

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.03.014

纤维增强再生混凝土力学性能研究现状及展望

侯莉娜¹, 何梦迪¹, 黄 炜², 周雪峰¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用纤维对再生混凝土进行增强改性形成纤维增强再生混凝土,可在一定程度上弥补再生混凝土的天然缺陷,对保护自然环境具有重要意义。为进一步推动纤维增强再生混凝土的发展及应用,本文在大量查阅国内外文献的基础上,对现阶段纤维增强再生混凝土力学性能的研究成果进行深入归纳总结。重点阐述不同种类纤维对再生混凝土常温下基本力学性能、高温下基本力学性能及动力性能增强效果与影响规律,指出了纤维再生混凝土力学性能研究有待进一步解决的问题,并提出了相关研究建议及展望,为该领域的深入研究及纤维再生混凝土的推广应用提供参考。

关键词: 纤维增强再生混凝土; 力学性能; 动态冲击性能; 高温

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)03-0403-11

Research status and prospect of mechanical properties of fiber-reinforced recycled concrete

HOU Lina¹, HE Mengdi¹, HUANG Wei², ZHOU Xuefeng¹

(1. College of Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Fiber-reinforced recycled concrete is formed by adding fibers into the recycled concrete, which makes up for the natural defects of recycled concrete to a certain extent and is of great significance in protecting the natural environment. In order to further promote the development and application of fiber-reinforced recycled concrete, based on a large number of references at home and abroad, the research results of mechanical properties of fiber-reinforced recycled concrete are summarized. This paper focuses on the reinforcement effect and influence law of different kinds of fibers on the basic mechanical properties of recycled concrete at room temperature, at high temperature and dynamic properties, points out the problems to be solved in the research on mechanical properties of fiber-reinforced recycled concrete, and puts forward the research suggestions and prospects, so as to provide reference for the further research in this field and the popularization and application of fiber-reinforced recycled concrete.

Key words: fiber-reinforced recycled concrete; mechanical properties; dynamic impact performance; high temperature

当前,我国城市建设规模逐年扩大,每年产生建筑垃圾达 24 亿吨左右,约占城市垃圾总量的 40%^[1]。将废弃建筑垃圾作为再生骨料研发再生骨料混凝土,是废弃建筑垃圾循环利用的有效途径,对保护自然环境具有重要意义。对废弃混凝土的研究,最早始于前苏联学者 Gluzhge。20 世纪 70 年

代,日本和丹麦等国相继开展了再生混凝土的研究^[2]。目前,国内外学者对再生骨料混凝土力学性能的研究已取得较多成果。然而,再生骨料混凝土自身存在压碎指标高、骨料硬度低、孔隙率大等不足,制约了其工程应用范围。

将纤维掺入再生混凝土中,形成纤维增强再生

收稿日期: 2020-11-26; 网络出版日期: 2021-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210413.1428.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978566);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JM-435)

第一作者: 侯莉娜,女,博士,讲师,研究方向为新型材料与结构体系。E-mail: houlina-163@163.com

混凝土,是对再生混凝土增强改性的有效措施。掺入纤维后的再生混凝土由于纤维的桥接作用减轻了其内部微缺陷的萌生及扩展,使其力学性能显著提高,扩大了再生混凝土的应用范围^[3]。国内外研究者相继开展了纤维再生混凝土的相关研究工作,并取得了一定的研究成果。本文主要针对目前国内外有关纤维增强再生混凝土力学性能的研究现状,重点分析不同纤维对再生混凝土力学性能的影响规律,主要包括常温条件下纤维增强再生混凝土的力学性能,高温条件下纤维再生混凝土的力学性能及纤维再生混凝土的动态冲击性能等,为纤维增强再生混凝土的进一步研究和应用提供参考,并提出了需要进一步解决的问题及研究建议。

1 常温条件下纤维增强再生混凝土基本力学性能研究现状

纤维增强再生混凝土常温条件下的基本力学性能是国内外学者研究的重点。研究人员主要针对对不同种类纤维增强再生混凝土的抗拉、抗压、抗折及抗弯性能和材料本构关系进行研究。

1.1 抗拉性能

目前多通过纤维再生混凝土的劈裂抗拉试验对不同纤维再生混凝土的抗拉性能及其影响因素(如:纤维掺量、纤维长径比、再生骨料替代率及纤维加入方式等)进行研究。

章文娇等^[4]试验表明钢纤维可显著增强再生混凝土劈裂抗拉强度,当纤维掺量为 117 kg/m³时,抗拉强度增强率达 49.2%。霍俊芳等^[5]研究发现再生混凝土的劈裂抗拉强度与钢纤维掺量呈正相关,但随再生骨料取代率的增加而降低。张丽娟^[6]通过钢纤维再生混凝土配合比正交试验发现,钢纤维体积率对劈拉强度影响显著,水胶比影响次之,再生骨料取代率的影响最小。除此之外,唐佳军等^[7]研究表明纤维撒布层数及掺量的增加均可提高再生混凝土的劈拉强度。Nazarimofrad 等^[8]发现同时使用硅灰和钢纤维对再生骨料混凝土劈裂抗拉强度增强显著,主要原因是钢纤维与含硅灰的砂浆粘结性更好。

针对聚丙烯纤维增强再生混凝土抗拉性能的研究结果均表明,聚丙烯纤维可提高再生混凝土劈裂抗拉强度^[4],并且,李坤^[9]、霍俊芳等^[5]试验(纤维掺量分别为 0%~0.4%和 0.2%~0.8%)发现,聚丙烯纤维掺量与再生混凝土劈拉强度呈正相关。何文昌等^[10]进行的高掺量(0.6%~1.2%)聚丙烯纤维再生混凝土劈裂抗拉试验结果表明,再生混凝土劈裂抗拉强度虽有提高,但随纤维掺量的增加,提高

幅度逐渐降低。此外,郝彤等^[11]研究发现振动搅拌工艺下,聚丙烯纤维对再生混凝土抗拉性能增强效果优于传统静力搅拌。

李坤^[9]、Dilbas 等^[12]通过对玄武岩纤维增强再生混凝土抗拉性能试验研究,发现不同掺量(0.1%~0.4%,0%~1.0%)玄武岩纤维均对再生混凝土劈裂抗拉强度有所提高。田凯^[13]研究则表明,当玄武岩纤维的掺量为 6 kg/m³时,其劈裂抗拉强度提高显著。李晓路等^[14]同时考虑不同再生骨料替代率及纤维掺量影响,结果表明,玄武岩纤维对于较大再生骨料替代率下的混凝土劈裂抗拉强度增强效果仍十分明显,如表 1 所示。此外,高银^[15]对不同长度玄武岩纤维再生混凝土抗拉性能研究表明,长度为 12 mm,体积掺量为 0.15%时抗拉强度达到最优。

表 1 不同玄武岩纤维掺量下劈裂拉伸强度^[14]

Tab. 1 Splitting tensile strength under different basalt fiber contents

再生骨料 替代率/%	不同纤维掺量下劈裂拉伸强度/MPa			
	0%	0.1%	0.2%	0.3%
0	2.22	2.14	2.17	2.11
20	2.59	2.75	2.13	2.49
30	2.13	2.40	2.12	2.57
40	2.25	2.21	1.92	2.56
50	1.64	2.08	1.15	1.74
60	2.20	2.29	1.55	2.20
70	1.59	2.26	2.38	2.17
80	1.39	2.11	2.50	1.77

李坤^[9]混掺玄武岩-聚丙烯纤维,发现不同掺量(玄武岩:0%~0.4%;聚丙烯:0%,0.2%,0.4%)下再生混凝土劈裂抗拉强度均可得到提高。任莉莉^[16]研究则表明,混掺玄武岩-聚丙烯纤维大部分试件劈裂抗拉强度有所提高,但纤维掺量过多时,劈裂抗拉强度反而降低。此外,章文娇等^[4]、孔祥清等^[17]均认为混掺钢-聚丙烯纤维再生混凝土劈裂抗拉强度增长幅度优于单掺纤维,且孔祥清等^[18]还发现混杂纤维再生混凝土劈裂抗拉强度随钢纤维长径比增加逐渐增加,随聚丙烯纤维长径比增加呈先下降后上升趋势。

除此之外,姚运等^[19]发现玻璃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度随再生骨料替代率增大而降低。Ali 等^[20]试验研究表明,掺入适量粉煤灰后,玻璃纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度随龄期增长呈增长趋势。王建超等^[21]指出碳纤维再生混凝土劈拉强度随再生骨料掺量增多而减小,随水灰比增大而减小。

上述研究表明,不同纤维均对再生混凝土抗拉性能有提高,多数纤维再生混凝土的劈拉强度随着纤维的掺量增加呈提高趋势,但会随再生骨料替代率的增加而有所降低。其中,玄武岩纤维再生混凝土在较大骨料替代率下增强效果仍十分明显。然而对于混掺纤维的比例和纤维加入方式使再生混凝土抗拉性能达到最优缺乏统一的标准,仍需进一步研究。

1.2 抗压性能

抗压性能是混凝土基本力学性能之一,对于纤维增强再生混凝土具有重要的研究意义。本节从不同纤维出发,总结纤维再生混凝土抗压强度变化规律。

针对钢纤维再生混凝土,章文娇等^[4]试验表明,钢纤维可提高再生混凝土的立方体抗压强度和轴心抗压强度,当钢纤维掺量为 39 kg/m^3 时,立方体抗压强度提高 10.2% ,轴心抗压强度提高 10.8% 。Nazarimofrad 等^[8]试验表明,再生混凝土抗压强度受母材混凝土抗压强度影响较大。张丽娟^[6]发现再生混凝土抗压强度随水胶比减小不断增大,随再生骨料取代率增加呈先增加后下降趋势。此外,唐佳军等^[7]、霍俊芳等^[5]及 Anike 等^[22]均发现,随钢纤维掺量增加,抗压强度先增加后减小,该现象是由于纤维掺量过多时,会引起“球团效应”,形成薄弱区,导致抗压强度降低。Liu 等^[23]对钢纤维增强再生功能梯度混凝土进行试验研究,发现不同混合物对再生功能梯度混凝土抗压强度影响不同,并提出复合材料抗压强度公式:

$$f_{\text{cm,FGC}} = 0.72 \cdot \frac{f_{\text{cm1}} \cdot V_1 + f_{\text{cm2}} \cdot V_2}{V_T} + 4.40 \quad (1)$$

式中: $f_{\text{cm,FGC}}$ 为复合材料抗压强度; f_{cm1} 为第一层材料抗压强度, f_{cm2} 为第二层材料抗压强度; V_1 为第一层体积, V_2 为第二层体积; V_T 为总体积。

Chan 等^[24]试验研究表明,钢纤维再生骨料功能梯度混凝土增强层与试块总高度的比值 $h/H < 0.75$ 时,再生骨料纤维混凝土(R-concretes)的抗压强度比相应的天然骨料纤维混凝土(N-concretes)低 30% ,当 $h/H = 1.00$ 时,R-concretes 抗压强度比 N-concretes 低 53% 。

在聚丙烯纤维对再生混凝土抗压性能影响方面,章文娇等^[4]、李坤^[9]、何文昌等^[10]均发现,加入聚丙烯纤维后再生混凝土立方体抗压强度下降,但降幅不大,最高下降 5.1% 。郝彤等^[11]则发现振动拌合工艺下抗压强度比传统静力搅拌有提高。

对玄武岩纤维再生混凝土抗压性能的研究主要考虑因素是再生骨料取代率及纤维掺量。李素娟^[25]、田凯^[13]试验发现,再生骨料取代率为 50% 时,随纤维掺量增加,再生混凝土抗压强度小幅度提升。但李晓路等^[14]得出结论,当再生骨料取代率为 $20\% \sim 40\%$ 时,在 0.1% 和 0.2% 玄武岩纤维掺量下,随纤维掺量增加,其抗压强度降低,但在 0.3% 纤维掺量下,其抗压强度开始提高。高银^[15]通过试验研究发现适当掺量和长度的玄武岩纤维(掺量为 $0.15\% \sim 0.3\%$,长度 $< 20 \text{ mm}$)对再生混凝土有一定增强作用,当掺量大于 0.3% ,长度大于 20 mm 时,再生混凝土抗压强度出现降低,其原因是,混凝土搅拌过程中玄武岩会吸收大量水,导致再生混凝土中水泥不能完全发生水化反应,从而引起抗压强度降低。

在混杂纤维再生混凝土抗压性能方面,任莉莉^[16]试验研究表明,玄武岩-聚丙烯混杂纤维对再生混凝土抗压强度有明显提高作用,但纤维掺量过多时($> 0.3\%$),纤维分布的不均匀性反而会使抗压强度降低,结果见图 1。章文娇等^[4]、孔祥清等^[17]发现,混掺钢-聚丙烯纤维,再生混凝土抗压强度的提高幅度介于单掺纤维之间。同时,混杂纤维掺量一定,再生混凝土抗压强度随钢纤维长径比增加不断增加,随聚丙烯长径比增加先增加再减小。李坤^[9]试验结果表明,混掺玄武岩-聚丙烯纤维再生混凝土抗压性能优于单掺纤维,当聚丙烯纤维含量为 0.4% ,玄武岩含量为 $0.1\% \sim 0.3\%$ 时,混杂纤维再生混凝土抗压强度均大于对应的单掺纤维再生混凝土和素再生混凝土。

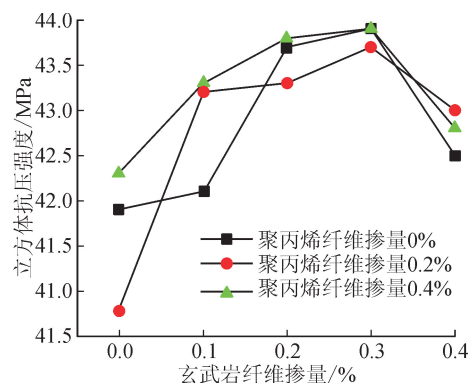


图 1 玄武岩-聚丙烯混杂纤维再生混凝土试件立方体抗压强度试验结果^[16]

Fig. 1 Test results of cube compressive strength of basalt-polypropylene hybrid fiber recycled concrete specimen

除此之外,姚运等^[19]试验表明,玻璃纤维再生混凝土抗压强度随骨料替代率的增加整体呈下降趋势。王建超等^[26]发现废弃丙纶纤维再生混凝土抗

压强度随纤维掺量增加逐渐增加。王建超等^[21]还发现碳纤维再生混凝土抗压强度随水灰比增大而减小,随再生骨料掺入量的增多而减小。Ali 等^[20]发现,同时加入玻璃纤维和粉煤灰可提高再生混凝土的抗压强度,且 28 天和 90 天抗压强度值的差异随着粉煤灰掺量的增加而增加。

综上所述,除聚丙烯纤维外,其余纤维在适当掺量下,均可提高再生混凝土的抗压性能。此外,再生混凝土取代率是影响纤维再生混凝土抗压性能的另一重要因素。然而,目前仅玄武岩纤维再生混凝土抗压性能研究同时考虑了纤维掺量与再生混凝土取代率耦合影响,其余均只考虑单因素变量。因此,如何确定在一定的再生混凝土取代率下,使再生混凝土抗压性能达到最佳的合理纤维掺量尚需进一步研究。此外,对钢纤维纤维再生骨料功能梯度混凝土抗压性能的研究还应考虑纤维掺量的影响。

1.3 抗折性能

抗折性能是评价纤维再生混凝土受到弯曲负荷不发生破坏的指标。本节分别阐述不同种类纤维对再生混凝土抗折强度的增强作用。

通过钢纤维再生混凝土抗折性能试验,霍俊芳等^[5]、孔祥清等^[18]发现加入钢纤维的再生混凝土抗折性能明显提高,且再生混凝土抗折强度与钢纤维掺量呈正相关关系。

朱红兵等^[27]、霍俊芳等^[5]研究结果均表明一定掺量下($0 \sim 1.6 \text{ kg/m}^3$)的聚丙烯纤维可提高再生混凝土抗折性能。何文昌等^[10]、孔祥清等^[28]则发现与素再生混凝土相比,高掺量($0.6\% \sim 1.2\%$)聚丙烯纤维再生混凝土抗折强度有明显提高,当纤维掺量增加大于 0.9% 时,提高幅度开始降低。此外,朱红兵等^[27]还发现加入聚丙烯纤维使再生混凝土抗折疲劳寿命明显提升。

在玄武岩纤维抗折性能方面,田凯^[13]研究发现,当玄武岩纤维掺量较低(3 kg/m^3)时,再生混凝土的抗折强度降低,主要是因为玄武岩纤维比表面积较大,较低掺量会使再生混凝土内部产生微裂缝,从而降低再生混凝土的抗折强度。但当玄武岩纤维掺量为 6 kg/m^3 时,再生混凝土的抗折强度增至最大,较素再生混凝土提高 10.5% 。

针对混杂纤维对再生混凝土抗折性能的影响,孔祥清等^[17]试验结果(见图 2)表明,当钢纤维掺量为 1.5% ,聚丙烯纤维掺量为 0.6% 时,再生混凝土增强效果最优,与单掺 1.5% 钢纤维时再生混凝土抗折强度相近,可见,混掺纤维对再生混凝土抗折强度的提高作用较单掺钢纤维更显著。何旭升^[29]通

过对混杂掺入聚丙烯三枝抗老化纤维和改性聚丙烯 TANK 纤维试验,发现掺加纤维使再生混凝土抗折强度明显增强,全部大于普通混凝土。

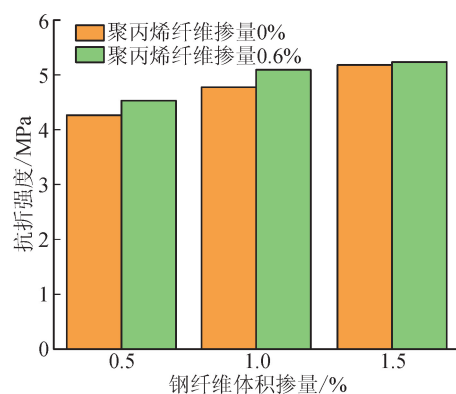


图 2 抗折强度与钢-聚丙烯混杂纤维掺量关系^[17]

Fig. 2 Relationship between flexural strength and the content of steel-polypropylene hybrid fiber

综上所述,不同种类的纤维均会对再生混凝土抗折性能产生积极影响,但玄武岩掺量较低时,会降低再生混凝土的抗折强度。因此,确定合理纤维掺量需进一步研究。此外,现有研究均仅以纤维掺量为关键参数进行纤维增强混凝土抗折性能分析,因此,对影响抗折性能的其他潜在因素(再生混凝土取代率,纤维长度、搅拌工艺等)还应进一步研究。

1.4 抗弯性能

对纤维增强再生混凝土抗弯性能的研究,研究人员主要集中在钢纤维、聚丙烯纤维和混杂纤维再生混凝土弯曲性能的研究。

张丽娟^[6]通过对钢纤维再生混凝土小梁的四点弯曲试验,发现当再生骨料取代率、钢纤维体积率一定时,钢纤维再生混凝土弯曲性能指标随抗压强度增加而增加,当抗压强度相近、钢纤维体积率不变时,再生混凝土小梁弯拉强度、弯曲韧性随再生骨料取代率增加略有增长。孔祥清等^[28]试验表明,钢纤维的加入可以改善再生混凝土的弯曲韧性,当钢纤维的掺量较高时,试件的荷载-挠度曲线会出现二次强化。Anike 等^[22]研究表明,使用常规方法设计的钢纤维再生混凝土使得抗弯强度有提高,使用等效砂浆体积混合设计方法弯曲强度有降低。Liu^[23]等分别采用欧洲标准试验法 EN 14651/210+A1 和巴塞罗那试验法,研究钢纤维增强再生功能梯度混凝土的弯曲和残余拉伸强度。欧洲标准试验法显示,钢纤维增强再生功能梯度混凝土开裂后呈先软化后硬化的现象,巴塞罗那试验则未观察到这种差异。Hu 等^[30]对钢纤维再生功能梯度混凝土的试验研究发现,随着纤维再生骨料混凝土厚度在总试件厚度

中占比的增加,试件抗弯性能逐渐降低。Chan等^[24]试验研究发现,纤维再生骨料混凝土厚度与总试件厚度 $h/H \leq 0.50$ 且钢纤维掺量 $\leq 0.50\%$ 时,试件呈软化开裂, $h/H \geq 0.75$ 且钢纤维掺量 $\geq 0.75\%$ 时,试件呈硬化开裂。

通过对聚丙烯纤维增强再生混凝土抗弯性能的研究,孔祥清等^[28]发现随着聚丙烯掺量的增加,试件峰值荷载逐渐增大,荷载-挠度曲线逐渐丰满。

孔祥清等^[28]同时进行的混掺钢-聚丙烯纤维再生混凝土弯曲性能试验表明(见图3),混杂纤维对再生混凝土弯曲破坏时承受的最大荷载、初裂挠度及韧性指数均有很大改善,改善效果优于单掺纤维。当钢纤维掺量为 1.0% ,聚丙烯纤维掺量为 0.9% 时,混杂纤维再生混凝土表现出良好的混杂效应,对弯曲性能的改善最为理想。

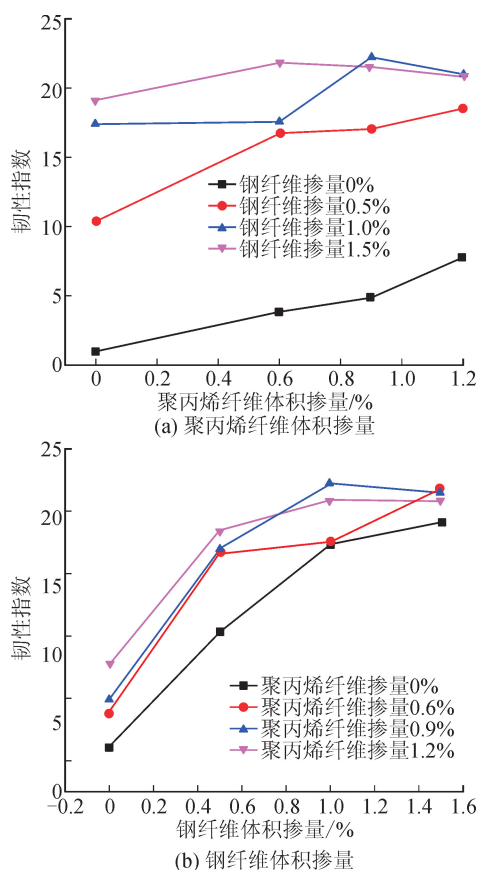


图3 聚丙烯-钢纤维掺量与韧性指数关系^[28]
Fig. 3 Relationship between fiber content of polypropylene-steel fiber and toughness index

Ali等^[20]试验研究发现,玻璃纤维的加入提高了材料在拉伸荷载作用下的抗开裂能力,对抗弯性能有利,添加粉煤灰的玻璃纤维再生混凝土抗弯强度提高幅度更大。

总之,加入上述纤维对再生混凝土抗弯性能均

有一定的提高,后续研究要进一步考虑多因素的耦合作用(纤维掺量、再生骨料替代率、纤维长度、纤维长径比等)。同时,对钢纤维增强再生功能梯度混凝土抗弯性能的研究可进一步考虑不同层材料强度及体积因素影响。

1.5 本构关系

在钢纤维增强再生混凝土本构关系研究方面,高丹盈等^[31]发现钢纤维再生混凝土破坏时的应力-应变曲线与钢纤维混凝土类似,且随钢纤维体积率增加,峰值应力及应变增大,并建立了钢纤维再生混凝土单轴受压本构模型及其表达式。

李斌等^[32]认为加入钢纤维可有效抑制裂缝和材料内部损伤的发展,使再生砖骨料混凝土延性及韧性得到增强,并建立了钢纤维再生砖骨料混凝土损伤本构模型。

田凯^[13]认为玄武岩纤维再生混凝土单轴受压应力-应变本构关系曲线与普通混凝土有相似之处,且玄武岩纤维掺量对再生混凝土应力应变曲线形状影响较大(见图4)。

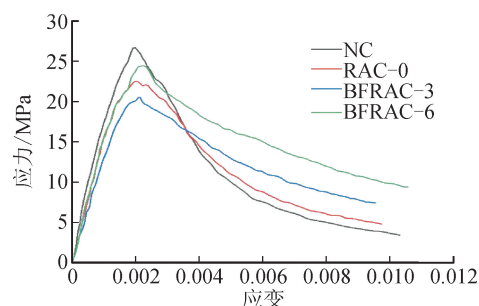


图4 玄武岩纤维再生混凝土受压应力-应变曲线^[13]
Fig. 4 Compression stress-strain curve of basalt fiber recycled concrete

在废弃纤维再生混凝土本构关系方面,王建超等^[26]基于试验结果,建立了废弃纤维再生混凝土单轴受压本构模型,并与GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》给出的单轴受压应力-应变关系曲线进行了对比,发现吻合度较高,且还发现废弃纤维再生混凝土峰值应变随纤维长度、纤维体积掺量增加而增加。

对聚丙烯纤维增强再生混凝土,张婷等^[33]基于理论研究,推导出聚丙烯纤维再生混凝土单轴受压本构模型,根据试验数据建立单轴受压损伤本构方程,依据方程做出理论曲线,与试验曲线对比发现二者拟合度较高。张婷还基于双剪强度理论,推导出聚丙烯纤维再生混凝土双剪损伤本构模型,建立纤维混凝土损伤本构模型从单轴到双轴的转化方法。谭艺师^[34]在规范的基础上,建立了聚丙烯纤维再生

混凝土单轴受压损伤本构模型,结合试验数据进行验证,发现加入聚丙烯纤维会大幅度降低试件的初始损伤。

总之,纤维再生混凝土单轴受压破坏应力-应变曲线与普通混凝土有相似之处,纤维可有效提高再生混凝土的延性。目前,纤维增强再生混凝土应力-应变关系多是基于单轴受压情况,为推进再生混凝土在实际工程中的应用,需将单轴受压本构关系扩展至多轴,进而对纤维增强再生混凝土本构关系进行系统研究。

1.6 弹性模量

Ramesh 等^[35]对钢纤维再生混凝土进行的试验研究表明钢纤维再生混凝土的弹性模量随骨料替代率的增加而降低。Kachouh 等^[36]发现,当再生骨料替代率为 100% 时,加入钢纤维对再生混凝土弹性模量的增加影响较小。霍俊芳等^[5]试验研究发现当钢纤维掺量为 1.5% 时,弹性模量增幅最大为 10.5%。

针对聚丙烯纤维再生混凝土,樊广利等^[37]发现聚丙烯三枝抗老化网状纤维(0.9 kg/m³)混凝土的弹性模量低于普通混凝土约 3.3%,子午线钢丝纤维(0.9 kg/m³)混凝土弹性模量低于普通混凝土约 1.01%,而改性聚丙烯(粗)TANK 纤维(0.9 kg/m³)混凝土弹性模量高于普通混凝土约 8.1%。霍俊芳等^[5]发现,聚丙烯纤维再生混凝土弹性模量随纤维掺量(0.2~0.8 kg/m³)的增加而增加,当纤维掺量为 0.8 kg/m³ 时,弹性模量增大 7.7%。相反周聪等^[38]发现,高性能聚丙烯纤维(直径较大、强度较高)再生混凝土的弹性模量随高性能聚丙烯纤维掺量(0.5%~1.25%)的增加略有降低。Ahmed 等^[39]试验发现,当聚丙烯纤维(长 12 mm)的含量从 0% 增加到 0.6% 时,基体弹性模量不断增加,当纤维从 0.6% 增加到 0.9% 时,弹性模量下降,且添加 0.9% 的聚丙烯纤维后,基体弹性模量比未添加聚丙烯纤维时降低了 3.38%。姚艳芳^[40]研究结果表明:加入硅灰(10%)和聚丙烯纤维(0.15%~0.45%)使再生混凝土动态弹性模量降低,静态弹性模量增加。

Liu 等^[41]对玄武岩纤维再生混凝土试验研究显示,再生混凝土强度为 C50 和 C60 时,再生混凝土弹性模量均有所提高。方圣恩等^[42]发现玄武岩纤维再生混凝土的弹性模量随纤维掺量(0%~0.2%)的增加呈先降低再增加趋势,并认为其降低的原因可能在于弹性模量取决于试验中再生混凝土受压弹性阶段,此阶段混凝土未发生破坏,纤维未能

发挥抗拉效果,同时未发生作用的纤维可能给混凝土带来更多的初始裂缝,进而导致再生混凝土弹性模量下降。

Gao 等^[43]研究表明,随着纤维掺量(0%~1.5%)的增大,钢-聚烯烃混杂纤维增强再生砖骨料混凝土弹性模量明显提高,当纤维掺量为 1.5% 时,再生混凝土弹性模量增加了 35.84%。

杨成智等^[44]研究显示,以玄武岩和聚丙烯纤维掺量均占 50%(B50P50)为标准组,B80P20 组弹性模量较标准组提高 1.7%,其他组弹性模量均有不同程度的降低,其中 B40P60 组弹性模量降低最大为 7.9%。

王建超等^[26]对废弃纤维再生混凝土的弹性模量进行试验研究,并采用数据拟合方法,综合考虑废弃纤维长度、再生骨料掺量、废弃纤维掺量影响,给出废弃纤维再生混凝土弹性模量计算公式:

$$E_{cf} = 0.78(0.374V_f + 0.965)(0.004l_f + 0.931) \cdot (-0.1r + 1.132)E_c \quad (2)$$

式中: E_{cf} 为废弃纤维再生混凝土的弹性模量,MPa; V_f 为废弃纤维掺量,%; l_f 为废弃纤维长度,mm; r 为再生骨料取代率。

综上所述,加入纤维后,再生混凝土的弹性模量有提高,也有降低,其原因可能是加入纤维后,纤维分布不均从而在混凝土中形成了薄弱层。因此,在今后的研究中,应尝试不同的搅拌方式,使得纤维分布均匀,更好的发挥纤维的作用。同时,纤维再生混凝土的动态弹性模量还应进一步研究。

2 高温下纤维增强再生混凝土基本力学性能研究现状

火灾是现代建筑结构常见灾害现象之一,火灾对于建筑结构的根本影响在于高温会使混凝土结构产生损伤与破坏,导致其承载能力和使用功能的损坏与丧失,带来巨大的生命和财产损失。在再生混凝土中加入纤维,利用纤维耐高温、强度高的特性提高再生混凝土高温后的基本力学性能,是近年来国内外学者研究的重点课题之一。

Chen 等^[45]发现(见图 5),高温下,钢纤维掺量一定时,再生混凝土的抗压强度随温度升高逐渐降低。温度一定时,再生混凝土抗压强度随钢纤维掺量增加逐渐降低,主要是由于钢纤维在再生混凝土中分布不均匀导致应力集中所致。同时,钢纤维的加入使应力-应变曲线发生了明显变化,钢纤维掺量较大时,曲线下降段更平缓,且随温度升高,峰值应

力处的应变逐渐增大,温度越高越明显。

Xie 等^[46]试验研究发现在 25 °C、200 °C、400 °C、600 °C 和 800 °C 时,钢纤维再生混凝土的弹性模量分别比再生混凝土提高了 3.7%、2.7%、32.5%、123.6% 和 89.7%。

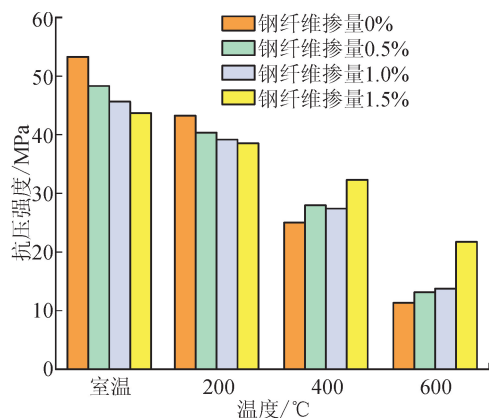


图5 温度对钢纤维再生混凝土抗压强度的影响^[45]

Fig. 5 Effect of exposure temperature on compressive strength of steel fiber recycled aggregate concrete

袁少林^[47]对聚丙烯纤维增强再生混凝土高温后力学性能进行试验研究,发现掺入聚丙烯纤维后,再生混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度均随着温度的升高呈降低趋势。

Wang 等^[48]研究认为,高温下玄武岩纤维有利于提高再生混凝土的抗压强度,玄武岩纤维掺量对再生混凝土劈裂抗拉强度的影响大于再生混凝土的置换率和纳米二氧化硅含量。郭瑞晋等^[49]发现,随温度升高,再生混凝土抗压及劈裂抗拉强度均有一定幅度的增加,当温度升至 200 °C 时,强度下降。同时,当玄武岩纤维掺量、温度一定时,水泥浆包裹纤维的加入方式对抗压强度和劈裂抗拉强度的提高幅度最佳。

孔祥清等^[50]将聚丙烯及玄武岩两种纤维混杂掺入再生混凝土,并对其高温下的抗压强度、劈裂抗拉强度进行研究,结果表明,一定温度下(20 °C ~ 800 °C),当聚丙烯及玄武岩纤维掺量一定时,再生混凝土抗压强度与劈裂抗拉强度均随温度的升高先增加再减小。袁少林^[47]研究也得出类似结论,同时还发现再生混凝土抗折强度随温度的升高逐渐下降,600 °C 之后对抗折强度的影响不明显。

综上,随温度升高,钢纤维再生混凝土抗压强度逐渐降低,而聚丙烯纤维再生混凝土的抗压强度、劈裂抗拉及强度都有所下降。玄武岩及玄武岩-聚丙烯混杂纤维再生混凝土抗压强度均随温度升高增加,但当温度升至一定数值后反而下降。因此,高温

加热时间、纤维掺量和温度等级等因素共同对高温后纤维增强再生混凝土力学性能影响应进一步探讨,同时,目前对高温后钢纤维再生混凝土的力学性能研究集中于抗压性能及弹性模量,其他性能研究应进一步开展,同时,高温后纤维增强再生混凝土的弹性模量也应深入研究。

3 纤维增强再生混凝土动态冲击性能研究现状

近年来纤维再生混凝土动态冲击性能方面的研究多集中在抗冲击性能等方面。试验方法多采用美国混凝土协会(ACI544)推荐的混凝土落锤冲击试验法。

已有研究均表明,钢纤维对再生混凝土对抗冲击性能有所提高^[8,51-52],同时 Nazarimofrad 等^[8]发现,添加硅灰的钢纤维再生骨料混凝土的抗压强度和劈裂强度都有显著增强,主要是由于钢纤维与含硅灰砂浆的粘结性更好,使得钢纤维显著改善了再生骨料混凝土的冲击性能。

Gao 等^[51]、孔祥清等^[52]试验结果表明,聚丙烯纤维可提高再生混凝土的抗冲击性能。周静海等^[53]通过研究再生混凝土受压徐变状况,发现在再生混凝土中掺入体积分数为 0.12% 的聚丙烯废弃纤维能够显著降低混凝土的徐变变形和徐变度,添加纤维的试件徐变破坏时间比不加纤维的长。

通过研究混掺钢-聚丙烯纤维再生混凝土动态冲击性能,Gao 等^[51]发现,混掺纤维再生混凝土抗冲击性能提高程度大于单掺纤维。孔祥清等^[17,52]分析了不同钢-聚丙烯纤维掺量和掺入方式对再生混凝土抗冲击性能的影响(见表 2)。结果表明,单掺或混杂纤维均可提高再生混凝土的抗冲击性能;当钢纤维掺量为 1.5%,聚丙烯纤维掺量为 0.9% 时,再生混凝土抗冲击能力提高最大。采用数理统计模型对试验结果进行拟合和失效概率预测表明,纤维再生混凝土的抗冲击次数很好地服从两参数 Weibull 分布。钢纤维与聚丙烯纤维混杂对改善再生混凝土的抗冲击性能呈现出优异的混杂增强效应。

综上所述,单掺钢纤维及聚丙烯纤维对再生混凝土的动态冲击性能均有提高,但当二者混掺时,过多或过少均不能起到良好的混杂效应,因此混掺纤维的合理掺量应进一步明确。此外,目前研究考虑关键因素主要是不同的纤维掺量,应变率对纤维再生混凝土的冲击性能也应深入探讨。同时,在减少冲击数据的离散性方面,也应进一步研究。

表 2 钢-聚丙烯纤维再生混凝土抗冲击能力^[52]
Tab. 2 Impact resistance contrast of steel-polypropylene
fiber recycled aggregate concrete

试件名称 (RAC)	平均初裂 冲击能/J	平均破坏 冲击能/J
0	26.5	35.3
SF0.5	35.3	158.8
SF1.0	44.1	502.7
SF1.5	61.7	723.1
PPF0.6	35.3	114.7
PPF0.9	35.3	132.3
PPF1.2	44.1	185.2
SF0.5-PPF0.6	35.3	229.3
SF0.5-PPF0.9	44.1	326.3
SF0.5-PPF1.2	44.1	476.3
SF1.0-PPF0.6	52.9	846.7
SF1.0-PPF0.9	52.9	1 014.3
SF1.0-PPF1.2	70.6	1 517.0
SF1.5-PPF0.6	79.4	1 640.5
SF1.5-PPF0.9	97.0	2 099.2
SF1.5-PPF1.2	88.2	1 737.5

注: RAC 表示再生骨料混凝土; 0 表示不参加纤维;
SF0.5 表示钢纤维掺量为 0.5%; PPF0.6 表示聚丙烯
纤维掺量为 0.6%; SF0.5-PPF0.6 表示钢纤维掺量为
0.5%, 聚丙烯纤维掺量为 0.6%; 依此类推。

4 结论及展望

通过上述对纤维增强再生混凝土受力性能研究现状的分析, 可知目前国内外对于纤维增强再生混凝土受力性能进行了一定的研究, 并已经取得了一定成果, 但仍存在许多问题有待进一步研究。

1) 现有纤维增强再生混凝土基本力学性能的研究多未考虑多因素同时作用影响, 因此, 应进一步考虑关键因素的耦合作用。同时, 不同混掺纤维, 不同纤维掺量对再生混凝土的性能的影响差异较大, 纤维的合理掺量尚未有统一标准, 混掺纤维的微观增强机理也应进一步研究。此外, 应将纤维再生混凝土单轴受压本构关系扩展至多轴, 从而对纤维再生混凝土本构关系进行深入系统研究。

2) 对高温后钢纤维再生混凝土的抗拉、抗折等性能需进一步研究。同时, 高温后不同纤维增强再生混凝土的弹性模量应深入探讨。而高温加热时

间、纤维掺量和温度等级共同对高温后纤维增强再生混凝土力学性能影响也应进一步研究。此外, 目前研究人员试验多采用箱式电阻炉升温, 其升温方式不同于火灾或爆炸造成的快速高温, 应进一步采用合理仪器设备从微观角度对纤维增强再生混凝土高温下的受力演变规律进行研究。

3) 目前对纤维再生混凝土的冲击性能研究主要考虑因素是不同的纤维掺量, 应变率对纤维再生混凝土冲击性能的影响也应深入探讨。同时, 在减少冲击数据的离散性方面应进一步考虑。此外, 不同搅拌方式及纤维加入方式对高温后纤维增强再生混凝土动力学性能的影响也应深入探讨。

4) 目前研究多以纤维增强再生混凝土基本力学性能为主, 对不同环境、不同温度下纤维增强再生混凝土构件及其组合构件力学性能、动力学性能和高温环境下的研究匮乏。

5) 纤维增强功能梯度再生混凝土的研究目前仅涉及钢纤维增强功能梯度再生混凝土的抗压及抗弯性能, 而目前动态冲击性能方面的研究多是针对纤维增强混凝土进行的, 因此, 应进一步加强纤维增强再生功能梯度混凝土的力学性能的研究, 尤其是其动态冲击性能。

6) 再生混凝土的尺寸效应及纤维增强再生混凝土构件抗震性能、抗疲劳性能、抗冲击性能等方面的深入研究。

7) 纤维再生混凝土在应用中影响其力学性能的因素还包括材料的制备, 由于再生混凝土具有天然缺陷, 部分纤维在搅拌和振捣过程中会折断或成团, 黏结性差, 因此纤维再生混凝土的预拌混合工艺及其设备应进一步研究。

参考文献:

- [1] 国家住房和城乡建设部. 2018 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [2] 孙琪, 曲艳东, 于照民, 等. 钢纤维再生混凝土的力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2018(5): 6-10, 15.
SUN Qi, QU Yandong, YU Zhaomin, et al. Research progress on mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced with steel fibers[J]. Concrete, 2018 (5): 6-10, 15.
- [3] PAN Huimin, MA Yunzhao. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete and its mechanism of crack resistance and toughening[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6): 956-961.
- [4] 章文姣, 鲍成成, 孔祥清, 等. 混杂纤维掺量对再生混凝土力学性能的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (13): 106-112, 123.

- ZHANG Wenjiao, BAO Chengcheng, KONG Xiangqing, et al. Experimental study on mechanical properties of hybrid fiber basic of recycled concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(13): 106-112, 123.
- [5] 霍俊芳,白笑笑,姜鹏飞,等. 钢纤维和聚丙烯纤维再生混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(8): 92-95, 99.
- HUO Junfang, BAI Xiaoxiao, JIANG Pengfei, et al. Research on mechanical properties of steel fiber and polypropylene fiber recycled concrete[J]. Concrete, 2019(8): 92-95, 99.
- [6] 张丽娟. 钢纤维再生混凝土配合比设计及其性能计算方法[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- ZHANG Lijuan. Mixture design and performance calculation method of steel fiber reinforced recycled concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [7] 唐佳军,裴长春. 撒布式混杂钢纤维再生混凝土力学性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 265-270.
- TANG Jiajun, PEI Changchun. Mechanical properties of layer hybrid steel fiber recycled aggregate concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 265-270.
- [8] NAZARIMOFRAD E, SHAIKH F U A, NILI M. Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2017, 6(1): 54-68.
- [9] 李坤. 纤维增强再生骨料混凝土基本力学性能试验与分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(2): 60-62.
- [10] 何文昌,孔祥清,高化东,等. 高掺量聚丙烯纤维再生混凝土力学性能及微观结构研究[J]. 混凝土, 2020(1): 82-86.
- HE Wenchang, KONG Xiangqing, GAO Huadong, et al. Research on the mechanical properties and microstructure of recycled aggregate concrete with high content polypropylene fiber [J]. Concrete, 2020(1): 82-86.
- [11] 郝彤,王帅,冷发光,等. 振动搅拌对再生混凝土力学性能强化的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(7): 29-34.
- HAO Tong, WANG Shuai, LENG Faguang, et al. Experimental study on mechanical properties improvement of recycled concrete by vibration stirring [J]. New Building Materials, 2020, 47(7): 29-34.
- [12] DILBAS H, ÇAKIR Ö. Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Material, 2020, 254: 119216.
- [13] 田凯. 玄武岩纤维对再生混凝土力学性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(6): 22-24, 103.
- TIAN Kai. Effect of basalt fiber on mechanical properties of recycled concrete[J]. New Building Materials, 2019, 46(6): 22-24, 103.
- [14] 李晓路,金宝宏,姚宇峰,等. 玄武岩纤维再生混凝土的基本力学性能[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 225-230.
- LI Xiaolu, JIN Baohong, YAO Yufeng, et al. Mechanical properties of basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2017, 37(3): 225-230.
- [15] 高银. 玄武岩纤维再生混凝土基本力学性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- GAO Yin. Study on basic mechanical properties of basalt fiber recycled concrete [D]. Huainan: Anhui University of Science And Technology, 2019.
- [16] 任莉莉. 纤维再生混凝土基本力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(4): 49-54.
- REN Lili. Study on basic mechanical properties of fiber recycled concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(4): 49-54.
- [17] 孔祥清,何文昌,周聪,等. 混杂掺入钢/聚丙烯纤维再生混凝土力学性能及抗冲击性能试验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(3): 94-99.
- KONG Xiangqing, HE Wenchang, ZHOU Cong, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and impact resistance of steel and polypropylene hybrid fiber reinforced recycled aggregates concrete [J]. Building Science, 2020, 36(3): 94-99.
- [18] 孔祥清,鲍成成,高化东,等. 钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(11): 105-109.
- KONG Xiangqing, BAO Chengcheng, GAO Huadong, et al. Experimental study on mechanical properties of hybrid fiber reinforced recycled concrete [J]. Concrete, 2017(11): 105-109.
- [19] 姚运,陈艳. 骨料替代率对玻璃纤维再生混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2017(4): 58-61.
- YAO Yun, CHEN Yan. Effect of replacement rate of recycled coarse aggregates on physical properties of glass fiber recycled concrete [J]. Concrete, 2017(4): 58-61.
- [20] Ali B, QURESHI L A, SHAN S H A, et al. A step towards durable, ductile and sustainable concrete: simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 118980.
- [21] 王建超,陆佳韦,周静海,等. 碳纤维再生混凝土力学性能的试验研究[J]. 混凝土, 2018(12): 95-99, 103.
- WANG Jianchao, LU Jiawei, ZHOU Jinghai, et al.

- Experimental research on mechanical properties of carbon fiber recycled concrete[J]. *Concrete*, 2018(12): 95-99, 103.
- [22] ANIKE E E, SAIDANI M, OLUBANWO A O, et al. Effect of mix design methods on the mechanical properties of steel fibre-reinforced concrete prepared with recycled aggregates from precast waste [J]. *Structures*, 2020, 27:664-672.
- [23] LIU Xingzi, YAN Mengpei, GALO BARDES I, et al. Assessing the potential of functionally graded concrete using fiber reinforced and recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 171: 793-801.
- [24] CHAN R, LIU Xingzi, GALO BARDES I. Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibers and recycled aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242.
- [25] 李素娟. 玄武岩纤维再生混凝土抗压强度试验研究[J]. *世界地震工程*, 2016, 32(2): 89-92.
- LI Sujuan. Experimental study of compressive strength of basalt fiber recycled aggregate concrete[J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(2): 89-92.
- [26] 王建超, 杨文涛, 周静海, 等. 废弃纤维再生混凝土力学性能及受压本构关系研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(10): 49-54.
- [27] 朱红兵, 姚晨, 赵本露, 等. 聚丙烯纤维掺量对再生混凝土抗折疲劳性能影响的试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2017, 43(5): 104-107.
- ZHU Hongbing, YAO Chen, ZHAO Benlu, et al. Experimental research on the effects of polypropylene fiber content on recycled concrete flexural fatigue performance[J]. *Sichuan Building Science*, 2017, 43(5): 104-107.
- [28] 孔祥清, 高化东, 刚建明, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土弯曲韧性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(9): 2729-2736.
- KONG Xiangqing, GAO Huadong, GANG Jianming, et al. Study on flexural toughness of steel-polypropylene hybrid fiber recycled aggregate concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(9): 2729-2736.
- [29] 何旭升. 不同纤维及含量对再生混凝土力学性能影响研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2019, 45(3): 110-114.
- HE Xusheng. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete with different fibers and contents[J]. *Sichuan Building Science*, 2019, 45(3): 110-114.
- [30] HU Tong, CHAN R, GALO BARDES I, et al. Characterization of functionally graded concrete produced with fibres and recycled aggregates[C]//2019 2nd International Seminar on Construction Science and Civil Engineering, 2019.
- [31] 高丹盈, 朱倩, 刘杰. 单轴受压下钢纤维再生骨料混凝土本构模型[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(2): 396-406.
- GAO Danying, ZHU Qian, LIU Jie. Constitutive model of SFRCAC under uniaxial compression [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(2): 396-406.
- [32] 李斌, 黄炜, 李昌宁, 等. 钢纤维再生砖骨料混凝土损伤本构模型研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 17-23.
- LI Bin, HUANG Wei, LI Changning, et al. Study on damage constitutive model of steel fiber recycled brick aggregate concrete[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 17-23.
- [33] 张婷, 黄炜, 戎翀. 聚丙烯纤维再生混凝土损伤本构模型的研究[J]. *材料导报*, 2015, 29(22): 150-155.
- ZHANG Ting, HUANG Wei, RONG Chong. Damage constitutive models of polypropylene fiber recycled concrete [J]. *Materials Review*, 2015, 29(22): 150-155.
- [34] 谭艺帅. 再生混凝土单轴受压本构关系及损伤模型研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- TAN Yishuai. Research on uniaxial compression constitutive relationship and damage model of recycled concrete[J]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [35] RAMESH R B, MIRZA O, KANG W H. Mechanical properties of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete [J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(2): 745-755.
- [36] KACHOUH N, EL-HASSAN H, EL-MAADDawy T. Effect of steel fibers on the performance of concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 348-359.
- [37] 樊广利, 张明明, 王社良. 纤维混凝土力学性能试验研究[J]. *混凝土*, 2018(5): 80-83.
- FAN Guangli, ZHANG Mingming, WANG Sheliang. Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete[J]. *Concrete*, 2018(5): 80-83.
- [38] 周聪, 郑泽宇, 孔祥清, 等. 高性能聚丙烯纤维对再生混凝土力学性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(1): 303-309.
- ZHOU Cong, ZHENG Zeyu, KONG Xiangqing, et al. Influence of high performance polypropylene fibers on mechanical property of recycled aggregate concrete

- [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (1): 303-309.
- [39] AHMED T W, ALI A A M, ZIDAN R S. Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 118010.
- [40] 姚艳芳. 聚丙烯纤维对再生混凝土力学性能和干缩率的影响[J]. 功能材料, 2020, 51(7): 7136-7140, 7147.
YAO Yanfang. Effect of polypropylene fiber on mechanical properties and dry shrinkage of recycled concrete[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51 (7): 7136-7140, 7147.
- [41] LIU Huaxin, YANG Jianwei, KONG Xiangqing, et al. Basic mechanical properties of basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2017, 11: 43-53.
- [42] 方圣恩, 洪华山, 张培辉. 纤维增强再生骨料混凝土力学性能试验及公式推导[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019 (5): 18-24, 43.
FANG Sheng'en, HONG Huashan, ZHANG Peihui. Mechanical property experiments and calculation formulas of fiber-reinforced recycled aggregate concrete [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(5): 18-24, 43.
- [43] GAO Danying, JING Jiahua, ZHOU Xiao. Reinforcing mechanism and calculation method of compressive behavior of hybrid fiber reinforced recycled brick aggregates concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3441-3449.
- [44] 杨成智, 裴长春. 废弃聚丙烯混杂纤维再生混凝土力学性能[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 122-127.
YANG Chengzhi, PEI Changchun. Mechanical properties of recycled concrete with hybrid waste polypropylene fibers[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 122-127.
- [45] CHEN G M, HE Y H, YANG H, et al. Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 1-15.
- [46] XIE Jianhe, ZHANG Zhen, LU Zhongyu, et al. Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature[J]. Construction and Building Materials, 2018, 184: 752-764.
- [47] 袁少林. 混杂纤维再生混凝土高温后力学性能试验研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2018.
- YUAN Shaolin. Research on mechanics performance of hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete after high temperature[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2018.
- [48] WANG Yonggui, LI Shuaipeng, HUGHES P, et al. Mechanical properties and microstructure of basalt fibre and nano-silica reinforced recycled concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118561.
- [49] 郭瑞晋, 毕重, 王涪, 等. 不同加入方式对高温后玄武岩纤维再生混凝土力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(2): 88-92.
GUO Ruijin, BI Zhong, WANG Fu, et al. Effects of different mixing methods on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete after high temperature [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(2): 88-92.
- [50] 孔祥清, 袁绍林, 董锦坤, 等. 聚丙烯-玄武岩混杂纤维再生混凝土高温性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 101-106.
KONG Xiangqing, YUAN Shaolin, DONG Jinkun, et al. Experimental study on performance of polypropylene-basalt hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(21): 101-106.
- [51] GAO Lin, SHI Yan, LIU Yachang. Influence study of reinforced fiber on the impact resistance performance of recycled aggregate concrete[J]. Advanced Materials Research, 2012, 418/419/420: 250-253.
- [52] KONG Xiangqing, HE Wenchang, XING Lili, et al. Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37 (7): 1763-1773.
- [53] 周静海, 吴迪, 赵庭钰, 等. 废弃纤维再生混凝土受压徐变及预测模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 143-151.
ZHOU Jinghai, WU Di, ZHAO Tingyu, et al. Pressure and creep characteristics of waste fiber recycled concrete and estimation model[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 143-151.

(责任编辑 王绪迪)