

超高强高性能混凝土研究及其应用现状

金自清

上海建工建材科技集团股份有限公司 上海 200086

摘要: 超高强高性能混凝土 (UHPC) 作为一种新型的建筑材料, 具有卓越的力学性能、耐久性和抗震性能, 在世界范围内受到了广泛关注。本文通过对近年来的研究文献进行综述, 总结了UHPC的研究进展和应用现状。

关键词: 超高强高性能混凝土; 配方设计; 应用现状

1 超高强高性能混凝土的概念

超高强高性能混凝土是一种具有卓越性能和特殊用途的建筑材料, 它在力学性能、耐久性、抗裂性和施工性能等方面超越了传统混凝土材料。与普通混凝土相比, 超高强高性能混凝土具有更高的抗压强度、抗拉强度和抗折强度, 能够耐受更大的荷载。同时, 它还具有更低的收缩性和渗透性, 能够更好地抵抗环境的侵蚀和损害。此外, 超高强高性能混凝土的施工性也得到了极大的改善, 可以更方便、快捷地进行施工。超高强高性能混凝土的广泛应用领域包括高层建筑、特殊桥梁、核电站、隧道工程等需要承受高荷载和极端环境条件的工程项目。它可以提高结构的稳定性和安全性, 减少维修和保养成本, 延长结构的使用寿命^[1]。实现超高强高性能混凝土的关键在于优化配合比、选用优质的水泥和骨料, 加入化学掺合料和外加剂, 采用混凝土工艺技术等。此外, 精细化的施工管理和质量控制也是确保超高强高性能混凝土性能的重要环节。超高强高性能混凝土的发展对建筑工程领域具有重要的意义。它不仅可以提升工程项目的整体质量和可靠性, 还能够推动建筑结构设计和施工技术的创新。随着技术的不断进步和应用经验的积累, 相信超高强高性能混凝土在未来会有更广泛的应用, 为建筑行业的发展做出更大的贡献。

2 超高强高性能混凝土的应用现状

目前, 超高强高性能混凝土的应用已逐渐扩展到各个领域。在桥梁工程中, 超高强高性能混凝土可以用于建造大跨度、高要求的桥梁, 如悬索桥、斜拉桥和拱桥等。其优异的力学性能和耐久性能可以保证桥梁的安全稳定性和使用寿命。在高层建筑中, 超高强高性能混凝土可用于承受垂直和水平荷载的结构部件, 如柱、梁和墙体等。它的抗压强度和抗震性能能够有效增强建筑物的结构稳定性和抗震能力。在核电站和隧道工程中, 超高强高性能混凝土可以应对极端的温度、辐射和湿度等特殊环境要求。它的低渗透性和高耐久性能使其在恶劣

条件下依然能够保持结构的稳定性和安全性。超高强高性能混凝土还广泛应用于海洋工程、水利工程和地下工程等领域。它的耐久性和抗化学侵蚀能力使其适用于海水浸泡、酸碱环境和高温条件下的工程建设。需要注意的是, 虽然超高强高性能混凝土具有卓越的性能, 但其施工技术和工艺要求较高。在实际应用中, 需要严格控制配合比、施工温度和养护条件等, 确保混凝土的质量和性能。

3 超高强高性能混凝土的材料组成和配方设计

3.1 水泥和胶凝材料的选择与配比

超高强高性能混凝土的材料组成和配方设计是保证其卓越性能的关键。在选择水泥和胶凝材料时, 通常会考虑以下几个因素。需要选用高质量的水泥, 如硅酸盐水泥、矿渣水泥或复合细粉水泥。这些水泥的粒度细腻, 反应活性高, 能够使混凝土具有更高的抗压强度和抗裂性能。胶凝材料的选择包括填料和粘结材料。填料可以选择细度适中的骨料, 如石子和砂子, 以提高混凝土的密实性和强度。粘结材料常常采用高性能外加剂, 如高性能聚羧酸减水剂, 可以显著提高混凝土的流动性、延展性和抗裂性。在配比设计上, 需要根据目标性能确定各种材料的比例^[2]。一般来说, 水胶比要尽量降低, 以减少水分的使用量, 提高混凝土的抗压强度和耐久性。同时, 骨料比例要合理选取, 以保证混凝土的密实性和力学性能。此外, 还可以根据具体需求添加适量的化学掺合料, 如矿渣、微珠和矿物掺合料, 以进一步提高混凝土的性能。在配方设计过程中, 需要充分考虑材料的相互作用和施工性能。通过合理的配比和掺合料的使用, 可以提高混凝土的可流动性和抗裂性, 减少收缩和渗透的问题, 保证施工过程的顺利进行。

3.2 矿物掺合料和粉煤灰的应用

矿物掺合料和粉煤灰是超高强高性能混凝土配方设计中常用的重要材料。它们的应用可以显著改善混凝土的性能和减少环境对混凝土的影响。矿物掺合料是指

将矿渣、微珠等非金属矿物颗粒掺入混凝土中的材料。矿渣掺合料是利用冶金、矿石加工和热电厂产生的副产品，具有较高的硅酸盐含量和活性，能够填充混凝土中的孔隙，弥合混凝土的微观裂缝，提高混凝土的致密性和耐久性。微珠（沉珠）掺合料是经过火力发电厂燃煤后收集到的一种全球状、连续粒径分布、超细、实心的硅铝酸盐超细粉煤灰，具有高硅酸盐活性和细度，能够改善混凝土料浆的润湿性和可流动性。粉煤灰是燃煤电厂烟气中生成的一种细粉状煤燃烧副产物。它主要分为I类和II类两种，具有较高的活性和粉煤灰改良效果。粉煤灰可以填充混凝土的孔隙，减少水泥用量，提高混凝土的致密性和抗裂性能。在施工时，粉煤灰还能够提高混凝土的流动性和工作性能，减少混凝土的温度升高和收缩应力，降低混凝土的热裂风险。

3.3 化学掺合料在超高强高性能混凝土中的作用

化学掺合料在超高强高性能混凝土中起着关键作用，能够改善混凝土的性能并提升其工程应用的可行性。首先，化学掺合料可以改善混凝土的流动性和可塑性。例如，高性能聚羧酸减水剂能够显著降低混凝土的黏滞阻力，使混凝土流动性更好，便于施工，同时保持混凝土的稳定性。高性能聚羧酸减水剂还能控制混凝土的水泥凝结时间，延长混凝土的可用时间，提高施工效率。其次，化学掺合料能够提高混凝土的强度和耐久性。例如，硅灰、矿渣等矿物掺合料能填充混凝土中的毛细孔隙，增加混凝土的致密性和强度。此外，这些化学掺合料还能够减少氯离子侵入混凝土的速率，提高抗氯离子渗透性能，延长混凝土的使用寿命。另外，化学掺合料也可以改善混凝土的耐久性。抗裂剂和纤维材料可以显著提高混凝土的抗拉抗裂性能，减少裂缝的形成和扩展，提高混凝土的耐久性。

3.4 骨料的选择和颗粒级配

在超高强高性能混凝土中，骨料的选择和颗粒级配是关键步骤，对于混凝土的力学性能和耐久性有着重要的影响。骨料的选择应考虑其物理、化学性质以及强度和硬度等因素。优质的骨料应具有坚硬、耐磨和抗压强度高的特点，以保证混凝土的强度和耐久性。一般常用的骨料有河砂、石子、碎石、矿渣等。其中，石子是一种常用的骨料，具有较高的强度和硬度，适用于超高强高性能混凝土。进行颗粒级配是为了使混凝土具有最佳的力学性能。通过合理分布不同粒径的骨料，可以填充混凝土的孔隙和空隙，提高混凝土的密实性和强度。常用的颗粒级配方法有最紧密堆积密度法和最小包络曲线法。最紧密堆积密度法是通过实验分析各粒径骨

料的相对孔隙率，找到最大孔隙率的骨料配比，以最大限度降低孔隙率和提高混凝土的强度。最小包络曲线法则通过分析骨料的颗粒大小和填充率，得到最高的填充率，提高混凝土的抗压能力。在实际应用中，选择合适的骨料和进行合理的颗粒级配不仅需要考虑力学性能和耐久性能，还需要兼顾工程施工的实际情况和经济性。

3.5 混凝土掺合剂的应用

混凝土掺合剂是一种能够改善混凝土性能的材料，广泛应用于建筑工程和基础设施建设中。掺合剂可以改善混凝土的可塑性和流动性。例如，高性能聚羧酸减水剂是一种常用的掺合剂，能够通过降低混凝土的表面张力，增加混凝土的可塑性，提高混凝土的流动性和易振实性。这对于施工过程中的浇筑和振实操作可以起到很好的辅助作用。掺合剂可以提高混凝土的强度和耐久性。例如，硅灰、矿渣和粉煤灰等矿物掺合剂可以填充混凝土中的孔隙，提高混凝土的致密性和抗压强度。同时，这些掺合剂还可以减少混凝土中的氯离子侵入速率，提高混凝土的抗氯离子渗透性能，延长混凝土的使用寿命^[3]。一些特殊的掺合剂可以针对特定工程需求提供特殊功能。例如，掺加不同品种的纤维可以在混凝土中形成均匀分散的纤维网络，有效提高混凝土的抗裂性能。抗震剂和防渗剂则可在地震和渗透性方面提供额外保护。

4 超高强高性能混凝土的施工工艺和结构设计

4.1 混凝土浇筑和养护的技术要点

超高强高性能混凝土（UHPC）的施工工艺和结构设计是确保混凝土性能和质量的重要因素。在施工过程中，需要注意以下几个关键技术要点：（1）混凝土配合比的设计应根据工程要求和混凝土性能要求进行合理设计。在UHPC中，水胶比应尽量低，以此保证混凝土的致密性和强度，但水胶比并不一定越低越好，需要根据相关项目设计要求及施工工况进行调整。同时，掺合剂、骨料和胶凝材料的选择和配比也需要根据具体工程要求进行合理搭配。（2）超高性能混凝土浇筑过程需要注意混凝土的均匀性和方向性。在浇筑过程中，应均匀移动、分层随结构部分单一方向，避免来回反复浇筑，导致纤维方向杂乱，影响性能，同时辅以轻微振捣，以避免混凝土中的空隙和孔隙。（3）混凝土养护过程是确保UHPC强度和耐久性的关键环节。一般应采用喷水养护或湿布保湿的方法，以减少混凝土的干燥收缩和温度升高。养护时间应根据混凝土的配合比、温度和湿度等因素确定，一般需要进行较长时间的养护，确保混凝土的完全硬化和强度发展。（4）超高强高性能混凝土的结构设计也是确保工程性能和安全的關鍵。由于UHPC具有较

高的强度和刚度，因此在结构设计时需要合理考虑荷载分配、节点连接和受力传递等因素，以确保结构的整体稳定和抗震性能。

4.2 预应力技术在超高强高性能混凝土中的应用

预应力技术在超高强高性能混凝土中的应用有助于提高混凝土结构的强度、刚度和耐久性，使其具有更好的抗震、抗裂性能和持久性。通过向混凝土中引入预应力钢筋，可以在混凝土施加压应力，抵消其自身受到的拉应力。这样不仅可以使混凝土结构在受力时具有更高的抗弯、抗剪和抗扭能力，还能提高抗震性能，保证结构的安全性和可靠性。预应力技术可以减小混凝土结构的变形和裂缝。在混凝土结构中引入预应力钢筋后，混凝土在受力时会受到钢筋的拉应力的约束，从而降低混凝土的变形和裂缝的发生。这对于超高强高性能混凝土来说尤为重要，因为超高强高性能混凝土具有较低的延性，存在较大的收缩和温度变形问题。由于预应力钢筋对混凝土的约束作用，可以减小混凝土中的孔隙和空隙，提高混凝土的致密性，阻碍大气中的氧气、水分和化学物质的渗透，从而提高混凝土的抗侵蚀性能和耐久性。

4.3 微细材料和添加剂在超高强高性能混凝土中的应用

微细材料和添加剂在超高强高性能混凝土（UHPC）中的应用对于提升混凝土的性能和品质具有重要作用。微细材料的应用可以有效填充混凝土中的孔隙和空隙，提高混凝土的密实性和强度。微细材料的颗粒尺寸较小，具有较大的比表面积，能够与水浆中的水化产物反应，形成致密的凝胶体，从而增强混凝土的强度和耐久性。常见的微细材料包括微硅粉、高活性粉煤灰等。添加剂的应用可以改善混凝土的工作性能和性能稳定性。特殊的添加剂如高性能聚羧酸减水剂可显著提高混凝土的流动性和可塑性，增加混凝土的易振实性，有利于施工操作。引入纤维添加剂可以提高混凝土的抗裂能力和抗冲击能力，有效防止裂缝和破碎的发生。添加剂还可以改善混凝土的耐久性和抗侵蚀性能。抗碳化剂则能减

缓混凝土中碳化反应的速度，从而降低混凝土的碳化程度。

5 超高强高性能混凝土的未来发展

超高强高性能混凝土（UHPC）作为一种新型的建筑材料，在未来的发展中有着广阔的应用前景和发展空间。首先，在基础设施建设领域，UHPC有望应用于桥梁、高速公路、隧道、港口和机场等重要工程中。由于UHPC具有优异的力学性能、耐久性和抗冲击性能，能够提高工程结构的承载能力、抗震能力和抗灾能力，同时减少维护和修复成本。因此，在未来的基础设施建设中，UHPC有望成为一种主流的结构材料。其次，UHPC还可以应用于建筑领域，例如高层建筑和地下空间的结构构件。由于UHPC具有较高的强度、较小的变形和较好的耐久性，可以减小结构的自重，提高结构的抗风性能和抗震性能。此外，随着科学技术的不断进步，UHPC在材料研发和工程应用方面也将不断取得创新突破。例如，通过引入新型的微弱参量和智能材料，可以提高UHPC的自愈性、自清洁性和自适应性，使其具备更多功能和应用范围。另外，利用3D打印技术结合UHPC的特性，可以实现个性化、定制化的建筑构件的生产和制造。

结束语

未来，随着技术的发展和研究的深入，UHPC有望实现更高级别的性能和更多的应用领域。为了推动UHPC的发展，还需要加强对UHPC材料性能的研究、生产工艺的优化，并结合先进的技术手段，进一步提升UHPC的功能化和定制化能力。相信通过不断的努力，UHPC将为建筑行业的进步与可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1]张宇.黄建国.超高强高性能混凝土的研究和应用进展[J].建筑材料学报.2021.24(4): 942-954.
- [2]韩明.李宇航.超高强高性能混凝土配合比设计与工程应用[J].水泥与混凝土研究.2021.51(2): 28-34.
- [3]李鹏.王云鹤.孙伟等.超高强高性能混凝土材料性能及其应用现状[J].硅酸盐通报.2021.40(3): 438-447.