

ICS 号

中国标准文献分类号

团体标准

T/CHTS XXXXX-20XX

公路桥梁钢壳-混凝土组合塔技术指南

Technical Guide for steel Shell - concrete Composite pylons for highway

Bridges

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国公路学会 发布

团 体 标 准

公路桥梁钢壳-混凝土组合塔技术指南

Technical Guide for steel Shell - concrete Composite pylons for highway
Bridges

T/CHTS XXXXX-20XX

主编单位：南京市公共工程建设中心

发布单位：中国公路学会

实施日期：20XX 年 XX 月 XX 日

XXXXXX（出版社）

前 言

本指南是在广泛调查研究并全面总结目前公路桥梁钢壳-混凝土组合塔实践经验的基础上编制。

本指南按照《中国公路学会标准编写规则》(T/CHTS 10001)编写,共分 8 章,主要内容包括:总则、术语、基本规定、材料、设计、施工、施工监控、质量控制与检测。

本指南由南京市公共工程建设中心提出,受中国公路学会委托,负责具体解释工作。请有关单位将实施中发现的问题与建议,反馈至南京市公共工程建设中心(地址:江苏省南京市建邺区江心洲街道梅子洲路 69 号;邮编:210019;联系电话:025-85658272;电子邮箱:673582506@qq.com),供修订时参考。

主编单位:南京市公共工程建设中心

参编单位:中交公路规划设计院有限公司、中交第二公路工程局有限公司、中交第二航务工程局有限公司、中铁宝桥集团有限公司

主要起草人:×××、×××、×××

主要审查人:×××、×××、×××

目 次

1 总则.....	5
2 术语和符号.....	6
2.1 术语.....	6
2.2 符号.....	7
3 基本规定.....	9
4 材料.....	10
4.1 钢筋.....	10
4.2 钢绞线.....	10
4.3 混凝土.....	10
4.4 钢壳材料.....	11
5 设计.....	12
5.1 一般规定.....	12
5.2 构造要求.....	13
5.3 承载能力极限状态设计.....	15
5.4 正常使用极限状态验算.....	16
5.5 剪力连接件设计.....	17
5.6 钢壳-混凝土组合塔施工期设计.....	19
6 施工.....	22
6.1 一般规定及总体工艺流程.....	22
6.2 施工设备.....	24
6.3 附筋钢壳零件及板单元加工.....	26
6.4 附筋钢壳节段组装与预拼装.....	27
6.5 附筋钢壳的现场安装.....	29
6.6 混凝土施工.....	34
7 施工监控.....	36
7.1 一般规定.....	36
7.2 施工测量.....	36
7.3 施工监控.....	38
8 质量控制与检验.....	43
8.1 钢壳制作质量检测.....	43
8.2 钢壳安装质量检测.....	45

1 总则

1.0.1 为规范公路桥梁工程钢壳-混凝土组合塔的设计、制造与安装，保证施工质量和安全，进一步贯彻“工厂化制造、装配化安装”的设计施工理念，制定本指南。

条文说明：钢壳-混凝土组合塔是一种新型的公路桥塔结构，其能够实现钢壳与混凝土协同受力，提高索塔力学性能，促进缆索承重桥梁索塔的快速化建造。

通过制定新型钢壳-混凝土组合塔结构设计、施工指南，以指导后续类似工程设计和施工，保证工程建设安全、优质和环保。

1.0.2 本指南适用于公路桥梁钢壳-混凝土组合塔的设计、制造及安装。

1.0.3 本指南在总结研究已建项目南京长江五桥钢壳-混凝土组合塔设计、制造及安装的相关技术、施工经验，并广泛征求意见的基础上，充分吸收国内外类似结构塔的技术成果，结合相关标准制定而成。

1.0.4 公路桥梁钢壳-混凝土组合塔的设计、施工、监控、质量控制与检验，除应符合本指南的规定外，尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 钢壳-混凝土组合塔 **steel shell - concrete composite pylons**

由内外壁钢壳、附着于钢壳的钢筋及钢壳内混凝土构成，钢壳与混凝土通过剪力连接件连接成协同受力、共同工作的结构。

2.1.2 首节钢壳 **the first section steel segment**

钢壳-混凝土组合塔与混凝土承台连接的第一段钢壳节段。

2.1.3 钢壳节段 **the steel shell segment**

按设计要求将组合塔钢壳在高度方向划分为若干段，称为钢壳节段。

2.1.4 附筋 **attached reinforcement**

在钢壳节段内部安装的竖向主筋、水平环向箍筋及拉筋的统称。

2.1.5 附筋钢壳 **the attached reinforcement of the steel segment**

钢壳与钢壳内安装的钢筋形成的整体结构，总称为附筋钢壳。

2.1.6 薄钢板开孔剪力件 **sheet steel cutout shears**

钢壳内外壁板竖向和横向的加劲板开孔内贯穿钢筋，使混凝土与钢壳壁板共同受力的连接构件。

2.1.7 竖向桁架 **vertical truss**

增加内外壁板连接刚度，间隔一定距离设置的竖向型钢桁架，竖向型钢桁架与钢壳壁板的竖向加劲板焊接连接。

2.1.8 水平桁架 **horizontal truss**

增加内外壁板连接刚度，间隔一定高度水平布置型钢桁架，水平型钢桁架与钢壳壁板的水平加劲板焊接连接。

2.1.9 补偿收缩混凝土 **shrinkage compensating concrete**

混凝土中掺入适量膨胀剂或用膨胀水泥配制的混凝土。

2.1.10 定位匹配 **locate matching**

钢壳节段加工组装和现场安装时，根据监控指令调整平面位置及倾斜度至满足设计、监控要求。

2.1.11 液压自爬升施工平台 **hydraulic self-climbing construction platform**

轨道附着于组合塔外壁，通过液压系统沿轨道实现自动爬升的施工平台，供

钢壳节段现场安装的施工作业。

2.2 符号

γ_0 ——桥梁结构重要性系数；

e ——轴向力作用点至截面受拉边或受压边较小边纵向钢筋和钢壳外壁板合力点的距离；

e_0 ——轴向力对截面重心轴的偏心距， $e_0 = M_d / N_d$ ；

M_d ——相应于轴向力的弯矩设计值；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{sd} 、 f'_{sd} ——纵向普通钢筋抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

f_{rd} 、 f'_{rd} ——纵向钢加劲板抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

η_{rs} ——钢加劲板承载能力系数，根据桥塔组合截面剪力连接度 γ 确定， $\gamma \geq 1$ ， $\eta_{rs} = 1$ ；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋截面面积；

A_r 、 A'_r ——受拉区、受压区钢壳及其竖向加劲板净截面面积之和；

b ——截面宽度，可随截面高度变化；

h_0 ——截面有效高度， $h_0 = h - a$ ，此处 h 为截面全高；

a'_s ——受压区竖向普通钢筋合力点至受压区边缘的距离；

a'_r ——受压区钢壳及其竖向加劲板合力点至受压区边缘的距离；

V ——钢混组合塔的剪力设计值；

V_u ——钢混组合塔受剪承载力设计值；

A_{sw} ——平行于桥塔受力平面的钢壳面积。

P ——斜截面内纵向受拉钢筋的配筋百分率， $P=100\rho$ ，当 P 大于 2.5 时，取 $P=2.5$ 。

$f_{cu,k}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度标准值，MPa。

ρ_{sv} ——箍筋配筋率；

f_{sv} ——箍筋抗拉强度设计值，MPa。

η_{rs} ——钢加劲板承载能力系数，根据塔组合截面剪力连接度 η 确定， $\eta \geq 1$ ，

$\eta_{rs} = 1$ ；

b ——截面宽度，可随截面高度变化；

h_0 ——截面有效高度， $h_0 = h - a$ ，此处 h 为截面全高。

中国公路学会标准征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 钢壳-混凝土组合塔是永久结构和临时结构相结合的新型结构，其设计应考虑运营期截面强度、刚度、稳定性等要求，同时应满足施工期受力及变形要求，设计方法可按运营阶段和施工阶段分别考虑。

3.0.2 钢壳-混凝土组合塔在设计时需结合工程特点，必要时，提前开展相应的结构受力试验、加工制造、现场安装等专题研究论证。

3.0.3 钢壳-混凝土组合塔宜采用内外双附筋钢壳，内填充混凝土的箱形组合截面。

3.0.4 钢壳-混凝土组合塔应采用工厂化制造、现场装配化施工，以实现快速建造。

3.0.5 施工过程中成塔的倾斜度、塔与塔座结合处等数据需妥善保留，以作为运营期结构零状态资料。

4 材料

4.1 钢筋

4.1.1 普通钢筋按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362-2018 中的规定取值。钢壳首节段主筋连接选用的锥套锁紧钢筋机械接头或直螺纹套筒机械接头，接头的强度不低于主筋。

4.2 钢绞线

钢壳-混凝土组合塔预应力筋应选用高强度低松弛应力钢绞线，其质量应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T5224-2014)的规定。

4.3 混凝土

4.3.1 钢壳-混凝土组合塔混凝土应采用补偿收缩混凝土，并掺加微膨胀防干缩裂纹掺合料，强度等级宜 C40~C80，钢壳内补偿收缩混凝土 28d 养护条件下，绝湿限制膨胀率宜为 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 。

条文说明：采用补偿收缩混凝土，可以有效控制由于混凝土收缩徐变而出现钢壳与混凝土之间脱空现象，确保钢壳与混凝土协同受力。

4.3.2 针对钢壳-混凝土组合塔特点，混凝土配合比设计应兼顾大流动、微膨胀、抗裂性与耐久性等性能指标。

4.3.3 水泥宜采用 P·II 型硅酸盐水泥，以便大体积混凝土配合比的优化设计。混凝土配合比可采用粉煤灰和粒化高炉矿渣粉双掺，掺和料掺量应控制不大于 55%，以降低混凝土绝热温升。

条文说明：有关工程实践研究表明，组合塔采用 C50 补偿收缩混凝土，混凝土的设计强度按 f60 进行控制，通过采用矿粉、粉煤灰双掺技术，掺入抗裂剂，控制混凝土绝湿限制膨胀率和绝热温升。

4.3.4 为有效控制组合塔混凝土温度裂缝，应控制混凝土入模温度和水化热，热期施工时，入模温度宜不高于 28℃，水泥水化过程中任何时间点混凝土内部温度不宜高于 65℃，内表温差不大于 25℃。

条文说明：为控制混凝土入模温度，宜对拌合站料仓、搅拌机进行全封闭，降低高温日照的影响；夏季设置冷库对砂、石料进行降温；碎冰机制碎冰对拌合用水降温。

4.4 钢壳材料

4.4.1 钢材

1 钢壳-混凝土组合塔中钢壳所用钢材，应根据结构的重要性、荷载特征、应力状态、连接方式、环境条件等因素确定强度和质量等级。

2 钢材的物理力学性能指标应满足《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D60-2015）的相关规定。

3 桁架系统应采用符合《碳素结构钢》GB/T 700-2006 规定的 Q235B 的型钢。

4.4.2 焊接材料

焊接材料的型号及规格应根据焊接工艺评定试验确定, 质量控制和管理应满足现行规范要求。

中国公路学会标准征求意见稿

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 钢壳-混凝土组合塔是由附筋钢壳和内填混凝土组成的组合体系，应采取合理的钢混界面连接技术，确保附筋钢壳与混凝土形成共同工作的组合截面。

5.1.2 钢壳-混凝土组合塔需分别进行运营期和施工期设计验算。其中运营期设计内容应包含运营期强度验算、刚度验算、稳定性验算及剪力连接件设计等；施工期验算应包含塔在混凝土浇筑过程中钢壳的受力及变形验算、钢壳吊装验算等。

5.1.3 钢壳-混凝土组合塔构件正截面承载力验算应按下列基本假定计算：

- 1 构件弯曲后其截面仍然保持平面；
- 2 不考虑截面受拉混凝土的抗拉强度；
- 3 钢和混凝土之间剪力连接件有效可靠，可实现钢混组合截面完全协同工作。

5.1.4 计算组合截面特性时，可采用换算截面法，其中计算结构内力时钢壳和混凝土均应按全截面计算截面刚度，验算结构刚度时，混凝土应按开裂后刚度计算截面刚度，折减系数取 0.85。

5.1.5 钢壳-混凝土组合塔构件应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行验算，作用效应组合应按《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）规定计算，施工期验算作用效应组合应按《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）规定计算。

5.1.6 钢壳-混凝土组合塔结构设计应兼顾永久结构和施工临时结构的需要，统筹考虑养护管理工作需求。组合塔塔内检修平台、爬梯、升降机轨道可兼顾钢壳节段间环缝焊接和钢壳节段混凝土浇筑施工时使用，运营期作为养护检修通道。

条文说明：组合塔塔柱内部利用永久电梯部分构件，作为施工时的人员竖向运输通道，可不使用外部电梯，减少外部施工对塔主体结构的干扰，避免事后修复工作。钢壳-混凝土组合塔中钢壳作为永久受力结构的同时，省去了大型爬模设备。液压自爬升施工平台在组合塔施工结束后拆除，其附着在组合塔外壁的预留预埋将作为后期塔壁涂装的预埋件保留。

5.1.7 应考虑钢壳-混凝土组合塔钢壳与混凝土之间脱空对结构受力的影响，在设计计算时可考虑一定的脱空率，并明确补偿收缩混凝土性能指标。

5.2 构造要求

5.2.1 钢壳-混凝土组合塔结构中主要包含钢壳结构、钢加劲板、水平桁架与竖向桁架系统、混凝土、附筋，见图 5.2.1-1、图 5.2.1-2。

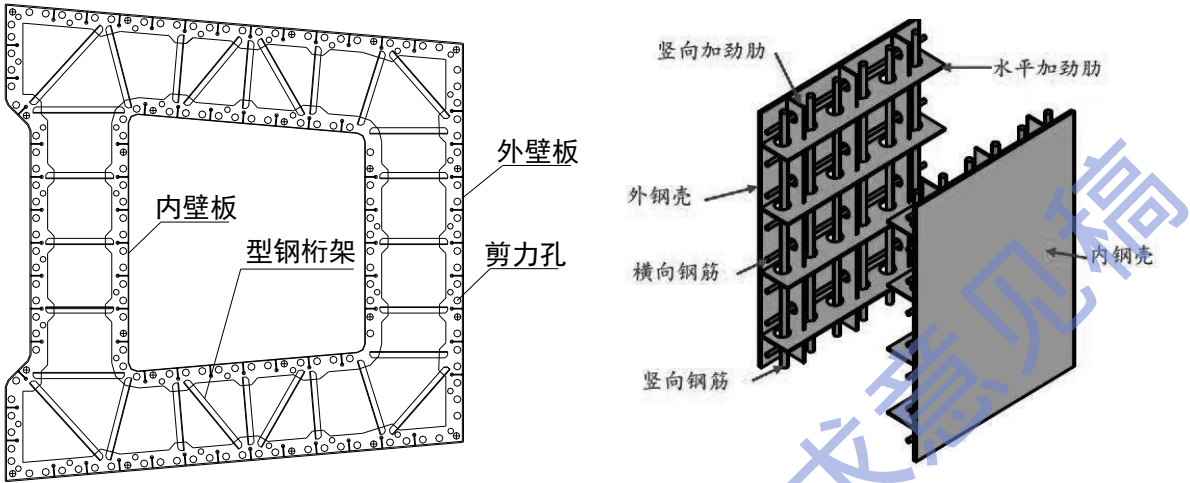


图 5.2.1-1 组合塔节段构造示意

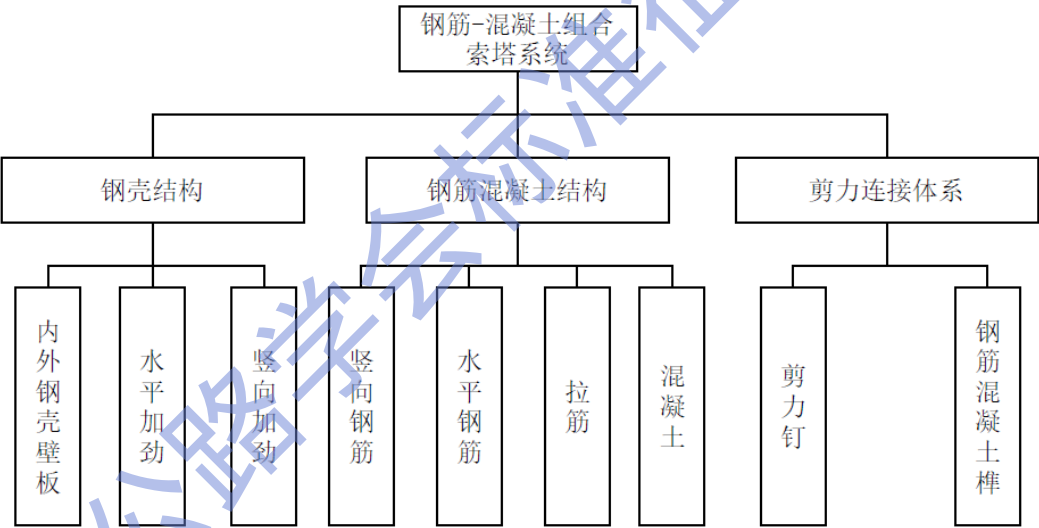


图 5.2.1-2 钢壳-混凝土组合塔系统

条文说明：钢壳-混凝土组合塔分为 3 个部分，即钢壳结构、钢筋混凝土结构、剪力连接体系。

钢壳结构包括：外钢壳壁板与内钢壳壁板、钢加劲板、水平桁架与竖向桁架系统。钢加劲板分为水平加劲肋与竖向加劲肋，均匀布设在外钢壳壁板与内钢壳壁板上，用于提高钢壳壁板面外刚度，满足施工承受混凝土侧压力的要求。同时钢壳结构也是桥塔混凝土浇筑时的模板，外层钢壳与内层钢壳通过平面桁架、竖向桁架系统连接，可满足钢壳吊装、混凝土浇筑时的受

力及变形要求，完全替代复杂的桥塔模板系统。

附筋包括竖向和横向钢筋，分别穿过水平和竖向加劲肋孔，形成薄钢板钢筋混凝土樁双向剪力件，连接钢壳与混凝土，同时也是桥塔受力的主筋。

5.2.2 钢壳-混凝土组合塔的节段化设计应符合下列规定：

1 钢壳-混凝土组合塔节段的平面尺寸应由成桥后的运营工况确定，节段高度尺寸应由施工期工况确定。节段化设计包括制造高度、吊重、钢筋长度、浇筑能力、接头数量、节段刚度和稳定性等。

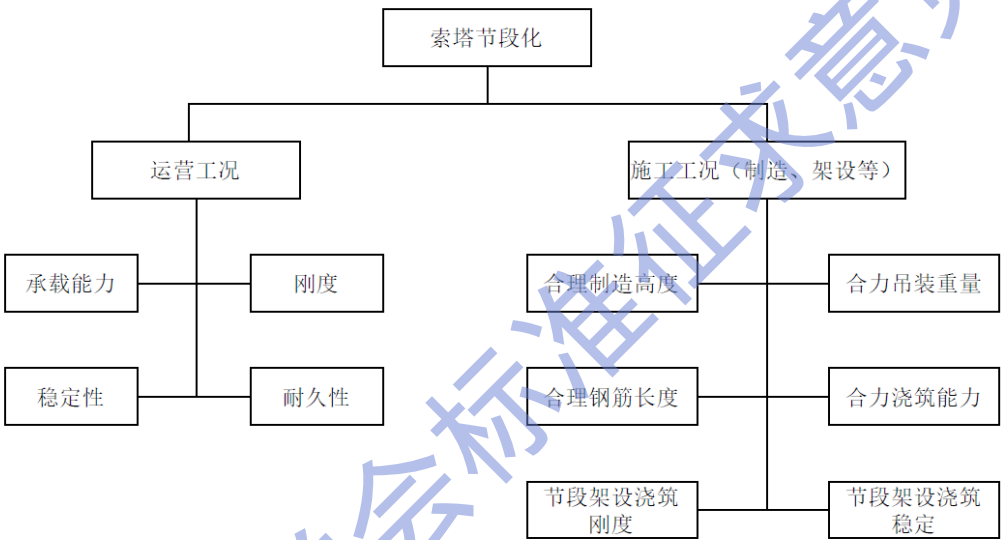


图 5.2.2 组合塔节段划分控制因素

2 钢壳-混凝土组合塔节段高度宜控制在 4m~9m 之间。

条文说明：节段化是钢壳-混凝土组合塔的设计与建造特点，钢壳-混凝土组合塔快速施工依托于钢壳节段制造与现场架设的并行作业、组合塔受力主筋以钢壳附筋的形式在工厂同步定位与安装，与钢壳一起起到模板作用。较大的节段高度，需要刚度较大的钢加劲板系统和支撑系统，以满足刚度、变形和稳定性要求。从节段的加工制造方面考虑，小节段高度便于加工制造和多节段匹配；大节段高度，造成重量过重，匹配场地要求高，但现场接头少；从钢筋长度和便于安装的角度考虑，一般节段不超过 9m。从节段的现场连接、混凝土浇筑方面考虑，小节段高度浇筑变形小，容易控制，但产生较多的现场接头，降低施工效率，一般节段高度不小于 4m；大节段高度对吊装要求高，单次混凝土浇筑高度大、方量大、变形大，但现场接头数量少。

按照上述原则，并结合以往普通钢筋混凝土塔经验，有关工程组合塔节段高度设计以 4.8m 为标准节高度，对于可采用较大起重能力的下塔柱节段增加至 5.2m 高度，对于复杂节段和吊装能力受限的节段减小至 4.4m 或更小。

5.2.3 外钢壳壁板厚度应由强度、刚度等设计条件确定，不宜小于 10mm，同时钢板不宜过厚，避免构件出现超筋破坏，影响结构延性。

5.2.4 内钢壳壁板厚度应根据施工期钢壳应力、变形等控制条件确定，不宜小于 6mm。

5.2.5 薄钢板钢筋混凝土樁构造应满足以下要求：

- 1 钢壳水平加劲与竖向加劲厚度不宜小于 10mm；
- 2 加劲肋开孔孔径不宜小于贯通钢筋直径与骨料最大直径之和；
- 3 贯通钢筋应采用螺纹钢筋，直径不宜小于 12mm。

5.2.6 节段连接构造应满足以下要求：

- 1 组合塔节段间的连接包括钢结构连接和竖向附筋连接。
- 2 钢结构连接应充分考虑外观、密封性、耐久性及施工的便利性，钢壁板宜采用全熔透焊接，加劲板宜采用高强螺栓连接。
- 3 钢筋的接头宜采用直螺纹套筒连接，每个接头应满足 I 级接头的要求，为保证钢筋的顺利有效连接，应设置可靠工装进行钢筋定位。

5.2.7 钢壳-混凝土组合塔首节段采用埋入式与塔座承台连接方案时，预埋钢筋应精确定位，可选用锥套锁紧钢筋机械接头或直螺纹套筒机械接头。

5.3 承载能力极限状态设计

5.3.1 钢壳-混凝土组合塔压弯构件正截极限承载力可按下列公式计算：

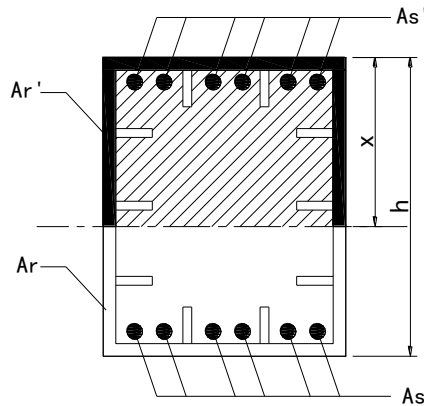


图 5.3.1 钢壳-混凝土组合塔正截面承载力计算参数示意

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd} b x + f_{sd}' A_s' + \eta_{rs} f_{rd}' A_r \quad (5.3.1-1)$$

$$\gamma_0 N_d e \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \eta_{rs} f'_{rd} A'_r (h_0 - a'_r) \quad (5.3.1-2)$$

$$e = \eta e_0 + \frac{h}{2} - a \quad (5.3.1-3)$$

5.3.2 钢壳-混凝土组合塔的抗剪承载力应符合下列公式规定：

$$\gamma_0 V \leq V_u \quad (5.3.2-1)$$

$$V_u = V_{cs} + V_{ss} \quad (5.3.2-2)$$

$$V_{cs} = 0.45 \times 10^{-3} b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k} \rho_{sv} f_{sv}}} \quad (5.3.2-3)$$

$$V_{ss} = 0.6 f_y A_{sw} \quad (5.3.2-4)$$

5.3.3 钢壳-混凝土组合受弯构件正截面极限承载力可采用下式计算：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \eta_{rs} f'_{rd} A'_r (h_0 - a'_r) \quad (5.3.3-1)$$

混凝土受压区高度 x 应按下式计算：

$$f'_{sd} A'_s + \eta_{rs} f'_{rd} A'_r \leq f_{cd} b x + f'_{sd} A'_s + \eta_{rs} f'_{rd} A'_r \quad (5.3.3-2)$$

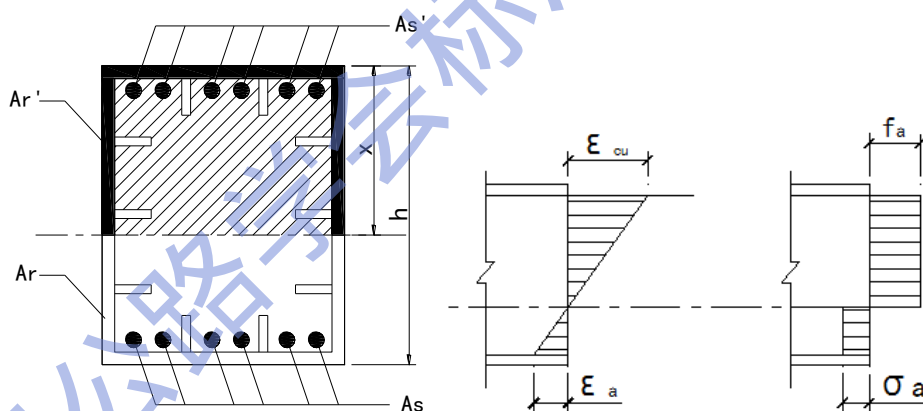


图 5.3.3 钢壳-混凝土组合塔正截面承载力计算参数示意

5.3.4 稳定性验算

应验算组合塔施工期和运营期结构整体稳定性，弹性屈曲稳定安全系数不宜小于 4，当不能满足弹性屈曲稳定要求时，应进行非线性稳定验算，其稳定系数不应小于 2。

5.4 正常使用极限状态验算

5.4.1 钢壳-混凝土组合塔截面刚度应按组合刚度计算，计算结构刚度时应考虑混凝土开裂的影响，组合截面刚度按下式计算。

弯曲刚度： $E_s I_s + 0.85 E_c I_c$

轴压刚度： $E_s A_s + 0.85 E_c A_c$

5.5 剪力连接件设计

5.5.1 钢壳-混凝土组合塔剪力连接件采用纵横双向钢筋混凝土榀，钢壳加劲肋布置间距应满足下式要求：

$$s_n / t_n \leq 40 \varepsilon_k \quad (5.5.1-1)$$

式中： s_n 为纵横肋布置间距（mm）； t_n 为外壁钢板厚度（mm）； ε_k 为钢号修正系数，取 $\sqrt{345 / f_y}$ 。

条文说明： 为保证钢壳不出现局部屈曲，对钢壳纵、横向加劲肋间距与钢壳外壁板厚度的比值进行规定。

5.5.2 剪力连接件竖向剪力设计值应满足下式要求：

$V_n \leq V_{pud}$ ， V_n 为单个钢筋混凝土剪力榀剪力设计值

$$V_s = \min \{ A f, b_e h_{c1} f_c \} \quad (5.5.2-1)$$

$$V_n = \frac{V_s}{n_f} \quad (5.5.2-2)$$

式中： V_s 是钢与混凝土交界面的竖向剪力（N）； A 是相邻连接件宽度上钢壳的截面积（mm²）； f 是钢壳材料的屈服强度（MPa）； B_e 是混凝土的有效宽度（mm）； h_{c1} 表示混凝土等效受压区高度（mm）； f_c 为混凝土抗压强度（MPa）； n_f 为该方向同一剪跨区段内配置的连接件数目。

竖向剪切承载力设计值取孔间钢板部分承载力和公路钢结构桥梁设计规范（JTG D64-2015）中对钢筋混凝土榀设计承载力规定的较低值，公式如下：

$$V_{pud} = \min \{ 1.8 h_{sc} \cdot t \cdot f_y, 1.4 (d^2 - d_s^2) f_{cd} + 1.2 d_s^2 \cdot f_{sd} \} \quad (5.5.2-3)$$

式中： V_{pud} 是单个钢筋混凝土剪力榀竖向抗剪极限承载力设计值（N）； h_{sc} 是指两孔间钢板宽度（mm），若钢板宽度大于孔径，需乘 0.7 折减； f_y 是指开孔板钢材的抗拉强度（MPa）； d 是指开孔直径（mm）； d_b 是指芯棒钢筋直径（mm）； f_{yb} 是指芯

棒钢筋的屈服强度 (MPa); f_{cd} 是指混凝土的抗压强度设计值 (MPa)。

条文说明: 为便于混凝土浇筑振捣, 加劲肋钢筋孔直径不宜小于 60mm。

5.5.3 钢筋混凝土剪力樨抗拉拔设计值需满足下式要求:

$$P_n \leq P_d \quad (5.5.3-1)$$

$$P_n = \alpha_n t_p s_p f_{py} \quad (5.5.3-2)$$

式中: P_n 是单孔钢筋混凝土樨剪力键的拉拔力设计值 (N); α_n 是连接件拉力系数, 可取为 0.03; t_p 是组合桥塔等组合构件中连接件附着的单片钢板厚度 (mm); s_p 是钢筋混凝土樨剪力键水平方向的间距 (mm); f_{py} 是钢板钢材的屈服强度 (MPa)。

P_d 为单个薄板钢筋混凝土樨剪力键的抗拔承载力可参照下式进行计算:

$$P_d = 1.8 l_m t f_y \quad (5.5.3-3)$$

式中: P_d 是每孔平均抗拔极限承载力设计值 (N); l_m 是指孔底距和孔边距中较小值, 若孔底距大于孔径, 需乘 0.7 折减 (mm); f_y 是指开孔板钢材的抗拉强度 (MPa)。

上述公式作为薄钢筋混凝土樨剪力键抗拔承载力计算公式的适用条件为:

$$t \cdot l_m < \frac{0.58 A_{tr} f_{yb} + 1.8 \pi (d/2)^2 \sqrt{f_{ck}} + 1.02 t h_{sc} f_{ck}}{f_u} \quad (5.5.3-4)$$

式中: A_{tr} 是指贯穿钢筋的截面积 (mm^2); f_{yb} 是指贯穿钢筋的屈服强度 (MPa); f_{ck} 是指混凝土的抗压强度标准值 (MPa); h_{sc} 是指开孔间距 (mm)。

条文说明: 钢壳与混凝土协同工作的关键在于: (1) 钢壳的屈曲临界应力应大于屈服应力, 防止钢壳弹性屈曲; (2) 钢壳与混凝土间基本无剪切滑移, 钢壳与混凝土组合截面的应变符合平截面假定。剪力连接件的设计应同时满足钢混界面抗剪和防止钢壳弹性屈曲的要求。

式 5.5.3-4 通过大量钢筋混凝土樨试验数据回归拟合而成, 用于判断开孔钢板和钢筋混凝土樨的破坏模式及薄钢筋混凝土樨剪力键抗拔承载力计算公式的适用条件。

5.6 钢壳-混凝土组合塔施工工期设计

5.6.1 钢壳-混凝土组合塔结构施工建造的主要工作包含附筋钢结构加工、钢筋定位与安装、现场钢结构拼装连接、钢筋连接、混凝土浇筑并养护五个部分。

条文说明：工作量较大也较为复杂的是附筋钢结构加工以及钢筋定位与安装，这两部分工作应放在工厂内精确且可控地完成，以确保施工质量。

5.6.2 钢壳节段吊装过程，钢壳体总体应力、变形量等应满足以下规定：

1 钢壳壳体应力 $\sigma \leq f_y$ ， f_y 为钢壁板屈服强度（MPa）；

2 内外壳变形差 $\delta \leq \frac{1}{2000}h$ ， h 为节段高度（mm）。

条文说明：钢壳-混凝土组合塔中的钢壳节段相比纯钢塔节段，壁板厚度较薄，刚度较小，因此吊装变形的控制是设计的重要内容，为控制钢壳吊装变形，需在钢壳内外壁之间设置型钢桁架，加强内外壁之间的连接，提高整体刚度。

型钢桁架包括水平桁架和竖向桁架，水平桁架在截面角点处布置成稳定三角构造，以提高水平截面抗扭和抗畸变性能；竖向桁架用于提高钢壳节段竖向稳定性。桁架系统布置，应留出上下、左右浇筑通道，确保浇筑过程中，人员能达到任何位置，以提高混凝土浇筑质量控制。

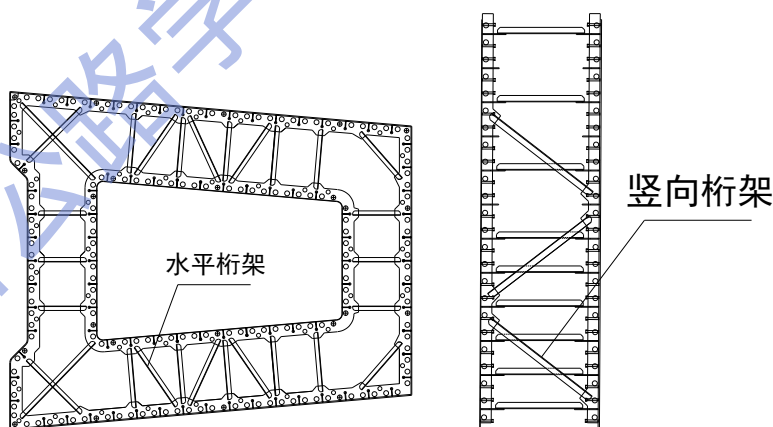


图 5.6.2 组合塔型钢桁架示意

5.6.3 钢壳节段混凝土浇筑过程验算中应考虑钢壳、新浇筑混凝土、钢筋自重；新浇筑混凝土对钢壳壁板的侧压力；振捣混凝土时产生的振动荷载；混凝土入壳时产生的水平方向的冲击荷载；其它可能产生的荷载，如风荷载、雪荷载、冬季保温设施等作用力。

5.6.4 钢壳节段混凝土浇筑过程中钢壳内钢壳外壁板应力及变形应满足以下规定:

1 混凝土浇筑时, 由纵、横向加劲形成的钢壳壁板区格中, 内、钢壳外壁板区格变形应符合下列规定:

$$\frac{\delta'_{out}}{b} \leq \frac{1}{800} \quad (5.6.4-1)$$

$$\frac{\delta'_{in}}{b} \leq \frac{1}{400} \quad (5.6.4-2)$$

式中:

δ'_{out} ——钢壳外壁板钢加劲板区格内的最大变形 (mm);

δ'_{in} ——钢壳内壁板钢加劲板区格内的最大变形 (mm);

b——钢加劲板区格的较小边长 (mm)。

2 混凝土浇筑时, 钢壳内、钢壳外壁板最大横向变形应符合下列规定:

$$\frac{\delta_{out}}{h} \leq \frac{1}{2000} \quad (5.6.4-3)$$

$$\frac{\delta_{in}}{h} \leq \frac{1}{1000} \quad (5.6.4-4)$$

δ_{out} ——钢壳外壁板最大横向变形 (mm);

δ_{in} ——钢壳内壁板最大横向变形 (mm);

h——节段高度 (mm)。

3 钢壳应力控制

钢壳外壁板平均应力 $\sigma_{out} \leq 0.3f_y$, f_y 为钢壁板屈服强度 (MPa);

钢壳内壁板最大应力 $\sigma_{in} \leq f_v$, f_v 为钢壁板设计强度 (MPa);

型钢桁架应力 $\sigma_{truss} \leq f_v$, f_v 为型钢桁架设计强度 (MPa);

条文说明: 钢壳及其加劲通过水平桁架、竖向桁架先连接成整体, 至现场安装完成后又作为桥塔混凝土的模板使用, 钢壳系统是钢壳-混凝土组合塔的基础, 必须保证施工期的受力安全及刚度要求。钢壳-混凝土组合塔施工期设计内容主要包括钢壳节段整体吊装和混凝土浇

筑两个过程中的结构安全验算及变形控制。

中国公路学会标准征求意见稿

6 施工

6.1 一般规定及总体工艺流程

6.1.1 钢壳-混凝土组合塔施工应按照《公路工程施工安全技术规范》(JTG F90-2015)要求,编制专项施工方案。施工方案需涵盖钢壳制作与运输、现场施工、测量监控、施工期大型设备设施的安装拆除等内容,并对钢壳节段定位安装、混凝土浇筑等施工控制要点予以明确。

6.1.2 在正式施工前可开展钢壳-混凝土组合塔实体模型试验,对组合塔钢壳节段加工、匹配、现场连接、混凝土浇筑等工艺及实施效果进行综合验证,形成标准化施工工艺。

条文说明: 钢壳-混凝土组合塔结构新颖,施工经验尚需积累总结,为确保组合塔施工质量,在正式施工前,可通过模型试验对主要施工工艺进行验证。

有关工程实践表明,在正式施工前组织木模实体试验与足尺模型试验可有效验证施工工艺。

木质模型做为制造工艺研究的实体,对两端折弯钢筋板单元的钢筋后弯施工、带弯钢筋板单元的钢筋穿入、节段分块方案、节段组拼顺序、节段施工空间等方面进行试验和验证。

足尺模型试验选取两节塔柱并按照拟定的制作工艺进行试验,模拟制造完成后的现场钢壳节段吊装、节段匹配、钢筋连接、环缝焊接、混凝土浇筑,并进行了相关质量检验检测。通过足尺模型试验,对组合塔施工工艺进行了综合验证,形成了指导后续施工的工艺标准。

6.1.3 组合塔节段加工工艺流程见图 6.1.3。

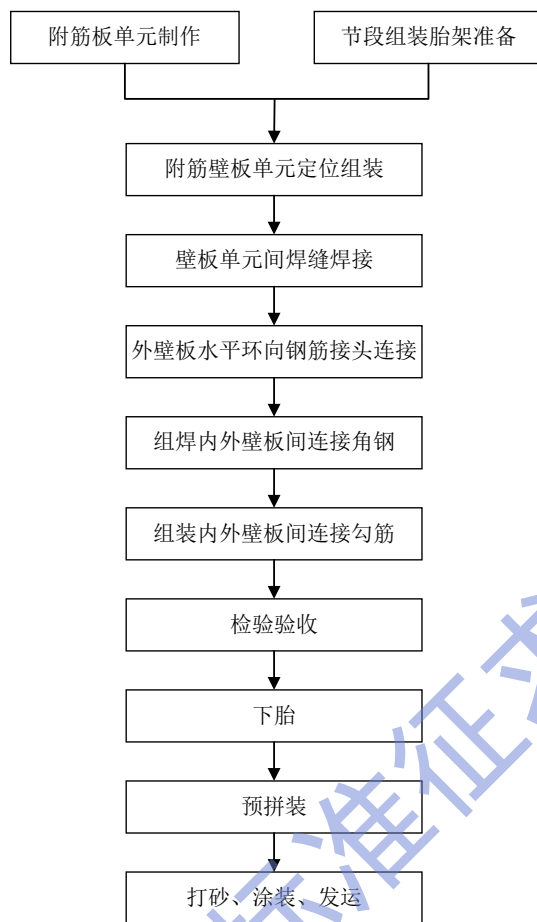


图 6.1.3 组合塔节段加工工艺流程图

6.1.4 组合塔标准节段施工主要包括节段吊装、定位调整、节段连接、混凝土施工等工序，具体见图 6.1.4，首节段钢壳施工工艺应根据其与承台设计的锚固形式而定。

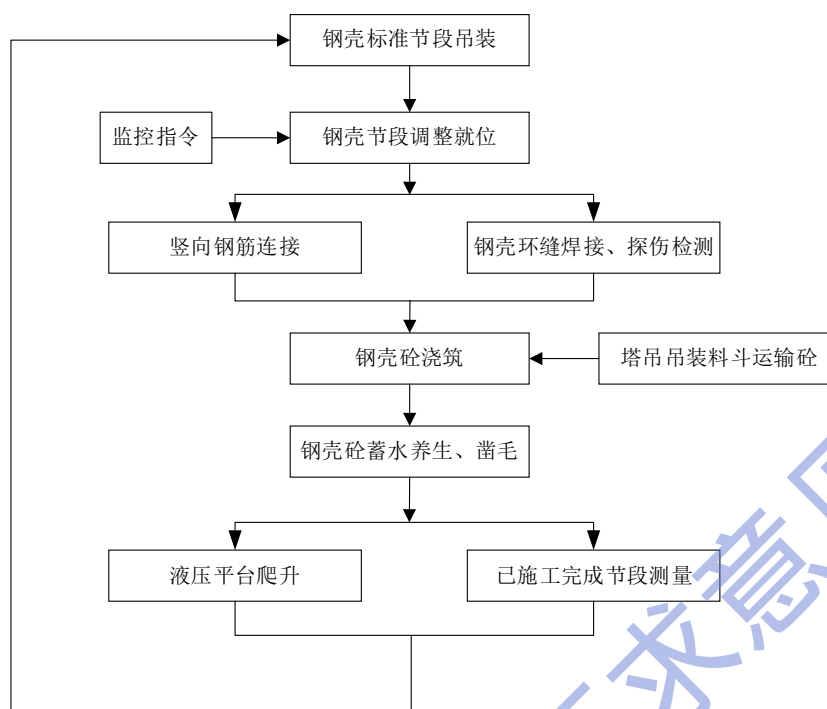


图 6.1.4 组合塔标准节段施工工艺流程图

6.1.5 钢壳节段安装的吊点及临时匹配件应在厂内制作时设置，在吊装前应对节段构件起吊的稳定性进行验算。

6.1.6 钢壳-混凝土组合塔架施工、液压爬升施工平台安拆及使用、塔吊安拆及其他大型吊装设备首次吊装等现场施工危险性较大的工序，应在开工前组织安全条件验收。

6.1.7 应对裸塔状态下，施工作业所用的塔吊、液压爬升施工平台及附墙等结构进行抗风安全性验算与设计，并制定相应的预案和措施。

6.1.8 钢壳制造阶段，应根据产品结构形式、制造工艺，设计和制作满足刚度和精度要求的工装、胎架。

6.1.9 组合塔现场施工所用的施工平台需进行专项设计；施工平台正式使用前，需通过荷载试验检测主要构件的受力情况，试验通过后方可正式投入使用。

6.1.10 钢壳节段运输及吊装过程中，应确保钢壳节段及预留预埋、匹配测量控制点和基线等附属构造的完好。

6.1.11 夏季高温季节施工时，现场可采取工业冷风机对钢壳内作业空间进行通风降温，保证工人作业安全和施工质量。

6.2 施工设备

6.2.1 根据组合塔钢壳钢结构件零件特点和加工精度要求，选择下料、加工设

备。

6.2.2 根据组合塔钢壳结构特点、板厚、组焊精度、变形控制要求等选择组焊设备，并配合必要的加劲定位工装、角度样板、焊接反变形工装、附筋定位工装等。

6.2.3 工厂加工制造设备应满足下述要求：

- 1 钢壳制造过程中宜选择智能化的划线设备，划线设备划线公差不宜大于0.5mm。
- 2 组合塔钢壳壁板单元制造应选择满足精度要求的智能化组装和焊接设备。
- 3 附筋折弯设备应能控制折弯半径和角度。
- 4 厂内吊装、运输设备应能满足强度、刚度、提升高度等要求，并根据节段重心位置，设计吊具。

6.2.4 现场施工设备应满足下述要求：

- 1 钢壳节段吊装应综合考虑陆域、水域的条件因素，选择适宜的吊装设备。
- 2 钢壳节段桥位现场吊装所采用的吊具强度、刚度、稳定性需满足规范要求；吊具应具有适应钢壳重心位置变化的调节功能；吊点宜连同钢壳节段同步设计、加工，且采用高强螺栓连接。
- 3 为避免或减少外置施工升降机在塔外壁上的预留预埋，以提高塔身外观质量，可结合塔内永久升降机设计，设置永临结合的塔内施工升降机。
- 4 钢壳-混凝土组合塔的现场节段安装作业平台，宜采用轻型液压整体自爬升施工平台，以减少对塔造成的预留预埋，并实现平台标准化、模块化安装和拆卸。轻型液压整体自爬升施工平台的设计、制造、安装、使用、维护保养应符合《液压爬升模板工程技术规程》（JTJ/T195-2018）中相关规定。施工平台的强度、刚度、稳定性需满足规范要求。

液压整体自爬升施工平台宜采用智能液压控制系统，实时监测液压自爬升施工平台位移同步性、顶升油缸压力等指标。

条文说明：通航条件满足要求的条件下，下塔柱较重节段一般采用浮吊吊装；桥位处于陆域或水域不具备通航条件的桥塔，下塔柱较重节段一般采用履带吊吊装；其余节段宜采用塔吊吊装。

钢壳-混凝土组合塔施工，应考虑塔内升降机永临结合设计和使用，可借用塔内永久升降

机电、轨道安装塔内施工升降机。

有关工程施工过程中，研发了轻型液压整体自爬升施工平台。平台主要承受施工作业人员、小型机具、焊接设备等荷载；液压整体自爬升施工平台通过轨道附着在组合塔外壁预埋件，组合塔外壁预埋预留在钢结构加工厂完成。

6.3 附筋钢壳零件及板单元加工

6.3.1 附筋钢壳的零件加工包括钢结构零件加工和附筋加工，应满足以下要求：

1 钢结构零件切割、矫正、弯曲、边缘加工、制孔等要求应满足《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）和《铁路钢桥制造规范》（QC/R 9211-2015）的要求。

2 采用机械直螺纹套筒连接的钢筋，加工、连接、安装精度及质量要求应满足《钢筋机械连接技术规程》（JGJ 107—2016）中Ⅰ级接头的规定，其余钢筋加工应满足《公路桥梁施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）的要求。

6.3.2 板单元件的加工应满足以下要求：

1 板单元为薄壁密肋结构，宜采取反变形、结构自约束、刚性外约束、机械焊、同向对称焊等工艺措施减小焊接变形，提高加工精度。

2 竖向加劲板的栓接孔，宜采用数控钻等措施控制制孔精度。板单元组装时宜以孔群为基准进行定位组装，保证栓接精度。

3 每次组装前应对组装胎架的外形尺寸精度等进行检查。

条文说明：组合塔为薄壁钢壳，板厚小，易产生较大的焊接变形，影响节段组拼精度，需采取适当控制措施。

有关工程实践中，设计钢壳内壁板板厚为6mm，外壁板为12~14mm，板单元同时组焊水平加劲和竖向加劲，为单侧密集肋板结构，焊缝面积占壁板面积10%，焊缝重占结构重量的3%，且焊有大量剪力钉，焊接变形控制难度大。为此外壁板采用了加劲分布组焊工艺，在反变形胎架上，先组装竖向加劲，实施机械焊接，再组装水平肋，对称焊接控制焊接变形；内壁板采用“双约束”焊接，即竖加劲和水平加劲一起组装后，利用纵横加劲自约束结构体系及胎架刚性临时固结的外约束措施，控制焊接变形，保证加工精度。

6.3.3 附筋板单元制造应满足以下要求：

1 无弯钩或单侧弯钩钢筋，可直接穿入钢筋定位孔定位；两侧弯钩钢筋，宜单侧折弯，穿入加劲肋定位孔后再折弯另一侧弯钩。见图 6.3.3-1 所示。

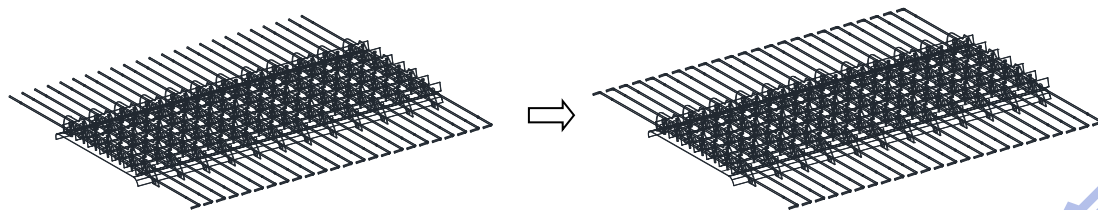


图 6.3.3-1 附筋安装示意（框线图）

2 为保证钢壳内竖向钢筋位置定位精度，宜采用钢筋定位工装定位附筋，机械连接接头定位偏差宜大于 1mm，且不应出现转角。

条文说明：对需要穿入板单元竖向加劲板孔中定位的钢筋，有两侧弯钩时，通常弯钩与钢筋孔干涉，这种情况可先折弯一侧弯钩，穿入钢筋孔后，再折弯另一侧弯钩。

竖向钢筋位置精度要求高，节段间接头采用机械连接，需用钢筋定位工装进行定位，否则混凝土浇筑时，钢筋会受扰动而出现移位情况，将无法保证钢筋接头连接质量。

有关工程实践表明，采用竖筋定位样板和定位卡座定位竖筋，即根据竖筋间距不同，制作不同孔距附筋定位样板，定位样板卡固在竖筋端头螺纹丝扣处，实施对竖向钢筋的精确定位，再使用槽型定位工装搭配定制螺母，固定附筋水平位置，竖向位置可调节。板单元阶段利用定位样板粗定位，节段拼装时二次精确定位，并预连接钢筋接头，保证节段间竖筋定位相对精度达 1mm 以内。

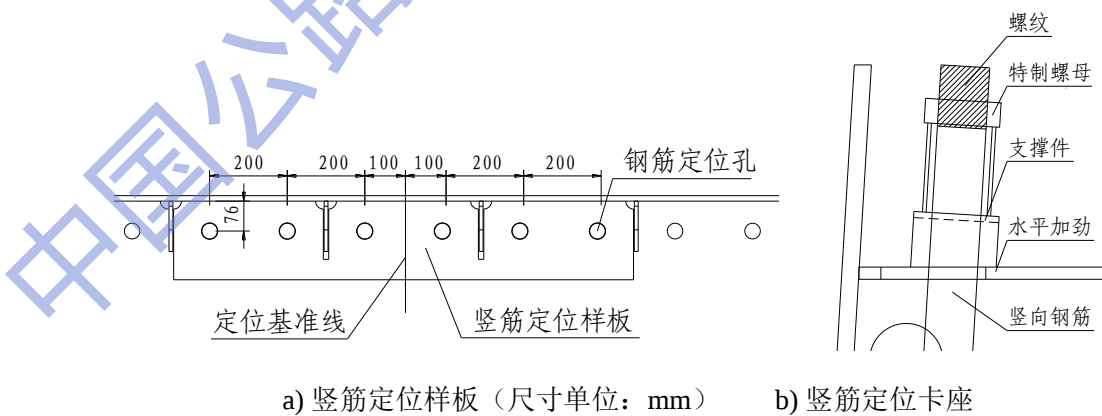


图 6.3.3-2 附筋定位样板及定位卡座示意

6.4 附筋钢壳节段组装与预拼装

6.4.1 附筋钢壳节段组装胎架应满足以下要求：

1 应结合组合塔钢壳节段的结构特点、外形尺寸，制作专用组装胎架，胎架应具备调整定位和支靠内、外壁板单元的功能。

2 胎架刚度和承载力需满足相关规范要求，以保证总拼节段的外形尺寸精度。

6.4.2 钢壳节段宜采用立式组装，组装过程中控制要点应符合下述规定：

1 内外壁板附筋板单元应利用胎架定位，控制内外壁板之间的间距、箱口尺寸及其与大地倾斜角度。钢壳内各层水平钢筋机械连接接头应对正，并用施拧设备施拧。

2 应采取对称施焊等焊接工艺措施，采用定位约束工装，控制节段焊接变形，保证节段焊后尺寸。距焊缝较近钢筋，应采取防护措施，避免焊接过程对塔壁附筋造成烧伤等不利影响。

3 钢壳节段组装允许偏差宜符合表 6.4.2 的规定。

表 6.4.2 钢壳节段组装允许偏差

检验项目	允许偏差 (mm)
高 度*	± 2.0
断面尺寸 (外壁)*	端口: ± 2.0 其它: ± 4.0
内外壁间距	端口: ± 4.0 其它: ± 6.0
水平及竖向加劲位置	± 2.0
加劲垂直度 (倾斜度)	≤ 2.0
横断面对角线差	≤ 5.0
锚点位置	± 2.0
锚箱角度	0.1°
扒筋等构造钢筋间距	± 20
旁弯	≤ 4.0

注：表中*项目的组装允许偏差是指除工艺量外的公差。

6.4.3 组合塔钢壳节段预拼装应符合以下规定：

1 钢壳预拼装应在专用的预拼装胎架上进行。应在相邻节段接口间设调整装置，进行高度、线形、接口匹配等项的调整，每次预拼装应尽量减少高度、垂直度实测偏差的同方向积累。

2 钢壳节段预拼装检测合格后，组装节段间的临时匹配件、导向板及临时吊耳等，并按规定打号。

3 组合塔钢壳节段预拼装检验标准应符合表 6.4.3 的规定。

表 6.4.3 组合塔钢壳节段预拼装检验

项 目	允许偏差 (mm)	条 件	检测工具及方法
预拼装长度	± 4.0	两端节段横基线间距	钢盘尺、弹簧称
轴线错位	≤ 1.0	相邻节段纵基线对位偏差	钢板尺
接口错边量	外壁板外侧 ≤ 0.5 (角部允许最大错边 1.0)	相邻节段壁板错边	钢板尺
	其余部位 ≤ 2.0		
轴线偏离度 (纵、横桥向)	$\leq L/6000$	L (m) - 预拼装长度	钢板尺、钢丝线 (经纬仪)、紧线器

6.4.4 钢壳的涂装体系应根据桥址处的气候、湿度、盐度等环境因素和防腐年限要求确定，材料应性能可靠、防蚀性强、耐候性好。

防腐涂装应符合设计及《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T722-2008) 规定。

6.5 附筋钢壳的现场安装

6.5.1 首节段钢壳安装

组合塔与承台连接可采用埋入式或非埋入式。当采用埋入式锚固方案时，首节钢壳安装应采取以下措施：

- 1 应于承台内设置预埋钢筋定位装置，提高预埋钢筋的定位精度。
- 2 应在承台内设置首节钢壳定位装置，定位装置应与首节钢壳在工厂内匹配制造。
- 3 应根据首节钢壳在承台内预埋钢筋位置及高程，对钢壳内预制预装的主筋位置及长度在加工厂内进行复核匹配，满足精度要求后，最终精确定位承台内预埋钢筋的位置。
- 4 首节钢壳内竖向主筋与承台内预埋钢筋宜采用锥套锁紧钢筋机械接头，以保证钢筋接头连接质量。
- 5 为保证首节钢壳安装精度，宜利用 BIM 技术建模开展钢筋碰撞及定位分析，保证首节段钢壳预埋钢筋精确定位。

条文说明：有关工程实践中，首节钢壳利用预埋至承台中的定位支架进行定位，定位支

架与首节段采用栓接，定位支架与首节段预拼并验收合格后配钻栓接孔，并标记工地安装匹配位置信息。

锥套锁紧钢筋机械接头连接工艺为将连待连接钢筋插入锁片两端、对中顶紧保持架；将锥套套入锁片的两端，用专用工具向内夹紧。连接允许竖向偏差 0~20mm，轴线偏差 0~20mm。

锥套锁紧钢筋机械连接技术适用于钢筋已经定位的连接，接头性能达到 I 级接头的性能；连接质量可靠，现场连接质量通过外观目测即可检测、判定；连接高效、快捷、方便。

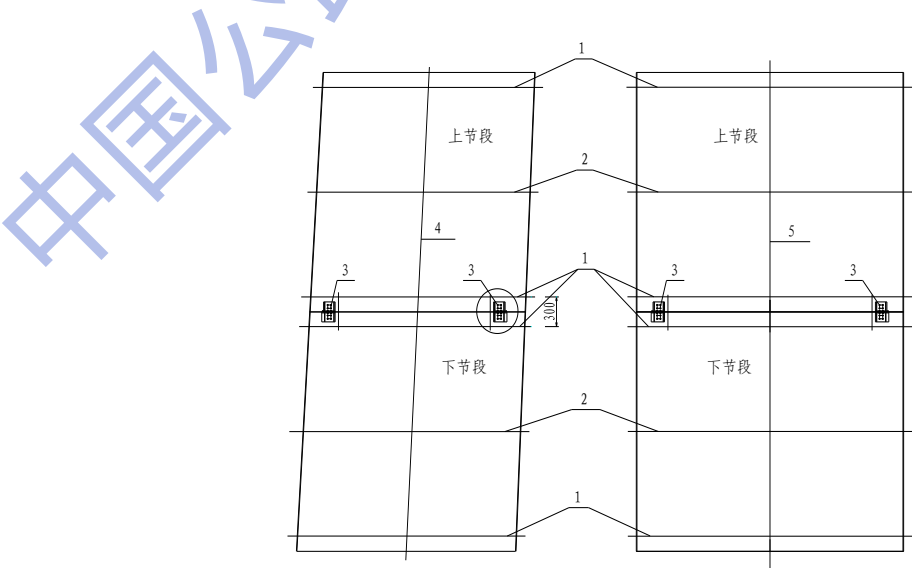
6.5.2 首节塔钢壳安装时，应采用全站仪和水准仪，对轴线平行偏位、顶面高程、相邻两定位座高程允许偏差等进行检测，允许偏差应符合表 6.5.2 的规定。

表 6.5.2 首节塔钢壳安装检测项目、检测范围及标准

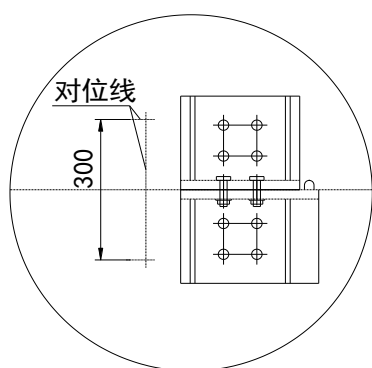
检测项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
轴线平行偏位 (mm)	顺桥向	5	全站仪：每节段 4 处
	横桥向	5	全站仪：每节段 4 处
横桥向与理论横桥向偏差(mm)		±3	全站仪：每节段 2 处
纵桥向与理论纵桥向偏差(mm)		±2	全站仪：每节段 2 处
顶面高程(mm)		±5	全站仪：每节段 4 处
相邻两定位座高程偏差(mm)	横桥向	1	水准仪：每节段 2 处
	顺桥向	2.4	水准仪：每节段 2 处

6.5.3 标准节段钢壳安装工艺应符合以下规定：

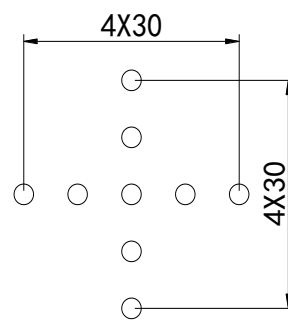
1 根据钢结构加工厂预拼时确立的钢壳节段匹配关系，利用钢壳节段上的匹配件、检查线进行现场安装定位。



a) 节段匹配示意



b) 匹配件结构形式



c) 样冲眼样式

1-检查线；2-水平基线；3-匹配件；4-侧壁板竖基线；5-横向中心线

图 6.5.3 钢壳节段“1+1”立式预拼装（尺寸单位：mm）

2 节段上匹配件应与节段紧密连接，避免出现松动。节段上应设置测量检测基准线，校核匹配效果。

3 倾斜组合塔架设时，应验算组合塔内力，控制成塔线形，分高度设置水平横撑或拉杆。在架设安装过程中，分阶段对已成的组合塔采取必要的抑振措施。

4 节段现场吊装，应在匹配件处于半接触状态时，进行定位冲钉施打。应保证定位冲钉顺利打入，安装完毕后相邻节段匹配件应确保相互接触。

条文说明：根据有关工程实践经验，组合塔钢壳节段工厂内采用 1+1 立式预拼，在节段环缝处设置了成对角钢式匹配件和对位检查线，工地吊装时利用节段间匹配件、对位检查线，支撑和定位吊装节段，以恢复钢壳节段工厂立式预拼时确立的节段间空间几何关系。

6.5.4 在安装含横梁节段前，根据设计、监控要求调整两塔肢的间距，可在含横梁节段的前一节段对称设置临时钢绞线作为调节拉杆。

条文说明：针对“A”型钢壳-混凝土组合塔，中上塔柱结合段施工时，在合龙段前一节段需设置主动撑调节装置，通过千斤顶施顶调节装置，调节组合塔两肢横桥向错台，实现组合塔中、上塔柱精准合龙。组合塔合龙调节装置见图 6.5.4-1、6.5.4-2。

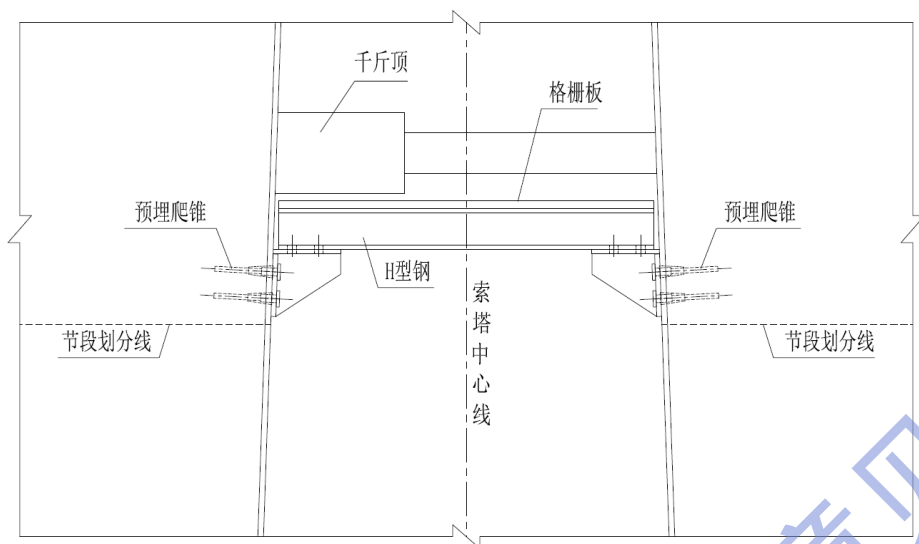


图 6.5.4-1 纵向调节装置

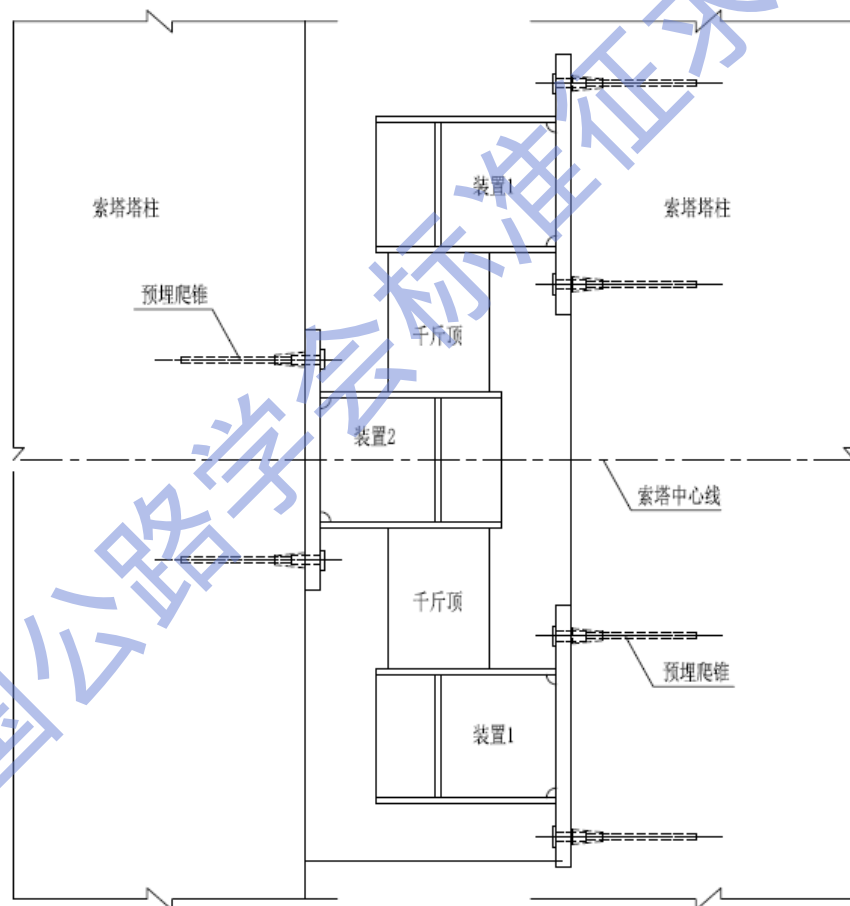


图 6.5.4-2 横向调节装置

6.5.5 钢壳节段竖向钢筋连接

1 竖向主筋的后场安装定位应采用工装形式，在竖向为活动状态，可进行上下位置的微调；钢壳吊装前，可将已安装桥塔节段竖向主筋直螺纹套筒逐一旋拧

松动，以便于相邻节段主筋连接。

2 钢壳节段在预拼时，所有竖向钢筋须进行匹配连接；为便于现场安装时对比预拼装时竖向钢筋连接的状态，应对竖向钢筋端头做标记线。

3 钢壳节段定位安装完成之后进行竖向钢筋连接时，通过钢筋上标记检查钢筋连接是否到位。

条文说明：有关工程实践表明，钢壳-混凝土组合塔竖向主筋以钢筋端头为基准，在 100mm 处划出标记线，长丝、短丝侧均标记，预拼装时测量标记线间距 L ，即 $L=200+t$ ， t 即为预拼装时竖向钢筋实际间隙，由于钢筋套筒较标准长度加长 10mm 特制，则 $L\leq 210\text{mm}$ 即为合格，测量数据后将 L 值范围记录在节段移交单上，作为现场安装时参考值，具体详见图 6.5.5-1。

竖向钢筋连接时，测量标记线间距 $L1$ ， $L1\leq 210\text{mm}$ 即与预拼装时状态一致，具体详见图 6.5.5-2。钢筋连接检验合格后，应逐根留有影像资料和记录。

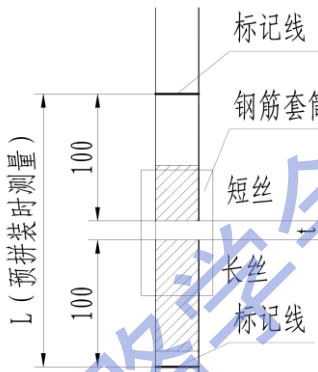


图 6.5.5-1 预拼装钢筋标记线

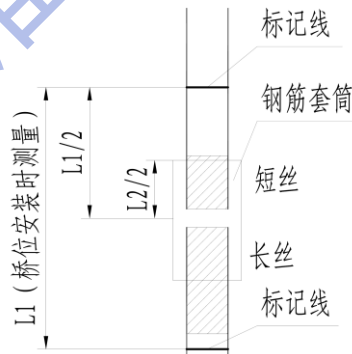


图 6.5.5-2 现场安装钢筋标记线

6.5.6 钢壳节段环缝焊接应符合以下规定：

1 焊缝在施焊前，应按照焊接工艺要求对接板面高差调整到允许偏差范围后方可施焊。

2 焊缝焊接工地环境温度、相对湿度、风力、特殊天气、除锈等要求应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）或《铁路钢桥制造规范》（QC/R 9211-2015）的要求。

6.5.7 钢横梁安装工艺应符合以下规定：

1 组合塔塔肢之间设置钢横梁时，钢横梁与钢壳节段之间宜采用螺栓连接形式。

2 钢横梁安装前，通过适度调节钢横梁下的塔肢节段两肢间设置的临时钢绞线拉杆，使两塔肢的间距满足下横梁的架设安装要求，以完成下横梁与塔柱的连接。

3 采用钢板尺测量钢横梁与节段之间距离及扭转，对拼接板进行配孔，将钢横梁与对应节段连接后，再根据监控指令张拉钢横梁体外预应力。

4 钢横梁安装完成后，体外预应力筋的张拉顺序应严格按设计规定进行，张拉时应保证结构或构件对称均匀受力。

5 可通过千斤顶施顶设置的主动撑调节装置，调节组合塔两肢间距；通过千斤顶施顶纠偏装置，调节组合塔两肢之间平面错台，实现钻石型组合塔钢合龙段的安装。

6.6 混凝土施工

6.6.1 钢壳-混凝土组合塔补偿收缩混凝土配合比设计原则包括：

1 采用大掺量矿物掺合料，降低胶凝材料用量和水泥用量，降低混凝土的绝热温升；

2 调整水泥、粉煤灰、矿粉掺合料组成，改善混凝土的工作性能和耐久性；

3 适当掺加抗裂剂，减少混凝土收缩，提高体积稳定性，进而提高混凝土自身的抗变形和抗开裂能力。

6.6.2 综合考虑组合塔混凝土施工质量、环保、经济等因素，确定组合塔塔柱节段混凝土输送方式。

条文说明：为更好保证桥塔混凝土性能，组合塔塔柱宜采用塔吊吊装料斗输送混凝土的工艺。

6.6.3 为保证混凝土与钢壳内壁连接质量，在混凝土浇筑前，应对待浇筑混凝土钢壳节段内壁板进行充分湿润。

6.6.4 钢壳节段混凝土浇筑施工时，振捣棒应插入加劲板上预留的振捣孔实施混凝土振捣作业，以保证混凝土浇筑施工质量。

6.6.5 混凝土施工缝凿毛质量应满足施工规范要求。为提高凿毛清渣效率和效果，凿毛后的混凝土渣可采用吸尘器进行清理。

6.6.6 为防止混凝土表层失水过快而引起混凝土与钢壳之间产生裂隙，混凝土初凝后及时对顶面混凝土应采用蓄水养护，蓄水深度宜大于 10cm。

6.6.7 组合塔在冬季低温季节施工混凝土时，可采取对组合塔节段外壁包裹帆布和节段顶部覆盖棉被的保温措施。

中国公路学会标准征求意见稿

7 施工监控

7.1 一般规定

7.1.1 钢壳-混凝土组合塔安装前应建立专用施工控制网。平面控制网的测量等级按《公路勘测规范》(JTG C10)二等控制网的规定,最弱相邻点点位中误差不应大于 5mm。高程测量等级按国家二等水准的规定,各项要求应符合《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897)。

7.1.2 施工测量必须采用统一的施工坐标系统和高程基准。施工坐标系统和高程基准必须与设计图纸保持一致。当采用桥轴线独立坐标系统或高程基准时,应建立确定的转换关系。

7.1.3 专用控制网应连测至少 3 个控制点,以保证测量基准的统一性。

7.1.4 测量平面坐标系宜采用桥轴坐标系,高程采用规定的高程基准;测量仪器宜采用测角精度不低于 0.5"、测距精度不低于 1mm+1mm/km 的全站仪。

7.1.5 组合塔钢壳节段现场安装施工监控目的为恢复节段工厂预拼的线型;识别现场出现的误差;调整不可恢复的误差。

7.1.6 施工监控以几何控制为主要原则,确保塔的裸塔线形满足设计和规范要求。

7.1.7 组合塔施工过程主要以控制塔的轴线点倾斜偏位为主,安装过程中的焊缝收缩在厂内制造时予以补偿,安装过程中塔高度控制需考虑塔的压缩量及混凝土收缩徐变等因素。

7.1.8 监控下塔柱拉杆及中塔柱主动横撑的荷载及相关位置的变形,保证下横梁安装到位及中塔柱顺利合龙。

7.1.9 应合理配置组合塔主动横撑的位置及荷载,在确保组合塔合龙的前提下,优化组合塔应力控制截面弯矩水平。

7.2 施工测量

7.2.1 组合塔钢壳节段预拼装测量

1 粗调底节段至水平,并精调底节段主控轴线垂直度至设计要求,测量底节段水平基线,记录轴线坐标及水平基线高差;

2 利用临时导向件支撑并调整顶节段水平位置,确保顶底节段主控轴线对位精度满足设计要求。对位精度无法达到上述指标时制造单位应通知监控方,同时

记录顶底口轴线数值；

3 精确调平顶节段水平基线，水平基线任意两点间高差不得大于 $1/6000$ ；

4 检查顶节段轴线的垂直度，记录垂直度偏差，并将主控轴线垂直度调整至设计要求；

5 根据焊缝宽度要求对连接端面进行修边，并完成钢筋预拼连接；

6 在钢壳节段接缝处安装已经配合好的成套匹配件，拆除临时导向件，在各匹配件旁上下壁板刻画竖向间距检查线，并记录检查线初始间距。

7.2.2 组合塔首节钢壳定位座安装测量

1 定位座为首节钢壳预埋在承台内的定位装置，测量内容应包含平面位置测量、高程测量、定位座的顶面高差以及相邻定位座的相对高差测量。

2 定位座测量需符合下列规定：

1) 平面位置测量宜采用极坐标测量法，平面位置偏差应不大于 2mm ；

2) 高程测量宜采用几何水准测量，高程偏差应不大于 5mm ；

3) 定位座的顶面高差以及相邻定位座的相对高差测量宜采用几何水准测量，定位座高差及相对高差应不大于 1mm 。

3 所有定位座定位完成后应对其构成的几何图形的尺寸进行检核，检核方法应采用精密钢尺量距方式进行测量，尺寸偏差应不大于 2mm ；

4 定位座在加固过程中应进行跟踪测量，以保证定位成果准确。

7.2.3 钢壳节段安装测量与控制

1 钢壳节段安装测量的内容包含水平基线点相对高差、轴线点平面位置和高程及匹配件三维坐标。

2 钢壳节段安装测量

1) 钢壳节段安装的测点应与厂内预拼的测点一致；

2) 轴线点及匹配件的平面位置测量宜采用极坐标测量法，轴线点平面位置偏差应不大于 2mm ；

3) 轴线点及匹配件的高程宜按照二等水准精度要求施测，可采用精密三角高程法，测量误差不得大于 $\pm 1\text{mm}$ 。

3 测量时间应在温度稳定时段进行，日出后不得进行测量；测量时应记录风速、温度等气象数据。

4 组合塔施工超过 100m 后，应进行日照变形观测，观测时间不宜小于 24h 。

根据观测结果绘制周日变形曲线，以便指导施工。

7.2.4 钢横梁安装测量

1 钢横梁安装测量的内容包括塔肢顺桥向、横桥向轴线，塔肢高程及相对高差、塔肢距离等；

2 钢横梁安装测量应符合以下规定：

1) 塔肢轴线测量宜采用极坐标测量法，两塔肢顺桥向（横桥向）轴线的相对偏差应小于 2mm；

2) 塔肢高程测量要求同 7.1.4 要求，相对高差宜采用几何水准测量法，按照二等水准精度要求施测，相对高差应小于 2mm；

3) 塔肢距离测量可采用极坐标法测量标示点坐标反算距离，亦可采用精密钢尺量距方式测量。

7.2.5 成塔后需测量内容和方法要求如下：

1 成塔后应对塔顶偏位和垂直度进行测量；

2 塔顶的轴线测量宜采用极坐标测量法，高程测量可采用精密三角高程法；

3 测量时间宜选择在夜间温度稳定时，并需详细记录温度、气压等气象信息；

4 裸塔的垂直度计算可采用塔顶的轴线偏位进行计算，也可采用其他方法进行测量。

7.3 施工监控

7.3.1 基于钢壳-混凝土组合塔钢壳节段端面未进行机加工、钢壳较柔，易发生变形、存在焊接收缩影响、钢壳混凝土易受日照影响等条件因素，施工监控可采取如下对策：

1 以 1+1 节段工厂预拼为主，预拼重点在于避免误差累计；

2 通过对工厂匹配件预拼安装及桥位连接状况的监控，确保在桥位复原工厂的预拼线形；

3 考虑温度对预拼装及现场安装的影响；

4 考虑焊接收缩及混凝土浇筑对组合塔几何位置的影响。

7.3.2 施工监控内容主要包含监测和控制两方面，需根据工程情况采用针对性的测量和控制方法，并制定相应的控制标准。

条文说明：经相关工程实践研究，索塔设计下塔柱与中、上塔柱的断面形式和安装高度的不同，应采用不同的测量方法。

1. 下塔柱

下塔柱为带凹槽的六边形断面，为精确控制纵横向桥轴线垂直度偏差及节段高程，监控测点布置在断面轴线及匹配件位置，如图 7.3.2-1 所示： P_n 为匹配件测点， A_n 为轴线点。另外，水平基线测量时采用匹配件测点投影附近的点位，编号采用 L_n ， L_1 表示匹配件点 P_1 投影下的水平基线。

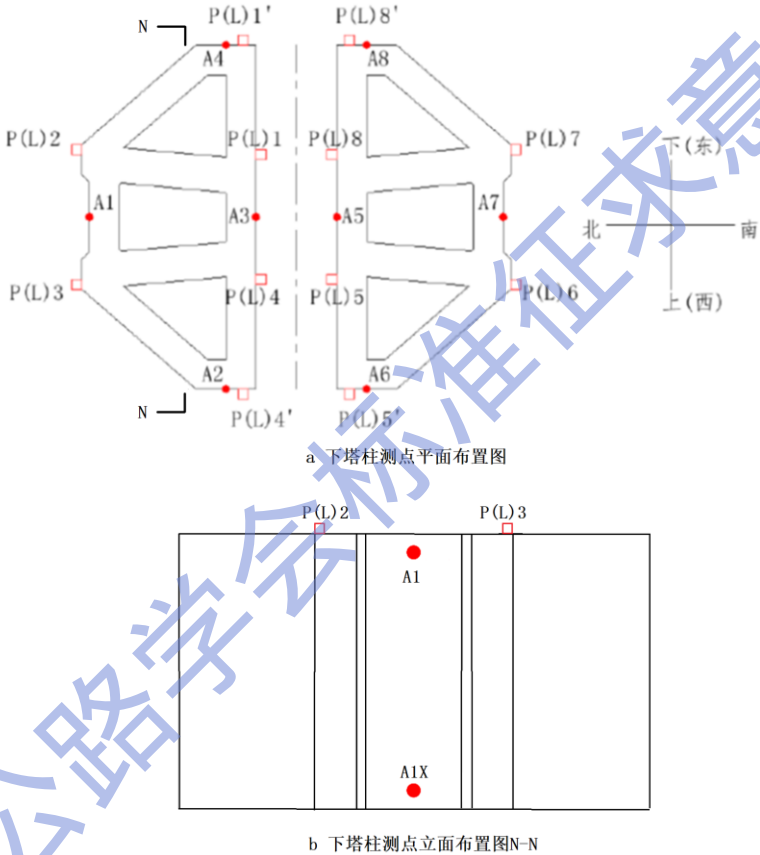


图 7.3.2-1 下塔柱测点布置

测量方法：

水平基线点：采用水准测量，记录各水平基线点相对高差。

轴线与匹配件测点：在预拼时测量匹配件测点和壁板上的轴线点的三维坐标。其中，匹配件测点高程测量方法为水准测量，平面采用现场桥轴坐标系。轴线测点测量结果应与理论坐标进行对比，其误差应小于 2mm，若误差超限，应对预拼坐标系及节段加工精度进行复查。标准节段可根据已安装情况，依次间隔 2 个节段采用水准测量匹配测点间的相对高差。

2. 中、上塔柱

中塔柱架设过程中，随着塔柱高度逐渐增加，将测站设置在已安装钢壳顶面的测量方式会产生较大的误差，同时有一定安全风险。在此期间，采用岸上设置测站的方式进行线形测量。其测量方案见图 7.3.2-2。

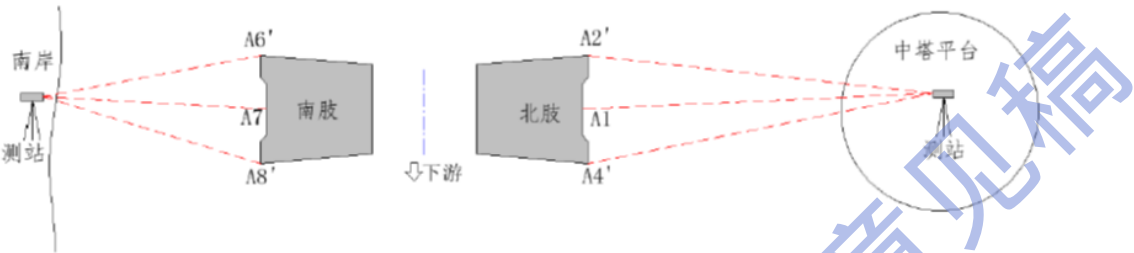


图 7.3.2-2 索塔安装现场测量方案示意（以南塔为例）

现场测量时所有测点均置于钢壳凹面上，A1、A1X 为轴线测点，A4'、A1、A2' 为高程测点，立面测点布置见图 7.3.2-3。

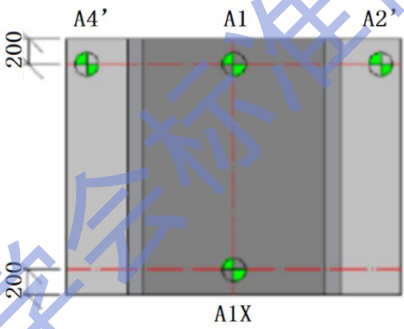


图 7.3.2-3 测点立面布置示意（以北肢为例，尺寸单位：mm）

7.3.3 钢壳各节段应以设计理论几何尺寸为无应力制造几何尺寸。制造过程控制宜采用 1+1 节段短线法立式匹配，在每轮预拼中要确保匹配的两个节段竖基线垂直并对齐。

7.3.4 组合塔钢壳节段现场安装采用逐段滞后控制方式，即在当前节段控制时修整上一节段的误差，到夜间再测量获得本节段的误差，本节段误差再通过下一节段控制时予以修整，以减少误差累计。

7.3.5 组合塔预拼装匹配件成套安装于刚度较大的部位，采用高强螺栓或焊接方式与塔壁固定。

条文说明：匹配件的作用是使得钢壳节段现场安装时节段间的连接恢复到厂内预拼装时的效果，匹配件现场安装流程见图 7.3.5。

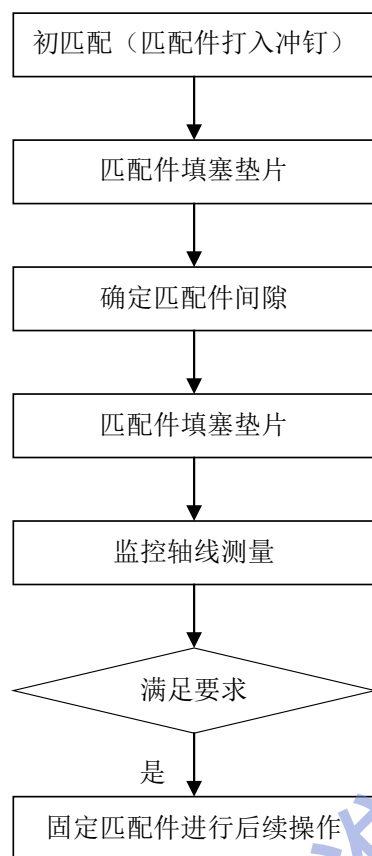


图 7.3.5 匹配件现场安装流程图

7.3.6 合龙控制包括横梁安装及横梁合龙控制。横梁与两个相连接节段在制造时共同匹配，在相邻节段安装完成、预应力张拉后，组合塔两肢间距与设计偏差及错台量需满足合龙控制要求。

7.3.7 钻石型组合塔中塔柱顶合龙段与两个相邻节段在制造时共同匹配。利用设计坐标测点的测量获得合龙距离及两塔肢错台量。通过调整主动横撑支顶力使得合龙距离与匹配时一致，通过调整错台千斤顶纠正两塔肢错台量。调整完成后即可进行合龙段安装。

7.3.8 组合塔钢壳节段安装过程中应在适当位置设置主动横撑，顶撑力的大小及拆除顺序均应研究确定，以实现对组合塔的力学控制，确保塔柱安装精确及安全。

7.3.9 需根据组合塔受力最优并满足横梁安装的目标进行主动横撑的位置及支顶力的确定。支顶力控制按照图 7.3.9 所示流程进行。

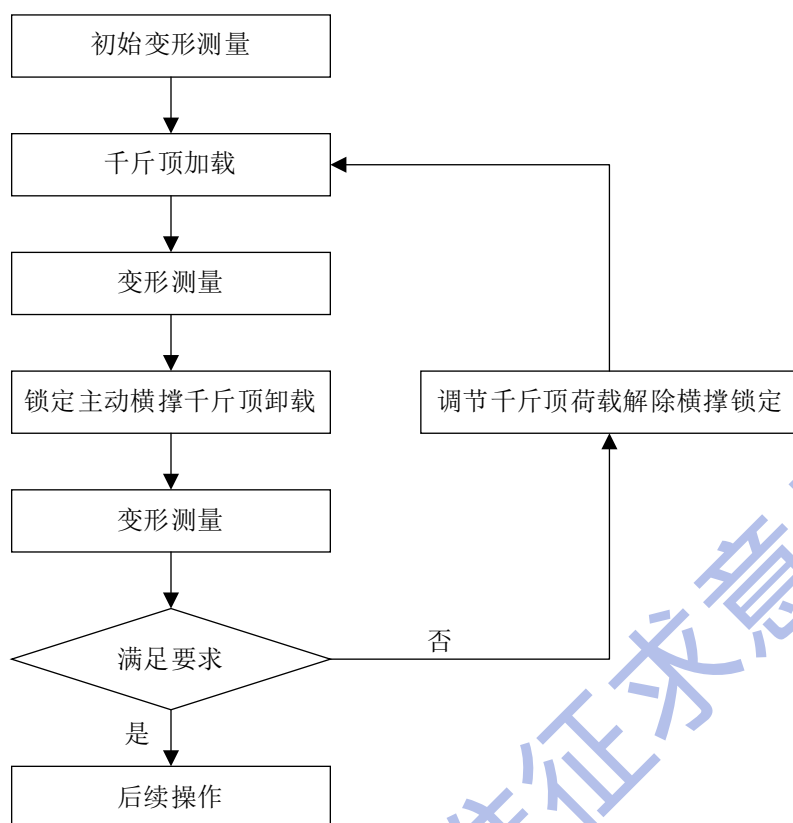


图 7.3.9 支顶力控制流程图

7.3.10 温度对现场监控的影响控制措施如下：

1 钢壳非均匀温度场对节段现场安装会产生较大的影响，非均匀温度场具有较大的随机性，不易予以修正补偿，应在钢壳温度均匀程度在 2°C 以内时方进行安装测量。温度检测采用热成像仪。

2 应在日出前进行测量，且尽量延后测量时间。节段安装应顺预拼线型进行，当塔顶节段发生较大温度变形时，新节段不得依据轴线误差进行调整。

条文说明：钢壳节段混凝土浇筑后，组合塔的热容大大增加，并且钢壳吸热快，在日照的环境下，钢壳-混凝土组合塔温度场即使在夜间也很难散热达到较为均匀的程度，这种情况在持续日照的环境下尤为突出。

7.3.11 组合塔监控控制标准应满足表 7.3.11 的规定。

表 7.3.11 组合塔施工控制标准

塔柱底偏位 (mm)		5
倾斜 (mm)	总体	1/3000，且不大于 30
	节段	节段高的 1/1000，且不大于 8
塔顶高程 (mm)		± 20

8 质量控制与检验

8.1 钢壳制作质量检测

8.1.1 组合塔钢壳焊缝无损检测

1 钢壳外、内壁板纵向对接焊缝、壁板棱角焊缝等焊缝施焊 24 小时后, 经外观检验合格, 方可进行无损检测。焊缝无损检验的质量分级、检验方法、检验部位及执行标准应符合表 8.1.1 的规定。

表 8.1.1 钢壳焊缝的级别、检验方法、检验范围及标准

适用范围	焊缝等级	检验方法	检验比例	检验部位	检测标准		评定标准	
					标准号	检测级别	标准号	评定等级
钢壳外壁板纵向对接焊缝 横梁腹板对接焊缝	I 级	超声波	100%	焊缝全长	GB/T 11345-2013	B 级	JTG/T F80/1-2017	I 级
内壁板纵向对接焊缝	II 级	磁粉	100%	焊缝两端各 1000mm	JB/T 6061-2007	—	JB/T 6061-2007	2X 级
壁板棱角焊缝	II 级	超声波	100%	焊缝两端各 500mm, 中间加探 1000mm	Q/CR 9211-2015	A 级	JTG/T F80/1-2017	II 级
横梁腹板与盖板棱角焊缝	II 级	超声波	100%	两端孔范围延长各 500mm, 中间加探 1000mm	Q/CR 9211-2015	A 级	JTG/T F80/1-2017	II 级
产品试板	I 级	超声波	100%	焊缝全长	GB/T 11345-2013	B 级	JTG/T F80/1-2017	I 级
注: ①、探伤比例指探伤接头数量与全部接头数量之比。 ②、板厚大于 (30mm 不等厚对接时按薄板) 计, 可使用检验等级为 C 级、质量等级为 I 级的超声波检验代替。								

8.1.2 焊缝超声波探伤的距离一波幅曲线灵敏度及缺陷评定等级符合标准《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2020) 的规定, 其他要求应符合现行国家标准《焊缝无损检测 超声检测技术、检测等级和评定》(GB/T 11345)。

8.1.3 组合塔钢壳节段验收

钢壳节段制造完成后应对组合塔钢壳节段高度、箱口平面尺寸等结构进行质量验收, 焊接钢壳基本尺寸允许偏差应符合表 8.1.3 的规定。

表 8.1.3 组合塔钢壳基本尺寸允许偏差

项 目		允许偏差 (mm)	说明	检测工具和方法
钢壳 节段	节段高度(H)	± 2.0	测量全长	钢卷尺
	箱口 尺寸	长度 L	测量两端面	钢盘尺、弹簧秤
		宽度 B		
	横断面对角线差	≤ 5.0	工地接头处的横断面	钢盘尺、弹簧秤
	旁弯	≤ 4.0	测量壁板棱角直线度	紧线器、经纬仪、钢板尺
	锚点位置	± 2.0	测量锚点纵、横向位置	平尺、钢板尺
	锚箱角度	$\leq 0.1^\circ$	测量锚箱角度	经纬仪、钢板尺
	垂直度	L/6000	测量纵横向塔轴线偏离度	紧线器、经纬仪、钢板尺
	外壁板平面度	4mm/4m	测量平面度	平尺、钢板尺、塞尺
	扒筋等构造钢筋间距	± 20		钢卷尺
	两侧牛腿相对高差	2.0	测量两侧牛腿上平面的相对高差	水准仪
	钢牛腿上层板顶面平面倾斜度	≤ 1.0		水准仪
	牛腿不锈钢顶板平面度	0.5/全平面		塞尺
横梁	箱型长度 L	± 4.0	测量全长	钢盘尺、弹簧秤
	箱型高度 h	± 2.0	测量两端面	钢卷尺
	箱型宽度 b	± 2.0		
	横断面对角线相对差 $ L1-L2 $	≤ 3.0		
	旁弯	3.0	测量棱线	紧线器、经纬仪、钢盘尺
	扭曲	≤ 5.0	正位测量上下两面四角不平度	水准仪、钢板尺

注：表中节段基本尺寸允许公差是指除现场工艺量外的公差。

8.1.4 组合塔钢壳节段涂装检测

漆膜的外观要求平整、均匀一致，无漏涂、起泡、裂纹、气孔和返锈等现象。涂膜厚度、附着力等质量检验符合表 8.1.4 要求。

表 8.1.4 涂装各工序质量检验要求表

工序	检测项目	检 测 手 段		检验要求	检测数量	标准
除油	油污、杂质	目测		清除可见油污、杂质	全 面	GB/T13312-91
喷砂	清洁度	图谱对照		按设计要求	全 面	GB/T8923. 1-2011
	粗糙度	表面粗糙度比较样板		按设计要求	全 面	GB/T13288. 2-2011
涂层	漆膜厚度	用磁性测厚仪		涂层执行要遵守双 90（85）原则	每一杆件为一测量单元，大杆件以 10m ² 为一测量单元，每个测量单元至少选取 3 处基准表面，每个基准表面按 5 点法进行测量。	TB/T1527-2011GB/T4956-2003 JT/T722-2008
	附着力	涂层体系	划格法	1 级或 0 级	各 2 点/每段钢塔内外表面	GB/T9286-1998 GB/T5210-2006 JT/T722-2008
			拉开法	涂装体系≥3MPa		
	外观	目测		①	在每种涂层指干后全面检查	JT/T722-2008
注：漆膜的外观要求平整、均匀一致，无漏涂、起泡、裂纹、气孔和返锈等现象，允许轻微桔皮和局部轻微流挂。						

8.2 钢壳安装质量检测

8.2.1 高强螺栓的规格、性能等级、抗滑移系数等应符合设计及《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82-2011) 中的规定。

8.2.2 应进行高强螺栓连接摩擦面的抗滑移系数检验, 检验结果应满足设计要求。

8.2.3 组合塔钢壳节段、钢横梁安装检测项目、检测范围及标准应满足 8.2.3-1、8.2.3-2 的规定。

表 8.2.3-1 组合塔钢壳安装检测项目、检测范围及标准

检测项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
垂直度偏差 (mm)	纵桥向	1/3000 高	全站仪: 每节段 2 处
	横桥向	1/3000 高	全站仪: 每节段 2 处
焊缝质量	焊缝尺寸	符合设计要求	检查全部
	焊缝探伤	符合设计要求	检查全部

节段间错台	≤ 2	钢尺检查：每节段 10 处
-------	----------	---------------

表 8.2.3-2 钢横梁安装检测项目、检测范围及标准

检测项目	规定值或允许偏差	检验方法和频率
张拉应力值	符合设计要求	查油压表读数：全部
张拉伸长率	符合设计规定	钢尺检查：全部
高强螺栓扭矩	$\pm 10\%$	扭矩扳手：检查 10%，且不少于 2 个

8.2.4 其它要求可按《公路工程质量检路评定标准》（JTG F80/1-2017）

8.10.1-1 节执行。

用词说明

1 本指南执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 标识严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或不得。

2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合《×××××》(×××)的有关规定”。

2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本指南第×章的有关规定”“应符合本指南第×.×节的有关规定”“应按本指南第×.×.×条的有关规定执行”