

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.044

# 钢-聚丙烯复掺纤维橡胶混凝土力学性能试验研究

邱建冬

(山西省交通规划勘察设计院有限公司,山西太原 030031)

**摘要:**废旧橡胶材料经过再生工艺处理可得到橡胶集料,可应用于水泥混凝土制品材料中。该文对不同纤维组合方案下(单掺MS、单掺PP、混掺MS-PP)的普通混凝土和橡胶混凝土(橡胶替代率为20%)进行力学性能试验,主要考察了混凝土的坍落度、密度、抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度和抗折强度。研究认为混凝土中掺入20%的橡胶集料后,相关性能指标显著下降。但0.9MS+0.1PP和0.8MS+0.2PP纤维组合方案下的普通混凝土和橡胶混凝土的力学性能得到全方面的性能提升。因此,在实际橡胶混凝土生产过程中要严格把控橡胶集料的掺量,必要时可混掺钢纤维和聚丙烯纤维来提升混凝土产品质量。

**关键词:**混凝土;力学性能;钢纤维;聚丙烯纤维;橡胶集料

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

传统水泥混凝土具有强度高、韧性低等特点,在长期的交通荷载作用下,会造成混凝土板块产生断裂、破碎等问题。废旧橡胶材料经再生工艺处理后可生产橡胶混凝土,具有良好的韧性和抗弯曲能力等特点,能实现道路的高质量、耐久性和长寿命服役。但在混凝土中使用橡胶集料会降低力学性能(密度、弹性模量和抗压、拉伸和弯曲强度),在逐渐增长的重载交通环境下,易造成橡胶混凝土的性能损伤<sup>[1-3]</sup>。因此,为进一步提升道路质量和服役水平,需深入研究满足现代路面交通需求的高强、高韧性路面材料。在混凝土中掺入纤维可以提高橡胶混凝土的力学性能。

薛刚等<sup>[4]</sup>研究了钢纤维橡胶混凝土的抗压强度,将细集料部分替换为橡胶颗粒(0.85~1.40 mm)。结果表明:随着橡胶颗粒含量的增加,混凝土抗压强度降低;黄智德等<sup>[5]</sup>在橡胶混凝土中掺入了0.5%体积掺量的钢纤维,纤维的加入使所有混合料的抗压强度、劈拉强度和弯曲强度分别有所提高;朱江等<sup>[6]</sup>在橡胶混凝土中添加了0.1%和0.12%聚丙烯纤维,使得混凝土应变能力和能量吸收显著提高,抗压强度

分别提高了14%和10%,劈拉强度分别提高了20%和27%,弯曲强度分别提高了27%和34%。添加纤维后混凝土性能的改善包括但不限于韧性、延展性、收缩率、抗剪强度、抗裂性和抗冲击性。国内外学者<sup>[7-9]</sup>也对掺纤维的混凝土进行了大量研究,认为尽管掺加纤维材料可以提升混凝土某些领域性能,但很难保障混凝土综合性能。复掺纤维作为近年来新型研究领域,认为可以弥补单掺纤维性能不足,实现各材料特性的优势互补,可全面提升混凝土材料的耐久性、强度等<sup>[10-11]</sup>。因此,本研究对混杂纤维(钢-聚丙烯)橡胶混凝土的力学性能(抗压、抗折、抗拉强度)进行试验,旨在进一步探究纤维橡胶混凝土的性能演变规律。

## 1 原材料与试验方案

本研究采用的原材料主要包括普通硅酸盐水泥、粗集料、细集料、橡胶集料、钢纤维、聚丙烯纤维和超塑化剂。

### 1.1 水泥

P.O 52.5N普通硅酸盐水泥,密度为3.15 g/cm<sup>3</sup>,水泥化学性能见表1。

投稿日期:2022-07-27(修改稿)

基金项目:山西省交通运输科技项目(编号:20-JKKJ-61)

作者简介:邱建冬,男,硕士,高级工程师.E-mail:174192198@qq.com

表1 水泥化学性能指标 %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	总碱	不溶残渣	烧失量
19.59	5.05	3.67	64.27	1.63	2.75	0.51	0.28	2.13

## 1.2 集料

使用密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>、吸水率为 0.2%、最大粒径为 10 mm 的碎石粗骨料。采用天然河砂细集料,密度 2.57 g/cm<sup>3</sup>,细度模数 3.05,吸水率 0.8%,含水率 2.0%,其中,细集料最大粒径为 4.95 mm。采用 1~2 mm 级配、密度为 0.73 g/cm<sup>3</sup> 的橡胶集料。对橡胶集料和粗细集料进行筛分,级配曲线如图 1 所示。

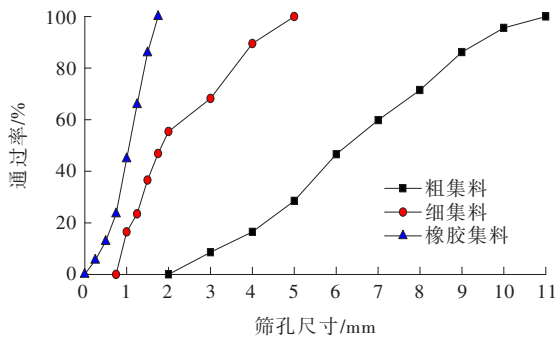


图1 粗细集料级配曲线

## 1.3 纤维

研究采用钢纤维(MS)和聚丙烯纤维(PP)两种纤维材料掺入混凝土中,其中,钢纤维的拉伸强度为 2 800 MPa,长度为 21 mm,长径比为 60,密度为 7.85 g/cm<sup>3</sup>。聚丙烯纤维的拉伸强度为 550 MPa,长度为 3 mm,密度为 0.91 g/cm<sup>3</sup>。橡胶骨料、钢纤维和聚丙烯纤维的外观如图 2 所示。

## 1.4 塑化剂

采用聚羧酸醚基超塑化剂,使用剂量为水泥重量的 0.2%,密度 1.06 g/cm<sup>3</sup>,pH 值 9.5。

## 1.5 配合比设计

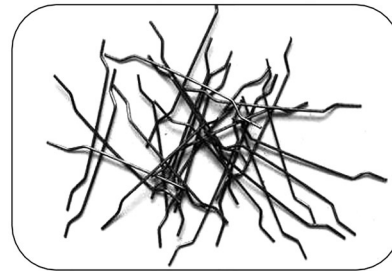
对单掺 MS 纤维、单掺 PP 纤维和混掺 MS-PP 纤维的混凝土进行配合比设计,纤维材料的掺量控制总量为 1%(体积取代率)。混凝土包括普通混凝土和橡胶混凝土(橡胶集料替代率为细集料的 20%,体积取代率),混凝土的水灰比均为 0.42,设计坍落度为 75~100 mm,混凝土设计方案如表 2 所示,配合比如表 3 所示。

## 1.6 试验方案

混掺纤维橡胶混凝土的制备流程主要包括:将橡胶集料与细集料在旋转式搅拌机进行均匀搅拌,



(a) 橡胶集料



(b) 钢纤维



(c) 聚丙烯纤维

图2 材料外观形貌

表2 不同纤维混凝土设计方案

编号	混凝土类型	橡胶集料 掺量/%	纤维掺量/%	
			MS纤维	PP纤维
I	PC-0-0	0	0.0	0.0
II	PC-1-0	0	1.0	0.0
III	PC-0.9-0.1	0	0.9	0.1
IV	PC-0.8-0.2	0	0.8	0.2
V	PC-0.7-0.3	0	0.7	0.3
VI	PC-0-1	0	0.0	1.0
VII	RC-0-0	20	0.0	0.0
VIII	RC-1-0	20	1.0	0.0
IX	RC-0.9-0.1	20	0.9	0.1
X	RC-0.8-0.2	20	0.8	0.2
XI	RC-0.7-0.3	20	0.7	0.3
XII	RC-0-1	20	0.0	1.0

表 3 水泥混凝土配合比设计

编号	混凝土类型	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )							塑化剂/L
		水	水泥	粗骨料	细集料	橡胶集料	MS纤维	PP纤维	
I	PC-0-0	242	538	620	905	0.0	0.00	0.00	0.0
II	PC-1-0	242	538	620	905	0.0	78.50	0.00	1.1
III	PC-0.9-0.1	242	538	620	905	0.0	70.65	0.92	1.1
IV	PC-0.8-0.2	242	538	620	905	0.0	62.80	1.84	1.1
V	PC-0.7-0.3	242	538	620	905	0.0	54.95	2.76	1.1
VI	PC-0-1	242	538	620	905	0.0	0.00	9.20	1.1
VII	RC-0-0	242	538	620	724	51.5	0.00	0.00	1.1
VIII	RC-1-0	242	538	620	724	51.5	78.50	0.00	1.1
IX	RC-0.9-0.1	242	538	620	724	51.5	70.65	0.92	1.1
X	RC-0.8-0.2	242	538	620	724	51.5	62.80	1.84	1.1
XI	RC-0.7-0.3	242	538	620	724	51.5	54.95	2.76	1.1
XII	RC-0-1	242	538	620	724	51.5	0.00	9.20	1.1

然后将水泥倒入搅拌机中干拌 1.5 min,将塑化剂与水按一定比例混合,并将其 70% 倒入搅拌机中,搅拌 2 min;将剩余的水倒入混凝土中,均匀搅拌 1.5 min;最后将纤维按比例倒入搅拌机中,搅拌 3~4 min 成型后倒入模具中进行成型和养护。对不同类型的混凝土进行力学性能试验,参照《混凝土强度检验评定标准》(GB 50107—2019),检测试件的密度、抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度、弯曲强度等,相关检测项目及试件尺寸如表 4 所示。

表 4 混凝土相关检测项目及试件尺寸

检测项目	试件尺寸	养护条件	试验条件
密度测试	100 mm×100 mm×100 mm 立方体		
抗压强度	150 mm×150 mm×150 mm 立方体		加载速率为 0.05~0.08 MPa/s
弹性模量	φ150 mm×300 mm 圆柱体	温度(20±2)℃,湿度 ≥95%	基准应力 0.5 MPa
劈裂抗拉强度	φ150 mm×300 mm 圆柱体		加载速率为 0.05~0.08 MPa/s
抗折强度	150 mm×150 mm×600 mm 棱柱体		加载速率为 0.05~0.08 MPa/s

## 2 混凝土性能测试研究

### 2.1 坍落度

混凝土在拌和施工过程中要考虑材料的保水

性、流动性及黏聚性,而坍落度试验则是衡量混凝土和易性的关键方法。将混凝土倒入坍落度桶中并进行振捣,观测其在自然条件下坍落深度,对于普通混凝土而言,坍落度一般不小于 10 mm。不同类型的混凝土坍落度试验结果如图 3 所示。

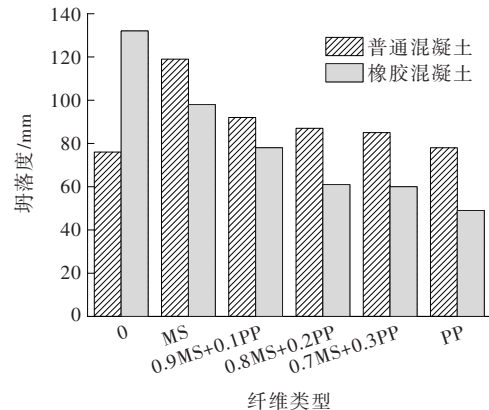


图 3 混凝土坍落度试验结果

由图 3 可知:对于不掺纤维的混凝土而言,20% 橡胶集料替代率下的橡胶混凝土坍落度要远大于普通混凝土,其主要原因是橡胶混凝土中添加了塑化剂材料。而掺加纤维材料后,橡胶混凝土的坍落度普遍低于素混凝土 15% 以上。在混凝土混合料中添加 1% 的纤维,特别是混杂纤维(MS-PP 纤维),可显著降低坍落度。由于在混凝土中添加了超塑化剂可以提高混凝土和易性。坍落度随着 PP 纤维含量的增加而降低。用 PP 纤维分别以 0.1%、0.2%、0.3% 和 1% 的比例,取代素混凝土中的 MS 纤维,使得混凝土坍落度降低 22.69%、26.89%、28.57% 和 34.45%。对于橡胶混凝土而言,则分别降低了 20.41%、37.76%、38.78% 和 50.00%。坍落度的显著下降是由于 PP 纤维与 MS 的加入可以在混合料中形成网状结构,从而抑制了混合料的表面泌水和集料离析。由于混凝土中纤维分布均匀、比表面积大、含量高(特别是直径很小的纤维),混凝土材料的黏度会明显增加,从而降低了坍落度值。

### 2.2 体积密度

对 28 d 养护后的混凝土立方体试块进行体积密度的测定,采用水中称重法测定试件体积,将饱水试件的表干质量除以体积可得到体积密度,测试结果如图 4 所示。

由图 4 可知:MS 纤维的加入通常对混凝土的密度有很大的影响,然而,0.8MS+0.2PP 和 0.9MS+

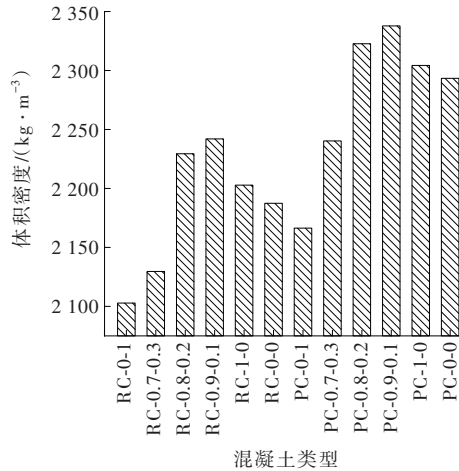


图4 不同类型混凝土体积密度

0.1PP混杂纤维混凝土的密度比素混凝土与单掺MS纤维混凝土要高。其原因是当MS纤维被少量PP纤维(0.1%、0.2%)取代时,大量MS纤维被保留在混凝土中,混凝土中的MS纤维有效含量较高。而单掺MS纤维制备混凝土时,受试验条件影响,部分MS纤维会残留在拌和设备中,无法实现MS纤维的完全利用,在一定程度上降低了试件的体积密度。此外,在混凝土中加入PP纤维可改善集料颗粒与水泥砂浆之间的黏结,从而减少水泥砂浆的含气量,进而增加混凝土试件的密度。对于掺纤维和不掺纤维的橡胶混凝土而言,其密度均小于普通混凝土。其主要原因是采用了20%的橡胶集料替代了天然细集料,橡胶集料的材质主要是橡胶颗粒,其密度远小于集料。因此,其拌和形成的橡胶混凝土密度在一定程度上有所下降。

### 2.3 抗压强度

采用标准立方体混凝土试件测试抗压强度,加载速率为0.05~0.08 MPa/s。不同类型混凝土28 d抗压强度试验结果如图5所示。

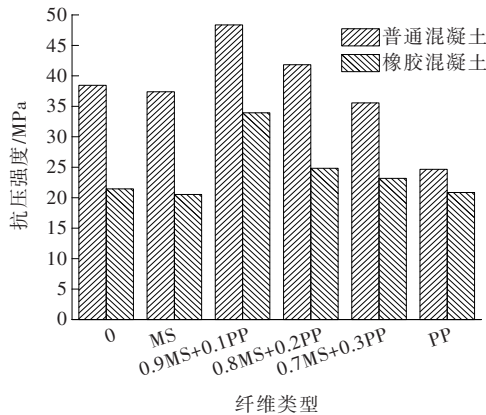


图5 不同类型混凝土28 d抗压强度

由图5可知:当仅使用MS纤维时,混凝土的抗压强度略有下降。对照素混凝土的抗压强度为38.5 MPa,而MS纤维混凝土的抗压强度为37.4 MPa,抗压强度降低了约2.9%。分析原因是MS纤维含量的增加,从而增加了混凝土中的空气含量,进而降低了混凝土试件的密度。0.9MS+0.1PP混凝土的抗压强度最高为48.4 MPa,比素混凝土高25.7%,其主要原因是混凝土中添加PP纤维改善了骨料颗粒与水泥砂浆之间的黏结。0.8MS+0.2PP混凝土的抗压强度为41.8 MPa,比素混凝土提高近8.6%。在普通混凝土中,PP纤维混凝土的抗压强度最低,其原因是混凝土中分散的聚丙烯纤维降低了混凝土的性能。在混凝土中用20%掺量的橡胶集料代替细集料,所有的橡胶混凝土抗压强度降低至约38.9%。由于混凝土中的橡胶颗粒削弱了橡胶集料与水泥混合物之间的结合,导致橡胶集料周围的应力集中,在外部荷载作用下混凝土裂缝会迅速蔓延。

### 2.4 弹性模量

研究对不同类型混凝土进行28 d弹性模量测试,将圆柱体混凝土试件固定在限位垫板上,以0.5 MPa为基准应力进行加载,记录初始荷载和1/3轴向抗压强度对应的荷载及试件变形,通过计算得到混凝土弹性模量,试验结果如图6所示。

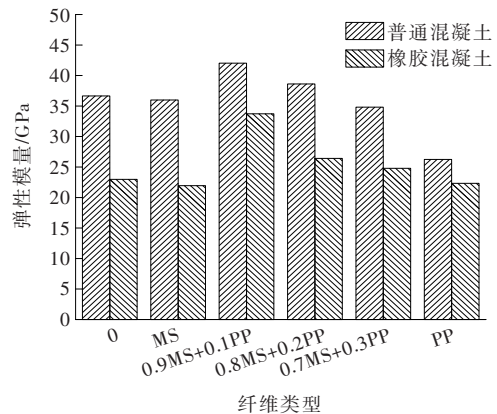


图6 不同类型混凝土弹性模量

由图6可知:弹性模量的试验结果与抗压强度的结果相似。在素混凝土中掺入MS纤维,弹性模量略有降低。橡胶混凝土的弹性模量整体上要小于普通混凝土,0.9MS+0.1PP和0.8MS+0.2PP纤维组合方案下的混凝土弹性模量最大,分别达到42.02 GPa和38.62 GPa,较素混凝土弹性模量分别提升了14.65%和5.38%。对于橡胶混凝土而言,掺MS纤维



纤维的橡胶混凝土弹性模量最低,其主要原因是MS纤维的模量较大,而橡胶混凝土中橡胶集料弹性模量较低,二者在拌和过程中会导致材料和易性差,在外部荷载作用下材料内部结构易失稳。但在掺入部分PP纤维后,由于其成丝状的网络结构分布,对内部混凝土起到加筋作用,弹性模量在一定程度上有所提升。

## 2.5 劈裂抗拉强度

对不同类型混凝土进行28d劈裂抗拉强度的性能测试,以0.05~0.08 MPa/s速率加载,记录劈裂条件下混凝土试件破坏对应的荷载,通过破坏荷载、劈裂面积计算得到劈裂抗拉强度,试验结果如图7所示。

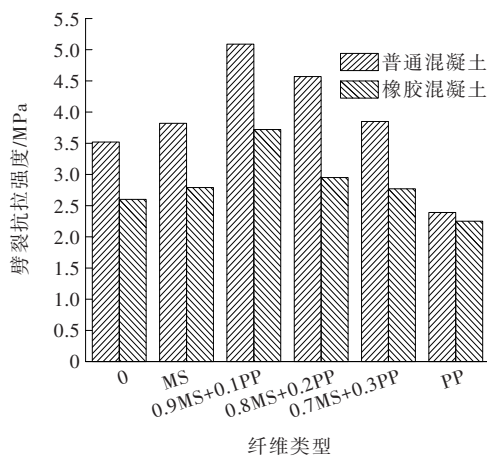


图7 不同类型混凝土劈裂抗拉强度

由图7可知:相较于素混凝土,MS纤维混凝土的劈裂抗拉强度为3.82 MPa,提升了8.52%。而0.9MS+0.1PP和0.8MS+0.2PP混凝土的劈裂抗拉强度达到5.09 MPa和4.57 MPa,分别提升了约44.60%和29.83%。混掺纤维的掺入,能够充分发挥钢纤维的强度提升和聚丙烯纤维加筋固化的优势。此外,橡胶混凝土的劈裂抗拉强度整体要小于普通混凝土,采用0.9MS+0.1PP纤维组合方案时,普通混凝土和橡胶混凝土的劈裂抗拉强度分别为5.09 MPa和3.72 MPa,橡胶混凝土劈裂抗拉强度下降了约26.92%。提高混凝土的抗拉强度通常可以提高混凝土的抗剪强度,在一定程度上可以减少混凝土的开裂和破坏。PP纤维普通混凝土和PP纤维橡胶混凝土的劈裂抗拉强度均低于素混凝土和素橡胶混凝土,可能与PP纤维的材料特性有关,混凝土拌和过程中纤维的分散不均匀,易导致纤维抱团积聚,在外部荷载作用下易产生局部应力集中和开裂损伤。

## 2.6 抗折强度

对不同类型混凝土进行28d抗折强度的性能测

试,将混凝土试件固定在抗折试验设备中,连续均匀施加荷载,直至试件下边缘断裂,记录试件破坏荷载、支座间跨度、试件高度及宽度,通过计算得到混凝土抗折强度,试验结果如图8所示。

由图8可知:抗折强度随MS纤维含量的增加而增加。相较于素混凝土,不同纤维组合类型下普通混凝土的抗折强度分别提升了25.44%、19.96%、18.20%和9.22%,掺MS纤维普通混凝土的抗折强度最高,达到6.41 MPa,掺PP纤维普通混凝土的抗折强度最小,为3.60 MPa。随着MS纤维的加入,纤维的抗折强度增加,具有较高的弹性模量和拉伸强度。虽然PP纤维比MS纤维短,但前者的弹性模量和拉伸强度比后者低。因此,聚丙烯纤维可以桥接微裂纹,但不会显著影响抗折强度。在混凝土混合料中加入橡胶集料会降低混凝土的抗折强度,主要是因为橡胶集料与水泥砂浆之间黏结性较弱。尽管橡胶集料降低了混凝土的抗折强度,但掺纤维的橡胶混凝土抗折强度均较不掺纤维的橡胶混凝土抗压强度有所提升。

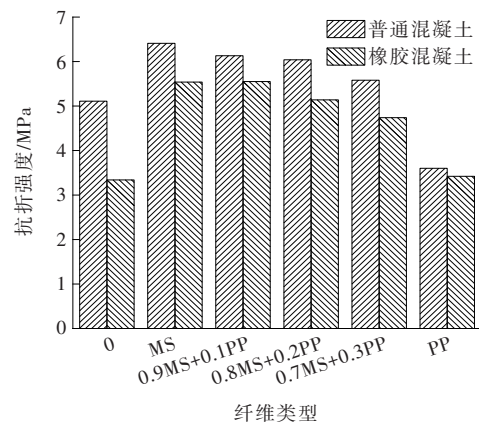


图8 不同类型混凝土抗折强度

## 3 结论

对不同类型纤维组合下的普通混凝土和橡胶混凝土进行力学性能试验研究,得到以下结论:

(1) 相较于普通混凝土,橡胶混凝土的坍落度、体积密度、抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度和抗折强度均有所下降。

(2) 无论是普通混凝土还是橡胶混凝土,0.9MS+0.1PP和0.8MS+0.2PP纤维组合方案下的混凝土的抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度和抗折强度均优于其他类型混凝土。

DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579. 2023.04.045

# 沥青路面涂层的光反射及汽车尾气降解效果分析

尚文勇<sup>1</sup>,周政<sup>2</sup>,陈俊<sup>3</sup>

(1.延安公路管理局,陕西 延安 716000;2.江苏交科交通设计研究院有限公司,江苏 淮安 223001;  
3.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**为了对比常见路面涂层填料的光反射和尾气降解效果,分别制备 Nano-TiO<sub>2</sub>、Nano-ZnO、Micro-TiO<sub>2</sub>为填料的3种路表涂层,采用自行开发的光反射率测试仪,进行不同填料掺量下涂层的反射率测试,确定填料最佳掺量;在填料最佳掺量下,对3种涂层沥青混合料的反射率进行测试,对比 Nano-TiO<sub>2</sub>、Nano-ZnO、Micro-TiO<sub>2</sub>对光反射效果;采用自行开发的尾气浓度分析仪,测试3种涂层在光催化条件下对气体 CO、HC、NO<sub>x</sub>的降解率,比较3种填料的降解效果。结果表明:沥青混合料反射率为5.46%~6.11%;反射涂层中填料最佳掺量为30%;涂刷涂层后,混合料反射率大幅下降,相同涂层用量下3种填料反射效果优劣排序为:Micro-TiO<sub>2</sub>>Nano-ZnO>Nano-TiO<sub>2</sub>,0.9 kg/m<sup>2</sup>用量时 Micro-TiO<sub>2</sub>涂层的反射率达59%;填料对尾气降解效果的优劣排序为:Nano-TiO<sub>2</sub>>Nano-ZnO>Micro-TiO<sub>2</sub>;其中涂层对3种尾气中的NO<sub>x</sub>降解效果最明显。

**关键词:**道路工程;沥青路面;反射涂层;汽车尾气降解;反射率  
**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A

## 0 引言

沥青路面因良好的行车舒适性和维修便利性,已经成为中国高等级公路的主要路面形式。但由于

沥青路面对太阳辐射的反射率较低,路表往往吸收大量的太阳辐射热量<sup>[1-3]</sup>,导致夏季路面温度很高,甚至达到70℃以上。沥青路面高温不仅造成车辙、拥包等永久变形,影响行车安全,还加剧城市热岛效应,降低人体舒适性<sup>[4-5]</sup>。此外,随着汽车保有量的不

(3) 0.9MS+0.1PP普通混凝土相较于素混凝土,抗压强度提升了25.7%,劈裂强度提升了44.6%,抗折强度提升了19.96%。

(4) 橡胶集料以20%的掺量替代部分天然细集料时,混凝土的相关力学性能有所下降,但在保障混凝土设计强度等级要求下,可实现建材成本节省和资源可循环利用。

### 参考文献:

[1] 陈玉良.橡胶混凝土力学性能研究[D].武汉:湖北工业大学,2015.  
[2] 熊辉,刘洪辉.掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究[J].中外公路,2020,40(1):206-211.  
[3] 周兴宇,杨鼎宜,李玉寿,等.多尺度聚丙烯纤维混凝土力学性能及损伤演化研究[J].混凝土与水泥制品,2020(4):49-53.

[4] 薛刚,武春风,胡小龙.塑钢纤维-橡胶混凝土应力-应变关系试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(11):3796-3802.  
[5] 黄智德,段瑞斌,向振宇,等.塑钢纤维橡胶混凝土的配制及力学性能研究[J].混凝土与水泥制品,2015(7):58-61.  
[6] 朱江,李旭东,张东升.不同分布的钢纤维改性橡胶混凝土性能研究[J].混凝土,2013(3):69-72.  
[7] 吕志恒,程铭,蒋喜生,等.玻璃纤维和聚丙烯纤维改善混凝土微观结构研究[J].中外公路,2020,40(6):267-270.  
[8] 张岩.钢纤维改性橡胶混凝土力学性能试验研究[D].武汉:湖北工业大学,2015.  
[9] 张恒.多尺度纤维混杂对水泥混凝土性能的影响[J].中外公路,2016,36(6):284-287.  
[10] 顾万,肖鹏,康爱红,等.混掺纤维混凝土桥面铺装材料性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2019(6):53-58.  
[11] 何桥敏,周丽.不同钢纤维掺量及黏结剂对混凝土性能的影响[J].中外公路,2018,38(5):267-270.

收稿日期:2022-08-20(修改稿)

作者简介:尚文勇,男,大学本科,高级工程师.E-mail:swy716000@163.com