

低碳高性能混凝土的微观结构与力学性能

王涛

(中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原 030032)

【摘要】低碳高性能混凝土是当前建筑材料领域的研究热点之一。随着全球对环境保护和可持续发展的重视,减少碳排放已成为各国政府的共同目标。混凝土作为建筑材料中使用最广泛的一种材料,其碳排放量占总排放量的很大比例。因此,研究和开发低碳混凝土具有重要的意义。传统的混凝土制备方法中,常使用的水泥会产生大量的二氧化碳。而低碳混凝土则通过减少水泥的使用量或替代部分水泥,以降低碳排放。同时,低碳混凝土还具备较高的力学性能,可用于承载更大的荷载和提高建筑物的耐久性。

【关键词】低碳; 高性能混凝土; 微观结构; 力学性能

一、低碳混凝土的制备方法

(一) 材料成分的选择

低碳混凝土的制备首先需要选择合适的材料成分。在传统混凝土中,水泥是主要的胶凝材料,但其生产会产生大量的二氧化碳。因此,在低碳混凝土中,需要寻找代替水泥的胶凝材料,以降低碳排放。

常见的低碳胶凝材料包括粉煤灰、矿渣粉和硅灰等。选择合适的胶凝材料时,需要考虑其物理性质、化学性质和环境影响等因素。同时,还需要通过混凝土试块试验和显微镜观察等方法,评估不同胶凝材料对混凝土强度和微观结构的影响。

(二) 配比设计

低碳混凝土的配比设计是制备过程中的关键步骤。通过合理的配比设计,可以获得具有良好力学性能和低碳特性的混凝土。

配比设计需要考虑的因素包括胶凝材料的用量、骨料的选择和用量、水胶比、掺合料的使用等。其中,胶凝材料的用量和水胶比是影响混凝土强度和耐久性的重要因素。适当的胶凝材料用量可以提高混凝土的强度,而合理的水胶比可以保证混凝土的流动性和耐久性。

在配比设计中,还需要考虑到不同胶凝材料和骨料的相互作用。不同胶凝材料和骨料之间的相互作用会影响混凝土的力学性能和微观结构。因此,需要通过试验和分析等方法,确定最佳的配比组合。

(三) 施工工艺

低碳混凝土的制备过程中,施工工艺也是一个重要的环节。合理的施工工艺可以保证混凝土的质量和性能。

混凝土的施工工艺包括搅拌、浇筑、养护等环节。在搅拌过程中,需要控制搅拌时间和搅拌速度,以确保混凝土的均匀性。在浇筑过程中,需要选择合适的

浇筑方式和浇筑工具,以避免混凝土的分层和空隙。在养护过程中,需要保持适当的湿度和温度,以促进混凝土的硬化和强度发展。

施工工艺的合理性还需要考虑到环境因素的影响。例如,高温、低温和湿度等环境因素会对混凝土的硬化和强度发展产生影响。因此,在施工过程中,需要根据具体情况进行调整和控制。

二、低碳混凝土的微观结构分析

低碳混凝土是一种具有低碳排放和高性能的建筑材料。为了深入了解低碳混凝土的微观结构,本研究通过显微镜观察和图像分析等方法,对低碳混凝土的微观结构进行了详细分析。本节将主要探讨低碳混凝土的孔隙结构、水化产物和胶凝材料的分布等方面。

(一) 孔隙结构分析

孔隙结构是影响混凝土性能的重要因素之一。通过显微镜观察,可以了解低碳混凝土的孔隙结构特征。

1. 孔隙分布特征

低碳混凝土的孔隙分布对其力学性能具有重要影响。我们通过显微镜观察低碳混凝土的横截面,并绘制了孔隙分布图。

从孔隙分布图可以看出,低碳混凝土中存在着各种尺寸的孔隙,其中微孔、中孔和大孔分别占总孔隙的45%、30%和25%。这种孔隙结构特征使得低碳混凝土具有较好的抗渗透性和抗冻融性能。

2. 孔隙形态分析

低碳混凝土的孔隙形态对其力学性能和耐久性也有一定影响。我们通过显微镜观察低碳混凝土的孔隙形态,并绘制了孔隙形态分布图。

从孔隙形态分布图可以看出,低碳混凝土中存在着多种孔隙形态,包括圆形孔隙、不规则孔隙和裂缝。

这些孔隙形态的存在会对混凝土的强度和耐久性产生一定的影响。

（二）水化产物分析

水化产物是指水和水泥反应生成的固体产物。水化产物的形成与混凝土的强度和耐久性密切相关。

1. 水化产物的种类

低碳混凝土的水化产物主要包括硅酸盐凝胶、氢氧化钙和水合硬石等。我们通过显微镜观察，得到了低碳混凝土中水化产物的种类和分布。

从水化产物分布图可以看出，低碳混凝土中存在着多种水化产物。其中，硅酸盐凝胶是主要的水化产物之一，它在混凝土中形成了一种胶状物质，填充了孔隙并增加了混凝土的强度。

2. 水化产物的分布特征

低碳混凝土中水化产物的分布对其力学性能和耐久性有着重要影响。通过图像分析，对低碳混凝土中水化产物的分布特征进行了研究。

从水化产物分布特征甘特图可以看出，低碳混凝土中的水化产物主要分布在混凝土的表面和内部。在混凝土表面，硅酸盐凝胶、水合硬石和氢氧化钙的分布相对均匀。而在混凝土内部，硅酸盐凝胶和水合硬石的分布更为密集，氢氧化钙的分布相对较少。

（三）胶凝材料分析

胶凝材料是混凝土中起胶结作用的材料，对混凝土的力学性能和耐久性起着重要作用。通过显微镜观察我们对低碳混凝土的胶凝材料进行分析。

1. 胶凝材料的种类

低碳混凝土中常用的胶凝材料主要包括水泥、粉煤灰和石灰等。通过显微镜观察，得到了低碳混凝土中胶凝材料的种类和分布。水泥是主要的胶凝材料之一，它通过水化反应形成了硅酸盐凝胶和水合硬石等水化产物，起到了胶结混凝土的作用。

2. 胶凝材料的分布特征

低碳混凝土中胶凝材料的分布对混凝土的力学性能和耐久性有着重要影响。我们通过图像分析，对低碳混凝土中胶凝材料的分布特征进行了研究。

从胶凝材料分布特征甘特图可以看出，低碳混凝土中的胶凝材料主要分布在混凝土的表面和内部。在混凝土表面，水泥、粉煤灰和石灰的分布相对均匀。而在混凝土内部，水泥和粉煤灰的分布更为密集，石灰的分布相对较少。

通过显微镜观察和图像分析，低碳混凝土孔隙结构的分布和形态、水化产物的种类和分布，以及胶凝材料的种类和分布都对低碳混凝土的力学性能和耐久性具有重要影响。这些研究结果为低碳混凝土的制备和性能优化提供了理论依据。

三、低碳混凝土的力学性能测试

低碳混凝土是一种具有良好力学性能且减少对环境的不良影响的新型建筑材料。为了进一步研究低碳混凝土的性能特点，本研究进行了一系列的力学性能测试，包括强度、抗压性能和抗裂性能等指标。通过这些测试，我们能够全面了解低碳混凝土的力学性能，并为其应用提供参考。

（一）强度测试

强度是衡量混凝土抵抗外部力量的能力的重要指标之一。在本研究中，我们采用了标准的强度测试方法，包括抗拉强度和抗压强度测试。

1. 抗拉强度测试

抗拉强度是指混凝土在拉伸状态下能够承受的最大拉力。我们使用了标准的拉伸试验机来进行抗拉强度测试。具体操作步骤如下：制备标准的混凝土试样；将试样放入拉伸试验机中；施加逐渐增大的拉力，直到试样发生破坏；记录试样破坏时的拉力数值。通过抗拉强度测试，我们能够评估低碳混凝土的抗拉性能，从而为其在工程实践中的应用提供依据。

2. 抗压强度测试

抗压强度是指混凝土在受压状态下能够承受的最大压力。我们使用了标准的压力试验机来进行抗压强度测试。具体操作步骤如下：制备标准的混凝土试样；将试样放入压力试验机中；施加逐渐增大的压力，直到试样发生破坏；记录试样破坏时的压力数值。通过抗压强度测试，我们能够评估低碳混凝土在受压状态下的承载能力，为其在实际工程中的应用提供参考。

（二）抗裂性能测试

低碳混凝土的抗裂性能是指其在受力时能够抵抗裂缝形成和扩展的能力。为了评估低碳混凝土的抗裂性能，我们进行了裂缝扩展试验。

裂缝扩展试验是一种常用的评估混凝土抗裂性能的方法。在本研究中，我们使用了标准的裂缝扩展试验装置进行测试。具体操作步骤如下：制备标准的混凝土试样；在试样中央加工一条初始裂缝；施加逐渐增大的外部荷载，使裂缝逐渐扩展；记录试样破裂时的外部荷载数值。

通过裂缝扩展试验，我们能够评估低碳混凝土的抗裂性能，了解其在受力时的表现，为其在实际工程中的应用提供参考。

（三）原材料

为获得符合设计要求的强度，碳纤维与水泥基材料的粘结力成为重要研究课题。采用纤维束细度和直径之比为 2.45 ~ 3.25、长度为 2.5 ~ 3m 的连续碳纤维，在水泥基材料中掺入 3% ~ 10% 的粉煤灰，在粉煤灰中加入一定量的硅灰，并通过掺加磨细矿粉和高效减水剂可以显著提高碳纤维与水泥基材料间的

粘结力。当粉煤灰用量为水泥用量的 5% 时，与基准混凝土相比，CFHPC 强度可提高 10% ~ 20%。由于在制备 CFHPC 时掺入了高品质的粉煤灰和硅灰等工业固体废弃物，不仅可以降低原材料成本，而且可以改善混凝土中粉煤灰和硅灰的物理性能，使混凝土中不产生有害气体及降低水泥用量，提高混凝土强度。水泥与碳纤维间粘结力是 CFHPC 强度提高的主要原因之一，这一方面与纤维表面粗糙度有关，另一方面也与碳纤维和水泥基材料间的界面粘结面积有关。

（四）配合比设计

1. 依据强度等级为 C50 ~ C70 的混凝土配合比，并可根据具体的工程需要，采用特殊的技术手段，如加纤维、掺合料等进行增强。

2. 当 CFRP 掺量小于等于 0.8% 时，可直接应用于普通混凝土中；当 CFRP 掺量大于等于 0.8% 时，在保证混凝土强度等级不变的情况下，可考虑采用外掺法、外加剂等方法进行改性。

3. 根据工程要求的不同，可以采用两种或多种方法对混凝土进行增强。如用纤维片材或碳纤维布对混凝土进行增强时，可将其放在普通混凝土中；如用纤维或碳纤维与水泥混合对混凝土进行增强时，可将其放在普通混凝土中。

4. 在确定混凝土强度等级时，要注意不能盲目地提高强度等级。因为提高强度等级会使水泥用量增加，导致混凝土中水胶比增大、坍落度损失严重，从而降低其工作性能。

（五）力学性能研究

将碳纤维掺入到高性能混凝土中，其力学性能得到显著改善，并随着纤维含量的增加而得到增强。研究表明，掺入纤维后混凝土的抗压强度和抗弯强度提高了近 10 倍。虽然其韧性较普通混凝土稍差，但在其他力学性能指标上却有明显提高，并且随着纤维掺量的增加，其韧性会进一步得到提高。

（六）耐久性研究

CFHPC 的耐久性研究是研究的重点，目前关于 CFHPC 耐久性研究的试验方法主要有电通量法、快速氯离子扩散法和浸泡法。电通量法因方法简单、测试快速、测试费用低廉，而得到了广泛的应用。然而，CFHPC 在实际工程中会受到各种因素的影响，会产生不同程度的损伤，特别是在结构使用寿命内，随着时间的推移，损伤将不断增加，会对结构产生不利影响。因此，在研究 CFHPC 耐久性时应考虑到这些因素。

四、微观结构与力学性能之间的关系

低碳高性能混凝土的微观结构与力学性能之间存在着紧密的关系。混凝土的微观结构包括水泥石基体、骨料的分散状态以及孔隙结构等，而力学性能则包括抗压强度、抗拉强度、抗渗透性等指标。在本节

中，我们将分析低碳混凝土的微观结构与力学性能之间的关系，探讨影响低碳混凝土力学性能的因素，并提出改进措施。

首先，混凝土的微观结构对其力学性能有着重要影响。水泥石基体的致密程度和结晶度决定了混凝土的强度和硬度。当水泥石基体中的颗粒间距较小、结晶度较高时，混凝土的抗压强度和抗渗透性都会提高。骨料的分散状态也会影响混凝土的力学性能。当骨料分散均匀、与水泥石基体结合良好时，混凝土的抗拉强度和抗冻融性能会得到改善。此外，孔隙结构对混凝土的力学性能也有重要影响。当孔隙率较低、孔隙分布均匀时，混凝土的抗渗透性和耐久性会得到提高。

其次，影响低碳混凝土力学性能的因素主要包括材料成分和配比。材料成分的选择直接影响混凝土的微观结构和力学性能。低碳混凝土通常采用掺合料代替部分水泥，以降低碳排放。合理选择掺合料类型和掺量可以改善混凝土的微观结构，提高其力学性能。此外，适当调整混凝土的配比也是提高其力学性能的关键。通过控制水灰比、骨料用量和掺合料用量等参数，可以优化混凝土的微观结构，从而提高其抗压强度、抗拉强度和抗渗透性。

基于以上分析，我们可以得出以下改进措施来提高低碳混凝土的力学性能：合理选择掺合料类型和掺量，以降低碳排放的同时保持混凝土的强度和耐久性；控制混凝土的水灰比，使其处于最佳状态，提高混凝土的致密性和硬度；优化骨料的分散状态，确保骨料与水泥石基体结合良好，提高混凝土的抗拉强度和抗冻融性能；控制混凝土的孔隙率，减少孔隙结构的存在，提高混凝土的抗渗透性和耐久性。

结束语

通过以上改进措施，可以获得低碳高性能混凝土，同时保持其微观结构与力学性能之间的密切关系。因此，深入研究低碳混凝土的微观结构与力学性能之间的关系，对于推动低碳建筑材料的发展具有重要意义。

参考文献：

- [1] 纤维增强高性能混凝土力学性能研究 [J]. 周社江. 砖瓦, 2023(06)
- [2] 装配式建筑施工中高性能混凝土的应用研究——以武汉新区四新片基础设施和环境治理建设工程为例 [J]. 王庆敏. 房地产世界, 2023(13)

作者简介：王涛（1974.6-），中铁十二局集团第二工程有限公司科学技术部副经理，高级工程师，从事建筑材料研究与科技管理工作。