

陆上风电高强钢塔筒生产制造技术研究及应用

王敏杰 孙静怡 李 品 宋生玮 张弼畅

中国水电四局(长治)能源装备工程有限公司 山西 长治 046000

摘要:为开发利用低风速、针对位于高切变地区利用风能的挑战,提高风电机组轮毂的高度成为了必要措施。当前,工程实践中采用的高塔架解决方案主要包括三种类型:全钢结构塔筒,全混凝土结构塔筒(即全混塔筒)以及结合了混凝土与钢结构的混合塔筒(钢混塔筒),这些方案旨在优化风力资源的获取效率与成本效益。我们将三种类型的塔筒——全钢结构塔筒,全混凝土塔筒以及结合了两者优势的钢混塔筒——进行了技术特性比较。结果显示,钢混塔筒不仅集成了全钢塔筒的轻量化与全混塔筒的稳定性之长处,而且有效规避了两者的潜在局限,因此成为解决高塔架构建难题的理想选择。我们应系统回顾并概述了不同塔筒形状(包括但不限于倒角正方形,圆锥形,倒角三角形,腰形,正多边形以及“自升式”)下的钢混塔筒技术发展史及其当前的研究趋势。此部分重点分析并总结了钢混塔筒技术的演进过程,将其划分为三个显著的发展阶段与三个主要的技术流派。

关键词:风电机组;钢混合塔筒;生产工艺;技术现状

1 发展历程与现状

1.1 陆上风电高强钢塔筒技术演进脉络

风电产业发展如火燎原,陆上风电高强钢塔筒技术的演进则更像是一场隐秘而深刻的材料蜕变之旅,初期塔筒多依赖普通钢材制造,但面对极端复杂气况与长期使用考验这类材料强度略显疲软稳定性也乏善可陈,风电规模扩张伴随单机容量攀升让塔筒承载力问题愈发突出,高强钢由此成为研究重心,最先引入的只是部分略高强度钢材焊接工艺稍作改良而后专用性较强的屈服强度提升兼顾韧性平衡的特制高强钢才粉墨登场,随着一系列的技术革新稳步推进目标指向逐渐明确即通过提高增高能力轻量化和增强结构稳固度完成性能跃迁这不仅回应着行业发展的迫切需求也让塔筒设计走向新维度^[1]。制造工艺告别了过去的分段加工与现场组装,朝着自动化,高精度的整体成型迈进,生产效率和产品品质因此实现了跳跃性增长,在现代化生产线里数控行走流畅切割轨迹,焊接机械臂对每个步骤的掌控都精准到位,极大降低了人为操作引入的误差,塔筒各部件在精度和规格上表现更为可靠,这轮技术进阶为陆上风电迈向规模化高效发展注入了一针强心剂。

1.2 陆上风电高强钢塔筒产业现状分析

陆上风电高强钢塔筒市场正呈现复杂的生态格局与激烈竞争局面,以全球视野来看,中国依靠丰厚的风能储备,强大的制造基础和政策推动力,已占据不可轻视的一席之地,本土许多塔筒企业迅速壮大起来,在满足国内大批风电设施建设项目需求之余还主动涉足国际市场,而在欧洲,其凭借前卫的技术理念和高标准的质

量要求,稳居高端塔筒产品的重要位置,无论从设计观念到精细加工还是基础材料应用方面都别具特色。市场竞争中各大企业通过技术创新,成本管控以及品牌塑造来争夺市场份额,部分企业深耕新型高强钢材料研发让塔筒减重同时提升性能,连带运输和安装开支也跟着削减,另有一些企业借优化生产流程搭配先进设备促使效率攀升,从而以低价策略抢占市场,产业集中度逐步上扬时大型企业便凭借规模与技术实力在市场里一家独大,中小企业则绕开正面交锋转而在特定细分市场或区域集中发力开展差异化角逐,在缝隙间寻求自身的发展天地。

1.3 陆上风电高强钢塔筒技术前沿趋势展望

未来陆上风电高强钢塔筒技术将走向多样化的前沿探索,在材料研发一侧,重心倾向推出强度,耐腐蚀性和抗疲劳表现均拔尖的全新钢材种类,比如纳米强化钢这类饱含潜力的选项,其韧性强韧之余还能维稳原本的强度属性,无论是应对苛刻环境还是追求延寿目标都游刃有余,制作工艺逐步融入智能化与数字化浪潮之中,随着大数据挖掘能力和AI算法的加入,让生产线上的监控实现动态跟踪且精度可控成为可能,这种变化无疑能进一步催升效率上限并巩固产品质量一致性表现。风电向偏远区域及高海拔复杂地形延伸时,塔筒的轻量化设计与便捷安装技术自然而然成为研究重点内容,模块化设计理念将塔筒分解为易运输,好装配的组件单元,确实能够在很大程度上缓减现场施工压力并大幅缩短所需时长,为削减环境负担,绿色制造技术逐渐融入塔筒生产环节,从初始原料挑选直至后续工艺过程中实施节能

减排优化布局，多方面驱动陆上风电朝向可持续轨道发展，也为全球清洁能源体系输送更强劲助力来源。

2 中国的钢混塔筒技术研究的三个发展阶段

2.1 初代及一代钢混塔筒技术

鉴于成本考量和技术约束，2013年初期代的钢筋混凝土风力发电塔筒采用了现场浇筑技术及滑模施工法，这一选择旨在优化资源利用并确保施工效率。采用滑模施工技术的一大显著优势在于其能够实现分段式的施工模式，同时，该方法所使用的模具设计相对简洁，不仅提高了施工效率，还有效降低了成本，体现了其在建筑工程领域的高效性和经济性。模具设计采用内壳与外壳双层结构，此配置允许根据特定的直径需求进行灵活的调整与定制。现浇式塔筒施工因受天气条件制约，极易引发裂缝问题，并且其较长的浇筑周期往往使得项目初期阶段的客户体验受到影响，这不仅限制了项目的及时交付，也对整体项目满意度构成挑战。为了有效应对现场施工挑战，天杉高科于2015年创新研发了分片预制式钢筋混凝土塔筒，这一突破性技术标志着中国钢混塔筒技术路线市场应用的开创性元年。

2.2 二代钢混塔筒技术

二代钢筋混凝土筒体技术采用了一种创新的模块化设计策略，即分片式设计，配合高效工厂化生产流程，并支持中长距离的便捷运输，最后通过现场实施的干湿连接技术实现组件的精准组装，从而形成了一套集成化的建造解决方案。针对塔节分片式设计，其核心优势在于能够实现模具的标准化生产，进而显著提升模具的精度，从而强化了产品质量控制的效能。这种设计模式还极大地便利了中长距离的物流运输，有效降低了整体运输成本，展现出在工业制造领域内的显著经济效益与灵活性^[2]。通过依据塔架的高度来灵活设定塔节的数量，可以实现资源的便捷快速调整与优化配置。工业化的批量生产模式显著降低了单位产品的平均成本，从而增强了其经济性与市场竞争力。传统的混凝土塔筒，采用正圆形截面设计，其直径沿塔筒高度方向逐渐递减，以此实现所需的锥形结构。鉴于精度控制与运输限制的高度要求，预制构件通常设计为约3米的高度，这意味着每隔3米就需要采用一套专门匹配的模具，以确保在满足结构性能的同时，亦能有效应对物流条件的挑战。伴随机组容量的加速升级演进，相应的预制组件尺寸与模具规格亦需同步更新，这一转变引发了显著的成本增压挑战。

为有效应对这一挑战，重庆海装公司创新性地采用了Mecal公司的先进设计理念，将传统的钢混塔筒结构巧妙地革新为垂直方向上的八片分段设计。该设计通过

将塔筒截面圆周精确等分为四个圆弧单元，并在每个圆弧单元外侧适当延伸，同时，在相邻两个圆弧单元之间精心加入梯形平板单元，确保了各圆弧单元的尺寸统一性，进而使得平板单元在制作过程中仅需通过调整平板边模的宽度就能精准适应塔筒的锥度变化，从而实现了高效、精准的定制化生产流程。通过实施模块化设计与制造，预制混凝土管片不仅简化了模具的构造，而且显著提升了管片的加工精确度。

3 中国的钢混塔筒技术的三个技术流派

3.1 圆锥形、逐级变径式结构

圆锥形与逐级变径式的工程技术方案源自西班牙，美国与中国经过二次自主开发的创新实践，其设计精髓在于采用“下大上小”的结构布局，即通过配置具有不同直径的塔节组件，旨在最大限度地发挥结构的固有强度与稳定性。这一独特设计不仅体现了对传统工程智慧的传承，而且展示了在现代工程技术领域内的创新应用。圆锥形塔筒的设计通过其直径的均匀变化，最大化地发挥了圆环结构的拱效应优势，确保了结构的整体受力分布均衡合理，有效避免了应力集中的现象，从而实现了结构的安全性和可靠性双重保障。混凝土塔段构建于多节独立的塔节之上，每节塔段进一步由2个或4个预先制造的管片精确拼接形成。鉴于每节塔筒的直径存在差异，这直接导致了模具种类的多样性，即每一节都需要定制化的模具，进而引发了模具数量的显著增加和高昂的制造成本问题。如图3.如图1所示，逐级变径式塔筒的设计采用三段等直径提升策略，其主体结构由三种规格的混凝土直筒节与三种混凝土过渡筒节构成。特别地，这些过渡筒节位于钢塔筒与三种直筒节之间，旨在实现平滑过渡的同时减少模具的使用数量，从而优化生产流程与成本效益。

当前，在圆锥形技术方案领域，金风科技（代表企业：天杉高科）与内蒙古金海新能源科技股份有限公司（简称“金海股份”），明阳智慧能源集团股份有限公司以及华东勘测设计研究院有限公司（简称“华东院”，旗下企业：浙江华勘新源科技有限公司）是业界公认的领先者；而在逐级变径式技术方案方面，金海股份，华东院和浙江运达风电股份有限公司则展现了显著的技术实力与市场影响力。

3.2 薄壁圆锥形+高强度混凝土结构

针对薄壁圆锥形与传统的圆锥形混凝土结构在材料应用与成本控制上的优化需求，金科新能源有限公司（现已更名为上海风领新能源有限公司，简称“金科新能源”）携手上海电气集团股份有限公司（简称“上海

电气”，其子公司为上海电气研砼建筑科技集团有限公司），引入了高强度C80混凝土预制管片作为创新解决方案。这一举措旨在通过减少混凝土用量，有效降低生产成本，同时确保结构性能与传统方案相媲美，实现经济效益与结构安全的双重提升。针对预应力技术的应用，金科新能源采取了一种体内预应力索结合灌浆的技术路径，与此相对，上海电气则采用了体外预应力索的解决方案。

3.3 倒角正方形、正多边形结构

针对圆锥形塔筒模具所引发的多而繁杂，成本高昂且占用空间大的问题，中国钢混塔筒生产商引入了多样化的替代策略，包括采用倒角正方形和正多边形结构等创新设计。代表性的企业采用的是源自荷兰MECAL公司的倒角正方形设计方案，该企业为中船海装风电有限公司。该研究将塔筒设计为由横向分割成八个部分的正方形塔节，包括四个角部组件和四个平板部件，从塔筒底端至顶端，各角部组件的外观一致，仅需一个模具便可生产所有角部组件，而平板部件则通过调整边模即可实现宽度的相应变化^[3]。采用倒角正方形布局策略不仅能够实现模具资源的高效利用，还能有效缩减构件的尺寸，从而便于其搬运与运输。代表性的制造商，如原湘电风能有限公司现今已更名至哈电风能有限公司，采用的是基于正多边形设计的方案。这一设计策略使得通过最少数量的模具即可实现所有塔节的预制生产，从而优化了制造流程和成本效益。混凝土塔筒的模具被划分为角模，标准模及调整模三类，其中角模与标准模的尺寸保持恒定。

4 陆上风电高强钢塔筒及钢混塔筒的应用成效与拓展

4.1 陆上风电高强钢塔筒与钢混塔筒应用效果

在实际风电场建设和运维过程中，陆上风电的高强度钢塔筒与钢结构混凝土塔筒分别展现了其独特的应用效益。多起风电场案例证实，采用高强度钢材制造的塔筒，因其卓越的强度与优良的韧性，在抵抗强风，极端气候等严酷天气状况方面表现优异。以中国北方一巨型风电场为例，使用高强度钢材制造的风力发电机在经历

了多次冬季强风的冲击后，其塔筒结构展现出卓越的稳定性，风机始终保持高效运行，为当地的电网源源不断提供着可靠的清洁能源。而钢筋混凝土制的塔筒亦在各类应用场景中展现出其优越性。对于那些对塔筒基础稳定性提出极高要求的软土地基环境，采用质量庞大且基础稳固的钢筋混凝土塔筒设计，成功地预防了塔筒可能出现的倾斜与沉降现象。以我国南方一例海滨风电场为考察对象，该风电场采用第三代钢筋混凝土塔筒技术构建风力发电机。在历经长期的海洋风蚀与复杂地质挑战后，这些设备仍展现出卓越的运营效能。混凝土组件的高耐久性显著降低了维护成本，体现了该项技术的经济优势与可靠性。通过对比分析多个风电场的长时间序列监测数据，我们能清晰识别出在不同环境条件下，各类塔筒的应用表现存在显著差异，这为未来风电场的设备选型提供了坚实的数据支持。

结论

此研究全面而深入地探讨了陆上风电中的高强度钢结构塔筒与钢筋混凝土塔筒的生产工艺及其应用范畴。回顾其发展轨迹，陆上风电的高强度钢塔筒技术持续演进，由通用钢材进化至专门的高强度钢材，制造流程亦从传统工艺跃升至自动化与高精度制造。目前，该行业的结构展现出多极化的竞争格局，在全球各地展现出不同的竞争优势。钢材混凝土组合塔筒技术已演化出三个阶段，并形成了三种技术派系，各自在特定应用中扮演关键角色。

参考文献

- [1]马武福,孙仲泽,翟乾俊,兰成坤,万雄斌.风电机组钢塔筒门框结构尺寸参数的优化[J].机电信息,2023,(16):21-24.
- [2]马武福,孙仲泽,万雄斌,兰成坤,翟乾俊.风电机组钢塔筒门框式门洞的筒壁应力计算方法研究与应用[J].机电信息,2023,(14):9-13.
- [3]陈绥琦.基于界面交换方法的钢-混组合塔筒流固耦合动力响应研究[D].华北水利水电大学,2023.