

· 综 合 ·



# 新型金属化改性法对橡胶混凝土性能的影响

刘磊<sup>1</sup>, 王成启<sup>2</sup>, 夏俊桥<sup>1</sup>, 张晓乐<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032; 2. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 金属化改性法是一种全新的橡胶改性方法。采用抗压强度、抗折强度、荷载-挠度试验, 研究金属化改性法对橡胶混凝土力学性能、弯曲韧性的改性效果, 并对比分析金属化改性法与丁苯胶乳、偶联剂等传统改性法的改性效果。结果表明, 金属化改性法能够大幅度提高混凝土的弯曲韧性; 金属化改性后的橡胶混凝土跨中挠度较未掺橡胶的混凝土增长 530%, 相比未改性橡胶混凝土 28 d 抗压强度提升 40%、抗折强度提升 25% 左右; 金属化改性法在混凝土力学性能、弯曲变形等方面的改性效果优于丁苯胶乳、偶联剂等传统改性法, 跨中挠度增长达 320%, 28 d 抗压强度衰减率降低 50%~75%。

**关键词:** 橡胶混凝土; 金属化; 改性

**中图分类号:** TU 528; U 654

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)03-0030-05

## Effect of new metallization modification method on property of rubber concrete

LIU Lei<sup>1</sup>, WANG Cheng-qi<sup>2</sup>, XIA Jun-qiao<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-le<sup>2</sup>

(1. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Academy of Science Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The metallization modification method is a new method of rubber concrete modification. We use compressive strength, flexural strength, and load-deflection tests to study the modification effect of mechanical, bending, and deflection properties of rubber concrete by the metallization modification method, and compare and analyze the modification effect between the metallization modification method and the traditional modification methods such as styrene-butadiene latex and coupling agent. The results show that the metallization modification method can greatly improve the bending toughness of concrete. The mid-span deflection of metallization modification rubber concrete grows 530% than that of unmixed rubber concrete, compares to the unmodified rubber concrete 28 d compressive strength increases by 40%, and flexural strength increases by about 25%. The metallization modification method in the mechanical property of concrete, bending deformation, and other aspects of the modification is better than the butyl rubber latex, coupling agent, and other traditional modification methods. The mid-span deflection increases by up to 320%, 28 d compressive strength decay rate decreases by about 50% to 75%.

**Keywords:** rubber concrete; metallization; modification

社会经济的高速运转产生了大量的废弃橡胶制品, 若直接焚烧、填埋会造成严重的环境污染<sup>[1]</sup>。橡胶是一种公认的大弹性、低应力的高分子材料。众多研究结果显示, 橡胶作为混凝土集料能够明显改善混凝土的表面刚度、弯曲韧性等性能。但橡胶与无机材料之间存在天然的黏结力

不足的问题, 橡胶在改善混凝土弯曲韧性、弹性模量的同时会对强度产生较大的负面作用。因此, 将废弃橡胶进行处理再利用依然是处理橡胶废弃制品的重要研究方向<sup>[2-3]</sup>, 橡胶混凝土的研究重点一直是橡胶的改性方法及改性剂。

目前橡胶混凝土常用的改性处理方法有水洗

法、强氧化物浸泡法、偶联剂表面处理法等,不同改性方式的方法理论都是基于提高橡胶表面粗糙度,从而提高橡胶和水泥基之间的黏结面积或者通过改性剂改变橡胶表面状态以提高橡胶与混凝土之间的黏结力。但上述方式的改性效果难以取得突破性进展,仅局部降低了混凝土强度的负面作用,改性过程操作复杂且不能改善橡胶对混凝土工作性的影响<sup>[4-5]</sup>。因此,本文从橡胶改性的黏结力入手,放弃改变橡胶的表面状态转而通过搭桥的方式引入铁粉作为过渡界面,改变橡胶和水泥基之间的黏结界面结构,从而提高水泥基材料与橡胶之间的黏结力,最终提高橡胶混凝土的性能。

本文通过分析金属化改性后橡胶混凝土的抗压强度、抗折强度、荷载-跨中挠度等性能的影响,并对比不同改性方式的改性效果。研究成果对橡胶混凝土的改性研究具有一定的参考价值和指导意义,将促进其在水运工程码头、地下管道等需要承受动荷载、弯曲变形较大等部位的应用深度,有望大幅提高橡胶混凝土耐久性和经济寿命,具有广泛的应用价值。

1 原材料及试验方法

1.1 试验原材料

水泥为上海奉贤海螺水泥厂 P·O 42.5 水泥;外加剂为苏州兴邦 PC1021 高性能聚羧酸粉体减水剂,减水率 30%;橡胶为粒径 3~6 mm 的废弃轮胎胶;铁粉为深圳市创辉磁材厂生产的 98% 纯度铁粉,粒度 300 目;砂为细度模数为 2.45 的河砂;石子为玄武岩碎石,粒径 5~25 mm;环氧树脂为上海证玺材料科技有限公司生产的 ZX-6021 型水性环氧树脂,固化剂为非离子型水溶性环氧树脂固化剂(型号 ZX-6010)。

1.2 试验方法

1.2.1 力学性能试验

根据 GB 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行混凝土抗压强度、抗折强度试验。

1.2.2 弯曲韧性试验

根据 JGJ/T 221—2010《纤维混凝土应用技术规程》进行混凝土弯曲韧性试验。

2 试验方案设计

2.1 橡胶金属化法

橡胶金属化法的核心是用合适配比的环氧树脂与铁粉复合,将铁粉黏结在橡胶表面,进而提高橡胶-水泥基材料的界面黏结能力。具体步骤为:1) 按照配料表配制出一定浓度的环氧树脂,并用水进行适当的稀释后待用;2) 将橡胶与适量铁粉进行干混合搅拌,直至搅拌均匀;3) 将稀释后的环氧树脂加入橡胶与铁粉的混合物进行强烈搅拌;4) 搅拌均匀后,在混合物中加入过量水泥进行强烈搅拌直至橡胶颗粒彼此分散开;5) 将分散后的金属化橡胶进行筛分并静置 28 d 进行混凝土试验。

在金属化操作过程中须准确设计橡胶、铁粉混合物和环氧树脂的比例关系。如果比例失调则会引起橡胶和铁粉无法有效黏结或金属橡胶混合物中出现明水,不利于后期的筛分操作。金属化橡胶的成品见图 1。



图1 金属化橡胶成品

2.2 混凝土配合比设计

橡胶为等体积取代河砂,取代率为 30%。根据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》进行基准配合比设计,经实验室优化后得出基准配合比及橡胶混凝土配合比,见表 1。

表 1 基准配合比及橡胶混凝土配合比

基材	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	橡胶/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )
基准	483.3	716.7	1 075	0	145
橡胶混凝土	483.3	501.69	1 075	83.85	145

2.3 混凝土试验方案设计

传统改性剂一般选择氢氧化钠、乳液、环氧树脂及偶联剂等，由于橡胶成分的复杂性造成不同学者对上述改性剂的研究结果存在一定的差异，这也是传统改性方式的弊端所在，不具有良好的适应性。本文选择研究较多的丁苯胶乳和钛酸酯偶联剂，与金属化改性法进行对比试验，方案见表 2。

表 2 不同改性剂掺量的试验方案

方案 编号	丁苯 胶乳/%	钛酸酯 偶联剂/%	橡胶/ kg	金属 橡胶/kg
JZ-0	0	0	0	0
XJ-1	0	0	83.85	0
DB-2	1	0	83.85	0
OL-3	0	1	83.85	0
JS-4	0	0	0	83.85

注：丁苯胶乳、钛酸酯偶联剂掺量为所掺橡胶的质量百分比；金属橡胶质量为改性后的质量。

3 结果与分析

3.1 金属化法对抗压强度改性效果的对比分析

不同改性方法下橡胶混凝土的抗压强度见图 2。可以看出，加入橡胶后混凝土强度相比基准组有明显的下降。与目前在橡胶改性效果方面的研究结果有一定差异的是，李悦等<sup>[6]</sup>及李靖<sup>[7]</sup>都提出，偶联剂是有效提升橡胶混凝土抗压强度的方法之一；但本文在加入丁苯胶乳和偶联剂后并不能提升橡胶混凝土的抗压强度，反而会进一步降低抗压强度。其中 XJ-1 普通橡胶混凝土强度下降率为 22%，DB-2 加入丁苯胶乳后强度下降率达到了 28%，而偶联剂 OL-3 组下降率更是达到了 40%。可能是因为丁苯胶乳和偶联剂加入后会引引起混凝土含气量提升过大，降低了混凝土密实性，从而损害了混凝土抗压强度。这也是很多论文中提到橡胶混凝土偶联剂等改性需要搭配消泡剂使用的原因。

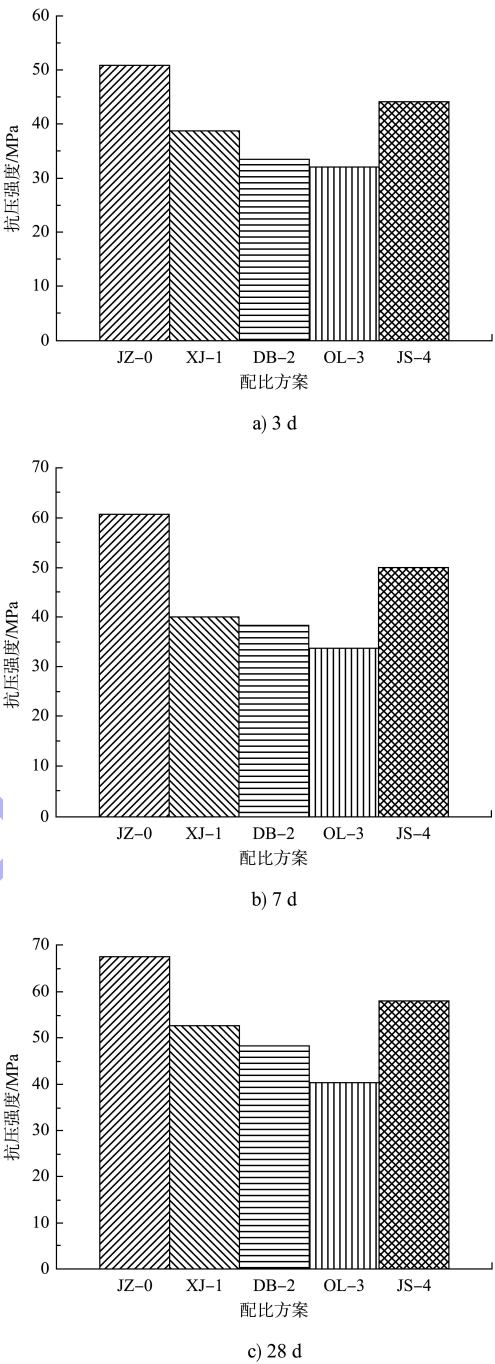


图 2 不同改性方法下橡胶混凝土抗压强度

对比 4 种改性方法可知，金属化法改性后的混凝土抗压强度相对于传统改性方式得到了明显提高，相比未改性橡胶混凝土 28 d 强度下降率从 22%降到了 14%左右，相比传统改性方式，橡胶对强度的负面影响降低了 50%~75%。由此可见，金属化改性方法在抗压强度方面的改性效果相对其他几种传统改性方式有明显的优势。金属化法改性后橡胶混凝土强度出现大幅度提升的主要原因是由于金属铁粉在无机材料水泥基和有机材料



橡胶之间起到了一个很好的桥梁作用, 本文将其称之为“黏结桥”。金属与水泥基之间的黏结力要大于橡胶和水泥基之间的黏结力, 金属化法利用环氧树脂将微小的铁粉黏结于橡胶颗粒表面, 从而改变了橡胶的表面物质。此时橡胶混凝土中的黏结界面由橡胶-水泥基转变为橡胶-环氧树脂-铁粉-水泥基, 大致的界面结构如图 3 所示。

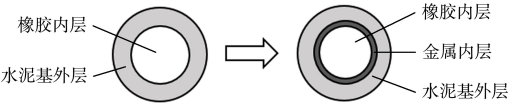
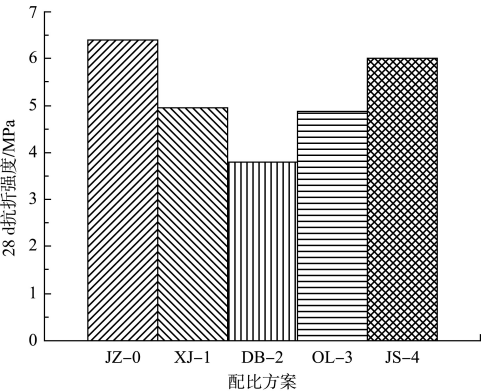


图 3 改性前后橡胶混凝土界面结构

因此, 改性后的橡胶颗粒通过环氧树脂和铁粉的“黏结桥”将水泥基材料牢牢地黏结在橡胶颗粒的表面, 这个黏结界面的黏结力要大于橡胶-水泥基材料界面的黏结力, 因此金属化橡胶混凝土的抗压强度会得到大幅提高。但相对于强度更高的水泥基材料而言, 橡胶颗粒属于低应力材料, 其成为混凝土中的薄弱点。在橡胶吸收能量的同时, 橡胶颗粒四周的水泥基材料会伴随橡胶颗粒的变形而发生脆裂, 这便导致金属化法改性虽能有效提高橡胶混凝土抗压强度, 但仍然低于未掺橡胶的空白组。

3.2 金属化法对抗折强度改性效果的对比分析

由 3.1 节的分析可知, 金属化法改性后橡胶与水泥基材料之间的黏结力提高而引起抗压强度提高, 但橡胶颗粒的低应力特性导致金属化改性橡胶混凝土并不能获得优于未掺橡胶的混凝土强度性能, 这种作用在橡胶混凝土的抗折强度试验中一样得以体现, 具体见图 4。



a) 抗折强度

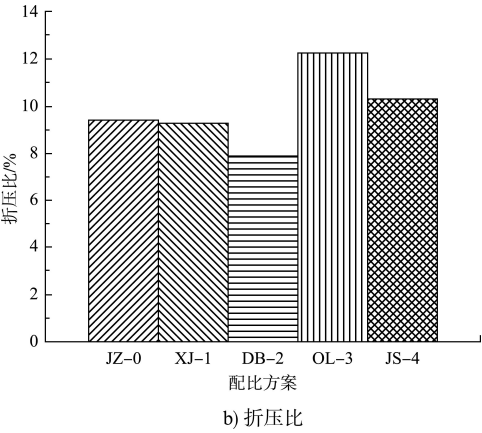


图 4 不同改性方法下橡胶混凝土抗折强度和折压比

由图 4a) 可知, 金属化改性橡胶混凝土抗折强度高于丁苯胶乳、偶联剂及未改性橡胶混凝土, 但略低于未掺橡胶的混凝土, 抗折强度达到 6 MPa, 略低于未掺橡胶的混凝土的 6.3 MPa。由图 4b) 可知, 金属化橡胶混凝土折压比为 10% 左右, 略低于偶联剂改性效果、略优于其他各组。但偶联剂组抗折强度实测值是降低的, 其折压比较大是以大幅降低抗压强度来达到的, 这不是工程实际需要的结果, 工程中希望在少牺牲或不牺牲强度的情况下达到提高抗折强度及变形能力的积极结果, 为此本文进行了弯曲变形试验。

3.3 金属化法对弯曲韧性改性效果的对比分析

折压比只能在一定程度上反映混凝土的弯曲韧性及抗裂性能, 并不能真正体现混凝土弯曲变形能力, 因此进行了混凝土弯曲韧性试验, 通过对比不同改性条件下的混凝土荷载-挠度来表征混凝土弯曲变形能力, 见图 5。

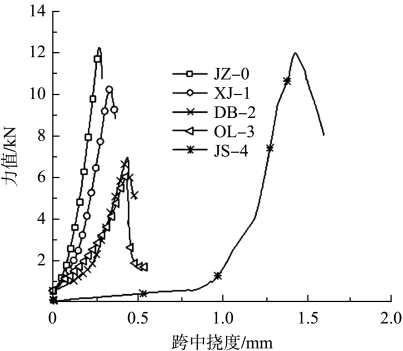


图 5 橡胶混凝土荷载-跨中挠度试验结果

可以看出, 未掺橡胶的基准组跨中挠度极限值最小, 约为 0.27 mm。加入橡胶后由于橡胶的

变形能够吸收一部分能量,降低了混凝土的脆性,跨中挠度出现一定程度的提高,其中 XJ-1、DB-2、OL-3、JS-4 组的跨中挠度分别为 0.34、0.43、0.44、1.43 mm。JS-4 组的跨中挠度增长幅度达到 320%~530%,改性效果十分明显。然而,加入丁苯胶乳和偶联剂的橡胶混凝土的跨中挠度虽然出现较为明显的增长,但是其抗压性能也出现较大的衰减,这在橡胶混凝土的抗压强度及抗折强度中已经得到验证。图 5 中 JS-4 组为金属化法改性后的橡胶混凝土试验组,其跨中挠度出现大幅度提高,并且最大应力值相对普通改性橡胶混凝土也出现一定程度的提高。原因在于,金属改性法改变了橡胶颗粒和水泥基的黏结界面结构,增大界面黏结力,因此在提高跨中挠度的过程中降低橡胶对混凝土强度的负面影响。而未改性或传统改性的橡胶颗粒与水泥基材料之间的黏结力十分薄弱,在混凝土发生弯曲变形的时候,橡胶颗粒与水泥基材料之间很快发生剥离,每一个剥离点都是混凝土的薄弱点。因此可以看到,虽然橡胶增大了混凝土的弯曲变形能力,但混凝土强度发生了较大程度的衰减,而金属化改性橡胶混凝土在获得更好的弯曲变形能力的情况下,对混凝土力学性能的负面影响较小,获得较好的改性效果。

综上所述,金属改性橡胶混凝土能够大幅度降低橡胶对混凝土力学性能的负面影响,并大幅度提高混凝土的变形能力,增大跨中挠度值,综合改性效果要优于未改性或传统改性方式下的混凝土。

#### 4 结论

1) 橡胶可以改善混凝土的弯曲韧性,但会大幅度降低混凝土力学强度。

2) 单纯的丁苯胶乳、偶联剂可以一定程度改

善混凝土弯曲韧性,但会增大橡胶对混凝土力学性能的负面影响,使用此改性法时需要配合其他手段共同使用。

3) 金属化改性法能够大幅度改善橡胶混凝土的弯曲韧性并明显降低橡胶对混凝土抗压强度、抗折强度的负面影响,28 d 抗压强度降低率从 22%降到 14%,跨中挠度增长幅度最大达到 530%。

4) 金属化法改性橡胶混凝土在弯曲韧性、改性效果要优于丁苯胶乳或偶联剂等传统改性法,28d 抗压强度衰减率降低 50%~75%,跨中挠度增长幅度约为 320%。

5) 金属化法改性效果综合较优,但目前对黏结剂选型、金属粉与橡胶的搭配比例以及金属粉与黏结剂的配比等方面还有待进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 何亮,黄勇,冯畅,等.橡胶混凝土性能及胶粉表面改性研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(8):2483-2489,2496.
- [2] 郭庆,马伍平.预处理方式对橡胶混凝土硬化性能的影响[J].广东建材,2015,31(8):17-19,20.
- [3] 陈振伟,胡卫国.不同橡胶处理方式对改性水泥混凝土力学性能影响[J].中外公路,2016,36(5):258-261.
- [4] 田艳凤,李赞成,高艳青.废旧橡胶粉改性混凝土渗透性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2015(9):86-89.
- [5] 王江,高久平,原通鹏,等.橡胶粉水泥混凝土物理力学性能试验研究[J].低碳世界,2017(3):201-202.
- [6] 李靖,王宝民.掺橡胶水泥混凝土橡胶颗粒界面的处理研究[C]//中国硅酸盐学会.2009 中国商品混凝土可持续发展论坛暨第六届全国商品混凝土技术与管理交流大会论文集.北京:[出版者不详],2009:128-132.
- [7] 李悦.橡胶集料水泥砂浆和混凝土的性能研究[J].混凝土,2006(6):45-48.

(本文编辑 王璁)