

# 模块1 砂石材料

## 学习目标

- 掌握砂石材料的技术性质和技术要求。
- 掌握矿质混合料的级配理论和组成设计方法。
- 能够使用图解法和试算法设计矿质混合料的配合比。

在道路与桥梁建筑中,砂石材料是用量最大的建筑材料,应用极为广泛。砂石材料由岩石自然风化或人工加工而成,可直接用作道路与桥梁的圬工结构材料,亦可加工成各种尺寸的水泥混凝土或沥青混合料的骨料。

用作道路与桥梁建筑的岩石或骨料都应具备一定的技术性质,以适应不同建筑类型的技术要求,特别是作为水泥混凝土或沥青混合料的骨料时,应按级配理论确定各种骨料的用量,因此,必须掌握其组成设计方法。

## 1.1 岩石

岩石是天然产出的具有稳定外形的矿物或玻璃集合体,其按照一定的方式结合而成的,是构成地壳和上地幔的物质基础。岩石按成因可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩。岩浆岩是由高温熔融的岩浆在地表或地下经冷凝所形成的岩石,也称火成岩。沉积岩是在地表由风化作用、生物作用或火山作用的产物经水、空气和冰川等外力的搬运、沉积和成岩固结而形成的岩石。变质岩是先成的岩浆岩、沉积岩等因其所处地质环境的改变经变质作用而形成的岩石。

岩石生成条件的不同使其在矿物成分、组成结构上有所变化,即使是同一类岩石,它们的性质也有很大的差别。为了保证工程质量,在使用时必须对岩石进行性质检验。

### 1.1.1 岩石的技术性质

岩石的技术性质主要包括物理性质、力学性质和化学性质。

#### 1. 岩石的物理性质

岩石的物理性质包括物理常数(如密度、毛体积密度和孔隙率等)、与水有关的性质(如吸水率、饱和吸水率和饱水系数等)、耐久性(抗冻性、坚固性等)。

##### 1) 物理常数

岩石的物理常数是岩石的矿物组成及结构状态的反映,它与岩石的技术性质有着密切的联系。岩石可由各种矿物形成不同排列的各种结构,但是从质量和体积的物理观点出发,

岩石的内部结构主要是由矿质实体和孔隙两部分组成。其中,孔隙包括不与外界连通的闭口孔隙和与外界连通的开口孔隙。岩石组成的结构外观如图 1-1(a)所示,岩石组成的体积比例如图 1-1(b)所示。

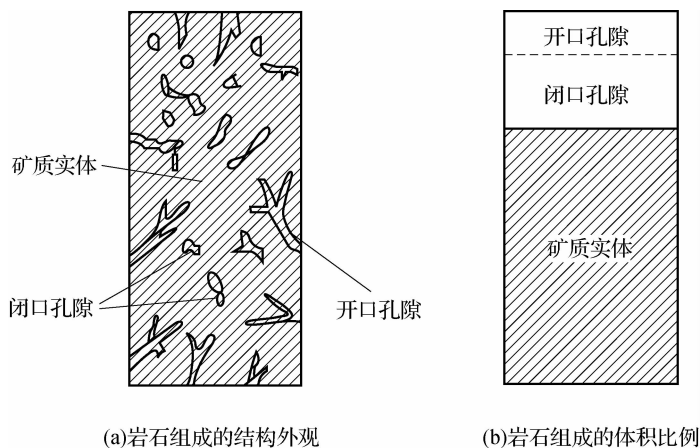


图 1-1 岩石组成结构示意图

在道路与桥梁工程中,岩石的物理常数主要包括密度、毛体积密度和孔隙率。这些物理常数在一定程度上表征了岩石的内部组成结构,并可间接反映其物理性质和力学特性。此外,这些物理常数也是混合料组成设计计算时的重要原始资料。

(1)密度。岩石的密度(又称真实密度或颗粒密度)是指在规定条件下[(105±5)℃时烘干至恒重],岩石矿质的单位实体体积(不包括开口孔隙体积与闭口孔隙体积)的质量。

岩石的密度是选择建筑材料、研究岩石风化、评价地基基础工程岩体稳定性及确定围岩压力等的计算指标。岩石的密度一般用 $\rho_t$ 表示,可按式(1-1)计算。

$$\rho_t = \frac{m_s}{V_s} \quad (1-1)$$

式中, $\rho_t$ 为岩石的密度(g/cm<sup>3</sup>); $m_s$ 为岩石矿质实体的质量(g); $V_s$ 为岩石矿质实体的体积(cm<sup>3</sup>)。

由于测定岩石密度是在空气中称量岩石质量,所以岩石中空气质量为零,则矿质实体的质量就等于岩石的质量,即 $m_s=m$ ,故式(1-1)可改写为

$$\rho_t = \frac{m}{V_s} \quad (1-2)$$

式中, $m$ 为岩石的质量(g)。

岩石的密度需按我国现行《公路工程岩石试验规程》(JTG E41—2005)进行测定。将岩石试样粉碎成岩粉并烘干至恒重,将已知质量的岩粉灌入密度瓶中并注入试液(洁净水或煤油),采用煮沸法或真空抽气法排除气体,根据置换原理测定其真实体积,按式(1-1)计算岩石密度。

(2)毛体积密度。岩石的毛体积密度又称块体密度,是指在规定条件下,烘干岩石包括孔隙在内的单位体积固体材料的质量。它是一个间接反映岩石致密程度、孔隙发育程度的参数,也是评价工程岩体稳定性及确定围岩压力等的计算指标。岩石的毛体积密度一般用 $\rho_d$ 表示,可按式(1-3)计算。



$$\rho_d = \frac{m_s}{V_s + V_n + V_i} \quad (1-3)$$

式中,  $\rho_d$  为岩石的毛体积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $V_n$  为岩石开口孔隙的体积( $\text{cm}^3$ );  $V_i$  为岩石闭口孔隙的体积( $\text{cm}^3$ )。

由前文可知,  $m_s = m$ , 且岩石的矿质实体体积和孔隙体积之和即为岩石的毛体积, 即  $V_s + V_n + V_i = V$ , 故式(1-3)可改写为

$$\rho_d = \frac{m}{V} \quad (1-4)$$

式中,  $V$  为岩石的毛体积( $\text{cm}^3$ )。

岩石的毛体积密度须按我国现行《公路工程岩石试验规程》进行测定。岩石毛体积密度的试验方法有量积法、水中称量法和蜡封法。量积法适用于能够制备成规则试件的岩石; 水中称量法适用于除遇水崩解、溶解或干缩湿胀外的其他各类岩石; 蜡封法适用于不能用量积法和水中称量法进行试验的岩石。

(3) 孔隙率。岩石的孔隙结构会影响由其所制成的骨料在水泥混凝土或沥青混合料中对水泥浆(或沥青)的吸收、吸附的程度。孔隙率是反映岩石裂隙发育程度的参数, 分为开口孔隙率和闭口孔隙率, 两者之和为总孔隙率。所谓总孔隙率是指开口孔隙和闭口孔隙的体积之和占岩石试样总体积的百分比, 一般提到的岩石孔隙率是指总孔隙率。岩石的孔隙指标一般不能实测, 可根据岩石的真实密度和毛体积密度计算总孔隙率。岩石的孔隙率一般用  $n$  表示, 可按式(1-5)计算。

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

式中,  $n$  为岩石的孔隙率;  $V_0$  为岩石孔隙(包括开口孔隙和闭口孔隙)的体积( $\text{cm}^3$ )。

岩石孔隙率亦可由岩石密度和毛体积密度计算求得, 由式(1-5)得

$$n = \left( \frac{V - V_s}{V} \right) \times 100\% = \left( 1 - \frac{V_s}{V} \right) \times 100\%$$

又由式(1-2)和式(1-4)得

$$V_s = \frac{m}{\rho_t}, V = \frac{m}{\rho_d}$$

故式(1-5)可改写为

$$n = \left( 1 - \frac{\rho_d}{\rho_t} \right) \times 100\% \quad (1-6)$$

岩石的孔隙率对自身性质影响很大, 同一种岩石的孔隙率及孔隙特征决定了岩石本身的强度、吸水率、耐冻性等的大小。

## 2) 与水有关的性质

岩石与水作用后, 水很快湿润岩石的表面并填充岩石的孔隙。因此, 水对岩石的破坏作用的大小主要取决于岩石的矿物组成及岩石孔隙的结构、尺寸大小和分布情况等。岩石在规定的条件下吸入水分的能力称为吸水性, 通常用吸水率与饱和吸水率来表示。吸水性能有效反映岩石微裂缝的发育程度, 可用来判断岩石的抗冻和抗风化等性能。

(1) 吸水率。岩石的吸水率是指在规定条件下, 岩石试件最大吸水质量与烘干至恒重时试件的质量的比值, 以百分率表示。岩石的吸水率一般用  $\omega_a$  表示, 可按式(1-7)计算。

$$\omega_a = \frac{m_1 - m}{m} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中,  $\omega_a$  为岩石的吸水率;  $m$  为烘干至恒重时试件的质量(g);  $m_1$  为吸水至恒重时试件的质量(g)。

岩石的吸水率须按我国现行《公路工程岩石试验规程》采用自由吸水法进行测定。将岩石试件烘干至恒重后,在铺有薄砂的盛水容器中,用分层逐渐加水的方法使岩石中的空气逐渐逸出,最后完全浸于水中任其自由吸水 48 h 后取出称量。测得烘干至恒重的质量和吸水至恒重的质量后即可由式(1-7)求得岩石吸水率。

(2)饱和吸水率。岩石饱和吸水率是指在强制饱和条件下,岩石试件的最大吸水质量与烘干试件质量之比。岩石的饱和吸水率一般用  $\omega_{sa}$  表示,可按式(1-8)计算。

$$\omega_{sa} = \frac{m_2 - m}{m} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中,  $\omega_{sa}$  为岩石的饱和吸水率;  $m_2$  为强制吸水饱和时试件的质量(g)。

岩石的饱和吸水率须按我国现行《公路工程岩石试验规程》(JTG E41—2005)采用真空抽气法或煮沸法进行测定。由于使用强制饱和试件,水分几乎充满岩石开口孔隙的全部体积。因此,岩石的饱和吸水率要比吸水率大。

(3)饱水系数。岩石饱水系数是指吸水率与饱和吸水率之比。岩石的饱水系数一般用  $K_w$  表示,可按式(1-9)计算。

$$K_w = \frac{\omega_a}{\omega_{sa}} \quad (1-9)$$

岩石的饱水系数为 0.5~0.8。饱水系数越大,说明常压下吸水后留余的空间就越有限,岩石越容易被冻胀破坏,因而岩石的抗冻性就越差,饱水系数是评价岩石抗冻性的指标。

岩石的吸水性与孔隙率的大小和孔隙构造特征有关。岩石内部独立且封闭的孔隙实际上并不吸水,只有开口且以毛细管连通的孔隙才吸水。孔隙结构相同的岩石,孔隙越大,吸水率越大;表观密度大的岩石,孔隙率小,吸水率也小。表 1-1 为几种常见岩石的密度和吸水率的测试值。

表 1-1 常见岩石的密度和吸水率

岩石名称		密度/(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率/%	岩石名称		密度/(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率/%
岩 浆 岩	花岗岩	2.30~2.80	0.10~0.92	沉 积 岩	砂岩	2.20~2.71	0.20~12.19
	辉长岩	2.55~2.98	—		石灰岩	2.30~2.77	0.10~4.55
	辉绿岩	2.53~2.97	0.22~5.00	变 质 岩	片麻岩	2.30~3.05	0.10~3.15
	安山岩	2.30~2.70	—		石英岩	2.40~2.80	0.10~1.45
	玄武岩	2.50~3.10	0.30~2.69		—	—	—



### 3) 耐久性

道路与桥梁都是直接暴露于大自然中的建筑物,时刻受到各种自然因素的影响。用于道路与桥梁建筑的岩石抵抗自然因素作用的性能称为岩石的耐久性。

天然岩石在道路与桥梁结构物中长期受到各种自然因素的综合作用,力学强度逐渐衰减。在工程使用中,引起岩石组织结构的破坏而导致力学强度降低的因素,首先是温度的升降(由于温度应力的作用,引起岩石内部的破坏);其次是岩石在潮湿条件下受到正负温度的交替冻融作用,引起岩石内部组织结构的破坏。在这两种因素中,哪一个为主导因素需由气候条件决定。在大多数地区,后者占主导地位。

目前已列入《公路工程岩石试验规程》中的耐久性试验有抗冻性试验和坚固性试验。

(1) 抗冻性。岩石试样在吸水饱和状态下,抵抗反复冻结和融化的性能称为抗冻性。岩石在反复冻融后其强度降低的主要原因如下。

① 构成岩石的各种矿物的膨胀系数不同,当温度变化时,由于矿物的胀缩系数不均而导致岩石结构的破坏。

② 当温度降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,岩石孔隙中的水将结冰,且体积增大 $9\%$ ,这就产生了很大的膨胀压力,使岩石的结构发生改变,直至破坏。

岩石的抗冻性用经过规定冻融循环后的质量损失百分率和冻融系数表征。规范规定采用直接冻融法测定岩石的抗冻性。该方法是将岩石加工成规则的试件,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重。然后在室温条件( $20\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 下使开口孔隙吸饱水,取出试件擦去表面水分,再置于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中冻结 $4\text{ h}$ ,取出试件,放入( $20\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 水中融解 $4\text{ h}$ ,如此为一个循环,反复冻融至规定次数为止。之后详细检查岩石试件是否有剥落、裂缝、分层与掉角等现象,并进行记录。岩石在经受 $10, 15, 25$ 次冻融循环后,可由外观、抗压强度及质量损失的指标来衡量岩石的抗冻性。

岩石质量损失率一般用 $L$ 表示,可按式(1-10)计算。

$$L = \frac{m_s - m_f}{m_s} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, $L$ 为岩石的质量损失率; $m_s$ 为试验前烘干试件的质量(g); $m_f$ 为试验后烘干试件的质量(g)。

岩石冻融系数一般用 $K_f$ 表示,可按式(1-11)计算。

$$K_f = \frac{R_f}{R_s} \quad (1-11)$$

式中, $K_f$ 为岩石的冻融系数; $R_f$ 为经若干次冻融循环试验后的岩石试件饱水抗压强度(MPa); $R_s$ 为未经冻融循环试验的岩石试件饱水抗压强度(MPa)。

一般认为冻融系数大于 $0.75$ ,质量损失率小于 $2\%$ 的岩石为抗冻性好的岩石。吸水率小于 $0.5\%$ ,软化系数[饱水状态下的试件与干燥状态下(或自然含水状态下)单向抗压强度之比]大于 $0.75$ 以及饱水系数小于 $0.8$ 的岩石也具有足够的抗冻性。对于一般道路与桥梁工程,往往根据上述标准来确定是否需要岩石进行抗冻性试验。桥涵用岩石抗冻性指标见表1-2。

表 1-2 桥涵用岩石抗冻性指标

结构物部位	冻融循环次数	
	大中桥	小桥
镶面的或表面的岩石	50	25

(2) 坚固性。根据《公路工程岩石试验规程》的规定,岩石的坚固性采用“硫酸钠溶液法”来测定。该方法是将岩石浸入饱和硫酸钠溶液中浸泡 20 h,使其饱和,然后取出置于 105 °C~110 °C 的烘箱中烘干 4 h,使其结晶膨胀,从烘箱中取出后冷却至室温,这样作为一次循环。如此重复若干个循环后,用蒸馏水煮沸洗净,烘干称重,计算其质量损失率。

此方法的原理是硫酸钠饱和溶液浸入岩石孔隙后,烘干使硫酸钠结晶体积膨胀,产生与水结冻相似的作用,使岩石孔隙受到扩张应力的作用,经过多次循环,引起岩石破坏。测定坚固性试验是测定岩石耐久性的一种简易、快速的方法。有设备条件的单位应采用直接冻融法试验。

## 2. 岩石的力学性质

道路与桥梁工程所用岩石除了应具有一定的抗压、抗折和抗剪强度外,还须具备抵抗冲击、抗磨光、抗磨耗等性能,其中,岩石的抗压强度和抗磨耗性是检验路用岩石性能的两个主要指标。

### 1) 单轴抗压强度

单轴抗压强度是岩石试件抵抗单轴压力时保持自身不被破坏的极限应力。单轴抗压强度试验是测定规则形状岩石试件单轴抗压强度的方法,主要用于岩石的强度分级和岩性描述。岩石的单轴抗压强度一般用  $R$  表示,可按式(1-12)计算。

$$R = \frac{P}{A} \quad (1-12)$$

式中, $R$  为岩石的单轴抗压强度(MPa); $P$  为试件破坏时的荷载(N); $A$  为试件的截面积( $\text{mm}^2$ )。

根据《公路工程岩石试验规程》的规定,测定形状规则的岩石试件的单轴抗压强度时,采用吸水饱和状态下的岩石立方体(或圆柱体)试件的抗压强度来评定岩石强度。岩石试件尺寸为:建筑地基用岩石采用直径为(50±2) mm、高径比为 2:1 的圆柱体试件;路面工程用岩石采用圆柱体或立方体试件,其直径、边长和高均为(50±2) mm;桥梁工程用岩石采用边长为(70±2) mm 的正方体试件。以上每组试件均为 6 个。

岩石的单轴抗压强度值取决于岩石的组成结构(如矿物组成、岩石的结构和构造、裂缝的分布等),同时也取决于试验的条件(如试件的几何外观、加载速度、温度和湿度等)。岩石含水状态对强度也有显著影响,一般来说,岩石含水率越大则岩石强度越低。含水状态对岩石强度的影响称为软化性,用软化系数  $K_p$  来表示,则

$$K_p = \frac{R_w}{R_d} \quad (1-13)$$

式中, $K_p$  为软化系数; $R_w$  为岩石饱和状态下的单轴抗压强度(MPa); $R_d$  为岩石烘干状态下的单轴抗压强度(MPa)。

软化系数可以用来评定岩石的抗冻性。通常吸水率小于 0.5%、软化系数大于 0.75 以

及饱水系数小于 0.8 的岩石具有足够的抗冻能力。

### 2) 抗磨耗性

抗磨耗性是岩石抵抗撞击、剪切和摩擦等综合作用的性能,用磨耗损失来表示。岩石的磨耗性用洛杉矶磨耗试验法(详见 1.2.1 粗骨料的技术性质)测定,磨耗损失一般用  $Q$  表示,即

$$Q = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中, $Q$  为岩石的磨耗损失; $m_1$  为装入筒中的试样质量(g); $m_2$  为试验后洗净烘干岩石试样的质量(g)。

## 3. 岩石的化学性质

### 1) 岩石的酸碱性

二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )和氧化钙( $\text{CaO}$ )是组成岩石的两种最主要的化学成分,两者比例的多少决定了岩石的酸碱性。通常,岩石按  $\text{SiO}_2$  的含量可分为酸性岩类( $\text{SiO}_2$  含量  $>65\%$ ,如花岗岩、流纹岩、石英岩等)、中性岩类( $\text{SiO}_2$  含量  $52\% \sim 65\%$ ,如闪长岩、辉绿岩等)、碱性岩类( $\text{SiO}_2$  的含量为  $45\% \sim 52\%$ ,如辉长岩、玄武岩等)和超碱性岩类( $\text{SiO}_2$  的含量  $<45\%$ ,如石灰岩等),如图 1-2 所示。

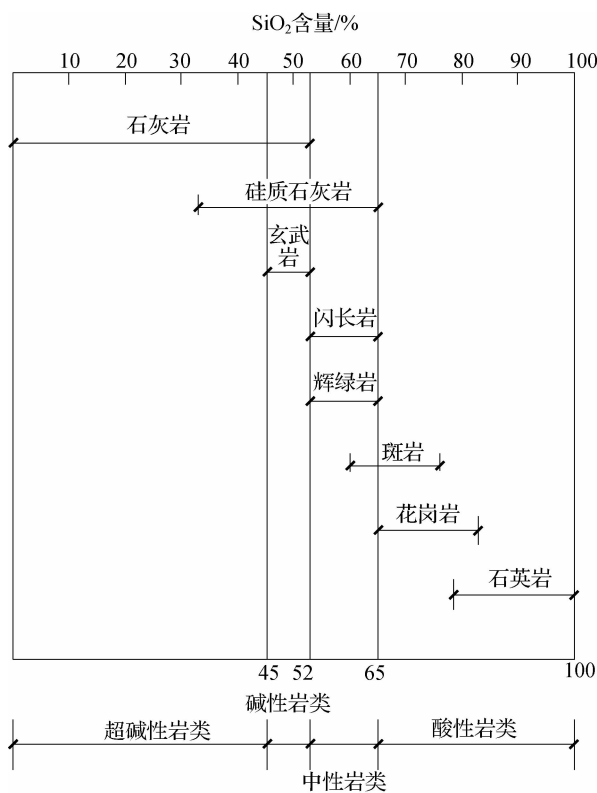


图 1-2 岩石酸碱性分类

由于造岩矿物种类繁多,同类或同种岩石的酸碱性也无统一的标准,因此通常在初步确

定岩石的酸碱性后,需要进行相关试验,以检验岩石与沥青的黏附能力。

## 2) 岩石的黏附性

岩石的黏附性直接影响到沥青混合料的使用性能,其中由于岩石与沥青的黏结性能不良而造成的沥青混合料剥离是沥青路面常见的破坏形式之一。

岩石与沥青的黏附性不仅取决于岩石的性质,同时也取决于沥青的性质。从岩石本身看,影响它与沥青黏附性的主要因素是岩石的化学性质和岩石的表面特征。

岩石的化学性质主要是指岩石的化学成分决定其表面电荷的性质与分布,从而影响岩石与沥青分子和水分子的黏附关系。岩石的表面特征是指岩石表面粗糙程度及比表面积对沥青黏附能力的影响。一般来说,表面粗糙、微孔隙多、孔径大的岩石的黏附能力较强,且碱性岩石的黏附能力要优于酸性岩石。

## 1.1.2 岩石的技术分级

按我国现行行业标准《公路工程岩石试验规程》的规定,道路建筑用天然岩石按其技术性质可分为4个等级,对不同矿物组成的岩石,其技术性质的要求也不同。因此,在分级之前首先应按其造岩矿物的成分、含量以及组织结构来确定岩石名称,然后划分其所属的岩类。按路用岩石技术要求的不同,分为4个岩类。各岩类划分及其主要代表性岩石分别如下。

(1) 岩浆岩类。如花岗岩、正长岩、辉长岩、辉绿岩、闪长岩、橄榄岩、玄武岩、安山岩、流纹岩等。

(2) 石灰岩类。如石灰岩、白云岩、泥灰岩、凝灰岩等。

(3) 砂岩和片岩类。如石英岩、砂岩、片麻岩、石英片麻岩等。

(4) 砾石类。

以上各岩组按其物理-力学性质(主要为饱水状态下的抗压强度和磨耗率)的不同可分为4个等级,见表1-3。

表 1-3 常用天然岩石的主要技术指标

岩石类别	主要岩石名称	岩石等级	技术标准	
			饱水强度/MPa	洛杉矶磨耗损失/%
I. 岩浆岩类	花岗岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩等	一级	>120	<25
		二级	100~120	25~30
		三级	80~100	30~45
		四级	—	45~60
II. 石灰岩类	石灰岩、白云岩、泥灰岩等	一级	>100	<30
		二级	80~100	30~35
		三级	60~80	35~50
		四级	30~60	50~60



续表

岩石类别	主要岩石名称	岩石等级	技术标准	
			饱水强度/MPa	洛杉矶磨耗损失/%
Ⅲ. 砂岩和片岩类	石英岩、砂岩、片麻岩、石英片麻岩等	一级	>100	<30
		二级	80~100	30~35
		三级	50~80	35~45
		四级	30~50	45~60
Ⅳ. 砾石类	—	一级	—	<20
		二级	—	20~30
		三级	—	30~50
		四级	—	50~60

表中4个等级的岩石分类如下。

一级:最坚硬的岩石。即为抗压强度大、磨耗损失低的岩石。

二级:坚硬的岩石。即为抗压强度较大、磨耗损失较低的岩石。

三级:中等强度的岩石。即为抗压强度较低、磨耗损失较大的岩石。

四级:较软的岩石。即为抗压强度小、磨耗损失大的岩石。

### 1.1.3 道路与桥梁用岩石制品

#### 1. 道路路面用岩石制品

道路路面建筑所使用的岩石制品,主要有直接用于铺砌路面面层的整齐块石、半整齐块石和不整齐块石三类。另外,还有用作路面基层的锥形块石、片石等。各种岩石制品的技术要求和规格简要介绍如下。

##### 1) 高级铺砌用整齐块石

高级铺砌用整齐块石是由高强、硬质、耐磨的岩石经精凿加工而成。这种整齐块石铺筑的路面需以水泥混凝土为基层,并且用水泥砂浆灌缝找平。因其造价较高,只用于有特殊要求的路面,如特重交通或履带车辆行驶的路面。

工程中主要检查整齐块石的尺寸是否符合设计要求。通常,大方块石为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times (120\sim 150)\text{ mm}$ ;小方块石为 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ ,抗压强度均不低于 $100\text{ MPa}$ 。用直尺紧靠块石边缘的四个边和表面,其间隙不能大于 $3\text{ mm}$ 。另外,这类岩石的抗压强度和洛杉矶磨耗损失应符合设计和规范的要求。

##### 2) 路面铺砌用半整齐块石

路面铺砌用半整齐块石是经过粗凿而成为立方体的方块石(方头弹石)或长方体的条石。检查时要求这类块石顶面与底面平行,底面积与顶面积之比不小于 $40\%$ 。同时,要求采用硬质岩石。半整齐块石顶面通常不进行加工,因此顶面平整性较差,一般只用在特殊路段,如土基尚未沉实稳定的桥头引道及干道、铁轮履带车辆经常通过的地段等。

##### 3) 路面铺砌用不整齐块石

路面铺砌用不整齐块石称拳石(或称弹街石),它是由粗打加工而得的块石,要求顶面为

一平面,底面与顶面基本平行,底面积与顶面积之比要大于 40%。其优点是造价不高,经久耐用;缺点是平整性差,行车振动大,故目前使用较少。

#### 4) 锥形块石

锥形块石又称为大块石,指的是底面大、顶面小,形状似截头锥体的石块,它是由片石进一步加工而得的粗骨料。锥形块石的底面积不宜小于  $100\text{ cm}^2$ ,以便砌摆稳定;高度一般为  $(160\pm 20)\text{ mm}$ 、 $(200\pm 20)\text{ mm}$  和  $(250\pm 20)\text{ mm}$  等,通常底基层厚度应为块石高的 1.1~1.4 倍。除特殊情况外,一般不采用锥形块石。

#### 5) 片石

片石是把大块的岩石利用工具分解成大致呈长方体的小块石,一般有长为 30 cm、宽为 50 cm、厚为 10~30 cm 和长为 30 cm、宽为 40 cm、厚度为 10~30 cm 两种,也可以根据需要进行加工。片石须有一个比较平整的面,长宽误差一般在 2 cm 左右。片石分许多种,如高速路护坡片石、河道渠道护堤片石等。

## 2. 桥梁用岩石制品

桥梁建筑所使用的主要岩石制品有片石、块石、方块石、粗料石、细料石及镶面石等。

#### 1) 片石

桥梁用片石中部尺寸应不小于 15 cm,体积不小于  $0.01\text{ m}^3$ ,每块质量一般在 30 kg 以上。用于圬工工程主体的片石,其极限抗压强度应不小于 30 MPa;用于附属圬工工程的片石,其极限抗压强度应不小于 20 MPa。

#### 2) 块石

块石是由成层岩中打眼放炮开采而得,或用楔子打入成层岩的明缝或暗缝中劈出的岩石。块石形状大致方正,无尖角,有两个较大的平行面,边角可不加工。其厚度应不小于 20 cm,宽度为厚度的 1.5~2.0 倍,长度为厚度的 1.5~3.0 倍,砌缝宽度不大于 20 mm。块石极限抗压强度应符合设计文件的规定。

#### 3) 方块石

方块石是在块石中选择形状比较整齐者稍加修整,使岩石大致方正。其厚度应不小于 20 cm,宽度为厚度的 1.5~2.0 倍,长度为厚度的 1.5~4.0 倍,砌缝宽度不大于 20 mm。方块石极限抗压强度应符合设计文件的规定。

#### 4) 粗料石

粗料石的形状尺寸和极限抗压强度应符合设计文件的规定,其表面凹凸相差不大于 10 mm,砌缝宽度不大于 20 mm。

#### 5) 细料石

细料石的形状尺寸和极限抗压强度应符合设计文件的规定,其表面凹凸相差不大于 5 mm,砌缝宽度不大于 15 mm。

#### 6) 镶面石

镶面石受气候因素影响大,损坏较快,一般应选用较好、较硬的岩石。岩石的外露面可沿四周雕琢成 2 cm 的边,中间部分仍保持原来的天然石面。岩石上下和两侧均粗琢成垛口,垛口的宽度不应小于 10 cm,琢面应垂直于外露面。

## 1.2 骨料

骨料是由不同粒径矿质颗粒组成,并在混合料中起骨架和填充作用的粒料。骨料包括岩石天然风化而成的砾石、卵石和砂,以及岩石经机械和人工轧制的各种尺寸的碎石、石屑等。

不同粒径的骨料在水泥混凝土或沥青混合料中所起的作用不同,因此技术要求也不同。骨料可分为细骨料和粗骨料。在沥青混合料中,凡粒径小于等于 2.36 mm 者称为细骨料,粒径大于 2.36 mm 者称为粗骨料;在水泥混凝土中,凡粒径小于等于 4.75 mm 者称为细骨料,粒径大于 4.75 mm 者称为粗骨料。骨料的物理、化学性质对沥青混合料或水泥混凝土有较大影响。

### 1.2.1 粗骨料的技术性质

#### 1. 粗骨料的物理性质

##### 1) 物理常数

在计算骨料的物理常数时,不仅要考虑到骨料的孔隙(开口孔隙或闭口孔隙),还要考虑颗粒之间的空隙。骨料的体积与质量的关系如图 1-3 所示。

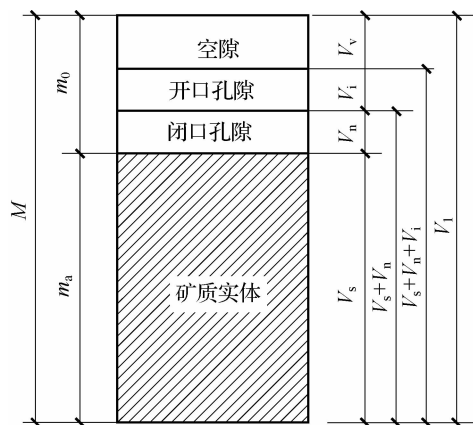


图 1-3 骨料的体积与质量的关系示意图

(1) 表观密度。表观密度也称视密度,是指在规定条件( $105 \pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 下,烘干骨料矿质实体单位表观体积(包括闭口孔隙在内的矿物实体的体积)的质量。骨料的表观密度一般用  $\rho_a$  表示,由图 1-3 可知,骨料的表观密度为

$$\rho_a = \frac{m_s}{V_s + V_n} \quad (1-15)$$

式中, $\rho_a$  为骨料的表观密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $m_s$  为骨料矿质实体的质量( $\text{g}$ ); $V_s$  为骨料矿质实体的体积( $\text{cm}^3$ ); $V_n$  为骨料实体中闭口孔隙的体积( $\text{cm}^3$ )。

矿质实体质量即为骨料质量(即  $m_s = m$ ),故式(1-15)可改写为

$$\rho_a = \frac{m}{V_s + V_n} \quad (1-16)$$

式中,  $m$  为骨料的质量(g)。

根据《公路工程骨料试验规程》(JTG E42—2005)的规定,采用网篮法测定粗骨料表观密度。将粗骨料在规定条件下烘干后称其质量,再将干燥粗骨料装在金属吊篮中浸水 24 h,使开口孔隙饱水,然后称出饱水的粗骨料在水中的质量,按排水法可计算出闭口孔隙的体积,进而计算出粗骨料的毛体积密度。

(2)毛体积密度。毛体积密度是指在规定条件( $105 \pm 5$ ) °C下,烘干骨料单位体积(包括闭口孔隙和开口孔隙在内的矿物实体)的质量。骨料的毛体积密度一般用  $\rho_b$  表示,由图 1-3 可知,骨料的毛体积密度为

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_s + V_n + V_i} \quad (1-17)$$

式中,  $\rho_b$  为骨料的毛体积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $V_i$  为骨料实体中开口孔隙的体积( $\text{cm}^3$ )。

根据《公路工程骨料试验规程》的规定,采用网篮法测定粗骨料毛体积密度。将粗骨料在规定条件下烘干后称其质量,再将干燥粗骨料装在金属吊篮中浸水 24 h,使开口孔隙饱水,然后称出饱水的粗骨料在水中的质量,再用拧干的湿毛巾擦干骨料表面水后称得饱和面干质量。根据粗骨料的烘干质量、饱水后在水中的质量和饱和面干质量,按排水法可计算出闭口孔隙和开口孔隙的体积,进而计算出粗骨料的毛体积密度。

(3)表干密度。表干密度是在规定的条件下,单位毛体积(包括闭口孔隙和开口孔隙在内的矿物实体)物质颗粒的饱和面干质量。骨料的表干密度一般用  $\rho_s$  表示,由图 1-3 可知,骨料的表干密度为

$$\rho_s = \frac{m_f}{V_s + V_n + V_i} \quad (1-18)$$

式中,  $\rho_s$  为骨料的表干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $m_f$  为骨料的饱和面干质量(g)。

(4)堆积密度。堆积密度是指单位体积(含物质颗粒固体及其闭口、开口孔隙体积及颗粒间空隙体积)物质颗粒的质量。骨料的堆积密度一般用  $\rho$  表示,由图 1-3 可知,骨料的堆积密度为

$$\rho = \frac{m_s}{V_s + V_n + V_i + V_v} \quad (1-19)$$

式中,  $\rho$  为骨料的堆积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $V_v$  为骨料颗粒间空隙的体积( $\text{cm}^3$ )。

骨料的堆积密度分为自然堆积密度、振实密度和捣实密度。根据《公路工程骨料试验规程》的规定,自然堆积密度是用平头铁锹将干燥的粗骨料装入容量筒内,装入时铁锹需离筒口 50 mm 左右,所测的密度又称为松装密度;振实密度是将装满粗骨料的容量筒在振动台上振动 3 min,或将骨料分三层装入容量筒中,在筒底部放置一根直径 25 mm 的圆钢筋,每装一层骨料后,将容量筒左右交替颠击地面 25 次;捣实密度是将骨料分三层装入容量筒中,每层用捣棒均匀捣实 25 次。振实密度和捣实密度又称为紧装密度。

(5)空隙率和间隙率。空隙率反映了骨料颗粒间相互填充的致密程度,是指骨料在某种堆积状态下的空隙体积(含开口空隙)占堆积体积的百分率。

水泥混凝土用粗骨料振实状态下的空隙率一般用  $V_e$  表示,即

$$V_e = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_a}\right) \times 100\% \quad (1-20)$$

式中,  $V_e$  为水泥混凝土用粗骨料的空隙率;  $\rho$  为按振实法测定的粗骨料的堆积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_a$



为粗骨料的表观密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

沥青混合料用粗骨料捣实状态下的间隙率一般用  $VCA_{\text{DRC}}$  表示,即

$$VCA_{\text{DRC}} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b}\right) \times 100\% \quad (1-21)$$

式中,  $VCA_{\text{DRC}}$  为沥青混合料用粗骨料捣实状态下的骨架间隙率;  $\rho$  为捣实状态下测定的粗骨料的堆积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_b$  为粗骨料的毛体积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

(6) 含水率和吸水率。骨料的含水率是骨料在自然状态下含水量的大小。骨料的含水率一般用  $\omega$  表示,即

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\% \quad (1-22)$$

式中,  $\omega$  为骨料的含水率;  $m_0$  为容器质量(g);  $m_1$  为未烘干骨料试样与容器的总质量(g);  $m_2$  为烘干后骨料试样与容器的总质量(g)。

骨料在饱水状态下的吸水率与骨料孔隙大小有一定的关系,因此,一般情况下要测定骨料的吸水率。骨料的吸水率一般用  $\omega_x$  表示,即

$$\omega_x = \frac{m_4 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\% \quad (1-23)$$

式中,  $\omega_x$  为骨料的吸水率;  $m_4$  为吸水至恒重后骨料试样与容器的总质量(g)。

## 2) 级配

级配指骨料中各组成颗粒的分级和搭配。一个好的级配要求空隙率最小,总表面积也不大。前者的目的是要使骨料本身最为紧密;后者的目的是要使用料最为节约。所以要正确选用各级尺寸的粗骨料并控制含量,以达到上述两个目的。

级配是通过筛分试验确定的。筛分试验按《公路工程骨料试验规程》的规定测定,将粗骨料通过一系列规定筛孔尺寸的标准方孔筛,测定出存留在各个筛上的骨料质量,根据骨料试样的总质量与存留在各筛孔上的骨料质量就可求得一系列与级配有关的参数。

粗骨料筛分试验有干筛法和水洗法两种,其中水泥混凝土用粗骨料采用干筛法,沥青混合料用粗骨料采用水洗法。

## 3) 针、片状颗粒含量

(1) 水泥混凝土用粗骨料的针、片状颗粒含量。针、片状颗粒是指粗骨料中细长的针状颗粒(长度大于该颗粒所属粒级的平均粒径的 2.4 倍)与扁平的片状颗粒(厚度小于该颗粒所属粒级的平均粒径的 0.4 倍)。平均粒径是指该粒级上、下粒径的平均值。当颗粒形状的各方向中的最小厚度(或直径)与最大长度(或宽度)的尺寸之比小于规定比例时,也属于针、片状颗粒。粗骨料的颗粒形状对骨料颗粒间的嵌挤力有着显著影响,比较理想的形状是接近球体或立方体,而针、片状颗粒本身容易折断,回旋阻力和空隙率大,影响水泥混凝土的和易性与强度,因此必须对其含量加以限制。水泥混凝土粗骨料针、片状颗粒含量的测定采用规准仪法,按《公路工程骨料试验规程》的规定测定。

(2) 沥青混合料用粗骨料的针、片状颗粒含量。指用游标卡尺测定的粗骨料的最小厚度(或直径)方向与最大长度(或宽度)方向的尺寸之比小于 1:3 的颗粒。沥青混合料用粗骨料的针、片状颗粒会影响骨料与沥青的黏附性能。因此,在骨料中应限制其含量,按《公路工程骨料试验规程》的规定测定。

#### 4) 坚固性

骨料的坚固性试验与岩石坚固性试验类似,是采用饱和硫酸钠溶液多次浸泡与烘干循环的方法,测定骨料试样承受硫酸钠结晶压力而不发生显著破坏或强度降低的性能。具体试验方法按我国《公路工程骨料试验规程》的规定测定。

试验表明,同一种岩石轧制成碎石后的坚固性要比块状试件低得多,这是由于轧制工艺对岩石结构的影响以及表面状况不同所造成的结果。

### 2. 粗骨料的力学性质

粗骨料的力学性质主要采用磨耗性和压碎值来表示,其次是用磨光值、道瑞磨耗值和冲击值表示。

#### 1) 磨耗性

磨耗性是指骨料抵抗撞击、剪切和摩擦等综合作用的能力。

按《公路工程骨料试验规程》的规定,粗骨料磨耗性采用洛杉矶磨耗试验机进行试验。洛杉矶磨耗试验又称搁板式磨耗试验,是将按规定级配组成的骨料与一定数目的钢球同时加入洛杉矶磨耗试验机的磨耗鼓中,磨耗鼓在规定条件下旋转摩擦 500 次后取出骨料试样,用水洗净留在筛上的试样,测试试验后骨料在 1.7 mm 标准筛上通过质量的百分率。粗骨料的磨耗损失一般用  $Q$  表示,即

$$Q = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1-24)$$

式中, $Q$  为洛杉矶磨耗损失; $m_1$  为装入磨耗鼓中试样质量(g); $m_2$  为试验后在 1.7 mm 筛上洗净烘干后试样质量(g)。

粗骨料的洛杉矶磨耗损失是骨料使用性能的重要指标,尤其是沥青混合料和基层骨料,它与沥青路面的抗车辙能力、耐磨性和耐久性密切相关。一般磨耗损失小的骨料坚硬、耐磨、耐久性好;软弱颗粒含量高、风化严重的岩石经过磨耗试验后就粉碎严重。所以洛杉矶磨耗试验是优选岩石的一个重要手段。

#### 2) 压碎值

骨料压碎值是骨料在连续增加的荷载下抵抗压碎的能力,是衡量骨料强度的一个指标,用以鉴定骨料品质。

按《公路工程骨料试验规程》规定,骨料的压碎值是将粒径 9.5~13.2 mm 的粗骨料 3 kg 装入压碎值测定仪的钢制圆筒内,放在压力机上,在 10 min 内均匀加荷至 400 kN,稳压 5 s,称量并计算其在 2.36 mm 标准筛上通过质量的百分率。粗骨料的压碎值一般用  $Q'_a$  表示,即

$$Q'_a = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1-25)$$

式中, $Q'_a$  为粗骨料压碎值; $m_0$  为试验前试样质量(g); $m_1$  为试验后通过 2.36 mm 筛孔的试样质量(g)。

压碎值作为衡量岩石强度的指标,与岩石的性质、作用力大小和级配有关。



### 3) 磨光值

现代高速交通的行车条件要求道路路面不仅要具有较高的抗磨损性,而且对路面的抗磨光性也提出了更高的要求。按《公路工程骨料试验规程》的规定,骨料的抗磨光性用磨光值表示。

磨光值是反映骨料抵抗轮胎磨光作用能力的指标。使用高磨光值的骨料(如玄武岩、安山岩、砂岩和花岗岩等)铺筑道路表层路面,可提高路表的抗滑能力,保障车辆的安全行驶。骨料的磨光值是将粒径为 9.5~13.2 mm 并剔除针、片状颗粒的骨料制成试件,将试件安装于加速磨光机的道路轮上加以磨耗,再用摆式摩擦系数仪测定试件的摩擦系数值,确定骨料的磨光值。骨料磨光值一般用 *PSV* 表示。对高速公路、一级公路,磨光值须不小于 42,对其他公路,磨光值须不小于 35。常用岩石的磨光值见表 1-4。

表 1-4 常用岩石的磨光值

项 目		岩石名称						
		石灰岩	角页岩	斑岩	石英岩	花岗岩	玄武岩	砂岩
磨光值	平均值	43	45	56	58	59	62	72
	范围	30~70	40~50	43~71	45~67	45~70	45~81	60~82

### 4) 道瑞磨耗值

磨耗值反映了骨料抵抗车轮撞击及磨耗的能力。一般磨耗损失小的骨料坚硬、耐磨并且耐久性好。沥青混合料和基层所用骨料的磨耗值一般采用洛杉矶磨耗试验,沥青混合料抗滑表层所用骨料的磨耗值通常采用道瑞试验。骨料的道瑞磨耗值一般用 *AAV* 表示。按《公路工程骨料试验规程》的规定,道瑞磨耗试验是将粒径为 9.5~13.2 mm 的洁净干燥骨料试样单层紧排于两个试模内,然后排砂并用环氧树脂砂浆填充密实,经 24 h 养护后拆模清砂取出试件并称其质量,再将试件固定于道瑞磨耗机上,在规定条件下旋转摩擦 500 圈后,取出试件,清砂后称取质量。每块试件的道瑞磨耗值为

$$AAV = \frac{3(m_1 - m_2)}{\rho_s} \quad (1-26)$$

式中,*AAV* 为骨料的道瑞磨耗值; $m_1$  为磨耗前试件质量(g); $m_2$  为磨耗后试件质量(g); $\rho_s$  为骨料的表干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

道瑞磨耗值越高,表示骨料的耐磨性越差。高速公路、一级公路抗滑层用骨料的道瑞磨耗值须不大于 14,其他公路的道瑞磨耗值须不大于 16。

### 5) 冲击值

冲击值反映了骨料抵抗多次连续重复冲击荷载作用的能力。对于路面表层,冲击值是一项重要的检测指标。骨料冲击值一般用 *AIV* 表示。按《公路工程骨料试验规程》规定,骨料的冲击值试验是称取粒径为 9.5~13.2 mm 骨料试样,将其装入钢筒中捣实,然后用质量为  $(13.75 \pm 0.05)$  kg 的冲击锤沿导杆自  $(380 \pm 5)$  mm 处自由下落,按规定连续锤击骨料 15 次,测试试验后骨料在 2.36 mm 标准筛上通过质量百分率。骨料冲击值可按式(1-27)计算。

$$AIV = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1-27)$$

式中,*AIV* 为骨料的冲击值; $m_0$  为试样总质量(g); $m_1$  为试验后通过 2.36 mm 筛孔的试样



质量(g)。

对于高速公路、一级公路,道路抗滑表层用骨料的冲击值须不大于 28%,其他公路不大于 30%。

## 1.2.2 细骨料的技术性质

细骨料的技术性质与粗骨料的技术性质基本相同,但是由于其颗粒大小的特点,亦有不同之处。

### 1. 物理常数

#### 1) 表观密度

细骨料的表观密度含义与粗骨料完全相同。细骨料的表观密度与其矿物成分有关,砂的表观密度一般为  $2.6 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。按《公路工程骨料试验规程》的规定,细骨料的表观密度的测定采用容量瓶法进行。

#### 2) 松装密度及紧装密度

细骨料干燥状态下的松装密度为  $1\ 350 \sim 1\ 650 \text{ kg/m}^3$ ,捣实后的紧装密度为  $1\ 600 \sim 1\ 700 \text{ kg/m}^3$ 。

#### 3) 空隙率

细骨料的空隙率含义与粗骨料完全相同。其值与细骨料的颗粒形状、颗粒级配、湿度以及堆积密度有关。砂在干燥松散状态下的空隙率为  $35\% \sim 45\%$ ,级配好的可减至  $35\% \sim 37\%$ 。

### 2. 级配与粗度

#### 1) 级配

砂的级配也可通过“筛分试验”确定。砂的筛分试验按《公路工程骨料试验规程》的规定,分为干筛法和水洗法。干筛法试验的具体内容如下。

取试样 500 g,在一套标准筛上进行筛分,分别求出试样存留在各筛上的质量,然后按下述方法计算其级配的有关参数。

(1)分计筛余百分率。在某号筛上的筛余质量占试样总质量的百分率为分计筛余百分率。细骨料的分计筛余百分率一般用  $a_i$  表示,即

$$a_i = \frac{m_i}{m} \times 100\% \quad (1-28)$$

式中, $a_i$  为某号筛分计筛余百分率; $m_i$  为存留在某号筛上的试样质量(g); $m$  为试样总质量(g)。

(2)累计筛余百分率。某号筛的分计筛余百分率和大于某号筛的各号筛分计筛余百分率之和为累计筛余百分率。细骨料的累计筛余百分率一般用  $A_i$  表示,即

$$A_i = a_1 + a_2 + \dots + a_i \quad (1-29)$$

式中, $A_i$  为某号筛累计筛余百分率; $a_1, a_2, \dots, a_i$  为对应各号筛的分计筛余百分率。

(3)通过百分率。通过某筛的试样质量占总试样质量的百分率。细骨料的通过百分率一般用  $P_i$  表示,即

$$P_i = 1 - A_i \quad (1-30)$$

式中, $P_i$  为通过百分率。





综上所述,分计筛余百分率、累计筛余百分率及通过百分率三者的关系见表 1-5。

表 1-5 分计筛余百分率、累计筛余百分率及通过百分率三者关系

筛孔尺寸/mm	分计筛余百分率/%	累计筛余百分率/%	通过百分率/%
4.75	$a_1$	$A_1 = a_1$	$100 - A_1$
2.36	$a_2$	$A_2 = a_1 + a_2$	$100 - A_2$
1.18	$a_3$	$A_3 = a_1 + a_2 + a_3$	$100 - A_3$
0.6	$a_4$	$A_4 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$	$100 - A_4$
0.3	$a_5$	$A_5 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5$	$100 - A_5$
0.15	$a_6$	$A_6 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$	$100 - A_6$

## 2) 粗度

粗度是评价细骨料粗细程度的一种指标,用细度模数表示。细骨料的细度模数一般用  $M_x$  表示,即

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \quad (1-31)$$

式中,  $M_x$  为细度模数。

细度模数越大,表示细骨料越粗。砂的粗度按细度模数一般可分为三级:  $M_x = 3.1 \sim 3.7$  为粗砂;  $M_x = 2.3 \sim 3.0$  为中砂;  $M_x = 1.6 \sim 2.2$  为细砂。

细度模数虽能表示砂的粗细程度,但不能完全反映出砂的颗粒级配情况,因为相同细度模数的砂可以有不同的颗粒级配。因此,要用颗粒级配和细度模数两个指标共同来表征砂的颗粒性质。

**【例 1-1】** 在某道路建筑工地取干砂样 500 g 做筛分试验,其结果列于表 1-6 中。求该砂样的分计筛余百分率、累计筛余百分率、通过百分率和细度模数,并判断该砂的粗细。

表 1-6 筛分试验结果

项 目	筛孔尺寸/mm							
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	筛底
各筛存留量/g	0	45.0	79.0	52.0	126.5	87.0	99.0	11.5
规范要求的通过范围/%	100	90~100	75~100	50~90	30~59	8~30	0~10	—

**【解】** (1)按题所给筛分结果计算,见表 1-7。

表 1-7 筛分计算结果

项 目	筛孔尺寸/mm							
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	筛底
分计筛余百分率/%	0	9.0	15.8	10.4	25.3	17.4	19.8	2.3
累计筛余百分率/%	0	9.0	24.8	35.2	60.5	77.9	97.7	100.0
通过百分率/%	100.0	91.0	75.2	64.8	39.5	22.1	2.3	0

根据上述计算结果,可绘制砂的筛分曲线,如图 1-4 所示。

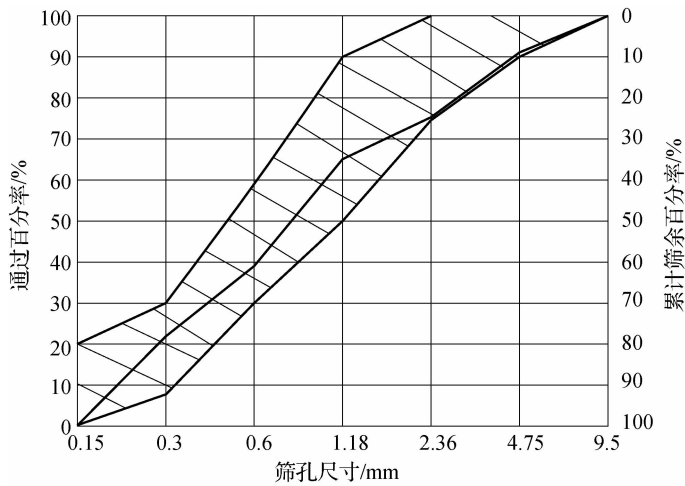


图 1-4 砂的筛分曲线

根据筛分曲线可以看出,该砂的通过范围均在《公路工程骨料试验规程》要求的范围内,说明该砂的级配符合规范的要求。

(2)计算细度模数。将表 1-7 的结果代入式(1-31)中,得

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} = \frac{(24.8 + 35.2 + 60.5 + 77.9 + 97.7) - 5 \times 9.0}{100 - 9.0} = 2.76$$

(3)根据细度模数  $M_x = 2.76$  可知,该砂为中砂。

### 1.2.3 骨料的技术标准

#### 1. 沥青混合料用骨料技术要求

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)对骨料的技术要求见表 1-8 和表 1-9。

表 1-8 沥青混合料用粗骨料的技术要求

项 目	高速公路及一级公路		其他等级公路
	表面层	其他层次	
表观相对密度, $\geq$	2.60	2.50	2.45
石料压碎值/%, $\geq$	26	28	30
磨耗损失/%, $\leq$	28	30	35
吸水率/%, $\leq$	2.0	3.0	3.0
坚固性/%, $\leq$	12	12	—
针、片状颗粒含量(混合料)/%, $\leq$	15	18	20
其中粒径大于等于 9.5 mm/%, $\leq$	12	15	—
其中粒径小于 9.5 mm/%, $\leq$	18	20	—

续表

项 目		高速公路及一级公路		其他等级公路
		表面层	其他层次	
水洗法( $<0.075$ mm 颗粒含量/%) $\leq$		1	1	1
软石含量/%) $\leq$		3	5	5
表面层所用粗骨料: 不同年降雨量/mm 磨光值 PSV	$>1\ 000$ , $\geq$	42	—	—
	$1\ 000\sim 500$ , $\geq$	40	—	—
	$500\sim 250$ , $\geq$	38	—	—
	$<250$ , $\geq$	36	—	—
表面层所用粗骨料: 不同年降雨量/mm 粗骨料的黏附性	$>1\ 000$ , $\geq$	5	4	4
	$1\ 000\sim 500$ , $\geq$	4	4	4
	$500\sim 250$ , $\geq$	4	3	3
	$<250$ , $\geq$	3	3	3

表 1-9 沥青混合料用细骨料的技术要求

项 目	高速公路及一级公路	其他等级公路
表观相对密度, $\geq$	2.50	2.45
坚固性/(>0.3 mm 部分,%) $\geq$	12	—
含泥量/(<0.075 mm 的含量,%) $\leq$	3	5
砂当量/%) $\geq$	60	50
亚甲蓝值/(g/kg) $\leq$	25	—
棱角性/(流动时间,s) $\geq$	30	—

## 2. 路面水泥混凝土用骨料技术要求

《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30—2014)对骨料的技术要求见表 1-10 和表 1-11。

表 1-10 水泥混凝土用粗骨料技术要求

项 目	技术要求		
	I 级	II 级	III 级
碎石压碎值/%) $\leq$	18.0	25.0	30.0
卵石压碎值/%) $\leq$	21.0	23.0	26.0
坚固性/(按质量损失计,%) $\leq$	5.0	8.0	12.0
针、片状颗粒含量/(按质量计,%) $\leq$	8.0	15.0	20.0
含泥量/(按质量计,%) $\leq$	0.5	1.0	2.0
泥块含量/(按质量计,%) $\leq$	0.2	0.5	0.7

续表

项 目	技术要求		
	I 级	II 级	III 级
吸水率/(按质量计,%) $\leq$	1.0	2.0	3.0
有机物含量(比色法)	合格		
硫化物及硫酸盐含量/ (按 $\text{SO}_3$ 质量计,%) $\leq$	0.5	1.0	1.0
洛杉矶磨耗损失/% $\leq$	28.0	32.0	35.0
岩石抗压强度/MPa	岩浆岩 $\geq$ 100;变质岩 $\geq$ 80;沉积岩 $\geq$ 60		
表观密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) $\geq$	2 500		
松散堆积密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) $\geq$	1 350		
空隙率/% $\leq$	47		
磨光值/% $\geq$	35.0		
碱活性反应	不得有碱活性反应或疑似碱活性反应		

表 1-11 水泥混凝土用细骨料技术要求

项 目	技术要求		
	I 级	II 级	III 级
坚固性/(按质量损失计,%) $\leq$	6.0	8.0	10.0
含泥量/(按质量计,%) $\leq$	1.0	2.0	3.0
泥块含量/(按质量计,%) $\leq$	0	0.5	1.0
氯离子含量/(按质量计,%) $\leq$	0.02	0.03	0.06
云母含量/(按质量计,%) $\leq$	1.0	1.0	2.0
硫化物及硫酸盐含量/(按 $\text{SO}_3$ 质量计,%) $\leq$	0.5	0.5	0.5
海砂中的贝壳类物质含量/(按质量计,%) $\leq$	3.0	5.0	8.0
轻物质含量/(按质量计,%) $\leq$	1.0		
吸水率/% $\leq$	2.0		
表观密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) $\geq$	2 500.0		
松散堆积密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) $\geq$	1 400.0		
空隙率/% $\leq$	45.0		
有机物含量(比色法)	合格		
碱活性反应	不得有碱活性反应或疑似碱活性反应		
结晶后二氧化硅含量/% $\geq$	25.0		

### 3. 桥涵水泥混凝土用骨料技术要求

《公路桥涵施工技术规范》(JTG TF50—2011)对骨料的技术要求见表 1-12 和表 1-13。

表 1-12 桥涵水泥混凝土用粗骨料的技术要求

项 目		技术要求		
		I 类	II 类	III 类
碎石压碎指标/%, <		10	20	30
卵石压碎指标/%, <		12	16	16
坚固性/(硫酸钠溶液法经 5 次循环后质量损失值, %), <		5	8	12
吸水率/%, <		1.0	2.0	2.5
针片状颗粒含量/(按质量计, %), <		5	15	25
有害物 质含量	含泥量/(按质量计, %), <	0.5	1.0	1.5
	泥块含量/(按质量计, %)	0	<0.5	<0.7
	有机物含量(比色法)	合格		
	硫化物及硫酸盐/(按 SO <sub>3</sub> 质量计, %)	0.5	1.0	1.0
岩石抗压强度/(水饱和状态, MPa)		火成岩 ≥80; 变质岩 ≥60; 水成岩 ≥30		
表观密度/(kg/m <sup>3</sup> ), >		2 500		
松散堆积密度/(kg/m <sup>3</sup> ), >		1 350		
空隙率/%, <		47		
碱-骨料反应		经碱-骨料反应试验后, 试件无裂缝、酥裂、胶体外溢等现象, 在规定试验龄期的膨胀率应小于 0.10%		

表 1-13 桥涵水泥混凝土用细骨料的技术要求

项 目		技术要求			
		I 类	II 类	III 类	
有害物 质含量	云母/(按质量计, %), ≤	1.0	2.0	2.0	
	轻物质/(按质量计, %), ≤	1.0	1.0	1.0	
	有机物(比色法)	合格			
	硫化物及硫酸盐/(按 SO <sub>3</sub> 质量计, %), ≤	1.0	1.0	1.0	
	氯化物/(按氯离子质量计, %), <	0.01	0.02	0.06	
天然砂含泥量/(按质量计, %), ≤		2.0	3.0	5.0	
泥块含量/(按质量计, %), ≤		0.5	1.0	2.0	
人工砂的石 粉含量/(按 质量计, %)	亚甲蓝 试验	MB 值 < 1.4 或合格, ≤	5.0	7.0	10.0
		MB 值 ≥ 1.4 或不合格, ≤	2.0	3.0	5.0

续表

项 目		技术要求		
		I 类	II 类	III 类
坚固性	天然砂/(硫酸钠溶液法经 5 次循环后质量损失值, %), ≤	8	8	10
	人工砂单级最大压碎指标 /%, <	20	25	30
表观密度/(kg/m <sup>3</sup> ), >		2 500		
松散堆积密度/(kg/m <sup>3</sup> ), >		1 350		
空隙率/%, <		47		
碱-骨料反应		经碱-骨料反应试验后, 由砂配制的试件无裂缝、酥裂、胶体外溢等现象, 在规定试验龄期的膨胀率应小于 0.10%		

## 1.3 其他砂石材料的技术性质

### 1.3.1 矿粉

近年来, 随着我国道路建设的迅速发展, 沥青路面得到了越来越广泛的使用。矿粉作为沥青混合料中的重要组成材料, 其掺量虽仅占 7% (质量分数) 左右, 但其表面积却占矿质混合料总表面积的 80% 以上。矿粉在沥青混合料中的作用主要是能显著扩大沥青与矿料进行物理、化学作用的表面积, 通过交互作用, 增加结构沥青的数量, 提高沥青混合料的黏结力。

#### 1. 矿粉的性质

试验表明, 沥青与矿粉的交互作用, 不仅与沥青的化学性质有关, 而且还与矿粉的自身性质有着密切的关系。这些性质主要有矿粉的级配、密度、亲水系数、塑性指数及加热安定性等。

##### 1) 级配

矿粉的级配是指矿粉颗粒大小的搭配情况。如果矿粉偏细, 则可增大矿粉的比表面积。对于矿粉的级配, 要求小于 0.075 mm 粒径的含量不能太少, 也不宜太多, 否则会因过细而使沥青混合料结成团块, 不易施工。因此, 矿粉必须具有良好的级配。

按《公路工程骨料试验规程》的规定, 矿粉筛分试验可用“水洗法”测定。将矿粉试样放入 (105±5) °C 烘箱中烘干至恒重, 冷却, 称取 100 g, 精确至 0.1 g。如有矿粉团存在, 可用橡皮头研杵轻轻研磨粉碎。将 0.075 mm 筛装在筛底上, 仔细倒入矿粉, 盖上筛盖。手工轻轻筛分, 至大体上筛不下去为止, 存留在筛底上的小于 0.075 mm 部分可弃去。除去筛盖和筛底, 按筛孔大小顺序套成套筛。将存留在 0.075 mm 筛上的矿粉倒回 0.6 mm 筛上, 在自来水龙头下方接一胶管, 打开自来水, 用胶管的水轻轻冲洗矿粉过筛, 0.075 mm 筛下部分任



其冲洗,直至流出的水色清澈为止。水洗过程中可以适当用手搅动试样,加速矿粉过筛,待上层筛冲干净后,去掉0.6 mm筛,接着从0.3 mm筛或0.15 mm筛上冲洗,但不得直接冲洗0.075 mm筛。分别将各筛上的筛余反过来用小水流仔细冲洗到各个搪瓷盘中,待筛余沉淀后,稍稍倾斜搪瓷盘。仔细除去清水,放入(105±5)℃烘箱中烘干至恒重。称取各号筛上的筛余量,精确至0.1 g。

各号筛上的筛余量除以试样总量的百分率即为各号筛的分计筛余百分率,精确至0.1%。用100减去0.6 mm、0.3 mm、0.15 mm、0.075 mm各筛对应的分计筛余百分率,即为通过0.075 mm筛的通过百分率,加上0.075 mm筛的分计筛余百分率即为0.15 mm筛的通过百分率。依次类推,计算出各号筛的通过百分率,精确至0.1%。

### 2) 密度

矿粉密度主要用于检验矿粉的质量,并供沥青混合料配合比设计计算使用。矿粉密度与细骨料的表观密度定义相同,但由于尺寸与性质上巨大的差异,按《公路工程骨料试验规程》规定,矿粉密度试验可用“李氏瓶”测定。对于亲水性矿粉应采用煤油作为测定介质。

将代表性矿粉试样置于瓷皿中,在105℃烘箱中烘干至恒重(一般不少于6 h),放入干燥器中冷却后,连同小牛角匙、漏斗一起准确称量,精确至0.01 g,矿粉质量应不少于20%。向比重瓶中注入蒸馏水至刻度0~1 mL之间,将比重瓶放入20℃的恒温水槽中,静放至比重瓶中的水温不再变化为止(一般不少于2 h),读取比重瓶中水面的刻度,准确至0.02 mL。用小牛角匙将矿粉试样通过漏斗徐徐加入比重瓶中,待比重瓶中水的液面上升至接近比重瓶的最大读数时为止,轻轻摇晃比重瓶,使瓶中的空气充分逸出。再次将比重瓶放入恒温水槽中,待温度不再变化时,读取比重瓶的读数,精确至0.02 mL。整个试验过程中,比重瓶中的水温变化不得超过1℃。准确称取牛角匙、瓷皿、漏斗及剩余矿粉的质量,精确至0.01 g。矿粉的密度一般用 $\rho_f$ 表示,即

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_2}{V_2 - V_1} \quad (1-32)$$

式中, $\rho_f$ 为矿粉的密度(g/cm<sup>3</sup>); $m_1$ 为牛角匙、瓷皿、漏斗及试验前瓷皿中干燥矿粉的总质量(g); $m_2$ 为牛角匙、瓷皿、漏斗及试验后瓷皿中干燥矿粉的总质量(g); $V_1$ 为加矿粉以前比重瓶的初读数(mL); $V_2$ 为加矿粉以后比重瓶的终读数(mL)。

### 3) 亲水系数

矿粉的亲水系数即矿粉试样在水(极性介质)中膨胀的体积与同一试样在煤油(非极性介质)中膨胀的体积之比,用于评价矿粉与沥青结合料的黏附性能。

亲水系数大于1的矿粉表示矿粉对水的亲和力大于对沥青的亲和力,称为憎油矿粉。这种矿粉在水和沥青都存在的情况下,易与水反应,而与沥青的黏结力很弱;相反,当亲水系数小于1时,表示矿粉对沥青的亲和力大于对水的亲和力,称为亲油矿粉,故与沥青的黏结力很强。因此,工程中必须选用亲水系数小于1的矿粉。为了鉴别矿粉的亲水性,必须检测矿粉的亲水系数。

按《公路工程骨料试验规程》的规定,称取烘干至恒重的矿粉5 g(精确至0.01 g),将其放在研钵中,加入15~30 mL蒸馏水,用橡皮研杵仔细磨5 min,用洗瓶把研钵中的悬浮液洗入量筒中,使量筒中的液面恰为50 mL,然后用玻璃棒搅和悬浮液。同上法将另一份同样重量的矿粉,用煤油仔细研磨后将悬浮液冲洗移入另一量筒中,液面亦为50 mL。将两量筒



静置,使量筒内液体中的颗粒沉淀。每天记录两次沉淀物的体积,直至体积不变为止。矿粉的亲水系数一般用  $\eta$  表示,即

$$\eta = \frac{V_B}{V_H} \quad (1-33)$$

式中, $\eta$  为矿粉的亲水系数; $V_B$  为水中沉淀物的体积(mL); $V_H$  为煤油中沉淀物的体积(mL)。

#### 4) 塑性指数

塑性指数是指矿粉液限含水量与塑限含水量之差,以百分率表示,是用来评价矿粉中黏性土成分含量的指标。

用于热拌沥青混合料中的矿粉大部分是通过 0.075 mm 筛的非塑性的矿物质粉末,即石灰石粉。为了增强沥青与酸性岩石的黏结力,有时需掺入适量的消石灰粉或水泥,但这样又会使矿粉的塑性指数增加。由于塑性指数高的矿粉具有较大的吸水性和吸油性,并会由此产生膨胀,使沥青混合料的强度降低,或者在水的作用下发生剥离,最终使沥青路面损坏。因此,用于沥青混合料中矿粉的塑性指数不宜过高,按现行规范其最大值必须小于 4%。

矿粉的塑性指数是按《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)的方法进行检测的。

#### 5) 加热安定性

加热安定性是矿粉在热拌过程中受热而不产生变质的性能,用于评价矿粉(除石灰石粉、磨细生石灰粉、水泥外)易受热变质成分的含量。

按《公路工程骨料试验规程》的规定,称取矿粉 100 g,装入蒸发皿或坩埚中,摊开。将盛有矿粉的蒸发皿或坩埚置于煤气炉或电炉火源上加热,将温度计插入矿粉中,一边搅拌矿粉,一边测量温度,加热到 200 °C 时关闭火源。将矿粉在室温中放置冷却,观察颜色的变化。

有些矿粉在受热后会发生变质,从而影响质量。尤其是火成岩石粉,在拌和过程中会发生较严重的变质,可采用此方法进行检验。

## 2. 矿粉的技术要求

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)对矿粉的技术要求见表 1-14。

表 1-14 矿粉的技术要求

项 目	高速公路及一级公路	其他等级公路
表观密度/(t/m <sup>3</sup> ), ≥	2.50	2.45
含水量/%, ≤	1	1
粒度范围<0.6 mm/%	100	100
<0.15 mm/%	90~100	90~100
<0.075 mm/%	75~100	70~100
外观	无团块结粒	
亲水系数,<	1	
塑性指数,<	4	
加热安定性	实测记录	



### 1.3.2 粉煤灰

粉煤灰是火力发电厂排放的废渣,呈灰色或浅灰色粉末,属于火山灰质活性材料。粉煤灰含有较多的活性氧化硅和活性氧化铝,它们与氢氧化钙在常温下起化学反应生成稳定的水化硅酸钙和水化铝酸钙,这些成分有助于混合料的硬化,增加强度。粉煤灰是球形熔粉,颗粒呈玻璃状,这些颗粒可以改善拌合物的和易性。

#### 1. 粉煤灰的技术性质

(1)细度。粉煤灰的细度对强度的形成有一定的影响,粉煤灰颗粒越细,则强度越高。这是由于经磨细的粉煤灰增大了表面积,使活性增大。

(2)密度。粉煤灰的密度与颗粒形状、铁质含量有关。玻璃球含量越多,粉煤灰密度越大;氧化铁成分越高,其密度亦越大;含碳多的则密度小。密度越大粉煤灰质量越好,一般为  $1.07 \sim 2.40 \text{ g/cm}^3$ 。

(3)堆积密度。粉煤灰的堆积密度一般为  $555 \sim 700 \text{ kg/m}^3$ 。

(4)烧失量。烧失量即粉煤灰中未烧尽的碳粉含量,未烧尽的碳粉在粉煤灰中是有害物质。如果粉煤灰中含碳量大,活性的二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙含量少,都会降低粉煤灰的活性增加粉煤灰的需水量降低强度,故烧失量越少越好。路面基层要求粉煤灰的烧失量不应超过 20%。

(5)含水量。湿粉煤灰的含水量不宜超过 35%。

(6)颜色。粉煤灰外观类似水泥,由于燃烧条件的不同使颜色在乳白色到灰黑色之间变化。

粉煤灰的颜色是一项重要的质量指标,它不仅可以反映含碳量的多少和差异,而且在一定程度上也可以反映粉煤灰的细度。颜色越深,则粉煤灰粒度越细,含碳量越高。

粉煤灰有低钙粉煤灰和高钙粉煤灰之分。通常高钙粉煤灰的颜色偏黄,低钙粉煤灰的颜色偏灰。

#### 2. 粉煤灰的技术要求

粉煤灰的品质分为 I, II, III 三个等级,具体技术要求见表 1-15。

表 1-15 粉煤灰的技术要求

序号	指标	粉煤灰级别		
		I	II	III
1	细度/(0.045 mm 方孔筛筛余,%), ≤	12	20	45
2	烧失量/%, ≤	5	8	15
3	需水量比/%, ≤	95	105	115
4	三氧化硫/%, ≤	3	3	3
5	含水率/%, ≤	1	1	—

#### 3. 粉煤灰在道路工程中的应用

粉煤灰在道路工程中的应用有如下几类。

(1)可以在硅酸盐水泥中加入适量的粉煤灰制成粉煤灰硅酸盐水泥。

- (2) 用作水泥混凝土路面掺合料, 节省水泥用量。
- (3) 用作沥青混合料路面的掺合料。
- (4) 用粉煤灰加水泥或石灰稳定砂砾做路面基层、底基层及垫层。
- (5) 拌制建筑砂浆, 代替部分石膏, 效果较好。
- (6) 粉煤灰与黏土烧制成粉煤灰砖。
- (7) 适用于受化学侵蚀的水泥混凝土及灌浆、泵送水泥混凝土。

### 1.3.3 冶金矿渣骨料

冶金矿渣(粒化高炉矿渣)是高炉炼铁过程中,由矿石中的脉石、燃料中的灰分和助熔剂(石灰石)等炉料中的非挥发组分形成的废物。主要有高炉水渣和重矿渣之分。高炉水渣是炼铁高炉排渣时,用水急速冷却而形成的散颗粒状物料,其活性较高,目前这类矿渣占矿渣总量的85%左右。重矿渣是指在空气中自然冷却或极少量水促其冷却形成容重和块度较大的石质物料。

冶金矿渣的主要成分是由 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等组成的硅酸盐和铝酸盐。 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{MnO}$ 主要来自矿石中的脉石和焦炭的灰分, $\text{CaO}$ 和 $\text{MgO}$ 主要来自熔剂。上述四种主要成分在冶金矿渣中占90%以上。根据铁矿石成分、熔剂质量、焦炭质量以及所炼生铁种类的不同,一般每生产1t生铁,要排出0.3~1.0t废渣,因此冶金矿渣是一种量大面广的工业废渣。

冶金矿渣是一种具有良好的潜在活性的材料,已成为水泥工业活性混合材料的重要来源。水泥企业使用冶金矿渣可以扩大水泥品种、改善水泥性能(抗蚀性)。冶金矿渣的活性用质量系数 $K$ 来衡量,系数大则活性高。冶金矿渣的活性与化学成分有关,但更取决于冷却条件。慢冷的矿渣具有相对均衡的结晶结构,主要矿物为钙铝黄长石、镁黄长石、钙长石、硫化钙、硅酸二钙等。除硅酸二钙具有缓慢水硬性外,其他矿物成分常温下水硬性很差。水淬急冷阻止了矿物结晶,因而形成大量的无定形活性玻璃体结构或网络结构,具有较高的潜在活性。在激发剂的作用下,其活性被激发出来,能起到水硬化作用而产生强度。

目前,冶金矿渣骨料已广泛用于水泥混凝土、沥青混合料路面的基层材料,也可作为修筑水泥混凝土或沥青混合料路面用的骨料。

### 1.3.4 煤矸石

煤矸石是采煤过程和洗煤过程中排放的固体废物,是一种在成煤过程中与煤层伴生的含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石。煤矸石包括巷道掘进过程中的掘进矸石,采掘过程中从顶板、底板及夹层里采出的矸石以及洗煤过程中挑出的洗矸石。

煤矸石的成分类似于黏性土,因此,宜用碱性材料(火山灰材料)加以稳定,所获材料可用作二级或二级以下公路路面的基层或底基层。

## 1.4 矿质混合料的组成设计

在水泥混凝土或沥青混合料中,所用骨料的粒径尺寸范围较大,而天然或人工轧制的单

一骨料粒径尺寸范围一般比较小,难以满足工程对某一混合料的目标级配范围的要求,因此需要将两种或两种以上的骨料掺配使用,即制成矿质混合料,简称矿料。矿质混合料组成设计的目的就是根据目标级配范围的要求,确定各种骨料在矿质混合料中的合理比例。为此,本部分内容主要介绍矿质混合料的级配理论、目标级配范围的确定方法和基本组成设计方法。

## 1.4.1 矿质混合料的级配理论和级配范围曲线

### 1. 矿质混合料的级配理论

#### 1) 级配类型

各种不同粒径的骨料,按一定的比例搭配起来,以达到最大密实度及最大摩擦力,可以采用两种类型的级配。

(1)连续级配。连续级配是某一矿质混合料在标准筛孔配成的套筛中进行筛分时,所得的级配曲线平顺圆滑、具有连续的(不间断的)性质,相邻粒径的粒料之间有一定的比例关系(按质量计)。这种由大到小,逐级粒径均有,并按比例互相搭配组成的矿质混合料称为连续级配矿质混合料。

(2)间断级配。间断级配是在矿质混合料中剔除一个或几个分级,形成一种不连续的混合料,这种级配的混合料称为间断级配矿质混合料。连续级配和间断级配曲线如图 1-5 所示。

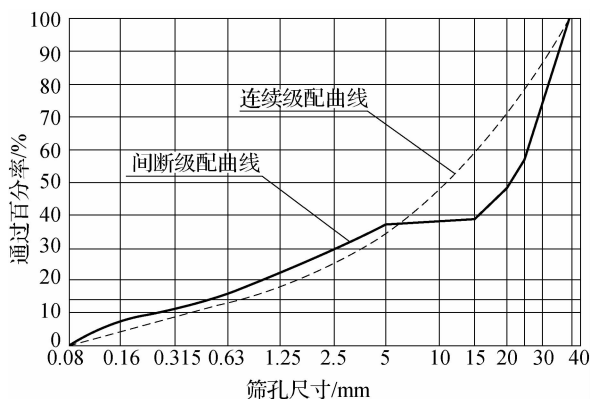


图 1-5 连续级配曲线和间断级配曲线比较

#### 2) 级配理论

目前常用的级配理论主要有最大密度曲线理论和粒子干涉理论。前者主要描述了连续级配的粒径分布,可用于计算连续级配;后者不仅可用于计算连续级配,而且也可用于计算间断级配。

##### (1) 最大密度曲线理论。

①富勒公式。富勒(W. B. Fuller)根据试验提出了一种理想曲线,认为矿质混合料的

颗粒级配曲线越接近抛物线,则其密度越大。根据上述理论,当矿质混合料的级配曲线为抛物线(见图 1-6)时,最大密度理想曲线可用颗粒粒径  $d$  与通过百分率  $P$  表示,如式(1-34)所示。

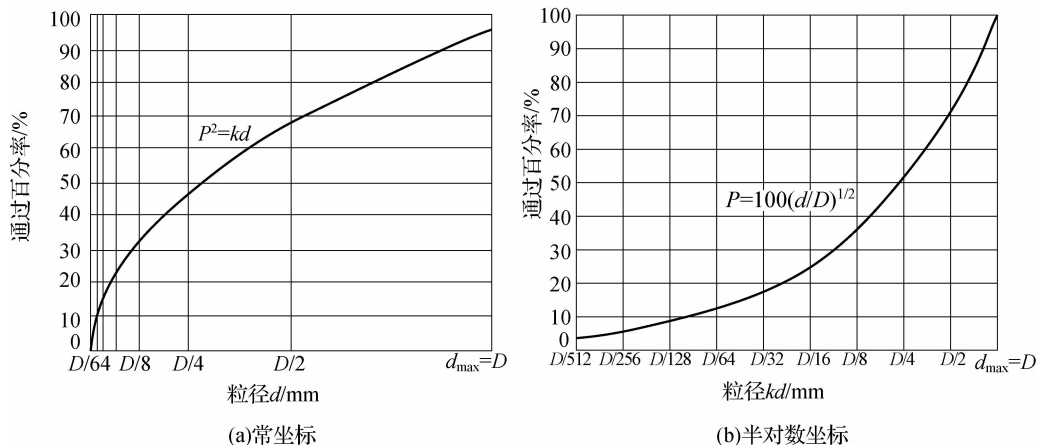


图 1-6 最大密度理想级配曲线

$$P^2 = kd \quad (1-34)$$

式中,  $P$  为通过百分率(%);  $k$  为系数;  $d$  为计算某级矿质骨料的粒径(mm)。

当颗粒粒径  $d$  等于最大粒径  $D$  时,即

$$k = 100^2 \frac{1}{D} \quad (1-35)$$

式中,  $D$  为矿质骨料的粒径(mm)。

当求任一级筛孔尺寸的颗粒通过百分率  $P$  时,将式(1-34)代入式(1-35)中,即得出最大密度理想曲线的级配计算公式为

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{1/2} \quad (1-36)$$

②泰波公式。泰波(A. N. Talbol)认为富勒曲线是一种理想的级配曲线,细料可能偏少,矿质混合料中的级配最好在一定范围波动,故将富勒最大密实度曲线改为  $n$  次幂的公式,即

$$P = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad (1-37)$$

式中,  $n$  为试验指数。

从式(1-37)可以看出,当  $n=1/2$  时,  $P$  的曲线为抛物线,即富勒曲线。在实际应用中,这一公式的指数不应固定为 0.5。有的研究认为,矿质混合料用于沥青混合料中,  $n=0.45$  时密度最大;对于水泥混凝土,当  $n=0.3 \sim 0.6$  时具有较好的密实度,工作性较好。级配曲线范围如图 1-7 所示。

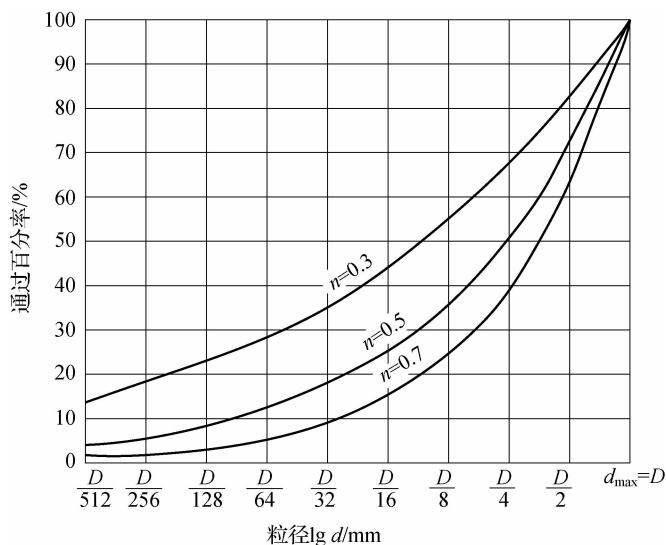


图 1-7 泰波级配曲线范围

为计算方便,泰波公式亦可改写为对数方程,即

$$\lg P = \lg 100 + n \lg d - n \lg D = (2 - n \lg D) + n \lg d \quad (1-38)$$

**【例 1-2】** 已知骨料的最大粒径  $D=40$  mm,  $n$  为 0.3 和 0.5, 试求该骨料中各级粒径的通过百分率(各级粒径尺寸按  $1/2$  递减)。

**【解】** 按泰波公式(1-38)得

$$\lg P = (2 - 0.3 \lg 40) + 0.3 \lg d$$

$$\lg P = (2 - 0.5 \lg 40) + 0.5 \lg d$$

式中,  $d$  按最大粒径为 40 mm 的  $1/2$  逐渐递减所得的  $d_i$  代入各级粒径通过百分率, 计算结果列于表 1-16。

表 1-16 理想级配曲线各级配粒径通过百分率

项 目	分级顺序 $N$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
粒径比 $\frac{D}{2^{N-1}}$	$D$	$\frac{D}{2}$	$\frac{D}{4}$	$\frac{D}{8}$	$\frac{D}{16}$	$\frac{D}{32}$	$\frac{D}{64}$	$\frac{D}{128}$	$\frac{D}{256}$	$\frac{D}{512}$	
粒径 $d_i/m$	40	20	10	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.02	
泰波指数 $n$	0.3	100	81.23	65.98	53.59	43.53	35.93	28.37	23.04	18.71	15.20
	0.5	100	70.69	49.99	35.35	25.00	17.32	12.25	8.66	6.12	4.30
通过百分率	0.8	100	80	64	51	41	33	26	21	17	14
递减率 $i$	0.7	100	70	49	34	24	17	12	8	6	4

③我国简化公式。我国在实践的基础上提出直接以通过百分率的递减率  $i$  为参数的计算公式, 即

$$P = 100(i)^{x-1} \quad (1-39)$$

式中,  $P$  为第  $x$  级通过百分率(%) ;  $i$  为通过百分率的递减率(当骨料最大粒径为  $D$  时, 其通过百分率为 100% ;  $d=D/2$  时, 其通过量为  $100i\%$  ;  $d=D/4$  时, 通过量为  $100i^2\%$  , 其余类推) ;  $x$  为粒径由大到小的顺序号(当骨料最大粒径为  $D$  时,  $x=1$  ; 粒径按  $1/2$  递减, 即为  $D/2$  时,  $x=2$  ; 粒径为  $D/4$  时,  $x=3$  , 其余类推)。

本方法  $i$  值与泰波指数  $n$  之间可以互换, 即

$$i = \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (1-40)$$

(2) 粒子干涉理论。魏矛斯(C. A. G. Weymouth)研究认为, 为达到最大密度, 前一级颗粒之间的空隙应由次一级颗粒所填充; 其所余空隙又由再次一级小颗粒所填充, 但填隙的颗粒粒径不得大于其间隙间距, 否则大小颗粒粒子之间势必发生干涉现象(见图 1-8)。为避免干涉现象的发生, 大小粒子间应按一定比例进行分配, 并从临界干涉的情况下导出前一级颗粒间的距离。

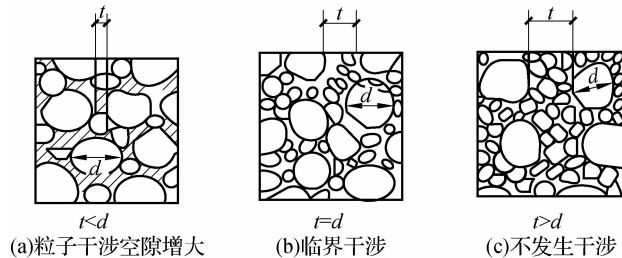


图 1-8 魏矛斯粒子干涉理论模式

$$t = \left[ \left( \frac{\Psi_0}{\Psi_a} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] D \quad (1-41)$$

式中,  $t$  为前粒级的间隙距离;  $D$  为前粒级的粒径;  $\Psi_0$  为次粒级的理论实积率(实积率即堆积密度与表观密度之比);  $\Psi_a$  为次粒级的实际实积率。

当处于临界干涉状态时  $t=d$ , 则式(1-41)可写为

$$t = \frac{\Psi_0}{\left(\frac{d}{D} + 1\right)^3} \quad (1-42)$$

式(1-42)即粒子干涉理论的公式。

## 2. 级配范围曲线的绘制

按前述级配理论公式计算出各级矿料在矿质混合料中的通过百分率, 以通过百分率为纵坐标轴, 以粒径为横坐标轴, 绘制成曲线, 即为理论级配曲线。但由于受矿料在轧制过程中的不均匀性, 以及混合料配制时的误差等因素影响, 所配制的混合料往往不可能与理论级配完全符合。因此, 必须允许配料时的合成级配在适当的范围内波动。

常用筛的筛孔是按  $1/2$  递减的, 筛分曲线如按常规坐标绘制, 则必然造成前疏后密, 不便于绘制和查阅。为此, 通常用半对数坐标代替, 即横坐标轴的筛孔尺寸(颗粒粒径)采用对数坐标, 而纵坐标轴的通过百分率(存留百分率)采用常规坐标。

我国沿用半对数坐标系绘制级配曲线的方法, 首先要按对数计算出各种颗粒粒径(即筛孔尺寸)在横坐标轴上的位置, 而表示通过百分率(存留百分率)的纵坐标则按普通算数坐标

绘制。绘制好横、纵坐标后,将计算所得的各颗粒粒径  $d_j$  的通过百分率  $P_j$  绘制在坐标图上,再将确定的各点连接成曲线,两个指数( $n_1$  和  $n_2$ )之间所包括的范围即为级配范围(通常用阴影表示)。如图 1-9 所示即为  $n_1=0.3$  和  $n_2=0.7$  的级配范围曲线。

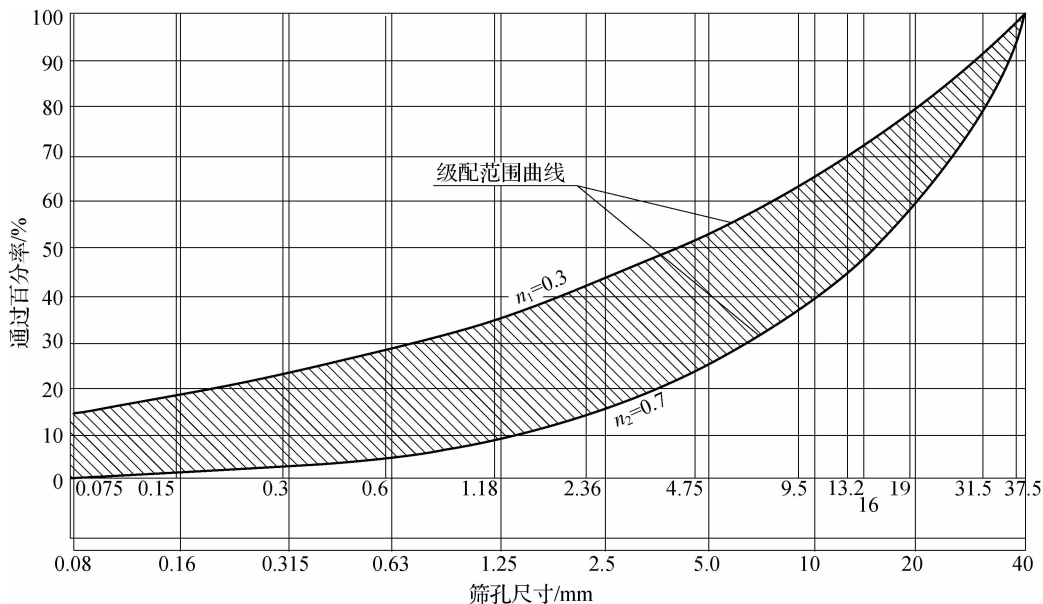


图 1-9 级配范围曲线

### 1.4.2 矿质混合料的组成设计

天然和人工轧制骨料的级配往往很难完全符合某一级配范围的要求,因此必须将两种或两种以上的骨料配合起来才能满足级配范围的要求。矿质混合料组成设计的任务就是确定混合料中各骨料的比例关系,以满足级配范围的要求。确定混合料配合比设计的方法有很多,目前最常用的有数解法和图解法。

#### 1. 数解法

用数解法求解矿质混合料组成的方法有很多,试算法是数解法中最简单的一种方法,可用于 2~3 种矿料组成设计计算。

##### 1) 已知条件

- (1) 各种骨料的筛分结果。
- (2) 技术规范要求的标准级配范围。

##### 2) 基本原理

假设有几种矿质骨料,欲配制成符合一定级配要求的混合料。决定各组成骨料在混合料中的比例时,应遵循以下方法。

(1) 首先假定混合料中某种粒径的颗粒是由某一种对该粒径占优势的骨料所组成,而其他各级骨料不含这种粒径。

(2) 根据各个主要粒径试算各种骨料在混合料中的大致比例。

(3) 将此比例与级配要求相对照,如比例不合适,则稍加调整,这样逐步渐进,最终达到

符合混合料的级配要求为止。

### 3) 计算方法

设 A, B, C 三种骨料, 欲配制成级配为  $M$  的矿质混合料, 求 A, B, C 三种骨料在混合料中的比例, 即确定 A, B, C 三种骨料的配合比。

(1) 假设条件。首先做下列两点假设。

① 设 A、B、C 三种骨料在混合料中用量的比例为  $X, Y, Z$ , 则

$$X+Y+Z=100 \quad (1-43)$$

② 设混合料中某一级粒径要求的含量为  $M_{(i)}$  (级配中值), A, B, C 三种骨料在原级配中此粒径的含量分别为  $m_{A(i)}, m_{B(i)}, m_{C(i)}$ , 则

$$m_{A(i)}X+m_{B(i)}Y+m_{C(i)}Z=M_{(i)} \quad (1-44)$$

(2) 计算步骤。在满足上述两点的前提下, 按以下步骤求 A, B, C 三种骨料在混合料中的用量。

① 计算 A 骨料在矿质混合料中的用量。按 A 骨料在混合料中占优势的  $i$  粒径计算, 此时忽略其他骨料在此粒径中的含量 [ $m_{B(i)}, m_{C(i)}$  均等于 0], 故得

$$m_{A(i)}X=M_{(i)}$$

$$\text{即} \quad X=\frac{M_{(i)}}{m_{A(i)}} \quad (1-45)$$

② 计算 C 骨料在矿质混合料中的用量。按 C 骨料在混合料中占优势的  $j$  粒径计算, 此时忽略其他骨料在此粒径中的含量 [即  $m_{A(i)}, m_{B(i)}$  均等于 0], 故得

$$m_{C(j)}Z=M_{(j)}$$

$$\text{即} \quad Z=\frac{M_{(j)}}{m_{C(j)}} \quad (1-46)$$

③ 计算 B 骨料在矿质混合料中的用量。

$$Y=100-(X+Z) \quad (1-47)$$

(3) 校核调整。按以上计算的配合比校核。如不在要求的级配范围内时, 应调整配合比重新进行计算和复核。经几次调整, 逐步接近级配范围, 直到符合要求为止。如确实不能满足级配要求时, 可掺加某些单粒级骨料或调换其他原始材料。

## 2. 图解法

图解法中较为常用的是修正平衡面积法, 目前, 我国技术规范中推荐的矿质混合料组成设计均采用这种方法。

### 1) 已知条件

采用修正平衡面积法求解矿质混合料组成时, 应满足以下条件。

(1) 各种骨料的筛分结果, 用以求出各级粒径的通过百分率。

(2) 按技术规范要求的标准级配范围, 用以求出要求的合成级配各级粒径的通过百分率中值。

### 2) 设计步骤

(1) 绘制级配曲线坐标图。

① 绘制一长方形图框, 通常纵坐标量取 10 cm, 横坐标量取 15 cm。连接对角线  $OO'$  作为级配范围中值。





②纵坐标按算数标尺,标出通过百分率。

③横坐标为筛孔尺寸。将各粒径合成级配范围的中值标于纵坐标上,从这些纵坐标点引水平线与对角线相交,从交点作垂线与横坐标相交,其交点即为各相应筛孔孔径的位置。如图 1-10 所示即为级配曲线坐标图。表 1-17 为细粒式沥青混合料用矿料的级配范围。

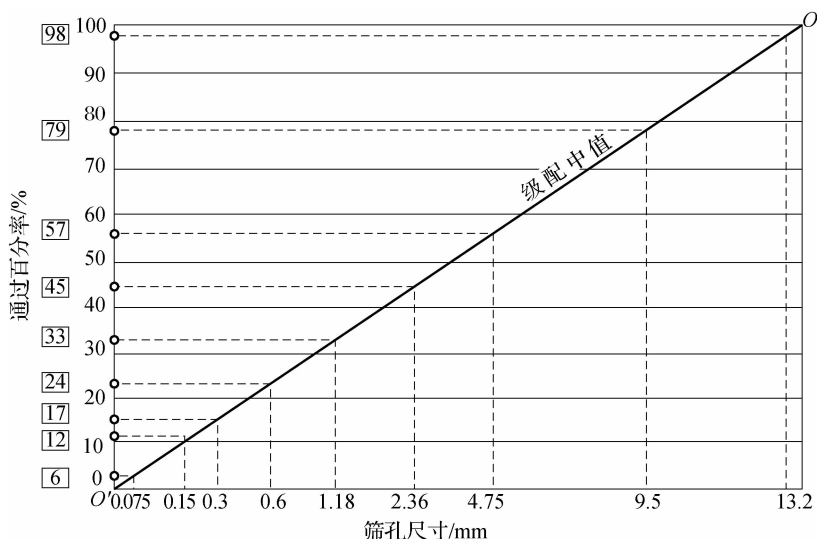


图 1-10 图解法级配曲线坐标图

表 1-17 细粒式沥青混合料用矿料的级配范围

项 目	筛孔尺寸/mm									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围/mm	100	95~100	70~88	48~68	36~53	24~41	18~30	12~22	8~16	4~8
级配中值	100	98	79	57	45	33	24	17	12	6

(2)在坐标图上绘制各种骨料的级配曲线。绘制如图 1-11 所示的级配曲线。

(3)确定各种骨料用量。将各种骨料的通过百分率绘于骨料级配曲线图上,如图 1-11 所示。实际骨料的相邻级配曲线并不是均为首尾相接的,可能有下列三种情况。

①两相邻级配曲线重叠。如骨料 A 级配曲线的下部与骨料 B 级配曲线上部搭接时,在两级配曲线之间引一条垂直于横坐标的直线  $AA'$ ,并使得  $a=a'$ ,垂线  $AA'$  与对角线  $OO'$  交于点  $M$ 。通过  $M$  作一水平线与纵坐标交于  $P$  点。 $OP$  即为骨料 A 的用量。

②两相邻级配曲线相接。如骨料 B 的级配曲线末端与骨料 C 的级配曲线前端正好在一垂直线上时,将前一骨料曲线末端与后一骨料曲线首端作垂线相连,垂线  $BB'$  与对角线  $OO'$  相交于点  $N$ 。通过  $N$  作一水平线与纵坐标交于  $Q$  点。 $PQ$  即为骨料 B 的用量。

③两相邻级配曲线相离。如骨料 C 的集配曲线末端与骨料 D 的级配曲线前端在水平方向彼此离开一段距离  $x$  时,作一垂直平分  $x$  的直线,并使得  $b=b'$ ,垂线  $CC'$  与对角线  $OO'$  相交于点  $R$ 。通过  $R$  作一水平线与纵坐标交于  $S$  点, $QS$  即为骨料 C 的用量。剩余  $ST$  即为骨料 D 的用量。

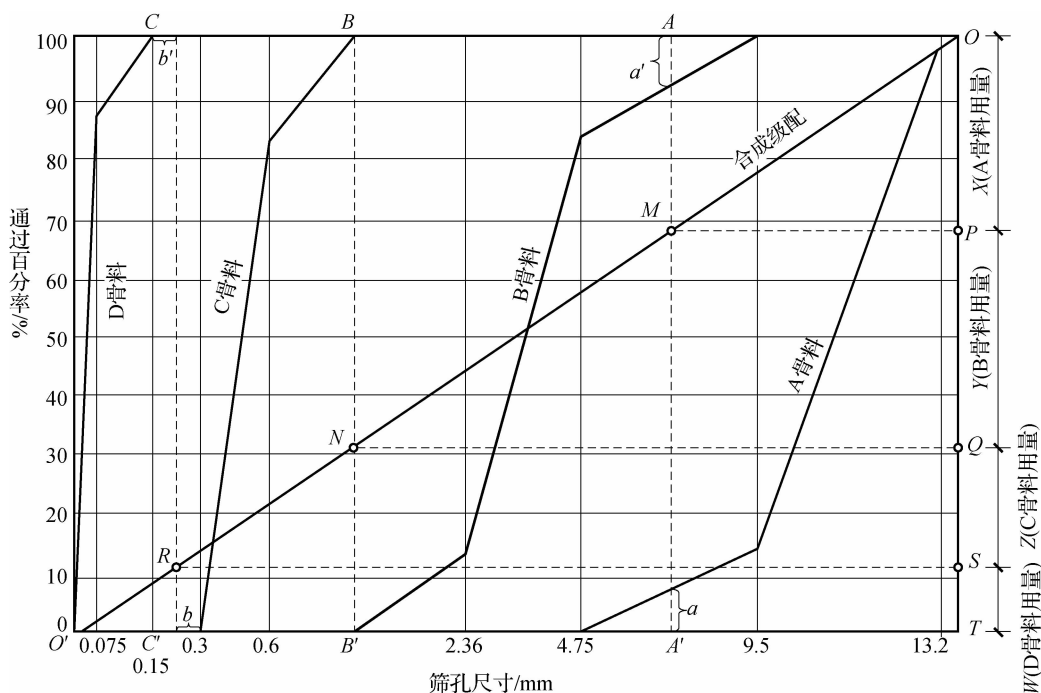


图 1-11 组成骨料级配曲线图和要求合成级配

(4)校核。按图解所得的各种骨料用量,校核计算所得合成级配是否符合要求。如不能符合要求(超出级配范围),应调整各骨料的用量,重新计算。

### 1.4.3 矿质混合料组成配合比设计实例

#### 1. 试算法实例

**【例 1-3】** 用试算法确定各种矿质骨料的配合比。

**【解】** (1)原始资料。现有粗砂、细砂、矿粉三种矿质骨料,经筛分的分计筛余百分率与混合料要求的标准级配范围均见表 1-18。

表 1-18 原有骨料的分计筛余百分率与混合料要求的级配范围

筛孔尺寸/mm	粗砂分计筛余百分率/%	细砂分计筛余百分率/%	矿粉分计筛余百分率/%	标准级配范围通过百分率/%
4.75	—	—	—	95~100
2.36	42	—	—	65~85
1.18	35	0	—	45~65
0.6	18	5	—	30~52
0.3	5	50	—	17~37
0.15	—	20	—	11~28
0.075	—	25	20	8~12
<0.075	—	—	80	—



(2)计算要求。

①用试算法确定粗砂、细砂、矿粉三种矿质骨料在混合料中所占的比例。

②按例题给出的标准级配范围校核矿质混合料的计算结果,确定其是否符合级配范围,定出配合比。

(3)计算步骤。

①先将矿质混合料要求级配范围的通过百分率换算为筛余中值,计算结果见表 1-19。

表 1-19 原有骨料的筛余中值

筛孔尺寸/mm	要求级配范围通过率的中值/%	要求级配范围累计筛余中值/%	要求级配范围分计筛余中值/%
4.75	97.5	2.5	2.5
2.36	75.0	25.0	22.5
1.18	55.0	45.0	20.0
0.6	41.0	59.0	44.0
0.3	27.0	73.0	14.0
0.15	19.5	80.5	7.5
0.075	10.0	90.0	9.5
<0.075	—	—	10.0

②计算粗砂在矿质混合料中的用量比例。由表 1-18 可知,粗砂在 2.36 mm 筛孔上存留的分计筛余百分率达到 42%,它在粗砂中占优势。假定混合料中 2.36 mm 的粒径全部由粗砂组成,其他骨料均不含这种粒径,从表 1-19 查得规范规定的 2.36 mm 筛的分计筛余中值为 22.5%。设粗砂在矿质混合料中的用量比例为 X,则

$$m_{a(2.36)} X = M_{(2.36)}$$

$$X = \frac{M_{(2.36)}}{m_{a(2.36)}} = \frac{22.5}{42} = 53.6\%$$

③计算矿粉在矿质混合料中的用量比例。由表 1-18 可知,矿粉小于 0.075 mm 的粒径占优势,在小于 0.075 mm 筛孔上存留的分计筛余百分率达到 80%。假定混合料中小于 0.075 mm 的粒径全部由矿粉组成,其他骨料均不含这种粒径。从表 1-19 查得规范规定的小于 0.075 mm 筛的分计筛余中值为 10%。设矿粉在矿质混合料中的用量比例为 Z,则

$$m_{c(<0.075)} Z = M_{(<0.075)}$$

$$Z = \frac{M_{(<0.075)}}{m_{c(<0.075)}} = \frac{10}{80} = 12.5\%$$

④计算细砂在矿质混合料中的用量比例。

$$Y = 100 - (X + Z) = [100 - (53.6 + 12.5)]\% = 33.9\%$$

(4)校核。通过计算,矿质混合料中粗砂占 53.6%,矿粉占 12.5%,细砂占 33.9%,将这些百分率乘以各自的筛分结果,再将三种矿料的筛余百分率相加,可得到设计矿质混合料级配,详见表 1-20。

表 1-20 矿质混合料配合组成计算校核

筛孔尺寸 $d_i/\text{mm}$	粗 砂			细 砂			矿 粉			矿质混合料			标准级配范围 通过百分率/%		
	原来级配分计筛余 $m_{a(i)}/\%$	用量比例 $X/\%$	占混合料百分率 $m_{a(i)}/X/\%$	原来级配分计筛余 $m_{b(i)}/\%$	用量比例 $Y/\%$	占混合料百分率 $m_{b(i)}/Y/\%$	原来级配分计筛余 $m_{c(i)}/\%$	用量比例 $Z/\%$	占混合料百分率 $m_{c(i)}/Z/\%$	分计筛余百分率 $/\%$	累计筛余百分率 $/\%$	通过百分率 $/\%$			
4.75		53.6			33.9			12.5		100			95~100		
2.36	42		22.5								22.5	22.5	77.5	65~85	
1.18	35		18.8								18.8	41.3	58.7	45~65	
0.6	18		9.6	5			1.7				11.3	52.6	47.4	30~52	
0.3	5		2.7	50			16.9				19.6	72.2	27.8	17~37	
0.15				20			6.8				6.8	79.0	20.9	11~28	
0.075				25			8.5		20		2.5	11.0	90.0	9.9	8~12
<0.075									80		10.0	10.0	100	0	
校核	$\Sigma=100$		$\Sigma=53.6$	$\Sigma=100$		$\Sigma=33.9$	$\Sigma=100$		$\Sigma=12.5$	$\Sigma=100$					

根据校核,结果符合级配范围要求。如不符合要求应调整配合比例,直到达到要求为止。如经几次调整确实不能符合级配要求,应调整或增加骨料品种。

## 2. 修正平衡面积法实例

**【例 1-4】** 试用修正平衡面积法求某高速公路沥青混合料路面用矿质混合料的配合比。

**【解】** (1)原始资料。

①现有碎石、石屑、矿粉等矿料,筛分试验得到各粒径通过百分率见表 1-21。

表 1-21 原有矿质骨料级配

材料组成	通过下列筛孔尺寸/mm,质量百分率/%										
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
9.5~19.0 mm 碎石	100	86.9	58.4	12.2	0	0	0	0	0	0	0
4.75~9.5 mm 碎石	100	100	100	85.5	4.2	0	0	0	0	0	0
2.36~4.75 mm 碎石	100	100	100	100	96.8	10.9	0	0	0	0	0
石屑	100	100	100	100	92.6	83.5	73.4	41.5	10.5	2.7	0
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	96.4	92.0	80.0

②设计级配范围见表 1-22。



表 1-22 矿质混合料要求级配范围和中值

级配名称	筛孔尺寸/mm										
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
设计级配中值	100	96.5	83.0	67.0	42.0	30.0	22.0	16.0	12.0	8.0	6.0
设计级配范围	100	93~	78~	62~	37~	25~	18~	13~	9~	6~	5~
		100	88	72	47	35	26	19	15	10	7

(2) 计算要求。

- ① 绘制级配曲线坐标图。
- ② 将各原有矿质材料筛分结果在坐标图上绘出级配曲线。
- ③ 按图解法求出各种骨料在矿质混合料中的用量。
- ④ 校核矿质混合料的计算结果, 确定其是否符合级配范围, 定出矿质混合料的配合比。

(3) 计算步骤。

- ① 绘制级配曲线图(见图 1-12), 在纵坐标上按算术坐标绘出通过百分率。

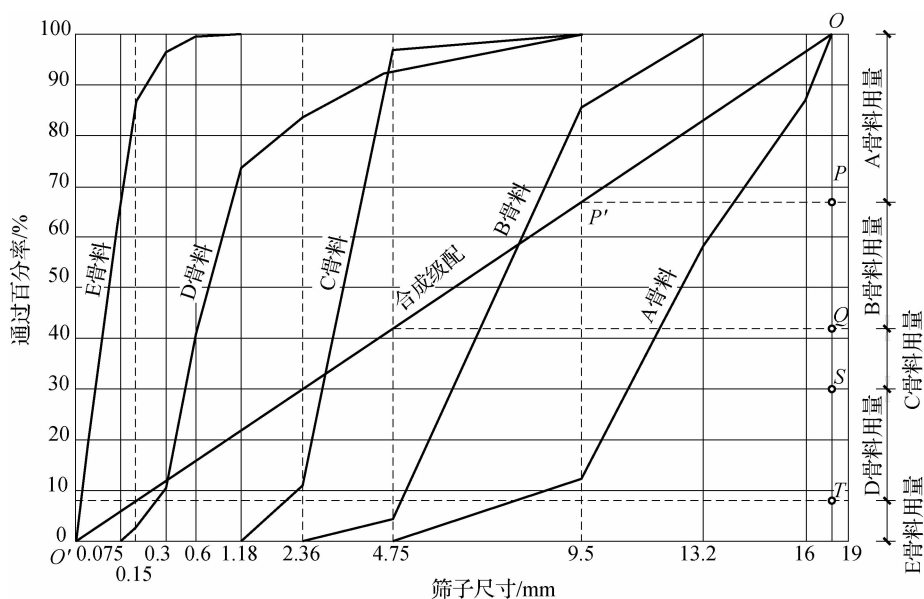


图 1-12 各组成材料和要求混合料级配曲线图

② 连对角线, 表示规范要求的级配中值。在纵坐标上标出规范规定的混合料各筛孔的要求通过百分率, 作水平线与对角线相交, 再从各交点作垂线交于横坐标上, 确定各筛孔在横坐标上的位置。

③ 将碎石、石屑和矿粉的级配曲线绘于图 1-12 上, 骨料 A, B, C, D, E 分别表示 9.5~19.0 mm 碎石、4.75~9.5 mm 碎石、2.36~4.75 mm 碎石、石屑和矿粉。

④ 在 9.5~19.0 mm 碎石和 4.75~9.5 mm 碎石级配曲线相重叠部分作垂线, 使垂线截取两级配曲线的纵坐标值相等。自垂线与对角线交点引一水平线, 与纵坐标交于 P 点, PP' 长度为 33%, 即为 9.5~19.0 mm 碎石的用量。同理, 求出 4.75~9.5 mm 碎石的用量为

26%, 2.36~4.75 mm 碎石的用量为 10%, 石屑的用量为 24%, 矿粉的用量为 7%。

⑤根据图解法求得的各骨料用量百分率,列表进行校核计算,见表 1-23。

表 1-23 矿质混合料组合计算

材料及组成		通过下列筛孔尺寸/mm,质量百分率/%										
骨料规格	比例/%	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
原材料级配	9.5~19.0 mm 碎石	100.0	100.0	86.9	58.4	12.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4.75~9.5 mm 碎石	100.0	100.0	100.0	100.0	85.5	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.36~4.75 mm 碎石	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0
	石屑	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.6	83.5	73.4	41.5	10.5	2.7
	矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.4	92.0
各种骨料在矿质混合料中的级配	9.5~19.0 mm 碎石	33.0	33.0	28.7	19.3	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4.75~9.5 mm 碎石	26.0	26.0	26.0	26.0	22.2	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2.36~4.75 mm 碎石	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.7	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	石屑	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	22.2	20.0	17.6	10.0	2.5	0.6
	矿粉	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.7	6.4
合成级配		100	95.7	86.3	67.4	41.0	27.7	24.1	17.1	10.0	7.5	5.4
设计级配中值		100.0	96.5	83.0	67.0	42.0	30.0	22.0	16.0	12.0	8.0	6.0
设计级配范围		100.0	93.0~100.0	78.0~88.0	62.0~72.0	37.0~47.0	25.0~35.0	18.0~26.0	13.0~19.0	9.0~15.0	6.0~10.0	5.0~7.0

(4)校核。将表 1-23 计算得到合成级配通过百分率,绘于规范要求的级配曲线中,如图 1-13 所示。从图 1-13 中可以看出,合成级配曲线完全在规范要求的级配范围之内且接近中值,呈一光滑平顺的曲线。确定矿质混合料配合比为 9.5~19.0 mm 碎石 : 4.75~9.5 mm 碎石 : 2.36~4.75 mm 碎石 : 石屑 : 矿粉=33 : 26 : 10 : 24 : 7。

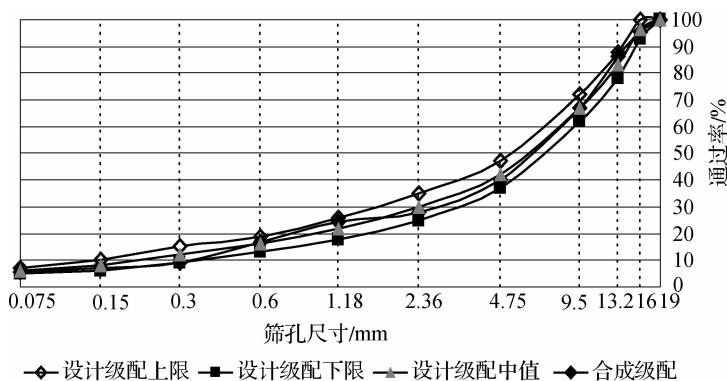


图 1-13 要求级配曲线和合成级配曲线

### 思考与练习

1. 岩石的主要物理常数有哪些？简述它们的含义。
2. 影响岩石抗压强度的主要因素(内因、外因)有哪些？
3. 道路用岩石的技术等级如何确定？
4. 骨料的主要物理常数有哪些？简述它们的含义。
5. 解释“级配”的含义，简述骨料级配的表示方法。
6. 如何确定骨料的细度模数？
7. 骨料磨光值、磨耗值和冲击值表示什么性能？这些数值对路面抗滑层用骨料有什么实际意义？
8. 岩石孔隙率与骨料空隙率的含义有何不同？
9. 简述矿粉和粉煤灰的工程应用。
10. 简述用试算法进行矿质混合料设计的基本步骤。
11. 简述用修正平衡面积法进行矿质混合料设计的基本步骤。
12. 某工程用石灰石，经饱水抗压强度(5 cm×5 cm 圆柱体试件)检验，平均极限荷载分别为 178 kN、181 kN、173 kN、177 kN、188 kN、184 kN，洛杉矶磨耗值为 33，试确定该石灰石的技术等级。
13. 根据某桥梁工地用细骨料的筛分数据，完成表 1-24 的内容，计算其细度模数，并判别其规格。

表 1-24 某细骨料筛分结果

项 目	筛孔尺寸/mm									
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	筛底	总计
筛余质量/g	0	15	63	99	105	115	75	22	6	500
分计筛余/%										
累计筛余/%										
通过百分率/%										

14. 试用试算法确定下列矿质混合料的配合比。

(1) 原始资料。矿质骨料筛分结果和标准级配范围见表 1-25。

表 1-25 某矿质骨料的筛分结果和标准级配范围

材料名称		筛孔尺寸/mm									
		16.0	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
累计筛余 /%	碎石	5	55	85	90	92	94	96	98	100	
	砂			18	38	47	65	82	90	99	1
	矿粉								3	12	88
标准级配范围/%		0~5	20~30	45~50	50~65	60~75	70~82	79~87	86~92	91~96	4~9

(2) 计算要求。

① 用试算法确定碎石、砂、矿粉三种矿质骨料在混合料中所占的比例。

② 按题给出的标准级配范围校核矿质混合料的计算结果, 确定其是否符合级配要求, 定出配合比。

15. 试用“修正平衡面积法”确定下列矿质混合料的配合比。

(1) 原始资料。矿质骨料筛分结果和混合料标准级配范围见表 1-26。

表 1-26 三种矿质骨料的筛分结果和混合料标准级配范围

材料名称	筛孔尺寸/mm									
	16.0	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
	通过百分率/%									
碎石	100	95	63	28	8	2	1	0	0	0
砂	100	100	100	100	100	90	60	35	10	1
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	97	88
标准级配范围/%	100	95~100	70~88	48~68	36~53	24~41	18~30	12~22	8~16	4~8

(2) 计算要求。

① 绘制级配曲线坐标图。

② 绘制级配曲线。

③ 按图解法求出各种骨料在矿质混合料中的用量。

④ 校核。



## 模块2 胶凝材料

### 学习目标

- 了解各种胶凝材料的含义和分类。
- 掌握各种胶凝材料的技术性质及其特点。
- 了解各种胶凝材料的应用范围与检测标准。

在土木工程中,把经过一系列的物理、化学作用后,由液体或膏状体变为坚硬的固体,同时能将砂、石、砖、砌块等散粒或块状材料胶结成具有一定机械强度的整体的材料,统称为胶凝材料。

胶凝材料品种繁多,按化学成分可分为有机胶凝材料和无机胶凝材料两大类,其中无机胶凝材料按硬化条件又可分为气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料两类。气硬性胶凝材料是指只能在空气中硬化并保持或继续提高其强度的胶凝材料,如石灰、石膏、水玻璃等。气硬性胶凝材料一般只适合于地上或干燥环境中,不宜用于潮湿环境,更不可用于水中。水硬性胶凝材料是指不仅能在空气中硬化,而且能更好地在水中硬化并保持或继续提高其强度的胶凝材料,如水泥。水硬性胶凝材料既适用于地上,也适用于地下或水中。

### 2.1 气硬性胶凝材料

#### 2.1.1 石灰

石灰(见图 2-1)是一种以氧化钙为主要成分的气硬性胶凝材料,是由石灰石、白云石、白垩、贝壳等碳酸钙含量高的原料,经  $900\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  煅烧而成。石灰是人类最早应用的胶凝材料。

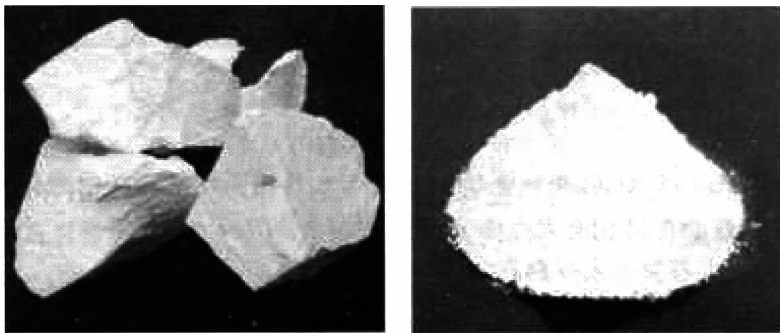


图 2-1 石灰

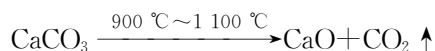
## 1. 石灰的生产与分类

### 1) 原料

生产石灰的原料有两种:一是天然原料,以  $\text{CaCO}_3$  为主要成分的矿物、岩石(如石灰岩、白云岩)或贝壳等;二是化工副产品,如电石渣(用碳化钙制取乙炔时产生的,其主要成分是氢氧化钙)。

### 2) 生产过程

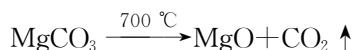
将主要成分为  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$  的岩石经高温煅烧(加热至  $900\text{ }^\circ\text{C}$  以上),逸出  $\text{CO}_2$  气体,得到的白色或灰白色的块状材料即为生石灰,其主要化学成分为  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ 。



在上述反应过程中, $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{CO}_2$  的质量比为  $100:56:44$ ,即质量减少  $44\%$ ,而在正常煅烧过程中,体积只减少约  $15\%$ ,所以生石灰具有多孔结构。石灰的生产过程中,对质量有影响的因素有:煅烧的温度和时间、石灰岩中  $\text{MgCO}_3$  的含量及黏土杂质的含量。

$\text{CaCO}_3$  在  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时开始分解,但速度较慢。所以,煅烧温度宜控制在  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C} \sim 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 。温度较低、煅烧时间不足、石灰岩原料尺寸过大、装料过多等因素,会产生欠火石灰。欠火石灰中  $\text{CaCO}_3$  尚未完全分解,未分解的  $\text{CaCO}_3$  没有活性,从而降低了石灰的有效成分含量。温度过高或煅烧时间过长时,则会产生过火石灰。随煅烧温度的提高和时间的延长,已分解的  $\text{CaO}$  体积会收缩,毛体积密度将增大,质地致密,熟化速度变慢。若原料中含有较多的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等黏土杂质,则会在表面形成熔融的玻璃物质,从而使石灰与水反应的速度变得更慢(需数天或数月)。过火石灰如用于工程上,其细小颗粒会在已经硬化的浆体中吸收水分,发生水化反应而体积膨胀,引起局部鼓泡或脱落,影响工程质量。

在石灰的原料中,除主要成分  $\text{CaCO}_3$  外,常含有  $\text{MgCO}_3$ 。



煅烧过程中  $\text{MgCO}_3$  分解出  $\text{MgO}$ ,存在于石灰中。根据石灰中  $\text{MgO}$  含量的多少,将石灰分为钙质石灰、镁质石灰。镁质石灰熟化较慢,但硬化后强度稍高。用于土木工程中的多为钙质石灰。

### 3) 石灰的分类

(1)按石灰的加工方法分类。生石灰呈白色或灰色块状,为便于使用,块状生石灰常需加工成生石灰粉、消石灰粉或石灰膏。块状生石灰是由原料煅烧而成的原产品,主要成分是  $\text{CaO}$ ;生石灰粉是由块状生石灰磨细而得到的细粉,其主要成分是  $\text{CaO}$ ;消石灰粉是块状生石灰用适量水熟化而得到的粉末,又称熟石灰,其主要成分是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;石灰膏是块状生石灰用较多的水(为生石灰体积的  $3\sim 4$  倍)熟化而得到的膏状物,也称石灰浆,其主要成分是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。

(2)按石灰中  $\text{MgO}$  的含量多少分类。由于生产原料中常含有  $\text{MgCO}_3$ ,因此生石灰中还含有次要成分  $\text{MgO}$ 。根据  $\text{MgO}$  含量的多少,生石灰分为钙质石灰和镁质石灰。钙质石灰主要由  $\text{CaO}$  或  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组成,而不添加任何水硬性的或火山灰质的材料。镁质石灰主要由  $\text{CaO}$  和  $\text{Mg}(\text{MgO}>5\%)$  或  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{MgO}$  组成,而不添加任何水硬性的或火山灰质的材料。根据化学成分的含量每类分成各个等级,见表 2-1。

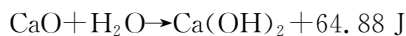
表 2-1 建筑生石灰的分类

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

## 2. 石灰的熟化与硬化

### 1) 熟化过程

块状生石灰在使用前都要加水消解,这一过程称为消解或熟化,也可称之为淋灰,经消解后的石灰称为消石灰或熟石灰,其化学反应式为



生石灰在熟化过程中有两个显著的特点:一是体积膨胀大(1~2.5倍);二是放热量大,放热速度快。煅烧良好、CaO含量高、杂质含量小的生石灰,其熟化速度快,放热量和体积增大也多。此外,熟化速度还取决于熟化池中的温度,温度越高,熟化速度越快。

### 2) 熟化方法

(1) 经过筛与陈伏后制成石灰膏。石灰膏在储灰池中储存半个月的过程称为陈伏。石灰中不可避免含有未分解的  $\text{CaCO}_3$  及过火的石灰颗粒,为消除这类杂质的危害,在使用石灰膏前应进行过筛和陈伏。即在化灰池或熟化机中加水,拌制成石灰浆,熟化的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  经筛网过滤(除渣)流入储灰池,在储灰池中沉淀陈伏成膏状材料,即石灰膏。陈伏期间,石灰膏表面应保留一层水,或用其他材料覆盖,避免石灰膏与空气接触而导致碳化。一般情况下,1 kg 的生石灰可化成 1.5~3 L 的石灰膏。石灰膏可用来拌制砌筑砂浆、抹面砂浆,也可以掺入较多的水制成石灰乳液用于粉刷。

(2) 制成消石灰粉。将生石灰淋以适当的水,消解成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,再经磨细、筛分而得到干粉,称为消石灰粉或熟石灰粉。

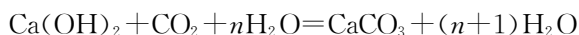
消石灰粉也需放置一段时间,待进一步熟化后使用。由于其熟化未必充分,不宜用于拌制砂浆、灰浆。消石灰粉常用于拌制石灰土、三合土。

### 3) 石灰的硬化

石灰浆在空气中的硬化是物理变化过程——“干燥结晶”和化学反应过程——“碳化硬化”两个同时进行的过程。

(1) 干燥结晶过程。石灰膏中的游离水分一部分蒸发掉,一部分被吸收。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  从过饱和溶液中结晶析出,结晶颗粒逐渐靠拢结合成固体,强度随之提高。

(2) 碳化硬化过程。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与空气中的  $\text{CO}_2$  反应生成不溶于水的、强度和硬度较高的  $\text{CaCO}_3$ ,析出的水分逐渐蒸发,其反应式为



这个反应实际是  $\text{CO}_2$  与水结合形成  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,再与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  作用生成  $\text{CaCO}_3$ 。如果没有水,这个反应就不能进行。碳化过程是由表及里,但表层生成的  $\text{CaCO}_3$  结晶阻碍了  $\text{CO}_2$  的深入,也影响了内部水分的蒸发,所以碳化过程长时间只限于表面。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的结晶作

用则主要发生在内部。石灰硬化过程的两个主要特点：一是硬化速度慢，二是体积收缩大。

从以上的石灰硬化过程可以看出，石灰的硬化只能在空气中进行，也只有在空气中才能继续发展提高其强度，所以石灰只能用于干燥环境的地面建筑物、构筑物，而不能用于水中或潮湿环境中。

### 3. 石灰的技术指标

#### 1) 建筑生石灰

根据现行建材标准《建筑生石灰》(JC/T 479—2013)，建筑生石灰的化学成分应符合表 2-2 的要求，物理性质应符合表 2-3 的要求。

表 2-2 建筑生石灰的化学成分

单位：%

名 称	CaO+MgO	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
CL 90	≥90	≤5	≤4	≤2
CL 85	≥85	≤5	≤7	≤2
CL 75	≥75	≤5	≤12	≤2
ML 85	≥85	>5	≤7	≤2
ML 80	≥80	>5	≤7	≤2

表 2-3 建筑生石灰的物理性质

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

#### 2) 建筑消石灰

根据现行建材标准《建筑消石灰》(JC/T 481—2013)，建筑消石灰分类按扣除游离水和结合水后(CaO+MgO)的百分含量加以分类，见表 2-4。

表 2-4 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

建筑消石灰的化学成分应符合表 2-5 的要求,物理性质应符合表 2-6 的要求。

表 2-5 建筑消石灰的化学成分

名称	CaO+MgO	MgO	SO <sub>3</sub>
HCL 90	≥90	≤5	≤2
HCL 85	≥85		
HCL 75	≥75		
HML 85	≥85	>5	≤2
HML 80	≥80		

表 2-6 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. 石灰的技术特性

石灰与其他胶凝材料相比具有以下特性。

##### 1) 保水性、可塑性好

生石灰熟化为石灰浆时,能自动形成颗粒极细的呈胶体分散状态的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,表面吸附一层厚的水膜,因而保水性能好,且水膜层也大大降低了颗粒间的摩擦力。因此,用石灰膏制成的石灰砂浆具有良好的保水性和可塑性。在水泥砂浆中掺入石灰膏,可使砂浆的保水性和可塑性显著提高。

##### 2) 硬化慢、强度低

石灰浆体硬化过程的特点之一就是硬化速度慢。原因是空气中的  $\text{CO}_2$  浓度低,且浆体碳化是由表及里,在表面形成较致密的壳,使外部的  $\text{CO}_2$  较难进入其内部,同时内部的水分也不易蒸发,所以硬化缓慢。碳浆体硬化后的强度也不高,如 1:3 石灰砂浆 28 d 的抗压强



度通常只有 0.2~0.5 MPa。

### 3) 体积收缩大

体积收缩大是石灰在硬化过程中的另一特点,一方面是由于蒸发大量的游离水而引起显著的收缩;另一方面碳化也会产生收缩。所以石灰除调成石灰乳液做薄层涂刷外,不宜单独使用,常掺入砂、纸筋等材料以减少收缩,限制裂缝的扩展。

### 4) 耐水性差

石灰浆体在硬化过程中的较长时间,主要成分仍是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (表层是  $\text{CaCO}_3$ ), 由于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  易溶于水,所以石灰的耐水性较差。硬化中的石灰若长期受到水的作用,会导致强度降低,甚至会溃散。

### 5) 吸湿性强

生石灰极易吸收空气中的水分而熟化成熟石灰粉,所以长期存放生石灰应处于密闭条件下,并应注意防潮、防水。

## 5. 石灰的技术应用

### 1) 拌制灰浆、砂浆

如麻刀灰、纸筋灰、石灰砂浆、水泥石灰混合砂浆等,用于砌筑工程、抹面工程。

### 2) 拌制灰土、三合土

利用石灰与黏性土可拌制成灰土;利用石灰、黏土与砂石或碎砖、炉渣等填料可拌制成三合土或碎砖三合土;利用石灰与粉煤灰、黏性土可拌制成粉煤灰石灰土;利用石灰与粉煤灰、砂、碎石可拌制成粉煤灰碎石土等,大量应用于建筑物基础、地面、道路等的垫层,地基的换土处理等。为方便石灰与黏土等的拌和,宜用磨细的生石灰或消石灰粉,磨细的生石灰还可使灰土和三合土有较高的紧密度、强度和耐水性。

### 3) 建筑生石灰粉

生石灰磨成的细粉称为建筑生石灰粉。建筑生石灰粉加入适量的水拌成的石灰浆可以直接使用,主要是因为粉状石灰熟化速度较快,熟化放出的热促使硬化进一步加快。硬化后的强度要比石灰膏硬化后的强度高。

### 4) 制作碳化石灰板材

碳化石灰板材是将磨细的生石灰掺 30%~40% 的短玻璃纤维或轻质骨料加水搅拌,振动成形,然后利用石灰窑的废气碳化 12~24 h 而成的一种轻质板材。它能锯、能钉,适宜用作非承重内隔墙板、天花板等。

### 5) 生产硅酸盐制品

将磨细的生石灰或消石灰粉与天然砂或粒化高炉矿渣、炉渣、粉煤灰等硅质材料配合均匀,加水搅拌,再经陈伏(使生石灰充分熟化)、加压成形和压蒸处理可制成蒸压灰砂砖。灰砂砖呈灰白色。如果掺入耐碱颜料,可制成各种颜色。它的尺寸与普通黏土砖相同,也可制成其他形状的砌块,主要用作墙体材料。

## 6. 石灰的储运

石灰保管时应分类存放在干燥的仓库内,不宜长期存储。运输过程中要采取防水措施。由于生石灰遇水发生反应会放出大量的热,所以生石灰不宜与易燃易爆物品共存储、运输,以免酿成火灾。

石灰存放时,可制成石灰膏密封或采取在上面覆盖砂土等措施与空气隔绝,防止硬化。

## 2.1.2 水玻璃

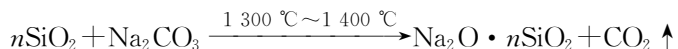
### 1. 水玻璃的生产与组成

水玻璃俗称“泡花碱”，如图 2-2 所示，是由碱金属氧化物和  $\text{SiO}_2$  结合而成的能溶于水的一种金属硅酸盐物质，可以作为矿物黏结剂使用。根据碱金属氧化物种类的不同，水玻璃分为硅酸钠水玻璃和硅酸钾水玻璃，工程中以硅酸钠水玻璃 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) 最为常用。



图 2-2 水玻璃

生产水玻璃的主要原料是石英砂、纯碱。将原料磨细后按比例配合，在玻璃熔炉内熔融而生成硅酸钠，冷却后得到固态水玻璃，然后在水中加热溶解而成液体水玻璃。其反应式为



式中， $n$  为水玻璃模数，即  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔数比，其值的大小决定水玻璃的性质。 $n$  值越大，水玻璃的黏度越大，黏结能力越强，易分解、硬化，但也难溶解，体积收缩也大。土木工程中常用水玻璃的  $n$  值一般为 2.5~2.8。水玻璃密度为  $1.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ 。

### 2. 水玻璃的性质

#### 1) 黏结强度较高

水玻璃有良好的黏结能力，硬化时析出的硅酸凝胶呈空间网络结构，具有较高的胶凝能力，因而黏结强度高。此外，硅酸凝胶还有堵塞毛细孔隙防止水渗透的作用。

#### 2) 耐热性好

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。故水玻璃常用于配置耐热混凝土、耐热砂浆、耐热胶泥等。

#### 3) 耐酸性强

水玻璃能经受除氢氟酸、过热 ( $300\text{ }^\circ\text{C}$  以上) 磷酸、高级脂肪酸或油酸以外的几乎所有的无机酸和有机酸的作用，常用于配制水玻璃耐酸混凝土、耐酸砂浆、耐酸胶泥等。

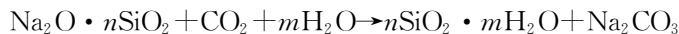
#### 4) 耐碱性、耐水性较差

水玻璃在加入氟硅酸钠后仍不能完全硬化，仍有一定量的水玻璃。由于水玻璃可溶于碱，且溶于水，硬化后的产物碳酸钠及氟化钠均可溶于水，所以水玻璃硬化后不耐碱、不耐水。为提高耐水性，可采用中等浓度的酸对已硬化的水玻璃进行酸洗处理。

### 3. 水玻璃的凝结硬化

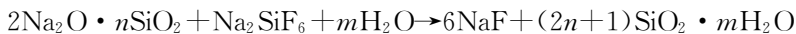
水玻璃在空气中的凝结硬化与石灰的凝结硬化非常相似，主要通过碳化和脱水结晶固结两个过程来实现。

水玻璃在空气中与  $\text{CO}_2$  作用,析出二氧化硅凝胶,凝胶因干燥而逐渐硬化,其反应式为



随着碳化反应的进行,硅胶含量增加,接着自由水分蒸发,硅胶脱水成固体而凝结硬化,其特点为速度慢(这是由于空气中  $\text{CO}_2$  浓度低,故碳化反应及整个凝结硬化过程十分缓慢)、体积收缩和强度低。

为加速水玻璃的凝结硬化速度和提高强度,使用水玻璃时一般要求加入固化剂氟硅酸钠,其反应式为



氟硅酸钠的掺量一般为 12%~15%。掺量少,凝结硬化慢,且强度低;掺量太多,则凝结硬化过快,不便施工操作,而且硬化后的早期强度虽高,但后期强度明显降低。因此,使用时应严格控制固化剂的掺量,并根据气温、湿度、水玻璃的模数、密度等在上述范围内做适当调整。即气温高、模数大、密度小时选下限,反之亦然。加入氟硅酸钠后,水玻璃的初凝时间可缩短到 30~60 min,终凝时间可缩短到 240~360 min,7 d 基本达到最高强度。

#### 4. 水玻璃的应用

水玻璃的用途非常广泛,几乎遍及国民经济的各个部门。在建筑行业中用于制造快干水泥、耐酸水泥防水油、土壤固化剂、耐火材料等。

(1) 涂刷材料表面,提高抗风化能力。水玻璃溶液涂刷或浸渍材料后,能渗入缝隙和孔隙中,固化的硅凝胶能堵塞毛细孔通道,提高材料的密度和强度,从而提高材料的抗风化能力。但水玻璃不得用来涂刷或浸渍石膏制品,因为水玻璃与石膏反应生成的硫酸钠会在制品孔隙内结晶膨胀,导致石膏制品开裂破坏。

(2) 加固土壤。将水玻璃与氯化钙溶液交替注入土壤中,两种溶液迅速反应生成硅胶和硅酸钙凝胶,起到胶结和填充孔隙的作用,使土壤的强度和承载能力提高。常用于粉土、砂土和填土的地基加固,称为双液注浆。

(3) 配制速凝防水剂。水玻璃可与多种矾配制成速凝防水剂,用于堵漏、填缝等局部抢修工作。这种多矾防水剂的凝结速度很快,一般为几分钟,其中四矾防水剂的凝结时间不超过 1 min,故工地上使用时必须做到即配即用。

(4) 配制耐酸胶泥、耐酸砂浆和耐酸混凝土。耐酸胶泥是用水玻璃和耐酸粉料(常用石英粉)配制而成的,与耐酸砂浆和混凝土一样,主要用于有耐酸要求的工程,如硫酸池等。

(5) 配制耐热胶泥、耐热砂浆和耐热混凝土。耐热胶泥主要用于耐火材料的砌筑和修补。水玻璃耐热砂浆和混凝土主要用于高炉基础和其他有耐热要求的结构部位。

(6) 防腐工程应用。改性水玻璃耐酸泥是耐酸腐蚀的重要材料,主要特性是耐酸、耐高温、密实抗渗、价格低廉、使用方便,可拌和成耐酸胶泥、耐酸砂浆和耐酸混凝土,适用于各种结构的防腐蚀工程,是贮酸池、耐酸地坪以及耐酸表面砌筑的理想材料。

### 2.1.3 石膏

石膏(见图 2-3)在建筑工程中的应用也有较长的历史。由于其具有轻质、隔热、吸声、耐火、色白且质地细腻等一系列优良性能,加上我国石膏矿藏(如南京石膏矿、大波口石膏矿、平邑石膏矿等)储量居世界首位,所以石膏的应用前景十分广阔。





图 2-3 石膏

石膏的主要化学成分是硫酸钙,它在自然界中以两种稳定形态存在于石膏矿石中:一是天然无水石膏( $\text{CaSO}_4$ ),也称生石膏、硬石膏;二是天然二水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),也称软石膏。天然无水石膏只可用于生产石膏水泥,而天然二水石膏可制造各种性质的石膏。

### 1. 石膏的生产

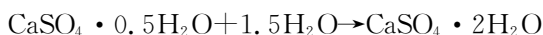
将天然二水石膏(或主要成分为二水石膏的化工石膏)加热,由于加热方式和温度的不同,可生产不同性质的石膏品种。当温度为  $65\text{ }^\circ\text{C} \sim 75\text{ }^\circ\text{C}$  时开始脱水,至  $107\text{ }^\circ\text{C} \sim 170\text{ }^\circ\text{C}$  时脱去部分结晶水,得到  $\beta$  型半水石膏( $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ );当加热温度为  $170\text{ }^\circ\text{C} \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$  时,石膏继续脱水成为可溶性硬石膏,与水调和后仍能很快凝结硬化;当加热温度升高到  $200\text{ }^\circ\text{C} \sim 250\text{ }^\circ\text{C}$  时,石膏中残留很少的水,凝结硬化非常缓慢;当加热温度高于  $400\text{ }^\circ\text{C}$  时,石膏完全失去水分成为不溶性硬石膏,失去凝结硬化能力,成为死烧石膏;当温度高于  $800\text{ }^\circ\text{C}$  时,部分石膏分解出的氧化钙起催化作用,所得产品又重新具有凝结硬化性能;当温度高于  $1\ 600\text{ }^\circ\text{C}$  时, $\text{CaSO}_4$  全部分解为石灰。目前,建筑工程中常用的石膏为  $\beta$  型半水石膏,即建筑石膏,且  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  的含量(质量分数)应不小于  $60\%$ 。

建筑石膏呈白色粉末状,密度为  $2.60 \sim 2.75\text{ g/cm}^3$ ,堆积密度为  $800 \sim 1\ 000\text{ kg/m}^3$ 。建筑石膏中杂质少、色白的,可作为模型石膏,用于建筑装饰及陶瓷的制坯工艺。

若将二水石膏置于蒸压釜中,在  $0.13\text{ MPa}$  的水蒸气中( $124\text{ }^\circ\text{C}$ )脱水,得到的是晶粒较  $\beta$  型半水石膏粗大、使用时拌和和用水量少的半水石膏,称为  $\alpha$  型半水石膏。将此熟石膏磨细得到的白色粉末称为高强石膏。由于高强石膏拌和和用水量少(石膏用量的  $35\% \sim 45\%$ ),硬化后有较高的密实度,所以强度较高,7 d 可达  $15 \sim 40\text{ MPa}$ 。

### 2. 石膏的凝结与硬化

建筑石膏遇水将重新水化成二水石膏,反应式为



建筑石膏与适量的水混合成可塑的浆体,但很快就失去塑性、产生强度,并发展成为坚硬的固体。石膏的凝结硬化是一个连续的溶解、水化、胶化、结晶的过程。

半水石膏极易溶于水,加水后很快达到饱和溶液而析出溶解度低的二水石膏胶体。由于二水石膏的析出,溶液中的半水石膏转变为非饱和状态,这样,又有新的半水石膏溶解,接着继续重复水化、胶化的过程。随着析出的二水石膏胶体晶体的不断增多,彼此互相联结,使石膏具有了强度。同时溶液中的游离水分不断蒸发减少,结晶体之间的摩擦



力、黏结力逐渐增大,石膏强度也随之增加,至完全干燥时强度停止发展,最后成为坚硬的固体。

石膏浆体的凝结硬化是一个连续进行的过程。从加水开始拌和到浆体开始失去可塑性的过程称为浆体的初凝,对应的这段时间称为初凝时间;从加水开始拌和到浆体完全失去可塑性,并开始产生强度的过程称为浆体的终凝,对应的时间称为浆体的终凝时间。建筑石膏凝结硬化较快,一般初凝不早于 3 min,终凝不迟于 30 min。

### 3. 石膏的技术性能

根据现行国家标准《建筑石膏》(GB/T 9776—2008),建筑石膏按原材料种类的分类和物理力学性能应分别符合表 2-7 和表 2-8 的要求。

表 2-7 建筑石膏的分类

类别	天然建筑石膏	脱硫建筑石膏	磷建筑石膏
代号	N	S	P

表 2-8 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. 石膏的特点

(1)孔隙率大、强度较低。为使石膏具有必要的可塑性,通常加水量比理论用水量多得多(加水量为石膏用量的 60%~80%,而理论用水量只为石膏用量的 18.6%),硬化后由于多余水分的蒸发,内部的孔隙率很大,因而强度较低。

(2)硬化后体积微膨胀。石膏在凝结过程中体积产生微膨胀,其膨胀率约为 1%。这一特性使石膏制品在硬化过程中不会产生裂缝,造型棱角清晰、饱满。

(3)防火性好,但耐火性差。由于硬化的石膏中结晶水含量较多,遇火时,这些结晶水吸收热量蒸发,形成蒸汽幕,阻止火势蔓延,同时表面生成的无水物为良好的绝缘体,起到防火作用。但二水石膏脱水后强度下降,故耐火性差。

(4)凝结硬化快。因建筑石膏初凝时间较短,为满足施工要求,常掺入缓凝剂以延长凝结时间。可掺入石膏用量 0.1%~0.2%的动物胶,或掺入 1%的亚硫酸盐酒精废液,也可以掺入硼砂或柠檬酸。掺入缓凝剂后,石膏制品的强度有所下降。若需加速凝固可掺入少量磨细的未经煅烧的石膏。

(5)保温性和吸声性好。建筑石膏孔隙率大,且孔隙多呈微细的毛细孔,所以导热系数小,保温、隔热性能好。同时,大量开口的毛细孔隙具有一定的吸声作用,因此建筑石膏还有良好的吸声性能。

(6)具有一定的调温、调湿性。由于建筑石膏热容量大,且由多孔而产生的呼吸功能使吸湿性增强,可起到调节室内温度、湿度的作用,创造舒适的工作和生活环境。



(7)耐水性差。由于建筑石膏硬化后的孔隙率较大,二水石膏又微溶于水,具有很强的吸湿性和吸水性,如果处在潮湿环境中,晶体间的黏结力削弱,强度显著降低,晶体遇水则溶解而引起石膏破坏。所以石膏及其制品的耐水性较差,不能用于潮湿环境中。

(8)可装饰性强。石膏呈白色,可以装饰干燥环境的室内墙面或顶棚,但受潮后颜色会变黄,失去装饰性。

### 5. 石膏的应用

(1)室内抹灰及粉刷。建筑石膏常被用于室内抹灰和粉刷。建筑石膏加砂、缓凝剂和水拌和成石膏砂浆,用于室内抹灰,其表面光滑、细腻、洁白、美观。石膏砂浆也可作为腻子用作油漆等的打底层。建筑石膏加缓凝剂和水拌和成石膏浆体,可作为室内粉刷的涂料。

(2)建筑装饰制品。建筑石膏具有凝结快、体积稳定、装饰性强、不老化、无污染等特点,常用于制造建筑雕塑、建筑装饰制品。

(3)石膏板。石膏板具有质轻、保温、防火、吸声、调节室内温度和湿度及制作方便等性能,应用较为广泛。常见的有:普通纸面石膏板、装饰石膏板、石膏空心条板、吸声用穿孔石膏板、耐水纸面石膏板、耐火纸面石膏板、石膏蔗渣板等。此外,各种新型的石膏板材仍在不断出现。

### 6. 石膏的验收与储运

建筑石膏一般采用袋装,可用具有防潮及不易破损的纸袋或其他复合袋包装;包装袋上应清楚标明产品标识、制造厂名、生产批号和出厂日期、质量等级、商标、防潮标志;运输、储存时不得受潮和混入杂物,不同等级的石膏应分别储运,不得混杂;石膏的储存期为3个月(自生产日期算)。超过3个月的石膏应重新进行质量检验,以确定等级。

### 7. 石膏制品的发展

石膏制品具有绿色环保、防火、防潮、阻燃、轻质、高强、易加工、可塑性好、装饰性强等特点,使得石膏及其制品倍受青睐,具有广阔的发展空间。当前石膏制品的发展趋势有:用于生产石膏砌块、石膏条板等新型墙体材料;石膏装饰材料,如各种高强、防潮、防火又具有环保功能的石膏线条、灯盘、门柱、门窗拱眉等装饰制品及具有吸音、防辐射、防火功能的石膏装饰板;具有轻质、高强、耐水、保温的石膏复合墙体,如轻钢龙骨纸面石膏板夹岩棉复合墙体,纤维石膏板或有膏刨花板等与龙骨的复合墙体,加气(或发泡)石膏保温板或砌块复合墙体,石膏与聚苯泡沫板、稻草板等复合的大板,这些石膏复合墙体正逐渐地取代传统的墙体材料。

## 2.2 水硬性胶凝材料

工程上主要的水硬性胶凝材料为水泥,水泥是由磨细的材料加入适量水成为塑性浆状后形成的,既能在空气中硬化,又能在水中硬化,并能把砂、石等材料牢固地胶结在一起。水泥种类很多,目前全世界有多达100多个水泥品种。水泥是主要的建筑材料之一,对社会发展和经济建设起着重要的作用。

水泥的分类方法有多种,按用途及性能可分为通用水泥和专用水泥两大类;按化学成分可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等,本单元任务主要介绍应用最广的硅酸盐系列水泥。

## 2.2.1 硅酸盐水泥

硅酸盐水泥是通用硅酸盐水泥的一种类型。通用硅酸盐水泥主要有硅酸盐水泥(分Ⅰ型、Ⅱ型,代号为P·Ⅰ、P·Ⅱ)、普通硅酸盐水泥(简称普通水泥,代号为P·O)、矿渣硅酸盐水泥(简称矿渣水泥,代号为P·S)、火山灰质硅酸盐水泥(简称火山灰水泥,代号为P·P)、粉煤灰硅酸盐水泥(简称粉煤灰水泥,代号为P·F)和复合硅酸盐水泥(简称复合水泥,代号为P·C)六种。

### 1. 硅酸盐水泥的生产工艺及组成

#### 1) 生产工艺

生产硅酸盐水泥的原料主要有石灰质原料、黏土质原料两大类,此外再配以辅助的铁质和硅质校正原料。其中石灰质原料主要提供CaO,包括石灰石、石灰质凝灰岩等;黏土质原料主要提供SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及少量的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,包括黏土、黏土质页岩、黄土等;铁质校正原料主要补充Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,包括铁矿粉、黄铁矿渣等;硅质校正原料主要补充SiO<sub>2</sub>,包括砂岩、粉砂岩等。

硅酸盐水泥生产过程是将原料按一定比例混合磨细,先制得具有适当化学成分的生料,再将生料在水泥窑(回转窑或立窑)中经过1400℃~1450℃的高温煅烧至部分熔融,冷却后而得硅酸盐水泥熟料(见图2-4),最后再加适量石膏(不超过水泥质量5%的石灰石或粒化矿渣)共同磨细至一定细度即得P·Ⅰ(P·Ⅱ)型硅酸盐水泥。水泥的生产过程可概括为“两磨一烧”,其生产工艺流程如图2-5所示。



图 2-4 硅酸盐水泥熟料

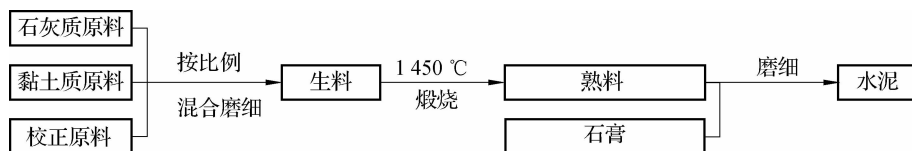


图 2-5 硅酸盐水泥生产工艺流程

#### 2) 硅酸盐水泥熟料的组成

生料开始加热时,自由水分逐渐蒸发而干燥,当温度上升到500℃~800℃时,首先是有机物被烧尽,其次是黏土分解形成无定型的SiO<sub>2</sub>及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,当温度到达800℃~1000℃时,石灰石进行分解形成CaO,并开始与黏土中SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>发生固相反应,随着温度的升高,固相反应加速,并逐渐生成2CaO·SiO<sub>2</sub>、3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。当温度达到1300℃时,固相反应结束。这时在物料中仍剩余一部分CaO未与其他

氧化物化合。当温度从  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$  升至  $1\ 450\ ^\circ\text{C}$  再降到  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ ，为烧成阶段，这时的  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  及  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  烧至部分熔融状态，出现液相，把剩余的  $\text{CaO}$  及部分  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  溶解于其中，在此液相中， $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  吸收  $\text{CaO}$  形成  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。此烧成阶段至关重要，需达到较高的温度并要保持一定的时间，否则，水泥熟料中  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  含量低，游离  $\text{CaO}$  含量高，对水泥的性能有较大的影响。

硅酸盐水泥熟料矿物成分及含量如下。

- (1) 硅酸三钙  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，简写为  $\text{C}_3\text{S}$ ，含量为  $45\% \sim 60\%$ 。
- (2) 硅酸二钙  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，简写为  $\text{C}_2\text{S}$ ，含量为  $15\% \sim 30\%$ 。
- (3) 铝酸三钙  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，简写为  $\text{C}_3\text{A}$ ，含量为  $6\% \sim 12\%$ 。
- (4) 铁铝酸四钙  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，简写为  $\text{C}_4\text{AF}$ ，含量为  $6\% \sim 8\%$ 。

在以上的矿物组成中，硅酸三钙和硅酸二钙的总含量占  $75\%$  以上，而铝酸三钙和铁铝酸四钙的总含量仅占  $25\%$  左右，硅酸盐占绝大部分，故名硅酸盐水泥。除上述主要熟料矿物成分外，水泥中还有少量的游离氧化钙、游离氧化镁，其含量过高会引起水泥体积安定性不良。水泥中还含有少量的碱 ( $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ )，碱含量高的水泥如果遇到活性骨料，易产生碱-骨料膨胀反应。所以水泥中游离氧化钙、游离氧化镁和碱的含量应加以限制。

各种矿物单独与水作用时，表现出不同的性能，见表 2-9。

表 2-9 硅酸盐水泥熟料矿物特性

矿物名称	密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	水化反应速率	水化放热量	强度	耐腐蚀性
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	3.25	快	大	高	差
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	3.28	慢	小	早期低后期高	好
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	3.04	最快	最大	低	最差
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	3.77	快	中	低	中

各熟料矿物的强度增长情况如图 2-6 所示。水化热的释放情况如图 2-7 所示。

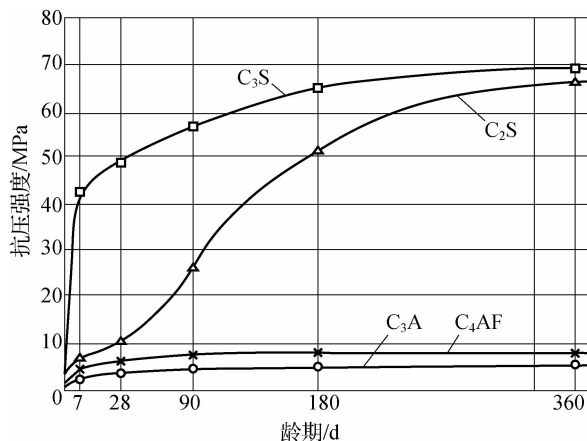


图 2-6 不同熟料矿物的强度增长曲线

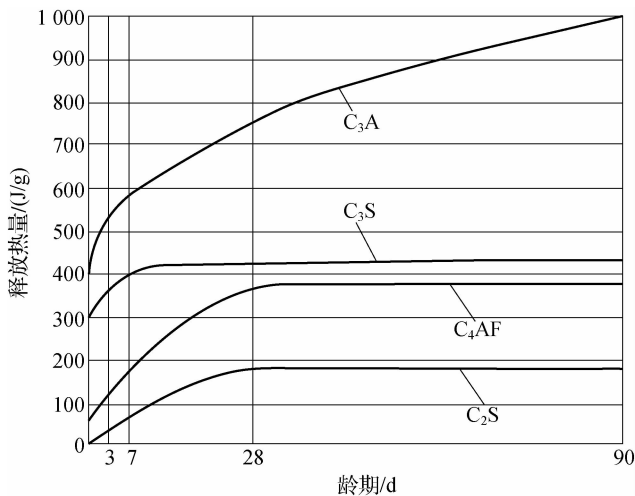


图 2-7 不同熟料矿物的水化热释放曲线

由表 2-9 及图 2-6、图 2-7 可知,不同熟料矿物单独与水作用的特性是不同的。

(1)  $C_3S$  的水化速度较快,早期强度高,28 d 强度可达一年强度的 70%~80%;水化热较大,且主要是早期放出,其含量也最高,是决定水泥性质的主要矿物。

(2)  $C_2S$  的水化速度最慢,水化热最小,且主要是后期放出,是保证水泥后期强度的主要矿物,且耐化学侵蚀性好。

(3)  $C_3A$  的凝结硬化速度最快(故需掺入适量石膏作为缓凝剂),也是水化热最大的矿物。其强度值最低,但强度成形最快,3 d 几乎接近最终强度。但其耐化学侵蚀性最差,且硬化时体积收缩最大。

(4)  $C_4AF$  的水化速度也较快,仅次于铝酸三钙,其水化热中等,且有利于提高水泥抗拉(折)强度。

水泥是几种熟料矿物的混合物,改变矿物成分间比例时,水泥性质即发生相应的变化,可制成不同性能的水泥。如增加  $C_3S$  含量,可制成高强、早强水泥(我国水泥标准规定的 R 型水泥);若增加  $C_2S$  含量而减少  $C_3S$  含量,水泥的强度发展慢,早期强度低,但后期强度高,其更大的优势是水化热降低;若提高  $C_4AF$  的含量,可制得抗折强度较高的道路水泥。

## 2. 硅酸盐水泥的凝结和硬化

硅酸盐水泥与适量的水拌和后,最初形成具有可塑性的浆体,随着水化反应的进行,水泥浆体逐渐变稠失去可塑性,但尚不具有强度,这一过程称为水泥的凝结。随后凝结了的水泥浆体开始产生强度,并逐渐发展成为坚硬的水泥石,这一过程称为硬化。水泥的水化贯穿凝结、硬化过程的始终,在几十年龄期的水泥制品中,仍有未水化的水泥颗粒。水泥的水化、凝结、硬化过程如图 2-8 所示。

### 1) 硅酸盐水泥的水化反应

硅酸盐水泥加水后,熟料矿物开始与水发生水化反应,生成水化产物,并放出一定的热量,其反应式如下。

(1) 硅酸三钙的水化。在水泥矿物中,硅酸三钙含量最高,它与水作用时,反应较快,水化放热量大,生成水化硅酸钙及氢氧化钙。

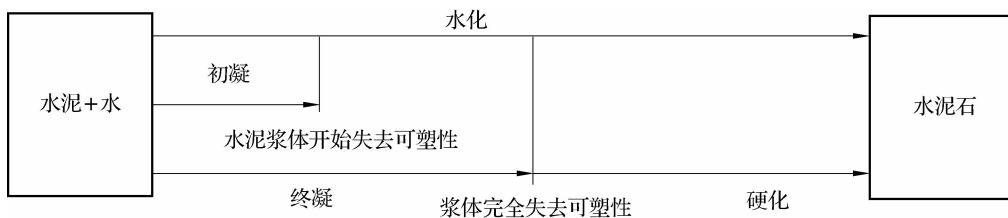
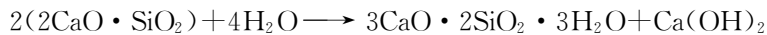


图 2-8 水泥的水化、凝结与硬化



(2) 硅酸二钙的水化。硅酸二钙的水化产物与硅酸三钙相同,但数量不同。水化反应较慢,水化放热量小。



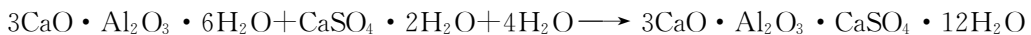
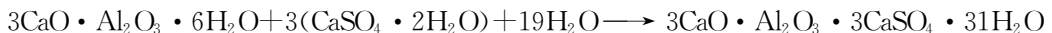
(3) 铝酸三钙的水化。铝酸三钙与水作用时,反应极快,水化放热量很大,生成水化铝酸三钙。水化铝酸三钙为晶体,易溶于水,它在石灰饱和溶液中能与氢氧化钙进一步反应,生成水化铝酸四钙。



(4) 铁铝酸四钙的水化。铁铝酸四钙与水作用时反应也较快,水化热中等,生成水化铝酸三钙及水化铁酸钙凝胶。



为调节凝结时间而掺入的适量石膏,与水化铝酸三钙反应生成高硫型水化硫铝酸钙(钙矾石)和单硫水化硫铝酸钙。



水化硫铝酸钙是难溶于水的针状晶体,它生成后即沉淀在熟料颗粒的周围,阻碍水化的进行,起到缓凝的作用。

综上所述,如果忽略一些次要的和少量的成分,则硅酸盐水泥与水作用后,生成的主要产物有: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。水泥完全水化后,水化硅酸钙约占 50%,氢氧化钙约占 25%,水化硫铝酸钙约占 7%。

## 2) 硅酸盐水泥的凝结与硬化过程

水泥的凝结硬化是个非常复杂的物理化学过程,可分为以下几个阶段,如图 2-9 所示。

水泥颗粒与水接触后,首先是最表层的水泥与水发生水化反应,生成水化产物,组成水泥-水-水化产物混合体系。反应初期,水化速度很快,不断形成新的水化产物扩散到水中,使混合体系很快成为水化产物的饱和溶液。此后,水泥继续水化所生成的产物不再溶解,而是以分散状态的颗粒析出,附在水泥粒子表面,形成凝胶膜包裹层,使水泥在一段时间内反应缓慢,水泥浆的可塑性基本上保持不变。

由于水化产物的不断增加,凝胶膜逐渐增厚而破裂并继续扩展,水泥粒子又在一段时间内加速水化,这一过程可重复多次。由水化产物组成的水泥凝胶在水泥颗粒之间形成了网状结构,水泥浆逐渐变稠,并失去塑性而出现凝结现象。此后,由于水泥水化反应的继续进行,水泥凝胶不断扩展而填充颗粒之间的孔隙,使毛细孔越来越少,水泥石就具有越来越高的强度和胶结能力。

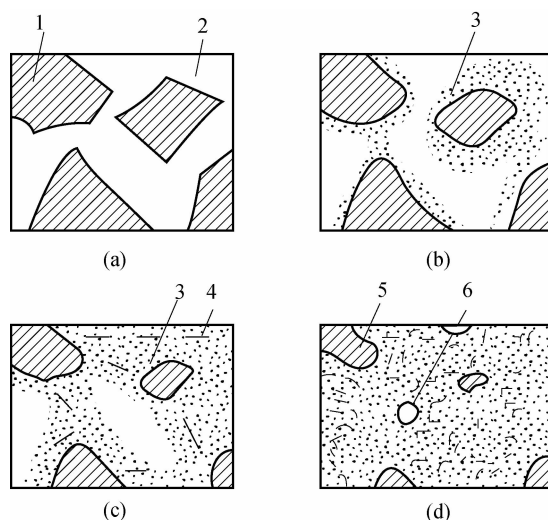


图 2-9 硅酸盐水泥的凝结硬化过程

1—水泥颗粒；2—自由水；3—凝胶；4—晶体[Ca(OH)<sub>2</sub>等]；5—毛细孔；6—气孔

综上所述,水泥的凝结硬化是一个由表及里,由快到慢的过程。较粗颗粒的内部很难完全水化。因此,硬化后的水泥石是由水泥水化产物凝胶体(内含凝胶孔)及结晶体、未完全水化的水泥颗粒、毛细孔(含毛细孔水)等组成的不均质结构体。

### 3) 影响硅酸盐水泥凝结硬化的因素

硅酸盐水泥的凝结硬化过程,也就是硅酸盐水泥强度发展的过程,受到许多因素的影响,有内部的和外界的,其主要影响因素分析如下。

(1) 矿物组成。矿物组成是影响水泥凝结硬化的主要内因,如前所述,不同的熟料矿物成分单独与水作用时,水化反应的速度、强度发展的规律、水化放热是不同的,因此改变水泥的矿物组成,其凝结硬化将产生明显的变化。

(2) 水泥细度。水泥颗粒的粗细程度直接影响水泥的水化、凝结硬化、强度、干缩及水化热等。水泥的颗粒粒径一般为  $7 \sim 200 \mu\text{m}$ ,颗粒越细,与水接触的比表面积越大,水化速度就越快越充分,水泥的早期强度和后期强度就越高。但水泥颗粒过细,在生产过程中消耗的能量会增多,机械损耗也会加大,生产成本便会增加,且水泥颗粒越细,需水性越大,在硬化时收缩也增大,因而水泥的细度应适中。

(3) 石膏掺量。石膏掺入水泥中的目的是为了延缓水泥的凝结、硬化速度,调节水泥的凝结时间。需注意的是,石膏的掺入要适量,掺量过少,不足以抑制  $\text{C}_3\text{A}$  的水化速度;掺量过多,其本身会生成一种促凝物质,反而使水泥快凝;如果石膏掺量超过规定的限量,则会在水泥硬化过程中仍有一部分石膏与  $\text{C}_3\text{A}$  及  $\text{C}_4\text{AF}$  的水化产物  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  继续反应生成水化硫铝酸钙针状晶体,体积膨胀,使水泥石强度降低,严重时还会导致水泥体积安定性不良。适宜的石膏掺量主要取决于水泥中  $\text{C}_3\text{A}$  的含量和石膏的品种及质量,同时与水泥细度及熟料中  $\text{SO}_3$  的含量有关,一般生产水泥时石膏掺量占水泥质量的  $3\% \sim 5\%$ ,具体掺量应通过试验确定。

(4) 水胶比。拌和水泥浆时,水与水泥的质量比称为水胶比。从理论上讲,水泥完全水化所需的水胶比为 0.22 左右。但拌和水泥浆时,为使浆体具有一定的塑性和流动性,所加



入的水量通常要大大超过水泥充分水化时所需用水量,多余的水在硬化的水泥石内形成毛细孔。因此拌和水越多,硬化水泥石中的毛细孔就越多,当水胶比为 0.4 时,完全水化后水泥石的总孔隙率为 29.6%;而水胶比为 0.7 时,水泥石的孔隙率高达 50.3%。水泥石的强度随其孔隙率的增加而降低。因此,在不影响施工的条件下,水胶比小,则水泥浆稠,易于形成胶体网状结构,水泥的凝结硬化速度快,同时水泥石整体结构内毛细孔少,强度也高。

(5) 养护湿度和温度。温度对水泥的凝结硬化影响很大,提高温度可加速水泥的水化速度,有利于水泥早期强度的形成。就硅酸盐水泥而言,提高温度可加速其水化,使早期强度能较快发展,但对后期强度可能会产生一定的影响(因而硅酸盐水泥不适宜用于蒸汽养护、压蒸养护的混凝土工程)。而在较低温度下进行水化时,虽然凝结硬化慢,但水化产物较致密,可获得较高的最终强度。但当温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  时,强度不仅不增长,而且还会因水的结冰而导致水泥石被冻坏。

湿度是保证水泥水化的一个必备条件,水泥的凝结硬化实质是水泥的水化过程。因此,在干燥环境中,水化浆体中的水分蒸发,导致水泥不能充分水化,同时硬化也将停止,并会因干缩而产生裂缝。

在工程中,保持环境的温度、湿度,使水泥石强度不断增长的措施称为养护,水泥混凝土在浇筑后的一段时间里应十分注意控制温度、湿度的养护。

(6) 龄期。龄期指水泥在正常养护条件下所经历的时间。水泥的凝结、硬化是随龄期的增长而渐进的过程,在适宜的温、湿度环境中,随着水泥颗粒内各熟料矿物水化程度的提高,凝胶体不断增加,毛细孔相应减少,水泥的强度增长可持续若干年。在水泥水化作用的最初几天内强度增长最为迅速,如水化 7 d 的强度可达到 28 d 强度的 70% 左右,28 d 以后的强度增长明显减缓,如图 2-10 所示。

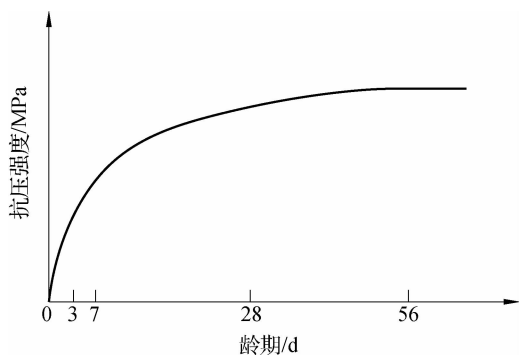


图 2-10 硅酸盐水泥强度发展与龄期的关系

水泥的凝结、硬化除上述主要因素之外,还与水泥的存放时间、受潮程度及掺入的外加剂种类等因素有关。

### 3. 硅酸盐水泥的技术要求

我国现行《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007/XG1—2009)对硅酸盐水泥及其他各类硅酸盐水泥提出如下技术要求。

#### 1) 化学指标

硅酸盐水泥及其他各类硅酸盐水泥的化学指标应符合表 2-10 的规定,否则为不合格。

表 2-10 通用硅酸盐水泥的化学指标

品 种	代 号	不溶物 (质量分数)	烧失量 (质量分数)	三氧化硫 (质量分数)	氧化镁 (质量分数)	氯离子 (质量分数)
硅酸盐水泥	P·I	≤0.75	≤3.0	≤3.5	≤5.0	≤0.06
	P·II	≤1.50	≤3.5			
普通硅酸盐水泥	P·O	—	≤5.0	≤4.0	≤6.0	
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	—	—		—	
	P·S·B	—	—	—		
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	—	—	≤3.5	≤6.0	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	—	—			
复合硅酸盐水泥	P·C	—	—			

## 2) 物理指标

(1) 细度(选择性指标)。细度是指水泥颗粒的粗细程度。细度对水泥的水化、凝结硬化以及强度发展均有很大影响。水泥颗粒越细,其比表面积(单位质量的表面积)越大,因而水化较快也较充分,水泥的早期强度和后期强度均较高。但水泥颗粒过细,易与空气中的水分及二氧化碳反应,致使水泥不宜久存,过细的水泥硬化时产生的收缩亦较大,而且磨制过细的水泥耗能多、成本高。水泥细度通常采用筛析法或比表面积法(勃氏法)测定。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的细度以比表面积表示,其比表面积不小于  $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ ;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的细度以筛余表示,其  $80 \mu\text{m}$  方孔筛筛余不大于 10% 或  $45 \mu\text{m}$  方孔筛筛余不大于 30%。

(2) 凝结时间。水泥的凝结分初凝和终凝。自水泥加水拌和算起到水泥浆开始失去可塑性所需的时间称为初凝时间;自水泥加水拌和算起到水泥浆完全失去可塑性,并开始有一定结构强度所需的时间称为终凝时间。

水泥的凝结时间在施工中具有重要作用。初凝时间不宜过短,以便有足够的时间在初凝之前对混凝土进行搅拌、运输和浇筑。当浇筑完毕,则要求混凝土尽快凝结硬化,产生强度,以利于下道工序的进行,因此终凝时间不宜过迟。

水泥凝结时间的测定是在规定温度和湿度条件下用凝结时间测定仪对标准稠度的水泥浆进行测定。测定过程中,标准稠度用水量是指水泥净浆达到规定稠度时所需的拌和水量,以占水泥质量的百分率表示,一般为 24%~30%。水泥熟料矿物成分不同时,其标准稠度用水量亦有所差别,磨得越细的水泥,其标准稠度用水量越大。

《通用硅酸盐水泥》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;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的初凝时间不小于 45 min,终凝时间不大于 600 min。凡初凝时间及终凝时间不符合规定者为不合格品。

(3) 体积安定性。水泥体积安定性是指水泥浆在凝结硬化过程中,体积变化的均匀



性。如水泥硬化后产生不均匀的体积变化,即为体积安定性不良。使用体积安定性不良的水泥,会使水泥制品、混凝土构件产生膨胀性裂缝,降低建筑物质量,甚至引发严重的工程事故。

引起水泥体积安定性不良的原因主要有以下两点。

①水泥中含有过多的游离氧化钙和游离氧化镁。当水泥原料比例不当、煅烧工艺不正常或原料质量差( $MgCO_3$ 含量高)时,会产生较多游离状态的氧化钙和氧化镁,它们与熟料一起经历了 $1450\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温煅烧,属严重过火的氧化钙、氧化镁,水化极慢,在水泥凝结硬化后很长时间才进行熟化。生成的 $Ca(OH)_2$ 和 $Mg(OH)_2$ 在已经硬化的水泥石中膨胀,使水泥石出现开裂、翘曲、疏松和崩溃等现象,甚至完全破坏。

②石膏掺量过多。当石膏掺量过多时,在水泥硬化后,残余石膏与固态水化铝酸钙反应生成水化硫铝酸钙,体积增大约1.5倍,从而导致水泥石开裂。

国家标准规定,由游离氧化钙引起的水泥安定性不良可采用煮沸法(试饼法和雷氏法)检验。试饼法是将标准稠度的水泥净浆做成试饼经恒沸3h后,观察其外形变化,目测试饼未出现裂缝,用直尺检查没有弯曲现象,即认为体积安定性合格;反之,为不合格。雷氏法是测定水泥浆在雷氏夹中硬化沸煮后的膨胀值,当两个试件沸煮后的膨胀值的平均值不大于规定值( $5.0\text{ mm}$ )时,即判定该水泥安定性合格,反之为不合格。当采用试饼法与雷氏法所测得的结果不同时,以雷氏法为准。游离氧化镁的水化比游离氧化钙更缓慢,由游离氧化镁引起的安定性不良必须采用压蒸法才能检验出来。由石膏造成的体积安定性不良则需通过将其长期浸泡在常温水中才能发现。由于游离氧化镁和石膏引起的体积安定性不良不易被快速检验出来,故常在水泥生产中对其用量严格加以控制。国家标准规定,硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥中游离氧化镁的含量不得超过 $5.0\%$ ,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中氧化镁的含量不得超过 $6.0\%$ ,三氧化硫的含量不得超过 $3.5\%$ 。其中矿渣硅酸盐水泥中三氧化硫的含量不得超过 $4.0\%$ 。

水泥的体积安定性检验必须合格,体积安定性不合格的水泥为不合格品,但某些体积安定性不合格的水泥在放置一段时间后,由于水泥中的游离氧化钙吸收空气中的水蒸气而水化,反而变为合格。

(4)强度与强度等级。水泥的强度是评定其质量的重要指标。《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)规定,水泥的强度是由水泥胶砂试件测定的。将水泥、标准砂按质量计以 $1:3$ 混合,用 $0.5$ 的水胶比按规定的拌制方法拌制成塑性水泥胶砂,并按规定方法制成 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 的试件,在标准养护条件下( $20\pm 1$ ) $^\circ\text{C}$ 的水中,养护至 $3\text{ d}$ 和 $28\text{ d}$ ,测定各龄期的抗折强度和抗压强度。据此将硅酸盐水泥的强度等级分为 $42.5$ , $42.5R$ , $52.5$ , $52.5R$ , $62.5$ , $62.5R$ 六个等级;普通硅酸盐水泥的强度等级分为 $42.5$ , $42.5R$ , $52.5$ , $52.5R$ 四个等级;矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥的强度等级分为 $32.5$ , $32.5R$ , $42.5$ , $42.5R$ , $52.5$ , $52.5R$ 六个等级。

不同品种不同强度等级的通用硅酸盐水泥,其不同龄期的强度值应符合表2-11的规定,否则视为不合格品。

表 2-11 不同品种各强度等级水泥各龄期的强度值

单位:MPa

品 种	强度等级	抗折强度		抗压强度	
		3 d	28 d	3 d	28 d
硅酸盐水泥	42.5	$\geq 17.0$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$
	42.5R	$\geq 22.0$		$\geq 4.0$	
	52.5	$\geq 23.0$	$\geq 52.5$	$\geq 4.0$	$\geq 7.0$
	52.5R	$\geq 27.0$		$\geq 5.0$	
	62.5	$\geq 28.0$	$\geq 62.5$	$\geq 5.0$	$\geq 8.0$
	62.5R	$\geq 32.0$		$\geq 5.5$	
普通硅酸盐水泥	42.5	$\geq 17.0$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$
	42.5R	$\geq 22.0$		$\geq 4.0$	
	52.5	$\geq 23.0$	$\geq 52.5$	$\geq 4.0$	$\geq 7.0$
	52.5R	$\geq 27.0$		$\geq 5.0$	
矿渣硅酸盐水泥 火山灰质硅酸盐水泥 粉煤灰硅酸盐水泥 复合硅酸盐水泥	32.5	$\geq 10.0$	$\geq 32.5$	$\geq 2.5$	$\geq 5.5$
	32.5R	$\geq 15.0$		$\geq 3.5$	
	42.5	$\geq 15.0$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$
	42.5R	$\geq 19.0$		$\geq 4.0$	
	52.5	$\geq 21.0$	$\geq 52.5$	$\geq 4.0$	$\geq 7.0$
	52.5R	$\geq 23.0$		$\geq 4.5$	

(5)碱含量(选择性指标)。水泥中碱含量按  $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$  计算值表示,若使用活性骨料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中的碱含量应不大于 0.60%,或由供需双方协商确定。

#### 4. 硅酸盐水泥的性能与应用

##### 1) 硅酸盐水泥的性能

(1)快凝快硬高强。与硅酸盐系列的其他品种水泥相比,硅酸盐水泥凝结(终凝)快、早期强度(3 d)高、强度等级高(低为 42.5,高为 62.5)。

(2)抗冻性好。由于硅酸盐水泥未掺或掺很少量的混合材料,故其抗冻性好。

(3)抗腐蚀性差。硅酸盐水泥水化产物中有较多的氢氧化钙和水化铝酸钙,耐软水及耐化学腐蚀能力差。

(4)碱度高,抗碳化能力强。碳化是指水泥石中的氢氧化钙与空气中的二氧化碳反应生成碳酸钙的过程。碳化对水泥石(或混凝土)本身是有利的,但碳化会使水泥石(混凝土)内部碱度降低,从而失去对钢筋的保护作用。

(5)水化热大。硅酸盐水泥中含有大量的  $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ ,在水泥水化时,放热速度快且放热量大。

(6)耐热性差。硅酸盐水泥中的一些重要成分在 250 °C 时会发生脱水或分解,使水泥石



强度下降,当受热 700 °C 以上时,将遭受破坏。

(7)耐磨性好。硅酸盐水泥强度高,耐磨性好。

2)硅酸盐水泥的应用

(1)适用于早期强度要求高的工程及冬季施工的工程。

(2)适用于重要结构的高强混凝土和预应力混凝土工程。

(3)适用于严寒地区,遭受反复冻融的工程及干湿交替的部位。

(4)不能用于大体积混凝土工程。

(5)不能用于处于高温环境的工程。

(6)不能用于海水和有侵蚀性介质存在的工程。

(7)不适宜蒸汽或蒸压养护的混凝土工程。

## 2.2.2 普通硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、6%~15%混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,称为普通硅酸盐水泥(简称普通水泥),代号 P·O。掺活性混合材料时,最大掺量不得超过 15%,其中允许用不超过水泥质量 5%的窑灰或不超过水泥质量 10%的非活性材料来代替。掺非活性混合材料时,最大掺量不得超过水泥质量的 10%。

普通硅酸盐水泥中绝大部分仍为硅酸盐水泥熟料、适量石膏及较少的混合材料(与以上所介绍的三种水泥相比),故其性质介于硅酸盐水泥与掺混合材料水泥之间,更接近于硅酸盐水泥。具体表现为:早期强度略低,水化热略低,耐腐蚀性略有提高,耐热性稍好,抗冻性、耐磨性、抗碳化性略有降低。

在应用范围方面,与硅酸盐水泥基本相同,甚至在一些不能用硅酸盐水泥的地方也可采用普通硅酸盐水泥,使得普通硅酸盐水泥成为土建行业应用面最广,使用量最大的水泥品种。

## 2.2.3 掺混合材料水泥

### 1. 混合材料

用于水泥中的混合材料,根据其是否参与水化反应分为活性混合材料和非活性混合材料。

#### 1)活性混合材料

活性混合材料是指具有潜在活性的矿物质材料。所谓潜在活性是指单独不具有水硬性,但在石灰或石膏的激发和参与下,可一起和水反应,而形成具有水硬性的化合物的性能。硅酸盐水泥熟料水化后会产生大量的氢氧化钙,并且水泥中需掺入适量的石膏,因此在硅酸盐水泥中具备了使活性混合材料发挥潜在活性的条件。通常将氢氧化钙、石膏称为活性混合材料的“激发剂”,分别称为碱性激发剂和硫酸盐激发剂,但硫酸盐激发剂必须在有碱性激发剂的条件下才能发挥作用。

水泥中常用的活性混合材料有:粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料及粉煤灰。

(1)粒化高炉矿渣。将炼铁高炉中的熔融矿渣经水淬等急冷方式处理而成的松软颗粒称为粒化高炉矿渣,又称水淬矿渣,其中主要的化学成分是 CaO、SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,占 90%以上。急速冷却的矿渣结构为不稳定的玻璃体,有较高的潜在活性。如果熔融状态的矿渣缓



慢冷却,其中的  $\text{SiO}_2$  等形成晶体,活性极小,称为慢冷矿渣,则不具有活性。

(2)火山灰质混合材料。凡是天然的或人工的以活性氧化硅和活性氧化铝为主要成分,其含量一般可达 65%~95%,具有火山灰活性的矿物质材料,都称为火山灰质混合材料。按其成因分为天然火山灰和人工火山灰两类。天然火山灰主要是火山喷发时随同熔岩一起喷发的大量碎屑沉积在地面或水中形成的松软物质,包括浮石、火山灰、凝灰岩等。人工火山灰是将一些天然材料或工业废料经加工处理而成,如硅藻土、沸石、烧黏土、煤矸石、煤渣等。

(3)粉煤灰。粉煤灰是发电厂燃煤锅炉排出的细颗粒废渣,其颗粒直径一般为 0.001~0.050 mm,呈玻璃态实心或空心的球状颗粒,表面比较致密。粉煤灰的成分主要是活性氧化硅、活性氧化铝及一定量的氧化钙,根据氧化钙的含量可分为低钙粉煤灰(氧化钙含量低于 10%)和高钙粉煤灰(氧化钙含量大于等于 10%)。高钙粉煤灰通常活性较高,因为所含的钙绝大多数是以活性结晶化合物存在的,如  $\text{C}_3\text{A}$ 、CS。此外,其所含的钙离子使铝硅玻璃体的活性得到增强。

#### 2)非活性混合材料

在水泥中主要起填充作用而不参与水泥水化反应或水化反应很微弱的矿物材料,称为非活性混合材料。将它们掺入水泥中主要是为了提高水泥产量,调节水泥强度等级。实际上非活性混合材料在水泥中仅起填充和分散作用,所以又称为填充性混合材料、惰性混合材料。磨细的石英砂、石灰石、黏土、慢冷矿渣及各种废渣等都属于非活性材料。另外,凡不符合技术要求的粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料及粉煤灰均可作为非活性混合材料使用。

### 2. 掺活性混合材料的硅酸盐水泥的水化特点

掺活性混合材料的硅酸盐水泥在与水拌和后,首先是水泥熟料水化,水化生成的氢氧化钙作为活性“激发剂”,与活性混合材料中的活性二氧化硅和活性三氧化二铝反应,即“二次水化反应”,生成具有水硬性的水化硅酸钙和水化铝酸钙。当有石膏存在时,石膏可与上述反应生成的水化铝酸钙进一步反应生成水硬性的低钙型水化硫铝酸钙。

与熟料的水化相比,“二次水化反应”具有速度慢、水化热小、对温度和湿度较敏感等特点。

### 3. 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥的性能与应用

这三种水泥的组成及所用混合材料的活性来源基本相同,所以这三种水泥在性质和应用上有许多相同点,在许多情况下可以替代使用。但由于混合材料的活性来源和物理性质(如致密程度、需水量大小等)存在着某些差别,故这三种水泥又各有其特性。

#### 1)三种水泥的性能与应用相同点

(1)早期强度低,后期强度增进率大。与硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥相比,这三种水泥熟料含量较少(即快硬的矿物  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{A}$  较少),而且二次反应很慢,所以早期强度低。后期,由于二次反应不断进行和水泥熟料的水化产物不断增多,使得水泥强度的增进率加大,后期强度可赶上甚至超过同强度等级的硅酸盐水泥。因此,这三种水泥不宜用于早期强度要求高的混凝土,如现浇混凝土、冬期施工混凝土等。

(2)硬化时对湿热敏感性较强,强度发展受温度影响较大。这三种水泥强度的发展受温度



的影响较硅酸盐水泥或普通水泥更为敏感。这三种水泥在低温下的水化明显减慢,强度较低。采用高温养护时,加大二次反应的速度可提高早期强度,且不影响常温下后期强度的发展。硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥采用高温养护也可提高早期强度,但其后期强度较一直在常温下养护的水泥强度低。因此,这三种水泥不宜用于有早期强度要求的现浇混凝土,适用于蒸汽养护的构件。

(3)水化热少。由于熟料含量少,水化时发热量高的  $C_3S$ 、 $C_3A$  含量相对减少,因而水化放热量少,适用于大体积混凝土工程。

(4)耐腐蚀性好,具有较强的抗溶出性侵蚀及抗硫酸盐侵蚀的能力。这三种水泥中熟料数量相对较少,水化生成的  $Ca(OH)_2$  数量也较少,而且还要与活性混合材料进行二次反应,使水泥石中易受腐蚀的  $Ca(OH)_2$  含量大为减少。同时,由于熟料数量较少,使水泥石中易受硫酸盐腐蚀的水化铝酸三钙含量也相对降低,因而它们的耐腐蚀性较好。但当采用含活性  $Al_2O_3$  含量较多的混合材料(如烧新土)时,水化生成较多的水化铝酸钙,因而耐硫酸盐腐蚀性较差。因此,这三种水泥适用于受溶出性侵蚀以及硫酸盐、镁盐腐蚀的水工建筑工程、海港工程、地下工程。

(5)抗冻性及耐磨性较差。因为水泥石的密实性不及硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥,所以抗冻性和耐磨性较差,不宜用于严寒地区水位升降范围内的混凝土工程,也不宜用于受高速夹砂水流冲刷或其他具有耐磨要求的混凝土工程。

(6)抗碳化能力较差。由于水泥石中  $Ca(OH)_2$  含量少,因此抵抗碳化的能力差,表层的碳化作用进行得较快,碳化深度也较大,这对钢筋混凝土极为不利,故不适用于  $CO_2$  浓度高的环境(如铸造、翻砂车间)中的混凝土工程。

## 2) 矿渣硅酸盐水泥的性能与应用

(1)泌水性和干缩性较大。由于粒化高炉矿渣是玻璃体,对水的吸附能力差(即保水性差),成形时易泌水而形成毛细通路及粗大的水隙,降低混凝土的密实性及均匀性。同时,增加水分的蒸发,因此其干缩较大,易使混凝土表面产生很多微细裂缝,从而降低混凝土的力学性能和耐久性。矿渣混凝土不宜用于要求抗渗的混凝土工程和受冻融干湿交替作用的混凝土工程。

(2)耐热性好。由于矿渣水泥硬化后  $Ca(OH)_2$  的含量低,矿渣本身又是耐火掺料,当受高温(不高于  $200\text{ }^\circ\text{C}$ )作用时,强度不致显著降低,因此矿渣水泥适用于受热的混凝土工程,若掺入耐火砖粉等材料可制成耐更高温度的混凝土。在这三种水泥中矿渣硅酸盐水泥的活性混合材料的含量最多,耐腐蚀性最好、最稳定。

## 3) 火山灰质硅酸盐水泥的性能与应用

(1)抗渗性高。由于水泥中含有大量较细的火山灰,泌水性小,当在潮湿环境下或水中养护时,会生成较多的水化硅酸钙凝胶,使水泥石结构致密,因而具有较高的抗渗性,适用于要求抗渗的水中混凝土工程。

(2)干缩大,易起粉。火山灰质硅酸盐水泥在硬化过程中的干缩现象较矿渣硅酸盐水泥更显著。若处在干燥的空气中,水泥石中的水化硅酸钙会逐渐干燥,产生干缩裂缝。在水泥石表面,由于空气中  $CO_2$  的作用,可使水化硅酸钙分解成  $CaCO_3$  和  $SiO_2$  的粉状混合物,使已硬化的水泥石表面产生“起粉”现象。为此,施工时应加强养护,较长时间保持潮湿,以免产生干缩裂缝和起粉。所以,火山灰质硅酸盐水泥不宜用于干燥或干湿交替环境下的混凝

土工程,以及有耐磨要求的混凝土工程。

#### 4) 粉煤灰硅酸盐水泥的性能与应用

(1) 早期强度低。由于粉煤灰呈球形颗粒,表面致密,不易水化,因此粉煤灰活性的发挥主要在后期,这种水泥早期强度的增进率比矿渣水泥和火山灰水泥更低,但后期可以提高。

(2) 干缩小,抗裂性强。由于粉煤灰的吸水能力弱,拌和时需水量较小,因而干缩小、抗裂性强。但球形颗粒保水性差、泌水较快,若养护不当易引起混凝土产生失水裂缝。

另外,复合水泥由于同时掺入了两种或两种以上的混合材料,改善了上述矿渣硅酸盐水泥、火山灰水泥和粉煤灰水泥这三种水泥的性质。其性质更接近于普通硅酸盐水泥,并且水化热低,耐腐蚀性、抗渗性及抗冻性较好。

## 2.2.4 其他品种水泥

### 1. 道路硅酸盐水泥

随着我国高等级道路的发展,水泥混凝土路面已成为主要路面类型之一。对专供公路、城市道路和机场跑道用的道路水泥,我国已制定了国家标准。现根据《道路硅酸盐水泥》(GB 13693—2005)就有关技术要求和技术标准分述如下。

道路硅酸盐水泥是以适当成分的生料烧至部分熔融,得到以硅酸钙和较大量的铁铝酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料,称为道路硅酸盐水泥熟料。由道路硅酸盐水泥熟料、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)。

#### 1) 技术要求

(1) 化学组成。在道路水泥或熟料中对下列有害成分的含量必须加以限制。

① 氧化镁。道路水泥中氧化镁含量不得超过 5.0%。

② 三氧化硫。道路水泥中三氧化硫含量不得超过 3.5%。

③ 烧失量。道路水泥中的烧失量不得大于 3.0%。

④ 游离氧化钙。道路水泥熟料中的游离氧化钙,旋窑生产不得大于 1.0%;立窑生产不得大于 1.8%。

⑤ 碱含量。如用户提出要求时,由供需双方商定。

(2) 矿物组成。

① 铝酸三钙。道路水泥熟料中铝酸三钙的含量不得大于 5.0%。

② 铁铝酸四钙。道路水泥熟料中铁铝酸四钙的含量不得小于 16.0%。

(3) 物理力学性质。

① 比表面积。道路水泥比表面积为 300~450 m<sup>2</sup>/kg。

② 凝结时间。道路水泥初凝不得早于 1.5 h,终凝不得迟于 10 h。

③ 安定性。道路水泥用沸煮法检验必须合格。

④ 干缩率。道路水泥 28 d 干缩率不得大于 0.10%。

⑤ 耐磨性。道路水泥耐磨性以磨损量表示,28 d 磨损量不得大于 3.60 kg/m<sup>2</sup>。

⑥ 强度。道路水泥各标号的各龄期强度不得低于表 2-12 中数值。



表 2-12 道路水泥各标号的各龄期强度表

单位:MPa

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

## 2) 工程应用

道路水泥是一种强度高(特别是抗折强度高)、耐磨性好、干缩性小、抗冲击性好、抗冻性和抗硫酸性比较好的专用水泥,它适用于道路路面、机场跑道道面、城市广场等工程。由于道路水泥具有干缩性小、耐磨、抗冲击等特性,可减少水泥混凝土路面的裂缝和磨耗等,减少了维修工作、延长了路面使用年限,因而可获得显著的社会效益和经济效益。

## 2. 膨胀水泥

一般硅酸盐类水泥在空气中硬化时,通常都表现为收缩,常导致混凝土内部产生微裂缝,降低了混凝土的耐久性。在浇筑构件的节点、堵塞孔洞、修补缝隙时,由于水泥石存在干缩,也不能达到预期的效果。膨胀水泥在硬化过程中能产生一定体积的膨胀,因此采用膨胀水泥配制混凝土,能克服或改善一般水泥的上述缺点,解决由于收缩带来的不利后果。

膨胀水泥按膨胀值的不同分为膨胀水泥和自应力水泥。膨胀水泥的线膨胀系数一般在1%以下,相当或稍大于一般水泥的收缩率,可以补偿收缩,所以又称为补偿收缩水泥或无收缩水泥。自应力水泥的线膨胀系数一般为1%~3%,膨胀值较大,在限制的条件(如配有钢筋)下,使混凝土受到压应力,这种压应力能避免混凝土内部产生微裂缝,还能抵消一部分因外界因素(如水泥混凝土管道中输送的压力水或压力气体)所产生的拉应力,从而有效地改善混凝土抗拉强度低的缺陷。

### 1) 膨胀水泥的分类

(1) 按强度组分的类型分类。膨胀水泥按其强度组分的类型可分为以下两种。

① 硅酸盐膨胀水泥。硅酸盐膨胀水泥是以硅酸盐水泥为主要组分,外加高铝水泥和石膏配制而成的。其膨胀作用是由于高铝水泥中的铝酸盐矿物和石膏遇水后生成具有膨胀性的钙矾石晶体,膨胀值的大小可通过改变高铝水泥和石膏的含量来调节。

② 铝酸盐膨胀水泥。由高铝水泥和二水石膏混合后磨细或分别磨细后混合而成。硫铝酸盐膨胀水泥是以含有适量无水硫铝酸钙的熟料,加入较多石膏磨细而成。

(2) 按膨胀值分类。膨胀水泥按其膨胀值可分为以下两种。

① 收缩补偿水泥。这种水泥膨胀性能较弱,膨胀时所产生的压应力大致能抵消干缩所引起的应力,可防止混凝土产生干缩裂缝。

② 自应力水泥。这种水泥具有较强的膨胀性能,当它用于钢筋混凝土中时,由于它的膨胀性能,使钢筋受到较大的拉应力,而混凝土则受到相应的压应力。当外界因素使混凝土结构产生拉应力时,就可被预先具有的压应力抵消或降低。这种靠水泥自身水化产生膨胀来张拉钢筋达到的预应力称为自应力,混凝土中所产生的压应力数值即为自应力值。

## 2) 膨胀水泥在工程中的应用

膨胀水泥适用于补偿混凝土收缩的结构工程,作为防渗层或防渗混凝土,填灌构件的接缝及管道接头,加固与修补结构,固结机器底座及地脚螺丝等。自应力水泥适用于制作自应力钢筋混凝土压力管及其配件。在道桥工程中,膨胀水泥常用于水泥混凝土路面、机场跑道或桥梁修补混凝土。

## 3. 抗硫酸盐硅酸盐水泥

抗硫酸盐硅酸盐水泥按其抗硫酸盐侵蚀程度的不同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,简称中抗硫水泥;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较高浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性胶凝材料,称为高抗硫酸盐硅酸盐水泥,简称高抗硫水泥。

### 1) 技术要求

(1) 烧失量。抗硫酸盐硅酸盐水泥中烧失量不得超过 3.0%。

(2) 氧化镁含量。水泥中氧化镁含量不得超过 5.0%。如果水泥经过压蒸安定性试验合格,则水泥中氧化镁含量允许放宽到 6.0%。

(3) 碱含量。水泥中碱含量按  $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$  计算值来表示,若使用活性骨料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中的碱含量不得大于 0.60%或由供需双方商定。

(4) 三氧化硫含量。水泥中三氧化硫的含量不得超过 2.5%。

(5) 不溶物。水泥中的不溶物不得超过 1.5%。

(6) 比表面积。水泥比表面积不得小于  $280 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

(7) 凝结时间。初凝时间不得早于 45 min,终凝时间不得迟于 10 h。

(8) 安定性。用沸煮法检验,必须合格。

(9) 强度。水泥标号按规定龄期的抗压强度和抗折强度来划分,各标号水泥的各龄期强度不得低于表 2-13 中数值。

表 2-13 抗硫酸盐硅酸盐水泥各龄期强度

单位:MPa

强度等级	抗压强度		抗折强度	
	3 d	28 d	3 d	28 d
32.5(中抗)	10.0	32.5	2.5	6.0
42.5(高抗)	15.0	42.5	3.0	6.5

## 2) 工程应用

抗硫酸盐硅酸盐水泥具有较高的抗硫酸盐侵蚀的性能,水化热较低,适用于受硫酸盐侵蚀的海港、水利、地下隧涵、引水、道路与桥梁基础等工程。

## 4. 大坝水泥

大坝水泥主要是指用于建造水利工程用的具有中等、低等水化热的水泥。我国把以硅酸钙为主要成分的特定矿物组成的熟料经加工磨制成水化热低而强度相当高的水工用特种水泥。

在我国,常用的大坝水泥有中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥。



此外,还有低热粉煤灰硅酸盐水泥、低热微膨胀水泥和粉煤灰低热微膨胀水泥。

中热硅酸盐水泥简称中热水泥,是指由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入适量石膏,经磨细制成的具有中等水化热的水硬性胶凝材料。根据其3 d和7 d的水化放热水平及28 d强度分为425和525两个等级。

低热硅酸盐水泥简称低热水泥,是指由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入适量石膏,经磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料。按其强度高低分为425和525两个等级。

低热矿渣硅酸盐水泥简称低热矿渣水泥,是指由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入矿渣、适量石膏磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料。按其强度高低分为325和425两个等级。

低热粉煤灰硅酸盐水泥简称低热粉煤灰水泥,是指由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入粉煤灰和适量的石膏经磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料。按其强度高低分为325和425两个等级。

低热微膨胀水泥,是指以粒化高炉矿渣为主要组分,加入适量硅酸盐水泥熟料和石膏,经磨细制成的水硬性胶凝材料。根据其强度高低可分为325和425两个等级。

粉煤灰低热微膨胀水泥,是指在以矿渣为基础的低热微膨胀水泥的基础上发展起来的一种水工水泥,其主要特点是熟料用量少,粉煤灰掺入量多,水化热低。

大坝水泥主要用于要求水化热较低的大坝和大体积混凝土工程。

## 5. 高铝水泥

高铝水泥又称铝酸盐水泥,是以铝矾土和石灰石为原料,经煅烧制得以铝酸钙为主要成分、氧化铝含量约50%的熟料,再磨细制成的水硬性胶凝材料。

### 1) 技术性质

- (1)外观。高铝水泥常为黄色或黄褐色。
- (2)密度。高铝水泥密度一般为 $3.0\sim 3.2\text{ g/cm}^3$ 。
- (3)细度。0.08 mm方孔筛筛余不得超过10%。
- (4)凝结时间。初凝时间不得早于40 min,终凝时间不得迟于10 h。
- (5)体积安定性。高铝水泥的体积安定性必须合格。
- (6)强度。高铝水泥以3 d强度确定其标号。各龄期强度不得低于表2-14的要求。

表 2-14 高铝水泥各龄期强度

标号	抗压强度/MPa, ≥		抗压强度/MPa, ≥		标号	抗压强度/MPa, ≥		抗压强度/MPa, ≥	
	1 d	3 d	1 d	3 d		1 d	3 d	1 d	3 d
425	35.3	41.7	3.9	4.4	625	54.9	61.3	5.9	6.4
525	45.1	51.5	4.9	5.4	725	64.7	71.1	6.9	7.4

### 2) 高铝水泥的特性及应用

(1)快硬早强,早期强度增长快。高铝水泥宜用于紧急抢修工程(筑路、修桥、堵漏等)和早期强度要求高的工程。但高铝水泥后期强度可能会下降,尤其是在高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的湿热环境下,强度下降更快,甚至会引起结构的破坏。因此,结构工程中使用高铝水泥应慎重。

(2)水化热大,而且集中在早期放出。高铝水泥适合于冬季施工,不能用于大体积混凝土工程及高温潮湿环境中的工程。

(3)具有较好的抗硫酸盐侵蚀能力。这是因为其主要成分为低钙铝酸盐,游离的氧化钙极少,水泥石结构比较致密,故适合于有抗硫酸盐侵蚀要求的工程。

(4)耐碱性差。高铝水泥与碱性溶液接触,甚至混凝土骨料内含有少量碱性化合物时,都会引起侵蚀,故不能用于接触碱溶液的工程。

(5)耐热性好。因为高温时产生了固相反应,烧结结合代替了水化结合,使得高铝水泥在高温下仍能保持较高的强度。

### 3)高铝水泥使用时应注意的问题

(1)最适宜的硬化温度为 $15^{\circ}\text{C}$ 左右,一般施工时环境温度不得超过 $25^{\circ}\text{C}$ ,否则,会产生晶型转换,强度降低。高铝水泥拌制的混凝土不能进行蒸汽养护。

(2)严禁高铝水泥与硅酸盐水泥或石灰混杂使用,也不得与尚未硬化的硅酸盐水泥混凝土接触作用,否则将产生瞬凝,以至无法施工,且强度很低。

(3)由于晶型转化及铝酸盐凝胶体老化等原因,高铝水泥的长期强度有降低的趋势。如需用于工程中,应以最低稳定强度为依据进行设计。

## 6. 白色和彩色硅酸盐水泥

### 1)白色硅酸盐水泥

凡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、三氧化二铁含量很少的白色硅酸盐水泥熟料,再加入适量石膏,共同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。

白水泥与硅酸盐水泥的区别在于水泥熟料中三氧化二铁的含量限制在 $0.5\%$ 以下,其他着色氧化物(氧化锰、二氧化钛等)含量降至极少。为此,应精选原料,生产应在无着色物污染的条件下进行,严格控制水泥中的含铁量。白水泥比普通的硅酸盐水泥凝固得快。其主要特点是矿渣微粉的用量为 $85\%\sim 90\%$ ,碱性添加物的用量不超过 $5\%$ 。混制出的白水泥的白度和强度不低于原料白水泥,而且早期强度还有明显的提高。

白水泥的技术性质与硅酸盐水泥基本相似。强度分为325,425,525,625四个标号;白度分为特级、一级、二级、三级四个等级;细度为在 $0.08\text{mm}$ 方孔筛筛余不得超过 $10\%$ ;初凝时间不得早于 $45\text{min}$ ,终凝时间不得迟于 $12\text{h}$ ,各龄期强度必须合格;体积安定性用沸煮法检验必须合格。

### 2)彩色硅酸盐水泥

彩色硅酸盐水泥是将硅酸盐水泥熟料(白水泥熟料或普通水泥熟料)、适量石膏和碱性颜料共同磨细而成的,即染色法。

### 3)工程应用

白色和彩色硅酸盐水泥用于装饰工程中,常用来配制彩色水泥浆,配制装饰混凝土;配制各种彩色砂浆用于装饰抹灰;制造各种颜色的水刷石、人造大理石及水磨石等制品。

## 2.2.5 水泥石的腐蚀与防护

### 1. 水泥石的腐蚀

硅酸盐水泥硬化后,在正常使用条件下,水泥石的强度会不断增长,具有较好的耐久性。但水泥石长期处在侵蚀性介质中(如流动的淡水、酸性或盐类溶液、强碱等),会逐渐受到侵



蚀变得疏松,强度下降,甚至破坏,这种现象称为水泥石的腐蚀。水泥石的腐蚀主要有以下四种类型。

### 1) 软水的侵蚀(溶出性侵蚀)

硅酸盐水泥属于水硬性胶凝材料,对于一般江、河、湖水等具有足够的抵抗能力。但是对于软水如冷凝水、雪水、蒸馏水、碳酸盐含量甚少的河水及湖水等,水泥石会遭受腐蚀。其腐蚀原因如下。

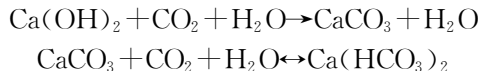
(1)当水泥石长期与软水接触时,水泥石中的氢氧化钙会被溶出,在静水及无压水的情况下,氢氧化钙很快处于饱和溶液中,使溶解作用中止,此时溶出仅限于表层,危害不大。但在流动水及压力水的作用下,溶解的氢氧化钙会不断流失,而且水越纯净,水压越大,氢氧化钙流失得越多。其结果是一方面使水泥石变得疏松,另一方面也使水泥石的碱度降低,导致了其他水化产物的分解溶蚀,最终使水泥石破坏。

(2)当环境水中含有重碳酸盐  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  时,由于同离子效应的缘故,氢氧化钙的溶解受到抑制,从而减轻了侵蚀作用,重碳酸盐还可以与氢氧化钙起反应,生成几乎不溶于水的碳酸钙。生成的碳酸钙积聚在水泥石的孔隙中,形成了致密的保护层,阻止了外界水的侵入和内部氢氧化钙的扩散析出。

因此,对需与软水接触的混凝土,预先在空气中放置一段时间,使水泥石中的氢氧化钙与空气中的  $\text{CO}_2$  作用形成碳酸钙外壳,则可对溶出性侵蚀起到一定的保护作用。

### 2) 酸性腐蚀

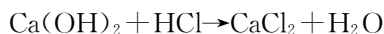
(1)碳酸水的腐蚀。雨水、泉水及某些工业废水中常溶解有较多的  $\text{CO}_2$ ,当含量超过一定浓度时,将会对水泥石产生破坏作用,其反应式为



上述第二个反应式是可逆反应,若水中含有较多的碳酸,超过平衡浓度时,上式向右进行,水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  经过上述两个反应式转变为  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  而溶解,进而导致其他水化产物分解和溶解,使水泥石结构破坏;若水中的碳酸含量不高,低于平衡浓度时,则反应进行到第一个反应式为止,对水泥石并不起破坏作用。

(2)一般酸的腐蚀。在工业污水和地下水中常含有无机酸( $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HPO}_3$  等)和有机酸(醋酸、蚁酸等),各种酸对水泥都有不同程度的腐蚀作用,它们与水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  作用后生成的化合物或溶于水或体积膨胀而造成对水泥的破坏。腐蚀作用最快的是无机酸中的盐酸、氢氟酸、硝酸、硫酸和有机酸中的醋酸、蚁酸和乳酸等。

例如,盐酸与水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  作用生成极易溶于水的氯化钙,导致溶出性化学侵蚀,反应式为



硫酸与水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  作用,其反应式为



生成的二水石膏在水泥石孔隙中结晶产生体积膨胀。二水石膏也可以再与水泥石中的水化铝酸钙作用,生成高硫型水化硫铝酸钙。生成的高硫型水化硫铝酸钙含有大量的结晶水,体积膨胀 1.5 倍,破坏作用更大。由于高硫型水化硫铝酸钙呈针状晶体,故俗称“水泥杆菌”。

### 3) 盐类的腐蚀

(1)镁盐的腐蚀。海水及地下水中常含有氯化镁、硫酸镁等镁盐,它们可与水泥石中的



氢氧化钙起置换反应生成易溶于水的氯化钙和松软无胶结能力的氢氧化镁。

(2)硫酸盐的腐蚀。硫酸钠、硫酸钾等对水泥石的腐蚀同硫酸的腐蚀,而硫酸镁对水泥石的腐蚀包括镁盐和硫酸盐的双重腐蚀作用。

#### 4)强碱腐蚀

碱类溶液若浓度不大时一般无害。但铝酸盐含量较高的硅酸盐水泥遇到强碱(如氢氧化钠)作用后会被腐蚀破坏。氢氧化钠与水泥熟料中未水化的铝酸盐作用,生成易溶的铝酸钠,出现溶出性侵蚀。

另外,当水泥石被氢氧化钠溶液浸透后,又在空气中干燥,与空气中的二氧化碳作用生成碳酸钠,碳酸钠在水泥石毛细孔中结晶沉积,可使水泥石胀裂。

综上所述,水泥石破坏有三种表现形式:一是溶解浸析,主要是水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解使水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度降低,进而引起其他水化产物的溶解;二是离子交换反应,侵蚀性介质与水泥石的组分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生离子交换反应,生成易溶解或是没有胶结能力的产物,破坏水泥石原有的结构;三是膨胀性侵蚀,水泥石中的水化铝酸钙与硫酸盐作用形成膨胀性结晶产物,产生有害的内应力,引起膨胀性破坏。

水泥石腐蚀是内外因并存的。内因是水泥石中存在有引起腐蚀的组分氢氧化钙和水化铝酸钙,水泥石本身结构不密实,有渗水的毛细管渗水通道;外因是在水泥石周围有以液相形式存在的侵蚀性介质。

除上述4种腐蚀类型外,对水泥石有腐蚀作用的还有其他一些物质,如糖、酒精、动物脂肪等。水泥石的腐蚀是一个极其复杂的物理化学过程,很少是单一类型的腐蚀,往往是几种类型腐蚀作用同时存在,相互影响,共同作用。

## 2. 水泥石腐蚀的防止措施

(1)根据侵蚀性介质选择合适的水泥品种。如采用水化产物中氢氧化钙含量少的水泥可提高对淡水等侵蚀的抵抗能力;采用含水化铝酸钙低的水泥可提高对硫酸盐腐蚀的抵抗能力;选择混合材料掺量较大的水泥可提高抗各类腐蚀(除抗碳化外)的能力。

(2)提高水泥的密实度,降低孔隙率。硅酸盐水泥水化理论水胶比为0.22左右,而实际施工中水胶比为0.40~0.70,多余的水分在水泥石内部形成连通的孔隙,腐蚀介质就易渗入水泥石内部,从而加速了水泥石的腐蚀。在实际工程中,可通过降低水胶比、仔细选择骨料、掺外加剂、改善施工方法等措施,提高水泥石的密实度,从而提高水泥石的抗腐蚀性能。

(3)加保护层。当侵蚀作用较强,上述措施不能奏效时,可用耐腐蚀的材料,如石料、陶瓷、塑料、沥青等覆盖于水泥石的表面,防止侵蚀性介质与水泥石直接接触,达到抗侵蚀的目的。

### 2.2.6 水泥受潮与储存

水泥受潮后因表面水化而结块,从而丧失胶凝能力,严重降低其强度。

即使在良好的储存条件下,水泥也不可储存过久,因为水泥会吸收空气中的水分和二氧化碳,缓慢水化和碳化反应,经3个月后水泥强度会降低10%~20%,6个月后会降低15%~30%,一年后会降低25%~40%。

由于水泥水化是从颗粒表面开始的,水化过程中水泥颗粒被水化产物所包裹,随着包裹层厚度的增加,反应速率会减缓。据研究测试,当包裹层厚达 $25\ \mu\text{m}$ 时,水化将终止。因此,受潮水泥颗粒只会在表面水化,若将其重磨,可使其暴露出新表面而恢复部分活性。对于轻微结块(能用手捏碎)的水泥,其强度降低10%~20%,这种水泥可以采取适当方式压碎后用



于次要工程。

### 思考与练习

1. 硅酸盐水泥的矿物组成有哪些？它们与水作用时各表现出什么特征？
2. 硅酸盐水泥的主要水化产物是什么？硬化后水泥石的组成有哪些？
3. 简述硅酸盐水泥的凝结硬化机理。影响凝结硬化过程的因素有哪些？如何影响？
4. 为什么在生产硅酸盐水泥时掺入适量的石膏对水泥不起破坏作用，而硬化后水泥石遇到有硫酸盐溶液的环境，掺入石膏时就有破坏作用？
5. 什么是细度？为什么要对水泥的细度做规定？硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的细度指标各是什么？
6. 规定水泥标准稠度及标准稠度用水量有何意义？
7. 什么是水泥的体积安定性？产生的原因是什么？水泥体积安定性不良应如何处理？
8. 什么是水泥的凝结时间？国家标准为什么要规定水泥的凝结时间？
9. 用于水泥中的混合材料有哪些类？掺入水泥后的作用分别是什么？硅酸盐水泥常掺入哪几种活性混合材料？
10. 为什么用不耐水的石灰拌制成的灰土、三合土具有一定的耐水性？
11. 与硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥相比，粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥有什么特点(共性)？这几种水泥又各有什么个性？
12. 水泥在运输和存放过程中为何不能受潮和雨淋？储存水泥时应注意哪些问题？
13. 试述铝酸盐水泥的矿物组成、水化产物及特性，以及使用中应注意的问题。

## 模块3 水泥混凝土和建筑砂浆

### 学习目标

- 掌握普通水泥混凝土组成材料的技术性质及其影响因素。
- 掌握普通水泥混凝土现行的配合比设计和质量评定方法。
- 了解普通水泥混凝土常用外加剂的作用及品种。
- 了解其他功能混凝土的特性。
- 了解建筑砂浆的技术性质。

### 3.1 普通水泥混凝土

水泥混凝土是道路与桥梁工程建设中应用最广泛、用量最大的建筑材料之一。随着目前高等级公路的发展,水泥混凝土与沥青混凝土一样,已成为高等级路面的主要建筑材料。在现代公路桥梁中,钢筋混凝土桥是最主要的一种桥型,广泛应用于高等级公路工程中。作为未来的道路与桥梁工程师,必须掌握水泥混凝土的基本理论和试验技能。

普通水泥混凝土按表观密度可分为轻混凝土(表观密度小于 $2\ 000\text{ kg/m}^3$ )、普通混凝土(表观密度为 $2\ 000\sim 2\ 800\text{ kg/m}^3$ )、重混凝土(表观密度大于 $2\ 800\text{ kg/m}^3$ );按抗压强度可分为低强度混凝土(抗压强度小于 $30\text{ MPa}$ )、中强度混凝土(抗压强度为 $30\sim 60\text{ MPa}$ )、高强度混凝土(抗压强度大于 $60\text{ MPa}$ )。其中,普通混凝土与中强度混凝土是道路与桥梁中最常用的水泥混凝土类型,但高等级公路和大型、特大型桥梁也选用高强度混凝土。

此外,为了满足工程的特殊要求,还配制各种特种混凝土,如泵送混凝土、道路混凝土、水工混凝土、加气混凝土、防水混凝土、纤维加筋混凝土、补偿收缩混凝土等。

普通水泥混凝土是以水泥和水组成的水泥浆体为结合料,将分散其间不同粒径的骨料胶结起来,在一定的条件下,硬化成为具有一定力学性能的一种人工石材。

普通水泥混凝土有很多优点:抗压强度高,耐久性、耐火性比较好,养护费用少;由于混凝土拌合物呈塑性状态,因此可以制作成各种形状复杂的结构和构件;水泥混凝土中骨料的体积占混凝土总体积的 $80\%\sim 90\%$ ,且骨料多为地方材料,价廉量广,很有经济意义;可以根据工程的要求改变材料组成配比来满足需要。

普通水泥混凝土也存在着缺点:与抗压强度相比,抗拉强度较低;由于干缩,容易出现裂缝;硬化速度较慢,导致施工工期长;自重较大,比强度低;水泥混凝土结构物拆除比较困难;影响强度的因素较多。

由于普通水泥混凝土有很多优点,所以它在工程中能够得到广泛的应用;科研人员也在不断改进它的缺点,使其使用范围更加广泛。



### 3.1.1 普通水泥混凝土的组成材料

水泥混凝土的技术性质很大程度上是由组成材料的性质及其相对含量决定的。水泥混凝土的组成材料主要包括水泥、砂、石、水和外加剂,有时还加入掺合料。要得到优质的混凝土,首先要正确选用原材料。

#### 1. 水泥

水泥是混凝土的胶结材料,混凝土的性能很大程度上取决于水泥的质量,在选择混凝土的组成材料时,对水泥的品种和强度等级必须合理加以选择。

##### 1) 水泥品种的选择

配制水泥混凝土一般可采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥,必要时也可选择特种水泥。水泥的性能必须符合现行国家有关标准的规定。

可根据混凝土工程的特点,所处环境、施工气候和条件等因素,参照表 3-1 选用水泥品种。

表 3-1 常用水泥品种的选用

混凝土工程特点或所处环境条件		优先选用	可以使用	不得使用
环境 条件	在普通气候环境中的混凝土	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	—
	在干燥环境中的混凝土	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
	在高湿度环境中或永远处在水下的混凝土	矿渣硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥	—
	严寒地区的露天混凝土、寒冷地区的处在水位升降范围内的混凝土	硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥	矿渣硅酸盐水泥(强度等级 > 32.5MPa)	火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥
	严寒地区处在水位升降范围内的混凝土	硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥(强度等级 > 42.5MPa)	—	火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥
	处于河床最低冲刷线以下	矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥	硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥	—
	受侵蚀性环境水或侵蚀性气体作用的混凝土	根据侵蚀性介质的种类、浓度等具体条件按专门(或设计)规定选用		
	厚大体积的混凝土	粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥	硅酸盐水泥、快硬硅酸盐水泥

续表

混凝土工程特点或所处环境条件		优先选用	可以使用	不得使用
工程特点	要求快硬的混凝土	快硬硅酸盐水泥、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
	高强(强度>C60)的混凝土	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
	有抗渗性要求的混凝土	普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥	—	不宜使用矿渣硅酸盐水泥
	有耐磨性要求的混凝土	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
	蒸汽养护环境混凝土	矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥	硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥	—

## 2) 水泥强度等级的选择

水泥强度等级应与需配制的混凝土设计强度等级相适宜。如用高强度等级水泥配制低强度等级混凝土,会使水泥用量偏少,影响混凝土的和易性与密实性,此时应加入一定量的混合材料来改善;如用低强度等级水泥配制高强度等级混凝土,则会使水泥用量过大,不经济,且会影响混凝土其他的技术性质,如增加干缩等,此时可考虑用掺加外加剂的方法来提高混凝土强度。

经验表明,一般以水泥强度等级(以 MPa 为单位)为混凝土强度等级的 1.0~1.5 倍为宜;配制强度等级较高的混凝土时,以水泥强度等级为混凝土强度等级的 0.7~1.2 倍为宜。但是,随着混凝土要求的强度等级不断提高,配制时一般不受此比例的约束。

水泥混凝土路面用水泥强度等级的选择,应根据路面交通等级所要求的设计抗压强度、抗折强度参照表 3-2 确定。当水泥供应条件允许时,应优先选用早强型水泥,以缩短路面养护时间,尽早开放交通。

表 3-2 各交通等级路面水泥各龄期的抗压强度、抗折强度

交通等级	特重交通		重交通		中、轻交通	
	龄期/d	3	28	3	28	3
抗压强度/MPa, ≥	25.5	57.5	22.0	52.5	16.0	42.5
抗折强度/MPa, ≥	4.5	7.5	4.0	7.0	3.5	6.5

## 2. 细骨料

混凝土中直径为 0.15~4.75 mm 的骨料称为细骨料。一般采用天然岩石经长期风化等自然条件形成的天然砂(如河砂、海砂及山砂等)。配制混凝土时,细骨料的质量应满足



《建设用砂》(GB/T 14684—2011)的规定。

水泥混凝土用砂按技术要求分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类。Ⅰ类砂宜用于强度等级大于C60的混凝土；Ⅱ类砂宜用于强度等级为C30~C60的混凝土；Ⅲ类砂宜用于强度等级小于C30的混凝土和建筑砂浆。其技术要求主要包括：粗细程度及颗粒级配，含泥量、泥块含量及石粉含量，有害物质含量及坚固性等。

#### 1) 粗细程度及颗粒级配

砂的粗细程度是指不同粒径砂粒混合在一起的平均粗细程度。砂子通常分为粗砂、中砂、细砂三种规格。在混凝土各种材料用量相同的情况下，若砂过粗，砂颗粒的表面积较小，混凝土的黏聚性、保水性较差；若砂过细，砂子颗粒表面积过大，虽黏聚性、保水性好，但因砂的表面积大，需较多水泥浆来包裹砂粒表面，当水泥浆用量一定时，富余的用于润滑的水泥浆较少，混凝土拌合物的流动性差，甚至还会影响混凝土的强度。所以，拌混凝土用的砂，不宜过粗，也不宜过细。颗粒大小均匀的砂是级配不良的砂。

砂的粗细程度通常用细度模数( $M_x$ )表示。细度模数越大，表示砂越粗，普通混凝土用砂的细度模数为3.7~1.6。当 $M_x=3.7\sim3.1$ 时为粗砂； $M_x=3.0\sim2.3$ 为中砂； $M_x=2.2\sim1.6$ 为细砂，按0.6 mm筛孔的累计筛余百分率分为三个级配区，级配范围见表3-3。普通混凝土在可能的情况下应选用粗砂或中砂，以节约水泥。

表 3-3 天然砂的颗粒级配范围

筛孔尺寸/mm	级配区		
	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区
	累计筛余/%		
9.5	0	0	0
4.75	10~0	10~0	10~0
2.36	35~5	25~0	15~0
1.18	65~35	50~10	25~0
0.6	85~71	70~41	40~16
0.3	95~80	92~70	85~55
0.15	100~90	100~90	100~90

由表中数值可见，在三个级配区内，只有0.6 mm级的累计筛余率是重叠的，故称其为控制粒级。控制粒级使任何一个砂样只能处于某一级配区内，避免出现属两个级配区的现象。其中Ⅰ区为粗砂区，用过粗的砂配制混凝土，拌合物的和易性不易控制，内摩擦角较大，混凝土振捣困难。Ⅲ区砂较细，为细砂区，适宜配制富混凝土和低流动性混凝土。超出Ⅲ区范围过细的砂，配成的混凝土不仅水泥用量大，而且强度将显著降低。Ⅱ区为中砂区，应优先选择级配在Ⅱ区的砂。当采用Ⅱ区砂时，应适当提高砂率；当采用Ⅲ区砂时，应适当减小砂率，以保证混凝土强度。工程中，若砂的级配不合适，可采用人工掺配的方法予以改善，即将粗、细砂按适当的比例掺和使用，也可将砂过筛，筛除过粗或过细的颗粒。

砂的颗粒级配是指不同粒径的颗粒互相搭配及组合的情况。级配良好的砂，其大小颗粒的含量适当，一般有较多的粗颗粒，并且有适当数量的中等颗粒及少量的细颗粒填充其空

隙,砂的总表面积及空隙率均较小。使用级配良好的砂,填充空隙用的水泥浆较少,不仅可以节省水泥,而且混凝土的和易性好,强度高,耐久性也较好。

### 2) 含泥量、泥块含量及石粉含量

含泥量是指砂中粒径小于 0.075 mm 的岩屑、淤泥和黏土颗粒总含量的百分数。泥块含量是颗粒粒径大于 1.18 mm,水洗碾压后可成为小于 0.6 mm 的块状黏土占淤泥颗粒的含量。石粉含量是人工砂生产过程中不可避免的粒径小于 0.075 mm 的颗粒的含量。水泥混凝土用砂的含泥量、泥块含量及石粉含量要求应符合表 3-4 的要求。

表 3-4 砂的含泥量、泥块含量及石粉含量限值

项 目			技术要求			
			I 类	II 类	III 类	
天然砂	含泥量/(按质量计,%) $\leq$		1.0	3.0	5.0	
	泥块含量/(按质量计,%) $\leq$		0	1.0	2.0	
人工砂	亚甲 蓝试 验	MB 值 $\leq$ 1.4 或快速 法试验合格	MB 值 $\leq$	0.5	1.0	1.4 或合格
			石粉含量/(按质量计,%) $\leq$	10.0		
		泥块含量/(按质量计,%) $\leq$		0	1.0	2.0
		MB 值 $>$ 1.4 或快速 法试验不合格	石粉含量/(按质量计,%) $\leq$	1.0	3.0	5.0
			泥块含量/(按质量计,%) $\leq$	0	1.0	2.0

水泥混凝土中这些细微颗粒可在骨料表面形成包裹层,妨碍骨料与水泥石的黏附;或以松散的颗粒存在,大大增加了骨料的表面积,因而增加了混凝土的需水量,特别是黏土颗粒,体积不稳定,干燥时收缩、潮湿时膨胀,对混凝土有很大的破坏作用。

### 3) 有害物质含量

砂在生产过程中,由于环境的影响和作用,常混有对混凝土性质有害的物质,主要有云母、轻物质、有机物、硫化物及硫酸盐、氯化物及贝壳等。云母为光滑的小薄片,与水泥的黏结性差,影响混凝土的强度和耐久性;硫化物和硫酸盐对水泥有腐蚀作用等。砂的有害物质含量限值见表 3-5。

表 3-5 砂的有害物质含量限值

项 目		技术要求		
		I 类	II 类	III 类
有害物 质含量	云母/(按质量计,%) $\leq$	1.0	2.0	
	轻物质/(按质量计,%) $\leq$	1.0		
	有机物	合格		
	硫化物及硫酸盐/(按 $SO_3$ 质量计,%) $\leq$	0.5		
	氯化物/(以氯离子质量计,%) $\leq$	0.01	0.02	0.06
	贝壳(海砂)/(按质量计,%) $\leq$	3.0	5.0	8.0