

废弃橡胶对混凝土力学性能与耐久性能研究综述

徐作维, 王学志

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年4月6日; 录用日期: 2025年4月27日; 发布日期: 2025年5月8日

摘 要

由于全球现代发展的迅速崛起和千变万化, 废橡胶造成了严重的环境问题。因此, 以骨料形式回收废橡胶作为补充建筑材料具有优势。本文回顾了废橡胶来源及其材料特性, 而后从废弃橡胶在混凝土中的不同性能方面入手, 概述了废橡胶骨料在基于普通混凝土的传统砂浆/混凝土混合物中作为部分或全部天然骨料替代物对橡胶化混凝土的强度、冲击载荷、耐磨性、抗冻融性、抗碳化性、吸水性、氯离子渗透性的影响。最后, 讨论并给出了废弃橡胶在混凝土中, 尤其在绿色超高性能混凝土和高力学保持性能的耐高温混凝土, 进一步应用和研究的建议。

关键词

废弃橡胶, 力学性能, 耐久性能, 物化性质, 混凝土

A Review of the Research on Mechanical Properties and Durability of Concrete by Waste Rubber

Zuowei Xu, Xuezhi Wang

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Apr. 6th, 2025; accepted: Apr. 27th, 2025; published: May 8th, 2025

Abstract

With the rapid rise and ever-changing nature of global modern development, waste rubber has become a serious environmental issue. Therefore, recycling waste rubber in the form of aggregate as

a supplementary building material holds significant advantages. This paper reviews the sources of waste rubber and its material properties. It then provides an overview of the effects of waste rubber aggregate, used as a partial or complete replacement for natural aggregate in traditional mortar/concrete mixtures based on ordinary concrete, on the strength, impact resistance, wear resistance, freeze-thaw resistance, carbonation resistance, water absorption, and chloride ion permeability of rubberized concrete. Finally, the paper discusses and offers suggestions for further applications and research of waste rubber in concrete, especially in green ultra-high-performance concrete and high-temperature-resistant concrete with excellent mechanical property retention.

Keywords

Waste Rubber, Mechanical Properties, Durability, Physical and Chemical Properties, Concrete

Copyright © 2025 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

众所周知, 中国的废物产生量估计每年超过 2360 亿吨, 其增长速度与经济增长速度相当[1]。因此, 减少废物和回收利用是废物管理框架中非常重要的元素, 因为它们有助于保护自然资源和减少对宝贵的垃圾填埋空间的需求。废橡胶是世界上备受关注的重要废物之一。其中, 从参考文献中的数据估计, 全球约有 40 亿个废弃轮胎被填埋和堆放, 因此, 废橡胶的主要来源是废弃轮胎。

为了妥善处理数量庞大的废旧橡胶, 必须采用创新技术对其进行回收利用。然而, 很大一部分废旧橡胶被用于土木工程, 如道路和铁路地基和路堤、翻新或出口[2]。回收的废轮胎被用于水泥窑的能源用途、焚烧发电[3]、用作混凝土基体的添加剂[4]-[6]。天然砂石作为砂浆/混凝土生产中的粗/细骨料, 在全球范围内的消耗量非常大, 近年来, 为了满足基础设施发展日益增长的需求, 一些发展中国家在天然砂石供应方面遇到了一些压力[7]。在许多国家, 适用于建筑的天然粗/细骨料非常稀缺。总体而言, 在过去 15 年中, 优质天然砂石的供应量明显在减少[8]。在建筑行业中重复使用废橡胶作为粗/细骨料的部分或全部替代品, 不仅减少了对天然原材料开采的需求, 还节省了垃圾填埋空间。

然而, 目前还没有文献综述论文, 对之前用废橡胶部分或全部替代天然骨料时砂浆/混凝土力学性能和耐久性能的研究进行回顾。因此, 本文回顾了废橡胶来源及其材料特性, 而后从废弃橡胶在混凝土中的不同性能方面入手, 概述了废橡胶骨料在基于普通混凝土的传统砂浆/混凝土混合物中作为部分或全部天然骨料替代物对橡胶化混凝土的强度、冲击载荷、耐磨性、抗冻融性、抗碳化性、吸水性的影响。最后, 讨论并给出了废弃橡胶在混凝土中进一步应用和研究的建议。

2. 橡胶的物理化学性质

2.1. 物理性质

废弃橡胶是固体废弃物的一种, 主要来源于废橡胶制品, 如报废的轮胎、人力车胎、胶管、胶带、工业杂品等, 以及橡胶制品厂生产过程中产生的边角料和废品, 见表 1 所示。无论是哪种原料橡胶, 都具有密度高、硬度大、拉伸性好、耐磨性强、耐温性好、耐化学性强等特点[9]。通过对已有研究成果的统计分析可知, 废弃橡胶的物理性质具有以下特点: 废弃橡胶的密度、表观密度及硬度通常小于天然碎石

骨料[10], 因此, 使用废弃橡胶骨料替代天然碎石骨料可减轻结构的自重。另外, 橡胶的硬度小于天然骨料, 则表明具有良好的柔韧性和弹性。这种硬度特性使得废弃橡胶能够在很大程度上吸收冲击力, 并且不易破碎。橡胶的耐温性良好, 这使得这些废弃橡胶能够在高温或低温环境中保持稳定的性能, 适用于特定条件下的应用。

Table 1. Sources of waste rubber
表 1. 废弃橡胶来源

废旧轮胎	废橡胶手套	废橡胶制品	建筑用废橡胶垫板
			

不同类型废弃橡胶骨料表面形状特征见图 1 所示。橡胶集料的几何形状、尺寸和形状决定了橡胶颗粒作为集料在复合材料中再利用的可能性。集料的长径比(最大与最小正交维数之比)对于制造需要特定流动性的复合材料(如混凝土、水泥基或沥青)非常重要。轮胎胎面的厚度约为 10~20 mm, 因此, 粒径小于 20 mm 的集料将更接近于长径比为 1 的球形。橡胶也可以切片形成纤维, 用作内部增强体。小粒径胶粒或者胶粉可与聚合物共混得到再生胶或与沥青共混生产沥青[11][12]。再生橡胶与其复合基体之间的界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)结合取决于两者组分的物理性能。扫描电子显微镜(SEM)图像见图 2 所示, 在 ITZ 处橡胶和水泥基体之间缺乏粘结(间隙), 以及橡胶颗粒周围有限的水化产物, 这说明橡胶颗粒与水泥基体之间的粘结较弱[13]。因此, 界面产生裂缝, 最终导致混凝土的强度降低。

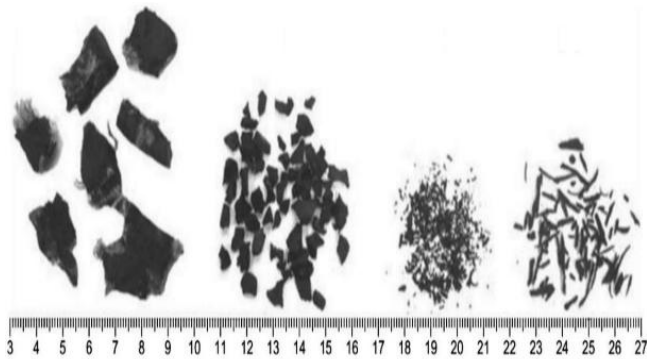


Figure 1. Rubber aggregate size
图 1. 橡胶骨料尺寸

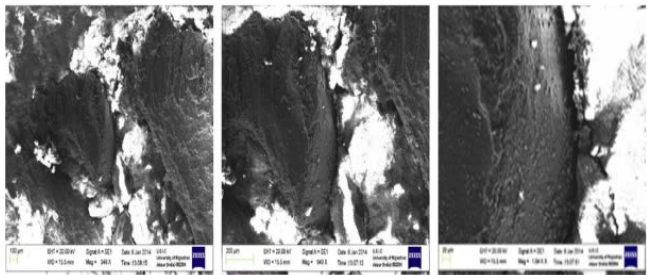


Figure 2. SEM micrograph of ITZ
图 2. 界面过渡区显微图

2.2. 化学性质

橡胶的主要化学成分为苯乙烯和丁二烯以及其他添加剂。根据不同作用添加剂分为硫化剂、促进剂、防老剂、填充剂、增塑剂、着色剂。还有一些其他的组分如水、挥发性有机物和无机杂质。X 射线衍射 (XRD) 分析是分析和研究晶体最常用的方法。在橡胶骨料混凝土(CRC)的研究领域中, XRD 常用于研究橡胶颗粒的矿物相种类以及橡胶与水泥界面过渡区(ITZ)中氢氧化钙(CH)的含量和结晶取向。刘学勇等人 [14] 研究了四种橡胶含量(0%、5%、10%和 15%)的水泥基体的水化产物的相结构(见图 3)。结果表明, 橡胶的加入使水泥基体水化产物中 CH 晶体的衍射峰强度降低了 51.4%~64.3%。其原因可能是, 尽管水泥的化学组成复杂, 但橡胶的疏水性降低了橡胶颗粒与水泥基体之间 ITZ 中 CH 晶体的尺寸。掺入橡胶颗粒后, 水化产物中没有发现新的相结构。

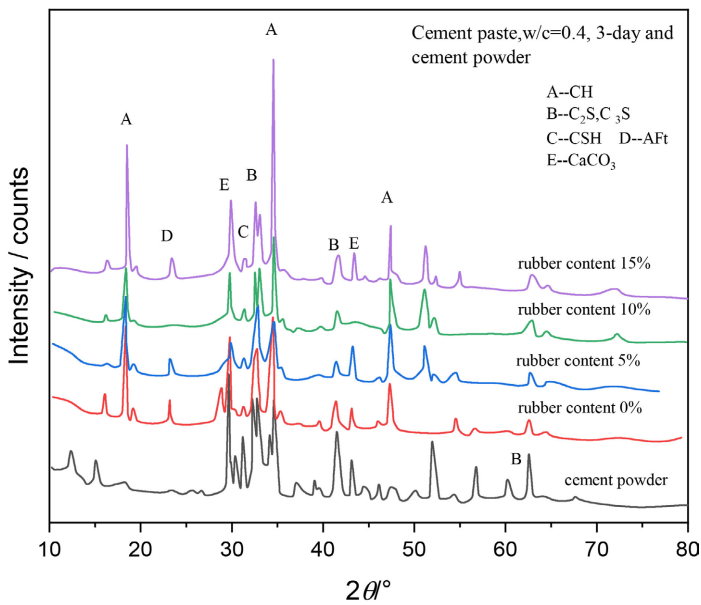


Figure 3. XRD analysis of CRC
图 3. 橡胶骨料混凝土 XRD 分析

3. 橡胶骨料对混凝土力学性能的影响

3.1. 抗压强度

在混凝土中使用再生橡胶通常会导致混凝土抗压强度较低。这种强度的降低是由橡胶材料的疏水性质和橡胶颗粒与水泥浆体之间的刚度/强度差异引起的。其疏水性导致橡胶集料与水泥浆体之间的不完全粘结, 在外部荷载作用下容易产生界面裂缝。从宏观层面来看, CRC 强度的整体降低取决于橡胶集料的尺寸、形状、力学性能和百分比取代水平。研究人员使用额外的材料来克服这些问题, 例如加入硅灰来增强 ITZ 中的粘结[15]。另一种可能性是在混凝土中使用非均匀基体, 因为橡胶集料由于其较低的比重在压实时上升到模具的上表面[16]。橡胶集料的掺量越大, CRC 的抗压强度降低幅度越大(见图 4) [17]。岳雪涛等人 [18] 采用纤维复合改性橡胶混凝土的方法, 研究不同钢纤维掺量对橡胶混凝土强度影响及其发展规律。结果表明, 钢纤维改性橡胶混凝土的效果比较明显, 且掺量越大, 强度越高。此外, 通过使用特定的溶剂、改性剂(如乳液、树脂或其他特定的改性剂)对橡胶集料进行预处理, 证明有助于改善橡胶与混凝土 [19] 之间的粘结, 提高粘结强度。

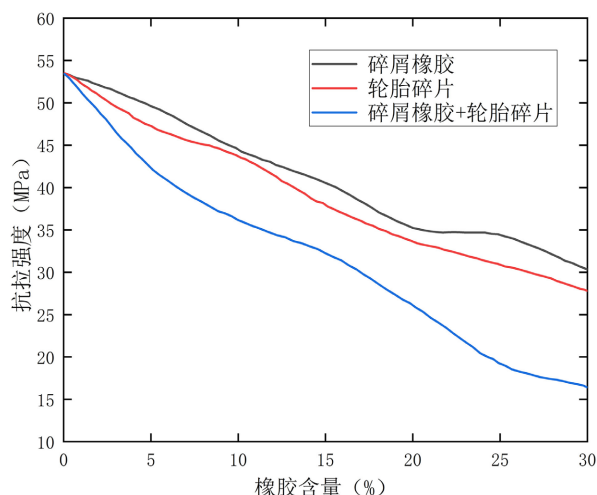


Figure 4. Variation of the compressive strength of CRC with rubber content
图 4. CRC 抗压强度随橡胶掺量的变化规律

3.2. 抗拉强度

一般来说, CRC 试样的抗拉强度低于普通混凝土(NC)试样。Akinyele 等人[20]发现, 在混凝土中添加 4%的(橡胶骨料)CR 替代(天然骨料)NA 时, 抗拉强度降低了 41%, 而使用 16%的 CR 时, 抗拉强度降低了 58%。因此, CR 越高, 强度越低。当用碎橡胶替代骨料时, 混凝土抗拉强度的降低幅度大于用橡胶粉替代水泥的 CRC。见图 5 显示了 CRC 的劈裂抗拉强度随 CR 含量和尺寸的变化[17]。研究人员之前提出了造成这一现象的几个原因。CR 与水泥浆接触的表面为微裂缝, 而 CR 为空腔, 因此 CRC 的整体抗拉强度低于 NC。薄弱的 ITZ 和沿 ITZ 的应力集中是 CRC 在拉应力作用下快速失效的原因之一。Aslani 等人[21]报告称, 当使用 5 毫米大小的 CR 而不是 2 毫米和 10 毫米大小的骨料时, 拉伸强度的降低幅度最小。这种情况可能是由于表面积较大, 但在 CRC 中使用了相同体积的 2 毫米和 5 毫米骨料作为 NA。10 mm 粒径的集料用于替代 NA 导致橡胶所占体积较大。为提高 CRC 结构的抗拉强度, 可采用混合施工技术。在混合 CRC 结构中, 顶层由 CRC 组成, 底层由 NC 组成, 达到最大弯曲承载能力, 混合结构的好处是它们提供了高的能量吸收能力。

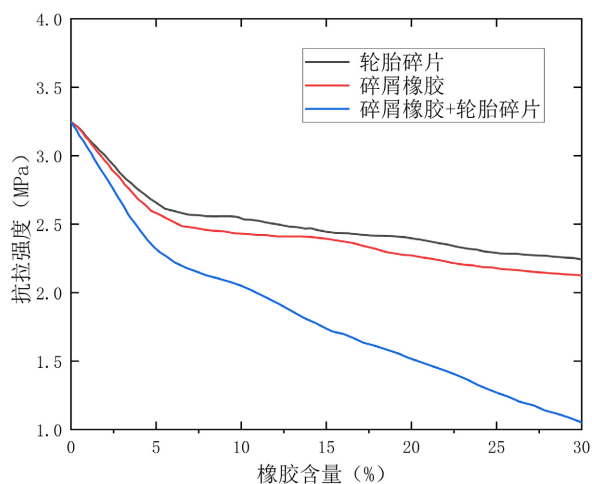


Figure 5. Variation of the tensile strength of CRC with rubber content
图 5. CRC 抗拉强度随橡胶掺量的变化规律

3.3. 抗折强度

CRC 抗折强度的下降趋势与抗压和劈裂拉伸强度几乎相似。同样, 王雯睿等人[22]发现, 当混凝土中用 CR 取代 30% 的砂时, 抗折强度降低了 20%。积极的一面是, CRC 不会像普通混凝土那样在弯曲时突然失效。因此, CRC 在弯曲荷载下不会表现出脆性破坏, 而是在一定变形量下破坏, 但不会完全解体。见图 6 所示[23], 橡胶和水泥浆的弱粘结力导致抗弯强度比抗压强度降低得更快。对于较小尺寸的 CR, 在弯曲试验中显示的强度降低较少。这种情况是由于小尺寸材料具有较高的密实能力。在某些情况下, 添加填充材料后, 橡胶含量达到 20% 时, 抗弯强度可提高到一定限度[24]。添加硅灰有利于减少 CRC 在弯曲负荷下的强度降低[25]。此外, 研究人员还建议在 CRC 中使用钢纤维或合成纤维, 以提高其抗弯强度和抗裂性[26]。

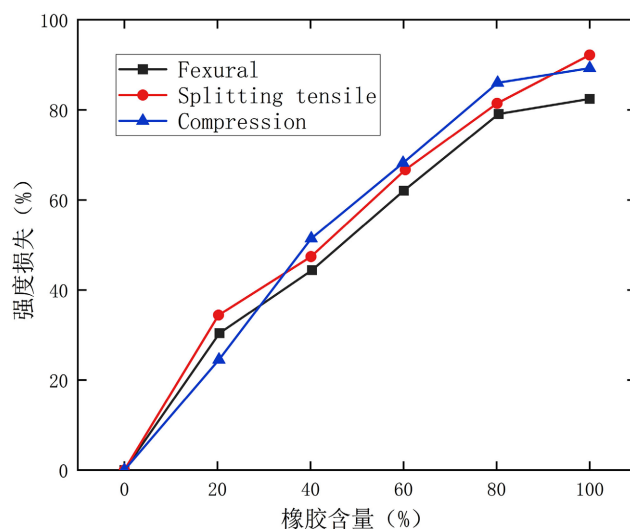


Figure 6. Variation of strength reduction with rubber content
图 6. 强度折减系数随橡胶含量的变化

3.4. 耐磨性

CRC 的耐磨性优于 NC。随着混凝土中橡胶添加量的增加, 耐磨性也在不断提高[27]。加入更细的橡胶颗粒, 混凝土的密度会增加, 耐磨性也会增加。见图 7 是耐磨性随橡胶含量和橡胶尺寸变化的典型代表[28]。见图 7 中, 含有较细 CR 的 CRC 显示出较低的磨损深度, 而增加 CR 含量则显示出更高的耐磨性。耐磨性的增加可能是由于橡胶的柔软性, 它就像一把刷子。相反, 当橡胶含量过高时, CRC 可能会出现更高的磨损损伤, 因为橡胶的团聚可能会导致基体表面刚度降低。在试样成型过程中, 由于 CR 的比重低于天然骨料, 因此 CR 的振动倾向于冲向混凝土试样的表面。当橡胶含量过高时, 这种趋势会更加明显。因此, 橡胶与水泥浆之间的粘结强度较低, 磨损导致的磨蚀也较高。

3.5. 抗冲击性

CRC 在冲击荷载下的性能优于静态荷载, 橡胶含量越高, CRC 的冲击能越高, 最多可替代 50% 的砂。黄壁荣[29]等人研究了橡胶颗粒等质量替代 0%、10%、20%、30%、40% 的石英砂对应变硬化水泥基复合材料(SHCC)力学及抗冲击性能的影响, 结果表明随着橡胶颗粒掺量的增加, 橡胶改性 SHCC 的耗能能力基本略有下降, 且随着冲击高度的增加, 下降幅度基本呈减小趋势, 但基本高于未掺橡胶颗粒的试件。

见图 8 [30]显示了不同橡胶含量的混凝土混合物耗能的典型变化, 描述了混凝土中橡胶含量增加时

耗能能力的增加趋势。因此, CRC 适用于冲击荷载条件, 但不允许使用过量的橡胶, 因为过量的橡胶含量会导致气孔, 从而降低冲击荷载承载能力, 在混凝土中用 100% 的橡胶替代天然骨料会导致冲击荷载能力降低约 72%。

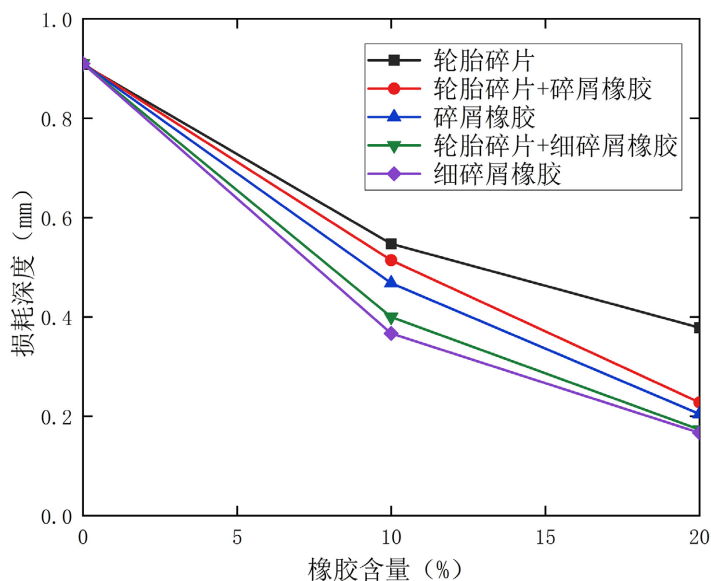


Figure 7. Variation of the abrasion depth of CRC with rubber content

图 7. CRC 磨损深度随橡胶含量的变化

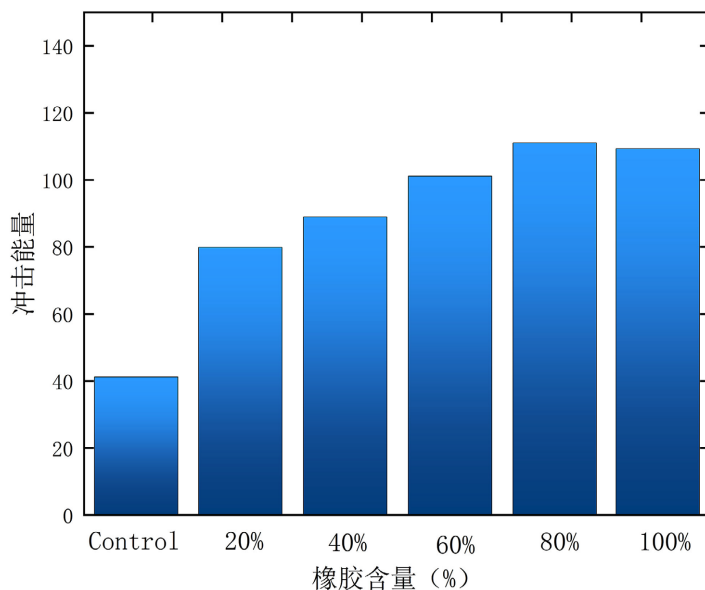


Figure 8. Variation of impact energy with different rubber content

图 8. 不同橡胶含量冲击能变化

4. 橡胶骨料对混凝土耐久性能的影响

4.1. 透水性和吸水性

虽然天然集料和 CR 的吸水能力接近, 但 CRC 的吸水能力高于 NC。张锦涛等人[31]该文研究了橡胶

颗粒按照不同掺量等体积取代砂(体积分数为 0%、5%、10%、15%、30%)制成橡胶混凝土后, 混凝土相关性能的变化规律。试验结果表明, 与普通混凝土相比, 吸水率随着橡胶掺量的增加而增加, 其原因是随着橡胶颗粒含量的增加, 孔隙率持续增大, 而橡胶颗粒周围存在裂缝和空隙, 为水的入渗提供了传输的空间, 橡胶颗粒含量越大, 裂缝数量和孔隙率越大, 继而提高吸水率。见图 9 显示了天然骨料的替代如何改变混凝土的吸水能力。CRC 的长期吸水能力明显高于 NC。之前的研究[32]发现, 在自密实 CRC 中用 60%的 NA 取代 25%的 CR 可显著降低混凝土的吸水能力。同时, 透水性和吸水性都随着 CR 尺寸和含量的增加而增加。

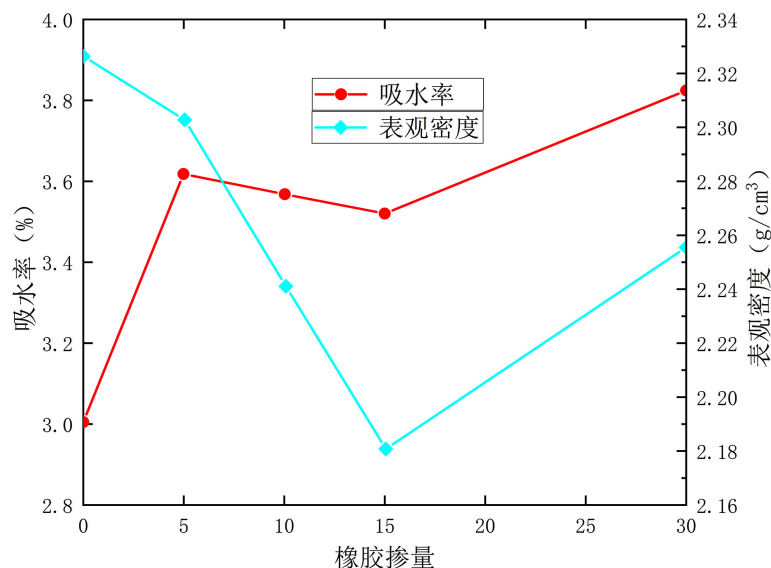


Figure 9. Change in water absorption of CRC
图 9. 橡胶混凝土吸水率变化

4.2. 抗碳化性能

CRC 的抗碳化性能通常低于 NC。先前的研究[33]表明, 与使用 NC 相比, 在混凝土中使用 12.5%的橡胶可降低碳化深度。进一步添加 CR 会增加 CRC 的碳化深度。当 15%的 CA 被 CR 取代时, 碳化深度增加了约 56%。另一项研究[34]指出, 不同 CR 含量和大小的 CRC 的吸水和碳化趋势相似。虽然 CRC 混合物的需水量比 NC 高, 但一般情况下, CRC 基体会形成更多的孔隙, 因此硬化后的吸液量会更大。CRC 的碳化深度随着混凝土龄期的增加而增加。Gupta 等人[35]认为, CRC 的碳化深度随着橡胶粉含量的增加而增加。他们还发现, 在任何置换水平下, 碳化深度都会随着二氧化碳暴露时间的延长而增加。鉴于其疏水性, CR 往往会排斥水泥浆, 从而在混凝土中形成具有弱 ITZ 的多孔基质。另外, CRC 中存在额外的空隙和裂缝, 这为二氧化碳轻松侵入混凝土内部创造了条件。CRC 密实致密的基质总是有利于降低碳化深度。鉴于较大的 CR 会产生更多孔的 CRC, 碳化深度也会随着 CR 的大小和含量而增加。

4.3. 抗冻融性能

加入橡胶可提高混凝土的抗冻融性。经过 240 次冻融循环后, 暴露于冻融实验中的 CRC 试样的平均重量损失非常低(约为 2%~3.5%) [28]。较细的 CR 可产生密实的 CRC, 从而防止内部粘结因连续冻融条件而恶化, 因为较细的橡胶颗粒会在水泥浆中夹带和滞留气泡, 降低渗透性。然而, 当橡胶含量超过最佳限度时, 就会发生结块并形成多孔结构, 从而导致混凝土在冻融循环条件下的抗冻性降低。见图 10 [28]

是 CRC 中不同比例和大小的 CR 在连续冻融循环条件下质量损失的典型示意图。见图 10 所示, 骨料的大小会对抗冻融性产生不利影响。当水进入多孔混凝土基体并在冻结温度下结成冰时, 其体积会增大, 空隙中会产生压力, 从而产生微裂缝。这些裂缝是反复冻融循环下最薄弱的部分[36]。通过添加抗冻添加剂并形成一致的球形空隙, 可显著降低霜冻引起的冰压力, 从而提高抗冻融性[36]。

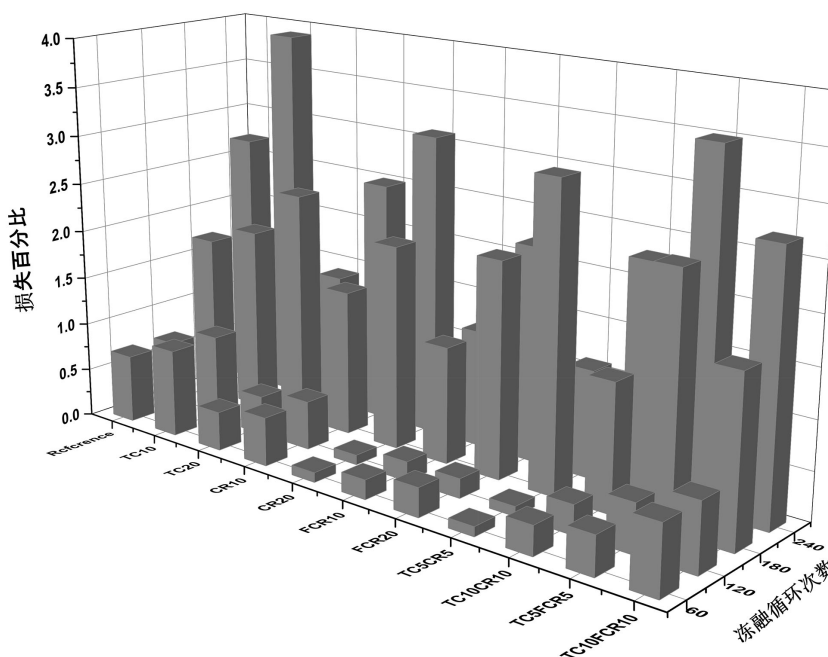


Figure 10. Changes in mass loss of CRC with the number of freeze-thaw cycles

图 10. CRC 的质量损失随冻融循环次数的变化

5. 结论与展望

5.1. 结论

(1) 橡胶的物理化学性质影响了橡胶骨料在混凝土基体中的作用, 了解清楚其性质有助于掌握橡胶骨料的应用与改性。

(2) 总体而言, 橡胶骨料的加入会降低混凝土的力学性能, 且这种趋势随着橡胶粒径和掺量的增大而增大。由于橡胶与水泥浆体的粘附性较低, 在 CRC 中观察到一个宽而多孔的弱界面过渡区。抗拉强度和抗折强度的降低幅度低于抗压强度的降低幅度。预处理工艺和硅灰、矿物填料等添加剂提高了 CRC 的强度。

(3) CRC 具有非常高的冲击能量吸收能力, 但由于 CR 的柔软性和低比重, 其耐磨性较低。这一特性有助于提高结构的疲劳寿命和抗震能力。

(4) 橡胶混凝土可以在寒冷地区存活到一个可靠的极限。然而, 橡胶的掺入使混凝土具有多孔性, 增加了混凝土对水和化学的吸收, 但易受冻和温度作用, 降低了混凝土的耐久性。

5.2. 展望

综上所述, 目前关于废弃橡胶骨料混凝土的研究存在的问题及对策: (1) 橡胶颗粒的形状、粒径、掺量等因素对混凝土性能的影响规律尚未完全掌握, 导致配合比设计存在不确定性。下一步将逐步开展系统的配合比设计研究, 探索废橡胶骨料混凝土在不同应用场景下的优化解决方案。(2) 橡胶颗粒与水泥浆

体之间的界面结合力较弱, 容易形成薄弱环节, 影响混凝土的整体性能。今后, 应尝试在废橡胶骨料混凝土中加入其他外加剂或增强材料, 如硅灰、矿渣和钢纤维, 以改善其力学性能。(3) 橡胶颗粒的掺入对混凝土的抗冻性、抗渗性、抗氯离子渗透性等耐久性能的影响存在争议。需要深入研究橡胶颗粒对混凝土耐久性能的影响机制, 为耐久性的提升提供理论支持。(4) 目前的研究主要集中在单一性能指标上, 缺乏对不同性能指标之间关系的系统性研究, 难以全面评估废弃橡胶骨料混凝土的性能。需要推动跨学科合作, 综合运用材料科学、力学、化学等多学科知识, 全面评估废弃橡胶骨料混凝土的性能。

参考文献

- [1] Al-Tayeb, M.M., Abu Bakar, B.H., Ismail, H. and Md Akil, H. (2012) Effect of Partial Replacement of Sand by Fine Crumb Rubber on Impact Load Behavior of Concrete Beam: Experiment and Nonlinear Dynamic Analysis. *Materials and Structures*, **46**, 1299-1307. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9974-3>
- [2] 张京旭. 废弃橡胶及再生砖混细骨料在人行道路面层的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [3] 祝建中, 陈烈强, 蔡明招. 塑料和橡胶类废物的热物理与焚烧特性研究的进展[J]. 重庆环境科学, 2002(6): 34-37.
- [4] 刘兰君, 阎宇彤. 改性橡胶透水混凝土基本性能研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(20): 104-108.
- [5] 桑勇. 新型橡胶多孔混凝土力学性能及数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(6): 51-56.
- [6] 于成鑫. 橡胶混凝土的力学性能及耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [7] 崔军, 徐迅, 游潘丽, 等. 建筑用砂石资源短缺现状及对策思考[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(2): 94-97.
- [8] Rashad, A.M. (2013) A Preliminary Study on the Effect of Fine Aggregate Replacement with Metakaolin on Strength and Abrasion Resistance of Concrete. *Construction and Building Materials*, **44**, 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.038>
- [9] 范梦婷, 彭靖. 橡胶在建筑行业中回收利用的意义与价值[J]. 科技经济市场, 2017(9): 193-195.
- [10] 徐彦红, 王再学, 赵桂英, 等. 磁性橡胶的研究现状及其发展前景[J]. 高分子通报, 2018(5): 28-33.
- [11] 田静. SBS + 橡胶粉复合改性沥青混合料试验及应用研究[J]. 交通世界, 2024(25): 26-28.
- [12] 刘水洋. 浅谈橡胶粉复合改性沥青混凝土罩面施工工艺[J]. 建筑机械化, 2016, 37(6): 62-64.
- [13] 周仙奕, 莫俊杰. 橡胶颗粒改性水泥砂浆的微观孔结构研究[J]. 广东公路交通, 2022, 48(4): 7-11.
- [14] 刘学勇, 杨林虎. 橡胶颗粒对水泥净浆水化产物影响的 XRD 分析[J]. 公路, 2011(4): 164-168.
- [15] 庞建勇, 杨春春, 姚韦靖, 等. 硅灰改性聚丙烯纤维橡胶混凝土力学试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2022, 42(5): 24-30.
- [16] Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A.A. (2009) Scrap-Tyre-Rubber Replacement for Aggregate and Filler in Concrete. *Construction and Building Materials*, **23**, 1828-1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- [17] Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., İpek, S. and Asaad, D.S. (2015) Influence of Waste Rubber Utilization on the Fracture and Steel-Concrete Bond Strength Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, **101**, 1113-1121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.030>
- [18] 岳雪涛, 尹文军, 刘玲, 等. 纤维复合废弃橡胶改性混凝土的力学性能[J]. 山西建筑, 2018, 44(9): 75-76.
- [19] 纪麟, 张恒, 于美明. 表面改性橡胶水泥砂浆的力学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(3): 183-187.
- [20] Akinyele, J.O., Salim, R.W. and Kupolati, W.K. (2016) The Impact of Rubber Crumb on the Mechanical and Chemical Properties of Concrete. *Engineering Structures and Technologies*, **7**, 197-204. <https://doi.org/10.3846/2029882x.2016.1152169>
- [21] Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D.L. and Tran Le, V.X. (2018) Experimental Investigation into Rubber Granules and Their Effects on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 1835-1847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.003>
- [22] 王雯睿, 朱璐晨, 朱焕彬, 等. 橡胶再生混凝土力学性能试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(9): 111-113+116.
- [23] Batayneh, M.K., Marie, I. and Asi, I. (2008) Promoting the Use of Crumb Rubber Concrete in Developing Countries. *Waste Management*, **28**, 2171-2176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.035>
- [24] 耿健, 关明芳. 橡胶混凝土研究进展综述[J]. 交通世界, 2022(36): 29-31.

-
- [25] 王锦燕, 吴方靖, 李富力. 碳纤维和微硅粉改善橡胶混凝土力学性能的试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(6): 158-160.
- [26] 张振雷. 混杂纤维橡胶混凝土基本力学性能试验研究[J]. 建筑与预算, 2024(6): 22-24.
- [27] 袁群, 李晓旭, 冯凌云, 等. 橡胶混凝土抗冲磨性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 124-130.
- [28] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. and İpek, S. (2014) Abrasion and Freezing-Thawing Resistance of Pervious Concretes Containing Waste Rubbers. *Construction and Building Materials*, **73**, 19-24.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.047>
- [29] 黄壁荣, 吴强, 陈辉, 等. 废旧橡胶颗粒对 SHCC 力学及抗冲击性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(11): 47-51.
- [30] Atahan, A.O. and Yücel, A.Ö. (2012) Crumb Rubber in Concrete: Static and Dynamic Evaluation. *Construction and Building Materials*, **36**, 617-622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068>
- [31] 张锦涛, 林炜杰, 余希林, 等. 废弃橡胶混凝土的性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(5): 93-95.
- [32] 田雷, 邱流潮, 胡筱. 自密实橡胶混凝土性能研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 146-162.
- [33] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P. and Kumar, S. (2015) Performance of High Strength Rubberized Concrete in Aggressive Environment. *Construction and Building Materials*, **83**, 320-326.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.012>
- [34] 李传道. 高掺量橡胶混凝土力学性能及耐久性能研究[J]. 江西建材, 2023(5): 23-25.
- [35] Gupta, T., Chaudhary, S. and Sharma, R.K. (2014) Assessment of Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Waste Rubber Tire as Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, **73**, 562-574.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>
- [36] 李钢粮, 黎晓辉, 周振, 等. 混掺纤维对再生橡胶混凝土抗冻融性能影响研究[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(10): 100-103.