

文章编号:1007-9629(2023)07-0731-08

纳米 SiO₂ 对橡胶混凝土断裂行为的影响

王娟^{1,2,*}, 王文超¹, 许耀群¹, 曹宏亮³, 王大辉³

(1. 郑州大学黄河实验室, 河南郑州 450001; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 3. 河南省水利科学研究院结构材料研究所, 河南郑州 450003)

摘要:为改善橡胶混凝土的力学性能,以纳米 SiO₂ 为改性剂,研究了纳米 SiO₂ 增强橡胶混凝土的断裂行为,采用数字图像相关方法,分析了纳米 SiO₂ 增强橡胶混凝土断裂性能,并结合微观结构分析探讨了其增强机理.结果表明:纳米 SiO₂ 的掺入对橡胶混凝土的断裂性能和强度提高效果显著;纳米 SiO₂ 与橡胶的协同作用提高了混凝土裂缝扩展稳定性,延长了断裂过程起裂到失稳的时间;纳米 SiO₂ 对橡胶混凝土断裂性能的提升归结于其对水泥基质的改善,从而提高了混凝土的承载能力.

关键词:橡胶混凝土; 纳米 SiO₂; 强度; 断裂性能; 数字图像相关方法

中图分类号: TU528.57

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.005

Effect of Nano-SiO₂ on Fracture Behavior of Rubber Concrete

WANG Juan^{1,2,*}, WANG Wenchao¹, XU Yaoqun¹, CAO Hongliang³, WANG Dahui³

(1. Laboratory of Yellow River, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Structural Materials Research, Henan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to improve the mechanical properties of rubber concrete, nano-SiO₂ was used as a modifier to study the fracture behavior of nano-SiO₂ reinforced rubber concrete. Digital image correlation technology was used to analyze the fracture performance of nano-SiO₂ reinforced rubber concrete, and its strengthening mechanism was explored through microstructure analysis. The results show that with the incorporation of nano-SiO₂, the fracture performance and strength of rubber concrete are improved significantly. The incorporation of nano-SiO₂ and rubber can improve the stability of concrete crack expansion and prolong the time from cracking to instability during the fracture process. The improvement of the fracture performance of rubber concrete by nano-SiO₂ is attributed to its improvement in the cement matrix, thereby enhancing the bearing capacity of concrete.

Key words: rubber concrete; nano-SiO₂; strength; fracture performance; digital image correlation

将废旧橡胶加工后取代天然骨料掺入混凝土,可以实现废橡胶的回收再利用,且会提升混凝土的韧性、抗冲磨性能、延性及抗疲劳性能等^[1-3].然而,由于橡胶颗粒与砂浆间的界面黏结较差^[4-5],橡胶混凝土的强度普遍低于普通混凝土^[6-9].为了改善其力学性能,学者们常利用 NaOH^[10-11]、KMnO₄^[12] 及偶联

剂^[13-14]等改性剂对橡胶颗粒表面进行处理.纳米 SiO₂ 是高火山活性的混凝土外加剂,能在微观尺度上改善界面过渡区(ITZ)结构和整体密实度,对混凝土性能提升效果显著^[15-17].Xu等^[18-19]证实纳米 SiO₂使 ITZ 与水泥砂浆弹性模量的比值提升了 30%;Fang等^[20]研究发现纳米 SiO₂能部分补偿因橡胶掺入造成的混

收稿日期:2022-09-27; 修订日期:2022-11-14

基金项目:长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2017517/KY);国家自然科学基金资助项目(52179145);河南省高校科技创新人才支持计划(21HASTIT013);河南省自然科学基金优秀青年基金资助项目(222300420081);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金资助项目(sklhse-2022-C-01)

第一作者(通讯作者):王娟(1981—),女,河南淮滨人,郑州大学教授,博士生导师,博士. E-mail: wangjuan@zzu.edu.cn

混凝土强度损失;根据 Zhang 等^[21]对纳米 SiO₂改性水泥基材料研究的梳理,纳米 SiO₂掺量为 3% 时对强度的提升效果最佳。

针对传统混凝土韧性差、易开裂的缺点,国内外学者研究了橡胶的掺入对混凝土断裂性能的影响,并在提升混凝土断裂能方面达成了共识^[22-24]。Wang 等^[25-27]认为橡胶混凝土的起裂荷载与峰值荷载低于普通混凝土。此外,张鹏等^[28]研究发现混凝土断裂韧性随着纳米 SiO₂和钢纤维掺量的增加先增大后降低;罗素蓉等^[29]研究发现掺入适量纳米 SiO₂能够提高再生混凝土的双 K 断裂韧度和断裂能。目前,国内外对改性橡胶混凝土断裂性能研究较少。开展纳米 SiO₂对橡胶混凝土断裂行为影响的试验研究,对推广橡胶混凝土在实际工程中的应用具有重要理论指导和实践意义。

本文采用三点弯曲切口梁,结合数字图像相关(DIC)方法,研究了纳米 SiO₂的掺入对橡胶混凝土断裂性能的影响,并对裂缝扩展规律进行了分析;结合扫描电镜(SEM)测试,探究了纳米 SiO₂对橡胶混凝土断裂性能的提升机理。

1 试验

1.1 原料与配合比

用 P·I 42.5 基准水泥配制普通混凝土(PC);已有研究表明橡胶颗粒体积分数为 20% 时橡胶混凝土拥有较理想的断裂韧性且不损失较多强度^[4, 25],因此用 3~6 mm 橡胶颗粒以 20% 等体积取代砂来配制橡胶混凝土(RC);在 RC 的基础上,将质量分数为 30% 的纳米 SiO₂分散溶胶添加至拌和水中来配制纳米橡胶混凝土(NRC),溶胶所含纳米 SiO₂质量为水泥质量的 3%。根据 SL352—2006《水工混凝土试验规范》,测试混凝土的 28 d 强度,每组 3 个试件,结果取平均值。纳米 SiO₂分散溶胶的基本性能见表 1;混凝土的配合比及力学性能见表 2(表中 f_c 、 f_t 分别为抗压强度、劈拉强度; m_w/m_c 为水灰比(质量比))。由表 2 可见:试件 RC 的抗压强度和劈拉强度比试件 PC(基准组)分别降低了 25.8% 和 8.7%;试件 NRC 的抗压强度和劈拉强度比试件 RC 分别提高了 19.3%、18.9%。

表 1 纳米 SiO₂分散溶胶的基本性能指标
Table 1 Basic properties of nano-SiO₂ sol

Appearance	Particle size/nm	Average particle size/nm	pH value	Solution	Specific gravity	Specific surface area/(cm ² ·g ⁻¹)	Viscosity/(mPa·s)
Liquid	10~80	30	7.9	Water	1.202	250 ± 30	3.39

表 2 混凝土的配合比及力学性能
Table 2 Mix proportions and mechanical performance of concretes

Specimen	m_w/m_c	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							f_c /MPa	f_t /MPa
		Stone	Sand	Water	Cement	Rubber	Nano-SiO ₂ sol	Water reducer		
PC	0.43	1 100.00	675.40	185.00	430.00	0	0	0.30	44.9	2.99
RC	0.43	1 100.00	547.90	185.00	430.00	56.71	0	0.43	34.2	2.70
NRC	0.43	1 100.00	547.90	185.00	430.00	56.71	43.00	0.52	39.9	3.21

1.2 断裂试验

根据 DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》,用微机控制电液伺服万能试验机(50 kN),采用三点弯曲切口梁试验研究橡胶混凝土双 K 断裂参数和断裂能,加载速率为 0.05 mm/min。试验制作 3 组共 15 个试件,试件尺寸为 100 mm×100 mm×515 mm,跨高比为 4,初始缝长 a_0 为 40 mm。用动态采集系统采集试验数据,得到了完整的荷载-裂缝端开口位移(P-CMOD)曲线和荷载-位移(P- δ)曲线。为获取断裂试件表面全场应变数据,采用 DIC-3D 系统对观测面全场应变进行观测。

1.3 微观结构观测

采集龄期为 28 d 的混凝土立方体试件碎片作为

SEM 观测的样本,选取界面黏结良好的橡胶颗粒与水泥石 ITZ 进行了微观结构观测,得到水泥砂浆和混凝土 ITZ 的扫描电镜照片。

2 断裂参数的计算公式

2.1 断裂韧度的计算公式

断裂韧度是反映材料所能容纳应力场强度能力的特性,采用 Xu 等^[30]提出的混凝土裂缝扩展双 K 断裂准则推荐的断裂韧度公式进行计算。

失稳断裂韧度 K_{IC}^S 的计算式为:

$$K_{IC}^S = \frac{1.5 \left(F_{max} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2} \right) \times 10^{-3} Sa_c^{1/2}}{th^2} f(\alpha) \quad (1)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha) \times (2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha) \times (1 - \alpha)^{3/2}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a_c}{h} \quad (3)$$

式中: F_{\max} 为 P -CMOD 曲线的峰值荷载; S 为试件两个支座间的跨度; L 为试件长度; m 为试件支座间的质量, 用试件总质量按 S/L 比折算; g 为重力加速度, 取值 9.81 m/s^2 ; a_c 为有效裂缝长度; t 为试件厚度; h 为试件高度; $f(\alpha)$ 为与有效裂缝长度有关的几何形状因子; α 为临界缝高比.

起裂韧度 K_{Ic}^0 的计算式为:

$$K_{Ic}^0 = \frac{1.5 \left(F_Q + \frac{mg}{2} \times 10^{-2} \right) \times 10^{-3} S a_0^{1/2}}{th^2} f(\alpha') \quad (4)$$

$$f(\alpha') = \frac{1.99 - \alpha'(1 - \alpha') \times (2.15 - 3.93\alpha' + 2.7\alpha'^2)}{(1 + 2\alpha') \times (1 - \alpha')^{3/2}} \quad (5)$$

$$\alpha' = \frac{a_0}{h} \quad (6)$$

式中: F_Q 为起裂荷载; $f(\alpha')$ 为与初始裂缝长度有关的几何形状因子; α' 为初始缝高比.

2.2 断裂能的计算公式

根据 P - δ 曲线, 采用 RILEM 国际结构与材料研究所联合会^[31] 推荐的三点弯曲方法对断裂能 G_F 进行计算. 断裂能 G_F 与延性指数 D_u 计算式分别为:

$$G_F = \frac{\int_{\delta_{\max}}^{\infty} Pd\delta + mg\delta_{\max}}{B(h - a_0)} = \frac{W_0 + mg\delta_{\max}}{A_{lig}} \quad (7)$$

$$D_u = G_F / P_{\max} \quad (8)$$

式中: W_0 为 P - δ 曲线下所围图形的面积; δ_{\max} 为梁最终破坏时的加载点位移; B 为试件宽度; A_{lig} 为断裂带净面积; P_{\max} 为 P - δ 曲线的峰值荷载.

3 结果与分析

3.1 断裂试验结果

将传统夹式引伸计(E)和 DIC 得到的混凝土 P -CMOD 曲线进行对比, 结果见图 1(a); 混凝土的 P - δ 曲线见图 1(b). 由图 1 可见, 2 种方法采集的数据吻合良好; 3 组试件的曲线规律相似, 断裂过程都呈现典型的三阶段式, 分别为线弹性阶段、稳定扩展阶段和失稳扩展阶段. 根据 P -CMOD 和 P - δ 曲线, 可由式(1)~(8)求得 3 组试件龄期为 28 d 时的双 K 断裂参数和断裂能.

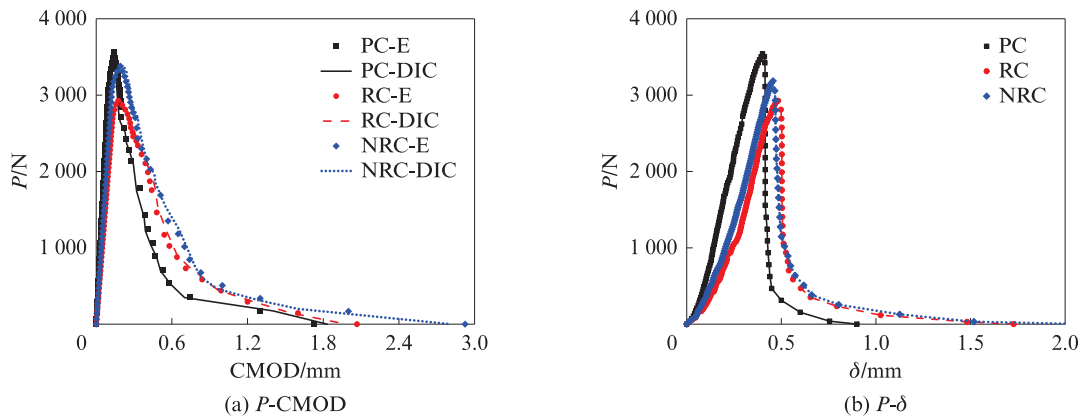


图 1 混凝土的 P -CMOD 曲线和 P - δ 曲线
Fig. 1 P -CMOD and P - δ curves of concretes

3.2 断裂过程区裂缝扩展演化规律

采用 DIC 对数字图像分析区域的全场位移进行监测, 探究纳米 SiO₂ 的引入对橡胶混凝土断裂过程区(FPZ)裂缝扩展演化规律的影响. 橡胶混凝土各加载阶段示意图见图 2. 由图 2 可见, $P1 \sim P6$ 加载步分别处于当荷载达到上升段 $0.4F_{\max}$ 、 $0.7F_{\max}$ 、 $1.0F_{\max}$ 和下降段 $0.7F_{\max}$ 、 $0.4F_{\max}$ 、 $0.1F_{\max}$ 的位置. 由于混凝土断裂破坏时裂缝的扩展形式可近似为 I 型, 因此观测试件计算区域的应变场变化时只考虑横向应变^[25].

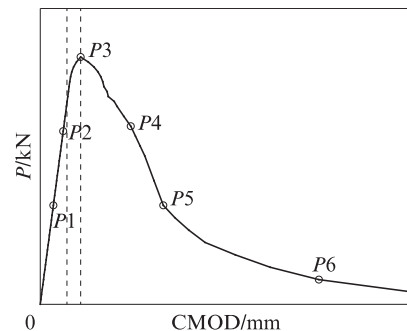


图 2 橡胶混凝土各加载阶段示意图
Fig. 2 Schematic diagram of each loading stage of rubber concrete

试件PC、RC和NRC的裂缝发展图见图3(图中 ϵ 为微应变).由图3可见:所有试件的FPZ裂缝扩展规律与*P-CMOD*曲线的三阶段具有一致性,且其在扩展时不断遇到水泥基体以及砂、石的阻挡而曲折地向着主应力的方向扩展,最终只产生了1条狭长的带状主裂缝;试件PC断裂过程区的形状大致为狭长的带状,在裂缝尖端缩小为三角形,加载到峰值荷载前裂缝很小,达到峰值荷载后裂缝迅速发展并失去

承载能力,显示出较明显的脆性特征;加载后试件RC比PC更先出现较大应变,但由于橡胶与砂浆之间存在齿合咬接,其达到峰值荷载砂浆开裂之后仍能传递部分应力,即应变软化现象,失稳时并未产生贯穿裂缝,整体而言掺入橡胶后混凝土的脆性特征得到一定改善;试件NRC裂缝扩展形态与试件RC相似,但其起裂更晚,加载到峰值荷载后并未产生突变,具有更高的稳定性.

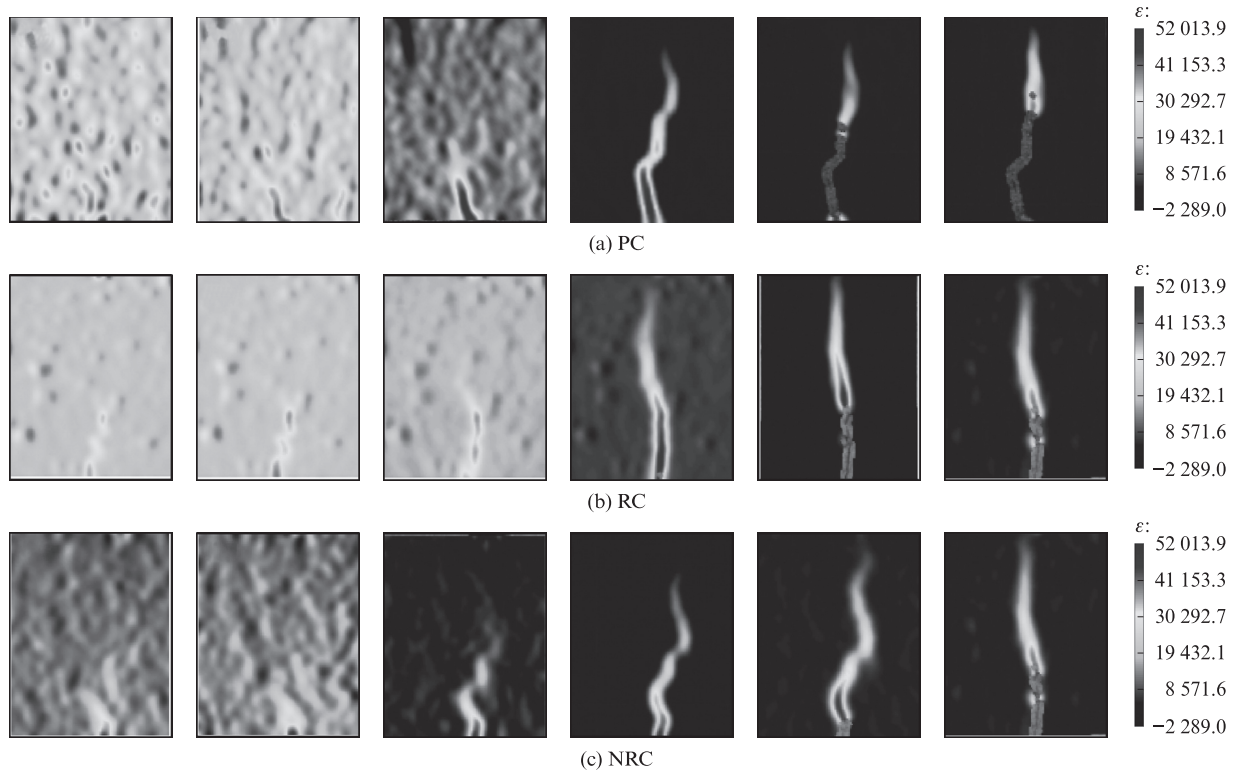


图3 试件PC、RC和NRC断裂过程区裂缝发展图

Fig. 3 Crack propagation in FPZ of specimen PC, RC and NRC

将CMOD随时间的变化规律进行了定量分析.试件PC在480 s起裂,在80 s内失去承载能力,最大裂缝开口位移为0.74 mm,呈现出明显的脆性.试件RC和NRC分别在432、415 s开始稳定扩展,并分别在864、900 s开始失稳扩展,从起裂到失稳扩展分别持续432、485 s,此后在低载下裂缝继续扩展.与试件RC相比,试件NRC在保持较好变形能力的同时还拥有较高的承载能力.

3.3 纳米SiO₂对橡胶混凝土断裂参数的影响

根据*P-CMOD*曲线和*P-δ*曲线提供的参数,由式(1)~(6)求得3组试件28 d双K断裂参数和断裂能.试件的起裂韧度和失稳韧度见图4.由图4可见,与试件PC相比,试件RC的失稳韧度提高了7.7%,起裂韧度与峰值荷载分别降低了4.2%、14.3%.究其原因:橡胶颗粒的强度和刚度远小于天然细骨料,其

取代细骨料后,削弱了原有砂石框架的承载体系;橡胶的憎水性使其本身具有引气剂功能,导致混凝土的孔隙率增大,当采用部分橡胶取代细骨料时,混凝土的起裂荷载和峰值荷载有所削弱^[26];橡胶具有优异的塑性与韧性,能在试件承载时发挥类似于纤维的桥联作用,在一定程度上抑制了裂缝的发展,但由于橡胶-基体的ITZ比较薄弱,产生拉应力的橡胶往往还未拉断便发生脱落,对韧性的提升十分有限.与试件RC相比,试件NRC的起裂荷载与峰值荷载分别提高了11.9%、8.0%,且有效裂缝长度基本保持在相同水平,其起裂韧度和失稳韧度分别提高了10.7%、9.3%.纳米SiO₂对水泥基体的改善修复了因橡胶掺入而削弱的砂石框架承载体系,峰值荷载和失稳韧度均超过基准组.

试件的断裂能和延性指数见图5.由图5可见,与

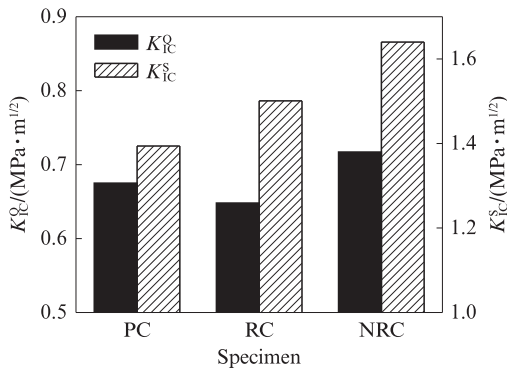


图4 试件的起裂韧度和失稳韧度

Fig. 4 Crack initiation toughness and instability toughness of specimens

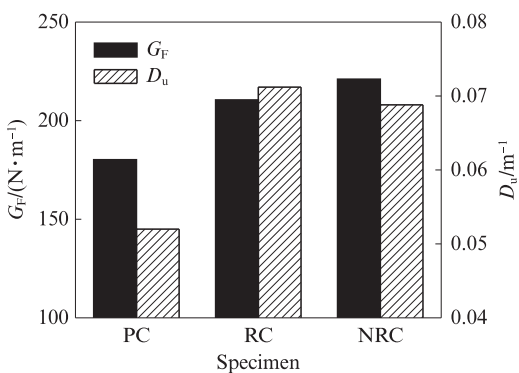


图5 试件的断裂能和延性指数

Fig. 5 Comparison of fracture energy of of specimens

试件PC相比,单掺橡胶后试件RC的断裂能和延性指数分别提高了16.8%、36.9%。裂缝扩展时,试件PC由于其脆性会迅速开裂,而橡胶颗粒由于其弹性会对混凝土产生一定的拉应力,吸收部分能量,阻止混凝土的进一步开裂。而试件RC虽然承载能力较

低,但当其达到峰值荷载后,橡胶颗粒则会发挥阻裂作用,使得混凝土从失稳状态发展至破坏状态耗时延长,从而导致断裂能和延性指数有所提高。掺入纳米SiO₂后,与试件RC相比,试件NRC的断裂能提高5.2%,纳米SiO₂与橡胶的协同作用可以明显提高混凝土的延性、耗能能力,有效改善混凝土的脆性。

3.4 纳米 SiO₂对橡胶混凝土的增强增韧机理

综上,以橡胶颗粒等体积取代20%砂时,混凝土的抗压强度、起裂韧度与峰值荷载都会受到不同程度的削弱,再掺入水泥质量3%的纳米SiO₂,试件NRC的各项断裂性能指标皆高于试件RC。这是由于在纳米SiO₂与橡胶颗粒综合作用下,混凝土具有更好的变形和承载能力。

3.4.1 纳米 SiO₂对强度的提升机理

纳米SiO₂改性水泥基材料的增强主要从填充效应、火山灰效应、晶核效应及界面调控4个方面来解释^[15-17]。28 d龄期试件RC和NRC水化产物的SEM照片见图6。由图6可见:RC的水化产物水化硅酸钙(C-S-H)凝胶以非晶态结构的形式存在于样品表面,而C-S-H凝胶是混凝土强度的主要来源,其周围还伴随着大颗粒氢氧化钙(CH)晶体,水化产物整体形态相对松散;试件NRC中,沉积的CH晶体分布在水泥基体中,增强了C-S-H的结构完整性。在水化前期,纳米SiO₂能填充基体中的微小孔隙并提供更多的成核位点,诱导水化生成网状C-S-H,并细化基体中CH粒径;水化后期,纳米SiO₂则通过参与火山灰反应消耗CH生成更多C-S-H凝胶,使结构更加均匀致密,这是其提高混凝土强度的主要原因。

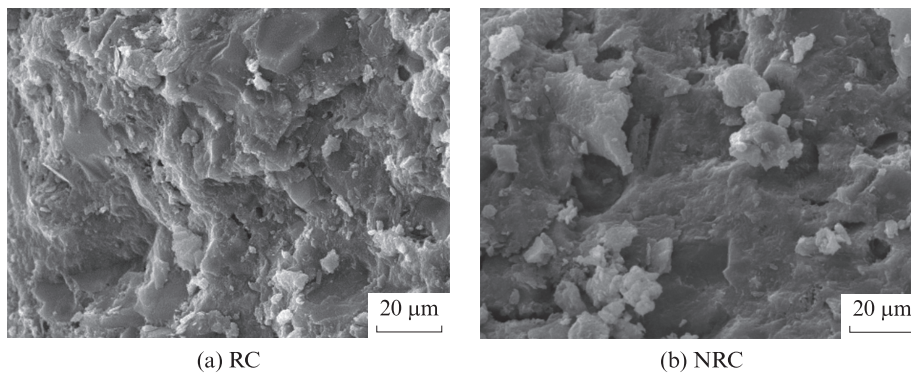


图6 28 d龄期试件RC和NRC水化产物的SEM照片

Fig. 6 SEM images of hydration products of specimen RC and NRC at 28 d

混凝土ITZ微观结构形态的SEM照片见图7。由图7可见:与试件PC中石子-水泥ITZ相比,试件RC的橡胶-水泥ITZ裂纹较明显,橡胶颗粒从浆体中分离,这是橡胶混凝土强度降低的主要因素^[32];纳米SiO₂能改善橡胶-水泥基体、石子-水泥基体界面

CH晶粒的取向性,减小其尺寸,在微观尺度上改善ITZ结构,在同等放大倍数下,经由纳米SiO₂调控后试件NRC中橡胶与水泥结合良好,并无明显裂隙,裂缝宽度降低了77.3%,从ITZ方面弥补了橡胶掺入对混凝土强度的削弱。

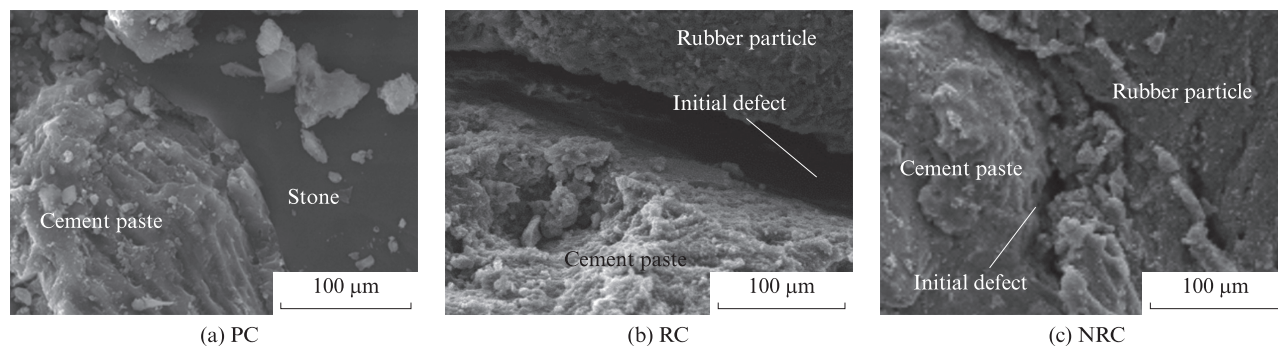


图7 混凝土ITZ微观结构形态的SEM照片

Fig. 7 SEM images of microstructure and morphology of ITZ in concretes

3.4.2 断裂韧度和强度的相关关系

有研究表明混凝土边界及尺寸效应、粗骨料最大粒径及分布等因素与断裂韧度相关,而在材料几何尺寸固定的情况下,断裂韧度的提高和强度密不可分^[33-36].分析了已有文献[25,37-39]和本文的数据,将抗压强度、劈拉强度与断裂韧度进行了逐步回归分析,获得的回归模型显示,起裂韧度与抗压强度的线性关系显著,而失稳韧度模型调整后的相关系数 $R^2=0.405$,自变量对失稳韧度解释比例仅有40.5%,小于50.0%.最终的回归模型为:

$$K_{IC}^0 = 0.008f_c + 0.338 \quad (9)$$

纳米 SiO_2 对橡胶混凝土起裂韧度的提升归结于其对承载能力的提高,在已知抗压强度的情况下,可较准确地预测起裂韧度值.而失稳韧度是由材料承载能力和变形能力共同决定的指标,断裂过程区的变形和黏聚力均为非线性分布^[40],仅采用劈拉强度去解释失稳韧度显然是不全面的.纳米 SiO_2 对橡胶混凝土断裂性能的提升可以从承载能力和变形能力两方面进行解释.纳米 SiO_2 的掺入促进了水泥水化反应,生成了致密的C-S-H结构,对橡胶与基体黏结作用的提升有效阻止了裂缝间的橡胶被拔出,使发生桥联的橡胶产生更大的拉应力与变形,并提高了峰值荷载和有效裂缝长度,失稳韧度也随之增大.

4 结论

(1)纳米 SiO_2 能提高橡胶混凝土的起裂韧度、失稳韧度和断裂能.掺入纳米 SiO_2 后,橡胶混凝土断裂过程中的起裂荷载与峰值荷载分别提高了11.9%、8.0%,起裂韧度、失稳韧度和断裂能分别提高了10.7%、9.3%、5.2%.

(2)纳米 SiO_2 通过改善橡胶混凝土强度对起裂韧度进行提升,并通过填充效应、火山灰效应、晶核效应及界面调控改善水泥基体与界面的微观结构和强度.回归分析结果表明,随着混凝土抗压强度的增

大,其起裂韧度呈线性增大趋势.

(3)纳米 SiO_2 对橡胶混凝土断裂性能的提升可以从承载能力和变形能力两方面进行解释.纳米 SiO_2 的掺入弥补了因橡胶界面薄弱而造成的起裂韧性和峰值荷载的降低.通过提高橡胶混凝土裂缝扩展过程的黏聚力和变形能力,提高了其失稳韧度和断裂能,延缓裂缝扩展失稳时间,使试件维持更加平稳的劣化失稳状态.

参考文献:

- [1] 刘艳荣,葛树奎,韩瑜.废旧轮胎橡胶粉改性水泥基材料研究概况[J].材料导报,2014,28(增刊2):422-426.
LIU Yanrong, GE Shukui, HAN Yu. Research progress of scrap rubber powder of waste tires modified cement-based composites [J]. Materials Reports, 2014, 28(Suppl 2):422-426.(in Chinese)
- [2] JASSIM T A, ZHUANG B, IBRAHIM A M, et al. Using wasted rubber material for reducing loads and energy dispersal in building industries: State of the art[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Diyala: IOP Publishing, 2021, 1076(1):012114.
- [3] 杨荣周,徐颖,郑强强,等.分级等荷循环受压下橡胶水泥砂浆的疲劳损伤演化[J].建筑材料学报,2021,24(5):961-969.
YANG Rongzhou, XU Ying, ZHENG Qiangqiang, et al. Fatigue and damage evolution characteristics of rubber cement mortar under graded constant load cyclic compression[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):961-969.(in Chinese)
- [4] WANG J, GUO Z Y, YUAN Q, et al. Effects of ages on the ITZ microstructure of crumb rubber concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254:119329.
- [5] 朱星瞳,耿欧,朱思远.废旧轮胎橡胶混凝土界面过渡区特征试验研究[J].硅酸盐通报,2021,40(2):573-578.
ZHU Xingtong, GENG Ou, ZHU Siyuan. Study on the characteristics of rubber concrete interface transition zone of waste tire[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(2):573-578.(in Chinese)
- [6] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1993, 5(4):478-496.

- [7] GHALY A M, CAHILL IV J D. Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(6):1075-1081.
- [8] 胡艳丽,高培伟,李富荣,等.不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J].建筑材料学报,2020,23(1):85-92.
HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on the mechanical properties of rubber concrete with different substitution rates [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 85-92.(in Chinese)
- [9] THOMAS B S, GUPTA R C, KALLA P, et al. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2014, 59:204-212.
- [10] CHEN C Y, LEE M T. Application of crumb rubber in cement-matrix composite [J]. Materials, 2019, 12(3):529.
- [11] GAO Y T, WANG B, LIU C J, et al. Experimental investigation on static compressive toughness of steel fiber rubber concrete[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2022, 61(1):576-586.
- [12] HE L, MA Y, LIU Q T, et al. Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120:403-407.
- [13] LI G Y, WANG Z K, LEUNG C K Y, et al. Properties of rubberized concrete modified by using silane coupling agent and carboxylated SBR[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 797-807.
- [14] DONG Q, HUANG B S, SHU X. Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48:116-123.
- [15] KHAN K, AHMAD W, AMIN M N, et al. Nano-silica-modified concrete: A bibliographic analysis and comprehensive review of material properties[J]. Nanomaterials, 2022, 12(12):1989.
- [16] KIM B J, LEE G W, CHOI Y C. Hydration and mechanical properties of high-volume fly ash concrete with nano-silica and silica fume[J]. Materials, 2022, 15(19):6599.
- [17] ZHAO J B, ZHANG B F, XIE J H, et al. Effects of nano-SiO₂ modification on rubberised mortar and concrete with recycled coarse aggregates[J]. Nanotechnology Reviews, 2022, 11(1):473-496.
- [18] XU J, WANG B B, ZUO J Q. Modification effects of nanosilica on the interfacial transition zone in concrete: A multiscale approach [J]. Cement and Concrete Composite, 2017, 81:1-10.
- [19] 徐晶,王彬彬,赵思晨.纳米改性混凝土界面过渡区的多尺度表征[J].建筑材料学报,2017,20(1):7-11.
XU Jing, WANG Binbin, ZHAO Sichen. Multi-scale characterization of interfacial transition zone in nano-modified concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):7-11.(in Chinese)
- [20] FANG J, ZHAO L, SHI J C. Frost resistance and pore structure of concrete incorporated with rubber aggregates and nano-SiO₂[J]. Materials, 2021, 14(5):1170.
- [21] ZHANG P, WAN J Y, WANG K J, et al. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148:648-658.
- [22] GRINYS A, SIVILEVIČIUS H, PUPEIKIS D, et al. Fracture of concrete containing crumb rubber [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013, 19(3):447-455.
- [23] REDA TAHA M M, EL-DIEB A S, ABD EL-WAHAB M A, et al. Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(10):640-649.
- [24] 曹国瑞,王娟,卿龙邦,等.橡胶混凝土断裂性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2018,40(6):91-97.
CAO Guorui, WANG Juan, QING Longbang, et al. Experiment study on the fracture characteristics of crumb rubber concrete[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 40(6): 91-97.(in Chinese)
- [25] WANG J, GUO Z X, ZHANG P, et al. Fracture properties of rubberized concrete under different temperature and humidity conditions based on digital image correlation technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276:124106.
- [26] 刘妙燕,陆俊,明攀.三点弯曲下橡胶混凝土的断裂性能[J].水利水电工程学报,2021(3):31-40.
LIU Miaoyan, LU Jun, MING Pan. Fracture properties of rubber concrete under three-point bending [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3):31-40.(in Chinese)
- [27] 薛刚,董亚杰,衣笑,等.橡胶粒径及掺量对混凝土断裂韧性的影响[J].混凝土,2022(2):99-101,106.
XUE Gang, DONG Yajie, YI Xiao, et al. Influence of rubber particle size and content on fracture toughness of concrete [J]. Concrete, 2022(2):99-101, 106.(in Chinese)
- [28] 张鹏,李清富,朱海堂,等.纳米SiO₂和钢纤维增强混凝土的断裂韧度[J].建筑材料学报,2017,20(3):366-372.
ZHANG Peng, LI Qingfu, ZHU Haitang, et al. Fracture toughness of nano-SiO₂ and steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3):366-372.(in Chinese)
- [29] 罗素蓉,林倩,李炜源,等.纳米材料改性再生骨料混凝土断裂性能[J].建筑材料学报,2022,25(11):1151-1159.
LUO Surong, LIN Qian, LI Weiyuan, et al. Improvement of fracture performance of recycled aggregate concrete by nanomaterials [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1151-1159.(in Chinese)
- [30] XU S L, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2):151-177.
- [31] ANON. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams[J]. Materials and Structures, 1985, 18(4):287-290.
- [32] THOMAS B S, GUPTA R C, KALLA P, et al. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2014, 59:204-212.
- [33] 张廷毅,高丹盈,郑光和,等.三点弯曲下混凝土断裂韧度及

- 影响因素[J]. 水利学报, 2013, 44(5):601-607.
- ZHANG Tingyi, GAO Danying, ZHENG Guanghe, et al. Fracture toughness of concrete and influencing factors under three-point bending[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5):601-607.(in Chinese)
- [34] 管俊峰, 胡晓智, 王玉锁, 等. 用边界效应理论考虑断裂韧性和拉伸强度对破坏的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(10):1298-1306.
- GUAN Junfeng, HU Xiaozhi, WANG Yusuo, et al. The effects of fracture toughness and tensile strength on destruction are considered by boundary effect theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10):1298-1306.(in Chinese)
- [35] 管俊峰, 王强, HU Xiaozhi, 等. 考虑骨料尺寸的混凝土岩石边界效应断裂模型[J]. 工程力学, 2017, 34(12):22-30.
- GUAN Junfeng, WANG Qiang, HU Xiaozhi, et al. Boundary effect fracture model for concrete and granite considering aggregate size[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12):22-30.(in Chinese)
- [36] 管俊峰, 姚贤华, 白卫峰, 等. 水泥砂浆断裂韧度与强度的边界与尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4):556-560, 575.
- GUAN Junfeng, YAO Xianhua, BAI Weifeng, et al. Boundary and size effect of fracture toughness and strength of mortar[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4):556-560, 575.(in Chinese)
- [37] 张新慧, 王学志, 张晓飞, 等. 不同强度对碾压混凝土试件双K断裂参数的影响[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(23):89-91.
- ZHANG Xinhui, WANG Xuezi, ZHANG Xiaofei, et al. Influence of different strength on double K fracture parameters of RCC[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018(23):89-91.(in Chinese)
- [38] 胡少伟, 范向前, 陆俊. 强度等级对混凝土双K断裂参数的影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9):77-81.
- HU Shaowei, FAN Xiangqian, LU Jun. Influence of strength grade on double-K fracture parameters of concrete[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9):77-81.(in Chinese)
- [39] 娄本星, 胡少伟, 范向前, 等. 不同养护温度下蒸养混凝土断裂性能研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1163-1168.
- LOU Benxing, HU Shaowei, FAN Xiangqian, et al. Fracture properties of steam-cured concrete under different curing temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1163-1168.(in Chinese)
- [40] 卿龙邦, 李庆斌, 管俊峰, 等. 基于虚拟裂缝模型的混凝土断裂过程区研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9):112-116, 132.
- QING Longbang, LI Qingbin, GUAN Junfeng, et al. Study of concrete fracture process zone based on fictitious crack model[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9):112-116, 132.(in Chinese)