

# 风电土建基础与塔筒连接技术研究

彭爱民

中国电建集团四川工程有限公司 四川 成都 610031

**摘要：**随着全球对可再生能源需求的日益增长，风电作为清洁能源的重要组成部分，其发展速度迅猛。风电塔筒作为风力发电机组的支撑结构，其稳定性与安全性直接关系到风电场的运行效率与经济效益。本文旨在深入探讨风电土建基础与塔筒连接技术，从连接方式的分类、受力特点、安装工艺、施工周期、经济性以及质量控制等方面进行全面分析，为风电行业提供理论参考和技术指导。

**关键词：**风电；基础；塔筒；连接

## 引言

风电塔筒与基础的稳固连接是确保风力发电机组长期安全运行的关键。传统的连接方式包括螺栓连接、预埋连接和焊接连接等，每种方式都有其独特的优缺点及适用范围。近年来，随着技术的不断进步，预应力锚栓笼等新型连接方式逐渐受到关注。本文将系统介绍这些连接方式，并分析其在实际应用中的表现。

## 1 风电土建基础与塔筒连接方式分类

### 1.1 螺栓连接

螺栓连接是风电土建基础与塔筒连接中的关键方式。它利用高强度螺栓穿过预留孔洞，并通过紧固螺母产生强大的摩擦力，实现稳固连接。此方式安装便捷，易于拆卸和调整，特别适用于地形条件简单的风电场。然而，螺栓连接对材质、紧固力矩有严格要求，需采用高强度螺栓并精确控制紧固力矩，以防断裂、变形或连接不稳。此外，定期的检查和维护也是确保螺栓连接长期稳定的必要措施，包括检查螺栓紧固状态、裂纹和腐蚀情况，及时修复或更换损坏部件。

### 1.2 预埋连接

预埋连接是风电土建基础与塔筒连接的另一种重要方式。它通过在浇筑混凝土前预置膨胀螺栓等预埋件，并将其与塔筒和基础紧固连接，形成整体结构。此方式优点在于连接稳固、受力均匀，能有效传递风力、重力等载荷，提高结构安全性。但需注意预埋件的防腐措施和与混凝土的锚固效果，确保其长期稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。同时，施工过程中需精确控制预埋件位置和深度，并注重施工质量控制，以保证连接的稳固性和耐久性。

### 1.3 焊接连接

焊接连接是风电土建基础与塔筒连接的关键技术，通过熔融金属实现高强度、稳定连接。其优势在于连接强度高，能承受各种载荷。然而，焊接连接具有不可调

整性，要求前期定位精确。同时，焊接材料需选用高强度钢材，确保连接安全稳固。施工过程中，需严格控制焊接参数，保证焊缝质量，并进行必要的热处理以消除残余应力和裂纹。此外，定期检查焊缝完整性，及时修复或更换损坏部位，以维持连接的最佳状态。

## 1.4 预应力锚栓笼连接

### 1.4.1 组成与结构

预应力锚栓笼连接主要由以下几个关键组件构成：

(1) 上锚板与下锚板：作为连接的主要承载部件，上锚板和下锚板均经过严格选材和厚度计算，以确保其能够承受塔筒传递的巨大载荷。这些锚板通常采用高强度钢材制成，具有优异的承载能力和耐久性。(2) 锚栓：作为连接的核心部件，锚栓的材质、直径和长度均经过精确选定。锚栓通过液压张拉器施加预张拉力，与基础混凝土形成紧密的结合，从而增强连接的稳固性。(3) 锚栓套管：用于保护锚栓免受混凝土浇筑过程中的污染和腐蚀，同时确保锚栓在混凝土中的正确位置。

### 1.4.2 工作原理

预应力锚栓笼连接的工作原理基于预应力力学原理，通过以下步骤实现塔筒与基础之间的高效连接：将预应力锚栓组合件（包括上锚板、下锚板、锚栓及套管）按照设计要求安装到基础上。使用液压张拉器对锚栓施加预张拉力，使锚栓与基础混凝土之间形成一个弹性体。这一步骤不仅增强了连接的稳固性，还有效地发挥了混凝土的抗压性能优势。在施加预张拉力后，对锚栓组合件进行固定，并根据需要进行调整以确保连接的精确性和稳固性。

### 1.4.3 优势与特点

与传统的连接方式相比，预应力锚栓笼连接具有以下显著优势：一是高效承载：通过精确的设计和安装，预应力锚栓笼连接能够更有效地分散和承受塔筒传来的

载荷,提高基础的承载能力和稳定性。二是耐久性强:由于采用了预应力技术,连接部位在长期使用过程中能够保持较好的稳定性和耐久性,减少因疲劳破坏导致的维修和更换成本。三是安装精度高:预应力锚栓笼连接允许在安装过程中进行精确的紧固程度控制,避免了因紧固不足或过度而导致的连接问题。四是适应性强:该连接方式允许在必要时进行一定的调整以适应不同的安装条件和要求,提高了施工的灵活性和效率。

#### 1.4.4 安装注意事项

在预应力锚栓笼连接的安装过程中,需要注意以下几点以确保施工质量和安全:(1)严格遵循设计要求:按照设计图纸和施工方案进行安装,确保各组件的规格、尺寸和位置符合设计要求。(2)加强质量控制:对锚栓、锚板等关键部件进行严格的质量检查和控制,确保其材质、性能和质量符合标准要求。(3)注意施工安全:在安装过程中加强安全管理和监督,确保施工人员遵守安全操作规程和防护措施,防止发生安全事故。(4)做好验收工作:在安装完成后进行严格的验收工作,检查连接部位的紧固程度、稳定性和密封性等指标是否符合设计要求和质量标准。

## 2 受力特点分析

### 2.1 螺栓连接与预埋连接的受力特点

螺栓连接主要通过高强度螺栓的剪切力和预紧力来传递塔筒与基础之间的载荷。其受力特点主要体现在受力路径明确、需要考虑疲劳强度。具体来说,螺栓作为直接传递载荷的元件,其受力路径清晰,便于进行力学分析和设计校核<sup>[2]</sup>。同时,由于风电机组在运行过程中会受到周期性的风荷载作用,螺栓连接处可能会产生疲劳损伤,因此在设计中需要特别考虑螺栓的疲劳强度,确保其在长期运行中的可靠性。预埋连接则是通过预先埋在混凝土基础中的预埋件(如膨胀螺栓等)与塔筒进行连接。其受力特点表现为受力均匀、锚固作用显著。具体来说,由于预埋件与混凝土基础紧密结合,通过预埋件传递的载荷能够较为均匀地分布在基础内部,减少了局部应力集中的现象。同时,预埋件与混凝土之间的锚固作用是保证连接稳定性的关键,良好的锚固效果能够确保预埋件在承受载荷时不会与混凝土发生脱粘或拔出。

### 2.2 焊接连接的受力特点

焊接连接通过焊缝将塔筒与基础牢固地连接在一起,其受力特点主要体现在焊缝质量对连接强度的影响上。焊缝的质量直接决定了焊接连接的强度和韧性,优质的焊缝应具有良好的连续性和致密性,无裂纹、夹渣等缺陷。在焊接过程中,需要严格控制焊接参数,如电

流、电压、焊接速度等,以确保焊缝的质量。不合适的焊接参数可能导致焊缝出现缺陷,进而影响连接的强度和稳定性。此外,焊接过程中会产生残余应力,这些应力可能会对连接结构的性能产生影响。

### 2.3 预应力锚栓笼连接的受力特点

预应力锚栓笼连接通过锚栓的预张拉力使基础整体处于受压状态,从而充分发挥混凝土的抗压性能优势。其受力特点主要体现在以下几个方面:首先是整体受压,预应力锚栓笼连接通过预张拉力使基础内部产生压应力场,使基础整体处于受压状态。这种受力状态不仅有利于发挥混凝土的抗压性能,还提高了基础的承载能力和耐久性能<sup>[3]</sup>。其次是减少拉裂缝,在正常工况下,由于基础整体处于受压状态,混凝土不易产生拉裂缝,这有助于保持基础的完整性和稳定性,从而延长基础的使用寿命。

## 3 质量控制措施

### 3.1 防腐措施

风电塔由于其长期处于户外环境,极易受到氧化腐蚀的影响,特别是在连接部位,更是腐蚀的重点区域。因此,针对连接部位的防腐措施显得尤为重要。首先,要从环境因素入手,严格控制连接部位所处的温度和湿度。高温、高湿的环境会加速金属的氧化反应,因此,在设计和施工过程中,应尽可能选择有利于防腐的环境条件,或在必要时采取降温、除湿措施。其次,在材料选择上,优先考虑使用不锈钢材质。不锈钢具有优异的抗腐蚀性能,特别是在含氯离子的环境中,其抗腐蚀能力远远优于普通钢材。因此,在风电塔的连接部位,应尽可能采用不锈钢材质,以提高其抗腐蚀能力。最后,涂覆防腐涂料也是一项重要的防腐措施。在选择涂料时,应注重其防腐性能、耐候性能以及与基材的附着力。涂料的涂覆应均匀、无遗漏,且涂层厚度应达到设计要求。此外,还应定期对涂料层进行检查和维护,及时发现并修复涂层破损处,以防止腐蚀的进一步扩展。

### 3.2 材料与工艺控制

为确保连接点的质量符合规范要求,必须从材料检验、工艺控制、焊缝检测等多个方面入手,实施严格的质量控制措施。首先,材料检验是质量控制的基础。所有用于连接处的材料,包括钢材、焊材等,都必须经过严格的检验,确保其质量符合相关标准。特别是对于关键材料,如高强度螺栓和焊缝填充材料,更需要进行全面的性能测试,以确保其在使用过程中能够满足设计要求。其次,工艺控制是确保连接处质量的关键。在制造过程中,必须严格按照既定的工艺流程进行操作,确保

每一个环节都得到有效的控制。例如,在焊接过程中,需要控制焊接速度、焊接温度等参数,以确保焊缝的质量。同时,对于螺栓连接,需要确保螺栓的紧固力矩达到规定要求,避免出现松动或断裂的情况<sup>[4]</sup>。最后,焊缝检测是质量控制的重要环节。在连接处制造完成后,需要对焊缝进行全面的检测,包括外观检查、尺寸测量以及无损检测等。外观检查可以确保焊缝表面无裂纹、夹渣等缺陷;尺寸测量可以确保焊缝的尺寸符合设计要求;而无损检测则可以进一步确保焊缝内部无缺陷,如气孔、夹渣等。

### 3.3 紧固力矩控制

为了确保紧固力矩符合标准,防止连接部位出现松动或断裂,必须严格按照规范要求进行操作。首先,要选用合适的紧固工具,并确保其精度和可靠性。不同的螺栓规格和材质,需要不同的紧固力矩,因此,在选择紧固工具时,必须确保其能够满足特定螺栓的紧固要求。其次,在紧固过程中,要严格按照规定的紧固顺序和步骤进行操作。通常,需要先对螺栓进行预紧,然后再按照对角或交叉的顺序进行最终紧固。这样可以确保螺栓受力均匀,避免局部应力过大导致松动或断裂。同时,紧固力矩的数值也必须严格控制。在紧固前,需要根据螺栓的规格、材质以及连接部位的受力情况,计算出所需的紧固力矩。在紧固过程中,要使用力矩扳手等工具进行实时监测,确保紧固力矩达到规定要求。最后,在紧固完成后,还需要对连接部位进行检查。通过观察螺栓的紧固状态、连接部位的变形情况等,可以判断紧固力矩是否合适。如果发现松动或断裂等异常情况,必须立即进行处理,确保连接部位的稳定性和安全性。

## 4 安全控制措施

### 4.1 强化风险评估与动态监控

在施工前,组织专业团队对施工现场进行全面、细致的风险评估,识别潜在的安全隐患、环境因素及人为因素,包括但不限于地质条件、气候条件、设备状况、人员技能等。施工过程中,实施动态风险评估机制,定期或不定期地复查和调整风险评估结果,确保及时发现新出现的风险并采取措施。针对识别出的风险,制定详细的预防措施、缓解措施和应急计划,确保风险得到有效控制。

### 4.2 深入安全教育与培训

确保所有参与施工的人员,包括管理人员、技术人员、操作人员及辅助人员,都接受必要的安全教育和培

训。针对高空作业、起重作业、电气作业等特殊工种,开展专项安全培训和技能考核,确保操作人员具备相应的资质和技能。定期组织安全知识讲座、案例分析会等,更新施工人员的安全意识和知识,强化安全操作规程的执行。

### 4.3 完善安全管理体系

建立清晰的安全管理组织架构,明确各级安全管理人员的职责和权限,确保安全管理责任到人。制定完善的安全管理制度、操作规程和作业指导书,涵盖施工全过程的安全管理要求。建立安全检查机制,定期对施工现场进行安全检查,及时发现并纠正安全隐患;同时,鼓励员工积极参与安全管理,形成良好的安全文化氛围。

### 4.4 强化应急准备与响应能力

根据风险评估结果和实际情况,制定详尽的应急预案和应急响应程序,包括火灾、坍塌、触电、高空坠落等常见事故的应急处理流程。定期组织应急演练活动,模拟真实场景下的应急处理过程,提高施工人员的应急响应速度和自救互救能力。确保施工现场配备足够的应急物资和设备,如消防器材、急救箱、担架等,并定期检查和维护其完好性。同时,与当地消防、医疗等部门建立紧急联动机制,确保在紧急情况下能够得到及时有效的支援。

## 结语

风电土建基础与塔筒连接技术是风电场建设中的关键环节。通过对比分析不同连接方式的受力特点、安装工艺、施工周期和经济性,可以为风电行业提供科学合理的选择依据。在实际应用中,应结合具体工程条件和技术要求,选择最适合的连接方式,并加强质量控制和安全措施,以确保风电塔筒与基础的稳固连接和长期安全运行。

## 参考文献

- [1]王芃文.海上风电筒型基础-塔筒-风机整体浮运与沉放安全性研究[D].天津大学,2021.
- [2]胡晨.风电塔筒装配式混凝土基础节点受力性能研究[D].重庆交通大学,2021.
- [3]彭穗湘.风电机组钢塔筒结构作用效应概率分析与基础可靠性[D].长沙理工大学,2018.
- [4]韦洁,彭莎,韦妮采.超高风电塔筒竖向体外预应力施工难题及解决方案研究[J].企业科技与发展,2024,(01):102-105.