

超低温下再生骨料与钢纤维对 LHRC 断裂性能的影响

晏晗宸 王执中 涂伊然 李扬^(通讯作者)

湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北武汉, 430068;

摘要: 为推动建筑业低碳转型, 协同解决传统混凝土高碳排放与建筑垃圾资源化利用难题, 本文以低碳高性能再生混凝土 (LHRC) 为对象, 系统研究低温环境下再生骨料取代率及钢纤维体积掺量对材料断裂性能的影响。结果表明: 低温对 LHRC 断裂性能存在双重影响。一方面, 再生骨料因固有缺陷及界面过渡区弱化, 导致材料断裂性能劣化, 且冻胀应力加剧其损伤积累, 低温下等效弯曲强度降幅达 38.56%。另一方面, 钢纤维通过桥接裂纹与耗能机制显著改善性能, 其低温协同效应源于冰晶锚固增强的纤维-基体机械咬合作用。

关键词: 低温环境; 断裂性能; 再生骨料; 钢纤维; 低碳

DOI: 10.64216/3080-1508.25.09.026

引言

现有研究表明, 在我国建筑领域的总碳排放中, 建材生产阶段约占 55.5%, 而水泥作为关键建材, 其生产过程的二氧化碳排放量十分惊人, 仅 2020 年就达到 12.3 亿吨^[1]。同时, 建筑废弃物的堆积处置加剧了土地占用与天然砂石开采压力, 而粉煤灰、矿渣等工业副产品的资源化利用也亟待推进^[2]。低碳高性能再生混凝土 (LHRC) 通过采用再生骨料替代天然骨料, 并掺入矿渣、粉煤灰等工业废料, 在碱激发作用下形成地聚物胶凝材料, 显著降低水泥用量与碳排放, 同时实现固废资源化利用^[3]。但是, 再生骨料表面附着的旧砂浆, 以及其本身存在的较高孔隙率、初始微裂纹等固有缺陷, 可能导致混凝土的断裂性能劣化^[4]。Zhang 等^[5]指出, 低温环境可能加剧这种由再生骨料缺陷引起的负面效应。另一方面, Mamatha 等^[6]认为, 钢纤维的掺入能够通过桥接裂纹和应力重分布等机制, 有效提升混凝土的韧性。然而,

汪振双等^[7]报道, 钢纤维在低温条件下的增强效应、它与基体之间的协同作用机制, 以及在低温环境中与再生骨料产生的交互影响, 目前尚不明确。此外, 相关研究^[8]指出, 低温诱发的孔隙水相变、冻胀应力以及界面过渡区 (ITZ) 的损伤演化, 都会对 LHRC 的断裂过程产生深刻影响。同时, 这些影响因素背后的内在规律还有待进一步厘清。据此, 本文系统研究不同低温、再生骨料替代率和钢纤维体积掺量对 LHRC 断裂性能的影响。研究成果旨在为极寒地区低碳高性能混凝土结构的设计与应用提供理论依据。

1 试验方案

1.1 实验材料及配合比

由于低碳高性能再生混凝土目前暂无统一的配合比设计方法, 因此在进行配合比设计时, 主要参考《普通混凝土配合比设计规程》以及国内外相关学者研究进展。根据预实验结果所得具体配合比参数详见表 1。

表 1. 低碳高性能再生混凝土配合比 (kg/m³)

编号	水胶比	天然河砂	钢纤维	水	减水剂	粗骨料		碱激发剂		胶凝材料	
						天然骨料	再生骨料	硅酸钠	氢氧化钠	S95 矿渣	粉煤灰
LH0-RC0	0.4	720	0	100	4	1080	0	186	21	250	250
LH1.0-RC0	0.4	720	78	100	4	1080	0	186	21	250	250
LH0-RC50	0.4	720	0	100	4	540	540	186	21	250	250
LH0.5-RC50	0.4	720	39	100	4	540	540	186	21	250	250
LH1.0-RC50	0.4	720	78	100	4	540	540	186	21	250	250
LH1.5-RC50	0.4	720	117	100	4	540	540	186	21	250	250
LH0-RC100	0.4	720	0	100	4	0	1080	186	21	250	250
LH1.0-RC100	0.4	720	78	100	4	0	1080	186	21	250	250

1.2 试件制作

低碳高性能再生混凝土的制备流程如下: 首先, 按设计模数配制碱激发剂溶液, 充分搅拌后静置冷却 12

小时备用。正式制备试件时, 先将粉煤灰、矿渣等胶凝材料与河砂、天然及再生骨料依次投入搅拌机进行干拌。随后加入含减水剂的拌合水搅拌, 再同步均匀加入碱激发剂溶液与钢纤维, 继续搅拌至均匀。最后, 将拌合物

装入模具并充分振捣密实, 24 小时后脱模, 置于 20℃、相对湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护室中养护 28 天。整个过程中, 需严格控制碱激发剂的加入时机与搅拌时间, 以应对材料的快凝特性。同时, 须确保钢纤维分散均匀, 避免结团现象。

1.3 实验方法

将 LHRC 试件置于深冷试验箱内, 通入液氮进行冷却。试块分批放入试验箱, 目标温度分别设定为-30℃、-60℃和-90℃。利用嵌入试件中心的热电偶实时监测温度, 以试件中心温度表征整体温度。为保障冷却均匀性, 通过调节液氮通入速率控制降温速率约为 $-1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。达到目标温度后, 恒温保持 2 小时, 以确保所有试块达到目标低温状态。

采用 CBT1105-D 型微机控制试验机, 对尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 400 mm 的缺口梁试件进行三点弯曲实验。试件制备时, 预埋钢板形成宽度 2 mm、深度 20 mm 的初始裂缝。实验采用位移控制模式, 加载速率设定为 0.06 mm/s, 以获取平滑的荷载-位移曲线。跨中挠度由两个量程为 40 mm 的 LVDT 位移传感器测量。在缺口梁底部安装夹持式引伸计, 并连接数据记录仪, 用于测量临界缺口张开位移 (CMOD)。

2 实验结果与分析

2.1 P-CMOD 曲线

图 1 所示为缺口梁三点弯曲实验得到的荷载-开口位移 (P-CMOD) 曲线。随着温度的降低, 试件的峰值荷载 $P_{\max}$ 显著提高, 但峰后承载力急剧下降, 表现出明显的低温脆化特征。这是因为低温促使混凝土内部自由水相变结冰, 冰晶填充微裂缝产生“自密实效应”, 提升了试件的初始承载力。然而, 作为刚性填充物, 冰晶显著削弱了材料的变形能力, 导致峰后阶段裂缝迅速贯通, P-CMOD 曲线呈现陡峭下降段。相反, 随着再生骨料取代率增加, 试件的 $P_{\max}$ 显著降低。这是因为再生骨料表面附着的旧砂浆层及其内部孔隙缺陷导致其力学性能弱于天然骨料, 在加载初期易引发应力集中并加速主裂缝形成, 致使 $P_{\max}$ 下降。

观察图 1 (c)~(f) 可以发现, 掺入钢纤维可有效缓解低温和再生骨料对材料性能的不利影响。在低温条件下, 钢纤维通过三维网状结构改变裂纹扩展路径, 迫使主裂纹绕行纤维或将其拔出, 从而消耗额外能量。该机制不仅显著提升了试件的 $P_{\max}$, 而且在 P-CMOD 曲线峰后段形成多级荷载平台, 有效提高了试件的残余应力与峰后延性。

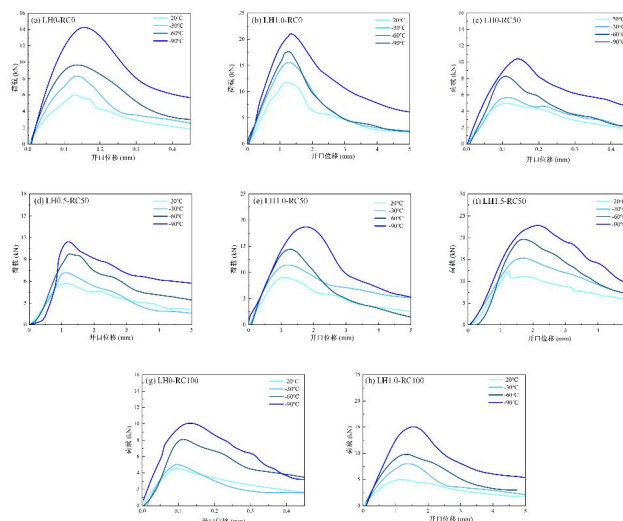


图 1. LHRC 的荷载-开口位移曲线

2.2 断裂参数

2.2.1 初始断裂荷载与失稳断裂荷载

一般情况下, 可通过识别 P-CMOD 曲线由线性向非线性转变的拐点来确定初始断裂荷载 P_{in} ; 而失稳断裂荷载 P_{un} 则对应曲线达到临界 CMOD 时的荷载, 可用于评价材料在极限状态下的性能。

研究表明, 随着温度降低, 试件的 P_{in} 和 P_{un} 显著增大, 且在钢纤维掺量为 1.5% 时达到最大值, 反映出低温与纤维的协同增强效应。低温条件下, 试件内部孔隙水冻结膨胀, 填充基体孔隙, 显著提升材料密实度与整体承载能力。同时, 低温提高材料的弹性模量与强度, 增强了其抵抗初始裂纹萌生的能力 (P_{in} 增大), 并能承受更大荷载直至达到极限状态 (P_{un} 增大)。此外, 钢纤维通过桥接效应抑制裂纹扩展, 在荷载作用初期承担部分拉应力以延缓初始裂纹出现, 在峰值阶段跨越裂纹传递应力以阻止裂纹快速贯通。1.5% 的钢纤维掺量可使钢纤维在基体中形成均匀连续的三维网络, 既避免了低掺量时桥接作用不足, 又克服了高掺量时纤维团聚引发的混凝土和易性和匀质性变差, 从而充分发挥其增强与增韧作用。

值得注意的是, P_{in} 和 P_{un} 在低温下的增幅随着再生骨料含量的增加而减小。虽然孔隙水冻结产生的“自密实效应”可在一定程度上提升材料强度, 但再生骨料的固有缺陷为冻胀应力提供了更多作用点, 从而易引发新裂纹或加剧既有裂纹扩展, 抵消冰晶填充带来的强度增益。

2.2.2 等效弯曲强度

等效弯曲强度 f_{eq} 通过量化 LHRC 在低温下的韧性和能量吸收能力, 反映了材料的强度特性, 尤其适用于

评估纤维增强混凝土在复杂环境下的断裂行为。其计算方法如下所示：

$$f_{eq} = \frac{3S}{2b(h-a_0)^2} \cdot \frac{D_{BZ}^f}{2.5} \quad (1)$$

式中： D_{BZ}^f 表示荷载-挠度曲线 $\delta 3$ 处的面积。

等效弯曲强度的计算结果如图 2 所示。分析表明，LHRC 的等效弯曲强度同时受温度、再生骨料取代率和钢纤维掺量影响。在不掺入钢纤维和再生骨料的情况下，当温度由 20℃ 降至 -90℃ 时， f_{eq} 自 1.85MPa 增至 5.55MPa，增幅达 200.00%。在 -90℃ 条件下，随钢纤维掺量提升，LH0.5-RC50、LH1.0-RC50、LH1.5-RC50 的 f_{eq} 相较 LH0-RC50 分别提高了 47.91%、84.40%、140.00%。这是因为低温促使孔隙水冻结，一方面使地聚物基体更为致密，提升了基体的荷载承受能力；另一方面，基体硬化增大了钢纤维锚固区范围，提升了纤维拉拔与滑移耗能能力。

相反，再生骨料含量增加则导致 f_{eq} 降低。在 20℃ 且不掺入钢纤维的情况下，随着再生骨料的取代率由 0% 增加至 100%， f_{eq} 减小了 0.84MPa。当温度降低至 -90℃ 时， f_{eq} 降幅达 38.56%，对应强度减少 2.14MPa。这表明低温环境加剧了再生骨料对界面及整体承载能力的不利影响。这种现象本质上是再生骨料自身缺陷与低温冻胀作用、材料脆性协同劣化的结果。

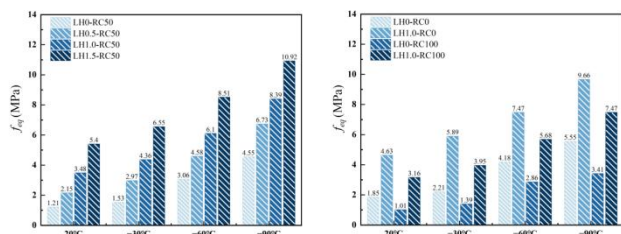


图 2. 不同试件的等效弯曲强度 (f_{eq})

3 结论

本文通过缺口梁三点弯曲试验，研究了超低温（20℃、-30℃、-60℃、-90℃）、再生骨料取代率（0%、50%、100%）及钢纤维掺量（0%、0.5%、1.0%、1.5%）对低碳高性能再生混凝土断裂性能的影响，主要结论如下：

（1）低温对 LHRC 断裂性能呈双重影响：随温度降低，断裂荷载及等效弯曲强度显著提高，但材料脆性加剧，峰后承载力骤降。

（2）再生骨料会导致 LHRC 断裂性能劣化：再生骨料固有缺陷及界面过渡区弱化导致等效弯曲强度下降，且低温下劣化更明显，-90℃ 时等效弯曲强度降幅达 38.

56%。

（3）钢纤维可有效改善低温断裂性能：1.5% 掺量效果最优，-90℃ 下等效弯曲强度提高 140%，低温下冰晶锚固增强纤维-基体咬合，进一步强化增韧作用。

（4）多因素耦合机制明确：低温提升强度但加剧脆性，再生骨料弱化性能，钢纤维可弥补二者不足，研究结果为极寒地区 LHRC 结构设计提供参数依据。

参考文献

- [1] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业碳排放报告(2020 年度)[R]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021: 15-18.
- [2] 吴锦文, 邓小伟, 焦飞硕, 等. 煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 238-252.
- [3] 简家成, 刘峥, 杨宏斌, 等. 地聚物胶凝材料制备及应用研究现状[J]. 矿产综合利用, 2014(3): 5.
- [4] 吴恺云, 罗素蓉, 郑建岚. 基于非接触式观测技术的再生骨料混凝土断裂性能分析[J]. 工程力学, 2022(003): 039.
- [5] H. Zhang, B. He, Y. Cheng, et al., Strengthening and embrittlement effect of cryogenic temperature on fiber reinforced geopolymer composite, Cem. Concr. Compos. 153 (2024) 105727.
- [6] Mamatha K H, Dinesh S V, Shreelakshmi. Effect of steel fibers and recycled concrete aggregates on the mechanical behaviour of concrete [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2024, 15(6): 2743-2756.
- [7] 汪振双, 谭晓倩. 钢纤维再生粗集料混凝土的力学性能和抗冻性研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4): 4.
- [8] Su J, Xu Z, Wang S, et al. Effect of low temperatures on fracture properties of steel fibre reinforced rubberised concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 443(000): 19.

作者简介：晏晗宸，2004.09，男，汉族，湖北襄阳，湖北工业大学土木建筑与环境学院，本科在读，主要从事低碳混凝土力学性能研究。

项目基金：大学生创新创业训练计划项目经费资助（S202410500122）；大学生创新创业训练计划项目经费资助（202310500033）。