

本征自感知超高性能混凝土研究进展与发展

李林威^{1,2}, 丁思齐³, 王欣悦⁴, 张立卿⁵, 荣辉¹, 李洪艳⁶, 冉千平⁶, 韩宝国²

(1. 天津城建大学材料科学与工程学院, 天津 300384; 2. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 3. 香港理工大学土木及环境工程学系, 香港 999077, 中国; 4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 5. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013; 6. 重大基础设施工程材料全国重点实验室, 东南大学材料科学与工程学院, 南京 211189)

摘要:超高性能混凝土(UHPC)因具有高强度、高韧性、高耐久性,而在超高建筑或超大跨度民用、军事国防以及复杂或极端服役环境等领域的基础设施建设中展现出广阔的应用前景。而此类基础设施对服役安全性和韧性通常有严苛要求,因此发展原位、实时、全寿命的结构健康监测技术具有重要意义。UHPC不含粗骨料且制备中使用钢纤维,因而具备了自感知性能的原材料组成“基因”,同时复合功能填料也可协同提高UHPC力学性能并可提升其本征感知特性。本征自感知超高性能混凝土(SSUHPC)既可构建整体结构,又可作为涂层、预制/装配式构件、嵌入式传感器布设/埋入结构关键位置,其与基础设施具有等同寿命,为发展“数智化”基础设施实现原位监测提供了新途径。基于此,本文首先简要介绍了UHPC的发展概况;简要概括了UHPC组成-工艺-结构-性能特点及应用其发展SSUHPC的材料“基因”优势;深入分析了SSUHPC在不同荷载(包括受压、拉伸和弯曲等)作用下的自感知行为及其机理,同时提出了优化SSUHPC的建议;最后,详细总结了SSUHPC在当前科学研究和工程应用中发展面临的挑战,并提出了具体的解决策略。

关键词:超高性能混凝土; 本征自感知; 原位监测; 智能; 基础设施

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1770-14

网络出版时间: 2025-09-09



超高性能混凝土(UHPC)是一种具有均匀密实结构及超高强/韧性和耐久性的纤维增强水泥基复合材料,其制备原理是通过提高混凝土组分的细度和活性(使用磨细石英砂及矿物掺合料),采用热养护促进水化反应,不使用粗骨料,采用超塑化剂保障低水胶比,改善水化产物的组成与结构。UHPC的最核心特征是增加水化硅酸钙凝胶数量并减少氢氧化钙数量,以提高水化产物中硅氧键比例并降低钙氧键比例,最大程度地减少复合材料内部的缺陷(孔隙与微裂缝),从而达到高均匀性和密实性以及强水泥基体-骨料结合界面(图1)^[1-4]。同时,UHPC的制备中采用钢纤维复合而向由共价键、离子键和范德华力主导的水泥基材料中引入金属键,因而改

善其性脆易裂、抗拉性能低、抗冲击性差等天然不足^[5]。基于上述机制,UHPC具有高性能特征,包括优异力学、耐久和工作性能,如其抗压强度高于150 MPa,约为普通混凝土的3倍以上,韧性是普通混凝土的300倍以上,而UHPC结构的自重仅为普通混凝土结构的1/3~1/2^[6-7]。

由以上介绍可知,钢纤维是UHPC制备的一种核心原材料,其不仅具有优异的力学性能,而且具有良好的导电性能,并由于一维的空间形态效应可在UHPC内部形成广泛的分布,从而增强导电网络。此外,UHPC制备不使用粗骨料,这可避免导电混凝土中导电通路被大尺寸骨料截断的问题^[8]。所以,UHPC具备发展自感知混凝土的原材料组成“基因”,

收稿日期: 2025-06-14。 修订日期: 2025-07-28。

基金项目: 国家自然科学基金(52308236, 52368031, 52508311); 全国建材行业重大科技攻关“揭榜挂帅”项目(2023JBGS10-02); 辽宁省自然联合基金(2023-BSBA-077); 江苏省自然科学基金(BK20231088); 中央高校基本科研业务费(DUT24GJ202); 中国博士后科学基金面上项目(2024M750410); 香港研资局优配基金项目(15229525)。

第一作者: 李林威(1995—),女,博士,讲师。

通信作者: 丁思齐(1991—),男,博士,助理教授;

韩宝国(1976—),男,博士,教授。

Received date: 2025-06-14. Revised date: 2025-07-28.

First author: LI Linwei (1995—), female, Ph.D., Lecturer.

E-mail: llwtcu@outlook.com; linweili@tcu.edu.cn

Correspondent author: DING Siqi (1991—), male, Ph.D., Assistant Professor.

HAN Baoguo (1976—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: s.q.ding@connect.polyu.hk; hanbaoguo@dlut.edu.cn

而且 UHPC 的高致密结构和高性能特征有利于保障电学及感知性能的长期稳定性。

基于此, 本文介绍了 UHPC 的发展概况; 概括了 UHPC 组成-工艺-结构-性能特点及应用其发展

本征自感知超高性能混凝土(SSUHPC)的材料“基因”优势; 分析了 SSUHPC 受压、受拉和受弯感知性能及机理, 并提出了优化 SSUHPC 的建议; 最后, 探讨了 SSUHPC 目前存在的挑战及未来发展路线。

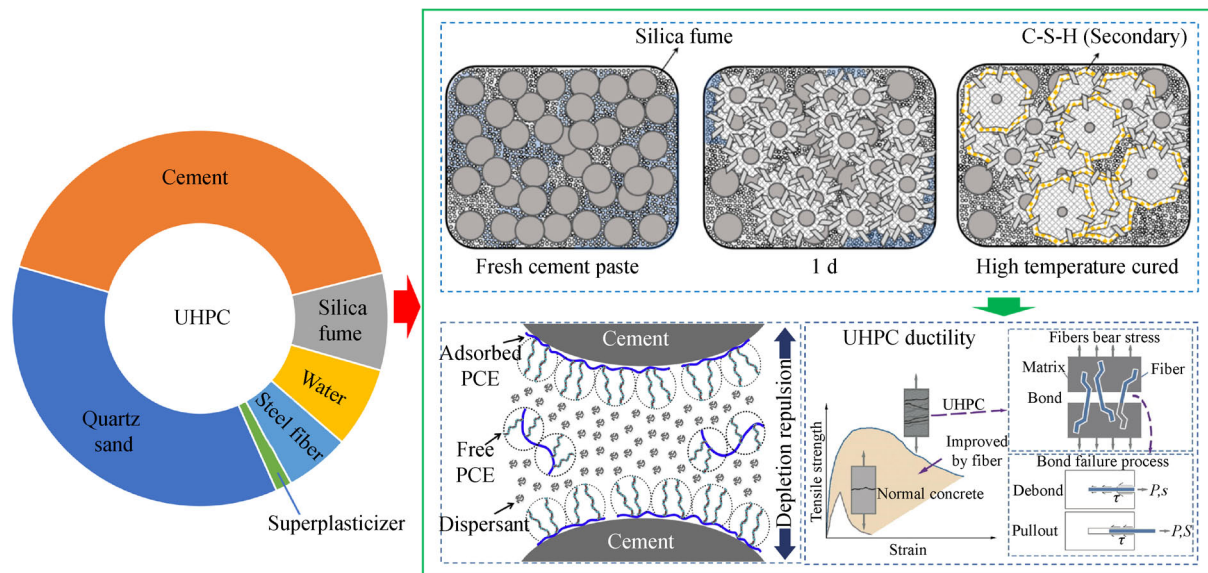


图 1 UHPC 的制备原理^[9]

Fig. 1 Fabrication principle of UHPC^[9]

1 UHPC 简介

UHPC 发展始于 20 世纪 90 年代中期, 其前身是法国 BOUYGUES 集团 Richard 等^[10]开发的活性粉末混凝土。Richard 基于堆积密度理论优化了颗粒材料的尺寸(包括使用大量胶凝材料以提高材料活性、减小骨料粒径), 设计了极低水灰比, 并采用短钢纤维、活性掺合料、高效减水剂、高温养护(90~400 °C)实现了混凝土的超高强度^[10-12], 最终使 UHPC 抗压强度范围达到 150~800 MPa。随后, De Larrard^[13]提出了“超高性能混凝土”的概念, 其制备工艺包括真空搅拌、凝结前及过程中施加压力以及 90°C 以上的热养护。自从 21 世纪开始, UHPC 的制备工艺和组分不断优化。如今, 采用标准养护工艺即可制备出强度 150 MPa 以上的 UHPC, 其性能更稳定、应用日益广泛。

表 1 为典型 UHPC、高性能混凝土(HPC)与普通混凝土(NC)的主要性能对比。与传统混凝土相比, UHPC 不含粗骨料, 且通过磨细和热养护提高了石英砂与水泥石的活性反应而使二者形成化学结合, 这有效避免了基体与骨料之间存在弱界面过渡区的问题。同时, 高胶凝材料用量和极低水胶比显著改善了混凝土的堆积密度与微观结构^[14]。这使得 UHPC 在力学性

能和耐久性上均表现优异。除表 1 所列性能外, UHPC 还具备优异的抗疲劳性能和抗冲击性能^[15-21]。其抗压疲劳强度达约 70 MPa^[18-19], 分别为高强混凝土和普通混凝土 1.3 倍^[20]和 3 倍^[19]; 在 14 m/s 冲击速度下, 动态抗压强度达到 200 MPa^[21]。

值得注意的是, 实现 UHPC 以上优异性能尤为关键的因素之一是复合钢纤维^[10]。其长度通常约为 13 mm, 直径为 0.15 mm, 体积掺量为 1.5%~2.0%。在力学性能方面, 钢纤维通过桥接裂缝、阻止裂缝扩展, 显著提高了 UHPC 的抗拉强度、弯曲韧性、抗冲击性和抗疲劳性能, 使其从本质上区别于普通及高强混凝土的脆性破坏模式。这也使得 UHPC 结构自重约是传统混凝土结构的 1/3~1/2^[6-7], 同时也显著降低了对预应力钢筋的使用需求。在功能性能方面, 均匀分散的钢纤维网络在基体中形成连续的导电/导热通路。在热学性能上, 钢纤维赋予 UHPC 通电自加热的能力, 可实现自融雪和除冰特性^[22]。在电学性能上, 则赋予 UHPC 应变/损伤敏感的电学响应特性, 使其具备了“自感知”能力。这种能力使 UHPC 不仅能承受荷载, 还能在承受荷载或发生损伤时, 通过监测其电阻等电学参数的变化, 实时感知自身的应变状态、损伤程度乃至裂缝萌生与发展。此外, UHPC 对宽度小于 150 μm 的裂缝具有高的自

愈能力,可显著延长其服役寿命,并降低混凝土结构的维护成本^[23]。同时,高致密基体结构与优异耐久性确保了 UHPC 功能性能的长期稳定性^[24]。

目前,UHPC 已大规模用于铁路枕木、体育场馆、大型建筑、人行天桥以及公路桥梁的大梁和桥面等结构^[25–28],尤其是在桥梁承重构件、接缝及桥面铺装层中的应用广泛^[29–30],如澳大利亚的野生大

桥^[31]、加拿大舍布鲁克立交桥^[32]和中国袁家河桥^[33]等。上述基础设施结构或者构件往往需要实时及长期监测以确保结构安全和韧性^[34–36]。如果 UHPC 具有本征自感知性能,便无须布设额外传感器,而实现自身的状况监测。其既可构建整体结构,又可作为涂层、预制/装配式构件或嵌入式传感器布设/埋入结构关键位置,从而为结构监测提供了崭新途径。

表 1 UHPC、高性能混凝土(HPC)、普通混凝土(NC)的主要性能对比^[14, 37–38]

Table 1 Comparison of the main properties of ultra high performance concrete (UHPC), high performance concrete (HPC) and normal concrete (NC) ^[14, 37–38]

Concrete type	Compressive strength	Flexural strength	Elastic modulus	Fracture toughness	Chloride ion diffusion coefficient
NC	20–50 MPa	2–5 MPa	30–40 GPa	0.12 kJ/m ²	1.1×10 ⁻¹² m ² /s
HPC	60–100 MPa	6–10 MPa	30–40 GPa	0.14 kJ/m ²	0.6×10 ⁻¹² m ² /s
UHPC	120–230 MPa	30–60 MPa	40–60 GPa	20–40 kJ/m ²	0.02×10 ⁻¹² m ² /s
UHPC/HPC	2–4	5–10	1.2	150–300	1/30
UHPC/NC	5–11	6–30	1.2	150–300`	1/50
Concrete type	Creep coefficient	Carbonation depth	Abrasion coefficient	Water-absorbing characteristics	Dynamic modulus after 300 freeze-thaw cycles
NC	1.3–2.1	4 mm/28 d	4	2.7 kg/m ³	75%
HPC	—	1.37 mm/28 d	2.8	0.4 kg/m ³	—
UHPC	0.29–0.31	0 mm/28 d	1.3	0.2 kg/m ³	96%
UHPC/HPC	—	—	1/2	1/2	—
UHPC/ NC	1/7–1/5	—	1/3	1/13	—

2 UHPC 自感知性能

UHPC 本征自感知特性源于其内部导电网络在外界荷载或环境因素作用下发生变化,即电学性能产生规律性响应。因此,自感知性能的评价指标主要包括各电学信号的变化率($M\%$)及电学信号对荷载及环境的灵敏度(μ),计算公式如下^[36, 39–40]:

$$M\% = \frac{(M_i - M_{i0})}{M_{i0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\mu = \frac{M\%}{(F_i - F_{i0})} \quad (2)$$

式中: M_i 和 F_i 分别为 UHPC 当下状态的电学性能(包括电阻、电压、电流、阻抗等)和宏观性能指标(包括应力、应变、温度、湿度等), M_{i0} 和 F_{i0} 分别为初始状态的电学性能和宏观性能指标^[39–41]。其中,电阻变化率是目前表征 UHPC 感知性能的最常用的电学性能指标。

UHPC 宏微观结构不仅是其传统力学性能及耐久性能的决定因素,也从根本上影响其电学性能^[42]。从结构类型上划分,UHPC 中的导电通路可以分为连续导电通路(第 1 类导电通路)、非连续导电通路(第

2 类导电通路)和“绝缘体”导电通路(第 3 类导电通路)^[8]。连续导电通路由连续的微孔及其中的孔溶液构成,其导电机理依赖于孔溶液内的离子(主要是 Ca^{2+} 和 OH^-)在连通的毛细孔网络内的定向迁移。由于该过程与孔隙溶液密切相关,此类导电行为表现出显著的环境敏感性,尤其易受温湿度影响。当 UHPC 内部自由水含量较高时,离子传导性的变化范围较大;在干燥状态下,离子导电能力变差^[43]。非连续导电通路则由不连续微孔、孔隙溶液及其所含离子构成。虽然其连续性被水泥基体阻断,但仍可在局部与其他导电通路耦合从而影响材料的电学性能。“绝缘体”导电通路实质为连续的水泥基体相,其导电性极低。由于 UHPC 具有基体密实、孔隙率小等特点,上述 3 类导电通路均近乎绝缘,导致传统 UHPC 导电性能较差。

SSUHPC 本质上源于功能填料对 UHPC 导电机理的多尺度(微观及宏观)调控^[44–46]。如表 2 所示,常用的功能填料包括毫米级的钢纤维,微米级的镍粉、钢渣及铜渣,以及纳米级的炭黑、石墨烯和碳纳米管等。功能填料通过均匀分散于连续相水泥基体中,在 UHPC 基体内形成空间三维导电网络。其

不仅引入大量可自由运动的电子，更在传统的 3 类导电通路之外，构建了第 4 类导电通路——功能填料本征导电通路。当功能填料在断开但足够接近时，其能够通过隧道传导或场发射传导机制而越过

UHPC 基体中功能填料之间的势垒^[47-48]，进一步提高 UHPC 导电性^[47, 49-50]。此外，UHPC 基体中不存在粗骨料的特点，也有利于功能性填料形成连续有效的导电通路^[51]。

表 2 制备 SSUHPC 的功能填料分类及性质
Table 2 Classification and properties of functional fillers for fabricating SSUHPC

Geometric scale	Functional filler	Dimension	Resistivity	Material attribute
Millimeter scale	Round steel fiber ^[52]	Diameter: 0.2–0.3 mm	1.94×10^{-8} – 2.06×10^{-8}	Metal-based material
	Hooked steel fiber ^[52]	Length: 13–30 mm	kΩ·cm	
	Twisted steel fiber ^[52]			
	Ultrafine steel fiber ^[51, 53]	Diameter: 8–20 μm Length: 10 mm	—	
Micron scale	Nickel powder ^[2]	Particle size: 6–11 μm	—	
	Copper slag ^[2]	Particle size: 140 μm	—	
	Steel slag ^[2, 54]	Particle size: 103 μm	—	
Nano scale	Nano carbon black (NCB) ^[55]	Particle size: 190 nm	1.8×10^{-4} kΩ·cm	Carbon-based material
	Graphene ^[56]	Diameter: 5–50 μm	—	
		Thickness: 3.4–8.0 nm		
	Carbon nanotube (CNT) ^[57–58]	Diameter: 15 nm Length: 100 μm	—	

受到荷载作用时，SSUHPC 导电通路会沿着不同应力方向而发生相应的动态变化，其功能填料与基体间沿着不同方向的黏结力也存在差异。其中，受压感知性能主要基于填料间距变化引起的电阻率改变，填料间距减小可以增强接触导电、量子隧道和场发射效应；受拉感知性能则依赖于微裂纹产生而造成的导电通路断裂，其主要源自于 UHPC 性脆易裂的性质以及功能填料–基体薄弱界面的脱黏；受弯感知性能则是复合了受压区和受拉区的特点。因此，以下将分别总结 SSUHPC 的受压、受拉及受弯感知性能，分析了其不同荷载下的内在导电机理，并给出了 SSUHPC 的优化建议。

2.1 受压感知性能

在受压荷载作用下，SSUHPC 内部导电通路及填料间距均减小，引起了电阻的降低及电阻率的变化。

钢纤维是广泛应用于 UHPC 中以构建内部导电网络的功能填料。Sun 等^[59]最早使用钢纤维作为导电填料制备 SSUHPC，其研究表明，经由烘干后的 UHPC 电阻变化率的重复性和灵敏度大大高于未经烘干的 UHPC。You 等^[60]研究了不同掺量钢纤维对 UHPC 受压感知性能的影响，然而其结果表明，即使钢纤维掺量高达 3%(体积分数)，UHPC 仍表现出较差的感知性能。You 等推测相关原因一方面是较低的水灰比导致宏观纤维在致密微观结构中难以

搭接而无法构成导电网络。另一方面，低水灰比导致 UHPC 孔隙水含量少，离子导电的效率也发生降低。可以看出，能够影响离子导电的相关因素，如 UHPC 配合比及温湿度等，均会显著影响 UHPC 的受压感知性能。Dong 等^[51, 61]最早使用直径为微米尺度的超细钢纤维制备 SSUHPC。图 2 分别对比了普通钢纤维增强 UHPC 和超细钢纤维增强 UHPC 受压感知性能。如图 2a 所示，在开裂或失效之前，普通钢纤维增强 UHPC 电阻变化率略有变化，而当宏观裂纹形成时，电阻变化率显著增加。相较之下，如图 2b 所示，超细钢纤维增强 UHPC 随着应力/应变的增加而增加，且变化显著，其最佳电阻率变化率达到 46.2%，最佳应变灵敏度达到 94.9。与宏观钢纤维相比，相同掺量下的超细钢纤维数量更多、分布更为广泛、网络更加连续。相较于普通钢纤维，在使用超细钢纤维作为功能填料的 SSUHPC 中，电子导电占据更重要地位，因此，受孔隙溶液中离子导电的影响(即外界环境因素)较小，感知性能也更加稳定。此研究中使用的超细钢纤维还具有不锈钢特性，进一步提高了 SSUHPC 长期稳定性。此外，Qiu 等^[62]研究发现，镀铜钢纤维 UHPC 受压感知性能与普通钢纤维一致，但镀铜钢纤维的镀铜涂层也能够提高 SSUHPC 的长期稳定性。

通过向钢纤维 UHPC 中复掺导电功能填料可以进一步完善内部导电网络，从而提高感知性能。Le

等^[58]曾研究了钢渣的粒度和含量对钢纤维 UHPC 受压感知性能的影响, 结果表明, 粒径小的钢渣骨料易在基体中均匀分散而使钢纤维 UHPC 受压电阻变化率最高。Song 等^[63]向钢纤维 UHPC 中复掺石墨烯, 研究了其在不同振幅压应力下的感知性能, 结果表明, 当应力为 40 MPa 时, 相较于未掺入石墨烯的钢纤维 UHPC, 0.25%、0.50%、0.75%、1.00%(质量分数)石墨烯掺入使得钢纤维 UHPC 的电阻率分别变化了 80.8%、69.5%、127.2%和 58.3%。Jung 等^[64]、Lee 等^[57]、Yoo 等^[65]均通过向钢纤维 UHPC 中复掺碳纳米管以完善纳米和微米尺度的导电网络。不同龄期及养护方式下的直流电阻结果指出, 碳纳米管掺入后, 钢纤维 UHPC 导电机制从离子传导转变为电子传导^[64]。这意味着, 无论基体中的含水量如何, 电子都能沿着碳纳米管与钢纤维建立连接并快速移动, 提高了感知性能的稳定性和重复性^[64]。但在上述研究中, 碳纳米管掺入虽使得钢纤维 UHPC 能监测其自身在受压荷载作用下损伤及开裂情况, 但噪声较大, 难以量化损伤及开裂程度及准确反映

应力应变。一方面, UHPC 在受压荷载作用下的形变量及功能填料间距变化过小。另一方面, 碳纳米管掺入通过填充及成核作用^[66], 被水泥基体包裹, 阻断了碳纳米管间的隧道效应或者场发射效应。此外, 上述研究并未通过直流/交流电阻与时间关系判断 UHPC 的主要导电机理, 其根据不同龄期及养护方式下的直流电阻结果得出的以电子导电为主的结论不一定完全准确。若以离子导电路通为主则通常会具有较大噪声。

纳米填料单独作为功能材料掺入 UHPC 中也能够提高其受压感知性能。Hussain 等^[55]通过单掺纳米炭黑制备了 SSUHPC, 并发现其应变敏感性随着纳米炭黑掺量的增加而增加, 当纳米炭黑掺量达到渗流阈值的上限(1.5%, 质量分数)时, 电子导电通路占据主导作用, 此时应变灵敏度最高且达到了 130。这与纳米炭黑具有粒径小、数量多的特点有关。当其达到渗流阈值时, 纳米炭黑颗粒之间距离要小于其他维度材料, 其隧道效应及场发射效应更加显著。

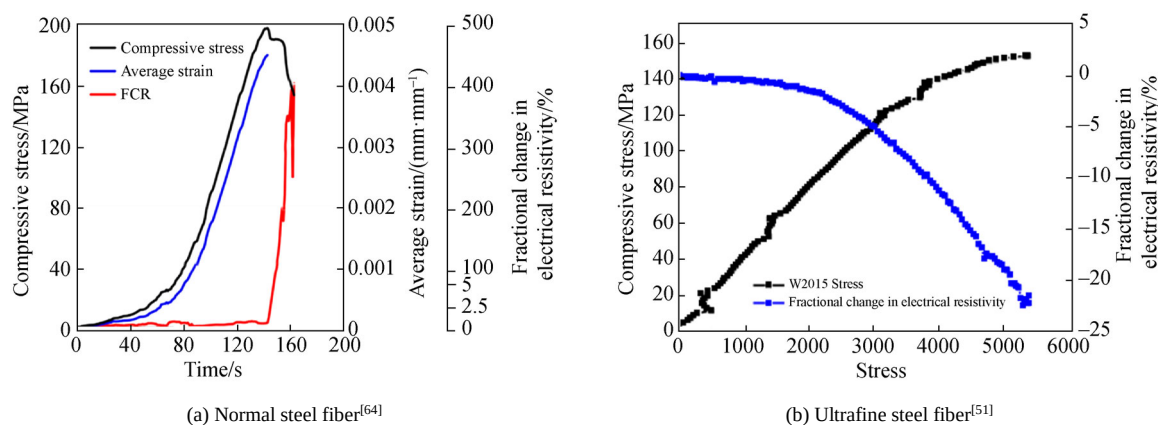


图 2 受压荷载下 SSUHPC 的应力/应变/电阻变化率-时间关系

Fig. 2 Relationship between stress/strain/fractional change of resistance and time of SSUHPC under compression

综上, UHPC 受压感知性能受到功能填料种类、环境湿度(孔隙溶液含量)及测试方法等因素的影响。将钢纤维和其他导电填料复掺能够进一步提高 UHPC 对损伤开裂的监测能力, 并降低感知信号的噪声水平。值得注意的是, UHPC 在受压时因其致密的微观结构而仅产生微小变形。而目前多数功能填料所构建的电子导电通路对此类微小变形的敏感性较低, 其感知能力仍然受到离子导电的影响, 最终致使 UHPC 电学信号发生波动且具有较大噪声。但无论是纤维材料还是纳米填料, 尺度越小、有效距离越小的功能填料对感知性能初始阶段的改善作

用也往往更为明显。

2.2 受拉感知性能

与受压荷载下电阻减小不同, 拉伸荷载会导致导电通路延长或断裂而导致 UHPC 电阻率增大。图 3a~图 3b 分别为脆性破坏和延性破坏的 UHPC 拉伸荷载、位移-时间曲线。可以看出, 在初始拉伸裂纹出现之前, 二者线弹性区的电阻变化率随微裂纹的增多而逐渐增加。如若 UHPC 为脆性破坏, 初始拉伸裂纹的出现直接引发电阻趋近于无穷大, 如图 3a 所示。若 UHPC 为延性破坏(图 3b), 在初始裂纹出现后, 功能填料本征导电通路成为主要因素。

此时电阻变化率表现出与应变硬化相似的行为,直到 UHPC 受拉强度达到其最大值。然后,试件伸长率随着裂纹宽度的增加而减少,电阻变化率的增加幅度也随之降低。通过对比图 3a 与图 3c、图 3b 与图 3d 可以看出,在弹性变形阶段,试件的受拉电阻变化率与应变呈现良好的线性相关性。这与受压初期的电阻变化率的非线性变化形成鲜明对比。Lee

等^[2, 57]的研究进一步证实,电阻变化率能够精确表征 UHPC 的拉伸行为全过程(从弹性变形到完全破坏),并能够量化表征其应力、应变,但对抗压行为的预测精度相对有限。该现象主要原因与受拉和受压荷载下导电网络演变机制不同有关。受压感知性能主要基于填料间距变化引起的电阻率改变,而受拉感知性能则依赖于微裂纹产生而造成的导电通路断裂。

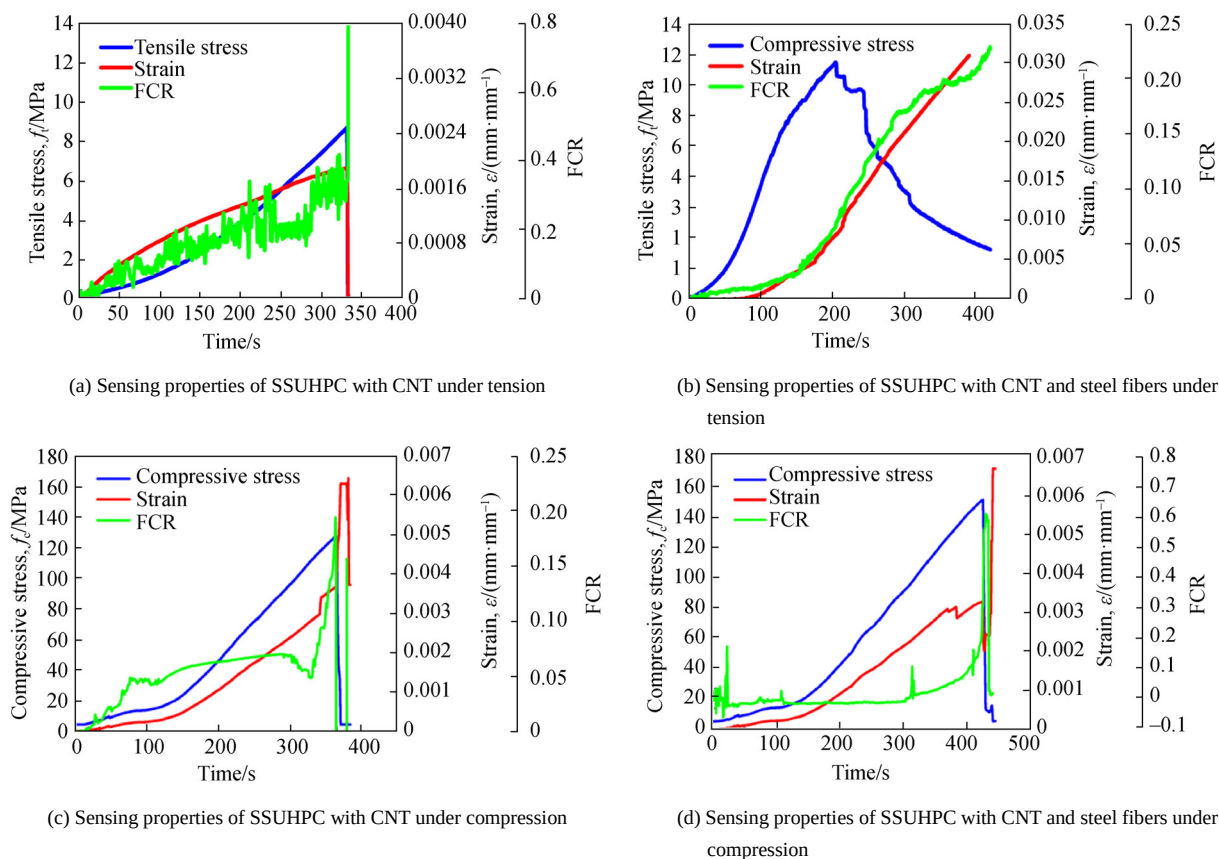


图 3 SSUHPC 拉伸与受压感知性能对比^[57]

Fig. 3 Comparison of SSUHPC's sensing properties under tension and compression^[57]

钢纤维对 UHPC 有显著增韧效果,因此其对受拉感知性能,尤其是初始拉伸裂纹出现后的感知性能影响显著。其影响因素主要包括钢纤维尺寸、形状、掺量等。Nguyen 等^[52]研究了不同类型钢纤维(扭曲钢纤维、光滑钢纤维和钩状钢纤维)对 UHPC 受拉感知性能的影响,发现扭曲钢纤维表现出最好的损伤监测能力,而钩状钢纤维则最差。Song 等^[63]研究了钢纤维掺量对 UHPC 受拉感知性能的影响,结果表明,拉伸应变灵敏度随着钢纤维掺量(从 0.5%到 2.0%,体积分数)的增加而增加,最高可达 150 以上。

钢纤维与其他功能填料复掺也显著提高了 UHPC 受拉感知性能。Song 等^[63]研究表明,复掺炭

黑或磨细高炉矿渣显著降低了应变硬化钢纤维 UHPC 的电阻率,并略微提高了其损伤感知能力。Lee 等^[57]和 Yoo 等^[65]研究发现,碳纳米管(0.5%, 体积分数)复掺钢纤维(2%, 体积分数)UHPC 具有优异的受拉感知性能。Lee 等^[57]曾分别用碳纳米管与 2 种不同形状(光滑型和卷曲型)、3 种不同长径比(65、97、100)的钢纤维复掺,结果表明,光滑型钢纤维 UHPC 的测试结果在预测拉伸行为(包括拉伸应力-应变曲线、裂纹开口位移曲线、断裂能)方面表现更好。Lee 等进一步对比了炭黑、镍粉、石墨烯、钢渣复掺钢纤维对 UHPC 受拉感知性能的影响,其中镍粉(10%, 质量分数)和石墨粉(5%, 质量分数)的效

果最佳^[2],但其效果均小于碳纳米管(0.5%,质量分数)^[47]。这是由于碳纳米管具有小尺寸特性,更有利于广泛分布在水泥基体内部而形成良好的导电网络。

2.3 受弯感知性能

对于 UHPC 受弯感知性能研究,其受压区导电通路变化与受压感知性能相似,受拉区则与受拉感知性能相似。

目前,用于赋予 UHPC 受弯感知性能的功能填料包括钢纤维、超细钢纤维、碳纤维及碳纳米管。Dong 等^[51, 53]研究了具有不同尺寸和长径比的超细钢纤维对 UHPC 受弯感知性能的影响,其研究结果表明,直径为 8 μm 、长为 15 mm 的超细钢纤维效果最好,此时 UHPC 弯曲应变敏感度可达到 42.6。Valverd 等^[67]采用再生碳纤维制备了 SSUHPC,研究结果表明,当再生碳纤维掺量为 1.0%(体积分数)时,UHPC 弯曲应变灵敏度达到最佳值,但其应变灵敏度存在显著离散性。在荷载幅值相同的循环加载条件下,弯曲应变灵敏度波动范围为 53~714,且不同循环的拟合系数(R^2)仅处于 0~0.29 之间。由此可见,再生碳纤维 UHPC 的自感知性能在稳定性及重复性方面远不如超细钢纤维。Jung 等^[64]研究了碳纳米管混掺钢纤维对 UHPC 受弯感知性能的影响,结果表明,当使用电固化养护时,0.5%(体积分数)碳纳米管和 2%(体积分数)钢纤维混掺 UHPC 能够通过电阻率变化有效地监测弯曲荷载的裂纹情况。You 等^[60]研究了 0.3%(体积分数)碳纳米管和 2%(体积分数)

钢纤维混掺 UHPC 的受弯感知性能,通过挠度曲线可以看出,电学信号可以准确模拟 UHPC 梁的峰前弯曲行为。Wang 等^[68]研究了超细钢纤维与普通钢纤维复掺对 UHPC 受弯感知性能的影响,研究结果表明,在 UHPC 基体开裂初期,0.4%(体积分数)超细钢纤维和 1.4%、1.6%和 1.8%普通钢纤维复掺后的 UHPC 的电阻变化率分别可达 6.20%、6.91%和 9.08%;而仅掺入普通钢纤维 UHPC 的电阻变化率均在 5%左右。图 4 进一步对比了钢纤维单掺、钢纤维/碳纳米管复掺、钢纤维/超细钢纤维复掺对 UHPC 受弯感知性能的影响规律。如图 4a 所示,钢纤维单掺体系的电阻变化率与试件变形基本呈现单调递增关系。图 4b 给出了钢纤维/碳纳米管复掺体系的典型三阶段响应特征。在弹性阶段,其电阻变化率与应变呈线性正相关,增幅约为 1%;当材料进入应变硬化阶段时,电阻变化率的瞬时增幅达 15%左右;后续裂纹扩展阶段,电阻变化率仍保持稳定增长。如图 4c 所示,钢纤维/超细钢纤维复掺体系虽呈现与钢纤维/碳纳米管复掺体系相似的阶段性响应规律,但其在弹性阶段与应变软化阶段的电阻变化率显著大于钢纤维/碳纳米管复掺体系,且其电阻率的变化是连续线性的。这主要归因于超细钢纤维网络形成的三维导电通路具有更高的灵敏度。此外,受弯感知性能还受到微裂纹的数量和宽度、纤维取向和屈服后硬化区的裂纹等因素影响^[60]。

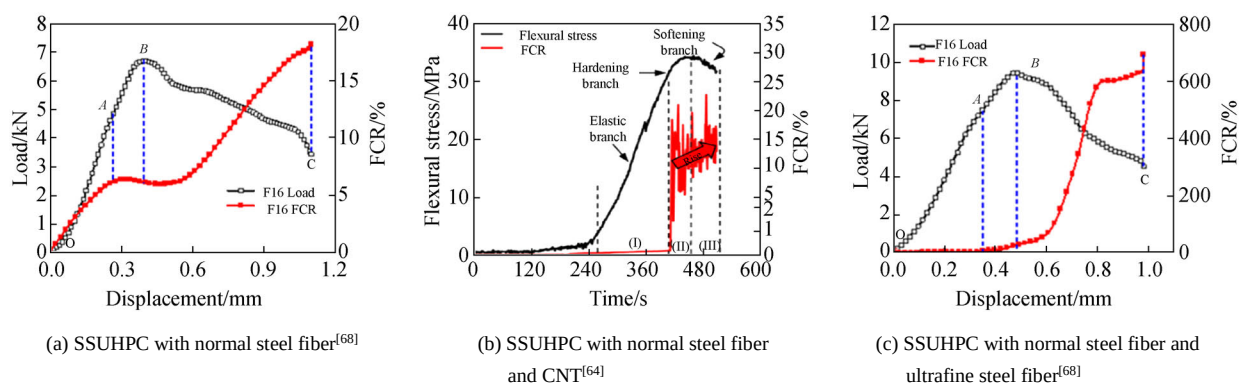


图 4 弯曲荷载下的 SSUHPC 应力/电阻变化率-时间关系

Fig. 4 Relationship between stress/fractional change of resistance and time of SSUHPC under bending

值得注意的是,以上研究采用的埋入电极尺寸较大,同时横穿了弯曲试件的受压和受拉区。这说明电学信号反映了受压区和受拉区导电通路的共同变化。此时电阻率的增加也表明 UHPC 受拉感知性能的灵敏度略高于受压感知性能。另外,如果电极

仅布置在受拉区,上述研究中的电学信号变化率及灵敏度会进一步提高。

根据上述不同类型荷载下的感知性能及原理分析,得出 SSUHPC 的优化方法,具体建议如下:

1) 具有最佳感知性能一般处于渗流阈值内,因此根

据直流/交流电阻等测试来判断 UHPC 渗流阈值, 可以初步选取合适功能填料及掺量, 从而优化感知 UHPC 材料设计。2) 利用直流/交流电阻-时间关系判断 UHPC 导电机理, 若以离子导电为主时, 合理的测试方法(如烘干后测量)能够提高感知性能的重复性并减小噪声, 这对提高受离子导电影响显著的 UHPC 受压感知性能至关重要。3) 采用合适的电极布置方式以提高感知性能的重复性、稳定性和敏感度, 同时减少极化时间以提高测试效率。例如, 在受弯感知性能测试中, 电极布置可避免贯穿受压区和受拉区。

3 发展和展望

作为一种优异的结构材料, UHPC 的力学和耐久性能已经得到广泛与深入的研究, 但其本征自感知性能研究近些年刚刚起步。随着第四次工业革命对新型传感技术的需求, SSUHPC 的发展得到越来越多的关注, 该领域也存在一些挑战, 具体如下:

1) 大规模制造低功能填料含量 SSUHPC 的设计和制备方法、工艺和设备。先进的合成和复合技术/理论, 如纤维混杂、多尺度复合、纳米技术(原位生长、自组装、接枝)、3D 打印技术、生物技术、数字孪生等, 有望为这一问题提供解决方案。此外, 随着数字化和智能化方法的发展, 人工智能、深度学习和其他新兴方法也可被应用于辅助 SSUHPC 的设计。需要特别强调的是, 这些先进方法和技术的应用有望实现 SSUHPC 的大规模制备, 以及实现自感知性能与力学性能(如强度、韧性、耐久性)的有效协同。

2) SSUHPC 感知性能的提高及其他功能的拓展。SSUHPC 的高弹性模量导致弹性阶段应变幅值较小, 所以其内部导电网络对微应变响应不敏感而具有较低的应变感知灵敏度, 因此需要丰富 UHPC 内部导电网络提高对小变形的敏感性。此外, SSUHPC 可与其他先进的水泥基材料技术相结合, 开发多功能 UHPC 或提高其传感性能(如稳定性和灵敏度), 如自修复 SSUHPC(利用传感网络触发修复功能并监测修复效果)、自感知海水海砂 UHPC 等。

3) 为 SSUHPC 开发有效、便捷的多层次传感信号采集和提取原理与方法。新的测试和数据采集技术以及数据提取和优化算法对于实现这一目标非常重要。与传统的电阻/电压测量相比, 电阻抗层析成像技术能提供更丰富的信息。传感信号的非接触测试或

采集技术可减少信号在长距离传输中的损耗^[69-74]。利用电路设计(如交流电路和补偿/差分电路^[75])和信号处理算法(如盲源分离法^[76]), 可将极化和环境影响分离开^[77-79]。随着数字化和智能化方法的发展, 人工智能、深度学习等新方法也被应用于提取传感信号。这些方法还可以进一步与结构的运行状态相关联, 实现信号处理与结构评估的同步。此外, 如建立 SSUHPC 内部电场与应力/应变场或环境场耦合关系, 可更深刻实现 UHPC 自身的状态感知。

4) SSUHPC 的传感机理, 建立统一的力-电本构模型。目前, 用于 SSUHPC 的功能填料有十余种。虽然区分各种填料的不同机理有助于深入了解 SSUHPC 的传感性能, 从而为混凝土的设计和应用奠定基础。但由于 SSUHPC 成分和性能的多样性和不确定性, 在对传导/传感机理的有限认识的基础上, 阐明不同类型的自感应混凝土在不同荷载和环境作用下的“传感指纹”并建立统一的力学-电学构成模型比较困难。此外, UHPC 具有良好的韧性和裂后承载能力, 因此建立其裂后感知关系或模型也特别重要。所以, 需要将实验室试验(各种加载条件、加速试验)和现场测试与传导/传感理论、微观结构分析和数值模拟(如多场和多尺度)有机结合, 以建立统一的传感性能物理模型。

5) SSUHPC 长期传感性能的基本原理、演变规律和模型。虽然 SSUHPC 内部结构致密而比普通混凝土性能更稳定且不易受外界环境影响, 但 SSUHPC 的长期传感性能演化同样具有时变性和复杂性, 目前还缺乏提高稳定性和鲁棒性的方法和原理以及性能预测模型。对长期传感性能演化的扩展研究将为进一步理解和调整传感性能以及建立性能预测模型提供指导。如图 5 所示, 通过将 SSUHPC 采集到的原位荷载和环境频谱与实验获得的物理方程/模型相结合, 可用于实现当前结构状态评估和未来结构状态预测。

6) SSUHPC 应用范围扩展。SSUHPC 的传感信号形式大多是力学参数。有必要扩展其传感参数, 如钢筋[如钢筋和纤维增强聚合物(FRP)钢筋]与混凝土之间的黏结和锚固状态, 以及耐久性 or 环境参数(如 pH 值和离子浓度, 这在隧道渗漏监测方面具有应用潜力)。

7) 基于 SSUHPC 的智能结构系统的设计、优化和软硬件集成方法。设计和优化方法对确保智能结构系统的有效性和效率至关重要。这包括对 SSUHPC 的浇筑和特性结合具体工程实际进行调整,

以及开发算法来有效利用采集的数据。硬件-软件集成是另一个重要方面,它包括开发接口和通信协议,实现与外部监控设备和数据处理系统进行交互。设

计、优化和软硬件集成方法力求最大限度地提高结构健康监测系统的准确性和可靠性,同时最大限度地降低资源消耗和维护要求。

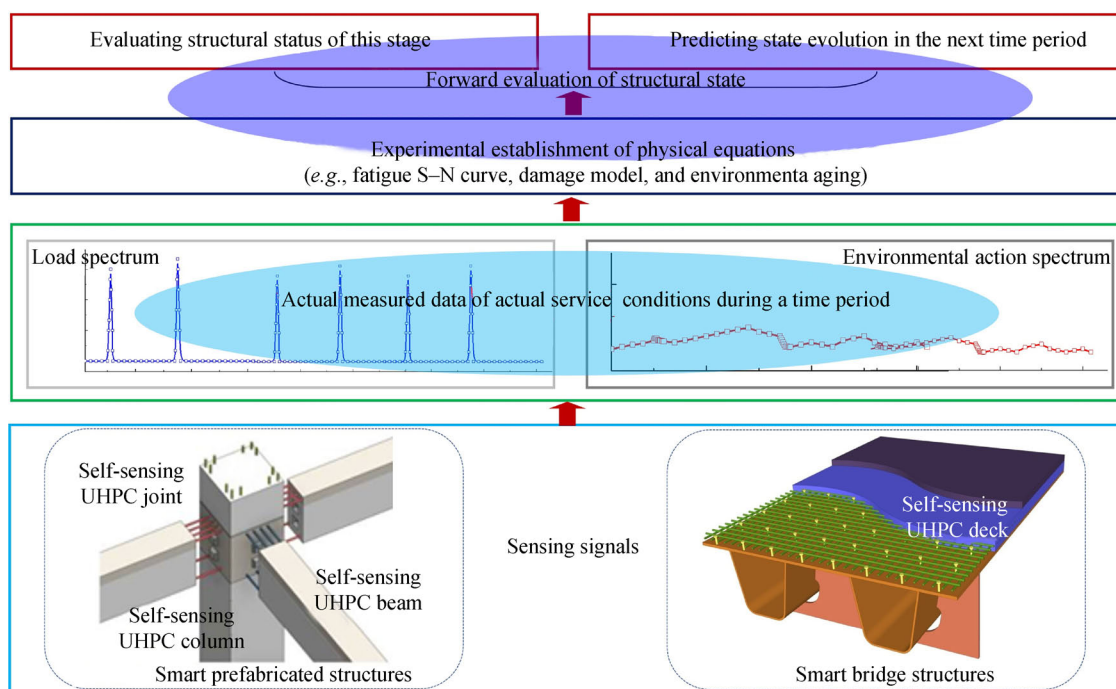


图5 基于SSUHPC原位监测数据的基础设施状态评估路线^[80]

Fig. 5 Evaluation approach for infrastructure state based on in-situ monitoring of SSUHPC^[80]

8) SSUHPC及其智能结构的多尺度、多物理场数值模拟方法。为统一SSUHPC材料和结构在不同层面的材料特性和结构行为,需考虑多尺度现象以全面理解多物理场下的SSUHPC材料与结构的行为。

9) 建立集成数字孪生模型的SSUHPC传感信号的结构健康监测和安全评估方法,以及基础设施的智能运行和管理方法。如图6所示,实际传感数据可反馈到数字孪生模型中,然后利用数字孪生模型对结构进行模拟和监测。通过与实际传感数据进行比较,并借助人工智能、大数据和机器学习等先进技术评估模型的准确性。基于数字孪生模型,可在数字空间中模拟基础设施,并将相应参数传输到施工中,而为施工过程提供指导。基础设施建设完成后,数字基础设施和真实基础设施在日常运行和维护中继续交换信息,包括可能出现的损伤(如裂纹和疲劳等),以提供实时的维护建议并优化维护计划,从而延长其使用寿命和降低维护成本。

10) SSUHPC的应用形式和领域扩展和延伸。

如可利用SSUHPC开发预制构件或装配式结构的现浇节点,且将其仅用于关键结构构件/节点,实现分布式传感并减少SSUHPC的用量;同时,预制可以提高SSUHPC水化程度而保证感知信号的稳定性。结合从实验室结果中获得的SSUHPC劣化模型,可实现生命周期评估和多参数获取(如车速、流量和动态承重);也可用于制造智能混凝土制品,如砌块和砖块(带接口和封装的标准传感器);还可用于高速铁路、公路和地铁(如轨道板、枕木)^[81–82]、机场(如跑道和场地地面)、核电站(如安全壳)、地下管廊和海上结构(如海上漂浮结构、海上风机)等重要结构。此外,开发FRP[如玻璃纤维增强材料(GFRP)、碳纤维增强材料(CFRP)]筋增强SSUHPC构件/结构,可避免钢筋短路或需要额外绝缘处理等问题;同时,SSUHPC与导电FRP加固相结合,可实现对构件/结构的整体监测^[62]。

11) SSUHPC及其智能结构的相关规程、规范和标准制定和建立。应广泛地开展SSUHPC在不同领域中的实际应用,通过应用检验其原位监测效果,发现问题并进行解决和完善,以促进SSUHPC应用

成套技术的建立以及相关法规和标准的形成。

12) 发展面向未来信息环境的“数智化”和韧性基础设施。SSUHPC 可为实现“物-结构-环境”的精细化感知、深度融合与协同工作, 以及基础设施与

泛在网络的融合发展提供物质基础, 如“结构-人”、“路桥结构-车辆/机器”、“轨道结构-列车”的互联与实时信息共享, 以及智能结构与通信系统的物理信息融合等^[81, 83-84]。

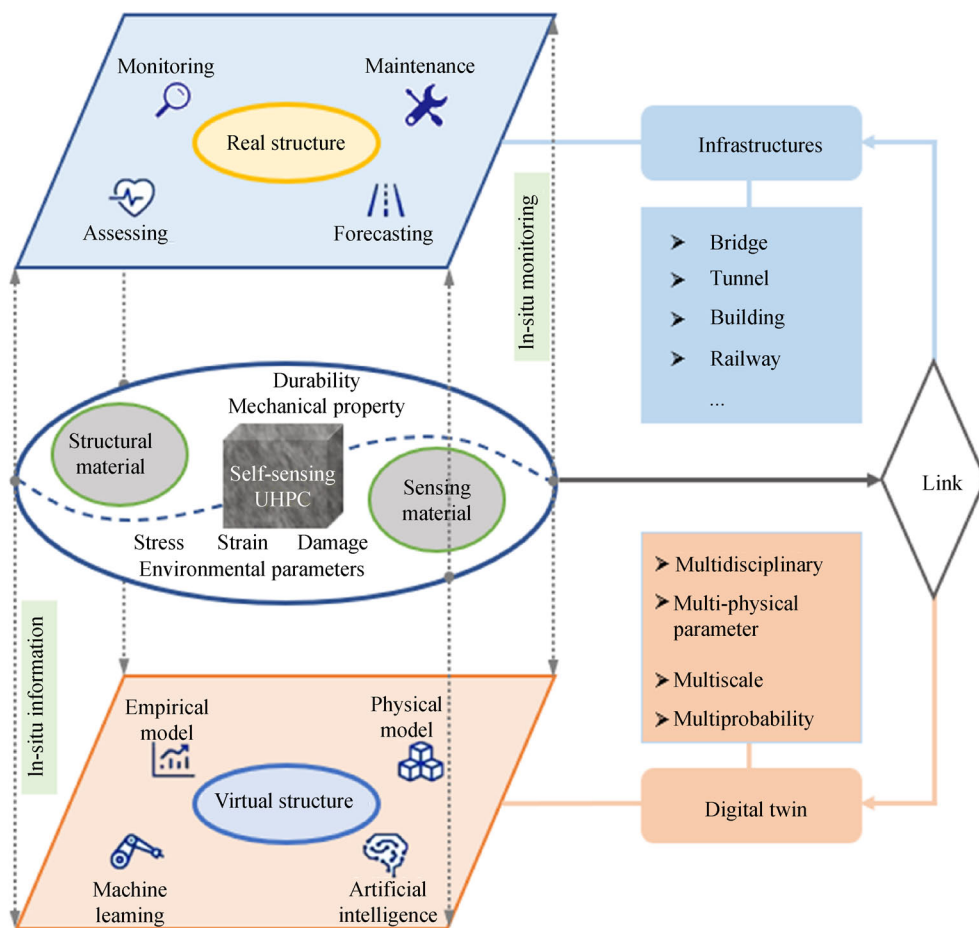


图 6 基于 SSUHPC 和数字孪生模型发展智能和韧性基础设施的构想^[80]

Fig. 6 A concept of developing intelligent and resilient infrastructures based on the integration of SSUHPC and digital twin^[80]

4 结论

功能填料, 如钢纤维以及复合石墨烯及碳纳米管等, 通过向 UHPC 引入大量自由移动的电子, 成了 UHPC 导电“基因”, 构成了 UHPC 第 4 类导电通路, 即功能填料本征导电通路。功能填料同时赋予了 UHPC 良好力学性能、耐久性能及感知性能, 能够实现原位监测荷载和环境对基础设施的影响, 进而为基础设施的运营和维护提供数据支持, 从而实现基础设施的“数智化”。SSUHPC 作为一种具有数字特性的高性能/智能/多功能材料, 有望突破传统意义上功能材料和结构材料的界限, 实现结构-功能一体化和功能多样化, 从而推动土木工程领域的范式转变。

参考文献:

- [1] KHAYAT K H, MENG W N, VALLURUPALLI K, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete: An overview[J]. Cem Concr Res, 2019, 124: 105828.
- [2] LEE S J, YOU I, KIM S, et al. Self-sensing capacity of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete containing conductive powders in tension[J]. Cem Concr Compos, 2022, 125: 104331.
- [3] DU J, MENG W N, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Compos Part B Eng, 2021, 224: 109220.
- [4] LIAO K Y, CHANG P K, PENG Y N, et al. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(6): 977-989.
- [5] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 741-751.
- [6] SCHMIDT M, FEHLING E. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe [J]. ACI Special Publication, 2005, 228: 51-78.

- [7] TAM C M, TAM V W Y, NG K M. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong [J]. *Constr Build Mater*, 2012, 26(1): 79–89.
- [8] SONG G L. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(11): 1723–1730.
- [9] SUN T, WANG X Y, ASHOUR A, et al. Sustainable ultra-high-performance concrete materials and structures[M]//*Sustainable Concrete Materials and Structures*. Amsterdam: Elsevier, 2024: 487–529.
- [10] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. *Cem Concr Res*, 1995, 25(7): 1501–1511.
- [11] BACH1E H H. Densified cement ultra-fine particle-based materials[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, Canada, 1981.
- [12] BIRCHALL J D, HOWARD A J, KENDALL K. Flexural strength and porosity of cements[J]. *Nature*, 1981, 289(5796): 388–390.
- [13] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. *Cem Concr Res*, 1994, 24(6): 997–1009.
- [14] CHEYREZY M, MARET V, FROUIN L. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete)[J]. *Cem Concr Res*, 1995, 25(7): 1491–1500.
- [15] RONG Z D, SUN W, ZHANG Y S. Dynamic compression behavior of ultra-high performance cement based composites[J]. *Int J Impact Eng*, 2010, 37(5): 515–520.
- [16] MAO L, BARNETT S J, TYAS A, et al. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 93: 822–830.
- [17] PYO S, EL-TAWIL S. Capturing the strain hardening and softening responses of cementitious composites subjected to impact loading[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 81: 276–283.
- [18] 余自若, 安明喆, 阎贵平. 活性粉末混凝土的疲劳性能试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(4): 35–40.
YU Ziruo, AN Mingzhe, YAN Guiping. *China Railw Sci*, 2008, 29(4): 35–40.
- [19] 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. *J Build Mater*, 2022, 25(4): 381–388.
- [20] 王瑞敏, 赵国藩, 宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. *土木工程学报*, 1991, 24(4): 38–47.
WANG Ruimin, ZHAO Guofan, SONG Yupu. *China Civ Eng J*, 1991, 24(4): 38–47.
- [21] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 79: 148–157.
- [22] DING S X, DONG S F, WANG X Y, et al. Self-heating ultra-high performance concrete with stainless steel wires for active deicing and snow-melting of transportation infrastructures[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 138: 105005.
- [23] XI B, AL-OBALDI S, FERRARA L. Effect of different environments on the self-healing performance of ultra high-performance concrete—A systematic literature review[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 374: 130946.
- [24] GUO Y X, WANG D Y, ASHOUR A, et al. Self-sensing ultra-high performance concrete: A review[J]. *Meas Sci Technol*, 2024, 35(3): 032003.
- [25] YOO D Y, YOON Y S. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *Int J Concr Struct Mater*, 2016, 10(2): 125–142.
- [26] BAE Y, PYO S. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance[J]. *Eng Struct*, 2020, 210: 110374.
- [27] YOO D Y, CHUN B, KIM J J. Effect of calcium sulfoaluminate-based expansive agent on rate dependent pullout behavior of straight steel fiber embedded in UHPC[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 122: 196–211.
- [28] BAE Y, PYO S. Effect of steel fiber content on structural and electrical properties of ultra high performance concrete (UHPC) sleepers[J]. *Eng Struct*, 2020, 222: 111131.
- [29] ZHOU M, LU W, SONG J W, et al. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 186: 1256–1267.
- [30] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬, 等. 正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(2): 40–45.
SHAO Xudong, CAO Junhui, YI Dutao, et al. *China J Highw Transp*, 2012, 25(2): 40–45.
- [31] NGUYEN K, FREYTAG B, RALBOVSKY M, et al. Assessment of serviceability limit state of vibrations in the UHPFRC-Wild bridge through an updated FEM using vehicle-bridge interaction[J]. *Comput Struct*, 2015, 156: 29–41.
- [32] BIERWAGEN D, ABU-HAWASH A. Ultrahigh-performance concrete highway bridge[C]// *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, America, 2005.
- [33] CHEN B C, HUANG Q W, WANG Y Y, et al. Design and construction of the first UHPC arch bridge in China[J/OL]. *J China Foreign Highway*, 2021–11–19. <https://zwgl.csust.edu.cn/zwglen/article/abstract/20210831001>
- [34] AZMEE N M, SHAFIQ N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2018, 9: e00197.
- [35] TANAKA Y, MAEKAWA K, KAMEYAMA Y, et al. The Innovation and Application of UHPFRC Bridges in Japan [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- [36] HABER Z B, MUNOZ J F, DE LA VARGA I, et al. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 190: 1056–1068.
- [37] LI L, WANG Y, ZHENG W Z. State of the art of durability of reactive powder concrete [J]. *Indust Constr*, 2008, S1: 773–776.
- [38] BHUSARI J P, S G K. A state of the art report on ultra high performance concrete: Reactive powder concrete[J]. *IOSR J Eng*, 2017, 7(5): 1–6.
- [39] CHEN P W, CHUNG D D L. Concrete as a new strain/stress sensor[J]. *Compos Part B Eng*, 1996, 27(1): 11–23.
- [40] FU X L, CHUNG D D L. Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar[J]. *Cem Concr Res*, 1997, 27(9): 1313–1318.
- [41] WEN S H, CHUNG D D. Effects of strain and damage on strain-sensing ability of carbon fiber cement[J]. *J Mater Civ Eng*, 2006, 18(3): 355–360.
- [42] HAN B G, DING S Q, YU X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review[J]. *Measurement*, 2015, 59: 110–128.
- [43] XU J, ZHONG W H, YAO W. Modeling of conductivity in carbon fiber-reinforced cement-based composite[J]. *J Mater Sci*, 2010, 45(13): 3538–3546.

- [44] HAN B G, YU X, OU J P. Self-Sensing Concrete in Smart Structures[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015
- [45] HAN B G, ZHANG L Q, OU J P. Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2017.
- [46] HAN B G, DING S Q, WANG J L, et al. Nano-Engineered Cementitious Composites: Principles and Practices[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2019.
- [47] HAN B G, OU J P. Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor[J]. Sens Actuat A Phys, 2007, 138(2): 294–298.
- [48] MAO Q Z, ZHAO B Y, SHENG D R, et al. Resistance chagement of compression sensible cement speciment under different stresses[J]. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 1996, 11(3).
- [49] HAN B G, DING S Q, SUN S W, ZHANG L Q, OU J P. Chemical modification of carbon nanotubes/nanofibers for application in cement and concrete field[M]//Chemical Functionalization of Carbon Nanomaterials. Boca Raton: CRC Press, 2015: 774–799.
- [50] HAN B G, YU X, OU J P. Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites[J]. J Mater Sci, 2010, 45(14): 3714–3719.
- [51] DONG S F, HAN B G, OU J P, et al. Electrically conductive behaviors and mechanisms of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. Cem Concr Compos, 2016, 72: 48–65.
- [52] NGUYEN D L, SONG J D, MANATHAMSOMBAT C, et al. Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension[J]. Compos Part B Eng, 2015, 69: 159–168.
- [53] DONG S F, DING S Q, HAN B G, et al. Multifunctional super-fine stainless wires reinforced UHPC for smart prefabricated structures[M]//European Workshop on Structural Health Monitoring. Cham: Springer International Publishing, 2022: 794–804.
- [54] VIET L, HYUNG L, JOO K. Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes[J]. Sens Actuat A Phys, 2020, 305: 111925.
- [55] HUSSAIN A, XIANG Y, YU T, et al. Nanocarbon black-based ultra-high-performance concrete (UHPC) with self-strain sensing capability[J]. Constr Build Mater, 2022, 359: 129496.
- [56] SONG F C, CHEN Q, JIANG Z W, et al. Piezoresistive properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete incorporating few-layer graphene[J]. Constr Build Mater, 2021, 305: 124362.
- [57] LEE S H, KIM S, YOO D Y. Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 185: 530–544.
- [58] LE H V, KIM M K, KIM S U, et al. Enhancing self-stress sensing ability of smart ultra-high performance concretes under compression by using nano functional fillers[J]. J Build Eng, 2021, 44: 102717.
- [59] SUN M Q, LIEW R J Y, ZHANG M H, et al. Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 65: 630–637.
- [60] YOU I, YOO D Y, KIM S, et al. Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2481.
- [61] DONG S F, WANG X Y, HAN B G. Stainless Steel Wires-Engineered Multifunctional Ultra-High Performance Concrete[M]. Boca Raton: CRC Press, 2023. <https://doi.org/10.1201/9781003276357>
- [62] QIU L S, DONG S F, YU X, et al. Self-sensing ultra-high performance concrete for *in situ* monitoring[J]. Sens Actuat A Phys, 2021, 331: 113049.
- [63] SONG J D, NGUYEN D L, MANATHAMSOMBAT C, et al. Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites[J]. J Compos Mater, 2015, 49(29): 3621–3634.
- [64] JUNG M, PARK J, HONG S G, et al. Electrically cured ultra-high performance concrete (UHPC) embedded with carbon nanotubes for field casting and crack sensing[J]. Mater Des, 2020, 196: 109127.
- [65] YOO D Y, KIM S, LEE S H. Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension[J]. Sens Actuat A Phys, 2018, 276: 125–136.
- [66] RUAN Y F, HAN B G, YU X, et al. Carbon nanotubes reinforced reactive powder concrete[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2018, 112: 371–382.
- [67] VALVERDE D, GARCÍA N, TORRENTS J M, et al. Piezoresistive response and self-sensing properties of UHPC reinforced with recycled carbon fibers[J]. Constr Build Mater, 2024, 448: 138171.
- [68] WANG D Y, DONG S F, WANG X Y, et al. Sensing performances of hybrid steel wires and fibers reinforced ultra-high performance concrete for *in situ* monitoring of infrastructures[J]. J Build Eng, 2022, 58: 105022.
- [69] LI X P, LI M. Multifunctional self-sensing and ductile cementitious materials[J]. Cem Concr Res, 2019, 123: 105714.
- [70] DÍAZ B, GUTIÁN B, NÓVOA X R, et al. Analysis of the microstructure of carbon fibre reinforced cement pastes by impedance spectroscopy[J]. Constr Build Mater, 2020, 243: 118207.
- [71] TALLMAN T N, SMYL D J. Structural health and condition monitoring *via* electrical impedance tomography in self-sensing materials: A review[J]. Smart Mater Struct, 2020, 29(12): 123001.
- [72] GUPTA S, GONZALEZ J G, LOH K J. Self-sensing concrete enabled by nano-engineered cement-aggregate interfaces[J]. Struct Health Monit, 2017, 16(3): 309–323.
- [73] HALLAJI M, SEPPÄNEN A, POUR-GHAZ M. Electrical impedance tomography-based sensing skin for quantitative imaging of damage in concrete[J]. Smart Mater Struct, 2014, 23(8): 085001.
- [74] KARHUNEN K, SEPPÄNEN A, LEHIKONEN A, et al. Electrical resistance tomography imaging of concrete[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(1): 137–145.
- [75] OU J P, HAN B G. Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components[J]. J Intell Mater Syst Struct, 2009, 20(3): 329–336.
- [76] DING S Q, XU C, NI Y Q, et al. Extracting piezoresistive response of self-sensing cementitious composites under temperature effect *via* Bayesian blind source separation[J]. Smart Mater Struct, 2021, 30(6): 065010.
- [77] CHANG C, SONG G B, GAO D, et al. Temperature and mixing effects on electrical resistivity of carbon fiber enhanced concrete[J]. Smart Mater Struct, 2013, 22(3): 035021.
- [78] ZHOU Z L, XIE N, CHENG X, et al. Electrical properties of low dosage carbon nanofiber/cement composite: Percolation behavior and polarization effect[J]. Cem Concr Compos, 2020, 109: 103539.
- [79] WANG X N, FENG D C, MENG J, et al. Double percolation phenomenon of carbon nanotube/cement composites as piezoresistivity sensing elements with exposure to salt environment[J]. Cem Concr Compos, 2024, 147: 105401.
- [80] WANG X Y, DING S Q, NI Y Q, et al. Intrinsic self-sensing concrete to energize infrastructure intelligence and resilience: A review[J]. J Infrastruct Intell Resil, 2024, 3(2): 100094.

- [81] DING S Q, XIANG Y, NI Y Q, et al. *In-situ* synthesizing carbon nanotubes on cement to develop self-sensing cementitious composites for smart high-speed rail infrastructures[J]. *Nano Today*, 2022, 43: 101438.
- [82] HAN B G, YU X, KWON E. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring[J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(44): 445501.
- [83] QIN H Y, DING S Q, ASHOUR A, et al. Revolutionizing infrastructure: The evolving landscape of electricity-based multifunctional concrete from concept to practice[J]. *Prog Mater Sci*, 2024, 145: 101310.
- [84] DING S Q, WANG X Y, QIU L S, et al. Self-sensing cementitious composites with hierarchical carbon fiber-carbon nanotube composite

fillers for crack development monitoring of a maglev girder[J]. *Small*, 2023, 19(9): 2206258.

作者贡献声明:

李林威: 初稿撰写、修改、校对

丁思齐: 构思、指导、修改、校对

王欣悦: 绘制图表、修改

张立卿: 修改

荣 辉: 修改指导

李洪艳: 修改

冉千平: 修改指导

韩宝国: 总体规划、修改指导、校对

Research Progress on Intrinsic Self-Sensing Ultra-High Performance Concretes

LI Linwei^{1,2}, DING Siqi³, WANG Xinyue⁴, ZHANG Liqing⁵, RONG Hui¹, LI Hongyan⁶, RAN Qianping⁶, HAN Baoguo²

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. Department of Civil and Environment Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 4. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 6. State Key Laboratory of Engineering Materials for Major Infrastructure, School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Extended Abstract

Ultra-high performance concrete (UHPC) is fabricated *via* optimizing the fineness and reactivity of its constituents and employing thermal curing to modify the composition and structure of hydration products. These techniques minimize internal defects, resulting in a highly homogeneous and dense matrix with strong matrix-aggregate interfacial bonding. Also, the use of steel fibers effectively addresses the inherent brittleness, low tensile, and poor impact resistance of conventional cementitious materials. Consequently, UHPC exhibits exceptional mechanical properties, durability, and workability, while possessing the intrinsic material “gene” necessary for the development of self-sensing capabilities. Self-sensing ultra-high performance concrete (SSUHPC) extends the functionality of conventional UHPC *via* enabling *in-situ* self-monitoring, thereby providing a guarantee for enhancing safety and service life of UHPC structures. SSUHPC can be also implemented as an integrated structural element, surface coating, prefabricated component, or embedded sensors within infrastructure, providing a solution for the advancement of digital-intelligent infrastructure.

This review comprehensively represents the material composition, self-sensing properties and mechanisms, engineering applications, current challenges, and future strategies for SSUHPC. The existing research status of SSUHPC is summarized. The composition, fabrication, microstructure and performance characteristics of UHPC are analyzed, highlighting its intrinsic material “gene” that underpins the development of SSUHPC. The primary and most crucial material “gene” is steel fibers, which provide both excellent mechanical properties and electrical conductivity. Their one-dimensional morphology allows a uniform dispersion within the matrix, forming and strengthening the conductive network. The same important material “gene” is the sole use of fine aggregates without coarse aggregates, which avoids a disruption of the conductive network and enhances its integrity. In addition, highly reactive fine components, such as silica fume and mineral powder, can be also regarded as the third material “gene” due to the compact microstructure that supports the long-term stability of self-sensing properties. The review further discusses the role of functional fillers, particularly carbon-based fillers like carbon black and graphene, which complement steel fibers to establish robust conductive networks. These fillers introduce a large number of free electrons, forming the fourth conductive pathway, *i.e.*, intrinsic conductive pathway of functional fillers, which synergistically improves both mechanical properties and self-sensing capabilities of SSUHPC. The sensing properties (*i.e.*, sensing properties under compression, tension, and bending) of SSUHPC are reviewed, along with the underlying mechanisms and influencing factors. The sensing properties under compression arise from a reduction in filler spacing, which enhances contact conductivity, quantum tunneling, and field emission effects, thereby decreasing electrical resistivity. Sensing properties under tension are primarily governed by the disruption of conductive pathways due to microcracking and filler-matrix interface debonding, resulting in an increased electrical resistivity. The dense microstructure and high elastic modulus of SSUHPC limit its compressive deformation, resulting in a less pronounced sensing performance under compression, compared to under tension, which is better captured due to the material’s inherent brittleness. This is because the fractional resistivity change can accurately characterize the entire tensile behavior from elastic deformation, plastic deformation to failure of SSUHPC, and even allow for quantitative characterization. Sensing properties under flexure represent a combination of the characteristics observed in both the

compressive and tensile zones. Regardless of load type, the material “gene”, *i.e.*, functional filler composition and content, fundamentally governs the sensing properties, followed by environment factors (*i.e.*, temperature and humidity) and measurement methods (*i.e.*, electrode materials and configurations). The resistance measurements can reveal percolation threshold and dominant conductive mechanism (*i.e.*, ionic or electronic conduction) of SSUHPC, providing a theoretical foundation for optimizing the material design and measurement protocols. For instance, if ionic conduction is dominant, appropriate testing methods (*i.e.*, measurement after drying) can improve the repeatability of sensing performance and reduce noise, or improving a functional filler content to shift ionic conduction to electronic conduction. Finally, the review summarizes the challenges of SSUHPC in the existing scientific research and engineering applications, proposes the corresponding strategies, and draws future development roadmaps. Some key areas include large-scale and low-cost manufacturing, in-depth understanding of sensing mechanisms and modeling, long-term sensing capacity and evolution models, design/optimization/software/hardware integration of intelligent structural system, development of “digital-intelligence” and resilient infrastructure for the future information environment, and development and establishment of relevant regulations/specifications/standards.

Summary and prospect Functional fillers, such as steel fibers, graphene, and carbon nanotubes, introduce a large number of free electrons into UHPC, becoming a conductive material “gene” of UHPC for the establishment of the intrinsic conductive path. The material “gene” simultaneously endows UHPC with excellent mechanical, durability, and sensing capabilities, facilitating *in-situ* monitoring of the impacts of loads and environment on infrastructure. This provides a crucial data support for infrastructure operation and maintenance, paving a way for infrastructure “digital-intelligence”. SSUHPC as a high-performance/intelligent/multifunctional material with digital-intelligent characteristics is expected to transcend the boundaries between functional and structural materials, achieving structural-functional integration and functional diversification, thereby driving a paradigm shift in the field of civil engineering.

Keywords ultra-high performance concrete; intrinsic self-sensing; *in-situ* monitoring; intelligent; infrastructure