

文章编号:1007-9629(2021)05-0908-08

纳米 SiO₂和 PVA 纤维增强水泥基复合材料的 断裂性能

张 鹏, 亢洛宜, 郭进军, 王 娟
(郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:通过18组共90根纳米 SiO₂和聚乙烯醇(PVA)纤维增强水泥基复合材料预制切口小梁试件的三点弯曲断裂试验,以起裂断裂韧度和断裂能作为评价指标,探讨了纳米 SiO₂掺量、PVA 纤维体积分数及石英砂粒径对水泥基复合材料断裂性能的影响.结果表明:适量的纳米 SiO₂和 PVA 纤维可显著改善试件的断裂性能,在未掺纳米 SiO₂或纳米 SiO₂掺量为 2.0% 条件下,随着 PVA 纤维体积分数的增加,试件的起裂断裂韧度和断裂能均呈现先增后减趋势,且均在 PVA 纤维体积分数为 1.2% 时达到最大值.当纳米 SiO₂掺量小于 1.5% 时,试件的断裂性能随着纳米 SiO₂掺量的增加而提高;当纳米 SiO₂掺量大于 1.5% 时,纳米 SiO₂的掺入对试件的断裂性能有不利影响;随着石英砂粒径的减小,试件的断裂性能逐渐降低.

关键词:水泥基复合材料;PVA 纤维;纳米 SiO₂;起裂断裂韧度;断裂能

中图分类号:TU528.0

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.002

Fracture Properties of Nano-SiO₂ and PVA Fiber Reinforced Cementitious Composites

ZHANG Peng, KANG Luoyi, GUO Jinjun, WANG Juan

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Through three-point bending fracture test of 18 groups of 90 pre-cut beam specimens of cementitious composite, the effect of polyvinyl alcohol (PVA) fiber and nano-SiO₂ contents on fracture properties of cementitious composite was revealed on condition that PVA fiber and nano-SiO₂ was added alone and by blending. The initial fracture toughness and fracture energy were used to evaluate fracture properties of cementitious composite. The results show that a moderate amount of PVA fiber and nano-SiO₂ incorporation can improve fracture properties of cementitious composite significantly. The initial fracture toughness and fracture energy of the beam specimens of cementitious composite without nano-SiO₂ and cementitious composite containing 2.0% nano-SiO₂ increase first and then decrease with the increase of PVA fiber volume content, and all the fracture parameters reach the maximum in the volume fraction of 1.2% of PVA fiber. When the content of nano-SiO₂ is less than 1.5%, the fracture properties of PVA fiber reinforced cementitious composite improve gradually with the increase of nano-SiO₂ content, however, the fracture properties of PVA fiber reinforced cementitious composite are adversely affected when the content of nano-SiO₂ exceeds 1.5%. With the decrease of quartz sand particle size, the fracture properties of nano-SiO₂ and PVA fiber reinforced cementitious composite decrease gradually.

Key words: cementitious composite; PVA fiber; nano-SiO₂; initial fracture toughness; fracture energy

收稿日期:2020-06-14; 修订日期:2020-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678534);河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTHN009)

第一作者:张 鹏(1978—),男,河南方城人,郑州大学教授,博士生导师,博士. E-mail: zhangpeng@zzu.edu.cn

通讯作者:郭进军(1972—),男,河南鲁山人,郑州大学教授,博士生导师,博士. E-mail: guojinjun@zzu.edu.cn

水泥基复合材料存在抗拉强度低、脆性大、韧性差等缺点,在各种荷载和变形作用下易产生裂缝.为改善这些缺点,国内外诸多研究者对改性水泥基复合材料进行了大量研究.结果表明,以聚乙烯醇(PVA)纤维作为增强体制备的水泥基复合材料具有优异的力学性能和较好的变形能力,有十分广阔的应用前景^[1].同时,许多水工建筑物在服役期间处于荷载与多种劣化因素的耦合作用下,因而,用于水利工程结构的水泥基复合材料不仅要具有优异的力学性能,同时还要有较高的耐久性.已有研究表明^[2-3],适量纳米SiO₂的掺入可显著改善水泥浆体的微观结构,从而显著提高水泥基复合材料的耐久性.基于此,可通过在水泥基复合材料中混掺PVA纤维和纳米SiO₂,以提高其力学性能和耐久性,延长结构的使用寿命,减少结构正常使用年限中的维修费用.

断裂性能对评价混凝土结构的安全性和耐久性具有重要意义^[4].然而,目前关于复掺纳米SiO₂和PVA纤维水泥基复合材料断裂性能的相关研究成果较少,因此,本文通过三点弯曲切口梁断裂试验,得到纳米SiO₂和PVA纤维增强水泥基复合材料(以下简称水泥基复合材料)的起裂断裂韧度和断裂能,研究了纳米SiO₂掺量、PVA纤维体积分数及石英砂粒径对水泥基复合材料断裂性能的影响规律,以期为水泥基复合材料的实际工程应用提供理论依据.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,河南省新乡孟电集团产;粉煤灰为I级粉煤灰,洛阳电厂产;纤维为高强、高弹性模量PVA纤维,可乐丽株式会社产;纳米材料为纳米SiO₂,SiO₂含量(质量分数,文中涉及的含量、水胶比等除特别注明外均为质量分数或质量比)为99.5%,平均粒径为30 nm,杭州万景新材料有限公司产;减水剂为减水率为22.0%的高效减水剂,江苏星辰化工有限公司产;拌和水为自来水;骨料为石英砂,巩义市元亨净水材料厂产.

1.2 配合比设计及试件制备

三点弯曲断裂试验采用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm、预切口深度为40 mm的缺口小梁试件,试件几何形状及尺寸见图1.

每个配合比下同时浇筑尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm立方体试件,用于测试水泥基复合材料的28 d立方体抗压强度(以下简称抗压强度).水泥基复合材料的水胶比为0.38,灰砂比为2.PVA

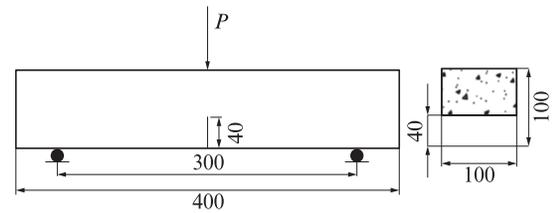


图1 切口小梁几何形状及尺寸
Fig. 1 Shape and size of notched beam (size:mm)

纤维体积分数为0%、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%和1.5%;纳米SiO₂掺量为0%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%(以水泥质量计);骨料采用4种粒径范围的石英砂,粒径范围分别为380~830、212~380、120~212、75~120 μm.共18组配合比,每组5个试件,试验结果取其平均值.水泥基复合材料配合比及抗压强度如表1所示.先将新拌水泥基复合材料装入试模,振捣、抹面后水平置于常温处,24 h后脱模;再放入标准养护室((20±2)°C、相对湿度95%以上)养护28 d.试验前对试件进行锯缝形式的预切口处理.

由表1可知:(1)当纳米SiO₂掺量为0%或2.0%时,随着PVA纤维体积分数的增加,试件抗压强度呈先增后减趋势,但增减幅度均较小;当PVA纤维体积分数为0.6%时,试件抗压强度达到最大值,与各自对照组(M1和M7)相比,分别增加了8.03%和8.07%.(2)当PVA纤维体积分数为0.9%时,试件抗压强度随纳米SiO₂掺量增加也呈先增后减趋势;当纳米SiO₂掺量从0%增至1.0%时,试件抗压强度逐渐增大;当纳米SiO₂掺量为1.0%时,试件抗压强度达到最大值,较单掺PVA纤维试件(M4)提高了16.02%;当纳米SiO₂掺量从1.0%增至2.5%时,试件的抗压强度呈现逐渐减小的趋势,特别地,当纳米SiO₂掺量从2.0%增大到2.5%时,可能由于较大掺量的纳米SiO₂易团聚,在试件受力过程中团聚处成为薄弱环节^[5],最终导致水泥基复合材料抗压强度大幅下降.(3)随着石英砂粒径的减小,试件的抗压强度基本呈现降低趋势.

1.3 试验方法

双K断裂准则是徐世焯等^[6]在研究素混凝土裂缝扩展问题时提出的简单实用的断裂准则.虽然因混凝土等水泥基材料中掺入纤维材料后,纤维进一步限制了材料的裂缝扩展,改变了材料的断裂特性,采用双K断裂准则有一定的局限性;但由于双K断裂准则判据的简单实用性,诸多学者在分析纤维混凝土断裂性能时仍采用双K断裂准则^[7-8].因此本文基于双K断裂模型,通过三点弯曲切口梁断裂试验,测得水泥基复合材料的起裂断裂韧度和断裂能.

表1 水泥基复合材料配合比及抗压强度

Table 1 Mix proportion and compressive strength of cementitious composite

Code	Water/ (kg·m ⁻³)	Cement/ (kg·m ⁻³)	Quartz sand/ (kg·m ⁻³)	Fly ash/ (kg·m ⁻³)	Water reducer/ (kg·m ⁻³)	φ(PVA fiber)/%	w (nano-SiO ₂)/%	Quartz sand particle size/μm	Compressive strength/MPa
M1	380	650	500	350	3	0	0	212-380	62.3
M2	380	650	500	350	3	0.3	0	212-380	64.8
M3	380	650	500	350	3	0.6	0	212-380	67.3
M4	380	650	500	350	3	0.9	0	212-380	61.8
M5	380	650	500	350	3	1.2	0	212-380	64.2
M6	380	650	500	350	3	1.5	0	212-380	62.7
M7	380	637	500	350	3	0	2.0	212-380	59.5
M8	380	637	500	350	3	0.3	2.0	212-380	61.8
M9	380	637	500	350	3	0.6	2.0	212-380	64.3
M10	380	637	500	350	3	0.9	2.0	212-380	56.3
M11	380	637	500	350	3	1.2	2.0	212-380	58.0
M12	380	637	500	350	3	1.5	2.0	212-380	54.9
M13	380	644	500	350	3	0.9	1.0	212-380	71.7
M14	380	640	500	350	3	0.9	1.5	212-380	69.5
M15	380	634	500	350	3	0.9	2.5	212-380	55.4
M16	380	637	500	350	3	0.9	2.0	380-830	70.6
M17	380	637	500	350	3	0.9	2.0	120-212	57.5
M18	380	637	500	350	3	0.9	2.0	75-120	57.3

三点弯曲断裂试验在600 kN微机控制电液伺服万能试验机上进行,采用荷载传感器测量荷载,其量程范围为0~50 kN,精度不低于1%。在断裂试验过程中采用电测位移传感器(LVDT)同步测量小梁试件的跨中挠度。试验采用DH3821静态应变测试分析系统,采集频率为2 Hz。将荷载传感器、LVDT与测试分析系统相连后可同步采集、存储竖向荷载及试件挠度值,得到试件的荷载-跨中挠度曲线。

1.4 断裂韧度与断裂能计算

双K断裂模型^[6,9]采用起裂断裂韧度 K_{IC}^Q 和失稳断裂韧度 K_{IC}^S 作为断裂性能的评价指标,其计算参考DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》。本文只采用 K_{IC}^Q 作为水泥基复合材料断裂韧度的评价指标。判读“荷载-跨中挠度”曲线上升段中从直线段转变为曲线段的转折点,该点所对应的荷载即为起裂荷载,结合试验测得的峰值荷载和“荷载-跨中挠度”曲线计算出试件的有效裂缝长度和 K_{IC}^Q 。

断裂能 G_F 是表征裂缝扩展所消耗能量的断裂参数^[10]。在断裂能和断裂韧度测试过程中同步采集试验数据,数据处理后可获得试件的荷载-跨中挠度($P-\delta$)曲线,进而根据式(1)计算出试件的断裂能^[9,11-12]:

$$\begin{aligned}
 G_F &= \frac{1}{b(h-a_0)} \left[\int_0^{\delta_{\max}} P(\delta) d\delta + mg\delta_0 \right] \\
 &= \frac{1}{b(h-a_0)} \left[W_0 + mg\delta_0 \right] \quad (1) \\
 &= \frac{W_0}{A} + \frac{mg\delta_0}{A}
 \end{aligned}$$

式中: A 为试件断裂韧带面积, m^2 , $A=b(h-a_0)$; b 、 h 、 a_0 分别为试件的高度、宽度及预制裂缝深度,本文 $b=0.1$ m、 $h=0.1$ m、 $a_0=0.04$ m; W_0 为 $P-\delta$ 曲线与 X 轴所围面积, N/m ; m 为支座跨度 S 上的总质量,其值等于试件质量 m_1 和试件上方辅助加载装置质量 m_2 之和, kg ; g 为重力加速度,取 9.8 m/s²; δ_0 为试件最终破坏时的跨中挠度, m 。

需要说明的是,对于纤维增强水泥基复合材料试件,其断裂时的断裂面积并不确定,断裂面等效受拉应力也并不为零,且计算时仅考虑作用在试件上外荷载做的功,因此由该方法计算得出的断裂能并不准确,所得参数仅用于本文各组之间的比较。

2 结果及分析

2.1 PVA纤维体积分数对断裂性能的影响

图2给出了未掺纳米SiO₂和纳米SiO₂掺量为2.0%时,PVA纤维体积分数对试件起裂断裂韧度的影响规律。由图2可知:(1)与未掺PVA纤维的试件相比,掺入PVA纤维试件的起裂断裂韧度明显提高。(2)单掺PVA纤维与复掺PVA纤维、纳米SiO₂试件的起裂断裂韧度随PVA纤维体积分数增加的变化趋势相同,均为先增大后减小,且最大值均出现在PVA纤维体积分数为1.2%时;当PVA纤维体积分数从0.3%增加到0.6%时,起裂断裂韧度提升幅度最大;当PVA纤维体积分数为1.2%时,与未掺PVA纤维试件相比,单掺PVA纤维试件和复掺PVA纤维、纳米SiO₂试件的起裂断裂韧度分别提高了59.10%和50.81%。

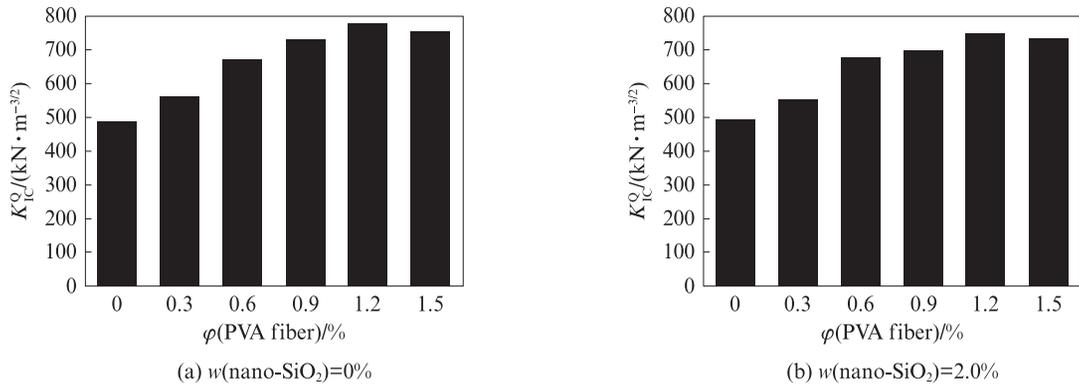


图 2 PVA 纤维体积分数对试件起裂断裂韧度的影响

Fig. 2 Effect of PVA fiber volume fraction on initial fracture toughness of specimens

图 3 给出了未掺纳米 SiO₂和纳米 SiO₂掺量为 2.0% 时, PVA 纤维体积分数对试件断裂能的影响规律. 由图 3 可以看出: PVA 纤维体积分数对试件的断裂能影响较大, 随着 PVA 纤维体积分数的增加, 试件的断裂能均先增大后减小, 当 PVA 纤维体积分数达到

1.2% 时, 试件的断裂能达到最大; 当 PVA 纤维体积分数为 1.2% 时, 与未掺 PVA 纤维试件相比, 单掺 PVA 纤维试件和复掺 PVA 纤维、纳米 SiO₂ 试件的断裂能增长了 1 559.43% 和 1 119.16%; 当 PVA 纤维体积分数从 1.2% 增加到 1.5% 时, 试件的断裂能呈现下降趋势.

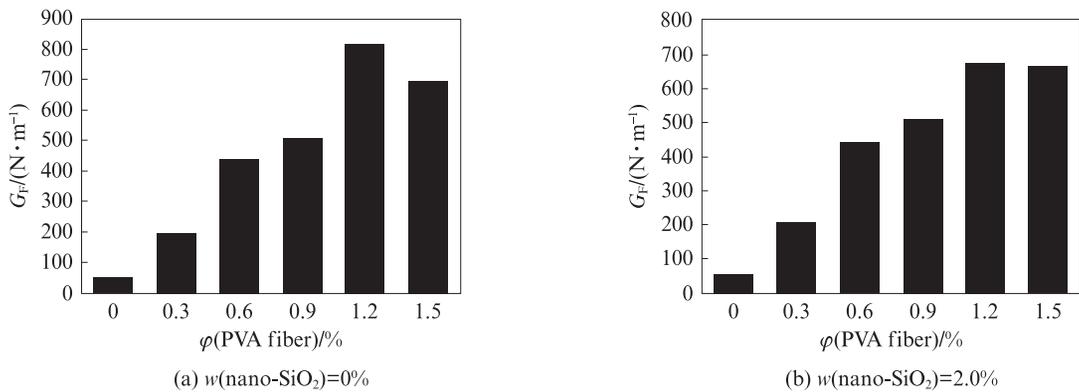


图 3 PVA 纤维体积分数对试件断裂能的影响

Fig. 3 Effect of PVA fiber volume fraction on fracture energy of specimens

未掺纳米 SiO₂和纳米 SiO₂掺量为 2.0% 时, 不同 PVA 纤维体积分数的水泥基复合材料试件的 $P-\delta$ 曲线如图 4 所示. 由图 4 可知: (1) 当 PVA 纤维体积分数

从 0% 增加到 1.2% 时, 试件的极限荷载逐渐增大; 当 PVA 纤维体积分数超过 1.2% 时, 试件的极限荷载开始逐渐降低, 表明 PVA 纤维体积分数适当的水泥基

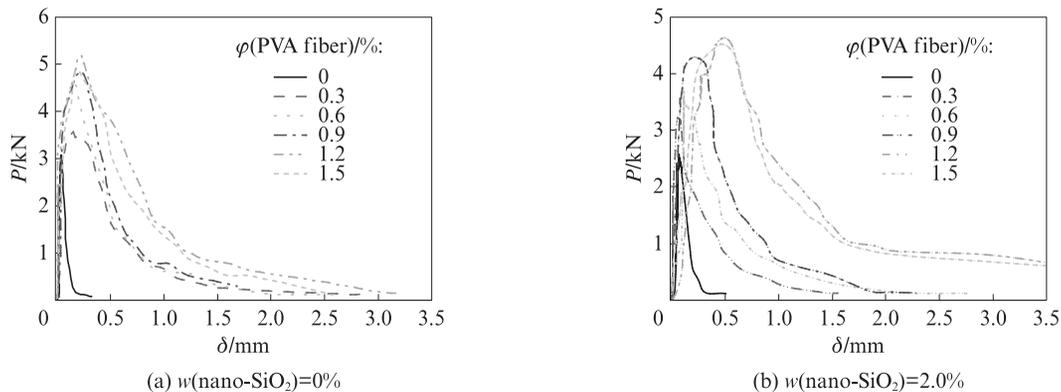


图 4 PVA 纤维体积分数对小梁试件荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 4 Effect of PVA fiber volume fraction on load-deflection curves of specimens

复合材料试件具有较高的承载能力。(2)当PVA纤维体积分数从0%变化到1.5%时,试件的最大跨中挠度和 $P-\delta$ 曲线的饱满度也基本呈现出先增大后减小的趋势,当PVA纤维体积分数达到1.2%时,试件的最大跨中挠度和 $P-\delta$ 曲线的饱满度最大,试件的 $P-\delta$ 曲线的变化规律也表明,随着PVA纤维体积分数的增加,PVA纤维增强水泥基复合材料和复掺PVA纤维、纳米 SiO_2 增强水泥基复合材料抵抗裂缝扩展的能力呈现先增强后降低的趋势。

PVA纤维对水泥基复合材料断裂性能的增强作用主要体现在以下2个方面:一方面PVA纤维与胶凝材料有较好的相容性,在水泥基复合材料中掺入PVA纤维后,PVA纤维均匀分布在基体内,打乱了水泥基复合材料基体内部原有的应力分布,限制了水泥基复合材料中裂缝的形成和扩展,使水泥基复合材料开裂时存在裂缝受阻或者裂缝偏转,从而产生多裂缝开裂现象,并且可以较好地抑制基体内微小裂缝向宏观裂缝扩展^[13];另一方面当裂缝出现后,PVA纤维会发挥阻裂效果,通过桥联作用将应力传递到周围的基体,减少应力集中,跨越裂缝的纤维也可以承受一部分应力,并且裂缝在扩展过程时还需要克服PVA纤维与基体界面之间存在的摩擦剪应力,有效地阻止了裂缝的发展^[1,14]。但当PVA纤维体积分数过大时,试件的起裂断裂韧度、失稳断裂韧度和断裂能有降低趋势,这可能是因为过多的PVA纤维掺入到基体中,导致试件内部孔隙增多,并且一部分纤维聚集成团,致使实际可以利用的纤维量有所减少,并在基体中形成薄弱面,使得材料性能降低^[15]。

2.2 纳米 SiO_2 掺量对断裂性能的影响

图5给出了PVA纤维体积分数为0.9%时,纳米 SiO_2 掺量对水泥基复合材料起裂断裂韧度的影响规律。由图5可知:随着纳米 SiO_2 掺量的增大,试件的起

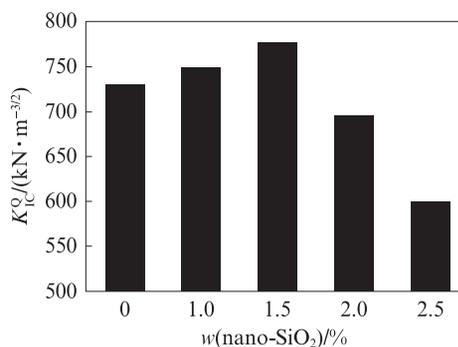


图5 纳米 SiO_2 掺量对试件起裂断裂韧度的影响
Fig. 5 Effect of nano- SiO_2 content on initial fracture toughness of specimens

裂断裂韧度先增后减;当纳米 SiO_2 掺量为1.5%时,试件的起裂断裂韧度出现最大值,较未掺纳米 SiO_2 的对照组提高了6.30%;当纳米 SiO_2 掺量为2.0%或2.5%时,试件的起裂断裂韧度低于对照组。由此说明,少量纳米 SiO_2 的掺入可小幅提高水泥基复合材料的起裂断裂韧度,但过量掺入会降低其起裂断裂韧度。

PVA纤维体积分数为0.9%时,纳米 SiO_2 掺量对水泥基复合材料断裂能和 $P-\delta$ 曲线的影响规律如图6所示。由图6(a)可知:随着纳米 SiO_2 掺量的增大,试件的断裂能先增后减;当纳米 SiO_2 掺量为1.5%时,试件的断裂能达到最大值;当纳米 SiO_2 掺量大于1.5%时,纳米 SiO_2 掺量对试件断裂能有不利影响,尤其是其掺量为2.5%时,试件的断裂能低于对照组。由图6(b)可见:随着纳米 SiO_2 掺量的增大,试件的极限荷载和 $P-\delta$ 曲线与横坐标轴之间的包络面积呈现先增加后减少的规律;在纳米 SiO_2 掺量低于1.5%时,试件的极限荷载和曲线与坐标轴之间的包络面积逐渐增大,纳米 SiO_2 掺量达到1.5%时,试件的极限荷载和曲线与坐标轴之间的包络面积最大,纳米 SiO_2 掺量高于1.5%时,试件的极限荷载和曲线

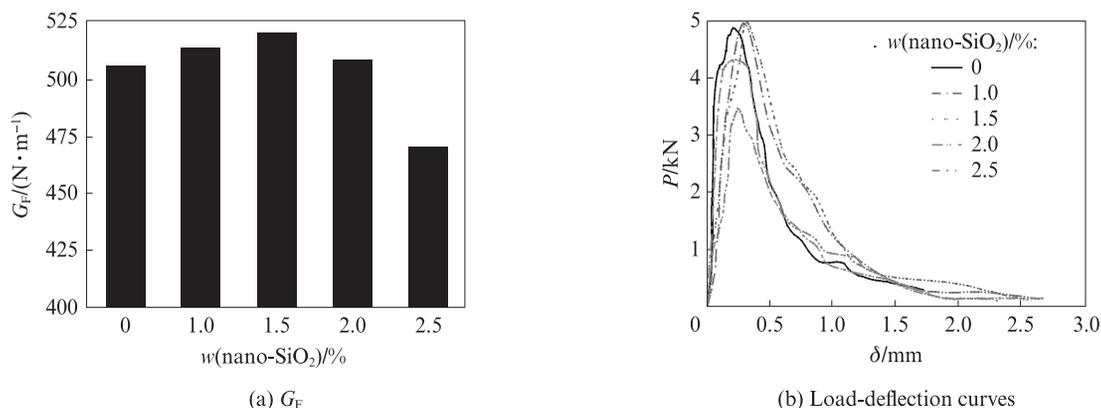


图6 纳米 SiO_2 掺量对试件断裂能和荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 6 Effect of nano- SiO_2 content on fracture energy and load-deflection curves of specimens

与坐标轴之间的包络面积开始减小.因此,在适量的掺量范围内,纳米SiO₂的掺入对PVA纤维增强水泥基复合材料的承载能力和韧性有一定的提升作用,但过量掺入对PVA纤维增强水泥基复合材料的承载能力和韧性有不利影响.

适量纳米SiO₂的掺入对PVA纤维增强水泥基复合材料的断裂性能有小幅度的提升,这可能是由于适量纳米SiO₂的掺入有效地发挥了纳米粒子的充填效应,显著增加了水泥基复合材料的密实度,减小了原生裂缝的数量及尺寸,微细裂缝产生应力集中而发展的可能性降低.同时PVA纤维与基体之间的摩擦力也取决于基体的密实程度,基体越密实,摩擦力越大,因此少量纳米SiO₂的掺入也更有效地发挥了PVA纤维的阻裂作用^[16].但过量纳米SiO₂掺入后,可能由于纳米SiO₂产生团聚现象,无法充分发挥纳米粒子的晶核效应和充填效应,并且拌和会吸附大量的表层水,参与水化的水量减少,导致水泥基复合材料的水化程度降低,水化不完全,在水泥基复合材料中形成薄弱地带区,宏观表现为对PVA纤维增强水泥基复合材料断裂性能产生了不利影响^[5].

2.3 石英砂粒径对断裂性能的影响

图7给出了PVA纤维体积分数和纳米SiO₂掺量分别为0.9%和2.0%时,石英砂粒径对水泥基复合材料起裂断裂韧度的影响规律.由图7可知:随着石英砂粒径的减小,试件的起裂断裂韧度呈现减小的趋势;对于以粒径为380~830 μm石英砂制备的试件,其起裂断裂韧度为723 kN·m^{-3/2},其余3组

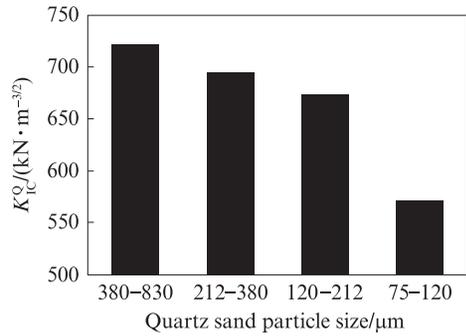


图7 石英砂粒径对试件起裂断裂韧度的影响
Fig. 7 Effect of quartz sand particle size on initial fracture toughness of specimens

试件的起裂断裂韧度分别为其起裂断裂韧度的96.1%、93.1%、78.90%.

PVA纤维体积分数为0.9%、纳米SiO₂掺量为2.0%时,石英砂粒径对水泥基复合材料断裂能和P-δ曲线的影响如图8所示.由图8可知:随着石英砂粒径的减小,试件的断裂能呈现降低趋势,试件的最大跨中挠度和荷载-挠度曲线的饱满度也随石英砂粒径的减小而减小;对于以粒径为380~830 μm的石英砂制备的试件,其断裂能为527.479 N/m,其余3组试件的断裂能分别是其断裂能的93.3%、90.0%、88.8%.由上述分析可知,随着石英砂粒径的减小,水泥基复合材料的断裂性能呈现降低趋势.这可能是因为裂缝需绕过骨料进行扩展,大粒径的石英砂对裂纹路径的阻碍作用较大,裂纹的扩展路径更加曲折,从而导致裂缝扩展时需要消耗更多的能量,而小粒径的石英砂对裂缝扩展的阻碍作用较小.

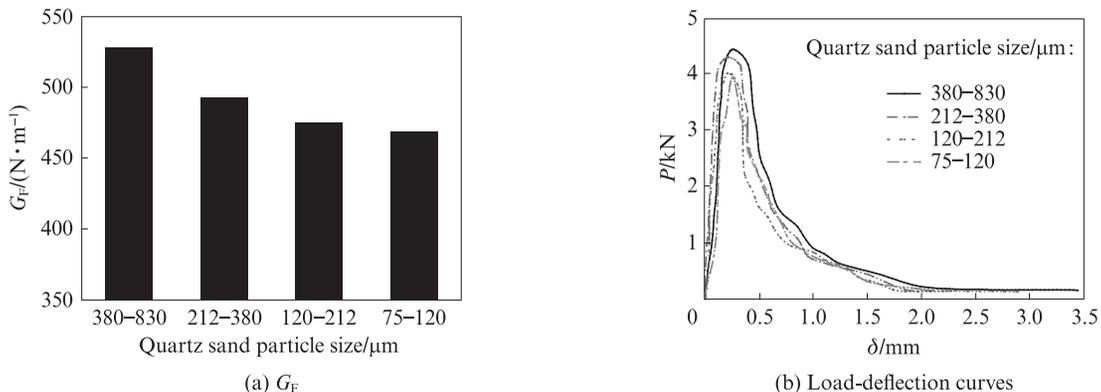


图8 石英砂粒径对试件断裂能和荷载-跨中挠度曲线的影响
Fig. 8 Effect of quartz sand particle size on fracture energy and load-deflection curves of specimens

2.4 PVA纤维和纳米SiO₂对水泥基复合材料微观结构的影响

图9为不同PVA纤维体积分数下未掺纳米SiO₂水泥基复合材料的微观形貌.由图9可以看出:当

PVA纤维体积分数为0.9%时,PVA纤维较均匀地分布在水泥基复合材料基体组织中,且PVA纤维可以桥联基体内的微裂缝,限制基体内微裂缝的扩展;当PVA纤维体积分数为1.5%时,水泥基复合材料

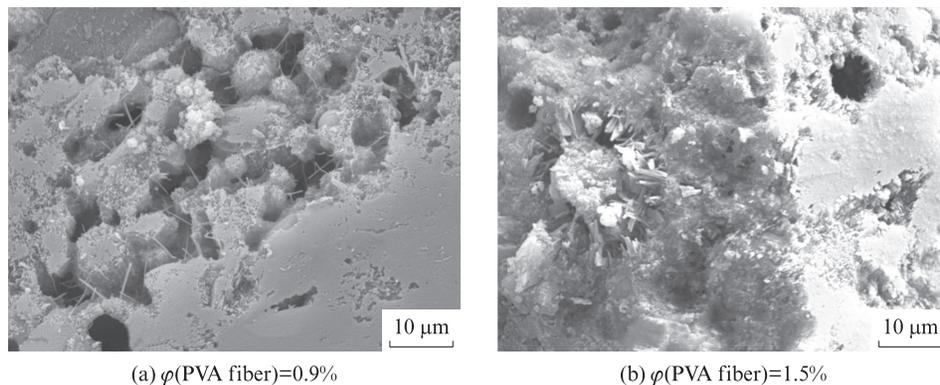
(a) $\varphi(\text{PVA fiber})=0.9\%$ (b) $\varphi(\text{PVA fiber})=1.5\%$

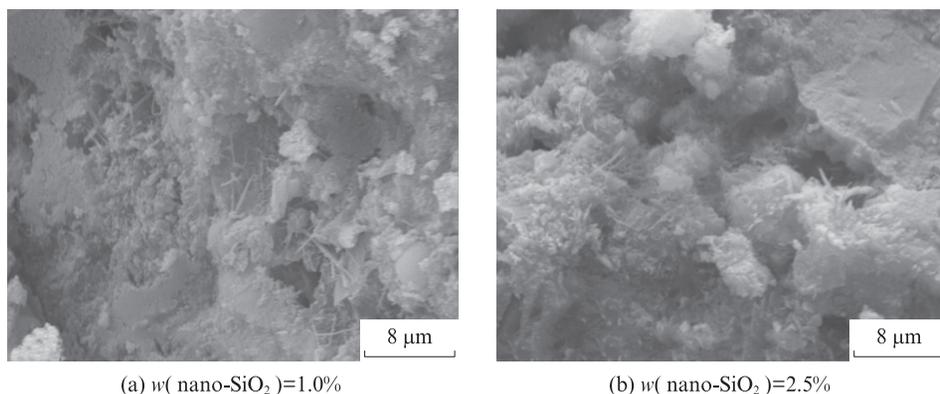
图9 不同PVA纤维体积分数下水泥基复合材料的微观形貌

Fig. 9 Morphology of PVA fiber volume fraction on microstructure of cementitious composites

基体中的部分PVA纤维聚集成团,其内部孔隙尺寸较PVA纤维体积分数为0.9%的水泥基复合材料大.这说明,适量的PVA纤维掺入到水泥基复合材料时,PVA纤维可以均匀分布,发挥其各种增强作用,从而提高水泥基复合材料的断裂性能;过量的PVA纤维掺入到水泥基复合材料时,部分PVA纤维会聚集成团,不能有效发挥PVA纤维的优良特性,从而导致水泥基复合材料断裂性能降低.

在PVA纤维体积分数为0.9%条件下,研究了纳米 SiO_2 掺量为1.0%和2.5%时水泥基复合材料的微观形貌如图10所示.对比图10(a)与图9(a)可知,掺入1.0%的纳米 SiO_2 后,试件基体中的孔洞数量较少,有明显的簇状结构出现,其致密性较高.由

图10(b)可见,试件基体中出现了纳米 SiO_2 团聚现象,且出现未完全水化的颗粒.相关研究结果表明,纳米 SiO_2 具有较高的活性和较大的比表面积,可以提供大量的成核位点,既可以使C-S-H凝胶在其表面键合,形成以纳米 SiO_2 颗粒为核心的簇状结构,又能促进水泥水化,可改善并强化水泥基复合材料基体的微观结构^[17].适量纳米 SiO_2 的掺入可有效发挥其小尺寸效应和表面效应,增强基体的密实性,从而改善PVA纤维增强水泥基复合材料的断裂性能;过量纳米 SiO_2 的掺入易引起纳米粒子的团聚,拌和时吸附大量自由水,导致水泥基复合材料基体中出现未完全水化部分,从而降低了水泥基复合材料的断裂性能.

(a) $w(\text{nano-SiO}_2)=1.0\%$ (b) $w(\text{nano-SiO}_2)=2.5\%$ 图10 纳米 SiO_2 掺量对水泥基复合材料微观结构的影响Fig. 10 Effect of nano- SiO_2 content on microstructure of cementitious composites

3 结论

(1)当PVA纤维体积分数由0%增大到1.5%时,无论水泥基复合材料中是否掺入纳米 SiO_2 ,试件的起裂断裂韧度和断裂能均呈现出先增后减的趋势,且在PVA纤维体积分数为1.2%时达到最大值.适量PVA纤维的掺入可显著增强水泥基复合材料

的断裂性能.

(2)适量的纳米 SiO_2 对水泥基复合材料的断裂性能有一定的增强效果,但过量掺入后,可能由于团聚效应会对其断裂性能带来不利影响.

(3)水泥基复合材料的起裂断裂韧度和断裂能随着石英砂粒径的减小表现出一致的变化规律,均呈现降低的趋势.

参考文献:

- [1] 公成旭,张君.高韧性纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J].水利学报,2008,39(3):361-366.
GONG Chenxu, ZHANG Jun. Tensile performance of high ductile fiber reinforced cementitious composite [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 361-366. (in Chinese)
- [2] 张鹏,代小兵,高继祥,等.纳米SiO₂和PVA纤维增强水泥基复合材料抗冻性能[J].土木工程与管理学报,2017,34(6):41-44.
ZHANG Peng, DAI Xiaobing, GAO Jixiang, et al. Study on freezing resistance of nano-SiO₂ and PVA fiber reinforced cement matrix composites [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(6): 41-44. (in Chinese)
- [3] 张鹏,万进一,苏红梅,等.纳米粒子和PVA纤维增强水泥基复合材料抗碳化性能研究[J].水电能源科学,2017,35(12):108-111.
ZHANG Peng, WAN Jinyi, SU Hongmei, et al. Carbonation resistance of nano-particles and PVA fiber reinforced cement based composites [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(12): 108-111. (in Chinese)
- [4] 黄庆康,孙巍巍,董浩林,等.混杂纤维增强水泥基复合材料断裂性能研究[J].混凝土与水泥制品,2016(5):49-52.
HUANG Qingkang, SUN Weiwei, DONG Haolin, et al. Study on fracture properties of hybrid fiber reinforced cement-based composites [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(5): 49-52. (in Chinese)
- [5] 罗素蓉,白俊杰.纳米改性对再生混凝土双K断裂参数的影响[J].水利学报,2018,49(6):670-677.
LUO Surong, BAI Junjie. Effect of nano-modification on double-K fracture parameters of recycled concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 670-677. (in Chinese)
- [6] 徐世焯,赵国藩.混凝土结构裂缝扩展的双K断裂准则[J].土木工程学报,1992,25(2):20-33.
XU Shilang, ZHAO Guofan. A double-K fracture criterion for the crack propagation in concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(2): 20-33. (in Chinese)
- [7] 范杰,李庚英,熊光晶,等.聚乙烯醇改性水泥砂浆的断裂性能[J].建筑材料学报,2016,19(2):336-341,358.
FAN Jie, LI Gengying, XIONG Guangjin, et al. Fracture properties of polyvinyl alcohol modified cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 336-341, 358. (in Chinese)
- [8] SUN X, GAO Z, CAO P, et al. Fracture performance and numerical simulation of basalt fiber concrete using three-point bending test on notched beam [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225(20): 788-800.
- [9] 赵亚楠.纳米粒子PVA纤维水泥基复合材料力学性能研究[D].郑州:郑州大学,2016.
- ZHAO Yanan. Study on mechanical properties of PVA fiber reinforced cementitious composite containing nano-particles [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)
- [10] 郭向勇,方坤河,冷发光.混凝土断裂能的理论分析[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(9):1219-1222.
GUO Xiangyong, FANG Kunhe, LENG Faguang. Analysis of the theory of fracture energy of concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(9): 1219-1222. (in Chinese)
- [11] 张秀芳,徐世焯.采用荷载-裂缝张开口位移曲线确定混凝土三点弯曲梁的断裂能[J].水利学报,2008(6):714-719.
ZHANG Xiufang, XU Shilang. Determination of fracture energy of three-point bending concrete beam using relationship between load and crack-mouth opening displacement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(6): 714-719. (in Chinese)
- [12] XU S L, REINHARDT H W. A simplified method for determining double-K fracture parameters for three-point bending tests [J]. International Journal of Fracture, 2000, 104(2): 181-209.
- [13] 张鹏,亢洛宜,魏华,等.PVA纤维和纳米SiO₂对地聚合物砂浆断裂性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(6):986-992.
ZHANG Peng, KANG Luoyi, WEI Hua, et al. Effect of PVA fiber and nano-SiO₂ on fracture properties of geopolymers mortar [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6): 986-992. (in Chinese)
- [14] 王金羽.PVA纤维与钢纤维对高性能纤维增强水泥基复合材料断裂性能的影响试验研究[D].北京:北京交通大学,2011.
WANG Jinyu. Experimental study on influence of polyvinyl alcohol fiber and steel fiber on fracture properties of high performance fiber reinforced cementitious composites [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [15] 王晓刚, WITTMANN F H, 赵铁军.优化设计水泥基复合材料应变硬化性能研究[J].混凝土与水泥制品,2006(3):46-49.
WANG Xiaogang, WITTMANN F H, ZHAO Tiejun. Study on the optimal design of strain hardening properties of cement-based composites [J]. China Concrete and Cement Products, 2006(3): 46-49. (in Chinese)
- [16] 李庆华,赵昕,徐世焯.纳米二氧化硅改性超高韧性水泥基复合材料冲击压缩试验研究[J].工程力学,2017,34(2):85-93.
LI Qinghua, ZHAO Xin, XU Shilang. Impact compression properties of nano-SiO₂ modified ultra high toughness cementitious composites using a split hopkinson pressure bar [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 85-93. (in Chinese)
- [17] LI G Y. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂ [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 1043-1049.