



低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验

苏骏 黄福 王淑波 许子扬 杨海鑫 李扬

Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature

SU Jun, HUANG Fu, WANG Songbo, XU Ziyang, YANG Haixin, LI Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230531.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响

Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete
复合材料学报. 2020, 37(10): 2602–2609 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200316.002>

钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响

Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid additon on impact resistance of recycled aggregate concrete
复合材料学报. 2020, 37(7): 1763–1773 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191106.001>

直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算

Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear
复合材料学报. 2021, 38(11): 3962–3970 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001>

玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制

Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete
复合材料学报. 2019, 36(8): 1926–1934 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180929.001>

再生骨料掺配比对再生透水混凝土性能的影响

Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete
复合材料学报. 2018, 35(6): 1590–1598 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.003>

基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征

Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image
复合材料学报. 2020, 37(7): 1774–1784 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190917.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验



分享本文

苏骏, 黄福*, 王淑波, 许子扬, 杨海鑫, 李扬

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要: 为探究低温作用对改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能的影响, 将再生骨料通过水泥净浆改性处理后, 分别设置 30wt%、60wt% 再生骨料取代率, 掺入适量钢纤维制成净浆改性再生混凝土 (CRAC), 以我国北方寒区温度为背景设置 20°C、0°C、-20°C、-40°C、-60°C 的温度梯度, 将 CRAC 经低温作用进行抗压强度及四点弯曲性能试验, 对其进行等效弯曲强度及弯曲韧性分析, 同时结合 SEM 从微观结构角度揭示其宏观性能改变机制, 在此基础上给出了低温作用下再生混凝土的纤维增强效应表达式。结果表明: 经低温作用 CRAC 弯拉强度显著提升, 较常温最大可提升约 168%; 随温度的进一步降低, 受冰晶生长作用及改性骨料特性影响, 再生骨料取代率为 60wt% 的 CRAC 耗能能力较 30wt% 表现更优; 同时低温作用下钢纤维体积掺量为 1.5vol% 的 CRAC 强度及韧性性能提升效果最佳, 研究结论为低温作用下再生混凝土的性能优化设计及推广应用提供参考。

关键词: 改性骨料; 再生混凝土; 低温作用; 弯曲韧性; 纤维掺量; 微观结构

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)02-0884-14

Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature

SU Jun, HUANG Fu*, WANG Songbo, XU Ziyang, YANG Haixin, LI Yang

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to study the effect of low temperature on bending property of modified aggregate-steel fiber recycled aggregate concrete, the replacement rates of 30wt% and 60wt% recycled aggregate were set, mixed with appropriate amount of steel fiber to make cement recycled aggregate concrete (CRAC), temperature gradients of 20°C, 0°C, -20°C, -40°C and -60°C were set in the cold area of northern China. CRAC was subjected to compressive strength and four-point bending performance tests by low-temperature action, and its equivalent bending strength and bending toughness were analysed, together with SEM to reveal its macroscopic performance change mechanism from the microstructure perspective, on the basis of which an expression for the fibre reinforcement effect of recycled concrete under low-temperature was proposed. The test results show that after low temperature treatment, the flexural strength of CRAC is significantly increased by 168%, respectively. With the further decrease of temperature, the bending property of 60wt% CRAC is better than that of 30wt% CRAC. At the same time, CRAC with 1.5vol% steel fibres has the best strength and toughness properties at low temperatures. The conclusion of the study is expected to provide reference for the performance design and application of recycled concrete in low temperature environment.

Keywords: modified aggregate; recycled aggregate concrete; low temperature; bending property; fiber content; micro structure

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-05-09; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发时间: 2023-06-01 10:07:44

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230531.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51508171); 湖北省自然科学基金项目 (2020CFB860)

National Natural Science Foundation of China (51508171); Natural Science Foundation of Hubei Province (2020CFB860)

通信作者: 黄福, 硕士生, 研究方向为纤维再生混凝土 E-mail: 1248089087@qq.com

引用格式: 苏骏, 黄福, 王淑波, 等. 低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 884-897.

SU Jun, HUANG Fu, WANG Songbo, et al. Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 884-897(in Chinese).

随着我国城市基础设施建设的快速发展，建筑固废排放量正逐年攀升，截止 2021 年，我国建筑固废排放量高达 30 亿吨，其中废弃混凝土约占 40% 左右，大量废弃混凝土不仅占用了大量的土地资源而且很难物尽其用^[1]。同时建筑固废也是欧盟等各国的主要废弃物，其资源化利用率从 90% 下降到 5% 不等^[2]。因此，将废弃混凝土作为混凝土骨料回收再利用，不仅可以节约资源，缓解对土地的需求^[3]，还可以减少 CO₂ 排放量^[4]，同时对我国“双碳”目标的实现具有重要的战略意义。

再生混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 是指利用废弃混凝土破碎加工而成的再生集料，部分或全部代替天然集料配制而成的新混凝土^[5]。由于再生骨料表面具有较多的微裂缝和旧砂浆，使再生混凝土存在多个较薄弱的界面过渡区 (ITZ)，导致再生混凝土的力学性能普遍低于天然混凝土^[6]，致使再生混凝土的推广应用遇到较大阻力。针对这一问题，国内外学者对再生骨料改性进行了大量的试验研究，并取得一系列重要研究成果。主要包含有增强旧砂浆，如聚合物乳液浸泡^[7]、碳酸钙沉积^[8]等；去除旧砂浆，如机械研磨^[9]、浸酸分离^[10]等；掺入纤维，如钢纤维^[11]、聚合物纤维^[12]等。相较溶液浸泡带来的次生化学污染及研磨等需要投入大量机械设备，采用水泥净浆改性再生骨料优势更明显。曹鑫铖等^[13]研究表明，再生骨料经包浆处理后能有效降低混凝土板裂缝开展的离散程度，使裂缝更加均匀分布，从而提高再生混凝土的抗开裂能力。王兴国等^[14]研究发现，经水泥净浆改性再生混凝土的抗压强度和抗折强度均得到明显提升，且在抗冲击性能方面，水泥净浆改性再生混凝土较纳米 SiO₂ 溶液具有更高比吸能。Kim 等^[15]认为掺入钢纤维可有效提高再生混凝土梁的弯曲强度和延性系数，钢纤维的控裂作用减缓了再生混凝土的韧性和抗弯强度的降低。朱海堂等^[16]研究表明，钢纤维对再生混凝土韧度增强效果较天然混凝土更强。牛海成等^[17]则发现当掺入 1.5 vol% 钢纤维和 0.1 vol% 聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol, PVA) 纤维时再生混凝土的开裂荷载、抗弯承载力和延性性能均达到峰值，较普通再生混凝土分别提高了 60.0%、4.2% 和 20.1%。因此，

将再生骨料进行水泥净浆预浸处理、掺入适量钢纤维，能有效提升再生混凝土的力学性能和耐久性能。

随着再生骨料改性及设计性能的逐步完善，再生混凝土逐渐在建筑物及构筑物中广泛投入使用，北京冬奥会速滑馆^[18]在建造中也采用了低取代率的再生混凝土。由于我国南北部气候差异显著，北部地区冬季气温较南部更低，而低温影响在北方地区混凝土结构设计中不容忽视。据气象观测资料显示：北京冬季史载最低气温约为 -27.4℃，而北部局部地区甚至达 -52.3℃。已有研究表明，低温作用下普通混凝土力学性能与常温条件下相比有很大的区别，主要受温度、含水率的影响较大^[19]。但有关低温作用对再生混凝土性能的影响尚未见文献报道，本文将再生骨料进行水泥净浆改性处理，并在再生混凝土中掺入适量的钢纤维，研究低温作用对改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能的影响，研究结论为再生混凝土的性能优化设计及推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料和试件制备

试验选用 P·O 42.5 华新牌水泥，采用细度模数为 2.5 的天然河砂，减水剂采用聚羧酸高效减水剂，采用直杆形镀铜微丝钢纤维，其物理性能见表 1。天然粗骨料 (Natural aggregate, NA) 选取武汉市自产骨料，再生粗骨料 (Recycled aggregate, RA) 为某商混站废弃混凝土经破碎筛分得到，水泥净浆改性再生骨料 (Cement recycled aggregate, CRA) 制作流程如图 1 所示，各项物理指标见表 2。经水泥净浆改性再生骨料压碎指标相对较低，使再生骨料具有较好的持荷能力，同时该改性可使其界面过渡区更均匀致密，进而可提升再生混凝土宏观力学性能^[20]。

试件制备时先将粗骨料 (NA、CRA)、河砂、水泥依次倒入搅拌机中干拌 2 min，随后边搅拌边均匀添加钢纤维，同时先加入一半的水，然后加入另一半水继续搅拌 2 min 获得拌合物，将其倒入模具中，同时将热电偶加入其中以便后期监测试验温度，最后将其放置 24 h 脱模后，放入标准养护室进行养护 28 天。

表 1 钢纤维物理性能

Table 1 Physical parameters of steel fiber

Density/(g·cm ⁻³)	Diameter/mm	Length/mm	Tensile strength/MPa	Modulus of elasticity/GPa
7.8	0.2	13	2 900	200



图1 水泥净浆改性再生骨料(CRA)制作流程及其形态

Fig. 1 Production process and morphology of cement recycled aggregate (CRA)

表2 不同骨料物理指标

Table 2 Physical indicators of different aggregates

Aggregate type	Aggregate size/mm	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Crush index/%	Water absorption/%	Moisture content/%
NA		2 750	9.60	0.83	1.20
RA	5-20	2 652	18.40	6.20	2.30
CRA		2 638	15.30	7.10	3.70

Note: NA—Natural aggregate.

1.2 试验设计

试验设计 CRA 质量取代率分别为 30wt% 和 60wt%，钢纤维体积掺量分别为 0vol%、0.5vol%、1.0vol%、1.5vol% (wt% 表示再生骨料质量占粗骨料用量比例，称为质量取代率；vol% 为钢纤维掺量占试件体积分数，称为体积掺量)，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，试件编号及配合比见表3，其中水泥、砂、基础水和减水剂分别为 406 kg·m⁻³、607 kg·m⁻³、195 kg·m⁻³ 和 2.82 kg·m⁻³，每组试件制作且测试 3 个样本，取其平均值探究低温作用及纤维掺量对水泥净浆改性再生混凝土 (Cement recycled aggregate concrete, CRAC) 弯曲性能的影响。

1.3 试验方法

1.3.1 降温试验

采用自主研制的深冷环境低温箱进行降温，降温设备如图2(a)所示。以我国北部寒区温度为背景，分别设置 20℃、0℃、-20℃、-40℃、-60℃ 的温度梯度，采用通入液氮方式进行降温使其达到目标温度，降温速率为 2℃/min，当预埋置于试件中心的热电偶及低温箱内自带环境温度监控系统均达到略低于目标温度时(设备详见图2(b)、图2(c))，使其恒温 2 h，随即进行加载试验。

1.3.2 弯曲性能试验

参考 CECS 13—2009^[21] 和 GB/T 50081—2019^[22]，

表3 试件编号及配合比

Table 3 Number and mix proportion of specimens

Number	NA/(kg·m ⁻³)	CRA/(kg·m ⁻³)	Steel fibre/vol%	Additional water/(kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa					
					20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃	
0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	824.60	353.40	0	13.17	41.62	44.44	48.94	56.71	62.76	
0.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	824.60	353.40	0.50	13.17	47.02	47.56	50.97	60.21	75.56	
1.0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	824.60	353.40	1.00	13.17	48.30	55.54	64.11	71.19	86.83	
1.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	824.60	353.40	1.50	13.17	49.36	56.20	56.13	67.18	85.07	
0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	471.20	706.80	0	26.34	39.74	52.52	61.76	69.08	81.64	
0.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	471.20	706.80	0.50	26.34	41.68	47.65	48.08	54.22	81.78	
1.0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	471.20	706.80	1.00	26.34	43.54	52.55	47.56	72.29	80.62	
1.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	471.20	706.80	1.50	26.34	46.78	58.33	57.46	68.21	83.92	

Note: CRAC—Cement recycled aggregate concrete; SF—Steel fibre.

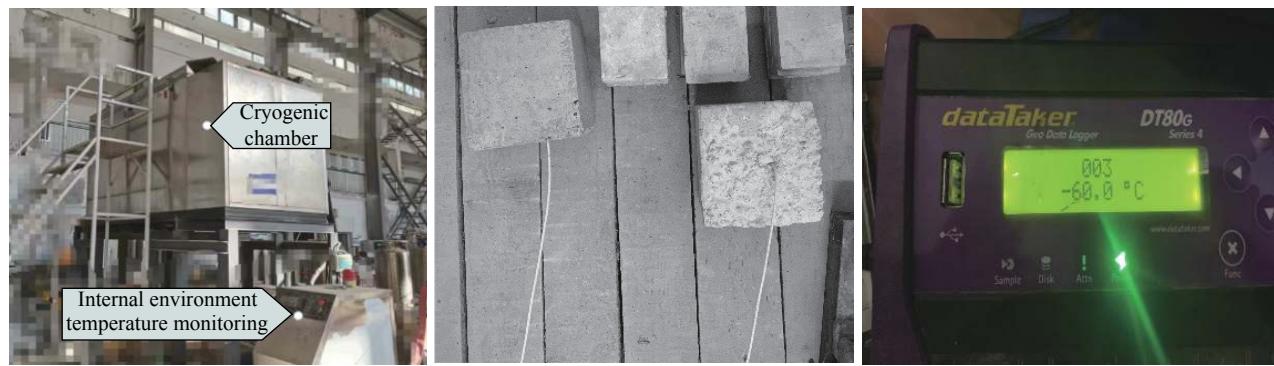


图 2 降温及温度传感设备
Fig. 2 Cryogenic equipment and temperature sensor

采用美特斯工业系统(中国)有限公司生产的 CBT1105-D 型微机控制四点弯曲试验机(图 3), 以位移控制方式进行加载, 加载速率为 0.6 mm/min, 用以研究低温作用及钢纤维掺量对 CRAC 弯曲性能的影响。由于在降温试验中, 使低温箱内环境温度与试件核心温度均达到略低于目标温度并进行了恒温, 且单个试件进行加载试验用时在 5 min 左右, 故本试验暂不考虑试件在加载过程中的温度损失。

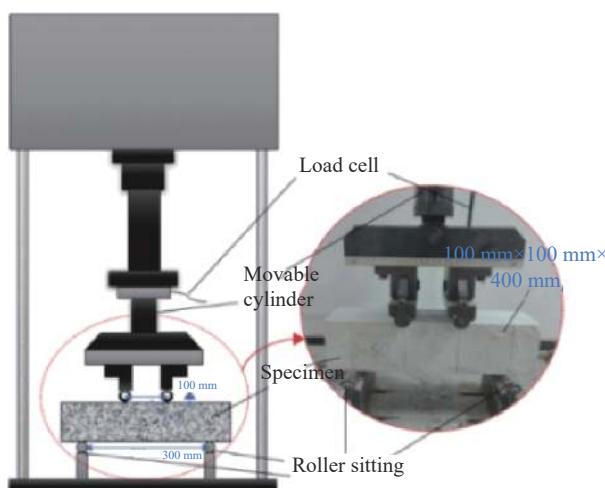


图 3 加载示意图
Fig. 3 Loading diagram

同时, 根据标准 CECS 13—2009^[21] 提出的等效抗弯强度和弯曲韧性指标来表征低温作用及纤维掺量对 CRAC 弯曲性能的影响, 计算表达式如下:

$$f_e = \frac{\Omega_k L}{b h^2 \delta_k} \quad (1)$$

式中: f_e 为等效弯曲强度; Ω_k 为跨中挠度为 $L/150$ 的荷载-挠度曲线下面积; δ_k 为跨中挠度为 $L/150$ 时挠度值; L 为试件跨度; b 为试件截面宽

度; h 为试件高度。

本文采用史占崇等^[23] 提出的偏移法确定荷载-挠度曲线中的初裂挠度 δ , 并依据 CECS 13—2009^[21] 计算其相应弯曲韧性指标, 计算简图如图 4 所示, 计算表达式如下:

$$I_5 = \frac{\Omega_{3\delta}}{\Omega_\delta}; \quad I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega_\delta} \quad (2)$$

式中: I_5 为 3 倍初裂挠度值 (3δ) 处荷载-挠度曲线包络面积与初裂挠度点处曲线包络面积的比值; I_{10} 为 5.5 倍初裂挠度值 (5.5δ) 处荷载-挠度曲线包络面积与初裂挠度点处曲线包络面积的比值; $\Omega_{k\delta}$ 为 k 倍的初裂挠度值处荷载-挠度曲线包络的面积。

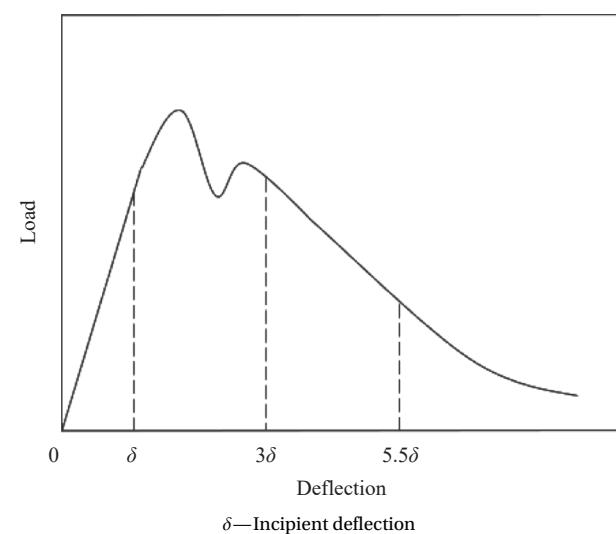


图 4 韧性指标计算简图
Fig. 4 Calculation diagram of toughness index

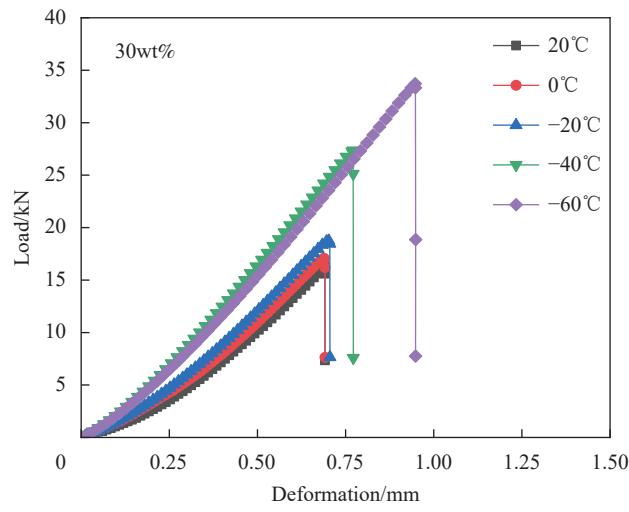
1.3.3 微观试验

采用 Hitachi SU8010 型场发射扫描电子显微镜(日本日立公司)对 CRAC 的微观形貌进行观察。

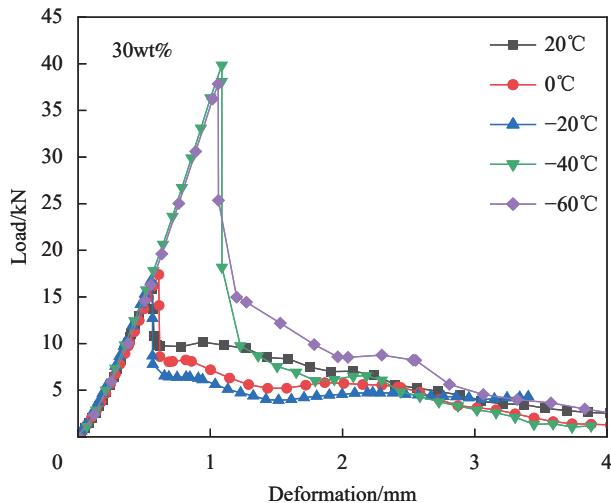
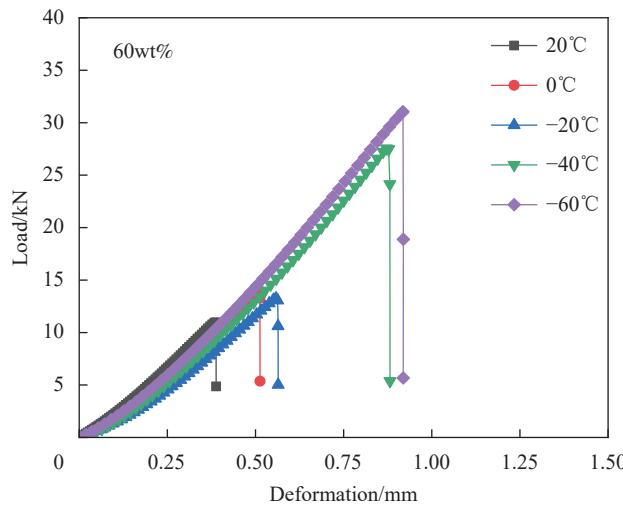
2 试验结果与分析

2.1 CRAC 荷载-挠度曲线与破坏形态

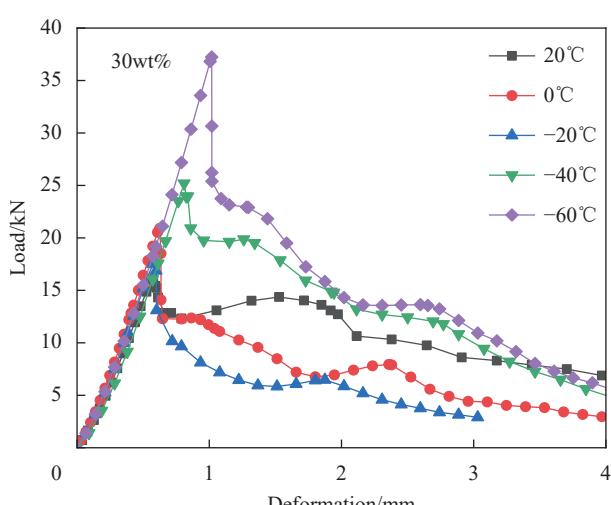
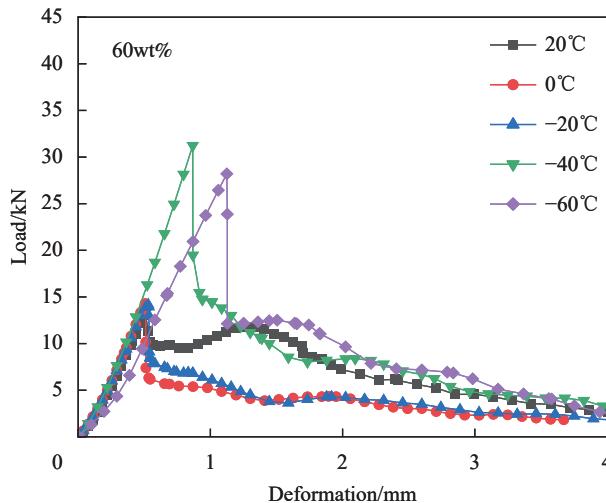
不同纤维掺量的 CRAC 试件荷载-挠度曲线如



(a) 0vol% steel fibre for CRAC

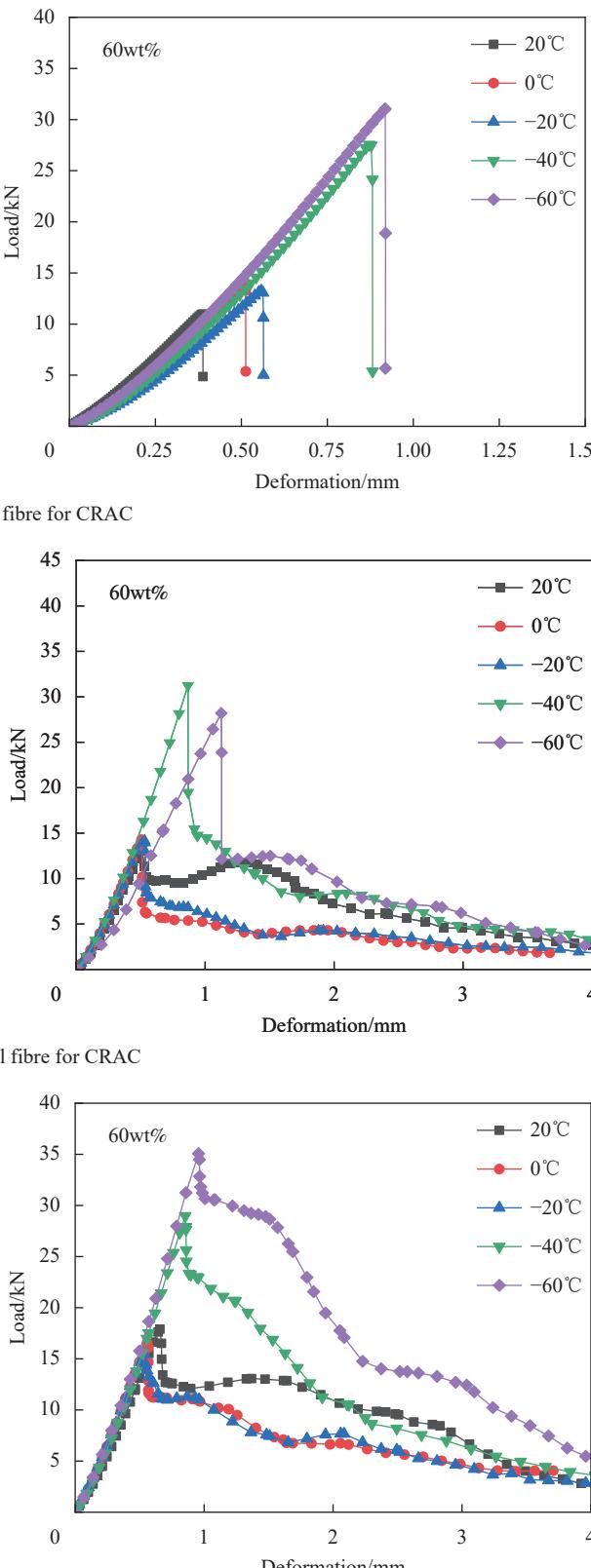


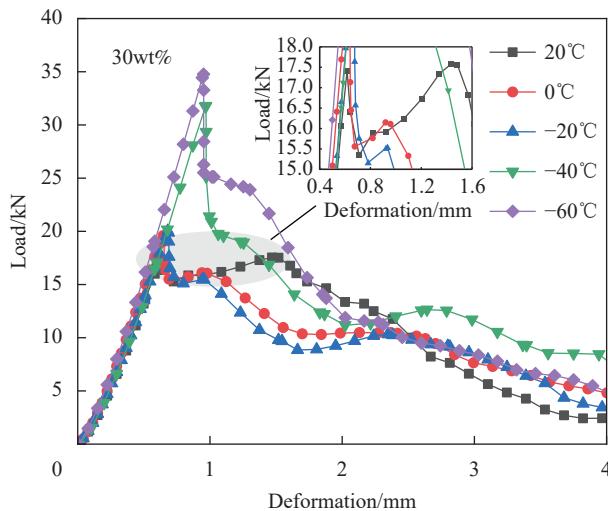
(b) 0.5vol% steel fibre for CRAC



(c) 1.0vol% steel fibre for CRAC

图 5 所示。可以看出，在加载过程中，经低温作用的试件强度会有显著提升，但其脆性明显增大，随温度进一步降低，荷载-挠度曲线表现出“跳崖”





(d) 1.5vol% steel fibre for CRAC

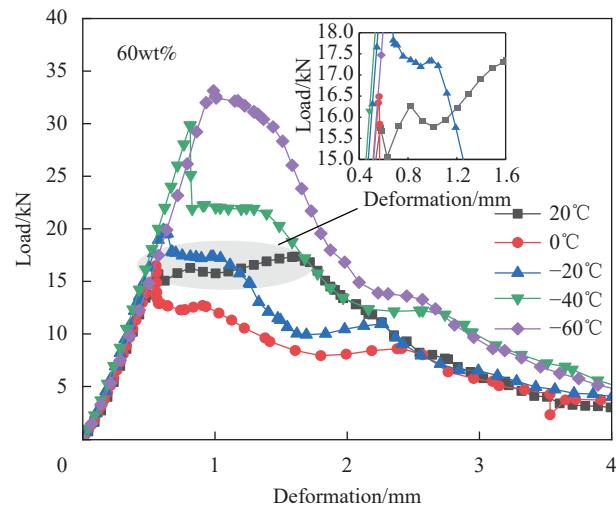
图 5 不同温度下水泥净浆改性再生混凝土 (CRAC) 受弯荷载-挠度曲线

Fig. 5 Bending load-deflection curves of cement recycled aggregate concrete (CRAC) at different temperatures

般突降趋势，且纤维掺量越低，其变化越明显。

图 5(a) 为未掺入纤维的 CRAC 荷载-挠度曲线，在受弯过程中，随荷载增加，试件中部出现沿截面发展的竖向裂缝并迅速贯穿整个截面，伴随着剧烈声响发生断裂，表现出明显脆性破坏特征，随着温度降低，其极限承载力明显提高，较常温状态最大可提高约 2.84 倍；而掺入适量钢纤维的试件在加载过程中表现出良好的韧性，其试验过程可归纳为开裂前阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段，试件破坏形态见图 6。

从图 5(b) 可以看出，在开裂前阶段，当荷载较小时，纤维掺量为 0.5vol% 的 CRAC 截面应力和应变均较小，此时荷载-挠度曲线呈线性上升；随着荷载逐渐增大，基体达到最大拉应变，试件底部出现细小裂缝，裂缝尖端产生应力集中并开始沿截面竖向发展，由于此时纤维含量相对较少，且纤维呈乱向分布，导致裂缝持续开展，继而部分荷载-挠度曲线出现陡降“跳崖”趋势，当裂缝尖端接触到基体内钢纤维时，此时钢纤维在裂缝处发挥桥联作用，缓解裂缝尖端应力的激增并将其均匀传递给纤维附近未开裂的基体，钢纤维的桥联作用限制了裂缝的进一步发展，使试件破坏具有韧性特征，延性增大；当荷载加载至峰值荷载的 80% 时，裂缝沿主裂缝进一步延伸，主裂缝宽度迅速增大，试件挠度增加，伴随断裂声试件破坏。图 5(c)、图 5(d) 为纤维掺量 1.0vol%、1.5vol% 的 CRAC，其试验现象与 0.5vol%

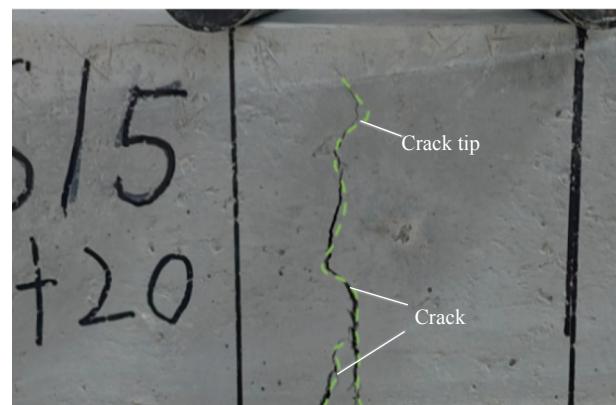


(e) 1.5vol% steel fibre for CRAC

试件相似，但承载力和变形能力均有不同程度的增长。此外，从图 5(d) 可以看出，在常温状态时，钢纤维掺量为 1.5vol% 的 CRAC 曲线出现二次强化



(a) Part of the specimen failure pattern



(b) Crack development pattern

图 6 1.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA) 试件破坏形态

Fig. 6 1.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA) specimen damage pattern

现象(荷载出现二次峰值现象),其主要原因是试件加载过程中裂缝尖端扩展到钢纤维桥联处时,尤其是在纤维掺量较高时,钢纤维拔出需要消耗大量能量,从而导致荷载出现二次峰值^[24];但随温度降低该现象消失,主要是由于随温度降低试件承载力显著提升,钢纤维与基体内水分冻结连接,当受力破坏时纤维与基体形成粘结效应;由于一方面CRA界面过渡区宽度相对较大,使材料在受力破坏时较高体积掺量的钢纤维发挥桥联作用空间增大,另一方面1.5vol%钢纤维易产生个别局部结团现象,从而导致常温状态下钢纤维掺量为1.5vol%时,再生骨料取代率为60wt%的CRAC二次强化现象较30wt%更明显,孔祥清等^[24]也得到相似结果;同时对比30wt%和60wt%荷载-挠度曲线发现,随温度进一步降低,60wt%CRAC曲线较30wt%更“饱满”,说明此时60wt%CRAC耗能能力更优。

2.2 CRAC弯拉强度

各试件弯拉强度见表4。可以看出,掺入适

量纤维可提升CRAC弯拉强度,随纤维掺量的增加,CRAC弯拉强度显著提升,在常温状态下,30wt%和60wt%的CRAC均在纤维掺量为1.5vol%时弯拉强度提升最明显,分别为0vol%的1.07倍、1.49倍;在低温状态下,CRAC弯拉强度整体随温度降低而提升,当温度达到-60℃时,较常温状态下最大可提升约168%;由于普通混凝土材料是由固、液、气三相组成的复合多孔材料,而CRAC由于再生骨料自身缺陷及新旧砂浆形成的界面过渡区会进一步使其孔隙率增大^[25]。经低温作用,材料中的毛细管孔隙水向冰的状态过渡,水转变成冰会填补CRAC内部孔隙缺陷,导致其对外部载荷的阻力显著增加^[26],从而提升其整体密实性,使弯拉强度显著提升。从表中可见弯拉强度出现部分离散现象,这与Cai等^[27]试验结果相似,主要是由于随温度降低,材料中毛细管孔隙中水逐渐向冰的状态转变,导致不同程度的体积膨胀,而膨胀产生的内应力使材料各项性能的离散性进一步增加。

表4 CRAC试件平均弯拉强度试验值

Table 4 Test values of average flexural tensile strength of each group CRAC specimens

Number	Test values of average flexural tensile strength/MPa				
	20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	4.88	5.12	5.62	8.21	10.12
0.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	4.77	5.24	5.03	11.39	12.00
1.0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	4.81	6.26	5.34	7.54	11.12
1.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	5.22	5.89	6.02	9.54	10.44
0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	3.47	4.20	3.97	8.25	9.30
0.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	3.91	4.27	4.35	8.44	9.35
1.0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	5.01	4.95	4.65	8.71	10.54
1.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	5.17	4.95	5.96	8.95	9.93

2.3 CRAC等效弯曲强度

图7为不同影响因素对CRAC等效弯曲强度的影响。可以看出,掺入适量纤维对CRAC性能有明显提升,同时其等效弯曲强度随纤维掺量增加而提升,30wt%和60wt%CRAC均在纤维掺量为1.5vol%时表现最优,分别较0.5vol%最大提升约85.80%和123.35%,主要是由于CRAC材料在受力破坏时,掺入适量纤维可有效发挥其桥联作用,进而达到增韧阻裂的作用。

温度变化对CRAC等效弯曲强度有显著影响,两种再生骨料取代率下CRAC均表现出随温度降低,其等效弯曲强度呈先下降后上升的趋势。同

一纤维掺量下,当温度达到-20℃时,30wt%CRAC等效弯曲强度较常温最大降低34.86%,而在-60℃时达到最大值,较-20℃时最大提升135.96%;60wt%CRAC在0℃时其等效弯曲强度达到最小值,较常温最大降低约44.79%,而在-60℃时较0℃最大提升123.16%。基于低温作用下孔隙水结晶成核及冰晶生长演化过程(图8)可知,CRAC等效弯曲强度随温度降低呈先下降后上升的趋势是由于经低温作用时,CRAC中孔隙水会自发形成晶胚,当晶胚等于或大于临界尺寸时会形成晶核^[28],而在此过程中由于晶胚通过能量屏障生长成晶核(孔隙水由液相转变为固相),造成CRAC中孔壁

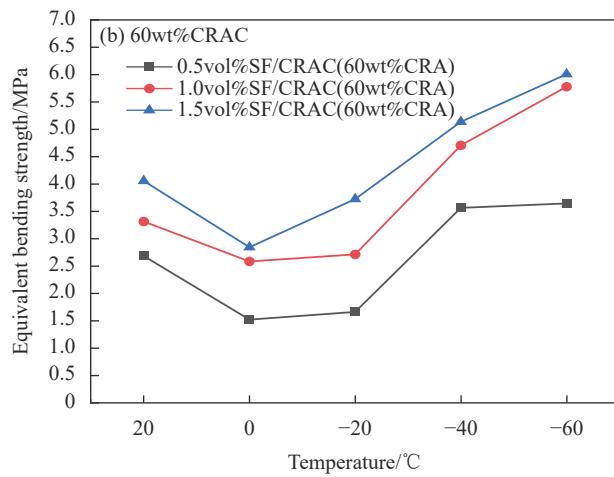
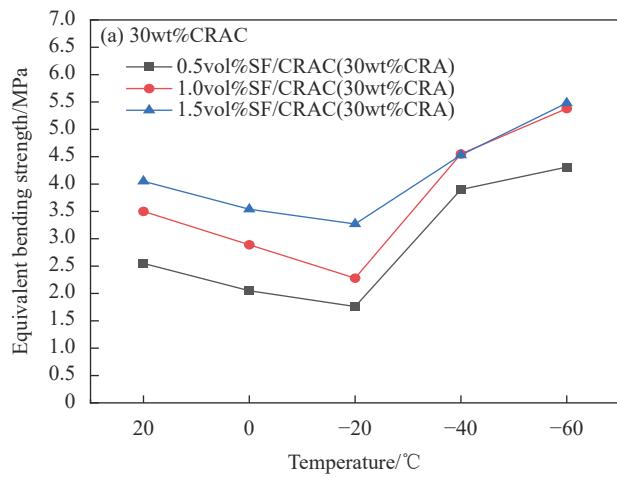


图 7 温度对 CRAC 等效弯曲强度的影响

Fig. 7 Effect of temperature on equivalent bending strength of CRAC



图 8 低温作用下孔隙水冰晶生长演化过程

Fig. 8 Evolution of pore water ice crystal growth under the effect of low temperature

形成不同程度微裂缝，同时一部分孔隙水迁移至裂缝中，从而使 CRAC 形成内部损伤导致其性能降低；随温度进一步降低，冰晶临界尺寸也随之降低，即 CRAC 中一部分毛细管孔隙水冻结成冰，同时填充基体内部微裂缝，一部分冰晶发挥粘结、增韧阻裂作用^[29]，进而使其性能提高。

从图 7 中对比 30wt% 与 60wt%CRAC 可发现，其等效弯曲强度分别在 -20°C、0°C 时达到最小值；除 0.5vol% 外，其他试验组当温度低于 0°C 时 60wt% 的 CRAC 等效弯曲强度均大于 30wt%。主要是由于孔隙水的冰点与孔径大小有关，孔径越小其冰点越低，同时在低温作用下混凝土性能提升程度与其含水率成正比^[28]，当温度达到 0°C 时，由于 60wt%CRAC 具有较高孔隙率，而更多大孔隙水成冰造成的内部损伤较明显，从而导致此时其等效抗弯强度略低于 30wt%；由于当温度在 -20~ -70°C 时更小的毛细管孔隙水开始冻结^[30]，同时使一部分损伤微裂缝得到填充，进而导致当温度低于 -20°C 时，30wt%CRAC 等效弯曲强度明显提升，同时由于 CRA 与 NA 相比，CRA 吸水率、含

水率更高，导致当温度低于 0°C 时，60wt%CRAC 性能提升幅度大于其内部损伤，使其等效抗弯强度较 30wt% 更高。由于 0.5vol% 纤维掺量相对较少，且纤维在基体内呈不均匀分布，使纤维发挥桥联作用不确定性增加，导致个别钢纤维掺量为 0.5vol% 的 60wt%CRAC 等效弯曲强度略低于 30wt%。

2.4 CRAC 弯曲韧性指标

弯曲韧性指标可表征材料耗能及发生变形后的残余强度，依据 CECS 13—2009^[21] 以初裂挠度 δ_0 的 3.0、5.5 的倍数挠度点与荷载-挠度曲线下包围面积计算的相应韧性指数见表 5。

不同影响因素下 CRAC 弯曲韧性指数变化趋势如图 9 所示。可以看出，不同再生骨料取代率下 CRAC 弯曲韧性指数均随温度降低呈先下降后上升的趋势，1.5vol% 纤维掺量 CRAC 表现出良好的抗低温损伤效能，除 0.5vol% 纤维掺量外，随温度进一步降低 60wt%CRAC 弯曲韧性指数整体较 30wt% 更高，由此说明随温度进一步降低 60wt%CRAC 较 30wt% 更具耗能能力，并从图 9(a)、图 9(b) 中可知，随温度进一步降低，CRAC 弯曲

表 5 CRAC 强度及韧性指标

Table 5 Strength and toughness index of CRAC

Number	Temperature/°C	Initial crack load/kN	Initial crack deflection/mm	Peak load/kN	Equivalent bending strength/MPa	I_5	I_{10}
0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	20	9.21	0.47	16.27	—	—	—
	0	9.73	0.46	17.08	—	—	—
	-20	10.25	0.44	18.74	—	—	—
	-40	15.66	0.48	27.36	—	—	—
	-60	17.66	0.56	33.72	—	—	—
0.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	20	10.69	0.39	15.91	2.55	5.68	10.05
	0	9.77	0.38	17.45	2.05	5.38	8.59
	-20	10.19	0.36	16.76	1.76	4.62	6.99
	-40	15.79	0.52	39.95	3.90	6.09	8.48
	-60	16.34	0.55	37.96	4.31	6.51	9.31
1.0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	20	13.97	0.44	16.01	3.50	6.01	11.94
	0	12.80	0.41	20.86	2.89	5.61	9.06
	-20	10.96	0.39	17.80	2.28	5.27	8.38
	-40	17.54	0.62	25.14	4.55	6.15	10.06
	-60	20.93	0.60	37.14	5.38	6.52	10.32
1.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	20	15.05	0.49	17.40	4.05	6.58	12.26
	0	13.64	0.47	19.62	3.54	6.17	10.62
	-20	13.63	0.49	20.08	3.27	5.74	9.74
	-40	17.10	0.59	31.81	4.53	6.29	10.29
	-60	20.18	0.56	34.78	5.48	6.75	10.04
0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	20	8.80	0.32	10.94	—	—	—
	0	9.34	0.37	14.00	—	—	—
	-20	9.19	0.42	13.24	—	—	—
	-40	15.69	0.58	27.51	—	—	—
	-60	17.15	0.58	30.99	—	—	—
0.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	20	10.17	0.41	13.03	2.69	5.77	10.94
	0	8.95	0.34	14.23	1.53	4.76	7.18
	-20	9.08	0.35	14.10	1.67	5.06	7.69
	-40	16.22	0.52	31.17	3.57	5.51	8.15
	-60	15.08	0.66	28.12	3.65	5.89	8.44
1.0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	20	13.40	0.47	17.91	3.32	5.94	11.15
	0	11.21	0.40	16.51	2.59	5.58	9.22
	-20	11.02	0.39	15.51	2.72	5.70	9.37
	-40	17.99	0.56	29.02	4.71	6.43	9.58
	-60	24.53	0.63	35.13	5.78	7.00	10.62
1.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	20	14.98	0.49	15.75	4.06	6.32	11.62
	0	12.03	0.43	16.48	2.85	5.70	9.54
	-20	15.10	0.42	19.87	3.73	6.24	10.28
	-40	19.26	0.53	29.84	5.14	6.55	10.77
	-60	23.29	0.64	33.11	6.01	7.08	10.31

Notes: As the 0vol% fibre doping CRAC exhibits brittle fracture, it is not possible to calculate its equivalent flexural strength and toughness index (I_5 , I_{10}).

韧性指数 I_5 略高于其常温状态。为进一步探究其成因，分别截取常温、-60℃ 状态下 CRAC 破坏时钢纤维拔出部分，通过 SEM 扫描(图 10(a)、图 10(b))可见，-60℃ 状态下 CRAC 钢纤维拔出损伤较常温状态更显著，由此说明低温状态下钢纤维拔出具有更高摩擦剪切阻力。同时结合图 11 可知，不同

温度下 CRAC 受力破坏时，基体内钢纤维均呈拔出、脱粘现象，而在-60℃ 作用下钢纤维拔出附着冰晶并与基体粘结，由于基体内孔隙水冰晶生长作用，一方面使 CRAC 基体内部较常温状态下更密实，另一方面由于钢纤维具有较高表面硬度，随温度进一步降低当水泥基体硬度高于钢纤维时，

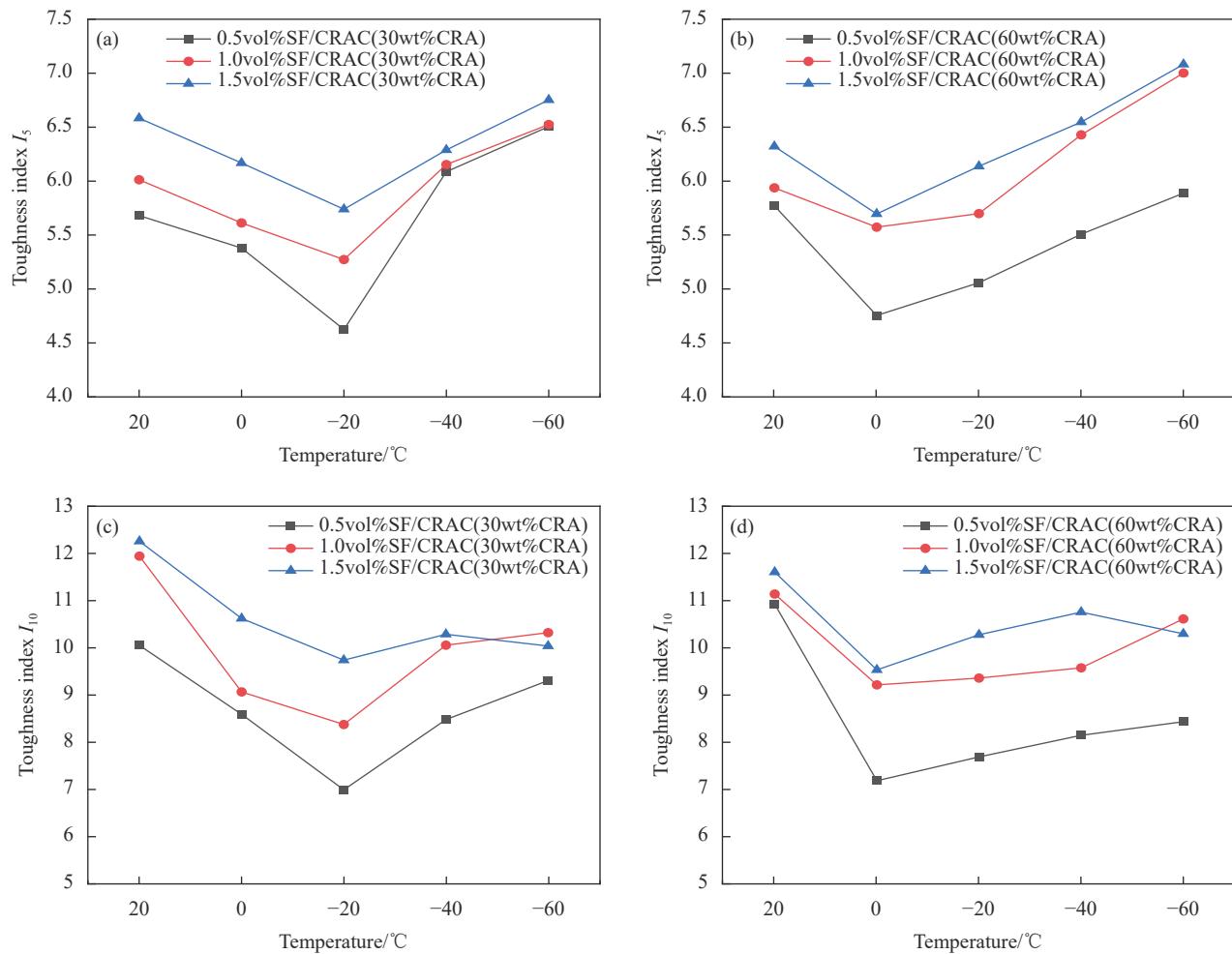
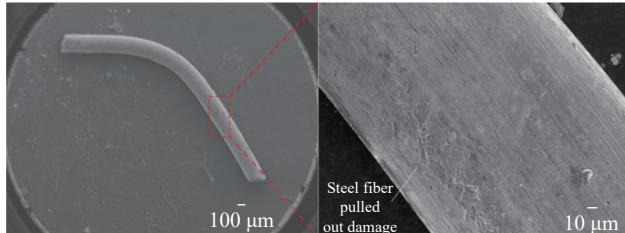
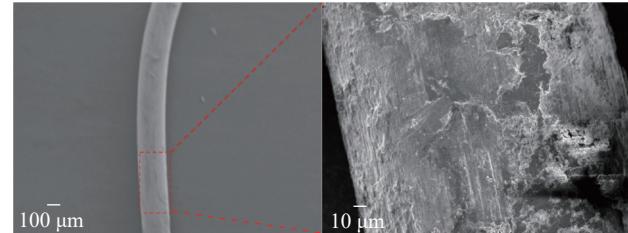


图 9 不同影响因素下 CRAC 弯曲韧性指数

Fig. 9 Bending toughness index of CRAC under different influence factors



(a) Steel fibre pull-out damage at normal temperature



(b) Steel fibre pull-out damage at -60°C

图 10 不同温度下钢纤维损伤机制

Fig. 10 Steel fiber damage mechanisms at different temperatures

使钢纤维-水泥基体粘接性能显著提高，进而提升材料峰后延性。

2.5 纤维对 CRAC 的增强效应

变形能是材料在受力破坏时的耗能能力，掺入适量钢纤维可有效提升 CRAC 弯曲性能(变形能)。为更直观反映低温作用下钢纤维对 CRAC 的增强效能，本文给出以不同钢纤维掺量的 CRAC 变形能与 0vol% 纤维掺量下的 CRAC 荷载-挠度曲

线包络面积的比值(纤维增强效应系数)来表征。计算公式如下：

$$T = \frac{S_k}{S_0} \quad (3)$$

式中： S_k 为纤维体积掺量为 k 时 CRAC 荷载-挠度曲线包络面积； S_0 为纤维掺量为 0vol% 时荷载-挠度曲线下包络面积； T 为纤维增强效应系数。各试件计算结果见表 6，纤维增强效应系数与温度

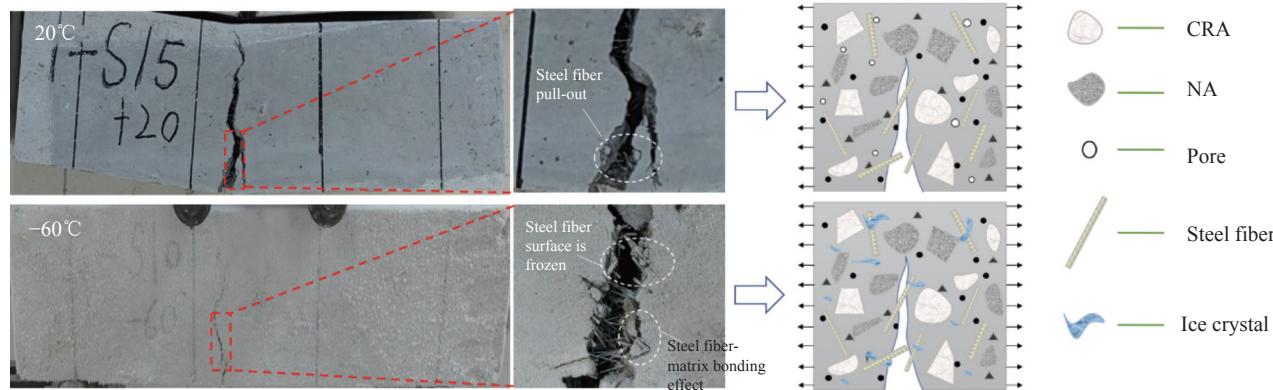


图 11 不同温度下 CRAC 破坏机制

Fig. 11 CRAC destruction mechanisms at different temperatures

关系如图 12 所示。

可知，在常温状态下 1.5vol% 纤维掺量 CRAC 增强效应最为显著，两种取代率下较 0.5vol% 分别可提升 59.86% 和 48.88%；经低温作用，不同纤维掺量下 CRAC 纤维增强效应随温度降低整体均呈下降趋势，而在同一骨料取代率下随纤维掺量增加其纤维增强效应相应增大；对比两种取代率

CRAC 可发现，再生骨料取代率为 60wt% 的 CRAC 纤维增强效应较 30wt% 更显著，其主要原因是，钢纤维呈乱向分布在基体中形成三维网状稳固结构，同时经低温作用孔隙水冻结成冰增大基体-纤维粘结作用，使当 CRAC 破坏时纤维拔出所耗能量增加，进而提升其弯曲性能；并结合上文所分析可知，在低温作用下，钢纤维与 CRAC 具有良

表 6 不同温度下 CRAC 纤维增强效应系数

Table 6 Fiber reinforcement effect coefficients of CRAC at different temperatures

Number	Fiber reinforcement effect coefficients				
	20°C	0°C	-20°C	-40°C	-60°C
0.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	5.63	4.09	3.39	3.15	2.78
1.0vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	8.93	5.88	4.82	5.18	4.02
1.5vol%SF/CRAC(30wt%CRA)	9.00	7.92	6.52	5.34	3.67
0.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	13.59	7.15	4.62	3.32	2.83
1.0vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	18.05	10.52	8.06	4.25	5.25
1.5vol%SF/CRAC(60wt%CRA)	20.38	13.75	11.29	5.29	4.87

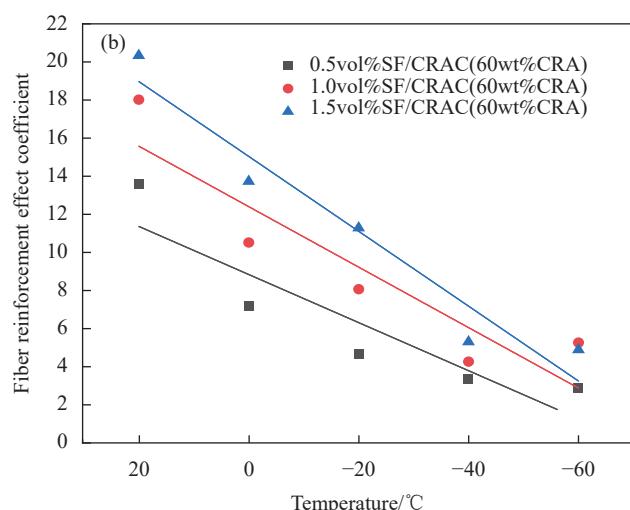
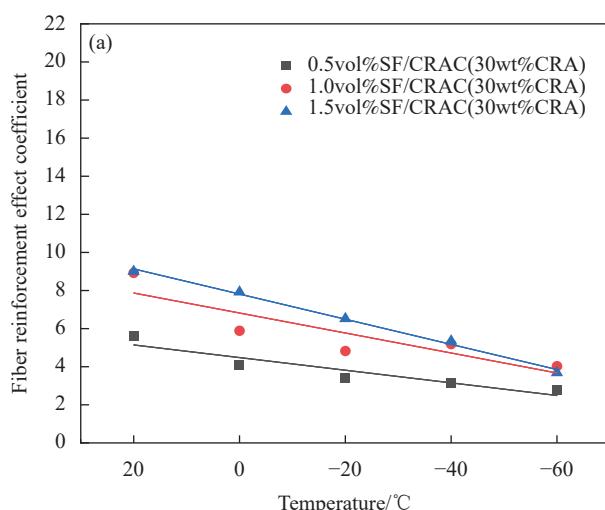


图 12 CRAC 纤维增强效应与温度的关系

Fig. 12 Relationship between fiber reinforcement effect of CRAC and temperature

好协同作用, 但随温度进一步降低, 材料中冰晶生长作用是影响材料性能的主要因素。

3 CRAC微观机制

常温状态下CRAC微观结构如图13所示, 从图13(a)可以看出, 在CRA与基体界面过渡区出现氢氧化钙(C-H)呈定向排列现象, 同时在其中富集水化硅酸钙(C-S-H)凝胶及少数(Aft)填充, 使界面整体结构较均匀。由于再生骨料经水泥净浆改性处理,

一方面骨料表面浆层在拌和过程中吸水较多, 而在水泥水化后期通过其缓释作用一定程度上补充过渡区水分(由此进一步阐释上文低温作用下60wt%CRAC性能提升现象), 从而使出现一部分水化产物C-S-H富集填充界面的现象。另一方面, 再生骨料与基体间通过一层浆体过渡层粘结, 使其中心质和介质之间的弹性模量与热膨胀系数相对较小^[31], 从而使在基体收缩及外力等因素作用下产生的局部应力降低。

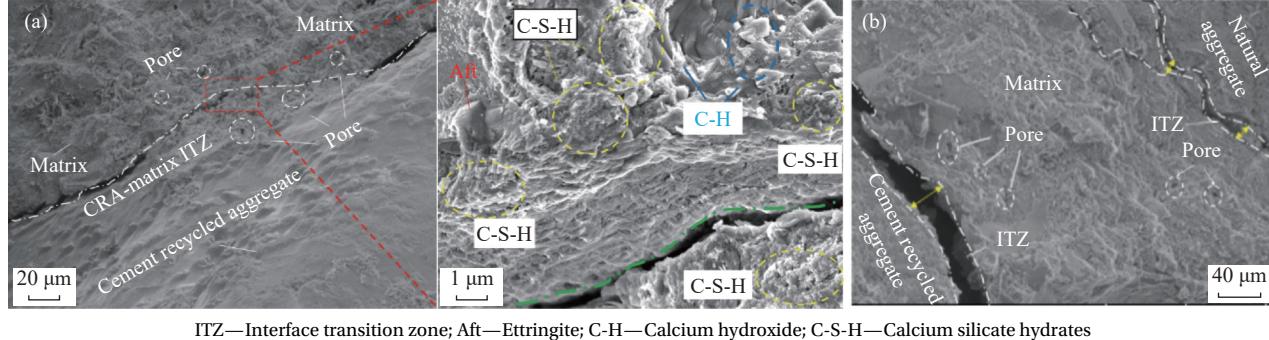


Fig. 13 Microstructure of CRAC

从图13(b)可以看出, CRA与基体界面过渡区宽度较NA更大, 其主要原因是, 虽然CRA中一部分水化产物C-S-H、Aft填充连接界面过渡区部分, 但是产物尺寸细小且其临界基体结构较NA更疏松, 从而使其界面过渡区宽度与NA存在一定差距。同时进一步说明, CRA与基体较宽的界面过渡区为低温作用下CRAC冰晶生长作用提供明显发展空间。

经低温作用CRAC微观结构如图14所示, 从图14(a)可以看出, 经低温作用CRA四周形成明

显微裂缝并向基体内部延伸, 临界基体部分存在较多大孔隙且结构疏松, 由此进一步说明在低温作用时, 由于CRA较高含水率及其缓释作用, 使CRA-基体界面过渡区处冰晶生长作用较显著。图14(b)为CRAC孔隙结构微观形貌, 从中可见经低温作用孔隙周围形成多条扩散延伸至界面过渡区的微裂缝, 并结合图8进一步说明在低温作用时, 一方面孔隙水冻结成冰造成孔壁损伤, 同时一部分孔隙水迁移至微裂缝中。另一方面, 由于冰晶生长作用使各向损伤连接填充。

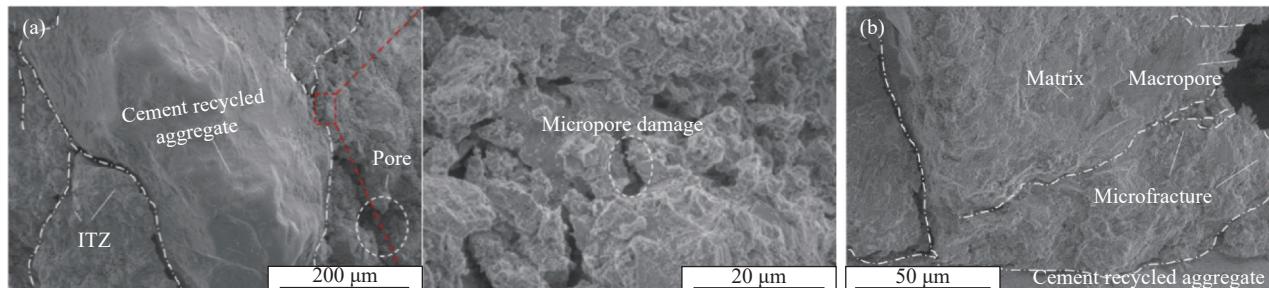


Fig. 14 Effect of low temperature action on the microstructure of CRAC

4 结论

通过对低温作用下不同再生骨料取代率及不

同钢纤维体积掺量的净浆改性再生骨料混凝土(CRAC)进行四点弯曲性能加载试验, 得到了不同

温度作用下 CRAC 的弯拉强度及荷载-挠度曲线，通过计算分析得到了 CRAC 等效弯曲强度、弯曲韧性指标；并提出低温作用下再生混凝土的纤维增强效应表达式，分析了低温作用及纤维掺量对 CRAC 弯曲性能的影响，并通过 SEM 扫描 CRAC 微观结构，得到以下主要结论：

(1) 常温状态下 CRAC 弯拉强度随钢纤维掺量增加得到明显提升，且在纤维掺量为 1.5vol% 时表现最优，其最大可达 0vol% 纤维掺量的 1.49 倍，同时其弯拉强度随温度降低明显提升，较常温条件下最大可提升 168%；

(2) 由于受 CRAC 孔隙水中冰晶生长作用及水泥净浆改性再生骨料 (CRA) 骨料特性影响，两种再生骨料取代率下钢纤维 CRAC 弯曲韧性随温度降低均呈先下降后上升的趋势；其中，随温度进一步降低再生骨料取代率为 60wt% 的 CRAC 耗能能力较 30wt% 更优；

(3) 低温作用下，掺入适量钢纤维可有效提升 CRAC 弯曲性能，两种再生骨料取代率下均在钢纤维掺量为 1.5vol% 时其弯曲性能达到最佳增强效应，且钢纤维的掺入对 60wt%CRAC 增强效应较 30wt% 更显著；同时钢纤维与 CRAC 具有良好协同作用，但随温度的降低，CRAC 材料中孔隙水的冰晶生长作用是影响其弯曲性能的主要因素。

参考文献：

- [1] 肖建庄, 张航华, 唐宇翔, 等. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J]. 科学通报, 2023, 68(5): 510-523.
- [2] XIAO Jianzhuang, ZHANG Hanghua, TANG Yuxiang, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(5): 510-523.
- [3] ALEXANDRIDOU C, ANGELOPOULOS G N, COUTELIERIS F A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 745-757.
- [4] SHI C J, WU Z M, CAO Z J, et al. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 86: 130-138.
- [5] KIM M S, SIM S R, RYU D W. Supercritical CO₂ curing of resource-recycling secondary cement products containing concrete sludge waste as main materials[J]. Materials, 2022, 15: 4581.
- [6] XIAO Jianzhuang. Recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 4.
- [7] TAM V W Y, GAO X F, TAM C M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1195-1203.
- [8] KOU S C, POON C S. Properties of concrete prepared with PVA impregnated recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 649-654.
- [9] BERNAL J, REYES E, MASSANA J, et al. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 196-210.
- [10] ULSEN C, TSENG E, ANGULO S C, et al. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8: 494-502.
- [11] KATZ A. Treatments for the improvement of recycled aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6): 597-603.
- [12] SENARTNE S, GERACE D, MIRZA O, et al. The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibers as a sustainable, structural material[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2318-2327.
- [13] WANG L, ZHOU S H, SHI Y, et al. Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 130: 28-37.
- [14] 曹鑫铖, 金宝宏, 宋牧原, 等. 自密实包浆再生混凝土早期塑性开裂试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(4): 144-149, 154.
- [15] CAO Xincheng, JIN Baohong, SONG Muyuan, et al. Experimental study on early plastic cracking of self-compacting recycled concrete with aggregates coated with cement slurry[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 144-149, 154(in Chinese).
- [16] 王兴国, 姜茂林, 陈旭, 等. 不同预浸骨料-PVA 纤维对再生混凝土力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1205-1214.
- [17] WANG Xingguo, JIANG Maolin, CHEN Xu, et al. Effect of different pre-soaked aggregate-PVA fiber on the mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1205-1214(in Chinese).
- [18] KIM J S, SHIN Y S, PARK Y B. A study on the structural characteristic of recycled aggregate concrete reinforced steel fiber[J]. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2008, 8(5): 35-42.
- [19] 朱海堂, 王宝庭, 楼志辉, 等. 钢纤维再生混凝土断裂制度试验

- 研究[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集. 北京:《新型建筑材料》, 2008: 68-72.
- ZHU Haitang, WANG Baoting, LOU Zhihui, et al. Experimental research on fracture toughness of steel fiber recycled concrete[C]//The 12th National Fiber Concrete Academic Conference. Beijing: New Building Materials , 2008: 68-72(in Chinese).
- [17] 牛海成, 高锦龙, 李博涵, 等. PVA-钢纤维对高强再生骨料混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5499-5511.
- NIU Haicheng, GAO Jinlong, LI Bohan, et al. Effect of PVA-steel fiber on the flexural performance of high-strength recycled aggregate concrete beams[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5499-5511(in Chinese).
- [18] 刘亦斌, 曹万林, 张建伟, 等. 国家速滑馆看台L形再生混凝土梁板工作性能试验[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 108-116.
- LIU Yibin, CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, et al. Experimental study on working performance of L-shaped recycled aggregate concrete beam-slabs in the stands of National Speed Skating Hall[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1): 108-116(in Chinese).
- [19] KOGBARA R B, IYENGAR S R, GRASLEY Z C, et al. A review of concrete properties at cryogenic temperatures: Towards direct LNG containment[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 760-770.
- [20] 李文贵, 肖建庄, 黄靓, 等. 再生混凝土界面过渡区纳观力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(12): 31-39.
- LI Wengui, XIAO Jianzhuang, HUANG Liang, et al. Experimental study on mechanical properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(12): 31-39(in Chinese).
- [21] 中国工程建设协会. 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.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Fiber reinforced concrete test method standard: CECS 13—2009[S]. Beijing: Planning Press of China, 2010(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [23] 史占崇, 苏庆田, 邵长宇, 等. 粗骨料UHPC的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(12): 86-97.
- SHI Zhanchong, SU Qingtian, SHAO Changyu, et al. Basic mechanical behavior and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(12): 86-97(in Chinese).
- [24] 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(in Chinese).
- [25] 肖建庄, 杨洁. 玻璃纤维增强塑料约束再生混凝土轴压试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1586-1591.
- XIAO Jianzhuang, YANG Jie. On recycled concrete confined by GFRP tube under axial compression[J]. Journal of Tongji University (Natural Sciences), 2009, 37(12): 1586-1591(in Chinese).
- [26] WANG K, MONTEIRO P J, RUBINSKY B, et al. Microscopic study of ice propagation in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(4): 370-377.
- [27] CAI X P, YANG W C, YUAN J, et al. Mechanics properties of concrete at low temperature[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1278: 389-393.
- [28] JIANG Z W, HE B, ZHU X P, et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119456.
- [29] KIM M J, KIM S, LEE S K, et al. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at cryogenic temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 498-508.
- [30] JIANG Z W, DENG Z L, ZHU X P, et al. Increased strength and related mechanisms for mortars at cryogenic temperatures[J]. Cryogenics, 2018, 94: 5-13.
- [31] 罗素蓉, 郑欣, 黄海生. 再生粗骨料预处理及再生混凝土徐变试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 242-247.
- LUO Surong, ZHENG Xin, HUANG Haisheng. Experimental study on pretreatment of recycled coarse aggregate and creep behavior of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 242-247(in Chinese).