

国家体育场(鸟巢)钢结构安装工程 焊接技术

戴为志¹,黄明鑫²,芦广平^{3,4},高良¹,贾宝华¹,张伟¹

(1.长江精工钢结构(集团)股份有限公司 焊接研究所,浙江 绍兴 312030;2.长江精工钢结构(集团)股份有限公司,浙江 绍兴 312030;3.西安交通大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710049;4.北京城建精工钢结构工程公司,北京 100012)

摘要:国家体育场(鸟巢)钢结构安装工程焊接技术有:Q460-Z35 焊接性试验研究新技术;大规模采用电加热预(后)热技术;厚板采用 SMAW-GMAW-FCAW-G 复合新工艺技术;大面积采用仰焊技术;GMAW、FCAW-G 大流量防风技术;钢结构低温焊接技术;铸钢及其异种钢焊接技术;防止冷、热裂纹技术等 14 项。在此主要介绍了钢结构埋设件压力埋弧焊新工艺的开发与应用;柱脚拼装焊接技术理论依据阐述分析;控制应力应变具体实施;低温焊接技术;“鸟巢”钢结构焊接工程仰焊技术;厚焊接将成为建筑钢结构的主要焊接技术;异种钢焊接技术;“鸟巢”钢结构焊接工程合拢技术。这些技术在国家体育场(鸟巢)工程焊接中的运用,为建筑钢结构焊接工程施工提供了有益的参考。

关键词:“鸟巢”焊接工程;建筑钢结构;低温焊接;焊接技术

中图分类号:TG457 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-2303(2008)04-0051-26

Welding technique of the National stadium(Bird's nest)steel structure build project

DAI Wei-zhi¹,HANG Min-xin²,LU Guang-ping³,GAO Liang¹,JIA Bao-hua²,ZHANG Wei¹

(1.Welding Institute, Changjiang Jinggong Steel Structure(Group) Co.,Ltd.,Shaoxing 312030, China;2.Changjiang Jinggong Steel Structure (Group)Co.,Ltd.,Shaoxing 312030, China;3.Xi'an Jiaotong University,School of Material Science & Engineering,Xi'an 710049, China;4.Beijing City Construction Jinggong Steel Structure Engineering Company,Beijing 100012, China)

Abstract: The welding techniques of the National stadium (Bird's nest)steel structure building project adopted 14 technologies, including the new technical research for welding test,electrical heating preheating (after heating)technique,new multiplicity technique of SMAW-GMAW-FCAW-G for the thick plate,invented welding,prevention of cold or hot crack,and so on.The main descriptions were the development and application of new technologies,such as submerged arc welding for build-in-fitting steel structure;invented welding technology;the thick plate welding technique;the heterogeneity steel welding;the jointing technology of steel structure welding engineering,etc.These technologies were used in the welding engineering of the National stadium(Bird's nest),supplied useful reference for architecture steel structure project.

Key words: Bird's nest welding project;architecture steel structure;low temperature welding;welding technique

0 前言

国家体育场(鸟巢)钢结构安装工程焊接技术共

收稿日期:2008-01-27

作者简介:戴为志(1947—),男,重庆人,教授级高工,享受国务院政府特殊津贴,国家体育场(鸟巢)城建国华钢结构分部副总工程师/专家顾问、中国工程建设焊接协会常务理事、中国钢结构协会理事、中国钢结构协会焊接分会副理事长、长江精工钢结构(集团)股份有限公司顾问总工/焊接研究所所长,撰写 60 余篇技术论文,获国内外多项科技发明奖。

14 项,从柱脚锚梁板埋设件焊接开始到主、次桁架合拢。具体项目为:

(1)Q460-Z35 焊接性试验研究新技术;(2)大规模采用电加热预(后)热技术;(3)厚板采用 SMAW-GMAW-FCAW-G 复合新工艺技术;(4)大面积采用仰焊技术;(5)GMAW、FCAW-G 大流量防风技术;(6)钢结构低温焊接技术;(7)铸钢及其异种钢焊接技术;(8)防止冷、热裂纹技术;(9)层状撕裂防止和处理技术;(10)特



殊焊缝处理技术;(11)焊接机器人(FCAW-SS)焊接技术的应用;(12)钢筋 T 型焊接接头压力埋弧焊新工艺;(13)复杂钢结构应力应变控制技术;(14)特殊钢结构合拢技术。

“鸟巢”钢结构焊接工程所用的 14 项焊接技

术十分典型,基本代表了建筑钢结构焊接技术的发展方向,以此为线索,来阐述建筑钢结构焊接技术的发展,找出其方向性和规律性,供工作中参考。柱脚拼装、安装如图 1 所示,立柱上柱拼装如图 2 所示,立柱下柱拼装如图 3 所示。

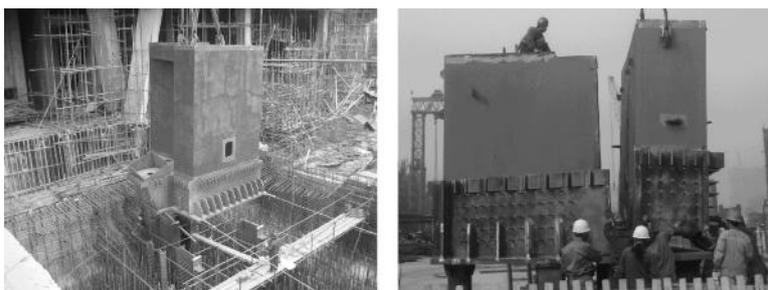


图 1 柱脚拼装、安装



图 2 立柱上柱拼装



图 3 立柱下柱拼装

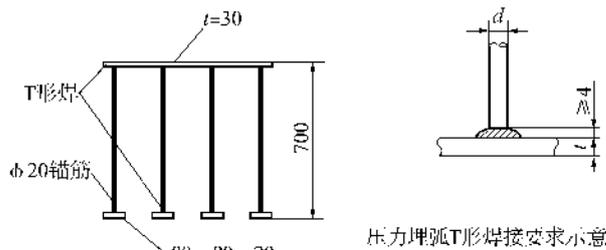


图 4 钢结构埋设件示意

1 国家体育场钢结构埋设件压力埋弧焊新工艺的开发与应用

在埋设件钢筋 T 型接头的焊接方法中,通常采用压力埋弧焊技术,但当时在国家体育场(鸟巢)工地上没有专用的压力埋弧焊机,用螺柱焊机取代压力埋弧焊接设备,是我们的基本思路。实践中对螺柱焊机进行了改造,同时研究和开发了焊接工艺,并成功地将此项技术应用于国家体育场的结构埋设件制作上,保证了焊接质量和工期。

1.1 钢结构埋设件

钢结构埋设件如图 4 所示。

1.2 钢板和钢筋材料

钢板材料全部为 Q345B,钢筋为 HRB400 级。钢

板 Q345B 钢板化学成分和机械性能如表 1、表 2 所示,钢筋 HRB400 化学成分和主要机械性能如表 3、表 4 所示。

表 1 Q345B 钢板化学成分

表 1 Q345B 钢板化学成分								%
w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(Al)	w(V)	w(Nb)	w(Ti)
0.200	1.000	≤	≤	≤	—	0.020	0.015	0.020
~	~	0.550	0.040	0.040	—	~	~	~
1.600	~	~	~	~	~	0.150	0.060	0.200

1.3 焊机改造

由于普通钢筋没有铝制引弧结加之瓷套保护套只适用于较小直径(小于等于 12 mm)栓钉,所以



表2 Q345B 钢板主要机械性能

屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ_s /%	冲击冲 A_{KV} /J(常温)
305	470~620	≥ 19	≥ 27

表3 HRB400 钢筋化学成分

$w(C)$	$w(Mn)$	$w(Si)$	$w(P)$	$w(S)$	碳当量
≤ 0.250	≤ 1.600	≤ 0.800	≤ 0.045	≤ 0.045	$C_{eq}=0.54$

表4 HRB400 钢筋主要机械性能

屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ_s /%
400	≥ 570	≥ 14

不能直接用于钢筋的焊接,同时也不满足设计要求。为此进行以下改造,如图5所示。

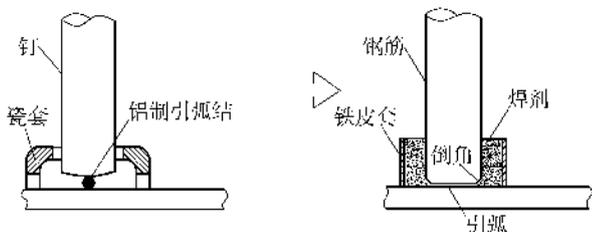


图5 焊机改造示意

螺柱焊与压力埋弧焊的比较如表5所示。

表5 螺柱焊与压力埋弧焊比较

项目	螺柱焊	压力埋弧焊
母材钢板 焊接厚度	严禁母材厚度薄于螺柱直径的1/3	严禁母材厚度薄于钢筋直径的1/3
应用直径	≤ 12 mm	≤ 22 mm
应用范围	只用于螺柱的焊接	应用钢筋与钢板T型焊接
引弧点	螺栓下部的铝制引弧结	不需引弧结,但钢筋端部须打磨平整并倒角
保护套	瓷套保护	自制铁皮套保护
焊剂	直径大于等于8 mm 螺栓用脱氧和稳弧焊剂;直径小于8 mm 的不做要求	必须使用脱氧和稳弧焊剂

1.4 焊接工艺参数的选择

1.4.1 焊接材料的选用

由于Q345B钢板与HRB400钢筋对焊,要求焊缝的抗裂性能良好,同时考虑到焊接接头应与母材等强的原则,选用碱性焊剂 CHF101。

CHF101 是氟碱型烧结焊剂,碱度约 1.8,呈球形颗粒,粒度 10~60 目,具有优良的焊接工艺性能,电弧燃烧稳定,焊缝成形美观,脱渣容易,焊缝具有较高的低温冲击韧性,可交、直流两用。

1.4.2 焊接方法

主要焊接工艺参数为:电流、通电时间、钢筋伸

出长度和提升高度。根据钢筋的直径不同以及被焊钢材表面状况选定不同的工艺参数。焊机进线铜芯不得小于 25 mm²,长度小于 100 m。当长度大于 100 m 时,进线应选用 35 mm²。φ 20 的钢筋选用的焊接工艺参数如表 6 所示。

表6 φ 20 钢筋焊接工艺参数

电流 I/A	时间当量 /格	伸出长度 l/mm	钢筋 垂直度/(°)	提升高度 h/mm
1 800	2	9~10	≤ 1	3.0~3.5

钢筋焊接前后伸缩如表 7 所示。

表7 钢筋焊接前后伸缩量

焊前 l_0 /mm	焊后 l_1 /mm	缩短 Δ l/mm
380.0	370.2	9.8
380.0	371.1	8.9
380.0	369.8	10.2
380.0	370.5	9.5
380.0	372.1	7.9
380.0	369.2	10.8
380.0	371.3	8.7

注:平均缩短量约 9.4 mm。

焊接过程结束,维持 4 s 以上时间等待焊缝成形后方可打开焊剂盒,将 T 型螺纹钉的锚板移出焊枪夹持部位后方可打开焊剂盒,移开焊枪,回收焊剂(清理焊渣)待下次重复使用。整个焊接过程约 2 min。钢筋提升、下压高度与时间相对关系如图 6 所示。

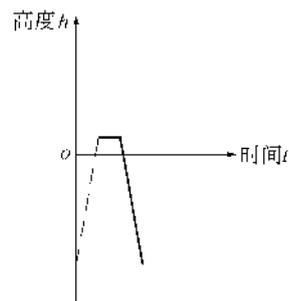


图6 钢筋提升、下压高度与时间相对关系

1.4.3 拉伸试验

拉伸试验如图 7 所示,实验结果见表 8。



图7 拉伸试验

专题讨论——奥运会场馆焊接暨国家体育场(鸟巢)焊接技术

表 8 拉伸实验结果

试件编号	规格 φ /mm	横截面积 S /mm ²	极限强度 σ /MPa	断裂特征及位置
1	20	314.2	600	焊缝脆断
2	20	314.2	575	焊缝脆断
3	20	314.2	615	母材,拉断

由表 8 可知试验符合设计规范要求,达到与母材等强。

1.4.4 焊缝宏观与微观金相组织

为了进一步证实试验的可靠性,进行了宏观和微观分析。试验项目见表 9。

表 9 实验项目

工程名称	试件名称	试样材质
国家体育场	柱脚埋设件	φ 20 钢筋 HRB400、钢板 Q345B
检验项目	检验标准	环境条件
宏观金相、微观金相	GB226-1991, GB/T13298-1991	27℃~29℃

(1)宏观金相。

采取与焊接方向垂直的截面为试验面,将该试验面冷加工磨削后,再手工精磨抛光,用硝酸溶液腐蚀,经过观察发现焊缝与钢板之间无缺陷。柱脚埋设件宏观金相照片如图 8 所示。

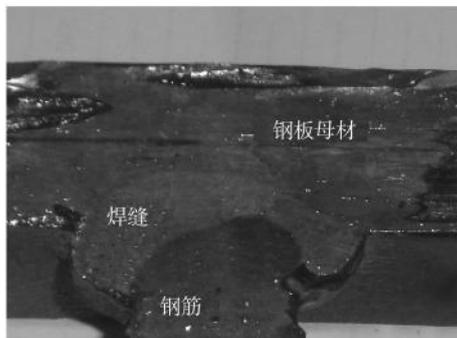
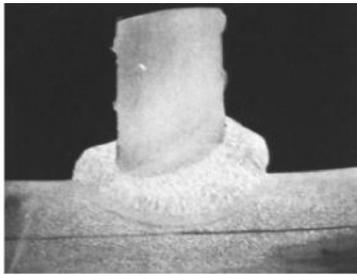


图 8 宏观金相试验

(2)微观金相组织。

焊缝区大多为粒状贝氏体和针状铁素体交叉混合分布,还有部分方向性分布的粒状贝氏体和少量侧板条贝氏体,所有的粒状贝氏体中的岛状相和侧板条贝氏体多数已分解,如图 9 所示。

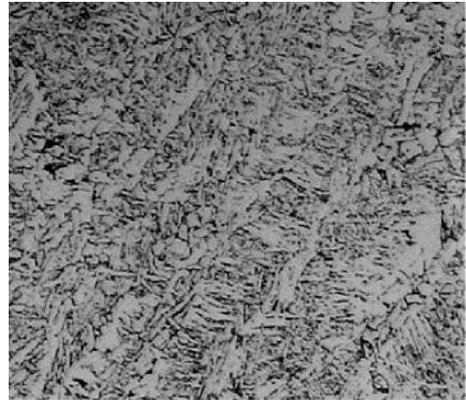


图 9 微观金相 1

a. 钢筋侧热影响区。

①粗晶区。晶内多数为粒状贝氏体和针状铁素体交叉混合分布,还有一些自晶界向晶内生长分布的粒状贝氏体和侧板条贝氏体。粒状贝氏体中的岛状相和侧板条贝氏体大多都已分解,如图 10 所示。

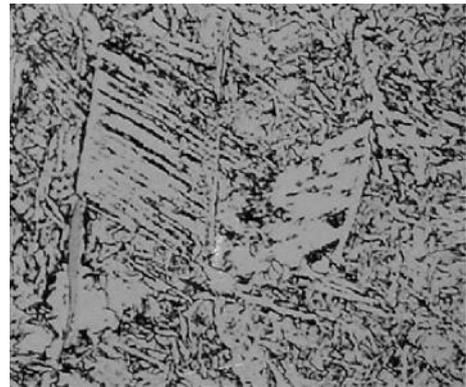


图 10 微观金相 2

②细晶区。组织没有根本变化,只是晶粒明显小于粗晶区。

③不完全重结晶区。铁素体、珠光体及少量保留有方向性粒状贝氏体和侧板条贝氏体的形貌组织,粒状贝氏体和侧板条贝氏体形貌的组织基本全部分解。

b. 钢板侧热影响区。

①粗晶区。晶内多数为方向性分布的粒状贝氏体和侧板条贝氏体,还有一些粒状贝氏体、针状铁素体交叉混合分布的组织;粒状贝氏体中的岛状相部分已分解,如图 11 所示。

②细晶区。晶粒明显细化,组织为铁素体、珠光体和仍保持方向分布的粒状贝氏体,粒状贝氏体中岛状相已全部分解。

③不完全重结晶区。多数为铁素体和珠光体组织呈带状分布,还残留有方向性粒状贝氏体形貌的组织,其中岛状相全部分解。

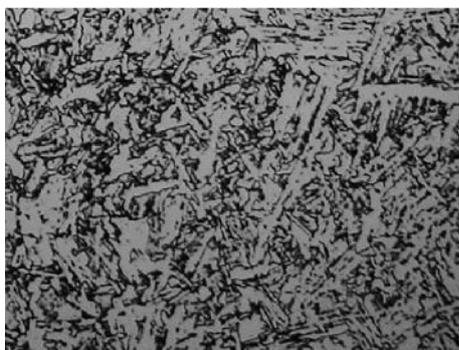


图 11 微观金相 3

1.5 工程应用

根据试验结果,对焊接工艺进行了总结,如表 10 所示。

国家体育场有 500 多个埋设件、1 万多接头,全部按此焊接工艺进行焊接,施工过程中对 T 型接头

表 10 焊接工艺参数

钢筋规格 φ /mm	电流 I/A	电压 U/V	时间 当量/格度	伸出长 l/mm	钢筋垂 直度/(°)	提升高 度 h/mm
8~22	1 800~2 000	40~50	2	9~10	1~5	3.0~3.5

抽检 40 多件,全部试验合格。目前国家体育场钢结构柱每根柱质量 700 多 t,没有发生因埋设件焊接质量而引起柱子安装变形。

2 柱脚拼装焊接技术理论依据分析

在国家体育场(鸟巢)钢结构安装焊接的全过程中,最复杂的阶段是柱脚的拼装焊接。由于运输条件的限制,到场柱脚钢构件十分零散,为了避免现场拼装过程中 Q460E-Z35 的对接,改变了原有的分段方案,又加大了柱脚构件拼装的难度。“鸟巢”12 号柱脚到货状态如图 12 所示。

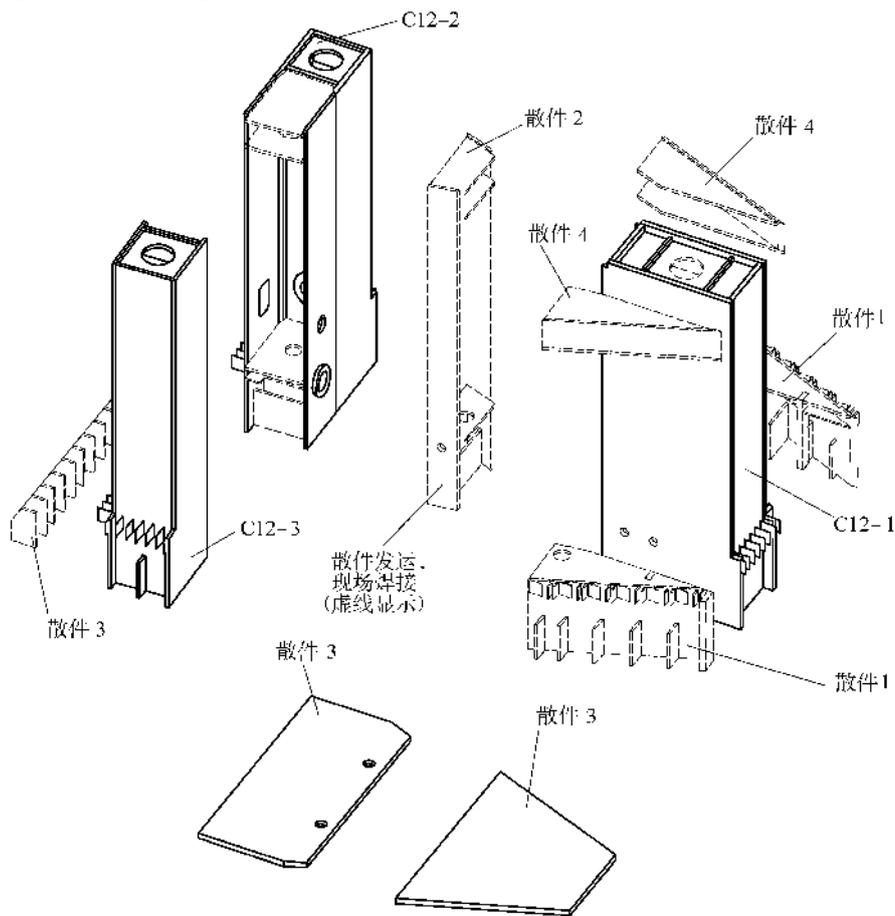


图 12 “鸟巢”12 号柱脚到货状态

柱脚是封闭结构,根据设计要求大部分焊缝为全熔透一级焊缝,按 UT-B I 级检测标准检验,由此焊接难度大大增加。真正反映工程难度的关键主要有以下三点。

(1)柱脚结构采用 Q345C、Q345GJD、Q460E-Z35 钢材、且厚度大,有一定的淬硬倾向;Q345GJD 厚 100 mm;Q460E-Z35 厚 100~110 mm。焊接涉及到典型全位置即平、立、横、仰、斜;焊接工作量大,焊缝

专题讨论——奥运会场馆焊接暨国家体育场(鸟巢)焊接技术

集中,因此控制焊接应力应变的焊接顺序编制十分困难;柱脚顶部与立柱和铸钢件有配合关系,允许错边量为 ± 3 mm,板厚构件质量大,对变形和应力的控制相当严格。

(2)封闭的柱脚钢结构内的筋板为传力构件,几乎 100%设计要求全熔透一级焊缝,这个规定给焊接带来不少困难。

(3)封闭柱脚钢结构内施焊场地十分窄小,焊工技术发挥十分困难。

由于“鸟巢”钢结构焊接工程准备工作非常充分,因此在施工顺序的安排上,作出了“拼装工程吊装服从于焊接”的决定。这是因为柱脚结构焊缝纵横交错,有的焊缝在构体之下,根据所排定的焊接顺序不可能在拼装成柱脚整体后实施。焊接工作在拼装过程中进行,先装什么、后装什么与焊接顺序密切相关,所有一切都表明:焊接顺序是柱脚焊接工程成败之关键,这样的思路代表了复杂钢结构拼装特殊的工艺方法。

焊接应力及应变(变形)是焊接过程中的一对矛盾。是客观存在而无法避免的,只有根据应力应变的固有规律,因势利导,使矛盾向所需要的方向转化。

设焊缝的总能量为 $E_{\text{总}}$

$$E_{\text{总}} = E_{\text{有}} + E_{\text{损}} + \sigma_{\text{残}} + \varepsilon = 1, \quad (1)$$

式中 $E_{\text{有}}$ 为冶金反应形成焊缝有用能; $E_{\text{损}}$ 为焊接过程中的损耗,无用功,包括幅射、对流和传导方式损失的能量; $\sigma_{\text{残}}$ 为焊接残余应力(短时间内为一常量); ε 为焊接变形的定量测量。

当冶金反应结束后,因 $E_{\text{有}}$ 在冶金反应中转化为焊缝成形, $E_{\text{损}}$ 在幅射、对流、传导中损失。所以式(1)转换为式(2)

$$\sigma_{\text{残}} + \varepsilon = C < 1, \quad (2)$$

式中 C 为常量。

从理论上分析,式(2)表明焊接残余应力和变形是存在同一焊件的不同能量形成,服从于能量守恒定律,矛盾的双方相辅相成,并可以互相转化,减少一方必须增大另一方。

为什么把“ C ”作为常量呢?道理十分简单:事实上应力应变之和是一个变量,只是发生变化的时间很长,同焊接柱脚的时间相比,焊接柱脚的时间完全可以忽略不计。在短时间内对应力应变几乎不起作用,因此把“ C ”作为常量。

由于焊缝在焊接过程中近缝区产生压缩塑性

变形,因此接头冷却后产生焊接残余应力,目前在理论上对于焊接残余应力分布规律影响因素有了一定的认识和理解,但是从定量的观点上看,由于情况复杂、多变,因而无论计算还是实测都存在一定的误差。因此,式(2)的工程应用价值也仅限于定性分析。

在实际焊接中,单向残余应力极为少见,一般都是以双向和三向应力状态出现,中等厚度以下焊件(实际中 $\sigma \leq 36$ mm),除了要产生平行于焊缝的纵向应力外(σ_{\parallel}),同时还要产生垂直于焊缝方向横向的残余应力(σ_{\perp});而对于厚大截面构件(通常认为 $\delta \geq 40$ mm),还将产生沿钢板厚度方向分布的平行于厚度方向的残余应力(σ_{δ}),而式(2)把上述复杂的应力状态全部作为($\sigma_{\text{残}}$),这就使较为复杂的应力状态变为能量形式便于理解和运用。

由式(2)可知,在同一焊件中,应力应变之和是一常量,它们相辅相成,可以互相转化,减少一方,必须增加别一方。式(2)作为一种思维模式具有很高的实用价值,在柱脚的拼装工程中起到了举足轻重的作用。

基于式(2)原理,在柱脚拼装工程中主要有以下几点做法。

2.1 排定整体焊接顺序

根据式(2)原理,拼装的顺序服从于焊接要求。首先拼成部件,其焊缝在拼装过程中完成,这时部件处于自由状态,变形大而应力小,拼装时应预留焊接收缩量。

焊接收缩量按式(3)计算^[1]

$$\varepsilon = K \frac{AN}{\delta}, \quad (3)$$

式中 ε 为焊缝的横向收缩量(单位:mm); AN 为焊缝的截面积(单位:mm²); δ 为构件的板厚(单位:mm); K 为系数, $K=0.1\sim 0.2$ 。当 R_F (拘束度)高时, $K=0.1$; 当 R_F 低时, $K=0.2$; 当 R_F 居中时, $K=0.15$ 。

经验公式均因不确定因素而影响其计算精度,其中以拘束度为主要因素,在使用式(3)之前对拘束度 R_F 要进行认真的分析研究,最后决定取舍(在长期实践中认为,横向收缩量式(3)相对准确一些)。

全部构件组装完成之后,按以下顺序进行焊接:(1)焊柱脚底座仰焊焊缝;(2)焊横焊焊缝;(3)焊立焊焊缝;(4)焊接内部筋板焊缝;(5)其他辅助焊缝。



通常柱脚内部筋板先焊,而“鸟巢”钢结构焊接工程柱脚要后焊筋板。在编排柱脚焊接顺序过程中发现:先焊内后焊外是一个误区,特别在厚板焊接工程中尤为如此。如果先焊筋板,再焊环焊缝,这时的筋板便成为环焊缝的约束、形成焊缝金属强大的拉应力场。就象“斜Y试验”一样,焊缝极有可能在焊接过程中出现热裂纹(在类似工程中焊缝就因筋板约束而形成热裂纹,造成返工)。这种缺陷的形成机理可以用式(2)来解释:结构刚性太大,变形基本无法形成,致使强大的拉应力场的应力值大于开裂临界应力所致。

2.2 典型焊接工艺与分析

根据上述分析和整体焊接顺序,为进一步阐明其中道理,分别对主要工序作以下说明。

(1)柱脚底座仰焊焊缝的焊接。

在全部构件组装完成后,仰焊焊缝便可进行焊接。究其原因,根据式(2)原理,利用柱脚本身自重对仰焊焊缝进行约束,控制形变,从而保证柱脚尺寸精度。

柱脚底板仰焊坡口采用X型,大面 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、 $2t/3$ (平焊位置,板厚的三分之二),小面 60° 、 $t/3$ (仰焊位置,板厚的三分之一)。

根据拟定的焊接顺序,先焊平焊至焊缝的 $2/3$,焊缝应产生较大角变形,因为柱脚上部自重不能完全限制变形的发生,这时应当立即停止焊接。

接着在仰焊位置开始气刨,气刨结束后,仰焊第一层,这时有可能角变形消失,如果底板还原,平焊的第二层和仰焊同时开焊,如果还存在影响组装精度的残余变形,继续仰焊第二层,直到变形消除为止。

柱脚底板还原以后,平焊、仰焊同时对称进行。这时的关键是平焊、仰焊的焊接速度基本一致,以获得均匀的受热而达到控制变形的目的,这种焊接方式一直到焊接工程结束。

在开始焊第一条仰焊焊缝(13号柱脚)时,仰焊位置的坡口是大面坡口,平焊是小面坡口,焊接顺序是按照先焊仰焊,平焊刨根,再焊平焊,最后对称同时焊接的方式。不难想象,这种坡口形式增加了仰焊的工作量,从而影响工程进度。

根据式(3),仰焊、平焊坡口大小不一致,必然带来不均匀的角变形,单从理论分析,其结论应当说是正确的,但工程中实际情况就不一样了。

a. 大、小面坡口由于角度大小正好相反,热输入

量虽然有一定的不同,但其值相差不大。

b. 厚钢板的角变形应当以钢板的中心为基准,大面坡口超过 $t/2$ (即一半板厚)焊肉不能计入大面产生角变形焊缝截面积,大、小面坡口截面积的差距因此而缩小。再者,小面刨根后,焊缝截面积有所增加。任何焊缝都不可能做到100%的均匀,不均匀带来应力应变的不一致在柱脚本身自重的约束下得到控制,完全可以保证尺寸上的精度要求。这就是要把柱脚全部组装完成后再正式焊接仰焊焊缝的道理所在。

(2)横焊缝的焊接。

由于运输单元的区别,“鸟巢”钢结构焊接工程柱脚拼装各不相同,有的柱脚没有仰焊焊缝,这种柱脚就可以直接焊横焊缝。柱脚横焊缝是典型的长焊缝,焊接成败的关键就是尽量使焊缝应力应变均匀,收缩量基本一致,以此来保证柱脚尺寸精度。要达到这个目的,首先抓好坡口质量,整条焊缝坡口间隙基本一致。这样在一致的焊接规范下,其收缩量可以保证基本一致。

在长焊缝焊接中,焊接顺序和方向将决定 σ_y 的分布和大小。从焊接应力应变控制的角度看,从头焊到尾的方法会使应力分布极不均匀。端头部分的拉应力十分强大,假如端头存在焊接缺陷,应力集中的情况就十分严重,同时也是产生热裂纹的必要条件之一。同理, σ_y 数值上是基本平衡的,由于分段倒退焊接,使长焊缝的 σ_y 均匀分布,这是我们所希望的。柱脚横焊长焊缝的基本焊接方法是:确定焊接方向,采用分段倒退法,获得成功。

(3)柱脚立焊长焊缝的焊接。

“鸟巢”钢结构焊接工程中,几乎所有的立焊焊缝长度都在3m以上,该焊缝有多种焊接方法,典型的方法有两种。

a. 从下向上焊接。这种方式如果没有特定要求,基本上绝对否定,因为纵向收缩引起横向变形会使焊缝末端坡口间隙变小,从而影响末端尺寸的精度。

因此,在柱脚立焊(V)长焊缝的焊接上,采用了另外一种焊接方式。

b. 首先焊有尺寸要求的末端焊缝,并在末端设置千斤顶约束焊缝,也就是希望增加焊接残余应力使柱脚变形小来保证尺寸精度,因此焊缝末端的横向应力有所增加,但肯定在安全值内。当末端焊缝正式构件约束焊接完成之后,其余焊缝按分段倒退焊法完成焊接,这个工艺对于保证安装尺寸精



度起到了十分重要的作用。

(4)筋板的焊接技术。

柱脚内部的筋板焊接要求一次合格率为 100%。这是因为柱脚内部施工场地十分狭窄,如果有返工将会造成更大的焊接难度。那么怎样才能达到这个目标呢?

在筋板焊接过程中,焊接顺序是决定应力是否均匀一致的关键,也是决定热裂纹是否产生的关键。不同的焊接顺序,将决定不同的应力分布,也就是说将决定焊接是否成功。

两边向中间焊和中间向两边焊会得到两种不同的结果。显然,两边向中间焊将为热裂纹提供应力场的必要条件。因为在焊缝的端头造成应力集中,所以这种方法在筋板焊接中,不能使用。

在筋板的焊接方法中,采用从中间开焊的方法,即从中间向两边焊,焊缝一次合格率达到 99.7%。

3 控制应力应变具体措施

国家体育场(鸟巢)钢结构马鞍型双曲面结构是旋转对称体系,对焊接而言规律性不强,在一个安装单元内毫无规律,因此采取了以下思想路线。

3.1 焊接工程的总体思路

协同安装,科学编程,六个统一,攻坚克难;先主后次,先大后小,高能密度、较小输入,分段跳焊,应变适当,工程全优。

(1)首先分析计算整体钢结构应力的分布状况,确定起始焊缝和合拢焊缝的位置,然后按总体思路进行工作。

国家体育场(鸟巢)钢结构立柱和主结构共同形成完整稳定的钢结构系统,由于各处截面和形状的差异,受力状况各不相同,这对焊接技术提出了很高的要求,特别是起始焊缝和合拢焊缝位置将决定结构体系应力和焊接残余应力的关系,所有的思路都是围绕着合拢焊缝强大的应力状态的位置是否与钢结构体系应力集中点相重合的关键点展开。原则上两处不能重复,否则应力叠加对钢结构体系不利。(注:此处的“合拢”是指一个局部钢结构整体形成的焊缝,是广义的“合拢”概念。)

(2)协同安装。协同安装工艺共同决定每一根主结构的安装顺序,确认起始点和合拢点,合拢点严禁在构件自重应力的集中点。

国家体育场(鸟巢)钢结构工程吊装和焊接的协调有两大原则:**a.** 柱脚拼装。吊装服从于焊接;**b.** 其

余结构,特别是主结构的安装,焊接服从于吊装。在其他结构的吊装过程中,由于钢结构体系的特殊性和控制焊接应力应变的难度,焊接仍然给吊装提出了很高的要求。这就是确认起始点和合拢点,从理论上分析,起始点是焊接残余应力最小,但变形最大的地方;合拢点是变形最小而残余应力最大的地方。两处特点鲜明,正好相反。在钢结构体系应力应变的分析基础上,完全可以根据起始点和合拢点的特点作为“鸟巢”整体钢结构体系的互补,使国家体育场(鸟巢)钢结构体系应力应变尽可能地均匀一致。起始点的另外一个作用是结构安装安全所需要的必须先焊的焊缝。

(3)科学编程。

以 JGJ81-2002《钢结构焊接规程》为指导思想,以焊接应力变形控制的理论为基础,编制科学合理的焊接程序,有效控制钢结构整体的应力和变形,使焊接残余应力和变形相对合理的存在结构之中,希望焊接应力不至于过大而影响结构安全(尽可能小),又不希望有过大形变而影响美观。为了实现这一目的,必须应用焊接技术理论对焊接顺序仔细编排,从全局出发,综合考虑每一条焊缝的焊接顺序。

(4)六个统一。

即执行焊接程序的组织保证:**a.** 施工各单位必须统一严格执行焊接程序——《焊接方案》;**b.** 统一进行焊接程序——《焊接方案交底》;**c.** 统一焊接技术(焊接方法);**d.** 统一焊接工艺评定;**e.** 统一焊工培训、考核;**f.** 统一质量检测。

焊接技术上的统一,为钢结构深化图纸设计提供了技术支持,特别是大规模的采用仰焊技术,不仅减少了焊接工作量,而且使国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程的工期提前,成本大大降低。

(5)攻坚克难。

重点抓好三个工艺评定:**a.** Q460 钢的焊接工艺评定;**b.** 厚板焊接工艺评定(分层);**c.** 铸钢与钢、异种钢的焊接工艺评定,特别是铸钢 GS-20Mn5V 和 Q460E-Z35 的焊接工艺研究。应注意:重要的焊缝先焊,次要的后焊;收缩量大的先焊,收缩量小的后焊。尽量采用如渣气联合保护焊和减少应力的焊接工艺。

(6)高能密度、较小输入。

采用电流密度较大的 GMAW、FCAW-G 技术,尽量小的热输入量的方法。



(7)分段跳焊。

对于较长焊缝,采用分段跳焊的方法,可以有效地控制应力应变,特别是采用分段倒退跳焊法,可以使整条焊缝受热基本均匀,从而达到焊接残余应力和应变基本均匀的目的。

(8)应变适当。

根据焊接应用技术理论,在具体工作中正确掌握焊缝残余应力、焊接残余应变的尺度,希望得到的结果是焊接残余应力在允许范围,且没有影响观感质量的焊接残余变形,即安全又美观。

(9)工程全优。

要达到这一目的,必须做到上述8条,并且要求有创造性的发挥,在实践中弥补方案中的不足,良好地控制“鸟巢”钢结构焊接工程的应力应变。

3.2 主结构焊接的指导思想

(1)焊接位置 and 技术的确定。

主结构全部采用全位置焊接方式,其重点是仰焊。初步决定用三种工艺进行,第一种是 SMAW,第二种是 SMAW+FCAW-G,第三种是 SMAW+GMAW+FCAW-G。

(2)焊接顺序。

控制两点,确定方向,单杆双焊,双杆单焊,逐渐向合拢点逼近。

主要是控制起点和固定口。起点作为结构安全和稳定的必须控制点;固定口不能设置在构件重心或靠近重心和应力集中的地段。

根据主结构“分区安装,分步进行,基本对称,控制合拢”的思想,焊接程序应当是:**a.** 以柱为点,弧线同步,内外并进,分头进行,监测应变,谨慎合拢。**b.** 扇形分中,多点同步,分向进行,异向合拢。

主结构焊接顺序示意如图 13 所示,主结构总体焊接顺序为:

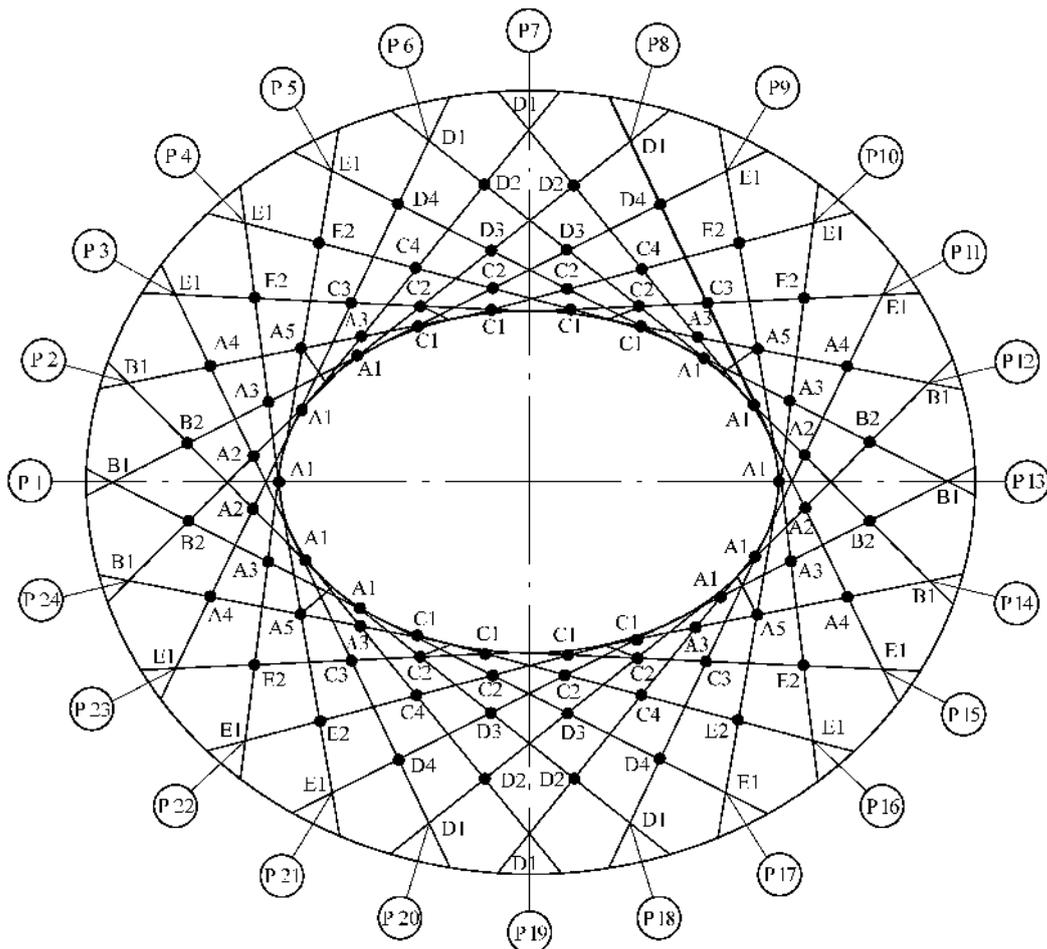


图 13 主结构焊接顺序示意

第一阶段:A,B。A 为内圈节点,B 为外圈节点;由内向外的方向焊接标志及顺序为 A1、A2、A3、A4、

A5;由外向内的方向焊接标志及顺序为 B1、B2。
第二阶段:C,D。C 为内圈节点,D 为外圈节点;

专题讨论——奥运会场馆焊接暨国家体育场(鸟巢)焊接技术

由内向外的方向焊接标志及顺序为 C1、C2、C3、C4；由外向内的方向焊接标志及顺序为 D1、D2、D3、D4。

第三阶段:E。由内向外的方向焊接标志及顺序为 A、C、E；由外向内的方向焊接标志及顺序为 E1、E2。

内圈的焊接顺序:由内向外的方向焊接标志及顺序为 A、C、E；由外向内的方向焊接标志及顺序为 E1、E2。

在焊接方法上采用气体保护焊、渣气联合保护等高能密度的焊接方式和小的焊接线能量(即小的 $E_{总}$)，从而获得较理想的焊接变形和残余应力状态。在具体消除应力的措施上,对长焊缝采用分段跳焊的方法,贯彻焊接顺序的总体思路肯定可以获得稳定的钢结构构件屋顶尺寸和合理的焊接残余应力,从而保证工程的安全可靠。

单杆双焊即两根梁与柱间的焊缝如图 14 所示。采用两人对称焊,要求保证焊接速度一致,焊接电流、电压参数一致;双杆单焊即横梁与立柱焊接如图 15 所示。先焊接一端,待焊缝温度冷却至常温方可进行另一端的焊接。



图 14 单杆双焊

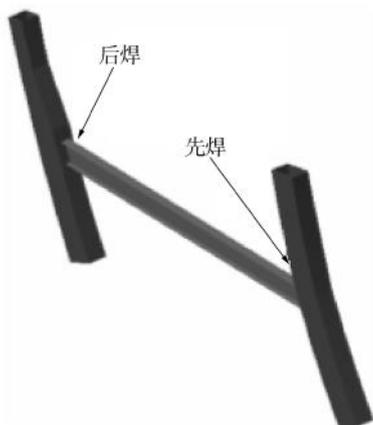


图 15 双杆单焊

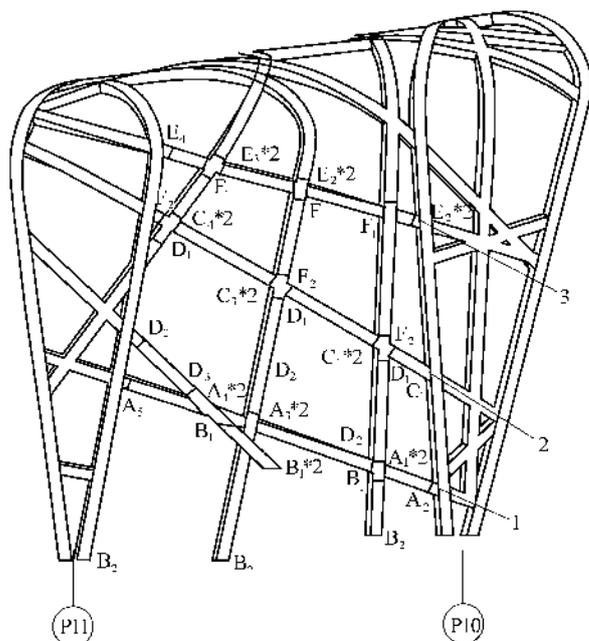
3.3 次结构的焊接顺序

按吊装顺序进行,原则上先焊横杆件后焊竖杆件。

从下向上(立面次结构),以桁架柱(主结构)为中心对称施焊;自由变形控制合拢。

次结构安装难度大,由于次结构无规律可言,焊接方法只能原则控制,以立柱为中心对称施焊可获得均布应力,采用自由变形的方法可以最大限度地减少焊接应力。

柱间次结构的焊接先于主桁架,根据分段安装顺序采取逐段由下往上,先焊横向杆件予以定位,后焊竖向杆件的顺序。并按照三柱间两小区同时对称施焊的原则。典型立面次结构焊接顺序如图 16 所示。



说明:(1)焊接顺序接 A→B→C→D→E→F,2 装上后可焊 1 以下区域,3 装上后可焊 2 以下区域,最后焊 3 以上次结构;(2)先焊横杆,后焊竖杆;(3)数据相同的同步焊接,字母脚标为焊接顺序,脚标后的数字为焊口数,其中对称焊口为同步焊接。

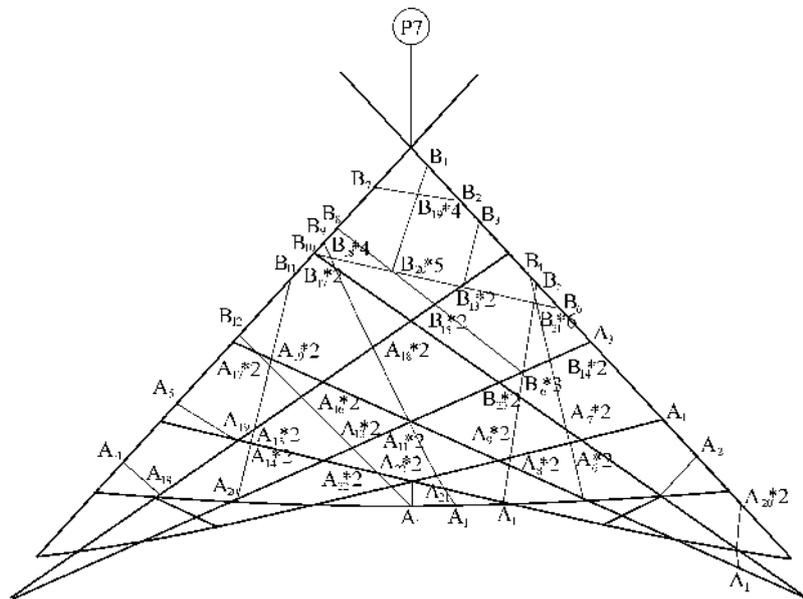
图 16 典型立面次结构焊接顺序示意

顶面次结构焊接顺序。以主桁架为主干对称焊接,每一焊接单元由外向内,由两端向中间焊接。典型顶面次结构焊接顺序如图 17 所示。

4 低温焊接技术

我国冬季覆盖范围大,建筑钢结构焊接工程冬季施工倍受焊接界人士的关注。钢结构焊接工程能否在冬季施工?有没有临界施工焊接的最低温度?历来是学术界、工程界致力解决的难题。

根据美国国家标准 AWS D1.1/D1.1M:2006《钢



说明:(1)焊接顺序——A由内向外焊接,B由外向内焊接;(2)焊接原则——以主桁架为主干对称焊接;(3)顺序中的脚标数为焊接的先后顺序,脚标后的数字为焊接的焊口数,其中对称焊口为同步焊接口。

图 17 顶面次结构焊接顺序

结构焊接规范》规定: -20℃为停止焊接的温度,但又申明采取了相应措施仍然可以焊接。我国 JGJ81-202《建筑钢结构焊接技术规程》规定:焊接作业区环境温度低于 0℃时,应根据钢材、焊材制定适当的措施;而日本建筑学会 JASS6《钢结构工程》规定的最低施焊温度为 -5℃。这些标准各不相同的规定说明:各国有各国的具体情况,没有统一的“临界施焊最低温度”的定义,只能根据具体情况,作出适合于客观环境的正确决策。

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程,有 10000t 以上的钢结构要在冬季完成焊接施工,根据工程实际认为:冬季施焊的临界温度不能只从钢材、焊材的承受能力来规定,而必须从人、机、料、法、环五大管理要素来确定,不能简单从事。根据这一基本思想,国家体育场(鸟巢)组织了很大规模的低温焊接试验,成效良好,制定《国家体育场钢结构低温焊接规程》,确定 -15℃为停止施焊的温度。

4.1 建筑钢结构焊接工程冬季施工可行性理论分析

钢结构低温焊接对焊缝金属危害的直接表征就是出现裂纹和工作状态下发生脆断,其脆断机理受温度下降的速率变化而变化,有一定的客观规律。

(1)焊接接头脆性断裂的分析。

焊接接头的脆性断裂是焊接接头中最可怕的失效形式,其后果往往是灾难性的,它是在应力不高于设计应力和没有显著塑性变形的情况下发生的。

脆性断裂的裂口平整,一般与主应力垂直,没有可以察觉的金属塑性形变,断口有金属光泽。

同一种材料在不同的条件下可以显示出不同的破坏形式,最主要的是温度、应力状态和加载速度,也就是说温度越低,加载速度越大,材料中的三向应力状态越严重,则产生脆性断裂的倾向越大。

a. 应力状态的影响。

实验证明,当材料处于单轴式和双轴式拉应力下,呈现塑性;当材料处于三向拉应力下,则不可能发生塑性变形,呈现脆性。在实际结构中三向应力可能三向载荷产生,但在更多的情况下是由于几何不连续引起的,设计不佳、工艺不当往往出现局部的三轴状态的缺口效应。因此脆断事故一般都起源于具有严重应力集中效应的缺口处,而试验中也只有引入这样的缺口才产生脆性行为。

b. 温度的影响。

如果把一组开有相同缺口的试样在不同温度下进行试验,则随着温度的降低,其破坏方式会发生变化,即从延性破坏变为脆性破坏。当温度降到某

专题讨论——奥运会场馆焊接暨国家体育场(鸟巢)焊接技术

一临界值时则出现塑性到脆性的转变,这个温度称之为脆性转变温度。脆性转变温度高,则脆性倾向严重。带缺口的试样转变温度比光滑试件的高,这与应力状态影响结论是一致的。

c. 加载速度的影响。

提高加载速度能促使材料脆性破坏,其作用相当于降低温度。应当指出,在相同的加载速率下,应变速率有缺口比无缺口的高得多,从而大大降低了材料的局部塑性,这就说明了钢结构一旦开始脆性断裂,就很容易产生扩展的现象。当缺口根部小范围金属材料发生断裂时,则在新裂纹前端的材料会突然受到高应力和高应变载荷,也就是说一旦缺口根部开裂,就有高的应变速率,而不管其原始加载条件是动载还是静载,此时伴有裂纹的加速扩展,应变速率更加急剧增加,导致结构最终破坏。

d. 材料状态的影响。

材料状态包括材料厚度、晶粒度和化学成分。

①厚度的影响。

厚板在缺口处容易形成三向应力,因此容易使材料变脆。把 45 mm 的钢板通过加工制作成板厚为 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm 的钢板,研究不同板厚所造成不同应力状态对脆性破坏的影响,发现在预制 40 mm 长的裂纹和施加应力等于 $\sigma_s/2$ 的条件下,发生脆断的脆性转变温度随板厚增加而直线上升,当板厚超过 30 mm 时,脆性转变温度增加得较为缓慢。

②晶粒度的影响。

对于低碳钢和低合金钢,晶粒度越细,其脆性转变温度越低。

③化学成分的影响。

钢中的 C、Ni、O、H、S、P 会增加钢的脆性,加入适量的 Mn、Ni、Cr、V,则有助于减少钢的脆性。

(2)低温焊接条件下,焊缝的冷却速度较常温焊缝要快得多,直接后果是影响二次结晶的重要参数 $t_{8/5}$ 下降,随之出现淬硬组织,硬度增加,因此冷裂纹的敏感性也相应增加。

(3)在结构拘束度很大的前提下,焊缝的冷却速度过快,极易增加焊缝一次结晶的区域偏析,在较强的拉应力场作用下,在焊缝中心发生结晶裂纹,是热裂纹的一种形式。

(4)冷裂纹的延迟效应增加,焊缝金属在冷却过程中,游离氢的溶解速度降低,冷却速度变快,氢逸出时间变短,因此残留在金属中的比例增大,使冷裂

纹效应增加。延迟效应与残留在金属中的氢含量成正比。

(5)低温下发生脆断的可能性增加,特别是对焊缝进行快速加载时其危险性增加,此时临界转变温度会上升,在拉应力和焊接残余应力的共同作用下(三向应力),结构的静载荷强度大幅降低,极大可能在远低于材料的 σ_s 点的外力作用下发生脆断,如吊耳焊缝。

(6)预热效果变差。相同的温度、相同的预热时间,低温下的效果远比常温差焊缝的层间温度保持相对困难。

通过以上 6 点分析,基本阐明了建筑钢结构焊接工程冬季施工的理论规律,从中也可以找到冬季施工及低温焊接试验的正确思想。不难发现,冬季施焊的两大关键:**a.** 尽量避免三向应力状态下施焊;**b.** 努力提高焊接环境和结构构件的实际温度。

钢材不是水,就钢材的焊接性而言,在 0℃ 或者 -5℃ 时,钢材的焊接性不会产生突变。因此,规定 -5℃ 为低温焊接禁区,其实是理论根据不足。

对冬季施工低温焊接而言,焊接界一直在思考和研究两大问题,这就是钢材低温焊接有没有极限温度?钢材的低温焊接临界温度是否存在呢?

建筑钢结构焊接工程是以“人、机、料、法、环”,全员、全面、全过程管理的综合性工程。所谓的极限温度应当是一个综合指标,而不能以某一环节、某一因素来决定,仅仅依靠钢材的指标来确定低温焊接的极限温度是不科学的,因此只能依靠大规模、严格的科学试验研究的最终结果进行综合分析最后来确定。可以肯定地说,绝非是 -5℃ 所能全部包涵。

而钢材焊接性突变的临界温度,目前理论上尚未定论,既使有,估计要低于钢材的脆性转变温度,对焊接工艺而言没有多大的实际意义。

根据以上分析可知:建筑钢结构焊接工程低温焊接试验应当有五大任务(或者说五大目标)。

a. 通过大规模的综合试验,确定冬季施工低温极限温度。

b. 通过准确的低温焊接试验,找出在低温环境中影响焊接接头质量的具体指标。

c. 通过准确的试验分析,找出低温环境影响焊接接头质量指标的内在规律。

d. 通过较长时间的低温焊接试验,摸索焊接



管理经验。

e. 根据低温焊接试验的结果及其分析,编制《国家体育场(鸟巢)钢结构低温焊接技术规程》,指导国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程施工。

4.2 国家体育场(鸟巢)钢结构低温焊接试验结果汇总

根据国家体育场(鸟巢)钢结构低温焊接试验研究的五大目标,汇总试验的全部结果如下。

(1)关于建筑钢结构焊接工程冬季施工极限温度的确定。

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程冬季施工的最低温度为-15℃。

美国 AWS D1.1 中,对钢结构低温焊接温度限制为-20℃,并说明只要采取措施还可以在更低的温度下施焊,这说明美国的钢材和焊材抵抗低温的能力是足够的。我们在低温试验的过程中也发现,气温对焊接工艺的正确实施影响不大。但是,在-15℃的环境中工作时间稍长,工人的操作技术便走形,无法保证焊缝成形质量。同时测温仪、送丝机工作也不正常。为此,特作出以上规定。

(2)低温环境对焊接接头综合性能的影响是肯定的,从试验研究的分析可知:影响接头的抗拉强度在低温环境中肯定会降低,控制不好很可能低于钢材本身的抗拉强度而使焊接接头不合格。

(3)准确均匀的预热温度、良好的施工环境,是国家体育场(鸟巢)钢结构低温焊接试验成功的关键,紧急后热措施是低温焊接试验成功的保证。

4.3 低温焊接试验成果应用原则

工艺试验和正式工程相比,焊缝所处的工况完全不同,照搬工艺试验的结果很可能适得其反,甚至产生缺陷。因为在工程实际中,低温焊接防治冷裂纹的同时,还须防范由于结构拘束度大,在冷却速度加大的前提下,焊缝中心产生偏析,在应力作用下产生的热裂纹。

因此,在工程中应注意以下几条原则:

(1)根据结构特点,合理编排焊接顺序,减少和尽可能均布焊接残余应力。

(2)钢材本身应实现正温,即要采用各种不同的预热方式提高焊缝周围小环境温度,以此来保证焊缝综合指标。

(3)正确选择预热方式。在预热温度和预热规范确定的前提下,正确选择预热方式对控制裂纹的产生有重要的意义。电加热与火焰加热相比具有明显

的优势:预热区域受热均匀,有效防止局部受热造成的接头附加应力;升温速度均匀、可控,防止母材过热等现象,使母材充分均匀预热;对于整体结构焊缝而言,防止受热不均造成构件变形。因此,低温焊接特别是厚板焊接优先采用电加热方式。

(4)由于在正式结构焊接中采取刚性固定的方式,为防止因氢和应力共同作用在焊缝根部产生延迟裂纹,对于板厚 $\delta \geq 40$ mm 采取焊后紧急后热及保温缓冷措施,后热温度 250℃~300℃;对于 $\delta < 40$ mm 的采取焊后紧急保温缓冷措施,可减缓焊缝的冷却速度,有助于扩散氢的逸出。

(5)由于氢在焊接熔合区附近的浓度值按马氏体、贝氏体、铁素体组织的变化依次降低,在异种钢焊接时由于热影响区组织形态的不同造成了氢在熔合区附近的浓度值分布不匀,当焊缝中存在应力集中点时,含氢量大的焊缝易出现延迟裂纹。因此,异种钢焊接时应特别注意预热和后热,这是继焊材选定之后决定成败的关键因素。

(6)控制线能量是防止焊接裂纹的有效途径。在低温施工中,SMAW 焊接采用 A_v 值 [A_v =一根焊条所焊缝的长度/一根焊条的长度(除焊条头)]控制线能量容易成功,如图 18 所示。在控制 $A_v \geq 0.6$ 的前提下,采用控制不同焊接位置的 A_v ,实现大电流、薄焊道、多层多道的焊接,以提高焊缝热量,防止淬硬组织的产生。

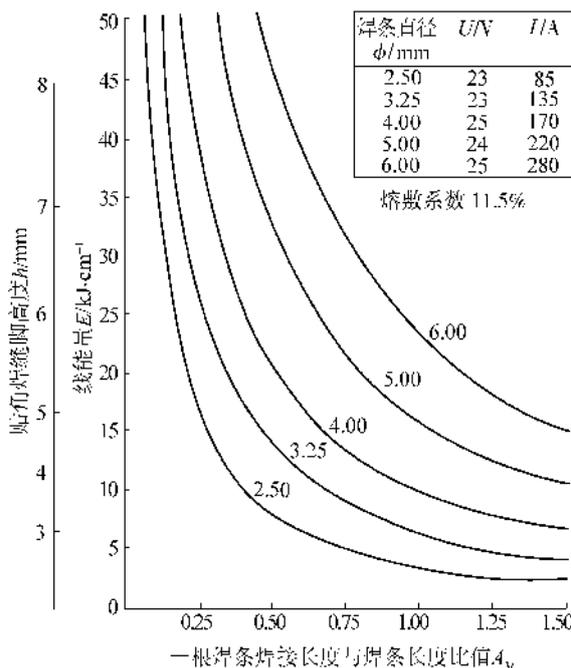


图 18 线能量与 A_v 值关系



专题讨论——奥运会场馆焊接暨国家体育场(鸟巢)焊接技术

5 “鸟巢”钢结构焊接工程仰焊技术

“鸟巢”钢结构全部采用 BOX 结构,特别是顶面主结构采用了双曲线马鞍型复杂结构。控制焊接应力应变相当困难,如果不采用仰焊技术,主结构所有节点上翼缘均得开一人孔,把下翼缘的仰焊坡口改为平焊坡口(见图 19),焊工在 BOX 箱体内存完平焊并检验合格后,再焊上翼缘的两条平焊缝和两条横焊缝。这种节点设计完全是为了避免仰焊,业内专家有人评价这种节点是最差设计。从控制焊接应力应变的角度上看,这种评价很有道理,假若“鸟巢”采用该设计,其后果难以想象。因为“鸟巢”特殊结构决定了控制结构初始应力的难度。24 榀门式钢架中有 22 榀贯通或基本贯通,最大跨度为 259 m 左右,如果采用该设计,那么控制焊接应力应变的对称施焊工艺不能应用,上下翼缘受热不均,必然带来收缩量的不一致。同时主结构上下弦杆的上翼缘的焊缝比下翼缘多一倍以上,因此上翼缘的焊接收缩就是近似下翼缘的一倍以上。上下弦杆同时不均匀的变形,足以使结构发生严重变形而影响结构的安全与美观。使本来就十分复杂的结构体系变得更加复杂。所以“鸟巢”钢结构工程必须使用仰焊技术。

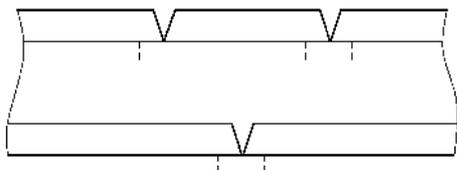


图 19 改仰焊(O)为平焊(F)节点示意

5.1 仰焊技术的由来、发展以及技术关键

仰焊技术不是新技术,很早以前焊接管道固定口时就采用仰焊技术,由于当时焊机、焊材和现在相比有一定差距,焊工技术和焊接工艺不成熟,仰焊被认为难度很高的焊接技术。从全面质量管理思想分析,当时五大管理要素有“人、机、料、法”四大要素没有解决或者没有完全解决好。所以仰焊技术难度很高理所当然。然而工程技术人员并没有放弃仰焊技术,多年来,很多组织、单位努力推广仰焊技术。中国工程建设焊接协会从 1992 年开始举办的全国焊工技术比赛以来,连续 8 届历时 18 年大力推行仰焊技术和气体保护焊技术,仰焊试板采用单面焊双面成形难度极高的焊接技术,参加比赛的中央企业、省、市地方的焊工人数一届比一届多,最多的人数达 200 人左右,这些焊工都是经过培训选拔的尖

子,中国石油天然气总公司曾经从 120 名优秀焊工中培训 3 个月,选拔 6 名技术尖子参赛。其他如电力、冶金、造船、省、市代表队大同小异。重结果也重过程,照此分析,18 年来培训焊工过程的潜移默化使全国的焊工队伍发生了十分可喜的变化,掌握仰焊技术的焊工越来越多。事实正是如此,在我国锅炉压力容器、压力管道、电力、石油、化工、造船行业一直在使用、研究仰焊技术。电力部门在《电站钢结构焊接技术通用条件》(DL/T678-1999)标准中对仰焊焊缝技术条件作了十分明确的规定,并在焊工技术考核规程(DL/T679-1999)中加以具体落实。我国“西气东输”工程采用高纤维素焊条和药芯焊丝(包括自保护焊丝)的大规模仰焊获得极大的成功,为仰焊技术的推广作出了贡献。

仰焊技术的推广应用得益于焊机性能先进和焊材质量提高。我国生产的逆变焊机、气体保护焊机性能稳定,完全可以取代进口焊机;以大西洋焊条为代表的焊条、天泰生产的 TWE-711 焊丝等优质产品完全可以满足仰焊技术的需要。可以肯定地说,大规模使用仰焊技术的时机已经成熟。

建筑钢结构焊接工程对仰焊技术畏缩不前和不理解是有一定道理的。其一,钢板厚、焊缝长,与管道焊接相比存在技术难度高、工作量大、对工人体力要求高的特点,这就是推广仰焊技术的难点之一;其二,在技术理论上存在认识上的盲区,“仰焊铁水重力论”就是其中最突出的代表。

“仰焊铁水重力论”是人们把冶炼和电弧焊混为一谈所致,不仅仅是管理者,有的工程技术人员还以铝热焊的理论来解释仰焊技术。理论上的错误必然带来认识上的偏差,很容易形成否定仰焊的极端意见。铝热焊不用电,利用铝、镁混合物燃烧产生高温把铁粉熔化,从坩埚中流出铁水进入轨道对接接头,利用铁水高温熔融轨道基本金属从而形成焊缝。这种技术应用较为单一,基本上是焊接轨道所用,的确是利用铁水重力与高温的焊接技术,如果用这种技术来进行仰焊,只能是天方夜谭。但是电弧焊不是铝热焊,两者有本质上的差别。电弧焊不单是冶金反应,而是十分复杂的电离、电解过程。焊接时电弧在产生高温的同时有很多作用力产生。可以这样认为:电弧焊既有铁水高温和重力的作用,同时又是各种作用力的结果,后者对焊缝的形成起主要作用。事实正是如此,根据熔滴过渡理论,电弧焊时产生多种作用力。以焊条电弧焊为例:电弧焊是利用焊

条与工件之间产生的电弧将焊条与工件局部加热到熔化状态,焊条端部熔化后的熔滴和熔化后的母材熔合在一起,形成熔池;随着焊接电弧向前移动,熔池逐步冷却结晶形成焊缝金属。对于这一点,很多人不明白熔融金属为什么不掉下来,是什么力起作用。

根据有关资料介绍和研究:电弧焊时,产生6种作用力作用于焊接熔池和焊缝金属的凝固,每种作用力对熔滴过渡有不同的影响,并且直接影响熔滴的大小和过渡形式。

(1)重力。

焊接时熔滴由于本身的重力而具有下垂的倾向,平焊(F)时,金属熔滴重力起促进熔滴过渡的作用。立焊(V)及仰焊(O)时,熔滴的重力阻碍熔滴向熔池过渡,成为阻力,是仰焊熔池进行冶金反应的有害的作用力。

(2)表面张力。

表面张力是焊条(焊丝)端头上保持熔滴的主要作用力。平焊(F)时,熔滴悬挂于焊条末端,在非短路的情况下,只有当其他力克服表面张力阻碍作用时,才能使熔滴过渡到熔池中去。所以平焊(F)时表面张力阻碍熔滴过渡,立焊(V)、横焊(H)、仰焊(O)时,表面张力则有利于熔滴过渡。立焊(V)、仰焊(O)、横焊(H)熔池的熔融金属因表面张力的作用而停留在熔池中参与冶金反应,不会因本身重力脱离熔池。也可以这样认为:熔滴和熔融金属的表面张力完全克服了自身重力,在三种位置上都能正常的形成熔池而进行正常的冶金反应。表面张力的与熔滴的成分(焊丝、焊条的品质)、温度和环境气氛有关,与焊条、焊丝的直径成正比。细条、细丝焊接时比粗条、粗丝焊接时熔滴过渡较为顺利而稳定。在保护气体中加入氧化性气体($Ar-O_2$ 、 $Ar-CO_2$),可以显著地降低液体的表面张力,有利于形成细颗粒熔滴向熔池过渡。如果熔滴在没有脱离焊条(焊丝)之前,就与熔池表面接触(即短路过渡),这时表面张力的作用与上述恰恰相反,会促使熔滴向熔池过渡。表面张力托起和保护熔池,使之正常进行冶金反应。

(3)电磁压缩力。

当两根平行的载流导体通过相同方向的电流时,会产生使导体相吸的电磁力。焊接时可以把焊条(焊丝)末端的液体熔滴看成由许多平行载流导体所组成,焊条(焊丝)及熔滴受到由四周向中心的电磁压缩力,电磁压缩力的大小和电流密度的平方成正

比,无论是平焊(F)、立焊(V)、横焊(H)、仰焊(O),电磁压缩力的方向都是促使熔滴向熔池过渡。

(4)斑点压力。

当电极形成斑点时,由于斑点导电和导热的特性,在斑点产生斑点力,也称斑点压力。斑点压力在一定条件下将阻碍熔滴向熔池过渡,由于阴极的斑点压力比阳极大,所以正接极的熔滴过渡较反接极时困难。

(5)等离子流力。

在电弧中由于电弧推力引起高温气流运动形成的力称为等离子流力,这种力有利于熔滴过渡。

(6)电弧气体吹力。

焊条(药芯焊丝)在焊接时末端的导管内形成大量的气体,这些气体在瞬间被电弧加热至高温时,体积急剧膨胀,并随着导管方向以挺直而稳定的气流把熔滴送入熔池中去,特别是在仰焊(O)位置上,电弧吹力十分有利于熔滴向熔池过渡,同时也是仰焊熔池的托起力之一。

上述6种作用力中,有4种力特别有利于仰焊(O)、立焊(V)、横焊(H)的熔滴过渡和熔池金属的稳定进行冶金反应,特别要指出的是: SMAW、FCAW-G 的药皮的约束力也是仰焊的有利因素。可以这样理解:仰焊时由于电弧产生的有效作用力托起熔池并且进行冶金反应,熔滴在有效作用力的作用下,以各种不同的方式进入熔池,这时以表面张力、电磁压缩力、等离子流力、电弧气体吹力、斑点压力的共同作用下,克服了熔滴本身重力而形成熔池,药皮在熔融金属的最外面,它同时具有表面张力,当熔池向前移动,熔融金属凝固将要进行时,药皮因其熔点低、凝固快的特点,提前凝固,形成托起液体金属的封闭薄膜,除保护焊缝金属外,还起到了成形作用,这时药皮的约束力起到了十分有利成形的补充加固作用,其作用的好坏程度完全由药皮本身的粘度和品质来决定。显然熔滴的重力不是影响电弧焊的决定性因素,这就是电弧焊同铝热焊的本质区别,可以肯定地说:仰焊时熔滴本身重力不会从根本上影响仰焊技术,因此“仰焊铁水重力论”是错误的,所以无论在理论和实践上,仰焊技术完全占有一席之地。

5.2 仰焊技术实施要点

理论上解决了认识问题,并不等于在实践中就会成功。事实上无论在理论研究和实际操作中,仰焊技术都有一定难度。因为不仅仅涉及技术,还涉及



到全面质量管理五大要素“人、机、料、法、环”。稍有不慎就会前功尽弃,带来的后果是丧失对仰焊技术推广的信心和决心。

优秀的焊接工艺和良好的操作技术是获得优秀仰焊焊缝的基本保证。性能优秀的焊机、品质优良的焊条(焊丝)会最大程度保证焊接质量、提高焊接效率。这是因为仰焊技术较其他技术对基本条件要求高的原因所致。“鸟巢”钢结构工程的实践,为我们提供了仰焊技术的管理模式。

(1) “人”是最关键的因素。

仰焊技术的优点是质量好,成本低;熔融铁水自重如果大于有效作用力,会立即脱离熔池,因此不会形成假焊或未熔合(与此相反,这种缺陷在平焊焊缝中则最容易发生)。焊接时药皮很容易翻至熔池表面,因此不容易形成夹渣(平焊容易夹渣);加上热空气上升,焊缝的层间温度能够保证,所以焊缝成形质量好。在 BOX 构件的焊接中采用仰焊,焊接工程量减少一半以上,所以成本低。但仰焊技术对焊工的操作技术要求高,对焊工的体力要求高,仰焊的效率是平焊的 70%左右,比其他位置稍低。所以这一点就是推广仰焊技术的又一难关。

“鸟巢”钢结构焊接工程对焊工的作法是三部曲:一是验证考核;二是强化培训;三是合理组织。

“鸟巢”钢结构工程项目部管理者不轻易相信焊工取得的上岗证,规定凡取得“冶金、化工、造船、电力、压力容器(省级以上)”上岗证的焊工可以参加验证考核,其他证件将不被接受;验证考核的目的是检测焊工证与焊工实际能力的相符性。验证是考核焊工的理论和 25 mm 厚试板的仰焊和立焊的操作技能。“鸟巢”钢结构工程参加考核的焊工 911 名,通过考核 832 名,占 91%。应当说这批焊工是非常优秀的,但他们中间参加强化培训用 50 mm 厚钢板考试仰焊和立焊时,265 名焊工几乎全军覆没。考试成绩之差十分令人吃惊。这个无情的现实充分说明了建筑钢结构厚板焊的特殊性,同时也说明焊工培训的重要性。

焊工集中半军事化培训方式主要内容是:

a. 技能培训。白天厚板(50 mm 以上)焊立焊、仰焊试板各一件,晚上理论学习和操作讲评。

b. 职业道德培训。主要培训焊工的责任心和主人翁精神,焊接是焊工的良心活,没有一定素质和职业道德是干不好厚板焊接的,这一点我们比技能培训还要重视。

c. 体力锻炼。

规定焊工必须完成的锻炼项目,如下蹲、俯卧撑等,目的是提高焊工的体能,以适应仰焊的要求。除此之外,还有针对性的进狭窄地方的模拟训练,全方位的提高焊工素质。

一个好的开头就是成功的一半。一开始,焊工的个人水平还不具备独立完成“鸟巢”厚板焊缝的能力,根据焊工当时的水平,将焊工分成打底、填充、盖面三部分。利用整个团队的能力来打开局面,开一个好头,这就是“合理组织”的全部内容。

经过上述程序,“鸟巢”钢结构工程 200 名焊接高手逐渐脱颖而出,在推行仰焊技术的过程中起到了决定性的作用。

(2) “机”主要是指焊机。

仰焊对焊机性能有一定的要求,从有效作用力的分析中可以看出,焊机性能越好,有效作用力的作用就越好。“鸟巢”钢结构工程使用 ZX-7 逆变焊机作为仰焊技术的主要焊机,这种焊机性能稳定,推力大,能够适应仰焊技术要求。

(3) “料”指焊接材料。

奥运“鸟巢”钢结构工程仰焊采用了 CHE507、CHE507RH、CE427RH 焊条,部分采用了 TWE-711 药芯焊丝,这些材料均能获得成形良好的仰焊焊缝,能够达到 UT-B-1 的检测要求。

(4) “法”指具体焊接方法。

焊接技术采用顺序的排位为: SMAW、FCAW-G、GMAW。“鸟巢”钢结构工程大规模采用 SMAW 和部分采用 FCAW-G 而获得成功。规定在具体操作手法上不允许摆动。就焊接技术的难度而言, SMAW 最容易,只要焊接规范合理、操作位置适合、热输入量控制准确,经培训过的焊工操作,完全可以获得表面成形良好、内部质量优异的焊接接头。FCAW-G 难度稍高,因为向下有熔融铁水、熔渣下落,容易阻塞焊枪,使 CO₂ 气体不通畅,造成焊接不连续。最难的就是 GMAW,因为实芯焊丝的工艺性能较差,成形难度较大,焊接时同样有药芯焊丝 FCAW-G 的缺点,可能因为没有药皮也影响焊缝成形。根据“鸟巢”钢结构工程仰焊技术成功经验, SMAW 技术适合大规模推广和大面积使用。FCAW-G 可在一定范围使用,最好用熟练焊工。迄今为止, GMAW 不宜大面积应用。在坡口的设计上也有一定讲究,建筑钢结构仰焊坡口设计为带钢衬垫坡口,大大地降低了仰焊的难度,



如果采用中国建设焊接协会技术比赛的单面焊双面成形的坡口(单 V),其难度将大大提高,对焊工的要求也就更加严格。

(5)“环”指施焊环境。

一般要求仰焊高度不应低于 1.2 m,应用 FCAW-G 技术时,应当有防风装置。

通过以上工作和焊工的努力,仰焊技术的缺点将逐步得到克服,在不断总结经验的基础上,仰焊技术肯定会取得更大发展和提高。

国家体育场(鸟巢)钢结构工程现场焊缝有 62 000 m(仰焊焊缝占 20%左右),所有对接焊缝(含仰焊焊缝)质量检查 UT-B-1 级。根据资料统计,仰焊焊缝有 12 000 m 以上。其中厚板焊缝占一定比例,仰焊柱脚焊缝钢板厚 100~110 mm,属 X 型坡口;其余均属单 V 型带衬垫坡口,最具有代表性的是 19 号柱脚底板仰焊焊缝一板厚 80 mm,属单 V 型带垫板坡口,长 4.5 m,坡口 $35^{\circ}+8$,至今为止这条焊缝为全国仰焊焊缝之最(UT 探伤结果一次合格率 100%)。

根据现场 UT 检测资料可知,仰焊焊缝探伤一次合格率高于平焊,100%合格。“鸟巢”钢结构焊接工程仰焊焊缝质量优异的事实充分证明:仰焊技术正以它独特的优势,在建筑钢结构焊接工程中显示出越来越重要的地位和作用。

根据以上介绍,我们对仰焊技术有了全面的认识,从理论和实际经验上确认了仰焊技术的可行性、可靠性,对仰焊技术优缺点有了进一步的了解,希望焊接工作者在实践中进一步总结经验,不断完善和提高仰焊技术,促进该技术的良好发展。

6 厚板焊接将成为建筑钢结构的主要焊接技术^[2]

随着钢板厚度的增加,焊接难度大大增加。在我国现行标准 GB/T1591-1994《低合金高强度结构钢》和 YB4104-2000《高层建筑结构用钢板》中规定钢板厚度最大为 100 mm,不仅可以看出厚板在生产上和焊接上的难度,而且还远远落后于建筑钢结构焊接工程的发展速度。

无论在理论和实践两方面都证明:建筑钢结构并不一定需要钢板越厚越好,然而由于设计师的理念,建筑钢结构焊接工程中厚钢板得到大量使用。国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程中 Q460-Z35 厚 110 mm, Q345GJD 厚 100 mm,北京新保利工程使用轧制 H 型钢翼板厚 125 mm(材质 ASTM A913Gr60),基

本代表了我国建筑钢结构焊接工程的用钢厚度。建筑钢结构厚板焊接技术得到了很大发展,是一项方兴未艾的实用技术。

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程采用了与原建筑钢结构焊接工程不完全一致的组合工艺,提高了焊接效率、保证了焊接质量,为厚板焊接技术提供了有益的借鉴经验。

6.1 厚板焊接坡口的设计

由于厚板焊接量大、难度高,技术界十分重视坡口的设计。坡口小易形成窄而深的形式,焊缝成形系数偏小,影响一次结晶,容易产生区域偏析。在拘束应力大的前提下进而导致焊接热裂纹的产生。

坡口加大,不仅焊接量大大增加,焊缝的焊接残余应力也大大增加,这对钢结构体系初始应力的控制极为不利,同时也影响工程工期。

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程中,经过大量的试验研究,确定坡口角度和间隙为 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$;间隙 6~10 mm。工程实践和工艺评定结果证明了这一坡口角度的科学性、合理性。

6.2 预热、后热采用远红外电加热技术

厚板焊接的关键是防止焊接裂纹的产生,准确的预热温度、层间温度、后热温度是防止裂纹产生的关键,特别是厚板高强钢的焊接尤为重要,这是因为其直接影响和控制高强钢裂纹产生三要素,即扩散氢含量、硬淬倾向和拘束应力。

同火焰预热方式相比较,远红外电加热有温度控制准确可靠,可以控制升、降温速度的优点。最重要的是所有采用电加热的焊缝全部受热均匀,从而避免了火焰加热的不均匀和焊接过程中的不均匀叠加而产生附加应力,有效地防止焊接裂纹的产生。

由于采用了远红外电加热技术,减少了厚钢板的温度差,同时也减少了不均匀加热和冷却所带来的附加应力,对提高厚板焊接质量十分有效。

同其他技术一样,在建筑钢结构焊接工程中,对全国内工程界特别是广大的建筑钢结构施工单位而言,采用远红外电加热技术有一个认识过程,远红外电加热的突出优点将会被人们所认识、接受,并发扬光大。

6.3 组合焊接新工艺

在厚板焊接中,常规焊接是从打底、填充到盖面全部完成。这种方式由于管理简便而大面积使用,然而该方式也有其局限性以 GMAW 为例,在厚板

打底焊接中,由于坡口小,干丝伸出过长,气体保护不好而产生缺陷造成返工。国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程创建的组合焊接新工艺成功地解决了这一难题。

a. 打底焊采用 SMAW(焊条电弧焊)。主要有两个目的:一是解决 GMAW 干丝伸出过长影响焊接质量的矛盾,提高打底焊缝成形质量;二是 SMAW 和 GMAW 相比,焊缝稀释率相对较低,这对提高焊缝金属的综合指标较为有利。

b. 填充焊采用 GMAW(实芯 CO_2 气体保护焊)。主要目的是利用 GMAW 的高效和熔深相对较大的优点,提高焊接质量和效率。

c. 盖面焊采用 FCAW-G(药芯 CO_2 气体保护焊)。主要是提高焊缝的表面质量,获得良好的观感效果。

从焊缝成形的角度上看:打底焊和盖面焊是最重要的步骤,如在 BOX 结构体系的厚板焊接中,缺陷若在打底焊缝,那么返工时间是整条焊缝正常焊接时间的三倍以上。因此,国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程中,提出了厚板焊缝一次合格率为 100% 的指标,引起了各级管理人员和焊工的高度重视,保证了组合工艺的有效实施,收到了良好的效果。

6.4 多层多道接头错位焊接新工艺

在钢板的焊接中,多层焊的焊缝质量比单层焊好,多层多道焊的焊缝质量比多层焊好,特别是板厚超过 25 mm 时效果最明显。因此,在厚板焊接时,首选多层多道焊技术。

所谓多层焊技术,不是一次成形,而是多层成形,焊接运条手法允许摆动,焊接厚度一般不控制,适合低碳钢厚板焊接。

多层多道焊就是在多层焊的基础上,焊接手法上不允许摆动,焊接厚度要明确规定,以限制焊缝的热输入量。一般规定:GMAW、FCAW-G 每一道不超过 5 mm(通常在 3~5 mm);SMAW 用 A_v 值来确定每一道的厚度,通常 $A_v \geq 0.6$;在立焊位置允许摆动,但限制摆动(SMAW 允许摆动宽度为焊条直径的三倍,GMAW、FCAW-G 允许摆动 15~20 mm)。

多层多道错位焊接技术就是在多层多道焊接技术的基础上,加入焊接接头每一道次错位连接,即接头不在一个平面内,通常错位 50 mm 以上,特别适合于高强厚钢板的焊接。

多层多道错位焊接技术的显著优点就是上一层次对下一层次进行了有效的热处理,如图 20 所示。

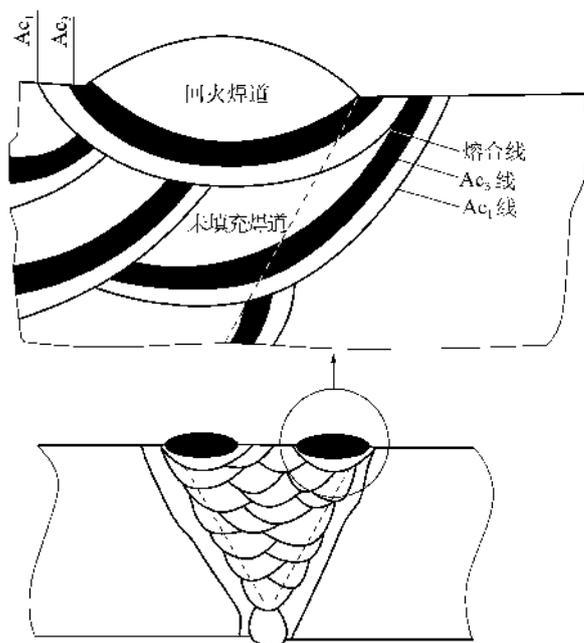


图 20 多层多道错位焊示意

在焊后冷却过程中,焊缝从接近基本金属开始凝固,单道焊的组织为典型的柱状结晶,且共晶粒通常是与等温曲线法向方向(即最大温度梯度方向)长大。由于凝固是从纯度较高的高熔点物质开始,所以在最后凝固部分及柱状晶的间隙处,便会留下低熔点不纯物质。在多层焊时,对前一道焊缝重新加热,加热超过 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 的部分可以消除柱状晶并使晶粒细化。因此多层焊比单层焊的力学性能要好,特别是冲击韧性有显著提高。

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程高强厚钢板全部采用了多层多道错位焊接技术,因此,焊接质量良好,证明这项技术有强大的生命力,值得推广应用。

7 异种钢焊接技术

7.1 异种钢焊接概述

根据目前焊接技术应用理论的观点,常见的异种钢材焊接分为两大类:

(1) α 类钢——能发生相变的钢,包括以铁素体为基础的钢、C 钢、低合金钢、Cr- m_0 耐热钢、高合金铁素体钢、马氏体钢等。

(2) γ 类钢——不能发生相变的奥氏体钢,包括 18-8 型、18-12 m_0 型、25-20 型钢等。

异种钢焊接分三种情况: $\alpha + \gamma$; $\gamma_1 + \gamma_2$; $\alpha_1 + \alpha_2$ 。



在建筑钢结构工程中常见的异种钢焊接为 $\alpha_1 + \alpha_2$,一般为碳素钢与低合金高强度钢、碳素钢与铸钢、低合金高强度钢与铸钢的焊接,难度最大的为低合金高强度钢与铸钢焊接。

“鸟巢”工程中,Q460E与GS20Mn5V的异种钢焊接技术在我国建筑钢结构中尚属首次,根据《国家体育场工程Q460E-Z35钢热加工、焊接性方案》,在前期Q460E-Z35钢焊接性试验取得的阶段性成果的基础上,进行刚性接头焊接试验。为了使试验结果能够具有针对性,我们结合实际构件中异种钢的焊接方式进行了刚性接头试件的焊接,并进行了相关的力学性能试验,目的是得出该钢种在不同焊接方法、不同线能量及刚性固定条件下的综合力学性能并对其焊接性进行综合评定,从而形成可靠的焊接工艺。

在此,以Q460E与GS-20Mn5V的异种钢焊接为典型进行异种钢焊接技术的分析。

7.2 异种钢焊接的技术特点与问题

异种材料的焊接问题与同种材料焊接相比,有着较大的不同,一般要比焊接同种材料困难。异种钢的焊接性主要取决于两种材料的冶金相溶性、物理性能、表面状态等,两种材料的这种差异越大,焊接性越差。

金相组织相同的异种钢焊接时,对焊接性影响不大。金相组织不同的异种钢焊接比同种钢焊接困难很多。因为两种不同金相组织的钢材存在结晶化学性(晶格参数、晶格类型、原子半径等)差异、物理性能(熔点、线膨胀系数、热传导系数、电阻比等)差异、力学性能差异、表面状态差异、焊缝稀释率的差异、熔合区形成过渡层和扩散层的差异等;导致金相组织变化或产生新组织,影响焊接热循环过程和结晶条件,使接头性能变坏,熔合区与焊接热影响区的力学性能尤其是塑性下降,以及增大焊接残余应力和产生裂纹。

(1)冶金相溶性的差异。

晶格类型、晶格参数、原子半径等的差异也就是通常说的“冶金相容性的差异”。

两种金属材料在冶金学上是否相容,取决于它们在液态和固态的互溶性以及在焊接过程中是否可以产生金属间化合物(脆性相),只有在液态和固态下都具有良好的互溶性的金属或合金才能在熔焊时形成良好的接头。当两种金属的晶格类型相同、晶格常数、原子半径及其负电性均比较相近时,

其溶质原子能够连续固溶于溶剂;否则易形成金属化合物,使焊缝性能大幅度降低。能够形成连续固溶体的异种材料具有良好的焊接性。

为了改善异种金属焊接性能,对不能形成无限固溶的异种金属,可在两种被焊金属之间加入过渡层。选择的过渡层金属与两种金属均能形成无限固溶体。

(2)物理性能的差异。

两种材料的物理性能差异主要是指熔化温度、线膨胀系数、热导系数电阻系数等差异。它们将直接影响焊接的热循环过程、结晶条件和接头质量。当异种材料热性能差异大时会使熔化情况不一致,给焊接造成困难;线膨胀系数相差较大时,会造成接头较大的残余应力和变形,易使焊缝及热影响区产生裂纹;异种材料电磁性相差较大时,而使焊接电弧不稳定,焊缝成形不好甚至形成不了焊缝。

(3)表面状态的差异。

材料表面状态是复杂的,表面氧化层(氧化膜)、结晶表面层、吸附的氧离子和空气分子、水、油污、杂质等状态,将直接影响异种材料的焊接性,必须给与充分重视。

此外,在焊接异种材料时,会产生一层成分、组织、性能与母材不同的过渡层,过渡层的性能会给焊接接头的整体性能带来重大的影响,处理好异种材料的过渡层对于获得满意的焊接质量至关重要。过大的熔合比会增大焊缝金属的稀释率,使过渡层更为明显;焊缝金属与母材的化学性能相差越大,熔池金属越不容易充分混合,过渡层越明显;熔池金属存在时间越长,越容易混合均匀。

7.3 Q460E-Z35与GS-20Mn5V可焊性分析及焊接难点

Q460E-Z35化学成分和力学性能分别如表11、表12所示。铸钢GS-20Mn5V的化学成分和力学性能分别如表13、表14所示。

7.3.1 可焊性分析

按照国际焊接学会提出的碳当量计算公式进行Q460E-Z35碳当量计算

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

取 $C = 0.089$, $Mn = 1.37$, $Ni = 0.074$, $Cu = 0.14$, $Cr = 0.12$, $Mo = 0.021$, $V = 0.058$ 。

则 $C_{eq} = 0.089 + 1.37/6 + (0.074 + 0.14)/15 + (0.12 + 0.021 + 0.058)/5 = 0.497\%$ 。



表 11 Q460E-Z35 化学成分

项目	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cu)	w(Ni)	w(Mo)	w(Nb)	w(V)	w(Cr)	C _{eq}
标准要求 Min	—	0.100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
标准要求 Max	0.140	0.400	1.600	0.030	0.030	0.350	0.250	0.070	0.040	0.060	0.250	—
复验	0.089	0.220	1.370	0.011	0.024	0.140	0.074	0.021	0.001	0.058	0.120	0.362

注:熔炼成分摘自材质单,炉批号为 81045。

表 12 Q460E-Z35 力学性能

牌号质量等级	屈服强度σ _s /MPa				抗拉强度σ _b /MPa	延伸率δ _s /%	冲击功A _k /J			180°弯曲试验	
	厚度(直径,边长)δ/mm									钢材厚度t/mm	
	≤16	16<δ≤35	35<δ≤50	50<δ≤100	0℃	-20℃	-40℃	≤16	16<t≤100		
Q460 E	≥460	≥440	≥420	≥400	550~720	17	—	—	≥27	d=2a	d=3a

注:d=弯心直径;a=试样厚度(直径)。

表 13 铸钢 GS-20Mn5V 化学成分

材料号	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(其他)
1.1120	0.170-0.230	≤0.600	1.000-1.500	≤0.020	≤0.015	≤0.300	≤0.150	≤0.400	—

表 14 铸钢 GS-20Mn5V 力学性能

材料号	热处理	铸件壁厚δ/mm	σ _{0.2} /MPa	σ _b /MPa	抗拉、抗压、抗弯 F/N	δ _s /%	A _k /J
1.1120	调质	≤50	360	500~650	324	24	70
		50<δ≤100	300	500~650	270	24	50
		100<δ≤160	280	500~650	252	22	40

按照日本 JIS 标准提出的碳当量计算公式进行 GS-20Mn5V 碳当量计算

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

取 C=0.17, Si=0.60, Mn=1.50, Ni=0.40, Cr=0.30, Mo=0.15, V=0。

则 C_{eq}=0.17+1.50/6+0.60/24+0.40/40+0.30/6+0.15/4+0/14=0.543%。

GS-20Mn5V 碳当量计算时,其化学成分均取上限,实际 GS-20Mn5V 碳当量可以保证在 0.50%左右。

碳当量数值越大,被焊金属的淬硬倾向越大,热影响区越容易产生冷裂纹。

碳当量 C_{eq}<0.4%时,淬硬倾向不大,焊接性良好;当碳当量 C_{eq}=0.4%~0.6%时,钢材易淬硬,说明焊接性已变差,焊接时需预热,随着板厚的增大,预热温度也适当提高。Q460E-Z35 碳当量为 0.49%,GS-20Mn5V 碳当量约为 0.50%左右,远大于 0.4%,所以淬硬倾向大,抗裂性能差,焊接性也较差。

7.3.2 Q460E-Z35 与 GS-20Mn5V 焊接难点

(1)化学成分、力学性能及物理性能的差异。

由于铸钢与低合金钢的化学成分、力学性能和物理性能不同,焊接时会产生很多缺陷,如气孔、裂纹等,给焊接操作者带来很大困难。

(2)两种材料稀释率差异。

GS-20Mn5V+Q460E-Z35 的焊接,稀释率更是人

们所关心的问题,此时有可能有两种材料产生不希望得到的有害化合物。如采用具有垫板的对接接头时,应注意垫板的成分,因为其有害成分对接头的稀释有可能导致焊缝中发生裂纹。

建筑钢结构厚板焊缝大多采用单 V 型带衬板的坡口型式,V 型坡口的根部肯定是稀释率最大的地方,同时也是应力最集中的地方。在打底焊接结束后,每一层的焊肉全都对焊缝根部加载,致使根部质量极不稳定,所以降低稀释率是保证厚板焊缝质量的重要措施。

(3)供货状态的差异。

GS-20Mn5V 供货状态为调质钢,Q460E-Z35 供货状态为正火钢。两者供货状态不同,各材料焊接特点不同,焊接难度加大。

a. 正火钢的焊接特点。

正火钢焊接热输入的确定主要依据是防止过热区脆化和焊接裂纹两个方面。由于各种正火钢的脆化倾向和冷裂倾向不同,因此对热输入的要求也不同。

对于含钒、铌、钛等强度级别较 Q460E-Z35 低的正火钢,如 Q420 等,为了防止沉淀相溶入和晶粒长大引起的脆化,宜选偏小的焊接热输入。

正火钢对许多焊接方法都适应,选择时主要考虑产品结构、板厚、性能要求和生产条件等,其中最

专题讨论——奥运场馆焊接暨国家体育场鸟巢焊接技术

为常用的是焊条电弧焊、埋弧焊和熔化极气体保护焊。钨极氩弧焊通常用于较薄的板或要求全焊透的薄壁管和厚壁管道等工件的封底焊。

b. 调质钢(淬火+高温回火)的焊接特点。

调质钢焊接不宜采用大直径的焊条或焊丝,应尽量采用多层多道焊工艺,最好采用窄焊道而不用横向摆动的运条技术。这样不仅使焊接热影响区和焊缝金属有较好的韧性,还可以减少焊接变形。双面施焊的焊缝,背面焊道应采用碳弧气刨清理焊根并打磨气刨表面后再进行施焊。如果采用大电流埋弧焊和电渣焊工艺,由于焊接能量大,焊接区加热时间长,冷却缓慢,焊接热影响区韧性急剧下降,因此调质高强钢在经过大电流埋弧焊和电渣焊后必须进行淬火+回火处理。调质钢焊接时为了防止冷裂纹产生,有时需要采用预热和焊后热处理。

综上所述,GS-20Mn5V+Q460E-Z35的焊接为调质钢与正火钢间的焊接,两种钢材在焊接工艺上存在差异,导致焊接难度增加。

7.4 焊接方法的选择

主要根据能否获得优质的焊接接头、接头形式、母材性能、构件工作条件及批量生产等因素选择焊接方法。还应考虑使母材金属熔化量降到最小限度,即尽可能降低熔合比,防止在焊缝过渡区出现脆性的淬火组织和裂纹等缺陷。

采用焊条电弧焊方法,工艺较灵活,熔合比较小;埋弧焊则生产效率高;CO₂气体保护焊具有广泛的实用性。

比较 SMAW、GMAW、FCAW-G 后确认,以 SMAW 稀释率为最小。在“鸟巢”钢结构焊接工程中,GS-20Mn5V+Q460E-Z35 焊接由于是现场焊接,焊接位置存在一定难度。为提高焊接速度,保证焊接质量,仰焊采用焊条电弧焊(SMAW);其他位置采用焊条电弧焊(SMAW)打底,CO₂气体保护焊(GMAW)填充的工艺。发挥各项技术的特长,焊缝不仅成形良好,且一次合格率相当高。

采用焊条电弧焊打底的目的是降低焊缝稀释率;减小焊接时因两侧金属稀释率不同,焊缝产生裂纹的可能性,从而提高了焊接的质量。

7.5 焊接材料的选择

(1) 异种钢焊接材料的选用原则。

a. 保证焊接接头的使用性能,即保证焊缝金属和焊接热影响区具有良好的力学性能和综合性能。

b. 保证焊缝金属有一定的致密性,即没有气

孔、夹渣或气孔/夹渣的数量、尺寸形状不超过允许标准。

c. 能防止在焊接接头内产生冷裂纹和热裂纹,即对冷裂、热裂不敏感。

d. 焊缝金属具有符合要求的热强性、耐热性、耐腐蚀性、耐磨性等,不产生脆性组织,尽可能降低或消除熔合区脆性。

e. 具有良好的工艺性,即具有良好的操作性能,能适应多层多道焊和全位置焊接等,并有一定的焊接效率。

f. 焊缝组织具有稳定性,其物理性能要和两母材相适应。

(2) Q460E-Z35 与 GS-20Mn5V 焊接材料的选择。

GS-20Mn5V 在钢材分类中没有明确规定,但它属于合金钢的一种形式。铸造组织和锻造(轧制)组织的区别在于综合性能上的差别,一般铸造组织硬度较高,而质地较锻造(轧制)组织疏松,但是它比较接近于焊缝,焊缝也是铸造组织。Q460E 是结构钢中最高级别钢种,GS-20Mn5V 虽质地优良,但在综合性能和强度级别方面与 Q460E 相比有很大程度上的差别。这两种钢的焊接在焊接材料选择方面仅仅从强度理论上着手显然是不够的,这是因为除了强度差别外,还需重点满足焊缝的抗裂性能要求,也是整个焊接技术的难点。因此在焊材的选用上,首先需满足 GS-20Mn5V 强度上的要求,希望焊缝能达到与 GS-20Mn5V 等强的要求,同时考虑 Q460E 具有淬硬倾向、抗裂性能差的特点,重点应用了微合金元素提高焊缝综合指标的机理,既保证了 50 级的强度,又要有良好的塑性和韧性储备,以提高焊缝的抗裂能力。为此在进行多项试验的基础上,选择 CHE507RH、JM58、JM56、TWE-711Ni1 等焊接材料作为 Q460E+GS-20Mn5V 焊接的试验焊材。在确定焊材的基础上,同时对焊接工艺作了进一步的改进。

7.6 焊前预热及后热

(1) 焊前预热。

焊前预热的作用是延长焊缝金属从峰值温度降到室温的冷却时间,使焊缝中的扩散氢有充分的时间溢出,避免冷裂纹的产生,延长焊接接头从 800 °C 到 500 °C 的冷却时间,改善焊缝金属及热影响区的显微组织,使热影响区的最高硬度降低,提高焊接接头的抗裂性。

预热温度的确定。

根据文献[1]介绍的估算预热温度公式



$[C]_{化}=C+Mn/9+Cr/9+Ni/18+Mo/13$ (化学成分影响的碳当量)

考虑厚度因素,用厚度碳当量计算

$[C]_{厚}=0.005\delta$ $[C]_{化}$ (板厚影响的碳当量)

总的碳当量公式

$[C]_{总}=[C]_{厚}+[C]_{化}$

焊接预热温度可根据经验公式计算

$T_0=350\sqrt{[C]_{总}-0.25}$ 。

Q460E-Z35(110 mm)与 GS-20Mn5V(100 mm)的预热温度的确定如表 15 所示。

根据异种钢焊接时,预热温度应以预热温度高的钢材一侧为最低预热温度,故焊接前预热温度选取 $150\text{ }^\circ\text{C}\leq T_0<200\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2)后热。

Q460E-Z35 与 GS-20Mn5V 焊接后热的原因:

表 15 预热温度参数值

钢材	$[C]_{化}$	$[C]_{厚}$	$[C]_{总}$	$T_0/\text{ }^\circ\text{C}$
Q460E-Z35	0.261 00	0.143 55	0.404 55	137.6
GS-20Mn5V	0.287 50	0.143 80	0.431 30	149.0

注:GS-20Mn5V 的化学成分均取平均值。

由于 GS-20Mn5V 含杂质较多,焊接后氢含量较高,为保证氢能及时逸出,防止产生冷裂纹。

焊接完毕后,紧急进行后热处理,后热温度 $300\text{ }^\circ\text{C}\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$,后热时间 2 h。后热完成,岩棉被保温缓冷至环境温度。

7.7 焊接工艺

7.7.1 焊接参数的选择

根据“鸟巢”的实际情况,以及长江精工钢结构(集团)公司在“鸟巢”中所作的工艺评定,特制订以下工艺供施工时参考,如表 16 所示。

表 16 工艺评定参数

序号	评定项目	焊接位置	规格 δ /mm	道次	焊接方法	焊条或焊丝		焊剂或保护气	保护气流量 $Q/L\cdot\text{min}^{-1}$	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 $v/\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$
						牌号	直径 φ /mm					
1	Q460E-Z35+GS-20Mn5V	横焊(H)	110+100	打底	SMAW	CHE507RH	3.2	—	—	130~150	22~26	6~10
				中间	SMAW	CHE507RH	4.0	—	—	150~180	22~24	6~25
				盖面	SMAW	CHE507RH	4.0	—	—	150~180	22~24	6~25
2	Q460E-Z35+GS-20Mn5V	仰焊(O)	110+100	打底	SMAW	CHE507RH	3.2	—	—	110~130	20~25	4~10
				中间	SMAW	CHE507RH	4.0	—	—	140~170	22~28	4~35
				盖面	SMAW	CHE507RH	4.0	—	—	140~160	22~28	18~35
3	Q460E-Z35+GS-20Mn5V	立焊(V)	110+100	打底	SMAW	CHE507RH	3.2	—	—	110~130	20~25	8~20
				中间	GMAW	JM56	1.2	CO ₂	25	130~180	16~20	8~18
				盖面	GMAW	JM56	1.2	CO ₂	25	130~180	18~22	10~16

注:焊接工艺评定试验时,烘干 $350\text{ }^\circ\text{C}\times 1\text{ h}$,预热温度 $150\text{ }^\circ\text{C}$,层间温度 $150\text{ }^\circ\text{C}\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$,无后热。

7.7.2 焊前准备

(1)焊条在使用前必须按规定烘焙,CHE507RH 焊条的烘焙温度为 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 。烘焙 1 h 后冷却到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 保温,随用随取,领取的焊条应放入保温筒内。

(2)不得使用药皮脱落或焊芯生锈的变质焊条,锈蚀或折弯的焊丝。

(3)CO₂ 气体的纯度必须大于 99.7%,含水率小于等于 0.005%,瓶装气体必须留 1 MPa 气体压力,不得用尽。

(4)焊前焊缝坡口及附近 50 mm 范围内清除净油、锈等污物。

(5)施焊前复查组装质量、定位焊质量和焊接部位的清理情况,如不符合要求,修正合格后方可施焊。

(6)焊条电弧焊现场风速不大于 8 m/s,气体保护焊现场风速不大于 2 m/s,应设防风装置。

(7)焊接前检查各焊接设备是否出于正常运行状态。

(8)检查坡口尺寸是否达到要求。

(9)焊工必须持证上岗。

7.7.3 现场焊接工艺

(1)焊前清理。Q460E 钢热切割试验结果表明,Q460E 钢具有淬硬倾向,因此在焊接前对 Q460E 钢的热切割面用角向磨光机进行打磨处理,打磨厚度 2 mm,至露出原始金属光泽。同时对坡口加工造成的钝边、凹槽进行打磨处理,要求不留钝边和避免坡口面留有加工凹槽。

(2)坡口形状控制。要求在加工及安装过程中严格执行深化图纸要求,坡口角度 35° ,间隙 8 mm。焊前进行坡口形状检查,项目为间隙、错边、焊缝原始宽度三项。

(3)预热、层间温度及后热温度控制。Q460E 钢在



150℃~200℃冷裂纹敏感性小。因此,预热温度不得低于150℃,同时不得高于200℃,层间温度控制同预热温度要求。焊接完毕后,紧急进行后热处理,后热温度300℃~350℃,后热时间2h。后热完成,岩棉被保温缓冷至环境温度。

(4)加热方法。采用电加热的方法,加热板设置在焊缝正反两面,预热温度达到设定值后,将焊缝正面的加热板拆除,焊缝背面的加热板作为伴随预热,焊后后热处理时再重新布置正面加热板,并用岩棉被包裹严密。

(5)测温方法。测温采用红外测温仪和接触式测温仪两种,测温点设置在焊缝原始边缘两侧各75mm处。使用红外测温仪时,需注意测温仪需垂直于测温表面,距离不得大于20cm。层间温度测温点应在焊道起点,距离焊道熄弧端300mm以上。后热温度测温点应在焊道表面。

(6)焊接环境要求。焊接要求在正温焊接,当环境温度为负温时,需搭设保温棚,确保焊接环境温度达到0℃以上,环境风速需小于2m/s方可施焊。

(7)焊接技术要求。焊接过程严格执行多层多道、窄焊道薄焊层的焊接方法,在平、横、仰焊位禁止焊枪摆动,立焊位焊枪摆幅不得大于20mm,每层厚度不得大于5mm。层间清理采用风动打渣机清除焊渣及飞溅物,同时对焊缝进行同频率锤击,起到消应处理的作用。

(8)其他要求。母材上禁止焊接卡码及连接板等临时设施,若必须焊接,在焊前按照正式焊接要求,对母材进行预热,预热温度150℃~200℃。在切割临时设施时,也必须进行预热150℃~200℃,尽量避免伤及母材,如发生该种情况,必须及时进行焊补,后打磨圆滑过渡。在焊接过程中,严禁在母材上出现随意打火或由于拖拉焊把或焊枪对母材造成的电弧擦伤。如发生该种情况,应立即报告技术人员,并采取措施进行焊补和打磨,预热和后热温度同正式焊接。

7.7.4 焊接缺陷及修复

(1)焊缝表面缺陷超过相应的质量验收标准时,对气孔、夹渣、焊瘤、余高过大等缺陷应用砂轮打磨、铲凿、钻、铣等方法去除,必要时应进行焊补;对焊缝尺寸不足、咬边、弧坑未填满等缺陷应进行焊补。

(2)经无损检测确定焊缝内部存在超标缺陷时应进行返修,返修应符合下列规定:

- a. 返修前应由施工企业编写返修方案。
- b. 应根据无损检测确定的缺陷位置、深度,用砂轮打磨或碳弧气刨清除缺陷。缺陷为裂纹时,碳弧气刨前应在裂纹两端钻止裂孔并清除裂纹及其两端各50mm长的焊缝或母材。
- c. 清除缺陷时应将刨槽加工成四侧边斜面角大于10°的坡口,并修整表面、磨除气刨渗碳层,必要时应用渗透探伤或磁粉探伤方法确定裂纹是否彻底清除。
- d. 焊补时应在坡口内引弧,熄弧时应填满弧坑;多层焊的焊层之间接头应错开,焊缝长度不小于100mm;当焊缝长度超过500mm时,采用分段退焊法。
- e. 返修部位连续焊成。如中断焊接时,应采取后热、保温措施,防止产生裂纹。再次焊接前宜用磁粉或渗透探伤方法检查,确认无裂纹后方可继续补焊。
- f. 焊接修补的预热温度应比相同条件下正常焊接的预热温度高,并应根据工程节点的实际确定是否需采用超低氢型焊条焊接或进行焊后消氢处理。
- g. 焊缝正、反面各作为一个部位,同一部位返修不宜超过两次。
- h. 对两次返修后仍不合格的部位应重新制订返修方案,经工程技术负责人审批,并报监理工程师认可后方可执行。

8 “鸟巢”钢结构焊接工程合拢技术

“合拢”是焊接工序的收官之作,是钢结构支撑塔架卸载的前提条件,合拢焊缝在一定程度上决定整体钢结构体系的初始应力状态。从严格的意义上讲,合拢焊缝属于带载焊接的范畴,具有很高的难度。同时合拢焊缝也具有极大的焊接残余应力,容易形成焊接残余应力集中的焊缝,因此存在一定的风险。

根据设计要求,国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程主、次结构均需进行合拢,屋顶主结构和立面次结构有四条均匀分布的合拢线。合拢的目的是为了确保支撑塔架卸载和后续肩部次结构及顶面次结构的安装,确保整个工程的工期目标。从焊接应用技术理论上分析,合拢焊缝对焊接工程钢结构体系初始应力状态的分布起十分重要的作用,因此,合拢

工程得到了各方面的重视。

具体合拢技术条件是:合拢温度 180℃~230℃; 主次结构均分别分两次同时进行。合拢工程具有以下特点。

8.1 合拢工程必须在夜间进行

国家体育场(鸟巢)屋盖钢结构属于特大型大跨度钢结构,双榀主桁架贯通最大跨度 258.365 m。

由于“鸟巢”的钢构件直接暴露于室外,冬季时钢构件的温度与室外气温基本相同。夏季时室外气温最高,同时太阳照射强度也最大,太阳照射将引起构件温度显著升高。结构在迎光面与背光面的温差,以及屋面、立面钢构件的温差将形成梯度较大的温度场分布。

温度变化将在结构中引起很大的内力和变形,对结构合拢的安全性将产生显著的影响,由于合拢温度是以钢结构杆件的平均温度为准,因此合拢工程必须在构件受热均匀的环境中进行。也就是说,合拢工程必须在没有日照的夜间并且在构件温度均匀时进行,这就是合拢工程对环境温度的具体要求。

8.2 合拢口焊接必须同时进行

国家体育场(鸟巢)钢结构主、次结构焊缝的合拢分成两个阶段,在相同温度范围内进行,每一个阶段在进行焊接时都是同时进行,从严格的意义上讲,真正的合拢是第二阶段的主结构焊缝的焊接。因为,真正形成钢结构主结构体系的一次初始应力的焊缝是在第二阶段形成,虽然在第一阶段钢结构体系的应力状态发生了很大变化,但这个初始应力没有达到最大值,同时也没有最后固定,容易发生变化。只有在第二阶段,钢结构体系形成了封闭、稳定的结构体系,这时钢结构的应力状态才是真正的一次初始应力状态。

为什么合拢焊缝焊接要同时进行呢?主要有两个原因:

(1)合拢温度的限制。只有在相同的构件和环境温度条件下,所形成的焊缝的差别受温度的影响最小。环境温度随时间的推移会发生变化,时间一长很有可能超出合拢温度的范畴,使合拢焊接不能进行,所以要同时焊接。

(2)从严格的意义上讲,合拢焊缝的焊接属于带载焊接范畴,如果两条或两条以上的焊缝不同时焊接,那么,先焊的焊缝负载要小,因而焊接的残余应力小,后焊的焊缝则刚好相反,负载比先焊的焊缝大得多,容易形成应力集中,焊缝的中心也容易出

现热裂纹。这种情况在“负载转移”的卡马焊接时要特别小心,一个断面上的所有卡马必须在同一时间内完成,也就是说,不能一个卡马焊好后再焊另一个卡马,而是所有卡马都同时焊接;如果卡马太多,要采取巡回焊接的技术,使所有卡马完成焊接时间大致相同;GMAW、FCAW-G 非常适合合拢焊缝和卡马的焊接。这样,能够使一个断面的卡马负载基本均匀,这种应力状态的形成对正式焊接主焊缝十分有利。所以,只有同时焊接所有的合拢焊缝,合拢焊缝才能获得基本相同的负载,从而使钢结构体系形成所希望的基本均匀的一次初始应力状态,达到封闭、稳定的目的,为成功卸载提供有力的技术支持。

8.3 数量多,合拢组织难度大

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程中的主桁架和立面结构各设置了四条合拢线,其中,主桁架合拢口 64 个,立面结构的合拢口 28 个,合拢口数量众多。立面结构和主桁架采取分次合拢方案,但一次合拢的对接口数量仍高达 32 个。

由于控制合拢一次初始应力的需要,要求所有合拢焊缝必须同时焊接,因此合拢规模庞大。为确保合拢线上的对接口同时合拢,需组织大量的人力和物力。同时,对于如此复杂的结构和复杂的温度场分布情况,要保证分次合拢时的温度条件完全相同,难度巨大。合拢与卸载是结构体系形成和后续次结构安装的先决条件,需统一考虑,统筹安排。

(1)合拢及合拢焊缝定义。

建筑钢结构在初始温度条件下,从分散的带临时约束体系到封闭稳定结构的结构体系转换过程叫合拢。使之成为封闭稳定结构的焊缝叫合拢焊缝。

(2)钢结构体系转换后的特点。

a. 体系的刚性明显增加,安全稳定性也明显增加。

b. 合拢后的钢结构体系临时约束一起形成了钢结构体系的一次初始应力。

c. 合拢完成后的钢结构体系经过卸载工序之后,钢结构体系再次转换为自承重体系,一次初始应力进行二次分配,形成钢结构系统真正的初始应力状态。

8.3 合拢温度的确定原则

合拢时,钢结构构件在合拢过程中的初始平均温度即为合拢温度,区别于大气温度,是结构使用



中温度的基准点,也称安装校准温度,其确定原则为:

(1)确定结构合拢温度时,首先考虑当地的气象条件,应使合拢温度接近平均气温,也就是可进行施工的天数所占的比例最大气温。

(2)合拢温度应尽量设置在结构可能达到极限最高、最低温度之间,使结构受温度影响最合理,保证日照形成的温差应力始终处于安全的受控状态。

(3)确定合拢温度应充分考虑施工中的不确定因素,预留一定温度的允许偏差,作调整用。

8.4 合拢顺序

因合拢口数量众多,如一次合拢,则需投入大量的人力和物力,且施工组织管理也相当困难,根据现场实际情况,结合设计提出的先行合拢构件需纳入后续合拢线合拢温度要求范围这一基本原则,本工程的合拢按合拢线依次进行合拢。具体原则为:先进行主桁架的合拢,再进行立面结构的合拢,主桁架合拢时,先进行两大施工区域内部合拢线的合拢,再进行两大施工分区间合拢线的合拢,同一合拢线的各合拢口同时、同步合拢。

在进行主桁架四条合拢线的合拢时,合拢温度条件要基本相同,此时因立面结构还未合拢和形成整体,故可不对立面结构的温度做严格的要求。但当进行立面结构的合拢时,顶面主桁架因已形成整体并参与受力,所以必须加以总体考虑,主桁架的温度要求同立面结构的合拢温度要求。

8.5 合拢口焊接

由于合拢焊缝对焊接要求相当高,所以焊接组织管理提出了相当高的要求。合拢焊缝应在尽可能短的时间内完成,应采取热输入量小,电流密度大的焊接技术。并必须按以下方法进行:

(1)选择气温相对稳定的情况下进行合拢,即合拢尽量在安排夜间进行。

(2)实际合拢时,先将合拢口的所有卡马焊接固定,并在标准合拢温度时间内尽快完成卡马的焊接,保证钢结构整体初始应力的一致。然后再进行合拢口焊缝的焊接,卡马的连接焊缝高度根据受力计算结果确定。

(3)卡马焊接完毕后,应及时进行合拢口对接焊缝的焊接,并确保焊接过程中钢结构的本体温度尽可能处于设计要求的合拢温度范围内。可适当增加焊接人员,加快焊接进度。

(4)主桁架上、下弦杆及腹杆同时施焊,先焊腹

板,后焊翼缘板,焊接方法可选用气保焊和焊条电弧焊。由于仰焊较平焊的速度慢,故每条上、下弦杆的仰焊缝均安排2名焊工,同时施焊。腹杆因断面较小,板壁较薄,可1名焊工进行焊接。

(5)对于立面次结构和主桁架,因同一垂直位置上存在多点焊接现象,为确保安全,需搭设防护棚,防止上部火花飘落和焊渣掉落造成下部施工人员受到伤害。

8.6 合拢焊缝负载转移技术

从焊接的本质上讲,一旦形成封闭稳定结构,就形成了系统的一次应力。而合拢焊缝便是应力最大的焊缝,随着温度的变化,应力随之变化,不仅在大小上变化,而且在方向上变化,这就给合拢焊缝的焊接带来很多困难,特别是在拉应力强大时焊接过程中极易形成热裂纹。

根据焊接应用技术理论和经验,最有效的方法是用卡马转移负载,待焊缝形成后,割除卡马。使一次应力全部转移在卡马上,然后再转移在焊缝上,确保焊缝的安全。

由于合拢口数量众多,且合拢段的安装随着工程的总体安装进程在不同时间里进行,合拢段的安装质量不仅影响结构安装过程中的安全,而且影响最终的合拢和结构的总体施工质量及结构使用过程中的安全,因此,必须采取合理的安装工艺措施,确保合拢段与相关构件的安装及结构的顺利合拢。为了获得合拢焊缝的成功,必须按照以下程序进行:

(1)在进行合拢段的安装时,要尽量控制合拢段安装时合拢口的间隙大小,该间隙大小要考虑温度变形计算结果和焊接收缩变形,如达不到预定的要求,可调整合拢焊缝的实际尺寸,具体方法按前述方法进行。

(2)为确保合拢段施工过程中的安全,合拢段安装就位后,除设计要求的合拢口不进行焊接连接外,其他接口部位均需及时焊接完毕,以增强结构的整体稳定性。

(3)为确保合拢口在施工过程中因温度变化而自由伸缩,合拢口采用卡马搭接连接,卡马的大小和数量需根据该接口部位的受力计算确定。

a. 合拢口上翼缘设置三块卡马,其他边各设置两块卡马,为增加卡马侧向稳定性,上翼缘两边卡马增设规格为100 mm×100 mm×10 mm的三角形加筋板。除下翼缘的卡马焊接固定在已装主桁架牛腿上外,其他卡马均焊接固定在合拢段端口上,如图



21 所示。

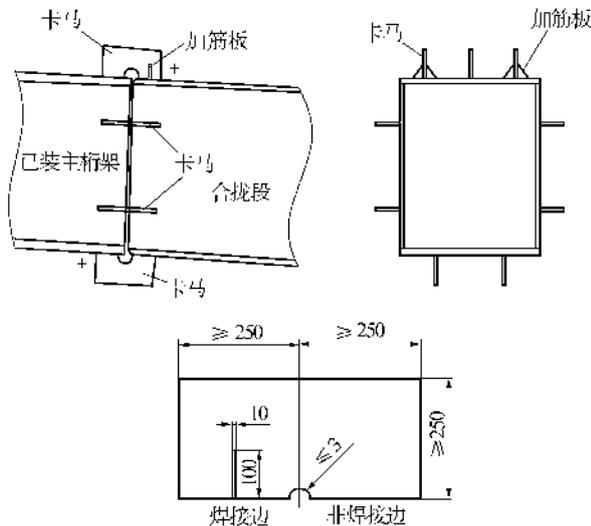


图 21 负载转移所用卡马具体尺寸

- b. 卡板厚度大于等于 20 mm, 高度大于等于 250 mm, 长度大于等于 500 mm, 材质为 Q235B。
- c. 焊缝要求焊角尺寸大于等于 14 mm, 双面角焊缝。
- d. 为确保安全, 合拢段安装就位后, 非合拢口要及时进行焊接。同时, 合拢口卡马需按要求设置好。
- e. 在整个安装过程中, 要定时进行合拢口的跟踪检查工作, 一是检查卡马的连接焊缝和变形情况, 确保卡马的安全; 二是检查合拢口的间隙情况。
- f. 用最快的速度, 最好的质量完成合拢焊缝的焊接工作, 全力力争一次合格率为 100%。
- g. 合拢焊缝焊接完成之后 24 h, 按 UT-B-1 的标准又对焊接质量进行检验, 根据质量的具体情况确定下一步工作内容。

h. 合拢焊缝出现缺陷应立即及组织返工, 返工完成 24 h 后按 UT-B-1 的标准进行检验, 原则上不允许再次返工。

i. 焊缝检验合格后, 割除卡马。在割除卡马的顺序上, 按对称割除的方式进行。

在割除卡马完成后, 整体结构的初始第一应力全部由焊缝承担, 包括合拢焊缝在内, 合拢焊缝此刻受到的冲击最大。从一定意义上讲, 割除卡马是对合拢焊缝质量的最大考验。

国家体育场(鸟巢)钢结构合拢焊缝全部经受住钢结构一次应力的冲击, 获得了巨大的成功。

9 结论

国家体育场(鸟巢)钢结构焊接工程举世瞩目, 一个崭新理念的工程将给材料工业和施工技术提供一个进步的机会。“鸟巢”工程在一定程度和范围内检验了我国的钢铁工业水平和综合施工能力, 特别把焊接技术推进一个新阶段。

在此只是应用了在工程进行过程中所形成的资料 and 文章, 还不能代表整个“鸟巢”钢结构焊接工程的施工技术, 但是从这一部分资料中可以看出, “鸟巢”这个复杂建筑钢结构焊接工程的施工技术登上了一个新的台阶, 形成了系统的技术系列, 可以为后续工程提供有益参考。

参考文献:

[1] 曾乐. 焊接工程学[M]. 北京: 亲时代出版社, 1986.
 [2] 陈伯鑫. 焊接工程缺欠分析与对策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

《电焊机》杂志 2007 年合订本简介

2007 年《电焊机》杂志不但将前沿性焊接切割技术、实用工艺、生产和使用维修经验奉献给了读者, 而且更以技术系统化、行业信息及时全面化展现在大家面前。

2007, 杂志社精心策划, 推出了 12 期“专题讨论”——数字化焊接电源, EMI(焊接环境下的电磁场对焊接操作者的影响), 高能束流焊接技术, 逆变焊接技术, 焊机中电子元器件的选择与应用, 2007 IFWT 船舶焊接国际论坛, 有色金属焊接工艺及设备, 焊接软件的开发及应用, 等离子焊接与切割, 摩擦焊设备及技术, 专用及特种、成套焊接设备, 自主创新焊接技术。您能从中了解到行业人士最关心、关

注的技术问题, 它为您提供了深层次、系统化和广泛的技术, 是您掌握国内外技术发展的最佳途径。

2007 年, 杂志的优秀栏目——专题综述、研究与设计、生产与应用、产品导购等, 在 2007 年得到了进一步发扬光大, 连续刊载的“使用与维修”, 将更多的维修经验介绍给大家。

《电焊机》杂志 2007 年合订本已正式出版发行, 每套订价 120 元/套(含邮寄费)。

联系人: 王杏英
 电话: 028-84216674 传真: 028-84216654
 地址: 成都市东三环路二段龙潭都市工业集中发展区航天路 24 号《电焊机》杂志社(610052)