

大型间冷塔双交叉斜支柱钢管混凝土施工工艺研究

王贞元

中国建筑第八工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】 大型间接冷却塔是火电、热电项目核心散热构筑物，双交叉斜支柱钢管混凝土结构作为新型塔体支撑体系，相较于传统钢筋混凝土支柱，具备刚度大、自重轻、抗震性能优、跨度适配性强等优势，现已广泛应用于超大型间冷塔工程。该结构属于高空异形空间钢混组合体系，存在构件倾斜角度大、双交叉拼装精度要求高、钢管混凝土浇筑密实度控制难、高空施工风险高等技术难题，尚无统一标准化施工工艺。为解决现场施工技术痛点，提升结构成型质量与施工安全性，本文依托大型热电厂间冷塔工程实例，系统探究双交叉斜支柱钢管混凝土全套施工工艺，细化构件预制、现场拼装、分层吊装、混凝土顶升浇筑、节点加固、质量检测等核心工序技术要点，梳理施工常见病害及工艺优化措施，形成一套适配大型间冷塔的标准化施工工艺体系。工程实践表明，优化后的施工工艺可有效提升斜支柱安装精度与混凝土密实度，结构成型合格率达 100%，大幅降低高空施工隐患，保障间冷塔整体结构稳定性。研究可为同类大型间冷塔双交叉钢混斜支柱施工提供技术参考与工艺借鉴。

【关键词】 大型间冷塔；双交叉斜支柱；钢管混凝土；拼装吊装；浇筑工艺；施工优化

1 引言

随着火电工程规模化、绿色化建设升级，大型间接冷却塔逐步向超高、大跨度、轻量化方向发展，传统整体现浇钢筋混凝土斜支柱自重大、抗裂性差、施工周期长，难以适配超大型间冷塔的结构受力与建设需求。双交叉钢管混凝土斜支柱作为创新型支撑结构，通过双杆件交叉组合形成 X 型空间受力体系，钢管约束混凝土协同受力，充分发挥钢材抗拉、混凝土抗压的材料优势，有效优化塔体受力结构，减轻基础荷载，提升间冷塔整体抗震与抗变形能力，是当前大型间冷塔结构优化的主流技术方向。

双交叉斜支柱钢管混凝土结构施工区别于常规竖向钢混构件，杆件呈大倾角倾斜布置，双交叉节点空间构造复杂，同时存在工厂预制精度把控、高空双杆同步拼装、大倾角钢管混凝土浇筑密实度控制、高空结构稳定性防控等多重技术难点。现阶段多数工程施工存在工艺不规范、拼装偏差超标、混凝土浇筑空鼓、节点成型质量差等问题，直接影响斜支柱承载性能与塔体结构安全。基于此，本文结合实际工程施工经验，系统拆解双交叉斜支柱钢管混凝土施工全流程工艺，优化关键施工技术，明确质量控制标准，为同类工程标准化施工提供支撑。

2 工程概况与结构施工特点

2.1 工程概况

本次研究依托某 660MW 热电联产项目大型间冷塔工程，间冷塔总高度 186.5m，底部最大直径 138.2m，采用双交叉钢管混凝土斜支柱作为核心竖向支撑体系，全塔共设置 38 榀双交叉 X 型斜支柱。单榀斜支柱高度 35.8m，单根钢管构件重量约 57t，

双交叉组合构件总重 114t，杆件倾斜角度 62° ，属于大倾角高空异形结构。支柱采用 Q355B 无缝钢管，管径 820mm，壁厚 16mm，内部填充 C40 自密实微膨胀混凝土，承担塔体竖向荷载、水平风荷载及地震荷载，结构受力关键性极强。

2.2 结构施工重难点

相较于传统单斜柱结构，双交叉斜支柱钢管混凝土施工技术难点突出，主要体现在三方面：一是双交叉杆件空间定位精度要求极高，两根斜杆交叉节点对位偏差需控制在 5mm 以内，高空拼装定位难度大；二是大倾角钢管腔体混凝土浇筑易出现离析、空鼓、顶部不密实等缺陷，常规自上而下浇筑工艺无法满足施工质量要求；三是高空大重量构件吊装稳定性差，双杆同步吊装易出现扭转、偏移，施工安全风险高；四是钢管与混凝土协同受力要求高，需严控混凝土收缩变形，保障钢混紧密结合。

3 双交叉斜支柱钢管混凝土核心施工工艺

结合工程结构特点与现场施工条件，确立「工厂精准预制、地面预拼装、高空分层吊装对位、节点加固、自密实混凝土顶升浇筑、整体检测验收」的成套施工工艺，各工序紧密衔接，保障结构施工精度与成型质量。

3.1 工厂构件预制工艺

构件工厂预制是保障现场拼装精度的基础，严格按照设计图纸进行钢管切割、坡口加工、配件焊接加工。钢管切割采用数控切割设备，严控构件长度偏差 $\leq 3\text{mm}$ ，端面平整度偏差 $\leq 2\text{mm}$ ；交叉节点、端部法兰盘采用一体焊接成型工艺，焊接完成后进行无损探伤检测，排查焊接裂纹、夹渣等缺陷。为适配双交叉

空间结构，提前在工厂完成单樰双杆预组对，校准交叉角度、杆件间距及节点位置，做好标记编号，避免现场高空对位偏差。预制完成后对钢管内壁除锈、除尘，外壁做防腐涂装处理，防止后期锈蚀影响结构耐久性。

3.2 地面预拼装与校核工艺

为降低高空施工误差、减少高空作业量，所有预制构件进场后均开展地面整体预拼装。按照间冷塔圆周排布顺序，将双交叉两根斜杆、连接节点、端部配件进行地面组拼，利用全站仪、水准仪精准校核杆件倾斜角度、交叉节点坐标、整体外形尺寸。重点校验双杆交叉中心点对位精度、杆件直线度，对拼装偏差及时微调校正，确保地面拼装合格后再进行高空吊装。预拼装完成后拆解构件，按照吊装顺序有序堆放，做好防护，防止构件变形、污染。

3.3 高空分层吊装与对位工艺

结合构件重量与高空施工工况，采用分层分段吊装施工工艺，摒弃整体一次性吊装风险高、对位难的弊端。选用大型汽车吊作为吊装设备，采用两点对称吊装方式，在构件重心上下设置吊装点，搭配专用吊具与缓冲护具，避免吊装过程构件变形、防腐层破损。吊装遵循「先主杆、后副杆、先下端固定、后上端对位」的顺序，单根杆件分层吊装就位，下端与基础法兰精准对接，临时螺栓固定，上端利用全站仪实时监测坐标偏差，微调杆件倾角与位置。双杆全部就位后，精准校准交叉节点位置，采用临时支撑体系固定双交叉结构，防止高空风荷载导致构件偏移、扭转，保障整体结构稳定性。

3.4 节点加固与体系成型工艺

双交叉节点是整个斜支柱的核心受力部位，吊装对位完成后需重点做好节点加固处理。在双杆交叉内侧设置十字加劲肋板焊接加固，提升节点抗剪、抗弯承载力，避免节点应力集中产生变形开裂。所有焊接焊缝采用满焊工艺，焊缝高度、长度严格符合设计标准，焊接完成后进行超声波无损检测，确保焊接质量达标。同时完善端部法兰连接，采用高强螺栓对称紧固，杜绝螺栓松动、受力不均问题，完成单樰双交叉斜支柱整体成型，形成稳定空间受力体系。

3.5 钢管混凝土顶升浇筑工艺

针对大倾角钢管混凝土浇筑易离析、空鼓的难题，采用**自下而上泵送顶升浇筑工艺**，替代传统自上而下浇筑方式，适配双交叉斜支柱异形腔体结构。选用 C40 自密实微膨胀混凝土，优化混凝土配合比，提升流动性、抗离析性与微膨胀性能，补偿混凝土后期收缩，保障钢混紧密结合。浇筑前封堵钢管顶部排气孔、预留浇筑口，底部设置泵送顶升接口，加装加劲肋

加固，防止泵送压力过大导致焊接接口开裂漏浆。浇筑过程匀速泵送，保持管内压力稳定，利用混凝土自重与泵送压力自然密实，无需人工振捣，待顶部排气孔溢出均匀混凝土浆液后停止泵送，封堵浇筑口与排气孔。单根杆件一次性连续浇筑成型，杜绝中途停顿产生施工冷缝。

3.6 后期养护与成型处理

混凝土浇筑完成后及时封闭养护，利用钢管腔体密闭性实现保湿养护，养护周期不少于 14d。养护期间严控环境温差，避免温度应力导致混凝土开裂。养护完成后对端部、浇筑口预留位置进行打磨修补，清理多余浆料与焊渣，复检构件尺寸、外观质量，完成斜支柱整体成型施工。

4 施工质量控制标准与数据对比

为量化施工工艺实施效果，结合规范要求制定双交叉斜支柱施工质量控制标准，对比传统施工工艺与本文优化工艺的施工质量指标，具体数据如下表所示。

表 1 不同施工工艺质量指标对比表

检测指标	规范允许偏差	传统施工工艺	本文优化施工工艺
杆件轴线偏差/mm	≤8	6.2~7.8	2.1~4.5
交叉节点对位偏差/mm	≤5	4.1~5.0	1.2~3.0
混凝土密实度合格率/%	100	92.3	100
焊缝无损检测合格率/%	100	95.6	100
构件成型优良率/%	—	85.2	98.7

由上表可知，优化后的成套施工工艺可显著降低构件安装偏差，彻底解决钢管混凝土密实度不足、焊接质量缺陷等问题，构件成型优良率大幅提升，完全满足大型间冷塔结构施工规范与设计受力要求。

5 施工常见问题与工艺优化措施

5.1 高空拼装偏移问题及优化

传统高空直接拼装易受风力、施工操作误差影响，出现杆件偏移、交叉节点错位等问题。优化措施：严格落实地面预拼装校核工艺，提前修正构件加工误差；高空吊装采用全站仪实时动态定位，小幅微调对位；增设临时可调支撑体系，精准控制杆件倾角与空间位置，杜绝拼装偏差超标。

5.2 钢管混凝土空鼓、离析问题及优化

大倾角钢管结构常规浇筑易出现混凝土离析、顶部空鼓、收缩缝隙等缺陷。优化措施：采用自下而上泵送顶升工艺，搭配微膨胀自密实混凝土，优化水灰比与外加剂掺量；浇筑过程保持匀速泵送，充分排出管内空气；延长养护周期，补偿混凝土

土收缩，保障钢混紧密粘结。

5.3 节点应力集中与焊接缺陷优化

双交叉节点受力复杂，易出现焊接不密实、应力集中开裂问题。优化措施：采用加劲肋节点加固设计，分散节点应力；实行分层分段焊接，控制焊接温度，避免高温变形；焊接后全数开展无损探伤检测，及时修补微小缺陷，保障节点结构完整性。

6 结论

大型间冷塔双交叉斜支柱钢管混凝土结构施工工艺复杂、精度要求高、安全风险大，其施工质量直接决定间冷塔整体结构稳定性与使用寿命。本文依托实际工程，优化形成「工厂精

准预制、地面预拼装校核、高空分层对位吊装、节点加固、泵送顶升浇筑、长效养护」的成套标准化施工工艺，有效解决了传统施工中拼装精度低、混凝土密实度差、节点成型质量不佳、高空施工风险高等技术痛点。

工程应用结果表明，优化工艺可精准控制双交叉斜支柱空间位置与成型尺寸，构件安装偏差远优于规范标准，钢管混凝土密实度、焊接质量合格率均达100%，结构成型质量优良，施工安全性与施工效率显著提升。该工艺适配大型间冷塔异形双交叉钢混斜支柱施工特点，技术成熟、实操性强，可为同类火电、热电间冷塔工程施工提供可靠的技术参考，具备良好的推广应用价值。

参考文献：

- [1] 王浩, 张伟. 大型间冷塔双交叉钢管混凝土斜支柱施工技术[J]. 工程技术研究, 2025, 10(08):112-114.
- [2] 李建军, 刘阳. 空冷塔X型钢管混凝土斜支柱泵送顶升浇筑工艺优化[J]. 电力建设, 2024, 45(05):78-83.
- [3] 陈凯, 赵明. 大型冷却塔钢混斜支柱拼装吊装精度控制研究[J]. 施工技术, 2024, 53(12):90-93.
- [4] 周磊, 吴峰. 双交叉异形钢管混凝土结构施工难点及质控措施[J]. 建筑施工, 2023, 45(09):1021-1023.
- [5] 张博文. 超大型间冷塔钢混组合支撑体系施工技术应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(02):189-193.