

建设行业专业技术管理人员继续教育培训教材

# 建筑钢结构施工 新技术及应用

JIANZHU GANGJIEGOU SHIGONG

XINJISHU JI YINGYONG

陈晓明 夏凉风◎主编

非  
外  
借



扫一扫

享受更多增值服务  
赢取精美建筑图书



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

建设行业专业技术管理人员继续教育培训教材

# 建筑钢结构施工 新技术及应用

JIANZHU GANGJIEGOU SHIGONG

XINJISHU JI YINGYONG

陈晓明 夏凉风 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书共三章,通过新技术介绍与应用实例相结合的方式,介绍了现代建筑钢结构施工及材料装备新技术。本书收录的新技术涉及建筑钢结构制造、安装等领域,尤其侧重现场施工新技术,包括测量、吊装、焊接等。

本书可作为建筑施工,尤其是钢结构施工技术及管理人員的继续教育培训教材,也可供相关专业的大中专院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑钢结构施工新技术及应用/陈晓明,夏凉风主编. —北京:中国电力出版社,2016.6

建设行业专业技术管理人员继续教育培训教材

ISBN 978-7-5123-8982-3

I. ①建… II. ①陈…②夏… III. ①钢结构—工程施工—新技术应用—继续教育—教材  
IV. ①TU758.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第113403号

中国电力出版社出版、发行

北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:周娟华 E-mail: [juanhua Zhou@163.com](mailto:juanhua Zhou@163.com)

责任印制:蔺义舟 责任校对:太兴华

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2016年6月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·11.75印张·287千字

定价:39.80元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

21 世纪初是我国建筑钢结构发展突飞猛进的时代。随着改革开放和国民经济的高速发展,我国钢铁产量快速增长,建筑用钢的品种、规格逐步齐全,性能也不断提高,为我国建筑钢结构的发展提供了良好的物质基础。源于建筑师越来越丰富的想象力,基于计算机超凡的结构计算能力,新型、复杂的空间钢结构层出不穷。在日新月异的城市建设中,一大批各具特色的钢结构建筑陆续拔地而起,快速地推动了建筑钢结构施工技术的发展。

本书结合最近几年建筑钢结构的发展,从制作安装、材料装备以及信息化施工等角度汇编了一些新技术和新工艺。全书分为三章:第一章为钢结构施工新技术:第一节由徐文敏编写,第二节由陈晓明编写,第三节由夏凉风编写,第四节由郁政华编写,第五节由吴欣之、陈晓明、王云飞、张宇编写,第六节由吴欣之、陈晓明、王云飞、夏凉风编写,第七节由陈晓明、陈国栋编写,第八节由谷凯、夏凉风编写。第二章为钢结构材料及施工装备新技术:第一节由徐文敏编写,第二节由盛林峰编写,第三节由夏凉风、周锋编写,第四节由吴欣之、夏凉风编写,第五节由张宇编写,第六节由陈晓明编写,第七节由陈坚编写。第三章为钢结构信息化施工技术:第一节由伍小平、周锋编写,第二节由周锋编写,第三节由贾宝荣编写。全书由陈晓明、夏凉风统稿。

书中新技术及案例主要由上海建工集团股份有限公司及下属上海市机械施工集团有限公司提供。感谢吴欣之、胡玉银、王美华、崔晓强、李增辉等业内专家在全书新技术选题以及编写过程中的指导和帮助。此外,作者还参阅了国内同行的部分研究成果和工程技术总结资料,在此一并表示感谢!书中引用了一些建筑及施工图片,目的是可以给读者清晰、直观的印象,在此也对这些图片的所有者表示感谢!

受作者水平和编写时间所限,本书难免存在疏漏和不当之处,敬请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前言

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第一章 钢结构施工新技术               | 1   |
| 第一节 多芯焊丝焊接技术               | 1   |
| 第二节 基于机器人技术的特殊空间网壳钢结构制造新技术 | 10  |
| 第三节 大跨度空间钢结构临时支撑卸载技术       | 22  |
| 第四节 钢结构恒力、弹性临时支撑技术         | 27  |
| 第五节 钢结构计算机控制提升安装技术         | 33  |
| 第六节 钢结构平移安装技术              | 50  |
| 第七节 开合钢屋盖安装技术              | 67  |
| 第八节 大型复杂膜结构施工技术            | 86  |
| 第二章 钢结构材料及施工装备新技术          | 97  |
| 第一节 高强度及特殊钢材应用技术           | 97  |
| 第二节 高强厚钢板工地焊接技术            | 106 |
| 第三节 新型钢结构抗震装置及安装技术         | 112 |
| 第四节 重型起重机置于永久结构上的配套技术      | 122 |
| 第五节 超高层建筑爬升塔机外挂布置技术        | 128 |
| 第六节 大型门式起重机在钢结构施工中的应用技术    | 136 |
| 第七节 GPS 测量定位技术在钢结构工程中的应用   | 143 |
| 第三章 钢结构信息化施工技术             | 150 |
| 第一节 大跨度空间钢结构施工控制技术         | 150 |
| 第二节 钢结构现场施工监测技术            | 160 |
| 第三节 BIM 在钢结构工程中的应用技术       | 171 |
| 参考文献                       | 183 |

# 第一章 钢结构施工新技术

## 第一节 多芯焊丝焊接技术

### 一、概述

随着时代的进步,建筑行业进入成熟期,国内建筑钢结构高速发展,在许多高层、超高层及大跨度建筑中,为满足造型和结构设计的需求,厚钢板的使用越来越广泛,因此,优良、高效、低耗的焊接是建筑钢结构工程中需要解决的一项重大问题。焊接水平,特别是自动化水平的提高,是实现钢结构技术快速发展的关键所在,多芯焊丝技术就是其中的重要课题。

### 二、技术简介

#### (一) 双丝埋弧焊

##### 1. 双电源双粗丝埋弧焊

顾名思义,双电源双粗丝埋弧焊的焊接电流分别从两个单独的电源流入两根独立的焊丝,如图 1-1 所示。前丝电极为直流,采用大电流、低电压,充分发挥直流电弧的高穿透性,获得较大的熔深和熔敷效率,并为后丝焊接提供预热功能,减低电能消耗;后丝电极为交流,采用小电流、大电压,增大焊缝熔宽,覆盖前丝大电流焊接后大量堆积的熔敷金属,改善焊缝外形和表面光洁度。

双电源双丝埋弧属于多芯焊丝技术中运用最广泛的多电源多丝埋弧焊。因为每根焊丝由单独的焊接电源供电,理论上可以排列很多焊丝进行焊接,但限于焊缝尺寸及过大的焊接热输入量的影响,应用最多的仍是双丝或三丝系统。焊丝排列顺序又分串列和并列,串列焊接时,当焊丝间距小于 50mm 时,两个电弧形成一个公共的熔池;焊丝间距大于 50mm 时,则形成两个独立的熔池,较长的熔池长度,使得熔池内热循环更加充分,有利于焊缝中微量元素的扩散,提高焊缝性能;并列焊接时,通过调节合适的焊丝间距,获得较大的熔宽及较小的熔深与热输入,适用于塞焊和堆焊等大填充量焊接。

##### 2. 单电源双细丝埋弧焊

单电源双细丝埋弧焊,该方法使用两根细丝代替一根较粗的焊丝,两根焊丝共用一个导电嘴,以相同的速度同时通过导电嘴向外送出,如图 1-2 所示。由于两丝靠得比较近,两焊丝互相影响,形成的电弧共熔池,单电源双细丝埋弧焊一般采用直流反接,直流电源能保证电弧的稳定性,反接能减少气孔和飞溅数量。两焊丝平行且垂直于母材,焊接方向相对,因为使用单电源,设备的投资费用远低于双电源双粗丝埋弧焊。由于焊丝直径较小,单电源双细丝埋弧焊可得到较小的焊缝稀释率和较低的热输入,这意味着在某些焊缝金属填充量大却对焊缝冲击韧性要求高的情况下,这种焊接方法具有其独一无二的优越性。

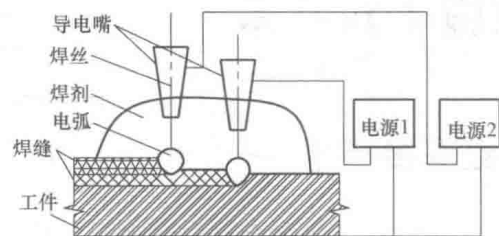


图 1-1 双电源双粗丝埋弧焊

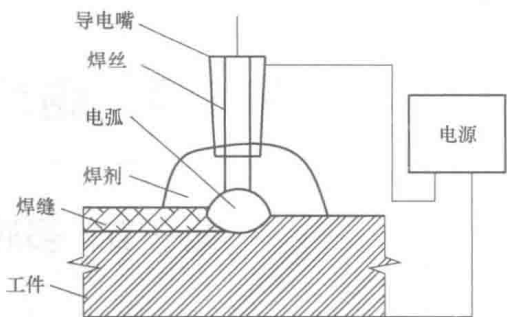


图 1-2 单电源双细丝埋弧焊

不同于多电源多丝埋弧焊，多芯焊丝技术中的单电源埋弧焊并不局限于双丝焊，单电源三丝焊、四丝焊也在逐步研究及推广应用，焊丝的排列顺序亦有纵向排置，也可横向排置或成任意角度。

(二) 多芯焊丝工艺参数

焊接的主要工艺参数包括焊接电流、电压以及焊接速度。其中，焊接电流是决定焊丝熔化速度、熔透深度和母材熔化速度的最重要参数。增大焊接电流，会使电弧的热功率和电弧力都有所增加，导致焊缝熔深增大，焊丝熔化速度增加，而熔宽变化不大，造成焊缝形状系数变小，这样的焊缝不利于熔池中气体及夹渣物的上浮和逸出，容易产生气孔、夹渣、裂纹等缺陷，严重时引起烧穿；焊接电流过小，焊接线能量低，熔池凝固过快，阻碍气体及夹渣物的逸出，焊缝中易产生气孔、夹渣等缺陷，严重时造成未熔合。

多芯焊丝焊的目的在于增加单位时间的金属填充量而提高效率，即采用双丝焊时，原单丝需要焊接两道的，采用双弧双丝后，仅需一道即可完成焊接，但这并不意味着工艺参数偏向于大电流低速度，易造成焊缝成形差、焊缝力学性能低等问题。实际上，多芯焊丝埋弧焊主要在于通过提高焊车行走速度，将增加的熔化金属快速分摊到较长的焊缝里，实现高速焊接，同时获得优良的焊缝成形。

(三) 焊接工艺试验

1. 焊接工艺试验

为比较多芯焊丝的使用性能，故进行对比试验，见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 焊接工艺对比试验

| 项目 | 单电单粗丝                                                         | 双电双粗丝                                          | 单电双细丝                                          |
|----|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 焊丝 | H <sub>10</sub> Mn <sub>2</sub> ， $\phi$ 4.8mm                | H <sub>10</sub> Mn <sub>2</sub> ， $\phi$ 4.8mm | H <sub>10</sub> Mn <sub>2</sub> ， $\phi$ 1.6mm |
| 焊剂 | SJ101                                                         |                                                |                                                |
| 母材 | Q345GJC-Z25， $t=60$ mm，规格为 60mm $\times$ 200mm $\times$ 650mm |                                                |                                                |
| 极性 | 直流反接                                                          | 前丝直流，后丝交流                                      | 直流反接                                           |

表 1-2 试验所用焊接设备型号

| 类型   | 型号      | 数量 |
|------|---------|----|
| 直流电源 | MZ-1000 | 2  |

续表

| 类型        | 型号        | 数量 |
|-----------|-----------|----|
| 交流电源      | BXL-1200  | 1  |
| 直流电源      | ZD5-1250E | 1  |
| 单电双丝埋弧焊焊车 | MZC-1250M | 1  |
| 单电单丝埋弧焊焊车 |           | 1  |
| 双电双丝埋弧焊焊车 |           | 1  |

焊接试验设备如图 1-3 所示。



图 1-3 焊接试验设备一览

针对车间最常见的对接、十字、角接焊接接头形式，进行焊接性能对比，三种接头形式如图 1-4、图 1-5 所示。

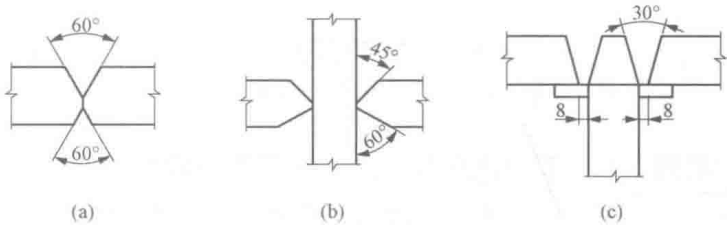


图 1-4 接头形式图  
(a) 对接接头；(b) 十字接头；(c) 角接接头

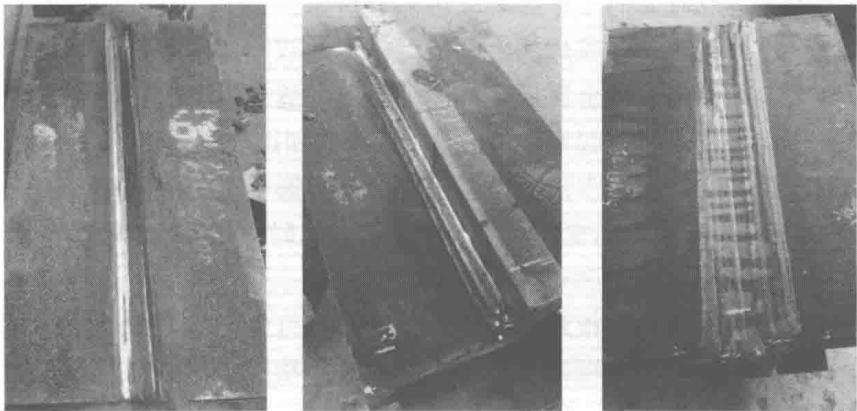


图 1-5 三种接头形式试验试板

2. 焊接检验结果与分析

(1) 焊接效率对比（见表 1-3）。

表 1-3 焊接效率对比

| 焊接方法  | 对接接头用时/s | 十字接头用时/s | 角接接头用时/s |
|-------|----------|----------|----------|
| 单电单粗丝 | 2285     | 4427     | 7117     |
| 单电双细丝 | 1772     | 3752     | 4420     |
| 双电双粗丝 | 1451     | 2881     | 3240     |

注：该时间仅为焊接过程中的时间，不包含碳刨、打磨、清渣等时间。

焊接效率柱状对比如图 1-6 所示。

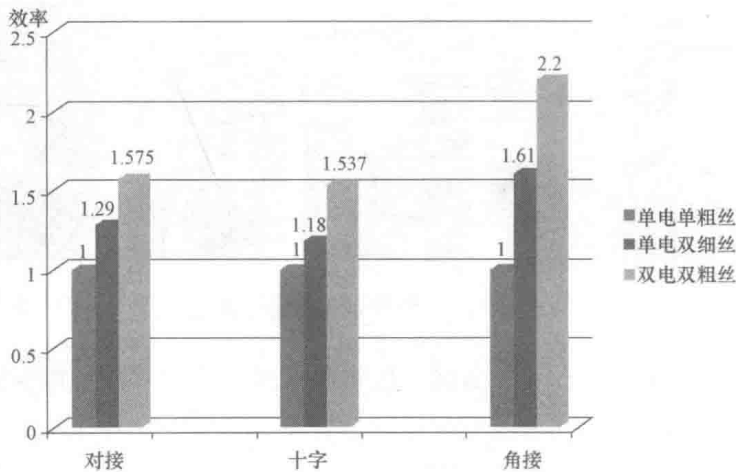


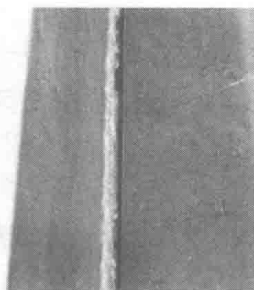
图 1-6 焊接效率柱状对比

注：将单电单粗丝焊接技术效率设定为 1 进行比较。

从图 1-6 可以看到，双电双丝比单电单丝对接接头的效率提高了 57.5%，比十字形接头的效率提高了 53.7%，比角接接头效率提高了 120%。单电双丝比单电单丝对接接头的效率提高了 29%，比十字接头的效率提高了 18%，比角接接头的效率提高了 61%。

分析实验结果：无论是双电双丝焊还是单电双丝焊，对于角接接头，效率提升明显；在对接接头和十字接头，双丝焊的效率提升较小。分析原因如下：在打底焊的过程中，采用单层单道焊接，焊缝成型系数对埋弧焊的影响较大，尤其双丝焊的焊丝填充量较大，而打底位置坡口宽度较窄，熔池中的熔敷金属无法横向铺开，焊缝成形系数较小，伴随着出现焊缝表面不光滑、咬边、夹渣、余高凸起等问题，如图 1-7 和图 1-8 所示，这使得打底过程中，尤其是双电双细丝焊接时，需要多次碳刨后补焊，严重影响了焊接效率。这一现象在打底焊熔深达到 16mm 左右，可进行分道焊后不再出现，此时，熔敷金属逐渐铺开，焊缝成形美观。

对接接头和十字接头采用清根焊，正反两侧均采用打底焊，且根部空间狭小，而角接接头采用衬垫焊，打底次数减半且根部间隙大。这就是角接接头时，双丝焊效率提升最为明显的原因。对接时，焊缝坡口为 60°，大于十字接头 45°的坡口角度，所以对接接头时，双丝焊的效率提升略高于十字接头。

图 1-7 单电双细丝焊  
打底焊缝成形图 1-8 单电单粗丝焊  
打底焊缝成形

双电双粗丝根据先直流、后交流、两根焊丝可独立供电的特点,采用单丝先进行打底焊接,避免了根部打底焊成形不良的缺陷,对比于单电双细丝单电源供电系统,焊接效率提升明显。

(2) 力学性能对比见表 1-4。

表 1-4

力学性能对比表

| 检测结果    | 拉伸<br>抗拉强度<br>$R_m/\text{MPa}$ | 侧弯  | 冲击 ( $0^\circ\text{C}$ )<br>冲击吸收能量 $KV_2/\text{J}$ |                     | 金相  | 硬度         |
|---------|--------------------------------|-----|----------------------------------------------------|---------------------|-----|------------|
|         |                                |     | 焊缝中心                                               | 热影响区                |     |            |
| 标准      | $\geq 470$                     | 无缺陷 | $\geq 34$                                          | $\geq 34$           | 无缺陷 | $\leq 350$ |
| 对接单电单粗丝 | 534/541 断母材                    | 合格  | 148, 150, 148 (159)                                | 171, 178, 136 (162) | —   | —          |
| 对接单电双细丝 | 535/534 断母材                    | 合格  | 143, 157, 145 (148)                                | 159, 204, 176 (178) | —   | —          |
| 对接双电双粗丝 | 548/546 断母材                    | 合格  | 90, 100, 87 (92)                                   | 190, 157, 129 (159) | —   | —          |
| 十字单电单粗丝 | 515/515 断母材                    | —   | 119, 109, 125 (118)                                | 176, 188, 174 (179) | 合格  | 合格         |
| 十字单电双细丝 | 570/569 断母材                    | —   | 151, 137, 134 (141)                                | 170, 222, 214 (202) | 合格  | 合格         |
| 十字双电双粗丝 | 564/561 断母材                    | —   | 116, 74, 47 (79)                                   | 174, 160, 179 (171) | 合格  | 合格         |
| 角接单电单粗丝 | 520/512 断母材                    | —   | 138, 137, 138 (138)                                | 208, 190, 202 (200) | 合格  | 合格         |
| 角接单电双细丝 | 528/521 断焊缝                    | —   | 135, 118, 130 (128)                                | 201, 206, 198 (202) | 合格  | 合格         |
| 角接双电双粗丝 | 530/532 断母材                    | —   | 76, 90, 110 (92)                                   | 199, 201, 224 (208) | 合格  | 合格         |

从对接接头力学性能柱状对比图(图 1-9)可以看出,三种焊接技术接头抗拉强度相差不大,但双电双粗丝焊缝中心冲击值较低,且热影响区的冲击值略低,这是由于双电双丝在焊接过程中,单位时间的填充量较大,热输入量较高,导致焊接接头的冲击性能降低。

从十字接头力学性能柱状对比图(图 1-10)可以看出,无论是双电双丝还是单电双丝,接头抗拉强度均不低于单电单丝。但单电双细丝因其焊丝直径小、设备具有高速焊接的特性,热输入量较低,使得焊缝中心冲击性能及热影响区冲击性能优势明显。

从角接接头力学性能柱状对比图(图 1-11)可以看出,双电双粗丝热输入量较高,焊缝中心冲击性能略低,但由于角接接头焊缝坡口宽,填充金属不会大量堆积,当对热影响区的热输入量较小时,接头热影响区冲击性能并未明显下降。

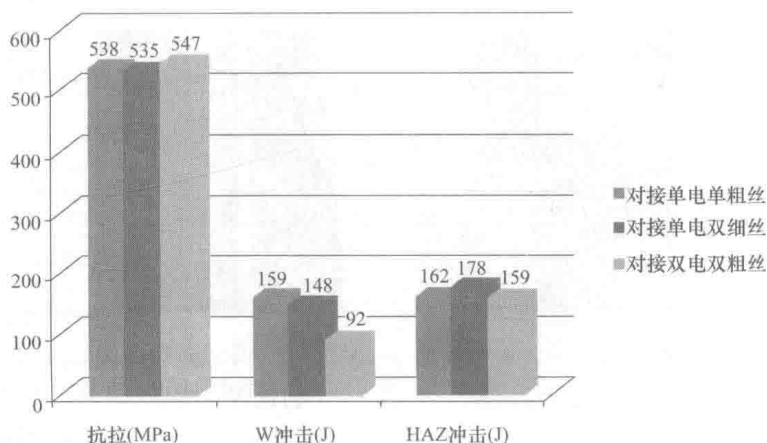


图 1-9 对接接头力学性能柱状对比

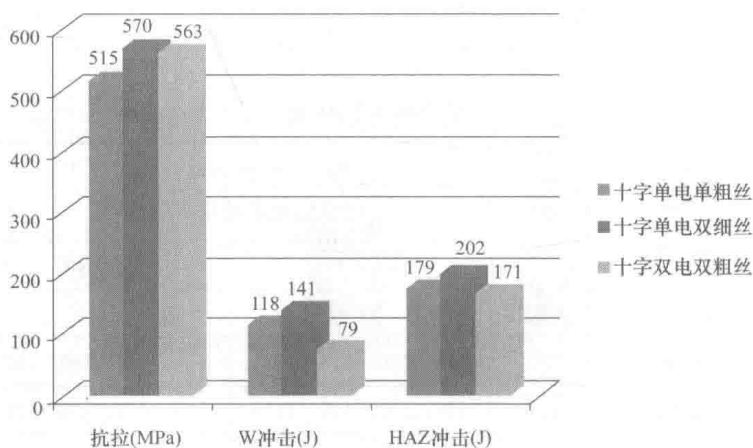


图 1-10 十字接头力学性能柱状对比

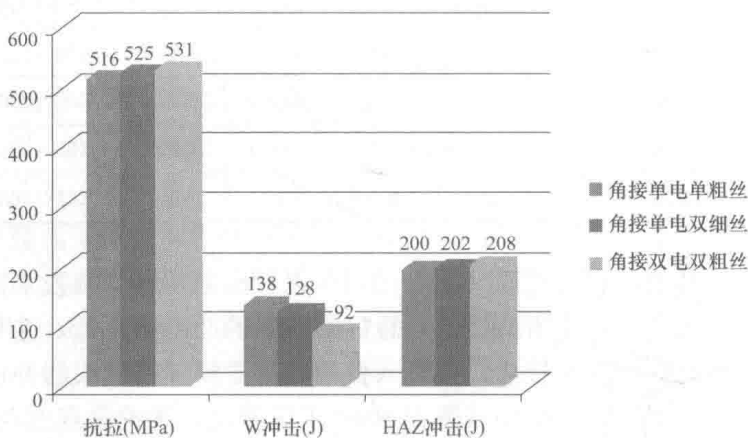


图 1-11 角接接头力学性能柱状对比

至此，可以看到，双电双粗丝焊能够极大地提高焊接效率，但其热输入量较高，对焊缝冲击性能略有影响；单电双细丝焊的焊接接头具有良好的力学性能，适用于高质量等级，如 D 级、E 级钢材，并能够明显提高焊接效率，也值得推广使用。

### 三、工程实例

工程实例：双电双粗丝技术在上海西亚宾馆箱型柱构件中的运用。

上海西亚宾馆改建项目位于寸土寸金的上海徐家汇，高度为 67.5m，地下 3 层，地上 13 层。整栋建筑平面呈矩形，长约 56m，宽约 22m，建筑首层层高 7.2m，标准层层高 4.4m。西亚宾馆的结构体系为钢框架支撑悬挂结构。结构在标高 23.550m（第 5 层）设置第一道桁架，桁架高 4.45m；在标高 58.800m（第 13 层）设置第二道桁架，桁架高 8.7m。第 5 层承受悬挂其下的 2~4 层以及其上的 6~7 层荷载。第 13 层承受悬挂其下的 8~12 层荷载（图 1-12）。

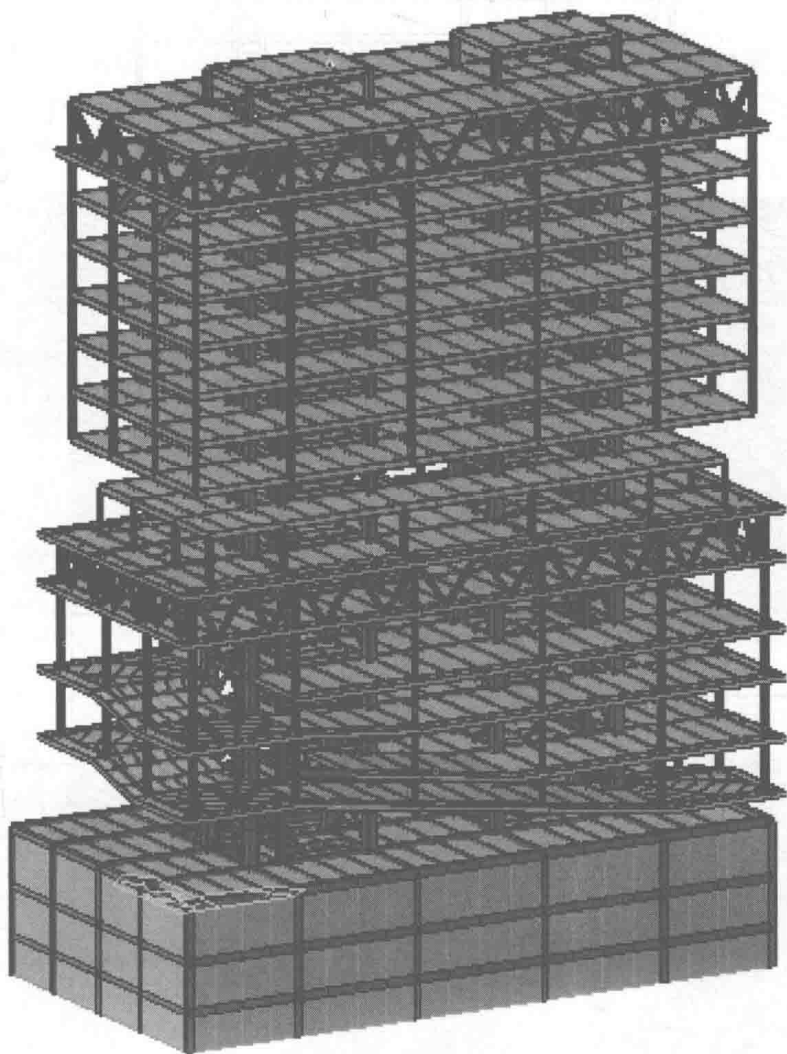


图 1-12 上海西亚宾馆改建项目结构三维示意图

主体钢结构采用焊接箱形柱，板厚为 50~70mm，外围采用 BH 吊柱（图 1-13），板厚为 50mm。由于采用了悬挑桁架连吊柱的结构形式，焊接质量要求高。箱型柱为内灌混凝土钢柱，外侧有栓钉、牛腿、连接板，内部亦有竖向劲板、电渣焊隔板及栓钉，焊接量巨大。

以第一节箱形柱为例，本体板厚为 70mm，本体翼腹板之间的拼制焊缝采用全熔透角接

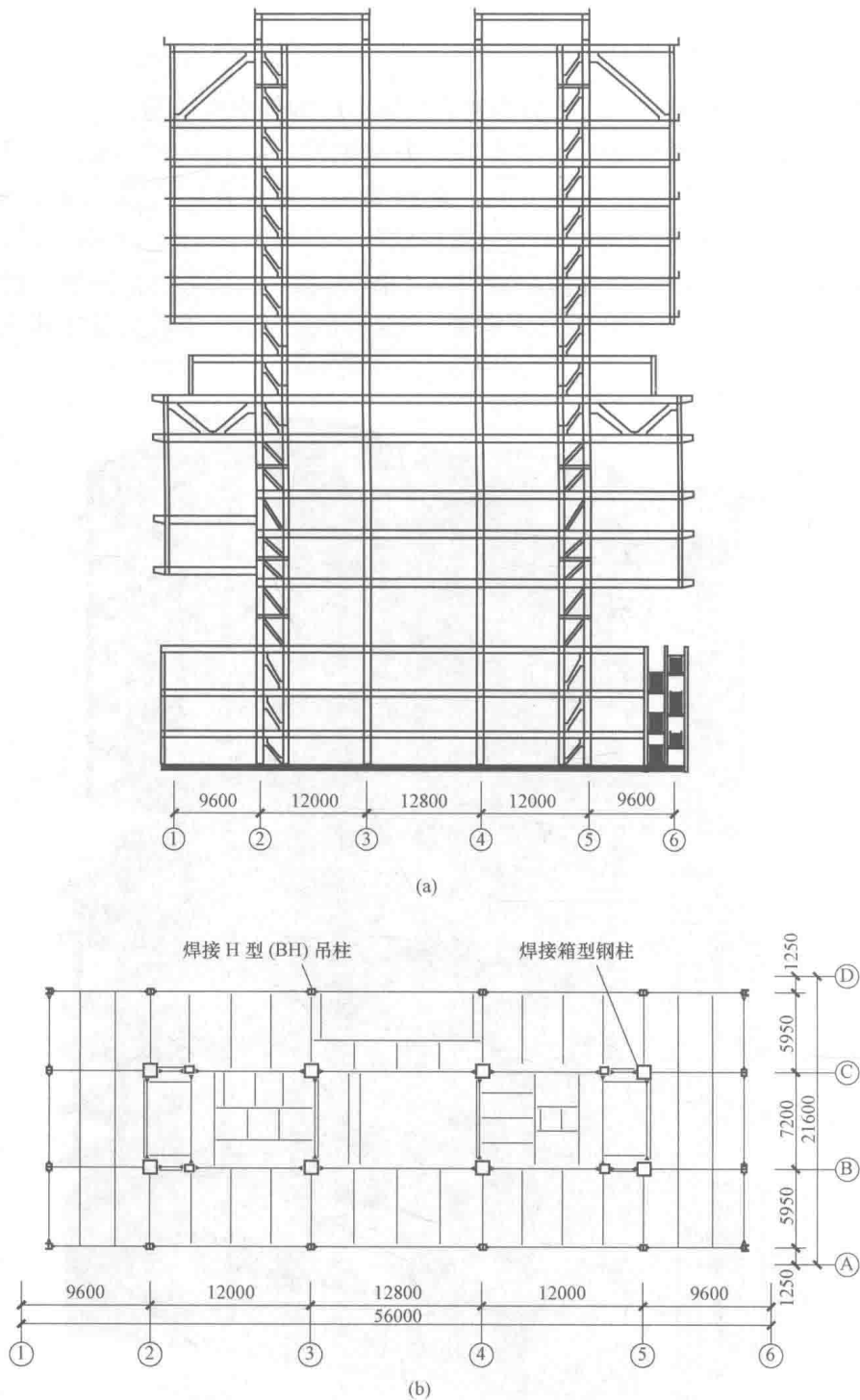


图 1-13 结构剖面及典型结构平面布置图

(a) 结构剖面图；(b) 典型结构平面布置图

形式，12 根箱型柱本体焊缝总长约 350m，采用单丝埋弧焊预计需要 120 个工时，5 台龙门单电单丝埋弧焊设备全力以赴，需要花费 12d 左右。考虑工期因素，采用了双电双粗丝埋弧焊进行焊接（图 1-14），在不到一周时间内，顺利完成所有构件本体焊接任务，为零件装配焊接、电渣焊、栓钉焊、打磨、检验、矫正、抛丸、打包发运等工序预留了大量的时间。

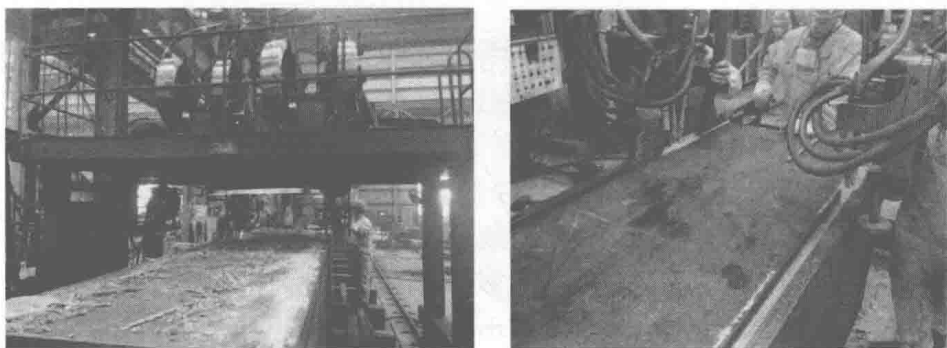


图 1-14 箱形柱本体双电双粗丝焊接现场

在西亚宾馆项目实际生产过程中，BOX 柱、BH 柱本体焊接外观如图 1-15、图 1-16 所示。双电双丝焊焊缝直线度良好、表面光滑、成形美观。由此可以看出，多芯焊丝技术优良，是提高焊接效率最有效的方法之一，值得不断探索、推广及运用。

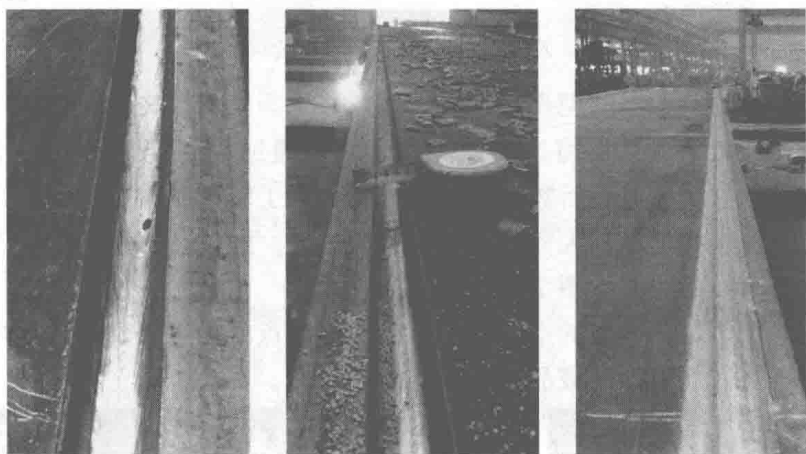


图 1-15 箱型柱双电双粗丝埋弧焊打底（左）、填充（中）、盖面（右）成形

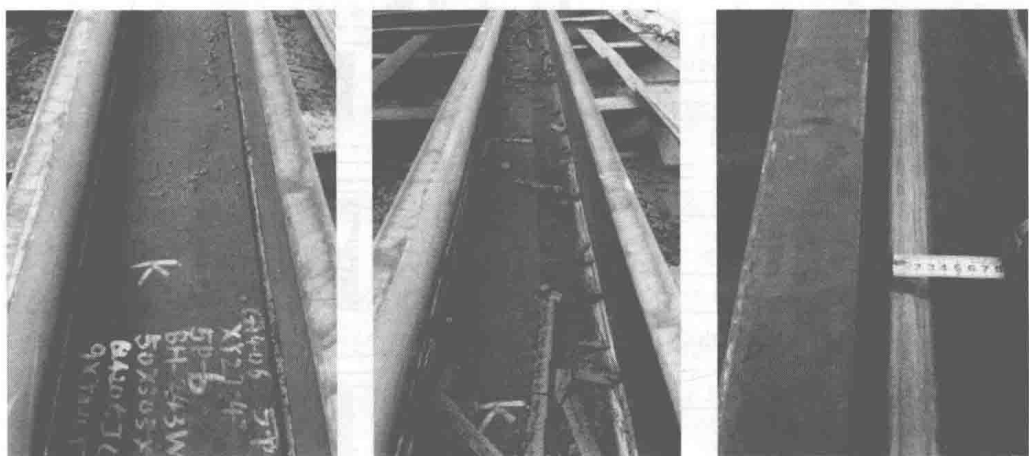


图 1-16 BH 柱双电双粗丝埋弧焊打底（左）、填充（中）、盖面（右）成形

## 第二节 基于机器人技术的特殊空间网壳钢结构制造新技术

### 一、概述

现代建筑随着追求新颖、轻巧、美观的效果，近几年在一些场馆及公共建筑中采用非常规形式截面构件组成的空间异形建筑越来越多，其中尤以上海世博会标志性建筑世博轴阳光谷为代表。这些建筑具有曲面异形、构件较小、精度要求高、节点数量众多且各不相同等特点。对于这类特殊的空间网壳钢结构，传统钢结构加工工艺，无论从技术上还是经济性上已不能适应精细化制造要求。基于机器人技术的特种钢结构制造新技术，可以完成从深化设计、制作到检测等全过程工作，实现了特种钢结构高精度、高效率的精细加工，并实现了全过程无图纸化制造。

### 二、技术简介

#### (一) 总体技术路线

基于机器人技术的特种空间网壳钢结构制造新技术，其总体技术路线为：深化设计提供机器人加工所需要的数据，然后将这些数据电子文本通过数据接口导入机器人特定的数据库，用机器人控制软件调用处理后数据，得到机器人加工轨迹的关键点数据，根据关键点及加工工艺要求生成轨迹指导机器人完成相关的加工作业。通过计算机测评软件系统完成对成品的精准检测。整个技术路线如图 1-17 所示。

该项新技术适用于各种截面的空间网壳多杆交汇节点的加工，具有自主知识产权，实现了从深化设计到机器人加工再到成品检测的无纸化制造。

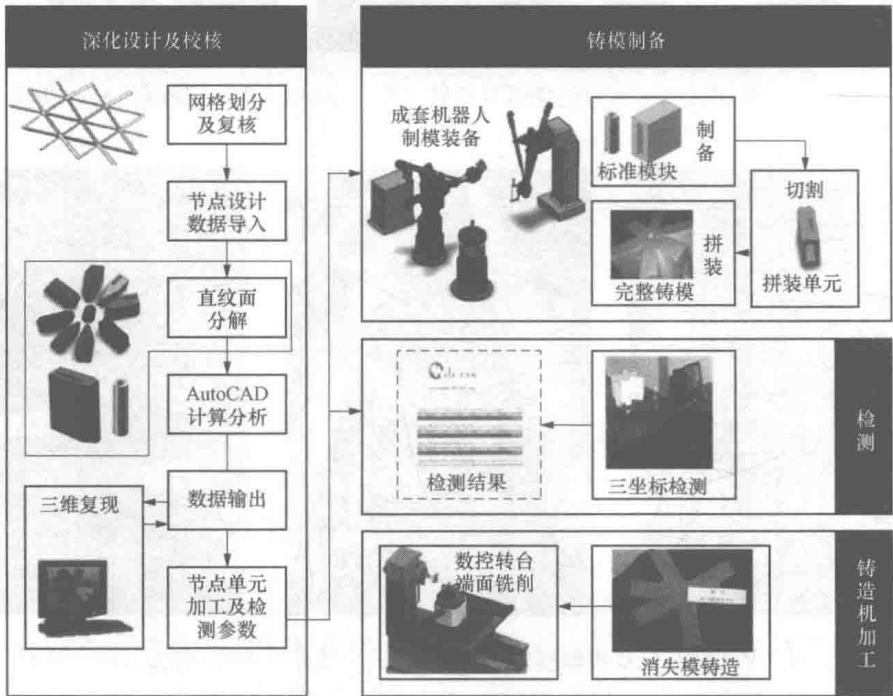


图 1-17 技术路线

## (二) 深化设计

### 1. 原始模型分析及构件编号系统建立

对于特殊的空间网壳钢结构,由于其造型复杂,没有规律可循,所以节点间的相互关系无法使用简单的方程描述。当网壳杆件为矩形等截面时,还需要每个节点处的截面方向。曲面网壳结构由杆件与节点连接的方式形成完整结构,因此节点是多杆汇交的节点,由于汇交的杆件都超过4根,而且任意3根的结构轴线都不共面,因此每个节点必须同时迎合周围所有杆件的空间特性,典型的节点形式如图1-18所示。

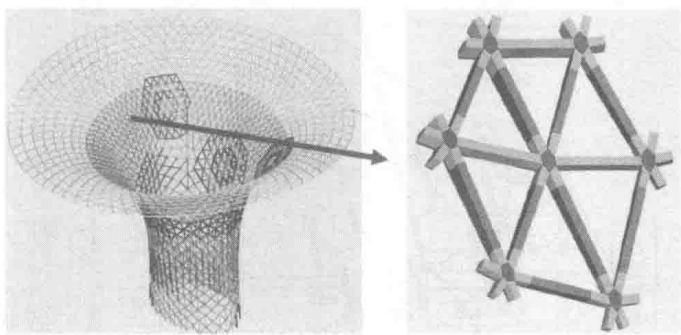


图 1-18 典型特殊网壳节点

对于特殊的空间异形网壳来说,众多的节点和杆件,完全相同的构件几乎没有,也就是说几乎要对每个节点、每根杆件进行定义。因此,深化设计尤为重要,而且传统的深化设计表达方法应对起来极为繁杂。

因此,需要研究一种创新的深化设计方法。首先,在对原始模型的深入分析的基础上,建立一种编号及识别方法,以便将节点和杆件间的相互关系表述清楚。编号系统力求简洁明了,能够表述清楚每个节点周围的相关节点编号,并将这些编号进行有序排列。

### 2. 初始数据提取

深化计算过程将主要围绕构件的几何空间关系,所以整个辅助深化设计的过程中始终围绕着两种数据形式:其一,节点间的相互关系;其二,坐标数据。基于这个原因,在选择原始数据时就必须兼顾数据采集的简易性和实用性。

建筑整体结构分析后会得到一个结构的轴线模型,可以利用结构计算软件提取杆单元信息和节点坐标并形成表格,而这两种表格就可以直接成为辅助深化设计的原始数据。

### 3. 深化计算

通过拓扑关系分析,找出所有点、线间的关系,形成数据库,并将数据库中的节点编号按照一定的空间关系排列。

在完成了相关节点之间关系的梳理并得到了符合要求的数列以后,就可以轻易地找到同在一个三角形单元里的三个点(数列的第一个编号加上其他排列相邻的两个编号,或者数列的第一个编号加上第二及最后一个编号)。先将这三个点任意组成两个向量,求其外积并单位化,就得到了这三个点所在平面的单位法向量。以此方法就可以得到指定节点所在的所有三角形单元的单位法向量(图1-19)。将相邻三角形单元的单位法向量相加,即可得到以这两个单元相交线段为结构中心线的杆件的截面方向;再以这些和向量为基础就可得到该节点的法向量。

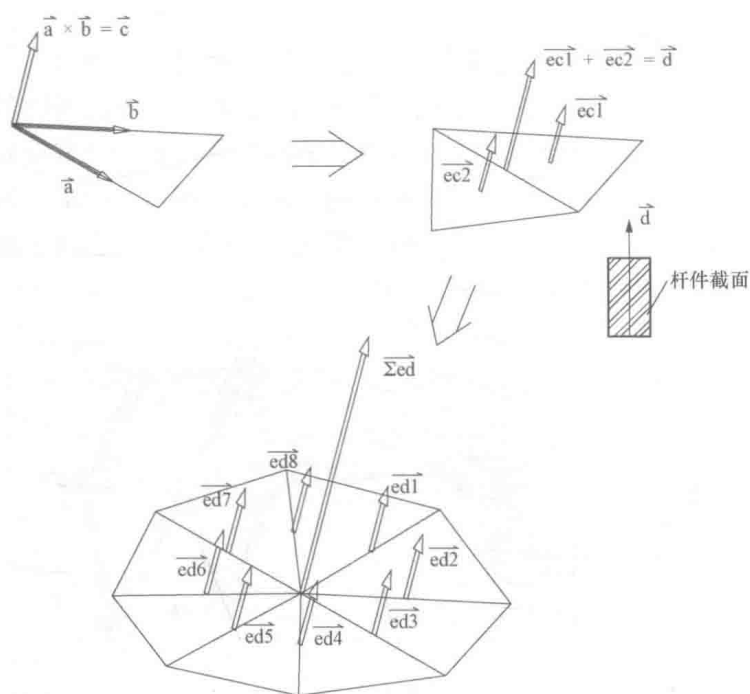


图 1-19 向量运算流程示意图

4. 输出数据转化

在节点的制造过程中，引入了机器人作为制造的主要力量，因此，深化设计的结果以数据为主，主要描述节点各个几何上的控制点的坐标。

在基础定义里已经得到了各节点位置的法向量，而且也知道了周围各杆件截面强轴的方向，同时也在得到轴线模型下各轴线交汇点（即节点）坐标的前提下，也可以轻易地得到各杆件所在轴线的空间位置。基于这些基础数据，经过空间解析几何计算，可以得到构件的各个平面的方程。然后，三个平面相交计算一个控制点，就得到了所有关键点的原始坐标数据。

（三）节点机器人加工

1. 节点加工工艺

结合网壳节点的特点，将每个网壳节点分解为 1 个中心圆柱单元和相连杆件数量相同的牛腿构造单元（图 1-20）。加工时，首先实现中心圆柱单元的标准化加工或定制，同时根据牛腿的尺寸参数批量加工或定制牛腿管材，切割下料后形成牛腿单元标准模块，再对其完成各组成单元结合面的精加工，然后完成整个节点的拼装，经回火、精加工、表面处理，形成最终的节点成品。

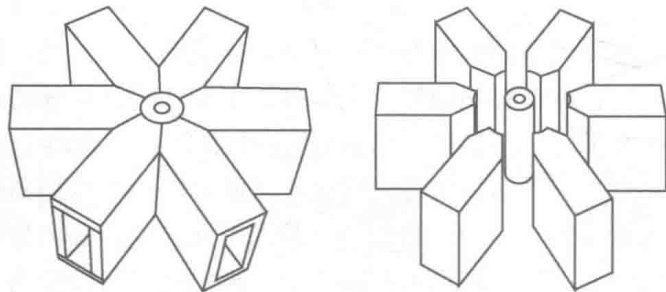


图 1-20 节点分解