



珠海歌剧院工程焊接工艺及技术

阙子雄 杜冰冰 王涛

1. 工程概况及焊接特点

(1) 工程概况 珠海歌剧院工程主要由大剧场、小剧场以及中部大天窗三部分组成。大、小剧场主体结构为框架—剪力墙结构，两组贝壳形体为空间钢桁架结构。每组贝壳形体由两片对称的贝壳状钢架通过中部联系桁架连为一体。

以大剧场为例，单片贝壳状钢架高度为60m，宽约80m，由径向桁架、环向系杆组成，钢架外表面呈平滑曲面。其中径向桁架为平面弧形桁架，由箱形构件构成，高6~8m，材质为Q345B（板厚≤35mm）和Q390GJC（板厚>35mm）；环向系杆为箱型弯扭构件，材质为Q345B。小剧场钢结构特征则基本类似（见图1）。

(2) 焊接特点 本工程弯弧、弯扭类构件占比达80%，构件造型复杂，结构受力特殊，贝壳状钢架为全焊接结构，因此焊接量大，焊接要求高。

焊接难点一：箱形构件的纵向和横向焊缝均采用全熔透焊缝，焊缝质量为一，支座和节点处的所有连接焊缝为一

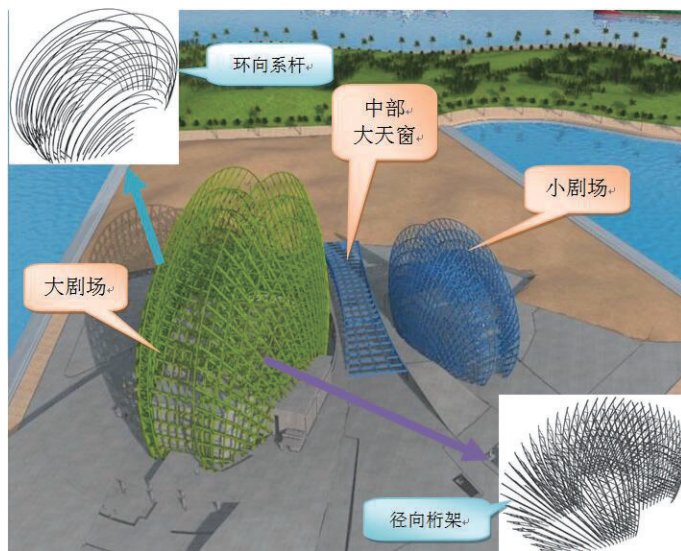


图1 大剧场局部示意

缝，焊缝质量整体要求高。

焊接难点二：实际生产中，存在节点部位加劲肋数量多、径向桁架弦杆弯弧构件与牛腿侧壁间夹角较小、空间全位置施焊等情况，如何控制焊接变形及焊后降低焊接残余应力等是焊接工艺的难点。

2. 焊接设备及焊接材料的选择及应用情况

选用摆动式气体保护焊自动焊接小车设备，型号为HK—8SS—W（见图2），此设备经过改进可以沿着曲面行走，主要用于弯扭箱型构件平焊位置的打底

焊接和填充焊接。

选用半自动气体保护焊设备，此种设备具备轻便灵活的特点，主要用于小夹角位置、立焊和仰焊等。

选用弧形小车埋弧焊设备（见图3），此种设备经过改进后可以沿曲面行走，具备埋弧焊高速焊接成形美观的特点，主要用于弯扭箱体构件的盖面焊接。

焊接材料的选择如表1所示。

3. 弯扭构件关键焊接工艺及焊接技术

(1) 坡口加工 弯扭板件的

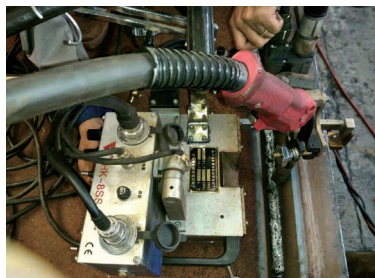


图2 摆动式气体保护焊自动焊接小车



图3 弧形小车埋弧焊

表 1

焊接方法	钢材	焊丝、焊剂型号	厂家
GMAW	Q345、Q390	ER50—6	大西洋、金桥
FCAM	Q345、Q390	E501T—1	大西洋、金桥
SAW	Q345、Q390	H10Mn2、SJ101	大西洋、金桥

坡口在无模成形前先采用机械加工的方式加工（见图4），坡口角度以 30° 为最佳，过大的坡口会增加熔敷金属，造成焊接变形过大。异型板件采取火焰切割坡口，坡口面应去除淬硬层，避免焊接接头晶粒粗大和脆硬现象。

（2）焊前准备和焊接环境 焊接前应清理焊接区域内的水分、油污及氧化皮等影响焊接质量的物质，并打磨露出良好金属光泽（见图5）。

天气气温 $\leq -10^\circ\text{C}$ 时必须停工或搭制保温房，一般作业气温应 $\geq 0^\circ\text{C}$ 。气体保护焊作业时风速若 $\geq 2\text{m/s}$ ，必须搭制防风棚才能进行施焊。

（3）预热、层间温度及焊后处理 预热方式采用火焰及电加热器两种方式，最低预热要求应符合表2要求。

层间温度控制在最低预热温度与 250°C 之间。预热焊接部位焊后应立即采用保温棉覆盖使焊道缓冷。

（4）焊接参数的选择 选用原则：采用小的热输入焊接，如表3所示。

（5）焊接工艺操作要点 在焊道中引熄弧时，引熄弧位置应错开 25mm 以上。引弧应采用回焊手法，熄弧应填满弧坑。焊接时应采用多层多道焊接，严禁宽幅摆动焊接（摆幅宽度限制为 20mm ）。盖面焊接时应充分

填满弧坑、焊道（包括引、熄弧板部位）。GMAW焊接中电弧终止处的焊坑，在重新起弧前清除焊渣等，并确认焊缝无焊接缺陷。进行多层焊接时，须清除前一道焊缝的焊渣以及焊道内的飞溅、杂物后才能实施下道焊接。可用锤击的方式减小焊接应力，但打底焊缝及盖面焊缝不可采用锤击。直线焊接时应注意保持焊接速度均匀，避免焊缝凹凸不平。定位点焊：焊缝长度为 $40\sim 60\text{mm}$ ，间距为 $300\sim 500\text{mm}$ ，焊脚尺寸为 $4\sim 6\text{mm}$ 。

4. 焊接变形的控制

弯扭构件主要以中薄板箱形为主，构件外形属细长杆类，箱体焊接的主要变形有挠曲（正弯）、侧弯、角变形及扭曲变形



图4 机械加工坡口



图5 坡口打磨

表 2

钢材类别	预热温度 / $^\circ\text{C}$	接头最厚部件的板厚/ mm		
		$20 < t \leq 40$	$40 < t \leq 60$	$60 < t \leq 80$
II (Q345)	—	40	60	80
III (Q390)	20	60	80	100

表 3

焊丝种类	焊接位置	气体流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	电弧电压/ V	焊接电流/ A	焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$
气保焊丝 $\phi 1.2\text{mm}$	F	20~25	25~33	260~320	20~40
	H	20~25	25~32	250~300	20~38
埋弧焊丝 $\phi 4.8\text{mm}$	F	—	32~38	650~900	28~38

等，必须在组装、焊接时加以控制。根据工厂对以往工程的制作经验，对于此类结构的变形，主要通过以下的方法进行控制。

(1) 焊接方法 以摆动式CO₂气体保护焊自动焊接小车设备为主，从而实现自动化焊接，最大程度上保障焊接质量。施焊时采用短路过渡技术，控制焊接变形。

(2) 焊接顺序 弯扭构件主体焊缝焊接顺序为：从中间向两边，采取分段退焊法施焊。弯扭构件主要以中薄板箱形为主，外形属细长杆件，头三道主体焊缝必须在胎架上有刚性固定的情况下焊接（横焊位置焊接见图6），施焊时由两名焊工同时在两侧对称进行。然后将构件翻转到水平位置采用自动焊接小车进行填充和盖面，焊接完毕后必须回胎检测矫正。

牛腿与弯扭本体施焊顺序为：先对称施焊牛腿腹板与弯扭本体腹板焊缝，再对称施焊牛腿翼板与本体翼板对接焊缝（见图7）。

节点处隔板与翼腹板焊缝施焊顺序为：先对称施焊隔板与腹板焊缝，再施焊隔板与上翼板焊缝，最后施焊隔板与下翼板焊缝。

(3) 合理的组焊顺序 采取“化整为零，集零为整”的分部装配法进行装配、焊接。如弯扭构件分解为弯扭本体和牛腿分别装配、焊接成形，矫正合格后，再进行总装、焊接（见图8、图9）。通过此种方法，可以把焊接应力分散到各部件中，焊接应力大为降低，将焊接变形的不利

影响控制到最小。

(4) 刚性支撑 箱体内部设置隔板以及角部定位器（见图10），外部设置马板、弓形夹紧器等（见图11），除了保证装配

精度，还可起到刚性支撑作用，控制焊接变形。

5. 焊缝质量检测

焊缝外观检测：焊缝需保持均匀，不得有裂纹、未熔合、夹



图6 主体焊缝焊接



图7 牛腿焊接



图8 牛腿单独组焊



图9 牛腿与主体整体组装

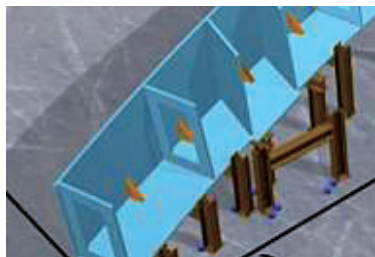


图10 隔板以及角部定位器



图11 弓形夹紧器

渣、咬边和气孔等缺陷。外观质量检查标准应符合GB50205—2001《钢结构工程施工质量验收规范》。

超声波无损检测：全熔透一级焊缝按焊缝条数及长度进行100%UT检测，内部缺陷评定等级不低于《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果的分级》

（GB11345—1989）标准规定的BⅡ级。

6. 结语

弯扭构件的制作精度是珠海歌剧院工程施工的关键，焊接工艺和焊接变形的有效控制又是保证弯扭构件制作精度的关键。珠海歌剧院构件的成功制作和安装是钢结构制作智慧和经验的结晶，也是全国优秀焊接工程的又一经典力作。

作者简介：阙子雄等，浙江精工钢构集团有限公司。