第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200118

含粗骨料超高性能混凝土的力学性能

黄维蓉[1,2]，杨玉柱[1,2]，刘延杰[1]，崔 通[3]

(1. 重庆交通大学材料科学与工程学院，重庆 400074；2. 重庆交通大学交通土建工程材料国家地方联合工程实验室，重庆 400074；3. 保利长大工程有限公司，广州 511430)

摘 要：采用河砂替代石英砂并添加粗骨料的方式制备含粗骨料的超高性能混凝土(UHPC)，研究不同粗骨料掺量和粒径对UHPC力学性能的影响。结果表明：粗骨料掺量的增加对UHPC基体新拌混合物的流动性具有降低作用，粗骨料粒径对新拌混凝土的流动性具有不规则增强效应；当粗骨料掺量不大于400 kg/m^{3}时，UHPC基体立方体抗压强度和轴心抗压强度呈现不同程度的增长，当粗骨料掺量继续增加，UHPC基体立方体抗压强度和轴心抗压强度出现下降；粗骨料粒径的增加对UHPC基体的立方体抗压强度和轴心抗压强度具有增强效应，而对UHPC抗折及劈裂抗拉强度影响不大。骨料掺量对UHPC基体的弹性模量具有增强效应，骨料粒径越小，弹性模量越大；UHPC初裂强度、峰值强度、初裂挠度、峰值挠度以及各阶段耗能均随粗骨料掺量的增加缓慢降低；初裂强度、峰值强度、各阶段耗能均随粗骨料粒径的增大而降低，初裂挠度与峰值挠度随粗骨料粒径的增加呈现缓慢上升的趋势；韧性指数I_5、I_{10}、I_{20}均随骨料掺量和粒径的增加而逐渐减小。

关键词：超高性能混凝土；粗骨料；抗压强度；弯拉性能；弹性模量；弯曲韧性
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1747–09
网络出版时间：2020–09–18

Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete Containing Coarse Aggregate

HUANG Weirong[1,2], *YANG Yuzhu*[1,2], *LIU Yanjie*[1], *CUI Tong*[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Joint National Engineering Laboratory of Traffic Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511430, China)

Abstract: Effects of coarse aggregate content and particle size on mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with river sand as a coarse aggregate replacing quartz sand were investigated. The results show that the cube compressive strength and axial compressive strength of UHPC matrix are obtained at the coarse aggregate filling content of less than 400 kg/m^3. The cube compressive strength and axial compressive strength decrease when the filling content of coarse aggregate further increases. The increase of particle size of coarse aggregate has a strengthening effect on the cube compressive strength and axial compressive strength of UHPC matrix, while the particle size of coarse aggregate has little effect on the UHPC flexural and splitting tensile strength. The UHPC initial crack strength, peak strength, initial crack deflection, peak deflection and energy dissipation decrease slowly with the increase of coarse aggregate filling content. The strength and energy dissipation in each stage decrease with the increase of particle size of coarse aggregate, while the initial crack deflection and peak deflection have a slow increasing trend with the increase of particle size of coarse aggregate, and the toughness index decreases gradually with the increase of aggregate filling content and particle size.

Keywords: ultra-high performance concrete; coarse aggregate; compressive strength; flexural tensile properties; elastic modulus; flexural toughness

超高性能混凝土(UHPC)作为新型的水泥基复合材料，自问世越来就不断受到社会各界的关注，其优异的力学及耐久性能使得科研工作者产生浓厚兴趣。超高性能混凝土最基本的配置思路是高强

收稿日期：2020–02–29。　修订日期：2020–03–06。
基金项目：广东省交通运输厅科技项目(科技-2017-02-012)；重庆交通大学研究生科研创新(创新基金)项目(2019S0108)；材料工程重庆市研究生联合培养基地基金(201902)。
第一作者：黄维蓉(1970—)，女，硕士，教授。

Received date: 2020–02–29.　**Approved date:** 2020–03–06.
First author: HUANG Weirong (1970–), female, Master, Professor.
E-mail: hwr228@163.com

水泥+矿物掺合料+高效减水剂+高强度集料(粗、细)+钢纤维，再配合特殊的搅拌工艺和养护方式，从而获得高强度及高耐久性的混凝土。但由于UHPC 的胶凝材料用量大使得成本明显提高，且造成 UHPC 收缩变形增大[1–3]，这对其质量与结构物外观产生严重影响。

对此，国内外研究者提出在 UHPC 中掺入粗骨料[4–7]。在 UHPC 中掺入粗骨料时，能够在一定程度上减少胶凝材料的用量，降低成本造价；限制 UHPC 收缩，而且由于骨料之间的咬合作用及骨料与纤维之间的锚固作用，提高了混凝土的整体稳定性与强度。Aictin[8]和 Mehtay[9]指出超高性能混凝土的超低水胶比使得混凝土内部结构更紧密，尤其是粗骨料与基体的界面粘结能力大大高于普通混凝土，这一结论为在 UHPC 中添加粗骨料提供了理论依据。Ma 等[10]研究了添加粗骨料对 UHPC 抗压强度的影响，结果表明加入粗骨料的 UHPC 缩短了搅拌时间，且有无粗骨料的 UHPC 抗压强度均在 150~165 MPa 之间，并没有因为加入骨料而出现大幅度降低，该结论虽未证明骨料对 UHPC 的抗压强度具有明显提升作用，但为 UHPC 中添加粗骨料降低工程造价提供了有利依据。Wille 等[11]研究了 7~16 mm 粗骨料对 UHPC 抗压强度的影响，结果显示加入粗骨料的 UHPC 比不加的抗压强度多出 10%，证明了粗骨料的加入对混凝土强度提升有积极作用，并解释到粗骨料的骨架作用提升了基体的整体性，使得 UHPC 的极限承载力增大。针对我国基础建设规模如此庞大的形势，以粗骨料掺入 UHPC 降低造价成为必要趋势，近年来国内学者也进行了大量研究。杨凤玲等[12]、李信等[13]、黄政宇等[14]、程俊等[15–16]都对含粗骨料的 UHPC 进行了试验研究，主要研究了不同粗骨料与钢纤维掺量对 UHPC 力学性能的影响，但粗骨料粒径的大小是否也对 UHPC 有影响报道。

为此，本工作旨在研究粗骨料掺量及粒径对 UHPC 工作性与力学性能的影响，为准确分析每种骨料粒径范围对 UHPC 的作用规律，特此加入了 3~5 mm 骨料粒径，以期达到推动含粗骨料 UHPC 在国内发展的目的。

1 实验

1.1 原材料

水泥选择 P·O 42.5 水泥，密度为 3.02 g/cm^3，比表面积为 345 m^2/kg，3 d 抗压与抗折强度分别为 27.5 MPa 与 5.8 MPa，28 d 抗压与抗折强度分别为 48.6 MPa 与 7.8 MPa；硅灰 SiO_2 含量为 95.2%，比表面积为 25 100 m^2/kg；矿粉比表面积为 430 m^2/kg；粉煤灰平均粒径为 3 μm；磨细石英粉为 325 目石英粉，平均粒径 50 μm，密度为 2.626 g/cm^3。砂为细度模数为 2.94 的河砂；粗骨料为辉绿岩碎石，粒径范围为 3~5、5~8、8~10 mm；钢纤维选取了一种长度为 30 mm，直径为 0.5 mm 的端勾型钢纤维；减水剂为减水率为 40%的白色粉末状聚羧酸类高效减水剂；水为自来水。

1.2 配合比

在保持砂浆各组分比例不变的前提下，单掺不同掺量、不同粒径的粗骨料，共设计了 7 组配合比，具体配合比见表 1。

表 1 超高性能混凝土配合比

Table 1 Mix ratio of ultra–high performance concrete (UHPC)

Sample No.	Mass fraction/%							Dosage of aggregate/(kg·m^{-3})			Water-binder ratio
	Cement	Silica fume	Slag powder	Fly ash	Quartz flour	Water reducer	Fibre	3~5 mm	5–8 mm	8–10 mm	
A1	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5		0		0.16
A2	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5		200		0.16
A3	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5		400		0.16
A4	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5		600		0.16
A5	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5		800		0.16
A6	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5	400			0.16
A7	57.7	11.5	5.8	5.8	19.2	1	2.5			400	0.16

1.3 制备

将胶凝材料、粉末状外加剂、骨料投入震荡式搅拌机，开动机器干拌 2 min 后，开启震荡，干拌 1 min；停止震荡，用筛网将纤维筛入持续搅拌的搅拌机，然后进行震荡至 6 min；停止震荡，将称好的水倒入搅拌机，搅拌 2 min，开启震荡，再搅拌 2 min；拌合结束后，用容器从出料口接料[12–15]。出料后立即进行流动度测试，测试结束

将混合料装入相应的模具。

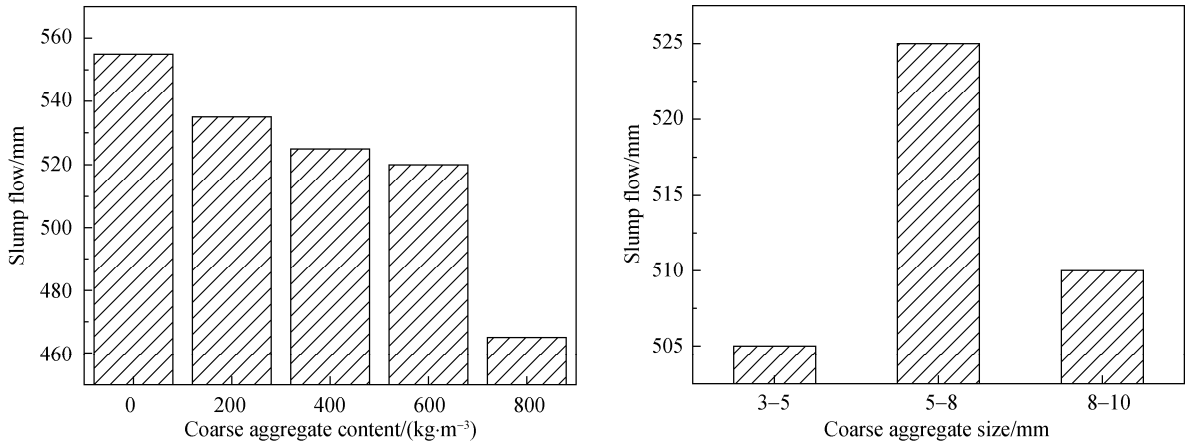
1.4　测试

按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行坍落扩展度测试；按照 GBT 31387—2015《活性粉末混凝土》标准测试立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗弯拉强度、弹性模量；按照 JGJT 221—2010《纤维混凝土应用技术规程》标准测试弯曲韧性。

2　结果与讨论

2.1　粗骨料掺量与粒径对 UHPC 工作性的影响

图 1 为不同掺量与粒径的粗骨料 UHPC 坍落扩展度结果，由图 1a 可见，扩展度随骨料掺量的增加逐渐降低，这主要是因为在水胶比不变的情况下随着骨料掺量的增加，裹附骨料表面的浆体用量增加，基体中自由流动的浆体减少，流动性降低。从图 1b 可以看出：当骨料粒径为 3~5 mm 时，扩展度最低，这主要是因为相同质量的碎石，骨料粒径越小，总比表面积越大，则造成新拌混凝土流动性较低；而在骨料粒径为 8~10 mm 时扩展度相对 5~8 mm 时出现下降。这与文献[12]中粗骨料粒径为 5~10 mm 或者 5~20 mm 时，掺量增加，UHPC 工作性降低的结论一致；主要是因为骨料粒径较大时，端勾型长纤维构成的“棚架效应”对基体的约束更明显，导致新拌混凝土的扩展度出现下降。



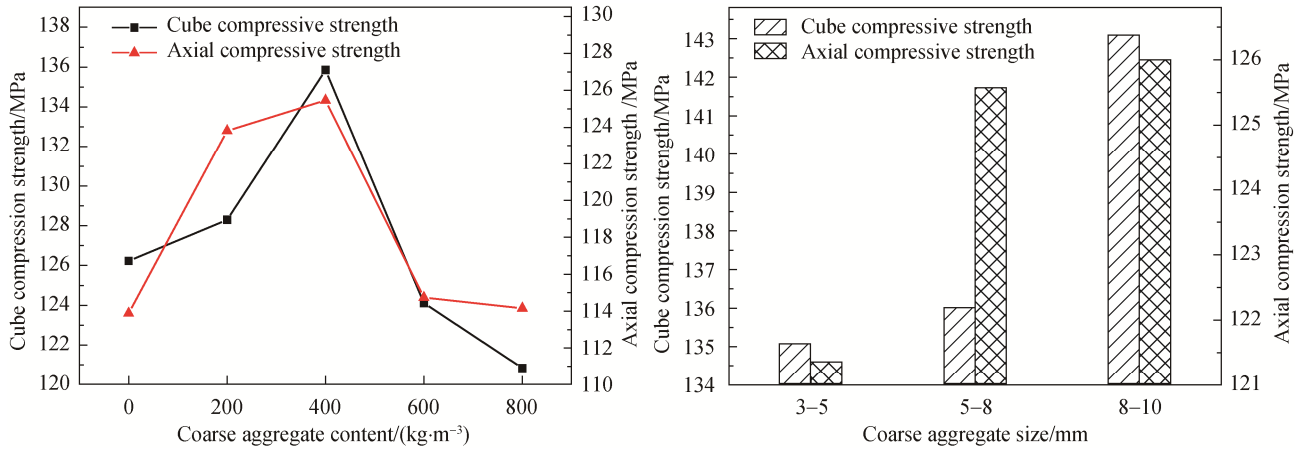
(a) 5–8 mm　　(b) 400 kg/m^3

图 1　粗骨料对 UHPC 工作性的影响

Fig. 1　Effect of coarse aggregate on the working property of UHPC

2.2　粗骨料掺量与粒径对 UHPC 抗压强度的影响

图 2 为不同粗骨料掺量与粒径的 UHPC 抗压强度试验结果，由图 2a 可以看出：当粗骨料掺量为 400 kg/m^3 时，立方体抗压强度和轴心抗压强度达到最大值，相比于无粗骨料时分别增加了 7.63% 和 10.17%；在 400 kg/m^3 掺量外，增加或者减少骨料掺量立方体抗压强度及轴心抗压强度均会降低，当掺量至 800 kg/m^3 时，相比 400 kg/m^3 立方体抗压强度与轴心抗压强度分别降低了 11.05%和 9.01%；骨料从 400 kg/m^3 继续增加至 600、800 kg/m^3 时，立方体抗压强度下降幅度要大于从 0~400 kg/m^3 的增长幅度。这主要原因包括是因为辉绿岩质地坚硬，本身具有较高的抗压强度，且本组实验采用粒径 5~8 mm 的辉绿岩碎石，表面粗糙，与基体的粘结能力较好，保证界面过渡区不会轻易破坏；粗骨料在 UHPC 的基体内部形成整体性较好的刚性骨架，且骨料之间的咬合作用力增强，加之钢纤维在骨料与基体之间的锚固作用，使得体系整体性能更好，抗压强度随之增加。当骨料掺量继续增加，混凝土强度出现降低主要是因为骨料掺量继续增加最先造成的是新拌混凝土的流动性下降。当掺量从 0~800 kg/m^3 时，新拌混凝土的坍落度扩展度从 555 mm 下降至 465 mm (见图 1)，纤维存在结团风险，浆体搅拌均匀性变差，内部结构缺陷增多，造成 UHPC 强度下降；此外当骨料掺量增加过多时水泥浆体无法充分包裹集料界面或者包裹层较薄，则会造成骨料与基体黏结力不足，同样造成混凝土强度降低。文献[12,14]的研究结果也证明了粒径为 5~10 mm 或者 5~20 mm 时，在一定范围内增加粗骨料掺量会提高 UHPC 的抗压强度，但超过这个范围，强度反而会下降。



(a) 5–8 mm (b) 400 kg/m^3

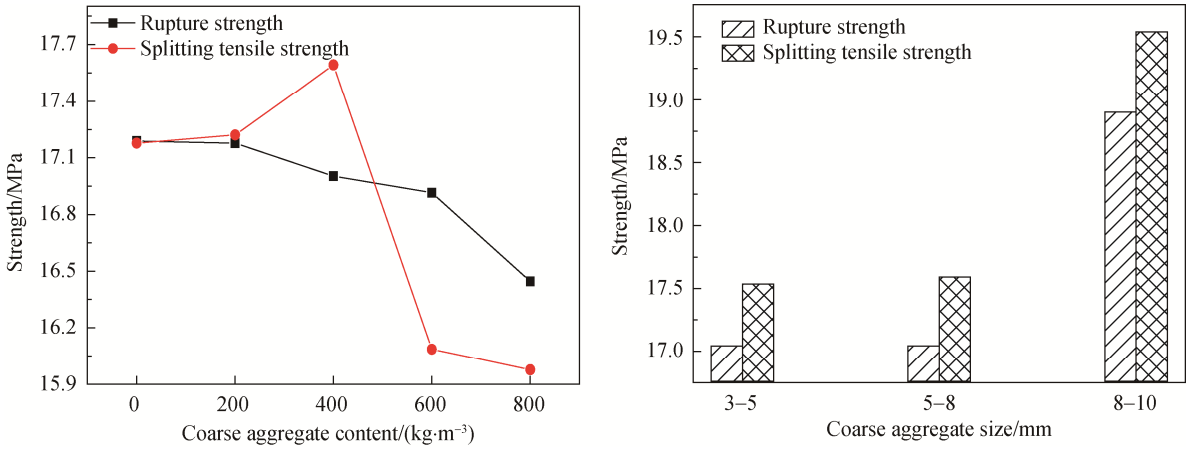
图 2 粗骨料对 UHPC 抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of coarse aggregate on compressive strength of UHPC

从图 2b 可以看出：当粗骨料掺量一定时(400 kg/m^3)，粗骨料粒径为 8~10 mm 的 UHPC 抗压强度和轴心抗压强度达到最大值，分别为 143.0 MPa 和 125.9 MPa，相比于骨料粒径为 5~8 mm 和 3~5 mm 时立方体抗压强度分别增长了 5.24%和 5.94%，轴心抗压强度分别增长了 0.35%和 3.84%，但总体增幅较小，可认为粗骨料粒径对 UHPC 抗压强度的提升作用并不明显；而粗骨料粒径较大时抗压强度及轴心抗压强出现小幅增长。这是因为一方面当骨料粒径为较小时，相同质量的碎石粒径越小则比表面积越大，造成 UHPC 基体流动性降低，骨料与基体的粘结能力变弱，且由于流动性降低导致硬化后基体内部缺陷增加，影响混凝土强度；另一方面骨料粒径较大时，骨料之间的咬合作用更明显，基体与骨料之间接触面积增加，粘结力变大，抗压强度出现小幅增长。文献[12]中指出，在骨料掺量分别为 10%、20%与 30%时，骨料粒径为 5~20 mm 的 UHPC 都比 5~10 mm 的抗压强度要高，但是由于 2 种粒径为包含关系，不能区分具体哪一范围的粒径增强效果更佳。

2.3 粗骨料掺量与粒径对 UHPC 弯拉性能影响

图 3 为粗骨料对 UHPC 弯拉性能的影响结果，由图 3a 可见，在粗骨料掺量小于 400 kg/m^3 时，粗骨料对 UHPC 基体的抗折强度、劈裂抗拉强度影响较小，当粗骨料掺量为 400 kg/m^3 时，UHPC 的劈裂抗拉强度最高，达到 17.6 MPa；当粗骨料继续增加，UHPC 基体的抗折强度和劈裂抗拉强度出现下降，但总体下降幅度较小。这与文献[14]中的结论一致。



(a) 5–8 mm (b) 400 kg/m^3

图 3 粗骨料对 UHPC 弯拉性能的影响

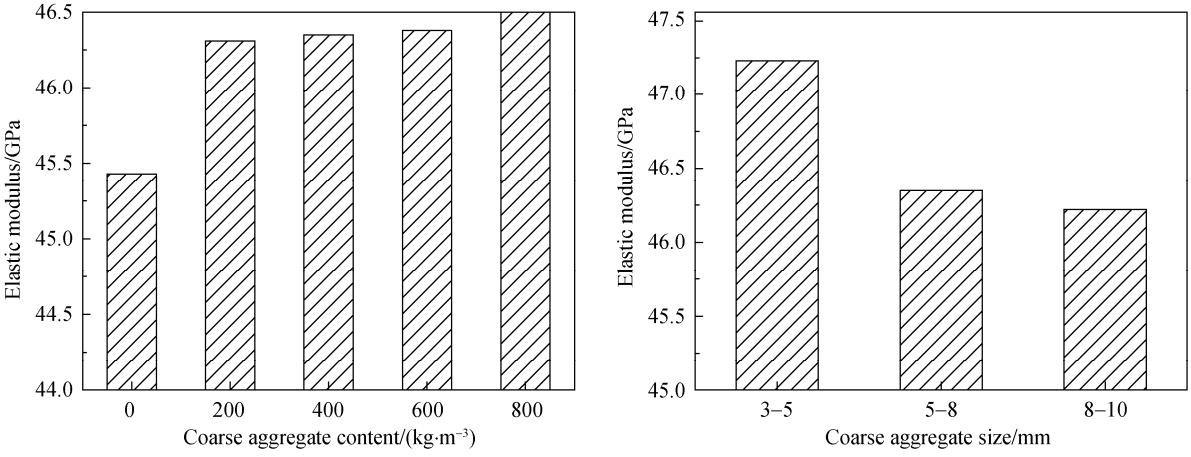
Fig. 3 Effect of coarse aggregate on bending performance of UHPC

当粗骨料掺量小于 400 kg/m^3 时，粗骨料对 UHPC 基体抗弯拉性能影响较小的原因主要是：在骨料掺量较少时，基体中的浆体较多，新拌混凝土的流动性较好，纤维分布比较均匀，与基体的粘结与锚固更牢固，对基体抗弯拉性能的贡献更大，此外辉绿岩粗骨料形成的架构良好的刚性骨架有利于抗弯拉性能的提高，并且由于骨料本身强度较高，在基体承受弯拉应力产生裂缝时，必然绕过粗骨料，但骨料之间的咬合作用又会限制内部微裂缝的发展；而当粗骨料掺量继续增加至 600 kg/m^3 和 800 kg/m^3 时，基体抗折强度和劈裂抗拉强度出现下降是因为：粗骨料掺量增加，基体中自由流动状态的浆体减少，新拌混凝土的流动性下降(见图 1)，导致纤维分散不均匀，纤维的有效利用率下降；此外自由浆体减少致使包裹纤维的浆体减少，纤维与基体的粘结力减弱，受拉过程中更容易被拔出，但由于影响 UHPC 弯拉强度的主要因素是纤维[17]，而在探究过程中并未改变纤维掺量，所以 UHPC 的抗弯拉强度变化并不明显。

由图3b可知，当骨料粒径在8~10 mm时，UHPC的抗折强度、劈裂抗拉强度达到最大值，分别为18.9 MPa 和 19.5 MPa，但总体增幅较小。原因主要是：在配制 UHPC 时选用的细集料是天然河砂，细度模数 2.94，整体偏粗，故出现在碎石粒径较小(3~5 mm 和 5~8 mm)的情况下，粒径区分不明显；而当骨料粒径较大(8~10 mm)弯拉强度出现小幅增长主要是因为：一方面骨料之间的咬合作用增强，提供部分抗弯拉能力；另一方面当骨料粒径较大时，纤维在骨料周边出现堆积与聚集，当以荷载为控制因素加载时，裂缝发展较快，聚集的纤维能够发挥更大的阻裂作用，在一定程度上提高了基体的抗弯拉能力。

2.4　粗骨料掺量与粒径对 UHPC 弹性模量的影响

图 4 为骨料对 UHPC 弹性模量的影响结果。由图 4 可以看出，UHPC 的弹性模量在掺入骨料之后出现增长，且随着骨料掺量增多弹性模量缓慢增加，最大达到 46.6 GPa，比无粗骨料时的弹性模量增长了 2.47%，但总体增长幅度并不大，这与文献[16,18]分别指出骨料粒径为 5~10 mm 与 5~8 mm 时，弹性模量随骨料掺量出现大幅增长的研究成果存在一定的差异。这是由于质地坚硬的辉绿岩相对于水泥石来讲，骨料本身的弹性模量相对较高，对 UHPC 基体的弹性模量具有增强效应，且骨料掺量越多，混凝土的弹性模量增长越大；虽然过多的骨料会造成基体与骨料粘结过度区面积增加，界面薄弱区相对增多，但弹性模量的测试是在弹性阶段完成，界面过渡区对其影响较小。弹性模量增长幅度相对较小主要是与骨料本身的特性相关，文献[16,18]采用了玄武岩作为粗骨料，而有研究[18]表明，骨料种类对混凝土弹性模量起决定性作用，对于高强混凝土来讲，玄武岩混凝土的弹性模量最高。



(a) 5–8 mm　　(b) 400 kg/m^3

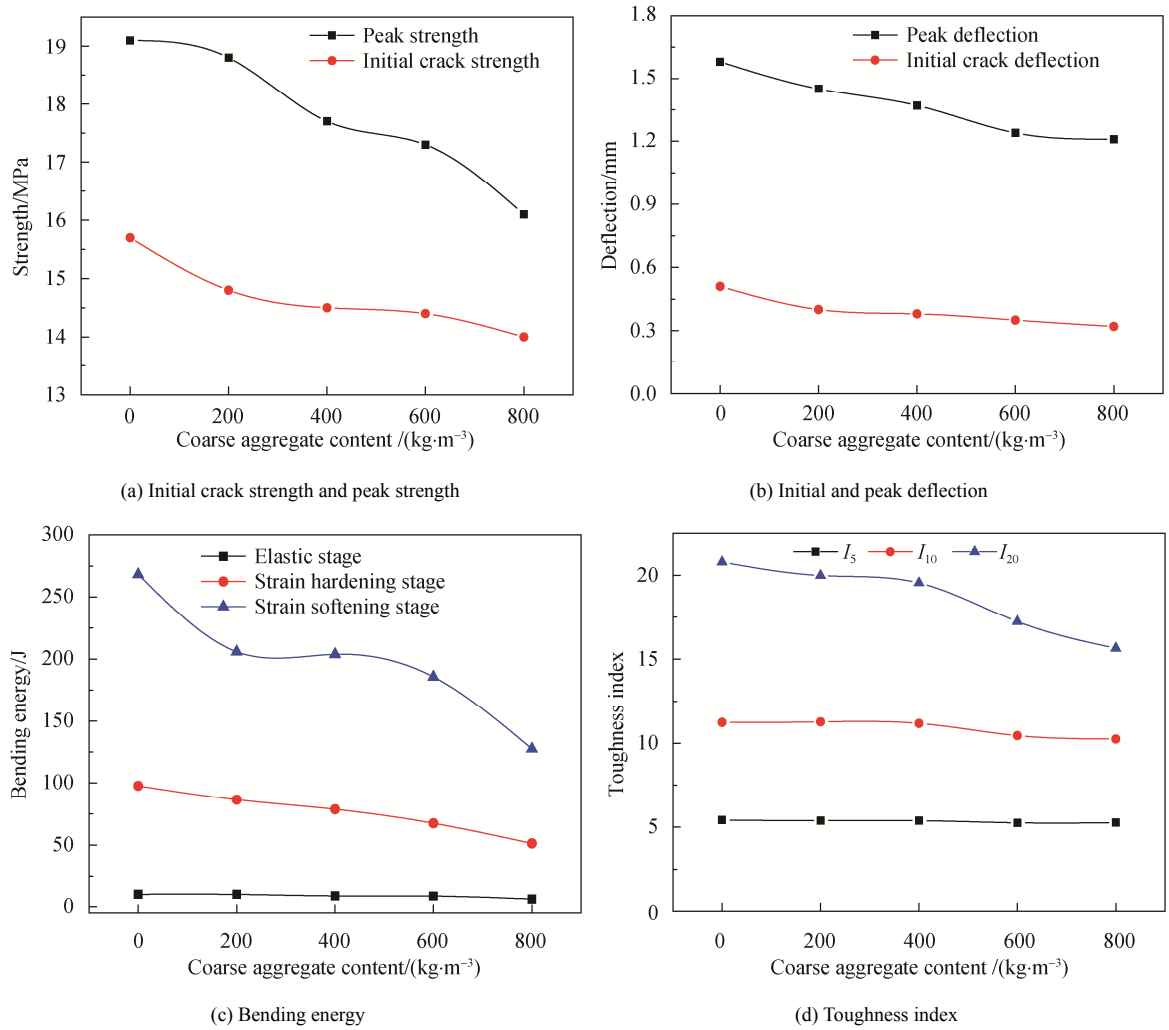
图 4　粗骨料对 UHPC 弹性模量的影响

Fig. 4　Effect of coarse aggregate on elastic modulus of UHPC

由图 4b 可见：骨料粒径对 UHPC 弹性模量存在一定影响，且粒径越小，弹性模量相对越大，使用 3~5 mm 辉绿岩时弹性模量最大为 47.2 GPa，而使用 8~10 mm 的骨料时弹性模量为 46.2 GPa，降低了 1 GPa；骨料粒径较小时弹性模量相对较高主要是因为骨料粒径较小时，单位体积内碎石掺量增多，而骨料对 UHPC 基体弹性模量的增强效应就越明显；且粒径越小，基体的匀质性越好，整体刚度越大，在受外力作用后试件变形所需要的应力越大，弹性模量就会越高。

2.5 粗骨料掺量与粒径对 UHPC 弯曲韧性的影响

图 5 为粗骨料掺量对 UHPC 弯曲韧性的影响结果，由图 5a 可见，粗骨料掺量对 UHPC 初裂强度影响并不大，骨料掺量较少时影响更小，但总体是随着骨料掺量的增加减小，粗骨料掺量为 200、400、600、800 kg/m^3 的初裂强度相比无粗骨料时分别下降了 5.7%、7.6%、8.3%、10.8%；对峰值强度影响在骨料掺量较少时影响较小，而当粗骨料掺量增加至 600、800 kg/m^3 时，影响程度加大，分别下降了 9.42%和 15.7%，其趋势与文献[19]一致。初裂强度随骨料掺量增加而逐渐减小主要原因是：粗骨料掺量很小或者无粗骨料时，UHPC 体系内自由流动状态浆体较多，浆体能够完全裹附集料表面，增大了骨料与基体的粘结强度，而初裂强度主要受骨料与基体的粘结强度影响，在骨料较少时变化不大；但随着骨料掺量增加自由流动状态浆体相对减少，粘结力下降，且内部结构出现缺陷，造成初裂强度下降；UHPC 峰值强度随粗骨料掺量下降相对明显主要是：到达应变硬化阶段，承受弯曲应力的主要是纤维与基体的粘结能力，随着骨料掺量的增加，基体流动性下降，纤维分散受到影响，有效利用率下降，在弯矩作用下内部裂缝发展越迅速，纤维与基体间粘结力损耗严重，纤维发生相对滑移，造成试件开裂。



(a) Initial crack strength and peak strength

(b) Initial and peak deflection

(c) Bending energy

(d) Toughness index

图 5 不同粗骨料掺量对 UHPC 弯曲韧性和初裂强度的影响

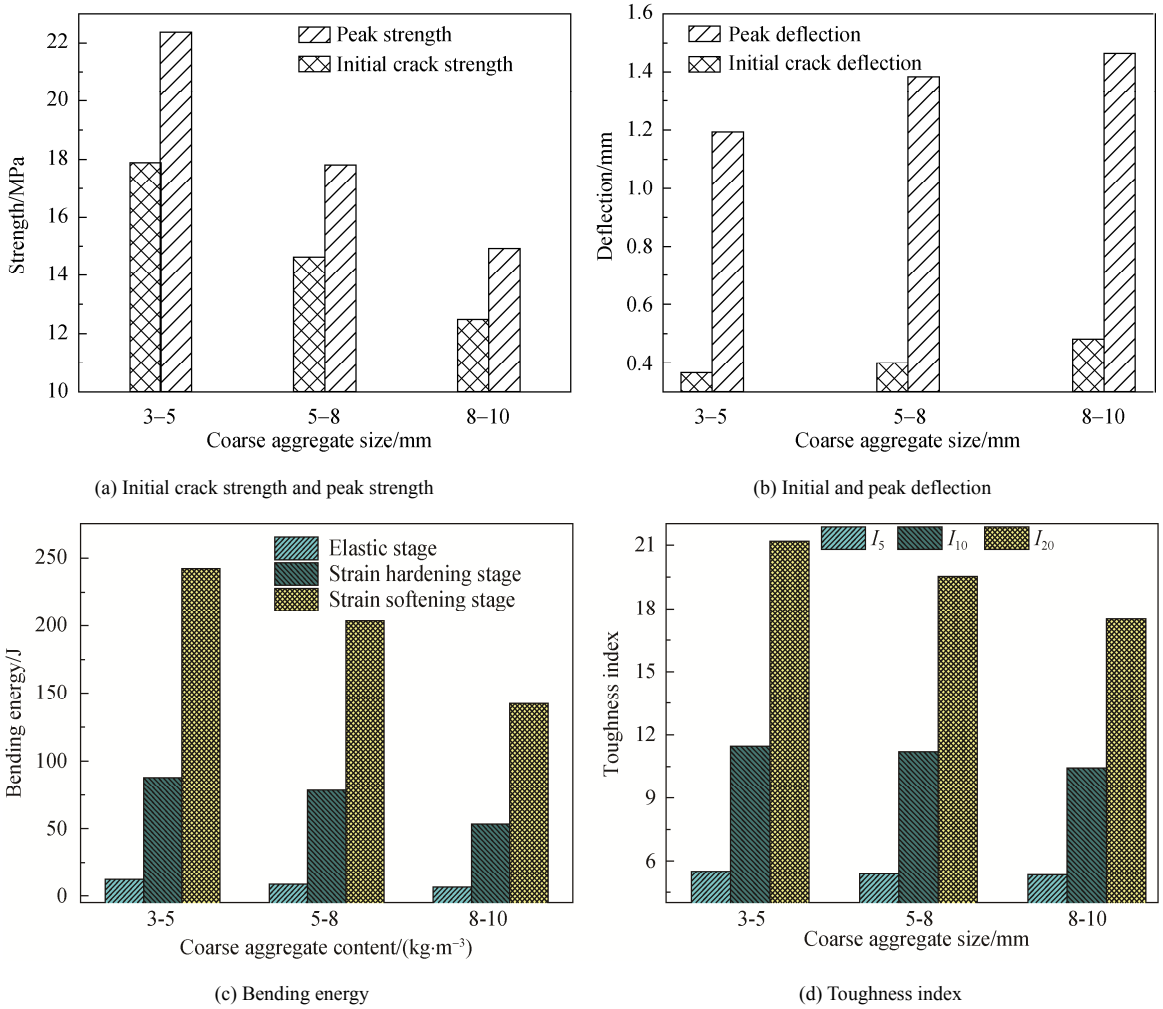
Fig. 5 Effect of different coarse aggregate content on bending toughness and initial crack strength of UHPC samples

由图 5b 可知，随着骨料掺量的增加，UHPC 基体的初裂挠度及峰值挠度均出现下降，然而初裂挠度随骨料掺量变化下降并不明显，峰值挠度下降幅度随骨料掺量增加开始变大，这主要是因为 2 阶段承受弯曲应力的方式不同导致，弹性阶段由骨料与基体的粘结力、骨料之间的咬合力承受弯曲应力，而应变硬化阶段主要由纤维与基体的粘结力来承担弯曲应力；进入应变硬化阶段，纤维的有效利用率随骨料掺量的增多下降明显，造成挠度下降相对明显，不过其总体上的趋势与文献[19]一致。

由图 5c 可见，随着粗骨料掺量的增加，UHPC 基体弹性阶段耗能随骨料掺量增加存在下降趋势，但总体差距不大，主要是因为此阶段由基体与骨料之间的粘结力及骨料与骨料之间的咬合力来受力，相较于纤维的作用效果并不明显；而应变硬化阶段、应变软化阶段耗能随粗骨料掺量的增加明显下降，进入应变软化阶段后，无粗骨料 UHPC 耗能大约是掺量为 800 kg/m^3 时的 2 倍，这是由于纤维与基体的粘结力成为阻碍裂缝发展的主要阻力，但随着骨料掺量的增加，纤维分散更加不均匀、与基体粘结力进一步减小，使得发挥阻裂作用的纤维数量减少，此外骨料掺量越多，基体内部缺陷越多，裂缝发展越快，弯曲耗能降低越大。文献[19]在应变硬化阶段变化较大，而在应变软化阶段的变化较小，结果的差异主要还是由于其粗骨料种类不一样造成的。

由图 5d 可见，粗骨料掺量对 UHPC 弯曲韧性指数存在不同程度的影响，对 I_5、I_{10} 影响较小，对 I_{20} 影响较大，但总体规律是随着粗骨料掺量的增加呈下降趋势：一方面是随着骨料掺量的增加，基体的刚性增大，造成 UHPC 脆性增加，弯曲韧性降低；另一方面是骨料掺量的增加造成纤维的分散与粘结受到影响，纤维开始出现结团，有效利用率下降，裂缝发展迅速，试件开裂严重，弯曲韧性指数也就会出现大幅下降，而针对不同阶段影响程度不同主要是各阶段受力方式不同所导致。

图 6 为不同粗骨料粒径对 UHPC 弯曲韧性的影响实测结果。由图 6a 可见，不同粒径粗骨料对 UHPC 初裂强度、峰值强度存在相似的影响规律。骨料粒径为 5~8 mm 和 8~10 mm 时的初裂强度相比粒径为 3~5 mm 时分别下降了 18.54%和 30.9%，峰值强度分别下降了 20.3%和 33.8%。UHPC 初裂强度、峰值强度随着骨料粒径的增加降低较为明显。UHPC 基体初裂强度、峰值强度随骨料粒径增大逐渐变小的原因是：一方面骨料粒径较大时，增加了单个骨料与基体的过渡区面积，在一定程度上增加了微裂缝的数量，当试件受弯时，应力作用下裂缝发展



(a) Initial crack strength and peak strength

(b) Initial and peak deflection

(c) Bending energy

(d) Toughness index

图 6　不同粗骨料粒径对 UHPC 弯曲韧性和初裂强度的影响

Fig. 6　Effect of different coarse aggregate size on bending toughness and initial crack strength of UHPC samples

较快，短时间内相互连接形成主裂缝，导致试件开裂破坏；另外当骨料粒径增大时，纤维分散的均匀性变差，大粒径的碎石导致纤维出现堆积和聚集，应力传递不均匀，纤维作用效果减弱，试件开裂较快。

图 6b 为不同粗骨料粒径下 UHPC 初裂挠度、峰值挠度的实测值。UHPC 基体的初裂挠度和峰值挠度随骨料粒径的增加而呈现增长趋势，但总体增长幅度较小，主要是因为一方面骨料粒径较小时，基体弹性模量较大，受弯刚性大，在弯矩作用下抵抗应力产生的变形较小，容易引起开裂；另一方面是弯曲荷载实验是以位移为控制因素进行加载，裂缝发展均匀缓慢，纤维与基体之间产生“滑移”需要更长时间，且当骨料粒径较大时，裂缝发展连接绕过骨料也需要时间，使得挠度在一定程度上增加。

由图 6c 可见，粗骨料粒径对 UHPC 基体各阶段耗能的影响是随着骨料粒径的增加，耗能逐渐减小。随着骨料粒径的增加，纤维在基体中分散受到影响，且骨料粒径越大，分散越不均匀，虽然骨料粒径的增加会增强骨料之间的咬合作用，但 UHPC 的抗弯拉能力还是主要靠纤维提供，骨料之间的咬合作用弥补不了因钢纤维结团造成的韧性损失；且随着骨料粒径的增大，单个骨料与基体之间的界面过渡区面积增加，微裂缝数量增加，在弯矩荷载作用下，裂缝发展较快并连接形成一条贯通的主裂缝，使基体在耗能较小的状态下开裂破坏。

由图 6d 可见，粗骨料粒径对 UHPC 弯曲韧性指数 I_5、I_{10} 的影响并不大，而对 I_{20} 影响较大，但总体是随着骨料粒径的增大而减小。骨料粒径为 5~8 mm 和 8~10 mm 时的韧性指数 I_5 比粒径为 3~5 mm 时仅降低了 2.2%和 3.1%，I_{10} 降低了 2.36%和 8.9%，I_{20} 降低幅度变大，分别为 7.79%和 17.37%，这主要是由于骨料粒径越大，纤维的分散受影响越严重，且界面区的微裂缝越多，在加载时裂缝发展越快，造成各阶段能耗出现降低。

3 结论

1) 粗骨料掺量的增加对 UHPC 基体新拌混合物的流动性具有降低作用；粗骨料粒径对新拌混凝土的流动性具有不规则增强效应，且当粗骨料粒径为 5~8 mm 时，新拌混凝土流动性最高。

2) 由于粗骨料表面粗糙，与基体的粘结能力较好，会在 UHPC 的基体内部形成整体性较好的刚性骨架，使得当粗骨料掺量不大于 400 kg/m^3 时，UHPC 基体立方体抗压强度和轴心抗压强度呈现不同程度的增长。当骨料掺量增加过多(超过 400 kg/m^3)时水泥浆体无法充分包裹集料界面或者包裹层较薄，则会造成骨料与基体粘结力不足，造成混凝土强度降低；粗骨料粒径的增加使得基体与骨料之间的接触面积增加，使得 UHPC 的立方体抗压强度和轴心抗压强度增强。

3) 当骨料掺量较少时，基体中的浆体较多，新拌混凝土的流动性较好，纤维分布比较均匀，与基体的粘结与锚固更牢固，会小幅度提高 UHPC 的抗弯拉性能。而粗骨料掺量超过 400 kg/m^3 时，基体中自由流动状态的浆体减少，新拌混凝土的流动性下降，导致纤维分散不均匀，使得 UHPC 的抗弯拉性能一定程度上降低；粗骨料粒径对 UHPC 抗折及劈裂抗拉强度影响不大。

4) UHPC 基体的弹性模量随着粗骨料掺量的增加、粒径的减少而增大。

5) UHPC 初裂强度、峰值强度、初裂挠度、峰值挠度以及各阶段耗能均随粗骨料掺量的增加缓慢降低；初裂强度、峰值强度、各阶段耗能均随粗骨料粒径的增大而降低，而初裂挠度与峰值挠度随粗骨料粒径的增加呈现缓慢上升的趋势；韧性指数均随骨料掺量和粒径的增加而逐渐减小。

参考文献:

[1] 万朝均, 尹亚柳, 王小茜, 等. 超高性能混凝土的制备[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3676–3681.
WAN Chaojun, YIN Yaliu, WANG Xiaoxi, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015, 34(12): 3676–3681.

[2] 牛旭婧, 朋改非, 尚亚杰, 等. 热水-干热组合养护对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1141–1148.
NIU Xujing, PENG Gaifei, SHANG Yajie, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1141–1148.

[3] 朋改非, 杨娟, 石云兴. 超高性能混凝土高温后残余力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 73–79.
PENG GaiFei, YANG Juan, SHI Yunxing. J Civ Eng (in Chinese), 2017, 50(4): 73–79.

[4] 朋改非, 滕岩, 黄艳竹, 等. 含粗骨料的超高性能混凝土火灾高温性能研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(1): 1–6.
PENG Gaifei, TENG Yan, HUANG Yanzhu, et al. J North Chin Univ Water Resour Electr Power (in Chinese), 2013, 34(1): 1–6.

[5] 余自若, 王博亨, 安明喆. 超高性能纤维增强混凝土板的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 131–139.
YU Ziruo, WANG Boheng, AN Mingzhe. J Build Struct (in Chinese), 2019, 40(9): 131–139.

[6] 程鹏, 吴方红, 曾彦钦, 等. 含粗骨料的超高性能混凝土受弯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 41–45.
CHENG Peng, WU Fanghong, ZENG Yanqin, et al. J Water Conserv Constr Eng (in Chinese), 2019, 17(2): 41–45

[7] 王永霞. 含白云石粗骨料超高性能混凝土的性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(1): 149–155.
WANG Yongxia. J Yangtze Academ Sci (in Chinese), 2020, 37(1): 149–155.

[8] AICTIN P C. High Performance Concrete[M]. New York: Routledge, 2004: 199–203.

[9] RICHARD P. Reactive Powder Concrete:A New Ultra-high Strength Cementtitious Material[M]. In: The 4th International Symposium on Utilization or High Strength & High Performance Concrete. Paris, 1996: 1343–1349.

[10] MA J, ORGASS M, DEHN F. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates[C]. Kassel: Kassel University Press, 2004: 205–212.

[11] WILLE K, NAAMAN A E, PARRAMONTESINOS G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa: A simpler way[J]. ACI Mater J, 2011, 108(1): 46–54.

[12] 杨凤玲, 嵇银行, 刘伟, 等. 含粗骨料超高性能混凝土的试验研究[J]. 混凝土, 2018(12): 110–113.
YANG Fengling, JI Yinhang, LIU Wei, et al. Concrete (in Chinese), 2018(12): 110–113.

[13] 李信, 陈露一, 黄有强, 等. 含粗骨料超高性能混凝土的制备及其性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11): 6–8.
LI Xin, CHEN Luyi, HUANG Youqiang, et al. Concr Cem Prod (in Chinese), 2019(11): 6–8.

[14] 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 J Hunan Univ (Nat Sci Ed，in Chinese), 2018, 45(3): 47–54.

[15] 程俊, 刘加平, 刘建忠, 等. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究及机理分析[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 115–119.
CHENG Jun, LIU Jiaping, LIU Jianzhong, et al. Mater Guide (in Chinese), 2017, 31(23): 115–119.

[16] 程俊, 刘加平, 张丽辉. 含粗骨料超高性能混凝土单轴拉伸性能及机理分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(12): 1–5.
CHENG Jun, LIU Jiaping, ZHANG Lihui. Concr Cem Prod (in Chinese), 2015(12): 1–5.

[17] 梁兴文, 胡翱翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 722–731.
LIANG Xingwen, HU Aoxiang, YU Jing, et al. J Compos (in Chinese), 2018, 35(3): 722–731.

[18] 苏阳. 粗骨料对高性能混凝土性能影响的试验研究[D]. 北京交通大学, 2013.
SU Yang. Experimental Study on the Effect of Coarse Aggregate on High Performance Concrete Performance (in Chinese, dissertation). Beijing Jiaotong University, 2013.

[19] 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[D]. 湖南大学, 2017
LI Shigen. A study on the mechanical properties of super high performance concrete containing coarse aggregate (in Chinese, dissertation). Hunan University, 2017.