

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

# 钢结构基本原理

崔佳 主编

龙莉萍 副主编

GANGJIEGOU JIBEN YUANLI

中国建筑工业出版社

高校土木工程专业规划教材

# 钢结构基本原理

崔佳 主编  
龙莉萍 副主编

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

钢结构基本原理/崔佳主编. —北京:中国建筑业出版社,2008  
高校土木工程专业规划教材  
ISBN 978-7-112-10354-6  
I. 钢… II. 崔… III. 钢结构-高等学校-教材  
IV. TU391  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 142079 号

本书以高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》为依据,结合《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)等新规范,系统介绍了钢结构的基本原理、基本知识、计算方法、结构特点及钢构件的稳定理论。

本书共分7章,主要包括:绪论、钢结构的材料、钢结构的破坏形式及计算方法、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、钢结构的连接等。

本书可作为土木工程专业大学本科的教材,也可供从事建筑钢结构设计、施工等相关工程技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑:王 跃 吉万旺  
责任设计:赵明霞  
责任校对:孟 楠 王金珠

高校土木工程专业规划教材

### 钢结构基本原理

崔 佳 主编

龙莉萍 副主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

世界知识印刷厂印刷

\*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:13 $\frac{3}{4}$  字数:330千字

2008年12月第一版 2008年12月第一次印刷

定价:23.00元

ISBN 978-7-112-10354-6

(17157)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

按照高等学校土木工程专业指导委员会的意见，原土木工程专业钢结构课程已被拆分为《钢结构基本原理》和《建筑钢结构设计》两门课，为了适应培养方案的变化，在过去已有钢结构教材的基础上编写了本书。

《钢结构基本原理》是土木工程专业的主要专业基础课之一，是研究建筑钢结构基本工作性能的一门工程技术型课程。本课程是建筑工程专业方向的必修课，课程教学的目的是使学生系统地学习钢结构的基本原理、基本知识、计算方法、结构特点及钢构件的稳定理论。

本书主要依据高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》，同时结合作者多年从事钢结构教学工作的经验编写而成。

本书共分7章。第1章阐述了钢结构的特点、钢结构的应用及发展。第2章主要讲解钢结构对材料性能的要求，包括钢材的物理性能及加工性能；同时讨论了化学成分、冶金缺陷、温度以及应力集中等各种因素对钢材性能的影响；给出了钢结构用钢材的种类和常用钢材规格。第3章介绍了钢结构及其构件可能发生的强度破坏、丧失稳定、脆性断裂等破坏形式；着重讲解了用于钢结构设计的概率极限状态设计方法以及我国钢结构设计规范常用的设计表达式。第4、5、6章是对轴心受力构件、受弯构件、拉弯压弯构件等基本构件受力特点及计算方法的介绍，由于钢构件承载能力的极限状态通常由整体稳定和局部稳定控制，故在这3章里，均穿插介绍了一些基本的结构稳定理论，如构件的弯曲失稳、扭转屈曲、弯扭屈曲、弹性薄板的屈曲以及屈曲后强度等，以便学生能系统地掌握这方面的内容，加深对钢构件设计方法的理解。第7章介绍了焊缝、普通螺栓、高强度螺栓连接的工作性能及计算方法，将连接一章放在基本构件学习完成后，是为了帮助学生更容易理解和掌握。

本书既可作为土木工程专业大学本科的教材，也可供有关工程技术人员参考。

参加本书编写的有崔佳（第1章）、熊刚（第2章）、戴国欣（第3章）、周淑容（第4章）、陈永庆（第5章）、程睿（第6章）、聂诗东（第7章）、郭莹（附录）。全书由崔佳主编，龙莉萍副主编，负责本书大纲的制定、全书内容的统一、审校、修改和定稿。

对书中的一些疏漏和不当之处，还望读者批评指正。

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>1 绪论</b> .....             | 1  |
| 1.1 钢结构的特点 .....              | 1  |
| 1.2 钢结构的应用和发展 .....           | 2  |
| 1.2.1 钢结构的应用 .....            | 2  |
| 1.2.2 钢结构的发展 .....            | 5  |
| <b>2 钢结构的材料</b> .....         | 7  |
| 2.1 钢结构对材料的要求 .....           | 7  |
| 2.2 钢材的主要性能 .....             | 7  |
| 2.2.1 钢材在单向均匀受拉时的工作性能 .....   | 7  |
| 2.2.2 钢材在复杂应力作用下的工作性能 .....   | 9  |
| 2.2.3 钢材在单轴反复应力作用下的工作性能 ..... | 10 |
| 2.2.4 钢材的冷弯性能 .....           | 10 |
| 2.2.5 钢材的冲击韧性 .....           | 11 |
| 2.3 各种因素对钢材主要性能的影响 .....      | 12 |
| 2.3.1 化学成分 .....              | 12 |
| 2.3.2 冶金缺陷 .....              | 12 |
| 2.3.3 钢材硬化 .....              | 13 |
| 2.3.4 温度影响 .....              | 13 |
| 2.3.5 应力集中 .....              | 14 |
| 2.4 钢结构用钢材的种类和钢材规格 .....      | 14 |
| 2.4.1 钢材的种类 .....             | 14 |
| 2.4.2 钢材的选择 .....             | 16 |
| 2.4.3 钢材的规格 .....             | 17 |
| <b>3 钢结构的破坏形式及计算方法</b> .....  | 19 |
| 3.1 钢结构的可能破坏形式 .....          | 19 |
| 3.1.1 强度破坏及塑性重分布 .....        | 19 |
| 3.1.2 整体失稳破坏 .....            | 19 |
| 3.1.3 板件局部失稳破坏 .....          | 19 |
| 3.1.4 疲劳破坏及损伤累积 .....         | 20 |
| 3.1.5 脆性断裂破坏 .....            | 20 |
| 3.1.6 刚度不足 .....              | 20 |
| 3.2 钢结构的计算方法 .....            | 20 |
| 3.2.1 极限状态 .....              | 20 |
| 3.2.2 概率极限状态设计方法 .....        | 21 |
| 3.2.3 设计表达式 .....             | 24 |
| <b>4 轴心受力构件</b> .....         | 27 |

|          |                          |           |
|----------|--------------------------|-----------|
| 4.1      | 轴心受力构件的强度和刚度             | 28        |
| 4.1.1    | 强度计算                     | 28        |
| 4.1.2    | 刚度计算                     | 29        |
| 4.1.3    | 轴心拉杆的计算                  | 30        |
| 4.2      | 轴心受压构件的整体稳定              | 31        |
| 4.2.1    | 理想轴心受压构件的临界力             | 31        |
| 4.2.2    | 初始缺陷对轴心压杆件稳定承载力的影响       | 36        |
| 4.2.3    | 实际轴心受压构件的整体稳定承载力和多柱子曲线   | 43        |
| 4.3      | 格构式轴心受压构件的整体稳定           | 52        |
| 4.3.1    | 格构式轴心受压构件的组成及应用          | 52        |
| 4.3.2    | 格构式轴心受压构件的整体稳定性          | 52        |
| 4.3.3    | 格构式柱分肢的稳定性               | 55        |
| 4.3.4    | 缀材及其连接的计算                | 55        |
| 4.4      | 轴心受压构件的局部稳定              | 60        |
| 4.4.1    | 板件的局部稳定性                 | 60        |
| 4.4.2    | 轴心受压矩形薄板的临界力             | 61        |
| 4.4.3    | 轴心受压构件组成板件的容许宽厚比         | 63        |
| 4.4.4    | 腹板屈曲后强度的利用               | 64        |
|          | 习题                       | 65        |
| <b>5</b> | <b>受弯构件</b>              | <b>68</b> |
| 5.1      | 受弯构件的类型和应用               | 68        |
| 5.2      | 受弯构件的强度和刚度               | 70        |
| 5.2.1    | 受弯构件的抗弯强度                | 70        |
| 5.2.2    | 受弯构件的抗剪强度                | 73        |
| 5.2.3    | 受弯构件的局部承压强度              | 74        |
| 5.2.4    | 受弯构件在复杂应力条件下的折算应力        | 75        |
| 5.2.5    | 受弯构件的刚度                  | 76        |
| 5.3      | 受弯构件的扭转                  | 76        |
| 5.3.1    | 受弯构件的剪力中心                | 77        |
| 5.3.2    | 自由扭转                     | 78        |
| 5.3.3    | 约束扭转                     | 79        |
| 5.4      | 受弯构件的整体稳定                | 82        |
| 5.4.1    | 受弯构件整体稳定的概念              | 82        |
| 5.4.2    | 双轴对称工字形截面简支梁在纯弯曲时的临界弯矩   | 83        |
| 5.4.3    | 单轴对称工字形截面梁承受横向荷载作用时的临界弯矩 | 83        |
| 5.4.4    | 影响受弯构件整体稳定性的主要因素         | 84        |
| 5.4.5    | 受弯构件整体稳定的计算方法            | 85        |
| 5.4.6    | 提高受弯构件整体稳定性的措施           | 87        |
| 5.4.7    | 双向受弯构件的整体稳定计算            | 89        |
| 5.5      | 受弯构件截面组成板件的局部稳定          | 91        |
| 5.5.1    | 受压翼缘板的局部稳定               | 92        |
| 5.5.2    | 腹板的局部稳定                  | 92        |

|          |                        |            |
|----------|------------------------|------------|
| 5.5.3    | 受弯构件腹板加劲肋的设计 .....     | 96         |
| 5.5.4    | 组合梁截面考虑屈曲后强度的设计 .....  | 99         |
|          | 习题 .....               | 107        |
| <b>6</b> | <b>拉弯和压弯构件</b> .....   | <b>109</b> |
| 6.1      | 概述 .....               | 109        |
| 6.2      | 拉弯和压弯构件的强度 .....       | 110        |
| 6.3      | 压弯构件的整体稳定 .....        | 111        |
| 6.3.1    | 单向弯曲实腹式压弯构件的整体稳定 ..... | 112        |
| 6.3.2    | 双向弯曲实腹式压弯构件的整体稳定 ..... | 118        |
| 6.3.3    | 单向弯曲格构式压弯构件的整体稳定 ..... | 118        |
| 6.3.4    | 双向弯曲格构式压弯构件的整体稳定 ..... | 119        |
| 6.4      | 压弯构件的局部稳定 .....        | 124        |
|          | 习题 .....               | 127        |
| <b>7</b> | <b>钢结构的连接</b> .....    | <b>128</b> |
| 7.1      | 焊缝连接的基本知识 .....        | 128        |
| 7.1.1    | 焊缝连接的特点 .....          | 128        |
| 7.1.2    | 焊缝连接的形式 .....          | 128        |
| 7.1.3    | 焊缝符号表示 .....           | 130        |
| 7.1.4    | 焊缝施焊的位置 .....          | 131        |
| 7.1.5    | 焊缝施焊的方法 .....          | 131        |
| 7.1.6    | 焊缝缺陷及检验 .....          | 132        |
| 7.2      | 角焊缝连接的设计 .....         | 133        |
| 7.2.1    | 角焊缝的工作性能 .....         | 133        |
| 7.2.2    | 直角角焊缝强度计算的基本公式 .....   | 134        |
| 7.2.3    | 斜角角焊缝的计算 .....         | 136        |
| 7.2.4    | 角焊缝的等级要求 .....         | 136        |
| 7.2.5    | 角焊缝的构造要求 .....         | 136        |
| 7.2.6    | 直角角焊缝连接计算的应用举例 .....   | 138        |
| 7.3      | 对接焊缝连接的设计 .....        | 146        |
| 7.3.1    | 焊透的对接焊缝连接设计 .....      | 146        |
| 7.3.2    | 焊透的对接焊缝连接应用举例 .....    | 147        |
| 7.3.3    | 部分焊透的对接焊缝连接设计 .....    | 150        |
| 7.4      | 焊接应力和焊接变形 .....        | 150        |
| 7.4.1    | 焊接应力的分类 .....          | 150        |
| 7.4.2    | 焊接应力的影响 .....          | 152        |
| 7.4.3    | 焊接变形的形式 .....          | 153        |
| 7.4.4    | 减少焊接应力和焊接变形的的方法 .....  | 153        |
| 7.5      | 螺栓连接的基本知识 .....        | 155        |
| 7.5.1    | 螺栓连接的形式及特点 .....       | 155        |
| 7.5.2    | 螺栓的排列要求 .....          | 156        |
| 7.5.3    | 螺栓连接的构造要求 .....        | 158        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 7.5.4 螺栓的符号表示 .....         | 158 |
| 7.6 普通螺栓连接的设计 .....         | 158 |
| 7.6.1 螺栓抗剪的工作性能 .....       | 158 |
| 7.6.2 普通螺栓的抗剪连接 .....       | 159 |
| 7.6.3 普通螺栓的抗拉连接 .....       | 161 |
| 7.6.4 普通螺栓受拉剪共同作用 .....     | 162 |
| 7.6.5 普通螺栓连接计算的应用举例 .....   | 162 |
| 7.7 高强度螺栓连接的设计 .....        | 169 |
| 7.7.1 高强度螺栓的预拉力及抗滑移系数 ..... | 169 |
| 7.7.2 高强度螺栓的抗剪连接 .....      | 170 |
| 7.7.3 高强度螺栓的抗拉连接 .....      | 171 |
| 7.7.4 高强度螺栓受拉剪共同作用 .....    | 172 |
| 7.7.5 单个螺栓承载力设计值公式汇总 .....  | 173 |
| 7.7.6 高强度螺栓连接计算的应用举例 .....  | 174 |
| 习题 .....                    | 177 |
| 附录 .....                    | 180 |
| 附录 1 钢材和连接的强度设计值 .....      | 180 |
| 附录 2 轴心受压构件的稳定系数 .....      | 181 |
| 附录 3 受弯构件的容许挠度 .....        | 184 |
| 附录 4 梁的整体稳定系数 .....         | 185 |
| 附录 5 各种截面回转半径的近似值 .....     | 189 |
| 附录 6 型钢表 .....              | 190 |
| 附录 7 螺栓规格 .....             | 209 |
| 参考文献 .....                  | 210 |



# 1 绪 论

## 1.1 钢结构的特点

以钢板、热轧型钢、冷弯薄壁型钢等钢材为主要承重结构材料，通过焊接或螺栓连接组成的承重构件或承重结构称为钢结构。

与其他结构如钢筋混凝土结构、砌体结构、木结构等相比，钢结构有如下一些特点：

(1) 材料强度高、塑性韧性好

与混凝土、砖石、木材及铝合金材料等相比，钢材具有很高的强度，因此，特别适用于建造跨度大、高度高以及荷载重的结构。但由于强度高，一般所需要的构件截面小而壁厚，在受压时容易发生失稳破坏或受刚度控制，强度有时难以得到充分的利用。

钢材的塑性好，在承受静力荷载时，材料吸收变形能的能力强，因此，一般情况下结构不会由于偶然超载而突然断裂，只增大变形，故易于被发现。同时，塑性好还能将局部高峰应力重分配，使应力变化趋于平缓。

钢材的韧性反映了承受动力荷载时材料吸收能量的多少，韧性好，说明材料具有良好的动力工作性能，适宜在动力荷载下工作，因此在地震区采用钢结构较为有利。

(2) 钢结构的重量轻

钢材的密度比混凝土大，但由于强度高，做成的结构却比较轻。结构的轻质性可以用材料的质量密度  $\rho$  和强度  $f$  的比值  $\alpha$  来衡量， $\alpha$  值越小，结构相对越轻。钢材的  $\alpha$  值约在  $(1.7\sim 3.7)\times 10^{-4}/\text{m}$ ；木材为  $5.4\times 10^{-4}/\text{m}$ ；钢筋混凝土约为  $18\times 10^{-4}/\text{m}$ 。在跨度及承载力相同的条件下，钢屋架的重量仅是钢筋混凝土屋架的  $1/4\sim 1/3$ ，冷弯薄壁型钢屋架甚至接近  $1/10$ 。

(3) 材质均匀、与力学计算的假定比较符合

钢结构的材料采用单一的钢材，由于冶炼和轧制过程的科学控制，钢材的组织比较均匀，其材质接近于匀质和各向同性体。而钢材的力学性能接近于理想的弹性—塑性体，其弹性模量和韧性模量均较大，因此，钢结构实际受力情况和工程力学计算结果比较符合，在设计中采用的经验公式不多，计算上的不确定性较小，计算结果比较可靠。

(4) 工业化程度高、施工周期短

钢结构所有材料皆已轧制成各种型材，加工简易而迅速。钢结构构件一般在专业加工厂制作，然后再运至现场安装，因此准确度和精确度较高，质量也易于控制。由于钢构件较轻，连接简单，运输安装方便，且施工采用机械化，可以大大缩短现场的施工周期。少量钢结构和轻型钢结构还可在现场制作，简易吊装。

同时，采用螺栓连接的钢结构，在结构加固、改建和可拆卸结构中，也具有其他结构不可替代的优势。

(5) 钢结构的密闭性好

钢结构钢材及焊接连接的水密性和气密性较好，不易渗漏，适用于制作各种压力容器、油罐、气柜、管道等水密性、气密性要求较高的结构。

#### (6) 钢结构耐腐蚀性差

钢材容易锈蚀，在使用期间必须注意防护，特别是薄壁构件更应注意，如定期除锈和涂刷油漆，以提高其耐久性。这也造成了钢结构的维护费用较高，因此，处于强腐蚀性介质内的建筑物不宜采用钢结构。

钢结构的防腐蚀措施一般采用涂刷防锈油漆或镀锌、镀铝锌等方法。钢结构在涂刷油漆前应彻底除锈，油漆质量和涂层厚度均应符合要求。

#### (7) 钢结构耐热但不耐火

钢材受热，当温度在 200℃ 以下时，其主要力学性能（屈服点和弹性模量）无太大变化。但温度超过 200℃ 后，不仅强度总趋势呈逐渐下降，还有蓝脆和徐变现象。温度达到 600℃ 左右时，钢材进入塑性状态，强度降为零，已不能继续承载。因此，《钢结构设计规范》规定构件表面温度超过 150℃ 以后必须进行隔热防护，对有防火要求的结构，还必须具备防火保护等措施。

#### (8) 钢材的脆断

钢结构在低温工作环境下和其他条件下可能发生脆性断裂，设计中应特别注意。

## 1.2 钢结构的应用和发展

### 1.2.1 钢结构的应用

钢结构的合理应用范围不仅取决于材料及结构本身的特性，还与国家经济发展水平紧密相连。新中国成立初期，我国钢产量只有十几万吨，远不能满足国民经济各部门的需求，因而钢结构的应用受到一定的限制。近几年来我国钢产量有了很大发展，到 2007 年，中国以 4.89 亿 t 的年生产量，再次成为全球第一大粗钢生产国，钢结构在建筑、桥梁上的应用也逐年上升。

就工业与民用建筑领域而言，钢结构的应用范围大致如下：

#### (1) 多层和高层建筑

我国过去钢材比较短缺，多层和高层建筑的骨架大多采用钢筋混凝土结构。近年来，钢结构在此领域已逐步得到发展，特别是在高层建筑领域。因为钢材的抗拉、抗压、抗剪强度高，因而钢结构构件结构断面小、自重轻。采用钢结构承重骨架，可比钢筋混凝土结构减轻自重约 1/3 以上。结构自重轻，可以减少运输和吊装费用，基础的负载也相应减少，在地质条件较差地区，可以降低基础造价。此外，钢结构自重轻也可显著减少地震作用，一般情况下，地震作用可减少 40% 左右。钢材良好的弹塑性性能，还可使承重骨架及节点等在地震作用下具有良好的延性。

我国现代高层建筑钢结构自 20 世纪 80 年代中期起步，第一幢高层建筑钢结构为 43 层、165m 高的深圳发展中心大厦。此后，在北京、上海、深圳、大连等地又陆续有高层建筑钢结构建成。较具代表性的如 81 层、325m 高的深圳地王大厦（图 1-1），60 层、208m 高的北京京广中心（图 1-2），北京中央电视台新大楼（图 1-3）以及上海环球金融中心（图 1-4）等。

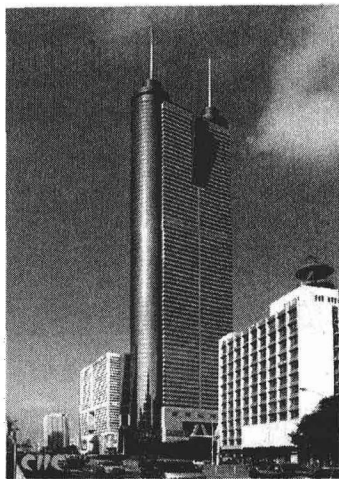


图 1-1 深圳地王大厦

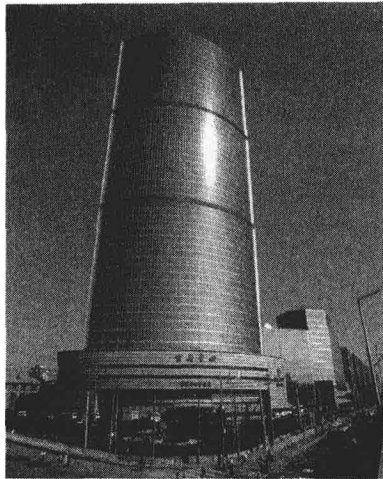


图 1-2 北京京广中心



图 1-3 中央电视台新楼

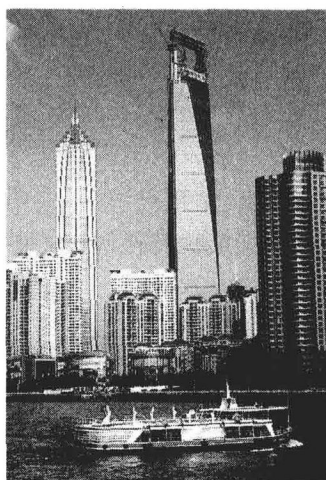


图 1-4 上海环球金融中心

## (2) 大跨度及大悬挑结构

公共建筑中的大会堂、影剧院、展览馆、体育馆、加盖体育场、航空港等由于建筑使用空间的要求，常常需要采用大跨度或大悬挑结构。大跨度及大悬挑结构主要是在自重荷载下工作，为了减轻结构自重，需要采用高强轻质材料，因此最适宜采用钢结构。

为 2008 年北京奥运会修建的各类体育场馆，如国家体育场“鸟巢”（图 1-5，跨度  $290\text{m} \times 340\text{m}$ ）、国家游泳中心“水立方”（图 1-6，最大跨度  $125\text{m}$ ）就是大跨度钢结构的代表。图 1-7 所示的可容纳 8 万人的天津奥林匹克中心体育场挑棚，则采用了大悬挑结构的形式。

## (3) 工业厂房

吊车起重量较大或工作较繁重的车间，如冶金厂房的平炉、转炉车间，混铁炉车间，初轧车间；重型机械厂的铸钢车间，水压机车间，锻压车间等，因为承受的荷载较大，抗

疲劳强度的要求较高，多采用钢骨架。此外，设有较大锻锤的车间，其骨架直接承受的动力荷载尽管不大，但间接的振动却极为强烈，也多采用钢结构。

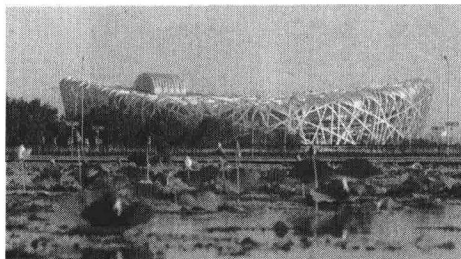


图 1-5 国家体育场“鸟巢”

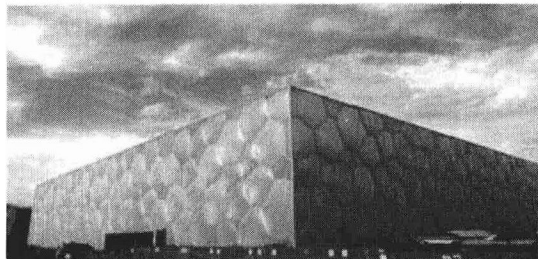


图 1-6 国家游泳中心“水立方”

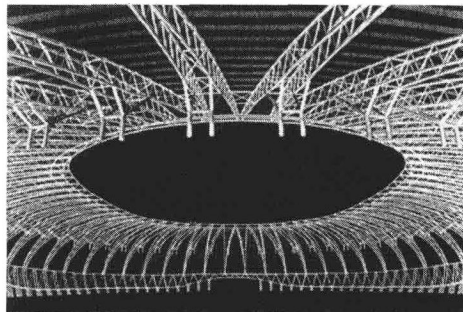
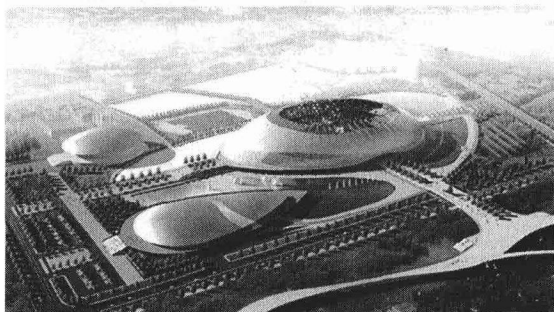


图 1-7 天津奥林匹克中心体育场

近年网架结构及轻型门式刚架结构的大量应用，在一般的工业厂房也越来越多地采用了钢结构。

#### (4) 高耸结构

高耸结构要求具备较强的抗风及抗地震能力，同时，也希望有较轻的结构自重。高耸结构包括塔架和桅杆结构，如电视塔、微波塔、输电线塔、钻井塔、环境大气监测塔、无线电天线桅杆、广播发射桅杆等，高达 450m 的广州新电视塔观光塔（图 1-8）就是其中的代表。高耸结构有时候也用于一些城市巨型雕塑及纪念性建筑，如美国纽约的自由女神像、法国巴黎的埃菲尔铁塔（图 1-9）等。

#### (5) 轻型结构

包括轻型门式刚架房屋钢结构（图 1-10）、冷弯薄壁型钢结构以及钢管结构。这类结构主要用于使用荷载较轻或中等跨度的建筑，其特点是屋面及墙面均采用轻质维护材料，自重及竖向荷载较小，因而结构的用钢量很低，甚至低于钢筋混凝土结构中的钢筋用量。近年来轻型钢结构已广泛应用于仓库、办公室、工业厂房及体育设施，并向住宅楼和别墅方向发展。

#### (6) 板壳结构

由于钢材良好的密闭性能，钢结构常用于制作各种板壳结构如油库、油罐、燃气库、高炉、热风炉、漏斗、烟囱、水塔以及各种管道等。

#### (7) 可拆卸或移动的结构

采用螺栓连接的钢结构拆卸方便，可用于建筑工地的生产、生活附属用房，临时展览

馆等。移动结构如塔式起重机、履带式起重机的吊臂、龙门起重机等也常用钢结构制作。

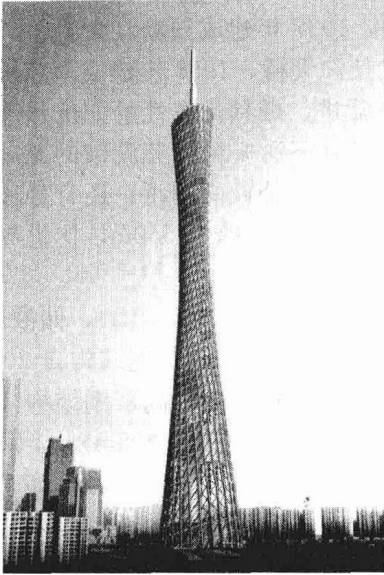


图 1-8 广州新电视塔

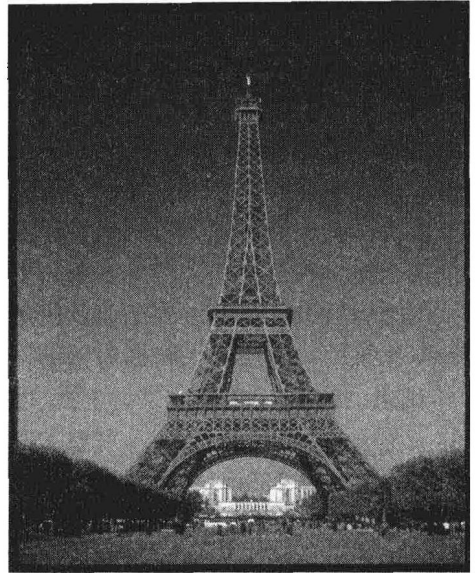


图 1-9 法国巴黎埃菲尔铁塔

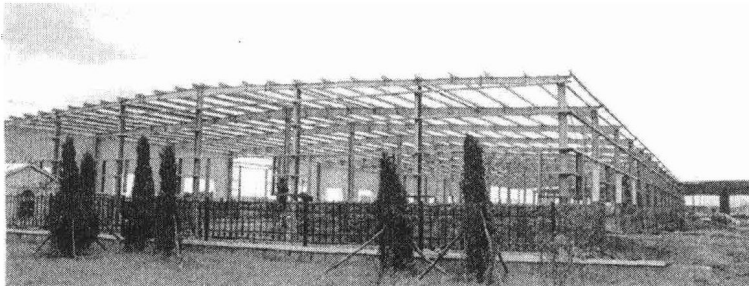


图 1-10 轻型门式刚架结构

#### (8) 其他特种结构

如栈桥、管道支架、井架和海上采油平台等。

#### 1.2.2 钢结构的发展

钢结构的发展始终伴随着科学的进步与技术的创新，主要体现在材料、连接形式、结构体系、设计计算方法及施工技术等领域。

从所用材料看，早期的金属结构主要是采用铸铁、锻铁，后来发展到以普通碳素钢和低合金钢作为承重结构材料，近年来又发展了铝合金，并逐步发展高强度低合金钢材。现行国家标准《钢结构设计规范》(GB 50007—2003)，就是在推荐传统 Q235 钢、Q345 钢和 Q390 钢的基础上，又增加推荐了 Q420 钢，钢的品种也有所增加。

从钢结构连接方式的发展看，在生铁和熟铁时代主要采用的是销钉连接，19 世纪初发展到铆钉连接，20 世纪初有了焊接连接，后期则发展了高强度螺栓连接。

从结构的形式看，早期钢结构主要用于桥梁和铁塔、储气库等。我国在公元前 200 多

年秦始皇时代就曾用铁造桥墩。公元 60 年左右汉明帝时代建造了铁链悬桥（兰津桥）。山东济宁铁塔和江苏镇江甘露寺铁塔也是很古的建筑，1927 年建成沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房，1931 年建成广州中山纪念堂钢结构圆屋顶，1937 年建成钱塘江大铁桥。新中国成立后，钢结构应用日益扩大，如 1957 年建成武汉长江大桥，1968 年建成南京长江大桥。近 20 多年，我国过江及跨海大桥的建设更是突飞猛进，最具代表性的如杭州湾跨海大桥，它全长 36km，是世界上最长的跨海大桥；位于长江下游安徽省芜湖市的芜湖长江大桥，跨江主桥长 2193m，全长 10616m，是目前中国最长的公铁两用桥；还有号称世界第一拱桥的重庆朝天门大桥，大桥采用钢桁架拱的结构形式，主跨达 552m，比世界著名拱桥——澳大利亚悉尼大桥的主跨还要长。

钢结构后来逐步发展到工业及民用建筑、水工结构以及板壳结构如高炉、储液库等。在房屋建筑中，高层和大跨成为钢结构的主要发展方向。我国高层建筑钢结构自 20 世纪 80 年代末、90 年代初从北京、上海、深圳等地起步，陆续兴建了一批高层钢结构，如北京的国贸中心（高 155.2m）、京城大厦（高 182m）、京广中心大厦（高 208m）；上海的国贸中心大厦（高 139m）、深圳发展中心大厦（高 165m）、地王商业大厦（楼顶面高 325m，塔尖处高 384m）等，这些高层钢结构的建成表明了我国高层建筑发展的新趋势。超高层结构近年来得到很大发展和应用。

结构体系的革新也是今后钢结构研究的方向，如钢结构住宅项目的推广实施，以及在大跨度、空间结构、网壳结构、悬索结构、膜结构等方面的运用。

由于钢构件受压时的稳定问题比较突出，常不能发挥高强度钢材的作用，而混凝土结构具有良好的受压性能，采用钢和混凝土组合构件可以充分发挥两种材料的优势，近年来，组合梁、组合楼板、钢管混凝土以及型钢混凝土等组合结构体系在各类建筑中也得到了广泛应用。

我国现行《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）与 1988 年规范（GBJ 17—88）比较，除在设计方法上又有所改进和提高外，还增加了一些新的内容，这些改进和新增内容也表明了钢结构今后的发展方向。

目前钢结构的设计方法采用考虑分布类型的二阶矩概率法计算结构可靠度，从而制订了以概率理论为基础的极限状态设计法（简称概率极限状态设计法）。这个方法的特点主要表现在不是用经验的安全系数，而是用根据各种不定性分析所得的失效概率（或可靠指标）去度量结构可靠性，并使所计算的结构构件的可靠度达到预期的一致性和可比性。但是这个方法还有待发展，因为它计算的可靠度还只是构件或某一截面的可靠度，而不是结构体系的可靠度，也不适用于疲劳计算的反复荷载或动力荷载作用下的结构。

近年来，优化理论在结构设计上得到成功应用，国内外钢结构设计软件也日趋成熟，计算机辅助设计及绘图等都得到很大发展。

最近几年，我国成品钢材朝着品种齐全、材料标准化方向发展。国产建筑钢结构用钢在数量、品种和质量上都有了较大改进，热轧 H 型钢、彩色钢板、冷弯型钢的年生产能力大大提高，为钢结构发展创造了重要条件。

我国近年来钢结构制造工业的机械化水平已有了较大提升，但在现场质量控制、吊装安装技术以及技术工人水平等方面还需要进一步提高。

## 2 钢结构的材料

### 2.1 钢结构对材料的要求

钢结构的原材料是钢，钢的种类繁多，性能差别也很大，适用于建筑结构的钢材只是其中的一小部分。建筑用钢材必须具有良好的力学性能及加工性能，即必须符合下列要求：

(1) 较高的抗拉强度  $f_u$  和屈服点  $f_y$

钢材的屈服强度  $f_y$  是衡量结构承载能力的指标，在相同条件下，较高的  $f_y$  可以使结构有较小的截面面积，以减轻结构自重、节约钢材和降低造价。而抗拉强度  $f_u$  是衡量钢材经过较大变形后的抗拉能力，它直接反映钢材内部组织的优劣，同时，作为一种安全储备， $f_u$  高可以增加结构的安全保障。

(2) 较高的塑性和韧性

钢材的塑性和韧性好，结构在静载和动载作用下有足够的应变能力，既可以减轻结构脆性破坏的倾向，又能通过较大的塑性变形调整局部峰值应力，同时，还具有较好的抵抗重复荷载作用的能力。

(3) 良好的工艺性能

工艺性能主要指钢材冷加工、热加工的性能和可焊性。良好的工艺性能保证了钢材易于加工成各种形式的结构或构件，而且不致因加工而对材料的强度、塑性、韧性等造成较大的不利影响。

根据结构的具体工作条件，有时还要求钢材具有适应低温、高温和腐蚀性环境的能力。

按以上要求，现行国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 具体规定：承重结构的钢材应具有抗拉强度、伸长率、屈服点和碳、硫、磷含量的合格保证；焊接结构尚应具有冷弯试验的合格保证；对某些承受动力荷载的结构以及重要的受拉或受弯的焊接结构尚应具有常温或负温冲击韧性的合格保证。

### 2.2 钢材的主要性能

#### 2.2.1 钢材在单向均匀受拉时的工作性能

钢材的各项力学性能指标一般通过标准试件的单向拉力试验获得。在常温静载情况下，普通碳素钢标准试件单向均匀受拉试验时的应力—应变 ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲线如图 2-1。由此试验曲线可获得有关钢材的主要力学性能指标。

##### 2.2.1.1 单向均匀受拉时的强度性能

图 2-1 中  $\sigma-\epsilon$  曲线的  $OP$  段为直线，表示钢材具有完全弹性性质，这时应力与应变成

正比，可由弹性模量  $E$  定义，即  $\sigma = E\epsilon$ ，材料的弹性模量  $E = \tan \alpha$ ，为该段直线的斜率。此段应力的最高点  $P$  所对应的应力值  $f_p$  称为比例极限。

曲线的  $PE$  段仍具有弹性，但非线性，即为非线性弹性阶段。这时应力与应变之间的关系可以用其增量表示，即  $E_t = d\sigma/d\epsilon$ ， $E_t$  叫做切线模量。此段上限  $E$  点的应力  $f_e$  称为弹性极限。弹性极限和比例极限相距很近，实际上很难区分，故通常只提比例极限。

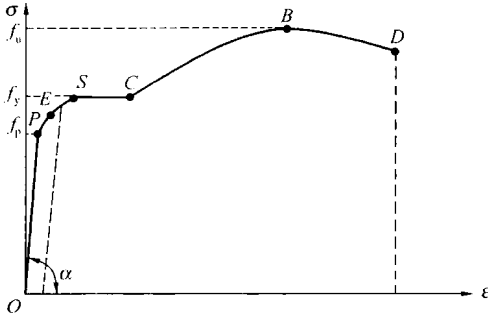


图 2-1 碳素结构钢的应力—应变曲线

应力超过比例极限后，随着荷载的增加，曲线在  $ES$  段出现非弹性性质，即应变  $\epsilon$  与应力  $\sigma$  不再成正比，此时的变形包括了弹性变形和塑性变形两部分，表现在卸荷曲线上，成为与  $OP$  平行的直线（图 2-1 中的虚线），留下永久性的残余变形。此段上限  $S$  点的应力  $f_y$  称为屈服点，对于低碳钢，此时出现明显的屈服台阶  $SC$  段，此阶段表现为在应力保持不变的情况下，应变继续增加。

在屈服台阶  $SC$  段，开始进入塑性流动范围时，曲线波动较大，以后逐渐趋于平稳，其最高点和最低点分别称为上屈服点和下屈服点。上屈服点和试验条件（加荷速度、试件形状、试件对中的准确性等）有关，下屈服点则对此不太敏感，所以设计中以下屈服点作为材料强度的依据。

对于没有缺陷和残余应力影响的试件，比例极限和屈服点比较接近，且屈服点前的应变很小（对低碳钢约为 0.15%）。为了简化计算，通常假定屈服点以前钢材为完全弹性，屈服点以后则为完全塑性，这样就可把钢材视为理想的弹—塑性体，其应力—应变曲线可以用双直线近似代替，如图 2-2 所示。

在屈服台阶的末端（ $C$  点），结构将产生很大的残余变形（对低碳钢，此时的应变  $\epsilon_c = 2.5\%$  左右），过大的残余变形在使用上是不允许的，表明钢材的承载能力达到了最大限度。因此，在设计时取屈服点为钢材可以达到的最大应力。

高强度钢（如热处理钢）没有明显的屈服点和屈服台阶。这类钢的屈服条件是根据试验分析结果而人为规定的，故称为条件屈服点（或屈服强度）。条件屈服点是以卸荷后试件中残余应变为 0.2% 时所对应的应力定义的，一般用  $f_{0.2}$  表示，见图 2-3。由于这类钢材不具有明显的塑性平台，设计中不宜利用它的塑性。

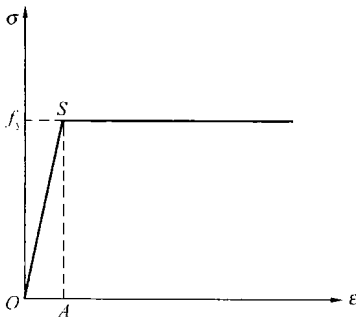


图 2-2 理想弹—塑性体的应力—应变曲线

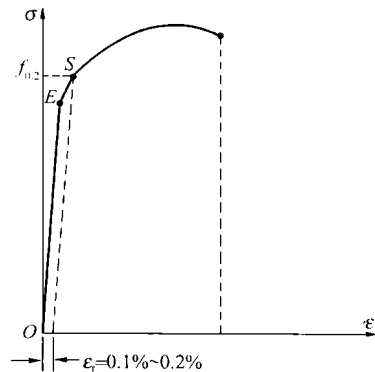


图 2-3 高强度钢的应力—应变曲线



超过屈服台阶的末端 C 点后，材料出现应变硬化，曲线上升，直至曲线最高处的 B 点，这点的应力  $f_u$  称为抗拉强度或极限强度。当应力达到 B 点时，试件发生颈缩现象，至 D 点而断裂。当以屈服点的应力  $f_y$  作为强度限值时，抗拉强度  $f_u$  成为材料的强度储备。

### 2.2.1.2 塑性性能

钢材的塑性性能可以用伸长率衡量，试件被拉断时的绝对变形值与试件原标距之比的百分数，称为伸长率。当试件标距长度与试件直径  $d$ （圆形试件）之比为 10 时，以  $\delta_{10}$  表示，当该比值为 5 时，以  $\delta_5$  表示。伸长率代表材料在单向拉伸时的塑性应变的能力。

屈服强度、抗拉强度和伸长率是钢材最重要的三项力学性能指标。

### 2.2.1.3 钢材物理性能指标

钢材在单向受压（粗而短的试件）时，受力性能基本上和单向受拉时相同。受剪的情况也相似，但剪切屈服点  $\tau_y$  及抗剪极限强度  $\tau_u$  均较受拉时为低，剪变模量  $G$  也低于弹性模量  $E$ 。

钢材和钢铸件的弹性模量  $E$ 、剪变模量  $G$ 、线性膨胀系数  $\alpha$  和质量密度  $\rho$  见表 2-1。

钢材和钢铸件的物理性能指标

表 2-1

| 弹性模量 $E$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 剪变模量 $G$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 线膨胀系数 $\alpha$ (1/°C) | 质量密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| $206 \times 10^3$             | $79 \times 10^3$              | $12 \times 10^{-6}$   | 7850                             |

### 2.2.2 钢材在复杂应力作用下的工作性能

在单向拉力试验中，单向应力达到屈服点时，钢材即进入塑性状态。在复杂应力，如平面或立体应力（图 2-4）作用下，钢材由弹性状态转入塑性状态的屈服条件是按折算应力  $\sigma_{red}$  与单向应力下的屈服点相比较来判断。对于接近理想弹—塑性材料的钢材，试验证明折算应力  $\sigma_{red}$  的计算采用能量强度理论（或第四强度理论）较为合适。根据能量强度理论，在三向应力作用下，折算应力  $\sigma_{red}$  以主应力表示时可按下式计算：

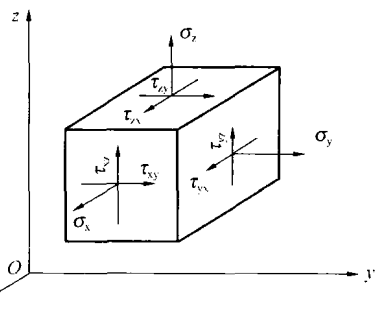


图 2-4 复杂应力

$$\sigma_{red} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2-1)$$

以应力分量表示时可按下式计算：

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-2)$$

当  $\sigma_{red} < f_y$  时即为弹性状态， $\sigma_{red} \geq f_y$  时为塑性状态。

如三向应力中有一向应力很小（如厚度较小，厚度方向的应力可忽略不计）或为零时，则属于平面应力状态，式（2-2）所定义的屈服条件成为：

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} = f_y \quad (2-3)$$

在一般的梁中，只存在正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$ ，则

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = f_y \quad (2-4)$$