次在硅橡胶体系中成功制备了同时具有微孔与纳米孔结构的泡沫材料,系统分析了泡孔结构演变现象及其对力学性能造成的影响。采用调控二氧化硅含量、预硫化时间和饱和压力的方式,实现了泡孔尺寸从微米级向纳米量级的可控转变。结果表明,微孔硅橡胶

泡沫的最小泡孔尺寸可达 $1.09 \mu\text{m}$,泡孔密度为 $2.83 \times 10^{11} \text{ cells/cm}^3$;在高硅含量(70 wt%)、较长预硫化时间(11 min)和高饱和压力(22 MPa)条件下,形成了纳米孔结构,其泡孔的尺寸降至59 nm,泡孔密度高达 $6.35 \times 10^{14} \text{ cells/cm}^3$ 。力学性能分析表明,连续蜂窝状微孔结构能赋予泡沫较为明显的压缩平台区。当开孔率慢慢升高,泡孔壁空化增强,压缩平台逐渐消失,拉伸强度由2.66 MPa降至1.94 MPa。说明泡孔结构的“连续性”与“闭孔率”直接决定材料的承载模式。因此,在密度一定的条件下,通过调控孔结构形态可改变材料的力学响应模式,实现不同功能需求(缓冲vs结构承载)的优化。

不同气体在橡胶基体中的溶解度与扩散速率差异显著,从而影响成核密度与后期体积稳定性。相较于 CO_2 ,超临界 N_2 具有较强的成核能力和较低的溶解度。Yu等^[23]采用超临界氮气(sc- N_2)物理发泡技术制备了轻质阻燃氟硅橡胶复合泡沫材料(图3),以聚磷酸铵(APP)和可膨胀石墨(EG)为复配阻燃剂,调控二者配比实现低密度与高阻燃性兼顾。当APP为12.5 phr、EG为7.5 phr时,泡沫密度低至 0.254 g/cm^3 ,极限氧指数36.4%,UL-94等级达V-0,且不影响耐老化、耐油及溶剂性能。此外,Li等^[27]与Belmonte等^[28]在热塑性聚氨酯(TPU)泡沫体系中,发现不同发泡介质在TPU基体中的溶解与扩散行为差异显著。结果表明,采用超临界 CO_2 发泡可获得较高的初始膨胀倍率,但成型后的泡沫容易出现收缩,引起体积稳

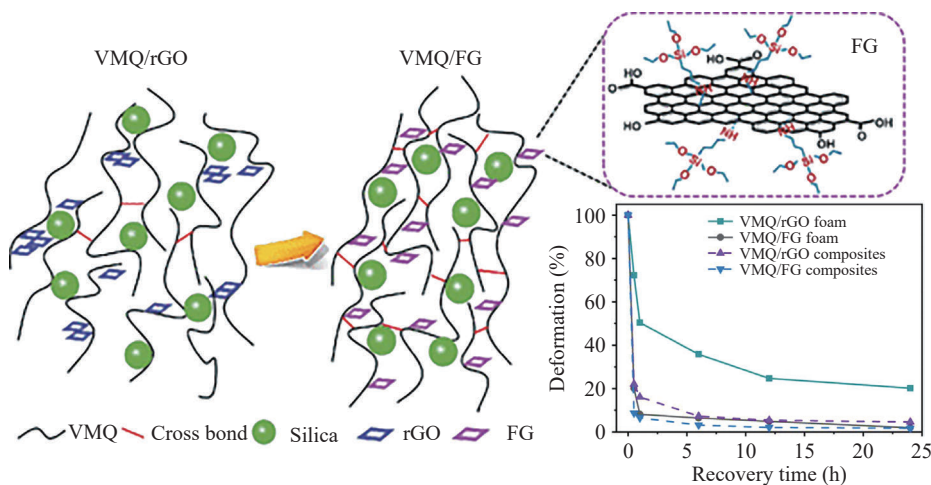


图2 3-氨基丙基三乙氧基硅烷与石墨烯氧化物相互作用示意图^[25] (2020 American Chemical Society版权许可)

Figure 2 Schematic diagram of the interaction between 3-aminopropyltriethoxysilane and graphene oxide (Reprinted with permission from Ref. [25]; Copyright (2020) American Chemical Society)

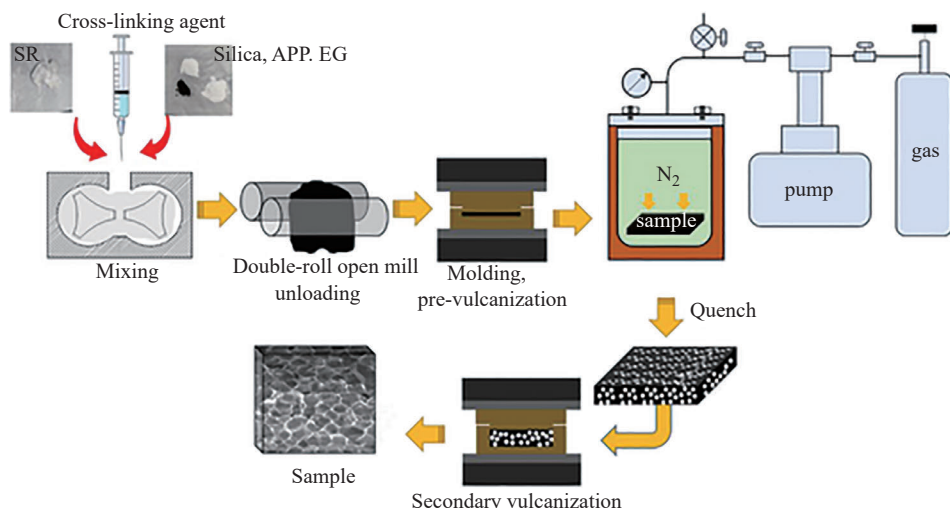


图3 阻燃FSR泡沫的制备过程^[23] (2023 American Chemical Society版权许可)

Figure 3 Preparation of flame retardant FSR foam (Reprinted with permission from Ref. [23]; Copyright (2023) American Chemical Society

定性较差; 相比之下, 超临界 N_2 发泡所得TPU泡沫膨胀倍率较低, 但结构稳定性良好, 几乎不发生收缩。借助 CO_2/N_2 混合发泡及 N_2 再发泡手段, 能在保持较高发泡倍率的同时显著增强泡沫体积稳定性, 为高稳定性TPU物理发泡材料的制备与工艺优化提供有价值的参考。除气体溶解-析出类物理发泡方式外, 部分研究还通过物理孔形成剂搭建多孔结构。Peng等^[29]研究了以NaCl作为致孔剂(类发泡剂)制备开孔硅橡胶泡沫, 在硅橡胶基体中引入NaCl颗粒并在硫化后溶解去除, 构建可操控的多孔结构。研究表明, NaCl并不通过分解释放气体发泡, 而是作为物理致孔剂直接影响泡孔的形成与连通性。随着NaCl含量的增加, 泡孔数量和尺寸增大, 孔隙率提高, 密度降低, 泡沫结构由以闭孔为主慢慢转变为稳定的开孔结构。但由于可实现有效承载的橡胶相减少, 导致力学强度下降; 与此同时, 开孔结构的形成则极大提升了材料的吸声性能。该研究再次表明, 密度降低伴随承载路径减少, 但通过结构类型转变(闭孔 $\rightarrow$ 开孔), 可实现声学功能增强。

总体而言, 物理发泡技术在泡孔精细调控、环境友好性及结构设计方面具有显著优势。其实现低密度与高力学稳定性的协同仍依赖于基体增强、共混设计、气体种类选择以及发泡参数的多因素耦合调控, 以达到轻质化与高回弹、高稳定性的综合优化。

1.2 空心微球填充

与化学或物理发泡橡胶通过气体成核与泡孔

生长实现轻质化不同, 空心微球(包括空心玻璃微球HGM、空心热塑性微球HTM等)作为轻质填料, 主要依赖固体填料内部封闭空腔对橡胶基体的体积替代效应来降低材料密度^[30], 同时对填料-基体界面进行调控, 以对复合材料的模量和刚度提供补偿。因此从密度-性能的耦合机制来看, 发泡与空心微球体系存在本质差异。发泡橡胶通过减少固相连续度以实现轻质化, 但承载能力被削弱; 而空心微球体系通过结构单元替代来实现轻质化, 保留了基体的连续网络。因此, 空心微球更强调界面的调控与填料完整性, 而非成核-生长动力学控制。

HGM和HTM在热稳定性与加工行为上各有特点; HGM通常耐高温, 模量高但界面脆, 易破裂; HTM在加工时可通过加热膨胀形成致密多孔结构, 具有更好的加工适应性^[31]。近年围绕HGM尺寸分布、表面改性及与基体界面相容性的研究表明, 通过界面增强策略可以缓解微球破裂与界面脱黏导致的力学退化问题, 使其在降低密度的同时维持结构完整性。

Wang等^[32]以HGM填充硅橡胶为例, 将硅橡胶密度从 1.10 g/cm^3 显著降低至 $0.65\sim 0.70\text{ g/cm}^3$, 最大降幅可达35%~40%, 在不引入宏观泡孔结构的条件下实现高效轻质化。与发泡橡胶相比, 轻质填料的引入避免了泡孔塌陷、收缩, 在一定程度上抑制了硅橡胶在老化过程中的性能衰减, 有助于提高轻质硅橡胶的长期服役稳定性。此外, 作者采用Lopez-Pamies本构模型对复合材料的非

线性力学行为进行拟合分析,证实该模型能够较好地描述HGM填充硅橡胶在老化前后的应力-应变响应关系,为轻质橡胶材料的结构设计与性能预测提供了理论依据。Yang等^[33]研究了HGM填充对复合橡胶密度及隔声性能的影响。结果表明,随着HGM添加量的增加,复合橡胶的总体密度明显降低,主要是因为HGM内部封闭空腔对橡胶基体的体积替代作用,使材料在不引入发泡孔结构的情况下实现轻质化。

Yang等^[34]开展了HGMs/SR复合材料的密度优化及综合性能研究。结果表明,HGMs与SR基体相容性良好,当HGMs体积分数从0%增长到50%时,复合材料密度从 0.97 g/cm^3 降到了 0.56 g/cm^3 ,且因引入大量封闭孔隙,导热系数低至 $0.11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。重要的是,该体系并未出现传统发泡橡胶中密度下降-强度下降的负相关趋势,相反,HGMs显著增强了材料力学性能,压缩强度最大可提升828%,拉伸强度提升164%,热分解温度达到 466.8°C ,说明在界面相容性良好的前提下,HGM既能够依托内部空腔结构实现材料轻质化,又可凭借高模量壳体有效分散应力,进而实现材料密度、力学性能与热稳定性的综合提升。Ma等^[35]以BR/SBR作为基体,通过PDA修饰并化学镀铜制备轻质橡胶复合材料(图4)。在 170°C 的环境中,HGMs-Cu表面的Cu与橡胶硫化体系内的活性硫反应生成 Cu_xS 界面层,显著增强了填料与橡胶的界面结合。随HGMs-Cu含量增加,材料密度近乎以线性方式下降,若体积占比为50%,其密度为

0.82 g/cm^3 ,磨耗显著降低。当体积分数为10%时,复合材料拉伸强度可达 11.4 MPa ,说明通过界面强化可重构应力传递路径,使高体积分数空心微球体系在轻质化条件下仍保持优异的力学与耐磨性能。

在空心微球填充体系中,除填充量与界面改性外,微球完整性本身亦影响密度-性能的耦合关系。空腔结构是否保持完整,直接决定轻质化效果与热-力学响应模式。Hu等^[36]以SR为基体,系统研究了完整与破碎HGM比例对复合材料性能的影响。结果表明,若破碎HGM体积分数从0%递增至100%,复合材料密度出现明显升高,主要源于HGM空腔结构被破坏;同时导热系数显著增加,隔热性能降低,破碎HGM填充体系的导热系数甚至超过了纯SR($0.195 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)。相反,破碎HGM因比表面积增大,可增强填料-基体界面作用,使拉伸强度、断裂伸长率等力学性能提高。作者还提出可通过热学与力学数据反推出制品中破碎HGM的含量,为实际加工评估提供方法。Guo等^[37]围绕丁腈橡胶(NBR)/HGM混炼胶作为研究对象,系统探讨了HGM及其表面改性对复合材料摩擦磨损性能的影响。通过界面改性增强HGM与NBR的界面结合力,可有效控制微珠脱落与界面裂纹扩展,使磨损体积损失较未改性体系降低约30%~40%。研究表明,良好的界面结合是实现轻质化与耐磨性能同步提升的关键。该作者又探究了硅烷偶联剂(KH550、KH570)及填充量对HGM增强NBR复合材料性能的影响^[38]。结果表明,

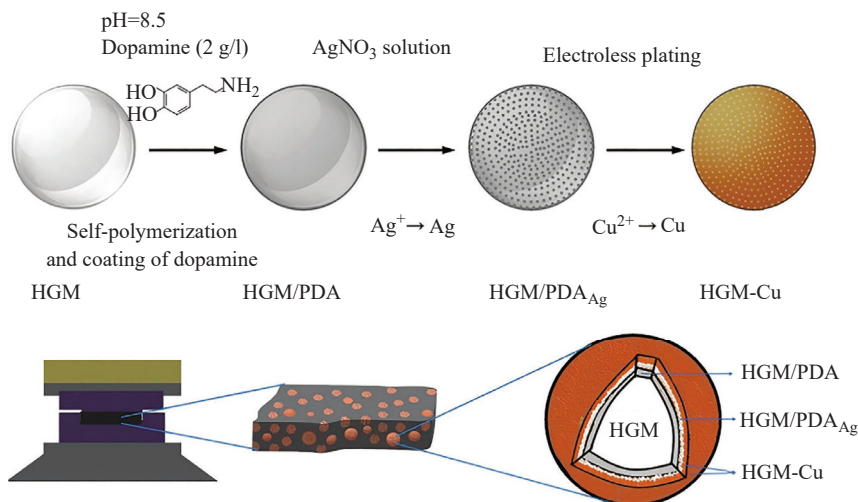


图4 复合材料的制备工艺^[35] (开放获取, 2023 作者版权许可)

Figure 4 Preparation process of composite materials (Reprinted with permission from Ref. [35]; Open Access, Copyright (2023) The Authors)

KH550 改性效果优于 KH570, 5 wt% KH550 改性 HGM 使 NBR 拉伸强度达 7.98 MPa, 摩擦系数降至 1.10, 磨损率低至 $0.72 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 界面结合效果最佳。HGM 填充量在 5~35 phr 范围内, 复合材料杨氏模量从 0.81 MPa 增加至 1.13 MPa, 邵氏硬度达 61 A, 磨损率随填充量的增加持续降低, 玻璃化温度稳定在 -3°C 左右。说明界面的强化可抑制微球脱落与裂纹扩展, 实现轻质化与耐磨性能同步提升。

空心热塑性微球 (HTM) 作为一类典型的轻质有机填料, 由热塑性聚合物外壳包裹烃类发泡剂组成, 受热后外壳软化、内部气体膨胀, 形成封闭空腔结构, 凭借密度极低、加工流动性好、泡孔结构均匀可控等优势, 成为橡胶轻质化的优质填料。与空心玻璃微球 (HGM) 相比, HTM 质地更柔韧, 耐剪切破碎能力更强, 适配橡胶混炼、注塑、挤出等常规加工工艺, 在乙烯基弹性体、液体硅橡胶、聚氨酯等多种橡胶基体中均有广泛应用。

Curd 等^[39]系统研究了 HTM 在复合泡沫塑料中的几何特征与力学性能, 重点分析其作为轻质结构单元的基础作用机理。结果表明, HTM 具有规则的球形形貌, 粒径主要分布在数十微米范围, 壳层厚度为亚微米至数微米, 内部封闭空腔使其表观密度显著低于实心聚合物填料。在合理壳厚-粒径数条件下, HTM 可在显著降低复合材料密度的同时, 仍保持一定的力学支撑与能量吸收能力。该研究阐明了空心热塑性微球通过体积替代实现轻质化的本质机制, 即通过壳层弹性变形与内部空腔压缩, 实现能量吸收与缓冲。Cai 等^[40]使用不同重量比的热膨胀空心微球 (TEHM) 制备 PDMS 泡沫塑料。如图 5 所示, 在聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 基质中加入 TEHM, 可以得到力学性能

提高、软化性能独特的泡沫塑料。这种软化行为使泡沫具有很好的韧性和较高的动能吸收效率。例如, TEHM/PDMS(1/2) 泡沫塑料的能量吸收为 0.8 MJ/m^3 , 较高的 I 值 (理想能量吸收效率) 为 74%。Smith 等^[41]研究了聚氨酯基体中嵌入 HTMs 的复合泡沫在高应变压缩载荷下的性能, 系统评估了其在高应变压缩载荷下的轻质特性与力学响应行为。结果表明, HTMs 实测密度仅 28.7 kg/m^3 , 远远低于聚氨酯基体 (1083 kg/m^3), 随填充率的 (0%~40%) 提升, 泡沫密度不断降低, 且实测值与理论公式 $\rho_{\text{th}} = \rho_{\text{mat}}(1 - \varphi) + \rho_{\text{mb}}\varphi$ (式中, ρ_{th} 为复合泡沫材料的理论密度, ρ_{mat} 代表聚氨酯基体的密度, φ 表示空心热塑性微球在复合泡沫中的体积分数, ρ_{mb} 为空心热塑性微球自身的密度) 契合度高。密度降低的同时, 材料力学性能优异, 若填充率为 40% 时, 比刚度较基体提升 2.5 倍, 达到 50% 应变时依然具有强恢复能力, 不见明显的损伤迹象。

在实际应用中, HTM 面临着与 HGM 相似的界面难题。其外壳极性弱、表面能低, 与橡胶基体相容性差、界面结合力弱, 受力易出现微球脱落、界面脱黏等问题, 造成材料力学性能大幅衰减, 混炼时容易团聚, 影响制品性能稳定性。为此, 学界针对 HTM 开展了关于表面改性及界面优化研究, 形成了适配其特性的改性方案, 补齐了相关研究短板。

Maf^[42]针对乙烯基塑性溶胶体系, 探究了未改性 HTM 与改性 HTM 对复合材料回弹性能、阻尼性能及力学强度的影响。研究选用 Expancel 系列 HTM, 通过动态力学分析 (DMA) 表征材料损耗因子 ($\tan\delta$) 与弹性模量, 结果显示, 纯 HTM 填充的乙烯基弹性体, $\tan\delta$ 峰值较高, 阻尼大, 回弹性能偏弱, 弹性模量偏低, 根源在于微球与基体界

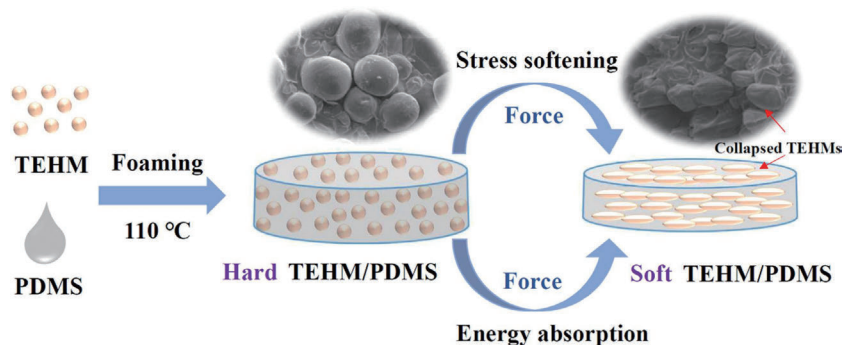


图5 改善软化性能和高动能吸收效率的PDMS/TEHM泡沫塑料制备示意图^[40] (2021 American Chemical Society版权许可)

Figure 5 Schematic of PDMS/TEHM foam plastic with improved softening performance and high kinetic energy absorption efficiency (Reprinted with permission from Ref. [40]; Copyright (2021) American Chemical Society)

面存在空隙,应力传递受阻。通过对HTM表面进行极性接枝改性,引入与聚氯乙烯基体相容的官能团,能有效提升界面润湿性,降低 $\tan\delta$ 峰值,提升材料回弹韧性,同时增强弹性模量,改善材料刚度与韧性的平衡。该研究证实,界面改性是解决HTM与极性橡胶基体相容性差的关键手段,改性后微球能牢牢锚定在基体中,充分发挥空腔轻质、缓冲吸能的优势。

Marl等^[43]以液体硅橡胶(LSR)为基体,选用低膨胀温度的Expancel 031 DU 40型HTM,研究了微球表面处理对发泡硅橡胶结构与性能的影响。未改性HTM填充的LSR发泡材料,微球与硅橡胶基体界面结合松散,断面SEM图像显示明显的界面缝隙,拉伸强度大幅下降,密度降低幅度受限,且泡孔分布不均。采用硅烷偶联剂对HTM表面进行预处理,在微球外壳引入硅氧烷基团,使其与硅橡胶基体形成化学交联结合,既能提升微球在胶料中的分散均匀性,杜绝团聚现象,又能强化界面结合力,抑制微球与基体分离。改性后制备的LSR发泡材料,泡孔结构更均匀致密,密度降幅提升,力学性能衰减幅度减小,克服了纯HTM填充体系界面薄弱、力学损失大的缺陷。研究还发现,适宜的改性剂用量能兼顾微球膨胀性能与界面结合效果,过量改性剂会导致胶料黏度上升,阻碍微球受热膨胀,影响轻质化效果。

对比HGM与HTM的改性策略可知,二者核心挑战均为界面相容性差、填料分散不均,但改性方式存在差异。HGM以硅烷偶联剂改性、表面粗化为主,侧重提升无机微球与有机基体的结合力;HTM除偶联剂改性外,还可通过表面接枝极性基团、等离子体处理等方式改善表面极性,适配不同橡胶基体的极性需求,且无需担心改性过程破坏微球壳层结构。目前,HTM改性研究仍集中在单一偶联剂改性、表面接枝改性方向,针对复杂工况、特种橡胶基体的多功能改性研究较少,是未来该领域的重要研究方向。

1.3 气凝胶/纳米骨架-橡胶混成体系

气凝胶以超低密度与超低热导著称,但其脆性使得纯气凝胶难以直接用作弹性部件^[44]。最近的策略是构建“气凝胶骨架+弹性橡胶包覆/浸渗”混成材料,从而获得兼具极低密度、良好隔热性能以及可压缩/回弹的复合结构。将硅气凝胶或二氧化硅纳米骨架与橡胶基体复合,可以制备出

保有较低热导且在循环压缩下保持稳定性能的材料体系^[45],适用于电池隔热、轻质隔热层与柔性压力传感器等应用^[46]。此类混成体系的关键在于界面黏结、气凝胶孔结构的完整性与橡胶浸润工艺的共同调控。

Alves等^[47]通过将硅气凝胶、再生轮胎橡胶和聚乙烯缩丁醛(PVB)采用热压成型的方法制备复合材料,系统分析了各组分比例对材料密度、热导率、力学性能和结构形貌的影响。研究表明,硅气凝胶的引入显著降低了材料密度和热导率,而橡胶相的加入改善了材料的柔韧性和压缩回弹性能;PVB在体系中起到黏结和结构稳定作用。该复合材料在保持较低热导率(约55 mW/(m·K))的同时具有良好的力学稳定性和热稳定性,显示出作为可持续建筑隔热材料的应用潜力。Lamy-Mendes等^[48]研究了二氧化硅与再生橡胶溶胶制备的纤维增强气凝胶复合材料的低密度及隔热性能。他们首次将过乙酸处理的再生橡胶溶胶融入硅溶胶体系,添加多种纤维增强,经常压干燥制得疏水面板。复合材料密度低至100.3 kg/m³,聚酯纤维增强型导热系数达(16.4±1.0) mW/(m·K)(超隔热级别),400 °C以下热稳定性良好,可承受循环压缩且近完全恢复,既实现废弃物回收利用,又为建筑隔热提供了低密度、高性能的环保材料选择。

Le等^[49]对以废轮胎橡胶粉(WTRP)和煤灰(CA)作为原料制备复合气凝胶的密度优化及综合性能展开研究。依靠冷冻干燥法,采用PVA、CMC为黏结剂、GA为交联剂,成功合成低密度复合材料。当CA与WTRP质量比为1:1、CMC质量分数0.6%时,气凝胶密度降低至0.055 g/cm³,孔隙率达到了95.6%。该材料兼具优异性能,导热系数0.027 W/(m·K),杨氏模量1.206 MPa,降噪系数0.414,且经MTMS对其改性后具有疏水性,实现了废弃物资源化与低密度高性能材料的协同,为保温隔音领域提供环保选择。Abd Halim等^[22]研究了硅橡胶(RTV-SiR)/二氧化硅气凝胶(SA)复合材料的密度优化及综合性能。以稻壳灰为原材料,经过常压干燥制备出密度仅0.07 g/cm³的疏水SA,把它以9 wt%比例混入RTV-SiR基体,制得复合材料。结果显示,复合材料密度较纯硅橡胶降低70%,低至0.74 g/cm³,同时导热系数下降47%(0.18 W/(m·K)),拉伸强度提升至3.48 MPa,

表面接触角实现 140° , 而且还能承受 800 s 火焰的冲击, 背面温度稳定在 100°C 。该研究采用 SA 填充, 实现了材料低密度与隔热、阻燃、疏水性能的同时提升, 为建筑保温领域提供了优质选择。Boonrawd 等^[50]研究了新型溶剂-乳胶混合法制备二氧化硅气凝胶/天然橡胶复合材料的密度优化及隔热性能。以正己烷为分散介质, 将 20~100 phr 二氧化硅气凝胶与天然橡胶乳胶混合, 经过干燥制备出复合材料。结果显示, 复合材料密度较纯 NR (909.0 kg/m^3) 明显降低, 随气凝胶含量的增加, 密度降至 247.0 kg/m^3 , 降幅超过 60%; 若含量为 40 phr 时, NR 会形成大孔结构, 气凝胶嵌入其中, 促使复合材料导热系数低至 $0.055\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 较纯 NR 而言下降了 68.19%, 而且玻璃化转变温度稳定在 -61°C 左右, 维持着良好的柔韧性。

总体来看, 气凝胶-橡胶混成体系通过“刚性纳米骨架+柔性弹性网络”的结构耦合, 实现了轻质化、隔热性与力学韧性的综合提升, 是未来高性能轻质功能复合材料的重要发展方向。

1.4 增材制造——3D 打印

近年来, 随着增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术的迅猛发展, 3D 打印逐步进入弹性体与橡胶材料领域, 为轻质橡胶的结构设计与制备提供了新的技术路径^[51]。与传统发泡或填充法主要依赖材料内部随机孔结构, 实现轻质化不同, 3D 打印的核心优势是借助数字化设计精确搭建可控制的宏观-介观有序多孔结构, 从而在降低密度的同时实现力学性能、变形模式以及功能特性的共同调控。

在材料体系方面, 目前适用于 3D 打印的橡胶材料主要集中于硅橡胶 (如 RTV/LSR 体系)、热塑性弹性体 (TPE、TPU) 以及部分改性天然橡胶或合成橡胶体系^[52]。其中, 硅橡胶因为其流变性能可调控、室温或低温情况下固化、耐老化性能优异, 成为较早实现 3D 打印成型的橡胶材料之一。例如, Ji 等^[53]研究了利用直接墨水书写 (DIW) 3D 打印技术结合仿生结构设计来制备轻质双组分液态硅橡胶 (LSR) 的方法, 通过设计模块化 Bouligand 仿生多孔结构, 让材料孔隙率稳定在 16%~20%, 成功降低了密度; 同时把关键参数优化为 80°C 打印温度、3 MPa 挤出压力、90 mm/s 打印速度等, 让轻质 LSR 的拉伸强度达到 9.30 MPa、断裂伸长率 800%, 10 次拉伸循环回弹率 94%, 其中 $0^\circ\sim 90^\circ$ 旋

转角结构在 100 次压缩循环操作后, 回收率高于 95%, 兼具良好的轻质特性以及力学稳定性, 为冲击防护、能量耗散领域的轻质弹性体应用提供了可行路径。

研究表明, 通过直写成型 (direct ink writing, DIW) 技术, 可将高填充或高黏度硅橡胶浆料逐层沉积然后固化, 制备出具有规则孔道结构的轻质弹性体, 其密度可降低 30%~60%, 并且保持良好的压缩回弹性能。为实现 DIW 技术在橡胶与硅橡胶体系中的应用, 研究重点逐步转向可打印弹性体墨水的构建。Elahee 等^[54]就用在 DIW 3D 打印的弹性有机硅墨水材料配方展开了研究, 通过调节体系的流变情况与固化动力学, 实现了三维弹性体结构的稳定成型。该研究为后续通过 DIW 构筑规则堆叠孔结构、实现低密度硅橡胶多孔材料提供了关键的材料基础。

在解决材料可打印性问题后, DIW 技术开始被引入具体橡胶体系, 用于轻质多孔结构的实际构筑。Garcia 等^[55]研究了丁苯橡胶 (SBR) 基黏合密封材料的 DIW 3D 打印行为, 通过调控打印路径和层间间距, 在橡胶结构中引入周期性孔道网络。该类孔结构主要依赖几何设计而非气体发泡, 在保证橡胶连续性的同时实现了结构轻质化, 为轻质橡胶密封与黏结构件的设计提供了新思路。进一步地, Chen 等^[56]研究开发了具有三峰孔隙率的 3D 打印硅橡胶泡沫, 使其具有出色的性能、多功能和多维可调性 (图 6)。将氯化钠与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 前驱体凝胶简单混合, 制备了可打印的黏弹性油墨。通过盐析和溶剂去除产生的分级孔隙率, 产生了具有前所未有的超弹性、极端压缩性、循环耐久性 (在 90% 应变和 1000 次大压缩的极端压缩下几乎为零的不可逆形状变形) 和优异的拉伸能力 (最大应变为 210%) 的 PDMS 泡沫。多孔结构还起到了表面粗糙度的作用, 提供了超疏水性能。模数、弹性、拉伸能力和吸油能力均可通过油墨配方或计算机辅助绘图进行调节。Zhou 等^[57]研究了基于 DIW 的 3D 打印硅胶多孔结构, 通过周期性栅格与空腔结构设计制备了具有形状可变能力和低温超弹性的多孔硅橡胶材料。结果表明, 该有序孔结构主要依赖结构轻质化实现低密度特征, 相较传统随机发泡橡胶体系, 在力学稳定性和结构可控性方面表现出明显优势。

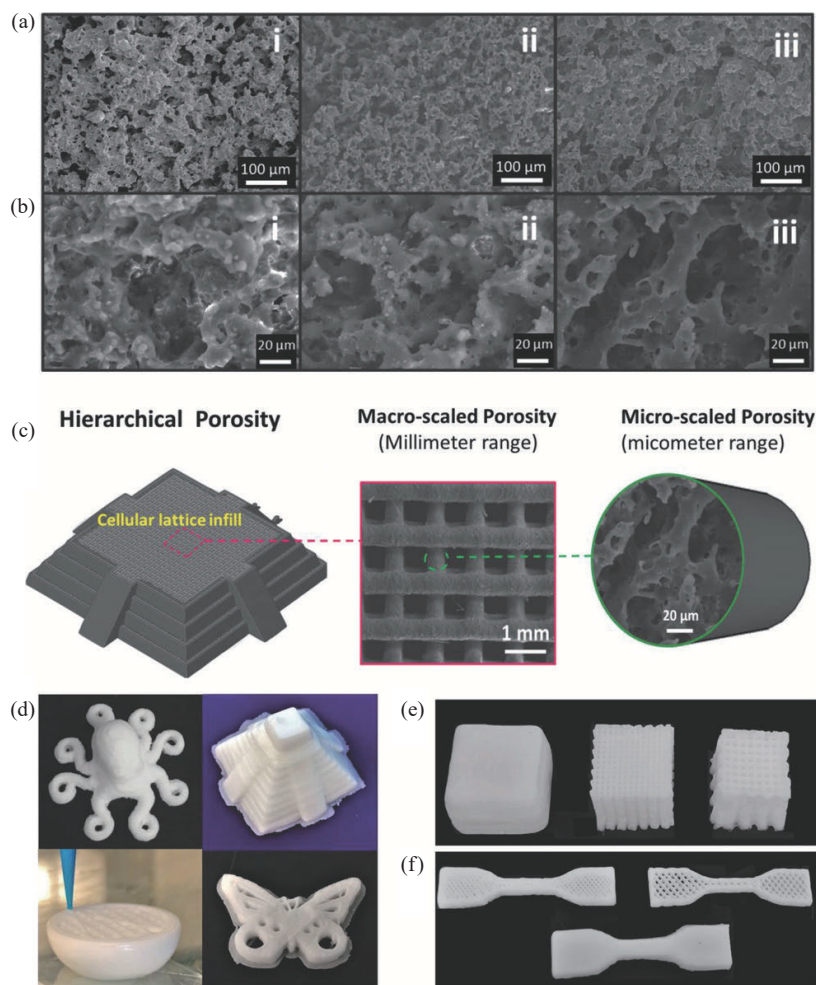


图6 (a, b)挤出丝内微尺度孔隙度的SEM图像; (c) 3D打印物体中的层级孔隙性; (d~f) 3D打印的光学图像PDMS泡沫结构^[56] (2019 American Chemical Society版权许可)

Figure 6 (a, b) SEM images of microscale porosity in extruded filaments; (c) Hierarchical porosity in 3D printed objects; (d~f) Optical images of 3D printed PDMS foam structures (Reprinted with permission from Ref. [56]; Copyright (2019) American Chemical Society)

除了采用DIW方法,基于光聚合的3D打印技术也被用于制备层级多孔弹性体结构中。通过在光固化树脂体系中引入可逆动态交联体系(如可交换共价键或物理可逆键),赋予材料一定的应力松弛与结构重构能力;同时结合超临界流体发泡,可实现多尺度孔结构的轻质弹性体材料的合成^[58]。由此获得的轻质弹性体在保持较低密度的同时,表现出优异的能量吸收能力与形变恢复特性^[59],实现了“可设计结构+可调网络”的同步优化。这类方法在构筑复杂拓扑、梯度孔隙以及多功能一体化结构方面具有明显优势。

然而,从工程应用角度看,3D打印轻质橡胶仍面临若干挑战。一方面,橡胶材料本身的高黏弹性和慢速硫化特性对打印成型窗口提出了较高要求,因此必须针对打印工艺专门设计材料配

方与流变性能^[60];另一方面,相较于连续挤出或模压发泡工艺,3D打印的成型效率仍然偏低^[61],目前更适合用于小批量定制化构件、功能原型及高附加值的应用场景。此外,打印结构在长期疲劳、老化及复杂环境服役条件下的可靠性,仍需要系统评估与标准化验证^[62,63]。总体而言,3D打印为轻质橡胶材料的制备提供了一种不同于传统发泡和填充的新思路,其显著优势体现在结构可设计性与功能集成的潜力上。虽然现阶段在大规模工业制备中难以替代传统工艺,但在复杂结构的规划设计、个性化需求应用以及多尺度轻质化结构构建方面呈现出独特价值,存在重要的研究意义和应用前景。

1.5 各类轻质橡胶制备方法对比

为直观对比不同轻质化技术的优劣,梳理各

项工艺的核心特点与适用场景，现将化学发泡、物理发泡、空心微球填充、气凝胶/纳米骨架-橡胶混成体系、3D打印这5种制备方法，从密度调控能力、力学性能、工艺复杂度、优缺点及适用场景进行系统性汇总，具体如表1所示。

综合来看，当前轻质橡胶材料的制备技术，无论是通过化学/物理发泡、空心填料填充构建多孔结构，还是借助3D打印实现精准结构设计，均围绕“低密度-高性能-多功能”这一核心需求，各自形成了差异化技术优势，经不同制备路径优化后的轻质橡胶材料，凭在力学性能、隔热隔声、阻燃缓冲以及能量吸收等方面表现突出，已在汽车工业、航空航天、高端装备、建筑节能等多个重点领域展现出广阔的应用前景。

2 轻质橡胶在不同领域的应用

2.1 汽车工业

在汽车轻量化与电动化背景下，轻质橡胶材料已成为非承载部件轻质化设计的重要技术手段，主要是在车门与车窗密封条、发动机舱隔热垫、底盘减振衬垫、电池包隔热与缓冲层以及NVH控制部件等方面运用^[64,65]。采用发泡或空心微球填充的方式，可在保证必要力学与耐久性能的前提下，显著降低部件质量。

Valentini等^[16]以EPDM为基体，制备了EPDM/石蜡复合泡沫材料，用作汽车热管理相关部件，其密度与传统实心橡胶相比明显要低，同时维持着良好的结构稳定性与热能存储能力，为汽车隔热与热调控的各个部件提供了新的材料选择。

在密封与减振领域，Wen等^[20]使用超临界CO₂物理发泡技术制备了微孔EPDM泡沫，以

引入硅橡胶增强基体的强度，在密度降低至约0.35 g/cm³的条件下，泡沫的拉伸强度和压缩强度分别提高461%和283%，有效解决了低密度发泡橡胶力学性能不足的问题，显示出其在汽车密封条与减振衬垫中的应用潜力。Guo等^[38]针对轻质橡胶应用需求，以HGM为轻质填料，经5 wt%硅烷偶联剂KH550改性后与NBR复合，制备兼具低密度与高耐磨性能的复合材料。HGM的空心结构赋予材料低密度优势，改性后与NBR基体界面结合稳固，随HGM含量(5~35 phr)增加，复合材料弹性模量提升、磨损率持续下降，且保持轻质特性。该材料有效解决了传统橡胶轻量化与耐磨性难以兼顾的问题，为汽车密封件、机械减振件、管道耐磨衬垫等对轻量化和耐磨性均有要求的场景提供了理想方案，拓展了轻质橡胶的应用范围。

随着新能源汽车的快速发展，电池系统对轻质隔热、阻燃与缓冲材料提出了更高要求^[66]。发泡橡胶凭借其良好的弹性，可用作减震器^[67,68]。它们可以在特定应用的一定频率范围内耗散或承受冲击能量，特别是在循环变形下^[69,70]。例如吸能聚合物泡沫塑料，可以减轻冲击应力并防止在发生碰撞时对乘员造成伤害。Sanborn等^[71]应用一种改进的Kolsky压杆装置来评估硅胶泡沫的频域能量耗散性能。他们能够在1~8 kHz的频率范围内制造出99%的冲击能量耗散的有机硅泡沫。在12.8 m/s的冲击速度下，小预应变状态的硅泡沫其冲击能量耗散率可接近100%；然而，当预应变增大时，该材料的能量耗散率则会显著下降至59%^[72]。

一些轻质橡胶材料的低热导率，在电池隔热

表1 不同轻质橡胶制备方法对比
Table 1 Comparison of preparation methods for different types of light rubber

制备方法	密度调控能力	力学性能	工艺复杂度	核心优势	主要短板	应用场景
化学发泡	高	一般	工艺成熟	成本低、适合量产	泡孔不均匀，易塌陷	常规减振、密封、隔热构件，大批量低成本制品
物理发泡 (超临界发泡)	高	较好	需高压设备	结构可控、性能均衡	设备复杂	高端密封、电池隔热、航空航天缓冲、高性能吸能部件
空心微球填充	一般	优异	需要界面改性	密度稳定、性能保持好	成本较高	高精度密封、深海防护、航空航天隔热、耐磨构件
气凝胶/纳米骨架-橡胶混成体系	高	一般	需严格控制气凝胶结构完整性	低导热、轻质隔热	成本较高	建筑/电池/航天超隔热、柔性保温、阻燃防护、吸声降噪
3D打印	较高	一般	工艺复杂	结构可定制、多功能	效率低、成本高	定制化部件、复杂结构、高端功能器件、精密防护

与热防护领域也展现出独特优势。Xie等^[21]构建了嵌入碳纳米管网络的天然橡胶发泡材料,在密度降低至 0.50 g/cm^3 的条件下,其热导率低至 $0.048\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,最低可达 $0.02\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,同时具备一定导电性,可用于电池隔热与电磁屏蔽一体化部件。此外,Abd Halim等^[22]将二氧化硅气凝胶引入硅橡胶体系,使复合材料密度降低约70%,导热系数下降47%,并在火焰冲击条件下表现出优异的隔热与阻燃性能,显示出其在动力电池热防护领域的应用潜力(图7)。Yu等^[23]制备的轻质阻燃氟硅橡胶泡沫在保证低密度(0.254 g/cm^3)的同时,实现了UL-94 V-0级阻燃性能,适用于新能源汽车电池包周边隔热与防火缓冲部件。

2.2 航空航天与高端装备领域

航空航天领域对材料的比强度、比刚度、耐极端环境能力和质量控制提出了极高要求^[73,74],使轻质橡胶材料在非承载功能部件中具有独特优势,主要用于隔热层、缓冲吸能层、密封与减振构件。

Yang等^[34]开发的中空玻璃微球/硅橡胶复合材料,在HGMs体积分数达50%时,材料密度降低至 0.56 g/cm^3 ,同时导热系数低至 $0.11\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,压缩强度显著提升,满足高温、高压工况下的隔热与结构稳定性要求,适用于航空航天及深地工程中的隔热密封部件。

Wang等^[9]以EPDM为基体制备了用于固体

火箭发动机隔热内衬的轻质橡胶发泡材料,并通过引入碳纳米管和碳纤维实现多尺度增强(图8)。发泡处理使材料密度由约 1.01 g/cm^3 降低至 $0.59\sim 0.65\text{ g/cm}^3$,热导率降低约35%,显著提升了隔热效率。进一步加入碳纳米管和碳纤维后,发泡材料的力学性能和烧蚀性能得到明显改善,其烧蚀速率接近致密橡胶体系,表明该轻质橡胶材料在满足航天隔热防护要求的同时实现了高效轻质化。Hu等^[75]制备并分析了环氧/HGM复合泡沫材料,该材料具有超轻质、高比强度及优异介电性能,是航天国防领域的理想材料。HGM(密度 $0.15\sim 0.46\text{ g/cm}^3$)与环氧基体复合,经硅烷化等改性及优化制备工艺,材料兼具低介电常数、低损耗角正切与高抗压强度,且密度可通过HGM体积分灵活调控。其核心应用集中于航天隐形技术,作为雷达吸波结构(RAS)芯材,能有效降低雷达散射截面(RCS),在X/Ku波段实现高效电磁衰减;同时适配航空领域的轻量化需求,用于结构件可提升payload容量与燃油经济性,拓展了轻质复合材料在高端国防航天领域的应用边界。

2.3 建筑、隔热与声学工程领域

在建筑节能和绿色建筑需求驱动下,轻质橡胶材料逐渐从传统防水密封角色拓展至隔热、隔声和减振功能材料^[76]。相比刚性泡沫材料,橡胶基轻质材料在抗冲击性、耐久性和施工适应性方面具有明显优势。

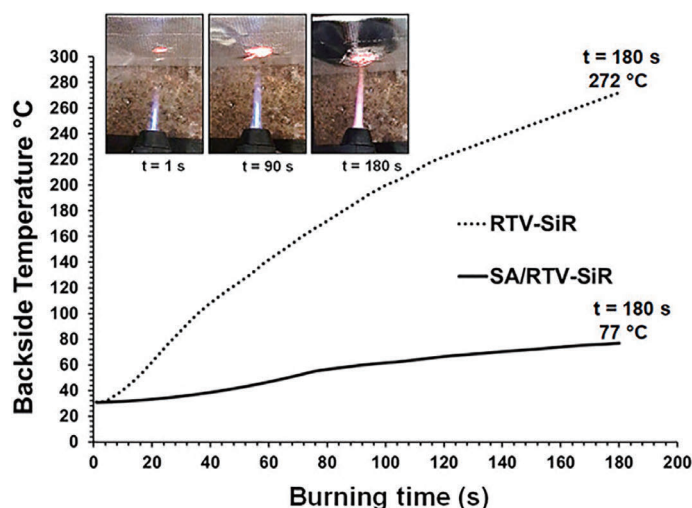


图7 室温硫化硅橡胶试样在火焰穿透试验前180 s内,背面温度随时间的变化规律^[22] (2021 American Chemical Society版权许可)

Figure 7 The variation law of the back temperature with time within 180 s before the flame penetration test for room temperature vulcanized silicone rubber samples (Reprinted with permission from Ref. [22]; Copyright (2021) American Chemical Society)

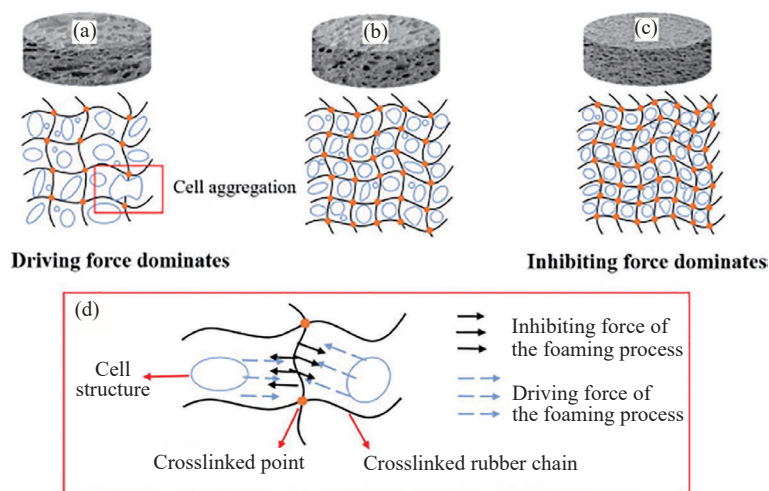


图8 不同预硫化温度下泡孔结构的形成机理:(a) 110 °C, (b) 120 °C, (c) 130 °C; (d)泡孔结构形成过程^[9] (2023 American Chemical Society版权许可)

Figure 8 Formation mechanism of cell structure under different pre-vulcanization temperatures: (a) 110 °C, (b) 120 °C, (c) 130 °C; (d) Formation process of cell structure (Reprinted with permission from Ref. [9]; Copyright (2023) American Chemical Society)

Alves等^[47]将硅气凝胶、再生橡胶与聚乙烯缩丁醛复合制备轻质隔热材料,其热导率约为 55 mW/(m·K),同时保持良好的柔韧性和压缩稳定性,显示出作为可持续建筑隔热材料的应用潜力。Boonrawd等^[50]通过溶剂-乳胶混合法制备了气凝胶/天然橡胶复合材料,材料密度较纯天然橡胶降低超过60%,导热系数下降约68%,在保持橡胶柔性的同时实现优异的隔热性能,为建筑隔热和柔性保温层提供了新思路。

发泡橡胶不仅是一种重量轻、成本低的材料,它在宽频率范围内的振动控制和噪声吸收能力也非常强^[77]。Vahidifar等^[78]研究指出纳米黏土(NC)含量和泡沫形态对吸声和/或反射的影响可以忽略不计,如图9所示。天然橡胶基质和空气之间的阻抗差异显著,导致声波穿透率很低,因此在空气-橡胶界面上有更多的声音反射。并且天然橡胶泡沫塑料的吸声系数随着炭黑(CB)含量的增加而降低^[79]。上述结论可由两方面机制予以证实:其一,较柔软的泡沫材料可通过基体振动实现更高效的声能吸收,因此CB含量的增加会加剧材料软化,进而导致吸声系数降低;其二,泡孔尺寸较小的泡沫通常表现出较差的吸声性能;而炭黑添加量的提高会使天然橡胶泡沫的泡孔尺寸减小,最终造成吸声性能下降。Zhang等^[80]在PU中加入机械力化学脱硫化的GTR粒子,提高了橡胶的黏弹性能,改善了橡胶链的流动性。当声波冲

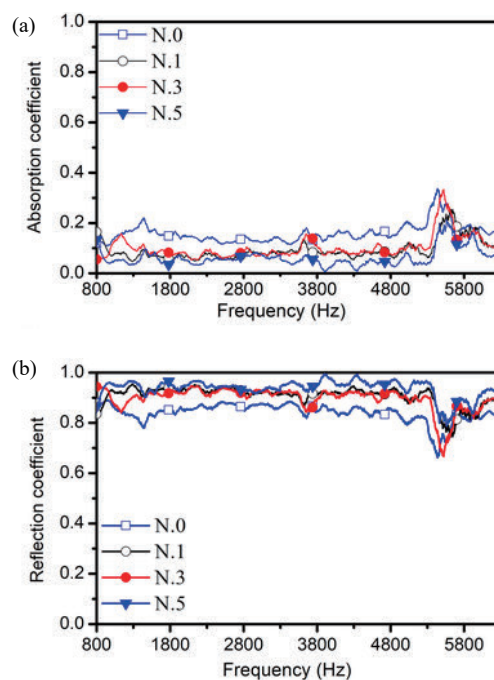


图9 不同NC含量的NR/NC/NCB杂化纳米复合泡沫塑料的吸声系数(a)和声反射系数(b)随频率的变化^[78] (2019 American Chemical Society版权许可)

Figure 9 Variations of sound absorption coefficient (a) and sound reflection coefficient (b) of NR/NC/NCB hybrid nanocomposite foams with frequency (Reprinted with permission from Ref. [78]; Copyright (2019) American Chemical Society)

击PU/GTR泡沫塑料时,由于橡胶分子链的运动,GTR颗粒发生了高度弹性变形,变形与应力之间

存在明显的滞后,该复合材料因此具有优异的中频区吸声性能。

此外, Hu 等^[76]研究了超细金属粉末(SFM)改性丁腈橡胶-聚氯乙烯(NBR-PVC)微孔发泡材料的轻质化及隔声应用。采用模压发泡法制备复合材料, SFM 的加入优化了发泡质量,当 SFM 含量为 30 wt% 时,材料兼具轻质与优异隔声性能,表面密度 0.360 g/cm^3 , 隔声指数达 30.5 dB, 较纯 NBR-PVC 提升 7.2 dB。该轻质隔声材料满足现代轻量化需求,为噪声控制领域提供了实用且高性能的新选择。Yang 等^[33]探究了 HGM 增强复合橡胶的轻质化及隔声应用,基于声学有限元模拟分析了结构参数对其声学行为的影响规律。HGM 的空心结构赋予材料轻质特性,结合橡胶基体的优良加工性,实现“小体积高性能”优势。优化后, 1~4 mm 厚复合材料加权隔声量达 14.02~25.27 dB, 较纯橡胶显著提升。该轻质隔声材料占用空间小、适配性强,可广泛应用于交通、建筑、电气设备等噪声控制场景。

3 工业化挑战与技术瓶颈

尽管轻质橡胶材料在实验室研究层面已取得显著进展,但在迈向大规模的工程应用过程中,仍面临着多重技术瓶颈与现实约束。

首先,工业应用中最核心的矛盾是“密度降低”与“力学性能保持”之间的内在冲突。无论是借助化学发泡、物理发泡,还是引入中空填料手段,孔隙结构的出现都会削弱材料的有效承载面积,导致拉伸强度、撕裂强度及疲劳寿命下降^[81]。在实验室尺度下,可通过优化发泡结构或引入纳米填料进行一定程度的性能补偿;然而在工业连续化生产过程中,泡孔尺寸分布与增强相的分散状态难以实现精确控制^[82],导致材料性能易出现批次波动,限制了其在高可靠性要求场景中的推广应用。例如,发泡橡胶的性能高度依赖泡孔结构参数,包括孔径大小、孔径分布、开闭孔比例及孔壁厚度^[83]。然而,在密炼、成型、硫化等传统橡胶加工工艺流程中,温度场、剪切场与化学反应过程存在高度耦合特性,难以精准调控泡孔的成核、生长及稳定全过程^[84]。工业化生产中,常出现泡孔不均、塌陷或连通等问题,引起制品密度和性能出现显著差别。这种一致性不足,在汽车、轨道交通、航空航天等对可靠性和批次稳定性要

求较高的领域构成明显挑战。

其次,对于空心微球体系,气凝胶颗粒及多尺度纳米填料等轻质化技术路径而言,填料在橡胶基体中的均匀分散和界面结合问题依旧是工业化应用的关键难点。一方面,轻质填料通常密度低、壳层及机械强度有限,在混炼和成型过程中容易发生破碎或团聚^[85];另一方面,填料与橡胶基体之间界面相容性不足会导致应力集中和界面脱黏^[86],削弱材料整体力学性能和耐久性,增加制品早期失效风险。因此,如何在保证填料完整性的同时进行界面强化,是提升轻质化体系长期可靠性的关键技术方向。

而作为轻质橡胶制备新路径的 3D 打印技术,虽然在结构定制化上优势显著,但其工业化应用还面临多重限制。其一,材料适配性体系受限,橡胶高黏弹性、慢硫化特性与打印快速成型需求相矛盾,适配体系仅局限于硅橡胶、热塑性弹性体等,通用橡胶可打印墨水的研发滞后,且配方需要兼顾流变、固化与性能,设计难度大。其二,成型效率偏低,逐层沉积的方式远不及传统工艺的连续化生产效率,难以满足大批量需求,且大尺寸构件容易出现层间结合不良、翘曲等问题,而微尺度打印对设备要求极高。其三,打印件性能与可靠性有待验证,3D 打印橡胶制品存在固有层间界面,易成为应力集中点,导致其拉伸强度、撕裂强度及疲劳寿命较模压制品存在明显差距,且在复杂环境下的长期服役稳定性,如耐老化、耐油、耐高低温循环等性能,尚未形成系统的工业化验证标准。

此外,从产业化与全生命周期角度来看,成本和可持续性问题同样制约轻质橡胶材料的规模化推广。高性能发泡剂、纳米填料及功能化轻质填料通常价格较高,显著增加原材料成本;3D 打印的设备与材料成本更使其在常规制品应用中缺乏市场竞争力。同时,多孔发泡结构、多相复合体系及 3D 打印定制化结构在回收再利用方面存在技术障碍,其复杂结构和多组分特性使传统橡胶回收与再生工艺难以直接适用。这不仅增加了废弃物处理难度,也对绿色制造和循环经济目标提出挑战。

因此轻质橡胶材料在实现“低密度-高性能”协同优化方面已具备坚实的理论与实验基础,但在结构可控性、批次稳定性、界面可靠性、规模化

制造效率以及可持续发展等方面仍存在系统性瓶颈。未来研究可围绕过程精准调控、界面工程强化、低成本高效制备与可循环设计等方向展开,以推动轻质橡胶材料由实验室创新向工业化成熟应用的转化。

4 结论与展望

以轻质橡胶材料的“密度-性能耦合调控”为核心科学问题,系统梳理了近年来该领域的研究进展,构建了“制备技术-结构调控-性能演化-工程应用-工业化挑战”的系统研究框架。首先从化学发泡、物理发泡、空心微球填充、气凝胶/纳米骨架混成及3D打印增材制造5大典型制备策略出发,系统分析了不同路径下的结构构筑原理与密度调控机制。其次从泡孔结构演化、界面应力传递角度,阐释了轻质化对橡胶材料力学、热学、声学等核心性能的影响规律,明确了结构参数与性能响应之间的内在关联。进一步,梳理了轻质橡胶在汽车工业、航空航天与高端装备、建筑隔热声学工程等领域的应用现状与产业化价值。最后,分析了规模化制备过程中面临的力学性能衰减、结构稳定性不足、工艺一致性波动等关键技术瓶颈,为高性能轻质橡胶材料的结构设计与工程化应用提供了理论依据和技术参考。

结合当前研究现状与工业化需求,未来轻质橡胶材料的研究需围绕“低密度-高性能-易制备-可持续”的总体目标,突破密度与性能的固有负相关关系,实现多维性能共同优化。重点聚焦几个方向:

(1) 高强度-低密度协同设计。通过多尺度结构调控(纳米增强、界面强化、有序结构构筑)与应力传递路径优化,弥补轻质化引起的力学性能损耗,实现结构强化与轻质化的同步提升。

(2) 绿色发泡与可持续材料体系构建。推进无毒环保发泡剂、生物基橡胶与可循环轻质填料的发展^[87],构建低碳、可回收的轻质橡胶材料体系,实现性能提升与环境友好的统一。

(3) 多功能集成与智能化发展。将轻质化设计与隔热、电磁屏蔽、阻燃、传感等功能相结合,构建结构-功能一体化材料体系,满足高端装备与智能化应用需求。

(4) 结合AI数据驱动与多尺度模拟,建立工艺-结构-性能定量耦合模型,实现橡胶复合材料

性能的精准预测与工艺智能调控,提升工业化制备的稳定性与可重复性。

总体而言,轻质橡胶材料作为轻量化高性能材料体系的重要组成部分,在汽车、航空航天、建筑节能等领域的实际应用需求持续增长,兼具重要的基础研究价值与工程应用意义。未来需通过材料结构设计、制备工艺创新以及跨领域技术融合的共同推进,突破密度-性能负相关、规模化制备稳定性不足等核心瓶颈,实现低密度、高强度与多功能性的同步优化,同时构建低成本、绿色可持续的制造体系,推动轻质橡胶材料从实验室研究向工业规模生产与高端应用加速转化。

参考文献

- 1 陈依婷, 郭策, 李龙海, 马耀鹏, 马玉秋. 基于蛛网藻结构的轮毂仿生轻量化设计及优化. 机械制造与自动化, 2020, 49(6), 90-94.
- 2 齐羿, 于海淼, 冯启飞, 马鹏飞. 新能源商用车发展趋势和应对策略. 重型汽车, 2023, (2), 38-39.
- 3 曾小红, 李博勋, 李光辉, 李志东, 滕王滕菲, 刘先宝, 黄贵修. 全球视野下我国天然橡胶生态安全风险与绿色发展路径. 中国热带农业, 2025, (5), 8-14.
- 4 Dong, M. Y.; Wang, G.; Zhang, X. N.; Tan, D. Q.; Jaya Prasanna Kumar, D.; Ren, J. N.; Colorado, H.; Hou, H.; Toktarbay, Z.; Guo, Z. H. An overview of polymer foaming assisted by supercritical fluid. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2023, 6(6), 207.
- 5 Quan, X. D.; Han, R. J.; Shao, Y. R.; Niu, K. M. Effect of hollow glass beads on density and mechanical properties of silicone rubber composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2021, 138(7), 49865.
- 6 Wang, Y. Y.; Pang, N.; Yin, X. Q.; Yu, M. J.; Wang, C. G.; Zhou, C. J. Designed composite aerogels with solid-solid phase transition and nanoscale pores for infrared stealth. *Small*, 2025, 21(19), 2411460.
- 7 Yang, M. Y.; Si, Q. L.; Tang, G. H.; Sheng, Q.; Guo, L.; Yang, R.; Li, N.; Zhang, H.; Gao, Q. F.; Peng, F. High-temperature resistance, lightweight, and thermally insulating silica aerogel via doping hollow silica nanoparticles. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2025, 8(17), 8845-8854.
- 8 Siddique, S. H.; Hazell, P. J.; Wang, H. X.; Escobedo, J. P.; Ameri, A. A. H. Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption-A review. *Addit. Manuf.*, 2022, 58, 103051.
- 9 Wang, Y. W.; Li, J.; Wan, L. Q.; Wang, L.; Li, K. A lightweight rubber foaming insulation reinforced by carbon nanotubes and carbon fibers for solid rocket

- motors. *Acta Astronaut.*, **2023**, 208, 270–280.
- 10 Kent, K.; Zeigel, R. F.; Kent, K.; Frost, A. L.; Schaaf, N. G. Controlling the porosity and density of silicone rubber prosthetic materials. *J. Prosthet. Dent.*, **1983**, 50(2), 230–236.
- 11 Zhai, W. T.; Jiang, J. J.; Park, C. B. A review on physical foaming of thermoplastic and vulcanized elastomers. *Polym. Rev.*, **2022**, 62(1), 95–141.
- 12 Rostami-Tapeh-Esmacil, E.; Vahidifar, A.; Esmizadeh, E.; Rodrigue, D. Chemistry, processing, properties, and applications of rubber foams. *Polymers*, **2021**, 13(10), 1565.
- 13 胡欢. 磺酰肼类发泡剂的合成与应用研究. 湖北工业大学硕士学位论文, **2015**.
- 14 Kmetty, Á.; Litauszki, K.; Réti, D. Characterization of different chemical blowing agents and their applicability to produce poly(lactic acid) foams by extrusion. *Appl. Sci.*, **2018**, 8(10), 1960.
- 15 Afrinaldi, B.; Vicarneltor, D. N.; Rudianto, R. P.; Hakim, A. R.; Muslim, O. F. Influence of zinc oxide addition on azodicarbonamide thermal decomposition in the polyethylene/ethylene vinyl acetate foaming release. *Mater. Sci. Forum*, **2021**, 1028, 234–239.
- 16 Valentini, F.; Dorigato, A.; Fambri, L.; Pegoretti, A. Novel EPDM/paraffin foams for thermal energy storage applications. *Rubber Chem. Technol.*, **2021**, 94(3), 432–448.
- 17 Petdee, T.; Naemsai, T.; Pianhanuruk, E.; Boonchouytan, W.; Homkhiew, C. Effects of blowing agents and curing temperatures on physical and mechanical properties of natural rubber foam for laminated floor tiles. *Polym. Polym. Compos.*, **2022**, 30, 09673911221106684.
- 18 Syahrin, S. M.; Zunaida, Z.; Hakimah, O.; Nuraqmar, S. M. S. Effect of blowing agent on compression and morphological properties of natural rubber latex foam. *3RD Int. Postgrad. Conf. Mater. Miner. Polym. Mamip 2019*, **2020**, 2267, 020037.
- 19 Suethao, S.; Phongphanphanee, S.; Wong-ekkabut, J.; Smitthipong, W. The relationship between the morphology and elasticity of natural rubber foam based on the concentration of the chemical blowing agent. *Polymers*, **2021**, 13(7), 1091.
- 20 Wen, H. Y.; Wang, M.; Luo, S. K.; Zhou, Y. L.; Liu, T. Mechanical properties of silicone rubber enhanced microcellular EPDM foams based on supercritical CO₂ foaming technology. *Macromol. Mater. Eng.*, **2021**, 306(10), 2100310.
- 21 Xie, Z. X.; Cai, Y. F.; Zhan, Y. H.; Meng, Y. Y.; Li, Y. C.; Xie, Q.; Xia, H. S. Thermal insulating rubber foams embedded with segregated carbon nanotube networks for electromagnetic shielding applications. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 435, 135118.
- 22 Abd Halim, Z. A.; Ahmad, N.; Yajid, M. A. M.; Hamdan, H. Thermal insulation performance of silicone rubber/silica aerogel composite. *Mater. Chem. Phys.*, **2022**, 276, 125359.
- 23 Yu, Z.; Song, Y. F.; Yang, L. J.; Wen, S. B.; Zhao, Y. J.; Zhao, Y. X.; Zhang, Z. X. Lightweight and flame retardant fluorosilicone rubber composited foam prepared by supercritical nitrogen. *J. Vinyl Addit. Technol.*, **2023**, 29(5), 901–908.
- 24 Lima, G. M. R.; Bose, R. K. Production and application of polymer foams employing supercritical carbon dioxide. *Adv. Polym. Technol.*, **2022**, 2022(1), 8905115.
- 25 Shi, S. Z.; Zhang, Y.; Luo, Y.; Liao, X.; Tian, C. X.; Tang, W. Y.; Yang, J. M.; Chen, J.; Li, G. X. Reinforcement of mechanical properties of silicone rubber foam by functionalized graphene using supercritical CO₂ foaming technology. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2020**, 59(51), 22132–22143.
- 26 Xiang, B.; Jia, Y. L.; Lei, Y. J.; Zhang, F. S.; He, J. P.; Liu, T.; Luo, S. K. Mechanical properties of microcellular and nanocellular silicone rubber foams obtained by supercritical carbon dioxide. *Polym. J.*, **2019**, 51(6), 559–568.
- 27 Li, Z.; Li, Y. Y.; Li, Y. R. Effects of three different kinds of foaming medium on the properties of expanded thermal plastic polyurethane prepared via supercritical carbon dioxide foaming. *Polymers*, **2024**, 16(15), 2224.
- 28 Belmonte, P.; Céspedes, M.; Ramos, M. J.; Rodríguez, J. F.; Garrido, I.; García, M. T.; García-Vargas, J. M. Foaming of thermoplastic polyurethane using supercritical CO₂ and N₂: antishrinking strategy. *J. Supercrit. Fluids*, **2024**, 211, 106311.
- 29 Peng, L. G.; Lei, L.; Liu, Y. Q.; Du, L. F. Improved mechanical and sound absorption properties of open cell silicone rubber foam with NaCl as the pore-forming agent. *Materials*, **2021**, 14(1), 195.
- 30 韦雄雄, 蔡杰慧, 王晨, 郝红. 基于聚合物的轻质微球的制备和应用. *高分子通报*, **2018**, (9), 29–35.
- 31 邓伟, 宫理想, 程冠之, 阚成友. 中空微球及其制备方法. *高分子通报*, **2011**, (4), 110–117.
- 32 Wang, Z. Y. Antiaging properties of hollow glass microsphere-filled silicone rubber composites based on Lopez-pamies constitutive model. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2025**, 142(36), e57434.
- 33 Yang, X. C.; Tang, S.; Shen, X. M.; Peng, W. Q. Research on the sound insulation performance of composite rubber reinforced with hollow glass microsphere based on acoustic finite element simulation.

- Polymers*, **2023**, 15(3), 611.
- 34 Yang, J. P.; Chen, L.; Gu, X. B.; Zhao, Z. Y.; Fu, C. H.; Yang, D. S.; Tian, D. Z.; Chen, Z. S.; Xie, H. P. Hollow glass microspheres/silicone rubber composite materials toward materials for high performance deep *in-situ* temperature-preserved coring. *Petrol. Sci.*, **2022**, 19(1), 309–320.
- 35 Ma, L. Y.; Wang, Y. M.; Zhang, X.; Wen, S. B.; Yu, Z.; Zhang, Z. X. Copper-coated hollow glass microspheres filled rubber composites: lightweight, interface bonding and mechanical properties. *Express Polym. Lett.*, **2023**, 17(5), 502–511.
- 36 Hu, Y.; Mei, R. G.; An, Z. G.; Zhang, J. J. Silicon rubber/hollow glass microsphere composites: Influence of broken hollow glass microsphere on mechanical and thermal insulation property. *Compos. Sci. Technol.*, **2013**, 79, 64–69.
- 37 Guo, Y. B.; Cao, Z. Q.; Wang, D. G.; Liu, S. H. Improving the friction and abrasion properties of nitrile rubber hybrid with hollow glass beads. *Tribol. Int.*, **2016**, 101, 122–130.
- 38 Guo, Y. B.; Zhang, Z.; Cao, Z. Q.; Wang, D. G. Wear behavior of hollow glass beads (HGB) reinforced nitrile butadiene rubber: effects of silane coupling agent and filler content. *Mater. Today Commun.*, **2019**, 19, 366–373.
- 39 Curd, M. E.; Morrison, N. F.; Smith, M. J. A.; Gajjar, P.; Yousaf, Z.; Parnell, W. J. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic microspheres for syntactic foam applications. *Compos. Part B Eng.*, **2021**, 223, 108952.
- 40 Cai, J. H.; Huang, M. L.; Chen, X. D.; Wang, M. Thermo-expandable microspheres strengthened polydimethylsiloxane foam with unique softening behavior and high-efficient energy absorption. *Appl. Surf. Sci.*, **2021**, 540, 148364.
- 41 Smith, M. J. A.; Yousaf, Z.; Potluri, P.; Parnell, W. J. Modelling hollow thermoplastic syntactic foams under high-strain compressive loading. *Compos. Sci. Technol.*, **2021**, 213, 108882.
- 42 Ahmad, M. Flexible vinyl resiliency property enhancement with hollow thermoplastic microspheres. *J. Vinyl Addit. Technol.*, **2001**, 7(3), 156–161.
- 43 Marl, S.; Giesen, R. U.; Heim, H. P. Liquid silicone rubber foamed with thermoplastic expandable microspheres. *Materials*, **2022**, 15(11), 3779.
- 44 吕璐涛, 杨宗霖, 刘伟, 鹿现永. 气凝胶材料的研究进展及其在航空航天领域的应用. *高分子通报*, **2022**, (4), 11–29.
- 45 Kang, D. W.; Jia, S. D.; Zhao, C. H.; Ni, Y.; Qi, J. Q.; Kang, Z. S.; Sui, Y. W.; Wei, F. X.; Xiao, B.; Meng, Q. K. High-temperature resistance performance of silica aerogel composites through fiber reinforcement. *Ceram. Int.*, **2024**, 50(15), 26829–26838.
- 46 黄勉如, 李亮, 孙春英, 张豪, 李少平, 季家友. 聚吡咯包裹碳化硅气凝胶复合材料的电化学和吸波性能. *高分子通报*, **2024**, 37(4), 513–522.
- 47 Alves, P.; Dias, D. A.; Pontinha, A. D. R. Silica aerogel-rubber composite: A sustainable alternative for buildings' thermal insulation. *Molecules*, **2022**, 27(20), 7127.
- 48 Lamy-Mendes, A.; Pontinha, A. D. R.; Santos, P.; Durães, L. Aerogel composites produced from silica and recycled rubber sols for thermal insulation. *Materials*, **2022**, 15(22), 7897.
- 49 Le, C. T.; Truong, T. Q.; Nguyen, D. P. T.; Bui, N. T. K.; Goh, X. Y.; Huynh, H. K. P.; Nguyen, A. T.; Phan, A. N.; Ngo, T. M.; Nguyen, S. T. Advanced aerogels from waste tires and coal ash for thermal and acoustic insulation applications insights into the effect of synthesis conditions and precursors contents on aerogel characteristics. *J. Porous Mater.*, **2024**, 31(1), 335–350.
- 50 Boonrawd, C.; Yodyingyong, S.; Benyahia, L.; Triampo, D. Novel solvent-latex mixing: thermal insulation performance of silica aerogel/natural rubber composite. *Gels*, **2022**, 8(1), 7.
- 51 彭昊. 面向增材制造的几何微结构分析、设计与填充框架. 山东大学博士学位论文, **2023**.
- 52 梁晓静, 于晓燕. 3D打印用高分子材料及其复合材料的研究进展. *高分子通报*, **2018**, (4), 27–35.
- 53 Ji, D.; Wang, Z. H.; Xia, H. S. 3D printing two-component liquid silicone rubber via direct ink writing. *Polymer*, **2025**, 341, 129275.
- 54 Fazley Elahee, G. M.; Cheng, X.; Rong, L. H.; Xu, M. W.; Souza, L.; Advincula, R. C.; Maia, J. On the cogent formulation of an elastomeric silicone ink material for direct ink write (DIW) 3D printing. *Polym. Eng. Sci.*, **2024**, 64(6), 2476–2490.
- 55 Garcia, V. J.; Fazley Elahee, G. M.; Collera, A. K.; Thornton, T.; Cheng, X.; Rohan, S.; Howard, E. L.; Espera, A. H.; Advincula, R. C. On the direct ink write (DIW) 3D printing of styrene-butadiene rubber (SBR)-based adhesive sealant. *MRS Commun.*, **2023**, 13(6), 1266–1274.
- 56 Chen, Q. Y.; Zhao, J. Y.; Ren, J. B.; Rong, L. H.; Cao, P. F.; Advincula, R. C. 3D printed multifunctional, hyperelastic silicone rubber foam. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(23), 1900469.
- 57 Zhou, L. Y.; Gao, Q.; Fu, J. Z.; Chen, Q. Y.; Zhu, J. P.; Sun, Y.; He, Y. Multimaterial 3D printing of highly

- stretchable silicone elastomers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, 11(26), 23573–23583.
- 58 Boyer, C.; Blasco, E.; Ke, C. F. Advanced 3D/4D printing for functional materials innovation. *Adv. Mater. Technol.*, **2023**, 8(23), 2301869.
- 59 Simmons, C.; Hunt, J.; Wolfe, E.; Kamin, R.; Pawar, S.; Momeni, K.; Beck, S.; Davami, K. Energy absorption and shape reformation analysis of low density additively manufactured star-shaped tensegrity structures. *Eng. Res. Express*, **2026**, 8(2), 025503.
- 60 Gögelein, C.; Dodevski, J. Dynamically vulcanized blends for 3D printing based on blends of poly(lactide acid) with ethylene-vinyl acetate-glycidyl methacrylate and poly(lactide acid) with epoxidized natural rubber. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(3), 2080–2091.
- 61 Akhoundi, B.; Behraves, A. H.; Bagheri Saed, A. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *J. Reinf. Plast. Compos.*, **2019**, 38(3), 99–116.
- 62 Nesterenkov, V.; Akhonin, S.; Klochkov, I.; Matviichuk, V.; Berezos, V.; Motrunich, S. High cyclic fatigue behavior of 3D-printed titanium alloy TA15. *Weld. World*, **2025**, 69(3), 717–725.
- 63 Fauziah, S.; Amirpour, M. Fatigue behavior of 3D-printed solid liquid composite (SLC) orthotic insole: An experimental study. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **2025**, 139(11), 5991–6008.
- 64 熊辉, 张略, 李磊, 刘顺理. 汽车密封条轻量化研究与结构优化设计. *中国汽车(中英文对照)*, **2025**, 35(7), 430–434.
- 65 王思蛟, 陈梦梦, 杨乐, 薛媛. 用于介电弹性体发电机的材料研究进展. *高分子通报*, **2024**, 37(3), 309–315.
- 66 钟尚江, 范子琛, 李活. 新能源汽车电池系统安全性设计研究. *汽车测试报告*, **2024**(1), 46–48.
- 67 Blood, R. P.; Ploger, J. D.; Yost, M. G.; Ching, R. P.; Johnson, P. W. Whole body vibration exposures in metropolitan bus drivers: a comparison of three seats. *J. Sound Vib.*, **2010**, 329(1), 109–120.
- 68 Avalue, M.; Belingardi, G.; Montanini, R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *Int. J. Impact Eng.*, **2001**, 25(5), 455–472.
- 69 Cui, L.; Kiernan, S.; Gilchrist, M. D. Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials. *Mater. Sci. Eng. A*, **2009**, 507(1-2), 215–225.
- 70 Miltz, J.; Ramon, O. Energy absorption characteristics of polymeric foams used as cushioning materials. *Polym. Eng. Sci.*, **1990**, 30(2), 129–133.
- 71 Sanborn, B.; Song, B.; Smith, S. Pre-strain effect on frequency-based impact energy dissipation through a silicone foam pad for shock mitigation. *J. Dyn. Behav. Mater.*, **2016**, 2(1), 138–145.
- 72 Sanborn, B.; Song, B. Energy dissipation characteristics in pre-strained silicone foam transitioning to silicone rubber. *J. Dyn. Behav. Mater.*, **2019**, 5(1), 51–58.
- 73 Shi, Z. C.; Liang, Z. H.; Huang, Z. Y.; He, A. N.; Qiao, S. J.; Tong, A. X.; Zhang, Y.; Luo, Y. X.; Wang, M. Q.; He, J.; Wang, B. H.; Wang, J. X.; Ye, T.; Qian, J.; Xu, C.; Chen, F. X.; Sun, S. J.; Wang, K.; Xu, W. L. Revolutionizing fiber materials for space: multi-scale interface engineering unlocks new aerospace frontiers. *Mater. Today*, **2025**, 88, 643–704.
- 74 Qi, W. H.; Zhang, Y. D.; Zhang, Y. J.; Yan, H.; Liu, Y. F.; Zhang, Z. W. Advanced honeycomb structures for aerospace: multiscale mechanics, bio-inspired hierarchical design, and multi-physics coupling responses. *Thin Walled Struct.*, **2026**, 218, 114132.
- 75 Anirudh, S.; Jayalakshmi, C. G.; Anand, A.; Kandasubramanian, B.; Ismail, S. O. Epoxy/hollow glass microsphere syntactic foams for structural and functional application-a review. *Eur. Polym. J.*, **2022**, 171, 111163.
- 76 Hu, S.; Cai, J.; Liao, G. F.; Fu, Q. Preparation and sound insulation performance of superfine metal powder/nitrile-butadiene rubber-polyvinyl chloride microcellular foaming material. *Adv. Polym. Technol.*, **2019**, 2019(1), 7608641.
- 77 Lee, J.; Kim, G. H.; Ha, C. S. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2012**, 123(4), 2384–2390.
- 78 Vahidifar, A.; Esmizadeh, E.; Rostami, E.; Nouri Khorasani, S.; Rodrigue, D. Morphological, rheological, and mechanical properties of hybrid elastomeric foams based on natural rubber, nanoclay, and nanocarbon black. *Polym. Compos.*, **2019**, 40(11), 4289–4299.
- 79 Vahidifar, A.; Nouri Khorasani, S.; Park, C. B.; Naguib, H. E.; Ali Khonakdar, H. Fabrication and characterization of closed-cell rubber foams based on natural rubber/carbon black by one-step foam processing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2016**, 55(8), 2407–2416.
- 80 Zhang, X. X.; Lu, Z. X.; Tian, D.; Li, H.; Lu, C. H. Mechanochemical devulcanization of ground tire rubber and its application in acoustic absorbent polyurethane foamed composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2013**, 127(5), 4006–4014.
- 81 Wu, J. Y.; Li, C. G.; Hailatihan, B.; Mi, L. L.; Baheti, Y.; Yan, Y. Z. Effect of the addition of thermoplastic resin and composite on mechanical and thermal properties of epoxy resin. *Polymers*, **2022**, 14(6), 1087.

- 82 Hui, B.; Ye, L.; Zhao, X. W. *In situ* preparation of polyurethane-imide/graphene oxide nano-composite foam: intercalation structure and thermal mechanical stability. *J. Polym. Res.*, **2018**, 25(12), 267.
- 83 Bommana, D.; Sahoo, N.; Dwivedy, S. K.; Dora, T. R. K. Effect of blowing agent CaCO_3 content on the microstructure and mechanical properties of AA 5083 foam. *Int. J. Met.*, **2022**, 16(4), 1885–1901.
- 84 Liang, J. M.; Zhang, H.; Luo, Z.; Zhong, J. C.; Wang, X. Y. Fatigue-crack-propagation behavior and mechanism of long hemp-fiber-enhanced styrene-butadiene rubber/carbon black compounds. *Polym. Compos.*, **2024**, 45(4), 2941–2953.
- 85 Hees, T.; Schirmeister, C. G.; Pfohl, P.; Hofmann, D.; Muelhaupt, R. Self-reinforcement *via* 1D nanostructure formation during melt blending of thermoplastics and thermoplastic elastomers with nanophase-separated UHMWPE/HDPE wax reactor blends. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2021**, 3(7), 3455–3464.
- 86 周宗淘. 芳纶表面处理对丁苯橡胶复合材料疲劳性能影响的研究. 贵州大学硕士学位论文, **2018**.
- 87 孙树泉, 张继川, 张立群, 刘实忠, 王润国, 康海澜, 王朝. 生物橡胶的研究进展. 高分子通报, **2013**, (4), 42–50.