文章编号:1674-2974(2025)05-0162-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025057

纳米碳酸钙对聚乙烯醇纤维混凝土静动态劈裂抗拉性能的影响

康玉梅†,李月兰 ,高雪 ,黄蔚
(东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:聚乙烯醇(PVA)纤维能抑制混凝土裂缝扩展,但抑制效果局限于基体内部的微裂缝,对纳米级裂缝的抑制效果甚微.本文研究纳米$CaCO_3$对PVA纤维混凝土静动态劈裂抗拉性能的影响,并通过扫描电镜(SEM)试验分析其增强机理.研究结果表明:纳米$CaCO_3$掺量为1.5%时,PVA纤维混凝土的静动态劈裂抗拉性能显著提高.当养护时间为28 d,纳米$CaCO_3$掺量为1.5%、PVA纤维掺量为0.6%时,与未掺加纳米$CaCO_3$的同掺量PVA纤维混凝土相比,静态劈裂抗拉强度提高了8.6%,在2.25~3.08 s^{-1}应变率下的动态劈裂抗拉强度和耗散能分别提高了11.2%和12.4%.SEM图像分析表明,加入纳米$CaCO_3$能够促进水化产物的生成来填补PVA纤维与基体的结合界面以及水泥基体内部的孔隙和微裂缝,增强纤维与基体之间的黏结度和PVA纤维的阻裂作用,从而提高混凝土材料的静动态劈裂抗拉性能.

关键词:纳米碳酸钙;聚乙烯醇纤维;动态测试;纤维混凝土;微观结构
中图分类号:TU528 **文献标志码**:A

Effect of Nano Calcium Carbonate on Static and Dynamic Splitting Tensile Properties of Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Concrete

KANG Yumei†, LI Yuelan, GAO Xue, HUANG Wei
(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Polyvinyl alcohol (PVA) fiber can inhibit the crack propagation of concrete, but the inhibition effect is limited to the micro-cracks inside the matrix and has few effects on nano-scale cracks. The impact of nano-$CaCO_3$ on the static and dynamic splitting tensile properties of PVA fiber reinforced concrete was studied in this paper, and the strengthening mechanism was analyzed by scanning electron microscope (SEM) test. The results show that the static and dynamic splitting tensile properties of PVA fiber reinforced concrete are significantly improved when the content of nano-$CaCO_3$ is 1.5%. When the curing time is 28 d, the content of nano-$CaCO_3$ is 1.5% and the content of PVA fiber is 0.6%, compared with the same content of PVA fiber reinforced concrete without nano-$CaCO_3$, the static splitting tensile strength is increased by 8.6%, and the dynamic splitting tensile strength and dissipation energy at 2.25~3.08 s^{-1} strain rate are increased by 11.2% and 12.4%, respectively. SEM image analysis shows that the addition of nano-$CaCO_3$ can promote the formation of hydration products to fill the bonding interface between

* **收稿日期**:2024-06-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1602232),National Natural Science Foundation of China (U1602232)
作者简介:康玉梅(1973—),女,辽宁灯塔人,东北大学副教授,工学博士
† 通信联系人,E-mail:kangyumei@mail.neu.edu.cn

PVA fiber and matrix and the pores and micro-cracks inside the cement matrix, enhance the bonding degree between fiber and matrix and the crack resistance of PVA fiber, thus improving the static and dynamic splitting tensile properties of concrete materials.

Key words: nano calcium carbonate; polyvinyl alcohol fiber; dynamic testing; fiber reinforced concrete; microstructure

混凝土是现代工程项目中使用最广泛、用量最大的建筑材料,但混凝土存在抗拉强度低、脆性破坏和裂缝难以控制等缺点[1]. 为了减少混凝土裂缝的产生,许多学者进行了大量研究发现在混凝土中掺入纤维可以有效抑制裂缝的产生和扩展[2-5]. 聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维因其亲水性好、分散性佳、具有较高的强度且无毒无害而被广泛应用于增强混凝土的抗拉性能[6]. Noushini 等[7]通过试验分析了 PVA 纤维对混凝土拉伸力学性能的影响,结果表明:PVA 纤维增强混凝土的轴向拉伸强度最高,达到 2.66 MPa,比钢纤维增强混凝土高 52.9%;徐阳晨等[8]研究了 PVA 纤维和碳纳米管掺量对混凝土力学性能的影响,发现当 PVA 纤维掺量为 0.2%、碳纳米管掺量为 0.15% 时,混凝土的劈裂抗拉强度达到最大,比普通混凝土试件强度提高 39.35%;Sun 等[9]通过试验发现在混凝土中加入体积掺量为 2% 的改性 PVA 纤维可以提高混凝土的抗拉性能,PVA 纤维可以通过桥联来弥补基体结构的缺陷.

普通纤维增强混凝土的效果局限于基体内部微裂缝,对纳米级裂缝几乎不起作用,而水泥基体内部的微裂缝和孔结构对混凝土力学性能的影响极为显著[10]. 纳米材料尺寸微小,将其掺入水泥基材料中,可以发挥微填充效应,促进水泥水化,从而增加混凝土基体结构和纤维界面的密实度,改善混凝土的微观结构和宏观性能[11-12]. 纳米 $CaCO_3$ 是一种活性较低、价格低廉的纳米级矿物微粉材料,主要通过晶核作用[13]、填充作用来改善界面的致密性. 肖佳等[14]通过测定水化产物中 $Ca(OH)_2$ 的含量并进行量热试验,发现纳米碳酸钙的加入增大了水化放热量,且掺量越高,其早期的水化反应速率越快;Sato 等[15]研究了纳米 $CaCO_3$ 对水泥中硅酸三钙(C_3S)水化反应的影响,发现纳米 $CaCO_3$ 能够促进 C_3S 的水化,加快钙矾石的形成,显著提高了水化初始阶段的基体密实度和弹性模量;Sekkal 等[16]使用分子动力学模拟方法研究了纳米 $CaCO_3$ 对水泥基材料界面黏结强度的影响,发现纳米 $CaCO_3$ 可以通过在界面上存在水分子的情况下接触水和 C—S—H 来吸收系统中的能量,从而保持系统的稳定性;苗生龙等[17]研究不同纳米 $CaCO_3$ 掺量的混凝土在高温冷却后的劈裂抗拉性能,发现纳米 $CaCO_3$ 掺量为 0.5% 时,混凝土的劈裂抗拉强度和耐高温性能最优.

建筑结构在服役期间可能会受到爆炸、地震、撞击等动态冲击荷载作用,容易造成重大生命、财产损失,因此对建筑材料进行动态力学性能研究尤为重要. 杨国梁等[18]基于直径 50 mm 的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置对不同体积掺量的 PVA 纤维混凝土进行了动态冲击试验,发现掺入 PVA 纤维可以显著提高混凝土试件的临界裂缝尖端张开位移值,提高试件的阻裂能力. 谢磊等[19]基于直径 80 mm 的 SHPB 装置对不同体积掺量的 PVA 纤维混凝土进行了动态冲击压缩试验,发现掺入 PVA 纤维对动态强度增强因子、冲击韧性和抗破碎能力有明显提高作用,且上述指标随纤维掺量的增加而进一步增强.

综上所述,PVA 纤维可以提高混凝土的抗拉强度,抑制裂缝扩展,纳米 $CaCO_3$ 可以加快水化反应速率,改善水泥基体的密实度. 目前研究主要集中在单掺 PVA 纤维和纳米 $CaCO_3$ 对混凝土静态力学性能的影响,关于在 PVA 纤维混凝土中掺入纳米 $CaCO_3$ 对混凝土动态力学性能影响的研究较少. 因此,本文主要研究不同掺量纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土静动态劈裂抗拉性能的影响,并通过扫描电镜(SEM)试验分析纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土的增强机理,为纳米材料混掺纤维改性混凝土在动态荷载作用下的劈裂抗拉性能研究提供试验依据.

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥采用工源牌P·O 42.5水泥;纳米$CaCO_3$物理性能如表1所示;PVA纤维长度为12 mm,物理性能如表2所示;分散剂为聚丙烯酸钠盐;粉煤灰为优质一级灰;减水剂为萘系高效减水剂,最大减水率20%;细骨料选用细度模数为2.53的天然河砂(粒径0.3~0.6 mm);粗骨料选用碎石(粒径4.75~19 mm).

表1 纳米$CaCO_3$的物理性能

Tab.1 Physical properties of nano-$CaCO_3$

$CaCO_3$质量分数/%	MgO质量分数/%	pH值	粒径/nm	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)
>98	≤0.5	8.5~9.5	15~20	40

1.2 试验方案和试件制备

经过多次试配,共设计13个试验组,其中,混凝土静动态劈裂抗拉试验试件尺寸(直径×高度)为100 mm×50 mm[20]. 纳米$CaCO_3$掺量(占水泥的质量分数)分别为1.0%、1.5%、2.0%,分别用N10、N15、N20表示;PVA纤维掺量(占混凝土的体积分数)分别为0.3%、0.6%、0.9%,分别用P3、P6、P9表示;试件编号N15P6表示纳米$CaCO_3$掺量为1.5%、PVA纤维掺量为0.6%. N0P0为素混凝土,N0P3、N0P6、N0P9为PVA纤维混凝土,具体配合比如表3所示. 试验中,先称取一定量的纳米$CaCO_3$和聚丙烯酸钠盐配制纳米$CaCO_3$分散液,二者的质量比为100∶1. 再将称量好的水泥、PVA纤维、砂、碎石、减水剂倒入搅拌机中干拌3 min,然后倒入分散均匀的纳米$CaCO_3$分散液继续搅拌5 min,最后将得到的拌合物装入相应的模具内,在振动台上振捣密实. 24 h拆模后放入养护室内进行养护,达到相应龄期时进行测试.

表2 PVA纤维的物理性能

Tab.2 Physical properties of PVA fiber

长度/mm	直径/mm	密度/($g \cdot m^{-3}$)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
12	0.016	1.3	1 560	20

表3 混凝土配合比

Tab.3 Mix ratio of concrete

编号	纳米$CaCO_3$掺量/%	PVA纤维掺量/%	水泥/($kg \cdot m^{-3}$)	粉煤灰/($kg \cdot m^{-3}$)	水/($kg \cdot m^{-3}$)	砂/($kg \cdot m^{-3}$)	粗骨料/($kg \cdot m^{-3}$)	减水剂/($kg \cdot m^{-3}$)
N0P0	0	0	369	41	123	800	1 200	12.3
N0P3	0	0.3	369	41	123	800	1 200	12.3
N0P6	0	0.6	369	41	123	800	1 200	12.3
N0P9	0	0.9	369	41	123	800	1 200	12.3
N10P3	1.0	0.3	365.3	41	123	800	1 200	12.3
N15P3	1.5	0.3	363.5	41	123	800	1 200	12.3
N20P3	2.0	0.3	361.6	41	123	800	1 200	12.3
N10P6	1.0	0.6	365.3	41	123	800	1 200	12.3
N15P6	1.5	0.6	363.5	41	123	800	1 200	12.3
N20P6	2.0	0.6	361.6	41	123	800	1 200	12.3
N10P9	1.0	0.9	365.3	41	123	800	1 200	12.3
N15P9	1.5	0.9	363.5	41	123	800	1 200	12.3
N20P9	2.0	0.9	361.6	41	123	800	1 200	12.3

1.3 试验加载装置及过程

混凝土静态劈裂抗拉试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[21],加载装置采用YAW-2000型电子万能试验机,加载速率为0.5 mm/min.

动态劈裂抗拉试验采用直径为100 mm的SHPB装置,SHPB试验系统示意图如图1所示,由加载系统、压杆系统、数据采集系统组成. 高压氮气为动态冲击荷载的主要动力来源,压杆装置由撞击杆、入射杆、透射杆和吸收杆组成,长度分别为600、500、3 500和1 200 mm,各杆件材料均为直径100 mm的高强合金钢,弹性模量为206 GPa,密度为7 850 kg/m^3,纵波波速为5 123 m/s.

试验前,将圆盘状试件夹在入射杆和透射杆之间. 通过预设撞击杆进深以及氮气气压来控制加载

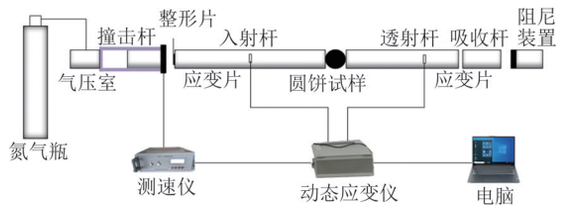


图 1　SHPB 试验系统示意图

Fig.1　SHPB test system diagram

速度,在试验过程中,首先,入射杆受到撞击杆的冲击,产生入射波$\varepsilon_i(t)$,入射波在入射杆与试件的接触面发生反射形成反射波$\varepsilon_r(t)$,入射波透过试件继续向前传播进入透射杆,形成透射波$\varepsilon_t(t)$. 应变片贴在入射杆和透射杆中部,当应力脉冲传播的同时,动态应变仪实时记录应变信号,为了尽量保证试件在破坏之前达到应力平衡状态,在入射杆前端粘贴直径 50 mm、厚 2 mm 的橡胶片作为脉冲整形器以延长波形上升的时间.

1.4　动态劈裂抗拉强度与耗散能的计算

动态劈裂抗拉试验是基于一维应力假设和均匀性假定开展[22]. 随着时间的延长,试件所受劈裂应力$F_d(t)$、应力率$\dot{\sigma}$、应变率$\dot{\varepsilon}$分别按下式进行计算,试件所受劈裂应力的峰值即为动态劈裂抗拉强度f_{dst}:

$$F_d(t) = E_0 A_0 \varepsilon_t(t) \tag{1}$$

$$\dot{\sigma} = \frac{f_{dst}}{\Delta t} \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E_s} \tag{3}$$

式中:$\varepsilon_t(t)$为透射杆上应变片记录的透射波信号;A_0、E_0分别为压杆的横截面面积(mm^2)、弹性模量(GPa);f_{dst}为试件的动态劈裂抗拉强度(MPa);Δt为试件达到峰值应力的时间差(μs);E_s为试件的弹性模量(GPa).

根据能量守恒原理和一维弹性波理论[23],不同纳米 $CaCO_3$ 掺量的 PVA 纤维混凝土试件在动态劈裂抗拉试验中的耗散能$W_d(t)$可根据入射能$W_i(t)$、反射能$W_r(t)$和透射能$W_t(t)$能量平衡进行计算,计算公式如下:

$$W_d(t) = W_i(t) - W_r(t) - W_t(t) \tag{4}$$

$$W_i(t) = E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_i^2(t)\mathrm{d}t \tag{5}$$

$$W_r(t) = E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_r^2(t)\mathrm{d}t \tag{6}$$

$$W_t(t) = E_0 C_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_t^2(t)\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中:$\varepsilon_i(t)$、$\varepsilon_r(t)$分别为入射杆上应变片记录的入射波、反射波信号;C_0为杆的纵波速度(m/s).

2　结果与讨论

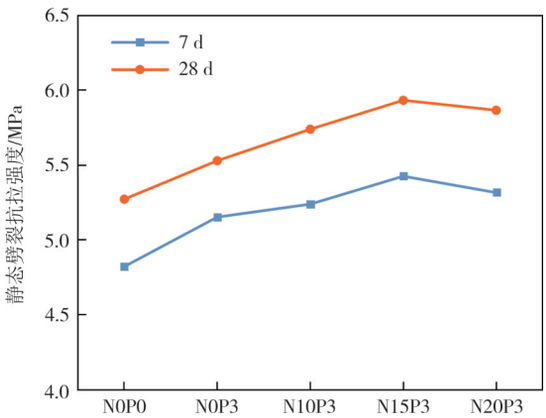
2.1　纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土静态劈裂抗拉性能的影响

图 2 为不同掺量纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土在养护龄期 7 d、28 d 时静态劈裂抗拉强度的影响. 由图 2 可知,PVA 纤维混凝土在养护龄期 7 d、28 d 的静态劈裂抗拉强度随着纳米 $CaCO_3$ 掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,当纳米 $CaCO_3$ 掺量为 1.5% 时,混凝土的静态劈裂抗拉强度达到最大. 当养护龄期为 28 d,PVA 纤维掺量和纳米 $CaCO_3$ 掺量分别为 0.6%、1.5% 时,混凝土的静态劈裂抗拉强度达到最大,为 6.19 MPa,较 N0P0 组提高 17.5%,较 N0P6 组提高 8.6%,说明 PVA 纤维的掺入有助于提高混凝土的静态劈裂抗拉强度,而纳米 $CaCO_3$ 可以进一步提高 PVA 纤维混凝土的静态劈裂抗拉强度. PVA 纤维和纳米 $CaCO_3$ 具有不同的尺度,二者结合能够在混凝土裂缝发展的不同时期和尺度上发挥抑制作用,阻止微裂缝发展成贯穿裂缝. 此外,PVA 纤维在承受和传递拉应力时,主裂缝在遇到纤维时通过改变开裂路径产生更多的次生裂缝来分散拉应力,进而增强混凝土结构的劈裂抗拉性能. 当纳米 $CaCO_3$ 掺量为 2.0% 时,PVA 纤维混凝土静态劈裂抗拉强度有所降低,但与单掺 PVA 纤维相比仍显著增强. 原因在于,过量纳米 $CaCO_3$ 的加入会在复合材料内部产生团聚现象,导致混凝土内部形成微小孔隙,从而降低混凝土静态劈裂抗拉强度. 对比 PVA 纤维掺量为 0.3%、0.6%、0.9% 时试件的静态劈裂抗拉强度可知,0.6% 的 PVA 纤维掺量水平更有利于混凝土力学性能的发挥,原因在于过高的掺量会使 PVA 纤维分散不均,在水泥基体中发生纤维弯折、成团的现象,从而降低混凝土的静态劈裂抗拉强度.

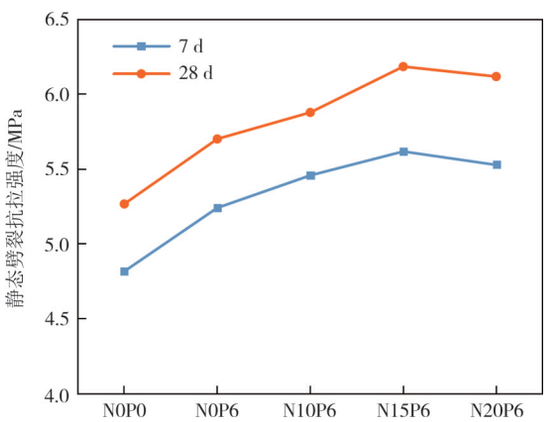
2.2　纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土动态劈裂抗拉性能的影响

2.2.1　试验结果

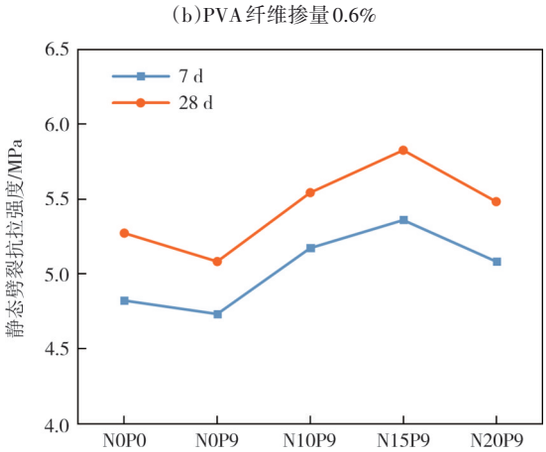
通过 SHPB 装置上的应变片采集的$\varepsilon_i(t)$、$\varepsilon_r(t)$和$\varepsilon_t(t)$以及时间数据,按照 1.4 节式(1)~式(7)计算得到纳米 $CaCO_3$-PVA 纤维混凝土试件的应变率、动态劈裂抗拉强度和耗散能,具体试验结果如表 4 所示.



(a)PVA纤维掺量0.3%



(b)PVA纤维掺量0.6%



(c)PVA纤维掺量0.9%

图2 不同掺量纳米$CaCO_3$对PVA纤维混凝土静态劈裂抗拉强度的影响

Fig.2 Effect of different content of nano-$CaCO_3$ on static splitting tensile strength of PVA fiber reinforced concrete

表4 动态劈裂抗拉试验结果

Tab.4 Dynamic splitting tensile test results

试件组别	应变率/s^{-1}	动态劈裂抗拉强度/MPa	耗散能/J
N0P0	1.02	9.03	33.70
	1.34	11.30	54.20
	1.72	13.10	66.10
	2.25	14.71	94.40

续表

试件组别	应变率/s^{-1}	动态劈裂抗拉强度/MPa	耗散能/J
N0P3	1.05	9.14	36.20
	1.36	11.94	57.10
	1.65	13.67	70.30
	2.07	15.15	100.20
N0P6	1.08	9.33	39.90
	1.45	11.72	58.90
	1.88	13.28	74.60
	2.44	15.47	106.90
N0P9	1.11	8.60	31.90
	1.40	11.07	53.10
	1.73	12.71	63.70
	2.28	14.56	90.20
N10P3	1.15	9.57	43.70
	1.31	12.68	61.70
	1.68	13.94	73.90
	2.18	15.44	105.70
N15P3	1.19	9.71	48.40
	1.41	12.88	64.30
	1.71	14.41	80.20
	2.34	15.83	112.50
N20P3	1.23	9.44	41.30
	1.44	12.35	60.10
	1.75	13.90	74.50
	2.37	15.66	107.30
N10P6	1.12	9.81	42.20
	1.39	11.89	63.50
	1.95	14.27	81.30
	2.71	16.26	110.90
N15P6	1.17	10.14	46.00
	1.53	13.35	68.00
	2.03	15.72	89.10
	2.87	17.21	120.20
N20P6	1.10	9.77	41.30
	1.48	13.10	61.20
	1.93	14.18	78.80
	3.08	16.70	109.10
N10P9	1.20	9.61	41.30
	1.47	11.87	61.30
	1.81	14.07	74.50
	2.31	16.20	104.80
N15P9	1.29	10.00	45.80
	1.51	12.82	66.50
	1.94	15.29	84.60
	2.46	16.88	115.70
N20P9	1.32	9.73	42.50
	1.67	12.49	60.80
	2.05	14.69	76.20
	2.84	16.45	106.30

2.2.2　破坏形态

不同应变率下纳米 $CaCO_3$-PVA 纤维混凝土动态劈裂抗拉破坏模式如图 3 所示. 由于材料内部的非均匀性,即使在相同的冲击速度下,得到的应变率也不相同. 因此,图 3 中给出的是应变率范围而不是单一应变率. 从图 3 可以看出,不同纳米 $CaCO_3$ 掺量的 PVA 纤维混凝土试件的破坏模式相似,都是由中心裂缝开始向两加载端扩展,最后沿加载方向被劈裂成两部分. 在动态荷载作用下,当应变率范围为 2.25~2.87 s^{-1} 时,试件两加载端面有三角形的局部挤压破坏,三角区的面积随应变率的增加而增大,出现这种破坏特征是由于试件在达到应力平衡前就已经出现裂纹[24]. 当应变率增大时,试件与加载点之间的摩擦力会增大,导致应力分布不均匀,使加载点处应力集中. 此外,PVA 纤维混凝土在动态劈裂荷载作用下破坏时都产生了宏观裂纹,这是由于混凝土内部存在初始缺陷或收缩等而产生了微裂缝,在高速冲击时,外力导致的裂缝更容易出现在薄弱区域或初始缺陷附近.



图 3　不同应变率下纳米 CaCO3-PVA 纤维混凝土的破坏形态

Fig.3　The failure pattern of nano-CaCO3-PVA fiber reinforced concrete under different strain rates

2.2.3　动态劈裂抗拉强度

不同应变率下 PVA 纤维混凝土动态劈裂抗拉强度随纳米 $CaCO_3$ 掺量变化如图 4 所示. 当纳米 $CaCO_3$ 掺量相同时,随着应变率的增加,动态劈裂抗拉强度也不同程度地增大. 由表 4 可得当纳米 $CaCO_3$ 掺量为 1.0%、PVA 纤维掺量为 0.9% 时,应变率范围为 2.25~2.84 s^{-1} 时的动态劈裂抗拉强度比应变率为 1.02~1.32、1.34~1.67、1.72~2.05 s^{-1} 时分别提高 68.6%、36.5%、15.1%,说明 PVA 纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度具有较强的应变率效应. 在相同应变率范围内,随着纳米 $CaCO_3$ 掺量的增加,PVA 纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度呈现先增大后减小的趋势. 在 1.72~2.03 s^{-1} 应变率范围内,当纳米 $CaCO_3$ 掺量为 1.5%、PVA 纤维掺量为 0.6% 时,PVA 纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度较 N0P6、N10P6 组分别上升 18.4%、10.2%,说明纳米 $CaCO_3$ 的掺入能显著提高 PVA 纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度. 由于纳米 $CaCO_3$ 的存在,混凝土内水化产物生成速度加快、基体的密实度增大,PVA 纤维在这种环境下能更好地发挥阻止裂缝发展的作用. 当纳米 $CaCO_3$ 掺量为 2.0% 时,PVA 纤维

混凝土试件的动态劈裂抗拉强度有所降低,但与N0P0组相比仍显著增强.过量纳米$CaCO_3$的加入会在复合材料内部产生黏附聚集现象,使混凝土内部缺陷增多,试件在动态冲击荷载作用下迅速发生破坏,强度大幅度降低.

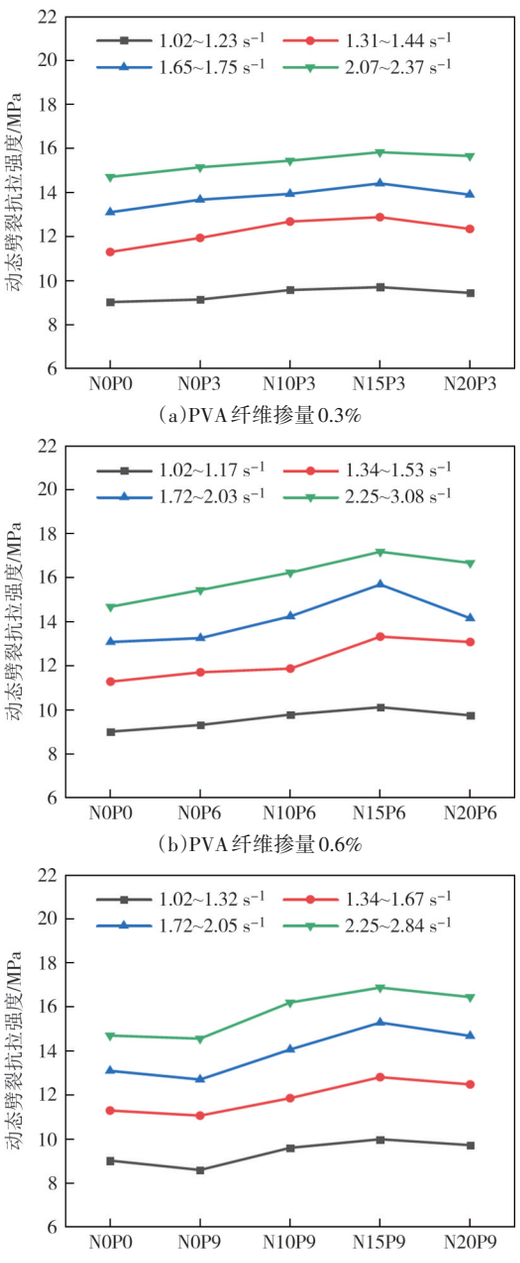


图4 不同应变率下纳米$CaCO_3$-PVA纤维混凝土动态劈裂抗拉强度

Fig.4 Dynamic splitting tensile strength of nano-$CaCO_3$-PVA fiber reinforced concrete under different strain rates

2.2.4 耗散能

不同应变率下PVA纤维混凝土耗散能随纳米$CaCO_3$掺量变化如图5所示.从图5可以看出,耗散能的变化趋势与图4所示动态劈裂抗拉强度一致.当纳米$CaCO_3$掺量相同时,随着应变率的增加,耗散能也不同程度地增大.当纳米$CaCO_3$掺量为1.5%、PVA纤维掺量为0.6%时,应变率范围为2.25~3.08 s^{-1}的耗散能比应变率为1.02~1.17、1.34~1.53、1.72~2.03 s^{-1}时分别提高161.3%、76.8%、34.9%,说明PVA纤维混凝土的耗散能具有明显的应变率效应.混凝土耗散能增加主要是因为试件内部微裂纹的形成和

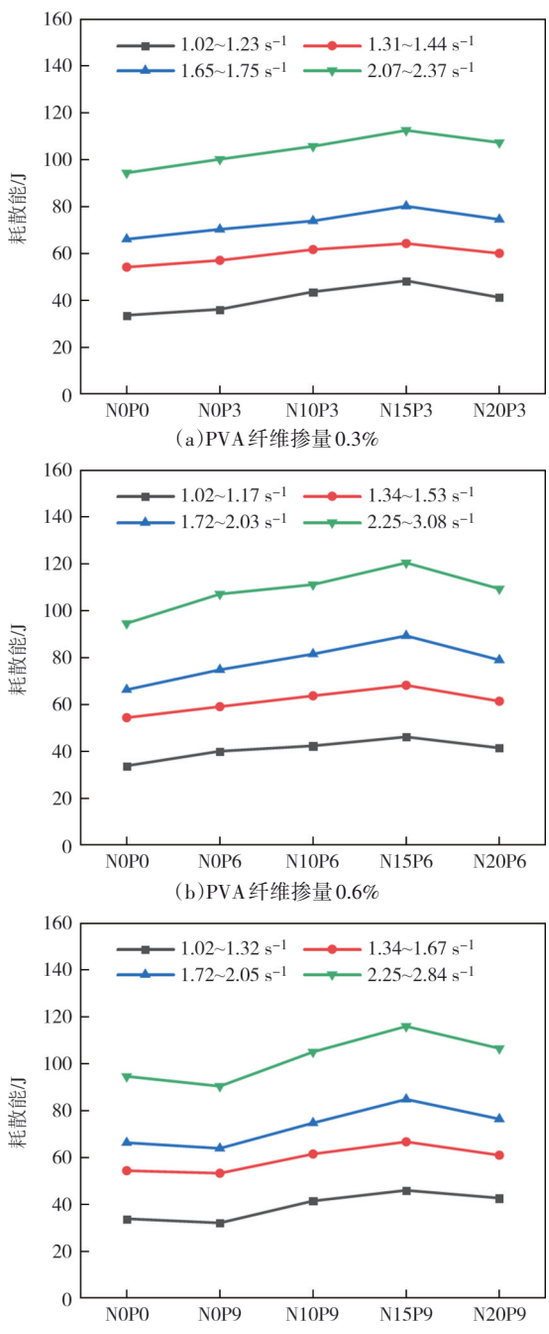


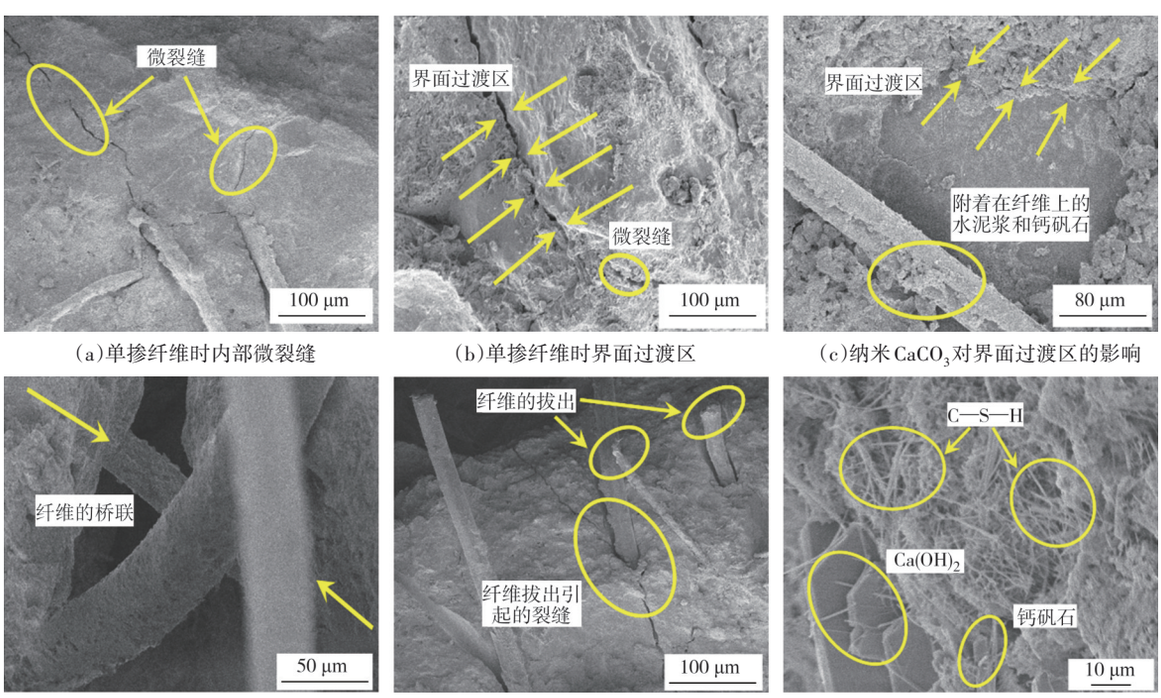
图5 不同应变率下纳米$CaCO_3$-PVA纤维混凝土耗散能

Fig.5 Dissipation energy of nano-$CaCO_3$-PVA fiber reinforced concrete under different strain rates

主裂纹的扩展.在较高应变率下,混凝土耗散能力的增加主要归因于裂缝的增多[25].因为在高速冲击下试件的加载时间非常短,没有足够的时间让裂纹扩展,而裂纹的形成比裂纹扩展消耗更多的能量,所以大大提高了耗能能力.在相同应变率范围内,随着纳米 $CaCO_3$ 掺量的增加,PVA 纤维混凝土的耗散能呈现先增大后减小的趋势.在应变率为 2.25~3.08 s^{-1} 时,N15P6、N10P6 组的耗散能比 N0P6 组分别提高了 12.4%、3.7%,这是因为纳米 $CaCO_3$ 可以促进水化产物的生成来填补纤维与基体之间的孔隙,增强了纤维与基体之间的黏结度,使纤维脱黏、拔出过程所吸收的能量提高,从而增大了试件的耗散能.当纳米 $CaCO_3$ 掺量为 2.0% 时,PVA 纤维混凝土试件的耗散能有所降低,这是因为加入过量纳米 $CaCO_3$,颗粒容易黏聚在一起,使混凝土内部孔隙、微裂缝数量增多,冲击荷载作用下试件会沿着裂缝迅速发生破坏,混凝土的耗能能力降低.

2.3　纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土微观结构的影响

图 6 为纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土养护 28 d 时微观性能的影响.对比图 6(a)(b)(c)可以看出,单掺 PVA 纤维的混凝土试样容易在纤维附近和界面过渡区产生微裂缝,虽然 PVA 纤维可以限制较大尺寸裂缝的发展,但无法抑制纳米级裂缝的产生和发展.掺入纳米 $CaCO_3$ 后,纳米 $CaCO_3$ 发挥晶核作用和填充作用,基体内部的孔隙数量明显减少,PVA 纤维与基体之间的界面过渡区更加密实,从而限制了微裂缝沿此薄弱区域的产生和扩展.同时,如图 6(d)所示,PVA 纤维横跨在裂缝之间,通过桥联作用使裂缝两端的水泥基体形成粘连结构,分散裂缝尖端的应力,有效抑制了裂缝的扩展.图 6(e)反映了部分 PVA 纤维在桥接裂缝时被拔出和随着纤维拔出产生的微裂缝,这是由于掺入纳米 $CaCO_3$ 后 PVA 纤维与基体之间的黏结程度增强,纤维脱黏、拔出过程中与水泥基体之间的摩擦力增大,所吸收的能量有所提高,这也解释了纳米 $CaCO_3$ 为何能够提高 PVA 纤维混凝土试件的耗散能.



(a)单掺纤维时内部微裂缝　(b)单掺纤维时界面过渡区　(c)纳米 $CaCO_3$ 对界面过渡区的影响

(d)PVA 纤维的桥联作用　(e)PVA 纤维的拔出作用　(f)纳米 $CaCO_3$ 对水化产物的影响

图 6　纳米 $CaCO_3$ 对 PVA 纤维混凝土微观结构的影响

Fig.6　Effect of nano-$CaCO_3$ on microstructure of PVA fiber reinforced concrete

从图 6(f)可以观察到呈纤维状的 C—S—H 凝胶、层板状的 $Ca(OH)_2$ 晶体和短柱状的钙矾石,C—S—H 凝胶将纳米 $CaCO_3$ 包裹在中间.纳米 $CaCO_3$ 主要通过发挥晶核作用和化学作用来提高水泥的水化反应速率,促进水化产物的生成.纳米 $CaCO_3$ 作为水化反应的成核位点,能迅速吸附水泥颗粒与水产生的 Ca^{2+} 和 OH^-,从而在其表面生成 $Ca(OH)_2$ 晶体和 C—S—H 凝胶,促进水化产物的生成,同时降低 C_3S 和水泥颗粒周围的 Ca^{2+} 浓度,进一步加速 C_3S 和水泥颗粒的水化.此外,纳米 $CaCO_3$ 与 C_3A(铝

酸三钙)反应生成具有特殊骨架和高渗透性的水化碳铝酸钙,这也增加了水泥颗粒周围的离子浓度梯度,从而加速离子扩散,促进水泥颗粒水化[26]. 生成的水化产物填充在PVA纤维与基体的结合界面以及水泥基体内部的孔隙和微裂缝中,细化了基体的孔结构,提高了水泥基体的密实度,进而增强了混凝土的力学性能.

3 结 论

本文通过对不同纳米$CaCO_3$掺量的PVA纤维混凝土进行静动态劈裂抗拉试验,探究不同纳米$CaCO_3$掺量和应变率下PVA纤维混凝土的劈裂抗拉强度、耗散能的变化规律及相应的破坏形态,得出以下结论:

1)纳米$CaCO_3$的掺入对PVA纤维混凝土的静态劈裂抗拉性能有增强作用. 随着纳米$CaCO_3$掺量的增加,混凝土的静态劈裂抗拉强度先增大后减小. 当养护龄期为28 d,纳米$CaCO_3$和PVA纤维掺量分别为1.5%、0.6%时,混凝土静态劈裂抗拉强度达到最大.

2)纳米$CaCO_3$-PVA纤维混凝土动态劈裂抗拉破坏分为初始裂缝产生、裂缝扩张和新裂缝产生、纤维拔出和拉断三个阶段. 随着应变率的增大,PVA纤维混凝土试件的破坏程度逐渐加大且破坏模式相似,都是由中心裂缝开始向两加载端扩展,最终沿加载方向劈裂成两部分.

3)在同一纳米$CaCO_3$掺量下,PVA纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度和耗散能均随应变率增加而增大,具有明显的应变率效应;在同一应变率下,PVA纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度和耗散能随纳米$CaCO_3$掺量增加呈现先增大后减小的趋势. 纳米$CaCO_3$掺量为1.5%时,PVA纤维混凝土的动态劈裂抗拉强度和耗散能达到最大,纳米$CaCO_3$的掺入能够有效增强PVA纤维混凝土的动态劈裂抗拉性能.

4)PVA纤维通过桥联作用来抑制裂缝的扩展,但抑制的裂缝尺寸有限. 掺入纳米$CaCO_3$后,纳米$CaCO_3$发挥晶核作用、化学作用和填充作用,通过促进水化产物的生成来填补混凝土内部的孔隙和微裂缝,使PVA纤维和水泥基体之间的界面过渡区更加致密,进一步增强了PVA纤维的阻裂作用,宏观上提高了混凝土材料的劈裂抗拉性能.

参考文献

[1] JIANG J Y, FENG T T, CHU H Y, et al. Quasi-static and dynamic mechanical properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete containing aeolian sand [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97: 369-378.

[2] JALAL A, SHAFIQ N, NIKBAKHT E, et al. Mechanical properties of hybrid basalt-polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced concrete [J]. Key Engineering Materials, 2017, 744: 3-7.

[3] 张广泰,张路杨,邢国华,等. 聚丙烯纤维混凝土梁受剪承载力试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(5):70-77.
ZHANG G T, ZHANG L Y, XING G H, et al. Experimental study on shear capacity of polypropylene fiber concrete beams [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5): 70-77. (in Chinese)

[4] 毕继红,霍琳颖,赵云,等. 钢纤维混凝土的本构模型及力学性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(7):9-18.
BI J H, HUO L Y, ZHAO Y, et al. Constitutive model and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(7): 9-18. (in Chinese)

[5] ARAIN M F, MEMON H, WANG M X, et al. Matrix tailoring for polyvinyl alcohol (PVA) fiber-reinforced ductile cementitious composites [J]. AATCC Journal of Research, 2023, 10(2): 63-72.

[6] FENG Y, NIU Z J, ZHAO C, et al. Compressive test investigation and numerical simulation of polyvinyl-alcohol (PVA) -fiber-reinforced rubber concrete[J]. Buildings, 2023, 13(2): 431.

[7] NOUSHINI A, VESSALAS K, SAMALI B. Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fibre reinforced concrete (PVA-FRC) [J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(9): 465-483.

[8] 徐阳晨,邢国华,黄娇,等. 聚乙烯醇纤维和碳纳米管改性对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报,2023,26(7):809-815.
XU Y C, XING G H, HUANG J, et al. Effect of PVA fiber and carbon nanotubes modification on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7): 809-815. (in Chinese)

[9] SUN M, ZHU J Q, SUN T, et al. Multiple effects of nano-$CaCO_3$ and modified polyvinyl alcohol fiber on flexure-tension-resistant performance of engineered cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124426.

[10] 赵静,李晓峰,郭力. 玄武岩-聚丙烯纤维混凝土孔隙结构分形维数及力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程,2023(8):78-84.
ZHAO J, LI X F, GUO L. Study on fractal dimension and mechanical properties of basalt polypropylene fiber concrete pore structure[J]. Composites Science and Engineering, 2023(8):78-84.(in Chinese)

[11] 康玉梅,佟佳欣. 多壁碳纳米管对钢渣混凝土力学及耐久性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023,54(8): 3070-3078.
KANG Y M,TONG J X. Effect of multi-walled carbon nanotubes on mechanical and durability of steel slag concrete[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(8): 3070-3078.(in Chinese)

[12] LIU Y J,ZHONG X,REZA MOHAMMADIAN H. Role carbon nanomaterials in reinforcement of concrete and cement; A new perspective in civil engineering [J]. Alexandria Engineering Journal,2023,72:649-656.

[13] 陈泽辛, 周宗伯 ,余志辉, 等. 碳酸钙晶须增强水泥基复合材料高温作用后的弯曲性能[J]. 功能材料, 2023, 54(9): 9100-9106.
CHEN Z X, ZHOU Z B, YU Z H, et al. Flexural properties of calcium carbonate whisker reinforced cementitious composites after exposed to elevated temperature[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(9): 9100-9106.(in Chinese)

[14] 肖佳, 周书会, 申闯, 等. 纳米 $CaCO_3$ 对水泥混凝土性能影响的研究进展[J]. 建筑科技, 2018, 2(1): 80-84.
XIAO J, ZHOU S H, SHEN C, et al. Research progress on the effect of nano $CaCO_3$ on the properties of cement concrete[J]. Building Technology,2018,2(1):80-84.(in Chinese)

[15] SATO T, BEAUDOIN J J. Effect of nano-$CaCO_3$ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials [J]. Advances in Cement Research, 2011, 23(1): 33-43.

[16] SEKKAL W, ZAOUI A. Nanoscale analysis of the morphology and surface stability of calcium carbonate polymorphs [J]. Scientific Reports,2013,3:1587.

[17] 苗生龙, 李庆涛, 赵园园,等. 高温后掺纳米 $CaCO_3$ 混凝土劈裂抗拉性能研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(3):68-72.
MIAO S L, LI Q T, ZHAO Y Y, et al. Study on splitting tensile properties of nano-$CaCO_3$ concrete after high temperature[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020,42(3):68-72.(in Chinese)

[18] 杨国梁,李峰,张志飞,等. 聚乙烯醇纤维混凝土动态断裂过程试验研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(2): 454-462.
YANG G L, LI F, ZHANG Z F, et al. Experimental study on dynamic fracture process of polyvinyl alcohol fiber concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 454-462.(in Chinese)

[19] 谢磊,李庆华,徐世烺. 纤维掺量对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9):3086-3100.
XIE L, LI Q H, XU S L. Influence of fiber volume fraction on dynamic compressive properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2021,38(9): 3086-3100.(in Chinese)

[20] CHEN M, ZHONG H, WANG H, et al. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete under dynamic splitting tension [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103764.

[21] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.(in Chinese)

[22] 鞠杨, 李业学, 谢和平, 等. 节理岩石的应力波动与能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2426-2434.
JU Y, LI Y X, XIE H P, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2426-2434.(in Chinese)

[23] 王怀亮. 双向应力下碾压混凝土动态力学性能[J]. 建筑材料学报,2015,18(5):847-851.
WANG H L. Dynamic properties of RCC in biaxial stress states [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 847-851.(in Chinese)

[24] CHEN X D, GE L M, ZHOU J K, et al. Dynamic Brazilian test of concrete using split Hopkinson pressure bar[J]. Materials and Structures, 2016, 50(1): 1.

[25] FENG W H, LIU F, YANG F, et al. Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 675-687.

[26] FU Q, ZHANG Z R, ZHAO X, et al. Effect of nano calcium carbonate on hydration characteristics and microstructure of cement-based materials: a review [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104220.