

CCPA

中国混凝土与水泥制品协会标准

T/CCPA XX—202X

陆上风力发电机组混凝土塔筒修复加固技术规程

Technical specification for repair and strengthening of onshore wind

turbine concrete tower

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国混凝土与水泥制品协会

发布

## 前 言

本规程是根据中国混凝土与水泥制品协会《关于下达2024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[2024]39号）的要求，为指导和规范陆上风力发电机组混凝土塔筒的修复加固，由中国混凝土与水泥制品协会混塔分会组织起草编制完成。

本规程在编制过程中，编制组经过广泛的调查研究，参考借鉴了国内外的相关标准规范的规定，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程共分7章，主要内容包括：1. 总则；2. 术语和符号；3. 基本规定；4. 缺陷调查与可靠性评估；5. 修复加固方案；6. 修复加固用材料；7. 修复及验收。

本规程由中国混凝土与水泥制品协会归口管理，由中国混凝土与水泥制品协会混塔分会负责日常管理，由内蒙古金海新能源科技股份有限公司负责具体技术内容解释，执行过程中，如有意见或建议，请寄送内蒙古金海新能源科技股份有限公司（地址：上海市杨浦区江浦路街道昆明路508号北美广场2505室，邮政编码：200000）。

**主 编 单 位：** 内蒙古金海新能源科技股份有限公司

上海电气研砿（木垒）建筑科技有限公司

北京天杉高科风电科技有限责任公司

浙江华东新能科技有限公司

上海风领新能源有限公司

**参 编 单 位：** 远景能源有限公司

明阳智慧能源集团股份公司

中国船级社质量认证有限公司

建研院检测中心有限公司

上海同济检测技术有限公司

苏州混凝土水泥制品研究院有限公司

同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司

江苏陆海工程科技有限公司

上海悍马建筑科技有限公司

**主要起草人：** 闫鲁南 孙莉丽 叶志燕 朱华希 黄赐荣 杨 伟

李光辉 雍 飞 穆 丹 撒利平 张小琼 彭先兵

黄冬平 李 云 谭 成

**主要审查人：** 略。

## 目 次

1 总则 .....	1
2 术语和符号 .....	2
2.1 术语 .....	2
2.2 符号 .....	3
3 基本规定 .....	4
4 缺陷调查与可靠性评估 .....	5
4.1 一般规定 .....	5
4.2 调查、检查与检测 .....	6
4.3 评估计算 .....	9
4.4 可靠性评估 .....	9
5 修复加固方案 .....	16
5.1 一般规定 .....	16
5.2 计算 .....	16
5.3 构造规定 .....	16
6 修复加固用材料 .....	18
6.1 混凝土 .....	18
6.2 钢筋及钢材 .....	18
6.3 纤维复合材 .....	19
6.4 加固用胶粘剂 .....	20
6.5 裂缝修补材料 .....	21
6.6 灌浆料 .....	21
6.7 锚栓 .....	23
6.8 聚合物改性水泥砂浆 .....	23
6.9 超高性能混凝土 .....	24
7 修复及验收 .....	26
7.1 一般规定 .....	26
7.2 修复加固实施 .....	26
7.3 验收 .....	31
7.4 后安全评估 .....	32
附录 A 混凝土塔筒常见缺陷及判定 .....	33

引用标准名录.....	35
附：条文说明.....	36

## Contents

1	General Provisions .....	1
2	Terms and Symbols .....	2
2.1	Terms .....	2
2.2	Symbols .....	3
3	Basic Requirements .....	4
4	Investigation and Reliability Assessment .....	5
4.1	General Requirements .....	5
4.2	Investigation, Inspection, and Testing .....	6
4.3	Calculations .....	9
4.4	Reliability Assessment .....	9
5	Repair and Strengthening Solutions .....	16
5.1	General Requirements .....	16
5.2	Calculations .....	16
5.3	Detailing Requirements .....	16
6	Materials for Repair and Strengthening .....	18
6.1	Concrete .....	18
6.2	Steel and Steel Reinforcement .....	18
6.3	Fiber Composites Material .....	19
6.4	Adhesives for Structural Strengthening .....	20
6.5	Closing Adhesive and Restore Adhesive for Cracks .....	21
6.6	Grouting Materials .....	21
6.7	Anchors .....	23
6.8	Polymer-Modified Cement Mortar .....	23
6.9	Ultra-High Performance Concrete .....	24
7	Repair and Acceptance .....	26
7.1	General Requirements .....	26
7.2	Implementation of Repair and Strengthening .....	26
7.3	Acceptance .....	31
7.4	Post-Safety Assessment .....	32
	Appendix A Common Defects and Appraisal of Concrete Towers .....	33

List of Quoted Standards .....	35
Addition: Explanatory of Provisions .....	36

# 1 总 则

**1.0.1** 为规范陆上风力发电机组混凝土塔筒修复、加固的技术要求，做到安全适用、提高质量、技术先进、经济合理、节能环保，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塔筒的修复与加固。

**1.0.3** 陆上风力发电机组混凝土塔筒的修复与加固，除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 混凝土塔筒 concrete tower

风力发电机组塔筒结构中的混凝土结构。

#### 2.1.2 结构加固 strengthening of structure

对可靠性不足的塔筒采取增强、局部更换或调整其内力等措施，使其满足安全性、适用性和耐久性的要求。

#### 2.1.3 结构修复 repair of structure

对局部含有缺陷的塔筒采取更换或施加胶粘剂等措施，使其恢复安全性、适用性和耐久性的要求。

#### 2.1.4 评估 assessment

根据检查、检测和分析验算结果，对风电塔筒的安全性和使用性进行的评价。

#### 2.1.5 部件 component

风电塔架中由若干个构件组成的单元。

#### 2.1.6 结构系统 structure system

风电塔架评估单元的组成部分，包括基础和上部塔架两个结构系统。

#### 2.1.7 评估单元 appraisal unit

可以独立进行可靠性评估的单体，本规程每台风电塔架为一个评估单元。

#### 2.1.8 水平错台 horizontal step-off

风电塔架中下节筒节顶面与相邻上节筒节底面之间，由于预制或安装偏差导致的内侧或外侧轮廓不对应。

#### 2.1.9 竖向错台 vertical step-off

风电塔架分片塔筒中，相邻分片间拼接后顶面或底面拼缝两侧出现高差。

## 2.2 符号

### 2.2.1 结构性能及作用效应

R——结构或构件的抗力；

S——结构或构件的作用效应。

### 2.2.2 可靠性评级

$a_u$ 、 $b_u$ 、 $c_u$ 、 $d_u$ ——部件的安全性等级；

$A_u$ 、 $B_u$ 、 $C_u$ 、 $D_u$ ——结构系统的安全性等级；

$a_s$ 、 $b_s$ 、 $c_s$ ——部件的使用性等级；

$a_d$ 、 $b_d$ 、 $c_d$ ——部件的耐久性等级；

$A_s$ 、 $B_s$ 、 $C_s$ ——结构系统的使用性等级；

a、b、c、d——部件的可靠性等级；

A、B、C、D——结构系统的可靠性等级；

### 3 基本规定

**3.0.1** 风电混凝土塔筒存在下列情况之一时，应进行缺陷调查与可靠性评估：

- 1 存在较多严重缺陷或出现较严重的腐蚀、损伤、变形时；
- 2 达到设计使用年限，拟继续使用时；
- 3 遭受灾害、事故时；
- 4 检查发现有安全隐患时；
- 5 法规规定的其他应进行检测与可靠性评估的情形。

**3.0.2** 风电塔筒存在下列情况时，宜进行缺陷调查与可靠性评估：

- 1 监测数据出现异常时；
- 2 需了解风电塔架的可靠性水平时。

**3.0.3** 调查、评估对象可为风电混塔的整体或局部。

**3.0.4** 混凝土塔筒经可靠性评估需要加固时，应根据评估结论，按本规程规定进行修复加固方案的编制、实施、验收及后评估。

**3.0.5** 混凝土塔筒的修复加固方案编制，宜与实际实施方法紧密结合，采取有效措施，保证新增构件、部件与原结构的连接可靠，新增截面与原截面粘结牢固，形成整体共同工作，尽量避免对原结构造成不利影响。

**3.0.6** 混凝土塔筒评估、加固设计采用的结构分析方法，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010规定的结构分析基本原则。

**3.0.7** 对加固修复过程中可能出现倾斜、失稳、过大变形或坍塌的情况，需在实施方案中提出相应的临时性安全措施，并在实施过程中严格执行。

**3.0.8** 修复加固工作完成后，宜对加固后混凝土塔筒进行后评估。

## 4 缺陷调查与可靠性评估

### 4.1 一般规定

4.1.1 陆上风力发电机组混凝土塔筒缺陷调查、检测及评估流程，应符合图4.1所示流程。

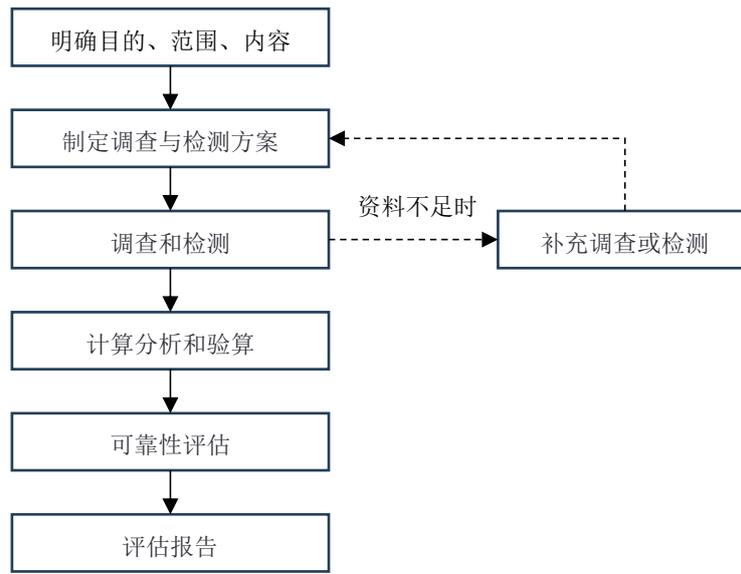


图 4.1 缺陷调查、检测及评估流程

4.1.2 调查与检查阶段，应对塔架建设的原始资料、塔筒设计资料、使用条件与环境、塔筒现状等进行调查或检查，调查、检查的内容、范围、深度和技术要求应满足可靠性评估需要。

4.1.3 存在下列情况时，宜对混凝土塔筒进行现场检测：

- 1 混凝土塔筒结构存在严重或多处损伤、变形；
- 2 需对混凝土塔筒结构动力特性进行专项检测时；
- 3 存在争议时。

4.1.4 检测中使用的计量器具、仪器仪表应满足检测要求，应在检定或校准合格有效期内。

4.1.5 检测现场取样不应影响结构整体安全，取样后应立即修补取样造成的损伤；现场检测工作开始前，应根据混凝土塔筒特点、使用环境、检测要求等制定相应的现场安全专项方案或者安全技术措施。

4.1.6 检测抽样方案，可按现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 有关规定执行。

4.1.7 检测工作完成后，应出具检测报告。

## 4.2 调查、检查与检测

### 4.2.1 原始资料调查

- 1 原始资料检查应包括塔筒概况、塔筒工艺文件、安装要求、运输要求、认证证书要求、竣工资料、验收文件、质量监督检查文件、运维巡检资料等；
- 2 原始资料不全或存在疑问时，应补充相应的调查与检测。

### 4.2.2 结构设计资料检查

- 1 塔筒结构设计资料应包括塔筒总图、塔筒结构设计要求、塔筒计算书（包含结构、强度、刚度、稳定性、疲劳损伤、开口部位校核、钢混转换段补充分析报告等）、预应力钢绞线强度和疲劳分析等；
- 2 必要时，结合 4.3 节理论分析结果进行对比分析。

### 4.2.3 使用条件与环境调查

- 1 使用条件与环境调查应包括维保、使用环境和使用历史情况的调查。
- 2 维保调查内容应包括维保项目和维保周期。
- 3 使用环境调查内容应包括气象环境、地质环境、工作环境和灾害环境等，可按表 4.2.3 规定内容进行调查。

表 4.2.3 使用环境调查内容

序号	环境类别	调查项目
1	气象环境	大气温度、大气湿度、降雨量、降雪量、霜冻期、风速、风向等
2	地质环境	地形、地貌、工程地质、地下水腐蚀性、地下水位深度、土壤冻结深度等
3	工作环境	潮湿环境、滨海环境、工业区大气环境、振动环境、周围风机影响等
4	灾害环境	地震、冰雪、台风、洪水；可能发生滑坡、泥石流等地质灾害地段等

4 使用历史调查应包括塔筒的设计与安装、使用时间、维修与加固、改造以及受灾和事故情况等的调查。调查风电机组并网以来的运行 SCADA 数据，应

包括风速、功率、转速、扭矩、振动、运行温度等关键数据，评估该风电机组是否存在过载、超速、超振动等情况。

#### 4.2.4 检测内容

混凝土塔筒主要检测内容，应符合表 4.2.4 规定。

表 4.2.4 混凝土塔筒主要检测内容

序号	检测项	备注
1	内外表面外观质量	包括但不限于塔筒混凝土掉块、剥落；钢筋露筋、锈蚀；相邻筒节挤压破坏；裂缝分布、长宽、深度等
2	混凝土强度	
3	拼缝、环缝	包括塔筒分片间的竖向拼缝、沿竖向不同筒节间的水平环缝
4	空鼓	主要指混凝土内部空鼓
5	钢筋数量、间距	
6	钢筋保护层厚度	
7	预应力系统	包括钢绞线索力、索体状态、转向装置、锚具等
8	塔架垂直度	
9	塔架频率	
10	错台状态	包括不同筒节间的水平错台和塔筒分片间的竖向错台

#### 4.2.5 检测方法

##### 1 内外表面外观质量

一般项目：通过目测或无人机排查，尺寸通过尺量法测量；

裂缝：长度可通过尺量法测量，宽度可通过裂缝宽度测试仪检测，深度可通过超声波法检测。

##### 2 混凝土强度

混凝土强度检测可采用回弹法、超声回弹综合法或同养试块对比法。若判别困难以及判定为强度不足可疑点的区域，可采用钻芯法进行核实。

##### 3 拼缝、环缝

应检测拼缝、环缝的填充饱满度、缺失情况及厚度。拼缝、环缝检测可使用探针法、钻孔内窥镜法或其他可靠方法。

当检测水平环缝内、外侧座浆料密实度时，检测间距宜根据实际塔筒损坏情况进行全检或抽检，可按相邻点位间距不超过 2m，每环总点位数不少于 8 点

进行；水平环缝内部不密实，可采用钻孔内窥镜法或其他有效方法，每环抽检不低于 8 处，发现不密实时应加大抽检数量。

塔筒分片拼缝检测可参照环缝要求执行。

#### 4 混凝土空鼓

根据内外表面外观质量检测判定结果确定需要检查的空鼓检测点，可采用雷达测试法、超声波测试法或阵列式超声法进行检测。若判别困难以及判定为内部空鼓可疑点的区域，可采用成孔或钻芯法进行核实。

#### 5 钢筋数量、间距

每个构件选取适当区域检测钢筋数量、间距，检测方法应符合《混凝土中钢筋检测技术标准》JGJ/T 152 相关规定。检测偏差需满足设计要求，设计无特殊规定时，可按《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》T/CCPA 54 规定执行。

#### 6 钢筋保护层厚度

每个构件选取适当区域检测保护层厚度，检测方法应满足《混凝土中钢筋检测技术标准》JGJ/T 152 相关规定。检测偏差需满足设计要求，设计无特殊规定时，可按《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》T/CCPA 54 规定执行。

#### 7 钢绞线索力

钢绞线索力检测可采用反拉法或频率法，每个塔架根据实际损坏情况进行抽检，抽检宜不少于两束。对检测数据结果进行分析，参照工艺文件确认张拉预应力偏差值。

#### 8 塔架垂直度

垂直度检测可采用全站仪或其他检测设备进行检测，检测方法按《建筑变形测量规范》JGJ 8 有关规定执行。塔架检测应在停机状态下进行，风速不宜大于 3m/s，若风轮叶片已安装，应记录检测时的叶片方位。

#### 9 塔架频率

塔架频率可采用云智慧数据采集分析仪或拾振器仪器设备进行检测，宜与主机 SCADA 系统读取数据进行对比分析。

## 4.3 评估计算

**4.3.1** 作用效应的分项系数和组合系数可按《风能发电系统 风力发电机组塔架和基础设计要求》GB/T 42600 或其他适用的国家、行业标准执行，可与原塔架设计保持一致。

**4.3.2** 结构分析使用的计算模型和计算假定，应满足被验算结构的实际受力和构造状况；受力复杂时宜采用有限单元法。

**4.3.3** 结构受到实际载荷偏心、温度、变形等作用且对结构承载有显著影响时，应计入上述作用产生的附加内力。

**4.3.4** 材料强度应根据结构实际状态按下列原则确定：

1 当材料种类和性能满足原设计要求时，可按原设计标准取值；

2 当存在下列情况之一时，应根据实测数据按现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T50344 有关规定取值：

1) 材料种类和性能不详；

2) 与原设计不符；

3) 材料性能已显著退化时。

**4.3.5** 风电塔架混凝土塔体的评估验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定。

## 4.4 可靠性评估

**4.4.1** 风电塔架的可靠性评估应符合下列规定：

1 可靠性评估划分为部件、结构系统、评估单元三个层次。

2 部件和结构系统两层次的可靠性评估等级，应包括安全性、使用性两方面的等级评定，并由此综合评定可靠性等级。

3 风电塔架可靠性评估的层次、等级划分及项目内容按表 4.4.1 执行。

4 当不要求可靠性等级评定时，可直接给出安全性、使用性评定结果。

表 4.4.1 风电混塔可靠性评估的层次、等级划分及项目内容

层次名称		部件		结构系统	评估单元	
安全性 评估等 级	等级	$a_u$ 、 $b_u$ 、 $c_u$ 、 $d_u$		$A_u$ 、 $B_u$ 、 $C_u$ 、 $D_u$	一、二、三、四	
	地基基础	—		地基变形、风机 现状	评估单元可靠性 评估等级按基础 和上部塔架两个 系统可靠性评估 等级中的较低者 确定	
		—		承载能力		
	塔体	混凝土 结构	承载能力、构造、不适 于承载的位移或变形、 裂缝或其他损伤			承载功能、结构 整体性
钢结构		承载能力、构造、不适 于承载的位移或变形、 锈蚀				
使用性 评估等 级	等级	$a_s$ 、 $b_s$ 、 $c_s$		$A_s$ 、 $B_s$ 、 $C_s$	评估单元可靠性 评估等级按基础 和上部塔架两个 系统可靠性评估 等级中的较低者 确定	
	地基基础	—		使用状况		
	塔体	混凝土结构	位移或变形、裂 缝、缺陷、损伤			使用状况 (及位移)
		钢结构	侧移变形、缺陷或 损伤、锈蚀			
可靠性 评估等 级	等级	$a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$		$A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$	评估单元可靠性 评估等级按基础 和上部塔架两个 系统可靠性评估 等级中的较低者 确定	
	地基基础	按本规程第 4.4.2 条规定的原则		按本规程第		
	塔体	确定		4.4.3 条规定的 原则确定		

**4.4.2** 部件的可靠性评估等级，应根据部件的安全性等级和使用性等级评定结果，按下列原则确定：

- 1 当部件安全性等级为  $c_u$  级或  $d_u$  级时，应按安全性等级确定；
- 2 当部件安全性等级为  $a_u$  级或  $b_u$  级时，可按安全性等级和使用性等级中较低的等级确定。

**4.4.3** 结构系统的可靠性评估等级，应根据结构系统的安全性等级和使用性等级评定结果，按下列原则确定：

- 1 当结构系统安全性等级为  $C_u$  级  $D_u$  级时，应按安全性等级确定；
- 2 当结构系统安全性等级为  $A_u$  级或  $B_u$  级时，可按安全性等级和使用性等级中较低等级确定。

**4.4.4** 部件和结构系统的安全性、使用性评估等级应符合下列规定：

- 1 部件和结构系统的安全性评估等级及处理应符合表 4.4.4-1 的规定。

表 4.4.4-1 部件和结构系统的安全性评估等级及处理

评估对象	评估等级	评级标准要求	处理要求
部件	a <sub>u</sub>	符合本规程的安全性要求，安全	不必采取措施
	b <sub>u</sub>	略低于本规程的安全性要求，但仍能满足结构安全性下限水平，不影响安全	可不必采取措施
	c <sub>u</sub>	不符合本规程的安全性要求，影响安全	应采取措施
	d <sub>u</sub>	严重不符合本规程的安全性要求，已严重影响安全	必须立即采取措施
结构系统	A <sub>u</sub>	符合本规程的安全性要求，不影响整体安全	个别不符合要求的次要构件宜采取适当措施
	B <sub>u</sub>	略低于本规程的安全性要求，仍能基本满足结构安全性的下限水平，尚不显著影响整体安全	极少数不符合要求的构件应采取适当措施
	C <sub>u</sub>	不符合本规程的安全性要求，影响整体安全	应采取适当措施，且极少数不符合要求的构件必须立即采取适当措施
	D <sub>u</sub>	严重不符合本规程的安全性要求，已严重影响整体安全	必须立即采取适当措施

2 部件和结构系统的使用性评估等级及处理应符合表 4.4.4-2 的规定。

表 4.4.4-2 部件和结构系统的使用性评估等级及处理

评估对象	评估等级	评级标准	处理要求
部件	a <sub>s</sub>	符合本规程的正常使用要求，在目标使用年限内能正常使用	不必采取措施
	b <sub>s</sub>	略低于本规程的正常使用要求，在目标使用年限内尚不明显影响正常使用	可不采取措施
	c <sub>s</sub>	不符合本规程的正常使用要求，在目标使用年限内明显影响正常使用	应采取适当措施
结构系统	A <sub>s</sub>	符合本规程的正常使用要求，在目标使用年限内不影响整体正常使用	个别不符合要求的次要构件宜采取适当措施
	B <sub>s</sub>	略低于本规程的正常使用要求，在目标使用年限内尚不明显影响整体正常使用	极少数不符合要求的构件应采取适当措施
	C <sub>s</sub>	不符合本规程的正常使用要求，在目标使用年限内明显影响整体正常使用	应采取适当措施

4.4.5 部件和结构系统的可靠性评估等级及处理应符合表 4.4.5 的规定。

表 4.4.5 部件和结构系统的可靠性评估等级及处理

评估对象	评估等级	评级标准	处理要求
部件	a	符合本规程的可靠性要求，安全，在目标使用年限内能正常使用或尚不明显影响正常使用	不必采取措施
	b	略低于本规程的可靠性要求，仍能满足结构可靠性的下限水平要求，不影响安全，在目标使用年限内能正常使用或尚不明显影响正常使用	可不采取措施
	c	不符合本规程的可靠性要求，或影响安全，或在目标使用年限明显影响正常使用	应采取措施
	d	严重不符合本规程的可靠性要求，已严重影响安全	必须立即采取措施
结构系统	A	符合本规程的可靠性要求，不影响整体安全，在目标使用年限内不影响或不明显影响整体正常使用	个别不符合要求的次要构件宜采取适当措施
	B	略低于本规程的可靠性要求，仍能满足结构可靠性的下限水平要求，尚不显著影响整体安全，在目标使用年限内不影响或尚不显著影响整体正常使用	极少数不符合要求的构件应采取的措施
	C	不符合本规程的可靠性要求，或影响整体安全，或在目标使用年限内影响整体正常使用	应采取措施，且极少数不符合要求的构件必须立即采取措施
	D	严重不符合本规程的可靠性要求，已严重影响整体安全	必须立即采取措施

#### 4.4.6 部件的安全性评级

1 当同时符合下列条件时，可直接根据部件实际完好程度定为  $a_u$  级或  $b_u$  级：

- 1) 部件未受结构性改变、修复或使用条件改变的影响；
- 2) 部件未发现明显损坏；
- 3) 部件工作正常，且不怀疑部件的可靠性不足；

4) 在下一目标使用年限内，部件所承受的作用和所处的环境不会发生显著变化。

2 混凝土结构部件的安全性评估，应按承载能力、构造、位移（或变形）和裂缝等四个检查项目，分别评定每一受检部件等级，取其中最低等级作为该部件安全性等级。

3 按承载能力评定时，应符合表 4.4.6-1 规定，分别评定每一验算项目等级，取其中最低等级作为部件承载能力安全性等级。

表 4.4.6-1 混凝土结构部件承载能力等级的评定

承载力安全性等级	a <sub>u</sub> 级	b <sub>u</sub> 级	c <sub>u</sub> 级	d <sub>u</sub> 级
R/S	≥1.00	≥0.95	≥0.9	<0.90

4 按构造评定时，应符合表 4.4.6-2 的规定，分别评定三个检查项目等级，取其中最低等级作为部件构造的安全性等级。

表 4.4.6-2 混凝土结构部件构造等级的评定

检查项目	a <sub>u</sub> 级 或 b <sub>u</sub> 级	c <sub>u</sub> 级 或 d <sub>u</sub> 级
结构构造	结构、部件构造合理，符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相关规定	结构、部件构造不当，或有明显缺陷，不符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相关规定
连接（或节点）构造	连接方式正确，构造符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 相关规定，无缺陷或仅有局部表面缺陷，工作无异常	连接方式不当，构造有明显缺陷，易导致焊缝或螺栓等发生变形、滑移、局部拉脱、剪坏或裂缝
受力预埋件	构造合理，受力可靠，无变形、滑移、松动或其他损坏	构造有明显缺陷，已导致预埋件发生变形、滑移、松动或其他损坏

5 按承载的位移或变形评定时，应符合下列规定：

1) 塔架混塔段顶部的侧移实测值大于  $H/100$ （ $H$  为塔架混塔段高度）时，应评定为 c<sub>u</sub> 级或 d<sub>u</sub> 级；在侧移承载能力验算中应计入由位移产生的附加应力影响；

2) 若塔体顶部的侧移尚在持续发展，应直接定为 d<sub>u</sub> 级。

6 当塔筒出现的受力裂缝宽度超过 0.1mm 时，应定为 c<sub>u</sub> 级或 d<sub>u</sub> 级。

7 当塔筒出现的非受力裂缝符合下列情况之一时，应定为 c<sub>u</sub> 级或 d<sub>u</sub> 级：

1) 因主筋锈蚀或腐蚀，导致混凝土产生沿主筋方向开裂、保护层脱落或掉角；

2) 因温度、收缩等作用产生开裂，且分析表明已显著影响结构的受力。

8 当部件有较大范围损伤时，应根据部件损伤的实际严重程度直接定为 c<sub>u</sub> 级或 d<sub>u</sub> 级。

#### 4.4.7 部件的使用性评级

1 使用性评级，应以现场的调查、检测结果为基本依据。

2 对被评估结构部件进行计算和验算结果评定时，应符合下列规定：

1) 应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010、《钢结构设计标准》GB50017、《高耸结构设计标准》GB50135 或其他适用标准规定的限值进行评级。若正常使用极限状态验算合格，可评定为  $a_s$  级或  $b_s$  级；若验算不合格，应评定为  $c_s$  级；

2) 若验算结果与观察不符，应进一步检查设计和安装方面可能存在的差错。

3 当同时符合下列条件时，部件使用性评估等级可直接评为  $a_s$  级或  $b_s$  级：

1) 经检查未发现部件有明显的变形、缺陷、损伤、腐蚀，也没有累积损伤问题；

2) 经过长时间的使用，部件状态基本良好，能够满足下一目标使用年限内的正常使用要求；

3) 在下一目标使用年限内，部件上的作用和环境条件不会发生显著变化。

5 结构部件的使用性评估等级，应按位移（或变形）、裂缝、缺陷和损伤四个检查项目，分别评定每一受检部件等级，取其中最低等级作为受检部件使用性评估等级。

6 按部件位移（或变形）检测结果评定时，宜满足下列规定：

1) 若检测值小于计算值及现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的限值时，可评为  $a_s$  级；

2) 若检测值大于或等于计算值，但不大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的限值时，可评定为  $b_s$  级；

3) 若检测值大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的限值时，应评定为  $c_s$  级。

7 按混凝土筒身顶部侧移检测结果评定时，可按表 4.4.7-1 的规定评级。

表 4.4.7-1 混凝土筒身侧移评定标准

项目	$a_s$ 级	$b_s$ 级	$c_s$ 级
侧移	$\leq H/750$	$> H/750$ 且 $\leq H/600$	$> H/600$

8 按裂缝宽度检测结果评定时，应符合下列规定

1) 当有计算值时，可按下列规定进行评级：

若检测值小于计算值及现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的限值时，可评定为  $a_s$  级；

若检测值大于或等于计算值，但不大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的限值时，可评定为  $b_s$  级；

若检测值大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的限值时，应评定为  $c_s$  级。

2) 若无计算值时，可按表 4.4.7-2 或表 4.4.7-3 的规定进行评级。

3) 对沿主筋方向出现的锈迹或细裂缝，应直接评定为  $c_s$  级。

4) 同一部件出现两种或两种以上的裂缝时，应分别评级，并应取其中最低等级作为部件的裂缝等级。

表 4.4.7-2 钢筋混凝土部件裂缝宽度等级的评定

检查项目	$a_s$ 级	$b_s$ 级	$c_s$ 级
混凝土受主筋处的裂缝宽度 (mm)	$\leq 0.15$	$\leq 0.20$	$> 0.20$

表 4.4.7-3 混凝土部件的缺陷和损伤等级的评定

检查项目	$a_s$ 级	$b_s$ 级	$c_s$ 级
缺陷	无明显缺陷	局部有缺陷，但缺陷深度小于钢筋保护层厚度	有较大范围缺陷或局部严重缺陷，且缺陷深度大于钢筋保护层厚度
钢筋锈蚀损伤	无锈蚀现象	探测表明有可能锈蚀	已出现沿主筋方向的锈蚀裂缝或明显的锈迹
混凝土腐蚀损伤	无腐蚀损伤	表面有轻度腐蚀损伤	有明显腐蚀损伤

## 5 修复加固方案

### 5.1 一般规定

5.1.1 混凝土塔筒经检测评定需要加固时，应根据检测评定结论和委托方提出的要求，由设计单位的专业技术人员进行加固设计。

5.1.2 加固范围应根据检测评估结论和加固后的使用要求确定。

5.1.3 运维阶段塔筒进行加固时，宜采取措施卸除部分作用在结构上的荷载。

5.1.4 新增钢构件、紧固件、锚具垫板等均应进行可靠的防锈蚀处理。

5.1.5 粘贴在混凝土塔筒表面的纤维复合材，不得直接暴露在阳光或有害介质中，其表面应进行防护处理。表面防护材料应对纤维及胶粘剂无害，且应与胶粘剂有可靠的粘接强度及相互协调的变形性能。

5.1.6 混凝土塔筒常见缺陷判定可参考附录A。构件不应有严重缺陷，且不宜有一般缺陷。对严重缺陷，应分析缺陷产生原因，制定专项修整方案，方案宜通过论证后实施。

### 5.2 计算

5.2.1 结构加固设计采用的计算分析方法，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010规定的结果分析基本原则，且应符合本规程4.3节评估计算的相关要求。

5.2.2 结构分析中的构件尺寸和材料参数，对原有部分宜根据评估报告采用实测值或设计值，对新增部分可依据加固设计文件取值。

5.2.3 验算结构承载力时，应考虑原结构在加固时的实际受力状况，包括加固部分应变滞后的影响，以及加固部分原结构共同工作程度。

5.2.4 为防止结构加固部分意外失效而导致的坍塌，在使用胶粘剂或其他聚合物的加固方法时，除进行加固设计外，尚应对原结构进行验算。

### 5.3 构造规定

**5.3.1** 后加或局部置换混凝土时，原构件混凝土表面应经处理。一般情况下，除混凝土表面应予凿毛外，尚应采取涂刷结构界面胶、种植剪切销钉或增设抗剪键等措施，以保证新旧混凝土共同工作。

**5.3.2** 局部置换混凝土时，置换用混凝土的强度等级应比原混凝土筒节混凝土提高一级。

**5.3.3** 焊接和胶粘剂同时，宜先焊接再注胶。

**5.3.4** 其他构造要求应符合设计及相关标准规范规定。

## 6 修复加固用材料

### 6.1 混凝土

**6.1.1** 加固修复用水泥进场时应对其品种、强度级别、包装或散装仓号、出厂日期等进行检查，并应对水泥的强度、安定性和凝结时间进行见证取样复验。检验结果应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175相关规定。当设计明确要求采用其他品种水泥时，水泥性能应符合相关标准要求。

**6.1.2** 加固修复用混凝土外加剂及矿物掺合料，应符合以下规定：

1 混凝土外加剂组成中不得含有氯化物或亚硝酸盐成分；进场时，应对其品种、性能、出厂日期等进行检查，并应对外加剂的相关性能指标进行检验，检验结果应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119相关规定。

2 混凝土用矿物掺合料宜采用硅灰、I级粉煤灰、粒化高炉矿渣；进场时，应对其品种、技术指标、出厂日期等进行检查，并应对矿物掺合料的相关技术指标进行检验，检验结果应符合国家现行有关标准规定。

3 需多品种外加剂、矿物掺合料复掺时，宜预先在工厂将外加剂、矿物掺合料混合成相应成品；进场时，应对其名称、技术指标、出厂日期等进行检查，并应进行配合比试验，检验结果应符合设计要求。

**6.1.3** 配合比设计应符合以下规定：

1 设计强度等级：应根据工程实际需要，选择适当的强度等级，需满足高于混塔原设计强度一个等级的基本要求；

2 水胶比：应根据强度等级和工程要求，合理确定水胶比；

3 材料用量：应根据设计强度等级、工程要求和实际情况，合理确定混凝土配合比的各项材料用量。

### 6.2 钢筋及钢材

**6.2.1** 加固修复用钢筋，其品种、质量和性能应满足设计要求，并符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367有关规定。进场时应按国家现行相

关标准规定，由实施单位会同监理人员见证抽取试件做屈服强度、抗拉强度、伸长率、弯曲性能和重量偏差检验，检验结果应符合相应标准规定。严禁采用再生钢筋和钢号不明的钢筋。

**6.2.2** 加固修复用型钢、钢板，其品种、规格和性能等应满足设计要求，并符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367有关规定。进场时，应按现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205规定见证取样做安全性能复验。

**6.2.3** 加固修复用焊接材料，其品种、规格、型号和性能应满足设计要求，并符合国家现行相关标准规定。焊接材料进场时，应按国家现行相关标准规定进行化学成分和力学性能取样检验。

### 6.3 纤维复合材

**6.3.1** 加固修复用纤维复合材料应为碳纤维复合材，碳纤维复合材的纤维应为连续纤维，且碳纤维宜选用聚丙烯腈基12K的小丝束纤维。

**6.3.2** 加固修复用碳纤维复合材安全性能应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728和《纤维增强复合材料工程应用技术标准》GB50608的规定。

**6.3.3** 碳纤维复合材主要力学性能应符合6.3.3-1和6.3.3-2的规定，其中抗拉强度标准值，应根据置信水平为0.99、保证率为95%的要求确定。

表 6.3.3-1 碳纤维布性能指标

	高强I级	高强II级
抗拉强度标准值 (MPa)	≥3400	≥3000
弹性模量 (MPa)	≥2.4×10 <sup>5</sup>	≥2.1×10 <sup>5</sup>
极限伸长率 (%)	≥1.7	≥1.5
弯曲强度 (MPa)	≥700	≥600
与基材混凝土正拉粘接强度 (MPa)	≥2.5，且为混凝土内聚破坏	
层间剪切强度 (MPa)	≥45	≥35

注：表中指标，除注明标准值外，均为平均值。

表 6.3.3-2 碳纤维网格性能指标

抗拉强度标准值 (MPa)	≥3500
弹性模量 (MPa)	≥2.3×10 <sup>5</sup>
极限伸长率 (%)	≥1.5

**6.3.4** 在材料性能检验及加固设计中，碳纤维复合材料截面积应按纤维净截面积计算，即取纤维布的计算厚度乘以宽度，纤维布计算厚度应按其单位质量面积除以纤维密度确定。除生产厂家特别说明并提供证明外，碳纤维密度取 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**6.3.5** 加固用碳纤维布的单位面积质量，不应低于 $200\text{g}/\text{m}^2$ ，不宜大于 $600\text{g}/\text{m}^2$ 。

**6.3.6** 碳纤维复合材抗拉强度设计值应按下式计算。

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f \gamma_e} \quad (6.3.1)$$

式中： $f_{fd}$ ——复材的抗拉强度设计值（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ）；

$f_{fk}$ ——复材的抗拉强度标准值（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ）；

$\gamma_f$ ——复材分项系数，纤维布取 1.4，其他复材制品取 1.25；

$\gamma_e$ ——复材环境影响系数，室内环境取 1.0，室外环境取 1.1。

**6.3.7** 碳纤维复合材进场时，应对其品种、级别、型号、规格、包装、中文标志、产品合格证和出厂检验报告等进行检查，同时尚应对下列重要性能指标和质量指标进行见证取样复验：

- 1 纤维复合材的抗拉强度标准值、弹性模量和极限伸长率；
- 2 纤维布的单位质量面积；
- 3 纤维布的k数。

检查和检验结果应满足设计要求，并符合本标准6.3节有关规定。

## 6.4 加固用胶粘剂

**6.4.1** 加固修复用胶粘剂应按用途分为粘贴纤维复合材用胶粘剂，粘贴钢板用胶粘剂和植筋锚固用胶粘剂。

**6.4.2** 加固修复用胶粘剂适用温度范围为 $-40^\circ\text{C}$ 至 $60^\circ\text{C}$ 。

**6.4.3** 加固修复用胶粘剂的基本性能、长期使用性能以及工艺性能应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728相关规定。

**6.4.3** 加固修复用结构胶粘剂，应按工程用量分批次进场到位。结构胶粘剂进场时，实施单位应会同监理人员对其品种、批号、包装、中文标志、产品合格证、出厂日期、出厂检验报告等进行检查；同时，应对其钢-钢拉伸抗剪强度、钢-混凝土正拉粘结强度和耐湿热老化性能等三项重要性能指标以及该胶粘剂不挥

发物含量进行见证取样复验；对抗震设防烈度为7度及7度以上地区建筑加固用的粘钢和粘贴纤维复合材的结构胶粘剂，尚应进行抗冲击剥离能力的见证取样复验；所有复验结果均须满足设计，并符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728有关规定。

## 6.5 裂缝修补材料

**6.5.1** 裂缝修补材料按用途分为裂缝修复胶、裂缝封闭胶和裂缝注浆料。

**6.5.2** 裂缝修补材料基本性能和工艺性能应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728相关规定。

**6.5.3** 裂缝修补材料进场时，实施单位应会同监理人员对其品种、批号、包装、中文标志、产品合格证、出厂日期、出厂检验报告等进行检查，所有复验结果均须满足设计要求，并符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728有关规定。

## 6.6 灌浆料

**6.6.1** 加固修复用水泥基灌浆料的安全性能应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448和《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728有关规定。

**6.6.2** 加固修复用水泥基灌浆料主要力学性能应符合表6.6.2的规定。

表 6.6.2 水泥基灌浆料性能指标

序号	试验项目		技术指标
1	细度 (4.75mm 筛余/%)		0
2	截锥流动度/mm	初始值	$\geq 300$
		30 min	$\geq 260$
3	抗压强度/MPa	3 d	$\geq 40$
		7 d	$\geq 60$
		28 d	$\geq 100$
4	与基材混凝土正拉粘结强度/MPa	28d	$\geq 1.8$ , 且为混凝土内聚破坏
5	竖向膨胀率/%	3 h	0.1~3.5
		3h 与 24 h 差	0.02~0.5
6	弹性模量/GPa		$\geq 45$
7	24h 自由泌水率/%		0
8	氯离子含量/%		$\leq 0.1\%$
9	抗冻等级 (快冻法)		$\geq F250$
10	对钢筋腐蚀作用		无
注: 1. 氯离子含量以灌浆料总量为基准。 2. 抗冻等级 (快冻法) 可根据气候条件等选择是否进行试验。			

6.6.3 用于冬期作业的水泥基灌浆料性能除应符合表6.6.2的规定外, 尚应符合表6.6.3的规定。

表 6.6.3-1 用于冬期作业时的水泥基灌浆料性能指标

规定温度 (°C)	抗压强度比 (%)		
	R <sub>7</sub>	R <sub>7+28</sub>	R <sub>7+56</sub>
-5	$\geq 20$	$\geq 80$	$\geq 90$
-10	$\geq 12$		

6.6.4 灌浆料进场时, 实施单位应会同监理人员对其品种、型号、出厂日期、产品合格证、出厂检验报告等进行检查, 并见证取样复验其浆体流动度或坍落度、抗压强度及其与混凝土正拉粘结强度等项目。复验结果应满足设计要求, 并应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448有关规定。

6.6.5 其他非水泥基灌浆料性能指标应满足有关标准规范的规定。

## 6.7 锚栓

**6.7.1** 加固修复用锚栓应采用后扩底锚栓、特殊倒锥形胶粘型锚栓或全螺纹胶粘型锚栓。

**6.7.2** 碳素钢、合金钢和不锈钢锚栓安全性评估，应符合表6.7.2-1和表6.7.2-2的规定。

表 6.7.2-1 碳素钢及合金钢锚栓的安全性能指标

性能等级	4.8	5.8	6.8	8.8
抗拉强度标准值 $f_{stk}$ (MPa)	$\geq 400$	$\geq 500$	$\geq 600$	$\geq 800$
屈服强度标准值 $f_{yk}$ 或 $f_{s0.2k}$ (MPa)	$\geq 320$	$\geq 400$	$\geq 480$	$\geq 640$
伸长率 $\delta_s$ (%)	$\geq 14$	$\geq 10$	$\geq 8$	$\geq 12$
受拉弹性模量 (MPa)	$\geq 2.0 \times 10^5$			

注：性能等级4.8时， $f_{stk}=400$ ， $f_{yk}/f_{stk}=0.8$ 。

表 6.7.2-2 不锈钢（奥氏体 A1、A2、A4）锚栓性能指标

性能等级	抗拉强度标准值 $f_{atk}$ (MPa)	屈服强度标准值 $f_{yk}$ (MPa)	伸长值 $\delta$
50	$\geq 500$	$\geq 210$	$\geq 0.6d$
70	$\geq 700$	$\geq 450$	$\geq 0.4d$
80	$\geq 800$	$\geq 600$	$\geq 0.3d$

**6.7.3** 锚栓进场时，实施单位应会同监理人员对其品种、型号、规格、中文标志和包装、出厂检验合格报告等进行检查，并对锚栓钢材受拉性能指标进行见证取样复验，其复验结果应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728有关规定。

## 6.8 聚合物改性水泥砂浆

**6.8.1** 加固修复用聚合物改性水泥砂浆，应选用乳液类聚合物材料，如改性环氧类、改性丙烯酸酯类、改性丁苯类或改性氯丁类聚合物。

**6.8.2** 当采用镀锌钢丝绳（或钢绞线或钢丝网）作为聚合物砂浆外加层的配筋时，除应将保护层厚度增大10mm并涂刷防碳化涂层外，尚应在聚合物砂浆中掺入阻

锈剂，但不得掺入以亚硝酸盐等为主成份的阻锈剂或含有氯化物的外加剂。

**6.8.3** 聚合物改性水泥砂浆用砂，应采用粒径不大于2.5mm的石英砂配制的细度模数不小于2.5的中砂。其使用技术条件，应按设计强度等级经试配确定。

**6.8.4** 加固修复用聚合物改性水泥砂浆主要力学性能应符合表6.8.4-1的规定。

**表 6.8.4-1 聚合物改性水泥砂浆性能指标**

序号	试验项目		技术指标
1	抗压强度/MPa	7 d	$\geq 60$
		28 d	$\geq 80$
2	劈裂抗拉强度/MPa	28 d	$\geq 8$
3	抗折强度/MPa	28 d	$\geq 15$
4	与基材混凝土正拉粘结强度/MPa	静置湿养护 28d	$\geq 2.5$ ，且为混凝土内聚破坏
5	与钢丝绳粘接抗剪强度/MPa	静置湿养护 28d	$\geq 10$

**6.8.5** 聚合物改性水泥砂浆进场时，实施单位应会同监理单位对其品种、型号、包装、中文标志、出厂日期、出厂检验合格报告等进行检查，同时尚应对聚合物改性水泥砂浆体的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度及聚合物改性水泥砂浆与混凝土正拉粘结强度进行见证取样复验。检查和复验结果应该符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367和《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728有关规定。

## 6.9 超高性能混凝土

**6.9.1** 加固修复用超高性能混凝土应符合现行团体标准《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107中结构类超高性能混凝土的有关规定，养护方式及性能等级应根据设计及实施要求参照现行团体标准《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107中的相关规定进行试验确定。

**6.9.2** 超高性能混凝土性能检验按照现行团体标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF37执行。

**6.9.3** 加固修复用UHPC的设计抗压强度不宜小于120MPa，具体强度等级应符合设计要求。

**6.9.4** UHPC搅拌及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。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。拌合物应连续浇筑，并保持表面湿润，避免出现层间冷缝。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，保湿养护时间不应少于14d。

## 7 修复及验收

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 混凝土塔筒修复前，应制定修复方案，做好实施前技术交底培训工作，熟悉作业内容、作业要领。

**7.1.2** 修复前，需认真做好资质报审工作，认真进行危险点分析，结合工程项目实际做好安全技术交底和安全教育培训工作。

**7.1.3** 进行高空作业时，需提前做好防高空坠落措施。

**7.1.4** 修复所需材料、设备、工具，必须满足质量要求，应有一定的材料储备。根据塔筒缺陷状态，及时提出所需材料，及时购买，保证所需材料有可靠来源，做好材料准备工作；修复前应对现场工具、设备进行检查，以确保设备、工具能够正常使用。

### 7.2 修复加固实施

**7.2.1** 裂缝修复方法适用范围及相关技术要点应符合表7.2.1规定。

**表 7.2.1 裂缝修复方法及技术要点**

修复方法	适用范围	技术要点
表面封闭法	表层微细独立裂缝（宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ ）或网状裂缝	1 裂缝两侧表面做打磨处理，清除表面松散物及油污； 2 若需粘贴纤维织物，需用特制滚筒沿纤维径向多次滚压，使胶液充分润透、渗到纤维中，并排出气泡。
柔性密封法	裂缝宽度 $> 0.5\text{mm}$ 的表面裂缝	1 按修复方案规定的尺寸沿缝开凿U形槽或V形槽，清理干净槽内的浮灰、渣滓，先刷一道界面胶，再采用聚合物改性水泥砂浆或环氧修补胶泥修补平整； 2 当需设置隔离层时，U形槽的槽底应为光滑平底。
压力注浆法	表面裂缝或贯穿性裂缝	1 在裂缝表面采用封缝胶进行封闭处理，并按裂缝走向设置注胶嘴（针筒注胶嘴间距 $100\text{mm}\sim 300\text{mm}$ ，机控注胶嘴间距 $300\text{mm}\sim 500\text{mm}$ ），确保在裂缝交叉点、较宽处和端部设置注胶嘴，每条裂缝上设置排气嘴； 2 封缝胶固化后需进行压气试验以检查密封效果，若在 $0.5\text{MPa}$ 气压下仍有不通气的注胶嘴，则需重新埋设并缩短布置间距。

注：修复详细做法步骤应符合《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB50550相关规定。

**7.2.2** 采用置换法进行塔筒空鼓、挤压破损部位修复时，应符合下述规定。

1 剔除被置换的混凝土时，应在到达缺陷边缘后，再向边缘外延伸剔除一段不小于50mm的长度，边缘需凿成角度45~90°或燕尾槽，避免薄层修补；

2 对缺陷范围较小的构件，应从缺陷中心向四周扩展，逐步进行剔除，其长度和宽度均不应小于200mm；

3 按修复方案或修补材料操作要求涂刷结构界面胶（剂），界面胶涂刷应厚薄均匀，不漏刷，不流挂；

4 置换区域大、深度大，需补配钢筋或箍筋时，其安装位置及其与原钢筋采用焊接的连接方法，焊接质量应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18要求；

5 置换混凝土材料的强度等级应比原混塔管片混凝土提高一级；

6 修复过程质量控制应符合现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550相关规定。

**7.2.3** 采用环氧结构胶或聚合物改性水泥砂浆进行剥落掉块修复时，应符合表7.2.3规定。

**表 7.2.3 剥落掉块修复方法及技术要点**

剥落掉块情况		修复方法	技术要点
较浅掉块	深度小于保护层厚度，未露筋，且大部分区域深度小于10mm~15mm	环氧结构胶	深度超过10mm时，需分两次以上修补，每次修补厚度不应超过10mm，两次修补间隔时间以现场结构胶实际固化状态为准
较深掉块	深度大于保护层厚度，或大部分区域深度大于10mm~15mm	植筋挂网+聚合物改性水泥砂浆	1 为提高新旧混凝土结合力，可在修复区域植筋作为抗剪销钉，注意植筋后钢筋顶需低于原轮廓表面10mm~15mm； 2 上下筒节之间应力集中导致的压溃，归类为掉块处理；若存在类似空鼓现象，应将相应部分全部凿除后再确认掉块深度及面积

除满足表7.2.3规定外，掉块修复方法实施过程尚应符合下列规定：

1 进行修补前，应将受损和疏松的混凝土彻底清除，并对修补区域及其周边进行打磨清洁；

2 用砂轮机将破损部位与完好的表面结合面按折线方式切割整齐，切割面需接近垂直，切进去约5mm~10mm即可；

3 若掉块处跨越上下两个筒节，修补前注意需要在横缝处使用隔板包裹保鲜膜进行上下筒节分隔，修补时不允许连成一体。

**7.2.4** 采用压力注胶法进行塔筒水平缝修复时，应符合下列规定。

1 适用范围：当采用压力注胶法无法保证水平缝注胶密实时，可考虑采用置换法或其他可靠方法；

2 座浆料缺失区域清洁：凿除水平缝外部后抹的封闭层，去除水平缝密封圈，用毛刷或压缩空气清理缺失区域内及两侧 4~5cm 范围内的灰尘、污渍和不平整部位；

3 密封处理：采用结构胶（或其他可靠措施）封闭横缝，骑缝设置注浆嘴和透气孔，需保证注胶时气体能够排出同时避免空气进入形成气泡或空洞，确保密封效果良好无泄漏；

4 注胶压力不宜低于0.5MPa，注胶顺序由一端依次到另一端，不宜跳跃注射；注胶时应随时观察是否存在泄漏或里外通透的虫孔，避免压力泄露；一旦发现泄露应立即停止注胶，将泄露处擦干净并等固化后重新封口，重新开始注胶；

5 水平缝修复完成后，对水平缝上下 200mm 内采取柔性防水。

**7.2.5** 锚板与过渡段底法兰滑移时，可采用增加销轴方式进行补强，相关技术要求宜满足下述规定。

1 钻孔定位：钻孔前使用尺子和锚具精确定位钻孔中心，并用圆规在钢法兰上标记出待钻孔的位置，钻头进入混凝土层的深度不宜超过5mm；

2 销轴安装及防腐：钻孔后需清理孔洞杂物，确保销轴能够顺利插入并稳固固定；安装前应在销轴表面涂抹一层油脂作为防腐措施；安装完成后，销轴顶面与法兰上表面齐平或较法兰上表面略低（高差5mm以内），沿销轴顶面四周施加防水密封胶。

**7.2.6** 采用粘贴纤维复合材进行塔筒加固修复时，应符合下列规定。

1 修复平整露出骨料新面的混凝土加固粘贴部位，应进一步按修复方案要求修复平整，并采用结构修补胶对较大孔洞、凹面、露筋等缺陷进行修补、复原；对有段差、内转角的部位应抹成平滑的曲面；对构件截面的棱角，应打磨成圆弧半径不小于25mm的圆角；

2 粘贴纤维材料部位的混凝土，其表层含水率不宜大于4%，且不应大于6%，对含水率超限的混凝土应进行人工干燥处理，或改用高潮湿面专用结构胶粘贴；

3 浸渍、粘结专用的结构胶粘剂，其配制和使用应按产品使用说明书的规定进行；胶液注入盛胶容器后，应采取措施防止水、油、灰尘等杂质混入；

4 修复过程质量控制应符合现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550相关规定。

**7.2.7** 采用粘贴钢板进行塔筒加固修复时，应符合下列规定。

1 混塔管片加固区的基面（粘合面）经修整后，需进行打毛和糙化处理。混凝土表面清理干净，并保持干燥；

2 外粘钢板部位的混凝土，表层含水率不宜大于4%，且不应大于6%，对含水率超限的混凝土应进行人工干燥处理，或改用高潮湿面专用结构胶粘合；

3 拌好的胶液应同时涂刷在钢板和混凝土粘合面上，经检查无漏刷后即可将钢板与原构件混凝土粘贴；粘贴后的胶层平均厚度应控制在2mm~3mm。竖贴时，胶层宜上厚下薄，胶液的垂流度不应大于3mm；

4 钢板粘贴时表面应平整，段差过渡应平滑，不得有折角；

5 修复过程质量控制应符合现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550相关规定。

**7.2.8** 钢绞线预埋管偏位，导致钢绞线上下锚点连线与预埋管中心线不重合时，可采用表 7.2.8 所示方法进行纠偏调整；纠偏措施对基础受力造成影响时，必须经过基础设计单位认可。

表 7.2.8 预应力钢绞线偏心修复技术要点

方法名称	方法描述	技术要点
扩孔灌浆	预应力孔道偏移后采用扩孔避免钢绞线碰壁	1 扩孔原则：不钻到钢筋； 2 穿索时索孔段应包覆 $\geq 10\text{mm}$ 柔性材料（如胶带缠绕）； 3 锚索张拉后填充抗压强度不低于 $80\text{MPa}$ 的灌浆料
设置支撑架	在钢绞线挤压预埋管一侧安装支撑架确保钢绞线离开预埋管 $\geq 5\text{mm}$	1 支撑架应安装在钢绞线挤压预埋管一侧，安装后应确保钢绞线离开预埋管 $\geq 5\text{mm}$ ； 2 支撑架安装时，应凿除安装位置混凝土保护层，与尽量多的外露钢筋焊接，待焊点冷却后支撑架方可受力； 3 采用环氧结构胶将支撑架与混凝土缝隙灌实
设置内衬管	在预埋管与钢绞线间插入弧度钢管作为转向块承受侧向力	1 内插无缝钢管加工上下口倒角并防腐； 2 穿入钢绞线张拉时应注意调整钢管内弧方向，使内弧朝向预埋管偏移方向； 3 钢绞线张拉完成后，应采用环氧结构胶对钢管与预埋管之间注胶

7.2.9 采用热熔 PE 法进行钢绞线 PE 护套破损修复时，应符合下列规定。

1 使用热熔焊枪软化 PE 伤口，将出风口温度调整到约 $230^{\circ}\text{C}$ ，出风口距离 PE 表面 $2\sim 4\text{cm}$ ，确保 PE 材料能够软化而不至于过热或烧焦；

2 待 PE 软化后，用美工刀对破损处边缘进行切除修整，形成约 $45^{\circ}$ 的平滑倒角，使用 PE 护套切块贴补，焊枪加热使二者相互熔融，打磨修补部位，使索体外形恢复原形。

7.2.10 塔筒漏水修复，可按表 7.2.11 所示方法实施。

表 7.2.10 漏水修补方法及技术要点

类型	技术要点
钢垫板与下法兰间漏水	1 清理：用湿抹布擦拭灰尘，采用压力气吹洗干净或用水清洗后自然晾干；确保表面完全清洁干燥，无油脂、灰尘和水； 2 粘贴透明胶带：使用宽度 $\geq 50\text{mm}$ 的透明胶带沿钢垫板外侧粘贴一圈，上边缘与钢垫板上表面齐平； 3 粘接丁基防水胶带：将丁基防水胶带剪裁出比钢垫板周长 $10\text{cm}$ 的长度，沿缝隙居中粘贴一圈，确保均匀贴合并无起泡或褶皱
塔筒拼缝、环缝漏水	1 清理：采用毛刷及吹风设备清理漏水部位外弧面缝隙处的粉末灰尘等杂物，漏水部位左右各扩展 $0.5\text{m}$ ； 2 将防水密封胶填入胶枪，在挤入横竖缝的过程中与两侧完全接触并尽量避免气体裹入； 3 使用工具将防水密封胶压实，确保其与横竖缝两侧表面均有良好接触，撕掉横竖缝两侧的美纹纸或保护胶带

## 7.3 验收

**7.3.1** 风电混塔塔筒加固修复工程验收，分为过程验收和结果验收。

**7.3.2** 风电混塔塔筒加固修复工程验收，应提供下列文件：

- 1 委托任务书或加固协议；
- 2 检测评估记录、报告；
- 3 原结构图纸，加固设计文件或修复方案；
- 4 材料质量证明书和复验报告；
- 5 实施资料；
- 6 监理报告或第三方检测报告；
- 7 竣工验收报告；
- 8 其他相关文件资料。

**7.3.3** 预制混凝土塔筒构件质量验收应符合下列规定：

- 1 质量验收应在拆模后混凝土表面未做修整和装饰前进行；
- 2 已隐蔽不可直接观察和量测的部位，需检查隐蔽工程验收记录；
- 3 修整或返工的结构构件部位应有实施前后的文字及图像记录资料。

**7.3.4** 修复加固后质量检测可采用下列方法：

- 1 裂缝修复质量检测可采用超声法或其他可靠方法；
- 2 塔筒空鼓、挤压破损部位采用置换法进行修复后，可采用阵列超声法、冲击回波法或其他可靠方法进行质量检测；
- 3 拼接缝修复后，可采用超声法、预埋钢丝拉拔法或其他可靠方法进行质量检测；
- 4 采用纤维复合材加固后，可采用锤击法、红外成像法或其他可靠方法进行质量检测；
- 5 采用粘贴钢板加固后，可采用冲击回波法、红外成像法或其他可靠方法进行质量检测；
- 6 漏水修补后，可采用红外成像法等进行质量检测；
- 7 采用上述检测方法进行质量检测时，应满足现行国家、行业标准相关规定的要求。

**7.3.5** 其他加固修复验收要求按照《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550有关规定执行。

## 7.4 后安全评估

**7.4.1** 加固修复完成后，宜对加固修复的项目进行后安全评估，后安全评估可采用监测或定期检测等方法。

**7.4.2** 采用监测方法进行塔架后安全评估时，宜包括以下内容：

- 1 沉降监测；
- 2 塔架倾斜监测；
- 3 塔架振动监测；
- 4 塔架拼缝开合度监测；
- 5 预应力钢绞线索力监测；
- 6 过渡段应力监测；
- 7 塔架内外温差监测；
- 8 加固修复部位状态监测。

## 附录 A 混凝土塔筒常见缺陷及判定

**A.0.1** 塔架安装阶段常见缺陷及判定如表A. 0. 1所示。

**表A.0.1 安装阶段常见缺陷及判定**

缺陷类别	缺陷描述	缺陷等级	备注
基础缺陷	预应力锚固端混凝土疏松、开裂等	严重缺陷	
座浆缝缺陷	座浆缝存在透光现象或存在内部蜂窝状缺失	严重缺陷	
	座浆缝内侧或外侧少量缺失	一般缺陷	
接缝水平错台	错台部位尺寸大于 10mm 或设计复核影响结构承载时	严重缺陷	
	错台尺寸不超过 10mm 或设计复核不影响结构承载时	一般缺陷	
接缝竖向错台	塔筒分片拼接后顶面或底面拼接部位出现高差	严重缺陷	
预应力转换装置缺陷	预应力转换装置座浆料堆积	一般缺陷	
钢绞线缺陷	与塔筒结构或内附件冲突，或钢绞线未达到设计应力、回缩	严重缺陷	
内附件安装缺陷	爬梯、平台等安装错位变形经评估有安全隐患时；内附件螺栓紧固不到位	严重缺陷	
	爬梯、平台等安装错位变形经评估无安全隐患时；内附件螺栓错位	一般缺陷	

**A.0.2** 塔架运维阶段常见缺陷及判定如表A. 0. 2所示。

**表A.0.2 运维阶段常见缺陷及判定**

缺陷类别	缺陷描述	缺陷等级	备注
掉块	对塔筒承载力有影响的掉块	严重缺陷	
	对塔筒承载力基本无影响的掉块	一般缺陷	
座浆缝缺陷	座浆缝存在透光现象、存在内部蜂窝状缺失或内外侧局部缺失造成塔筒外观质量宏观损伤	严重缺陷	
	座浆缝内侧或外侧少量缺失且未造成塔筒外观质量宏观损伤时	一般缺陷	
裂缝	贯穿裂缝，构件主要受力部位有影响结构受力或使用功能的裂缝	严重缺陷	
	少量非贯穿性干缩裂缝，或少量宽度小于 0.1mm 裂缝	一般缺陷	
钢绞线异常	预应力钢绞线断裂或失效	严重缺陷	
	钢绞线轻微锈蚀、PE 保护套破损	一般缺陷	
筒壁渗水	塔筒壁座浆缝渗水	一般缺陷	
基础积水	基础空腔积水、预应力孔道进水	一般缺陷	

## 用词说明

为了便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

**1** 表示很严格，非这样做不可的用词：

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，在条件允许时首先这样做的用词：

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。

- 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
- 《高耸结构设计标准》 GB 50135
- 《钢结构工程施工质量验收规范》 GB 50205
- 《建筑结构检测技术标准》 GB/T 50344
- 《混凝土结构加固设计规范》 GB 50367
- 《水泥基灌浆料材料应用技术规范》 GB/T 50448
- 《建筑结构加固工程施工质量验收规范》 GB 50550
- 《纤维增强复合材料工程应用技术标准》 GB 50608
- 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728
- 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
- 《混凝土外加剂》 GB 8076
- 《风能发电系统 风力发电机组塔架和基础设计要求》 GB/T 42600
- 《建筑变形测量规范》 JGJ 8
- 《钢筋焊接及验收规程》 JGJ 18
- 《混凝土中钢筋检测技术标准》 JGJ/T 152
- 《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》 T/CCPA 54

中国混凝土与水泥制品协会标准

# 陆上风力发电机组 混凝土塔筒修复加固技术规程

T/CCPA XX—202X

条文说明

## 制 定 说 明

《陆上风力发电机组混凝土塔筒修复加固技术规程》(T/CCPA XX-202X), 经中国混凝土与水泥制品协会 202X 年 X 月 X 日以第 X 号公告批准发布。

混凝土塔筒作为风力发电机组支撑塔架的重要组成部分, 以其优异的力学性能, 在风力发电工程建设领域, 得到了广泛的应用。特别是近几年, 随着国内风电建设领域的迅猛发展, 以及风力发电机组大型化发展趋势, 风力发电机组混合塔筒结构在我国的应用也越来越广泛。目前, 国内对于混凝土塔筒构件修复加固适用的标准接近空白。本规程是中国混凝土与水泥制品协会标准风电混塔系列技术标准的重要组成部分, 用于规范和指导混凝土塔筒构件的检测、评估及修复加固, 促进混凝土塔筒构件检测、加固行业良性快速发展。

本规程在编制过程中, 编制组进行了充分的调查研究, 总结了国内外混凝土塔筒构件生产和应用的实际经验。在本规程的编制过程中, 还参考了其他行业技术法规、技术标准。

为了便于广大混凝土塔筒构件检测、评估、修复加固单位和有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定, 《陆上风力发电机组混凝土塔筒修复加固技术规程》编制组按章、节、条的顺序编制了本规程的条文说明, 对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与规程正文及附录同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

# 目 次

1 总则 .....	39
2 术语和符号 .....	40
3 基本规定 .....	41
4 缺陷调查与可靠性评估 .....	42
4.2 调查、检查与检测 .....	42
4.3 评估计算 .....	43
4.4 可靠性评估 .....	43
5 修复加固方案 .....	45
5.1 一般规定 .....	45
5.2 计算 .....	45
5.3 构造规定 .....	45
6 修复加固用材料 .....	46
6.4 加固用胶粘剂 .....	46
7 修复及验收 .....	47
7.2 修复加固实施 .....	47
7.3 验收 .....	47
7.4 后安全评估 .....	48
附录 A 常见缺陷及判定 .....	49

## 1 总 则

**1.0.1** 风力发电机组混合塔筒技术已经在我国大批量推广应用，本规程的制定旨在规范和指导混凝土塔筒构件的修复与加固，确保工程质量。本规程主要根据我国现有的标准规范、科研成果和实践经验，并参考国际先进标准制定而成。

**1.0.2** 本规程适用于陆上风力发电机组混凝土塔筒构件的修复与加固，对于其他形式的风力发电机组塔架的混凝土结构，由于结构形式、制造工艺等均与混凝土塔筒构件有较大区别，故本规程没有纳入。

**1.0.3** 混凝土塔筒构件修复、加固涉及不同工程类别及国家标准或行业标准，在使用中除应执行本规程外，还应按所属工程类别符合国家现行相关标准的规定。当设计文件对混凝土塔筒构件结构及生产有不同于本规程的专门要求时，应遵守设计文件执行。

## 2 术语和符号

**2.1.1** 混凝土塔筒构件，主要指按照装配式结构设计的混凝土预制构件。目前混凝土塔筒的主要外形为圆筒或圆锥筒形，构件按其分片形式有半环型、1/4环型，以及整环型。近年来，混凝土塔筒结构外形还出现多种不规则形状，如六边形、八边形等，其结构还是筒式结构，在吊装现场装配组成整环塔筒节段，因此本规程的技术要求可参考执行。

**2.1.8 ~ 2.1.9** 对风电混塔中独有的缺陷进行规定。露筋、蜂窝、孔洞、夹渣、疏松、裂缝、连接部位缺陷、外形缺陷（缺棱掉角、棱角不平、翘曲不平、飞边凸肋等）、外表缺陷（构件表面麻面、掉皮、起砂、沾污等）等缺陷在《混凝土结构工程施工规范》GB 50666中已有规定，本规程参照执行。

### 3 基本规定

**3.0.1~3.0.8** 本章规定风电混塔检测、评估、修复加固需遵循的一般性原则。

## 4 缺陷调查与可靠性评估

### 4.2 调查、检查与检测

**4.2.4** 本条规定塔架混凝土塔筒的主要检测内容。外观质量损伤如掉块、剥落等宜根据现场检测绘制缺陷分布图；裂缝应根据现场检测绘制裂缝分布图。

**4.2.5** 本条列举目前混凝土塔筒检测中的常用方法，遵循满足精度要求前提下首选无损检测的原则，钻芯或成孔等对塔筒承载力有损伤的检测主要用于判别困难或需进一步核实时。当有可靠经验时，可采用其他检测方法。

1 超声波检测混凝土裂缝深度的基本原理是利用超声波绕过裂缝末端的传播时间来计算裂缝深度，具体可依据《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784相关规定。

2 混凝土强度检测回弹法和超声回弹综合法应满足《高强混凝土强度检测技术规程》JGJ/T 294相关要求，同养试块对比法的试块检测方法应满足《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081要求，取芯法的检测方法应满足《钻芯法检测混凝土强度技术规程》JGJ/T 384要求。当混凝土强度等级超过C100时，需满足专门的规定。

当采用回弹法对混凝土塔筒构件强度进行抽检时，应按照现行行业标准《高强混凝土强度检验技术规程》JGJ/T 294，选用4.5J或5.5J的回弹仪对构件进行测区布置、回弹值测量及测区平均回弹值的计算。混凝土抗压强度回弹换算应优先采用专用测强曲线换算取得，有条件的情况下宜根据自身技术数据库建立专用地区测强曲线，提高回弹强度换算准确率。当对回弹换算值争议较大时，可采用同条件标准试件或直接从构件测区内钻取混凝土芯样进行推定强度修正，试件数量或混凝土芯样不应少于6个。按现行行业标准《高强混凝土强度检验技术规程》JGJ/T 294中方法进行修正。

3 塔筒水平环缝对塔架受力影响明显，需对内、外侧以及内部密实情况认真检测。

7 钢绞线索力偏差范围工艺文件中无相关规定时，应提交塔架设计单位复核判定。

8 垂直度应在停机状态下检测，检测时风速宜小于3m/s，如叶片已安装，宜记录测试时的叶片方位。

9 塔架频率检测时，I阶频率为必检项；II阶频率可视具体情况综合判定是否进行检测。主机SCADA系统读取的频率数据主要用于调查阶段，检测阶段可作为对检测数据的对比校核。

## 4.3 评估计算

**4.3.1** 目前陆上风力发电机组混凝土塔架设计存在设计标准未统一的情况，本条未做强制性要求。一般情况下，若原设计阶段采用标准未失效情况下，可靠性评估阶段可采用与原设计阶段相同的标准。若存在争议或原设计阶段依据规范已被废止，可参考《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292第3.3.1~3.3.3条及条文说明中所述原则进行确定。

**4.3.2** 结构分析模型涉及的计算参数、边界条件需反映实际工作状况，结构分析中所做的简化和假定，应有理论、试验依据或经工程实践验证。受力状态复杂时宜采用有限单元法。

有限元分析建模时，需确保引入适当的边界条件，以保证能够准确考虑待评估部件与邻近结构区域的相互作用。如有必要，相邻组件也应在模型中考虑。非线性效应应被考虑在内，或在合适的情况下通过适当的简化手段线性化。若理想化的边界条件存在严重影响结果的风险，则应扩大建模范围，以保证模型边界和所考虑的结构区域之间有足够距离。

有限元分析时，使用的单元类型取决于分析目的。所选单元类型必须能够足够准确地反映结构刚度和要分析的应力。网格密度应根据单元特性选择，以确保结构的刚度条件、要分析的应力类型以及可能的失效行为能够得到足够准确的模拟，宜根据应力梯度逐渐增加网格的精细程度。当局部应力梯度过大时，可考虑采用“子模型”技术。采用“子模型”技术时，需对比整体模型&子模型边界附近的应力是否一致（即子模型验证）。

## 4.4 可靠性评估

**4.4.1** 本规程规定的风电塔架可靠性评估体系，参考《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》T/CECS 882，分为部件、结构系统、评估单元三个层次，各层次分项进行检查，确定评估等级时逐层逐步进行综合的评定模式。

考虑到基础与上部塔架受力联系紧密，部分重要塔架组件（如预应力系统）甚至直接锚固在基础中，故本规程在可靠性评估中，将塔架基础作为一个结构

系统一起纳入。表4.4.1中的钢结构主要指钢混转接段的钢结构，上部钢塔不在本标准评估范围内。

**4.4.4~4.4.5** 规定了三层次的评估等级标准，主要参考《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》T/CECS 882。

**4.4.6** 本条主要规定部件安全性评估等级相关内容。

5 塔架顶部侧移限值，参考《高耸结构设计标准》GB 50135的相关规定。塔架混塔段和钢段的变形能力不同，本条规定针对塔架混塔段的侧移变形。

6~7 塔架裂缝规定，参考《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》T/CECS 882，该标准在《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292规定限值的基础上，结合风电塔架实际环境、动载、疲劳等因素进行了调整，原规定中区分预应力混凝土构件和非预应力构件分别做了规定，考虑本标准主要针对预应力混凝土风电塔架，仅列出预应力构件相应限值。

**4.4.7** 本条主要规定部件使用性评估等级相关内容。

7 本条主要参考《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》T/CECS 882，指非运行状态下的侧移。

## 5 修复加固方案

### 5.1 一般规定

**5.1.3** 部分卸除作用在结构上的载荷，主要为了减少加固部分的应变滞后效应。

**5.1.6** 参考现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204，规定混凝土塔筒不宜有一般缺陷且不应有严重缺陷，和《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》T/CCPA 54标准的要求一致。参照现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204要求，对于严重缺陷应认证分析缺陷产生原因，消除缺陷产生的根源，制定专项修整方案且方案宜经过论证后再予以实施。

### 5.2 计算

**5.2.4** 本条参考《混凝土结构加固设计规范》GB50367有关规定，采取胶粘剂或其他聚合物的结构加固部分存在意外失效的可能性，一般要求原结构必须具备一定的承载力，以便加固部分意外失效时尚能继续承受永久荷载和少量可变荷载的作用。

### 5.3 构造规定

**5.3.3** 加固部分焊缝按现行国家标准《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》GB11345有关要求进行检测和评定。

## 6 修复加固用材料

### 6.4 加固用胶粘剂

**6.4.2** 常温型加固修复用胶粘剂适用温度一般不超过60℃，超出时需采用中温、高温或特高温型胶粘剂，相关材料参数可参照厂家说明，并满足现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB50728相关规定。

## 7 修复及验收

### 7.2 修复加固实施

#### 7.2.1 本条列举裂缝修复常用方法及技术要点。

当修补裂缝不要求恢复构件截面整体性 or 无补强要求时，表面密封法是常用的裂缝修补方法。该方法主要通过混凝土表层微细独立裂缝或网状裂缝的毛细作用吸收低黏度且具有良好渗透性的修补胶液，封闭裂缝通道。

柔性密封法主要用于修补较宽的表层裂缝，修复完成后表面需做防护层。

压力注浆法应根据裂缝宽度、深度和构件内部情况，选用定压注射器自动注胶法或机控压力注浆法，具体参见《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB50550相关规定。

当混凝土塔筒出现裂缝时，应结合现场检测和理论分析，认真分析裂缝出现的原因，后制定针对性的修复方案，消除裂缝产生的根源，现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB50550和《混凝土结构工程施工规范》GB50666中也有相关规定。

7.2.2 采用置换法进行塔筒空鼓、挤压破损部位修复时，为避免局部置换部位产生“销栓效应”，一般要求新置换的混凝土强度等级不宜过高，一般以提高一级为宜。另，为保证置换混凝土的密实性，对置换范围的最小尺寸也有相关规定，具体参见《混凝土结构加固设计规范》GB 50367相关规定。

7.2.4 混塔实践过程中发现，塔筒之间的水平坐浆层密实情况对筒节受力影响明显。采用压力注胶法进行塔筒水平缝修复时，需根据坐浆层实际缺失范围和联通状况进行适用性评估，当注胶法无法保证注浆密实时，可考虑采用置换或其他可靠方法。

7.2.5 粘贴钢板和粘贴碳纤维加固法属于常规加固方法，其修复过程质量控制应符合国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550相关规定。

7.2.8 当采用的钢绞线纠偏措施对基础受力造成影响时，需征求基础设计单位许可。

### 7.3 验收

**7.3.1** 为控制修复加固质量，混塔修复加固验收按阶段分为过程验收和结果验收。过程验收按照处理步骤现场验收，合格后方可进行下一步操作；当存在高空操作，不便进行现场验收时，可采用影像图片进行即时验收，验收合格后方可进行下一步操作。

## **7.4 后安全评估**

**7.4.1** 加固修复完成后，为评估修复效果，可采用监测或定期检测等手段进行后安全评估。

## 附录 A 常见缺陷及判定

**A.0.1~A.0.2** 混凝土塔筒根据状态不同分为生产阶段、安装阶段、运维阶段。生产阶段常见缺陷及判定，在《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》T/CCPA 54中已有规定，此处包含安装和运维阶段出现的缺陷。本附录基于塔筒外观质量、尺寸偏差和质量要求均满足《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》T/CCPA 54的前提下进行判定。

接缝水平错台的界限值系由《风力发电机组混凝土塔筒构件生产技术规程》T/CCPA 54中关于塔片弦长（或直径）偏差的容许最大值推算得到。

项目实践经验和有限元分析结果均表明，塔筒分片拼接缝的竖向错台会造成局部应力集中和较为严重的塔筒开裂，故安装阶段需对接缝处的竖向错台从严控制。

水平座浆缝对塔筒受力影响显著，建议根据座浆料缺失范围和联通状况，选用不同的修复方法，具体参见本规程7.2节；座浆料缺失一般易通过塔筒外观质量（如接缝处掉块、开裂等）表现出现，故关于座浆料少量缺失的判断可通过塔筒外观质量并结合项目实际情况进行综合判定。

塔筒掉块会影响塔筒受力（如受力面积减小等），宜结合实际情况经复核后进行判定。

裂缝宽度限值与第4章保持一致，需结合裂缝成因、对结构受力影响进行综合评估。