

武警学院统编教材



建筑结构与耐火设计

JIANZHU JIEGOU YU NAIHUO SHEJI

李胜利 屈立军 主编



中国人民公安大学出版社

武 警 学 院 统 编 教 材

建筑结构与耐火设计

主编 李胜利 屈立军
参编 陈 鑫 李文莉 王跃琴
邢 君

中国人民公安大学出版社
· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构与耐火设计/李胜利, 屈立军主编. —北京:
中国人民公安大学出版社, 2015. 6

武警学院统编教材

ISBN 978-7-5653-2210-5

I. ①建… II. ①李…②屈… III. ①建筑设计-防火-
武警院校-教材 IV. ①TU892

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 102105 号

武警学院统编教材

建筑结构与耐火设计

李胜利 屈立军 主编

出版发行: 中国人民公安大学出版社

地 址: 北京市西城区木樨地南里

邮政编码: 100038

印 刷: 北京泰锐印刷有限责任公司

版 次: 2015 年 6 月第 1 版

印 次: 2015 年 6 月第 1 次

印 张: 15.75

开 本: 787 毫米×1092 毫米 1/16

字 数: 291 千字

书 号: ISBN 978-7-5653-2210-5

定 价: 48.00 元

网 址: www.cppsups.com.cn www.porclub.com.cn

电子邮箱: zbs@cppsu.edu.cn zbs@cppsu.edu.cn

营销中心电话: 010-83903254

读者服务部电话 (门市): 010-83903257

警官读者俱乐部电话 (网购、邮购): 010-83903253

教材分社电话: 010-83903259

本社图书出现印装质量问题, 由本社负责退换
版权所有 侵权必究

说 明

教材作为体现教学内容和教学方法的知识载体，是深化教学改革、提高教学质量的重要保证。为满足我院各专业教学需要，我们组织各系（部）教员陆续编写了具有我院专业特色的系列教材。《建筑结构与耐火设计》是其中一部。

这套教材是以马克思列宁主义、毛泽东思想、邓小平理论、“三个代表”重要思想和科学发展观为指导，以教育部关于加强教材建设的文件精神、公安部关于教育训练改革的战略部署为依据，以提高教学质量、培养高素质人才为目的，按照学院人才培养方案和教学大纲的总体要求，在认真总结公安现役部队实战经验，充分吸收各学科最新理论成果和相关领域有益经验的基础上，结合公安现役高等教育自身发展规律编写而成的。在内容上，力求正确地阐述各门学科的基础理论、基础知识和基本技能，突出专业特色，贴近部队实际，并注意体现内容的科学性、系统性、适用性和相对稳定性。

本教材由李胜利、屈立军任主编。参加编写的人员有：李文莉（第一章、第六章、第八章第一节）；李胜利（第二章、第五章）；王跃琴（第三章、第四章第四节、第八章第二节）；邢君（第四章第一至第三节、第八章第四节）；陈鑫（第四章第五节、第七章、第八章第三节）。屈立军教授审核了编写提纲及书稿。

由于时间仓促，编者水平有限，缺点错误在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时修改。

这套教材在编写过程中，得到了上级主管部门、兄弟院校及有关部門的大力支持和帮助，谨在此深表谢意。

武警学院教材建设委员会

2015 年 5 月

目 录

第一章 建筑材料的力学性能	1
第一节 建筑钢材的力学性能	1
第二节 混凝土的力学性能	9
第二章 建筑结构设计方法	18
第一节 荷载效应与结构抗力	18
第二节 结构的可靠度理论	23
第三节 概率极限状态设计方法	27
第四节 建筑结构耐火设计方法	34
第三章 钢结构基本构件承载力计算	40
第一节 钢结构轴心受力构件	40
第二节 钢结构受弯构件	60
第三节 钢结构拉弯构件和压弯构件	71
第四章 钢筋混凝土结构基本构件承载力计算	80
第一节 钢筋混凝土构件的特点与构造要求	80
第二节 钢筋混凝土轴心受力构件	85
第三节 钢筋混凝土受弯构件的正截面承载力	89
第四节 矩形偏心受压构件正截面承载力计算	111
第五节 预应力混凝土结构简介	117
第五章 钢结构构件耐火设计	121
第一节 钢结构耐火保护方法	121
第二节 钢构件的临界温度计算	125
第三节 钢结构耐火保护层厚度计算	132
第四节 室内温度场	139
第五节 等效曝火时间	147
第六章 钢筋混凝土构件截面温度场计算	156
第一节 热传导微分方程	156
第二节 温度场的差分解法	161

第七章 钢筋混凝土构件耐火设计	168
第一节 火灾时钢筋混凝土构件的截面特征参数	168
第二节 轴心受压构件正截面承载力计算	172
第三节 受弯构件正截面承载力计算	176
第八章 建筑结构抗火试验与评估	181
第一节 钢筋混凝土结构抗火试验	181
第二节 钢结构抗火试验	191
第三节 钢结构抗火评估	201
第四节 混凝土框架结构受力分析	209
附 录	229
附录一 材料的力学性能	229
附录二 型钢截面参数	231
附录三 钢构件轴心受压稳定系数	239
附录四 混凝土保护层的最小厚度	241
附录五 纵向受力钢筋的最小配筋百分率	242
附录六 钢筋的计算截面面积及公称质量表	243
附录七 每米板宽各种钢筋间距时的钢筋截面积	244
主要参考文献	245

第一章 建筑材料的力学性能

工程中常用的建筑材料有粘土砖、石材、混凝土、木材、钢材、玻璃等。其中钢材、混凝土是最常用的结构承重材料，因此本章主要介绍这两类材料的力学性能。

第一节 建筑钢材的力学性能

钢材，是指含碳量小于 2% 的铁碳合金，其主要元素除铁、碳外，还有硅、锰、硫、磷等。建筑工程中使用的钢材分为钢结构用钢和钢筋混凝土结构用钢。

一、建筑钢材的常用钢种

(一) 碳素结构钢

碳素结构钢按屈服点的数值分为五个牌号，即 Q195、Q215、Q235、Q255 和 Q275，牌号由屈服点字母 Q 和屈服点数值组成。碳素结构钢随牌号增大，含碳量增加，其强度和硬度也会增大，但塑性和韧性降低。建筑工程中主要应用 Q235 钢，因 Q235 既有较高的强度，又有良好的塑性和韧性，而且可焊性也好，能满足一般钢结构和钢筋混凝土结构的用钢要求。

(二) 低合金结构钢

低合金结构钢是在碳素结构钢的基础上，添加少量合金元素（如硅、锰、钒、钛、铌等，合金总含量小于 5%）的一种结构钢。添加合金元素的目的是改善钢材性能，如提高钢材的屈服强度、抗拉强度、耐磨性、耐蚀性与耐低温性等。低合金高强度结构钢按屈服点的数值分为五个牌号，即 Q295、Q345、Q390、Q420 和 Q460。

二、建筑结构用钢分类

(一) 钢结构用钢

钢结构用钢主要是钢板和各类型钢，其常见钢种为 Q235、Q345、Q390、Q420。附表 1-1 给出了钢结构用钢的强度设计值，附录二给出了普通工字钢、

H 型钢的截面几何参数。

(二) 钢筋混凝土结构用钢

钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构用钢分为钢筋、钢丝和钢绞线。钢筋按加工工艺分为热轧钢筋、冷轧带肋钢筋、冷加工钢筋和热处理钢筋。

热轧钢筋指经热轧成型并自然冷却的成品钢筋，由低碳钢或普通合金钢在高温下压制而成。冷轧带肋钢筋是把热轧圆盘条经多道冷轧减径，一道压肋并经消除内应力后形成的一种带有两面或三面月牙形的钢筋。冷轧带肋钢筋具有强度高、塑性好，与混凝土黏结牢固，节约钢材，质量稳定等优点。冷加工钢筋包括冷拉和冷拔。冷拉是在常温下拉伸钢筋，使钢筋的应力超过屈服点，钢筋产生塑性变形，强度提高。冷拔是把 HPB300 级光面钢筋在常温下强力拉拔，使其通过特制的钨合金拔丝模孔，使钢筋变细，产生较大的塑性变形，强度提高而塑性降低。热处理钢筋是把热轧钢筋经淬火、回火等调质工艺处理后的钢筋，其强度大幅度提高而塑性降低不多。钢丝是用高碳镇定钢轧成圆盘，再经多次冷拔并进行应力消除、矫直回火处理而成。钢绞线是把多根高强钢丝绞在一起，分为 2 股、3 股和 7 股三种。

钢筋混凝土结构常用热轧钢筋有八种：HPB300（Ⅰ级，符号Φ），HRB335（Ⅱ级，符号Φ），HRBF335（Ⅱ级，符号Φ^F），HRB400（Ⅲ级，符号Φ），HRBF400（Ⅲ级，符号Φ^F），RRB400（余热处理Ⅲ级钢，符号Φ^R），HRB500（Ⅳ级，符号Φ），HRBF500（Ⅳ级，符号Φ^F）。随钢筋级别提高，其强度增大，但塑性降低。常用热轧钢筋的强度标准值和强度设计值分别见附表 1-2 和附表 1-3。

钢结构用钢和热轧钢筋都属于软钢，具有明显的流幅，软钢的设计强度以屈

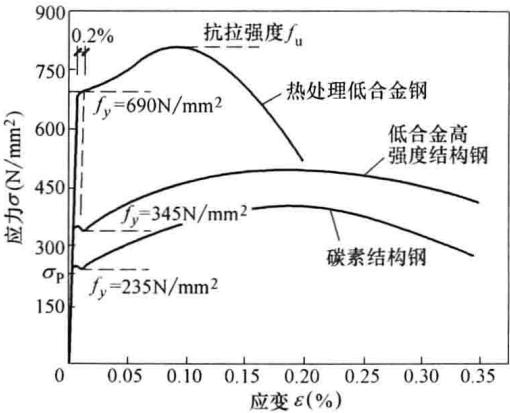


图 1-1 钢材单向拉伸应力-应变曲线

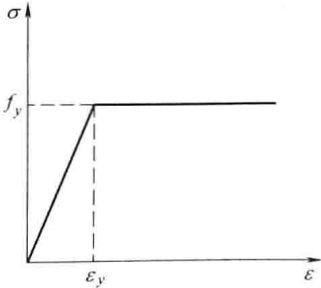


图 1-2 钢材的应力-应变曲线模型

服强度作为取值依据。热处理钢筋、钢丝和钢绞线属于硬钢，强度高，主要用于预应力混凝土结构。硬钢在拉伸试验中没有明显的屈服现象，其设计强度取条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 作为取值的依据。 $\sigma_{0.2}$ 是指钢材拉伸时残余应变为 0.2% 时所对应的应力，一般取抗拉强度 σ_b 的 0.85 倍。钢材的单向拉伸应力-应变曲线如图 1-1 所示。

为简化计算，钢结构设计时软钢的应力-应变曲线采用理想弹塑性模型，如图 1-2 所示。 f_y 为钢材的屈服强度， ϵ_y 为钢材的屈服应变。

钢材的弹性模量是钢材拉伸时应力与应变之比，反映钢材抵抗弹性变形的能力。钢结构用钢的弹性模量不分钢种，统一取 $E_s = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。钢筋混凝土结构所用钢筋的弹性模量取值见附表 1-4。

当钢筋强度较高时，为增加钢筋与混凝土之间的黏结力，往往把钢筋外形轧成人字形、月牙形或螺旋纹。钢筋混凝土结构除配置钢筋和钢丝外，有时也在型钢外浇筑混凝土，形成钢骨混凝土结构，如图 1-3 所示。

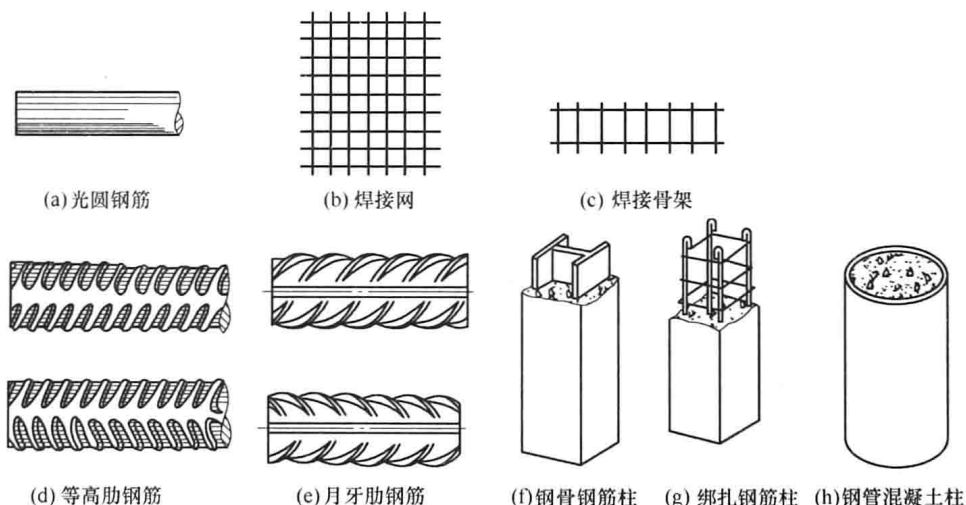


图 1-3 混凝土结构用钢及常见构件形式

三、影响钢材力学性能的因素

影响钢材力学性能的因素很多，除化学成分、生产工艺等钢材出厂前的影响因素外，使用过程中温度及应力集中也对钢材力学性能有较大影响。

(一) 温度对钢材性能的影响

1. 低温的影响

当温度低于常温时，随着温度的降低，钢材的强度略有提高，而塑性和韧性降低，逐渐变脆，称为钢材的低温冷脆。钢材的强度和塑性指标是由静力拉

伸试验获得的,用于承受动力荷载时,显然有很大的局限性。衡量钢材抗冲击性能的指标是钢材的韧性。韧性是钢材在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力,它与钢材的塑性有关而又不同于塑性,是强度与塑性的综合表现。韧性指标用冲击韧性值 a_K 表示,用冲击试验获得,它是判断钢材在冲击荷载作用下是否出现脆性破坏的主要指标之一。

在冲击试验中,一般采用截面为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$,长度为 55mm ,中间开有小槽的长方形试件,放在提锤式冲击试验机上进行试验。图 1-4 为钢材的冲击试验示意图。

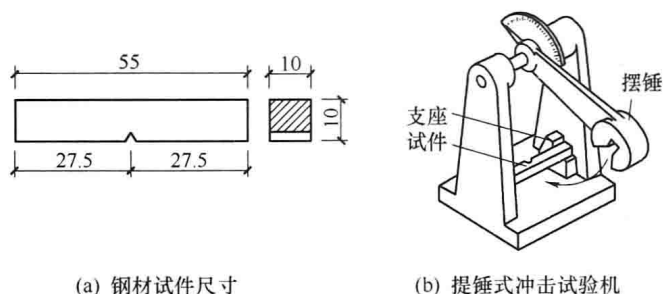


图 1-4 钢材冲击试验示意图

冲断试样后,由下式求出 a_K 值。

$$a_K = \frac{A_{KV}}{A_n} \quad (1-1)$$

式中 a_K ——冲击韧性, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$;

A_{KV} ——冲击功, $\text{N} \cdot \text{m}$, 由刻度盘读出;

A_n ——试件缺口处净截面面积, cm^2 。

冲击韧性 a_K 与试件缺口形式有关,还与试验的温度有关,温度越低,冲击韧性越低。

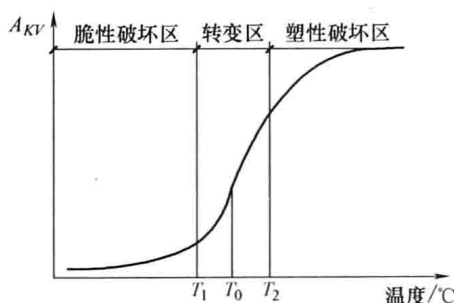


图 1-5 钢材缺口韧性与温度的关系

图 1-5 表示钢材的冲击功 A_{KV} 与温度的关系。随着温度的下降,钢材的冲击韧性下降,并且有一个转变温度区。为防止钢结构脆性破坏,要求结构使用温度大于 T_1 。对寒冷地区承受动力荷载的钢结构,除要求保证常温下的冲击韧性外,尚应根据钢材品种保证 0°C 、 -20°C 或 -40°C 时的冲击韧性。

2. 高温的影响

随温度升高, 钢材的强度、弹性模量降低, 而塑性增大。约在 200°C 以内, 钢材性能变化不大; 钢材在 250°C 附近会发生兰脆现象, 即强度提高而塑性降低; 在 $260\sim 320^{\circ}\text{C}$ 钢材发生蠕变现象, 即在应力不变情况下, 钢材以缓慢速度变形; 在 300°C 以后, 钢材的强度和弹性模量均开始显著下降, 塑性显著增加, 同时屈服平台消失; 在 $430\sim 540^{\circ}\text{C}$ 之间钢材的强度急剧下降; 550°C 时, 强度只有常温时的 $1/2$; 600°C 时, 强度只有常温时的 $1/3$, 强度很低而不能承担荷载, 钢材处于热塑性状态。

软钢的高温应力-应变曲线如图 1-6 所示。硬钢的高温应力-应变曲线如图 1-7 所示。计算时, 一般假定钢材高温时的应力-应变曲线模型和常温下相似, 如图 1-8 所示。

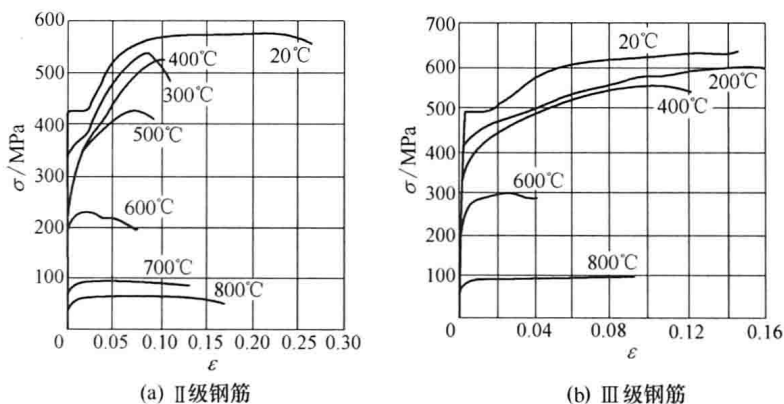


图 1-6 软钢的高温应力-应变曲线

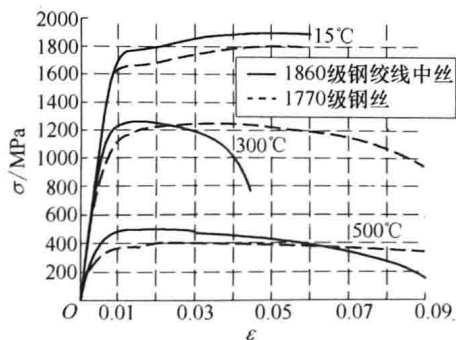


图 1-7 硬钢的高温应力-应变曲线

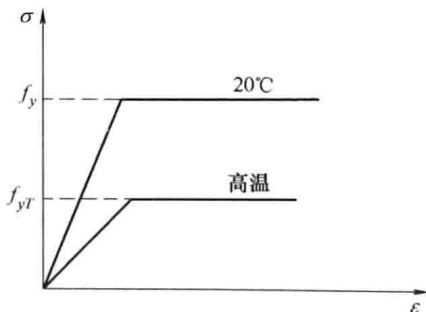


图 1-8 钢材高温时的应力-应变模型

(二) 应力集中的影响

当钢构件截面的完整性遭到破坏时,如有裂纹、孔洞、刻槽、截面突变以及钢材内部缺陷等,截面中的应力分布会变得很不均匀,如图 1-9 所示。在缺陷或截面突变处应力线曲折、密集,出现高峰应力的现象称为应力集中。

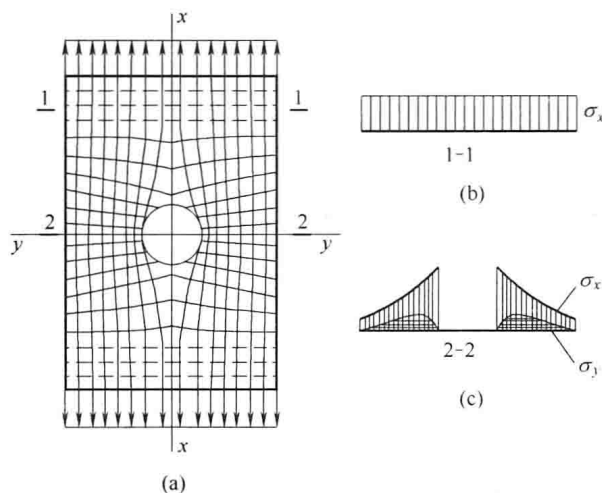


图 1-9 应力集中

在出现应力高峰的截面附近,截面较厚时将产生双向或三向应力。其原因是:材料某点在 x 方向伸长时, y 方向要收缩,由于 σ_x 分布很不均匀,最大应力处的横向收缩将受到较小应力处的阻碍,从而产生横向应力 σ_y 。

根据第四强度理论,复杂应力状态下单元体的折算应力为

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1-2)$$

当 $\sigma_0 < f_y$ 时,即折算应力小于钢材屈服强度时,钢材未屈服;当 $\sigma_0 > f_y$ 时,即折算应力大于钢材屈服强度时,钢材屈服。由上式可见,当材料具有同号应力时,很难进入屈服状态。

钢构件截面突变会产生应力集中,应力集中将引起同号双向应力或三向应力,而同号双向应力或三向应力会导致钢材变脆。应力集中现象的严重与否,决定于构件形状变化的大小。构件形状变化越急剧,高峰应力就越大,钢材的塑性也就降低越多。构件上裂纹和尖锐的凹角等都会出现严重的应力集中。应力集中现象的产生还可能是由于残余应力和钢材中存在非金属杂质,在外力作用下引起的。残余应力和外力引起的应力叠加,有时可能促使钢材发生脆性破坏。塑性破坏前,构件变形较大,具有明显的预兆;而脆性破坏是突然断裂,

无明显的预兆。

因此, 钢结构设计时应避免应力集中, 尽可能避免截面陡变, 采取圆滑过渡以及必要时进行表面加工等措施, 构件制造和施工时, 也应尽可能防止造成刻槽等缺陷。

四、建筑钢材的高温力学性能指标

结构用钢的高温力学性能指标是通过试验获得的。钢材在高温下的力学性能研究所采用的试验方法主要有两种: 恒温加载和恒载升温。

恒温加载是先将试件置于一恒定的温度场内, 待试件热变形平衡之后再对其施加荷载, 通过不同温度下的恒温加载试验就可得到不同温度下钢材的力学性能曲线, 以及强度、弹性模量和线膨胀系数等。恒温加载试验相对简单一些, 目前大部分数据由这种试验方法得到。

恒载升温试验是试件承受的荷载保持不变, 温度以一定的速率升高, 通过不断记录试件的应变变化而得到一定荷载水平和一定升温速率下应变与温度的关系, 改变荷载水平重复试验就可得到不同温度下钢材的应力-应变曲线。实际上, 建筑结构或构件在火灾前就已经承受有一定的荷载, 钢材中产生有一定的应力, 在保持该应力基本不变的条件下遭受火烧, 进而达到其临界温度而破坏。恒载升温正是模拟这种状态, 所以比恒温加载试验更加接近于实际情况。

(一) 钢结构用钢的高温力学性能指标

1. 有效屈服强度 f_{yT}

有效屈服强度 f_{yT} , 是指钢材在某一温度 T 时的实际屈服强度或条件屈服强度, 它是温度的函数。进行钢材高温强度计算时, 取钢材的有效屈服强度 f_{yT} 作为材料的强度取值指标。由于试验材料、试验方法、试验过程、试验控制方式和参数选择以及数据测量技术等不同, 国内外各研究机构给出的结果也不尽相同。国内钢结构耐火评估常采用的计算公式为:

$$\frac{f_{yT}}{f_{y20}} = \begin{cases} 1.0 & (20^{\circ}\text{C} \leq T_s < 300^{\circ}\text{C}) \\ 1.24 \times 10^{-8} T_s^3 - 2.096 \times 10^{-5} T_s^2 + 9.228 \times 10^{-3} T_s - 0.2168 & (300^{\circ}\text{C} \leq T_s < 800^{\circ}\text{C}) \\ 0.5 - T_s/2000 & (800^{\circ}\text{C} \leq T_s < 1000^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (1-3)$$

式中 f_{yT} ——钢材在温度 T 时的有效屈服强度, N/mm^2 ;

f_{y20} ——钢材在室温 20°C 时的屈服强度, N/mm^2 ;

T_s ——钢材温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2. 钢材的弹性模量

试验表明, 钢材的弹性模量随温度升高而降低。国内钢结构耐火评估常采

用的计算公式为:

$$\frac{E_{sT}}{E_{s20}} = \begin{cases} \frac{7T_s - 4780}{6T_s - 4760} & (20^\circ\text{C} \leq T_s < 600^\circ\text{C}) \\ \frac{1000 - T_s}{6T_s - 2800} & (600^\circ\text{C} \leq T_s < 1000^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1-4)$$

式中 E_{sT} ——钢材在温度 T 时的弹性模量, N/mm^2 ;

E_{s20} ——钢材在室温 20°C 时的弹性模量, N/mm^2 。

(二) 钢筋混凝土结构用钢的高温力学性能指标

1. 钢筋的强度

普通低碳钢, 随温度升高, 屈服台阶逐渐变小。到 300°C 时, 屈服台阶消失, 其屈服强度取条件屈服强度。在 400°C 以下时, 其强度比常温下略高, 但塑性降低。超过 400°C 时, 强度降低而塑性提高。

普通低合金钢在 300°C 以下时, 其强度略有提高但塑性降低。超过 300°C 时, 强度降低而塑性增加。低合金钢强度降低幅度比低碳钢稍小。

冷加工钢 (冷拉、冷拔、冷扭) 在冷加工过程中所提高的强度随温度升高而逐渐减小和消失, 但冷加工所减小的塑性可得到恢复。

高强钢丝属硬钢, 没有明显的屈服强度。在火灾高温下其极限抗拉强度比其他钢材降低更快。

定义钢筋在高温下的强度与常温下的强度之比为钢筋高温时的强度折减系数, 用 K_s 表示, 不同类别钢筋高温时的强度折减系数随温度升高的变化情况见表 1-1。钢材的抗压强度折减系数取值与抗拉强度折减系数相同。

表 1-1 钢筋高温时的强度降低系数 K_s

温度/ $^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700
普通低碳钢	1.00	1.00	1.00	0.67	0.52	0.30	0.05
普通低合金钢	1.00	1.00	0.85	0.75	0.60	0.40	0.20
冷加工钢	1.00	0.84	0.67	0.52	0.36	0.20	0.05
高强钢丝	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	—	—

2. 钢筋的弹性模量

钢筋的弹性模量随温度升高而降低, 但与钢筋种类和级别关系不大。定义钢筋在高温下的弹性模量与常温下的弹性模量之比为钢筋高温时的弹性模量折减系数, 用 K_{sE} 表示, 其值随温度升高的变化情况见表 1-2。

表 1-2 钢筋高温时的弹性模量折减系数 K_{sE}

温度/ $^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700
K_{sE}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70

第二节 混凝土的力学性能

混凝土是由胶凝材料、粗细骨料和水按适当比例配合,有时加入外加剂和掺和料,拌制成混合物,经一定时间硬化而成的人造石材。常用的胶凝材料有水泥、石膏、沥青以及水玻璃等,粗细骨料有石、砂以及重晶石、铁矿石、陶粒等。普通混凝土简称混凝土,是以水泥为胶凝材料,采用天然的普通砂、石作粗细骨料配制而成的混凝土,是建筑工程中应用范围最广、用量最大的混凝土,主要用作各类建筑的承重结构材料。

一、混凝土的常温力学性能

(一) 混凝土的强度

1. 混凝土的立方体抗压强度

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)的规定,按照标准的制作方法制成边长为 150mm 的立方体作为标准试件,在标准养护条件(温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度 90% 以上)下,养护至 28 天龄期,经标准试验方法(试验机加载板与试件之间不加润滑剂,混凝土强度等级低于 C30 时,加载速度为每秒钟 $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$,混凝土强度等级高于 C30 时,加载速度为每秒钟 $0.5 \sim 0.8 \text{ N/mm}^2$)测得的破坏时的平均压应力,称为混凝土的立方体抗压强度,以 f_{cu} 表示,单位 N/mm^2 。

2. 混凝土的立方体抗压强度标准值

混凝土的立方体抗压强度标准值是指用标准试验方法测得的具有 95% 保证率的立方体抗压强度,混凝土的立方体抗压强度标准值用 $f_{cu,k}$ 表示,单位 N/mm^2 。

$$f_{cu,k} = \mu_{f_{cu}} - 1.645\sigma_{f_{cu}} \quad (1-5)$$

式中 $\mu_{f_{cu}}$ ——一批混凝土立方体抗压强度的均值;

$\sigma_{f_{cu}}$ ——一批混凝土立方体抗压强度的方差。

为了便于设计选用和施工控制,根据混凝土立方体抗压强度标准值,将混凝土强度分成若干等级,即强度等级。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定,混凝土强度等级划分为 14 级: C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。其中, C50~C80 属高强混凝土。强度等级的表示方法是用“C”和“立方体抗压强度标准值”两项内容表示,如“C30”表示混凝土立方体抗压强度标准值为 30 N/mm^2 。

3. 混凝土的轴心抗压强度

试验表明,混凝土的抗压强度不仅与试件的尺寸有关,而且与试件的形状有关。实际工程中,混凝土构件大多是棱柱体,采用棱柱体试件测定抗压强度更能反映构件的受力特性。结构计算中所采用的混凝土轴心抗压强度即是用棱柱体来测定的。

试件尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 或 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 450\text{mm}$,其制作与养护同立方体试件,在棱柱体上测得的破坏时的平均压应力,称为混凝土的轴心抗压强度,以 f_c 表示,单位 N/mm^2 。

根据大量试验结果,混凝土轴心抗压强度 f_c 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 大致呈线性关系。《混凝土结构设计规范》对混凝土的轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与设计值 f_c 按下式计算:

$$f_{ck} = 0.88a_1a_2f_{cu,k} \quad (1-6)$$

$$f_c = f_{ck}/\gamma_c = f_{ck}/1.4 \quad (1-7)$$

式中 a_1 ——混凝土轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值之比,对混凝土强度等级为 C50 及其以下的取 $a_1 = 0.76$,对 C80 取 $a_1 = 0.82$,中间值采用线性内插;

a_2 ——高强度混凝土的脆性折减系数,对 C40 及其以下的取 $a_2 = 1.00$,对 C80 取 $a_2 = 0.87$,中间值采用线性内插;

γ_c ——结构材料的分项系数,对于混凝土结构取 1.4;

0.88——考虑实际构件与试件混凝土强度之间的差异而取用的折减系数。

4. 混凝土的轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度采用试件为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$,两端对中各预埋一根直径为 16mm 螺纹钢筋进行抗拉测定。试验时用试验机的夹具夹紧试件两端外伸的钢筋施加拉力,试件被拉断时其截面上的平均拉应力称为混凝土的轴心抗拉强度,以 f_t 表示,单位 N/mm^2 。

根据大量试验结果,混凝土轴心抗拉强度 f_t 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 大致呈曲线关系。《混凝土结构设计规范》对混凝土的轴心抗拉强度的标准值与设计值按下式计算:

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_2 \quad (1-8)$$

$$f_t = f_{tk}/\gamma_c = f_{tk}/1.4 \quad (1-9)$$

式中, δ 为混凝土立方体抗压强度的变异系数,取值见《混凝土结构设计规范》。

各级混凝土的强度标准值见附表 1-5,强度设计值见附表 1-6。

(二) 混凝土的变形

混凝土在硬化和使用过程中,受外界各种因素的影响会产生变形,变形是使混凝土产生裂缝的重要原因之一。

1. 混凝土在一次短期加荷作用下的变形

(1) 混凝土的应力-应变曲线

混凝土在一次短期加荷作用下的应力-应变曲线能够反映混凝土基本的力学性能,混凝土的应力-应变关系是研究和建立混凝土结构的强度、裂缝和变形计算的必要依据。混凝土构件截面的应力分布,挠度和裂缝分析,超静定结构的内力分布,塑性铰的极限转角,预应力的损失等都与应力-应变关系有关。

混凝土的应力-应变曲线一般取棱柱体试件来测定,通过安装在试件四个侧面的应变仪可测得不同应力下的变形值,从而画出应力-应变曲线。试验表明,完整的混凝土应力-应变曲线包括上升段和下降段两部分,如图 1-10 所示。

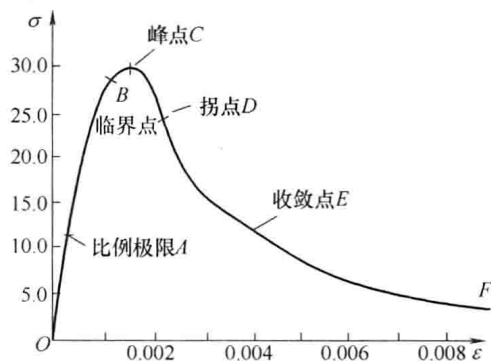


图 1-10 混凝土的应力-应变曲线

上升段 OC: 从加荷到 A 点,试件截面上的应力在 $(0.3 \sim 0.4) f_c$ 范围内,由于应力较小,混凝土的变形主要是骨料和水泥结晶体受力后产生的弹性变形,OA 段接近于直线。A 点称为比例极限点。随着荷载的增大,当应力在 $(0.3 \sim 0.8) f_c$ 范围时,混凝土呈现出明显的塑性,应力-应变曲线凸向应力轴,应变增长比应力要快。这是由于在荷载作用下,水泥凝胶体的黏性流动以及混凝土中微裂缝的出现和扩展所造成的。AB 段称为稳定裂缝扩展阶段,临界点 B 可作为混凝土的长期抗压强度的依据。当应力大于 $0.8 f_c$ 之后 (BC 段),混凝土内部微裂缝进入非稳态发展阶段,塑性变形急剧增大,曲线斜率明显减小。当应力继续增大到 f_c 时,混凝土内部黏结力破坏,随着微裂缝的延伸和扩展,试件形成若干贯通的纵向裂缝,应变增长更快,混凝土应力达到受压时最大承压应力 $\sigma_{\max}$ (峰值应力)称为混凝土的轴心抗压强度 f_c ,相应的应变称为峰值应变 ϵ_0 。试验表明, ϵ_0 在 $0.0015 \sim 0.0025$ 之间波动,平均值为 0.002。

下降段 CE: 当试件应力达到 f_c 之后,裂缝迅速发展,混凝土内部结构的整体性受到越来越严重的破坏,试件的平均应力强度下降,承载能力将开始下降, $\sigma\epsilon$ 曲线向下弯曲,直到曲线的凹向发生改变 (曲率为零的一点 D),D 点