

低碳高性能混凝土的配合比优化及力学性能研究

卢成君

南昌瑞活建筑科技有限公司 江西南昌 330000

摘要：低碳高性能混凝土作为建筑行业节能减排的核心材料，兼顾强度、耐久性与低碳环保特性，是实现“双碳”目标的重要技术路径。本文从原材料选择入手，分析胶凝材料、骨料、外加剂的适配性与作用机理；基于密实度原则，系统探讨胶凝材料比例、水胶比、砂率的优化设计方法；通过试验分析其抗压强度、抗折强度、弹性模量等力学性能，以及长期性能与耐久性的关联规律。研究旨在为低碳高性能混凝土的配合比设计提供科学依据，推动其在工程中的规模化应用，助力建筑行业绿色低碳转型。

关键词：低碳高性能混凝土；配合比优化；原材料选择；力学性能

引言

在全球“双碳”目标引领下，建筑行业亟需技术创新节能减排。混凝土是用量最大的建筑材料，其生产中水泥烧制环节碳排放占比高，传统混凝土高碳特性与绿色发展需求矛盾突出。低碳高性能混凝土通过优化原材料组成和配合比设计，降低碳排放且保证或提升核心性能，是解决矛盾的关键方案。目前，其研究与应用有一定进展，但实际工程中面临配合比设计不合理、力学性能不稳定、低碳与高性能协同难等问题，部分项目存在片面追求低碳或性能而忽视另一方的现象，制约推广应用。深入研究其原材料适配性、配合比优化规律与力学性能特征，建立科学设计与应用体系，对提升混凝土低碳化水平与综合性能、推动建筑行业绿色高质量发展有重要理论与实践意义。

一、低碳高性能混凝土的原材料选择与作用

（一）胶凝材料体系的选择

胶凝材料是混凝土强度形成的核心，也是碳排放的主要来源，低碳高性能混凝土胶凝材料体系的选择核心在于减少水泥用量，同时通过掺合料的合理搭配保证胶凝体系的水化活性与强度贡献。水泥作为传统胶凝材料，水化热高、碳排放量大，在低碳混凝土中需控制其用量，优先选用低热矿渣硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥等低碳型水泥品种，这类水泥通过优化熟料矿物组成，在保证强度的同时降低碳排放。

掺合料的合理选用是胶凝材料体系低碳化的关键，常用掺合料包括粉煤灰、矿渣粉、硅灰、稻壳灰等工业废渣或生物质废料。粉煤灰具有形态效应、活性效应与

微集料效应，能改善混凝土工作性，降低水化热，其火山灰活性可与水泥水化产物发生二次反应，提升混凝土后期强度；矿渣粉水化活性高，与水泥复配后能显著提高混凝土的密实度与耐久性；硅灰颗粒细小，比表面积大，能填充水泥水化产物的毛细孔隙，增强界面粘结强度，但需控制掺量以避免工作性下降。通过将不同掺合料复合使用，可发挥协同效应，在减少水泥用量、降低碳排放的同时，实现胶凝体系性能的优化^[1]。

（二）骨料与外加剂的选用

骨料作为混凝土的骨架，占混凝土体积的70%以上，其性能直接影响混凝土的强度、耐久性与工作性。低碳高性能混凝土对骨料的选用需兼顾性能与低碳要求，优先选用高强度、高洁净度、级配良好的天然骨料，减少骨料加工过程中的能耗与碳排放。对于粗骨料，应选择压碎值低、颗粒形状规则、针片状含量少的碎石或卵石，保证混凝土的骨架支撑作用；细骨料宜选用级配合理、含泥量低的天然砂，若采用机制砂需控制石粉含量与颗粒级配，避免影响混凝土工作性与强度。

外加剂是低碳高性能混凝土不可或缺的组分，能在改善工作性、降低水胶比的同时，减少水泥用量，实现低碳化目标。高效减水剂是核心外加剂，优先选用聚羧酸系高效减水剂，其减水率高、缓凝效果适中，能在降低水胶比的同时保证混凝土的工作性，减少水泥用量与水化热；引气剂可引入微小气泡，改善混凝土抗冻性与抗渗性，尤其适用于寒冷地区或潮湿环境下的工程；缓凝剂能调节混凝土凝结时间，避免水化热集中释放导致的裂缝，保障大体积混凝土的施工质量。外加剂的选用需根据胶凝材料特性、骨料类型与混凝土性能要求进行

适配，确保其与各组分的相容性。

（三）各组分对混凝土性能的影响机理

胶凝材料体系的组成直接决定混凝土的强度发展与碳排放水平。水泥用量过多会导致水化热过高，易产生温度裂缝，且增加碳排放；而掺合料的掺入会通过不同机理影响混凝土性能，粉煤灰的形态效应能减少混凝土需水量，改善工作性，活性效应则通过二次水化反应提升后期强度；矿渣粉的水化反应速度与水泥接近，能早期参与强度形成，同时其颗粒细化效应可改善混凝土内部结构；硅灰的高活性与微填充效应能显著提高混凝土的密实度与界面强度，但过量掺入会导致混凝土粘度增大，工作性下降。

骨料的性能对混凝土力学性能与耐久性具有重要影响。粗骨料的强度不足会导致混凝土受力时率先破坏，降低整体强度；细骨料级配不良会增加混凝土需水量，导致水胶比上升，密实度下降，进而影响强度与抗渗性；骨料的含泥量过高会削弱骨料与胶凝材料的界面粘结力，降低混凝土强度与耐久性。外加剂通过物理或化学作用改善混凝土性能，聚羧酸系减水剂通过吸附-分散作用使胶凝材料颗粒均匀分散，减少絮凝结构，降低需水量；引气剂引入的微小气泡能阻断毛细孔隙通道，提高混凝土抗冻性与抗渗性；缓凝剂通过吸附于水泥矿物表面，延缓水化反应速度，避免水化热集中^[2]。

二、低碳高性能混凝土的配合比优化设计

（一）基于密实度的配合比设计原则

低碳高性能混凝土的配合比优化以密实度为核心原则，通过合理搭配各组分比例，使混凝土内部结构致密，减少孔隙率，从而在降低水泥用量的同时，保证强度与耐久性。密实度是混凝土强度与耐久性的基础，致密的内部结构能减少水分渗透与有害物质侵蚀，提升混凝土的长期性能。基于密实度的设计原则要求各组分颗粒级配连续合理，胶凝材料浆体能够充分包裹骨料颗粒，并填充骨料间的空隙，形成结构密实、界面粘结牢固的整体。

在设计过程中，需通过骨料级配优化实现骨架密实，采用连续级配的骨料，使粗骨料空隙被细骨料填充，细骨料空隙被胶凝材料浆体填充，形成多级密实结构。同时，控制胶凝材料浆体的体积与性能，确保浆体具有良好的流动性与包裹性，能够充分填充骨料空隙，避免因浆体不足导致的孔隙率增大，或因浆体过多导致的收缩开裂。基于密实度的配合比设计需综合考虑骨料级配、胶凝材料用量、水胶比等因素，通过试验确定最优组合，

实现混凝土结构密实度与低碳性能的协同提升。

（二）胶凝材料比例的优化方法

胶凝材料比例的优化核心在于在减少水泥用量的前提下，通过掺合料的合理搭配，保证胶凝体系的水化活性与强度贡献。首先需确定胶凝材料的总用量，根据混凝土设计强度与工作性要求，结合骨料特性，初步确定胶凝材料总用量范围。在此基础上，合理分配水泥与掺合料的比例，一般情况下，水泥用量占胶凝材料总量的30%~50%，掺合料总量占50%~70%，具体比例需根据掺合料种类与性能调整。

对于粉煤灰与矿渣粉复合掺加的胶凝体系，可采用“高矿渣粉+低粉煤灰”或“粉煤灰与矿渣粉等比例”复合方式，发挥矿渣粉早期强度贡献与粉煤灰后期强度增长的协同效应。例如，当混凝土设计强度等级为C50时，可采用水泥30%、矿渣粉40%、粉煤灰30%的比例，既减少水泥用量，又保证混凝土早期强度与后期强度发展。硅灰的掺量一般控制在胶凝材料总量的5%~10%，过高掺量会导致工作性下降，需与粉煤灰或矿渣粉配合使用，平衡工作性与强度。胶凝材料比例的优化需通过试验确定，通过测试不同比例下混凝土的工作性、强度与水化热，选择最优配比方案^[3]。

（三）水胶比与砂率的优化调整

水胶比是影响混凝土强度与密实度的关键参数，低碳高性能混凝土的水胶比优化需在保证工作性的前提下，尽可能降低水胶比，提高混凝土强度与密实度。水胶比过低会导致混凝土流动性不足，施工难度增大，易产生蜂窝、麻面等缺陷；水胶比过高则会增加混凝土内部孔隙率，降低强度与耐久性。低碳高性能混凝土的水胶比一般控制在0.28~0.40之间，具体数值需根据胶凝材料特性、外加剂性能与混凝土工作性要求调整。

在确定水胶比时，需结合高效减水剂的减水效果，通过试验绘制工作性-水胶比关系曲线，选择满足施工工作性要求的最小水胶比。同时，水胶比的优化需与胶凝材料比例协同考虑，当掺合料掺量较高时，可适当提高水胶比以保证工作性，但需通过外加剂调整确保强度不受影响。砂率的优化需兼顾混凝土的工作性与强度，砂率过高会增加胶凝材料用量与混凝土收缩，过低则会导致混凝土粘聚性不足，易出现离析、泌水现象。低碳高性能混凝土的砂率一般控制在35%~45%之间，可通过试验确定最优砂率，即在此砂率下，混凝土具有良好的流动性、粘聚性与保水性，同时强度达到最优。

三、低碳高性能混凝土的力学性能研究

(一) 抗压强度与抗折强度特性

低碳高性能混凝土的抗压强度发展具有早期增长平缓、后期增长显著的特点，这与掺合料的二次水化反应特性密切相关。早期水泥水化产生的水化产物为强度提供基础，而掺合料的火山灰活性需在水泥水化产生的氢氧化钙激发下逐步发挥，因此混凝土早期强度增长速度低于传统混凝土，但后期随着二次水化反应的持续进行，水化产物不断填充内部孔隙，强度持续增长。某试验表明，采用水泥30%、矿渣粉40%、粉煤灰30%复合胶凝体系的C50低碳混凝土，7d抗压强度达到38.6MPa，28d抗压强度达到56.8MPa，90d抗压强度提升至65.2MPa，后期强度增长幅度明显高于传统混凝土。

抗折强度是混凝土抵抗弯曲破坏的能力，与抗压强度呈正相关关系，同时受混凝土内部结构均匀性与界面粘结强度影响。低碳高性能混凝土通过优化配合比，减少内部孔隙与界面缺陷，其抗折强度与抗压强度的比值相对稳定，一般在0.10-0.15之间。上述试验中，该C50低碳混凝土7d抗折强度为5.2MPa，28d抗折强度为6.8MPa，90d抗折强度达到7.5MPa，满足道路、桥梁等对弯曲性能有要求的工程应用需求。在实际工程中，可通过调整胶凝材料比例、优化骨料级配等方式，进一步提升混凝土的抗折强度，适应不同场景的使用要求^[4]。

(二) 弹性模量与变形性能

弹性模量反映混凝土抵抗弹性变形的能力，是结构设计中计算变形的重要参数。低碳高性能混凝土的弹性模量与抗压强度密切相关，随着抗压强度的提高，弹性模量逐渐增大，但其增长速率低于抗压强度。这是因为掺合料的掺入会在一定程度上改变混凝土的内部结构，使弹性模量的增长幅度略低于抗压强度。某试验数据显示，C50低碳高性能混凝土28d弹性模量为 3.45×10^4 MPa，C60低碳高性能混凝土28d弹性模量为 3.68×10^4 MPa，相较于同强度等级的传统混凝土，弹性模量略低，但仍能满足大部分结构工程的设计要求。

变形性能包括收缩变形与徐变变形，低碳高性能混凝土的收缩变形主要受胶凝材料用量、水胶比、掺合料种类等因素影响。通过优化配合比，控制胶凝材料用量与水胶比，合理选用掺合料，可有效降低混凝土的收缩变形。上述C50低碳混凝土的28d干燥收缩值为 325×10^{-6} ，90d干燥收缩值为 410×10^{-6} ，低于传统C50混凝土的收缩值，这得益于掺合料的形态效应与微集料效应，减少了混凝土内部的孔隙与应力集中。徐变变形方面，低碳高性能混凝土的徐变系数略高于传统混凝土，

但徐变发展趋于稳定的时间更早，长期徐变性能良好，不会对结构稳定性造成不利影响。

(三) 长期力学性能与耐久性关联

低碳高性能混凝土的长期力学性能与耐久性密切相关，长期强度的稳定增长为耐久性提供了结构基础，而良好的耐久性又能保障长期力学性能的发挥。随着龄期增长，低碳高性能混凝土的抗压强度、抗折强度持续提升，内部结构不断致密，水分渗透系数逐渐降低，抗渗性、抗冻性、抗碳化性等耐久性指标显著改善。

长期力学性能与耐久性的关联主要体现在内部结构的致密化上，二次水化反应产生的水化产物填充了混凝土内部的毛细孔隙，减少了有害物质侵入的通道，同时增强了骨料与胶凝材料的界面粘结强度，提升了混凝土的整体稳定性。此外，掺合料的火山灰反应还能降低混凝土内部的碱含量，减少碱骨料反应的风险，进一步提升长期耐久性^[5]。

结语

低碳高性能混凝土的配合比优化与力学性能研究是建筑材料低碳化转型核心。合理选胶凝材料、骨料与外加剂，构建适配原材料体系，可减水泥用量、降碳排放，提升混凝土性能。基于密度原则优化配合比设计，科学调整胶凝材料比例、水胶比与砂率，使混凝土内部结构致密，兼顾低碳与高性能。其力学性能早期强度稳定、后期持续增长、变形性能好，长期力学性能与耐久性关联大，为工程应用提供保障。工程实践中，要依项目强度要求、使用环境与施工条件选原材料、优化配合比，确保性能达标。未来，应加强原材料创新、完善配合比设计理论、推广工程应用，提升其低碳水平与综合性能，推动建筑行业绿色低碳高质量发展，为“双碳”目标提供技术支撑。

参考文献

- [1] 李杰. 配合比对高强混凝土性能影响的探讨[J]. 低碳世界, 2022(1).
- [2] 栾晨晨. 粉煤灰地聚物混凝土性能预测及配合比低碳优化设计[D]. 四川大学, 2022.
- [3] 许梓晔. 再生粗骨料沙漠砂混凝土的制备及力学性能研究[D]. 宁夏大学, 2022.
- [4] 黄雅攀. 湿热地区自养护机制砂路面混凝土性能及微观结构演化研究[D]. 佛山科学技术学院, 2021.
- [5] 肖建庄, 邓琪, 夏冰. 混凝土制备低碳化演进与展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2022(005): 039.