



## 第三章 水 泥

### 本章要求

1. 掌握通用硅酸盐水泥熟料的矿物组成及特性。
2. 掌握通用硅酸盐水泥的技术要求和主要性能的检测方法。
3. 掌握通用硅酸盐水泥的品种、储存及选用原则。
4. 理解通用硅酸盐水泥的水化、凝结和硬化过程。
5. 理解水泥石的腐蚀类型、基本原因及预防措施。
6. 了解通用硅酸盐水泥的生产过程和其他品种水泥的特性及应用。

重点:通用硅酸盐水泥的技术要求和主要性能的检测方法。

难点:通用硅酸盐水泥的水化、凝结和硬化过程。

### 教学要求

本章建议采用6~8个学时,其中第一节至第三节为必学内容。

能力目标	知识要点	权 重	自测分数
1. 能明确区分六大通用硅酸盐水泥。 2. 能对水泥的细度、凝结时间、安定性和强度进行检测并判定结果。	通用硅酸盐水泥的分类及生产工艺、水泥石的腐蚀类型及预防措施	15%	
3. 能根据工程特点与所处环境正确选用通用硅酸盐水泥的品种。 4. 能根据工程所处环境判断可能发生的腐蚀,并采取合适的防腐蚀措施。	通用硅酸盐水泥的定义及主要技术要求	65%	
5. 能正确地对水泥进行验收、储存及取样	通用硅酸盐水泥的储存及选用原则	20%	

## 教学参考标准

《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)、《水泥取样方法》(GB/T 12573—2008)、《水泥细度检验方法 筛析法》(GB/T 1345—2005)、《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)、《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》(GB/T 17671—1999)。

与水混合后成为塑性浆体,经一系列物理、化学作用凝结硬化变成坚硬的石状体,并能将砂、石等散粒状材料胶结为整体的水硬性胶凝细磨材料称为水泥。水泥是主要的建筑材料之一,被广泛应用于工业与民用建筑、道路、水利和国防工程。水泥作为胶凝材料与骨料及增强材料混合可制成混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土,也可配制成砂浆。水泥品种繁多,按其主要水硬性物质的不同可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥等,其中以硅酸盐水泥应用最为广泛。硅酸盐水泥按其性能和用途的不同又可分为通用硅酸盐水泥、专用水泥和特性水泥三大类,如图 3-1 所示。

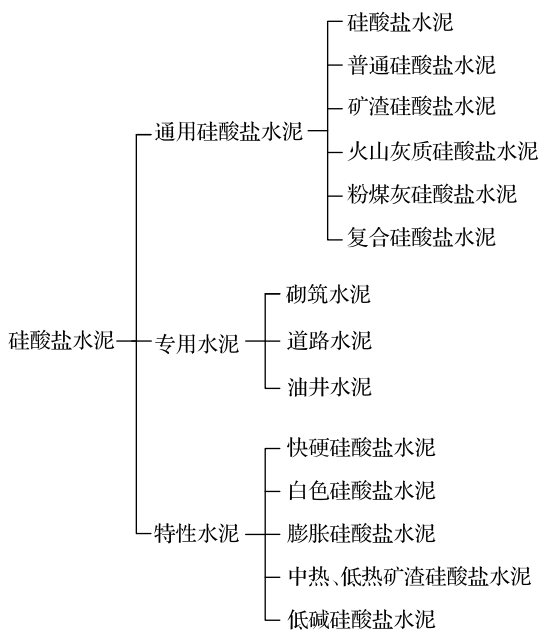


图 3-1 硅酸盐水泥的分类

## 第一节 通用硅酸盐水泥概述

通用硅酸盐水泥包括硅酸盐水泥、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。

### 一、通用硅酸盐水泥的生产工艺流程

通用硅酸盐水泥的生产原料主要为石灰质原料(如石灰石、白垩等)和黏土质原料(如黏土、页岩等),有时为调整化学成分还需加入少量辅助原料(如铁矿石等)。为调整通用硅酸

盐水泥的凝结时间,在生产的最后阶段还要加入石膏。

概括地讲,通用硅酸盐水泥的生产工艺流程就是两磨(磨细生料、磨细熟料)一烧(将生料煅烧成熟料),如图 3-2 所示。

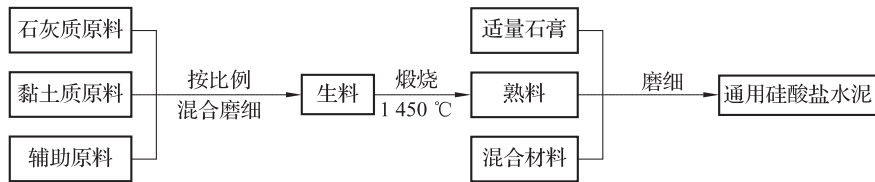


图 3-2 通用硅酸盐水泥的生产工艺流程

## 二、通用硅酸盐水泥的组分与组成材料

### (一)通用硅酸盐水泥的组分

通用硅酸盐水泥的组分见表 3-1。

表 3-1 通用硅酸盐水泥的组分

品 种	代 号	组分(质量分数)/%				
		熟料+石膏	粒化高炉矿渣	火山灰质混合材料	粉煤灰	石灰石
硅酸盐水泥	P·I	100	—	—	—	—
	P·II	≥95	≤5	—	—	—
		≥95	—	—	—	≤5
普通硅酸盐水泥	P·O	≥80 且 <95	>5 且 ≤20			—
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	≥50 且 <80	>20 且 ≤50	—	—	—
	P·S·B	≥30 且 <50	>50 且 ≤70	—	—	—
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	≥60 且 <80	—	>20 且 ≤40	—	—
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	≥60 且 <80	—	—	>20 且 ≤40	—
复合硅酸盐水泥	P·C	≥50 且 <80	>20 且 ≤50			

### (二)通用硅酸盐水泥的组成材料

通用硅酸盐水泥是以硅酸盐水泥熟料、适量的石膏及规定掺量的混合材料制成的水硬性胶凝材料。

#### 1. 硅酸盐水泥熟料

硅酸盐水泥熟料是将主要含  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的原料按适当比例磨成细粉状生料,然后送入水泥窑中进行高温煅烧(约  $1450^\circ\text{C}$ ),烧至部分熔融得到的以硅酸钙为主要矿物成分的水硬性胶凝物质。

生料在煅烧过程中,首先是石灰石和黏土分别分解出  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,然后在  $800\sim 1200^\circ\text{C}$  的温度下经过一系列的中间反应过程生成硅酸二钙( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )、铝酸三

钙( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )和铁铝酸四钙( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ );在  $1\ 400 \sim 1\ 450\ ^\circ\text{C}$  的温度下,硅酸二钙( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )又与  $\text{CaO}$  在熔融状态下发生反应生成硅酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )。这些经过反应生成的化合物(硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙)统称为水泥熟料的矿物组成。

当水泥熟料中的各种矿物单独与水作用时,会表现出不同的性能,见表 3-2。

表 3-2 水泥熟料矿物的组成、含量及特性

矿物名称		硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙
矿物组成		$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}$
简写式		$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
矿物含量		37%~60%	15%~37%	7%~15%	10%~18%
矿物特性	硬化速度	快	慢	最快	快
	早期强度	高	低	低	中
	后期强度	高	高	低	低
	水化热	大	小	最大	中
	耐腐蚀性	差	好	最差	中

水泥中各种熟料矿物的含量决定着水泥某一方面的性能。改变水泥熟料矿物成分之间的比例,水泥的性质就会发生相应的变化。例如,提高硅酸三钙的相对含量,就可以制得高强水泥和早强水泥;提高硅酸二钙的相对含量,同时适当降低硅酸三钙与铝酸三钙的相对含量,就可制得低热水泥或中热水泥。

## 2. 石膏

石膏是通用硅酸盐水泥中的重要组成部分,其主要作用是调节水泥的凝结时间,如天然二水石膏(G类)、硬石膏(A)、混合石膏(M类二级)及工业副产石膏(以硫酸钙为主要成分的工业副产品,如磷石膏、氟石膏等,使用前应经过试验证明对水泥性能无害)。

## 3. 混合材料

混合材料主要是指为改善水泥性能、调节水泥强度等级而加入到水泥中的矿物质材料。根据其性能可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火山灰性或潜在的水硬性,或兼有火山灰性和水硬性的矿物质材料,其绝大多数为工业废料或天然矿物。活性混合材料的主要作用是改善水泥的某些性能、扩大水泥的强度等级范围、降低水化热、增加产量。

活性混合材料主要有粒化高炉矿渣和粒化高炉矿渣粉、火山灰质混合材料和粉煤灰。

(1) 粒化高炉矿渣和粒化高炉矿渣粉。粒化高炉矿渣是将高炉炼铁的熔融矿渣经水或水蒸气急速冷却处理所得到的质地疏松、多孔的粒状物。将符合规定要求的粒化高炉矿渣经干燥、粉磨,达到一定细度并且符合活性指数后得到的粉体称为粒化高炉矿渣粉。粒化高炉矿渣在急冷过程中,熔融矿渣的黏度增加得很快,来不及结晶,大部分呈玻璃态(一般占80%以上),潜存较高的化学能(潜在活性)。粒化高炉矿渣的活性主要来源于其中的活性二

氧化硅和活性氧化铝。粒化高炉矿渣的化学成分与硅酸盐水泥熟料相近,差别在于氧化钙含量比熟料低,氧化硅含量较高。粒化高炉矿渣中氧化铝和氧化钙含量越高,氧化硅含量越低,则矿渣活性越高,所配制的水泥强度也越高。

(2)火山灰质混合材料。火山灰质混合材料泛指以活性二氧化硅及活性氧化铝为主要成分的活性混合材料。它的应用是从天然火山灰开始的,故而得名。火山灰质混合材料结构上的特点是疏松多孔、内比表面积大、易产生反应。

(3)粉煤灰。粉煤灰是煤粉锅炉除尘器所吸收的微细粉尘(又称为飞灰),是以二氧化硅和氧化铝为主要成分,经熔融、急冷而成的富含玻璃体的球状体。从其化学组分来分析,粉煤灰属于火山灰质混合材料,其活性主要取决于玻璃体的含量及无定形氧化铝和二氧化硅的含量。此外,粉煤灰结构致密,并且颗粒形状及大小对其活性也有较大影响,细小球形玻璃体含量越高,其活性越高。

#### 2)非活性混合材料

非活性混合材料是指在水泥中主要起填充作用而又不损害水泥性能的矿物质材料。它掺在水泥中的主要作用是扩大水泥的强度等级范围、降低水化热、增加产量、降低成本等。常用的非活性混合材料主要有石灰石( $Al_2O_3$ 的含量不大于2.5%)、砂岩及不符合质量标准的活性混合材料等。

### 三、通用硅酸盐水泥的技术要求

#### (一)化学指标

通用硅酸盐水泥的化学指标见表3-3。

表 3-3 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	$\leq 0.75$	$\leq 3.0$	$\leq 3.5$	5.0 <sup>a</sup>	$\leq 0.06^c$
	P·II	$\leq 1.50$	$\leq 3.5$			
普通硅酸盐水泥	P·O	—	$\leq 5.0$			
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	—	—	$\leq 4.0$	$\leq 6.0^b$	
	P·S·B	—	—		—	
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	—	—	$\leq 3.5$	$\leq 6.0^b$	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	—	—			
复合硅酸盐水泥	P·C	—	—			

a. 如果水泥压蒸试验合格,那么水泥中氧化镁的含量(质量分数)允许放宽至6.0%。

b. 如果水泥中氧化镁的含量(质量分数)大于6.0%,那么需进行水泥压蒸安定性试验并合格。

c. 当对水泥有更低要求时,该指标由买卖双方协商确定。

不溶物是指水泥经酸和碱处理后不能被溶解的残余物。它是水泥中非活性组分的反映,主要由生料、混合材料和石膏中的杂质组成。

烧失量是指水泥经高温灼烧后烧失的量占原质量的百分率,主要由水泥中未煅烧组分构成,如未烧透的生料、石膏带入的杂质、掺合料及存放过程中的风化物等。当样品在高温下灼烧时,会发生氧化、还原、分解及化合等一系列反应并放出气体。

## (二)碱含量

碱含量用  $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$  的计算值来表示。在混凝土中,当水泥的碱含量过高且骨料具有一定的活性时,会发生碱集料反应,造成胀裂破坏。因此,当使用活性骨料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中碱含量不得大于 0.6%或由买卖双方协商确定。

## (三)物理指标

### 1. 细度

水泥的细度是指水泥颗粒的粗细程度。

水泥与水的反应从水泥颗粒表面开始,逐渐深入内部。水泥颗粒越细,则其比表面积越大,与水的接触面积越大,水化反应进行得就越快和越充分。一般认为,粒径小于  $40\ \mu\text{m}$  的水泥颗粒才具有较高的活性,粒径大于  $90\ \mu\text{m}$  的颗粒接近惰性。通常情况下,水泥颗粒越细,其凝结硬化越快,强度(特别是早期强度)越高,收缩也越大。但水泥越细,越易吸收空气中的水分而受潮形成絮凝团,使水泥活性降低。此外,提高水泥的细度会增加粉磨时的能耗和成本,降低粉磨设备的生产率。

## 水泥细度检测

这里采用筛析法检测水泥的细度。

### 1) 检测依据

水泥细度的检测依据为《水泥细度检验方法 筛析法》(GB/T 1345—2005)。

### 2) 检测目的

检验水泥颗粒的粗细程度,评判水泥质量。

### 3) 仪器设备

(1) 负压筛析仪。负压筛析仪由筛座、负压筛、负压源及收尘器组成。其筛座由转速为  $(30\pm 2)\text{r}/\text{min}$  的喷气嘴、负压表、微电机及壳体等组成,如图 3-3 所示。

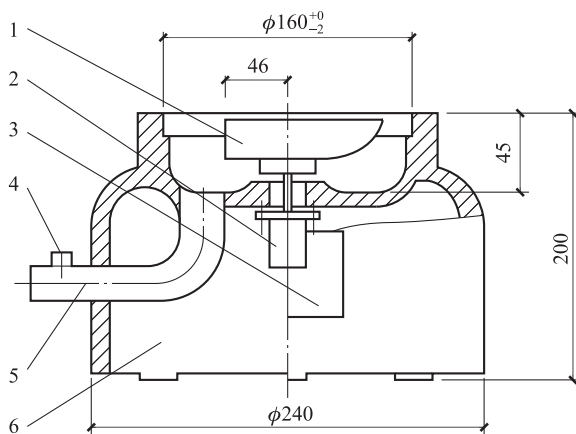


图 3-3 负压筛析仪筛座的组成

1—喷气嘴；2—微电机；3—控制板开口；4—负压表接口；5—负压源及收尘器接口；6—壳体

(2)天平。天平的称量为 100 g,感量为 0.01 g。

#### 4)检测步骤

(1)试验前把负压筛放在筛座上,盖上筛盖,接通电源,检查控制系统,调节负压为 4 000~6 000 Pa。

(2)称取水泥试样(精确至 0.01 g)。80 μm 筛析试验称取 25 g,45 μm 筛析试验称取 10 g。将试样置于洁净的负压筛中,将负压筛放在筛座上,盖上筛盖。

(3)启动负压筛析仪,连续筛析 2 min,在此期间若有试样黏附于筛盖上,可轻轻敲击筛盖使试样落下。

(4)筛毕,取下筛子,倒出筛余物,用天平称量筛余物的质量(精确至 0.01 g)。

#### 5)结果计算与评定

水泥试样筛余百分数按式(3-1)计算(精确至 0.1%)。

$$F = \frac{R_i}{W} \times 100\% \quad (3-1)$$

式中, $F$ 为水泥试样筛余百分数(%); $R_i$ 为水泥筛余物的质量(g); $W$ 为水泥试样的质量(g)。

进行合格评定时,每个样品应称取两个试样分别筛析,取筛余百分数的平均值为筛析结果。

## 2. 凝结时间

水泥从加水开始到失去流动性所需要的时间称为凝结时间。凝结时间又分为初凝时间和终凝时间。初凝时间是指从水泥加水拌和到水泥浆开始失去流动性所需要的时间;终凝时间是指从水泥加水拌和到水泥浆完全失去流动性并开始具有强度所需要的时间。

水泥凝结时间是以标准稠度的水泥净浆,在规定的温湿度条件下,用维卡仪来测定的。

### 水泥净浆凝结时间测定

#### 1)检测依据

水泥净浆凝结时间检测的依据为《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)。

#### 2)检测目的

测定水泥的初凝时间和终凝时间,评定水泥的质量。

#### 3)仪器设备

(1)湿气养护箱。湿气养护箱的温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,相对湿度大于 90%。

(2)维卡仪。维卡仪由金属滑杆[其下部可旋接测凝结时间用试针、测标准稠度用试杆或试锥,滑动部分的总质量为 $(300 \pm 1)\text{g}$ ]、松紧螺丝、标尺、指针和底座组成,如图 3-4 所示。

(3)其他仪器。其他仪器包括天平(称量不小于 1 000 g,感量不大于 1 g)和量筒(最小刻度为 0.1 mL,精度为 1%)。

#### 4)检测步骤

(1)称取水泥试样 500 g,按标准稠度用水量制备标准稠度水泥净浆并一次装满试模,振动数次刮平,立即放入湿气养护箱中。记录水泥全部加入水中的时间,作为凝结时间的起始时间。

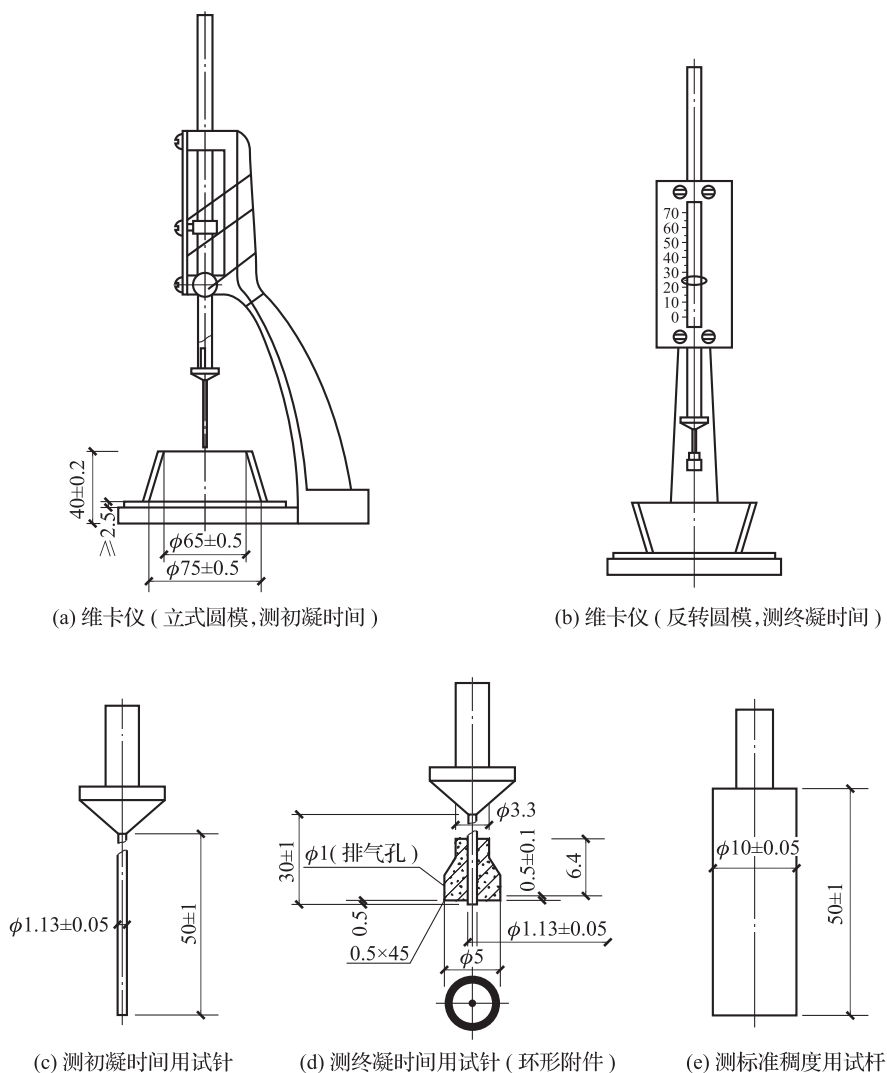


图 3-4 维卡仪及相关配件

(2) 初凝时间的测定。首先调整维卡仪,使其试针接触玻璃板时的指针为零。将圆形试模在湿气养护箱中养护至加水后 30 min 时进行第一次测定。测定时,从养护箱中取出圆形试模放到试针下,调整试针使其与水泥净浆表面接触,拧紧螺丝,然后突然放松,使试针垂直自由地沉入水泥净浆。观察试针停止下沉或释放试针 30 s 时指针的读数。临近初凝时,每隔 5 min 测定一次,当试针沉至距底板( $4\pm 1$ )mm 时为水泥达到初凝状态。

(3) 终凝时间的测定。为了准确观察试针沉入的状况,在试针上安装一个环形附件。在完成水泥初凝时间测定后,立即将圆形试模连同浆体以平移的方式从玻璃板上取下,翻转  $180^\circ$  (使直径大的一端向上,直径小的一端向下)后放在玻璃板上,再放入湿气养护箱中继续养护,临近终凝时间时,每隔 15 min 测定一次。当试针沉入水泥净浆只有 0.5 mm 时,即环形附件开始不能在水泥浆上留下痕迹时为水泥达到终凝状态。

(4) 当水泥达到初凝或终凝时,应立即重复上述操作一次。当两次结论相同时才能确定



水泥达到初凝或终凝状态。每次测定不能让试针落入原针孔;每次测定后,须将圆形试模放回湿气养护箱内并将试针擦净,而且要防止圆形试模受振。

#### 5) 结果计算与评定

(1) 由水泥全部加入水中至初凝状态的时间为水泥的初凝时间,用 min 表示。

(2) 由水泥全部加入水中至终凝状态的时间为水泥的终凝时间,用 min 表示。

规定水泥的凝结时间在施工中具有重要意义。初凝时间不宜过早是为了有足够的时间对混凝土进行搅拌、运输、浇筑和振捣等操作;终凝时间不宜过长是为了使混凝土尽快硬化,产生强度,以便尽快拆去模板,提高模板周转率,缩短工期。

### 3. 标准稠度用水量

由于加水量的多少对水泥的一些技术性质(如凝结时间等)的测定值影响很大,因而在测定这些性质时,必须在一个规定的稠度下进行,这个规定的稠度称为标准稠度。水泥净浆达到标准稠度时,所需的拌合水量占水泥质量的百分比称为标准稠度用水量。当水泥熟料矿物的成分和细度不相同,其标准稠度用水量也不相同。

## 水泥标准稠度用水量测定

这里采用标准法测定水泥的标准稠度。

#### 1) 检测依据

水泥标准稠度检测的依据为《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)。

#### 2) 检测目的

测定水泥净浆达到标准稠度时的用水量。

#### 3) 仪器设备

(1) 水泥净浆搅拌机。水泥净浆搅拌机由搅拌锅、搅拌叶片、传动机构和控制系统组成。搅拌叶片做与旋转方向相反的公转和自转,控制系统可自动控制或手动控制。

(2) 维卡仪。维卡仪的金属滑杆下部旋接测标准稠度用试杆,如图 3-4(e)所示。

(3) 其他仪器。所用其他仪器与水泥净浆凝结时间测定试验中相同。

#### 4) 检测步骤

(1) 调整维卡仪并检查水泥净浆搅拌机,使维卡仪上的金属滑杆能自由滑动,并使试杆接触玻璃板时指针对准零点。确认搅拌机运行正常,并用湿布将搅拌锅和搅拌叶片擦湿。

(2) 称取水泥试样 500 g,拌合水量按经验确定并用量筒量好。

(3) 将拌合水倒入搅拌锅内,然后在 5~10 s 内将水泥试样加入水中。将搅拌锅放在锅座上,升至搅拌位,起动搅拌机,先低速搅拌 120 s,停 15 s,再快速搅拌 120 s,然后停机。

(4) 搅拌结束后,立即将水泥净浆装入已置于玻璃底板上的圆形试模中,用小刀插捣,轻轻振动数次排出气泡,刮去多余净浆;抹平后迅速将圆形试模和比例底板移到维卡仪的底座上,调整试杆至与水泥净浆表面接触,拧紧螺丝,然后突然放松,使试杆垂直自由地沉入水泥净浆中。

(5) 在试杆停止沉入或释放试杆 30 s 时记录试杆到底板的距离。整个操作应在搅拌后 1.5 min 内完成。

## 5) 结果计算与评定

试杆沉入净浆并距底板 $(6\pm 1)$ mm时的水泥净浆为标准稠度水泥净浆。标准稠度用水量 $(P)$ 以拌和标准稠度水泥净浆的水量占水泥试样总质量的百分数为结果。

## 4. 安定性

水泥在凝结硬化过程中,体积变化均匀稳定的性质称为安定性。硅酸盐水泥在凝结硬化过程中的体积收缩绝大部分是在硬化之前完成的,因此,水泥石(包括混凝土和砂浆)的体积变化比较均匀稳定,即安定性良好。如果水泥中某些成分的化学反应不能在硬化前完成而在硬化后进行,并伴随体积不均匀的变化,那么会在已硬化的水泥石内部产生应力,当达到一定程度时会使水泥石开裂,引起安定性不良。水泥安定性不良一般是熟料中所含的游离氧化钙、游离氧化镁过多或生产时掺入的石膏过多等原因造成的。由游离的氧化钙过多引起的水泥安定性不良可用沸煮法(分雷氏法和试饼法)检验,在有争议时以雷氏法为准。

## 水泥安定性测定

## 1) 检测依据

水泥安定性检测的依据为《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)。

## 2) 检测目的

检验水泥是否由于游离氧化钙造成了安定性不良,以评定水泥的质量。

## 3) 仪器设备

(1) 沸煮箱。沸煮箱内装入的水应保证在 $(30\pm 5)$ min内由室温升至沸腾并保持3h以上,沸煮过程中不得补充水。

(2) 雷氏夹。雷氏夹如图3-5所示。当一个指针的根部悬挂在一根尼龙丝上,另一个指针的根部挂上300g的砝码时,两个指针针尖的距离增加值应为 $(17.5\pm 2.5)$ mm,即 $2x=(17.5\pm 2.5)$ mm(见图3-6),去掉砝码后针尖的距离能恢复至挂砝码前的状态。

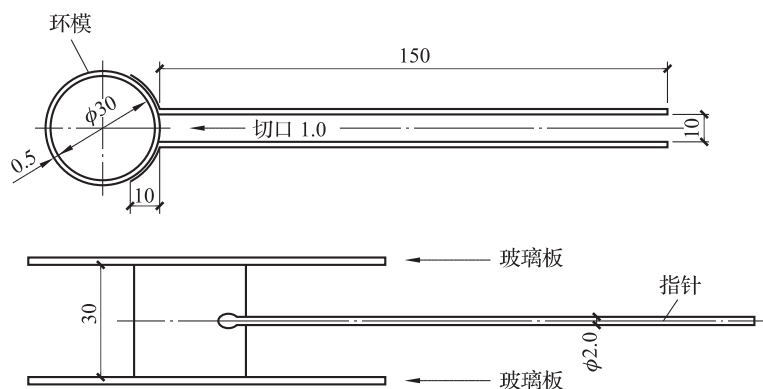


图 3-5 雷氏夹

(3) 雷氏夹膨胀测定仪。雷氏夹膨胀测定仪如图3-7所示,标尺最小刻度为0.5mm。

(4) 湿气养护箱。

(5) 其他仪器。所用其他仪器与标准稠度用水量测定试验相同。

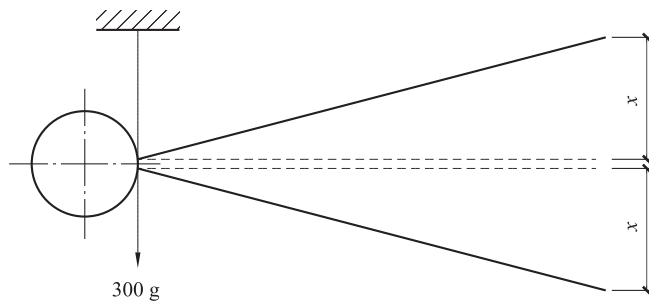


图 3-6 雷氏夹受力示意图

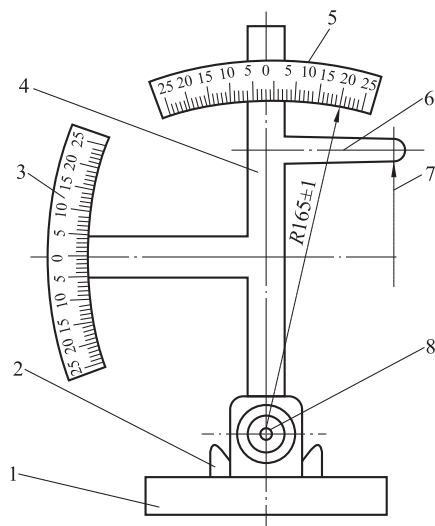


图 3-7 雷氏夹膨胀测定仪

1—底座；2—模子座；3—测弹性标尺；4—立柱；5—测膨胀值标尺；  
6—悬臂；7—悬丝；8—弹簧顶钮

#### 4) 检测步骤

(1) 测定前的准备工作。每个试样需制作两个试件，每个雷氏夹需配备两块质量为 75~85 g 的玻璃板，一垫一盖，并在与水泥接触的玻璃板和雷氏夹内表面涂一层机油。

(2) 将制备好的标准稠度水泥净浆立即一次装满雷氏夹，用小刀插捣数次，抹平，并盖上涂有有机油的玻璃板，然后将试件移至湿气养护箱内养护(24±2)h。

(3) 撤去玻璃板并取下试件，先测量雷氏夹指针尖端间的距离(A)，精确至 0.5 mm；然后将试件放入沸煮箱水中的试件架上，指针朝上，调好水位与水温，接通电源，用 25~35 min 的时间加热至沸腾，并保持 175~185 min。

(4) 取出沸煮后冷却至室温的试件，用雷氏夹膨胀测定仪测量雷氏夹两指针尖端的距离(C)，精确至 0.5 mm。

#### 5) 结果计算与评定

当两个试件沸煮后增加的距离(C-A)的平均值不大于 5.0 mm 时，即认为水泥安定性合格。当两个试件沸煮后增加的距离(C-A)的平均值超过 5.0 mm 时，应用同一样品立即

重做一次试验。再如此,则认为该水泥为安定性不合格。

由于游离氧化镁的水化作用比游离氧化钙的缓慢,因此必须用压蒸法才能检验出它的危害作用。石膏的危害则需长期浸在常温水中才能发现。

### 5. 强度

水泥的强度是表征水泥力学性能的重要指标,它与水泥的矿物组成、水泥的细度、水灰比、水化龄期和环境温度等有关,为了使试验结果有可比性,水泥强度必须按《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)的规定进行检验。

将用水泥、标准砂及水按规定比例(水泥:标准砂:水=1:3:0.5)和规定方法制成的规格为40 mm×40 mm×160 mm的标准试件,在标准条件[1 d内放入温度为(20±1)℃、相对湿度不低于90%的养护箱中;1 d后放入温度为(20±1)℃的水中]下养护,测定其3 d和28 d龄期时的抗折强度和抗压强度,据此划分水泥的强度等级,并按照3 d龄期时的强度大小分为普通型水泥和早强型(用R表示)水泥。

## 水泥胶砂强度检测

### 1) 检测依据

水泥胶砂强度检测的依据为《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)。

### 2) 检测目的

测定水泥各龄期的强度,以确定水泥的强度等级,或已知强度等级,检验强度是否满足国家标准所规定的各龄期强度数值。

### 3) 仪器设备及工具

(1)行星式搅拌机。行星式搅拌机应符合《行星式水泥胶砂搅拌机》(JC/T 681—2005)的要求,如图3-8所示。

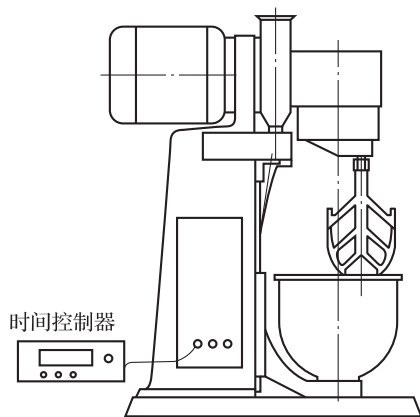


图 3-8 行星式搅拌机示意图

(2)试模。试模由三个水平的模槽(三联模)组成,可同时制作三个截面为40 mm×40 mm、长度为160 mm的棱柱形试体。在组装试模时,应用黄干油等密封材料涂覆模型的外接缝,试模的内表面应涂上一薄层模型油或机油。为控制试模内料层的厚度和刮平胶砂,应备有两个播料器和一个金属刮平直尺。

(3)振实台。振实台应符合《水泥胶砂试体成型振实台》(JC/T 682—2005)的要求,如

图 3-9 所示。

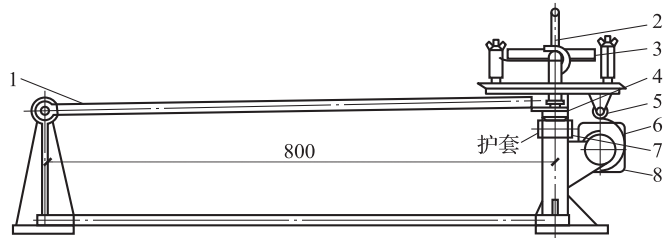


图 3-9 振实台示意图

1—臂杆；2—卡具；3—模套；4—突头；5—随动轮；6—凸轮；7—止动器；8—同步电机

(4) 抗折强度试验机。抗折强度试验机应符合《水泥胶砂电动抗折试验机》(JC/T 724—2005)的要求,如图 3-10 所示。

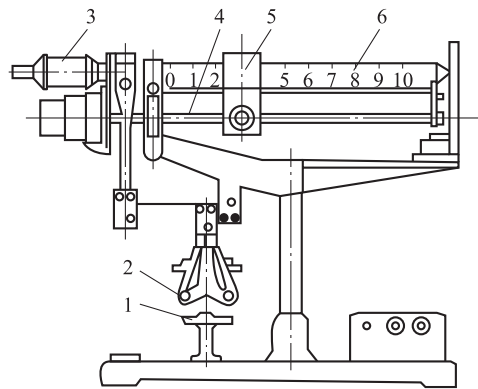


图 3-10 抗折强度试验机示意图

1—手轮；2—抗压夹具；3—平衡砣；4—丝杆；5—游动砣码；6—大杠杆

(5) 抗压强度试验机。抗压强度试验机的最大荷载以 200~300 kN 为佳,在较大的 4/5 量程范围内记录的荷载的精度应为  $\pm 1\%$ ,并具有按  $(2\ 400 \pm 200) \text{ N/s}$  的速率加荷的能力。

(6) 抗压夹具。抗压夹具的受压面积为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,并应符合《40 mm×40 mm 水泥抗压夹具》(JC/T 683—2005)的要求。

(7) 其他。胶皮刮具、小播料器、勺子、金属直尺、塑料锤、天平(精度为 1 g)、滴管(精度为 1 mL)。

#### 4) 检测步骤

##### (1) 水泥胶砂试件的制作。

①按 1 : 3 : 0.5 的比例准备水泥、中国 ISO 标准砂、拌合用水。一般来说,一锅胶砂可做成三个试件,每锅胶砂的材料用量见表 3-4。

表 3-4 每锅胶砂的材料用量

材 料	水泥	中国 ISO 标准砂	水
材料用量/g	450±2	1 350±5	225±1

②将水加入胶砂搅拌锅内,再加入水泥,把搅拌锅放在固定架上,升至固定位置;然后起动机,低速搅拌30 s,在第二个30 s开始时均匀地加入标准砂,再高速搅拌30 s;停90 s,在第一个15 s内将叶片和搅拌锅壁上的胶砂刮入锅中间。在高速下继续搅拌60 s。各阶段的搅拌时间误差应不大于1 s。

③将试模内壁均匀涂刷一层机油,并将空试模和模套固定在振实台上。

④用勺子将搅拌锅内的水泥胶砂分两次装模。装第一层时,每个槽里先放入300 g水泥胶砂,用大播料器垂直架在模套顶部沿每个模槽来回一次将料层播平,接着振动60次;再装第二层水泥胶砂,用小播料器刮平,再振动60次。

⑤移走模套,取下试模,用金属直尺以近似 $90^\circ$ 的角度架在试模模顶一端,沿试模长度方向做锯齿动作,由一端慢慢向另一端移动,一次将超过试模部分的胶砂刮去,并用同一直尺以近乎水平的方向将试件表面抹平。

(2)水泥胶砂试件的养护。

①脱模前的处理和养护。去掉试模四周的胶砂,立即放入雾室或湿箱的水平架上养护,使湿空气与试模各边接触,一直养护到规定的脱模时间再取出试件。养护时不应将试模放在其他试模上。脱模前用防水墨汁或颜料笔对试件进行编号。两个龄期以上的试件,在编号时应将同一试模中的三个试件分在两个以上龄期内。

②脱模。脱模可用塑料锤、橡皮榔头或专门的脱模器,并应非常小心。对于24 h龄期的,应在破型试验前20 min内脱模。对于24 h以上龄期的,应在成型后20~24 h脱模。

③水中养护。将脱模后已做好标记的试件立即水平或竖直放在 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ 的水中养护。水平放置时,刮平面应朝上。

试件应放在不易腐烂的算子上,并彼此保持一定的间距,以让水与试件的六个面接触。养护期间,试件间的间隔和试件上表面的水深不得小于5 mm。每个养护池只养护同类型的水泥试件。不允许在养护期间全部换水。

除24 h龄期或延迟至48 h脱模的试件外,所有到龄期的试件均应在破型前15 min从水中取出。擦去试件表面的沉积物,并用湿布覆盖至试验为止。

④试件的龄期。试件的龄期是从水泥加水搅拌起算的。不同龄期的水泥胶砂试件强度在下列时间里进行测定:24 h $\pm$ 15 min,48 h $\pm$ 30 min,72 h $\pm$ 45 min,7 d $\pm$ 2 h, $>$ 28 d $\pm$ 8 h。

(3)水泥胶砂试件的强度测定。

①抗折强度试验。将试件安放在抗折夹具内,使试件的侧面与抗折强度试验机的支撑圆柱接触,试件长轴垂直于支撑圆柱。起动试验机,以 $(50\pm 10)\text{N/s}$ 的速度均匀地加荷,直至试件断裂。

②抗压强度试验。保持抗折强度试验后的六个断块试件处于潮湿状态,并立即进行抗压试验。将断块试件放入抗压夹具内,并以试件的侧面作为受压面。起动抗压强度试验机,以 $(2\ 400\pm 200)\text{N/s}$ 的速度进行加荷,直至试件被破坏。

5)结果计算与评定

(1)抗折强度。

①试件的抗折强度 $f_{\text{tm}}$ 按式(3-2)计算,精确至0.1 MPa。

$$f_{\text{tm}} = \frac{3FL}{2b^3} = 0.002\ 34F \quad (3-2)$$

式中,  $F$  为折断时施加于试件中部的荷载(N);  $L$  为支撑圆柱之间的距离(mm),  $L=100$  mm;  $b$  为试件截面正方形的边长(mm),  $b=40$  mm。

②以一组三个试件抗折结果的平均值作为试验结果。当三个强度值中有超出平均值±10%的数值时,应剔除后再取平均值作为抗折强度试验结果。试验结果精确至0.1 MPa。

(2)抗压强度。

①试件的抗压强度  $f_c$  按式(3-3)计算,精确至0.1 MPa。

$$f_c = \frac{F}{A} = 0.000\ 625F \quad (3-3)$$

式中,  $F$  为试件被破坏时的最大压力荷载(N);  $A$  为受压部分的面积( $\text{mm}^2$ ),  $A=40$  mm×40 mm=1 600  $\text{mm}^2$ 。

②以一组三个棱柱体上得到的六个抗压强度测定值的算术平均值作为试验结果。当六个测定值中有一个超出六个平均值的±10%的数值时,应剔除这个数值,以剩下五个的平均值作为结果。当五个测定值中还有超过其平均值±10%的数值时,则此组结果作废。试验结果精确至0.1 MPa。

### 课堂思考

测定水泥胶砂的强度时,为什么要使用标准砂并与水泥有一定的比例?

#### 6. 水化热

水泥在水化过程中所放出的热量称为水泥的水化热。大部分的水化热是在水化初期(3~7 d)放出的,以后逐步减少。水泥放热量的大小及放热速度与水泥熟料的矿物组成和细度有关。硅酸盐水泥水化热很大,冬期施工时,水化热有利于水泥的正常凝结硬化。但对于大体积混凝土工程,如大型基础、大坝、桥墩等,水化热是有害的因素。由于混凝土本身是热的不良导体,积聚在其内部的热量不易散出,常使内部温度达到50~60℃,而混凝土表面散热很快,内外温差引起的应力可使混凝土产生裂缝。此外,水化热还容易在混凝土结构中引起微裂缝,影响混凝土结构的完整性。因此,大体积混凝土施工时一般要严格控制水泥的水化热。

对于通用硅酸盐水泥,当化学指标中任意一项及凝结时间、强度、安定性中的任意一项不符合标准规定的指标时均判定为不合格品。

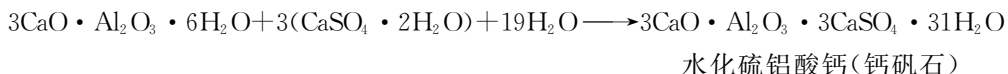
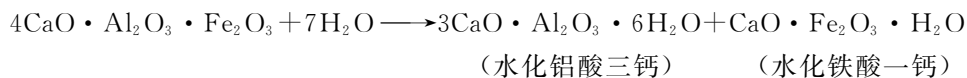
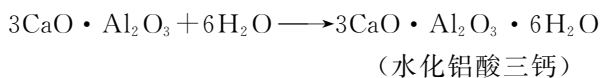
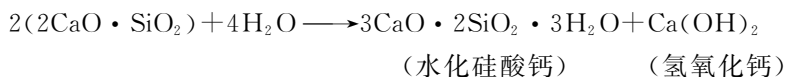
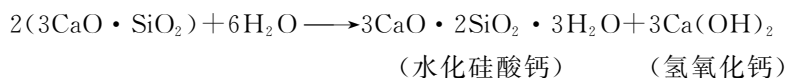
## 第二节 硅酸盐水泥

硅酸盐水泥是由硅酸盐水泥熟料、0~5%的石灰石或粒化高炉矿渣、适量石膏经磨细制成的水硬性胶凝材料。硅酸盐水泥分为两种类型,即I型和II型,不掺加混合材料的称为I型硅酸盐水泥,其代号为P·I。掺加不超过5%的石灰石或粒化高炉矿渣混合材料的称为II型硅酸盐水泥,其代号为P·II。

## 一、硅酸盐水泥的水化、凝结和硬化

### (一) 硅酸盐水泥的水化

水泥加水拌和后,水泥颗粒立即分散于水中并与水发生化学反应,生成水化产物并放出热量。其反应式为:



水化反应后生成的主要水化产物有两种类型,一种为凝胶体,另一种为晶体。其中,水化硅酸钙和水化铁酸钙为凝胶体,氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙为晶体。在完全水化的水泥石中,凝胶体约占 70%,氢氧化钙约占 20%。

### (二) 硅酸盐水泥的凝结

水泥加水拌和后发生剧烈的水化反应,一方面使水泥浆中的自由水分逐渐减少;另一方面,由于结晶和析出的水化产物逐渐增多,水泥颗粒表面的新生物厚度逐渐增大,使水泥浆中固体颗粒间的间距逐渐减少,越来越多的颗粒相互连接形成了骨架结构。此时,水泥浆便开始慢慢失去流动性,表现为水泥的初凝。

铝酸三钙水化最快,这会使水泥很快凝结,导致工程中缺少足够的时间进行操作。为此,在水泥中加入适量的石膏,一旦铝酸三钙开始水化,石膏就会与水化铝酸三钙反应生成针状的钙矾石。而随着钙矾石数量的增多,在水泥颗粒的表面会形成一层保护膜,阻止水泥颗粒表面的水化产物向外扩散,降低了水泥的水化速度,使水泥的初凝时间得以延缓。

当掺入水泥的石膏消耗殆尽时,水泥颗粒表面的钙矾石覆盖层一旦由于水泥水化物的积聚而被胀破,铝酸三钙等矿物就会再次快速水化,水泥颗粒逐渐相互靠近,直至连接形成骨架。此过程表现为水泥浆塑性逐渐消失,直到终凝。

### (三) 硅酸盐水泥的硬化

随着水泥水化的不断进行,凝结后的水泥浆结构内部孔隙不断被新生水化物填充,使水泥浆结构的强度不断增长,即使已形成坚硬的水泥石,只要条件适宜,其强度仍在缓慢增长。因此,硅酸盐水泥的硬化在长时期内是一个无休止的过程。

硅酸盐水泥的水化速度表现为早期快后期慢,特别是在最初的 3~7 d 水泥的水化速度最快,所以,硅酸盐水泥的早期强度发展最快。

硬化后的水泥浆体称为水泥石,它主要由凝胶体(胶体)、晶体、未水化的水泥熟料颗粒、毛细孔及游离的水分等组成。



水泥石的硬化程度越高,凝胶体含量越多,未水化的水泥颗粒和毛细孔含量越少,水泥石的强度越高。

#### (四)影响水泥凝结硬化的主要因素

##### 1. 水泥的熟料矿物组成及细度

由于水泥熟料中各种矿物的凝结硬化特点不同,因而当水泥中各矿物的相对含量不同时,水泥的凝结硬化特点就不同。水泥熟料的各种矿物凝结硬化特点见表 3-2。

水泥磨得越细,则水泥颗粒的平均粒径越小,比表面积越大,水化时与水的接触面越大,水化速度越快,水泥凝结硬化的速度就越快,早期强度就越高。

##### 2. 水灰比

水灰比是指水泥浆中水与水泥的质量之比。当水泥浆中加水较多时,水灰比较大,此时水泥的初期水化反应得以充分进行;但是由于水泥颗粒被水隔开的距离较远,颗粒间相互连接形成骨架结构所需的时间长,因而水泥浆凝结较慢。

水泥完全水化所需的水灰比为 0.15~0.25,而实际工程中往往加入更多的水以便利用水的润滑作用取得较好的塑性。当水泥浆的水灰比较大时,多余的水蒸发后会形成较多的孔隙,造成水泥石的强度较低。因此,水灰比过大会明显降低水泥的强度。

##### 3. 石膏的掺量

生产水泥时掺入的石膏主要作为缓凝剂使用,以延缓水泥的凝结硬化速度。掺入石膏后,生成的钙矾石晶体能改善水泥石的早期强度。但是石膏的掺量过多时,不仅不能缓凝,而且可能对水泥石的后期性能造成危害。

##### 4. 环境温度和湿度

水泥水化反应的速度与环境的温度有关,只有处于适当温度时,水泥的水化、凝结和硬化才能进行。通常来说,温度较高时,水泥的水化、凝结和硬化速度较快;温度较低时,水泥的水化作用延缓,强度增长缓慢。当环境温度低于 0℃时,水化反应停止,水结冰,导致水泥石被冻裂,结构被破坏。温度的影响主要表现在水泥水化的早期阶段,对后期影响不大。

水泥水化是水泥与水之间的反应,只有当水泥颗粒表面保持足够的水分时,水泥的水化、凝结和硬化才能充分进行。当环境湿度大时,水分不易蒸发,能满足水泥的水化、凝结和硬化所需的水分;当环境干燥时,水泥浆中的水分蒸发过快,在水分蒸发完毕后,水化作用将无法继续进行,硬化即停止,强度也不再增长,甚至还会在制品表面产生干缩裂缝。因此,使用水泥时必须注意养护,使水泥在适宜的温度及湿度环境中进行硬化,从而不断增加其强度。

##### 5. 龄期

水泥的水化、凝结和硬化是一个在较长时期内不断进行的过程,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,毛细孔不断减少,水泥的强度逐渐增加。实践证明,水泥一般在 28 d 内强度发展较快,28 d 后强度增长缓慢。

##### 6. 外加剂的影响

硅酸盐水泥的水化、凝结和硬化受硅酸三钙和铝酸三钙的制约,凡能对硅酸三钙和铝酸三钙的水化产生影响的外加剂,都能改变硅酸盐水泥的水化、凝结和硬化。加入促凝剂

( $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等)能促进水泥的水化、凝结和硬化,提高早期强度。相反,掺加缓凝剂(木钙、糖类等)会延缓水泥的水化、凝结和硬化,影响水泥早期强度的发展。

## 二、硅酸盐水泥的技术要求

### (一)细度的要求

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

### (二)凝结时间的要求

《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)规定,硅酸盐水泥的初凝时间不得小于  $45 \text{ min}$ ,终凝时间不得大于  $390 \text{ min}$ 。

### (三)安定性的要求

《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)规定,水泥出厂时,硅酸盐水泥中氧化镁的含量(质量分数)不得超过  $5.0\%$ ,若经压蒸安定性试验检验合格,则允许放宽到  $6.0\%$ 。硅酸盐水泥中三氧化硫( $\text{SO}_3$ )的含量(质量分数)不得超过  $3.5\%$ 。沸煮法检验必须合格。

### (四)强度的要求

硅酸盐水泥各强度等级和龄期的强度应符合表 3-5 的规定,若有一项指标不符合规定,则应降低强度等级,直到所有指标全部满足规定为止。

表 3-5 硅酸盐水泥各强度等级和龄期的强度

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

注:R 为早强型。

## 三、硅酸盐水泥的特性及应用

### 1. 强度高

硅酸盐水泥凝结硬化快,强度高,尤其是早期强度增长率大,特别适合早期强度要求高的工程、高强混凝土结构工程和预应力混凝土工程。

### 2. 水化热高

硅酸盐水泥  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{A}$  含量高,早期强度高,适用于冬期施工。但高放热量对大体积混凝土工程不利,若无可靠的降温措施,则不宜用于大体积混凝土工程。

### 3. 抗冻性好

硅酸盐水泥拌合物不易发生泌水,硬化后的水泥石密实度较大,其抗冻性优于其他通用

水泥,适用于严寒地区受反复冻融作用的混凝土工程。

#### 4. 碱度高、抗碳化能力强

硅酸盐水泥硬化后的水泥石呈强碱性,埋于其中的钢筋在碱性环境中表面生成一层灰色钝化膜,可保持几十年不生锈。空气中的  $\text{CO}_2$  与水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  会发生碳化反应生成  $\text{CaCO}_3$ ,使水泥石逐渐由碱性变为中性,当中性化深度达到钢筋附近时,钢筋失去碱性保护而锈蚀,表面疏松膨胀,造成钢筋混凝土构件报废。硅酸盐水泥碱性强且密实度高,抗碳化能力强,因此特别适用于重要的钢筋混凝土结构和预应力混凝土工程。

#### 5. 干缩小

硅酸盐水泥在硬化过程中会形成大量的水化硅酸钙凝胶体,使水泥石密实,游离水分子少,不易产生干缩裂纹,可用于干燥环境的混凝土工程。

#### 6. 耐磨性好

硅酸盐水泥强度高,耐磨性好,并且干缩小,可用于路面与地面工程。

#### 7. 耐腐蚀性差

硅酸盐水泥石中含有大量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和水化铝酸钙,容易引起软水、酸类和盐类的侵蚀,所以不宜用于受流动水、压力水、酸类和硫酸盐侵蚀的工程。

#### 8. 耐热性差

硅酸盐水泥的水化物在温度为  $250\text{ }^\circ\text{C}$  时开始脱水,导致水泥石强度下降。当达到  $700\text{ }^\circ\text{C}$  以上时,水泥石会受到破坏。因此,硅酸盐水泥不宜单独用于耐热混凝土工程。

#### 9. 湿热养护效果差

硅酸盐水泥经过蒸汽养护后,再经自然养护的 28 d 抗压强度往往低于未经蒸养的 28 d 抗压强度。

## 四、水泥石的腐蚀及其预防措施

### (一)水泥石的腐蚀

硅酸盐水泥硬化后即成为水泥石。水泥石在通常的使用条件下有较好的耐久性。但在某些腐蚀性介质作用下,硅酸盐水泥会逐渐受到损害,导致强度降低、性能改变,严重时会引起整个工程结构的破坏。引起水泥石腐蚀的原因有很多,且腐蚀是一个相当复杂的过程。水泥石腐蚀的类型主要有以下几种:

#### 1. 软水侵蚀

软水是不含或仅含少量  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$  等可溶性盐的水。雨水、雪水、蒸馏水、工厂冷凝水及含重碳酸盐甚少的河水与湖水等均属于软水。软水能使水化产物中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶解,并促使水泥石中其他水化产物发生分解,故软水侵蚀又称为溶出性侵蚀。

各种水化产物与水作用时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的溶解度最大,因此首先被溶出。在水量不多或无水压的静水情况下,由于周围的水迅速被溶出的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  所饱和,溶出作用很快终止,破坏作用仅发生于水泥石的表面部位,危害不大。但在大量水或流动水中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  会不断被溶出,特别是当水泥石渗透性较大而又受压力水作用时,水不仅能渗入水泥石内部,而且能产生渗流作用,将  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶解并渗滤出来,导致水泥石的密实度减小,强度受到影响;

随着液相中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浓度的降低,原来水化物间碱度的平衡受到破坏,引起其他水化产物的溶解或分解,最后剩下一些无胶结能力的硅酸凝胶、氢氧化铝、氢氧化铁等,水泥石结构彻底被破坏。

## 2. 酸类侵蚀

酸类侵蚀又称溶解性侵蚀。硅酸盐水泥水化产物呈碱性,其中含有较多的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,当遇到酸类或酸性水时就会发生中和反应,生成比  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶解度大的盐类,导致水泥石受损被破坏。

### 1) 碳酸的侵蚀

工业污水、地下水中常溶解着较多的  $\text{CO}_2$ ,这种碳酸水对水泥石的侵蚀作用的反应式为:



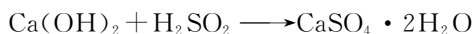
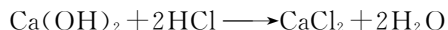
最初生成的  $\text{CaCO}_3$  溶解度不大,但若继续处于浓度较高的碳酸水中,则碳酸钙与碳酸水会进一步反应,其反应式为:



该反应为可逆反应,当水中溶有较多的  $\text{CO}_2$  时,上述反应向右进行;生成的  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  溶解度大,水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与碳酸水反应生成  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  而溶失, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浓度的降低又会导致其他水化产物的分解,使腐蚀作用进一步加剧。

### 2) 一般酸的腐蚀

工业废水、地下水、沼泽水中常含有多种无机酸、有机酸。工业窑炉的烟气中常含有二氧化硫( $\text{SO}_2$ ),二氧化硫遇水后生成亚硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_3$ )。各种酸类都会对水泥石造成不同程度的损害,其损害机理是酸类与水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生化学反应,生成物或易溶于水,或体积膨胀使水泥石产生内应力而导致破坏。无机酸中的盐酸、硝酸、硫酸、氢氟酸和有机酸中的醋酸、蚁酸、乳酸的腐蚀作用尤为严重。例如,盐酸、硫酸对水泥石腐蚀的反应式为:

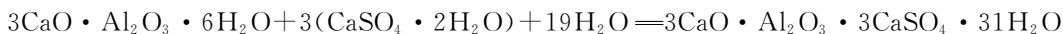


反应生成的  $\text{CaCl}_2$  易溶于水;生成的二水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )结晶膨胀,还会进一步引起硫酸盐的腐蚀。

## 3. 盐类腐蚀

### 1) 硫酸盐及氯盐的腐蚀

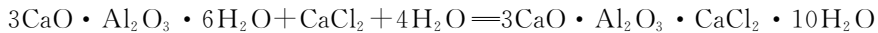
硫酸盐及氯盐的腐蚀属于膨胀型腐蚀。在一些湖水、海水、沼泽水、地下水及某些工业污水中常含硫酸盐,它们会先与硬化的水泥石结构中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生置换反应,生成硫酸钙( $\text{CaSO}_4$ )。硫酸钙再与水泥石中的水化铝酸钙发生反应,生成高硫型水化硫铝酸钙,其反应方程式为:



生成的高硫型水化硫铝酸钙含有大量结晶水,其体积较原体积增加 2 倍多,产生巨大的膨胀应力,因此对水泥石的破坏作用大。高硫型水化硫铝酸钙为针状晶体,俗称水泥杆菌。

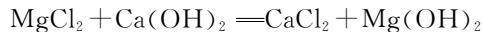
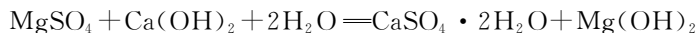
当水中硫酸盐浓度较高时,硫酸钙会在孔隙中直接结晶成二水石膏,造成膨胀压力,引起水泥石的破坏。

氯盐会对水泥石产生腐蚀,尤其会使钢筋产生严重锈蚀,这里主要介绍氯盐对水泥石的影响。氯盐进入水泥石主要有两种途径:一种途径是施工过程中掺加氯盐外加剂或拌合水中含有氯盐成分;另一种途径是环境中所含氯盐渗透到水泥石中。氯盐对水泥石的腐蚀机理是:氯化钠(NaCl)和氯化钙(CaCl<sub>2</sub>)等氯盐同水泥中的水化铝酸钙发生反应,生成膨胀性的复盐,使已硬化的水泥石被破坏,其反应方程式为:



#### 2) 镁盐的腐蚀(双重腐蚀)

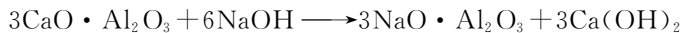
海水及地下水中常含有大量的镁盐,主要是硫酸镁(MgSO<sub>4</sub>)和氯化镁(MgCl<sub>2</sub>),它们与水泥石中的Ca(OH)<sub>2</sub>发生置换反应,其反应方程式为:



生成的氢氧化镁[Mg(OH)<sub>2</sub>]松软而无胶凝能力,CaCl<sub>2</sub>易溶于水,二水石膏则引起硫酸盐的破坏作用。因此,镁盐腐蚀属于双重腐蚀,腐蚀特别严重。

### 4. 强碱腐蚀

硅酸盐水泥水化产物呈碱性,一般碱类溶液浓度不大时不会对水泥石造成明显损害。但铝酸盐(C<sub>3</sub>A)含量较高的硅酸盐水泥遇到强碱(如NaOH)会发生反应,生成的铝酸钠易溶于水,其反应式为:



当水泥石被NaOH浸透后又在空气中干燥时,溶于水的铝酸钠会与空气中的CO<sub>2</sub>反应生成Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>。由于失去水分,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>在水泥石毛细管中结晶膨胀,引起水泥石疏松、开裂。

上述各类型腐蚀作用可以概括为下列三种破坏形式:

(1)溶解性浸蚀。溶解性浸蚀主要是介质将水泥石中的某些组分逐渐溶解带走,造成溶失性破坏。

(2)离子交换。这种破坏形式是侵蚀性介质与水泥石中的组分发生离子交换反应,生成容易溶解或是没有胶结能力的产物,破坏了原有的结构。

(3)形成膨胀组分。这种破坏形式是在侵蚀性介质的作用下,所形成的盐类结晶长大时体积增加,产生有害的内应力,导致膨胀性破坏。

值得注意的是,在实际工程中,水泥石的腐蚀往往是多种腐蚀介质同时存在的一个极其复杂的物理化学作用过程。引起水泥石腐蚀的外部因素是侵蚀介质。其内在因素有两个:一个是水泥石中含有易引起腐蚀的组分,即Ca(OH)<sub>2</sub>和水化铝酸钙;另一个是水泥石不密实。水泥水化反应理论需水量仅为水泥质量的23%左右,而实际应用时用水量多为40%~70%,多余水分会形成毛细管和孔隙存在于水泥石中,侵蚀性介质不仅在水泥石表面起作用,而且易进入水泥石内部引起严重破坏。

由于硅酸盐水泥水化产物中Ca(OH)<sub>2</sub>和水化铝酸钙含量较多,因此,其耐侵蚀性较其他水泥差。掺混合材料的水泥,其水化反应产物中Ca(OH)<sub>2</sub>明显减少,耐侵蚀性与硅酸盐水泥相比显著改善。

## (二)水泥石腐蚀的预防措施

### 1. 根据侵蚀环境特点合理选用水泥品种

水泥石中引起腐蚀的组分主要是Ca(OH)<sub>2</sub>和水化铝酸钙。当水泥石遭受软水等侵蚀

时,可选用水化产物中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量较少的水泥。若水泥石处在硫酸盐的腐蚀环境中,则可采用铝酸三钙含量较低的抗硫酸盐水泥。在硅酸盐水泥熟料中掺入混合材料可提高水泥的抗腐蚀能力。

### 2. 提高水泥石的密实度

水泥石中的毛细管、孔隙是引起水泥石腐蚀加剧的内在原因之一。因此,提高水泥石的密实度可使水泥石的耐侵蚀性得到改善。例如,采取强制搅拌、振动成型、真空吸水、掺加外加剂等措施,在满足施工操作的前提下降低水灰比等。

### 3. 表面加保护层

当侵蚀作用比较强烈时,需在水泥制品表面加保护层。保护层材料采用耐酸石料(石英岩、辉绿岩)、耐酸陶瓷、玻璃、塑料、沥青等。

## 第三节 普通硅酸盐水泥

普通硅酸盐水泥简称普通水泥,代号为 P·O。普通硅酸盐水泥中熟料和石膏的掺量之和应大于 80%且小于 95%,允许的符合标准要求的活性混合材料的掺量应大于 5%且不大于 20%。其中,允许使用不超过水泥质量 5%的符合标准要求的窑灰或不超过水泥质量 8%的非活性混合材料来代替。

普通硅酸盐水泥的技术要求如下:

- (1)细度的要求。比表面积不小于  $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。
- (2)凝结时间的要求。初凝时间不得小于 45 min,终凝时间不得大于 600 min。
- (3)强度的要求。根据 3 d 和 28 d 龄期的抗折强度和抗压强度,将普通硅酸盐水泥划分为 42.5、42.5R、52.5 和 52.5R 四个强度等级。普通硅酸盐水泥各强度等级和龄期的强度应符合表 3-6 的规定。

表 3-6 普通硅酸盐水泥各强度等级和龄期的强度

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
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	$\geq 27.0$		$\geq 5.0$	

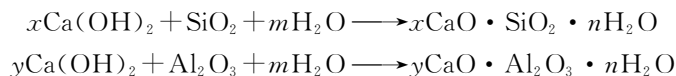
普通硅酸盐水泥与硅酸盐水泥的差别仅在于所含的活性混合材料稍多。但由于活性混合材料掺量较少,其矿物组成的比例仍在硅酸盐水泥的范围内,因此其性能、应用范围与硅酸盐水泥相近。与硅酸盐水泥相比,普通硅酸盐水泥的早期硬化速度稍慢,3 d 龄期强度略低,抗冻性、耐磨性及抗碳化性稍差,水化热略有降低,耐腐蚀性稍好。普通硅酸盐水泥的其他技术性质与硅酸盐水泥相同。

## 第四节 掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥

这里所指的硅酸盐水泥是指矿渣硅酸盐水泥、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。

### 一、活性混合材料及其作用

磨细的活性混合材料与水调和后,本身不会硬化或硬化极为缓慢,但在  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液中会发生显著水化反应,其水化反应式为:



生成的水化硅酸钙和水化铝酸钙具有水硬性,当有石膏存在时,水化铝酸钙还可以和石膏进一步反应生成水硬性产物——水化硫铝酸钙。

当活性混合材料掺入硅酸盐水泥中与水拌和后,首先发生的反应是硅酸盐水泥熟料水化生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;然后  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与掺入的石膏作为活性混合材料的激发剂,产生前述的反应(二次水化反应)。二次水化反应的速度较慢,受温度影响较大。温度高,则水化速度快、强度增长迅速;反之,则水化速度慢、强度增长缓慢。

可以看出,活性混合材料的活性是在  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和石膏作用下才激发出来的,故称它们为活性混合材料的激发剂,前者称为碱性激发剂,后者称为硫酸盐激发剂。

活性混合材料掺入硅酸盐水泥产生的作用主要表现为强度发展早低后高,水化热降低,抗腐蚀能力加强,节省熟料,降低能耗和成本,可调整硅酸盐水泥的强度等级。

### 二、掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥的组成

#### (一)矿渣硅酸盐水泥的组成

矿渣硅酸盐水泥(简称矿渣水泥)根据粒化高炉矿渣掺量的不同分为 A 型和 B 型两种, A 型矿渣硅酸盐水泥矿渣掺量大于 20% 且不大于 50%,代号为 P·S·A; B 型矿渣硅酸盐水泥矿渣掺量大于 50% 且不大于 70%,代号为 P·S·B。矿渣硅酸盐水泥中的矿渣允许用不超过水泥质量 8% 且符合标准要求的活性混合材料、非活性混合材料或符合标准要求的窑灰中的任意一种材料代替。

#### (二)火山灰质硅酸盐水泥的组成

火山灰质硅酸盐水泥(简称火山灰水泥)的代号为 P·P。水泥中熟料与石膏掺量之和应不小于 60% 且小于 80%;混合材料为符合标准要求的火山灰质活性混合材料,其掺量应大于 20% 且不大于 40%。

#### (三)粉煤灰硅酸盐水泥的组成

粉煤灰硅酸盐水泥(简称粉煤灰水泥)的代号为 P·F。水泥中熟料与石膏掺量之和应不小于 60% 且小于 80%;活性混合材料为符合标准要求的粉煤灰活性混合材料,其掺量应大于 20% 且不大于 40%。

#### (四)复合硅酸盐水泥的组成

复合硅酸盐水泥(简称复合水泥)的代号为P·C。水泥中熟料与石膏掺量之和应不小于50%且小于80%;混合材料为两种或两种以上的活性混合材料及非活性混合材料,其掺量应大于20%且不大于50%。所掺矿渣允许用不超过水泥质量8%且符合标准要求的窑灰代替。掺矿渣时活性混合材料的掺量不得与矿渣硅酸盐水泥重复。

### 三、掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥的技术要求

#### (一)细度的要求

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,80  $\mu\text{m}$  方孔筛筛余应不大于10%或45  $\mu\text{m}$  方孔筛筛余应不大于30%。

#### (二)凝结时间与安定性的要求

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得小于45 min,终凝时间不得大于600 min。

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安定性用沸煮法检验应合格。

#### (三)强度的要求

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按3 d、28 d 龄期抗压强度及抗折强度分为32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5和52.5R六个强度等级。各强度等级和龄期的强度应符合表3-7的规定。

表 3-7 掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥各强度等级和龄期的强度

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
32.5	$\geq 10.0$	$\geq 32.5$	$\geq 2.5$	$\geq 5.5$
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	$\geq 23.0$		$\geq 4.5$	

### 四、掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥的性能与应用

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都是在硅酸盐水泥熟料的基础上掺入较多的活性混合材料,再加上适量石膏共同磨细制成的。由于活性混合材料的掺量较多,且活性混合材料的化学成分基本相同,因此,它们具有一些相似的性质。这些性质与硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥相比有明显的不同。又由于不同的混合材料其结构不同,它们相互之间又具有一些不同的特性,这就决定了它们的特点和应用。这里从共性和个性两个方面来阐述它们的性质。



## (一)掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥的共性

### 1. 密度较小

硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的密度一般为  $3.05\sim 3.20\text{ g/cm}^3$ ；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，由于所掺混合材料的密度较小，因而其密度一般为  $2.7\sim 3.10\text{ g/cm}^3$ 。

### 2. 早期强度比较低，后期强度增长较快

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水泥熟料含量相对较少，加水拌和以后，首先是熟料矿物水化，水化后析出的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  作为碱性激发剂激发混合材料水化，生成水化硅酸钙、水化硫铝酸钙等水化产物，因此其早期强度比较低。随着后期二次水化的不断进行，水化产物逐渐增多，强度发展较快。

### 3. 对养护温、湿度敏感，适合蒸汽养护

当矿渣硅酸盐水泥、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水化温度降低时，水化速度明显减弱，强度发展缓慢。提高养护温度可以促进活性混合材料的水化，提高早期强度，但对后期强度的发展影响不大。而对硅酸盐水泥或普通水硅酸盐水泥进行蒸汽养护可提高早期强度，但后期强度发展要受到一定影响。

### 4. 水化热小

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熟料含量较少，放热量大的  $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$  相对较少。因此，其水化热小，适合于大体积混凝土施工。

### 5. 耐腐蚀性较好

由于矿渣硅酸盐水泥、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熟料含量少，水化以后生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  少，且二次水化还要进一步消耗  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，这就使水泥石结构中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量更低。因此，抵抗海水、软水及硫酸盐腐蚀性介质的作用较强。

### 6. 抗冻性、耐磨性较差

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抗冻性、耐磨性不及硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥。

## (二)掺较多活性混合材料的硅酸盐水泥的个性

### 1. 矿渣硅酸盐水泥

矿渣硅酸盐水泥的混合材料为玻璃态的物质，难磨细，对水的吸附能力差。故矿渣硅酸盐水泥保水性差，泌水性大。由于矿渣受过高温，矿渣硅酸盐水泥硬化后  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量又比较少，因此，矿渣硅酸盐水泥的耐热性比较好。

### 2. 火山灰质硅酸盐水泥

火山灰质硅酸盐水泥混合材料的结构疏松多孔，内比表面积大。其特点是易吸水、易反应；在潮湿的条件下养护可以形成较多的水化产物；水泥石结构致密，从而具有较高的抗渗性和耐水性；若处于干燥环境中，所吸收的水分会蒸发，导致体积收缩，产生裂缝。因此，火山灰质硅酸盐水泥不宜用于长期处于干燥环境和水位变化区的混凝土工程。

### 3. 粉煤灰硅酸盐水泥

粉煤灰与其他天然火山灰相比，结构较致密，比表面积小，有很多球形颗粒，吸水能力较

弱。因此,粉煤灰硅酸盐水泥需水量比较低,抗裂性较好,尤其适合于大体积水工混凝土工程及地下和海港工程等。

#### 4. 复合硅酸盐水泥

复合硅酸盐水泥因掺用两种或两种以上的混合材料,故混合材料相互之间能够取长补短。例如,矿渣硅酸盐水泥中掺石灰石能改善其泌水性,提高早期强度;在需水性大的火山灰质硅酸盐水泥中掺入矿渣等,能有效减少水泥需水量。

使用复合硅酸盐水泥时,应清楚所掺的主要混合材料。复合硅酸盐水泥包装袋上均应标明主要混合材料的名称。

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是建设工程中的常用水泥,它们的主要性能与应用见表 3-8。

表 3-8 常用水泥的主要性能与应用

水泥类型	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	复合硅酸盐水泥
主要成分	硅酸盐水泥熟料、混合材料、适量石膏	硅酸盐水泥熟料、混合材料、适量石膏	硅酸盐水泥熟料、粒化高炉矿渣、适量石膏	硅酸盐水泥熟料、火山灰质混合材料、适量石膏	硅酸盐水泥熟料、粉煤灰、适量石膏	硅酸盐水泥熟料、两种或两种以上混合材料、适量石膏
特性	(1)强度高; (2)快硬早强; (3)抗冻、耐磨性好; (4)水化热大; (5)耐腐蚀性较差; (6)耐热性较差	(1)早期强度较高; (2)抗冻性较好; (3)水化热较大; (4)耐腐蚀性较差; (5)耐热性较差	(1)强度早期低但后期增长快; (2)强度发展对温湿度敏感; (3)水化热低; (4)耐软水、海水、硫酸盐腐蚀性较好; (5)耐热性较好; (6)抗冻和抗渗性较差	(1)抗渗性较好,耐热性不及矿渣硅酸盐水泥; (2)干缩大,耐磨性差; (3)其他与矿渣硅酸盐水泥相同	(1)干缩性较小,抗裂性较好; (2)其他与矿渣硅酸盐水泥相同	(1)早期强度较高; (2)其他性能与掺主要混合材料的水泥接近
适用范围	(1)高强度混凝土; (2)预应力混凝土; (3)快硬早强结构; (4)抗冻混凝土	(1)一般的混凝土; (2)预应力混凝土; (3)地下与水中结构; (4)抗冻混凝土	水中、地下大体积混凝土和抗渗混凝土	(1)地上、地下与水中大体积混凝土; (2)其他与矿渣硅酸盐水泥相同	(1)地上、地下与水中大体积混凝土; (2)其他与矿渣硅酸盐水泥相同	(1)早期强度较高的工程; (2)其他与掺主要混合材料的水泥类似

续表

水泥类型	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	复合硅酸盐水泥
不适用范围	(1) 大体积混凝土; (2) 易受腐蚀的混凝土; (3) 耐热混凝土, 高温养护混凝土		(1) 早期强度要求较高的混凝土; (2) 严寒地区及处在水位升降的范围内的混凝土; (3) 抗渗性要求高的混凝土	(1) 干燥环境及处在水位变化范围内的混凝土; (2) 具有耐磨要求的混凝土; (3) 其他与矿渣硅酸盐水泥相同	(1) 有抗碳化要求的混凝土; (2) 其他与火山灰质硅酸盐水泥相同; (3) 有抗渗要求的混凝土	与掺主要混合材料的水泥类似

## 第五节 其他品种的水泥

### 一、高铝水泥

高铝水泥是以铝矾土和石灰为原料,按一定比例配合,经煅烧、磨细而制得的一种以铝酸盐为主要矿物成分的水硬性胶凝材料,又称矾土水泥或铝酸盐水泥。

#### (一)高铝水泥的矿物组成

高铝水泥的主要矿物成分为铝酸一钙( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,简称为CA),其含量约占高铝水泥质量的70%,此外还有少量的硅酸二钙( $\text{C}_2\text{A}$ )和其他铝酸盐,如七铝酸十二钙( $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ,简称为 $\text{C}_{12}\text{A}_7$ )、二铝酸一钙( $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ,简称为 $\text{CA}_2$ )和硅铝酸二钙( $2\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ,简称为 $\text{C}_2\text{AS}$ )等。

#### (二)高铝水泥的水化与硬化

高铝水泥的水化与硬化主要是指铝酸一钙的水化和水化物结晶。其水化产物随温度的不同而不同。当温度低于 $20^\circ\text{C}$ 时,其主要的反应式为:



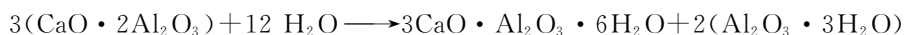
水化铝酸一钙(简称为 $\text{CAH}_{10}$ )

当温度为 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 时,其主要的反应式为:



水化铝酸二钙(简称为 $\text{C}_2\text{AH}_8$ )

当温度高于 $30^\circ\text{C}$ 时,其主要的反应式为:



水化铝酸三钙(简称为 $\text{C}_3\text{AH}_6$ )

水化产物 $\text{CAH}_{10}$ 和 $\text{C}_2\text{AH}_8$ 为针状或板状结晶,能相互交织成坚固的结晶合成体,析出

的氢氧化铝 $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ 填充于晶体骨架的空隙中,形成比较致密的结构,使水泥石获得很高的强度。高铝水泥的水化反应集中在早期,5~7 d后水化物的数量增加很少。因此,高铝水泥早期强度增长很快。

$\text{CAH}_{10}$ 和 $\text{C}_2\text{AH}_8$ 属于亚稳定晶体,随着时间的增长会逐渐转化为比较稳定的 $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,转化速度随温度的升高而加快;转化结果使水泥石内析出游离水,增大了孔隙体积。同时由于 $\text{C}_3\text{AH}_6$ 晶体本身缺陷较多、强度较低,因而水泥石强度明显降低。

### (三)高铝水泥的技术性质

高铝水泥呈黄、褐或灰色。《铝酸盐水泥》(GB 201—2000)规定,高铝水泥的比表面积应不小于 $300\text{ m}^2/\text{kg}$ 或 $45\text{ }\mu\text{m}$ 方孔筛筛余不得超过20%;高铝水泥分为CA-50、CA-60、CA-70和CA-80四种类型,其各龄期强度值见表3-9;初凝时间CA-50、CA-70、CA-80不得小于30 min,CA-60不得小于60 min;终凝时间CA-50、CA-70、CA-80不得大于6 h,CA-60不得大于18 h。其体积安定性必须合格。

表 3-9 高铝水泥各龄期强度值

水泥类型	抗压强度/MPa				抗折强度/MPa			
	6 h	1 d	3 d	28 d	6 h	1 d	3 d	28 d
CA-50	20*	40	50	—	3.0*	5.5	6.5	—
CA-60	—	20	45	85	—	2.5	5.0	10.0
CA-70	—	30	40	—	—	5.0	6.0	—
CA-80	—	25	30	—	—	4.0	5.0	—

注\*:当用户需要时,生产厂应提供结果。

### (四)高铝水泥的特性与应用

#### 1. 快硬早强

高铝水泥早期强度增长快,1 d强度即可达到极限强度的80%左右,故宜用于紧急维修工程(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,强度下降得更快,甚至会引起结构的破坏。因此,在结构工程中使用高铝水泥时应慎重。

#### 2. 水化热大,而且集中在早期放出

高铝水泥水化初期的1 d放热量约相当于硅酸盐水泥7 d的放热量,为水化热总量的70%~80%。因此,高铝水泥适合于冬期施工,不适用于大体积混凝土的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

由于高铝水泥的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,因此适用于有耐硫酸盐侵蚀要求的工程。

#### 4. 耐碱性差

当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,故不能用于接触碱性溶液的工程。

### 5. 耐热性好

高铝水泥在高温时产生了固相反应,烧结结合代替了水化结合,使得其在高温下仍能保持较高的强度。

#### (五)高铝水泥使用时的注意事项

(1)高铝水泥适宜的硬化温度为 15℃ 左右,一般施工时环境温度不得超过 25℃;否则会产生晶型转换,导致水泥强度降低。使用高铝水泥拌制的混凝土不能进行蒸汽养护。

(2)高铝水泥使用时严禁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使用;否则将产生瞬凝,造成无法施工,并且强度很低。

(3)由于晶型转换及铝酸盐凝胶体老化等,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,其值按《铝酸盐水泥》(GB 201—2000)的规定经试验确定。

## 二、白色硅酸盐水泥

白色硅酸盐水泥(简称白水泥)是由氧化铁含量少的硅酸盐水泥熟料、适量石膏及 0~10% 的石灰石或窑灰经磨细制成的水硬性胶凝材料,其代号为 P·W。

硅酸盐水泥呈暗灰色,主要原因是其含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  较多(3%~4%)。当  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量在 0.5% 以下时,水泥接近白色。白色硅酸盐水泥的生产要求使用纯净的石灰石、纯石英砂及白垩、纯净的高岭土作为原料,采用无灰分的可燃气体或液体燃料,磨机衬板采用铸石、陶瓷、花岗岩等,研磨体采用硅质卵石(白卵石)或人造瓷球。由于生产过程严格控制  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量并尽可能减少氧化锰( $\text{MnO}$ )、二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )等着色氧化物的含量。因此,白水泥生产成本较高。

白水泥的细度应满足 80  $\mu\text{m}$  方孔筛筛余不大于 10%;初凝时间不得小于 45 min,终凝时间不得大于 10 h;安定性用沸煮法检验必须合格;水泥中  $\text{SO}_3$  的含量不得超过 3.5%;白度值应不低于 87(白水泥的白度是指水泥色白的程度);按 3 d、28 d 的强度值将白水泥划分为 32.5、42.5、52.5 三个强度等级。白水泥各强度等级和龄期的强度见表 3-10。

表 3-10 白水泥各强度等级和龄期的强度

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
32.5	12.0	32.5	3.0	6.0
42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
52.5	22.0	52.5	4.0	7.0

## 三、中、低热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥

以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏,磨细制成的具有中等水化热的水硬性胶凝材料称为中热硅酸盐水泥(简称中热水泥),其代号为 P·MH。在中热水泥熟料中, $\text{C}_2\text{S}$  的含量应不超过 55%, $\text{C}_3\text{A}$  的含量应不超过 6%,游离  $\text{CaO}$  的含量应不超过 1.0%。

以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏,磨细制成的具有低水化热的水硬性胶凝

材料称为低热硅酸盐水泥(简称低热水泥),其代号为P·LH。在低热水泥熟料中, $C_2S$ 的含量应不小于40%, $C_3A$ 的含量不得超过6%,游离CaO的含量应不超过1.0%。

以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入粒化高炉矿渣和适量石膏,磨细制成的具有低水化的水硬性胶凝材料称为低热矿渣硅酸盐水泥(简称低热矿渣水泥),其代号为P·SLH。在低热矿渣水泥中,粒化高炉矿渣的掺加量按质量百分比计为20%~60%,允许用不超过混合材料总量50%的粒化电炉磷渣或粉煤灰代替部分粒化高炉矿渣。在低热矿渣水泥熟料中, $C_3A$ 的含量应不超过8%,游离CaO的含量应不超过1.2%,MgO的含量应不超过5.0%。若水泥经压蒸安定性试验合格,则熟料中MgO的含量允许放宽到6.0%。

以上三种水泥的性质应符合《中热硅酸盐水泥 低热硅酸盐水泥 低热矿渣硅酸盐水泥》(GB 200—2003)的规定,即细度应满足比表面积不小于 $250\text{ m}^2/\text{kg}$ ;  $SO_3$ 的含量不得超过3.5%;安定性用沸煮法检验应合格;初凝时间不得小于60 min,终凝时间不得大于12 h。

以上三种水泥的强度等级按规定龄期的抗压强度和抗折强度划分,各龄期的强度要求见表3-11。

表 3-11 中、低热水泥各龄期的强度要求

品 种	强度等级	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
中热水泥	42.5	12.0	22.0	42.5	3.0	4.5	6.5
低热水泥	42.5	—	13.0	42.5	—	3.5	6.5
低热矿渣水泥	32.5	—	12.0	32.5	—	3.0	5.5

水泥的水化热允许用直接法或溶解法进行检验,各龄期的水化热要求见表3-12。

表 3-12 中、低热水泥各龄期的水化热要求

品 种	强度等级	水化热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	
		3 d	7 d
中热水泥	42.5	251	293
低热水泥	42.5	230	260
低热矿渣水泥	32.5	197	230

中热水泥水化热较低,抗冻性和耐磨性较高,适用于大体积水工建筑水位变动区的覆面层及大坝溢流面,以及其他要求低水化热、高抗冻性和耐磨性的工程。低热水泥和低热矿渣水泥水化热更低,适用于大体积建筑物或大坝内部要求更低水化热的部位。此外,这三种水泥有一定的抗硫酸盐侵蚀能力,可用于低硫酸盐侵蚀的工程。

## 第六节 水泥的保管与验收

### 一、水泥的保管

#### (一)水泥的包装

水泥的包装方式主要有散装和袋装两种。散装水泥从出厂、运输、储存到使用,直接通过专用运输工具进行操作。发展散装水泥具有较好的经济和社会效益。袋装水泥每袋净含量为 50 kg,实际应不少于所标质量的 99%;随机抽取 20 袋,总质量(含包装袋)应不小于 1 000 kg。其他包装形式由供需双方协商确定,但有关袋装质量要求应符合规定。水泥包装袋上应清楚标明执行标准、水泥品种、代号、强度等级、生产者名称、生产许可证标志(QS)及编号、出厂编号、包装日期、净含量。散装水泥发运时应提交与袋装标志相同内容的卡片。为了便于识别,硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥包装袋上要求用红字印刷,矿渣硅酸盐水泥包装袋上要求用绿字印刷,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要求用黑字或蓝字印刷。

#### (二)水泥的储运

水泥在储存和运输时不得混入杂物。不同品种、强度等级的水泥应分别储存并进行标识,不得混放。散装水泥应分库存放。袋装水泥堆放时应考虑防水防潮,竖直堆放数量一般不超过 10 袋,每平方米可堆放 1 t 左右。储存期一般不超过三个月。即使在储存良好的条件下,也会因为水泥吸收空气中的水分缓慢水化而降低其强度。袋装水泥储存三个月后,其强度降低 10%~20%;储存六个月后,其强度降低 15%~30%;储存一年后,其强度降低 25%~40%。使用时应考虑先存先用的原则。

### 二、水泥的验收

水泥各项技术指标及包装质量符合要求时方可出厂。水泥出厂时应附检验报告。检验报告的内容应包括出厂检验项目、细度、混合材料品种和掺加量、石膏和助磨剂的品种及掺加量、属旋窑或立窑生产及合同约定的其他技术要求。当用户需要时,生产者应在水泥发出之日起 7 d 内寄发除 28 d 强度以外的各项检验结果,32 d 内补报 28 d 强度的检验结果。

交货时水泥的质量验收可以抽取的实物试样的检验结果为依据,也可以生产者同编号水泥的检验报告为依据。采取何种方法验收由买卖双方商定,并在合同或协议中注明。卖方有告知买方验收方法的责任。当无书面合同或协议,或未在合同、协议中注明验收方法时,卖方应在发货票上注明“以本厂同编号水泥的检验报告为验收依据”字样。

以抽取实物试样的检验结果为验收依据时,买卖双方应在发货前或交货地共同取样和签封。取样数量为 20 kg,缩分为二等份,一份由卖方保存 40 d,另一份由买方按相关标准规定的项目和方法进行检验。在 40 d 以内,当买方检验认为产品质量不符合标准规定要求而卖方又有异议时,双方应将卖方保存的另一份试样送省级或省级以上国家认可的水泥质量

监督检验机构进行仲裁检验。水泥安定性仲裁检验应在取样之日起 10 d 以内完成。

以生产者同编号水泥的检验报告为验收依据时,在发货前或交货时买方在同编号水泥中取样,双方共同签封后由卖方保存 90 d,或经买方认可后,卖方自行取样、签封并保存同编号水泥 90 d。在 90 d 内,当买方对水泥质量有疑问时,买卖双方应将共同认可的试样送省级或省级以上国家认可的水泥质量监督检验机构进行仲裁检验。

水泥进场以后应立即进行复验,为确保工程质量,应严格贯彻先检验后使用的原则。水泥复验的周期较长,一般要一个月。

## 复习思考题

### 一、填空题

1. 建筑工程中通用硅酸盐水泥主要包括硅酸盐水泥、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_六大品种。
2. 水泥按其主要水硬性物质分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_及\_\_\_\_\_等。
3. 硅酸盐水泥是由\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_经磨细制成的水硬性胶凝材料,按是否掺入混合材料分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_,其代号分别为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
4. 硅酸盐水泥熟料的矿物组成主要有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。其中,决定水泥强度的矿物主要是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
5. 水泥石是一种\_\_\_\_\_体系,它由\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_组成。
6. 混合材料按其性能分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两类。
7. 硅酸盐水泥的强度分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_六个等级。其中,R 型为\_\_\_\_\_,其\_\_\_\_\_强度较高。
8. 水泥石的腐蚀主要包括\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_四种。
9. 普通硅酸盐水泥是由\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_磨细制成的水硬性胶凝材料,其代号为\_\_\_\_\_。
10. 矿渣水泥、粉煤灰水泥和火山灰水泥的强度等级有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
11. 水泥胶砂强度试件的标准尺寸为\_\_\_\_\_。

### 二、名词解释

水泥的细度 水泥的安定性 混合材料 水泥标准稠度用水量 水泥的初凝时间和终凝时间 水泥的水化热

### 三、单选题

1. 有硫酸盐腐蚀的混凝土工程应优先选择( )水泥。
  - A. 硅酸盐
  - B. 普通
  - C. 矿渣
  - D. 高铝
2. 有耐热要求的混凝土工程应优先选择( )水泥。
  - A. 硅酸盐
  - B. 矿渣
  - C. 火山灰
  - D. 粉煤灰



3. 有抗渗要求的混凝土工程应优先选择( )水泥。
  - A. 硅酸盐
  - B. 矿渣
  - C. 火山灰
  - D. 粉煤灰
4. 下列材料中,属于非活性混合材料的是( )。
  - A. 石灰石粉
  - B. 粒化高炉矿渣
  - C. 火山灰
  - D. 粉煤灰
5. 为了延缓水泥的凝结时间,在生产水泥时必须掺入适量( )。
  - A. 石灰
  - B. 石膏
  - C. 助磨剂
  - D. 水玻璃
6. 通用硅酸盐水泥的储存期不宜过长,一般不超过( )。
  - A. 一年
  - B. 六个月
  - C. 一个月
  - D. 三个月
7. 对于大体积混凝土工程,应优先选择( )水泥。
  - A. 硅酸盐
  - B. 普通
  - C. 粉煤灰
  - D. 高铝
8. 硅酸盐水泥熟料矿物中水化热最高的是( )。
  - A.  $C_3S$
  - B.  $C_2S$
  - C.  $C_3A$
  - D.  $C_4AF$
9. 有抗冻要求的混凝土工程应优先选择( )水泥。
  - A. 矿渣
  - B. 火山灰
  - C. 粉煤灰
  - D. 普通
10. 水泥石产生腐蚀的内因是水泥石中存在( )。
  - A.  $Ca(OH)_2$
  - B.  $CaO$
  - C. 水化硅酸钙
  - D. 钙矾石
11. 在生产水泥时,若掺入的石膏过量,则会产生( )后果。
  - A. 水泥石的腐蚀
  - B. 水泥安定性不良
  - C. 快凝
  - D. 慢凝
12. 沸煮法只能检测出( )原因引起的水泥安定性不良。
  - A.  $SO_3$  含量超标
  - B. 游离  $CaO$  含量超标
  - C. 游离  $MgO$  含量超标
  - D. 生产时石膏掺量超标

#### 四、简述题

1. 什么是水泥的安定性? 安定性不良的原因和危害是什么? 如何测定水泥的安定性?
2. 矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥的共同特性是什么?
3. 防止水泥石腐蚀的措施有哪些?
4. 水泥在储存时应注意哪些方面?
5. 在下列工程中选择适宜的水泥品种,并说明理由。
  - (1)采用湿热养护的混凝土构件。
  - (2)大体积的混凝土工程。
  - (3)水下混凝土工程。

- (4) 现浇混凝土梁、板、柱。
- (5) 高温设备或窑炉的混凝土基础。
- (6) 严寒地区受冻融的混凝土工程。
- (7) 接触硫酸盐介质的混凝土工程。
- (8) 水位变化区的混凝土工程。
- (9) 高强混凝土工程。
- (10) 有耐磨要求的混凝土工程。

### 五、计算题

1. 称取 25 g 矿渣硅酸盐水泥做细度试验, 称得筛余为 2.0 g, 该水泥的细度是否达到了国家标准的要求?

2. 某通用硅酸盐水泥储存期超过三个月。已测得其 3 d 龄期强度达到强度等级为 32.5 的要求。现又测得其 28 d 抗折、抗压破坏荷载, 见表 3-13。

表 3-13 试件的抗折、抗压破坏荷载

试件编号	1		2		3	
抗折破坏荷载/kN	2.9		2.6		2.8	
抗压破坏荷载/kN	65	64	64	53	66	70

计算后判定该水泥是否能按 32.5 的强度等级使用。