

## 乳化沥青橡胶混凝土的力学性能

林强 刘赞群 禹雷 周蕴婵 崔雨

### Mechanical properties of emulsified asphalt rubber concrete

LIN Qiang, LIU Zhanqun, YU Lei, ZHOU Yunchan, CUI Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220513.003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 石墨含量对铜-石墨-乳化沥青复合材料组织和性能的影响

Effects of graphite content on microstructure and properties of Cu-graphite-emulsified asphalt composites

复合材料学报. 2021, 38(11): 3775–3784 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210121.001>

#### 玄武岩-碳纤维/矿渣混凝土力学性能正交试验

Orthogonal experiment on mechanical properties of basalt fiber-carbon fiber/slag concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190930.001>

#### 老化对水泥乳化沥青胶结料动态力学性能的影响

Effect of aging on the dynamic mechanical properties of cement emulsified asphalt mastic

复合材料学报. 2018, 35(7): 1975–1982 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.010>

#### 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性

Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios

复合材料学报. 2019, 36(8): 1935–1948 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180917.001>

#### 橡胶颗粒-钢纤维混掺对碾压混凝土抗冻性及抗冲击性能的影响

Frost resistance and impact properties of roller compacted concrete mixed with rubber particles and steel fibers

复合材料学报. 2018, 35(8): 2199–2207 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170920.002>

#### 橡胶沥青性能测试技术的应用

Application of rubber asphalt performance test technology

复合材料学报. 2018, 35(8): 2260–2273 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170905.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 乳化沥青橡胶混凝土的力学性能

林强<sup>1</sup>, 刘赞群<sup>\*1</sup>, 禹雷<sup>2</sup>, 周蕴嬅<sup>1</sup>, 崔雨<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)



分享本文

**摘要:** 对用乳化沥青 (Emulsified asphalt, EA) 改善橡胶混凝土 (Crumb rubber concrete, CRC) 的力学性能进行了研究。通过抗压、抗折、劈裂抗拉和三点弯曲试验, 研究了 5%、10% 和 15% 3 种橡胶掺量 (等体积取代细骨料) 下, EA 理论计算成膜覆盖橡胶颗粒表面 4 层、6 层和 8 层膜对应不同 EA 掺量对 CRC 力学性能的影响。试验结果发现, 对比未预处理 CRC 和 NaOH 预处理 CRC 两个对照组: 掺入不同掺量 EA 后, 不同橡胶掺量的 CRC 的抗压强度和劈裂抗拉强度均有较大提高, CRC 的峰值位移显著增大, 弯曲弹性模量  $E_b$  明显降低; 乳化沥青与橡胶质量比为 0.15 (6 层 EA 膜) 时, 3 种橡胶掺量下 CRC 较未预处理组相比抗压强度平均提高 3.5%, 峰值位移提高 27.6%,  $E_b$  降低 21.8%, 乳化沥青橡胶混凝土具有较突出的力学性能复合效应。

**关键词:** 橡胶颗粒; 混凝土; 乳化沥青; 力学性能; 回收

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)03-1560-09

## Mechanical properties of emulsified asphalt rubber concrete

LIN Qiang<sup>1</sup>, LIU Zhanqun<sup>\*1</sup>, YU Lei<sup>2</sup>, ZHOU Yunchan<sup>1</sup>, CUI Yu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. China Railway Engineering Design and Consulting Group CO., LTD., Beijing 100055, China)

**Abstract:** The effects of emulsified asphalt (EA) on the mechanical properties of crumb rubber concrete (CRC) were explored. The fine aggregate was replaced with 5%, 10% and 15% rubber by volume in concrete, and different EA contents corresponding to 4, 6 and 8 layers of films covering the surface of rubber particles according to theoretical calculation were studied. The results of compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength and three-point bending experiments show that, compared with the unpretreated CRC and NaOH pretreated CRC, the compressive strength and splitting tensile strength of the CRC with different rubber contents are greatly improved by adding different amounts of EA, the peak displacement increases and the flexural elastic modulus  $E_b$  decreases significantly; when the mass ratio of emulsified asphalt to rubber is 0.15 (6 layers of EA film), compared with the unpretreated CRC, the average increase in compressive strength is 3.5%, the peak displacement is 27.6%, and  $E_b$  is 21.8% lower for CRC at three rubber contents, emulsified asphalt-rubber concrete has a more prominent composite effect of mechanical properties.

**Keywords:** rubber particle; concrete; emulsified asphalt; mechanical properties; recycle

我国每年生产的废弃橡胶轮胎多达近 3 亿条, 折合重量超过 1 000 多万吨<sup>[1]</sup>。为了回收利用废旧橡胶轮胎, 研究表明将破碎橡胶轮胎颗粒加入混凝土中可以提高混凝土的韧性、抗裂性等<sup>[2-3]</sup>, 若将其应用在路面混凝土内, 将能有效地减少路面荷载开裂。

橡胶是一种表面为非极性的有机高分子材料, 与表面为极性的混凝土无机材料较难紧密连接在一起, 极大程度地影响了橡胶混凝土 (Crumb rubber concrete, CRC) 的力学性能<sup>[4]</sup>。为提高橡胶颗粒表面与混凝土材料之间的粘结能力, 需对其表面进行处理, 主要方法有用酸<sup>[5]</sup>、碱<sup>[5-8]</sup>、高锰

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-05-07; 录用日期: 2022-05-07; 网络首发时间: 2022-05-16 11:07:31

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220513.003>

通信作者: 刘赞群, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高铁用关键工程材料、水泥乳化砂浆、自密实混凝土和混凝土耐久性等

E-mail: [zhanqun.liu@csu.edu.cn](mailto:zhanqun.liu@csu.edu.cn)

引用格式: 林强, 刘赞群, 禹雷, 等. 乳化沥青橡胶混凝土的力学性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1560-1568.

LIN Qiang, LIU Zhanqun, YU Lei, et al. Mechanical properties of emulsified asphalt rubber concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1560-1568(in Chinese).

酸钾<sup>[9]</sup>等溶剂的浸泡清洗法,用水泥浆<sup>[10]</sup>、硅灰<sup>[11]</sup>等预裹覆胶凝材料法,通过硅烷偶联剂<sup>[10]</sup>、紫外线辐射<sup>[12]</sup>、局部氧化磺化<sup>[13]</sup>等方法。这些方法均能不同程度改善橡胶表面和水泥基体之间粘结效果,但由于大多使用高腐蚀物品或操作较为复杂<sup>[14]</sup>,使CRC的应用受到了很大的限制。

乳化沥青(Emulsified asphalt, EA)能与水泥之间形成良好的有机-无机复合效应<sup>[15]</sup>,同时EA能与橡胶颗粒之间形成强粘结<sup>[16]</sup>,因此,EA应能在橡胶颗粒与水泥浆之间形成良好的过渡层,提高橡胶混凝土的复合效应。已有研究显示,EA能改善橡胶颗粒砂浆的机械和物理性能<sup>[17]</sup>,用EA对橡胶表面进行改性处理,当EA与水泥量的体积比小于0.1时,EA的加入能够提高CRC的抗压强度<sup>[18]</sup>。

将EA加入到普通混凝土中会降低混凝土的强度,但在CRC中,EA成膜后可以覆盖在橡胶颗粒的表面,由于沥青薄膜的高延展特性,在混凝土发生脆性破坏过程中能有效地传递内部应力,减缓裂纹的扩展速度。在外力作用下橡胶颗粒与水泥基体两者将会协调地更加紧密,EA膜提高了其界面粘结能力,起到连接橡胶与水泥基体的“桥梁”作用,有效地传递荷载。因此,EA除能提高CRC的强度<sup>[18]</sup>,理论上还会提高CRC的弹韧性,这也是EA相较于其他改性方法最明显的优点。

针对上述研究构想,本文选取了常用的改性效果较好的NaOH溶液浸泡预处理橡胶颗粒<sup>[5-8]</sup>、未经预处理的橡胶颗粒两组CRC作为对照组。通过混凝土的抗压、抗折、劈裂抗拉强度和三点弯曲试验,对比分析EA对CRC静态力学性能的影响,对上述设想进行初步验证。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥采用湖南宁乡南方水泥厂生产的P·O42.5级普通硅酸盐水泥;橡胶颗粒为都江堰市华益橡胶有限公司生产的废弃轮胎橡胶颗粒,平均粒径713.22 μm,表观密度0.93 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为0.0184 m<sup>2</sup>/g,细度模数2.34,橡胶颗粒粒度分布曲线如图1所示;乳化沥青为安徽中铁工程材料科技有限公司生产的慢裂型阴离子乳化沥青,固含量为58wt%,平均粒径2.63 μm,密度0.96 g/cm<sup>3</sup>;粗骨料为碎石,连续级配,最大粒径16 mm;细骨料为普通河沙,中砂级配,细度模数2.7,表观密度2 550 kg/m<sup>3</sup>,含水率2.5%;

NaOH为天津市富宇精细化工有限公司生产的NaOH标准溶液滴定液;拌合水为实验室自来水。

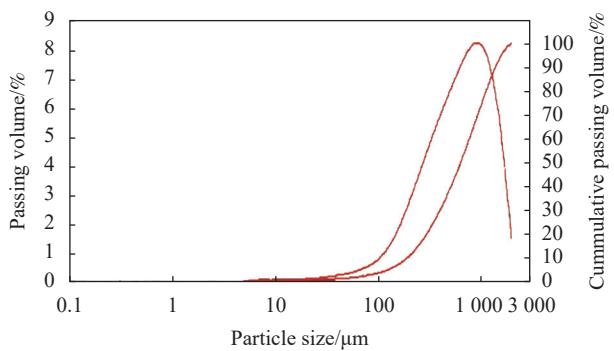


图1 橡胶颗粒粒度分布曲线

Fig. 1 Size distribution curve of rubber particles

1.2 配合比设计

假设EA成膜覆盖在橡胶颗粒表面,根据EA颗粒“堆积”脱水成膜理论,在理想情况下,沥青成膜后会包裹在橡胶颗粒周围(图2),此时达到相邻颗粒之间最小成膜“堆积”状态<sup>[19]</sup>。通过固含量对应计算理论EA膜层数,EA脱水成膜后的厚度 $d$ 及对应EA掺量 $m_2$ 的计算过程如下:

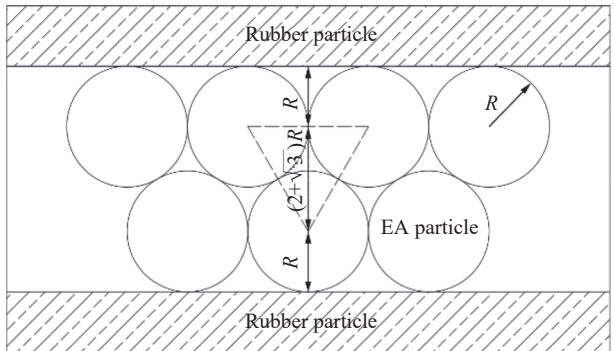
$$d' = \frac{2R + \sqrt{(2R)^2 - R^2}}{2} = \frac{(2 + \sqrt{3})}{2} R \tag{1}$$

$$d = 58\% \frac{(2 + \sqrt{3})}{2} \frac{R}{2} = 58\% \frac{(2 + \sqrt{3})}{2} \frac{2.628}{2} = 1.422 \mu\text{m} \tag{2}$$

$$S = S_a m_1 \tag{3}$$

$$m_2 = \rho S d n \tag{4}$$

其中: $d'$ 为沥青膜估算厚度,此时为两层沥青颗粒堆积后的平均厚度; $R$ 为沥青颗粒半径; $d$ 为破乳后的沥青膜厚度; $S_a$ 为橡胶颗粒的比表面积;



R—Asphalt particle radius; EA—Emulsified asphalt

图2 沥青成膜覆盖理想模型

Fig. 2 Ideal model of asphalt film covering

$m_1$  为不同橡胶掺量下的橡胶质量； $S$  为不同质量橡胶掺量下的橡胶颗粒总面积； $\rho$  为 EA 的密度； $n$  为不同的 EA 膜层数； $m_2$  为裹覆不同膜数下所需的 EA 含量。

以 C40 混凝土配合比为基础，按照 GB/T50081—

2002<sup>[20]</sup> 进行设计，橡胶颗粒为等体积取代细骨料体积比的 5%、10% 和 15%。为避免 EA 掺量过少而导致试验结果不明显等因素，综合考虑后决定研究 EA 裹覆橡胶颗粒表面 4 层、6 层和 8 层膜时对应 EA 掺量的情况，表 1 为混凝土具体配合比。

表 1 混凝土配合比  
Table 1 Mix proportion of concrete

(kg·m <sup>-3</sup> )							
Type	Specimen denotation	Cement	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	Rubber particles	Emulsified asphalt
PC	RC0	450	180	1 152.73	622.48	0	—
Rubber concrete	CRC5	450	180	1 152.73	591.36	11.35	—
	CRC10	450	180	1 152.73	560.23	22.70	—
	CRC15	450	180	1 152.73	529.11	34.05	—
NaOH treatment	NCRC5	450	180	1 152.73	591.36	11.35	—
	NCRC10	450	180	1 152.73	560.23	22.70	—
	NCRC15	450	180	1 152.73	529.11	34.05	—
EA treatment	CRC5 A4	450	179.50	1 152.73	591.36	11.35	1.14
	CRC5 A6	450	179.24	1 152.73	591.36	11.35	1.71
	CRC5 A8	450	178.99	1 152.73	591.36	11.35	2.28
	CRC10 A4	450	178.99	1 152.73	560.23	22.70	2.28
	CRC10 A6	450	178.48	1 152.73	560.23	22.70	3.42
	CRC10 A8	450	177.98	1 152.73	560.23	22.70	4.56
	CRC15 A4	450	178.31	1 152.73	529.11	34.05	3.42
	CRC15 A6	450	177.46	1 152.73	529.11	34.05	5.13
	CRC15 A8	450	176.62	1 152.73	529.11	34.05	6.84

Notes: PC—Plain concrete; (N)CRC5, (N)CRC10, (N)CRC15—Rubber volume substitution ratios of 5%, 10% and 15%, respectively; CRC—Crumb rubber concrete; A4, A6, A8—Layer of emulsified asphalt (EA) of 4, 6 and 8, respectively.

1.3 橡胶预处理及试件制备

参考文献 [21]，将橡胶颗粒浸泡在 10wt% 的 NaOH 溶液中 24 h，后放于清水中反复洗涤过滤至溶液 pH=7.0±0.1，并在风干后使用。EA 处理组需将橡胶颗粒与 EA 按照比例进行混合，两者先预搅 30 s 使其混合均匀，再加入鑫铭盛试验仪器有限公司生产的 HJW-100 型搅拌机。

搅拌时先将所有原材料在搅拌机中搅 30 s，后加入拌合水搅拌 2 min，直至搅拌均匀。将新拌混凝土快速装入试模并置于振动台上振动成型，在自然条件下养护 24 h 后脱模并放入标准养护室(温度 (20±2)℃，相对湿度 > 95%) 进行养护至规定龄期。

1.4 分析和测试方法

混凝土 3 天、7 天和 28 天抗压强度测试和 28 天劈裂抗拉强度测试实验均采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试模。3 天、7 天抗折强度及 28 天三点弯曲实验测试采用 100 mm×100 mm×400 mm

棱柱体试模，测试结果按照规范<sup>[18]</sup> 要求进行取值。混凝土抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度测试具体实验步骤和要求均按照规范 GB/T 50081—2002<sup>[20]</sup> 进行。抗压和劈裂抗拉强度实验仪器为无锡建仪实验器材有限公司生产的 TYA-2000E 型微机控制恒加载压力试验机，抗折强度实验仪器为鑫铭盛试验仪器有限公司生产的 DYE-300S 电流式压力试验机，抗压强度加载速率为 0.5 MPa/s，劈裂抗拉和抗折强度加载速率为 0.05 MPa/s。三点弯曲试验使用美国美斯特工业系统有限公司生产的 MTS 322T 型工作台，荷载和位移数据从仪器附件位移传感器 (LVDT) 等传感器获取，加载过程采用位移控制，加载速率为 0.1 mm/min，按照规范 JGJ/T 221—2010<sup>[22]</sup> 进行实验。在完成三点弯曲试验断裂后的试件上取样，采用 Nova Nano SEM230 型扫描电子显微镜对橡胶颗粒与水泥基体界面的微观结构进行观察。



2 结果与分析

2.1 橡胶混凝土抗压强度

图3为不同EA膜数对橡胶混凝土抗压强度的影响。可知,不同橡胶掺量的CRC抗压强度发展呈现出相似的规律,NaOH预处理组相比于未预处理组抗压强度均有所提高,3种橡胶掺量下在3天时平均提高6.3%,7天和28天分别提高2.6%和2.5%,可见橡胶颗粒在经过NaOH预处理后的确能在一定程度上提高CRC的抗压强度,这与文献[6]的结果相同。NaOH预处理通过对橡胶颗粒表面进行“老化”,使其表面变得粗糙[6],并洗去了一些憎水性的杂质和油污[7]及可能存在的硬脂酸锌[8]等,从而在一定程度上强化了其与水泥基体界面过渡区的粘结能力,进而改善了CRC的强度[6]。

养护3天时,EA对CRC抗压强度改性效果呈负相关,考虑其原因为EA可能包裹了部分的水泥颗粒,影响了水泥的早期水化进程[19],随着裹覆EA膜数的增加,CRC强度逐步降低,低于未预处理对照组。但到7天养护时,10%和15%两种橡胶掺量下EA处理组强度均高于两对照组,

橡胶颗粒裹覆4层EA膜时得到的抗压强度最高。EA成膜后所释放的水分可以被水泥所利用,水泥颗粒得到进一步的水化,CRC强度得到提高[18]。

28天龄期时,3种橡胶掺量下CRC抗压强度相较于RC0分别降低5.8%、16.3%和19.5%。3种橡胶掺量的抗压强度均为裹覆4层EA膜时最高,均高于NaOH预处理组,与同一橡胶掺量下未预处理CRC组强度对比,抗压强度恢复55.6%、42.1%和13.2%,EA处理对抗压强度提升效果明显。

3个水化龄期下均为裹覆EA膜层越多,抗压强度越低,这是由于当EA掺量较多时,其并未能全部在橡胶颗粒表面破乳成膜,而是被分散在CRC,有机与无机界面增加,EA对水泥的抑制作用越明显[23],这也进一步导致CRC强度下降。

2.2 橡胶混凝土抗折强度

不同龄期下各组CRC的抗折强度测试结果如图4所示,在各龄期下,3种橡胶掺量下的NaOH预处理组在抗折强度提升并不明显。

养护3天时,EA处理组CRC的抗折强度较低,在7天时,裹覆4层EA膜的效果最好,抗折强度最大且高于NaOH预处理组。在28天时,3种橡

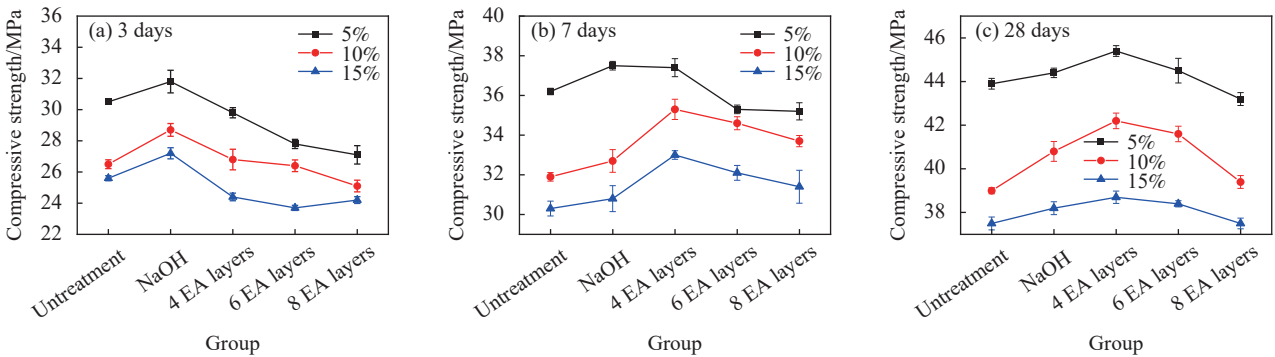


图3 不同乳化沥青(EA)膜数对橡胶混凝土抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of different layers of emulsified asphalt (EA) film on compressive strength of crumb rubber concrete

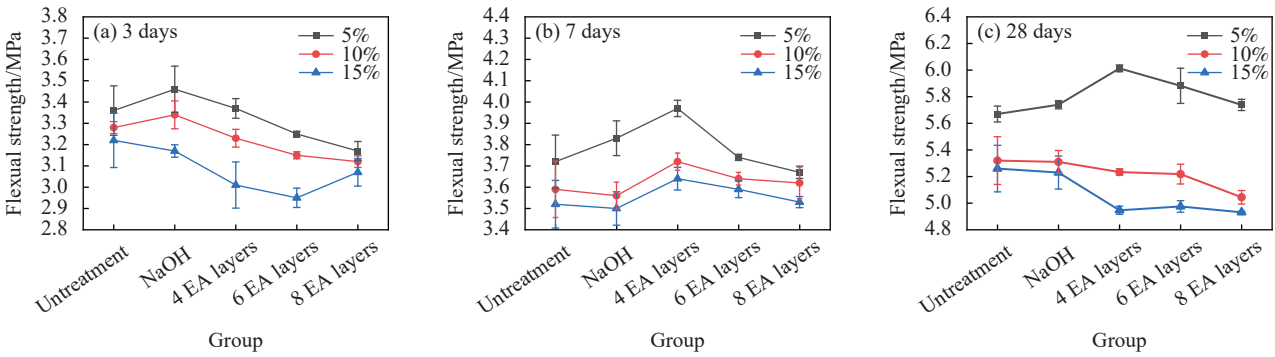


图4 不同EA膜数对橡胶混凝土抗折强度的影响

Fig. 4 Effect of different layers of EA film on flexural strength of crumb rubber concrete

胶掺量下 CRC 抗折强度较于 RC0 分别降低 8.1%、13.8% 和 14.8%，此时仅 5% 橡胶掺量下 EA 处理组抗折强度有提高，CRC5 A4 较 RC0 强度仅降低 2.6%，与 5% 橡胶掺量下未预处理 CRC 组强度对比，强度恢复 67.9%。10% 和 15% 橡胶掺量下 EA 预处理组抗折强度均低于对照组及其 NaOH 预处理组。在较低 5% 橡胶掺量时，EA 对抗折强度产生了积极复合效应，3 种 EA 膜层下得到的抗折强度均高于两个对照组。

28 天抗折强度最低为 CRC15 A8 组，其抗折强度为 4.9 MPa，接近 JTG D40—2011<sup>[24]</sup> 中要求特重等级路面的标准值 5 MPa 的要求，但 EA 组的 CRC 具有更高的劈裂抗拉强度和更大的抗折破坏变形，更适用于路面材料。

2.3 橡胶混凝土劈裂抗拉强度

劈裂抗拉强度是衡量混凝土抗裂性能的一个重要指标，能够反映混凝土的抗拉性能。28 天龄期下 CRC 劈裂抗拉强度如图 5 所示。在 3 种橡胶掺量下，NaOH 预处理组相较于未预处理组的强度均有所提升，但是提升效果有限，改性效果并不明显。

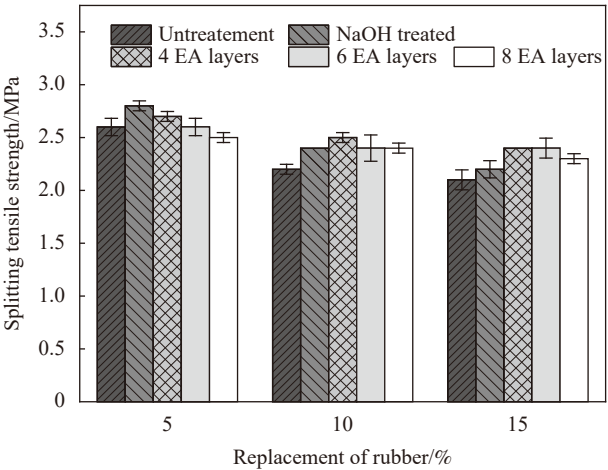


图 5 不同 EA 膜数对橡胶混凝土劈裂抗拉强度影响  
Fig. 5 Effect of different layers of EA film on splitting tensile strength of crumb rubber concrete

在 10% 和 15% 橡胶掺量下，EA 处理组对 CRC 的劈裂抗拉强度提升效果优于 NaOH 预处理组，从图 5 可以发现在 3 种橡胶掺量下，EA 处理组的劈裂抗拉强度同样在裹覆 4 层 EA 膜时最高。

2.4 橡胶混凝土弯曲性能

折压比能在一定程度上反映出 CRC 的弹韧性特征，但是并不能真正体现出乳化沥青掺入后对

CRC 脆性的改善和弯曲变形能力的提升。养护 28 天，各组 CRC 的三点弯曲荷载-位移曲线如图 6 所示。可以看到，掺入橡胶颗粒的 CRC 荷载-位移曲线同 RC0 相比下降得更缓慢，相同荷载下变形更大，这是由于橡胶可以吸收变形时的能量，减少内部裂纹的产生和扩展。随着橡胶颗粒掺量的增加，曲线峰值强度降低，曲线上段斜率逐渐变小，峰值荷载下的挠度逐渐增大，NaOH 改性后的效果区别不大。

3 种橡胶掺量下均为随着裹覆 EA 膜数的增加，曲线上段斜率逐渐变小，曲线有向右移动的趋势，表明混凝土弯曲弹性模量  $E_b$  逐渐降低。EA 处理组峰值位移较两个对照组增加明显，且随着裹覆 EA 膜数的增加，峰值位移逐渐增加。

将试验得到的曲线进行参数定量化分析。选择曲线上 0.85 倍峰值应力时的点作为混凝土的初裂点<sup>[25]</sup>，此时初裂点所对应的位移即为 CRC 的初裂点位移：

$$E_b = \frac{l^3}{48I_z} \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{l^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta F} \tag{5}$$

其中： $\Delta P$  为混凝土在 0.85 倍峰值应力时的点，即混凝土初裂点； $\Delta F$  为混凝土的初裂点位移； $l$  为三点弯测试中两支点之间的跨距； $I_z$  为被测混凝土试件的截面惯性矩； $b$  为试件的宽； $h$  为试件的高。

根据式 (5) 可以计算各组 CRC 的弯曲弹性模量  $E_b$ ，使用软件计算荷载-位移曲线下的积分面积，从图 6 中计算得到的相关曲线参数如表 2 所示。

3 种橡胶掺量下处理方式的区别对 CRC 弯曲弹性模量  $E_b$  的变化影响如图 7 所示。在 3 种橡胶掺量下，与同一橡胶掺量下的未预处理组相比，NaOH 预处理组的弯曲弹性模量  $E_b$  分别降低 2.4%、0.3% 和 9.6%，平均降低 4.2%。EA 处理组呈现出相同的规律，随着裹覆 EA 膜数的增加， $E_b$  逐渐减小，即 CRC 延展性和韧性逐渐提高。3 种橡胶掺量下，相较于未预处理组，EA 为 4 层膜时  $E_b$  平均降低 7.0%、6 层膜时降低 21.8%、8 层膜时降低 27.8%、EA 处理组  $E_b$  平均降低 18.9%。可见 EA 处理组的 CRC 脆性相较于 NaOH 预处理组得到明显降低，且裹覆 EA 膜数越多，其脆性下降得越多。

将荷载-位移曲线下包围的面积作为一个评价混凝土吸收能力的韧性指标，面积越大，则表明材料的

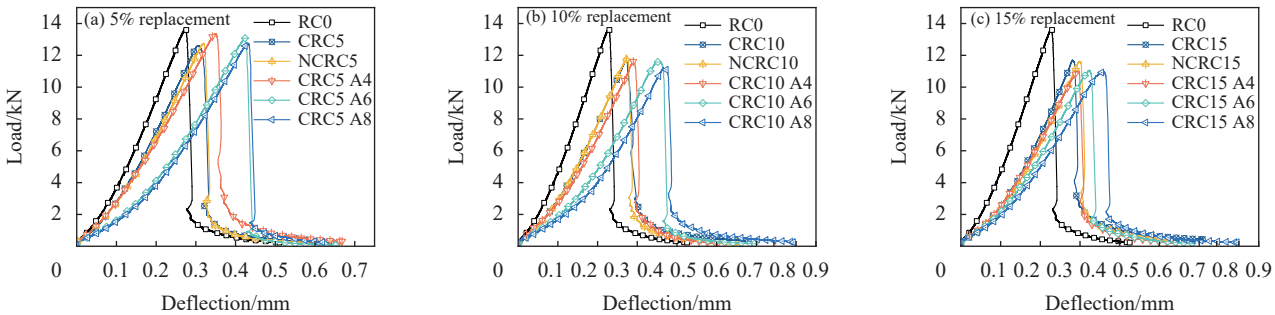


图6 不同橡胶参量下橡胶混凝土荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-deflection curves of crumb rubber concrete with different replacements of rubber

表 2 橡胶混凝土弯曲韧性参数

Table 2 Flexural toughness parameters of crumb rubber concrete

Type	Specimen denotation	$E_b$ /GPa	Integral area/(kN·mm)	Peak load/kN	Peak displacement/mm	Deflection of initial crack/mm
PC	RC0	3.30	1.960	13.791	0.273	0.239
Rubber concrete	CRC5	2.69	2.118	12.609	0.307	0.269
	CRC10	2.35	2.132	11.823	0.326	0.289
	CRC15	2.22	2.111	11.695	0.337	0.302
NaOH treatment	NCRC5	2.63	2.052	12.753	0.320	0.278
	NCRC10	2.30	1.997	11.808	0.330	0.290
	NCRC15	2.01	2.089	11.623	0.360	0.296
EA treatment	CRC5 A4	2.52	2.534	13.362	0.351	0.304
	CRC5 A6	1.99	2.441	12.071	0.424	0.377
	CRC5 A8	1.90	2.452	11.752	0.431	0.385
	CRC10 A4	2.17	2.045	11.631	0.350	0.308
	CRC10 A6	1.78	2.379	11.596	0.422	0.373
	CRC10 A8	1.88	2.416	11.210	0.439	0.398
	CRC15 A4	1.90	2.027	10.992	0.354	0.306
	CRC15 A6	1.62	2.154	11.056	0.388	0.338
	CRC15 A8	1.71	2.484	10.959	0.431	0.368

Note:  $E_b$ —Bending modulus of elasticity.

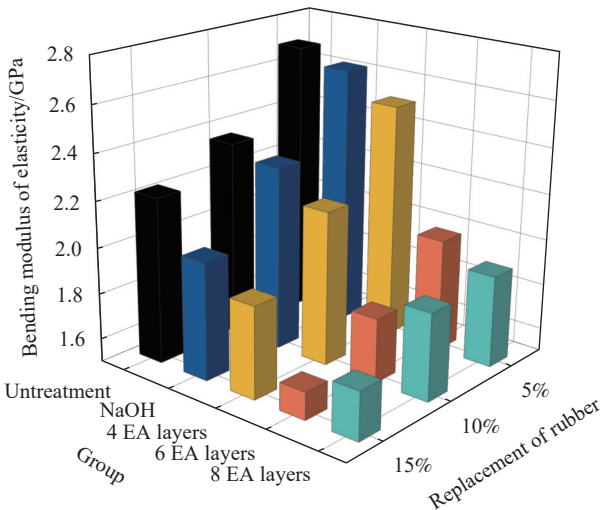


图7 不同EA膜数对橡胶混凝土弯曲弹性模量  $E_b$  的影响

Fig. 7 Effect of different layers of EA film on bending modulus of elasticity  $E_b$  of crumb rubber concrete

整体韧性越好，在断裂过程中吸收的能量越多。图8为3种橡胶参量下，各组CRC的积分面积和初裂点位移变化曲线。3种橡胶参量下NaOH预处理组的积分面积与未预处理组接近，NaOH预处理对CRC整体吸能能力无明显改观。但EA处理组对CRC在断裂过程中吸能能力有较大提高：3种橡胶参量下，与同一橡胶参量下的未预处理组相比，裹覆4层EA膜时积分面积平均提高3.9%、6层膜时提高9.6%、8层膜时提高15.6%、EA处理组平均提高9.7%，裹覆EA膜数越多，CRC韧性越好。在5%橡胶参量时，EA的效果最明显，此时EA处理组平均积分面积较未预处理组提高高达16.9%。

CRC5、CRC10和CRC15的初裂点位移较RC0分别提高12.5%、21.0%和26.8%，橡胶参量越多，



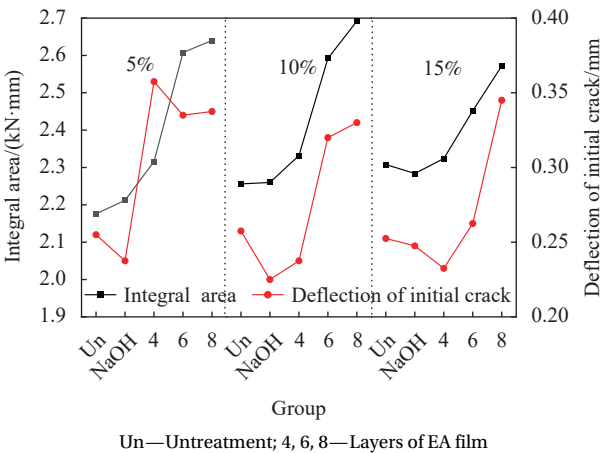


图 8 不同 EA 膜数对橡胶混凝土韧性指标的影响

Fig. 8 Effect of different layers of EA film on toughness index of crumb rubber concrete

CRC 初裂点位移越大。NaOH 预处理组初裂点的位移较未预处理组仅平均提高 0.72%，NaOH 预处理对 CRC 初裂点的影响可忽略不计。3 种橡胶掺量下，相较于未预处理组，裹覆 4 层 EA 膜时初裂点位移平均提高 7.0%、6 层膜时提高 27.0%、8 层膜时提高 34.2%、EA 处理组平均提高 22.7%，随着

裹覆 EA 膜数的增加，初裂点位移逐渐增大。初裂点位移的变化趋势进一步证明了 CRC 在经过 EA 处理后具有更大的延性，在受力时可以产生更大的变形。EA 处理对 CRC 弯曲韧性的提高程度远高于 NaOH 预处理。

2.5 橡胶混凝土微观形貌

图 9 为选取 10% 橡胶掺量下具有代表性的 CRC10、NCRC10 和 CRC10A6 3 组试件的微观形貌。

对比图 9(a) 和图 9(b)，可以发现橡胶颗粒在经过 NaOH 预处理后表面变得粗糙<sup>[6, 21]</sup>，橡胶颗粒与水泥基体界面粘结情况得到一定程度的改善。对比图 9(a) 和图 9(c)，可以发现图 9(c) 中部分水泥水化产物在橡胶颗粒表面附着，经过乳化沥青处理后的橡胶颗粒与水泥基体界面粘结情况良好，界面缝隙较小，界面孔隙率降低<sup>[18]</sup>，橡胶颗粒能较好地与水泥基体结合在一起。SEM 结果进一步证实了乳化沥青能够优化橡胶颗粒与水泥基体的界面，使其两者形成较好地粘结，乳化沥青橡胶混凝土从而在宏观性能上表现出理想的改善效果。

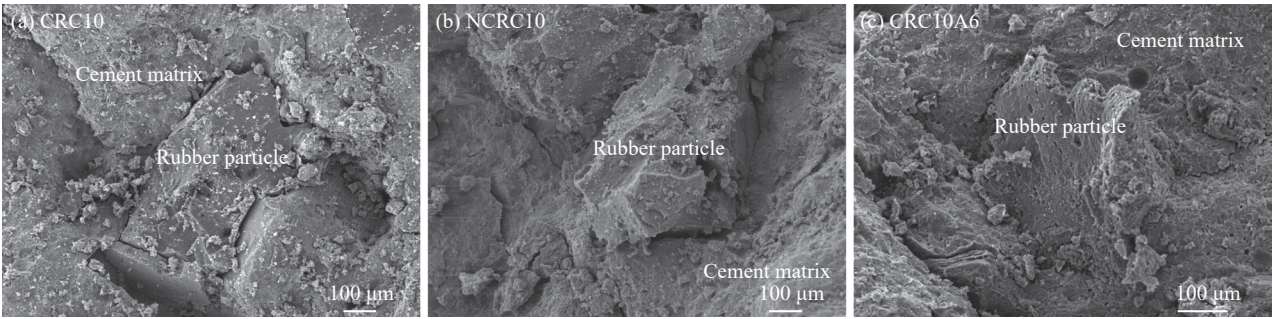


图 9 橡胶混凝土的微观形貌

Fig. 9 Microscopic structures of crumb rubber content

2.6 沥橡比对橡胶混凝土力学性能复合效应的影响

为更好地将 EA 膜层概念应用于具体实际，通过引入沥橡比(乳化沥青与橡胶颗粒的质量比)的概念对 EA 改善 CRC 进行综合分析。EA 处理组中 3 种 EA 膜层对应的沥橡比分别为 0.1、0.15 和 0.2。试验中 3 种橡胶掺量下 EA 处理组较未预处理组各值平均变化率如图 10 所示。可知，从强度方面考虑，当沥橡比为 0.1 时 EA 对 CRC 改善效果最好，此时抗压、劈裂抗拉强度均有提高，且抗折强度降低最少；从弯曲韧性指标考虑，沥橡比越大则效果越好。当沥橡比从 0.1 到 0.15 时，CRC 弯曲韧性提升明显，且此时 CRC 强度虽不及沥橡比为

0.1 时高，但强度降低幅值很小；当沥橡比从 0.15 到 0.2 时，弯曲韧性提升不大，强度却有较大衰减。综合考虑强度和韧性变化，当沥橡比为 0.15 时，EA 对 CRC 静态力学性能有着综合改善效果。

为更好地应用于工程实际需要，对 CRC 在不同沥橡比下抗压强度变化进行预测，拟合结果如图 11 所示。可知，CRC 抗压强度在 3 种沥橡比下线性相关程度较高，CRC 抗压强度随着橡胶掺量的增加而线性降低。使用一次线性关系对 CRC 抗压强度变化进行拟合，得到的结果拟合程度较高，式 (6)~(8) 给出了沥橡比为 0.1、0.15 和 0.2 3



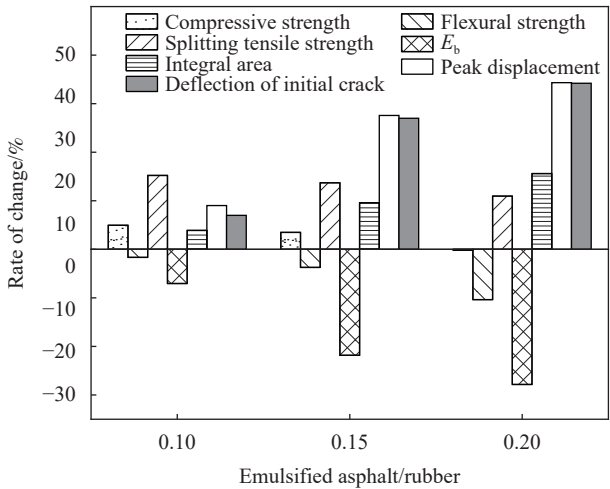
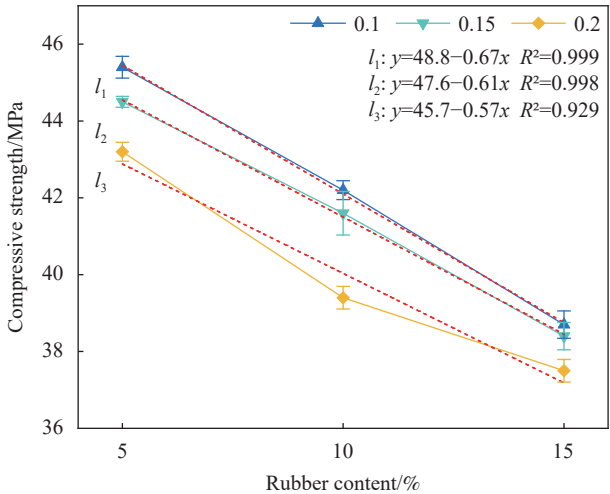


图 10 沥橡比对橡胶混凝土的综合影响

Fig. 10 Comprehensive effect of asphalt to rubber ratio on crumb rubber concrete



$l_1, l_2, l_3$ —Asphalt to rubber ratios;  $R^2$ —Fit coefficient

图 11 不同沥橡比对橡胶混凝土抗压强度影响

Fig. 11 Changes of compressive strength of rubber concrete with different asphalt to rubber ratios

种情况下 CRC 抗压强度  $f_c$  和橡胶掺量  $n$  的拟合关系式：

$$l_1: f_c = 48.8 - 0.67n \quad R^2 = 0.999 \tag{6}$$

$$l_2: f_c = 47.6 - 0.61n \quad R^2 = 0.998 \tag{7}$$

$$l_3: f_c = 45.7 - 0.57n \quad R^2 = 0.929 \tag{8}$$

其中， $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  为沥青与橡胶的比例。

3 结论

对比未预处理橡胶和 NaOH 预处理橡胶两个对照组，通过抗压、抗折、劈裂抗拉和三点弯曲试验研究了不同橡胶掺量下乳化沥青 (EA) 成膜覆

盖橡胶颗粒表面对橡胶混凝土 (CRC) 的力学性能影响，得到以下结论：

(1) 对比两个对照组，EA 改性对抗压强度提升效果明显，裹覆 4 层 EA 膜时效果最好，28 天时 10% 橡胶掺量下抗压强度相较于未预处理组提高达 8.2%，而 NaOH 预处理组仅平均提高 2.2%。在 5% 橡胶掺量下 EA 处理组能较大提高抗折强度，相较于未预处理组提高 6.0%；

(2) EA 处理能大幅改善 CRC 的韧性。相较于未预处理组，3 种橡胶掺量下，EA 处理组 CRC 初裂点位移平均提高 22.7%，5% 橡胶掺量下的 CRC 在断裂过程中吸收能量的能力平均提高 16.9%。EA 处理组弯曲弹性模量  $E_b$  相比于未预处理组平均降低 18.9%，此时 NaOH 预处理组仅平均降低 4.2%；

(3) 综合考虑 CRC 的强度结果和韧性变化趋势，在使用 EA 对 CRC 改善时建议采用裹覆 6 层 EA 膜，即沥橡比为 0.15。此时 EA 处理对 CRC 力学性能有着积极复合效应，并可根据给出的抗压强度拟合关系式对 CRC 强度进行预测。

综上，EA 能够作为橡胶表面处理的一种材料，能够起到连接橡胶与水泥基体的“桥梁”作用。EA 处理对比 NaOH 预处理橡胶有其明显的优点，不仅对强度有增益效果，而且能够显著提升 CRC 的弹韧性，EA 改性后的 CRC 可以考虑将其应用在需要有较大变形，弹韧性较高的路面工程，铁路混凝土轨枕等领域。

参考文献：

[1] 中国轮胎循环利用协会.《中国轮胎循环利用行业“十四五”发展规划》征求行业意见[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2020(11): 12-19.  
China Tire Recycling Association. Soliciting industry opinions for "the 14<sup>th</sup> five-year development plan of China's Tire Recycling Industry"[J]. China Tire Resources Recycling, 2020(11): 12-19(in Chinese).  
[2] ELDIN N N, SENOUCI A B. Use of scrap tires in road construction[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1992, 118(3): 561-576.  
[3] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1993, 5(4): 478-496.  
[4] 张海波, 管学茂, 刘小星, 等. 废旧橡胶颗粒对混凝土强度的影响及界面分析[J]. 材料导报, 2009, 23(8): 65-67.  
ZHANG Haibo, GUAN Xuemao, LIU Xiaoxing, et al. Study on compressive strength and interface of rubberized concrete[J]. Materials Reports, 2009, 23(8): 65-67(in

- Chinese).
- [5] TIAN S, ZHANG T, LI Y. Research on modifier and modified process for rubber-particle used in rubberized concrete for road[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243: 4125-4130.
  - [6] SEGRE N, JOEKES I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9): 1421-1425.
  - [7] MEDDAH A, BEDDAR M, BALI A. Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 72: 187-192.
  - [8] 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.
  - [9] YOUSSEF O, HASSANLI R, MILLS J E, et al. Influence of mixing procedures, rubber treatment, and fibre additives on rubcrete performance[J]. *Journal of Composites Science*, 2019, 3(2): 41.
  - [10] GUO S, DAI Q, SI R, et al. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148: 681-689.
  - [11] LI Z, LI F, LI J S L. Properties of concrete incorporating rubber tyre particles[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1998, 50(4): 297-304.
  - [12] OSSOLA G, WOJCIK A. UV modification of tire rubber for use in cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 52: 34-41.
  - [13] 何亮, 刘誉贵, 牟元华. 橡胶改性及其对橡胶水泥基质材料性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(3): 936-941.  
HE Liang, LIU Yugui, MOU Yuanhua. Rubber modification and its influence on the properties of rubber cement matrix[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(3): 936-941(in Chinese).
  - [14] LI Y, ZHANG X, WANG R, et al. Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116691.
  - [15] HUANG B, SHU X, LI G. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(10): 2008-2013.
  - [16] 李朝元, 刘赞群, 陈娟, 等. 水泥-乳化沥青-橡胶颗粒砂浆拉伸性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8): 2549-2556.  
LI Chaoyuan, LIU Zanqun, CHEN Juan, et al. Tensile properties of cement-emulsified-rubber particle mortar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(8): 2549-2556(in Chinese).
  - [17] OIKONOMOU N, MAVRIDOU S. Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(6): 403-407.
  - [18] BING C, NING L. Experimental research on properties of fresh and hardened rubberized concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(8): 04014040.
  - [19] 叶青. 水泥乳化沥青混凝土凝结硬化机理及微观结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
YE Qin. Study on setting and hardening mechanism and microstructure of cement emulsified asphalt concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese).
  - [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building, 2019(in Chinese).
  - [21] MOHAMMADI I, KHABBAZ H, VESSALAS K. Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(3): 813-827.
  - [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of fiber reinforced concrete: JGJ/T 221—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese).
  - [23] 毛子铭. 阳离子乳化沥青对水泥浆体微结构、力学及耐久性能的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.  
MAO Ziming. Effect of cationic asphalt emulsion on microstructure, mechanical properties and durability of cement paste[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020(in Chinese).
  - [24] 中华人民共和国交通运输部. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway cement concrete pavement: JTG D40—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese).
  - [25] 刘方, 王宝民, 袁晓洒, 等. 掺加废旧橡胶颗粒混凝土的韧性试验研究[J]. *混凝土*, 2019(3): 78-81, 85.  
LIU Fang, WANG Baomin, YUAN Xiaosa, et al. Experimental study on toughness of concrete containing scrap rubber[J]. *Concrete*, 2019(3): 78-81, 85(in Chinese).