



教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

土木工程专业系列教材

钢 结 构

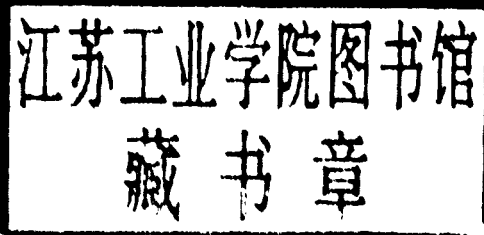
主编 丁 阳

天 津 大 学 出 版 社
中 央 广 播 电 视 大 学 出 版 社

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材
土木工程专业系列教材

钢 结 构

主编 丁 阳



天津大学出版社
中央广播电视大学出版社

内 容 提 要

本书是根据中央广播电视大学开放教育试点“工学科土建类土木工程专业”钢结构课程教学大纲以及钢结构多种媒体教材一体化设计方案编写的。全书共分 8 章,包括:概述、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、平面桁架、钢结构的制造。

本书主要讲述了钢结构的特点和设计方法、钢结构材料的工作性能、钢结构连接的计算和构造以及钢结构的基本构件(轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件)的工作性能、受力分析和设计要点等。各章附有计算和设计例题,章后习题类型多样,包括选择题、计算题和设计题,书后给出大量附表,以利于学生对基本概念的理解和对基本设计理论和方法的掌握,也便于学生自我考核。

本书是《土木工程专业系列教材》之一,结合《钢结构设计规范》GB 50017—2003 编写,可作为高等学校土木工程专业本科的专业基础教材,也可供从事土木工程的有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构/丁阳主编. —天津:天津大学出版社, 2005.1

ISBN 7-5618-1778-9

I. 钢… II. 丁… III. 钢结构—电视大学—教材

IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 138748 号

出版发行 天津大学出版社

中央广播电视大学出版社

出 版 人 杨风和

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(天津大学出版社)

北京市海淀区西四环中路 45 号(中央广播电视大学出版社)

网 址 www.tjup.com

电 话 营销部: 022—27403647 邮购部: 022—27402742 (天津大学出版社)

发行部: 010—68519502 读者服务部: 010—68511268 (中央广播电视大学出版社)

总编室: 010—68182524 (中央广播电视大学出版社)

印 刷 北京云浩印刷有限责任公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 210mm×297mm

印 张 16.25

字 数 520 千

版 次 2005 年 1 月第 1 版

印 次 2006 年 2 月第 2 次

印 数 3001~6000

定 价 23.00 元

土木工程专业课程建设

委员会名单

顾 问:	刘锡良	江见鲸	顾晓鲁		
策 划:	钱辉镜	杨风和	任 岩	陈家修	
主 任:	姜忻良				
副主任:	蒋克中	王铁成	刘兴业		
委 员:	丁 阳	丁红岩	于俊英	王 圻	王金敏
	方根男	刘宗仁	刘津明	包世华	罗福午
	孙天正	孙天杰	匡文起	李 杰	李林曙
	李砚波	李运光	任兴华	毕继红	严士超
	杨春风	陈永灿	陈忠良	吴铭磊	旷天鑑
	郑 刚	郑家扬	邹积明	何勇军	邵立国
	张晋元	张质文	陆培毅	周建宾	赵奎生
	赵 彤	赵铁生	常春伟	洪 钧	高学平
	黄世昌	康谷贻	韩庆华	温庆博	鄢小平
	魏鸿汉	戴自强			
秘 书:	郭 鸿	陈英蕙			

前 言

本教材是根据 2001 年 11 月审定的中央广播电视大学开放教育试点“工学科土建类土木工程专业”钢结构课程教学大纲以及 2002 年 3 月审定的钢结构多种媒体教材一体化设计方案编写的。本教材是《土木工程专业系列教材》之一。

开放教育是一种新型的远程教育模式，其培养对象主要是以业余学习为主的成人。在本教材编写过程中，充分考虑学生的学习环境、学习需要和学习方式，努力贯彻“以学生学习为中心”的现代教育理想，精选内容，理论联系实际，加强“导学”、“助学”功能，深入浅出，循序渐进，适应开放教育试点学生自学的需要，努力做到学以致用，培养学生分析问题和解决问题的能力。

钢结构课程多种媒体教材包括文字教材、录像教材、CAI 课件以及 IP 课件。四类教材充分发挥各自优势，取长补短，形成互补的较完善的综合性教材体系。录像教材，共计 12 讲（小时），突出对钢结构基本构件设计原理重点和难点的讲解与分析，形象直观，易于学生理解和掌握。CAI 课件的重点是钢结构自我检测练习，加强实践性教学环节，并通过自我检查，发现问题和不足，以便加强学习，不断提高学生分析问题和解决问题的能力。IP 课程共计 6 个专题、12 学时，强调钢结构课程内容的系统性，并通过例题的讲解，提高学生分析问题和解决问题的能力。本书是钢结构课程多种媒体教材的文字教材。

本书共分 8 章，包括：概述、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、平面桁架、钢结构制造。主要讲述了钢结构的特点和设计方法、钢结构材料的工作性能、钢结构连接的计算和构造以及钢结构的基本构件（轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件）的工作性能、受力分析和设计要点等。各章附有计算和设计例题，章后习题类型多样，包括选择题、计算题和设计题，书后给出大量附表，以利于学生对基本概念的理解和对基本设计理论和方法的掌握，也便于学生自我考核。

本书由太原理工大学尹德钰教授、天津大学刘锡良教授、任兴华教授审定，刘锡良教授主审。审定专家对本教材进行了认真的审阅，并提出了许多宝贵的建设性意见和建议。在教学大纲的制订、多种媒体教材一体化设计方案的设计以及本书的编写过程中，得到了天津大学刘锡良教授、清华大学石永久教授、哈尔滨工业大学张耀春教授等的大力支持，吸收了他们许多的宝贵经验、意见和建议，在此一并表示深深的谢意。

中央广播电视大学鄢小平老师做了本书的教学设计。

在本教材的编写过程中，直接或间接地引用了所列参考文献中的部分内容，谨致谢意。

由于作者理论水平有限，本书难免存在不足之处，敬请读者批评指教。

丁阳
2004 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 钢结构的特点	(1)
1.2 钢结构的设计方法	(2)
1.3 钢结构的应用和发展	(5)
第 2 章 钢结构的材料	(8)
2.1 钢结构对材料的要求	(8)
2.2 钢材的破坏形式	(9)
2.3 钢材的主要性能	(9)
2.4 各种因素对钢材主要性能的影响	(11)
2.5 复杂应力状态下钢材的屈服条件	(13)
2.6 钢材的疲劳	(14)
2.7 钢的种类和钢材的规格	(16)
第 3 章 钢结构的连接	(21)
3.1 钢结构的连接方法和特点	(21)
3.2 焊缝和焊接连接的形式	(23)
3.3 焊缝缺陷和质量检验	(25)
3.4 角焊缝的构造要求与强度计算	(27)
3.5 对接焊缝的构造要求和强度计算	(43)
3.6 焊缝质量等级的选用	(48)
3.7 焊接应力和焊接变形	(48)
3.8 螺栓和铆钉连接的排列和构造要求	(52)
3.9 普通螺栓连接的工作性能和计算	(54)
3.10 高强度螺栓连接的工作性能和计算	(64)
第 4 章 轴心受力构件	(74)
4.1 轴心受力构件的应用和截面形式	(74)
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	(75)
4.3 轴心受压构件的整体稳定	(77)
4.4 轴心受压构件的局部稳定	(87)
4.5 实腹式轴心受压构件的截面设计	(90)
4.6 格构式轴心受压构件的截面设计	(95)
4.7 轴心受压柱的柱头和柱脚	(102)
第 5 章 受弯构件	(110)
5.1 梁的类型和应用	(110)
5.2 梁的强度和刚度	(111)
5.3 梁的整体稳定	(115)
5.4 梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	(121)
5.5 考虑腹板屈曲后强度的组合梁承载力计算	(129)
5.6 型钢梁的设计	(133)
5.7 梁的拼接和连接	(138)
5.8 组合梁的设计	(143)

5.9 吊车梁设计特点	(151)
第 6 章 拉弯和压弯构件	(160)
6.1 拉弯和压弯构件的特点	(160)
6.2 拉弯和压弯构件的强度	(161)
6.3 实腹式压弯构件的整体稳定	(162)
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	(164)
6.5 压弯构件的计算长度	(166)
6.6 实腹式压弯构件的设计	(171)
6.7 格构式压弯构件的设计	(173)
6.8 框架的梁柱连接	(178)
6.9 偏心受压柱的柱脚设计	(178)
第 7 章 平面桁架	(186)
7.1 桁架的种类与应用	(186)
7.2 屋盖支撑	(190)
7.3 简支屋架设计	(194)
第 8 章 钢结构制造	(215)
8.1 钢结构的制造过程	(215)
8.2 钢结构制造对设计的要求	(219)
附录	(220)
附录 1 钢材和连接强度设计值	(220)
附录 2 受弯构件的挠度容许值	(222)
附录 3 梁的整体稳定系数	(223)
附录 4 轴心受压构件的稳定系数	(224)
附录 5 柱的计算长度系数	(228)
附录 6 疲劳计算的构件和连接分类	(231)
附录 7 型钢表	(233)
附录 8 螺栓和锚栓规格	(250)
参考文献	(251)

第1章 绪 论

学习目标

1. 了解钢结构同其他材料结构相比的特点。
2. 掌握钢结构的设计方法。

学习重点

1. 极限状态、失效概率的概念以及失效概率 p_f 与可靠指标 β 的关系。
2. 采用分项系数的设计表达式，各符号的意义。

1.1 钢结构的特点

钢结构是采用钢板、型钢通过连接而成的结构。钢结构和其他材料的结构相比具有如下特点。

(1) 建筑钢材强度高，塑性和韧性好

钢材与混凝土、砖石和木材等建筑材料相比，强度高很多，适用于建造跨度大、承载重的结构。但由于建筑钢材强度高，一般构件截面小而壁薄，受压时易为稳定承载力和刚度要求所控制，使强度难以得到充分的利用。建筑钢材塑性好，结构在一般条件下不会因超载而突然破坏。建筑钢材韧性好，结构适宜在动力荷载下工作，其良好的耗能能力和延性使钢结构具有优越的抗震性能。

钢材“塑性好”、“韧性好”的含义

(2) 钢结构的重量轻

钢材容重大，强度高，建造的结构比较轻。结构的轻质性可以用材料的质量密度和强度的比值来衡量，比值越小，结构相对越轻。以相同跨度的结构承受相同的荷载，钢屋架的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钢筋混凝土屋架的 $1/10$ 。

钢结构重量轻，为其安装、运输提供了便利条件，同时减轻基础的负荷，降低地基、基础部分的造价。

(3) 材质均匀，与力学计算的假定比较符合

钢材内部组织比较均匀，接近各向同性，且在一定的应力幅度内材料为弹性。因此，钢结构实际受力情况和工程力学计算结果比较符合，在计算中采用的经验公式不多，从而计算的不定性较小，计算结果比较可靠。另外，钢材在冶炼和轧制过程中质量可以严格控制，材质波动性小。

(4) 钢结构制作简便，施工工期短

钢结构所用材料皆已轧制成各种型材，由型材加工而成的构件一般是在金属结构厂制

作, 加工制作简便, 准确度和精密度均较高。钢构件较轻, 连接简单, 安装方便, 施工机械化, 周期短。钢结构由于螺栓连接的特性, 易于加固、改建和拆迁。

(5) 钢结构密闭性好

钢结构的材料和焊接连接的水密性和气密性较好, 适宜建造密闭的板壳结构, 如高压容器、油库、气柜、管道等。

(6) 钢结构耐腐蚀性差

钢材容易腐蚀, 对钢结构必须注意防护, 特别是薄壁构件, 因此, 处于较强腐蚀性介质内的建筑物不宜采用钢结构。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相关规范的要求。在设计中应避免使结构受潮、漏雨, 构造上应尽量避免存在难于检查、维修的死角。

(7) 钢材耐热但不耐火

钢材“耐热不
耐火”的含义

钢材受热时, 当温度在 200°C 以内时, 其主要力学性能 (如屈服点和弹性模量) 降低不多。温度超过 200°C 后, 材质发生较大变化, 不仅强度逐步降低, 还会发生蓝脆和徐变现象。温度达 600°C 时, 钢材进入塑性状态不能继续承载。因此, 《钢结构设计规范》规定钢材表面温度超过 150°C 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火保护措施。

(8) 钢结构可能发生脆性断裂

钢结构在低温和某些条件下, 可能发生脆性断裂或厚板的层状撕裂, 这些都应引起设计者的特别注意。

1.2 钢结构的设计方法

钢结构必须满足的功能包括:

①应能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种情况, 包括荷载和温度变化、基础不均匀沉降以及地震作用等;

②在正常使用情况下结构具有良好的工作性能;

③在正常维护下结构具有足够的耐久性;

④在偶然事件发生时及发生后仍能保持必需的整体稳定性。

结构计算的目的在于保证所设计的结构和构件满足预期的各种功能。因此, 结构的设计准则为: 结构由各种荷载所产生的效应 (内力和变形) 不大于结构和连接由材料性能和几何因素等所决定的抗力或规定限值。影响结构功能的各种因素都具有不定性, 为随机变量。因此, 荷载效应可能大于结构抗力, 结构不可能百分之百的可靠, 而只能对其作出一定的概率保证。

1.2.1 概率极限状态设计方法

1. 极限状态

“极限状态”
的概念

当结构或其组成部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求时, 此特定状态就称为该功能的极限状态。

钢结构的极限状态可以分为下列两类。

(1) 承载能力极限状态

承载能力极限状态包括构件和连接的强度破坏、疲劳破坏和因过度变形而不适于继续承载, 结构和构件丧失稳定, 结构转变为机动体系和结构倾覆。

(2) 正常使用极限状态

正常使用极限状态包括影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观的变形, 影响正常使用的振动, 影响正常使用或耐久性能的局部损坏 (包括混凝土裂缝)。

若结构设计时需要考虑 n 个影响结构可靠性的随机变量，例如材料抗力、几何参数、计算模式和各种作用产生的效应（内力）。各种作用包括恒载、各种可变荷载、地震作用、温度作用和支座沉陷等，则这 n 个随机变量之间通常可建立函数关系

$$Z = g(x_1, x_2, \cdots, x_n) \tag{1-1}$$

为了简化，只以结构构件的荷载效应 S 和抗力 R 两个基本随机变量表达结构的功能函数，即

$$Z = g(R, S) = R - S \tag{1-2}$$

在实际工程中，可能出现下列三种情况：① $Z > 0$ 时，结构处于可靠状态；② $Z = 0$ 时，结构达到临界状态，即极限状态；③ $Z < 0$ 时，结构处于失效状态。

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和规定的条件下，完成预定功能的概率。这里所指“完成预定功能”就是对于规定的某种功能结构不失效（ $Z \geq 0$ ）。若以 p_s 表示结构的可靠度，则上述定义可表达为

$$p_s = P(Z \geq 0) \tag{1-3}$$

结构的失效概率以 p_f 表示，则

$$p_f = P(Z < 0) \tag{1-4}$$

“结构失效概率”的概念

设 R 和 S 的概率统计值均服从正态分布（设计基准期取 50 年），可分别计算出它们的平均值 μ_R 、 μ_S 和标准差 σ_R 、 σ_S ，则结构功能函数 Z 也服从正态分布，它的平均值和标准差分别为

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \tag{1-5}$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{1-6}$$

式中： μ_R 、 μ_S 为抗力 R 和荷载效应 S 的平均值； σ_R^2 、 σ_S^2 为抗力 R 和荷载效应 S 的方差。

图 1-1 表示结构功能函数 $Z = R - S$ 的正态分布。图中由 $-\infty$ 到 0 的阴影面积表示 $Z < 0$ 的概率，即失效概率 p_f ，需采用积分法求得。由图可见，平均值 μ_Z 等于 $\beta\sigma_Z$ ， β 值和失效概率 p_f 存在着如下对应关系

$$p_f = \Phi(-\beta) \tag{1-7}$$

式中： $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

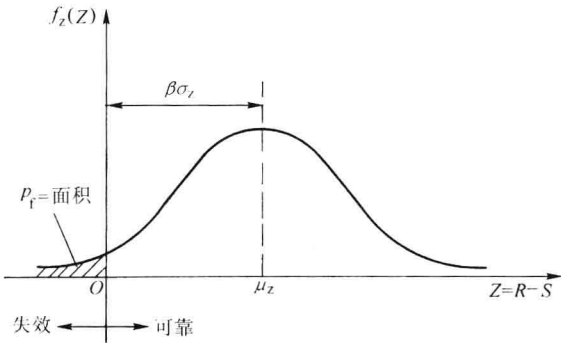


图 1-1 Z 的概率密度曲线

这样只要计算出 β 值就能得到对应的失效概率 p_f 。正态分布时， β 与 p_f 的对应关系如表 1-1 所示。 β 称为可靠指标，由下式计算

表 1-1 正态分布时 β 与 p_f 的对应值

可靠指标 β	4.5	4.2	4.0	3.7	3.5	3.2	3.0	2.7	2.5	2.0
失效概率	3.4	1.34	3.17	1.08	2.33	6.87	1.35	3.47	6.21	2.28
p_f	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$

p_f 和 β 的关系

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-8)$$

当 R 和 S 的统计值不按正态分布时, 可靠指标应以它们的当量正态分布的平均值和标准值代入式 (1-8) 计算。

由于 R 和 S 的实际分布规律相当复杂, 计算时采用典型的正态分布, 因而计算的 β 和 p_f 值是近似的, 故称为近似概率极限状态设计法。在推导 β 计算公式时, 只采用了 R 和 S 的二阶中心矩, 同时还进行了线性化的近似处理, 故又称“一次二阶矩法”。

这种计算方法只需知道 R 和 S 的平均值和标准差或变异系数, 就可计算安全指标 β 值, 使 β 值满足规定值即可。《建筑结构可靠度设计统一标准》按结构破坏类型 (延性或脆性破坏) 和安全等级 (根据破坏后果和建筑物类型分为一、二、三级) 分别规定了结构构件按承载能力极限状态设计时采用的不同的 β 值。钢结构的各种构件, β 值在 3.2 左右, 即 $\beta=3.2$, 属延性破坏, 安全等级为二级。

1.2.2 设计表达式

由上列分析可见, 概率极限状态设计方法比较复杂, 为了便于掌握, 采用广大设计人员所熟悉的分项系数设计公式。

《钢结构设计规范》除疲劳计算外, 采用以概率理论为基础的极限状态设计方法, 用分项系数的设计表达式进行计算。对于简单的荷载情况, 分项系数设计式可写成

$$\frac{R_k}{\gamma_R} \geq \gamma_G S_{G_k} + \gamma_Q S_{Q_k} \quad (1-9)$$

式中: R_k 为抗力标准值; S_{G_k} 为按标准值计算的永久荷载 (G) 效应值; S_{Q_k} 为按标准值计算的可变荷载 (Q) 效应值; γ 为分项系数。

经过计算和分析, 《建筑结构可靠度设计统一标准》规定, 在一般情况下荷载分项系数

$$\begin{aligned} \gamma_G &= 1.2 \\ \gamma_Q &= 1.4 \end{aligned} \quad (1-10)$$

当永久荷载效应与可变荷载效应异号时, 这时永久荷载对设计有利, 应取

$$\begin{aligned} \gamma_G &= 1.0 \\ \gamma_Q &= 1.4 \end{aligned} \quad (1-11)$$

在荷载分项系数统一规定的条件下, 《钢结构设计规范》对钢结构构件抗力分项系数进行分析, 使所设计的结构构件的实际 β 值与预期的 β 值差值甚小, 并结合工程经验, 规定 Q235 钢的 $\gamma_R = 1.087$; Q345、Q390 和 Q420 钢的 $\gamma_R = 1.111$ 。

钢结构设计用应力表达, 采用钢材强度设计值。强度设计值 f 是钢材的屈服点 f_y 除以抗力分项系数 γ_R , 如 Q235 钢抗拉强度设计值为 $f = f_y / \gamma_R = f_y / 1.087$; 对于端面承压强度设计值则为抗拉强度 f_u 除以抗力分项系数 γ_{Ru} , 即 $f = f_u / \gamma_{Ru} = f_u / 1.538$ 。

强度设计值

因此, 对于承载能力极限状态荷载效应的基本组合, 应按下列设计表达式中最不利值确定:

可变荷载效应控制的组合

采用分项系数的设计表达式

$$\gamma_0 \left(\gamma_G \sigma_{G_k} + \gamma_{Q_1} \sigma_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} \sigma_{Q_{ik}} \right) \leq f \quad (1-12)$$

永久荷载效应控制的组合

$$\gamma_0 \left(\gamma_G \sigma_{G_k} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} \sigma_{Q_{ik}} \right) \leq f \quad (1-13)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数 (对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件, 不应小于 1.1; 对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件, 不应小于 1.0; 对安全等级为三级或设计使用年限为 5 年的结构构件, 不应小于 0.9); σ_{G_k} 为永久荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力; $\sigma_{Q_{1k}}$ 为起控制作用的第一个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力 (该值使计算结果为最大); $\sigma_{Q_{ik}}$ 为其他第 i 个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力; γ_G 为永久荷载分项系数 (当永久荷载效应对结构构件的承载力不利时取 1.2, 但对式 (1-11) 则取 1.35; 当永久荷载效应对结构构件的承载力有利时取 1.0; 验算结构倾覆、滑移或漂浮时取 0.9); γ_{Q_1} , γ_{Q_i} 为第 1 个和其他第 i 个可变荷载分项系数 (当可变荷载效应对结构构件的承载力不利时取 1.4, 有利时取为 0); ψ_{ci} 为第 i 个可变荷载组合值系数, 按《建筑结构荷载规范》的规定取用。

以上两式, 除第一个可变荷载的组合值系数 $\psi_{c1} = 1.0$ 的楼盖 (例如仪器车间仓库、金工车间、轮胎厂准备车间、粮食加工车间等的楼盖) 或屋盖 (高炉附近的屋面积灰) 必然由式 (1-13) 控制设计, 取 $\gamma_G = 1.35$ 外, 其他只有大型混凝土屋面板的重型屋盖以及很特殊情况才有可能由式 (1-13) 控制设计。

对于一般排架、框架结构, 可采用下列简化式计算:

由可变荷载效应控制的组合, 按下式计算

$$\gamma_0 \left(\gamma_G \sigma_{G_k} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \sigma_{Q_{ik}} \right) \leq f \quad (1-14)$$

式中: ψ 为简化式中采用的荷载组合值系数, 一般情况下可采用 0.9; 当只有一个可变荷载时取 1.0。

由永久荷载效应控制的组合, 仍按式 (1-13) 进行计算。

对于正常使用极限状态, 钢结构只考虑荷载的标准组合, 其设计式为

$$v_{G_k} + v_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Q_{ik}} \leq [v] \quad (1-15)$$

式中: v_{G_k} 为永久荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值; $v_{Q_{1k}}$ 为起控制作用的第一个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值 (该值使计算结果为最大); $v_{Q_{ik}}$ 为其他第 i 个可变荷载标准值在结构或结构构件中产生的变形值; $[v]$ 为结构或结构构件的容许变形值。

设计表达式中
荷载分项系数的
取值

采用荷载的标
准值进行计算

1.3 钢结构的应用和发展

1.3.1 钢结构的应用

钢结构由于其自身的特点和结构形式的多样化, 随着我国国民经济的迅猛发展, 其应用范围越来越广泛。

在工业与民用建筑中钢结构的应用范围包括如下几方面。

(1) 工业厂房

吊车起重量较大或工作较繁重的车间多采用钢骨架。如冶金厂房的平炉和转炉车间、混铁炉车间和初轧车间; 重型机械厂的铸钢车间、水压机车间和锻压车间等。

近年来随着空间网架的大量应用, 一般的工业车间也采用了钢结构。

(2) 大跨结构

如飞机装配车间、飞机库、煤棚、会展中心、体育馆和展览馆等皆需大跨结构。结构体系可为网架、悬索、拱架以及框架等。

(3) 高耸结构

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、无线电天线桅杆和广播发射桅杆等。

(4) 多层和高层建筑

多层和高层建筑的骨架采用钢结构。近年来钢结构在此领域已逐步得到发展。

(5) 承受振动荷载影响及地震作用的结构

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,可采用钢结构。对于抗地震作用要求高的结构也宜采用钢结构。

(6) 板壳结构

油库、油罐、煤气库、高炉、热风炉、料斗、烟囱、水塔以及各种管道等均采用板壳结构。

(7) 其他结构

其他结构还包括栈桥、管道支架、井架和海上采油平台等结构。另外钢结构也广泛应用于跨度大、结构形式新颖的桥梁结构。

(8) 可拆卸或移动的结构

建筑工地的生产、生活附属用房和临时展览馆等,这些结构是可拆迁的;塔式起重机、履带式起重机的吊臂和龙门起重机等,这些结构是移动的,都采用钢结构。

(9) 轻型钢结构

轻型钢结构包括轻型门式刚架房屋钢结构、冷弯薄壁型钢结构以及钢管结构等。这些结构可用于荷载较轻或跨度较小的建筑。

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等,并向住宅和别墅发展。

(10) 钢-混凝土组合结构

钢-混凝土组合结构包括钢-混凝土组合梁和钢管混凝土柱等。

1.3.2 钢结构的发展

1949年新中国成立以后,随着经济建设的发展,钢结构得到一定程度的应用。但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。几个大型钢铁联合企业如鞍山、武汉、包头等钢厂的炼钢、轧钢、连铸车间等都采用钢结构。在公共建筑中以平板网架应用最多,1975年建成的上海体育馆采用三向网架,跨度已达110 m。1962年建成的北京工人体育馆采用圆形双层辐射式悬索结构,直径为94 m。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80 m,短轴60 m。武汉和南京长江大桥都采用了铁路公路两用双层钢桁架桥。广州、上海等地都建造了高度超过200 m的多边形空间钢桁架电视塔。

1978年改革开放以后,经济建设有了突飞猛进的发展,钢结构也有了前所未有的发展,应用的领域有了较大的扩展。高层和超高层房屋、多层房屋、单层轻型房屋、体育场馆、大跨度会展中心、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。目前已建和在建的高层和超高层钢结构已有30余幢,其中地上88层、地下3层、高365 m的上海金茂大厦的建成,标志着我国的超高层钢结构已进入世界前列。在大跨度建筑和单层工业厂房中,网架、网壳等结构的广泛应用,已受到世界各国的瞩目。1994年建成的天津体育馆屋盖采用圆形平面球形网壳,直径已达108 m。1996年建成的嘉兴电厂干煤棚采用矩形平面三心圆柱面网壳,跨度为103.5 m。1988年建成的长春体育馆采用错边蚌型网壳结构,平面为120 m×160 m。在大跨度空间结构中,上海体育馆马鞍形环形大悬挑空间钢结构屋盖和上海浦东国际机场航站楼张弦梁屋盖钢结构的建成,更标志着我国的大跨度空间钢结构已进入世界先进行列。

在桥梁方面, 钢结构的应用更是举世瞩目。1994年建成的铁路、公路两用的双层九江长江大桥, 其中主联跨长 $(180+216+180)$ m, 并用柔性拱加劲。1995年建成的上海市杨浦大桥, 采用双塔双索面斜拉桥, 主跨跨长为620 m。1999年建成的江阴长江大桥, 主跨采用悬索桥, 跨长1 385 m。这些桥梁的建成标志着我国已有能力建造多种形式的现代化的桥梁。

1996年我国钢产量已是世界第一, 年产量超过1亿吨。钢材质量及钢材规格也已能满足建筑钢结构的要求。1997年由建设部颁发的《中国建筑技术政策》(1996—2010年)中也明确提出了发展钢结构的要求。市场经济的发展与不断成熟更为钢结构的发展创造了条件。因此, 我国钢结构正处于迅速发展的前期。

随着2008年北京奥运会和2010年上海世博会的召开, 钢结构在我国必定进入一个更加快速发展的时期, 但是还存在一些新的问题亟待解决。

(1) 高性能钢材的应用

逐步发展高强度低合金钢材, 除Q235钢、Q345钢外, Q390钢和Q420钢在钢结构中的应用尚有待进一步研究, 并应不断研制新品种的钢材。

(2) 钢结构设计方法的改进

概率极限状态设计方法还有待发展, 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, 同时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。结构的优化设计问题也有待进一步研究。

(3) 结构形式的革新

促进结构形式改革的重要因素之一是推广高强钢索的应用, 如索膜结构和张拉整体结构的出现。钢-混凝土组合结构的应用也日益推广, 但结构的革新仍有待进一步发展。

(4) 钢结构的加工制造

钢结构制造工业的机械化水平还需要进一步提高。

习 题

1. 目前我国钢结构设计, _____。
 - (A) 全部采用以概率理论为基础的近似概率极限状态设计方法
 - (B) 采用分项系数表达的极限状态设计方法
 - (C) 除疲劳计算按容许应力幅、应力按弹性状态计算外, 其他采用以概率理论为基础的近似概率极限状态设计方法
 - (D) 部分采用弹性方法, 部分采用塑性方法
2. 按承载力极限状态设计钢结构时, 应考虑_____。
 - (A) 荷载效应的基本组合
 - (B) 荷载效应的标准组合
 - (C) 荷载效应的基本组合, 必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合
 - (D) 荷载效应的频遇组合
3. 在结构设计中, 失效概率 p_f 与可靠指标 β 的关系为_____。
 - A. p_f 越大, β 越大, 结构可靠性越差
 - B. p_f 越大, β 越小, 结构可靠性越差
 - C. p_f 越大, β 越小, 结构越可靠
 - D. p_f 越大, β 越大, 结构越可靠

答案: 1. (C) 2. (C) 3. (B)

第 2 章 钢结构的材料

学习目标

1. 掌握钢结构对材料的基本要求以及常用建筑钢材的钢种、钢号。
2. 理解钢材的塑性破坏和脆性断裂。
3. 掌握钢材的主要性能指标，了解影响钢材主要性能的因素。
4. 掌握钢材疲劳破坏的概念和疲劳强度验算。

学习重点

1. 钢材的屈服点、抗拉强度、伸长率、冷弯性能和冲击韧性。
2. 化学成分碳、硫、磷对钢材性能的影响。
3. 钢材疲劳破坏的概念和疲劳强度验算。
4. 钢结构常用钢材的钢种和钢号。

2.1 钢结构对材料的要求

用作钢结构的钢材必须符合下列要求。

(1) 较高的强度

较高的强度是指具有较高的抗拉强度 f_u 和屈服点 f_y 。 f_y 是衡量结构承载能力的指标， f_y 高可减轻结构自重，节约钢材和降低造价； 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 f_u 高可以增加结构的安全保障。

(2) 足够的变形能力

足够的变形能力是指具有较好的塑性和韧性。塑性好，结构在静载和动载作用下具有足够的应变能力，可减轻结构脆性破坏的倾向，同时可通过较大的塑性变形调整局部应力。韧性好，结构具有较好的抵抗重复荷载作用的能力。

(3) 良好的工艺性能

良好的工艺性能包括冷加工、热加工和可焊性能。良好的工艺性能不但易于加工成各种形式的结构，而且不致因加工而对结构的强度、塑性和韧性等造成较大的不利影响。

此外，根据结构的具体工作条件，有时还要求钢材具有适应低温、腐蚀性环境和疲劳荷载作用的能力。

2.2 钢材的破坏形式

钢材具有两种性质完全不同的破坏形式，即塑性破坏和脆性破坏。

塑性破坏是由于变形过大，超过了材料或构件可能的应变能力而产生的，而且仅在构件的应力达到了钢材的抗拉强度 f_u 后才发生，破坏前构件产生较大的塑性变形。在塑性破坏前，构件发生较大的塑性变形，且变形持续的时间较长，容易及时发现而采取补救措施，不致引起严重后果。另外，塑性变形后出现内力重分布，使结构中原先受力不等的部分应力趋于均匀，因而提高了结构的承载能力。

脆性破坏前塑性变形很小，甚至没有塑性变形，计算应力可能小于钢材的屈服点 f_y ，断裂从应力集中处开始。冶金和机械加工过程中产生的缺陷，特别是缺口和裂纹，常是断裂的发源地。破坏前没有任何预兆，破坏是突然发生的。由于脆性破坏前没有明显的预兆，无法及时察觉和采取补救措施，而且个别构件的断裂常会引起整体结构塌毁，后果严重，损失较大。因此，在设计、施工和使用过程中，应特别注意防止钢结构的脆性破坏。

塑性破坏的概念

念

脆性破坏的概念

念

2.3 钢材的主要性能

2.3.1 单向均匀拉伸时钢材的性能

钢材标准试件在常温、静载情况下，单向均匀受拉试验时的应力—应变 ($\sigma - \epsilon$) 曲线如图 2-1 所示。由此曲线可获得钢材的性能指标。

1. 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，这时应力可由弹性模量 E 定义，即 $\sigma = E\epsilon$ ，而 $E = \tan \alpha$ ， P 点应力 f_p 称为比例极限。

曲线 PE 段仍具有弹性，但呈非线性，即为非线性弹性阶段，这时的模量称为切线模量， $E_t = d\sigma/d\epsilon$ 。 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。

屈服点 f_y

随着荷载的增加，曲线出现 ES 段，这时表现为非弹性性质，即卸荷曲线成为与 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，出现明显的屈服台阶 SC 段，即在应力保持不变的情况下，应变继续增加。

高强度钢没有明显的屈服点和屈服台阶（图 2-2）。这类钢的屈服条件是根据试验分析结果人为规定的，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% 所对应的应力定义的，可用 $f_{0.2}$ 表示。

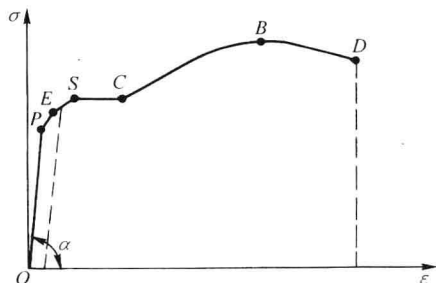


图 2-1 碳素结构钢的应力—应变曲线

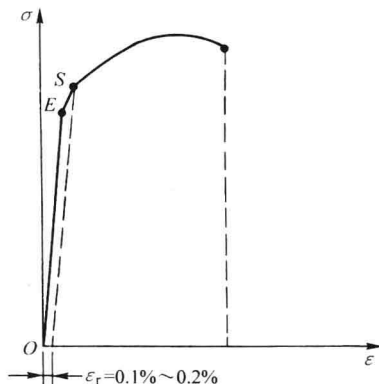


图 2-2 高强度钢的应力—应变曲线

抗拉强度 f_u

如图 2-1 所示，超过屈服台阶，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 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. 塑性性能

伸长率 δ

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 δ_{10} 表示；当比值为 5 时，以 δ_5 表示。伸长率代表材料在单向拉伸时的塑性应变的能力。

3. 钢材物理性能指标

钢材受剪物理性能指标不同于受拉、受压的物理性能指标

钢材在单向受压（粗而短的试件）时，受力性能基本和单向受拉时相同。受剪的情况也相似，但屈服点 f_{vy} 及抗剪强度 f_{vu} 均较受拉时小，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 α 和质量密度 ρ 列于表 2-1。

表 2-1 钢材和钢铸件的物理性能指标

弹性模量 E (MPa)	剪变模量 G (MPa)	线性膨胀系数 α (以每℃计)	质量密度 ρ (kg/m ³)
206×10^3	79×10^3	12×10^{-6}	7 850

冷弯性能指标的定义

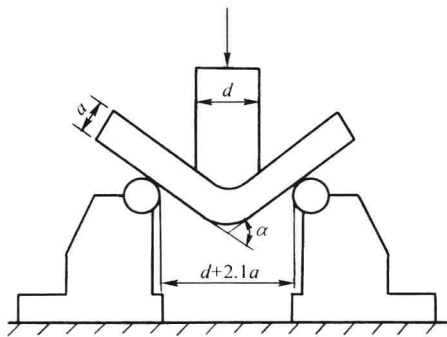


图 2-3 钢材冷弯试验示意图

2.3.2 冷弯性能

冷弯性能由冷弯试验确定（图 2-3）。试验时按照有关规定的弯心直径在试验机上采用冲头加压，使试件弯成 180°，如试件外表面不出现裂纹和分层，即为合格。冷弯试验不仅能直接检验钢材的弯曲变形能力和塑性性能，还能检验钢材内部的冶金缺陷。因此，冷弯性能是鉴定钢材在弯曲状态下的塑性应变能力和钢材质量的综合指标。

2.3.3 冲击韧性

冲击韧性指标的意义

拉伸试验所表现的钢材性能（如强度和塑性性能）属于静力性能，而韧性试验则可获得钢材的一种动力性能。韧性是钢材抵抗冲击荷载的能力，它用材料断裂时所吸收的总能量量度，其值为图 2-1 中 $\sigma-\epsilon$ 曲线与横坐标所包围的总面积，总面积愈大韧性愈高，故韧性是钢材强度和塑性性能的综合指标。通常钢材强度提高，韧性降低，表示钢材趋于脆性。

国家标准《碳素结构钢》规定采用国际上通用的夏比（Charpy）V 形缺口试件（图 2-4）在夏比试验机上进行试验，试件折断消耗的功用 C_v 表示，单位为 J。

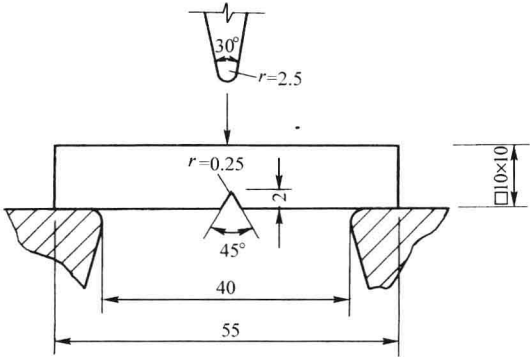


图 2-4 冲击韧性试验的示意图