

陆上风力发电机组
混凝土塔筒修复加固技术规程

编制说明

(征求意见稿)

标准编制组

二〇二五年一月

目 录

一、工作简况	2
(一) 任务来源	2
(二) 编制目的	2
(三) 参加单位	3
(四) 单位分工和主要起草人	4
(五) 工作过程	5
二、标准编制原则和主要内容	5
(一) 标准编制的原则	5
(二) 标准的主要内容	6
三、主要试验（或验证）情况分析	12
四、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明	18
五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况	18
六、采用国际标准和国外先进标准情况	21
七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准	22
八、重大分歧意见的处理经过和依据	23
九、标准性质的建议说明	23
十、贯彻标准的要求和措施建议	23
十一、废止现行相关标准的建议	23
十二、其他应予说明的事项	23

一、工作简况

（一）任务来源

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，《风力发电机组混凝土塔筒修复加固技术规程》为协会标准制定项目，项目计划号 2024-08-cbjh。

本规程由中国混凝土与水泥制品协会负责管理，由中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会牵头制定，由内蒙古金海新能源科技股份有限公司负责起草并组织相关单位共同完成。

（二）编制目的

我国已经成为全球风力发电规模最大、增长最快的市场。随着钢-混塔架安装工艺愈加成熟，整体安装周期基本可接近全钢塔筒。面对轮毂高度在 120m 以上的风电机组时，钢-混塔架以其自身的优势，可大大缓解全钢塔筒面临的高度增加与建造成本之间的矛盾，对于低风速、高切变风电场，具备良好的发电收益。以目前的技术水平，钢-混塔筒已成为风电高塔架的优选解决方案。

钢-混塔架的迅速发展带动了设计、安装、设备、运行、维护等各相关环节的发展，但在快速发展的同时，也出现了一些问题。所有设计、预制、运输、吊装等过程若存在不合理之处往往表现为筒节外观上裂缝、压溃掉块等缺陷存在。这些混凝土塔筒质量缺陷的存在轻则导致机组停止运转，重则导致风电塔架完全损坏甚至倒塌。单台风机造价较高，如果发生事故，损失极为严重，给混塔行业带来巨大负面影响。

混凝土塔筒作为一种混凝土制品，虽能在部分程度上借鉴混凝土设计、制作、运输、安装、修复方面的经验；但风电塔架载荷特性与常规民用、工业建筑明显不同，加上构件预制的大型化和几乎 100%的预制装配，使得混凝土塔架从设计至后期运维期间各个环节均表现出不同于常规民用、工业建筑。

陆上风力发电机组混凝土塔筒修复加固技术规程的缺失，使得业主方在使用混塔时缺乏足够的理论参考，在现场遇到相关问题时无法做出及时、准确的判断，并在不断推诿和延误中浪费不必要的资源，给混塔的进一步发展造成阻碍。

本技术规程是在现有国家规范和行业标准基础上，针对风电混塔的特点及突

出问题，结合行业工程实践和相关研究，总结的针对风电混塔塔筒加固修复的技术成果。

混凝土塔筒加固修复前，应先进行检测与鉴定，现行国标 GB50144《工业建筑可靠性鉴定标准》和 GB50292《民用建筑可靠性鉴定标准》中均未规定与风电混塔对应的建、构筑物类别，不方便直接对混塔塔架进行鉴定评级；团标 T/CECS882-2021《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》针对混塔、钢塔的鉴定评级提出概述性规定，但对于目前风电混塔塔筒中常见的部分缺陷，如接缝不饱满、掉块等均未提及。

混凝土塔筒属于混凝土制品，目前的加固修复一般参考国标 GB50367-2013《混凝土结构加固设计规范》，但该规范主要针对常规建、构筑物中的梁、板、柱构件，加固计算也以简化的正截面和斜截面承载力验算为主，对相对复杂的构件和节点受力涉及较少，对裂缝修补的规定也较为笼统。对于几乎全预制装配的大型风电混塔，非常规构件、复杂节点、局部应力集中、受力及非受力裂缝等情况经常出现；另外，《混凝土结构加固设计规范》第 1.0.2 条及条文说明指出，该规范适用于房屋建筑和一般构筑物，适用范围与《混凝土结构设计规范》一致；《混凝土结构设计规范》第 1.0.2 指出，对于需作振动计算的结构，尚应符合专门标准的要求，对于主控荷载以动荷载为主的风电混塔而言，制定本技术规程也可满足该要求。

针对上述现状，基于现行国标及团标，结合风电混塔独特的特点和亟待解决的问题，本技术规程对混塔塔筒加固修复中常用的材料、加固方案、计算分析和实施方法等进行规定；另外，针对目前工程实施过程中频繁出现的因缺陷鉴定方面的缺失而导致的遇到相关问题时无法做出及时、准确判断的情况，本技术规程在附录中针对塔筒常见缺陷的表现、产生原因、严重程度、加固修复措施及验收标准给出相关标准，以满足行业在这方面的需求。

（三）参加单位

本规程由中国混凝土与水泥制品协会负责管理，由中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会牵头制定。主编单位有中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会、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，参编单位有远景能源有限公司、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。

（四）单位分工和主要起草人

本规程共分 11 章，主要起草人及单位分工情况如表 1 所示。

表 1 主要起草人及单位分工

章节名称	单位分工	主要起草人
标准编制进度统筹	中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会	孙莉丽
1 总则	内蒙古金海新能源科技股份有限公司牵头	闫鲁南
2 术语和符号	内蒙古金海新能源科技股份有限公司牵头	闫鲁南
3 基本规定	内蒙古金海新能源科技股份有限公司牵头	闫鲁南
4 缺陷调查与可靠性评估	中国船级社质量认证有限公司牵头	穆丹、张小琼、撒利平、叶志燕、朱华希、黄冬平、雍飞、闫鲁南、李光辉、李云
5 修复加固方案	编制组全体	闫鲁南、叶志燕、朱华希、黄赐荣、杨伟、黄冬平、李光辉、雍飞、穆丹、谭成、李云、彭先兵、张小琼、撒利平
6 修复加固用材料	上海悍马建筑科技有限公司牵头	谭成、闫鲁南、朱华希、叶志燕、撒利平
7 缺陷及验收	编制组全体	朱华希、彭先兵、雍飞、闫鲁南、叶志燕、黄赐荣、杨伟、张小琼、撒利平、黄冬平、李光辉、穆丹、谭成、李云
附录 A 混凝土塔筒常见缺陷及判定	编制组全体	朱华希、闫鲁南、叶志燕、黄赐荣、杨伟、黄冬平、李光辉、雍飞、穆丹、谭成、李云、彭先兵、张小琼、撒利平
统稿	内蒙古金海新能源科技股份有限公司牵头	闫鲁南

（五）工作过程

2024年7月5日，编制组成立暨第一次工作会议在安徽省合肥市召开。会上，内蒙古金海新能源科技股份有限公司代表对标准编制背景，编制组成员单位组成，标准主要框架及编写意向，编写分工意向，以及编制进度计划安排予以汇报；会上各参编单位代表积极讨论并发言，并对标准框架、内容及侧重点安排建言献策。会议原则上通过了标准的主体框架和工作进度计划，在章节细节、侧重点等方面提出修改意见和建议。会议上特别强调了编制本标准时要和协会其他标准协调一致，不能有冲突。

2024年8月26日，规程编制组以线上会议形式召开了第二次会议。会上，规程编制组通报了规程草稿的编制进度情况，就草稿的相关内容等进行了讨论和交流，就规程草稿的修改反馈意见进行了通报和讨论，对于规程草稿的初步修改提出了修改意见和建议，明确了下一次会议讨论的主要技术要求内容和会议时间。

2024年10月16日，规程编制组成员在北京召开了本规程的草稿修改稿讨论会，对本规程的每章条文内容、章节标题、术语等进行讨论和修改。协会领导对标准初稿发表了意见，对初稿的内容及征求意见稿的完善方向及技术要点进行了指示。各参编单位代表听取了标准初稿编制完成情况，对初稿内容及技术重点进行讨论，确定了编制意见，提出了具体指标的修改意见及确定完成送审稿的时间。

2024年12月13日，规程编制组成员以线上会议形式召开了本规程征求意见稿的线上内审会。会上，各参编单位就目前混塔缺陷及修复加固后验收采用的各种无损检测方法交换了意见，确定了征求意见稿中缺陷检测方法的相关内容和技术要求；完善了本规程的编制架构，就征求意见稿的优化内容进行了讨论和确定。

二、标准编制原则和主要内容

（一）标准编制的原则

本规程按照《工程建设标准编写规定》（建标[2008]182号）给出的规则进行编写。本规程的编制遵从以下规则：贯彻执行国家的政策、法规，与现行其他国家标准协调一致的原则；技术指标制定先进可行、规范合理的原则；标准制定突出产品特性，促进陆上风力发电机组混凝土塔筒修复、加固行业健康发展和产

品推广的原则。

为了加强陆上风力发电机组混凝土塔筒修复、加固质量管理,明确技术要求,规范混凝土塔筒修复、过程控制及质量管理要求,编制本规程。本规程的内容借鉴混凝土塔筒生产企业和混凝土预制构件行业加固消缺方面的管理经验,以及大量的风电塔筒工程修复加固实践经验,提出切实可行的混凝土塔筒构件检测、修复、加固技术要求的条文内容,具体控制措施简明扼要,通俗易懂。本规程适用于风力发电机组混合塔筒结构的预应力装配式混凝土塔筒检测评估和修复加固,对于其他形式的风力发电机组塔架混凝土结构,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) 标准的主要内容

本规程共分7章,分别为: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;附录A 混凝土塔筒常见缺陷及判定。

必要说明的有关内容,参见下文内容:

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。

1.0.3 混凝土塔筒构件生产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

本章节中的术语都是在混凝土塔筒构件缺陷检测、评估、修复加固时用到的重要定义内容，为了明确其定义，编制专门的说明内容。

2.1.1 混凝土塔筒构件，主要指按照装配式结构原理设计的风电混凝土塔筒预制构件。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，现场装配组成整环塔筒节段。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

本章规定了混凝土塔筒检测、评估和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较核。

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，参照《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，主要参照《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GB 50666和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

本章主要规定了混凝土塔筒修复加固实施及修复加固验收、后安全评估的相关技术要求。

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 混凝土塔筒常见缺陷及判定

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。

三、主要试验（或验证）情况分析

本规程对混塔塔筒修复加固中常用的检测、评估、修复用材料、修复加固方案设计、计算分析要点和修复加固实施方法等进行规定，相关技术数据和要求引用现行国家及行业标准规范。

编制过程中，塔架缺陷检测及修复实施方法的现场验证参考了中国船级社质量认证有限公司、上海同济检测技术有限公司、内蒙古金海新能源科技股份有限公司、同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司等单位的试验、测试和工程实践成果。

图1为采用裂缝测量仪测塔筒裂缝宽度的测试图。从图中可以看出，对于1mm以下宽度的裂缝，裂缝测量仪基本可以精确测量其宽度。

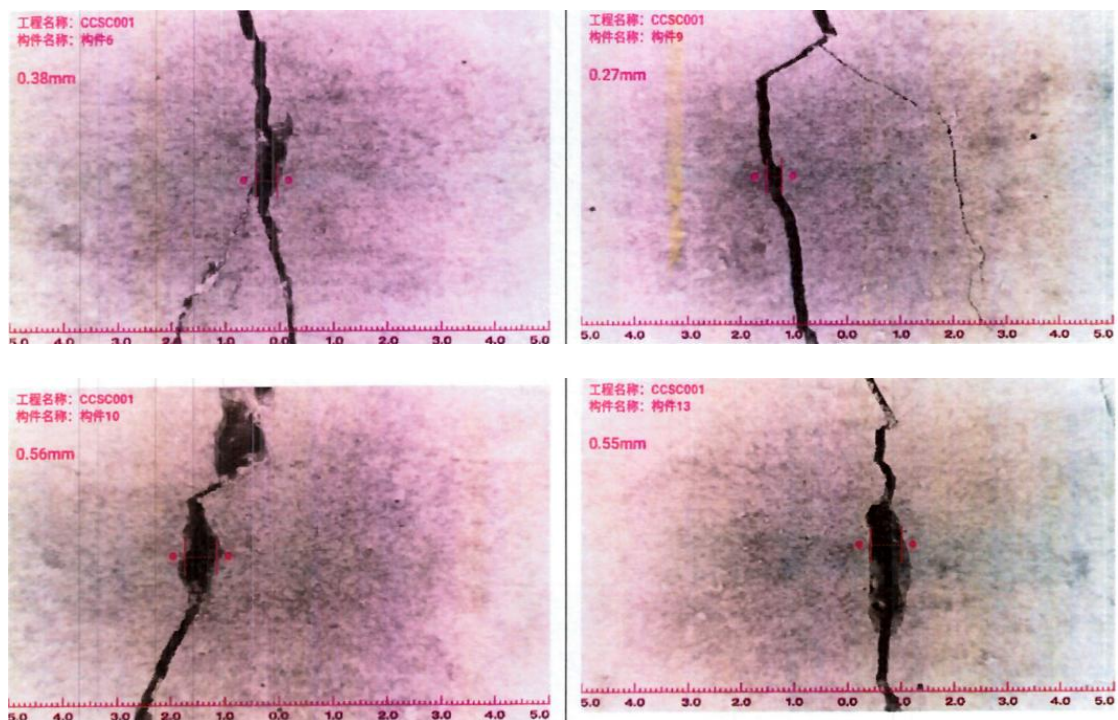


图 1 采用 HC-U91 型裂缝测量仪测塔筒裂缝宽度

混凝土塔筒裂缝深度可通过超声波检测法或阵列超声法等方法。超声波检测法利用超声波在混凝土内传播时在裂缝端点处产生衍射，通过衍射角与裂缝深度的几何关系进行换算得到，目前在混凝土塔筒裂缝深度测试中应用较广。一般裂缝分布和尺寸测试完成后会形成表 2 所示的裂缝检查汇总表，并配合裂缝分布图（图 2），形成对塔筒裂缝的全面描述，以便给裂缝评估和修复加固提供依据。

表 2 裂缝检查汇总表

裂缝序号	塔筒节位	裂缝位置（塔筒门设为0°，顺时针旋转）	裂缝位置	裂缝走向	缝长（cm）	缝宽（mm）	缝深（mm）
1	A6	10	顶部	竖向	125	0.15	31
2		20	顶部	竖向	85	0.13	151
3		38	顶部	竖向	136	0.19	50
4		68	顶部	竖向	115	0.14	35

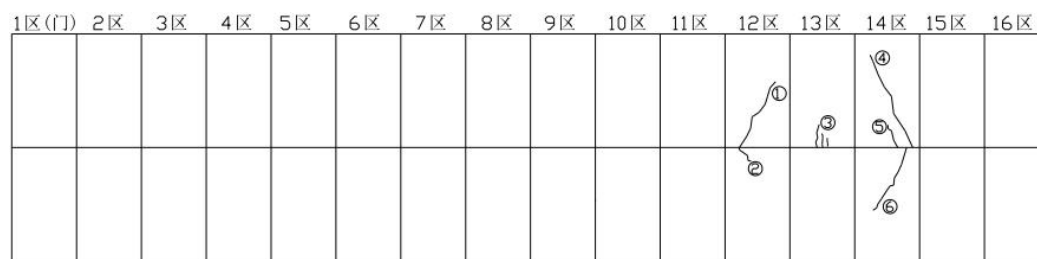


图 2 混凝土塔筒裂缝分布图

阵列超声法相比超声波检测法应用较晚，为此编制规程过程中对该方法进行了试验验证。如图 3 所示，试件为平面块体，尺寸为 1000mm×800mm×250mm，预制了 3 条裂缝，裂缝深度分别为 60mm、120mm 和 180mm。测试结果见图 4，由图可知，阵列超声法能够发现试件表面的裂缝，裂缝深度的测试误差在 5mm~20mm 左右（如图 4 左，裂缝实际深度 120mm，测试结果 140mm；图 4 右，裂缝实际深度 180mm，测试结果 185mm）。

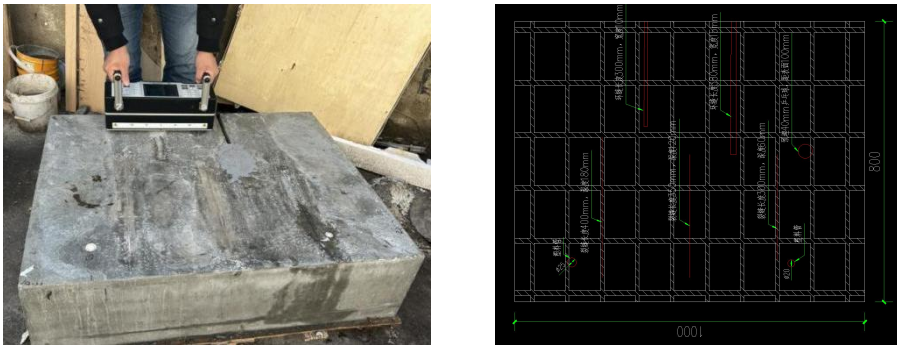


图 3 阵列超声法测试试件

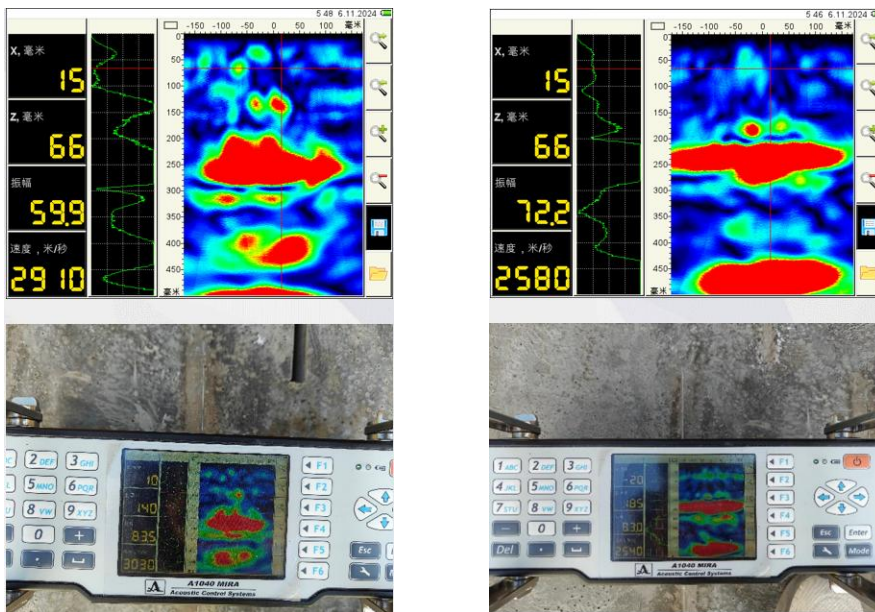


图 4 阵列超声法测试结果

图 5 为采用探针法检测塔筒内侧环缝饱满度的作业照片，若在塔筒外侧，需配备相应的蜘蛛人。采用探针法时，一般需根据实际塔筒损坏情况（基于内外表面外观质量检查结果）和最小间距提前确定的测点布置（如图 6 所示）。实践表明，当测点布置较密时（比如图 6，间隔 1m 设置 1 个测点），可通过平均缺失率（内壁或外壁单侧插入深度平均值/检测位置管片厚度×100%）作为评价座浆层饱满程度的参考指标（如表 3 所示）。

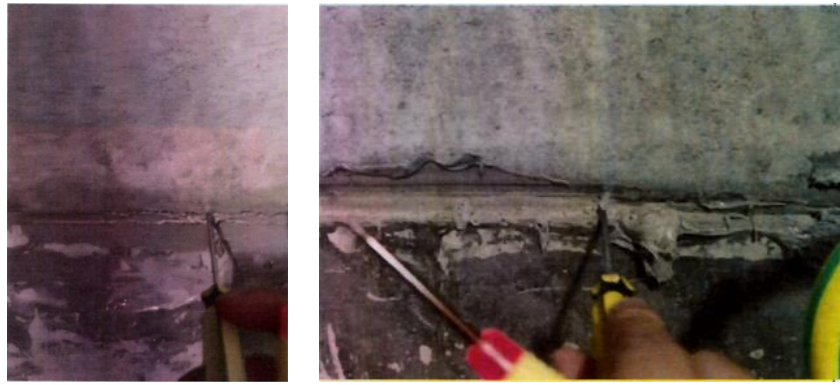


图5 探针法检测塔筒内侧环缝饱满度

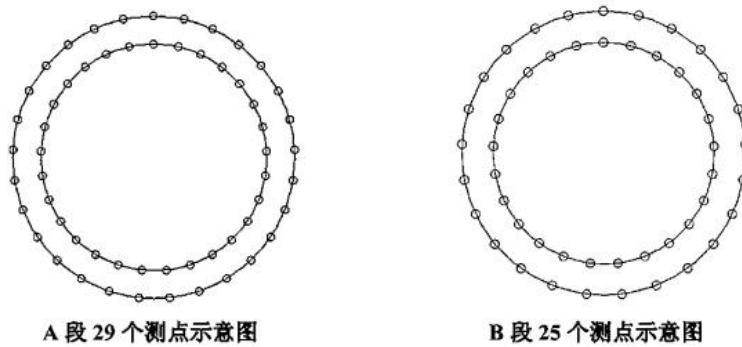


图6 探针法检测环缝饱满度测点布置

表3 探针法检测塔筒内侧环缝饱满度结果汇总表

位置	插入深度最大值 (cm)	插入深度平均值 (cm)	平均缺失率 (%)	位置	插入深度最大值 (cm)	插入深度平均值 (cm)	平均缺失率 (%)
A0 与 A1 间	0.0	0.0	0.0	C3 与 C4 间	16.0	1.0	3.3
A1 与 A2 间	4.0	0.5	1.4	C4 与 C5 间	0.0	0.0	0.0
A2 与 A3 间	3.5	0.2	0.5	C5 与 C6 间	2.3	0.1	0.3
A3 与 A4 间	0.0	0.0	0.0	C6 与 C7 间	0.0	0.0	0.0
A4 与 A5 间	0.0	0.0	0.0	C7 与 C8 间	0.0	0.0	0.0
A5 与 TD1a 间	0.0	0.0	0.0	C8 与 C9 间	3.5	0.3	1.0
TD1a 与 TD1b 间	3.0	0.4	1.1	C9 与 C10 间	5.0	0.3	1.0
TD1b 与 B1 间	0.0	0.0	0.0	C10 与 TD3a 间	6.0	0.3	1.0
B1 与 B2 间	0.0	0.0	0.0	TD3a 与 TD3b 间	0.0	0.0	0.0
B2 与 B3 间	3.8	0.7	2.5	TD3b 与 D1 间	7.0	0.6	1.8
B3 与 B4 间	0.0	0.0	0.0	D1 与 D2 间	2.3	0.2	0.6
B4 与 B5 间	4.0	0.2	0.7	D2 与 D3 间	6.0	1.0	3.1
B5 与 B6 间	0.0	0.0	0.0	D3 与 D4 间	5.0	0.3	0.9
B6 与 TD2a 间	0.0	0.0	0.0	D4 与 D5 间	4.1	0.4	1.2
TD2a 与 TD2b 间	5.0	0.3	0.8	D5 与 D6 间	0.0	0.0	0.0
TD2b 与 C1 间	2.0	0.1	0.2	D6 与 D7 间	5.1	0.7	2.2
C1 与 C2 间	0.0	0.0	0.0	D7 与 TD4 间	6.0	0.4	1.2
C2 与 C3 间	8.0	0.7	2.3	/	/	/	/

表4为雷达测试法检测塔筒混凝土空鼓的结果汇总表。实际塔筒缺陷检测中，一般根据塔筒内外表面外观质量检查结果提前确定需要检查的空鼓检测点，然后进行检测。

表 4 雷达测试法检测塔筒混凝土空鼓结果汇总表

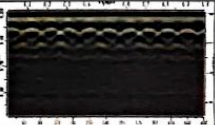
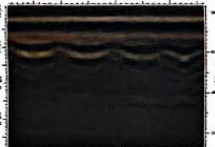
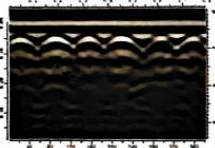
序号	位置	雷达实测图	情况描述
1	C6 内壁		未发现空鼓
1	TD3a 内壁		未发现空鼓
2	TD3a 内壁		未发现空鼓

表 5 为频率法检测体外钢绞线索力的测试结果，表 6 为该塔架采用反拉法测试索力与频率法结果的对比。对比结果显示，该塔架反拉索力与频率推算索力较为接近。

表 5 频率法测试钢绞线索力

塔号	预应力索号	频率/Hz	推算索力 (kN)	设计张拉力 (kN)	索力偏差值 (%)
6#风塔	左-1	2.81982	3652.1	4176	-12.55%
	左-2	2.81982	3652.1	4176	-12.55%
	左-3	2.78320	3557.9	4176	-14.80%
	左-4	2.75879	3495.7	4176	-16.29%
	左-5	2.80151	3604.8	4176	-13.68%
	左-6	2.78320	3557.9	4176	-14.80%
	左-7	2.78931	3573.5	4176	-14.43%
	左-8	2.81372	3636.3	4176	-12.92%
	左-9	2.80151	3604.8	4176	-13.68%



索力偏差百分比
0.00%
-5.00%
-10.00%
-15.00%
-20.00%

1 2 3 4 5 6 7 8 9

索力不均匀度 2.19%

表 6 频率法索力测试结果与反拉法测试结果对比

塔号	预应力索号	频率推算索力 (kN)	推算反拉索力 (kN)	设计张拉力 (kN)	反拉索力与设计张拉力偏差
6#风塔	左-1	3652.1	3743.3	4176	-10.36%
	左-2	3652.1	3743.3	4176	-10.36%
	左-3	3557.9	3646.7	4176	-12.67%
	左-4	3495.7	3583.0	4176	-14.20%
	左-5	3604.8	3694.8	4176	-11.52%
	左-6	3557.9	3646.7	4176	-12.67%
	左-7	3573.5	3662.7	4176	-12.29%
	左-8	3636.3	3727.1	4176	-10.75%
	左-9	3604.8	3694.8	4176	-11.52%



索力偏差百分比
5.000%
0.000%
-5.000%
-10.000%
-15.000%

1 2 3 4 5 6 7 8 9

— 与均偏差百分比 — 与设计偏差百分比

推算反拉索力值不均匀度 2.19%

表 7 为塔架频率实测结果，该测试通过在风电机组偏航平台、钢筒段-混凝土段连接平台及其下方约 30m 处分别布置传感器获得，与塔架频率计算值(0.259)

较为接近。鉴于混凝土材料的本构参数离散程度较大，塔架实测频率对于评估塔架后期与机组的匹配度尤为重要。

表 7 塔架频率实测结果

机组号	阶数	频率(Hz)	阻尼 (%)	备注
F09	1	0.258	1.906	塔筒左右 1 阶
	2	0.266	2.671	塔筒前后 1 阶
	3	0.875	1.246	塔筒左右 2 阶
	4	0.876	1.353	塔筒前后 2 阶

图 7 为采用压力注浆法进行塔筒水平缝修复的现场作业实例。实施过程中首先用毛刷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，然后采用封口胶封闭横缝，骑缝设置注浆嘴和透气孔。注浆顺序由一侧向另一侧依次进行，以不小于 0.5MPa 的压力将低粘度、高强度灌缝胶注入横缝腔内。注射过程中排气孔作为排出空气的通道和预留观察孔，直至观察孔胶体溢出高度超过横缝高度认为灌浆结束。实践表明该方法较适用于座浆料大块缺失或缺失部位相互联通的情况。



图 7 采用压力注胶法进行塔筒水平缝修复

图 8 为采用压力注浆法进行塔筒裂缝修复的现场作业实例。实施过程与压力注胶法进行塔筒水平缝修复类似，首先清理裂缝两侧区域，采用封口胶封闭裂缝表面并粘贴注浆嘴，待封口胶固化后进行压力注浆。注浆采用自下而上的方式，相邻上方注胶嘴作为下方注浆排出空气的通道及预留观察口，待上方注胶嘴有溢胶后再一次向上安装注浆器进行注射。实践表明，压力注胶法能较好起到对塔筒裂缝封闭和补强的作用。



图8 采用压力注浆法修复塔筒裂缝

图9为采用粘钢加固法进行混凝土塔筒加固补强的实例。塔筒出现自水平缝向上下延伸的裂缝，经钻孔排查发现塔筒水平缝存在蜂窝状缺胶，鉴于缺胶部位相互之间不联通，为保证修复效果，对缺胶部位横缝进行了整体置换，并采用压力注浆法对塔筒裂缝进行封闭和补强。考虑到裂缝对塔筒整体性可能造成的削弱，该项目在横缝置换和裂缝修复完成后，对塔筒进行了粘钢加固，钢板与塔筒壁之间采用粘钢胶+机械锚栓的组合方式进行连接。钢板考虑现场起吊能力进行了分片拆分，并在压力注射粘钢胶期间考虑低温天气对注胶部位实施了保温。目前该项目修复工作已经完成，即将进行试运行。



图9 采用粘钢加固法进行混凝土塔筒补强修复

四、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

本规程不涉及专利和相关知识产权问题。

五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

2023年12月20日，国家能源局发布1-11月份全国电力工业统计数据。截至11月底，全国累计发电装机容量约28.5亿千瓦，同比增长13.6%。其中，太阳能发电装机容量约5.6亿千瓦，同比增长49.9%；风电装机容量约4.1亿千瓦，同比增长17.6%。1-11月份，全国主要发电企业电源工程完成投资7713亿元，同比增长39.6%。其中，太阳能发电3209亿元，同比增长60.5%；核电774亿元，同比增长45.3%；风电2020亿元，同比增长33.7%。电网工程完成投资4458亿元，同比增长5.9%。

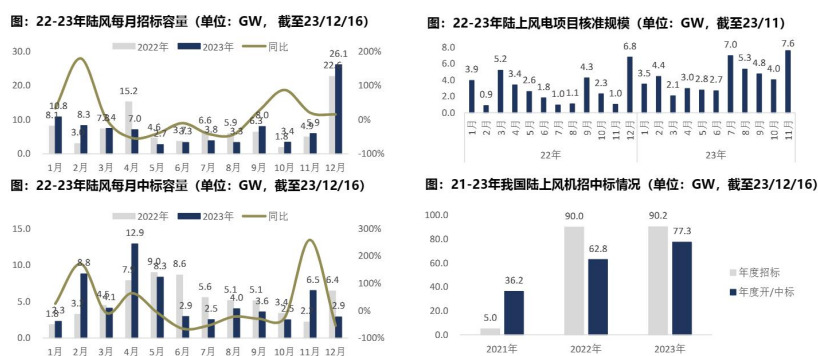


图 10 中国风电陆风招标/中标量

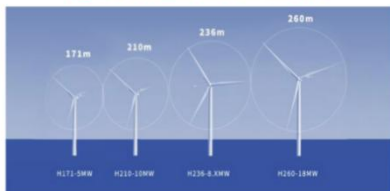
国家“双碳”政策提出后行业规划的多批陆上风光大基地资源的批量释放。陆风大基地项目、老旧机组改造、分散式核准制改备案制，共同推动“十四五”末期中国陆风进入装机高峰期。23年1-11月我国陆上风电核准项目规模达47.2GW，同比增长71.4%。进入23年下半年，风电项目核准规模较23年上半年显著增长。

风电平价时代的到来，使风机单机容量明显提升。据中国风能专业委员会发布的数据，2022年，中国新增装机的风电机组平均单机容量为4.49MW，同比增长27.8%，其中陆上风电机组平均单机容量为4.3MW，同比增长37.9%，海上风电机组平均单机容量为7.4MW，同比增长33.4%。

风电机组：大型化趋势明显

- 风机大型化是降本的重要抓手，近年风机大型化的速度加快，2022年新增装机的单机容量同比明显增长。
- 展望未来，风机大型化还将更进一步，目前风机企业已经推出10MW左右的陆上风机，并即将批量应用，头部风机企业已经开始着手研发12-15MW单机容量的陆上机组；海上方面，头部海上风机企业已经推出16-18MW的海上机组，后续推出单机容量20MW以上的机组可期。

中国海装海上风机往大型化方向迭代的示意图



资料来源：CWEA、中国海装、BNEF、平安证券研究所

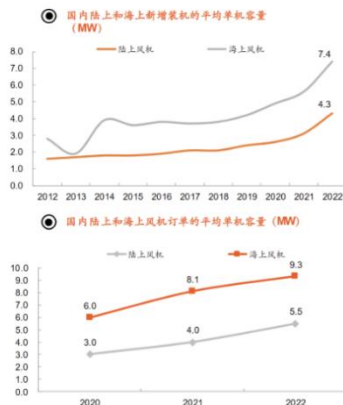


图 11 风机大型化趋势

图：低风速省市近地面高度风速(m/s)及输出功率随高度增长率(%)

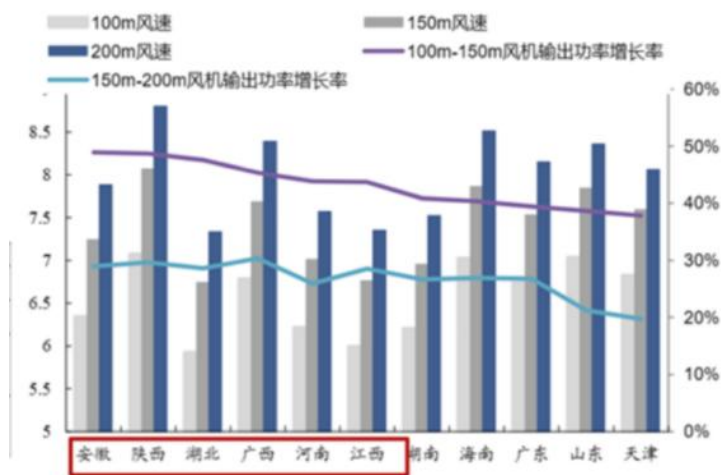


图 12 混塔经济性优势

风机大型化发展趋势下，钢混组合的混合塔架方案技术的经济性优势随塔筒高度的增加不断体现：

- (1) 高风速地区风能开发殆尽，中、低风速地区资源亟待开发，需提升轮毂高度获得更高风速，增加风机输出功率；
- (2) 混塔整机结构刚度大，抗疲劳和避震性能更强，结构更加安全；
- (3) 混塔频率高，振动频率可避开共振点，安全稳定性高；
- (4) 混凝土与预应力体系协同作用，安全稳定性高；
- (5) 据测算，塔筒高度>140m时，混塔更具经济性；
- (6) 分片式解决大直径塔筒运输难题。高塔筒通过增加直径既可以提升塔筒的承载能力又能兼顾经济性，但受制于运输限制，传统钢塔的直径很难突破5m。分片式塔筒可采用堆叠式或单片式运输，能够很好地解决大直径塔筒的运输

难题。

高塔架方案可显著提升低风速高切变风资源区发电量。风切变越大，增加塔高时风机输出功率的提升效果越显著，发电量越多，如安徽、河南、湖北、湖南、江西等低风速地区，塔高由 100m 增至 150m 时，安徽/陕西/湖北风机功率增幅约 50%，由 150m 增至 200m 时，陕西/广西/安徽/湖北/江西风机功率增幅约 30%。

对于钢混组合的混合塔架方案中重要的组成部分，混凝土塔筒占钢混塔架总造价的近 90%，因此，在产业化情况方面，混凝土塔筒为主体的风电钢混组合混合塔架在市场中已经在大量地推广应用。但是，混凝土塔筒没有专门的技术标准规范，用于指导塔筒构件缺陷的检测评估和修复加固，也是制约产业进一步发展，工程使用安全性保障的一个重要因素。

在产业推广方面，本规程的制定，将会使混凝土塔筒构件的缺陷检测评估和修复加固行为更为规范、过程管控有据可依，工程单位根据本规程能够进行合适的缺陷检测评估和修复加固，必将推动风电混合塔架产业的更大规模应用，为国家新能源政策发展助力，推动产业的规模化发展。

在推广应用论证方面，本规程的编制是在总结了大量混塔项目缺陷检测评估和修复加固实践经验，借鉴了预制混凝土构件行业缺陷检测及修复加固的相关要求，以及参考相关国家行业现行标准规范的基础上进行编制，具有其实施的可行性。本规程对于规范混凝土塔筒构件的缺陷检测评估和修复加固具有积极意义。本规程的内容已经过多家混塔生产企业、设计单位、第三方机构以及工程使用单位的相关专家多次讨论确定了最终内容，值得在整个混凝土塔筒构件缺陷检测评估和修复加固领域推广应用。

在经济效益方面，本规程的编制和实施，将规范企业的混塔缺陷检测和修复加固行为，提升混塔质量，必将使混凝土塔筒在现有行业规模化应用的基础上，扩大市场应用规模，也必将产生显著的经济效益。

六、采用国际标准和国外先进标准情况

本规程制定参考了国际电工委员会标准《Tower and foundation design requirements》IEC 61400-6 和《Guideline for the Certification of Wind Turbines》GL 2010。

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，国际标

准《Tower and foundation design requirements》IEC 61400-6 和国家能源局标准《风电机组混凝土-钢混和塔筒设计规范》NB/T 10907 等标准中关于荷载效应组合、分项系数的规定不完全一致。考虑到各标准参数取值虽有不同，但依据各自的可靠度标准，相应的结构可靠性应都能满足特定国家或地区的要求。本规程对塔架评估和加固修复评估中的依据的标准未做强制性要求。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。

部分较严重缺陷会导致平截面假定不成立，采用工程算法会导致比较大的误差，规程第 4.3.2 条建议受力复杂时宜采用有限单元法，有限单元法涉及的边界条件、单元选择、网格密度等要求在条文说明中进行了原则说明，相应内容参照《Guideline for the Certification of Wind Turbines》GL 2010 中有限元强度分析的相应章节“Appendix 5.A Strength Analyses with the Finite Element Method”。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准

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，且对目前标准体系起到一定的补充作用，简述如下。

混塔加固修复前应进行检测、鉴定，现行国标 GB50144《工业建筑可靠性鉴定标准》、GB50292《民用建筑可靠性鉴定标准》中均未规定与风电混塔对应的建、构筑物类别，不方便直接对混塔塔架进行鉴定评级；团体标准 T/CECS882-2021《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》对混塔、钢塔鉴定评级提出概述性规定，但对风电混塔中常见的部分缺陷，如接缝不饱满、掉块等均未提及。本标准在对混塔塔筒可靠性评级的规定参考了团体标准 T/CECS882-2021《风电塔架检测鉴定与加固技术规程》中混塔的层次分类及评级标准，对部分细节结合现行国家标准和风电混塔工程实践经验，进行了补充。

混塔塔筒目前的加固修复一般参考国标 GB50367-2013《混凝土结构加固设计规范》，该规范主要针对常规建、构筑物中的梁、板、柱构件，加固计算也以简化的正截面和斜截面承载力验算为主，对相对复杂的构件和节点受力涉及较少，对裂缝修补的规定也较为笼统。对于几乎全预制装配的大型风电混塔，非常规构件、复杂节点、局部应力集中、受力及非受力裂缝等情况经常出现；另，《混凝

土结构加固设计规范》第 1.0.2 条及条文说明指出，该规范适用于房屋建筑和一般构筑物，适用范围与《混凝土结构设计规范》一致；《混凝土结构设计规范》第 1.0.2 指出，对于需作振动计算的结构，尚应符合专门标准的要求，对于主控荷载以动荷载为主的风电混塔而言，制定本技术规程也可满足该要求。

针对上述现状，基于现行国标及团标，结合风电混塔独特的特点和亟待解决的问题，本技术规程对混塔塔筒加固修复中常用的材料、加固方案、计算分析和实施方法等进行规定；另外，针对目前工程实施过程中频繁出现的因缺陷鉴定方面的缺失而导致的遇到相关问题时无法做出及时、准确判断的情况，本技术规程在附录中针对塔筒常见缺陷的表现、产生原因、严重程度、加固修复措施及验收标准给出相关标准，以满足行业在这方面的需求。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

建议《风力发电机组混凝土塔筒修复加固技术规程》作为推荐性工程建设类中国混凝土与水泥制品协会标准发布实施。

十、贯彻标准的要求和措施建议

尽快做好标准发布实施工作，标准颁布实施后，相关部门和企业应做好标准宣贯培训工作，制定相应的实施方法，使本规程得以认真执行，在混凝土塔筒构件生产技术和质量管理方面起到重要的指导作用。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

无。