

轻质超高性能混凝土制备及其力学性能研究

范子威

无锡市惠山区公路事业发展中心 江苏无锡 214100

摘要: 本文聚焦于轻质超高性能混凝土 (LUHPC) 的制备工艺与力学性能研究。通过选用合适的原材料, 如水泥、轻集料、矿物掺合料、纤维等, 并采用紧密堆积理论和过剩浆体理论进行配合比优化设计, 成功制备出目标性能的 LUHPC。对其力学性能测试结果表明, 该材料具备较高的抗压强度、抗拉强度和良好的弯曲韧性。同时, 深入分析了各原材料及配合比参数对 LUHPC 力学性能的影响机制。本研究为 LUHPC 在实际工程中的广泛应用提供了重要的理论依据和技术支持。

关键词: 轻质超高性能混凝土; 制备工艺; 力学性能; 影响因素

引言

超高性能混凝土 (UHPC) 力学性能好、耐久性高, 是当代土木工程最具前景的材料, 但传统的 UHPC 存在自重大、价格高、收缩大的弊病, 一定程度上制约了其在跨度桥梁、超高层建筑等结构自重控制严格的工程中应用, 轻质超高性能混凝土 (LUHPC) 的研发成为该领域的重要探索方向。

一、研究背景与国内外研究现状

(一) 研究背景与意义

LUHPC 引进轻集料等轻质组分, 通过减少混凝土结构自重, 同时部分优化了收缩性能, 一方面, 在保证混凝土高性能的前提下达到了减小基础荷载、降低工程造价、提升结构抗震性能和使用空间等的目的; 另一方面, 合理使用工业废弃物制备轻集料, 实现资源循环利用, 符合可持续发展战略, 故对 LUHPC 的制备及其力学性能研究具有重要的理论意义和工程价值。

(二) 国内外研究现状

国外对 LUHPC 的研究相对较早, 一些国家的先进地区在该领域已取得了相关研究成果, 如日本的学者通过采用新型的轻集料并搭配对应的配合比设计制备具有良好工作性能和力学性能的 LUHPC, 并将其运用在一些标志性建筑物中; 欧美国家也进行了诸多研究, 通过改进原材料组分并搭配对应的方式不断优化 LUHPC 的性能。

国内关于 LUHPC 的研究近几年也有了一定的进步, 众多科研单位和大专院校在 LUHPC 原材料选用、配合比设计、微观结构与性能关系等方面做出了很多研究成果。部分研究成果已经在相关工程中得到了初步应用, 例如部分桥梁工程、超高层建筑的非承重构件采用了 LUHPC。但现阶段, LUHPC 在国内的应用还处在初级阶段, 缺乏相关技术标准以及规范, 仍有许多需不断研究和推广应用的内容^[1]。

二、轻质超高性能混凝土的制备

(一) 原材料选择

1. 水泥

水泥是混凝土中的主要胶凝材料, 对 LUHPC 的性能影响较大, 常采用强度较高的硅酸盐水泥, 如 P·O52.5 水泥或 P·I42.5 水泥。高标号水泥具有较高的早期强度与活性, 能较快与其余组分发生水化反应, 形成较为牢固的水泥石结构, 为 LUHPC 提供较稳定的力学基础; 同时因其为细粒组分, 较易填充轻集料的孔隙, 提高混凝土密实度。

2. 轻集料

轻集料是实现 LUHPC 轻质化的主要原材料, 常用的轻集料有陶砂、页岩陶粒、粉煤灰陶粒、浮石、空心玻璃微珠等。轻集料内孔隙发达、表观密度低, 能够有效降低混凝土总体重量。例如, 陶砂化学稳定性好、具有一定强度, 其内部孔隙在混凝土硬化过程中能发挥“内养护”作用, 提高混凝土内部微观结构和体积稳定性。应考虑轻集料的密度、强度、吸水率、粒形、级配等与其它原材料共同匹配, 以配合提升 LUHPC 性能为选料标准。

作者简介: 范子威 (1995.10-), 男, 汉族, 江苏连云港人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

3. 矿物掺合料

矿物掺合料是组成LUHPC的重要成分，主要用于提升混凝土的工作性、力学性能与耐久性能。硅灰、粉煤灰微珠、矿渣粉为常见的矿物掺合料。硅灰具备超高火山灰活性，在早期即可与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应，生成大量C-S-H凝胶，填充水泥石孔隙，细化孔结构，可大幅度提升混凝土的强度及耐久性。粉煤灰微珠颗粒细小，形态呈球状，“滚珠效应”可以降低水泥浆体的塑性粘度，提升混凝土的流动性，同时粉煤灰微珠后期也可参与火山灰反应，对混凝土的后期强度具有一定贡献。矿渣粉可提升混凝土后期强度，改善混凝土的抗渗性及抗侵蚀性。通过合理配比矿物掺合料的复掺用量可充分发挥矿物掺合料之间的协同作用，提升LUHPC性能^[2]。

4. 纤维

为提高LUHPC的韧性和抗裂性能，通常需掺入一定量的纤维。常用的纤维有钢纤维、聚丙烯纤维、碳纤维等。钢纤维具有较高的强度和弹性模量，能有效阻止混凝土裂缝的扩展，显著提高混凝土的抗拉强度和弯曲韧性。聚丙烯纤维可在混凝土中形成三维乱向分布的网络结构，提高混凝土的抗塑性开裂能力。碳纤维具有高强度、高模量的特点，能在不显著增加重量的情况下，有效提升混凝土的力学性能。在实际应用中，可根据工程需求和成本考虑，选择合适的纤维种类和掺量。

5. 外加剂

减水剂、膨胀剂等外加剂是组成LUHPC所必不可少的，外加剂包括许多种类。减水剂可以降低混凝土的水胶比，在提高混凝土强度和耐久性的前提下降低混凝土的用水量；聚羧酸高效减水剂减水率大、保坍性能优良，在LUHPC中被广泛应用。膨胀剂在混凝土硬化过程中可补偿收缩、减少开裂，提高混凝土体积稳定性。如钙矾石类膨胀剂能在混凝土内部产生一定的膨胀，抵消一部分收缩应力。

(二) 配合比设计

1. 设计原则

LUHPC的配合比设计遵循紧密堆积理论和过剩浆体理论。紧密堆积理论旨在通过优化颗粒级配，使水泥、矿物掺合料、轻集料等固体颗粒在混凝土中达到最紧密堆积状态，以降低空隙率，提高混凝土的密实度和强度。过剩浆体理论则是在满足紧密堆积的基础上，确保有足够的浆体包裹骨料颗粒并提供良好的流动性，同时保证浆体在硬化后具有足够的强度。在设计过程中，需综合考虑各原材料的特性、混凝土的工作性能、力学性能和

耐久性要求，通过试配和调整，确定最佳配合比。

2. 设计方法

依据工程需要确定LUHPC的目标性能，如设计强度等级、表观密度、工作性指标等，基于紧密堆积理论，利用Andreasen堆积模型或可压缩堆积模型(CPM)等方法计算出水泥、矿粉、轻粗细集料等固体颗粒的适宜级配，经测定各固体材料的密度和堆积密度，得到最小空隙率，从而得到胶凝材料的用量；按水胶比和强度关系，根据目标强度确定水胶比，一般LUHPC的水胶比较小，往往在0.15 ~ 0.20，按照过剩浆体理论确定工作性所需要的浆体量，从而得到用水量，根据减水率确定减水剂掺量，一般为胶凝材料总量的1% ~ 3%，纤维的掺量根据混凝土对韧性和抗裂性能的需求确定，钢纤维体积掺量一般为1% ~ 3%，聚丙烯纤维、碳纤维掺量低；初步确定好配合比后，试配混凝土，通过各原材料用量的调整，使其工作性、力学性能和表观密度满足设计需要^[3]。

3. 制备工艺

(1) 原材料预处理

对于轻集料来说，需要预先对轻集料进行湿润，以减轻轻集料在混凝土拌和过程中的吸水影响，确保混凝土的水胶比不发生改变。湿润时间及程度应该依据集料的吸收量以及集料的粒径来决定，通常应将集料湿润到接近饱和面干燥即可。对于水泥、矿粉等细集料，应确保干燥、未受潮，不能出现结团现象，从而造成混凝土粉料使用性能的降低。纤维使用前应该检视是否会出现结团、锈蚀等影响外观质量的现象。

(2) 搅拌工艺

利用强制式搅拌机搅拌，使各种原材料均匀充分混合搅拌，先将水泥、矿物掺合料、轻集料等干拌，使各种固体颗粒均匀分散，接着加入部分水和减水剂，搅拌一段时间，使该部分水、减水剂与水泥、矿物掺合料及轻集料混合后形成具有一定流动性的浆体，使胶凝材料得以湿润，并开始发生水化过程，接着在搅拌过程中，将纤维缓慢、均匀地加入，避免纤维出现结团现象，确保其可以均匀地分布在浆体中，接着再继续搅拌剩余的水和减水剂，直至混凝土拌合物具有良好的工作性，使坍落度、扩展度满足混凝土设计要求。混凝土搅拌时间控制在3 ~ 5分钟，根据搅拌机性能、混凝土配合比等因素适量调整。

(3) 成型与养护

将拌好的LUHPC拌合物尽快倒入模具中，使用振动台或插入式振捣棒进行振捣成型，排除混凝土内部气泡，

使其更密实。振捣时间不能太长，以防引起轻集料的上浮和分层。成型后，对混凝土试件覆膜养护，防止水分蒸发。养护常采用标准养护（温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度95%以上）、蒸汽养护相结合的方式。标准养护可保证混凝土在早期有一个适宜的水化环境，使得混凝土强度正常发展；蒸汽养护可加速水泥的水化反应，使得混凝土的早期强度有明显地提高，养护周期也会大大缩短。蒸汽养护制度要根据混凝土配合比与试件的尺寸进行优化，一般由三个步骤组成：升温、恒温、降温。升温速度不能太快，以免造成混凝土内部温度应力较大而开裂。

三、轻质超高性能混凝土的力学性能测试

（一）抗压强度测试

1. 试验方法

遵循《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081—2019）测试抗压强度。用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 立方体试件，每组试件3个。标准养护至规定龄期（3d、7d、28d等），将试件擦干表面水分放于压力试验机上，加载速率为 $0.5\text{--}0.8\text{MPa/s}$ ，均匀施加压力直至试件破坏，记录破坏荷载。

2. 结果分析

随着龄期的增长，LUHPC抗压强度逐渐增大。早期（3d）：由于水泥的快速水化及矿物掺合料的部分反应，LUHPC可形成较高的强度，可高达 $60 \sim 80\text{MPa}$ ，随着龄期的增长，矿物掺合料火山灰反应的进行，水泥石结构的不断密实，7d抗压强度可进一步增加至 $80 \sim 100\text{MPa}$ ，28d时，抗压强度趋于稳定，达到设计强度等级，一般在 $100 \sim 120\text{MPa}$ 以上。不同配合比的LUHPC抗压强度存在差异，水泥用量、水胶比、轻集料的种类和掺量、纤维掺量等均对其存在影响。增加水泥用量和降低水胶比，会增加水泥石的强度和密实度，会提高LUHPC的抗压强度；合适的轻集料种类和掺量会保证轻质的同时，也维持着混凝土的结构完整性，对抗压强度影响较小；适量的纤维掺量，可增加混凝土的韧性、抑制裂缝的发展，对提高抗压强度具有一定作用。

（二）抗拉强度测试

1. 试验方法

采用劈裂抗拉试验测定LUHPC的抗拉强度，试验依据同样为《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081—2019）。试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体，每组3个。在试件上下表面中心位置垫上垫条，将试件放置在压力试验机上，以 $0.02\text{--}0.05\text{MPa/s}$ 的加载

速率缓慢施加压力，直至试件沿劈裂面破坏，记录破坏荷载。

2. 结果分析

LUHPC的抗拉强度较低，纤维的掺入对其抗拉性能的提高起到了关键的作用，一般LUHPC劈裂抗拉强度 $3 \sim 6\text{MPa}$ 左右。纤维对混凝土产生了桥接作用，抑制了裂缝的形成和开展，提高了混凝土抗拉能力，钢纤维的增强作用明显，抗拉强度随掺钢纤维的增加而不断提高。而且，混凝土的微结构，即水泥石与轻集料的界面粘结强度，会对混凝土的抗拉性能产生重大影响。好的界面粘结可以有效地将应力向材料内部传递，提高混凝土的整体抗拉能力。

3. 弯曲韧性测试

（1）试验方法

采用四点弯曲试验测试LUHPC的弯曲韧性，试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，每组3个。在万能材料试验机上进行试验，试件两支点间距为 300mm ，加载点位于两支点中间，间距为 100mm 。采用位移控制加载方式，加载速率为 0.05mm/min ，记录荷载-挠度曲线。

（2）结果分析

从荷载-挠度曲线上可以获得LUHPC的弯曲韧性指数，即I5、I10、I20等。弯曲韧性指数越大表明混凝土的弯曲韧性越高。LUHPC弯曲韧性较好，这主要是纤维发挥增韧作用的结果，受弯过程中的纤维吸收了部分拉力，使混凝土在产生裂缝后仍能发挥一定承载力，荷载-挠度曲线下降较慢。钢纤维掺量、长径比和纤维-基体的粘结性能等都会对弯曲韧性产生明显影响。

结语

本文提出了轻质UHPC的设计方法及配制方案，为轻质UHPC材料理论研究及工程应用提供了依据，未来仍需多学科交叉及工程应用进行印证，进一步补充轻质UHPC性能及应用研究。

参考文献

- [1] 徐相哲. 回收轮胎钢纤维超高性能混凝土力学性能研究[D].2021.
- [2] 尚壮壮. 基于孔结构的再生保温混凝土抗氯离子渗透性能研究[D].2022.
- [3] 李进辉. 抗冲磨超高性能混凝土制备与微结构调控机理研究[D].2021.