

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.002

# 碳酸钙晶须对聚乙烯纤维增强水泥基复合材料 基本力学性能的影响

张建成<sup>1,2</sup>, 蒋学国<sup>3</sup>, 贾子康<sup>3</sup>, 赵吴锦<sup>3</sup>, 杨宝<sup>4</sup>

(1. 江苏科技大学(张家港)船舶与建筑工程学院, 江苏 张家港 215600;

2. 江苏科技大学(张家港)产业技术研究院, 江苏 张家港 215600;

3. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100;

4. 江苏科技大学苏州理工学院 船舶与建筑工程学院, 江苏 张家港 215600)

**摘要:** 聚乙烯纤维增强水泥基复合材料(PE-ECC)是一种具有高强度、高延性的建筑材料,主要应用于建筑和桥梁的加固,但较为昂贵的制造成本一直以来都是限制其进一步发展的主要原因,纤维混杂化是解决这一问题的有效途径。试验分别利用0、0.5%、1%和2%体积掺量的碳酸钙晶须(CW)替代部分的PE纤维,设计4组聚乙烯纤维-碳酸钙晶须增强水泥基复合材料(PE/CW-ECC)试件和1组普通混凝土试件,分别对其拉伸性能和压缩性能展开试验,并利用电镜扫描仪观察试件断口的微观结构。结果表明:对于压缩试验,加入适量的碳酸钙晶须可以提高PE/CW-ECC试件的抗压强度和压缩韧性;对于拉伸试验,加入碳酸钙晶须除了增强PE/CW-ECC试件的拉伸强度之外,还提高了初裂强度以及拉伸韧性,并表现出良好的应变硬化特性。在电镜扫描仪下观察试件断口发现,碳酸钙晶须通过晶须桥联、裂纹偏转等微观机制改善基体结构。

**关键词:** 聚乙烯纤维;水泥基复合材料;碳酸钙晶须;力学性能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0008-09

## Effects of Calcium Carbonate Whisker on Mechanical Properties of Polyethylene Fiber Reinforced Cement-based Composite

ZHANG Jiancheng<sup>1,2</sup>, JIANG Xueguo<sup>3</sup>, JIA Zikang<sup>3</sup>, ZHAO Wujin<sup>3</sup>, YANG Bao<sup>4</sup>

(1. School of Naval Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,

Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China; 2. Industrial Technology Research Institute of Zhangjiagang,

Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215600, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China;

4. Suzhou Institute of Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China)

**Abstract:** Polyethylene fiber reinforced cement-based composite material (PE-ECC) is a building material with high strength and high ductility, mainly used for the reinforcement of buildings and bridges. But the more expensive manufacturing cost has been the main reason limiting its further development. Fiber hybrid is an effective way to solve this problem. In this experiment, 0, 0.5%, 1% and 2% calcium carbonate whiskers (CW) were used to replace part of PE fiber. Four groups of PE/CW-ECC specimens and one group of ordinary concrete specimens were designed, and their tensile properties and compressive properties were tested respectively. Finally, the microstructure of the fracture was observed by a bench electron microscope scanner. The results show that when adding 1% volume fraction of calci-

收稿日期: 2025-07-21

修稿日期: 2025-08-27

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2019M661710); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20211101); 苏州市社会发展科技创新项目(SS202126); 张家港市产学研预研资金项目(ZKHBZ2309)

作者简介: 张建成(1984—), 男, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要从事高性能纤维增强水泥基复合材料、组合结构抗震的研究工作。

E-mail: zjc5108@just.edu.cn

um carbonate whiskers, the compressive and tensile properties of the PE/CW-ECC specimens both reached their best performance. Compared to specimens with only PE fibers, the compressive strength and tensile strength increased, respectively; the compressive toughness and tensile toughness also improved, respectively, and exhibited good strain hardening characteristics. It was found that calcium carbonate whisker improved the matrix structure through the microscopic mechanism such as whisker bridging and crack deflection.

**Keywords: polyethylene fiber; cement-based composite material; calcium carbonate whisker; mechanical properties**

普通混凝土拥有卓越的抗压性能,但其高脆性、低抗拉强度以及低韧性一直是一大弊病,为解决这一问题,相关学者进行了大量试验研究并研制出一种新型纤维增强水泥基复合材料(Fiber Reinforced Cement-based Composite, FRCC)<sup>[1-4]</sup>,通过与普通混凝土的对比分析发现,该种新型材料抗拉强度范围为3.0 MPa~8.0 MPa,极限拉伸应变稳定在2%~8%,是普通混凝土的200倍以上。并且,该材料还呈现出典型的应变硬化及多缝开裂的特性,是较为理想的延性材料。研究还发现与掺入某种单一的纤维相比,多种纤维的混合掺入更能够实现混凝土材料在抗压性能<sup>[5-7]</sup>、抗拉性能<sup>[8-11]</sup>、抗弯性能<sup>[12-14]</sup>等多方面的提高。但传统的水泥基复合材料所使用的PVA纤维、钢纤维等成本较高,极大地制约了其在实际工程中的应用。因此,利用新型纤维填充材料代替传统纤维,实现水泥基材料的纤维混杂化也是目前非常值得探索的研究方向。

碳酸钙晶须(CW)作为一种微米级的纤维填充材料,其生产工艺简单、成本低廉,且自身拥有高模量和高强度,在纤维增强水泥基复合材料领域中是用来替代部分传统纤维,实现纤维混杂化的理想材料。Zhang等<sup>[15]</sup>研究表明,加入碳酸钙晶须的聚乙烯纤维增强水泥基复合材料(PE-ECC)的力学性能有明显提高,这得益于碳酸钙能够与基体材料紧密结合,并对基体缺陷具有填充作用,对微观裂缝具有桥接和偏转作用。Ma等<sup>[16]</sup>研究发现碳酸钙晶须能够显著增强纤维/基体界面的摩擦结合强度,进而提高材料的应变硬化行为。Xie等<sup>[17]</sup>研制出一种碳酸钙晶须改性钢-PVA杂化纤维增强水泥基复合材料(CW-SPFRCC),研究发现,由于在微观尺度上的抗裂性和填充效果,碳酸钙晶须的加入可以有效改善SPFRCC的弯曲和压缩性能。微观结构分析表明,碳酸钙晶须通过晶须拔出、滑移、断裂实现对SPFRCC的性能的改善。Peng等<sup>[18]</sup>通过水泥砂浆碳化自愈反应发现,碳酸钙晶须可提高水泥浆裂缝的自愈性能。在水化和碳化的作用下,碳酸钙晶须与

环境中的二氧化碳、水、氢氧化钙发生反应,生成的产物填充了裂缝和孔隙,从而加速了水泥浆裂缝的自修复过程。

目前,虽然碳酸钙晶须已在多个领域得到应用,如陶瓷材料、高分子材料以及金属基复合材料的增强,但PE-ECC在引入碳酸钙晶须相关的研究内容较少,而且在工程上大多是用到钢纤维、玄武岩纤维、PVA纤维等混杂纤维制成的水泥基复合材料,鲜有PE/CW-ECC材料的应用。因此,本文利用碳酸钙晶须替代部分传统PE纤维,并根据以往研究成果,控制纤维总体积掺量在2%<sup>[19]</sup>左右,设计出聚乙烯纤维-碳酸钙晶须增强水泥基复合材料(PE/CW-ECC)。开展PE/CW-ECC试件的拉伸与压缩性能试验,并通过观察微观结构,分析晶须对PE/CW-ECC基体微观层面的改善,为聚乙烯纤维-碳酸钙晶须增强水泥基复合材料的应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原材料

本试验采用海螺牌P. II 52.5R水泥(安徽海螺水泥股份有限公司)、I级粉煤灰(河南恒源新材料有限公司)、S95矿粉和硅灰作为胶凝材料,细骨料采用河沙,粒径在0.1 mm~0.6 mm,平均粒径为0.35 mm。采用聚羧酸高性能减水剂(减水率27%)调节水泥浆体的工作性能。增稠剂选用羟丙基甲基纤维素,用量控制在胶凝材料质量的0.04%左右,用于打散纤维,提高纤维的分散性。一般来说,利用胶凝材料总量的10%~15%的粉煤灰取代水泥用量,可改善浆体工作性,且后期水化能提升韧性与耐久性,用量过多会降低早期强度<sup>[20]</sup>。硅灰可提高ECC的抗拉强度和抗压强度,改善基体的致密性,用量控制在胶凝材料总量的8%~20%,掺量过多则会严重影响浆体的流动性,干燥收缩增大,一般搭配高效减水剂使用。矿粉可以增强抗硫酸盐侵蚀性和后期强度,但其缓凝作用会对ECC早期强度有一定影响,用量控制在15%~20%。同时,要兼顾

ECC 的流动性和强度,研究表明,水胶比过低 ( $<0.20$ ) 会导致流动性极差、纤维团聚;过高 ( $>0.35$ ) 会导致基体孔隙率增大、强度与耐久性显著下降,且易出现泌水。砂胶比过高 ( $>0.4$ ) 会降低流动性、增加基体脆性;过低 ( $<0.2$ ) 则会导致收缩增大、成本上升。此外,对于纤维的用量有研究表明,纤维用量应为胶凝材料体积的  $1\% \sim 2\%$ , 掺量过低无法实现应变硬化,过高容易导致浆体流动性下

降、纤维结团现象。综合以上因素,本文 ECC 采用固定配合比为水泥:粉煤灰:硅灰:矿粉:细砂:水 =  $1.00:0.25:0.27:0.33:0.80:0.40$ , PE 纤维用量分为两组,一组是不加入任何纤维,另外一组为固定含量  $1.5\%$ , 同时以  $\text{CaCO}_3$  晶须用量为试验变量(含量  $0 \sim 2\%$ ), 研究不同含量的  $\text{CaCO}_3$  晶须对 ECC 力学性能的影响并开展试验。具体配比如表 1 所示。

表 1 试验各材料配比

组别	水胶比	水泥	粉煤灰	硅灰	矿粉	细砂	水	减水剂/%	PE 纤维/%	$\text{CaCO}_3$ 晶须/%	增稠剂/%
PE0CW0	0.22	1	0.25	0.27	0.33	0.8	0.40	1.5	0.0	0.0	0.00
PE1.5CW0	0.22	1	0.25	0.27	0.33	0.8	0.40	1.5	1.5	0.0	0.04
PE1.5CW0.5	0.22	1	0.25	0.27	0.33	0.8	0.40	1.5	1.5	0.5	0.04
PE1.5CW1	0.22	1	0.25	0.27	0.33	0.8	0.40	1.5	1.5	1.0	0.04
PE1.5CW2	0.22	1	0.25	0.27	0.33	0.8	0.40	1.5	1.5	2.0	0.04

注:PE0CW0 表示 PE 纤维掺量为 0, CW 掺量为 0; PE1.5CW0 表示 PE 纤维掺量为  $1.5\%$  (体积分数), CW 掺量为 0; PE1.5CW0.5 表示 PE 纤维掺量为  $1.5\%$  (体积分数), CW 掺量为  $0.5\%$  (体积分数)。

## 1.2 纤维与碳酸钙晶须

试验采用的纤维为超高分子量聚乙烯短纤维和重质碳酸钙晶须,纤维及晶须的基本参数见表 2。

表 2 纤维和晶须物理参数

纤维种类	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	长度 $/mm$	粒径 $/\mu m$	长径 比	抗拉强 度/GPa	弹性模 量/GPa
PE 纤维	$0.96 \sim 0.97$	12	24	500	$2.6 \sim 2.8$	$100 \sim 120$
$\text{CaCO}_3$ 晶须	$2.5 \sim 2.7$	0.02	$0.5 \sim 1$	$25 \sim 40$	$3 \sim 6$	$410 \sim 700$

## 1.3 试件制备

单轴拉伸试验选用“哑铃”型试件,每组 6 个试件,具体尺寸如图 1 所示。单轴压缩试验每组 6 个立方体试件,试件尺寸为  $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 。

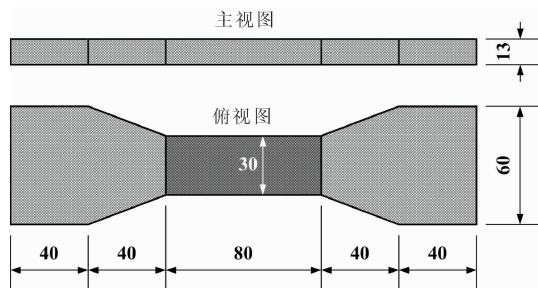


图 1 “哑铃”型试件尺寸

PE-CW-ECC 具体制备步骤如下:

(1) 首先称取既定质量的干混料,包括水泥、粉煤灰、硅灰、矿粉、砂子以及碳酸钙晶须和增稠剂(加入增稠剂是为了增强浆体的黏度,在搅拌过程

中,浆体有更高的剪切力以打散纤维,保证纤维的均匀分散),之后将干混料全部倒入水泥砂浆搅拌机,低速干拌  $2 \sim 3 \text{ min}$ 。

(2) 在干混料充分拌匀后加入水、减水剂和消泡剂等材料,先低速搅拌  $2 \text{ min}$ ,再高速搅拌  $3 \sim 4 \text{ min}$ 。

(3) 观察水泥砂浆实时状态,待浆体充分拌匀且具备良好流动性后,沿搅拌锅内壁分批加入 PE 纤维,不允许将纤维一次性倒入,容易造成结团现象,持续高速搅拌  $6 \sim 8 \text{ min}$ ,确保纤维被打散,均匀分布在水泥砂浆基体中。

(4) 为保证脱模顺利,模具内侧需薄刷一层脱模油。为使试件更加密实,表面孔洞较少,浆体需分批多层浇入试模,每浇一层,都用抹刀在试模四周来回插倒。否则,脱模后试块表面会有较多孔洞。

(5) 由于加入纤维后的浆体流动性较差,且粘性较大,故试块顶部很难平整,需要将抹刀蘸取少量水再抹平。抹平之后将模具放置振动台振动  $20 \text{ s}$ 。

(6) 将装好试块的模具四周贴上保鲜膜,随后在试块规定放置区静置  $48 \text{ h}$ ,等待试块完全硬化。脱模时,不可暴力脱模,否则容易损伤试块,需用气枪朝模具底部充气把试块挤出,保证试块的完整性,最后将所有脱模试块放入标准养护室养护  $28 \text{ d}$ 。

## 1.4 试验方法

依据《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》(JC/T 2461—2018)标准,试件的拉伸与压缩性能测试分别采用不同设备及参数进行,具

体如下:

### (1) 拉伸性能测试

测试设备选用美特斯工业系统有限公司生产的MTS 万能材料试验机,加载模式设为位移控制,加载速率设定为 0.5 mm/min。试件拉伸变形通过LVDT 位移计采集数据,该位移计的测试标距为 80 mm。

### (2) 压缩性能测试

测试设备采用中机思美迪科技有限公司的DF71CTM 电液伺服压力试验机,加载模式为力控制,加载速率控制在 2 500~3 000 N/s。试件压缩过程中的荷载与变形数据,分别通过荷载传感器和位移计进行同步采集。

## 2 结果与分析

### 2.1 破坏形态分析

图 2 展示了拉伸试件的裂缝与破坏形态。从图 2 拉伸试件破坏后的裂缝分布可以发现,普通混凝土试件表面几乎没有裂缝,破坏时没有明显征兆,呈现出典型的脆性破坏特征;单掺 1.5% 体积掺量的 PE 纤维后,试件表面分布着较多的细小裂缝,且试件保持着较为完好的状态,透过裂缝可以观察到,试件内部 PE 纤维处于伸长状态,且未曾断裂,说明纤维与基体之间粘结良好,纤维的拉拔吸收了外界部分能量,表现出明显的应变硬化特征;而掺入碳酸钙晶须的几组试件,可以发现试件表面仍布满了裂纹,且裂纹更细,更多,裂纹间距相对上组也更小,拉伸性能有了进一步提升。图 3 为各立方体试件的抗压破坏形态,由图 3 可见,不加任何纤维

的混凝土试块破坏后,呈块状脱落,无明显裂缝,表现出脆性破坏特征;而加入 PE 纤维和碳酸钙晶须的试块破坏后仍保持较为完整的形态,试块表面布满裂缝,表现出良好的延性破坏特征。

### 2.2 抗拉性能

图 4 展示了拉伸试件的应力-应变关系,试件拉伸力学性能的参数如表 3 所示,其中,拉伸韧性为峰值拉伸应力下,应力-应变曲线下覆盖的面积。由图 4、表 3 可知,不掺任何纤维的抗拉试件的抗拉强度达到 3.56 MPa,拉伸应变却只有 0.015%,且拉伸韧性很低。曲线没有波动段,达到峰值时,呈现尖锐峰,属于典型的脆性破坏曲线,反映出试件的高脆性和较差的能量吸收能力;而 PE1.5CW0 试件的抗拉强度达到了 5.91 MPa,相较上组提升了 66%。平均峰值应变 2.42%,是普通混凝土的 161 倍,且拉伸曲线有很长的波动段,表现明显的应变硬化行为,同时平均拉伸韧性达到了  $11.28 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^3$ ,说明试件具备良好的能量吸收能力,以上参数共同表明该批试件已拥有卓越的力学性能。加入 0.5% 和 1% 体积掺量的碳酸钙晶须后,PE1.5CW0.5 与 PE1.5CW1 试件的平均初裂应力较 PE1.5CW0 分别提升了 4.6% 和 9.9%,峰值应力分别达到了 6.48 MPa 和 7.20 MPa,分别提高了 9.6% 和 21.8%;峰值应变分别达到了 2.92% 和 3.08%,分别提高了 20.6% 和 27.3%;拉伸韧性也分别提高了 27.0% 和 29.3%。以上分析可知,单掺 1.5% 体积的 PE 纤维试件相比普通混凝土,拉伸性能有巨大提升。复掺 1.5% PE 纤维和适量  $\text{CaCO}_3$  晶须,试件拉伸性能又有进一步提升。主要因为碳酸钙晶须自身微米级尺

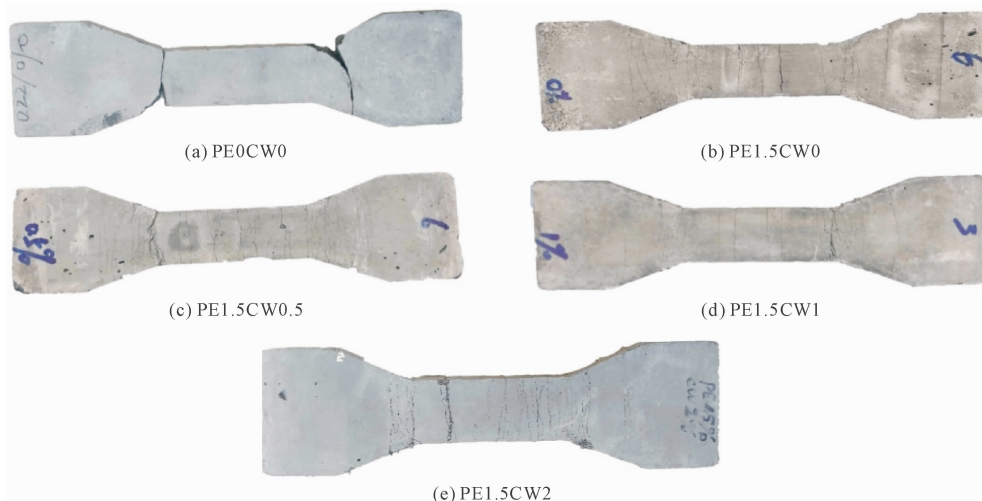


图 2 各试件的拉伸破坏形态

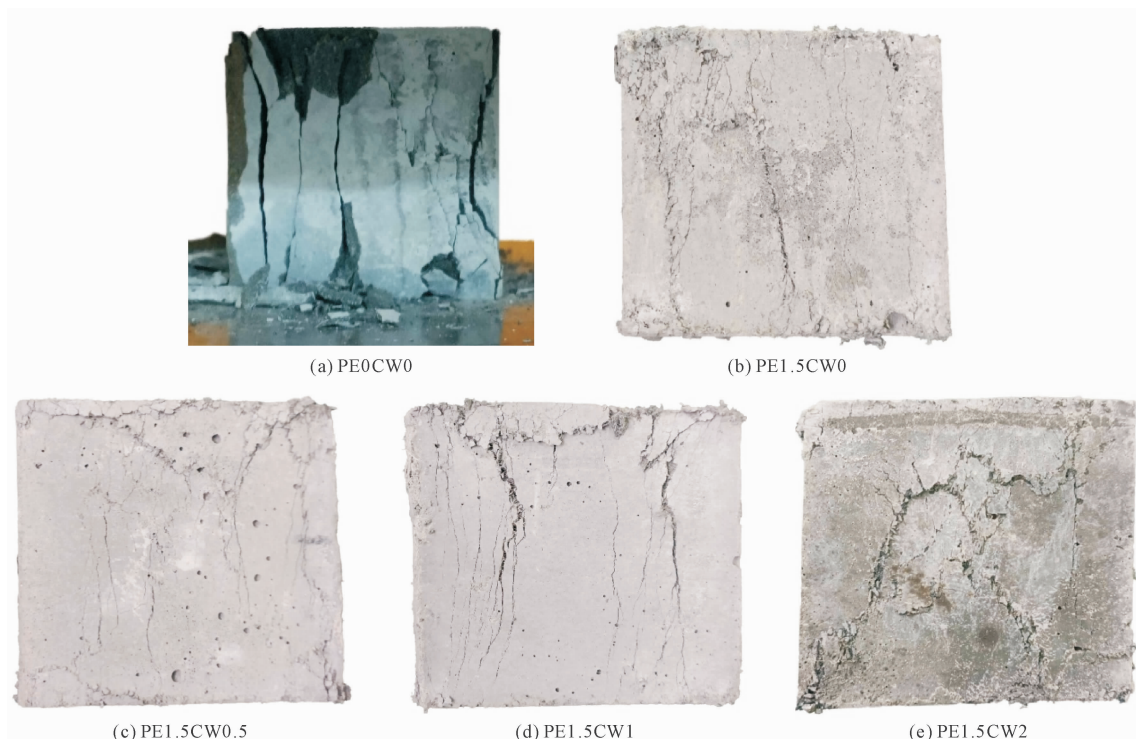


图 3 各立方体试件的压缩破坏形态

寸,在微观上可以桥接微裂纹,限制微裂纹发展,从而延缓微裂纹发展成宏观裂缝。此外,碳酸钙晶须对微裂纹有偏转作用,这可以有效地使微裂纹向多裂纹源方向发展,宏观上表现出多缝开裂特征。而掺入 2% 的  $\text{CaCO}_3$  晶须的试件峰值应力、应变以及拉伸韧性相较于 1%  $\text{CaCO}_3$  晶须掺量的试件均有所降低,这是由于过多的碳酸钙晶须会导致水泥基体的流动性变差,不利于纤维的分散,容易发生团聚现象,且掺量越高,团聚现象越严重,在基体中的分散程度就越低,从而导致纤维与基体间的有害界面增加,力学性能下降。

表 3 拉伸试件力学性能特征参数

组别	初裂应力 /MPa	初裂应变 /%	峰值拉伸应力 /MPa	峰值拉伸应变 /%	拉伸韧性 /( $\text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm}^{-3}$ )
PEOCW0	3.56	0.015	3.56	0.015	0.026
PE1.5CW0	2.83	0.032	5.91	2.420	11.280
PE1.5CW0.5	2.96	0.105	6.48	2.920	14.330
PE1.5CW1	3.11	0.095	7.20	3.080	14.58
PE1.5CW2	2.34	0.061	5.53	2.940	12.140

### 2.3 抗压性能

图 5 展示了压缩试件的应力-应变关系,试件压缩力学性能的参数如表 4 所示,其中,压缩韧性采用峰值应变下,应力-应变曲线下覆盖的面积。由

图 5 可知,各组压缩曲线在接近峰值前都表现出较为明显的延性特征,不会出现如普通混凝土中的尖锐峰,过了峰值点后,曲线也是缓慢下降,并没有出现陡然下降的现象。

表 4 压缩试件力学性能特征参数

组别	峰值压缩应力 /MPa	峰值压缩应变 /%	峰前压缩韧性 /( $\text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm}^{-3}$ )
PE1.5CW0	55.95	0.352	9.287
PE1.5CW0.5	68.46	0.432	13.629
PE1.5CW1	77.93	0.494	15.258
PE1.5CW2	60.03	0.413	12.157

由表 4 可知,PE1.5CW0.5 与 PE1.5CW1 平均抗压强度分别达到了 68.46 MPa 和 77.93 MPa,相比 PE1.5CW0,强度分别提高了 22.3% 和 39.3%,同时压缩韧性也分别提高了 46.7% 和 64.3%。可见,掺入碳酸钙晶须后试件的抗压强度以及峰前压缩韧性都得到了不同程度的提升。这得益于碳酸钙晶须自身微米级的尺寸,它可以填充基体孔隙,优化孔径分布,以此改善基体的密实度,使其能够承受更大的压应力。另外,基体密实度的提高也有助于增强基体与 PE 纤维之间粘结力,加上碳酸钙晶须自身高模量、高强度的特点,试件的压缩韧性也得到了一定程度的增强。而在掺入 2% 体积掺量的碳酸钙晶须

后,试块的抗压强度以及压缩韧性相比前2组,出现了下降的趋势,说明碳酸钙晶须增强材料力学性能的作用在削弱,这是因为过量的碳酸钙晶须会使基

体的流动性变差,在基体中很难分散,导致PE纤维发生团聚现象,与基体粘结的牢固程度下降,不利于试块的抗压性能的提高。

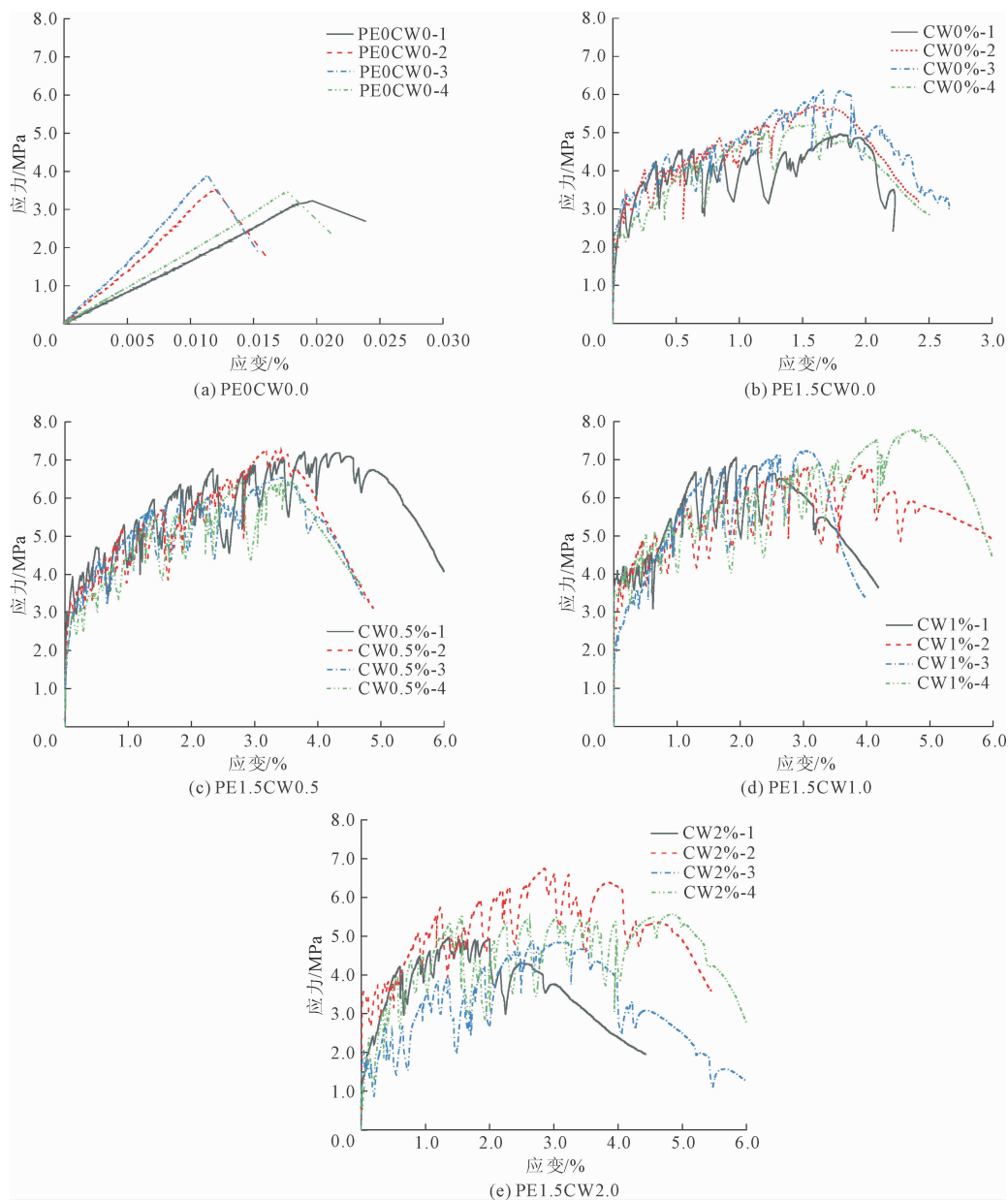


图4 拉伸应力-应变曲线

## 2.4 微观形貌分析

图6是各组拉伸试件破坏断口在电镜扫描仪不同放大倍数下的照片。图6(a)中是PE/CW-ECC的基体样貌,可以发现,材料基体密实,水泥、粉煤灰、硅灰和矿粉等胶凝材料颗粒均匀分布在集体中。图6(b)—图6(e)分别是碳酸钙晶须掺量从0到2%,在相同放大倍数下PE纤维在水泥基体中的分布情况,对比几组图片可知,随着碳酸钙晶须掺量的逐渐增加,PE纤维的分散性在降低。在PE1.5CW0.5

与PE1.5CW1两组中,PE纤维分散较为均匀,显然纤维与水泥基体接触面积更大,在试件承受外部荷载时,由与纤维与基体的接触面积大,纤维拔出时可以提供的摩擦力也更大,此过程相应地会吸收更多的外部能量,增强试件的韧性。而PE1.5CW2中,PE纤维分散得很不均匀,出现了团聚现象,会降低纤维与基体间界面得粘结度,从而影响整个基体的密实度,不利于材料力学性能的提升。

观察图6(g)可知,碳酸钙晶须均匀分布在水泥

基体中,且表面被基体材料包裹,在微观结构中实现了对基体的填充作用,使得基体更加密实;图 6(f)中,水泥基体出现的裂缝被晶须桥接,说明晶须可以填补受损基体的缺陷;图 6(h)是更高倍数的电镜图

像,碳酸钙晶须的存在会迫使扩展中的裂纹发生偏转,这一效应首先会衍生出更多的微裂源,进而促使材料基体形成广泛的微裂纹分布,增强试件多缝开裂的能力。

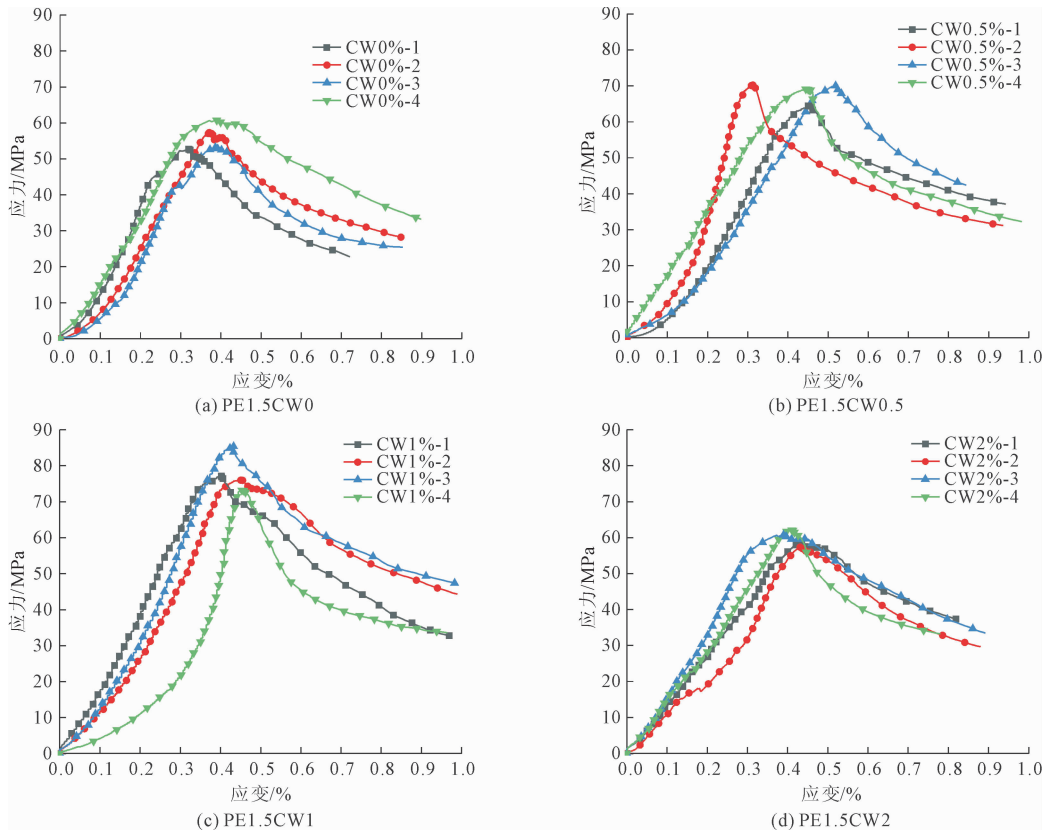


图 5 压缩应力-应变曲线

### 3 结论

本试验在聚乙烯纤维增强水泥基复合材料 (PE-ECC) 中添加了不同含量的  $\text{CaCO}_3$  晶须 (0 ~ 2%), 研究其对 ECC 力学性能的影响。通过扫描电镜观察了 PE/CW-ECC 的微观结构和形态, 深入分析了  $\text{CaCO}_3$  晶须增强 PE/CW-ECC 的微观机理, 所得结论如下:

(1) ECC 抗压和抗拉试件破坏时均表现出较好的延性特征, 裂缝呈现从无到有再到多的过程, 有明显的破坏征兆; 破坏后, 试件表面布满细密裂缝, 并保持较为完整的破坏形态。

(2) PE1.5CW1 立方体抗压性能最佳, 平均抗压强度达到 77.93 MPa, 压缩应变达到 0.49%。相较于 PE1.5CW0, 抗压强度与压缩应变分别提高了 39.3% 和 40.3%, 峰前压缩韧性提高了 64.3%。

(3) PE1.5CW1 拉伸试件的抗拉性能最佳, 平均抗拉强度达到 7.2 MPa, 拉伸应变达到 3.08%。相较于 PE1.5CW0, 抗拉强度与拉伸应变分别提高了 21.8% 和 27.3%, 拉伸韧性提高了 29.3%。

(4) 当 PE 纤维含量为 1.5% 时, 0.5% 与 1% 掺量的碳酸钙晶须对水泥基体的流动性影响不大, 纤维都能够在水泥基体中分布均匀, 不会出现结团现象。此外, 晶须通过填充基体孔隙、裂缝桥接、裂纹偏转等作用机制改善基体微观结构, 以此提升 PE/CW-ECC 的力学性能。

(5) 掺入 1.5% 的 PE 纤维与 2% 的碳酸钙晶须的水泥基体的流动性出现了下降趋势, 导致纤维不易分散, 出现结团现象。另外, 相比于 PE1.5CW1 各组试件, PE1.5CW2 抗压试件与拉伸试件的力学性能均有所降低, 抗压强度降低了 22.9%, 抗拉强度与峰值拉伸应变分别降低了 23.2% 和 4.5%。

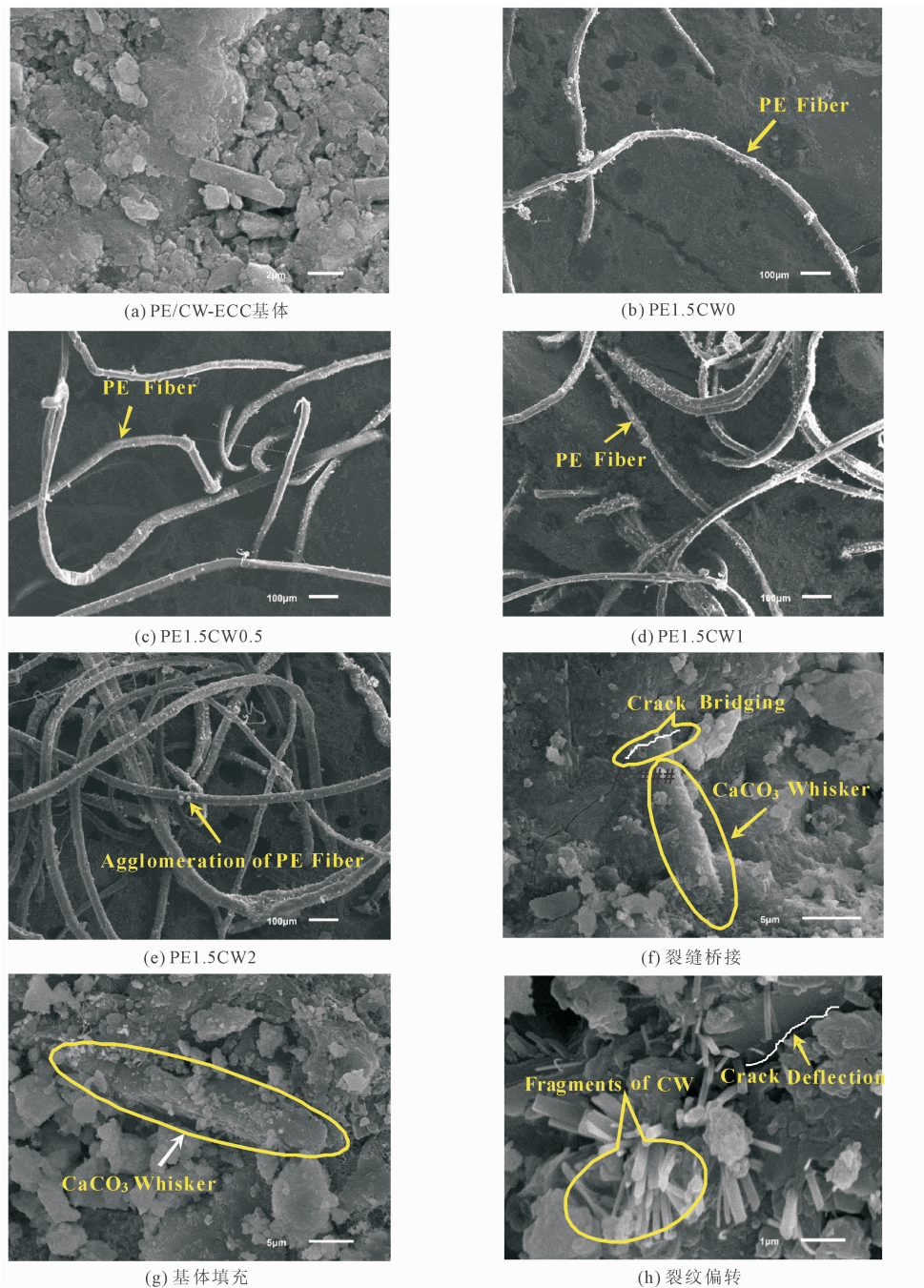


图 6 PE/CW-ECC 的微观结构

## 参考文献:

- [1] Yu Jing, Huang Botao, Wu Jiaqi, et al. Tensile and compressive performance of high-strength engineered cementitious composites(ECC) with seawater and sea-sand [C]//Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations. BEFIB, 2020.
- [2] Gong T, Ahmed H A, Curosu I, et al. Tensile behavior of hybrid fiber reinforced composites made of strain-hardening cement-based composites (SHCC) and carbon textile[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262:120913.
- [3] Liu Dawei, Yu Jian, Qin Fengjiang, et al. Mechanical performance of high-strength engineering cementitious composites (ECC) with hybriding PE and steel fibers [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,18: e01961.
- [4] Yu Zhihui, Yuan Zhen, Xia Chaofan, et al. High temperature flexural deformation properties of engineered cementitious composites (ECC) with hybrid fiber reinforcement[J]. Research and Application of Materials Sci-

- ence, 2020,2(2):26-27.
- [5] Wang Shunan, Xu Lihua, Li Biao, et al. Mechanical behavior and stress - strain model of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete under triaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2024,450:138595.
- [6] Zhou Yan, Chen Minggao. Static and dynamic compression performances of hybrid fiber-reinforced lightweight aggregate concrete[J]. Advances in Civil Engineering, 2022:6045514.
- [7] Ling Jiaxiang, Su Jiaying, Pan Hongshu, et al. Dynamic compression behavior of ultra-high performance concrete with hybrid polyoxymethylene fiber and steel fiber[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022,20:4473-4486.
- [8] Yang Guoliang, Bi Jingjiu, Dong Zhiwen, et al. Experimental study on dynamic tensile properties of macro-polypropylene fiber reinforced cementitious composites[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022,16(1):66.
- [9] 夏超凡,李志华,张 聪. 碳酸钙晶须对混杂纤维增强高延性水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 功能材料,2020,51(1):1120-1125.
- [10] Li Jiayue, Deng Zongcai. Tensile behavior of hybrid fiber-reinforced ultra-high-performance concrete [J]. Frontiers in Materials, 2021,8:769579.
- [11] Zhuang Jinping, Shen Sizheng, Yang Yu, et al. Mechanical performance of basalt and PVA fiber reinforced hybrid-fiber engineered cementitious composite with superimposed basalt fiber content [J]. Construction and Building Materials, 2022,353:129183.
- [12] Ashraf S, Rucka M. Enhancing the fracture performance of cementitious composites through synergistic integration of graphene with polyolefin and polyvinyl alcohol fibres [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 104:112273.
- [13] Guo Aofei, Zhou, et al. Flexural behavior of layered PVA fiber/steel fiber reinforced cementitious composite plates[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021,26(3):1288-1238.
- [14] Wang Zhaoyao, Liang Xingwen, Wang Ying, et al. Experimental and theoretical investigations on the flexural behavior of RC slabs with steel-PVA hybrid fiber reinforced cementitious composite (HFRCC) permanent formwork[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022,17:e01432.
- [15] Zhang Xutao, Lyu X, Zhang Xuwei, et al. Effect of high temperature on mechanical properties of polyethylene fibre-calcium carbonate whisker engineered cementitious composites[J]. Developments in the Built Environment, 2024,18:100462.
- [16] Ma Hui, Cai Jingming, Lin Zhan, et al. CaCO<sub>3</sub> whisker modified engineered cementitious composite with local ingredients [J]. Construction & Building Materials, 2017,151(10):1-8.
- [17] Xie Chaopeng, Cao Mingli, Si Wen, et al. Experimental evaluation on fiber distribution characteristics and mechanical properties of calcium carbonate whisker modified hybrid fibers reinforced cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020,265:120292.
- [18] Gong Peng, Zhang Chunmei, Wu Zhiqiang, et al. Study on the effect of CaCO<sub>3</sub> whiskers on carbonized self-healing cracks of cement paste: Application in CCUS cementing[J]. Construction and Building Materials, 2022,321:126368.
- [19] 周晓媛,彭玉林. PVA 纤维/超高韧性水泥基复合材料的性能研究[J]. 合成纤维,2023,52(5):94-98.
- [20] Victor C Li. Engineered Cementitious Composites (ECC) [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2019.