

超高性能混凝土研究综述

陈建涛

中国一冶集团有限公司 湖北 武汉 430080

【摘要】：超高性能混凝土(UHPC)是一种先进水泥基复合工程材料，具有超高的强度、韧性以及耐久性，使得建筑工程材料的性能有了巨大突破，在建筑领域正逐步得到应用。本文对 UHPC 的制备技术、力学性能进行了概述，并对 UHPC 的发展前景做出展望。

【关键词】：超高性能混凝土；制备技术；力学性能

Research on Ultra High Performance Concrete

Jiantao Chen

China First Metallurgical Group Co., LTD., Hubei Wuhan 430080

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) is a kind of advanced cement-based composite engineering material, with super high strength, toughness and durability, which makes the performance of construction engineering materials has a great breakthrough, and is gradually being applied in the field of construction. This paper summarizes the preparation techniques and mechanical properties of UHPC, and presents the development prospect of UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete; preparation technology; mechanical properties

混凝土因其取材方便、较低造价、良好的可塑性、较高的强度、防火性以及耐久性等优点，在建筑与土木工程领域得到广泛应用。同时，也因其自重、抗拉强度低、养护周期长、不耐高温、拆除废弃物再生利用性较差等缺点，限制了混凝土的应用，并对环境造成较大污染^[1]。

近年来，绿色环保作为社会经济可持续发展的目标，建筑领域对材料性能的要求也更加严格。UHPC 不仅具有超高的强度、韧性以及耐久性，并且 UHPC 的原材料包括有矿渣、粉煤灰等，在降低自重的同时，还可以再次利用建筑垃圾，在一定程度上改善生态环境。这些使得 UHPC 在建筑领域有着广泛的应用前景。

目前，UHPC 依然有一些不足之处。UHPC 在制作中掺入的钢纤维和聚丙烯纤维，降低其流动性，不利于浇筑，且纤维容易聚团，从而对 UHPC 造成不利影响，此外，UHPC 的生产成本明显高于普通混凝土，使得 UHPC 的应用受到严重阻碍。但随着众多学者的深入研究，技术难点的不断突破，UHPC 必将获得广泛应用。本文将对 UHPC 的制备技术、力学性能进行浅述，并对 UHPC 的发展前景做出展望。

1 UHPC 的制备

1.1 UHPC 的制备原理

UHPC 是通过提高组成材料的堆积密度，减少组成材料之间的缺陷，从而获得超高强度。为实现这一目的，UHPC 在制备时采取如下措施：（1）不使用粗骨料；（2）优化细骨料的颗粒级配，提高骨料间的紧密程度；（3）掺入矿渣、硅灰、粉煤灰等超细活性矿物掺合料，进一步填充骨料间的孔隙，优

化内部结构；（4）掺入钢纤维和聚丙烯纤维，提高 UHPC 的抗拉、抗裂能力；（5）进行高温养护，减少 UHPC 收缩，优化内部微观结构。

1.2 UHPC 的原材料

UHPC 所采用的原材料：普通硅酸盐水泥一般选用 42.5 级及以上，细骨料一般选用石英砂、河砂或机制砂，矿物掺合料一般包含矿渣、硅灰、粉煤灰等，纤维分为钢纤维和聚丙烯纤维，此外加入高效减水剂提高 UHPC 的和易性，减小纤维对 UHPC 流动性的不利影响。

1.3 原材料及配合比对 UHPC 性能的影响

在制作 UHPC 时，原材料和配合比的差异对 UHPC 的性能也有一定影响，众多学者针对不同的原材料和配合比进行了大量的研究。吴炎海等^[2]选用 42.5 级普通硅酸盐水泥、石英砂、硅灰、石英粉和高效减水剂配制活性粉末混凝土(RPC)，并用粉煤灰替代部分水泥。试验发现水胶比对 RPC 的流动度和强度有较大影响，综合考虑了流动度和强度之后，确定水胶比为 0.22，砂胶比为 0.88，高效减水剂的掺量为胶凝材料质量的 2.5%~3%。用掺量为 0.2 的粉煤灰代替水泥时，可以在不降低 RPC 抗压强度的情况下，提高其流动度，有利于气泡的排出，改善 RPC 的工作性能。为提高 UHPC 的延性，闫光杰等^[3]在确定水胶比为 0.19 的情况下，研究发现掺加钢纤维能提高 RPC 的抗压强度和抗折强度，使 RPC 的破坏由脆性转为塑性，呈现延性破坏的特征，但钢纤维含量的增加会降低 RPC 的流动性，不利于拌合成型，综合考虑之后确定钢纤维产量为 170kg/m³。李锋等^[4]确定水胶比为 0.15 时，研究同时掺加硅灰和粉煤灰对 UHPC 工作性能的影响。试验发现硅灰掺量越多，

UHPC 流动性越低,而掺加粉煤灰却可以明显改善 UHPC 的流动性。试验所得硅灰和粉煤灰掺量分别为 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $100\text{kg}/\text{m}^3$, 钢纤维体积掺量为 3%。

王军等^[5]选用 52.5 级水泥、微珠、矿粉、硅灰、沸石粉、河砂、卵碎石以及高效减水剂配制 UHPC, 研究发现水胶比为 0.16 时, 混凝土强度最高, 掺加沸石粉对 UHPC 工作性能的影响较大, 增加沸石粉的掺量, UHPC 的流动性和抗压强度都有所降低, 但沸石粉能吸收较多水分, 并在龄期释放, 改善 UHPC 内部结构, 降低 UHPC 的自收缩。利用铁尾矿—矿渣基高性能胶凝材料(TSBC)代替水泥制备 UHPC, 并与用 52.5 级水泥制备的 UHPC 对比。试验发现 TSBC 所制备的 UHPC 早期强度不及水泥基 UHPC, 但是, TSBC 所制备的 UHPC 后期强度不输水泥基 UHPC, 并且拥有更好的抗冻性和抗氯离子侵蚀能力。基于紧密堆积理论设计方法制备 UHPC, 发现掺加粉煤灰对 UHPC 的流动性有明显改善; 加入一定量的氧化镁能降低 UHPC 的自收缩; 加入钢纤维能提高 UHPC 的内部粘结力, 增加其抗折强度、抗压强度, 同时也能降低其收缩率。选用风积沙配制 UHPC, 于西北地区而言具有更高的经济效益与环境效益。试验研究了砂胶比、水胶比、外加剂和外掺材料对风积沙 UHPC 工作性能的影响, 发现最佳水胶比范围为 0.21~0.23、砂胶比范围为 0.9~1.1、玄武岩纤维最佳体积掺量为 1%~1.5%, 另外加入消泡剂能有效地减少混凝土拌合物中的气泡, 降低 UHPC 的孔隙率, 进而提高其抗压强度。

1.4 UHPC 的制备流程

在 UHPC 的拌制过程中, 投料顺序对 UHPC 的工作性能有一定影响, 并且在拌制过程中最大的难题就是纤维分散不均, 极易和水泥以及超细矿物掺合料聚团, 对 UHPC 产生不利影响。试验了三种投料顺序, 投料顺序的不同对 UHPC 的力学性能和工作性能有较大影响, 尤其是流动性影响最大。但上述试验中并没有掺加纤维, 在制备 UHPC 的试验中, 首先将骨料和胶凝材料进行搅拌, 随后加入水和减水剂, 待拌合物搅拌为胶状物后, 再加入钢纤维搅拌至均匀。而对于钢纤维加入的顺序, 明阳等有不同看法, 其将所有干料和钢纤维放在一起搅拌至均匀, 再边搅拌边加入称好的水。试验发现当钢纤维掺量达到 3% 时, 出现结团现象。

在投料时, 先将钢纤维和骨料搅拌均匀, 再加入胶凝材料搅拌, 最后加入水和减水剂搅拌至均匀。刘娟红认为该投料顺序使得钢纤维分布地更加均匀, 能有效防止钢纤维聚团对 UHPC 的工作性能造成不利影响。

2 UHPC 的性能研究

2.1 力学性能

相较于普通混凝土, UHPC 不仅具有超高的抗压强度, 其他的力学性能也都有更好的表现。文献^[2]中制作了 31 组试件,

并在 90°C 热水中养护, 在未掺加钢纤维的情况下, 所得的 3 天抗压强度为 $120\sim 160\text{MPa}$, 抗折强度为 $16\sim 26\text{MPa}$ 。文献^[3]中试验所得 28 天抗压强度为 $120\sim 180\text{MPa}$, 抗折强度为 $3\sim 22\text{MPa}$, 与文献^[2]最大的差异就是掺加了钢纤维, 钢纤维的存在, 能有效阻止裂缝的发展, 使 UHPC 的破坏由脆性转为塑性, 明显提高了 UHPC 的韧性和延性。但上述两个试验所用材料的成本较高, 为了使 UHPC 更符合实际工程的需要, 降低施工成本, 选用河砂为细骨料, 并掺加玄武岩碎石为粗骨料, 试验得到的 UHPC 抗压强度为 $150\sim 180\text{MPa}$, 抗弯拉强度为 $29\sim 37\text{MPa}$, 当粗骨料掺量为 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 时, UHPC 抗压强度达到最大值, 较无粗骨料的 UHPC 抗压强度有所提高; 当粗骨料掺量不超过 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 粗骨料掺量对 UHPC 抗弯拉强度的影响较小; 粗骨料对 UHPC 弹性模量的影响近乎呈线性增长。该试验对降低 UHPC 生产成本以及扩展 UHPC 的应用范围提供了思路。

在现有试验研究中, 主要研究了 UHPC 的静力性能, 对 UHPC 疲劳性能的研究尚有不足。对 RPC 进行了疲劳试验, 发现 RPC 在破坏时呈劈裂破坏, 而掺加钢纤维后, RPC 的破坏形态表现为剪切破坏。发现在疲劳荷载作用下, 含粗骨料的 UHPC 在破坏时呈剪切破坏, 因为钢纤维的存在, 试件在破坏时仍保存着较好的完整性, 在破坏断面存有滑移痕迹。

2.2 耐久性

UHPC 的耐久性极好与 UHPC 的制备原理有很大关系。UHPC 的原材料具有相当高的堆积密度, 减少了 UHPC 的内部缺陷, 使得 UHPC 具有超高抗渗性。现如今耐久性的两项评价指标为: 一是抗氯离子侵蚀能力, 氯离子会导致钢筋锈蚀, 对构件造成不利影响; 二是抗冻融循环能力。试验研究测得氯离子扩散系数为 $22.17\times 10^{-14}\text{m}^2/\text{s}$, 且试件经冻融循环 300 次后无质量损失, 动弹模损失仅有 0.8%, 由此可见, 试件具有优良的抗氯离子侵蚀能力和抗冻融循环能力。

3 UHPC 的不足之处

根据上述众多学者研究成果, 可以知道, UHPC 具有诸多优点, 不仅能够打破普通混凝土在应用中的限制, 提高 UHPC 的应用范围, 还能在一定程度上改善生态环境, 提高工程的绿色化程度。但目前, UHPC 依然有一些不足之处, 使得 UHPC 的应用受到严重阻碍。

3.1 UHPC 的生产成本较高

UHPC 的原材料一般包括 42.5 级及以上的普通硅酸盐水泥、石英砂、矿渣、硅灰、粉煤灰, 以及纤维材料和高效减水剂, 这些材料的价格无疑会让施工方放弃选用 UHPC。虽然从表面上看 UHPC 的造价要比普通混凝土高很多, 但是, 在工程中采用 UHPC 所需要的混凝土用量会远远少于普通混凝土的用量, 造价高了, 用量却降了下来, 与此同时, 运输、施工、

维护中的成本也跟着降低,因此在工程中采用 UHPC 依然能取得不错的经济收益。随着众多学者不断地深入研究,制备 UHPC 的原材料不断丰富更新, UHPC 造价过高这一问题必然能够得到有效解决。

3.2 UHPC 的生产工艺难度较大

在上述各位学者的试验研究中,所需 UHPC 的用量较少,试验人员可以自行制备,即使在试验条件下,纤维材料可以由人工均匀撒入,都经常发生纤维聚团现象,施工所需用量巨大,制备条件不如试验条件,纤维聚团的问题将会更加严重,大大提高 UHPC 的生产难度。这也在很大程度上限制了 UHPC 在实际工程中的应用。

4 UHPC 的应用及发展前景

UHPC 由于高昂的成本和高难的生产工艺无法得到广泛应用,但对于严酷环境下的工程,如海洋工程、港口工程、桥梁工程等,上述工程易被盐水冻融、氯离子侵蚀,使得建筑物不易达到预期使用寿命或后期维护频繁,采用 UHPC 进行浇筑能有效延长其使用寿命。因此,现阶段 UHPC 主要应用于上述处于严酷环境下的工程。

日本的羽田机场在扩建时,新建跑道位于海面上,为减轻

结构自重并抵抗海水中高浓度的氯离子侵蚀,该工程采用 UHPC 浇筑混凝土板,不仅降低了初期的建设成本,后期维护费用也有所减少,取得了可观的经济效益。

大站镇岸垮堤引桥是国内首座大跨径 UHPC 公路桥梁,由 4 幅 102 米跨径 UHPC 简支箱梁组成。对于大跨度的桥梁,必然面临自重过大、过度下挠、箱体开裂等问题,该梁桥采用了湖南大学邵旭东团队研发的单向预应力 UHPC 薄壁连续箱梁新结构,利用 UHPC 的超高强度,有效解决了传统混凝土所面临的问题,该工程是桥梁建设和 UHPC 梁桥发展的一次重大突破。

在广东江门桥梁建设中,一个国内首创的 5m3UHPC 搅拌站投入使用,为桥梁顺利施工提供了保障。为推广 UHPC 在工程建设中的应用,相应的基础建设设备也应不断调整、更新,为生产和施工创造便利条件。

虽然目前国内对 UHPC 的研究尚不充足,如 UHPC 微观结构的研究、UHPC 在高温下的性能研究等,但随着政府的日益重视,众多科研人员的不断努力, UHPC 有关理论将会逐步丰富、完善,并打破 UHPC 在工程应用中的局限, UHPC 在国内的发展前景将会是一片光明。

参考文献:

- [1] 梁天霄,郑元勋.超高性能混凝土的研究综述[J].科技展望,2016,26(36):19-20.
- [2] 吴炎海,何雁斌.活性粉末混凝土(RPC200)的配制试验研究[J].中国公路学报,2003(04):45-50.
- [3] 闫光杰,阎贵平,安明喆,等.200MPa 级活性粉末混凝土试验研究[J].铁道学报,2004(02):116-119.
- [4] 李锋,孔文艺,罗健,等.超高性能混凝土(UHPC)的配制及应用探究[J].混凝土与水泥制品,2019(07):26-29.
- [5] 王军,程宝军,贾丽莉,等.超高强高性能混凝土的配制研究[J].混凝土与水泥制品,2013(11):18-22.