



橡胶粉对纤维增强水泥基复合材料力学性能的影响

闫佳欣, 张 雷, 李治龙, 鲁 毅

(中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:为明确橡胶粉掺量对工程用水泥基复合材料(ECC)力学性能的影响,为纤维增强水泥基复合材料的制备优化提供理论依据,文章通过抗压试验、单轴拉伸试验、弯曲试验,分析橡胶粉掺量(0~30%)对ECC抗压强度、极限拉伸应力、极限拉伸应变及弯曲位移的作用。研究发现:橡胶粉掺量上升会降低ECC抗压强度;橡胶粉可提升国产ECC延性,掺橡胶粉的PVA-ECC受拉呈现应变硬化与多缝开裂,拉伸应变显著提高,且能增强弯曲韧性(弯曲位移增大);当橡胶粉掺量为10%时,ECC力学性能最优。本研究探究不同橡胶粉掺量对ECC力学性能的影响规律,为相关材料制备提供理论支撑。

关键词:PVA纤维; 橡胶粉; 纤维增强水泥基复合材料; 力学性能; 粉煤灰

中图分类号:TQ172

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)10-0016-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.10.120

Impact of rubber powder on the mechanical properties of engineering cementitious composites

YAN Jiaxin, ZHANG Lei, LI Zhilong, LU Yi

(College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to clarify the effect of rubber powder contents on mechanical properties of engineered cementitious composites (ECC), so as to provide theoretical basis for preparation of fiber reinforced cementitious composite, the effects of different rubber powder contents (0~30%) on the mechanical properties of ECC are analyzed through compression tests, uniaxial tensile tests, and bending tests, including compressive strength, ultimate tensile stress, ultimate tensile strain, and bending displacement. The research shows that: 1) The increase in rubber powder content will reduce the compressive strength of ECC. 2) The incorporation of rubber powder helps to improve the ductility of domestic ECC. PVA-ECC with rubber powder shows obvious strain hardening and multiple crack propagation phenomena under tension, and its tensile strain is significantly improved. The incorporation of rubber powder improves the flexural toughness of PVA-ECC, which is manifested by the continuous increase of bending displacement. 3) When the rubber powder content is 10%, ECC has the best mechanical properties. This study explores the influence law of different rubber powder contents on the mechanical properties of ECC, which can provide theoretical basis and practical guidance for the preparation of fiber-reinforced cement-based composites.

Key words: PVA fibers; rubber powder; fiber-reinforced cementitious composite; mechanical properties; fly ash

伴随着我国工业化进展加快,汽车数量不断增长,废弃轮胎的回收率与日俱增。废旧橡胶作为一种难以生物降解的材料,其堆积不仅会占用大量土

地,而且橡胶在自然环境中分解缓慢,可能释放有害物质,构成严重的“黑色污染”。因此,探究废旧橡胶的再次利用已成为推动绿色发展的重要举措。

收稿日期:2025-04-14

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ41078)

作者简介:闫佳欣(2000—),女,硕士研究生,从事土木工程材料研究。

随着人们环保意识不断增强, 如何恰当处理废旧橡胶正在成为解决环境污染的新问题。将回收的橡胶粉替代细骨料掺入水泥基材料中, 这一举措, 既为废旧橡胶找到了新的“归宿”, 能有效解决环境污染问题, 又能依靠橡胶粉自身较好的吸能变形能力, 有效提高材料的整体力学性能。目前, 已有部分学者对废旧橡胶与混凝土结合进行了相关研究。曾磊等^[1]研究发现, 伴随着橡胶粉掺量的不断提升, 使用聚丙烯纤维所制备的橡胶混凝土, 其抗氯离子侵蚀性能不断提升。薛守宁等^[2]基于最紧密堆积模型, 设计出高致密橡胶混凝土, 其各项力学性能皆优于普通橡胶混凝土。

高延性水泥基复合材料(engineering cementitious composites, ECC)由于优秀的拉伸延展性, 断裂性和自愈性得到广泛研究。已有学者对 ECC 的断裂性^[3]和自愈性^[4]研究进展进行了总结。在 ECC 制备中, 目前广为使用的是日本生产的聚乙烯(PE)纤维和聚乙烯醇(PVA)纤维, 该纤维虽然性能优异, 但材料的高成本对大力推广 ECC 材料有所限制。因此, 找到一种既兼备成本效益又有着高性能的此纤维替代品已成为当前 ECC 研究中一个重要方向, 这促使许多学者开始深入国产材料的研究。例如, 石玉成等^[5]使用国产 PE 纤维和 PVA 纤维的混掺制备 ECC, 所制备的材料仍拥有多裂纹开裂及应变硬化特性, 这一发现证明了国产 ECC 的替代可能性。然而, 与日本 PVA 纤维制备的 ECC 材料相比, 当前国产 PVA - ECC 在应变硬化调控方面仍存在显著差异。这种差异主要体现在裂缝控制力上, 因此, 优化国产 PVA - ECC 的性能已成为提升 ECC 材料综合性能的重要方向。

根据以往研究, 贺绍华等^[6-7]对橡胶粉制备下的 PE - ECC 进行研究得到橡胶粉的加入对材料吸能作用有着显著影响, 因此对 ECC 抗冲击性能有着提升作用。颜岩等^[8]对高橡胶下的水泥基材料进行了抗冻性能研究, 最终结果显示, 高掺量橡胶集料水泥基材料的抗冻性能比普通水泥基材料更佳; 此外, 橡胶粉的良好弹性促进了水泥基体的弹性模量、变形性能及抗裂性能提升。

然而, 前人研究橡胶粉改性 ECC 时未考虑经济性, 多以 PE 纤维为原料。鉴于此, 本研究将在国产 PVA 纤维制备的 ECC 中, 掺入不同掺量橡胶粉, 通过抗压、单轴拉伸、四点弯曲试验, 探究其对 PVA - ECC 力学性能影响并确定最佳掺量, 寻找合理橡胶粉掺量提升 PVA - ECC 延性, 明晰橡胶粉改善纤维与基体界面黏结、“缓冲”“桥接”、吸能分散应力、延缓裂缝扩展以增韧性延性的作用。

1 试验材料和方法

1.1 原材料

普通硅酸盐水泥, 等级为 P·O42.5; I 级粉煤灰, 产于广东汕头华能海门电厂; 橡胶粉, 产于巩义龙泽净水材料厂, 粒径为 0.38 mm, 性能密度为 1 050 kg/m³; PVA 纤维, 长度为 12 mm, 直径为 39 μm, 弹性模量为 40 GPa, 抗拉强度为 1 600 MPa; 碳酸钙晶须呈纤维状; 石英砂粒径范围在 0.109 ~ 0.212 mm。本试验中水泥、粉煤灰和稻壳灰主要化学成分组成如表 1 所示, 纤维基本参数如表 2 所示。本试验中 ECC 的配合比如表 3 所示, 橡胶粉、PVA 纤维、石英砂和碳酸钙晶须为体积比, 其他参数均为与水泥的质量比。

表 1 主要材料的主要化学组成(质量分数)

材料名称	CaO	Si ₂ O	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	CO ₂	%
水泥	62.55	21.89	5.58	2.89	2.86	0.87	2.26	0.83	0.19	—	
粉煤灰	7.56	48.42	29.93	1.65	6.83	1.24	1.27	1.32	1.72	—	
稻壳灰	0.51	89.56	0.19	0.30	0.21	—	0.21	—	—	5.73	

表 2 纤维性能参数

纤维类别	长度/mm	直径/μm	密度/(g·cm ⁻³)	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
PVA 纤维	12.00	39	1.3	1 550	40
碳酸钙晶须	0.02 ~ 0.03	1 ~ 2	2.8	3 000 ~ 6 000	410 ~ 710

表 3 ECC 的优化配合比 kg/m^3

编号	水泥	粉煤灰	水	碳酸钙晶须	石英砂	橡胶粉	PVA 纤维
E1	382	443	339	28	839	0	21
E2	382	443	339	28	805	34	21
E3	382	443	339	28	771	68	21
E4	382	443	339	28	737	102	21

1.2 ECC 的制备

(1) 在干燥的状态下将称重后的石英砂(橡胶粉)、水泥、粉煤灰等材料倒入搅拌桶中,采用某 B20-W 型加强搅拌机低速条件下搅拌 3 min,使其被搅拌为均匀混合物。

(2) 将水和减水剂搅拌后倒入搅拌机中,搅拌 2 min,然后加入国产 PVA 纤维后搅拌 4 min,使得纤维与 ECC 浆体混合均匀。

(3) 将浆体装入涂油的模具当中,抹平后开启振动台进行振捣,待振捣后在其表面覆盖保鲜膜以保持浆体湿度。

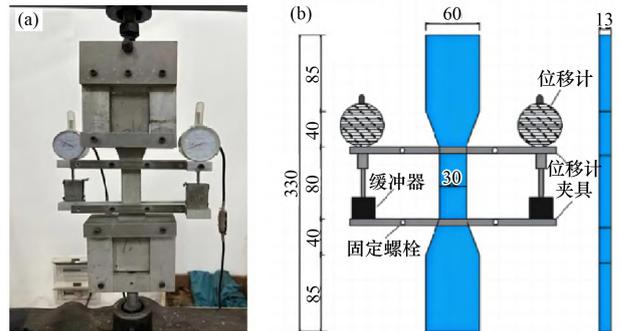
(4) 置于干燥环境下满 24 h 再脱模,并将脱模之后的 ECC 在标准养护箱的要求环境下进行养护 28 d 龄期后取出试件。

1.3 试验方法

抗压试验按照《韧性纤维增强水泥基复合材料力学性能标准试验方法》(JC/T 2461—2018)^[9]中规定的步骤进行。试件的尺寸为各边长为 70.7 mm 的立方体,每个配合比制备 3 个以上样品。

单轴拉伸试验采用“狗骨形”试件,符合日本土木工程学会(JSCE)^[10]制定的试验标准。每个配合比准备 3 个样品,并使用 CMT5105 万能试验机测试其拉伸性能,试样的尺寸和加载装置如图 1 所示。

ECC 的四点弯曲试验参照《玻璃纤维增强水泥性能实验方法》^[11]弯曲性能测试方法进行,试验装置如图 2(a) 所示。试件尺寸如图 2(b) 所示,



(a) 加载设备; (b) 试件尺寸

图 1 单轴拉伸装置及试件尺寸 mm

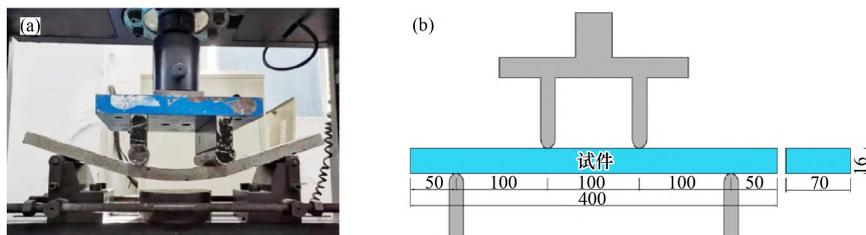
设备选用位移控制,其加载速率保持在 1 mm/min。每组配合比取 3 个有效数据。

2 结果与讨论

2.1 抗压性能

不同橡胶粉掺量下 ECC 的抗压强度如图 3 所示。伴随着橡胶粉在 ECC 中掺量的增加, ECC 试件的抗压强度呈现下降趋势。具体而言,未加入橡胶粉的 E1 配合比下 ECC 的抗压强度最高,达到了 39.24 MPa;掺入 10% 橡胶粉的 E2 组试件在标准养护 28 d 后强度为 34.19 MPa; E3 组(20% 掺量)降至 30.39 MPa; E4 组(30% 掺量)进一步降至 28.74 MPa。与前一组配合比相比,强度较前一组依次降低 14.77%、11.25% 和 5.74%。根据图 3 可以明显看出,当橡胶粉掺量从 0 增至 10% 时, ECC 的抗压强度下降幅度较明显;当掺量超过 10% 后,降幅趋缓并逐渐平缓。

橡胶粉掺入后抗压强度下降主要是以下两方面的原因: 1) 由于橡胶粉属于惰性材料,无火山灰作用,无法与水泥产生水化反应,因此橡胶粉在 ECC 中就只能起到填充作用,这导致水泥与橡胶粉接触的界面黏结相对薄弱。具体而言,橡胶表面的疏水性质会导致空气滞留在水泥浆中,从



(a) 加载设备; (b) 试件尺寸

图 2 薄板弯曲试件尺寸及加载装置

mm

而导致“空腔”现象, 该现象使得橡胶和水泥浆之间结合比较弱, 从而降低水泥基材料的强度^[12]。2) 当 ECC 受压时, 橡胶粉自身的刚度比较低会引起材料内部松动, 导致孔隙的不断增多和裂缝的逐步扩展, 这进一步加剧了 ECC 的抗压强度的不断递减。

根据图 3 可以得到, 即使橡胶粉的加入会使得 ECC 抗压强度有所下降, 但是所有配比的 ECC 的抗压强度均能够保持在 25 MPa 以上。这种现象主要因为橡胶颗粒与水泥基体的协同作用: 虽然橡胶粉的弹性模量小, 但其在 ECC 中能够形成的柔性网络结构, 有效分散了应力集中。此外, 橡胶粉表面的多孔结构能够吸附部分拌合水, 在养护过程中缓慢释放, 促进了水泥水化反应的持续进行。当橡胶粉掺量控制在 30% 以内时, 其对材料强度的削弱效应能够满足普通建筑结构的承载要求。

2.2 拉伸性能

不同橡胶粉掺量 ECC 的拉伸应力应变 - 曲线如图 4 所示, 拉伸强度和拉伸应变数据变化汇总如图 5 所示。由图 4 可知, 所有配合比下 ECC 的拉伸应力 - 应变曲线均包括线弹性阶段、应变硬化阶段以及破坏阶段^[13]。所有 ECC 试件都展现出

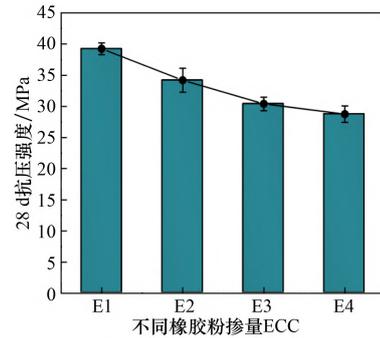
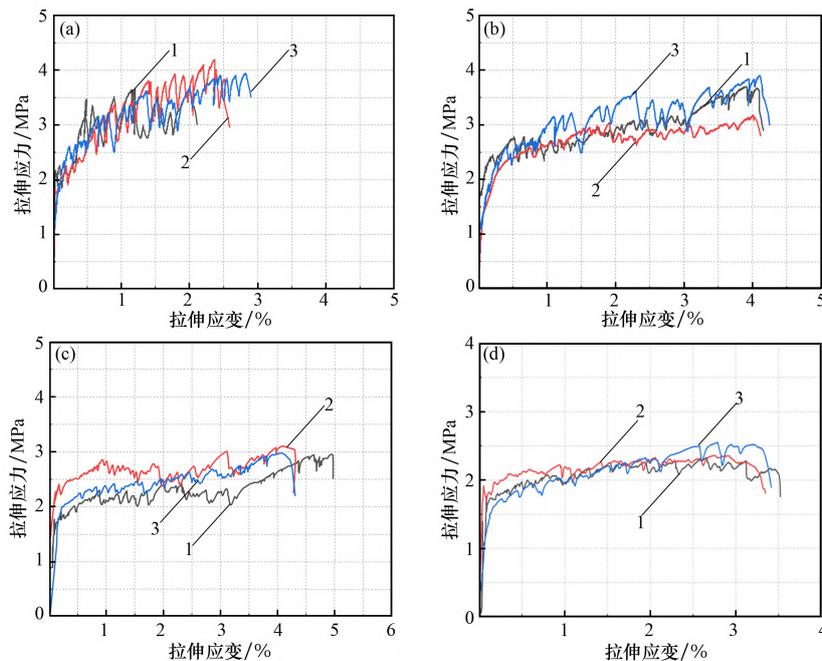


图 3 不同橡胶粉掺量的 ECC 抗压强度

应变硬化特性。相比之下, 未掺橡胶粉的 E1 试件在表面出现首条裂缝后, 裂缝的扩展速度较快, 最终迅速贯穿整个试件截面。而掺入橡胶粉的 ECC 试件, 在拉伸过程中, 表面会形成许多较为细小裂缝, 这些裂缝在拉伸力的作用下逐渐扩展成为断裂裂缝, 试件破坏。

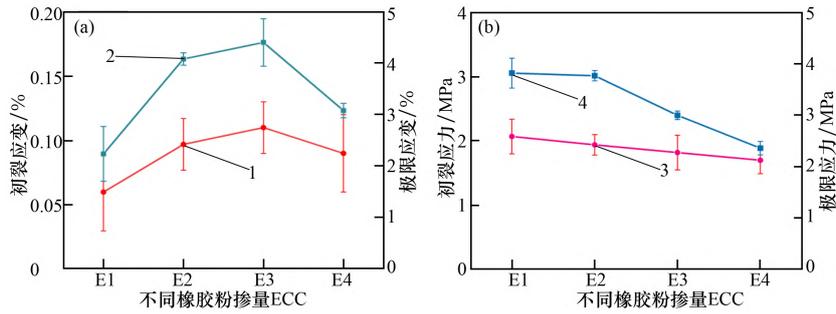
据图 5 可知, 橡胶粉的加入使 ECC 试件的初裂拉伸应变和极限拉伸应变先上升后下降, 而初裂拉伸应力和极限拉伸应力不断下降。相较于未加入橡胶粉的 E1 组, E2, E3 组的拉伸应变分别为 4.08% 和 4.40%, 分别提升了 82.14% 和 96.42%, 这表明试件抵抗变形的能力得到了显著增强。在拉伸应力方面, E2, E3 组分别为 3.77 MPa



掺量/%: (a) 0; (b) 10; (c) 20; (d) 30

1—试件 1; 2—试件 2; 3—试件 3。

图 4 不同橡胶粉掺量 ECC 的拉伸应力应变 - 曲线



(a) 拉伸应变; (b) 拉伸应力

1—初裂应变; 2—极限应变; 3—初裂应力; 4—极限应力。

图 5 不同橡胶粉掺量 ECC 的拉伸性能

和 2.875 MPa,与 E1 组相比,分别下降了 0.8% 和 24.73%。这些数据均说明一定掺量下的橡胶粉对拉伸性能的提升。进一步对比 E3 组和 E4 组, E4 组的极限拉伸应变和对应下的应力分别降低了 26.6% 和 26.7%,这说明当橡胶粉的掺量大于 30% 下,对 ECC 拉伸性能有一定削弱作用。综合图 5 分析,当橡胶粉掺量为 10% 时, ECC 试件的极限拉伸应变提高明显,同时极限拉伸应力的下降幅度相对较小,整体拉伸性能最佳。

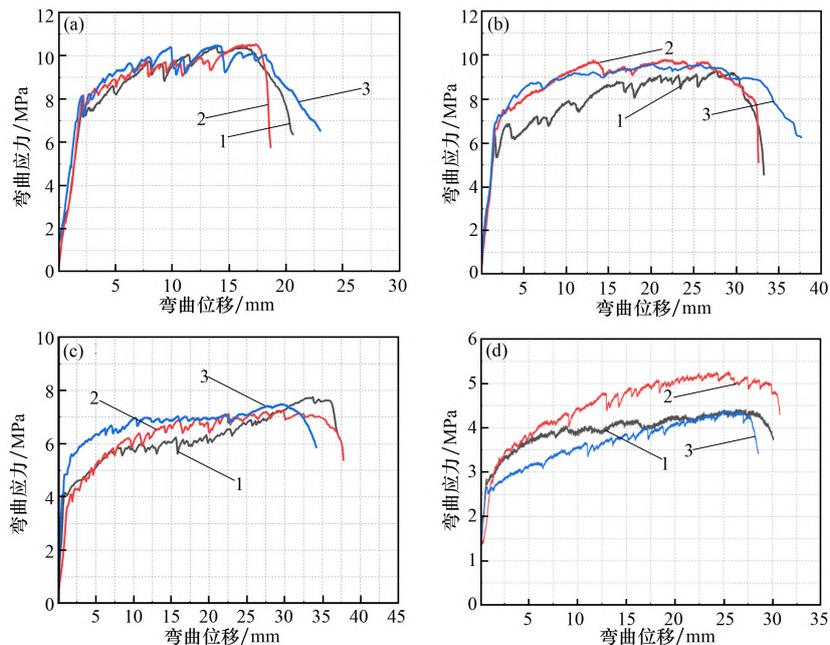
产生此现象的原因是加入橡胶粉后 ECC 的整体弹性模量降低,促进多缝开裂现象的产生,而 ECC 高延性的主要特征是多缝开裂现象,从而有助于 ECC 拉伸应变的提高。ECC 拉伸应力下降的

原因与抗压强度下降的原因类似。当 ECC 的橡胶粉掺量达到 30%,拉伸性能整体又有所下降是因为当橡胶粉掺量过大后基体强度会过度损失,难以形成有效的应力传递结构。并且,纤维与基体间的界面结合强度不足以支撑桥接应力传递,当外荷载超过界面黏结强度时,纤维出现明显的滑移破坏现象,界面的应力难以传递。

2.3 弯曲性能

不同橡胶粉掺量对应的 ECC 强度-位移曲线如图 6 所示。由图 6 可知,橡胶粉掺入后各个配合比都展现出明显的延性破坏特征。

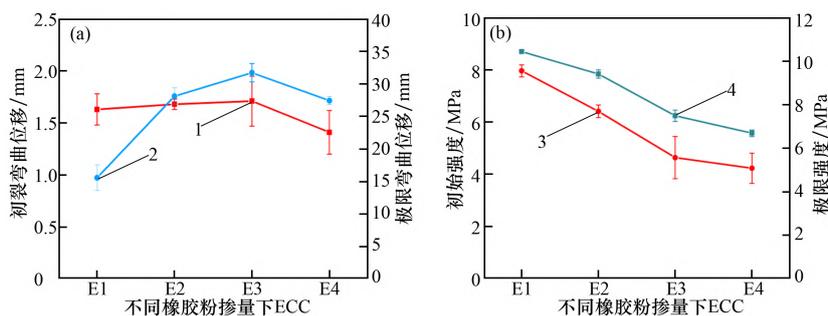
ECC 试件对应下的弯曲位移、弯曲强度变化趋势及具体数值如图 7 所示。



掺量/%: (a) 0; (b) 10; (c) 20; (d) 30

1—试件 1; 2—试件 2; 3—试件 3。

图 6 不同橡胶粉掺量下 ECC 的弯曲应力-位移曲线



(a) 弯曲位移; (b) 弯曲强度

1—始裂弯曲位移; 2—极限弯曲位移; 3—初始强度; 4—极限强度。

图7 不同橡胶粉掺量下ECC的弯曲性能

由图7可知, ECC的弯曲位移随着橡胶粉掺量的增加呈现出先上升后下降的规律, 而弯曲强度则不断降低。具体分析可知, 未掺入橡胶粉的E1组, 其极限弯曲位移为15.57 mm, 极限弯曲应力为14.44 MPa。与E1组相比, E2组和E3组的极限弯曲位移分别提高了80.6%和103.79%, 而极限弯曲强度则分别降低了9.87%和28.26%。然而, 当橡胶粉掺量进一步增大, 所带来的负面效应开始显现, E4组的弯曲性能明显下降。与E3组相比, E4组的极限弯曲位移下降了13.5%, 极限弯曲应力下降了10.68%。总体而言, E2组的弯曲性能表现最佳, 其极限弯曲位移可达到28.12 mm, 极限弯曲强度为9.41 MPa。

在弯曲试验过程中, ECC的韧性随着橡胶粉的增加得到增强是因为以下两个方面原因, 首先, 橡胶粉类似于微小弹簧, 能承担部分载荷, 可以有效阻止微裂缝的扩展以及延缓新裂缝的产生, 展现出明显的延性破坏特征^[14]。其次, 橡胶粉的加入使纤维的滑移硬化效果提高, 从而进一步减少纤维强度的损失^[15], 这不仅有利于多缝开裂, 而且对于提升ECC的韧性也具有正向作用。

2.4 ECC最优配比确定

为了直观地对比不同橡胶粉掺量在力学性能方面的优劣, 选取抗压强度、极限拉伸应变、极限拉伸应力、极限弯曲位移和极限弯曲应力这5个关键参数作为评价指标。运用五维评估法^[16-17]对E1、E2、E3和E4组进行综合分析, 结果如图8所示。

如图8所示, 橡胶粉加入后的E2、E3、E4组所包含的区域面积均超过了对照组E1组。分析

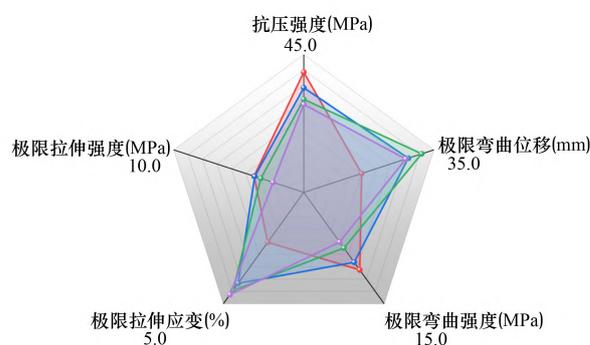


图8 ECC力学性能五维评估

E1的雷达图, 可知该配合比下ECC的抗压强度最佳, 拉伸应变和弯曲韧性较差; 与之相比, E2组的阴影区域形状较为规则, 这说明其力学性能的各个方面表现较为均衡, 不仅强度表现良好, 而且在拉伸应变和弯曲位移方面也展现出显著的优势。E2组试件的极限拉伸应变达到了4.08%, 弯曲位移达到了28.12 mm, 这些数据说明其良好的韧性。但是, E2组在抗压强度、极限拉伸强度和弯曲强度方面较低, 这也进一步说明了橡胶粉对ECC试件韧性提升和强度降低的作用。与E3相比, E4组的阴影区域面积明显减少, 这表明ECC中加入过量的橡胶粉后会导致综合力学性能下降。综合考虑雷达图中的各项指标, E2组(橡胶粉掺量为10%)的国产ECC在应变与应力方面表现较为均衡, 其综合力学性能更为优越。

3 结论

(1) 随着橡胶粉掺量不断增多, 国产ECC的抗压强度持续降低。根据普通建筑工程对材料强度的实际需求, 橡胶粉掺量应控制在20%以内。

(2) 橡胶粉的掺入对国产ECC的延性改善作

用明显。橡胶改性 PVA - ECC 在受拉作用下展现出明显的应变硬化特征和多裂缝发展现象,其拉伸延性得到提升。弯曲韧性测试中,材料的弯曲位移随着橡胶粉掺量增加而持续增大,表明橡胶粉掺入对 ECC 抗变形能力有积极作用。

(3) 当橡胶粉掺量为 10% 时, ECC 材料的综合力学性能达到最优水平。该配比下材料抗压强度为 34.19 MPa, 极限拉伸应变达 4.08%, 对应拉伸应力为 3.77 MPa; 弯曲试验中测得极限弯曲位移 28.12 mm, 对应的弯曲强度为 9.41 MPa。

参考文献:

- [1] 曾磊,胡志惠. 聚丙烯纤维橡胶混凝土抗氯离子侵蚀性能研究[J/OL]. 长江大学学报(自然科学版), 1-10[2025-05-08]. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJDFTotal-CJDL20250413001.htm>.
- [2] 薛守宁,董江峰,朱忠平,等. 高致密高强橡胶混凝土的力学性能[J]. 南昌大学学报(工科版), 2024, 46(1):76-82.
- [3] 郭鑫,任建伟. PE - ECC 断裂性能试验研究[J]. 工程建设, 2022, 54(11):8-12.
- [4] 郭小盛,马凯,周珊珊. 纤维增强水泥基复合材料自愈合性能研究进展[J]. 工程建设, 2023, 55(1):6-11.
- [5] 石玉成,李贺东. 国产 PVA/PE 纤维混杂超高韧性水泥基复合材料拉压性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(4):111-115.
- [6] 贺绍华,李栩铭,邱逸涛,等. 华南地区湿热环境下工程水泥基复合材料配合比优化及抗压尺寸效应研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(3):164-170;226.
- [7] 贺绍华,陈焕伟,江政,等. 橡胶粉改性聚乙烯纤维增强水泥基复合材料的静力和抗冲击性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6):167-174.
- [8] 颜岩,吴佩颖,张佳,等. 高掺量橡胶集料水泥基材料抗冻性试验研究[J]. 混凝土, 2023, (12):97-101.
- [9] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法(JC/T 2614 - 2018)[S]. 北京:中国建材工业出版社, 2018.
- [10] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks [S]. Japan:Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [11] 纤维混凝土试验方法标准:CECS 13:2009[S]. 北京:中国计划出版社, 2010.
- [12] 张静,张新宇,李婷婷,等. 高寒环境下橡胶粉掺入对水泥砂浆的抗冻性能影响[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1):111-118.
- [13] 刘宇闻,陈维,程志军,等. 轻质高延性地聚合物混凝土抗拉性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(12):1709-1715.
- [14] 韩洪宇,李少秋,魏武巍,等. 改性橡胶粉水泥稳定碎石抗裂性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11):4254-4260.
- [15] 占雪芳,王宪,严亨利,等. 无缝桥梁用掺橡胶粉 LEM - SHCC 路桥连接板拉伸性能及其应用[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5):104-118.
- [16] 卫垚鑫,李可,朱俊涛,等. 高强度绞线网 - ECC 加固 RC 柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(6):141-152.
- [17] 霍彦霖,孙华阳,刘天安,等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料抗弯冲击性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11):5086-5097.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国 - 知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。