

海水珊瑚砂ECC的力学性能与裂纹宽度控制

王振波 郝如升 李鹏飞 韩宇栋 孙鹏

Mechanical properties and crack width control of seawater coral sand ECC

WANG Zhenbo, HAO Rusheng, LI Pengfei, HAN Yudong, SUN Peng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220607.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维对混凝土裂缝宽度、曲折度及渗透性的影响

Effect of fiber on the crack width, tortuosity and permeability of concrete

复合材料学报. 2019, 36(2): 491–497 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180413.004>

玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验

Axial compression test of basalt fiber reinforced polymer reinforced coral reef and sand aggregate concrete column

复合材料学报. 2020, 37(10): 2428–2438 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200219.003>

海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars–coral concrete

复合材料学报. 2018, 35(12): 3458–3465 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001>

钢筋锈蚀对全珊瑚海水钢筋/混凝土柱大偏心受压性能的影响

Influence of steel corrosion to the large eccentric compression behavior of coral aggregate reinforced concrete column

复合材料学报. 2019, 36(10): 2426–2438 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181228.001>

新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验

Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer–steel composite tube columns

复合材料学报. 2021, 38(9): 3084–3093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201117.001>

大掺量高吸附性石粉高强机制砂混凝土收缩开裂抑制试验

Experiment on control measures of shrinkage and cracking of high strength manufactured sand concrete containing a large amount of high absorbcency stone powder

复合材料学报. 2021, 38(8): 2737–2746 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210430.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

海水珊瑚砂 ECC 的力学性能与裂纹宽度控制



分享本文

王振波^{*1}, 郝如升¹, 李鹏飞¹, 韩宇栋², 孙鹏¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要: 为解决珊瑚混凝土的脆性与耐久性问题, 采用岛礁地域性原材料制备了海水珊瑚砂高延性水泥基材料 (Seawater coral sand engineered cementitious composites, SCECC)。试验研究了不同骨料种类、最大粒径和细度模数对 ECC 抗压、抗拉力学性能和裂缝控制能力的影响。结果表明: 随珊瑚砂细度模数减小, SCECC 抗压强度先增后降, 最大粒径 2.36 mm 的特细砂 SCECC 达到最高 (63.3 MPa); 降低珊瑚砂最大粒径, SCECC 拉伸性能参数不同程度地提升。最大粒径 0.60 mm 的 SCECC 拉伸性能最优, 其初裂强度、抗拉强度和极限拉应变分别为 2.29 MPa、4.11 MPa 和 5.15%, 临近破坏时的平均裂纹宽度可控制在 81 μm 。相比于淡水石英砂 ECC, SCECC 抗压强度高且早期强度发展快 (7 天抗压强度可达 28 天的 73%~78%)。两种 ECC 的骨料破坏和聚乙烯醇 (PVA) 纤维失效模式不同, SCECC 拉伸强度、弹性模量及峰值应变附近的裂纹控制能力略低, 但延性明显更优。

关键词: 高延性水泥基材料; 珊瑚砂; 细度模数; 最大粒径; 裂纹宽度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2023)04-2261-12

Mechanical properties and crack width control of seawater coral sand ECC

WANG Zhenbo^{*1}, HAO Rusheng¹, LI Pengfei¹, HAN Yudong², SUN Peng¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group CO., LTD., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to address the brittleness and durability issues of coral aggregate concrete, seawater coral sand engineered cementitious composites (SCECC) was prepared by using the regional raw materials located in islands and reefs. The effects of different aggregate types, maximum grain size and fineness modulus on the compressive, tensile properties and crack control ability of ECC were experimentally investigated. The results show that with the decrease of the fineness modulus of coral sand, the compressive strength of SCECC first increases and then decreases, which maximizes (63.3 MPa) at SCECC with the maximum grain size of 2.36 mm. Reducing the maximum grain size of coral sand results in improved tensile performance to varying extents. SCECC with a maximum grain size of 0.60 mm exhibits the best tensile properties, and its initial cracking strength, tensile strength and ultimate tensile strain are 2.29 MPa, 4.11 MPa and 5.15%, respectively. Meanwhile, its average crack width approaching strain capacity is controlled at 81 μm . Compared with tap water-quartz sand ECC, SCECC possesses higher compressive strength and more rapid development of early strength (its 7 days compressive strength can arrive at 73%-78% of 28 days compressive strength). The failure modes of aggregate and polyvinyl alcohol (PVA) fiber in these two ECCs are different, resulting in slightly lower tensile strength, elastic modulus and crack control ability at peak strain, but significantly enhanced tensile ductility of SCECC.

Keywords: ECC; coral sand; fineness modulus; maximum grain size; crack width

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-17; 录用日期: 2022-05-26; 网络首发时间: 2022-06-08 07:02:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220607.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51808545); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2022 YQLJ05)

National Natural Science Foundation of China (51808545); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022 YQLJ05)

通信作者: 王振波, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高延性水泥基复合材料 (ECC/SHCC)、海水珊瑚骨料混凝土、混凝土断裂力学

E-mail: wangzb@cumt.edu.cn

引用格式: 王振波, 郝如升, 李鹏飞, 等. 海水珊瑚砂 ECC 的力学性能与裂纹宽度控制[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2261-2272.

WANG Zhenbo, HAO Rusheng, LI Pengfei, et al. Mechanical properties and crack width control of seawater coral sand ECC[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2261-2272(in Chinese).

海水珊瑚骨料混凝土 (Seawater coral aggregate concrete, SCAC) 是由珊瑚礁砂石、海水等海洋地域性原材料制备, 其已在海洋国家的国防和基础设施建设中展现出缩短工期、降低成本的优势^[1-3]。但 SCAC 性脆易裂, 在荷载和环境作用下将不可避免地产生开裂, 张开至毫米级的裂缝成为有害离子的侵蚀通道。严酷的海洋环境甚至会加剧这一进程, 致使 SCAC 在海洋岛礁工程应用中面临巨大挑战。高延性水泥基材料 (ECC) 正是为克服普通混凝土脆性、解决其耐久性问题而发展起来的高性能建筑材料^[4-6], 其在拉伸荷载下具有应变硬化、高延性、裂缝自控等优势, 目前已被研究应用于混凝土路面、桥墩和地下水库等工程领域^[7-9]。

传统 ECC 主要由水泥、粉煤灰、矿渣粉、精细硅砂、淡水和纤维等材料配制组成。其中, 精细硅砂存在研磨和运输价格高、过度开采危害环境等问题, 很大程度上限制了 ECC 的应用潜力。为此, 许多学者因地制宜地开展了地缘性材料 (沙漠砂、海砂等) 代替硅砂制备 ECC 的研究。例如, Huang 等^[10]以海砂制备的 ECC 抗压强度超过 130 MPa、拉伸应变可达 5%; 李祚等^[11]利用沙漠砂制备的 ECC 强度无明显变化, 但延性大幅降低; Sahmaran 等^[12]使用破碎石灰岩砂和砾石砂制备的 ECC 可达到甚至超过硅砂 ECC 的强度与延性。类似地, 如果能够在海洋岛礁建设中使用珊瑚砂代替硅砂、以海水代替淡水制备 ECC 材料, 将有望补齐现有海水珊瑚骨料混凝土的性能短板, 发挥 ECC 高延性、高耐久、抗爆抗冲击的优势, 为构筑高性能化的岛礁工程结构奠定坚实基础。

基于此, 本文将使用海水、珊瑚砂等岛礁地域性原材料制备一种新型的海水珊瑚砂高延性水泥基材料 (SCECC), 试验研究珊瑚砂细度模数和最大粒径对 SCECC 抗压强度、抗拉强度、极限拉应变、裂纹宽度和弹性模量的影响, 寻找适用于 SCECC 的珊瑚砂粒径参数。研究结果可为实现 ECC 的海洋岛礁本地化生产, 提升海工材料力学性能与耐久性建立支撑。

1.2 试件成型与养护

按照表 7 中的配合比制备 ECC, 具体搅拌成

1 试验方案

1.1 原材料

试验原材料包括: 金隅冀东水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 其化学成分见表 1; I 级粉煤灰; 人工模拟海水, 其配比情况列于表 2; 日本 Kuraray 公司生产的聚乙烯醇 (PVA) 纤维, 其性能参数列于表 3; 江苏苏博特新材料公司生产的高效聚羧酸减水剂; 采集于某热带海域岛屿的珊瑚砂, 其化学成分列于表 4, 表观密度为 2 272.3 kg/m³, 24 h 吸水率为 6.5%, 其在实验室过方孔筛后可获得不同的粒径区间, 珊瑚砂的形态形貌如图 1 所示; 石英砂产自秦皇岛石英砂厂, 作为珊瑚砂的对照; 参照 JGJ 52—2006^[13], 测得两种细骨料在不同粒径区间下的压碎值, 具体见表 5; 试验中各组所用 ECC 骨料的级配参数列于表 6。其中, 配比名称以“拌和水和骨料类型-骨料最大粒径-级配编号”的规则进行命名, 如 SC-2.36-1、SC-2.36-2、SC-1.18、SC-0.60、TQ-0.60, SC 表示海水和珊瑚砂 (Seawater and coral sand, SC), TQ 表示淡水和石英砂 (Tap water and quartz sand, TQ)。

表 1 P·O 42.5 水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of P·O 42.5 cement

Component	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O
Mass fraction/wt%	66.54	15.99	4.26	3.83	2.78	1.61	1.46

表 2 人工模拟海水成分

Table 2 Composition of artificial seawater

Component	NaCl	CaCl ₂	MgSO ₄	MgCl ₂
Content/(mol·L ⁻¹)	445.2	17.22	51.68	64.82

表 3 聚乙烯醇 (PVA) 纤维物理和力学性能

Table 3 Physical and mechanical properties of polyvinyl alcohol (PVA) fiber

Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Diameter/mm	Length/mm
1.2	1 620	42.8	0.039	12

表 4 珊瑚砂化学成分

Table 4 Chemical composition of coral sand

Component	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SrO
Mass fraction/wt%	0.46	0.50	2.43	6.06	0.43	0.35	85.25	0.29	2.07	1.91

型过程如下: 先将称量好的骨料投入搅拌机 (JJ-5, 沧州威尔特公司), 然后缓慢加入总用水量 8wt%

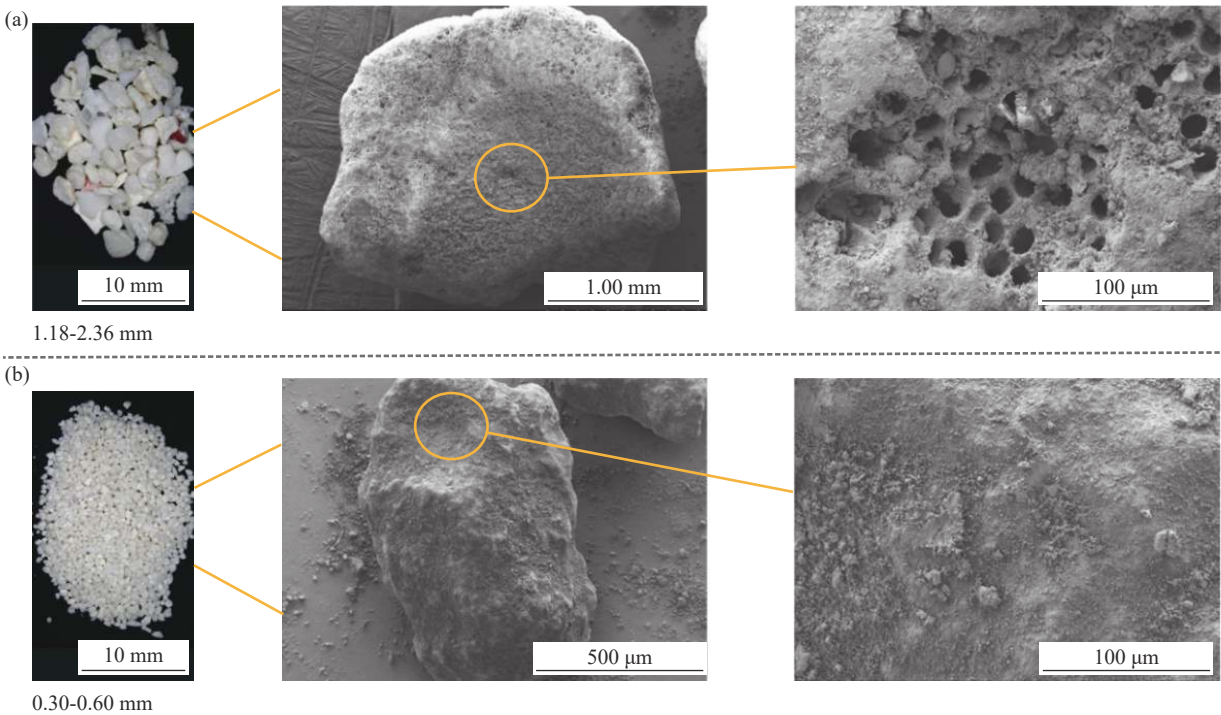


图 1 珊瑚砂的形貌

Fig. 1 Appearances of coral sand

的拌和水，搅拌 1 min 使骨料均匀预湿；加入水泥、粉煤灰继续搅拌 2 min，使胶凝材料与骨料混合均匀；加入剩余拌和水与减水剂，继续搅拌 2 min，获得均匀的浆体；缓慢撒入 PVA 纤维，充分搅拌 2 min 直至纤维分散均匀；将搅拌好的 ECC 浆体浇筑入模，在振捣台上振捣 1 min 后进行抹面，使用保鲜膜覆盖以防止水分散失；在室温下放置 24 h 后拆模，并将试块移入标准养护室(温度为 (20±2)℃，相对湿度 ≥95%)分别养护至 7 天和 28 天。在开展力学性能试验前 6 h，从养护室取出试件并静置晾干。

表 5 两种骨料的压碎指标

Table 5 Crushing index of two aggregates

Aggregate type	Crushing value in different particle size ranges/%		
	1.18-2.36 mm	0.60-1.18 mm	0.30-0.60 mm
Quartz sand	14.0	4.6	3.4
Coral sand	25.5	12.6	3.7

1.3 试验方法

抗压试件为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体，每组 ECC 制备 3 个试块。在微机控制电液伺服试验机 (YAW4306, MTS 公司) 上进行抗压试验，控制加载速率为 0.5 mm/min。单轴拉伸试验在微机控制电子万能试验机 (E45.305, MTS 公司) 上进行，控制加载速率为 0.15 mm/min，拉伸试

件选用狗骨型^[14]，每组制备 3 个试件，在试件两侧分别安装标距为 80 mm 的引伸计，实时测量试件的轴向拉伸应变，加载装置和试件尺寸见图 2。

在力学性能之外，ECC 的开裂形态是衡量其自愈能力和耐久性的关键，如何对 ECC 开裂形态进行表征已成为该材料研制设计的重要内容。目前，ECC 裂纹形态统计方法以应变和裂纹数量估算平均裂纹宽度^[15]、显微镜测量^[16]比较多见，而类似这种局部化的裂纹信息不能代表材料整体的开裂形态。数字图像处理作为一种高效统计裂纹信息的方法^[17]，可以更好地描述 ECC 在应变硬化过程中的裂纹发展规律。本文在该方法的基础上，使用 MATLAB 软件统计 ECC 全截面的裂纹信息，具体步骤描述如下。在单轴拉伸试验过程中拍照记录不同应变下试件表面的裂纹形态，并对图像进行二值化处理。在二值图上建立坐标系，沿拉伸荷载方向为 y 方向，垂直于荷载方向为 x 方向。将 y 方向的每一像素列作为一条参考线，对每条参考线上的裂纹进行标签化(同一连通域的白色像素计为标签相同)。按照从左到右、从上到下的顺序，依次提取每条参考线上的裂纹标签最大值(即裂纹数量)和各标签内包含的像素数量(乘以像素实际大小即为该条裂纹的宽度)。使用下式计算试件表面全部裂纹的平均宽度 W_{mean} ：

表 6 各组高延性水泥基材料 (ECC) 骨料级配参数

Table 6 Aggregate grading parameters of each engineered cementitious composite (ECC) mixtures

Sample	Proportion of aggregates in different particle size ranges/%			Fineness modulus
	1.18-2.36 mm	0.60-1.18 mm	0-0.60 mm	
SC-2.36-1	30	25	45	2.65(Medium sand)
SC-2.36-2	5	15	85	1.55(Extra fine sand)
SC-1.18	0	11	89	1.43(Extra fine sand)
SC-0.60	0	0	100	1.23(Extra fine sand)
TQ-0.60	0	0	100	1.23(Extra fine sand)

Notes: SC-2.36-1 represents first grade of seawater coral sand ECC with the maximum grain size of 2.36 mm; TQ-0.60 represents tap water-quartz sand ECC with the maximum grain size of 0.60 mm.

表 7 ECC 配合比 (质量比)

Table 7 Mix proportions of ECC (Mass ratio)

Sample	Cement	Fly ash	Sand		Water		PVA fiber	Super plasticizer
			Coral sand	Quartz sand	Seawater	Tap water		
SC-2.36-1	1	0.43	0.5	—	0.5	—	0.032	0.00123
SC-2.36-2	1	0.43	0.5	—	0.5	—	0.032	0.00135
SC-1.18	1	0.43	0.5	—	0.5	—	0.032	0.00147
SC-0.60	1	0.43	0.5	—	0.5	—	0.032	0.00172
TQ-0.60	1	0.43	—	0.5	—	0.5	0.032	0.00172

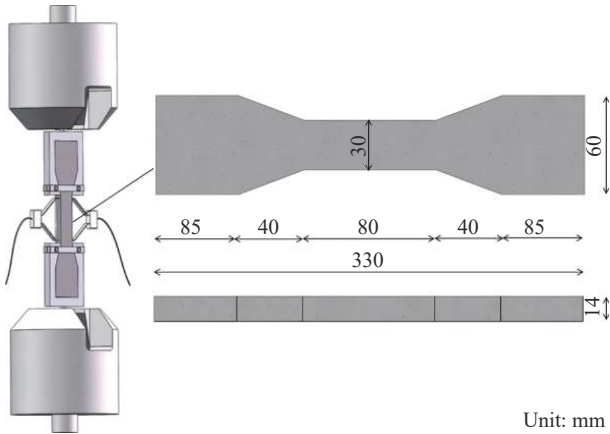


图 2 轴拉装置与试件尺寸

Fig. 2 Setup of uniaxial tension and sample size

$$W_{\text{mean}} = \sum_{x=1}^n \sum_{i=1}^{n_x} e Q_{xi} / \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n n_x \tag{1}$$

其中： n 是沿试件宽度方向的像素个数； n_x 是第 x 条参考线上裂纹的数量； e 为每个像素点代表的实际宽度 (本文为 $15\text{ }\mu\text{m}$)； Q_{xi} 为第 x 条参考线的第 i 条裂纹的像素个数。

场发射扫描电子显微镜 (SEM, SU8020, 日本日立公司) 观测试验的步骤如下：先在拉伸试件的主裂纹断面处取小部分样品，然后使用导电胶固定样品并对其进行真空干燥和喷金处理，最后

观察断面处的纤维形貌。

2 试验结果与分析

2.1 各组 ECC 抗压力学性能

图 3 给出了各组 ECC 的 7 天和 28 天抗压强度的平均值及标准差。珊瑚砂最大粒径为 2.36 mm 时，随着细度模数减小 (SC-2.36-1 的中砂变为 SC-2.36-2 的特细砂)，SCECC 抗压强度显著提高。SC-2.36-2 的 7 天和 28 天抗压强度分别为 45.9 MPa 和 63.3 MPa，相较于 SC-2.36-1 各自提升约 59% 和 72%。当珊瑚砂为特细砂时 (SC-2.36-2、SC-1.18 和 SC-0.60)，随着最大粒径减小，SCECC 抗压强度小幅度降低。其中 SC-0.60 的强度最低，7 天和 28 天抗压强度分别为 41.0 MPa 和 54.1 MPa，比 SC-2.36-2 降低约 11% 和 15%。这是由于 SC-2.36-1 中的粗砂 (考虑到大于 0.60 mm 的珊瑚砂压碎值大、强度低、内部多孔，为便于区分，本文将大于 0.60 mm 的珊瑚砂简称为“粗砂”) 占比达到 55%，粗珊瑚砂强度低、孔隙大，导致较低的抗压强度。反过来，SC-2.36-2 中的粗砂占比仅为 20%，当适量细砂与水泥浆体填充粗砂间的孔隙时，珊瑚砂与水泥石间的机械咬合力增强，珊瑚砂的堆积更加紧密，故 SC-2.36-2 抗压强度相较于 SC-2.36-1 有明显提升。SC-0.60 中没有粗砂，基材内部相对均匀，但骨料的堆积效应减弱，因此其抗压强度

降低。

TQ-0.60 的 7 天和 28 天抗压强度分别为 27.0 MPa 和 47.7 MPa，其 7 天抗压强度为 28 天的 57%，而各组 SCECC 的这一比值介于 73%~78%。这是由于海水中的离子可加快水泥水化速率，如 Cl^- 可促进铝酸钙 (C_3A) 反应，与加入氯盐类早强剂的作用类似^[18]。此外，由于珊瑚砂内部存在大量孔隙，经预湿后吸收了一部分拌和水。在硬化过程中，孔隙中的水逐渐释放出来，营造内养护环境，从而增强珊瑚砂与水泥石的粘结力^[19]。类似的强度发展规律在珊瑚粗骨料混凝土中亦有体现^[20]。

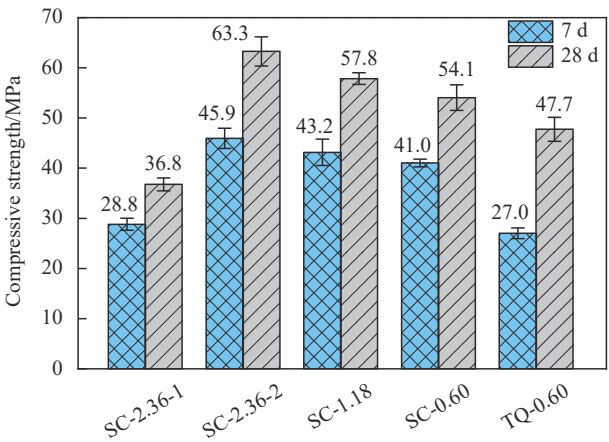


图3 各组 ECC 抗压强度
Fig.3 Compressive strength of ECC specimens

在相同的骨料粒径和级配下，SC-0.60 的 7 天和 28 天抗压强度相较于 TQ-0.60 分别提升了 52% 和 13%。已有研究表明，在无纤维的情况下，相同配比的珊瑚砂砂浆比石英砂砂浆抗压强度低 20% 左右^[21-22]。而掺纤维引入的界面、气孔等内部缺陷通常又会导致 ECC 强度低于基材砂浆^[23-25]。结合本文试验结果与珊瑚砂浆试验结果来看，珊瑚砂 ECC 因掺纤维导致的强度下降幅度小于石英砂 ECC，这说明纤维引入的缺陷会在一定程度上削弱骨料自身强度对 ECC 强度的影响。同时应当注意到，SC-0.60 和 TQ-0.60 的抗压强度均低于含有粗砂的 SC-2.36-2。

2.2 各组 ECC 拉伸力学性能

图 4 展示了各组 ECC 的拉伸应力-应变曲线。可以发现，所有 ECC 均先经历线弹性阶段，在产生第一条裂纹后进入稳态开裂，表现为应变硬化和多点开裂特征。在峰值应力以后，不同配比 ECC 的直拉曲线表现出两种不同的下降趋势：其一，应力在峰值后骤然下降，试件从某一裂纹处

断裂并迅速丧失承载力，受拉本构模型对应双线性本构模型^[26-27]，如图 4(d) 和 4(e)；其二，应力随应变增加缓慢波动下降，试件最终在主裂缝处破坏，此过程仍有局部的应变硬化，应力存在第二波峰，受拉本构模型对应于考虑弱强化阶段的三线本构模型^[28]，如图 4(a)~4(c)。这两种曲线下降趋势可能与纤维的破坏模式有关，将在本文 2.4 节结合纤维破坏状态做进一步分析。

图 5 统计了各组 ECC 的拉伸初裂应力、峰值应力、峰值应变和弹性模量的平均值和标准差。珊瑚砂为中砂 (SC-2.36-1) 时，SCECC 的初裂应力为 1.72 MPa，其他特细砂 SCECC 的初裂应力介于 2.19~2.29 MPa 之间。与抗压强度不同的是，ECC 的拉伸开裂强度主要取决于基材强度。图 6 展示了各组 SCECC 和 TQECC 试件的断面形态。SCECC 断面处不同粒径、不同形状珊瑚砂的表面光滑 (图 6(a)~6(c) 圆圈内)，存在明显的断裂痕迹。这说明，拉伸荷载产生的裂纹贯穿了珊瑚骨料内部，强度较低的珊瑚砂成为 SCECC 的主要缺陷。珊瑚粗砂含量越多，相当于引入基材的缺陷越多，SCECC 的开裂强度越低。而 SC-2.36-1 不仅骨料间孔隙大、整体密实度低，且珊瑚砂在 1.18~2.36 mm 区间 (该区间珊瑚砂压碎值最大) 的含量更是高达 30%。在双重缺陷作用下，SC-2.36-1 的开裂强度远低于其他 SCECC。随珊瑚砂最大粒径降低，其压碎指标减小，即基体整体缺陷减少，SCECC 初裂强度增大，至 SC-0.60 时达到最高 (2.29 MPa)。

峰值应力随骨料粒径与级配的变化规律和初裂应力类似，SC-0.60 最高 (4.11 MPa)，SC-2.36-1 最低 (2.52 MPa)，并且与其他三组 SCECC 差距明显。SC-2.36-2 与 SC-1.18 抗拉强度接近，但前者的峰值应变仅为后者的 68%。SC-0.60 的峰值应变最高，达 5.15%。从图 4(f) 各组 SCECC 的典型拉伸应力-应变对比曲线可以看出，SC-2.36-2、SC-1.18 和 SC-0.60 在达到峰值应力前，应力抖动幅度较接近，但应变硬化的结束点不同，导致它们的峰值应力与极限应变差异较大。在 ECC 初裂后，断裂面间的纤维承担外部荷载，并传递至周围完整基体，随着拉伸应力增大，相对薄弱的截面陆续开裂，产生新的裂纹。而粗砂的存在影响了纤维在基体中分散的均匀程度，降低了纤维的桥接应力^[29-30]，在图 6(a) 和 6(b) 可观察到聚集的纤维 (椭圆内)。因此，在相同的拉伸应力下，含有粗砂的 SCECC 不能引发更多截面开裂，丧失了承受

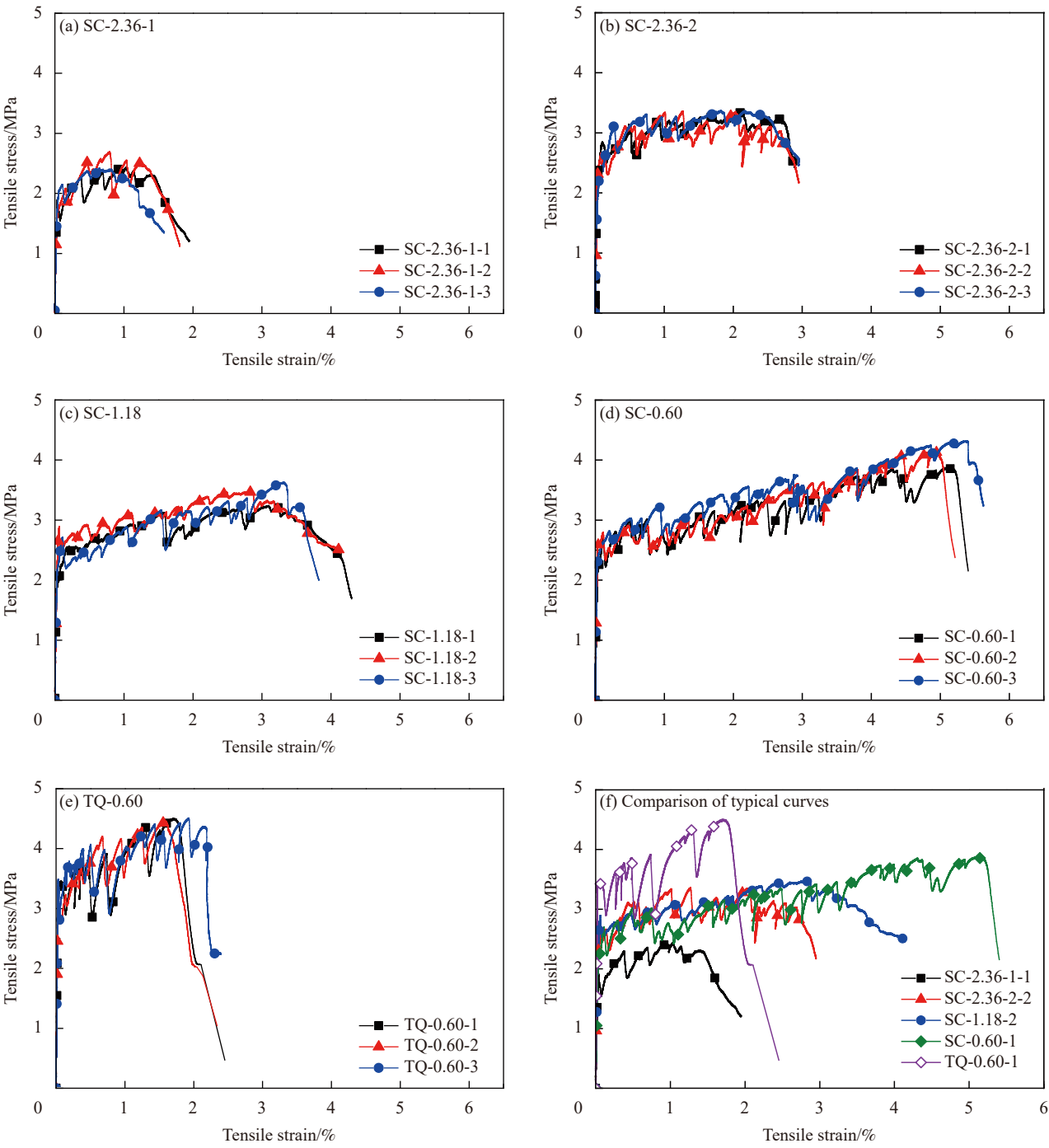


图4 各组 ECC 单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial tensile stress-strain curves of ECC specimens

更大荷载的能力，提前结束应变硬化过程。有研究指出粒径小于 0.90 mm 的骨料不会影响 PVA 纤维在基体中的均匀分布^[31]，由此，当珊瑚砂最大粒径为 0.60 mm 时，可认为不同断面处的纤维分布均匀，可提供有效的桥接应力，在应变硬化过程中不断引发新的开裂，因而其拉伸性能要优于粒径大于 0.60 mm 的 SCECC。

TQ-0.60 的初裂应力、峰值应力和峰值应变分别为 3.25 MPa、4.49 MPa 和 1.74%(分别是 SC-0.60 的 1.4 倍、1.1 倍和 34%)，其中的初裂应力远高于各组 SCECC。SC-0.60 和 TQ-0.60 的峰值应力分别是各自初裂应力的 1.8 倍和 1.4 倍，可以说 SC-0.60 是通过应变硬化弥补了基材抗拉的不足。根据图 6(d)，TQ-0.60 断面处的骨料并不明显，通过

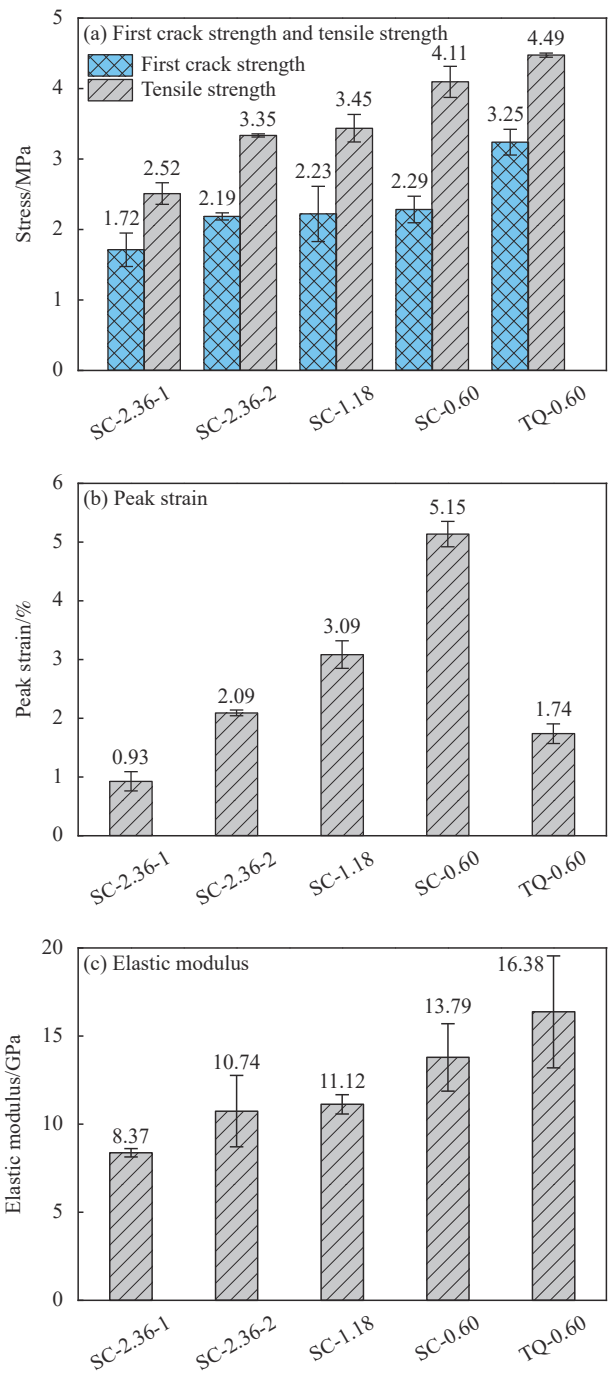


图5 各组 ECC 单轴拉伸性能参数

Fig. 5 Parameters for uniaxial tensile properties of each ECC

电子显微镜放大后，可看到表面粘结有水泥石的石英砂。石英砂的强度和模量相对较高，骨料-水泥石的界面过渡区成为 TQ-0.60 基材中的主要缺陷^[32]。因此，裂纹倾向于绕着骨料发展，使裂纹迂曲度增加、基材断裂韧性增大，这也使随后新的开裂变得更加困难。综上，材料的拉伸破坏机制不同是 SCECC 较 TQECC 具有更高延性和应变

硬化能力的主要原因。

图 5(c) 的弹性模量是以拉伸应力-应变曲线弹性段的斜率确定^[33]。可以看出，随着细度模数减小 SCECC 的弹性模量不同程度地提升，与拉伸初应力变化规律相同，SC-0.60 最大，达 13.79 GPa。这是由于随着粗砂占比减少，珊瑚砂的密实度和 SCECC 的均匀度均有所提升，二者皆有利于弹性模量的提升。而 TQ-0.60 弹性模量为 16.38 GPa，相较于 SC-0.60 提升了 18.8%，这主要归功于石英砂较高的强度和模量。

2.3 各组 ECC 裂纹形态变化

图 7 为各组 ECC 在临近拉伸破坏时的裂纹形态二值图。其中，各组 ECC 图片等宽不等长是由于各自对应的应变值 (以配比编号后的数字表示) 不同；图中方框内的裂纹为最终破坏时的主裂纹。可以看出，对于最大粒径大于 0.60 mm 的 3 组 SCECC，在试件临近破坏时可观察到明显的主裂纹，而最大粒径为 0.60 mm 的 SC-0.60 与 TQ-0.60 主裂纹的张开程度相对较小。按照 1.3 节中介绍的方法，统计得到 ECC 在不同应变下的平均裂纹宽度，并绘制于图 8。随拉伸应变增大，平均裂纹宽度逐渐增大，在接近破坏时的增长趋于平缓。相同应变下，当珊瑚砂最大粒径从 2.36 mm 降至 0.60 mm，SCECC 的平均裂纹宽度显著减小。例如，在 0.5% 应变时，SC-2.36-1 的平均裂纹宽度为 91 μm，这是 SC-0.60 的 1.75 倍。不同 SCECC 在接近破坏时的平均裂纹宽度亦随珊瑚砂的最大粒径减小而降低。特别地，SC-0.60 在 5.0% 应变的平均裂纹宽度仅有 81 μm，甚至低于 SC-2.36-1 在 0.5% 应变时的平均裂纹宽度。TQ-0.60 在 0.5% 应变的平均裂纹宽度低于 SC-0.60，在 1.0% 和 1.5% 时反而又高于 SC-0.60。结合拉伸应力-应变曲线不难发现，TQ-0.60 在前 0.5% 应变内曲线抖动次数多，即产生新裂缝数量多；但应变达到 1.0% 和 1.5% 时，抖动次数明显减小，该阶段应变的增加主要是由于裂纹扩张。反观 SC-0.60，其曲线抖动次数与幅度较均匀，应变由 0.5% 增加至 5.0% 时平均裂纹宽度仅增长约 29 μm。总体而言，在相同应变下 SC-0.60 对裂纹宽度的控制效果优于 TQ-0.60，但在临近峰值应变时 SC-0.60 的裂纹宽度更大。

以上数据说明骨料的种类、级配和粒径都对裂纹宽度产生很大的影响，且裂纹发展规律与轴拉应力-应变曲线的抖动幅度息息相关。

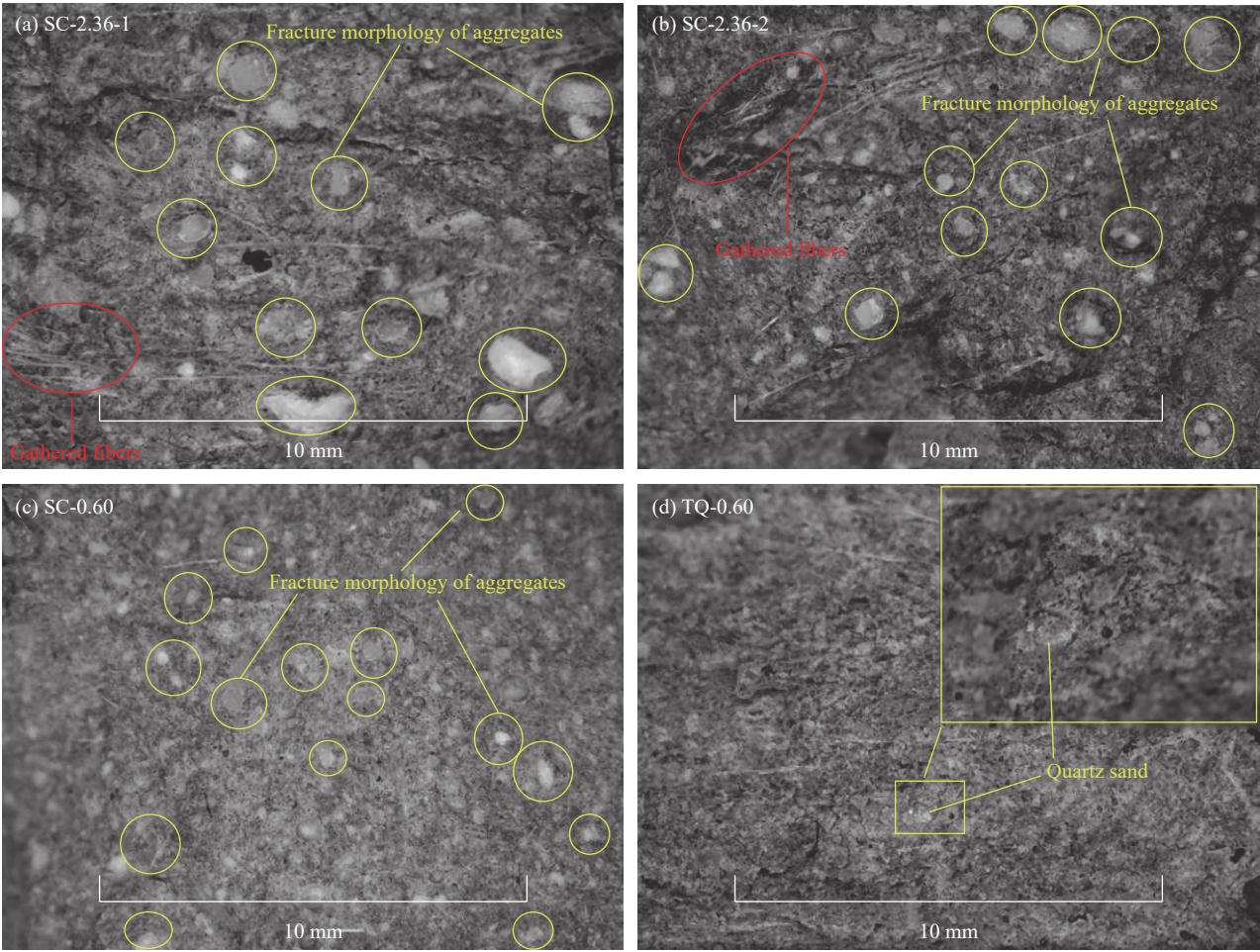


图6 ECC试件断面形态

Fig. 6 Characteristics of crack plane of ECC specimens

值得注意的是，最大粒径为 0.60 mm 的两组 ECC 的裂纹控制能力均优于其他 SCECC，这可以保证其带裂缝工作时具有更好的耐久性。但相比于 SC-0.60，TQ-0.60 具有更高的开裂强度，其在拉伸荷载下引发基材开裂的难度更高，因此裂纹数量更少、多缝开展能力较低。本文使用的石英砂 ECC 配比是经过调整设计、试验试配而成，目的是在保证一定延性的同时获得较高的抗裂强度和裂纹控制能力，这与制作不成功的试件有本质区别。工程实践中，在确保 ECC 延性之外更应追求较高的抗裂强度和裂纹控制能力。TQ-0.60 的极限拉应变为 1.74%，已可满足多数结构构件对材料延性的需求；SC-0.60 的极限拉应变虽可达 5.15%，但其开裂强度远低于 TQ-0.60，这对于具有高抗裂需求的工程应用，尤其是海工结构实际是不利的。因此，未来如何提升 SCECC 的抗裂强度和裂纹控制能力，将是其走向工程结构应用需要解决的问题。

2.4 各组 ECC 中纤维的微观形貌

纤维的脱粘拔出和断裂是 PVA 纤维在 ECC 应硬化过程中的主要失效形式。图 9 得到了各组 ECC 断面处 PVA 纤维的 SEM 图像。可以看出，SC-2.36-1 中的 PVA 纤维表面完整。结合拉伸试验结果，该配比破坏时的强度较低，这可能是由于基材对纤维的锚固不足，导致轴拉曲线在峰值以后缓慢下降，试验现象为主裂纹的持续张开。

由图 9(b) 和图 9(c) 可知，SC-0.60 和 TQ-0.60 断面上 PVA 纤维的状态较复杂，PVA 纤维的失效包含拔出与断裂两种模式。这两个配比的拉伸强度均远高于 SC-2.36-1，轴拉曲线在峰值后快速下降，断面处 PVA 纤维的断裂比例较高，无明显的裂纹扩张阶段。相比于 SC-0.60，TQ-0.60 中的纤维断裂比例更高，纤维表面磨损严重。除 TQ-0.60 拉伸强度较高外，还有可能是由于石英砂的球度和圆度低于珊瑚砂^[34]，更容易刮削纤维，从而加大了基材对纤维的损伤。

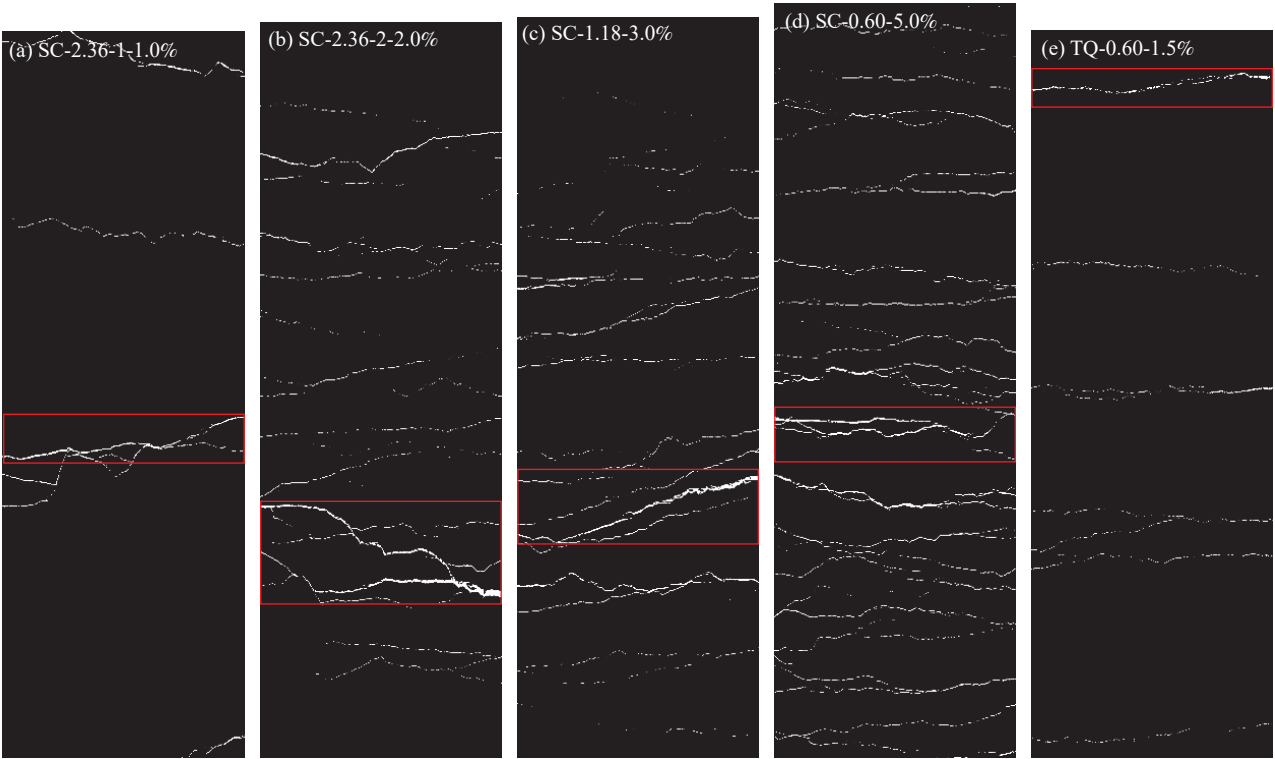


图 7 各组 ECC 裂纹形态图

Fig. 7 Cracking morphologies of each ECC

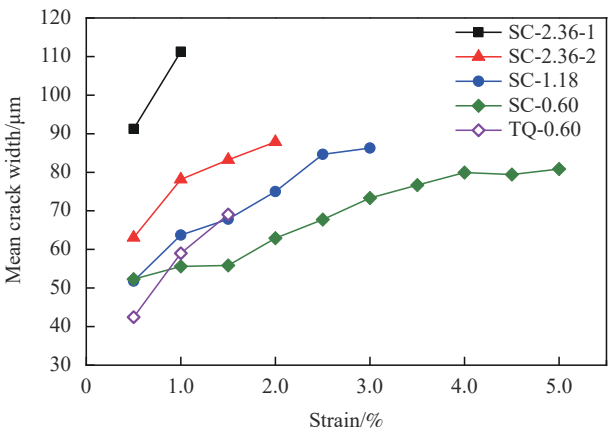


图 8 各组 ECC 不同应变下平均裂纹宽度发展趋势

Fig. 8 Development trend of average crack width at different strains of each ECC

3 结论

(1) 随珊瑚砂细度模数减小，海水珊瑚砂高延性水泥基材料 (Seawater coral sand engineered cementitious composites, SCECC) 的 7 天和 28 天抗压强度先提高后降低。其中，最大粒径 2.36 mm 的特细砂 SCECC 抗压强度最高，7 天和 28 天分别达到 45.9 MPa 和 63.3 MPa。SCECC 强度发展快，其 7 天抗压强度均可达 28 天抗压强度的 73%~78%。

(2) 珊瑚砂为特细砂时，降低最大粒径对 SCECC 初裂强度影响较小，但应变硬化能力显著提升。最大粒径 0.60 mm 的 SCECC 拉伸性能最优，其初裂强度、抗拉强度、极限拉应变和弹性模量分别可达 2.29 MPa、4.11 MPa、5.15% 和 13.79 GPa。同配比情况下，淡水石英砂 ECC 的拉伸强度和弹性模量高于 SCECC，但极限拉应变只有 SCECC 的 34%。

(3) ECC 平均裂纹宽度随拉伸应变逐渐增大，在临近破坏时的增长幅度趋于平缓。应变相同时，随珊瑚砂细度模数减小，SCECC 平均裂纹宽度降低。最大粒径 0.60 mm 的 SCECC 在应变 5.0% 时的平均裂纹宽度仅有 81 μm。在相同应变下，同骨料粒径的 SCECC 裂纹控制能力优于石英砂 ECC，但 SCECC 在峰值应变附近的裂纹宽度大于石英砂 ECC。

(4) 不同种类骨料在基材中的破坏机制不同，SCECC 中裂纹贯穿骨料，而淡水石英砂 ECC 的破坏沿骨料表面展开。主断面处聚乙烯醇 (PVA) 纤维的失效模式与抗拉强度及轴拉曲线的下降趋势相关：抗拉强度低、轴拉曲线下降缓慢时，PVA 纤维以脱粘拔出为主；而抗拉强度高、轴拉曲线急剧下降时，PVA 纤维的断裂比例较高。

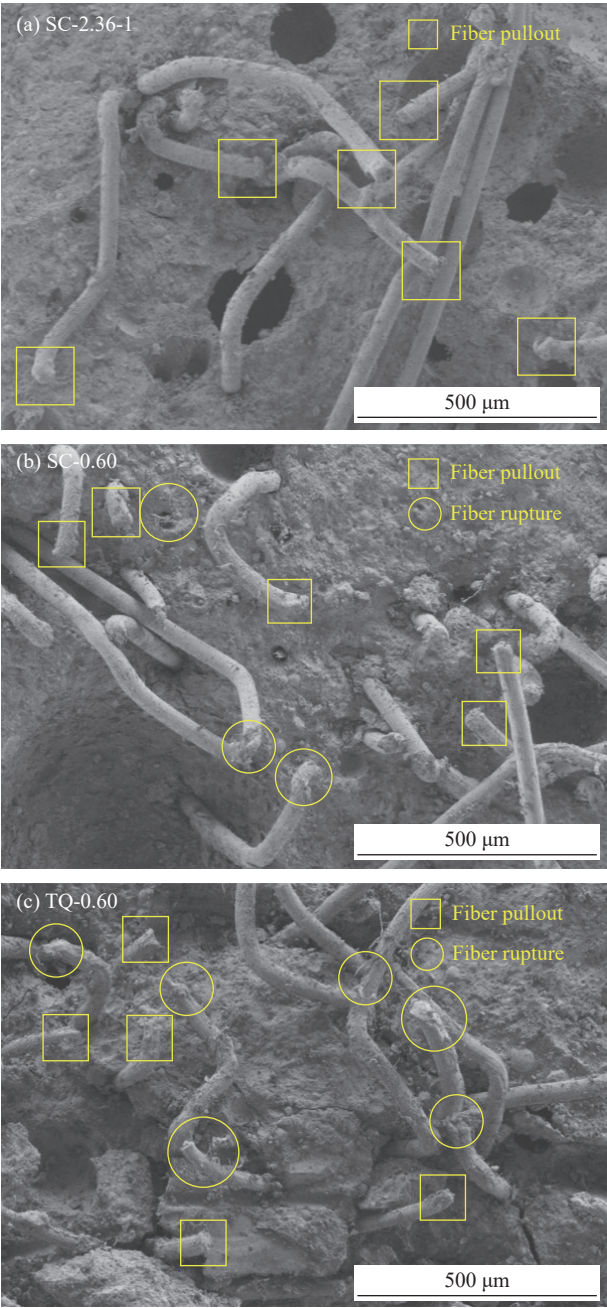


图9 各组 ECC 断面处 PVA 纤维的 SEM 图像

Fig. 9 SEM images of PVA fiber at crack planes of each ECC

参考文献:

[1] WANG A G, LYU B C, ZHANG Z H, et al. The development of coral concretes and their upgrading technologies: A critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 1004-1019.

[2] 马林建, 罗棕木, 段力群, 等. 全珊瑚混凝土的脆性评价[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 281-288.

MA Linjian, LUO Zongmu, DUAN Liqun, et al. Brittleness evaluation of coral concrete[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(2): 281-288(in Chinese).

[3] 李小伟, 曹旗. FRP配筋海水珊瑚骨料混凝土材料及构件力学性能研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(3): 926-941.

LI Xiaowei, CAO Qi. Research progress on mechanical properties of FRP reinforced seawater coral aggregate concrete materials and structural components[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(3): 926-941(in Chinese).

[4] ZHANG J, GONG C X, GUO Z L, et al. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(4): 303-312.

[5] 高世壮, 薛善彬, 张鹏, 等. 高温作用对应硬化水泥基复合材料吸水性能及微结构演化特征的影响[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(10): 4778-4787.

GAO Shizhuang, XUE Shanbin, ZHANG Peng, et al. Effect of high temperature environment on water absorption and microstructure evolution of strain hardening cementitious composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(10): 4778-4787(in Chinese).

[6] 蒋永祥, 王跃, 马耀举, 等. 受蚀高韧性水泥基材料轴压损伤的超声表征[J]. *水利水电技术*, 2022, 53(12): 134-140.

JIANG Yongxiang, WANG Yue, MA Yaoju, et al. Ultrasonic characterization of the compression damage in eroded high toughness cementitious composites[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(12): 134-140(in Chinese).

[7] 张君, 陈切顺, 王振波, 等. 无切缝水泥混凝土路面设计与建造[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(3): 68-73.

ZHANG Jun, CHEN Qieshun, WANG Zhenbo, et al. Design and construction of jointless concrete pavement[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(3): 68-73(in Chinese).

[8] 贾毅, 赵人达, 廖平, 等. PP-ECC用于墩底塑性铰区域的抗震性能试验[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(7): 100-110.

JIA Yi, ZHAO Renda, LIAO Ping, et al. Experimental investigation on seismic behavior of bridge piers with polypropylene-engineered cementitious composite in plastic hinge regions[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(7): 100-110(in Chinese).

[9] WANG Z B, SUN P, ZUO J P, et al. Long-term properties and microstructure change of engineered cementitious composites subjected to high sulfate coal mine water in drying-wetting cycles[J]. *Materials & Design*, 2021, 203: 109610.

[10] HUANG B T, YU J, WU J Q, et al. Seawater sea-sand engineered cementitious composites (SS-ECC) or marine and coastal applications[J]. *Composites Communications*, 2020, 20: 100353.

- [11] 李祚,姚淇耀,朱圣焱,等. 乌兰布和沙漠砂制备高延性水泥基复合材料的力学性能[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1103-1115.
- LI Zuo, YAO Qiyao, ZHU Shengyan, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites prepared with sand in Ulanbuh desert[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1103-1115(in Chinese).
- [12] SAHMARAN M, LACHEMI M, HOSSAIN K M A, et al. Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. ACI Materials Journal, 2009, 106(3): 308-316.
- [13] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- China Academy of Building Science. Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52—2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press(in Chinese).
- [14] ROKUGO K, KANDA T, YOKOTA H, et al. Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan[J]. Materials and Structures, 2009, 42(9): 1197-1208.
- [15] 王振波, 张君, 王庆. 混杂纤维增强延性水泥基复合材料力学性能与裂宽控制[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 216-221.
- WANG Zhenbo, ZHANG Jun, WANG Qing. Mechanical behavior and crack width control of hybrid fiber reinforced ductile cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 216-221(in Chinese).
- [16] LIU H Z, ZHANG Q, GU C S, et al. Influence of microcracking on the permeability of engineered cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72: 104-113.
- [17] LU C, YU J, LEUNG C K Y. An improved image processing method for assessing multiple cracking development in strain hardening cementitious composites (SHCC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 74: 191-200.
- [18] 韩宇栋, 丁小平, 郝挺宇, 等. 海水珊瑚骨料混凝土耐久性研究现状[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 186-192, 120.
- HAN Yudong, DING Xiaoping, HAO Tingyu, et al. Current status of research on durability of seawater-coral aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2021, 51(2): 186-192, 120(in Chinese).
- [19] LYV B C, WANG A G, ZHANG Z H, et al. Coral aggregate concrete: Numerical description of physical, chemical and morphological properties of coral aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 100: 25-34.
- [20] 王振波, 刘伟康, 韩宇栋, 等. 实现高强度海水珊瑚骨料混凝土的配合比设计[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 181-185.
- WANG Zhenbo, LIU Weikang, HAN Yudong, et al. Mix proportion design of high-strength seawater coral aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2021, 51(6): 181-185(in Chinese).
- [21] 秦修云, 赵军, 刘茂军. 水泥珊瑚砂砂浆的抗压强度与微观结构[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 239-244.
- QIN Xiuyun, ZHAO Jun, LIU Maojun. Compressive strength and microstructure of coral sand cement mortar[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 239-244(in Chinese).
- [22] 梅军帅, 吴静, 王罗新, 等. 珊瑚砂浆的力学性能与微观结构特征[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 263-270.
- MEI Junshuai, WU Jing, WANG Luoxin, et al. Mechanical properties and microstructure characteristics of coral sand mortar[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 263-270(in Chinese).
- [23] CAI X R, XU S L. Uniaxial compressive properties of ultra high toughness cementitious composite[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2011, 26(4): 762-769.
- [24] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(1): 04014111.
- [25] 王振波, 左建平, 张君, 等. 混杂纤维延性水泥基材料单轴受压力学特性[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 639-644.
- WANG Zhenbo, ZUO Jianping, ZHANG Jun, et al. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced engineered cementitious composites under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 639-644(in Chinese).
- [26] KANDA T, LIN Z, LI V C. Tensile stress-strain modeling of pseudostrain hardening cementitious composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 147-156.
- [27] 张聪, 夏超凡, 袁振, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的拉伸本构关系[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1754-1762.
- ZHANG Cong, XIA Chaofan, YUAN Zhen, et al. Tension constitutive relationship of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1754-1762(in Chinese).
- [28] 姚淇耀, 陆宸宇, 罗月静, 等. PE/PVA纤维海砂ECC的拉伸性能与本构模型[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(9): 976-983.
- YAO Qiyao, LU Chenyu, LUO Yuejing, et al. Tensile properties and constitutive model of PE/PVA fiber sea sand ECC[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(9): 976-983(in Chinese).
- [29] LI M, LI V C. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites[J]. Materials

and Structures, 2013, 46(3): 405-420.

[30] 李祚, 潘丁菊, 罗月静, 等. 骨料粒径对纤维增强水泥基复合材料性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(2): 318-327.

LI Zuo, PAN Dingju, LUO Yuejing, et al. Effect of aggregate particle size on the mechanical properties of engineered cementitious composite[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(2): 318-327(in Chinese).

[31] PAUL S C, VAN ZIJL G P A G. Mechanically induced crack-ing behaviour in fine and coarse sand strain hardening ce-ment based composites (SHCC) at different load levels[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2013, 11(11): 301-311.

[32] LI Y B, LI J X, YANG E H, et al. Investigation of matrix crack-ing properties of engineered cementitious composites (ECCs) incorporating river sands[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123: 104204.

[33] 王振波. 聚乙烯醇-钢纤维混杂增强水泥基复合材料力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

WANG Zhenbo. Studies on mechanical performance of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber reinforced cementsitious composites[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016(in Chinese).

[34] ZHANG X Y, ZUO J P, WANG Z B, et al. The evolution of the microstructure and mechanical properties of coral aggre-gate mortar under uniaxial compression using ultrasonic analysis[J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 12400.