

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.06.019

回收轮胎聚合物纤维混凝土性能试验研究

陈猛¹, 刘阳波¹, 陶云霄¹, 王浩²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 为研究回收橡胶轮胎聚合物纤维(RTPF)对混凝土工作性能和基本力学性能的影响,对素混凝土(F0)、RTPF和聚丙烯纤维(PPF)混凝土进行拌合物性能测试、基本力学性能试验和纤维作用机理分析.结果表明:含气量随RTPF掺量增大而增大,且相同体积掺量(0.1%)下PPF的引气能力大于RTPF;坍落度随RTPF纤维掺量增大而降低,相同体积掺量(0.1%)下PPF比RTPF混凝土坍落度低;混凝土抗压强度随RTPF纤维掺量增大而降低;RTPF混凝土劈裂抗拉强度和抗折强度均出现了先升高后降低的趋势,RTPF体积掺量0.2%为最优纤维掺量.SEM测试表明,混凝土破坏时RTPF被拔出基体或发生拉断破坏,RTPF可有效提供桥连作用.研究表明RTPF可改善混凝土基本力学性能,并在一定掺量范围内可有效替代PPF.

关键词: 纤维混凝土;回收轮胎聚合物纤维(RTPF);聚丙烯纤维;工作性能;力学性能

中图分类号: TU 528.572 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)06-0870-05

Experimental Study on Properties of Recycled Tyre Polymer Fiber Reinforced Concrete

CHEN Meng¹, LIU Yang-bo¹, TAO Yun-xiao¹, WANG Hao²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China. Corresponding author: CHEN Meng, E-mail: cmwhut@163.com)

Abstract: To study the effect of recycled rubber tyre polymer fiber (RTPF) on the working performance and mechanical properties of concrete, tests on the properties of the mixtures, the basic mechanical properties and the mechanism of the fiber performances were conducted on the plain concrete (F0), RTPF concrete and polypropylene fiber (PPF) concrete. The results showed that the air content increases with the increasing of the RTPF fraction, and the air entraining capacity of PPF is better than that of the RTPF with the same volume fraction (0.1%). The slump decreases with the increasing of the RTPF fraction, and the slump of the PPF concrete is lower than that of the RTPF concrete under the same volume fraction (0.1%); the compressive strength of concrete decreases with the increasing of the RTPF fraction. Both the splitting tensile strength and the flexural strength of the RTPF concrete increase at the initially stage and then decrease; 0.2% is determined as the optimal volume fraction. The SEM showed that the RTPF was pulled out from the matrix or broken by tension, which indicates that the RTPF can effectively provide bridging effect. This study showed that the RTPF can improve the mechanical properties of concrete and can replace the PPF effectively within a certain range of the fiber fraction.

Key words: fiber reinforced concrete; recycled tyre polymer fiber(RTPF); polypropylene fiber; working performance; mechanical properties

可持续发展是国际社会的关注重点,提高资源的回收利用率愈加受到人们重视.汽车行业的

飞速发展产生了大量的废旧橡胶轮胎,焚烧及填埋处理会污染空气及土地资源,合理利用废旧轮

收稿日期: 2019-10-11

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2020-MS-089);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2001005);辽宁省重点研发计划项目(2019JH2/10300051).

作者简介: 陈猛(1981-),男,辽宁开原人,东北大学讲师,博士;王浩(1953-),男,北京人,中国工程院院士.

胎材料可以减轻环境负担^[1].

废旧轮胎回收加工后产生大量的钢纤维、橡胶颗粒和聚合物纤维(recycled tyre polymer fiber, RTPF). 相关研究表明, 将从废旧轮胎中回收的钢纤维加入混凝土, 能够大大增强混凝土的韧性^[2], 橡胶颗粒可以改善混凝土的耐久性^[3]; Baricevic 等^[4]将 RTPF 加入混凝土中, 结果表明 RTPF 增强了混凝土的抗冻融能力. 另外, RTPF 可以降低混凝土的毛细吸水性, 同时并不会明显影响混凝土的可泵性和抗压以及抗折强度^[5]. 在混凝土材料中, RTPF 吸收的水分不会在水化过程中全部释放出来, 可以减小混凝土自身收缩^[6]. 承受动态冲击荷载时, 掺量为 2.4 kg/m^3 的 RTPF 混凝土表现出最好的能量吸收作用^[7]. 目前, RTPF 对混凝土拌合物及基本力学性能的影响缺少系统的试验研究, 并且 RTPF 在混凝土中的作用机理需要进行科学分析.

国内外研究表明聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PPF)能够有效抑制混凝土的塑性收缩、减少裂纹、增强抗折和抗拉强度^[8-10]. 有机合成纤维的生产过程对环境污染较大, 使用废旧纤维可有效缓解环境压力, RTPF 混凝土与 PPF 混凝土基本力学性能的差别需要系统的试验分析. 本文设计素混凝土(F0)、4种掺量 RTPF 混凝土和1种掺量 PPF 混凝土, 通过拌合物性能测试、基本力学性能试验和微观损伤机理分析, 研究 RTPF 对混凝土基本力学性能的影响和作用机理.

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

水泥采用 P. I. 42.5 硅酸盐水泥; 细骨料为细度模数 2.56 的河砂, 最大粒径为 4.75 mm; 粗骨料为 5~20 mm 的碎石; 减水剂为减水率 38% 的聚羧酸高效减水剂. RTPF 和 PPF 如图 1 所示. RTPF 的直径、强度和弹性模量由上海新纤仪器有限公司生产的纤维直径分析仪(SGD-1A)和工程纤维强度伸度仪(XG-1A)检验, RTPF 和 PPF 物理及力学性能见表 1.

素混凝土(F0)配合比为: 水泥 550 kg, 砂 560 kg, 石子 1 128 kg, 水 154 kg, 减水剂 5.5 kg; RTPF 掺量分别为 1.2, 2.4, 4.8 和 9.6 kg(体积掺量分别约为 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.8%), 材料编号分别为 RTPF12, RTPF24, RTPF48 和 RTPF96; PPF 掺量为 0.9 kg(体积掺量约为 0.1%), 材料编号为 PPF09.

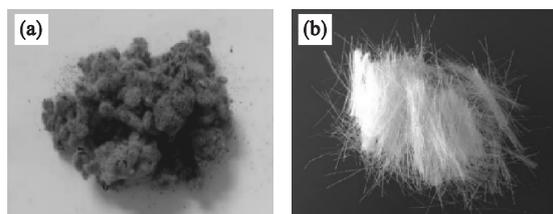


图 1 RTPF 和 PPF 图

Fig. 1 The images of the RTPF and PPF

(a)—RTPF; (b)—PPF.

表 1 纤维物理及力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of fibers

纤维类型	长度/mm	直径/ μm	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	强度/MPa	弹性模量/GPa
PPF	19	26	910	376	3.79
RTPF	8.7 ± 4.1	21.1 ± 2.5	1 160	475	3.21

1.2 试件制备及试验方法

按照配合比将水泥和骨料放入搅拌机中干拌, 然后加入称量好的水和减水剂搅拌不小于 120 s, 最后加入纤维搅拌至纤维分散均匀. 将混凝土拌合物浇入模具并振捣密实, 24 h 后脱模并放入标准养护室(温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度在 95% 以上).

按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[11]测试混凝土的坍落度和含气量; 按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[12]测试混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度; 使用扫描电子显微镜(Ultra-plus SEM)

观察试件破坏后的纤维形貌, 测试前在试件表面进行喷金处理, 加速电压为 15 kV.

2 试验结果及讨论

2.1 混凝土拌合物性能

2.1.1 含气量

混凝土拌合物含气量如图 2 所示. F0 含气量为 1.88%. RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 的含气量分别比 F0 增加了 11.2%, 17.6%, 27.1%, 47.9% 和 28.2%. 含气量随 RTPF 掺量增加而递增, 原因是纤维与浆体之间

存在薄弱界面,为气体进入提供更多通道,另外 RTPF 上附有橡胶颗粒,橡胶颗粒表面粗糙,很容易在搅拌过程中引入空气^[13]. PPF09 的含气量与 RTPF48 相近,相同体积掺量(0.1%)下,PPF 的引气能力远大于 RTPF,这是由于 PPF 具有较强疏水性^[14],而 RTPF 为尼龙帘子布粉碎后的纤维,遇水后具有一定亲水性^[6].

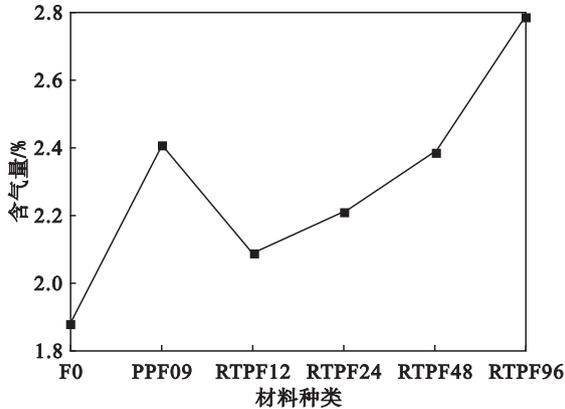


图 2 混凝土拌合物含气量

Fig. 2 Air content of the concrete mixtures

2.1.2 坍落度

混凝土的坍落度如图 3 所示. F0 坍落度为 185 mm, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 的坍落度分别比 F0 降低 8.1%, 18.9%, 35.1%, 62.2% 和 14.6%. PPF09 的坍落度介于 RTPF12 和 RTPF24 之间, RTPF 的掺量越大,混凝土拌合物的坍落度越低,这主要是因为 RTPF 和橡胶颗粒吸收了混凝土拌合物中的水分^[7],导致坍落度降低.

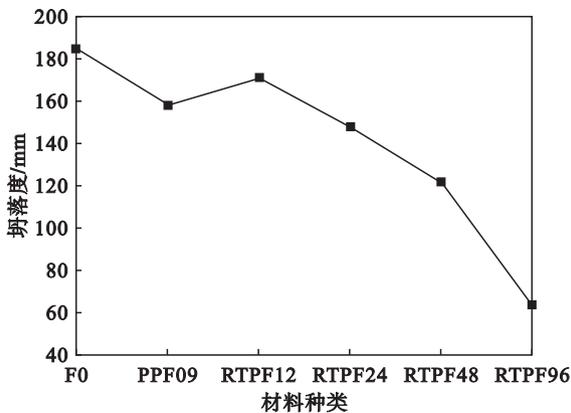


图 3 混凝土拌合物坍落度

Fig. 3 The slump of the concrete mixtures

2.2 抗压强度

2.2.1 立方体抗压强度

立方体抗压强度(f_{cu})试验采用 150 mm × 150 mm × 150 mm 试件,不同材料在 7 d 和 28 d 的

立方体抗压强度如图 4 所示. 当养护龄期为 7 d 时, F0 的立方体抗压强度为 42.1 MPa, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 的立方体抗压强度分别比 F0 降低 3.6%, 3.8%, 8.3%, 18.0% 和 2.1%. 当养护龄期为 28 d 时, F0 的立方体抗压强度为 67.3 MPa, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 的立方体抗压强度较 F0 分别降低 2.2%, 3.6%, 4.3%, 17.7% 和 5.8%, RTPF 混凝土 7 d 和 28 d 的立方体抗压强度随纤维掺量增大而降低,这与文献[4]和[5]的试验结果趋势一致;当 RTPF 掺量达到 0.8% 时,强度降低明显,这主要是因为 RTPF96 含气量较大,坍落度较小. 同时, RTPF 中含有的橡胶颗粒弹性模量较小,在压应力作用下相对于混凝土变形大,会降低混凝土的立方体抗压强度,文献[3]和[13]的研究表明,混凝土立方体和轴心抗压强度随橡胶颗粒掺量增大而降低. PPF09 在 28 d 的立方体抗压强度介于 RTPF24 和 RTPF48 之间,相同体积掺量(0.1%)下 RTPF 相比 PPF 对混凝土的抗压强度影响较小.

2.2.2 轴心抗压强度

轴心抗压强度(f_{ck})试验采用 150 mm × 150 mm × 300 mm 的试件,试验结果如图 4 所示. F0 的轴心抗压强度为 58.5 MPa, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 分别比 F0 降低 1.9%, 2.6%, 8.4%, 12.6% 和 1.0%, 相同体积掺量(0.1%)的 RTPF 和 PPF 对轴心抗压强度的影响相差不大. F0 的强度比(轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值)为 0.87, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 的强度比分别为 0.87, 0.88, 0.83, 0.92 和 0.91, 两种纤维混凝土的强度比与 F0 相差不大.

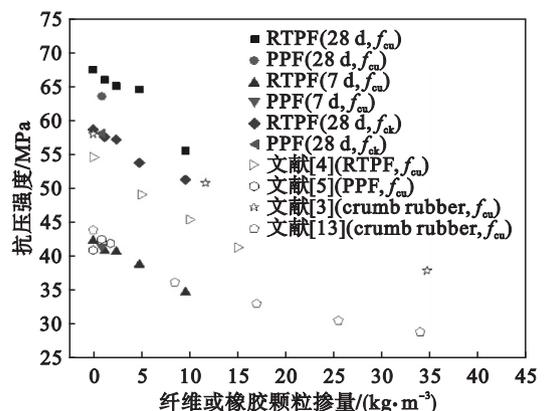


图 4 抗压强度随纤维或橡胶颗粒掺量变化图

Fig. 4 Effect of fiber or rubber particle fraction on the compressive strength of the concrete mixtures

2.3 劈裂抗拉强度

劈裂抗拉试验采 150 mm × 150 mm × 150 mm 试件, 试验结果如图 5 所示. F0 劈裂抗拉强度为 4.83 MPa, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 分别比 F0 提高 3.3%, 7.6%, 7.0%, 6.2% 和 4.7%. 这是由于 RTPF 和 PPF 可以抑制混凝土的早期收缩, 减少微裂纹的产生及扩展, 并在混凝土中呈三维乱向分布, 发挥桥接作用^[4-6,15], 从而提高劈裂抗拉强度. 但是随 RTPF 掺量增加, 混凝土内部薄弱界面增多, 拌合物工作性能变差, 混凝土的劈裂抗拉强度降低.

拉压比为劈裂抗拉强度与立方体抗压强度之比. F0 拉压比为 7.17%, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 分别比 F0 提高了 5.72%, 11.71%, 11.74%, 29.15% 和 11.29%, 拉压比随 RTPF 掺量增大而增大, 可见 RTPF 和 PPF 均可有效改善混凝土的脆性.

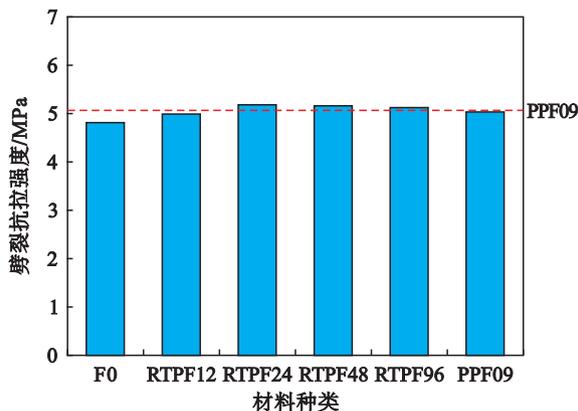


图 5 混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 5 The splitting tensile strength of concrete

2.4 抗折强度

抗折试验采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 试件, 试验结果如图 6 所示. F0 抗折强度为 4.79 MPa, RTPF12, RTPF24, RTPF48, RTPF96 和 PPF09 分别比 F0 提高了 3.5%, 9.6%, 7.3%, 5.6% 和 8.7%, RTPF 混凝土抗折强度出现先升高后降低的趋势. RTPF 掺量超过 2.4 kg/m³ 时混凝土抗折强度下降, 这是由于拌合物含气量较大, 坍落度较小, 同时橡胶颗粒与混凝土之间的黏结界面抗拉性能较差, 这与文献[3]和[8]的研究结果相似. 文献[6]和[8]的试验结果表明 PPF 对混凝土抗折强度具有增强作用. PPF 比 RTPF 更长, 能够有效提高纤维的锚固长度^[16], 故在相同体积掺量(0.1%)下, PPF 提高混凝土抗折强度更为明显.

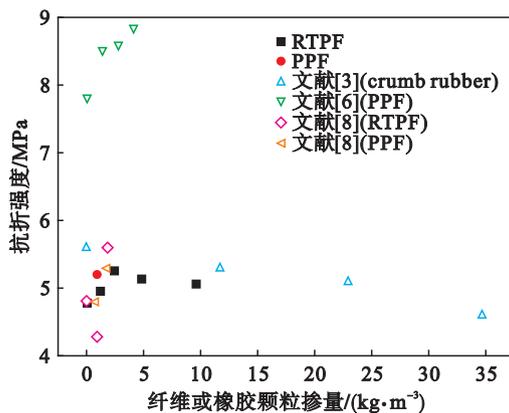
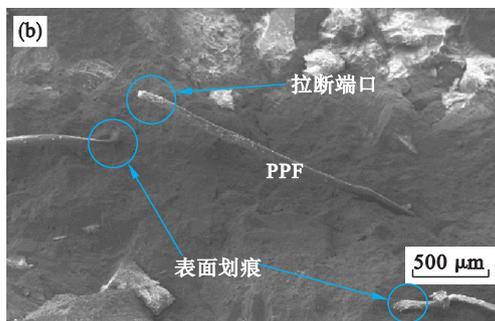
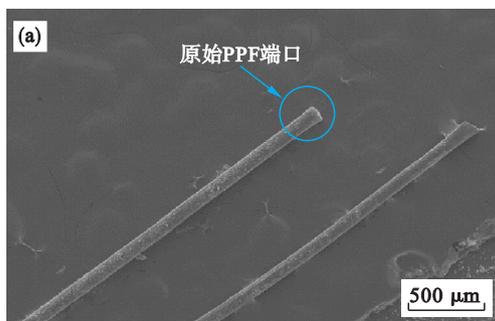


图 6 抗折强度随纤维或橡胶颗粒掺量变化图

Fig. 6 Effect of fiber or rubber particle fraction on flexural strength of concrete mixtures

2.5 纤维作用机理分析

图 7 为原始 RTPF 和混凝土破坏后扫描电子显微镜测试图. 图 7a 中原始 PPF 端口整齐, 图 7b 中在混凝土破坏后 PPF 端口呈尖锥形, 这表明纤维在混凝土破坏时被拉断, 同时部分纤维表面出现划痕, 表明纤维在破坏过程中被拔出基体发挥了桥连作用. 图 7c 为混凝土破坏后 RTPF 形貌, 部分纤维表面有划痕或破坏端口呈锥状斜茬. RTPF 表面的粗糙度比 PPF 大, 可以有效提供与基体之间的黏结力, 抑制混凝土的收缩并在断裂过程中发挥桥连作用.



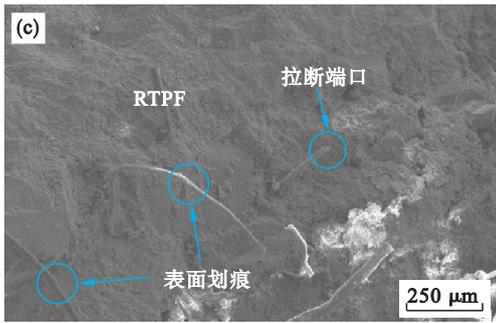


图 7 纤维扫描电子显微镜图像

Fig. 7 SEM images of fibers

(a)—原始 PPF; (b)—破坏后 PPF; (c)—破坏后 RTPF.

3 结 论

1) RTPF 和 PPF 混凝土含气量均高于 F0, 含气量随 RTPF 掺量增大而递增, 在相同体积掺量 (0.1%) 下, PPF 的引气能力大于 RTPF; 混凝土坍落度随 RTPF 掺量升高而降低, 体积掺量在 0.1% ~ 0.8% 的 RTPF 混凝土坍落度比 F0 降低了 8.1% ~ 62.2%, PPF09 坍落度介于 RTPF12 和 RTPF24 之间.

2) RTPF 和 PPF 混凝土抗压强度均低于 F0 且抗压强度随 RTPF 掺量增大而降低; RTPF 体积掺量在 0.4% 范围内对立方体抗压强度影响不大; 体积掺量在 0.1% ~ 0.8% 的 RTPF 混凝土轴心抗压强度比 F0 降低了 1.9% ~ 12.6%, 相同纤维体积掺量 (0.1%) 的 RTPF 和 PPF 对轴心抗压强度的影响相差不大.

3) RTPF 和 PPF 混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度均高于 F0, 劈裂抗拉强度和抗折强度随 RTPF 掺量均出现先升高后降低的趋势, RTPF 体积掺量 0.2% 为最优纤维掺量, 其劈裂抗拉强度和抗折强度分别比 F0 提高 7.6% 和 9.6%.

4) 混凝土破坏后 RTPF 形貌出现表面划痕和端口拉断, 表明纤维从混凝土基体中拔出或发生受拉破坏, 纤维与混凝土基体存在有效黏结力并发挥桥连作用.

参考文献:

[1] Adhikari B, De D, Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber [J]. *Progress in Polymer Science*, 2000, 25: 909 - 948.

[2] Abbass W, Khan I M, Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete [J]. *Construction Building and Materials*, 2018, 168: 556 - 569.

[3] Liu F, Zheng W, Li L, et al. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 711 - 719.

[4] Baricevic A, Rukavina J M, Pezer M, et al. Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties [J]. *Cement Concrete and Composites*, 2018, 91: 29 - 41.

[5] Baricevic A, Pezer M, Rukavina J M, et al. Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete [J]. *Construction Building and Materials*, 2018, 176: 135 - 144.

[6] Serdar M, Baricevic A, Rukavina J M, et al. Shrinkage behavior of fiber reinforced concrete with recycled tire polymer fibers [J]. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 2015: 1 - 9.

[7] Chen M, Chen W, Zhong H, et al. Experimental study on dynamic compressive behavior of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete [J]. *Cement Concrete and Composites*, 2019, 98: 95 - 112.

[8] Bantia N, Gupta R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36: 1263 - 1267.

[9] Afroughsabet V, Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers [J]. *Construction Building and Materials*, 2015, 94: 73 - 82.

[10] Li J J, Niu J G, Wan C J, et al. Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. *Construction Building and Materials*, 2016, 118: 27 - 35.

[11] 中国国家标准化管理委员会. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50081—2016 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.)

[12] 中国国家标准化管理委员会. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

(Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.)

[13] Li L J, Ruan S H, Zeng L. Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles [J]. *Construction Building and Materials*, 2014, 70: 291 - 308.

[14] Barnat-Hunek D, Smarzewski P. Influence of hydrophobisation on surface free energy of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete [J]. *Construction Building and Materials*, 2016, 102: 367 - 377.

[15] Rostamia R, Zarrebini M, Mandegari M, et al. The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties [J]. *Cement Concrete and Composites*, 2019, 97: 118 - 124.

[16] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴余, 等. 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36 (8): 1935 - 1948.

(Luo Hong-lin, Yang Ding-yi, Zhou Xing-yu, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1935 - 1948.)