

ICS 27.180

P 59

T/CEC

中国电力企业联合会标准

P

T / CEC 5008 — 2018

风力发电机组预应力装配式 混凝土塔筒技术规范

Code of prestressed precast concrete
tower for wind turbine

2018-07-03 发布

2018-09-01 实施

中国电力企业联合会 发布

中国电力企业联合会标准

风力发电机组预应力装配式
混凝土塔筒技术规范

Code of prestressed precast concrete
tower for wind turbine

T / CEC 5008 — 2018

主编机构：北京国金新能科技有限公司

批准部门：中国电力企业联合会

施行日期：2018 年 9 月 1 日

中国电力出版社

2018 北 京

中国电力企业联合会标准
风力发电机组预应力装配式混凝土塔筒技术规范
Code of prestressed precast concrete tower for wind turbine
T / CEC 5008 — 2018

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京九天众诚印刷有限公司印刷

*

2018 年 6 月第一版 2018 年 6 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 4 印张 96 千字

*

统一书号 155198 · 854 定价 **49.00** 元

版 权 专 有 侵 权 必 究
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

前 言

本规范是根据中国电力企业联合会《中电联关于印发 2017 年第四批中国电力企业联合会标准制定计划的通知》（中电联标准〔2017〕279 号）的要求，由北京国金新能科技有限公司会同有关单位共同编制完成。

本规范在编制过程中借鉴了国际先进的混凝土塔筒相关规范，同时参考了国内的混凝土烟囱设计规范、混凝土烟囱施工及验收规范、高耸结构设计规范、风力发电机组塔架等规范的相关内容，以多种方式广泛征求了全国有关单位的意见，对主要问题做了反复修改，最后经审查定稿。

本规范共分 16 章，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、材料、荷载和地震作用、塔筒结构设计、基础设计、基础施工、塔筒预制管片制作、附件安装、塔筒防腐蚀、塔筒吊装工程、预应力工程、安全监测、工程验收、职业健康安全与环境保护等。

本规范由能源行业风电标委会风电场运行维护分技术委员会提出并归口。

本规范主编单位：北京国金新能科技有限公司

本规范参编单位：中国建筑科学研究院

柳州欧维姆机械股份有限公司

中电大型设备安装工程有限公司

西卡（中国）有限公司

本规范主要起草人员：孙 羽 赵亚华 金根发 杨 宸

邓 飞 曾凡江 赵晓军 王 晶

高 超 宋普涛 蒋业东 王晓琳

李 军 顾晓峰 刘烜赫

T / CEC 5008 — 2018

本规范主要审查人员：许松林 汪 毅 张学礼 范晓旭
叶 林 马彦军 张文忠 王亚南
邹功胜 陈才华 朱爱萍 柴海棣
辛克锋 刘 昊 蔡国洋 陈瑞金
陆卯生 王康世 张 凯

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
4	材料	7
4.1	混凝土原材料	7
4.2	混凝土	8
4.3	灌浆料	9
4.4	管片竖缝封缝材料	13
4.5	水平拼接缝用粘接材料	13
4.6	钢筋	14
4.7	预应力材料	15
4.8	其他	15
5	荷载和地震作用	17
5.1	荷载与作用分类	17
5.2	风力发电机组风荷载	17
5.3	塔筒风荷载	19
5.4	地震作用	20
5.5	荷载和地震作用效应组合	20
6	塔筒结构设计	23
6.1	一般规定	23
6.2	承载能力极限状态计算	24
6.3	正常使用极限状态计算	27

T / CEC 5008 — 2018

6.4	疲劳验算	31
6.5	耐久性设计	33
6.6	构造规定	34
7	基础设计	37
7.1	一般规定	37
7.2	扩展基础地基及结构计算	38
7.3	构造规定	42
8	基础施工	44
8.1	一般规定	44
8.2	钢筋工程	44
8.3	模板工程	45
8.4	混凝土工程	45
8.5	质量检验	45
9	塔筒预制管片制作	49
9.1	一般规定	49
9.2	钢筋工程	49
9.3	模板工程	50
9.4	混凝土工程	50
9.5	管片拼装	53
9.6	质量检验	54
9.7	储存及运输	57
10	附件安装	58
11	塔筒防腐蚀	59
12	塔筒吊装工程	60
12.1	一般规定	60
12.2	吊装工程	60
12.3	吊装质量检验	61

13	预应力工程	62
13.1	一般规定	62
13.2	预应力施工	62
13.3	质量检验	64
14	安全监测	66
14.1	一般规定	66
14.2	塔筒安全监测	66
15	工程验收	68
16	职业健康安全与环境保护	69
附录 A	水泥基灌浆材料性能要求	70
附录 B	管片拼接材料及环氧砂浆试验方法	71
附录 C	预制管片外观质量缺陷	75
附录 D	预制管片尺寸检查表	76
附录 E	预应力施工验收表	79
附录 F	塔筒对正、水平度及导电率的验收记录表	85
附录 G	竖缝灌浆质量控制表	86
附录 H	水平接缝灌浆质量控制表	88
附录 I	预应力孔道灌浆料泌水率和膨胀率测试方法	90
本规范用词说明		92
引用标准名录		93
附：条文说明		97

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic requirements	5
4	Materials	7
4.1	Concrete raw materials	7
4.2	Concrete	8
4.3	Grouts	9
4.4	Seal material for vertical joints	13
4.5	Seal material for horizontal joints	13
4.6	Reinforcement	14
4.7	Post-tensioning material	15
4.8	Other	15
5	Loads and seismic effects	17
5.1	Load classification	17
5.2	Wind loads on wind turbine	17
5.3	Wind loads on tower	19
5.4	Seismic effects	20
5.5	Combination of loads and seismic effects	20
6	Shaft structural design	23
6.1	General requirements	23
6.2	Ultimate limit states calculation	24
6.3	Serviceability limit states calculation	27
6.4	Fatigue calculation	31

6.5	Durability design	33
6.6	Detailing requirements	34
7	Foundation design	37
7.1	General requirements	37
7.2	Spread foundation structural calculation	38
7.3	Detailing requirements	42
8	Foundation construction	44
8.1	General requirements	44
8.2	Reinforcement	44
8.3	Formwork	45
8.4	Concrete	45
8.5	Quality inspection	45
9	Precast concrete pieces production	49
9.1	General requiremints	49
9.2	Reinforcement	49
9.3	Formwork	50
9.4	Concrete	50
9.5	Assembly of concrete pieces	53
9.6	Quality inspection	54
9.7	Storage and transportation	57
10	Ancillary works	58
11	Tower anti-corrosion	59
12	Shaft erection	60
12.1	General requirements	60
12.2	Erection	60
12.3	Quality inspection	61
13	Post-tensioning works	62
13.1	General requirements	62
13.2	Post-tensioning construction	62

T / CEC 5008 — 2018

13.3	Quality inspection	64
14	Safety monitoring	66
14.1	General requirements	66
14.2	Tower safety monitoring	66
15	Project acceptance	68
16	Occupational health, safety and environmental protection	69
Appendix A	Performance requirements of cement-based grouting materials	70
Appendix B	Jointing materials and epoxy mortar testing method	71
Appendix C	Appearance defects of precast concrete pieces	75
Appendix D	Geometric inspection forms of precast concrete pieces	76
Appendix E	Post-tensioning works acceptance forms	79
Appendix F	Final tower alignment, horizontality and electrical conductivity control form	85
Appendix G	Vertical joint grouting quality control form	86
Appendix H	Horizontal joint grouting quality control form	88
Appendix I	Test method of bleeding rate and expansion rate of post-tensioning channel grouting material	90
	Explanation of wording in this code	92
	List of quoted standards	93
	Addition: Explanation of provisions	97

1 总 则

1.0.1 为规范风力发电机组预应力装配式混凝土塔筒设计、制作、施工安装及验收要求，做到安全适用、技术先进、经济合理、保证质量、方便施工，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于采用后张法有黏结预应力的陆上风力发电机组装配式混凝土塔筒。

1.0.3 风力发电机组预应力装配式混凝土塔筒的设计、施工及验收，除遵照本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语 和 符 号

2.1 术 语

2.1.1 预制混凝土管片 precast concrete piece

在工厂或现场预先生产制作完成，构成塔筒的结构构件，简称“预制管片”。管片根据形状一般分为 C 型和 O 型两类。

2.1.2 混凝土塔筒 concrete tower

基础以上用于承载风力发电机组回转部分及以上部件的混凝土结构。

2.1.3 转换段 transition piece

塔筒顶部的过渡结构，用于连接风力发电机组和塔筒混凝土。

2.1.4 附件 internals

塔筒内部除主体结构之外的附属构件，如平台、电缆桥架、电缆支架、照明设备等。

2.1.5 风力发电机组风荷载 wind load on wind turbine

作用于风力发电机组叶轮及机舱上的风荷载，不包括塔筒所受的风荷载。

2.1.6 塔筒风荷载 wind load on tower

作用于塔筒上的风荷载。

2.1.7 切入风速 cut-in wind speed

风力发电机组开始发电时，轮毂高度处的最小无湍流稳态风速。

2.1.8 切出风速 cut-out wind speed

风力发电机组设计所允许的发电状态下，轮毂高度处的最大无湍流稳态风速。

2.1.9 额定风速 rated wind speed

风力发电机组设计达到额定功率时，轮毂高度处的最小无湍流稳态风速。

2.1.10 极大风速 extreme wind speed

t 秒内最高风速的平均值，其概率为 N 年一遇（重现期： N 年）。

注：本标准采用的重现周期为 $N=50$ 年和 $N=1$ 年，时间间隔为 $t=3s$ 和 $t=10min$ 。极大风速即为俗称的“生存风速”。在风力发电机组设计中以极大风速来定义设计荷载工况。

2.2 符 号

2.2.1 计算指标

f_c ——混凝土抗压强度设计值；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值；

f_y ——普通钢筋抗拉、抗压设计值；

f_{py} ——预应力筋抗拉设计值；

f_{ptk} ——预应力筋抗拉强度标准值；

R_d ——构件承载力设计值；

C ——设计时对变形、裂缝等规定的限值。

2.2.2 作用和作用效应

F_d ——荷载设计值；

F_k ——荷载标准值；

S ——变形、裂缝等作用效应的代表值；

S_d ——荷载或作用组合的效应设计值；

S_{wk} ——风荷载效应的标准值；

S_{Gk} ——永久荷载效应的标准值；

S_{Pk} ——预应力荷载效应的标准值；

S_{Qk} ——正常运行状态下可变荷载效应的标准值；

S_{Qk1} ——停机检修时可变荷载效应的标准值；

- S_{GE} ——重力荷载效应的代表值；
 S_{Ehk} ——水平地震作用效应的标准值；
 v_r ——额定风速；
 v_{in} ——切入风速；
 v_{hub} ——轮毂高度处风速；
 v_{out} ——切出风速；
 μ_s ——风荷载体形系数；
 μ_z ——风压高度变化系数；
 β_z ——风振系数。

2.2.3 计算系数及其他

- γ_0 ——高耸结构重要性系数；
 γ_{RE} ——承载力抗震调整系数；
 γ_G ——永久荷载分项系数；
 γ_P ——预应力荷载分项系数；
 γ_Q ——可变荷载分项系数；
 γ_W ——风荷载分项系数；
 γ_{Q1} ——停机检修时可变荷载分项系数；
 γ_{GE} ——重力荷载分项系数；
 γ_{Ehk} ——水平地震作用分项系数；
 ψ_{wE} ——抗震基本组合中的风荷载组合值系数。

3 基 本 规 定

3.0.1 塔筒主体结构的设计使用年限不应低于风力发电机组的设计寿命。

3.0.2 塔筒的极限状态应包括下列两类：

1 承载能力极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的过度变形。

2 正常使用极限状态。这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定的限值。

3.0.3 塔筒的承载力应按下列公式验算：

1 持久设计状况、短暂设计状况：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (3.0.3-1)$$

2 地震设计状况：

$$S_d \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.0.3-2)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，取 1.0；

S_d ——荷载或作用组合的效应设计值；

R_d ——构件承载力设计值；

γ_{RE} ——构件承载力抗震调整系数，按表 3.0.3 取值。

表 3.0.3 构件承载力抗震调整系数

结构类别	正截面承载力计算				斜截面承载力计算	受冲切承载力计算	局部受压承载力计算
	受弯构件	偏心受压构件		偏心受拉构件	各类构件		
		轴压比小于0.15	轴压比不小于0.15				
γ_{RE}	0.75	0.75	0.80	0.85	0.85	0.85	1.00

3.0.4 塔筒的变形、裂缝等作用效应应按下列公式验算：

$$S \leq C \quad (3.0.4)$$

式中：S ——变形、裂缝等作用效应的代表值；

C ——设计时对变形、裂缝等规定的限值。

3.0.5 塔筒混凝土强度等级不应低于 C60，基础混凝土强度等级不应低于 C35。

3.0.6 塔筒的设计、生产、施工和维护等过程可采用信息化协同平台，实现建设和运维全过程的数据共享。

3.0.7 塔筒的生产和施工过程应建立完善的质量、安全与环境保护管理体系。

3.0.8 塔筒施工应满足下列要求：

1 应制订完善的总体和分部分项工程施工组织方案和应急预案；

2 施工操作人员应经过培训，并具备各自岗位需要的基础知识和技术水平，特殊工种的作业人员应持证上岗。

3.0.9 设计、施工及验收过程应进行完整的记录。

3.0.10 塔筒工程所用的材料和部件等应有产品合格证书或产品性能检测报告。

3.0.11 特种设备和工器具应进行检测并在有效期内。

3.0.12 塔筒应设置沉降观测点，沉降点的设置和观测应按现行行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8 的要求进行。

4 材 料

4.1 混 凝 土 原 材 料

4.1.1 塔筒及基础混凝土用水泥应符合下列规定：

1 水泥品种宜采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥，水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定。

2 塔筒混凝土用水泥强度等级宜选用 52.5。

4.1.2 塔筒混凝土用粗骨料应符合现行国家标准《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685 中 I 类技术要求的规定，还应符合下列规定：

1 粗骨料最大粒径不应超过塔筒壁厚的 1/4，且不应超过钢筋最小净间距的 3/4，宜采用 5mm~15mm 连续级配石子。

2 粗骨料的母岩抗压强度应比混凝土强度等级标准值高 30%。

3 对粗骨料或用于制作粗骨料的岩石，应进行碱活性检验，包括碱-硅酸反应活性检验和碱-碳酸盐反应活性检验，不宜采用有碱活性的粗骨料。

4.1.3 塔筒混凝土用细骨料应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684 中 I 类技术要求的规定，还应符合下列规定：

1 细骨料宜采用细度模数为 2.6~3.0 的中砂，且 300 μ m 筛孔的颗粒通过量不宜少于 15%。

2 采用人工砂时，石粉 MB 值应小于 1.4。

3 细骨料吸水率应小于 2%。

4.1.4 基础混凝土用粗、细骨料应分别符合现行国家标准《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685 及《建设用砂》GB/T 14684 的规定。

4.1.5 混凝土用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

4.1.6 在使用矿物掺合料时，矿物掺合料的种类和掺量应经试验确定，且矿物掺合料应符合下列规定：

1 粉煤灰应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的规定，且粉煤灰宜采用 I 级；磨细粉煤灰应符合现行国家标准《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 的规定。

2 粒化高炉矿渣粉不宜低于 S95 级，粒化高炉矿渣粉应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的有关规定。

3 硅灰的二氧化硅含量宜大于 90%，比表面积宜大于 $15 \times 10^3 \text{m}^2/\text{kg}$ ，活性指数宜大于 105%，硅灰其他性能应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 的有关规定。

4 复合掺合料应符合现行行业标准《混凝土用复合掺合料》JG/T 486 中普通型 I 级的有关规定，同时其比表面积不应小于 $700 \text{m}^2/\text{kg}$ ，28d 活性指数不宜低于 110%；掺复合掺合料的受检混凝土与基准混凝土的倒置坍落筒排空时间比不应大于 60%。

4.1.7 外加剂应符合下列规定：

1 外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 的有关规定；

2 外加剂与水泥和矿物掺合料之间应有良好的适应性，并应经试验验证；

3 减水剂宜采用聚羧酸系高性能减水剂，并应符合现行行业标准《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223 的规定；

4 防冻剂应符合现行行业标准《混凝土防冻剂》JC 475 的规定。

4.2 混 凝 土

4.2.1 混凝土的强度标准值、轴心抗压强度设计值、轴心抗拉强度设计值、弹性模量和线膨胀系数等取值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

4.2.2 塔筒混凝土宜采用自密实混凝土；基础混凝土应采用泵送混凝土，其拌合物性能应符合现行行业标准《混凝土泵送技术规范》JGJ/T 10 的有关规定。

4.2.3 塔筒混凝土的拌合物性能应满足设计和施工要求，当采用自密实混凝土时，还应符合下列规定：

1 坍落扩展度宜控制在 650mm~750mm，坍落扩展度 1h 损失不应大于 50mm；

2 T500 宜控制在 4s~7s；

3 离析率不宜大于 10%；

4 含气量宜控制在 2%~4%。

4.2.4 塔筒混凝土和基础混凝土的配制强度应分别符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 和《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定。

4.2.5 混凝土的耐久性应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定。塔筒混凝土的耐久性能还应符合下列规定：

1 早期抗裂试验的单位面积的总开裂面积不宜大于 $700\text{mm}^2/\text{m}^2$ 。

2 用于受氯离子侵蚀环境条件时，抗氯离子渗透性能宜满足 28d 电通量不大于 1000C 或氯离子迁移系数不大于 $1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 。

3 用于盐冻环境条件时，抗冻等级不宜小于 F350。

4.3 灌 浆 料

4.3.1 应根据强度要求、环境温度、施工条件合理选用灌浆材料。

4.3.2 塔筒预应力孔道用水泥基灌浆料用原材料应符合下列规定：

1 水泥应采用性能稳定、强度等级不低于 42.5 的低碱硅酸盐或低碱普通硅酸盐水泥。水泥的技术要求除应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定外，尚应符合表 4.3.2-1 的规定。

表 4.3.2-1 水泥技术要求

项目	技术要求	检验标准
比表面积（m ² /kg）	≤300（硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥）	《通用硅酸盐水泥》GB 175
80μm 方孔筛筛余量（%）	≤10.0（普通硅酸盐水泥）	《水泥细度检验方法（筛析法）》GB/T 1345
游离氧化钙含量（%）	≤1.5	《水泥化学分析方法》GB/T 176
碱含量（%）	≤0.60	
熟料中的 C ₃ A 含量（%）	≤8；海水环境≤10	按《水泥化学分析方法》GB/T 176 的规定检验后计算求得
氯离子含量（%）	≤0.06	《通用硅酸盐水泥》GB 175

2 外加剂应与水泥具有良好的相容性，且不得含有氯盐、亚硝酸盐或其他对预应力筋有腐蚀作用的成分。减水剂应采用高效减水剂，且应满足现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 中高效减水剂一等品的要求，其减水率应不小于 20%。

3 矿物掺合料的品种宜为 I 级粉煤灰、磨细矿渣粉或硅灰，并应符合表 4.3.2-2～表 4.3.2-4 的规定。

表 4.3.2-2 粉煤灰技术要求

项目	技术要求		检验标准
	C50 及以上混凝土		
细度（%）	≤12		《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596
需水量（%）	≤100		
含水率（%）	≤1.0（干排灰）		
烧失量（%）	≤5.0	≤3.0	《水泥化学分析方法》GB/T 176
SO ₃ 含量（%）	≤3		
CaO 含量（%）	≤10（硫酸盐侵蚀环境）		
游离 CaO 含量（%）	F 类粉煤灰≤1.0 G 类粉煤灰≤4.0		
氯离子含量（%）	≤0.02		

续表 4.3.2-2

项目	技术要求	检验标准
	C50 及以上混凝土	
安定性（雷氏夹煮沸后增加距离，mm）	C 类粉煤灰≤5.0	《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T 1346

表 4.3.2-3 磨细矿渣粉技术要求

项目	技术要求	检验标准
比表面积（m ² /kg）	350~450	《水泥比表面积测定方法（勃氏法）》GB/T 8074
需水量比（%）	≤100	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736
含水率（%）	≤1.0	《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046
烧失量（%）	≤3	《水泥化学分析方法》GB/T 176
SO ₃ 含量（%）	≤4	
MgO 含量（%）	≤14	
氯离子含量（%）	≤0.02	《水泥原料中氯的化学分析方法》JC/T 420
28d 活性指数（%）	≥95	《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046

表 4.3.2-4 硅 灰 技 术 要 求

项目	技术要求	检验标准
比表面积（m ² /kg）	≥18000	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736
需水量比（%）	≤125	
含水率（%）	≤3.0	《水泥化学分析方法》GB/T 176
烧失量（%）	≤6	
SiO ₂ 含量（%）	≥85	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736
氯离子含量（%）	≤0.02	《水泥原料中氯的化学分析方法》JC/T 420
28d 活性指数（%）	≥85	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736

4 灌浆料用水宜采用符合国家卫生标准的清洁饮用水，不应含有对预应力钢绞线或水泥有害的成分，每升水中氯离子或任何

一种其他有机物的含量不应超过 350mg。

5 膨胀剂宜采用钙矾石系或复合膨胀剂，不应采用以铝粉为膨胀源的膨胀剂或总碱量 0.75%以上的高碱膨胀剂。

6 压浆材料中的氯离子含量不应超过胶凝材料总量的 0.06%，比表面积应大于 350m²/kg，三氧化硫含量不应超过 6.0%。

7 塔筒预应力孔道用水泥基灌浆料匀质性应符合表 4.3.2-5 的规定。

表 4.3.2-5 塔筒预应力孔道用水泥基灌浆料匀质性要求

项目	性能指标
含水率（%）	≤3.0
细度（0.08mm 方孔筛筛余量，%）	≤10
氯离子含量（%）	≤0.06

8 塔筒预应力孔道用水泥基灌浆料浆体性能应符合表 4.3.2-6 的规定。

表 4.3.2-6 塔筒预应力孔道用水泥基灌浆料浆体性能要求及试验依据

项目		技术指标	试验依据
凝结时间（h）	初凝	≥5	《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50
	终凝	≤14	
流动度（s）	初始流动度	≤17	
	30min 流动度	≤20	
	60min 流动度	≤25	
泌水率（%）	3h	0	本规范附录 I
膨胀率（%）	24h	0~2.0	
压力泌水率（%）	0.22MPa（孔道垂直高度≤1.8m 时）	≤1.0	《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50
	0.36MPa（孔道垂直高度>1.8m 时）	≤2.0	
充盈度	合格	合格	

续表 4.3.2-6

项目		技术指标	试验依据
抗压强度 (MPa)	3d	≥25	《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50
	28d	≥50	

4.3.3 塔筒预制管片拼接竖缝及首节管片与基础间使用的水泥基灌浆料性能应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448 的要求，具体性能要求见本规范附录 A。

4.4 管片竖缝封缝材料

4.4.1 管片竖缝封缝材料应满足表 4.4.1 的要求，试验方法应按本规范附录 B 执行。

表 4.4.1 管片竖缝封缝材料性能要求

项目		性能指标
适用期 (min)	23℃*	≥30
触变性	5mm	无流挂
抗压强度 (MPa)	1d	≥45
	7d	≥60
抗折强度 (MPa)	7d	≥30
黏结强度 (与混凝土, MPa)		≥2.5, 混凝土内聚破坏
拉伸剪切强度 (MPa)		≥7
不挥发物含量 (%)		≥99

注：*为按照《塑料试样状态调节和试样的标准环境》GB/T 2918 的规定，在温度 23℃±2℃、相对湿度 50%±5%的标准实验室条件下制样，并测试材料性能。

4.5 水平拼接缝用粘接材料

4.5.1 水平拼接缝用粘接材料应满足表 4.5.1 的要求，试验方法应按本规范附录 B 执行。

表 4.5.1 水平拼接缝用粘接材料性能要求

项目		性能指标
可操作时间 (min)		≥20
干燥时间 (min)	表干	≥90
	实干	≤240
触变性	5mm	无流挂
黏结强度 (与混凝土, MPa)	1d	≥3, 混凝土内聚破坏
抗压强度 (MPa)	1d	≥70
	7d	≥80
抗折强度 (MPa)	7d	≥40
热变形温度 (℃)		≥50
压缩弹性模量 (MPa)		≥8000
拉伸强度 (MPa)		≥12
可挤压性 (mm ²)		≥3000
断裂伸长率 (%)		≥0.6
拉伸剪切强度 (MPa)		≥12
耐湿热老化 (%)	90d	≤10

注：不同适用温度的材料，测试温度也不同。适用温度为 5℃～10℃的材料，测试温度为 10℃；适用温度为 10℃～25℃的材料，测试温度为 20℃；适用温度为 20℃～35℃的材料，测试温度为 25℃；适用温度为 30℃～45℃的材料，测试温度为 35℃。

4.6 钢 筋

4.6.1 塔筒和基础宜采用热轧带肋钢筋。其中，基础宜采用 HRB400 或 HRB500 钢筋，塔筒宜采用 HRB500 钢筋。

4.6.2 塔筒受力钢筋的直径不应小于 8mm、不宜大于 14mm，拉结筋的直径不宜小于 6mm。

4.6.3 钢筋的强度标准值、强度设计值、弹性模量和线膨胀系数等应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

4.6.4 钢筋的疲劳强度应满足现行国家标准《混凝土结构设计规

范》GB 50010 的规定。

4.7 预 应 力 材 料

4.7.1 预应力筋应采用高强度低松弛钢绞线，预应力钢绞线的强度标准值、强度设计值、弹性模量和线膨胀系数等应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

4.7.2 预应力钢绞线应有出厂质量证明书或试验报告单，钢绞线每盘（卷）上应挂有标牌，标牌上写明品种、直径、强度级别、松弛级别、重量、出厂日期及编号等。预应力钢绞线进场时应按型号、种类分批检验。

4.7.3 预应力孔道应符合下列规定：

1 预留孔道的内径宜比预应力束外径大 15mm 或以上，且孔道内径的截面积不宜小于 3 倍钢绞线截面积。

2 预应力混凝土用金属波纹管的性能和质量应符合现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225 的规定，且钢带厚度宜符合增强型要求。当采用钢管时，管道应具有足够的刚度，且应具有光滑的内壁并可被弯曲成适当的形状而不出现卷曲或被压扁。

4.7.4 锚具宜采用夹片式锚具，其静载锚固性能、疲劳荷载性能、锚固区传力性能、锚板强度、内缩量、锚口摩阻损失及张拉锚固工艺等应满足现行国家标准《预应力筋锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定。

4.8 其 他

4.8.1 钢筋连接用套筒应符合现行行业标准《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163 的规定。

4.8.2 预埋吊钉的屈服强度标准值不应小于 345MPa，且屈强比不应大于 0.8。

4.8.3 塔筒预埋件制作允许偏差应符合表 4.8.3 的规定。

表 4.8.3 预埋件制作允许偏差

项次	检验项目	允许偏差 (mm)	检验方法
1	预埋件锚板边长	$-5 \sim 0$	用钢尺量测
2	预埋件锚板平整度	1	用直尺和塞尺量测
3	预埋件 (含锚筋) 尺寸	$-5 \sim +10$	用钢尺量测
4	螺栓及螺纹长度	$0 \sim 10$	用钢尺量测
5	预埋管的椭圆度	不大于预埋管直径的 1%	用钢尺量测

5 荷载和地震作用

5.1 荷载与作用分类

5.1.1 塔筒所受的荷载与作用可分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载。

5.1.2 永久荷载应包括塔筒、基础、设备和附件自重及土压力。

5.1.3 可变荷载应包括风机风荷载、塔筒风荷载、风力发电机组振动荷载、平台均布荷载和多遇地震作用。

5.1.4 偶然荷载应包括罕遇地震作用。

5.1.5 除本规范第 5.1.2~5.1.4 条规定的荷载外,还应考虑现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 和《风力发电机组 设计要求》GB/T 18451.1 中规定的各项荷载和作用。

5.2 风力发电机组风荷载

5.2.1 风力发电机组风荷载应包括叶轮和机舱受到的风荷载,应分为正常运行荷载、极端荷载和疲劳荷载三类,且应采用荷载标准值表示。

5.2.2 风力发电机组风荷载应由风力发电机组外部风况条件确定。风况可分为风力发电机组正常运行期间频繁出现的正常风况和 1 年或 50 年一遇的极端风况。

5.2.3 正常风况包括正常风廓线模型(NWP)、正常湍流模型(NTM)。不同模型的风速和湍流标准偏差应按照现行国家标准《风力发电机组 设计要求》GB/T 18451.1 的规定计算。

5.2.4 极端风况包括极端风速模型(EWM)、极端运行阵风模型(EOG)、极端湍流模型(ETM)、极端风向变化模型(EDC)、方

向变化的极端相干阵风模型（ECD）和极端风切变（EWS）等模型。不同模型的风速和湍流标准偏差按照现行国家标准《风力发电机组 设计要求》GB/T 18451.1 的规定计算。

5.2.5 设计荷载工况应包括极限工况（U）和疲劳工况（F）两种类型。其中，极限工况下应评估结构的承载力、稳定性和挠度；疲劳工况下应评估结构的疲劳强度。

5.2.6 极限工况应分为正常（N）、非正常（A）及运输和吊装（T）三种状态。

5.2.7 风机风荷载的设计荷载工况（DLC）应由表 5.2.7 确定。

表 5.2.7 风机风荷载的设计荷载工况（DLC）

工况		风况	其他情况	工况类型	状态
1 发电	1.1	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	极端事件外推	U	N
	1.2	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	—	F	
	1.3	ETM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	—	U	N
	1.4	ECD $v_{hub} = \begin{cases} v_r - 2 & \text{m/s} \\ v_r & \text{m/s} \\ v_r + 2 & \text{m/s} \end{cases}$	—	U	N
	1.5	EWS $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	—	U	N
2 发电兼有故障	2.1	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	控制系统故障或电网掉电	U	N
	2.2	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	保护系统或先前发生的内部电气故障	U	A
	2.3	EOG $v_{hub} = v_r \pm 2\text{m/s}$ 和 v_{out}	外部或内部电气故障，包括电网掉电	U	A
	2.4	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	控制、保护或电气系统故障，包括电网掉电	F	
3 启动	3.1	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	—	F	
	3.2	EOG $v_{hub} = v_{in}$, $v_r \pm 2\text{m/s}$ 和 v_{out}	—	U	N
	3.3	EDC $v_{hub} = v_{in}$, $v_r \pm 2\text{m/s}$ 和 v_{out}	—	U	N

续表 5.2.7

工况		风况	其他情况	工况类型	状态
4 正常 关机	4.1	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	—	F	
	4.2	EOG $v_{hub}=v_r \pm 2\text{m/s}$ 和 v_{out}	—	U	N
5 紧急 关机	5.1	NTM $v_{hub}=v_r \pm 2\text{m/s}$ 和 v_{out}	—	U	N
6 停机 (静止或 空转)	6.1	EWM 50 年一遇	—	U	N
	6.2	EWM 50 年一遇	失去电网连接	U	A
	6.3	EWM 1 年一遇	极端偏航误差	U	N
	6.4	NTM $v_{hub} < 0.7v_{ref}$	—	F	
7 停机 兼有故障	7.1	EWM 1 年一遇	—	U	A
8 运输、 组装、维 护 and 修理	8.1	NTM v_{maint} 由主机厂家设定	—	U	T
	8.2	EWM 1 年一遇	—	U	A

注： $v_r \pm 2\text{m/s}$ 应分析此风速范围内所有风速的敏感性。

5.3 塔筒风荷载

5.3.1 塔筒风荷载应包括机舱连接法兰以下的部分所受到的风荷载。

5.3.2 塔筒风荷载标准值应按下式计算：

$$w_k=\beta_z\mu_s\mu_zw_0 \tag{5.3.2}$$

式中： w_k ——塔筒风荷载标准值， kN/m^2 ；
 w_0 ——基本风压值，应根据风机风荷载的设计荷载工况选取相应的基本风压值，但不宜小于 0.35kN/m^2 ；
 μ_s ——风荷载体形系数，应按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定取值；
 μ_z ——风压高度变化系数，应按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定取值；

β_z ——风振系数，应将塔筒、风机和叶轮作为整体计算。

5.3.3 对于圆形塔筒，当塔筒坡度小于或等于 2%时，应根据雷诺数的不同情况进行横风向风振验算。横风向风荷载应按现行国家标准《烟囱设计规范》GB 50051 的规定计算。

5.4 地 震 作 用

5.4.1 塔筒抗震验算应符合下列规定：

- 1 地震作用应采用风场所在地的基本烈度作为抗震设防烈度；
- 2 应将塔筒、基础和风力发电机组作为整体进行计算；
- 3 在计算地震作用时，钢筋混凝土塔筒的结构阻尼比可取为 0.05；
- 4 抗震设防烈度为 6 度时，可不进行截面抗震验算；
- 5 抗震设防烈度为 7 度时，可不计算竖向地震作用；8 度和 9 度时，还应计算竖向地震作用。

5.4.2 地震作用的计算应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

5.4.3 抗震设防烈度为 7 度且为 I、II 类场地时，且基本风压不小于 0.5kN/m^2 时，可不进行截面抗震验算，但应满足现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的抗震构造要求。

5.5 荷载和地震作用效应组合

5.5.1 塔筒应按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行荷载和地震作用效应组合，并应取各自最不利的效应组合进行设计。

5.5.2 承载能力极限状态下，塔筒应分别按正常运行、机组掉电、停机检修、地震作用四种设计状态，并应取最不利情况进行承载力设计。各设计状态包含的荷载效应组合应符合表 5.5.2 的规定。

表 5.5.2 荷载和地震作用效应组合

设计状态	组合内容
正常运行	结构自重、设备自重、附件自重、平台均布荷载、风机风荷载（发电、启动、正常关机）、塔筒风荷载、设备振动荷载
机组掉电	结构自重、设备自重、附件自重、平台均布荷载、风机风荷载（发电兼有故障、紧急关机）、塔筒风荷载、设备振动荷载
停机检修	结构自重、设备自重、附件自重、平台检修荷载、风机风荷载（停机、停机兼有故障）、塔筒风荷载
地震作用	结构自重、设备自重、附件自重、平台均布荷载、风机风荷载（发电、停机）、塔筒风荷载、地震作用

1 正常运行及设备或电网故障两种设计状态下，塔筒荷载组合的效应设计值应按下式计算：

$$S_d = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_P S_{Pk} + \gamma_Q S_{Qk} + \gamma_W S_{Wk} \quad (5.5.2-1)$$

式中： S_{Gk} ——永久荷载标准值的效应；

S_{Pk} ——预应力荷载标准值的效应；

S_{Qk} ——正常运行状态下可变荷载标准值的效应；

S_{Wk} ——风荷载标准值的效应，应包括风机风荷载和塔筒风荷载；

γ_G ——永久荷载分项系数（其中：当永久荷载效应对结构不利时，对由可变荷载效应控制的组合应取 1.2，对由永久荷载效应控制的组合应取 1.35；当永久荷载效应对结构有利时，不应大于 1.0）；

γ_P ——预应力荷载分项系数（其中：当预应力荷载效应对结构不利时，对由可变荷载效应控制的组合应取 1.2，对由永久荷载效应控制的组合应取 1.35；当预应力荷载效应对结构有利时，不应大于 1.0）；

γ_Q ——可变荷载分项系数，取 1.4；

γ_W ——风荷载分项系数（其中：塔筒风荷载分项系数，取 1.4；风力发电机组风荷载分项系数按本规范表 5.5.3 取值）。

2 停机检修设计状态下,塔筒荷载组合的效应设计值应按下列式计算:

$$S_d = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_P S_{Pk} + \gamma_{Q1} S_{Qk1} + \gamma_W S_{Wk} \quad (5.5.2-2)$$

式中: S_{Qk1} ——停机检修时可变荷载标准值的效应;

γ_{Q1} ——停机检修时可变荷载分项系数,取 1.4。

3 地震作用设计状态下,塔筒荷载组合的效应设计值应按下列式计算:

$$S_d = \gamma_G S_{GE} + \gamma_P S_{Pk} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \psi_{wE} \gamma_W S_{Wk} \quad (5.5.2-3)$$

式中: S_{GE} ——重力荷载代表值的效应;

S_{Ehk} ——水平地震作用标准值的效应;

γ_{Eh} ——水平地震作用分项系数,取 1.3;

ψ_{wE} ——抗震基本组合中风荷载组合值系数,取 0.2。

5.5.3 风机风荷载分项系数应按表 5.5.3 的规定取值。

表 5.5.3 荷载分项系数

不利荷载		有利荷载
状态类型 (见表 5.2.5)		所有的设计状态
正常 (N)	非正常 (A)	
1.35*	1.1	

注: *为对于设计荷载工况 DLC1.1,若给定的荷载通过统计荷载外推法来确定,风速在 v_{in} 和 v_{out} 之间,那么正常运行设计状态风机风荷载分项系数应为 1.25。

5.5.4 塔筒正常使用极限状态,应验算风荷载作用下混凝土的裂缝宽度和轮毂高度处的水平位移。

1 正常运行及设备或电网故障两种设计状态下,塔筒荷载组合的效应设计值应按下列式计算:

$$S = S_{Gk} + S_{Pk} + S_{Qk} + S_{Wk} \quad (5.5.4-1)$$

2 停机检修设计状态下,塔筒荷载组合的效应设计值应按下列式计算:

$$S = S_{Gk} + S_{Pk} + S_{Qk1} + S_{Wk} \quad (5.5.4-2)$$

6 塔筒结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 塔筒设计应进行下列计算或验算：

- 1 塔筒动力特性计算；
- 2 水平截面承载能力极限状态计算；
- 3 接缝受剪承载能力极限状态计算；
- 4 疲劳验算；
- 5 正常使用极限状态裂缝控制验算；
- 6 正常使用极限状态塔筒顶端水平位移计算。

6.1.2 塔筒及风电机组组成的结构体系的一阶自然频率与主要激励频率的相对偏差不应小于 10%，且应位于塔筒允许频率范围内（见图 6.1.2）。塔筒的主要激励频率有以下两项：

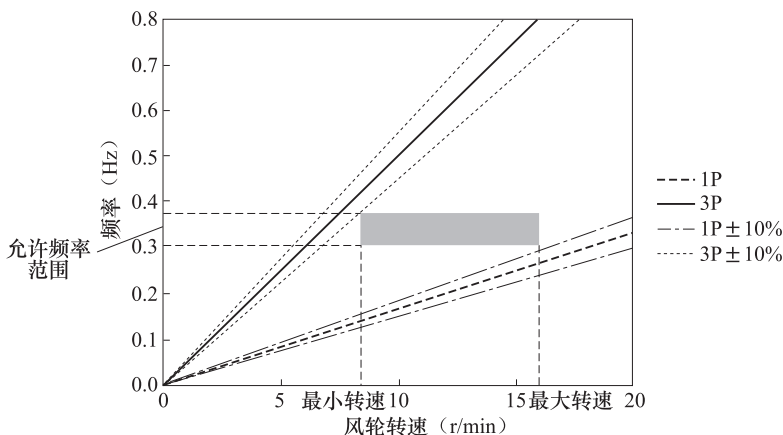


图 6.1.2 允许频率范围

1 叶轮转速的 1 倍, 即 1P 频率 (风轮旋转频率);

2 叶轮转速的 3 倍, 即 3P 频率 (叶片通过频率)。

6.1.3 塔筒的力学模型应符合下列规定:

1 塔筒应为一悬臂体系, 且底端应考虑基础转动刚度的影响。

2 塔筒可采用壳单元或杆单元模拟。当采用杆单元时, 每段预制管片应分别简化为一个质点, 每个质点的重力荷载应取相邻上、下质点距离内结构自重的 1/2。

6.1.4 计算塔筒的自振特性和正常使用极限状态时, 可将塔筒视为弹性体系, 截面抗弯刚度取 $1.0E_cI$ 。

6.1.5 当塔筒高度超过 100m 时, 设计应考虑预应力钢绞线分批张拉, 并进行施工过程验算。

6.1.6 塔筒后张预应力的设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

6.1.7 在正常使用极限状态下, 塔筒轮毂高度处的水平位移与轮毂高度之比不应大于 1/100, 不宜大于 1/200。

6.1.8 在温度作用效应下, 塔筒的最大裂缝宽度不应大于 0.2mm。

6.1.9 预制管片吊点的数量不应少于 4 个, 吊点的设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

6.2 承载力极限状态计算

6.2.1 塔筒设计应考虑二阶效应和附加弯矩的影响, 附加弯矩 M_a 的计算可按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定执行。

6.2.2 塔筒水平截面极限受弯承载力可按下列公式计算:

1 塔筒截面无孔洞时 (见图 6.2.2-1):

$$N \leq \alpha \alpha_l f_c A - \sigma_{p0} A_p + \alpha f'_{py} A_p - \alpha_t (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s \quad (6.2.2-1)$$

$$M+M_a \leq (\alpha_1 f_c A r + r f_y A_s + r_p f'_{py} A_p) \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} + \quad (6.2.2-2)$$

$$[(f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p + r f_y A_s] \frac{\sin \alpha_t \pi}{\pi}$$

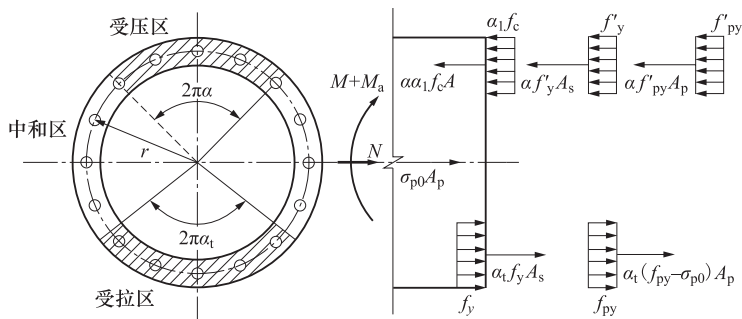


图 6.2.2-1 塔筒截面无孔洞时极限承载力计算简图

2 塔筒受压区有一个孔洞时 (见图 6.2.2-2):

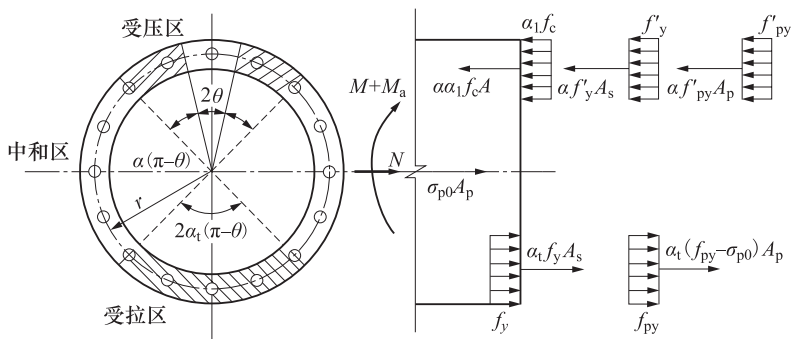


图 6.2.2-2 塔筒受压区有一个孔洞时极限承载力计算简图

$$N \leq \alpha \alpha_1 f_c A - \sigma_{p0} A_p + \alpha f'_{py} A_p - \alpha_t (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s \quad (6.2.2-3)$$

$$M+M_a \leq (\alpha_1 f_c A r + r f_y A_s + r_p f'_{py} A_p) \frac{\sin(\alpha\pi - \alpha\theta + \theta) - \sin \theta}{\pi - \theta} + \quad (6.2.2-4)$$

$$[(f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p + r f_y A_s] \frac{\sin \alpha_t (\pi - \theta)}{\pi - \theta} + \sigma_{p0} A_p r \frac{\sin \theta}{\pi - \theta}$$

式中: A ——塔筒截面面积, 当有孔洞时, 扣除孔洞面积;

A_p 、 A_s ——全部纵向预应力和非预应力钢筋的截面面积, 当截面有孔洞时, 扣除孔洞断筋的面积;

r ——塔筒平均半径, $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$, r_1 、 r_2 分别为环形截面的内、外半径;

r_p ——预应力钢筋的半径;

α ——受压区的半角系数, 按式 (6.2.1-1) 确定;

α_1 ——系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时取 1.0, 当混凝土强度等级超过 C80 时取 0.94, 其间按线性内插法取用;

α_t ——受拉钢筋的半角系数, 宜取 $\alpha_t = 1 \sim 1.5 \alpha$, 当 $\alpha \geq 2/3$ 时, 取 $\alpha_t = 0$;

θ ——塔筒截面受压区的孔洞半角 (rad);

f_{py} 、 f'_{py} ——预应力钢筋的抗拉、抗压强度 (N/mm²);

f_y 、 f'_y ——非预应力钢筋的抗拉、抗压强度 (N/mm²);

σ_{p0} ——消压状态时预应力钢筋中的拉应力。

6.2.3 水平接缝受剪承载力按下式计算:

$$2V + \frac{T}{r} \leq \mu N \quad (6.2.3)$$

式中: V 、 T 、 N ——水平截面的剪力、扭矩和轴力设计值 (含预应力产生的附加轴力);

μ ——水平接缝的摩擦系数, 无实测数据时可取为 0.5。

6.2.4 竖向接缝受剪承载力按下式计算:

$$V_v = 0.10 f_c A_k + 1.65 A_{sd} \sqrt{f_c f_y} \quad (6.2.4)$$

式中: A_k ——各键槽的根部截面面积之和, 取接缝左右两侧预制构件键槽根部截面面积之和的较小值;

A_{sd} ——垂直穿过结合面的所有钢筋的面积。

6.3 正常使用极限状态计算

6.3.1 塔筒的抗裂验算应根据结构所处的环境类别和作用等级，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定进行计算，且最大裂缝宽度不应大于 0.20mm。

6.3.2 正常使用极限状态下，塔筒水平截面不应出现裂缝。

6.3.3 轴向力对截面圆心的偏心距 e_{0k} 和截面核心距 r_{co} 应分别按下列公式计算：

1 轴向力对截面圆心的偏心距 e_{0k} ：

1) 当截面无孔洞或有两个大小相等且对称的孔洞时：

$$e_{0k} = \frac{M_k}{N_k + N_{pe}} \quad (6.3.3-1)$$

2) 当截面上有孔洞且大小不相等时：

$$e_{0k} = \frac{M_k - N_{pe}a}{N_k + N_{pe}} \quad (6.3.3-2)$$

式中： N_k 、 M_k ——各项荷载标准值（包括风荷载）共同作用下的截面轴向力和弯矩；

a ——截面形心轴至圆心轴的距离；

N_{pe} ——有效预应力，即预应力钢筋对构件产生的轴向力。

2 截面核心距 r_{co} ：

1) 当截面无孔洞或有两个大小相等且对称的孔洞时：

$$r_{co} = \frac{1}{2}r \quad (6.3.3-3)$$

2) 当截面受压区有一个孔洞时：

$$r_{co} = \frac{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - 2 \sin \theta}{2(\pi - \theta - \sin \theta)} r \quad (6.3.3-4)$$

6.3.4 混凝土塔筒水平截面的应力应按下列规定计算（见图 6.3.4）：

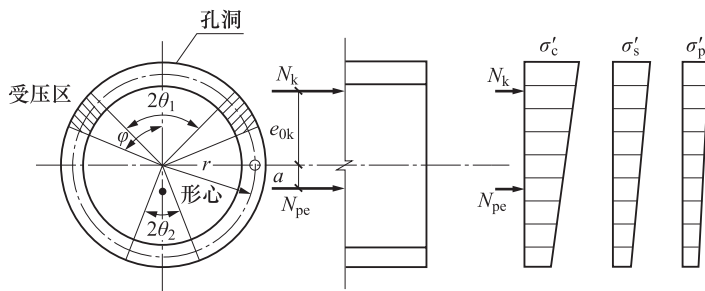


图 6.3.4 水平截面在标准荷载作用下的计算

1 背风面混凝土的压应力 σ'_c 应按下列公式计算，且不应大于混凝土的抗压强度设计值 f_c ：

1) 计算截面无孔洞时：

$$\sigma'_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left(1 + 2 \frac{e_{0k}}{r} \right) \quad (6.3.4-1)$$

2) 计算截面受压区有一个孔洞时：

$$\sigma'_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left\{ 1 + \frac{2 \left(\frac{e_{0k}}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta} \right) [(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta]}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - \frac{2 \sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \right\} \quad (6.3.4-2)$$

2 迎风面混凝土的压应力 σ_c 应按下列公式计算：

1) 计算截面无孔洞时：

$$\sigma_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left(1 + 2 \frac{e_{0k}}{r} \right) \quad (6.3.4-3)$$

2) 计算截面受压区有一个孔洞时：

$$\sigma'_c = \frac{N_{pe} + N_k}{A_0} \left\{ 1 - \frac{2 \left(\frac{e_{0k}}{r} + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta} \right) (\pi - \theta - \sin \theta)}{\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta - \frac{2 \sin^2 \theta}{\pi - \theta}} \right\} \quad (6.3.4-4)$$

式中： A_0 ——塔筒水平截面的换算面积。

对于无孔洞截面：

$$A_0 = 2\pi r t (1 + \omega_{hs} + \omega_{hp})$$

对于有一个孔洞的截面：

$$A_0 = 2(\pi - \theta) r t (1 + \omega_{hs} + \omega_{hp})$$

式中： t ——筒壁厚度；

ω_{hs} 、 ω_{hp} ——塔筒水平截面的特征系数，取 $\omega_{hs} = 2.5\rho_s\alpha_{Es}$ ， $\omega_{hp} = 2.5\rho_p\alpha_{Ep}$ ，其中 α_{Es} 、 α_{Ep} 为钢筋、预应力钢筋和混凝土弹性模量之比， ρ_s 、 ρ_p 为钢筋和预应力钢筋的配筋率。

6.3.5 混凝土塔筒在各项荷载标准值和温度的共同作用下，产生的最大水平裂缝宽度 $w_{\max}$ (mm) 按下式计算：

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (6.3.5-1)$$

$$\sigma_{sk} = \sigma_s + 0.5E_s \Delta t \alpha_T \quad (6.3.5-2)$$

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_{sk}} \quad (6.3.5-3)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (6.3.5-4)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}} \quad (6.3.5-5)$$

式中： σ_{sk} ——在各项标准荷载和温度共同作用下的纵向普通钢筋拉应力或预应力钢筋等效应力；

σ_s ——在各项荷载标准组合值作用下的纵向钢筋拉应力 (N/mm^2) 或预应力钢筋的等效应力，可按第 6.4.4 条规定计算；

α_T ——混凝土线膨胀系数，取 $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ；

Δt ——筒壁内外温差 ($^\circ\text{C}$)；

α_{cr} ——构件受力特征系数，取 1.7；

- ψ —— 裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, 当 $\psi < 0.2$ 时取 0.2, 当 $\psi > 1.0$ 时取 1.0, 对直接承受重复荷载的构件, 取 1.0;
- ρ_{te} —— 按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率, 在最大裂缝宽度计算中, 若 $\rho_{te} < 0.01$, 取 0.01;
- c —— 最外一排纵向受拉钢筋的边缘至受拉区底边的距离 (mm), 当 $c < 20$ 时取 20, 当 $c > 65$ 时取 65;
- A_{te} —— 有效受拉混凝土截面面积 (mm^2);
- A_s —— 受拉区纵向普通钢筋截面面积 (mm^2);
- A_p —— 受拉区纵向预应力钢筋截面面积 (mm^2);
- d_{eq} —— 受拉区纵向钢筋的等效直径 (mm);
- d_i —— 受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径 (mm);
- n_i —— 受拉区第 i 种纵向钢筋的根数;
- ν_i —— 受拉区第 i 种纵向钢筋的相对黏结特征系数, 按表 6.3.5 采用。

表 6.3.5 钢筋的相对黏结特征系数

钢筋类别	普通钢筋		后张法预应力钢筋		
	光面钢筋	带肋钢筋	带肋钢筋	钢绞线	光面钢丝
ν_i	0.7	1.0	0.8	0.5	0.4

注: 1 对环氧树脂涂层带肋钢筋, 其相对黏结特征系数应按表中系数的 0.8 倍取用。

2 当 $e_{0k} \leq r_{co}$ 时, 水平裂缝宽度不需验算。

6.3.6 塔筒由于内外温差所产生的最大竖向裂缝宽度 $w_{\max}$ (mm) 可按式 (6.3.5-1) 计算, 但 σ_{sk} 应按下式计算:

$$\sigma_{sk} = E_s \Delta t \alpha_T (1 - \xi) \quad (6.3.6-1)$$

$$\xi = -\omega_v + \sqrt{\omega_v^2 + 2\omega_v} \quad (6.3.6-2)$$

$$\omega_v = 2\rho_{te}\alpha_E \quad (6.3.6-3)$$

式中： ξ ——受压区相对高度；
 ω_v ——塔筒竖向截面的特征系数；
 α_E ——钢筋和混凝土的弹性模量比值。

6.4 疲 劳 验 算

6.4.1 塔筒正截面疲劳应力验算时，可采用下列基本假定：

- 1 截面应变保持平面；
- 2 受压区混凝土的法向应力图形为三角形；
- 3 要求不允许出现裂缝的预应力混凝土塔筒，受拉区混凝土的法向应力图形为三角形；
- 4 采用换算截面计算。

6.4.2 在疲劳验算中，荷载应取风机正常运行状态下的荷载标准值。

6.4.3 塔筒疲劳验算中，应计算下列部位的混凝土应力和钢筋应力幅：

- 1 正截面受拉区和受压区边缘纤维的混凝土应力；
- 2 正截面受拉区纵向预应力钢筋和普通钢筋的应力幅；
- 3 截面重心及截面几何尺寸剧烈改变处的混凝土主拉应力。

注：受压区纵向钢筋可不进行疲劳验算。

6.4.4 正截面混凝土疲劳应力和钢筋的应力幅应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求。

6.4.5 要求不出现裂缝的预应力混凝土塔筒，其正截面的混凝土、纵向预应力筋和普通钢筋的最小、最大应力和应力幅应按下列公式计算：

- 1 受拉区或受压区边缘纤维的混凝土应力为：

$$\sigma_{c,\min}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\max}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_0 \quad (6.4.5-1)$$

$$\sigma_{c,\max}^f \text{ 或 } \sigma_{c,\min}^f = \sigma_{pc} + \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_0 \quad (6.4.5-2)$$

- 2 受拉区纵向预应力筋的应力及应力幅为：

$$\Delta\sigma_p^f = \sigma_{p,\max}^f - \sigma_{p,\min}^f \quad (6.4.5-3)$$

$$\sigma_{p,\min}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{pE} \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0p} \quad (6.4.5-4)$$

$$\sigma_{p,\max}^f = \sigma_{pe} + \alpha_{pE} \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0p} \quad (6.4.5-5)$$

3 受拉区纵向普通钢筋的应力及应力幅为：

$$\Delta\sigma_s^f = \sigma_{s,\max}^f - \sigma_{s,\min}^f \quad (6.4.5-6)$$

$$\sigma_{s,\min}^f = \sigma_{s0} + \alpha_E \frac{M_{\min}^f}{I_0} y_{0s} \quad (6.4.5-7)$$

$$\sigma_{s,\max}^f = \sigma_{s0} + \alpha_E \frac{M_{\max}^f}{I_0} y_{0s} \quad (6.4.5-8)$$

式中： $\sigma_{c,\min}^f$ 、 $\sigma_{c,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区或受压区边缘纤维混凝土的最小、最大应力，最小、最大应力以其绝对值进行判别；

σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后，由预加力在受拉区或受压区边缘纤维处产生的混凝土法向应力；

$M_{\min}^f$ 、 $M_{\max}^f$ ——疲劳验算时同一截面上在相应荷载组合下产生的最小、最大弯矩值；

α_{pE} ——预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值， $\alpha_{pE} = E_s / E_c$ ；

I_0 ——换算截面的惯性矩；

y_0 ——受拉区边缘或受压区边缘至换算截面重心的距离；

$\sigma_{p,\min}^f$ 、 $\sigma_{p,\max}^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层预应力筋的最小、最大应力；

$\Delta\sigma_p^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层预应力筋的应力幅；

σ_{pe} ——扣除全部预应力损失后,受拉区最外层
预应力筋的有效预应力;

y_{0s} 、 y_{0p} ——受拉区最外层普通钢筋、预应力筋截面
重心至换算截面重心的距离;

$\sigma_{s,min}^f$ 、 $\sigma_{s,max}^f$ ——疲劳验算时,受拉区最外层普通钢筋的
最小、最大应力;

$\Delta\sigma_s^f$ ——疲劳验算时受拉区最外层普通钢筋的
应力幅;

σ_{s0} ——消压弯矩 M_{p0} 作用下受拉区最外层普
通钢筋中产生的应力,此处 M_{p0} 为受拉
区最外层普通钢筋重心处的混凝土法
向预加应力等于零时的相应弯矩值。

6.4.6 预应力混凝土塔筒斜截面混凝土的主拉应力应符合下列规定:

$$\sigma_{tp}^f \leq f_t^f \quad (6.4.6)$$

式中: σ_{tp}^f ——预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳验算纤维处的
混凝土主拉应力,按现行国家标准《混凝土结构
设计规范》GB 50010 的规定计算;

f_t^f ——混凝土轴心抗拉疲劳强度设计值。

6.5 耐久性设计

6.5.1 结构的耐久性应根据结构的设计使用年限、结构所处的环境类别及作用等级进行设计。

6.5.2 结构的耐久性设计主要包含以下内容:

- 1 结构的设计使用年限、环境类别及其作用等级;
- 2 有利于减轻环境作用的结构形式、布置和构造;
- 3 结构材料的耐久性质量要求;
- 4 钢筋的保护层厚度;
- 5 混凝土裂缝控制要求;

- 6 防水、排水等构造措施;
- 7 严重环境作用下采取合理防腐附加措施或多重防护策略;
- 8 耐久性所需的施工养护制度与保护层厚度的施工质量验收要求;
- 9 结构使用阶段的维护、修理与检测要求。

6.5.3 预应力筋应根据具体情况采用表面防护、孔道灌浆、加大混凝土保护层厚度等措施,外露的锚具应采取封锚等有效措施,此外尚应符合现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的要求。

6.6 构造规定

6.6.1 筒壁的最小厚度 $t_{\min}$ (mm) 可按下列式计算:

$$t_{\min} = \max \{100 + 0.01d, 180\} \quad (6.6.1)$$

式中: d ——塔筒外直径 (mm)。

6.6.2 塔筒可采用同一坡度的圆锥形,设计有要求时也可采用分段不同直径的圆柱形或其他形式。

6.6.3 纵向或环向钢筋的混凝土保护层厚度应根据结构的环境类别和作用等级确定,但不宜小于 30mm。筒壁外表面至竖向预留孔道壁的距离应大于 40mm,且不宜小于孔道直径的 1/2。竖向孔道之间的净距不应小于 50mm 或孔道直径。

6.6.4 筒壁上的孔洞应规整,同一截面上开多个孔洞时,应均匀布置。

6.6.5 塔筒应配置双排纵向钢筋和双层环向钢筋,且纵向普通钢筋应采用变形带肋钢筋,其最小配筋率应符合表 6.6.5 的规定。

表 6.6.5 混凝土塔筒的最小配筋率

塔筒配筋类别		最小配筋率 (%)
纵向钢筋	外排	0.25
	内排	0.20

续表 6.6.5

塔筒配筋类别		最小配筋率 (%)
环向钢筋	外排	0.20
	内排	0.20

注：环向钢筋最小配筋率尚不应小于 $45f_t/f_y$ ，其中 f_t 、 f_y 分别为钢筋和混凝土抗拉强度设计值。

6.6.6 纵向钢筋和环向钢筋的最小直径和最大间距应符合表 6.6.6 的规定。

表 6.6.6 钢筋最小直径和最大间距 (mm)

配筋类别	钢筋最小直径	钢筋最大间距
纵向钢筋	10	外侧 250，内侧 300
环向钢筋	8	250，且不大于筒壁厚度

6.6.7 内、外层环向钢筋应分别与内、外排纵向钢筋绑扎成钢筋网 (见图 6.6.7)。壁厚大于 400mm 时，内、外钢筋网之间应用拉筋连接，拉筋直径不宜小于 6mm，拉筋的纵横间距不应大于 600mm。拉筋应交错布置，并与纵向钢筋牢固连接。

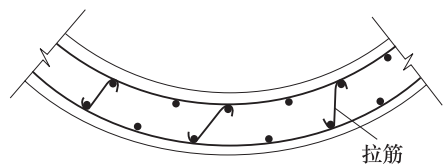


图 6.6.7 纵向钢筋与环向钢筋布置

6.6.8 直径超过 300mm 的圆孔及边长超过 300mm 的矩形孔应按下列要求布置补强钢筋：

- 1 补强钢筋应靠近洞口周围布置，其面积可取同方向被孔洞切断钢筋截面积的 1.3 倍。
- 2 矩形孔洞的四角处应配置 45°方向的斜向钢筋，每处斜向

钢筋可按筒壁每 100mm 厚度采用 250mm^2 的钢筋面积，且钢筋不宜少于 2 根。

3 所有补强钢筋伸过孔洞边缘的长度不应小于 45 倍钢筋直径。

6.6.9 后张法有黏结预应力混凝土塔筒应设置灌浆孔和排气孔。

6.6.10 预应力钢绞线的锚垫板和张拉设备的支承处应进行局部加强，其配筋量应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关条文计算。

6.6.11 锚垫板的承压面应与孔道末端垂直，预应力钢绞线或孔道曲线末端直线段长度应符合表 6.6.11 的要求。

表 6.6.11 预应力钢绞线曲线起始点与张拉锚固点之间直线段最小长度

预应力钢绞线张拉控制力 (kN)	<1500	1500	>6000
直线段最小长度 (mm)	400	500	600

7 基 础 设 计

7.1 一 般 规 定

7.1.1 塔筒基础宜采用圆形或环形扩展式基础，基础设计应参考现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定执行。

7.1.2 基础或承台混凝土应一次浇筑成型，基础混凝土浇筑前应浇筑垫层混凝土。

7.1.3 钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 7.1.3 的规定，同时不宜小于粗骨料最大粒径的 1.25 倍。严寒和寒冷地区受冰冻的部位，保护层厚度还应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

表 7.1.3 扩展基础、筏板基础承台混凝土保护层最小厚度（mm）

基础部位	钢筋部位	环境条件类别			
		二	三	四	五
顶面、侧面（无地下水时）	外层钢筋	30	35	40	45
顶面、侧面（有地下水时）	外层钢筋	40	45	50	55
底部	外层钢筋	80	100	110	120

7.1.4 基础底板顶面钢筋的计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定，其中单侧纵向钢筋的最小配筋率不应小于 0.15%，底板受力钢筋的最小直径不应小于 20mm。

7.1.5 基础混凝土应按所处环境类别和设计工况确定相应的裂缝控制要求，最大裂缝宽度不应大于 0.3mm，并采用荷载效应标准组合按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定验算裂缝宽度。

7.1.6 正常使用极限状态下基础底面与地基不允许脱开；承载能力极限状态下基底脱开面积不应大于基底总面积的 25%。

7.1.7 受洪（潮）水影响的基础，除应满足防洪要求外，基础底板混凝土中的预埋管道尚应采取防水和止水措施。

7.2 扩展基础地基及结构计算

7.2.1 扩展基础结构计算应符合下列规定：

- 1 扩展基础应验算基础牛腿处的局部受压承载力；
- 2 扩展基础应按不配置箍筋和弯起钢筋的一般板类受弯构件验算斜截面受剪承载力；
- 3 基底底板的配筋应按受弯承载力计算确定。

7.2.2 地基承载力的计算应符合下列要求：

- 1 当承受轴心荷载时：

$$p_k \leq f_a \quad (7.2.2-1)$$

式中： p_k ——相应于荷载效应标准组合下基础底面平均压力值（ kN/m^2 ）；

f_a ——修正后的地基承载力特征值，应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定采用。

- 2 当承受偏心荷载时：

除应符合式（7.2.2-1）的要求外，尚应满足下式要求：

$$p_{k,\max} \leq 1.2f_a \quad (7.2.2-2)$$

式中： $p_{k,\max}$ ——相应和荷载效应标准组合下基础边缘的最大压力代表值（ kN/m^2 ）。

当考虑地震作用时，在式（7.2.2-1）、式（7.2.2-2）中应采用调整后的地基抗震承载力 f_{ak} 代替地基承载力特征值 f_a ，地基抗震承载力 f_{ak} 应按现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的规定采用。

7.2.3 当基础承受轴心受压荷载和在核心区内承受偏心荷载时，验算地基承载力的基础底面压力可按下列公式计算：

1 矩形和圆（环）形基础承受轴心荷载时：

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} \quad (7.2.3-1)$$

式中： F_k ——相应于荷载效应标准组合下上部结构传至基础的竖向力（kN）；

G_k ——基础自重（包括基础上的土重）标准值（kN）；

A ——基础底面面积（m²）。

2 矩形和圆（环）形基础承受（单向）偏心作用时：

$$p_{k,\max} = \frac{F_k + G_k}{A} + \frac{M_k}{W} \quad (7.2.3-2)$$

$$p_{k,\min} = \frac{F_k + G_k}{A} - \frac{M_k}{W} \quad (7.2.3-3)$$

式中： M_k ——相应于荷载效应标准组合下上部结构传至基础的力矩值（kN·m）；

W ——基础底面的抵抗矩（m³）；

$p_{k,\max}$ ——相应和荷载效应标准组合下基础边缘的最大压力代表值（kN/m²）。

7.2.4 对于圆（环）形基础，当基础在核心区外承受偏心荷载，且基底脱开地基土面积不大于全部面积的 1/4 时（见图 7.2.4），验算地基承载力的基础底面压力可按下列公式确定：

$$p_{k,\max} = \frac{F_k + G_k}{\xi r_1^2} \quad (7.2.4-1)$$

$$a_c = \tau r_1 \quad (7.2.4-2)$$

式中： r_1 ——基础底板半径（m）；

a_c ——基底受压面宽度（m）；

ξ 、 τ ——系数，根据 r_2/r_1 及 e/r_1 按现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定确定〔其中 r_2 为环形基础孔洞的半径（m），当 $r_2=0$ 时即为圆形基础〕。

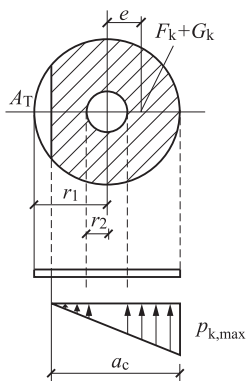


图 7.2.4 偏心荷载作用下圆（环）形基础底面部分脱开时的基底压力

7.2.5 计算矩形扩展基础强度时，基底压力可按下列规定采用：

1 坡形顶面的扩展基础（见图 7.2.5-1）。

计算任一截面 $x-x$ 的内力时，可采用按下式求得的基底均布荷载设计值 p ：

$$p = \frac{p_{\max} + p_x}{2} \quad (7.2.5-1)$$

式中： p —— 基底均布荷载；

$p_{\max}$ —— 基底边缘最大压力；

p_x —— 计算截面 $x-x$ 处的基底压力。

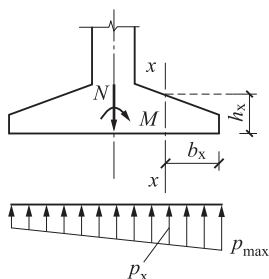


图 7.2.5-1 坡形顶面扩展基础的荷载计算

2 台阶形顶面的扩展基础（见图 7.2.5-2）。

计算截面 1-1 及 2-2 的内力时，可分别采用按下列两式求得的基底均布荷载 p ：

$$p = \frac{p_{\max} + p_1}{2} \quad (7.2.5-2)$$

$$p = \frac{p_{\max} + p_2}{2} \quad (7.2.5-3)$$

式中： p_1 、 p_2 ——计算截面 1-1、2-2 处的基底压力设计值。

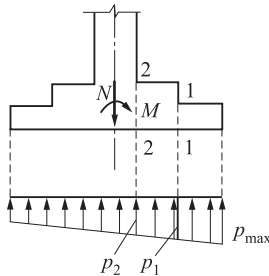


图 7.2.5-2 台阶形顶面扩展基础的荷载计算

7.2.6 计算圆形、环形基础底板强度时（见图 7.2.6），可取基础外悬挑中点处的基底最大压力 p 作为基底均布荷载。 p 值可按下列式计算：

$$p = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} \times \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (7.2.6)$$

式中： N ——相应于荷载效应基本组合下上部结构传至基础的轴向力设计值（不包括基础底板自重及基础底板上的土重）；

M ——相应于荷载效应基本组合下上部结构传至基础的力矩设计值；

A ——基础底板的面积；

I ——基础底板的惯性矩。

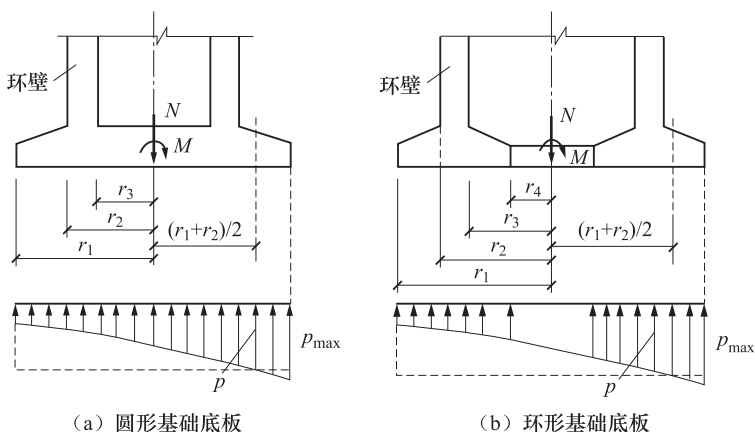


图 7.2.6 圆形、环形基础的基底荷载计算

注：对基底部分脱开的基础，除基底压力分布的计算不同外，底板强度计算时 p 的取法均相同。

7.2.7 塔筒扩展基础在承受拔力时均应进行底板抗拔强度计算，并按计算在底板上表面配负弯矩钢筋。

7.2.8 基础顶面预应力锚具设计应满足以下要求：

- 1 预应力锚具设计应兼顾上部结构的精度要求、安装调整的可能性及混凝土基础施工的实际可能性确定施工精度要求，并对预应力孔道进行相应扩大，便于安装时调整。
- 2 预应力锚具应验算混凝土的局部承压。

7.3 构造规定

7.3.1 扩展基础的尺寸（见图 7.3.1）宜符合下列要求：

- 1 底面直径宜控制在轮毂高度的 $1/6 \sim 1/5$ 范围内；
- 2 基础边缘高度宜为底面宽度或直径的 $1/20 \sim 1/15$ ，且不应小于 1.0m；
- 3 空腔直径不宜小于 7.5m，高度不宜小于 1.5m；
- 4 基础牛腿高度不宜小于 1.0m。

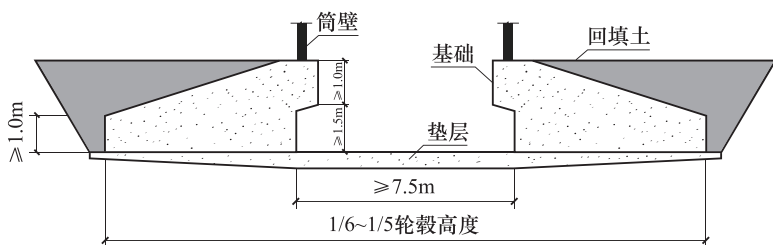


图 7.3.1 基础形式及尺寸

7.3.2 基础牛腿应满足预应力局部承压要求，并应考虑锚具安装及张拉空间的要求。

7.3.3 除应满足本规范第 7.3.1、7.3.2 条的规定外，基础内部空间还应满足干式箱式变压器、电气柜、电缆桥架、冷却风道等的布置要求。

8 基 础 施 工

8.1 一 般 规 定

8.1.1 塔筒基础工程施工前，应取得下列资料：

- 1** 岩土、水文工程勘察报告；
- 2** 基础工程施工所需的设计文件；
- 3** 基础工程施工影响范围内的建（构）筑物、地下管线和障碍物等资料；
- 4** 施工组织设计和专项施工、监测方案。

8.1.2 基础工程施工前应做好准备工作，分析工程现场的工程水文地质条件、邻近地下管线、周围建（构）筑物及地下障碍物等情况。对邻近的地下管线及建（构）筑物应采取相应的保护措施。

8.1.3 基础施工过程中应控制地下水、地表水和潮流的影响。

8.1.4 基础工程冬、雨期施工应采取防冻、排水措施。

8.1.5 塔筒基础构造尺寸及预应力孔道位置精度检查应符合本规范第 8.5 节的要求。

8.1.6 土方、基坑工程及基础施工应满足现行国家标准《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004 和《烟囱工程施工及验收规范》GB 50078 的要求。

8.2 钢 筋 工 程

8.2.1 钢筋的弯钩及绑扎后的铁丝头应背向保护层。

8.2.2 采用绑扎接头时，钢筋搭接长度应符合设计要求；当设计无规定时，钢筋的搭接长度应为钢筋直径的 40 倍。

8.2.3 钢筋的接头应交错布置，并符合设计要求；设计无要求时，

在同一连接区段内绑扎接头的根数不应多于钢筋总数的 25%。

8.2.4 切割和弯制钢筋的周围环境温度应控制在 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，并且不应应对钢筋进行任何方式的加热处理。

8.3 模 板 工 程

8.3.1 模板与混凝土的接触面应光洁、平整，无异物。施工前模板应涂刷脱模剂，脱模剂不应污染钢筋表面。

8.3.2 模板应分成若干部分以方便安装及拆卸。

8.3.3 模板连接处应采取措施防止漏浆。

8.3.4 模板应具有足够的刚度及稳定性。

8.3.5 模板安装完后应保证预应力孔道及锚垫板位置精度。

8.4 混 凝 土 工 程

8.4.1 塔筒基础施工应符合现行国家标准《烟囱工程施工及验收规范》GB 50078 的要求。

8.4.2 塔筒基础混凝土浇筑过程中，应采取措施避免混凝土离析、冷缝等混凝土缺陷出现。

8.4.3 可通过使用振捣棒增加基础浇筑时混凝土密实度，振捣棒使用过程中不应触碰钢筋及锚垫板、波纹管、接地扁铁等预埋件。

8.4.4 混凝土浇筑过程中锚垫板及预应力孔道不应发生移动，应对其位置进行实时监控。

8.4.5 应通过垫块保证混凝土保护层厚度满足设计要求，且垫块强度不应低于塔筒基础混凝土设计强度。

8.4.6 冬期、高温和雨期施工应满足国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的有关规定。

8.5 质 量 检 验

8.5.1 塔筒基础钢筋工程的质量标准及检验方法应符合表 8.5.1 的规定。

表 8.5.1 塔筒基础钢筋工程的质量标准及检验方法

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	钢筋的品种、级别、规格和数量	应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 及《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004 的有关规定		检查质量合格证明文件、标志及检验报告
	2	钢筋绑扎、焊接和机械连接接头设置	应符合设计要求;应做力学性能检验,其质量应符合现行国家标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 和《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ 107 的有关规定		检查产品合格证、试验报告
一般项目	1	接头位置和数量	宜设在受力较小处。同一竖向受力钢筋不宜设置 2 个或 2 个以上接头		观察、钢尺检查
	2	主筋间距	±20	mm	质量检查,抽查数量不少于 10 处
	3	混凝土保护层	-5~+15		

8.5.2 混凝土塔筒基础模板安装质量标准及检验方法应符合表 8.5.2 的规定。一般项目的检查数量不应少于 10 处。

表 8.5.2 混凝土塔筒基础模板安装质量标准及检验方法

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/检验工具
主控项目	1	模板及其支撑结构与加固措施	应根据工程结构形式、荷载大小、施工设备和材料供应等条件设计,应具有足够的承载能力、刚度和稳定性		观察检查
	2	避免脱模剂沾污	在涂刷模板脱模剂时不应沾污钢筋		
一般项目	1	模板安装的一般要求	1 模板的接缝不应漏浆,在浇筑混凝土前,模板不应有积水; 2 模板与混凝土接触面应清理干净,并涂刷脱模剂,不应采用影响结构性能或妨碍装饰工程施工的脱模剂; 3 浇筑前,模板内杂物应清理干净		

续表 8.5.2

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/检验工具
一般项目	2	模板地坪质量	应平整、光洁，不应产生影响混凝土质量的下沉、裂缝、起砂或起鼓		观察检查
	3	顶模直径	±5	mm	钢卷尺
	4	顶模相邻孔距	±1		游标卡尺
	5	顶模孔直径	±1		游标卡尺

8.5.3 塔筒基础混凝土质量标准及检验方法应符合表 8.5.3 的规定。一般项目的检查数量不应少于 10 处。

8.5.3 塔筒基础混凝土的质量标准及检验方法

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/检验工具
主控项目	1	混凝土组成的材料品种、规格和质量	应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定		检查合格证和检验报告
	2	配合比设计	应根据混凝土强度等级、耐久性和工作性等进行配合比设计，并应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的有关规定		检查配合比设计资料
	3	混凝土强度等级及试件的取样和留置	应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定		检查施工记录及试件检验报告
	4	原材料每盘称量的偏差	应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定	—	检查衡器计量合格证和复称
	5	对侧孔道中心距	—15～+25	mm	卷尺
	6	相邻孔道中心距	±15		

续表 8.5.3

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/检验工具
一般项目	1	顶部及底部外径	外径的 1%，且 ≤ 100	mm	卷尺
	2	顶部及底部内径	内径的 1%，且 ≤ 80		
	3	外缘高度	± 20		
	4	顶面平整度	± 15		水平尺及塞尺

8.5.4 基础锚垫板及预应力孔道等质量标准及检验方法应符合表 8.5.4 的规定。

8.5.4 基础锚垫板及预应力孔道等质量标准及检验方法

序号	项目	检验标准或误差要求	检验方法/检验工具
1	基础中心位置	$\leq 15\text{mm}$	激光仪或卷尺
2	波纹管间距	$\pm 15\text{mm}$	卷尺
3	波纹管外观质量	无锈渍、无变形、无异物梗阻	目测、内视镜
4	波纹管外露高度	$> 50\text{mm}$ ，且 $< 100\text{mm}$	卷尺
5	锚垫板区域裂缝	单一裂缝宽度 $< 0.08\text{mm}$	裂缝宽度尺
6	锚垫板外观质量	平整、无锈渍	目测

9 塔筒预制管片制作

9.1 一般规定

9.1.1 管片生产前应编制生产方案，生产方案宜包括生产计划及生产工艺、模具方案、技术质量控制措施、成品存放、运输和保护方案等。

9.1.2 原材料进场和贮存应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902 和《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

9.1.3 预制管片正式生产前应进行试生产，并根据试生产结果对技术工艺进行调整。

9.1.4 预埋件加工制造应执行设计文件指定的预埋件图集，预埋件试验应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的有关规定。

9.1.5 预制管片应具有唯一编码和生产信息，并同时在管片内外侧明显位置标注产品编码、生产单位、生产日期等信息。

9.1.6 混凝土搅拌站与施工现场宜相邻布置。

9.2 钢筋工程

9.2.1 钢筋表面不应有油污及锈蚀。

9.2.2 钢筋接头的方式、位置，同一截面受力钢筋的接头百分率，钢筋的搭接长度及锚固长度等应符合国家现行有关标准的规定。

9.2.3 钢筋网片宜在经检验尺寸合格的胎具上进行绑扎。

9.2.4 绑扎完成的钢筋网片宜采用专用吊架吊运至模板内。

9.2.5 钢筋网片放置于模板内之后，应对钢筋网片位置、钢筋间距及保护层厚度进行调整，直至符合设计要求。

9.2.6 预应力孔道用金属波纹管或钢管应与钢筋网片牢固连接，保证位置不发生变化。垂直接地电导体应设置在钢筋网片内、外排之间，应用特殊夹具绑扎到内排水平钢筋上，并应在管片上下两端留有足够断面的引出线。

9.3 模 板 工 程

9.3.1 模板应具有足够的强度、刚度和稳定性，应能承受浇筑时混凝土的重量、侧压力及工作荷载，且应符合下列规定：

- 1 埋件和预留孔洞应定位准确，埋件应牢固可靠；
- 2 模板底模及地坪等应平整、光洁，不应有下沉、裂缝；
- 3 底模与内、外模固定方式应可靠，在混凝土浇筑时模板不应偏移和漏浆。

9.3.2 脱模剂可采用水性或油性，脱模剂不应污染钢筋表面，且不应影响脱模后混凝土表面的后期处理。涂刷脱模剂之前应将模板表面清理干净。

9.3.3 喷涂脱模剂后，应在脱模剂的有效时间内完成混凝土浇筑。

9.3.4 合外模之前应先检测钢筋网片及预埋件，其摆放位置应满足设计要求。

9.3.5 合模前应按设计和施工要求检查管片混凝土保护层厚度，合模时垫片或垫块不应移位或掉落。

9.4 混 凝 土 工 程

9.4.1 原材料计量应符合下列规定：

1 混凝土生产及计量数据应可追溯。原材料计量设备的精度应满足现行国家标准《混凝土搅拌站（楼）技术条件》GB 10171的有关规定，应具有法定计量部门签发的有效检定证书，并应定期校验。混凝土生产单位每月应自检一次；每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准。

2 每盘混凝土原材料计量的允许偏差应符合表 9.4.1 的规

定，原材料计量偏差应每班检查 1 次。

表 9.4.1 各种原材料计量的允许偏差（按质量计，%）

原材料种类	胶凝材料	粗、细骨料	拌合用水	外加剂
每盘计量允许偏差	±2	±3	±1	±1
累计计量允许偏差	±1	±2	±1	±1

3 在原材料计量过程中，应根据粗、细骨料含水率的变化及时调整水和粗、细骨料的称量。

4 当下料仓无遮雨措施时，如遇较大雨雪天气，应停止混凝土生产；待雨雪停止后，下料仓存放的粗、细骨料应全部放出后重新投料进行生产。

9.4.2 混凝土的配合比调整及控制应符合下列规定：

1 对首次使用的配合比、使用时间间隔超过 3 个月的配合比应进行开盘鉴定。

2 在混凝土生产过程中，应及时测定粗、细骨料的含水率，并根据其变化情况及时调整称量。

3 当混凝土的原材料品质、施工工艺发生较大变化时，应重新进行配合比选定试验。

4 当施工工艺及环境条件未发生明显变化，原材料的品质在合格的基础上发生波动时，可对混凝土外加剂用量、砂率等进行适当调整，调整后的混凝土应满足设计和施工要求。

5 当施工工艺、环境条件和原材料未发生明显变化时，配合比的主要参数，如胶凝材料总量、水胶比、矿物掺合料种类及掺量等不应进行较大的调整。

9.4.3 混凝土搅拌应符合下列规定：

1 混凝土搅拌机应符合现行国家标准《建筑施工机械与设备 混凝土搅拌站（楼）》GB/T 10171 的规定，宜采用盘式或双卧轴强制式搅拌机。

2 塔筒混凝土的搅拌时间应保证混凝土拌合物的匀质性,最短搅拌时间不宜小于 120s。

3 当搅拌机搅拌润泵砂浆后,应清理搅拌机后再搅拌塔筒混凝土。

4 搅拌应保证混凝土拌合物质量匀质,同一盘混凝土的搅拌匀质性应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的有关规定。

9.4.4 混凝土拌合物性能检验应符合下列规定:

1 在混凝土塔筒管片制作过程中,应根据搅拌站和预制厂的具体情况对混凝土拌合物进行抽样检验。

2 混凝土拌合物的检验频率应符合以下规定:

1) 混凝土出机时,宜对混凝土坍落扩展度、T500、离析率、含气量进行检测;

2) 混凝土入模前,应对混凝土坍落扩展度、T500、离析率、含气量进行检测。

3 混凝土拌合物性能应符合本规范第 4.2 节的规定。

9.4.5 混凝土搅拌运输车运输过程中不应随意停车、加水、加外加剂,混凝土搅拌运输车到达预制厂浇筑前,应使搅拌罐高速旋转不少于 30s 后,再将混凝土拌合物卸出。

9.4.6 管片浇筑应符合下列规定:

1 当采用顶升施工工艺时,应在浇筑混凝土前检查模板接缝的密封情况,保证模板在混凝土浇筑过程中模板接缝不漏浆。

2 模板温度不宜低于 5℃,当低于 5℃时,应采取保温措施;不宜高于 35℃,当高于 35℃时,宜采取遮挡措施避免阳光照射模板,或从模板外侧进行洒水降温,洒水不应使模板内有积水。

3 冬季泵送管道宜采取保温措施,夏季泵送管道应采取防晒措施。

4 润滑泵送管道宜采用砂浆,不应采用水。搅拌罐车开始卸混凝土前,应确认泵车料斗内无润泵砂浆。

5 混凝土浇筑速度应符合设计和施工要求，并经过试验确定。

9.4.7 应在混凝土抗压强度达到设计和施工要求后再进行拆模。

9.4.8 同条件养护试件应符合下列规定：

1 在浇筑混凝土同时，应留置同条件养护试件，试件数量应满足但不限于管片拆模、吊装及张拉等强度合格评定用。

2 同条件养护试件应标记清楚，并应妥善保管。

9.4.9 应根据环境及其他条件确定合理的养护措施，并对混凝土的养护过程作详细记录。

9.4.10 混凝土养护应符合下列规定：

1 拆模后，应及时对混凝土进行合理的保温、保湿养护。

2 塔筒混凝土的养护应符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 的有关规定。

9.4.11 冬期、高温和雨期施工应满足现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的有关规定。

9.5 管 片 拼 装

9.5.1 预制管片拼装应按设计要求进行，拼装前应进行下列准备工作：

1 应确认预制管片各部位尺寸偏差符合设计要求；

2 宜用压缩空气对其各部位进行清扫；

3 管片拼装用材料及工具应准备齐全。

9.5.2 预制管片拼装应避免在温度变形较大的环境下进行。

9.5.3 竖缝灌浆作业应符合下列要求：

1 当竖缝宽度 $\leq 50\text{mm}$ 时，竖缝灌浆应采用压力灌浆工艺。浆体由底部注浆管注入，至缝最顶部冒浆且稳定出浆后方可停止。

2 当竖缝宽度 $> 50\text{mm}$ 时，竖缝灌浆可采用自重法灌浆工艺。浆体由竖缝顶端灌入，通过导流槽沿缝内壁滑入缝的底部，至缝最顶部冒浆且稳定出浆后方可停止。

- 3 应使用封缝材料对竖缝内外侧进行密封处理。
- 4 应对预制管片采取临时固定措施，待灌浆料强度达到设计要求后方可拆除临时固定措施。
- 5 同一组合管片的竖缝灌浆作业应同步进行，并应实时监控注浆速度、温度等，确保所有竖缝灌浆压力平衡。

9.6 质 量 检 验

9.6.1 塔筒预制管片钢筋工程的质量标准及检验方法应符合表 9.6.1 的规定。

表 9.6.1 塔筒预制管片钢筋工程的质量标准及检验方法

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	钢筋的品种、级别、规格和数量	应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定		检查质量合格证明文件、标志及检验报告
	2	纵向受力钢筋的连接方式	应符合设计要求		观察
	3	接头方式	应做力学性能检验，其质量应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 和《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ 107 的有关规定		检查产品合格证、试验报告
一般项目	1	接头位置和数量	宜设在受力较小处。同一竖向受力钢筋不宜设置 2 个或 2 个以上接头		观察、钢尺检查
	2	接头外观质量	应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18 的有关规定		观察
	3	钢筋绑扎、焊接和机械连接接头设置	应符合现行行业标准《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ 107 和《钢筋锥螺纹接头技术规程》JGJ 109 的有关规定		观察、钢尺检查
	4	主筋间距	±20	mm	质量检查，抽查数量不少于 10 处
	5	混凝土保护层厚度	—5～+15		

9.6.2 混凝土塔筒预制管片模板安装质量标准及检验方法应符合表 9.6.2 的规定。一般项目的检查数量不应少于 10 处。

表 9.6.2 混凝土塔筒预制管片模板安装质量标准及检验方法

类别	序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法
主控项目	1	模板底模平整度及水平度	±1	mm	2m 靠尺、塞尺及经纬仪检查
	2	内外模直径	−5~+2		钢卷尺检查
	3	内外模间距	±5		板尺检查
	4	模板高度	±2		钢卷尺检查
	5	波纹管位置	±5		
	6	预埋件安装误差	应符合现行行业标准《电力建设施工质量验收及评价规程 第 1 部分：土建工程》DL/T 5210.1		—
	7	端模平面度	±1		水平尺及塞尺检查
	8	盖板与底模孔同轴度	±3		线坠及板尺检查
	9	内外模倾斜度	±1/800		线坠及板尺检查
	10	避免脱模剂沾污	涂刷模板脱模剂时不应沾污钢筋		观察
一般项目	1	模板安装的一般要求	1 模板的接缝不应漏浆，在浇筑混凝土前，模板不应有积水； 2 模板与混凝土接触面应清理干净，并涂刷脱模剂，不应采用影响结构性能或妨碍装饰工程施工的脱模剂； 3 浇筑前，模板内杂物应清理干净		观察
	2	模板地坪质量	应平整、光洁，不应产生影响混凝土质量的下沉、裂缝、起砂或起鼓		观察

注：预制管片中预埋传感器时，应按传感器测量要求检查其预埋位置。

9.6.3 塔筒预制管片混凝土的质量标准及检验方法应符合表 9.6.3 的规定。

表 9.6.3 塔筒预制管片混凝土的质量标准及检验方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	检验方法
1	混凝土组成的材料品种、规格和质量	应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定	检查合格证和检验报告
2	配合比设计	应根据混凝土强度等级、耐久性和工作性等进行配合比设计，并应符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 的有关规定	检查配合比设计资料
3	混凝土强度等级及试件的取样和留置	应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定	检查施工记录及试件检验报告
4	原材料每盘称量的偏差		检查衡器计量合格证和复称

9.6.4 预制管片外观质量应根据缺陷类型和缺陷程度，按本规范附录 C 进行分类。预制管片外观质量不应有缺陷，对已经出现的严重缺陷应制定技术处理方案进行处理并重新检验，对出现的一般缺陷应进行修整并达到合格。

9.6.5 预制管片质量标准及检验方法应符合表 9.6.5 的规定。

表 9.6.5 预制管片质量标准及检验方法

序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/ 检验工具
1	厚度	-5~+10	mm	卷尺
2	高度	±10		
3	直径	±10		
4	波纹管位置	±10		
5	定位孔道中心	符合设计要求		目测
6	冷缝	管片无冷缝		
7	波纹管通畅	通过通球检验合格		
8	波纹管竖直度	符合设计要求		
9	裂缝宽度	管片无裂缝或裂缝宽度小于 0.2，且为非贯穿裂缝（由里到外、由上到下或由左到右贯穿）	mm	裂缝卡

续表 9.6.5

序号	项目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/ 检验工具
10	离析	无混凝土离析现象		目测
11	起吊插口	管片起吊插口无缺失，且周边无裂缝		
12	保护层厚度	符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定	—	混凝土保护层 检测仪
13	试样强度	管片试样标准条件养护 28d 达到设计强度要求	—	标准养护
14	锚垫板	锚垫板规格、数量及位置符合设计及施工要求		目测
15	灌浆孔及排气孔	符合设计及施工要求		

9.6.6 管片报废标准应在相应的产品技术规格书中明确。

9.7 储 存 及 运 输

9.7.1 应根据管片形状尺寸、车体平衡确定装车绑扎固定措施和运输方案，运输司机应根据路况控制车速，运输过程中不应急刹车及急加速，遇坑洼、颠簸不平的道路应缓慢行驶，避免管片边缘及其他重要部位如吊点、预应力孔道等受到损害。

9.7.2 施工现场内道路应按照管片运输车辆的要求合理设置转弯半径及道路坡度。

9.7.3 存放堆场应坚实平整，并有排水措施。预制管片装卸、吊装工作范围内不应有障碍物，并应有满足预制管片周转使用的场地。

9.7.4 预制管片运送到施工现场后，应按规格、品种、使用部位、吊装顺序设置存放场地。存放场地应设置在吊车的有效起重范围内，并设置通道。

9.7.5 应对预留孔道、暗樨的端口用专用保护塞进行封堵，避免水、粉尘或碎屑引起腐蚀或堵塞。

10 附 件 安 装

10.0.1 附件安装前，应完成下列工作：

1 应按图纸确认管片预留孔洞、预埋件无遗漏，尺寸、位置准确无误。

2 应对所有附件品种、规格、尺寸和外观按设计要求进行检查，并验收合格。

10.0.2 所有附件在塔筒吊装前，应在地面安装完毕并验收合格。

10.0.3 塔筒门应与塔筒贴合紧密，开启顺利；爬梯及爬梯支撑应安装牢固，上下成直线，接头牢固。

10.0.4 附件应按设计图纸的要求安装，安装时应防止混凝土表面损坏。

10.0.5 每节预制管片吊装完毕后，应及时与下段管片的爬梯及防坠落导轨进行连接。

10.0.6 预制管片吊装前，应对该节管片的接地电阻进行测量，确认管片接地线完好；塔筒吊装就位后，应及时安装各节塔筒间的防雷接地导线和基础内的接地装置。

11 塔筒防 腐 蚀

11.0.1 塔筒腐蚀等级应参照现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 进行划分。

11.0.2 防腐蚀材料的选择应根据腐蚀性介质的性质、浓度和作用条件，结合材料的耐腐蚀性能、物理力学性能、使用部位、材料的可操作性确定。

11.0.3 表面涂层类防腐蚀材料应具有良好的耐碱性、附着性、耐腐蚀性及耐候性。

11.0.4 由底层和表层组成的涂层类防腐蚀材料，其底层应具有良好的渗透能力，表层还应具有良好的抗老化性等性能。

11.0.5 当材料受多种介质混合作用、交替作用及非常温介质作用时，其抗腐蚀性能应通过试验确定。

11.0.6 防腐蚀材料的施工，除应符合现行国家标准《建筑防腐蚀工程施工及验收规范》GB 50212 的规定外，还应符合相应标准的要求。

12 塔筒吊装工程

12.1 一般规定

12.1.1 吊装前应制定完整的吊装方案，通过评审，并经过试吊修改完善。

12.1.2 吊装前应确认预制管片、设备、工器具、辅料等各项目检验合格，符合吊装条件。

12.1.3 吊装过程中预应力孔道外露部分不应变形。

12.1.4 吊装及水平缝粘接材料施工时，水平缝粘接材料不应进入预应力孔道。

12.2 吊装工程

12.2.1 预制管片吊装前，应确认基础混凝土的强度满足设计要求，并应对基础顶面的平整度、垫铁水平度、基础中心、预应力孔道位置进行复测。

12.2.2 预制管片就位应满足下列要求：

1 每节管片应进行同轴度测量，基础或首节的中心应作为后期检验塔筒中心是否偏移的参考点，其误差应符合设计要求。

2 首节管片吊装完成后与基础顶面宜留有不小于 10mm 的空隙。空隙应采用水泥灌浆料进行填充。

3 首节管片底部灌浆宜采用自重法灌浆工艺。

4 每吊装一节管片应对其进行调平，误差应符合设计要求。

5 上下节管片水平缝粘接材料施工应与吊装同步进行，粘接材料施工开始至管片就位的时间间隔应满足施工要求，且水平接缝的缝隙应满足设计要求。

6 水平缝粘接材料应严格按照工艺要求进行配制,搅拌质量应由质检人员进行确认合格后方可使用。

7 吊装下一节预制管片前,应对上一节预制管片孔道的通畅性进行检查,合格后方可吊装。

12.2.3 吊装应符合下列规定:

1 吊装所用的起重机械性能应能满足吊装要求,且起重机械的使用应满足特种设备使用管理规定。

2 吊装作业前,起重作业人员应进行技术和安全交底,应熟知施工方案、吊装程序,并清楚管片的尺寸、重量、重心位置、吊点位置。

3 吊装前,应确认预埋吊钉及周边混凝土牢固可靠。

4 吊装前,应确认风速、气温等气象条件满足吊装要求。

5 吊装前,预制管片混凝土抗压强度应达到设计要求。

6 水平缝粘接材料施工应涂抹均匀、密实,满足工艺要求。

12.3 吊 装 质 量 检 验

12.3.1 塔筒吊装工程质量标准及检验方法应符合表 12.3.1 的规定。

表 12.3.1 塔筒吊装工程质量标准及检验方法

序号	项 目	质量标准/允许偏差	单位	检验方法/检验工具
1	塔筒中心引测点与基准点的偏差	5	mm	尺量、线坠、经纬仪或激光仪
2	塔筒顶部水平度	±0.5 或设计要求	mm	水平仪或经纬仪
3	塔筒接地体导通电阻	符合设计要求	mΩ	电阻测试仪
4	混凝土及灌浆料试件强度	符合设计要求	—	标准养护
5	预应力孔道通畅性	贯通		通球/内窥镜

13 预 应 力 工 程

13.1 一 般 规 定

- 13.1.1 预应力施工应符合设计规定要求，制定专项施工方案。
- 13.1.2 预应力孔道应通畅无堵塞、密封无破损。
- 13.1.3 同一预应力孔道内宜选用同一批次的钢绞线。
- 13.1.4 应严格按照工艺要求进行制浆，浆体流动性指标应符合本规范第 4.3.2 条的要求。
- 13.1.5 钢绞线张拉完成并经检查合格后，孔道灌浆宜在 48h 内完成。
- 13.1.6 灌浆时浆体应从预应力孔道最低处注入，且孔道内浆体应饱满、密实。
- 13.1.7 预应力工程施工及验收应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 及《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的相关规定。

13.2 预 应 力 施 工

- 13.2.1 预应力施工应完成以下准备工作：

- 1 预应力钢绞线束制作和安装时，不应采用加热、焊接或电弧切割，应采用砂轮锯或切断机等机械方法切断。在预应力钢绞线旁边进行气割或焊接工作时，应防止预应力钢绞线受焊接火花或接地电流的影响。

- 2 预应力钢绞线下料长度应满足设计要求，同一预应力孔道内钢绞线束的长度应相同，其长度误差不应超过 $\pm 50\text{mm}$ 。

- 3 预应力钢绞线穿束前应采用内窥镜对孔道通畅性进行

检查。

4 张拉用的设备和仪表的量程、精度应满足预应力钢绞线张拉的要求，并应经过配套标定，标定期限不应超过半年。

5 灌浆前，应对灌浆料进行试验，合格后方可使用。试验方法参见现行国家标准《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182 相关规定。

6 灌浆泵的压力和流量应符合灌浆速率的要求；灌浆泵压力表的量程应根据灌浆泵的压力、形式确定。

13.2.2 钢绞线穿束工作应满足下列要求：

1 预应力钢绞线穿束可采用整束索在地面编排后，从下向上提拉到位的施工方法，也可以采用从塔顶逐根下穿，在孔道中编排成束的施工方法。应根据结构特点、施工条件和工期要求等综合确定。

2 穿束过程中，应避免钢绞线与不洁物接触，并应防止钢绞线出现塑性弯折，穿束时钢绞线过弯时的弯曲半径应大于 600mm。孔道内的钢绞线束不应有整束扭转或束内单根打绞的现象。

13.2.3 预应力张拉应满足以下规定：

1 预应力张拉前，应计算所需张拉力、压力表读数及理论伸长值，明确张拉顺序和程序，并填写张拉申请单报批。

2 预应力钢绞线张拉时，混凝土抗压强度应符合设计要求，设计无要求时应不低于混凝土设计强度值的 75%。

3 张拉时为保证塔筒均匀受力，应采用多点对称等荷张拉的方法。

4 张拉时发现以下情况应停止张拉，且在查明原因后采取措施：

- 1) 预应力钢绞线断丝、滑丝或锚具碎裂；
- 2) 混凝土出现裂缝或破碎，锚垫板陷入混凝土；
- 3) 孔道中有异常声响；
- 4) 达到所需张拉力后，伸长值明显不足；或张拉力不

足，预应力钢绞线被拉动并继续伸长。

5 预应力钢绞线张拉时，应填写张拉记录表，张拉记录表格式见本规范附录 E。

13.2.4 预应力孔道灌浆施工应符合下列规定：

1 灌浆设备应与预应力孔道灌浆的浆体类型、浓度及灌浆压力相适应，灌浆应稳定均匀连续进行。

2 灌浆时浆体温度宜在 $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间，灌浆过程中及灌浆后 48h 内，塔筒及环境温度不应低于 5°C 。

13.2.5 封锚保护应满足下列规定：

1 预应力钢绞线锚固后的外露部分应采用机械方法切割，预应力钢绞线的外露长度不宜小于 30mm。

2 锚头防护宜采用保护罩。

13.3 质 量 检 验

13.3.1 预应力钢绞线或预应力孔道曲线控制点的竖向位置偏差应符合表 13.3.1 的规定。

表 13.3.1 曲线控制点的竖向位置允许偏差（mm）

管片厚度	$t \leq 300$	$300 < t \leq 1500$	$t > 1500$
允许偏差	± 5	± 10	± 15

13.3.2 预应力钢绞线张拉质量验收应符合下列规定：

1 预应力钢绞线张拉锚固后，实际建立的预应力值与设计规定检验值的相对偏差不应超过 $\pm 5\%$ ，张拉力、张拉顺序及张拉工艺应符合设计及施工方案的要求；

2 采用应力控制方法张拉时，控制张拉力下预应力钢绞线伸长实测值与计算值的相对偏差不应超过 6%。

13.3.3 锚固阶段应检验张拉端预应力钢绞线的内缩量。张拉端预应力钢绞线的内缩量应符合表 13.3.3 的规定。

表 13.3.3 张拉端预应力钢绞线的内缩量限值

锚具类别		内缩量限值（mm）
夹片式锚具	有顶压	5
	无顶压	8

13.3.4 预应力孔道灌浆后，应对灌浆质量进行检查，孔道内浆体应饱满、密实。

13.3.5 预应力孔道水泥基灌浆料的性能指标应符合本规范第 4.3 节的要求。

13.3.6 锚具的封闭保护措施应符合设计要求，当设计无要求时，外露锚具和预应力钢绞线的混凝土保护层厚度不应小于：一类环境时 20mm；二类、三类环境时 50mm。

14 安 全 监 测

14.1 一 般 规 定

14.1.1 混凝土塔筒监测应分为施工期间监测和运行期间监测，施工期间的监测宜与运行期间的监测相结合。

14.1.2 安装监测系统的混凝土塔筒应具有代表性，装设数量应根据工程项目具体情况决定。

14.1.3 塔筒监测过程中发生下列情况之一，应及时进行预警或报警，同时应提高监测频次：

- 1 监测数据或监测数据变化速率出现异常；
- 2 监测数据或监测数据变化速率达到或超出预警值；
- 3 塔筒本身或风机其周边环境出现异常。

14.1.4 测点的布置位置和数量应能充分、正确反映塔筒结构及环境特性。

14.1.5 监测设备的选择应符合长期可靠监测的要求。

14.1.6 监测点数量、系统功能、通信方式、通信规约等应满足系统设计的要求，且监测系统应具有可兼容性和可扩展性。

14.1.7 传感器应符合监测系统对测量精度、灵敏度、通频带、动态范围、量程、线性度、稳定性、供电方式及寿命等要求。

14.1.8 系统软件开发应符合现行国家标准《计算机软件开发规范》GB 8566 的规定，软件系统应具备自动恢复功能，在无人值守的情况下，可从故障中恢复正常工作状态。

14.2 塔 筒 安 全 监 测

14.2.1 施工期间监测应为控制结构施工过程、优化施工工艺、安

全施工提供技术支持。运行期间监测应为塔筒在运行期间的安全性、结构设计验证、结构模型修正、结构损伤识别及结构养护提供技术支持。

14.2.2 塔筒应监测基础沉降、塔筒变形、应变和预应力钢绞线索力，此外还宜监测动力响应。监测点布设应符合下列规定：

1 变形监测应包括沉降、倾斜和水平位移，沉降应包含均匀和不均匀沉降。沉降测点宜布设在沿周边与基础轴线相交的对称位置上，点数不宜少于 4 个。倾斜和水平位移测点宜布置在塔筒顶部。

2 应变监测的测点应选择应力较大的位置和结构关键部位。

3 同一塔筒内应选取有代表性的预应力钢绞线进行索力监测，同一束钢绞线宜选取多个关键截面布置索力测点。

14.2.3 监测频次应符合下列要求：

1 施工过程的每个阶段应至少进行一次施工期间监测。

2 停工时和复工时应分别进行一次监测。

3 运行期间监测宜长期实时进行，实现全寿命过程监测。

14.2.4 施工阶段的监测应按施工进度进行巡视检查。

14.2.5 监测预警应根据塔筒结构设计性能，并结合长期数据积累提出与结构安全性、适用性和耐久性相应的阈值。

14.2.6 当监测数据出现异常或报警时，应首先检查监测系统是否工作正常，确认数据准确、有效后，再对结构进行检查。

14.2.7 监测系统应保存完整的监测记录数据，不应随意修改。监测系统应能自动生成极端情况下的塔筒健康状态分析报告。

15 工 程 验 收

15.0.1 塔筒整体工程验收应在所有单位工程完成且检验合格后进行。

15.0.2 塔筒验收资料应包括所有单位工程检验合格证明文件，单位工程验收应包括但不限于表 15.0.2 中所列内容。

表 15.0.2 塔筒施工完成应提供的验收资料

序号	验收项目	质量检查记录要点	质量标准
1	基础质量验收	混凝土强度、尺寸检查；表观质量	本规范第 8.5 节
2	预制管片质量验收	混凝土强度、尺寸检查；表观质量；混凝土保护层厚度	本规范第 9.6 节及附录 D
3	预制管片竖缝拼接、灌浆及成品质量验收	竖缝拼接强度、尺寸检查；表观质量	本规范附录 G 及附录 D
4	水平缝垫铁找平、粘接材料施工记录	需要每节记录	本规范附录 H
5	预应力张拉工程验收记录	孔道通畅；孔道严密性；钢绞线穿管；张拉记录；孔道灌浆	本规范第 13.3 节及附录 E
6	附属工程安装验收记录	爬梯、电缆支架、照明灯具、盘柜安装	本规范第 10 章
7	塔筒整体质量、安全性检查验收	垂直度、同心度、沉降观察；接地连接及电阻值、绝缘电阻；表观质量、裂缝宽度	本规范第 12.3 节及附录 F

15.0.3 所有材料应附有相应质量证书，此外应对整个工程施工所用设备序列号进行记录，并提供使用前的校验报告。

16 职业健康安全与环境保护

16.0.1 混凝土塔筒施工过程中应按照现行国家标准《风力发电工程施工与验收规范》GB/T 51121 及现行行业标准《建筑施工安全检查标准》JGJ 59、《建筑施工现场环境与卫生标准》JGJ 146 等安全、职业健康和环境保护的有关规定执行。

16.0.2 顶升工艺混凝土浇筑过程中，应符合下列要求：

1 混凝土泵管及注浆口应设置安全防护设施，非作业人员不应靠近；

2 拆卸混凝土泵管时，操作人员不应直接面对注浆口。

16.0.3 预制管片起吊前应检查钢丝绳、吊具和管片状态，确认预埋吊钉周边混凝土质量完好无损后，方可缓慢提升管片。

16.0.4 吊运预制管片时，非作业人员不应进入危险区域。

16.0.5 非作业人员不应进入锚索张拉作业区，张拉时千斤顶出力方向 45° 范围内不应有人。

16.0.6 预应力孔道灌浆过程中，非作业人员应远离进、出浆口。

16.0.7 环氧类粘接材料操作人员应穿工作服，佩戴防护口罩、橡胶手套、护目镜等防护用品。

16.0.8 塔筒拆除后可将废弃混凝土块破碎、筛分、分级，并按照一定的比例混合后，作为再生骨料利用。

16.0.9 再生细骨料应符合《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176 的规定，再生粗骨料应符合《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177 的规定。

16.0.10 再生骨料不应用于配制预应力混凝土。

附录 A 水泥基灌浆材料性能要求

表 A 塔筒预制管片拼接竖缝及首节管片与基础间
使用的水泥基灌浆料性能指标要求

项目		技术指标	试验依据
流动度 (mm)	初始值	≥290	GB/T 50448
	30min 保留值	≥260	
竖向膨胀率 (%)	3h	0.1~3.5	
	24h 与 3h 膨胀值之差	0.02~0.5	
抗压强度 (MPa)	1d	≥40	
	3d	≥60	
	28d	≥90	
泌水率 (%)		0	《水泥基灌浆材料》JC/T 986
初凝时间 (h)		4~6	

附录 B 管片拼接材料及环氧砂浆试验方法

B.0.1 标准试验条件：不同适用温度产品的调节和养护温度应按表 4.4.1 及表 4.5.1 中的规定执行，误差小于 2°C ，相对湿度 $50\% \pm 5\%$ 。样品试验前，应在此条件下至少放置 24h，并在此条件下进行试验。

B.0.2 试样制备：试验前样品与所有器具应在实验室试验条件下放置至少 24h，穿戴防腐手套和护目镜。先将各组分单独搅拌，再将 A 组分与 B 组分按规定的配合比一次性混拌。用带搅拌叶（见图 B.0.2）的低速电钻（ $400\text{r}/\text{min} \sim 600\text{r}/\text{min}$ ）搅拌至少 3min，避免引入气泡，直至混合物均匀。

在搅拌期间，应及时将搅拌桶内壁的附着物刮落。材料混合后应在可施工期内完成注模、修整。

500g 以内的试样制备，可用调色刀手工搅拌。搅拌时应避免引入气泡。



图 B.0.2 搅拌叶

B.0.3 适用期：

1 仪器和试剂。

- 1) 恒温水浴：能保持给定温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 电子天平：感量为 0.1g 。
- 3) 固化剂：种类和添加剂由拼接胶制造者规定。

2 操作步骤。

- 1) 将适量试样倒入 100mL 烧杯中，加入规定量固化剂，

搅拌制成 100g 混合物。以加入固化剂的时间作为起始时间，随后把烧杯置于给定温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴中，并使试样表面位于液面以下约 2cm。

- 2) 不断观察试样，读取试样产生异状的时间，从起始时间到产生异状的时间即适用期。试样发生异状是指明显出现黏度上升，凝胶化、沉淀、分离、变色等有碍于拼接胶使用的现象。

3 计算。同一试样测定两次，求其平均值，以 min 表示。

B.0.4 干燥时间：按《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》GB/T 1728 的规定进行。测试样品厚度为 3mm。

B.0.5 触变性：按《建筑密封材料试验方法 第 6 部分：流动性的测定》GB/T 13477.6 的规定进行。测试样品厚度为 5mm。

B.0.6 黏结强度（与混凝土）：按照《工程结构加固材料应用安全性鉴定规范》GB 50728—2011 附录 G 的规定进行测试。试样养护 7d 后测试。

B.0.7 抗压强度和抗折强度：按《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》GB/T 17671 的规定进行。试样养护 7d 后测试抗折强度。

B.0.8 热变形温度：按《塑料 负荷变形温度的测定 第 2 部分：塑料、硬橡胶和长纤维增强复合材料》GB/T 1634.2 的规定进行。使用弯曲应力为 0.45MPa 的 B 法。试样养护 7d 后测试。

B.0.9 压缩弹性模量：

1 样品制备：按《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》GB/T 17671 的规定制备样品。样品尺寸为 40mm×40mm×160mm，样品在标准条件下固化 7d 备用。

2 测试工具：电子拉力试验机、应变计。

3 测试步骤：

- 1) 安放试样，使试样的中心线与上、下压板的中心线对准，确保试样端面与压板表面平行，调整试验机，使压板表面恰好与试样端面平行，在试样的中间位

置安装应变计。以 2N/s~10N/s 的速度在试样高度轴的方向上施加荷载，直至应变达到 0.0022，记录此时的荷载 N_1 ，如此重复至少两次，检查试样及应变计，使整个系统处于正常工作状态。

- 2) 以同样的速率施加荷载 N_2 ，为之前记录荷载的 10% 左右，将应变计归零，然后以同样的速度将荷载增加至 N_1 ，记录变形量，如此快速重复四次，记录形变量。

4 计算结果：

$$E_c = \frac{L_0 \Delta P}{bh \Delta L}$$

式中： E_c ——压缩弹性模量 (MPa)；

L_0 ——试样高度中间安装仪表的标距 (mm)；

ΔP ——荷载增量，为 N_1 和 N_2 的差值 (N)；

b ——试样宽度 (mm)；

h ——试验厚度 (mm)；

ΔL ——与荷载增量对应的标距 L_0 内的变形增量 (mm)。

B.0.10 抗拉强度和断裂伸长率：按《树脂浇铸体性能试验方法》GB/T 2567 的规定进行。试样养护 7d 后测试。

B.0.11 拉伸剪切强度：按照《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定（刚性材料对刚性材料）》GB/T 7124 的规定进行测试。试样养护 7d 后测试。

B.0.12 耐湿热老化：按《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728—2011 中附录 J 的规定进行。试样养护 7d 后测试。

B.0.13 不挥发物含量：按照 GB 50728—2011 附录 H 的规定进行测试。

B.0.14 可挤压性：

1 仪器：

1) 温度箱：能保持给定温度 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 。

2) 静脉注射筒。

2 操作步骤:

- 1) 根据材料适用温度的下限温度值设定温度箱温度。
待温度箱温度稳定后, 分别取适量 A、B 组分材料, 放于温度箱中静置 2h。
- 2) 准备两张足够尺寸的蜡纸。将其中一张蜡纸平铺在一坚固、平整、光滑、水平的基面上(或压力机的基台上)。
- 3) 充分搅拌胶粘剂, 搅拌完成后放于温度箱静置 10min。
- 4) 取出胶, 仔细填于静脉针筒内, 避免胶内含有气泡。
- 5) 将 3140m^3 胶粘剂挤在蜡纸中心点上, 胶粘剂与蜡纸接触的面积越小越好。
- 6) 将第二张蜡纸覆盖住胶粘剂表面。通过砝码(或压力机)在第二张蜡纸上施加恒定的 15kg 压力(见图 B.0.14-1), 压力维持 3min。
- 7) 移除砝码(或给压力机卸载), 揭开蜡纸, 测量并计算胶粘剂扩展后的面积, 测量 3 次取平均值(见图 B.0.14-2)。



图 B.0.14-1 压力机施加恒定压力

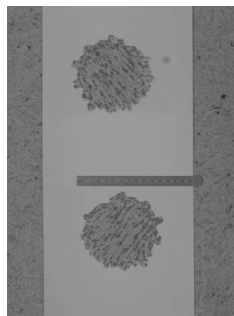


图 B.0.14-2 测量蜡纸上胶粘剂直径

附录 C 预制管片外观质量缺陷

表 C 预制管片外观质量缺陷

名称	现象	严重缺陷	一般缺陷
露筋	管片内钢筋未被混凝土包裹而外露	管片内外弧面有露筋	管片其他部位（底部、顶部及 C 型管片端部）有少量露筋
蜂窝	混凝土表面缺少水泥砂浆而形成石子外露	管片主要受力部位蜂窝	其他部位有少量蜂窝
孔洞	混凝土中孔穴深度和长度均超过保护层厚度	管片主要受力部位有孔洞	其他部位有少量孔洞
夹渣	混凝土中夹有杂物且深度超过保护层厚度	管片主要受力部位有夹渣	其他部位有少量夹渣
疏松	混凝土中局部不密实	管片主要受力部位有疏松	其他部位有少量疏松
裂缝	缝隙从混凝土表面延伸到混凝土内部	管片主要受力部位有影响结构性能或使用功能的裂缝	其他部位有少量不影响结构性能或使用功能的裂缝
连接部位缺陷	管片连接处混凝土缺陷及连接钢筋、连接件松动	连接部位有影响结构传力性能的缺陷	连接部位有基本不影响结构传力性能的缺陷
外形缺陷	缺棱掉角、棱角不直、翘曲不平、飞边凸肋等	混凝土管片有影响使用功能或装饰效果的外形缺陷	其他混凝土管片有影响使用功能的外形缺陷
外表缺陷	管片表面麻面、掉皮、起砂、沾污等	具有重要装饰效果的混凝土管片有外表缺陷	其他混凝土管片有影响使用功能的外表缺陷
脱模剂残留	管片定位锥孔洞处、C 型管片端部残留油性脱模剂	残留脱模剂影响管片拼接牢固性、预应力张拉系统有效性，且难以清除	残留少量脱模剂，不影响拼接传力性能，且易清除

附录 D 预制管片尺寸检查表

表 D.0.1 C 型管片尺寸允许偏差

项次	检验项目		允许偏差（mm）
1	管片整体规格尺寸	厚度	-5~+10
2		高度	±10
3		直径	±10
4	门洞尺寸	厚度	-5~+10
5		高度	±2
6		宽度	±2
7	钢筋连接套筒	中心间距	±5
8		至内外边沿距离	±5
9		倾斜度	±1°
10	水平波纹管	中心间距	±5
11		至内外边沿距离	±5
12		倾斜度	±1°
13		深度	0~+10
14	竖向波纹管	顶部波纹管位置	±10
15		突出高度	-5~+10
16		底部波纹管位置	±10
17	竖向接缝	几何尺寸	±1
18		凹口几何尺寸	±2
19		凹口间距	±2
20	波纹管定位锥	直径	±5

续表 D.0.1

项次	检验项目		允许偏差 (mm)
21	波纹管定位锥	高度	± 5
22		至管片内外沿距离	± 10
23	其他尺寸	导向锥位置	± 10
24		起吊插口位置	± 10
25		管片顶部凹槽深度	± 1

表 D.0.2 一次浇筑 O 型管片尺寸允许偏差

项次	检验项目		允许偏差 (mm)
1	管片整体规格尺寸	厚度	$-5 \sim +10$
2		高度	± 10
3		直径	± 10
4	竖向波纹管	顶部波纹管位置	± 10
5		突出高度	$-5 \sim +10$
6		底部波纹管位置	± 10
7	波纹管定位锥	直径	± 5
8		高度	± 5
9		至管片内外沿距离	± 10
10	其他尺寸	导向锥位置	± 10
11		起吊插口位置	± 10
12		管片顶部凹槽深度	± 1

表 D.0.3 C 型管片拼接而成 O 型管片尺寸允许偏差

项次	检验项目		允许偏差 (mm)
1	直径检查	顶部内外径	$-10 \sim +20$
2		底部内外径	$-10 \sim +20$
3	波纹管距离检查	顶部管中心间距	± 15
4		底部管中心间距	± 15

续表 D.0.3

项次	检验项目		允许偏差 (mm)
5	接缝检查	顶部内外径	0~5
6		底部内外径	0~5
7	错位检查	错位	10
8		突出	15

附录 E 预应力施工验收表

表 E.0.1 预应力系统孔道通查记录

施工单位		预应力系统孔道通查记录		编号:	
				共 页 第 页	
工程名称			孔道责任施工单位		
作业工长			记录人		
操作者			结构部位		
孔道 编号	检查清理日期	通过球最大直径 (mm)	排除孔道内积水和杂物 是 () 否 ()	锚垫板清理干净 是 () 否 ()	
备注		1. 孔道清理和检查完毕，如不能随即穿束，应将孔道封闭。 2. 表列各项作业内容应认真完成			
责任施工单位			监理公司		
授权代表:			授权代表:		
年 月 日			年 月 日		

表 E.0.2 预应力系统孔道密封检查记录

施工单位		预应力系统孔道密封检查记录		编号:	
				共 页 第 页	
工程名称			孔道责任施工单位		
作业工长			记录人		
操作者			结构部位		
压力表编号			压力表校验日期		
检查日期					
孔道 编号	测试压力 (bar)		持续时间 (min)		备 注
密封性测试时水压不高于灌浆压力					
责任施工单位			监理公司		
授权代表:			授权代表:		
年 月 日			年 月 日		

表 E.0.3 预应力系统穿束记录

施工单位		预应力系统穿束记录			编号:		
					共 页 第 页		
工程名称			责任施工单位				
穿束方式			穿束负责人				
天气状况		天气: 温度 ℃	质检员				
记录人			隐蔽记录号				
结构部位							
钢束编号	穿束日期	批号	盘号	穿入根数	钢绞线		备注
					弹性模量	表面状态等级	
穿束特殊要求	1. 钢束伸出锚垫板长度符合规定。 2. 钢绞线表面状态不低于“B”级标准			备注	钢束两端外露部分用双层塑料薄膜包裹		
责任施工单位				监理单位			
授权代表:				授权代表:			
年 月 日				年 月 日			

表 E.0.4 预应力系统张拉记录

施工单位		预应力系统张拉记录				编号： 共 页 第 页			
工程名称		钢束编号							
责任施工单位		钢束理论长度 (mm)							
钢束规格		锚具型号		锚具质量 证明编号					
张拉日期		年 月 日		张拉记录					
天气状况		天气：温度 ℃		张拉负责人					
钢束类别									
设计	控制应力	MPa		张拉 设备	千斤顶	型号：			
	张拉力	kN			张拉油泵	型号：			
	理论伸长值	mm			油泵压力表	校验日期：			
张拉端		夹片 批号	工作锚板批号		张拉端	夹片批号	工作锚 板批号	钢 板 尺	编号：
(A)					(B)				检验号：
喇叭口方位		张拉 千斤顶	油泵压力表		喇叭口 方位	张拉 千斤顶	油泵压 力表		编号：
编号：		编号：	编号：		编号：	编号：	编号：		检验号：
张拉 序号	张拉力 (kN)	油泵 压力 (bar)	千斤顶伸出值或 钢绞线测点位置 (mm)		油泵压力 (bar)	千斤顶伸出值 或钢绞线测点 位置 (mm)		两端伸长度 (A+B)	
P_1									
P_2									
拉 入 长 度	锚固后伸长值读数		A			B		张拉操作人员：	
	总拉入长度 (mm)								
	内缩量 (mm)								
张拉前 检查	所有夹片、工作锚板就位						观察结果：		
	所有钢绞线就位								
张拉后 检查	夹片跟进状况								
	钢绞线有无断裂或滑移								
备注	1. 初始张拉油压 100bar 以下的推算伸长值为____mm，千斤顶钢绞线段弹性回缩值取____mm。 2. 钢束两端合计张拉伸长值____mm，与理论伸长值误差：____%。评定：								
责任施工单位					监理公司				
授权代表：					授权代表：				
年 月 日					年 月 日				

表 E.0.5 预应力系统水泥浆拌制记录

施工单位		预应力系统水泥浆拌制记录			编号:	
					共 页 第 页	
工程名称				责任施工单位		
制浆负责人				测试人		
制浆日期		年 月 日		操 作		
质检员				记录人		
搅拌设备运转情况				水泥浆品种	缓凝水泥浆 ☐	膨胀水泥浆 ☐
计量器具 检验号	磅秤/ 水泥计量 秤			搅拌时间	开始	结束
	台秤			一次搅拌		
配合比编号				二次搅拌		
每拌 配合 比材 料	水	水源 (水质)			生产批号	复验试验报告 编号
		质量 (kg)				
	水泥	品种				
		质量 (kg)				
	添加剂	名称				
		质量 (kg)				
		名称				
质量 (kg)						
测试温度						
环境温度 (℃)		拌合水温度 (℃)		水泥温度 (℃)		
浆体 测试 记录		序号	出罐流动度 (s)	出罐温度 (℃)		测试时间
		1				
		2				
		3				
		4				
		5				
备注: 1. 本批水泥浆的试验报告附后。						
2. 本批制浆共搅拌水泥浆_____罐, 用于_____钢束导管的灌浆						
责任施工单位				监理公司		
授权代表:				授权代表:		
年 月 日				年 月 日		

表 E.0.6 预应力系统灌浆记录

施工单位		预应力系统灌浆记录				编号:	
						共 页 第 页	
工程名称				责任施工单位			
灌浆日期		年 月 日		灌浆负责人			
质检员				记录人			
结构部位							
灌浆设备型号				压力表编号			
水泥浆品种				环境温度			
测试人				隐藏记录号			
储浆罐中水泥浆温度		序号	时间/温度	时间/温度	时间/温度		
		1					
		2					
		3					
序号	孔道编号	水泥浆流动度 (s)		入口处灌浆压力 (bar)	灌注时间		
		入口	出口		开始	结束	
灌浆操作:							
备注							
责任施工单位				监理公司			
授权代表:				授权代表:			
年 月 日				年 月 日			

附录 F 塔筒对正、水平度及
导电率的验收记录表

表 F 塔筒对正、水平度及导电率的验收记录表

工程名称				施工许可证 (开工证)	
建设单位				项目负责人	
设计单位				项目负责人	
监理单位				总监理工程师	
施工单位				项目经理	
				项目技术负责人	
序号	项目		检验标准或误差要求	检验方法	检验结果
1	张拉之前	塔筒同心度	塔筒顶部中心偏移最大可接受误差 300mm	经纬仪（激光/铅锤）和靶心	
2		水平度	±0.5mm	水准仪	
3	张拉之后	塔筒同心度	塔筒顶部中心偏移最大可接受误差 300mm	经纬仪（激光/铅锤）和靶心	
4		水平度	±0.5mm	水准仪	
5	导通电阻		塔筒底部到顶部电阻值应<200mΩ	微欧计	
6					
检查结论:					
总监理工程师 (建设单位项目负责人)					
年 月 日					

附录 G 竖缝灌浆质量控制表

表 G 竖缝灌浆质量控制表

管片编号			施工日期	
建设单位			项目负责人	
设计单位			项目负责人	
监理单位			总监理工程师	
施工单位			项目经理	
			项目技术负责人	
序号	项目	内容	结果	备注
1	设备追溯（标识及校准）	天平		
2		配料器		
3		温度计		
4		压力计		
5		泵		
6	配合比	水		
7		成分 A		
8		成分 B		
9	温度	环境		
10		水		
11		浆料		
12	样品	样品类型		
13		模具标识		
14		时间		

附录 H 水平接缝灌浆质量控制表

表 H 水平接缝灌浆质量控制表

管片编号			施工日期	
建设单位			项目负责人	
设计单位			项目负责人	
监理单位			总监理工程师	
施工单位			项目经理	
			项目技术负责人	
序号	项目	内容	结果	备注
1	设备追溯（标识及校准）	天平		
2		温度计		
3	配合比	水		
4		成分 A		
5		成分 B		
6	温度	环境		
7		底层		
8		水		
9		浆料		
10	样品	样品类型		
11		模具标识		
12		时间		
13		批号		
14		龄期		

附录 I 预应力孔道灌浆料泌水率和 膨胀率测试方法

I.0.1 温度、湿度应符合下列规定：

- 1 实验室温度应为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应大于 50%。
- 2 养护室的温度应为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应大于 90%；养护水的温度应为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- 3 成型时，水泥基灌浆材料和拌合水的温度应与实验室的温度一致。

I.0.2 测试原理：测试包含体积变化和泌水率的测量。泌水率是测量残留在灌浆材料表面的水的体积。体积变化是测量在测试开始和结束时灌浆材料体积变化的百分比。测试主要衡量沉淀或膨胀引起的体积变化。

I.0.3 试样制备：试样搅拌程序及方式可按照厂家相关说明操作。

I.0.4 设备：

- 1 透明管 1 根，内径为 60mm~80mm，长度约 1m，配备端盖。
- 2 七股钢绞线 1 根，长度约 900mm，能够放进透明管内部。
- 3 温度计。

I.0.5 程序：

- 1 将透明管垂直放置，开口端朝上，将透明管固定，确保没有移动和振动。
- 2 安装钢绞线，确保其牢固固定在底部，并且处于中心位置。
- 3 以稳定的流速将灌浆材料倒入透明管中确保不会带入空气（从底部或者使用小直径导管），灌浆料填充至 h_0 高度，大约在钢绞线顶部 10mm。密封透明管顶部，避免水分蒸发。记录灌浆和环境温度。

- 4 记录起始时间 t_0 和灌浆起始高度 h_0 。
- 5 在第一个小时内每隔 15min 记录灌浆高度 h_g ，随后记录 2h、3h 和 24h 数据。
- 6 记录灌浆材料泌水的高度 h_w （见图 I.0.5）。
- 7 通过透明管观察灌浆材料的外观变化，记录不均匀的情况。不均匀情况如下：
 - 1) 在灌浆材料顶面形成泌水。
 - 2) 沉淀导致产生不同颜色的灌浆料区域。

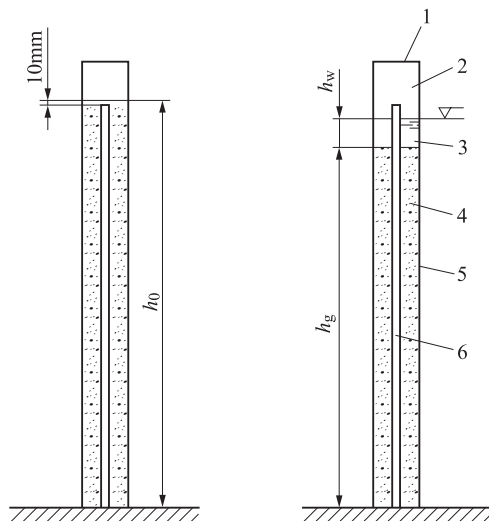


图 I.0.5 泌水率测试示意图

1—密封；2—空气；3—水；4—灌浆料；5—透明管；
6—钢绞线； h_0 — t_0 时的高度； h_g — t_n 时的高度

I.0.6 结果报告：

泌水率： $h_w/h_0 \times 100\%$ 。

体积变化： $(h_g - h_0) / h_0 \times 100\%$ 。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。

2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
《混凝土结构设计规范》GB 50010
《建筑抗震设计规范》GB 50011
《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046
《烟囱设计规范》GB 50051
《烟囱工程施工及验收规范》GB 50078
《高耸结构设计规范》GB 50135
《混凝土质量控制标准》GB 50164
《构筑物抗震设计规范》GB 50191
《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
《建筑防腐蚀工程施工及验收规范》GB 50212
《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448
《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476
《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728—2011
《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003
《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004
《风力发电工程施工与验收规范》GB/T 51121
《通用硅酸盐水泥》GB 175
《水泥化学分析方法》(GB/T 176)
《水泥细度检验方法(筛析法)》GB/T 1345
《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T
1346
《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596

T / CEC 5008 — 2018

《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596

《塑料 负荷变形温度的测定 第2部分：塑料、硬橡胶和长纤维增强复合材料》GB/T 1634.2

《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》GB/T 1728

《树脂浇铸体性能试验方法》GB/T 2567

《塑料试样状态调节和试验的标准环境》GB/T 2918

《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224

《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定（刚性材料对刚性材料）》
GB/T 7124

《水泥比表面积测定方法（勃氏法）》GB/T 8074

《混凝土外加剂》GB 8076

《软件开发规范》GB 8566

《混凝土搅拌站（楼）技术条件》GB 10171

《建筑密封材料试验方法 第6部分：流动性的测定》GB/T
13477.6

《预应力筋锚具、夹具和连接器》GB/T 14370

《建设用砂》GB/T 14684

《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685

《预拌混凝土》GB/T 14902

《水泥胶砂强度检验方法（ISO法）》GB/T 17671

《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046

《风力发电机组 设计要求》GB/T 18451.1

《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736

《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176

《混凝土用再生粗骨料》GB/T 25177

《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182

《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690

《电力建设施工质量验收及评定规程 第1部分：土建工程》
DL/T 5210.1

- 《水泥原料中氯的化学分析方法》JC/T 420
- 《混凝土防冻剂》JC 475
- 《水泥基灌浆材料》JC/T 986
- 《建筑变形测量规范》JGJ 8
- 《混凝土泵送技术规范》JGJ/T 10
- 《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18
- 《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55
- 《建筑施工安全检查标准》JGJ 59
- 《混凝土用水标准》JGJ 63
- 《钢筋机械连接通用技术规程》JGJ 107
- 《钢筋锥螺纹接头技术规程》JGJ 109
- 《建筑施工现场环境与卫生标准》JGJ 146
- 《钢筋机械连接用套筒》JG/T 163
- 《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223
- 《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225
- 《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281
- 《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369
- 《混凝土用复合掺合料》JG/T 486
- 《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50

中国电力企业联合会标准

风力发电机组预应力装配式
混凝土塔筒技术规范

T / CEC 5008 — 2018

条 文 说 明

目 次

1	总则	100
3	基本规定	101
4	材料	102
4.2	混凝土	102
4.3	灌浆料	102
4.5	水平拼接缝用粘接材料	103
4.7	预应力材料	103
4.8	其他	103
5	荷载和地震作用	104
5.1	荷载与作用分类	104
5.2	风力发电机组风荷载	104
5.4	地震作用	104
5.5	荷载和地震作用效应组合	104
6	塔筒结构设计	106
6.1	一般规定	106
6.4	疲劳验算	106
6.6	构造规定	106
7	基础设计	107
7.2	扩展基础地基及结构计算	107
7.3	构造规定	107
8	基础施工	108
8.1	一般规定	108
8.2	钢筋工程	108
8.3	模板工程	108

9	塔筒预制管片制作	109
9.1	一般规定	109
9.3	模板工程	109
9.4	混凝土工程	109
9.5	管片拼装	109
9.6	质量检验	109
10	附件安装	111
11	塔筒防腐蚀	112
12	塔筒吊装工程	113
12.2	吊装工程	113
12.3	吊装质量检验	113
13	预应力工程	114
13.1	一般规定	114
13.2	预应力施工	114
13.3	质量检验	114
14	安全监测	115
14.1	一般规定	115
16	职业健康安全与环境保护	116

1 总 则

1.0.2 根据现行行业标准《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369 的规定，预应力混凝土结构分为体外预应力、有黏结预应力和无黏结预应力三种体系。本规范适用于上述三种体系中的有黏结预应力体系。

3 基 本 规 定

3.0.1 一般风力发电机组的设计寿命为 20 年,本规范建议塔筒的设计使用年限不低于 20 年。

3.0.5 根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定,为满足结构耐久性的需要,预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C50。在风电混凝土塔筒中,C60 及以上标号的混凝土在国际上已有大量工程应用,国内建筑工程领域也已广泛使用 C60 及以上的混凝土,且性价比较好。故本规范作此规定。

3.0.6 信息化协同平台的主要实现手段是建筑信息模型(BIM)。BIM 技术在建筑工程领域有较多的应用先例,其优势主要有:在设计阶段,通过计算机检查管片的各种预埋件、预留孔洞及预应力孔道尺寸,保证位置准确无误,避免在施工过程中发生返工等问题;可以快速生成材料用量清单,便于进行成本和造价管理;便于合理布置塔筒内的各类电气屏柜及通风道;便于实现塔筒全生命周期的产品质量跟踪和责任追溯。

3.0.12 沉降观测点一般宜设置在首节塔筒管片。

4 材 料

4.2 混 凝 土

4.2.2 考虑到风电机组混凝土塔筒壁厚较薄,钢筋及预埋件密集,采用非自密实混凝土加振捣施工不能保证混凝土密实度和外观质量,因此建议采用自密实混凝土。

4.2.4 本规范规定塔筒混凝土强度等级不应低于 C60,属于高强混凝土,配置强度应符合现行行业标准《高强混凝土应用技术规程》JGJ/T 281 的规定。但该标准中混凝土强度的上限为 C80,然而,国际工程经验表明风电混凝土塔筒大量采用 C80 以上强度等级的混凝土。因此,当混凝土强度等级高于 C80 时,应通过试验确定其配制强度。

4.3 灌 浆 料

4.3.1 同一配方的压浆剂与水泥厂不同批号的水泥配制而成的压浆料往往会出现明显工作性能超范围的变化,是国内客观存在的常见情况。当调整压浆剂掺入量仍不能兼顾所有性能时,往往会不得已放弃某项性能,使工程存在质量风险。混凝土塔筒高度一般超过 100m,对预应力孔道灌浆料的要求较高,宜使用质量稳定性更有保障的预包装产品;生产厂家对水泥灌浆材料有其明确的使用温度范围要求。当施工及养护的环境温度超出温度范围上限,则应采取合理的高温施工措施,反之则应采取合理的低温施工措施。

4.3.2 国内标准对于预应力压浆料的测试方法中对轻微泌水、轻微膨胀往往难以观察得到,故膨胀率和泌水率参考了 EN 445 中的测试方法。EN 445 中测试泌水的方法中要求置入钢绞线,更为合理。

4.5 水平拼接缝用粘接材料

4.5.1 本条规定参考了 FIP 标准对节段拼接用粘接胶的一般要求。水平拼接缝用粘接材料不仅应具有较好的机械强度，还应具有足够的可施工时间、可挤压性工作性。正确施工后，材料还应具有较好的气密性。应根据环境温度和基面温度合理选用适用的产品型号。在产品标注的最高使用温度下施工，应有足够的可操作时间；在产品标注的最低使用温度下进行施工养护，1d 抗压强度应超过 40MPa。根据 GB 50728 的规定，预期使用寿命达到 30 年的结构胶应通过 90d 耐湿热老化测试；预期使用寿命达到 50 年的结构胶，还应通过耐长期应力作用的测试。

4.7 预应力材料

4.7.3 1 参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 第 10.3.7 条的规定：“预留孔道的内径宜比预应力束外径及需穿过孔道的连接器外径大 6mm~15mm，且孔道的截面积宜为穿入预应力束截面积的 3.0 倍~4.0 倍”。结合风电机组混凝土塔筒施工经验，孔道直径过小可能造成钢绞线穿束困难。因此，在结构强度和构造措施允许的情况下，本条建议适当加大孔道直径。

2 按现行行业标准《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225 中预应力金属波纹管的厚度有普通型和增强型两种规格，参照实际工程经验及其他行业类似塔筒预应力孔道的壁厚取值，本规范建议按增强型波纹管的最小厚度选用。

4.7.4 后张预应力钢绞线锚具一般有夹片式、挤压式、压花式等多种类型，夹片式锚具便于施工，因此本规范建议采用夹片式锚具。

4.8 其 他

4.8.2 为保证预制管片吊点强度，预埋吊钉的材料强度不宜过低，且应具有足够的延性。本条参考国内外工程经验，对吊钉强度等级和屈强比提出要求。

5 荷载和地震作用

5.1 荷载与作用分类

5.1.1 本规范对荷载的分类参考现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的有关规定。

5.2 风力发电机组风荷载

5.2.1 风机风荷载种类按照现行国家标准《风力发电机组 设计要求》GB/T 18451.1 中描述的荷载选取。

5.2.2 在很多情况下, 风况包括稳定的平均气流与变化的可确定的阵风廓线或与湍流的组合。在所有的情况下应考虑平均气流与水平面夹角达到 8° 时的影响, 假定此气流倾斜角不随高度变化。湍流是指矢量风速相对于 10min 平均值的随机变化。湍流模型在使用时应考虑风速、风切变和风向的变化的影响, 并允许通过变化的风切变旋转采样。

5.2.4 极端风况包括风切变以及由于暴风和风速及风向快速变化引起的风速峰值。

5.4 地 震 作 用

5.4.3 本条参考现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定。

5.5 荷载和地震作用效应组合

5.5.2 1 本条规定的各荷载分项系数参考现行国家标准《建筑结

构荷载规范》GB 50009 的规定。其中，预应力荷载视作永久荷载的一种，其荷载分项系数的取值按永久荷载考虑。

3 重力荷载分项系数同样取为 1.0，理由同上。

6 塔筒结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 本条规定了塔筒结构设计时应计算或验算的内容。其中，第 2~4 条对应承载能力极限状态，第 5~6 条对应正常使用极限状态。

6.1.4 预应力体系保证塔筒水平截面在正常使用极限状态下不出现裂缝，因此混凝土的应力-应变关系基本符合线弹性关系，故本规范对截面抗弯刚度不做折减。

6.1.7 混凝土结构顶点位移过大会带来倒塌和开裂的风险，因此应对水平位移角进行限制。本规范参考现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的要求，规定塔筒轮毂高度处的水平位移角不应大于 1/100。同时，水平位移角过大，说明结构偏柔，会造成塔筒的一阶自然频率不满足设计要求。因此，本规范同时建议轮毂高度处的水平位移角不宜大于 1/200。

6.1.8 本条参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求，规定预应力混凝土结构裂缝宽度不应大于 0.2mm。

6.4 疲劳验算

6.4.4 本条参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 第 6.7.4 条的规定。

6.6 构造规定

6.6.10 预应力锚具和支撑处的局部加强设计应由结构设计人员和预应力厂家密切协调，避免施工中出现锚垫板尺寸不协调等问题。

7 基 础 设 计

7.2 扩展基础地基及结构计算

7.2.1 3 本条根据风力发电机组地基基础结构受力特点,明确扩展基础应进行局部受压、正截面受弯和斜截面受剪的承载力计算。

7.3 构 造 规 定

7.3.1 本条根据工程经验对扩展式基础的尺寸提出若干建议。

1 钢塔筒的工程经验表明,扩展基础的底宽或直径宜控制在轮毂高度的 $1/5 \sim 1/3$ 范围内。相比于钢塔筒,混凝土塔筒的塔筒重量大大增加,有利于基础抗倾覆。故在其他条件相同的情况下,混凝土塔筒的基础直径可比钢塔筒的基础直径有所减小。综合考虑地基承载力和抗倾覆稳定性等综合因素,参靠国外工程数据,本规范提出基础底面直径为轮毂高度的 $1/6 \sim 1/5$ 为宜。

2 预应力钢绞线的穿束、张拉和灌浆均需要一定的操作空间,在充分征求预应力施工单位意见后,本条建议基础空腔直径不小于 7.5m,且高度不小于 1.5m。

8 基 础 施 工

8.1 一 般 规 定

8.1.1 本条参考现行国家标准《建筑地基基础工程施工规范》GB 51004 的规定。

8.2 钢 筋 工 程

8.2.2 本条参考现行国家标准《烟囱工程施工及验收规范》GB 50078—2008 第 4.2.2 条的规定。

8.2.3 本条参考现行国家标准《烟囱工程施工及验收规范》GB 50078—2008 第 4.2.4 条的规定。

8.3 模 板 工 程

8.3.1 施工时应避免钢筋沾染脱模剂，尤其是油性脱模剂。

9 塔筒预制管片制作

9.1 一般规定

9.1.3 若首件验收不合格，则应采取相应措施直到管片符合质量标准，之后才可转入管片正式生产。

9.1.5 管片唯一编码至少应包括预制管片代号、模具代号及流水号等信息。

9.1.6 搅拌站与施工现场相邻布置可减少混凝土拌合物的运输距离，缩短运输时间，减少混凝土坍落度损失。

9.3 模板工程

9.3.5 塑料垫圈或砂浆垫块应能保证混凝土保护层厚度要求，且应绑扎牢固，按梅花状布置，间距满足钢筋限位及控制变形要求，钢筋绑扎丝甩扣应弯向管片内侧。

9.4 混凝土工程

9.4.8 2 标记内容应包含管片塔筒编号、浇筑时间等信息。

9.5 管片拼装

9.5.1 本规范中，管片拼装是指将两个或多个预制管片通过竖缝连接，拼装为一个筒形段的过程。

9.6 质量检验

9.6.5 本质量检验表针对圆形塔筒，若采用非圆形塔筒，检验项

目应服从设计要求。表格中未列出的其他需要做尺寸检测的项目（例如水平波纹管深度、竖向波纹管突出高度、起吊插口位置、管片顶部凹槽尺寸等）应在企业标准中作详细规定，详见本规范附录 D。

9.6.6 国外预制混凝土塔筒企业标准中管片不可修复缺陷特征参见表 1。

表 1 管片不可修复缺陷特征

序号	不可修复缺陷特征
1	管片存在大冷缝
2	管片（尤其是在关键部位）存在不可接受的裂缝：宽度大于 3mm 的裂缝或者贯穿裂缝（由里到外，由上到下或由左到右贯穿）
3	有比较严重的混凝土离析现象（大面积一定深度内无粗骨料）
4	C 型管片拼接用钢筋连接套筒有缺失或位置尺寸超公差
5	管片起吊插口有缺失、位置尺寸超公差或周边出现裂缝
6	管片上保护工人安全相关的锚固点有缺失或位置尺寸超公差
7	在大面积范围内，管片外侧混凝土保护层厚度小于 20mm，或内侧小于 10mm
8	管片试样同条件养护 56d 仍未达到设计强度要求

10 附 件 安 装

10.0.6 防雷接地线、等电位连接施工应与预制管片安装配合。利用预制管片内钢筋或接地扁钢作为防雷接地线时，应进行引下线导通性试验，确认导通电阻符合设计要求，保证连接的可靠性。

11 塔 筒 防 腐 蚀

11.0.2 与钢塔筒不同，混凝土塔筒自身具有一定的耐腐蚀性能，当混凝土塔筒耐久性不足时，可选择丙烯酸类、聚氨酯类、环氧类、硅烷类涂层等防护材料对塔筒进行防腐蚀处理。

11.0.6 防腐蚀材料品种较多，不同品种防腐蚀材料施工操作要求差异较大，当选用的防腐蚀材料有相应产品施工标准时，应参照相关标准施工。例如，聚脲涂层施工可参照现行行业标准《水利水电工程聚脲涂层施工技术规程》DL/T 5317 的规定进行等。

12 塔筒吊装工程

12.2 吊 装 工 程

12.2.2 4 参照国外预制混凝土塔筒工程相关企业标准，管片吊装过程中调平误差要求一般为 $\pm 1\text{mm}$ 。

12.2.3 1 起重机操作请参照现行国家标准《塔式起重机》GB/T 5031 的规定进行。

6 水平缝粘接材料涂抹不当，可能造成两方面问题。其一，水平缝密实度不足，影响水平缝的气密性，导致预应力孔道灌浆时可能出现漏浆问题；其二，水平缝粘接材料可能进入预应力孔道，造成孔道堵塞，影响预应力钢绞线穿束。

12.3 吊 装 质 量 检 验

12.3.1 本表中塔筒顶部水平度要求指标参照了国外预制混凝土塔筒工程企业标准。

13 预 应 力 工 程

13.1 一 般 规 定

13.1.2 孔道应依次进行通畅性试验、密封性试验（避免预应力孔道及水平缝在灌浆过程中出现漏浆问题），确保孔道质量合格后方可进行穿索、灌浆等作业。

13.1.5 本条参照《后张法预应力施工规程》DGTJ08-235—2012第9.1条、GB 50666第6.5.1条的规定，孔道灌浆宜在48h内完成。

13.2 预 应 力 施 工

13.2.1 4 本条参考《混凝土结构工程施工规范》GB 50666—2011第6.4.2条的规定。

13.3 质 量 检 验

13.3.1 本条参考《混凝土结构工程施工规范》GB 50666—2011第6.3.7条的规定。

13.3.3 本条参考《混凝土结构工程施工规范》GB 50666—2011第6.4.11条的规定。

13.3.6 本条参考《后张法预应力施工规程》DGTJ08-235—2012第9.5条的规定。

14 安 全 监 测

14.1 一 般 规 定

14.1.12 具有代表性的混凝土塔筒是指第一次采用混凝土塔筒的风机机型，风机设计生产或混凝土塔筒设计生产厂商认为需要验证、改进设计而获取运行数据时。

14.1.14 测点的布置位置是正确捕捉塔筒有效信息的关键，测点要能精确反映塔筒的实际状态及变化趋势。测点布置应能满足对塔筒的内力分布、变形和动力特性等作全面的分析需要，选择塔筒静力和动力反应及变形较大的部位，并结合现场实际情况确定测点位置；测点的数量既要考虑到监测的可靠性，又要考虑经济性。

14.1.17 传感器各项性能指标应满足设计要求，设计没有明确测量精度、灵敏度、量程时，可按《建筑变形测量规范》JGJ 8 的相关规定和设计单位确定。也可参照：变形监测仪器量程应介于测点位移估计值或允许值的 2 倍~3 倍；应变传感器量程宜不小于预测最大值的 2 倍；索力监测可选用磁通量传感器、光纤光栅应变传感器、压力传感器等，监测精度宜不低于 1.5%FS；动力响应监测宜选用低平性能优良的力平衡式或电容式加速度传感器，量程不小于 $\pm 2g$ ，横向灵敏度高于 1%，频响范围 0Hz~100Hz。

14.1.18 在软件系统运行过程中，可能因接口、硬件故障等出现死机现象，此时需软件系统具有自启动功能，能自动从故障中恢复，但恢复过程不能影响数据采集、存储以及评估等功能的运行。

16 职业健康安全与环境保护

16.0.3 在管片制作、脱模、拼接及倒运中，需要多次起吊管片，预埋吊钉及周边混凝土需确保完好无损，避免出现吊钉松动、脱落引起的重大安全事故。

16.0.8 破碎后的高强混凝土是制作普通混凝土的一种资源，可用作再生粗骨料和细骨料，不同于普通混凝土破碎后只适宜作为道路的路基或垫层。
