

地聚物橡胶混凝土多尺度力学行为研究进展

郭可教¹, 卞宇轩¹, 白佳琪¹, 邵建文^{1,*}

1. 鲁东大学, 水利土木学院, 烟台, 264025

摘要: 高性能可持续建筑材料的市场需求正随着全球工业化和城市化的快速发展而持续攀升, 废旧轮胎处理问题已成为全球性资源与环境问题。地聚物混凝土因其能耗低, 污染小成为研究的热点之一。但其脆性本质问题限制了其在工程领域的广泛应用。废旧轮胎经碾压破碎后加工成橡胶颗粒, 作为柔性材料有望改善地聚物混凝土的脆性本征, 且地聚物胶凝基质可以为橡胶颗粒的表面处理提供有益的碱性环境, 适量的表面刻蚀可增大橡胶颗粒与基质的接触面积。地聚物胶凝基质与橡胶颗粒的有机结合已成为地聚物混凝土研究的新方向。为此, 本文从宏观、细观、微观尺度系统总结分析了地聚物橡胶混凝土(Rubberized geopolymer concrete, RGC)基本力学性能(抗压强度、劈裂抗拉强度、抗冲击性能)及界面微结构特性的研究进展。通过多尺度关联分析, 揭示了宏观力学性能与界面过渡区、孔隙结构及微观化学键合的内在联系, 阐明了橡胶-基体界面键合及水化产物结晶机制对材料性能的影响规律。针对不同尺度研究中存在的不足, 提出未来研究的方向与建议, 旨在为橡胶-地聚物复合材料的设计与应用提供理论依据。

关键词: 地聚物; 废旧橡胶; 混凝土; 多尺度; 力学行为; 微观结构

Research Progress on the Multiscale Mechanical Behavior of Rubberized Geopolymer Concrete

GUO Ke-ao¹, BIAN Yu-xuan¹, BAI Jia-qi¹, SHAO Jian-wen^{1,*}

1. School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai, 264025, China

Abstract: The market demand for high-performance sustainable building materials is steadily rising alongside rapid global industrialization and urbanization., while waste tire disposal has emerged as a critical global resource and environmental challenge. Geopolymer concrete has become a research hotspot due to its low energy consumption and minimal environmental pollution. However, its inherent brittleness significantly limits broader engineering applications. Processed rubber particles from crushed waste tires, as flexible materials, show potential in mitigating the brittle nature of geopolymer concrete. Moreover, the geopolymer matrix provides an advantageous alkaline environment for surface treatment of rubber particles, where appropriate surface etching can enhance the contact area between rubber particles and the matrix. The synergistic combination of geopolymer binders and rubber particles has thus become a new research focus in geopolymer concrete development. This paper systematically reviews the research progress on the fundamental mechanical properties (compressive strength, splitting tensile strength, and impact resistance) and interfacial microstructure characteristics of Rubberized geopolymer concrete (RGC) across macro-, meso-, and micro-scales. Through multi-scale correlation analysis, the intrinsic relationship between macroscopic mechanical performance and the interfacial transition zone, pore structure, and microchemical bonding is elucidated. The influence mechanisms of rubber-matrix interfacial bonding and hydration product crystallization on material performance are clarified. Addressing existing limitations in research across different scales, future research directions and recommendations are proposed to provide a theoretical foundation for the design and application of rubber-geopolymer composite materials.

Keywords: Geopolymer; Waste rubber; Concrete; Multiscale; Mechanical behavior; Microstructure

近些年, 硅酸盐水泥作为建筑材料领域的主要胶凝材料, 其生产过程存在能耗大、温室气体排放高等环境问题, 同时其生产过程中消耗了大量原材料和能源。据统计, 平均每生产 1 t 水泥需消耗约 2 t 原料, 排放约 1 t CO₂ 和氮氧化物气体^[1]。在碳达峰、碳中和背景下, 地聚物作为一种新型绿色低碳建筑材料, 有着不可估量的发展潜力^[2]。地聚物是指由铝硅酸盐材料在碱激发剂的作用下形

成的胶凝材料,地聚物混凝土(Geopolymer concrete, GPC)是指用地聚物作为胶凝材料的混凝土^[3]。与普通混凝土(Ordinary concrete, OC)相比,生产 GPC 的 CO₂ 排放量减少约 75%~84%^[4],同时其对于工业废弃材料和能源的回收利用效果显著改善,在建筑工程材料中得到广泛的应用。

随着我国现代化建设迈向深层,全国各地大规模兴建基础设施,自然资源与能源的消耗量猛增。有“黑色污染”之称的废旧轮胎对环境造成较大污染^[5]。据统计,每年大约有 15 亿条轮胎被焚烧填埋。为了应对此问题,研究人员尝试将废旧轮胎加工成橡胶颗粒掺入 GPC 中作为其中的细骨料,制成既满足工程应用又绿色环保的新型混凝土——地聚物橡胶混凝土(Rubberized geopolymer concrete, RGC)^[6]。这一举措既解决了固体废弃物的处理问题,同时也缓解了河砂资源的匮乏。将橡胶颗粒掺入 GPC 中,既能改善 GPC 的性能,使其具有节能环保等优点,又符合无废城市建设与更新的可持续发展理念,同时为减少 CO₂ 等温室气体的排放提供了新的思路,为碳中和、碳达峰注入了新质生产力,对绿色循环经济发展具有现实意义。

直至目前,RGC 已在工程建造、回收利用等多方面应用效果显著。据相关学术界以及实地数据反馈情况,RGC 在一些多场景应用中仍具有更加广阔的上升空间,其力学性能潜力正在被无限挖掘。针对于 RGC 多尺度力学行为的深入研究是挖掘其力学性能的关键。基于此,本文通过总结近几年国内外研究学者对 RGC 力学行为的研究报道,从宏观、细观、微纳尺度归纳总结 RGC 多尺度力学行为的研究现状,揭示其宏观力学性能与微观结构的内在联系,挖掘目前研究阶段 RGC 力学性能的潜力,提出有针对性的未来研究方向性建议,以期地为地聚物混凝土材料设计与工程应用研究提供借鉴和参考。

1 地聚物橡胶混凝土的多尺度力学行为

1.1 宏观尺度

1.1.1 橡胶颗粒的抗压强度

尽管我国在橡胶混凝土领域的研究起步相对滞后,但近年来研究进展十分迅速^[7]。众多国内学者围绕橡胶混凝土开展了多维度的研究。刘日鑫^[8]等人针对橡胶颗粒掺量与混凝土抗压强度之间的关系展开探究,结果表明,随着橡胶颗粒掺量的上升,混凝土抗压强度呈下降趋势,当橡胶颗粒掺量低于 10%时,抗压强度的下降幅度较为有限。刘春生^[9]研究了橡胶颗粒替代砂对混凝土力学性能的影响,试验结果显示,随着橡胶颗粒掺量的增加,混凝土抗压强度逐渐降低。Zhang^[10]等人在 RGC 的动态抗压强度和生命周期评估中发现,在相似的应变速率下,用水泥代替前驱体几乎没有改变动态抗压强度,如图 1 所示,表明地聚物可以以适当比例替代水泥。

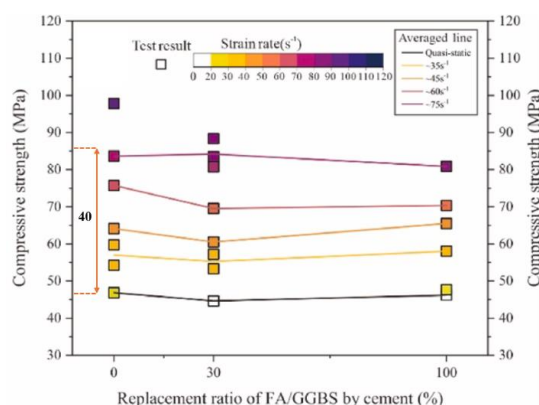


图 1 替代率与动态抗压强度之间的关系^[10]

Fig. 1 Relationship between substitution ratio and dynamic compressive strength^[10]

鉴于橡胶颗粒掺入会导致混凝土力学强度下降的问题, 相关学者提出通过对橡胶进行改性处理的方式来提升 RGC 的力学强度。例如, 谢建和^[11]等人在橡胶混凝土中掺入硅粉, 结果表明硅粉的掺入显著增强了橡胶混凝土中砂浆与骨料间的黏结力, 进而提高了混凝土的抗压强度。高丹盈^[12]等人则聚焦于纳米 SiO₂ 对橡胶混凝土高温力学性能的影响, 研究表明, 纳米 SiO₂ 的掺入提升了橡胶混凝土的密实度, 对其抗压强度和劈裂抗拉强度均有显著的增强作用。

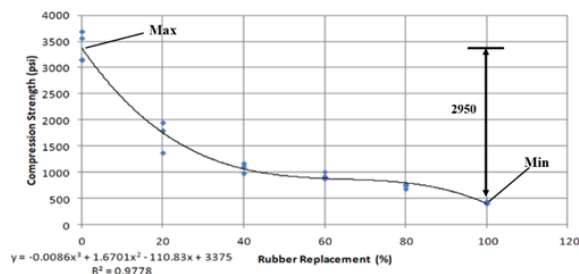


图 2 抗压强度与橡胶含量的关系^[13]

Fig. 2 Compressive strength vs. rubber content^[13]

Miller 和 Nathan^[13]依据 ASTM 标准开展试验, 将达到龄期的试件放置于试验加载系统中进行测试, 记录试验过程中荷载和挠度的变化数据, 加载结果如图 2 所示, 显示了 RGC 抗压强度与橡胶替代率的变化关系。从图中可以看出, 随着橡胶含量的增加, 抗压强度呈现出系统性的非线性下降, 同时, 本研究观察到橡胶含量达到 60% 是混凝土主导性能和橡胶主导性能之间的一个分界点。随后, 当橡胶含量增加到 80% 和 100% 时, 抗压强度急剧下降。

李鲲鹏^[14]等人为更清楚地呈现增强再生骨料混凝土 (Reinforced recycled aggregate concrete, RRAC) 在压缩载荷下的表面变形, 利用数字图像方法以及图像处理技术软件计算了表面应变, 并以 3D 图像显示压缩破坏后 RRAC 的表面应变, 如图 3 所示。

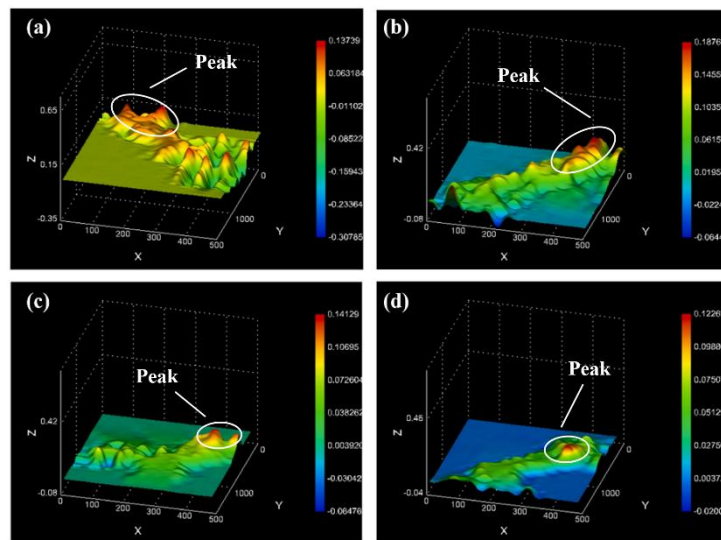


图 3 RRAC 的表面应变^[14]

Fig. 3 Surface strain of RRAC^[14]

Z 方向代表应变的大小, X 方向是试样的宽度方向, Y 方向是试样的高度方向。上图可知, 表面应变呈现与山体相似的分布, 表明表面变形更复杂, RRAC 的表面应变随着橡胶替代率的增加而减小, 说明橡胶增强了 RRAC 的变形回弹性。

1.1.2 抗冲击性能

近年, 我国社会经济发展迅速, 国内外的贸易量激增, 直接促使我国公路和水路货运量的大幅

度增长。这也导致更多基础设施和货运车船之间的事故，如混凝土桥梁在服役期间遭受到货运卡车的撞击的事件屡见不鲜^[15]。普通混凝土的高脆性限制了其在实际工程中的应用，以橡胶颗粒替代部分细骨料制成 RGC 可实现废弃橡胶回收利用，同时又能改善普通混凝土脆性大的不足，但会降低混凝土的强度^[16]。

在超高性能混凝土（Ultra-high performance concrete, UHPC）及相关材料抗冲击性能的探索进程中，众多学者开展了丰富研究。Yoo^[17]等学者经研究指出，在 UHPC 中加入钢纤维，能够提升材料的初始刚度，增强其冲击后的剩余承载能力，但与此同时，也会增大 UHPC 的脆性。Bindiganavil^[18]等人的研究进一步证实，纤维增强超高性能混凝土（Ultra-high performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC）在性能上显著优于传统纤维增强混凝土（Fiber-reinforced concrete, FRC）。在低速冲击载荷环境下，UHPFRC 相较 FRC，能够耗散更多能量。国内学者涂天驰^[19]借助水砂枪法试验发现，当机制砂中针状骨料含量在 0~30% 范围变化时，UHPC 的抗冲磨性能会先上升后下降。具体而言，当机制砂针状含量为 20%，且钢纤维体积掺量为 3% 时，UHPC 的抗冲磨性能逐步降低^[20]。Zahraa^[21, 22]针对粉煤灰矿渣基聚合物混凝土的抗冲击性能展开研究，结果表明，该材料的抗冲击性能优于同强度等级的水泥基混凝土。Ranade^[23]等人对高强度高延性混凝土和 UHPC 的低速抗冲击性能进行探究时发现，UHPC 在冲击载荷作用下，通常会发生准脆性弯曲破坏。不过，随着冲击头尺寸减小，其破坏模式会转变为脆性冲切破坏。

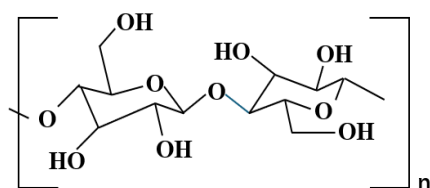


图 4 纳米纤维的重复单元^[25]

Fig. 4 The repeating units of the nanofibers^[25]

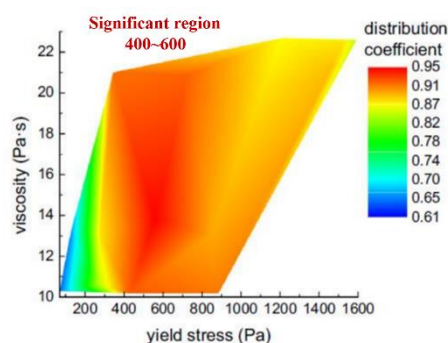
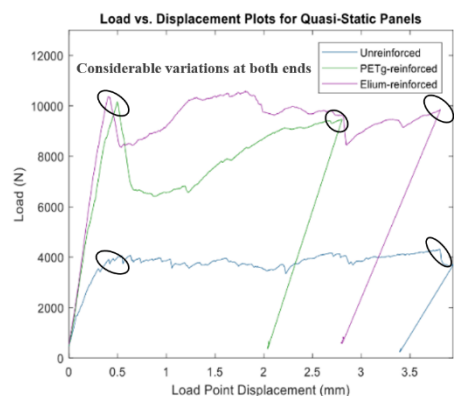
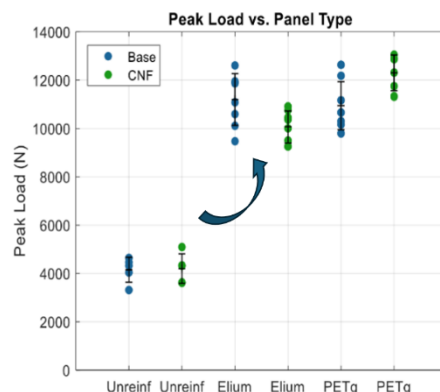
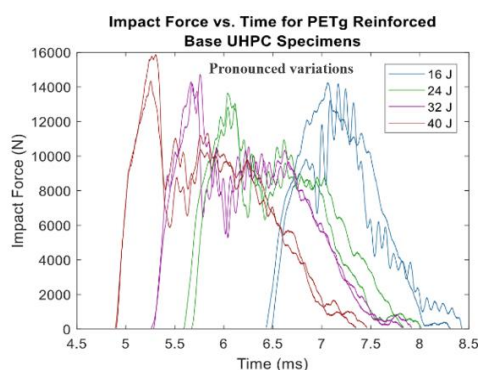
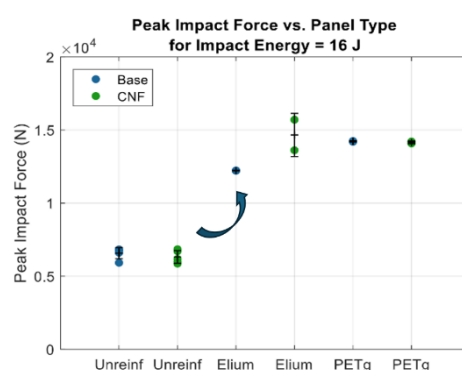
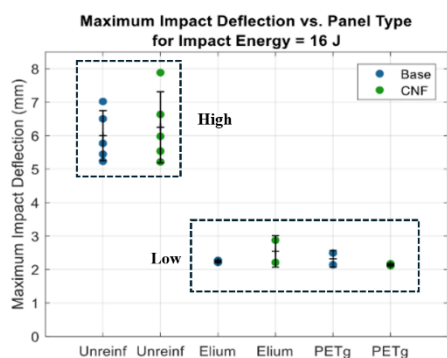
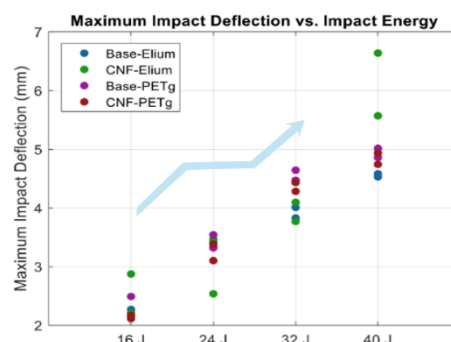


图 5 纤维分散性与流变性能的关系^[26]

Fig. 5 Fiber dispersion versus rheological performance^[26]

Gillis^[24]等人开发出了一种纳米纤维素（Carbon nanofiber, CNF）改性的 UHPC 和纤维增强聚合物（Fiber reinforced polymer, FRP）夹芯板原型，通过发挥 CNF 对弯曲性能的改善作用以及 FRP 提供的额外增强效果，提升超高性能混凝土的抗冲击性。图 4 为纳米纤维素的重复单元^[25]；图 5 展示了纤维分散性与流变性能的关系^[26]。

使用 MATLAB 软件对载荷和加载点位移数据进行分析，将载荷-位移曲线下的面积看作试件在准静态测试过程中吸收的能量。图 6 展示了面板试件的载荷-位移对比结果^[27]，图 7 记录了按面板类型分类的准静态峰值载荷^[27]。

图 6 面板试件的载荷—位移对比图^[27]Fig. 6 Comparative load-displacement plot for panels specimens^[27]图 7 按面板类型划分的准静态峰值载荷^[27]Fig. 7 Quasi-Static peak load separated by panel type^[27]图 8 PETg 增强的基准 UHPC 面板冲击的力—时间曲线图^[27]Fig. 8 Force-Time plots for the PETg-reinforced base UHPC panel impacts^[27]图 9 试件类型在 16 焦耳冲击能量下的峰值冲击载荷^[27]Fig. 9 Peak impact load for specimen types at an impact energy of 16 J^[27]图 10 试件在 16 J 冲击下的最大冲击挠度^[27]Fig. 10 Max impact deflection from a 16 J impact for specimens^[27]图 11 热塑性增强面板的最大冲击挠度^[27]Fig. 11 Max impact deflection of the thermoplastic-reinforced panels^[27]

文献^[27]针对低速冲击测试结果展开了深入分析与讨论, 得出以下结论: PETg 胶带增强的基准 UHPC 试件, 其冲击力随时间变化情况均呈现在图 8 中。随时间变化, 整体冲击力变化起伏较大, 其中 40 J 的冲击力随时间变化的峰值最高。图 9 记录了在冲击能量为 16 焦耳的条件下, 各类试件的峰值冲击载荷, 其整体荷载情况呈现上升趋势。对比未增强的 UHPC 面板和热塑性复合材料增强面板, 图 10 直观显示出, 在冲击过程中前者的挠度明显高于后者, 这充分表明钢纤维对增强 UHPC 抗冲击性能发挥着关键作用^[28]。图 11 则详细给出了在各种冲击能量下, 热塑性增强面板所能达到的

最大冲击挠度。这些测试结果，为深入理解 UHPC 的抗冲击性能提供了有力的依据，为未来研究和应用提供了参考方向。基于上述橡胶颗粒抗冲击性能的试验，从不同的研究角度归纳了主要结论、影响因素如表 1 所示。

表 1 抗冲击混凝土改性方法与性能特征^[26-28]
Table 1 Analysis of modification methods and performance characteristics of impact-resistant concrete^[26-28]

研究角度	关键发现	影响因素
材料改进	橡胶颗粒替代细骨料可改善脆性但强度降低	橡胶掺量、骨料类型
钢纤维增强效果	提高初始刚度和剩余承载力，但增加脆性	钢纤维掺量
UHPFRC 性能优势	低速冲击下能量耗散能力优于 FRC	纤维类型、冲击速度
PETg 胶带	PETg 增强试件冲击力-时间曲线特征	增强材料类型
机制砂影响	针状骨料含量 20%+钢纤维 3%时抗冲磨性能最佳	针状骨料比例、纤维掺量

1.1.3 抗劈裂性能

张琳琳^[29]等人通过对具有不同橡胶体积分含量的橡胶砂浆（RuM）样品进行劈裂测试，针对不同比例试件进行劈裂强度测试，得到劈裂荷载与位移的关系曲线，如图 12 所示，其归一化结果如图 13 所示。

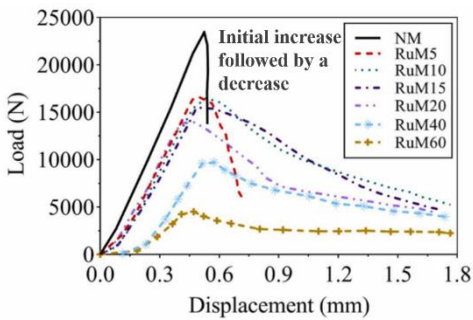


图 12 劈裂荷载-位移曲线^[28]
Fig. 12 Splitting Load-Displacement Curve^[28]

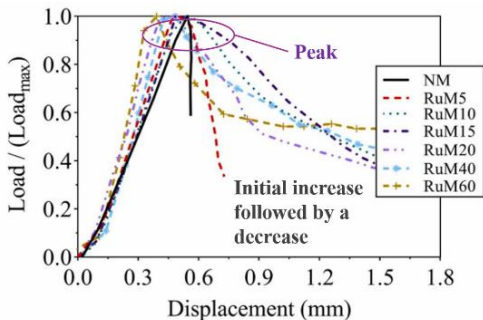


图 13 标准化劈裂荷载-位移曲线^[28]
Fig. 13 Normalized Splitting Load-Displacement Curve^[28]

从图中可以看出，用橡胶骨料代替部分细骨料会导致试样的劈裂强度降低。橡胶骨料对施加的劈裂荷载的阻力的贡献最小。陆峰^[30]等人通过动态劈裂拉伸试验，采用式（1）和式（2）计算得到橡胶混凝土的动态劈裂拉伸强度，其结果列于表 2 中。从表中数据不难发现，SCRC 的强度随着应变率的增加而增加。在相同应变速率下，橡胶掺入降低了混凝土的强度，随着橡胶掺量的增加，降低了幅度增大^[31, 32]。

$$DIF_{ft}=f_{td}/f_{ts} \tag{1}$$

$$f_{td}=2P_{tmax}/\pi DL=2A\epsilon_{tmax}/\pi DL \tag{2}$$

式中 f_{td} 为动态劈裂抗拉强度， ϵ_{tmax} 为最大应变、 D 和 L 分别为直径和厚度。

表 2 SCRC 的动态劈裂拉伸结果^[30]
Table 2 Dynamic splitting tensile results of SCRC^[30]

试样	应变率	均值	Δ	拉伸强度	均值	Δ	DIF
	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(%)	
SCRC-0	1.36		—	4.30		—	1.09
	2.56	1.96	1.2	7.35	5.825	3.05	1.86
SCRC-5	1.28		—	3.87		—	1.03
	2.29	1.785	1.01	5.86	5.61	1.99	1.55
SCRC-10	1.24		—	3.63		—	1.05
	2.07	1.665	0.83	5.25	5.3	1.62	1.51
SCRC-15	1.02		—	3.44		—	1.21
	2.03	1.525	1.01	5.13	5.62	1.69	1.81

1.1.4 宏观尺度研究现状评述

通过对宏观尺度研究内容的总结，进行如下评述：

RGC 的力学性能呈现显著的掺量依赖性，抗压强度与劈裂强度均随橡胶掺量增加而单调递减，且衰减幅度与掺量呈正相关。国内外研究证实，当橡胶替代率超过 30%时，强度劣化效应尤为显著（降幅达 40%~60%），这表明橡胶改性在提升功能特性的同时，需审慎控制掺量以平衡力学性能要求。

研究表明，界面改性可有效补偿橡胶掺入导致的性能损失，通过掺入硅粉（5~10 wt.%）和纳米 SiO₂（1~2 wt.%）可显著提升橡胶-基体界面粘结强度（增幅 40~60%）并降低孔隙率（降幅 25%~40%），使改性后的 RGC 在 20%橡胶掺量下仍能保持基准混凝土 85%以上的力学性能。这种界面强化机制为平衡材料功能性与力学性能提供了有效技术路径。

RGC 在抗冲击性能上有优势和潜力，相比普通混凝土的高脆性，RGC 能够改善这一不足，实现废弃橡胶的回收利用。同时，不同学者针对超高性能混凝土及相关材料的抗冲击性能研究表明，通过添加纤维（如钢纤维）、采用特殊材料改性（如纳米纤维素）等方式，可进一步提升其抗冲击性能。这表明 RGC 在实际工程应用中，特别是在对冲击性能有要求的场景（如易受撞击的基础设施）中具有应用潜力。

多种因素影响 RGC 力学性能，除橡胶掺量外，混凝土的力学性能还受到骨料特性（如机制砂针状骨料含量）、纤维的种类和掺量（如钢纤维体积掺量）、应变率等多种因素的综合影响。在不同的性能指标（抗压、抗冲击、抗劈裂）方面，各因素的影响规律和程度有所不同。因此，在实际应用中，需要综合考虑这些因素，科学合理地设计 RGC 的配合比和性能参数。

1.2 细观尺度

RGC 作为橡胶混凝土与地聚物混凝土的结合体，综合两者优势，具有更为广阔的应用前景。然而，为充分发挥其性能优势，深入理解其细观结构与性能之间的关系至关重要。在细观层面，RGC 是由地聚物基体、橡胶颗粒、骨料以及它们之间的界面组成的复杂多相体系。各组成部分的特性以及它们之间的相互作用，直接决定了材料的宏观性能。例如，橡胶颗粒与地聚物基体的界面粘结强度，影响着材料的力学性能和耐久性；橡胶颗粒的掺入改变了地聚物内部的孔隙结构，进而对材料的抗渗性、抗冻性等产生影响。但目前对于 RGC 细观结构与性能关系的认识不够深入，许多基础问题有待解决。因此，开展 RGC 的细观研究，对于揭示其性能提升机制、优化材料设计、推动工程应

用具有重要的现实意义。

1.2.1 界面过渡区

杨刚^[33]等人在采用 ABAQUS 有限元软件模拟分析混凝土损伤演化过程时发现, 当位移为 0.50 mm 时混凝土中出现贯穿裂缝, 如图 14 所示。图 15 表明复掺硅粉后, 橡胶颗粒界面的裂缝减少, 而粗骨料界面的裂缝增加。

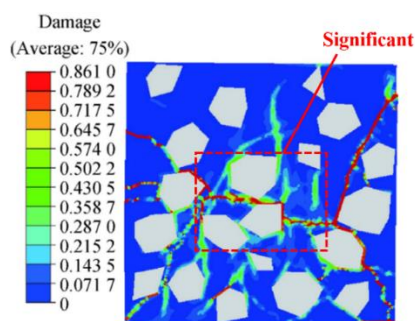


图 14 混凝土加载过程的损伤云图^[33]

Fig. 14 Damage cloud diagram during concrete loading process^[33]

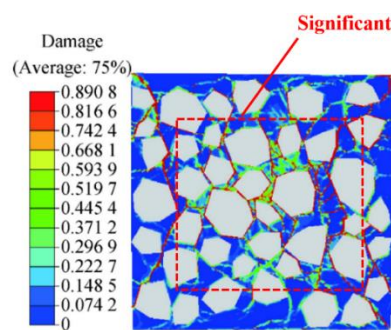


图 15 混凝土受压时的应力损伤云图^[33]

Fig. 15 Stress damage cloud diagram of concrete under process^[33]

研究表明, 硅粉对混凝土细观结构与界面性能具有显著的改善作用。在受压状态下, 普通混凝土内部产生的微细裂缝, 大多集中于粗骨料界面。在混凝土中掺入橡胶后, 微细裂缝逐渐向橡胶颗粒界面转移。随着橡胶掺量增加, 橡胶颗粒界面处的微细裂缝数量也随之增多。而硅粉的掺入能够有效减少橡胶界面的裂缝数量, 提升混凝土内部结构稳定性, 显著增强混凝土的承载能力。牛紫鹃^[34]等人基于纤维增强理论研究了 PVA 纤维特性对力学特性的影响, 发现当适量 PVA 纤维掺入橡胶混凝土基体后, 会形成致密的三维网状体系。这些纤维如同加强筋般分散其中, 可有效传递应力, 抑制基体内部既有微裂缝的扩展, 并延缓新裂缝的萌生, 最终显著提升 RGC 基体的韧性、延展性、强度以及变形能力。图 16 为测得的掺有不同长度 PVA 纤维长度的试件应力-应变关系曲线。图中黑色、红色、蓝色分别对应纤维长度为 6 mm、8 mm 和 18 mm。由此表明, 较长 PVA 纤维有益于增加基体的强度。

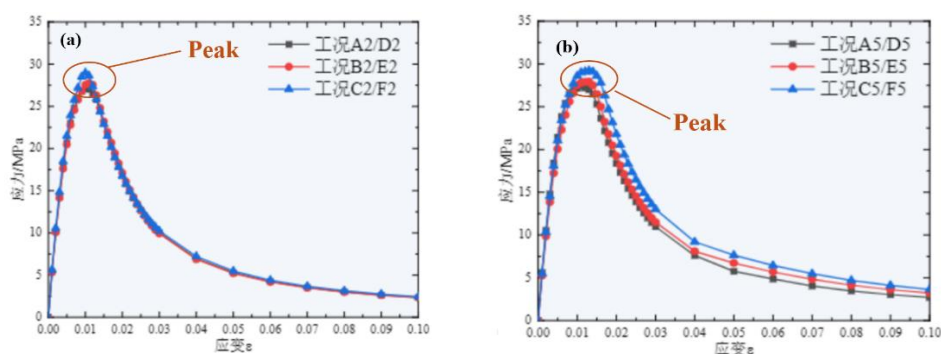


图 16 不同 PVA 纤维长度下应力-应变关系曲线^[34]: (a) 0.5% 掺量; (b) 1% 掺量。

Fig. 16 Stress-strain curves under different PVA fiber lengths^[34]: (a) 0.5% addition; (b) 1% addition.

1.2.2 孔隙结构

朱星瞳^[35]等人通过混凝土单轴压缩试验, 可以测得随着橡胶颗粒取代率的增加, 掺入不同橡胶粒径的混凝土, 其立方体抗压强度逐渐减小, 如图 17 所示。混凝土立方体抗压强度随不同橡胶颗粒取代率变化, 橡胶颗粒在混凝土中取代率的提高, 掺有各个粒径的橡胶混凝土立方体抗压强度均逐步减小。以 20 目橡胶颗粒为例, 掺量由 0 增加至 13% 时, 强度降低了 11MPa, 占比为 25.6%。此外,

橡胶混凝土的力学强度与橡胶颗粒尺寸大小呈现正相关性。

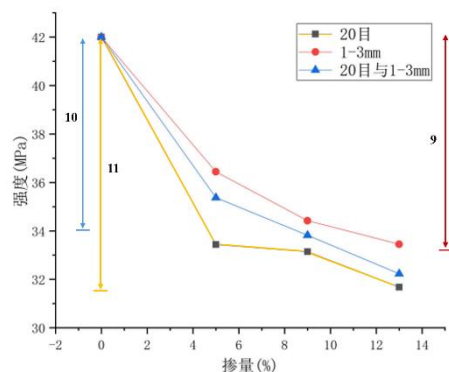


图 17 橡胶混凝土立方体抗压强度^[35]

Fig. 17 Cube compressive strength of rubberized concrete^[35]

朱星瞳^[35]等人以橡胶混凝土为研究对象, 运用单轴抗压试验、随机集料模型和 X-CT(X-ray computed tomography)试验三种研究方法, 从细观力学角度分析了不同掺量、粒径的橡胶混凝土的单轴抗压强度、单元损伤程度、孔隙、裂隙的几何特征, 验证了二维随机集料模型的可靠性。

在准静态加载速率的条件下, 罗麒锐^[36]等人基于橡胶混凝土单轴受拉模型, 针对初始缺陷对其力学性能的影响展开研究。研究发现, 橡胶混凝土中的砂浆-骨料界面微裂纹、砂浆-橡胶界面微裂纹、砂浆-砂浆界面微裂纹以及孔隙, 均会对其力学性能产生作用。这些因素对橡胶混凝土力学性能的影响程度存在差异, 从大到小依次为: 砂浆-砂浆界面微裂纹>孔隙>砂浆-骨料界面微裂纹>砂浆-橡胶界面微裂纹。杨友志^[37]等人通过压汞法 (Mercury Intrusion Porosimeter, MIP), 应用式 (3) 计算分析混凝土孔结构和分形特征。

$$P = \pi^2 p = P' = 2\pi r \sigma \cos(\pi - \theta) \quad (3)$$

当掺入橡胶水泥基复合材料的时候会引入一定数量的气泡, 提升橡胶水泥基复合材料的孔隙率, 因此 PVA 的掺入会在一定程度上影响橡胶水泥基复合材料的力学性能和耐久性能。图 18 为不同橡胶颗粒掺量下 PVA 改性前后的试件孔隙率随橡胶掺量的变化规律^[37]。可以看出, 橡胶掺量一定时, 掺 PVA 纤维的试件其孔隙率明显低于不掺 PVA 的试件。低孔隙率意味着高密实性, 对于强度发展和抵抗有害离子入侵能力的提高是有益的。

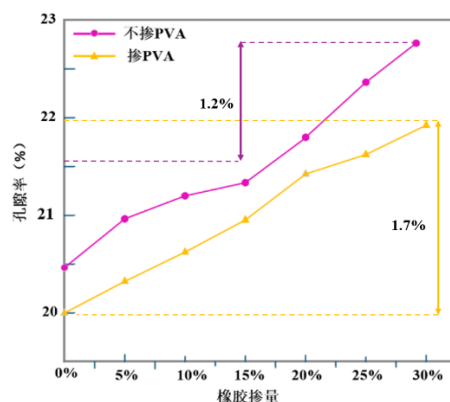


图 18 不同橡胶颗粒掺量下 PVA 改性前后的试件孔隙率^[37]

Fig. 18 The porosity of specimens before and after PVA modification under different rubber contents^[37]

翟胜田^[38]等人提出以废旧橡胶轮胎为原料, 通过力-化学作用与超声波聚能共振技术, 结合有机

-无机改性浆液的包覆和耦合剂的接枝共聚技术，同步实现橡胶集料表面改性处理和新型橡胶集料的制备。其中，通过采用全自动比表面积及孔隙分析仪对橡胶集料的比表面积及孔隙结构进行测试，观察到橡胶集料在力-化学改性过程中产生了较为明显的变化，表面的裂纹和内部的孔隙被填充和包覆，如图 19 所示。

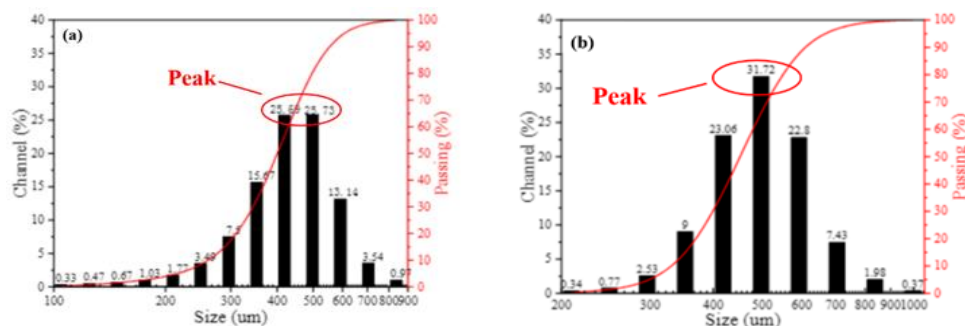


图 19 橡胶集料改性前后粒径分布图^[38] (a) 未改性橡胶颗粒; (b) 改性后的橡胶颗粒
Fig. 19 Particle size distribution of rubber aggregate before and after modification
(a) Unmodified rubber particles; (b) Modified rubber particles^[38]

改性后橡胶集料的粒径分布发生明显的变化粒径范围增加为 52 μm 到 70 μm ，且粒径 200 μm 以上占比为 62.4%。同时，由粒度累积曲线可以看出，改性后橡胶集料的中值粒度大 200 μm ，最大粒度值为超过 400 μm 。由此可以看出，改性作用增加了橡胶集料的粒径范围和大小。经过力-化学改性后，橡胶颗粒的粒径分布更趋近于正态分布，表明粒径的连续性增强。橡胶颗粒改性后其粒径级配与连续级配的河砂匹配性提高，混凝土致密性增加，这有益于力学强度的提高，基于紧密堆积理论的研究可证实这一点^[38]。

1.2.3 细观尺度研究现状评述

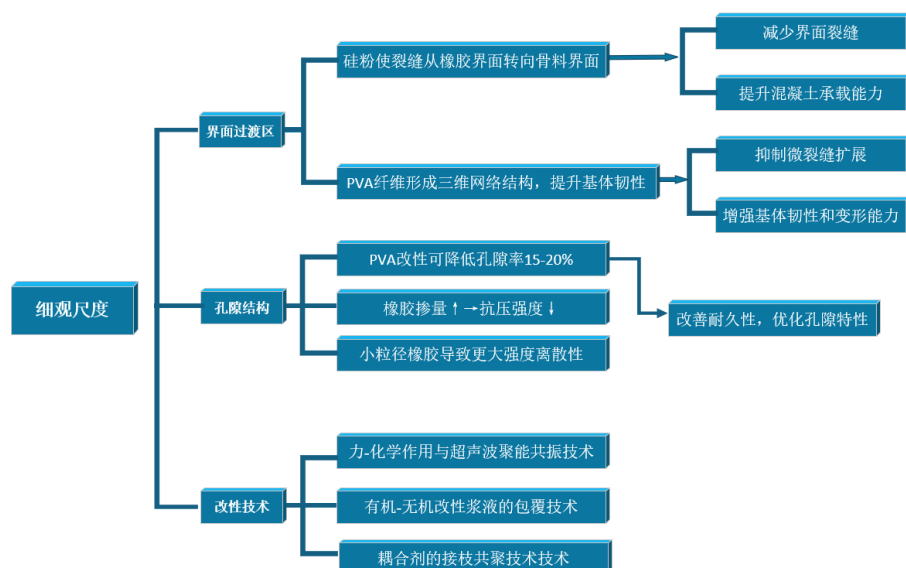


图 20 细观尺度研究焦点与改性机制
Fig. 20 Meso-scale research focuses and modification mechanisms

通过分析既有有关细观尺度的相关文献，总结了其研究焦点与基体改性机制，如图 20 所示。细观尺度研究主要集中在界面过渡区、孔隙结构及界面改性技术等方面。其中，界面过渡区调控作用显著，硅粉通过改善橡胶颗粒与地聚物基体的界面性能有效减少界面裂缝并提升混凝土承载能力；PVA 纤维则通过形成三维网状结构抑制微裂缝扩展，同时增强基体韧性和变形能力，证实界面优化是提升材料性能的关键途径。孔隙结构对混凝土性能产生多维度影响。研究表明，橡胶颗粒掺量与

粒径增大会降低混凝土强度，同时小粒径颗粒导致强度离散性增大；在微裂纹和孔隙等初始缺陷中，砂浆-砂浆界面微裂纹对力学性能的削弱作用最为显著；橡胶掺入提高了孔隙率，但 PVA 改性可优化孔隙特性，从而改善耐久性；橡胶集料表面改性不仅能填充孔隙，还可扩大有效粒径范围，实现细观结构优化。

1.3 微观尺度

材料性能归根结底由其微观结构所决定。在微观尺度下，RGC 是由地聚物基体、橡胶颗粒、骨料以及组分界面所构成的复杂多相体系。地聚物基体的化学组成、微观结构特征，如硅铝酸盐网络结构的聚合度与连接方式，直接影响着基体自身的强度与刚度。橡胶颗粒与地聚物基体之间的界面粘结状况，包括界面的化学键合、物理吸附以及过渡区的结构特性等，对材料在受力过程中的应力传递效率与裂纹扩展路径起着决定性作用。橡胶颗粒自身的特性，诸如粒径大小、形状、表面化学性质以及在混凝土中的分布状态，也会对整体材料的力学性能产生显著影响，如粒径方面，较小颗粒加剧界面缺陷，较大颗粒易引发应力集中；表面化学性质方面，经硅烷改性的橡胶可使界面粘结力提升 50% 以上，而未处理表面会加速裂纹扩展。通过微观尺度深入剖析这些因素的相互作用机制，才能精准揭示 RGC 性能提升或劣化的根源，进而为材料的优化设计提供坚实的理论依据。

1.3.1 界面微观结构

从水泥基材料胶凝体系的本质特性入手，通过精准调控其微观结构，基于“微观到宏观”的多尺度协同优化路径开展材料设计，已成为提升水泥基材料韧性的前沿技术方向，也是当前国内外学者在该领域重点攻关的理论与技术核心。

根据于双鹏^[39]等人的研究，当橡胶作为骨料掺入混凝土后，其颗粒在压缩或弯曲荷载作用下可高效吸收能量，显著增强了橡胶混凝土的抗冲击性能。徐业守^[40]等人证实，橡胶骨料能够有效抑制氯离子向水泥基质渗透，从而提升混凝土抵御氯离子扩散的能力，改善其抗渗性能。Onuaguluchi^[41]等人发现，采用石灰石粉预处理碎橡胶，可增强橡胶与水泥石的界面结合强度，并促进基质致密化。Yu^[42]等研究指出，PVA 与水泥基材料间的范德华力和静电作用（主要源于 OP-Caw-OS 键）促使 PVA 稳定吸附于 C-S-H 表面。Ozgur Ekincioglu^[43]等人通过实验表明，PVA 水解度在 73% 至 99% 区间时，水泥强度达到峰值；尽管所有试样浸水后均出现强度衰减，但中等水解度的 PVA 试样强度损失率最低。

于娇^[44]等人通过硅烷偶联剂（Silane coupling agent, SCA）—橡胶两相的表面润湿性研究，过渡至 SCA 改性橡胶—水泥复合材料界面的分子结构、物相及形貌分析，进而深入至 SCA 改性橡胶水泥基材料的孔结构与裂缝分布情况研究。其中，使用扫描电镜（SEM）观测到的改性处理过程中废旧橡胶颗粒表面形态如图 21 所示。图示表明改性处理使得 SCA 迁移到橡胶表面，同时橡胶颗粒表面水泥得到充分水化。

研究团队借助扫描电子显微镜（SEM）对 SCA 改性前后的橡胶颗粒与水泥基体的界面结合状态展开深入观察。图 22 呈现了改性前后橡胶—水泥基体界面的对比图像。分析显示，未改性橡胶与水泥基体间存在显著间隙，反映出两者的粘附性欠佳；反观经 SCA 改性后的界面，橡胶颗粒被水泥基体紧密包裹，界面贴合紧密，几乎无可见缝隙。

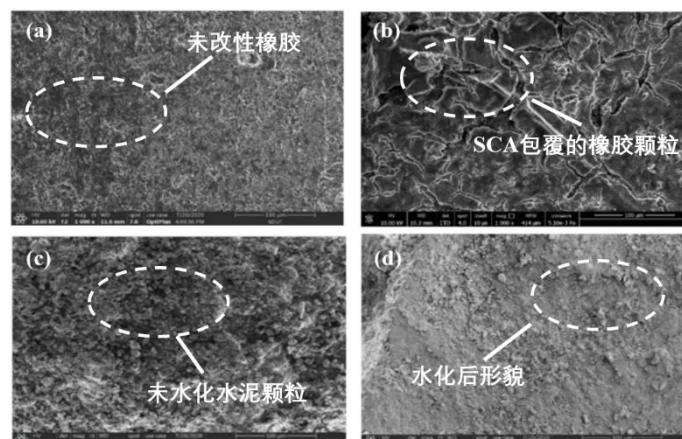


图 21 扫描电镜图像 (100μm) 比例: (a) 未改性橡胶; (b) SCA 包覆的橡胶颗粒; (c) 未水化水泥颗粒; (d) 水化后形貌^[44]

Fig. 21 Scanning electron microscope images (Scale 100μm): (a) Unmodified rubber; (b) SCA-coated rubber particles; (c) Unhydrated cement particles; (d) Hydrated morphology^[44].

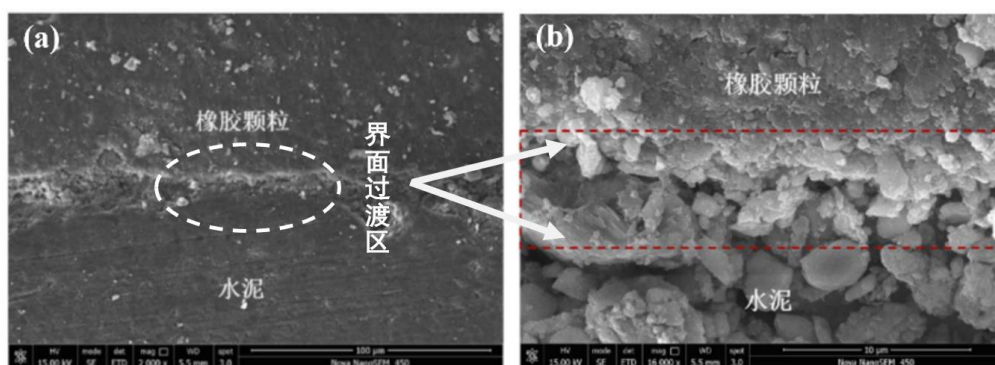


图 22 SCA 改性橡胶颗粒-水泥集体界面形貌: (a) 100 μm; (b) 10 μm^[44]

Fig. 22 Morphology of the interface between SCA-modified rubber particles and cement matrix: (a) 100 μm; (b) 10 μm^[44]

进一步聚焦界面微观结构可见, 相较于碎石等亲水性粗骨料表面易形成水化水膜, 橡胶颗粒的憎水特性抑制了其表面区域的水化反应进程, 致使界面过渡区产生裂隙。这类缺陷易诱发应力集中, 成为材料力学性能的潜在薄弱环节。而 SCA 改性显著改变了这一状况, 改性后, 水化产物在橡胶颗粒表面定向生长并堆积, 有效填充了原有界面裂隙。与未改性组对比, 改性处理大幅促进了界面区域的水泥水化程度, 修复了橡胶颗粒与水化产物间的结合缺陷。对于上述试验过程, 图 23 解释了 SCA 改性机制原理, 式 (4) 为橡胶表面硅烷羟基化反应, 式 (5) 为 Si-OH 的缩合反应。

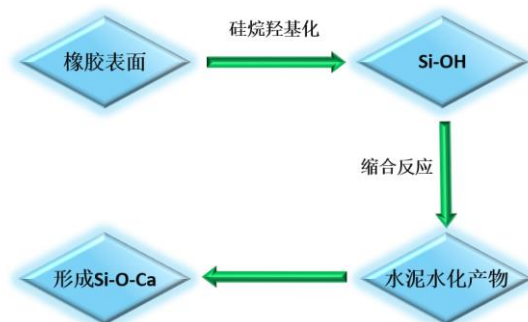
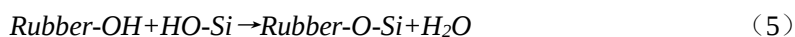
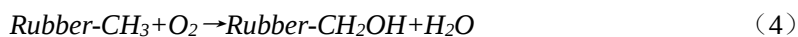


图 23 SCA 改性机制原理

Fig. 23 Schematic of the silane coupling mechanism

袁静^[45]等人发现, 若将未经处理的废橡胶颗粒表面的杂质与混凝土基材直接接触, 这些松散的杂质会极大地影响橡胶颗粒与混凝土基材的粘结界面, 导致涂胶混凝土丧失抗压强度。袁静^[45]等人通过高温搅拌处理废橡胶颗粒, 使得其表面杂质被包封, 同时形成氧化膜, 提高了废橡胶颗粒的弹性模量, 优化了废橡胶颗粒与混凝土基材的粘结界面, 提高了橡胶混凝土的抗压强度, 图 23 揭示了废橡胶颗粒与混凝土基材的界面结合机理。

杨涛^[46]等人应用电镜 (SEM) 分析法和能谱 (EDS) 分析法对改性橡胶混凝土微观结构中的界面裂缝厚度及成分进行分析, 发现复合改性的橡胶颗粒能够与水泥基体中的水化产物氢氧化钙充分发生反应, 生成较多的碳酸盐、碳酸钙等碳化合物, 从而导致界面裂缝处的碳元素含量增加^[47], 如图 24 所示。经过复合改性处理的橡胶集料与水泥基体间会发生一系列物理作用和化学反应, 有助于形成较薄的界面裂缝。

此外, 橡胶复合改性以后可以提高混凝土的柔韧性和延展性, 使得橡胶集料更均匀地分散在混凝土中。这样碳元素的扩散路径更加便捷和广泛, 进一步使得复合改性橡胶混凝土 EDS 谱图中橡胶颗粒区域的 C 元素含量增加。

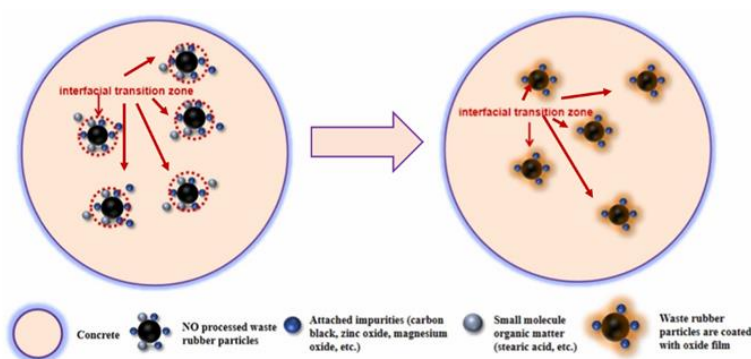


图 24 废橡胶颗粒与混凝土基材的界面结合机理^[45]

Fig. 24 Mechanism of interfacial bonding between rubber particles and concrete matrix ^[45]

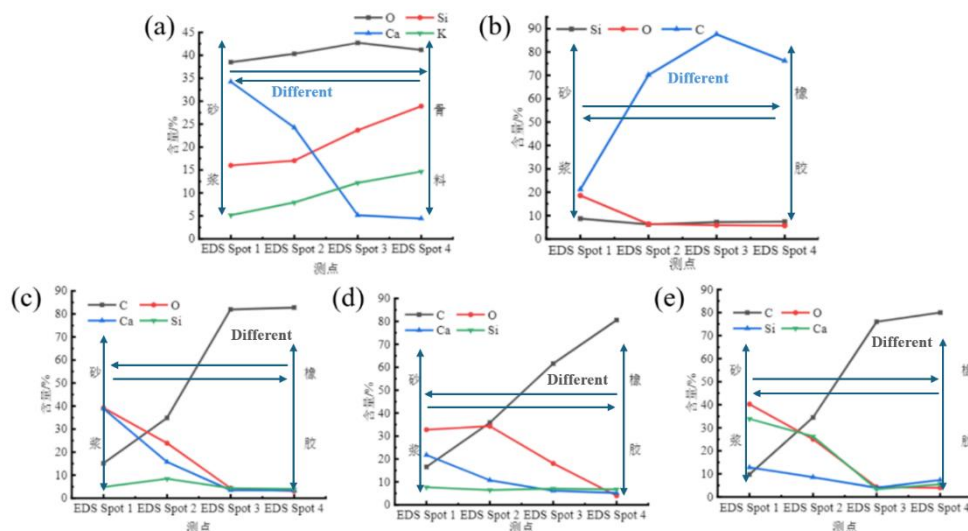


图 25 不同改性方式处理下的橡胶混凝土界面裂缝处成分分布: (a) 未改性橡胶; (b) 未改性的 10% 橡胶; (c) KH570 改性的橡胶; (d) (e) 掺有纤维^[47]

Fig. 25 Components of rubber concrete interfacial transition zone under different modification methods: (a) Unmodified rubber; (b) 10% unmodified rubber content; (c) KH570-modified rubber; (d) (e) Fiber-reinforced composite ^[47]

1.3.2 微观尺度研究现状评述

性能提升机制方面,橡胶骨料可增强混凝土抗冲击性与抗渗性;石灰石粉预处理可强化橡胶-水泥石界面;PVA 因范德华力吸附于 C-S-H 表面,中等水解度(73%~99%)时水泥强度最佳。SCA 改性可使橡胶表面水泥水化充分,SEM 显示界面从“间隙显著”转变为“紧密包裹”,有效填充裂隙并修复结合缺陷。基于复合改性作用,复合改性橡胶与氢氧化钙反应生成碳化合物,增加界面碳元素含量,形成更薄裂缝;同时提升混凝土柔韧性,优化碳元素扩散路径。

2 结论

本文从宏观、细观、微观尺度系统归纳分析 RGC 基本力学行为及界面微结构特性的研究进展,得出以下结论:

(1) 在橡胶掺量与力学性能的关系模型中,抗压强度、劈裂抗拉强度随橡胶掺量增加呈非线性下降,但橡胶掺量在不足 10%时对强度的损失是可控的。橡胶含量 $\geq 60\%$ 时性能由“混凝土主导”转向“橡胶主导”,橡胶的负面作用突显。一定细度的橡胶颗粒可在细观尺度下细化孔结构,这导致强度测试结果呈现一定离散性,甚至是会出现强度略有增加的异象。

(2) 研究表明掺合料与改性方式对基体强度的影响机制不同。硅粉、纳米 SiO_2 ,通过填充孔隙来提升基体强度,而 SCA 偶联剂通过改变橡胶颗粒亲水性,增大接触面积,提高与基体的粘结力,进而提高强度;从纤维增强角度来看,加入 PVA、钢纤维等材料,主要通过纤维桥接裂缝,形成三维网络,抑制裂缝扩展,改善基体韧性和抗冲击性。

(3) 宏观性能由细观界面过渡区和孔隙结构决定,微观界面化学键是细观结构稳定的基础。通过多尺度性能关联性分析,基体宏观力学性能由细观界面过渡区与孔隙结构共同决定,而微观界面化学键作用是细观结构稳定的关键。因此,RGC 力学行为本质和机理可以从原子/分子层面(橡胶-基体化学键合界面及水化产物结晶机制)来解析。通过材料配合比反向精准设计可调控分子间相互作用力,优化橡胶表面官能团,进而实现对材料性能的靶向调控。

(4) 废旧轮胎橡胶颗粒与工业固废的有机结合,有利于消解缓解问题。同时,橡胶赋予了材料高韧性、抗冲击性,适用于机场航道、路面结构、防撞护桩等场景。其耐高温性、耐腐蚀性及固定重金属离子的能力也使得其在停机坪(耐煤油侵蚀)、海岸构筑物及其它海洋环境中具有广阔的应用潜力。

3 展望

基于本文对 RGC 多尺度力学行为的研究,建议从以下内容开展后续研究。

(1) 在基础研究方面,需深入研究 RGC 在复杂环境下的多尺度力学行为,例如极端温度、湿度、化学侵蚀等环境因素的综合作用。多尺度协同优化是突破性能瓶颈的关键,通过学习并预测橡胶掺量、纤维类型与宏观性能的映射关系以更好地揭示基体劣化机理。针对开裂问题,可通过原位表征技术追踪裂缝跨尺度扩展路径,深入探讨生物基改性剂(如木质素、壳聚糖)等新材料替代传统化学偶联剂的可行性。此外,采用预处理方式,如超声波改性等改性技术优化橡胶表面亲水性,促进水化反应,在一定程度上减少裂纹的产生,提高力学性能。从不同尺度深入探索,优化橡胶与地聚物基体的界面性能来提高材料整体性能是未来研究的聚焦点之一。

(2) 通过采用系统化的方法论框架对关键技术进行革新,深入研究改进实验方法,尤其需要更接近实际工程条件;发展更精确的数值模拟技术,进而考虑更多复杂因素,如材料的微观缺陷、多相之间的动态相互作用等,可为材料设计和性能预测提供更可靠的手段。

(3) 鉴于原材料来源广、性质不稳定等因素,应加强 RGC 本地化工程应用研究,探究 RGC 在路面结构工程、桥面铺装、防撞护桩等基础设施工程中的适用性和可行性,充分挖掘其多元化发展趋势和应用潜力场景。基于 RGC 材料的性能优势,拓展其在异形结构及复杂工程场景中的应用范围。通过建立全生命周期成本分析模型,重点优化材料配比设计和施工工艺参数,为 RGC 在新基建等应用场景中的多元化发展奠定实践基础。

(4) 有必要开展基于人工智能背景的 RGC 与其它新型材料的联用研究,以克服现有试验条件的局限性,拓展其研究的延伸性,进一步深入研究复杂环境耦合作用下的长期稳定性,构建基于机器学习、人工智能的材料组分-性能预测模型,开发适用于恶劣环境下长期服役结构的材料体系。

参考文献

- [1] Yildizel S A, Tayeh B A, Calis G. Experimental and modelling study of mixture design optimisation of glass fibre-reinforced concrete with combined utilisation of Taguchi and Extreme Vertices Design Techniques[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 2093-2106.
- [2] 杜运兴,姚裕珠,李艳秋,等. 纯扭作用下地聚物混凝土梁静力性能试验研究[J]. *混凝土*, 2025(1): 15-21.
- [3] 宋广伟. 基于微界面改性的橡胶混凝土力学性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2024.
- [4] 章定文,王安辉. 地聚合物胶凝材料性能及工程应用研究综述[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(5): 13-38.
- [5] Erman T. Sustainable rubberized pervious concrete[D]. Middle East Technical University, 2023.
- [6] 赖冬明. 地聚物橡胶混凝土的抗冲击及抗冻融试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [7] 郑邦容,唐延丰,李佳骏,等. 橡胶混凝土力学性能与耐久性能研究进展[J]. *混凝土与水泥制品*, 2022, (09): 88-91.
- [8] 刘日鑫,侯文顺,徐永红,等. 废橡胶颗粒对混凝土力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(3): 341-344.
- [9] 刘春生. 橡胶集料混凝土的研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [10] Zhang B, Feng Y, Zhou X, et al. Dynamic mechanical behaviour and life cycle assessment of rubberised solid waste-based geopolymers concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 501: 145247.
- [11] 谢建和,李自坚,孙明炜. 硅粉对纤维橡胶再生混凝土抗压性能影响试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2016, 33(03): 72-77.
- [12] 高丹盈,陈嘉伟,王一泓. 高温中纤维纳米改性橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(S1): 65-72.
- [13] Miller N M, Tehrani F M. Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 147: 264-271.
- [14] Li K, Du S, Yuan S, et al. Study on the basic mechanical properties, dynamic properties, and frost resistance of rubber recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 471: 140671.
- [15] 赖大德. 用于结构防护的纤维橡胶混凝土抗冲击研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [16] 陈永升. 大流动性钢纤维橡胶混凝土抗拉及抗冲击性能试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [17] Yoo D Y, Banthia N, Yoon Y S. Impact Resistance of Reinforced Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers[J]. *ACI Structural Journal*, 2017, 114(1): 113-124.
- [18] Bindiganavile V, Banthia N, Aarup B. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite[J]. *Materials Journal*, 2002, 99(6): 543-548.
- [19] 涂天驰. 超高性能混凝土的抗冲磨性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [20] Li J, Wang X, Chen D, et al. Design and application of UHPC with high abrasion resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 309: 125141.
- [21] Mohsin Z H, Hilo A N, Al-Gasham T S, et al. Experimental study on the depth of abrasion in hydraulic structures using samples of geopolymers concrete[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 1964-1971.
- [22] Cheyad S M, Hilo A N, Al-Gasham T S. Comparing the abrasion resistance of conventional concrete and geopolymer samples[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 1832-1839.
- [23] Ranade R, Li V C, Heard W F, et al. Impact resistance of high strength-high ductility concrete[J]. *Cement and Concrete*

- Research, 2017, 98: 24-35.
- [24] Smith-Gillis R, Lopez-Anido R, Rushing T S, et al. Development of thermoplastic composite reinforced ultra-high-performance concrete panels for impact resistance[J]. Materials, 2021, 14(10): 2490:1-16.
- [25] 彭玉娇. 纳米纤维素晶体对水泥基材料水化和力学性能的影响研究[D]. 济南: 山东建筑大学,2021.
- [26] Wang R, Gao X, Huang H, et al. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 65-73.
- [27] Dancygier A N, Yankelevsky D Z, Jaegermann C. Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(11): 1768-1779.
- [28] Zhang M H, Shim V P W, Lu G, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 825-841.
- [29] Zhang L, Feng M, Liu B, et al. Multi-scale study on the crack resistance and energy dissipation mechanism of modified rubberized concrete[J]. Construction and Building Materials, 2024, 457: 139448.
- [30] Feng L, Chen X, Zhang J, et al. Experimental and mesoscopic investigation of self-compacting rubberized concrete under dynamic splitting tension[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104942.
- [31] Segre N, Joeke I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste[J]. Cement and concrete research, 2000, 30(9): 1421-1425.
- [32] Siddique R, Naik T R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview[J]. Waste management, 2004, 24(6): 563-569.
- [33] 杨刚, 葛浪潮, 谢森辉, 等. 硅粉-橡胶混凝土的力学性能及细观模拟[J]. 硅酸盐通报,2025,44(03):1032-1040.
- [34] 牛紫娟. 基于正交试验法的 PVA 纤维增强橡胶混凝土宏细观力学性能机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学,2024..
- [35] 朱星瞳. 基于随机集料模型和 X-CT 试验的橡胶混凝土细观损伤研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2022.
- [36] 罗麒锐. 基于粘结裂缝模型的橡胶混凝土细观性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2019.
- [37] 郑邦容, 唐延丰, 李佳骏, 等. 橡胶混凝土力学性能与耐久性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品,2022,(09):88-91.
- [38] 翟胜田. 橡胶集料混凝土材料的设计、制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学,2023.
- [39] 于双鹏, 杨启容, 陶礼, 等. 基于分子动力学模拟的轮胎橡胶气相热解产物反应机理[J]. 化工进展,2021, 40(06): 3119-3131.
- [40] 徐业守, 徐赵东, 郭迎庆, 等. 基于分子动力学模拟的天然橡胶黏弹性材料力学行为[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2021, 51(03): 365-370.
- [41] Onuaguluchi O. Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber-cement matrix interface and cement mortar properties[J]. Journal of cleaner Production, 2015, 104: 339-345.
- [42] Jiao B, Pan B, Che T. Evaluating impacts of desulfurization and depolymerization on thermodynamics properties of crumb rubber modified asphalt through molecular dynamics simulation[J]. Construction and Building Materials, 2022, 323: 126360.
- [43] Xu J, Chen X, Yu B. Experimental and simulation study of rubber/cement paste interface modified by waste paint and silica in two stages[J]. Construction and Building Materials, 2023, 382: 131323.
- [44] 于娇. 基于分子动力学的硅烷偶联剂改性橡胶水泥基材料设计与性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学,2021.
- [45] Jing Y, Zhang C, Lin G, et al. Studies on the mechanical properties of rubber concrete reinforced with high-temperature stirred pretreated waste rubber particles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 440: 137516.
- [46] 杨涛. 改性橡胶混凝土微细观结构与抗渗性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学,2023.
- [47] Kashani A, Ngo T D, Hemachandra P, et al. Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 467-473.

¹第1作者简介: 郭可敖(2006-), 男, 本科生, 研究方向: 固废资源化利用。E-mail: 2052885672@qq.com。

*通讯作者简介: 邵建文(1992-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 固废资源化利用; 新型高性能混凝土材料与结构。E-mail: jwshao@ldu.edu.cn。