

《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》

# 编制说明

（征求意见稿）

标准编制组

二〇二五年二月

# 目 录

一、 工作概况 .....	1
(一) 任务来源 .....	1
(二) 主要工作过程 .....	1
二、 标准编制原则和主要内容 .....	2
(一) 标准编制原则 .....	2
(二) 标准主要内容说明 .....	3
三、 主要试验（或分析验证）情况分析 .....	8
(一) 运达巨石涟水风电项目 .....	8
(二) 天津阳光静海 90MW 风电项目 .....	9
(三) 浙江运达国投天津宝坻 150MW 风电场项目 .....	10
(四) 华锐酒泉马鬃山 200MW 风电项目 .....	11
(五) 讷河市东庆 100MW 风电项目 .....	12
(六) 国华投资陕西公司志丹顺宁一期 100MW 风电项目 .....	13
四、 标准中所涉及的专利 .....	14
五、 产业化、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况 .....	14
六、 采用国际标准和国外同类先进标准情况 .....	17
七、 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性 .....	18
八、 重大分歧意见的处理经过和依据 .....	19
九、 标准性质的建议说明 .....	19
十、 贯彻标准的要求和措施建议 .....	19
十一、 废止现行相关标准的建议 .....	20
十二、 其他应予说明的事项 .....	20

## 一、 工作概况

### （一）任务来源

根据中国建筑材料联合会《关于下达 2023 年第九批协会标准制定计划的通知》（中建材联标发〔2023〕86 号）和中国混凝土与水泥制品协会《关于下达 2023 年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第四批）的通知》（中制协字[2023]55 号），由上海风领新能源有限公司、苏州混凝土水泥制品研究院有限公司等单位作为标准负责起草单位组织《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》团体标准的编制工作（计划号 2023-108-xbjh）。

本文件由中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会共同管理并归口，由上海风领新能源有限公司、苏州混凝土水泥制品研究院有限公司等组织相关单位共同完成。

### （二）主要工作过程

本标准于 2023 年 9 月收到立项通知。接到任务后，由上海风领新能源有限公司和苏州混凝土水泥制品研究院有限公司组织成立标准工作组。工作组首先对产品行业状况和国内外相关标准文件进行了广泛调研分析，并征求了部分专家意见，形成标准草稿。

2023 年 11 月 3 日以线上+线下方式召开了《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》标准第一次工作会议，来自四川华构住宅工业有限公司、埃肯国际贸易（上海）有限公司、北京市高强混凝土有限责任公司、天津恒沣翎翔金属新材料股份有限公司、同济大学、致泰科技新材料（江苏）有限公司、嘉兴学院、上海复培新材料科技有限公司、武汉源锦建材科技有限公司、清华大学、深圳国金电力新能设计院有限公司、北京市燕通建筑构件有限公司、上海风领新能源有限公司、苏州混凝土水泥制品研究院有限公司、中国混凝土与水泥制品协会 UHPC 分会等相关专家和代表 25 人参加了此次会议，在本次会议上讨论了本标准的范围、规范性应用文件、技术指标、检验方法等内容，工作组提出了编制计划和编制大纲，围绕编制大纲，与会代表们发表了自己的观点、意见和建议，并讨论了塔筒与管片设计、管片预制生产和安装中需要关注和研究的问题编制组将根据会上提出的意见建议，修改完善编制大纲，及时开展草案编写工作，与会专家和代表提出了意见和建议。

2024 年 6 月 25 日-26 日在安徽淮南召开了《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》标准第二次工作会议，来自高校、科研院所、设计和施工单位等 33 位专家和代表出席了会议。与会代表针对《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》标准的范围、规范性引用文件、术语和定义、分类及标记、一般要求、技术要求、试验方法、检验规则、标志、运输和贮存逐条进行讨论，并在会上正式确定将标准名称更改为《风电塔筒用超高性能混凝土管片技术规程》。

会议结束后，编制组根据第二次工作会议对草案提出的意见建议修改完善标准文本、条文说明及编制说明，形成《风电塔筒用超高性能混凝土管片技术规程》征求意见稿。

本标准的主要参编单位及分工如下：

1. 上海风领新能源有限公司和苏州混凝土水泥制品研究院有限公司主要负责标准立项、标准讨论会组织及筹备、标准相关文献搜集及分发、行业征求意见汇总、标准正文的编写及修改等。

2. 致泰科技新材料（江苏）有限公司、甘肃三远硅材料有限公司、天津恒津翎翔金属新材料股份有限公司、湖南省锦翼工程技术有限公司、北京建工新型建材有限责任公司、江西建材科研设计院有限公司、上海复培新材料科技有限公司、深圳国金电力新能设计院有限公司、北京市燕通建筑构件有限公司为本标准提供了大量的验证试验样品，以及生产工艺和实际工程应用相关的大量材料。

3. 同济大学、嘉兴学院、清华大学、哈尔滨工业大学负责本标准的验证试验工作，并对试验结果进行分析。

2024年9月，标准编制组综合了组内专家及参编单位的相关意见，完成了本文件的征求意见稿，并向标准化管理部门提交了申请，以公开征集公众意见。

## **二、标准编制原则和主要内容**

### **（一）标准编制原则**

本标准根据我国风电塔筒用超高性能混凝土管片行业的实际应用情况而制定。我们通过调研风电塔筒的生产、安装、销售与市场等实际情况，结合对现有资料的分析与对比，尽力使得本标准既保持先进性，又能适合行业现况，并有利于UHPC产品的推广和行业发展。

为了明确风电混塔用超高性能混凝土管片在生产、运输、安装、验收和维护过程的技术要求，加强质量管理，规范UHPC塔筒管片生产和应用过程控制和质量要求，编制本规程。本规程的内容借鉴UHPC塔筒制造企业和安装单位、预应力相关单位管理经验，以及大量的风电塔筒工程应用实践经验，提出切实可行的UHPC塔筒管片生产、运输、安装技术管理要求及质量要求的条文内容，具体控制措施简明扼要，通俗易懂。本规程适用于陆上风力发电机组混凝土-钢混合塔筒结构的预应力装配式超高性能混凝土塔筒的预制管片构件，对于其他材料或其他形式的风力发电机组塔架结构，由于结构材料、结构体系、制造工艺等均与UHPC

塔筒管片有很大区别，故本规程没有纳入。凡本规程未作规定的，应符合国家现行有关标准的规定。

## （二）标准主要内容说明

本标准共分 8 部分：1 总则；2 术语；3 基本规定；4 材料；5 管片生产；6 管片运输和安装；7 预应力工程；8 成品验收；9 维护。

### 1 总则

说明了本标准的编制遵循的原则、目的、适用范围以及与其他相关标准的相容性。

本规程只提出了风电塔筒用超高性能混凝土管片在生产、运输、安装过程中的工艺技术要求，管片自身的原材料要求和技术要求请参考《风电塔筒用超高性能混凝土管片》。与超高性能混凝土管片无关但可能应用于风电塔筒的部件，如钢塔筒、基础等，本规程未作约定。

### 2 术语

2.1 超高性能混凝土的定义为由水泥、矿物掺合料、骨料、纤维、外加剂和水等原材料制成的具有高力学性能、高耐久性能的纤维增强水泥基复合材料，与目前国内相关的超高性能混凝土术语与定义协调一致。

2.2 超高性能混凝土管片和 2.3 超高性能混凝土塔筒规定了用超高性能混凝土制作的塔筒最小单元以及拼装后的结构型式，与 GB/T 19072-2022《风力发电机组 塔架》相关描述协调一致。

2.4 拼接缝、2.5 竖直拼缝、2.6 水平缝规定了超高性能混凝土塔筒连接节点的定义，与 GB/T 19072-2022《风力发电机组 塔架》相关描述协调一致。

2.7 转换段和 2.8 预埋锚栓规定了混凝土塔筒与钢塔筒之间的连接段以及连接节点所使用的组件的定义，与国内风电混塔行业惯用术语协调一致。

2.9 附件规定了塔筒内部除主体结构之外的附属构件的定义，与 GB/T 18451.1-2022《风力发电机组 设计要求》相关描述协调一致。

2.10 体外预应力超高性能混凝土塔筒和 2.11 体内有粘结预应力超高性能混凝土塔筒规定了采用不同预应力系统的塔筒的结构形式，与 JGJ369-2016《预应力混凝土结构设计规范》相关描述协调一致。

### 3 基本规定

本章规定了 UHPC 塔筒管片应用时应该遵守的基本技术要求和质量管理要求，旨在提高 UHPC 塔筒产品企业的技术质量管理水平，明确基本要求，提升企业产品质量。

## 4 材料

本章规定了风电混塔用 UHPC 管片本体材料、管片连接材料、预应力系统材料和其他应用于 UHPC 塔筒的材料。

4.2 管片材料对管片用 UHPC 原材料的技术要求、管片用 UHPC 的技术要求以及管片中使用的钢筋、锚杆、螺母等金属材料的技术要求进行了规定。其中，管片用 UHPC 原材料的技术要求与《风电混塔用超高性能混凝土管片》协调一致，原材料的贮存要求与国家现行标准协调一致；管片用 UHPC 的技术要求与国家现行标准协调一致；管片用金属材料的技术要求与国家现行标准协调一致。

4.3 连接材料对 UHPC 管片连接用环氧拼接胶和管片水平拼缝连接用水泥基座浆料进行了规定。

4.4 预应力系统材料规定了预应力钢绞线、预应力锚具、体外预应力索、体内有粘结预应力孔道水泥基灌浆料的技术要求，预应力系统材料的技术要求与国家现行标准协调一致。

4.5 其他材料规定了与 UHPC 管片相互连接的零部件及其连接材料的技术要求，其要求均与国家现行标准协调一致。

## 5 管片生产

本章规定了风电混塔用 UHPC 管片的生产技术要求，从模具工程、钢筋工程、预埋件、混凝土制备、养护、拆模与吊运等步骤分别提出技术要求。

5.2 模具工程规定了模具的设计、使用、养护、验收等方面的技术要求。第 5.2.8 条提出的模具尺寸公差要求略高于《风电塔筒用超高性能混凝土管片》规定的管片尺寸允许公差，因为只有模具精度高于管片的精度要求时，才能保证用该模具制造的管片可以达到设计精度。

5.3 钢筋工程对超高性能混凝土管片生产过程中钢筋加工、绑扎以及安装等环节进行了具体规定。第 5.3.6-9) 条混凝土浇筑之前，应检查模具和钢筋的温度不应高于 35℃，不应使混凝土提前凝固。该温度主要依据 GB50666 第 8.1.2 节中混凝土入模温度不应低于 5℃，不应高于 35℃。该标准中对于高温施工说明中，要求对模具等进行洒水和遮阳等降温处理，但并未对温度值作明确要求。根据我司现场作业记录，经过洒水和遮阳等降温措施后，模具温度可控制在 30℃至 35℃之间。

超高性能混凝土管片由于其功能性要求，需要在管片生产过程中预先埋置预埋件，5.4 预埋件章节对预埋件的安装以及允许偏差进行了具体规定。

5.5 混凝土制备规定了 UHPC 原材料的检验批次、质量要求，规定了 UHPC 的搅拌、运输、

浇筑的技术要求。

5.6 养护规定了 UHPC 管片浇筑完成后的养护机制。为适应风电混塔行业管片的生产制造条件，本标准提出了两类养护制度，一类是自然养护，一类是蒸汽养护。当环境温度不低于 5℃，温度适宜，且温差不大的环境下，UHPC 管片可采用自然养护方式，自然养护方式与国家现行规范一致。蒸汽养护根据不同生产厂家的生产环境和养护设备又分为 80~90℃恒温养护、温度较高区域蒸汽养护和温度较低区域蒸汽养护三种养护制度。其中，80~90℃恒温养护与国家现行规范相协调一致，温度较高区域蒸汽养护和温度较低区域蒸汽养护是在江苏省、甘肃省、天津市、陕西省、黑龙江省和河南省等多个省市进行 UHPC 塔筒管片生产过程中，基于所得经验和试验数据而提出的。温度较高区域（夜晚温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ）应采取保温养护罩、内设喷雾装置的养护设备，养护过程可以利用水化热和夏季高温进行保温养护，试验结果表明，该养护条件下，同条件试块的强度达到设计强度的 75%后取消养护措施，试块强度可继续增长并在 28 天内达到设计强度。温差较大或夜晚温度较低区域应采取保温养护罩、通入蒸汽、保持内部温度在 50~60℃，利用水化热和蒸汽进行保温保湿养护。试验结果表明，该养护条件下，同条件试块的强度达到设计强度的 85%后取消养护措施，试块强度可继续增长并在 28 天内达到设计强度。

5.7 拆模与吊运规定了管片拆模和在场内吊运的要求。

5.8 质量检验对 UHPC 管片生产所需要用到的各批次原材料及零部件质量证明文件进行审核及实物抽检进行了规定，对 UHPC 管片的设计强度及不同生产环境下不同工序的同养试块抗压强度进行了规定，同时也推荐了试块尺寸规格及抗压强度测试方法。需要说明的是，因风电混塔 UHPC 管片的混凝土用量较大，每天都需要留存 UHPC 试块用于检测，再加上脱模、起吊、运输、预应力张拉等工序均需要同条件试块进行构件的强度确认，故本标准未按照 T/CBMF 37 要求每组成型 6 个试块，而是依然按照 GB/T 50081 要求每组成型 3 个试块，并对试块尺寸、加载速率等内容进行了额外说明。另外，本章节规定了钢筋保护层厚度、构件尺寸、外观质量等技术指标和检验要求与《风电塔筒用超高性能混凝土管片》协调一致。

5.9 存储与成品保护规定了 UHPC 管片存放要求、存放场地要求、从生产区运输至堆放区的运输方式、场内吊运要求和成品保护要求。

## 6 管片运输和安装

本章规定了风电混塔用 UHPC 管片的运输与安装技术要求，从管片运输、拼接和吊装吊运等步骤分别提出技术要求。

6.2 管片运输提出了管片运输和堆放的一般要求，以确保在运输和堆放过程中避免对管片造成损害。

6.3 管片拼装是指将两个或多个管片通过竖缝拼接，形成一个整体管节的过程。本节主要从拼装精度、拼装质量控制等方面对管片拼装提出了技术要求，以确保在拼装过程中满足设计要求。

6.4 吊装规定了塔筒吊装专项方案编制的要求，并实行专家论证制度；对作业人员、设备及安装风速给出相关规定和要求，均以保障工作安全为主要手段与路径。塔筒安装单位包括吊装单位和预应力单位。应执行基础交接制度，明确基础接口的各项指标满足要求，保障顺利安装。基础平台是整个安装工序重要的承载部位。给出了具体的参数要求，以确保工作安全。参照预制塔筒相关企业标准，管片吊装过程中调平误差要求一般为 $\pm 1\text{mm}$ 。水平缝粘接材料涂抹不当，可能造成多方面问题。其一，水平缝密实度不足，影响水平缝的气密性，导致预应力孔道灌浆时可能出现漏浆问题；其二，水平缝粘接材料可能进入预应力孔道，造成孔道堵塞，影响预应力钢绞线穿束；其三，水平缝涂抹不密实，可能在调平垫块处产生局部应力集中，导致管片局部开裂剥落。表 6.4-1 中塔筒顶部水平度要求指标参照了预制塔筒企业标准。

## 7 预应力工程

本章分别从体内有粘结预应力系统和体外预应力系统讲述了风电混塔不同种类预应力系统工程的技术要求。

7.1.1 预应力专项施工方案内容一般包括：施工顺序和工艺流程；预应力施工工艺，包括预应力筋制作、孔道预留、预应力筋安装、预应力筋张拉、孔道灌浆和封锚等；材料采购和检验、机具配备和张拉设备标定；施工进度和劳动力安排、材料供应计划；有关分项工程的配合要求；施工质量要求和质量保证措施；施工安全要求和安全保证措施；施工现场管理机构等。

7.2 体内有粘结预应力系统对预应力索的堆放、制造与安装、预应力孔道的成型、预应力索穿索、张拉、灌浆、封锚等方面提出了技术要求。

7.2.8~7.2.9 风电塔筒预应力索穿束一般采用“后穿束”工艺。后穿束工艺，预应力索穿入孔道后至张拉灌浆的时间间隔较短，可以有效防止预应力筋锈蚀，同时不占用结构施工工期，有利于加快施工速度，是较好的工艺方法，有关时间限制是根据国内外相关标准及我国工程实践经验提出的。

7.2.10~7.2.21 规定了风电混塔预应力张拉的技术要求，其要求均与国家现行标准协调一致。

7.2.22 规定了预应力孔道灌浆的技术要求，其要求均与国家现行标准协调一致。另外，结合实际工程经验，7.2.22-4) 条规定了一次灌浆高度不宜超过 100 米。

7.2.23~7.2.25 规定了体内预应力系统封锚和防腐要求，张拉后的预应力索处于高应力状态，对腐蚀很敏感，饱满、密实的防腐是保证预应力系统耐久性的关键。



7.3 体外预应力系统规定了仅适用于体外预应力系统的技术要求，其他与体内有粘结预应力系统一致的技术要求参考本规程第 7.2 条内容。

7.4 质量控制从材料进场检查、安装前检查、张拉前检查、张拉过程控制、灌浆前检查等步骤提出了质量控制要求。预应力索、预留孔道、锚垫板和锚固区加强钢筋的安装质量，主要检查确认预应力索品种、级别、规格、数量和位置，成孔管道的规格、数量、位置、形状以及灌浆孔、排气兼泌水孔，锚垫板和局部加强钢筋的品种、级别、规格、数量和位置，预应力索锚具和连接器的品种、规格、数量和位置等。实际上作为原材料的预应力索、锚具、成孔管道等已经过进场检验，主要是检查与设计的符合性，而管道安装中的排气孔、泌水孔是不能忽略的。

预应力索张拉质量首先与材料、制作以及安装质量相关，在此基础上，需要保证张拉时同条件养护混凝土试块的强度符合设计要求。大量后张预应力索的张拉质量，要根据张拉记录予以判断，包括张拉伸长值、回缩值、张拉过程中预应力索的断裂或滑脱数量等。

## 8 成品验收

8.1 一般规定对 UHPC 管片在机位点拼装、安装的专项方案、人员资质及设备状态要求等做了一般性规定。拼装、安装质量遵循《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204-2015。

8.2 关键材料及关键零部件入场检验明确了 UHPC 管片拼装、安装时所使用的**水泥基型的灌浆料、水泥基型无收缩的座浆料、环氧胶型的环氧粘接剂**等的各项性能检测要求。同时对钢制转接段、锚栓也提出了资料审查和第三方检测的要求。

8.3 管片到场验收对管片到场验收做出了详细规定。主要包括：1.到场资料清单验收；2.管片实体到场检验项目和允许偏差；3.管片到场检验方法与检验工具；4.管片缺陷判定规则等。

8.4 UHPC 管节拼装过程验收和 8.5 UHPC 塔筒安装过程验收对钢混塔架安装过程验收做出了详细规定。主要包括：1.拼装验收注意事项、检查频次及拼环尺寸的允许偏差及检验方法；2.安装过程管节水平度、垂直度、水平缝饱满度、密实度进行检查验收；3.钢制转接环及高强度锚栓的力矩过程验收等。

8.6 塔筒成品验收对到场管片成品验收资料管理做出了规定，包括资料名称及相应保存期限要求。

8.7 验收资料对塔筒成品验收做出了详细规定。主要包括：1.混塔段成品验收时混凝土强度不低于设计强度的 100%；2.竖向拼接缝验收，全数检查塔筒竖缝密封材料合格证、检测报告及填充密实度；3.预应力验收遵循国家标准 GB 50666；4.孔道灌浆验收；5.防腐与封锚；6.水平缝验收，全数检查塔筒水平缝密封材料合格证、检测报告及填充密实度；7.钢制转接段验收，包括高强度锚栓的力矩最终验收；8.基础沉降观测；9.塔架垂直度验收；10.塔架水平度验收，预

应力施工完成后过渡段顶面水平度偏差应不大于 5mm；11.塔架接地电阻验收，整塔不得大于 4  $\Omega$ ；12.验收资料包含内容等。

## 9 维护

9.1 一般规定明确了维护的范围，主要包含对于管片外观、接缝、钢制转接段以及预应力体系的维护。钢塔筒和主机的维护应参考主机厂家提供的维护手册。

9.2 外观规定了管片外观维护的检查频率、检查和记录项目以及处理方法。

9.3 接缝规定了接缝维护的检查频率、检查和记录项目以及处理方法。

9.4 钢制转阶段规定了钢制转接段的检查频率、检查和记录项目以及处理方法。

9.5 预应力系统对于预应力体系而言，一般可分为体外预应力和体内预应力。对于两种体系的维护要求有一定差异，故针对两种体系分别规定了检查频率、检查和记录项目以及处理方法。

## 三、 主要试验（或分析验证）情况分析

编制组以先进科学、合理可行为原则，以安全生产和建造可靠结构为第一要务，本着实事求是、精益求精的精神编制本标准。为此，编制工作组对正在建造并相继完成的风电塔筒项目进行了广泛调研，对超高性能混凝土管片设计、生产、安装过程各个环节进行细致观察，对工程取得的数据进行全面分析等，与相关技术人员深入交流讨论，反复修改标准草案，力图使材料性能要求、预制生产与安装工艺过程、质量控制关键节点等各方面技术内容科学合理，使本标准具有良好的可操作性，能够保证风电塔筒结构安全性、可靠性和耐久性，大幅提升长期免维护服役性能。为本标准提供数据、生产工艺和安装支撑的工程实践项目如下：

### （一）运达巨石涟水风电项目

巨石涟水项目规划装机容量 233MW 风电，场址位于江苏省涟水县东部，共安装 47 台单机容量 5MW 风力发电机组。我司中标 38 台，适配运达 WD200-5000-180 机型，轮毂高度 180m。

HH180-WD5.0-200 型钢混塔筒结构总高度约 177.3m（含基础抬高 0.5m）。其中，混凝土部分高度为 157.4m（含基础抬高 0.5m），钢制转接环高度为 1.4m，钢塔段高度约 18.5m。塔筒底部外径 7800mm，混凝土塔筒段顶部外径 4800mm，由下至上塔筒外径逐级递减。

混凝土部分为预制装配式结构，28 天立方体抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$ ，总高 157.4m（含基础抬高 0.5m），共有 40 节，其中 M01~M19、M21~M39 高 4m，M20 高 2.5m、M40 高 2.4m。混凝土塔筒沿竖向分两段设置 40 束后张有粘结预应力钢绞线，每束采用 12 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线。其中第一段钢绞线顶部锚固在 M20，底部张拉端在基础位置，第二段钢绞线顶部固定端位于钢制转接段底法兰，底部张拉端在 M20 下端。在钢制转换段吊装完成后穿束安装张拉钢绞

线，最后进行灌浆。



## (二) 天津阳光静海 90MW 风电项目

天津阳光静海 90MW 风电项目规划装机容量 90MW 风电，场址位于天津静海区。本风电场工程拟安装 18 台单机容量为 5MW 的 WD200-5000-150 型风力发电机组，轮毂高度 150 米。

WD200-5.0-HH150 型钢混塔筒结构总高度约 147.3m（含基础抬高 0.5m）。其中，混凝土部分高度为 129.4m（含基础抬高 0.5m），钢制转接环高度为 1.4m，钢塔段高度约 16.5m。塔筒底部外径 6600mm，混凝土塔筒段顶部外径 4800mm，由下至上塔筒外径逐级递减。

混凝土部分为预制装配式结构，28 天立方体抗压强度 $\geq 150\text{Mpa}$ ，总高 129.4m（含基础抬高 0.5m），共有 32 节，其中 M00~M09、M11~M31 高 4m，M10 高 2.5m、M32 高 2.4m。混凝土塔筒沿竖向分两段设置 40 束后张有粘结预应力钢绞线，M00~M10 每束采用 11 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线，M10~M32 每束采用 10 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线。其中第一段钢绞线顶部锚固在 M10，底部张拉端在基础位置，第二段钢绞线顶部固定端位于钢制转接段底法兰，底部张拉端在 M10 下端。在钢制转换段吊装完成后穿束安装张拉钢绞线，最后进行灌浆。



### （三）浙江运达国投天津宝坻 150MW 风电场项目

浙江运达国投天津宝坻 150MW 风电场项目规划装机容量 150MW 风电，场址位于天津市宝坻区。本风电场工程拟安装 28 台单机容量为 5MW 的 WD190-5.0-HH150 型风力发电机组，轮毂高度 150 米。

WD190-5.0/5.5-HH150 型钢混塔筒结构总高度约 147.2m（含基础抬高 0.5m）。其中，混凝土部分高度为 117.4m（含基础抬高 0.5m），钢制转接环高度为 1.4m，钢塔段高度约 28.4m。塔筒底部外径 7800mm，混凝土塔筒段顶部外径 4800mm，由下至上塔筒外径逐级递减。

混凝土部分为预制装配式结构，28 天立方体抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$ ，总高 117.4m（含基础抬高 0.5m），共有 30 节，其中 M00~M11、M13~M28 高 4m，M12 高 2.5m、M29 高 2.4m。混凝土塔筒沿竖向分两段设置 40 束后张有粘结预应力钢绞线，M00~M12 每束采用 10 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线，M12~M29 每束采用 10 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线。其中第一段钢绞线顶部锚固在 M12，底部张拉端在基础位置，第二段钢绞线顶部固定端位于钢制转接段底法兰，底部张拉端在 M12 下端。在钢制转换段吊装完成后穿



束安装张拉钢绞线，最后进行灌浆。



#### （四）华锐酒泉马鬃山 200MW 风电项目

华锐酒泉马鬃山 200MW 风电项目规划装机容量 200MW 风电，场址位于酒泉市肃北蒙古族自治县马鬃山镇东南向约 94km 的剥蚀残丘区。本项目共计 32 台混凝土塔筒，其中 HH120-SL6.25-193 型混塔 32 台，轮毂高度 120 米，适配华锐 6.25-193 风力发电机组。

HH120-SL6.25-193 型混塔结构总高度约 117.626m（含基础抬高 0.5m），其中，混凝土部分高度为 58.9m（含基础抬高 0.5m），钢制转接环高度为 1.4m，钢塔段高度约 57.326m。塔筒底部外径 5400mm，混凝土塔筒段顶部外径 4800mm，由下至上塔筒外径逐级递减。

混凝土部分为预制装配式结构，28 天立方体抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$ ，总高 58.9m（含基础抬高 0.5m），共有 15 节，其中 M01~M14 高 4m，M15 高 2.4m。混凝土塔筒沿竖向设置后张有粘结预应力钢绞线，钢制转换段吊装完成后张拉并灌浆。



### （五）讷河市东庆 100MW 风电项目

讷河市东庆 100MW 风电项目规划装机容量 100MW 风电，场址位于呼玛县呼玛镇讷河市南约 20km，主要分布在兴旺乡附近，共安装 18 台单机容量 5.56MW 风力发电机组。适配明阳 MySE5.56-200 机型，轮毂高度 140m。

MySE5.56-200-HH140 型钢混塔筒结构总高度约 137.7m（含基础抬高 0.5m）。其中，混凝土部分高度为 118.9m（含基础抬高 0.5m），钢制转接环高度为 1.4m，钢塔段高度约 17.4m。塔筒底部外径 5400mm，混凝土塔筒段顶部外径 4800mm，由下至上塔筒外径逐级递减。

混凝土部分为预制装配式结构，28 天立方体抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$ ，总高 118.9m（含基础抬高 0.5m），共有 30 节，其中 M01~M29 高 4m，M30 高 2.4m。混凝土塔筒沿竖向设置 40 束后张有粘结预应力钢绞线，每束采用 11 根 1860 级 S15.7mm 钢绞线。其中钢绞线顶底部张拉端在基础位置，顶部固定端位于钢制转接段底法兰。在钢制转换段吊装完成后穿束安装张拉钢绞线，最后进行灌浆。



#### （六）国华投资陕西公司志丹顺宁一期 100MW 风电项目

国华投资陕西公司志丹顺宁一期 100MW 风电项目规划装机容量 100MW 风电，场址位于陕西省延安市志丹县顺宁镇。本风电场工程拟安装 20 台单机容量为 5MW 的 WT5.0-195-HH140 型风力发电机组，轮毂高度 140 米。本项目为特殊地形项目。

WT5.0-195-HH140 型钢混塔筒结构总高度约 137.3m（含基础抬高 0.5m）。其中，混凝土部分高度为 121.4m（含基础抬高 0.5m），钢制转接环高度为 1.4m，钢塔段高度约 14.5m。塔筒底部外径 6600mm，混凝土塔筒段顶部外径 4800mm，由下至上塔筒外径逐级递减。

混凝土部分为预制装配式结构，28 天立方体抗压强度 $\geq 150\text{Mpa}$ ，总高 121.4m（含基础抬高 0.5m），共有 31 节，其中 M01~M08、M10~M30 高 4m，M09 高 2.5m、M31 高 2.4m。混凝土塔筒沿竖向分两段设置 40 束后张有粘结预应力钢绞线，M01~M09 每束采用 10 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线，M09~M31 每束采用 9 根 1860 级 S15.2mm 钢绞线。其中第一段钢绞线顶部锚固在 M09，底部张拉端在基础位置，第二段钢绞线顶部固定端位于钢制转接段底法兰，底部张拉端在 M09 下端。在钢制转换段吊装完成后穿束



安装张拉钢绞线，最后进行灌浆。



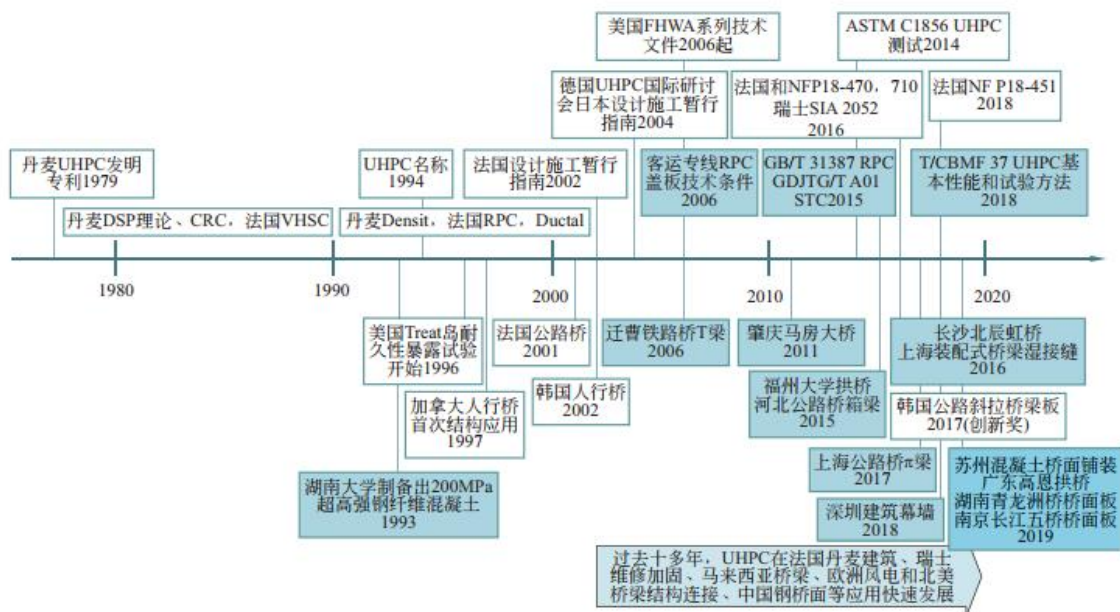
#### 四、 标准中所涉及的专利

本规程中未涉及专利与相关的知识产权。

#### 五、 产业化、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

超高性能混凝土（Ultra High Performance Concrete, UHPC）作为一种具有优异力学性能和耐久性能的新型水泥基材料，也被认为是近二十年来最具创新性的水泥基材料，在近十几年吸引了国内外广大学者与工程人员的高度关注，并迅速成为科学研究和工程应用领域的热点。在水泥基材料及其应用领域，UHPC 作为先进水泥基材料，为轻量化与耐久耐用工程结构提供了创新的源泉和空间；低碳、绿色环保、可持续和高质量发展的要求，也推动了 UHPC 在工程建设中的应用。根据 CCPA-UHPC 分会 2021 年 9 月发放问卷表格调查了中国 2021 年 UHPC 生产应用情况，从所收到项目调查表以及媒体报道信息统计，2021 年中国 UHPC 用量超过 7 万立方米（不含未收集到工程用量）。UHPC 的发展历程和关键节点见下图。





UHPC 的应用领域包括桥梁工程、维修加固、建筑幕墙和外立面以及混凝土制品等。

### (一) 桥梁工程

钢-UHPC 复合桥面是中国主要的 UHPC 应用之一，进入了规模化、可持续发展阶段。2020 年完成的钢桥面铺装项目数量有较大增长，如上海新浏港大桥、崇明东平河大桥、济阳路高架，福州新洪塘大桥，贵州遵余高速飞龙湖乌江大桥，甘肃秦安特大桥、常州钱资湖大桥、黄石棋盘洲长江公路大桥，乌鲁木齐市秋实路桥，南京浦云路大桥、潮汕环线榕江特大桥、深圳龙珠一路跨大沙河桥、鄂尔多斯市乌兰木伦河 3 号桥，京沪高速公路改扩建工程的多座桥梁等等。国内还有多座在建桥梁，即将进入 UHPC 铺装阶段。

南京长江五桥和湖南益阳青龙洲大桥均采用了创新的钢-UHPC 组合梁。今年年中，这两座大桥的 UHPC 桥面板都已完成安装和 UHPC 湿接缝连接，进入桥面铺装和工程扫尾阶段。广东惠清高速麻埔停车区跨线桥，为先简支后结构连续的钢-UHPC 轻型组合  $\pi$  梁，全桥四跨一联，每跨 25m，共长 100m。桥梁断面全宽 8.5m，横向由 3 片全预制钢-UHPC 组合  $\pi$  梁组成，单片  $\pi$  梁标准宽度为 2.8m。梁高 101cm，其中 UHPC 桥面板厚 13cm，工字梁高 88cm，桥面板即行车面，无铺装层。

采用 UHPC 湿接缝进行构件之间“结构连接”，施工快、成本低、连接强度高，兼具技术和经济优势。浙江嘉兴的快速路工程是 2020 年最大的结构连接项目，湿接缝 UHPC 用量超过 6000m<sup>3</sup>。广东阳茂高速改扩建工程，为保证新旧桥梁拼接带位置的拼接质量和结构耐久性，减少后续病害，拼接带采用 UHPC 宽湿接缝方案，适用于 13m、16m、

20m 跨预应力混凝土空心板内边板拼接处、TJ1 合同段阳阳铁路跨线桥、TJ4 合同段南水河大桥连续箱梁拼接带。

湖南中路华程 2020 年施工了两座桥梁的 UHPC 部分，均是用于解决桥梁墩顶负弯矩区的开裂问题。武倘寻高速公路天生特大桥主梁采用钢—混组合连续 T 梁，墩顶负弯矩区铺设厚 15cm、宽 2m 的 UHPC 接缝，形成桥面连续结构。云浮罗定至茂名信宜（粤桂界）高速公路高台大桥，主梁采用双工字钢板组合梁和预制混凝土桥面板，在墩顶支座中心线两侧各 7.25m 范围负弯矩区的桥面板顶面铺设 10cm 厚 UHPC 层，并用 UHPC 连接桥面板负弯矩区湿接缝、负弯矩区剪力钉群预留槽。

## （二）维修加固

宣城汉江大桥的 UHPC 湿接缝加固工程。该桥全长 1886.95 米，始建于 1986 年，2017 年经检测评定桥梁技术状况等级为 3 类，桥面铺装技术状态评为 4 类，于 2020 年启动维修加固工作。为了提高东、西引桥 50m、30m 预应力混凝土 T 梁接缝承载力，原接缝层凿除，采用 UHPC 湿接缝浇筑改造，宽度分别为 80cm、40cm，接缝厚度为 10cm。山东某高速公路在役桥梁的 T 梁被桥下货车横向撞损，裂缝较多。为了尽快恢复桥梁的承载能力，山东省交通科学研究院采用钢模外包，内部填充 UHPC 的方式进行加固。荷载试验表明效果良好，至今运营一年左右，未出现明显问题。

## （三）建筑幕墙和外立面

舟山海洋文化艺术中心二期工程由“一厅六中心”构成，包含音乐厅、会议中心、展览中心、培训中心、青少年活动中心、妇女儿童活动中心、工会活动中心等功能，位于舟山新城。建筑分为 4 个单体与室外廊道，平面呈蜂巢状，酷似一个个岛礁，以朴素自然的清水混凝土为表现形式，将建筑融入自然。外立面由现浇 UHPC 格栅与网状外框架结构构成，造型独特，施工难度较高。UHPC 格栅采用封闭模板、泵送灌注施工成型，总计使用约 1000 吨 UHPC 预混料。深汕科技园展示中心，采用 UHPC 外立面蜂巢状格栅幕墙，面积达 8500m<sup>2</sup>；北海国际金融中心，外立面为白色 UHPC 蜂巢状单元板幕墙，面积为 6000m<sup>2</sup>；泰康嘉德艺术中心，幕墙采用大板块（8m<sup>2</sup>左右）UHPC 平板，面积为 6500m<sup>2</sup>；深圳茅洲河碧道之环，造型飘逸的环由 UHPC 曲面板构成，使用了 1500m<sup>2</sup> 曲面板；上海松江职工活动中心，三栋圆环建筑曲面 UHPC 幕墙板面积达 9000m<sup>2</sup>。

2020 年 10 月完工的恒基旭辉天地（TheRoof）项目，位于上海中心城区新天地。项目由四座建筑构成，外立面采用 2500 个大小不一的 UHPC 花钵和 UHPC 幕墙板组成，整个建筑笼罩于植物的覆盖中，形成一个水平和垂直的立体花园。花钵体型较大，除自

重外还要承受土壤、水分和植物重量以及风荷载作用和安装固定产生的应力；幕墙系统部分采用大板块，其中首层板块为通高转角一体板，高度超过 4m。采用 UHPC 制造薄壁花钵可减轻自重、满足承载需求和牢固固定，也适合制造大尺寸幕墙板，共计使用了 450 吨 UHPC 预混料预制生产花钵和幕墙板。

#### （四）混凝土制品

随着超高性能混凝土技术发展，越来越多的混凝土制品使用超高性能混凝土来制作。T/CEC143—2017《超高性能混凝土电杆》中规定的超高性能混凝土电杆混凝土抗压强度标准值不小于 90MPa，实际在生产过程中，使用超高性能混凝土的抗压强度都是大于等于 120MPa，超高性能混凝土电杆与传统电杆相比，电杆厚度更薄、重量更轻，强度高，耐久性好，承受荷载大。GB/T 31387-2015《活性粉末混凝土》中规定的活性混凝土抗压强度为 100MPa~180MPa，抗折强度 14MPa~24MPa；T/CSTM00290-2022《超高性能混凝土检查井盖》、T/CSTM00289-2022《超高性能混凝土外墙挂板》中规定的超高性能混凝土抗压强度不应低于 120MPa，抗弯强度不应低于 14MPa；T/GDHS003—2021《无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥技术规范》中规定的超高性能混凝土抗压强度为 130MPa~200MPa。

在风电塔筒中采用超高性能混凝土，可大幅减少主要材料用量，提升管片耐久性和抗裂性，进而减少后期的检查维护费用。由于超高性能混凝土抗压强度大幅高于普通混凝土，采用超高性能混凝土制作管片，在正截面承载力不变的前提下，可减少混凝土用量 20%。附加带来管片制作、运输、拼接和安装等各个环节的成本降低。而且由于材料抗拉性能的大幅提升，也带来管片本身抗剪扭承载力的提升以及抵抗温度荷载能力的提升，从而降低管片的配筋。相比于传统的钢筋混凝土管片，钢筋用量可降低约 30%。此外，采用超高性能混凝土制作的管片也具有更好的质量，不易在运输、安装和后期使用过程中出现混凝土缺陷，从而降低了修复和检查维护的成本。综上，在风电塔筒中采用超高性能混凝土具有良好的推广前景，也符合风电行业快速发展的需要。

## 六、采用国际标准和国外同类先进标准情况

UHPC 风电塔筒管片属于首次应用，没有先例可循。经广泛查阅，尚未找到有关的国际标准和国外先进标准，同时，本标准制定中没有采用国内外相关标准的关键指标或相关数据。

## 七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

经广泛调研和多方面征求意见，本规程符合现行的相关法律、法规、规章及相关标准的要求。

目前行业内能够参考的风电塔筒标准主要有中国电力企业联合会标准 T/CEC 5007-2018《风力发电机组预应力现浇式混凝土塔筒技术规范》、T/CEC 5008-2018《风力发电机组预应力装配式混凝土塔筒技术规范》、国家能源行业标准 NB/T10907-2021《风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范》、NB/T 10908-2021《风电机组混凝土-钢混合塔筒施工规范》，以及国家标准 GB/T 19072-2022《风力发电机组 塔架》。行业内现有参考标准所规定的混凝土塔筒结构材料均为普通混凝土，非超高性能混凝土（UHPC），其规定的结构主体材料的力学性能均低于本标准的要求（详见表 1）。本标准弥补了超高性能混凝土在风电塔筒领域里的应用空白。

表 1 风电塔筒行业内标准对混凝土抗压强度的要求对比

标准号	GB/T19072	T/CEC5008	T/CEC5007	NBT10907	NBT10908	本规程
混凝土抗压强度（MPa）	C40-C80	<C80 (参照 GB50010)	C60-C100	C40-C80	<C100	>120

风电塔筒是一个受力复杂及且比较大的构件，尤其是弯矩非常大，对塔筒抗弯性能有严格要求，因此提高混凝土抗拉强度、混凝土韧性及耐久性为塔筒发展趋势，而超高性能混凝土正是高抗拉强度、高韧性与耐久性好的材料，所制作的 UHPC 塔筒具有先进性。

本标准第 5 章对生产工艺进行细化了要求，针对 UHPC 特点细化材料要求、对 UHPC 制备、浇筑都有详细要求，尤其是养护工艺，对 T/CBMF37 进行补充，根据生产实际提出了适合 UHPC 材料特点的详细养护制度要求，对 UHPC 质量控制更严谨，确保管片质量符合要求。

表 2 UHPC 预制构件标准对养护制度和材料耐久性的要求对比

标准号	GB/T 14902	GB 50164	GB/T 19072	T/CEC 5008	T/CEC 5007	NBT 10907	NBT 10908	本标准
养护制度	未涉及	自然养护与蒸汽养护	未涉及	未涉及	未涉及	自然养护	自然养护	自然养护与详细的蒸汽养护制度
耐久性 (氯离子渗透) ( $D_{rcm} \times 10^{-12}$ )	最高等级<1.5	最高等级<1.5	未涉及	$\leq 1.5$	$\leq 1.5$	未涉及	未涉及	0.02-0.2

本标准第9章对超高性能混凝土塔筒的维护进行了规定。从现行风电塔架相关规范之间的横向对比可以发现，现行规范编制的主要侧重点在于设计方法，以及制造、施工和验收环节的具体要求，偶有提及安全监测相关内容。但安全监测章节的内容，主要侧重点在于监测点的选择，传感器布置，以及监测数据分析等，与维护有本质区别。

表3 UHPC 风电塔筒行业内标准对塔筒维护章节的对比

T/CEC 5007-2018	包含安全监测章节，但无维护相关内容。
T/CEC 5008-2018	包含安全监测章节，但无维护相关内容。
NB/T10907-2021	包含安全监测章节，但无维护相关内容。
NB/T 10908-2021	包含各类工程的质量检查要求，但无维护相关内容。
GB/T 19072-2022	包含设计、制造、施工和验收，但无维护相关内容。

作为陆上风力发电机组的重要部件，钢混塔架的维护是确保风力发电机组正常运行和延长使用寿命的关键。维护工作的目标是确保风塔结构处于良好状态，以确保风塔在使用寿命内功能正常，美观耐用。换言之，维护工作属于预防性措施，目标是避免、推迟或减少缺陷和因缺陷产生的影响。为了实现这个目标，有必要经常检查风塔并在发现问题后尽快解决，以避免问题恶化或者无法修复。

钢混塔架一般由混凝土塔筒、转接段、钢塔筒、预应力等系统组成。混凝土塔筒一般为预应力装配式预制混凝土结构，预应力系统对保证结构承载力起到了至关重要的作用，除了定期对预制混凝土构件表观质量、预制构件之间连接节点的检查外，还需要在塔架服役期内重点对预应力系统进行检查与维护。钢塔筒一般通过转接段与混凝土塔筒相连，需定期对连接螺栓和锚栓进行检查和紧固。

关于管片运输、拼装、吊装、预应力施工以及质量验收，普通混凝土塔筒与 UHPC 塔筒之间并无显著差异。

## 八、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在制定的过程中，没有出现重大分歧意见。

## 九、标准性质的建议说明

本规程的性质建议为推荐性标准。

## 十、贯彻标准的要求和措施建议

尽快做好规程发布实施工作，规程颁布实施后，相关部门应做好规程宣贯培训工作，制定相应的实施方法，使本规程得以认真执行，为工程设计提供依据。

## **十一、废止现行相关标准的建议**

本标准为新制定标准，无需废止其他标准。

## **十二、其他应予说明的事项**

无其他说明。