

“十三五”规划教材

焊接结构生产

HANJIE JIEGOU SHENGCHAN

罗 辉 主编 >>>>



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

焊接结构生产

HANJIE JIEGOU SHENGCHAN

罗 辉 主编 >>>>

杜宝帅 李新梅 副主编 >>>>



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书介绍了钢结构焊接的应力与变形,焊接接头断口,焊接接头设计与接头强度,焊接工艺评定,焊接结构生产工艺(包括备料、成型加工、装配、焊接、检验等),焊接夹具和工装,焊接工艺卡应用实例,焊接生产组织管理等,以压力容器和起重机主梁焊接为实例详细介绍了相关技术问题。

本书可供焊接相关设计人员和企业技术人员参考,同时也可供本科院校焊接、材料成型与控制工程等专业教学使用。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构生产/罗辉主编. —北京:化学工业出版社,
2018.2

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-31290-7

I. ①焊… II. ①罗… III. ①焊接结构-焊接工艺-
高等学校-教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第330454号

责任编辑:李玉晖 杨 菁
责任校对:宋 夏

文字编辑:陈 喆
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市双峰印刷装订有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数408千字 2018年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究

前言

Preface

《焊接结构生产》是焊接工程技术专业必修课,是理论性和实践性较强的实用性技术。焊接结构在化工、容器、造船、航空、机械、运输等行业得到广泛的应用。焊接结构生产过程是局部加热,焊缝金属经过了加热、熔化、冷却热循环,由于焊接熔池小,冷却速度快,容易在焊接结构中产生较大的焊接应力,导致构件变形,影响产品质量,增加产品成本,因此,如何组织生产,控制焊接应力和变形是焊接结构生产的主要问题之一,也是焊接工程技术人员长期研究的关键问题。

本书首先介绍焊接应力形成基本理论,分析焊接应力产生原因及防治焊接应力影响的措施,然后介绍了焊接变形种类及防治焊接变形工艺措施,对焊接接头的形式、焊接接头设计、静载强度的计算和焊接接头脆性断裂等内容进行了简要介绍。本书以焊接结构生产工艺为主,强调焊接结构生产工艺评定、零件备料加工工艺、焊接结构的生产过程如装配、焊接及焊接生产所用焊接工装夹具,并举例说明焊接夹具设计过程。本书以压力容器、起重机主梁为典型焊接结构,分析其焊接生产工艺、焊接生产管理等各项内容,并结合压力容器焊接生产介绍企业管理制度及安全生产与防护等内容。

本书对焊接结构生产应力、焊接接头设计、接头强度计算、焊接接头断口等进行了理论分析,重点突出,内容精炼,便于读者掌握和理解。同时对焊接结构生产中常用的生产工艺做了较大篇幅介绍,从备料、成形加工、装配、焊接等焊接生产工艺过程详细讲解,编入了焊接工艺评定、各种焊接工艺卡应用实例,特别是对焊接工装设计过程进行实例补充,以供焊接相关设计人员和企业技术人员指导设计、生产。本书可作为本科院校相关专业的教材。全书通俗易懂,实用性强。

本书编者均系高等院校、科研院所、工程技术专家,具有多年从事焊接工艺实践经验。本书的第1章、第3章由李新梅编写,第2章由杜宝帅编写,第4章、第7章、第8章由杨凤琦、潘光慧、罗辉编写,第5章由王萌萌、潘光慧、罗辉编写,第6章由李君君编写。全书由李以善统一定稿,由张忠文审稿。

参加编写的还有山东国家电力研究院张忠文,山东技术学院周峥,山东建筑大学霍玉双、孙俊华、史传伟、马海龙,北京工业大学袁涛等。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

编者
2017年10月

目录

Contents

第1章 焊接结构概述

1

1.1 ▶ 焊接结构特点及类型	2
1.1.1 焊接结构的特点	2
1.1.2 焊接结构的类型	3
1.1.3 典型建筑焊接结构	4
1.2 ▶ 焊接结构常用金属材料	11
1.2.1 焊接结构对钢材的要求	11
1.2.2 焊接结构选材的基本原则	13
思考题	16

第2章 焊接应力与变形

17

2.1 ▶ 焊接内应力与变形	17
2.1.1 应力、应变基本概念	17
2.1.2 自由杆件模型及自由变形率、外观变形率和内部变形率	17
2.1.3 三杆件模型	18
2.2 ▶ 焊接热应力与变形产生原因	19
2.2.1 焊接热应力	19
2.2.2 研究焊接应力与变形的基本假定	20
2.3 ▶ 焊接应力与变形的形成过程	20
2.3.1 长板条中心加热	20
2.3.2 长板条单侧加热	22
2.4 ▶ 焊接结构中形成的应力与变形	23
2.4.1 焊接应力与变形的影响因素及受约束杆件应力应变演化过程	23
2.4.2 焊接应力与变形的演化过程	23
2.4.3 焊接热应变循环	25
2.4.4 热循环过程中材料性能的变化	27
2.5 ▶ 焊接残余应力	27
2.5.1 纵向残余应力的分布	28
2.5.2 横向残余应力的分布	29

2.5.3	厚板中的残余应力	31
2.5.4	拘束状态下焊接的内应力	32
2.5.5	封闭焊缝引起的内应力	33
2.5.6	相变应力	33
2.6	▶ 焊接残余应力对构件的影响	36
2.6.1	残余应力对构件承载力的影响	36
2.6.2	残余应力对结构脆性断裂的影响	36
2.6.3	残余应力对结构疲劳强度的影响	37
2.6.4	残余应力对构件刚度的影响	37
2.6.5	残余应力对受压杆件稳定性的影响	38
2.6.6	残余应力对应力腐蚀的影响	38
2.6.7	残余应力对构件精度和尺寸稳定性的影响	38
2.7	▶ 焊接变形	39
2.7.1	焊接变形的分类	39
2.7.2	纵向收缩变形及其引起的挠曲变形	41
2.7.3	横向收缩变形及其引起的挠曲变形	43
2.7.4	角变形	48
2.7.5	薄壁焊接构件的翘曲(波浪变形)	50
2.7.6	焊接错边和扭曲变形	52
2.7.7	焊接变形的影响因素	53
2.7.8	焊接变形量的控制	54
2.8	▶ 焊接应力的调控和消除	55
2.8.1	焊接过程中应力的调控	55
2.8.2	焊接残余应力的消除	58
2.9	▶ 焊接变形的控制和消除	60
2.9.1	设计和制造阶段采取的措施	60
2.9.2	焊后矫形的措施	65
思考题		66

第3章 焊接接头断裂

68

3.1	▶ 焊接接头的基本形式	68
3.1.1	焊接接头类型	68
3.1.2	焊缝的类型	72
3.2	▶ 焊接接头脆性断裂	74
3.2.1	脆性断裂事故分析	74
3.2.2	脆性断裂断口形貌特征	75
3.2.3	影响脆性断裂的原因	77
3.2.4	焊接结构抗脆断性能的评定	81
3.2.5	防止脆性断裂的措施	84
3.3	▶ 焊接接头的疲劳断裂	86

3.3.1 疲劳断裂事故案例	87
3.3.2 疲劳强度和疲劳极限	87
3.3.3 疲劳断裂过程及断口形貌特征	88
3.3.4 影响焊接接头疲劳强度的因素	92
3.3.5 提高焊接接头疲劳强度的措施	97
思考题	99

第4章 焊接接头设计与焊接工艺评定

100

4.1 ▶ 焊接接头设计	100
4.1.1 焊接接头的设计原则	100
4.1.2 焊接接头设计的内容与准则	101
4.1.3 焊接坡口的设计与选择	101
4.1.4 接头形式和坡口类型	102
4.2 ▶ 焊接接头静载强度计算	103
4.2.1 常用焊接接头的工作应力分布	103
4.2.2 焊接接头静载强度计算的假定	106
4.2.3 对接、搭接和T形接头焊缝强度计算	106
4.3 ▶ 焊接工艺评定	110
4.3.1 焊接工艺评定目的和意义	111
4.3.2 焊接工艺评定方法	111
4.4 ▶ 焊接结构工艺审查	117
4.4.1 焊接结构工艺性审查目的	117
4.4.2 焊接工艺性审查的内容	118
4.4.3 焊接结构生产工艺规程的内容	123
4.4.4 焊接工艺规程的编制程序	124
4.4.5 焊缝标注	126
思考题	135

第5章 焊接结构生产工艺

137

5.1 ▶ 焊接结构生产组织	137
5.1.1 生产过程的空间组织	137
5.1.2 生产过程的时间组织	139
5.2 ▶ 焊接结构生产工艺过程	140
5.2.1 钢材的变形矫正	141
5.2.2 钢材的预处理	144
5.2.3 焊接结构零件备料工艺	146
5.2.4 零件的成形加工工艺	155
5.2.5 零件的拉深成形	162
5.2.6 其他零件成形方法	164

5.2.7 焊接结构的装配	165
思考题	170

第6章 焊接夹具设计与焊接机械装备 173

6.1 ▶ 焊接与装配夹具设计	173
6.1.1 夹具概述	173
6.1.2 装配夹具的分类和组成	174
6.1.3 装配夹具的设计要求	174
6.1.4 定位元件设计	178
6.1.5 夹紧机构设计	185
6.1.6 夹具体设计	204
6.2 ▶ 焊接夹具设计实例	205
6.2.1 摇臂焊接夹具结构分析	205
6.2.2 绘制夹具草图	209
6.2.3 绘制装配图	209
6.2.4 绘制零件图	209
6.3 ▶ 装配-焊接机械装备	210
6.4 ▶ 焊接变位机械	212
6.4.1 焊件变位机械	212
6.4.2 焊机变位机械	213
6.4.3 焊工变位机械	215
6.4.4 焊接机器人	215
思考题	216

第7章 焊接结构生产实例 218

7.1 ▶ 压力容器焊接生产	218
7.1.1 压力容器概述	218
7.1.2 压力容器的分类	218
7.1.3 容器的主要参数	220
7.1.4 容器的基本结构形式	221
7.1.5 容器的组成	222
7.1.6 压力容器焊接接头的分类	226
7.1.7 分汽缸压力容器焊接生产	228
7.2 ▶ 桥式起重机主梁焊接生产	231
7.2.1 桥式起重机的结构	231
7.2.2 桥式起重机桥架组成及主要部件的结构特点和技术要求	231
7.2.3 桥式起重机主梁的制造工艺	234
思考题	237

8.1 ▶ 现代企业管理概述	239
8.1.1 5S企业管理模式	239
8.1.2 精益管理模式	240
8.2 ▶ 焊接生产管理	240
8.2.1 焊接生产质量保证体系	240
8.2.2 焊接材料的管理	241
8.2.3 焊工档案管理制度	244
8.3 ▶ 焊接生产安全	244
8.3.1 国家安全生产条例	244
8.3.2 生产安全用电	245
8.4 ▶ 焊工劳动卫生防护与现场急救处理	248
8.4.1 焊工劳动卫生防护	248
8.4.2 焊工个人防护	252
思考题	253

焊接钢屋架，通常都是将零部件在工厂内制成，然后再运到工地安装，所用强度级别达到490MPa以上，厚度达100~150mm。还有许多工作条件极其恶劣的焊接结构，如大型火力发电锅炉，其工作压力达32.4MPa，蒸汽温度可达650℃；大型储罐直径达33m、容积为100000m³等。

目前，各工业先进国家已经制定出各种焊接结构的设计及制造规范、标准和工艺。近年来又发展了许多新的焊接工艺，如：摩擦焊、激光焊、等离子弧焊等。许多新型结构材料不断提出新的焊接要求，又促进了许多新焊接工艺方法的诞生。例如航天器的制造中，为了解决航天器结构的高强金属及合金的焊接，加速了惰性气体保护焊和等离子弧焊等工艺的发展。反过来新的工艺又使制造各种大型、尖端结构产品成为可能。可以说，现有的尖端设备不用焊接结构就不可能制造出来，像原子能电站的核容器、深海探测潜艇、航天器、各种化工石油合成塔、万吨级至数十万吨级的远洋油轮等都属于这一类。

1.1 焊接结构特点及类型

1.1.1 焊接结构的特点

与铆接、螺栓连接的结构相比较，或者与铸造、锻造方法制造的结构相比较，焊接结构具有下列优点。

① 焊接接头强度高。现代焊接技术能够使焊接接头的强度等于甚至高于母材的强度；而铆接或螺栓连接的结构，需预先在母材上钻孔，这样就削弱了接头的工作截面，从而导致接头的强度低于母材约20%。

② 焊接结构设计的灵活性大，主要表现在：

a. 焊接结构的几何形状不受限制。可以制造空心封闭结构，而采用铆、铸、锻等方法是无法制造的。

b. 焊接结构的壁厚不受限制。铆接结构板厚大于50mm时，铆接将会十分困难；但焊接结构在厚度上基本没有限制，有些现代高压容器的单层壁厚可以达到300mm。被焊接的两构件可厚可薄，而且厚与薄相差很大的两构件也能相互焊接。

c. 焊接结构的外形尺寸不受限制。对于大型金属结构可分段制成部件，现场组装焊接成整体，而锻造或铸造结构均受到自身工艺和设备条件限制，外形尺寸不能做得很大。

d. 可以充分利用轧制型材组焊成所需的结构。这些轧制型材可以是标准的或非标准（专用）的，这样的结构质量轻，焊缝少。目前许多大型起重机和桥梁等都采用型材制造。

e. 可实现异种材料的连接。在同一结构的不同部位可按需要配置不同性能的材料，然后把它们焊接成一个实用的整体，充分发挥材料各自的性能，做到物尽其用。

f. 可与其他工艺方法联合制造。如设计成铸-焊、锻-焊、栓-焊、冲压-焊接等联合的金属结构。

③ 焊接接头密封性好。制造铆接结构时必须捻缝以防止渗漏，但是在使用期间很难保证水密性和气密性的要求，而焊接结构焊缝处的水、油、气的密封性比其他连接方法无法比拟的，特别是在高温、高压容器结构上，只有焊接才是最理想的连接形式。

④ 焊前准备工作简单。特别是近年来数控精密气割技术的发展，对于各种厚度或形状复杂的待焊件，不必预先画线就能直接从板料上切割出来，一般不再进行机械加工就能投入

装配和焊接。

⑤ 易于结构的变更和改型。与铸、锻工艺相比，焊接结构的制造无需铸型和模具，因此成本低、周期短。特别是制作大型或重型、结构简单而且是单件或小批量生产的产品结构时，具有明显的优势。

⑥ 成品率高。一旦出现焊接缺陷，可容易实现修复，因此很少产生废品。

同时，焊接结构也存在以下缺点和不足之处：

① 存在焊接应力和变形。焊接是一个局部不均匀加热的过程，不均匀的温度场会导致热应力的产生，并由此造成残余塑性变形和残余应力，以及引起结构的变形。这对结构的性能造成一定的影响，如焊接应力可能导致裂纹，残余应力对结构强度和尺寸稳定性不利。为避免这类问题，常需要进行消除应力处理和变形校正，因而会增加工作量和生产成本。

② 对应力集中敏感。焊接接头具有整体性，其刚度大，焊缝的布置、数量和次序等都会影响到应力分布，并对应力集中较为敏感。而应力集中点是结构疲劳破坏和脆性断裂的起源，因此在焊接结构设计时要尽量避免或减少产生应力集中的一切因素，如处理好断面变化处的过渡、保证良好的施焊条件避免结构因焊接困难而产生焊接缺陷等。

③ 焊接接头的性能不均匀。焊缝金属是由母材和填充金属在焊接热作用下熔合而成的铸造组织，靠近焊缝金属的母材（近缝区）受焊接热影响而发生组织和性能的变化（焊接热影响区），因此焊接接头在化学成分、组织和性能上都是一个不同于母材的不均匀体，其不均匀性程度远远超过了铸、锻件，这种不均匀性对结构的力学行为，特别是对断裂行为有重要影响。因此，在选择母材和焊接材料以及制订焊接工艺时，应保证焊接接头的性能符合产品的技术要求。

④ 对材料敏感，易产生焊接缺陷。各种材料的焊接性存在较大的差异，有些材料焊接性极差，很难获得优质的焊接接头。由于焊接接头在短时间内要经历材料冶炼、冷却凝固和焊后热处理三个过程，因此焊缝金属中常常会产生气孔、裂纹和夹渣等焊接缺陷。例如，一些高强度钢和超高强度钢在焊接时容易产生裂纹，铝合金焊缝金属中容易产生气孔。这些都对结构的强度很不利，所以对材料的选择必须特别注意。

1.1.2 焊接结构的类型

焊接结构应用在各种建筑物和工程构筑物上，类型众多，其分类方法也不尽相同，各分类方法之间也有交叉和重复现象。即使同一焊接结构中也有局部的不同结构形式，因此很难准确和清晰地对其进行分类，通常可从用途（使用者）、结构形式（设计者）和制造方式（生产者）来进行分类，见表 1-1。

表 1-1 焊接结构的类型

分类方法	结构类型	焊接结构的代表产品	主要受力载荷
按用途分类	运载工具	汽车、火车、船舶、飞机、航天器等	静载、疲劳、冲击载荷
	储存容器	球罐、气罐等	静载
	压力容器	锅炉、钢包、反应釜、冶炼炉等	静载、热疲劳载荷
	起重设备	建筑塔吊、车间行车、港口起重设备等	静载、低周疲劳
	建筑设施	桥梁、钢结构的房屋、厂房、场馆等	静载、风雪载荷、低周疲劳
	焊接机器	减速机、机床机身、旋转体等	静载、交变载荷

续表

分类方法	结构类型	焊接结构的代表产品	主要受力载荷
按结构形式分类	桁架结构	桥梁、网架结构等	静载、低周疲劳
	板壳结构	容器、锅炉、管道等	静载、热疲劳载荷
	实体结构	焊接齿轮、机身、机器等	静载、交变载荷
按制造方式分类	铆焊结构	小型机器结构等	静载
	栓焊结构	桥梁、轻钢结构等	静载、风雪载荷低周疲劳
	铸焊结构	机床机身等	静载、交变载荷
	锻焊结构	机器、大型厚壁压力容器等	静载、交变载荷
	全焊结构	船舶、压力容器、起重设备等	静载、低周疲劳

1.1.3 典型建筑焊接结构

多年来，焊接以其独特的优点已经取代铆接，成为建筑结构的主要连接方法。焊接钢结构被广泛应用于各类工业与民用房屋和构筑物中，见表 1-2。这些结构主要作为建筑物的基本骨架，用以承重和承受其他外加载荷的作用。其主要要求除了应保证结构几何尺寸及安装和连接之外，尤其应有足够的强度和稳定性，同时应具有一定的抗震、防腐和防火等特殊的使用性能。

表 1-2 焊接建筑结构的應用範圍

建筑结构分类	焊接结构或构件
工业建筑	①重工业厂房 包括冶金工业的冶炼、轧钢厂房、重型机械制造业的铸钢、水压机、锻压、大型装配厂房；造船业的船体制造及装配车间；飞机制造业的装配车间、飞机库等。这些建筑的全部或部分承重结构可以是全钢厂房（钢柱、钢桥式起重机梁、钢屋架及其支撑体系），也可以部分采用钢结构，如采用钢桥式起重机梁、钢屋架及其支撑体系等 ②平台结构 在上述厂房、车间中的加料平台结构，化工工业系统中的工作平台结构等 ③仓储建筑 如大型工农业产品散装及原料仓库的全部或部分承重结构 ④小型货棚 其承重结构可以采用轻型钢架、轻钢桁架等 ⑤货架 可以采用冷弯薄壁型钢结构
民用建筑	①大跨公共建筑 如大、中型体育馆、展览馆、游乐中心、商场、火车站、航空港、剧院等建筑的全部或主要承重结构，如采用空间桁架、钢架、平板网架、拱及网壳结构等 ②多层及高层建筑 高层旅馆、办公楼、公寓、商业贸易中心等建筑，可以采用全钢的多层或高层钢框架结构，也可以部分采用承重钢结构，如这些建筑中的中庭部分的屋盖结构多数采用钢网架等 ③中小型房屋的屋盖结构 跨度在 15~24m 的食堂、俱乐部、文化宫等建筑的屋盖可采用钢桁架、平板网架等 ④小型可移动房屋 如近年来的移动展馆房屋的骨架多采用轻钢结构

1.1.3.1 焊接钢桁架

在建筑结构中，按结构传递载荷的路径不同，可分为平面结构体系和空间结构体系。在平面结构体系中，桁架作为主要屋盖承重构件一般沿建筑物的短向布置，在建筑物结构的另一方向布置檩条和支撑等构件。建筑结构的屋盖载荷通过桁架传递至两端的支撑柱和基础。檩条、支撑的作用有两方面：一是将屋面载荷传递给桁架；二是对桁架提供侧向支撑，以保证桁架在其平面外的稳定和结构的整体刚度。

桁架结构又称为杆系结构，是指由长度远大于其宽度和厚度的杆件在节点处通过焊接工艺相互连接组成的能够承受横向弯曲的结构，其杆件按照一定的规律组成几何不变结构。焊

桁架结构广泛应用于建筑、桥梁、起重机、高压输电线路和广播电视发射塔架等,如图 1-2 所示。

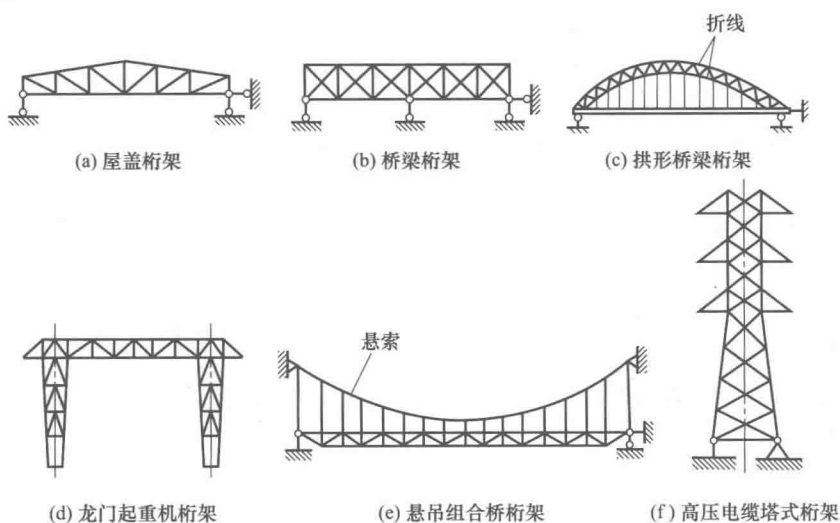


图 1-2 基于用途的桁架种类

根据承受载荷大小不同,又可分为普通桁架 [图 1-2 (c)、(f)]、轻钢桁架 [图 1-2 (a)]和重型桁架 [图 1-2 (b)、(d)、(e)]。根据桁架的外形轮廓,桁架可分为三角形、平行弦、梯形、人字形和下撑式桁架等 (图 1-3)。

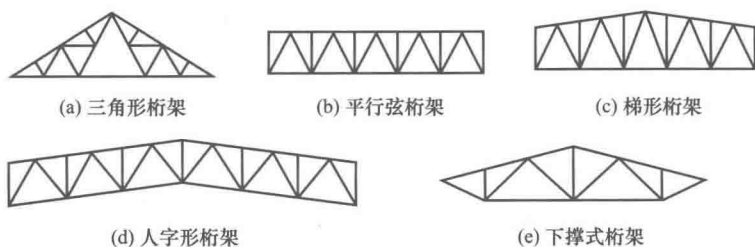


图 1-3 基于形状的桁架种类

桁架结构由上弦杆、下弦杆和腹杆三部分组成,图 1-4 给出了几种常用的腹杆布置方法。对两端简支的屋盖桁架而言,当下弦无悬吊载荷时,以人字形体系和再分式体系较为优越 [图 1-4 (b)、(g)]; 当下弦有悬吊载荷时,应采用带竖杆的人字形体系 [图 1-4 (c)]; 桥梁结构中多用三角形和带竖杆的米字型体系 [图 1-4 (e)、(f)]; 起重机械和塔架结构多采用斜杆或交叉斜杆体系 [图 1-4 (a)、(d)]。

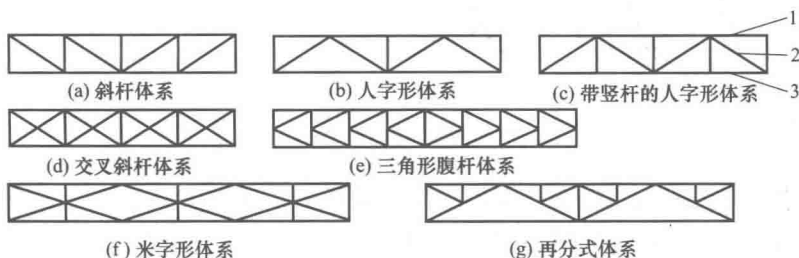


图 1-4 桁架的腹杆体系

1—上弦杆; 2—腹杆; 3—下弦杆

桁架结构中常用的型材有工字钢、T形钢、管材、角钢、槽钢、冷弯薄型材、热轧中薄板以及冷轧板等。图 1-5 给出了常用上弦杆的截面形式。上弦杆承受以压力为主的压弯力，尤其上部承受较大的压应力，因此构件应具有一定的受压稳定性，结构部件必须连续，必要时加肋板，见图 1-5 (d)、(e)。图 1-6 给出了常用的下弦杆的截面形式，下弦杆承受以拉应力为主的拉弯力，结构相对简单。可以看出，桁架结构中上下弦杆截面形式基本相同，只是考虑到受力情况不同，主受力板位置有所变化。一般情况下，缀板加于受拉侧，肋板加于受压侧。腹杆截面形式与上下弦杆截面形式也基本相同，腹杆主要承受轴心拉力或轴心压力，所以腹杆截面形式尽可能对称，其中双臂截面类型常用于重型桁架中，用来承受较大的内力。

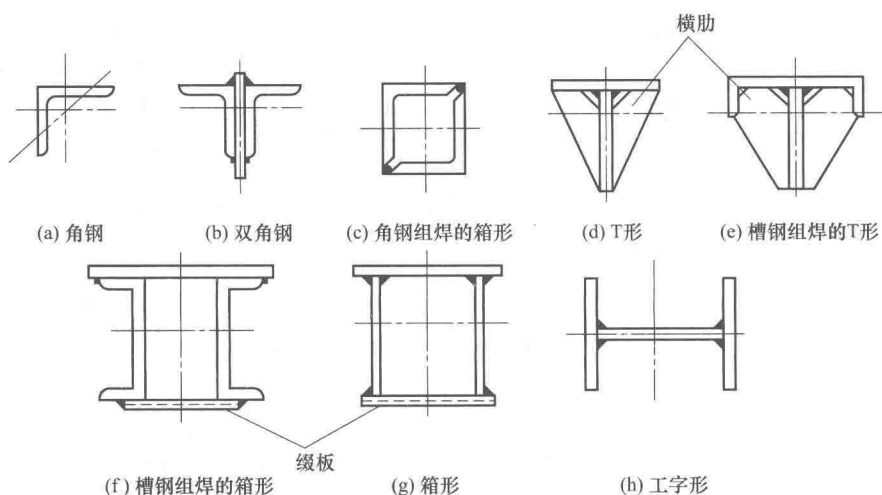


图 1-5 常用上弦杆的截面形式

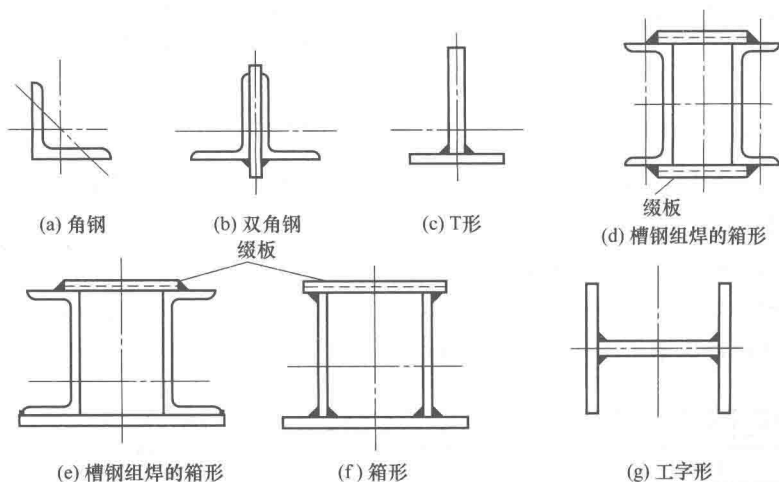


图 1-6 常用下弦杆的截面形式

焊接节点是指用焊接方法将各个不同方向的型材组合成整体并承受应力的结构。图 1-7 (a) ~ (c) 给出了三种将型材直接焊接在一起的节点，这些焊接节点虽然具有强度高、节省材料、重量轻和结构紧凑等优点，但焊接节点处焊缝密集，焊后残余应力高，应力复杂，容易产生严重的应力集中。如果结构承受的是动载荷，则焊接节点应尽量采用对接接头，否

则会降低钢结构的使用寿命。管材焊接节点相贯较多,制造比较困难,可采用插入链接板,见图 1-7 (d);或部分插入链接板,见图 1-7 (e);目前多用球形节点,即将各个方向的管材焊在一个空心球上,结构强度高,受力合理,见图 1-7 (f)。

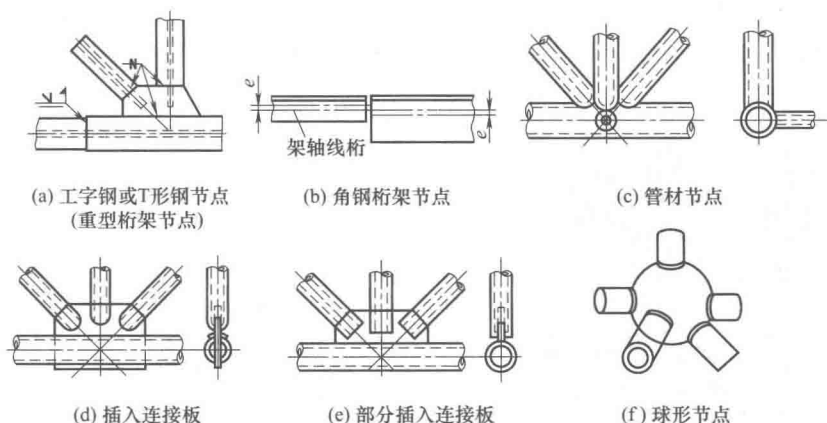


图 1-7 桁架结构的焊接节点形式

1.1.3.2 大跨空间钢结构

大跨空间钢结构一般指跨度大于或等于 60m 的建筑物结构。大跨建筑物结构有平面结构体系和空间结构体系两大类,前者有梁式、框架式和拱式等体系;后者则有网架、网壳、悬索、索膜和张弦结构等结构体系。空间结构体系在载荷作用下呈三维受力特征,与平面结构体系相比,具有结构受力合理、整体刚度大、用钢量较省且易于塑造新颖美观的建筑外形等特点,故在大跨建筑中得到十分广泛的应用。

例如,为迎接 2008 年北京奥运会的召开,建成的国家体育场和国家游泳中心就是采用空间格构式钢架结构。国家体育场屋盖为鞍形曲面,平面呈椭圆形,长轴 332.3m,短轴 296.4m,中间开口尺寸长向 185.3m,短向 127.5m,大跨屋盖支承在 24 根桁架柱上,柱距 37.958m,屋盖主桁架围绕屋盖中间的开口放射形布置,有 22 根主桁架直通或接近直通,并形成由分段直线构成的内环桁架,少量主桁架在内环附近截断,以避免使节点构造过于复杂。主桁架和桁架柱相交处形成刚性节点,组成的桁架和柱的构件大量采用钢板焊接而成的箱形构件。交叉布置的主结构与屋面、立面的次结构一起形成了“鸟巢”的奇特建筑造型(图 1-8)。

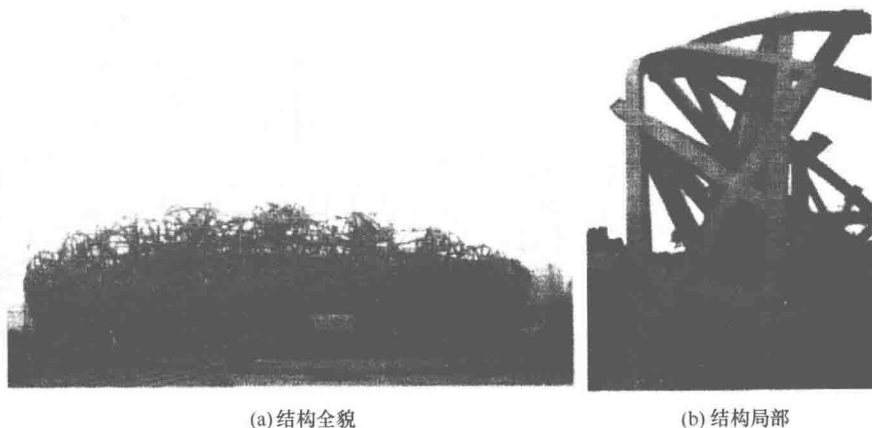


图 1-8 正在施工中的国家体育场——鸟巢

国家游泳中心水立方的建筑造型，其长、宽、高分别为 177m、177m、30m，屋盖厚 7.202m，墙体厚 5.876m。“水立方”结构形成系基于气泡理论，将由多面体细胞填充的巨大空间（大于建筑物轮廓尺寸）进行旋转、切割，得到建筑物的外轮廓和内部使用空间，切割产生的内、外表面杆件和内外表面之间保留的多面体棱线便形成了结构的弦杆和腹杆。这种新型的空间钢架构成简单，重复性高，结构内部多面体单元只有 4 种杆长。3 种不同的节点，每个节点汇交的杆件仅有 4 根（图 1-9）。

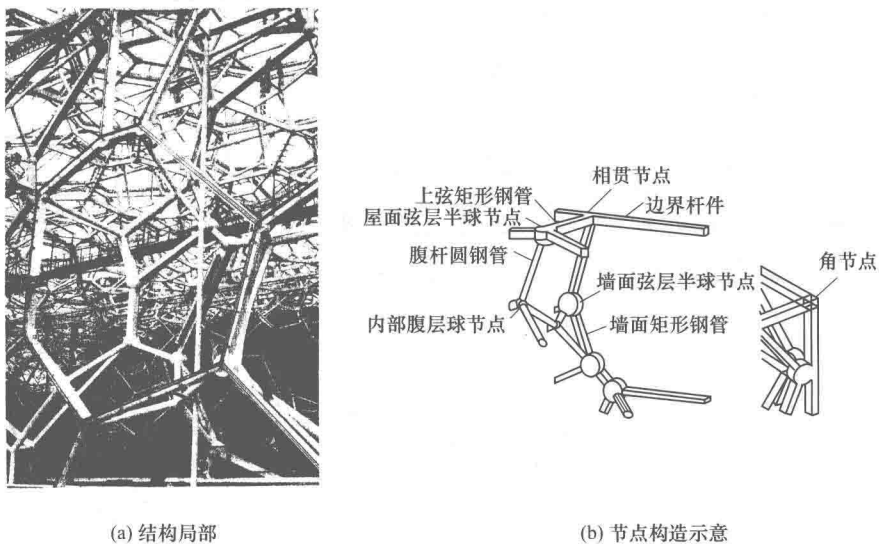


图 1-9 国家游泳中心——水立方

在空间钢结构中，应用较为普遍的是网格结构，这种结构是由多根杆件按照一定规律布置并通过节点连接而组成的，是一种高次超静定的空间杆系结构，见图 1-10。其空间刚度大、整体性强、稳定性强、安全度高，具有良好的抗震性能和较好的建筑造型效果，同时兼有重量轻、省材料、制作安装方便等优点，因此是适用于大、中跨度屋盖体系的一种良好的结构形式，近年来网架结构在国内外得到普遍推广应用。网架结构按外形可分为平板网架 [简称网架，外形呈平板形，见图 1-10 (a)] 和曲面网架 [简称网壳，外形呈曲面形状，见图 1-10 (b)、(c)]，平板网架在设计、计算、构造和施工制作等方面都比曲面网架简便，应用范围较广。网架可布置成双层或三层，双层网架是最常用的一种网架形式。

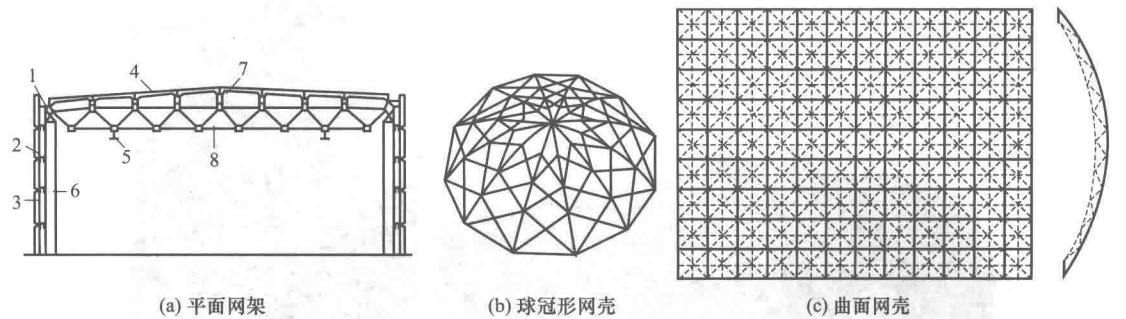


图 1-10 网架结构

1—内天沟；2—墙架；3—轻质条形墙板；4—网架板；5—悬挂吊车；6—混凝土柱；7—坡度小立柱；8—网架