

天津子牙河大桥悬索结构安装施工工艺

甘科 韦壮科 赵干明 梁霆

(柳州欧维姆工程有限公司 545005)

摘要: 自锚式悬索桥是一种近期国内较流行的城市景观桥, 本文主要介绍天津子牙河大桥悬索结构安装的施工工艺。

关键词: 自锚式悬索桥 主缆 吊杆 索鞍 索夹

1. 工程概况

天津子牙河大桥位于天津市区内, 为跨越子牙河的一座大桥, 桥梁总体跨径布置为 $(4 \times 24) + (30+36) + (48.05+115+48.05) + (2 \times 30) + (5 \times 24)$ 米, 总长553.1米。其中主桥采用 $(48.05+115+48.05)$ 米的自锚式悬索桥形式, 主桥长度为211.1米(见图1: 主桥立面图)。

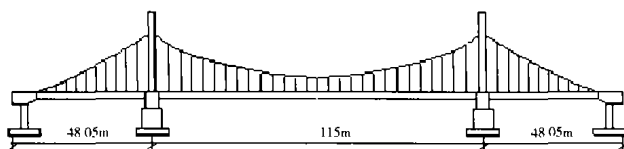


图1 子牙河桥主桥立面图

2. 悬索结构的主要组成

2.1 索鞍:

全桥共四个索鞍, 每个索鞍重约13.6吨, 设置于各塔顶, 其主要功能是: 承受主缆拉力产生的竖向压力以及不平衡水平力, 并传递到索塔上, 同时也起到使主缆在塔顶处平缓过渡, 减少主缆过塔顶时的弯曲应力的目的。索鞍主要由索鞍槽、上底板以及下底板等三部分构成。

2.2 主缆:

主缆采用预制平行钢丝索股法(即PPWS法)制作, 采用 $\Phi 5\text{mm}$ 高强镀锌平行钢丝, 标准强度为 $R_{yb}=1670\text{MPa}$, 每根主缆由19股每股包含127根钢丝的索股组成, 索股截面成正六边形, 右上角设红色基准丝, 作为索股制作时控制索股长度的基准, 并可用来检查索股在架设过程中的扭转情况。主缆成桥线型采用二次抛物线形式,

其中中跨矢跨比为1:6.05, 矢高19.0米, 边跨矢跨比1:15.13, 矢高3.04米。每根主缆长约230米, 主缆标准断面直径约27.0cm(考虑空隙率20%), 索夹位置断面直径约26.6cm(考虑空隙率约18%)。

2.3 索夹:

索夹是将主缆和吊杆相连接的连接件, 它由两个半圆形铸钢件组成, 并由高强螺栓将其上紧在主缆上, 全桥共设90套。

2.4 散索套:

散索套由两个半圆形铸钢件组成, 设置在锚碇横梁前端, 其主要功能是将主缆索股散开, 引入锚孔各锚固点, 每个散索套重528Kg, 全桥共设4套。

2.5 吊杆:

吊杆是将加劲梁和桥面系吊于主缆上的构件, 它除受恒载外, 还受到时刻变化的活载、风载引起的拉伸、弯曲和摆动。本桥吊杆上端采用拴接和索夹耳板连接, 下端采用带有冷铸锚与加劲梁连接。每根吊杆间距为4米, 全桥共设吊杆94根, 其中8根采用 $\Phi 100\text{mm}$ 的刚性吊杆, 其余86根采用 $\Phi 7\text{mm}$ 高强镀锌外层热挤PE的平行钢丝成品索, 标准强度为 $R_{yb}=1670\text{MPa}$ 。

3. 施工工艺

3.1 工艺流程:

子牙河大桥悬索结构按下列工艺流程进行施工:

施工准备—索塔封顶前安装塔顶预埋件及索鞍下底板—索塔封顶且砼强度达到要求后焊接塔顶钢支架—安装索鞍—安装猫道—安装索道—

索股牵引准备—索股牵引、提升、横移、整形入鞍—调整索股线型—主缆各索股架设完后安装索鞍压盖并压紧—预紧缆—紧缆—安装索夹和散索套—安装吊杆—张拉吊杆实现体系转换—调整各吊杆索力直至符合设计要求—根据桥面荷载增加情况调整吊杆索力—复拧索夹螺栓—索鞍位置调整及最后固定—防腐—拆除猫道及索道。

3.2 预埋件安装:

在每个索塔塔顶及横梁上表面设置预埋钢板,以供焊接塔顶钢支架用;在每个锚碇横梁顶面预埋 $\phi 32$ 螺纹钢,用于锚固猫道及固定卷扬机。

3.3 索鞍下底板安装:

按设计图纸要求在索鞍下底板底面焊接锚固钢板及锚固钢筋,用汽吊将索鞍下底板安装在塔顶设计位置,用全站仪及水平尺准确定位,要求纵、横向偏差小于 $\pm 5\text{mm}$,高程偏差小于 $\pm 5\text{mm}$,四角高差小于 2mm 。用电焊将索鞍下底板与索塔钢筋焊接牢固。

3.4 塔顶钢支架安装:

在栈桥上用型钢焊塔顶钢支架,待索塔砼达到养护时间后,用汽吊将钢支架吊到塔顶,与塔顶预埋钢板牢固焊接。

3.5 索鞍上底板安装:

用汽吊将索鞍上底板吊到塔顶,根据下底板上的螺栓定位,用PID-3500电动扭矩扳手拧紧M30高强螺栓,顺序为从中间往两边拧紧。为保证各螺栓均匀受力,应对各螺栓循环多次复拧。

3.6 索鞍安装:

将索鞍上底板表面擦干净,垫上四氟乙烯板。用汽吊将索鞍吊到塔顶,根据索鞍和上平板表面的定位标记点定位,要求纵、横向偏差小于 $\pm 5\text{mm}$,高程偏差小于 $\pm 5\text{mm}$,四角高差小于 2mm 。在塔顶反力支架上安装100T手摇千斤顶,将索鞍顶推至设计预偏位置(向边跨预偏 50mm),在预埋件上用钢板焊挡块临时固定,防止索鞍往纵向、横向移动。

3.7 猫道架设:

3.7.1 猫道的布置:

猫道分别设置在两根主缆之下,每条猫道分为三段布置:即北锚~北塔、北塔~南塔、南塔~南锚。猫道主要由锚固调节装置、承重索、猫道面层、栏杆、扶手、滚筒和抗风缆等组成。猫道面低于主缆中心 $1.0\sim 1.3\text{米}$,面宽 2.2米 (见图2)。

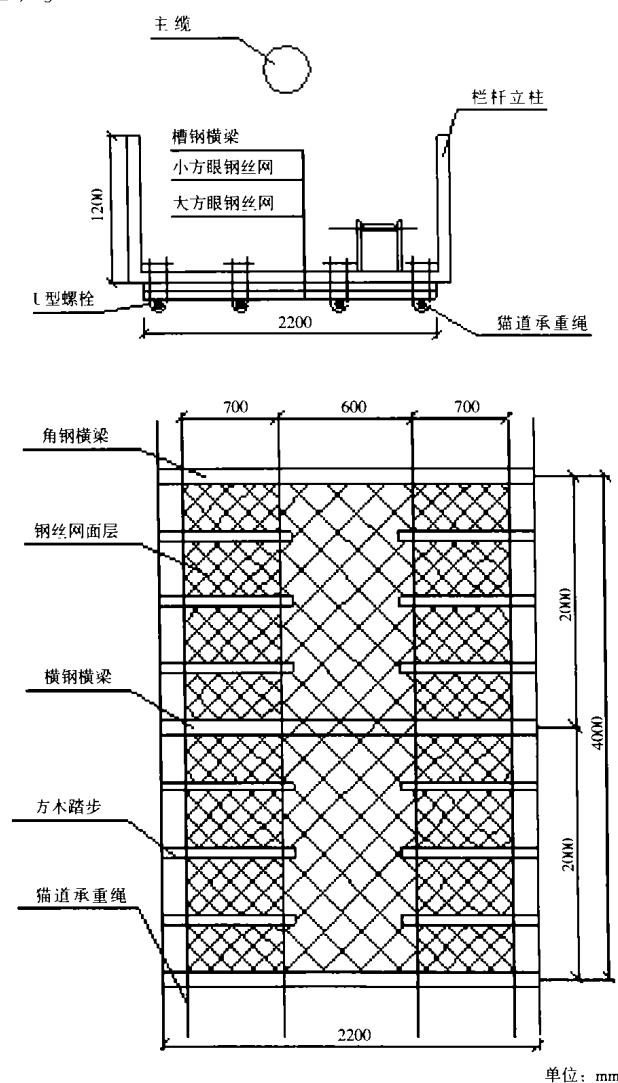


图2 猫道构造图

3.7.2 猫道的架设过程:

猫道架设的主要施工流程为:安装锚固支架—安装调节装置—架设并调整承重索—猫道面层铺设—猫道线型微调—猫道面层固定—栏杆立柱及扶手绳安装—猫道滚筒安装—抗风缆安装。

在地面将锚固支架拼焊好,用吊车整体吊装就位,将之与塔身预埋件固定牢固;按主缆空缆线型计算确定承重索的下料长度,将钢丝绳放置

于桥面的彩条布上,在平整的钢梁面上将钢丝绳下好料;在中跨,将每单幅的两根承重索作为一组分开放在已拼装好的钢箱梁面的彩条布上,两端分别与调节装置上的后一组槽钢箱联接并用绳夹夹紧。利用塔顶卷扬机将一端吊至塔顶,通过精轧螺纹钢与塔顶锚固支架的槽钢箱连接;再利用另一塔顶卷扬机将另一端吊至塔顶并连接。按此方法将全桥承重索安装完;在边跨,先吊装靠近索塔一端,另一端则用葫芦拽拉与锚顶横梁上的预埋件相连;待承重索全部架设完成后,测量每根承重索的线型,利用两侧的锚固调节装置对各承重索线型进行调整,使每条承重索达到设计垂度。

将猫道面层分成每2米为一段分别铺设。将大网眼钢丝网剪成长2米、宽2.2米的形状,将小网眼钢丝网剪成长2米、宽1米的形状,用铁丝在每片大网眼钢丝网上按图2所示固定好两片小网眼钢丝网、一根槽钢或角钢横梁、六根方木踏步成为一片面层。将做好的各片面层堆放于桥面。在中跨主缆最低点处用人工将一片猫道面层铺于承重索上,有横梁一端朝索塔牵引方向,横梁用U型螺栓与承重索相连,不拧紧螺帽,以便于拽拉。将牵引钢丝绳与横梁连接,开动卷扬机,将面层往索塔方向拖动2米后停止;用人工将第二片猫道面层铺于承重索上,有横梁一端朝牵引方向并与第二片面层连接,横梁两端同样用U型螺栓与承重索相连,不拧紧螺帽;开动卷扬机,将面层再往索塔方向拖动2米后停止;按此方法将全桥猫道面层对称安装完。在边跨,同样以中跨拽拉猫道面层的方法从锚碇横梁往索塔方向铺设。

在猫道面层铺设完成后,利用精轧螺纹钢再进行一次猫道线型微调,以保证其受力均匀和猫道面层的平整。从跨中向两端拧紧U型螺栓螺帽,用铁丝把方木踏步、猫道面层与承重索固定。最后安装栏杆立柱及扶手绳、猫道滚筒。

3.8 索道安装:

3.8.1 索道的布置:

在上下游各架设一组相互独立的工作索道,

用于主缆索股的架设及索夹、吊杆的安装、紧缆以及小型机具、料具的吊运等。索道由塔顶钢支架、导向承重索、牵引循环索、锚碇、驱动系统、走行小车等组成。

3.8.2 索道的安装:

索道安装方法与猫道安装方法相似。

3.9 主缆架设:

3.9.1 索股牵引准备:

根据现场情况,在桥南侧6#锚碇横梁上表面的预埋件上固定两台5T卷扬机来牵引索股沿猫道放索,在9#锚碇横梁上表面的预埋件上固定两台2T卷扬机来牵引索股锚头进锚管。将主缆放索架放在9#锚碇横梁上表面的主缆纵向中心线上,与锚梁顶面预埋件焊接固定。按索股安装顺序(1#-19#),用吊车将索股卷盘放在放索架上。

3.9.2 索股牵引、入鞍:

将5T卷扬机的牵引钢丝绳头与索股锚头连接好并预紧,用2T手拉葫芦将锚头与索道小车连接牢固,严防松脱。前端锚头从放索架上抽出,启动南侧5T卷扬机缓慢放索,使索股依次通过北边跨猫道、北塔顶、中跨猫道、南塔顶、南边跨猫道、南锚碇横梁(见图3)。放索同时用放索架刹车装置调整放索速度。放索过程中设专人跟随索股锚头前进,随时用索道小车的手拉葫芦调整锚头的高度,防止锚头与猫道相碰;在猫道面上每隔一定距离设专人监控,防止牵引过程中索股从橡胶滚轮上滑下或在牵引过程中钢丝及缠包带挂住滚轮而变形;在每个塔顶设专人,负责使锚头顺利通过塔顶,具体操作为:当锚头到达塔顶时,用对讲机通知5T卷扬机停止牵引,用挂在塔顶钢支架上的手拉葫芦挂住锚头,将索道小车从边跨索道上拆下,安装到中跨索道上;用手拉葫芦配合,5T卷扬机点动牵引将锚头牵引过塔顶,重新用手拉葫芦将锚头与索道小车连接好,继续用5T卷扬机牵引索股放索,直至锚头到达南锚碇横梁锚管口,解除锚头与索道小车上手拉葫芦的连接;利用手拉葫芦将索股后端锚头从放索架上脱出。

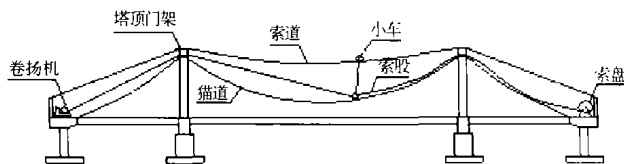


图3 牵引索股示意图

检查整根索股的扭转情况，从前端锚头开始往后端锚头方向用人工将索股扭正，保证有红色丝的平面平行朝上，且红色丝位于六边形的右上角。用5T卷扬机牵引索股前端锚头进入锚管并穿出锚管约4~5米，直至后端锚头到达锚碇横梁锚管口，用9#锚梁的2T卷扬机牵引后端锚头进入锚管，装上前端锚头与后端锚头的螺母，调整锚头位置使锚头中心与锚管中心同轴，且螺母位于锚头最后端头。用六边形整形器从索股中跨中点往两岸侧方向将索股整成六边形，整形时用木锤敲打索股表面使之方便成形。

在每个塔顶距索鞍两侧约1m处分别将握索器安装在索股上，并将它与挂在支架上的手拉葫芦相连，通过收紧手拉葫芦把索股从猫道滚筒上提起，直至比索鞍顶高约0.2m处并确认全跨径的索股已离开边跨及中跨滚筒后，用手拉葫芦将索股横移至索鞍槽正上方。在距索鞍两侧约0.8m处的索股上安装六边形夹具，拆除索鞍段索股的绑扎带，在距索鞍约0.5m处开始用四边形整形器将索鞍部位六边形索股整成矩形，整形时用短钢锯片分层以保证整形效果。将四边形整形器从边跨往中跨方向往前移，并用木锤敲打索股表面，使索股在索鞍段全部整成设计形状的矩形。整形方向均为从边跨往中跨进行。

整形完成后，将索股放入鞍槽内设计位置，各索股入鞍顺序见图4。入鞍时从边跨向中跨方向进行，严格控制索股着色丝在鞍槽的位置，以防索股扭转。

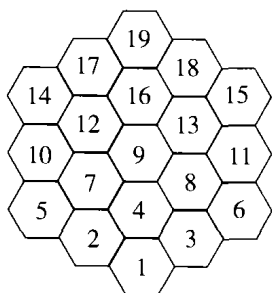


图4 主缆索股架设顺序图

3.9.3 调整索股线型：

为使上述初步架好的索股与设计规定的线型相吻合，必须进行索股线型调整。白天架设的索股，无论是基准索股还是一般索股，线型调整必须在温度稳定时进行。调整时，提前3天用温度计每隔一小时测量气温变化情况，做好记录，把温度变化小的时间定为调整时间（一般在凌晨5:00-8:00）。

3.9.3.1 绝对垂度调整：

以首根索股(1#索股)为基准索股，在测定索股下缘的标高后进行调整。测量点布置为：中跨、边跨均以各跨中点的索股下缘作为测量控制点。利用全站仪进行测量，并根据测量结果反复进行索股绝对垂度调整。

在两个塔顶钢支架上挂手拉葫芦，根据测量数据，反复调整索股在索鞍槽内位置，直至中跨线型符合设计要求，精度要求为：基准索股标高(绝对值)允许误差 $\pm 15\text{mm}$ ；上、下游基准索股之间标高允许误差(相对值) $\pm 15\text{mm}$ ；普通索股之间标高允许误差(相对值) $\pm 5\text{mm}$ 。

中跨垂度调整完以后，开始调整边跨垂度。方法为：在锚碇横梁后端的主缆锚垫板后安装千斤顶张拉索股(见图5)，通过调整螺母在锚具上的位置来调整边跨主缆索股的长度，即调整索股边跨的垂度，直至边跨线型符合设计要求。

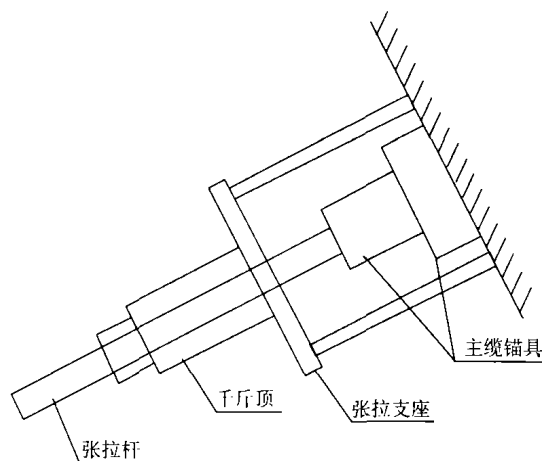


图5 张拉主缆索股示意图

3.9.3.2 相对垂度调整：

对基准索股以外的索股(2#-19#索股)进行垂度调整为相对垂度调整，用大号游标卡尺测量与基准索股的相对高度决定调整量。

相对垂度调整方法与绝对垂度调整基本相同。但相对垂度调整时，索股调整速度不宜过快，否则被调整索股就容易压在下面的索股上，这样将不能测定正确的相对垂度。另外，如果压在基准索股上，基准索股的垂度就失常，因此，相对垂度的调整，要在对下面的索股若即若离的状态下进行。

按顺序安装完19根索股且调整完索股线形后，即可安装索鞍压盖，此前对鞍槽内空隙部分用铅块填满，并用PID-3500电动扳手按设计要求拧紧压盖螺栓。

3.10 紧缆：

紧缆目的是将各根索股挤紧成一个外部成圆形、内部排列紧密、断面稳定、能团结一致承受外部强大荷载的索股群，在全部索股架设完毕，并且空缆成型调整后，即可进行此项工作。紧缆作业大致可分成预紧缆和正式紧缆。

3.10.1 预紧缆：

预紧缆是把架设完了的索股群大致整成圆形的作业。根据设计要求，边跨自塔顶索鞍位置向6#、9#墩锚固位置进行，将各股不均匀情况迭加至锚固位置，通过调整锚头螺母位置达到各股主缆长度满足设计要求，拉力均等；中跨为消除各股不均匀情况，其紧缆顺序采用间跳方式，即自跨中、四分点、八分点位置分别向两侧紧缆。

沿全长检查主缆索股排列情况，确认各索股排列无交叉情况；用钢带打包机在主缆上每隔约1m打上一道钢带，按上述顺序将整根主缆收紧，直至把索股群大致整成圆形为止，且主缆空隙率达到26%~28%。

空隙率测定方法：用1m钢卷尺测量主缆周长，根据测出的主缆周长计算主缆空隙率，其计算公式如下：

$$k=1-nd^2/D^2$$

式中：k—主缆空隙率，n—钢丝总数，d—钢丝直径，D—紧索后主缆直径

3.10.2 正式紧缆：

正式紧缆是用专用的紧缆机把主缆整成圆形，并达到所规定的空隙率，即标准断面为20%，索夹位置断面为18%。其作业可在白天进

行，紧缆顺序是由各跨中央向索鞍和散索套方向进行。

正式紧缆作业程序为：紧缆机安装—紧缆机移动—紧缆机就位及调整—用紧缆机紧固主缆—空隙率测定—打钢带—紧缆机放松—空隙率确认—紧缆机移动。

紧缆操作步骤：启动油泵，将紧缆机的油缸活塞缓慢打出，同时利用控制阀上的四个截止阀，分别单独控制四个油缸的进油量，使每个活塞的顶出速度基本一致。待夹紧块贴紧主缆表面后，试观察四个油缸活塞的伸出量是否一致，如果一致，再继续同时缓慢加压，加压时应力求平稳，避免冲击，直到将主缆压紧到设计要求的主缆直径尺寸。用1m钢卷尺在距紧缆机15~20cm的地方测量周长，按上述公式计算主缆空隙率。当空隙率达到设计要求时，在靠近紧缆机的地方打上两道钢带，钢带间的距离为10cm左右。松开紧缆机，移到下一个紧缆点，每一个紧缆点间的距离约为1m。这时再复测上一个紧缆点的周长，并把所在位置及周长记录下来。

空隙率的大小直接影响主缆直径，而主缆直径偏大或偏小都会影响索夹安装，因此在紧索时要严格控制空隙率的大小，使其尽可能地满足设计要求。一般情况下，标准断面的空隙率为20%±2%，索夹部位为18%±2%。

3.11 安装索夹及散索套：

当主缆紧缆并且线型定型后，采用全站仪测距把索夹的安装位置在主缆上作标记。标记完成后，对标记位置要再一次用全站仪进行复测、确认。将索夹搬运至待安装位置正下方，用索道小车将索夹吊至主缆上进行安装，安装时在索夹的结合部位需注意不让钢丝发生弯曲。具体做法是：在索夹上缘孔打入工具螺栓；将索夹吊至待安装位置，并用工具螺栓进行预紧；卸下工具螺栓，换上索夹螺栓，用PID-3500电动扭矩扳手设计要求进行紧固；为保证同一个索夹的各颗螺栓受力均匀，可按设计力的10%、30%、50%、70%、90%、100%共分六级用电动扭矩扳手为螺栓加载，加载顺序为从中间往两边进行。索夹安装顺序：中跨从跨中向塔顶进行，边跨从跨中向

散索套和塔顶进行。

3.12 安装吊杆:

将吊杆搬运到桥面相应的待安装位置正下方;解开吊杆索盘,引出吊杆的两端锚头;将猫道面待装吊索位置正下方的钢丝网剪开一个直径约0.5m的圆孔。用索道小车将吊杆吊起,上锚头穿过已剪开的网洞,继续起吊吊杆,直至上锚头吊离钢梁锚管口时,将其引入锚管,下锚头穿出梁底垫板,然后拧上锚固螺母;将吊杆上锚头与索夹耳板用拴销连接;移动索道小车安装下一根吊杆。吊杆安装顺序可与索夹安装顺序一致,即中跨是从跨中向塔顶进行,边跨是从跨中向散索套和塔顶进行。

利用在钢梁底部吊杆锚头位置处设置的工作平台安装YCW150千斤顶及张拉组件。按设计要求反复调整索力,使桥面线型与吊杆索力均符合设计要求。

3.13 索鞍位置调整:

随着主缆荷载的增加,索鞍将向中跨偏移。为保证在全部恒载施加完成后索鞍处于最终设计位置,必须严格控制其初始位置,并观测记录每一施工阶段偏移量,同时设置千斤顶顶推装置(见图6),确保索鞍最终就位,用电焊将索鞍固定。

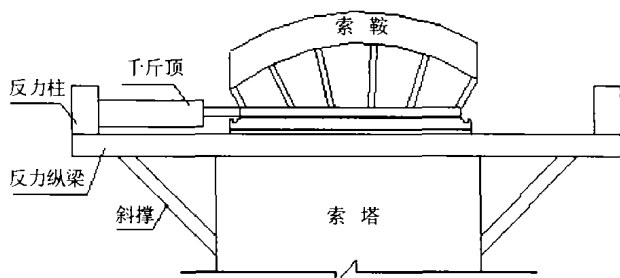


图6 顶推索鞍示意图

3.14 防腐:

将待密封面的水分、油污、锈蚀、盐渍等污物清洗干净,并在清洗干净1小时内进行涂装施工。先用棉纱汽油或二甲苯擦洗干净,然后用白色清洁棉纱蘸丙酮沿同一方向擦拭密封面,直至无明显污迹为止。对索夹、螺栓等有锈蚀的部位必须用电动打磨机除锈。

主缆规则部位的防护为:用软毛刷涂刷专用磷化底漆1道,厚度适当,常温干燥4小时以上;

刷涂专用环氧云铁底漆2道,厚度加以控制,常温干燥4小时以上;在每两个索夹之间各缠4道碳纤维布,此前先在待缠碳纤维布处先用钢带打包机打一道钢带,钢带宽32mm,厚0.8mm,将与碳纤维布配套用的胶水均匀涂抹在主缆钢丝表面待缠纤维布处,然后将碳纤维布缠在主缆上,边缠边用滚轮沿同一方向滚压碳纤维布表面,使碳纤维布充分浸润胶料,最后,在最外层碳纤维布表面再均匀涂刷一层胶水;用干净棉纱浸少量BC-1表面处理剂抹涂在环氧云铁底漆表面,晾干15分钟以上,用三辊研磨机将专用密封剂与固化剂按一定的比例搅拌均匀,用刮刀将密封剂刮涂在主缆钢丝表面,把凹面填平,厚度控制在0.5mm左右,密封剂在室温硫化24小时。检查刮好密封剂的表面,对有气泡、凹槽处进行修补。将搅拌均匀的专用密封剂用刮刀均匀刮涂在主缆表面,厚度控制在0.5mm左右,将玻璃布缠包在专用密封剂表面,缠包方向从主缆的低处向高处进行,玻璃布搭接宽度为2~3cm左右,缠绕好的玻璃布表面应平整且无明显鼓包现象,在缠绕好的玻璃布表面用专用密封剂再刷涂一遍,使密封剂渗透到玻璃纤维内,然后在室温下硫化一天;用刮刀将搅拌均匀的专用密封剂刮涂在主缆表面,厚度控制1mm左右,在室温下硫化1~2天;然后按上述工艺再刮涂一遍专用密封剂,厚度控制1mm左右,刮涂时要减少表面的小气泡,使外型呈圆形,专用密封剂硫化后,对表面不平整的位置用细砂纸打磨平整、圆滑;最后刷涂聚氨酯面漆3道,每道面漆干燥时间为4小时以上,总干膜厚度120 μ m。

索夹对接缝部位的防护为:涂刷磷化底漆及环氧云铁底漆后,用刮刀将专用密封剂填满缝隙,表面用刮刀刮平,刷涂聚氨酯面漆。

主缆与索夹交接处环缝的防护为:涂刷磷化底漆及环氧云铁底漆后,用刮刀将专用密封剂刮成45°角、35×35mm的环型密封型面,刷涂聚氨酯面漆。

主缆不规则部分(散索部份)的防护为:在

主缆散索段各索股外表面分别涂刷磷化底漆及环氧云铁底漆、刮涂专用密封剂、用高强玻璃布作单索股缠包、再刮涂专用密封剂、刷涂聚氨酯面漆，即与主缆规则段的施工工艺相似；将散索套上下直缝与环缝的空隙用专用密封剂预先封严，然后将专用密封剂用手动注胶枪压注入散索套内，可分几次灌注直至灌满；将环氧、固化剂、石英砂、辉绿岩粉按合适的比例搅拌均匀，用灌浆泵往预埋管内灌注环氧浆直至将管内全部灌满，管口处用灌环氧水泥浆密封。

索鞍的防护为：用专用密封剂将鞍座顶盖与鞍座体的对接缝部分密封，在整个索鞍外表面刷涂聚酯面漆。

索夹及吊杆上锚头的防护为：用电动打磨机将螺栓头表面除锈，在整个索夹及吊杆上锚头表面涂刷环氧云铁底漆及聚氨酯面漆。

防腐质量控制：主缆清洗干净后，表面应无油脂、水分、灰尘等异物存在，用白色清洁布擦拭被清洗后的表面，应无明显污迹；密封剂不允许漏涂、缺陷、异物夹杂、表面有气孔存在；密封剂厚度检验方法为用裁纸刀切取小片，用卡尺测定厚度。用软质绘图橡皮摩擦密封剂表面，应无剥离现象；油漆表面应光滑、无缺陷，若发现裂纹、脱落、漏涂时，必须重新修整或补涂。每涂完一层漆后，必须检查厚度，可用测厚仪对工件上的涂层或随炉件进行测量，涂层厚度必须达到工艺规程要求。

4. 结束语：

子牙河大桥上部悬索结构由柳州OVM公司施工，从2003年9月开始，至2004年4月全部完工，共用了约8个月时间，其中净工期约为6个月，包含了安装索鞍、架设猫道、安装主缆、紧缆、安装索夹、安装吊杆、体系转换、防腐等多项工序，各工序经业主和监理验收，均符合设计及规范要求。虽然在施工期间碰到很多技术难题，但经过全体施工人员的努力，最后都能成功有效地解决。本桥的顺利建成通车，使天津市又多了一道靓丽的风景线。

参考文献

- [1]严国敏编. 现代悬索桥. 北京: 人民交通出版社. 2002.
[2]雷俊卿, 郑明珠, 徐恭义编. 悬索桥设计. 人民交通出版社. 2002.

(上接第31页)

预应力束，纵向预应力集中在主梁腹板附近混凝土面板内布置以使其能可靠锚固。横向预应力采用 $3\phi 15.24$ 高强度低松弛预应力钢绞线，横向布置基本间距为0.5m，在相邻的多个节段间预应力的布置尽量相近以减小相邻主梁节段由于横向预应力的张拉导致的主梁横向变形差异，保证钢梁节段栓接顺利实施。主梁在悬拼施工时布置28根直径为32mm的预应力粗钢筋，其中约有一半预应力筋集中在竖腹板附近混凝土面板内布置，以针对性的克服在弯曲剪力滞后效应下主梁横向混凝土面板的应力不均匀现象。

主梁钢结构部分一般截面底板及斜腹板厚16mm，竖腹板及腹板上翼缘厚24mm，塔根及边墩、辅助墩顶附近主梁钢板局部加厚。主梁横隔梁采用桁架形式以利过桥管线的布置。主梁一般截面横隔梁板厚16mm，上翼缘板厚24mm。

主梁相邻节段间钢结构部分的连接均采用 $\Phi 24$ mm高强度螺栓拼接以减小在海上施工的难度，保证施工质量。

主梁钢结构部分和混凝土面板之间通过设置剪力钉来传递结合面间的剪切力，剪力钉的布置根据各节段剪力的大小布置。剪力钉采用直径为22mm的圆头焊钉，其长度除上翼缘钢板两端部为有效抗弯采用较长的450mm外，其余均为200mm。主梁剪力钉除主梁节段间拼接板采用现场焊接外其余均在工厂焊接。

4. 结语

钢-混凝土箱形结合梁这种梁式在东海大桥主航道桥斜拉桥上的设计实践，将为今后更广阔的应用积累经验。