

聚合物改性钢纤维再生混凝土抗冲击性能研究

夏冬桃¹,任康宁¹,吴方红²,李彪¹,何国章¹

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;

2. 佛山科学技术学院交通与土木建筑学院,广东 佛山 528225)

摘要 目的 研究水性环氧树脂质量分数、再生粗骨料取代率和超短微丝钢纤维体积分数对 RAC 抗冲击性能的影响,以促进其工程应用。方法 对 RAC 进行抗压和落锤冲击试验,通过极差分析法研究各因素对 RAC 抗冲击性能的影响,并分析水性环氧树脂的改性机理;同时基于 Weibull 分布理论对冲击试验结果进行拟合检验和冲击寿命预测分析。结果 钢纤维体积分数对 RAC 抗冲击性能的影响最大,纤维体积分数由 0 增至 1.0% 时,RAC 初裂冲击耗能和破坏冲击耗能的增幅分别接近 150% 和 900%;再生粗骨料取代率对水性环氧树脂的改性效果影响较大;双参数 Weibull 分布能较好地描述 RAC 抗冲击次数的分布特征。结论 水性环氧树脂掺入后可改善界面过渡区的密实性;钢纤维掺入后能显著提升 RAC 基体的冲击韧性和延性。

关键词 水性环氧树脂;钢纤维再生混凝土;冲击韧性;Weibull 分布;正交试验

中图分类号 TU528

文献标志码 A

Study on Impact Resistance of Polymer Modified Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete

XIA Dongtao¹, REN Kangning¹, WU Fanghong², LI Biao¹, HE Guozhang¹

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, China, 430068; 2. School of Transportation, Civil Engineering and Architecture, Foshan University, Foshan, China, 528225)

Abstract: To promote the engineering application of recycled aggregate concrete (RAC), the effects of the mass fraction of waterborne epoxy resin, the recycled coarse aggregate replacement rate, and the volume fraction of ultra-short microfilament steel fiber on the impact resistance of RAC were studied. The cube compressive and drop weight impact tests were carried out on RAC, and the effect of each factor on the impact resistance of RAC was studied by range method, and the modification mechanisms of waterborne epoxy resin were analyzed. Meanwhile, the Weibull distribution theory was used to fit the impact tests results and predict the impact life. The results show that the volume fraction of steel fiber plays the most significant role on impact resistance of RAC. The increase of the volume fraction of fiber from 0 to 1.0%, the initial crack impact energy

收稿日期:2022-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(52208152)

作者简介:夏冬桃(1975—),女,教授,博士,主要从事纤维混凝土材料与结构等方面研究。

dissipation and the damage impact energy dissipation of RAC increase by nearly 150% and 900%, respectively. The recycled coarse aggregate replacement rate has great effect on the modification effect of waterborne epoxy resin. The two-parameter Weibull distribution can better describe the distribution characteristics of the impact resistance times of RAC. The waterborne epoxy resin can improve the compactness of the interfacial transition zone; the impact toughness and ductility of RAC matrix can be significantly improved by the incorporation of steel fiber.

Key words: waterborne epoxy resin; steel fiber reinforced recycled aggregate concrete; impact toughness; Weibull distribution; orthogonal experiment

再生混凝土(RAC)能降低能耗和CO₂排放,是破解当前建筑垃圾治理困境的有效途径,在“双碳”战略背景下其发展前景广阔。但由于再生粗骨料自身的缺陷,限制了RAC广泛应用。研究表明掺加纤维可改善RAC的力学性能^[1],常见的是掺加乱向分布的钢纤维,钢纤维的桥接及微加筋作用起到增强增韧阻裂的效果^[2-3]。而混凝土结构在服役过程中不仅会承受静态荷载作用,也可能遭受爆炸、冲击等具有突发性和破坏性的动态荷载作用,这些动态荷载会对结构产生巨大的破坏影响。F. Omidinasab等^[4]研究发现掺入钢纤维可抵消再生骨料对混凝土的力学性能及抗冲击性能的负面影响。孔祥清等^[5]研究发现单掺适量的钢纤维及钢纤维与聚丙烯纤维混掺均可提高RAC的抗冲击性能。而大量的试验研究发现钢纤维再生混凝土(SFRAC)破坏的主要特征是钢纤维从断裂面中拔出而未被拉断,这说明SFRAC中钢纤维与基体界面间的黏结力不足,因此需要对SFRAC的界面进行改性研究^[6]。目前常见的改性方法是往混凝土中掺入聚合物乳液,有学者研究表明水性环氧树脂是应用于混凝土中最有效的聚合物之一,其在混凝土中形成的具有互穿聚合物网络结构的连续相,可增强混凝土基体的黏结力^[7]。钱慧丽等^[8]研究了水性环氧树脂乳液对天然混凝土(Natural Concrete, NC)抗冲击性能的影响,结果表明水性环氧树脂乳液可阻碍混凝土内部裂缝的拓展,从而提升其抗冲击性能。目前关于水性环氧树脂与钢纤维复掺对

RAC抗冲击性能的影响及其界面改性机理的研究尚不多见。

因此,笔者通过设计正交试验,探究水性环氧树脂与钢纤维对RAC抗冲击性能的影响及其改性机理,并采用双参数Weibull分布模型对RAC的冲击寿命进行统计分析,研究如何延长RAC的冲击寿命,为RAC的配合比设计提供参考。

1 试验

1.1 试验原材料

水泥选用华新牌P·O 42.5级水泥;砂选用本地级配良好的河砂;天然粗骨料采用粒径5~16 mm连续级配的碎石;再生粗骨料采用本地的废弃混凝土,经处理后得到粒径5~16 mm的骨料,其性能指标见表1。矿渣粉为武汉华神智能科技有限公司生产的S95级矿渣粉;水性环氧树脂及水性环氧固化剂由上海汉中化工有限公司生产,水性环氧树脂环氧当量为185~195,水性环氧固化剂胺氢当量为280~290,配制乳液时两者的质量比为1:1.3;超短微丝钢纤维为武汉新途工程纤维制造有限公司生产,其性能参数见表2;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,减水率为15%~20%。

表1 再生粗骨料物理性能

Table 1 Physical properties of the recycled coarse aggregate

含水率/%	吸水率/%	松散堆积密度/(kg·m ⁻³)	紧密堆积密度/(kg·m ⁻³)
0.7	4.9	1 350	1 430

表2 钢纤维参数

Table 2 Steel fiber parameters

长度/ mm	等效直径/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
13	0.2	2930	200

1.2 正交试验设计

试验采用 $L_{16}(4^5)$ 的正交表,不考虑各因素间的交互作用,剩余两个空白列用于估计试验误差。试验的各因素及水平设置如下:水性环氧树脂质量分数(A)分别为0、2%、4%、6%,再生粗骨料取代率(B)分别为0、

30%、45%、60%,钢纤维体积分数(C)分别为0、0.6%、0.8%、1.0%。水性环氧树脂乳液质量分数为聚合物乳液与胶凝材料总量的质量比;钢纤维体积分数为钢纤维与混凝土的体积比。RAC的配合比设计依据《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011)^[9],各组混凝土的配合比见表3。实际试验中加入处理再生粗骨料的附加用水,由于水性环氧固化剂中约含50%的水分,因此用水量须相应减少。

表3 水性环氧树脂与钢纤维复掺的RAC配合比

Table 3 The proportions of RAC mixed with waterborne epoxy resin and steel fiber

试件编号	水平组合	材料用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)								
		水	水泥	天然粗骨料	再生粗骨料	河砂	水性环氧树脂乳液	钢纤维	矿渣粉	减水剂
NC-0-0-0	$A_1B_1C_1$	184.0	368.0	1 159.0	0	597.0	0	0	92.0	4.6
RC-0-30-0.6	$A_1B_2C_2$	184.0	368.0	811.6	347.4	597.0	0	47.1	92.0	4.6
RC-0-45-0.8	$A_1B_3C_3$	184.0	368.0	637.4	521.6	597.0	0	62.8	92.0	4.6
RC-0-60-1.0	$A_1B_4C_4$	184.0	368.0	463.6	695.4	597.0	0	78.5	92.0	4.6
NC-2-0-0.6	$A_2B_1C_2$	181.4	358.8	1 159.0	0	597.0	9.2	47.1	92.0	4.6
RC-2-30-0	$A_2B_2C_1$	181.4	358.8	811.6	347.4	597.0	9.2	0	92.0	4.6
RC-2-45-1.0	$A_2B_3C_4$	181.4	358.8	637.4	521.6	597.0	9.2	78.5	92.0	4.6
RC-2-60-0.8	$A_2B_4C_3$	181.4	358.8	463.6	695.4	597.0	9.2	62.8	92.0	4.6
NC-4-0-0.8	$A_3B_1C_3$	178.8	349.6	1 159.0	0	597.0	18.4	62.8	92.0	4.6
RC-4-30-1.0	$A_3B_2C_4$	178.8	349.6	811.6	347.4	597.0	18.4	78.5	92.0	4.6
RC-4-45-0	$A_3B_3C_1$	178.8	349.6	637.4	521.6	597.0	18.4	0	92.0	4.6
RC-4-60-0.6	$A_3B_4C_2$	178.8	349.6	463.6	695.4	597.0	18.4	47.1	92.0	4.6
NC-6-0-1.0	$A_4B_1C_4$	176.2	340.4	1 159.0	0	597.0	27.6	78.5	92.0	4.6
RC-6-30-0.8	$A_4B_2C_3$	176.2	340.4	811.6	347.4	597.0	27.6	62.8	92.0	4.6
RC-6-45-0.6	$A_4B_3C_2$	176.2	340.4	637.4	521.6	597.0	27.6	47.1	92.0	4.6
RC-6-60-0	$A_4B_4C_1$	176.2	340.4	463.6	695.4	597.0	27.6	0	92.0	4.6

注:试件编号为NC/RC- x - j - z ,NC为天然混凝土;RC为再生混凝土; x 为水性环氧树脂质量分数,%; j 为再生粗骨料取代率,%; z 为钢纤维体积分数,%。

1.3 试件制备与养护

RAC的搅拌方法参照文献[9]执行,采用两阶段搅拌工艺浇筑成型。抗压试验采用边长为100 mm的立方体试件,每组制备3块。抗冲击试验采用直径为150 mm,厚度为63 mm的圆饼形试件,每组制备6块。掺加水性环氧树脂的混凝土其养护方式不同于普通混凝土,由于在干燥环境下可促进聚合物颗粒形成连续的膜结构,因此掺加水性环氧

树脂的试件的养护制度为先在标准养护室中养护6 d,再置于干燥环境中养护22 d,其余试件则在标准条件下养护28 d。

1.4 试验方法

各项试验按照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)^[10]进行。此外笔者对冲击试验装置进行了改进(见图1),该装置中将落锤的端部打磨成半球形,并增设了电磁开关,有效避免了手动定位及释放落锤产

生的试验误差。试件的初裂冲击次数 N_1 和破坏冲击次数 N_2 的判定方法以及每一组试件的初裂冲击耗能 W_1 和破坏冲击耗能 W_2 的计算方法参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)^[10],其计算式如下。

$$W_1 = N_1 mgh. \quad (1)$$

$$W_2 = N_2 mgh. \quad (2)$$

式中: W_1 为初裂冲击耗能, J; W_2 为破坏冲击耗能, J; m 为冲击锤的质量, 取 4.5 kg; g 为重力加速度, 取 $9.81(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$; h 为冲击锤下落高度, 取 1 m。

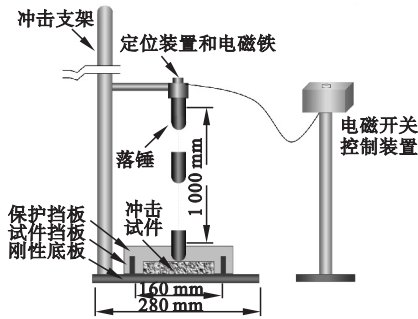


图1 改进的落锤冲击试验装置

Fig. 1 Improved drop weight test device

2 试验结果及分析

各组的立方体抗压强度均满足 C40 等级混凝土的强度要求, 其中 RC-0-60-1.0 试件的抗压强度最高, 为 65.6 MPa。

2.1 试验结果

落锤冲击试验结果见表 4, 由表 4 可知, 除 RC-0-60-1.0 试件外各组的 N_1 差别不大, 但各组的 N_2 差异明显。RC-0-60-1.0 的 N_1 和 N_2 均最高。RC-2-45-1.0 的 N_2 也相对很高, RC-0-60-1.0 和 RC-2-45-1.0 的 N_1 分别为基准组的 4.6 倍, 2.9 倍, N_2 分别较基准组提升了 16.8 倍和 11.9 倍。

基于中心质假说^[11]的观点, 水性环氧树脂胶乳颗粒的粒径为 0.4 ~ 5 600 nm, 在混凝土内部原位形成改性的微中心质^[8,12], 在其界面效应圈内可改善孔隙结构, 钢纤维是大中心质, 在大中心质效应圈内改善了混凝土的结构与性质, 分别在微观和宏观的尺度上对混凝土体系中对应的各层次的组分进行增强, 从而表现为抗冲击韧性的提升。

表 4 抗冲击试验结果

Table 4 The test results of impact resistance

试件编号	N_1 /次	N_2 /次	试件编号	N_1 /次	N_2 /次
NC-0-0-0	2	2	NC-4-0-0.8	3.25	19.50
RC-0-30-0.6	4.25	18.00	RC-4-30-1.0	4.50	18.50
RC-0-45-0.8	5.25	22.50	RC-4-45-0	2.75	3.25
RC-0-60-1.0	9.25	35.50	RC-4-60-0.6	3.00	14.50
NC-2-0-0.6	2.75	19.00	NC-6-0-1.0	3.75	24.75
RC-2-30-0	2.25	2.50	RC-6-30-0.8	2.75	14.75
RC-2-45-1.0	5.75	25.75	RC-6-45-0.6	3.00	15.00
RC-2-60-0.8	3.25	17.75	RC-6-60-0	2.50	3.00

对于仅掺水性环氧树脂的 RAC, 其抗冲击次数相较于基准组有不同程度的提升, 其中提升幅度最大的试件是 RC-4-45-0, N_1 和 N_2 的增幅分别为 37.5% 和 62.5%。这是因

为水性环氧树脂胶乳颗粒可以填充混凝土中的细微孔隙, 改善混凝土的密实性, 从而提升了 RAC 的抗冲击性能。

2.2 冲击耗能极差分析

根据表4的冲击试验结果计算出 W_1 和 W_2 , 并对这两个关键指标进行极差分析, 结果见表5。由表5可知, 极差值最大的因素C为影响 W_1 和 W_2 的主要因素, 各因素对 W_1 和 W_2 的影响从大到小依次为钢纤维体积分数、水性环氧树脂质量分数、再生粗骨料取代率。

表5 极差分析结果

Table 5 The range analysis results

指标	W_1/J			W_2/J		
	A	B	C	A	B	C
k_1	229.0	129.7	104.9	860.8	720.1	118.6
k_2	154.5	151.8	143.5	717.4	593.2	733.9
k_3	149.0	184.9	160.0	615.3	733.9	822.2
k_4	132.4	198.7	256.6	634.6	780.8	1153.3
R	96.6	69.0	151.7	245.6	187.6	1034.7

注: $k_i (i=1 \sim 4)$ 表示所有组别在给定因素的 i 水平下对应的冲击耗能结果之和的平均值; R 表示极差。

2.2.1 水性环氧树脂对冲击耗能的影响

笔者将已有文献中关于水性环氧树脂改善 NC 抗冲击性能的研究成果与试验分析的结果进行对比(见图2)^[8]。

结合表5和图2可知, 水性环氧树脂对 NC 和 RAC W_2 的改善效果有所不同。当水性环氧树脂质量分数从0增至4%时, RAC

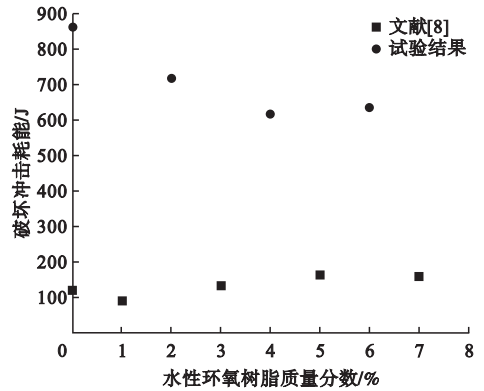
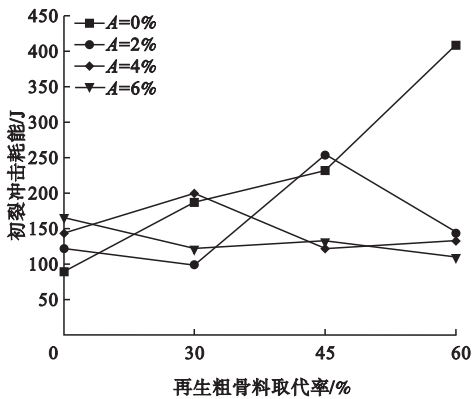


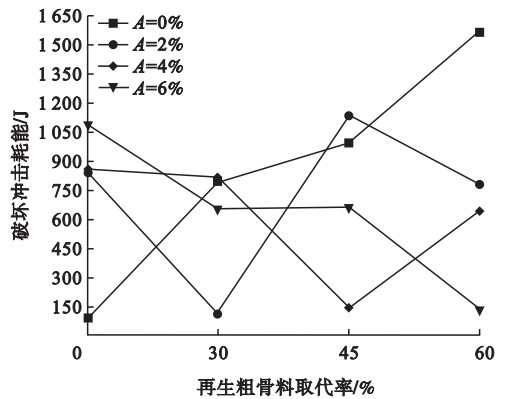
图2 水性环氧树脂质量分数对 NC 和 RAC 的 W_2 的影响

Fig. 2 Effect of the mass fraction of waterborne epoxy resin on the W_2 of NC and RAC

的 W_1 和 W_2 逐渐下降, 而对于 NC 而言, 当水性环氧树脂质量分数从0增至5%时, 其 W_2 总体为上升的趋势^[8]。根据表4计算的结果, 绘制出在不同的水性环氧树脂质量分数的条件下再生粗骨料取代率与 W_1 和 W_2 指标的关系图(见图3)。从图3可看出, 当再生粗骨料取代率从0增至60%时, 在每一取代率下使混凝土的 W_1 和 W_2 相对最佳的水性环氧树脂质量分数由6%减小至0, 说明水性环氧树脂对 RAC 抗冲击性能的改善效果受再生粗骨料取代率的影响较大。



(a) 不同的水性环氧树脂质量分数与 W_1 的关系



(b) 不同的水性环氧树脂质量分数与 W_2 的关系

图3 不同水性环氧树脂质量分数与 W_1 和 W_2 的关系

Fig. 3 Relationship between the different mass fraction of waterborne epoxy resin and W_1 and W_2

这是因为干燥环境有利于水性环氧树脂

颗粒形成聚合物膜, 而再生粗骨料吸水率高,

其吸收的水分会在养护过程中缓慢释放,水性环氧树脂成膜所需的干燥环境与再生粗骨料释水产生的湿润环境之间构成一种竞争关系,因此这对水性环氧树脂的改性效果起到了削弱的作用。同时当水性环氧树脂质量分数较大时,在搅拌阶段会引入一定量的空气至混凝土中,使得其孔隙率增大^[12],因此在再生粗骨料释水和孔隙率的综合作用下,使得当再生粗骨料取代率为60%时,RAC的冲击耗能随着水性环氧树脂质量分数的增加而下降。图2中水性环氧树脂质量分数从4%增至6%时,RAC的 W_2 略有增大,这种现象有待于进一步研究。

2.2.2 再生粗骨料取代率对冲击耗能的影响

由表5可知,当再生粗骨料取代率从0增至60%时,混凝土的 W_1 和 W_2 呈不断增大的趋势,增幅分别为53.2%和8.4%。这一方面是由于再生粗骨料的表面与新水泥砂浆形成的黏结力较大,另一方面是因为再生粗骨料起到了“内养护”的作用。

2.2.3 钢纤维体积分数对冲击耗能的影响

由表5可知,RAC的 W_1 和 W_2 与钢纤维体积分数呈正相关,当钢纤维体积分数从0增至1.0%时,RAC的 W_1 和 W_2 的增幅分别接近150%和900%。这是因为钢纤维起到了增韧的作用,减缓了混凝土塑性变形的发展^[13],同时每根桥接于裂缝处的钢纤维起到了阻碍裂缝拓展延伸的作用。

笔者将已有文献中关于钢纤维改善NC抗冲击性能的研究成果与试验分析的结果进行对比(见图4)^[13-14]。由图4可知,随着钢纤维体积分数的增加,NC和RAC的 W_2 均有不同程度的提升,即钢纤维对NC和RAC抗冲击性能的改善效果是一致的。

根据各因素最优水平的选取原则,同时考虑到试验误差的影响和水性环氧树脂的改性作用,RAC抗冲击性能的各因素最优水平组合为 $A_2B_3C_4$ 。

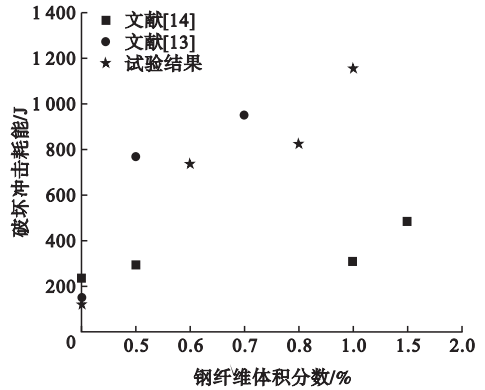


图4 钢纤维体积分数对NC和RAC W_2 的影响

Fig. 4 Effect of the volume fraction of steel fiber on the W_2 of NC and RAC

2.3 水性环氧树脂对水化产物的改性机理

图5和图6为NC-0-0-0和RC-4-45-0试样中水化产物放大10 000倍后的微观形貌。由图5可知,未掺水性环氧树脂的NC-0-0-0中有层布排列的CH晶体、无序团聚的C-S-H凝胶体和针棒状的钙矾石,水化产物的表面有较多细小的孔洞,整体结构较为疏松。

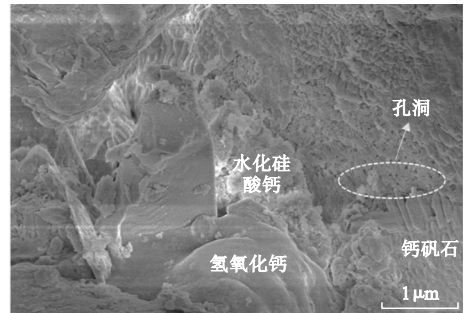


图5 NC-0-0-0中水化产物的微观形貌

Fig. 5 The micro morphologies of hydration products of NC-0-0-0

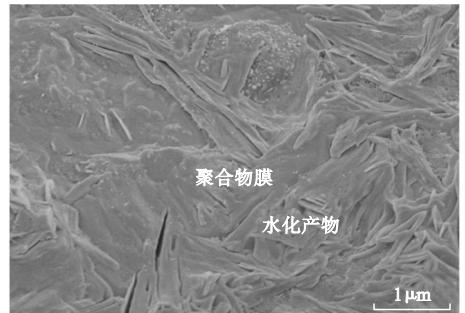


图6 RC-4-45-0中水化产物的微观形貌

Fig. 6 The micro morphologies of hydration products of RC-4-45-0

而由图6可知,掺入水性环氧树脂后,整体结构未见明显的细小孔洞和裂纹,各组间黏结紧密,聚合物膜与水化产物形成了相互交织的空间网络结构,在冲击荷载作用下可起到缓冲作用,分散和转移了混凝土中的内应力,减少了微裂纹的产生。

2.4 水性环氧树脂对界面过渡区的改性机理

图7为RC-0-60-1.0和RC-2-45-1.0的试样中钢纤维与水泥水化产物间界面过渡区(ITZ)放大500倍的微观形貌。未掺水性环氧树脂的RC-0-60-1.0中钢纤维与水泥水化产物间ITZ的缝隙较宽,水化产物中有数条较宽的微裂缝。这是因为钢纤维表面的质点具有吸附其他物质的倾向^[6],这种极性的特点使它具有亲水性^[15],从而使得附近的水灰比增大,导致ITZ的力学性能较弱,结构较疏

松。此时钢纤维与水泥水化产物间主要依靠物理作用黏结在一起^[6]。在荷载作用下,裂纹首先会沿着ITZ开展并逐渐延伸,当裂纹由微观尺度发展到宏观尺度时,使得界面处的水泥基体发生断裂,从而形成微裂缝。

而掺入水性环氧树脂的RC-2-45-1.0中钢纤维与水泥水化产物间的ITZ黏结紧密,水化产物中微裂缝的宽度明显变小(见图7(b))。水性环氧树脂起到了阻裂剂和粘结剂的作用,一方面环氧树脂乳液中的-COOR和-OH会以离子键的形式与部分水泥水化产物中的Ca²⁺结合,形成含钙络合聚合物,改善了水泥石的抗裂性能;另一方面起到了“架桥”的作用,乳液中含有的极性基团会与钢纤维表面产生物理化学吸附效应^[6],从而改善钢纤维与水泥水化产物间ITZ的密实性。

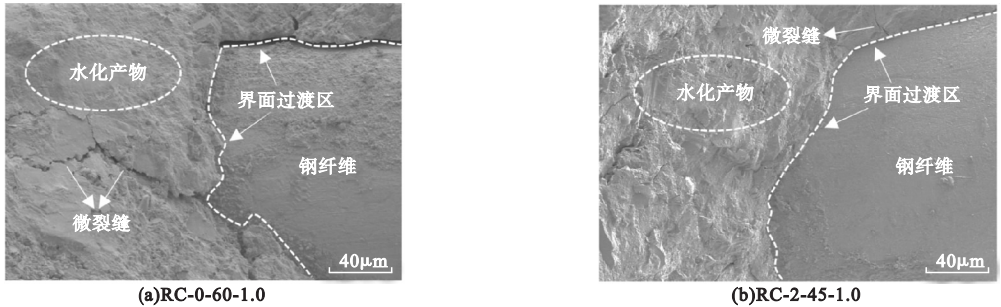


图7 RC-0-60-1.0与RC-2-45-1.0的钢纤维与水泥水化产物间ITZ的微观形貌

Fig. 7 The micro morphologies of the ITZ between steel fiber and hydration products of RC-0-60-1.0 and RC-2-45-1.0

3 基于Weibull分布的拟合分析

3.1 抗冲击次数分布的拟合检验

已有研究表明,SFRAC的冲击寿命服从Weibull分布^[3],因此笔者采用Weibull分布理论对各组试件的抗冲击次数进行概率统计分析。将试件的抗冲击次数 N 视作随机变量,则关于 N 的概率密度函数 $f(N)$ 和累积分布函数 $F(N)$ 可表示为

$$f(N) = \frac{\gamma}{N_x - N_0} \left(\frac{N - N_0}{N_x - N_0} \right)^{\gamma-1} \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_x - N_0} \right)^{\gamma} \right]. \quad (3)$$

式中: γ 为形状参数; N_x 为尺度参数即特征

寿命参数; N_0 为位置参数即最小寿命参数。

$$F(N) = P_f(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_x - N_0} \right)^{\gamma} \right]. \quad (4)$$

式中: $P_f(N)$ 为失效概率函数。

基于安全性、可靠性及适用性的角度考虑,可认为 N_0 无限趋近于0,因此得出基于双参数Weibull分布的存活概率函数 $P_s(N)$ 如下^[16]:

$$P_s(N) = 1 - P_f(N) = \exp \left[- \left(\frac{N}{N_x} \right)^{\gamma} \right]. \quad (5)$$

对式(5)等式两边先取倒数再取两次自然对数,得到:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s(N)} \right) \right] = \gamma [\ln N - \ln N_x]. \quad (6)$$

令 $X = \ln N; Y = \ln[\ln(1/P_s(N))]; B = \gamma \ln N_x$, 则(6)可化简为式(7), 如下:

$$Y = \gamma X - B. \quad (7)$$

$$P_s(N) = 1 - \frac{m}{t+1}, 0 < m \leq t. \quad (8)$$

式中: t 为各组进行抗冲击试验的试件总数, 取值 6; m 为各组的冲击试验结果按递增的顺序排列后得到的顺序数。

由式(7)可知, Y 与 X 应满足线性关系, 根据式(8)求出 $P_s(N)$ [3,16], 进而得到每个试件的 Y 与 X , 采用线性拟合的方法, 得出各组试件对应的参数 γ 和 B 以及相关系数 R^2 , 如表 6 所示。

表 6 基于 Weibull 分布的冲击寿命线性拟合结果
Table 6 The linear regression results of impact life based on the Weibull distribution

试件编号	N_1			N_2		
	γ	B	R^2	γ	B	R^2
NC-0-0-0	2.279	1.915	0.995	2.279	1.915	0.995
RC-0-30-0.6	1.189	1.963	0.974	3.205	9.801	0.966
RC-0-45-0.8	1.371	2.413	0.965	6.904	21.966	0.965
RC-0-60-1.0	2.067	4.786	0.984	3.089	11.292	0.937
NC-2-0-0.6	1.343	1.911	0.904	3.088	9.537	0.933
RC-2-30-0	1.338	1.379	0.992	1.364	1.648	0.963
RC-2-45-1.0	1.618	3.122	0.964	4.790	15.946	0.928
RC-2-60-0.8	1.513	2.040	0.916	4.214	12.647	0.915
NC-4-0-0.8	1.309	1.810	0.979	4.104	12.718	0.914
RC-4-30-1.0	1.969	3.267	0.994	4.082	12.190	0.949
RC-4-45-0	1.481	1.892	0.971	1.748	2.548	0.966
RC-4-60-0.6	1.576	2.012	0.974	2.618	7.289	0.955
NC-6-0-1.0	2.397	3.558	0.985	4.581	15.202	0.917
RC-6-30-0.8	1.851	1.862	0.999	2.708	7.768	0.925
RC-6-45-0.6	1.656	2.034	0.946	9.562	26.325	0.992
RC-6-60-0	1.828	1.977	0.986	1.576	2.012	0.974

由表 6 可知, 各组基于 Weibull 分布的拟合相关系数 R^2 最小值为 0.904, 大多数在 0.95 以上, 说明 $\ln[\ln(1/P_s(N))]$ 与 $\ln N$ 之间存在显著的线性相关性, 即各组试件的抗冲击次数均服从双参数 Weibull 分布。

3.2 不同失效概率下 RAC 的冲击寿命预测

根据式(5)~(7)推导出在不同失效概率下 ($P_f(N) = 0.1, 0.15, 0.3$) 各组试件冲击寿命的表达式:

$$N = \exp\left\{\frac{\ln[\ln(1/P_f(N))] + B}{\gamma}\right\}. \quad (9)$$

由式(9)及表 6 可得出各组配合比的混凝土在不同失效概率下的破坏冲击寿命 N_2 (见图 8)。由图 8 可知, 各组试件在不同失效概率下 N_2 的增长趋势与实测值保持一致。掺入水性环氧树脂后, 混凝土试件的冲击寿命较基准组有一定程度的改善; 掺入钢纤维后, 混凝土的冲击寿命有明显的改善。各组试件的 N_2 与失效概率呈正相关, 这与混凝土材料的结构及性质相契合。

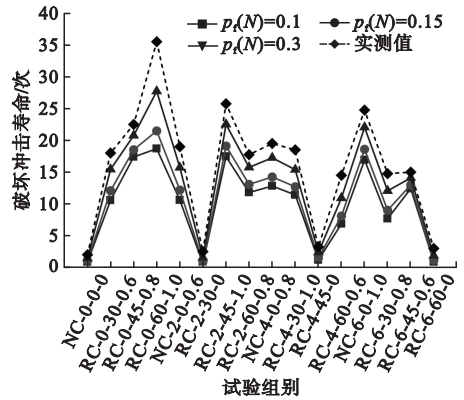


图 8 不同失效概率下各组试件的冲击寿命

Fig. 8 The impact life of specimens under different probabilities of failure

4 结论

(1) 各因素对 RAC 抗冲击性能影响的从大到小顺序是钢纤维体积分数、水性环氧树脂质量分数、再生粗骨料取代率。掺入钢纤维可显著改善 RAC 的韧性和延性; 当再生粗骨料取代率较低时, 由于聚合物膜与水化产物形成了空间网状结构, 使得掺入水性环氧树脂的 RAC 较基准组 N_2 的最大增幅达到 62.5%; 当再生粗骨料取代率较高时, 由于再生粗骨料释水和孔隙率的综合作用, 使得 RAC 的抗冲击性能有所下降。

(2) 水性环氧树脂质量分数取 2%, 再生粗骨料取代率取 45%, 钢纤维体积分数取 1.0%, 为 RAC 抗冲击性能的最优配合比。该配合比下试件的 W_1 和 W_2 较基准组分别

提升了187.4%和1187.3%。

(3)水性环氧树脂一方面起到了阻裂剂和粘结剂的作用,另一方面起到了“架桥”的作用,改善了钢纤维和水化产物间ITZ的密实性。

(4)采用双参数Weibull分布对各组配合比混凝土的 N_1 和 N_2 进行拟合,得到的相关系数 R^2 均在0.9以上。

参考文献

- [1] DAS C S, DEY T, DANDAPAT R, et al. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete [J]. Construction and building materials, 2018, 189: 649 - 659.
- [2] 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.
- [3] 孔祥清,何文昌,邢丽丽,等.钢纤维对再生混凝土抗冲击性能的影响[J].材料科学与工程学报, 2022, 40(2): 284 - 291.
(KONG Xiangqing, HE Wenchang, XING Lili, et al. Impact resistance of recycled aggregate concrete reinforced with steel fibers [J]. Journal of materials science & engineering, 2022, 40(2): 284 - 291.)
- [4] OMIDINASAB F, GOODARZI S M, MOGHADAM A S. Characterization and optimization of mechanical and impact properties of steel fiber reinforced recycled concrete [J]. International journal of civil engineering, 2021(759): 1 - 15.
- [5] 孔祥清,何文昌,邢丽丽,等.钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响[J].复合材料学报, 2020, 37(7): 1763 - 1773.
(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.)
- [6] 罗立峰,周建春,黄培彦.聚合物钢纤维混凝土的增强机理分析[J].复合材料学报, 2002, (3): 46 - 50.
(LUO Lifeng, ZHOU Jianchun, HUANG Peiyan. Reinforced mechanism with the polymer latex added in the steel fibre reinforced concrete [J]. Acta materiae compositae sinica, 2002, (3): 46 - 50.)
- [7] PANG B, JIN Z Q, ZHANG Y S, et al. Ultraductile waterborne epoxy-concrete composite repair material: epoxy-fiber synergistic effect on flexural and tensile performance [J]. Cement and concrete composites, 2022, 129(5): 104463.
- [8] 钱慧丽,梁会忠,韩飞,等.低掺量水性环氧树脂对高性能混凝土抗冲击韧性的研究[J].混凝土, 2013(5): 97 - 100.
(QIAN Huili, LIANG Huizhong, HAN Fei, et al. Study on the effects of low volume waterborne epoxy resin on dynamic ductility of high performance concrete [J]. Concrete, 2013(5): 97 - 100)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.再生骨料应用技术规程: JGJ/T 240—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of recycled aggregate: JGJ/T 240—2011 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.)
- [10] 中国工程建设标准化协会.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. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13: 2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.)
- [11] 吴中伟.水泥基复合材料的界面问题[J].武汉建材学院学报, 1982(2): 143 - 149.
(WU Zhongwei. Interface problems of cement-based composites [J]. Journal of Wuhan institute of building materials, 1982(2): 143 - 149.)
- [12] 黄展魏,陈伟,李秋,等.水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构[J].硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2530 - 2535.
(HUANG Zhanwei, CHEN Wei, LI Qiu, et al. Mechanical properties and microstructure of waterborne epoxy resin modified cement mortar [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(8): 2530 - 2535.)
- [13] 邓宗才,李建辉,孙宏俊,等.新型纤维增强混凝土梁的抗弯冲击特性[J].公路, 2004(12): 163 - 169.
(DENG Zongcai, LI Jianhui, SUN Hongjun, et al. Flexural impact properties of new fiber reinforced concrete beams [J]. Highway, 2004(12): 163 - 169.)
- [14] 牛龙龙,张士萍,韦有信.钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品, 2019(3): 51 - 54.
(NIU Longlong, ZHANG Shiping, WEI Youxin. Effect of steel fiber content on mechanical properties of concrete [J]. China concrete and cement products, 2019(3): 51 - 54.)
- [15] 夏冬桃,李欣怡,吴昊.混杂纤维混凝土与既有混凝土的粘结斜剪性能试验研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 645 - 654.
(XIA Dongtao, LI Xinyi, WU Hao. Experimental research on the bonding oblique shear performance of HFRC and existing concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(4): 645 - 654.)
- [16] ZHANG T, WU B, KONG X, et al. Investigation of impact resistance of high-performance polypropylene fiber-reinforced recycled aggregate concrete [J]. Crystals, 2022, 12(5): 669.
(责任编辑:王国业 英文审校:范丽婷)