Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1446-1458
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146144

Hans汉斯

橡胶混凝土动力性能与减震防护机制研究进展

韩凯旭

山东科技大学安全与环境工程学院，山东 青岛

收稿日期：2026年9月14日；录用日期：2026年10月19日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

废旧轮胎资源化利用与地下工程动力灾害防护需求推动了橡胶混凝土在减震、抗冲击和耗能领域的研究。本文综述其材料特征、静动力性能、减震耗能机制及地下工程应用，重点分析橡胶掺量、粒径、替代方式和界面特征对动力响应的影响。研究表明，橡胶掺入通常降低材料强度与刚度，但可提高变形能力、阻尼和冲击耗能性能；其动力响应本质上受骨架承载与柔性耗能竞争控制，耗能主要来源于橡胶弹性/黏弹变形、界面滑移摩擦及裂纹路径重构。现有研究表明，橡胶混凝土在隧道减振、约束阻尼衬砌及刚－柔组合防护中具有应用潜力，但材料耗能优势向结构安全收益的转化仍受结构形式、围岩条件及长期服役性能制约。本文进一步总结现有研究局限与发展方向，为橡胶混凝土地下工程减震防护研究与设计提供参考。

关键词

橡胶混凝土，动力性能，耗能机制，地下工程，减震防护

Research Progress on Dynamic Performance and Vibration Mitigation and Protective Mechanisms of Rubberized Concrete

Kaixu Han

College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: September 14, 2026; accepted: October 19, 2026; published: November 3, 2026

Abstract

The recycling of waste tires and the demand for dynamic disaster protection in underground engineering have promoted research on rubberized concrete for vibration mitigation, impact resistance,

文章引用: 韩凯旭. 橡胶混凝土动力性能与减震防护机制研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1446-1458.
DOI: 10.12677/me.2026.146144

and energy dissipation. This paper reviews its material characteristics, static and dynamic properties, vibration mitigation and energy dissipation mechanisms, and underground engineering applications, with emphasis on the effects of rubber content, particle size, replacement method, and interfacial characteristics. Rubber incorporation generally reduces strength and stiffness but improves deformation capacity, damping, and impact energy absorption. Its dynamic response is governed by the competition between skeleton load-bearing and flexible energy dissipation, involving rubber elastic/viscoelastic deformation, interfacial sliding and friction, and crack-path reconstruction. Existing studies indicate potential applications in tunnel vibration mitigation, constrained damping linings, and rigid-flexible protective systems, although the translation of material-level energy dissipation into structural safety benefits remains dependent on structural configuration, surrounding-rock conditions, and long-term performance. Finally, current limitations and future research directions are summarized to support the vibration mitigation and protective design of rubberized concrete in underground engineering.

Keywords

Rubberized Concrete, Dynamic Performance, Energy Dissipation Mechanism, Underground Engineering, Vibration Mitigation and Protection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着废旧轮胎数量增加，其资源化利用已成为固体废弃物处理的重要问题。将废旧轮胎加工为橡胶颗粒并部分替代天然骨料，可减少废弃物处置压力并拓展再生材料利用途径[1]-[3]。与此同时，隧道、地下车站及地下防护结构在强震、冲击和爆炸等动力作用下可能发生衬砌开裂、剥落及承载能力退化，对材料的变形、耗能和损伤控制能力提出了更高要求[4] [5]。

橡胶颗粒具有低模量和较大变形能力，掺入混凝土后通常会降低强度和刚度，但可改善延性、阻尼及冲击耗能等动力性能[1]-[3] [6]-[11]。因此，橡胶混凝土的关键并非单纯提高某一动力指标，而是在满足基本承载要求的基础上协调强度、刚度与耗能能力。如何将材料尺度的柔性与耗能优势进一步转化为构件和地下结构尺度的减震防护效益，是其工程应用需要解决的核心问题。

现有研究已由材料尺度逐步拓展至构件及地下工程场景，但材料参数、动力损伤与耗能机制向结构防护效益的跨尺度转化仍缺乏系统认识[6]-[17]。区别于已有主要聚焦材料与一般构件动力行为的综述，本文以“材料组成–力学与动力性能–耗能机制–地下工程应用”为主线，从材料–界面–裂纹–构件–地下结构多尺度出发，重点评述橡胶混凝土的动力性能、承载–耗能竞争机制及其向地下工程减震防护效益转化的证据与适用边界。

2. 橡胶混凝土材料组成及基本特征

2.1. 橡胶颗粒类型、粒径与掺入方式

橡胶混凝土通常采用废旧轮胎破碎、研磨所得的再生橡胶作为柔性组分。根据颗粒尺度和形态，可分为橡胶粉(rubber powder)、颗粒橡胶(crumb rubber)及较大尺寸的粗粒橡胶(rubber chips/shredded rubber)等[1] [18]-[20]。其中，颗粒橡胶通常用于替代部分细骨料，较大尺寸橡胶可用于替代部分粗骨料。由于

不同研究对橡胶类型的粒径界限并不统一，进行文献比较时应同时报告实际粒径或粒径区间[1] [20]。

现有研究对橡胶掺量的定义也存在差异，主要包括质量分数、体积分数以及天然骨料体积替代率等[1] [19] [20]。由于橡胶与天然骨料密度差异较大，不同掺量定义下的数值不能直接比较。因此，分析橡胶掺量对性能的影响时，应同时明确颗粒粒径、替代对象及掺量基准，以避免参数定义差异造成误判。

2.2. 橡胶－水泥基界面及细观结构特征

与天然骨料相比，轮胎橡胶具有较低弹性模量和明显疏水性，未经处理时与水泥浆体之间的润湿与黏结能力较弱[1] [19] [21]。因此，橡胶颗粒周围容易形成相对疏松的界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)，并伴随孔隙、微裂隙及局部接触不足等缺陷。近期纳米压痕、原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)及扫描电子显微镜－能谱分析(scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy, SEM-EDS)等研究进一步表明，橡胶－浆体界面区域的局部模量和黏结能力低于基体，说明 ITZ 是影响橡胶混凝土力学性能的重要细观薄弱区[21]-[23]。

除界面黏结不足外，橡胶与水泥基体之间显著的模量差异还会改变局部荷载传递路径，使颗粒周围产生不均匀变形和应力集中，并促进界面损伤及裂纹萌生[20] [21]。另一方面，低模量橡胶具有较大的变形能力，可对局部应力和变形过程产生一定调节作用。由此可见，橡胶颗粒及其界面同时具有承载弱化与柔性调节两方面特征，这也是后续强度下降、延性改善及动力耗能行为产生差异的重要材料基础。

3. 橡胶混凝土力学与动力性能

3.1. 静力性能及强度－变形权衡

橡胶颗粒掺入后，混凝土最显著的宏观变化表现为承载能力和刚度降低，而变形能力及裂后韧性趋于改善。大量试验和综述结果表明，随着橡胶替代率增加，抗压强度和弹性模量总体呈下降趋势，劈裂抗拉与抗折强度多数情况下也有所降低[1] [24] [25]。其中，抗压强度对橡胶掺量较为敏感，主要与橡胶自身低刚度、橡胶－浆体界面黏结较弱以及颗粒周围孔隙增加有关；弹性模量则由于高模量天然骨料被柔性橡胶取代而持续下降。相比之下，峰值应变通常增大，下降段趋缓，试件由突然脆裂向较为渐进的开裂和变形过程转变，表现出较高的延性和一定的韧性增益[1] [24] [25]。

上述变化并非仅由橡胶掺量决定。粒径、替代对象及表面状态均会改变性能下降幅度。相同体积掺量下，较小颗粒通常有利于减小局部缺陷尺度并改善静态抗压性能，而粗颗粒产生的刚度失配和界面效应更加突出；细骨料替代与粗骨料替代由于改变的骨架层级不同，其强度和变形响应也存在差异[25]。NaOH、硅烷、预包覆等表面处理能够通过改善润湿性和界面黏结部分恢复强度，但其效果受处理方式和基体组成影响，并不能完全消除橡胶低模量造成的整体刚度下降[1]。因此，橡胶混凝土并不存在脱离材料体系和应用目标的统一最优掺量，其基本特征应概括为：强度－刚度损失与延性－韧性增益同时存在，并随橡胶尺度、掺量及界面状态发生竞争性变化。这一权衡构成后续评价其动力防护价值的基础。

3.2. 动态压缩与应变率效应

在分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)等高应变率试验中，橡胶混凝土表现出明显的应变率敏感性。对于同一配合比，随着应变率提高，动态抗压强度通常增加，动态增大系数(dynamic increase factor, DIF)随之升高；部分研究发现，橡胶含量较高或颗粒尺寸较大的试件具有更明显的 DIF 增长，说明柔性颗粒的引入可能增强材料对加载速率的敏感程度[10] [25]-[27]。但需要区分“DIF 提高”和“动态强度提高”两个概念：由于橡胶混凝土的准静态强度基准较低，即使其 DIF 高于普通混凝土，同

一应变率下的绝对动态抗压强度仍可能较低[10] [26] [27]。

与强度变化相比，其动态变形和破坏特征更能体现橡胶作用。橡胶掺入后峰值应变通常增加，高速加载下试件破坏过程更为渐进，局部鼓胀、裂纹分叉以及较大块体残留更加明显，完全粉碎程度有所减弱；同时，吸收能和耗散能随应变率提高而增加，橡胶颗粒的变形使部分入射能量由快速裂纹扩展转化为内部变形和损伤耗散[10] [25]。不同研究所得 DIF、峰值应变及能量指标存在较大离散性，这不仅与橡胶掺量和粒径有关，也受到基体强度、试件直径与长径比、实际应变率区间以及 SHPB 波形整形和应力均匀条件的影响。因此，跨文献比较时不能仅依据单一 DIF 数值判断优劣。总体而言，较强的速率敏感性、较大的极限变形和能量吸收能力，为橡胶混凝土抵抗冲击和爆炸等短时高强动力荷载提供了材料层面的依据[10] [26] [27]。

在动力本构描述方面，现有研究主要通过修正传统混凝土本构中的损伤与应变率参数，或引入橡胶含量相关的速率效应和损伤演化关系，表征橡胶混凝土的动态响应。例如，已有研究基于 K&C 模型分析橡胶混凝土板的抗爆行为，并结合 SHPB 试验建立考虑橡胶含量与应变率影响的 DIF 模型[26] [28] [29]。总体而言，不同模型对橡胶含量、应变率及损伤演化的处理方式尚不统一，对界面损伤、裂纹演化和耗能过程的定量描述也较为有限[29] [30]。

3.3. 循环荷载、阻尼与滞回耗能

在低幅振动和循环荷载条件下，橡胶的引入通常表现为动态模量降低、阻尼增大和振动衰减加快。自由振动及循环试验表明，橡胶掺量增加可提高材料或构件的等效阻尼，但其阻尼水平受振动频率、应变幅值、裂缝状态、轴力及钢筋约束等因素影响[31]-[33]。其耗能主要与橡胶黏弹变形、橡胶－浆体界面微滑移、内部摩擦及微裂纹反复开闭等过程有关。

进入非线性往复加载阶段后，橡胶对滞回性能的影响更为复杂。部分构件试验表现出变形能力提高和刚度退化减缓，但也有研究发现，阻尼增大并不一定伴随滞回耗能提高，高橡胶掺量造成的承载力下降甚至可能使滞回环面积减小[33] [34]。因此，材料阻尼提高不能直接等同于结构整体减震性能提高；其实际减震效果还受到结构刚度、承载能力、配筋与轴压水平、边界条件及地震动特征等因素影响，仍需在构件和结构尺度进行验证。此外，Fang 等[11]的双向振动台试验表明，适量橡胶可提高柱构件的延性、变形与耗能能力并降低部分峰值加速度和残余位移，但过高橡胶替代率造成的承载力削弱仍会限制结构减震收益。

3.4. 抗冲击与抗爆性能

落锤和低速冲击研究总体表明，适量橡胶可提高混凝土的冲击变形能力和能量吸收水平，减轻突然碎裂，并使裂纹由单一贯通向分散、弯曲及多裂纹扩展转变[1] [9]。但峰值冲击力和位移并不随橡胶含量单调变化：刚度降低可能增大瞬时或残余变形，而接触时间延长及破坏模式改变又有利于缓解局部脆性损伤。因此，抗冲击性能应结合吸收能、变形、裂纹范围及冲击后完整性等指标综合评价，而不能仅依据抗压强度或单一峰值响应判断。

对于爆炸荷载，现有试验与数值研究表明，橡胶混凝土具有减轻局部碎裂、剥落和脆性损伤的潜力，其优势主要来源于较大的变形容限和能量耗散能力，而非静态强度提高[7] [28] [35]。但现有研究数量仍较有限，且装药量、爆距、构件尺寸、配筋及约束条件差异较大，尚不足以形成统一的定量规律。因此，现阶段更适宜将橡胶混凝土的抗爆性能概括为具有一定构件尺度证据支持的潜在动力防护优势。

为辨析不同研究结论差异的来源，表 1 系统对比了代表性研究的材料参数、加载条件及关键动力性能指标，并进一步归纳其主要影响因素及半定量关系。

Table 1. Comparison of representative studies on the dynamic performance of rubberized concrete
表 1. 橡胶混凝土动力性能代表性研究对比

代表文献	基体强度	橡胶替代率/粒径/处理方式	加载速率/试验条件	DIF	阻尼比/断裂能/耗能指标	半定量关系归纳
Pham *et al*. [25]	普通混凝土；同一基准配合比	15%体积替代天然骨料；1~3 mm、3~5 mm 及二者组合；未处理	SHPB 动态压缩；同时进行静态压缩试验	随应变率增大；大粒径橡胶组应变率敏感性更强	主要评价能量吸收；未报告阻尼比	橡胶粒径↑ → 静态抗压强度↓，应变率敏感性↑；小粒径有利于静态强度，但在动态压缩下优势减弱。
Jiang *et al*. [27]	SCC 静态抗压强度 74.7 MPa；RuSCC 随替代率增大降至 5.8~41.9 MPa	细骨料替代：20%、40%，CR 平均 1.6 mm；粗骨料替代：20%、40%、60%、80%，CR 平均 3.3 mm；体积替代	SHPB 动态压缩；约 64~220 s^{-1}；准静态加载 0.3~0.5 MPa/s	总体随应变率及橡胶替代率↑；80%粗骨料替代组在 120、160 s^{-1} 下 DIF 分别较 SCC 高约 70%、93%	能量吸收随应变率↑，但在相同应变水平下随橡胶替代率↑而↓	橡胶替代率↑ → 静态强度显著↓而 DIF↑；同掺量下细骨料替代组速率敏感性略高于粗骨料替代组；说明 DIF 增大不等于绝对动态强度提高。
Wang *et al*. [10]	RAC 单一配合比；P.O 42.5R 水泥	改性橡胶骨料 MRA 110 kg/m^3 替代部分细骨料；50 mesh；采用机械化学活化及改性浆液处理	Φ120 × 100 mm SHPB + 30,000 fps 高速摄影；代表性平均应变率约 12.96、29.01、39.99、47.15 s^{-1}	研究重点为动态强度及波形演化，未建立橡胶掺量－DIF 对比	直接分析入射、反射、透射及耗散能；高应变率下出现明显能量耗散过程	RAC 反射波出现“先高后低双峰”；应变率↑ → 第一峰前平台更明显；全过程由前期储能主导 → 后期耗能主导，橡胶变形及裂纹扩展共同耗能。
Jin *et al*. [22]	C35 橡胶混凝土	5%体积替代细砂；3~5 mm；水处理、NaOH、硬脂酸锌(ZS)三种界面状态	四点弯曲损伤 + 悬臂梁自由衰减；5 级损伤状态(挠度 0~0.20 mm) + 细观反演	NR	相对水处理：NaOH 使整体阻尼比↓3.01%、界面阻尼比↓75.4%；ZS 使整体阻尼比↑15.37%、界面阻尼比↑381.9%；并获得黏结强度、断裂能与界面阻尼比的平面拟合关系	界面增强并不必然提高阻尼：NaOH 提高黏结但明显降低界面阻尼；ZS 降低界面黏结/断裂能却大幅提高界面阻尼，说明界面存在明显的承载－耗能竞争关系。
Kaushik *et al*. [9]	M50 级；基准抗压强度 58.9 MPa	橡胶按体积替代砂 0%~30% (5%递增)；crumb rubber	500 × 100 × 100 mm 梁；6 kg 落锤、落高 500 mm；低速冲击 + FE + SEM	NR	10%、20%、30%替代时冲击吸能分别约↑49%、↑71%、↑98%；30%组断裂能由 148 增至 196.5 N/m	橡胶掺量↑ → 强度、模量↓，峰值位移、延性、断裂能及冲击吸能↑；30%时峰值冲击力约↑23%，说明冲击防护收益与准静态强度呈明显权衡。
Fang *et al*. [11]	普通柱与 RuC 柱；10%替代使抗压强度约↓25%，20%约↓66%	体积替代率 0%、10%、20%；细橡胶 1~5 mm、粗橡胶 5~10 mm 替代相近粒径天然骨料；橡胶预浸水 24 h	1/12 缩尺 RC 柱双向振动台；PGA 约 0.1~1.0 g；白噪声测试识别频率与阻尼	NR	10% RuC 总体具有相当或更高阻尼；10%组横向漂移能力最高约↑9.72%，残余位移最大约↓73.33%，平均峰值加速度响应约↓32.05%	适量替代有利、过量替代不利：10%在承载－延性－耗能之间表现出较好平衡；20%因强度损失过大在 0.9 g 下倒塌；减震效果还受共振影响，并非随橡胶含量单调改善。

续表

Yang *et al*. [35]	NC 28 d 抗压强度约 34.91 MPa；随橡胶增加下降	橡胶按体积替代砂 0%、10%、30%、50%；crumb rubber 约 0.85 mm	2000 × 2000 × 100 mm 钢筋混凝土板近场爆炸；爆距 0.5 m；现场爆炸 + LS-DYNA 数值分析	NR	未直接报告材料阻尼比；主要以残余变形、裂缝和拉伸区损伤评价耗能/抗爆行为	抗爆收益具有荷载依赖性而非单调关系：较小爆炸能量下 NC 因强度/刚度较高损伤较轻；大能量爆炸下 RuC 因变形与耗能能力较强，拉伸区损伤更小；作者建议综合强度时橡胶体积替代率 ＜30%。
Mei *et al*. [36]	RSC 橡胶－砂－水泥体系，无粗骨料；力学性能随配比变化	RM (橡胶占橡胶－砂混合物质量比) = 0、10、30、50、70、100%；CM = 30%~60%；RPS = 0.075~2 mm；未处理	单轴压缩 + 巴西劈裂 + SHPB (0.25 MPa) + 动三轴(1 Hz；围压 100~800 kPa) + 衬砌锤击验证	NR	动应变 ＞0.01 时 RM↑ → 阻尼比↑；CM↑ → 阻尼比↓；最优 RSC50-40-1 衬砌阻尼比由对照组 5.85%升至 14.83%，复合损耗因子 0.12→0.30	RM↑ → 强度、弹模和 Gmax↓，延性及耗能能力↑；RPS 在 0.075~2 mm 范围总体影响较小。综合承载与耗能提出 RSC50-40-1：RM = 50%、CM = 40%、RPS = 0.075~0.25 mm；隔震层使加速度幅值由 0.19 降至 0.10 m/s²、振动持续时间 0.29 降至 0.04 s。

总体而言，不同研究结果的差异主要源于橡胶掺量定义、粒径与替代对象、界面处理以及加载条件和评价指标的不一致。尽管试验条件存在差异，现有结果仍共同表明橡胶混凝土具有明显的承载－耗能权衡特征，即橡胶掺入通常伴随静态强度和刚度降低，但可提高变形、阻尼及能量耗散能力，其动力性能因此应结合强度、耗能与损伤指标综合评价。

4. 橡胶混凝土减震耗能机制

4.1. 橡胶弹性/黏弹变形耗能

轮胎橡胶的弹性模量显著低于水泥基体，并具有较大的变形与恢复能力。动力荷载作用下，橡胶颗粒作为柔性夹杂发生压缩、剪切和恢复变形，可延长局部变形过程并改变颗粒周围的应力分布，使部分输入能暂时转化为可恢复弹性应变能，并通过黏弹滞后产生能量损耗[37] [38]。同时，橡胶与基体之间的模量差异还会促进后续界面相对变形和裂纹路径重构。因此，橡胶本体变形是多尺度耗能过程的重要组成部分，但随着损伤发展，界面滑移、裂纹扩展及摩擦等机制将共同参与能量耗散[10] [38]。

4.2. 界面滑移、脱黏与摩擦耗能

橡胶与水泥浆体之间存在明显的刚度、表面状态和黏结差异，其界面过渡区通常较天然骨料－浆体界面更为疏松，并伴随孔隙和局部缺陷[1] [23]。受荷后，模量失配使橡胶周缘产生较大的相对变形，界面可经历微滑移、脱黏，并进一步发展为颗粒拔出、摩擦和局部撕裂。上述过程需要持续克服界面黏结与摩擦阻力，使输入能以界面断裂能、摩擦功和不可逆损伤等形式耗散[10] [22]。近期研究表明，橡胶表面处理能够同时改变界面黏结、断裂能及界面阻尼，说明橡胶－浆体界面不仅是承载薄弱区，也是重要的能量耗散单元[22]。因此，界面改性的作用不应仅理解为提高黏结强度，还可能通过调节界面破坏和滑移行为影响耗能过程。总体而言，界面弱化有利于滑移和摩擦机制的启动，但也会降低荷载传递效率并促进微裂纹萌生；界面增强则可改善承载性能，但其对耗能行为的影响仍取决于界面状态、基体强度及加载条件。由此可见，橡胶－浆体界面具有明显的承载－耗能双重作用，其合理调控应兼顾荷载传递与能量耗散，而不宜简单追求单一界面指标最大化。

4.3. 裂纹偏转、分叉与扩展耗能

橡胶颗粒及其界面改变了水泥基体中原有较直接的裂纹扩展路径。数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)、声发射以及破坏形貌观察表明，裂纹接近柔性橡胶颗粒后可发生偏转、绕行、分叉或局部钝化，并形成较为分散的微裂纹，从而抑制单一主裂纹快速贯通[3] [10] [39]。裂纹路径延长和裂面增加会提高断裂过程中的能量消耗，同时与颗粒变形、界面脱黏及裂面摩擦等过程耦合，使局部集中破坏向多区域渐进损伤转变[10] [39]。需要指出的是，裂纹扩展延缓主要体现为破坏过程更加渐进和峰后变形能力改善，并不意味着峰值强度必然提高；当界面缺陷较多时，裂纹仍可能提前萌生。

4.4. 强度损失与耗能增益的竞争机制

综合上述过程，橡胶混凝土可视为由水泥基体、天然骨料、低模量橡胶颗粒及其界面组成的非均质复合体系，其宏观动力性能本质上取决于“骨架承载–柔性耗能”机制之间的竞争。水泥石与天然骨料骨架主要提供强度和刚度，橡胶颗粒及其界面则通过弹性/黏弹变形、界面滑移摩擦和裂纹路径重构等过程提高变形与耗能能力。随着橡胶含量增加，耗能单元增多，但天然骨料持续被替代，低刚度区、界面缺陷及孔隙也随之累积，使承载路径连续性降低并加剧强度和刚度损失[1] [10] [22] [23] [40]。

因此，橡胶混凝土并不存在仅由橡胶掺量决定的统一“最优区间”，其承载–耗能平衡还受到基体强度、橡胶粒径、替代方式和界面状态等因素影响[10] [22] [40]。工程设计的关键是在满足基本承载和刚度要求的前提下，获得适宜的延性、损伤容限和能量耗散能力，而非单纯追求最大橡胶掺量、最大阻尼或最大单项吸能指标。上述多尺度耗能路径及其与强度、刚度损失之间的竞争关系可概括为图 1 所示的机制链。

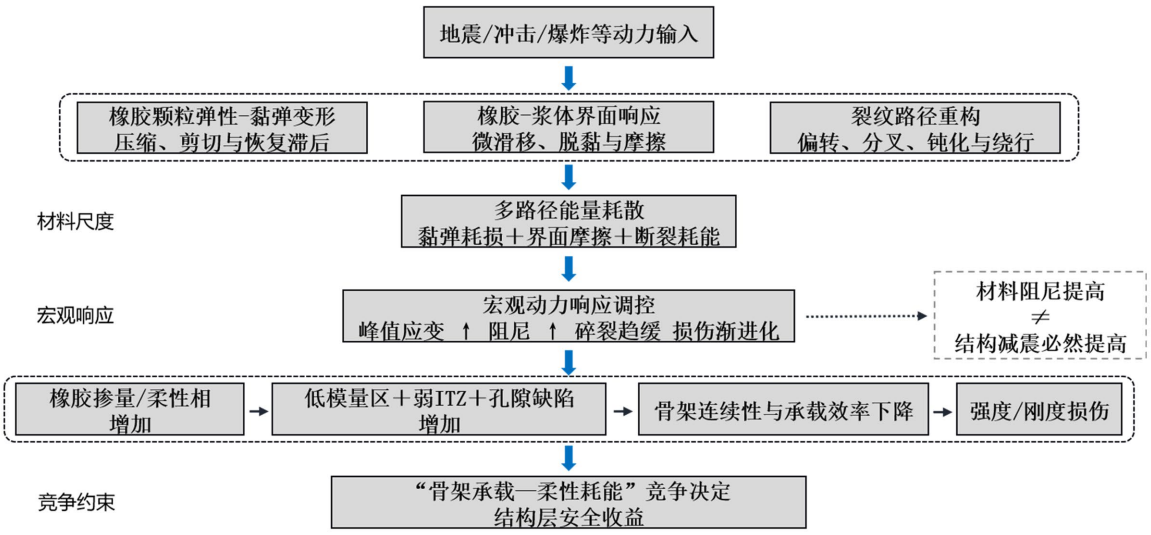


Figure 1. Schematic illustration of the multiscale vibration damping and energy dissipation mechanisms in rubber concrete
图 1. 橡胶混凝土多尺度减震耗能机制示意图

5. 面向地下工程的减震防护应用

5.1. 地下结构抗震与减震层应用

地下结构的地震响应并非由衬砌材料单独决定，而是地震波传播、围岩–结构动力相互作用及结构

刚度共同作用的结果。对于隧道、地下车站及地下洞室，地震波经非均质地层传播时发生反射、折射和透射，围岩变形进一步向衬砌传递动力作用，因此，降低局部刚度突变、增加耗能环节和调控应力波传播，是地下结构减震的重要思路[12]-[14]。橡胶混凝土具有较低弹性模量和较高阻尼，其波速和波阻抗与普通混凝土存在差异，作为衬砌局部材料或柔性夹层时，可通过变形耗能以及界面处应力波反射、透射关系的改变，降低部分动力能量向主体结构传递[13] [14] [41]。但低刚度同时可能增加结构变形，因此其作用取决于材料参数、设置位置、厚度以及围岩约束条件。

目前，橡胶混凝土在隧道减振方面已获得一定结构尺度证据。Jin 等将其用于隧道仰拱填充层，并通过足尺试验验证的数值模型发现，橡胶掺入能够降低隧道振动加速度，且减振效果具有明显频率选择性[12]；Mei 等首先通过材料试验明确 RSC 配比对力学与阻尼性能的影响[36]，并进一步构建橡胶－砂混凝土(rubber-sand concrete，RSC，即由废轮胎橡胶颗粒、砂和水泥按特定配比制备的柔性水泥基复合材料)约束阻尼衬砌，通过锤击试验及隧道数值分析表明，阻尼层能够调节加速度、应力和塑性应变响应，但其效果与层厚和构造形式并非简单线性关系[13]。近期，李凯臣等[15]基于隧道精细化三维数值模型与增量动力分析进一步表明，在其计算工况下，RSC 约束阻尼层可降低衬砌严重损伤概率，其中基本地震水平下的降幅约为 26.7%，且减震效果受到近断层脉冲型、近断层非脉冲型及远场地震动类型的明显影响。此外，将橡胶混凝土用于隧道二次衬砌及路床的研究已开始考虑分层地基－隧道耦合，但目前主要依据数值计算[14]。面向轨道交通振动传播路径控制，Li 等[16]提出预制周期性橡胶－混凝土复合屏障，并通过室内试验与数值分析验证其特定频段隔振能力；Gui 等[17]则将橡胶混凝土引入隧道隔振桩体系，说明相关应用正由衬砌和填充层向传播路径隔振构造拓展。

从耗能机制与衬砌损伤模式的关联来看，隧道抗震场景下橡胶混凝土的能量耗散随地震动强度和损伤阶段发生机制转换。小震或中震作用下，橡胶颗粒的弹性/黏弹变形及橡胶－浆体界面的微滑移与摩擦构成主要耗能路径，表现为等效阻尼增大、加速度响应降低而衬砌基本保持完好[37] [38]；随着地震动增强并进入非线性阶段，界面脱黏和基体微裂纹发展，裂纹在橡胶颗粒附近发生偏转、绕行和分叉，使裂纹扩展耗能逐渐增强，并推动破坏由集中贯通向多裂纹渐进损伤转变[3] [10] [39]。因此，其减震效益本质上体现为耗能机制由界面滑移向界面损伤与裂纹扩展协同作用演化，通过多尺度耗能促进集中损伤弥散化，而非单纯依赖材料强度提高。

因此，对地下车站、矿山巷道及大型地下洞室而言，更合理的定位是将橡胶混凝土作为减震层、缓冲层或刚－柔复合支护中的功能材料进行探索，而非直接替代主体承重混凝土。材料阻尼提高只是结构减震的必要条件之一，实际安全收益仍需通过围岩－结构体系的整体动力分析和试验加以确认。

5.2. 地下结构冲击与爆炸防护

隧道内部爆炸、地下结构局部撞击、深部矿山岩爆以及洞口落石冲击均具有作用时间短、局部能量密度高和损伤突发性强等特点。传统混凝土在此类荷载下容易出现局部压碎、裂纹快速贯通及拉伸区剥落。橡胶混凝土较大的变形和耗能能力使其具有作为防护层或缓冲层的潜力：柔性颗粒及界面变形可延长应力脉冲作用过程，并通过颗粒变形、界面摩擦和裂纹扩展耗散部分输入能量，从而减轻集中碎裂并降低向主体承载层传递的动力能量[9] [35] [41]。落锤构件试验表明，橡胶混凝土能够改善冲击吸能和破坏延性；钢筋橡胶混凝土板近场爆炸试验也显示，在特定较大爆炸荷载下，其受拉区损伤可低于普通混凝土板[9] [35]。但这些证据主要来自一般梁、板构件，不能直接等同于地下隧道或洞室已经获得相同防护效果。

面向矿山动力灾害，近年来橡胶水泥基柔性材料的刚－柔组合支护研究提供了与橡胶混凝土耗能机制相近、且更接近地下工程条件的旁证。岩石－橡胶水泥砂浆(rubber cement mortar, RCM)柔性层－高性

能支护混凝土组合体循环冲击试验表明，波阻抗差异能够增加应力波反射、降低透射能量，并改善组合体系的抗冲击响应[41]；进一步的模型爆破试验和数值分析表明，废轮胎橡胶－水泥复合材料柔性层在模型尺度下具有缓冲和能量耗散作用[42]。由于[41] [42]所用柔性材料体系并非传统骨料替代型橡胶混凝土，因此更适合作为刚－柔协同防护机制的邻近工程证据，而不宜视为橡胶混凝土现场应用的直接验证。

然而，橡胶混凝土的强度和刚度下降、弱界面及孔隙累积、长期耐久性和复杂地下环境适应性仍可能限制其防护效果[1]，且实际爆炸、岩爆及长期服役条件下的足尺验证仍较有限。因此，现阶段更适宜将其作为与高强主体衬砌协同工作的柔性耗能单元，通过“刚性承载层－柔性缓冲层”实现承载与防护功能分工，其工程化还需解决层间连接、参数匹配、耐久退化及结构尺度设计等问题。为区分不同地下工程场景下的验证尺度与证据强度，表 2 归纳了现有研究的应用形式、主要作用及适用范围。

Table 2. Applications and validation scales of rubber concrete for vibration mitigation and protection in underground engineering
表 2. 橡胶混凝土地下工程减震防护应用及验证尺度

应用场景	研究或拟应用形式	目标动力问题	主要研究发现或潜在作用	当前验证尺度	证据性质与适用范围	代表文献
隧道轨道/仰拱区域	橡胶混凝土仰拱填充层	列车振动、环境振动	可降低部分振动响应，且减振效果具有频率选择性	足尺试验验证数值模型 + 隧道动力分析	具有较强结构尺度依据，但参数规律主要来自数值计算	Jin *et al*. [12]
隧道衬砌体系	初支－橡胶砂混凝土耗能层－二衬约束阻尼结构	地震振动	可调节衬砌加速度、应力及塑性应变响应，层厚和构造形式对效果有显著影响	结构试验与隧道数值分析	结构尺度试验与数值证据，尚缺统一设计参数	Mei *et al*. [13]
分层地基隧道	二次衬砌或基础局部采用橡胶混凝土	地震波传播与围岩－结构耦合	低刚度及波阻抗差异可改变波传播特性和局部动力响应	三维分层地基－隧道数值模型	数值分析证据，工程效果仍需试验验证	Lu *et al*. [14]
深部矿山巷道/深埋隧道	围岩－RCM 柔性层－高性能支护混凝土刚－柔组合	岩爆、矿震、循环冲击	波阻抗失配可增强应力波反射、降低透射能量，并通过柔性层耗能缓冲	刚－柔组合体 SHPB 循环冲击试验	组合体动力试验旁证；材料体系并非传统橡胶混凝土，现场验证仍有限	Yang and Xu [41]
地下结构局部抗爆	柔性防护层或复合防护构造	内部爆炸、近场爆炸	具有降低局部碎裂、拉伸区损伤和背面剥落风险的潜力	一般钢筋混凝土板近场爆炸试验	间接构件尺度证据，尚不能直接外推至地下结构	Yang *et al*. [35]
洞口、竖井及局部构件	橡胶混凝土缓冲层或抗冲击构件	落石、设备撞击及局部冲击	可提高冲击变形和能量吸收能力，减轻脆性碎裂	一般梁构件低速落锤试验	间接构件尺度证据，地下工程应用仍属潜在方向	Kaushik *et al*. [9]

6. 施工可行性、长期耐久性与经济性分析

橡胶混凝土由实验室配合比走向工程应用，首先面临施工和易性与均匀性控制问题。橡胶颗粒表面疏水、吸水率低且与水泥浆体润湿性较差，掺入后易降低拌合物坍落度和黏聚性，高掺量下还可能出现泌水和离析[24]。工程上可通过优化水胶比和砂率、掺加高效减水剂等改善工作性，并采用 NaOH、硅烷偶联剂或水泥浆包裹等表面处理改善橡胶－浆体界面润湿与黏结性能[22]。均匀性控制同样是工程应用

的关键。由于橡胶颗粒密度显著低于砂石骨料，搅拌和振捣过程中易发生上浮，导致颗粒分布不均和性能离散。对此，可采用分次投料、控制搅拌与振捣时间以及掺加硅灰或增黏组分等措施提高体系稳定性[24] [43]。

地下工程长期受到地下水、冻融、温湿变化及化学侵蚀等复杂环境作用，橡胶混凝土的长期性能退化主要表现为橡胶－浆体界面的渐进损伤。冻融循环过程中，界面孔隙水反复冻胀促进微裂纹和脱黏区扩展，导致强度、阻尼及耗能能力退化[44]。Han 等[44]研究表明，橡胶掺量增加虽会引入更多初始孔隙，但其柔性变形也可在一定程度上缓解冻胀应力，表明冻融性能受界面缺陷与橡胶变形能力共同影响。干湿与温湿循环可因橡胶和水泥基体热物性差异在界面产生循环应力并诱发疲劳损伤；硫酸盐、氯离子及碳化等环境作用则可能通过侵蚀介质传输和界面损伤加速材料退化[45]。Zhai 等[45]研究表明，橡胶表面改性有助于改善耐久性，其作用与抑制侵蚀介质向界面区域传输有关。此外，橡胶的黏弹性可能增大长期荷载下的蠕变变形。总体而言，橡胶－浆体界面的损伤累积是影响长期服役性能的关键，因此地下工程应用中还需重点关注环境劣化后强度、阻尼及动力耗能性能的协同演化。

从经济性看，橡胶混凝土的材料成本受原料、改性及运输等因素共同影响。废旧橡胶颗粒具有一定的成本和资源化利用优势，但表面预处理、外加剂及胶凝材料用量增加会部分抵消其经济性[24]。此外，橡胶颗粒体积密度较低，长距离运输可能增加成本，因此其材料经济性具有明显的区域和运输半径依赖性。从全寿命周期看，其经济性应结合减震耗能带来的损伤控制和维护成本降低综合评价[13] [15]。已有多目标优化与智能预测研究也为性能－成本协同设计提供了方法[43] [46]，因此不宜仅以单方材料成本判断其经济性。

7. 现存问题与发展趋势

橡胶混凝土由材料研究走向地下工程减震防护仍面临参数体系不统一、结构尺度验证不足、跨尺度机制不清及长期服役研究不足等问题[1] [6] [7] [29] [30]。后续应规范橡胶参数与动力试验方法，建立可比较的性能数据库，并构建“材料－构件－地下结构”分级验证及“界面－裂纹－能量－结构响应”跨尺度分析体系。同时，应关注地下水、冻融及侵蚀环境下强度、阻尼与耗能性能的协同退化[30] [44] [45]，并统筹承载、耗能、耐久、施工及全寿命成本，实现由单一性能优化向多目标协同设计转变[43] [46]。

面向未来，在参数标准化、尺度验证和耐久性研究的基础上，橡胶混凝土动力性能研究可进一步向数据驱动设计、智能感知和多尺度机理建模等方向拓展。其一，发展基于人工智能与机器学习的动力性能预测与逆向设计方法。针对橡胶掺量、粒径、界面状态、基体强度及应变率等多参数耦合问题，可整合试验与微观表征数据，建立“材料参数－微观结构－动力性能”映射关系，并结合可解释机器学习与多目标优化，实现面向 DIF、阻尼及耗能能力等目标的配合比预测与逆向设计[46]，推动材料设计由试验试配向数据驱动优化转变。其二，探索橡胶混凝土与智能传感技术的融合。通过引入碳纤维、石墨粉或碳纳米管等导电组分构建力－电响应体系，可利用电阻变化表征动力荷载下的损伤演化，并进一步结合数据驱动方法实现损伤识别与状态评估。将其用于隧道衬砌或减震层，有望实现“承载－耗能－感知”一体化，为地下结构健康监测提供新的技术路径。其三，发展微观力学驱动的多尺度动态本构模型。针对现有宏观唯象模型难以反映橡胶－界面－基体相互作用的问题，可基于代表体积单元(RVE)等方法，耦合橡胶黏弹性、界面损伤及基体弹塑性损伤行为，建立“微观－细观－宏观”跨尺度本构框架，并结合纳米压痕、微观 CT 和声发射等试验进行参数标定，以提高复杂应变率和损伤状态下动力响应的预测能力。上述方向可分别从数据驱动、功能集成和机理建模层面推动橡胶混凝土由性能表征向智能设计、状态感知和跨尺度预测发展，为地下工程减震防护应用提供新的研究路径。

8. 结论

本文围绕橡胶混凝土的材料特征、静动力性能、减震耗能机制及地下工程应用进行了系统梳理，主要结论如下。

(1) 橡胶混凝土总体呈现强度、刚度下降与延性、耗能能力提高并存的特征，其变化受橡胶掺量、粒径、替代方式及界面状态共同影响，不存在适用于不同材料体系和工程目标的统一最优掺量。

(2) 橡胶混凝土的动力优势主要体现为变形容限、阻尼及能量耗散能力增强，而非绝对动力强度提高。DIF、材料阻尼或冲击吸能的增加不能直接等同于结构尺度减震与防护性能提升。

(3) 橡胶弹性/黏弹变形、界面滑移摩擦及裂纹偏转和分叉共同构成多尺度耗能机制，其宏观动力性能本质上取决于骨架承载与柔性耗能之间的竞争与协调。

(4) 地下工程中，橡胶混凝土更适合作为减震层、缓冲层或刚－柔复合体系中的功能性耗能材料。未来需加强结构尺度与长期服役验证，并统筹承载、耗能、耐久和经济性，实现材料耗能优势向结构安全效益的可靠转化。

参考文献

[1] Ren, F., Mo, J., Wang, Q. and Ho, J.C.M. (2022) Crumb Rubber as Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete: An Overview. *Construction and Building Materials*, **343**, Article ID: 128049. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128049

[2] Khatib, Z.K. and Bayomy, F.M. (1999) Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11**, 206-213. https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1999)11:3(206)

[3] Zhang, L., Feng, M., Liu, B., Geng, G. and Lin, B. (2024) Multi-Scale Study on the Crack Resistance and Energy Dissipation Mechanism of Modified Rubberized Concrete. *Construction and Building Materials*, **457**, Article ID: 139448. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139448

[4] Tsinidis, G., Karatzetzou, A., Stefanidou, S. and Markogiannaki, O. (2022) Developments in Seismic Vulnerability Assessment of Tunnels and Underground Structures. *Geotechnics*, **2**, 209-249. https://doi.org/10.3390/geotechnics2010010

[5] Cheng, R., Chen, W., Hao, H. and Li, J. (2021) A State-of-the-Art Review of Road Tunnel Subjected to Blast Loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **112**, Article ID: 103911. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103911

[6] Xiong, Z., Fang, Z., Feng, W., Liu, F., Yang, F. and Li, L. (2021) Review of Dynamic Behaviour of Rubberised Concrete at Material and Member Levels. *Journal of Building Engineering*, **38**, Article ID: 102237. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102237

[7] Eltayeb, E., Ma, X., Zhuge, Y., Xiao, J. and Youssf, O. (2021) Dynamic Performance of Rubberised Concrete and Its Structural Applications—An Overview. *Engineering Structures*, **234**, Article ID: 111990. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111990

[8] Pham, T.M., Chen, W., Khan, A.M., Hao, H., Elchalakani, M. and Tran, T.M. (2020) Dynamic Compressive Properties of Lightweight Rubberized Concrete. *Construction and Building Materials*, **238**, Article ID: 117705. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117705

[9] Kaushik, A., Prakash, G. and Rajput, A. (2022) Influence of Crumb Rubber on the Response of Concrete Beams against Low Velocity Impact. *Construction and Building Materials*, **347**, Article ID: 128614. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128614

[10] Wang, W.Y., Deng, Y.J., Liu, L.B., Zhang, L.H. and Yao, Y. (2024) Dynamic Mechanical Properties and Energy Dissipation Analysis of Rubber-Modified Aggregate Concrete Based on SHPB Tests. *Construction and Building Materials*, **445**, Article ID: 137920. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137920

[11] Fang, X., Bi, K., Pham, T.M. and Hao, H. (2025) Seismic Behaviours of Rubberized Concrete (RuC) Columns: Bidirectional Shaking Table Test. *Engineering Structures*, **332**, Article ID: 120060. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120060

[12] Jin, H., Tian, Q., Li, Z. and Wang, Z. (2022) Ability of Vibration Control Using Rubberized Concrete for Tunnel Invert-Filling. *Construction and Building Materials*, **317**, Article ID: 125932. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125932

[13] Mei, X., Sheng, Q., Chen, J., Cui, Z., Li, J., Li, C., *et al*. (2024) Aseismic Performances of Constrained Damping Lining Structures Made of Rubber-Sand-Concrete. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 1522-1537.

https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.08.003

[14] Lu, S., Wang, C., Su, J. and Wang, F. (2025) Dynamic Interaction between Layered Foundation and Rubber Concrete Tunnel Lining Structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **157**, Article ID: 106178. https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106178

[15] 李凯臣, 梅贤丞, 崔臻, 等. 考虑地震动类型与橡胶-砂-混凝土约束阻尼层的隧道衬砌地震易损性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45(7): 2046-2060.

[16] Li, Z., Ma, M., Liu, K. and Jiang, B. (2023) Performance of Rubber-Concrete Composite Periodic Barriers Applied in Attenuating Ground Vibrations Induced by Metro Trains. *Engineering Structures*, **285**, Article ID: 116027. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116027

[17] Gui, P., Jin, H. and Jiang, B. (2026) Study on Vibration Isolation Performance of Rubberized Concrete Piles for Tunnel in Rail Transit. *Journal of Vibration and Control*. https://doi.org/10.1177/10775463261444774

[18] Eldin, N.N. and Senouci, A.B. (1993) Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **5**, 478-496. https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1993)5:4(478)

[19] Assaggaf, R.A., Ali, M.R., Al-Dulaijan, S.U. and Maslehuddin, M. (2021) Properties of Concrete with Untreated and Treated Crumb Rubber—A Review. *Journal of Materials Research and Technology*, **11**, 1753-1798. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019

[20] Mo, J., Ren, F., Tian, S., Wang, Q. and Ho, J.C.M. (2023) Impact of Crumb Rubber Particle Size on the Mechanical and Microstructure Properties of Rubberized Concrete. *Structural Concrete*, **24**, 4077-4092. https://doi.org/10.1002/suco.202200616

[21] Li, Y., Zhang, X., Wang, R. and Lei, Y. (2019) Performance Enhancement of Rubberised Concrete via Surface Modification of Rubber: A Review. *Construction and Building Materials*, **227**, Article ID: 116691. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116691

[22] Jin, H., Wang, Z., Zhao, C. and Xiao, J. (2024) Effect of Rubber Surface Treatment on Damping Performance of Rubber-Mortar ITZ in Rubberized Concrete. *Journal of Building Engineering*, **83**, Article ID: 108441. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108441

[23] Yang, G., Qi, Y., Ma, Z. and Xu, J. (2025) Quantitative Characterization of Crumb Rubber Concrete Interfacial Transition Zone Based on Microscopic Test Method. *Construction and Building Materials*, **505**, Article ID: 144689. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144689

[24] He, S., Jiang, Z., Chen, H., Chen, Z., Ding, J., Deng, H., *et al*. (2023) Mechanical Properties, Durability, and Structural Applications of Rubber Concrete: A State-of-the-Art-Review. *Sustainability*, **15**, Article 8541. https://doi.org/10.3390/su15118541

[25] Pham, T.M., Renaud, N., Pang, V., Shi, F., Hao, H. and Chen, W. (2022) Effect of Rubber Aggregate Size on Static and Dynamic Compressive Properties of Rubberized Concrete. *Structural Concrete*, **23**, 2510-2522. https://doi.org/10.1002/suco.202100281

[26] Lai, D., Demartino, C. and Xiao, Y. (2022) High-Strain Rate Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete. *Construction and Building Materials*, **319**, Article ID: 125739. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125739

[27] Jiang, Y., Zhang, S., Xue, G. and Wang, W. (2023) Compressive Behavior of Rubberized Concrete under High Strain Rates. *Structures*, **56**, Article ID: 104983. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104983

[28] Feng, W., Chen, B., Yang, F., Liu, F., Li, L., Jing, L., *et al*. (2021) Numerical Study on Blast Responses of Rubberized Concrete Slabs Using the Karagozian and Case Concrete Model. *Journal of Building Engineering*, **33**, Article ID: 101610. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101610

[29] Feng, W., Chen, B., Tang, Y., Wei, W., He, W. and Yang, Y. (2022) Structural Effects and Real Strain-Rate Effects on Compressive Strength of Sustainable Concrete with Crumb Rubber in Split Hopkinson Pressure Bar Tests. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **22**, Article No. 136. https://doi.org/10.1007/s43452-022-00457-x

[30] Ling, R., Zhou, C., Wu, R., Xie, Y. and Wu, C. (2024) Study on Mechanical Response and Constitutive Model of Rubber Concrete under Impact Load and Water Content Coupling. *Buildings*, **14**, Article 2528. https://doi.org/10.3390/buildings14082528

[31] Liang, C., Fu, Y., Wang, C., Gao, Y. and Zhao, J. (2022) Damping of Rubberized Recycled Aggregate Concrete and Damping Estimation of Its Elements by Finite Element Analysis. *Composite Structures*, **281**, Article ID: 114967. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114967

[32] Liu, R., Palermo, A. and Chiaro, G. (2023) Effect of Reinforcing and Crack Width on the Vibration Damping Capacity of Rubberized Concrete Beams. *Structural Concrete*, **24**, 2740-2754. https://doi.org/10.1002/suco.202200232

[33] Elghazouli, A.Y., Bompa, D.V., Xu, B., Ruiz-Teran, A.M. and Stafford, P.J. (2018) Performance of Rubberised

Reinforced Concrete Members under Cyclic Loading. *Engineering Structures*, **166**, 526-545. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.090

[34] Hassanli, R., Youssf, O. and Mills, J.E. (2017) Experimental Investigations of Reinforced Rubberized Concrete Structural Members. *Journal of Building Engineering*, **10**, 149-165. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.006

[35] Yang, F., Feng, W., Liu, F., Jing, L., Yuan, B. and Chen, D. (2019) Experimental and Numerical Study of Rubber Concrete Slabs with Steel Reinforcement under Close-In Blast Loading. *Construction and Building Materials*, **198**, 423-436. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.248

[36] Mei, X., Sheng, Q., Cui, Z., Zhang, M. and Dias, D. (2023) Experimental Investigation on the Mechanical and Damping Properties of Rubber-Sand-Concrete Prepared with Recycled Waste Tires for Aseismic Isolation Layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **165**, Article ID: 107718. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107718

[37] Hernández-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M. and Witoszek, B. (2002) Static and Dynamic Behaviour of Recycled Tyre Rubber-Filled Concrete. *Cement and Concrete Research*, **32**, 1587-1596. https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00833-5

[38] Xue, J. and Shinozuka, M. (2013) Rubberized Concrete: A Green Structural Material with Enhanced Energy-Dissipation Capability. *Construction and Building Materials*, **42**, 196-204. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005

[39] Ming, P., Lu, J., Cai, X., Liu, M. and Chen, X. (2020) Analysis of the Crack Evolution Process in Crumb Rubber Concrete Based on Acoustic Emission Technology. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **24**, 2088-2098. https://doi.org/10.1007/s12205-020-1508-x

[40] Di, S., Jia, C., Qiao, W., Li, K. and Tong, K. (2018) Energy Evolution Behavior and Mesodamage Mechanism of Crumb Rubber Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**, Article ID: 9843416. https://doi.org/10.1155/2018/9843416

[41] Yang, R. and Xu, Y. (2023) Experimental Study on Dynamic Compression Behavior Characteristics and Stress Wave Propagation Law of Rigid-Flexible Combinations under Cyclic Bi-Directional Impact Loading. *Journal of Materials Research and Technology*, **25**, 925-945. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.261

[42] Yang, R., Xu, Y., Zhang, Q., He, M. and Zhou, L. (2026) Integrated Theoretical, Experimental, and Numerical Analysis for Dynamic Disaster Control of Deep Surrounding Rock under Static-Dynamic Coupling Stress. *Journal of Applied Geophysics*, **254**, Article ID: 106467. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2026.106467

[43] Abunassar, N. and Alas, M. (2025) Optimization of Strength and Durability Properties of Rubberized Concrete Mixtures Containing Silica Fume Using Taguchi Method. *Construction and Building Materials*, **468**, Article ID: 140455. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140455

[44] Han, X., Zhang, Z., Wang, D., Chen, A., Ji, Y., Wang, Z., *et al*. (2025) Experimental Study on Freeze-Thaw Failure Mechanism of Rubberized Concrete and Analytical Evaluation of the Damage Evolution. *Construction and Building Materials*, **480**, Article ID: 141511. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141511

[45] Zhai, S., Hu, J., Hai, R., Cui, L., Zhang, Y., Yang, L., *et al*. (2025) Investigation on the Durability Performance and Mechanism Analysis of Modified Crumb Rubber Concrete. *Construction and Building Materials*, **471**, Article ID: 140746. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140746

[46] 梅贤丞, 马亚丽娜, 李建贺, 等. 橡胶-砂混凝土耗能特性智能预测模型研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(7): 113-120, 126.