



超高性能混凝土(UHPC)力学性能研究进展

陈建康*

宁波大学, 宁大·宏日UHPC力学联合研究院, 宁波 315211

*联系人, E-mail: chenjiankang@nbu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-06; 接受日期: 2023-10-12; 网络出版日期: 2024-04-29

国家自然科学基金(编号: 11832013)资助项目

摘要 基于最紧密堆积理论的超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)的概念自20世纪70年代被提出以来, 针对该混凝土的理论研究和工程应用都取得了突破性的进展. 本文综述了近半个世纪, 特别是近十年来超高性能混凝土力学性能的研究进展, 包括: (1) 准静态荷载作用下UHPC的力学性能; (2) 冲击与爆炸荷载下UHPC的力学响应; (3) UHPC力学性能的耐久性. 最后, 对今后UHPC力学性能的研究给出了展望.

关键词 混凝土, 超高性能, 拉伸强度, 拉伸韧性, 动态响应, 抗腐蚀性能

PACS: 62.20.De, 62.20.Fe, 62.20.Mk, 66.10.Cb

1 引言

混凝土是四大结构材料之一, 也是世界上用量最大的结构材料. 我国是基建强国, 混凝土的用量占全球的60%, 所以混凝土的力学性能及其演化应该引起力学研究者的重视. 通常混凝土具有较好的抗压性能, 但是抗拉能力非常差, 普通混凝土的抗拉强度仅为1–2 MPa. 这是因为即便是搅拌充分且养护得当, 混凝土内部也存在大量的缺陷, 如孔洞和裂纹, 尤其是粗骨料与水泥砂浆之间的界面过渡区存在大量缺陷. 对于混凝土而言, 其拉伸强度对材料的缺陷极为敏感, 导致混凝土的拉伸强度很低. 钢筋混凝土虽然充分应用了混凝土良好的抗压性能和钢筋的抗拉性能, 但是未能彻底解决混凝土的裂缝问题, 所以通常钢筋混凝土

结构是允许混凝土带裂缝服役的, 只要裂缝宽度控制在亚毫米量级. 带来的问题是, 带裂缝的混凝土结构容易被碳化和渗水, 在腐蚀环境下裂缝的存在更易于侵蚀性离子在材料中的扩散导致钢筋锈蚀, 从而降低耐久性. 于是, 人们一直致力于研发具有较高韧性、较高强度的混凝土. 超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)的基本理论自20世纪70年代末被提出以来, 就一直被关注、被不断完善, 并逐步开始在工程中应用^[1].

1979年, 丹麦学者Bache^[2]申请了基于小颗粒致密填充水泥的技术专利, 并开创性地提出了小颗粒致密化理论(Densified System with ultra-fine Particles, DSP). 此后, 丹麦开始了相关研究, 并将这种新型混凝土材料称为密实增强复合材料或新型混凝土. 我们知

引用格式: 陈建康. 超高性能混凝土(UHPC)力学性能研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 254609

Chen J K. Advances in the mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 254609, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0283](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0283)

道, 水化后的水泥颗粒(水泥石)的尺寸通常在 $5\sim 10\ \mu\text{m}$, 水泥石之间存在大量的微米级空隙^[3], 具体见图1. DSP的基本思想是用尺度为 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的矿粉颗粒填充水泥石的间隙, 用尺度为 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 的硅灰颗粒填充矿粉颗粒之间的空隙, 形成密实增强的复合材料(图2), 所以DSP也被称为最紧密堆积理论. 如果在这种密实材料中再添加适量的增强短纤维, 将会大大提高材料的力学性能.

作为新型超高性能水泥基复合材料, UHPC的超高性能主要来自两个方面^[4]: 一是以水泥、超细粉体、细填料、细骨料、纤维、高性能减水剂为主要原材料复合而成的高性能基体, 与传统的普通混凝土相比, 该基体通常不加入粗骨料, 这样就消除了粗骨料与基体之间界面过渡区的缺陷, 从而提高材料的力学性能. 二是较高抗拉伸性能的短纤维, 比如金属类的钢纤维, 无机类的玻璃纤维、碳纤维, 有机类的聚乙烯纤维、聚丙烯纤维等. 因此, UHPC本质上是纤维增强的超塑化混凝土.

事实上, 水泥基材料的微结构能够决定材料的宏观性能和力学性能(如强度、模量、断裂韧性等). 材料的微结构密实意味着缺陷少. 通过一定的途径, 提高材料的均匀性和密实性, 减少材料内部的孔隙和缺陷, 可以提高材料的性能. 这需要合理设计胶凝体系的颗粒级配, 充分发挥不同级配颗粒的相互填充作用, 以凸显细集料效应, 从微米尺度大大降低材料的初始缺陷, 显著提高材料的宏观力学性能.

根据这一思路, 各国开展了UHPC材料性能的研究. 根据文献^[1]所提供的信息, 20世纪90年代, UHPC成为法国工程界的研究热点. 学者们对活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)进行了研究, 发表了一系列相关论文并获得了相关的专利, 促进了UHPC在全世界范围的推广. UHPC名称是由法国学者于1994年提出的, 能够更好地表达此种混凝土材料的优越性能, 后逐渐被广泛接受和采用^[5]. 随后, 美国、加拿大和欧洲开始了UHPC性能的测试与工程应用. 我国从20世纪90年代起就自主研发UHPC, 2015年颁布了关于UHPC的国家标准, 2018年又颁布了中国建筑材料联合会协会标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》. 研究成果应用于多个大型桥梁工程中^[6,7].

近十年来, 研究者对于UHPC的力学性能研究逐步深入, 包括准静态力学性能、冲击与爆炸条件下的

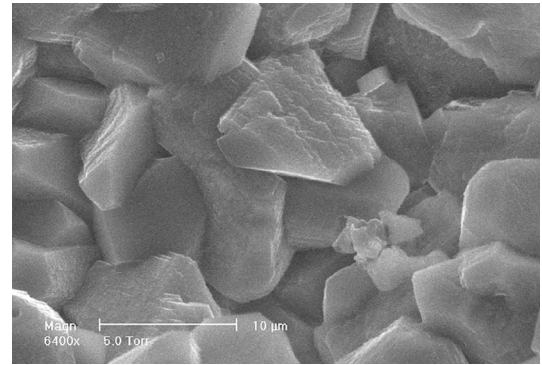


图1 水泥石SEM图片

Figure 1 SEM image of cement stone.

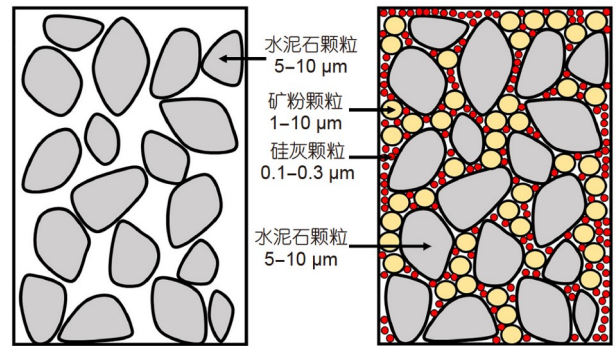


图2 (网络版彩图)小颗粒致密填充水泥示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of small particle dense filling cement.

动态力学性能、UHPC耐久性以及实验方法等. 本文试图梳理总结这方面的研究成果, 为学术界和工程界提供参考.

2 UHPC的准静态力学性能

材料的准静态力学性能是惯性效应可以忽略的力学性能. UHPC的准静态力学性能的研究较早起始于丹麦学者Bache^[2], 他通过使用普通砂石骨料和亚微米材料硅灰以及高效减水剂, 配制出超高强度混凝土(第二天的抗压强度就可达到128 MPa). 这说明, UHPC的抗压性能远远超出普通混凝土. 到了21世纪, UHPC在准静态荷载下的力学性能的研究已经基本完善. 本节具体介绍UHPC的压缩强度、拉伸强度和剪切强度, 以及增强纤维与基体材料之间的界面力学行为研究进展.

2.1 UHPC的压缩性能

在UHPC受压情况下的力学性能研究方面, 重点研究放在了材料设计与受压性能关联关系方面. 例如, Wille等人^[8]研究了水胶比对材料抗压强度的影响, 水胶比不仅影响UHPC的流动性, 也影响固化后的强度. 水胶比增大改善了UHPC的流动性, 但也降低了材料的强度. 特别是当水胶比减小到一定程度时难以搅拌均匀, 延长搅拌时间会导致过多气泡进入基体, 增加了材料的缺陷, 材料的抗压强度反而会降低^[9]. Li等人^[10]讨论了粗骨料是否可以加入UHPC的问题. 研究发现, 适量加入粗骨料可以减少胶凝材料的用量, 并可提高UHPC的弹性模量^[11,12]. 此外, 不同石材的粗骨料也会影响UHPC的抗压性能. 例如, Piasta等人^[13]研究了玄武岩粗骨料对UHPC的影响, 发现可以提高UHPC的模量. Wu等人^[14]则在粗骨料的选择上采用了花岗岩和玄武岩, 发现UHPC的抗压强度和抗弯强度相对更高. 以上研究表明, 水胶比和骨料是制备高弹模和高强UHPC的关键因素. 最近, 欧阳雪等人^[15]进一步分析了不同玄武岩骨料掺量和不同水胶比对UHPC受压力学性能的影响, 并给出了基于抗压强度的经验公式. 其实验得到的最高抗压强度可超过180 MPa.

以上研究是从抗压性能的角度讨论的UHPC材料设计, 没有涉及抗拉伸以及抗折性能的影响. 由于粗骨料界面过渡区缺陷的存在, 材料的拉伸强度和抗折强度对其极为敏感, 所以UHPC抗拉强度的研究引起了许多研究者的关注.

2.2 UHPC的拉伸性能

UHPC的拉伸强度通常采用对径受压的巴西圆盘测试方法确定(图3). 由弹性力学平面应力理论得到沿铅锤径线AB的水平方向的正应力是均匀分布的, 且表达式为

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi LD}, \quad (1)$$

式中 P 为压力, D 和 L 分别为圆盘的直径和厚度. 式(1)是测量混凝土拉伸强度的理论依据.

采用巴西圆盘的好处在于可以将拉伸强度的测试转为压缩荷载下的测试, 这种实验加载方式比较容易实现. 特别是对于混凝土、岩石、陶瓷类材料, 拉伸荷载容易在夹具处由夹持的接触应力作用产生损伤破

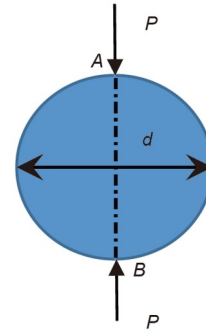


图3 (网络版彩图)巴西圆盘劈裂实验

Figure 3 (Color online) Brazilian disk splitting testing.

坏, 对于这类材料, 人们更倾向于采用巴西圆盘技术测量材料的拉伸强度. 对于接触应力所产生的损伤效应, 可以采用柔性垫片加以弱化, 在实验技术上容易实现. 比如, Guo等人^[16]采用这个技术给出了准静载(加载速率 $d\sigma/dt=6.4\times 10^{-5}$ GPa/s)条件下UHPC的力学响应. 在不添加短纤维的条件下, 材料的拉伸强度也达到了5.78 MPa, 远高于普通混凝土. 根据实验结果, 得到了材料的应力应变曲线, 并进行了材料的弹塑性分析.

需要指出的是, 尽管采用巴西圆盘实验方法确定硅酸盐材料和岩石类材料的拉伸强度是常用的方法, 但是这个方法建立在一个很强的假设基础之上: 铅锤方向的压应力(σ_y)对拉伸强度没有影响. 然而, Chen等人^[17]采用Eshelby等效夹杂理论的研究发现: 由于微缺陷的存在, 铅锤的压应力会在缺陷的两极密切面产生水平方向的拉应力, 从而影响材料的拉伸强度. 另外, 当圆盘试样出现裂纹, 对径受压线上的拉应力的均匀性就会遭到破坏, 在这种情况下式(1)不再成立. 因此, 巴西圆盘技术难以对UHPC的拉伸韧性做出评判和测试. 近年来, 人们尝试采用一维拉伸实验确定UHPC的拉伸性能^[18-21].

Jang等人^[18]采用直接拉伸实验的方法, 考察了钢纤维表面处理对UHPC的拉伸性能的影响. 他们采用氯化钠溶液腐蚀钢纤维, 以增加钢纤维表面的粗糙度, 从而提高钢纤维与水泥基材料的结合力. 实验结果表明, UHPC的拉伸曲线不同于普通混凝土的拉伸曲线. 对于普通混凝土, 拉伸应力达到峰值即断裂, 而UHPC达到峰值后, 还会出现长长的尾巴, 这就是材料的软化阶段. 图4是根据文献^[18]的实验结果绘出的UHPC单轴拉伸曲线, 不仅表明UHPC具有非常高的拉伸强度,

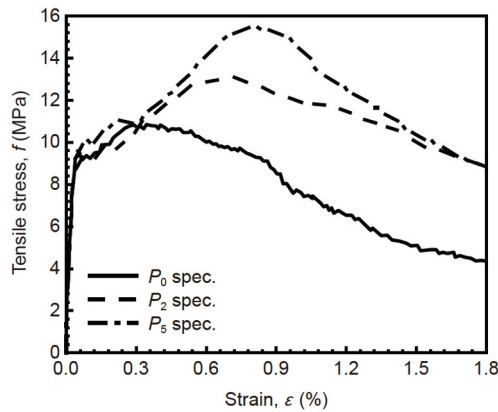


图 4 UHPC单轴拉伸曲线

Figure 4 Uniaxial tension curve of UHPC.

还具有非常高的拉伸韧性. 图4还说明钢纤维表面的粗糙度有助于提高UHPC的抗拉强度和拉伸韧性. 当钢纤维的腐蚀程度达到5%时, 试样拉伸曲线在应变为0.8%时拉伸强度超过15 MPa, 且在应变为1.8%时, 其仍有9 MPa的拉伸强度. 如果使用合适的钢纤维表面处理工艺(如SiO₂包覆处理), 其抗拉性能和韧性还能进一步提升.

Yoo等人^[19]利用直接拉伸实验考察了钢纤维腐蚀对超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)拉伸行为的影响, 得到了类似的结果. 实验采用了0%–8%五种不同腐蚀程度的宏观直钢筋纤维, 结果显示钢筋腐蚀程度在0%, 2%, 4%组别的UHPC最高抗拉强度可达15 MPa以上, 且具有较好的韧性, 以对照组为例, 其抗拉强度在应变为0.9%时达到峰值, 在应变为2.1%时, 其仍保持约9 MPa的抗拉强度.

UHPC优异的抗拉伸性能和韧性也在Shi等人^[20]、Hashimoto等人^[21]、Yoo等人^[22]的研究中得到佐证.

在一维拉伸实验技术方面, 日本土木工程协会(JSCE)于2008年发布的HPFRC设计指南^[23]中规定, 使用梯形过渡的哑铃试件开展直拉实验(图5(a)); 瑞士工程及建筑师学会(SIA)制定并颁布的SIA 2052-2016规范中^[24]采用弧形过渡的哑铃试件进行直拉实验(图5(b)); 也有研究者采用了阶梯形过渡的哑铃试件(图5(c))进行拉伸实验^[25]. 杨简等人^[26]采用数值方法分析了不同试样的应力分布, 得出的结论是, 弧形过渡的哑铃试样应力分布最均匀. 对于加载的夹具, 人们也尝试了四

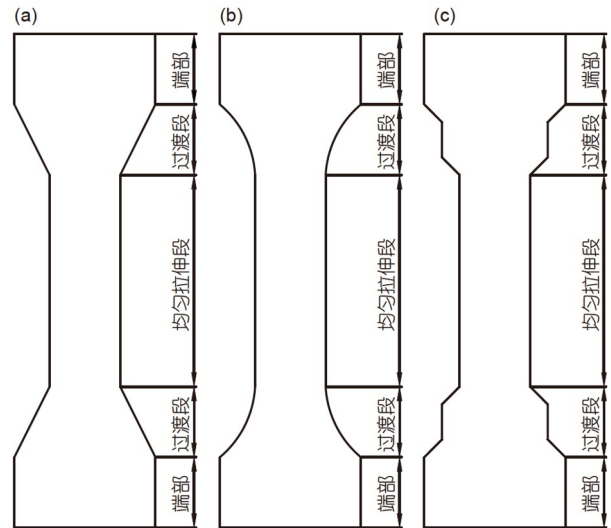


图 5 不同过渡区形状设计的哑铃试样. (a) 梯形过渡; (b) 弧形过渡; (c) 阶梯形过渡

Figure 5 Dumbbell samples designed with different transition zone shapes. (a) Trapezoidal transition; (b) arc transition; (c) step transition.

种: 面内夹持式、面外夹持式、埋入式和粘贴式^[27]. 实验证实, 面内夹持保证材料断裂破坏发生在均匀拉伸区的概率最高. 考虑到混凝土与岩石类材料容易在试样端部夹持处由于接触应力起裂破坏. 因此, 采用面内夹持连接方式时通常需要对试件变截面区进行局部加强处理. 常见的试件局部加强方式可大致分为: 内嵌式加强(预埋钢丝网片)和外粘式加强. 外粘式又包括柔性加强(粘贴碳纤维布)和刚性加强(粘贴铝片). 到目前为止, UHPC单向拉伸的实验方法和技术还在不断地探索之中.

2.3 UHPC的剪切强度

在UHPC剪切强度研究方面, Lukić和Forquin^[28]制作了冲切试样. 在材料设计中, 他们考虑了两种钢纤维含量, 分别为2%和0%的体积分数, 后者为对比相. 实验结果表明, 抗剪强度依赖于UHPC中的纤维含量. 纤维含量不同, 抗剪强度差异较大, 并给出了定量实验结果: 未添加钢纤维的试样最大剪切应力为45 MPa, 而添加2%体积纤维增强试样的最大剪切应力约为70 MPa, 抗剪强度较不添加钢纤维的试样提高了55.6%. 这一结果定量地表明钢纤维在UHPC中的重要作用.

纤维对UHPC的重要作用受两个因素制约: 一是纤维的含量与分布; 二是纤维与水泥基界面的结合力.

如果短纤维在材料中分布不均匀, 会导致材料的力学性能下降. 以钢纤维为例, 当钢纤维掺量较高时, 会诱发UHPC在浇筑过程中的流动性和纤维分布的缺陷, 包括纤维球化、纤维团聚、纤维分散不均匀、纤维取向相对规则等^[29-32]. Yoo等人^[33,34]重点研究了0%, 1%, 2%, 3%和4%钢纤维含量的UHPC的抗压强度和弹性模量. 研究表明, 含有3%钢纤维的试件表现出最佳的力学性能, 添加4%钢纤维明显恶化了UHPC的抗压强度, 因为纤维分布和流动性差.

短纤维与水泥基的界面结合力是UHPC高强度和高韧性的保证. 因此, 引起了人们对短纤维界面力学性能的关注. Chen等人^[35]采用八形试样测量嵌入UHPC中的单根纤维的界面黏结强度. 根据实验结果, 通过以下公式可以分析出界面结合强度和拔出能量:

$$\tau_f = F_{B,\max} / \pi d_f l_f, \quad (2)$$

$$W_{B,P} = \int_0^{l_f} F_B(s) ds, \quad (3)$$

其中 τ_f 是纤维与UHPC基体的结合强度, d_f 是纤维直径, l_f 是纤维的黏合长度, $F_{B,\max}$ 是最大黏结载荷, $W_{B,P}$ 是拔出能量, $F_B(s)$ 是黏结载荷和滑动位移的函数.

为了提高界面的结合强度, 他们采用双绞工艺处理了纤维. 实验证实, 双绞纤维因具有表面形状的复杂性, 提高了界面强度. 和普通纤维相比, 界面强度提高了177%, 拔出能提高了239%.

3 UHPC的动态力学性能

材料的动力学性能通常是指惯性效应不可忽略的力学性能. 具有UHPC的建筑物和防护项目在服役过程中通常会承受较高应变率的冲击载荷作用(如重物坠落、车辆冲击和爆炸等). 现有研究表明, UHPC在动态冲击荷载作用下表现出与准静态实验显著不同的结果, 应变率效应是使动力学性能不同于准静态性能的主要原因, 试样强度、裂纹扩展速度、吸能能力与破坏模式均受应变率影响^[36,37]. 因此, 了解UHPC在动态荷载作用下的力学性能对其结构设计与分析至关重要, 有必要总结和深化理解现有研究中UHPC在承受冲击与爆炸条件下的力学响应, 以促进其在工程领域的进一步应用与发展.

UHPC的动态力学性能研究主要包括冲击压缩、冲击拉伸、侵彻以及爆炸荷载下的力学响应.

3.1 冲击压缩

近年来, 有关UHPC动态压缩性能的研究已经进行了许多讨论^[38]. 为了准确讨论UHPC的抗冲击性能, 现在通常采用落锤和霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)技术分析材料的动态抗压强度、峰值应变、能量吸收和破坏形态, 应变率通常在 10^0-10^3 s^{-1} 范围.

动态增强因子(Dynamic Increase Factor, DIF)通常被用来量化应变率效应对混凝土动态性能的影响, 是动态与静态性能指标的比值, 该值与混凝土应变率相关. 研究表明, UHPC的DIF相对普通混凝土更低, Su等人^[39]发现抗压强度为110–145 MPa的UHPC试样在 $40-100 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内抗压强度的DIF值为1.2–1.8. Wu等人^[40]的研究结果表明, 抗压强度为150 MPa的UHPC试样在 $130-200 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内抗压强度的DIF值为1.1–1.5. 对于普通混凝土, 张永生^[41]的测试发现抗压强度为32.5 MPa的材料在 $50-200 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内抗压强度的DIF值为1.6–2.4. 大多数文献结果表明, 即便UHPC的动态抗压强度能够随着应变率的增大而上升, 但由于质量远优于普通混凝土, 其动态抗压强度难以出现翻倍增大的现象.

在UHPC中加入纤维、纳米材料等物质可以显著提升试样的抗冲击性能, 其中钢纤维对UHPC的动态性能贡献最大, 随机分布的钢纤维能够在试样当中起到抵御裂纹发展和限制试样横向变形的作用, 从而提高试样的抗冲击性能^[42]. Ren等人^[43]在应变率为 $17.6-328.4 \text{ s}^{-1}$ 的范围中讨论了两种典型的钢纤维(微直和钩状)和三种体积分数(0%, 1.0%和2.0%). 实验结果表明, 相同应变率下, UHPC试件的损伤程度随钢纤维含量的增加而减弱, 表明添加钢纤维可以减少试样的裂纹发展. 此外, 添加钢纤维的试样的动态抗压强度均得到不同程度的提高, 极限韧性随着钢纤维体积比的增加而逐渐增加, 其中微直钢纤维对抗压强度和韧性的提升最大. Zhang等人^[44]得到了相似的结论, 他们发现随着钢纤维体积分数的增加, UHPC抵抗SHPB反复冲击的次数明显增加, 且钢纤维可以降低试样的破碎程度, 保持试样的完整性.

近几年来, 在UHPC中的纳米材料对材料的动态

力学性能的影响引起了关注. 目前在UHPC中常用的纳米材料包括: 纳米SiO₂ (NS)、纳米CaCO₃ (NC)、石墨纳米片(Graphite Nanoplatelets, GNPs)、氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)、碳纳米管(Carbon Nanotubes, CNTs)、碳纳米纤维(Carbon Nanofibers, CNFs)等^[45]. 纳米材料可以通过填充孔隙来提高UHPC的致密程度, Wu等人^[46]通过压汞实验发现, 添加了NC或NS的UHPC试样孔隙率相对普通UHPC试件更低. 仵鹏涛等人^[47]发现纳米材料含量对UHPC动态强度和DIF影响明显, 纳米材料含量从1%增加到3%, 试样的动态抗压强度和DIF均有较大的提高. 但纳米材料在工程领域仍未得到广泛的应用, 尽管近年来许多研究人员提出了纳米材料的最佳剂量以增强UHPC的力学性能, 但由于其高昂的价格, 纳米材料通常仅在基体/纤维和基体/骨料等脆弱区域中使用.

3.2 冲击拉伸

动态抗拉强度是材料的主要力学性能指标, 与UHPC相关的许多性能优势都与其拉伸性能有关. 许多学者针对UHPC动态拉伸荷载作用下的力学性能进行了讨论^[48]. 为了充分分析UHPC在动态拉伸荷载作用下的力学性能响应, 现有研究通常使用SHPB和应变能框架冲击机(Strain Energy Frame Impact Machine, SEFIM)研究UHPC的动态拉伸行为, 进而讨论试样或结构的极限抗拉强度、开裂强度、DIF、能量吸收能力和破坏形态等关键指标.

与动态压缩的相关研究类似, UHPC在动态拉伸荷载作用下同样具有应变率敏感性, 在动态拉伸荷载作用下试样的拉伸强度大于准静态时的拉伸强度. 与准静态拉伸试件以主裂纹的扩展现象不同, 在动态拉伸中, 实验样品会发生裂纹群同时扩展的现象, 故在动态冲击拉伸下, UHPC表现出更高的抗拉强度和抗拉韧性. Wille等人^[49]研究了超高性能纤维增强混凝土(UHP-FRC)从准静态应变率(0.0001 s⁻¹)到地震应变率(0.1 s⁻¹)的动态拉伸行为. 结果表明, 随着应变率从准静态增加到地震速率, UHP-FRC的开裂后拉伸强度和能量吸收能力增加, 而UHP-FRC在地震速率下仍保持应变硬化拉伸行为并伴有多个微裂纹. Pyo等人^[50]则讨论了UHP-FRC在应变率90–146 s⁻¹范围内的直接拉伸行为, 结果表明, 对于使用钢纤维增强试样能够实现拉伸应变硬化行为, 峰值应力下的应变比普通混凝土

高两个数量级, 且UHP-FRC试样在冲击载荷下的能量吸收能力显著, 比准静态试样高出约一个数量级. Bindiganavile等人^[51]得到类似的结论, 他们发现含有6%的钢纤维的UHP-FRC在冲击载荷下产生的弯曲强度和韧性分别比普通纤维增强混凝土高两倍和四倍.

通过研究不同配方的UHPC试件的受拉破坏过程发现, 由于钢纤维(SF)表现出相对较高的模量和抗拉强度, 添加钢纤维是改善UHPC的拉伸性能和延展性的最佳方式. Zhao等人^[52]的研究结果表明, 在4.7–11.0 s⁻¹的平均应变率范围内, 使用1.5% SF增强材料使UHPC的动态劈裂强度和耗能分别提高了7%–29%和2.5%–41%. Su等人^[39]研究了不同纤维和纤维体积分数对UHPC动态拉伸性能的影响, 结果发现掺杂微型钢纤维的UHPC材料具有更高的动态强度, 且增加纤维体积分数有利于提升UHPC在动态拉伸荷载下的力学性能.

UHPC极限拉伸强度、弯曲强度等指标的DIF与普通混凝土明显不同, 许多研究中总结了这些指标的经验公式. Malvar和Ross^[53]提出的模型描述了高应变率下UHPC极限抗拉强度的动态增加因子, 即

$$\text{DIF}_{f_t} = \begin{cases} (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^\delta, & \dot{\epsilon} \leq 25 \text{ s}^{-1}, \\ \beta(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{0.3735}, & \dot{\epsilon} > 25 \text{ s}^{-1}, \end{cases} \quad (4)$$

其中, DIF_{f_t} 代表极限拉伸强度的动态增强因子, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变率, δ 和 β 为待定的无量纲参量.

Park等人^[54]建议 $\delta = 0.01465$ 和 $\beta = 0.002352$, 该模型能够较好地模拟高应变率下极限拉伸强度的DIF值.

3.3 UHPC的侵彻与剪切实验

混凝土的侵彻实验是弹丸高速冲击(通常为10–1500 m/s)对混凝土造成高度局部损伤的实验. 普通混凝土的拉伸强度非常低, 在高速弹丸冲击下容易发生断裂和脆断, 难以承担军事工程领域的设计要求. UHPC超高的材料强度和韧性使其成为军用建筑中抵抗高速弹丸冲击的理想材料, 许多研究人员讨论了UHPC在高速弹丸冲击下的力学性能响应^[55].

UHPC在高速弹丸冲击下的损伤程度远小于普通混凝土. 吕映庆等人^[56]对比了UHPC与普通混凝土在弹丸冲击(700–1500 m/s)下的破坏情况, 结果发现在相同的子弹速度冲击下, UHPC的损伤程度远小于普通

混凝土, 试件在约700 m/s的高速弹丸冲击下仍保持较好的完整性。

纤维的含量和类型均会影响UHPC对高速弹丸冲击的抵抗能力, 且拉伸强度较高但应变能力较低的纤维, 如钢、碳、玻璃、玄武岩等可以增强试样的强度和韧性以提高UHPC的抗冲击性能。赖建中等人^[57]研究了钢纤维对UHPC抗侵彻性能的影响, 结果发现添加钢纤维后试样的吸能能力更强, 试样能够承受2次子弹冲击。Sovják等人^[58]得到了相似的结果, 高强度钢微纤维的使用显著提高了对弹丸冲击的抵抗力, 但钢纤维体积超过2%后UHPC的抗冲击性能无明显变化。Liu等人^[55]认为, 当子弹产生的原始应力波向内传播时, 部分施加的能量能够通过纤维摩擦拔出过程消耗, 进而减轻混凝土的开裂情况。除此之外, 纤维能够增强试样的动态拉伸强度、弹性模量和韧性, 这同样能够减少子弹冲击产生的拉伸裂纹损伤。

实验数据为侵彻实验下UHPC的损伤破坏现象提供了最直接和可信的信息, 但其高昂的成本和采样困难给实验带来了巨大阻力。目前, 数值模拟软件如LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS/Explicit等为研究混凝土在高速子弹冲击下的动态响应提供了技术支撑, 此外, 数值模拟能够分析UHPC试样在受冲击过程中的应力波传播和损伤演变过程, 这些规律在实验当中无法进行测试。预测高速弹丸冲击混凝土的侵彻深度(DOP)已经提出了许多模型, 其中比较经典的模型是弹道研究实验室和修正后的美国国防研究委员会(NDRC)提出的两个经验公式^[59]。

(1) BRL公式

$$DOP = \frac{1.33 \times 10^{-3}}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{m_0}{d_p^3} \right) d_p^{1.2} v_0^{1.33}. \quad (5)$$

(2) NDRC修正公式

$$DOP = 2G^{0.5} d_p, \text{ for } G \geq 1, \\ DOP = (G+1) d_p, \text{ for } G < 1, \quad (6)$$

其中, 参量 G 的定义式为

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{N^* m_0}{d_p \sqrt{f_c}} \left(\frac{v_0}{d_p} \right)^{1.8}, \quad (7)$$

式中 f_c 代表混凝土的单轴抗压强度, m_0 代表弹丸质量, d_p 代表弹丸直径, v_0 代表弹丸初始速度, N^* 是弹丸形状

因子。

必须指出, 式(7)所表达的 G 是有问题的。根据式(6), 可知 G 为无量纲量。但是式(7)中的 G 却是有量纲的量, 仅当等式右边最后一项的幂次为2时, G 才是无量纲量。所以提醒读者在使用NDRC修正公式(7)时应注意这个问题。

BRL公式和NDRC修正公式均低估了UHPC的DOP值, 因此一些研究人员结合经验公式以及特定UHPC的实验数据提出了一些改进公式^[60-62], 但这些公式往往针对特定材料的UHPC, 仍不具备普适性, 因此现有DOP公式的有效性依旧较窄。

在UHPC的动态剪切强度方面, Lukić和Forquin^[28]利用三维数值模拟对以往的剪切试样的形状进行了优化, 设计了PTS (Punch Through Shear, PTS)样品, 确保了试样在实验过程中完全均匀的剪切应力场。样品的对径截面几何形状如图6(根据文献[28]简化绘制)所示。

试样的上槽口内径与下槽口外径完全重合, 形成直筒形剪切断面。为了使围环与混凝土试样之间的压力接触均匀, 围环的放置位置如图6所示。用于准静态和动态实验过程的铝围圈厚度为10 mm, 高度为15 mm, 配有两个135°的应变计。样品被小心地引入限制环中, 样品和限制环之间的间隙由环氧双组分树脂填充, 这种树脂通常用于结构应用。此外, 为了避免试件的自我约束, 在试件的边缘处设置均匀分布的径向切口(如图6所示), 并利用三维数值模拟证实了采用径向切口的必要性。基于样品设计, 他们设计了实验方案。将PTS样品放置在一个钢支撑筒上, 以确保一个完美平坦的接触面, 保证驱动力均匀地分布在整个样品的外围部分。支撑筒的内径对应于试件底部槽口的外径, 使试件中部相对于其周边发生轴向位移。因此, 剪切韧带发生II型断裂。采用SHPB技术(图7, 根据文献

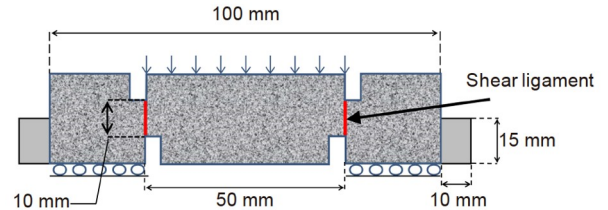


图6 (网络版彩图) 动态剪切实验样品示意图

Figure 6 (Color online) Schematic figure of the dynamic shear experimental samples.

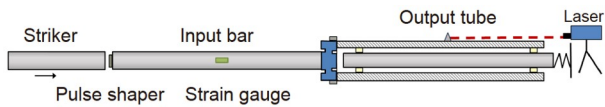


图 7 (网络版彩图)动态剪切的SHPB实验示意图

Figure 7 (Color online) Schematic representation of the SHPB experiment with dynamic shear.

[28]简化绘制)进行剪切实验,发现UHPC的动态剪切强度甚至可以达到115 MPa,充分说明UHPC具有优越的抗剪切性能。

3.4 抗爆性能

与普通混凝土相比, UHPC可以应用于承受极端载荷(如冲击和爆炸)的结构,因此抗爆性能是UHPC重点考察的一项指标。具有防爆保护的混凝土结构必须具有足够的结构强度、刚度和能量吸收能力以抵抗爆炸载荷。目前的研究通常将UHPC制备成梁、板、柱等构件,在一定距离下引爆炸药以测试UHPC的抗爆性能。

大量研究结果表明, UHPC相较常规混凝土具备更好的抗爆性能。Li等人^[63]发现,在相同的爆炸作用下UHPC与普通混凝土板相比显著降低了混凝土冲孔和剥落损伤,其原因归结为两点,首先是钢纤维可以有效防止混凝土开裂,甚至可以桥接混凝土裂缝,减轻底面剥落破坏;其次是UHPC具有超高的抗压强度和优异的延展性,这一特征使其能够大量吸收爆炸能量,从而减少冲孔破坏。Wu等人^[64]对比常规钢筋混凝土板与带钢筋的超高强度混凝土板在爆炸条件下的力学性能响应,结果发现后者的能量吸收能力约为前者的9倍,且爆炸测试后的后者比前者受到的损伤要小。Yi等人^[65]得到了类似的结果,他们讨论了UHPC、活性粉末混凝土和常规的抗爆特性。实验证实, UHSC和活性粉末混凝土的弹性模量、泊松比、抗压强度、劈裂抗拉强度比相应的常规混凝土值高出3.0–7.9倍,实验结果证明UHPC具备比常规混凝土试样更高的抗爆能力。

针对提高UHPC抗爆能力已经进行了许多讨论。Ellis等人^[66]评估了UHPC板的抗爆性能。结果表明,在材料设计中,增加耗能的因素对于提高面板的抗爆性能至关重要。添加纤维等材料可以显著增强UHPC的延展性和吸能能力。Ohtsu等人^[67]的研究结果表明,纤维

有助于控制剥落,剥落破坏的体积随着纤维含量的增加而减小。Mao等人^[68]得到了相似的结论,他们发现随着纤维体积的增加, UHPC板的抗爆破性能逐步增强。除了采用纤维增强UHPC的抗爆性能外,采用复合结构也是提高结构抗爆能力的一种思路。Liao等人^[69]将超高延展性混凝土(UHDC)作为防爆板后部, UHPC作为防爆板前部,讨论了UHDC-UHPC复合板的抗爆性能,结果发现UHDC完全消除了拉伸反射波引起的剥落,加固后的UHDC-UHPC面板在近距离爆炸荷载下具有优异的抗局部损伤能力。

目前已经进行了许多实验来讨论UHPC在爆炸条件下的力学性能响应,但是这些测试需要花费大量的时间和经费来完成,且实验伴随着一定的安全隐患。相比较之下,数值模拟是一种经济和安全的方式来调查UHPC在爆炸载荷下的动力行为。目前通常使用LS-DYNA软件来模拟混凝土试样在爆炸条件下短时间内的破坏过程,但现阶段准确模拟UHPC的爆炸过程仍比较困难。Li等人^[70]讨论了自由空气和接触装药爆炸作用下UHPC板的弹塑性水动力模型数值研究,并且结合实验数据对爆炸过程进行模拟,虽然数值模拟合理再现爆炸荷载作用下的结构损伤,但在模型当中忽略了应变率对UHPC材料的影响。Foglar等人^[71]同样结合实验和数值模拟讨论了UHPC在爆炸载荷作用下的力学性能响应,但没有详细给出模型参数的相关值。Su等人^[72]基于现有UHPC爆炸响应的实验数据完善了关键的模型参数。

从目前的研究结果来看,有关UHPC在爆炸条件下的力学性能响应的研究仍有不足,数值模拟的研究水平无法稳定预测UHPC的爆炸过程,仍需对UHPC进行大量的爆炸实验进行检测以提供理论研究的数据支撑。

4 UHPC的耐久性能

在严苛环境下(腐蚀、低温、高温、二氧化碳、紫外辐射等环境)混凝土材料力学性能衰变的机理,基本上可以归结为化学/物理/力学因素的耦合作用,其力学机理的核心是内膨胀力所诱发的拉伸应力的作用^[73]。

基于最紧密堆积理论的UHPC具有超低的孔隙度与缺陷,具有较高的拉伸强度,因此在理论上,它应该

具有超高耐久性,但这个结论正确与否需要实验验证.

4.1 UHPC的抗碳化性能

混凝土碳化是指大气中的 CO_2 与混凝土结构表面接触并且通过孔隙不断向混凝土内部扩散,与其中碱性水化物(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)起反应的过程^[74].碳化作用会降低混凝土的碱度,当碳化深度超过混凝土的保护层时,就会导致混凝土中的钢筋钝化膜不稳定,造成钢筋锈蚀.钢筋锈胀力会进一步导致混凝土保护层开裂、钢筋混凝土黏结力破坏、结构耐久性降低等不良后果.而碳化后的混凝土基体材料也会变脆,易产生微裂纹,不仅劣化了混凝土的力学性能,还为 CO_2 在材料中的扩散提供了更多的通道.

关于UHPC的碳化性能,国内外的研究工作者也做了较多的工作.通常用碳化深度或碳化速率来反映材料的抗碳化性能的指标.研究发现,UHPC具有非常优异的抗碳化性能.UHPC的碳化速率主要受到内因和外因两方面的影响.

内因主要指UHPC自身的材料配比(如水灰比等)和制作工艺(如不同固化方式、养护方式等).研究表明,水灰比越大,UHPC的孔隙率越高,碳化速率越快^[75,76].相比于普通混凝土,UHPC的水灰比非常低,微观结构紧密,孔隙率小.无论是在标准或是热固化条件下,都很少发生碳化^[77,78].如Gu等人^[77]研究了三种固化条件(标准固化、蒸汽固化、烘箱固化)对UHPC碳化性能的影响,将试样放在碳化室180 d.实验结果表明,在不同固化条件下,UHPC碳化深度均为0.因此需要更多的碳化时间来揭示不同固化条件下UHPC试件碳化性能差异.尽管碳化深度并没有直接地体现制作工艺对于UHPC的抗碳化性能的影响,但制作工艺(如固化方式)在孔隙率上还是有较为直观的体现.研究表明,UHPC的孔隙率随着养护温度的升高而降低.当温度从20°C升高到180°C时,孔隙率降低了40%–80%,这也与水灰比、材料配比和固化温度有关^[79–82].这意味着蒸汽固化的UHPC相对于标准固化的可能有更好的性能,孔隙度的大幅度降低可以使UHPC具有更加致密化和均匀化微观结构,提高集料-基界面质量,大幅提升UHPC的渗透阻力和耐久性.葛晓丽等人^[83]还开展了UHPC未水化水泥颗粒后期水化对其抗碳化性能的影响.他们先通过实验得出60°C水养护能够有效加速UHPC中未水化水泥颗粒的后期

水化.再将试样先养护28 d,然后放置在60°C的水中养护0, 7, 28, 90 d,再分别碳化28 d,测量其碳化深度.结果表明,60°C水养护条件下,UHPC的抗碳化性能随养护龄期的延长呈现先增大后减小的趋势.其中养护龄期为28 d时,抗碳化性能最强.

外因主要指UHPC的服役环境(如高浓度 CO_2 加速实验、施加载荷过程中碳化等).研究表明,碳化只有在适当的条件下才能在混凝土中发生^[84].例如,在空气干燥的条件下,由于缺乏水来溶解 CO_2 ,碳化速率将会减慢.然而,混凝土孔隙溶液的饱和状态也将会成为 CO_2 扩散的障碍,此情形下也能减缓碳化速率.因此,适宜的水分和 CO_2 浓度是碳化进行的重要条件.已有的关于UHPC的碳化实验结果均表明,UHPC具有优异的抗碳化性能,无论是加速或是施加载荷情况下的碳化实验,其碳化深度都非常小.如Sohail等人^[85]开展了高性能和超高性能混凝土6个月的碳化实验.在50% CO_2 , 60% RH和23°C的环境室中固化28 d,碳化一定时间后统计碳化深度并计算碳化速率.结果表明,UHPC在暴露于50% CO_2 的环境6个月没有碳化渗透.Long等人^[78]和Sun等人^[86]也得到了类似的结果,经过56和90 d碳化处理的UHPC试件未曾发现碳化迹象.Perry等人^[87]和Schmidt等人^[88]暴露6个月,发现UHPC有一定程度的碳化,但也非常小,碳化深度仅为0.5 mm. Piérard等人^[89]使用加速实验测试了UHPC的耐久性.碳化测试之前,将UHPC在50°C环境中烘干14 d,然后在20°C和60% RH气候室内放置7 d.之后将UHPC放在1%的 CO_2 环境中加速碳化1年.结果表明碳化深度仅为1.5–2 mm. Tafroui等人^[90]研究了含偏高岭土的UHPC耐久性.将UHPC试样在20°C的水中养护28 d后,在富含 CO_2 (50% CO_2 , 50%空气)和良好湿度(65%湿度)的封闭环境中,通过加速碳化实验测量混凝土抗碳化性能.在给定的时间间隔内,测试了试样碳化深度的时间演化以及试样的质量变化.尽管加速碳化实验持续了19个月(通常持续不到3个月),但在测试的UHPC上没有发现碳化.这些结果与Roux等人^[91]的结果一致.Andrade等人^[92]制作了小型UHPC梁置于碳化室中,在5%–100% CO_2 的流动下放置2年,结果表明试样基本没有碳化迹象.暴露3年后,深度仅为1.5–1.7 mm.

对于施加载荷状态下的碳化实验,Gu等人^[77]在施加弯曲载荷的情况下对UHPC试样进行碳化180 d的实

验, 仍未观察到碳化现象. 试样破裂表面喷涂酚酞后, 边缘未见明显的碳酸化区. 一定程度上, UHPC机械诱发的微裂纹被碳化产物部分或完全填充, 这有助于强度的提高, 未对碳化起到促进作用.

4.2 UHPC抗侵蚀性能

海洋环境下的混凝土结构容易受到侵蚀性离子的攻击而导致耐久性降低. 比如, 氯离子在混凝土中扩散, 如果钢筋表面氯离子浓度达到阈值则产生锈蚀. 这不仅降低了钢筋的加强效应, 还弱化了钢筋与混凝土之间的黏结力, 且钢筋锈胀力会导致混凝土的微裂纹成核、长大, 最后汇合为主裂缝, 主裂缝的贯通将大大降低混凝土结构的承载能力^[69].

UHPC具有非常优异的抗氯离子侵蚀的性能, 其氯离子扩散系数至少比传统混凝土和高性能混凝土低一个数量级^[93,94]. UHPC的氯离子扩散系数受到内因和外因两方面因素的影响.

内因主要指UHPC自身的材料配比(如水灰比、纤维掺量等^[95])和制作工艺(如不同固化方式、养护制度等). 对于纤维掺量的研究, 研究表明, 随着纤维掺量的增加, 氯离子渗透深度反而是增加的. 如Hussein等人^[96]采用了三种不同纤维含量(1%, 1.5%和2%)的超高性能纤维增强混凝土, 讨论了氯离子侵蚀对普通混凝土、高强混凝土和UHPC组成的混凝土梁抗弯性能的影响. 结果表明, 纤维含量增加时氯离子渗透深度也增加, 同时, 纤维含量的增加也显著提高了混凝土复合试件的力学性能. Wang等人^[97]也得到了类似的结论. 他们研究了120 MPa纤维超高强混凝土抗硫酸盐及氯离子侵蚀性能研究. 对PVA纤维体积掺量为0%–2.0%、基体强度为120 MPa的PVA纤维超高强混凝土进行了抗硫酸盐侵蚀及氯离子渗透实验研究. 实验结果表明, 随着纤维掺量的增加, PVA纤维超高强混凝土抗氯离子渗透性能有所降低, PVA纤维超高强混凝土的氯离子扩散系数随着服役过程指数衰减. 因此, 加入适量PVA纤维会提高超高强混凝土立方体抗压强度, PVA纤维超高强混凝土可以很好地抵御硫酸盐环境的侵蚀作用; Gu等人^[77]研究了三种固化条件(标准固化、蒸汽固化、烘箱固化)对UHPC抗氯离子性能的影响, 将棱柱体试块(40 mm×40 mm×160 mm)放在浓度为10% (重量比)的氯化钠溶液中腐蚀90 d. 实验结果表明, 烘箱固化UHPC的耐氯离子性能低于标准固化

和蒸汽固化UHPC. 标准固化和蒸汽固化试样的氯化物渗透深度小于5 mm, 烘箱固化试样的氯化物渗透深度为5–10 mm. 烘箱固化试样0–5 mm深度处的氯离子浓度远高于标准和蒸汽固化试样.

外因主要是指UHPC的服役环境(介质溶液浓度、加载状态、测试时间等). 研究表明, UHPC的氯离子扩散系数数值范围仅为 0.2×10^{-13} – 4.1×10^{-13} m²/s^[79,89,93,98–100], 远低于普通混凝土. 所以研究者们往往通过加速实验来得到评价氯离子渗透性的数据. 尽管加速测试的结果与混凝土在现场的实际情况不同, 但也为结构设计和寿命预测提供了一种有效的质量控制手段.

常见的氯离子加速实验包括快速氯离子渗透实验(RCPT)^[101]和Nordtest方法NT Build 443^[102], 前者直接通过氯离子扩散系数评价UHPC的氯离子渗透性能, 后者则是先通过测量UHPC电导, 再通过计算得到的试样库仑量间接去反映UHPC的氯离子渗透性能. 关于氯离子的加速实验工作已有不少, 相比于高性能混凝土和普通混凝土, UHPC表现出了更好的抗氯离子渗透的性能, 更低的孔隙率. 如Sohail等人^[85]研究了高性能和超高性能混凝土的耐久性特性. 制作了UHPC, HPC (高性能混凝土), 和NSC (正常强度混凝土), 在NaCl溶液中浸泡95 d, 按照ASTM C1556-11a测定氯化物扩散系数、吸附性、电阻率和孔隙率. 结果表明, 高性能混凝土和UHPC的氯扩散系数分别比普通混凝土低一个和三个数量级. 高性能混凝土和UPHC的吸附性分别在常规混凝土的一半到三分之一之间. 这可以帮助减少水的吸收, 而水是氯和其他有害物质的运输工具. 同时, 高性能混凝土和UHPC具有非常高的电阻率, 电阻率分别可达343和480 kΩ cm, 这意味着放置在这些材料中的钢筋的腐蚀风险非常低. 常规混凝土、高性能混凝土和UHPC的孔隙度分别为5.5%, 2.65%和1.43%. Graybeal等人^[103]研究了UHPC的抗氯离子性能和抗冻融性. 根据AASHTO T259-80规范进行标准氯离子渗透测试. 试样在3%浓度的氯化钠溶液中腐蚀90 d后, 采用AASHTO T260-97标准实验方法对采用四种固化制度的UHPC取样和测试, 取样深度分别为13, 25, 38, 51, 64和76 mm. 结果表明, 在所有情况下, 特定深度固化方案的平均氯化物含量都低于测试方法的最低精度阈值, 表明渗透到UHPC中的氯化物体积积极低. 这些结果与其他专注于类似UHPC的研究结果一致. Roux等人^[98]和Cwirzen等人^[104]报告说, UHPC的吸水

率非常低, 因此对腐蚀性化学品的侵入具有很高的抵抗力. Vernet^[105]和Bonneau等人^[106]都表明, 这些UHPC具有不连续的毛细管孔隙率, 因此表现出显著降低的渗透性. 值得注意的是, 任何蒸汽处理的UHPC应用都显著降低了氯离子渗透到混凝土中的能力. Piérard等人^[89]使用加速实验测试了UHPC的耐久性. 根据Nordtest方法 NT Build 443 (1995), 将UHPC在质量浓度约为14%的氯化钠溶液中加速腐蚀90 d. 结果显示, 氯离子渗透范围限制在距离蚀表面2–3 mm处. Scheydt等人^[107]对UHPC进行了实时检测, 也观察到了类似的入侵深度. 基于Fick第二扩散定律的数学模型计算得到UHPC的氯化物扩散系数低至 $0.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 而普通强度混凝土的典型值为 5×10^{-12} – $50 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[108,109]. Tafraoui等人^[90]研究了含偏高岭土的UHPC耐久性. 试样在20°C环境中浸泡清水中养护28 d后, 通过实验测得UHPC的有效氯离子扩散系数. 结果表明, UHPC的氯离子扩散系数平均比普通混凝土小三个数量级, 测得的扩散系数数量级皆在 $10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, 这与低孔隙体积及其不连续性有关. 含硅灰的UHPC对氯离子的扩散系数与文献中给出的扩散系数相当. 偏高岭土所得系数高于其他UHPC.

硫酸根离子对混凝土的侵蚀表现为硫酸根离子与混凝土孔隙溶液或固相反应生成钙矾石晶体, 晶体的长大产生的膨胀力导致混凝土微裂纹成核. 在抗硫酸盐侵蚀方面, UHPC作为保护层, 其本身的性能非常优异. 其具有非常优秀的抗硫酸盐和氯盐的性能. UHPC的孔隙率很小, 硫酸盐很难扩散至UHPC内部, 所以常规的硫酸盐腐蚀更是很难对UHPC造成伤害, 相关研究也表明UHPC有着较强的抗硫酸盐腐蚀能力.

Piérard等人^[89]使用加速实验测试了UHPC的耐久性. 将UHPC浸泡在质量浓度约为1.6%的硫酸钠溶液中, 定期测量长度变化. 结果表明, 即使在500 d的浸泡后, 也没有膨胀或恶化. 王卫仑等人^[97]研究了120 MPa纤维超高强混凝土抗硫酸盐侵蚀性能. 对PVA纤维体积掺量为0%–2.0%, 实验结果表明, PVA纤维超高强混凝土可以很好地抵御硫酸盐环境的侵蚀作用.

4.3 抗冻融性能

所谓冻融破坏是指混凝土负温和正温的交替循环作用下, 由于孔隙内的冻胀力交替驱动, 使得混凝土微裂纹不断扩展, 导致材料的微结构疏松, 在宏观上形成

混凝土表层剥落与强度失去的现象. 质量损失率和相对动弹性模量是评价试样抗冻融循环的两个重要评价参数. 通常情况下, 受冻融作用的混凝土会因材料剥落而失去质量, 并随着微裂缝的出现而相对动模量降低. 与常规混凝土不同, UHPC具有较低的孔隙度, 水很难渗入UHPC材料是其优异的抗冻融性能的一个重要原因^[78,110–113].

目前的研究表明, 冻融循环对UHPC所造成的破坏不论是在质量还是动弹性模量的损失上都是非常小的^[108,114]. 比如, 李云峰等人^[115]研究了不同矿物掺合料UHPC抗冻融性能, 配制了3组不同水胶比(水胶比为0.21, 0.24, 0.27)的UHPC, 按照国家标准GB/T 50082-2009进行冻融循环. 结果表明, 水胶比为0.21的试样质量损失率最小, 相对动弹性模量最大, 抗冻性最好. 3组水胶比下试样的冻融循环次数与质量损失率、相对动弹性模量下降量均呈正相关. 800次冻融循环后, 试样的质量损失率均在2%以内小幅波动, 相对动弹性模量始终保持在90%以上. Graybeal等人^[103]研究了UHPC的耐久性(抗冻融性能和抗氯离子性能). 根据ASTM C 666-03标准测试方法测试UHPC对冻融降解的抵抗力. 按四种固化制度浇筑了试样, 制作后5–6周开展冻融循环, 在9个月内开展了690次冻融循环. 结果表明, 无论采用何种养护方法, 这种类型的混凝土都比目前使用的普通混凝土具有更强的耐久性. 在抗冻融退化方面, 经过2倍于正常次数的ASTM C 666冻融循环后, 该混凝土的相对动态模量至少为96%. 另外几项研究也验证了这个结论^[106,116,117], 在UHPC经300或600次冻融循环后, 材料性能没有劣化, 质量损失几乎为0. 即使经过800次冻融循环, 也未发现明显的材料变质现象^[93]. 类似的结论得到了另外一些研究者的证实, 如Ahlborn等人^[118]按照ASTM C 666程序B进行了冻融循环实验. 结果表明, 经过32次冻融循环后, UHPC试件没有出现降解. 更进一步地, Acker和Behloul^[119]报道, 经过300次冻融循环后, UHPC未出现降解. Piérard等人^[89]使用加速实验测试了UHPC的耐久性, 将UHPC试样在去离子水和3% NaCl溶液中参照技术规范CEN/TS 12390-9开展冻融实验. 抗冻融性一般通过混凝土板在56次冻融循环(即56 d)后的质量(单位: kg/m^2)的测量来评估, 该实验做了112次. 结果表明, UHPC试件在循环112次后也没有出现降解, 试样的质量损失在112次循环后极低, 即使在NaCl溶液中也是如此, 皆小于 $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$. Cwir-

zen等人^[120]也得到了类似的结果. Alkaysi等人^[117]研究了硅粉和水泥类型对超高性能混凝土耐久性的影响. 其以水泥类型和硅粉用量为变量, 配置了不同的UHPC. 实验数据显示在60次以上的冻融循环中, 所有混合物的质量损失均低于极限值, 测试的样品均具有非常低的吸水率和不变的相对动态模量, 表明没有内部损坏. 这与其他具有致密基质的类似材料的研究非常吻合.

随着冻融循环次数的增加, UHPC甚至在质量和相对动态模量有所提升^[121,122]. 在125个周期后, Gray-beal等人^[103]报告了UHPC的质量增加0.2%. Yang等人^[123]还发现, 经过1098次冻融循环后, UHPC试件的抗压强度、静态弹性模量和动弹性模量均高于对照试件. 质量和相对动弹性模量的增加可能与冻融过程中吸收的水分和持续的水化作用有关^[95]. 研究还发现, UHPC试件在浸泡后或变质过程中, 由于存在大量的未水化水泥颗粒, 能够对微裂缝进行自修复^[124]. An等人^[125]和Granger等人^[126]的研究也证实了这一点. An等人^[125]的研究考虑了继续水化、氯盐腐蚀与冻融循环耦合作用下的UHPC损伤机理. 将试块按照国家标准GB/T 50082-2010进行冻融循环, 指定次数后测试样品结合水和孔隙结构. 实验证实, 在经过1500次冻融循环后, 试样的结晶水含量超过了11%, 继续水化反应生成的C-S-H凝胶可填充小于100 nm的孔隙, 使得部分损伤得到了修复.

Gu等人^[77]还研究了不同固化方式对于UHPC抗冻融性能的影响. 其设置了三种养护条件(标准固化、蒸汽固化、烘箱固化), 将棱柱体试块(40 mm×40 mm×160 mm)按照国家标准GB/T 50082-2009进行冻融循环, 冻融温度为-20℃-20℃, 一个循环为4 h, 指定次数后测试试件的质量和相对动弹性模量. 实验结果表明, 经过800次冻融循环后, UHPC试件的质量损失小于1%, 相对动弹性模量大于94.0%. 标准固化UHPC与蒸汽固化UHPC具有相似的冻融性能, 略优于烘箱固化UHPC. 而表面剥落是造成质量损失的主要原因.

Liu等人^[127]研究了UHPC在低温环境($T = 20^{\circ}\text{C}$, -30°C , -60°C , -90°C , -120°C 和 -160°C)下的基本力学性能、弯曲性能和断裂性能. 其中UHPC的弯曲和断裂性能由四点弯曲(FPB)实验和三点弯曲(TPB)缺口实验得到. 实验结果表明, 随着温度的降低, UHPC的力学性能(抗压和劈裂强度)几乎呈线性提高, 并给出

了定量实验结果: 当实验温度从环境温度降至 -160°C 时, 试样抗压强度和劈裂抗拉强度的增量分别为58.4%和57.9%. 由于水灰比较低, UHPC的低温强度增量远小于NWC (普通混凝土). Xie等人^[128]的研究表明, 当温度由 20°C 降至 -80°C 时, NWC的抗压强度增量为66.7%, 劈裂抗拉强度增量为105.5%. Lee等人^[129]报告随着温度从 20°C 下降到 -70°C , 混凝土抗压强度增加了1倍. 而当温度从 20°C 降至 -90°C 时, UHPC的抗压强度和劈裂抗拉强度的增量分别仅为30.8%和42.1%.

与此同时, 低温处理可显著提高UHPC的抗弯强度、双k断裂韧性和断裂能量^[128]. 实验结果表明, 当实验温度从环境温度降至 -160°C 时, 平均峰值荷载挠度从1.22 mm变化为1.06, 1.55, 1.50, 1.47和1.74 mm, 增幅分别为-12.8%, 26.8%, 23.2%, 20.5%和42.3%. 这说明钢纤维在低温下的黏结性能得到了明显的改善. 当实验温度从环境温度降至 -160°C 时, UHPC断裂能量 G_F 从21.6 kN/m提高到33.1, 34.9, 35.2, 39.9和40.4 kN/m, 增量分别为53.0%, 61.2%, 62.8%, 84.8%和86.7%. UHPC的断裂能量高于普通混凝土近100倍^[130].

5 结语

本文针对UHPC的准静态、动态力学性能以及耐久性问题的研究进展进行了梳理和总结. UHPC不仅在理论上有着较为可靠的基础, 四十多年来, 在工程上也有较为广泛的应用. 据2019-2021年连续三年的“中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告”, UHPC的首次工程应用是1997年的加拿大人行桥工程. 随后, 21世纪的2001和2002年, UHPC应用于法国的公路桥工程和韩国的人行桥工程. 近十年来, UHPC在法国、丹麦的结构工程, 瑞士的混凝土结构加固, 马来西亚桥梁工程, 欧洲风电塔工程, 北美桥梁的结构连接等工程领域得到了有效的应用. 近年来UHPC在我国的工程应用也逐渐展开, 比如2017年竣工的上海嘉闵高架袁家河桥是我国的首座 π 型UHPC公路桥; 2021年建成通车的宁波舟山港主通道工程桥采用了UHPC的T型梁; 2023年建成通车的广东英德北江四桥采用了UHPC薄壁箱梁结构等. 我国工程技术人员还推动了UHPC的组合结构的发展, 其中钢-UHPC的组合就是其中的一种组合形式. 比如宁波的西洪大桥和中兴大桥、上海的泖港大桥、京雄高速白沟河特大桥等均采

用了钢-UHPC的组合桥面体系. 除了桥梁工程以外, UHPC还应用于装配式工业与民用建筑中, 如上海金山海玥庭装配楼、余姚双河变电站等, 充分利用了UHPC突出的力学性能, 实现了“强节点、弱构件”的设计思路, 保障了构件连接的安全性. 水利水电工程的加固领域, UHPC也发挥了它的优越性. 比如, 位于黄河北干流的万家寨水利枢纽在长期的泥沙冲刷下泄洪道表面损伤严重, 2015年采用UHPC进行表面加固, 效果良好; 天津港在腐蚀、冻胀、船舶碰撞等因素作用下保护层剥落, 结构劣化严重. 经采用宁波宏日泰耐克研发的UHPC对码头的横梁进行修补, 效果良好.

随着UHPC应用范围的进一步拓展, 需要相应的标准与规范. 我国的建材联合会和中国混凝土与水泥制品协会(CBMF/CCPA)分别于2018, 2020和2021年发布了团体标准系列, 即T/CBMF 37-2018/T/CCPA 7-2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》、T/CBMF 96-2020/T/CCPA 20-2020《超高性能混凝土预混料》、T/CBMF127-2021/T/CCPA 2-2021《超高性能混凝土预制构件生产技术规程》和T/CBMF 128/T-2021/CCPA 23-2021《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规程》. 由此, 构建了我国的CBMF/CCPA系列UHPC团体标准规程的技术体系. 此外, 还有相关的团体标准, 比如, 中国公路学会标准T/CHTS10036-2021《高韧性混凝土组合桥面结构技术指南》; 广东省公路学会标准T/GDHS 003-2021《无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥技术规范》.

但是, 这一领域仍存在亟须解决的问题, 应该引起我们的重视.

首先, UHPC的实验技术需要统一. 前已述及, UHPC的强度通过巴西圆盘技术和单轴拉伸技术确定, 由于巴西圆盘技术属于非单向应力状态, 它与单轴拉伸的差异性应该仔细考察, 并加以理论分析, 夯实工程应用的基础. UHPC拉伸韧性应该通过单轴拉伸实验决定. 但是单轴拉伸实验的试样形状与尺寸、端部的增强技术各有不同. 除此之外, 已经存在的加载的四种夹持方式也需要统一, 特别在规范方面要有明确

规定. 另外在剪切强度的确定方面, 也是方法多样. 本文所介绍的准静态和动态剪切实验是在金属圆环约束下进行的, 尽管这样得到的数据离散性较小, 但是实验方法是建立在这样一个假设的基础之上: 金属圆环的约束力对于剪切强度没有影响. 这个假设是否成立、有何种程度的近似性, 还需要研究.

其次, UHPC耐久性需要进行综合研究. 耐久性问题的本质是力学问题, 具体表现在材料在服役过程中强度和刚度不断失去的过程. 已有的研究成果都表明, UHPC具有优异的抗碳化、抗腐蚀、抗冻融性能, 因此材料的耐久性好. 事实上, 大多数涉及UHPC耐久性的实验都在无荷载的条件下进行. 但是, 已有的单轴拉伸实验表明, 尽管UHPC具有很高的拉伸韧性, 但是在较大应变的区域会产生很多微裂纹. 这些微裂纹的存在, 为CO₂和侵蚀性离子的扩散提供了通道, 材料的抗碳化和抗腐蚀的性能有可能下降. 由于有了微裂纹, 材料在服役过程中的抗拉强度也会下降, 在极寒的情况下, 孔隙结冰的膨胀力更容易让孔隙壁开裂, 有可能导致UHPC抗冻融的性能也会下降. 所以, 需要荷载与严酷环境共同作用的实验结果才能够合理评价UHPC的耐久性.

再次, UHPC的应用范围应当拓展. UHPC以其优异的力学性能作为结构材料, 比如, 将UHPC技术与导电混凝土技术以及压电混凝土技术相结合, 有可能形成新型高耐久的功能材料, 可用于结构的健康监测与检测, 或者进行高性能的道路发电. 也可以考虑UHPC技术和其他技术结合, 以实现其他的功能目标.

最后, 降低UHPC的成本. 混凝土之所以成为结构工程的主要建筑材料, 有一个根本性的原因: 在满足强度要求和建筑美学的前提下, 与其他结构材料相比混凝土的成本最低. 目前UHPC的材料性能虽好但成本比较高, 主要应用于工程的关键部位, 还没有做到对整个结构的全覆盖. 将UHPC制作为模具, 将普通混凝土浇筑其内后, 模具不拆除, 成为混凝土构件的保护层. 这应该是一个可取的思路. 提高UHPC性能而降低成本, 需要多学科的合作.

参考文献

- 1 UHPC Branch of China Concrete and Cement Products Association. 2019 China ultra high performance concrete (UHPC) technology and application development report (in Chinese). Beijing: China Concrete, 2020. 30–43 [中国混凝土与水泥制品协会UHPC分会. 2019年中国超

- 高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告. 北京: 混凝土世界, 2020. 30–43]
- 2 Bache H H. Densified cement ultra-fine particle-based materials. In: Proceedings of the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa: Aalborg Cement, 1981. 17
- 3 Jiang M Q. The evolution of micro-structure and macro-mechanical properties of concrete material in marine water attack (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Yangzhou: Yangzhou University, 2005. 24–45 [蒋敏强. 海水侵蚀下砼材料的微结构演化及宏观力学性能的研究. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学, 2005. 24–45]
- 4 Richard P, Cheyrez M. Composition of reactive powder concretes. [Cement Concrete Res](#), 1995, 25: 1501–1511
- 5 Ultra High Performance Cementitious Materials and Engineering Technology (UHPC) Branch of China Concrete and Cement Products Association. 2020 China ultra high performance concrete (UHPC) technology and application development report (in Chinese). Beijing: China Concrete, 2021. 20–29 [中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(UHPC)分会. 2020年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告. 北京: 混凝土世界, 2021. 20–29]
- 6 UHPC Branch of China Concrete and Cement Products Association. 2021 China ultra high performance concrete (UHPC) technology and application development report (I) (in Chinese). China Concrete, 2022. 24–33 [中国混凝土与水泥制品协会UHPC分会. 2021年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(上). 北京: 混凝土世界, 2022. 24–33]
- 7 UHPC Branch of China Concrete and Cement Products Association. 2021 China ultra high performance concrete (UHPC) technology and application development report II (in Chinese). China Concrete, 2022. 32–38 [中国混凝土与水泥制品协会UHPC分会. 2021年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(下). 北京: 混凝土世界, 2022. 32–38]
- 8 Wille K, Naaman A E, Parra-montesinos G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. *ACI Mater J*, 2011, 108: 46–54
- 9 Wang C, Yang C, Liu F, et al. Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials. [Cement Concrete Compos](#), 2012, 34: 538–544
- 10 Li P P, Yu Q L, Brouwers H J H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC). [Construct Build Mater](#), 2018, 170: 649–659
- 11 Huang Z Y, Li S G. Study on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate (in Chinese). *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2018, 45: 47–54 [黄政宇, 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45: 47–54]
- 12 Cheng J, Liu J P, Liu J Z, et al. An experimental study and a mechanism analysis on mechanical properties of ultra-high performance concrete with coares aggregate (in Chinese). *Mater Rep*, 2017, 31: 115–119, 131 [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. 材料导报, 2017, 31: 115–119, 131]
- 13 Piasta W, Góra J, Budzyński W. Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. [Construct Build Mater](#), 2017, 153: 728–739
- 14 Wu F, Xu L, Chi Y, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite: The effect of coarse aggregate. [Composite Struct](#), 2020, 236: 111810
- 15 Ouyang X, Shi C J, Shi J H, et al. Compressive mechanical properties and prediction for elastic modulus of ultra-high performance concrete (in Chinese). *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49: 296–304 [欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测. 硅酸盐学报, 2021, 49: 296–304]
- 16 Guo Y B, Gao G F, Jing L, et al. Quasi-static and dynamic splitting of high-strength concretes—tensile stress-strain response and effects of strain rate. [Int J Impact Eng](#), 2019, 125: 188–211
- 17 Chen J, Song H, Zhang M, et al. Theoretical analysis on the nucleation of micro-damage in cement mortar under compressive loading and sulfate attack. [Acta Mech Solid Sin](#), 2013, 26: 53–61
- 18 Jang Y S, Oh T, Banthia N, et al. Effects of nano-SiO₂ coating and induced corrosion of steel fiber on the interfacial bond and tensile properties of ultra-high-performance concrete (UHPC). [J Building Eng](#), 2022, 54: 104637
- 19 Yoo D Y, Shin W, Chun B. Corrosion effect on tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with straight steel fibers. [Cement Concrete Compos](#), 2020, 109: 103566
- 20 Shi Z, Su Q, Kavoura F, et al. Uniaxial tensile response and tensile constitutive model of ultra-high performance concrete containing coarse

- aggregate (CA-UHPC). [Cement Concrete Compos](#), 2023, 136: 104878
- 21 Hashimoto K, Toyoda T, Yokota H, et al. Tension-softening behavior and chloride ion diffusivity of cracked ultra high strength fiber reinforced concrete. In: *Proceedings of the RILEM International Symposium on Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete*. Marseille, 2014. 257–264
- 22 Yoo D Y, Shin W, Chun B, et al. Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance. [Cement Concrete Res](#), 2020, 133: 106091
- 23 Yokota H, Rokugo K, Sakata N. JSCE recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks. In: *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. Tokyo: Springer, 2008. 2
- 24 SIA 2052. Bétons Fibrés Ultra-performant: Matériaux, Dimensionnement et Exécution (UHPRFC: Construction Material, Dimensioning and Application). Technical Report, SIA, 2016
- 25 Wille K, El-Tawil S, Naaman A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. [Cement Concrete Compos](#), 2014, 48: 53–66
- 26 Yang J, Chen B C, Shen X J, et al. The optimized design of dog-bones for tensile test of ultra-high performance concrete (in Chinese). *Eng Mech*, 2018, 35: 37–46 [杨简, 陈宝春, 沈秀将, 等. UHPC单轴拉伸试验狗骨试件优化设计. *工程力学*, 2018, 35: 37–46]
- 27 Yang J, Li Y, Chen B C, et al. Study on uniaxial tensile test method and constitutive relationship of UHPC (in Chinese). *Mater Rep*, 2023, 38: 22110263 [杨简, 李洋, 陈宝春, 等. UHPC直拉试验方法与本构关系研究. *材料导报*, 2023, 38: 22110263]
- 28 Lukić B, Forquin P. Experimental characterization of the punch through shear strength of an ultra-high performance concrete. [Int J Impact Eng](#), 2016, 91: 34–45
- 29 Sharma R, Jang J G, Bansal P P. A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high-performance concrete. [J Building Eng](#), 2022, 45: 103314
- 30 Kang S T, Kim J K. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPRCC). [Cement Concrete Res](#), 2011, 41: 1001–1014
- 31 Barnett S J, Lataste J F, Parry T, et al. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. [Mater Struct](#), 2010, 43: 1009–1023
- 32 Yoo D Y, Kim S, Park G J, et al. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. [Composite Struct](#), 2017, 174: 375–388
- 33 Yoo D Y, Shin H O, Yang J M, et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. [Compos Part B-Eng](#), 2014, 58: 122–133
- 34 Yoo D Y, Lee J H, Yoon Y S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. [Composite Struct](#), 2013, 106: 742–753
- 35 Chen Z, Wang X, Ding L, et al. Mechanical properties of a novel UHPC reinforced with macro basalt fibers. [Construct Build Mater](#), 2023, 377: 131107
- 36 Li W M, Xu J Y. Strengthening and toughening in basalt fiber-reinforced concrete (in Chinese). *J Chin Ceram Soc*, 2008, 36: 476–481, 486 [李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应. *硅酸盐学报*, 2008, 36: 476–481, 486]
- 37 Zhang W H, Liu P Y, Lv Y J. Dynamic mechanical property of UHPCs: A review (in Chinese). *Mater Rep*, 2019, 33: 3257–3271 [张文华, 刘鹏宇, 吕毓静. 超高性能混凝土动态力学性能研究进展. *材料导报*, 2019, 33: 3257–3271]
- 38 Yu Q, Zhuang W, Shi C. Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates. [Cement Concrete Compos](#), 2021, 124: 104258
- 39 Su Y, Li J, Wu C, et al. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC. [Construct Build Mater](#), 2016, 114: 708–718
- 40 Wu Z, Shi C, He W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. [Cement Concrete Compos](#), 2017, 79: 148–157
- 41 Zhang Y S. Experimental study on dynamic mechanical properties of basalt fiber concrete under impact load (in Chinese). *Concrete*, 2023, 400: 25–29 [张永生. 冲击荷载下玄武岩纤维混凝土动态力学特性试验研究. *混凝土*, 2023, 400: 25–29]
- 42 Zhang Y S, Zhang W H, Chen Z Y. A complete review of ultra-high performance concrete: Design and preparation, microstructure, mechanics

- and durability, engineering applications (in Chinese). *Mater Rev*, 2017, 31: 1–16 [张云升, 张文华, 陈振宇. 综论超高性能混凝土: 设计制备·微观结构·力学与耐久性·工程应用. 材料导报, 2017, 31: 1–16]
- 43 Ren G M, Wu H, Fang Q, et al. Effects of steel fiber content and type on dynamic compressive mechanical properties of UHPCC. *Construct Build Mater*, 2018, 164: 29–43
- 44 Zhang W, Zhang Y, Zhang G. Single and multiple dynamic impacts behaviour of ultra-high performance cementitious composite. *J Wuhan Univ Technol-Mat Sci Edit*, 2011, 26: 1227–1234
- 45 Yoo D Y, Oh T, Banthia N. Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC)—A review. *Cement Concrete Compos*, 2022, 134: 104730
- 46 Wu Z, Shi C, Khayat K H, et al. Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC. *Construct Build Mater*, 2018, 182: 118–125
- 47 Wu P T, Liu Z X, Wu C Q, et al. Experimental study on influence of nano-particles on dynamic mechanical properties of ultra-high performance concrete (in Chinese). *Bull Chin Ceram Soc*, 2016, 35: 3546–3555 [作鹏涛, 刘中宪, 吴成清, 等. 纳米材料对超高性能混凝土动态力学特性的影响实验研究. 硅酸盐通报, 2016, 35: 3546–3555]
- 48 Thomas R J, Sorensen A D. Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construct Build Mater*, 2017, 153: 846–856
- 49 Wille K, Xu M, El-Tawil S, et al. Dynamic impact factors of strain hardening UHP-FRC under direct tensile loading at low strain rates. *Mater Struct*, 2016, 49: 1351–1365
- 50 Pyo S, El-Tawil S, Naaman A E. Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates. *Cement Concrete Res*, 2016, 88: 144–156
- 51 Bindiganavile V, Banthia N, Aarup B. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite. *Mater J*, 2002, 99: 543–548
- 52 Zhao X, Li Q, Xu S. Contribution of steel fiber on the dynamic tensile properties of hybrid fiber ultra high toughness cementitious composites using Brazilian test. *Construct Build Mater*, 2020, 246: 118416
- 53 Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Mater J*, 1998, 95: 735–739
- 54 Park S H, Kim D J, Kim S W. Investigating the impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using an improved strain energy impact test machine. *Construct Build Mater*, 2016, 125: 145–159
- 55 Liu J, Li J, Fang J, et al. Ultra-high performance concrete targets against high velocity projectile impact—a state-of-the-art review. *Int J Impact Eng*, 2022, 160: 104080
- 56 Lv Y Q, Chen N X, Wu H J, et al. Mechanism of high-velocity projectile penetrating into ultra high performance concrete target (in Chinese). *Acta Armamentarii*, 2022, 43: 37–47 [吕映庆, 陈南勋, 武海军, 等. 弹体高速侵入超高性能混凝土靶机理. 兵工学报, 2022, 43: 37–47]
- 57 Lai J Z, Guo X J, Zhu Y Y. Properties of ultra-high performance concrete subjected to penetration and explosion (in Chinese). *J Hebei Univ Technol*, 2014, 43: 1007–2373 [赖建中, 过旭佳, 朱耀勇. 超高性能混凝土抗侵入及抗爆炸性能研究. 河北工业大学学报, 2014, 43: 1007–2373]
- 58 Sovják R, Vavříník T, Máca P, et al. Experimental investigation of ultra-high performance fiber reinforced concrete slabs subjected to deformable projectile impact. *Procedia Eng*, 2013, 65: 120–125
- 59 Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *Int J Impact Eng*, 2005, 32: 224–284
- 60 Cao Y Y Y, Yu Q, Tang W H, et al. Numerical investigation on ballistic performance of coarse-aggregated layered UHPFRC. *Construct Build Mater*, 2020, 250: 118867
- 61 Liu J, Wu C, Chen X. Numerical study of ultra high performance concrete under non-deformable projectile penetration. *Construct Build Mater*, 2017, 135: 447–458
- 62 Liu J, Wu C, Li J, et al. Numerical investigation of reactive powder concrete reinforced with steel wire mesh against high-velocity projectile penetration. *Construct Build Mater*, 2018, 166: 855–872
- 63 Li J, Wu C, Hao H. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Eng Struct*, 2015, 102: 395–408
- 64 Wu C, Oehlers D J, Rebstroff M, et al. Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Eng Struct*, 2009, 31: 2060–2069

- 65 Yi N H, Kim J H J, Han T S, et al. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. [Construct Build Mater](#), 2012, 28: 694–707
- 66 Ellis B D, DiPaolo B P, McDowell D L, et al. Experimental investigation and multiscale modeling of ultra-high-performance concrete panels subject to blast loading. [Int J Impact Eng](#), 2014, 69: 95–103
- 67 Ohtsu M, Uddin F A K M, Tong W, et al. Dynamics of spall failure in fiber reinforced concrete due to blasting. [Construct Build Mater](#), 2007, 21: 511–518
- 68 Mao L, Barnett S J, Tyas A, et al. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading. [Construct Build Mater](#), 2015, 93: 822–830
- 69 Liao Q, Yu J, Xie X, et al. Experimental study of reinforced UHDC-UHPC panels under close-in blast loading. [J Building Eng](#), 2022, 46: 103498
- 70 Li J, Wu C, Hao H. An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. [Mater Des](#), 2015, 82: 64–76
- 71 Foglar M, Hajek R, Fladr J, et al. Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPFRC and UHPFRC bridge decks. [Construct Build Mater](#), 2017, 145: 588–601
- 72 Su Q, Wu H, Fang Q. Calibration of KCC model for UHPC under impact and blast loadings. [Cement Concrete Compos](#), 2022, 127: 104401
- 73 Chen J K, Yang M. Advances of environment damage mechanics in marine engineering concrete (in Chinese). [Mech Eng](#), 2023, 45: 499–512 [陈建康, 杨敏. 海工混凝土环境损伤力学研究进展. [力学与实践](#), 2023, 45: 499–512]
- 74 Wei J, Zhang X L, Zhao X L. Recent studies and developing directions of the durability of concrete structure (in Chinese). [Low Temp Archit Technol](#), 2003, 2: 1–4 [卫军, 张晓玲, 赵霄龙. 混凝土结构耐久性的研究现状和发展方向. [低温建筑技术](#), 2003, 2: 1–4]
- 75 Liu S F, Sun W, Lin W, et al. Preparation and durability of a high performance concrete with natural ultra fine particles (in Chinese). [J Chin Ceram Soc](#), 2003, 11: 1080–1085 [刘斯凤, 孙伟, 林玮, 等. 掺天然超细混合材高性能混凝土的制备及其耐久性研究. [硅酸盐学报](#), 2003, 11: 1080–1085]
- 76 Park J J, Koh K T, Kim S W, et al. Evaluation of durability performance of ultra high strength cementitious composites. In: [Proceedings of the 2006 Korea Civil Engineering Society Regular Academic Conference](#). Korea Civil Engineering Association. Seoul, 2006. 2508–2511
- 77 Gu C, Sun W, Guo L, et al. Effect of curing conditions on the durability of ultra high performance concrete under flexural load. [J Wuhan Univ Technol-Mat Sci Edit](#), 2016, 31: 278–285
- 78 Long G C, Xie Y J, Wang P M, et al. Properties and micro/mecrostructure of reactive powder concrete (in Chinese). [J Chin Ceram Soc](#), 2005, 33: 456–461 [龙广成, 谢友均, 王培铭, 等. 活性粉末混凝土的性能与微观结构. [硅酸盐学报](#), 2005, 33: 456–461]
- 79 Scheydt J C, Müller H S. Microstructure of ultra high performance concrete (UHPC) and its impact on durability. In: [Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials](#). Kassel, 2012. 349–356
- 80 Cwirzen A. The effect of the heat treatment regime on the properties of reactive powder concrete. [Adv Cem Res](#), 2016, 19: 25–33
- 81 Heinz D, Ludwig H M. Heat treatment and the risk of DEF delayed ettringite formation in UHPC. In: [Proceedings of the 1st International symposium on ultra high performance concrete](#). Kassel, 2004. 717–730
- 82 Herold G, Müller H S. Measurement of porosity of ultra high strength fibre reinforced concrete. In: [Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete](#). Kassel, 2004. 685–694
- 83 Ge X L, Liu J P, Wang Y J, et al. Effect of rehydration of unhydrated cement on ultra high performance concrete (in Chinese). [J Civil Archit Enviro Eng](#), 2016, 38: 40–45 [葛晓丽, 刘加平, 王育江, 等. 未水化水泥颗粒后期水化对UHPC性能的影响. [土木建筑与环境工程](#), 2016, 38: 40–45]
- 84 El-Turki A, Ball R J, Allen G C. The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime. [Cement Concrete Res](#), 2007, 37: 1233–1240
- 85 Sohail M G, Kahraman R, Al Nuaimi N, et al. Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. [J Building Eng](#), 2020, 33: 101669
- 86 Sun W, Lai J Z. Dynamic mechanical behaviour and durability of ultra high performance cementitious composite. [Key Eng Mater](#), 2009, 400: 3–15

- 87 Perry V, Zakariasen D. First use of ultra high performance concrete for an innovative train station canopy. *Concrete Technol Today*, 2004, 25: 1–2
- 88 Schmidt M, Fehling E, Teichmann T, et al. Ultra high performance concrete: Perspective for the precast concrete industry. *Concr Precast Plant Technol*, 2003, 69: 16–29
- 89 Piérard J, Donms B, Cauberg N. Evaluation of durability parameters of UHPC using accelerated lab tests. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*. Kassel, 2012. 371–376
- 90 Taфраoui A, Escadeillas G, Vidal T. Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin. *Constr Build Mater*, 2016, 112: 980–987
- 91 Roux N, Andrade C, Sanjuan M A. Etude Expérimentale sur la durabilité des Bétons de Poudres Réactives. *Annales de l’Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, 1995, 532: 133–143
- 92 Andrade M C, Frias M, Aarup B. Durability of ultra high strength concrete: Compact reinforced composite. In: *Proceedings of the BHP96 Fourth International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*. Paris, 1996. 29–31
- 93 Liu J, Song S, Wang L. Durability and micro-structure of reactive powder concrete. *J Wuhan Univ Technol-Mat Sci Edit*, 2009, 24: 506–509
- 94 Chuang M L, Huang W H. Durability analysis testing on reactive powder concrete. *Adv Mater Res*, 2013, 811: 244–248
- 95 Li J, Wu Z, Shi C, et al. Durability of ultra-high performance concrete—A review. *Construct Build Mater*, 2020, 255: 119296
- 96 Hussein L, Amleh L, Siad H, et al. Effect of severe chloride environment on the flexural behaviour of hybrid concrete systems. *Mag Concrete Res*, 2020, 72: 757–767
- 97 Wang W L, Tang X, Ke Y W, et al. 120 MPa fiber ultra high strength concrete exposure to sulfate and chloride invading environment (in Chinese). *Concrete*, 2016, 10: 5–7 [王卫仑, 唐信, 柯玉伟, 等. 120 MPa纤维超高强混凝土抗硫酸盐及氯离子侵蚀性能研究. *混凝土*, 2016, 10: 5–7]
- 98 Roux N, Andrade C, Sanjuán M. Experimental study of durability of reactive powder concretes. *J Mater Civ Eng*, 1996, 8: 1–6
- 99 Cauberg N, Remy O, Pierard J. Evaluation of durability and cracking tendency of ultra high performance concrete. 2008, doi: 10.1201/9780203882955.CH92
- 100 Thomas M, Green B, O’Neal E, et al. Marine performance of UHPC at treat island. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*. Kassel, 2012. 365–370
- 101 ASTM C1202. Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *Annual Book of American Society for Testing Materials*, Philadelphia, 2000
- 102 Luping T, Sörensen H E. Evaluation of the rapid test methods for measuring the chloride diffusion coefficients of concrete. Nordtest project 1388-98. Swedish National Testing and Research Institute, 1998
- 103 Graybeal B, Tanesi J. Durability of an ultra high-performance concrete. *J Mater Civ Eng*, 2007, 19: 848–854
- 104 Cwirzen A, Penttala V, Vornanen C. Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC. *Cement Concrete Res*, 2008, 38: 1217–1226
- 105 Vernet C. UHPC microstructure and related durability performance laboratory assessment and field experience examples. In: *Proceedings of the International Symposium on High Performance Concrete*. Orlando, 2003. 1–19
- 106 Bonneau O, Lachemi M, Dallaire E, et al. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *Aci Mater J*, 1997, 94: 286–289
- 107 Scheydt J, Muller H, Herold G. Long term behaviour of ultra high performance concrete under the attack of chlorides and aggressive waters. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*. Kassel, 2008. 231–238
- 108 Jones T, Cather B. Ultra high performance fibre-reinforced concrete. *Concr Eng*, 2005, 9: 59–61
- 109 Baroghel Bouny V. Nouvelle approche performantielle et prédictive fondée sur les indicateurs de durabilité. *Laboratoire Central des ponts et chaussées*, Paris, 2005. 4: 1–4
- 110 Dils J, Boel V, De Schutter G. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construct Build Mater*, 2013, 41: 455–463
- 111 Atcin P C. The durability characteristics of high performance concrete: A review. *Cement Concrete Compos*, 2003, 25: 409–420
- 112 Colombo I G, Colombo M, di Prisco M. Tensile behavior of textile reinforced concrete subjected to freezing-thawing cycles in un-cracked and

cracked regimes. [Cement Concrete Res](#), 2015, 73: 169–183

- 113 Zhong R, Wille K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. [Construct Build Mater](#), 2015, 98: 51–60
- 114 Uchida Y, Fischer G, Hishiki Y, et al. Review of Japanese recommendations on design and construction of different classes of fiber reinforced concrete and application examples. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*. Tokyo, 2008
- 115 Li Y F, Wang X B, Wei F T, et al. Experimental study of the freeze-thaw performnace of ultra-high strength concrete with different mineral admixtures (in Chinese). *China Sci Pap*, 2017, 12: 2632–2636 [李云峰, 王宣卜, 魏凤婷, 等. 不同矿物掺合料超高强混凝土抗冻融性能的试验研究. *中国科技论文*, 2017, 12: 2632–2636]
- 116 Yang W, Huang Z. Study on durability of reactive powder concrete. *China Concr Cem Prod*, 2003, 29: 19–20
- 117 Alkaysi M, El-Tawil S, Liu Z, et al. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). [Cement Concrete Compos](#), 2016, 66: 47–56
- 118 Ahlborn T M, Misson D L, Peuse E J, et al. Durability and strength characterization of ultra high performance concrete under variable curing regimes, In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel, 2008. 197–204
- 119 Acker P, Behloul M. Ductal Technology: A large spectrum of properties, a wide range of applications. In: *Proceedings of the International Symposium on UHPC*. Kassel, 2004. 11–23
- 120 Cwirzen A, Penttala V, Cwirzen K. The effect of heat treatment on the salt freeze-thaw durability of UHSC. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel, 2008. 221–230
- 121 Graybeal B A. Material property characterization of ultra-high performance concrete. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, Greep, 2006
- 122 Lee M G, Chiu C T, Wang Y C. The study of bond strength and bond durability of reactive powder concrete. *J Astm Int*, 2005, 2: 10
- 123 Yang X L, Xu Y B, Tan X D, et al. Relationships among crystallographic texture, fracture behavior and Charpy impact toughness in API X100 pipeline steel. [Mater Sci Eng-A](#), 2015, 641: 96–106
- 124 Jacobsen S, Sellevold E J. Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. [Cement Concrete Res](#), 1996, 26: 55–62
- 125 An M, Wang Y, Yu Z. Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze-thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration. [Construct Build Mater](#), 2019, 198: 546–552
- 126 Granger S, Loukili A, Pijaudier-Cabot G, et al. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. [Cement Concrete Res](#), 2007, 37: 519–527
- 127 Liu Y, Xie J, Yan J B. Flexural and fracture performance of UHPC exposed to low-temperature environment. [Construct Build Mater](#), 2023, 373: 130865
- 128 Xie J, Liu Y, Yan M L, et al. Mode I fracture behaviors of concrete at low temperatures. [Construct Build Mater](#), 2022, 323: 126612
- 129 Lee G C, Shih T S, Chang K C. Mechanical properties of high-strength concrete at low temperature. [J Cold Reg Eng](#), 1988, 2: 169–178
- 130 Hu S, Fan B. Study on the bilinear softening mode and fracture parameters of concrete in low temperature environments. [Eng Fract Mech](#), 2019, 211: 1–16

Advances in the mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC)

CHEN JianKang^{*}

NBU-Hongri Joint Academy for Mechanics of UHPC, Ningbo University, Ningbo 315211, China

**Corresponding author (email: chenjiankang@nbu.edu.cn)*

Since the concept of ultra high performance concrete (UHPC) was proposed in 1979, based on the theory of “Densified System with ultra-fine Particles” (DSP), considerable progress has been made in theory and application. This paper summarizes the research progress on the mechanical properties of UHPC in the past half-century, particularly in the past decade, including (1) the mechanical properties of UHPC under quasistatic loads, (2) the mechanical response of UHPC under impact and explosive loads, and (3) the durability of UHPC mechanical properties. Finally, some important problems related to the mechanical properties of UHPC that need to be solved in the future are presented.

concrete, ultra-high performance, tension strength, tension toughness, dynamic response, resistant to corrosion

PACS: 62.20.De, 62.20.Fe, 62.20.Mk, 66.10.Cb

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0283](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0283)