

超高性能混凝土自收缩机理与耐久性能研究综述

陈 雯

中土城联工程建设有限公司 石家庄 长安 050011

【摘 要】 超高性能混凝土（UHPC）凭借超高强度、高韧性、低孔隙率及优异耐久性能，广泛应用于桥梁加固、高层建筑、市政特种工程等领域。相较于普通混凝土，UHPC 采用超低水胶比、高掺量胶凝材料的配比设计，水化过程极易产生显著自收缩变形，易引发早期微裂缝，破坏结构整体性，大幅削弱长期耐久性能，制约工程长效服役效果。为系统梳理 UHPC 自收缩与耐久性研究成果，明晰二者内在关联，本文综述 UHPC 自收缩形成机理、时空演化规律，分析自收缩对抗渗、抗冻、抗腐蚀、抗碳化等核心耐久性能的影响机制，总结材料配比、养护制度、外加剂、纤维掺量等关键因素的作用规律，归纳现阶段主流的自收缩调控与耐久性提升技术。同时梳理当前研究存在的短板，展望未来研究方向，旨在为 UHPC 材料优化设计、工程病害防控及长效耐久应用提供理论参考与技术支持。

【关键词】 超高性能混凝土；自收缩机理；微观结构；耐久性能；性能调控；研究进展

1 引言

超高性能混凝土（UHPC）是基于最紧密堆积原理研发的新型水泥基复合材料，通过超低水胶比、活性粉末掺配、纤维增韧改性，彻底弥补了普通混凝土强度低、孔隙大、耐久性差的缺陷，具备高强度、高韧性、高抗渗性等优势，是现代土木工程绿色化、高性能化发展的核心材料。现阶段 UHPC 已大规模应用于大跨度桥梁、装配式建筑、海洋工程、隧道加固等重点工程，服役环境日趋复杂，对材料体积稳定性与长期耐久性提出了更高要求。

不同于普通混凝土，UHPC 水胶比通常控制在 0.2 以下，胶凝材料掺量高达 800~1200kg/m³，水化反应剧烈且内部水分消耗极快，极易产生自干燥效应，引发显著的早期自收缩变形。相关研究表明，UHPC 早期自收缩变形占总收缩的 70%以上，是诱发早期微裂缝的核心诱因。微裂缝的产生会破坏混凝土致密微观结构，为水分、有害离子侵入提供渗透通道，大幅降低结构抗冻、抗渗、抗腐蚀能力，导致耐久性能衰减，缩短工程服役年限。当前学界针对 UHPC 自收缩机理、耐久性提升技术开展了大量研究，但二者耦合作用机制、长效演化规律尚未形成统一体系。基于此，本文系统梳理国内外相关研究成果，综述 UHPC 自收缩形成机理、耐久性能演化特征、关键影响因素及性能调控技术，总结现存问题并展望研究趋势，为 UHPC 工程长效应用提供支撑。

2 UHPC 自收缩形成机理与演化规律

2.1 核心形成机理

自收缩是混凝土在恒温、无外部水分交换条件下，因内部水化反应、自干燥效应产生的宏观体积收缩现象，是 UHPC 最突

出的体积变形特征，其核心机理主要包含孔隙负压理论与化学收缩耦合理论两大体系。一是孔隙负压作用，UHPC 超低水胶比导致内部自由水分匮乏，水泥及活性粉末水化过程持续消耗内部毛细水，引发孔隙内部湿度快速下降，形成毛细负压，在负压作用下固相骨架受压收缩，产生宏观自收缩变形；二是化学收缩作用，胶凝材料水化生成水化硅酸钙、氢氧化钙等密实产物，水化产物总体积小于原材料与参与反应水分的总体积，引发内部微观体积收缩，宏观表现为构件收缩变形。双重效应叠加，使得 UHPC 自收缩远大于普通混凝土，且集中发生在水化早期。

2.2 时空演化规律

UHPC 自收缩具有显著的时间阶段性特征，早期发展速率极快，后期逐步趋于稳定。大量试验数据表明，UHPC 浇筑后 0~7d 为自收缩快速增长阶段，该阶段自收缩变形可达到总收缩量的 75%~85%；7~28d 收缩速率放缓，变形持续小幅增长；28d 后自收缩基本趋于稳定，无明显变形增量。从空间分布来看，UHPC 表层与内部收缩存在差异，表层水分微量散失叠加自干燥效应，收缩变形略大于内部，易产生表层微裂缝，而内部收缩均匀性较好，整体体积变形一致性更高。

表 1 不同龄期 UHPC 自收缩变形特征统计

养护龄期	自收缩变形占总收缩比例/%	变形发展速率	主要变形特征
0~3d	55~65	极快	水化剧烈，自干燥效应显著，易产生塑性微裂缝
3~7d	15~20	较快	水化速率放缓，收缩持续增长，裂缝持续扩展
7~28d	10~15	平缓	微观结构逐步致密，收缩增量大幅降低
28d以后	≤5	基本稳定	水化基本完成，体积趋于稳定

3 UHPC 耐久性能演化特征及自收缩影响机制

3.1 抗渗性能

抗渗性是 UHPC 最核心的耐久指标,致密的微观孔隙结构是其高抗渗性的基础。无收缩缺陷的 UHPC 孔隙率极低,内部多为封闭微孔,水分与有害离子难以渗透扩散。而早期自收缩引发的微裂缝会打通内部封闭孔隙,形成贯通性渗透通道,大幅提升水分渗透速率。试验研究表明,自收缩开裂后的 UHPC 渗透系数较完整试件提升 3~5 倍,且裂缝宽度越大,抗渗性能衰减越显著,直接诱发内部钢筋锈蚀、基体冻融破坏等次生病害。

3.2 抗冻性能

冻融破坏的核心原理是孔隙内水分冻胀产生体积膨胀,挤压基体引发结构破损。UHPC 自收缩产生的微裂缝会增大内部储水空间,低温环境下孔隙水分冻胀、融缩循环往复,持续扩张微裂缝,导致裂缝贯通延伸。长期冻融循环作用下,基体表层剥落、内部结构疏松,抗压强度、韧性持续衰减。数据显示,相同冻融循环次数下,存在早期自收缩裂缝的 UHPC 试件强度损失率较完整试件高出 18%~25%,耐久寿命大幅缩短。

3.3 抗碳化与抗腐蚀性能

大气中的二氧化碳、工业环境中的酸碱盐有害离子,主要通过表面裂缝侵入混凝土内部。UHPC 自收缩微裂缝会降低碳化阻力,加速内部水化产物碳化反应,降低混凝土碱性,削弱钢筋钝化膜防护效果,极易引发钢筋锈蚀。在海洋、化工腐蚀环境中,氯离子、硫酸盐离子会沿裂缝快速渗透,引发基体膨胀、开裂、剥落,形成恶性循环,严重破坏结构稳定性,大幅降低工程长期服役安全性。

4 UHPC 自收缩与耐久性关键影响因素

4.1 材料配比因素

水胶比是影响 UHPC 自收缩的核心参数,水胶比越低,内部自由水分越少,自干燥效应越显著,自收缩变形越大,对应耐久性能越差。胶凝材料掺量过高会加剧早期水化反应速率,增大早期收缩应力,提升开裂风险。此外,矿物掺合料种类与掺量影响显著,粉煤灰、矿渣等活性掺合料可优化水化速率,细化微观孔隙,适度降低自收缩;而硅灰活性极高,过量掺入会加剧早期水化收缩,诱发微裂缝发育。

4.2 养护制度因素

养护温度、养护时长、养护方式直接调控 UHPC 水化进程与收缩变形。蒸汽养护可加速早期水化反应,快速形成致密微观结构,有效抑制后期收缩变形,提升结构密实度与耐久性;标准常温养护下水化速率平缓,早期自收缩发展周期更长,微裂

缝发育概率更高。同时,早期保湿养护不足会加剧内部自干燥效应,扩大收缩变形,造成耐久性能缺陷。

4.3 外加剂与纤维因素

膨胀剂、减缩剂是调控 UHPC 自收缩的核心外加剂,膨胀剂可通过水化反应产生体积膨胀,补偿自收缩变形,抑制微裂缝产生;减缩剂可降低孔隙溶液表面张力,减小毛细负压,从根源降低收缩应力。钢纤维、聚乙烯纤维等增韧材料可约束基体收缩变形,阻断微裂缝扩展路径,提升结构整体性,间接保障耐久性能,但纤维掺量过高易出现团聚缺陷,反而降低密实度。

5 UHPC 自收缩调控与耐久性提升技术

5.1 配比优化调控技术

通过优化水胶比、复配矿物掺合料可有效平衡 UHPC 强度与体积稳定性。在满足设计强度前提下,适度提升水胶比、合理降低硅灰掺量,复配 20%~30%粉煤灰或矿渣,可延缓早期水化速率,细化孔隙结构,降低自收缩变形。同时优化骨料级配,提升基体密实度,减少内部孔隙缺陷,从材料源头提升耐久性能。

5.2 外加剂改性技术

膨胀剂与减缩剂复配使用可实现协同控缩效果,单一膨胀剂补偿收缩效果有限,搭配适量减缩剂可大幅提升控缩效率。试验表明,复配掺加 6%膨胀剂+1.5%减缩剂时,UHPC 早期自收缩变形可降低 40%以上,微裂缝基本消除,抗渗、抗冻性能显著提升。此外,纳米材料可细化微观孔隙,优化水化产物形态,进一步提升结构致密性与耐久性。

5.3 纤维增韧与养护优化技术

合理掺加钢纤维可有效约束基体收缩变形,抑制微裂缝萌生与扩展,提升结构抗裂性能,最优钢纤维掺量为 2%~3%,可实现控缩增韧双重效果。养护工艺方面,采用“常温保湿养护+后期蒸汽养护”组合模式,早期保湿补水抑制自干燥,后期高温养护完善水化结构,可显著降低收缩变形,提升 UHPC 长期耐久稳定性。

6 现存研究不足与研究展望

6.1 现存研究不足

当前 UHPC 自收缩与耐久性研究仍存在诸多短板:一是现有研究多聚焦单一因素影响,对多因素耦合作用下自收缩演化规律、耐久性能衰减机制研究不足;二是自收缩微观开裂与宏观耐久性能的量化关联模型尚未完善,难以精准预判长期服役性能;三是复杂腐蚀、高低温循环等极端服役环境下,UHPC 收缩变形与耐久性长效演化规律研究匮乏;四是低成本、长效型控

缩改性技术不成熟,部分外加剂、改性材料成本较高,制约工程规模化推广。

6.2 未来研究展望

未来研究可聚焦四个方向:一是构建多因素耦合作用下UHPC自收缩演化与耐久性衰减量化模型,实现性能精准预判;二是深化极端服役环境下UHPC长期性能演变规律研究,完善长效耐久评价体系;三是研发低成本、绿色复合型控缩改性材料,优化配比与施工工艺,平衡性能与成本;四是结合微观测试技术,揭示自收缩开裂、微观结构劣化与宏观耐久性失效的内在机理,为UHPC长效服役与工程病害防控提供理论支撑。

7 结论

UHPC自收缩由内部自干燥效应与化学收缩耦合作用产生,

早期变形速率快、贡献率高,极易引发微裂缝缺陷,是制约其长期耐久性能的核心因素。自收缩诱发的微裂缝会破坏基体致密结构,大幅降低UHPC抗渗、抗冻、抗碳化、抗腐蚀性能,加速结构耐久性能衰减。材料配比、养护制度、外加剂改性、纤维掺量是影响UHPC自收缩与耐久性的关键因素,通过配比优化、外加剂复配改性、纤维增韧、养护工艺优化等技术,可有效抑制自收缩变形、阻断微裂缝扩展,显著提升材料长效耐久性能。

现阶段UHPC自收缩与耐久性耦合机理、极端环境长效演化规律、低成本改性技术仍存在研究短板。未来需深化多因素耦合机理研究,完善性能评价体系,研发绿色高效改性技术,推动UHPC材料高性能化、低成本化、长效化发展,进一步拓展其在各类重大工程中的应用场景与服役寿命。

参考文献:

- [1] 覃维祖. 超高性能混凝土性能机理与工程应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(02):1-8.
- [2] 邓宗才, 连怡红, 赵连志. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土自收缩性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(01):61-69.
- [3] 王瑞, 李悦, 张勇. 超高性能混凝土自收缩机理与调控方法研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(05):1689-1697.
- [4] 刘军, 周建民, 赵鑫. 超低水胶比混凝土自干燥收缩机理研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(08):102-109.
- [5] 陈俊, 杨峰, 李明. 矿物掺合料对UHPC收缩及耐久性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(03):521-527.
- [6] 张海波, 王浩. 养护制度对超高性能混凝土自收缩与孔隙结构的调控机制[J]. 中外公路, 2024, 44(02):189-194.
- [7] 李洋, 陈宇. 超高性能混凝土微裂缝对耐久性能的影响规律[J]. 工程材料与应用, 2022, 10(04):78-83.
- [8] 周明辉, 孙佳. 纤维改性UHPC收缩变形及抗冻耐久性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(01):156-161.
- [9] 张博文. 超高性能混凝土长期耐久性研究进展与展望[J]. 材料导报, 2024, 38(09):2301-2308.