

文章编号:1007-9629(2023)05-0555-08

SMA/PVA 混杂纤维增强水泥基复合材料拉伸性能

杨 翌^{1,2,*}, 钟奕岚¹, 杨 智³, 熊 浩¹

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 武汉科技大学 城市更新湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430065; 3. 中建壹品投资发展有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要:为研究形状记忆合金(SMA)/聚乙烯醇(PVA)混杂纤维增强水泥基复合材料(SMA/PVA-ECC)的拉伸性能,开展单轴拉伸试验,分析了 SMA/PVA-ECC 试件的破坏现象、应力-应变曲线及特征参数,比较了 SMA 纤维掺量及其直径对试件拉伸性能的影响。结果表明:SMA/PVA-ECC 试件卸载后残余裂缝宽度显著减小;SMA 纤维掺量及其直径对试件拉伸性能影响显著,当 SMA 纤维直径为 0.2 mm、掺量为 0.2% 时,试件综合拉伸性能最好,其初裂强度、极限拉伸应力及应变较工程水泥基复合材料(ECC)试件分别提高 56.4%、23.6% 及 13.4%。

关键词:SMA/PVA 混杂纤维增强水泥基复合材料;超弹性;拉伸性能;自复位

中图分类号:TU352.11

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.05.014

Tensile Properties of SMA/PVA Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites

YANG Zhao^{1,2,*}, ZHONG Yilan¹, YANG Zhi³, XIONG Hao¹

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Hubei Engineering Research Center for Urban Renewal, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. China Construction Yipin Investment Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to study the tensile properties of shape memory alloy/polyvinyl alcohol-engineering cement-based composite materials (SMA/PVA-ECC), uniaxial tensile test were carried out, and the damage phenomena, stress-strain curves and characteristic parameters of the SMA/PVA-ECC specimens were analyzed, and the effects of SMA fibers content and diameter were compared. The results show that the residual crack widths of SMA/PVA-ECC specimens are significantly reduced after unloading. The content and diameter of SMA fiber have significant effects on the tensile properties of the specimens. Compared with the engineering cement-based composite materials (ECC) specimens, the comprehensive tensile properties of the specimens with 0.2 mm fiber diameter and 0.2% fiber content are the best, and the initial cracking strength, ultimate tensile stress and ultimate tensile strain are increased by 56.4%, 23.6% and 13.4%, respectively.

Key words: SMA/PVA-ECC; superelasticity; tensile property; self-centering

通过在水泥基体中掺入特定类型和性能的短纤维制备而成的工程水泥基复合材料(ECC),具有多缝开裂及应变硬化等特性,且其极限拉应变可达普通混凝土的数百倍^[1],已被广泛应用于土木工程领

域^[2-3]。然而 ECC 多采用单掺纤维体系,纤维断裂比较高,不易实现高强度与高延性兼得^[4];另外 ECC 无法在卸载后提供裂缝闭合及变形自复位^[5],其高延性的实现仍以明显残余变形损伤为代价。

收稿日期:2022-05-21; 修订日期:2022-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178158);湖北省自然科学基金资助项目(2019CFB540);国家级大学生创新创业训练计划项目(202110488009);湖北省教育厅高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(Zy2022e004)

第一作者(通讯作者):杨 翌(1977—),男,湖北武汉人,武汉科技大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yzwh77@163.com

形状记忆合金(SMA)具有独特的形状记忆效应及超弹性特性,恢复塑性变形量可达初始长度的14%^[6].其中,超弹性SMA可通过应力诱导产生超弹性,且具有显著的旗形滞回耗能特性,非常适用于抗震结构^[7-9].

将超弹性SMA与ECC相结合,不仅能够利用SMA的旗形滞回耗能特性提升复合材料的耗能能力,而且SMA卸载后的变形回复力可为ECC提供裂缝闭合及变形自复位能力,在自复位抗震结构中具有广阔应用前景.与SMA线材或筋材相比,SMA纤维无须特殊连接锚固.将SMA纤维用于ECC且两者充分粘结或锚固时,SMA纤维应力随着ECC基体受力的增大而增大,可引发SMA材料相变,激发超弹性,从而产生较大应变及旗形滞回耗能特征,使ECC具有优异的耗能能力;同时,卸载后又能产生回复力,带动裂缝闭合和ECC材料变形恢复;且随机分布的SMA纤维可在任意方向为ECC提供闭合裂缝及恢复变形能力^[10].Ali等^[11-12]研究了SMA纤维与聚乙烯醇(PVA)纤维混杂制作的ECC材料的力学性能,发现与单掺PVA纤维的ECC相比,SMA纤维的掺入显著提高了ECC的拉伸及弯曲性能. Khakimova等^[13]和 Sherif等^[14]在砂浆梁中分别掺入端部直形超弹性SMA纤维和端部弯钩形钢纤维,对比研究后发现,与掺入弯钩形钢纤维相比,掺入直形SMA纤维的梁卸载后具有裂缝闭合和自复位能力.

表1 ECC配合比

Table 1 Mix proportion of ECC

Mix proportion/kg					φ (PVA fiber)/%
Cement	Fly ash	Quartz sand	Water	Water reducer	
1.000 0	4.000 0	0.200 0	0.220 0	0.007 9	2

通过直接拉伸试验得到ECC材料的应力-应变曲线,如图1所示.由图1可见,本试验制备的ECC具有明显的应变硬化特性,极限应变达5%以上,拉伸应力超过4 MPa.

1.1.2 形状记忆合金材料

SMA纤维原材料为SMA丝,江阴仁昌镍钛新材料有限公司产,密度为6.49 g/cm³,化学组成为55.86%Ni和44.14%Ti.采用差式扫描量热仪(DSC)测定SMA丝的相变温度,发现其奥氏体的出现和消失温度分别为-34.60、-18.19℃,证明该SMA丝在常温下为奥氏体,可产生超弹性.为研究超弹性SMA的拉伸力学性能,对直径为0.2、0.5、1.0 mm的SMA丝进行直接拉伸试验.设计SMA丝的有效拉伸长度(标距)为100 mm,加载速率为2 mm/min,得到其应

当前,关于SMA/PVA混杂纤维增强水泥基复合材料(SMA/PVA-ECC)基本力学性能的相关研究还十分匮乏.鉴于此,本文针对SMA/PVA-ECC的拉伸力学性能开展研究,通过单轴拉伸试验,研究了应力-应变曲线和SMA纤维掺量(体积分数)及其直径对SMA/PVA-ECC拉伸性能及开裂形态的影响.

1 试验

1.1 原材料

1.1.1 工程水泥基复合材料

ECC原材料包括:P·I 52.5硅酸盐水泥;I级优质粉煤灰,密度为2.55 g/cm³,细度为16%,含水量(质量分数,文中涉及的含量、砂胶比等除特别注明外均为质量分数或质量比)为0.85%;白色晶体状石英砂,主要成分为SiO₂,粒径为150 μm(100目);聚羧酸高效减水剂,减水率为16%,掺量为0.79%;PVA纤维,日本可乐丽公司产,掺量(体积分数)为2%,密度为1.3 g/cm³,直径为40 μm,长度为12 mm,拉伸强度为1 600 MPa,弹性模量为39 GPa,伸长率为7%.

综合文献[15-16],同时根据拌和物的和易性及流动性,对ECC配合比进行调整,最终确定本试验用ECC配合比,见表1,其中砂胶比为0.20,水胶比为0.22.

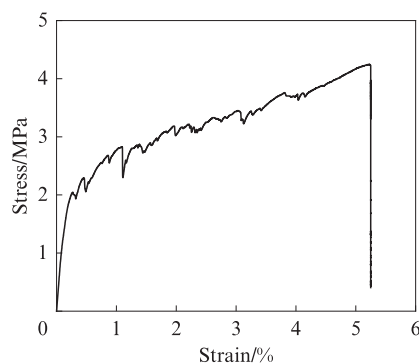


图1 ECC的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of ECC

力-应变曲线,如图2所示.由图2可见,3种直径的SMA丝均在应变达到2%左右时开始发生因应力诱导产生的马氏体相变,出现明显的应变平台.

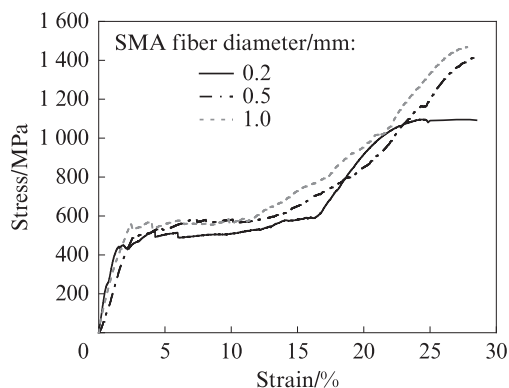


图2 SMA纤维的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of SMA fiber

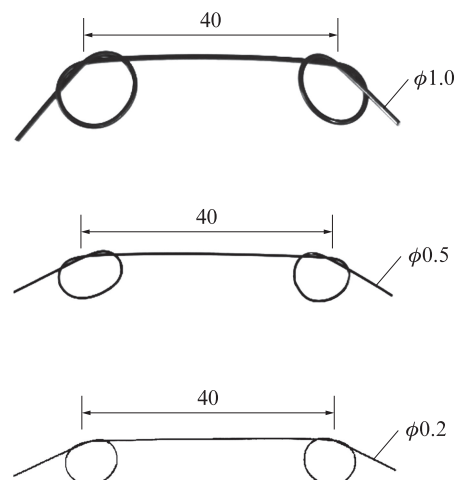


图4 SMA纤维端头设计

Fig. 4 End design of SMA fiber (size:mm)

1.2 SMA/PVA-ECC 试件设计及加载方案

1.2.1 试件设计

采用单轴拉伸试验来研究 SMA/PVA-ECC 的拉伸力学性能及影响因素.拉伸试件形状设计为狗骨形,其尺寸示意图见图3.SMA纤维的端头设置为打结形端头,控制2个打结形端头结点间长度为40 mm,SMA纤维端头设计见图4.为分析SMA纤维掺量及其直径对SMA/PVA-ECC拉伸性能的影响,选取3种SMA纤维掺量(0.2%、0.3%和0.4%)和3种SMA纤维直径(0.2、0.5、1.0 mm)进行拉伸试验.设计并制作9组,每组3个拉伸试件.单轴拉伸试件表见表2.

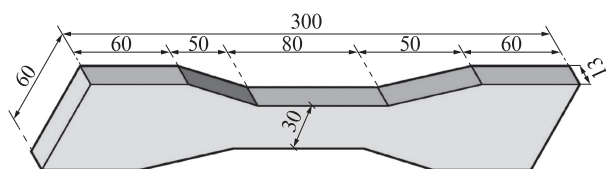


图3 拉伸试件尺寸示意图

Fig. 3 Dimension diagram of tensile specimen (size:mm)

1.2.2 试件制作

首先将各粉状材料(水泥、粉煤灰、石英砂和减水剂)倒入JJ-5型水泥砂浆搅拌机中,干拌2 min至分散均匀;然后加入部分拌和水,先低速搅拌1 min,观察拌和物和易性,再加入剩余拌和水,继续搅拌1 min,待拌和物具有良好流动性后分批次掺入PVA纤维,高速搅拌3 min;接着在拌和物中分批次撒入SMA纤维,将其搅拌均匀,倒入模具中,24 h后脱模;最后将试件置于标准养护箱((20±2)℃且相对湿度95%以上)中养护28 d.需要说明的是,本试验主要保证SMA纤维在试件有效拉伸区轴拉方向上均匀分布.

1.2.3 试验加载方案

采用WD-PD6305万能试验机开展单轴拉伸试验.为避免试件与试验机夹具因直接接触引起的应力集中导致试件局压发生破坏,同时防止试件偏心

表2 单轴拉伸试件表

Table 2 Specimen table of uniaxial tension

Specimen No.	SMA fiber diameter/mm	φ (SMA fiber)/%	φ (PVA fiber)/%	Number of specimen
ECC		0	2	3
S-0.2-0.2	0.2	0.2	2	3
S-0.2-0.3	0.2	0.3	2	3
S-0.2-0.4	0.2	0.4	2	3
S-0.5-0.2	0.5	0.2	2	3
S-0.5-0.3	0.5	0.3	2	3
S-0.5-0.4	0.5	0.4	2	3
S-1.0-0.2	1.0	0.2	2	3
S-1.0-0.3	1.0	0.3	2	3
S-1.0-0.4	1.0	0.4	2	3

受拉,设计并制作了专门固定狗骨形试件的拉伸夹具.为了使上下夹持端与试验机能够稳定连接,对上下夹持端表面进行了45°倾斜划痕打磨处理.试验采用位移控制加载,加载速率为0.5 mm/min,荷载和位

移均由试验机自动记录.应力与应变取试件实际尺寸进行计算.待试件出现1条明显主裂缝并发生应变软化后即停止加载.图5为单轴拉伸试验装置及拉伸夹具示意图.

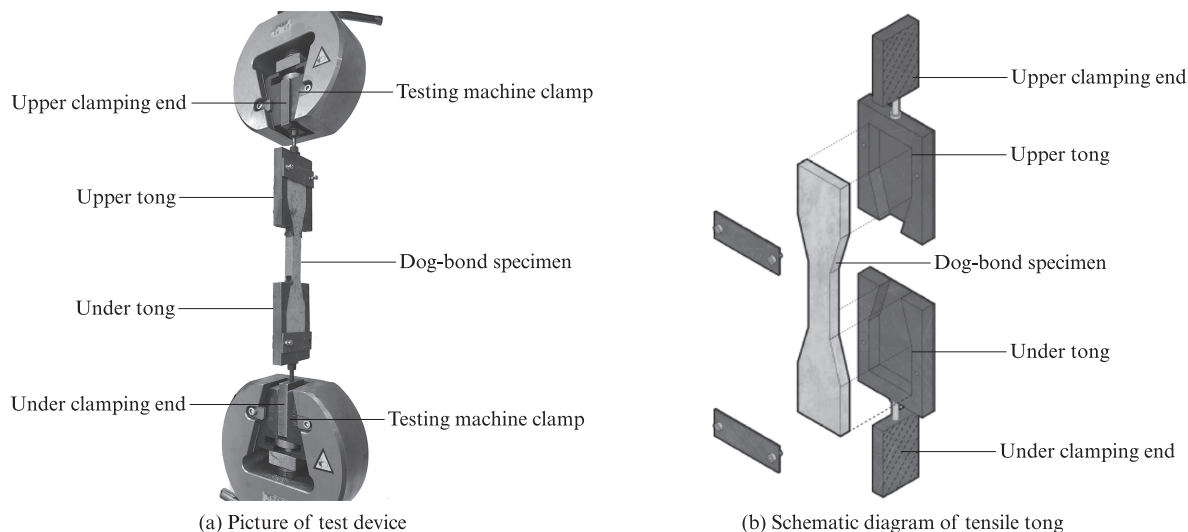


图5 单轴拉伸试验装置及拉伸夹具示意图

Fig. 5 Uniaxial tension test device and schematic diagram of stretching fixture

2 结果与讨论

2.1 破坏形态

图6为试件破坏形态.由图6可见:(1)无论是ECC试件还是SMA/PVA-ECC试件,在加载阶段均出现明显多缝开裂现象;卸载后所有试件的微裂缝基本闭合,SMA/PVA-ECC试件的主裂缝闭合效果优于ECC试件.(2)在加载初期,ECC试件和SMA/PVA-ECC试件基体表面均未出现明显裂缝;继续加载后,微裂缝从试件两端逐渐向中部扩展直至饱和,

微裂缝宽度基本保持不变,直到在试件中部出现明显主裂缝.(3)在破坏阶段,ECC试件的主裂缝宽度较大,卸载后主裂缝未能实现有效闭合;而SMA/PVA-ECC试件的主裂缝平均宽度为2.44~3.14 mm,卸载后残余裂缝平均宽度为0.34~0.47 mm,卸载后主裂缝附近区域的微裂缝均得到有效闭合.这说明,SMA/PVA-ECC试件中的端头打结形SMA纤维与ECC具有良好的锚固性能,SMA纤维的超弹性得到有效利用,卸载后SMA纤维产生的回复力能够使基体裂缝得到有效闭合.

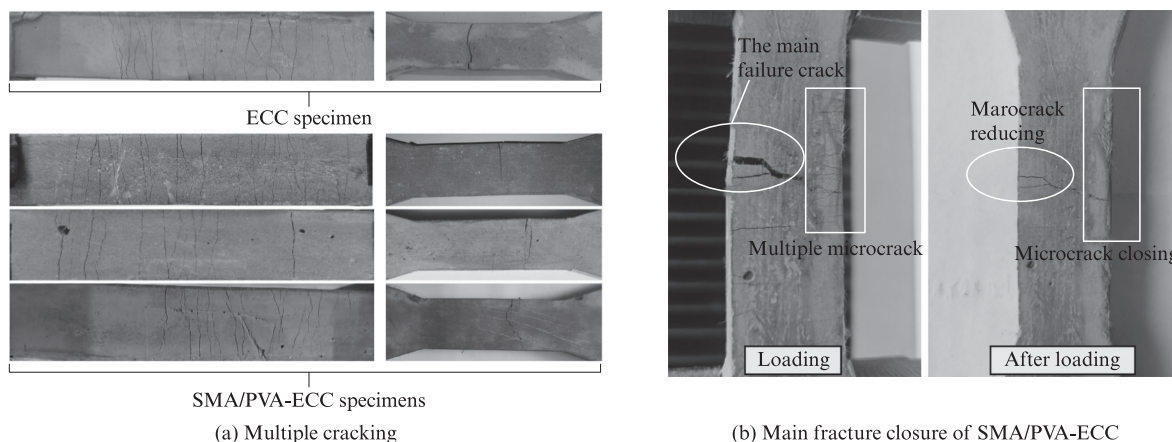


图6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimens

2.2 应力-应变曲线

2.2.1 ECC试件和SMA/PVA-ECC试件应力-应

变曲线的总体对比

本试验选取每组试件中最具代表性的应力-应

变曲线进行对比分析.图7为 ECC 试件和 SMA/PVA-ECC 试件的应力-应变曲线.由图7可见:(1)2类试件的应力-应变曲线均表现出3阶段发展过程且具有明显的应变硬化特征;曲线出现多次上下微小抖动,表明试件存在明显的多缝开裂特征.(2)与仅掺入PVA纤维的ECC试件相比,掺入混杂纤维的SMA/PVA-ECC试件的初裂强度有明显提升,且部分混杂纤维试件的极限拉伸应力也得到提升.(3)达到峰值应力后,SMA/PVA-ECC试件的应力退化较ECC试件缓慢,说明PVA纤维被完全拉断或拔出后,SMA纤维在打结形端头的锚固作用下,仍可继续承载,减缓应力退化速率;大多数SMA/PVA-ECC试件的极限应变较ECC试件有所下降,仅个别混杂纤维试件的应变高于ECC试件.

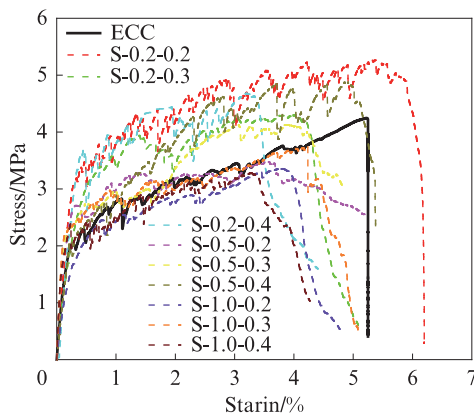


图7 ECC试件和SMA/PVA-ECC试件的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of ECC specimen and SMA/PVA-ECC specimens

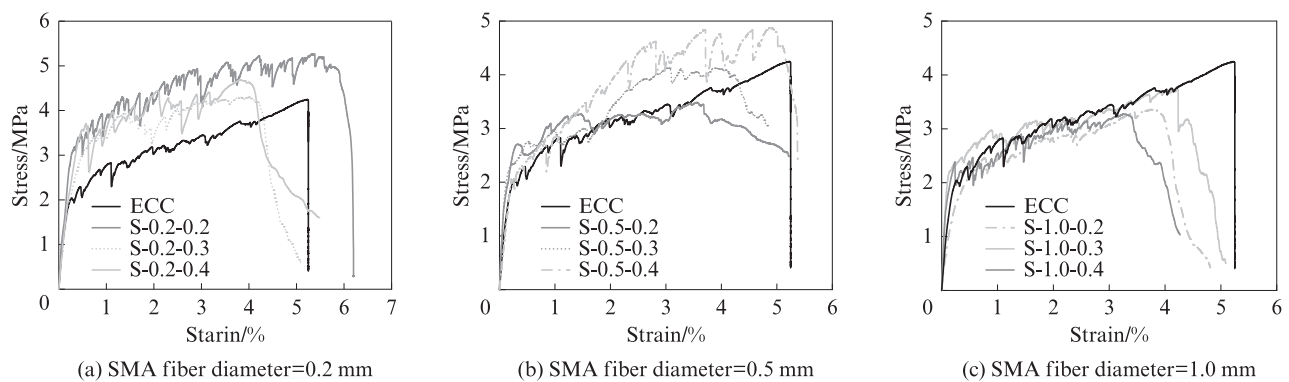


图8 相同SMA纤维直径条件下SMA纤维掺量对SMA/PVA-ECC试件应力-应变曲线的影响

Fig. 8 Effect of SMA fiber content on the stress-strain curves of SMA/PVA-ECC specimens with the same SMA fiber diameter

2.2.2.2 SMA纤维直径

试验研究了相同SMA纤维掺量条件下,SMA纤维直径对SMA/PVA-ECC试件应力-应变曲线的影响,结果见图9.由图9(a)、(b)可见:当SMA纤维掺量相同时,SMA纤维直径小的试件比纤维直径大的试件具有更高的极限拉伸应力及应变.这是因为

2.2.2 SMA/PVA-ECC试件拉伸性能的影响因素

2.2.2.1 SMA纤维掺量

试验研究了相同SMA纤维直径条件下,SMA纤维掺量对SMA/PVA-ECC试件应力-应变曲线的影响,结果见图8.由图8(a)可见:(1)与ECC试件相比,SMA纤维直径为0.2 mm、掺量为0.2%、0.3%、0.4%的SMA/PVA-ECC试件极限拉伸应力总体上均有提升.(2)当SMA纤维掺量为0.2%时,试件的极限拉伸应力及应变最大;SMA纤维掺量为0.3%和0.4%试件的极限拉伸应力及应变接近.这是因为SMA纤维掺量越大,越易在浇筑过程中发生聚集成团现象,从而部分阻碍基体流动,导致试件内部存在孔隙及滞留空气,增加试件内部缺陷.由图8(b)可见:(1)SMA纤维直径为0.5 mm的SMA/PVA-ECC试件极限拉伸应力及应变随着SMA掺量的增加呈增长趋势.(2)SMA纤维掺量为0.4%的试件(S-0.5-0.4)极限拉伸应力高于ECC试件,但极限应变仍比ECC试件低;其余2组SMA/PVA-ECC试件的极限拉伸应力及应变均低于ECC试件.由图8(c)可见:SMA纤维直径为1.0 mm的SMA/PVA-ECC试件中,SMA纤维掺量为0.3%的试件极限拉伸应力及应变最大,但低于ECC试件.综上所述:小直径的SMA纤维掺量越小,SMA/PVA-ECC试件拉伸性能越好;而大直径的SMA纤维只有掺量适中时,SMA/PVA-ECC试件的拉伸性能才较好.

复合材料的抗拉强度主要由纤维桥联应力决定,在相同掺量下,小直径SMA纤维的根数比大直径SMA纤维的根数多,SMA纤维提供的桥接力更大,从而提升了SMA/PVA-ECC复合材料的强度和变形能力.但分析图9(c)可知,当SMA纤维超过一定掺量后,直径较小的SMA纤维可能因聚集成团而导

致产生负混杂效应,使得SMA纤维直径较小的复合材料试件(S-0.2-0.4)的拉伸应力与SMA纤维直径较大的SMA纤维试件(S-0.5-0.4)接近.由此可见,

当SMA纤维掺量较低时,纤维直径小的试件拉伸性能更好;SMA纤维超过一定掺量后,纤维直径中等的试件拉伸性能较好.

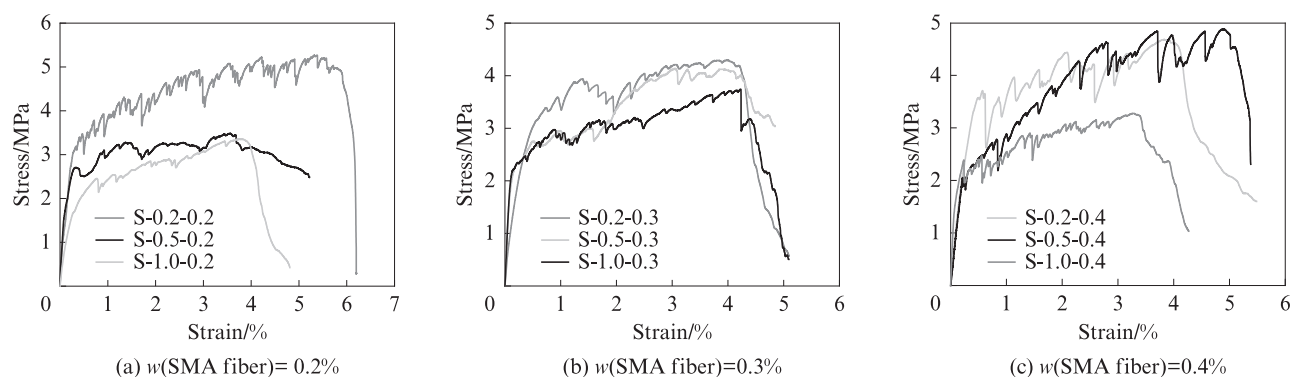


图9 相同SMA纤维掺量条件下SMA纤维直径对SMA/PVA-ECC试件应力-应变曲线的影响

Fig. 9 Effect of SMA fiber diameter on the stress-strain curves of SMA/PVA-ECC specimens with the same SMA fiber content

2.3 特征参数

试件拉伸应力-应变曲线的特征参数见表3.由表3可知:(1)仅掺PVA纤维的ECC试件初裂强度较小,仅为2.04 MPa;SMA纤维的掺入提升了SMA/PVA-ECC试件的初裂强度,为2.05~3.57 MPa.其中,试件S-0.2-0.2、S-0.2-0.3和S-0.2-0.4的初裂强度

较ECC试件分别提高了56.4%、54.4%、75.0%,极限拉伸应力分别提高了23.6%、1.4%、10.4%.(2)SMA纤维的掺入使大部分SMA/PVA-ECC试件变形能力降低,仅试件S-0.2-0.2的极限拉伸应变比ECC试件提高了13.4%.因此,当SMA纤维直径为0.2 mm且掺量为0.2%时,SMA/PVA-ECC拉伸性能最佳.

表3 试件拉伸应力-应变曲线特征参数

Table 3 Tensile stress-strain curve characteristic parameters of specimens

Specimen No.	Initial cracking strength/MPa	Initial cracking strain/%	Ultimate tensile stress/MPa	Ultimate tensile strain/%
ECC	2.04	0.26	4.24	5.23
S-0.2-0.2	3.19	0.33	5.24	5.93
S-0.2-0.3	3.15	0.56	4.30	4.01
S-0.2-0.4	3.57	0.48	4.68	3.83
S-0.5-0.2	2.71	0.32	3.43	3.56
S-0.5-0.3	2.35	0.23	4.09	4.10
S-0.5-0.4	2.05	0.21	4.88	4.89
S-1.0-0.2	2.07	0.47	3.36	3.83
S-1.0-0.3	2.23	0.14	3.81	4.32
S-1.0-0.4	2.39	0.23	3.31	3.91

2.4 SMA纤维应变

由于打结形端头可为SMA纤维和ECC基体提供充分的锚固力,因此假设SMA纤维打结形端头与ECC基体之间没有相对滑移.对于任意单根SMA纤维,其受拉变形后的纤维长度 L_f' 可取其初始长度 L_f 与基体裂缝宽度 W 之和.SMA纤维变形示意图如图10所示.

此时SMA纤维应变 ϵ_f 可采用式(1)表示:

$$\epsilon_f = \frac{W}{L_f} \quad (1)$$

依据式(1)计算试件主裂缝处SMA纤维应变值,结果见表4.由表4可知,各试件主裂缝处SMA纤维应变为5.89%~8.13%,均超过相变应变2%.结合SMA纤维单轴拉伸应力-应变曲线(图2)可知,主裂缝处SMA纤维应力可达550~600 MPa.说明试件主裂缝处的打结形SMA纤维均可达到因应力诱导引发的马氏体相变状态,SMA纤维能够有效发挥超弹特性.

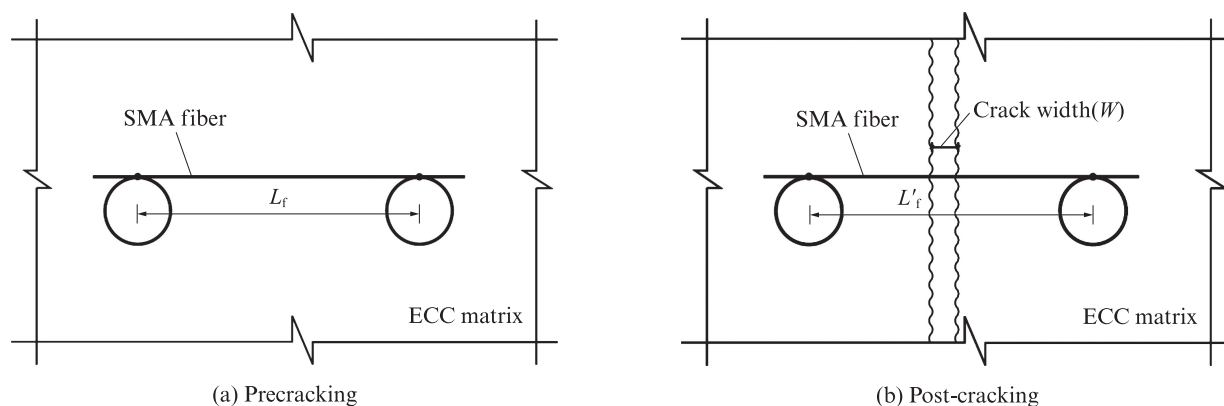


图 10 SMA 纤维变形示意图

Fig. 10 Schematic diagram of SMA fiber deformation

表 4 试件主裂缝处 SMA 纤维应变
Table 4 Strain of SMA fiber at the main crack of specimens

Specimen No.	W/mm	$\epsilon_f/\%$
S-0.2-0.2	2.51	6.28
S-0.2-0.3	2.42	6.05
S-0.2-0.4	2.39	5.98
S-0.5-0.2	2.64	6.60
S-0.5-0.3	2.82	7.05
S-0.5-0.4	2.70	6.75
S-1.0-0.2	2.97	7.43
S-1.0-0.3	3.25	8.13
S-1.0-0.4	3.21	8.03

Note: All data in the table are average values.

3 结论

(1) 端头打结形 SMA 纤维与 ECC 之间具有良好锚固性能, SMA 纤维可有效发挥超弹性特性. 卸载后, SMA/PVA-ECC 试件微裂缝能够得到有效闭合, 主裂缝残余宽度显著减小.

(2) SMA/PVA-ECC 试件的应力-应变曲线表现出 3 阶段发展过程, 且具有明显应变硬化特征; SMA 纤维提高了 SMA/PVA-ECC 试件的初裂强度及部分试件的极限拉伸应力; 达到峰值应力后, SMA/PVA-ECC 试件的应力退化较 ECC 试件缓慢, 但其极限应变大多低于 ECC 试件.

(3) SMA 纤维的直径和掺量对 SMA/PVA-ECC 试件的拉伸性能影响显著. 小直径的 SMA 纤维掺量越小, 试件的拉伸性能越好; 而大直径的 SMA 纤维掺量只有适中时, 试件的拉伸性能才较好. 当 SMA 纤维掺量较低时, 纤维直径小的试件拉伸性能更好; 当 SMA 纤维掺量超过一定值后, 纤维直径中等的试件拉伸性能较好. SMA 纤维直径为

0.2 mm、掺量为 0.2% 时试件的综合拉伸性能最好, 其初裂强度、极限拉伸应力及应变较 ECC 试件分别提高 56.4%、23.6% 及 13.4%.

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 周建伟, 余保英, 孔亚宁, 等. PVA 纤维增韧工程水泥基复合材料在屋面防水工程中的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(10): 138-141, 156.
ZHOU Jianwei, YU Baoying, KONG Yaning, et al. Research on application of PVA fiber toughened engineered cementitious composite in roof waterproof engineering [J]. New Building Materials, 2021, 48(10): 138-141, 156. (in Chinese)
- [3] 刘曙光, 常智慧, 张栋翔, 等. PVA-ECC 材料在桥梁伸缩缝工程中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(2): 80-82.
LIU Shuguang, CHANG Zhihui, ZHANG Dongxiang, et al. Application of PVA-ECC material in bridge expansion joint engineering [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(2): 80-82. (in Chinese)
- [4] 王振波, 张君. 混杂纤维水泥基复合材料力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2018(4): 65-69.
WANG Zhenbo, ZHANG Jun. Research advance in mechanical behavior of hybrid fiber reinforced cementitious composites [J]. Concrete, 2018(4): 65-69. (in Chinese)
- [5] DEGHANI A, ASLANI F. Crack recovery and re-centring performance of cementitious composites with pseudoelastic shape memory alloy fibres [J]. Construction and Building Materials, 2021, 298: 123888.
- [6] ANDRAWES B, DESROCHES R. Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(3): S60.

- [7] LI X P, LI M, SONG G B. Energy-dissipating and self-repairing SMA-ECC composite material system[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(2):025024.
- [8] DIZAJI F S, DIZAJI M S. Seismic performance assessment of steel frames upgraded with shape memory alloy re-centering dampers for passive protection of structures subjected to seismic excitations using high-performance NiTiHfPd material[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(6):065004.
- [9] ZHOU X H, KE K, YAM M C H, et al. Shape memory alloy plates: Cyclic tension-release performance, seismic applications in beam-to-column connections and a structural seismic demand perspective[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 167:108158.
- [10] INDHUMATHI S, DINESH A, PICHUMANI M. Diverse perspectives on self healing ability of engineered cement composite-all-inclusive insight [J]. Construction and Building Materials, 2022, 323:126473.
- [11] ALI M A E M, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Hybrid-fiber reinforced engineered cementitious composite under tensile and impact loading[J]. Materials & Design, 2017, 117:139-149.
- [12] ALI M A E M, NEHDI M L. Experimental investigation on mechanical properties of shape memory alloy fibre-reinforced ECC composite[C]//The International Conference on Civil and Architecture Engineering. Cairo: Military Technical College, 2016, 11:1-11.
- [13] KHAKIMOVA E, SHERIF M M, OZBULUT O E, et al. Experimental investigations on shape memory alloy fiber reinforced concrete [C]//6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology. Urbana-Champaign: University of Illinois, Urbana-Champaign, United States. 2015.
- [14] SHERIF M M, KHAKIMOVA E M, TANKS J, et al. Cyclic flexural behavior of hybrid SMA/steel fiber reinforced concrete analyzed by optical and acoustic techniques [J]. Composite Structures, 2018, 201:248-260.
- [15] 许荔. 装配式RC和RC/ECC组合框架结构抗震性能和设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
XU Li. Seismic performance and design method of precast RC and RC/ECC composite frame structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [16] 王玉清, 刘潇, 刘曙光, 等. 配合比对PVA-FRCC长期自生收缩性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2):150-157.
WANG Yuqing, LIU Xiao, LIU Shuguang, et al. Effect of mix proportion on the long-term autogenous shrinkage of PVA-FRCC [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):150-157. (in Chinese)