

普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材

# 钢结构设计原理

## 学习指导与习题精解

丁南宏 孙建琴 主编



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材

# 钢结构设计原理 学习指导与习题精解

丁南宏 孙建琴 主编

中国铁道出版社

2012年·北京

## 内 容 简 介

本书为高等院校土木工程专业教材《钢结构设计原理》的学习指导书,主要包括:钢结构特点、应用和计算方法,钢材材料性能及选用,钢结构的连接构造及设计方法,钢结构基本构件(轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件)的工作性能 and 设计方法等,前6章均由基本要求、学习要点、习题及习题参考答案四部分组成,通过某一钢屋架设计达到知识的融会贯通,并在书的最后附有两套模拟试题以供自测。

本书可作为高等院校土木工程类、工程管理类及建筑类专业学生的学习指导书,也可作为上述专业的成人继续教育、网络教育及专业技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理学习指导与习题精解/丁南宏,孙建琴

主编. —北京:中国铁道出版社,2012.2

普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-113-14170-7

I. ①钢… II. ①丁… ②孙… III. ①钢结构—结构设计—高等学校—教学参考资料 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 012398 号

书 名: 钢结构设计原理学习指导与习题精解

作 者: 丁南宏 孙建琴 主编

---

责任编辑: 李丽娟

编辑部电话: (010) 51873135

电子信箱: llj704@163.com

封面设计: 冯龙彬

责任校对: 孙 玫

责任印制: 李 佳

---

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 三河市华业印装厂

版 次: 2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 13 字数: 325 千

书 号: ISBN 978-7-113-14170-7

定 价: 25.00 元

---

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话: 市电 (010) 51873170, 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504, 路电 (021) 73187

# 前言

“钢结构设计原理”为土木工程专业的专业基础课,根据大土木专业的教学计划,分配给本门课程的学时数往往较少;另外,它又是一门实践性很强且与规范密切相关的课程,学习者普遍感到“内容多、公式多、概念多、理论强,规范条文多”,学习中容易出现概念不清、公式理解不透、计算步骤掌握不好的情况。针对上述情况,编者以现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)为依据,特编写此学习指导书。

为了使学生全面而又重点地掌握基本概念、原理和方法,提高学生分析问题与解决问题的能力,编者根据教学大纲的要求,将本课程要求掌握的知识点通过各章基本要求、学习要点、习题及习题参考答案等形式反映出来。基本要求使学习有的放矢,学习要点使学习事半功倍,习题使知识点以不同角度重现,在计算题参考答案中增加点评环节,以期达到举一反三的效果。

本书共分七章,前六章主要为钢结构连接设计及各类基本构件设计的基本概念、基本原理和基本方法,第七章为某一钢屋架设计,是前六章知识的综合运用。此外,本书附有两组模拟试题,供读者自测之用。

参加本书编写的有丁南宏(第一、二、三章)、孙建琴(第四、七章)、李伟(第五、六章和模拟题),本书由丁南宏、孙建琴主编。在编写本书的过程中,参考了许多专家学者的著作,部分习题选自苏彦江老师的供稿,研究生廖伟华为本书的文字和插图的输入做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中仍难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2012年1月

# 目 录

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第一章 钢结构概述 .....  | 1   |
| 一、基本要求 .....     | 1   |
| 二、学习要点 .....     | 1   |
| 三、习题 .....       | 4   |
| 四、习题参考答案 .....   | 7   |
| 第二章 钢结构的材料 ..... | 9   |
| 一、基本要求 .....     | 9   |
| 二、学习要点 .....     | 9   |
| 三、习题 .....       | 15  |
| 四、习题参考答案 .....   | 20  |
| 第三章 钢结构的连接 ..... | 24  |
| 一、基本要求 .....     | 24  |
| 二、学习要点 .....     | 24  |
| 三、习题 .....       | 37  |
| 四、习题参考答案 .....   | 49  |
| 第四章 轴心受力构件 ..... | 67  |
| 一、基本要求 .....     | 67  |
| 二、学习要点 .....     | 67  |
| 三、习题 .....       | 82  |
| 四、习题参考答案 .....   | 90  |
| 第五章 受弯构件 .....   | 110 |
| 一、基本要求 .....     | 110 |
| 二、学习要点 .....     | 110 |
| 三、习题 .....       | 120 |
| 四、习题参考答案 .....   | 129 |
| 第六章 偏心受力构件 ..... | 143 |
| 一、基本要求 .....     | 143 |
| 二、学习要点 .....     | 143 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 三、习题 .....               | 150        |
| 四、习题参考答案 .....           | 158        |
| <b>第七章 普通钢屋架设计</b> ..... | <b>168</b> |
| 一、设计资料 .....             | 168        |
| 二、荷载计算 .....             | 170        |
| 三、屋架杆件内力计算 .....         | 170        |
| 四、屋架杆件截面设计 .....         | 171        |
| 五、屋架节点设计 .....           | 178        |
| 六、檩条设计 .....             | 187        |
| <b>模拟题 A</b> .....       | <b>191</b> |
| <b>模拟题 A 题解</b> .....    | <b>193</b> |
| <b>模拟题 B</b> .....       | <b>197</b> |
| <b>模拟题 B 题解</b> .....    | <b>199</b> |
| <b>参考文献</b> .....        | <b>202</b> |

# 第一章

## 钢结构概述

### 一、基本要求

掌握钢结构的特点,正确理解钢结构的合理应用范围及组成原理,了解近似概率极限状态设计方法的概念,理解规范采用的基本设计表达式,了解各分项系数取值的依据和含义,了解钢结构的发展。

本章重点为钢结构的特点和应用,荷载和材料的强度取值;难点为钢结构的极限状态和概率极限状态。

### 二、学习要点

#### (一)钢结构的特点和应用范围

##### 1. 特点

钢材轻质高强,塑性和韧性好;材质均匀,和力学计算的假定比较符合,安全可靠度高;生产、安装工业化程度高,施工周期短;钢材具有可焊性,密闭性能好;具有一定的耐热性;钢结构容易加固维修、拆卸或改建。由于钢材易锈蚀,因而钢结构有维护费用高的缺点;另外,钢结构还有低温下易脆断、动载作用下噪声大及防火性差、价格昂贵等缺点。

##### 2. 合理应用范围

钢结构适合用于高耸结构和高层结构,大跨度结构,重型厂房结构,承受动力荷载作用的结构,可拆卸结构,轻型钢结构,容器及其他构筑物。可概括为“高、大、重、特、轻”等五类结构。

#### (二)钢结构的建造过程及其初始缺陷

##### 1. 建造过程

钢结构的建造由工厂加工制造和工地安装两个过程组成。工厂加工制造:原材料的验收,放样和下料,冷热加工,必要的矫正,除锈和涂漆。工地安装:拼装子结构,吊装,临时固定,原材料的验收,放样和下料,冷热加工,必要的矫正,除锈和涂漆。

##### 2. 初始缺陷

包括几何缺陷(初弯曲、初偏心、杆件长度误差等)和材料缺陷(弹性模量、极限强度等力学参数的非均匀性,残余应力等)。

#### (三)钢结构的组成

(1)按照构建方式或力学计算模型的不同,可将钢结构分为平面结构和空间结构两大类。如单层厂房是典型的平面结构,网壳是典型的空间结构。

(2)钢结构的组成可划分为基本结构和附属结构,其中基本结构一般是平面承重结构,如屋盖桁架(屋架)、柱、主桁架等,附属结构包括纵向构件及各种支撑、联结系等。随着大跨度空间结构体系的发展,钢结构的基本结构逐渐发展为空间承重结构。

(3)任何一种钢结构都是由拉杆、压杆、梁、板、柱、桁架、拉索等基本构件按一定方式主要

通过焊接或螺栓连接组成的空间几何不变体系。

#### (四) 钢结构的近似概率极限状态设计法

##### 1. 作用及作用效应

施加在结构上的集中力或分布力(直接作用,也称为荷载)和引起结构外加变形或约束变形的原因(间接作用)通称为作用。按作用随时间的变异性可分为永久作用、可变作用和偶然作用;按结构的反应特点可将作用分为静态作用和动态作用。

由作用引起的结构或构件的反应(如内力、变形和裂缝等)称为作用效应( $S$ )。当结构的变形对其作用效应的影响不大时,可按结构的原始位形进行作用效应的分析,称为一阶分析;反之,应在作用效应的分析中计及变形的影响,称为二阶分析,如钢结构的稳定问题。

##### 2. 抗力

结构或构件承受作用效应的能力(如承载力等)称为抗力( $R$ )。影响结构或构件抗力的随机因素主要有:加工、承载、环境等因素导致的材质变异(材料性能的变异性);制作尺寸偏差和安装误差等因素导致的几何参数的变异(几何参数的变异性);抗力计算所采用的基本假设或计算公式的变异(计算模式的变异性)。

##### 3. 极限状态

若结构或结构的某一部分超过某一特定的状态就不能完成某预定的功能,则此特定的状态就称为该功能的极限状态。极限状态是区分结构可靠状态与失效状态的界限。

在现行极限状态设计法中,由作用效应和抗力的平衡关系,引入两类极限状态:承载能力极限状态和正常使用极限状态。

(1) 承载能力极限状态:结构或构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形,包括倾覆、强度破坏、疲劳破坏、丧失稳定、结构变为机动体系或出现过度的变形。

(2) 正常使用极限状态:结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值,包括出现影响正常使用(或外观)的变形、振动和局部破坏等。

极限状态方程可写为  $Z = g(R, S) = R - S = 0$ 。

##### 4. 结构可靠性、可靠度和失效概率

结构可靠性是结构安全性、适用性和耐久性的总称。可靠度则是可靠性的一种度量。结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率称为可靠度( $P_r = P\{R - S > 0\}$ );结构不能完成预定功能的概率称为失效概率( $P_f = P\{R - S < 0\}$ )。

##### 5. 可靠指标和目标可靠指标

(1) 可靠指标。在结构的抗力和作用都服从正态分布时,失效概率可表示为

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1-1)$$

式中  $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数。

相应于  $P_f$  的参数  $\beta$  称为可靠指标。

(2) 目标可靠指标。目标可靠指标是指为使结构既安全可靠,又经济合理,规范或标准规定的最低可靠指标。目标可靠指标可根据各种结构的重要性及失效后果以优化方法分析确定,亦可采用风险水平类比法或校准法确定。我国现行钢结构设计规范采用校准法确定结构的目标可靠指标。

##### 6. 极限状态设计表达式

(1) 承载能力极限状态设计表达式

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1-2)$$

式中  $\gamma_0$ ——结构重要性系数,分别依建筑结构的安全等级取为:1.1(一级)、1.0(二级)和

0.9(三级);

$R$ ——抗力;

$S$ ——作用效应的组合值,通常应考虑基本组合,必要时尚应考虑偶然组合。

基本组合(强制性要求)包括由可变荷载效应控制的组合和由永久荷载效应控制的组合。

由可变荷载效应控制的组合:

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1-3)$$

由永久荷载效应控制的组合:

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1-4)$$

式中  $\gamma_G$ 、 $\gamma_{Qi}$ ——永久荷载和第  $i$  个可变荷载的分项系数;

$S_{Gk}$ 、 $S_{Qik}$ ——相应于永久荷载和第  $i$  个可变荷载标准值的荷载效应;

$n$ 、 $\psi_{ci}$ ——参与组合的可变荷载数和第  $i$  个可变荷载的组合值系数。

(2)正常使用极限状态设计表达式

$$S \leq C \quad (1-5)$$

式中  $C$ ——结构或构件达到正常使用要求的规定限值,可以是变形、裂缝、振幅、加速度,甚至应力等的限值。

通常应考虑  $S$  的标准组合,对于钢与混凝土组合梁尚应考虑准永久组合。

标准组合:

$$S = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1-6)$$

准永久组合:

$$S = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (1-7)$$

式中  $\psi_{qi}$ ——第  $i$  个可变荷载的准永久值系数。

(五)钢结构荷载和材料强度代表值取值规定

### 1. 钢结构荷载代表值取值规定

《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)(本书中简称为《钢规》)规定:计算结构或构件的强度、稳定性以及连接的强度时,应采用荷载设计值(荷载标准值乘以荷载分项系数);计算疲劳和正常使用极限状态的变形时,应采用荷载标准值。

对于直接承受动力荷载的结构:在计算强度和稳定性时,动力荷载设计值应乘以动力系数;在计算疲劳和变形时,动力荷载标准值不乘动力系数。

计算吊车梁或吊车桁架及其制动结构的疲劳和挠度时,吊车荷载应按作用在跨间内荷载效应最大的一台吊车确定。

### 2. 钢结构材料强度代表值取值规定

材料的强度设计值为材料强度标准值除以抗力分项系数。计算下列情况的结构构件或连接时,强度设计值应乘以相应的折减系数。

(1)单面连接的单角钢;

①按轴心受力计算强度和连接时,折减系数取 0.85。

②按轴心受压计算稳定性时,对于等边角钢,折减系数取  $0.6 + 0.0015\lambda$ ,但不大于 1.0;对于短边相连的不等边角钢,折减系数取  $0.5 + 0.0025\lambda$ ,但不大于 1.0;对于长边相连的不等

边角钢折减系数取 0.7。上述计算中  $\lambda$  为长细比,对中间无联系的单角钢压杆,应按最小回转半径计算,当  $\lambda < 20$  时,取  $\lambda = 20$ 。

- (2) 无垫板的单面施焊对接焊缝,折减系数取 0.85;
  - (3) 在施工条件较差的高空进行焊缝和铆钉连接时,折减系数取 0.9;
  - (4) 沉头和半沉头铆钉连接,折减系数取 0.8。
- 当几种情况同时存在时,其折减系数应连乘。

### 三、习 题

#### (一) 填空题

1. 在我国现行钢结构设计规范中,当计算结构的强度、稳定性及连接的强度时,应采用荷载的\_\_\_\_\_,当计算疲劳和变形时,应采用荷载的\_\_\_\_\_。
2. 我国钢结构设计方法除疲劳计算外,采用以\_\_\_\_\_为基础、\_\_\_\_\_表达的极限状态设计法,并将极限状态分为\_\_\_\_\_极限状态和\_\_\_\_\_极限状态。
3. 钢结构设计的基本要求是\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
4. 度量结构可靠性的指标是\_\_\_\_\_,在现行的结构设计中,常常用\_\_\_\_\_作为结构可靠度的数量指标。
5. 厂房钢结构一般指重型、大型车间的承重骨架。通常由\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_,天窗架、托架、制动梁(桁架)、各种支撑及墙架等构件组成。
6. 单面连接的单角钢,按轴心受力计算强度和连接时,强度设计值应乘以折减系数\_\_\_\_\_;在施工条件较差的高空进行焊缝和铆钉连接时,折减系数取\_\_\_\_\_。
7. 作用按其随时间的变异性可分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
8. 在钢结构承载能力极限状态设计表达式  $\gamma_0 S \leq R$  中,  $\gamma_0$  为\_\_\_\_\_系数。
9. 某构件当其可靠指标  $\beta$  减小时,相应失效概率将\_\_\_\_\_,结构可靠性\_\_\_\_\_。
10. 近似概率极限状态设计方法是以\_\_\_\_\_来衡量结构或构件的可靠程度的。
11. 与节点板单面连接的等边角钢轴心受压构件,  $\lambda = 100$ , 计算稳定性时,钢材强度设计值应采用的折减系数是\_\_\_\_\_;计算强度时,钢材强度设计值应采用的折减系数是\_\_\_\_\_。
12. 钢材承受的设计强度等于钢材的屈服强度除以\_\_\_\_\_。
13. 对结构或构件进行\_\_\_\_\_极限状态验算时应采用永久荷载和可变荷载的标准值。
14. 根据结构发生破坏时可能产生后果的严重程度,把结构分为一、二、三级三个安全等级。一般工业民用建筑钢结构取\_\_\_\_\_级。
15. 建筑结构的安全性、适用性和耐久性统称为结构的\_\_\_\_\_。

#### (二) 选择题

1. 大跨度结构常采用钢结构的主要原因是钢结构\_\_\_\_\_。
  - A. 密封性好
  - B. 自重轻
  - C. 制造工厂化
  - D. 便于拆装
2. 钢结构对动力荷载的适应性强,这主要是由于钢材具有\_\_\_\_\_。
  - A. 良好的塑性
  - B. 良好的韧性
  - C. 均匀的内部组织
  - D. 良好的塑性和均匀的内部组织
3. 钢结构的极限承载力极限状态是指\_\_\_\_\_。
  - A. 结构发生剧烈震动
  - B. 结构的变形已不能满足使用要求

- C. 结构达到最大承载力产生破坏      D. 使用已达到 50 年
4. 现行《钢结构设计规范》所用的结构设计方法是\_\_\_\_。
- A. 半概率、半经验的极限状态设计法      B. 容许应立法
- C. 以概率论为基础的极限状态设计法      D. 全概率设计法
5. 在结构设计理论中,荷载分项系数和抗力分项系数一般都取\_\_\_\_,前者通常以\_\_\_\_形式出现在设计表达式中,后者通常以\_\_\_\_形式出现在设计表达式中。
- A.  $<1.0$ ,乘积因子,乘积因子      B.  $>1.0$ ,倒数乘积因子,乘积因子
- C.  $<1.0$ ,乘积因子,倒数乘积因子      D.  $>1.0$ ,乘积因子,倒数乘积因子
6. 决定结构或构件的目标可靠指标既要考虑\_\_\_\_,又要考虑\_\_\_\_。
- A. 材料性能,施工质量的离散性      B. 安全等级,破坏后果的严重性
- C. 作用类别,抗力特性的离散性      D. 力学模型,几何尺寸的离散性
7. 下列\_\_\_\_种极限状态为承载力极限状态。
- A. 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡
- B. 影响正常使用的振动
- C. 影响正常使用或耐久性的局部损坏
- D. 影响正常使用或外观的变形
8. 下列\_\_\_\_种极限状态为正常使用极限状态。
- A. 结构转变为机动体系      B. 结构和结构构件丧失稳定
- C. 影响正常使用的振动      D. 结构构件或连接因应力超过材料强度限值破坏
9. 在进行正常使用极限状态计算时,计算用的荷载\_\_\_\_。
- A. 需要将永久荷载的标准值乘以永久荷载分项系数
- B. 需要将可变荷载的标准值乘以可变荷载分项系数
- C. 永久荷载和可变荷载都要乘以各自的荷载分项系数
- D. 永久荷载和可变荷载都用标准值,不必乘荷载分项系数
10. 钢结构按承载力极限状态设计时,荷载值应取\_\_\_\_。
- A. 荷载的标准值      B. 荷载的设计值
- C. 荷载的准永久值      D. 荷载的平均值
11. 工程结构的可靠指标  $\beta$  与失效概率  $P_f$  之间的关系是\_\_\_\_。
- A.  $\beta$  越大,  $P_f$  越大
- B.  $\beta$  与  $P_f$  呈反比关系
- C.  $\beta$  与  $P_f$  存在一一对应的关系,且  $\beta$  越大,  $P_f$  越小
- D.  $\beta$  与  $P_f$  呈正比关系
12. 若用  $S$  表示结构的荷载效应,用  $R$  表示结构的抗力,则结构按极限状态设计时应符合条件\_\_\_\_。
- A.  $S > R$       B.  $S \geq R$       C.  $S < R$       D.  $S \leq R$
13. 验算组合梁刚度时,荷载通常取\_\_\_\_。
- A. 标准值      B. 设计值      C. 组合值      D. 最大值
14. 对于直接承受动力荷载的结构,下列荷载取值正确的是\_\_\_\_。
- A. 在计算强度时,动力荷载设计值应乘以动力系数;在计算稳定性、疲劳和变形时,动力荷载标准值不应乘以动力系数

- B. 在计算强度和稳定性时,动力荷载设计值应乘以动力系数;在计算疲劳和变形时,动力荷载设计值不应乘以动力系数
- C. 在计算强度和稳定性时,动力荷载设计值应乘以动力系数;在计算变形时,动力荷载标准值不应乘以动力系数
- D. 在计算强度和稳定性时,动力荷载设计值应乘以动力系数;在计算疲劳和变形时,动力荷载标准值不应乘以动力系数

15. 已知某一结构在  $\beta=3$  时,失效概率为  $P_f=0.001$ ,若  $\beta$  改变,以下结论准确的是\_\_\_\_\_。

- A.  $\beta=2.5$ ,  $P_f<0.001$ ,结构可靠性降低
- B.  $\beta=2.5$ ,  $P_f>0.001$ ,结构可靠性降低
- C.  $\beta=3.5$ ,  $P_f>0.001$ ,结构可靠性提高
- D.  $\beta=3.5$ ,  $P_f<0.001$ ,结构可靠性降低

16. 设计钢结构时,关于其安全等级的确定,下列说法正确的是\_\_\_\_\_。

I. 一般工业与民用建筑钢结构的安全等级可取一级; II. 一般工业与民用建筑钢结构的安全等级可取二级; III. 一般工业与民用建筑钢结构的安全等级可取三级; IV. 特殊建筑钢结构的安全等级可根据具体情况另行确定。

- A. I、IV      B. II、IV      C. III、IV      D. IV

### (三)判断题

1. 我国现行钢结构设计规范采用校准法确定结构的目标可靠指标。 ( )
2. 结构设计基准期就是结构的寿命,超过这一期限后,意味着结构完全不能使用。 ( )
3. 在设计表达式中荷载分项系数以乘积因子出现,而抗力分项系数一般以分母形式出现。 ( )
4. 计算结构的强度、变形及稳定性时,动力荷载应乘以动力系数。 ( )
5. 《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)推荐的设计方法是近似概率极限状态设计法。 ( )
6. 在构件稳定性计算中,荷载应采用标准值。 ( )
7. 在结构安全等级相同时,延性破坏的目标可靠指标小于脆性破坏的目标可靠指标。 ( )
8. 材料的强度设计值为材料强度标准值除以材料强度分项系数。 ( )
9. 结构可靠性就是结构安全性。 ( )
10. 当结构的功能函数  $Z=g(R,S)=R-S=0$  时,表示结构处于失效状态。 ( )

### (四)简答题

1. 简述钢结构的特点。
2. 为什么说钢结构较为安全可靠?
3. 试结合钢结构的特点分析其合理应用范围。
4. 如何理解近似概率极限状态设计法(水准 II)?
5. 从可靠性角度考虑,钢结构应满足哪些基本功能的要求?
6. 什么是钢材强度的标准值和设计值? 如何确定?
7. 如何确定荷载的标准值、设计值和组合值?
8. 说明公式  $\beta=\mu_z/\sigma_z$  中,各个符号的意义及其可靠度  $P_f$  与  $\beta$  之间的关系。
9. 结构的安全系数和结构的可靠度有何区别?

## 四、习题参考答案

## (一)填空题

- |                        |                  |
|------------------------|------------------|
| 1. 设计值,标准值             | 8. 结构重要性         |
| 2. 概率理论,分项系数,承载能力,正常使用 | 9. 增大,降低         |
| 3. 安全可靠、经济合理、技术先进      | 10. 可靠指标 $\beta$ |
| 4. 可靠度,可靠指标            | 11. 0.75,0.85    |
| 5. 檩条、屋架、柱、吊车梁         | 12. 材料的分项系数      |
| 6. 0.85,0.9            | 13. 正常使用         |
| 7. 永久作用、可变作用、偶然作用      | 14. 二            |
|                        | 15. 可靠性          |

## (二)选择题

- |      |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. B | 2. B  | 3. C  | 4. C  | 5. D  | 6. B  | 7. A  | 8. C  |
| 9. D | 10. B | 11. C | 12. C | 13. A | 14. D | 15. B | 16. B |

## (三)判断题

- |                 |              |                 |             |                 |             |                 |                 |
|-----------------|--------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 1. $\checkmark$ | 2. $\times$  | 3. $\checkmark$ | 4. $\times$ | 5. $\checkmark$ | 6. $\times$ | 7. $\checkmark$ | 8. $\checkmark$ |
| 9. $\times$     | 10. $\times$ |                 |             |                 |             |                 |                 |

## (四)简答题

1. 钢材轻质高强,塑性和韧性好;材质均匀,和力学计算的假定比较符合,安全可靠度高;生产、安装工业化程度高,施工周期短;钢材具有可焊性,密闭性能好;具有一定的耐热性,但防火性差;钢结构容易加固维修、拆卸或改建。由于钢材易锈蚀,因而,钢结构有维护费用高的缺点,另外,钢结构还有低温下易脆断、动载作用下噪声大及价格昂贵等缺点。

2. 由于钢材具有良好的塑性和韧性。塑性好,则结构不会因偶然超载而发生破坏;韧性好,则可适应动载要求,适用于建造受动载的结构(如吊车梁,铁路桥梁等)以及地震地区的建筑。另外,由于钢材组织比较均匀,接近各向同性,符合力学的基本假定,计算结果精度高,因而钢结构较为稳妥可靠。

3. 钢结构的承载力大,因此,适用于荷载大的重型厂房和高层建筑;钢结构自重轻,因此,适用于大跨度结构、可拆卸和移动式结构;钢结构对动力荷载的适应性强,因此,适用于直接承受动载的结构或对抗震性能要求高的结构;钢结构的密闭性好,因此,适用于制造容器和管道。

4. 该方法是把各种参数作为随机变量,运用概率分析的方法考虑其变异性来确定设计值。采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法,由于在分析中忽略或简化了基本变量随时间变化的关系,在确定基本变量的概率分布时有相当程度的近似性,且为了简化计算而将一些复杂关系进行了线性化,所以还只能是一种以近似概率法为基础的极限状态设计法(疲劳强度除外),按照目标可靠指标要求,用“校准法”给出了各随机变量的分项系数,提供了用分项系数表达的极限状态设计公式。

5. 钢结构应满足下列基本功能的要求:

(1)能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种作用,包括荷载、温度变化、基础不均匀沉降及地震等作用;

(2)在正常使用时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)在偶然事件发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

其中(1)、(4)两项是对结构安全性的要求,第(2)项是对结构适用性的要求,第(3)项是对结构耐久性的要求。结构可靠性就是上述4项基本功能所满足结构安全性、适用性、耐久性的总称。

6. 将具有一定保证率的强度值作为钢材强度的标准值。如果钢材强度服从正态分布,且要求保证率为95%,则钢材强度标准值=钢材强度平均值 $-1.645 \times$ 钢材强度标准差。材料强度设计值由其标准值除以相应的分项系数得到。

7. 某一荷载的标准值应按其具有一定保证率的条件反推得到。例如,假定某一荷载服从正态分布,如果要求95%的保证率,则荷载标准值=荷载平均值 $+1.645 \times$ 荷载标准差。荷载设计值由某一荷载标准值乘以相应的分项系数得到。荷载组合值:考虑结构或构件承受两种或两种以上荷载作用时,他们同时达到其标准值的概率将有所降低的因素,将其标准值乘以相应的组合系数而得到其组合值。

8.  $\mu_Z, \sigma_Z$ ——分别为结构功能函数 $Z$ 的均值和标准差;

$P_r$ ——结构可靠度,  $P_r = P\{Z > 0\}$ ;

$$\beta \text{——结构的可靠指标, } \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}。$$

可靠度 $P_r$ 与可靠指标 $\beta$ 之间的关系为 $P_r = 1 - \Phi(-\beta)$ ,其中, $\Phi(\cdot)$ 是标准正态函数。可见结构的可靠度 $P_r$ 取决于可靠指标 $\beta$ , $\beta$ 越大,可靠度 $P_r$ 越大,且二者之间存在一一对应的关系,说明 $\beta$ 可以作为衡量结构可靠度的一个数量指标。

9. 在容许应力设计法中,为考虑非正常情况下,作用效应和结构抗力的变异(即可能荷载超过其标准值,抗力小于其标准值的情况时),为保证结构安全而引入的一个系数,称为安全系数。安全系数由工程经验确定。由于安全系数取为定值,忽视了作用效应和结构抗力的变异在实际上不具有比例关系,因而采用一个确定的安全系数势必带来各种情况实际隐含的可靠度不一样,有的过分安全,有的可能又不安全。

结构的可靠度是用来度量结构可靠性的指标,它从安全性、适用性、耐久性三个方面反映了结构完成其功能要求的能力,并从概率的角度可真正从数量上对结构的可靠性进行比较科学的对比分析。因此,可靠度对结构完成其预定功能的度量比安全系数具有全面性和科学性。

## 第二章

# 钢结构的材料

### 一、基本要求

掌握对钢结构用材的要求;掌握钢材在不同条件下可能产生的两种破坏形式,理解两种破坏形式对钢材正确使用和设计的意义;通过钢材的单向拉伸试验、冷弯试验,掌握钢材在正常情况下的静力工作性能,了解《钢规》对钢材机械性能指标规定的依据和意义;通过钢材的冲击韧性试验、疲劳试验,了解钢材的动力工作性能,并能验算疲劳;理解各种因素(化学成分、冶金缺陷、应力集中、硬化、温度等)对钢材性能的影响,特别要注意分析影响钢材脆性破坏的因素;掌握钢材的类别,并能根据具体条件和要求,正确选用钢材。

本章重点为钢材的主要性能及其指标,对钢结构用材的要求,建筑钢材的类别及钢材的选用;难点为影响钢材性能的因素,钢材的延性破坏和脆性破坏、循环加载和快速加载效应。

### 二、学习要点

#### (一)建筑钢材的基本要求

- (1)较高的强度——即屈服强度  $f_y$  和抗拉强度  $f_u$  比较高。
- (2)足够的变形能力——即塑性和韧性性能好。
- (3)良好的加工性能与耐久性——即适合冷、热加工,同时具有良好的可焊性,具有适应低温、有害介质侵蚀(包括大气锈蚀)以及重复荷载作用等的性能。
- (4)应该容易生产,价格便宜。

#### (二)钢材的主要性能

##### 1. 强度

结构用钢的主要强度指标有屈服强度  $f_y$  和抗拉强度  $f_u$ ,可通过标准试件的静力拉伸试验得到。屈服点  $f_y$  为设计时钢材可达到的最大应力,称强度标准值。抗拉强度  $f_u$  是钢材破坏前能够承受的最大应力, $f_u$  高可以增加结构的安全保障,故强屈比  $f_u/f_y$  可看作钢材强度储备系数。

##### 2. 塑性

钢材的塑性是指应力超过屈服点后,试件产生明显的残余塑性变形而不断裂的性质。塑性好坏可用拉伸断裂时的最大相对塑性变形伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  表示。 $\delta$  和  $\psi$  值可以通过标准试件的静力拉伸试验得到。通常以伸长率  $\delta_{10}$  或  $\delta_5$  来表征钢材断裂前塑性变形能力的指标。

塑性好则结构破坏前变形比较明显,从而可减少脆性破坏的危险性,并且塑性变形还能调整局部高峰应力,使之趋于平缓。结构或构件在受力时(尤其承受动力荷载时),材料的塑性好坏往往决定了结构是否安全可靠,因此钢材塑性指标比强度指标更为重要。

##### 3. 冲击韧性

钢材的冲击韧性(或韧性)是钢材在塑性变形和断裂的过程中吸收能量的能力,也表示钢

材抵抗冲击荷载的能力,它是强度与塑性的综合表现。国际通用夏比试验法测试冲击韧性,更全面刻画材料韧性的是断裂韧性指标  $a_k$  ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )。

温度对冲击韧性有很大的影响,低于某个温度值时,韧性急剧下降,钢结构设计规范对钢材的冲击韧性  $a_k$  有常温和负温要求规定。在选用钢材时,应根据结构的使用情况和要求提出与环境温度[如  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $-40^\circ\text{C}$ ]相应的冲击韧性指标要求。

韧性好表示在动荷载作用下破坏时要吸收比较多的能量,同样也降低脆性破坏的危险程度。对采用塑性设计的结构和地震区的结构而言,钢材变形能力的大小具有特别重要的意义。

#### 4. 冷弯性能

冷弯性能是指钢材在冷加工(常温下加工)时,对产生裂缝的抵抗能力。冷弯性可用冷弯试验来检验,即在钢材承受规定弯曲程度的弯曲变形时,检查试件弯曲部分的外面、里面和侧面是否有裂纹、断裂和分层现象。冷弯性能是判别钢材塑性变形能力及冶金质量的综合指标。

#### 5. 可焊性

钢材的可焊性是指在一定的材料,焊接工艺和结构条件下,钢材经过焊接能够获得良好的焊接接头的性能。

可焊性好坏可通过可焊性试验来检验,可焊性试验内容包括抗裂性试验和使用性能的试验。国际焊接学会以下列公式表达的碳当量  $C_E$  来评估钢材的可焊性:

$$C_E = C + M_n/6 + (C_r + M_o + V)/5 + (N_i + C_u)/15 \quad (2-1)$$

$C_E \leq 0.38\%$  时,可焊性很好(Q235 和 Q345 钢属于这一类);

$0.38\% < C_E \leq 0.45\%$  时,需要采取适当的预热措施并注意控制施焊工艺;

$C_E > 0.45\%$  时,需要采取较高的预热温度和严格的工艺措施。

一般而言,厚度不超过 40 mm 的 Q235 钢和厚度不超过 25 mm 的 Q345 钢,环境温度不低于  $0^\circ\text{C}$  时,不需预热处理。

#### 6. 耐久性

耐久性考虑耐腐蚀性、抗疲劳性和耐时效性。

#### 7. Z 向伸缩率

当钢材较厚时,或承受沿厚度方向的拉力时,要求钢材具有板厚方向的收缩率要求,以防厚度方向的分层、撕裂。

### (三) 影响钢材性能的因素

#### 1. 化学成分

钢材的基本元素为铁(Fe),在普通碳素钢中约占 99%,此外,碳(C)、硅(Si)和锰(Mn)等有益元素和硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)等有害元素的总含量约为钢的 1%,但对钢材力学性能却有很大影响。

碳元素含量提高,则强度提高,但塑性、韧性、冷弯性能、可焊性及抗锈蚀能力下降。含碳量小于 0.25% 的钢材为低碳钢(除高强度螺栓和高强度钢丝外,建筑用钢基本属于这一类),含碳量介于 0.25% 和 0.6% 之间的钢材为中碳钢,含碳量大于 0.6% 的钢材为高碳钢。

锰(Mn)、硅(Si)、钒(V)、铌(Nb)、钛(Ti)、铝(Al)、铬(Cr)和镍(Ni)基本上属于有益元素,一般都有提高钢材强度、塑性和韧性的效能,但锰或硅的含量过高,则可导致可焊性降低。铝用于补充脱氧,铬和镍用于 Q390 和 Q420 钢材。

硫(S)、磷(P)、氧(O)和氮(N)基本上属于有害元素,一般都会使钢材的韧性降低。硫和氧易导致热脆,磷和氮则易导致冷脆。

## 2. 冶金和轧制过程

冶炼过程决定了钢的化学成分和金相组织结构,因而确定了钢种和钢材牌号。冶炼过程中产生的冶金缺陷(如偏析、非金属夹杂、气孔及裂纹等)将影响钢材的力学性能。

浇铸过程中由于脱氧程度不同,可形成沸腾钢、半镇静钢、镇静钢和特殊镇静钢。沸腾钢的塑性、韧性、可焊性较差,容易发生时效和变脆,但产量较高、成本较低。半镇静钢脱氧程度较高些,上述性能都较好。而镇静钢的脱氧程度最高,性能最好,但产量较低,成本较高。

轧制过程在使钢材晶粒变细和改善钢材性能的同时,亦使其产生明显的各相异性。

热处理只对某些高强度钢材进行,目的是在能够取得高强度的同时,使其保持良好的塑性和韧性。常见的热处理方法包括正火、回火、淬火及调质处理(淬火加回火)。

## 3. 应变时效

应变时效是指钢材应变硬化和时效硬化的综合效应。

时效硬化(时效)是指随着时间的增长,纯铁体中残留的碳、氧固溶物质逐步析出,形成自由的碳化物或氧化物微粒,约束纯铁体的塑性变形,使钢材转脆的现象。时效将提高钢材的强度,降低塑性、韧性。若人为地加速时效硬化的过程,则称为人工时效。

冷加工(常温下的冷拉、冷弯、冲孔、机械剪切等加工)通常使钢材产生应变硬化,在提高钢材的屈服点和强度的同时,塑性和韧性降低。

## 4. 温度

在正温范围内,一般情况下,随着温度的提高,钢材的强度降低,变形增大,但在  $200^{\circ}\text{C}$  以内,性能变化较小;钢材在  $250^{\circ}\text{C}$  附近时,钢材抗拉强度提高,塑性、韧性下降,表明氧化膜呈蓝色,即产生蓝脆现象,在温度区间  $250\sim 320^{\circ}\text{C}$  内产生徐变现象;钢材在  $600^{\circ}\text{C}$  以上几乎丧失承载力。

在负温范围内,钢材表现为屈服点和强度均提高,而塑性和韧性都降低,对冲击韧性的影响尤其突出。当温度从常温下降到一定值时,钢材的冲击韧性忽然急剧下降,试件断口呈脆性破坏特征,这种现象称为冷脆现象。钢材由韧性破坏转变到脆性破坏的温度叫冷脆转变温度。要避免脆性破坏,结构所处温度必须高于冷脆转变温度。

## 5. 应力集中和残余应力

由于钢结构构件中存在孔洞、槽口、凹角、裂缝、厚度变化、形状变化、内部缺陷等原因,使这些区域产生局部高峰应力,此谓应力集中现象。应力集中越严重,钢材塑性越差。应力集中区域(尤其是板厚较大时)常处于三向应力状态,因此,结构设计要关注应力集中区域的脆性断裂问题。

残余应力为钢材在冶炼、轧制、焊接、冷加工过程中,由于不均匀的冷却、组织构造的变化而在钢材内部产生的不均匀应力。残余应力的存在易使钢材发生脆性破坏。

## 6. 复杂应力状态

当钢材处于复杂应力作用下时(平面应力或立体应力),可按能量强度理论(第四强度理论),以折算应力  $\sigma_{zs}$  是否大于  $f_y$  来判断钢材是否由弹性状态转变为塑性状态。若  $\sigma_{zs} < f_y$ , 则为弹性状态;若  $\sigma_{zs} \geq f_y$ , 则为塑性状态。纯剪情况下  $\sigma_{zs} = \sqrt{3}\tau$ , 即  $\tau < \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0.58f_y$  时为弹性状态。

根据  $\sigma_{zs}$  的计算公式可知,钢材在多轴应力作用下,当处于同号应力场且数值接近时,钢材不易屈服,可能导致脆性破坏;而当处于异号应力场时,将发生塑性破坏。