

# 昂船洲大桥桥塔

香港昂船洲大桥为拉索结构,总长 1596 米,其中主跨长 1018 米。大桥横跨蓝巴勒海峡,于 2009 年底通车,成为进入繁忙的葵涌集装箱码头的主要通道。这座大桥从香港岛和九龙的很多地方都可以看得到。大桥最为引人注目的特征是位于两端的尖锥状双子单塔,它们支撑着宽达 50 米桥面。尖塔高于海平面 295 米,下部为强化混凝土结构,上部的 115 米为由不锈钢外皮和强化混凝土内芯构成的复合结构。

## 选 材



图片 1: 昂船洲大桥全貌

这座大桥的设计寿命为 120 年。鉴于大桥处于严酷的海洋和污染环境,因此要求采用具有高耐久性的材料。此外,建造完成后,受持续不断的交通流量影响,对桥塔进行维护将会非常困难。因为不锈钢具有的耐久性和吸引人的外观,桥塔上部的复合结构部分选择了不锈钢作为外皮。如果用碳钢,那就需要刷保护性涂层,这些涂层在经过约 25-30 年后就需要重新涂覆。

最初被考虑的是标准的含钼奥氏体不锈钢,但因其设计强度相对较低( $220 \text{ N/mm}^2$ ),并且,鉴于所设计表面的粗糙度会导致耐蚀表现上的不确定性,而被放弃。更高合金化的奥氏体不锈钢,如 1.4539 (N08904)和 1.4439 (S31726),因为不可能满足成本、可获得性和强度方面的要求也未对其进行详细考研。因双相钢 1.4462 (S32205)在具有高强度( $460 \text{ N/mm}^2$ )同时具有良好的耐蚀性和表面光亮容许度。



图片 2: 单塔和拉索

所有暴露在外面的表面均规定采用光洁度为 1K 的材料(1K 的定义根据 EN10088 标准第 2<sup>nd</sup>部分的规定),这种表面的平均粗糙度为  $Ra 0.5 \mu\text{m}$ 。通过使用氧化铝和玻璃珠的混合物对表面进行喷丸处理,从而获得了一种有轻度纹理、无方向性、低反射率的表面。

## 设计

尖塔上部 115 米最初的设计方案是采用全钢结构。但是,我们知道圆形塔易受涡流喷射振动影响。调查显示塔顶的侧向振动频率与悬索的自然频率碰巧一致;这就意味着可能由于线性共振而激发悬索振荡。

为避免发生这种情况,塔上部的的设计改成了用不锈钢外皮包覆强化混凝土圆芯的复合结构,而混凝土圆芯则包裹着钢索的锚箱。这种设计形式使其具有更大的质量、刚度和阻尼作用,从而改进了对涡流喷射的反应。

尖塔的外皮由 32 圈厚度为 20mm 的热轧不锈钢板组成,每圈的高度从 5.6 米到 3.2 米。呈圆锥形的塔尖部分直径自 10.9 米渐变为 7.2 米,相应的混凝土墙厚度则从 1.4 米降至 0.8 米。高度较低的三套悬索固定在塔身下部的强化混凝土内,高于这一位置的部分则建有 25 个

锚箱,其余的 25 套悬索就安装在锚箱内。每座塔的顶部都预留了空间,当需要抵消塔振动时,将来可以用来安装摆式质量阻尼器。

塔身上部的结构能力依赖于不锈钢表皮、混凝土核芯及锚箱之间的复合作用。剪力连接件(图 5 和图 6)为直径 16 毫米的双相不锈钢,长度为 300 毫米。连接件的数量是根据保证传递混凝土墙与表皮之间所有短期和长期负载的要求而确定的,以约 300 毫米中心距均匀分布,以防止表皮和锚箱板在达到屈服点前发生局部弯曲。原本可采用碳钢柱头栓,因为它们可以焊到双相不锈钢上面;而且因这两种钢都会被浇注到混凝土中,所以本案不必考虑双金属腐蚀风险<sup>[2]</sup>,但是,双相不锈钢柱头栓具有更高的强度。

为了开发出适合的焊接程序,在建设开始前制作了一圈不锈钢表皮原型。在这个原型上也对一系列的制造技术进行了研究,以使接触面之间接合承受得当,同时还伴随进行了一项如何获得高质量的表面及如何容易地进行修复的调研。



图片 3: 不锈钢外皮



图片 4: 建设中的大桥



图片 5: 桥塔内的剪力连接件

为便于提升,每圈不锈钢外皮都制作成两半,并有 25 毫米厚的硬化处理法兰和 25 毫米厚的硬化处理中间环。采用直径 22 毫米的双相不锈钢高强度摩擦抓紧螺栓来做垂直接头。对连接钢板的接触面要进行处理以确保摩擦系数大于 0.2。螺栓经预加荷载以达到 165kN 的轴向拉力。在正常使用状态下不允许发生滑动,但在达到最终极限状态时,允许滑动产生,而剩余的施加载荷在支座受到抵抗。

水平方向的接头被假定只能有效抵抗垂直方向的压力,而无被传递的剪应力。因为单独一节外皮的高度对整个断面直径而言为小,每节外皮均可有效的分别起到束缚住内核的水平箍圈的作用。因此,不锈钢外皮被假定只抗垂直和水平方向的应力,而非剪力和扭力。外皮板材的设计是在计算的应力满足冯·米塞斯 (von Mises) 屈服准则的情况下完成的。剪力连接件的间距根据外皮与混凝土之间的剪力转移来确定;由此得出的间距是外皮在压力下屈服而非产生弯曲。



图片 6: 边线法兰的连接

外皮与法兰盘之间的连接是一种关键的结构连接,它要求接触面紧密贴合(超过 60%以上的接触面积的最大缝隙为 0.25 毫米)。为满足这一要求而对边线法兰进行机加工将会是一项极其耗时的工作,而且为此要在现场进行的大量的焊接将很难控制并导致扭曲。解决方案是使用螺栓将边部连接到一起和采大量采用手工金属电弧焊工艺焊接。对钢板进行定位焊,将法兰盘通过螺栓连到一起并按次序完成焊接。事后发现,尽管这种方法并未完全消除扭曲变形,但它大大缩小了缝隙尺寸并将接触面积提高到设计规范的限制要求之内。

## 制作与安装

**制作:** 典型的半圈外皮是将四张平板通过等强焊连接起来,然后把连起来的钢板滚压成正确的形状。但是,最初的四圈每圈有 5.6 米高,受压弯设备宽度的限制,钢板在焊接前就被滚压出正确的曲率。

除在第 18.44 to 18.52<sup>[1]</sup> 中做出说明的外,制作工作遵照 BS 5400-6,第 4.1 至 4.16 条规定进行。所有使用的工具和加工设备都是专门用来加工不锈钢的,为防止污染,不会用来加工其他金属材料。

**安装:** 外皮和锚箱均用作混凝土浇筑的永久模壳。外皮和锚箱的树立组装要先于混凝土浇筑两圈。因搬运和树立不锈钢组件而需要的临时附着件都采用与结构部分相同钢种的不锈钢制造。这些附着件一般位于建筑物完工后看不到的地方;但当无法做到这样时,就在去掉临时附加件后,将不锈钢表面恢复为原指定表面。

**焊接:** 采用国际钼协会(IMOA)的双相不锈钢焊接指南<sup>[4]</sup>。在焊接耗材的选择上,确保焊缝金属的机械性能和耐蚀性不低于母材要求。焊工资格要符合 EN287<sup>[5]</sup>,焊接程序要依据现行欧洲标准。焊缝区域进行喷丸处理以保持统一的表面状态。



图片 7: 安装不锈钢外皮

本案例信息由奥雅纳(Arup)友情提供

## 参考文献

- [1] EN 10088-2:2005 Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes
- [2] Stainless steel in contact with other metallic materials. Materials and Applications Series, Volume 10, Euro Inox, 2009
- [3] BS 5400-6:1999 Steel, concrete and composite bridges. Specification for materials and workmanship, steel
- [4] Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels. International Molybdenum Association, 2001 (new Edition 2009)
- [5] EN 287-1:2004 Qualification test of welders – Fusion welding. Steels

结构用不锈钢网上信息中心:

[www.stainlessconstruction.com](http://www.stainlessconstruction.com)

## 采购详情

业主:	香港路政署
设计公司:	Arup 奥雅纳
市政 & 结构工程:	Arup
主承包商:	前田 - 日立 - 横河 - 新昌
制作工场:	中国广东省中山

本系列结构用不锈钢案例研究由 Team Stainless 赞助

