



60-F23341C-S02-16

甘肃能化庆阳2×660MW煤电项目工程

初步设计阶段

第 14 卷
第 2 分卷

间接空冷塔两机一塔
结构选型专题报告

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group

2024年11月 西 安

甘肃能化庆阳2×660MW煤电项目
初步设计阶段

第 14 卷 第 2 分卷

间接空冷塔两机一塔
结构选型专题报告

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group

2024年7月 西 安

本工程初步设计文件由以下各卷组成

- 第 1 卷 总的部分
- 第 2 卷 电力系统部分
- 第 3 卷 总图运输部分
- 第 4 卷 热机部分
- 第 5 卷 运煤部分
- 第 6 卷 除灰渣部分
- 第 7 卷 电厂化学部分
- 第 8 卷 烟气脱硫工艺部分
- 第 9 卷 电气部分
- 第 10 卷 仪表与控制部分
- 第 11 卷 信息系统及安全防护部分
- 第 12 卷 建筑结构部分
 - 第 1 分卷 建筑部分
 - 第 2 分卷 土建结构部分
- 第 13 卷 采暖通风及空气调节部分
- 第 14 卷 水工部分
 - 第 1 分卷 供水部分
 - 第 2 分卷 水工结构部分
- 第 15 卷 环境保护部分
- 第 16 卷 水土保持部分
- 第 17 卷 消防部分
- 第 18 卷 劳动安全部分
- 第 19 卷 职业卫生部分
- 第 20 卷 节约资源部分
- 第 21 卷 施工组织大纲部分
- 第 22 卷 运行组织及设计定员部分
- 第 23 卷 设备及主要材料清册
- 第 24 卷 工程概算

批 准： 刘 学 军

审 核： 袁 瑞 山

校 核： 侯 宪 安

设 计： 尹 高 璇

目 录

1	项目概述	1
1.1	规划容量及本期建设规模	1
1.2	建设单位及工程进度	1
1.3	设计依据	1
2	厂址自然条件	1
2.1	水文气象条件	1
2.2	岩土工程条件	6
3	钢筋混凝土间接空冷塔方案	12
4	钢筋混凝土间接空冷塔结构设计	12
4.1	设计参数	12
4.2	钢筋混凝土间接空冷塔结构方案	13
4.3	钢筋混凝土间接空冷塔结构尺寸	15
4.4	钢筋混凝土间接空冷塔结构分析	15
4.5	钢筋混凝土间接空冷塔施工可行性	16
4.6	我院近期已完成的钢筋混凝土间接空冷塔工程实例	17
5	钢结构间接空冷塔方案	25
6	钢结构间接空冷塔结构设计研究	25
6.1	钢结构间接空冷塔方案基本情况	25
6.2	钢结构冷却塔主要设计荷载	37
6.3	钢结构冷却塔结构设计研究	40
6.4	钢结构冷却塔施工	59
6.5	蒙皮围护结构设计	67

6.6	钢结构冷却塔防腐处理及外围护结构	68
7	地基处理设计方案	68
8	钢筋混凝土与钢结构间冷塔优缺点对比	69
8.1	钢管混凝土斜支柱钢筋混凝土冷却塔	69
8.2	钢结构	69
8.3	钢结构与钢筋混凝土结构冷却塔比较	70
9	结论	70

【内容摘要】间冷塔系统的配置方案关系到电厂的安全满发和经济运行，本专题报告根据目前电厂的水文气象条件，从技术，经济和保证主机安全满发等方面，分别按照钢管混凝土斜支柱钢筋混凝土空冷塔、双曲线型钢结构空冷塔、直筒截锥型钢结构空冷塔三种结构形式，对两机一塔间冷塔结构方案进行了结构论证，并对混凝土结构塔和钢结构塔的结构、施工、投资等进行了比较和分析。

1 项目概述

1.1 规划容量及本期建设规模

甘能化庆阳电厂（2×660MW机组）工程为新建工程，为甘肃能化九龙川煤矿配套建设煤电一体化项目，本期拟建设2×660MW超超临界间接空冷燃煤机组，厂址位于甘肃省庆阳市宁县东南方向早胜镇附近，距离宁县直线距离约15km，与早胜镇距离约1.5km。厂址北侧为寺底村，南侧及东侧为南北村。厂址北距G327国道直线距离约500m，西距G211约1.0km，距G69银百约3.0km，有多条村村通道路在厂址内通过，交通便利。

1.2 建设单位及工程进度

建设单位为甘肃能化股份有限公司。

本工程计划在2024年12月开工，第一台机组计划于2027年5月建成投产，第二台机组计划于2027年6月建成投产。

电厂年发电利用小时数5500小时考虑。

1.3 设计依据

- 1）本工程可行性研究报告及其评审会议纪要文件。
- 2）已审查通过的初步设计原则及意见。
- 3）电规总院可行性研究报告评审意见及可行性研究报告。
- 4）甘肃能化股份有限公司提供的原始资料。
- 5）火力发电厂设计技术规程及各专业有关技术规程规定。
- 6）现行的国家及行业有关规程、规范和规定。

2 厂址自然条件

2.1 水文气象条件

2.1.1 水文条件

厂址位于甘肃省庆阳市宁县东南约15km处，北侧距327国道、九龙河分别约600m、

7.5km，西距早胜镇、马莲河分别约1.5km、12km，厂址高于北侧九龙河约250m，不受北侧九龙河百年一遇洪水影响；厂址高于西侧马莲河约300m，不受西侧马莲河百年一遇洪水影响。站址东南约150m有冲沟发育，站址高于冲沟底部上百米，不受冲沟洪水影响，但距离冲沟较近，应注意高边坡的稳定性。

厂址位于山塬顶部，现状为农田，整体地势较高，区域地势东北高西南低，厂址东、北侧受坡面洪水的影响，另，厂址北侧和南侧围墙处，局部低洼，最洼处地势比旁边低一米多，下雨时低洼处会积水，建议将围墙外侧平整并保持排水通畅，在围墙外侧平整后建议东、北侧围墙基础抬高0.4m。

2.1.2 气象条件

宁县深居内陆属温带季风气候区。冬季漫长寒冷，雨雪少；春季转瞬即逝，冷暖变化大；夏季短促，气温高，降水集中；秋季降温快，初霜也来得早。气候干燥，气温日较差大，光照充足，太阳辐射强。降水各季分配不匀，降水较多主要集中在6~9月。

厂址附近有宁县气象站，宁县气象站建站于1957年，是国家基本气象站，位于宁县早胜镇“乡村”，北纬35°25′、东经108°00′，海拔高度为1221.2m。2004年迁站至北纬35°31′、东经107°55′，海拔高度为979.4m，2017年迁站至北纬35°32′、东经107°53′，海拔高度为1135.3m。宁县气象站位于电厂西北方向约19km处，电厂海拔约1230m。宁县气象站与电厂海拔、自然地理环境接近且两者间无较大阻挡物，故确定本工程常规气象条件采用宁县气象站观测资料统计。

根据宁县气象站多年观测资料，统计得宁县气象站基本气象要素年值和月值见表 2.1-1 和表2.1-2。

表2.1-1 宁县气象站基本气象要素年值统计表

项目	单位	数值	发生日期
平均气压	hPa	879.7	
平均气温	℃	8.9	
最热月平均气温	℃	21.9	
最冷月平均气温	℃	-5.5	
极端最高气温	℃	37.3	1997.7.21
极端最低气温	℃	-27.1	1991.12.28
平均水汽压	hPa	9.2	
平均相对湿度	%	68	

项目	单位	数值	发生日期
年平均降水量	mm	565.4	
一日最大降水量	mm	100.7	1992.8.12
年平均蒸发量	mm	1379.9	
平均风速	m/s	1.9	
最大风速	m/s	21	1973.12.30
最大积雪深度	cm	24	1993.3.17
平均雷暴日数	d	24.1	
平均沙暴日数	d	0.4	
平均大风日数	d	4.0	
平均雾日数	d	26.8	

表2.1-2 宁县气象站累年逐月气象要素统计表

月份	平均气压 (hPa)	平均温度 (℃)	平均风速 (m/s)	平均相对 湿度 (%)	平均降水量 (mm)	平均蒸发量 (mm)
1	884.0	-5.5	1.6	60	4.9	37.4
2	882.1	-2.2	2.0	60	7.6	50.6
3	880.1	3.6	2.2	63	21.8	93.3
4	877.9	10.6	2.4	60	36.7	154.6
5	876.5	15.4	2.2	63	51.9	189.4
6	873.5	19.6	2.1	66	66.6	207.6
7	872.3	21.9	2.1	73	115.7	201.7
8	875.1	20.7	1.9	77	108.9	172.0
9	880.2	15.3	1.6	79	78.3	108.8
10	884.0	9.2	1.7	76	49.3	79.7
11	885.5	2.1	1.7	71	19.0	47.9
12	885.5	-3.7	1.7	63	4.7	36.8
平均 或合计	879.7	8.9	1.9	68	565.4	1379.9

2.1.3 设计风速及风压

根据宁县气象站历年实测10min平均最大风速系列采用极值I型法统计计算，并参照国家《建筑结构荷载规范》GB50009-2012中的风压等值线图，暂定电厂厂址处五十年一遇10m高10min平均最大风速为23.7m/s，其相应的风压为0.35kN/m²；百年一遇10m高

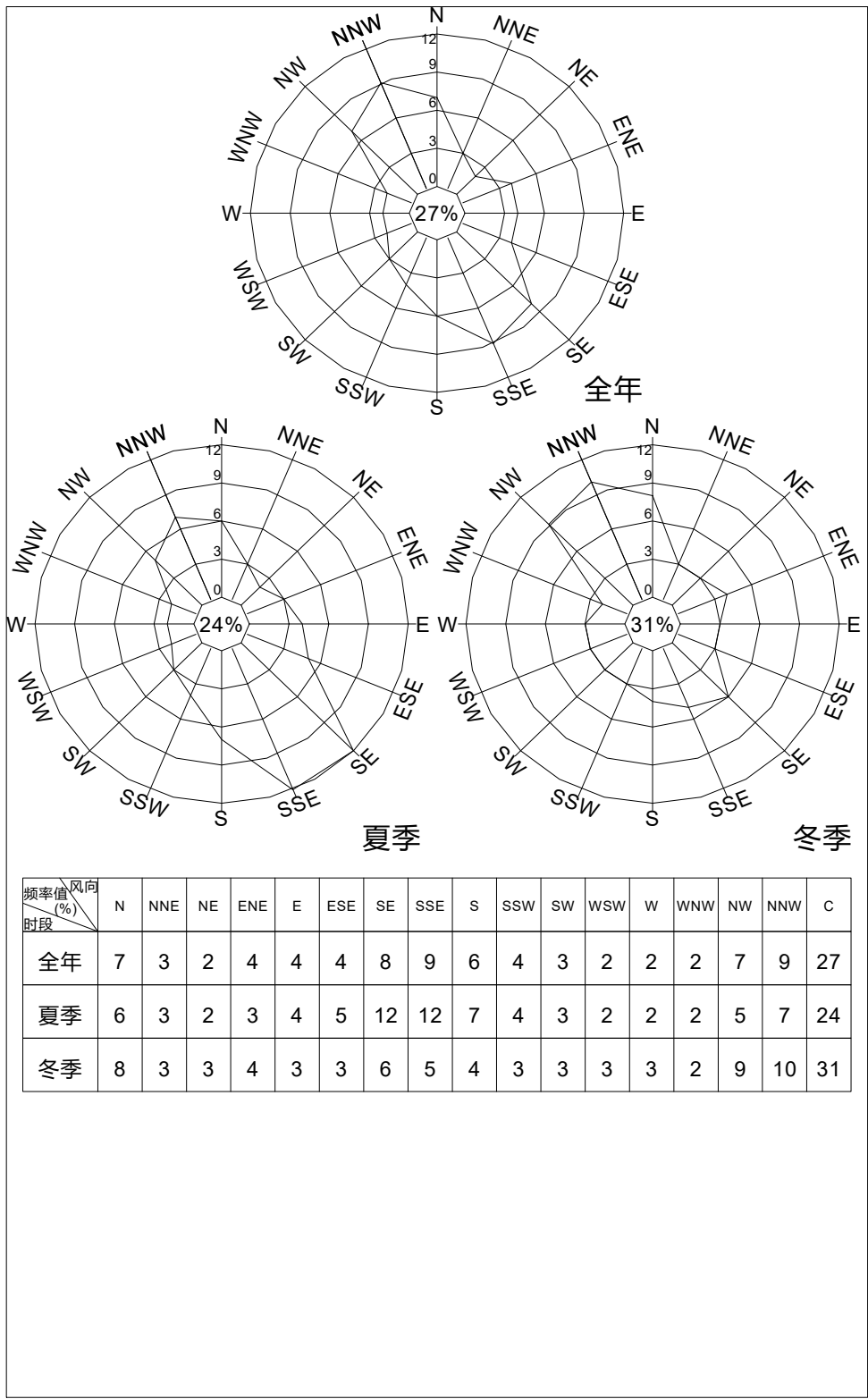
10min 平均最大风速应为 25.3m/s，相应风压为 0.40kN/m²。

2.1.4 雪压

根据宁县气象站历年最大积雪深度资料，采用极值 I 型法统计计算，并结合周围地区及《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 中的全国基本雪压分布图分析后认为，电厂五十年一遇雪压应采用 0.30kN/m²。

2.1.5 三十年一遇极端最低气温及风速

根据宁县气象站历年极端最低气温资料系列，采用 P-III 型频率计算并结合周边工程，确定三十年一遇极端最低气温为 -27.0℃。



2.1-1 宁县气象站全年、夏季、冬季风向玫瑰图

2.2 岩土工程条件

2.2.1 地形地貌及不良地质作用

拟建厂址地貌上属黄土塬，场地地势平坦开阔，场地原始地形总体上呈北西高、西东低，由北西向南东微倾态势，地面高程1227.70~1232.60m。地表中西部及南部建设有较多的民房，多为砖混结构；输电线路较多，多为近东西向展布、少量为近南北向展布；其余地段均为耕地，主要种植小麦、蔬菜等农产品。

场地南侧最近约380m（距离冲沟沟头距离）处为近南北向展布的黄土冲沟，该冲沟宽约400m，沟深最大约110m，沟底见有水体，水体高程约1111.5m（比厂区高程低约120m），考虑到厂址距离冲沟存在安全距离，可不考虑冲沟内不良地质作用对场地的影响。

2.2.2 地层岩性及分布特征

根据本次勘察钻孔（最大深度66m）及探井揭露的地层、地质调查测绘结果，结合前期勘察成果，并参考区域地质资料，拟建厂址地层岩性从上到下主要为上更新统马兰组（ Q_3^{eol} ）黄土、中更新统离石组（ Q_2^{eol} ）黄土，黄土层中夹有多层古土壤，各土层分布较稳定。各层岩性及分布特征描述如下：

L1黄土（ Q_3^{eol} ）：浅黄色，稍湿~湿，硬塑，土质较均匀，垂直节理、大孔隙发育，粉粒含量高。地表一般有40mm~60mm的农耕土层，富含植物根须。该层为第一层黄土，层厚8.3m~13.3m，层底高程1215.93m~1223.25m。

S1古土壤（ Q_3^{eol} ）：棕黄~棕红色，稍湿~湿，硬塑，土质不均匀，具粒状结构，大孔隙和虫孔发育，见较多白色钙质菌丝，混钙质结核，黏粒含量高，含少量的钙质结核。该层为第一层古土壤，勘探揭露层厚1.3m~4.6m，层底埋深11.5m~17.2m，层底高程1212.93m~1220.25m。

L2黄土（ Q_2^{eol} ）：褐黄色，稍湿~湿，硬塑，土质较均匀，垂直节理、大孔隙较发育，粉粒含量高，混少量钙质结核。该层为第二层黄土，部分钻孔夹有古土壤薄层，层厚5.1m~11.9m，层底埋深18.0m~26.5m，层底高程1203.83m~1212.93m。

S2古土壤（ Q_2^{eol} ）：棕黄~棕红色，稍湿~湿，硬塑，土质不均匀，具粒状结构，针状孔隙和虫孔发育，见较多白色钙质菌丝，混钙质结核，黏粒含量高。该层为第二层古土壤，层厚0.6m~3.8m，层底埋深20.0m~27.8m，层底高程1202.47m~1211.23m。

L3黄土（ Q_2^{eol} ）：褐黄~黄褐色，稍湿~湿，硬塑，土质较均匀，见针状孔隙，垂直节理发育，混钙质结核，粉粒含量较高。该层为第三层黄土，层厚5.4m~13.5m，层

底埋深28.6m~35.8m，层底高程1193.39m~1202.84m。

S3古土壤 (Q_2^{eol}): 棕褐~棕红色，稍湿~湿，硬塑，土质较均匀，见针状孔隙，见白色钙质菌丝，混钙质结核，黏粒含量高。下部见有较多的钙质结核。该层为第三层古土壤，一般层厚1.1m~4.6，层底埋深31.0m~39.0m，层底高程1189.48m~1199.97m。

L4黄土 (Q_2^{eol}): 褐黄~黄褐色，稍湿~湿，硬塑，土质较均匀，见针状孔隙，垂直节理发育，混钙质结核，粉粒含量较高。该层为第四层黄土，单层厚3.1m~11.8m，层底埋深36.5m~47.6m，层底高程1180.53m~1194.94m。

S4古土壤 (Q_2^{eol}): 棕褐~棕红色，稍湿~湿，硬塑，土质较均匀，见针状孔隙，混钙质结核，黏粒含量高，见有钙质结核。该层为第四层古土壤，单层厚1.5~6.4m，层底埋深40.2m~50.8m，层底高程1177.73m~1191.24m。

L5黄土 (Q_2^{eol}): 褐黄~黄褐色，湿~饱和，硬塑，土质均匀，见针状孔隙，混钙质结核，粉粒含量较高。该层为第五层黄土，夹有一层特征不明显的古土壤，单层厚9.7m~20.6m，层底埋深58.8m~65.0m，层底高程1163.48m~1171.09m。

S5古土壤 (Q_2^{eol}): 棕褐~棕红色，湿~很湿，硬塑，土质较均匀，见少量针状孔隙，混钙质结核，黏粒含量高。该层为第五层古土壤，层厚1.0m~3.5m，层底埋深61.1m~64.2m，层底高程1164.73m~1167.99m。

L6黄土 (Q_2^{eol}): 黄褐色，湿~饱和，硬塑，土质均匀，见少量针状孔隙，混少量钙质结核。该层为第六层黄土，勘探揭露单层厚度1.1m~4.0m，钻孔未揭穿该层。

各层土的埋藏条件及空间分布情况见工程地质剖面图F23341C-G01-04~19。

2.2.3 地下水埋藏条件

依据本次勘察结果，并结合区域地质资料，场地地下水主要为第四系黄土孔隙水。该类地下水主要以潜水形式分布于第四系中更新统黄土层中，主要以大气降水为补给来源，以人工取水和附近沟谷低处泉水为其主要排泄方式。

根据相关水文地质资料可知，受季节影响，地下水水位变化幅度为2.0~3.0m，其中12~2月为枯水期，5~9月为丰水期。勘察期间属丰水期，钻孔测得水位为第四系黄土孔隙水，水位埋深为44.0~47.9m，对应标高1182.13~1185.83m。

根据调查得知，厂区周边地下水位随城市发展及工农业用水影响，近年来，地下水位呈下降趋势，表现在10余年前当地村民打井取用地下水一般井深在45m以内，近年来周边打井取用地下水井深需达到55m以上。

2.2.4 建筑场地类别及地震动参数

依据地震安评报告及地勘资料，工程场地的地基土类型为中软场地土，建筑场地类别为Ⅲ类。根据地震安评报告，所在区50年超越概率10%地震动峰值加速度0.087g，水平地震影响系数 α_{max} 为0.09对应抗震设防烈度为7度，地震动反应谱特征周期为0.65s。

2.2.5 厂区地基土岩土工程评价

1) 黄土湿陷性

场地按自重湿陷场地，湿陷等级按Ⅳ（很严重）考虑；本阶段大部分区域湿陷下限按L3层底考虑，湿陷下限深度按31.0m考虑；部分区域（J143、J146）湿陷下限按L4层中部考虑，湿陷下限深度按39.0m考虑；建议下阶段根据建（构）筑物总平面布置及勘察结果进一步分区评价。

2) 地下水及地基土腐蚀性

根据《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001）（2009年版）附录G的规定，场地环境类型为Ⅱ类。本阶段勘察通过腐蚀性分析评价结果显示，地下水及地基土对混凝土结构和混凝土结构中的钢筋具微腐蚀性；考虑到本阶段尚未开展电阻率测量工作，土对钢结构的腐蚀性在下阶段进一步确定。

3) 地基土承载力特征值

表2.2.1 地基土承载力特征值一览表

层号	评价方法、依据	评价结果 $f_{ak}(\text{kPa})$	地基承载力特征值 $f_{ak}(\text{kPa})$
L1黄土	标准贯入试验（N=8.0）	128	150
	室内试验 $w=10.0\sim 18.8$ ， $w_L/e=24.0\sim 35.8$	155~250	
	地区经验数据	150	
S1古土壤	标准贯入试验（N=9.2）	147	150
	室内试验 $w=14.2\sim 19.6$ ， $w_L/e=31.1\sim 47.6$	185~250	
	地区经验数据	150	
L2黄土	标准贯入试验（N=9.6）	154	160
	室内试验 $w=11.9\sim 22.0$ ， $w_L/e=28.9\sim 37.4$	155~250	
	地区经验数据	160	
S2古土壤	标准贯入试验（N=9.6）	154	170
	室内试验 $w=18.3\sim 21.6$ ， $w_L/e=34.6\sim 45.1$	190~250	
	地区经验数据	170	
L3黄土	标准贯入试验（N=9.9）	158	170
	室内试验 $w=12.7\sim 26.0$ ， $w_L/e=30.2\sim 46.0$	145~250	

层号	评价方法、依据	评价结果 $f_{ak}(\text{kPa})$	地基承载力特征 值 $f_{ak}(\text{kPa})$
	地区经验数据	170	
S3古土壤	标准贯入试验 (N=10.2)	163	190
	室内试验 $w=17.4\sim 25.8$, $w_L/e=39.2\sim 46.6$	190~240	
	地区经验数据	190	
L4黄土	标准贯入试验 (N=10.8)	173	190
	室内试验 $w=14.5\sim 27.2$, $w_L/e=30.4\sim 39.7$	150~250	
	地区经验数据	190	
S4古土壤	标准贯入试验 (N=12.0)	192	200
	室内试验 $w=18.5\sim 25.1$, $w_L/e=31.5\sim 50.9$	150~230	
	地区经验数据	200	
L5黄土	标准贯入试验 (N=12.4)	198	200
	室内试验 $w=19.0\sim 28.2$, $w_L/e=34.7\sim 55.4$	170~230	
	地区经验数据	200	
S5古土壤	室内试验 $w=17.8\sim 27.8$, $w_L/e=39.7\sim 51.3$	190~240	220
	地区经验数据	220	
L6黄土	室内试验 $w=22.3\sim 26.8$, $w_L/e=39.8\sim 45.2$	190~210	220

4) 地基均匀性分析

根据本次勘察成果,地基土岩性种类、层位多,主要有(L1~L6)层黄土、(S1~S5)层古土壤,各层底面高程及厚度存在一定差异,且局部夹薄层,见有钙质结核,是产生不均匀沉降的不利因素,其层位稳定,力学性质差异不大,且成层性、连续性较好,主要持力层其层位埋深和厚度在水平和竖直方向上差异不大。综合分析认为,本工程场地按一般均匀性地基对待。

5) 地基土工程性能评价

Q_3 黄土、古土壤,主要分布于上部,由上至下逐渐由物理力学性质逐渐变好,具湿陷性,一般不宜直接作为建筑物的持力层。

Q_2 黄土、古土壤,位于 Q_3 黄土、古土壤下部,上部具湿陷性,中下部一般不具湿陷性。该层中下部可作为建(构)筑物的桩端持力层。

2.2.6 地基处理方案分析论证

依据本次勘察成果,在目前自然工况下,工程场地属自重湿陷性场地,湿陷性敏感、

强烈，不宜作为建筑物的天然地基，需采用人工地基，应根据地层的性质及分布特点，针对不同建（构）筑物采取不同的地基处理措施。根据《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB 50025—2018）第6.1.1条、第6.1.3条、第6.1.4条和第6.1.5条，在自重湿陷性黄土场地，甲类建筑物应处理基础底面以下的全部湿陷性黄土层；乙、丙类建筑物消除地基部分湿陷量的有关规定。综合考虑，地基处理方法建议采用钻孔灌注桩、灰土垫层、免夯填挤密桩复合地基等地基基础方案。分析如下：

（1）对于厂区拟建的主厂房、锅炉房、冷却塔等地基承载力和变形要求高的主要建（构）筑物，可采用干作业的钻孔灌注桩方案，成孔方法时需考虑钙质结核层对成孔的影响，以及成孔的安全性和经济性，桩端进入非湿陷性土层一定深度。

（2）对厂区的乙、丙类建筑可考虑采用部分消除湿陷量的地基处理方案，如挤密桩复合地基、灰土垫层法等，并结合防水及结构措施。处理深度（或厚度）应满足《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB 50025—2018）的有关要求。

若采用桩基方案，可考虑采用旋挖等干作业成孔工艺，结合附近工程经验，各层土的极限侧阻力及极限端阻力经验值见表2.2-1，最终桩基参数的取值以试桩报告为准。

表2.2-1 各层土的极限侧阻力及极限端阻力经验值

层号	极限侧阻力 q_{sik} （kPa）	极限端阻力 q_{pik} （kPa）
L1黄土	-25	/
S1古土壤	-15	/
L2黄土	-15	/
S2古土壤	-10	/
L3黄土	-10	/
	90（中性点以下）	
S3古土壤	95	/
L4黄土	95	/
S4古土壤	105	1300
L5黄土	110	1300
S5古土壤	115	1300
L6黄土	120	1400

注：根据工程经验，黄土桩侧正负摩阻力中性点按0.6倍的湿陷土层总厚度考虑。

需特别说明的是：

地基处理方案的选择,应根据场地地质条件、环境条件、技术条件、经济条件、安全等多方面因素综合考虑,不论采用何种方法,有关设计与施工工艺参数,应通过现场原体试验结果确定。

2.2.7 结论及建议

(1) 依据地震安评报告及地勘资料,工程场地的地基土类型为中软场地土,建筑场地类别为Ⅲ类。根据地震安评报告,所在区50年超越概率10%地震动峰值加速度 $0.087g$,水平地震影响系数 α_{\max} 为0.09对应抗震设防烈度为7度,地震动反应谱特征周期为0.65s。

(2) 场地地势平坦开阔,分布有均匀的深厚黄土(中软土),根据《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB50011-2010)中表4.1.1,属于对建筑抗震的一般地段。场地内不存在地震液化和震陷问题。

(3) 拟建厂址地貌上属黄土塬,场地地势平坦开阔,场地原始地形总体上呈北西高、西东低,由北西向南东微倾态势,地面高程1227.70~1232.60m。地表中西部及南部建设有较多的民房,多为砖混结构;输电线路较多,多为近东西向展布、少量为近南北向展布;其余地段均为耕地,主要种植小麦、蔬菜等农产品。

厂址距离周边冲沟有适宜的安全距离,可不考虑冲沟内不良地质作用对场地的影响。

(4) 依据本次勘察成果,厂址地层从上到下为第四系上更新统马兰组(Q_3^{eol})黄土、中更新统离石组(Q_2^{eol})黄土,黄土层中夹有多层古土壤,各土层分布较稳定。

(5) 厂区地下水主要以潜水形式分布于第四系中更新统黄土层中,主要以大气降水为补给来源,以人工取水和附近沟谷低处泉水为其主要排泄方式,地下水水位变化幅度为2.0~3.0m,勘察期间属丰水期,钻孔测得水位为第四系黄土孔隙水,水位埋深为44.0~47.9m,对应标高1182.13~1185.83m。根据调查得知,近年来地下水位呈下降趋势。

(6) 场地按自重湿陷场地,湿陷等级按Ⅳ(很严重)考虑;本阶段大部分区域湿陷下限按L3层底考虑,湿陷下限深度按31.0m考虑;部分区域(J143、J146)湿陷下限按L4层中部考虑,湿陷下限深度按39.0m考虑;建议下阶段根据建(构)筑物总平面布置及勘察结果进一步分区评价。

(7) 地下水及地基土对混凝土结构和混凝土结构中的钢筋具微腐蚀性。

(8) 厂址上部地基土工程性能较差,不能满足天然地基要求,需采用人工地基或桩基础方案。建议甲类建筑物应处理基础底面以下的全部湿陷性黄土层;乙、丙类建筑物消除地基部分湿陷量的有关规定。

(9) 依据《建筑地基基础设计规范》（GB50007—2011），本工程场地季节性标准冻土深度在60~80cm。。

3 钢筋混凝土间接空冷塔方案

本工程采用两机一塔方案，两台机组设一座间冷塔。

工艺通过热力优化拟定钢筋混凝土间接空冷塔主要热力参数如下表3-1。

表3-1 钢筋混凝土间冷塔主要热力设计参数

序号	项 目	散热器塔外垂直布置
		混凝土塔
1	散热器冷却面积（万m ² ）	311.26
2	冷却倍数	50
3	设计气温（℃）	13
4	设计背压（kPa）	9
5	夏季气温（℃）	30
6	夏季背压（kPa）	27
7	散热器三角个数（个）	220（双层布置）
8	冷却塔底部零米柱直径（m）	~171.2
9	冷却塔底部散热器外侧直径（m）	~181.2
10	冷却塔高度（m）	223
11	冷却塔进风口高度	40.5
12	冷却塔出口直径（m）	115
13	散热器管型	18mm六排管（散热器高36.5m）

4 钢筋混凝土间接空冷塔结构设计

4.1 设计参数

本工程采用两机一塔，塔高超过223m，本阶段冷却塔设计采用100年一遇基本风压进行设计。

依据《建筑结构荷载规范》GB50009-2012，本阶段按B类地貌考虑。

通过我院的科研项目和我院已经设计施工完的塔高≥190m的间冷塔设计参数的取值情况，确定本工程间冷塔全塔采用统一风振系数1.9。

本阶段本工程间冷塔的塔群系数C_g暂按1.20考虑，同时结构重要性系数按1.0考虑。

本工程30年一遇极端最低气温为-27.1℃。塔内外气温计算温差暂按42.7℃考虑。

依据地震安评报告及地勘资料，工程场地的地基土类型为中软场地土，建筑场地类别为Ⅲ类。根据地震安评报告，所在区50年超越概率10%地震动峰值加速度0.087g，水平地震影响系数 α_{max} 为0.09对应抗震设防烈度为7度，地震动反应谱特征周期为0.65s。

本工程五十年一遇10m高10min平均最大风速为23.7m/s，相应风压为0.35kN/m²；百年一遇10m高10min平均最大风速应为25.3m/s，相应风压为0.40kN/m²。

4.2 钢筋混凝土间接空冷塔结构方案

4.2.1 塔型稳定计算

根据间冷系统热力优化的结果,结合厂址气象条件和岩土工程条件,同时借鉴同类型机组工程冷却塔设计经验,对本工程推荐方案超大规模冷却塔塔型进行多方案比选及优化分析研究,在保证工程安全的前提下,通过选定塔筒合理的形状、尺寸,达到降低工程造价、缩短施工工期的目的。

塔筒整体稳定分析公式

$$q_{cr} = CE\left(\frac{h}{r_0}\right)^{2.3}$$

[GB/T 50102-2014 (3.5.15-1)]

$$K_B = \frac{q_{cr}}{\omega} \geq 5$$

[GB/T 50102-2014 (3.5.15-2)]

式中：

K_B ——稳定安全系数；

q_{cr} ——塔筒屈曲临界压力值(kPa)；

ω ——塔顶设计风压值(kPa)；

C ——经验系数，其值为0.052；

E ——混凝土弹性模量(kPa)；

r_0 ——塔筒喉部半径(m)；

h ——塔筒喉部处壁厚(m)。

从式中可知，在风压一定的情况下，塔筒整体稳定主要与喉部塔筒壁厚 h 和塔筒混凝土弹性模量 E 成正比，提高混凝土强度或加大筒壁厚度均可达到提高整体稳定系数的目的。

表4.2-1 本工程冷却塔整体稳定屈曲稳定计算一览表

计算参数	参 数 取 值	说 明
C	0.052	经验系数

计算参数	参 数 取 值	说 明
β	1.90	风振系数
$E(\text{kPa})$	$3.25\text{E}+07$	混凝土弹性模量(塔筒C40)
$\omega_0(\text{kPa})$	0.40	设计基本风压
$Z(\text{m})$	223	塔高
d_0	110	喉部内模直径
$h(\text{m})$	0.325	喉部处壁厚(最小壁厚)
$r_0(\text{m})$	55.1625	喉部中面半径
$\omega(\text{kPa})$	2.3147	塔顶标高处设计风压
$q_{cr}(\text{kPa})$	12.573	塔筒屈曲临界压力值
K_B	5.43	整体稳定系数, 规范要求 ≥ 5

4.2.2 塔筒优化

冷却塔结构选型计算采用我院开发的冷却塔结构选型程序。该程序采用薄膜理论、数解法分析壳体应力, 计算时除可考虑静载、风荷载作用外, 还计算了内吸力产生的应力, 对塔型进行选型分析和局部屈曲稳定验算, 控制壳体屈曲安全系数应 ≥ 5.0 , 使结构应力水平较低、满足抗倾、抗拔和地基承载力要求。

在塔型优化时, 主要热力尺寸由我院工艺专业通过热力系统优化确定。

塔筒模板高度暂按目前国内大型冷却塔施工中使用日趋普遍的1.3米/节考虑。

冷却塔支柱对数取54对, 采用钢管混凝土双交叉斜支柱, 支柱直径为1.321m。冷却塔基础采用环板基础。

间冷塔筒壁母线为一直线锥体段+两段双曲线(以喉部为界)组成。

考虑到本工程冷却塔属特大冷却塔, 但风压较小, 结合以往工程钢筋混凝土冷却塔结构设计、建设施工、建设周期、结算造价等实际经验, 暂按无肋光面钢筋混凝土冷却塔考虑。

结构优化确定间冷塔喉部位置及壳底斜率, 优化的过程是通过试算获得较为理想的喉部位置及壳底斜率。

根据国家标准《火力发电厂间接空冷系统设计规范》(DL/T 5545 - 2018), 喉部至塔顶距离与塔总高的比率I值取0.15~0.25, 它直接影响到壳体的应力和塔基底的上拔力, 较高的比率可以降低塔的上拔力, 但当I值大于0.25时, 须对塔筒应力进行仔细研究。

壳底斜率 $\text{tg}\varphi$ 为壳体底部边缘线与垂直轴夹角的正切, 采用高值时, 壳体上拔力较

小而作用在基础上的水平力较大。

在以上参数的区间内，比较了约40多个结构方案，最终选用工程量相对较小、内力分部相对有利的设计参数。在以上参数的区间内，我们利用我院编写的优化程序，进行了结构优化计算，最终选用工程量合理、支柱受力合理的设计参数。

塔型选定后，我们采用冷却塔塔筒计算程序，根据最终选定的参数，对冷却塔进行了计算分析，分析结果表明，局部稳定系数最小值5.1，满足要求。同时利用ANSYS程序按规范公式进行了复核，屈曲稳定安全系数均满足要求。

4.3 钢筋混凝土间接空冷塔结构尺寸

根据我们的初步分析和以往设计机组工程经验，并参考国内外大塔资料，确定现阶段冷却塔结构尺寸如下。

表4-3 间接空冷方案结构优化尺寸汇总表

项 目		单位	参数	备 注
冷却塔本体 主要几何参数	塔筒混凝土强度等级		C40	
	冷却塔塔高	m	223	
	±0.0m直径	m	171.2	
	喉部直径	m	110	
	喉部标高	m	162.02	
	塔顶出口直径	m	115	
	进风口高度	m	40.5	钢环梁底标高
	最小壁厚	m	0.325	
	壳底最大壁厚	m	1.50	
	壳底斜率		0.25	
	斜支柱型式		双交叉钢管混凝土 斜支柱	直径1.321m
	斜支柱对数		54	
	冷却塔基础型式		环板基础	9.8m×2.5m
	地基处理		灌注桩	

4.4 钢筋混凝土间接空冷塔结构分析

现阶段，我们使用冷却塔结构选型程序及我院开发的《冷却塔静、动力分析程序LBS、LBSD》和《大型冷却塔稳定及静动力分析设计软件LCTADS》，对本工程拟建的

冷却塔结构方案进行了分析计算，初步的分析计算结果表明，上述初选的间冷塔结构方案其几何尺寸及配筋（冷却塔塔筒配筋量约为 160kg/m^3 左右）都基本控制在比较合理的水平。

冷却塔结构属于空间薄壳结构，自振频率低，柔性大，抗震性能优良。

4.5 钢筋混凝土间接空冷塔施工可行性

本工程间冷塔塔高 223.0m （两机一塔）， 0m 直径 171.2m （两机一塔），50年一遇设计基本风压 0.35kPa ，100年一遇设计基本风压 0.40kPa 。

截止到2023年12月底，国内塔高 200m 及以上的冷却塔已建成33座，在建10座。目前，国内已建成的最高的冷却塔是2022年11月份建成的内蒙古蒙能金山热电厂二期工程 $2\times 660\text{MW}$ 冷却塔（两机一塔），塔高 228m ；国内在建的最高的冷却塔是湖南益阳电厂三期 $2\times 1000\text{MW}$ 冷却塔（两机一塔，高位塔），塔高 242.4m 。证明设计建造 220m 左右的冷却塔是完全可行的。

我院设计常乐电厂一期1#-4#冷却塔，塔高 210m ，该塔2018年~2023年陆续建成投运，该地区不但设计风压大，而且常年大风，这也证明在大风地区设计建造 210m 左右的冷却塔是完全可行的。

我院设计神木神信热电 $2\times 660\text{MW}$ 机组间冷塔（一机一塔）塔高 215m ，采用双交叉钢管混凝土斜支柱，2022年7月22日环基开始挖土施工，2023年8月17日#1塔施工到顶，毛工期13个月（含冬休期2个月），扣除天气等因素，1号间冷塔总施工周期约9.5个月；2号间冷塔总施工周期约8.5个月，两座间冷塔的施工速度均打破了同类型间冷塔历史记录，在电力行业施工速度中达到领先水平。。

塔筒施工过程中，尤其是接近冬期较低气温条件下施工时，由于塔筒未到顶，同时较低龄期的混凝土强度和弹性模量尚未增长充分，较低地气温也影响了混凝土力学性能的正常发挥，此时塔筒的稳定性问题应予重视。在施工前施工方案制定时，对不同高度、不同气温条件下的混凝土的初期强度、施工速率进行详细分析，提出针对性地控制要求。通过合理的施工组织，本工程冷却塔对施工期稳定安全是有保证的。

根据我们的工程实践和经验，结合近几年来我们对大量超高空冷塔的专题研究和分析，本工程两机一塔方案空冷塔的建设是完全可行的，土建施工工期可控制在13~15个月。

4.6 我院近期已完成的钢筋混凝土间接空冷塔工程实例

我院设计完成的钢筋混凝土间接空冷塔工程一览表

工程名	机组规模 (MW)	塔高 (m)	环基直径 (m)	系统配置	状态
国电大武口发电厂上大代小热电联产2X330MW机组工程	2×300	157.8	124.304	一机一塔	2010.10投运
国电宝鸡第二发电厂扩建工程（三塔合一）	2×660	170	145.292	一机一塔 三塔合一	2011.01投运
宁夏水洞沟电厂	2×660	172.0	145.5	一机一塔	2011.03投运
山西山阴发电厂（两机一塔，三塔合一）	2×300	165	160.0	两机一塔 三塔合一	2012.04投运
华能陕西秦岭发电有限公司7#、8#机组工程（三塔合一）	2×660	179.8	131.512	一机一塔 三塔合一	2011.12投运
华能左权发电厂一期	2×660	173.8	140.34	一机一塔	2011.12投运
新疆神火集团煤电有限公司4×350MW工程	4×350	170.0	162.298	两机一塔	2014.05投运
金昌市热电联产(2×330MW)工程	2×330	162.0	125.768	一机一塔	2013.12投运
英力特宁东2×330MW机组热电联产工程	2×350+甲醇	180	155.9	三机一塔	2013.06投运
中电投西宁火电厂	2×660	164.68	141.922	一机一塔	2015.12投运
新疆国信准东2X660MW煤电项目	2×600	175.0	152.453	一机一塔	2018.01投运
国电哈密大南湖煤电一体化2×660MW工程	2×660	173.0	150.708	一机一塔	2015.12投运
鄂尔多斯市君正能源化工动力分厂工程	2×330	180.0	168.798	两机一塔	2015.01投运
内蒙古鄂尔多斯电力（集团）有限责任公司4×330MW机组工程（两机一塔，三塔合一）	4×330	180.0	167.096	两机一塔 三塔合一	2015.08投运
山西河坡发电有限责任公司上大压小2×350MW超临界热电联产机组工程	2×350	178.0	149.148	两机一塔	2015.07投运
山阴二期2×350M低热值煤发电供	2×350	180.0	160.56	一机一塔	2019.06投运

工程名	机组规模 (MW)	塔高 (m)	环基直径 (m)	系统配置	状态
热工程（两机一塔，三塔合一）					
国电宁夏吴忠热电厂“上大压小”新建工程	2×350	178.0	155.94	两机一塔	2016投运
陕西美鑫产业投资有限公司年产30万吨铝镁合金项目配套动力设施工程	4×350	179.0	155.75	两机一塔	2016.06投运
甘肃白银市热电联产工程	2×350	176.0	148.58	两机一塔	2015.10投运
山西灵石启光2X350MW低热值煤综合利用发电工程	2×350	185.0	160.30	两机一塔	2016.06投运
大唐八零三上大压小2X300MW热电联产工程	2×300	170.0	136.5	两机一塔	2016.12投运
中铝宁夏银星电厂2×660MW工程	2×660	167.0	135.017	一机一塔	2017.01投运
山西潞安长子高河	2×660	220.0	185.072	两机一塔	2017.04投运
陕西神华富平热电新建工程	2×350	140.0	107.072	一机一塔	2018.07投运
陕能赵石畔煤电一体化项目雷龙湾电厂工程	2×1000	204.0	149.19	一机一塔	2018.12投运
陕西榆能横山煤电一体化项目电厂新建工程	2×1000	196.0	149.18	一机一塔	2018.12投运
兵团红星发电2x660MW机组新建工程	2×660	185.0	151.159	一机一塔	2019.11投运
陕西商洛发电有限公司2x660MW工程	2×660	173.0	137.012	一机一塔	2018.11投运
甘肃电投常乐电厂调峰火电项目1、2号机组	2×1000	210.0	168.18	一机一塔	2020.09投运
聊城信源集团有限公司机组空冷系统改造工程	2×660	222.0	187.948	两机一塔	2025.05投运
长安益阳发电有限公司2×100万千瓦扩能升级改造项目	2×1000	242.5	183.948	两机一塔	施工塔筒
榆能杨伙盘煤电一体化项目	2×660	188.00	141.84	一机一塔	2023.02投运 单交叉钢管 混凝土支柱
黄陵矿业集团有限公司店头2×660电厂	2×660	210.00	159.814	两机一塔	2023.07投运 双交叉钢管 混凝土支柱

工程名	机组规模 (MW)	塔高 (m)	环基直径 (m)	系统配置	状态
蒙泰东胜二期2×660热电联产项目	2×660	214.70	169.20	两机一塔	2022.12投运 双交叉钢管 混凝土支柱
神木神信热电厂	2×660	215.0	149.3	一机一塔	2022.12建成 双交叉钢管 混凝土支柱



图4.6-1 内蒙古蒙泰东胜工程实景照片



图4.6-2 杨伙盘工程实景照片



图4.6-3 陕西黄陵店头电厂工程实景照片（塔高）



图4.6-4 陕能赵石畔煤电一体化项目雷龙湾电厂间冷塔（塔高204m）



图4.6-5 山西潞安长子高河电厂间接空冷冷却塔图（塔高220m）



图4.6-6 神木神信热电厂1、2号机组间冷塔（塔高215m）



图4.6-7 甘肃电投常乐电厂火电调峰项目1、2号机组间冷塔（塔高210m）



图4.6-8 山东信发信源电厂间接空冷冷却塔（塔高222m）



图4.6-9 新疆信泓电厂间接空冷冷却塔（塔高198m）

（2023-06-05浇筑环基垫层，2024-07-04到塔，历时13个自然月，其中冬休期3.5个月）

5 钢结构间接空冷塔方案

本工程采用两机一塔方案，两台机组设一座间冷塔。
工艺通过热力优化拟定钢结构间接空冷塔主要热力参数如下表5-1。

表5-1 钢结构间接空冷塔主要热力设计参数

序号	项 目	设计参数	
1	钢塔塔型	双曲线型	直锥型
2	散热器冷却面积（万m ² ）	315.65	315.65
3	冷却倍数	50	50
4	设计气温（℃）	13	13
5	设计背压（kPa）	9	9
6	夏季气温（℃）	30	30
7	夏季背压（kPa）	27	27
8	冷却塔底部零米柱直径（m）	~171.2	~171.2
9	冷却塔底部散热器外侧直径（m）	~181.2	~181.2
10	冷却塔高度（m）	223	223
11	冷却塔进风口高度	41.0	41.0
12	冷却塔出口直径（m）	115	115
13	散热器三角个数	220（双层布置）	220（双层布置）
14	散热器管型	18mm六排管 （散热器高37.0m）	18mm六排管 （散热器高37.0m）

6 钢结构间接空冷塔结构设计研究

6.1 钢结构间接空冷塔方案基本情况

6.1.1 国内外钢结构冷却塔应用情况

冷却塔的结构方案可采用钢筋混凝土结构或钢结构，从全球范围看，绝大多数冷却塔为钢筋混凝土结构。从上世纪七十年代开始，国外出现了钢结构冷却塔，至今国外建成了近30座间冷钢塔。国内近几年兴起了钢塔技术研究和应用实践，目前也有多个钢结构间冷塔的工程实施建成投运。随着政策导向、新技术的成熟应用，钢结构间冷塔成了新建工程可选结构形式之一。

截止到2023年12月底，国内已有多个工程钢结构冷却塔建成或在建，见表6.1-1。

随着技术的发展和业主需求的多样化，间接空冷冷却方式在缺水区的电厂将大量采

用，钢结构冷却塔结构型式成为业主可供选择的结构形式之一。钢结构冷却塔具有施工受气候制约小、现场施工工期可控、具有一定的残值等优点，很好的解决了北方地区钢筋混凝土冷却塔施工周期受冬季停工的影响。同样，当混凝土材料采购困难且人工费较高时，钢结构大塔也将成为可供选择的方案。

6.1.2 国内钢结构冷却塔研究概况

6.1.2.1 国内相关单位的研究工作

随着电站空冷技术和钢结构技术的发展，间冷系统采用钢结构塔已成为越来越多业主的选择。与传统的混凝土冷却塔相比，钢结构冷却塔具备施工周期短、钢结构冷却塔的综合造价低、自重轻、抗震性能突出、美观的优点。

国内钢结构间冷塔采用的塔型一般分为两种：双曲线型和直筒锥段型，详见实际工程图片：



双曲线型



直筒锥段型

目前具备投运业绩的钢结构间冷塔系统供货厂家主要有华电重工和双良冷却两家，华电重工塔型均为双曲线型钢结构塔，双良塔型均为直筒锥段型钢结构塔。

双良集团于2012年至2013年委托中国建筑科学研究院，最早进行了钢结构塔（目标对象的塔高180米）的风工程研究，使用大型风洞完成了钢塔的刚性模型试验、弹性模型试验以及风振分析，并基于试验研究成果完成了钢结构塔体的结构静力计算和屈曲稳定分析等设计计算工作。

华电重工与中国建筑科学研究院、北京交通大学、中国建筑研究总院有限公司合作

完成了主体结构及围护结构风荷载研究，彩钢板维护系统抗风揭研究，使用大型风洞完成了钢塔的刚性模型试验及风振分析，利用试验研究成果完成了钢结构塔体的几何非线性分析及材料非线性分析等设计计算工作。

新疆华电哈密2×1000MW煤电项目,210m双曲线型钢塔试验模型图片：



通过研究及分析计算为钢结构塔在我国的应用奠定了设计基础，到目前为止已有11个项目18座钢塔建成投产，另外还有6个项目11座钢塔正在施工。同时结合实际工程造价，在当时的材料价格下认为采用钢结构塔比采用混凝土塔能节约一定的造价。哈空调针对钢结构冷却塔也进行了相应的研究工作，认为钢结构冷却塔具有造价低施工速度快的优势，研究成果已见诸文献报道。华电集团在实际工程中采用了双曲线钢结构冷却塔，其中华电土右小机间冷塔已运行数年，另有3个工程的钢结构冷却塔目前正处于施工阶段。

6.1.2.2 国内典型工程钢结构冷却塔结构

表6.1-1 国内典型工程钢结构冷却塔工程（截止到2023年12月）

工程名称	机组容量	类型	塔型	配置	塔高 (m)	数量 (座)	建成 时间
华电土右电厂2×660MW机组	2×660MW 小机间冷	空冷塔	双曲线	两机一塔	124	1	2016.04
蒙能锡林浩特热电厂	2X350MW	空冷塔	直筒圆锥	两机一塔	181	1	2018.09
宁夏大坝电厂四期 2×660MW工程	2×660MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	170	2	2018.04

工程名称	机组容量	类型	塔型	配置	塔高 (m)	数量 (座)	建成 时间
陕能麟游低热值煤电工程	2×660MW	排烟空冷塔	直筒圆锥	两机一塔	170.5	1	2018.05
新疆信友奇台电厂	2×660MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	175	2	2019.11
新疆华电哈密发电四期	2×350MW	空冷塔	双曲线	两机一塔	160	1	2020.10
国电双维上海庙煤电一期	2×1000MW	空冷塔	直筒圆锥	两机一塔	190.2	2	2021.01
内蒙古科右中旗热电厂	2×660MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	160	2	2021.09
国电双维上海庙煤电二期	2×1000MW	空冷塔	直筒圆锥	两机一塔	190.2	2	2022.05
国电建投内蒙古能源有限公司长滩电厂	2×660MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	160	2	2022.10
双良晶硅新材料(包头)三期 50GW单晶硅项目	/	空冷塔	直筒圆锥	/	128	2	2023.08
华能正宁电厂二期	2×1000MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	190.2	2	在建
内蒙古达拉特五期	1×1000MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	192	1	在建
山东能源灵台电厂	2×1000MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	195	2	在建
国能彬长2×660MW CFB	2×660MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	170	2	在建
华电巴里坤电厂	2×1000MW	空冷塔	双曲线	一机一塔	210	2	在建
甘电投张掖电厂二期	2×1000MW	空冷塔	直筒圆锥	一机一塔	195	3	在建

(1) 新疆信友奇台电厂 2×660MW 工程

系统配置： 一机一塔

结构形式： 直筒圆锥单层三角格构，蒙皮外置

设计风压： 0.72 kN/m²

塔高： 175 m

0m 直径： 151.28 m

出口直径： 102.50 m

环基单跨长度： 9.5 m

建设状态：1#机组间冷钢塔2019年4月17日结顶，于2019年1月18日通过168小时满负荷连续运行。2#机组间冷钢塔2019年11月7日结顶。建设工期：2015年开建，2018年12月调试（中间停建）。



建成后的钢结构间冷塔

(2) 华能宁夏大坝电厂四期2×660MW工程

系统配置： 一机一塔

结构形式： 直筒圆锥单层三角格构，蒙皮外置

设计风压： 0.51 kN/m²

塔高： 170.0 m

0m直径： 129.4 m

出口直径： 84.0 m

环基单跨长度： 10.16 m

建设状态： 2018年4月建成，10月21日投运。建设工期：12个月。



建成后的钢结构间冷塔

(3) 陕能麟游低热值煤发电2×350MW工程

系统配置： 排烟冷却塔，两机一塔
结构形式： 直筒圆锥单层三角格构，蒙皮内置
设计风压： 0.39 kN/m²
塔高： 170.5 m
0m直径： 147.5 m
出口直径： 96.5 m
环基单跨长度： 12.87 m
建设状态： 2018年5月建成,12月投运。建设工期：12个月。



建成后的钢结构间冷塔

(4) 蒙能锡林浩特2×350MW工程

系统配置： 两机一塔

结构形式： 直筒圆锥单层三角格构，蒙皮外置

设计风压： 0.55 kN/m²

塔高： 181 m

0m直径： 154.3 m

出口直径： 94 m

建设状态： 2018年5月建成,9月投运。建设工期：15个月（冬歇3个月）。



建成后的钢结构间冷塔

(5) 华电土右电厂 2×660MW 机组工程

系统配置： 小机间冷，两机一塔

结构形式： 双曲线形双层网壳，蒙皮外置

设计风压： 0.39 kN/m²

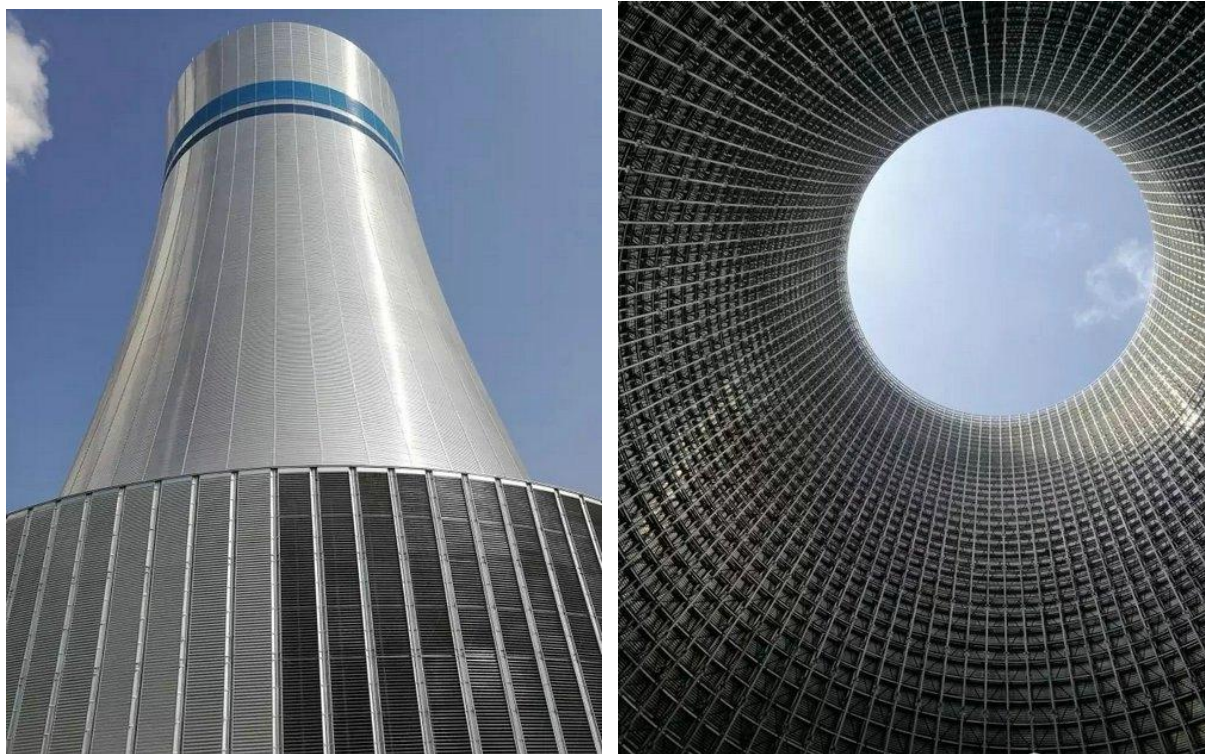
塔高： 124.0 m

0m直径： 77.6 m

喉部直径： 48.2 m

环基单跨长度： 5.85 m

建设状态： 2016年12月，投运。



建成后的钢结构间冷塔

(6) 新疆华电哈密热电有限公司四期扩建 (2×350MW) 热电联产工程

系统配置: 两机一塔

结构形式: 双曲线形双层网壳, 蒙皮外置

设计风压: 0.60 kN/m^2

塔高: 160.0 m

0m直径: 140.40m

喉部直径: 92.667 m

环基单跨长度: 14.00 m

建设状态: 2021年竣工, 投运。



(7) 华电巴里坤2×1000MW电厂

结构形式： 双曲线形双层网壳，蒙皮外置

设计风压： 0.74 kN/m^2

塔高： 210.0 m

0m直径： 147.0m

喉部直径： 90.00 m

环基单跨长度： 15.00m

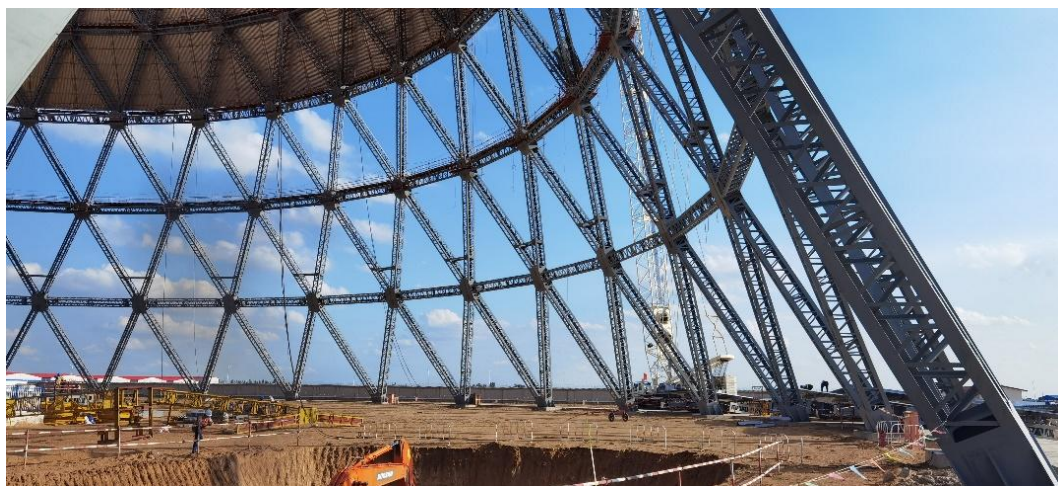
建设状态： 2023年11月开工，目前国内最高钢塔，正在建设。



6.1.3 钢塔塔身结构形式

6.1.3.1 直筒锥段型

钢塔采用直筒锥段型，结构为圆形变截面钢结构塔型。主要受力构件为由角钢拼焊而成的格构柱，格构柱构成大型三角构架后吊装，蒙皮结构固定于三角构架上。



采用格构柱形式的直筒锥段钢塔

6.1.3.2 双曲线型

钢塔采用双曲线型，塔身采用新型斜交网壳结构形式，网壳底部落地。主要受力构件为钢管+球节点。相比格构柱型结构具有焊接量小，节点轻，整体钢结构用量小的优点。此结构形式也适用于直筒锥段塔型。



采用双向斜交网壳形式的双曲线型钢塔

6.2 钢结构冷却塔主要设计荷载

6.2.1 结构自重

结构自重包括钢结构骨架构件重量、檩条及外围护板重量及连接节点重量。

6.2.2 风荷载

风荷载是冷却塔的重要荷载之一，是冷却塔的主要作用荷载。其结构主要受风荷载控制。因此西北院对于钢结构冷却塔进行风洞试验，风洞试验包括刚性模型试验、气弹模型试验和内阻力试验，获取钢塔的风载体型系数、风振系数和内阻力系数。图6.2-1所示为风载体型系数的风洞试验情况。图6.2-2所示为气弹模型风洞试验情况。图6.2-3所示为内阻力试验情况。

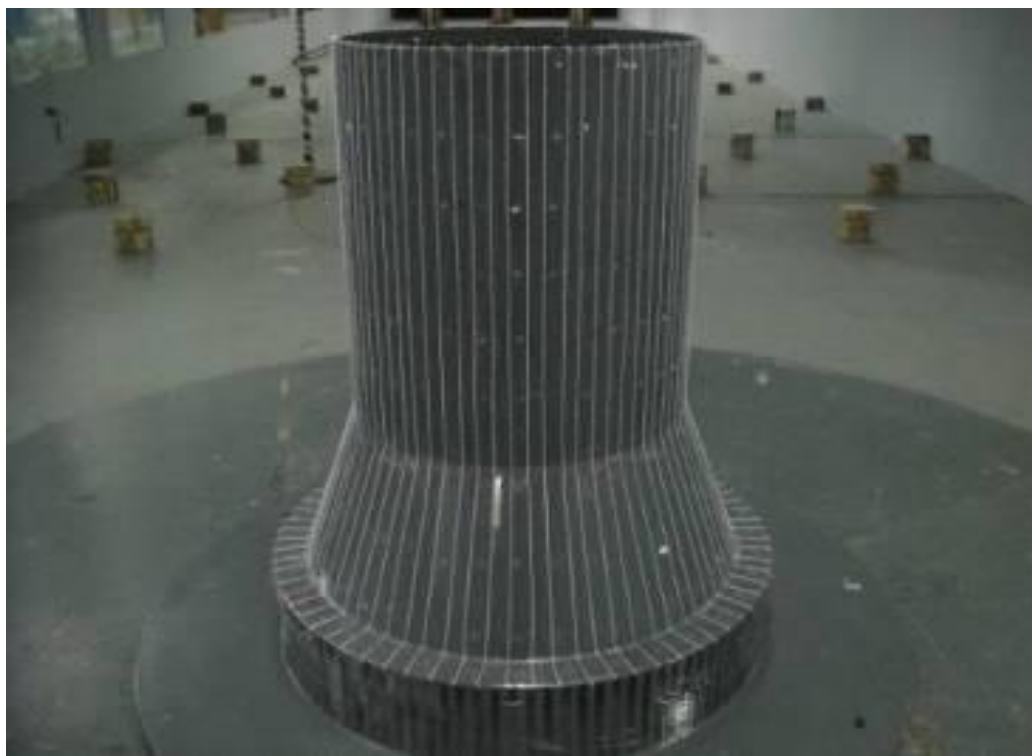


图6.2-1 风载体型系数试验



图6.2-2 气弹模型风洞试验



图6.2-3 内阻力试验模型

通过风洞试验和计算分析得出了钢冷却塔的风载体型系数、风振系数和内阻力系数，为工程设计奠定了基础。

关于冷却塔设计风荷载的取值，国内《工业循环水冷却设计规范》(GB/T 50102-2014)及中国电力工程工程顾问集团企业标准《超大型冷却塔设计导则》(QDG 1-S012-2011)中规定，设计采用100年一遇基本风压。

本工程冷却塔主要风荷载设计参数取值如下：

- (1) 基本风压：基本风压按 0.40kN/m^2 考虑。
- (2) 地貌类型按B类地貌。
- (3) 风振系数及风压曲线根据钢结构空冷塔风洞试验结果取值。
- (4) 塔群影响系数根据风载下多塔干扰试验确定。

6.2.3 温度荷载

本工程30年一遇极端最低气温为 $-27.^\circ\text{C}$ 。塔内外气温计算温差暂按 42.7°C 考虑。

6.2.4 抗震设防

依据地震安评报告及地勘资料，工程场地的地基土类型为中软场地土，建筑场地类别为III类。根据地震安评报告，所在区50年超越概率10%地震动峰值加速度 0.087g ，水平地震影响系数 α_{\max} 为0.09对应抗震设防烈度为7度，地震动反应谱特征周期为0.65s。

6.2.5 设计工况

荷载分项系数和荷载组合系数按《工业循环水冷却设计规范》(GB/T 50102-2014)的有关规定采用。

对于塔筒优化计算，其荷载组合如下：

$$S=\gamma_G S_{GK}+\gamma_W S_{WK}+\gamma_{\psi_t} S_{TK} \quad [\text{GB/T 50102-2014 (3.5.11-1)}]$$

$$S=\gamma_G S_{GK}+\gamma_W \psi_W S_{WK}+\gamma_T S_{TK} \quad [\text{GB/T 50102-2014 (3.5.11-2)}]$$

地震作用按《构筑物抗震设计规范》要求进行考虑。

对于地基承载力验算，其荷载组合如下：

$$S_K=1.1G+S_{WK}/\beta+\psi_t S_{TK} \quad [\text{GB/T 50102-2014 (3.5.18)}]$$

对于基础上拔力平衡验算，应采用下列组合：

$$S=S_{GK}+1.2S_{WK} \quad [\text{GB/T 50102-2014 (3.5.20)}]$$

上述式中：

S—荷载效应组合的设计值；

S_{GK} —按永久荷载标准值计算的荷载效应值；

S_{WK} —按风荷载标准值计算的荷载效应值；

S_{TK} —按计入徐变系数的温度作用标准值计算的效应值；

ψ_w —风荷载效应组合系数，一般取0.6；

ψ_t —温度作用效应组合系数，一般取0.6；

γ_G —永久荷载分项系数，当其效应对结构有利时取1.0;当其效应对结构不利时取1.3；

γ_w —风荷载分项系数，取1.5；

γ_T —温度作用分项系数，取1.0。

6.3 钢结构冷却塔结构设计研究

6.3.1 塔型选择

钢结构冷却塔可以采用两种基本形式，即传统的双曲线型形式，或者采用直筒锥段形式，如图6.3-1所示。

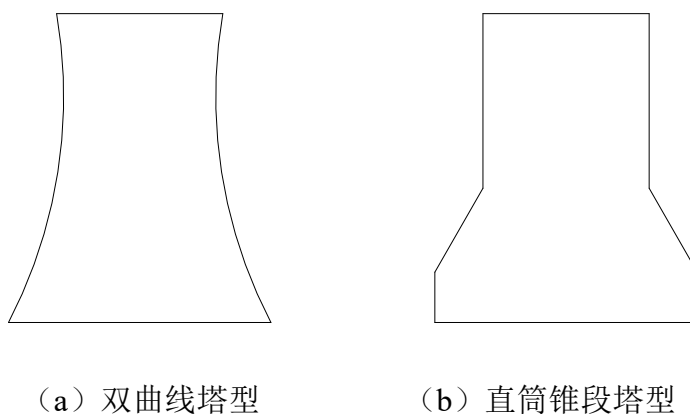


图6.3-1 冷却塔塔型

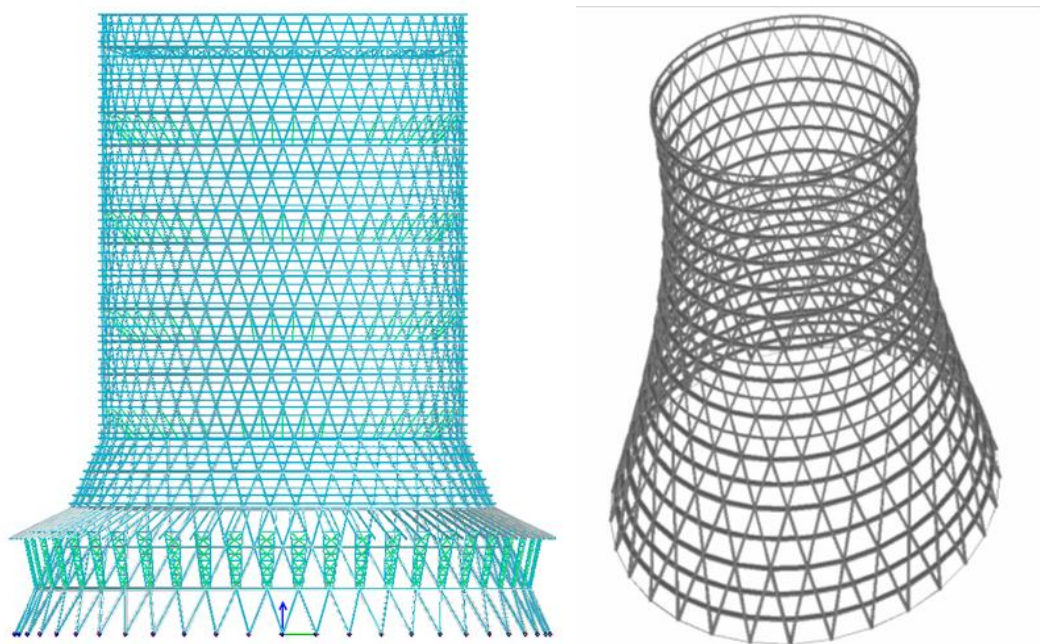


图6.3-2 有限元分析模型

6.3.2 钢结构间冷塔结构体系

钢结构冷却塔的结构体系、杆件截面种类较多，直筒圆锥/双曲线、大网格/三角网格、单层/双层网架、实腹杆件/钢桁架/钢管、高强彩钢板/铝合金板等都有应用。

本工程钢结构塔可有两种结构体系选择：

钢桁架三角单元直筒圆锥铝蒙皮钢结构冷却塔

钢桁架三角单元双曲线铝蒙皮钢结构冷却塔

简列如下：

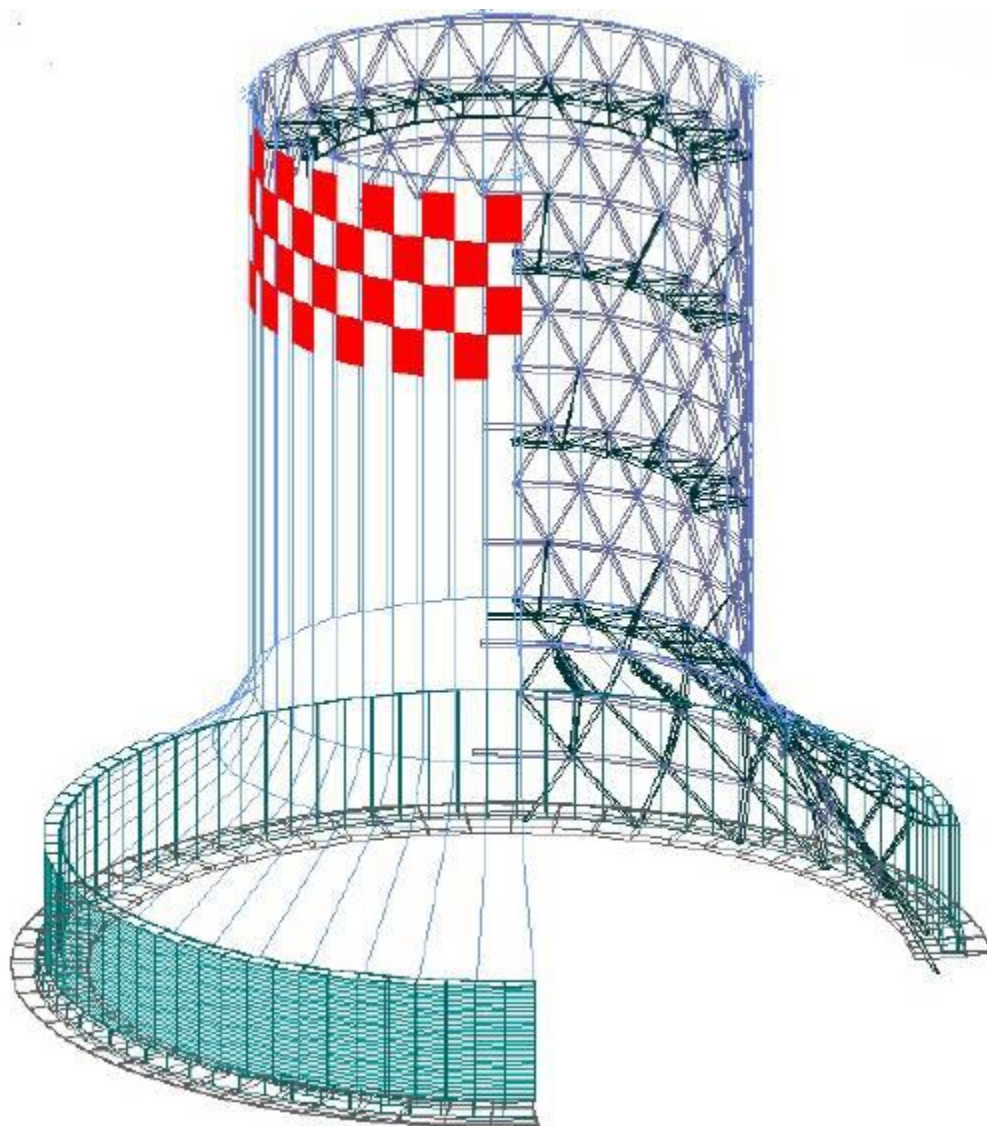


图6.3-3 直筒锥段间冷塔结构组成示意图

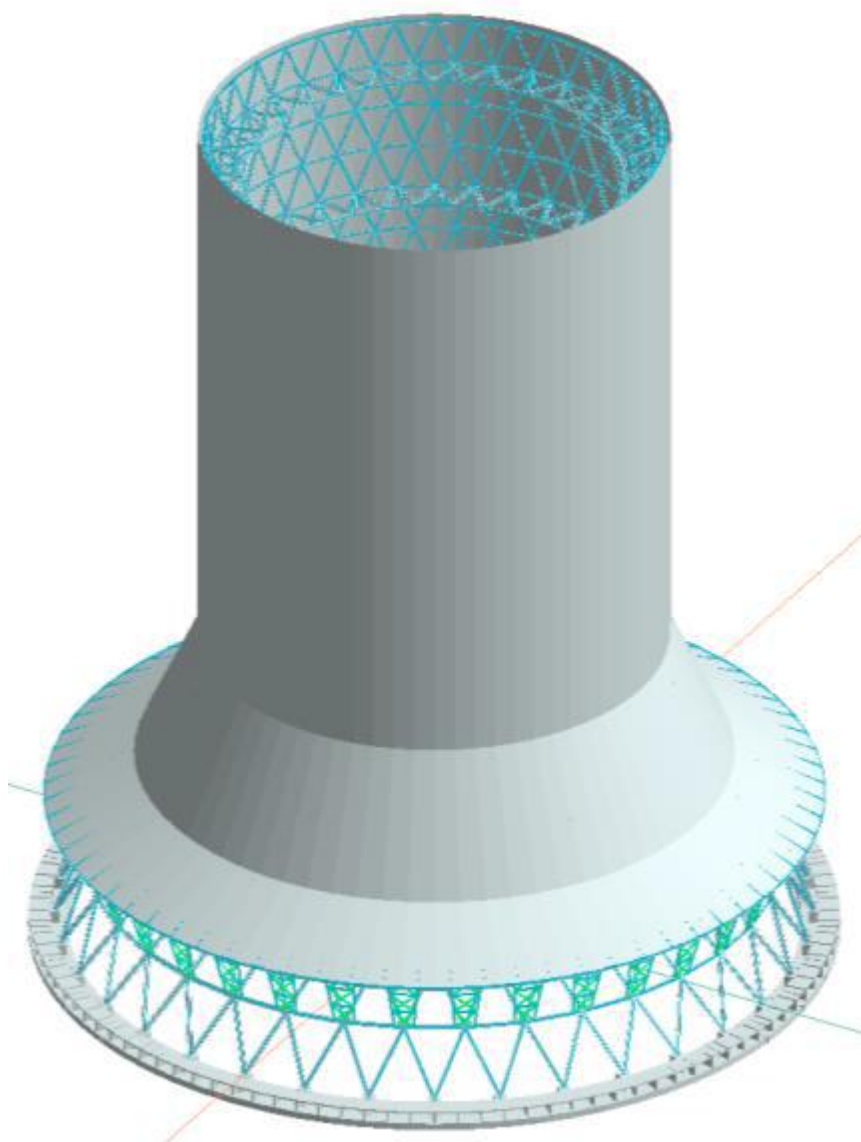


图6.3-4 直筒锥段间冷塔蒙皮效果图

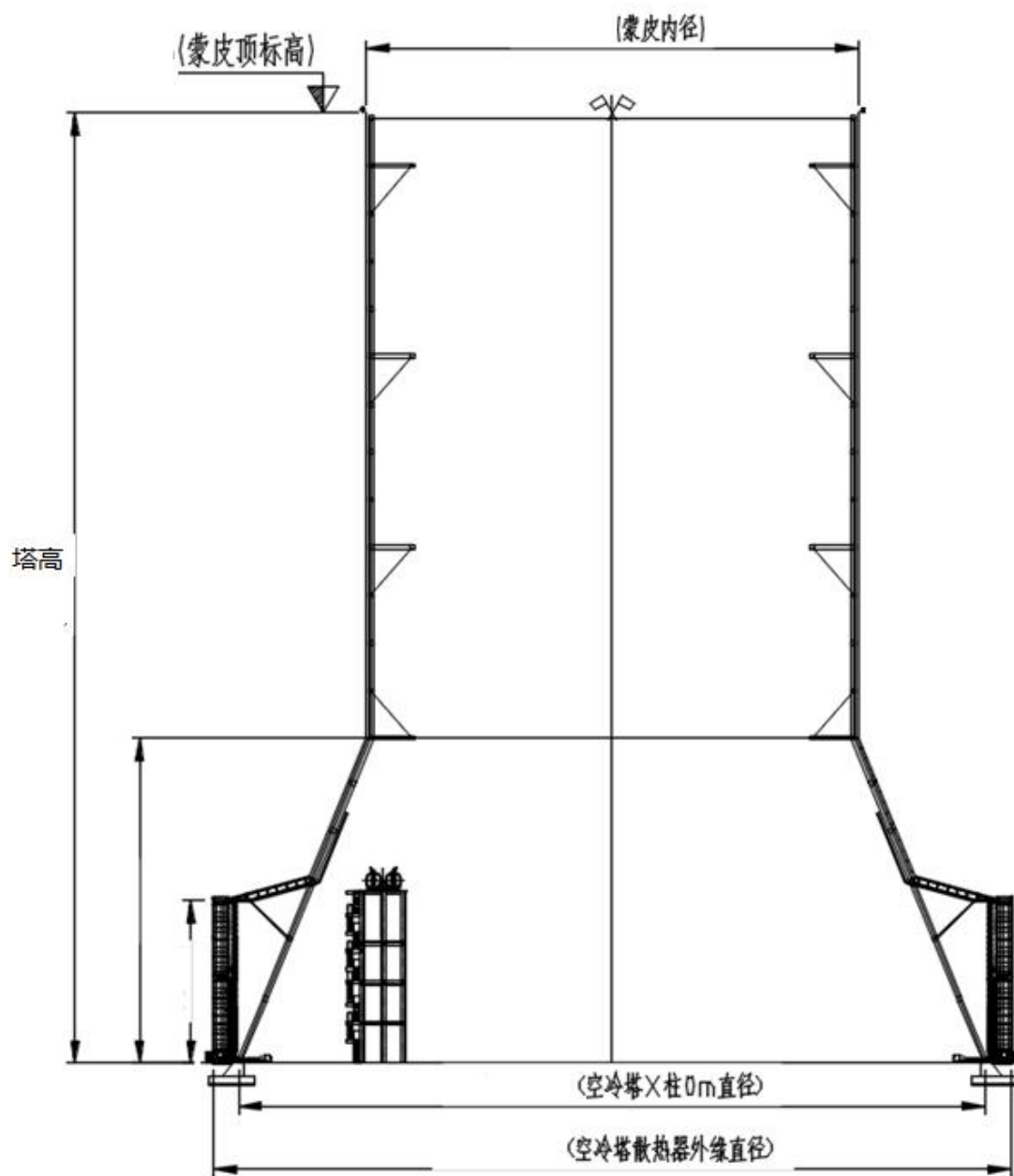


图6.3-5 直筒锥段间冷塔结构剖面图

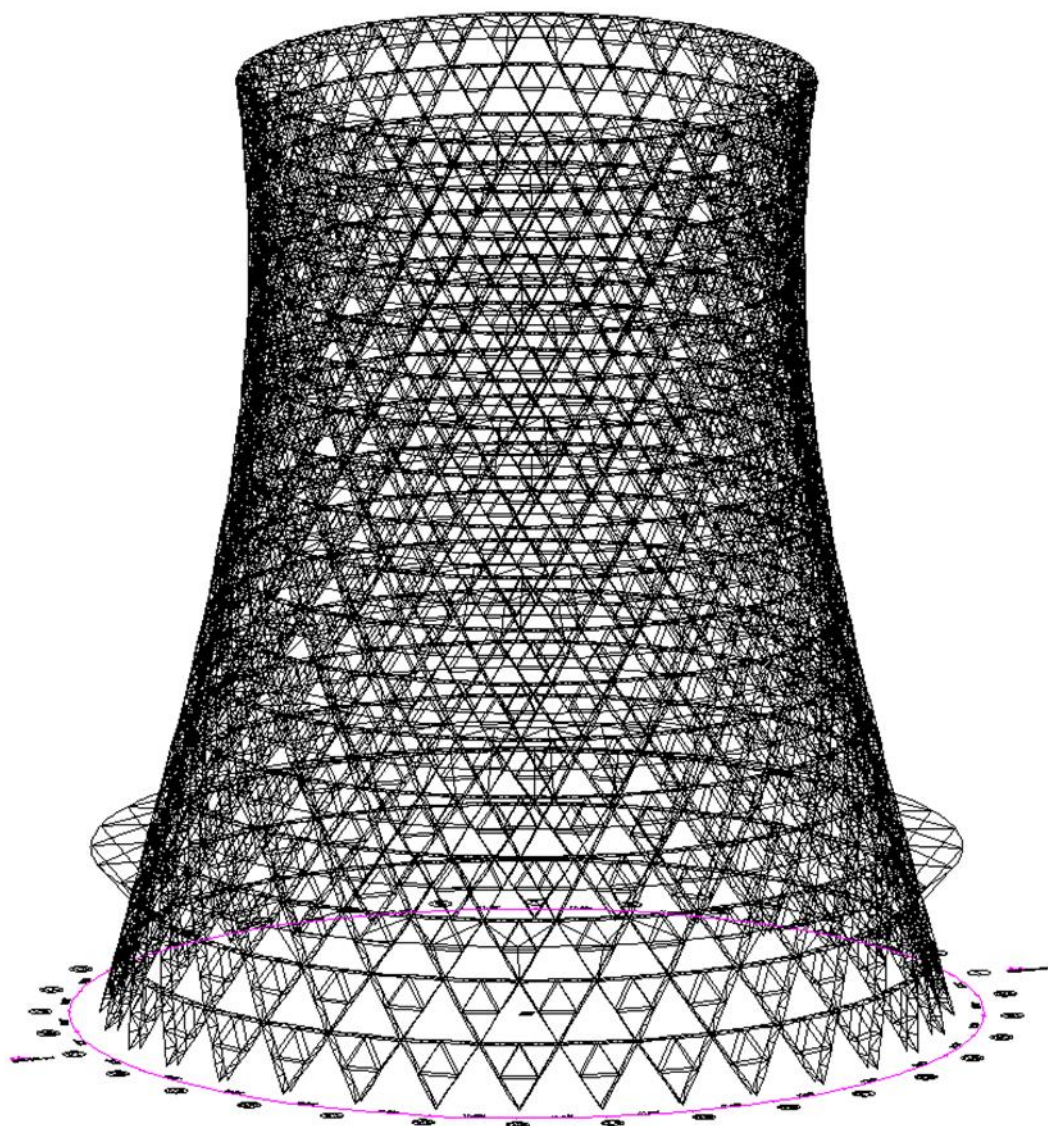


图6.3-6 双曲线型间冷塔结构组成示意图

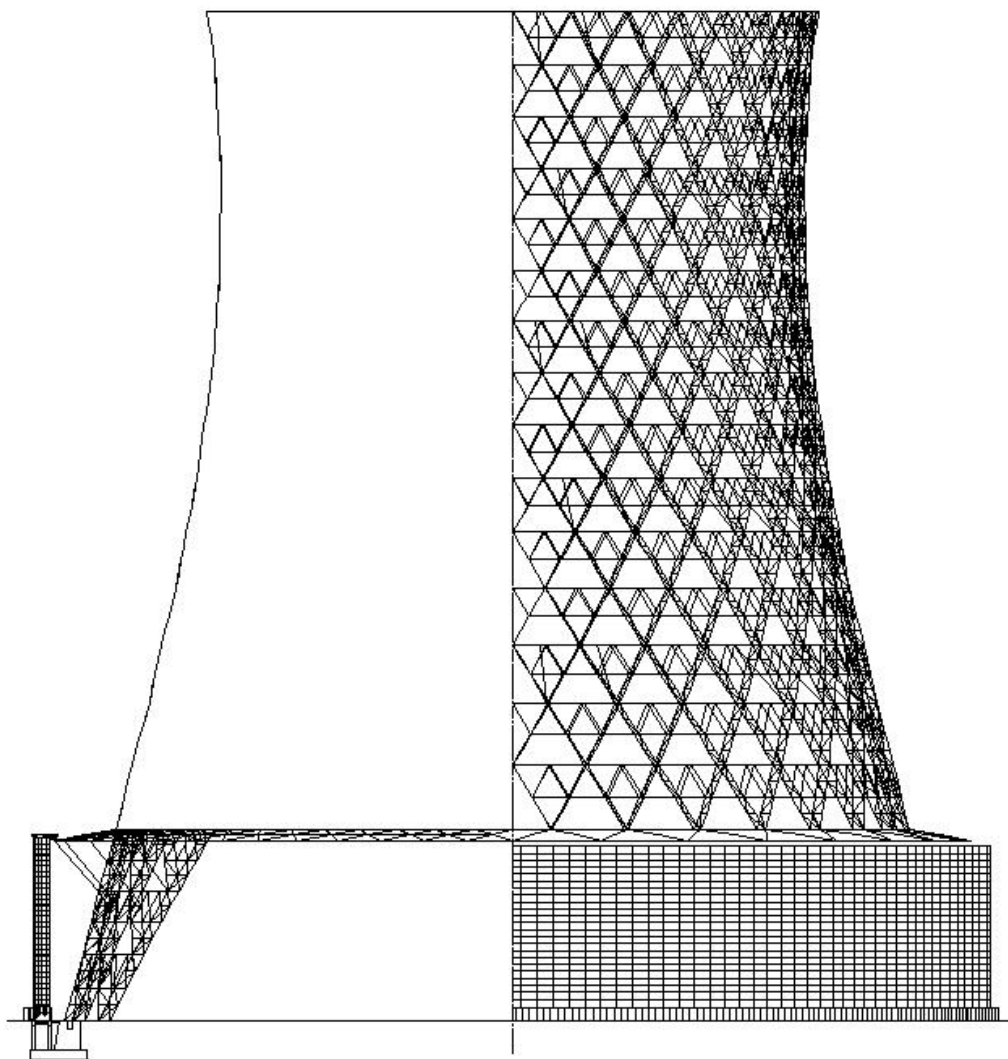


图6.3-7 双曲线型间冷塔结构剖面图

鉴于国内直筒锥型钢结构间冷塔的研究设计暂无200m及以上高度的工程业绩,本工程现阶段暂参考国内210m双曲线型钢塔结构间冷塔研究设计成果,进行本工程223米双曲线型钢塔结构设计,初拟塔型结构参数如下表:

表6.3-1 两机一塔钢结构间冷塔方案热力设计参数

项目	单位	参数
冷却塔塔高	m	223
进风口高度	m	41.0
±0.0m标高支撑点直径	m	171.2

项目	单位	参数
喉部直径	m	110
塔顶出口直径	m	115
±0.0m标高支撑点数量	个	约42
蒙皮材质\厚度		氟碳压型钢板蒙皮（宝钢基板）0.8mm
环梁道数	m	约5
散热器布置外径		181.2
散热器总面积	m ²	315.65

本工程暂采用压型钢板板外置的钢结构冷却塔，高度223m，出口直径115m，钢塔底部直径171.2m。

钢结构冷却塔主体为一个223m高的空间网架结构，采用双曲线双向斜交钢管桁架结构体系，双层网格，网格厚度3米，高度上共26层，塔体采用等边三角形网格组成，网格高度由11.0m至8.0m不等。为了增加钢塔整体侧向刚度，沿高度布置5道加强环。结构采用圆管作为基本构件，钢材牌号采用Q355B。节点采用相贯焊接，局部交汇较多杆件处采用焊接球节点。

考虑钢塔的检修维护，在钢塔内部设置一部从地面至塔顶沿三角单元斜杆设置的斜梯，可通往每一层，在每1-2层环向设置走道护栏，便于钢塔的防腐检修维护。

整体布置如6.3-8(示意图)。

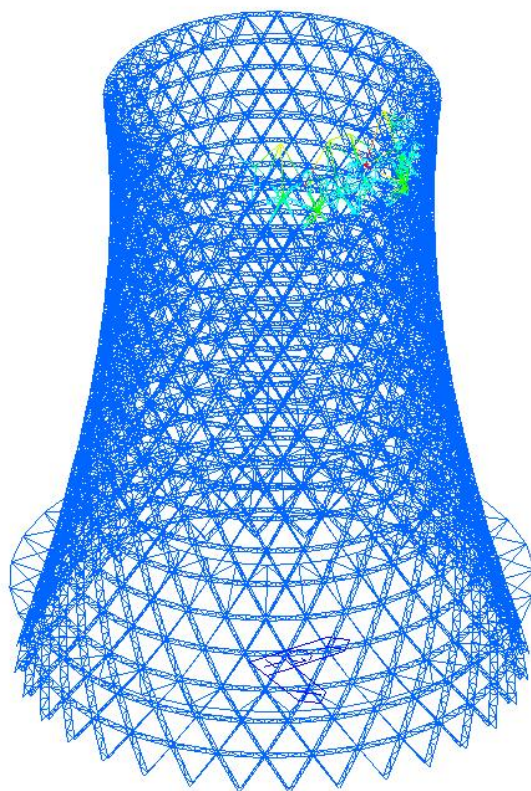


图6.3-8 钢结构冷却塔布置图

6.3.3 钢结构间冷塔结构设计

6.3.3.1 力学计算原则

钢结构冷却塔的主要荷载：恒载、风荷载、温度作用等。

因国内外现有的冷却塔设计规范或标准中没有双曲线钢结构冷却塔风压分布及风振系数等，一般需依据风洞试验确定，本次方案设计阶段暂参照混凝土塔取值，风压分布曲线采用K1.0风压分布曲线。

6.3.3.2 塔体的设计原则

塔体结构计算分析依据中国设计规范和法规。

钢结构冷却塔设计选用材料按中国标准规定的力学性能和使用要求进行系统的力学分析，包括各力学杆件受力情况、各杆件的稳定性以及整体位移和形变等。

冷却塔主体结构斜柱柱脚采用刚接支座，为考虑地基基础在不均匀荷载下的变形，建立钢结构与基础总装模型，设计计算中采用两种模型的包络计算值。

钢结构冷却塔主体结构应进行以下分析计算：

(1) 运营阶段正常使用极限状态下冷却塔塔身的变形验算，满足规范要求；

- (2) 运营阶段承载力极限状态下的格构构件受力验算，满足规范要求；
- (3) 冷却塔主体结构建议进行特征值屈曲分析、考虑几何非线性与材料非线性的全过程分析，冷却塔主体结构稳定性应满足空间结构的稳定性要求；
- (4) 应根据安装过程和受力特性，选取关键施工阶段，考虑施工阶段风荷载，进行了冷却塔塔身的变形计算、杆件强度验算、整体稳定性计算。施工过程中，在风荷载作用下，冷却塔变形、强度及稳定性满足规范要求。

据其特定的使用环境，使用的材料主要有以下几种：

- a. Q355、Q235等
- b. 铝合金板及配套连接件
- c. 高强度螺栓

6.3.3.3 塔体的结构分析过程

为简单明了地表达整体计算的主要成果，本次仅以图形的形式提供，详见以下各图：

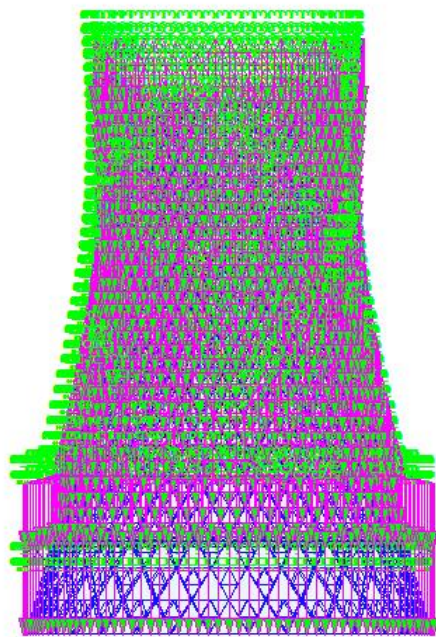


图6.3.3-1 钢结构冷却塔荷载施加示意

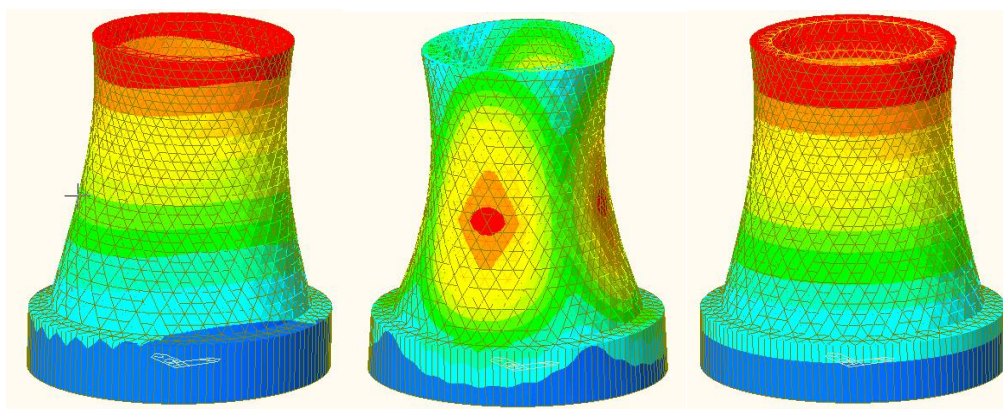


图6.3.3-2 钢结构冷却塔典型振型

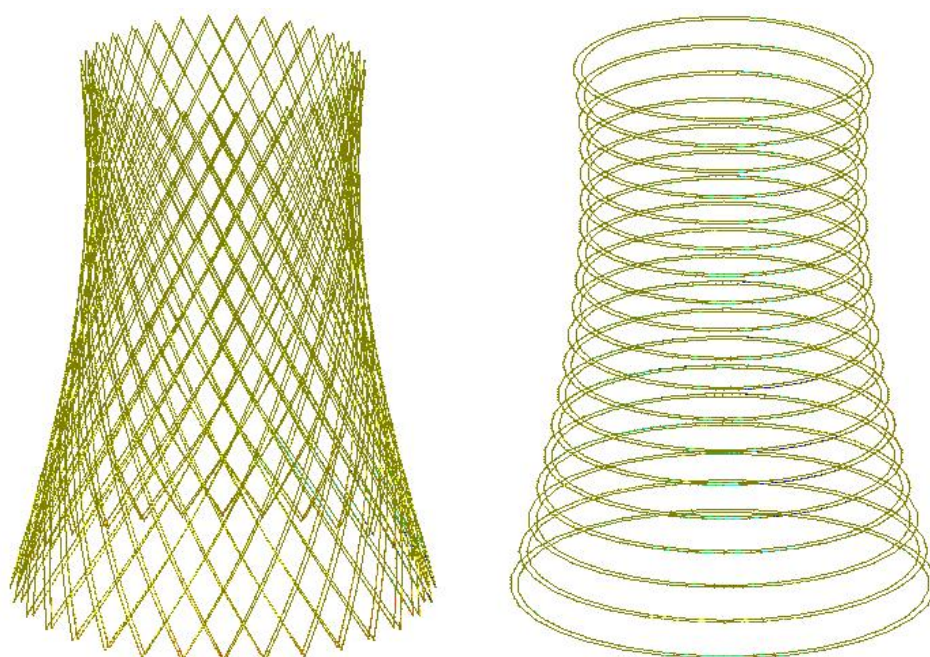


图6.3.3-3 水平杆、斜向杆运行阶段最大轴力计算

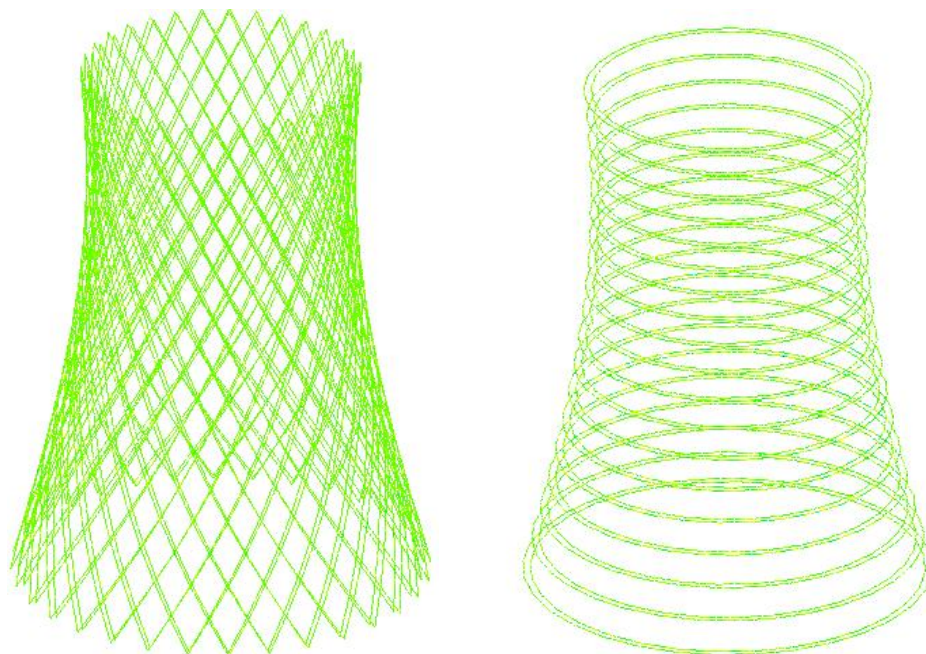


图6.3.3-4 水平杆、斜向杆运行阶段最大弯矩计算

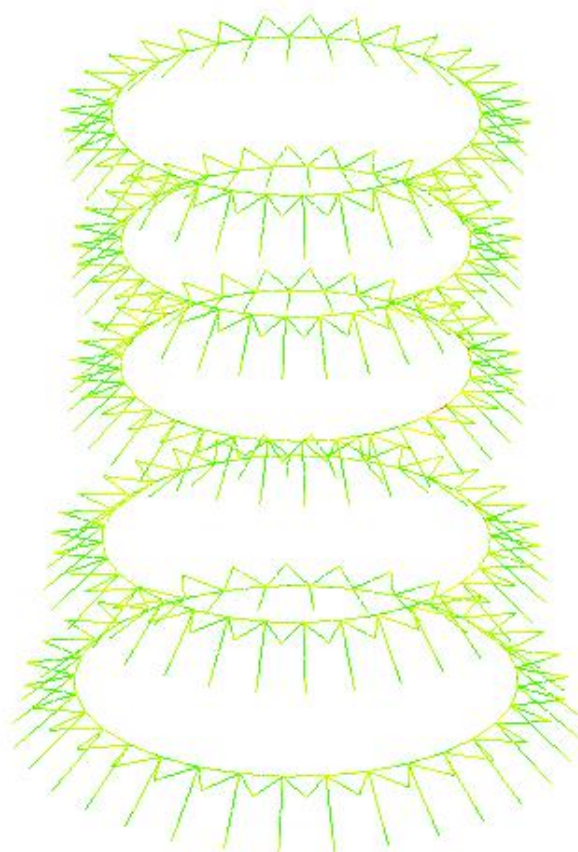


图6.3.3-5 加强环运行阶段最大轴力计算

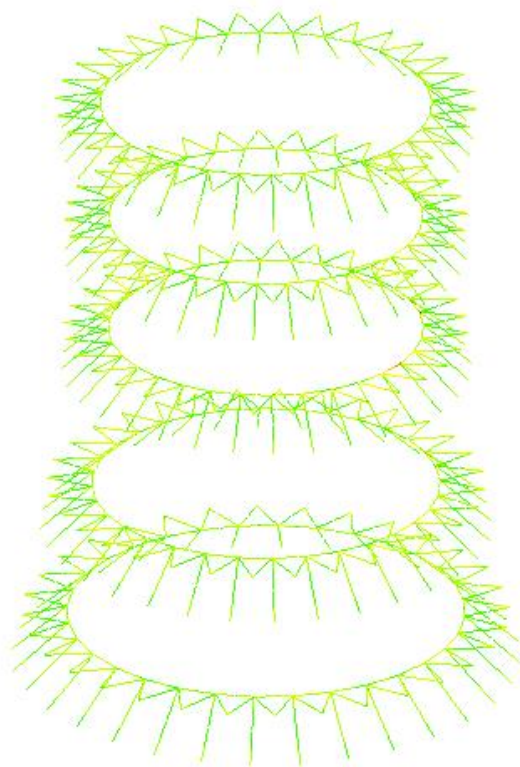


图6.3.3-6 加强环运行阶段最大弯矩计算

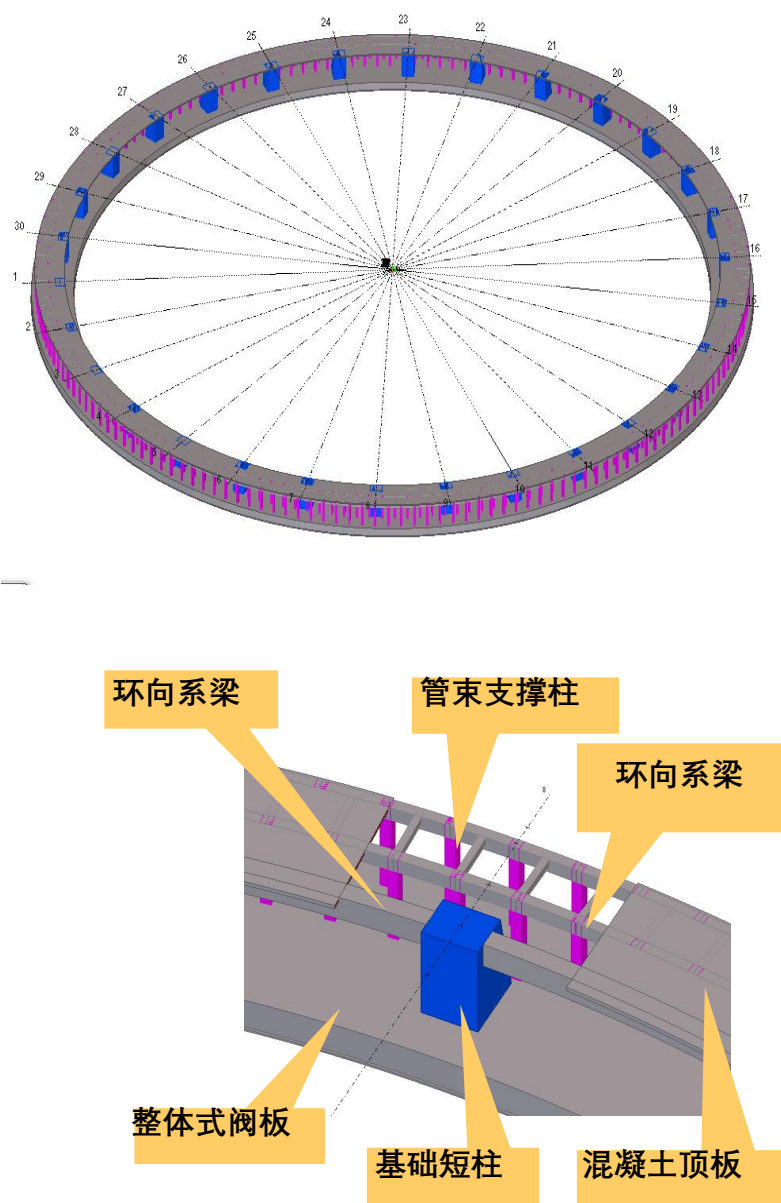
6.3.3.4 基础布置

根据上部钢结构特点和工艺要求，钢结构柱脚下设混凝土基础短柱，沿环向共设～32个基础短柱，为增加短柱的整体性，柱间设环向联系梁。

零米标高设置一层混凝土顶板，用于支撑零米层相应设备，下设环向支撑柱。

底部采用环形整体式筏板。

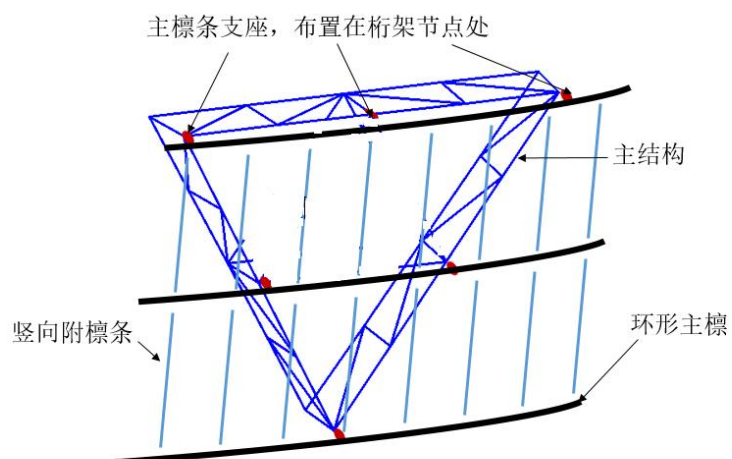
此类基础刚度大承载力高，整体性好，能为上部塔筒提供可靠的支撑，并满足风荷载作用下的基础抗拔和有效减少不均匀沉降的要求等。



6.3.3.5 钢结构间冷塔围护结构

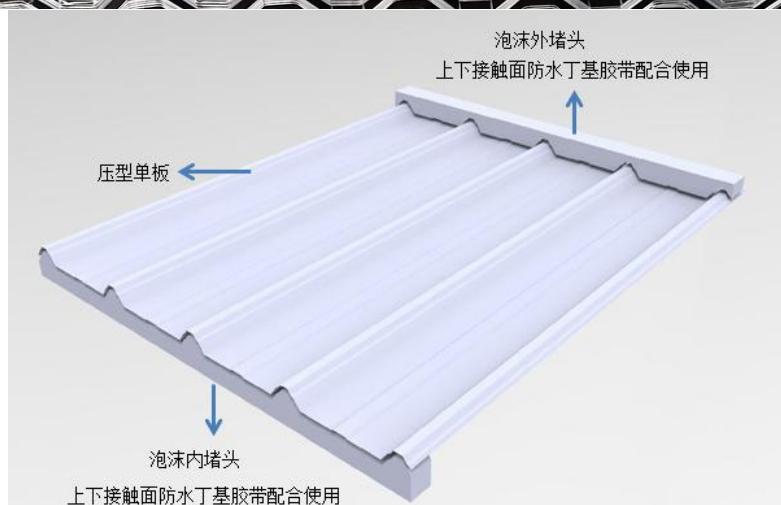
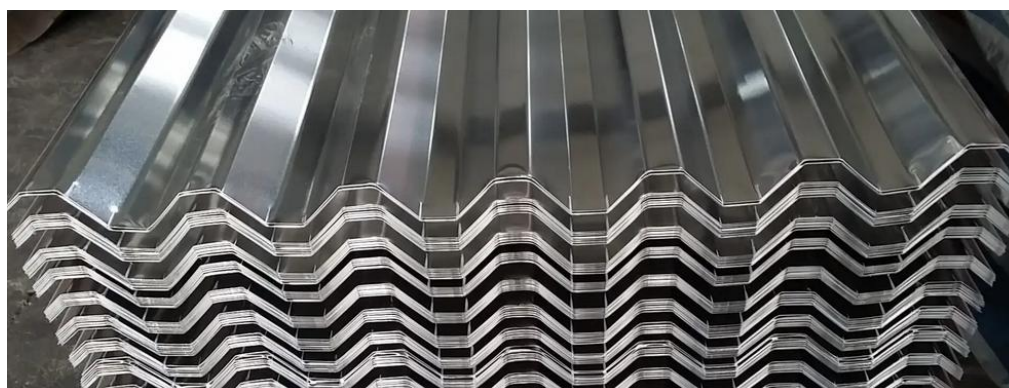
(1) 檩条布置

檩条采用环形主檩和竖向次檩布置，环形主檩间距等于主桁架节点沿竖向的间距。



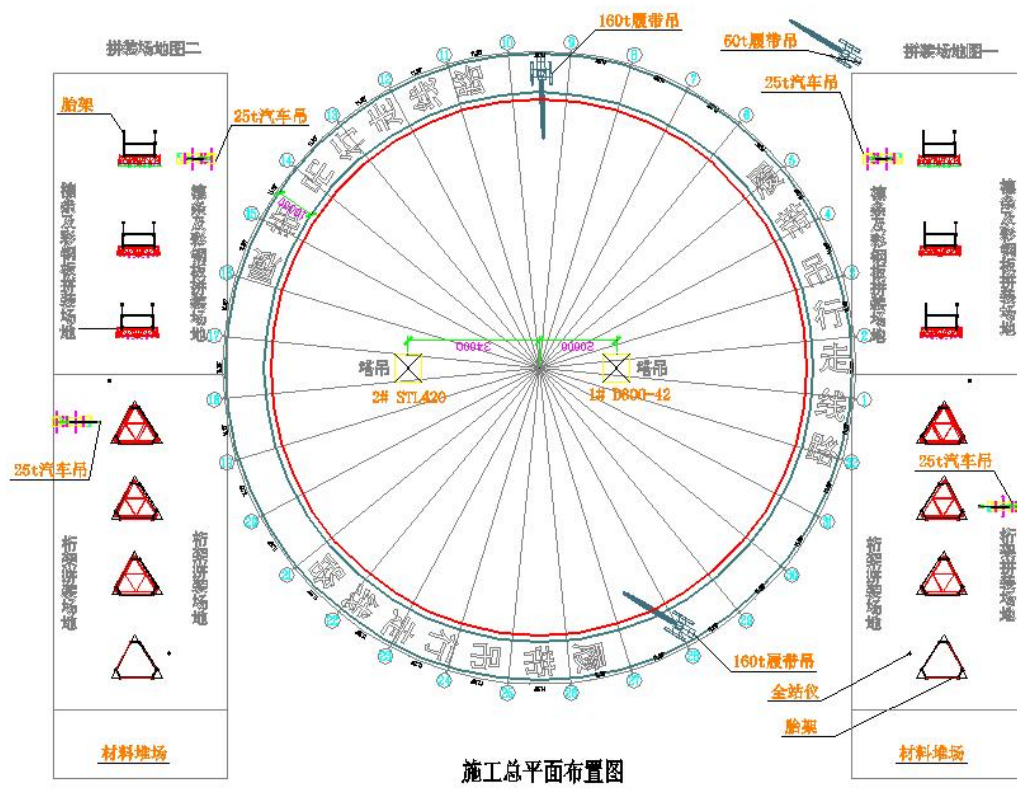
(2) 面板

结合钢结构间接空冷塔风荷载分布规律特点，间接空冷塔围护面板采用铝合金面板或压型钢板。围护面板可考虑采用结构强度更高的彩钢板。



6.3.3.6 钢结构塔的安装设计

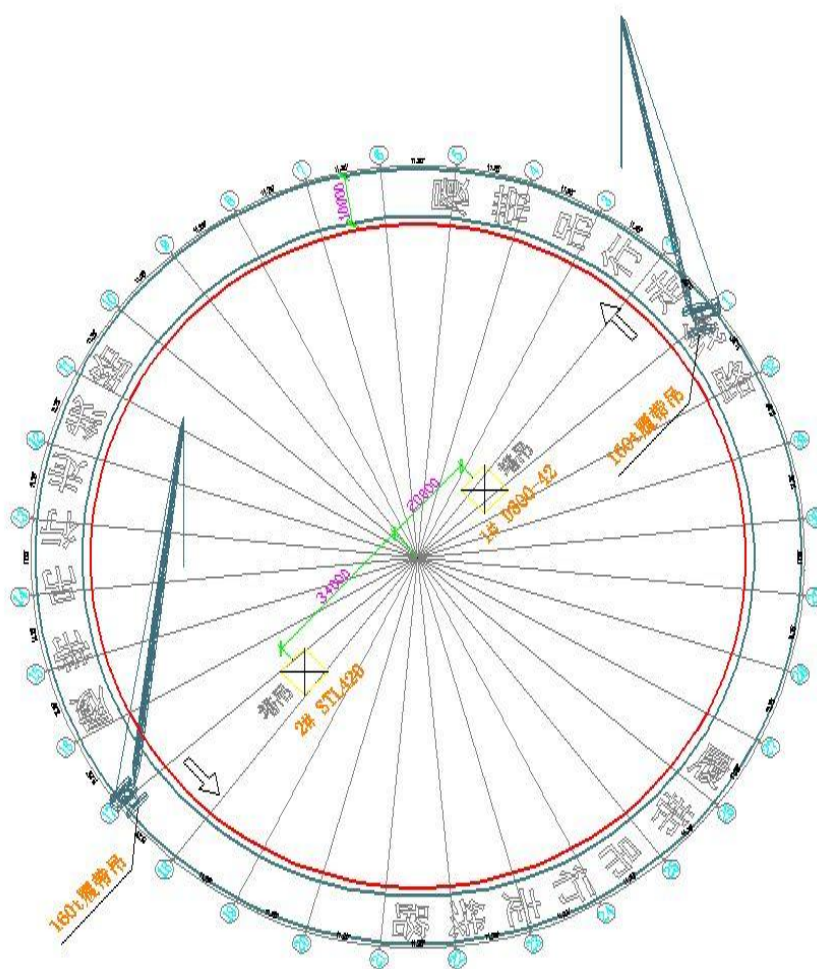
(1) 钢塔施工总图平面布置



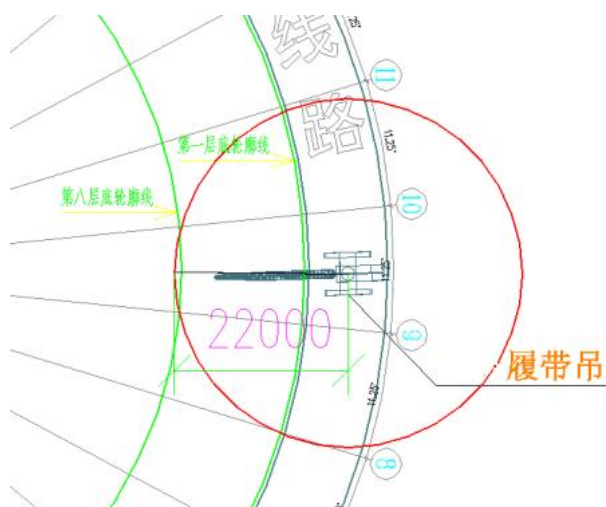
(2) 钢结构塔安装总体思路

工程总体分为1个吊装区和2个拼装区，1到7层采用2 台大型吊机（150吨履带吊）开始安装，8层以上采用2台塔吊，1台型号TC7052塔吊，1台型号TC7036塔吊。

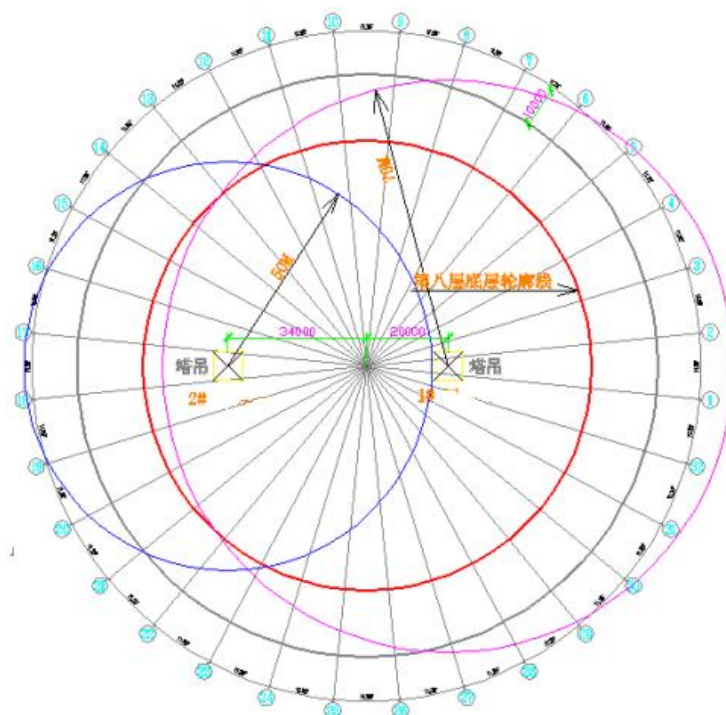
拼装部分分为两个场地，场地一和场地二，同时进行拼装。每个场地三角形桁架的拼装，用4个胎架进行拼装，使用全站仪精确定位，25t汽车吊进行杆件拼装；3个胎架安装主次檩条及彩钢板，使用全站仪精确定位，25t汽车吊进行杆件拼装。三角形桁架转胎架使用50t进行倒运场地。



履带吊塔吊布置图

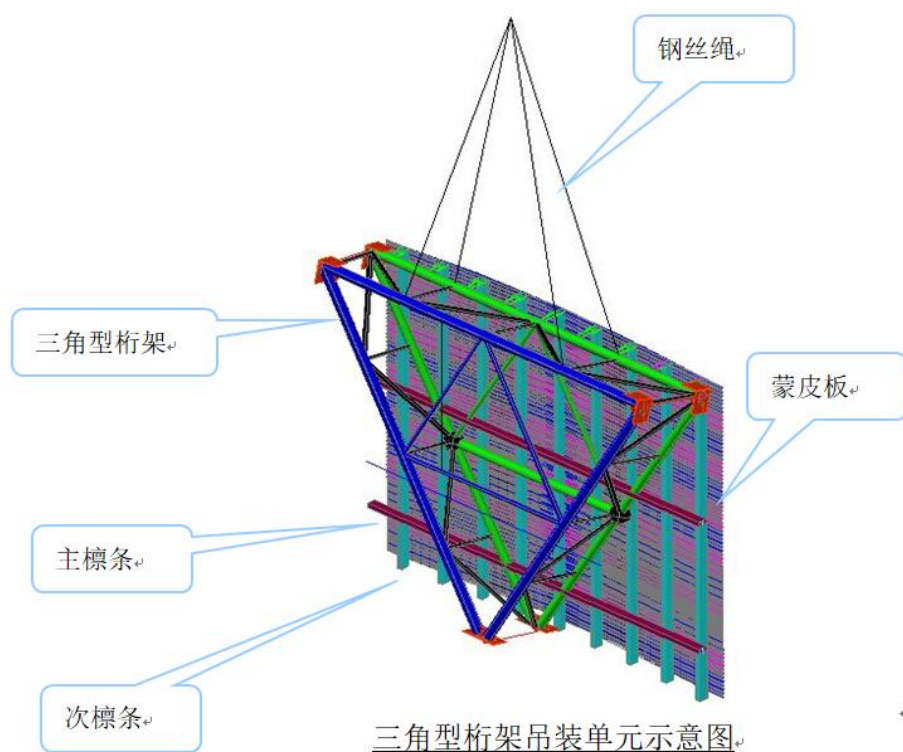


150吨履吊主要用于桁架1~6层的吊装



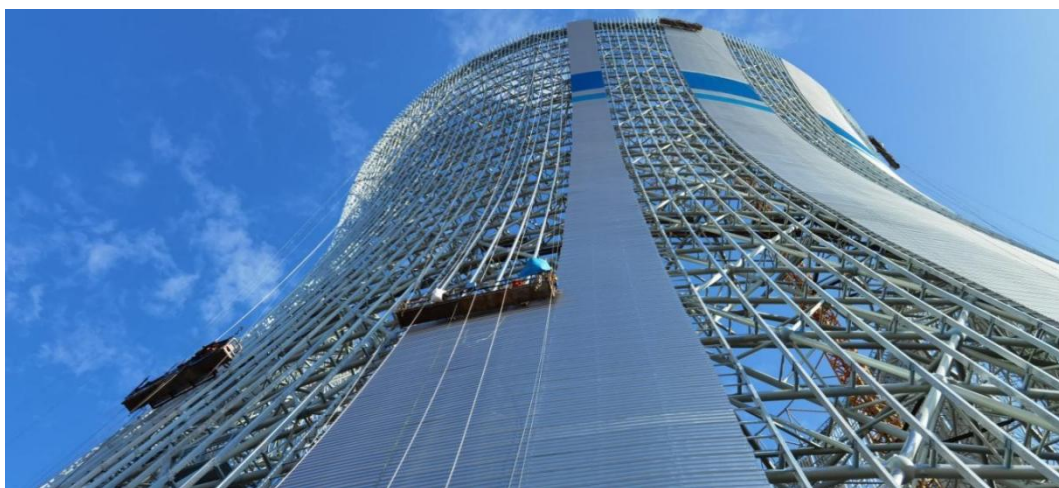
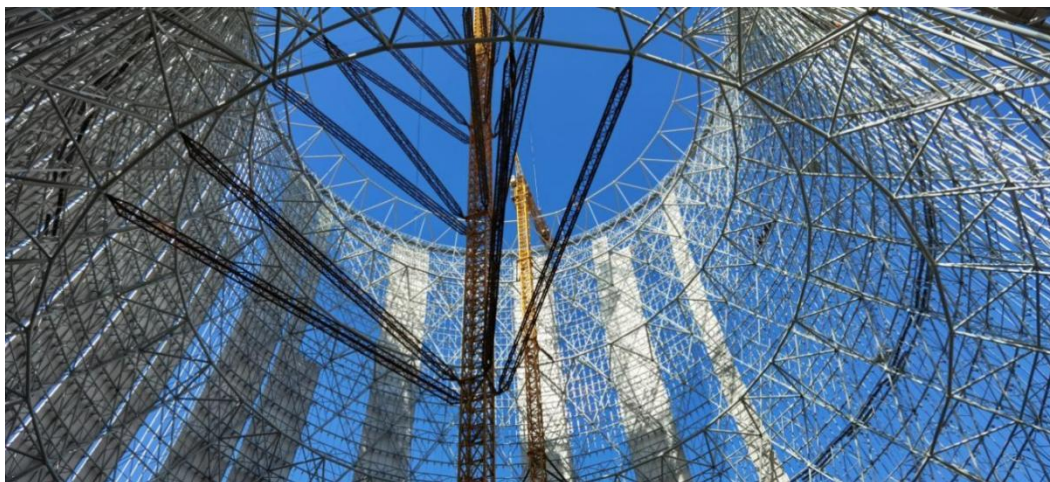
C7036塔吊主要用于桁架8层以上的50米范围吊装

TC7052塔吊主要用于桁架8层以上的70米范围吊装



(3) 双曲线钢塔安装现场实施实景





6.4 钢结构冷却塔施工

6.4.1 钢结构冷却塔垂直运输的难点分析

从传统混凝土冷却塔的多种垂直运输方案可知道,钢筋等物料主要依靠塔吊(平臂吊、折臂吊)或多功能升降机,人员是通过曲线电梯或升降机,混凝土是通过泵送或是多功能施工升降机。新型钢结构冷却塔相较于传统混凝土结构的垂直运输其优势是取消了混凝土和钢筋的运输,但其劣势是钢构件数量和重量增加了,所以钢构件的运送和吊装就位是钢结构冷却塔施工的难点。人员依靠曲线电梯或升降机可满足要求。

6.4.2 钢结构冷却塔的施工组织安排

6.4.2.1 施工总体部署

1) 钢构件预检和配套,钢构件出厂前,制作厂应将每个构件的质量检查记录及产品合格证交安装单位。

2) 定位轴线、标高和地脚螺栓的检查, 安装前应对建筑物的定位轴线、底层柱的位置线标高进行复核, 合格后方可进行安装。

3) 安排钢构件的现场堆放, 按照安装流水顺序由中转堆场配套运入现场的钢构件, 利于现场施工机械尽量将其就位到安装机械的回转半径内。

4) 安装机械的选择

高层钢结构施工皆用塔式起重机, 要求塔式起重机的臂杆长度有足够的覆盖面, 要有足够的起重力, 满足不同部位构件起重要求。因为塔吊是高层钢结构工程施工的核心设备, 其选择与布置要根据建筑物的布置、现场条件及钢构件自身重量等因素综合考虑, 并保证拆装的安全、方便、可靠。

5) 吊装机械: 根据本工程施工特点, 由于构件自重较小, 但是最大安装高度达 233m, 通过市场调研情况, 38m 层以下可采用 50T 汽车吊及塔吊完成吊装工作, 38m 层以上塔吊即可满足吊装要求。

6) 人员运输机械: 采用 SC200/200 施工升降机完成人员的垂直运输。

6.4.2.2 平面布置

1) 将筒体钢结构施工划分为 4 个单元, 每个单元布置塔吊一台, 塔身最高可达 233m, 76m 以下采用软附墙, 76m 以上附着在塔身钢构上, 以此满足塔吊安装的安全技术要求。

2) 在塔内合适位置布置一台 SC200/200 施工升降机满足人员施工上下作业面。

6.4.3 冬季施工方案

6.4.3.1 冬季焊接措施

1) 组织措施

(1) 冬季施工期间, 安排专人检查各项冬季施工设施的准备情况, 确保工程施工的需要。

(2) 加强保温、御寒措施, 必要时限制工作时间, 采取轮班作业。

(3) 在低温下焊接, 焊接顺序必须严格遵循焊接方案中的规定。

(4) 高空焊接设防风和保温措施。

2) 材料

(1) 冬季焊接应采用冲击柔性好、防低温的低氢型焊条, 焊前按规范要求烘烤 (350℃), 并存放在 80~100℃ 的烘箱内, 使用时采用保温桶存放, 随取随放。

(2) 对受低温影响的材料焊前进行工艺评定, 确保电焊时的工艺系数, 施工工序、电流、电压、预热温度、保温时间及冷却速度。

3) 焊接预热与保温

(1) 严谨在 -15°C 以下对钢板进行剪切、冲孔, 严谨在 -12°C 以下对钢构件进行冷弯和矫正, 必要时要进行预热和保温。

(2) 焊接前按工艺要求进行预热, 预热可采用电阻器或火焰预热, 焊后进行热处理, 保温缓慢冷却。施工现场环境温度低于 0°C , 对于 $t\leq 36\text{mm}$ 的钢板, 焊前在始焊点附近板厚1.5倍且不小于100mm的范围内采用火焰预热至 36°C 以上, 方可焊接, 且在焊接过程中均不应低于这一温度, 焊后保温缓冷。

(3) 电加热器等预热设备的布置由电工负责, 不得有裸露的电阻丝或导线。

(4) 焊接接头两端板厚不同时, 按照厚板确定预热温度, 钢板材质不同时, 按照高强度板确定预热温度。

(5) 预热温度的测量采用红外测温仪, 预热温度应尽可能在焊件反面测量, 测量点应在离电弧经过前的焊接点两边各不小于75mm处。对于箱型构件等无法在反面进行测温的情况, 应根据板厚不同适当提高正面预热温度, 以便所有焊接的预热温度都能达到要求。当采用火焰加热时, 应在加热停止后再测温度。

(6) 对于负温下的焊接, 焊接的预热温度宜比一般规定的温度高出 $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$, 对于焊接返修部位的预热, 预热温度应高出正常温度 50°C , 预热范围也应适当加宽以保证焊接的质量。

(7) 焊接过程中通过在加热区域覆盖保温棉的方式进行保温。

4) 其他焊接技术

(1) 焊接施工时, 在焊缝周围采用封闭的方法, 采取措施将焊口四周封闭起来, 利用电加热片进行加热。

(2) 负温下施工时, 构件的组装应预留焊缝收缩余量。

(3) 每条焊缝应一次连续焊接, 不得中断。低温下焊接时, 在平面上焊接顺序应从结构中心开始向四周对称扩展焊接。

(4) 露天作业时, 搭设临时防护棚。一方面防雨雪飘落在烧热的焊缝上, 另一方面冬季风大, 可防止风影响熔池的保护, 保证焊接质量。

(5) 负温下, 超声波检测仪的探头与钢材接触面应使用不冻结的油基耦合剂。

(6) 当周围气温温度在 -5°C 以上时, 可以不搭设防护棚焊接, 但焊接时应采取相应的防风措施。

6.4.3.2 冬季吊装措施

- 1) 操作人员上岗前要接受冬季施工安全教育与安全交底。
- 2) 冬季吊装时, 应尽可能选择晴朗无风的天气进行。
- 3) 下雪或是现场结霜时进入工作区, 采取相应的防滑安全措施, 清扫现场的积雪和霜后, 方可进入。
- 4) 当有5级以上的大风时, 停止吊装作业。
- 5) 冬季吊装时, 操作人员应加强防寒措施, 确保吊装过程安全。
- 6) 冬季吊装时, 遇雨、雪、霜、露天气时应采取防滑措施, 及时将施工与吊装区域的积雪积霜清除干净。
- 7) 冬季施工时, 施工通道与高空操作平台需设防滑条, 防止滑倒。
- 8) 冬季吊装作业时, 吊机要添加防冻油。
- 9) 吊装作业的临时加固措施应牢靠, 支撑结构的强度与刚度应通过计算并符合要求, 防止冬天大风天气对结构件稳定性的影响。
- 10) 吊耳、吊装用平衡梁、钢丝绳、卸扣等设计及选用均需根据吊装工况进行演算合格后方可投入使用。
- 11) 对所有起重工具应定期进行检查, 并对损坏部位做出鉴定, 吊索绑扎应正确牢靠。
- 12) 吊机吊装前, 应认真检查吊机的性能, 吊装时, 需对吊装物的重量、就位高度等数据进行复核, 结合吊机性能进行计算, 吊机起重能力高于所吊重物重量的情况下方可起吊。
- 13) 设备必须保养好, 运行正常, 所选起吊用工具和钢丝绳必须有足够的安全系数, 一般不得小于5~6倍。
- 14) 构件高空就位后, 不连接牢靠不能松钩, 根据设计要求, 当天要尽可能实现多点面焊接成型。
- 15) 合理安排吊装顺序, 加快吊装作业, 尽快形成构件自身稳定体系。
- 16) 对于焊接工作量大的构件, 保证轴向焊接固定, 侧向采用缆风绳临时固定。

6.4.4 工程施工实例

本工程钢结构间冷塔塔高233m, 0m直径181.1m (± 0.0 m标高支撑点直径), 设计基本风压0.40kPa。目前已有华能宁夏大坝电厂四期间冷塔(高170.0m)、陕西麟游低热值煤发电厂间冷塔(高170.50m)、国电双维发电厂一二期工程间冷塔(高190.5m)等一批

钢结构间冷塔陆续建成。在建造这些塔时从构件的制作、拼装、运输、吊装及保证施工期稳定措施等多方面进行过论证,上述工程常年大风天数少,大风对总工期的影响较小。

陕西麟游低热值煤发电厂 170.50m 间冷塔,其已于 2018 年 5 月建成投运,间冷塔塔体为全钢结构,包含下部锥体、圆柱塔体、加强环、展宽平台、上塔爬梯、内侧檩条及铝板等。钢塔高 170.5m,下部锥体底部直径为 147.5m,锥体高度 55m,上部圆柱塔体直径为 98.5m,圆柱塔体高度 115.5m。该工程施工中主要施工机械的选择和布置如下:

(1) 锥段安装

锥段吊装选用一台 150 吨履带吊塔内安装、一台 200 吨履带吊塔外安装。SCC1500C(150t)履带吊: 81m 主臂, 65t 配重, 半径 $R=28\text{m}$, $Q=15.4\text{t}$; QUY200t 履带吊: 83m 主臂, 65t 配重, 半径 $R=38\text{m}$, $Q=13.5\text{t}$; 锥段最重部件为 P1 组合三角 11.9t, 两台履带吊均满足吊装要求。

锥段吊装、安装机械布置及吊装示意如图 6.4-1、图 6.4-2。



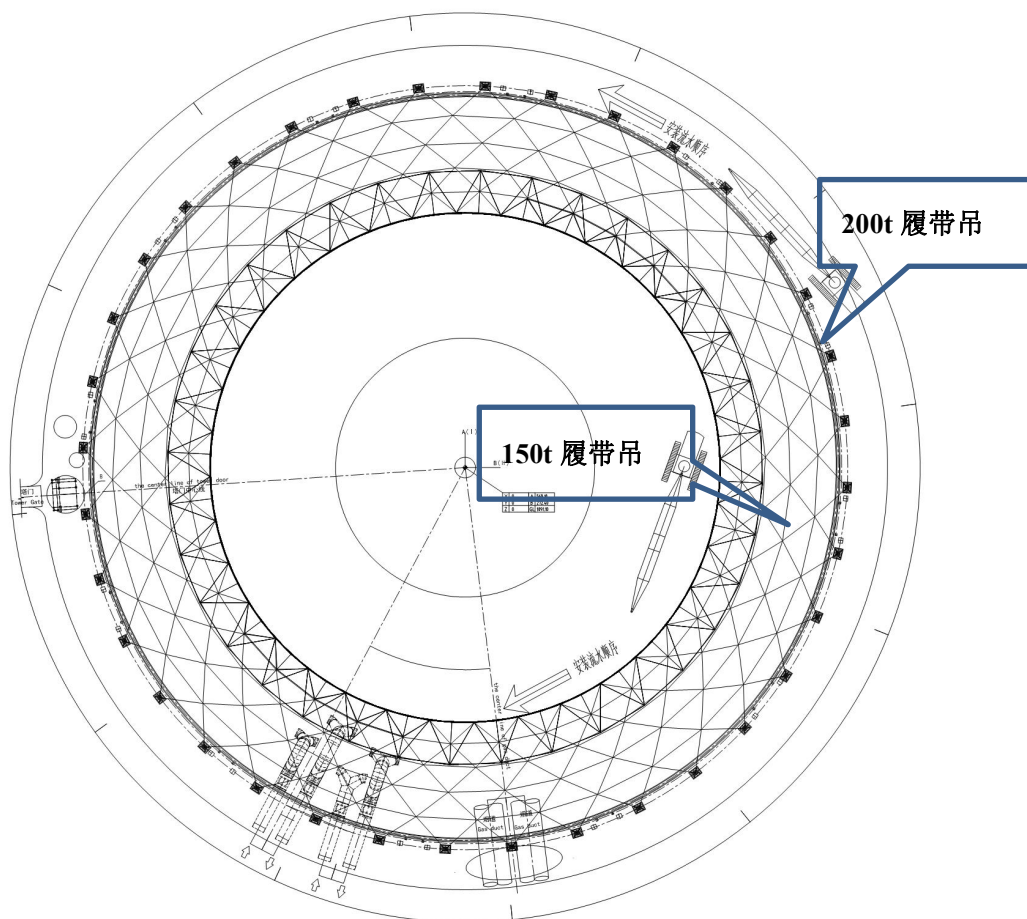
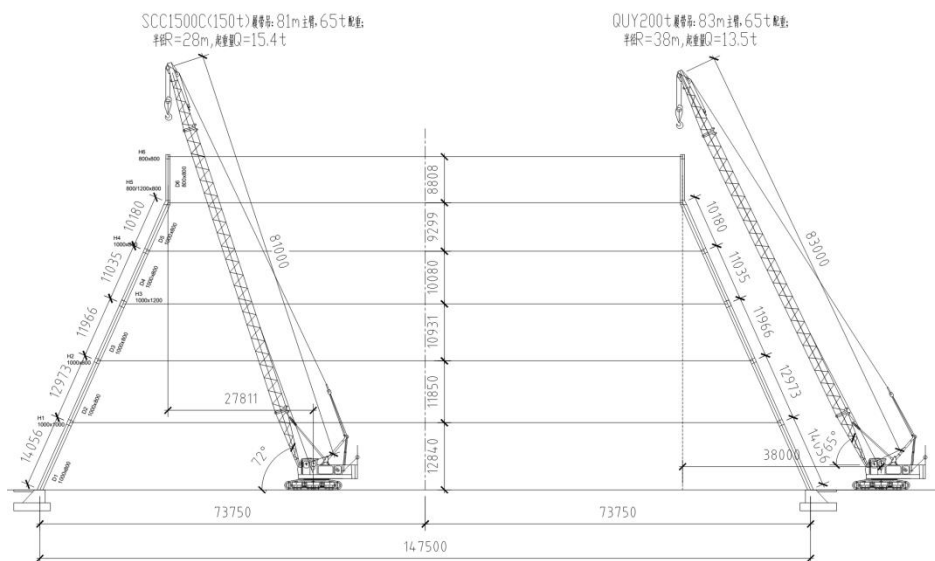


图6.4-1 锥段安装机械平面布置示意图



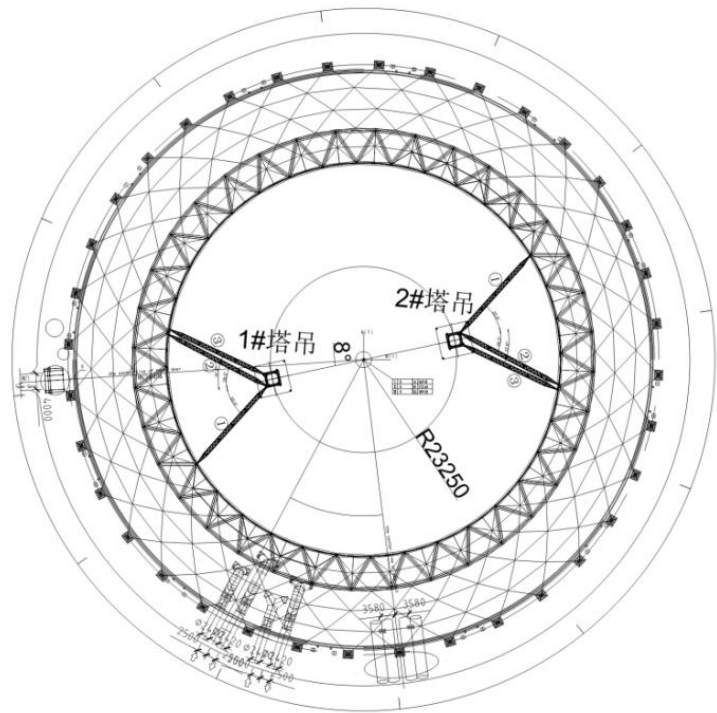


图6.4-3 直段安装机械平面布置示意图

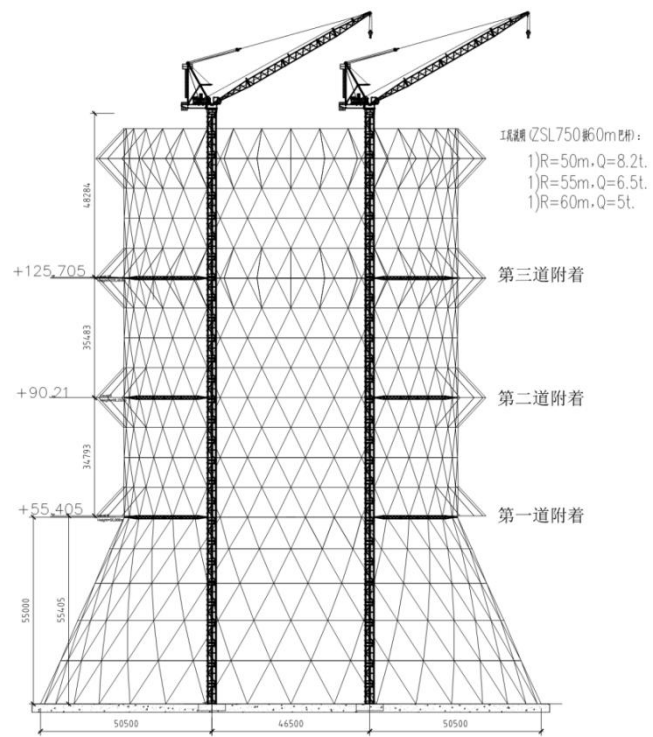


图6.4-4 直段安装机械立面布置示意图

6.5 蒙皮围护结构设计

钢塔围护体系（蒙皮）采用矩管檩条+波形铝板的型式。铝板波形、壁厚以及檩条布置根据设计风载计算确定。铝板间的连接采用特殊的弹性咬合连接结构，可实现在不同安装间隙下的可靠密封，确保蒙皮整体密封严密性。蒙皮波形、檩条间距及布钉间距根据相关设计标准按50年一遇风载荷及相关系数计算确定，挠度和刚度满足设计要求。蒙皮结构设计安全系数和耐久性按30年免维护考虑。

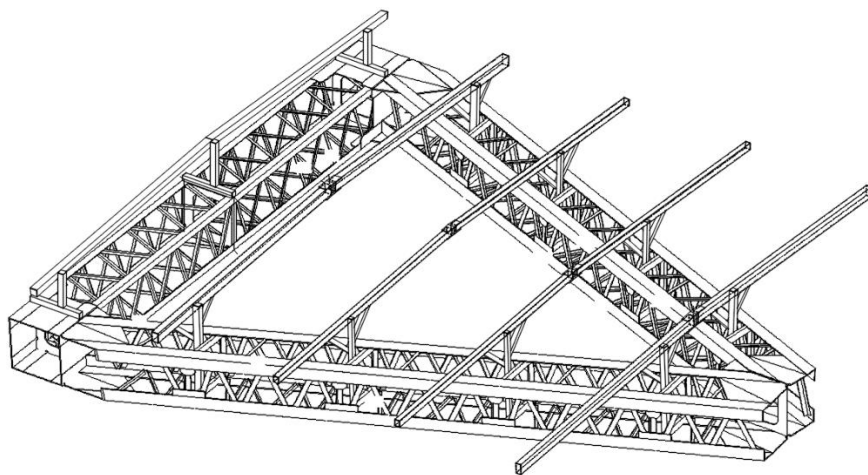


图6.5-1 钢三角结构示意图（带檩条结构）

6.5.1 连接可靠性保证措施

钢结构塔蒙皮通常采用自攻钉与檩条结构连接，自攻钉连接系统的可靠性至关重要。自攻钉采用进口带硬质合金钻头不锈钢自攻钉，并配套进口专用工具，根据不同的材料厚度，选用不同的螺距和钉长，打钉转速和扭矩通过试验筛选最佳配套。并制定专门用于自攻钉安装施工的安装手册，规范现场施工。班组施工作业前，应经过上岗培训。掌握操作技能后，方可上岗作业。施工过程中抽检试样进行拉脱力检测。

6.5.2 抗风揭性能

钢结构塔围护体系（蒙皮）可靠性应通过抗风揭性能试验验证。试验时应选取一个最不利的三角格构单元进行抗风揭试验验证，确保连接结构强度的可靠。

国内空冷厂家双良公司在其所实施的钢结构塔工程中，专门委托中国建筑科学研究院进行了钢结构塔围护结构幕墙性能试验。试验验证其蒙皮结构设计可承受正压7.4Kpa，负压6.2Kpa。此安全保障做法和性能值可作为本工程实施参照。

6.5.3 蒙皮密封结构设计保证密封严密性

钢塔蒙皮采用压型铝板，在地面与三角组装后随每个冷却三角吊装，密封性主要取决于高空安装三角封闭间接缝密封性。接缝设计采用弹性凸楞结构，并采用咬边的连接结构如下图，可吸收安装中存在的接缝间隙偏差，安装难度小，密封可靠性易保证。



图6.5-2 接缝密封结构图

6.6 钢结构冷却塔防腐处理及外围护结构

中东地区的伊朗、叙利亚等国，采用钢结构间接空冷塔的发电厂较多，有的钢结构空冷塔已运行了数十年。工程实践表明：钢结构间接空冷塔技术上是成熟的，结构安全性可以保证；完整、可靠、持续的防腐体系是保证钢结构间接空冷塔耐久性的前提，也是钢结构间接空冷塔成功与否的关键。

由于钢结构间接冷塔的钢结构构件处于干热的空气中，且本工程所处环境类别为一类，钢结构构件的防腐问题不是特别严重，所选用的防腐做法可采用冷喷锌防腐，锌层厚度 $85\mu\text{m}$ ，含锌量不低于96%。

以上钢结构的防腐涂层主要均在工厂内完成，现场仅少量高空补漆，其涂层防腐质量可控。

7 地基处理设计方案

根据本工程现阶段的岩土勘察资料，间接冷塔的地基处理采用钢筋混凝土灌注桩，下一阶段根据初、详勘资料进一步优化调整。

8 钢筋混凝土与钢结构间冷塔优缺点对比

8.1 钢管混凝土斜支柱钢筋混凝土冷却塔

钢筋混凝土冷却塔在国内外电厂中应用非常广泛，已经过逾百年的运行考验。

钢管混凝土斜支柱钢筋混凝土冷却塔方案具有以下优点：

- ①耐久性好；
- ②耗钢量小，整体刚度大；
- ③耐腐蚀性能好，维护工作量小；
- ④类似国内工程较多；
- ⑤全寿命周期成本（LCC）低；
- ⑥施工准备周期短（从空冷设备定标到环基施工）；
- ⑦钢管柱在加工厂制造，现场拼装，施工速度快（有效工期与钢结构冷却塔相当或略长）

不利之处是：

- ①结构自重大，地基处理费用高；
- ②需要较大的施工场地，须备有砂石堆场，临时设施多，对砂石骨料质量要求严格。
- ③工种多，需要较多劳动力，文明施工须做的工作较多；

8.2 钢结构

钢结构方案具有以下优点：

- ①材料强度高，构件截面小；
- ②材质均匀，延性好，抗震性能好；
- ③自重轻，便于吊装，减少基础荷载，降低基础投资；
- ④占用施工场地小，宜于文明施工；
- ⑤工厂制造，现场拼装，现场施工速度快。

不利之处是：

①本工程所在地年平均相对湿度68%，属于半干旱地区，且厂址位于河道边，环境湿度对钢结构防腐影响较大；

②工业大气对钢结构腐蚀性大。

③现有的实际工程防腐工艺及施工质量很难做到全寿命免维护，维护工程量大，需要高空作业；

④钢结构冷却塔施工基本起吊单元采用带蒙皮起吊方式，5级及以上大风对大件吊

装影响大；

- ⑤高空焊接、焊缝检验、蒙皮安装作业要求高；
- ⑥蒙皮的高空安装质量难以保证，存在较大的安全隐患。

8.3 钢结构与钢筋混凝土结构冷却塔比较

表8-1 钢结构冷却塔与钢筋混凝土结构冷却塔（两机一塔）比较汇总表

比较项目	方案名称	钢筋混凝土塔 (钢管混凝土斜支柱)	钢结构塔 (双曲线型)	钢结构塔 (直锥型)
冷却塔塔高		223	223	223
空冷塔出口直径(m)		115	115	115
空冷塔支柱零米直径(m)		171.2	171.2	171.2
空冷塔散热器外缘直径(m)		181.2	181.2	181.2
进风口高度(m)		40.5	41.0	41.0
总换热面积m ²		311.26	315.65	315.65
施工周期		14个月	12个月	12个月
冷却塔结构造价（万元）		15289	16190	14583
设备购置费（万元）		12762	13940	13940
安装工程费（万元）		2500	2530	2530
地基处理费用（万元）		2304	2134	2048
投资总费用（万元）		32855 (概算价)	34794 (市场价)	34101 (市场价)
投资总费用差值（万元）		0.00	1939	246

- 附注：
- 1、投资总费用里不包含空冷塔塔内设施土建费用、全塔除散热器以外的钢结构安装费用。
 - 2、施工工期中均不含冷却塔地基处理施工周期

9 结论

通过调查研究、计算分析、工程造价、与已建冷却塔的工程类比，我们认为：设计建造本工程间接空冷塔无论是采用钢管混凝土斜支柱钢筋混凝土结构冷却塔方案还是钢结构冷却塔方案是完全可以实现的，技术上是 有保证的，结构是安全可靠的。

建设工期钢结构冷却塔方案略快，总造价钢管混凝土斜支柱钢筋混凝土结构冷却塔略低于钢结构冷却塔方案。

综合考虑建设进度和成本因素，本项目推荐采用直锥型钢结构冷却塔。