



高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

钢结构设计原理

宋高丽 主编

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

钢结构设计原理

宋高丽 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构设计原理/宋高丽主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 7

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材

全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

ISBN 978-7-112-23603-9

I. ①钢… II. ①宋… 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 068934 号

本书主要介绍钢结构基本构件 (轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件) 和钢结构连接 (焊缝连接、螺栓连接) 的基本设计方法。全书按《钢结构设计标准》GB 50017—2017 编写, 计算案例主要为普通钢屋架单层厂房和钢平台, 以案例阐述理论, 以实用和够用为主要编写原则。

本书既可作为土木工程专业本科生的教材, 也可供钢结构工程技术人员参考。

为了更好地支持教学, 本书作者制作了教学课件, 有需要的读者可以发送邮件至: 2917266507@qq.com 免费索取。

* * *

责任编辑: 聂伟王跃

责任校对: 王瑞

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

钢结构设计原理

宋高丽 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 289 千字

2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷

定价: 28.00 元 (附配套数字资源及课件)

ISBN 978-7-112-23603-9

(33895)

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

本书根据《钢结构设计标准》GB 50017—2017 编写，主要阐述钢结构材料的种类和性能、钢结构基本构件的截面设计方法、钢结构连接（焊缝连接、螺栓连接）的基本构造和设计方法。全书共分为 6 章，分别为：绪论、钢结构的材料、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、钢结构的连接。

本书在知识体系上力求简明扼要，适当弱化公式的推导过程，以实用、够用为主要原则。各章节案例主要为普通钢屋架单层厂房和钢平台，有利于学习者将基本设计理论与实际应用相结合。

本书可作为高校土木工程专业和其他相关专业钢结构设计原理课程的教材，也可作为钢结构工程技术人员的参考书籍。本书由昆明学院宋高丽编写第 1~6 章、周卫霞编写附录部分，课件由周卫霞制作。

本书在编写过程中，参考或引用了有关单位或个人的资料，谨致谢意。限于编者水平，书中的错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1	4.4 受弯构件整体稳定性计算	59
1.1 钢结构的应用和发展	1	4.5 受弯构件局部稳定性计算	65
1.2 钢结构的特点	5	4.6 型钢梁和焊接截面梁的截面 设计	74
1.3 钢结构的设计方法	6	复习思考题	80
复习思考题	9	第 5 章 拉弯和压弯构件	82
第 2 章 钢结构的材料	10	5.1 概述	82
2.1 钢材的主要力学性能	10	5.2 拉弯和压弯构件强度计算	83
2.2 钢结构常用钢材种类	12	5.3 实腹式压弯构件整体稳定性 计算	85
2.3 影响钢材性能的主要因素	18	5.4 实腹式压弯构件局部稳定性 计算	88
2.4 钢材的选用	20	5.5 格构式压弯构件的稳定性 计算	89
2.5 钢板及型钢	22	5.6 拉弯和压弯构件截面设计	100
复习思考题	23	复习思考题	100
第 3 章 轴心受力构件	24	第 6 章 钢结构的连接	103
3.1 概述	24	6.1 钢结构的连接方法	103
3.2 轴心受力构件强度计算	25	6.2 焊接的方法和焊缝	103
3.3 轴心受力构件刚度计算	26	6.3 对接焊缝连接构造和计算	111
3.4 轴心受压构件的整体稳定性 计算	28	6.4 角焊缝连接构造和计算	115
3.5 实腹式轴心受压构件局部 稳定性计算	34	6.5 焊接应力和焊接变形	128
3.6 实腹式轴心受压构件截面 设计	38	6.6 螺栓连接的排列和构造	129
3.7 格构式轴心受压构件截面 设计	41	6.7 螺栓连接的工作性能和 计算	134
复习思考题	50	复习思考题	150
第 4 章 受弯构件	52	附录	153
4.1 概述	52	附录 1 钢材和连接强度设计值	153
4.2 受弯构件强度计算	53	附录 2 型钢表	157
4.3 受弯构件刚度计算	58	附录 3 各种截面回转半径的	

近似值	178	附录 6 压弯和受弯构件的截面板	
附录 4 螺栓的有效直径和有效		件宽厚比等级及限值	183
面积	179	附录 7 附图	184
附录 5 轴心受压构件的稳定		参考文献	185
系数	180		

第 1 章 绪 论

1.1 钢结构的应用和发展

1.1.1 钢结构的应用

钢结构是用钢板、型钢经过加工制成各种基本构件，通过焊接、螺栓连接等方式连接组成的结构。20 世纪 80 年代以来，随着我国经济建设的快速发展，钢结构在工业及民用建筑中的应用日益广泛。

(1) 工业厂房 (图 1-1)

大型冶金企业、重型机械制造厂、火力发电厂等的一些车间，由于厂房跨度和柱距大、高度高，车间内设有工作繁忙和起重量较大的起重运输设备等，一般采用钢屋架（或钢梁）、钢柱和钢吊车梁等组成的全钢结构。

近年来，随着压型钢板等轻型屋面材料的应用，一般的工业厂房也常采用钢结构，结构形式主要为实腹式变截面门式刚架。

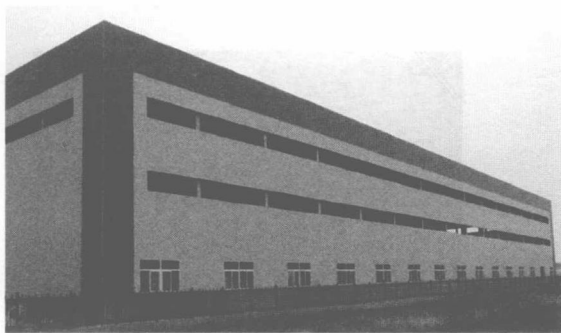
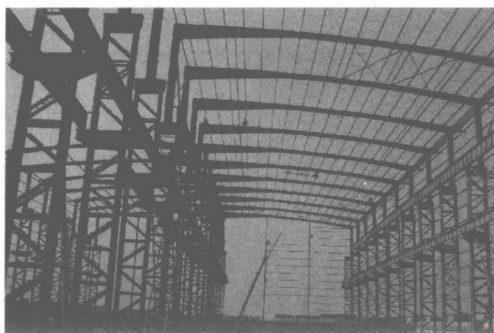


图 1-1 钢结构厂房

(2) 大跨结构 (图 1-2)

一般情况下，跨度不小于 60m 的结构就称为大跨度结构，常见的如飞机装配车间、会展中心、体育馆、桥梁等结构。结构跨度越大，自重在全荷载中所占比重也就越大，减轻结构的自重会带来明显的经济效益，因此轻质高强的钢结构在大跨结构中具有明显的优势。

(3) 可移动或可拆卸的结构 (图 1-3)

需要搬迁的结构，如建筑工地生产生活用房、临时性展览馆等，采用钢结构最为适宜。塔式起重机、履带式起重机的吊臂和龙门起重机等移动结构，都采用钢结构。

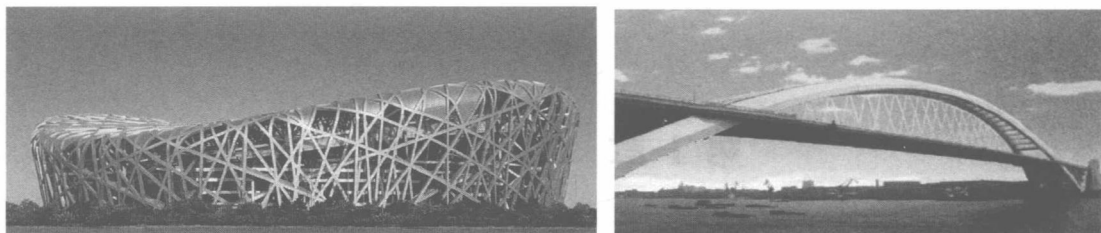


图 1-2 大跨结构

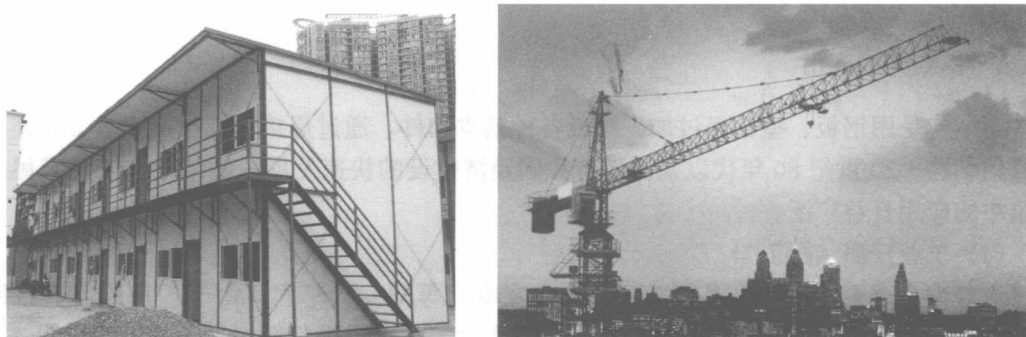


图 1-3 可移动或可拆卸结构

(4) 多层及高层建筑 (图 1-4)

房屋高度越大, 施工难度越大, 风荷载、地震作用等水平荷载对其影响也越大, 因此在高层建筑中采用钢结构更为理想。

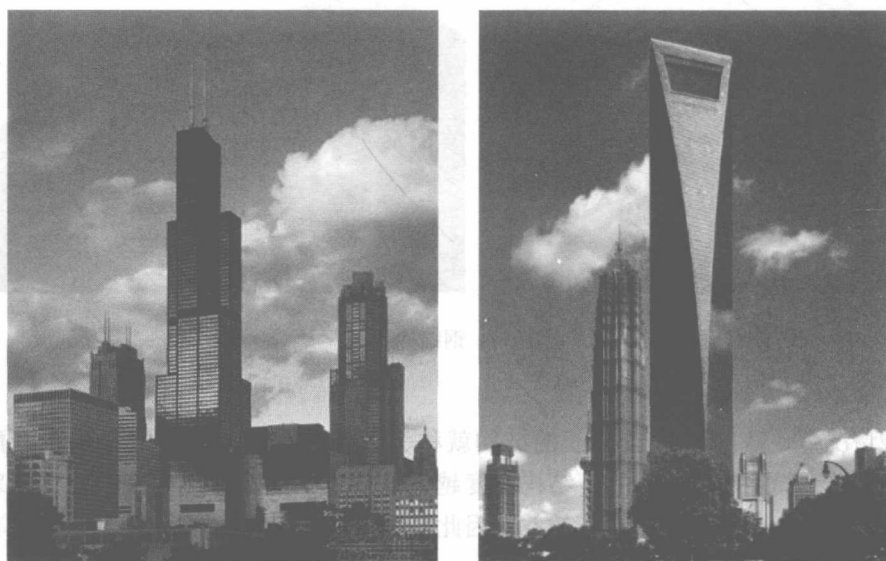


图 1-4 高层建筑

根据 1990 年 11 月第四届国际高层建筑会议资料, 当时已建成的世界最高 90 幢高层建筑中, 51 幢为钢结构, 25 幢为钢-钢筋混凝土结构, 14 幢为钢筋混凝土结构。

(5) 高耸结构 (图 1-5)

高耸结构包括塔架和桅杆结构,如电视塔、输电线塔、无线电天线桅杆、广播发射桅杆等。

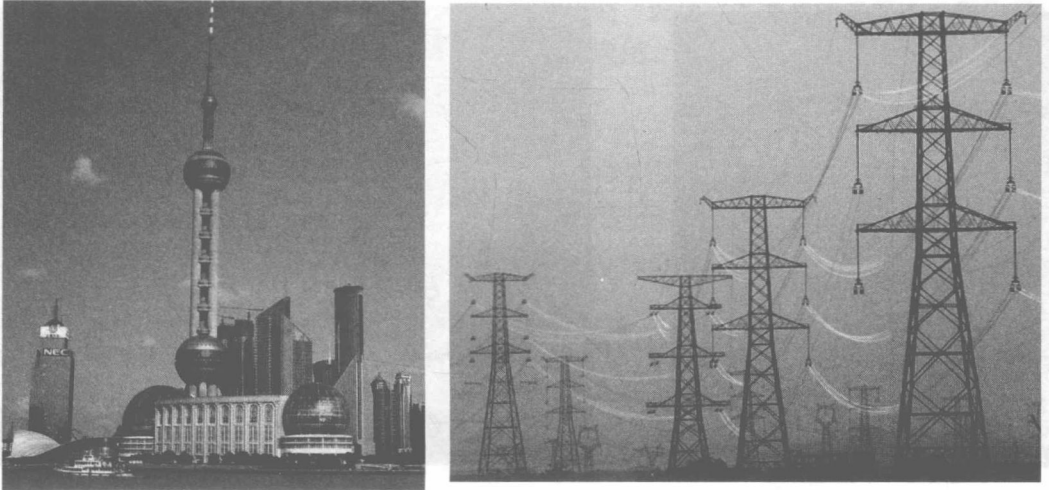


图 1-5 高耸结构

(6) 钢-混凝土组合结构

混凝土的抗压强度远高于其抗拉强度,钢构件受压时往往是稳定性起控制作用而不能充分发挥它的强度优势,将钢与混凝土并用,使两种材料的优势都得到充分发挥。常见的钢-混凝土组合构件有压型钢板与混凝土组合楼板、钢与混凝土组合梁、钢管混凝土柱等,如图 1-6 所示。

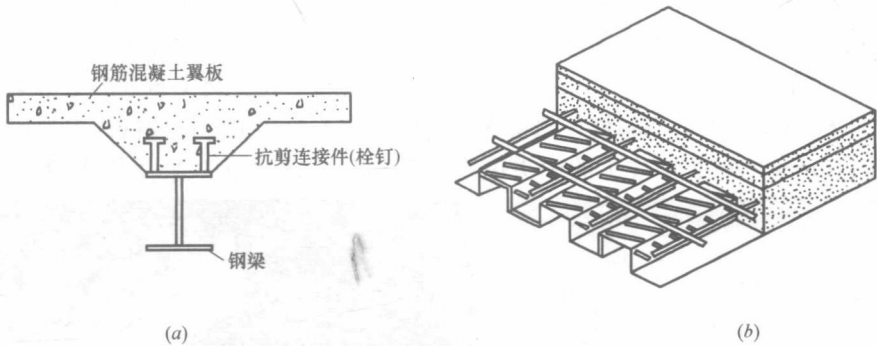


图 1-6 钢-混凝土组合构件

(a) 钢与混凝土组合梁; (b) 压型钢板与混凝土组合楼板

(7) 其他结构

其他结构如储气罐 (图 1-7)、油罐、高炉等容器及栈桥、管道支架、井架和海上采油平台 (图 1-8) 等结构也常采用钢结构。

1.1.2 钢结构的发展

1949 年新中国成立以后,由于受到钢产量的制约,钢结构仅在重型厂房、大跨度公共建筑、铁路桥梁以及塔桅结构中采用。如 1961 年建成的北京工人体育馆,采用了圆形

双层辐射式悬索结构，直径 94m。1967 年建成的浙江体育馆，采用双曲抛物面正交索网的悬索结构，椭圆平面，长轴 80m，短轴 60m。1975 年建成的上海体育馆采用三向网架，跨度达 110m。1977 年北京建成的环境气象塔是一高度达 325m 的钢桅杆结构。

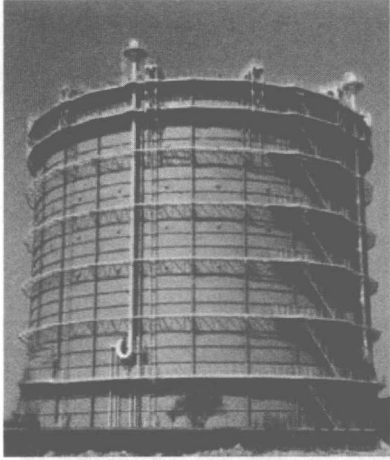


图 1-7 干式储气罐



图 1-8 海上采油平台

1978 年我国实行改革开放政策以来，经济建设有了突飞猛进的发展，钢产量逐年增加，自 1996 年超过 1 亿吨以来，一直位列世界钢产量的首位，且钢材的质量及钢材规格已能满足建筑钢结构的要求。1997 年建设部颁发的《中国建筑技术政策》（1996-2010 年）中明确提出了发展钢结构的要求。

1999 年，地上 88 层、地下 3 层、高 420.5m 的上海金茂大厦（图 1-9）的建成，标志着我国超高层钢结构已进入世界前列。2008 年建成的国家体育场“鸟巢”，以其独特的建筑造型吸引了全世界的目光。工程主体结构呈空间马鞍椭圆形，南北长 333m，东西宽 294m，高 69m。交叉布置的主桁架与屋面及立面的次结构一起形成了“鸟巢”的特殊建筑造型。主桁架主要杆件截面为箱形，钢板最大厚度为 110mm。2009 年竣工的中央电视台新台址（图 1-10）采用钢支撑筒体结构体



图 1-9 上海金茂大厦

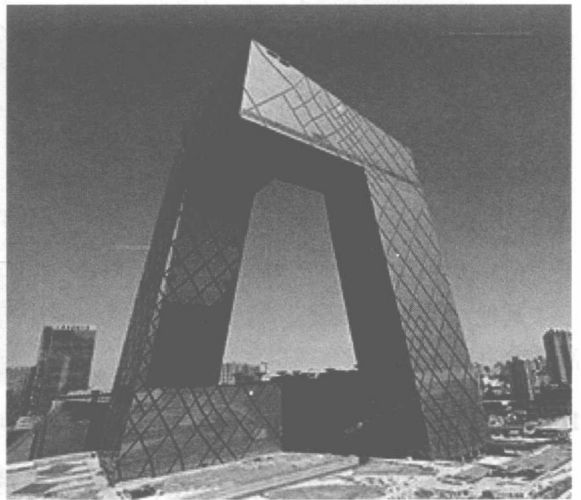


图 1-10 中央电视台新台址

系，主楼由高 234m 的塔楼 1 和高 194m 的塔楼 2 组成，塔楼双向 6° 倾斜，并由 14 层 56m 高、悬挑长度 75m、重 1.8 万吨的悬臂钢结构连接。筒体结构采用了 Q390、Q420、Q460 等高强度钢材，钢构件最大板厚达到 100mm。

经过多年的发展，我国在钢结构领域的科学研究、设计、制造和施工等方向都取得很多成就，但仍有很多问题需解决，如高性能钢材的应用、钢结构设计方法的改进、结构形式的革新、钢结构加工制造水平还需进一步提高等。

1.2 钢结构的特点

钢结构和其他材料的结构相比具有如下特点：

(1) 材料强度高，塑性和韧性好

钢材与其他建筑材料如混凝土、砖、石、木材等相比，强度要高得多，因此一般构件截面小且壁薄。当构件在受压时通常稳定性和刚度起控制作用，强度难以得到充分利用。钢材塑性好，结构或构件在一般条件下不会发生脆性破坏。钢材韧性好，结构对动力荷载的适应性较强。

(2) 钢结构的重量轻

结构的轻质性可以用材料的质量密度和强度的比值 β 来衡量， β 值越小，结构相对越轻。建筑钢材的 β 值为 $(1.7 \sim 3.7) \times 10^{-4}/\text{m}$ ，而钢筋混凝土的 β 值为 $18 \times 10^{-4}/\text{m}$ 。一般在跨度相同、所受荷载相同的情况下，钢屋架的重量约为钢筋混凝土屋架重量的 $1/4 \sim 1/3$ ，如果采用冷弯薄壁型钢屋架，其重量甚至仅为钢筋混凝土屋架的 $1/10$ 。

(3) 材质均匀，符合力学计算假定

钢材内部组织比较均匀，接近各向同性，实际受力情况与工程力学计算结果比较符合。钢材在冶炼和轧制过程中质量可以严格控制，材质波动的范围小。

(4) 工业化程度高，施工工期短

钢结构构件一般在工厂制作、工地安装，构件制作的准确度和精密度均较高，现场施工机械化程度高，可以有效缩短施工工期。

(5) 绿色环保

采用钢结构可大大减少砂、石、水泥的用量，减少对不可再生资源的使用。钢结构加工制造过程中产生的余料，以及废弃和破坏的钢结构或构件，均可回炉重新冶炼成钢材重复使用。

(6) 耐腐蚀性差

钢材容易锈蚀，防止钢材锈蚀最常采用的方法是涂防锈漆。在涂刷油漆前应彻底除锈，油漆质量和涂层厚度均应符合相关规范要求。设计时应尽量避免在构造上存在难以检查、清刷和油漆之处以及能积留湿气和大量灰尘的死角或凹槽，处于较强腐蚀性介质环境中的建筑物不宜采用钢结构。耐候钢具有较好的抗锈性能，近年已逐步推广应用。

(7) 钢材耐热不耐火

钢材受热时，若温度在 200°C 以内钢材性质变化不大。当温度超过 200°C ，钢材强度逐渐降低，还会发生蓝脆和徐变现象。当温度达到 600°C 时，钢材进入塑性状态不能继续承载。因此，《钢结构设计标准》GB 50017—2017 规定，高温环境下的钢结构温度超过

100℃时，应进行结构温度验算，并根据不同情况采取防护措施。钢结构耐火性较差，在火灾中未加防护的钢结构一般只能维持 20min 左右。对需防火的钢结构，常用的防火措施通常是在构件表面喷涂防火涂料、外包混凝土或其他防火材料等。

1.3 钢结构的设计方法

1.3.1 概率极限状态设计方法

(1) 结构的功能要求

结构计算的目的在于保证所设计的结构构件在施工和使用过程中能满足预期的各种功能要求。结构在规定的设计使用年限内应满足的功能主要有：

- ① 在正常施工和正常使用时，能承受可能出现的各种作用；
- ② 在正常使用情况下具有良好的工作性能；
- ③ 在正常维护下具有足够的耐久性；
- ④ 在偶然事件（如地震、火灾、爆炸、撞击等）发生时及发生后，仍能保持必需的整体稳定性。

这里的“各种作用”指使结构产生内力或变形的各种原因，如施加在结构上的集中力或分布力（直接作用，也称为荷载），以及引起结构外加变形或约束变形的原因（间接作用，如地震、温度变化、地基沉降等）。

(2) 结构的极限状态

当整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一项功能要求时，此特定状态就称为该功能的极限状态。结构的极限状态主要有：

① 承载能力极限状态

承载能力极限状态指结构或结构构件在荷载作用下，达到最大承载力或不适于继续承载的变形的状态，包括：结构构件或连接因超过材料强度而破坏，或因过度变形而不适于继续承载；整个结构或其一部分作为刚体失去平衡；结构转变为机动体系；结构或结构构件丧失稳定；结构因局部破坏而发生连续倒塌；地基丧失承载力而破坏；结构或结构构件的疲劳破坏。

② 正常使用极限状态

正常使用极限状态指结构或结构构件在荷载作用下，达到正常使用的某项规定限值的状态，包括：影响正常使用或外观的变形；影响正常使用或耐久性能的局部损坏；影响正常使用的振动；影响正常使用的其他特定状态。

③ 耐久性极限状态

耐久性极限状态是指结构或结构构件在环境影响下出现的劣化达到耐久性能的某项规定限值或标志的状态，包括：影响承载能力和正常使用的材料性能劣化；影响耐久性能的裂缝、变形、缺口、外观、材料削弱等；影响耐久性能的其他特定状态。

(3) 概率极限状态设计方法

结构的工作性能可用结构的功能函数来描述。若结构设计时需要考虑 n 个影响结构可靠性的随机变量，即 x_1, x_2, \dots, x_n ，则这 n 个随机变量之间通常可建立函数关系：

$$Z=g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-1)$$

式中, Z 称为结构的功能函数。

为了简化, 只以作用效应 S 和结构抗力 R 两个基本随机变量表达结构的功能函数, 则得:

$$Z=g(R, S)=R-S \quad (1-2)$$

在实际工程中, 可能出现三种情况: ① $Z>0$ 时, 结构处于可靠状态; ② $Z=0$ 时, 结构达到临界状态; ③ $Z<0$ 时, 结构处于失效状态。

传统的设计方法认为 S 和 R 都是确定的变量, 只要按 $Z>0$ 进行设计结构就是绝对安全的, 但事实并非如此, 因为影响结构功能的各种因素, 如荷载的大小、材料强度的高低、构件截面尺寸大小和施工质量等都具有不确定性, 因此绝对可靠的结构是不存在的。结构设计要解决的根本问题是在结构的可靠和经济之间选择一种最佳的平衡。那么, 对所设计结构的功能只能给出一定概率的保证, 只要可靠的概率足够大, 或者说失效的概率足够小, 便可认为所设计的结构是安全的。

按照概率极限状态设计方法, 结构的可靠度定义为: 结构在规定的时间内、规定的条件下, 完成预定功能的概率。若以 p_s 表示结构的可靠度, 则可靠度的定义可表达为:

$$p_s=P(Z \geq 0) \quad (1-3)$$

若以 p_f 表示结构的失效概率, 则:

$$p_f=P(Z < 0) \quad (1-4)$$

由于事件 ($Z < 0$) 和 ($Z \geq 0$) 是对立的, 所以结构可靠度 p_s 和结构的失效概率 p_f 的关系可表示为:

$$p_s + p_f = 1 \quad (1-5)$$

因此, 结构可靠度的计算可以转换为结构失效概率的计算。钢结构设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法 (除疲劳计算和抗震设计外), 用分项系数设计表达式进行计算。

1.3.2 分项系数设计表达式

(1) 承载能力极限状态设计表达式

结构或结构构件强度不足破坏或过度变形时的承载能力极限状态设计, 应符合下式要求:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1-6)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数: 对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1, 对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0, 对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9;

S_d ——承载能力极限状态下作用组合的效应 (如轴力、弯矩等) 设计值: 对非抗震设计, 应按作用的基本组合计算; 对抗震设计, 应按作用的地震组合计算;

R_d ——结构构件的抗力设计值。

整个结构或其一部分作为刚体失去平衡时的承载能力极限状态设计, 应符合下式规定:

$$\gamma_0 S_{d,dst} \leq S_{d,stab} \quad (1-7)$$

式中 $S_{d,dst}$ ——不平衡作用效应的设计值;

$S_{d, stb}$ ——平衡作用效应的设计值。

结构或结构构件的疲劳强度不足的破坏应按容许应力设计原则及容许应力幅的方法进行设计。

建筑结构设计时，应考虑持久状况、短暂状况、偶然状况、地震状况等不同的结构设计状况。其中持久设计状况适用于结构使用时的正常情况；短暂设计状况适用于结构出现的临时情况，包括结构施工和维修时的情况等；偶然设计状况适用于结构出现的异常情况，包括结构遭受火灾、爆炸、撞击时的情况等；地震设计状况，适用于结构遭受地震时的情况。对不同的设计状况，应采用不同的作用组合。

对持久设计状况和短暂设计状况，应采用作用的基本组合，其效应设计值 S_d 按下式中最不利值确定：

$$S_d = S\left(\sum_{i \geq 1} \gamma_{G_i} G_{ik} + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} Q_{1k} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q_j} \psi_{cj} \gamma_{L_j} Q_{jk}\right) \quad (1-8)$$

式中 $S(\cdot)$ ——作用组合的效应函数；

γ_{G_i} ——第 i 个永久荷载的分项系数，当永久荷载效应对结构不利时，取 1.3；当永久荷载效应对结构有利时，不应大于 1.0；

G_{ik} ——第 i 个永久荷载标准值；

Q_{jk} ——第 j 个可变荷载标准值，其中 Q_{1k} 为各可变荷载中起控制作用者（主导可变荷载）；

γ_{Q_j} ——第 j 个可变荷载的分项系数，其中 γ_{Q_1} 为主导可变荷载 Q_{1k} 的分项系数。当可变荷载效应对结构不利时，取 1.5；当可变荷载效应对结构有利时，取 0；

γ_{L_j} ——第 j 个可变荷载考虑结构设计使用年限的荷载调整系数，其中 γ_{L_1} 为主导可变荷载 Q_{1k} 考虑结构设计使用年限的调整系数，按表 1-1 取值；

ψ_{cj} ——第 j 个可变荷载的组合值系数，按现行《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 规定采用。

当作用与作用效应按线性关系考虑时，基本组合的效应设计值 S_d 按下式中最不利值计算：

$$S_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q_j} \gamma_{L_j} \psi_{cj} S_{Q_{jk}} \quad (1-9)$$

式中 $S_{G_{ik}}$ ——按第 i 个永久荷载标准值 G_{ik} 计算的荷载效应值；

$S_{Q_{jk}}$ ——按第 j 个可变荷载标准值 Q_{jk} 计算的荷载效应值，其中 $S_{Q_{1k}}$ 为各可变荷载效应中起控制作用者。

建筑结构考虑结构设计使用年限的荷载调整系数 γ_L

表 1-1

结构设计使用年限(年)	5	50	100
γ_L	0.9	1.0	1.1

注：对设计使用年限为 25 年的结构构件， γ_L 应按各种材料结构设计标准的规定采用。

对偶然设计状况应采用作用的偶然组合，对地震设计状况应采用作用的地震组合，其应符合的规定详见相关规范。

(2) 正常使用极限状态设计表达式

结构或结构构件按正常使用极限状态设计时，应符合下式要求：

$$S_d \leq C \quad (1-10)$$

式中 S_d ——正常使用极限状态下作用组合的效应值；

C ——设计对变形、裂缝等规定的相应限值，按相关结构设计规范的规定采用。

按正常使用极限状态设计时，宜根据不同情况采用作用的标准组合、频遇组合或准永久组合。标准组合宜用于不可逆正常使用极限状态；频遇组合宜用于可逆正常使用极限状态；准永久组合宜用于长期效应是决定性因素时的正常使用极限状态。

设计计算时，对正常使用极限状态的材料性能的分项系数，除各结构设计规范有专门规定外，应取为 1.0。

各组合的效应设计值 S_d 可分别按以下各式确定：

① 标准组合

标准组合的效应设计值 S_d 按下式确定：

$$S_d = S \left(\sum_{i \geq 1} G_{ik} + Q_{1k} + \sum_{j > 1} \psi_{cj} Q_{jk} \right) \quad (1-11)$$

当作用与作用效应按线性关系考虑时，标准组合的效应设计值 S_d 按下式计算：

$$S_d = \sum_{i \geq 1} S_{G_{ik}} + S_{Q_{1k}} + \sum_{j > 1} \psi_{cj} S_{Q_{jk}} \quad (1-12)$$

② 频遇组合

频遇组合的效应设计值 S_d 按下式确定：

$$S_d = S \left(\sum_{i \geq 1} G_{ik} + \psi_{f1} Q_{1k} + \sum_{j > 1} \psi_{qj} Q_{jk} \right) \quad (1-13)$$

当作用与作用效应按线性关系考虑时，频遇组合的效应设计值 S_d 按下式计算：

$$S_d = \sum_{i \geq 1} S_{G_{ik}} + \psi_{f1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j > 1} \psi_{qj} S_{Q_{jk}} \quad (1-14)$$

③ 准永久组合

准永久组合的效应设计值 S_d 按下式确定：

$$S_d = S \left(\sum_{i \geq 1} G_{ik} + \sum_{j \geq 1} \psi_{qj} Q_{jk} \right) \quad (1-15)$$

当作用与作用效应按线性关系考虑时，准永久组合的效应设计值 S_d 按下式计算：

$$S_d = \sum_{i \geq 1} S_{G_{ik}} + \sum_{j \geq 1} \psi_{qj} S_{Q_{jk}} \quad (1-16)$$

式中 ψ_{f1} ——可变荷载的频遇值系数，按现行《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 规定采用；

ψ_{qj} ——第 j 个可变荷载的准永久值系数，按现行《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 规定采用。

复习思考题

- 1-1 与其他材料的结构相比，钢结构有哪些特点？
- 1-2 简述钢结构的应用范围。
- 1-3 钢结构采用什么设计方法？其原则是什么？
- 1-4 什么是钢结构的承载能力极限状态、正常使用极限状态和耐久性极限状态？

第 2 章 钢结构的材料

2.1 钢材的主要力学性能

钢材的力学性能是指钢材在拉伸、冷弯和冲击作用下显示的强度、塑性、冷弯性能及韧性，可通过试验测定。试件的制作和试验方法要符合国家相关标准的规定。

2.1.1 强度

钢材的强度指标可通过拉伸试验获得。拉伸试验是将试件在常温下，通过拉力试验机或万能试验机由零开始缓慢加载直到试件被拉断，进行一次单向均匀的拉伸。如图 2-1 所示为拉伸试验得到的碳素结构钢应力-应变曲线示意图。图中纵坐标为试件截面的应力 σ （按变形前的截面积计算），横坐标为试件的应变 ϵ （ $\epsilon = \Delta L / L$ ， L 为试件原有标距段长度，一般取试件直径的 5 倍或 10 倍； ΔL 为标距段的伸长量）。从图 2-1 中可看出，钢材在单向拉伸的过程中主要经历如下几个阶段：

弹性阶段（OA 段）：当应力不超过 A 点，钢材处于弹性工作阶段，应力 σ 和应变 ϵ 成正比，符合虎克定律。A 点的应力称为比例极限，记为 f_p ，在这一阶段如果卸载，应力 σ 和应变 ϵ 将恢复为零。

弹塑性阶段（AB 段）：AB 段应力 σ 和应变 ϵ 不再保持直线变化，在这一阶段如果卸荷，应力降为零，但应变不能完全恢复，会产生残余应变。

屈服阶段（BC 段）：当应力达到 B 点后，即使荷载不增加但变形仍会持续增加，即发生了塑性流动，此时 σ - ϵ 曲线接近一水平线，B 点的应力称为屈服点，记为 f_y 。含碳量较高的钢材，拉伸试验时没有明显的屈服点，通常取残余应变为 0.2% 时的应力作为名义上的屈服点，记为 $f_{0.2}$ 。

硬化阶段（CD 段）：钢材在屈服阶段产生了较大的塑性变形，达到 C 点后又恢复继续承载的能力， σ - ϵ 曲线又开始上升，直到应力达到最大值（D 点），即钢材的抗拉强度 f_u 。

劲缩阶段（DE 段）：应力达到最大值 f_u 时，试件中部截面变细，形成颈缩现象， σ - ϵ 曲线开始下降直到试件被拉断（E 点）。

屈服点 f_y 和抗拉强度 f_u 是衡量钢材强度性能的重要指标， f_y / f_u 称为屈强比。设计时，取屈服点 f_y 作为钢材设计应力极限，并将 σ - ϵ 曲线简化为如图 2-2 所示的理想弹塑性模型，相当于把钢材看作理想的弹塑性体，即钢材应力小于 f_y 时是完全弹性的，超过 f_y 后则是完全塑性的。

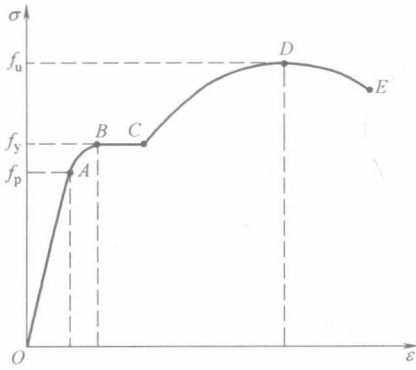


图 2-1 碳素结构钢材的应力-应变曲线

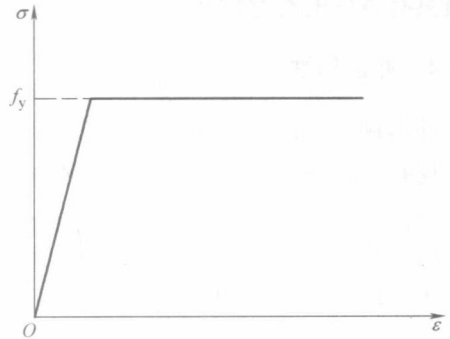


图 2-2 理想弹塑性材料的应力-应变曲线

2.1.2 塑性

通过钢材的拉伸试验，还可获得衡量钢材塑性性能的一个重要指标，即伸长率 δ ，表示钢材断裂前发生塑性变形的能力。 δ 值越大，表示钢材的塑性性能越好，有助于避免和降低钢结构发生脆性破坏的可能。

$$\delta = \frac{(L_1 - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中： L_0 和 L_1 分别为试件拉伸前和拉伸后的标距长度，如图 2-3 所示。当试件拉伸前标距长度与试件直径之比为 5 或 10 时，伸长率分别以 δ_5 、 δ_{10} 表示。

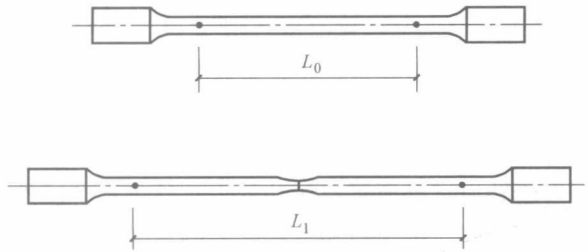


图 2-3 钢材拉伸试验的试件

拉伸试验过程中在应力小于抗拉强度 f_u 时，试件沿标距产生均匀拉伸变形，到劲缩阶段，均匀拉伸变形停止而代之以颈缩变形，颈缩变形在长试件和短试件中是相同的，因而同一钢材，由短试件求得的 δ_5 大于由长试件求得的 δ_{10} 。

2.1.3 冷弯性能

冷弯性能是鉴定钢材在弯曲状态下的弯曲变形性能和抗分层的性能，通过冷弯试验来确定。试验是将厚度为 a 的试件置于如图 2-4 所示支座上，在常温下加压使试件弯曲 180° ，如果试件表面不出现裂纹和分层等，即表示钢材冷弯性能合格。

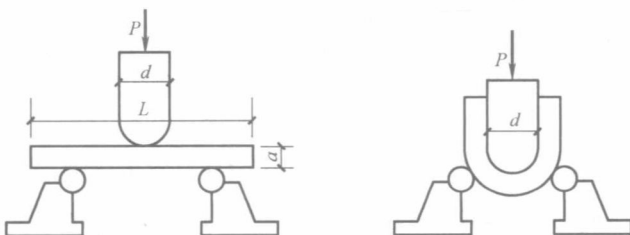


图 2-4 钢材的冷弯试验

弯心直径 d 随试验的钢材种类及其厚度不同，通常有 a 、 $1.5a$ 、 $2a$ 、 $2.5a$ 和 $3a$ 等。

冷弯性能是评估钢材质量优劣的一个综合性指标，不仅要求钢材具有必要的弯曲变形能力和塑性性能，同时还要求钢材中没有或极少有冶炼过程中产生的缺