

混凝土塔筒安装技术在风力发电安装工程中的应用

黄海云 于红玉

广西建工集团第二安装建设有限公司

摘要: 近几年来,随着能源与环境的矛盾日益凸显,环保节能成为中国电力工业结构调整的重要方向。风力发电作为一种新型的清洁能源越来越受到重视,并且风力发电机组的单台容量有逐年上升的趋势。因此这对风机的塔架高度提出了更高的要求,钢-混凝土混合式风力发电机组塔筒应运而生。这种混合式结构具有制作便捷,施工快捷,结构稳固同时又能降低成本,最重要的是这种结构能够将风机轮毂高度提升120m以上,能更好地利用风力资源。本文结合装机容量为10台单机容量5MW风机的风电项目,采用了混塔基础安装技术,该技术具有工效高、安全性好、质量可靠等优点,在保证质量与安全的前提下,能有效提高施工效率,降低施工成本。

关键词: 混凝土塔筒; 风机塔筒; 风机基础; 风力发电

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.16.037

21世纪清洁能源将会成为全球重要的能源发展方向,钢筋混凝土风电塔筒是一种用于支撑风力发电机组的结构,通常由混凝土和钢筋构成。它们通常被用于海上和陆上的风电场,以支撑风力发电机组和风叶。钢筋混凝土风电混塔具有承载能力强、抗裂性能好、刚度较小,可以承受高速风和恶劣天气条件下的挑战。随着风电开发逐渐由我国西北风资源丰富的地区向中东部丘陵及南方平原低风速区域发展,风力发电机组大容量、长叶片和高塔架机组成为风电项目建设的一大趋势^[1]。

一、工程概况

本文依托的项目为10台单机容量5MW风力发电机组的混凝土塔筒吊装及安装。每台混凝土塔筒由1#混塔、2#混塔、3#混塔、4#混塔及过渡段构成。每段混塔均由4片圆角段及4片平板段现场拼装、灌浆组成。其中1#混塔在设备基础位置拼装、灌浆,无须二次吊装;2#、3#、4#混塔先在基础附近的组装平台进行拼装、灌浆,达到设计强度后进行整段吊装^[2];过渡转换环为成品构件,可直接整体吊装。

二、技术优势

设备先进、技术成熟。运用精密水准仪、经纬仪综合测量技术,同步配合,快速测量、调效混凝土混塔构件的安装标高、水平度和平行度。

工艺合理。从混塔预拼到混塔吊装,施工方法科学合理,操作简单。

三、混凝土塔筒安装技术要点

(一) 基础质量验收

(1) 混塔安装前项目技术负责人会同业主、监理对风机混凝土基础进行验收,确保风机基础合格。

(2) 检查基础环法兰与混塔底法兰对按标记。

(3) 确保基础环法兰上平面水平度在2mm之间为一

平面,没有严重的损伤和变形。使用水平仪在法兰表面四周取六个均匀分布的点测量水平,效验基础环的水平度误差,做好记录。

(二) 1#混塔安装

(1) 将调平垫片调平,确保接地端子正确配置且能够连接方便。接着将地脚螺栓安装到基础锚栓中。

(2) 使用220t汽车起重机和100t汽车起重机同步起钩至圆角段距离地面2m左右时,100t汽车起重机停止起钩,保持起重量,220t汽车起重机继续起钩,直至圆角段竖直吊起。然后将下端吊具拆除,调出转杆至基础正上方。

(3) 起重指挥人员指挥汽车起重机将圆角段放入M36地脚螺栓,放在调平垫片上;(垫块可采用电木或钢。当采用钢等硬质材料时,垫块上部尚应放置橡胶片(1mm)可变形材料,使得垫块与预制管片之间形成有效接触面,防止应力集中)。

(4) 通过经纬仪检查圆角段垂直度(即y坐标),用撬棍和液压千斤顶调节节段高度。检查节段倾斜度(标板上的Z坐标),调节节段的倾斜度,达到标准范围内,检查节段位置(标板上的X坐标),用撬棍调节节段高度。

(5) 连接锚栓和锚垫板,将底端与基础间连接螺栓紧固;

(6) 采用高空作业车载人至顶部拆除圆角段上方吊具位置,将吊具拆除,主汽车起重机松钩,进行其余三段圆角段的安装。

(7) 圆角段对角安装连接相邻圆角段连接定位连接杆,可以适当调整圆角段位置,保证其上口尺寸。

(8) 平板段安装

司索工将吊具安装至一片平板段两端,上下端分别挂到220t汽车起重机和50t汽车起重机吊钩上。汽车起重机缓慢起吊至平板段距离地面2m左右时,50t汽车起重机停止起钩,保持起重量,220t汽车起重机继续起钩,直至平板段竖直吊起,工作人员将下端吊具拆除。

在吊装过程中,应保持平板段侧向垂直,严禁横向水平起吊。

220吨吊车缓慢旋转机身,将平板段靠近两圆角段中间区域,缓缓放置到调平垫片上。

检查相邻构件的顶端和底端表面是否平齐,如有偏差,则需通过调平垫片调节构建位置,直至到达正确位置。

在混塔内部通过支架将平板段与圆角段稳固连接,如果有必要,可以在支架与混塔构件之间加装垫片;将地面连接螺栓临时紧固至额定力矩。

操作人员从混塔内部到达顶部,将吊具取下,主吊车松钩。

在1#混塔顶端安装好地脚螺栓,为下一段混塔组装

做好准备。

(9) 竖向缝灌浆施工步骤

灌浆前，需先把升降平台吊放至混塔内，以便进行灌浆操作。注浆完成以后，把注浆管切除；把切割完的注浆口在进行打磨，表面打磨平整；可以进行下一步吊装。

(10) 内附件的安装

混塔内附件按设计图纸逐个进行安装，包括爬梯、防坠落系统、平台（每节设有钢平台，便于塔内工作及维护）、必要的照明及消防设施、工作用插座、电缆夹及桥架等。

(三) 2#、3#、4# 混塔预安装

2#、3#、4#混塔先在基础附近的组装平台进行拼装、灌浆，达到设计强度后进行吊装；过渡转换环为成品构件，可直接整体吊装。

(四) 2#、3#、4# 混塔及过渡转换环吊装

(1) 全面检查需要起吊的2#混塔是否有明显剥落，油漆有无损伤，有损伤的按照技术规范要求进行修复。检查确定跨竖缝铜带安装就位。

(2) 清除底段混塔上端面的杂物，检查1#混塔顶部水平度和2#混塔底部水平度，通过调整垫块保证2#混塔垂直度。

(3) 底段混塔顶部所有地脚螺栓已经安装就位，确定底段混塔上端面密封胶条已经环向粘贴搭接密封。

(4) 用500t履带式起重机起钩至2#混塔顶部，操作人员从混塔内部到达2#混塔顶部临时平台，将吊具平衡梁安装至混塔预埋吊耳上，固定牢固。地面工作人员在2#混塔底段相对固定两条缆风绳，用于控制吊装过程中的混塔方位。

(5) 将2#混塔与预装平台之间的连接螺母全部拆除。

(6) 试吊。将2#混塔缓慢起至距离地面约0.5m高度，检查吊车的稳定性、吊具及混塔是否牢固、平稳，确定合格后，吊至地面1.5m高，地面人员清除2#混塔底端面的杂物。

(7) 吊车起吊混塔至底段混塔上端面处，高空起重指挥人员指挥吊车使2#混塔下端缓缓下降直至所有孔位穿入地脚螺栓，小心放置混塔至调平垫片上。

(8) 混塔顶面采用水平尺进行初步找平，对于水平偏差较大的部位通过专用垫片进行调整。

(9) 在进行上节混塔吊装时，采用卷尺测量安装缝隙宽度。采用水平尺和卷尺测量混塔内边缘壁的错边量。

(10) 垂直度^[3]采用经纬仪测量混塔标记线的方法进行垂直度测量。在每接混塔的外壁标记十字核准线。每段混塔至少在两个方向进行标记。

(11) 在进行混塔安装时，采用两台经纬仪同时检测混塔十字标记线，当经纬仪中十字标记线与下塔节同时对正时，根据结果实时修正调整垫片厚度，完成混塔安装。当偏差较大时，通过小型千斤顶进行调整。

(12) 重复以上安装步骤，完成3#、4#混塔及过渡转换环安装。

(五) 灌浆

(1) 第一塔节横缝灌浆

将灌浆料倒入横缝处。倒浆过程应缓慢而稳定，不可高速倾倒，清理墙上，地板垫片，地基及设备所有溢出的灌浆料。

(2) 其他节横缝灌浆

先将底部横缝结合面打磨干净，表面要求无油、无尘、无杂质；在横缝方向粘上密封橡胶密封，在泡沫棒内侧采用密封胶进行密封；等密封胶完全固化以后开始灌浆。

将注射枪插入横缝密封橡胶内，缓慢注射砂浆，直到前方所有位置均填充满材料，将注射枪慢慢从接缝处移出，确保灌浆料填充在调平垫片和密封橡胶间的空隙内，在接缝处形成接缝，并使其固化。清除溢出浆料。在保质保量填充完一层后，将注射枪移至下一顺序，并重复该过程，直至完成接缝所有砂浆的填充。

(3) 纵缝灌浆

密封垫安装

在拼装完成的塔节外侧缝隙嵌入密封垫（密封条），并在竖缝处放置2个专用直径为14mm的钢筋。

除第一塔节外，第二、三、四塔节均在地面预制拼装，拼装完成后灌浆前，先在在竖缝底部，安装密封垫。

注浆顺序要求。

受结构限制，第一序列注浆自上而下，其余注浆均自下而上。

注浆

在进行灌浆时，应不断对混合进行一致性评估。如果对一致性有任何疑问，立即停止注浆，并进行流动性测试。在注浆过程中，必须规范灌浆压力和抽运速度，保证灌浆过程稳定可控。

注浆过程：打开装配件阀门，开始注浆。待灌浆通过顶部套筒组件，停止灌浆，盖上顶部套筒组件。清理

表 1 混塔参数表 来源：自制

序号	部件名称	构件高度 (m)	重量 (t)	结构底标高 (m)	结构顶标高 (m)	备注
1	1 段混塔圆角段	15.69	30.3	1.00	16.69	单体构件
	1 段混塔平板段	15.69	24.6	1.00	16.69	单体构件
2	2 段混塔	14.37	237.2	16.69	31.06	整体
3	3 段混塔	14.37	206.8	31.06	45.43	整体
4	4 段混塔	14.37	159.1	45.43	59.8	整体
5	过渡转换环	2.5	66.7	59.8	62.3	整体

溢出的灌浆料，移至下一次垂直接缝并重复上述过程，直至完成塔节上8个竖缝灌浆。

(六) 吊车选型及验算

(1) 1#混塔在设备基础位置拼装、灌浆，无须二次吊装；2#、3#、4#混塔先在基础附近的组装平台进行拼装、灌浆，达到设计强度后进行吊装；过渡转换环为成品构件，可直接整体吊装，具体参数如表1所示。

(2) 采用220t汽车起重机一台，50t汽车起重机一台进行第1、2、3、4段混塔拼接。采用500t履带式起重机一台进行第2、3、4段混塔及过渡转换环吊装。

(3) 1#混塔由4片圆角段与4片平板段构成，安装高度为+1m，构件高度均为15.49米，上述8片构件均单独吊装，拟采用220吨汽车吊及50吨汽车吊联合作业。220吨吊车为主吊，50吨吊车为辅吊，配合完成构件翻身作业。

(4) 2#混塔拟整体进行吊装，构件单体重量237.2吨，安装高度为+16.69m，构件高度为14.37米，拟用抚顺UY500履带起重机进行吊装，该吊车使用2*250吨吊钩，总重量为13吨，吊具重量约3.5吨，吊装负荷验算如下：

2#混塔总重量 $G=G^0+G^1+G^2=237.2+13+3.5=253.7$ 吨，经实际现场核实吊车中心到构件中心线距离为18m，后配重160吨，车身压重40吨，查抚顺UY500履带起重机超起工况性能表，当吊装幅度18m，吊臂长度54m时，额定起重量为336吨。336吨>253.7吨，负荷率75.5%，结论：满足荷载要求。

2#混塔安装高度为16.69米，构件高度为14.37米，吊装时高出1#混塔平面1米，吊具高度为10.5米，吊钩及预留高度5m，吊装高度计算： $16.69+14.37+1+10.5+5=47.56$ 米，吊车实际可吊装高度 $\sqrt{54^2-18^2}=50.91\text{m}>47.56\text{m}$ ，结论：吊装高度满足要求。

(5) 3#混塔拟整体进行吊装，构件单体重量206.8吨，安装高度为+30.06m，构件高度为14.37米，拟用抚顺QY500履带起重机进行吊装，该吊车使用250吨吊钩，重量为6.5吨，吊具重量3.5吨，吊装负荷验算如下：

3#混塔总重量 $G=G^0+G^1+G^2=206.8+6.5+3.5=216.8$ 吨，经实际现场核实吊车中心到构件中心线距离为18m，后配重160吨，车身压重40吨，查抚顺UY500履带起重机超起工况性能表，当吊装幅度18m，吊臂长度66m时，额定起重量为278吨。278吨>216.8吨，负荷率77.98%，结论：满足吊装需要。

3#混塔安装高度为31.06米，构件高度为14.37米，吊装时高出2#混塔平面1米，吊具高度为7.48米，吊钩及预留高度5米，吊装高度计算： $31.06+14.37+1+7.48+5=58.91$ 米，吊车实际可吊装高度 $\sqrt{66^2-18^2}=63.49\text{m}>58.91\text{m}$ ，结论：吊装高度满足要求。

(6) 4#混塔拟整体进行吊装，构件单体重量159.1吨，安装高度为+45.43m，构件高度为14.37米，拟用抚顺QY500履带起重机进行吊装，该吊车使用250吨吊钩，重量为6.5吨，吊具重量3.5吨，吊装负荷验算如

下：

4#混塔总重量 $G=G^0+G^1+G^2=159.1+6.5+3.5=169.1$ 吨，经实际现场核实吊车中心到构件中心线距离为18m，后配重160吨，车身压重40吨，查抚顺QY500履带起重机超起工况性能表，当吊装幅度18m，吊臂长度78m时，额定起重量为212吨。212吨>169.1吨，负荷率79.76%，结论：满足吊装需要。

4#混塔安装高度为45.43米，构件高度为14.37米，吊装时高出3#混塔平面1米，吊具高度为6.5米，吊钩及预留高度3.5米，吊装高度计算： $45.43+14.37+1+6.5+3.5=70.8$ 米，吊车实际可吊装高度 $\sqrt{78^2-18^2}=75.89\text{m}>70.8\text{m}$ ，结论：吊装高度满足要求。

(6) 过渡转换环拟整体进行吊装，构件单体重量66.7吨，安装高度为+69.8m，构件高度为2.5米，拟用抚顺QY500履带起重机进行吊装，该吊车使用250吨吊钩，重量为6.5吨，吊具重量3.5吨，吊装负荷验算如下：

过渡转换环总重量 $G=G^0+G^1+G^2=66.7+6.5+3.5=76.7$ 吨，经实际现场核实吊车中心到构件中心线距离为20m，后配重160吨，车身压重40吨，查抚顺UY500履带起重机超起工况性能表，当吊装幅度20m，吊臂长度78m时，额定起重量为211吨。211吨>76.7吨，负荷率36.35%，结论：满足吊装需要。

过渡转换环安装高度为59.8米，构件高度为2.5米，吊装时距离第一段混塔高度为1米，吊具高度为4.2米，吊钩及预留高度4米，吊装高度计算： $59.8+2.5+1+4.2+4=71.5$ 米，吊车实际可吊装高度 $\sqrt{78^2-20^2}=75.89\text{m}>71.5\text{m}$ ，结论：吊装高度满足要求。

(七) 验收内容

(1) 塔架规格型号、外形尺寸、垂直度、端面水平度、标高是否符合设计要求。

(2) 接面的紧固螺栓强度是否符合设计要求

(3) 横缝及纵缝施工工艺是否符合设计要求。

四、结语

随着全球对可再生能源的需求不断增加，钢筋混凝土风电塔筒的应用前景将会越来越广阔。本项目采用混凝土塔筒安装技术缩短了混塔安装工期，降低了施工成本，施工质量良好，达到了预期效果。

参考文献

[1] 何滢. 张光毅. 40米钢混塔架装配式混凝土段吊装工艺研究[J], 中国电力企业管理. 2022(03), 90-91.

[2] 吴琥珀. 张世佳. 混凝土塔筒安装工艺的工期优化, 工程建设与设计. 2023(01), 171-175.

[3] 李海涛. 张靖. 李建民. 韩旭. 樊志国. 浅谈某风机基础混凝土强度和风机塔筒垂直度检测[J], 工程质量. 2023, 41(06), 103-106.

作者简介：黄海云(1981-)，女，广西柳州人，广西大学化学化工学院，高级工程师，主要从事机电工程施工技术研究。

于红玉(1990-)，女，广西贺州人，广西科技大学，工程师，主要从事机电工程施工技术研究。