

文章编号: 1674-599X(2022)01-0043-12

混杂纤维超高性能混凝土断裂性能研究

梁睿, 李传习, 聂洁, 李海春, 刘高成, 王圣杰

(长沙理工大学桥梁与建筑绿色建造和维护湖南省重点实验室, 湖南 长沙, 410114)

摘 要: 为探明超高性能混凝土(UHPC)的断裂性能与机理, 以合成纤维替代率为变量, 通过三点弯曲断裂试验, 以聚乙烯醇纤维(PVA)、聚丙烯纤维(PP)替代部分钢纤维对UHPC断裂性能的影响进行研究, 并使用修正后的双K断裂韧度与断裂能的计算公式, 分别计算了不同纤维含量的UHPC断裂性能指标。研究表明: 合成纤维(PVA或PP纤维)替代部分钢纤维后, 荷载-裂缝口张开位移曲线会出现“二次硬化”现象, 荷载-位移曲线的下降段会出现明显波动; PVA纤维替代部分钢纤维后, 可有效提高UHPC的起裂韧度与延性, 同时亦会造成黏聚韧度与纤维桥接韧度的下降, 以致失稳韧度的下降; PP纤维替代部分钢纤维后, 会导致UHPC起裂韧度小幅下降, 失稳韧度与断裂能明显下降; PVA纤维与PP纤维各半, 共同替代30%的钢纤维后, 能综合提高UHPC的断裂力学性能, 是最理想的钢纤维替代方案。

关键词: UHPC; 混杂纤维; 替代钢纤维; 断裂韧度; 断裂能; 纤维桥接韧度增量

中图分类号: TV413.3

文献标志码: A

Research on fracture toughness of hybrid-fiber ultra-high performance concrete with steel fiber and different synthetic fibers

LIANG Rui, LI Chuan-xi, NIE Jie, LI Hai-chun, LIU Gao-cheng, WANG Sheng-jie

(Hunan Key Laboratory of Green Construction and Maintenance of Bridges and Buildings in Changsha University of Science & Technology, ChangSha 410114, China)

Abstract: In order to explore the fracture performance and mechanism of ultra-high performance concrete (UHPC), the effect of polyvinyl alcohol fiber (PVA) and polypropylene fiber (PP) replacing part of steel fibers on the fracture performance of UHPC was studied by three-point bending fracture test with the substitution rate of synthetic fiber as the variable. The modified double-K fracture toughness formula and fracture energy formula were used to calculate the fracture performance indexes of UHPC with different fiber contents. The results show that, the phenomenon of "secondary hardening" occurs in the load-CMOD curve and obvious fluctuation can be found in the descending section of the load-deflection curves after replacing part of steel fiber with synthetic fiber (PVA or PP). The initiation toughness and ductility of UHPC could be effectively improved by replacing part of steel fiber with PVA fiber, and the cohesive toughness and bridge connection toughness are decreased, as so to reduce the unstable toughness. When PP fiber is used to replace part of steel fiber, the fracture initiation toughness of UHPC is slightly decreased, but the unstable toughness and fracture energy are reduced significantly. The fracture mechanical properties of UHPC could be comprehensively improved when 30% of steel fiber is replaced by mean proportion of PVA fiber and PP fiber, which is the most ideal solution for replacing steel fiber.

Key words: UHPC; hybrid fiber; replacing steel fiber; fracture toughness; fracture energy; bridge connection toughness increment

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078059, 51778069, 51805055)

作者简介: 梁睿(1996—), 男, 长沙理工大学硕士生。

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, 简称为UHPC) 是一种具有超高强度、超高韧性和超强耐久性的新型水泥基复合材料^[1-2], 通常掺入钢纤维或高强聚合物纤维, 从而提高其抗拉、弯曲韧性和抗冲击能力^[3]。目前, 已广泛应用于大跨径桥梁、超高层建筑及其他特殊结构当中^[4-6]。在开展工程应用的同时, 对其材料性能的深入研究仍不可或缺, 而作为准脆性材料, 断裂性能研究是UHPC安全评定的重要研究课题之一。但是由于钢纤维造价较高, 且通常在UHPC中掺量较大, 导致UHPC的成本较高, 在一定程度上阻碍了其进一步的应用与发展^[7]。PVA纤维表面存在羟基, 具有良好的亲水性, 与基体锚固性能好, 有利于阻碍微裂缝的发展, 能有效提高混凝土的断裂性能^[8-10]。已有研究表明: PP纤维能有效阻碍混凝土开裂^[11], 对提高混凝土的断裂韧性和改善裂后行为有明显的效果^[12-14]。考虑到这两种纤维的经济性明显优于钢纤维的^[13,15], 若以合成纤维 (PVA或PP纤维) 代替部分钢纤维, 能提高断裂力学性能, 降低经济成本, 对UHPC的推广应用有重要意义。

国内外学者已对UHPC的断裂性能进行了一系列研究。杨益伦等人^[16-17]分别针对不同钢纤维掺量、不同试件尺寸研究钢纤维对UHPC断裂性能的影响, 均表明钢纤维的掺入能有效提高UHPC的断裂韧性。Sovják等人^[18-19]的研究表明: UHPC的断裂能随钢纤维掺量增加而增加。邓宗才^[8]研究了不同掺量的钢纤维与粗聚烯烃纤维和聚乙烯醇纤维混掺、不同几何尺寸钢纤维混掺对改善UHPC韧性的效果表明: 钢纤维与合成纤维在裂缝开裂阶段相继发生作用, 能有效提高UHPC的韧性。这些研究表明: 钢纤维掺量的增加对提高UHPC的断裂性能至关重要, 在掺入钢纤维的基础上加入不同性能、尺寸的合成纤维, 能进一步提高UHPC的断裂性能, 但针对PVA纤维与PP纤维替代部分钢纤维对UHPC断裂性能影响的研究鲜见。因此, 本研究拟以PVA纤维与PP纤维替代部分钢纤维, 混掺3种不同几何尺度与力学性能的纤维 (即钢纤维、PVA纤维、PP纤维) 制作混杂纤维超高性能混凝土 (hybrid-Fiber ultra-high performance concrete, 简称HFUHP) 材料, 通过切口梁三点弯曲试验, 基于双K断裂模型^[20-22], 研究HFUHP在不同纤维

混掺模式下的双K断裂韧度和断裂能, 分析合成纤维替代率对HFUHP断裂韧度的影响规律。通过纤维桥接韧度的增值, 探讨不同纤维混掺的影响效果。

1 双K断裂参数与断裂能解析式

断裂韧度 K_{Ic} 是断裂力学中重要的参数, 是判断混凝土对裂缝扩展的抵抗能力, 对评价裂缝的稳定性与结构的安全性起关键作用。国内外大量研究表明: 混凝土的断裂过程分为裂缝起裂、裂缝稳定扩展、裂缝失稳扩展等3个阶段。徐世烺等人^[23-24]提出了双K断裂理论, 引入了起裂韧度 K_{Ic}^{ini} 与失稳韧度 K_{Ic}^{un} 作为裂缝起裂与临界失稳的控制参数, 分别表征材料抵抗裂缝开展的能力和构件在裂缝即将失稳扩展时对外力的抵抗能力。当裂缝尖端处的应力强度因子 $K < K_{Ic}^{ini}$ 时, 裂缝不起裂; 当 $K_{Ic}^{ini} \leq K < K_{Ic}^{un}$ 时, 裂缝稳定扩展; 当 $K \geq K_{Ic}^{un}$ 时, 裂缝失稳扩展。

1.1 失稳韧度

试件的失稳韧度 K_{Ic}^{un} 的计算式为^[23]:

$$K_{Ic}^{un} = \frac{1.5 \left(P_{max} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2} \right) \times 10^{-3} S \sqrt{a_c}}{th^2} f(\alpha), \quad (1)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}. \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a_c}{h}. \quad (3)$$

$$a_c = \frac{2}{\pi} (h + h_0).$$

$$\arctan \sqrt{\frac{tE \cdot (CMOD_c + \Delta CMOD)}{32.6(P_{max} + \Delta P)}} - 0.1135 - h_0. \quad (4)$$

$$E = \frac{k}{t} \left[3.70 + 32.60 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right) \right]. \quad (5)$$

$$\Delta P = \frac{mg}{2} \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

$$\Delta CMOD = \frac{\Delta P}{tE} \left[3.70 + 32.60 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right) \right] + \frac{b}{k}. \quad (7)$$

式中: P_{max} 为切口梁三点弯曲试验实测峰值荷载,

kN; S 为两支座间的跨度, m; t 为试件厚度, m; h 为试件高度, m; a_0 为初始裂缝长度, m; a_c 为临界失稳下裂缝的长度; CMOD_c 为临界失稳状态下裂缝口张开位移临界值, μm , 如图1所示; m 为支座间试件的质量, kg; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; h_0 装置夹式引伸计刀口薄钢板的厚度, m; E 为P-CMOD曲线的计算切线弹性模量, GPa; k 为P-CMOD曲线弹性段拟合直线的斜率, kN/mm; b 为P-CMOD曲线弹性段拟合直线的截距, kN。

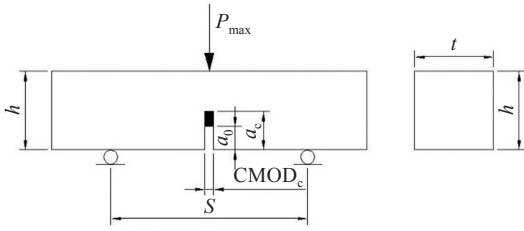


图1 失稳韧度的主要参数示意

Fig. 1 Schematic of main parameters of unstable toughness

1.2 起裂韧度

用试件的切口梁三点弯曲试验起裂荷载 P_{ini} 和初始裂缝长度 a_0 分别代替式 (1) 和式 (3) 中的 P_{max} 与 a_c , 可得试件的起裂韧度 $K_{\text{lc}}^{\text{ini}}$ [23]。其中, 起裂点通过试验曲线法确定, 即起裂荷载 P_{ini} 为试件 P-CMOD 曲线的上升段从直线段转变为曲线段的转折点对应的荷载 [23]。

1.3 黏聚韧度与纤维桥接韧度

根据混凝土双 K 断裂模型, 在裂缝没有开始发展时, 结构只受到外荷载的作用。起裂韧度 $K_{\text{lc}}^{\text{ini}}$ 是裂缝开始发展时结构抵抗外力的能力。失稳韧度 $K_{\text{lc}}^{\text{un}}$ 是最大荷载时结构抵抗外力的能力。 $K_{\text{lc}}^{\text{ini}}$ 和 $K_{\text{lc}}^{\text{un}}$ 并非 2 个孤立参数, 两者之差值是虚拟裂缝上黏聚力作用的结果 [24], 可认为:

$$K_{\text{lc}}^{\text{un}} = K_{\text{lc}}^{\text{ini}} + K_{\text{lc}}^{\text{c}} \quad (8)$$

式中: K_{lc}^{c} 为试件的黏聚韧度。

由于 UHPC 试件存在纤维桥接的作用, 因此, K_{lc}^{c} 可看作试件在裂缝开始发展后混凝土基体黏聚力与纤维桥接力共同作用产生的抵抗外力的能力 [25], 即:

$$K_{\text{lc}}^{\text{c}} = K_{\text{lc}}^{\text{cc}} + K_{\text{lc}}^{\text{cs}} \quad (9)$$

式中: $K_{\text{lc}}^{\text{cc}}$ 与 $K_{\text{lc}}^{\text{cs}}$ 分别为混凝土基体黏聚韧度与混掺纤维桥接韧度 (即相应状态裂纹尖端处的应力强度因子)。

相同混凝土的基体, 黏聚韧度为定值 [14, 25], 因

此, 可通过求纤维混掺后裂缝尖端处纤维桥接应力强度因子的增值来表征该混掺方案对基准混掺方案的效果增量:

$$\Delta K_{\text{lc}}^{\text{s}} = \Delta K_{\text{lc}}^{\text{un}} - \Delta K_{\text{lc}}^{\text{ini}} \quad (10)$$

式中: $\Delta K_{\text{lc}}^{\text{s}}$ 、 $\Delta K_{\text{lc}}^{\text{un}}$ 、 $\Delta K_{\text{lc}}^{\text{ini}}$ 分别为目标混凝土对基准混凝土纤维桥接韧度、起裂韧度、失稳韧度的增量。

1.4 断裂能

混凝土的断裂能 G_f 是评价混凝土断裂过程中耗能能力的参数, 反映裂缝扩展单位面积所需消耗的能量, 可由三点弯曲试验测得的荷载-位移曲线 (P - δ 曲线) 与横坐标包围的面积得出 [26]。由于试验条件的限制, P - δ 曲线的尾段一般难以直接测出, P - δ 曲线的尾段符合幂函数规律 [23], 可表示为:

$$P = \beta \delta^{-\lambda} \quad (11)$$

式中: β 、 λ 可通过 $P=P_{\text{max}}/3$ 后的试验数据点拟合确定, 设此时位移为 δ_1 。

假设曲线尾段延伸至位移无穷大处, 可得曲线尾段包围面积:

$$W_1 = \int_{\delta_1}^{+\infty} P(\delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{+\infty} \beta \delta^{-\lambda} d\delta = \frac{\beta}{1-\lambda} \delta_1 \quad (12)$$

因为本试验所用试件质量较小, 试件自重做功对断裂能计算结果影响不大, 为简化计算, 保证足够的精确度, 试件自重做功部分取实际加载过程中最终测得的跨中位移 δ_0 进行计算, 所以断裂能的最终计算式为:

$$G_f = \frac{W}{A} = \frac{W_0 + W_1 + mg\delta_0}{A} \quad (13)$$

式中: W_0 为实测 P - δ 曲线在 $\delta < \delta_1$ 段与横坐标的包围面积; A 为试件断裂韧带面积, 即 $A=t(h-a_0)$ 。

2 试验

2.1 原材料组成

试验原材料为: 水泥、矿粉、石英砂、硅灰、减水剂、水、钢纤维、PVA 纤维和 PP 纤维等。其中, 拌和用水直接采用城市自来水; 水泥选用南方牌 P.O52.5 级普通硅酸盐水泥, 实测抗压和抗折强度分别为 33.8、6.6 MPa (3 d) 与 61.37、8.5 MPa (28 d), 比表面积 342 m^2/kg , 烧失量 1.95%; 石英砂选用粒径为 26~40 目的精制石英砂; 硅灰的活性指数、烧失量及比表面积分别为 125、2.8、

20 m²/g; 减水剂减水效率为 30%; 钢纤维、PVA 纤维、PP 纤维尺寸及力学性能见表 1, 纤维外观如图 2 所示。

表 1 钢纤维、PVA 纤维和 PP 纤维物理与力学特性
Table 1 Physical and mechanical properties of steel fiber, PVA fiber and PP fiber

纤维种类	密度/ g·cm ⁻³	长度/ mm	直径/ μm	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	外观
钢纤维	7.80	13	200.00	205.0	2 800	直线
PVA 纤维	1.30	12	15.09	35.0	1 500	直线
PP 纤维	0.91	19	48.00	4.8	486	直线

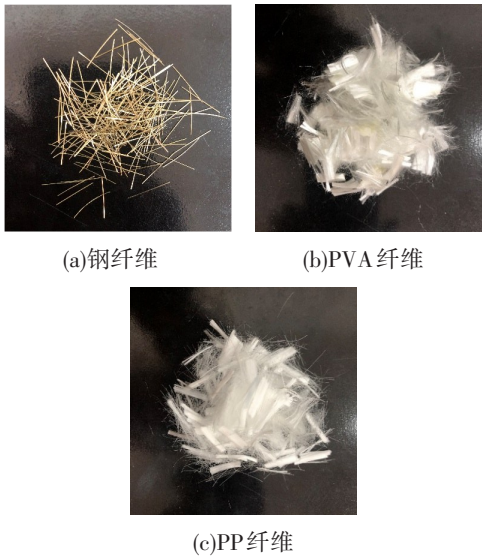


图 2 钢纤维、PVA 纤维和 PP 纤维样品

Fig. 2 Steel fiber, PVA fiber and PP fiber samples

2.2 纤维掺量设计

设置纤维总体积掺量为 2%, 以单掺 2% 钢纤维 (S1) 为对照组, 以合成纤维替代率 γ 为 10%、20%、30% 分别设置钢纤维混掺 PVA/PP 纤维各 1 组 (S2~S7), 外加 1 组同时混掺 3 种纤维的试件 (S8) 作为第 2 组对照组 ($\gamma=30\%$), 见表 2。

表 2 试件编号及纤维体积掺量

Table 2 Specimen number and corresponding volume content of each fiber %

试件组别	钢纤维	PVA 纤维	PP 纤维	γ
S1	2.0	0	0	0
S2	1.8	0.2	0	10
S3	1.6	0.4	0	20
S4	1.4	0.6	0	30
S5	1.8	0	0.2	10
S6	1.6	0	0.4	20
S7	1.4	0	0.6	30
S8	1.4	0.3	0.3	30

2.3 试件制作与养护

UHPC 混合料的搅拌流程及试件养护分别如图 3~4 所示。

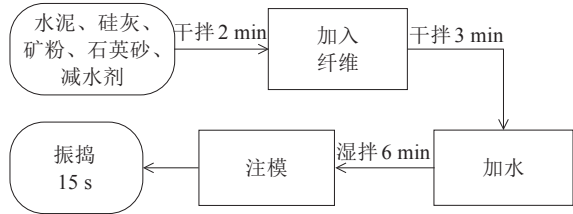


图 3 混合料搅拌流程

Fig. 3 Mixing process of mixture

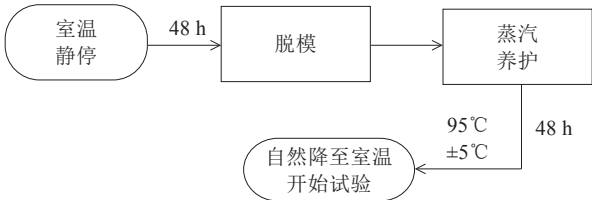
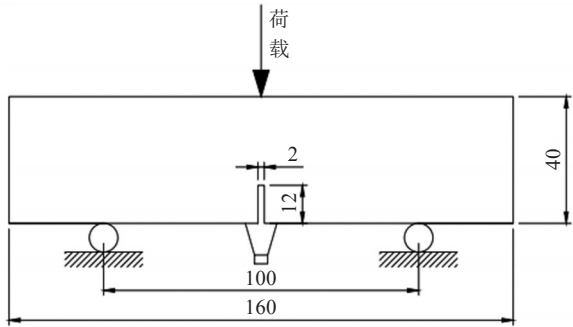


图 4 试件养护制度

Fig. 4 Specimen curing process

2.4 试验方法

三点弯曲断裂试验参考《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)^[27]进行。试验切口梁试件的使用尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 跨中带长 12 mm、宽 2 mm 的预制裂缝 (浇筑前预先嵌入固定尺寸的薄钢板), 试件尺寸及试验装置如图 5 所示。试验选用 WDW-300D 型万能试验机进行三点弯曲试验, 支座间跨度为 100 mm, 加载采用位移控制模式。由开始加载到荷载下降至峰值荷载的 70% 时, 保持加载速率为 0.1 mm/min。荷载小于峰值荷载的 70% 后, 以 0.5 mm/min 的速率继续加载。荷载降至峰值荷载的 10% 时, 停止加载, 即此时的挠度值为 δ_0 。试件的跨中挠度值 δ 由万能试验机自动采集, 跨中裂缝张开位移 CMOD 由夹式引伸计采集, 引伸计标距为 10 mm, 量程为 4 mm, 精度为 0.001 mm。



(a)切口梁试件尺寸 (单位: mm)



(b)三点弯曲断裂试验装置

图5 切口梁试件及断裂试验装置

Fig. 5 Notched beam specimen and fracture test device

3 试验结果及分析

3.1 试验现象

各组切口梁试件的断裂破坏形态如图6所示。从图6中可以看出, 由于混凝土基体中存在纤维桥接的作用, 断裂面的发展并没有随着荷载的增大直达试件顶面, 而是以“C”形或者“S”型的形式曲折地向上蔓延。在蔓延过程中, 主裂缝附近会出现很多细小的裂缝, 这些细小的裂缝与主裂缝共同承担耗能作用, 具有明显的延性破坏特征。在试验过程中, 当荷载达到试件的“起裂点”后, 试件会随着荷载的提升, 偶尔发出钢纤维与混凝土基体轻微摩擦的“吡啦”声, 并逐渐在预制裂缝上方出现众多细小裂纹。当荷载达到最大荷载后或即将达到最大荷载时, 预制裂缝尖端的微裂缝变得更加清晰可见。同时, 试件会发出清脆的钢纤维拔出声或较小的合成纤维被拔出或拉断的声音, 随着试验的进行, 最后试件断裂破坏。在断裂面可以看出, 破坏主要是因为钢纤维被拔出, 其次是PVA/PP纤维等合成纤维被拔出或拉断。

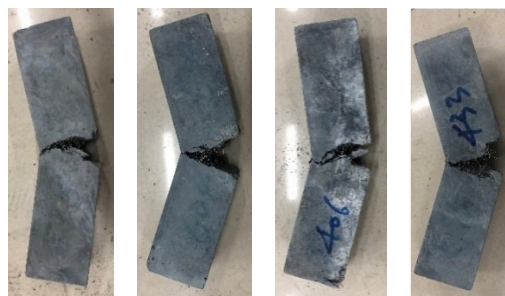


(a)S1

(b)S2

(c)S3

(d)S4



(e)S5

(f)S6

(g)S7

(h)S8

图6 各组试件断裂破坏形态

Fig. 6 Fracture failure modes of specimens in each group

3.2 荷载-变形曲线

各组试件的荷载变形曲线如图7~14所示, 部分不完整的P-CMOD曲线是因引伸计的安装误差使裂缝张开的位移超出了引伸计的量程所致。

8组试件在P-CMOD曲线形态中, 曲线皆出现了明显斜率不变的弹性段, 斜率逐渐降低的裂缝稳定发展阶段, 以及平稳下降的裂缝失稳发展阶段。PVA/PP纤维代替部分钢纤维后, 大部分试件在最大荷载附近出现明显的曲线波动, 具体表现为荷载短暂下降后继续上升的“二次硬化”现象, 原因是部分钢纤维拔出后荷载下降, 当合成纤维普遍开始发挥作用后, 荷载又随之继续上升。

在P- δ 曲线中, 除S3组与S8组试件外, 其余试件的曲线饱满程度皆有不同程度的削弱, 甚至出现曲线在达到峰值荷载后快速下降的现象。表明: 单以一种合成纤维代替部分钢纤维, 容易引起试件耗能能力的下降, 而混掺两种不同尺度的合成纤维代替钢纤维时, 3种纤维由于弹性模量、几何尺寸和抗拉强度的梯度变化, 在断裂过程中相继发挥桥接的作用, 弥补了性能较弱的单一合成纤维对试件耗能能力的削弱。与S1组试件进行对比, S2~S7组试件P- δ 曲线的下降段皆出现了更为明显的波动, 原因是掺入了合成纤维后, 合成纤维不断拔出、拉断所致。而S8组的下降段并没有出现明显的波动, 表明: 3种纤维在开裂区相继发挥作用的机理, 有利于促进裂缝失稳扩展后纤维桥接应力传递的稳定。

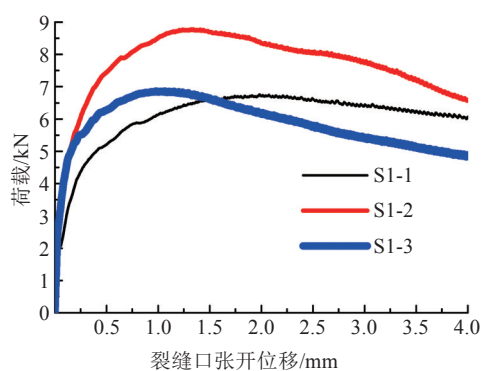
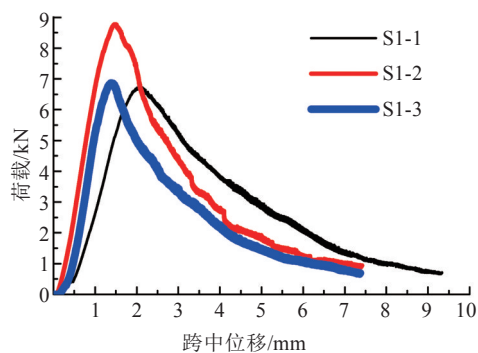
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图7 S1组试件的荷载-变形曲线

Fig. 7 Load-deformation curves of specimens in group S1

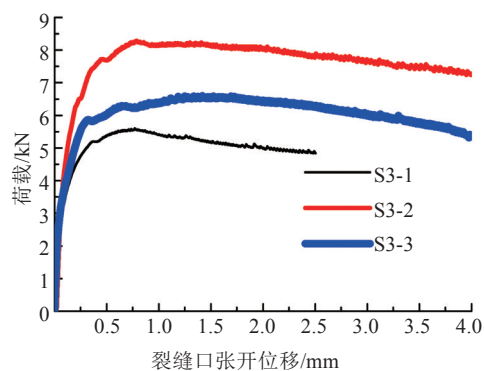
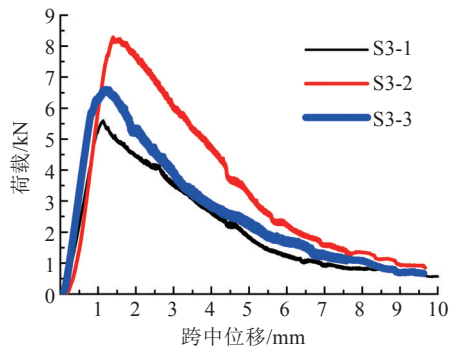
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图9 S3组试件的荷载-变形曲线

Fig. 9 Load-deformation curves of specimens in group S3

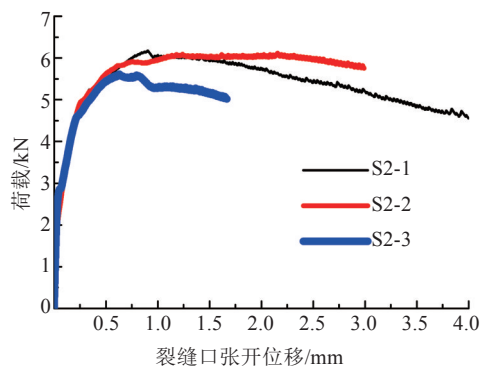
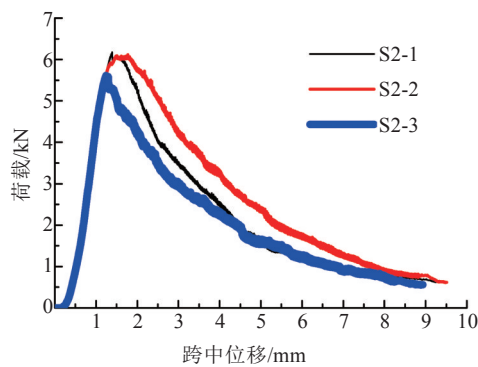
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图8 S2组试件的荷载-变形曲线

Fig. 8 Load-deformation curves of specimens in group S2

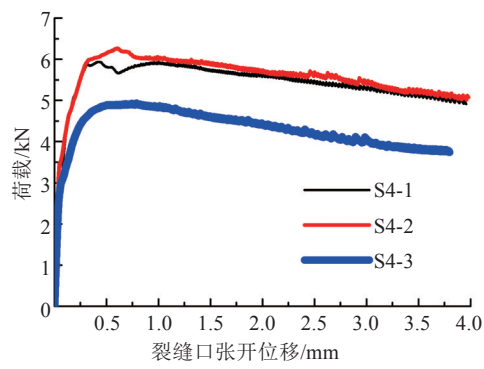
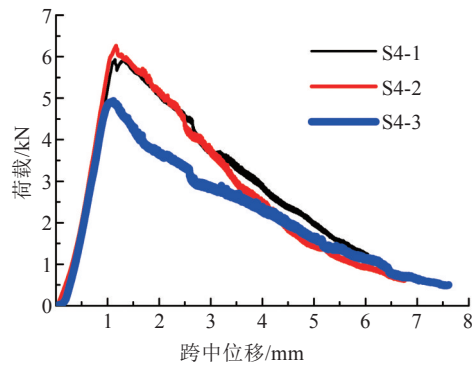
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图10 S4组试件的荷载-变形曲线

Fig. 10 Load-deformation curves of specimens in group S4

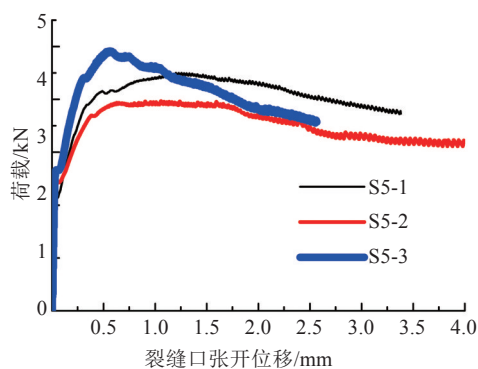
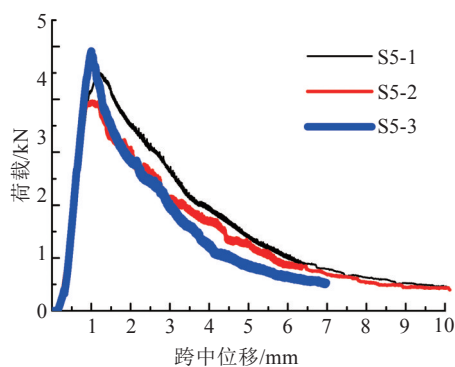
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图 11 S5 组试件的荷载-变形曲线

Fig. 11 Load-deformation curves of specimens in group S5

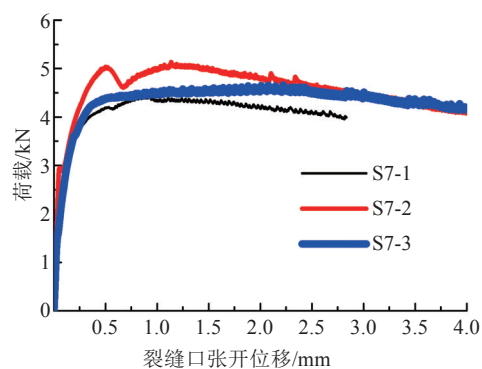
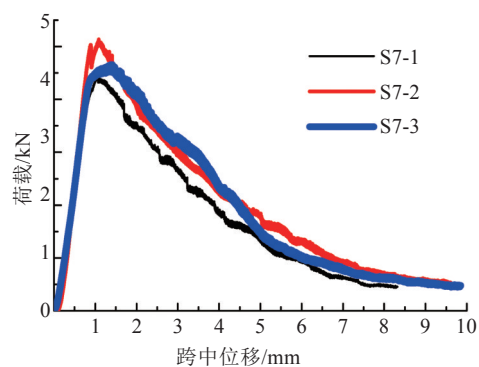
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图 13 S7 组试件的荷载-变形曲线

Fig. 13 Load-deformation curves of specimens in group S7

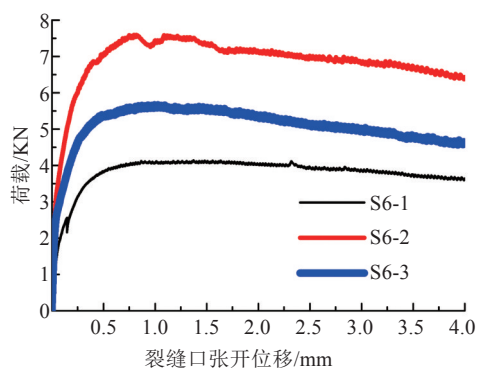
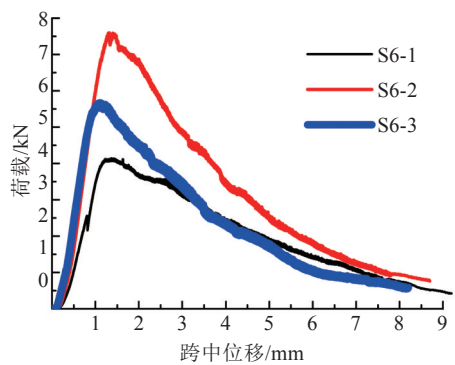
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图 12 S6 组试件的荷载-变形曲线

Fig. 12 Load-deformation curves of specimens in group S6

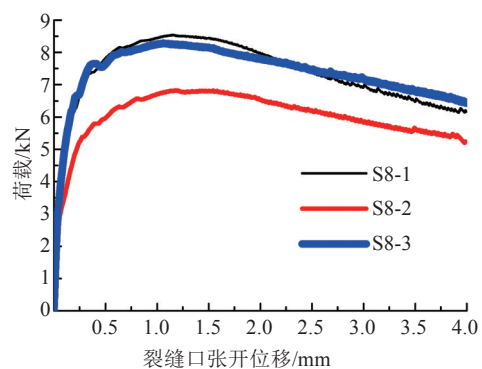
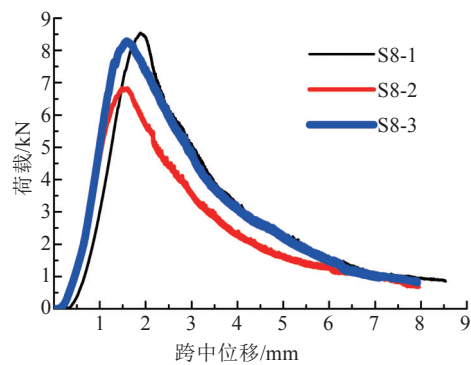
(a) P -CMOD 曲线(b) P - δ 曲线

图 14 S8 组试件的荷载-变形曲线

Fig. 14 Load-deformation curves of specimens in group S8

3.3 断裂参数计算结果及分析

由式(1)和(14)计算得出各组试件双K断裂韧度参数和断裂能,见表3,表中数据皆为均值。

由表3可知,与S1相比,试件S2~S4的起裂韧度均有所提升,表现为正替代效应,随着合成纤维替代率(γ)的增加呈逐渐提升趋势,最大增幅为34.2%($\gamma=30\%$)。试件S2~S4的失稳韧度随着 γ 的增加而逐渐降低,均低于试件S1的,表现为负替代效应,最大降幅为56.0%($\gamma=30\%$)。表明:直径较小的PVA纤维能有效抑制HFUHPC微裂缝的产生与发展,且抑制效果较钢纤维的优秀,但对裂缝稳定扩展阶段的抑制作用则逊色于钢纤维的。当 $\gamma=30\%$ 时,掺量过大的PVA纤维将导致纤维分布不均,从而影响纤维整体的增韧效果^[29],失稳韧度呈断崖式下跌。试件S5~S7的起裂韧度较S1的均有所减小,但减小幅度并不大,表现为负替代效应。 $\gamma=20\%$ 时,其最低下降13.0%; $\gamma=10\%$ 时,其最高下降7.5%。试件S5~S7的失稳韧度与S1的对比,也有不同程度下降,表现为负替代效应,但降幅随着 γ 的提高而减小。试件S5~S7的失稳韧度在 $\gamma=10\%$ 时,最低下降36.1%; $\gamma=30\%$ 时,最高下降29.9%。这是由于PP纤维较PVA纤维的直径大,加上PVA纤维表面的羟基具有优秀的基体黏结性能,表明:①PP纤维在早期抗裂减缩的能力上较PVA纤维的差^[18,29]。PP纤维的弹性模量较低,意味着对抑制微裂缝的产生与发展存在“效果延迟”,导致其对起裂韧度的增益效果不如钢纤维的。②以少量PP纤维替代钢纤维($\gamma=10\%$),会严重影响钢纤维对HFUHPC的增韧效果,而随着替代率的提高,较长的PP纤维所带来的裂缝有效桥接,能部分弥补这种混掺的负效应。因此,相同单种合成纤维替代率下(S2~S7),PVA纤维对起裂韧度的增益效果优于PP纤维与钢纤维的,PVA纤维与PP纤维对失稳韧度的增益效果均不如钢纤维的。

在断裂能方面,无论是单以PVA纤维还是单以PP纤维替代钢纤维,随着 γ 的逐渐提升,断裂能变化趋势皆为先减后增再减,且均在 $\gamma=20\%$ 时,

分别达到混掺后断裂能的最大值。但是,除S3与S6外,断裂能均低于S1的,最低为S5组的,下降了40%。同时,在 γ 值一致的前提下,以PVA纤维替代部分钢纤维试件的断裂能,大于以PP纤维替代部分钢纤维试件的。表明:单种合成纤维替代钢纤维时,替代率过低或过高,会因为纤维整体质量的降低,纤维分布不均等原因,使试件耗能能力大幅降低。PVA纤维因为对混凝土基体的锚固能力更强,所以在提升试件耗能能力方面更优于PP纤维。

当3种纤维混掺时(S8),试件的起裂韧度明显大于单掺钢纤维试件(S1)的,提升了20.1%,表现为正替代效应。但其起裂韧度低于同 γ 值下S4组试件的,同时略高于PVA纤维掺量较大试件(S3)。原因为:①PVA纤维对起裂韧度的增益效果远比PP纤维优秀,在同 γ 值下,试件S8的起裂韧度略低于试件S4的。②混掺多种尺寸、性能尺度的纤维,能进一步抑制试件微裂缝的产生,足以抵消PP纤维对起裂韧度微弱的削弱效果。与此同时,S8组试件的失稳韧度、断裂能皆高于S1组试件的,分别提升了2.9%、0.7%,表明:PVA纤维与PP纤维的组合能在断裂性能上良好的替代部分钢纤维。

断裂位移 δ_0 越大,试件在裂缝失稳发展后,保持强度的能力越强,延性越强。S2~S8组试件中,除S4组外,断裂位移皆高于S1组的。表明:以适量的合成纤维替代部分钢纤维,能提升UHPC的延性。其中,S3组试件($\gamma=20\%$)的断裂破坏位移最大,延性最佳,提升了19.2%。除S4组的断裂位移小于S7、S1组外,同 γ 值下PVA纤维对断裂位移的提升效果大于PP纤维的,表明:在合适的掺量范围内,PVA纤维更有利于提高试件的延性,而过多的PVA纤维因分布不均,对试件的延性产生负替代效应。3种纤维混掺后(S8),试件的断裂位移与S1组的对比,没有获得较大的提升(仅提升0.1%),且小于除S4组外的各组单以一种合成纤维替代钢纤维的试件。表明:PVA纤维与PP纤维同时替代钢纤维,对UHPC延性的提升作用不大,且不及单一合成纤维替代钢纤维的。

表3 断裂参数计算结果
Table 3 Calculation results of fracture parameters

编号	$\gamma/\%$	CMOD _c /mm	a_c/mm	P_{ini}/kN	P_{max}/kN	$K_{\text{Ic}}^{\text{ini}}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	$K_{\text{Ic}}^{\text{un}}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	δ_0/mm	$G_f/\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$
S1	0	1.427	29.679	2.582	7.466	1.241	17.203	8.148	16 582.27
S2	10	1.229	29.545	2.492	5.967	1.298	14.826	9.204	14 312.84
S3	20	0.991	27.189	2.823	6.832	1.356	12.087	9.711	18 983.83
S4	30	0.606	24.545	3.473	5.711	1.665	7.567	7.766	14 328.86
S5	10	0.958	29.983	2.386	4.462	1.148	11.000	9.061	9 451.09
S6	20	1.054	28.601	2.244	5.802	1.080	11.445	8.692	16 686.09
S7	30	1.41	30.082	2.301	4.743	1.108	12.064	9.209	12 834.14
S8	30	1.132	29.464	3.107	7.887	1.491	17.700	8.156	16 704.87

由式 (8)、(10) 计算出各组试件的黏聚韧度, 以及混掺合成纤维后的试件纤维桥接韧度的增量 (皆以 S1 组试件为基准), 其计算结果见表 4。由表 4 可知, 单独以 PVA 纤维或 PP 纤维替代钢纤维, 纤维桥接应力与黏聚应力裂缝尖端处的应力强度因子皆有明显下降, 且两者变化趋势相同。而 PVA 与 PP 纤维共同替代部分钢纤维时 (S8), 黏聚韧度提升了 1.5%, 且纤维桥接韧度增量为正数 (即 0.247), 3 种纤维随着裂缝的产生与发展相继产生桥接效果, 共同作用产生的桥接应力对裂缝尖端强度因子具有明显的增强效果, 产生正替代效应, 进一步验证了以多种多尺度的合成纤维混掺替代部分钢纤维在一定纤维掺量范围内行之有效。

表 4 黏聚韧度与纤维桥接韧度增量计算结果

Table 4 Calculation results of cohesion toughness and fiber bridging toughness increment

编号	$\gamma/\%$	$K_{\text{Ic}}^c/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$\Delta K_{\text{Ic}}^s/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
S1	0	15.962	0
S2	10	13.528	-2.434
S3	20	10.731	-5.231
S4	30	5.902	-10.060
S5	10	9.852	-6.110
S6	20	10.364	-5.597
S7	30	10.956	-5.006
S8	30	16.209	0.247

3.4 合成纤维替代钢纤维增韧机理分析

试验表明, 单以 PVA 或 PP 纤维任意一种纤维替代钢纤维时, 失稳韧度、黏聚韧度、纤维桥接韧度与断裂能都会受到不同程度的削弱, 起裂韧度则各有增减, 而以等量的 PVA 与 PP 纤维共同替

代 30% 钢纤维时, HFUHPC 的各项断裂性能参数皆高于单掺钢纤维 UHPC 的。这归因于钢纤维、PVA 纤维与 PP 纤维之间良好的协同抗裂能力。在裂缝产生前, 不仅细小的 PVA 纤维与 PP 纤维填充了混凝土基体内的细微孔隙, 降低了 HFUHPC 初期的塑性收缩, 减少了其内部初始缺陷^[29], 而且 PVA 纤维的表面存在羟基, 具有加强纤维与混凝土基体黏结作用的能力, 进一步阻止微裂缝的产生^[8], 使试件的初裂强度与起裂韧度得到提高。在裂缝起裂后, 钢纤维具有弹性模量较高、长度较短、对混凝土基体锚固能力强的特点, 其附近微小的变形能使钢纤维产生较大的拉应力。钢纤维最先对微裂缝起到了桥接作用, 有效阻止微裂缝的发展。弹性模量居中的 PVA 纤维随着荷载提升与钢纤维拔出, 开始发挥阻止裂缝进一步发展的作用。同时, PVA 与混凝土基体黏结能力强, 使其在拔出与拉断的过程中消耗较多能量。试件变形继续增大, 钢纤维的作用逐渐减小。此时, 弹性模量最小、长度最大的 PP 纤维开始发挥作用, 在纤维地拔出与拉断过程中消耗大量能量, 而 PP 纤维本身的疏水性为其带来了良好的分散性, 使试件的增韧效果更稳定。与此同时, 细小的 PVA 纤维与 PP 纤维在搅拌的过程中, 与钢纤维产生“纤维连锁”机制^[29-30], 从而产生了良好的机械咬合力, 有效阻止了 HFUHPC 裂缝间的纤维被拔出, 进一步增强了试件的韧性。PVA 纤维与 PP 纤维组合因为该纤维混掺增韧机理, 良好的弥补了由于钢纤维掺量下降而导致断裂性能下降的缺陷, 并产生了正替代效应, 从而在提升断裂性能的情况下有效降低成本。

4 结论

通过三点弯曲断裂试验,以合成纤维替代率为变量,开展了以聚乙烯醇纤维(PVA纤维)、聚丙烯纤维(PP纤维)替代部分钢纤维对UHPC断裂性能影响的研究工作,得到结论为:

1)以PVA纤维替代适量的钢纤维,能有效提高单掺钢纤维UHPC试件的起裂韧度与延性,同时会造成黏聚韧度与纤维桥接韧度的下降,从而导致失稳韧度的下降。其中, $\gamma=30\%$ 时试件的起裂韧度最高,提升了34.2%,但失稳韧度最低,下降了56.0%; $\gamma=20\%$ 时试件的断裂破坏位移最大,断裂能最大,延性最佳,增幅分别为19.2%、14.5%。

2)以PP纤维替代一定量钢纤维,会导致单掺钢纤维UHPC试件的起裂韧度小幅下降, $\gamma=20\%$ 时最低,下降了13.0%;也会导致失稳韧度与断裂能明显下降,两者在 $\gamma=10\%$ 时最低,分别下降36.1%、40.0%。PP纤维替代部分钢纤维,能小幅提升单掺钢纤维UHPC试件的断裂破坏位移量。

3)钢纤维、PVA纤维与PP纤维共同增韧的效果良好,3种纤维能在裂缝开裂的不同阶段发挥自身的效果,且三者形成的“纤维连锁”机制使纤维更难被拔出,有效弥补了因钢纤维的减少而造成断裂韧性降低的缺陷,从而在提升断裂性能的情况下有效降低成本。以等量的PVA纤维与PP纤维,共同替代30%的钢纤维,能提高单掺钢纤维UHPC试件的起裂韧度、黏聚韧度、失稳韧度、断裂破坏位移量与断裂能,增幅分别为20.1%、1.5%、2.9%、0.1%、0.7%。

4)纤维桥接韧度增量的概念对纤维桥接效果的定量描述更为清晰,有助于分析HFUHPC在不同纤维混掺模式下纤维增韧的机理。

参考文献(References):

- [1] Richard P. Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] 邵旭东,吴佳佳,刘榕,等.钢-UHPC轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J].中国公路学报,2017,30(3): 218-225. (SHAO Xu-dong, WU Jia-jia, LIU Rong, et al. Basic performance of waffle deck panel of lightweight steel-UHPC composite bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 218-225. (in Chinese))
- [3] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24. (CHEN Bao-chun, JI Tao, HUANG Qing-wei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24. (in Chinese))
- [4] 陈宝春,韦建刚,苏家战,等.超高性能混凝土应用进展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(2):10-20. (CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, SU Jia-zhan, et al. State of the art progress on application of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 10-20. (in Chinese))
- [5] 杨娟,朋改非.钢纤维类型对超高性能混凝土高温爆裂性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(6):1599-1608. (YANG Juan, PENG Gai-fei. Influence of different types of steel fiber on explosive spalling behavior of ultra-high-performance concrete exposed to high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1599-1608. (in Chinese))
- [6] 李传习,胡正,李游,等.钢-超高性能混凝土胶接组合板受弯的界面性能[J].交通科学与工程,2020,36(4):28-35. (LI Chuan-xi, HU Zheng, LI You, et al. Interfacial bonding performance of steel-ultra-high performance concrete adhesively bonded composite slabs[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 28-35. (in Chinese))
- [7] 陈宝春,林毅焱,杨简,等.超高性能纤维增强混凝土中纤维作用综述[J].福州大学学报(自然科学版),2020,48(1): 58-68. (CHEN Bao-chun, LIN Yi-jun, YANG Jian, et al. Review on fiber function in ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 58-68. (in Chinese))
- [8] 邓宗才.混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J].复合材料学报,2016,33(6):1274-1280. (DENG Zong-cai. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274-1280. (in Chinese))
- [9] 罗素蓉,林扬兴,肖建庄.钢-PVA混杂纤维高强再生骨料混凝土断裂性能[J].建筑结构学报,2020,41(12):93-102. (LUO Su-rong, LIN Yang-xing, XIAO Jian-zhuang.

- Fracture behaviors of hybrid steel-PVA fiber reinforced high strength recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Structures, 2020,41(12):93-102.(in Chinese))
- [10] 黄志强,刘鑫,皮新萌. 三点弯曲下PVA-尾矿砂水泥基复合材料断裂特性[J]. 沈阳工业大学学报,2016,38(4):450-456. (HUANG Zhi-qiang, LIU Xin, PI Xin-meng. Fracture characteristics of PVA reinforced tailing sand cementitious composite under three-point bending[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016,38(4):450-456.(in Chinese))
- [11] 李小燕,高培伟,林晖,等. 聚丙烯纤维对机场道面砼性能的影响[J]. 公路与汽运,2006,(6): 75-77. (LI Xiao-yan, GAO Pei-wei, LIN Hui, et al. Effect of polypropylene fiber on performance of airport pavement concrete[J]. Highways & Automotive Applications, 2006,(6):75-77.(in Chinese))
- [12] 漆贵海,彭小芹,叶浩文,等. 聚丙烯纤维对超高强混凝土断裂特性的影响[J]. 建筑材料学报,2015,18(3):487-492. (QI Gui-hai, PENG Xiao-qin, YE Hao-wen, et al. Effects of polypropylene fibres on fracture energy properties of ultra high strength concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015,18(3):487-492.(in Chinese))
- [13] 朱海堂,孙丽萍,王占桥. 钢-聚丙烯混杂纤维高强混凝土断裂性能的混杂效应[J]. 新型建筑材料,2009,36(2): 24-27. (ZHU Hai-tang, SUN Li-ping, WANG Zhan-qiao. Hybrid effect of steel-polypropylene fiber on fracture property of high strength concrete[J]. New Building Materials, 2009,36(2):24-27.(in Chinese))
- [14] 梁宁慧,缪庆旭,刘新荣,等. 聚丙烯纤维增强混凝土断裂韧度及软化本构曲线确定[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1144-1152. (LIANG Ning-hui, MIAO Qing-xu, LIU Xin-rong, et al. Determination of fracture toughness and softening traction-separation law of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1144-1152.(in Chinese))
- [15] 董吉龙. PVA纤维混凝土力学性能试验研究[D]. 济南:山东科技大学,2014. (DONG Ji-long. Experimental study on mechanical properties of PVA fiber reinforced concrete [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2014.(in Chinese))
- [16] 杨益伦,黄卿维,陈宝春. 不同钢纤维掺量的UHPC断裂性能试验研究[J]. 南昌大学学报(工科版),2019,41(2): 133-138. (YANG Yi-lun, HUANG Qing-wei, CHEN Bao-chun. Experimental research on the fracture property of ultra high performance concrete with various steel fibre contents[J]. Journal of Nanchang University(Engineering & Technology), 2019,41(2):133-138.(in Chinese))
- [17] 裴蓓蓓,孙明清,王应军. 试样尺寸对超高性能混凝土断裂性能影响的试验研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(4): 56-59. (PEI Bei-bei, SUN Ming-qing, WANG Ying-jun. Study on the effects of specimen size on fracture performance of ultra high performance concrete[J]. New Building Materials, 2018,45(4):56-59.(in Chinese))
- [18] Sovják R, Rašínová J, Máca P. Effective fracture energy of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete under increased strain rates[J]. Acta Polytechnica, 2014, 54(5):358-362.
- [19] Qadir H H, Faraj R H, Sherwani A F H, et al. Mechanical properties and fracture parameters of ultra high performance steel fiber reinforced concrete composites made with extremely low water per binder ratios[J]. SN Applied Sciences, 2020,2(9):1-12.
- [20] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, Part I: Experimental investigation of crack propagation. Int J Fract 98: 111-149[J]. International Journal of Fracture, 1999,98(2):111-149.
- [21] Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 151-177.
- [22] Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 179-193.
- [23] 徐世烺,熊松波,李贺东,等. 混凝土断裂参数厚度尺寸效应的定量表征与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017,50(5):57-71. (XU Shi-lang, XIONG Song-bo, LI He-dong, et al. Quantitative characterization and mechanism analysis on thickness-dependent size effect of concrete fracture[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 57-71. (in Chinese))
- [24] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京:科学出版社,2011. (XU Shi-lang. Fracture mechanics of concrete[M]. Beijing: Science Press, 2011.(in Chinese))

- [25] Kazemi M T, Golsorkhtabar H, Beygi M H A, et al. Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 482-489
- [26] Hillerborg A. Results of three comparative test series for determining the fracture energy G-F of concrete[J]. Materials and Structures, 1985,18(5):407-413.
- [27] 河海大学. 水工混凝土断裂试验规程 DL/T 5332—2005 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006. (Hohai University. Electricity & Power Standard of the People's Republic of China: Norm for fracture test of hydraulic concrete: DL/T 5332—2005[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese))
- [28] 邓宗才, DAUD Jumbe R. 混掺纤维 RPC 增韧特性试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 202-207. (DENG Zong-cai, DAUD J R. Experimental study on the flexural toughness of RPC reinforced by hybrid fibers[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 202-207. (in Chinese))
- [29] 姚志雄, 周健. 纤维增强活性粉末混凝土(RPC)断裂能的研究 [J]. 建筑材料学报, 2005, 8(4): 356-360. (YAO Zhi-xiong, ZHOU Jian. Study on fracture energy of reactive powder concrete reinforced by steel-polypropylene hybrid fiber[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(4): 356-360. (in Chinese))
- [30] 邓宗才, 冯琦. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 14-21. (DENG Zong-cai, FENG Qi. Fracture properties of hybrid fibers reinforced reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 14-21. (in Chinese))

(上接第 20 页)

- characteristics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [17] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 518-521. (SUN Li-jun. Structural behavior study for asphalt pavements[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 518-521. (in Chinese))
- [18] 刘新海, 彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究 [J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 38-43. (LIU Xin-hai, PENG Xiao-lin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 38-43. (in Chinese))
- [19] 李建庆, 王天伟, 郝磊. 水泥稳定碎石劈裂强度影响因素研究 [J]. 山东交通科技, 2017(5): 49-51. (LI Jian-qing, WANG Tian-wei, XI Lei. Research on influencing factors of the splitting strength of cement stabilized macadam[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2017(5): 49-51. (in Chinese))