

盾构近距离穿越高压电塔的主动加固与变形控制施工技术

李 帅

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：针对盾构隧道近距离穿越高压电塔主动加固与变形控制，从高压电塔自身加固、周边土体注浆和盾构掘进参数控制等方面进行研究，对施工中关键技术进行攻坚，研制了电塔主动加固技术、电塔变形控制等，高效地实现了盾构近距离安全穿越高压电塔施工。

【关键词】：盾构隧道；近距离穿越；高压电塔；主动加固；变形控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.039

引言

随着城市轨道交通、地下管廊等基础设施建设快速发展，大部分线路采用盾构成型隧道技术，但由于城市中高压电塔的存在，对盾构隧道穿越期间的安全控制十分重要；不良地基（软土、砂层、杂填土等）因承载力低、沉降量大、稳定性差，给盾构穿越施工带来极大挑战；高压电塔作为重要的电力基础设施，结构刚度大、抗变形能力弱，盾构近距离穿越引发的地基变形易导致电塔倾斜、塔身开裂，甚至引发电力安全事故，威胁公共安全。如2025年7月12日深惠城际项目前怡区间盾构施工导致南山水质净化厂内南山热电厂新4#高压电塔一侧出现倾斜。该事例反映出盾构施工对地层扰动有很大影响，盾构侧穿时，各基础沉降不均，极易导致电塔倾斜。

本文以深圳市城市轨道交通15号线工程同乐车辆段高压电力管线迁改工程穿越14座电塔为背景，进行盾构近距离穿越不良地基高压电塔的主动加固与变形控制施工工序研究，通过对电塔基础的预加固处理、严格控制盾构穿越期间掘进参数、加强盾构穿越期间各项监测，对高压电塔的安全十分重要。

1 工程概况

深圳市城市轨道交通15号线工程同乐车辆段高压电力管线迁改工程，线路全长4.7km，4.4km为地下敷设，含明挖、盾构、顶管等多种区间段及8座工作井、1个新建终端。盾构隧道采用土压平衡盾构机，管片为钢筋混凝土预制构件，混凝土强度等级为C50。本工程是将深圳地铁15号线同乐车辆段选址内8回高压线缆入地，在原有高压线下方新建电力隧道。新建电力隧道沿线侧穿14座电塔基础，其中7座为近距离穿越不良地基且为独立基础的高压电塔。盾构隧道与高压电塔位置关系，典型剖面如下图1所示。

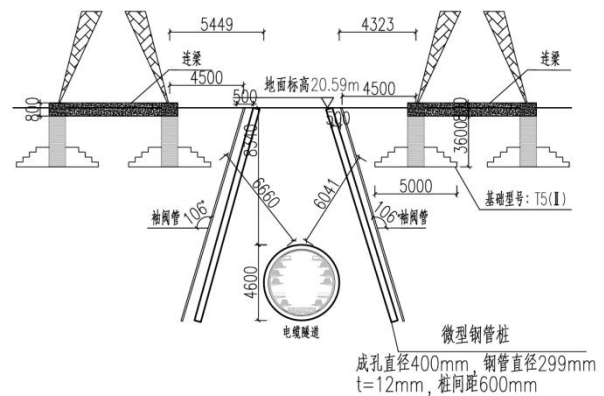


图1 电力隧道与41#电塔相互关系剖面图

2 电塔基础主动加固方式

盾构隧道近距离穿越的7座高压电塔均为独立基础，且地处不良地质区域，施工风险突出。核心风险为盾构掘进过程中产生的地层扰动，会导致电塔基础不均匀沉降，进而引发电塔倾斜、塔身开裂，甚至造成高压线短路、塔身折断等重大电力安全事故，严重威胁公共安全和区域电力供应稳定^[1]。此外，部分电塔承担多回高压线路输送任务，塔身高、基础规模差异较大，且周边地质多为黏性土层、全风化花岗岩层等承载力较低的地层，进一步加剧了施工风险，需针对性采取主动加固措施。

本次研究的7座独立基础电塔涵盖不同类型与地质条件，具体概况如下：30#、32电塔为直线塔，基础规模为 $5 \times 5 \times 2\text{m}$ ，塔高42m，塔地质为硬塑状砾质黏性土层，采用独立基础；35#、36#均为直线塔，基础规模均为 $2.8 \times 2.8 \times 1\text{m}$ ，塔高42m，塔地质均为硬塑状砾质黏性土层；37#为耐张塔，基础规模 $4 \times 4 \times 1.5\text{m}$ ，塔高42m，塔地质为硬塑状砾质黏性土层；40#为耐张塔，基础规模 $5.2 \times 5.2 \times 1.9\text{m}$ ，塔高42m，塔地质为黏性土层；41#为直线塔，基础规模 $5 \times 5 \times 2\text{m}$ ，塔高57m，塔地质为黏性土层，是7座电塔中高度最高、承载线路最多的核心输电枢纽^[2]，以上电塔架设的均为220kv高压线路。

高压电塔与盾构隧道相对关系及主动加固方式见下表所示:

表1 近距离穿越独立基础电塔加固方式一览表

序号	电塔编号	位置关系	空间净距 (m)	水平距离 (m)	隧道埋深 (m)	主动加固方式	与地面夹角	备注
1	30#	侧穿	6.33	4.494	8.68	袖阀管+微型钢管桩袖阀管+基础连梁	100°	
2	32#	侧穿	7.2	4.434	9.23	袖阀管+基础连梁	90°	
3	35#	侧穿	13.219	3.731	16.53	袖阀管+基础连梁	76°	
4	36#	侧穿	15.25	3.273	18.73	袖阀管+基础连梁	80°	
5	37#	侧穿	8.467	5.947	8.18	袖阀管+基础连梁	107°	
6	40#	侧穿	6.17	6.17	6.36	袖阀管+微型钢管桩+基础连梁	107°	
7	41#	侧穿	4.32	4.32	8.34	袖阀管+微型钢管桩+基础连梁	106°	

3 高压电塔主动加固与变形控制工序

3.1 施工准备

电塔加固施工前,组织人员对电塔的地面标高、电缆高度、基础形式进行逐项核查,确定加固设备的高度。

挖掘机、钻机、吊车等设备进场前安装近电预警器,进场后按规定地点和方式布置,并进行相应的保养和试运转等工作,以保证施工机械能正常运转。

3.2 袖阀管施工

(1) 测量放样。电塔基础临近隧道的范围,基础外放2.5~3m,定位袖阀管,管孔间距600mm,打设角度76°~107°,控制与隧道外轮廓的间距。

(2) 钻机钻孔。采用QS-260型号潜孔钻成,成孔前核验钻机平整度和钻杆角度,确保打设角度,成空直径不小于50mm,垂直度和长度控制。

(3) 袖阀管安装就位。袖阀管采用Φ48mm,侧壁设置Φ10mm@300mm注浆孔的PVC管,孔口用防水胶带封堵,袖阀管的安装就位后,顶部外露300mm使用速凝水泥砂浆封堵,以防止注浆过程中冒浆现象的发生,底部距孔底预留100~200mm注浆缓冲层。

(4) 注浆顺序。采用“跳孔注浆”方式,从远离隧道侧向隧道方向,隔二做一的顺序,相邻孔施工间隔≥24h,同一孔内采用“自下而上”分段注浆,每段注浆高度控制在0.5~1m,通过注浆压力控制每步距注浆效果^[3]。

(5) 注浆参数。采用双柱注浆方式,浆液采用单液浆,

水泥采用42.5级普通水泥,水灰比1:1;初始注浆压力0.4~1MPa,注浆控制以注浆量和地面隆起或沉降变动作为指标,注浆速度控制至20~40L/min,保证注浆效率。

(6) 电塔监测。注浆过程中在最近的电塔侧设置百分表,监测电塔倾斜情况。

(7) 安全防护。注浆设备操作人员需佩戴安全帽、防护手套及护目镜,高压管路附近严禁站人,防止管路爆裂伤人;用电设备需接地,避免漏电事故。



图2 袖阀管加固施工

3.3 微型钢管桩施工

(1) 测量放样。测量人员通过设备确定电塔基础边线,基础外放2.5~3m,按0.6m间距进行桩位放样定位微型钢管桩,打设角度76°~107°,控制与隧道外轮廓的间距。



图3 多功能坡度测量仪器安装

(2) 钻机钻孔。采用 QS-330 钻机打设成孔，成孔跳三打一，在上序施工并注浆完毕 24h 后再进行下序施工，在整序桩施工完毕后方可注浆，每一序小直径桩在注浆时分两序注浆，每序注浆在一天内完成。孔位偏差 $\leq 50\text{mm}$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ 。如下图 2。

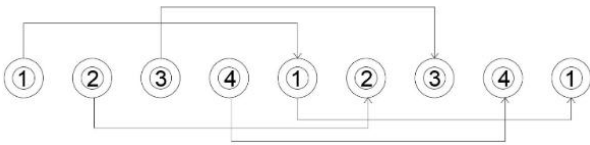


图4 微型钢管桩施工工序示意图

(3) 钢管制作与安装：钢管采用 299mm \times 12mm 规格，拼接采用满焊，焊缝强度不低于母材。钢管底部需做成锥形导向头，侧壁按 300mm 间距开设注浆孔，孔口临时用防水胶带封堵，防止杂物进入。考虑高压线下的安全高度要求，钢管分节长度不大于 6m。

钢管安装时钢管中心与孔中心对齐，底部距孔底预留 100~200mm 注浆间隙。钢管连接采用坡口焊，连接位置钢管内部设置衬管，内衬管长度 L=300mm，壁厚 $\geq 10\text{mm}$ 。

在钢管适当位置上设置卡环，防止在连接过程中下段钢管落入孔内，直至钢管下放到设计标高。钢管安装垂直度需实时监测，采用测斜仪校准^[4]。

(4) 微型钢管桩注浆。浆液采单液水泥液浆，水泥采用 42.5 级普通水泥，水灰比 1:1；初始注浆压力 0.4~1MPa，注浆量按桩身体积的 1.2~1.5 倍控制。注浆前，使用速凝水泥砂浆封堵钢管与孔壁之间的间隙，检查管路密封性，注浆顺序从孔底向上连续进行，不得中断以防止注浆过程中冒浆现象的发生，注浆控制以注浆量和地面隆起或沉降变动做为指标。



图5 微型钢管桩加固施工

3.4 连梁施工

隧道穿越段独立扩大基础电塔基础外轮廓线与隧道外轮廓线间距小于一倍洞径的，通过新建连梁，将电塔四个支座的基础连接在一起，提高电塔基础的整体稳定性，提升电塔基础的抗扰动能力。

(1) 施工准备。根据加固结构及尺寸标记电塔连梁对应位置，人工开挖土体，深度按原基础主柱顶面以下 0.8m 控制，宽度为电塔原基础主柱外放 0.3m。

(2) 原基础保护。电塔原基础主柱凿毛后，对电塔原基础主柱进行外包不小于 300mm 厚混凝土保护。采用 C30 混凝土，主筋直径为 20mm，箍筋直径 10mm，间距 250mm。预留连梁锚筋，锚筋弯折长度 300mm。

(3) 连梁钢筋绑扎。电塔原基础保护混凝土施工完成后，对电塔原基础主柱包封。包封完成后，进行连梁钢筋绑扎，主筋直径为 20mm，箍筋直径 10mm，间距 200mm。

(4) 立模浇筑。钢筋绑扎完成并验收通过后，人工配合机械浇筑混凝土，浇筑时充分振捣，保证浇筑密实。

连梁浇筑完成后，需进行不少于 7 天的养护，养护期间严禁碰撞、扰动连梁结构，养护完成后需进行强度检测，确保连梁强度达到设计要求后，方可进行后续盾构掘进施工，避免因连梁强度不足导致加固失效。

3.5 盾构掘进参数控制

根据穿越电塔段地质情况和隧道埋深，盾构机土压力设定 1.0-1.2bar，刀盘扭矩设定 200-800KNm，推力设定在 600-1000T，推进速度在 30-50mm/min，环出土量控制在 27.8-36.1m²(松散系数 1.0-1.2，根据宽度 1.5m 管片出土量折算)。水泥砂浆作为同步注浆材料，注浆量 3.5-3.8m³/环，注浆压力控制 2bar~3bar。充填系数建议取 1.5，二次补强注浆采用水泥浆，水泥浆水灰比=1:1(重量比)，注浆压力为 0.3~0.5MPa。保持盾构机 4 组推力油缸推力均衡，确保刀盘中心和盾尾中心

的位移在允许的偏差范围内,在下穿掘进阶段尽量少采用纠偏措施,成型管片垂直姿态偏差较小,地表沉降值较小^[5]。

3.6 电塔变形监测

本工程施工期间,电塔变形控制采用“实时监测、动态调整”的原则,除注浆和掘进过程中的常规监测外,还需设置自动化监测系统,对电塔倾斜度、基础沉降量进行24小时不间断监测,监测频率每30分钟1次,当监测数据接近预警值时,立即停止施工,分析原因并调整加固或掘进参数。监测预警值设定为:电塔倾斜度 $\leq 0.3\%$,基础不均匀沉降 $\leq 3\text{mm}$,确保电塔变形始终处于可控范围。

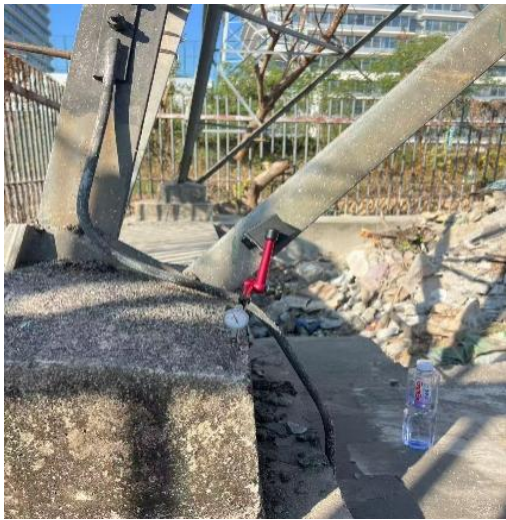


图6 百分表监测电塔倾斜

4 小结

本文结合深圳市城市轨道交通15号线工程同乐车辆段高压电力管线迁改工程,针对盾构近距离穿越7座不良地基独立基础高压电塔的施工难题,研究并应用了袖阀管注浆、微型钢管桩、基础连梁相结合的主动加固技术,搭配科学的盾构掘进参数控制和24小时动态监测措施,有效控制了地层扰动和电塔变形,确保了7座高压电塔在盾构穿越期间的结构安全和正常运行。该施工技术解决了盾构隧道近距离穿越高压电塔的安全风险难题,优化了加固施工工序,为同类工程提供了可借鉴的技术经验和实践参考。

参考文献:

- [1] 吴广兴,王锴鑫,张延冰,等.地铁盾构穿越桥梁桩基变形控制分析及应用[J].现代城市轨道交通,2025,(11):41-47.
- [2] 张同文.城市地铁盾构隧道穿越复杂地层施工风险控制措施[J].四川水泥,2025,(11):194-196.
- [3] 邱俊男.城市快速路盾构隧道穿越施工风险评估[J].建筑施工,2023,45(08):1707-1710.
- [4] 蔡宗洋.地铁盾构穿越施工地块的相互影响分析[J].四川材,2023,49(06):114-116.
- [5] 段军朝,徐朝阳,何凯罡.隔离桩对软弱地层地铁暗挖隧道侧穿电塔的影响分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(01):65-70.