

# 第 1 章

## 概 述

学习要点：钢结构特点和应用；钢结构设计方法。

### 1.1 钢结构的特点和应用

#### 1.1.1 钢结构的特点

钢结构是由钢板、热轧型钢等组成的承重结构,和其他材料的结构相比,有如下特点。

(1) 强度高,质量轻。钢材的容重约是钢筋混凝土的 3 倍多,但其抗压强度却较钢筋混凝土大近 20 倍。因此,其强重比要远高于混凝土,在相同承载力下,钢构件截面积小、重量轻。例如,在跨度和荷载相同的情况下,钢屋架的重量约为钢筋混凝土屋架的  $1/4\sim 1/3$ 。因此,钢结构特别适合于跨度大或荷载很大的构件和结构。

(2) 塑性和韧性好。钢材塑性好,结构在破坏之前有明显的变形,延性好;有良好的抗震性能;钢结构还具有良好的韧性,对动力荷载的适应性强。

(3) 材质均匀,接近各向同性。钢材内部组织比较接近于匀质和各向同性体,同力学计算的假定比较符合。而且在一定的应力幅度内几乎是完全弹性的。因此,钢材的实际受力情况和工程力学计算结果比较符合。

(4) 制作简便,施工工期短。钢结构一般都在专业工厂由机械化生产制造,后运至工地现场通过焊缝或螺栓安装,工业化生产程度高,质量容易保证,工期短,也便于改建、加固和拆迁。

(5) 密闭性好。钢结构采用焊接连接后可以做到安全密封,能够满足高压容器、油罐、管道等对气密性和水密性的要求。

(6) 绿色环保。钢结构工程施工现场占地面积少,现场湿作业少,环境污染少,材料可回收利用。

(7) 耐热但不耐火。钢结构耐热性能好,但耐火性能差。钢材表面温度在  $200^{\circ}\text{C}$  以内时,钢材性质变化很小;当钢材表面温度达到  $400^{\circ}\text{C}$  以上时,钢材强度下降较为明显;当温度达到  $600^{\circ}\text{C}$  左右时,钢材几乎完全丧失承载能力。为了满足建筑物防火要求,必须采取防火措施。目前,工程上应用较多的是在钢结构表面喷薄型或厚型防火涂料,也可以在钢结构外面包混凝土或其他防火材料等,这不仅增加了造价,也影响外观和施工。采用耐火钢,可以大幅度减少防火涂料的使用,具有良好的综合经济效益,因此应增加对耐火钢方面的研究。

(8) 耐腐蚀性差。普通钢材容易锈蚀,必须采用防腐蚀涂料等表面防护措施,在使用期间需定期保养。近年来出现的高性能涂料和耐候钢具有较好的抗腐蚀性,已逐步得到推广和应用。

(9) 稳定问题较为突出。由于钢材强度大,构件截面小,厚度薄,因而在压力和弯矩等作用下会引起构件甚至整个结构的稳定问题。在设计中考虑如何防止结构或构件失稳,在钢结构设计和施工中必须给予足够重视。

## 1.1.2 钢结构的应用范围

目前钢结构应用范围大致如下。

### 1. 重型工业厂房

工业厂房吊车起重量较大或者其工作较繁重车间的主要承重骨架多采用钢结构。有强烈辐射热的车间,也经常采用钢结构。结构形式多为由钢屋架和阶形柱组成的门式刚架或排架,也有采用网架做屋盖的结构形式。

### 2. 大跨度结构

大跨结构跨度越大,自重占在荷载中所占的比例就越大,因此减轻结构的自重会带来明显的经济效益。钢材强度高和结构重量轻的优势适合于大跨结构,因此钢结构在大跨空间结构和大跨桥梁结构中得到了广泛应用。所采用的结构形式有空间桁架、网架、网壳、悬索(包括斜拉体系)、张弦梁、实腹或格构式拱架和框架等。

### 3. 高层及超高层结构的骨架

钢结构或其组合结构作为高层和或超高层结构的骨架,近年来得到了越来越广泛的应用。其结构形式主要有:多层框架、框架-支撑结构、框筒、悬挂和巨型框架等。

### 4. 受动力荷载影响的结构

受动力荷载影响的结构,例如设有较大锻锤或产生动力作用的其他设备的厂房,由于钢材具有良好的韧性往往采用钢结构体系。对于抗震能力要求高的结构,采用钢结构也是比较适宜的。

### 5. 高耸结构

包括塔架和桅杆结构,如高压输电线路的塔架、广播、通信和电视发射用的塔架和桅杆、火箭(卫星)发射塔架等,也是钢结构的应用范围。

### 6. 密闭结构和其他构筑物

冶金、石油、化工企业中大量采用钢板做成的容器结构,包括油罐、煤气罐、高炉和热风

炉等。此外,经常使用的还有皮带通廊栈桥、管道支架和锅炉支架等其他钢构筑物。海上采油平台也大都采用钢结构。

### 7. 可拆卸结构

钢结构不仅重量轻,还可以用螺栓或其他便于拆装的方法来连接,因此非常适用于需要搬迁的结构,如建筑工地、油田和需野外作业的生产和生活用房的骨架。

## 1.2 钢结构的设计方法

和其他结构一样,钢结构的设计采用以概率论为基础的极限状态设计法,并采用分项系数设计表达式进行计算。

钢结构是在钢筋混凝土结构课以后开课。因为可靠度理论是一门专门的学科,本章对一次二阶矩近似概率设计法的理论不作介绍了。本节仅就这种方法的几层意思作简要说明。

### 1.2.1 承重结构的两种极限状态

#### 1. 承载能力极限状态

承载能力极限状态是指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。这包含两种情况:其一是指某一截面或连接部位的某点的应力超过材料强度、构件整体丧失稳定或在特定条件下出现低应力状态的脆性断裂;其二是结构或构件虽未出现破坏但产生了不适于继续承载的变形。

#### 2. 正常使用极限状态

正常使用极限状态是指影响结构、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的局部损坏(包括混凝土裂缝)。正常使用极限状态中的变形、振动的限制通常是在弹性范围内。

**思考题:**

承载能力极限状态和正常使用极限状态对变形的限制有什么不同?

### 1.2.2 可靠度结构设计

按照概率极限状态设计法,结构的可靠度的定义是:结构在规定的时间内、规定的条件下,完成预定功能的概率。预定功能是指结构的安全性、适用性和耐久性,或统称为可靠性。完成预定功能,就是对规定的某种功能来说结构不失效。

结构的可靠度通常受荷载、材料性能、几何参数等具有随机性的因素的影响。可靠的结构设计是指失效概率小到可以接受的程度。

思考题:

1. 什么是可靠度?
2. 什么是可靠的结构设计?

### 1.2.3 分项系数设计表达式

#### 1. 承载能力极限状态表达式

$$\gamma_0 \left( \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q_1} S_{Q_{1,k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{c_i} \gamma_{Q_i} S_{Q_{i,k}} \right) \leq R \quad (1-1a)$$

式中:  $R = \frac{R_k}{\gamma_R}$  为结构抗力的设计值, 其中  $R_k$  是抗力的标准值, 取自其概率分布的 0.05 下分位点, 有 95% 的保证度,  $\gamma_R$  是抗力分项系数;  $S_{Gk}, S_{Q_{i,k}}$  是恒荷载和可变荷载效应的标准值, 取自其概率分布 0.05 上分位点, 有 95% 的保证度,  $i=1$  是最大的可变荷载效应;  $\gamma_G, \gamma_{Q_i}$  分别是恒荷载分项系数、可变荷载分项系数;  $\gamma_0$  为结构重要性系数, 分为三级: 对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年以上的结构构件, 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 25 年的结构构件, 不应小于 0.95。一般工业与民用建筑钢结构的安全等级应取二级, 其他特殊建筑钢结构的安全等级应根据具体情况另行确定。  $\psi_{c_i}$  为第  $i$  个可变荷载的组合系数, 其值不大于 1。

对于一般排架、框架结构, 可采用简化规则, 当只有一个可变荷载时, 式(1-1a)变为

$$\gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q_1} S_{Q_{1,k}}) \leq R \quad (1-1b)$$

当有多个可变荷载时, 式(1-1)变为

$$\gamma_0 \left( \gamma_G S_{Gk} + 0.9 \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} S_{Q_{i,k}} \right) \leq R \quad (1-1c)$$

#### 2. 分项系数 $\gamma$ 的取值

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)规定的目标可靠指标  $\beta$  值, 是通过《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—1984)作反演算, 找出隐含在现有工程结构中的可靠指标  $\beta$  值。它从整体上继承了原有的可靠度水准。

一般钢结构(安全等级为二级)采用  $\beta=3.2$ , 相应的失效概率是  $P_f=6.87 \times 10^{-4}$ 。目标可靠指标  $\beta$  值和相应失效概率如表 1-1 所示。

表 1-1 目标可靠指标  $\beta$  值和相应失效概率

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	$3.7, 1.08 \times 10^{-4}$	$3.2, 6.87 \times 10^{-4}$	$2.7, 3.47 \times 10^{-3}$
脆性破坏	$4.2, 1.34 \times 10^{-5}$	$3.7, 1.08 \times 10^{-4}$	$3.2, 6.87 \times 10^{-4}$

分项系数  $\gamma$  的取值和可靠指标  $\beta$  值有关,为计算简便,恒荷载和可变荷载的分项系数都取定值。一般情况下,恒荷载的分项系数  $\gamma_G=1.2$ ,可变荷载的分项系数  $\gamma_Q=1.4$ ;在  $S_{Gk}$  和  $S_{Qk}$  异号的情况下, $\gamma_G=1.0$ , $\gamma_Q=1.4$ 。确定构件的  $\gamma_R$  值的原则是与目标可靠指标  $\beta$  值的偏离最小。对 Q235 钢构件, $\gamma_R=1.087$ ;对 Q345,Q390,Q420 钢构件, $\gamma_R=1.111$ 。

### 3. 正常使用极限状态表达式

当验算变形是否超过规定限值时,不考虑荷载的分项系数,即用荷载的标准值计算。荷载效应的组合有短期组合(标准组合)和长期组合(准永久组合)。钢结构或构件只按短期组合,其表达式是

$$w = w_{Gk} + w_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{Q_i} w_{Q_{i,k}} \leq [\omega] \quad (1-2a)$$

式中: $w$  为结构或构件的变形值; $w_{Gk}$  为恒荷载标准值在结构或构件中产生的变形值; $w_{Q_{1k}}$  为最大可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值; $w_{Q_{i,k}}$  为第  $i$  个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值; $\psi_{Q_i}$  为第  $i$  个可变荷载组合值系数,当有风荷载参与组合时取 0.6,无风荷载时取 1.0,一般框、排架,当有两个或两个以上荷载参与组合且有风荷载时取 0.85,其他情况取 1.0;  $[\omega]$  为规范规定的结构或构件的容许变形值。

当只有一个可变荷载时

$$w = w_{Gk} + w_{Q_{1k}} \leq [\omega] \quad (1-2b)$$

**思考题:**

承载能力极限状态和正常使用极限状态在计算时有什么区别?

## 1.3 钢结构的发展

钢结构的发展体现在以下几个主要方面。

### 1. 采用新的高性能钢材

高性能钢材的重要特性是强度高,并具有优良的塑性和韧性。例如,1988 年发布的《钢结构设计规范》中,强度最高的钢材是 15MnV,相当于 Q390,2002 年修订的规范增加了 Q420 级钢。还会采用更高强度的结构用钢。

### 2. 采用耐火耐候钢材

耐火耐候性能是指钢材的耐高温、耐恶劣天气、耐腐蚀强度。随着耐火耐候钢加工技术的不断成熟和完善,将在建筑行业中得到广泛应用。

### 3. 开发新的结构形式

推广高强度钢索的应用,如:大跨度的索膜结构和张拉整体结构,两种不同性能的材料取长补短、协同工作的钢和混凝土组合结构,索和拱配合使用的杂交结构等。

### 4. 提高钢结构的制造技术和工艺水平

钢结构的制造也无例外地向机电一体化发展,制造安装质量也要进一步提高。

## 习题

- 1.1 结构的承载能力极限状态包括哪些计算内容？正常使用极限状态包括哪些计算内容？
- 1.2 可靠度指标和失效概率有什么关系？
- 1.3 钢结构主要由哪几种基本受力构件组成？
- 1.4 钢结构的特点有哪些？
- 1.5 分项系数设计表达式中各项符号的含义是什么？
- 1.6 结构抗力的标准值，取自其概率分布哪一个分位点作为其代表值？其保证度是多少？

## 第 2 章

# 钢结构的材料

**学习要点：**衡量材料力学性能的指标；使钢材变脆的因素；型钢符号的含义；选择钢材应考虑的因素。

## 2.1 钢结构用材的要求

### 1. 两种破坏现象

塑性破坏(延性破坏)的特征是当应力超过屈服强度  $f_y$  后,材料有明显塑性变形;当应力继续增大,断面出现颈缩,有持续的变形时间。

脆性破坏(非延性破坏)的特征是破坏前无征兆(变形很小),断口平直,破坏突然发生。

钢结构需用强度高且塑性性能好的材料制作,应当注意的是原来塑性表现极好的钢材也会因工作条件的改变而出现脆性破坏现象。

### 2. 钢结构对钢材的基本要求

(1) 较高的强度。即要求钢材的屈服强度  $f_y$  较高,这样可减少截面尺寸,减轻自重,节约钢材;要求抗拉强度  $f_u$  较高,可以增加安全储备。

(2) 足够的变形能力。即要求塑性好,可调整局部应力峰值,提高构件的延性和抗震能力,还可降低脆性破坏的危险;韧性好,在动荷载作用下吸收较多的能量,降低脆性破坏的危险。

(3) 良好的加工性。包含良好的冷、热加工和可焊性,不会因加工给强度、塑性、韧性带来不利影响。

钢结构规范推荐采用普通碳素钢 Q235、低合金钢 Q345、Q390、Q420 及 Q460 等,选用规范未推荐的钢材时,需有可靠依据,以确保钢结构的质量。

## 2.2 钢材的力学性能

### 2.2.1 单向拉伸时的性能

钢材在常温、静载条件下一次单向均匀拉伸在拉力试验机上进行,由试验绘制出图 2-1(a)所示的应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线。曲线中的直线段  $Oa$  的终点  $a$  以下的应力  $\sigma$  和应变  $\epsilon$  成比例,符合胡克定律, $a$  点的应力记为  $f_p$ ,称为比例极限。 $a$  点以上附近还有一点称为弹性极限,试验时不易求得,总之  $a$  点以上曲线开始偏离直线。到达  $b$  点时,荷载不增加,变形持续增大,发生塑性流动。到达  $c$  点,曲线接近一水平直线。 $b$  点的应力记为  $f_y$ ,称为屈服强度。 $c$  点以后,随着应力  $\sigma$  增加,应变  $\epsilon$  继续增大,但其斜率逐渐减小,到达  $d$  点时,试件发生颈缩现象,如图 2-2(b)所示, $\sigma$ - $\epsilon$  曲线开始下降,到  $e$  点试件被拉断。 $d$  点的应力记为  $f_u$ ,称为抗拉强度。图 2-1(b)是屈服点附近的放大图。过了屈服点  $b$  后, $\sigma$ - $\epsilon$  曲线发生波动,波动区的最高点称为上屈服点,最低点称为下屈服点,上屈服点不太稳定,下屈服点比较稳定,能反映材料的性能,通常下屈服点的应力记为屈服强度  $f_y$ 。

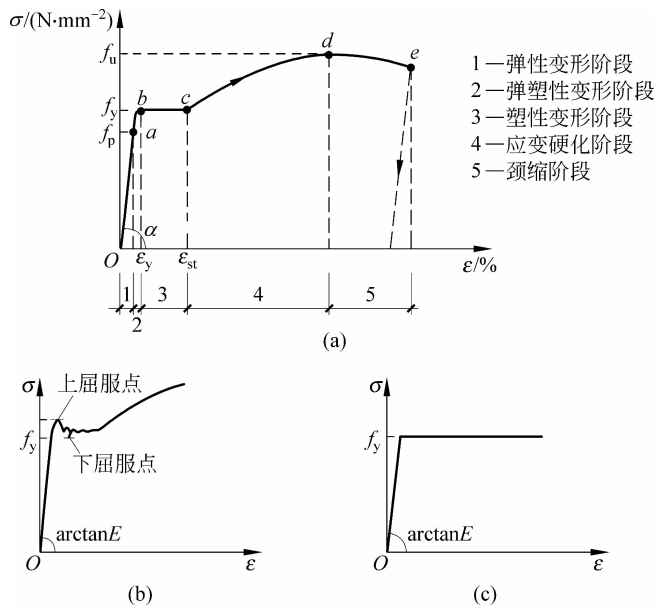


图 2-1 钢材拉伸试验所得  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线(未按比例画出)

(a) 钢材  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线; (b) 屈服点附近  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线放大图; (c) 理想弹塑性体的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线

一次单向拉伸试验较易进行,且便于规定标准的试验方法来确定钢材的性能指标,由一次单向均匀拉伸的应力-应变规律示出的力学性能指标如下。

(1) 屈服强度  $f_y$ 。 $f_y$  的应变( $\epsilon=0.15\%$ )和比例极限  $f_p$  的应变( $\epsilon=0.1\%$ )很接近,在弹性计算时常以纤维应力达到  $f_y$  作为弹性设计的强度标准,或材料抗力的标准。屈服点后的流幅  $\epsilon=0.15\% \sim 2.5\%$ ,表明材料已失去承担更大荷载的能力;这也是理想弹塑性模型(图 2-1(c))的试验基础。

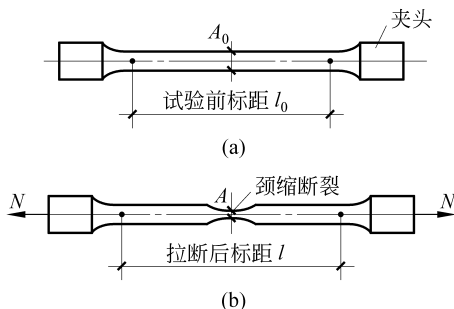


图 2-2 拉伸试验试件及拉断时的颈缩现象  
(a) 拉伸试验试件；(b) 拉断时的颈缩现象

(2) 抗拉强度  $f_u$ 。出现屈服平台之后,材料应变硬化曲线的最高点的应力为  $f_u$ ,之后出现颈缩断裂。以  $f_u$  作为强度储备,规范规定钢材的强屈比  $f_u/f_y \geq 1.2$ 。

(3) 弹性模量  $E$ 。 $E$  是弹性阶段应力-应变之比,即直线  $Oa$  的倾角的正切值,  $E = \tan \alpha$ 。计算时不论钢种,都取  $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

(4) 伸长率  $\delta$

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

它是表征材料塑性性能的一个指标,是断裂前试件的永久变形和原标定长度的百分比。取圆形试件直径  $d$  的 5 倍或 10 倍为标定长度,相应的伸长率记为  $\delta_5, \delta_{10}$ 。其值越大,构件破坏前出现的变形越大,越易发现和采取适当的补救措施。

(5) 理想弹塑性模型(图 2-1(c))在屈服强度  $f_y$  之前材料为弹性其弹性模量为  $E, f_y$  之后为塑性,其弹性模量  $E = 0$ 。后面的计算都以此模型为依据。

## 2.2.2 冷弯性能

冷弯试验是将厚度为  $a$  的试件放在图 2-3(a)所示的支座上,在压力机上进行。根据试件厚度,按规定的弯心直径  $d$  将试件弯曲  $180^\circ$ (图 2-3(b)),表面及侧面无裂纹或分层为合格。它表征钢材产生塑性变形时,对发生裂缝的抵抗能力,是衡量材料塑性变形能力的指标,也是冶金质量优劣的综合指标。特别是焊接构件焊后变形需要进行调直和调平等,都要求材料有较好的冷弯性能。

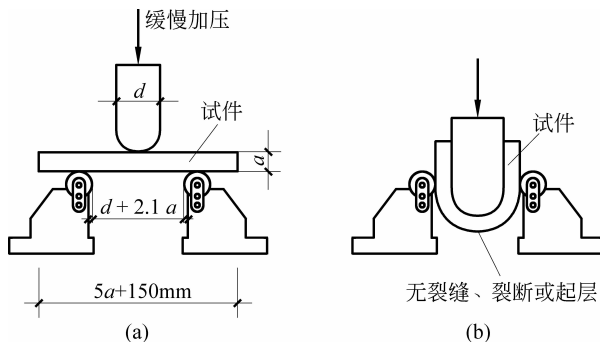


图 2-3 钢材的冷弯试验  
(a) 弯曲前；(b) 弯曲后

### 2.2.3 冲击韧性

冲击韧性是钢材受冲击在塑性变形和断裂时吸收机械能量的量度,是强度和塑性的综合指标。吸收能量较多才断裂的钢材是韧性好的钢材。用冲击韧性来衡量钢材抗脆断的性能,脆断总发生在有缺口高峰应力的地方。因此,冲击韧性也叫做缺口韧性。图 2-4 所示带缺口的钢材标准试件在冲击试验机上进行。

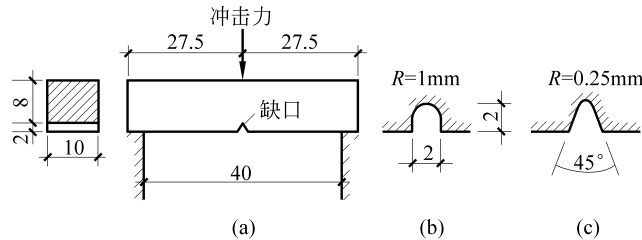


图 2-4 冲击韧性试验

(a) 冲击韧性试验; (b) 梅氏试件 U 形缺口; (c) 夏比试件 V 形缺口

梅氏试件跨中带 U 形缺口,断口处单位面积的功即为冲击韧性值,用  $a_k$  表示,单位  $J/cm^2$ 。

夏比试件跨中带 V 形缺口,缺口高峰应力处常呈三向受拉应力状态,更能反映实际结构的缺陷。夏比缺口韧性用  $A_{kv}$  表示,单位是  $J$  ( $1J=1N \cdot m$ )。我国以前曾采用梅氏试件作冲击韧性试验,而今则已改用夏比(V 形缺口)试件。

应注意,钢材的冲击韧性随温度变化而发生变化,低温时冲击韧性与高温时相比明显下降。对于受动荷载作用的结构,应提出常温 ( $20^\circ C \pm 5^\circ C$ ) 冲击韧性、 $0^\circ C$  冲击韧性和负温 ( $-20^\circ C$  或  $-40^\circ C$ ) 冲击韧性。

## 2.3 影响钢材性能的因素

### 2.3.1 化学成分的影响

#### 1. 碳(C)

碳素钢主要是铁碳的合金,其碳的质量分数小于 2%。按含碳量划分为低碳钢(其含碳量小于 0.25%)、中碳钢(其含碳量大于 0.25%,小于 0.6%)和高碳钢(其含碳量大于 0.6%)。含碳量越高其可焊性越差,含碳量在 0.12%~0.20% 范围内,可焊性最好。

#### 2. 锰(Mn)

锰能显著提高钢材的强度且不过多降低塑性和冲击韧性,但锰会使钢材的可焊性下降。

#### 3. 硅(Si)

硅是强脱氧剂,能提高钢的强度而不显著影响塑性、韧性、冷弯性、可焊性,但过量会恶