**文章编号:**1007-9629(2024)09-0806-10

# 粗骨料UHPC单轴拉伸性能及损伤本构模型

## 梁林,王秋维\*,史庆轩

(西安建筑科技大学土木工程学院,陕西西安 710055)

摘要:通过单轴拉伸试验,研究粗骨料用量和钢纤维的掺量、类型及混杂配比对粗骨料超高性能混凝 土(CA-UHPC)受拉性能的影响,揭示了CA-UHPC破坏机理以及粗骨料与钢纤维的相互作用机 制.结果表明:粗骨料引起的薄弱界面和空间阻隔作用削弱了钢纤维的增韧作用,CA-UHPC拉伸性 能随粗骨料用量增大而降低,建议其用量不超过450 kg/m<sup>3</sup>;增大钢纤维掺量能改善CA-UHPC拉伸 性能,且平直钢纤维的增韧作用更稳定;1.0%平直和1.0%端勾钢纤维混杂时,其与粗骨料匹配良 好,钢纤维有效利用率达到25.4%,能够充分发挥混杂纤维的协同增韧作用.最后建立了考虑粗骨料 和钢纤维影响的CA-UHPC受拉损伤本构模型.

关键词:超高性能混凝土;粗骨料;拉伸性能;损伤本构模型;钢纤维

**中图分类号:**TU528.572 文献标志码:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.09.005

## Uniaxial Tensile Properties and Damage Constitutive Model of UHPC with Coarse Aggregate

#### LIANG Lin, WANG Qiuwei\*, SHI Qingxuan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The effects of coarse aggregate usage amount and steel fiber characteristics including content, type and hybrid on tensile properties of ultra-high performance concrete with coarse aggregate (CA-UHPC) were studied through uniaxial tensile test. The failure mechanism of CA-UHPC and the interaction mechanism of coarse aggregate and steel fiber were revealed. The results show that the weak interface and spatial barrier caused by coarse aggregate weaken the toughening effect of steel fiber. The tensile properties of CA-UHPC decrease with the increase of coarse aggregate content, so the recommended amount of coarse aggregate should not exceed 450 kg/m<sup>3</sup>. Increasing fiber content can improve the tensile properties of CA-UHPC, in which the toughening effect of straight steel fiber is more stable. When 1.0% straight and 1.0% end-hooked steel fibers are mixed, the fibers are well matched with coarse aggregate and the effective utilization rate of fibers reaches 25.4%, which indicates that the synergistic toughening effect of hybrid fibers is fully exerted. Finally, a tensile damage constitutive model of CA-UHPC is established considering the effect of coarse aggregate and steel fibers.

**Key words:** ultra-high performance concrete; coarse aggregate; tensile property; damage constitutive model; steel fiber

超高性能混凝土(UHPC)是一种具有极高强 度、超高韧性以及优越耐久性的创新型水泥基复合 材料,满足工程结构轻量化、装配化和低碳化发展需 求,应用前景广阔<sup>[1-3]</sup>.由于UHPC通常使用大量胶凝 材料,导致其生产成本高昂,限制了其工程应用.对 此,在UHPC中掺入粗骨料能有效降低胶凝材料用

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178505,51878543);陕西省教育厅协同创新中心项目(23JY043)

收稿日期:2023-11-30;修订日期:2024-01-03

第一作者:梁 林(1996—),男,陕西汉中人,西安建筑科技大学博士生.E-mail:lianglin1107@xauat.edu.cn

通讯作者:王秋维(1982—),女,陕西西安人,西安建筑科技大学教授,博士生导师,博士.E-mail: wqw0815@126.com

量和节约成本,且能限制基体的收缩、徐变和提升其 弹性模量<sup>[4-5]</sup>.针对中国庞大的基础建设规模,发展粗 骨料超高性能混凝土(CA-UHPC)是必要趋势,开展 其力学性能等研究具有重要意义.

目前,国内外学者主要探究了粗骨料含量、粒径<sup>[6-8]</sup>以及纤维掺量、类型<sup>[9-10]</sup>等对CA-UHPC受压性能的影响,并取得较为丰富的成果.然而,UHPC独特的拉伸性能是其区别于高强混凝土、ECC等的显著特征,若由于粗骨料而明显削弱其拉伸性能,则CA-UHPC将失去原有的应用价值<sup>[11]</sup>.Liu等<sup>[12]</sup>研究表明过高的粗骨料含量将降低UHPC抗拉性能,提出临界粗骨料体积分数为25%.李力剑等<sup>[13]</sup>发现增大钢纤维的掺量和长径比能较好提升CA-UHPC拉伸性能.Shi等<sup>[14]</sup>探究了不同钢纤维掺量下CA-UHPC的拉伸应力-应变响应特征并建立受拉本构方程.可见,虽然有CA-UHPC拉伸性能的相关研究,但理论研究尚不充分.

本文通过单轴受拉试验研究粗骨料含量和钢纤 维的掺量、类型及混杂配比对CA-UHPC破坏模式、 拉伸强度和韧性等的影响,揭示CA-UHPC破坏机 理以及粗骨料与钢纤维的相互作用机制;并基于试 验结果,建立考虑粗骨料和钢纤维影响的CA-UHPC 受拉损伤本构模型,为其材料特性研究和工程应用 提供理论基础.

## 1 材料与方法

#### 1.1 原材料及配合比

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;硅灰的平均 粒径为 0.1  $\mu$ m, SiO<sub>2</sub>含量(质量分数,文中涉及含 量、水胶比等除特别注明外均为质量分数或质量 比)大于 95%;石英粉的平均粒径为 0.045 mm;粗 骨料采用最大粒径为 10 mm 的玄武岩碎石,其表观 密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>;细骨料采用最大粒径 1.25 mm 的天然河砂,细度模数为 2.4;减水剂为聚羧酸类高 效减水剂,减水率≥40%;纤维采用长度 18 mm、直 径 0.2 mm 的平直钢纤维(SF)和长度 16 mm、直径 0.2 mm 的端钩钢纤维(HF),其极限抗拉强度均为 2 850 MPa.

基于课题组前期研究提出的UHPC基体配合比 m(水泥):m(硅灰):m(石英粉):m(石英砂)=1.000: 0.250:0.300:0.875,水胶比为0.16,砂胶比为0.7<sup>[1]</sup>, 在保持水胶比和砂胶比不变情况下,用河砂代替石 英砂并分别加入4种用量(250、450、650、850 kg/ m<sup>3</sup>)的玄武岩碎石;在含450 kg/m<sup>3</sup>粗骨料的UHPC 中单掺或混掺SF纤维和HF纤维,共13组试件,其 设计参数详见表1.

Sample No.	Usage amount of coarse aggregate/(kg·m $^{-3})$	$\varphi(\mathrm{SF})/\%$	$\varphi(\mathrm{HF})/\%$
A00-S2.0	0	2.0	0
A25-S2.0	250	2.0	0
A45-S2.0	450	2.0	0
A65-S2.0	650	2.0	0
A85-S2.0	850	2.0	0
A45-S1.0	450	1.0	0
A45-S1.5	450	1.5	0
A45-H1.0	450	0	1.0
A45-H1.5	450	0	1.5
A45-H2.0	450	0	2.0
A45-S1.5H0.5	450	1.5	0.5
A45-S1.0H1.0	450	1.0	1.0
A45-S0.5H1.5	450	0.5	1.5

表1 CA-UHPC试件设计 Table 1 Design of CA-UHPC specimens

#### 1.2 试件制备及测试

试件制作时,先将河砂、石英粉和粗骨料投入搅拌机干拌4min,随后倒入水泥和硅灰继续干拌4min,至粉料搅拌均匀;然后加入水和减水剂后湿拌约10min,至拌和料呈完全流态;最后边搅拌边撒入钢纤维,继续搅拌5min.搅拌完成后,将新鲜拌和料沿模具长度方向水平浇筑入模,并在模具上覆盖塑

料薄膜,静置24h后脱模,然后将试件放在20~25℃ 的常温条件下养护28d,其中需保持试件前7d表面 湿润.

依据 T/CBMF 37—2018《超高性能混凝土基本 性能与试验方法》<sup>[15]</sup>,在量程为 100 kN 的电子万能试 验机上进行 CA-UHPC 单轴拉伸试验,试件采用狗 骨头形状,测量段尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm, 每组制备6个试件.试验装置如图1所示,试验时调整上、下夹具放入试件,并安装千分表测量其竖向变形,采用速率为0.1 mm/min的位移加载.测试结果为3个CA-UHPC有效拉伸试件的平均值.



图1 瓜娅衣且 Fig.1 Test device

## 2 破坏过程及机理分析

CA-UHPC受拉破坏过程如图2(a)所示.加载 初期,CA-UHPC处于弹性阶段(状态O),基体完好 且无裂缝出现,应力随应变线性增长;继续加载,粗 骨料周围界面过渡区首先出现离散微裂缝(状态A), 这是由于粗骨料的粗糙外形和吸水特性削弱了粗骨 料-基体界面性能<sup>[11,16]</sup>;随着拉应力增大,离散微裂缝 蔓延到基体内,并发展形成连续微细裂缝且在其余 薄弱位置出现多条微裂缝(状态B),连续微细裂缝处 的应力由钢纤维承担,纤维开始发挥阻裂作用, CA-UHPC进入多缝开裂阶段,拉应力随应变持续缓 慢增长,呈现应变硬化特征;当某条局部裂缝无法满 足应力传递时,其发展成为主裂缝(状态C),应力达 到峰值;随后主裂缝不断扩展而其余多缝不再发展, 裂缝处的钢纤维不断被拔出并发出"呲呲"声,拉应 力随应变增大而缓慢下降,主裂缝贯通基体后,拉应 力完全由断裂面残存的钢纤维承担,直至CA-UHPC 完全破坏.

CA-UHPC试件的最终破坏形态如图2(b)~(d) 所示.可见,试件破坏时出现垂直受拉方向的明显主 裂缝,且其周围分布多条水平微细裂缝.无粗骨料 UHPC的裂缝曲折程度和多缝开裂特征显著;随着 粗骨料掺量的增加,主裂缝逐渐趋于平整,多缝开裂 特征不断减弱,这是由于粗骨料增大了基体内部缺 陷,影响纤维桥联作用的发挥.随着钢纤维掺量增 大,CA-UHPC的主裂缝弯曲和多缝开裂特征越明 显,且平直钢纤维由于分布较均匀更有利于试件发 生韧性破坏;混掺1.0%平直和1.0%端勾钢纤维 CA-UHPC的裂缝曲折程度和多缝开裂特征最为显 著,表明该比例下混杂钢纤维能有效限制裂缝扩展.



(a) Micro-scale failure process



(b) Effect of coarse aggregate



(c) Effect of steel fiber
 (d) Lo
 图 2 CA-UHPC受拉破坏过程和最终破坏模式
 Fig. 2 Tensile failure process and ultimate failure mode of CA-UHPC

(d) Local amplification of crack

#### 3.1 拉伸强度

各因素对 CA-UHPC 拉伸强度的影响如图 3 所示,其中初裂强度 $f_{cr}$ 是指拉伸应力-应变曲线弹 性段终点的拉应力,抗拉强度 $f_{t}$ 是指曲线峰值点对 应的拉应力.由图 3可知:(1)随着粗骨料用量的 增大,CA-UHPC 的初裂强度和抗拉强度相较于无 粗 骨 料 UHPC 分 别 降 低 11.26%~30.55% 和 9.96%~27.26%,表明粗骨料用量对初裂强度影响 较大,这是由于粗骨料增大了基体内部初始缺陷, 但粗骨料用量超过 450 kg/m<sup>3</sup>( $\varphi_{ca}$ =18%)时,其抗 拉强度降幅整体较高(22.46%~27.26%).(2)钢纤 维掺量从 1.0% 增加到 2.0%, 单掺 SF 纤维和 HF 纤维的 CA-UHPC 抗拉强度分别提高 37.62% 和 58.76%, 且同纤维掺量下, 掺 HF 纤维 CA-UHPC 的抗拉强度比掺 SF 纤维试件高 15.24%~ 34.46%, 表明端勾钢纤维对 CA-UHPC 抗拉强度 的增强显著.(3)相比于试件 A45-S2.0, 混杂纤维 试件的初裂强度随着 HF 纤维掺量增大分别提高 8.07%、19.22%、14.83%, 抗拉强度分别提高 13.55%、33.65%、16.36%, 表明混杂钢纤维的增强 效果呈现先增后减的趋势, 混掺 1.0% SF 纤维和 1.0% HF 纤维对 CA-UHPC 拉伸强度的增强效果 最好, 其初裂强度和抗拉强度分别达到 10.05、 11.44 MPa.





#### 3.2 拉伸韧性

UHPC的拉伸韧性通常采用其拉伸应力-应变曲线的包围面积 G(单位体积断裂能)进行表征,量纲为kJ/m<sup>3[11]</sup>.为深入探究各因素对 UHPC 拉伸韧性的影响,首先对各组 UHPC 试件的平均拉伸应力-应变曲线(图 4)进行分析.

由图4可知:(1)随着粗骨料用量的增加, CA-UHPC拉伸曲线的饱满程度不断下降,应变硬化 特征和变形能力被削弱,当粗骨料用量超过450 kg/m<sup>3</sup> 时,CA-UHPC曲线软化明显,表明过多粗骨料会严重 削弱UHPC拉伸性能.(2)增大钢纤维掺量能明显改善 CA-UHPC的拉伸性能,当掺量不低于1.5%时,粗骨 料用量为450 kg/m<sup>3</sup>的CA-UHPC试件均表现出应变 硬化行为.(3)掺SF纤维CA-UHPC的应变硬化特征 明显,峰前曲线较为饱满,峰后曲线下降平缓;HF纤维 使CA-UHPC的峰前拉伸强度显著提高,但其应变硬 化阶段较短,拉伸应变和残余强度较低,这归因于端勾 钢纤维与基体间额外的锚固力以及其拔出过程中对基 体严重的损伤.(4)2.0%纤维掺量下,混杂钢纤维试件 的峰前拉伸应力均高于单掺SF纤维试件,试件 A45-S1.0H1.0的抗拉强度与单掺试件A45-H2.0相 近,但其拉伸曲线更饱满,应变硬化阶段发展充分,峰 后残余应力水平整体较高,表明混掺1.0%SF纤维和 1.0%HF纤维对CA-UHPC拉伸性能的提升显著.

由于钢纤维在不同受力阶段发挥不同的增韧作用,为更好地表征CA-UHPC的拉伸韧性,本文基于断裂能G进一步定义峰前韧性gp和峰后韧性gk,其计 算方法见式(1).

$$g_{\mathrm{p}} = \int_{0}^{\epsilon_{\mathrm{p}}} \sigma(\epsilon) \mathrm{d}\epsilon; \quad g_{\mathrm{k}} = \int_{\epsilon_{\mathrm{p}}}^{\epsilon_{\mathrm{k}}} \sigma(\epsilon) \mathrm{d}\epsilon; \quad G = g_{\mathrm{p}} + g_{\mathrm{k}}(1)$$

式中: $\sigma(\epsilon)$ 表示应力-应变关系; $\epsilon_p$ 为峰值拉应变; $\epsilon_k$ 为峰后极限拉应变,根据试验曲线确定,当拉应变为 2.0%时,残余拉应力普遍下降到抗拉强度50%以下,较多钢纤维被拔出失效,材料残余能量较少<sup>[17]</sup>,因此取 $\epsilon_k=2.0\%$ .

根据式(1)计算得到各组CA-UHPC的拉伸韧性指标,如图5所示.分析可知:(1)CA-UHPC拉伸韧性随粗骨料用量增加而下降10.10%~44.78%,当



Fig. 4 Eeffect of factors on uniaxial tensile stress-strain curves of CA-UHPC

粗骨料用量超过 450 kg/m<sup>3</sup>时,其峰前韧性显著降低 62.96%,表明此时粗骨料严重影响了纤维的增韧作用.(2)随着纤维掺量从 1.0% 提高到 2.0%,单掺 SF 和 HF 纤维试件的拉伸韧性分别提高 64.84% 和 212.64%,但除 2.0% 纤维掺量外,HF 纤维试件的拉伸韧性比 SF 纤维试件低  $14.70\% \sim 41.39\%$ ,峰前韧性低  $41.80\% \sim 55.38\%$ ,说明平 直钢纤维对

CA-UHPC的增韧作用更稳定.(3)混杂1.0%平直和 1.0%端勾钢纤维的CA-UHPC拉伸韧性最高 (202.7 kJ/m<sup>3</sup>),比单掺纤维试件A45-S2.0和 A45-H2.0分别提高33.97%和20.51%,且其峰前韧 性达到63.5 kJ/m<sup>3</sup>(>50 kJ/m<sup>3</sup>)<sup>[17]</sup>,表明该纤维配比 下混杂钢纤维的协同增韧作用强,CA-UHPC具有优 异的拉伸韧性.



综上所述,当粗骨料用量超过450 kg/m<sup>3</sup>(φ<sub>ca</sub>= 18%),CA-UHPC拉伸应力-应变曲线软化特征显著, 抗拉强度和拉伸韧性明显下降,建议粗骨料用量不应 超过450 kg/m<sup>3</sup>;2.0% 纤维掺量下,平直和端勾钢纤维 以1:1混杂能发挥良好的协同增韧作用,CA-UHPC的 拉伸应力-应变曲线饱满,应变硬化阶段发展充分,峰 后残余应力水平较高,抗拉强度和拉伸韧性分别达到 11.44 MPa和202.7 kJ/m<sup>3</sup>,拉伸性能提升显著.

#### 3.3 粗骨料与钢纤维相互作用机制

为研究粗骨料与钢纤维的相互作用机制,图6给出 代表性CA-UHPC试件的断面图.同时将CA-UHPC 实际抗拉强度与无粗骨料UHPC在钢纤维全部发挥作 用下的极限抗拉强度之比定义为纤维有效利用率U<sub>f</sub> (式(2))<sup>[18]</sup>,以量化分析粗骨料对钢纤维的影响.

$$U_{\rm f} = \frac{f_{\rm t}}{f_{\rm m} + 0.01 w \varphi \sigma_{\rm f}} \tag{2}$$

式中: $f_i$ 为CA-UHPC抗拉强度; $f_m$ 为UHPC基体抗拉强度,试验测得 $f_m$ =6.05 MPa; $\alpha$ 为纤维取向因子, $w=0.5; \varphi$ 为纤维增强因子, $\varphi=\eta V_i l/d(V_i, l 和 d 分)$ 

别为钢纤维体积分数、长度和直径;η为纤维黏结系数)<sup>[19]</sup>;σ<sub>f</sub>为钢纤维极限抗拉强度.

由图 6 可见, 无粗骨料 UHPC 中的钢纤维分布整 体较为均匀, 而 CA-UHPC 中的钢纤维分布情况较差, 局部粗骨料周围纤维分布稀疏(实线区域), 部分粗骨 料间隙的纤维团聚现象又十分明显(虚线区域), 且存 在较多无法发挥桥联作用的横向分布纤维(虚线), 表 明钢纤维的分布均匀性受到粗骨料的空间阻隔作用而 明显下降.此外, 粗骨料的粗糙外形特征和吸水性使其 与胶凝材料粘结不紧密且黏结处水化不充分, 从而形 成薄弱界面过渡区, 降低了基体对纤维的握裹作用<sup>[13]</sup>. 可见, 钢纤维的均匀分布和黏结性能均受到粗骨料影 响, 使其难以有效发挥增强、增韧作用.



图 6 CA-UHPC 断面特征 Fig. 6 Characteristics of CA-UHPC fracture surface

各组CA-UHPC的钢纤维有效利用率U<sub>4</sub>如图7所 示.可见,钢纤维有效利用率随粗骨料含量的增加而降 低,这是由于粗骨料的空间阻隔作用降低了有效纤维 的数量.随着钢纤维掺量增大,纤维出现团聚的可能性 越大,其有效利用率降低,但纤维掺量的增大使基体中 有效纤维数量增多,从而增强了CA-UHPC拉伸性能. 相比于HF纤维,SF纤维的有效利用率提高约48%,表 明在粗骨料限制下平直钢纤维的分布更均匀,能够有 效发挥作用的纤维数量较多,但SF纤维-基体的界面 作用较弱,导致SF纤维增强CA-UHPC的拉伸强度较 低.当1.0%平直和1.0%端勾钢纤维混杂时,平直钢 纤维起到良好的边壁效应,优化了端勾钢纤维的分布,



纤维有效利用率达到25.4%,使得不同类型的钢纤维 能充分发挥增强、增韧作用,并与粗骨料良好匹配,从 而有效改善粗骨料对CA-UHPC拉伸性能的劣化.

## 4 拉伸损伤本构模型

#### 4.1 模型建立

建立 CA-UHPC 损伤本构模型的核心在于探究 其损伤演化过程,关键为损伤因子 D 的构建以及损 伤演化函数的选择.本文选用 Weibull 分布函数<sup>[20]</sup>描 述 CA-UHPC 的损伤演化,D=1-exp(-x<sup>#</sup>/α),基于 Lemaitre 应变等效原理<sup>[21]</sup>推导 CA-UHPC 应力-应 变关系方程,如式(3)所示.

 $\sigma = (1 - D) E \varepsilon = E \varepsilon \exp(-x^{\beta}/\alpha)$ (3) 式中:E为弹性模量;x为模型自变量;a和β为模型 参数.

#### 4.2 模型参数确定

本构方程应满足以下边界条件:① 在初始点*O*, 当 $\epsilon$ =0时, $\sigma$ =0且d $\sigma$ /d $\epsilon$ = $E_t$ ;②在初裂点*A*,当 $\epsilon$ = $\epsilon_{cr}$ 时, $\sigma$ = $\sigma_{cr}$ ;③ 在峰值点*B*,当 $\epsilon$ = $\epsilon_p$ 时, $\sigma$ = $\sigma_p$ 且d $\sigma$ /d $\epsilon$ = 0,如图8所示.设x= $\epsilon/\epsilon_p$ ,y= $\sigma/\sigma_p$ ,对式(3)无量纲 化,并导入①~③边界条件,得到拉伸应力-应力关 系的无量纲方程(式(4)), $\beta$ =1/ln( $E_t\epsilon_p/\sigma_p$ ).明确粗骨 料和钢纤维对参数 $\beta$ 的影响规律,便能建立完整的 CA-UHPC拉伸损伤本构模型.

$$y = x \exp\left(\frac{1}{\beta} - \frac{x^{\beta}}{\beta}\right) \tag{4}$$



Fig. 8 Tensile stress-strain curve of typical CA-UHPC

通过计算参数β并与试验曲线对比,发现根据峰 值点和初裂点应力、应变计算的参数β仅吻合曲线上 升段,下降段参数β由于钢纤维不同受力阶段增韧作 用的差异以及粗骨料对基体的削弱作用导致其发生 变化,故下降段β值通过拟合得到,结果如表2所示.

为明确粗骨料和钢纤维对参数 $\beta$ 的影响,引入粗骨 料削弱系数 $\lambda$ 和纤维增强因子 $\varphi^{[19]}$ .根据前述粗骨料含量 对UHPC拉伸性能的影响,其含量为0时,削弱系数 $\lambda$ = 1且随着含量的增大 $\lambda$ 值不断降低,分析试验数据得到削 弱系数 $\lambda$ 与粗骨料体积分数 $\varphi_{ca}$ 的关系如式(5)所示.

表 2 模型参数  $\beta$ Table 2 Model parameter  $\beta$ 

		1	1		
Sample No.	$arphi_{ m ca}/\sqrt[9]{_0}$	φ	Ascending segment $\beta$	Descending segment $\beta$	Goodness of fit $R^2$
A00-S2.0	0	1.80	0.042	0.325	0.987
A25-S2.0	10	1.80	0.042	0.286	0.992
A45-S2.0	18	1.80	0.040	0.243	0.996
A65-S2.0	26	1.80	0.029	0.224	0.988
A85-S2.0	34	1.80	0.012	0.209	0.997
A45-S1.0	18	0.90	0.106	0.116	0.996
A45-S1.5	18	1.35	0.063	0.214	0.998
A45-H1.0	18	1.84	0.039	0.268	0.995
A45-H1.5	18	2.76	0.067	0.325	0.991
A45-H2.0	18	3.68	0.120	0.376	0.984
A45-S0.5H1.5	18	3.21	0.103	0.345	0.976
A45-S1.0H1.0	18	2.74	0.054	0.328	0.989
A45-S1.5H0.5	18	2.27	0.055	0.308	0.997

 $\lambda = \begin{cases} 1 - 30.06\varphi_{ca}^{3.45} & \text{, ascending segment} \end{cases}$ 

$$1-1.147 \varphi_{\rm ca}$$
 , descending segment

通过回归分析得到 R表达式, 如式(6)所示。

(5)

图9给出参数 $\beta$ 随纤维增强因子 $\varphi$ 的变化趋势, 通过[

$$\beta = \begin{cases} \lambda \left( 0.215 - 0.156\varphi + 0.037\varphi^2 \right) & \text{,scending segment} \\ \lambda \left[ 0.537 - 0.731\exp\left(-\varphi/1.347\right) \right] & \text{,escending segment} \end{cases}$$
(6)

将式(6)代入式(4),得到考虑粗骨料和钢纤维 影响的CA-UHPC 拉伸损伤本构模型,如式(7)所示.该模型适用于钢纤维掺量不超过2.0%含粗骨 料 UHPC 的材料特征研究及构件精细化有限元 分析.







#### 4.3 模型验证

为验证上述拉伸损伤本构模型的准确性,采用 本文及文献[12]、[22]和[23]中CA-UHPC试件的 试验数据进行验证,对比模型曲线与试验曲线的吻 合情况,如图10所示.由图10可见,模型曲线与试验 曲线总体趋势一致,吻合度较好,表明本文建立的损 伤本构模型能较好预测CA-UHPC的单轴拉伸应 力-应变全曲线.





### 5 结论

(1)CA-UHPC受拉破坏时裂缝曲折程度和多缝

开裂特征随着粗骨料含量增加而不断减弱.平直钢 纤维由于分布较均匀更有利于CA-UHPC发生韧性 破坏,混掺1.0%平直和1.0%端勾钢纤维能有效限 制CA-UHPC裂缝扩展,其韧性破坏特征显著.

(2)随着粗骨料含量的增大,CA-UHPC的拉伸 强度和拉伸韧性分别降低10%~30%和10%~ 45%,拉伸曲线的应变硬化特征和峰后持荷能力逐 渐减弱;当用量超过450 kg/m<sup>3</sup>时,曲线应变软化特 征明显,强度和韧性的降幅超过22%,因此建议其用 量不应超过450 kg/m<sup>3</sup>.

(3)CA-UHPC中单掺平直钢纤维可获得较稳定的拉伸性能,而端勾钢纤维可显著提升其抗拉强度. 对于粗骨料用量为450 kg/m<sup>3</sup>的CA-UHPC,当钢纤 维掺量不低于1.5%时,其表现出应变硬化行为;当 纤维掺量为2.0%时,以1:1混杂的平直和端勾钢纤 维能发挥良好的协同增韧作用,其应变硬化特征、抗 拉强度和韧性等3种拉伸性能均得到显著增强.

(4)粗骨料与基体间形成界面薄弱区,增大了基体内部缺陷并降低纤维-基体的黏结性能,同时其空间阻隔作用影响纤维均匀分布,削弱了钢纤维的增强、增韧作用.随着粗骨料用量和钢纤维掺量增大,纤维有效利用率均降低;粗骨料用量为450 kg/m<sup>3</sup>时,混杂1.0%平直和1.0%端勾钢纤维能够实现与粗骨料的良好匹配,使纤维有效利用率达到25.4%.

(5)基于应变等效原理构建了 CA-UHPC 受拉 损伤本构方程,通过分析试验数据明确了模型参数β 与粗骨料削弱系数λ和纤维增强因子φ的关系,从而 建立了考虑粗骨料和钢纤维影响的 CA-UHPC 拉伸 应力-应变损伤模型,能较好地预测材料性能.

#### 参考文献:

- [1] 王秋维,史庆轩,陶毅,等.活性粉末混凝土抗压力学性能及 指标取值[J].建筑材料学报,2020,23(6):1381-1389.
   WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, TAO Yi, et al. Compressive mechanical properties and indexes of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020,23(6):1381-1389. (in Chinese)
- [2] DU J, MENG W N, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) [J]. Composites Part B:Engineering, 2021, 224:109220.
- [3] 王龙,池寅,徐礼华,等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能 尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):781-788.
  WANG Long, CHI Yin, XU Lihua, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8): 781-788. (in Chinese)
- [4] 李力剑,徐礼华,池寅,等.含粗骨料超高性能混凝土单轴受 压疲劳性能[J].建筑材料学报,2022,25(4):381-388.
   LI Lijian, XU Lihua, CHI Yin, et al. Fatigue performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate under

uniaxial cyclic compression [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):381-388. (in Chinese)

- [5] WANG J Q, LIU J P, WANG Z, et al. Cost-effective UHPC for accelerated bridge construction: material properties, structural elements, and structural applications [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2):04020117.
- [6] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1):46-54.
- [7] 黄维蓉,杨玉柱,刘延杰,等.含粗骨料超高性能混凝土的力 学性能[J],硅酸盐学报,2020,48(11):1747-1755.
  HUANG Weirong, YANG Yuzhu, LIU Yanjie, et al. Mechanical properties of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J], Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11):1747-1755. (in Chinese)
- [8] WUFH, XULH, CHIY, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite: The effect of coarse aggregate [J]. Composite Structures, 2020, 236:111810.
- [9] 黄政宇,李仕根.含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):47-54.
  HUANG Zhengyu, LI Shigen. Study on mechanical properties of ultra-high performance concrete with coarse aggregate [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2018,45(3): 47-54. (in Chinese)
- [10] DENG F Q, XU L H, CHI Y, et al. Effect of steel-polypropylene hybrid fiber and coarse aggregate inclusion on the stress-strain behavior of ultra-high performance concrete under uniaxial compression [J]. Composite Structures, 2020, 252:112685.
- [11] 刘加平,刘建忠,韩方玉,等.基于钢-混凝土组合结构轻量化的粗骨料超高性能混凝土研究进展与应用[J].建筑结构学报,2022,43(9):36-44.
  LIU Jiaping, LIU Jianzhong, HAN Fangyu, et al. Research progress and application of coarse aggregate ultra-high performance concrete used for lightweight steel-concrete composite structure [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (9):36-44. (in Chinese)
- [12] LIU J, HAN F Y, CUI G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 310-318.
- [13] 李力剑,刘素梅,徐凡丁,等.含粗骨料超高性能混凝的土单 轴受拉力学性能[J].建筑材料学报,2024,27(2):167-173.
  LI Lijian, LIU Sumei, XU Fanding, et al. Uniaxial tensile behavior and mechanism analysis of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. Journal of Building Materials,2024,27(2):167-173. (in Chinese)
- [14] SHI Z C, SU Q T, KAVOURA F, et al. Uniaxial tensile response and tensile constitutive model of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate (CA-UHPC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 136:104878.

[15] 中国建筑材料联合会,中国混凝土与水泥制品协会.超高性能

混凝土基本性能与试验方法:T/CBMF 37—2018[S].北京:中国建材工业出版社,2018:8-9.

China Building Materials Federation, China Concrete & Cementbased Products Association. Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2018: 8-9. (in Chinese)

- [16] LILJ, XULH, ZENGYQ, et al. Understanding the role of coarse aggregate on tensile fatigue behaviors of ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 139:105069.
- [17] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48:53-66.
- [18] HAN F Y, CHEN H S, JIANG K F, et al. Influences of geometric patterns of 3D spacer fabric on tensile behavior of concrete canvas [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65:620-629.
- [19] 王秋维,梁林,史庆轩.混杂钢纤维超高性能混凝土轴拉力学 性能及本构模型[J].复合材料学报,2024,41(1):383-394.
   WANG Qiuwei, LIANG Lin, SHI Qingxuan. Mechanical

properties and constitutive model of ultra-high performance concrete with hybrid steel fiber under axial tension [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1);383-394. (in Chinese)

[20] 邓金岚,杨简,陈宝春,等.超高性能纤维增强混凝土单轴本 构关系和钢纤维增强作用对其影响[J].复合材料学报,2024, 41(2):911-924.

DENG Jinlan, YANG Jian, CHEN Baochun, et al. Uniaxial constitutive relation of ultra-high performance fiber reinforced concrete and the effect of steel fiber reinforcement on it [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2):911-924. (in Chinese)

- [21] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2):233-245.
- [22] PYO S, KIM H K, LEE B Y. Effects of coarser fine aggregate on tensile properties of ultra high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 84:28-35.
- [23] 张丽辉, 刘加平, 周华新, 等. 粗骨料与钢纤维对超高性能混 凝土单轴拉伸性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 109-114.

ZHANG Lihui, LIU Jiaping, ZHOU Huaxin, et al. Effects of coarse aggregate and steel fiber on uniaxial tensile property of ultra-high performance concrete [J]. Materials Reports, 2017, 31 (23):109-114. (in Chinese)

#### (上接第805页)

dots from non-activated and activated pyrolytic carbon black [J]. Nanomaterials, 2022, 298:12030298.

- [12] DONG S J, YAN J T, XU N, et al. Molecular dynamics simulation on surface modification of carbon black with polyvinyl alcohol [J]. Surface Science, 2011, 605(9/10):868-874.
- [13] FEI Y Y, FU Y B, BAI X Q, et al. Defective nanographenes containing seven-five-seven (7-5-7)-membered rings [J]. Journal of the American Chemical Society, 2021, 143(5):2353-2360.
- [14] FEI Y Y, LIU J Z. Synthesis of defective nanographenes containing joined pentagons and heptagons [J]. Advanced Science, 2022, 9(19):2201000.
- [15] NIE F H, CHOW C L, LAU D. Effect of functionalization and defects on thermal conductivity of graphene sheets modified asphalt nanocomposites [J]. Applied Surface Science, 2023, 621: 156804.
- [16] WANG L, ZHANG L, LIU Y. Molecular dynamics study on the effect of mineral composition on the interface interaction between rubberized asphalt and aggregate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(4):04022032.
- [17] 禹辉,孟潇飞,甘新众,等.干投法废轮胎热解炭黑改性沥青 表面层首件工程工艺试验研究[J].公路,2022,67(2):7-15. YU Hui, MENG Xiaofei, GAN Xinzhong, et al. Research on the

first piece engineering process of the surface layer of pyrolytic carbon black modified asphalt made from waste tires by dry-casting method [J]. Highway, 2022, 67 (2) : 7-15. (in Chinese)

- [18] XU G J, WANG H. Molecular dynamics study of oxidative aging effect on asphalt binder properties [J]. Fuel, 2017, 188:1-10.
- [19] 邱延峻,苏婷,郑鹏飞,等.基于分子模拟的沥青胶结料物理 老化机理研究 [J].建筑材料学报,2020,23(6):1464-1470.
   QIU Yanjun, SU Ting, ZHENG Pengfei, et al. Physical aging mechanism of asphalt binder based on molecular simulation [J].
   Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1464-1470. (in Chinese)
- [20] YOU L Y, SPYRIOUNI T, DAI Q L, et al. Experimental and molecular dynamics simulation study on thermal, transport, and rheological properties of asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2020, 265:120358.
- [21] SUN G Q, NIU Z X, ZHANG J P, et al. Impacts of asphalt and mineral types on interfacial behaviors: A molecular dynamics study [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17:e01581.
- [22] GAN Y W, LI C M, CHEN A Q, et al. Factors affecting the properties of PCB-modified asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(11):04023390.