

# 超高性能混凝土 (UHPC) 在风电塔筒施工质量控制中的技术应用

张明达

冀东混凝土(天津)有限公司 天津 300399

**摘要:** 本文探讨了超高性能混凝土(UHPC)在风电塔筒施工质量控制中的技术应用。UHPC因其高强度、高韧性和优异耐久性,在风电塔筒施工中展现出显著优势。文章详细阐述了UHPC的材料性能与特点,施工工艺流程,以及施工质量控制关键技术,包括原材料质量控制、配合比设计与优化、施工过程中的质量控制和施工质量检测与评定。

**关键词:** 超高性能混凝土(UHPC); 风电塔筒; 施工质量控制

## 一、超高性能混凝土(UHPC)的材料性能与特点

### 1. UHPC的组成与性能

UHPC(超高性能混凝土)是一种由特殊配方水泥、细砂、超细粉料(如硅灰、石英粉等)、钢纤维以及高效减水剂等组成的复合材料。它特殊的组成结构,使UHPC具有优良的特性。由于超细粉料的填充能力和钢纤维的强化效果,UHPC展现出了极高的紧密度和强度,其抗压能力通常可以超过150MPa,某些高品质的产品的抗压强度甚至可以超越800MPa。同时UHPC也显示了较好的韧性及抗裂性能,能有效地吸收力作用下的能量并维持结构整体性。另外UHPC耐久性优良,能抵抗各种环境因素如化学侵蚀,冻融循环及氯盐侵入所造成的破坏,保证了结构在严酷环境中的长期稳定。

### 2. UHPC的力学性能

UHPC的力学性能极为出色,其抗压强度远超普通混凝土,普遍可达150MPa以上,极端情况下甚至能突破800MPa大关。这种高强度的特性,使得UHPC在承受巨大荷载时依然能保持结构稳定。同时,UHPC还展现出卓越的抗拉性能,初裂强度在7~11MPa之间,极限抗拉强度更是可高达37MPa,这得益于其内部掺入的大量钢纤维,有效提升了材料的韧性和延性。在受到冲击或振动时,UHPC能够承受较大的变形而不发生破坏,这种高韧性特性对于提高结构的安全性和耐久性具有重要意义。

### 3. UHPC的耐久性

UHPC之所以具有极其突出的耐久性,是由于它具有密实的微观结构以及优良的材料组成。UHPC的内部

孔隙率由于其极低的水胶比而显著减少,这有效地阻止了如氯离子、硫酸盐等外部侵蚀性物质的渗透,从而显著增强了其对化学侵蚀的抵抗力。同时UHPC也表现出了优异的抗冻融特性,经多次冻融循环作用,内部结构与性能仍能稳定,无明显剥落与破坏。另外UHPC具有优异的抗碳化性能及耐磨性能,能在苛刻环境条件下能长期维持原有力学性能及外观质量。这些优良的耐久性特性使UHPC被广泛应用于风电塔筒,桥梁,高层建筑以及其他需长期经受恶劣环境的工程领域。

## 二、UHPC在塔筒施工中的工艺流程

### 1. 材料配制与运输

UHPC(超高性能混凝土)的材料配置和运输过程是确保其卓越性能得到最大限度发挥的核心环节,这一环节要求进行精细的操作和严格的管理。材料配制阶段需要对每种原材料进行严格的选择,以保证其品质达到高标准要求。水泥作为一种胶凝材料,其强度和稳定性直接影响到UHPC的最终性能表现;对于骨料,需要确保其粒度分布合理且质地坚固,这样才能为其提供坚固的骨架支持;掺入掺合料是为了使混凝土微观结构最优化,增强混凝土密实度和耐久性;但高效减水剂可以有效地减小水胶比,从而使混凝土获得较高强度,同时又保持流动性。这些原材料经过精确计量,再经过高效搅拌机充分搅拌,以保证各种成分分布均匀,从而形成工作性能卓越的混凝土拌合物。

在运输期间,UHPC拌合物性能的维持也是必不可少的。由于UHPC水胶比很低,运输条件要求比较严格。需要使用专业混凝土搅拌车输送,同时保证搅拌罐连续

低速旋转，避免混凝土拌合物离析或者初凝。同时运输路线需要事先计划好，以保证拌合物能以最短的时间到达施工现场，降低运输时时间损耗和性能波动。另外，还要密切注意环境温度和湿度的变化情况，并采取必要的隔热或保湿措施以保证UHPC拌合物运输途中性能的稳定，从而为以后施工打下坚实的基础。

## 2. 混凝土浇筑与振捣

在UHPC施工过程中，混凝土的浇筑和振捣是至关重要的步骤，它们的质量直接影响到整体结构的稳定性和持久性。浇筑之前，模板需要经过仔细的检验，以保证模板牢固不漏，给混凝土成型提供规则的空间。在浇注过程中，混凝土拌合物要从高处倾倒下来，并利用本身流动性进行均匀摊铺，以免产生离析现象。对高度较高结构需要分层浇筑，各层厚度要严格控制在要求范围之内才能保证混凝土均匀致密。

振捣过程是确保混凝土达到最优密实度的核心环节。利用插入式振捣器或者附着式振捣器高频振动使混凝土内空气有效地排出体外，骨料和胶凝材料完全结合在一起，从而形成密实微观结构。振捣时操作人员需有较多经验，并根据混凝土坍落度，浇筑部位以及振捣器性能等因素灵活地调节振捣时间与插入深度以避免出现过振或者漏振现象。过振可引起混凝土分层或者泌水现象，漏振可在混凝土中产生蜂窝麻面及其他缺陷，对混凝土的力学性能造成严重的影响。

## 3. 养护与质量检测

养护和质量检测作为UHPC建设过程中不可缺少的重要一环，共同保障混凝土结构长期性能和安全性。由于UHPC高性能特性主要取决于它在硬化时微观结构的发育，所以需要精心规划和实施养护过程。通过采纳恰当的养护方法，例如使用保湿膜、喷施养护剂或蒸汽养护，可以有效地维持混凝土表面的湿度，加速水泥的水化过程，进而创造出更为紧凑和均匀的内部构造。养护时间长短及养护条件选择均需要依据特定工程环境及混凝土配合比做出详细调整才能保证混凝土强度及耐久性得到充分发挥。

为了确认养护的效果和混凝土的性质，质量检测成为了至关重要的工具，利用无损检测、抗压强度测试和抗渗性能试验等多种科学手段，能够全方位地评估UHPC的性能指标是否达到了设计的预期标准。这些试验既注重混凝土即时性能的研究，又预测了混凝土长期耐久性，从而为结构安全服役提供科学依据。质量检测

工作需要贯穿于整个施工过程中，无论是原材料检验还是成品构件验收，每个环节都需要严格把好质量关，才能保证不合格品不会进入施工现场和不合格品不会投入使用。

养护和质量检测互为补充共同组成UHPC施工质量控制中的一个重要制度，只有对这两方面给予足够的重视和有效地落实，才可以保证UHPC结构仍能在严酷的环境条件中保持其优良的特性，从而为项目的安全性和耐久性提供扎实的保证。

## 三、UHPC施工质量控制关键技术

### 1. 原材料质量控制

原材料质量控制作为UHPC建设质量的根本，它的重要意义不言而喻。制备UHPC时，水泥选择非常关键，需要选择强度等级较高，性能比较稳定的水泥进行强度、细度以及安定性等方面的严格把关。高效减水剂作为UHPC的核心添加剂，对混凝土的性能和机械特性有直接的影响。因此，选择具有高减水率和低坍落度损失的产品是至关重要的，并需要通过实验来确定其最佳的添加量。诸如硅灰和粉煤灰这样的矿物掺合料，可以显著增强UHPC的持久性和体积的稳定性。为了确保其质量达到规定的标准，我们需要对其活性指标、水分含量和粒子分布进行严格的检查。骨料选择也是一个至关重要的问题，需要选择级配合理，颗粒形状较好的粗骨料与细骨料，严格控制含泥量与杂质含量才能确保UHPC力学性能与耐久性。另外，水质好坏还直接影响到UHPC性能，需要选择无杂质，无有害离子水源，同时要测试出水PH值及含盐量。通过对质量检测及质量管理体系的严格管理，保证了各原材料各项性能指标均满足设计要求，为UHPC施工质量打下了坚实的基础。

### 2. 配合比设计与优化

在UHPC施工中，配合比的设计和优化被视为质量控制的关键步骤，这直接影响到混凝土的机械特性、持久性和施工表现。设计UHPC配合比时需要考虑水泥用量，水灰比，矿物掺合料用量，减水剂用量和骨料级配几个方面。水泥用量对混凝土强度有直接影响，需要在达到设计强度的同时尽可能地减少水泥用量，从而降低成本，减轻环境负担。水灰比被认为是影响UHPC性能的核心参数。过低的水灰比可能会增加施工的复杂性，而过高的水灰比则可能导致混凝土的强度和耐用性下降。因此，我们需要通过实验来确定最佳的水灰比范围。掺加矿物掺合料可显著改善UHPC耐久性及其体积稳定性，

需要结合施工环境及设计要求，选择适宜的掺合料类型，确定最佳掺量。减水剂掺量对混凝土工作性及力学性能有直接影响，需要进行系统试验来确定最优掺量才能实现坍落度损失量低，流动性好，强度高为目的。另外对骨料进行级配设计时需要考虑UHPC高强特性并选取合理粗、细骨料配比才能保证混凝土密实、均匀。设计时还要综合考虑施工环境、季节性因素等因素做出动态的调整，如当温度较高或者温度较低时，水灰比、外加剂掺量等都需要适当的优化才能确保施工性能及混凝土质量。经过全面的实验验证和深入的理论分析，持续地调整和优化配合比参数可以显著提高UHPC的整体性能，从而为风电塔筒的建设质量提供坚实的支撑。

### 3. 施工过程中的质量控制

在风电塔筒施工中，UHPC的质量管理是至关重要的一步，其核心目标是确保混凝土在整个施工阶段都能维持出色的性能和结构特点。首先在搅拌环节中，需要对搅拌时间，搅拌速度以及投料顺序进行严格把控，确保UHPC搅拌均匀一致。搅拌时间太短会使物料混合不足，时间太长又会诱发坍落度的过度损失，所以需要通过实验来确定最优的搅拌参数。二是运输时需要注意保持UHPC湿度、温度、避免阳光直射、风吹等，以防因水分蒸发而降低性能。同时需要定期对混凝土坍落度进行检测，以保证施工过程中流动性满足要求。浇筑环节中，需要分层浇筑，各层厚度不能太厚才能保证振捣效果。浇筑时需要混凝土坍落度及温度进行实时监控以保证混凝土处于设计范围之内。另外振捣也是确保UHPC密实性最关键的一步，需要采用高频振动器，振捣所需要的时间要求均匀、足够长，避免蜂窝、孔洞等缺陷。养护阶段需要及时对保湿材料进行覆盖并维持合适的温度和湿度环境以保证UHPC早期强度开发。同时还需要实时监控施工环境中的温度，湿度以及风速来调整养护措施。通过全过程质量控制保证了UHPC施工期性能稳定，为风电塔筒结构安全耐久性提供了保证。

### 4. 施工质量检测与评定

施工质量检测与评定作为UHPC在风电塔筒建设中的一个重要步骤，旨在通过科学检测手段及评定方法保证混凝土各项性能指标满足设计要求的前提下，为施工质量的提高提供可靠依据。施工结束后需要根据有关规

范及标准对UHPC进行强度、耐久性、外观质量及体积稳定性等综合试验。强度检测作为评价UHPC性能好坏的核心标准，需要对标准养护试件进行抗压强度与抗拉强度检测以保证满足设计要求。同时需要通过抗弯强度、抗剪强度试验来验证UHPC复杂受力情况下承载能力。对UHPC的耐久性进行检测是评价其长期性能的核心环节，这需要通过进行抗冻融循环试验、抗化学腐蚀试验和抗碳化试验来验证其在恶劣环境中的耐久性表现。外观质量检测多采用目视检查和测量手段来评价混凝土表面有无蜂窝，孔洞，裂缝及其他缺陷以保证结构完整美观。另外，UHPC体积稳定性也需要进行测试，并通过混凝土收缩率、膨胀率等指标的测定来评价混凝土长期服役后变形性能。评估时需要结合检测数据及施工记录对UHPC性能指标达到设计要求进行全面分析，对检测出的不合格项需要及时进行分析补救措施以保证施工质量符合预期目的。通过运用科学的检测和评估手段，我们可以全方位地了解UHPC的各项性能特性，从而为风电塔筒的稳定运行和延长其使用寿命提供强有力的支持。

### 结论

在风电塔筒的施工质量管理中，超高性能混凝土（UHPC）表现出了明显的技术上的优越性。从严格控制原材料质量，优化配合比设计，强化施工过程质量控制及开展综合施工质量检测及评价等方面可保证UHPC塔筒质量安全。随着风电行业的不断发展和对塔筒材料要求的不断提高，UHPC将在风电塔筒施工中发挥更加重要的作用，为风电行业的可持续发展做出积极贡献。

### 参考文献

- [1] 宋秋磊, 骆静静, 李梦媛, 等. 机制砂UHPC的性能及其在风电塔筒管片中的应用研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(10): 58-63.
- [2] 张学森, 吴香国, 李丹, 等. 额定风速下装配式UHPC风电塔筒静力与疲劳性能[J]. 可再生能源, 2022, 40(8): 7.
- [3] 庞昆. UHPC增强风力发电塔钢—混转接段静力与疲劳性能研究[D]. 重庆交通大学, 2024.