

纤维掺量对再生混凝土力学性能影响的研究进展

杨金泽*, 张晓东#

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年2月11日; 录用日期: 2025年3月4日; 发布日期: 2025年3月13日

摘要

在工程项目中应用再生混凝土, 既保护了生态环境, 又提高了废弃混凝土的利用率, 满足了可持续发展的要求。但是, 再生混凝土在力学性能上可能不及普通混凝土。为了提高再生混凝土的性能, 增加其在工程领域中的普及和应用, 在使用钢纤维、植物纤维和矿物纤维材料方面取得了显著进展。这些材料掺入到再生混凝土中以改善其机械性能。研究表明: 1) 钢纤维提高了再生混凝土的强度、韧性和弹性模量; 2) 植物纤维混凝土具有轻质、环保、韧性高、保温性能好等优点, 但在碱性环境中会发生腐蚀, 同时植物纤维吸水能力强, 导致湿胀干缩现象; 3) 玄武岩纤维的制作成本相对较低, 掺入适量的玄武岩纤维可以改善再生混凝土的力学性能。

关键词

再生混凝土, 纤维, 强度, 力学性能

Research Progress on the Influence of Varying Fiber Contents on Mechanical Properties of Recycled Concrete

Jinze Yang*, Xiaodong Zhang#

School of Civil Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Feb. 11th, 2025; accepted: Mar. 4th, 2025; published: Mar. 13th, 2025

Abstract

Applying recycled concrete for engineered projects not only protects the ecological environment

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杨金泽, 张晓东. 纤维掺量对再生混凝土力学性能影响的研究进展[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 320-327.
DOI: 10.12677/hjce.2025.143037

but also improves the utilization rate of waste concrete to satisfy sustainable development requirements. However, the mechanical properties of recycled concrete are not as good as those of ordinary concrete. To enhance the former's performance and increase its popularity and application in engineering fields, notable advances have been made by using steel, synthetic, plant, and mineral fiber materials. These materials are added to recycled concrete to improve its mechanical properties. Studies have shown that 1) steel fibers have a distinct reinforcing effect and improve the strength, toughness, and elastic modulus of recycled concrete; 2) plant fiber concrete is lightweight and environmentally friendly and provides high toughness and good thermal insulation, but the fibers corrode in alkaline environments; in addition, plant fibers have high water absorption capacity, which leads to wet expansion and dry shrinkage phenomena, 3) the cost of basalt fiber, a mineral fiber, is relatively low, and a suitable basalt content can improve the mechanical properties of recycled concrete to a certain extent.

Keywords

Recycled Concrete, Fiber, Strength, Mechanical Property

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

近年来, 建筑垃圾已占城市垃圾总量的 30%~40%。据国家统计局报告, 建筑垃圾逐年增加, 对生态环境造成了不利的影响。其对环境造成的污染影响不容小觑。它包括水污染、土地污染和空气污染。此外, 处理建筑垃圾的成本非常高。在如此严峻的形势下, 建筑垃圾的回收利用显得尤为重要。一些建筑废料可以进一步加工, 生产再生混凝土。再生混凝土是利用废弃混凝土经处理后形成再生骨料的一种新型混凝土。它部分或完全取代了天然骨料, 如砂和石。然而, 这些回收骨料的机械性能相对较低, 通常表现出较高的孔隙率和吸水能力[1]。

再生混凝土在加载前会出现微裂纹和孔隙损伤。研究表明, 在混凝土中通过掺入纤维可以缓解这些问题, 使其满足工程建设项目的要求。因此, 在再生混凝土中掺入不同纤维的研究和探讨是必要的。

学者们对再生混凝土的机械性能与普通混凝土的机械性能进行了比较的研究, 例如抗压强度测试、弹性模量、干收缩率和蠕变变量等实验。在再生混凝土中掺入纤维可以显著改善其机械性能。然而, 关于不同纤维掺入再生混凝土的力学性能研究尚不充分, 仍需进一步补充和完善。

本文从纤维混凝土增强机理入手, 综述了不同种类纤维掺量对混凝土力学性能的影响, 并介绍了学者在相关领域内所取得的研究进展, 以促进再生混凝土的研究与应用。

2. 钢纤维

钢纤维具有良好的导热性, 可以促进水泥在硬化过程中更均匀地水化并改善纤维与混凝土之间界面粘合。在再生混凝土中加入钢纤维可以减轻再生骨料对混凝土力学和冲击性能的影响, 并进一步提高材料的强度和韧性。与柔性纤维的影响相比, 钢纤维对混凝土力学性能的影响更为显著[2]。

2.1. 抗压强度

从图 1 可以看出, 当钢纤维掺量从 0% 增加到 1.5% 时, 再生混凝土的抗压强度逐渐增加。

Gao 等[3]研究了纤维体积分数和钢纤维种类对钢纤维增强再生混凝土立方试样抗压强度的影响。当钢纤维体积掺量为 1.5% 时, 混凝土的抗压强度为 49.8 Mpa, 提高了 22.06%。Zhou 等[4]通过增加钎焊钢纤维的含量, 研究了再生混凝土的抗压强度和其他机械性能的变化, 并指出过量的钢纤维会降低混凝土的抗压强度。降低的主要原因如下: 1) 引入纤维会产生气泡; 2) 纤维的引入增加了混凝土的界面孔隙率, 这种增加与纤维的长度和体积成正比, 3) 由于纤维和骨料混合的均匀性不足而产生纤维团聚。在 Li 等[5]的研究中发现, 随着钢纤维掺量的增加, 混凝土的抗压强度逐渐增加。在李悦等[2]研究也发现了类似结论。

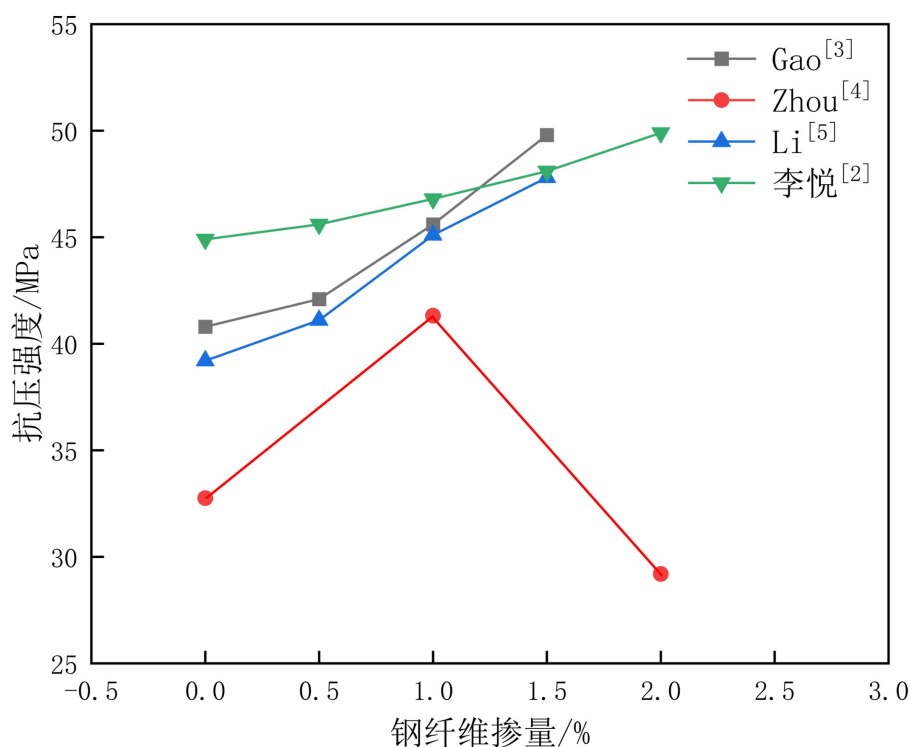


Figure 1. Relation between steel fiber content and compressive strength of concrete
图 1. 钢纤维掺量与混凝土抗压强度关系

2.2. 劈裂强度和抗弯强度

不同研究小组研究了体积掺量为 0%~3.0% 的钢纤维再生混凝土的弯曲性能。从图 2 可以看出, 随着钢纤维掺量的增加, 再生混凝土的抗弯强度也会随之增加。

He 等[6]研究发现当钢纤维的体积掺量增加 0%~1.5% 时, 再生混凝土的抗弯强度一直呈上升趋势。在 Yang 等[7]的研究中发现钢纤维之间的连接可以防止水泥基层产生裂缝和发展, 减少应力集中, 并能够形成更稳定的结构, 从而改善再生混凝土的抗弯和劈裂强度。Wang 等[8]、张仓等[9]也发现了类似结论, 只是混凝土出现抗压强度最高值的纤维掺量有所不同。

2.3. 其他性能参数

随着钢纤维含量的增加, 再生骨料混凝土的韧性也会随之提高。掺入钢纤维有助于防止剥落, 并显著提高再生混凝土在高温后的延展性和抗裂性。研究表明, 钢纤维的加入对混凝土的微膨胀具有一定的抑制作用。

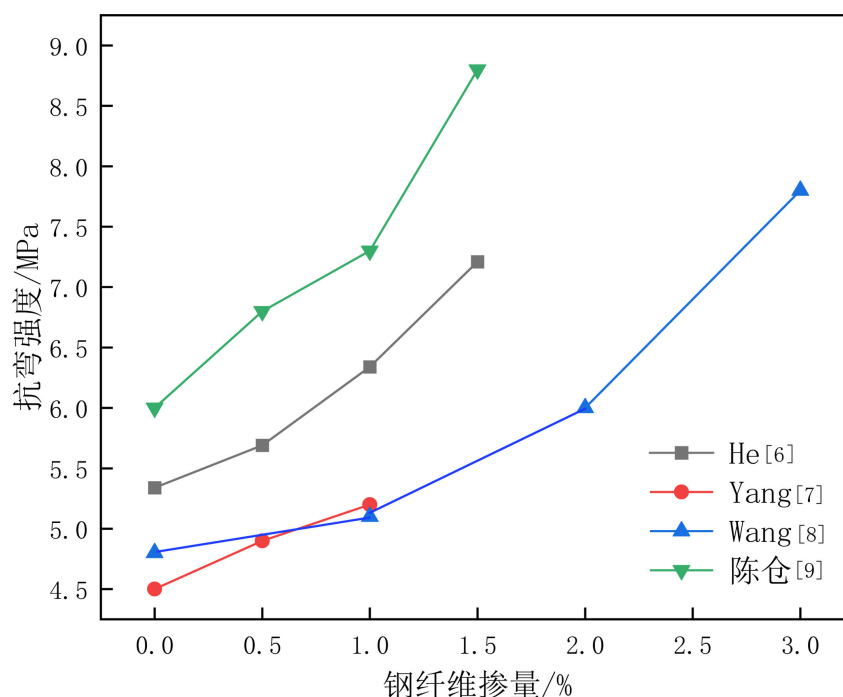


Figure 2. Influence of steel fiber content on flexural strength of concrete
图 2. 钢纤维掺量对混凝土抗弯强度影响

3. 植物纤维

作为一种具有纤维素结构的复杂天然复合材料,植物纤维可以大量生产并且是可再生的。此外,它们的强度和刚度与普通合成纤维相似,密度较低。因此,它们的强度比和刚度比(弹性模量与密度之比)很高,从而以低成本减轻了混凝土的重量。它们正在被开发为水泥填充材料。工程中广泛使用的传统纤维存在许多环境问题,植物纤维的应用有利于环境保护。其符合可持续发展要求。它在促进节能减排、循环经济、环境和谐等重大国家政策的实现方面发挥着推动作用。但是,植物纤维在再生混凝土中的应用研究有待扩大,关于植物纤维在普通混凝土中的应用的研究很多。

植物纤维混凝土相关的研究进展总结如下,希望能为植物纤维再生混凝土及相关材料领域的学者提供参考。

3.1. 秸秆纤维

研究表明,随着油菜秸秆掺量的增加,混凝土的抗压强度逐渐降低,混凝土的 7 d 抗压强度下降速度快于 28 d 抗压强度。随后, Baohua [10]选取油菜秸秆的砂比、水灰比和灰分含量作为变量,测试了块体的导热系数,观察到了相同的趋势。这是因为掺入秸秆灰会减少混凝土中的水泥量并减少水化反应,从而导致混凝土强度降低。而当油菜秸秆纤维长度为 30~40 mm,体积含量为 0.1%时,抗压强度达到峰值,提高了 16.45%。当纤维长度为 20~30 mm,体积含量为 0.2%时,劈裂拉伸强度和弯曲强度分别提高了 9.12% 和 6.64% [11]。当油菜秸秆灰掺量为 10%时,混凝土的动承载力达到最佳值。在其他特性方面,秸秆混凝土还具有良好的保温性能。

3.2. 木纤维

木纤维增强混凝土是一种新型环保材料,可以吸收和降解碳元素,还可以减少 CO₂ 发射。在力学性

能方面, 根据 Yang [7]的研究, 掺入木屑的混凝土材料在干燥和饱和吸水状态下的强度呈下降趋势。然而, 饱和吸水状态下强度的下降趋势更为明显。当锯末的体积添加量为 3%时, 混凝土的强度会降低约 38%, 而当体积添加量达到 10%时, 混凝土会离析。高昱、王东等[12]研究表明, 木纤维降低了混凝土的流动性, 但延缓了混凝土开裂的时间, 木纤维对混凝土的抗压强度及吸水率影响不大。而 Mazen 等[13]研究表明, 在混凝土中掺入植物纤维, 可显著改善混凝土的抗弯强度, 延缓混凝土的开裂。

3.3. 椰壳纤维

椰壳纤维具有良好的机械性能、耐热性、耐湿性和耐磨性[14]。Zhao 等[15]研究表明当椰壳纤维含量为 0.5 kg/m³时, 再生混凝土的抗弯强度可高达 5.79 MPa, 最低为 4.1 MPa, 提高了 5.13%~23.19%, 达到了在普通混凝土结构工程中应用的必要条件。Cupta 等[16]研究表明混凝土的劈裂抗拉强度随着椰壳纤维的添加而增加。当椰壳纤维含量为 0.25%, 且纳米 SiO₂ 含量为 3%, 所得混凝土具有良好的耐磨性。Syed 等[17]研究报告称, 水灰比为 0.4 的椰壳纤维混凝土材料具有更好的机械性能。当椰壳纤维为网状时, 混凝土具有更好的界面性能。

植物纤维混凝土重量轻, 环保, 保温性能好。它已被应用于一些项目, 并取得了可喜的成果。CR 胶乳的加入可以有效提高纤维增强混凝土的强度和这些材料的粘度。然而, 在混凝土搅拌过程中会产生许多碱性物质, 在碱性环境中, 与腐蚀相关的问题不容忽视。此外, 使用植物纤维会导致湿混凝土膨胀和干缩, 从而导致植物纤维发生变化, 并影响它们与混凝土的结合程度。

4. 玄武岩纤维

玄武岩纤维是一种常见的矿物纤维, 作为一种新型的无机绿色纤维材料, 具有良好的延展性和可负担性。许多研究表明, 玄武岩纤维可以提高混凝土的强度, 一些研究表明它可以增加再生混凝土的强度。与钢纤维的高成本相比, 该纤维表现出高强度、高模量、良好的耐高低温性能以及较强的耐酸碱性能。此外, 它们无污染, 在生产过程中不会产生或排放有毒物质, 并且可以很容易地用常规工艺和设备进行加工。

玄武岩纤维的膨胀和收缩系数基本与水泥相同。当与水泥混凝土混合时, 玄武岩纤维表现出天然的相容性, 易于分散, 具有良好的化学稳定性。研究表明, 加入玄武岩纤维改善了混凝土不稳定的裂缝扩展, 有效防止了裂缝的快速扩展, 增加了混凝土的抗裂性, 并产生加固、抗裂和增韧效果。

掺入适量的玄武岩纤维可以提高抗压强度、劈裂抗拉强度和抗弯强度在一定程度上[18][19]。学者们对体积掺量为 0%~0.4%的玄武岩纤维再生混凝土的压缩和劈裂抗拉性能进行了深入研究, 其中纤维掺量分别为 0.1%、0.2%和 0.3%一直是研究热点。一般来说, 当玄武岩纤维掺量增加 0%~0.15%时, 再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度呈上升趋势。此外, 研究发现, 当替代率为 50%时, 含有不同玄武岩纤维含量的再生混凝土材料的基本力学性能优于普通混凝土。在一定的掺量下, 再生混凝土的抗压强度随着纤维长度的增加而增加。

4.1. 抗压强度

当玄武岩纤维含量为 1%时, 再生混凝土达到最大抗压强度。据报道, 再生混凝土的抗压强度会随着玄武岩纤维含量的增加而增加。由图 3 易知, 在 Liu 等[20]的研究中发现, 随着纤维的增加, 混凝土抗压强度先增加后降低。Li 等[21]研究发现, 在添加玄武岩纤维后, 混凝土抗压强度先降低后上升。在 Ren 等[22]研究中也发现了类似趋势, 在纤维掺量为 0.2 vol%时, 其抗压强度达到最高值。而在张兰芳等[23]的研究中, 随着纤维掺量的增加, 混凝土抗压强度一直下降。

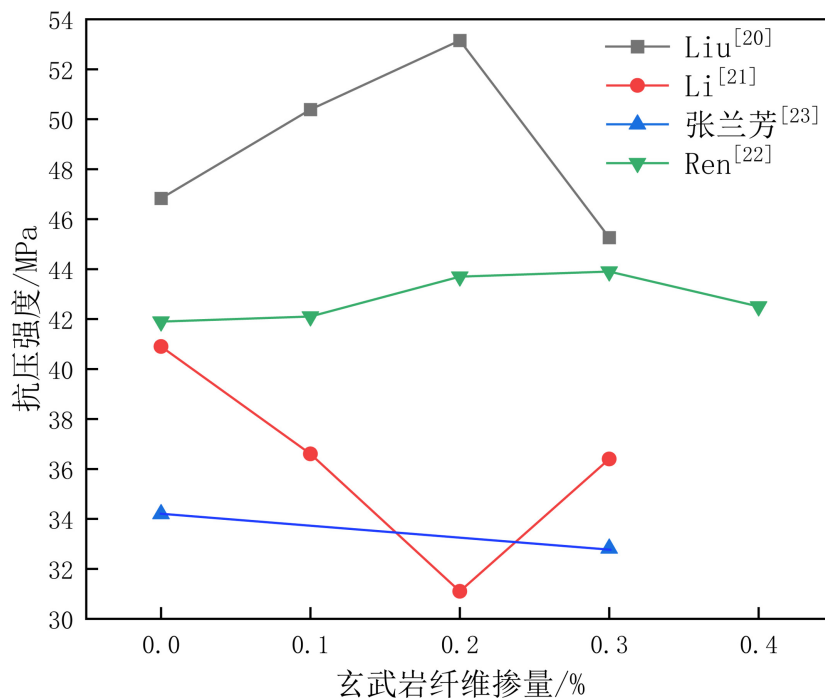


Figure 3. Relationship between basalt content and compressive strength of concrete
图 3. 玄武岩掺量与混凝土抗压强度关系

4.2. 劈裂抗拉强度

从图 4 易知, 当玄武岩纤维含量为 4 kg/m^3 时, 再生混凝土的劈裂抗拉强度提高 8.3% [24]。Li 等[21]

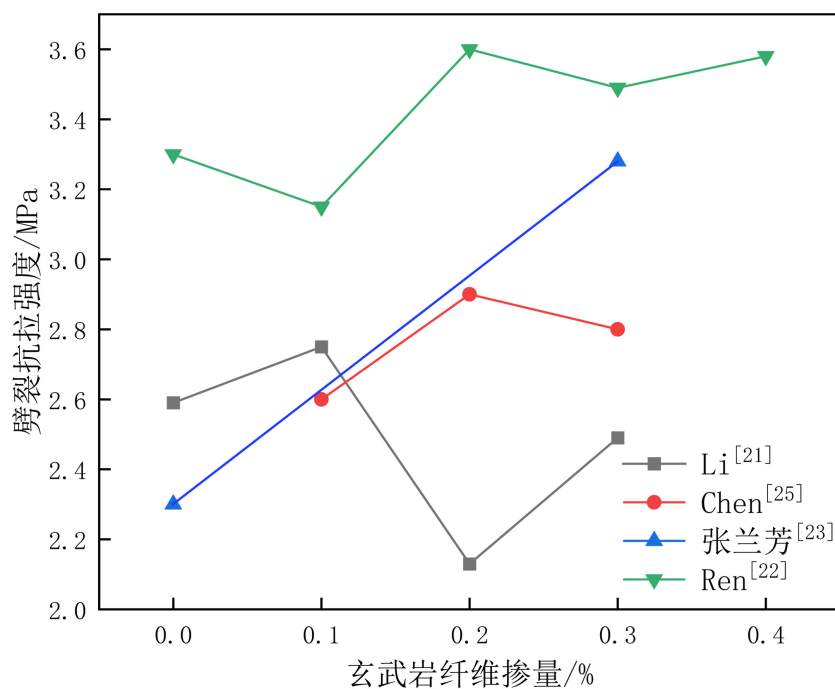


Figure 4. Effect of basalt fiber content on flexural strength of concrete
图 4. 玄武岩纤维掺量对混凝土抗弯强度影响

研究发现, 随着纤维掺量的增加, 混凝土的劈裂抗拉强度先降低后上升, 当掺量过高时, 该强度在一定程度上减弱。而在 Chen 等[25]的研究中发现, 随着纤维的掺入, 混凝土的劈裂抗拉强度先增加后降低, 当纤维掺量为 0.2 vol% 时, 该强度达到最高值。在张兰芳等[23]的研究中, 混凝土劈裂抗拉强度在纤维掺量为 0.3 vol% 达到峰值, 相比未掺入玄武岩纤维时, 其强度提高了 42%。Ren 等[22]研究了不同替代水平 (0、2 和 4 kg/m³) 的再生混凝土物理力学性能, 当玄武岩纤维含量为 4 kg/m³ 且替代率为 50% 时, 抗弯强度和劈裂抗拉强度增加到最大值。

4.3. 其他性能参数

研究表明, 弹性模量随着玄武岩纤维含量的增加 (0%~0.2%) 而先降低, 后增加。在再生混凝土中添加该纤维可以减缓再生混凝土的冻融损伤和提高混凝土的抗弯能力。

5. 总结

- 1) 加入适量的钢纤维后, 再生混凝土的强度明显提高, 脆性降低, 弹性模量提高。
- 2) 植物纤维混凝土重量轻, 环保, 韧性高, 保温性能好。但在搅拌混凝土时, 与碱性环境中的纤维会产生腐蚀问题, 并且植物纤维吸收水分并会经历湿膨胀和干缩。
- 3) 玄武岩纤维具有许多优势, 包括节省生产成本。将这些纤维添加到混凝土中可以提高其弯曲韧性和延展性。因此, 合理添加玄武岩纤维, 玄武岩纤维再生混凝土可以达到普通混凝土的强度。

参考文献

- [1] 李泽英. 再生粗骨料特性及其对混凝土性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- [2] 李悦, 王兴雷, 丁庆军. 钢纤维长度与掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2017(7): 62-65, 69.
- [3] Gao, D.Y., Lou, Z.H. and Wang, Z.Q. (2007) Experimental Research on the Compressive Strength of Steel Fiber Recycled Concrete. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, **28**, 5-10.
- [4] Zhou, C.X., Tan, Y., Zhou, J.Z. and He, Q. (2021) Experimental Study on Strength and Failure of Steel Fiber Recycled Concrete. *Journal of Hubei University of Technology*, **36**, 76-80.
- [5] Li, L.P. and Ma, Q.H. (2017) Effect of Steel Fiber on Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Cement Concrete. *Journal of China & Foreign Highway*, **37**, 267-270.
- [6] He, W.C., Kong, X.Q., Zhou, C. and Wang, X.Z. (2020) Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Concrete*, **42**, 44-49.
- [7] Yang, F., Chen, A.J., Wang, J. and Sun, X.P. (2012) Experiments of Splitting Tensile and Flexural Strength Mechanical Properties of Steel Fiber Recycled Concrete. *Concrete*, **34**, 11-14.
- [8] Wang, Z.S. and Tan, X.Q. (2016) Frost Resistant and Mechanical Properties of Steel Fiber Recycled Aggregate Concrete. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, **35**, 1184-1187.
- [9] 张仓. 钢纤维混凝土基本力学性能试验研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(22): 83-85.
- [10] Liu, B.H., Yi, L., Zeng, Z. and Zhou, Y. (2018) Experimental Research on Thermal Insulation Properties of the Rape Straw Ash Concrete. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, **44**, 330-333.
- [11] Zeng, Z., Liu, B.H., Zhang, W.J. and Fang, L. (2019) Experimental Study on Mechanical Properties of Low-Volume Rape Straw Fiber Concrete. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **21**, 117-123.
- [12] 高昱, 王东, 罗庚望, 等. 木质纤维在混凝土中的抗裂性应用研究[J]. 商品混凝土, 2012(1): 37-41.
- [13] Alshaaer, M., Mallouh, S.A., Al-Kafawein, J., Al-Faiyz, Y., Fahmy, T., Kallel, A., et al. (2017) Fabrication, Microstructural and Mechanical Characterization of Luffa Cylindrical Fibre—Reinforced Geopolymer Composite. *Applied Clay Science*, **143**, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.03.030>
- [14] 李超飞, 苏有文, 陈国平, 等. 植物纤维混凝土的研究现状[J]. 混凝土, 2013(5): 55-56, 61.
- [15] Zhao, Y.Q., Chen, A.J., Ma, J.T. and Wang, X.H. (2018) Experimental Study on Breaking for Coconut Fibres Recycled Concrete. *Concrete*, **40**, 64-67, 71.
- [16] Gupta, M. and Kumar, M. (2019) Effect of Nano Silica and Coir Fiber on Compressive Strength and Abrasion Resistance

- of Concrete. *Construction and Building Materials*, **226**, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.232>
- [17] Syed, H., Nerella, R. and Madduru, S.R.C. (2020) Role of Coconut Coir Fiber in Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **27**, 1104-1110. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.477>
- [18] Li, S.J. (2016) Experimental Study of Compressive Strength of Basalt Fiber Recycled Aggregate Concrete. *World Earthquake Engineering*, **32**, 89-92.
- [19] Dong, T., Liao, W.J., Liu, J.J., Tang, X., Zou, F.M., et al. (2022). Effects and numerical Simulation of Basalt Fibers on the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Concrete*, **44**, 92-96.
- [20] Liu, Y., Liu, Y.Z. and Guo, Y.D. (2021) Effect of Basalt Fiber on Early Cracking Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, **46**, 814-821.
- [21] Li, X.L., Jin, B.H., Yao, Y.F. and Guo, H.W. (2017) Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, **37**, 225-230.
- [22] Ren, L.L. (2019) Study on the Basic Mechanical Properties of Fiber Recycled Concrete. *China Concrete and Cement Products*, **46**, 49-54.
- [23] 张兰芳, 尹玉龙, 刘晶伟, 等. 玄武岩纤维增强混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2834-2837.
- [24] Chen, A.J., Chen, M., Hu, F.Q., Wang, D.H. and Li, H.X. (2015) Basalt Fiber's Effect on the Mechanical Behavior of Rubber Recycled Concrete. *Concrete*, **37**, 59-62.
- [25] Chen, X.X., Tan, Y., Tong, Y. and Zhang, W.W. (2021) Analysis of Mechanical Properties of Basalt Fiber Recycled Concrete Based on Response Surface Method. *China Concrete and Cement Products*, **48**, 59-63.