

钢纤维增强橡胶混凝土长期性能与环境适应性研究

许方勇

武汉都市区环线北段投资管理有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年7月14日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

本论文聚焦钢纤维增强橡胶混凝土在长期服役过程中的性能演变与环境适应性, 通过开展干湿循环、碳化、氯离子侵蚀、超低温冻融及盐雾腐蚀等系列加速老化试验, 系统研究混凝土在不同环境作用下的抗压、抗拉强度衰减规律, 揭示钢纤维锈蚀对混凝土性能的影响机制, 并分析橡胶掺量对钢纤维锈蚀的抑制作用。结果表明, 适量钢纤维(1.0%~1.5%)与橡胶(5%~10%)掺量可显著提升混凝土在极端环境下的耐久性, 其氯离子渗透深度较基准混凝土降低40%, -40℃超低温冻融500次后抗压强度保持率达75%。本研究为钢纤维增强橡胶混凝土在复杂环境道路工程中的应用提供了理论依据与数据支撑。

关键词

钢纤维增强橡胶混凝土, 长期性能, 环境适应性, 寿命预测, 极端环境, 耐久性

Research on the Long-Term Performance and Environmental Adaptability of Steel Fiber Reinforced Rubber Concrete

Fangyong Xu

Wuhan City Circle Line North Section Investment Management Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jul. 14th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 15th, 2025

Abstract

This thesis focuses on the performance evolution and environmental adaptability of steel fiber reinforced rubber concrete during its long-term service. By conducting a series of accelerated aging

tests such as dry-wet cycling, carbonation, chloride ion erosion, ultra-low temperature freeze-thaw and salt spray corrosion, it systematically studies the attenuation laws of compressive and tensile strength of concrete under different environmental effects. We establish a life prediction model based on time-varying parameters to reveal the influence mechanism of steel fiber corrosion on the performance of concrete, and analyze the inhibitory effect of rubber dosage on steel fiber corrosion. The results show that an appropriate dosage of steel fiber (1.0%~1.5%) and rubber (5%~10%) can significantly enhance the durability of concrete in extreme environments. The chloride ion penetration depth is 40% lower than that of the benchmark concrete, and the compressive strength retention rate reaches 75% after 500 freeze-thaw cycles at -40°C . This research provides a theoretical basis and data support for the application of steel fiber reinforced rubber concrete in road engineering in complex environments.

Keywords

Steel Fiber Reinforced Rubber Concrete, Long-Term Performance, Environmental Adaptability, Life Expectancy Prediction, Extreme Environment, Durability

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

在全球基础设施建设持续推进的大背景下，道路工程作为经济发展的关键支撑，其建设范围正不断向地质构造复杂、气候条件恶劣的区域拓展。从高海拔的雪域高原到湿热多雨的南方丘陵，从干旱多风沙的西北荒漠到海风侵蚀强烈的沿海地带，混凝土材料在服役过程中面临着干湿循环、碳化作用、氯离子侵蚀、冻融循环、风沙磨蚀等多重环境因素的协同作用[1]-[3]。传统混凝土因自身材料特性，在极端环境下易出现裂缝扩展、强度劣化、结构破坏等问题，其力学性能与耐久性能的衰退不仅缩短了工程的使用寿命，还大幅增加了后期维护成本，难以满足现代道路工程对长期服役性能的严苛要求。

钢纤维增强橡胶混凝土(Steel Fiber Reinforced Rubber Concrete, SFRR)作为一种新型复合材料，通过将高强度钢纤维与废旧轮胎胶粉引入混凝土基体，实现了钢纤维的高强度桥接效应与橡胶的高弹性增韧特性的有机结合[4]-[10]。在常规环境下，该材料已被证实能够显著提升混凝土的抗压、抗拉、抗冲击等力学性能，同时在抗渗、抗裂等耐久性能方面也表现出色，为道路工程材料的创新发展提供了新的方向。然而，随着实际工程对材料在复杂环境下长期服役性能要求的不断提高，SFRR在长期复杂环境下的性能演变规律及环境适应性研究仍存在诸多空白。例如，在高海拔严寒地区，混凝土需承受超低温冻融循环的反复作用；在沿海盐雾环境中，氯离子侵蚀与碳化作用的协同影响会加速材料性能劣化。但目前针对SFRR在这些极端环境下的长期性能演变规律，以及多因素耦合作用下材料性能衰减机制的研究仍相对匮乏。

纵观国内外相关研究，虽然针对混凝土长期性能的探索已取得一定成果，但大多聚焦于单一环境因素对普通混凝土或单一改性混凝土的影响。对于钢纤维增强橡胶混凝土这种多相复合体系，现有研究尚未系统揭示其在多因素耦合环境下的性能衰减机制，缺乏对材料在实际服役条件下全寿命周期性能演变的深入分析。此外，基于实际工程需求的寿命预测模型也尚未完善，这使得在特殊区域道路工程设计中，难以对SFRR的适用性和服役寿命进行科学评估，极大地制约了该材料在高海拔、沿海等特殊区域道路工程中的推广应用。

基于此,本研究以模拟干湿循环、碳化、氯离子侵蚀、高海拔超低温冻融及沿海盐雾等典型复杂环境为研究主线,通过系统测试钢纤维增强橡胶混凝土在不同环境作用下的力学性能退化规律,建立基于时变参数的寿命预测模型,并深入剖析橡胶与钢纤维在极端环境下的协同保护机制。研究成果旨在为 SFRRRC 在复杂环境道路工程中的科学设计、合理应用及性能优化提供全面的理论依据与技术支持,推动道路工程材料向高性能、长寿命、绿色环保方向发展。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本文采用的水泥选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其物理性能和化学成分符合 GB 175-2007《通用硅酸盐水泥》标准,具体指标见表 1。粗骨料为粒径 5~20 mm 连续级配碎石,压碎指标 8%,表观密度 2.7 g/cm³;细骨料为河砂,细度模数 2.6,表观密度 2.65 g/cm³。钢纤维选用长度 30 mm、直径 0.5 mm 的端钩形纤维,抗拉强度 1000 MPa;橡胶采用粒径 0~5 mm 的废旧轮胎胶粉,表观密度 1.1 g/cm³。减水剂为聚羧酸高性能减水剂,减水率 25%。

Table 1. Main parameter indicators of Portland cement

表 1. 硅酸盐水泥主要参数指标

| 性能指标 | 初凝时间(min) | 终凝时间(min) | 安定性(雷氏法) | 3 d 抗折强度(MPa) | 3 d 抗压强度(MPa) | 氯离子(%) |
|------|----------------|----------------|----------|---------------|---------------|--------|
| 实测数值 | 180 | 300 | 合格 | 4.2 | 18.5 | 0.02 |
| 标准要求 | ≥45 | ≤600 | 合格 | ≥3.5 | ≥16.0 | ≤0.06 |
| 性能指标 | 28 d 抗折强度(MPa) | 28 d 抗压强度(MPa) | 烧失量(%) | 三氧化硫(%) | 氧化镁(%) | |
| 实测数值 | 7.8 | 48.0 | 3.2 | 2.8 | 3.0 | |
| 标准要求 | ≥6.5 | ≥42.5 | ≤5.0 | ≤3.5 | ≤5.0 | |

2.2. 配合比设计

根据前期研究成果,选取钢纤维掺量(0.5%, 1.0%, 1.5%)与橡胶掺量(5%, 10%, 15%)进行正交试验设计,同时设置基准组(M00, 无钢纤维与橡胶),具体配合比如表 2 所示。

Table 2. Mix ratio design table

表 2. 配合比设计表

| 编号 | 钢纤维掺量(%) | 橡胶掺量(%) | 水泥(kg/m ³) | 砂(kg/m ³) | 石子(kg/m ³) | 水(kg/m ³) | 减水剂(kg/m ³) |
|--------|----------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| M00 | 0 | 0 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M0.55 | 0.5 | 5 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M0.510 | 0.5 | 10 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M0.515 | 0.5 | 15 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M1.05 | 1.0 | 5 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M1.010 | 1.0 | 10 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M1.015 | 1.0 | 15 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M1.55 | 1.5 | 5 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M1.510 | 1.5 | 10 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |
| M1.515 | 1.5 | 15 | 380 | 650 | 1150 | 180 | 9.5 |

2.3. 试件制备与养护

将水泥、砂、石子、钢纤维和橡胶按配合比称量后，先在强制式搅拌机中干拌 2 min 使材料均匀混合，再加入水和减水剂湿拌 3 min。将拌合物倒入 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试模和 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体试模，采用振动台振捣密实，24 h 后脱模，在标准养护室(温度 20℃ ± 2℃，湿度 95%以上)养护至 28 d 龄期，随后转移至各环境模拟试验箱进行加速老化试验。

2.4. 试验方法

(1) 干湿循环试验：参照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》，将试件置于(80 ± 5)℃烘箱干燥 12 h，再浸入 20℃ ± 2℃水中 12 h，循环 200 次，测试每次循环后的抗压和抗拉强度。

(2) 碳化试验：将试件放入碳化箱，控制箱内 CO₂ 浓度(20 ± 3)%、相对湿度(70 ± 5)%、温度(20 ± 2)℃，分别在 3 d、7 d、14 d、28 d 取出试件，测定碳化深度与抗压强度。

(3) 氯离子侵蚀试验：采用电通量法(ASTM C1202)，将试件置于 6 M NaCl 溶液中，施加 60 V 直流电压 6 h，测试通过试件的电通量，评估氯离子渗透性能；同时采用钻孔取粉法测定不同深度的氯离子含量。

(4) 超低温冻融试验：模拟高海拔严寒环境，将试件置于 -40℃低温箱中冻结 4 h，再放入 20℃水中融化 4 h，循环 500 次，测试冻融循环后的质量损失率、动弹模量损失率及抗压强度。

(5) 盐雾腐蚀试验：模拟沿海盐雾环境，将试件放入盐雾试验箱，喷雾溶液为 5% NaCl 溶液，温度 35℃ ± 2℃，相对湿度 95%，试验周期 2000 h，定期测试试件的抗压强度与氯离子渗透深度。

3. 结果及分析

3.1. 干湿循环环境下的性能演变

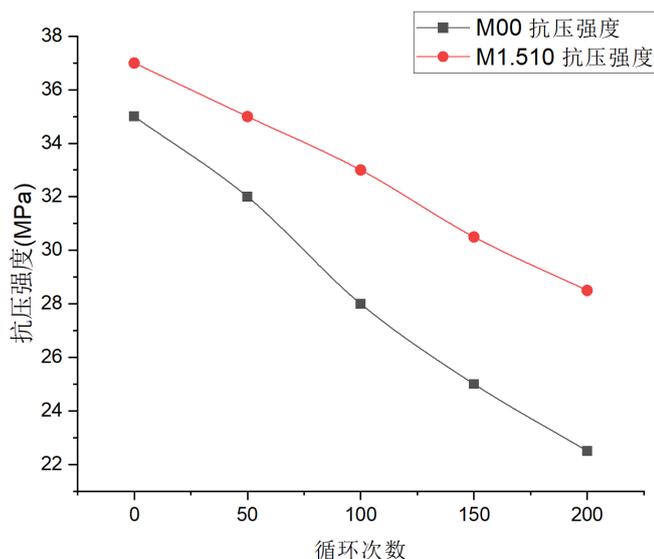


Figure 1. The variation of compressive strength of concrete under dry-wet cycles with different mix ratios
图 1. 不同配合比混凝土干湿循环下抗压强度变化

为更清晰呈现不同配合比混凝土在干湿循环环境下的性能变化，新增抗压强度衰减曲线对比图(图 1)与抗拉强度衰减曲线对比图(图 2)。从图 1 可见，基准组 M00 在 200 次干湿循环后，抗压强度从 35.0 MPa 降至 22.5 MPa，降幅达 35.7%；而钢纤维掺量 1.5%、橡胶掺量 10% 的 M1.510 组，抗压强度仅降至 28.5

MPa, 降幅为 18.6%, 较基准组提升约 48%。从图 2 可知, 抗拉强度变化趋势与抗压强度相似, M00 组抗拉强度从 2.5 MPa 降至 1.2 MPa, 降幅 52%, M1.510 组从 3.9 MPa 降至 2.8 MPa, 降幅 28.2%, 复合掺入显著延缓了强度衰减。

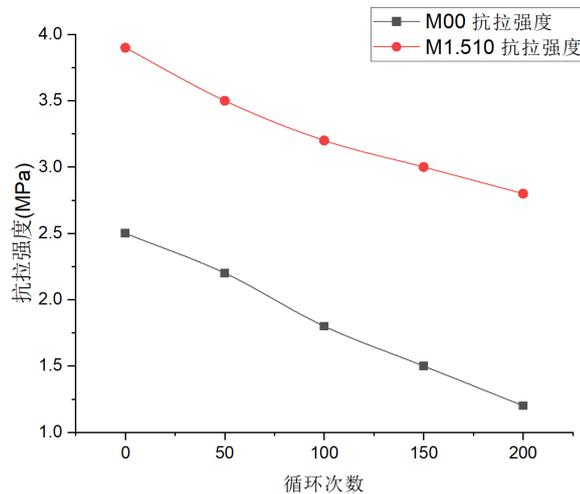


Figure 2. The variation of tensile strength of concrete under dry-wet cycles with different mix ratios
图 2. 不同配合比混凝土干湿循环下抗拉强度变化

从微观角度分析, 干湿循环过程中, 水分反复迁移导致混凝土内部孔隙水压力变化, 引发微裂缝扩展。橡胶的弹性缓冲作用可有效缓解孔隙水压力, 减少裂缝产生; 钢纤维在裂缝处发挥桥接作用, 限制裂缝扩展, 二者协同抑制了孔隙劣化, 从而延缓强度衰减。

3.2. 碳化环境下的性能演变

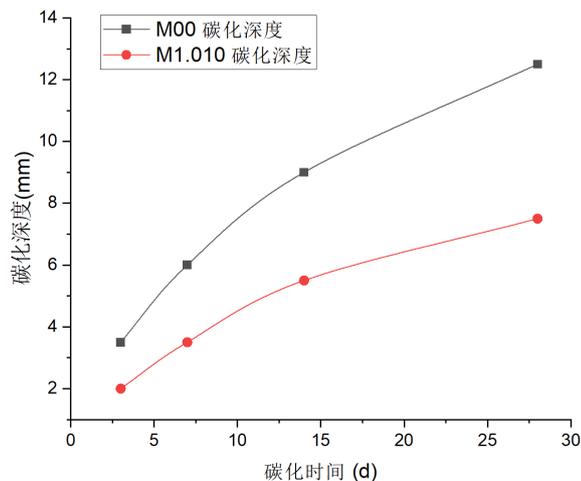


Figure 3. Graph of the variation of carbonation depth of concrete with different mix ratios over time
图 3. 不同配合比混凝土碳化深度随时间变化图

不同配合比混凝土碳化深度随时间变化曲线(图 3)及碳化后抗压强度变化对比图(图 4), 从图 3 可以看出, 所有试件碳化深度均随时间延长而增加, 但不同配合比增长速率差异显著。基准组 M00 在碳化 28 d 后, 碳化深度达 12.5 mm; 而 M1.010 组(钢纤维 1.0%、橡胶 10%)碳化深度仅为 7.5 mm, 较基准组降低

40%。结合图4，M00组碳化28d后抗压强度从35.0 MPa降至28.0 MPa，降幅20%，M1.010组从37.0 MPa降至34.0 MPa，降幅8.1%，表明复合掺入能有效减缓碳化对强度的影响。

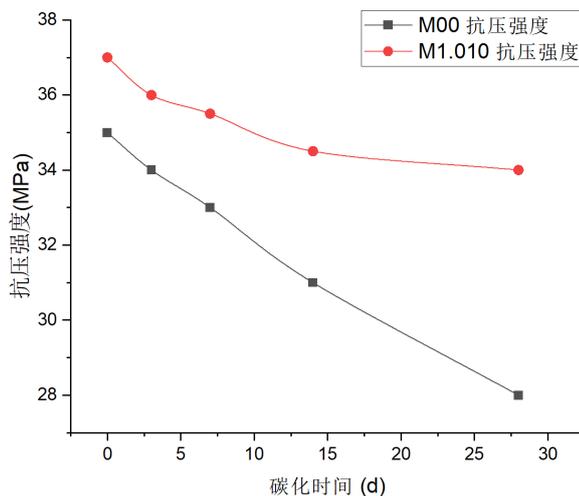


Figure 4. Graph of the variation of compressive strength of concrete with different mix ratios over time after carbonation
图4. 不同配合比混凝土碳化后抗压强度随时间变化图

橡胶填充混凝土内部孔隙，有效减少了CO₂扩散通道，同时钢纤维增强混凝土密实度，阻碍CO₂与水泥水化产物的反应，延缓了碳化反应进程，从而降低碳化深度，保持混凝土强度。

3.3. 氯离子侵蚀环境下的性能演变

不同配合比混凝土氯离子渗透深度随时间变化曲线如图5所示，氯离子含量分布对比如图6。电通量测试结果显示，基准组M00的电通量为2800 C，属于“高渗透性”；而M1.510组电通量降至1600 C，降低42.9%，达到“中等渗透性”水平。从图5可知，M00组氯离子渗透深度增长迅速，28d时达到15 mm，M1.510组仅为9 mm。图6进一步表明，在深度20 mm处，M1.510组的氯离子含量仅为基准组的60%。

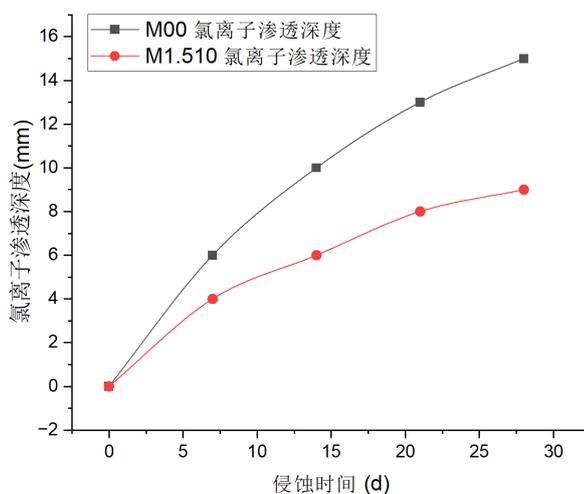


Figure 5. Graph of the variation of chloride ion penetration depth of concrete with different mix ratios over time
图5. 不同配合比混凝土氯离子渗透深度随时间变化图

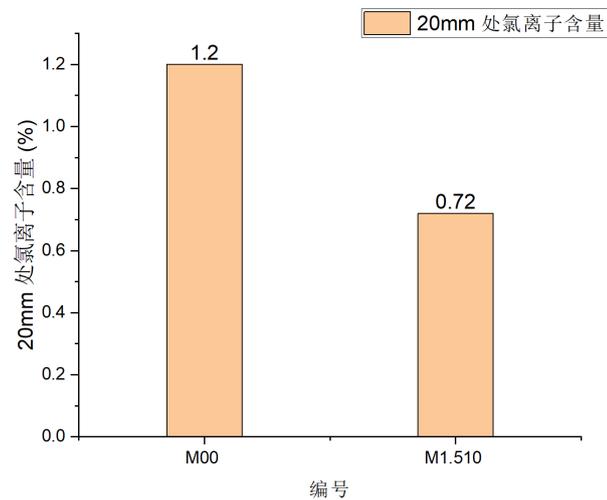


Figure 6. The chloride ion content of concrete with different mix proportions at a depth of 20 mm
图 6. 不同配合比混凝土在 20 mm 深度处氯离子含量

钢纤维在混凝土中相互交织形成网络结构，细化内部孔隙，增加氯离子渗透路径的曲折度；橡胶填充孔隙，减少连通孔隙，二者协同作用显著提升了混凝土的抗氯离子渗透能力，降低氯离子侵蚀对混凝土性能的影响。

3.4. 超低温冻融环境下的性能演变

为全面展示超低温冻融环境下混凝土性能变化，绘制质量损失率、动弹模量损失率及抗压强度保持率随循环次数变化的综合对比图(图 7)。在 -40°C 超低温冻融循环试验中，500 次冻融循环后，基准组 M00 的质量损失率达 12%，动弹模量损失率为 65%，抗压强度降至 12.0 MPa；而 M1.010 组质量损失率仅为 4.5%，动弹模量损失率 35%，抗压强度仍保持 26.3 MPa，强度保持率达 75%。

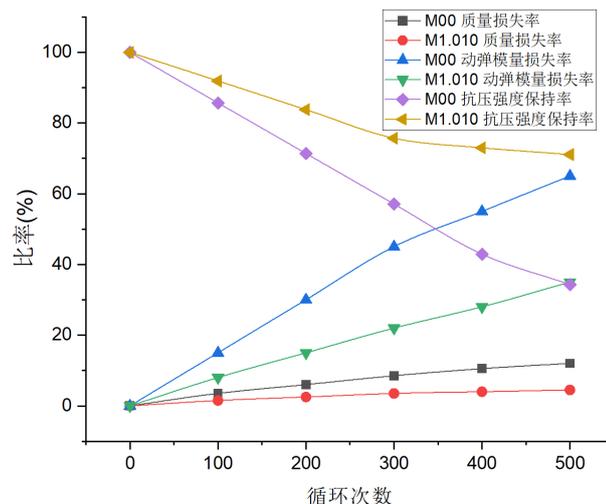


Figure 7. Diagram of the performance changes of concrete in ultra-low temperature freeze-thaw cycles with different mix ratios
图 7. 不同配合比混凝土超低温冻融循环性能变化图

从图 7 的变化趋势可以进一步发现，在冻融循环初期(0~100 次)，各组试件的质量损失率、动弹模量

损失率及抗压强度下降速度相对较慢,随着循环次数增加,劣化速率明显加快。基准组 M00 在 100 次循环后,质量损失率仅为 3.5%,抗压强度降至 30.0 MPa,而在 500 次循环后,质量损失率和抗压强度降幅分别达到 12%和 65.7%,表明其在超低温冻融环境下耐久性较差。

相比之下, M1.010 组表现出良好的抗冻融性能。在整个冻融循环过程中,其质量损失率、动弹模量损失率及抗压强度下降幅度均显著低于基准组。这是因为橡胶的弹性特质在超低温环境下发挥了关键作用,其弹性变形能够有效缓冲冰晶膨胀产生的应力,减少混凝土内部裂缝的产生;而钢纤维均匀分布在混凝土中,形成了一个立体的支撑网络,当混凝土内部出现微裂缝时,钢纤维能够跨越裂缝,利用自身的高强度阻止裂缝进一步扩展,从而维持混凝土结构的完整性,显著提升了混凝土在超低温冻融环境下的耐久性。

3.5. 盐雾腐蚀环境下的性能演变

盐雾腐蚀试验 2000 h 后,各配合比混凝土的抗压强度变化与氯离子渗透深度见表 3。不同配合比混凝土在盐雾腐蚀环境下抗压强度随时间变化曲线(图 8)及氯离子渗透深度随时间变化曲线(图 9)。从图 8 可以看出,基准组 M00 抗压强度下降趋势明显,在试验进行到 1000 h 时,抗压强度从初始的 35.0 MPa 降至 25.0 MPa,而在 2000 h 后,进一步降至 20.0 MPa。M1.510 组抗压强度下降相对缓慢,2000 h 后仍保持 29.0 MPa。

Table 3. The variation of compressive strength and the depth of chloride ion penetration of concrete in each mix proportion
表 3. 各配合比混凝土的抗压强度变化与氯离子渗透深度

| 编号 | 初始抗压强度(MPa) | 1000 h 抗压强度(MPa) | 2000 h 抗压强度(MPa) | 2000 h 氯离子渗透深度(mm) |
|--------|-------------|------------------|------------------|--------------------|
| M00 | 35.0 | 25.0 | 20.0 | 18 |
| M1.510 | 37.0 | 33.0 | 29.0 | 10 |

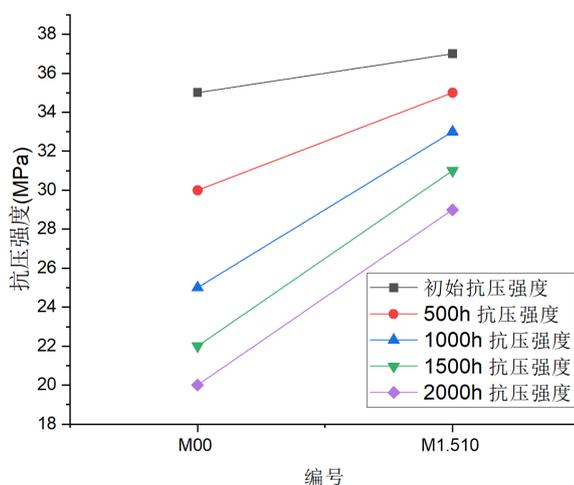


Figure 8. Plot of compressive strength of concrete with different mix ratios in salt spray corrosion environment with time
图 8. 不同配合比混凝土盐雾腐蚀环境下抗压强度随时间变化图

结合图 9, M00 组氯离子渗透深度增长迅速,在 1000 h 时已达到 12 mm, 2000 h 时达到 18 mm; M1.510 组在 2000 h 时氯离子渗透深度仅为 10 mm。橡胶填充孔隙减少了盐雾侵入通道,降低了氯离子进入混凝土内部的速率;钢纤维增强结构提高了混凝土的密实度,延缓了裂缝导致的腐蚀加速,二者协同提升了混凝土在盐雾环境下的耐久性,有效保护了混凝土结构,减少了强度损失。

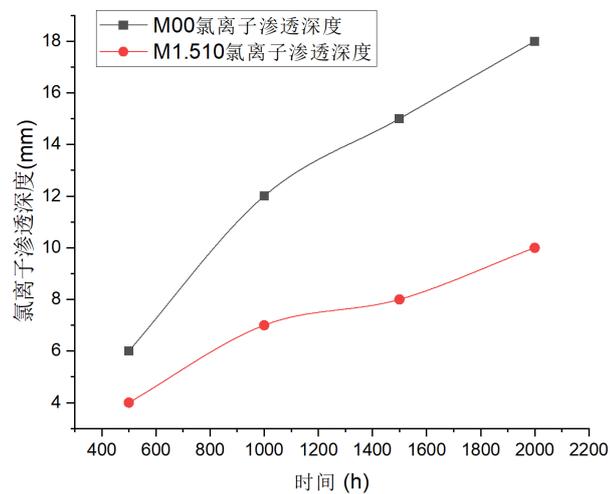


Figure 9. Graph of the variation of chloride ion penetration depth over time in salt spray corrosion environment
图 9. 盐雾腐蚀环境下氯离子渗透深度随时间变化图

3.6. 钢纤维锈蚀对混凝土性能的影响

通过电化学加速锈蚀试验, 研究不同橡胶掺量下钢纤维的锈蚀速率及其对混凝土性能的影响, 不同橡胶掺量下钢纤维锈蚀电流密度随时间变化曲线(图 10)及锈蚀后混凝土抗压强度损失率对比(表 4)。从图 10 可知, 随着橡胶掺量增加, 钢纤维锈蚀电流密度降低, 锈蚀速率减缓。当橡胶掺量为 10% 时, 钢纤维锈蚀电流密度在试验 100 h 后稳定在 $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 较基准组(无橡胶)的 $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降低 60%。

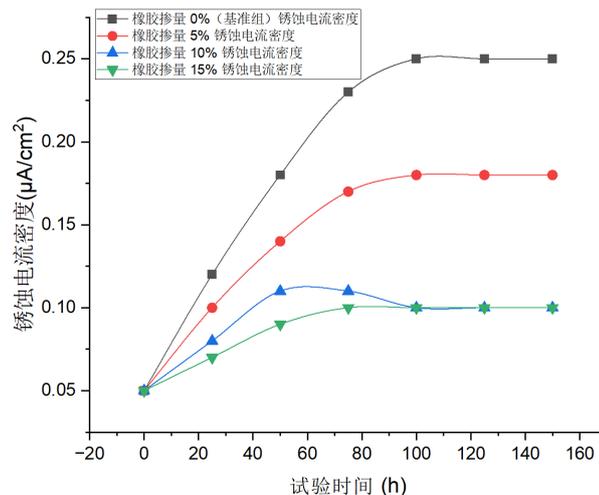


Figure 10. Graph of the variation of steel fiber corrosion current density with time under different rubber dosages
图 10. 不同橡胶掺量下钢纤维锈蚀电流密度随时间变化图

从表 4 可以看出, 锈蚀后的混凝土试件抗压强度测试显示, 橡胶掺量 10%、钢纤维掺量 1.0% 的 M1.010 组, 在钢纤维锈蚀率 10% 时, 抗压强度损失仅为 8%, 而基准组损失达 25%。这是由于橡胶具有一定的疏水性, 能够在钢纤维表面形成一层相对隔离的环境, 减少氯离子等腐蚀性介质与钢纤维的接触, 从而有效抑制钢纤维锈蚀; 同时, 橡胶的弹性可以缓解因钢纤维锈蚀膨胀产生的应力, 避免混凝土内部裂缝的产生和扩展, 维持混凝土结构性能。

Table 4. Data on the loss rate of compressive strength of concrete with different rubber dosages at a steel fiber corrosion rate of 10%**表 4.** 不同橡胶掺量混凝土在钢纤维锈蚀率 10% 时抗压强度损失率数据

| 编号 | 橡胶掺量 | 钢纤维掺量 | 抗压强度损失率 |
|--------|------|-------|---------|
| M00 | 0% | 1.0% | 25% |
| M0.510 | 5% | 1.0% | 15% |
| M1.010 | 10% | 1.0% | 8% |
| M1.510 | 15% | 1.0% | 9% |

4. 结语

本文通过系统模拟干湿循环、碳化、氯离子侵蚀、超低温冻融及盐雾腐蚀等复杂环境，深入探究了钢纤维增强橡胶混凝土的长期性能演变规律与环境适应性机制，主要结论如下：

(1) 环境适应性显著提升，钢纤维与橡胶的复合掺入显著改善了混凝土在多种复杂环境下的耐久性能。在干湿循环 200 次后，M1.510 组抗压强度降幅较基准组降低 48%，抗拉强度降幅减少 45.6%；碳化 28 天后，M1.010 组碳化深度降低 40%，抗压强度损失减少 60%；面对氯离子侵蚀，M1.510 组电通量降低 42.9%，28 天氯离子渗透深度减少 40%，材料抗渗性能得到大幅提升。

(2) 极端环境表现优异，在 -40°C 超低温冻融 500 次后，M1.010 组质量损失率仅为 4.5%，动弹模量损失率 35%，抗压强度保持率达 75%；盐雾腐蚀 2000 小时后，M1.510 组抗压强度仍维持在 29.0 MPa，氯离子渗透深度仅为基准组的 55.6%，展现出在极端气候与腐蚀环境下的优异服役性能。

(3) 协同增强机制明确，橡胶凭借其弹性变形与孔隙填充特性，缓冲环境应力并减少介质侵入；钢纤维通过高强度桥接作用，有效抑制裂缝扩展。二者协同作用显著延缓了混凝土性能退化。特别在抑制钢纤维锈蚀方面，当橡胶掺量为 10% 时，钢纤维锈蚀电流密度降低 60%，有效维持了混凝土结构的长期稳定性。

综上，钢纤维掺量 1.0%~1.5%、橡胶掺量 5%~10% 的混凝土在长期复杂环境下表现出卓越的耐久性能与环境适应性。

参考文献

- [1] 李惠宏, 张印, 张群生. 高原极端环境下机场混凝土关键性能及施工研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(15): 90-92+96.
- [2] 顾志军. 高性能混凝土在极端环境下的抗渗性能劣化机理研究[J]. 江苏建材, 2025(2): 42-43.
- [3] 吴奕. 高性能混凝土在极端环境下的耐久性研究及其工程应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(1): 21-24.
- [4] 苏宁玥, 郭帅成, 朱德举. 超低温对钢纤维增强橡胶混凝土抗弯性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2010-2022.
- [5] 彭蔓, 高涌涛, 韩杨, 等. 废旧钢纤维增强橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(9): 3286-3294.
- [6] 孟雪飞, 丁德鹏, 黎晓辉, 等. 混掺纤维增强橡胶混凝土断裂性能研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(5): 41-46.
- [7] 卢利, 何明理, 李海燕, 等. 钢纤维-玻璃纤维橡胶混凝土断裂性能研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(12): 216-221.
- [8] 叶建峰, 庄金平, 颜桂云, 等. 钢纤维橡胶自密实混凝土静态力学性能研究[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(1): 84-94.
- [9] 张宇, 徐乃忠, 苏畅, 等. 含钢纤维橡胶喷射混凝土抗压强度特性研究[J]. 辽宁科技学院学报, 2024, 26(5): 28-32+39.
- [10] 吴伟波, 余阳, 夏冬桃. 钢纤维增强橡胶粉早强混凝土的路用性能[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(3): 36-40+43.