

超高性能混凝土原材料组成研究现状

肖志龙¹, 杨鼎宜^{1,2*}, 钱云峰¹, 戴舒宁¹, 蔡成¹, 王明亮¹, 陶一帆¹

¹扬州大学, 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州

²扬州大学, 绿色建筑材料研究所, 江苏 扬州

Email: 2645438818@qq.com, *ydy1991@163.com

收稿日期: 2021年5月28日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月24日

摘要

超高性能混凝土基于紧密堆积原理制备, 选用的原材料均具有不同程度的性能影响。对超高性能混凝土在原材料组成(辅助胶凝材料、骨料、纤维和外加剂等)方面进行综述, 梳理并概述了近年来学者们围绕原材料展开的研究与成果, 分析了目前存在的问题, 并对超高性能混凝土的未来发展前景进行展望, 以期今后超高性能混凝土的发展和研究提供帮助和参考。

关键词

超高性能混凝土, 辅助胶凝材料, 骨料, 纤维, 外加剂

Research Status of Raw Material Composition of Ultra High Performance Concrete

Zhilong Xiao¹, Dingyi Yang^{1,2*}, Yunfeng Qian¹, Shuning Dai¹, Cheng Cai¹, Mingliang Wang¹, Yifan Tao¹

¹College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²Research Institute of Green Building Materials, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Email: 2645438818@qq.com, *ydy1991@163.com

Received: May 28th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

Abstract

Ultra-high performance concrete is prepared based on the principle of compact stacking, and the

*通讯作者。

文章引用: 肖志龙, 杨鼎宜, 钱云峰, 戴舒宁, 蔡成, 王明亮, 陶一帆. 超高性能混凝土原材料组成研究现状[J]. 土木工程, 2021, 10(6): 542-553. DOI: 10.12677/hjce.2021.106061

raw materials selected have varying degrees of performance impact. A review of the composition of ultra-high performance concrete in raw materials (auxiliary cementitious materials, aggregates, fibers and admixtures, etc.) is presented to sort out and outline the research and achievements of scholars around raw materials in recent years, analyze the current problems and prospect the development, in order to provide reference and help for future research and development.

Keywords

UHPC, Supplementary Cementitious Material, Aggregate, Fiber, Admixture

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会的不断发展和科学技术的不断进步,人们对于混凝土强度等级的要求不断增加,在20世纪90年代末,超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称UHPC)的概念被首次提出。UHPC具有致密的微观结构和很好的强度性能,UHPC的抗压强度是普通强度混凝土的3倍以上,弹性模量可以达到普通混凝土的2倍,UHPC的其他一些性能也明显要优于普通混凝土,因此UHPC能够满足一些大跨度、超高层、特殊用途和严苛环境中结构的高性能要求,大大提高了这些结构的可靠性,UHPC的优异性使其在许多应用领域具有巨大的潜力,有很好的发展前景。

基于UHPC巨大的发展潜力,学者们对UHPC展开了大量的研究,而且取得了很多的成果,本文从UHPC的原材料(胶凝材料、骨料、外加剂、纤维等)组成出发,系统整理了原材料组成对UHPC性能的影响,为今后对UHPC的研究和发展提供帮助和参考依据。

2. 辅助胶凝材料

UHPC的胶凝材料体系中以水泥和硅灰为主,因为它们可以有效且迅速地发生水化,而大量的水泥和硅灰也导致了成本的大幅增长。基于相关理论和方法的发展,粉煤灰、再生粉体等多种工业废渣制备活性辅助性胶凝材料也成为了可能,进而达到节约水泥、硅灰、能源资源等目标,有效降低成本。

2.1. 粉煤灰

粉煤灰是由火力发电、工业及民用锅炉燃煤产生的一种固体废物,我们国家在生产生活中产生了大量的粉煤灰,这些粉煤灰的处理往往较为困难,大量的粉煤灰如果不加以控制或处理,会造成环境的污染,而且会对生物和人体造成危害,因此如何合理利用粉煤灰是一个难点,一些学者在研究过程中将粉煤灰作为原材料掺入了UHPC中,发现粉煤灰的掺入可以改善UHPC的相关性能。

曹润倬等人[1]为了探究超细粉煤灰(UFA)对UHPC力学性能、流变性及微观结构的影响,用超细粉煤灰代替粉煤灰掺入,并对UHPC浆体的流动性的进行了测试,结果发现使用超细粉煤灰代替粉煤灰可以使砂浆的塑性黏度和屈服应力降低,提高UHPC的弯曲强度和抗压强度,提高UHPC的流变性能,降低UHPC的孔隙率。

王雪莲[2]为了探究粉煤灰微珠的掺入对活性粉末混凝土新拌浆体工作性、硬化后力学强度和收缩特性的影响,在硅酸盐水泥中掺入粉煤灰微珠,并测定其工作性能,结果发现随着粉煤灰微珠掺量的增加,

活性粉末混凝土的干燥收缩逐渐降低, 自收缩明显降低。粉煤灰微珠掺量 30%左右时浆体的工作性能最佳。

巫美强[3]等人为了研究粉煤灰掺量对活性粉末混凝土(RPC)性能的影响, 选用了极低水胶比(0.14)制备 200 MPa 级的 RPC, 结果发现当水胶比为 0.14 时, RPC 的强度随着粉煤灰掺量的增加而减小。

罗远彬[4]等人为了使自密实混凝土的抗收缩和抗裂性得到提高, 在配置超高聚丙烯纤维自密实混凝土时改变粉煤灰掺量并对其工作性能和力学性能进行了试验研究, 结果发现随着粉煤灰掺量的增加, 自密实混凝土的流动性能得到了改善。

杭美艳[5]为了探索粉煤灰取代量对 UHPC 各项性能的影响, 测试了不同的粉煤灰取代量下 UHPC 的各项性能, 结果发现: 粉煤灰取代量越大混凝土流动度越大, UHPC 的抗压强度的变化趋势随粉煤灰取代量的增加先降低后升高, 而 UHPC 的抗折强度的变化趋势随粉煤灰取代量的增加先升高后降低; 随粉煤灰取代量的增加, 混凝土微观结构的密实度的变化趋势先减小后增大。

由此看来粉煤灰的掺入可以改变 UHPC 浆体的流动性能, 而且掺入量越多 UHPC 浆体的流动性越大; 当粉煤灰掺入量合理时 UHPC 的力学性能(抗压强度、抗折强度)和其它性能(密实度、孔隙率)也可以得到改善, 可以改善性能的粉煤灰具体最佳掺量仍需结合相关实验来确定。由此可以看出, 粉煤灰作为部分胶凝材料掺入 UHPC 是可行的, 可以起到改善 UHPC 相关性能和节约水泥的作用。

2.2. 再生粉

社会的进步, 科技的发展使人们实现了物质上和精神上的富足, 但是在发展的道路上, 也遗留下了大量的建筑垃圾, 这些建筑垃圾的处理较为困难, 极大地损害了生态环境。因此, 人们思考着如何提高他的利用率。经过了大量的研究和不懈的努力, 学者们发现, 可以将固体废物变成再生粉体掺入 UHPC。

彭术[6]等人为了探究混凝土再生粉对 UHPC 性能的影响, 改变了废弃混凝土中再生粉对水泥的取代量并对其进行了实验, 结果发现 UHPC 的流动度随着再生粉对水泥的取代量的增加而显著降低, UHPC 的抗压强度随着混凝土养护龄期的增加而增加, 随再生粉的增加而降低, UHPC 抗渗性在掺入再生粉之后表现优异。

邓立贤[7]等人为了探究再生粉对 UHPC 性能的影响, 改变了 UHPC 中混合再生粉的掺入量, 得出结论: 当取代量超过 25%后, UHPC 的工作性能快速下降, 有机再生粉制备的超高性能混凝土的工作性能得到改善, 并且抗压强度下降明显, 有机再生粉制备的超高性能混凝土的抗压强度有较大幅度的下降。

蒋华国[8]等人研究了 UHPC 中再生微粉对硅灰的不同取代量, 对 UHPC 性能的影响, 得出结论: 再生微粉取代率从 0%增加到 45%时, UHPC 的流动度逐渐减小, 但不影响其配制; 早期收缩减少, 对 UHPC 早期变形有利, 说明再生微粉有利用价值。

彭博[9]等人为了让废弃玻璃资源化, 用废弃玻璃粉取代一部分水泥来研究其对活性粉末混凝土(RPC)相关性能的影响, 结果发现: 废弃玻璃粉颗粒能够填充 RPC 中的孔隙, 从而使 RPC 的孔隙率减小, 增强中心质叠加效应, 提高 RPC 的强度和工作性能。

刘数华[10]等人为了探究玻璃粉对 RPC 性能的影响, 通过改变废弃玻璃粉代替水泥的掺量进行试验, 得出结论: 在配置 RPC 时掺入一定细度的废弃玻璃粉作为矿物掺合料替代部分水泥, 可以使 RPC 的强度得到提高; 玻璃粉具有火山灰活性, 可以形成稳定的水化硅酸钙等水化产物。

腾银见[11]等人为了研究玻璃钢再生料对 RPC 力学性能的影响, 在配制 RPC 时用玻璃钢再生粉末替代石英砂, 并对其力学性能进行了试验, 得出结论: 用玻璃钢再生粉末取代石英砂, 对 RPC 的工作性能影响不大, 但是可以使力学性得到提升。

由上我们可以发现, 再生粉体的掺入对 UHPC 的流动性和力学性能都有一定影响, 具体表现为, 随

着再生粉取代量的增加, UHPC 的流动度逐渐减小, 不同再生粉体的掺入对 UHPC 的性能影响也不同, 一些再生粉比如玻璃粉可以减小孔隙率, 提高强度和工作性能, 而混凝土再生粉的掺入却可以提高 UHPC 的抗渗性, 今后可以结合 UHPC 的不同工作需要来掺入不同的再生粉, 这些都印证了再生粉体作为原材料是可行的, 可以产生较大的经济效益, 节约成本, 具有可持续性和环保性, 但未来仍需进一步的探究。

2.3. 其它粉体

也有很多学者尝试采用其他材料, 比如矿粉、石粉、稻壳灰、固硫灰等。矿粉是由开采出的矿石进行粉碎所得到的粉体, 石粉是由石头粉碎后得到的粉体, 稻壳灰是稻壳、米糠等稻谷加工中产生的副产品, 而固硫灰是一种工业副产物。与其它建筑材料相比, 这些粉体具有来源广泛、价格低廉等优势, 若加以合理利用, 不仅可以节约成本, 而且可以解决这些废弃材料的利用问题, 有利于环境保护、节约资源。为此学者们对此进行了研究。

鲁亚[12]等人为了探究铜尾矿粉对 UHPC 性能的影响, 通过采用不同粉磨方式对铜尾矿进行磨细甚至微纳米化处理, 再将其作为填充料掺入 UHPC 中并研究其工作性能和力学性能, 结果发现铜尾矿的掺入可以使 UHPC 达到与基准 UHPC 同样的流动性能和力学性能, 且能降低 UHPC 生产成本。

陈梦义[13]等人为了探究铁尾矿粉对 UHPC 性能的影响, 通过改变铁尾矿粉取代石英粉的比例并采用三种不同的养护制度(标准养护、恒温水养及蒸压养护)下配制了不同的 UHPC, 并测定其力学性能, 结果发现: 在配制 UHPC 时用磨细铁尾矿粉取代石英粉, UHPC 的力学性能几乎不受影响, 但是在不同的养护制度下, 掺铁尾矿粉 UHPC 的力学性能变化很大。

赵学涛[14]等人为了研究不同石粉含量对 UHPC 性能的影响, 对掺入不同石粉含量的 UHPC 进行实验, 发现随着石粉含量的增加, UHPC 的坍落度和扩展度呈现出先升后降的趋势, 并在 3% 时较大, UHPC 抗压强度先升后降, 且在石粉的含量为 3%~5% 时 UHPC 的抗压和抗折强度增幅较大, 抗冻性在石粉含量为 3% 时表现最好, 综合来看 UHPC 的性能在石粉含量为 3%~5% 时最为优异。

王剑[15]等人研究了在不同石粉含量(5%、7%、10%、12%、15%)和不同钢纤维长度对机制砂 UHPC 性能的影响并与河砂 UHPC 进行比较, 发现机制砂 UHPC 的流动性随着石粉含量增加明显降低明显且低于河砂 UHPC 的流动性, 随着石粉含量增加机制砂 UHPC 的力学性呈现出先升后降的趋势, 弹性模量和抗压强度在石粉含量为 12% 时表现最好, 抗弯拉强度在石粉含量为 10% 时最好, 在石粉含量为 10%~15% 时机制砂 UHPC 力学性能优于河砂 UHPC, 综合来看 10% 时最好。

张磊[16]等人为了研究在标养条件下掺固硫灰活性粉末混凝土的耐久性选用固硫灰加入到活性粉末混凝土中, 对 RPC 的抗碳化、抗冻融循环、抗硫酸盐侵蚀以及抗硫酸盐侵蚀碳化等性能进行了测定, 得出结果: 固硫灰对 RPC 的抗碳化性能影响不大, 而抗硫酸盐侵蚀的性能会得到提升, 不会对其性能造成过多不良影响。

张颖[17]等人为了研究掺稻壳灰的活性粉末混凝土拌合物的性能, 采用内掺法在活性粉末混凝土中加入自制高活性稻壳灰代替部分优质水泥并测定 RPC 的工作性能、含气量及表观密度等性能。得出结果, 稻壳灰的加入会降低活性粉末混凝土拌合物的流动性和坍落度, 当稻壳灰等量替代水泥且替代量小于 10% 时, 活性粉末混凝土的表观密度随着稻壳灰替代量的增加而增加, 含气量有较强的减少趋势, 当替代量大于 10% 时, 活性粉末混凝土的表观密度随着稻壳灰替代量的增加而减小, 而含气量变化较小。

由此我们可以发现, 适量矿粉的掺入 UHPC 的力学性能基本不影响, 掺入矿粉后甚至可以达到与原本 UHPC 同样的流动性和力学性能; 掺入适量石粉有些性能甚至可以得到提高, 而且可以降低生产成本, 产生经济效益; 适量的固硫灰掺入, UHPC 性能影响不大而抗腐蚀性却能得到提高。由此看来, 采用其它的不常见的材料来制备 UHPC 是可行的, 在适宜范围内不影响相关性能, 甚至会有所改善, 因此, 可

以进一步探究。

3. 骨料

骨料是 UHPC 制备过程中的重要原材料之一, 它的种类和掺量影响着 UHPC 的各项性能, UHPC 一般采用常见的石英砂作为骨料, 然而近年来出于经济性和环保性考虑, 转而选用河砂、矿渣、海砂等材料部分取代或全部取代石英砂用作 UHPC 的骨料, 还有研究掺入粗骨料以降低收缩等不利因素的做法。

3.1. 粗骨料

UHPC 的一般由微米级颗粒(水泥、矿粉、粉煤灰)和毫米级颗粒(骨料)等组成, 在组成上往往不含有粗骨料, 但现在有学者发现适当粗骨料的加入会对收缩性等性能有所改善, 粗骨料是指材料粒径大于 5 mm 的骨料, 普通混凝土常用的粗骨料有碎石和卵石, 粗骨料的掺量和粒径对 UHPC 都有着很大的影响。

陈倩[18]为探讨粗骨料对 UHPC 力学性能的影响, 通过改变不同粗骨料的掺量(0%、15%、30%), 对 28dUHPC 进行了劈裂试验, 发现随着粗骨料掺量的增加, 劈裂抗拉强度先增大后减小, 15%时略有增加, 30%的时候显著下降。

周晓光[19]等为了探讨围压和粗骨料类型对 UHPC 性能的影响, 在不同压力(0、5、10、20、40、70 mpa)下, 对不同粗骨料(玄武岩、石英岩、大理岩)的超高强混凝土(UHSC)进行了常规三轴试验。结果表明, 随着围压的增大, 单轴受压时含粗骨料的 UHSC 强度低于 RPC, 含石英岩和玄武岩的 UHSC 强度高于 RPC。超高强混凝土的弹性模量和所含粗骨料的弹性模量有关, 与围压基本无关。

李聪[20]等为了探讨粗集料含量对 UHPC 性能的影响, 研究了 5 组不同粗集料掺量的 UHPC (质量分数分别为(0%、12.5%、22.5%、32.5%和 42.5%)), 发现粗集料的掺入可以降低 UHPC 粗集料的自收缩。粗集料掺量越大, 粗集料的自收缩减少越明显。粗集料掺量为 22.5%和 32.5%时, UHPC 的抗压强度略有增加。当粗集料掺量为 22.5%时, 弹性模量显著增加, 抗拉强度随粗集料掺量的增加而降低。当粗集料掺量为 22.5%时, 降低值最小。

黄伟荣[21]等为了研究粗骨料掺量和粒径对 UHPC 的工作性能和力学性能的影响规律, 将不同粒径的粗骨料掺入到 UHPC 中, 结果表明:粗骨料掺量的增加会降低 UHPC 的流动性;当掺量增加到一定量(400 kg/m³)时, UHPC 的立方体抗压强度和轴心抗压强度均有提高, 但抗弯拉性能则会在一定程度上有所降低。当粒径为 5~8 mm 时, 新拌混凝土的流动性最好, 但对抗折和劈裂抗拉强度影响很小。随着粗骨料掺量的增加和粒径的减小, 弹性模量增加。

李信[22]等人在超高性能混凝土中加入河砂、碎石等材料, 结果表明, 粗骨料的加入会使超高性能混凝土的流动性、抗压强度和抗折强度降低, 但是弹性模量却有所提高, 抗氯离子渗透性能和抗冻性能不如普通超高性能混凝土优异, 但是表现良好, 自收缩性能得到改善, 特别是早期的自收缩率明显降低, 同时粗骨料的掺量越多, 流动性降低得越多, 而不同力学性能随粗骨料的掺量变化却不明显。

综上所述, 我们可以发现, 适量粗骨料的掺入可以形成高强骨架, 进而提高力学性能, 合适粒径的粗骨料又可以提高工作性能, 而体积更大的粗骨料也可以减少水泥的用量, 既减少水化引起内外温差裂缝与收缩的发生概率, 又可以大幅降低成本。

3.2. 细骨料

粒径在 4.75 mm 以下的骨料称为细骨料, 在混凝土中起到骨架或填充作用。现如今用的比较多的细骨料是机制砂、珊瑚砂、海砂等材料。机制砂的广泛使用主要是因为河砂过度开采后, 人们意识到了资源匮乏, 生产量跟不上需求量, 才想到利用机制砂代替河砂。而海砂、珊瑚砂的推广使用是因为一些沿

海工程,地理位置偏远,很多材料运输不方便,所以就地取材,利用工程富有的珊瑚砂、海砂。

赵学涛等[23]为探讨砂率对超高性能混凝土的影响,采用单因素法研究了不同砂率(40%、41%、42%、43%、44%、45%、46%)对超高性能混凝土的影响,发现随着砂率的增加,坍落度和扩展度先增大后减小。不同龄期(3 d、7 d、14 d、28 d) UHPC 的抗压强度先升后降,但砂率对 UHPC 抗折强度影响不明显,最佳砂率为 42%~44%。

王晶[24]等人为了探究海砂对 UHPC 性能的影响,用海砂代替了超高性能混凝土中使用较为成熟的石英砂,并对其进行了系统的研究。结果表明,海砂拌合物的水胶比在 0.16~2.0 之间时,流动性好,易于成型和压实。当抗折强度和抗压强度达到最大值时,此时的水胶比为 0.16,当砂胶比在 0.9~1.1 范围内时,海砂 UHPC 的抗折强度对砂胶比的变化较为敏感,而且海砂 UHPC 的抗压强度较高,达到最大抗折强度时砂胶比为 1.0。

冯滔滔[25]为了探究机制砂对 UHPC 性能的影响,通过改变机制砂等质量取代河砂的量进行实验,得出结论:机制砂 UHPC 与细集料用河砂的 UHPC 抗压强度接近,采用机制砂作为细集料不会显著降低 UHPC 的强度,机制砂 UHPC 具有优异的抗冲击性能。

赵学涛[26]为了探究机制砂对 UHPC 性能的影响用机制砂代替 UHPC 中的河砂,并通过改变机制砂取代河砂的掺量进行实验,得出结论:机制砂代替河砂,可以有效的提高 UHPC 的流动性和强度,并且在机制砂掺量为 40%~60%时,UHPC 的流动性较好;当机制砂掺量为 10%~20%时,UHPC 的强度较大。

陈飞翔[27]为了探究珊瑚砂对 UHPC 性能的影响,通过在不同胶砂比下,改变珊瑚礁砂取代石英粉的量来进行实验,结果表明:随着胶砂比的增大,珊瑚礁砂 UHPC 的流动度,抗压强度和抗折强度也随之增大。当胶砂比超过 1:1 时,抗压强度和抗折强度的增长的趋势变得缓慢,而且基本符合 UHPC 力学性能对于指标的要求;当胶砂比为 1:1 时,当珊瑚礁粉取代珊瑚礁砂比例增加,这样会导致珊瑚礁砂 UHPC 的流动度减小,而且珊瑚礁砂 UHPC 的抗压强度和抗折强度会先增加,随后减小。

综上所述,细骨料的种类和掺量影响着 UHPC 的坍落度和扩展度,种类不同的细骨料制出的 UHPC 力学性能也不相同。珊瑚砂和海砂会影响氯离子含量,进而影响混凝土的耐久性,这是未来需要关心的点,有待探究。此外,在制备 UHPC 的过程中如何把握种类和掺量也需要进一步探究。

4. 纤维

由于混凝土具有抗拉强度低、延性差等缺点,在实际使用过程中通常带裂缝工作,影响了结构的耐久性和美观性。因此,学者们对此进行了大量的研究,发现在混凝土中加入纤维可以有效地改善这个缺点。自此,高强度、高韧性、高耐久性的纤维混凝土被广泛运用于公路、桥梁、地铁、隧道等土木工程中。目前,研究较多的纤维主要是钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等。

4.1. 钢纤维

钢纤维是当今使用最普遍的混凝土增强材料,也是让 UHPC 强度达到超高的主要因素之一,因此,国内外学者对于钢纤维的研究也比较充分。

吴礼程等[28]为了研究钢纤维含量对 RPC 力学性能的影响,把钢纤维掺量作为自变量,进行了常规三轴试验。结果表明,在单轴加载条件下,钢纤维对 RPC 试样的抗压强度和破坏形态产生很大的影响。当围压为 10~70 MPa、钢纤维掺量为 0%~2.4%时,钢纤维只会影响 RPC 的破坏形态,但对其抗压强度的影响却是不明显。

杨简[29]等人为了研究钢纤维掺入对混凝土性能的影响,将钢纤维掺入混凝土进行性能测试,结果发现:钢纤维能增加混凝土的抗压强度,但会使新拌浆体的流动性能降低,从而影响 UHPC 的工作性能。

王剑[15]等人研究了在钢纤维总掺量(2%)不变时钢纤维长度(8 mm 平直、13 mm 平直、20 mm 端钩)及不同长度钢纤维组合对机制砂 UHPC 性能影响,发现纤维长度增加,机制砂 UHPC 的流动性也会下降,而抗弯拉强度、抗压强度、静力受压弹性模量会随之增大,长度为 13 mm 平直钢纤维和的长度为 20 mm 端钩钢纤维含量为 1%进行混杂实验时,机制砂 UHPC 的力学性能表现是最佳的。

苏捷[30]等人为了研究 UHPC 抗折强度及尺寸效应,以强度等级、钢纤维类型和体积掺量为自变量进行了分组对比实验。结果发现:伴随着 UHPC 强度等级的不断提高、钢纤维掺量的不断增加,UHPC 抗折强度尺寸效应逐渐增强。且钢纤维类型会影响 UHPC 抗折强度尺寸效应,端钩型纤维 UHPC 试件抗折强度尺寸效应相比于平直型纤维 UHPC 试件,表现更为优秀。

苏家战[31]等人为了研究不同形状的钢纤维对 UHPC 受拉性能的具体影响,以圆直钢纤维和弓型钢纤维为研究对象,以形状和长径比为自变量,采用轴拉、抗折和劈裂三种实验方式进行对比分析,得出结论:圆直钢纤维中长纤维对提高 UHPC 轴拉强度、极限应变、弹性模量效果明显,短纤维对提高初裂强度效果明显;而相比之下,弓型钢纤维能够更有效提升材料各项力学性能,更达到预期的效果。

薛刚[32]为了研究钢纤维掺量对 RPC 力学性能的影响因素,以钢纤维掺量为自变量,通过对比实验和微观分析研究,得出结论:随着钢纤维掺量的不断增加,RPC 的抗压、抗折强度呈线性不断提高,最后总结得到最优体积掺量为 1.0%。

李新星[33]为了研究钢纤维对 RPC 性能的影响,以钢纤维种类、长度、长径比和混杂纤维为自变量,通过对比实验研究发现:钢纤维单掺时,随着掺量或长径比的增加,RPC 流动度会显著降低,抗压强度和抗折强度却不断提高。但是当纤维长度大于 20 mm 时,所测试到的强度开始呈现降低下降趋势。因此混杂掺纤维能够有效提高 RPC 的流动性,同时使 RPC 强度较单掺提高 5%~10%,而通过实验对比,可以得出当长、短纤维掺比为 1:2 时,RPC 的流动度达最佳水平。

陈竞[34]等人为了研究钢纤维直径及组合对 UHPC 性能的影响,以钢纤维直径、直径组合及掺量为自变量,分别对钢纤维 UHPC 的流动度、抗压强度、抗折强度、抗拉强度进行试验分析,得出结论:随着钢纤维掺量和直径的增加,UHPC 抗压、抗折、抗拉强度逐渐增大,UHPC 流动度却不断减小;分析实验数据进行对比,总结分析得 UHPC 中钢纤维达到表现时的直径为 0.22 mm,掺量为 1.5%~2.0%。

综上所述我们可以看出钢纤维的掺入有利于提高 UHPC 的抗压强度、耐久性及工作性能,而具体影响程度受到钢纤维掺量、长度等因素的影响,未来仍需进一步探究。

4.2. 其它纤维

除钢纤维外,一些其他纤维(聚丙烯纤维、玄武岩纤维等)也凭借其各自的优势在 UHPC 中有所应用,引起相关学者的研究。

张一帆[35]为了研究碳纤维对 RPC 强度和温敏性的影响,以碳纤维的掺量为自变量,进行实验研究发现:碳纤维能够有效增加 RPC 的抗压强度和抗折强度,掺量达到 0.6%时提高较大。碳纤维影响 RPC 温敏性的能力有限。

陈倩[36]为了探究聚丙烯纤维对 UHPC 力学性能的影响,对不同聚丙烯纤维体积掺量(0%、0.05%、0.1%、0.15%),不同纤维长径比(167、280、396)的 28 d UHPC 进行了劈裂实验,发现随着体积产量的增加,劈裂抗拉强度先增后减,0.10%时最大。随着长径比的增加,劈裂抗拉强度先减后增,综合来看,在纤维体积掺量 0.1%,长径比为 167 时性能最好。

向真[37]等人为了研究玄武岩纤维对 RPC 耐久性的影响,对 9 组玄武岩纤维 RPC 和 3 组素 RPC 进行了氯离子渗透试验,另外还对 1 组玄武岩纤维 RPC 进行了碳化性能试验,通过研究分析得出结论:玄武岩纤维 RPC 具有良好的抗氯离子渗透性能和抗碳化性能,根据试验结果表明,当水胶比达到 0.22、玄

玄武岩纤维体积掺量达到 0.10% 时, 其抗氯离子渗透性能表现最好。

姚宇飞[38]为了研究玄武岩纤维单掺以及与聚乙烯醇纤维混杂对 RPC 工作性能和力学性能的影响, 结果发现: 掺入玄武岩纤维能提升 RPC 的力学性能, 但其增韧效果有限。随着玄武岩纤维掺量的增加, RPC 的流动度呈指数式下降, 最优体积掺量为 0.75%。玄武岩纤维与聚乙烯醇纤维混杂对 RPC 能起到增强、增韧和阻裂作用, 使混掺组力学性能优于单掺组。

赵洪[39]等人为了研究剑麻纤维对 RPC 流动度和力学性能的影响, 选取不同的剑麻纤维掺量, 并量化计算了剑麻纤维对 RPC 延性和脆性的改善情况, 得出结论: 剑麻纤维能够显著降低拌合物的工作性, 并且也会降低 RPC 的抗压和抗折强度; 还发现能够提升试件的变形能力, 改变了 RPC 的受力破坏形式, 脆性和延性得到显著提高。

苏骏[40]等人为了研究不同纤维对 UHPC 力学性能和抗冲磨性能的影响, 以纤维的种类和掺量作为自变量, 进行抗压、抗拉及抗冲磨试验。得出结论: 钢纤维能够有效提升 UHPC 抗压性能并前效果胜过聚乙烯醇纤维; 钢纤维与聚乙烯醇纤维再提升 UHPC 的抗拉性能方面, 有显著效果; 聚乙烯醇纤维能够有效提升 UHPC 的抗冲磨性能, 并前胜过钢纤维。

腾银见[11]用玻璃钢再生纤维取代耐碱玻璃纤维来研究玻璃钢再生料对 RPC 力学性能的影响, 得出结论: 玻璃钢再生纤维相较于耐碱玻璃纤维, RPC 的流动性显著提高, 但是强度有明显的降低。

曹雅娴[41]等人为了研究聚乙烯醇纤维长度和体积掺量对混凝土轴心抗压强度和抗折强度的影响, 采用灰色理论模型分析轴心抗压强度和抗折强度随龄期的变化规律, 结果发现: 聚乙烯醇纤维的掺入在一定程度上对提高混凝土的轴心抗压强度和抗折强度有积极作用。

孔德成[42]等人为了研究聚丙烯纤维对 UHPC 断裂性能的影响, 采用三点弯曲断裂试验研究了聚丙烯粗纤维体积分数为 0%~2.0% 的 UHPC 的断裂性能, 结果发现: 与不掺纤维的素超高性能混凝土相比, 聚丙烯粗纤维的掺入可有效地改善断裂试件的韧性。

综上所述可以看出掺入纤维的成分、掺量、类型、组合方式和分布等都会对 UHPC 的性能产生不同程度的改善效果。钢纤维掺入后可以大幅度提升 UHPC 的力学性能, 降低 UHPC 的流动性; 聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维掺入 UHPC, 有利于提高抗折强度、抗弯性能和韧性; 聚乙烯醇纤维的掺入, 可以有效改善 UHPC 的脆性, 阻止 UHPC 微裂缝的形成和发展, 有助于提高 UHPC 的抗折强度和劈裂抗拉强度, 而更多种类的纤维及相应的组合仍有待进一步探究与应用。

5. 外加剂

混凝土外加剂是在制备混凝土过程中加入的, 用以改善混凝土相关性能的原材料。在现代混凝土材料制备过程中, 外加剂起着重要的作用, 成为了优质混凝土的必须组成, 比如减水剂可以在在保持混凝土坍落度不变的条件下减少用水量; 膨胀剂是一种补偿收缩的理想材料, 其可以有效地减少裂缝的产生, 被广泛应用于结构自防水、水池和刚性防水屋面工程中, 一些其他外加剂也对提高 UHPC 的性能起着重要作用, 因此, 学者对其展开了研究与分析。

王哲[43]等人从湿堆积密实度、极限水胶比和抗压强度等角度出发, 研究了高效减水剂对 UHPC 密实度和工作性能的影响, 结果发现, 随着减水剂掺量的增加, UHPC 的塑性粘度先降低再增高, 流动性先增高再略微持平后降低, 增加工作性能、湿堆积密实度和强度均呈现先增高后降低的趋势, UHPC 的工作性能在减水剂掺量 4% 时最优, 湿堆积密实度和强度在减水剂掺量为 3% 时最高。

邓立贤[44]等人为了研究膨胀剂对超高性能混凝土抗裂性能的影响, 选用 MgO 膨胀剂(掺量 3%、5% 和 8%)和 HCSA 膨胀剂(3%、5% 和 6%), 测定其对 UHPC 抗拉强度、弹性模量和收缩等开裂参数的影响, 得出结论, MgO 和 HCSA 膨胀剂对 UHPC 的力学性能如抗压强度、抗拉强度和弹性模量等均有不利影

响,但在适当的范围内 UHPC 依旧能有较高的强度。对收缩性和抗裂性有一定的改善作用, MgO 膨胀剂能延缓水化进程,而 HCSA 膨胀剂能促进水化进程。

王强[45]为了研究在 UHPC 中加入 CSA 膨胀剂对 UHPC 的收缩性能的影响,模拟了施工现场的结构尺寸、施工温度、养护条件(绝湿、覆盖),得出结论,在绝湿的条件下,因为 CSA 具有较大需水特性,所以导致掺加膨胀剂的 UHPC 后期胶凝材料的水化不足,进而导致比普通 UHPC 的收缩值低;在不失水的绝湿养护下,掺加 CSA 的 UHPC 的水化收缩期比普通 UHPC 的周期更长,在没有养护水补充的条件下掺 CSA 的 UHPC 的收缩比不掺 CSA 的 UHPC 更大。

刘路明[46]等人为了研究膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响,选用膨胀剂单掺、内养剂单掺、膨胀剂与内养剂复掺为试验参数,研究膨胀剂与内养剂对新拌超高性能混凝土性能、硬化后超高性能混凝土力学性能和收缩变形性能的影响。得出结果, UHPC 在单掺膨胀剂后,浆体流动性下降,附加水胶比对 UHPC 的流动性影响较大,凝结时间随掺量增加而延长。复掺膨胀剂和内养剂后,提高延长了 UHPC 的流动性和凝结时间,能有效降低 UHPC 的自收缩。

付泽东[47]等人为了探索 CSA 膨胀剂对超高性能混凝土性能的影响,研究了 UHPC 水硬化过程并探讨了 CSA 膨胀剂的影响规律和作用机理。结果发现,较低掺量的 CAS 膨胀剂对 UHPC 基本没有影响;掺量 10%~15%时, UHPC 的工作性能和初凝时间降低。掺入 CAS 膨胀剂降低了 UHPC 的自收缩和干燥收缩。

邓宗才[48]等人为了解决 UHPC 的收缩开裂风险高等问题,研究了膨胀剂、减缩剂对 UHPC 自收缩性能的影响,并开展单掺膨胀剂或减缩剂 UHPC 的扩展度、基本力学性能及自收缩规律的试验研究,得出结论,单独掺入膨胀剂、减缩剂,可以提升 UHPC 的扩展度,但是抗压强度会降低。

宋普涛[49]等人为了研究消泡剂种类及掺量对海砂超高性能混凝土性能的影响,选用掺加有机硅消泡剂和聚醚消泡剂的海砂 UHPC,测定了其流动度、密度、含气量、抗压强度及吸水率,进而得出结论,有机硅消泡剂掺量为 0.24%和聚醚消泡剂掺量 0.09%时,海砂 UHPC 的密度最高、含气量最低。采用掺量为 0.16%的有机硅消泡剂和掺量为 0.06%的聚醚消泡剂制备的海砂 UHPC 的流动度最大,吸水率最低,7天和 28天抗压强度最高。

龚建清[50]等人研究了无机早强剂碳酸锂、纳米材料纳米碳酸钙对 UHPC 流动性能和早期力学性能的影响,并用 SEM、XRD 对其早期水化产物形貌及水泥水化反应程度进行研究,得出结论, UHPC 的流动度随着碳酸锂掺量的增加而增大;单独掺入碳酸锂或者纳米材料纳米碳酸钙, UHPC 抗折强度和抗压强度提高。

张倩倩[51]为了研究减水剂吸附行为对水泥-硅灰浆体黏度的影响选用不同硅灰掺量下羧酸基和膦酸基 2 种减水剂,测定其对浆体流变性能,吸附性能,堆积密实度和溶液黏度的影响。得出结果,浆体中掺加硅灰会使 2 种减水剂对浆体黏度的影响规律发生明显的变化,膦酸基减水剂有助于降低高硅灰掺量浆体的黏度,并且其在硅灰表面的吸附能力比羧酸基减水剂更强。

由此看来,适当地掺加减水剂有助于提高 UHPC 地工作性、湿堆积密实度和强度;加入膨胀剂对 UHPC 的力学性能有不利影响,但可以有效提升 UHPC 的扩展度,降低 UHPC 的自收缩,未来外加剂的种类及掺量问题仍需我们进一步的探究。

6. 存在问题

1) UHPC 原材料的研究除了上述这些常见材料外,还有其它很多材料的研究,未来也将有越来越多的材料应用于 UHPC 的制作中,我们无法穷尽,这些等待着未来进一步探究。

2) 不同种类的原材料(骨料、胶凝材料、纤维和外加剂)在 UHPC 中发挥着各自改善性能和降低成本

的作用,但这些原材料研究往往局限于实验阶段,缺乏实际工程的检验,因此,关于原材料对UHPC性能的影响仍然需要后续工程应用的验证和我们的进一步探究。

3) 需要建立科学的配合比设计方法。UHPC性能由各种原材料共同决定,如何合理把握这些原材料之间的配合比关系仍是一个难点,如何建立科学的设计方法是UHPC发展的重点之一。

7. 结语

混凝土是多种原材料组成的混合物,UHPC原材料对混凝土的性能有着极大的影响,不同原材料对UHPC性能的影响也不同,本文从辅助胶凝材料、骨料、纤维、外加剂等四个方面梳理了原材料对UHPC性能的影响,在混凝土的生产过程中,需要对不同的原材料进行严格的检测和控制,使其符合规范和实际使用要求,确保UHPC的性能达到最理性的效果,未来仍需进一步探究,本文系统整理了原材料组成的相关研究现状,希望为今后的研究和发展提供参考与帮助。

基金项目

扬州市市校企合作专项(YZ2018139)“绿色超高性能混凝土及其在轨道交通工程中的应用研究”;扬州大学大学生科技创新基金(X20200468);国家重点研发计划(2018YFD1101002)。

参考文献

- [1] 曹润倬,周茗如,周群,何勇.超细粉煤灰对超高性能混凝土流变性、力学性能及微观结构的影响[J].材料导报,2019,33(16):2684-2689.
- [2] 王雪莲.粉煤灰微珠活性粉末混凝土力学与收缩特性研究[J].硅酸盐通报,2019,38(10):3373-3377.
- [3] 巫美强,刘数华,高志扬.硅灰和粉煤灰在200 MPa活性粉末混凝土中的应用机理[J].混凝土,2020(3):142-145.
- [4] 罗远彬,郑愚,周玲珠,刘利川,吴方宏.超高聚丙烯纤维自密实混凝土的配制及其性能探讨[J].混凝土,2020(12):118-122+126.
- [5] 杭美艳,孙忠科,郭艳梅.粉煤灰对UHPC性能及微观结构的影响[J].混凝土与水泥制品,2020(12):11-14+19.
- [6] 彭术,陈浩,水中和,余睿,王鑫鹏,凌刚.废弃混凝土再生粉制备超高性能混凝土基体的性能研究[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2125-2130.
- [7] 邓立贤,钱雕,刘康宁.基于建筑垃圾综合处置的生态型超高性能混凝土设计研究[J].节能,2020,39(10):9-12.
- [8] 蒋华国,李风华.再生微粉掺量对超高性能混凝土力学性能影响研究[J].新型建筑材料,2020,47(8):79-81+133.
- [9] 彭博,李碧雄.废弃玻璃粉用于活性粉末混凝土的可行性研究[J].混凝土世界,2018(2):68-73.
- [10] 刘数华,巫美强,高志扬.废弃玻璃粉在活性粉末混凝土中的应用研究[J].混凝土,2019(7):125-127.
- [11] 腾银见,吕淑珍,李军,卢忠远,牛云辉,赖振宇.玻璃钢再生料对RPC工作性及力学性能影响试验研究[J].混凝土与水泥制品,2020(5):92-95.
- [12] 鲁亚,刘松柏,赵筠.利用铜尾矿制备经济型超高性能混凝土的研究[J].新型建筑材料,2018,45(12):18-21+43.
- [13] 陈梦义,李北星,王威,朱志刚.铁尾矿粉的活性及在混凝土中的增强效应[J].金属矿山,2013(5):164-168.
- [14] 赵学涛,杨鼎宜,杜保聪,朱从香,杨俊,刘淼.石粉含量对超高性能混凝土性能影响研究[J].混凝土与水泥制品,2020(3):6-9.
- [15] 王剑,李北星,杨建波.石粉含量与钢纤维长度对机制砂超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(7):2120-2126.
- [16] 张磊,吕淑珍,王婷.标养条件下掺固硫灰活性粉末混凝土的耐久性初探[J].混凝土,2018(9):97-99.
- [17] 张颖,余跃心,曹茂柏,王收,李殿呈.掺稻壳灰的活性粉末混凝土拌合物性能研究[J].淮阴工学院学报,2019,28(1):20-24.
- [18] 陈倩.聚丙烯纤维和粗骨料对超高性能混凝土抗拉强度的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):113-116+199.

- [19] 周晓光, 王哲. 围压及粗骨料对超高强混凝土抗压性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 144-152.
- [20] 李聪, 陈宝春, 韦建刚. 粗集料 UHPC 收缩与力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(5): 11-20.
- [21] 黄维蓉, 杨玉柱, 刘延杰, 崔通. 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.
- [22] 李信, 陈露一, 黄有强, 张志豪, 谭洪波. 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.
- [23] 赵学涛, 杨鼎宜, 朱从香, 杨俊, 刘淼, 沈城. 砂率对超高性能混凝土的性能研究[J]. 混凝土, 2021(1): 17-19+24.
- [24] 王晶, 倪博文, 周永祥, 宋普涛, 王祖琦, 冷发光. 利用未淡化海砂配制超高性能混凝土的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(5): 1-4.
- [25] 冯滔滔, 蒋金洋, 刘志勇, 岳承军, 王凤娟, 吴宜锐, 褚洪岩. 机制砂超高性能混凝土的冲击压缩力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1177-1187.
- [26] 赵学涛, 杨鼎宜, 朱从香, 杨俊, 刘淼. 掺机制砂的超高性能混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2020(9): 152-154+160.
- [27] 陈飞翔, 陈尚雷, 张国志, 杨荣辉. 珊瑚礁砂制备超高性能混凝土的可行性研究[J]. 混凝土, 2020(7): 65-69.
- [28] 吴礼程, 王哲, 刘迪, 朱昊辉, 路远, 林露. 围压及钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 208-215.
- [29] 杨简, 陈宝春, 吴香国, 苏家战, 黄卿维. 新拌超高性能纤维增强混凝土流动性对其抗压强度的影响[J/OL]. 复合材料学报, 1-13. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210115.005>, 2021-04-21.
- [30] 苏捷, 史才军, 秦红杰, 张祥. 超高性能混凝土抗折强度尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1740-1746.
- [31] 苏家战, 林毅焱, 陈宝春, 黄卿维. 不同形状钢纤维对 UHPC 受拉性能影响的试验研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 246-251+261.
- [32] 薛刚, 张夏. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土基本力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 934-938.
- [33] 李新星, 周泉, 李水生. 钢纤维对活性粉末混凝土性能影响研究[J]. 施工技术, 2020, 49(14): 81-85.
- [34] 陈竞, 周红梅, 谢正元, 彭昱翔, 黄华甫. 钢纤维直径及组合对 UHPC 性能的影响[J]. 广西科技大学学报, 2020, 31(3): 50-57.
- [35] 张一帆, 杜红秀, 石丽娜. 碳纤维及硅灰掺量对活性粉末混凝土强度和温敏性的影响[J]. 混凝土, 2019(7): 79-81.
- [36] 陈倩. 聚丙烯纤维和粗骨料对超高性能混凝土抗拉强度的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 113-116+199.
- [37] 向真, 王德弘, 师人杰, 王晨, 鞠彦忠, 范云廷. 玄武岩纤维活性粉末混凝土耐久性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(7): 43-46.
- [38] 姚宇飞. 河砂玄武岩纤维 RPC 的配合比设计及验证[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4): 59-64.
- [39] 赵洪, 黄向阳, 龙广成, 李坦平, 蔡松韬. 生态型活性粉末混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(6): 90-93.
- [40] 苏骏, 李磊, 吴鹏, 蔡新华. 钢纤维与 PVA 纤维对超高性能混凝土强度及抗冲磨性能影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11): 39-42.
- [41] 曹雅娴, 侯慧芳, 刘曙光, 赵建军, 徐勇彪. PVA 纤维混凝土力学性能增长规律研究[J/OL]. 混凝土与水泥制品, 2021(5): 56-59. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2021.05.056.04>, 2021-05-18.
- [42] 孔德成, 安明喆, 贾方方. 聚丙烯粗纤维超高性能混凝土的断裂性能[J/OL]. 公路, 2021(5): 281-285. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1668.U.20210510.1138.106.html>, 2021-05-18.
- [43] 王哲, 肖勋光, 水中和, 冷勇, 童瑶, 余睿, 王鑫鹏. 基于最紧密堆积理论合理选择 UHPC 的减水剂掺量[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1503-1509.
- [44] 邓立贤, 童轩胜, 刘康宁. 膨胀剂对超高性能混凝土抗裂性能的影响研究[J]. 节能, 2020, 39(8): 8-12.
- [45] 王强. 超高性能混凝土(UHPC)收缩性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(7): 12-15.
- [46] 刘路明, 方志, 黄政宇, 裴炳志, 吴玉友. 膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1706-1715.
- [47] 付泽东, 吕林女, 肖静, 何永佳, 申培亮. CSA 膨胀剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4): 559-564+594.
- [48] 邓宗才, 连怡红, 赵连志. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土自收缩性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021,

47(1): 61-69.

- [49] 宋普涛, 王晶, 宋小兵, 杜博渊, 冷发光. 消泡剂种类及掺量对海砂超高性能混凝土(UHPC)性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(5): 733-737.
- [50] 龚建清, 郭万里, 龚啸, 张阳, 谢泽鄯, 吴五星, 戴远帆. 碳酸锂与纳米碳酸钙对 UHPC 早期力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3463-3472.
- [51] 张倩倩, 舒鑫, 杨勇, 冉千平. 减水剂吸附行为对水泥-硅灰浆体黏度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1716-1721.