

大直径混凝土管片塔筒分段拼装与预应力张拉安装工艺研究

于长海

中交一航局第一工程有限公司, 天津 300456

DOI:10.61369/ETQM.2026070034

摘 要： 大直径混凝土管片塔筒施工有复杂拼装以及预应力张拉安装过程，在风电混塔“混凝土环段全部吊装完毕后进行整体张拉”情况下，做到准确拼装并精准张拉至关重要。本文介绍了一种新的分段拼装加预应力张拉的方法，介绍了该方法的操作步骤、注意事项和解决措施等，采用这种方法能够大大提高工作效率并且保证结构安全可靠。研究发现，吊装后预应力整体张拉配合精确拼装是保证工程质量的关键所在。

关 键 词： 大直径混凝土管片；塔筒；分段拼装；预应力张拉；安装工艺

Study on Segmental Assembly and Prestressed Tensioning Installation technology of Large Diameter Concrete Segment Tower

Yu Changhai

NO.1 ENGINEERING COMPANY LTD OF CCCC FIRST HARBOR ENGINEERING, Tianjin 300456

Abstract： The construction of large diameter concrete segment tower involves complicated assembling and prestressed tensioning installation technology. Aiming at the typical working condition of wind power hybrid tower, which is "integral tensioning after all concrete ring segments are hoisted", it is the key to realize high-precision assembly and precise tensioning. In this study, the innovative technology of sectional assembly and prestressed tensioning is discussed, and the operation process, technical control points and common problems coping strategies are expounded in detail. By optimizing the construction method, the efficiency can be significantly improved and the structural stability can be ensured. The research shows that the prestressed integral tensioning technology combined with precise assembly technology after hoisting is the core factor to ensure the construction quality.

Keywords： large-diameter concrete segments; tower tube; segmental assembly; prestressed tensioning; installation process

引言

大直径混凝土管片塔筒广泛应用于风力发电等领域，其分段拼装与预应力张拉安装是关键环节。在实际风电混塔工程中，通常先完成砼环段各管片的精密拼装、吊装，待全部环段就位后再进行整体预应力张拉。这种“先拼装后整体张拉”的工艺，对拼装精度和张拉同步性要求极高。在实际操作中，如何高效、安全地完成贯穿整个塔筒高度的钢绞线穿束，并实现多点千斤顶的精准同步张拉，是现场施工的核心挑战。因此，优化整体张拉工艺，是提升施工效率与质量的关键。

一、大直径混凝土管片塔筒施工中的主要技术问题

（一）塔筒分段拼装的难点与挑战

大直径混凝土管片塔筒的分段拼装面临诸多挑战。塔筒结构庞大笨重，每段拼装精度要求极高，必须确保对接精确无误。尤其在风电混塔“先吊装后整体张拉”工艺中，砼环段吊装完毕后的整体垂直度与环向接缝精度，直接决定后续预应力分布的均匀

性。若累积误差过大，即使整体张拉也难以消除偏心受力风险。传统拼装方法受场地、设备及人员技术水平限制，误差难以避免，加之混凝土温度胀缩进一步增加控制难度。优化拼装方法、改进设备、加强现场管理是提升质量的关键。

（二）预应力张拉技术的应用问题

预应力张拉技术应用于大直径混凝土塔筒中可以提高塔筒的刚度及承载力，在施工中也存在一定的问题。预应力张拉的受力

情况需精确掌握，在不同的施工阶段有不同的要求，如果不能很好地控制张拉力大小，则会造成塔筒的形变或者开裂等现象。而在张拉时应力是否均匀也是十分重要的，一旦某个位置受到过大的张拉力就有可能造成很大的安全隐患^[1]。

二、分段拼装工艺的优化方法

（一）管片拼装的精度要求与控制

管片拼装精度直接影响塔筒结构安全及稳定性，在管片拼装过程中需保证其接缝紧密以及对接精确度，过大误差会造成塔筒局部变形或者降低其承载能力，为满足较高精度要求，必须对每一步工序提出明确标准并使用先进仪器设备进行检测，例如全站仪、激光测距仪等，随时监测每一分拼装位置的变化情况，在施工过程中哪怕是一点点偏差都会造成整个塔筒不稳定状态，所以工人要严格遵守施工方案实施。同时根据不同的管片材质大小还应有不同的精度补偿手段，改变拼装方式或者工具来保证精度准确性以防止塔筒出现质量问题。

（二）施工环境对拼装工艺的影响

施工环境对管片拼装工艺有极大影响，尤其是恶劣天气情况下，气温、湿度、风速都会造成拼装误差，低温或者高温会造成混凝土伸缩从而影响拼装对接精度[2]。大风会影响吊装过程中位置偏离以及不稳定，故应把握好时间。而在现场，由于外界环境变化会导致拼装达不到预期效果，需采取相应技术手段加以弥补。安装气象监测设备，使用精确温度控制系统并选择恰当的时间段施工，以便降低不良天气给施工精度带来的不利作用，保证每一道工序都符合要求。

（三）优化拼装工艺的技术方案

为了提高分段拼装速度以及精度，对拼装工艺进行优化需从以下几个方面着手。一是采用模块化拼装方式，减小每一块管片尺寸偏差，在此基础上再优化管片拼装设备，降低人工操作影响，从而提高拼装精度；二是使用机械设备以及自动化技术，例如机械手、自动化拼装机等，可大大加快拼装速度并且保证其一致性，消除人工操作所带来的误差；三是在拼装期间加强对现场情况监督，在拼装过程中安装各种传感器及监测设备，随时观察拼装进展并发现异常后立即做出相应处理措施；四是借助大数据分析 with 精细施工技术改善拼装工艺，以期达到更好效果。

三、预应力张拉安装工艺的技术难题

（一）预应力张拉的力学原理

预应力张拉可以提高结构承载能力，主要是把预应力传给混凝土。在风电混塔施工过程中，在所有砼环段安装完成后进行一次性张拉，钢绞线从塔筒顶端到底端穿过，千斤顶位于塔筒顶端或者底端同时施加张拉力，从而使塔筒整个截面有均匀的回向以及轴向压力。这样可以有效地抵抗风电机组工作时产生的倾覆弯矩，也可以使各个环段管片紧密结合为一个整体^[3]。而张拉力的大小及位置都需要准确把握，不能过大导致某个部位受力过大甚

至产生裂缝，也不能太小达不到预应力的目的，这是保证预应力效果以及塔筒长期安全的重要因素。

（二）张拉过程中的常见问题与解决方案

在砼环段全部吊装完毕后的整体张拉过程中，常见问题包括多点张拉同步性偏差、张拉力分布不均及钢绞线穿束阻力过大。针对穿束难题，塔筒高度常超80米，可采用“前端牵引+中部辅助推送”方式，在每10-15米环缝处预留操作孔，借助导向滑轮与石墨润滑剂辅助穿束，并在完成后进行“预抽动”测试，确认钢绞线无卡阻。为确保同步张拉精度，应采用数控智能同步张拉系统，通过压力与位移传感器实时反馈，自动调节油路，将各点张拉力偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内，伸长量差值不超过6mm；对直径大于7m的塔筒，宜采用A-C-B-D-A四点对称循环张拉，循环2-3次至力值稳定。张拉按20%→50%→80%→100% σ_{con} 四级分级加载，每级稳压不少于5分钟，并用全站仪监测塔顶位移，若单向偏移超3mm，须暂停排查。达100%设计力值后持荷15分钟，待油压稳定方可锚固。

（三）预应力施工监测与控制

预应力施工监测与控制是保证整个张拉过程质量的关键所在，在监测过程中要对张拉力值、钢绞线伸长量、塔筒截面应力以及环缝压缩量等进行及时测量反馈，使张拉力误差保持在 $\pm 5\%$ 以内，每一个千斤顶都装有压力-位移双控传感器，在塔筒的重要部位布置应变计，在环缝处布置位移计来监测接缝压缩量（目标值为0.5—1.0mm），张拉完毕后持荷10—15min，直到力值不再变化才可进行锚固操作，由于长钢绞线受温度影响较大，在一天内如果存在温差大于15℃的情况，则需要根据公式来进行温度修正，从而保证张拉质量和安全性。

（四）“先拼装后整体张拉”工况下的关键前置条件

“先拼装后整体张拉”工况下，张拉前须满足三项关键前置条件：一是混凝土强度必须以同条件养护试块为准，达到设计强度的100%且龄期不少于7天；二是张拉前24小时内完成环缝“零状态”复测，采用0.3mm塞尺检查，确保缝隙不贯通，对局部超差（2mm）处，须用无收缩高强灌浆料嵌缝处理，保障预应力有效传递；三是穿束前应用0.5-0.7MPa高压空气彻底吹洗预应力孔道，清除浆皮、杂物及积水，显著降低摩擦损失，为顺利张拉奠定基础。

四、施工过程中的质量控制与风险管理

（一）施工过程中的质量标准与规范

在大直径混凝土管片塔筒施工中，严格遵循行业质量标准与规范是确保工程质量的基本要求。相关标准包括材料的选用、施工工艺的实施、施工设备的精度等方面，确保每个环节都达到设定的技术指标。混凝土管片的质量控制，要求对混凝土的配合比、强度等级、耐久性等进行严格把控，确保其在施工中能够承受较大的力学压力。施工过程中对每一段管片的拼装、预应力张拉、连接焊接等工艺的质量标准也需明确，采取标准化的操作流程，避免任何因操作不当或偏差过大的情况发生。采用质量控制

体系，将设计、材料、工艺等各个环节进行全面监管，确保所有施工阶段都符合预定质量要求。

（二）施工风险的评估与应对策略

施工阶段的风险评价是指对可能导致工程施工延期、安全问题或者质量问题的各种因素识别并提出相应的对策。例如施工设备出现故障、材料质量不合格、环境因素的变化（比如恶劣天气）以及工人操作不当等因素都可能是风险源。针对每一个潜在的风险都要对其发生的可能性及后果进行分析，找出最应该解决的风险并且提出相应的防范以及补救措施^[4]。对于设备故障可以采取定期保养、制定应急方案的方法进行预防；对于环境影响则可以采取防护措施或者改变施工的时间来进行避免。在施工的过程中还要经常巡视工地现场，以便能够尽早发现问题并处理。建立完善的风险管理机制，尽可能地减少施工中可能会遇到的风险，保证工程能够正常开展。

（三）质量控制的技术手段与管理措施

质量控制的技术方法必不可少，在施工中发挥着重要作用，包括精密测量手段、自动化检测仪器和信息化管理软件应用情况。现场可以采用激光扫描仪、全站仪等先进仪器设备，对每道工序进行跟踪检查，保证安装精度和施工要求；另一方面利用信息技术手段，施工质量可以在大数据平台下进行动态监管，一旦发现问题立即纠正。建立质量控制档案，从技术参数、工期到人员情况都有详细记载，对问题有据可查。领导层要开展经常性检查和随机抽查工作，保证各项工作到位并加强施工人员的质量教育。

五、技术创新与未来发展趋势

（一）新材料与新技术在施工中的应用

新材料的应用为大直径混凝土管片塔筒施工提供新的方法。高性能混凝土大幅提高塔筒强度以及耐久性，特种水泥、超高强

度钢筋、纤维增强混凝土等增加其抵抗地震及疲劳破坏的能力。而3D打印、喷射混凝土以及全自动流水线等新技术的应用，大幅提升施工速度并且降低人工失误率，在各个环节都做到高标准。

（二）智能化施工技术的发展

智能化施工技术是大直径混凝土塔筒工程施工的一大趋势，在物联网、人工智能、大数据等技术的支持下可以对施工现场所有工作进行在线监测及分析。无人驾驶车辆、自动化机器人的使用以及智能传感器的应用使得塔筒拼装、预应力张拉等工作更为精准快捷。施工过程中出现的各种设备故障或人为的操作错误均能被及时发现并通过智能化手段进行处理从而大大提高了工作效率及施工质量^[5]。

（三）行业标准与施工方法的未来趋势

未来，行业的规范以及施工工艺将越来越重视可持续发展、绿色施工的理念，逐渐向更高水平的精细化、高效化、绿色环保的方向发展。而随着建筑信息模型（BIM）的应用，在施工过程中信息交流和协作可以有效避免施工过程中的问题发生。施工工艺的发展将朝着智能化、自动化的方向发展，以机械化的工具或者全自动化的系统代替人工操作，提高质量和效率。未来的规范不仅仅是对工程的质量提出要求，也对环境保护、施工安全以及节能降耗等方面提出了更高的要求，促进建筑业的发展走向绿色、智能、高效。

六、结语

技术的发展创新促进大直径混凝土管片塔筒施工技术不断进步和完善，提高施工质量及速度。预应力张拉、分段拼装等工艺的成熟保证工程建设。而智能化及新型材料应用使得工程质量及管理水平再上台阶，对以后塔筒施工提出更高标准和要求。

参考文献

[1] 段德恩. 轨道交通工程大直径混凝土管片生产策划及四新技术应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2023(8): 249-251.
[2] 王剑宏, 夏志鹏, 陈超军, 孙会彬, 王世兴, 田雨, 胡云发, 陈健. 钢纤维混凝土抗弯性能及大直径管片应用试验研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(1): 244-255.
[3] 李茂林. 大直径筒仓立柱式钢支撑桁架体系施工分析 [J]. 常州工学院学报, 2023, 36(2): 18-22.
[4] 徐海源, 周脉席, 姜睿, 于诚. 大直径盾构管片清水混凝土制备及施工关键技术研究 [J]. 广东建材, 2024, 40(3): 23-26.
[5] 李超. 超大直径盾构混凝土预制管片抗裂性能影响因素及防治措施 [J]. 交通世界, 2023(26): 161-163+167.