

ICS 27.180

CCS F 11

T/CAEE

团 体 标 准

T/CAEE XXXX—XXXX

大功率海上风电塔筒

High-capacity offshore wind turbine tower

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电子装备技术开发协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 设计原则	2
5 设计要求	3
6 材料要求	4
7 制造与安装	6
8 检验	12
9 附件制作与安装	13
10 完工资料及随机文件	13
11 塔筒组装	15
附 录 A 塔筒原材料选用推荐	16
附 录 B 塔筒焊缝无损检测推荐	17

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电子装备技术开发协会提出。

本文件由中国电子装备技术开发协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

大功率海上风电塔筒

1 范围

本标准规定了大功率海上风电塔筒（以下简称“塔筒”）的设计、材料、制造、检验、运输、安装及验收等方面的要求。

本标准适用于额定功率6.0MW及以上的海上风电塔筒。其他功率等级的海上风电塔筒可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 51096 风力发电厂设计规范

GB/T 18451.1 风力发电机组 设计要求

GB/T 19072 风力发电机组 塔筒

GB/T 31517.1 固定式海上风力发电机组设计要求

GB/T 51308 海上风力发电场设计标准

NB/T 31001 风电机组筒形塔制造技术条件

DL/T 5383 风力发电场设计技术规范

EN 1993-1-6:2007+A1-2017 欧洲规范 3 钢结构设计 第 1-6 部分：壳结构

3 术语和定义

3.1 海上风力发电场

在沿海多年平均大潮高潮线以下海域的风力发电场，包括在相应开发海域内无居民的海岛上开发建设的风力发电场。

3.2 风力发电机组

将风的动能转化成电能的设备。

3.3 筒节

由具备特定形状的钢板经过卷制及纵焊缝焊接形成的锥筒形或者直筒形的单个零件。

3.4 塔段

两端以法兰接触面为界的钢制塔筒段。

3.5 附件

塔段以外的其他零件或部件。

3.6 塔筒

海上风力发电机组支撑结构的一部分,连接下部结构和风轮-机舱组件。

3.7 纵焊缝

在卷制后的钢板对接接口通过焊接形成的连续焊缝。

3.8 环焊缝

在组对后的筒节与筒节、筒节与法兰颈部的对接接口通过焊接形成的连续焊缝。

3.9 环境条件

可影响风力发电机组性能的环境特性(如风、波浪、海流、水位、海冰/湖冰、海生物、冲刷和海床整体运动等)。

3.10 外部条件

影响海上风力发电机组运行的外部因素,包括环境条件、电网条件和其他气候因素(如温度、降雪、覆冰等)。

3.11 轮毂高度

风力发电机组风轮扫掠面中心点距平均海平面的高度。

3.12 载荷效应

单一载荷或组合载荷对结构部件或整个系统产生的影响,如内力、应力、应变、位移等。

3.13 支撑结构

海上风力发电机组的一部分,包括塔筒,下部结构和基础。

4 设计原则

4.1 塔筒的设计使用寿命不应低于风力发电机组的设计使用寿命。

4.2 塔筒应在全部设计载荷情况下稳定、安全的支撑风轮和机舱(包括发电机和传动系统等部件),具有足够的强度承受作用在风轮、机舱和塔筒上的静载荷和动载荷,在制造运输、安装和运维过程中具备足够的刚度抵御外力作用变形的能力,当发生偶然事件时结构能保持整体稳定性。

4.3 塔筒设计应选取所有设计工况中最不利的载荷工况组合进行计算分析,载荷选取原则需结合具体项目需求,由设计单位与整机商共同商讨确定,载荷应按照 GB/T 18451.1 的相关规定进行计算分析,同时还应考虑塔筒和基础倾斜引起的附加载荷,其中由安装、制造和温度等因素引起的塔筒倾斜宜按 5mm/m 计算,由基础变形和不均匀沉降等因素引起的塔筒倾斜宜按 3mm/m 计算。

- 4.4 塔筒设计应考虑塔筒吊装、停机或不对风时可能产生的涡激振动对塔筒的影响，可根据 EN1991-1-4:2005 附录 E 的方法或其他具有相同安全水平的方法来进行计算分析，计算分析时应考虑塔筒的一阶涡激振动，必要时应考虑二阶及更高阶的涡激振动。
- 4.5 塔筒设计应考虑耐久性影响，耐久性设计应包括抗疲劳强度、抗震(有必要时)、抗台风、抗蚀、运维要求等。
- 4.6 钢制塔筒设计应进行极限强度分析、疲劳强度分析和屈曲稳定性分析。
- 4.7 塔筒设计应进行整机状态下的频率分析，若其固有频率与风轮旋转频率及叶片通过频率存在共振应采取软件或硬件的措施减小塔筒振动和振幅。
- 4.8 塔筒设计应考虑防雷接地要求。
- 4.9 塔筒设计应提供设计载荷、使用寿命、环境条件、工作温度和基础刚度、标高、轮毂中心高度、风轮-机舱组件质量、重心位置、转动惯量和风轮转速范围以及偏航结构对顶法兰的要求等数据内容。
- 4.10 塔筒设计应充分考虑运输条件、厂家生产能力、现场施工条件、电气及其他设备接口等因素。
- 4.11 钢制塔筒设计应根据 GB/T18451.1 选取载荷局部安全系数、材料局部安全系数和失效后果局部安全系数，其中失效后果局部安全系数应满足 GB/T18451.1 中二类零件的要求。

5 设计要求

- 5.1 筒节极限强度分析应符合 GB/T 18451.1 的规定，塔筒附件的极限强度分析应符合 GB/T17888(所有部分)的要求。疲劳工况最大载荷下，结构不应发生局部塑性变形。
- 5.2 塔筒的稳定性分析应考虑特定类型结构的相关失效模式，即塔筒的筒体屈曲。若塔段两端是 L 型或 T 型法兰，可仅对各塔段的稳定性进行分析；若塔段两端采用其他型式，应证实塔段两端能提供必要的边界条件以便分析各塔段的稳定性，否则应分析塔筒整体的稳定性。
- 5.3 塔筒的筒体屈曲分析时应考虑制造和安装过程中可能出现的几何、结构和材料缺陷，明确缺陷对应的制造等级要求（具体可参考 A/B/C 级分级标准），确保设计与制造等级匹配，海上风力发电机组塔筒制造等级不低于 B 级。
- 5.4 塔筒门框和加强结构的分析，对于塔段上有无加强结构的开口都应进行包含考虑缺陷的材料和几何非线性(GMNI)的数值屈曲分析。门框开口区域还应进行极限强度和疲劳强度分析。
- 5.5 塔筒的疲劳强度分析应包括塔筒环焊缝的疲劳强度分析和塔筒附件连接结构的疲劳强度分析。对于塔筒结构的连续区域(门框除外)，可采用只考虑弯矩中最大疲劳载荷分量进行疲劳强度分析。塔段与法兰焊缝、塔段门孔周边焊缝疲劳等级为 A 级，塔段环、纵焊缝疲劳等级为 B 级，其余焊缝疲

劳等级为C级,各疲劳等级对应的具体应力幅值限值应符合 GB/T 19072 或相关疲劳设计标准规定,统一行业取值准则。

5.6 对于法兰和螺栓连接的极限强度分析可采用简化计算方法,如 Petersen/Seidel 方法。简化计算方法至少需要考虑螺栓断裂导致的失效、塔筒筒壁或法兰上出现塑性铰且螺栓断裂导致的失效、塔筒筒壁或法兰上出现塑性铰三种失效模式。并应考虑塔筒筒壁轴向载荷对塔筒筒壁和法兰的应力的影响。

5.7 钢结构设计标准可参考 EN 1993-1-6-2007+A1-2017: 作为欧洲规范 3 更新后的内容,随着欧洲规范在国际上的广泛认可和应用,在钢结构壳体设计领域得到了广泛应用,是重要的设计依据

6 材料要求

6.1 钢材要求

6.1.1 塔筒主体(包括筒体、法兰、门框)用钢应考虑塔筒的强度、使用环境温度、运行温度、材料的焊接及制造工艺以及经济性,可根据CB/T 700和 GB/T 1591选择使用,非塔筒主体用钢与塔筒主体焊接时应与塔筒主体材料相容。对于Q390及以上级别高强度钢,钢厂应提供完善的焊接性资料,包括但不限于指导性焊接工艺参数,尤其是热输入、预热温度以及后热制度;热加工工艺参数、焊材匹配试验及报告等资料。焊材匹配试验包括焊接工艺评定和疲劳试验。

6.1.2 塔筒用钢板的尺寸、外形及允许的偏差应符合GB/T709规定,厚度允许偏差不应低于C级。钢板表面质量应符合GB/T 14977规定的B类2级要求。如钢板厚度方向有性能要求,应符合GB/T 5313规定。如钢板有超声波要求,应符合NB/T47013.3中规定的I级及以上要求。

6.1.3 塔筒材料的订货内容、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志、质量证明书等应符合GB/T 3274 规定。钢板质量证明书应满足GB/T18253中3.1的要求。

6.1.4 塔筒制造单位应按质量证明书检验项目进行验收,如质量证明书所列项目不齐全或数据有疑问,则应对该炉批号钢材进行取样复验。

6.1.5 塔筒制造所用钢材的各项性能指标应符合设计文件要求。若需采用替代材料,应由制造单位提出申请,并通过取样检验,表明所采用的替代材料满足设计要求,经设计单位确认后方可执行。

6.1.6 钢板入厂后,塔筒生产商应立即进行目视检查,同步按钢板每批次数量的10%进行UT复检。此外,从入厂到下料,须完成对钢板厚度的100%检测。如有一张不合格,必须对该批次每张钢板进行复查;门框钢板需逐张进行UT复验。钢板必须按照批次(组批规则参考GB/T 1591)进行取样送至第三方实验室进行理化性能试验,在塔筒发货前需提交齐全的理化试验报告,报告化学成分复验覆盖100%炉号,力学性能复验覆盖100%批号。

6.2 法兰要求

6.2.1 法兰采用整体环锻成型，法兰原材料只允许镇静钢锭或连铸圆钢，不允许用连铸板坯。法兰整体锻造比不低于4:1，法兰锻件交货状态应为正火加回火，表面无锻造裂纹、折叠、压痕、接缝、白点和残余缩孔等缺陷。

6.2.2 法兰材料各项性能指标和化学成分应符合GB/T 1591的要求，法兰在锻造后应满足 GB/T 5313 中的厚度方向性能级别要求。

6.2.3 法兰订货内容、技术要求、取样、试验方法、检验规则、标志、标签和随行文件以及包装、运输和贮存应符合JB/T 11218的规定。

6.2.4 法兰应按照NB/T 47013.3标准执行UT检测，质量等级为I级；法兰内R角处应按照NB/T 47013.4进行MT检测，质量等级为I级。

6.2.5 每一热处理批次和炉号的法兰的机械性能、化学成分必须满足 GB/T 1591相关要求，金相实验晶粒度>6 级、非金属夹杂物I级，并附放大100倍的金相照片。

6.2.6 法兰入厂后，来料试样由塔筒厂送至第三方实验室进行理化性能试验。按照到货批次进行尺寸(至少包含内/外径+孔距)抽检并做相应记录。塔筒制造商必须对进厂每个热处理批次法兰数量的10%进行UT复验，法兰内R角处100%进行MT复验。

6.3 焊接材料要求

6.3.1 焊接材料选用合格产品且不低于一等品，针对不同强度等级的钢号之间焊接，选用焊接材料应保证焊缝金属的抗拉强度高于或等于强度较低一侧母材抗拉强度下限值，且不超过强度较高一侧母材标准规定的上限值。焊接材料应与母材匹配，冲击吸收能量不低于母材要求。

6.3.3 焊接材料的使用必须与工艺评定文件中指定的焊接材料保持一致，主焊缝所选用的焊丝或焊丝-焊剂组合需要按批次进行机械性能和化学成分复验，制造厂需在项目开始时制作熔敷金属试板送至实验室进行理化试验。

6.4 紧固件要求

6.4.1 用于塔筒连接的紧固件用钢及性能等级由设计单位根据GB/T5782、GB/T 3098.1、GB/T 3098.2、GB/T 1231、GB/T 32076等标准进行选用，并在设计文件中明确其性能要求。考虑到塔筒的使用工况，塔筒附件用螺母宜采用GB32076或其他螺母（协议处理）。

6.4.2 塔筒连接用标准件均为高强度紧固件，采用达克罗（片状锌铬盐）、锌镍渗层、渗锌或热浸锌等表面防护涂层，对于附件连接用紧固件防护涂层按图纸要求。紧固件应具备完整的质量证明书和合格证，M20及以上高强度螺栓每种规格、每批次试验应由具有 CMA/CNAS 资质的机构检测，按批次在交货前提供测试报告。如有其他检测需要，检测要求按此部分执行。螺栓连接副应能保证扭矩系数。

6.5 内附件要求

6.5.1 原材料力学、化学性能至少应符合相关国家标准或相近的国际标准规定或相关技术协议。原材料应有完整合格的产品出厂证明，质量证明书原件或加盖供材单位检验公章的有效复印件。

6.5.2 结构钢的质量等级应按结构件的使用场景进行选择，对于需要焊接的结构钢，应使用B级及以上的质量等级；当工作温度高于0℃时，其质量等级不应低于B级；当工作温度不高于0℃时，但高于-20℃时，其Q235、Q355质量等级不应低于C级，Q390，Q420及Q460不应低于ND、MD级；当结构件厚度不小于40mm时，结构的质量等级宜在以上规则基础上提高一个等级使用。

6.5.3 对于承受静力载荷的结构件，热轧钢板的厚度偏差应符合GB/T 709规定的A级偏差，表面质量应符合GB/T 14977 B1级别；对于承受疲劳载荷的结构件，热轧钢板的厚度偏差应符合GB/T 709规定的B级偏差，表面质量应符合GB/T 14977 B1级别。

6.5.4 对于承受疲劳载荷的结构件，内部应无超出设计要求的夹杂、裂纹、气孔和分层等，超声波探伤等级不宜低于NB/T 47013.3 I级；对于存在T形接头的焊接件，如承受疲劳载荷或者存在层向撕裂可能时，应保证厚度方向性能。未经表面处理的板材、型材表面应清洁，不应有裂纹和腐蚀斑点存在。板材和型材表面上的起皮、起泡、压坑、碰伤、擦伤、划伤、表面粗糙、局部机械损伤等缺陷的深度不应超过所在部位壁厚公称尺寸的8%，且最大不超过0.5mm。

6.5.5 不锈钢热轧钢板的化学成分、力学性能及低倍组织等各项性能、要求应符合GB/T 4237的规定；不锈钢冷轧钢板的化学成分、力学性能及低倍组织等各项性能、要求应符合GB/T 3280的规定；结构用不锈钢无缝钢管的化学成分、力学性能及低倍组织等各项性能、要求应符合GB/T 14975的规定。不锈钢其他型材的化学成分、力学性能、要求应符合GB/T 20878的规定。

7 制造与安装

7.1 工艺文件

塔筒制作前应根据设计图样和技术规范编制塔筒制作、焊接、防腐及检测工艺文件。

7.2 下料

7.2.1 钢板应按塔筒制作工艺文件中所规定的尺寸采用数控切割机下料，并按焊接工艺文件切割焊接坡口。

7.2.2 钢材切割面或剪切面应无裂纹、分层和大于1.0mm 的边缘缺棱，切割面平面度不大于0.05t，且不大于2.0mm，割纹深度不大于0.3mm，局部缺口深度不大于1.0mm。

7.2.3 筒节下料的尺寸大小口弦长偏差 $\leq \pm 2$ mm，对角线长度偏差 $\leq \pm 3$ mm。

7.2.4 塔筒主体钢板下料后应采用无应力钢印标识，深度 ≤ 1 mm。

7.3 卷圆

7.3.1 筒节卷制应严格控制圆度、对口的错边量、局部凹凸度，筒节任意截面圆度公差要求为 $(D_{\max}-D_{\min})/D_{\text{nom}} \leq 0.005\text{mm}$ 。

7.3.2 纵缝对口错边量（见图1） $h \leq 0.1t$ ，且最大不超过3mm， t 为钢板厚度(mm)。

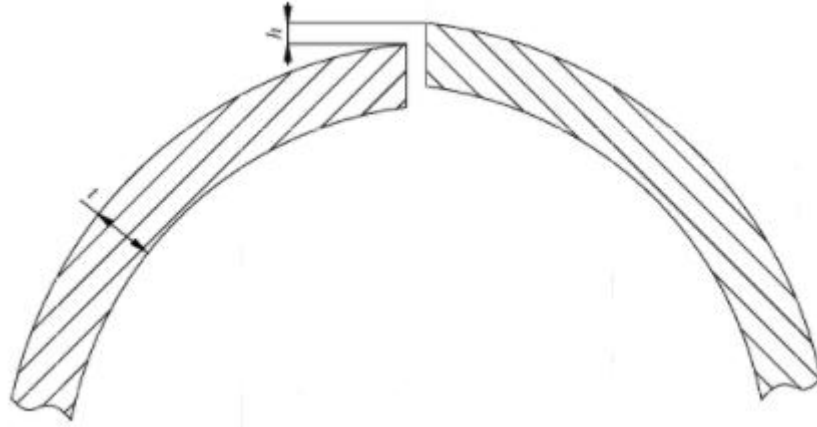


图1 纵缝对口错边

7.3.3 筒节纵焊缝棱角和环向表面局部凹凸度(见图2)检测样板长度选取如表1，筒节纵焊缝棱角和环向表面局部凹凸度检测，凹凸度 E 不大于 $0.01L$ ， L 为样板长度。

表1 纵焊缝棱角和环向表面局部凹凸度检测样板选取

单位：mm

t	6~7	8~9	10~11	12~13	14~15	16~17	18~19	≥ 20
L	150	200	250	300	350	400	450	500

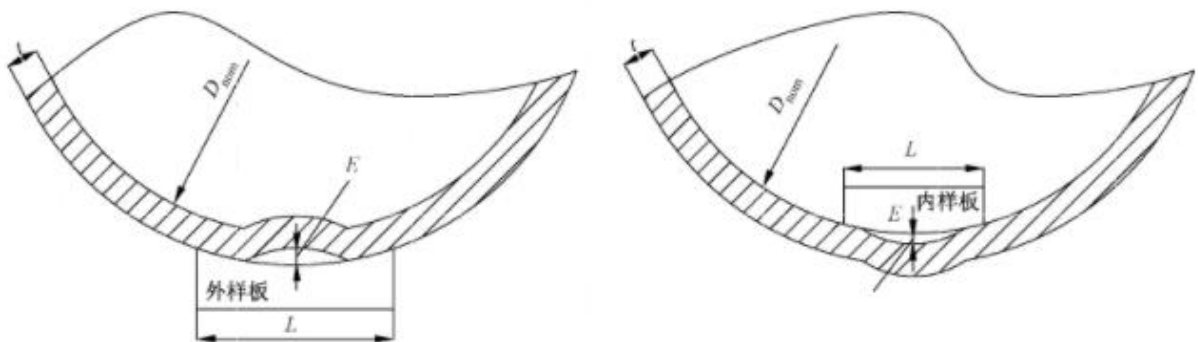


图2 纵焊缝棱角及环向局部凹凸度检测示意图

7.3.4 钢板卷制后其边缘应圆滑过渡，表面不得有损伤、褶皱和凹面，划痕深度不应大于0.5mm。

7.4 组对

7.4.1 筒节与筒节对接一般采用外壁对齐或者中对齐。不同厚度筒节对接时，当板厚差 ≥ 4 mm时，应对较厚的板作按照1:4做削薄处理。

7.4.2 环缝对口错边量（见图3）应 $\leq 0.1t$ ，且最大不超过2mm，在测量对口错边量时不应计入两板厚度差值。

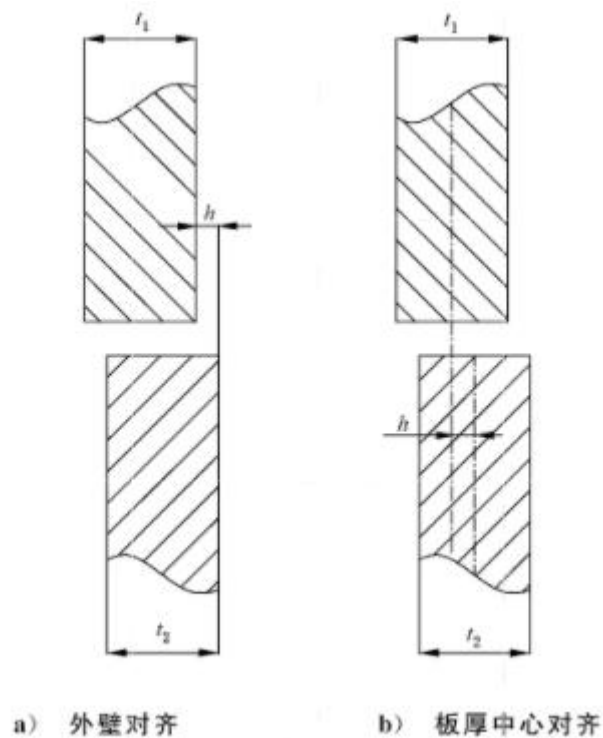


图3 环焊缝对口错边示意图

7.4.3 环缝棱角和纵向表面局部凹凸度（见图4）要求用 $L=600$ mm长的直尺检查环缝两侧的棱角或筒体表面局部凹凸度，其凹凸度 E 值应 $\leq (0.1t+1)$ mm。

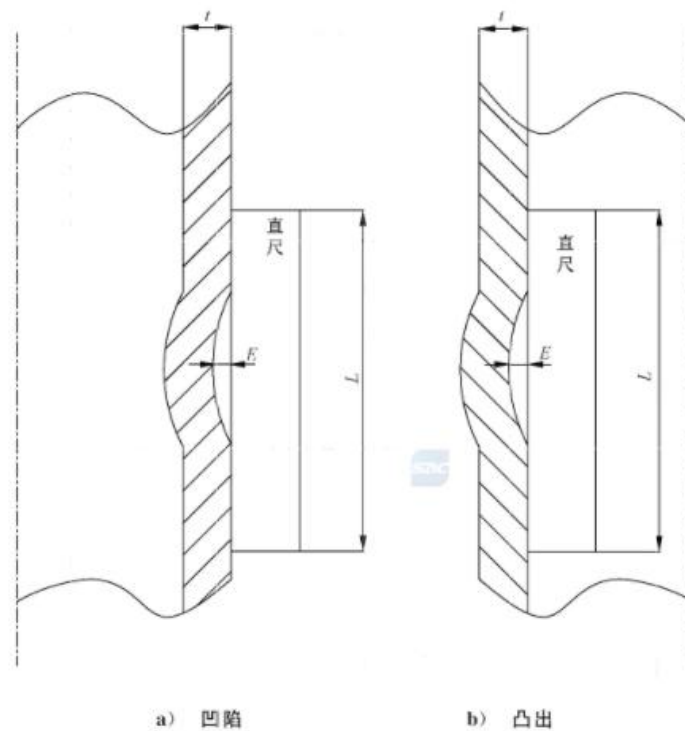


图4 环焊缝棱角及纵向局部凹凸度测量示意图

7.4.4 塔筒的圆度、棱角及局部凹凸度公差应保证不影响安装平台板。

7.4.5 塔段直线度、高度公差可参考GB/T 19804执行，相应等级应由设计单位决定。

7.4.6 塔段直线度 L 要求：塔段高度 $H \leq 20000\text{mm}$ 时， $L \leq H/1000\text{mm}$ ；塔段高度 $H > 20000\text{mm}$ 时， $L \leq (0.5H/1000 + 10)\text{mm}$ 。

7.4.7 塔段两端面平行度允许偏差为 5.0mm ，塔段垂直度 $\leq H/1000\text{mm}$ （ H 为塔筒高度），塔段高度偏差 $\leq \pm 20\text{mm}$ 。

7.4.8 法兰焊接后的螺栓孔位置中心圆的直径偏差，在法兰表面上，与垂直成 45° 的方位上测量两次，并记录。圆度检测时应考虑产品重量对圆度的影响，所测结果应符合设计要求。

7.4.9 法兰焊接完成后，应进行平面度和法兰面内倾量的检测，检测结果应符合设计文件的相关规定。

7.4.10 母材上待焊接的表面和两侧应均匀、光洁，且无毛刺、裂纹和其他对焊缝质量有不利影响的缺欠。待焊接的表面及距焊缝位置 50mm 范围内不得有影响正常焊接和焊缝质量的氧化皮、锈蚀、油脂、水等杂质。

7.4.11 在焊接接头的端部设置焊缝引弧板、引出板，使焊缝在提供的延长段上引弧和终止。焊条电弧焊和气体保护电弧焊焊缝引弧板、引出板长度应大于 25mm ，埋弧焊引弧板、引出板长度应大于 100mm 。

7.5 焊接

7.5.1 焊接材料包括焊条、焊丝、焊剂、气体、电极和衬垫等，应具有符合要求的质量证明书。

7.5.2 焊工应经过专门的理论和操作技能培训，取得国家授权的相关部门颁发的资格证书，并且焊工焊接的钢材种类、焊接方法和焊接位置等均应与焊工本人考试合格的项目相符。必要时可增加焊接操作人员手工操作技能附加考试。

7.5.3 塔筒焊接前，应按NB/T 47014或同等国外标准开展焊接工艺评定试验，并形成焊接工艺评定报告（PQR）。《焊接工艺评定报告》须覆盖产品板厚、焊缝形式、以及材料组合。项目实际使用的焊材品牌和型号应同焊接工艺评定报告保持一致，当焊丝或者焊剂更换品牌或型号时需要重新开展焊接工艺评定。返修焊缝和全焊透的角焊缝的焊接工艺应单独评定。

7.5.4 根据《焊接工艺评定报告》的内容及NB/T 47015中附录C关于WPS的文件格式编制焊接工艺规程（WPS），以此作为塔筒焊接的依据。产品的施焊范围不得超出《焊接工艺评定报告》的覆盖范围。

7.5.5 焊接坡口应根据GB/T 985.1、GB/T985.2要求设计并经工艺评定确定选择坡口形式和尺寸。焊接坡口加工方法可采用机械方法、火焰切割、等离子切割等加工方法。火焰切割或等离子切割加工的坡口应去除坡口表面的氧化皮、熔渣及影响焊接质量的表面层。坡口及其内外的表面 $\geq 20\text{mm}$ 范围内的油、漆、垢、锈、毛刺及镀锌层等应清除干净，且不得有裂纹、夹层等缺陷。

7.5.6 焊接环境温度低于 5°C 时应在施焊处 100mm 范围内进行预热，不同厚度的钢板，焊前预热温度由制造厂家在焊接工艺评定中确定。

7.5.7 焊接作业一般应在室内进行，特殊情况需露天作业，应满足图样和技术规范要求。出现下列情况之一且无有效措施时，不得施焊：

- 1) 风速：气保护 $>2\text{m/s}$ ，焊条电弧焊时 $>5\text{m/s}$ ；
- 2) 相对湿度 90% ；
- 3) 雨雪环境；
- 4) 焊接作业条件不符合《焊接安全作业技术规程》规定要求时。

7.5.8 焊接环境温度不低于 -10°C 。低于 0°C 时，应采取加热或防护措施，确保焊接接头和焊接表面各方向大于或等于1.5倍钢板厚度且不小于 100mm 范围内的母材温度不低于 20°C ，且在焊接过程中均不应低于这一温度。当焊接环境温度低于 -10°C 时，必须进行相应焊接环境下的工艺评定试验，评定合格后方可进行焊接，否则严禁焊接。

7.5.9 焊接修复：

- 1) 表面修复，焊缝及母材表面的所有超标缺陷，应按工艺要求修复；
- 2) 焊缝返修，对需要进行返修的焊缝，应当分析内部缺陷产生的原因，提出改进措施，按评定合格的焊接返修工艺进行返修。同一部位返修不宜超过两次，如超过两次必须编制专项返修方案由企业技术总工和专业监理工程师审批。

7.6 焊缝无损检测

7.6.1 无损检测应在焊接完成 24h 后，外观检测合格后进行；当钢材标称屈服强度大于420MPa，以焊接完成 48h 后无损检测和72h再次超声波检测结果作为验收依据。

7.6.2 焊缝无损检测报告签发人员必须持有相应探伤方法的Ⅱ级或Ⅱ级以上资格证书，焊缝无损检测机构必须取得相应检测资质。

7.6.3 风力发电机组支撑结构主焊缝应进行100%无损检测，其检测项目、合格等级应符合合同或设计要求。

7.6.4 风力发电机组支撑结构主焊缝应按照设计要求比例进行磁粉检测、射线检测，其检测标准、合格等级应符合合同或设计要求。

7.6.5 当设计或合同文件允许时，可采用其他检测方法进行焊缝无损检测，其检测标准、合格等级应符合合同或设计要求。

7.7 焊接产品试验

7.7.1 试板的原材料必须合格，且应与塔筒用材质有相同钢号、相同规格，和相同热处理状态。

7.7.2 试板应由施焊塔筒的焊工，采用施焊塔筒时相同的条件与相同的焊接工艺焊接。有热处理要求的容器，试板应随容器一起进行热处理。

7.7.3 试板的尺寸应满足试验所需的试样类别和数量的截取要求。对接接头试板尺寸，长度大于等于400mm，宽度大于等于150mm。

7.7.4 当设计对产品试板的数量有要求时，应按照设计文件执行，当无要求时建议按照5套塔筒为一个批次制作产品试板。

7.7.5 产品试板制作应能覆盖所有母材厚度、焊接方法和焊接位置，焊接完成后送具有相关检测资质的单位进行检验。

7.8 表面防腐处理

7.8.1 海上风力发电系统的设计运行年限为 25 年，海上平台防腐涂层系统的设计寿命不得小于风力发电系统的设计运行年限。风力发电机组暴露于腐蚀环境的实际情况，根据 ISO 12944-2 的要求，塔筒的外表面属于CX腐蚀类别，内表面属于C4腐蚀性类别，防腐保护等级满足ISO 12944-1 的要求。塔筒的涂层性能要求：

涂层性能	检验标准	涂层性能要求
涂层厚度	GB/T13452.2	达到各配套方案的厚度要求
硬度	GB/T1730	达到产品硬度指标
附着力	GB/T 5210	达到5MPa以上
耐冲击性	GB/T1732	用4倍放大镜观察无裂纹、皱皮及剥落
柔韧性	GB/T1731	涂层在弯曲后用4倍放大镜观察无网纹、裂纹及剥落等破坏现象

耐盐水性	GB/T1763	涂层无剥落、起皱、生锈和失光现象
------	----------	------------------

7.8.2 筒体除锈前应清除钢板表面的油污、油脂及各种残留物等。筒体喷涂前宜采用喷砂或喷钢丸除锈，喷砂或喷丸后工件表面应干燥、无灰尘、无油污、无氧化皮、无锈迹，筒体表面粗糙度应达到Rz40 μm ~Rz100 μm ，除锈等级达到GB/T 8923中的Sa2.5级规定，热喷锌区域要求达到Sa3级规定。

7.8.3 除涂层修补外，钢结构涂装应在室内完成。

7.8.4 喷砂或喷丸除锈后应尽快进行涂装施工，在符合技术规范条件下，涂装间隔时间按涂料施工技术要求执行。通常在4h之内进行涂装。

7.8.5 防腐施工过程，环境相对湿度 $\leq 85\%$ ，钢材表面温度高于露点温度至少 3°C ，且防腐过程中钢材表面应保持干燥。

7.8.6 塔段表面的整体或局部热喷镀锌要求按GB/T9793的规定，锌层厚度应在50 μm ~100 μm 。热喷锌时相对湿度不得超过80%，钢板温度应高于露点温度 3°C 以上。

7.8.7 油漆涂装施工应符合ISO 12944-5的规定，不允许露天作业，当温度低于 5°C 或高于 40°C 时，必须采取措施来提高气候条件到可以接受的范围。油漆涂装相对湿度小于85%，且钢板温度不高于露点 3°C 。

7.8.8 涂层外观应色泽均匀、平整、有光泽，表面不允许有鱼眼、裂纹、剥落、针孔、流挂、起皱、起泡等缺陷。干膜测厚区位置应随机选择，塔段内外表面至少每 5m^2 为一个测区，每区至少3个测量点。测量结果平均值作为该区的涂层干膜厚度值，塔段所有测区的干膜厚的平均值作为该段塔筒的干膜厚度值。

7.8.9 塔段表面涂层各层厚度值由设计单位按下列三个规则选用一个，作为检查的依据：

- 1) 80-20评定规则：所有测量点中80%测点的测量值不应低于规定的干膜厚度，其余20%测点的测量值不应低于规定干膜厚度的80%；
- 2) 90-10评定规则：所有测量点中90%测点的测量值不应低于规定的干膜厚度，其余10%测点的测量值不应低于规定干膜厚度的90%；
- 3) 最小干膜厚度原则：所有测点的测量值不应低于设计要求的规定值。

最大干膜厚度不应大于规定值的3倍。

7.8.10 必要时应制作涂层试板，涂层附着力按照GB/T5210或GB/T9286进行检测，单个测试值不小于5MPa，平均值不小于6MPa。

8 检验

8.1 检验类别

产品检验分为出厂检验和型式检验，有下列情况之一时应进行型式检验：

- 1) 新产品的试制定型鉴定时；

- 2) 产品的设计、工艺等方面有重大改变时;
- 3) 出厂检验的结果与上次型式检验有较大差异时;
- 4) 国家质量监督机构要求进行型式检验时;
- 5) 定期对产品进行抽检时;
- 6) 在使用中出现重大偏差时。

8.2 塔筒实物质量应分为外部质量与内部质量。外部质量包括表面粗糙度、尺寸公差、重量公差、表面缺陷;内部质量包括材料力学性能、化学成分。

8.3 检验人员应是专职质量管理人员、质检员和试验员,检测用具、仪器及设备应符合计量检定和质量检测要求,能够提供精确可靠的检测数据。

8.4 塔筒应至少由制造单位质量检验部门检查和验收。需方要求参加供方检验时,双方应商定检验日期,若需方在商定的时间内未能到场,供方可自行检验并将检验结果提交需方。

8.5 过程检验和出厂检验时抽检不合格,应在同一批产品中抽取双倍数量的产品,对不合格项进行复检,如仍不合格,则应对同一批产品100%进行检验。产品在过程检验和出厂检验出现不合格,或使用时出现质量问题时,需方将根据需要加大抽检比例。

8.6 首批产品抽检,需方可根据需要加大抽检比例或全检。如一个批次按比例抽检数量少于一套时,按一套抽检。

8.7 塔筒按设计文件规定的出厂检验项目采用全数出厂检验,并由制造单位质检部门检验合格,出具产品合格证书并经需方监理工程师认可后方可出厂。

9 附件制作与安装

9.1 塔筒所有钢制附件按施工图样下料、制作,尺寸公差 $\leq \pm 3$ mm,切割边缘倒角 $R \geq 2$ mm。棱角处应平滑过渡,去除边角处的毛刺。

9.2 要求喷涂的附件按设计要求与塔段同工艺喷涂,要求热镀锌的附件按设计文件的规定制作。

9.3 塔内涂层应充分干燥后,方可进行附件安装。安装过程中,应保持塔内表面的清洁,避免损伤漆面。梯子及梯子支撑应安装牢固,上下成直线。门板装配应保证与门框贴合紧密,开闭灵活,无卡阻现象,门板开启后应有锁定装置。塔筒平台板的支撑梁或相应支撑结构的上平面在装配时应粘贴厚度为2mm~8mm的橡胶板。附件装配时螺栓连接件应按设计规定的力矩紧固。

10 完工资料及随机文件

10.1 塔筒完工后应及时汇编各工序的检测报告,包括但不限于以下文件:

10.1.1 塔段的制作和焊接的完工资料包括以下文件:

- 1) 主体钢材、法兰质量证明书;

- 2) 材料清单;
- 3) 焊接报告;
- 4) 主体钢材、法兰质量检测报告;
- 5) 无损检测报告;
- 6) 塔段的几何尺寸检测报告;
- 7) 减震装置的泄漏试验报告(若存在时);
- 8) 焊缝工艺评定报告;
- 9) 筒体、门框、法兰理化性能检验报告
- 10) 塔筒椭圆度、同心度、垂直度等检验记录
- 11) 焊接过程记录

10.1.2 表面处理的完工资料包括以下文件:

- 1) 表面处理方案;
- 2) 表面处理记录;
- 3) 表面处理返修记录。

10.1.3 最终检验和交付完工资料包括以下文件:

- 1) 附件安装检验报告;
- 2) 第三方监理报告(若存在时);
- 3) 产品发货清单。

10.1.4 制作过程中的设计变更文件(若存在时)。

10.1.5 制造厂对竣工资料应存档,保存期至少5年。

10.2 标志、包装、储存

10.2.1 生产厂家可按照GB/T13306制作标牌,标牌内容应包括制造单位名称、产品名称、出厂编号、出厂日期,标牌材质应选用不易腐蚀的材料。

10.2.2 同一台塔筒上、下段对接标识,塔体下法兰与基础环上法兰对接标志按有关图样要求标注。

10.2.3 包装应根据塔筒的结构尺寸、重量大小、运输方法(铁路、公路、水路)等特点进行,保证其安全可靠地运达目的地。

10.2.4 塔筒应待涂层完全固化并经检验合格后,方可进行包装。

10.2.5 塔段成品应存放在开阔、洁净、平整的场地,塔段成品应放置在楔形垫木或支架上,楔形垫木或支架与塔筒之间应放置缓冲物。

10.2.6 露天存放时,应确保储存场地有良好的排水设施,不会积水以免浸泡塔段。

10.2.7 塔段两端应设置防雨布,防雨布应完好。

10.2.8 放置塔段时,宜将爬梯放置在6点钟方向。

10.3 运输

10.3.1 运输前，塔筒内升降机护栏门、平台翻盖门、塔筒门等活动部件应可靠固定。电缆、照明等电气设备应做好防水措施并固定在爬梯等附件上。

10.3.2 海上运输船舶应满足运输沿线国家和地区航运的相关要求。船舶应具有足够的载重能力、纵强度、横强度以及扭转强度；设备积载区域应具有足够的局部强度，并应清洁干燥。塔段在运输过程中应可靠固定。运输过程中不应擅自移动设备位置，且不应拆除设备运输支架。

10.3.3 塔段的吊运不应破坏涂层，吊装工具应采取可靠防护措施，避免与涂层直接接触。

10.3.4 随机零部件应按使用部位分类包装，并采取必要的防护措施，确保在装卸及运输过程中不被磕碰损坏。零部件应有标志，涵盖零部件名称与图号。标志粘贴在零部件表面，并用透明胶带进行可靠防护和固定。标志不应褪色、脱落。

10.3.5 应采取有效措施防止塔段和法兰在储存、运输过程中产生变形。

11 塔筒组装

11.1 设备部件各组装阶段的安装偏差，应遵守风机设备厂家技术文件中指定的专用技术标准。

11.2 承包人在卸货时应按照风机设备厂家技术文件的要求对塔筒及其组件进行各项检查，塔筒卸货时，风速 $\leq 10\text{m/s}$ ，无雨雪、雷电等恶劣天气。塔筒装卸时，应严格按照设备厂家提供的安装作业指导书进行装卸。塔筒在放置期间，底部不能与地面直接接触；塔筒两端用防雨布封堵；塔筒节放置时，轴线方向与主风向一致；同一台机位卸车时，须确保各段塔筒及附件成套、匹配。塔筒内电器设备要做好防雨、防潮等保护措施。

11.3 塔筒吊装前，需要对基础平整度水平度、基础接地电阻进行测量与验收，安装后基础顶法兰水平度应符合设计要求及相关规范标准，接地电阻应小于 4Ω 。

11.4 螺栓预紧器具进行检查并进行标定。

11.5 设备部件各组装阶段的安装偏差，应遵守风机设备厂家技术文件中指定的专用技术标准

附录 A

塔筒原材料选用推荐

表 A.1 塔筒钢材选用推荐

部件	材料		公差要求	备注	
	低温机型	常温机型			
塔架	筒体	钢板选材 (C 板、D 板、E 板后 Z 向性能) 根据机组生存温度和 Eurocode 3 Part 1, 10 - prEN 1993-1-10-2023-03 设计		GB/T 709-2019 C 级	
	法兰	Q355E-Z35	Q355E-Z25	参考图纸	整体锻件制造
	门框	Q355E-Z35	Q355D-Z25	GB/T 709-2019 C 级	正火或控制轧 制状态交货
	梯子、平台、等附件	Q235A/B	Q235A/B	/	/

注：设计单位可根据塔筒载荷选用Q390及以上级别高强钢，选用高强钢需注明其交货状态。

表A.2 塔筒焊材选用推荐

钢种	牌号	焊条电弧焊		埋弧焊				气体保护焊			
		焊条 牌号	焊条 型号	烧结焊剂与 配用焊丝		熔炼焊剂与 配用焊丝		实芯 焊丝 ER49-1	保 护 气 体 CO2 或 CO2 +Ar2	药 芯 焊 丝 E501T-1 E501T-5 E501T-6	保 护 气 体 CO2
				烧结 焊剂	配用 焊丝	熔炼 焊剂	配用 焊丝				
碳 素 钢	Q235A、B	J422	E4303	/	/	HJ431	H08A H08MnA			E501T-1	
低 合 金 钢	Q355C	J506	E5016	SJ101	H10Mn2 H08MnA	HJ431 HJ350	H08MnA H10Mn2	ER50-2 ER50-6 ER50-7		E501T-1 E501T-5 E501T-6	CO2
		J507	E5015								
	J506H	E5016-1									
	J507RH	E5015-G									
Q355E	J507RH J507TiB	E5015-G	SJ101	H10Mn2 H08MnA	/	/	/	/	E501T-1 L/5L/6L		

注：Q390及以上级别高强钢焊材选用可参考NB/T47018。

附录 B

塔筒焊缝无损检测推荐

检测部位		合格 级别	探伤方法、探伤比例		
			超声波探伤	射线探伤	磁粉探伤
塔筒纵、环缝	执行标准：NB/T 47013.2、NB/T	I 级	100%		100% (板 厚>30mm)
T型接头		II 级	100%	所有T型接头	
门框拼接焊缝	47013.3和NB/T	I 级	100%		100%
法兰与筒体焊缝	47013.4	I 级	100%		100%
门框与筒体焊缝		I 级	100%		100%
筒体环焊缝接头重叠部位		I 级	100%		100%
与筒体焊接的承重附件		I 级	按图纸执行		100%

备注：与筒体焊接的承重附件包括但不限于平台支撑、吊耳、外爬梯与筒体连接耳板等承重大于50kg的焊接附件。必要时可使用相控阵超声检测、衍射时差法超声检测代替射线检测。