



高等学校专业综合改革试点项目成果：  
土木工程专业系列规划教材  
河南省“十二五”普通高等教育规划教材  
经河南省普通高等学校教材建设指导委员会审定

总主编 赵顺波

# 钢结构设计原理

© 赵顺波 主编

Design Principle of  
Steel Structure

高等学校专业综合改革试点项目成果：

土木工程专业系列规划教材

河南省“十二五”普通高等教育规划教材

经河南省普通高等学校教材建设指导委员会审定

总主编：赵顺波

# 钢结构设计原理

曲福来 王 慧 李长永

赵顺波 主编

赵顺波 编著



机械工业出版社

为适应当前钢结构的发展和高等学校土木工程专业本科生培养的需要,按照高等学校土木工程学科专业指导委员会编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》中针对“钢结构基本原理”课程的核心知识单元和知识点的要求,以新版《钢结构设计标准》为重要依据,补充了部分现代钢结构案例,融入了新颖的结构设计思想,最终形成了本书。

全书共分6章,主要内容包括绪论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件的设计、受弯构件的设计、拉弯和压弯构件的设计。为了便于教学使用,本书除在各章编入相应的例题外,还在各章后列出了反映相应重点概念和计算方法的思考题和习题。

本书可作为高等学校土木工程专业学生的课程教材,也可作为土建工程技术人员继续教育教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/赵顺波主编. —北京:机械工业出版社, 2019.7  
河南省“十二五”普通高等教育规划教材  
ISBN 978-7-111-62662-6

I. ①钢… II. ①赵… III. ①钢结构-结构设计-高等学校-教材  
IV. ①TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第083809号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林辉 责任编辑:林辉

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静

责任印制:郜敏

北京中兴印刷有限公司印刷

2019年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18印张·445千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62662-6

定价:45.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

高等学校“专业综合改革试点”项目成果：土木工程专业系列规划教材

## 编审委员会

主任委员：赵顺波

副主任委员：程远兵 李晓克

委员：（排名不分先后）：

李凤兰 霍洪媛 潘丽云

曲福来 曾桂香 陈爱玖

王 慧 李长永 梁 娜

王延彦 赵 山 陈贡联

李克亮 张晓燕 杨亚彬

陈 震 刘世明 刘焕强

王慧贤 管俊峰 李长明

丁新新

# 前 言

随着城市建设的发展和高层建筑的增多，我国钢结构建筑发展十分迅速。钢结构住宅作为一种绿色环保建筑，符合可持续发展要求，已被住建部列为重点推广项目。我国钢结构发展成绩喜人，钢结构建筑逐渐成为城市的重要建筑。钢结构建筑的结构形式不仅美观，而且力求以最小的单位面积承载最大的力，这里涉及结构、材料、安装等诸多因素。

为适应当前钢结构的发展和高等学校土木工程专业本科生培养的需要，按照高等学校土木工程学科专业指导委员会编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》中针对“钢结构基本原理”课程的核心知识单元和知识点的要求，以新版《钢结构设计标准》为重要依据，补充了部分现代钢结构案例，融入了新颖的结构设计思想，最终形成了本书。全书共分6章，主要内容有：绪论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件的设计、受弯构件的设计、拉弯和压弯构件的设计。为了便于教学使用，本书除在各章中编入相应的例题外，还在各章后列出了反映相应重点概念和计算方法的思考题和习题。

本书为河南省高等学校“专业综合改革试点”项目：土木工程（河南省教育厅，教高〔2012〕859号）的教研成果，并被列入河南省高等教育“十二五”规划教材计划（河南省教育厅，教高〔2015〕1027号）。

本书由河南省土木工程结构类课程教学团队的“钢结构设计原理”课程主讲教师曲福来教授、王慧副教授、李长永副教授、赵顺波教授共同编著，由团队负责人赵顺波教授审核定稿，经河南省普通高等学校教材建设指导委员会审定，可作为土木工程专业学生“钢结构设计原理”课程的教材，也可作为土建工程技术人员的继续教育教材。

本书编写过程中参考了国内同行的著作、教材和论文资料，在此谨致谢忱。由于编者水平所限，本教材之中不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前 言

第1章 绪论 .....	1	本章导读 .....	113
本章导读 .....	1	4.1 概述 .....	113
1.1 钢结构的主要特点 .....	1	4.2 轴心受拉构件的受力性能和计算 .....	115
1.2 钢结构的应用及发展 .....	2	4.3 轴心受压构件的计算 .....	118
1.3 钢结构的主要破坏形式 .....	11	4.4 实腹式轴心受压构件的截面设计 .....	144
1.4 本课程的任务和特点 .....	12	4.5 格构式轴心受压构件的截面设计 .....	149
思考题 .....	14	思考题 .....	160
第2章 钢结构的材料 .....	15	习题 .....	161
本章导读 .....	15	第5章 受弯构件的设计 .....	163
2.1 钢结构对材料的要求 .....	15	本章导读 .....	163
2.2 钢材的主要性能 .....	16	5.1 概述 .....	163
2.3 影响钢材性能的主要因素 .....	20	5.2 梁的强度 .....	166
2.4 钢材的种类和规格 .....	26	5.3 梁的刚度 .....	172
2.5 钢结构用钢材的选择 .....	30	5.4 梁的整体稳定 .....	173
思考题 .....	31	5.5 梁的局部稳定 .....	186
习题 .....	32	5.6 型钢梁的设计 .....	200
第3章 钢结构的连接 .....	33	5.7 组合梁的设计 .....	206
本章导读 .....	33	5.8 考虑腹板屈曲后强度的组合梁承载力 计算 .....	212
3.1 钢结构的连接方法和特点 .....	33	思考题 .....	221
3.2 焊缝连接的设计规定、形式和焊缝的质量 等级 .....	35	习题 .....	221
3.3 对接焊缝的构造要求和计算 .....	43	第6章 拉弯和压弯构件的设计 .....	224
3.4 角焊缝的构造要求和计算 .....	50	本章导读 .....	224
3.5 焊接残余应力和焊接残余变形 .....	69	6.1 概述 .....	224
3.6 螺栓连接的排列和构造要求 .....	74	6.2 拉弯和压弯构件的强度 .....	225
3.7 普通螺栓连接的工作性能和计算 .....	79	6.3 拉弯和压弯构件的刚度 .....	227
3.8 高强度螺栓连接的工作性能和计算 .....	93	6.4 实腹式压弯构件的整体稳定 .....	228
3.9 混合连接 .....	104	6.5 实腹式压弯构件的局部稳定 .....	238
思考题 .....	107	6.6 实腹式压弯构件的设计 .....	241
习题 .....	108	6.7 格构式压弯构件的计算 .....	244
第4章 轴心受力构件的设计 .....	113	思考题 .....	250
		习题 .....	250

附录	253	附录 5 受弯构件的挠度容许值	260
附录 1 钢材和连接强度指标	253	附录 6 梁的整体稳定系数	261
附录 2 螺栓和锚栓规格	256	附录 7 型钢表	263
附录 3 轴心受压构件的稳定系数	257	参考文献	281
附录 4 各种截面回转半径的近似值	259		

# 第1章 绪论

## 本章导读

► 内容及要求 介绍钢结构的主要特点，钢结构的应用及发展，钢结构的主要破坏形式，以及本课程的任务和特点。通过本章学习，应对钢结构有基本的了解，包括其特点、破坏形式、应用范围、发展现状及发展趋势，以建立对钢结构的感性认识。

► 重点 钢结构的主要特点、主要破坏形式

► 难点 钢结构的主要破坏形式

## 1.1 钢结构的主要特点

钢结构是采用钢板、型钢<sup>○</sup>连接而成的结构。与其他材料的结构相比，钢结构具有如下优点：

(1) 建筑钢材强度高，材性好 与混凝土、砖石和木材等建筑材料相比，钢材强度高。钢材由钢厂生产，质量控制严格，材质均匀性好，且具有良好的塑性和韧性。钢材强度高的特性使它适合于建造大跨度、承载重的结构。钢材均匀的材质和良好的和塑性，使钢结构在一般条件下不会因超载而突然破坏，可以依靠钢材变形来调整结构内力并进行重分配，为结构补强加固提供了缓冲余地。钢材良好的韧性，使钢结构适宜在动力荷载作用下工作。

(2) 钢结构的重量轻 与混凝土、砖石和木材等建筑材料相比，钢材虽然密度较大，但其强度高，钢材的质量密度与强度的比值为  $(1.7 \sim 3.7) \times 10^{-4} / \text{m}$ ，而钢筋混凝土的质量密度与强度的比值约为  $18 \times 10^{-4} / \text{m}$ ，所以采用钢材建造的结构比较轻。以相同跨度的结构承受相同的荷载，钢屋架重量为钢筋混凝土屋架的  $1/4 \sim 1/3$ ，冷弯薄壁型钢屋架甚至接近于钢筋混凝土屋架的  $1/10$ 。钢结构建筑的自重约为同高度混凝土结构建筑的  $1/2 \sim 3/5$ ，且钢结构柱截面面积较混凝土结构柱的截面面积减少一半左右，有效增加了建筑的使用面积。钢结构重量轻，为其安装、运输提供了便利条件，同时也可减轻基础的负荷，进而降低地基、基础部分的工程造价。

(3) 钢结构制作工业化程度高，施工工期短 钢结构所用材料均为工厂制作。由钢板和各种型材加工而成的构件一般是在金属结构厂制作，具备成批生产加工的条件，制作准确度和精密度均较高，运往施工现场后通过连接整体组装，安装简便，施工机械化程度高，施工工期短，可以全天候施工作业，其施工速度可提高到混凝土结构的 1.5 倍左右，进而降低施工管理成本。采用螺栓连接的钢结构，易于拆装搬迁，适宜于结构加固、改建和拆迁。

(4) 钢结构密闭性好 钢结构的材料和焊接连接可以做到完全密封，适宜建造对气密

○ 型钢包括工字钢、H型钢、T型钢、槽钢、角钢、热轧无缝钢管等。

性和水密性有一定要求的高压容器、大型油库、气柜、油罐、输油或输水压力管道等。

(5) 钢结构抗震性能好 钢结构自重轻, 受到的地震作用较小。钢材具有较高的强度和较好的塑性、韧性性能, 抗震性能好, 震害发生时表现出很好的延性变形能力和抗倒塌能力。国内外历次地震中, 钢结构建筑物损坏相对较小。

(6) 钢结构造型美观, 具有轻盈灵巧的效果 钢结构可以较大程度地超越结构的束缚, 通过各种线形的构件组合出多种形式的空间和新奇优美的形象, 其强大的造型潜力是砌体结构所难以企及的。

(7) 钢结构符合可持续发展的需要 钢结构产业对资源和能源的利用相对合理, 对环境破坏相对较少, 是一项绿色环保型建筑产业。钢材是具有很高再循环利用价值的材料, 边角料都可以回收利用。对同样规模的建筑物, 钢结构建造过程中有害气体的排放量只相当于混凝土结构的 65%。钢结构建筑物由于很少使用砂、石、水泥等散料, 从根本上避免了扬尘、废弃物堆积和噪声等污染问题。

但是, 钢结构也存在着可能会影响其选择应用的一些缺点。

(1) 失稳和变形过大易造成破坏 钢结构质量轻的优点来自于其构件一般截面小而薄, 受压时易受结构稳定和刚度要求的限制, 使强度难以得到充分发挥。所以设计时需要附加劲肋或缀材以达到增强结构稳定性、减小结构使用阶段变形的目的, 从而相应增加了构件连接的工作量和繁杂程度。

(2) 钢结构耐腐蚀性差 钢材容易腐蚀, 对钢结构特别是薄壁构件必须注意防腐保护, 故其维护费用较高。因此, 处于较强腐蚀性介质内的建筑物不宜采用钢结构。在钢结构施工过程中应避免使结构受潮、淋雨, 在构造上应尽量避免存在难于检查、维修的死角。

(3) 钢材耐热但不耐火 钢材受热时, 当温度在 250℃ 以内时, 其主要力学性能 (如屈服强度和弹性模量) 降低不多。温度超过 250℃ 以后, 材质发生较大变化, 强度逐步降低。温度达 600℃ 时, 钢材已不能继续承载。因此, GB 50017—2017《钢结构设计标准》规定钢材表面温度超过 150℃ 后即需加以隔热防护, 对需防火的结构, 应按相关的规范采取防护和保护措施。

(4) 钢结构可能发生脆性断裂 钢结构在低温和某些条件下, 可能发生脆性断裂以及厚板的层状撕裂, 这些情况都应引起设计者的特别注意。

## 1.2 钢结构的应用及发展

钢结构是土木工程的主要结构形式之一, 随着我国国民经济的迅速发展, 其发展极为迅速, 在土木工程各个领域都得到了广泛的应用, 如高层和超高层建筑、多层房屋、工业厂房、体育场馆、会展中心、火车站候车大厅、飞机场航站楼、大型客机检修库、自动化高架仓库、城市桥梁和大跨度公路桥梁、粮仓以及海上采油平台等都已采用钢结构。为了克服钢结构的缺点, 发挥其优势, 以适应社会建设不断发展的需要, 对钢结构的材料、结构形式、结构设计计算理论等方面的研究也在不断发展。

### 1.2.1 应用领域及结构形式的发展

#### 1. 高层及超高层钢结构

国外在 20 世纪 70 年代建造了多幢高层和超高层钢结构建筑。例如, 美国芝加哥西尔斯

大厦, 110层, 高度443m; 毁于“9.11事件”的美国纽约世贸中心, 双塔都为110层, 高度417m。我国从20世纪80年代开始, 在上海、北京、深圳等城市相继建成了十几幢高层建筑, 在90年代以后又建成了以上海三大地标(见图1-1)——上海金茂大厦(88层, 高420.5m)、上海环球金融中心(地上101层, 高492m)、上海中心大厦(地上118层, 高632m)及北京央视大楼(地上51层, 高234m, 见图1-2)等为代表的一批超高层钢结构建筑, 其建筑高度、结构形式、施工速度和施工管理水平均已进入世界先进行列。

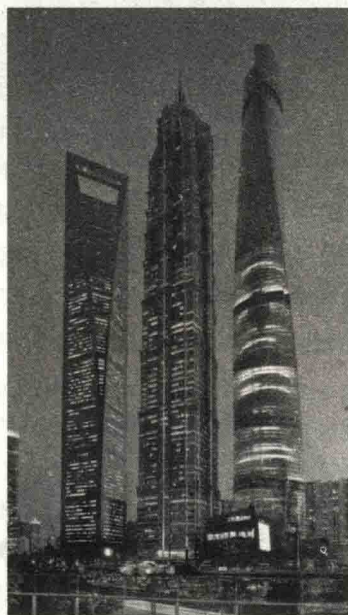


图 1-1 上海三大地标



图 1-2 北京央视大楼

高层和超高层建筑的建造, 促进了钢结构与混凝土结构的混合结构、钢板与混凝土和型钢与混凝土组成的钢-混凝土组合结构等新型结构形式和建造技术的发展。例如, 上海中心大厦的主楼地上118层、地下5层, 为框筒结构体系, 核心筒为现浇钢筋混凝土, 外框为钢结构与混凝土结构组合而成的巨型框架, 是钢结构与混凝土结构混合建造超高层建筑的典范。

在钢管内浇筑混凝土形成的钢管混凝土结构, 由于管内混凝土在纵向压力作用下处于三向受压状态并起到抑制钢管局部失稳的作用, 因而使构件的承载力和变形能力大大提高; 由于钢管充当了混凝土的模板, 施工速度大大加快。例如, 深圳赛格广场大厦, 地上72层, 高291.6m, 为全钢管混凝土结构。

以型钢或型钢和钢筋焊成的骨架作筋材的钢骨混凝土结构, 由于其筋材刚度大, 施工时可用其支撑模板和混凝土自重, 从而简化支模工作, 成为20世纪90年代以来高层和超高层建筑结构的主要结构形式之一。例如, 马来西亚吉隆坡城市中心的双塔大厦, 88层, 高450m, 为钢骨混凝土结构。

此外压型钢板-混凝土板组合楼板、压型钢板轻型墙体、型钢与混凝土组合梁楼盖体系、外包钢混凝土柱也得到了比较广泛的应用。这些新型组合结构具有充分利用材料强度、较好的适应变形能力(延性)、施工较简单等特点, 从而拓宽了钢结构和钢筋混凝土结构的应用

范围。

## 2. 轻型钢结构住宅

轻型钢结构住宅是以轻型钢构件作为承重骨架，以轻型墙体材料作为维护结构所构成的居住类建筑。与传统的住宅结构相比，轻型钢结构住宅除具有一般钢结构的优点外，还具有建筑空间布置灵活、可有效增大建筑使用面积、降低建造成本等方面的优越性。在美国、日本、澳大利亚等发达国家，轻型钢结构住宅占住宅总建造面积的比例已达 25% 以上。我国的轻型钢结构住宅研究起步于 20 世纪 90 年代末，目前还处于研究和试点工程阶段，但发展态势非常好。试点工程的钢结构体系采用了框架结构体系、框支结构体系、框架-剪力墙结构体系、错列桁架体系、钢-混凝土组合结构体系等（见图 1-3 和图 1-4）。特别是近年来出现的超轻型钢结构高级住宅，是目前世界上新型的环保节能型住宅。它以镀锌轻钢龙骨为结构构件建造住宅，型钢厚度在 1.6mm 以下，明显区别于 H 型钢等厚壁型材。轻型钢结构住宅的发展促进了经济钢型材包括冷弯型钢、热轧或焊接 H 型钢、T 型钢、焊接或无缝钢管及其组合构件的研发和生产，也促进了轻质墙体材料包括压型钢板及其组合板材、PC 板、蒸压轻质加气混凝土板（ALC 板）及稻草板等材料的开发和生产。住宅建筑量大面广，是 21 世纪我国发展轻型钢结构的主要领域。



图 1-3 钢结构小高层住宅



图 1-4 轻型钢结构别墅

## 3. 大跨度空间钢结构

大跨度空间钢结构主要是指网架、网壳结构及其组合结构（两种或两种以上不同建筑材料组成）和杂交结构（两种或两种以上不同结构形式构成），在机场航站楼、火车站候车大厅、体育馆、大型展览馆、机场机库、工业厂房、大跨度屋盖或楼层结构、散料仓库、公路收费站篷等方面得到了广泛应用。

北京首都机场 T3 航站楼钢结构工程体量大，钢结构安装多达 4 万余吨，其屋顶钢网架为双曲面造型，面积约 16 万  $\text{m}^2$ ，对焊接变形、温度变形和安装累计误差等安装精度要求极高（见图 1-5）。郑州新郑国际机场 T2 航站楼主楼屋盖为双曲面钢网架结构，屋盖长 319m，宽 216m，总投影面积约 7.9 万  $\text{m}^2$ ，网架形式为正交斜放四角锥体系（见图 1-6）。随着交通运输事业的高速发展，各地都投入建设一批规模庞大的机场航站楼和高铁车站。其中，南京火车站、上海浦东机场航站楼、广州白云机场航站楼、深圳机场航站楼等均采用空间钢结构建造。高速公路收费站篷有约一半的比例采用各种形式的空间钢结构。

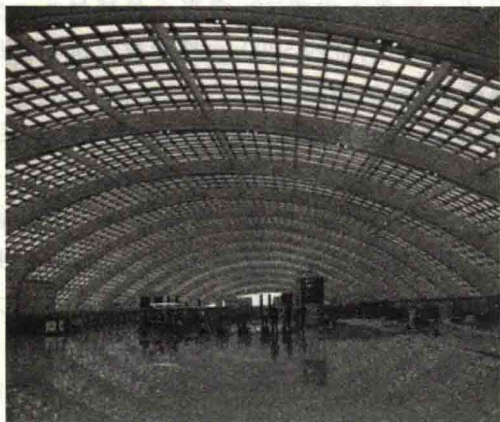


图 1-5 北京首都机场 T3 航站楼



图 1-6 郑州新郑国际机场 T2 航站楼

首都体育馆的屋盖为正交斜放的平面桁架系网架，平面尺寸  $99\text{m} \times 112.2\text{m}$ ，网架高  $6\text{m}$ ，网格  $4.7\text{m}$ ，采用  $16\text{Mn}$  角钢以高强度螺栓连接（见图 1-7）。上海体育中心的万人体育馆和游泳馆，都采用了由圆钢管与焊接空心球节点组成的三向网架，体育馆平面为直径  $110\text{m}$  的圆形，周边挑檐  $7.5\text{m}$ ，总尺寸为  $125\text{m}$ ；游泳馆的平面为不对称的六边形，外包尺寸为  $90\text{m} \times 90\text{m}$ 。天津体育馆为直径  $108\text{m}$ ，挑檐  $13.5\text{m}$ ，总直径达  $135\text{m}$  的球面网壳，矢高为  $35\text{m}$ ，双层网壳厚  $3\text{m}$ 。各大中城市积极兴建大型体育馆，以及北京 2008 年奥运会比赛场馆的建设，在结构设计、材料、施工技术和科研等领域内，推动了空间钢结构技术的发展。



图 1-7 首都体育馆



图 1-8 河南省艺术中心

我国大量形态各异的艺术中心、会展中心等建筑都选用了空间结构形式，如上海国际会议中心、广州会展中心展览大厅、上海新国际博览中心和南京国际展览中心等。其他城市如郑州、西安、成都、兰州、乌鲁木齐、重庆等的大型艺术和会展中心建筑也在近年内落成（见图 1-8），钢结构在这个领域的市场潜力很大。

对于飞机库来说，建筑物的一边需要敞开以便设置机库大门，同时在屋盖下还要求悬挂吊车，因此采用三边支承、一边自由的网架是一种合理的结构形式。例如：北京首都机场的四机位机库，跨度为  $153\text{m}$  双跨，进深  $90\text{m}$ ，可同时容纳四架波音 747 客机进行维修。网架

为三层斜放四角锥式，采用圆钢管与焊接空心球节点，屋盖下设置 10t 多支点悬挂吊车，整个网架有杆件 18000 个、节点 6000 多个，屋盖钢结构耗用钢材约 5000t。长沙黄花机场机库屋盖，平面尺寸 48m×64m，网架高 5m，开口边为高 7.5m 的四层网架。

以钢筋混凝土上弦板代替钢上弦杆的组合网架结构是近十几年来开发的结构体系，它可充分发挥混凝土受压、钢材受拉的强度优势，使结构的承重和围护作用合二为一，即用于屋盖结构，也用于多层和高层建筑的楼层结构，其形式之多、跨度之大、应用范围之广在世界上是领先的。工程实例有：徐州夹河煤矿大食堂屋盖为平面 21m×54m 的蜂窝形三角锥组合网架，江西抚州体育馆屋盖为平面 45.5m×58m 的组合网架，新乡百货大楼夹层改造（增加四层）采用 35m×35m 的组合网架楼层结构，长沙纺织大厦（地下 2 层，地上 11 层）采用柱网 10m×12m 和 7m×12m 的组合网架楼层及平面 24m×27m 的组合网架屋盖结构。

在单层钢网壳结构上敷设预制带肋混凝土面板再连接灌缝形成整体后组合而成的新型空间结构—组合网壳，大大改善了单层钢网壳的性能，克服了其设计由稳定性控制的缺点。工程实例有：山西汾西矿务局工程处食堂屋盖为 18m×24m 三向型双曲组合扁网壳，山西潞安矿务局常村矿井选煤厂倒圆锥台煤仓的顶盖为直径 34.1m 的肋环型组合球面网壳。

预应力大跨度网架和网壳结构是近年发展起来的一种新型空间结构，在传统网架和网壳结构中引入现代预应力技术，可起到提高整个结构的刚度、减小结构挠度、改善内力分布、降低应力峰值的作用，从而可降低材料耗量，具有明显的技术经济效益。工程实例有：上海国际购物中心的七、八层楼，采用在下弦平面下 20cm 处增设 4 束高强度钢丝铸锚束的预应力正放四角锥组合网架，平面尺寸 27m×27m，截去一个腰长为 12m 的等腰三角形，采用预应力后节省钢材用量 32%。四川攀枝花体育馆，采用八支点预应力短程线型球面网壳，平面尺寸 74.8m×74.8m 缺角八边形，对角柱跨度 64.9m，周边设八道预应力拉索，比非预应力钢网壳节省用钢量 25%。广东清远市体育馆，采用六支点预应力六块组合型三向扭曲壳，平面尺寸为 46.82m 的正六边形，对角柱跨度 89.0m，周边设六道预应力拉索。据不完全统计，最近十多年来，在体育馆、机场候机大厅或机库、大型剧院、会展中心等领域，我国已建造了 30 余座预应力空间钢结构，使现代预应力技术与钢结构的发展形成了有机结合与快速发展的新格局，目前我国在预应力钢结构技术领域从预应力拉索体系开发、预应力张拉设备研制、预应力张拉施工方式、结构体系与分析方法等方面取得了很多成熟的经验。

#### 4. 桥梁钢结构

交通建设是我国重点发展的基础设施领域，钢结构轻型高强的优点特别适合于大跨度桥梁结构。1968 年修建的公铁两用南京长江大桥，最大跨度 160m（见图 1-9、图 1-10）；1994 年建成的公铁两用九江长江大桥，主联跨长（180+216+180）m；1995 年建成的上海杨浦大桥，采用双塔双索面斜拉桥，主跨跨长为 602m；1999 年建成的江阴长江大桥，主跨采用悬索桥，跨度 1385m。2001 年建成的南京长江第二大桥南汊主桥，为双塔双索面扇形布置拉索的斜拉桥，主跨达 628m。这些成就表明我国现代化桥梁的建设水平已进入世界先进行列。

同时，钢管混凝土在大跨拱桥及斜拉桥和悬索桥塔柱建造中的应用得到迅速发展，工程

实例不胜枚举。代表性桥梁有重庆菜园坝大桥主跨 420m (见图 1-11), 郑州黄河二桥的主桥为 8 孔、每孔跨度 100m (见图 1-12), 四川旺苍东河桥主跨 115m, 四川涪陵长江大桥主跨 200m, 浙江象山铜瓦门大桥主跨 238m, 武汉汉江三桥主跨 280m, 浙江千岛湖南浦大桥主跨 330m, 广州丫髻沙大桥主跨 360m, 四川万县长江公路桥主跨 420m 等。



图 1-9 南京长江大桥全景

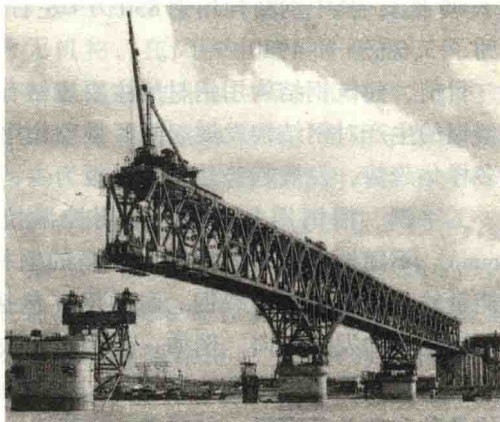


图 1-10 南京长江大桥施工场景

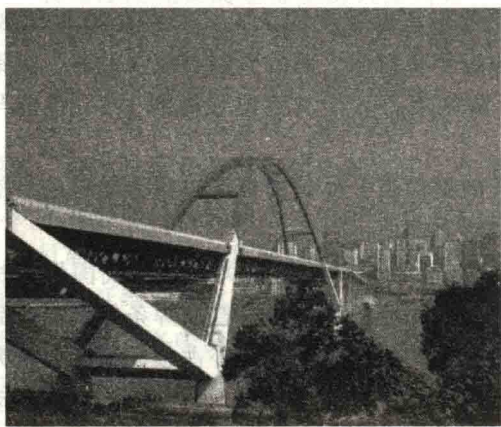


图 1-11 重庆菜园坝大桥



图 1-12 郑州黄河二桥

## 5. 压力管道及容器

水工压力钢管是水电站建设高压引水管道的的主要结构形式之一。伴随着“西气东输”和“西油东引”工程的建设,也大量采用了高压输气(油)管线及中转站、终点站的大容量储油(气)罐、库、塔等容器金属设备。城市污水处理厂的沼气罐也基本上采用钢结构。

## 6. 特种钢结构

徐州电视塔塔楼采用直径 21m 单层联方型全球网壳,并采用地面组装、整体提升到 99m 设计标高就位的施工安装方法。上海东方明珠电视塔,选取装饰用的单层联方型全球网壳。大连友谊广场中心采用直径 25m,镶嵌镜面的水晶球网壳。杭州市地标,采用总高度 40.8m、跨度 30m 的螺栓球节点网架结构。

### 1.2.2 材料和焊接与防护技术方面的发展

(1) 钢材 钢结构的广泛应用推动了我国钢铁产量的持续和快速发展。据统计,继1996年首次突破亿吨大关后,2016年达到了近8.1亿t的高水平;2002年全国建筑行业用钢1.05亿t,其中钢结构用钢830万t左右;到2015年全国建筑行业用钢和钢结构用钢分别达到了3.6亿t和4980多万t。

目前,建筑钢结构用钢材的主要规格有热轧钢板、热轧型钢和薄壁型钢等,特别是热轧H型钢的生产对钢结构发展起到了推动作用。随着钢结构建筑的大量兴建,建筑钢材的需求呈多样化趋势,发展趋势是以中厚板为主,型钢、钢管、彩色涂层卷板需求增加,大中型角钢、工字钢、槽钢用量减少。采用控温控轧技术生产的低焊接预热温度的厚钢板( $t \geq 50\text{mm}$ )、不随厚度变化固定屈服强度的钢材、超厚高强度板、高韧性和高耐寒性能钢、高线能量输入焊接和抗撕裂钢、耐候钢(包括抗盐腐蚀)等高性能钢材的研发和生产,是今后结构用钢的发展方向。例如,连接京九铁路的九江长江大桥,采用15MnVN高强度、高韧性钢,钢板焊接最大厚度达到56mm;芜湖长江大桥采用了14MnNb新钢种。我国热强化钢材的品种和数量还有限,需要进一步研发。

提高钢结构耐火能力的根本方法是提高钢材的耐火能力。因此,耐火钢的研发成为钢材新的发展方向。耐火钢性能的关键是具有良好的高温强度,同时具有良好的焊接性能,要求其能够在350~600℃温度下保持1~3h后的强度不低于室温强度的2/3。日本在20世纪80年代开始研发耐火钢,并在工程中广泛应用。我国近年来对耐火钢的研制有较快发展,宝钢等大型钢厂生产的耐火钢,在600℃时屈服强度下降幅度不大于其室温强度的1/3,性能与国外耐火钢的性能相当。

发展薄片、美观、廉价又能与混凝土牢固结合的钢模板,使钢模板可以作为结构的一部分参与受力,还可省去装修工序,也是钢结构的发展方向之一。

(2) 焊接技术 焊接技术的发展与钢结构产业水平的提高密切相关,当前我国焊接材料产量跃居世界首位,但品种明显落后于先进国家,大部分产品集中在普通焊条等低端产品的生产上,焊丝及特种焊条、焊接成套设备等高附加值产品的市场被国外占领。因此,研究先进高效的焊接方法和焊接新能源的应用,研发新型高效优质焊接材料,研制焊接过程自动化、智能化和组装焊接一体化的焊接设备及专用工艺设备,以及焊接结构的寿命评估与延寿技术是当前钢结构产业焊接技术的重要课题。

(3) 防腐涂料 在钢结构表面涂敷防腐涂料是提高钢结构抗腐蚀性能的重要技术措施。水性富锌、无机富锌和环氧富锌底漆均是长效的底漆。以高模数的硅酸钾为基数的水性无机富锌底漆和面漆是高性能防腐防污材料,具有发展潜力。其中,底漆必须解决底材“闲蚀”和耐水性差的难题,带锈防腐是目前研究的热点之一。面漆主要在保证保护性能的前提下,提高其装饰性和耐久性。此外,将纳米技术应用于防腐涂料的开发、电弧喷涂锌复合涂层体系、热喷涂金属阶梯涂层等也得到了发展。

大连振邦氟碳涂料股份有限公司自主研发的常温固化氟碳金属漆和罩面清漆,以环氧富锌底漆和环氧云铁中间漆为配套涂层组成钢结构长效氟碳金属漆配套涂料,在大连30万吨原油码头、大连世界博览广场、郑州黄河二桥得到了应用,北京奥运国家主体育场鸟巢钢结构工程也选用了这种涂料。

(4) 防火涂料 在钢结构表面涂敷防火涂料是提高钢结构耐火性能的重要技术措施。根据 GB 14907—2002《钢结构防火涂料通用技术条件》的规定,用于提高钢结构耐火能力的防火涂料按涂层厚度可分为厚涂型(涂层厚度不大于 $25\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 、耐火极限不低于2h)、薄涂型(涂层厚度不大于 $5.0\text{mm}\pm 0.5\text{mm}$ 、耐火极限不低于1h)和超薄涂型(涂层厚度不大于 $2.00\text{mm}\pm 0.20\text{mm}$ 、耐火极限不低于1h)等,其中厚涂型和薄涂型为传统的防火涂料,施工一般采用喷涂技术。厚涂型涂料一般为无机物,在火灾中涂层不膨胀,依靠材料的不燃性、低导热性或涂层中材料的吸热性,延缓钢材的升温,保护钢构件,由于这种防火涂料组分的颗粒较大,涂层外观不平整,影响建筑的整体美观,多用于耐火极限要求2h以上的室内外隐蔽钢结构及多层厂房钢结构。薄涂型涂料通常是用合适的水性乳胶漆聚合物作基料再配以阻燃剂和添加剂等组成,受火时能膨胀发泡,以膨胀发泡所形成的耐火隔热层延缓钢材的升温,保护钢构件,一般用于耐火极限要求不超过2h的钢结构,该涂料一般分为底层(隔热层)和面层(装饰层),其装饰性优于厚涂型防火材料。超薄型涂料是近几年研发的新品种,可采用喷涂、刷涂或辊涂施工,一般为溶剂型,具有优越的黏结强度,耐候耐水性好,在受火时缓慢膨胀发泡形成致密坚硬的防火隔热层,该防火层具有很强的耐火冲击性,延缓了钢材的温升,有效保护钢构件,一般用于耐火极限要求不超过2h的钢结构,施工简便,装饰性更好。研制开发高耐候性、耐火性能更高、装饰性能优良的超薄型防火涂料是今后钢结构防火涂料的发展方向。目前国内外已出现了耐火性能达到或超过2h的超薄型防火涂料,在各种轻钢结构、网架等工程中得到了应用,是市场上大力推广的品种。

此外,粉末防火涂料、弹性防火涂料、色彩防火涂料、多功能性防火涂料均为重要研究领域,纳米技术和填料表面处理技术、先进的聚合物生产技术、高自动化水平的涂料生产工艺和先进的涂料检测技术也是提高相关产业水平的研究课题。

目前,一项新的钢结构防火保护技术——绝热纤维喷涂材料护层得到了越来越多的应用。绝热纤维喷涂材料是一种不燃、柔软超细无机纤维与专用胶黏剂的混合物,将该材料采用配套喷涂设备喷涂到钢结构表面后形成一定厚度的整体封闭绝热层,不受钢结构复杂程度和基体表面异型程度的限制,一次性施工完成既可同时具有绝热、防火、隔声、防腐、密封、抗冷凝及装饰等功能。

### 1.2.3 设计计算理论方面的发展

钢结构的设计理论,经历了从把材料看作弹性体的容许应力古典理论(结构内力和构件截面计算均套用弹性理论,采用容许应力设计方法),发展为考虑材料塑性的极限强度理论,再发展成按极限状态设计的理论体系等三个阶段。目前在工程结构设计规范中已采用基于概率论和数理统计分析的极限状态可靠度理论。但很多数据的研究分析及理论阐述尚需进一步的完善和发展,体系的可靠度、疲劳计算的极限状态等问题还没有解决。对于板间屈曲后的强度、压弯构件的弯扭屈曲、空间结构的稳定、钢材的断裂理论、钢-混凝土组合结构的设计方法等,尚需进一步深入研究。

随着钢结构应用领域的扩大,我国及时开展了相应的科研与工程实践经验总结工作,部分现行的有关国家规范、标准以及建筑、水利水电、桥梁等行业规范见表1-1。

表 1-1 国家及行业钢结构类规范、标准 (部分)

序号	规范名称	规范编号
1	建筑结构荷载规范	GB 50009—2012
2	钢结构设计标准	GB 50017—2017
3	冷弯薄壁型钢结构技术规范	GB 50018—2002
4	钢结构工程施工质量验收规范	GB 50205—2001
5	钢结构焊接规范	GB 50661—2011
6	组合结构设计规范	JGJ 138—2016
7	高层民用建筑钢结构技术规程	JGJ 99—2015
8	空间网格结构技术规程	JGJ 7—2010
9	粮食钢板筒仓设计规范	GB 50322—2011
10	立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范	GB 50341—2014
11	立式圆筒形钢制焊接储罐施工规范	GB 50128—2014
12	低合金高强度结构钢	GB/T 1591—2018
13	建筑结构用钢板	GB/T 19879—2014
14	厚度方向性能钢板	GB/T 5313—2010
15	碳素结构钢	GB/T 700—2006
16	热轧型钢	GB/T 706—2016
17	钢结构用高强度大六角头螺栓	GB/T 1228—2006
18	钢结构用高强度大六角螺母	GB/T 1229—2006
19	钢结构用高强度垫圈	GB/T 1230—2006
20	钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件	GB/T 1231—2006
21	紧固件公差螺栓、螺钉、螺柱和螺母	GB/T 3103.1—2002
22	钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副	GB/T 3632—2008
23	六角头螺栓 C 级	GB/T 5780—2016
24	六角头螺栓	GB/T 5782—2016
25	紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱	GB/T 3098.1—2010
26	钢结构高强度螺栓连接技术规程	JGJ 82—2011
27	非合金钢及细晶粒钢焊条	GB/T 5117—2012
28	埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求	GB/T 5293—2018
29	公路钢结构桥梁设计规范	JTG D64—2015
30	公路斜拉桥设计细则	JTG/TD 65—01—2007
31	公路桥涵施工技术规范	JTG/TF 50—2011
32	水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范	GB/T 14173—2008
33	水利水电工程钢闸门设计规范	SL 74—2013
34	水电站压力钢管设计规范	NB/T 35056—2015