

DOI:10.11918/202211080

掺轻质砂超高性能混凝土的轴拉力学性能

王俊颜^{1,2}, 喻星乔^{1,2}, 周田^{1,2}

(1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804;

2. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804)

摘要: 为研究轻质砂对不同试件尺寸下超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)拉伸应变强化性能的影响, 采用轻质砂对原黄砂进行等体积替代, 完成9组不同轻质砂体积率(0~35%)和不同试件厚度(30~100 mm)的单轴拉伸试验, 并同步进行声发射实时探伤测试。结果表明: 轻质砂体积率对UHPC弹性极限点对应力和对应变的影响较小, 但轻质砂体积率由0增加到35%时, UHPC的极限抗拉强度和极限拉应变分别由10.6 MPa和 2.35×10^{-3} 提高到了19.4 MPa和 4.3×10^{-3} ; 轻质砂体积率大于15%时, UHPC的应变强化程度得到显著提升, 试件内部产生的损伤点数更多且分布更均匀, 展现出良好的裂缝控制能力; 在相同轻质砂体积率下, UHPC的应变强化程度随试件厚度的增加而降低, 且试件内部的损伤点趋于集中, 表现出明显的尺寸效应。

关键词: 轻质砂; 超高性能混凝土; 拉伸应变强化; 声发射; 尺寸效应

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)02-0028-09

Uniaxial tensile properties of ultra high performance concrete doped with lightweight sand

WANG Junyan^{1,2}, YU Xingqiao^{1,2}, ZHOU Tian^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: To explore the effects of lightweight sand on the strain hardening properties of ultra high performance concrete (UHPC) with different specimen sizes, the lightweight sand was used to replace the yellow sand by equal volume. Nine groups of uniaxial tensile tests were carried out with different lightweight sand volume rate ranging from 0 to 35% and different specimen thicknesses from 30 mm to 100 mm. Meanwhile, simultaneous acoustic emission real-time flaw detection tests were conducted. Results show that the volume rate of lightweight sand demonstrates little effect on the stress and strain at the elastic limit point of UHPC, but when the volume rate of lightweight sand increases from 0 to 35%, the ultimate tensile strength and ultimate tensile strain of UHPC grow from 10.6 MPa and 2.35×10^{-3} to 19.4 MPa and 4.3×10^{-3} respectively. When the volume rate of lightweight sand is greater than 15%, the strain hardening degree of UHPC significantly increase with more damage points generated and more uniformly distributed inside the specimen, showing remarkable crack control capability. With the same lightweight sand volume rate, the strain hardening degree of UHPC decreases with the increase of specimen thickness, and the damage points inside the specimen tend to be concentrated, exhibiting an obvious size effect.

Keywords: lightweight sand; ultra high performance concrete; tensile strain hardening; acoustic emission; size effect

超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)^[1-3]是依据颗粒紧密堆积、低水胶比和纤维增强等原则设计, 具备超高强度、超高韧性和超高耐久的水泥基材料^[4-5]。高应变强化UHPC能够在开裂后仍具备高抗拉性能, 即具有较高的抗

拉强度与拉伸应变强化的类金属特性^[6], 形成多处分布的微裂纹, 从而具备优秀的裂缝控制能力^[7-8], 提供建造长寿命桥梁与海工结构的可能性。轻质砂原料为膨化珍珠岩, 能贮存水分进行内养护^[9], 对水化产物的形成有积极作用^[10], 有利于提高UHPC

收稿日期: 2022-11-22; 录用日期: 2023-01-09; 网络首发日期: 2023-03-23

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230321.1530.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278271); 宁波市重大科技专项(2020Z034); 福建省引导性科技计划项目(2022H0028)

作者简介: 王俊颜(1982—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 王俊颜, 14529@tongji.edu.cn

中钢纤维与基体的黏结性能,提升轴心极限抗拉强度,增强常温养护型 UHPC 的应变强化效果。目前有关膨胀珍珠岩的应用研究主要集中于改善水泥基复合材料的导热性能^[11-12]以及制备高强轻质混凝土^[13-15]。本文研究了不同轻质砂体积率和不同试件尺寸对 UHPC 拉伸应变强化性能的影响,并同步进行声发射探伤测试,分析 UHPC 试件内部损伤的演化机制。

1 试 验

1.1 试验原材料及配合比

本研究采用的 UHPC 的水胶比为 0.17,纤维体积掺量为 2.0%,其中预混料主要成分见表 1。水泥采用江南-小野田水泥厂生产的 P·II 52.5 硅酸盐水泥;硅灰选用埃肯公司生产的微硅粉,比表面积为

22 000 m²/kg, SiO₂ 质量分数为 94.48%;微珠为从粉煤灰提取的超细沉珠,主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃,质量分数分别为 50%~55%和 20%~25%;减水剂采用粉末状聚羧酸系高效减水剂;消泡剂为粉状的聚醚类消泡剂;所使用砂包括普通黄砂与轻质砂两种,普通黄砂为河砂,粒径为 0.3~0.6 mm,真密度为 2 650 kg/m³;轻质砂原料为精选膨化珍珠岩,并进行憎水处理,如图 1(a)所示,最大粒径 ≤1.0 mm,堆积密度为 231 kg/m³。

表 1 预混料配合比

成分	水泥	硅灰	矿粉	微珠	减水剂	膨胀剂	消泡剂
ρ	790	135	167	58.5	9	35.5	1



(a) 轻质砂



(b) 镀铜平直型钢纤维

图 1 钢纤维和轻质砂

Fig. 1 Fibre and lightweight sand

将轻质砂按总体积的一定比例等体积取代黄砂,共设计 6 组配合比,如表 2 所示。轻质砂使用前

需要将 0.3 mm 粒径以下的颗粒筛除,纤维采用平直形镀铜钢纤维,相关性能参数见表 3。

表 2 UHPC 配合比

Tab. 2 Mixture proportions of UHPC

试件编号	轻质砂体积率/%	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				
		预混料	黄砂	轻质砂	钢纤维	水
UT-0	0	1 208.8	932.2	0	161.6	200
UT-9	9	1 208.8	693.8	20.8	161.6	200
UT-15	15	1 208.8	535.2	34.6	161.6	200
UT-21	21	1 208.8	375.6	48.4	161.6	200
UT-30	30	1 208.8	137.2	69.2	161.6	200
UT-35	35.18	1 208.8	0	81.2	161.6	200

表 3 钢纤维力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of fibre

纤维种类	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长度/mm	直径/ μm	长径比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
镀铜平直型钢纤维	2 500	200	16	200	80	7 850

1.2 试件制备及养护方法

图 2 为掺轻质砂 UHPC 的部分制作细节,制备采用如下步骤:启动搅拌机→投入粉料→干拌 2 min →加水→搅拌 3 ~ 5 min (物料达到流态) →依次加入轻质砂、黄砂,搅拌 1 ~ 2 min →投入纤维→继续搅拌 2 min 以上→浇筑试件,将 UHPC 拌合物沿着试件长度方向来回倒料 4 ~ 5 次,将搅拌物浇筑在钢模中,经抹面后加盖塑料膜,以防止水分的快速散失,室温下静置 24 h 后拆模。脱模后的试件进行标准养护,温度为 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度 90% 以上,28 d

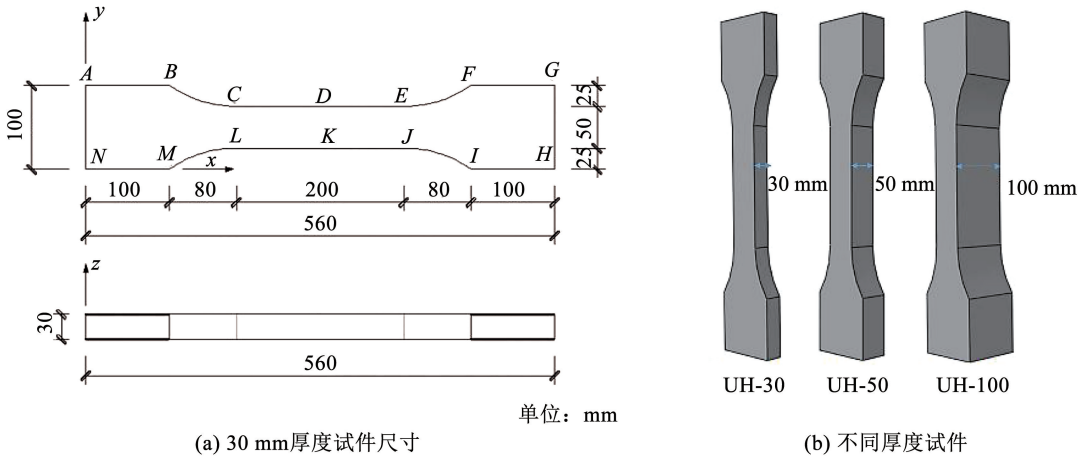
龄期时进行轴拉性能测试。

试件分为两部分。第 1 部分共 6 组,分别掺加了不同取代比例的轻质砂,每组试件包含 3 个狗骨头拉伸试件,试件厚度均为 30 mm;第 2 部分共 3 组,采用相同配合比,但试件厚度分别为 30、50、100 mm 的 3 组试件,每组试件同样包含 3 个狗骨头拉伸试件,详见图 3。两部分试验均还需要根据 GB/T 17671—1999 成型 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的棱柱试件测试 7 d 强度,并在测试强度前用排水法测试试件的硬化密度。



图 2 轴拉试件成型过程

Fig. 2 Uniaxial tension specimen forming process



(a) 30 mm 厚度试件尺寸

(b) 不同厚度试件

图 3 狗骨头轴拉试件

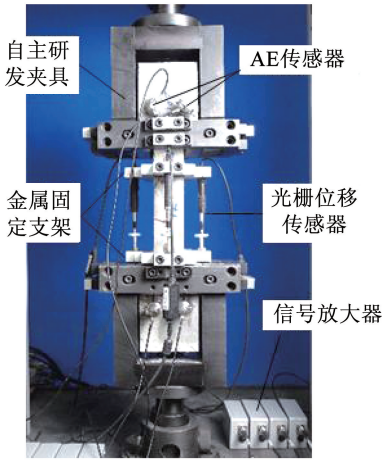
Fig. 3 Dog-bone shape uniaxial tensile loading specimen

1.3 加载装置及试验方法

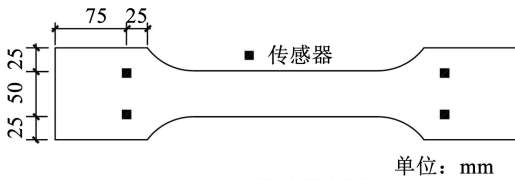
在 300 kN 电子伺服万能试验机上进行 UHPC 的单轴拉伸试验,试验机准确度为 $\pm 0.5\%$,夹具经过特殊设计以避免加载偏心。狗骨头试件由上下夹具固定,中间段固定的两个矩形金属架之间的距离即为试件的测试标距 L ,定为 200 mm。两个金属架用来安装精度为 0.000 1 mm 的两个线性可变位移计,以测量轴向拉伸变形,并转化为试件的应变值 ϵ ,最终与电脑采集的拉伸应力值形成拉伸应力 - 应变曲线。试验预加载速度设为 1 mm/min,当荷载达到 0.5 kN,按照 0.3 mm/min 的加载速率进行正式加载,UHPC 的直接拉伸加载在拉伸应力小于峰

值应力的 80% 时结束试验。

UHPC 的直接拉伸实验装置与声发射探伤定位试验装置如图 4 (a) 所示,试件传感器的布置如图 4 (b) 所示,在试件正反面各布置 4 个传感器,利用凡士林通过热熔胶枪将传感器固定于试件表面,传感器与 AE 采集系统相连。断铅试验后,对 UHPC 进行单轴拉伸试验及 AE 同步探伤试验,首先进行预加载试验,加载速度设为 1 mm/min,当荷载达到 0.5 kN 后,按照 0.3 mm/min 的加载速率进行正式加载,声发射采集系统开始工作,直至试件发生破坏,声发射采集系统与轴拉试验同步停止。



(a) 实验装置



(b) AE传感器布置

图 4 声发射实验装置

Fig. 4 Setup of acoustic emission test device

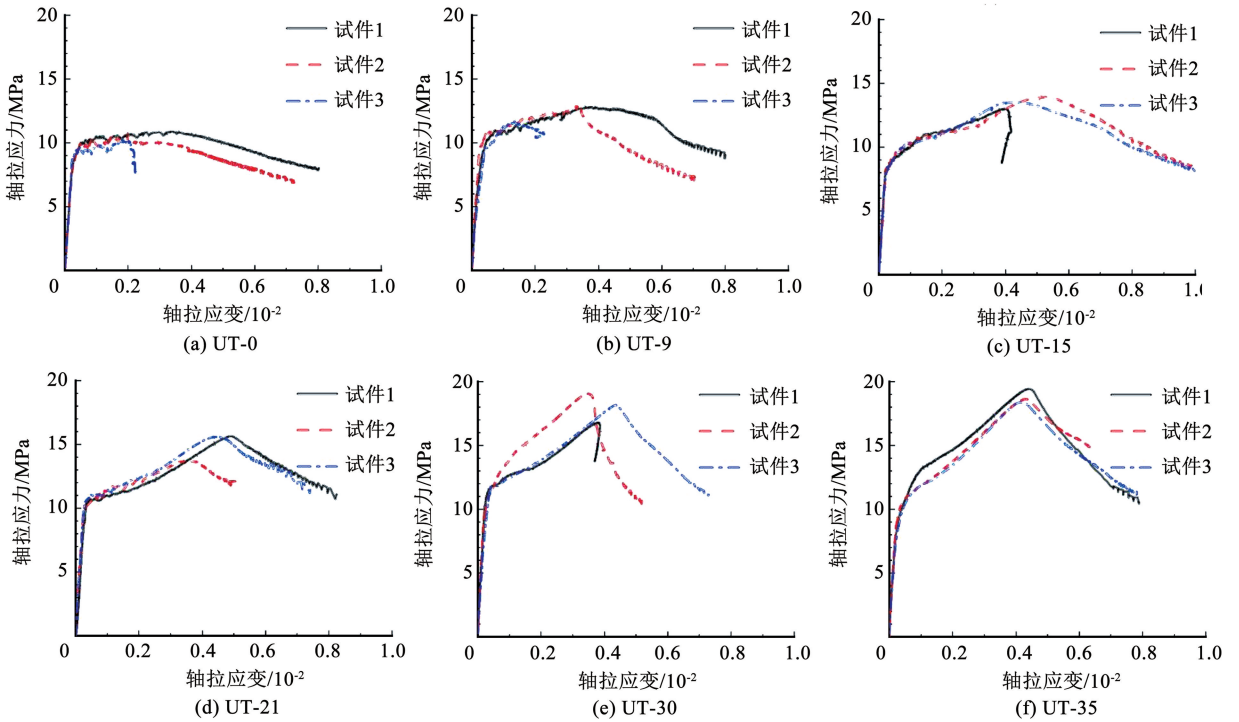


图 5 不同轻质砂体积率 UHPC 的拉伸应力 - 应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of UHPC with different lightweight sand volume rate

表 4 不同轻质砂体积率 UHPC 的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of UHPC with different lightweight sand volume rate

UHPC	硬化密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 d 抗压强度/MPa	f_{Ute} /MPa	$\varepsilon_{Ute}/10^{-2}$	f_{Utu} /MPa	$\varepsilon_{Utu}/10^{-2}$	f_{Utu}/f_{Ute}	E_U/GPa
UT-0	2 516	193.16	8.142	0.025	10.622	0.235	1.305	37.7
UT-9	2 465	174.13	9.506	0.028	12.754	0.386	1.342	37.2
UT-15	2 419	142.41	8.246	0.022	13.492	0.439	1.636	38.2
UT-21	2 378	142.05	8.327	0.027	14.639	0.425	1.518	37.9
UT-30	2 300	129.29	10.105	0.026	18.013	0.411	1.783	38.3
UT-35	2 257	111.89	10.767	0.023	19.647	0.438	1.825	37.6

试件的弹性段极限点对应应力为 8 ~ 10 MPa, 弹性点对应应变为 0.02% ~ 0.03%; 对于应变强化段, 轻质砂体积率的增加使得 UHPC 的极限应变、极限抗拉强度及其与弹性段极限点对应应力的比值 f_{Ult}/f_{Ute} 均有明显的增加, 极限抗拉强度为 10.5 ~ 20.0 MPa, 极限拉伸应变为 $(2.3 \sim 4.4) \times 10^{-3}$ 。出现抗压强度降低而弹性段极限点对应应力和极限抗拉强度上升的原因在于: 轻质砂在受压与受拉过程中起到的作用并不相同; 受压过程中由于轻质砂自身强度较低容易被粉碎, 降低了 UHPC 的密实度, 这一削弱作用要强于其内养护对各相之间黏结性的改善作用; 而在受拉过程中, 轻质砂起到的内养护作用促进了水泥水化, 提高了轻质砂与基体的黏结性以及基体与纤维之间的黏结性, 对于抗拉强度的有利作用更大。

2.2 轻质砂体积率对 UHPC 的损伤演化机制的影响
通过对 UT-0、UT-15、UT-30 3 组 UHPC 在轴向

拉伸过程中同步进行的声发射无损探伤定位试验, 得到 3 组 UHPC 在不同应变处的损伤点分布图, 如图 7 所示。

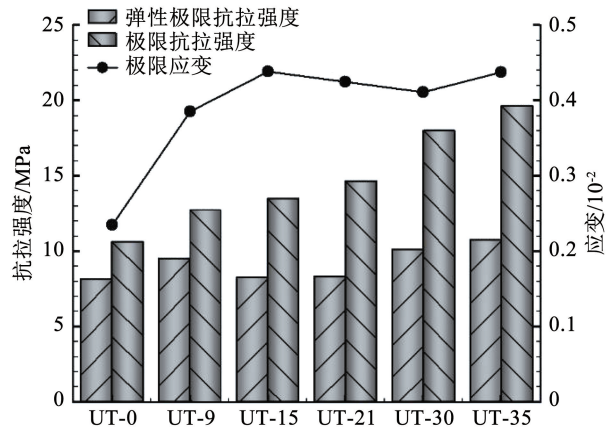


图 6 不同轻质砂体积率 UHPC 的轴拉性能

Fig. 6 Uniaxial tension properties of UHPC with different lightweight sand volume rate

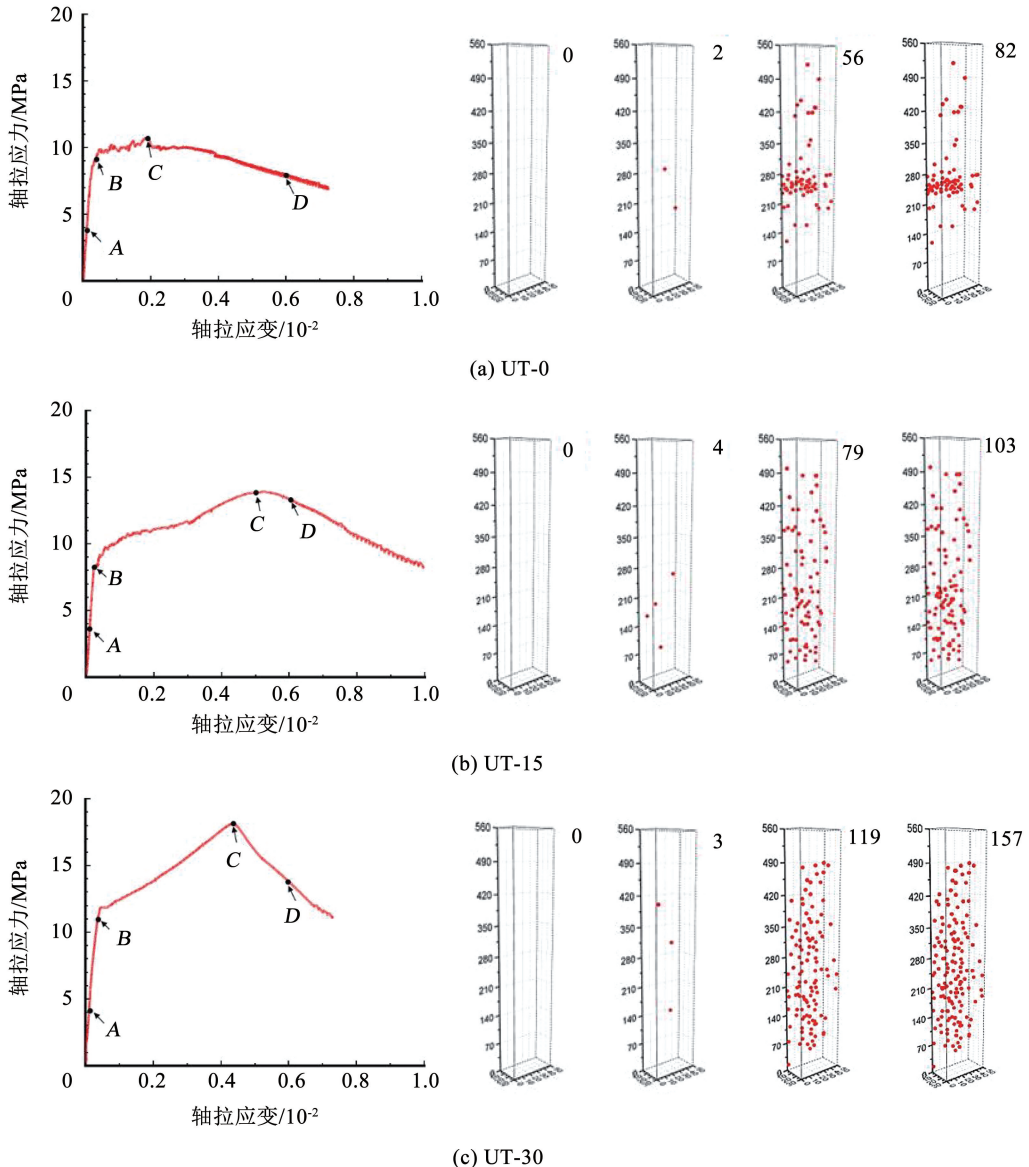


图 7 不同轻质砂体积率 UHPC 内部损伤点分布

Fig. 7 Distribution of internal damage point at different lightweight sand volume rate UHPC

图7中点A、B、C、D分别取自轴拉应力-应变曲线的弹性段(0.01×10^{-2})、弹性极限点、抗拉极限点、软化段(0.6×10^{-2}),损伤点分布图中的数字表示损伤点总数量,同时将过程中的损伤点数量随应变($0 \sim 0.6 \times 10^{-2}$)变化趋势绘制成图8。

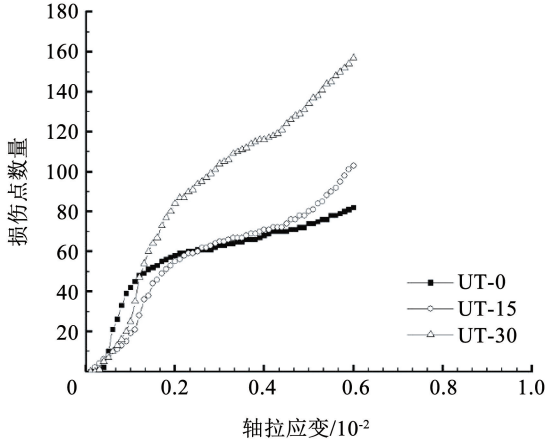


图8 不同轻质砂体积率 UHPC 的内部损伤点数量

Fig. 8 Number of internal damage point at with different light weight sand volume rate UHPC

由图7可知,3组UHPC在B点开始出现零星的损伤点,说明直到初裂点后,试件中才开始出现不可逆损伤,抗拉极限点处,UT-0、UT-15、UT-30组UHPC分别产生了56、79和119个损伤点,这表明拉伸应变强化程度越大的UHPC在应变强化阶段会产生更多的微裂纹。随着加载的继续进行,UT-0中的损伤点逐渐呈“块状”聚集在试件高度220~270mm内,这与试件最后主裂缝出现的位置一致。

从图8可以看出:UT-0的损伤点快速发展区间位于 $(0.02 \sim 0.10) \times 10^{-2}$,占强化阶段形成损伤点总数的75%,UT-15和UT-30的损伤点快速发展区间均为 $(0.08 \sim 0.16) \times 10^{-2}$,占比则分别为42%和43%,这表明损伤点在应变强化阶段的前期增长速率更快;对比UT-15和UT-30可以看出,应变强化程度更高的UT-30在 $0 \sim 0.4 \times 10^{-2}$ 内产生损伤点的速率均高于UT-15,印证了前文应变强化程度更大对应产生了更多微裂纹的结论。

将试件沿高度划分为8等分,D点各等分区损伤点占比绘成柱状图,结果见图9。可以看出:UT-0中,7个区域出现损伤点,但71.6%的损伤点集中出现在210~280mm高度内;UT-15中,8个区域都有损伤点,其中,140~210mm高度内出现的损伤点最多,占25.5%;UT-30中,损伤点遍布8个区域,分布较UT-15更为均匀,损伤出现最多的高度为210~

280mm,占比为23.1%。从上述数据可知,应变强化程度越高的UHPC,在轴拉荷载下内部产生的损伤点越多,分布范围更广且更均匀。由于内部损伤点的产生及分布代表微裂纹的产生和分布情况,这也印证了应变强化型UHPC往往伴随着多缝开裂现象。初裂点以后,试件变形以微裂纹的形式均布展开,变形一定时,产生的微裂纹数量越多,越能分散变形量。由于UHPC初裂后促使现有裂缝继续发展所需的能量一般大于产生新裂缝所需的能量,应变强化型UHPC中均匀分布的微裂纹有利于新微裂缝的稳定发展。

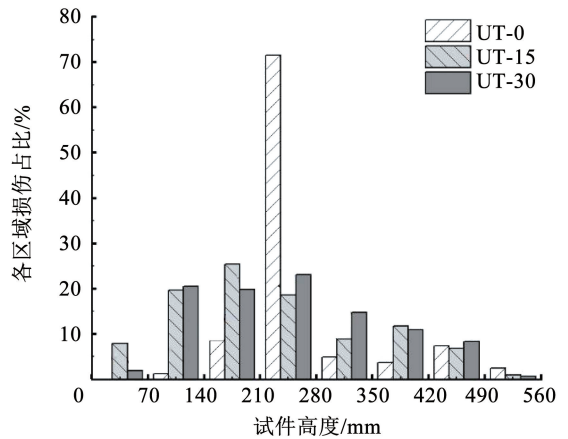
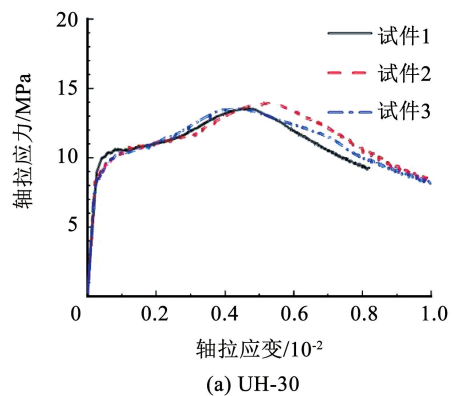


图9 不同轻质砂体积率 UHPC 声发射损伤点分布

Fig. 9 Distribution of AE damage points of UHPC with different lightweight sand volume rate

2.3 不同试件厚度对 UHPC 力学性能的影响

图10为采用与UT-15相同配合比,但厚度分别为30、50、100mm的UHPC轴拉应力-应变全曲线,分别编号为UH-30、UH-50、UH-100。可以看出:UH-30的应变强化现象最为显著,应变强化阶段曲线斜率最大;随着试件厚度的增加,应力-应变曲线趋于平缓,UH-100的非弹性段曲线几乎与X轴平行;厚度越薄的试件在软化阶段的强度衰减速率越快。



(a) UH-30

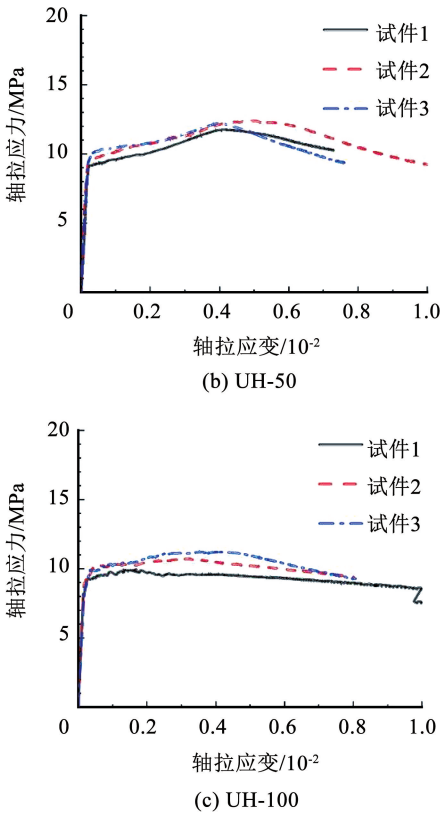


图 10 不同试件厚度 UHPC 的拉伸应力 - 应变曲线

Fig. 10 Tensile stress-strain curve of UHPC with different specimen thickness

表 5 为 3 组不同厚度 UHPC 轴拉应力 - 应变曲线的特征参数,为了方便对比,同样将轴拉曲线的特征参数单独绘制成图 11,可以看出:UH-30、UH-50、

UH-100 的平均弹性极限点对应力 f_{Ute} 分别为 8.6、9.1、8.5 MPa,相应的平均弹性极限点对应变 ϵ_{Ute} 分别为 0.027%、0.022%、0.018%;UH-30、UH-50、UH-100 的平均极限抗拉强度 f_{Utu} 分别为 13.7、12.1、10.7 MPa,对应的平均强化极限应变 ϵ_{Utu} 分别为 0.472%、0.437%、0.299%。对比 3 种厚度 UHPC 的拉伸力学性能可知,三者的弹性极限点对应力相差较小,而 UH-30 的极限抗拉强度分别为 UH-50 和 UH-100 的 1.13 倍和 1.28 倍, f_{Ute}/f_{Utu} 同样随着厚度的增加而减小, UH-30 的强化极限应变则分别为 UH-50 和 UH-100 的 1.08 倍和 1.58 倍。上述数据说明对于应变强化型 UHPC,试件厚度的增加使得试件极限抗拉强度与极限应变降低,强化段刚度减小,应变强化的特性减弱,但软化阶段的强度衰减速率有所下降。

2.4 不同试件厚度 UHPC 的损伤演化机制

通过声发射无损探伤定位试验得到了 UH-30、UH-50、UH-100 的损伤点分布,如图 12 所示。与 2.2 节中情况类似,3 种厚度的 UHPC 在 A 点没有出现损伤点,到 B 点处有零星损伤点产生,C 点时 3 组 UHPC 中均产生了大量损伤点,直到 D 点,试件 UH-30、UH-50、UH-100 中产生的损伤点数分别为 103、143、191 个,换算至 50 mm × 30 mm 截面积后,三者损伤点数分别为 103、86、57 个。以上数据可知在相同应变下,试件厚度的增加减少了等横截面积内的平均损伤点数量。

表 5 不同试件厚度 UHPC 的力学性能

Tab. 5 Mechanical properties of UHPC with different specimen thickness

UHPC 试件	$\epsilon_{Ute}/10^{-2}$	ϵ_{Ute} 平均值/ 10^{-2}	$\epsilon_{Utu}/10^{-2}$	ϵ_{Utu} 平均值/ 10^{-2}	f_{Ute}/MPa	f_{Ute} 平均值/ MPa	f_{Utu}/MPa	f_{Utu} 平均值/ MPa	f_{Ute}/f_{Utu}
UH-30	1	0.023		0.456	8.9		13.6		1.5
	2	0.030	0.027	0.525	8.3	8.6	13.9	13.7	1.7
	3	0.027		0.435	8.5		13.5		1.6
UH-50	1	0.023		0.419	9.0		11.8		1.3
	2	0.020	0.022	0.497	9.2	9.1	12.4	12.1	1.3
	3	0.023		0.397	9.1		12.2		1.3
UH-100	1	0.016		0.168	8.1		10.0		1.2
	2	0.018	0.018	0.323	8.8	8.5	10.7	10.7	1.2
	3	0.020		0.407	8.6		11.5		1.3

采用 2.2 节中的损伤点区域分类方法绘制出图 13,可以看出:损伤点的分散度随着试件厚度的增加而变差,局部损伤点分布的密度增大;UH-50 损伤点最集中的区域为 350 ~ 420 mm,占比为 39.4%,

试件 UH-100 损伤点最集中的区域为 280 ~ 350 mm,占比高达 54.2%,试件 UH-30 中损伤点最集中的占比仅为 25.4%,说明越厚的试件在轴拉荷载下能量耗散能力越弱,损伤更容易发生局部集聚。

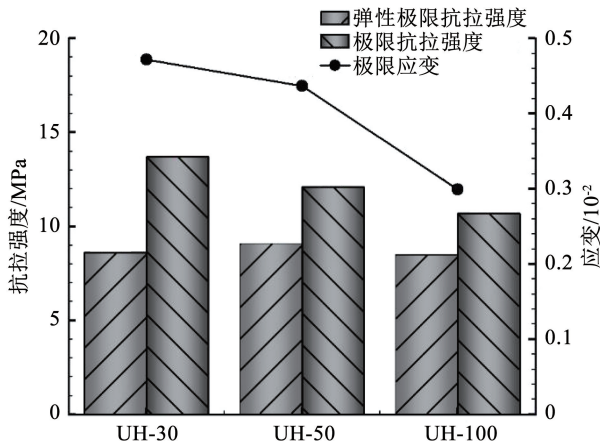
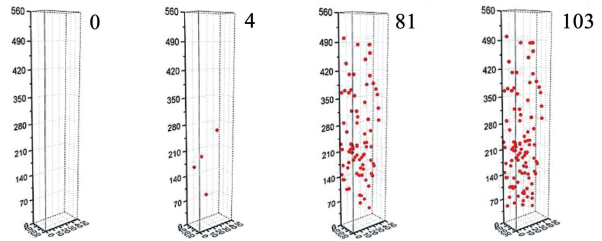
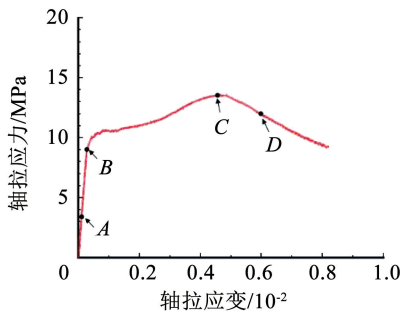


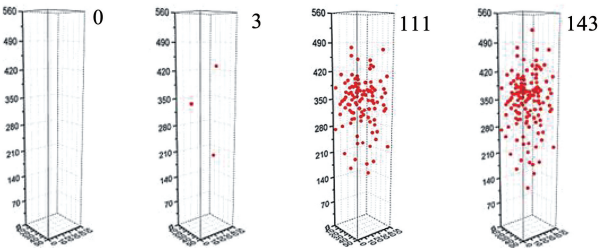
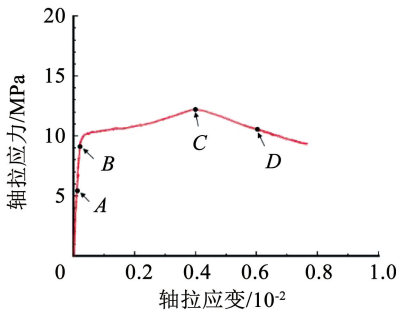
图 11 不同试件厚度 UHPC 的轴拉性能

Fig. 11 Uniaxial tensile properties of UHPC with different specimen thickness

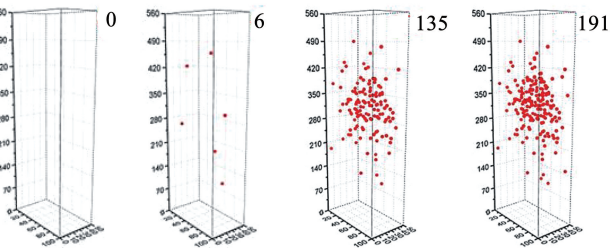
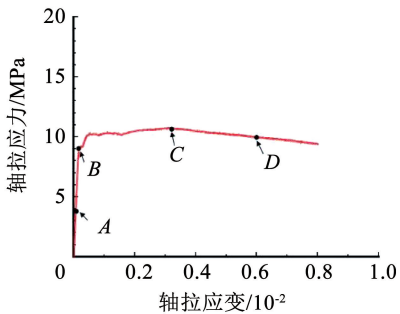
这 3 组试件仅有厚度上的差别,且受拉时弹性段内只发生基体层面的开裂,在断裂韧性和弹性极限点对应力上无较大差异。由于强化段时基体内出现微裂缝,荷载通过纤维的桥接作用从基体传递到连接微裂缝两端的纤维上,UHPC 应变强化段的拉伸特性主要取决于嵌入纤维,当 UHPC 中的纤维取向与受拉方向越一致时,纤维的利用率越高,UHPC 浆体浇筑进模具时,流速会因壁面的摩擦力而依据距离壁面的远近呈抛物线函数状,并产生扭矩导致纤维沿平行于流动方向排列^[16],随着试件厚度的增加,扭矩的大小会因流速剖面的增大而减小,从而导致纤维取向系数和单位面积内的纤维数量均随试件尺寸的增加而减小,因此,UHPC 强化阶段的应变能力逐步减弱。



(a) UH-30



(b) UH-50



(c) UH-100

图 12 不同厚度 UHPC 内部损伤点分布

Fig. 12 Distribution of internal damage point at different thicknesses UHPC

厚试件与薄试件在几何形状上的不同使得薄试件比厚试件更容易产生贯穿性裂纹,在软化阶段,试件中

的微裂缝密度已经接近饱和的情况下,薄试件中的主裂缝比厚试件发展得更快,抗拉能力下降更显著。

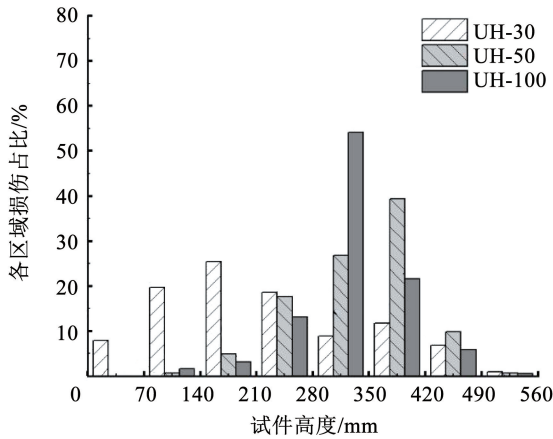


图 13 不同试件厚度 UHPC 声发射损伤点分布

Fig. 13 Distribution of AE damage points of UHPC with different specimen thickness

3 结 论

1) 轻质砂等体积取代原黄砂时, 取代量的增加显著提升了 UHPC 的应变强化效果, 对强化段刚度、极限抗拉强度、极限应变及 f_{Um}/f_{Ute} 的提高存在有利影响。轻质砂体积率由 0 增加到 35% 时, UHPC 的极限抗拉强度和极限应变分别由 10.6 MPa 和 2.35×10^{-3} 提高到了 19.4 MPa 和 4.3×10^{-3} 。

2) 声发射探损试验结果表明, 在试件尺寸一致的情况下, UHPC 损伤点在强化段前期发展得更快, 且应变强化程度越高, 其内部产生的损伤点数量越多, 分布更均匀, 因此, 在等量变形下能形成更多均布微裂纹, 使得应变强化 UHPC 表现出良好的裂缝控制能力。

3) 在强化阶段, UHPC 试件的厚度对纤维在试件中的取向有重要影响, 薄试件中纤维更容易与轴拉荷载成同方向排列, 因此, 薄试件的应变强化效果要优于厚试件; 在软化阶段, 由于微裂缝密度接近饱和, 且薄试件比厚试件更容易产生贯穿裂缝, 薄试件的主裂缝发展更快, 软化速率更快。

4) UHPC 试件厚度的增加使得材料内部的局部损伤点分布密度增大, 更容易发生损伤点局部聚集, 降低 UHPC 的极限抗拉强度和强化极限应变, 从而应力-应变曲线趋于平缓, 应变强化效果不明显。

参 考 文 献

[1] YOO D Y, BANTHIA N. Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 149: 416. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.136

[2] 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

CHEN Baochun, WEI Jiangang, SU Jiazhan, et al. State-of-the-art progress on application of ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Building Science and Engineering*, 2019, 36(2): 10

[3] 赵筠, 廉慧珍, 金建昌. 钢-混凝土复合的新模式-超高性能混凝土(UHPC/UHPFR)之一: 钢-混凝土复合模式的现状、问题及对策与 UHPC 发展历程[J]. *混凝土世界*, 2013, 52(1): 67

ZHAO Yun, LIAN Huizhen, JIN Jianchang. A new mode of steel-

concrete composite ultra high performance concrete (UHPC/UHPFR); the current situation, problems and countermeasures of steel-concrete composite mode and the development history of UHPC [J]. *Concrete World*, 2013, 52(1): 67

[4] 王俊颜, 耿莉萍, 郭君渊, 等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 165

WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, et al. Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 165. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201705148

[5] BIAN Chen, WANG Junyan, GUO Junyuan. Damage mechanism of ultra high performance fibre reinforced concrete at different stages of direct tensile test based on acoustic emission analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 267: 120927. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120927

[6] LIU Tianan, YANG Yingzi, CHEN Zhitao, et al. Optimization of fiber volume fraction to enhance reinforcing efficiency in hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composite [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103704. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103704

[7] 王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚, 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(11): 10

WANG Junyan, GUO Junyuan, XIAO Rucheng, et al. Study on crack control mechanism of strain-hardening ultra high performance concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(11): 10. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2017.11.002

[8] WANG Junyan, GUO Junyuan. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2018, 88: 17. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2018.01.007

[9] 孙诗兵, 聂光临, 姚晓丹, 等. 膨胀珍珠岩掺加量对水泥砂浆性能的影响[J]. *混凝土*, 2015(3): 114

SUN Shibing, NIE Guanglin, YAO Xiaodan, et al. Influence of adding amount of expanded perlite on the properties cement mortar [J]. *Concrete*, 2015(3): 114. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2015.03.031

[10] ROZYCKA A, PICHOR W. Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 65. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.019

[11] 向振宇, 叶武平. 轻质隔墙板用小粒径膨胀珍珠岩的应用研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(1): 144

XIANG Zhengyu, YE Wuping. Application research of small particle size expanded perlite in lightweight partition board [J]. *New Building Materials*, 2018, 45(1): 144. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2018.01.037

[12] LU Z, LU C, LEUNG C K Y, et al. Graphene oxide modified strain hardening cementitious composites with enhanced mechanical and thermal properties by incorporating ultra-fine phase change materials [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 98: 83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.02.010

[13] SENGUI O, AZIZI S, KARASMANOGLU F, et al. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43: 671. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.11.008

[14] 耿旗辉, 侯东帅, 王鑫鹏, 等. 利用膨胀珍珠岩制备超高性能轻及次轻骨料混凝土[J]. *青岛理工大学学报*, 2022, 43(2): 11

GENG Qihui, HOU Dongshuai, WANG Xinpeng, et al. The preparation of ultra-high performance lightweight and semi-lightweight aggregate concrete with expand perlite [J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2022, 43(2): 11

[15] 周和平. 膨胀珍珠岩配制轻质混凝土的研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2013, 7(7): 22

ZHOU Heping. Study on the formulation of lightweight concrete with expanded perlite [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2013, 7(7): 22. DOI:10.19761/j.1000-4637.2013.07.006

[16] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(3): 391. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005