

绪 论

土木工程材料是指人类建造活动中所使用一切材料,如砖、石、石灰、石膏、水泥、混凝土、砂浆、钢材、木材、沥青、塑料,以及绝热、吸声、装饰材料等的总称。它是一切土木工程的物质基础。由于组分、结构和构造的不同,土木工程材料的品种门类繁多、性能各不相同、价格相差悬殊,且由于其在土木工程中用量巨大,因此正确选择和合理使用土木工程材料对整个工程的安全、实用、美观、耐久及造价就具有重大意义。一般来说,优良的土木工程材料必须具有:足够的力学强度,以安全地承受设计荷载;自重小,以减轻下部结构和地基的负荷;具有与使用环境相适应的耐久性,以便减少维修费用;用于特殊部位的材料,应具有相应的特殊功能,如隔热、防水、隔音等。同时,土木工程材料应具有与环境的相适应性和对居住环境的安全性。

土木工程材料的发展经历了漫长的历史过程,并随着人类社会生产力和科学技术水平的提高而不断产生品种繁多的新材料。天然的土、石、木、竹等是古人类主要的建筑材料,我国古代劳动人民巧妙地运用和加工天然的建筑材料,建造出当时最高水平并且流传至今的建筑结构,其中最为雄伟和壮观的土木工程要属万里长城。根据历史记载,有二十多个诸侯国家和封建王朝修筑过长城,其中秦、汉、明三个朝代所修长城的长度都超过一万里,总长度大约有十万里以上!修筑长城的建筑材料,在没有大量用砖之前,主要是土、石和木料、瓦件等,需用的土、石量很大,一般都是就地取材。如在高山峻岭就开山取石,用石块砌筑;在平原黄土地带则就地取土,用土夯筑;在沙漠地区还采用芦苇或红柳枝条层层铺砂的办法来修筑。明朝的长城在许多重要地段采用了砖石垒砌城墙,除土、石、木料外,还用大量砖和石灰,不但修得坚固,而且关外有关、城外有城,长城沿线修建了许多城堡和烽火台,把它和首都以及重要州、县形成一个有机的军事防御工程体系。其材料运输量之浩大、工程之艰巨世所罕见,充分体现了我国古代建筑工程的伟大成就,表现出我国古代劳动人民的聪明才智。自18世纪以来,西方工业国家发明出种种现代建筑材料,从钢材、水泥混凝土、钢筋与预应力混凝土,到近三四十年以来出现的纤维增强水泥基材料和纤维增强塑料、彩板轻钢、建筑膜等,为基础设施建设,包括道路、桥梁、铁路、机场和港口等交通设施和水利灌溉、给排水及居住建筑、通信等的迅速发展奠定了基础。

土木工程材料可按不同原则分类。依据材料来源,可分为天然材料和人造材料;依据使用功能,可分为结构材料、墙体材料、装饰材料、防水材料、绝热材料等。为研究方便起见,通常依据组成材料的化学成分和物质种类将其分为无机材料、有

机材料和复合材料三大类(图 0.1)。

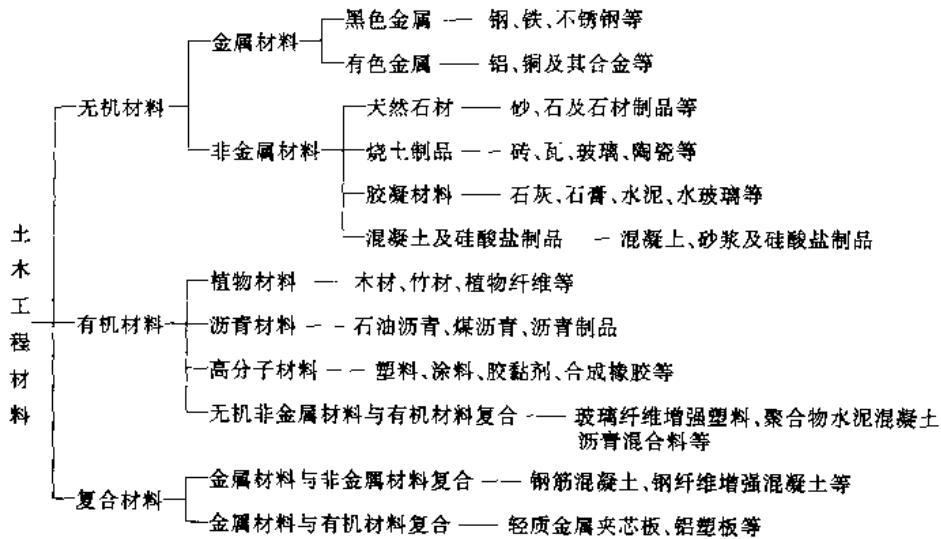


图 0.1 土木工程材料的分类

土木工程材料的技术标准是生产和使用单位检验、确认产品质量是否合格的技术文件。其主要内容包括：产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收规则、运输和储存注意事项等。目前，我国技术标准分为四级：国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。

1) 国家标准。国家标准有强制性标准(GB)、推荐性标准(GB/T)。

2) 行业标准。行业标准如建筑工程行业标准(代号 JGJ)、建筑材料行业标准(代号 JC)、交通工程行业标准(代号 JT)、冶金工业行业标准(代号 YB)等。

3) 地方标准。地方标准是由地方主管部门发布的地方性技术指导文件，代号为 DBJ。

4) 企业标准。凡没有制定国家标准、行业标准的产品，均应制定企业标准。企业标准仅适用于本企业，代号为 QB。

对强制性国家标准，任何技术(或产品)不得低于其中规定的要求；对推荐性国家标准，表示也可执行其他标准的要求；地方标准或企业标准所制定的技术要求应高于国家标准。

标准的表示方法通常为：标准名称、部门代号、编号和批准年份。例如，国家标准(强制性)《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204-2002)；国家标准(推荐性)《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080-2002)；建工行业标准《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2000)。

随着我国对外开放和对外参与国际土木工程投标建设，还经常涉及与土木工程关系密切的国际或外国标准，其中主要有：国际标准，代号为 ISO；美国材料与试

验协会标准,代号为 ASTM;德国工业标准,代号为 DIN;英国标准,代号为 BS;法国标准,代号为 NF 等。

本课程是土建类工程监理专业的一门技术基础课,并兼有专业课的性质。课程的任务是使学生通过学习,获得土木工程材料的基础知识,掌握土木工程材料的性能、应用技术及材料的试验检测技能,以便在今后的工程监理工作中正确地评价、选择和合理使用土木工程材料,也为进一步学习其他相关的专业课打下基础。

土木工程材料是一门实践性和适用性很强的课程,除了课堂理论教学以外,注重日常工程实践的观察和试验训练非常重要。通过参观和观察可以了解不断涌现的新的土木工程材料;通过重要的试验教学环节可以验证基本理论,学习试验方法,掌握土木工程材料的检验评价方法,培养科学研究的能力和严谨的科学态度。

第一章 土木工程材料的基本性质

本章主要介绍土木工程材料的基本物理、力学、化学性质和相关参数的计算公式,同时对其他性质做简要介绍。

在土木工程各类构筑物和建筑物中,各部位所起的作用不同,在使用过程中所处环境和受到的侵蚀作用也各不相同。这就要求用于不同建筑部位和不同环境的土木工程材料应具有与其相适应的性质。为了保证构筑物和建筑物的正常使用,保证良好的耐久性,要求在工程设计与施工中正确地选择和合理地使用材料,熟悉和掌握各种土木工程材料的基本性质。

1.1 土木工程材料的基本物理性质

1.1.1 材料的基本物性参数

1. 密度 ρ

密度是指材料在绝对密实状态下,单位体积的质量,按下式计算:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中: ρ ——密度, g/cm^3 ;

m ——材料的质量, g ;

V ——材料在绝对密实状态下的体积, cm^3 。

绝对密实状态下的体积是指不包括孔隙在内的体积。在常用土木工程材料中,除了钢材、玻璃等少数接近于绝对密实的材料外,绝大多数材料都含有一定的孔隙。在测量有孔隙的材料密度时,应把材料磨成细粉以排除其内部孔隙,以李氏瓶法测定其密度。

2. 表观密度 ρ_0

表观密度是指材料在自然状态下,单位体积的质量,按下式计算:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

式中: ρ_0 ——表观密度, g/cm^3 ;

m ——材料的质量, g ;

V_0 ——材料的自然体积, cm^3 。

材料的自然体积是指包含内部孔隙体积在内的体积。材料内常含有水分,材料的质量会随其含水率的变化而变化,因此测定表观密度时应注明其含水状态。材料的表观密度大小取决于材料的密度、孔隙率、孔隙构造和其含水情况。

3. 堆积密度 ρ_0

堆积密度是指散粒材料(粉状及颗粒状材料)在堆积状态下,单位体积的质量。按下式计算:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

式中: ρ_0 ——堆积密度, kg/m^3 ;

m ——材料的质量, kg ;

V_0 ——材料的堆积体积, m^3 。

材料的堆积密度取决于材料颗粒的表观密度以及颗粒堆积的密实程度,同时材料的含水状态也会影响堆积密度值。

在土木工程中,进行配料计算、确定材料堆积空间和运输量、计算材料用量以及构件自重等时,经常用到材料的密度、表观密度、堆积密度。

1.1.2 材料的基本结构参数

1. 密实度 D

密实度是指材料的体积内被固体物质填充的程度,按下式计算:

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% \quad \text{或} \quad D = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\%$$

2. 孔隙率 P

孔隙率是指材料体积内孔隙体积占材料自然体积的百分率,按下式计算:

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - \frac{V}{V_0} = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\%$$

密实度和孔隙率是从不同的两个方面反映材料的同一性质,对同一材料,其 $P + D = 1$ 。

材料的许多性质(如强度、吸湿性、抗冻性、吸声性等)均与孔隙率的大小密切相关,同时还与孔隙的构造特征有关。孔隙特征是指孔隙的形状、孔隙的大小和分布状态。按孔隙的形状将其分为开口孔和闭口孔(以常温常压下,水是否能进入孔中划分);按孔隙的孔径大小将其分为粗孔和微孔。在工程实践中,经常通过控制材料的孔隙率和孔隙特征以改善材料的某些性能。

3. 填充率 D'

填充率是指在某堆积体积中,被散粒材料的颗粒所填充的程度,按下式计算:

$$D' = \frac{V_0}{V_0} \times 100\% \quad \text{或} \quad D' = \frac{\rho_0}{\rho_0} \times 100\%$$

4. 空隙率 P'

空隙率是指在颗粒状材料的堆积体积内,散粒材料颗粒间空隙体积所占的比例,按下式计算:

$$P' = \frac{V'_0 - V_0}{V'_0} = 1 - \frac{V_0}{V'_0} = \left(1 - \frac{\rho'_0}{\rho_0} \right) \times 100\%$$

即

$$P' + D' = 1$$

空隙率的大小反映了散粒材料的颗粒之间相互填充的程度。空隙率可作为控制混凝土集料的级配及计算砂率的依据。

1.1.3 材料与水有关的性质

1. 亲水性和憎水性

材料的亲水性是指材料在空气中与水接触时,容易被水润湿的性质,其润湿角 $\theta < 90^\circ$ 。混凝土、砂、石等属于亲水性材料。

材料的憎水性是指材料不易被水润湿的性质,其润湿角 $\theta > 90^\circ$ 。玻璃、塑料、沥青等属于憎水性材料。憎水性材料在建筑上常被用作防水材料。材料的润湿情况如图 1.1 所示。

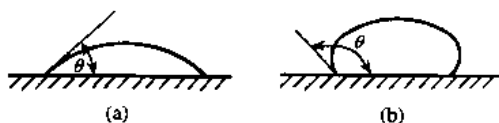


图 1.1 材料的润湿示意图

(a)亲水性材料;(b)憎水性材料

2. 吸湿性

吸湿性是指材料在潮湿空气中吸收水分的性质。用含水率 $W_{\text{含}}$ 表示材料中水分的多少,材料的含水率是指材料所含水分的质量占材料干燥质量的百分数,即

$$W_{\text{含}} = \frac{m_{\text{湿}} - m_{\text{干}}}{m_{\text{干}}} \times 100\%$$

式中: $m_{\text{湿}}$ ——材料含水时的质量,g;

$m_{\text{干}}$ ——材料的干燥质量,g。

一般来说,材料的含水率与其孔隙特征和亲水性有关。此外,还与材料所处环境的温度和湿度有关。当材料的含水率与环境湿度达到平衡状态时,称为平衡含水率。木材在使用时应考虑其是否达到平衡含水率。

3. 吸水性

吸水性是指材料在水中吸收水分的性质,用吸水率表示。吸水率有质量吸水率 W_m 和体积吸水率 W_v 两种。

质量吸水率为材料吸水饱和时,所吸水的质量占材料干燥质量的百分数,即

$$W_m = \frac{m_{\text{湿}} - m_{\text{干}}}{m_{\text{干}}} \times 100\%$$

式中: $m_{\text{湿}}$ ——材料吸水饱和后的质量,g;

$m_{\text{干}}$ ——材料的干燥质量,g。

体积吸水率是指材料吸水饱和时,所吸水的体积占材料自然体积的百分数,即

$$W_v = \frac{m_{\text{湿}} - m_{\text{干}}}{V_0} \times \frac{1}{\rho_w} \times 100\%$$

式中: $m_{\text{湿}}$ ——材料吸水饱和后的质量,g;

$m_{\text{干}}$ ——材料的干燥质量,g;

ρ_w ——水的密度,g/cm³;

V_0 ——材料的自然体积,cm³。

W_v 常用于轻质多孔材料。

材料吸水后其强度降低,耐久性下降,体积膨胀和导热性增大。因此,吸水率大,对材料性质易产生不利影响。

4. 耐水性

耐水性是指材料在长期饱和水的作用下,不破坏,强度也不显著降低的性质,用软化系数 K 表示。软化系数表示材料在饱和水作用下,强度降低的程度。软化系数的范围在 0~1 之间。软化系数计算如下:

$$K = \frac{f_w}{f}$$

式中: f_w ——材料在吸水饱和后的抗压强度,MPa;

f ——材料在干燥状态下的抗压强度,MPa。

对于经常位于水中或受潮严重的重要结构物的材料,其软化系数不宜低于 0.85;受潮较轻的或次要结构物的材料,其软化系数不宜低于 0.75。软化系数大于 0.8 的材料,通常可认为是耐水的材料。

5. 抗渗性

抗渗性是指材料抵抗压力水渗透的性质。地下建筑物和水工建筑物用材料要求具有一定的抗渗性,用作防水的材料对抗渗性要求更高。

材料的抗渗性主要取决于其孔隙率的大小和孔隙特征。孔隙率小且孔隙为闭口孔的材料抗渗性好。

材料的抗渗性用抗渗等级 P_n 表示, n 为材料能抵抗的最大水压,如 P_2 、 P_4 、 P_6 、 P_8 、 P_{10} 、 P_{12} 等。

6. 抗冻性

抗冻性是指材料在水饱和状态下,经受多次冻融循环不破坏,强度也不显著降低的性质。

所谓冻融循环是指将吸水饱和后的材料置于 -20°C 下冻结规定时间,然后在 $+20^{\circ}\text{C}$ 左右的水中融化,并反复进行该过程。通过测定其质量和强度损失情况来衡量材料的抗冻性。

材料经多次冻融交替作用后,表面将出现剥落、裂纹,产生质量损失和强度降低。冰冻对材料的破坏作用,在于材料孔隙中的水分结冰时体积膨胀而对孔壁产生很大的压力造成孔壁破裂所致。

材料的抗冻性与其材料内孔隙构造特征、材料强度、吸水饱和程度等因素有关。抗冻性良好的材料,对于抵抗温度变化、干湿交替等破坏作用的能力也较强。所以,抗冻性常作为评价材料耐久性的一个指标。

对常处于冻融环境的混凝土,常用抗冻等级 F_n 表示其抗冻性, n 是混凝土能够经受的冻融循环次数,如 F_{25} 、 F_{30} 、 F_{100} 、 F_{150} 等。

1.1.4 材料与热有关的性质

1. 导热性

导热性是指材料传导热量的性质,用导热系数 λ 表示。导热系数在数值上等于厚度为 1m 的材料,当其相对两侧表面的温差为 1K 时,经单位面积(1m^2)、单位时间(1s)所通过的能量可用下式表示:

$$\lambda = \frac{Qd}{At(T_1 - T_2)}$$

式中: λ ——材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

Q ——传导的热量, J ;

d ——材料的厚度, m ;

A ——材料的传热面积, m^2 ;

t ——传热时间, s ;

$T_1 - T_2$ ——材料两侧的温度差, K 。

导热系数是评定材料保温隔热性能的重要指标,导热系数小,其保温隔热性能好。材料的导热系数主要取决于材料的组成和结构。一般来说,金属材料的导热系数大,无机非金属材料适中,有机材料最小。孔隙率大且为闭口微孔的材料导热系数小。此外,材料的导热系数还与其含水率有关,含水率增大,其导热系数明显增大。

2. 热容量

热容量是指材料温度变化 1K 时所吸收或放出的热量。热容量的大小用比热容 c 表示。比热容表示 1g 的材料,温度升高 1K 时所吸收的热量或降低 1K 时放出的热量,可用下式表示:

$$Q = cm(T_1 - T_2)$$

式中: Q ——材料吸收或放出的热量, J;

c ——材料的比热容, J/(g · K);

m ——材料的质量, g;

$T_1 - T_2$ ——材料受热或冷却前后的温度差, K。

材料的比热容, 对保持建筑物的室内温度稳定有很大的意义, 采用热容量大的材料作建筑物的围护材料, 能在热流变动或采暖设备供热不均匀时, 缓和室内的温度波动。几种典型材料的热参数见表 1.1。

表 1.1 几种典型材料的热参数

材料名称	钢 材	混凝土	松 木	烧结砖	花岗岩	封闭空气	水
比热容/[J/(g · K)]	0.48	0.84	2.72	0.88	0.92	1.00	4.18
导热系数/[W/(m · K)]	58	1.51	1.71~0.35	0.80	3.49	0.023	0.58

3. 热变形性

材料的热变形性是指材料在温度变化时其尺寸的变化。常用长度方向变化的线膨胀系数表示, 计算公式如下:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(t_2 - t_1)}$$

式中: α ——线膨胀系数, 1/K;

L ——材料原长度, mm;

ΔL ——材料的线变形量, mm;

$t_2 - t_1$ ——材料在升降温前后的温度差, K。

材料的热变形对土木工程是不利的。对于像金属、塑料等热膨胀系数大的材料, 因温度和日照都易引起伸缩, 成为构件产生位移的原因, 在构件接合和组合时都必须予以注意; 大面积水泥混凝土路面或大体积混凝土工程中, 热变形产生的膨胀应力超过混凝土的抗拉强度时, 会引起温度裂缝等。

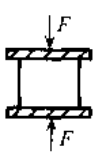
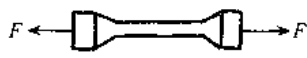
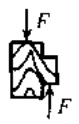
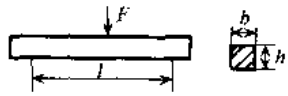
1.2 土木工程材料的力学性质

1.2.1 材料的强度及强度等级

1. 强度

强度是指材料在外力(荷载)作用下, 抵抗破坏的能力。材料抵抗静荷载产生应力破坏的能力, 称为材料的静力强度。它是用材料在静荷载作用下达到破坏时的极限应力值表示的, 是通过对材料试件进行破坏试验而测得的。根据外力作用的情况不同, 材料主要有抗压、抗拉、抗剪、抗弯四种强度, 如表 1.2 所示。

表 1.2 静力强度分类

强度类别	举 例	计算式
抗压强度 f_c /MPa		$f_c = \frac{F}{A}$
抗拉强度 f_t /MPa		$f_t = \frac{F}{A}$
抗剪强度 f_s /MPa		$f_s = \frac{F}{A}$
抗弯强度 f_m /MPa		$f_m = \frac{3Fl}{2bh^2}$

注: F 为破坏荷载(N); A 为受荷面积(mm^2); l 为跨度(mm); b 为断面宽度(mm); h 为断面高度(mm)。

不同种类的材料其强度不同,同种材料其强度随孔隙率及宏观构造特征的不同也有很大差异。一般来说,材料的孔隙率越大,其强度越低。此外,所测得的材料强度值还与试验时材料试件的形状、尺寸、表面状态、含水率及试验时的加荷速度等有关。因此,测定材料强度时,应严格按国家标准规定的方法进行。

2. 强度等级

为了掌握材料的力学性质,合理选择及使用材料,常将土木工程材料划分成不同的强度等级。强度等级是指按照材料相应强度值的不同,将其划分成若干个不同的强度级别。

由于钢材在土木工程中主要用于抗拉,因此以其屈服强度划分其强度等级。对于水泥混凝土等主要用于抗压的材料,则以其相应的抗压强度值作为划分强度等级的依据。

对以相应的抗压强度值作为划分强度等级依据的材料,如混凝土、轻混凝土、砖、砌块、水泥、砂浆等,其强度等级的表示方法有如下一些共同特点:

1) 强度等级符号均由表示材料品种的相应字母和相应的等级强度值两个部分组成。表示材料品种的符号见表 1.3。

表 1.3 表示材料的符号

材料品种	符号	材料品种	符号	材料品种	符号	材料品种	符号
混凝土	C	砌块	Mu	普通水泥	PO	矿渣水泥	PS
轻混凝土	CL	砖	Mu	复合水泥	PC	火山灰水泥	PP
砂浆	M	硅酸盐水泥	P	粉煤灰水泥	PF		

2) 等级强度值均为 28 天龄期的相应强度规定值。

3) 材料 28 天龄期的相应实际强度值均不得低于其等级强度值;否则,材料的强度不合格。

M5 表示强度等级为 5MPa 的砂浆,或者 28 天抗压强度值不低于 5MPa 的砂浆。C30 表示强度等级为 30MPa 的混凝土,或者立方体抗压强度标准值为 30MPa 的混凝土。

3. 比强度

比强度是按单位质量计算的材料强度,其值等于材料的强度与其表观密度的比值,它是衡量材料轻质高强的主要指标。常用钢材、混凝土、木材的强度比数值见表 1.4。

表 1.4 钢材、混凝土、木材的比强度值

材 料	表观密度 $\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	抗压强度 f_c/MPa	比强度 f_c/ρ_0
低 碳 钢	7 860	415	0.053
普通混凝土	2 400	30	0.012
松 木	500	34.3	0.069

比强度越大,材料的轻质高强性能越好。选用比强度大的材料或提高材料的比强度,对减轻结构自重、降低工程造价等具有重大意义。

1.2.2 材料的变形性质

1. 弹性与塑性

弹性是指材料在外力作用下产生变形,当外力取消后,能够完全恢复原来的形状和尺寸的性质。这种能完全恢复的变形称为弹性变形。

塑性是指材料在外力作用下产生变形,当外力取消后能完全保持变形后的形状和尺寸的性质。这种不能恢复的变形称为塑性变形(永久变形)。

实际上,完全的弹性或塑性材料均是不存在的。各种材料在不同的应力作用下,表现出不同的变形性能。

2. 脆性与韧性

脆性是指材料在外力作用下,当应力达到一定限度后,无明显的塑性变形而突然破坏的性质。具有这种性质的材料称为脆性材料,如石材、混凝土、玻璃、陶瓷等。这类材料的抗压强度远高于其抗拉强度,不宜承受冲击、振动荷载。

韧性是指材料在外力作用下,在破坏前有显著的塑性变形出现的性质,如建筑钢材、有色金属、木材等均属韧性材料。对承受冲击、振动荷载的结构,选用材料时要考虑其塑性和韧性。

1.3 土木工程材料的耐久性

材料的耐久性是指材料在使用环境中,在多种因素作用下能长期不变质、不破坏而保持其原有性能的性质。

材料在使用过程中,除受各种力的作用外,还会受周围环境的各种自然因素的影响,包括物理作用、化学作用、生物作用和碳化作用。

物理作用包括干湿变化、温度变化、冻融变化、磨损、溶蚀等。这些作用都会使材料受到一定程度的破坏,影响材料的长期使用。

化学作用包括酸、碱、盐类的水溶液及有害气体等对材料的腐蚀作用,导致材料变质或遭损。

生物作用是指昆虫、菌类等对材料的蛀蚀和腐朽作用。

碳化作用是材料在空气中 CO_2 的作用下,发生碳化而破坏。

影响材料耐久性的因素是多方面的,耐久性是一项综合性的性质,主要包括抗冻性、抗蚀性、抗风化性、抗渗性、耐磨性、大气稳定性等。对不同种类的材料来说,其耐久性的内容各不相同。处在不同建筑部位及工程所处环境不同,其材料的耐久性也具有不同的内容。

思 考 题

- 1.1 C40、P42.5、F100、Mu15、M2.5 的含义是什么?
- 1.2 什么是材料的表观密度、堆积密度、吸湿性、含水率、抗冻性?
- 1.3 什么是材料的强度、强度等级? 什么是材料的弹性、塑性?
- 1.4 什么是材料的孔隙率、孔隙特征? 它们对材料的性能有何影响?
- 1.5 某混凝土工程施工,每拌制一盘混凝土需加干砂 240kg,测得现场用砂的含水率为 3%,求每拌制一盘混凝土时湿砂的投料量是多少?

第二章 建筑金属材料

本章的重点是介绍钢材的力学性能、钢材的强化以及钢材的性质与选用;阐述钢材的化学组成及晶体结构与性质的关系、建筑钢材的锈蚀与保护,并简要介绍了铝和铝合金材料。

建筑金属材料已经越来越多地应用在现代建筑工程当中,尤其是一些建筑钢材和轻金属材料已经得到广泛应用。

建筑钢材是指建筑工程中所用的各种钢材。主要有用于钢结构的各种型钢、钢板、钢管和用于混凝土结构中的各种钢筋、钢丝、钢绞线。钢材具有较高的抗拉、抗压、抗冲击和耐疲劳的特性,可以通过焊接、铆接、切割和热加工等手段制成的制品和钢结构。随着建筑业和钢铁工业的快速发展,尤其是在高层建筑和大跨度结构中,钢材是重要的建筑材料之一。

轻金属材料一般具有轻质高强的特性,其优良的特性在建筑工程应用中得到快速发展,本章主要介绍铝和铝合金。

2.1 钢材的化学组成、晶体结构与性质的关系

钢材是以铁元素为主的并含有碳元素以及其他化学元素的晶体材料,化学元素和它的含量以及晶体结构不同都会影响钢材的性质。

钢材按化学成分可分为:碳素钢和合金钢两大类。碳素钢根据含碳量可分为:低碳钢(含碳量小于 0.25%)、中碳钢(含碳量 0.25%~0.6%)和高碳钢(碳量大于 0.6%)。合金钢按合金元素的总含量可分为:低合金钢(合金元素含量小于 5%)、中合金钢(合金元素含量为 5%~10%)和高合金钢(合金元素含量大于 10%)。

2.1.1 钢材的化学组成对其性质的影响

1. 碳

由于碳元素对钢材的强度、塑性、韧性影响都很大,它对钢材性质有决定性的作用。一般地,随着含碳量的增加,钢材的强度和硬度会相应提高,而塑性和韧性相应降低,但含碳量超过 1%时,钢材的极限强度开始下降。此外,含碳量过高还会增加钢的冷脆性和时效敏感性,降低抗大气腐蚀性和可焊性。含碳量对钢材性能的影响如图 2.1 所示。

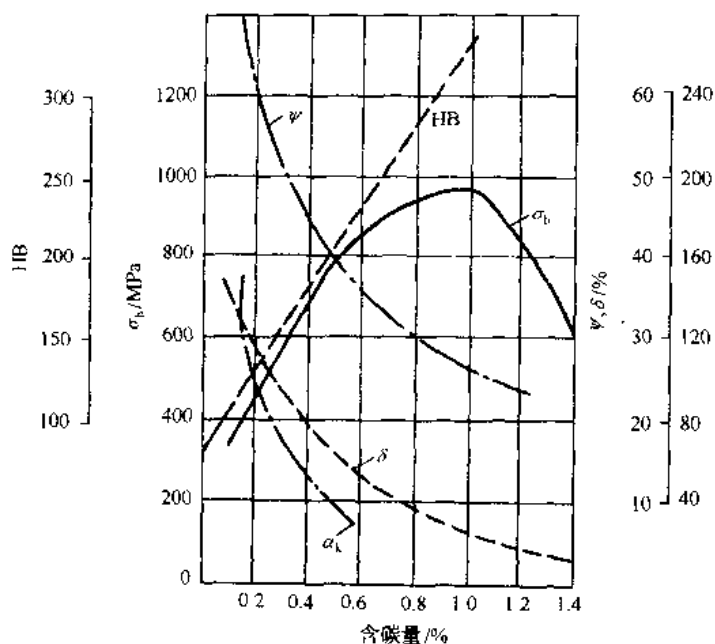


图 2.1 含碳量对碳素钢性质的影响

σ_s 、抗拉强度； α_k 、冲击韧性；HB、硬度； δ 、伸长率； ψ 、断面收缩率

2. 硅、锰

硅和锰是在炼钢时为了脱氧去硫而加入的元素。

硅是钢材中的主要合金元素，通常含量在 1% 以下，硅元素的存在可提高钢材的强度，对塑性和韧性没有明显影响。但硅元素含量超过 1% 时，其冷脆性增加，可焊接性能变差。

锰也是钢材的主要合金元素之一，当锰元素含量在 0.8%~1% 时，可显著提高钢材的强度和硬度，几乎不降低塑性和韧性。当锰元素含量超过 1% 时，在提高强度的同时，塑性和韧性有所下降，可焊性变差。

3. 硫、磷

硫、磷通常为有害元素，由炼钢原料带入。

硫在钢材中以 FeS 形式存在，FeS 是一种低熔点化合物，当钢材在红热状态下加工或焊接时，FeS 已熔化，使钢材的内部产生裂纹，这种现象称为热脆性。热脆性大大降低了钢材的热加工性能和可焊性。同时，由于硫元素的存在，降低了钢材的冲击韧性、疲劳强度和抗腐蚀性。因此，在碳钢中，硫元素的含量要严格控制。

磷元素会显著降低钢材的塑性和韧性，特别是低温冲击韧性下降更为明显，钢材焊接时焊缝容易产生冷脆性，这种现象称为冷脆性。磷元素虽然可以提高钢材的强度和耐腐蚀性，但由于其使钢材的冷弯性能下降、可焊性变差，在碳钢中，磷元素

的含量也要严格控制。

4. 氧、氮

氧、氮大部分以化合物的形式存在,这些非金属化合物会显著降低钢材的塑性和韧性,以及冷弯性能和可焊性,其含量应有严格控制。

2.1.2 钢材的晶体结构对其性质的影响

钢材的基本组成成分是铁和碳。根据铁原子和碳原子的结合方式的不同,碳素钢在常温下有三种基本组织。

1. 铁素体

铁素体是碳在铁中的固溶体,即以铁为溶剂、碳为溶质所形成的固体溶液。由于原子之间的空隙很小,对碳的溶解度也很小,接近于纯铁。在铁素体中晶格滑移面较多,因此它赋予钢材以良好的塑性、韧性和延展性,但强度和硬度很低。

2. 渗碳体

渗碳体是铁与碳的化合物,以 Fe_3C 的形式存在,含碳量可高达 6.67%,其晶体结构复杂,性质硬而脆。

3. 珠光体

珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物。其强度较高,塑性和韧性介于铁素体和渗碳体之间。

钢材的三种基本组织的力学性质如表 2.1 所示。

表 2.1 钢材基本组织成分及力学性质

名称	组织成分	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	硬度 HB
铁素体	钢的晶体组织中溶有少量碳的纯铁	343	40	80
渗碳体	钢的晶体组织中的碳和铁化合物(Fe_3C)	<343	0	600
珠光体	由铁素体和渗碳体所组成(含碳量为 0.80%)	833	10	200

钢材的三种基本组织相对含量与含碳量的关系如图 2.2 所示。

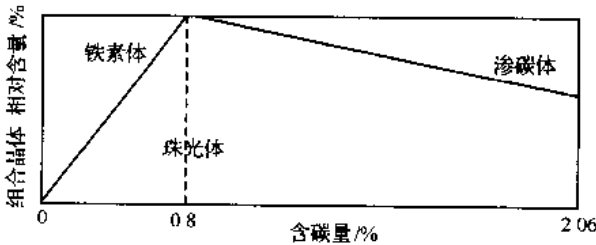


图 2.2 钢材基本组织相对含量与含碳量的关系

碳素钢中,当含碳量为 0.8%,且缓慢冷却,则晶体组织全为珠光体,这种钢为共析钢。含碳量低于 0.8%时,是由铁素体和珠光体组成,这种钢为亚共析钢。含碳量超过 0.8%但低于 2.06%时,是由珠光体和渗碳体组成,这种钢为过共析钢。含碳量为 6.67%的生铁中全由渗碳体组成。建筑钢材含碳量不大于 0.8%,是共亚析钢,强度较高,塑性和韧性较好。

2.2 钢材的主要力学性能

2.2.1 钢材的拉伸性能

拉伸是建筑钢材的主要受力形式,所以拉伸性能是表示钢材性能和选用钢材的重要指标。

将低碳钢制成一定规格的试件,放在材料实验机上进行拉伸实验,可以绘出图 2.3 所示的应力-应变关系曲线。钢材的拉伸性能就可以通过图 2.3 来阐明。从图 2.3 中可以看出,低碳钢受拉至拉断,经历了四个阶段:弹性阶段($O \rightarrow A$)、屈服阶段($A \rightarrow B$)、强化阶段($B \rightarrow C$)和颈缩阶段($C \rightarrow D$)。

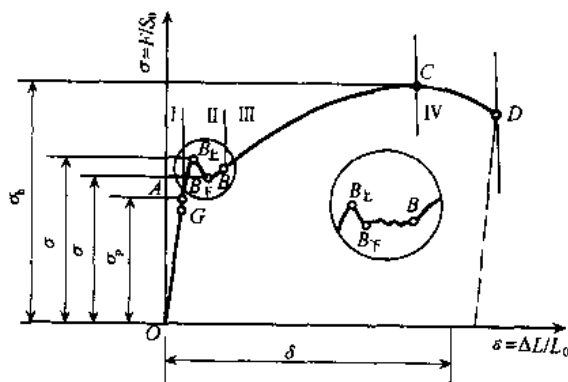


图 2.3 低碳钢的受拉应力-应变关系曲线

(1) 弹性阶段($O \rightarrow A$)

曲线中 OA 段是一条直线,应力与应变成正比。如卸去外力,试件能恢复原来的形状,这种性质即为弹性变形。与 A 点对应的应力称为弹性极限,以 σ_p 表示。应力与应变的比值为常数,即弹性模量(E), $E = \sigma/\epsilon$ 。弹性模量反映钢材抵抗弹性变形的能力,是钢材在受力条件下计算结构变形的重要指标。

(2) 屈服阶段($A \rightarrow B$)

应力超过 A 点后,应力、应变不再成正比关系,开始出现塑性变形。应力的增长滞后于应变的增长,当应力达 B_L 点后,瞬时下降至 B_H 点、变形迅速增加,而此时外力则大致在恒定的位置上波动,直至 B 点,这就是所谓的“屈服现象”,似乎钢

材不能承受外力而屈服,所以 AB 段称为屈服阶段。与 B_F 点(此点较稳定,易测定)对应的应力称为屈服点(屈服强度),用 σ_s 表示。

钢材受力大于屈服点后,会出现较大的塑性变形,已不能满足使用要求,因此屈服强度是设计上钢材强度取值的依据,是工程结构计算中非常重要的一个参数。

(3) 强化阶段(B→C)

当应力超过屈服强度后,由于钢材内部组织中的晶格发生了畸变,阻止了晶格进一步滑移,钢材得到强化,所以钢材抵抗塑性变形的能力又重新提高,B→C 呈上升曲线,称为强化阶段。对应于最高点 C 的应力值(σ_b)称为极限抗拉强度,简称抗拉强度。

显然, σ_b 是钢材受拉时所能承受的最大应力值。屈服强度和抗拉强度之比(即屈强比= σ_s/σ_b)能反映钢材的利用率和结构安全可靠程度。屈强比越小,其结构的安全可靠程度越高,但屈强比过小,又说明钢材强度的利用率偏低,造成钢材浪费。建筑结构钢合理的屈强比一般为 0.60~0.75。

(4) 颈缩阶段(C→D)

试件受力达到最高点 C 后,其抵抗变形的能力明显降低,变形迅速发展,应力逐渐下降,试件被拉长,在有杂质或缺陷处,断面急剧缩小,直至断裂,故 CD 段称为颈缩阶段。

将拉断后的试件拼合起来,测定出标距范围内的长度 L_1 (mm)与试件原标距 L_0 (mm)之差为塑性变型值,它与 L_0 之比称为伸长率(δ),如图 2.4 所示。伸长率的计算式如下:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

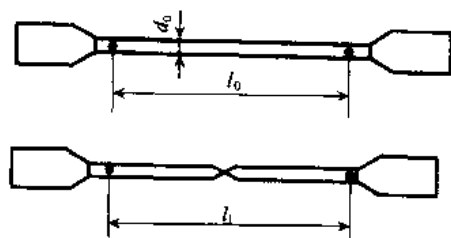


图 2.4 试件拉伸前和断裂后标距的长度

伸长率 δ 是衡量钢材塑性的重要指标。 δ 越大,说明钢材的塑性越好,而一定的塑性变形能力,可保证应力重新分布,避免应力集中,从而钢材用于结构的安全性越大。

塑性变形在试件标距内的分布是不均匀的,颈缩处的变形最大,离颈缩部位越远其变形越小。所以,原标距与直径之比越小,则颈缩处伸长值在整个伸长值中的比重越大,计算出来的 δ 值越大。通常以 δ_5 和 δ_{10} 分别表示和 $L_0=5d_0$ 和 $L_0=10d_0$