

文章编号:1007-9629(2024)06-0487-09

VAE 乳胶粉/碳纤维复合改性混凝土的力学性能

王志航¹, 白二雷^{1,*}, 周俊鹏², 刘高杰³, 杨宁⁴

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 中国人民解放军 93204 部队, 北京 100077; 3. 中国海警局直属第三局, 广东 广州 510006; 4. 中国人民解放军 75840 部队, 广东 广州 510000)

摘要:为探究醋酸乙烯酯-乙烯共聚物(VAE)乳胶粉和碳纤维对混凝土力学性能的混杂改性效果及机理,制备了1种VAE乳胶粉改性混凝土(VAEMC)、3种碳纤维改性混凝土(CFMC)和3种VAE乳胶粉/碳纤维复合改性混凝土(VAE/CFMC),测试了改性混凝土的电阻率和力学性能,并进行了扫描电镜试验和压汞试验.结果表明:VAE乳胶粉可以促进碳纤维的分散,VAE/CFMC的电阻率小于CFMC;与CFMC相比,VAE/CFMC的力学性能更佳;VAE乳胶粉与碳纤维具有“正混杂效应”,复掺VAE乳胶粉与碳纤维时,混凝土的力学性能呈现出“1+1>2”的复合增强效果;VAE乳胶粉可以优化CFMC的孔隙结构,细化其孔径,增强碳纤维/混凝土基体界面的物理结合,使碳纤维的破坏形式由拉滑破坏转变为拉断破坏.

关键词:混凝土;碳纤维;VAE乳胶粉;力学性能;正混杂效应;界面

中图分类号:TU528.043

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.002

Mechanical Properties of VAE Latex Powder/Carbon Fiber Co-modified Concrete

WANG Zhihang¹, BAI Erlei^{1,*}, ZHOU Junpeng², LIU Gaojie³, YANG Ning⁴

(1. School of Aviation Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 93204, People's Liberation Army of China, Beijing 100077, China; 3. The Third Bureau of China Maritime Police Bureau, Guangzhou 510006, China; 4. Unit 75840, People's Liberation Army of China, Guangzhou 510000, China)

Abstract: To explore the hybrid modification effect of vinyl acetate-ethylene copolymer(VAE) latex powder and carbon fiber on mechanical properties of concrete and its mechanism, one kind of VAE latex powder modified concrete (VAEMC), three kinds of carbon fiber modified concrete(CFMC) and three kinds of VAE latex powder/carbon fiber co-modified concrete(VAE/CFMC) were prepared. Their resistivity and mechanical property were tested, and scanning electron microscope test and mercury intrusion porosimetry test were carried out. The results show that VAE latex powder can promote the dispersion of carbon fiber, and the resistivity of VAE/CFMC is lower than that of CFMC. Compared with CFMC, VAE/CFMC has better mechanical property, VAE latex powder and carbon fiber have positive hybrid effect. When VAE latex powder and carbon fiber are co-incorporation, the mechanical property of concrete is better than addition of the two components. VAE latex powder can improve the pore structure of CFMC, refine its pore size, reinforce the physical bond of carbon fiber/concrete matrix interface, and change the failure mode of carbon fiber from pull slip to pull break.

Key words: concrete; carbon fiber; VAE latex powder; mechanical property; positive hybrid effect; interface

收稿日期:2023-07-07; 修订日期:2023-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278287);空军工程大学优秀博士学位论文扶持基金立项项目(KGD082323002)

第一作者:王志航(1996—),男,江西丰城人,空军工程大学博士生.E-mail:1833525542@qq.com

通讯作者:白二雷(1979—),男,河南焦作人,空军工程大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:bwkgy@163.com

混凝土作为当今工程建设中被广泛应用的建筑材料,其本身也存在着脆性大、韧性差、易开裂等缺点^[1].这使其在工程应用中受到了一定的限制,而掺入纤维可有效解决上述问题^[2].用于改性混凝土的纤维很多,其中碳纤维不仅可以改善混凝土的力学性能、耐久性能和疲劳性能^[3-5],还可以赋予混凝土导电性、压敏性、温敏性、电磁波屏蔽及吸波特性等功能性特点^[6-8].因此,碳纤维在混凝土性能改进和功能化应用方面具有广阔的前景.

然而,碳纤维表面活性官能团少,表现为化学惰性,且表面光滑,与混凝土基体之间无法形成化学键键合,仅有机咬合力等物理作用^[9-10].在承受荷载时,碳纤维易被拔出,增强、增韧效果未得到有效利用.因此,需要对碳纤维/混凝土基体的界面进行改善增强.相关研究表明:在钢纤维改性混凝土中掺入聚合物材料可以增强钢纤维/混凝土基体的界面性能,提高钢纤维的作用效果^[11-14].因此,考虑将聚合物材料引入碳纤维改性混凝土中,以期改善碳纤维/混凝土基体的界面性能.醋酸乙烯酯-乙炔共聚物(VAE)乳胶粉具有在混凝土中分散性好、与混凝土相容性高等优点^[15].因此,可以选用VAE乳胶粉作为聚合物材料掺入碳纤维改性混凝土之中.

鉴于此,本文制备了1种VAE乳胶粉改性混凝土(VAEMC)、3种碳纤维改性混凝土(CFMC)和3种VAE乳胶粉/碳纤维复合改性混凝土(VAE/CFMC),测试了改性混凝土的电阻率,分析了VAE乳胶粉对碳纤维分散性的影响,并且从抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比等方面分析了VAE乳胶粉和碳纤维对混凝土力学性能的混杂改性效果.此

外,通过扫描电镜(SEM)试验和压汞(MIP)试验,分析了VAE乳胶粉和碳纤维对混凝土的混杂改性机理.

1 试验

1.1 试验材料

水泥为P·O 42.5水泥;碎石为5~20 mm的石灰岩碎石,堆积密度为1 600 kg/m³;砂为细度模数2.8的中砂,堆积密度为1 503 kg/m³;水为自来水;VAE乳胶粉为VINNAPAS®5044N型,白色粉末,颗粒尺寸为1~7 μm,堆积密度为400~550 kg/m³;碳纤维为PAN基6 mm短切碳纤维,密度为1 760 kg/m³,直径为7 μm,抗拉强度为4 900 MPa,拉伸模量为240 GPa,电阻率为1.5×10⁻³ Ω·cm;助剂包括FDN高效减水剂母液、NOPCONXZ型金属皂类消泡剂、羟乙基纤维素分散剂和DN-12型成膜助剂.

1.2 试件制备

根据已有研究成果^[16-17],VAE乳胶粉的合适掺量(体积分数)为4%~8%,本文确定VAE乳胶粉的掺量为4%.混凝土的配合比如表1所示.其中,PC表示普通混凝土,VAEMC表示VAE乳胶粉掺量为4%的VAE乳胶粉改性混凝土,VAE/CFMC1~VAE/CFMC3表示VAE乳胶粉掺量固定为4%、碳纤维掺量(体积分数)分别为0.1%~0.3%的VAE乳胶粉/碳纤维复合改性混凝土,CFMC1~CFMC3表示碳纤维掺量分别为0.1%~0.3%的碳纤维改性混凝土.VAE乳胶粉/碳纤维分散液的制备流程如图1所示.VAE/CFMC试件的制备基于“裹砂石法”^[18],试件尺寸分别为100 mm×100 mm×100 mm与100 mm×100 mm×400 mm.

表1 混凝土的配合比
Table 1 Mix proportions of concretes

Specimen	Cement	Gravel	Sand	Water	VAE latex powder	Carbon fiber	Water reducer	Defoamer	Dispersant	Unit: kg/m ³
										Film forming agent
PC	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	0	2.45	0.61	0.82	0.41
VAEMC	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	0	2.45	0.61	0.82	0.41
VAE/CFMC1	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	0.83	2.45	0.61	0.82	0.41
VAE/CFMC2	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	1.66	2.45	0.61	0.82	0.41
VAE/CFMC3	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	2.49	2.45	0.61	0.82	0.41
CFMC1	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	0.83	2.45	0.61	0.82	0.41
CFMC2	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	1.66	2.45	0.61	0.82	0.41
CFMC3	204.00	536.00	376.00	100.00	8.17	2.49	2.45	0.61	0.82	0.41

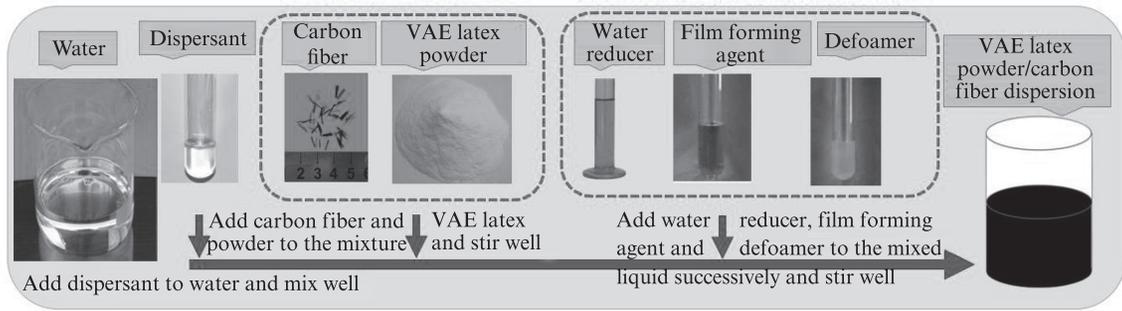


图1 VAE乳胶粉/碳纤维分散液的制备流程

Fig. 1 Preparation process of VAE latex powder/carbon fiber dispersion

1.3 试验方法

采用“四电极法”测试试件的电阻率,测试装置由HY3005MT型直流稳压电源、MT-1280型万用表及导线组成,如图2所示.浇筑电阻率测试试件时,事先等间距预埋4块铜网电极,铜网单丝直径为1 mm.

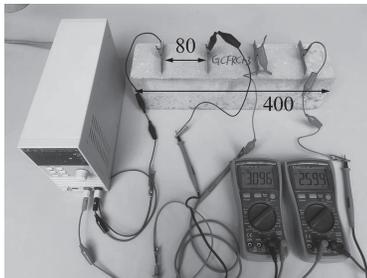


图2 电阻率测试装置

Fig. 2 Resistivity test device(size: mm)

采用DYE-3000S型混凝土全自动压力试验机进行抗压试验和劈拉试验,采用HYY型电液式材料试验机进行抗折试验.

选取抗压试验后的试件碎块,采用NanoSEM230型场发射SEM观测其微观形貌,采用PoreMaster33型全自动MIP测试其孔隙结构.

2 结果与分析

2.1 电阻率

为了分析VAE乳胶粉对碳纤维分散性的影响,测试了试件的电阻率,结果如表2所示.由表2可知:

(1)仅掺加VAE乳胶粉时,混凝土的电阻率没有明显的变化,VAEMC与PC的电阻率没有明显的差异.

(2)碳纤维对混凝土的电阻率有显著的影响.无论是在PC还是VAEMC中掺加碳纤维,混凝土的电阻率均显著减小.且随着碳纤维掺量的增大,VAE/CFMC与CFMC的电阻率均不断减小.当碳纤维掺量为0.3%时,VAE/CFMC3的电阻率较VAEMC减小了41.15%,CFMC3的电阻率较PC减小了

32.22%.当碳纤维掺量相同时,VAE/CFMC的电阻率均较CFMC小.当碳纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%时,VAE/CFMC的电阻率分别较CFMC减小了12.51%、12.88%、14.76%.由此可见,VAE乳胶粉可以促进碳纤维的分散,使得碳纤维在混凝土中均匀分散搭接,形成完整的导电网络,从而在宏观上表现为混凝土的导电性增强,电阻率降低.

本文在制备VAE乳胶粉/碳纤维分散液时,将VAE乳胶粉与碳纤维同时加入混合液体中.碳纤维单丝细小,比表面积大,具有疏水性.VAE乳胶粉具有良好的分散性,与水接触可分散成乳液.因此,一方面,VAE乳胶粉在液体中分散成乳液的过程可以促进碳纤维的分散,且乳液中含有大量的活性物质,可以增强碳纤维的湿润度,有利于其分散^[19];另一方面,VAE乳胶粉遇水分散成乳液后,乳液与碳纤维接触,吸附在碳纤维表面,增大了碳纤维的亲水性,从而促进了碳纤维的分散^[20].

表2 试件的电阻率
Table 2 Resistivity of specimens

Specimen	Resistivity/ (Ω·mm)	Specimen	Resistivity/ (Ω·mm)
PC	142.96	VAE/CFMC3	82.60
VAEMC	140.35	CFMC1	126.32
VAE/CFMC1	110.51	CFMC2	108.45
VAE/CFMC2	94.48	CFMC3	96.90

2.2 力学性能

2.2.1 抗折强度

试件的力学性能如表3所示.由表3可知:

(1)VAE乳胶粉的掺加可以提高普通混凝土的抗折强度,碳纤维的掺加可以提高VAEMC的抗折强度.与PC相比,VAEMC的抗折强度增大了6.48%.VAE乳胶粉在混凝土中,首先遇水分散成乳液,而后随着水化的进行,脱水形成具有黏性的聚合物膜.均匀分布在混凝土内部的聚合物膜可以增强混凝土的整体性,提高混凝土内部结构的内聚力^[21].

因此,VAE乳胶粉可以提高混凝土的抗折强度.

(2)在掺加VAE乳胶粉的基础上,增掺碳纤维可进一步提高混凝土的抗折强度.且随着碳纤维掺量的增大,混凝土的抗折强度先增大后减小.当碳纤维掺量为0.1%时,VAE/CFMC1的抗折强度较VAEMC增大了32.56%,较PC增大了41.14%.当碳纤维掺量为0.2%时,VAE/CFMC2的抗折强度最大(9.08 MPa),较VAEMC增大了62.43%,较PC

增大了72.95%.当碳纤维掺量为0.3%时,VAE/CFMC3的抗折强度较VAE/CFMC2有所减小,但仍比VAEMC大.由此可知,当碳纤维掺量较大时,反而会影响碳纤维对混凝土增强效果的发挥.并不是碳纤维的掺量越大,混凝土抗折强度的提高幅度越大,此结果与文献[9,22]中的结论一致.当碳纤维掺量较大时,纤维出现团聚,从而影响了混凝土的抗折强度.

表3 试件的力学性能
Table 3 Mechanical properties of specimens

Specimen	Flexural strength/MPa	Compressive strength/MPa	Splitting tensile strength/MPa	Flexural-compressive strength ratio/%
PC	5.25	32.47	2.44	16.17
VAEMC	5.59	33.16	2.79	16.86
VAE/CFMC1	7.41	38.06	3.68	19.47
VAE/CFMC2	9.08	36.16	4.32	25.11
VAE/CFMC3	8.64	34.74	3.79	24.87
CFMC1	6.32	34.56	2.82	18.29
CFMC2	7.53	33.88	3.42	22.23
CFMC3	7.38	33.20	3.29	22.26

2.2.2 抗压强度

由表3可知:与VAEMC相比,VAE/CFMC1、VAE/CFMC2、VAE/CFMC3的抗压强度分别增大了14.78%、9.05%、4.76%;由此可见,碳纤维的掺加可以提高VAEMC的抗压强度,且当碳纤维掺量为0.1%时,混凝土抗压强度的提高幅度最大;而后随着碳纤维掺量的增大,混凝土抗压强度的提高幅度不断减小;与PC相比,VAEMC、VAE/CFMC1、VAE/CFMC2、VAE/CFMC3的抗压强度分别增大了2.13%、17.22%、11.36%、6.99%.仅掺加VAE乳胶粉对混凝土抗压强度的提高效果不显著,而复掺VAE乳胶粉与碳纤维可显著提高混凝土的抗压强度.VAE乳胶粉最终在混凝土中形成聚合物膜,但聚合物膜的抗压强度低、弹性模量小,因此其对混凝土抗压强度的提高效果不佳^[23].而增掺碳纤维后,均匀分布的碳纤维可在混凝土内部组成纤维网络,既可以阻止裂缝的扩展,又可以在承受荷载时传递应力.因此,增掺碳纤维后,混凝土的抗压强度显著增大.但当碳纤维掺量较大时,纤维出现团聚,影响其增强作用的发挥,从而使得混凝土抗压强度的增幅减小.

2.2.3 劈拉强度

由表3可知:VAE乳胶粉的掺加可以提高混凝土的劈拉强度,VAEMC的劈拉强度较PC增大了14.34%;掺加0.1%~0.3%的碳纤维均可提高VAEMC的劈拉强度,VAE/CFMC1、VAE/

CFMC2、VAE/CFMC3的劈拉强度均较VAEMC大;随着碳纤维掺量的增大,混凝土的劈拉强度先增大后减小;当碳纤维掺量为0.2%时,混凝土的劈拉强度最大,为4.32 MPa.VAE/CFMC1、VAE/CFMC2、VAE/CFMC3的劈拉强度较VAEMC分别增大了31.90%、54.84%、35.84%,较PC分别增大了50.82%、77.05%、55.33%.VAE乳胶粉在水中溶解成乳液,随着水化反应的进行,混凝土中水分不断减少,乳液颗粒填充在混凝土的孔隙中或吸附在水化产物表面,最终脱水形成高黏聚力、化学稳定性好的聚合物膜.VAE乳胶粉可通过聚合物膜减少混凝土内部的孔隙,提高骨料与水化产物的黏结力以及增强混凝土的密实性.且聚合物膜的塑性变形能力好,抗拉强度大^[24].因此,VAE乳胶粉可较好地改善混凝土的抗折强度和劈拉强度.然而,聚合物膜的抗压强度低、弹性模量小.因此,VAE乳胶粉对混凝土抗压强度的提高效果不明显.掺加碳纤维后,混凝土在承受劈拉荷载以致内部产生裂缝时,横跨于裂缝两侧的碳纤维可承担部分拉应力,发挥着“加筋”作用.起着“加筋”作用的碳纤维既可减小混凝土内部的应力集中,又可使裂缝绕过碳纤维扩展,延长裂缝的扩展路径,从而延缓混凝土的破坏^[25].裂缝扩展路径被延长后,需要消耗更多的能量,因此混凝土可承受更大的荷载.但当碳纤维掺量为0.3%时,纤维出现团聚,影响了碳纤维的增强作用,从而使得

混凝土的劈拉强度较碳纤维掺量为0.2%时有所减小。

2.2.4 折压比

抗折强度与抗压强度之比(折压比)是表征混凝土韧性的指标。由表3可知:

(1)掺加VAE乳胶粉可以提高普通混凝土的韧性,掺加碳纤维可以提高VAEMC的韧性。VAEMC的折压比为16.86%,较PC增大了4.27%。VAE乳胶粉可以改善普通混凝土韧性的主要原因在于,VAE乳胶粉形成聚合物膜的抗拉强度更大,对混凝土抗折强度的提高效果优于抗压强度。

(2)在VAEMC的基础上,随着碳纤维掺量的增大,混凝土的韧性先增大后减小。当碳纤维掺量为0.2%时,混凝土的折压比最大,韧性最佳。VAE/CFMC1、VAE/CFMC2、VAE/CFMC3的折压比较VAEMC分别增大了15.48%、48.93%、47.51%,较PC分别增大了20.41%、55.29%、53.80%。虽然掺加碳纤维后混凝土的抗折强度、抗压强度和劈拉强度均有所提高,但以抗折强度和劈拉强度的提高最为显著。因此,碳纤维的掺加可以提高混凝土的折压比,改善混凝土的脆性,使得混凝土的韧性得以增强。

2.3 与CFMC、VAEMC的力学性能对比

由表3可知:

(1)VAE/CFMC与CFMC的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比均随着碳纤维掺量的增大呈现先增大后减小的趋势;且无论是PC还是VAEMC,掺加碳纤维后混凝土的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比均较未掺加时大;当碳纤维掺量为0.2%时,VAE/CFMC与CFMC的抗折强度、劈拉强度及折压比均最大;当碳纤维掺量为0.1%时,VAE/CFMC与CFMC的抗压强度均最大;当碳纤维掺量相同时,VAE/CFMC的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比均较CFMC大;当碳纤维掺量为0.1%~0.3%时,VAE/CFMC的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比分别较CFMC增大17.07%~20.58%、4.64%~10.13%、15.20%~30.50%、6.45%~13.00%。由此可见,在混凝土中已掺加碳纤维的基础上,增掺VAE乳胶粉可进一步提高混凝土的力学性能。

(2)VAE乳胶粉与碳纤维对混凝土抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比的复合增强效果优于单掺VAE乳胶粉与单掺碳纤维的增强效果之和;VAE/CFMC1的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折

压比较PC分别增大41.17%、17.22%、50.82%、20.41%,而VAEMC与CFMC1的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比较PC的增大幅度之和为26.86%、8.57%、29.91%、17.38%。由此可见,VAE乳胶粉与碳纤维对混凝土力学性能的改善表现出“1+1>2”的效果。复掺VAE乳胶粉与碳纤维时,混凝土力学性能呈现出了复合增强效果,VAE乳胶粉与碳纤维对混凝土力学性能的增强效果得到了更好的发挥。一方面,VAE乳胶粉促进了碳纤维的分散,使混凝土中的纤维网络分布更加均匀,从而促使碳纤维的增强作用得到更加有效的发挥;另一方面,碳纤维表面光滑,无活性官能团,与混凝土基体黏结差。而掺入VAE乳胶粉后,可增强碳纤维/混凝土基体界面,从而提高碳纤维作用效果^[26]。因此,VAE乳胶粉与碳纤维复掺时,VAE乳胶粉在发挥自身作用效果的同时,促进了碳纤维作用效果的发挥,从而表现出“1+1>2”的增强效果。

3 VAE 乳胶粉/碳纤维的混杂改性机理

3.1 微观形貌分析

VAE/CFMC的微观形貌如图3所示。由图3可知:

(1)在荷载作用后,碳纤维发生了明显的滑动。碳纤维表面无活性官能团,其与混凝土基体的结合仅依靠物理机械咬合。且碳纤维表面光滑,其与混凝土基体的机械咬合力弱。因此,在荷载作用时,碳纤维与混凝土基体之间易发生相对滑移,从而导致碳纤维的作用效果无法有效发挥(图3(a))。

(2)掺加VAE乳胶粉后,随着水化的进行,VAE乳胶粉变成了聚合物膜。由于本文VAE乳胶粉掺量不是很大,因此形成了网络交织状的聚合物膜。一方面,聚合物膜横跨混凝土基体上的裂缝和孔隙,发挥桥连作用;另一方面,吸附在碳纤维表面或分散在碳纤维周围的聚合物膜,将碳纤维与混凝土基体紧密粘连在一起,从而提高了碳纤维/混凝土基体界面的结合(图3(b))。

(3)当碳纤维周围分布较多聚合物膜时,碳纤维与混凝土基体紧密结合。在荷载作用下,碳纤维作用效果发挥显著,可承受足够大的应力,直至被拉断(图3(c))。

(4)当碳纤维掺量较大时,不易分散,出现了纤维团聚现象,从而影响了碳纤维作用效果的发挥(图3(d))。

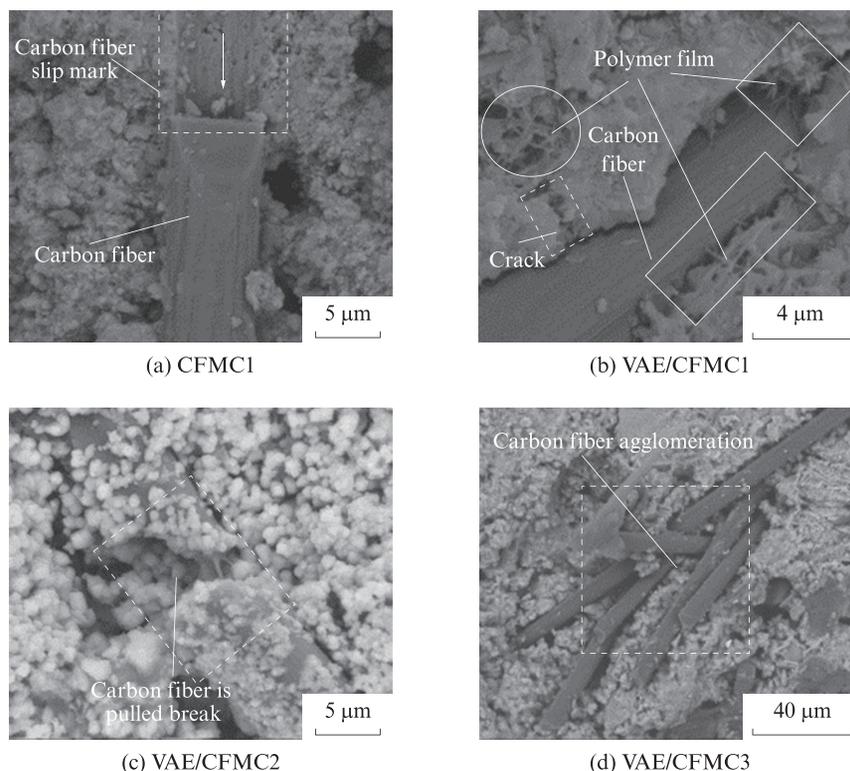


图3 CFMC和VAE/CFMC的微观形貌

Fig. 3 Micromorphology of CFMC and VAE/CFMC

3.2 孔隙结构分析

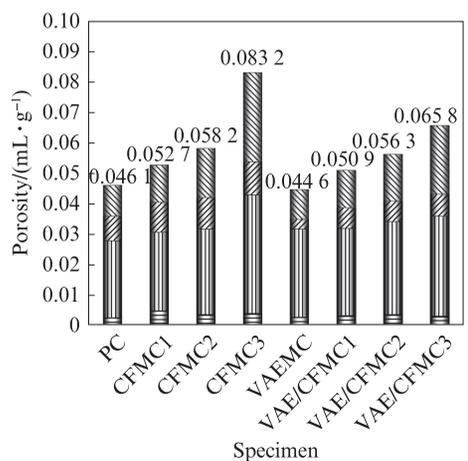
试件的孔隙量如图4所示.由图4可知:

(1)无论是在PC还是VAEMC的基础上,掺加碳纤维均会使得混凝土的总孔隙量增大.且随着碳纤维掺量的增大,混凝土的总孔隙量不断增大.在CFMC中,当碳纤维掺量较小时,混凝土总孔隙量的增幅还相对较小,CFMC1、CFMC2的总孔隙量分别较PC增大了14.32%、26.25%.而当碳纤维掺量较大时,混凝土总孔隙量的增幅较大,CFMC3的总孔隙

量较PC增大了80.48%.由于碳纤维表面光滑,与混凝土基体的黏结不紧密,甚至碳纤维/混凝土基体界面存在明显的孔隙,从而导致了混凝土内部初始缺陷的增多.因此,CFMC的总孔隙量较PC大,VAE/CFMC的总孔隙量较VAEMC大.

(2)在CFMC中,当碳纤维掺量较大时,纤维易团聚,从而导致混凝土的初始缺陷进一步增多,总孔隙量显著增大.VAE/CFMC1、VAE/CFMC2、VAE/CFMC3的总孔隙量较VAEMC分别增大了14.12%、26.23%、47.53%.与CFMC3的总孔隙量对PC的增幅(80.48%)相比,VAE/CFMC3的总孔隙量对VAEMC的增幅(47.53%)显著减小.由此可见,VAE乳胶粉的掺加促进了碳纤维的分散,从而改善了纤维团聚现象.但碳纤维的团聚仍存在,因此VAE/CFMC3总孔隙量的增幅仍较大.与CFMC相比,VAE/CFMC的总孔隙量均有所减小,尤其是VAE/CFMC3,较CFMC3减小了20.91%.由此可见,VAE乳胶粉的掺加可以减小CFMC的总孔隙量.VAE乳胶粉在混凝土中形成的聚合物膜可以填充部分孔隙及裂缝,因此VAE/CFMC的总孔隙量减小.

试件的孔隙百分比如图5所示.由图5可知:碳纤维的掺入使得混凝土的大孔(孔径 $d > 1000$ nm)和毛细孔($100 \text{ nm} < d \leq 1000$ nm)的百分比增大,即孔径大于100 nm的孔隙所占百分比增大,凝胶孔



■ $d > 1000$ nm; ■ $100 \text{ nm} < d \leq 1000$ nm;
 ■ $10 \text{ nm} \leq d \leq 100$ nm; ■ $d < 10$ nm

图4 试件的孔隙量

Fig. 4 Porosities of specimens

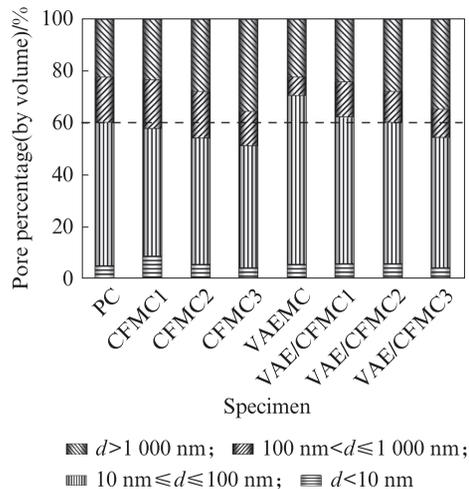


图5 试件的孔隙百分比

Fig. 5 Pore percentages of specimens

($d < 10 \text{ nm}$)和过渡孔($10 \text{ nm} \leq d \leq 100 \text{ nm}$)的百分比减小,即孔径小于 100 nm 的孔隙所占百分比减小;随着碳纤维掺量的增大,混凝土的大孔和毛细孔($d > 100 \text{ nm}$)的百分比不断增大,凝胶孔和过渡孔($d < 100 \text{ nm}$)的百分比不断减小;PC、CFMC1、CFMC2、CFMC3的大孔和毛细孔的百分比分别为39.66%、42.01%、45.65%、48.52%, VAEMC、VAE/CFMC1、VAE/CFMC2、VAE/CFMC3的大孔和毛细孔的百分比分别为29.35%、37.59%、39.54%、45.53%。由此可见,碳纤维对混凝土的孔隙结构具有一定的劣化作用。与CFMC相比,VAE/CFMC的大孔和毛细孔的百分比有所减小。由此可见,VAE乳胶粉可以优化CFMC的孔隙结构,细化其孔径。

3.3 机理分析

混凝土中VAE乳胶粉与碳纤维既发挥各自作用效果,又具有“正混杂效应”,从而对混凝土力学性能实现了“ $1+1>2$ ”的增强效果。VAE乳胶粉/碳纤维的混杂改性机理主要包括以下两个方面:

(1)VAE乳胶粉对碳纤维分散的促进作用。由于碳纤维单丝细小,表面积大,在混凝土基体中易团聚,因此碳纤维的分散在制备CFMC时至关重要。VAE乳胶粉遇水后极易分散,可形成高黏性的聚合物乳液。聚合物乳液可提高浆体的黏度,从而增大碳纤维间斥力,减少碳纤维的团聚^[27]。此外,碳纤维是一种疏水性材料,而聚合物乳液亲水性强,且聚合物乳液具有大量活性物质。因此,聚合物乳液可增强碳纤维的湿润度,使碳纤维相互润滑而不缠结,从而促进碳纤维的分散。

(2)VAE乳胶粉对碳纤维/混凝土基体界面的增强作用。碳纤维阻裂、桥连作用发挥的好坏与纤维/

混凝土基体界面的结合效果密切相关。碳纤维表面活性官能团少,表现为化学惰性,无法与混凝土基体键合,碳纤维/混凝土基体界面仅依靠物理结合。同时,碳纤维表面光滑,从而导致碳纤维/混凝土基体界面的结合更差,甚至界面处存在明显孔隙^[28]。而VAE乳胶粉在混凝土中可形成高黏聚力的聚合物膜。分散在碳纤维周围或吸附在碳纤维表面的聚合物膜可填充碳纤维/混凝土基体界面处的孔隙,将碳纤维与混凝土基体黏结在一起,从而提高碳纤维/混凝土基体界面的物理结合(如图6所示),使得碳纤维的破坏形式由拉滑破坏转变为拉断破坏。

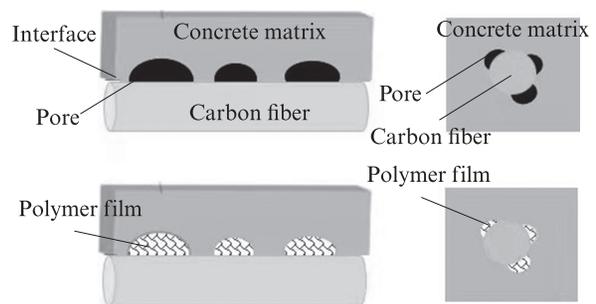


图6 VAE 乳胶粉对碳纤维/混凝土基体界面的增强作用

Fig. 6 Reinforcing effect of VAE latex powder on the carbon fiber/concrete matrix interface

4 结论

(1)醋酸乙烯酯-乙烯共聚物(VAE)乳胶粉可以促进碳纤维的分散。随着碳纤维掺量的增大,VAE乳胶粉/碳纤维复合改性混凝土(VAE/CFMC)的电阻率不断减小。碳纤维掺量相同时,VAE/CFMC的电阻率较碳纤维改性混凝土(CFMC)小。

(2)随着碳纤维掺量的增大,VAE/CFMC的抗折强度、抗压强度、劈拉强度及折压比均先增大后减小。当碳纤维掺量相同时,VAE/CFMC的力学性能比CFMC更佳。

(3)VAE乳胶粉与碳纤维具有“正混杂效应”,复掺VAE乳胶粉与碳纤维时,混凝土的力学性能呈现出“ $1+1>2$ ”的复合增强效果。

(4)VAE乳胶粉可优化CFMC的孔隙结构,细化其孔径,增强碳纤维/混凝土基体界面的物理结合,使混凝土中碳纤维的破坏形式由拉滑破坏转变为拉断破坏。

参考文献:

- [1] 霍琳颖,毕继红,赵云,等.不同纤维长度的混杂钢纤维混凝

- 土本构模型[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10):1034-1039.
- HUO Linying, BI Jihong, ZHAO Yun, et al. Constitutive models of hybrid steel fiber reinforced concrete with different fiber lengths [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25 (10) : 1034-1039. (in Chinese)
- [2] DANGWAL S, SINGH H. Seismic performance of corroded non-seismically and seismically detailed RC beam-column joints rehabilitated with high strength fiber reinforced concrete [J]. *Engineering Structures*, 2023, 291:116481.
- [3] 赵秋红, 董硕, 朱涵, 等. 钢纤维橡胶混凝土的循环受压应力-应变关系[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):789-797.
- ZHAO Qiuhong, DONG Shuo, ZHU Han, et al. Stress-strain relationship of steel fiber rubber concrete under cyclic compression [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8):789-797. (in Chinese)
- [4] JI Y C, LIU W C, JIA Y M, et al. Durability investigation of carbon fiber reinforced concrete under salt-freeze coupling effect [J]. *Materials*, 2021, 14(22):6856.
- [5] 于天来, 刘兴国, 姚爽, 等. 碳纤维筋体外预应力加固钢筋混凝土梁的疲劳性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(6):1867-1873.
- YU Tianlai, LIU Xingguo, YAO Shuang, et al. Fatigue performance of reinforced concrete beams reinforced by external prestressing with carbon fiber reinforcement[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2016, 46 (6) : 1867-1873. (in Chinese)
- [6] SONG F C, CHEN Q, ZHENG Q M. Multifunctional ultra-high performance fibre-reinforced concrete with integrated self-sensing and repair capabilities towards in-situ structure monitoring[J]. *Composite Structures*, 2023, 321:117240.
- [7] 张滇军, 徐世焯, 孙进. 碳纤维砂浆与碳纤维混凝土导电性能实验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3):347-352.
- ZHANG Dianjun, XU Shilang, SUN Jin. Experimental study on electrical conductivity of carbon fiber mortar and carbon fiber concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(3):347-352. (in Chinese)
- [8] CHEN Z, LIU Y S, WANG M Z, et al. Effect of coarse aggregate grading optimization on temperature, thermal stress and compressive strength of carbon fiber-reinforced concrete by ohmic heating curing[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 66:105882.
- [9] LU S, XIA W, BAI E L, et al. Interfacial modification: The dynamic compression properties and enhancement mechanism of concrete added with micro-nano hierarchical carbon-based fiber [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2022, 247:110340.
- [10] XIA W, LU S, BAI E L, et al. Strengthening and toughening behaviors and dynamic constitutive model of carbon-based hierarchical fiber modified concrete: Cross-scale synergistic effects of carbon nanotubes and carbon fiber [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63:105482.
- [11] 朱志威. 聚合物钢纤维混凝土钢桥面铺装结构性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- ZHU Zhiwei. Study on structural performance of polymer steel fiber concrete steel bridge deck pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [12] 仵卫伟. 聚合物钢纤维混凝土钢桥面铺装材料耐久性性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- WU Weiwei. Study on durability of polymer steel fiber concrete steel bridge deck pavement material [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [13] SHARIFIANJAZI F, ZEYDI P, BAZLI M, et al. Fibre-reinforced polymer reinforced concrete members under elevated temperatures: A review on structural performance [J]. *Polymers*, 2022, 14(3):472.
- [14] 赵云, 毕继红, 王照耀, 等. 矿渣粉对钢纤维自密实混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1):24-30.
- ZHAO Yun, BI Jihong, WANG Zhaoyao, et al. Influence of slag powder on the properties of steel fiber self-compacting concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1):24-30. (in Chinese)
- [15] 张金林, 尹谷雨, 倪常彪, 等. 可再分散乳胶粉与PE纤维对喷射混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(7):57-60.
- ZHANG Jinlin, YIN Guyu, NI Changbiao, et al. Effect of redispersible emulsion powder and PE fiber on properties of shotcrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2023(7):57-60. (in Chinese)
- [16] 杨建森, 姜晓楠. 聚合物胶粉改性混凝土的力学性能[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3):649-652.
- YANG Jiansen, JIANG Xiaonan. Mechanical properties of polymer rubber powder modified concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(3):649-652. (in Chinese)
- [17] LIU G J, BAI E L, XU J Y, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios [J]. *Materials*, 2019, 12(21):3530.
- [18] 王志航, 许金余, 吴云泉, 等. 纳米碳纤维增强混凝土的介电特性[J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(1):134-141.
- WANG Zhihang, XU Jinyu, WU Yunquan, et al. Dielectric properties of nano-carbon fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1):134-141. (in Chinese)
- [19] 李刊, 魏智强, 乔宏霞, 等. 四大类外掺材料对聚合物改性水泥基材料性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊1):654-661.
- LI Kan, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Research progress on effects of four kinds of additives on properties of polymer-modified cement-based materials [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(Suppl 1):654-661. (in Chinese)
- [20] 高妮, 温久然. 不同聚合物与玻璃纤维复掺砂浆性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4):77-80.
- GAO Ni, WEN Jiuran. Study on effect of polymer and glass fiber on the properties of mortar [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(4):77-80. (in Chinese)
- [21] MOSTAFA N H, MATIN P, MORTEZA A G. Experimental assessment of the efficiency of deep learning method in predicting the mechanical properties of polymer concretes and composites [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76:107107.
- [22] LIU G J, BAI E L, XU J Y, et al. Study on dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete [J]. *Materials Science Forum*, 2020, 976:180-185.

- [23] GUO C C, PEI L Y, GUAN H, et al. Experimental study on interfacial damage mechanisms of polymer-concrete composite structure[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 75:106968.
- [24] 钟世云, 王培铭. 聚合物改性砂浆和混凝土的微观形貌[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(2):168-173.
ZHONG Shiyun, WANG Peiming. Microstructure of polymer modified mortar and concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(2):168-173. (in Chinese)
- [25] JIANG C X, LI R, MO J Y, et al. Effect of fiber surface treatment on interfacial mechano-electric properties of carbon fiber reinforced concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 211-212:1087-1090.
- [26] LIU G J, BAI E L, XU J Y, et al. Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261:119995.
- [27] 常森, 许金余, 杨宁. 新型聚合物乳胶粉对碳纤维增强混凝土力学性能的影响[J]. *功能材料*, 2019, 50(11):11161-11165.
CHANG Sen, XU Jinyu, YANG Ning. Effect of new polymer emulsion powder on mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(11):11161-11165. (in Chinese)
- [28] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3):1586-1597.
WANG Zhihang, BAI Erlei, XU Jinyu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of polymer modified carbon fiber reinforced concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3):1586-1597. (in Chinese)