文章编号:1674-2974(2025)05-0118-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025053

高强高延性混凝土单轴拉伸性能试验研究

邓明科,王一童,杨家盛†,张阳玺
(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:为探究高强高延性混凝土(high-strength and high-ductility concrete,HSHDC)的单轴拉伸性能,设计了12组试件进行了薄板单轴拉伸试验,研究了水胶比(0.14、0.16和0.18)、PE纤维体积率(1.5%、2.0%、2.5%)、纤维种类(PE和PVA)及PE纤维直径(22 μm、35 μm和40 μm)对薄板单轴拉伸行为的影响.并利用峰值前应变能密度分析了上述因素对HSHDC能量吸收能力的影响.结果表明:随着水胶比的增大,HSHDC的抗拉强度呈先升高后降低的趋势,而极限拉伸应变呈增大趋势;HSHDC的抗拉强度随着纤维体积率的增加而增大,而HSHDC的极限拉伸应变在水胶比较小时随着纤维体积率的增加而减小,在水胶比较大时则相反;与0.14水胶比相比,在0.16和0.18水胶比下,HSHDC的峰值前应变能密度较大;与掺入PVA纤维的HSHDC试件相比,掺入PE纤维的HSHDC的拉伸性能和能量吸收能力更优,且小直径的PE纤维更适合制备HSHDC.最后,利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)研究了HSHDC致密的基体和粗糙的PE纤维表面.

关键词:高延性混凝土;纤维直径;纤维体积率;抗拉强度;极限应变
中图分类号:TU528.58 **文献标志码**:A

Experimental Study on Uniaxial Tensile Properties of High-strength and High-ductility Concrete

DENG Mingke, WANG Yitong, YANG Jiasheng†, ZHANG Yangxi
(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To investigate the uniaxial tensile properties of high-strength and high-ductility concrete, (HSHDC), 12 groups of specimens were designed, and uniaxial tensile tests were carried out. The effects of water-binder ratio (0.14, 0.16 and 0.18), PE fiber volume ratio (1.5%, 2.0% and 2.5%), fiber types (PE and PVA), and PE fiber diameters (22 μm, 35 μm and 40 μm) on the uniaxial tensile behavior of thin sheets were studied. The influence of the above factors on the energy absorption capacity of HSHDC was analyzed in terms of the strain energy density before the peak stress. The results show that with the increase of the water-binder ratio, the tensile strength of HSHDC increases first and then decreases, while the ultimate tensile strain increases. The tensile strength of HSHDC increases with the fiber volume ratio, while the ultimate tensile strain of HSHDC decreases with the

* **收稿日期**:2024-05-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878545),National Natural Science Foundation of China (51878545);西安市重大科技创新计划项目(20191522415KYPT015JC017),Xi'an Major Science and Technology Planing Peoject(20191522415KYPT015JC017)
作者简介:邓明科(1979—),男,四川南充人,西安建筑科技大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: yangjs178@163.com

increase of fiber volume ratio when the water-binder ratio is low, but not vice versa when the water-binder ratio is large. When the water-binder ratio of 0.16 and 0.18 occurs, the strain energy density of HSHDC before the peak is higher with different fiber volume ratios. Compared with the HSHDC specimen mixed with PVA fiber, the HSHDC mixed with PE fiber has better tensile properties and energy absorption capacity, and the PE fiber with a small diameter is more suitable for HSHDC preparation. Finally, the dense matrix of HSHDC and the rough surface of PE fiber were studied by scanning electron microscope (SEM).

Key words: high-ductility concrete; fiber diameter; fiber volume ratio; tensile strength; ultimate strain

高延性混凝土(high-ductility concrete, HDC)是一种具有高韧性、高抗裂性能和高耐损伤能力的新型结构材料. 与普通混凝土相比,HDC 的抗拉强度高,在拉伸荷载作用下具有多裂缝开展和应变硬化等特征. 基于其优异的拉伸力学性能,HDC 在砌体加固、结构修复和抗震等工程中广泛应用[1-2]. 但传统的 HDC 的抗压强度基本在 60 MPa 以下,限制了其更高层次的应用.

随着土木工程领域新材料、新技术的发展,HDC 逐渐被应用于混凝土结构的加固和修复. 与加固砌体结构不同,加固混凝土结构的 HDC 需要更高的抗压强度(100 MPa 以上),以减小构件尺寸,提高加固材料的利用率. 因此,制备同时具备高强度和高延性的水泥基复合材料,即高强高延性混凝土(HSHDC)具有重要意义.

目前,国内外众多学者已开发了不同性能的 HDC[3-9],但关于同时具备高抗压和高抗拉强度的 HDC 研究较少. 美国密西根大学的 Ranade 等[10-11]于 2011 年制备出 HSHDC. Ranade 等[12]提出了基于细观力学的 HSHDC 设计方法. Yu 等[13]研究了纤维增强指数对 HS-ECC 力学性能的影响. Zhang 等[14]用轻质惰性填充材料开发出了轻质 HSHDC. 同济大学的陆洲导等[15]利用聚乙烯(PE)纤维配制出了 100 mm 立方体抗压强度最高为 114 MPa,平均拉伸应变超过 8% 的 HSHDC,并研究了 HSHDC 无筋梁的抗弯性能. 雷东移等[16]制备出了超高强超高延性水泥基复合材料,并研究了其微观结构与宏观拉伸性能的联系,得出了超高强超高延性水泥基复合材料的微观力学设计理论. 目前,HSHDC 的配制成本较高,原材料较难取得. 国内外对于 HSHDC 的力学性能研究总体较少,一些如纤维种类、纤维掺量、纤维直径等关键参数对 HSHDC 力学性能的影响尚不确定,这都限制了 HSHDC 在工程中的应用.

因此,为了方便 HSHDC 在工程中的应用,本文使用国产原材料在标准养护条件下制备了 HSHDC. 通过单轴拉伸试验,分析了水胶比、PE 纤维体积率、纤维种类及 PE 纤维直径对 HSHDC 单轴拉伸性能的影响,并分析了上述因素对 HSHDC 峰值前应变能密度的影响. 最后利用 SEM 探究了 HSHDC 的纤维破坏模式和微观形貌,验证了 HSHDC 优异的抗拉强度和拉伸应变能力.

1　试验概况

1.1　试验材料

试验选用 P·O 52.5R 普通硅酸盐水泥;硅灰的需水量比为 122%,其余符合《高强高性能混凝土用矿物外加剂》(GB/T 18736—2017)[17]要求;粉煤灰采用 I 级粉煤灰;矿粉采用磨细粒化高炉矿渣粉(ground granulated blastfurnace slag, GGBS),比表面积为 430 m^2/kg;石英砂最大粒径为 0.5 mm;纤维力学性能见表 1. 表 1 中,PE 纤维的表示方法为纤维名称-纤维直径. 例如 PE-22 表示直径为 22 μm 的 PE 纤维. 减水剂为聚羧酸高性能减水剂,减水率大于 50%,固体含量为 20%. 试验掺入的矿物掺合料化学组成见表 2.

1.2　方案设计

试验根据相关文献[18-22],确定了基体中矿物掺合料的掺量、石英砂的级配、水胶比、砂胶比及纤维种类等具体参数,配制了抗压强度为 104.5 MPa 的 HSHDC 基体,大于《高强混凝土结构技术规程》(CECS 104—1999)[23]中对高强混凝土定义的强度 50~80 MPa.

试验使用配制出的 HSHDC 基体设计了 12 组 HSHDC 薄板拉伸试件,每组试件制作 3 个相同试样.

表1 纤维物理力学性能

Tab.1 Physical and mechanical properties of fibers

纤维名称	直径/μm^{-3}	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	长度/mm	密度/(g·cm^{-3})
PVA	22	1 600	40	7	12	1.3
PE-22	22	3 800	145	2.9	12	0.97
PE-35	35	3 800	145	2.9	12	0.97
PE-40	40	3 800	145	2.9	12	0.97

表2 矿物掺合料化学组成

Tab.2 Chemical composition of mineral admixtures %

矿掺名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	CaO	烧失量
粉煤灰	64.6	19.9	3.5	1.3	0.4	3.8	4.7
矿粉	32.4	15.1	0.5	9.2	1.9	36.6	1.1
硅灰	94.0	0.8	1.1	1.1	0.3	0.5	1.8

分别研究了水胶比、纤维体积率、纤维种类及纤维直径对HSHDC拉伸力学性能的影响. 试验方案如表3所示.

表3 HSHDC拉伸试验方案

Tab.3 Tensile test scheme of HSHDC

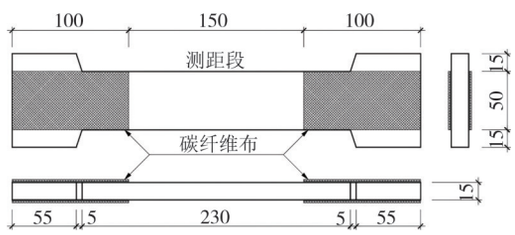
试件名称	纤维种类	纤维体积率/%	水胶比
E22-1.5%-0.14	PE-22	1.5	0.14
E22-1.5%-0.16	PE-22	1.5	0.16
E22-1.5%-0.18	PE-22	1.5	0.18
E22-2.0%-0.14	PE-22	2.0	0.14
E22-2.0%-0.16	PE-22	2.0	0.16
E22-2.0%-0.18	PE-22	2.0	0.18
E22-2.5%-0.14	PE-22	2.5	0.14
E22-2.5%-0.16	PE-22	2.5	0.16
E22-2.5%-0.18	PE-22	2.5	0.18
E35-2.0%-0.16	PE-35	2.0	0.16
E40-2.0%-0.16	PE-40	2.0	0.16
A40-2.0%-0.16	PVA-40	2.0	0.16

表3中,试件命名包括3部分,第1部分为纤维种类,PE纤维用E加纤维直径表示,PVA纤维用A加纤维直径表示. 例如E22表示直径为22 μm的PE纤维;第2部分为纤维的体积率;第3部分的0.14、0.16、0.18表示HSHDC的水胶比分别为0.14、0.16、0.18.

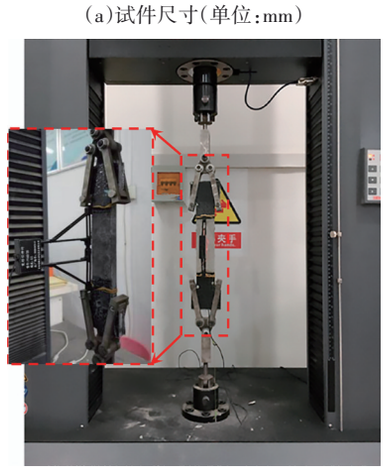
1.3 试件制备

单轴拉伸性能的试件参照日本土木工程学会(JSCE)标准[24]推荐的试样尺寸,选用狗骨形状试样进行测试,试样厚度为15 mm,标距段宽50 mm、长150 mm. 拉伸试件尺寸及加载装置见图1.

将按设计配合比称取的胶凝材料水泥、粉煤灰、矿粉、硅灰、细砂在混凝土搅拌机中干拌2~3 min,然后加水搅拌3~5 min,加入适量减水剂,最后加入纤维,拌制5~8 min后分层装入模具中,振动台振捣90 s后抹面并于表面覆薄膜静置养护. 在温度为22 ℃、相对湿度为95%的养护箱中养护28 d后取出测试. 单轴拉伸试验测试设备为MTS万能力学试验机,拉伸速率为0.2 mm/min.



(a)试件尺寸(单位:mm)



(b)加载装置

图1 单轴拉伸试验试件尺寸及加载装置示意图

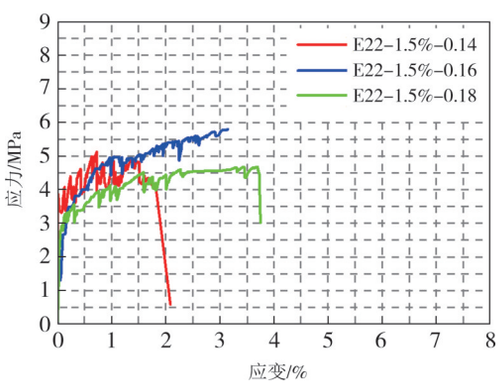
Fig.1 Uniaxial tensile test specimen size and loading device diagram

2 拉伸强度试验结果及分析

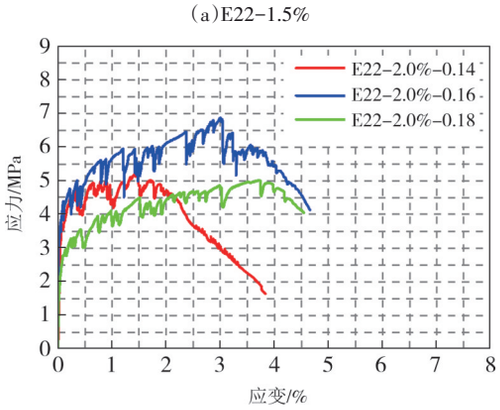
2.1 HSHDC的应力-应变曲线

在单轴拉伸荷载作用下,不同参数下HSHDC试件的应力-应变曲线见图2. 其中每组试件取最有代表性的1条曲线. 试验测得的应力-应变曲线大致分为三个阶段:1)弹性阶段. 试件出现第一条裂纹之前,应力-应变呈线性比例发展,荷载主要由基体承担;2)多缝开裂(也称应变硬化)阶段. 在此阶段,由

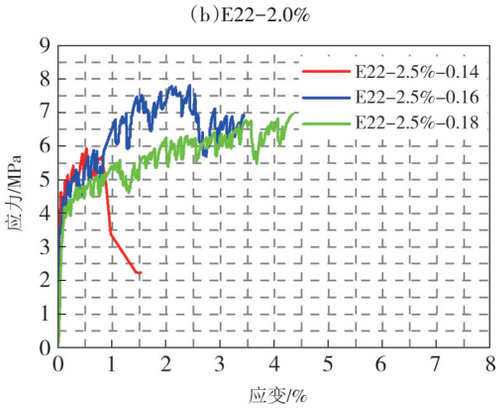
于基体的开裂,曲线的斜率低于弹性阶段.试件开裂后,HSHDC 内乱向分布的纤维起到了桥接作用,抑制了试件内部微裂纹的扩展,试件荷载由断裂面处的纤维承担并传递给试件内部的其他部分,试件内部不断产生新的裂纹,避免了应力集中,形成多裂缝开展现象,试件出现了多条细密的裂纹,如图 3 所示.因此,在这一阶段,在较大的应变范围内,试件应力随着 HSHDC 内部纤维的拔出和断裂而上下起伏,没有明显降低;3)失效阶段.在这一阶段,已经产生的裂缝持续增大,纤维不断被拔出或拉断,桥联应力不断减小直至不能抵消试件承受的荷载,试件中的某一条裂缝发生失稳拓展,导致试件被拉断丧失承载力.



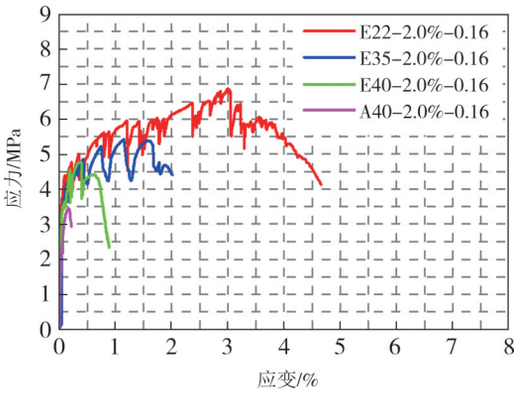
(a)E22–1.5%



(b)E22–2.0%



(c)E22–2.5%



(d)不同纤维种类

图 2　不同参数下 HSHDC 的拉伸应力–应变曲线

Fig.2　Tensile stress–strain curves of HSHDC with different parameters

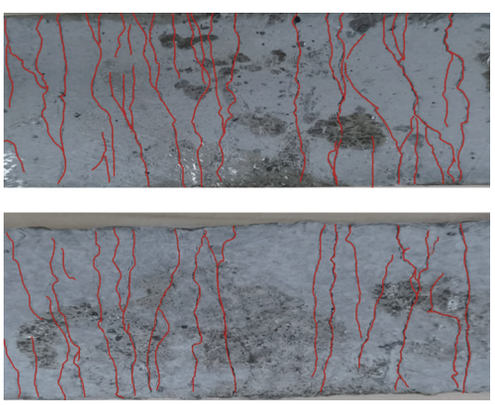


图 3　掺 PE 纤维的 HSHDC 开裂模式

Fig.3　Cracking mode of HSHDC doped with PE fiber

基于上述分析,HSHDC 的拉伸应力–应变曲线可以简化为如下三折线型本构关系表示:

$$\sigma=\begin{cases}E_1\varepsilon, 0<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{cr}\\ \sigma_{cr}+E_2(\varepsilon-\varepsilon_{cr}), \varepsilon_{cr}<\varepsilon\leqslant\varepsilon_p\\ \sigma_p-E_3(\varepsilon-\varepsilon_p), \varepsilon>\varepsilon_p\end{cases}\tag{1}$$

其中:E_1、E_2 和 E_3 分别为 HSHDC 在弹性阶段、多缝开裂阶段和失效阶段的拉伸弹性模量;σ_{cr}、ε_{cr} 分别为 HSHDC 初裂时的拉伸应力和拉伸应变;σ_p、ε_p 分别为 HSHDC 的峰值应力和对应的拉伸应变.

由图 2 和图 3 可知,掺有 PE–22 纤维(纤维直径为 22 μm 的 PE 纤维)的试件在拉伸荷载作用下具有较好的变形能力,宏观表现出多裂缝开展的特性.

通过单轴拉伸应力–应变曲线计算得到的各组 HSHDC 试件基本拉伸力学性能指标的平均值见表 4.

其中,将拉伸应力–应变曲线上斜率首次为零的点对应的拉伸应力与应变定义为初裂强度(σ_{cr})与初裂应变(ε_{cr});将峰值应力及对应的应变分别定义为

HSHDC材料的抗拉强度(σ_p)与极限拉伸应变(ε_p).

由表4可知,在12组HSHDC试件中,掺入PE纤维的11组试件的抗拉强度均达到了4.5 MPa以上.试件E22-2.5%-0.16的抗拉强度最高,达到7.81 MPa;11组试件极限拉伸应变在0.38%~4.39%之间.试件E22-2.5%-0.18的极限拉伸应变最高,达到了4.39%;掺入PVA纤维的1组试件的抗拉强度为3.35 MPa,极限拉伸应变为0.16%. HSHDC试件的拉伸应变远大于普通混凝土(约0.01%),证明HSHDC具有优异的拉伸力学性能.

表4 HSHDC拉伸力学性能参数

Tab.4 Tensile mechanical properties of HSHDC

试件名称	σ_{cr}/MPa	ε_{cr}/%	σ_p/MPa	ε_p/%
E22-2.5%-0.14	4.64	0.01	5.93	0.52
E22-2.0%-0.14	3.60	0.07	5.25	1.44
E22-1.5%-0.14	3.85	0.01	5.09	1.80
E22-2.5%-0.16	4.48	0.03	7.81	2.43
E22-2.0%-0.16	3.77	0.11	6.84	3.04
E22-1.5%-0.16	3.53	0.09	6.05	3.15
E22-2.5%-0.18	4.41	0.11	6.96	4.39
E22-2.0%-0.18	4.01	0.08	5.00	3.84
E22-1.5%-0.18	3.55	0.09	4.68	3.65
E35-2.0%-0.16	4.20	0.14	5.40	1.63
E40-2.0%-0.16	3.52	0.07	4.83	0.38
A40-2.0%-0.16	2.46	0.06	3.35	0.16

2.2 因素分析

2.2.1 水胶比对HSHDC抗拉强度和应变的影响

由表4和图4可知,当纤维种类及其体积率相同,HSHDC的抗拉强度在水胶比为0.16时最高,相较于水胶比为0.14和0.18分别提升了19%~32%和12%~47%;HSHDC的极限拉伸应变随着水胶比的增加而增大,水胶比为0.18时极限拉伸应变最高,相较于水胶比为0.16和0.14分别提升了16%~81%和103%~744%.

纤维均匀分布是提升混凝土拉伸力学性能的前提.混凝土中水胶比较小时,纤维在混凝土内分布不均匀,易出现结团现象,增加混凝土内部缺陷,影响混凝土的抗拉性能;混凝土中水胶比较大时,纤维的分散性增强,纤维利用率得到提升,纤维能够充分发挥桥接作用[25].同时,混凝土内部结构变得疏松,密实度降低,材料的极限拉应力降低.因此,对于制备HSHDC,存在合适的水胶比范围,使HSHDC的抗拉强度最高,根据试验结果,HSHDC在0.16水胶比下抗拉强度最高.

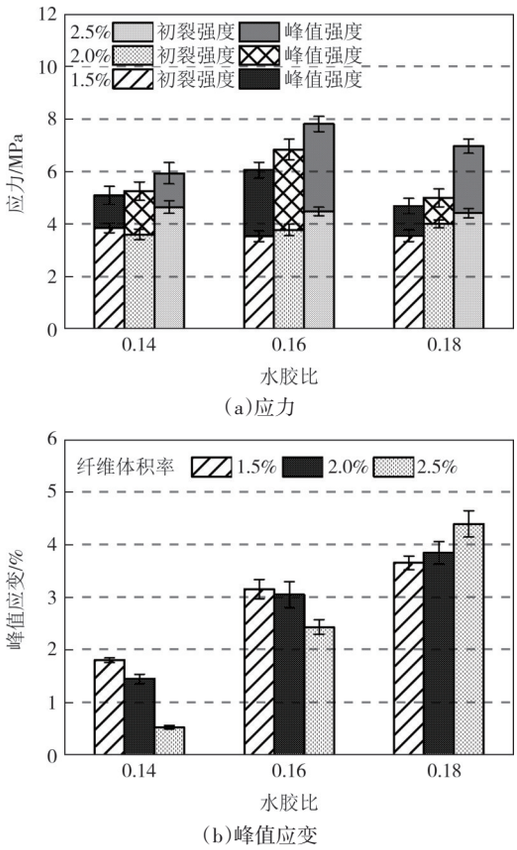


图4 水胶比和纤维体积率对HSHDC拉伸力学性能的影响

Fig.4 Effect of water-binder ratio and fiber volume ratio on tensile mechanical properties of HSHDC

2.2.2 纤维体积率对抗拉强度和应变的影响

在相同水胶比下,HSHDC的抗拉强度随着纤维体积率的增加而增大.在水胶比为0.14时,纤维体积率为2.5%的HSHDC峰值应力比纤维体积率为2.0%和1.5%的HSHDC分别提高了13%和17%;在水胶比为0.16时,纤维体积率2.5%的HSHDC峰值应力比纤维体积率为2.0%和1.5%的HSHDC分别提高了14%和29%;在水胶比为0.18时,纤维体积率2.5%的HSHDC峰值应力比纤维体积率为2.0%和1.5%的HSHDC分别提高了39%和49%.

掺入纤维提高混凝土基体拉伸力学性能的原理主要有两个方面:一是纤维可以在混凝土受拉时分散应力,避免应力集中,从而提高抗拉强度;二是适量的纤维在混凝土出现裂缝时起到了桥接作用,防止裂缝进一步扩展.随着纤维体积率的增大,混凝土中纤维根数增多,对应力的分散作用和对裂缝的桥接作用增强,从而提升抗拉强度.

此外,在水胶比为0.14和0.16时,HSHDC的极限拉伸应变随着纤维体积率的增加而降低,在水胶比为0.18时,HSHDC的极限拉伸应变随着纤维体积

率的增加而增加. 当HSHDC的水胶比较低(0.14、0.16)时,纤维体积率的增加会导致纤维分布不均匀,削弱纤维的桥接作用,增加混凝土内部缺陷. 此外,PE纤维为疏水性纤维,与基体产生的化学黏结作用较弱,当PE纤维掺量过高而水胶比较小时,纤维不能完全被基体包裹,对基体的增强作用减弱;而当HSHDC的水胶比较高(0.18)时,纤维分布均匀,此时适当地增加纤维体积率对HSHDC的拉伸应变有利.

2.2.3　纤维种类和直径对抗拉强度和应变的影响

由表4和图5可知,对比直径相同、纤维种类不同的两组试件. 掺入PE-40纤维的试件峰值应力和极限拉伸应变高于掺入PVA-40纤维的试件. 掺入PE-40纤维的HSHDC的抗拉强度大约为掺入PVA-40纤维的1.4倍. 掺入PE-40纤维的HSHDC的极限拉伸应变约为掺入PVA-40纤维的2.4倍.

根据上述试验结果,掺入PE纤维比掺入PVA纤维更适合制备HSHDC. 一方面,PVA纤维具有亲水性,同时与基体产生摩擦力和化学黏结力作用,当PVA纤维掺入密实度高的高强基体中,纤维与基体间的摩擦力已经很大,再加上化学黏结力的作用,致使纤维和基体的结合面强度过高. 因此,在HSHDC受拉时,PVA纤维易被过早拉断而失效,此时,PVA纤维并未充分发挥其作用,导致HSHDC的拉伸性能较差;PE纤维的憎水性使其与砂浆机体之间仅存在摩擦力,比PVA纤维与基体的结合面强度更低. 因此,在HSHDC受拉时,PE纤维不易被过早拉断或拔出而失效. 另一方面,PE纤维抗拉强度和弹性模量比PVA纤维更高,可以更有效地抵抗外力,从而提升HSHDC的抗拉强度[26].

由图5可知,随着PE纤维直径的增加,HSHDC的拉伸力学性能变差. 掺入PE-35、PE-40纤维的HSHDC的峰值应力分别较掺入PE-22纤维的降低了21%和29%;极限拉伸应变分别降低了46%和88%.

综上,PE-22纤维比PE-35和PE-40纤维更适合制备HSHDC. 原因是在纤维的体积率和长度一定时,掺入纤维的直径越小,纤维的根数越多,所发挥的桥接作用越大[27]. 此外,在纤维掺量一定时,小直径纤维和混凝土的黏结面积更大,黏结力更大,纤维的增韧作用也更强[28].

2.3　能量吸收能力评价方法及因素分析

除了比较应力和应变之外,能量吸收能力也可以评价不同参数下HSHDC的拉伸力学性能. 混凝土在受拉状态下达到峰值应力前,纤维对应力的分散作用和对裂缝的桥接作用使混凝土吸收了较多能量,实现了稳态开裂. 因此,当混凝土达到峰值应力前的能量吸收能力较强时,混凝土往往更易实现多裂缝开展,具有更高的韧性,从而提升混凝土的拉伸力学性能.

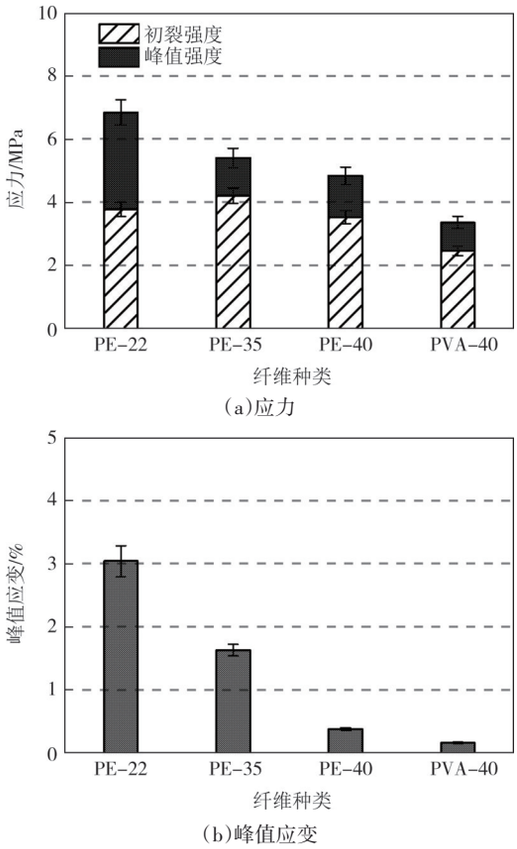


图5　纤维种类和纤维直径对HSHDC拉伸力学性能的影响

Fig.5　Effect of fiber type and fiber diameter on tensile mechanical properties of HSHDC

Wille等[29]和Yu等[30]定义了变量g为峰值前应变能密度,反映了混凝土达到峰值应力前的能量吸收能力,从能量角度评价了混凝土的力学性能. g是对拉伸过程中峰值应力之前的应力应变进行累积,即材料的应力-应变曲线在达到峰值应力之前所包围的面积. 如图6所示,图中,σ_e、σ_{ck}分别为混凝土的弹性极限应力和峰值应力,ε_e、ε_{ck}分别为混凝土的弹性极限应变和极限应变. 根据式(2)计算g值.

$$g = \int_0^{\varepsilon_{ck}} \sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{2}$$

g值从能量角度反映HSHDC的拉伸力学性能,g值越大,HSHDC拉伸力学性能越好. Wille等[29]通过计算掺入钢纤维的UHPC的g值,得出UHPC的g值

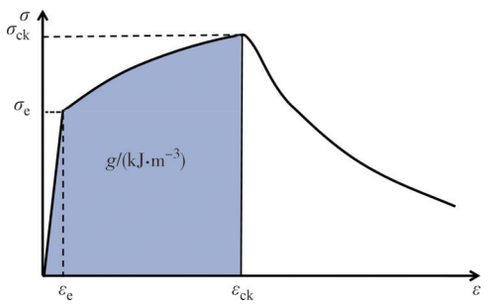


图6 峰值应力前的能量吸收能力g[29]

Fig.6 Energy absorption capacity before peak stress g[29]

基本在25~90 kJ/m^{3}之间.

本文根据式(2)对12组不同参数的HSHDC试件的应力-应变曲线求取g值,结果如表5所示.

表5 不同试件峰值前应变能密度g

Tab.5 Strain energy density g before peak of different specimens

试件名称	g/(kJ·cm^{-3})
E22-2.5%-0.14	41.2
E22-2.0%-0.14	66.2
E22-1.5%-0.14	29.8
E22-2.5%-0.16	151.8
E22-2.0%-0.16	169.8
E22-1.5%-0.16	152.1
E22-2.5%-0.18	243.1
E22-2.0%-0.18	155.6
E22-1.5%-0.18	153.2
E35-2.0%-0.16	51.1
E40-2.0%-0.16	15.8
A40-2.0%-0.16	4.4

2.3.1 水胶比对峰值前应变能密度的影响

由表5和图7可知,0.14水胶比下的三组不同纤维体积率的试件g值总体较低,都在100 kJ/cm^{3}以下;0.16和0.18水胶比下不同纤维体积率的试件g值总体较高,都在150 kJ/cm^{3}以上.这反映了0.16和0.18两种水胶比下的HSHDC的能量吸收能力较强,且优于UHPC(g=25~90 kJ/cm^3).

PE纤维作为憎水性纤维,其与混凝土基体的化学黏结作用较弱.但由于HSHDC是一种高强基体,其密实度比普通混凝土基体更大.因此,当PE纤维掺入HSHDC时,其与混凝土基体间的化学黏结作用比与普通混凝土基体的更强.当水胶比较小时,纤维被砂浆包裹所产生的黏结力进一步增大,使得试件在受拉时PE纤维更易被拉断而非拔出,当水胶比适中时,纤维被砂浆包裹所产生的黏结力减小,试件受拉时被拔出的PE纤维数量增多.由于纤维在拔出时

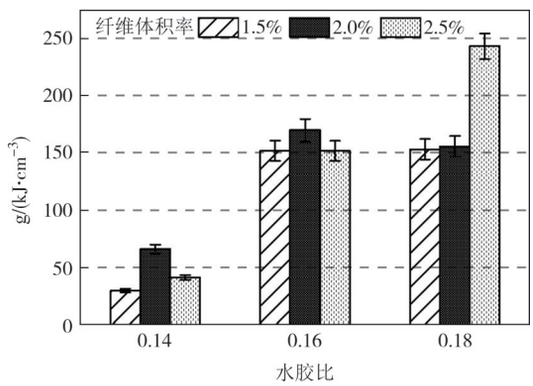


图7 水胶比和纤维体积率对峰值前应变能密度g的影响

Fig.7 Effect of water-binder ratio and fiber volume ratio on strain energy density g before peak

产生的能量高于纤维被拉断产生的能量[31],因此,对于HSHDC,适当增加水胶比有利于提升试件的能量吸收能力,从而提高试件的拉伸韧性.

2.3.2 纤维体积率对峰值前应变能密度的影响

对比相同水胶比下不同纤维体积率的试件可以发现,在水胶比为0.14和0.16时,随着纤维体积率的增加,试件峰值前应变能密度先增大后减小,g值在纤维体积率为2.0%时达到最大;在水胶比为0.18时,随着纤维体积率的增加,试件峰值前应变能密度增大,g值在纤维体积率为2.5%时达到最大.总的来说,水胶比为0.18、纤维体积率为2.5%的试件E22-2.5%-0.18、峰值前应变能密度最大,g值达到了243.1 kJ/cm^3.

掺入基体中的纤维通过形成三维网格结构提升基体的强度和变形能力.在水胶比过低(0.14)时,掺入砂浆基体内部的纤维无法均匀分布,形成的三维网格结构数量较少.此时,当纤维的体积率增大,掺入HSHDC内部的纤维易发生结团,增加混凝土的内部缺陷,从而降低HSHDC的拉伸韧性,使峰值前应变能密度g较低.在水胶比较高(0.18)时,纤维易均匀分布在混凝土中,形成的三维网格结构数量较多.此时,适当地增加纤维体积率能够有效填充HSHDC内的三维网格结构,提升试件的拉伸韧性.

2.3.3 纤维种类和直径对峰值前应变能密度的影响

1)由表5和图8可知,在其他参数相同的条件下,掺入PE纤维的E40-2.0%-0.16试件峰值前应变能密度大于掺入PVA纤维的试件A40-2.0%-0.16.掺入PE-40纤维的试件的g值大约为PVA-40纤维的3.6倍.这两种纤维与基体的结合面强度与拉伸力学性能的关系涉及裂缝在开裂试样中稳定扩展的前提即能量准则.能量准则要求纤维的桥接余能J_b'大

于裂缝尖端断裂韧度 J_{tip}. Li[3]给出了裂缝稳定开裂的原理示意图(图 9),并根据 Marshall 和 Cox[4]分析的桥接能的积分算法,给出了非连续短纤维桥接裂缝时的 J_{tip} 和 J_b' 的计算公式,如下:

$$J_{tip} = \sigma_{ss}\delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta)\mathrm{d}\delta \tag{3}$$

$$J_b' = \sigma_0\delta^* - \int_0^{\delta^*} \sigma(\delta)\mathrm{d}\delta \tag{4}$$

式中:J_{tip} 为裂缝尖端断裂韧度;J_b' 为纤维的桥接余能;σ_{ss}、δ_{ss} 分别为裂缝稳定扩展时的应力和对应裂缝开口宽度;σ_0、δ^* 分别为纤维的最小桥接应力和对应的裂缝开口宽度.

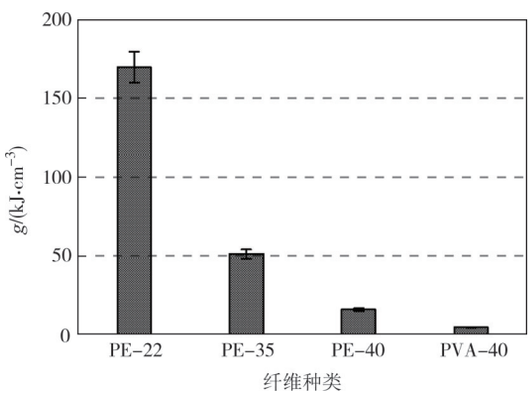


图 8　纤维种类和纤维直径对峰值前应变能密度 g 的影响

Fig.8　Effect of fiber type and fiber diameter on strain energy density g before peak

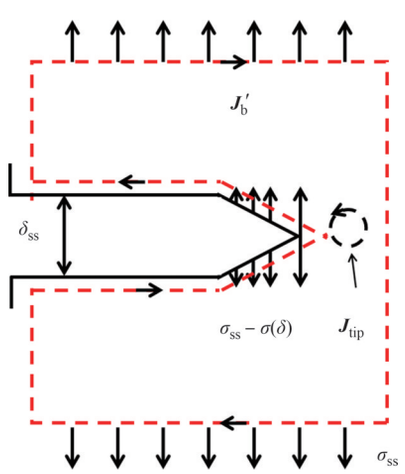


图 9　裂缝稳定开裂原理[3]

Fig.9　The principle of crack stability propagation[3]

PVA 纤维与基体间的结合面强度高,而其自身强度和弹性模量较低,致使其在试件的拉伸过程中易被拉断,对应裂缝开口宽度 δ^* 较小. 根据式(4)可知,纤维的桥接余能 J_b' 与 δ^* 成正比,在其他条件不变的前提下,当裂缝开口宽度 δ^* 较小时,纤维的桥接余能 J_b' 也会较小,不易满足能量准则的要求 $J_{tip} \leqslant J_b'$. 当纤维的桥接余能小于裂缝尖端断裂韧度时,纤维无法提供突破裂缝尖端断裂韧度所需的能量,从而使应力无法传回基体,引发新的裂缝. 试样开裂后很快失效,这直接导致极限拉伸应力及应变较低.

PE 纤维不仅与基体间的结合强度较低,而且其强度和弹性模量较高,在试件的拉伸过程中更易被拔出而非拉断. 由于纤维在拔出时产生的能量高于纤维断裂产生的能量[31],因此,掺入 PE 纤维的 HSHDCC 的能量吸收能力更强. 同时,在高强基体中,纤维与基体间的摩擦力较大,致使 PE 纤维与基体结合面强度不至于过低,不易导致纤维的最小桥接应力 σ_0 低于裂缝稳定扩展应力 σ_{ss},进而使 J_b' 小于 J_{tip}. 因此. 当 PE 纤维掺入高强基体中时,更易满足能量准则的 $J_{tip} \leqslant J_b'$ 条件. 此时,纤维能够将应力从裂缝平面传回基体以启动新的裂缝,如此往复,形成多裂缝开展,从而提升了基体的拉伸力学性能.

2) 由表 5 和图 8 可知,掺入三种不同直径纤维的 HSHDC 的峰值前应变能密度有较大区别,掺入 PE-22 纤维试件的 g 值分别达到了掺入 PE-35 和 PE-40 纤维试件的 3.3 倍和 10.7 倍,证明了掺入直径更小的 PE 纤维对提升 HSHDC 的能量吸收能力更有利. 在纤维体积率和长度不变的情况下,增大纤维直径减小了单位体积 HSHDC 中的纤维根数,从而减少能够传递应力,吸收能量的纤维数量,使得 HSHDC 在吸收的能量较低时就达到峰值应力.

3　HSHDC 微观形貌试验结果及分析

图 10 和图 11 为具有优异应变硬化能力的 E22-2.5%-0.18 试件的微观形貌测试结果. 由图 10 可知,HSHDC 的微观结构致密性较好,没有明显的孔洞和裂纹. 这是由于 HSHDC 内部具有更优的颗粒级配,能够改善其孔隙结构和致密性. 此外,掺入 HSHDC 中的矿物掺含料含二氧化硅、活性氧化铝等活性组分,这些活性组分与氢氧化钙反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙或水化硫铝酸钙等产物,进一步优化 HSHDC 的孔隙结构,提升 HSHDC 的力学性能.

从图 11(a)可以看出,掺入 HSHDC 中的 PE 纤维表面存在部分水化产物,说明 PE 纤维与基体结合良好. 此外,还可以看到 PE 纤维的直接拉伸断裂. 由于 HSHDC 是一种高强基体,其密实度较高. 因此 PE 纤维掺入 HSHDC 时,其与混凝土基体间的化学黏结作用比与普通混凝土基体的更强,会有部分 PE 纤维在基体受拉时发生断裂.

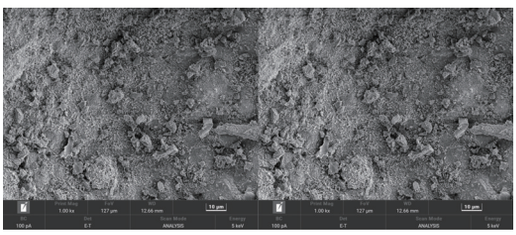
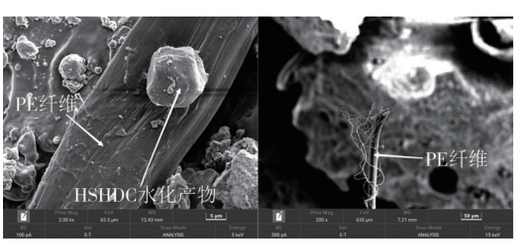


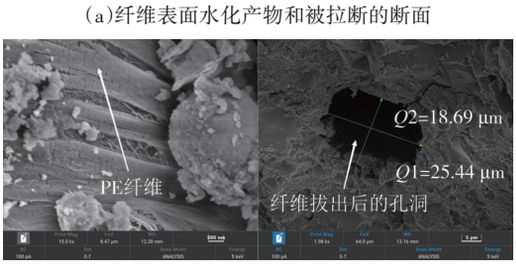
图 10 HSHDC 微观形貌的 SEM 图

Fig.10 SEM image of HSHDC micromorphology

图 11(b)显示了在试件中留下的纤维拔出孔,表明了当 HSHDC 承受拉伸荷载时,PE 纤维从基体中拔出.此外,还可以看出 PE 纤维根部明显的磨损和划痕,表明了 PE 纤维在混凝土破坏时发生了滑移.这是由于 PE 纤维为憎水性纤维,在混凝土受拉破坏时更易被拔出.此时,由于 PE 纤维的一部分嵌入混凝土基体中,在纤维拔出过程中,纤维表面被基体划伤,从而消耗大量能量,起到了增韧的作用.由于纤维在拔出时产生的能量高于纤维断裂产生的能量,因此图 11(b)也展现了 HSHDC 优异的能量吸收能力.



(a)纤维表面水化产物和被拉断的断面



(b)纤维被拉断的断面和滑移痕迹

图 11 HSHDC 内部纤维破坏的 SEM 图

Fig.11 SEM image of fiber destruction in HSHDC

4 结 论

1)合适的水胶比可以改善 HSHDC 中纤维-基体界面从而提升混凝土的拉伸力学性能.HSHDC 的抗拉强度随着水胶比的增加先增大后降低,在水胶比为 0.16 时达到最大.极限拉伸应变随着水胶比的增加而增大.

2)HSHDC 的抗拉强度随着纤维体积率的增加而增大;极限拉伸应变在水胶比较低时随着纤维体积率的增加而降低,水胶比较高时规律相反.

3)掺入 PE 纤维的 HSHDC 的拉伸力学性能比掺入 PVA 纤维的更好,掺入小直径 PE 纤维的 HSHDC 的拉伸力学性能更好.

4)0.14 水胶比下的 HSHDC 峰值前应变能密度较小;0.16 和 0.18 水胶比下的 HSHDC 的峰值前应变能密度较大,且大于 UHPC;掺入 PE 纤维的试件峰值前应变能密度大于掺入 PVA 纤维的试件;掺入直径更小的 PE 纤维对提升 HSHDC 的能量吸收能力更有利.

5)在 SEM 下观察到 PE 纤维的根部划痕、被拉断的断面以及拔出后留下的孔洞.验证了掺入的 PE 纤维在 HSHDC 破坏时发生了滑移、和拉断和拔出,从微观层面反映了 HSHDC 具有优良的拉伸力学性能.

参考文献

[1] KONG H J, BIKE S G, LI V C. Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(3): 301-309.

[2] KIM Y Y, KONG H J, LI V C. Design of engineered cementitious composite (ECC) suitable for wet-mix shotcreting [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(6): 511-518.

[3] LI V C. From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1993, 471: 1-12.

[4] MARSHALL D B, COX B N. A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites [J]. Mechanics of Materials, 1988, 7(2): 127-133.

[5] LI V C, LEPECH M D, WANG S X, et al. Development of green ECC for sustainable infrastructure systems [C]//Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. Iowa: Iowa State University, 2004, 181-192.

[6] 高英力, 冯心崚, 龙国鑫, 等. 混杂纤维-尾矿砂 ECC 配合比优化及疲劳性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(5): 1785-1793.
GAO Y L, FENG X L, LONG G X, et al. Ratio optimization and fatigue performance research of mixed fiber-tailing sand ECC [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(5): 1785-1793. (in Chinese)

[7] 胡静, 张品乐, 吴磊, 等. 基于响应面法的 ECC 基体力学性能研究与配合比优化[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊 2): 173-177.
HU J, ZHANG P L, WU L, et al. Study on mechanical properties of cementitious matrix based on response surface method and optimization of the fitting ratio [J]. Materials Reports, 2022, 36(Sup.2): 173-177. (in Chinese)

[8] 李晓琴, 杜茜, 战越, 等. 基于微观力学和断裂力学试验方法的MMFM-ECC配合比设计[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 307-314.
LI X Q, DU X, ZHAN Y, et al. MMFM-ECC design method based on micro mechanics and fracture mechanics[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2018, 40(2): 307-314.(in Chinese)

[9] 李晓琴,杨潇,丁祖德,等. 基于UDEM-ACE方法的ECC配合比优化设计[J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2354-2361.
LI X Q, YANG X, DING Z D, et al. Optimized mix proportion design of ECC based on the UDEM-ACE method[J]. Materials Reports,2019,33(14):2354-2361.(in Chinese)

[10] RANADE R, LI V C, STULTS M D, et al. Composite properties of high-strength, high-ductility concrete [J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(4): 413-422.

[11] RANADE R, LI V C, HEARD W F. Tensile rate effects in high strength-high ductility concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2015(68): 94-104.

[12] RANADE R, HEARD W F, WILLIAMS B A. Multi-scale mechanical performance of high strength-high ductility concrete [M]//Dynamic Behavior of Materials, Volume 1. Cham: Springer International Publishing,2016:93-101.

[13] YU K Q, LU Z D, DAI J G, et al. Direct tensile properties and stress - strain model of UHP-ECC[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2020,32(1): 04019334.

[14] ZHANG Z G, YUVARAJ A, DI J, et al. Matrix design of light weight, high strength, high ductility ECC [J]. Construction and Building Materials,2019,210:188-197.

[15] 陆洲导,林晨旭,余江滔,等. 可用于无钢筋建造的超强超韧水泥基复合材料[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(6): 880-884.
LU Z D,LIN C X,YU J T,et al. High strength ultra-high ductile cementitious composite developed for steel-free construction[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(6): 880-884.(in Chinese)

[16] LEI D Y, GUO L P, CHEN B, et al. The connection between microscopic and macroscopic properties of ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC)[J]. Composites Part B:Engineering,2019,164:144-157.

[17] 高强高性能混凝土用矿物外加剂: GB/T 18736—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Mineral admixtures for high strength and high performance concrete: GB/T 18736—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China,2018.(in Chinese)

[18] YU K Q, YU J T, DAI J G, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [J]. Construction and Building Materials, 2018(158): 217-227.

[19] 温得成, 魏定邦, 吴来帝. 基于MAA模型的UHPC基体配合比设计和特性分析[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(7): 693-699.
WEN D C, WEI D B, WU L D, et al. Research on mix design and characteristics of UHPC matrix mixture based on MAA model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7): 693-699. (in Chinese).

[20] SHARMA R L, PANDEY S P. Influence of mineral additives on the hydration characteristics of ordinary Portland cement [J]. Cement and Concrete Research,1999,29(9):1525-1529.

[21] 冯乃谦. 高性能混凝土的结构、性能与粉体效应[J]. 混凝土与水泥制品,1996(2):6-13.

[22] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) [J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2003,1(3):215-230.

[23] 高强混凝土结构技术规程:CECS 104—1999[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
Technical Specification for High-Strength Concrete Structures: CECS 104—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese)

[24] YOKOTA H, ROKUGO K, SAKATA N. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks[C]//High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Tokyo: Springer, 2008: 2.

[25] 李艳,梁兴文,刘泽军. 高性能生态型建筑材料PVA-ECC的试验研究[J]. 工业建筑,2011,41(4):97-102.
LI Y, LIANG X W, LIU Z J. Experimental research on preparation of ecological cementitious composites pva-ecc [J]. Industrial Construction, 2011, 41(4): 97-102.(in Chinese)

[26] 赵胜前,游庆龙,李京洲,等. 改性聚酯纤维对机场水泥混凝土的增韧阻裂效果分析[J]. 材料导报, 2024, 38(13):306-313.
ZHAO S Q, YOU Q L, LI J Z, et al. Analysis of toughening and cracking resistance effect of modified polyester fiber on airport cement concrete[J]. Materials Review, 2024, 38(13):306-313.(in Chinese)

[27] 寇佳亮,邓明科,梁兴文. 延性纤维增强混凝土单轴拉伸性能试验研究[J]. 建筑结构,2013,43(1):59-64.
KOU J L, DENG M K, LIANG X W. Experimental study of uniaxial tensile properties of ductile fiber reinforced concrete[J]. Building Structure,2013,43(1):59-64.(in Chinese)

[28] 杨家盛, 邓明科, 张晴晴, 等. 纤维特征参数对HES-HDC单轴拉伸性能的影响及拉伸韧性评价方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 130-140.
YANG J S, DENG M K, ZHANG Q Q, et al. Effect of fiber characteristics parameters on uniaxial tensile properties of HES-HDC and evaluation method of tensile toughness[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2024,51(3):130-140.(in Chinese)

[29] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading [J]. Cement and Concrete Composites,2014,48:53-66.

[30] YU K Q, DING Y, LIU J P, et al. Energy dissipation characteristics of all-grade polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC)[J]. Cement and Concrete Composites,2020,106:103459.

[31] KANDA T, LI V C. Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,1998,10(1):5-13.