

风电塔筒用超高性能混凝土管片  
应用技术规程

Technical specification for application of ultra-High performance concrete  
segments for wind power tower cylinder

(征求意见稿)

(本稿完成时间: 2025. 2. 20)

20××-××-××发布

20××-××-××实施

中国建筑材料联合会 发布  
中国混凝土与水泥制品协会

# 前 言

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)的要求(计划号2023-108-xbjh),标准编制组在总结超高性能混凝土在陆上风力发电机组混凝土塔筒领域的应用技术成果并在广泛征求意见的基础上,编制了本规程。

本规程共分9章:主要内容包括:1 总则;2 术语;3 基本要求;4 材料;5 管片生产;6 管理运输和安装;7 预应力工程;8 成品验收;9 维护。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利,本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程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,由中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(UHPC)分会负责日常管理,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负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请反馈给上海风领新能源有限公司(地址:上海市黄浦区蒙自路763号丰盛创建大厦2102室,邮编:200023,邮箱:limengyuan@flrenewables.com)。

**主 编 单 位:** 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超高性能水泥基材料与工程技术(UHPC)分会

**参 编 单 位:**

**主要起草人:**

**主要审查人:**

## 目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	3
4 材 料	4
4.1 一般规定	4
4.2 管片材料	4
4.3 连接材料	4
4.4 预应力系统材料	4
4.5 其他材料	5
5 管片生产	6
5.1 一般规定	6
5.2 模具工程	6
5.3 钢筋工程	7
5.4 预埋件	8
5.5 混凝土制备	9
5.6 养护	10
5.7 拆模与吊运	10
5.8 质量检验	11
5.9 存储与成品保护	11
6 管片运输和安装	13
6.1 一般规定	13
6.2 管片运输	13
6.3 管片拼装	14
6.4 吊装	14
7 预应力工程	16
7.1 一般规定	16
7.2 体内有粘结预应力系统	16
7.3 体外预应力系统	17
7.4 质量控制	18
8 成品验收	20
8.1 一般规定	20
8.2 关键材料及关键零部件入场检验	20
8.3 管片到场验收	21
8.4 UHPC 管节拼装过程验收	22
8.5 UHPC 塔筒安装过程验收	23
8.6 塔筒成品验收	23
8.7 验收资料	25
9 维 护	27
9.1 一般规定	27
9.2 外观	27
9.3 接缝	27
9.4 钢制转接段	27
9.5 预应力系统	28
用 词 说 明	29
引用标准名录	30
附：条文说明	32

## Contents

1 General provisions .....	1
2 Terms .....	2
3 Basic requirements .....	3
4 Materials .....	4
4.1 General requirements .....	4
4.2 Segment materials .....	4
4.3 Connecting materials .....	4
4.4 Prestressing system materials .....	4
4.5 Other Materials .....	5
5 Segment manufacture .....	6
5.1 General requirements .....	6
5.2 Formwork .....	6
5.3 Reinforcement .....	7
5.4 Embedded part .....	8
5.5 Concrete production .....	9
5.6 Curing .....	10
5.7 Demoulding and lifting .....	10
5.8 Quality inspect .....	11
5.9 Storage and Product Protection .....	11
6 Transportation and installation .....	13
6.1 General requirements .....	13
6.2 Segment transportation .....	13
6.3 Segment assembly .....	14
6.4 Hoisting .....	14
7 Prestress engineering .....	16
7.1 General requirements .....	16
7.2 Internally bonded prestress system .....	16
7.3 Externally prestress system .....	17
7.4 Quality controlling .....	18
8 Product acceptance .....	20
8.1 General requirements .....	20
8.2 Entry inspection of key materials and components .....	20
8.3 On site acceptance of segments .....	21
8.4 Acceptance of UHPC segment joint assembly process .....	22
8.5 Acceptance of UHPC tower installation process .....	23
8.6 Acceptance of tower products .....	23
8.7 Acceptance material .....	25
9 Maintenance .....	27
9.1 General requirements .....	27
9.2 Appearance .....	27
9.3 Joint .....	27
9.4 Steel transition section .....	27
9.5 Prestress system .....	28
Explanation of wording .....	29
List of quoted standards .....	30
Addition: Explanation of provisions .....	32

# 1 总 则

1.0.1 为规范风电塔筒用超高性能混凝土管片应用的技术要求,保证产品应用质量,做到安全适用、技术先进、经济合理、低碳环保,制定本规程。

1.0.2 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。

1.0.3 风电塔筒用超高性能混凝土管片的生产、运输、安装、验收和维护,除应符合本规程外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

- 2.1 **超高性能混凝土** ultra-high performance concrete (UHPC)  
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、高抗渗性能的纤维增强水泥基复合材料。
- 2.2 **超高性能混凝土管片** ultra-high performance concrete segments  
在工厂或现场预先生产制作完成的，构成超高性能混凝土塔筒的基本单元。
- 2.3 **超高性能混凝土塔筒** concrete tower  
由超高性能混凝土管节拼装后用于承载风力发电机组上部荷载的筒状钢筋混凝土结构。
- 2.4 **拼接缝** splice joint  
装配式混凝土塔架上下管节间的水平接缝和左右构件间的竖向接缝。
- 2.5 **竖直接缝** vertical joint  
装配式混凝土塔架左右相邻构件间的拼接缝。
- 2.6 **水平接缝** horizontal joint  
装配式混凝土塔架上下管节间形成的拼接缝。
- 2.7 **转换段** transition section  
混凝土塔筒与钢塔筒之间的连接段，转换段可以是混凝土结构，也可以是钢结构。
- 2.8 **预埋锚栓** embedded anchor  
在混凝土塔筒转换段中，预先安装埋置在混凝土中的锚栓系统，用于混凝土转换段与钢结构转换段或钢塔筒的安装连接。
- 2.9 **附件** attachment  
塔筒内部除主体结构之外的附属构件，如平台、电缆桥架、电缆支架、照明设备等。
- 2.10 **体外预应力超高性能混凝土塔筒** externally prestressed UHPC tower  
混凝土构件截面之外配置后张预应力筋的结构。
- 2.11 **体内有粘结预应力超高性能混凝土塔筒** internally bonded prestressed UHPC tower  
配置与混凝土之间通过水泥基砂浆实现粘结的预应力筋的后张法预应力混凝土结构。

### 3 基本规定

- 3.0.1 管片的设计使用年限不应低于风力发电机组的设计寿命。
- 3.0.2 选用管片时应结合风电工程实际情况，进行方案比较和技术经济分析。
- 3.0.3 管片的生产、运输、验收、安装和维护等过程可采用信息化协同平台，实现建设和运维全过程的数据共享。
- 3.0.4 管片生产、运输、验收、安装和维护应建立完善的质量管理体系和制定相应的质量控制制度；有持证要求的岗位应持证上岗。
- 3.0.5 管片生产或安装工艺发生改变时，应进行试验性制作。
- 3.0.6 管片生产、运输、安装和维护应建立完善的安全管理体系和安全保障措施，使其作业过程满足安全方面的规定。
- 3.0.7 管片生产、安装过程中产生的噪声、废水、粉尘或废气等污染物排放和固体废弃物处置应符合有关环境保护、节能减排方面的规定。

## 4 材 料

### 4.1 一般规定

4.1.1 超高性能混凝土及其原材料、钢材和其他辅助材料应符合国家现行有关标准的规定，具有质量合格证明文件。

4.1.2 使用前应对各类原材料进行检验，检验合格后方可应用。

### 4.2 管片材料

4.2.1 水泥、矿物掺合料、骨料、外加剂、纤维、水等管片用超高性能混凝土原材料的检验应符合《风电混塔用超高性能混凝土管片》的规定。

4.2.2 独立包装的外加剂和钢纤维等原材料，包装应完好、无污染，材料性能质量应无影响。外加剂的贮存应符合 GB 50119 的规定；钢纤维的贮存应符合 GB/T 39147 的规定；其他原材料的贮存应符合国家现行标准的有关规定。

4.2.3 管片用超高性能混凝土的基本性能要求应符合 T/CBMF 37/T/CCPA 7 中的有关规定，性能等级及施工性能要求应根据设计和施工要求参照 T/CBMF 37/T/CCPA 7 中的相关规定进行试验确定，试件制作和养护除满足本标准规定外，对本标准未作规定的，还应满足 GB/T 50081 的相关规定。

4.2.4 管片用超高性能混凝土性能检验按照 T/CBMF 37/T/CCPA 7 执行。

4.2.5 环境温度较低时（当日最低温度 $<5^{\circ}\text{C}$ ）管片用超高性能混凝土不宜使用早强剂等化学外加剂，应通过加热养护等措施保证强度发展。

4.2.5 非预应力筋宜采用 HRB500 热轧带肋钢筋，应符合 GB/T 1499.2 的规定。

4.2.6 预埋件的锚筋宜采用 HRB400E 级钢筋，吊钩、吊环宜采用 HPB300 级钢筋，应符合 GB/T 1499.2 的规定。

4.2.7 锚杆宜选用 8.8 级和 10.9 级，应符合 GB/T 3098.1 的规定。

4.2.8 螺母宜选用 6 级、8 级和 10 级，应符合 GB/T 3098.2 的规定。

### 4.3 连接材料

4.3.1 UHPC 塔筒管片连接用环氧拼接胶的基本性能、施工性能、耐久性能和环保性能应符合 GB/T44543 要求，可根据施工环境选择不同温度范围的拼接胶。其中压缩强度试验、压缩弹性模量试验及剪切弹性模量试验应按 GB/T 2567 进行测定；不挥发物含量试验应按 GB/T 2793 进行测定；环保性能指有害物质限量值，应符合 GB 30982 本体型胶粘剂的有关规定。

4.3.2 UHPC 塔筒管片连接用水泥基座浆料与灌浆料应符合《风电发电机组钢混塔筒安装关键材料》的要求，基本性能、施工性能、耐久性能和环保性能应根据施工环境及设计要求进行选择。其中成型及养护方法及抗压强度试验方法依据 JG/T 408 中所示；流动度、竖向膨胀率分别依据 GB/T 50448 中附录 A.0.2 和附录 A.0.6 所示方法测试；抗折强度试验方法依据 GB/T 17671 中所示的方法进行试验；氯离子含量依据 GB/T 8077 所示的方法进行试验；泌水率依据 GB/T 50080 所示的方法进行试验。

### 4.4 预应力系统材料

4.4.1 预应力钢绞线性能应符合 GB/T 5224 的有关规定，宜采用高强度低松弛钢绞线，采用无粘结预应

力钢绞线时应符合 JG/T 161 的规定。

4.4.2 体外无粘结预应力索的外包层材料性能及涂包质量应符合现行国家标准 GB/T30827 的有关规定，防腐油脂质量应符合现行行业标准 JG/T430 的有关规定。

4.4.3 预应力筋用锚具、夹具和连接器应符合 GB/T 14370 的规定。

4.4.4 体内有粘结预应力成孔管道如采用金属波纹管，应符合 JG/T 225 中相关规定，如采用塑料波纹管成孔，应符合 JT/T 529 中相关规定。

4.4.5 体内有粘结预应力孔道水泥基灌浆料应符合 GB/T 50448 的规定，其强度不得低于设计及规范要求。

#### 4.5 其他材料

4.5.1 锻造法兰应符合 JB/T 11218 的规定，化学成分应符合 GB/T 1591 和 GB/T 5313 中 Z 向性能的要求，成分允许偏差应符合 GB/T 222 规定；钢板法兰应符合 GB/T 9119 的规定。

4.5.2 焊条应符合 GB/T 5117 和 GB/T 5118 的规定，焊丝应符合 GB/T 8110、GB/T 10045、GB/T 17493、GB/T 5293 和 GB/T 12470 的规定，焊剂应符合 GB/T 5293 和 GB/T 12470 的规定。

4.5.6 硅酮、聚氨酯、聚硫建筑密封胶应分别符合 GB/T 14683、JC/T 782、JC/T 483 的规定。

4.5.7 现场用水应符合 JGJ63 的规定。

## 5 管片生产

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 施工单位应编制模具、模板工程专项技术方案，宜采用钢模板。
- 5.1.2 模具生产和使用时应严格遵守相关安全生产管理规定，并满足相关国家标准、操作规程和设计要求。
- 5.1.3 钢筋在运输和存放时，不得损坏包装和标志，并按按牌号、规格分别堆放。室外堆放时，应采用避免钢筋锈蚀的措施。
- 5.1.4 钢筋加工应符合 GB 50204 的要求，同时应符合设计图纸的相关要求。
- 5.1.5 预埋件的种类、数量、规格型号应符合设计要求。
- 5.1.6 预埋件的质量应符合设计要求和国家现行有关标准的规定。
- 5.1.7 UHPC 生产塔筒浇筑前应制定专项生产方案，并通过试验确认专项方案的可行性和适用性。
- 5.1.8 UHPC 原材料性能应稳定，且储存、计量、投料和搅拌设备系统应完善，且所制备出的 UHPC 经检验工作性能、力学性能满足设计及施工要求。UHPC 配合比应委托具备 CMA 资质的第三方进行验证并获取配合比验证报告。

### 5.2 模具工程

- 5.2.1 模具应根据施工过程中的各种控制工况进行设计，应满足承载力、刚度和整体稳固性要求。
- 5.2.2 模具应结构合理、紧密不漏浆、操作简单、维修方便。
- 5.2.3 模具应按 JGJ/T 283 的有关规定进行设计，模具制作应考虑模具自身的温度收缩和 UHPC 的体积收缩。
- 5.2.4 模具的使用和养护应符合以下规定：
- 1) 模具使用时应制定保养计划，进行定期保养并记录；
  - 2) 模具应用专用吊具吊运，不应损伤模具；
  - 3) 模具应用专用工具拆装，所有移动转动部位应润滑得当；
  - 4) 模具应用专用工具清理，不应损伤型腔表面；
  - 5) 混凝土浇筑前脱模剂应涂抹均匀；
  - 6) 模具存储，应清理彻底，涂抹防锈油，存放环境应保持通风干燥。
- 5.2.5 模具、模板在安装和组拼前应进行检查，并符合以下规定：
- 1) 进场安装前，应检查复核型号、数量、尺寸和接口形式；
  - 2) 模具、模板组拼前，应检查加固所需的螺栓、螺母、对拉螺杆等配件是否齐全，并应检查支撑和安装作业平台是否牢靠；
  - 3) 模具、模板安装前应进行试拼装，试拼装无误后再进行安装。
- 5.2.6 当模具安装高度超过 2m 时，应搭设安装作业平台。
- 5.2.7 模具、模板组拼后应对模具整体尺寸、预埋件位置、预应力孔道位置等尺寸进行检查，并对上下相邻两节模具的预应力孔道和埋件位置进行校对。
- 5.2.8 模具生产和组装后的尺寸公差要求应保持一致，关键尺寸公差要求如表 5.2.8。

表 5.2.8 模具尺寸公差要求

项目	质量标准/允许偏差 (mm)	检验方法
----	----------------	------

外观质量	表面	无凹凸、破损，无锈蚀、焊瘤焊渣	观察
	焊接	焊缝均匀、饱满，无夹渣、脱焊	
出厂尺寸偏差允许值	高度	$\pm 2$	尺量
	弦长	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	
	弧长	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	
	倾斜度	$\leq$ 构件高度设计值 $1/1500$	采用激光水平仪投射底模边垂直线，尺量模具顶面与底模垂直线之间的距离
	对角线	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	尺量
	底、端模面平面度	$\leq 2$	2米折叠靠尺与塞尺配合，测量靠尺与模面间隙，测6~8点数据，取最大值
	预埋开孔位置	$\pm 2$	尺量
	模具安装定位孔位置	$\pm 2$	
安装尺寸偏差允许值	底模水平度	$\leq 2$	使用水准仪测量，测6~8点数据，取最大值与最小值差
	底模弦长	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	尺量
	内外模弦长	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	
	内外模面弧长	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	
	分片构件模具对角线长	$\pm 2$ 或设计值的 $\pm 1/1500$ 的较大值	
	内模倾斜度	$\leq$ 构件高度设计值的 $1/1500$	采用激光水平仪投射底模边垂直线，尺量模具顶面与底模垂直线之间的距离
	模具安装错台	$\leq 2$	尺量

### 5.2.9 模具的验收应符合以下规定：

- 1 模具制作与安装时，面板拼缝应严密；模具间连接位置及用于固定预埋件的螺栓、定位销等应固定可靠；
- 2 模具脱模、模板拆除应符合 GB 50666 的规定；
- 3 定期检查模具几何尺寸、型腔表面光洁度、各功能部件工作正常，并及时进行修整。

## 5.3 钢筋工程

### 5.3.1 钢筋进场检验应符合以下规定：

- 1 钢筋进场时，应按同一厂家的钢筋、同一牌号、同一炉批号、同一尺寸的每 60t 为一验收批的原则。

2 对随附钢筋批次的检测报告与质量证明文件进行 100%检查，检测报告与质量证明文件应包含每个钢筋批次的化学成分、金相组织及机械性能等指标。

3 钢筋进场时，应按国家现行相关标准的规定抽取试件作屈服强度、抗拉强度、伸长率、弯曲性能和重复偏差检验，检验结果应符合 GB 1499.2《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》的规定。

5.3.2 钢筋加工前应对钢筋进行检查，钢筋表面应清洁、无损伤，不应有裂纹，油污和片状老锈。

5.3.3 钢筋加工过程应符合以下规定：

1 钢筋配料及制作应严格按照设计图纸要求，不应随意更改；钢筋的断料应先进行放样试切，经检测尺寸无误后方可连续断料；

2 钢筋调直应符合 GB50666 的有关规定；

3 钢筋的弯钩和弯折应符合 GB50666 的有关规定；

5.3.4 已完成加工的半成品钢筋的进场验收应符合以下规定：

1 按照同一验收批的原则，对随附钢筋批次的检测报告与质量证明文件进行 100%检查，检测报告与质量证明文件应包含每个钢筋批次的化学成分、金相组织及机械性能等指标。

2 按照同一验收批的原则，检查钢筋入场时的复验报告，检验项目和结果应符合 GB 1499.2《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》的规定。

3 按照设计图纸要求对半成品钢筋进行检验。

5.3.5 钢筋笼制作应符合下列规定：

1 钢筋接头的方式、位置，同一截面受力钢筋的接头百分率以及钢筋的搭接长度和锚固长度应符合设计要求；

2 钢筋骨架的组装应在符合设计的胎具或模具上进行；

3 绑扎完成的钢筋网片宜采用专用吊架吊运至模板内，位置应符合设计要求；

4 预应力孔道用金属波纹管或钢管应与钢筋网片牢固连接，保证位置不发生变化，必要时可使用定位工装；

5 垂直接地电导体应设置在钢筋网片内、外排之间，可采用专用夹具或绑丝固定在内侧钢筋上，并应在管片上下两端留有足够断面的引出线；竖向接地应与内侧水平钢筋网有两个点可靠连接。

5.3.6 钢筋笼入模应符合下列规定：

1 钢筋笼制备需要标识清晰，将钢筋笼安装至模具时应注意与模具规格相匹配；

2 钢筋应无损伤，表面不得有裂纹、油污、颗粒状或片状老锈；

3 钢筋笼入模前，模具应清洗干净，先用油灰刀、刷子或砂纸打磨，去除所有的混凝土废料，然后用压缩空气或抹布去除灰尘，涂抹脱模剂；

4 钢筋笼在模具上绑扎，或者绑扎好的钢筋笼入模时，应特别注意脱模剂不要污染钢筋；

5 钢筋笼保护层垫片的类型、数量以及布置均应足以达到所需的混凝土保护层；

6 如有钢筋与预埋件相互干扰，钢筋可略作移动（幅度尽可能小），以便准确放置预埋件；

7 钢筋笼就位后，应由专业人员进行钢筋笼检查，检查内容包含钢筋规格、尺寸、数量、位置、搭接长度、钢筋保护层，并予以记录；

8 所有合模操作均应缓慢完成，不应使钢筋笼发生变形，不应使垫片和预埋件发生移动，不应损坏模具部件；

9 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。

## 5.4 预埋件

5.4.1 预埋件进场安装前应按设计图纸要求或进料检验指导书对预埋件进行材质、型号、规格、精度和尺寸等进行检查。

5.4.2 预埋件应安装牢靠，且具有防止混凝土浇筑振捣时造成预埋件偏移的措施，同时螺栓端孔用塑料帽盖予以封堵；

5.4.3 预埋件固定方式应不影响其性能，高强预埋件应禁止焊接固定；

5.4.4 预埋件与模板面板之间不应存在能使混凝土浆体渗入的缝隙；

5.4.5 预埋件之间相互位置出现冲突时的处理方法，应经设计确定。

5.4.6 预埋件宜通过模具进行定位，其中心线位置安装允许偏差为 2mm。

## 5.5 混凝土制备

5.5.1 对于管片用超高性能混凝土原材料的进场检验批次，水泥、粉煤灰、矿渣粉和减水剂应符合相关标准的规定，微珠应符合 JGJ/T486 的规定，硅灰应符合 GB/T 27690 的规定，骨料应符合 GB/T14684 的规定，钢纤维应符合 GB/T 39147 的规定，其进场检验批次不应超过 200t。

5.5.2 原材料应按品种、规格和生产厂家分别标识，并具有防尘、防潮、防雨的措施；夏季宜搭设遮阳棚，避免原材料温度过高。

5.5.3 原材料应按质量单独计量。预混料或者水泥、矿物掺合料、水、外加剂和纤维的计量偏差不应超出 1%，骨料的计量偏差不应超出 2%，每工作班检查不应少于 1 次。

5.5.4 UHPC 开盘前应严格、准确地测定骨料的含水率，以便及时调整施工配合比；采用预混料制备 UHPC 时，应根据预混料厂家提供的使用说明书中的要求进行搅拌。

5.5.5 应根据管片体积、生产工艺和进度要求合理配备配料与搅拌生产系统；应采用强制式搅拌机，一次搅拌量不宜大于搅拌机公称容量的 70%，并应设置防止纤维结团的投料装置。

5.5.6 搅拌机开盘前，应检查设备状态，确保设备操作无异常，搅拌机内部清洁、无积水。

5.5.7 应按试验性制作确定的下料顺序和搅拌工艺进行搅拌，搅拌过程应符合下列规定：

- 1 搅拌应保证拌合物的均匀性，出机拌合物中不应有肉眼可见的纤维结团；
- 2 每次管片生产时均应密切监视开拌前两盘的混凝土拌合物的流动度、粘聚等工作性能，如不符合设计要求，应及时分析处理，直至满足设计要求后方可用于管片生产；
- 3 混凝土的拌制进度与浇筑进度须紧密配合，拌制进度需服从浇筑进度；
- 4 拌合物出机后不得加水；
- 5 搅拌设备应及时进行冲洗；
- 6 采取措施防止下料和搅拌过程中的扬尘。

5.5.8 UHPC 运输设备应符合下列规定：

- 1 运输设备的运输能力应适应混凝土凝结速度和浇筑速度的需要，保证浇筑过程连续进行。运输过程中应保证拌合物均匀，不产生分层、离析；
- 2 运输设备的内壁应平整光滑、不吸水、不渗透；可采用普通混凝土搅拌运输车、吊斗进行运输；
- 3 UHPC 搅拌运输车在运输途中及等候卸料时，应保持搅拌车罐体以 1r/min~3r/min 的速率旋转；采用吊斗运输过程中应对混凝土进行遮盖保护；
- 4 运输和输送设备卸料后应及时清洗干净；
- 5 混凝土运输、输送设备等，夏季高温期应采取遮阳、表面洒水等降温措施、冬季应采取表面覆盖毛毡等保温措施。

5.5.9 UHPC 浇筑前，模具内不得有积水，应检查模具安装的紧固性和接缝的密合密封情况，保证模具在浇筑过程中不移位、不涨模和不漏浆；模具在合模前，应涂刷脱模剂，防止拆模时混凝土粘模。

5.5.10 UHPC 浇筑时应符合下列规定：

- 1 入模温度要求应符合 GB 50666 中的相关规定，高温施工时，混凝土入模温度宜控制在 30℃ 以下；

冬季施工时，入模温度不宜低于 5℃。

2 布料机下料口或封板不得触碰模具、钢筋及其他预留预埋装置。

3 立式浇筑高度应不大于 4m。

4 浇筑时，拌合物下料点和流动方向应考虑对纤维分布和取向性的影响，宜使拌合物承受主拉应力的方向流动，并通过试验性制作确定。

5 起重机配合吊斗下料时，吊斗开启和关闭阀门应密封良好；吊斗距离模具高度不宜超过 600mm；下料时应均匀，并辅以人工摊铺；不得踩踏钢筋骨架，应采取分层连续浇注方式，避免一次性集中下料。

6 露天生产遇雨雪天气时应停止浇筑作业；若必须浇筑时应有相应质量保证措施，避免雨雪等进入混凝土及模具中。

7 管片浇筑应安排受过培训或有生产经验的技术人员指导，保证 UHPC 拌合物的均匀性，并做到连续性浇筑，保持表面湿润，避免出现层间冷缝。

8 对于扩展度等级为 F800 的拌合物，不宜进行振捣；扩展度等级为 F700 和 F600 的拌合物，可采用低频振动或插捣方法密实成型；扩展度等级为 F500 及以下的拌合物，应通过试验性制作和检验钢纤维分布状态，确定适宜的振捣方法、振捣强度与时间。

9 拌合物采用振动密实，应符合下列规定：

1) 平板式振捣器的移位间距应使振动器平板能覆盖已振实部分不小于 100mm；

2) 附着式振动器的布置应通过试验性制作确定。

## 5.6 养护

5.6.1 UHPC 在浇筑、振捣完成后应及时进行抹面，且应避免出现纤维外露和凹坑的现象，要求表面平整。

5.6.2 UHPC 在首次抹面时，严禁向表面洒水，在二次抹面时可采用适量喷雾湿润表面。

5.6.3 管片浇筑抹面完成后应立即覆盖薄膜或喷洒养护剂进行保湿养护，并应符合下列规定：

1 覆盖薄膜时，不得损坏、损伤 UHPC；

2 薄膜应搭接、有效铺设，并固定紧实；

5.6.4 UHPC 管片采用自然养护措施时，保湿养护时间不应少于 14d，且保持管片的表面温度不低于 5℃。构件芯部与表面温差不宜大于 25℃，当温差大于 25℃时，宜采取保温措施。

5.6.5 UHPC 管片采用蒸汽养护措施时，应符合下列规定：

1 宜在 UHPC 终凝后开始高温蒸汽养护，同时拆除薄膜；

2 蒸汽不得直接喷射到 UHPC 表面；

3 恒温养护温度在 80℃~90℃时，恒温时间不宜少于 72h；恒温养护温度在 90℃以上时，恒温时间不宜少于 48h；养护的相对湿度不应低于 95%；升、降温速率均不应大于 15℃/h；

4 管片表面温度与环境温度差降至小于 20℃，蒸汽养护结束。

5 温度较高区域（夜晚温度 $\geq$ 25℃）脱模后，立刻放入保温养护罩中、内设喷雾装置，利用水化热和夏季高温进行保温养护，同条件试块的强度达到设计强度的 75%，养护结束。

6 温差较大或夜晚温度较低区域，脱模后，立刻放入保温养护罩中，通入蒸汽，保持内部温度在 50~60℃，利用水化热和蒸汽保温保湿养护，同条件试块的强度达到设计强度的 85%，养护结束。

5.6.6 其他蒸汽养护或热处理制度应通过试验和试验性制作确定。

## 5.7 拆模与吊运

5.7.1 管片拆模应符合下列规定：

1 拆模时，同条件养护的混凝土试件抗压强度应满足工艺要求。

- 2 拆模顺序应与支模顺序相反进行。
  - 3 拆模时混凝土表面温度与大气温度差不应超过 25℃。
- 5.7.2 管片起吊强度应满足施工工况验算。
- 5.7.3 管片拆模时采用的吊具应符合下列规定：
- 1 根据预制构件形状、尺寸、重量以及吊装和设计受力特征选择吊具、卡具、索具、托架和支撑等吊装和固定措施；
  - 2 按现行国家标准的规定进行设计验算或试验检验，经验证合格后方可使用；
  - 3 管片多吊点起吊时，应保证各个吊点受力均匀；
  - 4 吊装过程中，吊索水平夹角不宜小于 60° 且不应小于 45°，尺寸较大或形状复杂的管片应使用分配梁或分配桁架类吊具，并应保证吊车主钩位置、吊具及管片重心在垂直方向重合。

## 5.8 质量检验

- 5.8.1 管片生产前应检查各批次原材料及零部件合格证、质量证明文件及第三方的检测报告（若有）是否齐全及满足要求，同时对物料安排抽检，合格后方可安排生产。
- 5.8.2 管片用 UHPC 的抗压强度应符合以下规定：
- 1 管片用 UHPC 的设计抗压强度不应小于 120MPa，具体强度等级应符合设计要求。
  - 2 温度较高区域（当日最低温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ）抗压强度测量值应达到设计抗压强度的 75%方可运输、吊装和张拉预应力；温度较低区域（当日最低温度 $< 5^{\circ}\text{C}$ ）的管片出厂时抗压强度测量值应达到设计抗压强度的 85%方可运输、吊装和张拉预应力。
  - 3 每一节 UHPC 管片均应进行抗压强度检验。一个塔筒的全套管片作为一个检验批次。
  - 4 管片运输、吊装和张拉预应力前的抗压强度以同条件养护的 UHPC 试块强度值进行判定；判定管片合格的抗压强度以 28 天标准条件养护的 UHPC 试块强度值进行判定。
  - 5 UHPC 的抗压强度应按 GB/T 50081 的有关规定进行测定，并应符合下列规定：
    - 1) 宜采用尺寸为 100mm $\times$ 100mm $\times$ 100mm 立方体试件，每组为 3 个试块，同时制作同养试块与标养试块，按要求分别养护；
    - 2) 加载速率宜为 1.20MPa/s $\sim$ 1.40MPa/s；
    - 3) 抗压强度检验值均不乘以尺寸换算系数。
- 5.8.3 管片钢筋保护层厚度、构件尺寸、外观质量等技术指标和检验要求应符合《风电塔筒用超高性能混凝土管片》的规定。

## 5.9 存储与成品保护

- 5.9.1 混塔管片存放应按规格型号、出厂日期、使用部位、吊装顺序分类存放、编号清晰。
- 5.9.2 存放场地宜为混凝土硬化地面或经人工处理的地坪，除应满足平整度和承载力要求，还应有排水措施。
- 5.9.3 因混塔侧模不承重，模板拆除时混塔强度只要保证其表面、棱角不因拆模而损坏即可拆除，根据工程实践，结合自然环境及温度情况，可在台位养护 24h $\sim$ 48h 后脱模。
- 5.9.4 如果龙门吊可以覆盖生产区和堆放区，则可以用龙门吊直接将混塔段从预制工位吊运至堆放区，如果龙门吊无法覆盖生产区和堆放区，可考虑采用龙门吊、板车、履带吊或汽车吊的方式转运至堆放区。
- 5.9.5 吊运作业要点：
- 1 吊运路线应事先设计，吊运路线应避开工人作业区域。
  - 2 吊带吊具要与构件连接牢固。

3 吊运速度应当控制，避免构件大幅度摆动

4 吊运路线下禁止工人作业。

#### 5.9.6 成品保护：

1 管片起吊转运及存储过程中，应避免管片磕碰；转运车要配备轮胎、木方等铺垫材料，防止运输过程中的颠簸。出厂吊运过程中，同样需防止管片磕碰。

2 管片露天堆放时，预埋件应有防锈措施；预留预埋孔洞等应采取封闭措施，防止积水。

## 6 管片运输和安装

### 6.1 一般规定

- 6.1.1 预制管片装卸、吊装工作范围内不应有障碍物，并应有满足预制管片周转使用的场地。存放堆场应坚实平整，并有排水措施。
- 6.1.2 管片运送到施工现场后，应按规格、品种、使用部位吊装顺序设置存放场地。
- 6.1.3 吊装前应编制专项吊装方案，并进行专家论证。
- 6.1.4 吊装前应确认预制管片、设备、工器具、辅料等各项目检验合格，符合吊装条件。吊装所用的起重机械性能应满足吊装要求，且起重机械的使用应满足特种设备使用管理规定。
- 6.1.5 吊装前应执行基础交接程序，建设单位组织监理、总包、管片制造、安装、基础施工、预应力安装等相关单位驻场人员进行验收。
- 6.1.6 基础交接验收应包含并不限于如下：基础顶板中心点位置、基础顶面凹槽深度与截面宽度以及分度圆半径、基础底部空腔底面锚垫板处混凝土应密实、无裂缝、顶面预应力孔道应顺直相邻预应力孔道的中心距离、顶面凹槽内的预埋定位销的深度以及中心位置、凹槽内不应有浮浆等。与混凝土塔筒相关的基础接口应满足表 6.1.6 的要求。

表6.1.6 混塔基础交接检查项

	检查项目	设计要求	检查方式
1	基础预埋件水平度	$\leq 10\text{mm}$	水平度测量
2	基础预应力孔道偏差	$\leq 10\text{mm}$	尺量
3	定位销轴中心度	$\leq 2\text{mm}$	尺量
4	基础接地	$\leq 4\ \Omega$	电阻测试仪测量
5	基础锚垫板密实度	无疏松、孔洞	目测、锤击

- 6.1.7 吊装前，应确认风速、气温等气象条件满足吊装要求。吊装时风速不宜超过 10m/s。
- 6.1.8 吊装作业前，起重作业人员应进行技术和安全交底，应熟知施工方案、吊装程序，并清楚管片的尺寸、重量、重心位置、吊点位置。

### 6.2 管片运输

- 6.2.1 管片运输前应根据项目机位点分布进行路勘，并根据管片形状尺寸、车体平衡确定装车绑扎固定措施和运输方案，运输司机应根据路况控制车速，运输过程中不应急刹车及急加速，遇坑洼、颠簸不平的道路应缓慢行驶，避免管片边缘及其他重要部位如吊点、预应力孔道等受到损害。
- 6.2.2 施工现场内道路应按照管片运输车辆的要求合理设置转弯半径及道路坡度。
- 6.2.3 应对预留孔道、暗椎的端口用专用保护塞进行封堵，避免水、粉尘或碎屑引起腐蚀或堵塞。
- 6.2.4 管片运输前其强度要求不低于设计要求。
- 6.2.5 管片运输应采取可靠的固定措施，管片运输时不应发生移动、倾倒、变形。
- 6.2.6 管片预埋吊点应朝上，标识宜朝向堆垛间的通道。

### 6.3 管片拼装

- 6.3.1 管片拼装应按照设计要求进行，拼装可以在机位点或者专门的拼装场进行。
- 6.3.2 管片拼装用拼装台应有足够的刚度和强度，满足拼装变形要求，拼装支撑面平整度不宜大于 2mm。
- 6.3.3 管片拼装前，应取下拼接缝上所有连接口的防护装置，并检查是否有腐蚀、堵塞或积水，拼接前应处理清洁。
- 6.3.4 管片拼装前应检查管片质量，确保管片型号规格和外观质量符合设计要求。
- 6.3.5 管片拼装用连接件（插筋或者螺栓）应成套使用，连接件的安装应符合供应商要求。
- 6.3.6 管片拼装后，管节的几何尺寸应符合设计要求。
- 6.3.7 管片拼接缝的内、外侧及底部，应采用密封材料密封处理。
- 6.3.8 管片竖缝灌浆时应采取临时固定装置，待浆体强度达到设计要求后方可拆除临时固定装置。
- 6.3.9 管片竖缝灌浆宜采用底部压力注浆工艺，灌浆应缓慢进行，至最顶部冒浆且稳定出浆后方可停止。
- 6.3.10 管片竖缝灌浆后，应采取有效的养护措施，冬季施工时应采取有效的保温措施。
- 6.3.11 管片竖缝拼接采用连接螺栓和环氧胶时，连接基面不得有明水，胶层厚度要涂抹均匀，不得出现拼接后不饱满、透光现象。
- 6.3.12 管片竖缝拼接用连接螺栓和环氧胶，应按照材料使用说明书进行操作，并满足设计要求。

### 6.4 吊装

- 6.4.1 管节吊装前，应确认基础混凝土的强度满足设计要求，并不应低于设计强度等级值的 75%，并应对基础顶面的平整度、垫块水平度、基础中心、预应力孔道位置进行复测，并应满足设计要求。
- 6.4.2 管节吊装前，应确认预埋吊钉及周边混凝土牢固可靠。管片混凝土抗压强度应达到设计要求，且不宜低于设计强度等级值的 75%；竖直拼缝灌浆料强度应满足设计要求。
- 6.4.3 吊装平台不能存在松软土、橡皮土、雨水坑、积雪等不利于安装的因素，如有应采用碎砖石、碎混凝土块等建筑渣土材料换填并压实。
- 6.4.4 地面承载能力不低于 130kN/m<sup>2</sup>，平台压实系数不小于 0.95，平台倾斜度应不大于 1%。
- 6.4.5 主吊行走轨迹下铺设钢质走道板增加地基强度，必要时对地基进行预压。
- 6.4.6 基础施工单位移交安装机位平台时，应出具含有地基承载力、压实系数及平整度的三方试验检测报告。
- 6.4.7 吊装过程中预应力孔道外露部分不应变形。
- 6.4.8 吊装及水平缝粘接材料施工时，水平缝粘接材料不应进入预应力孔道。
- 6.4.9 预制管片就位应满足下列要求：
- 1 首节管片应进行同轴度测量，基础或首节的中心应作为后期检验塔筒中心是否偏移的参考点，其误差应符合设计要求。
  - 2 首节管片吊装完成后与基础顶面宜留有不小于 10mm 的空隙。空隙宜采用水泥基灌浆料进行填充。
  - 3 首节管片底部灌浆宜采用自重法灌浆工艺。
  - 4 每吊装一节管片应对其进行调平，误差应符合设计要求。
  - 5 上下节管片水平缝粘接材料施工应与吊装同步进行，粘接材料施工开始至管片就位的时间间隔应满足粘结材料可施工性能要求，且水平接缝的缝宽应满足设计要求。
  - 6 水平缝粘接材料应严格按照工艺要求进行配制，搅拌质量应由质检人员进行确认合格后方可使用。

7 吊装下一节预制管片前，应对上一节预制管片孔道的通畅性进行检查，合格后方可吊装。

6.4.10 塔筒吊装工程质量标准及检验方法应符合表 6.4.10 的规定。

表 6.4.10 塔筒吊装工程质量标准及检验方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/检验工具
1	塔筒中心引测点与基准点的偏差	5	mm	尺量、线坠、经纬仪或激光仪
2	塔筒垂直度	H/1000	—	激光垂准仪
3	塔筒顶部水平度	符合设计要求	mm	水平仪或经纬仪
4	塔筒接地体导通电阻	符合设计要求	mΩ	电阻测试仪
5	混凝土及灌浆料试件强度	符合设计要求	—	标准养护
6	预应力孔道通畅性	贯通	—	通球/内窥镜

## 7 预应力工程

### 7.1 一般规定

7.1.1 预应力施工前应编制预应力系统专项施工方案。

7.1.2 预应力系统施工时，当所处环境温度低于 $-15^{\circ}\text{C}$ 时不宜进行预应力筋张拉；当所处环境温度高于 $35^{\circ}\text{C}$ 或日平均环境温度连续5日低于 $5^{\circ}\text{C}$ 时，不宜进行灌浆施工；当所处环境温度高于 $35^{\circ}\text{C}$ 或日平均环境温度连续5日低于 $5^{\circ}\text{C}$ 条件下进行灌浆施工时，应采取专门的质量保证措施。

### 7.2 体内有粘结预应力系统

7.2.1 预应力索应分类、分规格装运和堆放。堆放时应符合下列要求：

- 1 在室外存放时不得直接堆放在地面上，宜垫枕木并用防水布覆盖。
- 2 长期存放时应置于仓库内，仓库应干燥、防潮、通风良好、无腐蚀气体和介质。
- 3 在潮湿环境中存放，宜采用防锈包装产品、防潮纸内包装、涂敷水溶性防锈材料等。
- 4 预应力索盘卷存放时，应确保其盘径不致过小而影响预应力索的力学性能。

7.2.2 预应力索下料应选用长度适宜的平整、清洁场地，制作好的预应力索应做好标识分类堆放，并做好防锈、防污染、防破损等措施。

7.2.3 预应力索的下料长度应经计算确定，并满足设计要求，应采用砂轮锯或切断机等机械方法切断。预应力束制作或安装时应避免焊渣或接地电火花的损伤。

7.2.4 预应力索在制造和安装过程中，应采取预防措施预防腐蚀、受热、磨损和其他伤害。

7.2.5 预应力索安装前，应及时检查其规格尺寸和数量，逐根检查并确认其端部组配件可靠无误后，方可在工程中使用。

7.2.6 混凝土塔筒预应力索或成孔管道应按设计规定的形状和位置安装，并应符合下列规定：

- 1 预应力索或成孔管道应平顺，并可靠固定。可采用定位钢筋绑扎固定，定位钢筋直径不宜小于 $10\text{mm}$ ，间距不宜大于 $1.2\text{m}$ ，预应力索曲线曲率较大处的定位间距，宜适当缩小。
- 2 预应力索或成孔管道控制点水平位置允许偏差不应大于 $10\text{mm}$ 。

7.2.7 采用钢管或胶管抽芯成孔时，钢筋井字架的间距：对钢管宜为 $1\text{m}\sim 1.2\text{m}$ ，对胶管宜为 $0.6\text{m}\sim 0.8\text{m}$ ，浇筑混凝土后，应陆续转动钢管，待混凝土初凝后、终凝前抽出。

7.2.8 穿索方法可采用单根穿索、卷扬机集束穿索及吊车集束穿索。

7.2.9 预应力索穿入孔道及其防护，应符合下列规定：

- 1 预应力索穿入孔道后至孔道灌浆的时间间隔不宜过长，当环境相对湿度大于 $60\%$ 或处于近海环境时，不宜超过 $14\text{d}$ ；当环境相对湿度不大于 $60\%$ 时，不宜超过 $28\text{d}$ 。
- 2 当不能满足本条第1款的规定时，宜对预应力索采取防锈措施。

7.2.10 预应力索张拉设备应由专人使用和管理，并应定期维护和校验。张拉设备的校验应符合下列规定：

1 张拉设备应配套校验。压力表的精度不应低于 $1.6$ 级；校验张拉设备用的试验机或测力设备测力示值的不确定度不应大于 $1.0\%$ ；校验时千斤顶活塞的运行方向，应与实际张拉工作状态一致。

2 张拉设备的校验期限不应超过半年。当张拉设备出现反常现象时或千斤顶检修后，应重新校验。

3 应根据第三方机构出具的张拉设备标定证书，对预应力张拉力控制值进行换算，确定设计张拉力对应的油压表控制度数。

7.2.11 施加预应力时，管片强度应满足设计要求，拼接缝的材料强度应满足设计要求。

- 7.2.12 预应力索的张拉控制应力、张拉顺序应符合设计及专项施工方案的要求。
- 7.2.13 预应力索的张拉应从零开始按要求进行分级张拉，张拉至设计要求的张拉力后停止张拉，持荷 2min~5min 后锁定。
- 7.2.14 预应力张拉应采用控制应力与预应力索伸长值双控方法进行，以控制应力为主，伸长值进行校核。实测伸长值与计算伸长值的允许偏差应控制在±6%。
- 7.2.15 体内有粘结预应力系统宜进行现场孔道摩擦系数测定，并可根据实测结果调整张拉控制力。
- 7.2.16 预应力索的张拉顺序应符合设计要求，且应避免出现对结构不利的应力状态；当设计无具体要求时，应符合下列规定：
- 1 预应力索的张拉顺序应根据结构受力特点、施工方便及操作安全等因素确定，遵循对称张拉原则，宜采用十字对称或米字对称张拉。
  - 2 张拉宜采用整束张拉的方式，体内预应力严禁使用单根预应力索的方式张拉。
- 7.2.17 预应力索张拉过程中应避免出现钢绞线滑脱或断丝。
- 7.2.18 预应力索张拉锚固后，应对锚固状态和张拉记录进行检查，确认合格后，方可切割外露多余部分的预应力索。宜采用砂轮锯或其他机械方法切割多余的预应力索，不得采用电弧切割。切割后的预应力索外露长度不应小于 1.5 倍预应力索直径，且不应小于 30mm。
- 7.2.19 预应力索张拉锚固后，如遇到特殊情况需要放张，宜在工作锚上安装退锚器，采用千斤顶放张。预应力索放张应有专项安全保护措施，预应力索放张退锚时不得断裂，高应力状态的预应力索不得弹出伤人。
- 7.2.20 张拉时发现以下情况应停止张拉，应在查明原因并采取措施后方可继续张拉：
- 1 预应力索断丝、滑丝或锚具、夹片碎裂。
  - 2 基础混凝土出现裂缝或破碎，锚垫板陷入混凝土。
  - 3 孔道中有异常声响。
  - 4 达到张拉力后，伸长值明显不足。
- 7.2.21 张拉完成 24 小时后需观察锚具夹片回缩情况，满足要求后方可进行下一步施工。
- 7.2.22 体内预应力系统孔道灌浆应符合下列规定：
- 1 灌浆前应清洗孔道，保持孔道湿润，并应采用封堵材料对锚具、夹片、喇叭口缝隙进行封堵，宜采用灌浆帽对锚具及外露钢绞线整体封闭后进行灌浆施工。
  - 2 孔道灌浆应采用预应力孔道灌浆料，灌浆料 28 天抗压强度不应低于 80MPa。
  - 3 灌浆前应对锚具夹片空隙等可能漏浆处采用高强度水泥浆封堵，封堵材料达到一定强度时方可灌浆。
  - 4 孔道灌浆应缓慢均匀连续进行，同一段孔道中途不得中断，当孔道长度超过 100 米时，可根据情况设置接力灌浆方案，并采取可靠检验措施保障灌浆密实度。
  - 5 当检查发现灌浆口有空隙时，宜进行二次灌浆或重力补浆。
- 7.2.23 预应力索切筋完成后应尽快封锚，防腐与封锚应满足设计要求。外露钢绞线宜采用专用防腐油脂进行涂抹。锚具孔内钢绞线以及夹片缝隙宜采用专用防腐油脂挤压填充密实。
- 7.2.24 锚具处应安装封锚罩，封锚罩与结构主体应有可靠的连接，并应进行密封处理。
- 7.2.25 预应力索张拉端锚具宜采用与结构同强度等级的细石混凝土或无收缩防水砂浆封闭保护。

### 7.3 体外预应力系统

- 7.3.1 体外无粘结预应力索的下料、制造、安装、穿束、张拉、防腐与封锚的要求与第 7.2.2 至 7.2.5、7.2.8、7.2.10 至 7.2.14、7.2.16 至 7.2.21、7.2.23 至 7.2.24 条相同。

7.3.2 体外无粘结预应力索存放时，不得放置在受热影响的场所，且不得直接堆放在地面上。其他堆放要求与第 7.2.1 条相同。

7.3.3 体外无粘结预应力索安装前除满足第 7.2.5 条的要求外，对护套轻微破损处，可采用外包防水聚乙烯胶带进行修补，每圈胶带搭接宽度不应小于胶带宽度的 1/2，缠绕层数不应小于 2 层，缠绕长度应超过破损长度 30mm。

7.3.4 体外预应力索安装完成后，应对预应力索的安装质量进行检查。体外预应力索与混凝土塔筒或塔筒内附件不应干涉。

7.3.5 体外预应力索张拉端锚具宜采用防腐油脂封闭保护。

## 7.4 质量控制

7.4.1 预应力工程材料进场检查应符合下列规定：

1 预应力筋用锚具、夹具和连接器的进场检查应符合现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的有关规定。

2 预应力索中钢绞线应成批检查和验收，组批规则应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的有关规定。

3 预应力索中钢绞线进场检测项目应包括外观质量、外形尺寸和拉伸性能。

4 预应力索中钢绞线的检验项目、取样数量、取样方法、试验检测方法和质量评价，应按表 7.4.1 执行。

5 无粘结预应力钢绞线进场时，尚应进行防腐润滑脂质量和护套厚度的检验，检验结果应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JGT 161 的有关规定。

表 7.4.1 钢绞线的检验项目、取样数量、取样方法、试验检测方法和质量评价

序号	检验项目	取样数量	取样方法	试验检测方法	质量评价
1	表面	逐盘卷	—	目视	GB/T 5224
2	外形尺寸	逐盘卷	—	符合精度要求的 适宜量具	
3	钢绞线伸直性	3 根/批	任选 1 盘切取	符合精度要求的 适宜量具	
4	整根钢绞线最大力	3 根/批	任选 1 盘切取	GB/T 21839	
5	整根钢绞线最大力最大值				
6	弹性模量				
7	最大力总伸长率				
8	0.2%屈服力				
9	应力松弛试验	1 根/批	任选 1 盘切取		

7.4.2 预应力安装前，应对预应力索、预留孔道、锚垫板和锚固区加强钢筋的外观、品种、级别、规格、数量和位置等进行检查。

7.4.3 预应力索张拉前应进行下列检查：

- 1 预应力索张拉前的同条件养护混凝土试块的强度；
- 2 预应力索张拉伸长值计算书；
- 3 预应力张拉设备的标定证书；

4 基础锚垫板下混凝土不应有空鼓，不密实的情况。

7.4.4 张拉过程中，预应力索断丝或滑丝的控制指标应符合表 7.4.4 的规定。

表 7.4.4 预应力索断丝或滑丝的控制指标

预应力索类	检查项目	控制数量
钢绞线	每个截面断丝之和不超过该截面钢丝总数的百分比	$\leq 3\%$
	每根钢绞线断丝或滑丝	$\leq 1$ 丝

7.4.5 预应力索、锚垫板安装水平、垂直方向尺寸偏差不应大于 $\pm 10\text{mm}$ 。体内有粘结预应力系统中预应力孔道的水平位置及直径尺寸偏差不应大于 $10\text{mm}$ 。

7.4.6 预应力索实际伸长值与理论计算伸长值偏差不宜大于 $\pm 6\%$ 。

7.4.7 体内有粘结预应力系统灌浆用水泥浆或灌浆剂应进行下列检查：

- 1 配合比设计阶段检查稠度、泌水率、自由膨胀率、氯离子含量和试块强度。
- 2 现场搅拌后检查稠度、泌水率，并根据验收规定检查试块强度。
- 3 灌浆记录表。

## 8 成品验收

### 8.1 一般规定

8.1.1 UHPC 塔筒安装前应有按专家论证意见修改完成的专项安装方案，并经安装单位技术负责人、总监理工程师批准；对现场施工技术负责人、现场管理人员以及施工作业人员进行技术安全交底后方可正式安装作业。

8.1.2 起重设备应经备案，证件、保险、资质齐全，工况与安装方案相符，车况、钢丝绳状态良好，安全限位装置有效，作业配置路基板，静载试验合格。

8.1.5 相关计量器具如数显电子秤、激光标线仪、垂准仪、力矩扳手、钢卷尺等取得计量检定单位的检定报告并在检定周期内。

8.1.6 作业人员须体检健康证、保险齐备，登高等特种作业人员应持证上岗。

8.1.7 在 UHPC 塔筒安装期间，应满足现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204-2015 的相关要求。

### 8.2 关键材料及关键零部件入场检验

8.2.1 UHPC 塔筒拼装用水泥基型的灌浆料、环氧胶型的环氧粘接剂等；混凝土塔筒安装用水泥基型无收缩的座浆料、环氧胶型的环氧粘接剂等；预应力孔道水泥基型灌浆料。水泥基型的灌浆料按 JG/T 408-2019 验收；水泥基型无收缩的座浆料按现行行业标准《风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范》NB/T 10907-2021 验收；环氧胶型的环氧粘接剂按现行国家标准《预制混凝土节段拼装用环氧胶粘剂》GB/T 44543 验收；预应力孔道水泥基型灌浆料按现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448-2015 验收。

8.2.2 UHPC 塔筒拼装和安装中使用水泥基型粘结材料时，拌合用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的相关要求，拌合用水的检测应符合现行国家标准《水质 氯化物的测定 硝酸银滴定法》GB/T 11896 的相关要求。

8.2.3 UHPC 塔筒拼装与安装粘结材料在进场时，应检查包装信息、抽查包装袋内混合料是否结块，同时应检查随材料进场的有关出厂质量证明文件，核查质量证明文件内的生产日期、强度等级、强度值、混凝土龄期、环氧胶型的环氧粘接剂有效期等信息；

8.2.4 对粘结材料的外观、出厂质量证明文件检查合格后，按照委托检测见证取样流程，送有相应资质、检测能力的第三方检测单位复试其必要的材料性能。委托送检复试项目、批次按照表 8.2.4-1、表 8.2.4-2、表 8.2.4-3 执行，同时应满足设计及国家、行业标准要求。

表 8.2.4-1 环氧粘接剂复试检验项目列表

序号	试验项目		检验依据	指标要求	取样要求	资料要求		
1	可施胶时间		GB/T44543-2024	$\geq 20\text{min}$	同一原料、工艺、配方规格生产的 10 吨为一批	1、试验报告中试验项目齐全并进行判定； 2、试验报告检测依据规范准确； 3、试验报告技术标准准确。		
2	可粘接时间			$\geq 60\text{min}$				
3	抗流挂性能			$\geq 10\text{min}$				
4	抗压强度	12h		$\geq 20$				
5		24h		$\geq 60$				
6		7d		设计要求				
7	钢对钢拉伸剪切强度						$\geq 17$	
8	钢对混凝土正拉粘接强度						$\geq 3.0$ ，且为混凝土本体破坏	

表 8.2.4-2 水泥基座浆料复试检验项目列表

序号	试验项目		检验依据	指标要求	取样要求	资料要求
1	初始流动度		NB/T 10907 GB/T 8077 GB/T 50080 GB/T 17671 GB/T 50448	130~200	同配方、同批 号原材料的 产品应以 50 吨为一检验 批	1、试验报告中试验项目齐全并进行判定； 2、试验报告检测依据规范准确； 3、试验报告技术标准准确。
2	氯离子含量/%			≤0.03		
3	泌水率			0		
4	抗压强度	1d		≥35MPa		
		3d		≥60MPa		
5	竖向膨胀率	28d	≥设计要求			
		3h	≥0.02%			
		3h 和 24h 差值	0.02%~0.5%			

表 8.2.4-3 水泥基灌浆料复试检验项目列表

序号	试验项目		检验依据	指标要求	取样要求	资料要求
1	流动度	初始	JG/T 408 GB/T 8077 GB/T 50080 GB/T 17671 GB/T 50448	≥300mm	同配方、同批 号原材料的 产品应以 50 吨为一检验 批	1、试验报告中试验项目齐全并进行判定； 2、试验报告检测依据规范准确； 3、试验报告技术标准准确。
		30min		≥260mm		
2	氯离子含量/%			≤0.03		
3	泌水率			0		
4	抗压强度	1d		≥35MPa		
		3d	≥60MPa			
5	竖向膨胀率	28d	≥设计强度			
		3h	≥0.02%			
		3h 和 24h 差值	0.02%~0.5%			

8.2.5 送检材料复试应做封样处理，确保检测材料与取样材料的一致性。

8.2.6 钢制转接段应经现场外观验收合格，并检查出厂合格证及质量证明文件、监造签发的放行单。钢制转接段法兰椭圆度及平面度应进行检查。

8.2.7 对到场的连接钢塔筒与钢制转接段的高强度螺栓外观、出厂质量证明文件检查合格后，按照高强度螺栓技术要求和设计要求委托检测见证取样，送有相应资质、检测能力的第三方检测单位复试其材料性能。

8.2.8 对到场的连接混合塔筒顶段与钢制转接段的锚栓外观、出厂质量证明文件检查合格后，按照锚栓技术规范要求委托检测见证取样流程，送有相应资质、检测能力的第三方检测单位复试材料性能。

### 8.3 管片到场验收

8.3.1 UHPC 塔筒的质量应符合本规范、国家现行标准的规定和设计要求。

检查数量：全数检查

检查内容：见下表 8.3.1 管片到场资料验收清单

表 8.3.1 管片到场资料验收清单

技术资料分类	资料名称
原材料和部件	质保书、合格证、质量证明文件等
	台账、入厂检测记录及报告等
对外送检记录及结果	第三方试验、检测报告等
生产过程记录	模具验收及日常检查记录

	钢筋加工及成品检查记录
	隐蔽工程检查记录
	混凝土浇筑前检查记录
	混凝土浇筑记录
	构件养护记录
	构件尺寸检查报告
	裂缝检查报告
	钢筋保护层厚度检查报告
	外观质量检查报告
	出厂合格证等出厂资料
	搅拌楼混凝土搅拌、配合比调整记录等
	监造放行单
	运输节点同养试块出厂强度报告
不合格品维修记录	不合格品维修记录及二次验收记录

8.3.2 UHPC 塔筒管片运输至项目现场后，应按《超高性能混凝土管片》对塔筒管片实体进行全数检查，其检验方法、检验工具和判定规则应符合《超高性能混凝土管片》的规定。

8.3.3 当 UHPC 塔筒在运输工程中产生刚蹭、碰撞时，应组织各方参与对影响结构性能和安装、使用功能的尺寸进行检测和鉴定，根据鉴定结果出具相应的处理方案。

#### 8.4 UHPC 管节拼装过程验收

8.4.1 拼装专用工具使用前及使用中应检查：吊索、吊具必须是按国家标准规定生产、检验、具有合格证和维护、保养说明书的产品；吊带表面没有破损、边缘割断、裂痕及其他损坏；缝合处无脱线，纤维束没有断裂；

8.4.2 组装平台的表面高差应控制在 2mm 以内，混凝土塔筒分片拼装的整体尺寸要满足设计要求，且满足安装需求；

8.4.3 将待拼装管片对照出厂质量证明文件进行外观及结构尺寸检查，经检查合格后方可进行现场拼装作业；

8.4.4 UHPC 塔筒粘结材料搅拌应按照材料技术使用说明书拌制和使用，UHPC 塔筒拼装灌浆料的厚度要涂抹均匀，不得出现拼接后不饱满、透光现象；

8.4.5 UHPC 塔筒分片拼装完成后应对拼装环进行检查与验收，应检查拼环的径向尺寸、定位销轴相对中心距离尺寸、拼缝位置的内外错位尺寸、顶面水平度等。拼环尺寸的允许偏差及检验方法见表 7.5-1。

检查数量：全数检查

检验方法：尺量

表 8.4.5 拼环尺寸的允许偏差及检验方法

项目	允许偏差 (mm)	检验方法
整环外径	±6	钢卷尺尺量检查
定位销轴孔中心距	≤2	
整环顶面水平度	≤3	数显激光标线仪
拼缝处错位	≤10	钢卷尺尺量检查

## 8.5 UHPC 塔筒安装过程验收

8.5.1 根据 UHPC 塔筒安装基面不同条件，混凝土塔筒安装分为以下五个区段，见表 8.5.1。

表 8.5.1 混凝土塔筒段安装区段划分表

序号	安装区段概念	安装名称
1	混塔空心基础与混凝土塔筒段连接位置	首段
2	混凝土塔筒段第二段至最上面一段之间区段	中间段
3	混凝土塔筒段的最上面一段	过渡段
4	混凝土塔筒段的最上面一段与上部钢塔筒之间的连接段	转接段

8.5.2 按照混塔设计方的技术要求和工艺文件分别对首段安装、中间段安装、过渡段安装、转接段安装中的要求，均应对水平度、垂直度、水平缝饱满度、密实度进行检查验收，并留存影像记录文件。

检查数量：全数检查

检查方法：水平以及垂直度检测仪器、影像设备记录

表 8.5.2 UHPC 塔筒安装检验要求

序号	类别	检查项目	质量标准	检验方法	
1	主控	座浆缝质量	均匀溢浆，且水平缝内外端部应挤压	观察	
2		过渡段水平度	$\leq 3\text{mm}$	水平仪	
3		转换段水平度	张拉后 $\leq 5\text{mm}$	水平仪	
4	一般	垂直度	$H < 18\text{m}$	$< 15\text{mm}$ 或设计要求	垂准仪
			$H \geq 18\text{m}$	$H/1200$ 或设计要求	
5	一般	高度	$\pm H/1000$	水准仪	
6		外观质量	不应有一般缺陷	观察	

8.5.3 铝制爬梯及混合塔筒其他内附件安装位置应正确，螺栓用力矩扳手按要求紧固并做好防松标记线。

8.5.4 UHPC 塔筒管片在安装前须满足同养试块强度达到 80%前提下进行，起吊时管片同养试块强度和竖缝灌浆料试块强度应达到设计规定的强度。

8.5.5 钢制转接段安装验收，包括高强螺栓（锚栓）的预拉力检测、焊缝质量、下法兰与过渡段的贴合度、钢制转接段垂直度等。

1 钢制转接段上焊缝应全数目视普查。

2 钢制转接段连接过渡段的高强度锚栓按混合塔筒设计方的技术要求紧固完成后，需进行检验，并在锚栓与螺母之间做好防松标识。钢制转接段连接过渡段的高强度锚栓的预拉力检测宜采用直接张拉法，检测时预拉力可设置为施工时预拉力的 100%，张拉时观察螺母是否会转动。高强度锚栓预拉力检测抽样比例建议为 10%。

3 钢制转接段垂直度按现行国家标准 GB/T 19072《风力发电机组 塔筒》中 6.7.3.3.7 执行。

4 铝制爬梯安装，上、下梯节应对准成一直线；安全滑轨及钢丝绳安装位置应准确。

8.5.6 钢塔段的安装验收依照风力发电机组主机厂的设计要求执行。

8.5.7 UHPC 塔筒安装完成转序交接前，安装单位应负责对所安装项目按照标准要求完成自检程序并合格。

## 8.6 塔筒成品验收

8.6.1 UHPC 塔筒成品验收应由单个机位组成一个单位工程，由建设方组织设计、监理、混塔供货单位、吊装单位、预应力施工单位共同参加进行。

8.6.2 同一台（套）UHPC 塔筒混凝土标准养护试件强度同条件养护试件换算强度依据 GB/T18736 相适

应的评定方法评定合格，UHPC 强度检验评定采用单塔验收。塔筒成品验收时 UHPC 强度不低于设计强度的 100%。

检查数量：每段塔筒均需检查。

检验方法：检查同条件试块强度报告。

8.6.3 塔筒竖缝密封材料应符合设计要求，并具有合格证及检测报告。塔筒竖缝密封材料填充应饱满、密实，不应有通缝。

检查数量：全数检查；

检验方法：观察、检验，检查检测报告。

8.6.4 预应力系统验收应符合下列规定：

1 钢绞线出现断裂或滑脱的数量不应超过同一截面钢绞线总根数的 3%，且每根断裂的钢绞线断丝不得超过一丝。

2 采用应力控制方法张拉时，张拉力下预应力筋的实测伸长值与计算伸长值的相对允许偏差为±6%；

3 最大张拉应力应符合现行国家标准 GB 50666 的规定。

检查数量：全数检查；

检验方法：检查张拉记录。

4 锚固阶段张拉端预应力筋的内缩量应符合设计要求。

检查数量：每工作班抽查预应力筋总数的 3%，且不少于 3 束；

检验方法：丈量。

5 预应力筋锚固后，锚具外预应力筋的外露长度大于上下剩余伸长值加 200mm。

检查数量：在同一检验批内，抽查预应力筋总数的 3%，且不应少于 5 束；

检验方法：观察，丈量。

8.6.5 体内有粘结预应力系统孔道灌浆验收应符合下列规定：

1 预留孔道灌浆后，孔道内水泥浆应饱满、密实。

检查数量：全数检查；

检验方法：观察，检查灌浆记录。

2 灌浆用水泥浆的性能应符合下列规定：

1) 3h 自由泌水率宜为 0，且不应大于 1%，泌水应在 24h 内全部被水泥浆吸收；

2) 水泥浆中氯离子含量不应超过水泥重量的 0.06%；

3) 当采用普通灌浆工艺时，24h 自由膨胀率不应大于 6%；

4) 检查数量：同一配合比检查一次；

5) 检验方法：检查水泥浆性能试验报告。

3 现场留置的灌浆用水泥浆试件的抗压强度不应低于 80MPa。试件抗压强度检验应符合下列规定：

1) 每组应留取 6 个边长为 40x40x160mm 的长方体试件，并应标准养护 28d；

2) 试件抗压强度应取 6 个试件的平均值；当一组试件中抗压强度最大值或最小值与平均值相差超过 20%时，应取中间 4 个试件强度的平均值。

3) 检查数量：每工作班留置一组；

4) 检验方法：检查试件强度试验报告。

8.6.6 外露锚具及预应力筋应按设计要求采取可靠的防止损伤或腐蚀的保护措施，防腐与封锚应符合下列规定：

1 处于腐蚀环境时，应设置全密封防护罩；不要求更换的预应力筋，可在防护罩内灌注环氧砂浆或

其他防腐蚀材料。

2 锚具的封闭保护措施应符合设计要求。当设计无具体要求时，外露锚具和外露预应力筋的混凝土保护层厚度，依据 GB 50010 不应小于：一类环境时 20mm；二 a、二 b 类环境时 50mm；三 a、三 b 类环境时 80mm。

检查数量：在同一检验批内，抽查预应力筋总数的 5%且不应少于 5 处；

检验方法：观察，尺量。

8.6.7 塔筒水平缝密封材料应符合设计要求，并具有合格证及检测报告。塔筒水平缝密封材料填充应饱满、密实，不应有通缝。

检查数量：全数检查；

检验方法：观察、检验，检查检测报告。

8.6.8 钢制转接段验收应符合下列规定：

1 钢制转接段上焊缝应全数目视普查。

2 目测检查钢制转接段连接过渡段的高强度锚栓与螺母之间做好防松标识。钢制转接段连接过渡段的高强度锚栓的预拉力检测宜采用直接张拉法，检测时预拉力可设置为施工时预拉力的 100%，张拉时观察螺母是否能转动。高强度锚栓预拉力检测应全数检查。

3 下法兰与过渡段应贴合无缝隙。

8.6.9 管节吊装前和混塔预应力施工完成以后应进行基础沉降观测，观测方法和结果应符合基础设计要求。

8.6.10 混塔预应力施工完成后垂直度应不大于  $H/1000$ 。

检查数量：全数检查；

检验方法：采用垂准仪进行检查。

8.6.11 预应力施工完成后过渡段顶面水平度偏差应不大于 5mm。

检查数量：全数检查；

检验方法：采用扫平仪测量检查。

8.6.12 接地铜编织线连接时接地螺栓涂抹导电膏，力矩应符合设计要求。塔架吊装完成以后，应对混塔接地电阻进行测量，整机接地电阻不得大于  $4\Omega$ 。

## 8.7 验收资料

8.7.1 UHPC 塔筒生产企业建立完善的技术资料管理体系，明确技术资料保管场所及设备，并指派相关技术资料管理负责人。

8.7.2 技术资料包括纸质文档和电子文档，包括但不限于构件生产相关的技术文件。

8.7.3 UHPC 管片技术资料的收集是由 UHPC 塔筒构件生产企业各部门分别收集和保管，并建立保管台账和档案资料目录。技术资料档案宜根据类型进行汇编、标识和归档，应做到分类清晰，标识明确、查找方便，便于阅读，妥善保存。

8.7.4 技术资料的使用应经过相关管理负责人的同意。

8.7.5 技术资料的保管期限应符合表 8.7.5 的规定，超过保管期限的技术资料方可销毁。

表 8.7.5 技术资料管理期限表

技术资料分类	资料名称	保管期限
原材料和部件	供应合同及其他附属文件	资料产生起20年
	质保书、合格证、质量证明文件等	
	台账、检测报告等	

试验检测记录及结果	原材料检测记录、检测报告，对外送检报告等	资料产生起20年
校准检验、年检以及内部设备检查检修记录	设备日常运行检查及维修记录表	资料产生起5年
	计量设备检验检定结果	
	设备年检报告等	
文件记录	图纸收发记录	项目结束后5年
	文件收发记录	资料产生起5年
	对外往来公文及邮件记录等	项目结束后5年
	质量手册及文件修改记录等	下次修订为止
生产过程记录	模具验收及日常检查、维修记录	资料产生起20年
	钢筋加工及成品检查记录	
	隐蔽工程检查记录	
	混凝土浇筑前检查记录	
	混凝土浇筑记录	
	构件模内养护记录	
	构件成品检查记录	
	发货检查记录	
	出厂合格证等出厂资料	
	搅拌楼混凝土搅拌、配合比调整记录等	
不合格品维修、报废等记录	不合格品维修记录及二次验收记录	资料产生起5年
	不合格品报废记录	

#### 8.7.6 UHPC 塔筒验收资料，包括但不限于：

- 1 塔筒质量证明书、强度检测报告等；
- 2 水平缝、竖缝拼接材料质量证明文件，复试报告；
- 3 水平缝、竖缝试块强度报告；
- 4 安装过程水平缝作业影像资料、管节水平度测量记录、吊装垂直度测量记录；
- 5 预应力材料质量证明文件和复试报告；
- 6 预应力张拉记录，水平度、垂直度测量记录。

## 9 维 护

### 9.1 一般规定

9.1.1 UHPC 塔段维护应从混凝土结构外观和接缝等方面进行。

### 9.2 外观

9.2.1 外观检查方式塔内以目测为主，塔外应借助无人机等辅助设备观察。运行后首年，每季度检查 1 次；第二年每半年检查一次；第三年之后每年检查一次。

9.2.2 检查筒节表面是否有影响结构性能或使用功能的裂缝、掉块等缺陷。检查塔筒内外壁是否有严重污渍、水渍，尤其是涉水机位浸水后的外观清洁，视严重程度，决定是否采取清洁措施。

9.2.3 如发现筒节有严重缺陷性质的裂缝，应拍照记录并描述裂缝位置、分布、走向等，并和上次检查情况进行比较，如裂缝长度存在明显扩展或宽度明显增加的情况，应及时上报并组织分析原因，并对该位置增加检查频率，必要时综合缺陷情况制定合理的修复方案。

9.2.4 如发现筒节掉块，应拍照记录并描述掉块位置、大小、厚度等，并检查附近有无继续掉落趋势，设置相关警示和隔离，及时上报并组织分析原因和制定处理措施。

9.2.5 雨季来临时，应及时检查混凝土塔筒渗水情况，应拍照记录并描述渗水位置和程度，如渗水量较大应及时上报分析原因和制定处理措施。

9.2.6 除正常的检查计划外，凡遇 11 级（32m/s）以上大风或者风机结构发生共振（风机反复启停）应进行补充检查，所有操作和检查都应有完整的记录。

9.2.7 筒节产生相关结构缺陷时，应认真分析缺陷产生的原因，对严重缺陷应制定专项修补方案，方案经论证审批通过后方可实施，不得擅自处理。

### 9.3 接缝

9.3.1 接缝检查方式以目测为主。运行后首年，每季度检查 1 次；第二年每半年检查一次；第三年之后每年检查一次。

9.3.2 检查筒节或管片拼接面是否有碎渣或透光现象。

9.3.3 如发现筒节或管片拼接面有碎渣或透光现象时，应拍照记录并描述其位置、大小等，并和上次检查情况进行比较，如范围扩展较大，应及时上报并组织分析原因和制定处理措施。

### 9.4 钢制转接段

9.4.1 钢制转接段和钢塔段首次巡检应在运行后二周进行，之后的巡检频次为：运行后首年每季度一次；运行满一年之后，每年一次。连接构造复杂的转接段的巡检频次应由设计人员确定。

9.4.2 钢制转接段巡检时，应清除巡检部位表面的油污、浮锈和其他杂物。

9.4.3 钢制转接段的巡检包括高强螺栓（锚栓）的预拉力检测、焊缝质量、法兰板的贴合度等。预拉力检测宜采用直接张拉法，对于安装后划线的螺栓（锚栓）可采用目测法检测。

9.4.4 每次巡检时，钢制转接段上高强螺栓（锚栓）的预拉力和焊缝应全数普查。

9.4.5 转接段连接中的高强螺栓（锚栓）外观质量巡检应包括螺栓腐蚀、断裂、松动、脱落、螺杆弯曲、滑移变形、螺栓孔挤压变形等。

9.4.6 螺栓预拉力检查采用扭矩法。参照前期标记的力矩线位置，使用额定力矩转动螺母并测量转动角

度，根据测得的转动角度判断螺栓的预紧情况。

9.4.7 锚栓张拉力检查采用拉伸法，对检查锚栓张拉到验收油压，螺母与法兰板之间无间隙且螺母用扳手或拨杆施加扭矩  $50\text{N}\cdot\text{m}$  不能拧动，则说明该锚栓达到验收要求。按 10% 比例，选取平均分布的锚栓测试张拉力。如有超过设计许可的张拉力衰减，则增加检测比例，直至 100% 检测。

9.4.8 钢制转接段焊缝质量的巡检一般可采取直接目视、低倍放大镜、焊缝量规和钢尺等方法对外观质量进行巡检，对巡检人员无法达到的位置可采用无人机进行巡检；受力部位的焊缝需特别注意，如法兰-塔筒壁。

9.4.9 当对焊缝质量存在怀疑时，可采用超声波或射线等检测方法对内部质量进行检测；对构造复杂或厚板的焊缝，可采用超声波相控阵或超声波衍射时差法等作为辅助技术手段进行探伤检测。

## 9.5 预应力系统

9.5.1 预应力系统有体外、体内两种技术路线。预应力系统维护应从索体、索力、防腐等方面进行。索体、索力维护仅适用于体外预应力系统。

9.5.2 体外预应力系统的维护应符合下列规定：

- 1 预应力系统索体检查每年 1 次。
- 2 检查索体自由段有没有和塔壁及其他物体意外接触的迹象。
- 3 检查索体与风塔结构接触处（转向处、预埋管出口处、减振处）有无柔性保护层、保护层有无损坏，如有则需处理或更换。
- 4 预应力系统索力检测每 5 年 1 次。
- 5 按 30% 比例，选取平均分布的索测试索力。如有超过设计许可的索力衰减，则增加检测比例，直至 100% 检测。
- 6 用单根千斤顶检测索力，每束检测不少于整束根数的  $1/3$ ，在锚环上均匀取样。单根钢绞线索力与平均索力的偏差应在 2% 以内。
- 7 预应力系统防腐检查每年 1 次。
- 8 常规检查包括金属部件是否生锈（特别是钢绞线、锚板、夹片等受力部件）、保护盖帽内是否有积水等。
- 9 若保护罩严重受损或明显有腐蚀迹象，则需要告知后张系统供应商。供应商必须到现场评估，确定修复方法。

9.5.3 体内预应力系统的维护应符合下列规定：

- 1 在预应力孔道灌浆后，钢绞线和管片筒壁形成一个整体，属于免维护的范畴。在没有经历诸如火灾、机械损伤，非正常高温等极端情况下，预应力钢绞线和索力并不需要经常性的维护。
- 2 预应力系统防腐检查要求同体外预应力。

9.5.4 如发生水灾、火灾、风电机组故障等特殊事件后，应联系预应力系统供应商或有资质单位一起针对发现的损伤制定进一步检验方法及解决方案。

# 用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的：  
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：  
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：  
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

## 引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注明日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

- GB/T 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
- GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准
- GB/T 50164 混凝土质量控制标准
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB/T 50448 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50666 混凝土结构施工规范
- GB 55008 混凝土结构通用规范
- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 222 钢的成品化学成分允许公差
- GB/T 700—2006 碳素结构钢
- GB/T 701 低碳钢热轧圆盘条
- GB 1499.1 钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋
- GB 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 1596—2017 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB/T 2567 树脂浇筑体性能试验方法
- GB/T 2793 胶粘剂不挥发物含量的测定
- GB/T 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱
- GB/T 3098.2 紧固件机械性能 螺母
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 5313 厚度方向性能钢板
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB/T 9119 板式平焊钢制管法兰
- GB 30982 建筑胶粘剂有害物质限量
- GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法
- GB/T 11896 水质 氯化物的测定 硝酸银滴定法
- GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- GB/T 14684—2022 建设用砂
- GB/T 17671 水泥胶砂强度检验方法
- GB/T 18046—2017 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- GB/T 18736—2017 高强高性能混凝土用矿物外加剂
- GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰

- GB/T 30827 体外预应力索技术条件
- GB/T 39147 混凝土用钢纤维
- GB/T 44543 预制混凝土节段拼装用环氧胶粘剂
- JG/T 225 预应力混凝土用金属波纹管
- JG/T 408 钢筋连接用套筒灌浆料
- JG/T 430 无粘结预应力筋用防腐润滑脂
- JGJ 63 混凝土用水标准
- JC/T 540 混凝土制品用冷拔低碳钢丝
- JT/T 529 预应力混凝土桥梁用塑料波纹管
- T/CBMF 37/T/CCPA 7 超高性能混凝土基本性能与试验方法
- T/CBMF 96/T/CCPA 20 超高性能混凝土预混料

# 风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程

T/CBMF XX—202X  
T/CCPA XX—202X

## 条文说明

## 制定说明

《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》（T/CBMF XX—202X/T/CCPA XX—202X），经中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会202X年X月XX日以第X号（总第XX号）公告批准发布。

本规程制定过程中，编制组进行了广泛的调研、分析和论证，认真总结讷河市东庆100MW风电项目、巨石涟水风电项目等工程中的实际应用成果和经验，参考有关国家标准及相关科研成果，并在广泛征求意见的基础上编制而成。

为了便于广大工程建设与设计单位、施工单位及工程技术人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《风电塔筒用超高性能混凝土管片应用技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供读者作为理解和把握标准规定的参考。

## 1 总则

1.0.1~1.0.3 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。

2.4~2.6 拼接缝、竖直拼缝、水平缝分别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 JGJ 369-2016《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

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

4 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

5 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。5.3.6 中第 9 款规定，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 GB 50666 第 8.1.2 条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

6 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

7 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，有利于加快施工进度，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。