

## 0.1 土木工程材料发展概况

土木工程材料是指在土木工程中所使用的各种材料的总称,是一切土木工程实体的物质基础。土木工程材料是随着人类社会生产力和科技水平的提高而逐步发展起来的。

人类最初是直接从自然界中获取天然材料并将其用作土木工程材料的,如黏土、石材、木材等。随着烧制黏土砖、瓦的出现和石灰等气硬性胶凝材料在土木工程中的应用,人类逐渐冲破了天然土木工程材料的束缚。

烧制材料的出现是土木工程材料的第一次飞跃,成为人类建筑史上的一个里程碑。至今,世界上仍然保留着许多经典的古建筑,如我国的长城、布达拉宫和赵州桥,埃及的金字塔,意大利的罗马圆形大剧场等。这些均显示了古代建筑技术及材料应用方面的辉煌成就。

混凝土的大量使用是土木工程材料的第二次飞跃。19世纪初,硅酸盐水泥的出现为混凝土的应用提供了物质条件,而钢筋混凝土为土木工程提供了更多的结构形式。

钢材的大规模使用是土木工程材料的第三次飞跃。由钢材应用于简单的梁、拱结构发展到应用于桁架、框架、网架和悬索结构,出现了建筑结构形式百花争艳的局面,而建筑物跨径由砖、石、木结构的几十米发展到钢结构的几百米乃至上千米,创造出史无前例的奇迹。

进入20世纪之后,特别是进入21世纪以来,由于社会生产力突飞猛进的发展,以及材料科学和工程科学的形成与发展,土木工程材料的性能和质量不断提高,品种不断增加,以有机材料为主的合成材料异军突起,复合材料及一些具有特殊功能的土木工程材料(如绝热材料、隔声材料、装饰材料及纳米材料等)应运而生。

社会的进步、环境保护和节能降耗的需要,对土木工程材料提出了更高、更多的要求。土木工程材料逐渐朝着高性能化、复合化、多功能化及绿色化的方向发展。

## 0.2 土木工程材料的分类

土木工程材料来源广泛,性质各异,用途不同,种类繁多。根据不同的分类方法,可以将土木工程材料划分成不同的种类。

根据使用功能的不同,可将土木工程材料分为结构材料(梁、板、柱等所用的材料)、围护材料(墙体、屋面材料等)和功能材料(防水、保温、装饰等材料)。

按照化学成分的不同,可将土木工程材料分为无机材料、有机材料和复合材料三大类,它们又可进行更为详细的划分,具体如图0-1所示。



图 0-1 土木工程材料的分类

此外,根据材料来源的不同,还可将土木工程材料分为天然材料和人造材料。其中,人造材料又可按冶金、窑业(水泥、玻璃、陶瓷等)、石油化工等材料制造部门来分类。根据使用部位的不同,又可将土木工程材料分为承重材料、屋面材料、墙体材料和地面材料等。

### 0.3 土木工程材料对土木工程的影响

土木工程材料对土木工程的影响可以从以下几个方面来说明:

(1)土木工程材料是保证土木工程质量的基础。土木工程材料不仅是构成土木工程建(构)筑物的物质基础,也是其质量基础。在土木工程中,从材料的生产、选择、使用和检验评定到材料的储存、保管,任何环节的失误都可能造成工程的质量缺陷,甚至导致重大质量事故。因此,合格的土木工程技术人员必须准确、熟练地掌握土木工程材料的有关知识。为保证土木工程材料的质量,世界范围内统一使用国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)标准,而我国也从不同的层次制定了相应的标准,分别有国家标准、行业标准和地方标准。这些标准和规范确保了土木工程材料的标准化,以保证土木工程的质量。

(2)土木工程材料对土木工程造价也有一定的影响。在一般土木工程的总造价中,与材料有关的费用占 50%以上,而在实际工程中,材料的选择、使用及管理对工程成本影响也很大。学习并准确熟练地掌握土木工程材料的知识,可以优化选择和正确使用材料,充分利用材料的各种功能,在保证优质的同时可显著降低工程造价。

(3)土木工程材料对土木工程技术进步起促进作用。在土木工程的建设过程中,工程的设计方法、施工方法都与材料密切相关。从根本上说,材料是基础,是决定土木工程结构形式和施工方法的主要因素。因此,材料性能的改进、材料应用技术的进步都会直接促进土木工程技术的进步。例如,钢材及水泥取代了过去的砖、石、木,使钢筋混凝土结构占据了建筑结构形式的主导地位。现代玻璃、陶瓷、塑料、涂料等新型材料及复合材料的大量应用使建筑物的结构形式更加丰富多彩。

由此可见,土木工程材料在土木工程中有着举足轻重的地位,对土木工程的发展起着不可忽视的作用。

## 0.4 土木工程材料的选择和使用

土木工程材料的种类繁多、性质各异,并且不同的建筑或者同一建筑的不同部位对材料的要求也不尽相同,如卫生间的地面需要防水材料,而室内其他地面则更加注重保温等性能。因此,土木工程材料的选择和使用显得尤为关键。为确保工程质量,满足设计要求,在选择使用土木工程材料时,应从以下几个方面考虑:

(1)材料的功能性。材料所应具有的功能应该与材料使用场所的特点结合考虑。根据土木工程功能的需要,要求材料具有相应的防水、绝热、隔声、防火、装饰等性质。例如,在人流密集的商场,应采用耐磨性好、易清洁的地面装饰材料;影剧院的地面材料还应有一定的吸声功能;厨房的墙面和顶棚宜采用耐污性和耐水性良好的装饰材料,其他面应选用防水性能优异的材料;等等。在选择使用材料时,必须考虑其使用部位及与之相应的功能。

(2)材料的耐久性。为了保证建筑物等在遭受风吹、日晒、雨淋、冰冻及周围各种有害介质侵蚀的情况下仍能长期使用,要求材料具有良好的耐久性。材料的耐久性主要包括以下三个方面的内容:

①力学性能。力学性能主要包括强度、受力变形、黏结性、耐磨性及可加工性等。

②物理性能。物理性能主要包括密度、吸水性、耐水性、抗渗性、耐热性、绝热性、耐火性、绝缘性、吸声性、隔声性、光吸收性、光反射性等。

③化学性能。化学性能主要包括耐酸碱性、大气侵蚀等。

材料的耐久性是材料使用时应考虑的重要因素。

(3)材料的经济性。土木工程材料的费用占建设项目总投资的比例很高。因此,应将工程的设计效果与投资综合起来考虑,即从长远性、经济性的角度来考虑,充分利用有限的资金取得最佳的使用效果。

(4)材料的环保性。以往人们在选择材料时,考虑较多的是材料的功能性和经济性,而忽略了材料的环保要求。除了人类活动的影响外,造成室内污染的因素有两个,即通风和材料。为了避免对人造成伤害和保护环境,材料选择时也要考虑其环保性。

## 0.5 学习“土木工程材料”课程的目的和方法

“土木工程材料”作为土木工程类各专业的一门专业基础课,其目的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技术性能、应用方法及其试验检测技能,同时对土木工程材料的储运和保护有所了解,以便在今后的工作实践中能正确选择和使用土木工程材料,也为进一步学习其他有关课程打下基础。

本课程学习的重点是掌握土木工程材料的性能与应用,而对土木工程材料的生产只做一般性了解。土木工程材料种类繁多,需要学习和研究的内容范围很广。因此,对其学习不必面面俱到,而应平均分配力量,按主线有重点、点面结合地进行学习。

学习本课程时,要注意了解事物的本质和内在联系。对于同一类属的不同品种的材料,

不但要学习它们的共性,更重要的是了解它们各自的特性和具备这些特性的原因。

在教学中,除了课堂教学,还将安排必要的试验课。试验课是本课程必不可少的重要教学环节,其任务是验证基本理论、掌握试验方法、培养严谨缜密的科学态度和科学研究能力。学生应特别注意了解试验条件对试验结果的影响,并对试验结果做出正确的分析和判断。

## 思考与练习

1. 简述未来土木工程材料的发展方向。
2. 简述土木工程材料的分类。
3. 土木工程材料对土木工程的影响表现在哪些方面?
4. 选择土木工程材料时应注意哪些问题?
5. 你计划如何学好“土木工程材料”课程?



## 土木工程材料的基本性质

土木工程材料是构成土木工程的物质基础。所有的建筑物、桥梁、道路等都是由各种不同的材料经设计、施工建造而成的。在不同的使用环境及不同的使用部位,必须使土木工程材料具有与之相适应的性质。

土木工程对材料的要求是复杂的,材料的选用与其所具有的性质是密切相关的。因此,必须了解土木工程材料的组成、结构及构造,掌握土木工程材料的性质,从而合理地选用土木工程材料。

### 1.1 土木工程材料的组成、结构及构造

#### 1.1.1 土木工程材料的组成

要想掌握土木工程材料的性质,必须先了解其组成。土木工程材料的组成包括材料的化学组成和矿物组成。

##### 1. 化学组成

材料的化学组成是指构成材料的化学元素及其化合物。习惯上,将金属材料的化学组成以主要元素的含量来表示,无机非金属材料的化学组成则以各种氧化物的含量表示。

材料的化学组成是决定材料化学性质、物理性质和力学性质的主要因素,影响着材料的性质,如混凝土的碳化、钢材的锈蚀、石油沥青的老化、木材的燃烧等性质都是由构成材料的化学组成所决定的。

##### 2. 矿物组成

矿物是指无机非金属材料中具有特定晶粒结构和特定物理力学性能的组织结构。材料的矿物组成是指构成材料的矿物的种类和数量。

某些材料,如天然石材、无机胶凝材料等,其矿物组成是决定其性质的主要因素。例如,花岗岩的主要矿物组成为石英、长石和少量云母,花岗岩中酸性矿物多,其耐酸性好,但耐火性差;而大理石的主要矿物组成为方解石、白云石,含有少量石英,大理石不耐酸腐蚀,酸雨会使大理石中的方解石腐蚀,致使石材表面失去光泽。

而对于某些材料来说,即使化学组成相同,矿物种类和数量的不同也可能造成其性质的差异。就水泥来讲,即使其化学组成相同,如果其熟料矿物的组成不同或含量不同,也会使其硬化速度、水化热、强度、耐腐蚀性等性质产生很大的差异。

### 1.1.2 土木工程材料的结构和构造

土木工程材料的结构和构造同样决定着其性质。一般从宏观、亚微观和微观三个层次来分析研究材料的结构、构造与性质的关系。

#### 1. 宏观结构

宏观结构是指材料宏观存在的状态,即用肉眼或放大镜就能观察到的粗大组织,其尺度范围在 1 mm 以上。材料的宏观结构分类及其主要特征如下:

(1) 密实结构。密实结构的材料内部基本上无孔隙,结构致密。这类材料的特点是强度和硬度较高,吸水性小,抗渗和抗冻性好,耐磨性较好,绝热性差,如钢材、天然石材、玻璃钢等。

(2) 多孔结构。多孔结构的材料内部存在大体上呈均匀分布的、独立的或部分相通的孔隙,孔隙率较高,孔隙又有大孔和微孔之分。具有多孔结构的材料,其性质取决于孔隙的特征、数量、大小及分布情况。一般来说,这类材料的强度较低,抗渗性和抗冻性较差,绝热性较好,如加气混凝土、石膏制品、烧结普通砖等。

(3) 纤维结构。纤维结构的材料内部组成具有方向性,纵向较紧密而横向疏松,组织中存在着相当多的孔隙。这类材料一般平行纤维方向的强度较高,导热性较好,如木材、竹材、玻璃纤维、石棉等。

(4) 层状结构。层状结构的材料具有叠合结构,用胶结料将不同的片材胶合成整体,其每一层的材料性质不同,但叠合成层状结构的材料后,可获得平面各向同性,更重要的是可以显著提高材料的强度、硬度、绝热或装饰等性质,扩大其使用范围,如胶合板、纸面石膏板、塑料贴面板等。

(5) 散粒结构。散粒结构材料是指呈松散颗粒状的材料,有密实颗粒与轻质多孔颗粒之分。前者有砂子、石子等,其结构致密,强度高,适合作为混凝土集料;后者有陶粒、膨胀珍珠岩等,因其多孔结构,故适合作为绝热材料。散粒结构的材料颗粒间存在大量的空隙,其空隙率主要取决于颗粒大小的搭配。其用作混凝土集料时,要求紧密堆积,为轻质多孔粒状材料;用作保温填充料时,则希望空隙率大一些好。

(6) 纹理结构。天然材料在生长或形成过程中自然形成的天然纹理和人工制造材料时特意造成的纹理使材料具有良好的装饰性。为了提高建筑材料的美观性,目前广泛采用仿真技术,已研制出具有多种纹理的装饰材料。

#### 2. 亚微观结构

亚微观结构也称为细观结构,是指用光学显微镜能观察到的结构,是介于宏观和微观之间的结构,其尺度范围可达到微米级,如天然岩石的矿物、晶体颗粒、非晶体组织,钢材的铁素体、渗碳体和珠光体,木材的木纤维、导管、髓线和树脂道等显微组织,以及混凝土的裂缝等。

在亚微观结构层次上,材料各种组织的性质是各不相同的,这些组织的特征、数量、分布,以及界面之间的结合情况等,都对土木工程材料的整体性质起着重要的作用。

### 3. 微观结构

微观结构是指原子、分子层次上的结构,其尺度范围可达到纳米级,可借助电子显微镜、扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪等手段来分析研究该层次上的结构特征。材料的许多物理、力学性质(如强度、硬度、熔点、导热性、导电性等)都是由材料内部的微观结构所决定的。

在微观结构层次上,土木工程固体材料可分为晶体、玻璃体和胶体三类。

(1)晶体。晶体是由质点(离子、原子或分子)在空间上按特定的规则有规律地排列而成的固体。晶体具有特定的几何外形、固定的熔点和化学稳定性。晶体按质点的类型和化学键的种类不同分为原子晶体、离子晶体、分子晶体和金属晶体。

①原子晶体。原子晶体是由中性原子以共价键结合而成的晶体,一般都具有很高的熔点,有些被选为耐火材料。原子晶体(如金刚石)有很高的硬度。

②离子晶体。离子晶体是由正、负离子以离子键结合而成的晶体。离子晶体一般有较高的熔点、沸点。因而  $MgO$ 、 $Al_2O_3$  等常用作耐高温材料。

③分子晶体。分子晶体是由极性分子或非极性分子以范德华力(分子键)结合而成的晶体,如冰。

④金属晶体。金属晶体是由金属离子以金属键结合而成的晶体,如钢、铝合金等。

(2)玻璃体。呈熔融状态的材料在急速冷却时,其质点来不及或因某种原因不能按规则排列就产生凝固而形成的结构称为玻璃体,又称为无定形体或非晶体,结构特征为质点在空间上呈非周期排列。它具有不确定的凝固外形,无固定熔点,存在各向同性的特征。玻璃、釉、塑料等都属于玻璃体。

在一定条件下,玻璃体结构的物质容易与其他物质发生化学反应,因而玻璃体类物质的活性较高,炉渣、火山灰、粒化高炉矿渣等材料中都含有一定量的玻璃体成分,故常以这些材料作为水泥的原料,使其在水泥水化、凝结、硬化中发挥作用。

(3)胶体。胶体是指物质以极微小的质点(粒径为  $1\sim 100\ \mu m$ )分散在介质中所形成的结构。与晶体和玻璃体相比,胶体结构的强度较低,变形较大。胶体的分散质颗粒细小,使其具有吸附性、黏结性。根据分散质与分散介质的相对比例不同,胶体结构分为溶胶、溶凝胶和凝胶。

乳胶漆是高分子树脂通过乳化剂分散在水中形成的涂料;道路石油沥青要求高温不软、低温不脆,需具有溶凝胶结构;硅酸盐水泥水化形成的水化产物中的凝胶将砂和石黏结成一个整体,形成人工石材。

综上所述,材料的结构各种各样,其性质也相应有很多的不同。与材料的结构相比,材料的构造这一概念更强调相同材料或不同材料间的搭配组合关系。例如,材料的孔隙、岩石的层理、木材的纹理及疵病等,这些结构的特征、大小、尺寸及形态决定了材料特有的一些性质。若孔隙是开口、细微且连通的,则材料易吸水、吸湿,耐久性较差;若孔隙是封闭的,材料的吸水性会大大下降,抗渗性则提高。因此,对于同种材料来讲,其构造越密实、越均匀,强度越高,表观密度越大。

## 1.2 土木工程材料的物理性质

土木工程材料的物理性质包括与质量有关的性质、与构造有关的性质、与水有关的性质和与热有关的性质。

### 1.2.1 土木工程材料与质量有关的性质

#### 1. 密度

密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量,按式(1-1)计算。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中, $\rho$ 为材料的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $m$ 为材料在绝对干燥(绝干)状态下的质量( $\text{g}$ ); $V$ 为材料在绝对密实状态下的体积( $\text{cm}^3$ )。

所谓绝对密实状态下的体积,是指不含有任何内部孔隙的固体物质本身的体积。土木工程材料中除了钢材、玻璃等少数材料外,绝大多数材料都含有一定的孔隙,如砖、石材等常见的块状材料。对于这些有孔隙的材料,测定其密度时,需先将其磨成细粉,经干燥至恒重后用李氏比重瓶测定其体积,然后按式(1-1)计算其密度值。材料磨得越细,测得的密度数值就越准确。

另外,工程上还经常用到相对密度,相对密度是指材料的密度与 $4^\circ\text{C}$ 纯水密度之比。

#### 2. 表观密度

表观密度(又称视密度、近似密度)是指材料在自然状态下单位体积的质量,按式(1-2)计算。

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{m}{V + V_b} \quad (1-2)$$

式中, $\rho_0$ 为材料的表观密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $m$ 为材料的质量( $\text{g}$ ); $V_0$ 为材料在自然状态(不含开口孔隙时)下的体积( $\text{cm}^3$ ); $V_b$ 为材料内部闭口孔隙的体积( $\text{cm}^3$ );其余符号意义同前。

所谓自然状态下的体积(又称表观体积),是指包含固体物质本身的体积及材料内部闭合孔隙的体积。当材料含有水分时,其质量和体积都会发生变化,因而表观密度也会发生变化。故测定表观密度时应注明含水情况,未特别注明者,常指气干状态下的表观密度。对于外形规则的材料,可直接通过测量体积得到表观密度;对于外形不规则的材料,则可采用封蜡排水法测定表观体积。

#### 3. 体积密度

体积密度(又称容积密度,俗称容重)是指材料在自然状态下单位宏观外形体积的质量,按式(1-3)计算。

$$\rho' = \frac{m}{V'} = \frac{m}{V + V_b + V_k} \quad (1-3)$$

式中, $\rho'$ 为体积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $m$ 为材料的质量( $\text{g}$ ),按有关标准规定,该质量是指材料在自然

状态下的气干质量,即将试件置于通风良好的室内存放 7 d 后测得的质量; $V'$  为材料在自然状态下的宏观外形体积( $\text{cm}^3$ ); $V_k$  为材料内部开口孔隙的体积( $\text{cm}^3$ );其余符号意义同前。

材料在自然状态下的宏观外形体积是指包含材料内部所有孔隙(含开口孔隙和闭口孔隙)的体积。对材料进行体积密度试验时,其质量可以在任意含水状态下测量,但应注明其含水情况,未特别注明时,所测得的密度常指气干状态下的体积密度;在进行材料对比试验时,则应在绝干状态下进行。

毛体积密度是指单位体积(含材料的实体成分及其闭口孔隙、开口孔隙等物质材料表面轮廓线所包围的毛体积)材料的干质量,因其质量是指试件烘干后的质量,故毛体积密度也称干体积密度。

#### 4. 堆积密度

堆积密度是指散粒状材料或粉状材料单位体积(含物质固体颗粒及其闭口孔隙、开口孔隙体积及颗粒间的空隙体积)物质颗粒的质量,有干堆积密度和湿堆积密度之分。堆积密度按式(1-4)计算。

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0} = \frac{m}{V' + V_v} \quad (1-4)$$

式中, $\rho'_0$  为材料的堆积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $m$  为材料的质量( $\text{g}$ ); $V'_0$  为材料的堆积体积( $\text{cm}^3$ ); $V_v$  为散粒状材料或粉状材料间空隙的体积( $\text{cm}^3$ );其余符号意义同前。

材料的堆积体积是在自然松散状态下将材料按一定的方法装入一定容积的容器测得的体积。材料的堆积密度反映散粒结构材料堆积的紧密程度及材料可能的堆放空间。堆积体积采用容量筒测定,容量筒的大小视材料颗粒的大小而定,一般测量砂子采用 1 L 的容量筒,测量石子采用 10 L、20 L 或 30 L 的容量筒。

含孔材料的体积组成如图 1-1 所示。

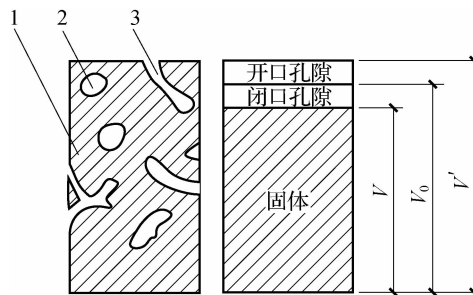


图 1-1 含孔材料的体积组成

1—固体; 2—闭口孔隙; 3—开口孔隙

常见土木工程材料的密度、表观密度、堆积密度和孔隙率见表 1-1。

表 1-1 常见土木工程材料的密度、表观密度、堆积密度和孔隙率

材料名称	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	孔隙率/%
钢	7.85	7 850	—	0
花岗岩	2.70~3.00	2 500~2 900	—	0.5~1.0
碎石	2.40~2.60	—	1 400~1 700	45~50(空隙率)
砂	2.50~2.60	—	1 450~1 650	35~40(空隙率)
水泥	2.80~3.10	—	1 200~1 300	50~55(空隙率)
普通混凝土	—	2 000~2 800	—	5~20
烧结空心砖	2.60~2.70	800~1 100	—	50~60
红松木	1.55~1.60	400~800	—	55~75
泡沫塑料	—	20~50	—	98

## 1.2.2 土木工程材料与构造有关的性质

### 1. 密实度和孔隙率

#### 1) 密实度

密实度是指材料固体物质的体积占自然状态下总体积的百分率,按式(1-5)计算。

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

或

$$D = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\%$$

式中, $D$  为材料的密实度;其余符号意义同前。

#### 2) 孔隙率

孔隙率是指材料孔隙体积占自然状态下总体积的百分率,按式(1-6)计算。

$$P = \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \times 100\% \quad (1-6)$$

或

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

式中, $P$  为材料的孔隙率;其余符号意义同前。

密实度与孔隙率的关系可用式(1-7)表示。

$$D + P = 1 \quad (1-7)$$

材料密实度或孔隙率的大小直接反映材料的密实程度。材料的孔隙率高,则表示其密实程度小。

材料的许多性质(如强度、热工性质、声学性质、吸水性、吸湿性、抗渗性、抗冻性等)不仅

与材料的孔隙率大小有关,而且与材料的孔隙特征有关。孔隙特征是指材料内部孔隙构造上的特征,如孔隙的大小、形状、分布、连通性等。在一般工程应用上,材料的孔隙特征通常主要是指孔隙的连通性,按此可将孔隙分为开口孔隙和闭口孔隙。

开口孔隙是指材料内部不仅彼此互相贯通,并且与外界相通的孔隙,如常见的毛细孔。在一般浸水条件下,开口孔隙能吸水饱和。开口孔隙能提高材料的吸水性、透水性和吸声性,并降低材料的抗冻性。

闭口孔隙是指材料内部彼此不连通,而且与外界隔绝的孔隙。闭口孔隙能提高材料的保温隔热性能和材料的耐久性。

## 2. 填充率、空隙率和间隙率

### 1) 填充率

填充率是指材料在堆积状态下被散粒状材料的颗粒所填充的程度,按式(1-8)计算:

$$D' = \frac{V'}{V_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

或

$$D' = \frac{\rho_0'}{\rho} \times 100\%$$

式中, $D'$ 为材料的填充率;其余符号意义同前。

### 2) 空隙率

空隙率是指材料在堆积状态下散粒状材料颗粒之间的空隙体积(开口孔隙与间隙之和)所占总体积的百分率,按式(1-9)计算。

$$P' = \left(1 - \frac{V'}{V_0}\right) \times 100\% \quad (1-9)$$

或

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

式中, $P'$ 为材料的空隙率;其余符号意义同前。

空隙率的大小反映了散粒状材料颗粒之间互相填充的致密程度和集料开口孔隙的多少。

填充率与空隙率的关系可用式(1-10)表示。

$$D' + P' = 1 \quad (1-10)$$

### 3) 间隙率

间隙率是指材料在堆积状态下散粒状材料颗粒之间的间隙体积占总体积的百分率,按式(1-11)计算。

$$P'_0 = \left(1 - \frac{V'}{V_0}\right) \times 100\% \quad (1-11)$$

或

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

式中,  $P'_0$  为材料的间隙率;其余符号意义同前。

间隙率的大小反映了散粒状材料的颗粒之间互相填充的致密程度。

### 1.2.3 土木工程材料与水有关的性质

土木工程材料在使用过程中经常会与雨水、地下水、生活用水及大气中的水汽等接触,因此,有必要研究材料与水之间的相互作用情况。

#### 1. 亲水性和憎水性

材料与水接触时能被水润湿的性质称为亲水性;反之,材料与水接触时不能被水润湿的性质称为憎水性。

材料的亲水与憎水程度可用润湿角  $\theta$  来表示,如图 1-2 所示。 $\theta$  越小,表明材料越易被水润湿。一般认为,当润湿角  $\theta \leq 90^\circ$  时,表明水分子之间的内聚力小于或等于水分子与材料之间的吸引力,材料具有亲水性;当润湿角  $\theta > 90^\circ$  时,表明水分子之间的内聚力大于水分子与材料之间的吸引力,材料具有憎水性。

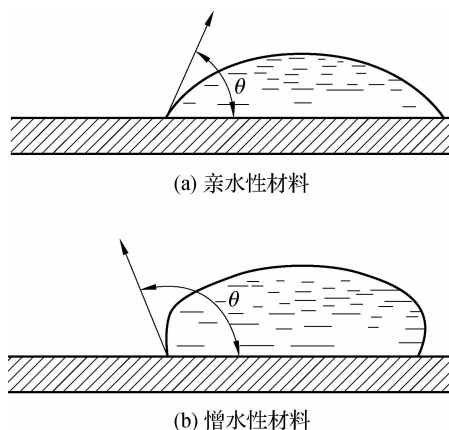


图 1-2 材料的润湿角

具备亲水性的材料称为亲水性材料。大多数土木工程材料(如混凝土、钢材、砖、石和木材等)都属于亲水性材料。这些材料的表面可以被水润湿,当材料存在开口孔隙时,水分能通过孔隙的毛细作用自动渗入材料内部。一般亲水性材料的耐水性差,但可通过对其表面进行憎水处理来改善其耐水性能。

具备憎水性的材料称为憎水性材料。大部分有机材料(如沥青、石蜡、塑料和有机硅等)都属于憎水性材料。憎水性材料不能被水润湿,水分不易渗入其毛细管中,故憎水性材料常用作防水材料。

#### 2. 吸水性和吸湿性

##### 1) 吸水性

材料在水中吸收水分的能力称为吸水性,以吸水率表示。材料的吸水率有质量吸水率和体积吸水率两种表示方法。

(1)质量吸水率。质量吸水率是指材料吸水饱和后所吸水的质量占材料在干燥状态下



质量的百分率,按式(1-12)计算。

$$W_m = \frac{m_1 - m}{m} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中,  $W_m$  为材料的质量吸水率(%) ;  $m_1$  为材料吸水饱和后的质量(g) ;  $m$  为材料在干燥状态下的质量(g)。

(2) 体积吸水率。体积吸水率是指材料吸水饱和后所吸水的体积占表观体积的百分率,按式(1-13)计算。

$$W_v = \frac{V_w}{V_0} \times 100\% = W_m \times \frac{\rho_0}{\rho_w} \quad (1-13)$$

式中,  $W_v$  为材料的体积吸水率(%) ;  $V_w$  为材料吸水饱和后水的体积( $\text{cm}^3$ ) ;  $\rho_w$  为水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ; 其余符号意义同前。

材料的吸水率与其孔隙特征有很大的关系。若材料具有闭口孔隙,则水分难以渗入材料内部,吸水率就较小;若材料具有粗大的开口孔隙,水分虽容易进入,但不易在孔中保留,吸水率也较小;若材料具有细微而连通的开口孔隙,则材料的吸水能力就特别强。

## 2) 吸湿性

材料在潮湿空气中吸收水分的性质称为吸湿性,并用含水率表示,按式(1-14)计算。

$$W' = \frac{m_w - m}{m} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中,  $W'$  为材料的含水率(%) ;  $m_w$  为材料含水时的质量(g) ;  $m$  为材料在绝对干燥状态下的质量(g)。

材料的吸湿性随空气湿度的变化而变化。干燥材料在潮湿环境下能吸收空气中的水分,而潮湿材料能在干燥环境中释放水分,而且其过程是可逆的。材料与空气温湿度相平衡时的含水率称为平衡含水率(或称气干含水率)。

材料吸水或吸湿后,其很多性能会受到显著影响,如材料的表观密度增大、体积膨胀、强度下降、保温性能降低、抗冻性变差等。

## 3. 耐水性

耐水性是指材料长期在水的作用下不破坏,而且强度也不显著降低的性质。水对材料的破坏是多方面的,如对材料的力学性质、光学性质、装饰性等都会产生破坏作用。材料耐水性用软化系数  $K_R$  表示,按式(1-15)计算。

$$K_R = \frac{f_b}{f_g} \quad (1-15)$$

式中,  $f_b$  为材料在吸水饱和状态下的抗压强度(MPa) ;  $f_g$  为材料在干燥状态下的抗压强度(MPa)。

软化系数的大小表明材料在浸水饱和后强度降低的程度。一般材料吸收水分后,其内部质点间的结合力会有所减弱,强度也会有不同程度的降低。如果材料中含有某些可溶性物质(如石膏、石灰等),则强度降低更为严重。即使是致密的花岗岩,如长期浸泡在水中,强度也将下降 3% 左右。材料的耐水性主要与其组成成分在水中的溶解度和材料的孔隙率有关。溶解度很小或不溶的材料,则软化系数一般较大,如金属材料的  $K_R = 1$  ;若材料可溶于水且具有较大的孔隙率,则其软化系数较小或很小,如石膏的  $K_R$  接近于 0。

软化系数数值一般为 0~1。软化系数越小,表示材料的耐水性越差。通常软化系数大于 0.85 的材料称为耐水性材料。软化系数的大小有时成为选择材料的重要依据。对于经常位于水中或受潮严重的重要结构物的材料,其软化系数不宜小于 0.85;受潮较轻或次要结构物的材料,其软化系数不宜小于 0.75。

#### 4. 抗渗性

材料的抗渗性是指材料抵抗压力水渗透的性质。材料的抗渗性常用渗透系数或抗渗等级来表示。渗透系数按式(1-16)计算。

$$K_s = \frac{Qd}{AtH} \quad (1-16)$$

式中, $K_s$  为渗透系数(cm/h); $Q$  为透水量( $\text{cm}^3$ ); $d$  为试件的厚度(cm); $A$  为透水面积( $\text{cm}^2$ ); $t$  为渗水时间(h); $H$  为水头高度(cm),简称水压。

渗透系数  $K_s$  的物理意义是:在一定时间内,在一定的水压作用下,单位厚度的材料在单位截面面积上的透水量。渗透系数越小的材料,其抗渗性越好。

对于土木工程中大量使用的砂浆、混凝土等材料,其抗渗性能常用抗渗等级来表示。

$$P = 10H - 1 \quad (1-17)$$

式中, $P$  为抗渗等级; $H$  为材料透水前所能承受的最大水压力(MPa)。

例如,材料的抗渗等级 P6 表示材料能承受 0.6 MPa 的水压而不渗水。材料的抗渗等级越大,表示材料的抗渗性越好。

土木工程材料一般都具有不同程度的渗透性,当材料两侧存在不同水压时,周围的腐蚀性介质即可进入材料内部,并将所分解的产物带出,使材料逐渐被破坏,如地下建筑、基础、压力管道等经常受到压力水的作用,故所用材料应具有一定的抗渗性。专门用于防水的材料要求具有较高的抗渗性。

材料的抗渗性与材料的孔隙率和孔隙特征有密切的关系。材料越密实,闭口孔越多,孔径越小,越难渗水;具有较大孔隙率,且孔连通、孔径较大的材料,其抗渗性较差。

#### 5. 抗冻性

材料在吸水饱和状态下能经受多次冻融循环作用而不发生破坏,同时强度也不严重降低的性质称为抗冻性。

土木工程材料的抗冻性用抗冻等级 F 来表示。抗冻等级是指将材料吸水饱和后,按规定方法进行冻融循环试验,所能经受的最大冻融循环次数,如 F25、F100、F300 等。抗冻等级越高,材料的抗冻性越好。

在冻融循环过程中,材料表面将出现裂纹、剥落等现象,质量受到损失,强度降低。这是因为当材料孔隙内充满水,且将水温下降至使孔隙中的水结冰时,孔隙体积膨胀(约增大 9%),将会给孔壁造成很大的静水压力(可高达 100 MPa),致使孔壁开裂。而反复的冻融又会在材料的内外层产生明显的应力差和温度差,对材料起进一步的破坏作用。

抗冻性主要取决于材料内部的孔隙率和孔隙特征,孔隙率小及具有封闭孔的材料,其抗冻性较好。另外,抗冻性还与材料吸水饱和的程度、材料本身的强度,以及冻结条件(如冻结温度、冻结速度及冻融循环作用的频繁程度)等有关。

### 1.2.4 土木工程材料与热有关的性质

#### 1. 导热性

导热性是指当材料两侧存在温度差时,热量将由温度高的一侧通过材料传递到温度低的一侧的能力。材料的导热性可用导热系数(热导率)来表示。材料的导热能力与材料厚度、传热面积、两侧温差及热传导时间有关,匀质材料的导热系数可按式(1-18)计算。

$$\lambda = \frac{Qd}{At(T_1 - T_2)} \quad (1-18)$$

式中, $\lambda$  为导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ;  $Q$  为传导的热量 $(\text{J})$ ;  $d$  为材料的厚度 $(\text{m})$ ;  $A$  为材料的传热面积 $(\text{m}^2)$ ;  $t$  为热传导时间 $(\text{s})$ ;  $T_1$ 、 $T_2$  分别为材料两侧的温度 $(\text{K})$ 。

材料的导热性受材料的物质构成、孔隙率、孔隙特征、含水率及热流方向等因素影响。绝大多数建筑材料的导热系数为  $0.029 \sim 3.49 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。 $\lambda$  值越小,说明材料的导热性越差。土木工程中,一般把  $\lambda$  值小于  $0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  的材料称为绝热材料。

#### 2. 热容量和比热

##### 1) 热容量

材料的热容量是指材料在温度变化时吸收和放出热量的能力,按式(1-19)计算。

$$Q = mc(t_1 - t_2) \quad (1-19)$$

式中, $Q$  为材料的热容量 $(\text{kJ})$ ;  $m$  为材料的质量 $(\text{kg})$ ;  $t_1 - t_2$  为材料受热或冷却前后的温度差 $(\text{K})$ ;  $c$  为材料的比热 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

##### 2) 比热

材料的比热(或比热容) $c$  的物理意义是指质量为  $1 \text{ kg}$  的材料在温度每改变  $1 \text{ K}$  时所吸收或放出的热量,按式(1-20)计算。

$$c = \frac{Q}{m(t_1 - t_2)} \quad (1-20)$$

比热是反映材料吸热或放热能力大小的物理量。不同材料的比热不同;即使是同一种材料,由于所处的物态不同,比热也不同。例如,水的比热为  $4.186 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,而结冰后比热为  $2.093 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

材料的导热系数和比热是设计建筑物围护结构(墙体、屋盖)、进行热工计算时的重要参数。进行建筑设计时,应选用导热系数较小而热容量较大的材料,以保持建筑物室内温度的稳定性。同时,导热系数也是工业窑炉热工计算和确定冷藏库绝热层厚度的重要数据。

#### 3. 热阻和导温系数

材料层厚度  $\delta$  与导热系数  $\lambda$  的比值称为热阻  $R$ 。其值  $R = \delta/\lambda$ ,单位为  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,它表明热量通过材料层时所受到的阻力。在同样的温差条件下,材料的热阻越大,通过材料层的热量越少。在多层平壁导热条件下,平壁的总热阻等于各单层材料的热阻之和。

导温系数也称热扩散率,是材料的一种热物理性质,表示材料被加热或冷却时,其内部温度趋于一致的能力。导温系数越大,表明材料内部的温度分布趋于均匀越快。其值可按式(1-21)计算。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1-21)$$

式中,  $\alpha$  为材料的导温系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\rho$  为材料的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); 其余符号意义同前。

由热扩散率的定义可总结出以下几点:

(1) 物体的导热系数  $\lambda$  越大, 在相同的温度梯度下可以传导的热量越多。

(2) 分母  $\rho c$  是单位体积的物体温度升高 1 K 所需的热量。 $\rho c$  越小, 温度升高 1 K 所吸收的热量越小, 可以剩下更多热量继续向物体内部传递, 能使物体各点的温度更快地随界面温度的升高而升高。

热扩散率  $\alpha$  是  $\lambda$  与  $1/\rho c$  两个因子的结合。 $\alpha$  越大, 表示物体内部温度趋于一致的能力越大, 因而称为热扩散率。这种物理上的意义还可以从另一个角度来加以说明, 即从温度的角度看,  $\alpha$  越大, 材料中温度变化传播得越迅速。可见,  $\alpha$  也是材料传播温度变化能力大小的指标, 因而称为导温系数。

#### 4. 耐燃性

材料对火焰和高温的抵抗能力称为材料的耐燃性, 是影响建筑物防火、建筑结构耐火等级的一项重要因素。土木工程材料按耐燃性不同可分为不燃材料、难燃材料和可燃材料三类。

(1) 不燃材料。不燃材料是指遇明火或高温不起火、不碳化、不微燃的材料, 如钢铁、混凝土、砖、石、玻璃等。

(2) 难燃材料。难燃材料是指遇明火或高温难起火、难碳化、难微燃, 仅在火焰存在时能继续燃烧或微燃, 移走火源后立即停止燃烧的材料, 如纸面石膏板、水泥刨花板、铝箔复合材料、经防火处理的木材等。

(3) 可燃材料。可燃材料是指遇明火或高温立即起火或微燃, 且在移走火源后能继续燃烧或微燃的材料, 如木材、沥青、聚乙烯、聚氨酯、玻璃钢、化纤织物等。使用可燃材料时, 应做防燃处理。

《建筑材料及制品燃烧性能分级》(GB 8624—2012) 将建设工程中使用的建筑材料、装饰装修材料及制品的燃烧性能分为 A 级(不燃材料)、 $B_1$  级(难燃材料)、 $B_2$  级(可燃材料) 和  $B_3$  级(易燃材料) 4 个等级。

## 1.3 土木工程材料的力学性质

### 1. 强度

强度是指材料抵抗外力破坏的能力, 常以材料在外力作用下失去承载能力时的极限应力来表示, 也称极限强度。工程中材料经常承受拉、压、弯、剪的作用; 相应地, 材料的强度就有抗拉强度、抗压强度、抗弯强度及抗剪强度, 如图 1-3 所示。

材料的抗拉强度、抗压强度和抗剪强度可按式(1-22)计算。

$$f = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1-22)$$

式中,  $f$  为材料的抗拉强度、抗压强度或抗剪强度(MPa);  $P_{\max}$  为材料破坏时的最大荷载(N);  $A$  为材料的受力横截面面积( $\text{mm}^2$ )。

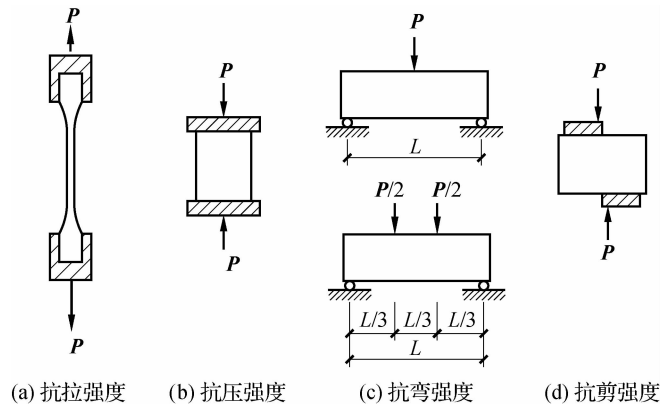


图 1-3 材料的受力示意

材料的抗弯强度与受力情况有关,当外力是作用于构件中央一点的集中荷载,且构件有两个支点[见图 1-3(c)上图];当材料截面为矩形时,材料的抗弯强度可按式(1-23)计算。

$$f = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2} \quad (1-23)$$

式中,  $f$  为材料的抗弯强度(MPa);  $L$  为试件两支点间的距离(mm);  $b$ 、 $h$  分别为试件的截面的宽度和高度(mm);其余符号意义同前。

有时抗弯强度的试验方法是在跨度的三分之一点上作用两个相等的集中荷载[见图 1-3(c)下图],这时材料的抗弯强度按式(1-24)计算。

$$f = \frac{P_{\max}L}{bh^2} \quad (1-24)$$

材料的强度与其组成和结构等内部因素有关。即使材料的组成相同,如其构造不同,强度也不一样。材料的孔隙率越大,则强度越小。对于同一品种的材料,其强度与孔隙率之间存在近似直线的反比关系。一般而言,表观密度越大的材料,其强度越大。晶体结构的材料,其强度还与晶粒的粗细有关,其中细晶粒的强度高。玻璃原是脆性材料,在制成玻璃纤维后,则成为很好的抗拉材料。材料的强度还与其含水状态及温度有关,含有水分的材料,其强度较干燥时的低。温度升高时,材料的强度一般将降低,这在沥青混凝土中表现得尤为明显。

此外,材料的强度还与测试条件和方法等外部因素有很大关系。例如,对于相同的材料,采用小试件时测得的强度较大;试件高或加载速度快时,测得的强度值偏高;试件表面不平或表面涂润滑剂时,测得的强度值偏低。因此,测定材料强度时,必须严格按照规定的试验方法进行。

大部分土木工程材料根据强度的大小不同可划分为若干强度等级。对于水泥、混凝土、砂浆、砖等脆性材料,以抗压强度值来划分强度等级;建筑钢材主要用于抗拉,则主要以其屈服强度(由拉伸试验测定)划分强度等级。

衡量材料是否轻质高强可采用比强度指标(即单位体积质量的材料强度)来表示,其值等于材料的强度与其表观密度之比。材料的比强度越大,越轻质高强。

## 2. 变形性能

材料在外力作用下会发生变形。当外力消除后,材料能够完全恢复原来形状的性质称为

弹性,这种可逆的变形称为弹性变形,如图 1-4(a)所示。当外力消除后,材料仍能保持变形后的形状尺寸且不出现裂缝的性质称为塑性,这种不可逆的变形称为塑性变形,如图 1-4(b)所示。

实际上,完全的弹性材料或塑性材料是不存在的。许多材料在受力不大时,仅产生弹性变形,可视为弹性材料;当受力超过一定限度后,便出现塑性变形,如低碳钢。另外,有的材料在受力一开始弹性变形和塑性变形便同时发生,如图 1-4(c)所示;除去外力后,弹性变形可以恢复( $ab$ ),而塑性变形( $Oa$ )不会消失。这类材料称为弹塑性材料,如常见的混凝土材料。

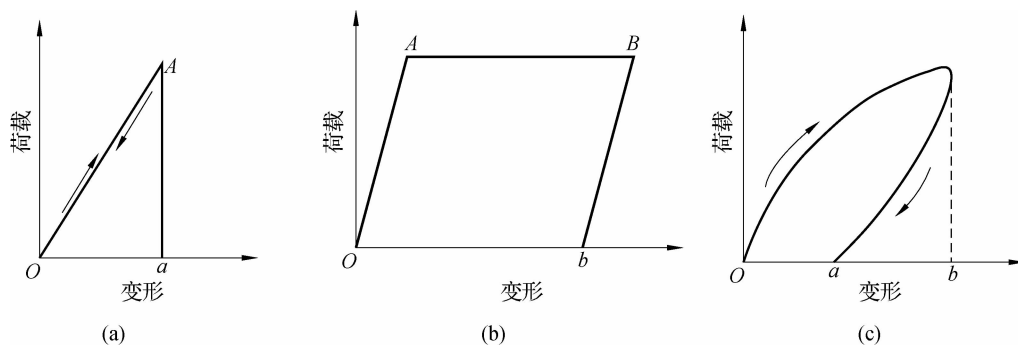


图 1-4 材料的弹性变形、塑性变形和塑性变形曲线

### 3. 脆性和韧性

#### 1) 脆性

脆性是指材料在外力作用下无明显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。脆性材料的特点是塑性变形很小,且抗压强度远大于抗拉强度(脆性材料的抗压强度是抗拉强度的 5~50 倍),但承受冲击或震动荷载的能力很差。脆性材料有花岗岩、大理石、陶瓷、玻璃、黏土砖、普通混凝土和铸铁等,常用作承压构件。

#### 2) 韧性

韧性是指材料在冲击或震动荷载作用下,能吸收较大能量,产生一定的变形而不发生突然破坏的性质,具有这种性质的材料称为韧性材料。韧性材料的特点是变形大,特别是塑性变形大,抗拉强度接近或高于抗压强度。木材、建筑钢材、橡胶等材料都属于韧性材料。

在土木工程中,要求承受冲击荷载和有抗震要求的工程结构(如吊车梁、桥梁、路面等)所用材料均应具有较高的韧性。

### 4. 硬度和耐磨性

#### 1) 硬度

硬度是材料抵抗其他物质刻画或压入其表面的能力,它与材料强度等性能有一定的关系。不同种类材料的硬度测量方法不同,通常有刻画法、压入法和回弹法。

(1) 刻画法。刻画法常用于矿物材料的测定,以滑石、石膏、方解石、萤石、磷灰石、长石、

石英、黄玉、刚玉和金刚石 10 种矿物作为标准划分硬度等级,即莫氏硬度(10 级)。

(2)压入法。压入法用于测定金属材料、塑料、橡胶等材料的硬度。以一定压力将一定规格的钢球或由金刚石制成的尖端压入试样表面,根据压痕的面积或深度来测定硬度值,常用的硬度表示方法有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HRA、HRB、HRC)和维氏硬度(HV)。

(3)回弹法。回弹法用于测定混凝土表面的硬度,并可间接推算混凝土的强度,也用于测定陶瓷、砖、砂浆、塑料、橡胶等材料的表面硬度和间接推算其强度。

## 2) 耐磨性

耐磨性是指材料表面抵抗磨损的能力,以磨损率来表示,按式(1-25)计算。

$$N = \frac{m_1 - m_2}{A} \quad (1-25)$$

式中, $N$  为材料的磨损率( $\text{g}/\text{cm}^2$ ); $m_1$ 、 $m_2$  分别为试件磨损前和磨损后的质量( $\text{g}$ ); $A$  为试件的受磨面积( $\text{cm}^2$ )。

材料的耐磨性与材料的组成结构及强度和硬度有关。一般来说,硬度大的材料,耐磨性较好,但不易加工。在土木工程中,有些工程部位(如道路路面、桥面、工业地面等)经常受到磨损,选择材料时应适当考虑强度和耐磨性。

# 1.4 土木工程材料的耐久性

## 1. 影响土木工程材料耐久性的因素

材料在长期使用过程中,在环境因素作用下,能保持其原有性能而不变质、不破坏的性质,统称为耐久性。它是土木工程材料的一项综合性能。

在土木工程材料的使用过程中,除内在原因使其组成结构或性能发生变化以外,使用环境中各种自然因素的作用,包括物理作用、化学作用和生物作用,对其也起到一定程度的作用。

(1)物理作用。物理作用包括干湿变化、冷热变化、冻融变化等。这些变化会使材料体积发生收缩或膨胀,或产生内应力,造成材料内部裂缝扩展,久而久之,材料逐渐发生破坏。

(2)化学作用。化学作用包括大气和环境水中的酸、碱、盐等溶液或其他有害物质对材料的侵蚀作用,以及日光、紫外线等对材料的作用。这些作用使材料逐渐发生质变、恶化而破坏。

(3)生物作用。生物作用包括昆虫或菌类等侵害作用。这些作用导致材料发生虫蛀、腐朽等而破坏。

不同的材料有不同的耐久性特点:对无机矿物材料(混凝土、石材等),要考虑其抗冻性、有害气体等的作用;对金属材料,主要考虑其化学腐蚀作用;对木材,主要考虑生物作用带来的损坏。另外,不同的工程环境对材料的耐久性也有不同的要求,如寒冷地区室外工程的混凝土应考虑其抗冻性;处于有压力水作用下的水工工程及地下工程所用的混凝土应有抗渗性要求。要根据材料所处的结构部位和使用环境等因素综合考虑其耐久性,并根据各种材料的耐久性特点合理地选用材料。

## 2. 提高土木工程材料耐久性的措施

为了提高材料的耐久性,延长建筑的使用寿命和减少维修费用,可根据使用情况和材料

特性采取相应的措施。例如,设法减轻大气或周围介质对材料的破坏作用(降低湿度,排除侵蚀性物质等);提高材料本身对外界作用的抵抗性(提高材料的密度,采取防腐措施等),也可用其他材料保护主体材料免受破坏(覆面、抹灰、刷涂料等)。

## 知 识 库

### 1. 与土木工程材料性质相关的英文词汇

碱 alkali	氖 neon
合金 alloy	无细集料混凝土 no-fines aggregate concrete
铝 aluminum	波特兰水泥 portland cement
灰 ash	白榴火山灰 pozzolana
柏油 asphalt	预应力混凝土 prestressed concrete
棒材,撑条,杆件 bar	钢筋 reinforcing steel bar
梁 beam	淤泥,粉粒 silt
沥青 bitumen	钢材 steel
砌块 block	石材 stone
砖 hollow brick	瓦 tile
空心砖 cell brick	木材,木料 timber
水泥 cement	火山灰 volcanic ash
陶瓷 ceramic, pottery	木头 wood
瓷器 china	早强剂 early-strength admixture
黏土 clay	催化剂,促凝剂 accelerating agent
卵石 cobble	活性剂 active agent
化合物 compound	掺合剂,掺合料,外加剂 additive, admixture
混凝土 concrete	胶黏剂,黏合剂 adhesive
混凝土保护层 concrete cover	加气水泥 aerated cement
(砖)层,行 course	加气混凝土 aerated concrete
幕墙 curtain wall	加气混凝土砌块 aerated concrete block
细粒 fine	加气混凝土砌块隔墙 aerated concrete block partition
玻璃 glass	加气砖 aerated tile
砾石 gravel	作用剂,试剂 agent
砂砾,粗砂 grit	骨料,集料 aggregate
薄砂浆,灰浆 grout	引气混凝土 air entrained concrete
石膏 gypsum	加气剂 air entraining admixture
锰 manganese	密度 density
大理石 marble	表观密度 apparent density
砌体 masonry	
金属 metal	
砂浆 mortar	



堆积密度	bulk density	憎水性	hydrophobic property
密实度	solidity	吸水性	water-absorbing quality
孔隙率	porosity	吸水率	water content
孔隙	pore	含水率	water percentage
空隙率	voidage	质量吸水率	specific absorption of quality
空隙	void	体积吸水率	specific absorption of volume
强度	strength	质量含水率	water content of quality
弹性	elasticity	吸湿性	moisture absorption
塑性	plasticity	耐水性	water resistance
脆性	brittleness	饱和	saturation
韧性	toughness	比强度	specific strength
耐久性	durability	比热	specific heat
抗压强度	compressive strength	导热率	thermal conductivity
抗拉强度	tensile strength	导热性	permeability to heat
抗剪强度	shearing strength	导热系数	coefficient of heat passage
抗弯强度	bending strength	导温系数	thermal diffusivity
变形	deformation	抗冻性	freezing resistance
润湿角	wetting angle	抗渗性	penetration resistance
亲水性	hydrophilic property	热阻	heat resistance

## 2. 国内外土木工程材料相关标准、规范介绍

为了保证土木工程的质量,必须实行土木工程材料的标准化,世界范围统一使用的是 ISO 国际标准,而各个国家或地区也制定了不同的标准来规范土木工程材料的质量。中外土木工程标准体系的差异如下:

(1) 欧洲国家的标准。欧洲标准是规范各参与国对土木工程材料的要求,保证土木工程质量的的标准。欧洲电工标准化委员会(CENELEC, Comité Européen de Normalisation Électrotechnique)和欧洲标准化委员会(CEN, Comité Européen de Normalisation)及它们的联合机构 CEN/CENELEC 是欧洲最主要的标准制定机构。CENELEC 于 1976 年成立于比利时的布鲁塞尔,由两个早期机构合并而成。它的宗旨是协调欧洲有关国家的标准机构所颁布的电工标准和消除贸易上的技术障碍。在业务范围上,CENELEC 主管电工技术的全部领域,而 CEN 则管理其他领域。按参加国所承担的共同义务,通过欧洲标准(EN, European Norm)赋予某成员国的有关国家标准以合法地位,或撤销与之相对立的某一国家的有关标准,也就是说成员国的国家标准必须与欧洲标准保持一致。

英国、法国、德国是欧洲标准的三大主要贡献者,因此,欧洲标准以英语、法语、德语三大官方语言同时出版。英国标准(BS, British Standard)是由英国标准协会(BSI, British Standards Institution)制定的标准,法国标准(NF, Normes Francaises)是由法国标准化协会(AFNOR, Association Francaise de Normalisation)设立的技术委员会制定的标准,德国标准(DIN, Deutsch Industrial Norman)是由德国标准化委员会的代表们讨论和制定的特定领域的标准化要求,并最终形成的标准。各国在实施欧洲标准时,可视本国需要将其翻译成本国语言,但必须完全等同,不能有任何偏差。

欧洲是依靠欧盟统一化的思想,将欧洲主要国家(英国、法国、德国等)的标准加以甄别修改,转化为全欧洲统一的标准,以促进成员国在产品、材料、技术等方面的深入交流,有着较大的益处。

(2)美国标准。在美国从事土木工程,其标准的制定机构是美国的行业协会,如建筑材料应遵从美国材料与试验协会(ASTM, American Society Testing and Materials)标准,混凝土结构要遵从美国混凝土协会(ACI, American Concrete Institute)标准,钢结构要遵从美国钢结构协会(AISC, American Institute of Steel Construction)标准,等等。

ASTM 标准分以下六种类型:

①标准试验方法(standard test method)。标准试验方法是指为鉴定、检测和评估材料、产品、系统或服务的质量、特性及参数等指标而采用的规定程序,如《通过胶带试验测定附着力的试验方法》(ASTM D3359—2009e2)等。

②标准规范(standard specification)。标准规范对材料、产品、系统或项目提出技术要求并给出具体说明,同时还提出了满足技术要求而应采用的程序。标准规范,如《非金属材料暴露用荧光紫外线灯的操作规范标准》(ASTM G154—2012a)。

③标准惯例(standard practice)。标准惯例对一种或多种特定的操作或功能给予说明,但不产生测试结果的程序。

④标准术语(standard terminology)。标准术语对名词进行描述或定义,对符号、缩略语、首字缩写进行说明。

⑤标准指南(standard guide)。标准指南对某一系列标准进行选择或对用法进行说明,但不介绍具体的实施方法。

⑥标准分类(standard classification)。标准分类根据来源、组成、性能或用途对材料、产品、系统或特定服务进行区分和归类。

美国标准依靠的是行业协会,通过行业协会强大的号召力,制定被认可的标准并争取在世界上得到推广。

(3)中国标准。我国的常用标准有三大类:第一类是国家标准,包括强制性国家标准(代号 GB)和推荐性国家标准(代号 GB/T),如《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)等;第二类是行业标准,如建工行业标准(代号 JG)、建材行业标准(代号 JC)、交通行业标准(代号 JT)等;第三类是地方标准(代号 DB)和企业标准(代号 QB)。任何技术或产品不得低于强制性国家标准规定的要求;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。

中国标准、规范大多是政府相关行政部门主导编制颁布的,大多数政府部委都颁布了主管范围内的行业标准、规范。因此,我国各行业的标准、规范有所差异,互不相同,与欧洲标准的统一体系形成反差。

## 思考与练习

1. 土木工程材料的组成有哪些?对材料的性质有何影响?
2. 简述土木工程材料的结构和构造对材料性质的影响。
3. 土木工程材料的密度、表观密度、体积密度、堆积密度有何区别?

4. 土木工程材料的孔隙率、空隙率、间隙率有何区别?
5. 土木工程材料的亲水性与憎水性是如何划分的? 如何区别吸水性与吸湿性?
6. 试分析土木工程材料的孔隙率和孔隙特征对材料耐水性、抗渗性、抗冻性及导热性的影响。
7. 土木工程材料的强度、硬度与耐磨性各与哪些因素有关? 材料的弹性变形和塑性变形特点是什么? 脆性材料和韧性材料各有何特点?
8. 影响土木工程材料耐久性的因素有哪些? 如何提高土木工程材料的耐久性?
9. 本章所述的土木工程材料各性质之间有何内在联系?
10. 在质量为 20 kg、容积为 10 L 的容量筒中装满绝干石子后,其总质量为 25.4 kg。若向筒内注入水,待石子吸水饱和后,为注满此筒需注入水 7.5 kg。擦干上述吸水饱和的石子的表面后,称得总质量为 26.4 kg(含筒重)。求该石子的吸水率、表观密度、堆积密度和开口孔隙率。

## 金属材料

金属材料是由金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性的材料的统称。金属材料通常分为黑色金属、有色金属和特种金属材料三大类。黑色金属是指以铁为主要成分的金属及其合金材料,如工业纯铁、铸铁和碳素钢。有色金属是指除铁、铬、锰以外的所有金属及其合金,如铜、铝、铅等。特种金属材料包括不同用途的结构金属材料 and 功能金属材料。

在土木工程中,金属材料多种多样,其中钢材就是最为重要的一种金属材料,主要应用于钢筋混凝土结构中。从20世纪90年代起,随着社会经济的发展,一栋栋高楼大厦拔地而起,带动着建筑工程的发展,而在未来钢材的需求量将会越来越大。

### 2.1 钢材的组成、生产与分类

#### 2.1.1 钢材的组成

##### 1. 钢材的化学成分

钢材的化学成分主要是碳、硅、锰、磷、硫以及氧、氮、氢等元素。

(1)碳(C)。碳是钢材中除铁之外含量最多的元素,决定着钢材的性能。钢材的强度和硬度随着含碳量的增加而相应地提高,而塑性和韧性则相应降低。土木工程所用钢材的含碳量不应大于0.8%。这是因为当钢材中的含碳量达到0.8%时,钢材的强度最大;但超过0.8%时,钢材的强度反而下降,其下降曲线类似于抛物线。

(2)硅(Si)。硅是在钢材炼制过程中为了脱氧去硫而加入的元素,可以提高钢的强度和韧性。硅在一般碳素钢中的含量为0.1%~0.4%。如果把硅作为合金元素加入钢中,当其含量达到1.0%~1.2%时,钢材的抗拉强度可提高15%~20%,但焊接性能变差,塑性和韧性明显降低。

(3)锰(Mn)。锰是在钢材炼制过程中为了脱氧去硫而加入的元素,锰元素的加入可以提高钢的强度和韧性,降低钢的脆性。锰的脱氧去硫作用比硅弱。锰在一般碳素钢中的含量为0.25%~0.8%。当锰在钢中的含量小于0.8%时,锰对钢的性能影响不显著;但当锰含量大于1.0%时,钢材的耐腐蚀和焊接性能会降低。

(4)磷(P)。磷是在钢材提炼过程中带进来的有害元素。当钢材中的磷含量增加时,钢

材的强度增加,而塑性和韧性下降。磷元素对钢材的冷脆性影响较大,使钢材在低温条件下冷脆性变大,而且显著影响钢材的可焊性。

(5)硫(S)。硫不仅在大气中是有害元素,而且是钢材中的有害元素。硫在钢材中以硫化铁(FeS)的形式存在,硫化铁是一种低熔点化合物。在钢材的焊接过程中,随着温度的增加,硫化铁熔化,致使钢材内部产生裂纹,对钢材的强度和韧性造成不利影响。硫还有强烈的偏析作用,因此,硫在钢材中的含量应受到严格的控制。

(6)氧(O)、氮(N)、氢(H)。氧、氮、氢这三种气体对钢材来讲都是有害气体,因为这三种气体会显著降低钢材的塑性和韧性。氧在钢材中的存在形式大多为氧化物形式,能够使钢材的强度、塑性和可焊性降低。当钢材中的氮元素含量增加时,钢材的强度和硬度会相应地提高,而塑性和韧性则大大降低,而且钢材冷脆性和焊接性能发生变化。钢材中溶有氢会引起钢材内部出现裂纹和白点(圆圈状的断裂面),断口有白点的钢材一般不能用于建筑结构。

## 2. 钢材的晶体组织

钢材是多晶体,铁原子和碳原子在晶粒中以不同的规律排列,可以形成不同的晶格。晶格是用于描述原子在晶体中排列规律的三维空间几何点阵,而晶胞是晶格中能够代表晶格特征的最小几何单元,如图 2-1 所示。铁、碳两种元素可以不同的形态存在,这种形态称为晶体组织。钢是以铁(Fe)为主的 Fe-C 合金。Fe-C 合金于一定条件下能形成具有一定形态的聚合物,其称为钢材的晶体组织,因在显微镜下能观察到它们的微观形貌图像,故也称显微组织。显微组织主要有铁素体、珠光体、渗碳体和奥氏体四种。

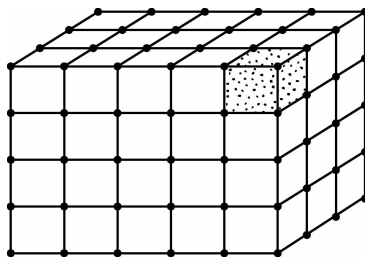


图 2-1 晶格与晶胞

### 1) 金属的晶体结构

金属材料通常都是一种晶体材料。金属的晶体结构反映金属材料内部的原子排列的规律。它决定着材料的显微组织和材料的宏观性能。晶体中原子(或离子)规则排列的方式称为晶体结构,如图 2-2(a)所示。通过金属原子(或离子)的中心划出许多空间直线,这些直线将形成空间格架,这种格架称为晶格,如图 2-2(b)所示。晶格的结点为金属原子(或离子)平衡中心的位置。

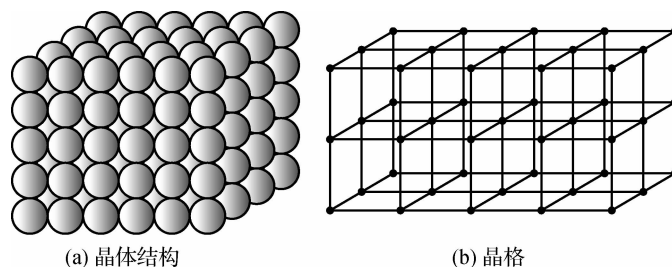


图 2-2 金属的晶体结构及晶格

金属晶体的晶格通常有面心立方晶格、体心立方晶格和密集六方晶格三种类型,如图 2-3 所示。

(1)面心立方晶格。面心立方晶格的特征为金属原子分布在立方体的八个角上和六个面的中心,面中心的原子与该面四个角上的原子紧靠。具有面心立方晶格的金属有铝、铜、镍、金、银、 $\gamma$ -铁等。

(2)体心立方晶格。体心立方晶格的晶胞中,八个原子处于立方体的角上,一个原子处于立方体的中心,角上的八个原子与面中心的原子紧靠。具有体心立方晶格的金属有钨、钒、 $\alpha$ -铁等。

(3)密集六方晶格。密集六方晶格的特征是金属原子分布在立方体的十二个角上,在上下底面的中心各分布一个原子,上下底面之间均匀分布三个原子。具有密集六方晶格的金属有镁、镉、锌、铍等。

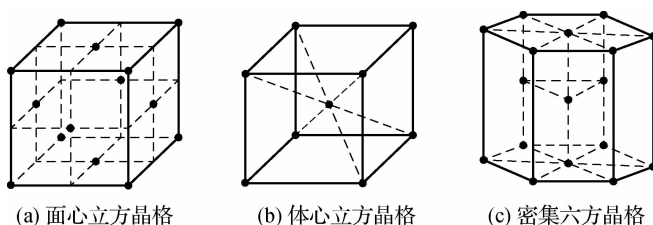


图 2-3 金属晶体的晶格类型

## 2) 钢的基本晶体组成

钢的基本晶体组成如下:

(1)铁素体。钢材中的铁素体为碳在  $\alpha$ -Fe 中的固溶体。由于  $\alpha$ -Fe 体心立方晶格的原子间空隙小,溶碳能力较差,故铁素体的含碳量很少(小于 0.02%),由此决定其塑性、韧性好,但强度、硬度低。

(2)渗碳体。渗碳体为铁和碳的化合物碳化三铁( $\text{Fe}_3\text{C}$ )。其含碳量高达 6.67%,晶体结构复杂,塑性差,性硬脆,抗拉强度低。

(3)珠光体。珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物。其含碳量为 0.8%,强度较高,塑性和韧性介于铁素体和渗碳体之间。

(4)奥氏体。奥氏体是指  $\gamma$ -Fe 中的固溶体。其溶碳能力较强,高温时含碳量可达 2.06%,低温时下降至 0.80%。其强度、硬度不高,但塑性好。碳素钢处于红热状态时即存在这种组织,这时钢易于轧制成形。

晶体组织的划分、组成、含碳量及其性能比较见表 2-1。

表 2-1 晶体组织的划分、组成、含碳量及其性能比较

晶体组织	组成	含碳量	性能
铁素体	C 溶于 $\alpha$ -Fe 中的固溶体	小于 0.02%	塑性良好,强度、硬度很低
渗碳体	铁与碳形成的 $\text{Fe}_3\text{C}$	6.67%	塑性差,硬度高,强度低
珠光体	铁素体与渗碳体的机械混合物	0.80%	强度较高,塑性和韧性介于铁素体和渗碳体之间
奥氏体	C 在 $\gamma$ -Fe 中的固溶体	0.80%~2.06%	强度、硬度不高,塑性好

当温度  $T \leq 727\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,钢的晶体组织为铁素铁、渗碳体、珠光体;当  $T > 727\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,钢的晶体组织为奥氏体。

建筑钢材的含碳量不大于  $0.8\%$ ,其基本组织为铁素体和珠光体。当钢材的含碳量增大时,珠光体的相对含量随之增大,铁素体则相应减小。因此,在一定范围内,钢材的强度随着含碳量增大而提高,但塑性和韧性则相应下降。

### 3. 钢材的组成对性能的影响

钢材中含量最大的元素为铁,其次为碳,以及硅、锰、磷、硫、氧、氮、氢等元素。每一种元素本身具有一定的特性,当在钢材的冶炼过程中将这些元素加入以后,钢材的自身特性会随着各种元素的多少而产生差异性。除铁、碳外,钢材在冶炼过程中会从原料、燃料中引入一些其他元素,这些元素存在于钢材的组织结构中,对钢材的结构和性能有重要的影响。这些元素可分为两类:一类是能改善优化钢材性能的元素,称为合金元素,主要有硅、锰、钛、钒、铌等;另一类是会劣化钢材性能的元素,属于钢材的杂质,主要有氧、硫、氮、磷等。化学元素对钢材性能的影响见表 2-2。

表 2-2 化学元素对钢材性能的影响

化学元素	强 度	硬 度	塑 性	韧 性	可 焊 性	其 他
碳(C) < 0.8% ↑	↑	↑	↓	↓	↓	冷脆性 ↑
硅(Si) > 1% ↑			↓	↓↓	↓	冷脆性 ↑
锰(Mn) ↑	↑	↑		↑		脱氧(硫)剂
钛(Ti) ↑	↑↑		↓	↑		强脱氧剂
钒(V) ↑	↑					时效 ↓
铌(Nb) ↑	↑		↑	↑		
磷(P) ↑	↑		↓	↓	↓	偏析、冷脆性 ↑↑
氮(N) ↑	↑		↓	↓↓	↓	冷脆性 ↑
硫(S) ↑	↓				↓	
氧(O) ↑	↓				↓	

注:“↑”代表含量增大或性能增强,“↓”代表含量减小或性能降低,“↑↑”代表性能增强程度较大,“↓↓”代表性能降低程度较大。

图 2-4 所示为含碳量对钢材性能的影响。从图中可以看出,在一定范围内,钢材的硬度和强度随含碳量的增加而提高,钢材的塑性、韧性和冷弯性能随着含碳量的增加而下降。当含碳量增至  $0.8\%$  左右时,钢材的强度达到最大;当含碳量超过  $0.8\%$  以后,强度反而下降。图中,  $\sigma_b$  表示抗拉强度, HB 表示硬度,  $\alpha_k$  表示冲击韧性,  $\psi$  表示面积收缩率,  $\delta$  表示伸长率。

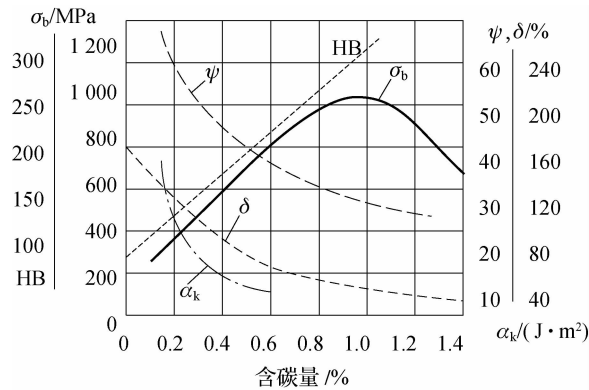


图 2-4 含碳量对钢材性能的影响

## 2.1.2 钢材的生产与分类

### 1. 钢材的生产

#### 1) 冶炼

铁元素在地壳中占 4.7%，通常以化合物的形式存在于铁矿石中。主要的铁矿石有赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、褐铁矿和黄铁矿。把铁矿石、焦炭、石灰石（助熔剂）按一定比例装入高炉中，在炉内高温条件下，焦炭中的碳与矿石中的氧化铁发生化学反应，将矿石中的铁还原出来，此过程中生成的一氧化碳和二氧化碳由炉顶排出，从而使矿石中的铁和氧分离。通过这种冶炼方法得到的铁中仍含有较多的碳和其他杂质，故其性能既硬又脆，影响使用，因而上述过程称为炼铁。

将铁在炼钢炉中进一步熔炼，并供给足够的氧气，通过炉内的高温氧化作用，部分碳被氧化成一氧化碳气体而逸出，其他杂质则形成氧化物进入炉渣中被除去，这样可得到含碳量符合要求的产品，即钢，此过程称为炼钢。钢在强度、韧性等性质方面都较铁有了较大幅度的提高，在土木工程中大量使用的都是钢材。

#### 2) 铸锭

铸锭是将在炼钢炉中冶炼好的钢水倒入盛钢桶内，进行最后的脱氧、调整成分和调整温度处理后，注入钢锭模中凝固成为钢锭；或是在连续铸钢设备中铸成钢坯。将钢液注入一定形状的模式中直接得到冶金产品的过程称为铸钢。其中，连铸（连续铸钢）发展迅速，它具有一系列的优点，也是一项短流程技术，从长远看，将会取代传统的模铸生产模式。

铸锭过程是钢液由液相结晶成为固相的过程，也是钢材生产中的重要环节。由于铸锭的失误能使精炼合格的钢液报废，在铸锭过程中产生的缺陷使后续的锻造或轧制等压力加工不能实现，或者使成品的合格率降低；因而，铸锭过程的操作是否适宜，对决定最终成品的质量是极为重要的。

#### 3) 压力加工

经炼钢工序生产的钢锭或连铸坯不能直接作为其他工业生产的原材料或直接用于社会消费，必须对其做进一步的压力加工（塑性加工）或其他加工，制成各种形状并能满足各种用



途的钢材。钢材既是工业生产的基础原材料,同时又是社会生活中重要的消费材料,在国民经济中具有十分广泛的用途。在钢铁工业生产中,绝大多数钢材是经压力加工制成的或先经压力加工再经其他加工制成的。所谓压力加工,就是用不同的设备、工具对金属施加外力,使之产生塑性变形,制成具有预期的尺寸、形状和性能的产品的方法,又称为塑性加工。压力加工的方法很多,有热压延加工法和冷压延加工法。

(1)热压延加工法。热压延加工法是将坯料加热到金属的再结晶温度以上而进行的塑性加工方法,其中热轧法是最主要的生产方法,约有90%的钢是采用热轧法直接成材,或是先经热轧法再采用其他加工方法成材的。热压延加工法包括热轧法、锻压法、挤压法等方法。

①热轧法。热轧法是将钢料加热到1 000~1 250℃,用轧钢机轧制成材的方法。

②锻压法。锻压法是用锻锤、精锻机、快锻机或液压机将钢锭锻压成钢材、钢坯或锻件毛坯的方法。锻压法是最早采用的加工方法。采用锻压法,可以得到机械性能更好,以及用轧制法所不容易或不能够得到的形状的成品钢材。

③挤压法。挤压法是将坯料装入挤压机的挤压筒中加压,使之从挤压筒的孔中挤出,形成比坯料断面小,并有一定断面形状的型材、管材或空心材等的方法。挤压法用于生产用热轧法难以生产的产品(如复杂断面钢材、不锈钢管等)。

(2)冷压延加工法。冷压延加工法是将热轧后的钢材在再结晶温度以下继续进行加工,使之成为冷压延加工钢材的方法。采用冷压延加工法,可以改善钢材的机械性能,并得到尺寸精度高和有一定光洁度的产品。冷压延加工法包括冷轧法、冷拔法、冷弯法、热处理等方法。

①冷轧法。冷轧法主要用于生产冷轧钢板、冷轧钢管及冷轧钢筋。冷轧钢板可采用二辊式轧机、四辊可逆式轧机、多辊可逆式轧机和冷连轧机生产。

②冷拔法。冷拔法主要用于生产型钢和钢管。冷拔法就是用冷拔机对型钢和钢管进行冷拔。对钢管进行冷拔又分无芯棒拉拔、长芯棒拉拔和短芯棒拉拔三种。

③冷弯法。冷弯法主要用于生产冷弯型钢和焊管。冷弯法通过冷弯机将钢带或钢板在冷状态下弯曲成各种断面形状的钢材。

④热处理。钢材的热处理是将钢在固态下加热到预定的温度,保持一定的时间,然后以某种冷却方式冷却下来的一种加工工艺,其工艺过程是:加热—保温—冷却。

热处理的目的是改变钢的内部组织结构,从而改善工件的工艺性能、使用性能,挖掘钢材的潜力,延长零件的使用寿命,提高产品的质量,节约材料和能源。

根据工艺方法不同,钢材的热处理分为以下三大类:

- a. 整体热处理。整体热处理包括退火、正火、淬火和回火、调质及其他。
- b. 表面热处理。表面热处理包括表面淬火和回火等。
- c. 化学热处理。化学热处理包括渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗、渗其他非金属、渗金属、多元共渗、熔渗。

## 2. 钢材的分类

钢材种类很多,性质各异,分类方法也有很多。

### 1)按化学成分分类

按化学成分不同,钢材可分为以下两种:

(1)碳素钢。碳素钢的化学成分主要是铁,其次是碳,故也称为铁碳合金。其含碳量为 $0.02\% \sim 2.06\%$ 。此外,其还含有极少量的硅、锰和微量的硫、磷等元素。碳素钢按含碳量又可分为低碳钢(含碳量小于 $0.25\%$ )、中碳钢(含碳量为 $0.25\% \sim 0.60\%$ )和高碳钢(含碳量大于 $0.60\%$ )三种。其中,低碳钢在建筑工程中应用最多。

(2)合金钢。合金钢是指在炼钢过程中,有目的地加入一种或者多种能够改善钢材性能的合金元素而制得的钢种。常用的合金元素有硅、锰、钛、钒、铌、铬等。按合金元素总含量的不同,合金钢可以分为低合金钢(合金元素总含量小于 $5\%$ )、中合金钢(合金元素总含量为 $5\% \sim 10\%$ )和高合金钢(合金元素总含量大于 $10\%$ )。低合金钢为建筑工程常用的主要钢种。

### 2)按钢材中有害杂质磷和硫的含量分类

按钢材中有害杂质磷和硫含量的不同,钢材可分为以下四类:

(1)普通钢。普通钢的磷含量大于 $0.035\%$ 而不大于 $0.045\%$ ,硫含量大于 $0.035\%$ 而不大于 $0.050\%$ 。

(2)优质钢。优质钢的磷含量大于 $0.030\%$ 而不大于 $0.035\%$ ,硫含量大于 $0.020\%$ 而不大于 $0.035\%$ 。

(3)高级优质钢。高级优质钢的磷含量大于 $0.025\%$ 而不大于 $0.030\%$ ,硫含量大于 $0.020\%$ 而不大于 $0.030\%$ 。

(4)特级优质钢。特级优质钢的磷含量不大于 $0.025\%$ ,硫含量不大于 $0.020\%$ 。

### 3)按脱氧程度分类

在炼钢过程中,为了除去碳和杂质,必须供给足够的氧气,这也使钢液中一部分金属铁被氧化,使钢材的质量降低。为将氧化铁重新还原成金属铁,通常在冶炼后期加入硅铁、锰铁或铝锭等脱氧剂,进行精炼。按脱氧程度不同,可将钢分为以下几种:

(1)沸腾钢。沸腾钢是脱氧较不完全的钢,代号为F。钢材浇铸后,在冷却凝固的过程中,钢液中残留的氧化亚铁与碳化合后,生成的一氧化碳气体大量外逸,造成钢液激烈“沸腾”,故称之为沸腾钢。这种钢的成分分布不均,密实度较差,因而影响钢的质量,但其成本较低,可广泛用于一般建筑结构中。

(2)镇静钢。炼钢时采用硅铁、锰铁和铝锭等作为脱氧剂,脱氧完全,且同时能起到去硫作用。这种钢水在铸锭时能平静地充满锭模并冷却凝固,故称为镇静钢,代号为Z。镇静钢是脱氧完全的钢,质量优于沸腾钢,但成本较高,故只用于承受冲击荷载或其他重要的结构中。

(3)半镇静钢。半镇静钢的脱氧程度和材质介于沸腾钢和镇静钢之间,为质量较好的钢,代号为b。

(4)特殊镇静钢。比镇静钢脱氧程度更充分彻底的钢称为特殊镇静钢,代号为TZ。

### 4)按用途分类

钢按用途不同可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢。

(1)结构钢。结构钢主要用于制作工程结构构件及机械零件。

(2)工具钢。工具钢主要用于制作各种刀具、量具及模具。

(3)特殊性能钢。特殊性能钢是具有特殊物理、化学或机械性能的钢,如不锈钢、耐热

钢、耐酸钢、耐磨钢、磁性钢等。

钢材的主要分类方法如图 2-5 所示。



图 2-5 钢材的主要分类方法

## 2.2 钢材的力学性能

### 2.2.1 钢材的抗拉性能

拉伸是建筑钢材的主要受力形式,所以抗拉性能是表示钢材性能和选用钢材的重要指标。钢材的抗拉性能可通过低碳钢受拉时的应力-应变图(见图 2-6)表示。

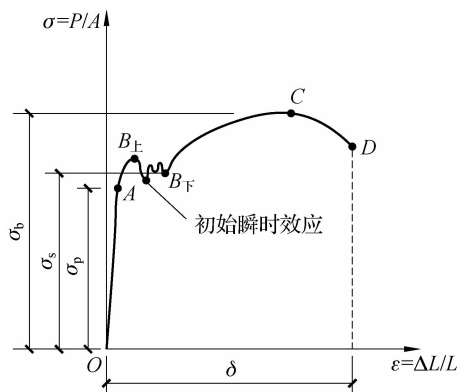


图 2-6 低碳钢受拉时的应力-应变图

从图 2-6 中可以看出,曲线划分为四个阶段,即弹性阶段(OA)、屈服阶段(AB)、强化阶段(BC)和颈缩阶段(CD)。

### 1. 弹性阶段

在图 2-6 中的 OA 段,应力较低,应力与应变成正比例关系,卸去外力,试件恢复原状,无残余变形,这一阶段称为弹性阶段。弹性阶段的最高点(A 点)所对应的应力称为弹性极限,用  $\sigma_p$  表示。在弹性阶段,应力和应变的比值为常数,该常数称为弹性模量,用  $E$  表示,即  $E = \sigma / \epsilon$ 。

### 2. 屈服阶段

图 2-6 中的 AB 段为屈服阶段。当应力超过弹性极限后,应变的增长速度比应力快,此时,除产生弹性变形外,还产生塑性变形。当应力超过 A 点后,即使应力不再增加,塑性变形仍明显增长,钢材出现了屈服现象,这一阶段称为屈服阶段。在屈服阶段中,应力会有波动,出现上屈服点( $B_u$ )和下屈服点( $B_f$ )。由于下屈服点比较稳定且容易测定,因此,采用下屈服点对应的应力作为钢材的屈服极限( $\sigma_s$ )或屈服强度。

钢材受力达到屈服强度后,变形迅速增长,尽管尚未断裂,但已不能满足使用要求,故结构设计中以屈服强度作为容许应力取值的依据。低碳钢有明显的屈服点;硬钢则无明显的屈服点,硬钢的屈服点以试件在拉伸过程中产生的残余变形达到原始标距长度的 0.2% 时所对应的应力作为规定的屈服极限,以  $\sigma_{0.2}$  表示(见图 2-7)。

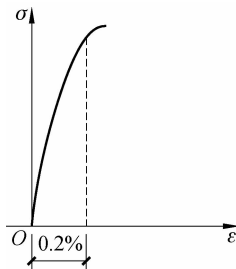


图 2-7 硬钢的屈服点  $\sigma_{0.2}$

### 3. 强化阶段

图 2-6 中的 BC 段为强化阶段。钢材屈服到一定程度后,内部晶格扭曲、晶粒破碎等原因阻止了塑性变形的进一步发展,钢材抵抗外力的能力重新提高,在应力-应变图上,曲线从 B 点开始上升直至最高点 C,这一过程称为强化阶段。对应于最高点 C 的应力称为抗拉强度( $\sigma_b$ ),它是钢材所承受的最大拉应力。常用低碳钢的抗拉强度为 375~500 MPa。

### 4. 颈缩阶段

图 2-6 中的 CD 段为颈缩阶段。在应力-应变图上,当曲线达到 C 点时,试件薄弱处的断面将显著减小,塑性变形急剧增加,试件产生颈缩现象而断裂。

钢材的塑性通常用拉伸试验时的伸长率或断面的收缩率来表示。

(1) 伸长率。将拉断后的试件拼合起来,测量出标距长度  $l_1$ ,  $l_1$  与试件受力前的原标距  $l_0$  之差为塑性变形值,其与原标距  $l_0$  之比为伸长率  $\delta$ ,按式(2-1)计算。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中,  $\delta$  为伸长率;  $l_0$  为试件的原始标距长度(mm);  $l_1$  为断裂试件拼合后的标距长度(mm)。

(2) 断面收缩率。断面收缩率是指断口处的面积收缩量与原面积之比。

### 2.2.2 钢材的冲击韧性

钢材抵抗冲击荷载不被破坏的能力称为冲击韧性。用于重要结构的钢材,特别是承受冲击振动荷载的结构所使用的钢材,必须保证其冲击韧性。

影响钢材冲击韧性的因素很多,当钢材内硫、磷的含量高,存在化学偏析,含有非金属夹杂物及焊接形成的微裂缝时,钢材的冲击韧性都会显著降低。

环境温度对钢材的冲击韧性影响很大。试验证明,钢材的冲击韧性随温度的降低而下降,开始时下降缓慢,当达到一定温度范围时,突然下降很多而呈脆性,这种性质称为钢材的冷脆性。这时的温度称为脆性临界温度,其数值越低,说明钢材的低温冲击韧性越好。因此,对在负温下使用的结构,应选用脆性临界温度较使用温度低的钢材。由于脆性临界温度的测定较复杂,故通常是根据气温条件规定 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的负温冲击值指标。

对于直接承受动荷载且可能在负温下工作的重要结构,必须按照有关规范要求对钢材的冲击韧性检验。

### 2.2.3 钢材的耐疲劳性能

钢材受交变荷载反复作用时,在应力低于其屈服强度的情况下突然发生脆性断裂破坏的现象,称为疲劳破坏。疲劳破坏是在低应力状态下突然发生的,所以危害极大,往往造成灾难性的事故。在一定条件下,钢材疲劳破坏的应力值随应力循环次数的增加而降低。钢材在无穷次交变荷载作用下而不至引起断裂的最大循环应力值称为疲劳强度极限,实际测量时常以 $2 \times 10^6$ 次应力循环为基准。一般来说,钢材的抗拉强度高,其疲劳极限也较高。

研究表明,钢材的疲劳破坏是由拉应力引起的,首先在局部开始形成微细裂缝,由于裂缝尖端处产生应力集中而使裂缝迅速扩展,直至钢材断裂。因此,钢材内部成分的偏析和夹杂物的多少,以及最大应力处的表面光洁程度、加工损伤等,都是影响钢材疲劳强度的因素。疲劳破坏常常是突然发生的,往往造成严重的事故。

## 2.3 钢材的工艺性能

### 2.3.1 冷弯性能

冷弯性能是指钢材在常温下承受弯曲变形的能力,是建筑钢材的工艺性能。

如图 2-8 所示,采用的弯曲角度越大,弯心直径与试件厚度(或直径)的比值越小,表示材料的冷弯性能越好。按规定的弯曲角度和弯心直径进行试验时,试件的弯曲处不发生裂缝、断裂或起层,即认为其冷弯性能合格。

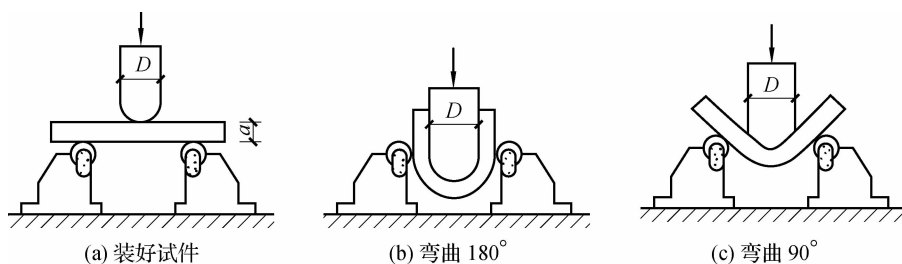


图 2-8 试件冷弯

$D$ —弯心直径； $a$ —试件厚度(或直径)

冷弯反映钢材处于不利变形条件下的塑性，而伸长率则是反映钢材在均匀变形下的塑性。因此，冷弯是对钢材塑性更严格的检验，它揭示钢材是否存在内部组织不均匀、内应力和夹杂物等缺陷。冷弯试验对焊接质量也是一种严格的检验，能揭示焊件在受弯表面是否存在未熔合、微裂纹及夹杂物等缺陷。

### 2.3.2 焊接性能

焊接是钢结构工程的主要连接形式。焊接的质量取决于焊接工艺、焊接材料及钢材的可焊接性。

钢材的可焊性是指钢材是否适应通常的焊接方法与工艺的性能。钢材可焊性的优劣主要取决于其化学成分。含碳量小于 0.25% 的碳素钢具有良好的可焊性。加入合金元素(如硅、锰、钒、钛等)将增大焊接处的硬脆性，降低可焊性。

焊接结构用钢应选用含碳量较低的镇静钢。对于高碳钢和合金钢，为了改善焊接后的硬脆性，焊接时一般需采用焊前预热及焊后热处理等措施。

## 2.4 钢材的加工与强化

### 2.4.1 冷加工强化

冷加工强化就是在常温下对钢材进行冷拉、冷拔、冷轧、冷扭、冷冲等机械加工，最终使其发生塑性变形。

钢筋冷拉与时效处理前后应力-应变曲线如图 2-9 所示。图中曲线  $OBCD$  为未经冷拉处理的钢筋的应力-应变曲线。将试件拉至超过屈服极限的某一点  $K$ ，然后卸去荷载，由于试件已产生塑性变形，故曲线沿  $KO'$  下降， $KO'$  大致与  $BO$  平行。如果重新对试件进行拉伸，新的屈服点必将高于原来可达到的  $K$  点。因此，钢材经冷拉以后屈服点将会提高。

钢材产生冷加工强化的原因是：在对钢材进行冷加工时，由于晶粒间已产生滑移，晶粒形状改变，有的被拉长，有的被压扁，甚至变成纤维状。同时在滑移区域，晶粒破碎，晶格歪扭，从而对继续滑移造成阻力，要使晶粒间重新产生滑移，就必须增加外力，这就意味着钢材的屈服强度有所提高，但由于减少了可以利用的滑移面，故钢的塑性降低。另外，在塑性变形中产生了内应力，钢材的弹性模量降低。

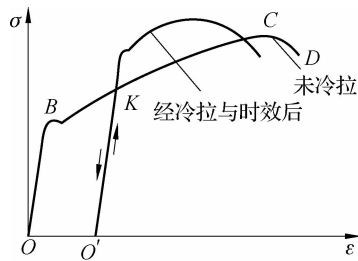


图 2-9 钢筋冷拉与时效处理前后应力-应变曲线

目前,常用的冷轧带肋钢筋、冷拉钢筋及预应力高强冷拔钢丝等,都是利用这一原理进行加工的产品。由于经冷加工的钢材的屈服强度提高,因而可达到节约钢材的目的。

### 2.4.2 时效强化

钢材随着时间的延长而表现出强度提高、塑性和冲击韧性下降的现象称为时效。时效又可分为自然时效和人工时效。自然时效为将经过冷加工后的钢材在常温下存放 15~20 d 的处理过程,人工时效为将经过冷加工后的钢材加热到 100~200 °C 并保持一段时间的处理过程。根据图 2-9 可知,冷加工后再经过时效处理的钢筋的屈服点进一步提高,抗拉强度稍见增长,塑性和韧性继续降低。

时效强化产生的原理主要是  $\alpha$ -铁晶格中的碳、氮原子向缺陷处移动、集中甚至有以碳化物或氮化物析出的趋势。当钢材经冷加工产生塑性变形后,或受动载的反复振动,都会促进氮、氧原子的移动和聚集,加速时效的发展,加剧晶格畸变,阻碍晶粒发生滑移,从而增加了钢材抵抗塑性变形的能力。

时效敏感性是指钢材因时效导致性能改变的程度。时效敏感性越大的钢材,经过时效作用后,其冲击韧性和塑性的降低越显著。对于承受动荷载的结构物,应选用时效敏感性较小的钢材。钢材的时效敏感性可用应变时效敏感系数  $C$  表示,按式(2-2)计算。 $C$  越大,则钢材的时效敏感性越大。

$$C = \frac{A_k - A_{ks}}{A_k} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中, $A_k$ 、 $A_{ks}$ 分别为进行钢材时效处理前、处理后的冲击吸收功(J)。

### 2.4.3 热处理

热处理的方法有退火、正火、淬火和回火等。对建筑钢材一般只在生产厂完成热处理工艺。在施工现场,有时须对焊接件进行热处理。

#### 1. 退火

退火是将钢材加热到一定温度,保温后缓慢冷却(随炉冷却)的一种热处理工艺。按加热温度不同,退火可分为低温退火和完全退火。

(1)低温退火。低温退火的加热温度在相变温度以下。低温退火的目的是细化晶粒,改善组织,降低硬度,提高塑性,消除组织缺陷和内应力,防止变形、开裂。

(2)完全退火。完全退火的加热温度为 800~850 °C,高于基本组织转变温度,经保温后

以适当速度缓冷,从而达到改变组织并改善性能的目的。例如,对含碳量较高的高强度钢筋进行焊接,容易形成很脆的组织,故必须紧接着进行完全退火以消除这种不利的转变,以保证焊接质量。

## 2. 正火

钢材经过加热至相变(铁素体等基本组织转变)温度以上,组织变为奥氏体之后,置于空气中冷却。这种处理,可细化钢材晶粒,调整碳化物的大小和分布,而再结晶可除掉内部应力。对于经过压延难于除掉的应力和淬火、回火有困难的大型钢件,特别是铸钢件,正火是重要的热处理工艺。

正火与退火的差异仅为冷却速度不同,正火是退火的一种变态或特例,正火是在空气中冷却,不需要占用设备,生产效率高。钢材经过正火后,硬度、强度提高,而塑性降低。正火的主要目的是细化晶粒,消除组织缺陷等。因此,在生产中尽量使用正火代替退火工艺。

## 3. 淬火和回火

淬火和回火通常是两道相连的处理过程。淬火的加热温度在基本组织转变温度以上,保温使组织完全转变,即投入选定的冷却介质(如水或矿物油等)中急冷,使其转变为不稳定组织,淬火即完成。随后进行回火,加热温度(150~650℃)在基本组织转变温度以下,保温后按一定速度冷却至室温。其目的是促进淬火后的不稳定组织转变为所需要的组织,消除淬火过程中产生的内应力。我国生产的热处理钢筋是采用中碳低合金钢经油浴淬火和铅浴高温(500~650℃)回火制得的,它的组织为铁素体和均匀分布的细颗粒渗碳体。

# 2.5 土木工程中常用的钢材

## 2.5.1 常用钢材的主要品种

常用钢材的主要品种有以下几种:

### 1. 碳素结构钢

碳素结构钢是指一般结构钢和工程用热轧板、管、带、型材、棒材等。《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)规定了碳素钢的牌号表示方法、技术要求等。

#### 1) 牌号

碳素结构钢的牌号由四部分表示,按顺序为代表屈服强度的字母(Q)、屈服强度数值、质量等级(有A、B、C、D四级,逐级提高)和脱氧程度(F为沸腾钢,Z为镇静钢,TZ为特殊镇静钢;用牌号表示时,Z、TZ可省略)。例如,Q235AF表示屈服点为235 MPa的A级沸腾钢。

#### 2) 技术要求

《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)对碳素结构钢的化学成分、力学性能做出了具体的规定。

碳素结构钢的化学成分应符合表 2-3 的规定。



表 2-3 碳素结构钢的化学成分

牌 号	等 级	厚度 (或直径) /mm	脱氧方法	化学成分(质量分数)/%, ≤				
				C	Si	Mn	P	S
Q195		—	F、Z	0.12	0.30	0.50	0.035	0.040
Q215	A	—	F、Z	0.15	0.35	1.20	0.045	0.050
	B							0.045
Q235	A	—	F、Z	0.22	0.35	1.40	0.045	0.050
	B			0.20 <sup>①</sup>				0.045
	C		Z	0.17			0.040	0.040
	D		TZ				0.035	0.035
Q275	A	—	F、Z	0.24	0.35	1.50	0.045	0.050
	B	≤40	Z	0.21			0.045	0.045
		>40		0.22			0.040	0.040
	C	—	Z	0.20			0.035	0.035
D		TZ	0.035		0.035			

①经需方同意, Q235B的碳含量可不大于0.22%。

碳素结构钢的拉伸和冲击试验结果应符合表 2-4 的规定, 弯曲试验结果应符合表 2-5 的规定。

表 2-4 碳素结构钢的拉伸和冲击试验结果

牌号	等级	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eH}/(N \cdot mm^{-2}), \geq$						抗拉强度 <sup>②</sup> $R_m/$ ( $N \cdot mm^{-2}$ )	断后伸长率 $A/\%, \geq$					冲击试验 (V形缺口)	
		厚度(或直径)/mm							厚度(或直径)/mm					温度 /°C	冲击 吸收功 (纵向)/J, ≥
		≤16	>16 ~40	>40 ~60	>60 ~100	>100 ~150	>150 ~200		≤40	>40 ~60	>60 ~100	>100 ~150	>150 ~200		
Q195		195	185	—	—	—	—	315~430	33	—	—	—	—	—	—
Q215	A	215	205	195	185	175	165	335~450	31	30	29	27	26	—	—
	B													20	27
Q235	A	235	225	215	215	195	185	370~500	26	25	24	22	21	—	—
	B													20	27 <sup>③</sup>
	C													0	
	D													-20	

续表

牌号	等级	屈服强度 <sup>①</sup> $R_{eH}/(N \cdot mm^{-2}), \geq$						抗拉强度 <sup>②</sup> $R_m/(N \cdot mm^{-2})$	断后伸长率 $A/\%, \geq$					冲击试验 (V形缺口)	
		厚度(或直径)/mm							厚度(或直径)/mm					温度 /°C	冲击 吸收功 (纵向)/J, $\geq$
		$\leq 16$	$>16$ $\sim 40$	$>40$ $\sim 60$	$>60$ $\sim 100$	$>100$ $\sim 150$	$>150$ $\sim 200$		$\leq 40$	$>40$ $\sim 60$	$>60$ $\sim 100$	$>100$ $\sim 150$	$>150$ $\sim 200$		
Q275	A	275	265	255	245	225	215	410~540	22	21	20	18	17	—	—
	B													20	27
	C													0	
	D													-20	

①Q195的屈服强度值仅供参考,不作为交货条件。

②厚度大于100mm的钢材,其抗拉强度下限允许降低20N/mm<sup>2</sup>。宽带钢(包括剪切钢板)的抗拉强度上限不作为交货条件。

③厚度小于25mm的Q235B级钢材,如供方能保证冲击吸收功值合格,经需方同意,可不作检验。

表 2-5 碳素结构钢的弯曲试验结果

牌 号	试样方向	冷弯试验, 180°, $B=2a$ <sup>①</sup>	
		钢材厚度(或直径) <sup>②</sup> /mm	
		$\leq 60$	$>60 \sim 100$
		弯心直径 $d$	
Q195	纵	0	—
	横	$0.5a$	
Q215	纵	$0.5a$	$1.5a$
	横	$a$	$2a$
Q235	纵	$a$	$2a$
	横	$1.5a$	$2.5a$
Q275	纵	$1.5a$	$2.5a$
	横	$2a$	$3a$

①B为试样宽度, a为试样的厚度(或直径)。

②钢材厚度(或直径)大于100mm时,弯曲试验由双方协商确定。

### 3) 选用

碳素结构钢随牌号增大,含碳量增加,强度增大,但塑性和韧性降低。建筑工程中主要应用Q235号钢,其可用于轧制各种型钢、钢板、钢管与钢筋。Q235号钢具有较高的强度,良好的塑性、韧性,可焊性及可加工等综合性能好,且冶炼方便,成本较低,因而广泛用于一般钢结构。其中C、D级可用于重要的焊接结构。

Q195、Q215号钢强度较低,但塑性、韧性较好,易于冷加工,可用于制作铆钉、钢筋等。

Q275号钢的强度高,但塑性、韧性、可焊性差,可用于钢筋混凝土配筋及钢结构中的构件及螺栓等。对受动荷载作用的结构、焊接结构及低温下工作的结构,不能选用A、B质量等级的钢及沸腾钢。

## 2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢分为优质钢、高级优质钢(钢号后加A)和特级优质钢(钢号后加E)。《钢铁产品牌号表示方法》(GB/T 221—2008)规定,优质碳素结构钢的牌号采用阿拉伯数字或阿拉伯数字和规定的符号表示,以两位阿拉伯数字表示平均含碳量(以万分之几计)。例如,平均含碳量为0.08%的沸腾钢,其牌号表示为08F;平均含碳量为0.10%的半镇静钢,其牌号表示为10b。对含锰量较高的优质碳素结构钢,在表示平均含碳量的阿拉伯数字后加锰元素符号。例如,平均含碳量为0.50%,含锰量为0.70%~1.0%的钢,其牌号表示为50Mn。

目前,我国生产的优质碳素结构钢有08F、10F、15F、08、10、15、20等31个牌号,详见《优质碳素结构钢》(GB/T 699—1999)[《优质碳素结构钢》(GB/T 699—2015)将于2016年11月1日实施]。优质碳素结构钢中的硫、磷等有害杂质含量较低,且脱氧充分,质量稳定,在建筑工程中常用作重要结构的钢铸件、高强螺栓及预应力锚具。

## 3. 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢一般是在普通碳素钢的基础上添加少量的一种或几种合金元素而制成的。合金元素有硅、锰、钒、铬、镍及稀土元素。加入合金元素后,可使其强度、耐腐蚀性、耐磨性、低温冲击韧性等性能得到显著提高和改善。

《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)规定了低合金高强度钢的牌号、尺寸、外形与技术要求等。

### 1) 牌号

低合金高强度钢的牌号由代表屈服强度的字母、屈服强度数值和质量等级三个部分组成。例如,Q295A表示屈服强度为295 MPa的A级低合金高强度结构钢。

当需方要求钢板具有方向性能时,则在上述规定的牌号后加上代表厚度方向(Z向)性能级别的符号,如Q345DZ15。

### 2) 选用

低合金高强度结构钢具有轻质高强,耐蚀性、耐低温性好,抗冲击性强,使用寿命长等良好的综合性能,具有良好的可焊性及冷加工性,易于加工与施工。因此,低合金高强度结构钢可以用作高层及大跨度建筑(如大跨度桥梁、大型厅馆、电视塔等)的主体结构材料。与普通碳素钢相比,采用低合金高强度结构钢,可节约钢材,具有显著的经济效益。

低合金高强度结构钢中的合金元素起细晶强化和固溶强化等作用,使其不但具有较高的强度,而且具有较好的塑性、韧性和可焊性。Q345号钢的综合性能较好,是钢结构的常用牌号,Q390也是推荐使用的牌号。与碳素结构钢Q235相比,低合金高强度结构钢Q345的强度和承载力更高,并具有良好的承受动荷载和耐疲劳性能,但价格稍高。用低合金高强度结构钢代替碳素结构钢Q235,可节省钢材15%~25%,并可减轻结构的自重。

当低合金高强度结构钢中的铬含量达11.5%时,铬就在合金金属的表面形成一层惰性的氧化铬膜,而成为不锈钢。不锈钢具有低的导热性、良好的耐蚀性能等优点;其缺点是在

温度发生变化时膨胀性较大。不锈钢既可以作为承重构件,又可以作为装饰材料。

## 2.5.2 混凝土结构常用的钢材

### 1. 钢筋

钢筋是土木工程中使用最多的钢材品种之一,钢筋按生产工艺性能和用途的不同可分为以下几类:

#### 1) 热轧钢筋

##### (1) 热轧光圆钢筋。

①牌号和化学成分。《钢筋混凝土用钢 第1部分:热轧光圆钢筋》(GB 1499.1—2008)和《〈钢筋混凝土用钢 第1部分:热轧光圆钢筋〉国家标准第1号修改单》(GB 1499.1—2008/XG1—2012)规定,热轧光圆钢筋的牌号由 HPB (hot rolled plain bars)+屈服强度特征值构成,有 HPB300 一个牌号。热轧光圆钢筋牌号及化学成分(熔炼分析)应符合表 2-6 的规定。

表 2-6 热轧光圆钢筋牌号及化学成分

牌 号	化学成分(质量分数)/%, ≤				
	C	Si	Mn	P	S
HPB300	0.25	0.55	1.50	0.045	0.050

②力学性能。热轧光圆钢筋的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、最大力总伸长率等力学性能特征值应符合表 2-7 的规定。按表中规定的弯芯直径弯曲 180°后,钢筋受弯曲部位表面不得产生裂纹。表 2-7 所列各力学性能特征值可作为交货检验的最小保证值。

表 2-7 热轧光圆钢筋力学性能特征值

牌 号	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	最大力总	冷弯试验 180°, ( <i>d</i> —弯芯直径, <i>a</i> —钢筋公称直径)
	/MPa	/MPa	/%	伸长率/%	
	≤				
HPB300	300	420	25.0	10.0	<i>d</i> = <i>a</i>

##### (2) 热轧带肋钢筋。

①牌号和化学成分。《钢筋混凝土用钢 第2部分:热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2007)规定,热轧带肋钢筋按屈服强度特征值分为 335、400、500 级,其牌号的构成及含义见表 2-8。热轧带肋钢筋的化学成分和碳当量(熔炼分析)应符合表 2-9 的规定。根据需要,钢中还可加入 V、Nb、Ti 等元素。

表 2-8 热轧带肋钢筋牌号的构成及含义

类 别	牌 号	牌号构成	英文字母含义
普通热轧钢筋	HRB335	由 HRB+屈服强度 特征值构成	HRB—热轧带肋钢筋的英文 (hot rolled ribbed bars)缩写
	HRB400		
	HRB500		

续表

类别	牌号	牌号构成	英文字母含义
细晶粒热轧钢筋	HRBF335	由 HRBF+屈服强度特征值构成	HRBF—在热轧带肋钢筋的英文缩写后加“细”的英文(fine)的首位字母
	HRBF400		
	HRBF500		

表 2-9 热轧带肋钢筋的化学成分和碳当量

牌号	化学成分(质量分数)/%, ≤					
	C	Si	Mn	P	S	Ceq
HRB335 HRBF335	0.25	0.80	1.60	0.045	0.045	0.52
HRB400 HRBF400						0.54
HRB500 HRBF500						0.55

注:碳当量  $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Cu + Ni)/15$ 。

②力学性能。热轧带肋钢筋的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、最大力总伸长率等力学性能特征值应符合表 2-10 的规定。表 2-10 所列各力学性能特征值可以作为交货检验的最小保证值。

表 2-10 热轧带肋钢筋的力学性能特征值

牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	最大力总伸长率/%
	≤			
HRB335 HRBF335	335	455	17	7.5
HRB400 HRBF400	400	540	16	
HRB500 HRBF500	500	630	15	

(3)选用。热轧光圆钢筋的强度较低,但塑性及焊接性好,便于冷加工,广泛用于普通钢筋混凝土;HRB335、HRB400 热轧带肋钢筋的强度较高,塑性及焊接性也较好,广泛用作大、中型钢筋混凝土结构的受力钢筋;HRB500 热轧带肋钢筋的强度高,但塑性与焊接性较差,适宜用作预应力钢筋。

## 2) 冷轧带肋钢筋

冷轧带肋钢筋是低碳钢热轧圆盘条经冷轧后,在其表面冷轧成的三面有肋的钢筋。《冷轧带肋钢筋》(GB 13788—2008)规定,冷轧带肋钢筋的牌号由 CRB 和钢筋的抗拉强度最小值构成。C、R、B 分别为冷轧(cold rolled)、带肋(ribbed)、钢筋(bar)三个词的英文首字母。冷轧带肋钢筋分为 CRB550、CRB650、CRB800、CRB970 四个牌号。其中,CRB550 为普通钢筋混凝土用钢筋,其他牌号为预应力混凝土用钢筋。冷轧带肋钢筋的力学、工艺性能应

符合表 2-11 的规定。当对冷轧带肋钢筋进行弯曲试验时,受弯曲部位表面不得产生裂纹。冷轧带肋钢筋反复弯曲试验的弯曲半径应符合表 2-12 的规定。

表 2-11 冷轧带肋钢筋的力学、工艺性能

牌 号	屈服强度 /MPa, $\geq$	抗拉强度 /MPa, $\geq$	伸长率/%, $\geq$		弯曲试验, 180°	反复弯曲 次数	应力松弛
			$A_{11.3}$	$A_{100}$			初始应力应相当于公称 抗拉强度的 70%
							1 000 h 应力松弛率/%, $\leq$
CRB550	500	550	8	—	$D=3d$	—	—
CRB650	585	650	—	4	—	3	8
CRB800	720	800	—	4	—	3	8
CRB970	875	970	—	4	—	3	8

注:表中  $D$  为弯芯直径,  $d$  为钢筋公称直径。

表 2-12 冷轧带肋钢筋反复弯曲试验的弯曲半径

钢筋公称直径/mm	4	5	6
弯曲半径/mm	10	15	15

冷轧带肋钢筋的握裹力较高,可广泛用于中、小预应力混凝土结构构件和普通钢筋混凝土结构构件,也可用于焊接钢筋网。

## 2. 预应力混凝土用钢丝

预应力高强度钢丝是用优质碳素结构钢盘条,经酸洗、冷拉或再经回火处理等工艺制成的,专用于预应力混凝土。

### 1) 分类及代号

《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223—2014)规定,预应力钢丝按不同方法分为不同种类,用不同的代号表示。

(1) 预应力钢丝按加工状态不同分为冷拉钢丝和低松弛钢丝两类。

① 冷拉钢丝。冷拉钢丝用盘条通过拔丝模或轧辊经冷加工制成,代号为 WCD。

② 低松弛钢丝。低松弛钢丝用钢丝在塑性变形下进行短时热处理制成,代号为 WLR。

(2) 预应力钢丝按外形不同分为光圆钢丝、螺旋肋钢丝和刻痕钢丝三种。

① 光圆钢丝。其代号为 P。

② 螺旋肋钢丝。螺旋肋钢丝的表面沿长度方向上具有规则间隔的肋条,代号为 H。

③ 刻痕钢丝。刻痕钢丝的表面沿长度方向上具有规则间隔的压痕,代号为 L。

### 2) 力学性能

《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223—2014)规定,消除应力光圆及螺旋肋钢丝的力学性能应符合表 2-13 的要求,0.2%屈服力  $F_{p0.2}$  应不小于最大力的特征值  $F_m$  的 88%。消除应力的刻痕钢丝的力学性能,除弯曲次数外,应符合表 2-13 规定。对所有规格消除应力的

刻痕钢丝,其弯曲次数均应不小于3次。

表 2-13 消除应力光圆及螺旋肋钢丝的力学性能

公称直径 $d_n$ /mm	公称抗拉强度 $R_m$ /MPa	最大力的特征 值 $F_m$ /kN	最大力的 最大值 $F_{m,max}$ /kN	0.2%屈 服力 $F_{p0.2}$ /kN, $\geq$	最大力总 伸长率 ( $L_0 =$ 200 mm) $A_{gt}/\%$ , $\geq$	反复弯曲性能		应力松弛性能	
						弯曲 次数/ (次/180°), $\geq$	弯曲 半径 $R$ /mm	初始力相 当于实际 最大力的 百分数/%	1 000 h 应 力松弛率 $r/\%$ , $\leq$
4.00	1 470	18.48	20.99	16.22	3.5	3	10	70	2.5
4.80		26.61	30.23	23.35		4	15		
5.00		28.86	32.78	25.32		4	15		
6.00		41.56	47.21	36.47		4	15		
6.25		45.10	51.24	39.58		4	20		
7.00		56.57	64.26	49.64		4	20		
7.50		64.94	73.78	56.99		4	20		
8.00		73.88	83.93	64.84		4	20		
9.00		93.52	106.25	82.07		4	25		
9.50		104.19	118.37	91.44		4	25		
10.00		115.45	131.16	101.32		4	25		
11.00		139.59	158.70	122.59		—	—		
12.00	166.26	188.88	145.90	—	—				
4.00	1 570	19.73	22.24	17.37	3.5	3	10	80	4.5
4.80		28.41	32.03	25.00		4	15		
5.00		30.82	34.75	27.12		4	15		
6.00		44.38	50.03	39.06		4	15		
6.25		48.17	54.31	42.39		4	20		
7.00		60.41	68.11	53.16		4	20		
7.50		69.36	78.20	61.04		4	20		
8.00		78.91	88.96	69.44		4	20		
9.00		99.88	112.60	87.89		4	25		
9.50		111.28	125.46	97.93		4	25		
10.00		123.31	139.02	108.51		4	25		
11.00		149.20	168.21	131.30		—	—		
12.00	177.57	200.19	156.26	—	—				

续表

公称直径 $d_n$ /mm	公称抗拉强度 $R_m$ /MPa	最大力的特征值 $F_m$ /kN	最大力的最大值 $F_{m,max}$ /kN	0.2%屈服力 $F_{p0.2}$ /kN, $\geq$	最大力总伸长率 ( $L_0=200$ mm) $A_{gt}/\%$ , $\geq$	反复弯曲性能		应力松弛性能	
						弯曲次数/(次/180°), $\geq$	弯曲半径 $R$ /mm	初始力相当于实际最大力的百分数/%	1 000 h 应力松弛率 $r/\%$ , $\leq$
4.00	1 670	20.99	23.50	18.47	3.5	3	10	70 80	2.5 4.5
5.00		32.78	36.71	28.85		4	15		
6.00		47.21	52.86	41.54		4	15		
6.25		51.24	57.38	45.09		4	20		
7.00		64.26	71.96	56.55		4	20		
7.50		73.78	82.62	64.93		4	20		
8.00		83.93	93.98	73.86		4	20		
9.00		106.25	118.97	93.50		4	25		
4.00	1 770	22.25	24.76	19.58	3.5	3	10	70 80	2.5 4.5
5.00		34.75	38.68	30.58		4	15		
6.00		50.04	55.69	44.03		4	15		
7.00		68.11	75.81	59.94		4	20		
7.50		78.20	87.04	68.81		4	20		
4.00	1 860	23.38	25.89	20.57	3.5	3	10	70 80	2.5 4.5
5.00		36.51	40.44	32.13		4	15		
6.00		52.58	58.23	46.27		4	15		
7.00		71.57	79.27	62.98		4	20		

### 3) 特点及应用

预应力混凝土用钢丝具有强度高、柔性好、无接头等优点,施工方便,不需冷拉、焊接头等加工,而且质量稳定、安全可靠。其主要应用于大跨度屋架及薄腹梁、大跨度吊车梁、桥梁、电杆、枕轨或曲线配筋的预应力混凝土构件。刻痕钢丝由于屈服强度高且与混凝土的握裹力大,主要用于预应力钢筋混凝土结构,以减少混凝土的裂缝。

### 3. 预应力钢绞线

预应力钢绞线是用两根(或其他根数)钢丝在绞线机上捻制后,再经低温回火和消除应力等工序制成的。钢绞线的捻向一般为左(S)捻。预应力钢绞线以盘或卷的状态交货,每盘钢绞线应由一整根组成,如无特殊要求,每盘钢绞线的长度不小于 200 m。成品钢绞线的表面不得有润滑剂、油渍等降低钢绞线与混凝土黏结力的物质。钢绞线表面允许有轻微的浮锈,但不得锈蚀成目视可见的麻坑。



《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014)规定,1×2 结构钢绞线的力学性能应符合表 2-14 的要求。

表 2-14 1×2 结构钢绞线的力学性能

钢绞线 公称直径 D/mm	公称抗 拉强度 $R_m$ /MPa	整根钢 绞线的 最大力 $F_m$ /kN, $\geq$	整根钢 绞线最 大力的 最大值 $F_{m,max}$ /kN, $\leq$	0.2% 屈服力 $F_{p0.2}$ /kN, $\geq$	最大力 总伸长率 ( $L_0 \geq 400$ mm) $A_{gt}/\%$ , $\geq$	应力松弛性能	
						初始负荷 相当于公 称最大力 的百分数/%	1 000 h 应力松弛 率 $r/\%$ , $\leq$
8.00	1 470	36.9	41.9	32.5	对所有规格	对所有 规格	对所有 规格
10.00		57.8	65.6	50.9			
12.00		83.1	94.4	73.1			
5.00	1 570	15.4	17.4	13.6			
5.80		20.7	23.4	18.2			
8.00		39.4	44.4	34.7			
10.00		61.7	69.6	54.3			
12.00		88.7	100	78.1			
5.00	1 720	16.9	18.9	14.9	3.5	70	2.5
5.80		22.7	25.3	20.0			
8.00		43.2	48.2	38.0			
10.00		67.6	75.5	59.5			
12.00		97.2	108	85.5			
5.00	1 860	18.3	20.2	16.1			
5.80		24.6	27.2	21.6			
8.00		46.7	51.7	41.1			
10.00		73.1	81.0	64.3			
12.00		105	116	92.5			
5.00	1 960	19.2	21.2	16.9			
5.80		25.9	28.5	22.8			
8.00		49.2	54.2	43.3			
10.00		77.0	84.9	67.8			

预应力钢绞线具有强度高、与混凝土黏结性能好、断面面积大、使用根数少、柔性好、易于在混凝土结构中排列布置、易于锚固等优点。其主要用于大跨度、重荷载的后张法预应力混凝土结构中。

## 2.5.3 钢结构常用的钢材

### 1. 型钢

#### 1) 热轧型钢和冷轧型钢

型钢有热轧和冷轧两种成形方式。热轧型钢主要有角钢、工字钢、槽钢、T型钢、H型钢、Z型钢等。以碳素结构钢为原料热轧加工的型钢可用于大跨度、承受动荷载的钢结构。冷轧型钢主要有角钢、槽钢等开口薄壁型钢及方形、矩形等空心薄壁型钢,主要用于轻型钢结构。

热轧型钢的标记方式为在一组符号中标出型钢名称、横断面主要尺寸、型钢标准号及钢号与钢种标准。

#### 2) 冷弯薄壁型钢

冷弯薄壁型钢通常用2~6 mm厚的钢板冷弯或模压而成,有角钢、槽钢等开口薄壁型钢和方形、矩形等空心薄壁型钢,可用于轻型钢结构。冷弯薄壁型钢的标示方法与热轧型钢相同。

### 2. 钢管

按照生产工艺不同,钢管分为无缝钢管与焊接钢管两大类。

(1) 无缝钢管。无缝钢管多采用热轧-冷拔联合工艺生产,也可用冷轧方式生产,但后者成本高昂。无缝钢管具有良好的力学性能与工艺性能。在土木工程中无缝钢管主要用于压力管道,在一些特定的钢结构中往往也使用无缝钢管。

(2) 焊接钢管。焊接钢管采用优质带材焊接而成,表面镀锌或不镀锌(视使用要求而定)。焊接钢管按焊缝形式不同有直纹焊管与螺纹焊管之分。焊接钢管成本低,易加工,但在多数情况下抗压性能较差。

### 3. 钢板和压型钢板

用光面轧辊轧制而成的扁平钢材,以平板状态供货的,称为钢板;以卷状供货的,称为钢带。根据轧制温度不同,钢板又可分为热轧和冷轧两种。建筑用钢板及钢带的钢种主要是碳素结构钢,重型结构、大跨度桥梁、高压容器等也采用低合金高强度结构钢钢板。

按厚度不同来分,热轧钢板分为厚板(厚度大于4 mm)和薄板(厚度为0.35~4 mm)两种;冷轧钢板只有薄板(厚度为0.2~4 mm)一种。

厚板可用于焊接结构;薄板可用于屋面或墙面等围护结构,或作为涂层钢板的原料,如用于制作压型钢板等。钢板还可弯曲成弯曲型钢,有冷弯型钢和热弯型钢之分。

薄板经冷压或冷轧成波形、双曲形、V形等形状,形成压型钢板。制作压型钢板的板料采用有机涂层薄钢板(或称彩色钢板)、镀锌薄钢板、防腐薄钢板或其他薄钢板。压型钢板具有单位质量轻、强度高、抗震性能好、施工快、外形美观等特点,主要用于围护结构、楼板、屋面等。

## 2.6 钢材的腐蚀与防护

### 2.6.1 钢材的腐蚀

钢材的腐蚀是指其表面与周围介质发生化学反应而遭到破坏。腐蚀的发生有许多因素,如湿润的空气、土壤、工业废气等。如钢材在存放中受到严重腐蚀,不仅截面面积减小,材质降低甚至报废,而且除锈工作耗费较大。根据钢材与周围介质的不同作用,可将腐蚀分为以下两种类型:

#### 1. 化学腐蚀

化学腐蚀是指钢材与周围介质直接发生化学反应而引起的腐蚀。化学腐蚀通常是由于氧化作用,使钢材中的铁形成疏松的氧化铁而被腐蚀。在干燥环境中,化学腐蚀进行缓慢,但在潮湿环境和温度较高时腐蚀速度加快。这种腐蚀也可由空气中的二氧化碳或二氧化硫作用,以及其他腐蚀性物质的作用而产生。

#### 2. 电化学腐蚀

金属在潮湿气体及导电液体(电解质)中,由于电子流动而引起的腐蚀,称为电化学腐蚀。建筑钢材在使用和存放中发生的腐蚀主要属于这一类。就钢材而言,当凝聚在钢铁表面的水分中溶入二氧化碳或硫化物气体时,即形成一层电解质水膜。钢材本身就是铁和铁碳的化合物,以及其他杂质化合物的混合物。它们之间形成以铁为负极,以碳化铁为阳极的原电池,经电化学反应生成铁锈。在阳极区,铁被氧化成亚铁离子进入水膜;由于水中溶有来自空气中的氧,故在阴极区,氧将被还原为  $\text{OH}^-$ 。两者结合成为不溶于水的  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,并进一步被氧化成为红棕色的铁锈  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。由于水膜中离子的浓度提高,阴极放电快,锈蚀进行较快,因而在工业大气条件下钢材较容易被腐蚀。钢材在酸碱盐溶液及海水中发生的腐蚀、在大气中的腐蚀、与其他金属接触处的腐蚀均属于电化学腐蚀,可见电化学腐蚀是钢材腐蚀的主要形式。

### 2.6.2 钢材的防护

钢材的腐蚀既有材质本身的原因,也有外界环境的作用,因此,要减少或防止钢材的腐蚀,需要从三方面着手:改变钢材本身的易腐蚀性,隔离环境中的侵蚀性介质和改变钢材表面的电化学过程。钢材的具体防护措施如下:

#### 1. 选用耐候钢

耐候钢,即耐大气腐蚀钢。耐候钢是在碳素钢和低合金钢中加入少量铜、铬、镍、钼等合金元素而制成的。这种钢在大气作用下表面能形成一种致密的防腐保护层,起到耐腐蚀作用,同时保持钢材良好的焊接性能。耐候钢的强度级别与常用碳素钢和低合金钢一致,技术指标也相近,但其耐腐蚀能力却高出数倍。

#### 2. 钢材涂装

钢材防锈的方法通常是采用表面刷漆的涂装方法。常用的底漆有红丹、环氧富锌漆、铁红环氧底漆等,面漆有醋酸磁漆、酚醛磁漆等。对薄壁钢材,可在热浸镀锌或镀锌后加涂塑

料涂层,这种方法较好,但是成本较高。

### 3. 电化学防腐

电化学防腐主要应用于一些不易或不能覆盖保护层的地方(如轮船外壳、地下管道、道桥建筑等),即在钢铁结构上接一块较钢铁更为活泼的金属作为牺牲阳极来保护钢结构。

### 4. 钢材的防火

钢材的防锈已广为人知,但对钢材,特别是钢结构的防火,却常被疏忽。实际上,尽管钢结构具有良好的力学性能,尤其是具有很高的强度,但在高温时却会发生较大的变化。裸露的、未做表面防火处理的钢结构的耐火极限仅有 15 min 左右。在温度升高至 500 °C 的环境下,钢材的强度迅速降低,甚至垮塌。因此,对于钢结构,尤其是有可能经历高温环境的钢结构,需要做必要的防火处理,主要的方法就是在其表面涂敷防火涂料。防火涂料主要有 STI-A 型钢结构防火涂料、LG 钢结构防火隔热涂料等。一般采用分层喷涂防火涂料的工艺制作涂层;进行局部修补时,可用手工涂抹或刮涂。

## 2.7 土木工程其他常用金属材料

### 2.7.1 铝

铝为银白色轻金属,密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,塑性好,导电、导热性能强,但强度较低。铝的化学性质很活泼,在空气中易和空气反应生成一层氧化铝薄膜,覆盖在下层金属表面,可阻止其继续受到腐蚀。纯铝可加工成铝粉,用于加气混凝土的发气,也可作为防腐涂料(又称银粉)用于铸铁、钢材等的防腐。纯铝产品有铝锭和铝材两种。铝锭的牌号以“Al-顺序号”表示,顺序号由 0、1、2 组成,顺序号越大,表示铝的纯度越低。铝材的牌号用汉语拼音字母“L”加上顺序号表示,共分七级,级数越大,含杂质越多,纯度越低。

### 2.7.2 铝合金

为提高铝的强度,在纯铝中可加入锰、镁、铜、硅、锌等制成各种铝合金,通过电化学处理可使铝合金制品的表面具有各种颜色,大大提高其装饰效果。铝合金密度低,但强度比较高,接近或超过优质钢,塑性好,可加工成各种型材,具有优良的导电性、导热性和抗腐蚀性。铝合金的大气稳定性高。铝合金由于一般机械性能明显提高并仍然保持铝质量轻的固有特性,因此,其使用价值也大大提高。

#### 1. 铝合金的应用

铝合金有防锈铝合金(LF)、硬铝合金(LY)、超硬铝合金(LC)、锻铝合金(LD)、铸铝合金(LZ)等类型,可应用于以下三类情况:

- (1)在一类结构中,铝合金作为以强度为主要因素的受力构件,如屋架等。
- (2)在二类结构中,铝合金作为不承力构件或承力不大的构件,如建筑工程的门、窗、卫生设备、管系、挡风板、支架、扶手等。
- (3)在三类结构中,铝合金主要作为各种装饰品和绝热材料。

铝合金由于延伸性好,硬度低,可锯可刨,可通过热轧、冷轧、冲压、挤压、弯曲、卷边等加

工,制成不同尺寸、形状和截面的板、管、棒及各种型材和铝箔。目前,我国各地所产铝及铝合金材料已构成较完整的系列。使用铝合金时,可按需要和要求参考有关手册和产品目录,对铝合金的品种和规格做出合理选择。

## 2. 铝合金的品种

通过热挤压、轧制、铸造等工艺,铝合金可被加工成各种铝合金门窗、龙骨、压型板、花纹板、管材、型材、棒材等。压型板和花纹板可直接用于墙面、屋面、顶棚等的装饰,也可与泡沫塑料或其他隔热保温材料复合为轻质、隔热保温的复合板材。某些铝合金可替代部分钢材用于建筑结构,使建筑结构的自重大大降低。

常用的铝合金品种有铝合金门窗、铝合金装饰板及吊顶等。

### 1) 铝合金门窗

在现代建筑中使用铝合金门窗,尽管其造价比普通门窗高,但由于其长期维修费用低,性能好、美观、节约能源等,因而在世界范围内仍然得到广泛使用。与普通门窗相比,铝合金门窗具有以下特点:

(1)质轻。铝合金门窗用材省,质量轻,每平方米耗用铝材质量平均只有8~12 kg,较钢木门窗轻50%左右。

(2)性能好。铝合金门窗的密封性能好,气密性、水密性、隔声性、隔热性都较普通门窗有显著提高。

(3)色调美观。铝合金门窗框料型材表面经过氧化着色处理,既可保持银白色,也可以根据需要制成各种柔和的颜色或带色的花纹。

(4)耐腐蚀。铝合金门窗不需涂漆,不褪色、不脱落、表面不需维修,使用简单方便。

(5)便于工业化生产。

### 2) 铝合金装饰板及吊顶

(1)铝合金装饰板有以下几种:

①铝合金花纹板。铝合金花纹板采用防锈铝合金材料,用特制花纹机辊轧而成,花纹美观大方,不易磨损,防滑性能好,防腐蚀性能强,也便于冲洗。通过表面处理可以得到不同颜色的铝合金花纹板,其广泛用于现代建筑的墙面装饰及楼梯踏板等处。

②铝质浅花纹板。铝质浅花纹板的花纹精确别致,色泽美丽大方,除具有普通纹板的优点以外,刚度提高20%,抗污垢,抗划伤、擦伤能力均有提高,尤其是增加了立体图案和美丽的色彩,使建筑物更加美观。

③铝及铝合金波纹板。铝及铝合金波纹板主要用于墙面装饰,也可用于屋面,有银白色等多种颜色。其既有一定的装饰效果,又有很强的反射阳光的能力,并十分经久耐用,在大气中使用20年不需更换,因搬迁拆卸下来的波纹板仍可使用,因而其得到了广泛应用。

④铝及铝合金压型板。铝及铝合金压型板具有质量轻、外形美观、耐久、耐腐蚀、安装容易、施工进度快等优点。通过表面处理可得到各种色彩的铝及铝合金压型板,其适用于屋面和墙面。

⑤铝及铝合金冲孔平板。铝及铝合金冲孔平板采用各种铝合金平板经机械冲孔而成,具有良好的防腐蚀性能,光洁度高,有一定的强度,易加工成各种形状、尺寸,有良好的防震、防水、防火性能,并具有良好的消声效果。其主要用于棉纺厂、各种控制室、电子计算机机房

的顶棚及墙壁,也用于噪声大的车间厂房,也是电影院、剧场的理想消声材料。

(2)铝合金吊顶。铝合金吊顶的特点是质量轻、不燃烧、耐腐蚀、施工方便、装饰华丽等。

### 3) 铝箔

铝箔是指用纯铝或铝合金加工成的薄片制品。

铝箔按状态和材质不同可分为硬质箔、半硬质箔和软质箔。硬质箔是轧制后未经软化处理(退火)的铝箔。软质箔是轧制后经过充分退火而变软的铝箔,多用于包装、电工材料、复合材料中。半硬质箔的硬度介于硬、软箔之间,常用于成形加工。

铝箔的力学性能包括抗拉强度、伸长率、破裂强度和撕裂强度。铝箔还具有很好的防潮性能和绝热性能,并作为全新多功能保温隔热材料和防潮材料广泛用于土木工程中。

建筑上应用较多的铝合金卷材是铝箔牛皮纸和铝箔布,前者用作绝热材料,后者多在寒冷地区做保温窗帘,在炎热地区做隔热窗帘,以及在太阳房和农业温室中做活动隔热屏。

铝合金板材型(如铝箔泡沫板、铝箔波形板、微孔铝箔波形板、铝箔石棉纸夹心板等)的强度较高,刚度较好,常用在室内或者设备内表面上,选择适当的色调和图案,可同时起到很好的装饰作用。微孔铝箔波形板在炎热地区做隔热窗帘,以及在太阳房和农业温室中做活动隔热屏,其还有很好的吸声作用。

在炎热地区,铝箔用在围护结构外表面,可以反射掉大量太阳辐射热,产生“冷房效应”;在寒冷地区,可减少室内向室外的散热损失,提高墙体的保温能力。

目前,我国铝的产量不高,但铝矿储量极为丰富,随着国民经济建设的迅速发展,其产量会大幅度提高,在土木工程中的应用也将越来越广。

## 知 识 库

### 1. 金属材料性质相关英文词汇

力学性能 mechanical property

抗拉性能 tensile property

抗拉强度 intensity of tension

冲击韧性 impact ductility

耐疲劳性 fatigue durability

冷弯性能 cold bending property

强度 strength

加工性能 machinability

抗腐蚀及耐用性 corrosion & resistance durability

金属特性 special metallic features

晶体结构 crystal pattern

空间点阵及晶胞 space lattice & unit cell

金属结晶格子 metal space lattice

退火 annealing

化学性能 chemical properties

物理性能 physical properties

淬火 quenching

## 2. 国内外金属材料相关标准、规范介绍

### 1) 国内外标准、规范中对热轧光圆钢筋规定的差异

对于热轧光圆钢筋,我国标准主要有《钢筋混凝土用钢 第1部分:热轧光圆钢筋》(GB 1499.1—2008);美国标准主要有《混凝土增强用变形及光面碳素钢棒材的标准规范》(ASTM A615—2015)和《混凝土增强用低合金钢变形及光面钢筋的标准规范》(ASTM A706—2015)两本,由美国材料与试验协会制定。在钢筋应用方面,美国标准主要是由美国混凝土学会制定的《两个标准混凝土结构规范》(ACI 318M—2011)。欧洲国家的标准主要有《钢的等级定义和划分》(BS EN 10020—2000)和《混凝土增强用钢-可焊接增强钢-总则》(BS EN 10080—2005)。中、美两国的规范均对钢筋的定义、分类、等级、强度等方面进行了规定。从对比中可以发现,我国标准中热轧光圆钢筋牌号为HPB300,强度等级为300 MPa。我国还对每批钢筋的检验项目、取样方法和试验方法做出了明确规定。而美国标准 ASTM A615—2015 中包含五个等级的钢筋:40级、60级、75级、80级和100级。美国主要钢筋的等级强度单位英制、公制对应见表 2-15。对于有抗震等级要求的结构,中、美两国的光圆钢筋伸长率对比见表 2-16。欧洲规范 BS EN 10020—2000 根据化学元素的组成对钢筋进行划分。欧洲规范 BS EN 10080—2005 对焊接钢筋的焊接长度等进行了明确的规定。

表 2-15 美国主要钢筋的等级强度单位英制、公制对应

钢筋等级	40 级	60 级	75 级	80 级	100 级
英制/ksi	40	60	75	80	100
公制/MPa	280	420	520	550	690

注:ksi 为英制单位。

表 2-16 中、美两国的光圆钢筋伸长率对比

光圆钢筋标准	强度等级	公称直径/mm	伸长率/%
中国标准	300 MPa	6~22	10
美国标准	280 MPa(40 级)	10~19	11~12

### 2) 国内外标准、规范中对热轧带肋钢筋规定的差异

对于热轧带肋钢筋,我国标准主要有《钢筋混凝土用钢 第2部分:热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2007)。热轧带肋钢筋包括普通热轧钢筋 HRB335、HRB400、HRB500 和细晶粒热轧钢筋 HRBF335、HRBF400、HRBF500 六个牌号,强度分别为 335 MPa、400 MPa、500 MPa。该规范规定,对有较高要求的抗震结构宜用牌号后加“E”的钢筋,并规定了实测抗拉强度与实测屈服强度之比、钢筋实测屈服强度与屈服强度特征值之比,以及最大伸长率;对于其他要求(如钢筋的化学成分含量、外形、质量、尺寸偏差,力学和工艺性能,检验试验等)也都做了明确规定。而美国标准 ASTM A615—2015 和 ASTM A706—2015 中规定碳素钢带肋钢筋与光圆钢筋类似,对带肋钢筋的定义、分类、等级、强度、变形、化学组成等方

面也进行了相应的规定。中、美两国的带肋钢筋伸长率对比见表 2-17。而欧洲标准中关于带肋钢筋的规定标准与光圆钢筋的规定标准类似。

表 2-17 中、美两国的带肋钢筋伸长率对比

带肋钢筋标准	强度等级	公称直径/mm	伸长率/%
中国标准	335 MPa	6~50	7.9(9)
	400 MPa		
	500 MPa		
ASTM A615 (碳素钢)	420 MPa(60 级)	10~57	7~9
	520 MPa(75 级)		6~7
ASTM A706 (合金钢)	420 MPa(60 级)	10~57	10~14
	550 MPa(80 级)		

通过以上国内外的标准对比分析可看出,国内外钢筋标准可分为中、美体系和欧洲国家体系。由于欧洲的地理位置得天独厚,不处于地震多发地带,对钢筋一般无抗震要求。而中、美国家处于地震带区,均在某种程度上对钢筋有抗震要求。例如,美国标准 ASTM A706—2015、我国标准中的强屈比均规定为 1.25。我国的标准综合水平在国际上处于中上水平,但与国外先进标准仍然存在一定的差距,今后仍需不断修订,以达到国际先进水平。

## 思考与练习

1. 含碳量对钢材的性能有哪些影响? 硫和磷的含量对钢材的性能有哪些影响?
2. 评价建筑用钢材的主要技术指标是什么?
3. 建筑工程中主要使用哪些钢材?
4. 冷加工对钢材的力学性能有何影响?
5. 钢材的锈蚀是如何产生的? 有哪些防锈措施?



## 无机胶凝材料

胶凝材料是指具有一定的机械强度并经过一系列物理作用、化学作用,能将散粒状或块状材料黏结成整体的材料。根据化学组成不同,可将胶凝材料分为有机胶凝材料和无机胶凝材料两大类,如图 3-1 所示。

有机胶凝材料是以天然的或合成的有机高分子化合物为基本成分的胶凝材料,常用的有沥青、各种合成树脂等。无机胶凝材料是以无机化合物为基本组分的胶凝材料,根据凝结硬化条件的不同,其又可分为气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料两类。气硬性胶凝材料只能在空气中硬化,也只能在空气中保持和发展其强度。常用的气硬性胶凝材料有石膏、石灰和水玻璃等。气硬性胶凝材料一般只适用于干燥环境,而不宜用于潮湿环境,更不可用于水中。水硬性胶凝材料既能在空气中,又能更好地在水中硬化、保持并继续发展其强度。常用的水硬性胶凝材料包括各种水泥。水硬性胶凝材料既适用于干燥环境,又适用于潮湿环境或水下工程。

### 3.1 气硬性胶凝材料

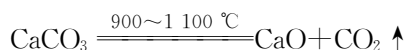
#### 3.1.1 石灰

石灰是人类使用较早的无机胶凝材料之一。由于其原料分布广,生产工艺简单,成本低廉,在土木工程中应用广泛。

##### 1. 石灰的生产及分类

###### 1) 石灰的生产

煅烧生产石灰的原料主要是以碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )为主的天然岩石,如石灰石、白垩等。将这些原料在高温下煅烧,碳酸钙将发生反应分解生成生石灰[生石灰的主要成分为氧化钙( $\text{CaO}$ )]和二氧化碳,即



石灰石分解的温度约为  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,但为了加速分解过程,常将煅烧温度提高到  $1000\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 。在煅烧过程中,若温度过低或煅烧时间不足, $\text{CaCO}_3$  将不能完全分解,而生成欠

火石灰。石灰的有效成分(氧化钙)过少,使用时缺乏黏结力。如果煅烧时间过长或温度过高,将生成颜色较深、块体致密的过火石灰。如果生石灰中夹杂有过火石灰,用于墙面抹灰时,由于过火石灰与水反应速度缓慢,会使硬化后的墙面抹灰出现局部体积膨胀,产生隆起、裂缝等现象,严重影响施工质量。

## 2)石灰的分类

石灰有生石灰和消石灰之分,两种石灰又可分别分成不同的种类。

(1)生石灰。《建筑生石灰》(JC/T 479—2013)规定,按化学成分(主要是MgO含量的多少)不同,生石灰分为钙质石灰和镁质石灰两类。当生石灰中MgO含量小于或等于5%时,称之为钙质石灰;当生石灰中MgO含量大于5%时,称之为镁质石灰。建筑生石灰的分类见表3-1。

表 3-1 建筑生石灰的分类

类 别	名 称	代 号
钙质石灰	钙质石灰 90	CL 90
	钙质石灰 85	CL 85
	钙质石灰 75	CL 75
镁质石灰	镁质石灰 85	ML 85
	镁质石灰 80	ML 80

将煅烧成块状的生石灰经过不同的方法加工,还可得到石灰的另外三种产品:

①生石灰粉。在石灰的制备过程中,将石灰石、白云石、白垩、贝壳等原料进行煅烧后,即得到块状的生石灰。生石灰粉是由块状的生石灰磨细而成的。

②消石灰粉。消石灰粉是生石灰用适量水经消化和干燥而成的粉末,主要成分为氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ,也称为熟石灰粉。

③石灰膏。石灰膏是将块状生石灰用过量水(约为生石灰体积的3~4倍)消化,或将消石灰粉与水拌和,所得的一定稠度的膏状物,主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水。

(2)消石灰。消石灰,又称为熟石灰。《建筑消石灰》(JC/T 481—2013)规定,按照扣除游离水和结合水后 $(\text{CaO}+\text{MgO})$ 的百分含量不同,建筑消石灰可按表3-2进行分类。

表 3-2 建筑消石灰的分类

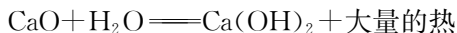
类 别	名 称	代 号
钙质消石灰	钙质消石灰 90	HCL 90
	钙质消石灰 85	HCL 85
	钙质消石灰 75	HCL 75
镁质消石灰	镁质消石灰 85	HML 85
	镁质消石灰 80	HML 80

建筑工程用石灰分为建筑生石灰、建筑生石灰粉和建筑消石灰粉三个品种。

## 2. 石灰的熟化与硬化

### 1) 熟化

工地上使用生石灰前要对其进行熟化。熟化是指生石灰(氧化钙)与水作用生成消石灰(氢氧化钙)的过程,又称石灰的消解或消化。生石灰的熟化反应为



生石灰熟化过程中会释放出大量的热,体积增大1~2.5倍。煅烧良好、氧化钙含量高的石灰熟化较快,放热量和体积增大也较多。

为了消除过火石灰的危害,石灰膏在使用之前应进行陈伏。陈伏是指石灰乳(或石灰膏)在储灰坑中放置14 d以上的过程。过火石灰在这一期间将慢慢熟化。陈伏期间,石灰膏表面应保有一层水分,使其与空气隔绝,以免与空气中的二氧化碳发生碳化反应。

### 2) 硬化

石灰浆体的硬化包括结晶和碳化两个同时进行的过程。

(1) 结晶过程。石灰浆体在干燥过程中,游离水分蒸发,形成网状孔隙。这些滞留于孔隙中的自由水由于表面张力的作用而产生毛细管压力,使石灰粒子更紧密,且由于水分蒸发,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  从饱和溶液中逐渐结晶析出。

(2) 碳化过程。  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与空气中的  $\text{CO}_2$  和水反应,形成不溶于水的碳酸钙晶体,析出的水分则逐渐被蒸发。由于碳化作用主要发生在与空气接触的表层,且生成的  $\text{CaCO}_3$  膜层较致密,阻碍了空气中  $\text{CO}_2$  的渗入,也阻碍了内部水分向外蒸发,因而,碳化过程较慢。

## 3. 石灰的性质与技术要求

### 1) 石灰的性质

(1) 可塑性好。生石灰熟化为石灰浆时,能自动形成颗粒极细(直径约为  $1 \mu\text{m}$ )的呈胶体分散状态的氢氧化钙,其表面吸附有一层厚厚的水膜。因此,用石灰调成的石灰砂浆突出的优点是具有良好的可塑性。在水泥砂浆中掺入石灰膏可使砂浆的可塑性显著提高。

(2) 硬化较慢、强度低。从石灰浆体的硬化过程可以看出,由于空气中二氧化碳稀薄,硬化甚为缓慢,而且石灰浆体表面碳化后,形成致密外壳,不利于碳化作用的深入,也不利于内部水分的蒸发,因而,石灰是硬化缓慢的材料。同时,石灰的硬化只能在空气中进行。硬化后的强度也不高,1:3的石灰砂浆28 d抗压强度通常只有0.2~0.5 MPa。

(3) 硬化时体积收缩大。石灰在硬化过程中,由于大量的游离水蒸发,从而引起体积的显著收缩,故石灰除调成石灰乳用于薄层涂刷外,不宜单独使用。工程上常在其中掺入砂、各种纤维材料等以减少收缩。

(4) 耐水性差。硬化后的石灰受潮后,其中的氢氧化钙和氧化钙会溶解,强度更低,在水中还会溃散。因此,石灰不宜在潮湿的环境中使用,也不宜单独用于建筑物基础。

(5) 石灰吸湿性强。块状生石灰在放置过程中会缓慢吸收空气中的水分而自动熟化成

消石灰粉,消石灰粉再与空气中的二氧化碳作用生成碳酸钙,失去胶结能力。

储存生石灰,不但要防止其受潮,而且不宜储存过久。最好将生石灰运到工地(或熟化工厂)后立即熟化成石灰浆,将储存期变为陈伏期。由于生石灰受潮熟化时放出大量的热,而且体积膨胀,因而储存和运输生石灰时还应注意安全。

## 2) 石灰的技术要求

《建筑生石灰》(JC/T 479—2013)规定,建筑生石灰的化学成分和物理性质应分别符合表 3-3 和表 3-4 的要求。

表 3-3 建筑生石灰的化学成分

名 称	(氧化钙+氧化镁)(CaO+MgO)	氧化镁(MgO)	二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	三氧化硫(SO <sub>3</sub> )
CL 90-Q CL 90-QP	≥90%	≤5%	≤4%	≤2%
CL 85-Q CL 85-QP	≥85%	≤5%	≤7%	≤2%
CL 75-Q CL 75-QP	≥75%	≤5%	≤12%	≤2%
ML 85-Q ML 85-QP	≥85%	>5%	≤7%	≤2%
ML 80-Q ML 80-QP	≥80%	>5%	≤7%	≤2%

表 3-4 建筑生石灰的物理性质

名 称	每 10 kg 产浆量/dm <sup>3</sup>	细 度	
		0.2 mm 筛余量/%	90 μm 筛余量/%
CL 90-Q	≥26	—	—
CL 90-QP	—	≤2	≤7
CL 85-Q	≥26	—	—
CL 85-QP	—	≤2	≤7
CL 75-Q	≥26	—	—
CL 75-QP	—	≤2	≤7
ML 85-Q	—	—	—
ML 85-QP		≤2	≤7
ML 80-Q	—	—	—
ML 80-QP		≤7	≤2

注:生石灰的其他物理特性,根据用户要求,可按照《建筑石灰试验方法 第 1 部分:物理试验方法》(JC/T 478.1—2013)进行测试。

《建筑消石灰》(JC/T 481—2013)规定,建筑消石灰的化学成分和物理性质应分别符合表 3-5 和表 3-6 的要求。

表 3-5 建筑消石灰的化学成分

名 称	(氧化钙+氧化镁)(CaO+MgO)	氧化镁(MgO)	三氧化硫(SO <sub>3</sub> )
HCL 90	≥90%	≤5%	≤2%
HCL 85	≥85%		
HCL 75	≥75%		
HML 85	≥85%	>5%	≤2%
HML 80	≥80%		

注:表中数值以试样扣除游离水和化学结合水后的干基为基准。

表 3-6 建筑消石灰的物理性质

名 称	游离水/%	细 度		安 定 性
		0.2 mm 筛余量/%	90 μm 筛余量/%	
HCL 90	≤2	≤2	≤7	合格
HCL 85				
HCL 75				
HML 85				
HML 80				

## 4. 石灰的应用

### 1) 石灰乳

将消石灰粉或熟化好的石灰膏加入大量的水搅拌稀释,便制成石灰乳。石灰乳是一种廉价易得的涂料,主要用于内墙和顶棚刷白,增加室内的美观和亮度。向石灰乳中加入各种耐碱颜料,可制成彩色石灰乳;加入少量磨细粒化高炉矿渣或粉煤灰,可提高其耐水性;加入聚乙烯醇、干酪素、氯化钙或明矾,可减少涂层粉化现象。

### 2) 砂浆

由于石灰膏和消石灰粉中的氢氧化钙颗粒非常小,调水后具有很好的可塑性,因而,常用石灰膏或消石灰粉配制成石灰砂浆或水泥石灰混合砂浆,用于抹面和砌筑。

石灰乳和石灰砂浆应用于吸水性较大的基面(如加气混凝土砌块)上时,应事先将基面润湿,以免石灰浆脱水过速而成为干粉,丧失胶结能力。

### 3) 石灰土和三合土

石灰与黏土拌和后成为灰土或石灰土,再加入砂或炉渣、石屑等,即成为三合土。

石灰可改善黏土的和易性,在强力夯打之下,大大提高了其紧密度;而且黏土颗粒表面的少量活性氧化硅和氧化铝与氢氧化钙起化学反应,生成了不溶性的水化硅酸钙和水化铝酸钙,从而提高了黏土的强度和耐水性。石灰土中的石灰用量增大,则强度和耐水性提高,

但超过某一用量后,就不再提高了。一般,石灰用量为石灰土总重的6%~12%或更低。

石灰土和三合土的应用在我国已有数千年的历史,主要用于建筑物的地基基础和道路工程的基层、垫层。

#### 4) 硅酸盐制品

石灰是制作硅酸盐制品的主要原料之一。硅酸盐制品是以磨细的石灰与硅质材料为胶凝材料,必要时加入少量的石膏,经养护(蒸汽养护或蒸压养护),生成以水化硅酸钙为主要产物的人造材料。硅酸盐制品中常用的硅质材料有粉煤灰,磨细的煤矸石、页岩、浮石和砂等。

常用的硅酸盐制品有蒸压灰砂砖、蒸压加气混凝土砌块或板材等。

### 3.1.2 石膏

石膏是以硫酸钙为主要成分的气硬性胶凝材料。由于生产石膏的原料来源丰富,生产耗能较低,且其制品具有较多的优点,因而在土木工程中得到广泛应用。目前,常用的石膏胶凝材料有建筑石膏、高强石膏等。在土木工程中,应用的石膏胶凝材料主要是建筑石膏。

#### 1. 石膏的组成及分类

石膏的主要化学成分为硫酸钙,按产源不同可分为天然石膏、建筑石膏和化工石膏三类。

##### 1) 天然石膏

天然石膏又称生石膏,直接存在于自然界中,由开采石膏矿而得。天然石膏又分为天然二水石膏和天然无水石膏。

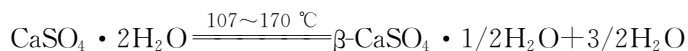
(1) 天然二水石膏。天然二水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )又称生石膏或软石膏。它是生产石膏胶凝材料的主要原料。纯净的天然二水石膏矿石呈无色透明或白色,但天然二水石膏常含有各种杂质而呈灰色、褐色、黄色、红色、黑色等颜色。

(2) 天然无水石膏。天然无水石膏( $\text{CaSO}_4$ )结晶紧密,结构比天然二水石膏致密,质地较硬,难溶于水,又称天然硬石膏。天然硬石膏的密度为 $2\ 900 \sim 3\ 100\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,一般作为生产水泥的原料。

##### 2) 建筑石膏

建筑石膏是以 $\beta$ 型半水石膏( $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )为主要成分,不预加任何外加剂的粉状胶结料,主要用于制作石膏建筑制品。

建筑石膏主要是由天然二水石膏在 $107 \sim 170\ ^\circ\text{C}$ 的干燥条件下加热脱水而成的。天然二水石膏在温度为 $65 \sim 75\ ^\circ\text{C}$ 时脱水,至 $107 \sim 170\ ^\circ\text{C}$ 时生成 $\beta$ 型半水石膏。其反应方程式为



建筑石膏晶体较细,调制成一定稠度的浆体时需水量较大,因而强度较低。

同样以半水石膏为主要成分的高强石膏,是将天然二水石膏置于 $0.13\ \text{MPa}$ 、 $124\ ^\circ\text{C}$ 的过饱和蒸汽条件下蒸压,或置于某些盐溶液中煮沸,获得的晶粒较粗、较致密的 $\alpha$ 型半水石膏( $\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )。

高强石膏晶粒粗大,调制成浆体时需水量较小,因而强度较高。

### 3) 化工石膏

化工石膏是指一些含有  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{CaSO}_4$  混合物的化工副产品及废渣,也可作为生产石膏的原料,如磷石膏是制造磷酸时的废渣。此外,化工石膏还有盐石膏、硼石膏、钛石膏等。

## 2. 建筑石膏的水化与凝结硬化

将建筑石膏与适量的水相混合,最初成为可塑的浆体,但是很快就失去塑性并产生强度,发展成为坚硬的固体。这一过程可从水化和硬化两方面分别说明。

将建筑石膏加水拌和,建筑石膏与水发生水化反应,即



建筑石膏加水后,首先溶解于水,由于天然二水石膏在水中的溶解度比半水石膏小得多(仅为半水石膏溶解度的  $1/5$ ),半水石膏的饱和溶液对于天然二水石膏就成了过饱和溶液。因此,天然二水石膏以胶体大小的微粒自水中析出,直到半水石膏全部耗尽。这一过程进行得很快,需  $7 \sim 12 \text{ min}$ 。

石膏浆体中的自由水分因水化和蒸发而逐渐减少,粒子的总表面积增加,因而浆体的可塑性逐渐减小,浆体渐渐变稠,这一过程称为凝结。其后,浆体继续变稠,逐渐凝聚成为晶体。晶体逐渐长大,共生和相互交错,浆体逐渐产生强度,并不断增长,直到完全干燥。晶体之间的摩擦力和黏结力不再增加时,强度才停止发展。这一过程称为建筑石膏的硬化。

石膏浆体的凝结和硬化是一个连续的过程。凝结可以分为初凝和终凝两个阶段:浆体开始失去可塑性的状态称为浆体初凝,从加水至初凝的时间称为初凝时间;浆体完全失去可塑性,并开始产生强度称为浆体终凝,从加水至终凝的时间称为终凝时间。

## 3. 建筑石膏的性质与技术要求

### 1) 建筑石膏的性质

(1) 凝结硬化速度。建筑石膏的凝结硬化速度快,它的凝结时间随煅烧温度、磨细程度和杂质含量等情况的不同而不同。一般建筑石膏与水拌和后,在常温下数分钟内即可初凝,  $30 \text{ min}$  内即可达到终凝。在室内自然干燥的状态下,建筑石膏达到完全硬化约需 1 周。

(2) 硬化时体积的变化。建筑石膏在凝结硬化过程中体积略有膨胀,硬化时不出现裂缝,所以可以不掺加填料而单独使用,并可很好地填充模型。硬化后的石膏表面光滑,颜色洁白。其制品尺寸准确、轮廓清晰,可锯可钉,具有很好的装饰性。

(3) 硬化后的表观密度与强度。建筑石膏水化的理论需水量只占天然半水石膏质量的  $18.6\%$ ,但实际上为使石膏浆体具有一定的可塑性,往往需加水  $60\% \sim 80\%$ 。多余的水分在硬化过程中逐渐被蒸发,使硬化后的石膏留有大量的孔隙,一般建筑石膏的孔隙率为  $50\% \sim 60\%$ 。因此,建筑石膏硬化后强度较低,表观密度较小,导热性较低,吸声性较好。

(4) 防火性能。石膏硬化后的结晶物  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  遇到火烧时,结晶水蒸发,结晶物吸收热量并在表面生成具有良好绝热性的无水物,起到阻止火焰蔓延和温度升高的作用,所以石膏有良好的抗火性。

(5) 调温、调湿作用。建筑石膏的热容量大、吸湿性强,故能对室内温度和湿度起到一定的调节作用。

(6)耐水性、抗冻性和耐热性。建筑石膏硬化后,具有很强的吸湿性和吸水性,在潮湿的环境中,晶体间的黏结力被削弱,强度明显降低,在水中晶体还会溶解而引起破坏,在流动的水中破坏发生得更快;若石膏吸水后受冻,则孔隙内的水分结冰,引起体积膨胀,使硬化后的石膏体发生破坏。所以,石膏的耐水性和抗冻性均较差。此外,若石膏在温度过高的环境中(超过 65 ℃)使用,天然二水石膏会脱水分解,造成石膏的强度降低。因此,建筑石膏不宜用于潮湿和温度过高的环境中。

在建筑石膏中掺入一定量的水泥或其他含有活性  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  的材料(如粒化高炉矿渣、石灰、粉煤灰或有机防水剂等),可不同程度地改善建筑石膏制品的耐水性。

(7)储存及保质期。在储运过程中,应防止建筑石膏受潮及混入杂物。不同等级的建筑石膏应分别储运,不得混杂。一般建筑石膏的储存期为 3 个月;如超过 3 个月,其强度将降低 30%左右。对超过储存期限的石膏应重新进行质量检验,以确定其等级。

## 2) 建筑石膏的技术要求

根据《建筑石膏》(GB/T 9776—2008)的规定,建筑石膏按强度、细度、凝结时间指标分为三个等级,见表 3-7。其中,建筑石膏的抗折强度和抗压强度为试样与水接触后 2 h 测得的。

表 3-7 建筑石膏的物理力学性能

等 级	细度(0.2 mm 方孔筛筛余)/%	凝结时间/min		2 h 强度/MPa	
		初 凝	终 凝	抗 折	抗 压
3.0	≤10	≥3	≤30	≥3.0	≥6.0
2.0				≥2.0	≥4.0
1.6				≥1.6	≥3.0

## 4. 建筑石膏的应用

建筑石膏具有很多优良的性能,在建筑中的应用十分广泛,一般制成石膏抹面灰浆用于内墙装饰;也可用来制作各种石膏板、各种建筑艺术配件及建筑装饰、彩色石膏制品等。另外,石膏作为重要的外加剂,广泛应用于水泥、水泥制品及硅酸盐制品。下面择要做简单介绍。

### 1) 石膏砂浆和粉刷石膏

由于建筑石膏的优良特性,其常用于室内高级抹灰和粉刷。建筑石膏加水、砂及缓凝剂拌和成石膏砂浆,由于石膏的“呼吸”作用,石膏砂浆可用于室内抹灰;这时应加缓凝剂,以保证有足够的施工时间。石膏粉刷层表面坚硬、光滑细腻,不起灰,便于进行再装饰,如粘墙纸、刷涂料等。

### 2) 石膏板及装饰件

石膏板具有轻质、保温隔热、吸声、防火、尺寸稳定及施工方便等性能,因此可广泛应用于高层建筑及大跨度建筑的隔墙。常用石膏板有纸面石膏板、纤维石膏板、空心石膏板、吸声用穿孔石膏板和装饰石膏板等。建筑石膏还广泛用作石膏角线等装饰件。



### 3.1.3 水玻璃

#### 1. 水玻璃的分类

水玻璃俗称泡花碱,是由不同比例的碱金属和二氧化碳化合而成的一种可溶于水的硅酸盐。

##### 1) 按组成成分分类

按组成成分不同,水玻璃可分为硅酸钠水玻璃( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ,简称钠水玻璃)和硅酸钾水玻璃( $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ,简称钾水玻璃),这两种水玻璃较为常用。最常用的钠水玻璃的生产方法有湿法和干法两种。钠水玻璃的模数是指硅酸钠中氧化硅和氧化钠的分子数之比,一般为1.5~3.5。

##### 2) 按存在形态分类

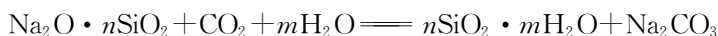
按存在形态不同,水玻璃可分为固体水玻璃和液体水玻璃。

(1) 固体水玻璃。固体水玻璃在水中溶解的难易随模数而定,模数为1时,能溶解于常温的水中;模数增大时,则只能在热水中溶解;当模数大于3时,其要在4个大气压以上的蒸汽中才能溶解于水。低模数固体水玻璃的晶体组分较多,黏结能力较差。固体水玻璃的模数越高,胶体组分相对越多,黏结能力、强度、耐酸性和耐热性越高,但难溶于水,不易稀释,不便施工。

(2) 液体水玻璃。液体水玻璃因所含杂质不同而呈青灰色、绿色或微黄色,无色透明的液体水玻璃最好。液体水玻璃可以与水按任意比例混合成不同浓度(或比重)的溶液。同一模数的液体水玻璃,其浓度越稠,则密度越大,黏结力越强,常用水玻璃的密度为1300~1500 kg/m<sup>3</sup>。在液体水玻璃中加入尿素,在不改变其黏度的情况下,可提高黏结力25%左右。

#### 2. 水玻璃的硬化

液体水玻璃会吸收空气中的二氧化碳,发生的反应为



这种反应将析出无定形硅酸凝胶,并逐渐干燥而硬化。这个过程进行得很慢,为了加速硬化,常加入氟硅酸钠( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ )作为促硬剂,促使硅酸凝胶加速析出。发生的反应为



氟硅酸钠的适宜用量为水玻璃质量的12%~15%。如果用量太少,不但水玻璃的硬化速度缓慢,强度降低,而且未经反应的水玻璃易溶于水,因而耐水性差;但如果氟硅酸钠的用量过多,又会引起凝结过速,使施工困难,而且水玻璃硬化后的渗水性大,强度也低。加入适量氟硅酸钠的水玻璃7d基本上可达到最高强度。

#### 3. 水玻璃的性质

凝结硬化后的水玻璃具有以下特性:

(1) 黏结能力强。水玻璃有良好的黏结能力,硬化时析出的硅酸凝胶可堵塞毛细孔隙,从而防止水渗透。用水玻璃配制的混凝土抗压强度可达15~40 MPa。

(2) 不燃烧、耐高温。水玻璃不燃烧,在高温下硅酸凝胶干燥得更加强烈,强度并不降低,甚至有所增加。其可用于配制水玻璃耐热混凝土和耐热砂浆。

(3)耐酸能力强。水玻璃具有很强的耐酸能力,能抵抗大多数无机酸和有机酸的腐蚀。

(4)不耐水。水玻璃在加入氟硅酸钠后仍不能完全硬化,仍然有一定量的  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 。由于  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  可溶于水,所以水玻璃硬化后不耐水。

(5)不耐碱。硬化后水玻璃中的  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  均可溶于碱,因而水玻璃不耐碱。

#### 4. 水玻璃的应用

由于水玻璃具有上述一些优良的性能,在建筑工程中可有多种用途,扼要列举如下:

(1)涂刷材料表面。用水玻璃涂刷材料表面,可提高材料的抗风化能力。以水玻璃浸渍或涂刷砖、水泥混凝土、硅酸盐混凝土、石材等多孔材料,可提高材料的密实度、强度、抗渗性、抗冻性及耐水性等。这是因为水玻璃与空气中的二氧化碳反应生成硅酸凝胶,同时水玻璃也与材料中的氢氧化钙反应生成硅酸钙凝胶,两者填充于材料的孔隙,使材料致密。

水玻璃不能用于涂刷或浸渍石膏制品,这是因为硅酸钠会与硫酸钙反应生成硫酸钠,在石膏制品孔隙中结晶,体积显著膨胀,从而导致石膏制品开裂。水玻璃还可用于配制内、外墙涂料。

(2)配制防水剂。以水玻璃为基料,加入两种、三种或四种矾可配制成二矾、三矾或四矾快凝防水剂。此类防水剂凝结迅速,一般不超过 1 min,适用于与水泥浆调和,堵塞漏洞、缝隙等局部抢修工程。因其凝结过速,故不宜用于调配防水砂浆。

(3)加固土壤。将模数为 2.5~3 的液体水玻璃和氯化钙溶液通过金属管交替向地层压入,两种溶液发生化学反应,析出硅酸胶体,将土壤颗粒包裹并填实其空隙。硅酸胶体是一种吸水膨胀的果冻状凝胶,因吸收地下水而经常处于膨胀状态,可阻止水分的渗透和使土壤固结。由这种方法加固的砂土的抗压强度可达 3~6 MPa。

## 3.2 硅酸盐水泥

水泥是土木工程中最重要的建筑材料之一,具有良好的水硬性,广泛应用于土木工程的各个领域。随着水泥的科学研究及生产技术的发展,满足各种特殊性能要求的新品种水泥不断增多。水泥品种虽然很多,但硅酸盐水泥是最基本的类型。

### 3.2.1 硅酸盐水泥的生产、矿物成分及水化特性

#### 1. 硅酸盐水泥的生产

由硅酸盐水泥熟料、0~5%石灰石或粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为硅酸盐水泥(波特兰水泥)。硅酸盐水泥分为两种类型:不掺加混合材料的硅酸盐水泥称为 I 型硅酸盐水泥,其代号为 P·I;在粉磨硅酸盐水泥熟料时,掺加不超过水泥质量 5% 的石灰石或粒化高炉矿渣混合材料的硅酸盐水泥,称为 II 型硅酸盐水泥,其代号为 P·II。

以石灰质原料和黏土质原料为主要原料,将几种原料按适当比例配合后,粉磨成生料;然后将制得的生料入窑进行煅烧,得到熟料;再将熟料配以适当的石膏(和混合材料)在磨机中磨细,即得到硅酸盐水泥。硅酸盐水泥生产的工艺流程如图 3-1 所示。

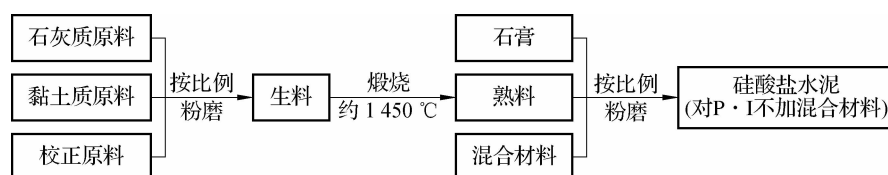


图 3-1 硅酸盐水泥生产的工艺流程

## 2. 硅酸盐水泥的矿物成分

### 1) 硅酸盐水泥熟料

硅酸盐水泥熟料是指由主要含  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的原料，按适当比例磨成细粉，烧至部分熔融所得的以硅酸钙为主要矿物成分的水硬性胶凝物质。其中，硅酸钙矿物含量不小于 66%，氧化钙和氧化硅的质量比不小于 2.0。

硅酸盐水泥熟料的矿物组成及含量见表 3-8。其中，硅酸三钙和硅酸二钙的总含量在 70% 以上，铝酸三钙与铁铝酸四钙的含量在 25% 左右。除了主要熟料矿物外，硅酸盐水泥中还含有少量游离氧化钙、游离氧化镁和碱等，但其总含量一般不超过水泥质量的 10%。

表 3-8 硅酸盐水泥熟料的矿物组成及含量

名称	矿物成分	简称	含量/%	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
硅酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	37~60	3 250
硅酸二钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15~37	3 280
铝酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	7~15	3 040
铁铝酸四钙	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	10~18	3 770

### 2) 石膏

(1)天然石膏。天然石膏是指符合《天然石膏》(GB/T 5483—2008)中规定的 G 类或 M 类二级(含)以上的石膏或混合石膏。

(2)工业副产石膏。工业副产石膏是指以硫酸钙为主要成分的工业副产物，采用前应该经过试验证明其对水泥性能无害。

### 3) 混合材料

在生产水泥时，为改善水泥的性能，调节水泥的强度等级而加到水泥中去的人工的和天然的矿物材料，称为混合材料。混合材料包括活性混合材料、非活性混合材料和窑灰。

(1)活性混合材料。符合相关标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料都属于活性混合材料。活性混合材料是指具有火山灰性或潜在水硬性，以及兼有火山灰性和水硬性的矿物质材料。它们都含有大量活性氧化硅( $\text{SiO}_2$ )与活性氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )。与水调和后，它们本身不会硬化或硬化极为缓慢，强度很低。但在氢氧化钙溶液中，其就会发生显著的水化，特别是在饱和的氢氧化钙溶液中及有石膏存在的条件下，水化更快。

①粒化高炉矿渣。在高炉冶炼生铁时，所得以硅酸盐与硅铝酸盐为主要成分的熔融物，经淬冷成粒后，即形成粒化高炉矿渣，简称矿渣。

②粉煤灰。从煤粉炉烟道气体中收集的粉末称为粉煤灰。

③火山灰质混合材料。凡天然的或人工的,以氧化硅、氧化铝为主要成分的矿物质材料,将其磨细加水拌和并不硬化,但与气硬性的石灰混合后,再加水拌和,则不但能在空气中硬化,而且能在水中继续硬化的,称为火山灰质混合材料。

(2)非活性混合材料。活性指数分别低于相关标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料、石灰石和砂岩都属于非活性混合材料。其中,石灰石中的三氧化二铝的含量应不超过 2.5%。

(3)窑灰。窑灰是从水泥回转窑窑尾废气中收集的粉尘,应符合《掺入水泥中的回转窑窑灰》(JC/T 742—2009)的规定。

#### 4)助磨剂

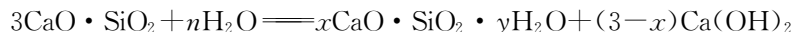
粉磨水泥时允许加入助磨剂,其加入量应不超过水泥质量的 0.5%,助磨剂应符合相关标准的规定。

### 3. 硅酸盐水泥的水化特性

硅酸盐水泥的性能是由其熟料组成矿物的性能决定的。讨论硅酸盐水泥的水化,即讨论硅酸盐水泥熟料各矿物的水化。

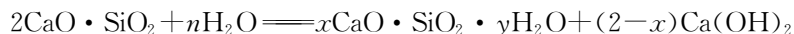
将硅酸盐水泥加入拌合用水后,四种主要熟料矿物分别与水发生水化反应。

(1)硅酸三钙(C<sub>3</sub>S)的水化。硅酸三钙在常温下的水化反应为



硅酸三钙的反应速度较快,生成的水化硅酸钙(C-S-H 凝胶)以凝胶状态析出,构成具有很高强度的空间网状结构,生成的氢氧化钙以晶体的形态析出。

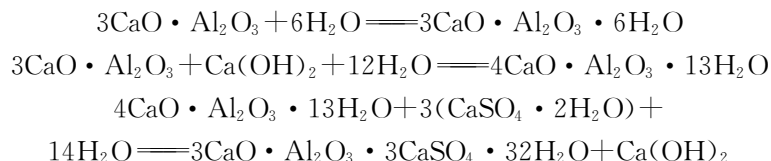
(2)硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)的水化。C<sub>2</sub>S 与 C<sub>3</sub>S 的水化相似,水化速度较慢,其反应方程式为



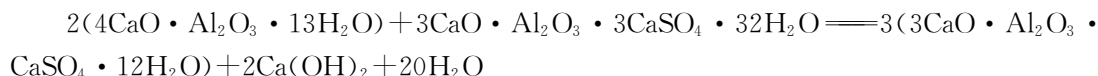
所形成的水化硅酸钙也称为 C-S-H 凝胶,但 Ca(OH)<sub>2</sub> 的生成量比 C<sub>3</sub>S 水化反应生成的少,结晶却粗大些。

(3)铝酸三钙(C<sub>3</sub>A)的水化。铝酸三钙的水化迅速,放热快,其水化产物组成和结构受液相 Ca(OH)<sub>2</sub> 浓度和温度的影响很大,生成水化铝酸钙。

在有石膏的情况下,C<sub>3</sub>A 水化的最终产物与石膏的掺入量有关,起初形成三硫型水化硫铝酸钙,其简称钙矾石(AFt),其反应方程式为

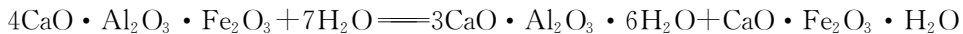


若石膏在 C<sub>3</sub>A 完全水化前耗尽,则钙矾石与 C<sub>3</sub>A 作用转化为单硫型水化硫铝酸钙(AFm),其反应方程式为

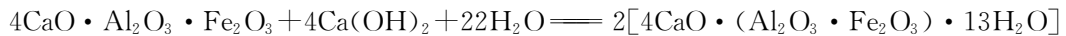


(4)铁铝酸四钙(C<sub>4</sub>AF)的水化。C<sub>4</sub>AF 的水化反应与 C<sub>3</sub>A 相似,只是水化反应速度较慢,水化热较低,即使单独水化也不会快速凝结。C<sub>4</sub>AF 单独与水反应时,生成水化铝酸三钙

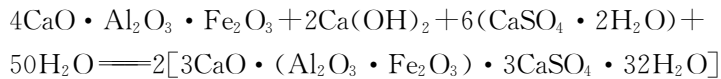
晶体和水化铁酸钙凝胶,其反应方程式为



在有氢氧化钙存在的情况下,  $\text{C}_4\text{AF}$  水化形成水化铁铝酸四钙,反应方程式为



在有氢氧化钙和石膏存在的情况下,  $\text{C}_4\text{AF}$  发生的水化反应式为



硅酸盐水泥熟料矿物的基本特性见表 3-9。

表 3-9 硅酸盐水泥熟料矿物的基本特性

名 称	水化反应速度	水化热	强 度	耐化学侵蚀性	干 缩
硅酸三钙	快	大	较高	中	中
硅酸二钙	慢	小	早期低,后期高	良	小
铝酸三钙	最快	最大	低	差	大
铁铝酸四钙	快	中	较低	优	小

综上所述,硅酸盐水泥与水作用后,生成的主要水化产物有水化硅酸钙和水化铁酸钙凝胶,氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙晶体。

### 3.2.2 硅酸盐水泥的凝结硬化

水泥的凝结是指水泥加水拌和后成为塑性的水泥浆,其中的水泥颗粒表面的矿物开始在水中溶解并与水发生水化反应,水泥浆逐渐变稠并失去塑性,但还不具有强度的过程。

硬化是指凝结的水泥浆体随着水化的进一步进行开始产生明显的强度并逐渐发展成为坚硬水泥石的过程。

水泥的凝结和硬化实际上是一个连续复杂的物理、化学变化过程。

水泥加水拌和后,水泥颗粒分散在水中,成为水泥浆体,如图 3-2(a)所示;水泥颗粒的水化从其表面开始。水和水泥一接触,水泥颗粒表面的水泥熟料与水便发生反应,形成相应的水化物。一般在几分钟内,先后析出水化硅酸钙凝胶,水化硫铝酸钙、氢氧化钙和水化铝酸钙晶体等水化产物,包裹在水泥颗粒表面。在水化初期,水化物不多,包有水化物膜层的水泥颗粒之间是分离的,水泥浆还具有可塑性,如图 3-2(b)所示。

随着时间的推移,水泥颗粒不断水化,新生水化物增多,使包在水泥颗粒表面的水化物膜层增厚,颗粒间的空隙逐渐缩小,而包有凝胶体的水泥颗粒则逐渐接近,以至相互接触,接触点在范德华力的作用下凝结成多孔的空间网络,形成凝聚结构,如图 3-2(c)所示。这种结构不具有强度,在震动的作用下会发生破坏。凝聚结构的形成,使水泥浆开始失去可塑性,也就是水泥开始初凝。

随着以上过程的不断进行,水化物不断增多,颗粒间的接触点数目增加,结晶体和凝胶体互相贯穿形成的网状结构不断加强。而固相颗粒之间的空隙(毛细孔)不断减少,结构逐渐紧密,直至水泥浆体完全失去可塑性,开始能担负一定荷载的强度,这时水泥表现为终凝,并开始进入硬化阶段,如图 3-2(d)所示。

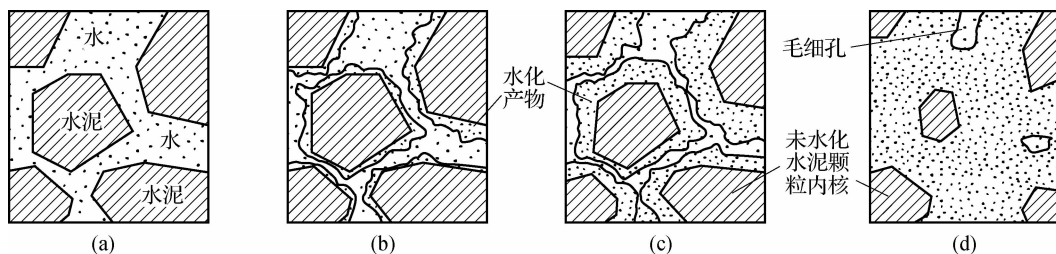


图 3-2 硅酸盐水泥的凝结硬化过程

水泥进入硬化期后,在有水存在的情况下,水化反应仍继续进行,但水化速度逐渐减慢,水化物总量随时间延长而逐渐增加,扩展到毛细孔中,使结构更致密,强度相应提高。

水泥的水化和凝结硬化是从水泥颗粒表面开始,逐渐向水泥颗粒的内核深入进行的。开始时水化速度快,水泥的强度增长也较快;但由于水化不断进行,堆积在水泥颗粒周围的水化物不断增多,阻碍水和水泥未水化部分的接触,水化减慢,强度增长也逐渐减慢。但无论时间多久,水泥颗粒的内核都很难完全水化。因此,在硬化水泥石中,同时包含有水泥熟料的水化产物、未水化的水泥颗粒、水(自由水和吸附水)和孔隙(毛细孔和凝胶孔),它们在不同时期相对数量的变化使水泥石的性质随之发生改变。

水泥石中多余的水(自由水和吸附水)被蒸发后,会在水泥中留下微孔(裂纹),从而降低水泥石的强度。

影响水泥凝结硬化的因素主要有熟料矿物的成分、水泥的细度、用水量、养护时间、石膏的掺量、温度和湿度。

### 3.2.3 硅酸盐水泥的技术性质

水泥是土木工程大量使用的原材料,其各项性能直接影响工程的质量,国家标准对水泥的化学指标、碱含量和物理指标有明确的规定和要求。实际工程中有时还需了解水化热。

#### 1. 化学指标

硅酸盐水泥的化学指标应符合表 3-10 的规定。

表 3-10 硅酸盐水泥的化学指标

代 号	不溶物/%	烧失量/%	三氧化硫/%	氧化镁/%	氯离子/%
P·I	≤0.75	≤3.0	≤3.5	≤5.0	≤0.06
P·II	≤1.50	≤3.5	≤3.5	≤5.0	≤0.06

注 1:如果水泥压蒸试验合格,则水泥中氧化镁的含量允许放宽至 6.0%。

注 2:如果水泥中氧化镁的含量大于 6.0%,需进行水泥压蒸安定性试验并要求合格。

注 3:当有特殊要求时,氯离子含量由买卖双方协商确定。

(1)不溶物。不溶物是指经盐酸处理后的残渣,再以氢氧化钠溶液处理,经盐酸中和过滤后所得的残渣经高温灼烧所剩的物质。不溶物含量高,对水泥质量有不良影响。

(2)烧失量。烧失量用来限制石膏和混合材料中的杂质,以保证水泥的质量。

(3)三氧化硫。水泥中过量的三氧化硫会与铝酸三钙反应形成较多的钙矾石,使体积膨胀,将导致水泥安定性不良。

(4)氧化镁。水泥中氧化镁水化生成氢氧化镁,使体积膨胀;而其水化速度慢,须以压蒸的方法加快其水化,方可判断其安定性。

(5)氯离子。一定含量的氯离子会腐蚀钢筋,故需对其含量加以限制。

## 2. 选择性指标

水泥中的碱含量为选择性指标,其以  $\text{Na}_2\text{O}+0.65\text{K}_2\text{O}$  计算值表示。若使用活性集料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中的碱含量应不大于 0.60%或由买卖双方协商确定。

## 3. 物理指标

### 1) 凝结时间

水泥的凝结时间分为初凝时间和终凝时间。初凝时间是水泥净浆加水拌和至开始失去可塑性所需的时间;终凝时间是水泥净浆加水拌和至完全失去可塑性,并开始产生强度所需的时间。混凝土的搅拌、运输和浇捣及砂浆的粉刷和砌筑都应在初凝前完成,因此,水泥的初凝时间不能过短。施工完毕后,要求水泥尽快硬化,并具有强度,故终凝时间不能太长。

《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)规定,硅酸盐水泥的初凝时间不小于 45 min,终凝时间不大于 390 min。

### 2) 安定性

水泥的体积安定性是指水泥在凝结硬化过程中体积变化的均匀性。如果水泥在硬化后产生不均匀的体积变化,即体积安定性不良,就会使构件产生膨胀性裂缝,降低结构物的质量,甚至引起严重的事故。

引起水泥体积安定性不良的原因有熟料中游离氧化钙过多或游离氧化镁过多或掺入的石膏过多。熟料中所含的游离氧化钙或游离氧化镁都是过烧的,熟化很慢,在水泥已经硬化后才发生以下熟化反应:



反应过程中,产生固相体积膨胀,引起不均匀的体积变化,导致水泥石开裂。当石膏掺量过多时,在水泥硬化后,残留的石膏还会继续与固态的水化铝酸钙反应生成高硫型水化硫铝酸钙,体积约增大 1.5 倍,也会引起水泥石开裂。

游离氧化钙引起的水泥体积安定性不良可用沸煮法检验,按照《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T 750—1992)的规定进行试验。

### 3) 强度及等级

强度是评价和选用水泥的重要质量指标。水泥的强度除受水泥的矿物组成、细度、石膏掺量、龄期和养护条件的影响外,还与试验方法有关。我国采用胶砂法检验水泥的强度。根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)的规定,水泥和标准砂按 1:3 的比例混合,加入规定数量的水,按规定的方法制成试件,在标准温度(20±1)°C 的水中养护,测定其 3 d 和 28 d 的强度。根据规定龄期的抗压强度和抗折强度,《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)将硅酸盐水泥分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 六个强度等级。根据早期强度有普通型和早强型(R)两种类型,各强度等级硅酸盐水泥在各龄期的强度不得

低于表 3-11 中的数值。

表 3-11 硅酸盐水泥各龄期的最低强度要求

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0
62.5	28.0	62.5	5.0	8.0
62.5R	32.0	62.5	5.5	8.0

#### 4) 细度

细度(选择性指标)是指水泥颗粒的粗细程度。它对水泥的性质影响很大,水泥颗粒越细,与水起反应的表面积就越大,水化较快且较完全,因而凝结硬化快,早期强度较高,但早期放热量和硬化收缩也较大,且成本较高,储存期较短。因此,水泥应有适当的细度。

水泥的细度可用筛析法和比表面积法检验。筛析法是采用边长为  $80\ \mu\text{m}$  的方孔筛对水泥试样进行筛析试验,以筛余百分数表示水泥的细度。比表面积法是用透气法测定水泥的比表面积(单位质量的粉末所具有的总表面积),以  $\text{m}^2/\text{kg}$  为单位。与筛析法相比,比表面积法能较好地反映水泥粗细颗粒的分配情况,是较为合理的检验方法。

《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)规定,硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的细度以比表面积表示,不小于  $300\ \text{m}^2/\text{kg}$ 。

#### 4. 水化热

水泥在水化过程中放出的热量称为水化热。水化放热量和放热速度不仅决定于水泥的矿物成分,而且还与水泥的细度、水泥中掺入的混合材料及外加剂的品种、数量等有关。硅酸盐水泥在 1~3 d 龄期内水化放热量达总放热量的 50%, 7 d 达 75%, 6 个月达 83%~91%。由此可见,水泥的水化热大部分在早期(3~7 d)放出,以后逐渐减少。

大型基础、水坝、桥墩等大体积混凝土构筑物,由于水化热积聚在内部不易散失,内部温度上升可达  $50\sim 60\ ^\circ\text{C}$ , 内外温度差所引起的应力可使混凝土产生裂缝。因此,在大体积混凝土工程中,不宜采用硅酸盐水泥。

### 3.2.4 水泥石的腐蚀及预防措施

在通常使用条件下,硅酸盐水泥硬化形成的水泥石有较好的耐久性。但在某些液体或气体作用下,水泥石会发生腐蚀,导致强度降低,甚至破坏。

#### 1. 水泥石的腐蚀

引起水泥石腐蚀的原因很多,作用机理也很复杂,主要是以下几种典型的腐蚀:

##### 1) 软水的侵蚀

水泥石中的绝大部分成分是不溶于水的,其中的氢氧化钙的溶解度也很低,在一般的水

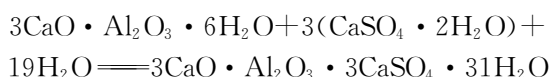


中,水泥石表面的氢氧化钙和水中的碳酸氢盐反应,生成碳酸钙,填充在毛细孔中,并覆盖在水泥石的表面,对水泥石起保护作用。因此,水泥石在一般水中是难以被腐蚀的。但水泥石长期与雨水、雪水、蒸馏水、工厂冷凝水等含碳酸氢盐少的软水相接触,会溶出氢氧化钙。在静水作用及无水压的情况下,溶出的氢氧化钙在水中很快饱和,溶解作用会中止,溶出将只限于表层,对水泥石影响不大。如果有流水及压力水作用,氢氧化钙将不断溶解流失,而且水泥石中碱度的降低还会引起其他水化物的分解溶蚀,使水泥石进一步破坏,以致全部溃裂。此为软水侵蚀,又称溶出性侵蚀。

## 2) 硫酸盐的腐蚀

含硫酸盐的海水、湖水、地下水及某些工业污水长期与水泥石接触时,其中的硫酸盐会与水泥石中的氢氧化钙发生反应,生成硫酸钙。

硫酸钙与水泥石中的水化铝酸钙作用会生成高硫型水化硫铝酸钙(钙矾石),其反应式为

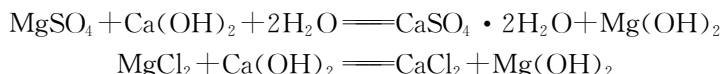


反应所生成的高硫型水化硫铝酸钙体积增加 1.5 倍以上,会引起膨胀应力,造成水泥石开裂,对水泥石起极大的破坏作用。高硫型水化硫铝酸钙为针状晶体,故又称“水泥杆菌”。

当水中硫酸盐浓度过高时,硫酸钙还会在孔隙中直接结晶成天然二水石膏,体积膨胀,引起膨胀应力,最终导致水泥石破坏。

## 3) 镁盐的腐蚀

在海水及地下水中,常含有大量的镁盐,主要是硫酸镁和氯化镁。它们与水泥石中的氢氧化钙发生的反应为



反应所生成的氢氧化镁松软而无胶凝能力,氯化钙易溶于水,天然二水石膏则引起硫酸盐的腐蚀作用。因此,硫酸镁对水泥石起镁盐和硫酸盐的双重腐蚀作用。

## 4) 一般酸的腐蚀

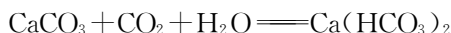
无机酸中的盐酸、氢氟酸、硝酸、硫酸和有机酸中的醋酸等对水泥石都有不同程度的腐蚀作用。它们与水泥石中的氢氧化钙反应生成化合物,或者易溶于水,或者引起体积膨胀,在水泥石内部造成内应力而导致破坏。例如,盐酸与水泥石中的氢氧化钙作用生成氯化钙,反应产生的产物易溶于水,导致水泥石破坏。

## 5) 碳酸的腐蚀

在工业污水、地下水中常溶解有较多的二氧化碳。开始时,二氧化碳与水泥石中的氢氧化钙作用生成碳酸钙,即



生成的碳酸钙再与含碳酸的水作用转变成碳酸氢钙,即



所生成的碳酸氢钙易溶于水。碳酸钙与含碳酸的水作用转变成碳酸氢钙的反应是可逆反应,当水中含有较多的碳酸,并超过平衡浓度,则反应向右进行。因此,水泥石中的氢氧化钙

通过转变为易溶于水的碳酸氢钙而溶失。碱度降低,还会导致水泥石中其他水化物的分解,使腐蚀作用进一步加剧。

除上述腐蚀类型外,对水泥石有腐蚀作用的还有一些其他物质,如糖、氨盐、动物脂肪、含环烷酸的石油产品等。在实际工程中,水泥石的腐蚀是一个极为复杂的物理、化学作用过程,水泥石很少遭受单一的腐蚀作用,往往是几种腐蚀作用同时存在,互相影响。

需要说明的是,水泥石腐蚀的主要内因有两方面:一是水泥石中存在易被腐蚀的组分,主要是氢氧化钙和水化铝酸钙;二是水泥石本身不够密实。

## 2. 水泥石腐蚀的预防

根据对以上腐蚀原因的分析,可采用以下措施,以减少或防止水泥石受到腐蚀:

(1)根据侵蚀环境特点,合理选用水泥及熟料矿物的组成。例如,对于软水的侵蚀,可采用掺入活性混合材料较多的水泥,这些水泥的水化产物中氢氧化钙含量较少,耐软水侵蚀性强;对于硫酸盐的腐蚀,则可采用铝酸三钙含量低的水泥。

(2)提高水泥的密实度,改善孔结构。硬化水泥石是多孔体系,腐蚀性介质通常是靠渗透进入水泥石内部,从而使水泥石发生破坏的。因此,提高水泥石的密实度,是阻止腐蚀性介质进入水泥石内部,提高水泥耐腐蚀性的有力措施。在减少孔隙率,提高密实度的同时,要尽量减少毛细孔,减少连通孔,以提高抗蚀性。

(3)加做保护层。当腐蚀作用较强时,可用耐腐蚀性好的涂料等材料在混凝土及砂浆表面做不透水的保护层,防止腐蚀性介质与水泥石接触。

### 3.2.5 硅酸盐水泥的应用

硅酸盐水泥的强度等级较高,凝结硬化较快,抗冻性好。其主要用于重要结构的高强度混凝土和预应力混凝土工程,以及要求凝结快、早期强度高的冬季施工及严寒地区遭受反复冻融的工程。

硅酸盐水泥硬化后形成的水泥石中含有较多的氢氧化钙,耐软水侵蚀和耐化学腐蚀性差,不适用于经常与流动的淡水接触及有水压作用的工程,也不适用于受海水、矿物水等作用的工程。硅酸盐水泥在水化过程中水化放热的速度快、放热量大,不宜用于大体积混凝土工程。

## 3.3 通用硅酸盐水泥

通用硅酸盐水泥是指以硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料制成的水硬性胶凝材料。目前,常用的通用硅酸盐水泥主要有硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。

### 3.3.1 通用硅酸盐水泥的性能特点

普通硅酸盐水泥的混合材料掺量相对较少,影响不大,故总体性能与硅酸盐水泥相近。矿渣硅酸盐水泥等其他品种的通用硅酸盐水泥因混合材料掺量较大,硅酸盐水泥熟料先水化,在此过程中,硅酸三钙和硅酸二钙通过反应会生成水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙,所产生的氢氧化钙再与混合材料中活性的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  发生水化反应,此反应称为二次水化反

应。一般来说,掺入较多的混合材料会使水泥的水化速度减慢,故对早期强度有所影响;另一方面,又降低了水泥石中氢氧化钙的含量,对水泥性能有较大的影响。混合材料的种类不同,其水化反应也有差异,故不同品种的通用硅酸盐水泥性能也有较大的差别。几种通用硅酸盐水泥的性能特点见表 3-12。

表 3-12 几种通用硅酸盐水泥的性能特点

品 种	硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥	粉煤灰硅酸盐水泥
性能特点	早期强度高,水化热较大,抗冻性较好,耐腐蚀性较差,干缩较小	与硅酸盐水泥类同	早期强度较低,后期强度增长较快;水化热较低;耐热性好;抗冻性较差;干缩性较大;泌水较多	早期强度较低,后期强度增长较快;水化热较低;耐热性较强;抗渗性好;抗冻性较差;干缩性大	早期强度较低,后期强度增长较快;水化热较低;耐热性较强;抗裂性较高;抗冻性较差;干缩性较小

### 3.3.2 通用硅酸盐水泥的选择与应用

通用硅酸盐水泥可参考表 3-13 选择与应用。

表 3-13 通用硅酸盐水泥的适用性

品 种	硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥	粉煤灰硅酸盐水泥
适用范围	一般土建工程中的钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土结构,受反复冰冻作用的结构,配制高强混凝土	与硅酸盐水泥基本相同	高温车间和有耐热耐火要求的混凝土结构,大体积混凝土结构,蒸汽养护的构件,有抗硫酸盐侵蚀要求的工程	地下、水中大体积混凝土结构和有抗渗要求的混凝土结构,蒸汽养护的构件,有抗硫酸盐侵蚀要求的工程	地上、地下及水中大体积混凝土结构,蒸汽养护的构件,抗裂性要求较高的构件,有抗硫酸盐侵蚀要求的工程
不适用范围	大体积混凝土结构,受化学及海水侵蚀的工程	与硅酸盐水泥基本相同	早期强度要求高的工程,有抗冻要求的混凝土工程	处在干燥环境中的混凝土工程,其他同矿渣硅酸盐水泥	有碳化要求的工程,其他同矿渣硅酸盐水泥

需要说明的是,通用硅酸盐水泥的适用范围并非是绝对的。例如,在混凝土中掺入一定量的粉煤灰等掺合料,硅酸盐水泥同样可应用于大体积混凝土结构。

## 3.4 特性水泥与专用水泥

在土木工程中,除常用的硅酸盐系列水泥外,因工程需要,还可能使用特性水泥和专用水泥等其他水泥。其中,特性水泥包括铝酸盐水泥、快硬水泥、白色硅酸盐水泥、彩色水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥、膨胀水泥和自应力水泥等;专用水泥包括道路硅酸盐水泥、砌筑水泥等。

### 3.4.1 铝酸盐水泥

#### 1. 铝酸盐水泥的分类及组成

铝酸盐水泥是以石灰石和铝矾土为主要原料,经煅烧至全部或部分熔融,得到以铝酸钙为主要矿物的熟料,经磨细而成的水硬性胶凝材料,代号为 CA。按  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的不同,铝酸盐水泥分为 CA-50 ( $50\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 60\%$ )、CA-60 ( $60\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 68\%$ )、CA-70 ( $68\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 77\%$ ) 和 CA-80 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 77\%$ ) 四类。铝酸盐水泥是一类快硬、高强、耐腐蚀、耐热的水泥,又称高铝水泥。

铝酸盐水泥的主要矿物成分分为铝酸一钙 ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , 简称 CA) 和二铝一钙 ( $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ , 简称  $\text{CA}_2$ ), 还有少量的其他铝酸盐, 如  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  (简称  $\text{C}_2\text{AS}$ )、 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (简称  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ ) 等, 有时还有少量的  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  等。

CA 是高铝水泥的主要矿物, 有很高的水硬活性, 凝结时间正常, 水硬化迅速;  $\text{CA}_2$  水硬化慢, 后期强度高, 但早期强度却较低, 具有较好的耐高温性能。

#### 2. 铝酸盐水泥的技术性质

《铝酸盐水泥》(GB 201—2000) 规定, 铝酸盐水泥的细度、凝结时间及胶砂强度应符合表 3-14 的要求。

表 3-14 铝酸盐水泥的细度、凝结时间及胶砂强度要求

性能指标		水泥类型			
		CA-50	CA-60	CA-70	CA-80
细 度		比表面积不小于 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ 或 $0.045 \text{ mm}$ 筛筛余不大于 $20\%$			
凝结时间	初凝时间/min, 不早于	30	60	30	30
凝结时间	终凝时间/h, 不迟于	6	18	6	6
抗压强度 /MPa	6 h	20	—	—	—
	1 d	40	20	30	25
	3 d	50	45	40	30
	28 d	—	85	—	—
抗折强度 /MPa	6 h	3.0	—	—	—
	1 d	5.5	2.5	5.0	4.0
	3 d	6.5	5.0	6.0	5.0
	28 d	—	10.0	—	—

### 3. 铝酸盐水泥的应用

(1) 铝酸盐水泥的早期强度发展迅速,适用于工期紧急的工程,如国防、道路和特殊抢修工程等。

(2) 铝酸盐水泥的放热量与硅酸盐水泥大致相同,但其放热速度特别快,一天之内即可放出水化热总量的70%~80%。应特别注意,铝酸盐水泥不能用于大体积混凝土工程。铝酸盐水泥早期的水化放热量大,在较低的气温下也能很好地硬化,可用于冬期施工的工程。

(3) 铝酸盐水泥硬化后,密实度较大,不含氢氧化钙,因此,对海水和硫酸盐的侵蚀作用具有高的抵抗能力。其适用于受软水、海水和酸性水腐蚀及受硫酸盐腐蚀的工程。

(4) 铝酸盐水泥有较高的耐热性,如采用耐火粗细集料(如铬铁矿等),可制成使用温度达1 300~1 400 °C的耐热混凝土。

(5) 铝酸盐水泥与硅酸盐水泥或石灰相混,不但产生闪凝,而且生成高碱性的水化铝酸钙,使混凝土开裂破坏。因此,铝酸盐水泥施工时除不得与石灰和硅酸盐水泥混合外,也不得与尚未硬化的硅酸盐水泥接触使用。铝酸盐水泥的耐碱性极差,与碱性溶液接触,甚至在混凝土集料内含有少量的碱性化合物,都会引起不断的侵蚀。因此,铝酸盐水泥不得用于接触碱性溶液的工程。

(6) 铝酸盐水泥最适宜的硬化温度为15 °C左右,一般不得超过25 °C。如果温度过高,水化铝酸一钙和水化铝酸二钙会转变成水化铝酸三钙,固相体积减小,导致孔隙率大大增加,强度显著降低。因此,对铝酸盐水泥混凝土不能进行蒸汽养护,也不宜在高温季节施工。

由于上述的晶型转变,铝酸盐水泥的长期强度及其他性能有降低的趋势。因此,铝酸盐水泥不宜用于长期承重的结构及处于高温、高湿环境的工程。

#### 3.4.2 快硬水泥

工程上常用的快硬水泥为快凝快硬硫铝酸盐水泥。

以适当成分的生料烧至部分熔融,制得以硅酸三钙、氟铝酸钙为主的熟料,再加入适量的硬石膏、粒化高炉矿渣、无水硫酸钠,经过磨细制成的一种凝结快、小时强度增长快的水硬性胶凝材料,称为快凝快硬硅酸盐水泥。

《快凝快硬硫铝酸盐水泥》(JC/T 2282—2014)对快凝快硬硫铝酸盐水泥的术语与定义、组分与材料、强度等级、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志、运输与储存做了规定。其适用于建筑工程、土木工程、道路、隧道、水利等工程紧急抢修及堵漏。

#### 3.4.3 白色硅酸盐水泥和彩色水泥

《白色硅酸盐水泥》(GB 2015—2005)规定,由白色硅酸盐水泥熟料、适量石膏及规定的混合材料磨细制成的水硬性胶凝材料称为白色硅酸盐水泥,简称白水泥。白色硅酸盐水泥熟料是指以适当成分的生料烧至部分熔融,所得以硅酸钙为主要成分,氧化铁含量少的熟料。

白水泥的物理性能要求主要为白度。白度是以白水泥与MgO标准白板的反射率的比值来表示的。为提高熟料的白度,在煅烧时宜采用弱还原气体;也可采用漂白措施,就是将刚出窑的熟料喷水冷却,使熟料急冷,以提高熟料的白度。为提高水泥的白度,在粉磨时应加入白度较高的石膏,同时提高水泥的粉磨细度。

用白色水泥熟料、石膏及颜料共同磨细可制得彩色水泥。所用颜料要求在光和大气下

能耐久,能耐碱而又不对水泥性能起破坏作用。常用的颜料有氧化铁、二氧化锰、氧化铬、赭石、群青和炭黑等。

在水泥生料中加入少量金属氧化物着色剂直接烧成彩色熟料,也可制得彩色水泥。

### 3.4.4 抗硫酸盐硅酸盐水泥

《抗硫酸盐硅酸盐水泥》(GB 748—2005)规定,按抗硫酸盐侵蚀程度不同,抗硫酸盐硅酸盐水泥可分为中抗硫酸盐硅酸盐水泥和高抗硫酸盐硅酸盐水泥两类。以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏磨细制成的具有抵抗中等浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性胶凝材料,称为中抗硫酸盐硅酸盐水泥,简称中抗硫酸盐水泥,代号为P·MSR。以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏磨细制成的具有抵抗性较高浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性凝胶材料,称为高抗硫酸盐硅酸盐水泥,简称高抗硫酸盐水泥,代号为P·HSR。

中抗硫酸盐水泥中, $C_3S$ 和 $C_3A$ 的含量分别不应超过55.0%和5.0%。高抗硫酸盐水泥中, $C_3S$ 和 $C_3A$ 的含量分别不应超过50.0%和3.0%。

抗硫酸盐硅酸盐水泥中,烧失量应不小于3.0%, $SO_3$ 的含量应不大于2.5%,水泥比表面积不得小于 $280\text{ m}^2/\text{kg}$ ,各龄期强度也应符合标准要求。抗硫酸盐硅酸盐水泥适用于一般受硫酸盐侵蚀的海港、水利、地下、隧涵、道路和桥梁基础等工程设施。

### 3.4.5 膨胀水泥和自应力水泥

#### 1. 膨胀水泥

使水泥产生膨胀的反应主要有三种:CaO水化生成 $Ca(OH)_2$ ,MgO水化生成 $Mg(OH)_2$ ,以及水泥中铝酸钙水化形成钙矾石。因为前两种反应产生的膨胀不易控制,目前广泛使用的是以钙矾石为膨胀组分的各种膨胀水泥。

以适当成分的生料,经煅烧所得以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的熟料,加入适量二水石膏磨细制成的具有可调膨胀性能的水硬性胶凝材料,称为膨胀硫铝酸盐水泥。

#### 2. 自应力水泥

水泥在无限状态下,水硬化过程中的体积膨胀称为自由膨胀。水泥在限制状态下,水硬化过程中的体积膨胀称为限制膨胀。水泥水化后,体积膨胀能使砂浆或混凝土在限制条件下产生可利用的化学预应力。通过测定水泥砂浆的限制膨胀率,计算出自应力值。自应力水泥按自应力值不同可分为不同的级别。

(1)自应力硅酸盐水泥。以适当比例的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥、高铝水泥和天然二水石膏磨制而成的膨胀性的水硬性胶凝材料,称为自应力硅酸盐水泥。自应力硅酸盐水泥根据28d自应力值大小不同分为S1、S2、S3、S4四个等级。

(2)自应力铝酸盐水泥。自应力铝酸盐水泥是以一定量的高铝水泥熟料和天然二水石膏粉磨而成的大膨胀率胶凝材料,按1:2标准砂浆28d自应力值大小不同分为3.0、4.5和6.0三个等级。

### 3.4.6 道路硅酸盐水泥

由铁铝酸钙含量较高的硅酸盐道路水泥熟料,0~10%活性混合材料和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,称为道路硅酸盐水泥,简称道路水泥。

对道路水泥的性能要求是:耐磨性好、收缩小、抗冻性好、抗冲击性好,有高的抗折强度和良好的耐久性。道路水泥的上述特性主要依靠改变水泥熟料的矿物组成、粉磨细度、石膏加入量及外加剂来达到。

《道路硅酸盐水泥》(GB 13693—2005)对道路水泥的有关技术要求如下:

- (1)氧化镁含量。道路水泥中氧化镁含量应不大于 5.0%。
- (2)三氧化硫含量。道路水泥中三氧化硫含量应不大于 3.5%。
- (3)烧失量。道路水泥中的烧失量应不大于 3.0%。
- (4)比表面积。道路水泥的比表面积为 300~450 m<sup>2</sup>/kg。
- (5)凝结时间。道路水泥的初凝时间应不早于 1.5 h,终凝时间不得迟于 10 h。
- (6)安定性。用沸煮法检验必须合格。
- (7)干缩率。28 d 干缩率应不大于 0.10%。
- (8)耐磨性。28 d 磨耗量应不大于 3.00 kg/m<sup>2</sup>。
- (9)碱含量。道路水泥的碱含量由供需双方商定。若使用活性集料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中碱含量应不超过 0.60%。碱含量按 Na<sub>2</sub>O+0.658 K<sub>2</sub>O 计算值表示。
- (10)强度。水泥的等级按规定龄期的抗压和抗折强度划分,3 d、28 d 龄期的抗压强度和抗折应不低于表 3-15 所示的数值。

表 3-15 道路水泥的等级与各龄期强度

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
32.5	3.5	6.5	16.0	32.5
42.5	4.0	7.0	21.0	42.5
52.5	5.0	7.5	26.0	52.5

### 3.4.7 砌筑水泥

《砌筑水泥》(GB/T 3183—2003)规定,凡由一种或一种以上的水泥混合材料,加入适量硅酸盐水泥熟料和石膏,经磨细制成的工作性较好的水硬性胶凝材料,称为砌筑水泥,代号为 M。砌筑水泥中混合材料掺加量按质量百分比计应大于 50%,允许掺入适量的石灰石或窑灰。其技术要求为:水泥中三氧化硫含量应不大于 4.0%;0.08 mm 方孔筛筛余不大于 10.0%;初凝时间应不早于 60 min,终凝时间应不迟于 12 h;安定性用沸煮法检验,应合格;保水率不低于 80%。砌筑水泥分 12.5 和 22.5 两个强度等级。砌筑水泥主要用于砌筑和抹面砂浆、垫层混凝土等,不应用于结构混凝土。

## 知 识 库

### 1. 胶凝材料相关英文词汇

胶凝材料	binding material	气硬性无机胶凝材料	air hardening inorganic binding material
有机材料	organic material	水硬性胶凝材料	hydraulic binding material
无机材料	inorganic material		

石灰	lime	粉煤灰硅酸盐水泥	portland fly-ash cement
凝结	setting	复合水泥	composite portland cement
硬化	hardening	高铝水泥	high-alumina cement
消化	slaking	氯氧镁水泥	magnesium-oxy-chloride cement
水化	hydration	通用水泥	general cement
生石灰	quick lime	专用水泥	special cement
熟石灰	slaked lime	特性水泥	characteristic cement
生石灰粉	ground quick lime	铝酸盐水泥	aluminous cement
熟石灰粉	ground hydrated lime	硫铝酸盐水泥	sulfoaluminate cement
石灰膏	lime paste	水硬性	hydraulicity
合成材料-胶黏剂	compound material-tackiness agent	可塑性	plasticity
细度	fineness	耐久性	durability
抹灰	plastering	硅酸盐	silicate
粉刷	rendering	抗腐蚀	anti-corrosion
钙质生石灰	calcium quick lime	抗冻	freezing resistance
镁质生石灰	high-magnesium quick lime	锚固	anchoring
白云石消石灰粉	dolomite ground slaked lime	石灰石	limestone
过火石灰	over-burnt lime	二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	carbon dioxide
欠火石灰	under-burnt lime	氧化钙(CaO)	calcium oxide
结晶	crystallization	硅酸三钙	tricalcium silicate
碳化	carbonization	硅酸二钙	dicalcium silicate
保水性	water retentivity	铝酸三钙	tricalcium aluminate
收缩	shrinkage	铁铝酸四钙	tetracalcium aluminoferrite
石灰浆	lime paste	氢氧化钙	calcium hydroxide
石灰乳	lime milk	水化硅酸钙	calcium silicate hydrate
硅酸盐制品	silicate products	硫酸盐	sulfate
碳化石灰板	carbonated lime board	水化铝酸钙	calcium aluminate hydrate
灰砂砖	lime-sand brick	水化铁酸钙	calcium ferrite hydrate
活性混合料	active blended material	水化硫铝酸钙(钙矾石)	ettringite
波特兰水泥(硅酸盐水泥)	portland cement	浆体	paste
普通硅酸盐水泥	ordinary portland cement	初始反应期	initial period
矿渣硅酸盐水泥	furnace-slag cement	潜伏期	induction period
火山灰质硅酸盐水泥	portland pozzolana cement	毛细管	capillaries
		比表面积	specific surface area
		筛分析法	sieve analysis
		负压筛法	negative pressure sieving method



水筛法	water pressure sieving method	体积安定性	soundness
干筛法	dry sieving method	体积安定性不良	poor dimensional stability
标准稠度	normal consistency	游离的	disassociated
初凝	initial setting	雷氏夹法	Le chatelier soundness test
终凝	final setting		

## 2. 国内外胶凝材料的相关标准、规范

### 1) 国内外标准、规范对石灰规定的差异

我国标准《建筑生石灰》(JC/T 479—2013)、美国标准《建筑用生石灰标准规范》(ASTM C5—2010)、《建筑结构用水硬性熟石灰标准规范》(ASTM C141/C141M—2014)、欧洲国家标准《建筑石灰 第1部分:定义、规范和符合性准则》(BS EN 459-1—2015)分别对建筑用石灰的定义、分类、技术要求、检验规则等方面进行了规定。

对比来看,国内外规范存在一定的差异。我国标准将石灰按照化学成分不同分为钙质石灰和镁质石灰,又根据氧化镁含量的多少分为不同等级(CL 90、CL 85、CL 75、ML 85、ML 80);美国标准虽然也将石灰分为钙质石灰和镁质石灰,但并没有将两种石灰再次分级,只是规定了两种石灰的化学组成(如氧化镁、氧化钙等的含量);欧洲国家标准中并没有镁质石灰的概念,将钙质石灰分为CL 90、CL 80、CL 70三个等级,同时也规定了各等级钙质石灰的化学组成,与我国标准相比,氧化镁、二氧化碳、三氧化硫的含量指标相同,而氧化钙与氧化镁的总含量的比例稍有不同。

### 2) 国内外标准、规范对石膏规定的差异

我国标准《天然石膏》(GB/T 5483—2008)、《建筑石膏》(GB/T 9776—2008)、美国标准《石膏标准规范》[ASTM C22/C22M—2000(2015)]及欧洲国家标准《石膏板的定义、要求和试验方法》(BS EN 520-2004+A1—2009)对石膏及石膏板进行了规定。

对比来看,国内外规范对石膏的规定并没有很大的差别。美国标准中规定石膏中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的含量应不少于70%;我国标准规定天然石膏按照产品的品位(质量分数)共分为特级、一级、二级、三级、四级几个等级,其中,四级的品位要求不低于55%,并未对 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的含量做直接规定。其他方面的差异有待读者继续发掘。

### 3) 国内外标准、规范对水泥规定的差异

我国标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)、美国标准《波特兰水泥标准规范》(ASTM C150/C 150M—2012)、欧洲国家标准《水泥、普通水泥的构成、规范和符合性准则》(BS EN 197-1—2011)对水泥的定义、组成、分类、技术要求等方面做出了规定。

全国水泥标准化技术委员会的颜碧兰等曾对国内外不同国家的水泥标准,包括水泥的标准设置、水泥的分类、技术要求等几个方面的指标进行比较详细的对比。本文在此基础上通过对比各国现行规范,得出了以下几点差异:

(1)水泥的分类(见表 3-16)。

表 3-16 水泥的分类

国家或地区	种类名称					
中国	硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥	粉煤灰硅酸盐水泥	火山灰质硅酸盐水泥	复合硅酸盐水泥
美国	0(5个品种: I型普通、 II型中抗或 中热、III型 高早强、 IV型低热、 V型高抗硫)		矿渣改性波特兰: ≤25%; 波特兰矿渣: 25%~70%		火山灰改性波特兰: ≤15%; 波特兰火山灰: 15%~40%	
欧洲国家	CEN I (波特兰水泥)0~5%		波特兰矿渣: CEN II/A-S, 6%~20%; CEN II/B-S, 21%~35%; 高炉水泥: CEN III/A-S, 36%~65%; CEN III/B-S, 66%~80%; CEN III/C-S, 81%~90%	波特兰粉煤灰: CEN II/A-V, 6%~20%; CEN II/B-V, 21%~35%; CEN II/A-W, 6%~20%; CEN II/B-W, 21%~35%	波特兰火山灰: CEN II/A-P, 6%~20%; CEN II/B-P, 21%~35%; CEN II/A-Q, 6%~20%; CEN II/B-Q, 21%~35%; 火山灰水泥: CEN IV/A, 11%~35%; CEN IV/B, 36%~55%; 波特兰烧页岩: CEN II/A-T, 6%~20%; CEN II/B-T, 21%~35%	波特兰复合: CEN II/A-M, 6%~20%; CEN II/B-M, 21%~35%; 复合水泥: CEN V/A, 36%~60%; CEN V/B, 62%~80%

注:表中的数字表示水泥中混合材料的掺量。

虽然各国对硅酸盐系列水泥的种类的划分有所不同,但对硅酸盐系列水泥的基本性能和应用范围的理解是一致的。而且我们可以从通用硅酸盐水泥标准的命名和组成,波特兰水泥中允许掺加 5% 以下的混合材料,不同品种水泥允许加入不同掺量的矿渣、粉煤灰等工业废渣,以及强度检验方法所采用的国际标准等方面看出各国的水泥标准逐渐趋于一体化。但由于水泥生产、销售、使用都受地域限制,因此,各国在水泥标准中依据本国资源、工业废渣等情况对掺加混合材的种类和最高掺量的规定是不同的。

(2)力学性能。首先对于强度龄期,各国水泥标准均设置2~3个龄期(日本一般设置3~4个龄期)。其中,国内标准只设置3 d和28 d龄期,美国标准则是根据五种类型水泥的不同特性设置龄期,而欧洲国家标准除32.5等级设置为7 d和28 d龄期,其余等级均设置为2 d、28 d龄期。

对于强度指标,我国水泥标准中规定的3 d强度指标对于不同等级、不同品种的水泥是不同的,而且还分早强型和非早强型;而28 d强度指标则与强度等级一致,没有再考虑水泥的品种。欧洲水泥标准中同一等级的早期强度指标对每一种水泥都一样,28 d强度指标与强度等级一致,与其他国家标准不同的是,欧洲标准规定了强度值上限,这对于从保证水泥的均匀性,来保证混凝土的质量非常有益。美国水泥标准则没有规定强度等级,按不同类型、不同品种的水泥规定各龄期的强度指标,但由于ASTM强度试验方法与其他几个国家不同,因而强度指标并没有可比性。

(3)物理性能指标。通过对物理性能指标的对比发现,国内标准和欧洲标准规定的物理性能指标基本相同,相比较而言,我国对于安定性指标的规定还严格一些;由于美国标准体系对物理性能指标的检验方法规定不同,因此,对物理性能指标并没有什么可比性。

(4)化学性能指标。通过对比可知,各国水泥标准都对不溶物、烧失量、MgO、SO<sub>3</sub>等化学成分进行了限制,但不完全相同。例如,对于不溶物,我国对硅酸盐水泥规定了不溶物,而且P·I、P·II水泥不溶物指标分别参考美国标准和英国相关标准,欧洲标准对I型和III型水泥做了规定,但限量比我国标准和美国标准高许多。又如,对于MgO含量,欧洲标准中没有限制水泥中MgO的含量,其他各国标准对此均做了规定,相比较而言,我国标准较为严格。

综上所述可以看出,各国标准规范既要遵从国际标准一体化的原则,又要结合各自国情进行具体的修改与制定,以便适应于本国该行业的发展,推动经济产业的进步。

## 思考与练习

1. 什么叫生石灰的熟化? 生石灰熟化后为什么要陈伏?
2. 试述建筑石膏和高强石膏的特性、差别和用途。
3. 从硬化过程和硬化产物分析石灰和石膏性能的差别。
4. 选用水玻璃时,为什么要考虑水玻璃的模数?
5. 硅酸盐水泥熟料的主要矿物组分是什么? 这些熟料矿物有何特性?
6. 硅酸盐水泥有哪些主要技术要求? 这些要求有何工程意义?
7. 试述几种通用硅酸盐水泥的性能特点及应用。
8. 侵蚀水泥石的环境因素有哪些? 如何有效地预防水泥石的腐蚀?
9. 铝酸盐水泥有哪些特性? 怎样正确使用?
10. 某工地需使用微膨胀水泥,但刚好缺此产品,可以采用哪些措施予以解决?