

文章编号:1007-9629(2023)07-0809-08

聚乙烯醇纤维和碳纳米管改性对混凝土力学性能的影响

徐阳晨, 邢国华*, 黄 娇, 吴欣宇, 陆勇健

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为研究聚乙烯醇(PVA)纤维和碳纳米管(CNTs)对混凝土力学性能的影响,制备了不同PVA纤维和CNTs掺量的混凝土试件来进行抗压、劈裂抗拉以及抗折试验,并通过数字图像相关(DIC)技术对试件在抗折试验下的裂缝扩展进行了全过程监测.结果表明:当PVA纤维体积分数和CNTs质量分数均为0.15%时,混凝土试件的力学性能最优;DIC应变云图直观展示了混凝土试件在抗折试验过程中的裂缝扩展,可以对裂缝的位置以及发育方向进行准确地判别;PVA纤维和CNTs通过桥接作用延缓了水泥基体中微裂缝的发展,改善了混凝土的微观结构,表现出正混杂效应.

关键词:混凝土;聚乙烯醇纤维;碳纳米管;力学性能;数字图像相关技术;微观结构

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.014

Effect of PVA Fiber and Carbon Nanotubes Modification on Mechanical Properties of Concrete

XU Yangchen, XING Guohua*, HUANG Jiao, WU Xinyu, LU Yongjian

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To study the effect of polyvinyl alcohol (PVA) fiber and carbon nanotubes (CNTs) on the mechanical properties of concrete, the concrete specimens reinforced with different content of PVA fiber and CNTs were prepared for compressive, splitting tensile and flexural tests, and the crack propagation of specimens under the flexural test was monitored by digital image correlation (DIC) technology. The results show that 0.15% PVA fiber and 0.15% CNTs can make concrete specimen obtain the best mechanical properties. DIC strain nephogram visually describes the crack propagation of specimen during the flexural test, which can be applied to judge accurately the crack location and development direction. PVA fibers and CNTs delay the propagation of microcracks and improve the microstructure of concrete by bridging microcracks in cement matrix, exhibiting a positive hybrid effect.

Key words: concrete; polyvinyl alcohol fiber; carbon nanotube; mechanical property; digital image correlation (DIC); microstructure

混凝土在服役过程中容易产生裂缝,从而影响力学和耐久性能^[1].研究表明^[2],在混凝土中掺入纤维是抑制其裂缝产生和扩展的一种有效方法.

近年来,碳纳米管(CNTs)由于其优异的力学性能,逐渐成为研究的热点.研究发现^[3-4],CNTs既能发

挥纳米材料的微填充作用,增加混凝土的密实度,又能充当微纤维,发挥桥接作用,抑制了混凝土微裂缝的扩展和产生.聚乙烯醇(PVA)纤维是一种人工合成纤维,具有较高的抗拉强度和弹性模量.PVA纤维的掺入可以提高混凝土的力学和耐久性能,同时与其他纤维相

收稿日期:2022-08-11; 修订日期:2022-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178106);陕西省杰出青年基金资助项目(2021JC-26)

第一作者:徐阳晨(1996—),男,河南周口人,长安大学博士生. E-mail: 2020028014@chd.edu.cn

通讯作者:邢国华(1983—),男,内蒙古呼和浩特人,长安大学教授,博士生导师,博士. E-mail: ghxing@chd.edu.cn

比,PVA纤维对混凝土的裂缝控制更有优势^[5].若将PVA纤维和CNTs混杂掺入,则可以同时抑制混凝土的微观和宏观裂缝.Sindu等^[6]研究表明,同时掺入PVA纤维和CNTs有效地桥接了水泥基复合材料的多尺度裂缝,抑制了裂缝的扩展.Cheng等^[7]研究发现,PVA纤维和CNTs的掺入使复合材料具有优异的裂缝控制能力.此外,PVA纤维与水泥基体之间有更好的相容性和黏结力^[8],而CNTs的存在可以增强这种黏结力,进而增强PVA纤维对混凝土裂缝的控制.

基于此,本文采用PVA纤维和CNTs作为增强材料,制备PVA纤维及CNTs增强混凝土复合材料,通过抗压、劈裂抗拉及抗折试验来研究单掺和复掺PVA/CNTs对混凝土力学性能的影响,以期能充分发挥PVA纤维与CNTs在宏观和微观尺度上抑制混凝土裂缝发展中的互补作用.同时,采用3D数字图像相关技术(DIC)对混凝土试件在抗折试验过程中裂缝的分布以及扩展过程进行实时监测.此外,通过扫描电镜(SEM)观察PVA纤维和CNTs增强混凝土的微观结构,继而探讨PVA纤维和CNTs对混凝土的增强机制.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用安徽海螺水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积为 $1.439 \text{ m}^2/\text{g}$,密度为 $3\,120 \text{ kg}/\text{m}^3$,化学组成(质量分数,文中涉及的组成、减水率除特别说明外均为质量分数)如表1所示.细集料采用河砂,表观密度为 $2\,580 \text{ kg}/\text{m}^3$,细度模数为2.8.粗集料为连续级配的碎石(CAs),粒径为5~20 mm.CNTs为中国科学院成都有机化工有限公司生产的羧基化多壁碳纳米管,主要性能参数如表2所示.PVA纤维购自可乐丽上海某公司,物理性能如表3所示.减水剂采用减水率为30%的粉末状聚羧酸高效减水剂(SP).水采用普通自来水.

表1 水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition of cement

							$w/\%$
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	IL	
63.8	20.6	4.5	2.7	2.3	2.2	1.6	

表2 CNTs的主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of CNTs

Diameter/nm	Length/ μm	Purity(by mass)/%	Specific surface area/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	True density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$w(-\text{COOH})/\%$
10-30	10-30	95	110	2.1	1.55

表3 PVA纤维的物理性能

Table 3 Physical properties of PVA fiber

Length/mm	Diameter/mm	Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%
12	0.04	1.3	1560	41	6.5

1.2 配合比设计

本试验参考以往的研究^[9],分别制备了单掺PVA纤维和CNTs的增强混凝土,然后保持CNTs掺量不变,改变PVA纤维的掺量来研究复掺PVA/

CNTs对混凝土力学性能的影响(见表4).

1.3 试样制备

由于碳纳米管很难均匀的分布在水泥基复合材料中,导致不能发挥其增强功能.文献[10]表明羧基

表4 混凝土的配合比

Table 4 Mix proportions of concretes

Specimen No.	Mix proportion/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				$w(\text{SP})/\%$	$w(\text{CNTs})/\%$	$\varphi(\text{PVA})/\%$
	Cement	Sand	CAs	Water			
C0	469	610	1183	188	0.15	0	0
P15	469	610	1183	188	0.15	0	0.15
C15	469	610	1183	188	0.15	0.15	0
CP5	469	610	1183	188	0.15	0.15	0.05
CP10	469	610	1183	188	0.15	0.15	0.10
CP15	469	610	1183	188	0.15	0.15	0.15
CP20	469	610	1183	188	0.15	0.15	0.20
CP25	469	610	1183	188	0.15	0.15	0.25

官能团有助于碳纳米管的分散,而与聚羧酸减水剂一起使用时也可以在一定程度上分散CNTs^[11].因此,本试验采用羧基化多壁碳纳米管,并在试样制备过程中,首先将CNTs和聚羧酸减水剂混合到水中,使用高速电动搅拌机机械搅拌10 min,制备成分散均匀的CNTs悬浮液;然后,将水泥、砂、碎石依次倒入搅拌机中搅拌1 min;接着,将PVA纤维倒入搅拌机中继续干拌1 min;最后,将CNTs悬浮液倒入搅拌机中搅拌3 min.搅拌完成后将新拌混凝土倒入已刷油的模具中,放在振动台上振实以消除气泡对试样的影响.之后将试样放置于25℃的室内,并且用塑料膜覆盖以防止其表面水分蒸发,24 h后脱模.脱模后的试样将在水中进一步养护至28 d.

1.4 试验方法

新拌混凝土的坍落度试验参照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行.混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度试验均参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行.抗压强度和劈裂抗拉强度试验采用尺寸为100 mm的立方体试件,抗折强度试验采用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件,每组试验准备3个平行试件,结果取其平均值.

采用WAW-31000型万能试验机对混凝土试件进行抗压、劈裂抗拉和抗折试验.其中:抗压和劈裂抗拉试验的加载方式采用力控制,加载速率分别为0.5 MPa/s和0.05 MPa/s;抗折试验采用位移加载方式,加载速率为0.05 mm/min.同时,利用3D DIC对抗折试验中试件的裂缝发展过程进行全程观测.

表6 混凝土的抗压和劈裂抗拉强度

Table 6 Compressive and splitting tensile strength of concrete

Specimen No.	Compressive strength/ MPa	Growth rate of compressive strength/%	Splitting tensile strength/ MPa	Growth rate of splitting tensile strength/%
C0	43.08		3.10	
P15	44.62	3.58	4.13	33.23
C15	45.37	5.32	4.01	29.35
CP5	47.37	9.96	4.05	30.65
CP10	47.01	9.12	4.10	32.26
CP15	46.80	8.64	4.25	37.10
CP20	46.46	7.85	4.32	39.35
CP25	43.03	-0.12	3.86	24.52

(1)单掺PVA纤维和CNTs均可提高混凝土的抗压强度.复掺PVA/CNTs后,混凝土的抗压强度较单掺时有所提高,当PVA纤维掺量为0.05%时强度达到最大值.继续增大PVA纤维的掺量,混凝土的抗压强度逐渐降低.当PVA纤维掺量为0.20%时,混凝土的抗压强度甚至低于对照组.

2 结果与讨论

2.1 坍落度

表5为PVA纤维和CNTs对混凝土坍落度的影响.由表5可知:

(1)单掺PVA纤维略微降低了混凝土的坍落度,单掺CNTs则显著降低了混凝土的坍落度.这是因为CNTs的尺寸达到纳米级,具有较大的比表面积,可以吸附更多的水,增大了混凝土的需水量,从而使新拌混凝土的坍落度降低.

(2)复掺PVA/CNTs时混凝土的坍落度低于单掺PVA纤维和CNTs混凝土的坍落度,且随着PVA纤维掺量的增加,混凝土的坍落度逐渐降低.这是因为PVA纤维会互相搭接形成“网络结构”,阻碍了新拌混凝土的流动.随着PVA纤维掺量的增加,这种“网络结构”逐渐增多,降低了混凝土的流动性^[12].

表5 各组混凝土的坍落度

Table 5 Concrete slump of each group

Specimen No.	Slump/ mm	Growth rate/%	Specimen No.	Slump/ mm	Growth rate/%
C0	174		CP10	107	-38.51
P15	155	-10.92	CP15	100	-42.53
C15	122	-29.89	CP20	89	-48.85
CP5	115	-33.91	CP25	81	-53.45

2.2 PVA纤维和CNTs对混凝土力学性能的影响

2.2.1 抗压强度和劈裂抗拉强度

PVA纤维和CNTs对混凝土强度的影响如表6所示.由表6可见:

(2)相比于抗压强度,PVA纤维和CNTs对混凝土劈裂抗拉强度的提升效果更为显著.与试件C0相比,试件P15和C15的劈裂抗拉强度分别提高了33.23%和29.35%.复掺PVA/CNTs后,混凝土的劈裂抗拉强度随着PVA纤维掺量的增加呈现出先增大后降低的趋势.当PVA纤维掺量为0.20%时,

复掺PVA/CNTs混凝土的劈裂抗拉强度达到最大值,比对照组混凝土提高了39.35%。

2.2.2 抗折强度

表7为各组混凝土的28 d抗折强度,图1为混凝土试件典型的荷载位移曲线。由表7和图1可见:

(1)单掺PVA纤维和CNTs也能显著提高混凝土的抗折强度。与抗压强度、劈裂抗拉强度类似,复掺PVA/CNTs混凝土的抗折强度优于单掺PVA纤维和CNTs的混凝土,体现了PVA纤维和CNTs的“正混杂效应”。此外,复掺PVA/CNTs时,随着PVA纤维掺量的增加,混凝土的抗折强度先增大后降低。与试件C0相比,试件CP5、CP10、CP15、CP20和

CP25的抗折强度分别提高了14.80%、16.14%、19.28%、16.82%和11.66%。当PVA纤维掺量为0.15%时,混凝土的抗折强度取得最大值5.32 MPa。当PVA纤维掺量超过0.15%后,混凝土的抗折强度有所下降。

(2)所有试件在达到峰值荷载前均表现出近似的线性行为,并且在达到峰值荷载后曲线陡然下降,这与Sagar等^[13]的研究结果类似。PVA纤维和CNTs的掺入增大了混凝土试件的峰值荷载和位移。试件CP15的峰值荷载和位移分别为17.74 kN和0.712 mm,比试件C0高出了19.46%和33.83%,显示出良好的弯曲延性。

表7 混凝土的28 d抗折强度

Table 7 28 d flexural strength of concrete

Specimen No.	Flexural strength/MPa	Growth rate/%	Specimen No.	Flexural strength/MPa	Growth rate/%
C0	4.46		CP10	5.18	16.14
P15	5.16	15.70	CP15	5.32	19.28
C15	5.07	13.68	CP20	5.21	16.82
CP5	5.12	14.80	CP25	4.98	11.66

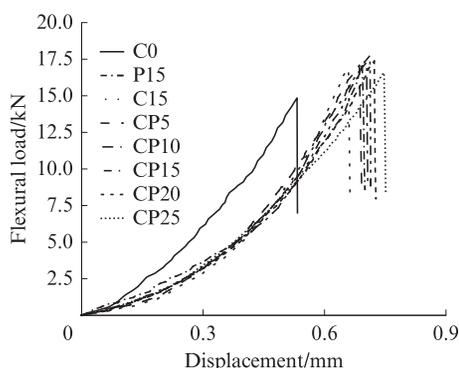


图1 PVA纤维和CNTs增强混凝土的抗折荷载-位移曲线
Fig. 1 Flexural load-displacement curves of PVA fibers and CNTs reinforced concrete

2.2.3 断裂能

荷载位移曲线下的面积代表了挠曲韧性,可用于评估PVA纤维和CNTs增强混凝土的断裂能^[14]。对图1的曲线进行积分可以得到单掺和复掺PVA/CNTs增强混凝土的断裂能(见图2)。由图2可见:与单掺CNTs相比,单掺PVA纤维显著提高了混凝土的断裂能。复掺PVA/CNTs混凝土的断裂能随着PVA纤维掺量的增加而逐渐增大;相对于试件C0,试件CP5、CP10、CP15、CP20和CP25的断裂能分别增加了29.41%、33.49%、37.58%、38.68%和48.35%。对比分析单掺和复掺PVA/CNTs混凝土试件的断裂能发现,PVA纤维对混凝土断裂能的提高发挥了重要的作用,这是因为PVA纤维的存在使得混凝土中裂缝的扩展需要消耗更多的能量,进而增

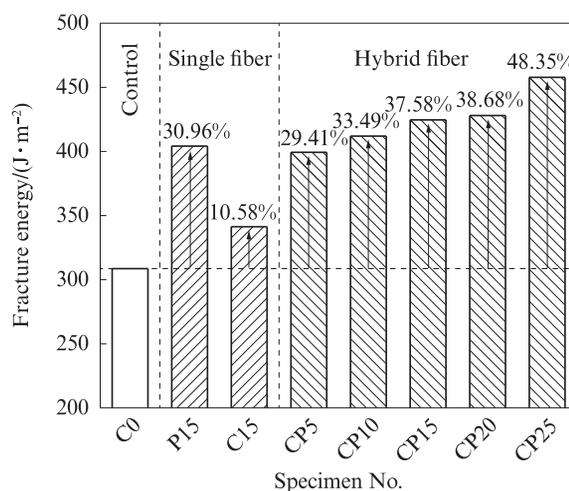


图2 单掺和复掺PVA/CNTs增强纤维混凝土的断裂能
Fig. 2 Fracture energy of reinforced concrete with single and composite PVA/CNTs

大了混凝土的断裂能^[15]。

2.3 基于DIC的弯曲裂缝分析

为了探索PVA纤维和CNTs增强混凝土在弯曲荷载作用下裂缝的发展规律,通过DIC图像处理,得到了所有试件的损伤应变云图,即试件的裂缝开展情况,如图3所示。由于所有试件的裂缝均在出现在跨中位置,因此取试件的中段(试件长度的三分之一)作为DIC图像。图像所处的2个阶段分别为0.9倍的峰值荷载(0.9 P_p)阶段和峰值荷载(P_p)阶段。

由图3可见:在0.9 P_p 阶段,所有试件均表现出较小的应变,未有裂缝产生;在 P_p 阶段,不同的试件表

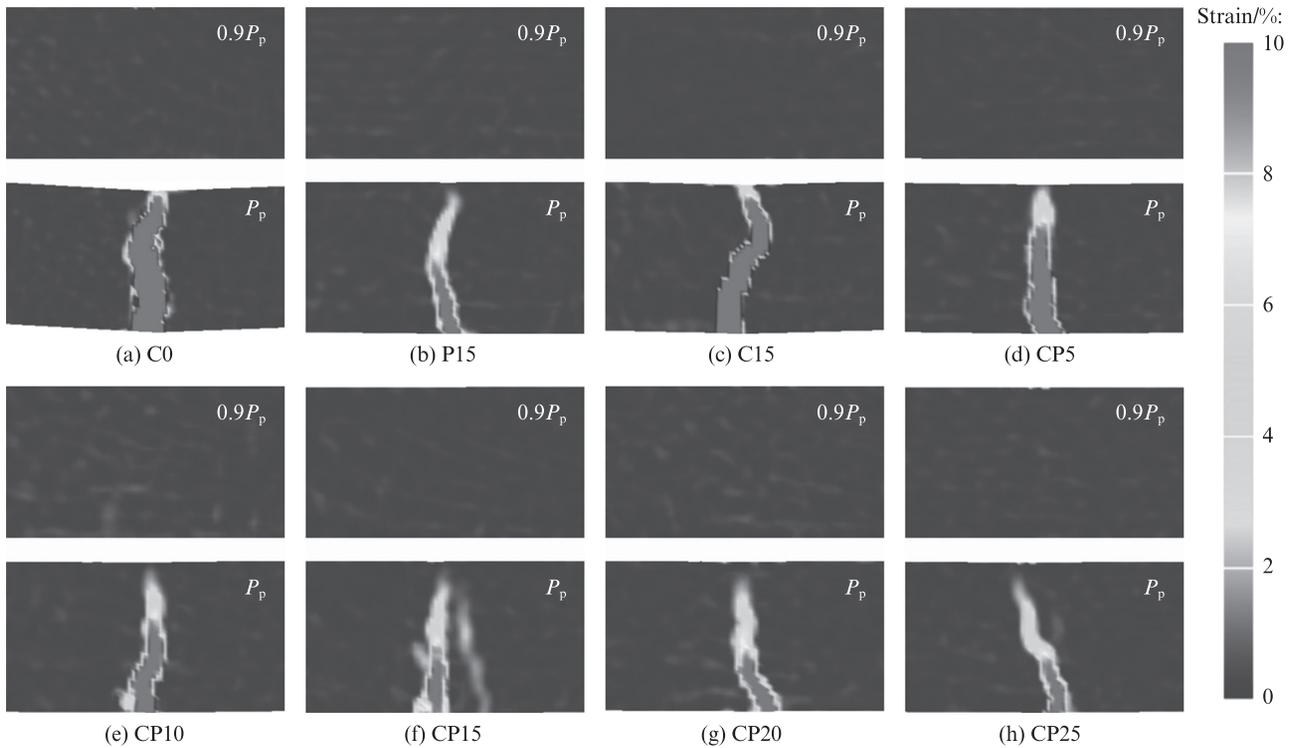


图3 试件在不同荷载下的应变云图

Fig. 3 Strain cloud diagrams of specimens under different loads

现出不同的损伤应变,试件出现裂缝;试件C0的应变带最宽,其高度贯穿了整个试件,表明试件此时已经完全断裂;单掺CNTs试件C15的应变带较宽,垂直高度达到试件高度的90%左右,表明试件在峰值荷载时并未完全断裂.此外,无论是单掺PVA纤维还是复掺PVA/CNTs,混凝土试件应变带的宽度和高度均显著减小,并且在复掺PVA/CNTs时,随着PVA纤维掺量的增大,试件应变带的宽度和高度逐渐降低.但当PVA纤维掺量超过0.15%时,对试件应变带的影响不大.对于一些肉眼难以观察的裂缝,也能在DIC的应变云图中清晰的反映出来.例如,试件CP15除了出现了1条应变较大的应变带,还有1条应变较小的应变带,表明试件在峰值荷载时出现2条裂缝.

通过DIC技术对PVA纤维和CNTs增强混凝土抗折试验的全过程分析,清楚直观地展示了在不同荷载作用下试件的裂缝发展过程.相比单掺CNTs混凝土试件,掺入PVA纤维后混凝土试件裂缝的高度和宽度明显变小.复掺PVA/CNTs后,混凝土试件在峰值荷载时的裂缝进一步减小,表明PVA纤维和CNTs能有效控制混凝土裂缝的开展.

2.4 PVA纤维和CNTs增强混凝土力学性能的综合评估

PVA纤维和CNTs对混凝土力学性能的影响如图4所示.由图4可见:相比单掺PVA纤维,单掺

CNTs在提高混凝土的抗压强度方面更有优势,但在提高混凝土劈裂抗拉和抗折强度方面不如PVA纤维;复掺PVA/CNTs时,低掺量(0.05%和0.10%)的PVA纤维更有利于提高混凝土的抗压强度;较高掺量(0.15%和0.20%)的PVA纤维在提高混凝土的劈裂抗拉和抗折强度方面效果显著;当掺量超过0.20%时,PVA纤维的掺入整体降低了混凝土的力学性能;当PVA纤维掺量为0.15%时,混凝土获得了较为平衡的力学性能.

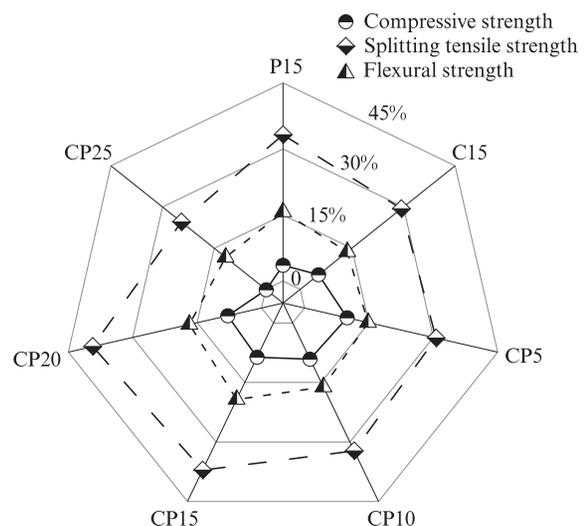


图4 PVA纤维和CNTs对混凝土力学性能的影响

Fig. 4 Effect of PVA fiber and CNTs on mechanical properties of concrete

2.5 PVA纤维和CNTs增强混凝土的微观结构

图5为混凝土的形貌.由图5可见:虽然CNTs能桥接和填充部分微裂缝,但在较大的裂缝之间没有桥接物质可以阻碍其发展,裂缝的长度和宽度相对较大(图5(a)、(b));由于PVA纤维的存在,基体内部的裂缝以微裂缝为主,但PVA纤维与基体之间存在间隙(图5(c));复掺PVA/CNTs后,基体内部的微裂缝明显减少,且PVA纤维与基体之间紧密结合,PVA纤维桥接在裂缝的两侧,这可以有效传递应力,降低裂缝尖端的应力集中,使裂缝两端

的水泥基体在PVA纤维的桥接作用下形成了黏连结构,有效的限制了裂缝的发展(图5(d));PVA纤维在水泥基体中相互搭接形成的三维网络结构也可以有效抑制裂缝的扩展(图5(e));从图5(c)、(d)中均可以观察到PVA纤维因脱黏滑移而留下的纤维沟槽,这可以消耗部分断裂能;此外,部分PVA纤维在桥接裂缝时被拔出(图5(f)),在被拔出时与水泥基体之间形成的摩擦力会消耗一定的能量,这也解释了PVA纤维增强混凝土试件断裂能的提升.

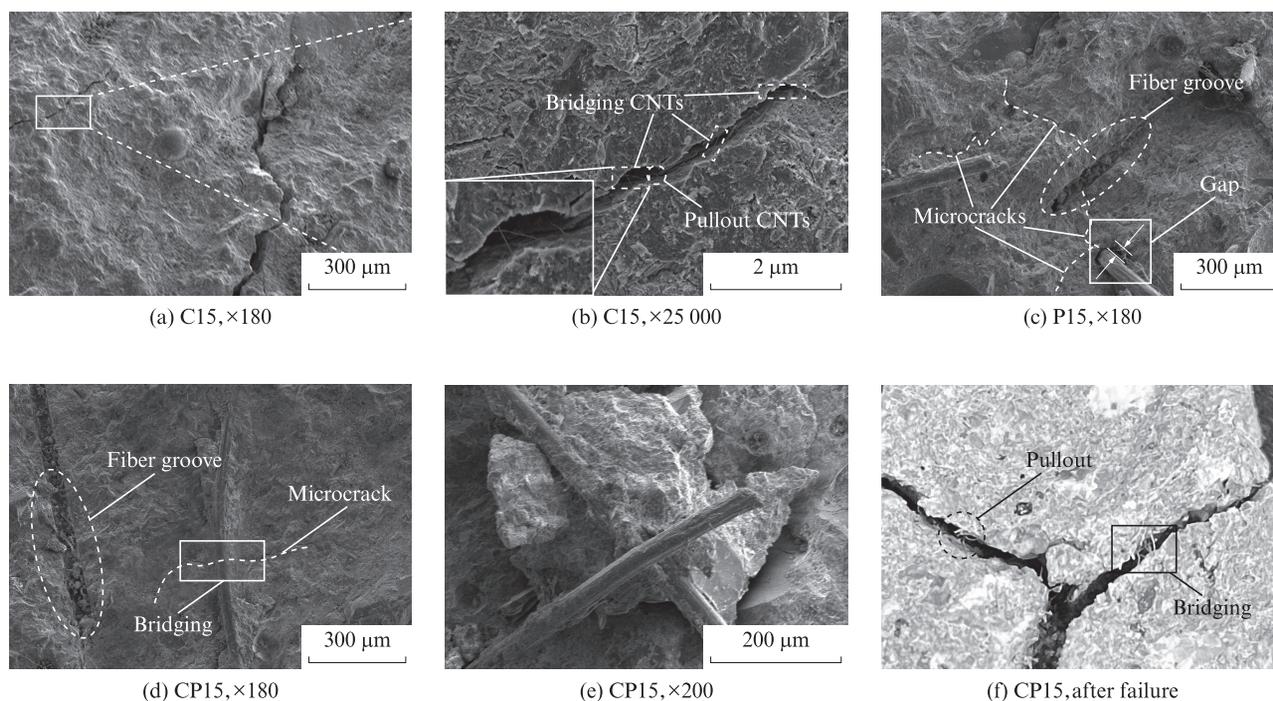


图5 混凝土的形貌
Fig. 5 Structure of concrete

2.6 PVA纤维和CNTs对混凝土的增强机制

由上述试验结果可知,单掺CNTs能够显著提高混凝土的力学性能.这是因为CNTs的微填充效应可以填充水泥水化产物之间的孔隙,细化基体的孔结构,提高了水泥基体的密实度^[16].其次,在CNTs和水泥基体之间的界面上存在3种力,即范德华力、机械咬合力和化学黏结力.其中,化学黏结力对界面的性质起着关键的作用.由于CNTs中的-COOH基团与水化硅酸钙或Ca(OH)₂中的-OH基团发生反应,增强了化学黏结力,从而改善了界面的微观结构^[17].此外,CNTs作为一种微纤维可以桥接混凝土内部的微裂缝,并抑制其扩展,增强了混凝土内部的薄弱部位,进而提高了混凝土的力学性能.与单掺CNTs类似,PVA纤维掺入后,混凝土的力学性能也得到了明显的提升.这是因为混凝土中乱向分布的

PVA纤维能够约束裂缝的发展,有助于提高混凝土的韧性和承载力.

复掺PVA/CNTs后,混凝土的力学性能优于分别单掺PVA纤维和CNTs混凝土的力学性能.从图5(d)可以看出,由于CNTs的存在,PVA纤维与水泥基体之间的界面过渡区更加致密,这有助于发挥PVA纤维的阻裂效应.同时,PVA纤维和CNTs具有不同的弹性模量和不同的尺度,二者混杂能够在混凝土裂缝发展的不同阶段和不同尺度上发挥桥接作用,减少裂缝的萌发,并抑制其形成贯穿裂缝.此外,在抗折试验中可以看到,复掺0.15%的PVA/CNTs混凝土试件还出现了多条裂缝的现象,这是因为PVA纤维在承受和传递荷载时,迫使主裂缝在跨越纤维时衍生出更多的次生裂缝^[18].值得注意的是,PVA纤维的掺量过高时则会降低复掺PVA/CNTs

混凝土的强度,因此PVA纤维的掺量不能过大。

3 结论

(1)单掺聚乙烯醇(PVA)纤维和碳纳米管(CNTs)显著提高了混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度.复掺PVA/CNTs后进一步增强了混凝土的力学性能,但增强效果并不明显.复掺时,0.15%掺量的PVA纤维和CNTs增强混凝土具有较为平衡的力学性能。

(2)单掺PVA纤维和CNTs均可以提高混凝土的断裂能,PVA纤维对混凝土断裂能的提升效果更显著.复掺时,随着PVA纤维掺量的增大,混凝土的断裂能逐渐增大.0.15%质量分数的CNTs和0.25%体积分数的PVA纤维将混凝土的断裂能提高48.35%。

(3)数字图像相关技术(DIC)清晰地表征了混凝土试件在抗折试验过程中的裂缝扩展行为,对于肉眼难以观察的微小裂缝,DIC也可以敏锐地捕捉,可将其应用于监测纤维增强混凝土的裂缝位置及开展过程。

(4)CNTs通过填充、桥接水泥基体中的微裂缝改善了普通混凝土的微观结构,增强了混凝土的力学性能.复掺PVA纤维和CNTs可以在不同尺度上桥接水泥基体中的裂缝,抑制裂缝的产生和扩展.此外,CNTs的存在使得PVA纤维和水泥基体之间有着更为致密的界面过渡区,进一步增强了二者之间的界面黏结性能.PVA纤维掺入后与CNTs表现出正混杂效应,宏观表现为混凝土力学性能的提高。

参考文献:

- [1] ALSHAGHEL A, PARVEEN S, RANA S, et al. Effect of multiscale reinforcement on the mechanical properties and microstructure of microcrystalline cellulose-carbon nanotube reinforced cementitious composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 149:122-134.
- [2] 牛旭婧,朋改非,何杰,等.多尺度钢纤维组合与碳纳米管对RPC力学性能影响[J].*建筑材料学报*, 2020, 23(1):216-223. NIU Xujing, PENG Gaifei, HE Jie, et al. Influence of multi-scale steel fiber combination and carbon nanotube on mechanical properties of reactive powder concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):216-223. (in Chinese)
- [3] NOCHAIYA T, CHAIPANICH A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(6):1941-1945.
- [4] WANG B M, HAN Y, LIU S. Effect of highly dispersed carbon nanotubes on the flexural toughness of cement-based composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 46:8-12.
- [5] WANG L, HE T S, ZHOU Y X, et al. The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 282:122706.
- [6] SINDU B S, SASMAL S. On the development and studies of nano-and micro-fiber hybridized strain hardened cementitious composite [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019, 19(2):348-359.
- [7] CHENG Z J, LU Y Y, AN J P, et al. Multi-scale reinforcement of multi-walled carbon nanotubes/polyvinyl alcohol fibers on lightweight engineered geopolymer composites [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 57:104889.
- [8] SANCHAYAN S, FOSTER S J. High temperature behaviour of hybrid steel-PVA fibre reinforced reactive powder concrete [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(3):769-782.
- [9] 郑冰森,陈嘉琪,施韬,等.多壁碳纳米管增强混凝土的断裂性能[J].*硅酸盐学报*, 2021, 49(11):2502-2508. ZHENG Bingmiao, CHEN Jiaqi, SHI Tao, et al. Fracture properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11):2502-2508. (in Chinese)
- [10] ALREKABI S, CUNDY A B, LAMPROPOULOS A, et al. Mechanical performance of novel cement-based composites prepared with nano-fibres, and hybrid nano-and micro-fibres [J]. *Composite Structures*, 2017, 178:145-156.
- [11] NALON G H, RIBEIRO J C L, PEDROTI L G, et al. Residual piezoresistive properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121:104104.
- [12] 张鹏,王磊,王娟,等.纳米CaCO₃和PVA纤维增强混凝土工作性及力学性能的研究[J].*混凝土与水泥制品*, 2020(3):42-45, 54. ZHANG Peng, WANG Lei, WANG Juan, et al. Study on the workability and mechanical properties of nano-CaCO₃ and PVA fiber reinforced concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(3):42-45, 54. (in Chinese)
- [13] SAGAR B, SIVAKUMAR M V N. Compressive properties and analytical modelling for stress-strain curves of polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291:123192.
- [14] RUAN Y F, HAN B G, YU X, et al. Carbon nanotubes reinforced reactive powder concrete [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112:371-382.
- [15] YU J, ZHANG M, LI G Y, et al. Using nano-silica to improve mechanical and fracture properties of fiber-reinforced high-volume fly ash cement mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239:117853.
- [16] 牛荻涛,何嘉琦,傅强,等.碳纳米管对水泥基材料微观结构及耐久性能的影响[J].*硅酸盐学报*, 2020, 48(5):705-717. NIU Ditao, HE Jiaqi, FU Qiang, et al. Effect of carbon nanotubes on microstructure and durability of cement-based materials [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(5):705-717. (in Chinese)