

水泥混凝土 性能与检验控制

◎ 王安岭 编著



化学工业出版社

水泥混凝土

性能与检验控制

· 王 强 · 编著

中国水利水电出版社

水泥混凝土 性能与检验控制

◎ 王安岭 编著



化学工业出版社

北京

本书按照水泥混凝土生产工艺流程,介绍了混凝土全过程管理的技术核心环节,包括混凝土原材料的性能与检验控制、混凝土性能与检验控制、混凝土配合比设计与混凝土质量控制等。本书主要内容有混凝土的六大组成材料水泥、砂、石、矿物掺合料、外加剂、水的质量要求、生产工艺、性能影响因素与改善措施、应用要点、主要性能及试验方法;混凝土的拌合物性能、力学性能和耐久性的质量要求、性能影响因素与提高措施、主要性能及试验方法;普通混凝土、高强混凝土和自密实混凝土的配合比设计方法;原材料质量控制、混凝土配合比及生产质量水平控制、混凝土生产与施工质量控制、合格评定等。

本书可供建筑水泥混凝土从业人员使用,尤其适合新入职的从事建筑水泥混凝土试验、检测、监理、管理等人员使用,也可作为行业考试和培训参考用书。

水泥混凝土性能与检验控制

王安岭 编著

图书在版编目(CIP)数据

水泥混凝土性能与检验控制/王安岭编著. —北京:
化学工业出版社, 2018.1
ISBN 978-7-122-31154-2

I. ①水… II. ①王… III. ①水泥-混凝土-性能分
析 IV. ①TU528.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 300819 号

责任编辑:李玉晖
责任校对:王 静

文字编辑:孙凤英
装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码 100011)
印 装:高教社(天津)印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 288 千字 2018年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

我国是混凝土生产和应用大国，年混凝土产量已经超过 40 亿立方米。作为主要的建筑结构材料，混凝土质量对建筑主体质量起着根本和决定性作用，混凝土的质量直接关系到人民居住安全、生命安全，关系到未来社会成本。

我国预拌混凝土行业发展正面临关键的转型期和市场整合期。近些年，混凝土产业的格局随着大型水泥企业的进入和业内大企业的兼并重组而发生了翻天覆地的变化，行业发展日新月异；政府对环境的重视、史上最严环保政策的出台也为行业的发展提供了挑战和机遇；行业存在的一系列问题愈发凸显，在产能严重过剩、资源紧缺、市场供大于求的整体状况下，发展形势不容乐观。

我国还不是混凝土技术研发和应用强国，混凝土行业发展还存在一些问题，如前些年预拌混凝土发展迅猛，扩张过快，技术人员相对短缺，从业人员职业素养不高；预拌混凝土行业准入门槛较低，行业发展不规范，管理粗放；企业普遍对科研重视不够，资金投入不足，特别是基础性研究没有上升到足够的高度予以重视；预拌混凝土是地域性产品，各地区原材料品种和性能不同，特别是矿物掺合料和砂石骨料质量差别很大，这些因素成为制约混凝土技术发展的瓶颈。

混凝土质量影响因素多，技术复杂，工艺、材料、管理以及控制过程等方面出现偏差，就可使混凝土质量存在着不可预见性的风险和隐患。由于混凝土的不可修复性，一旦发生质量事故，后果严重，教训深刻。基于此，我们编写了这本书，目的在于提高和加强从业人员，尤其是初入行业技术人员的质量控制意识，通过对混凝土原材料、配合比、生产过程和合格控制关键过程的检验和控制，提高全员质量意识，提高技术管理水平，促进行业整体技术进步。

本书共分 4 章。在第一章中，主要介绍了水泥、砂、石、矿物掺合料、外加剂、水这六大组成材料的质量要求、生产工艺、性能影响因素与改善措施、应用要点、主要性能及试验方法等内容。在第二章中，介绍了混凝土的拌合物性能、力学性能和耐久性的质量要求、性能影响因素与提高措施、主要性能及试验方法等内容。在第三章中介绍了混凝土配合比设计方法，包括普通混凝土、高强混凝土和自密实混凝土的性能和原材料技术要求等内容。在第四章中，介绍了混凝土质量控制的核心环节，主要包括原材料质量控制、混

凝土配合比及生产质量水平控制、混凝土生产与施工质量控制、合格评定等内容。全书按混凝土生产和工艺流程，简明扼要地阐述了实施混凝土全过程控制管理的技术核心内容。

本书在编写过程中，参考了国家、行业最新标准、规范以及一些文献资料，谨向这些编者和作者致以诚挚的敬意和感谢！

限于作者水平，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正，以在今后改正。

编著者

2017 年 12 月

目 录

第一章 混凝土原材料的质量要求及其检验方法 1

第一节 水泥	1
一、概述	1
二、质量要求	5
三、试验方法	8
第二节 砂	14
一、概述	14
二、质量要求	18
三、试验方法	21
第三节 石	27
一、概述	27
二、质量要求	29
三、试验方法	32
第四节 矿物掺合料	38
一、概述	38
二、质量要求	40
三、试验方法	45
第五节 外加剂	58
一、概述	58
二、质量要求	67
三、试验方法	71
第六节 拌合用水	86
一、概述	86
二、质量要求	86
三、试验方法	87

第二章 混凝土性能 89

第一节 混凝土拌合物性能	89
--------------	----

一、概述	89
二、质量要求	95
三、试验方法	98
第二节 混凝土力学性能	109
一、概述	109
二、质量要求	111
三、试验方法	115
第三节 混凝土长期性能和耐久性能	119
一、概述	119
二、质量要求	121
三、性能等级划分	131
四、试验方法	132

第三章 混凝土配合比设计 146

第一节 普通混凝土配合比设计	146
一、概述	146
二、混凝土配合比设计的基本规定	147
三、混凝土配合比的计算	149
第二节 高强混凝土配合比设计	157
一、基本规定	157
二、原材料	157
三、混凝土性能	159
第三节 自密实混凝土配合比设计	160
一、原材料	160
二、混凝土性能	161
三、配合比设计	161

第四章 混凝土质量控制 165

第一节 混凝土原材料质量控制	165
一、主要控制项目及检验批的划分	165
二、质量控制要求	166
第二节 混凝土配合比及生产质量水平控制	168
一、混凝土配合比控制	168
二、生产控制水平评价	168
三、混凝土强度的合格评定	169
四、混凝土子分部工程的实体验收	170
第三节 混凝土生产与施工质量控制	171
一、一般规定	171

二、原材料进场.....	172
三、计量.....	172
四、搅拌.....	172
五、运输.....	174
六、浇筑成型.....	174
七、养护.....	176
八、混凝土质量检验.....	177

参考文献

179

第一节 水 泥

一、概述

1. 水泥的定义与分类

水泥是指将土质重要成分之一——硅酸盐的熟料经高温煅烧后磨细成粉，加入适量水和一些外加剂，均匀地拌合，加水搅拌，即成塑性浆体。该浆体在空气中水化硬化，并随着时间增长而不断增长和保持它的强度，使物体牢固地结合在一起。

按照用途和性能的不同，水泥可分为：

(1) 通用硅酸盐水泥：是指以硅酸盐水泥熟料、或硅酸盐水泥熟料和一定比例的石膏，按一定比例，在磨机中磨细制成的水硬性胶凝材料。

(2) 特种水泥：具有特殊性能的水泥，如快凝水泥、早强水泥、膨胀水泥、自应力水泥、耐热水泥、耐硫酸水泥、耐海水水泥等。

按照生产方法的不同，水泥可分为：

(1) 硅酸盐水泥：是指以硅酸盐水泥熟料和石膏，按一定比例，在磨机中磨细制成的水硬性胶凝材料。

(2) 铝酸盐水泥：是指以铝酸盐水泥熟料和石膏，按一定比例，在磨机中磨细制成的水硬性胶凝材料。

(3) 硫铝酸盐水泥：是指以硫铝酸盐水泥熟料和石膏，按一定比例，在磨机中磨细制成的水硬性胶凝材料。

(4) 其他水泥：是指以其他水泥熟料和石膏，按一定比例，在磨机中磨细制成的水硬性胶凝材料。

水泥的组成成分：水泥熟料、石膏、外加剂、掺合料等。

水泥的用途：水泥是建筑工程中最重要的材料之一，广泛应用于房屋建筑、道路工程、桥梁工程、水利工程、工业建筑等。

2. 水泥的生产工艺简介

水泥的生产工艺基本上可概括为“两磨一烧”。即生料磨、熟料磨、水泥磨。生料磨是将石灰石、黏土、铁矿粉等原料按一定比例配合，经破碎、烘干、粉磨后，制成生料粉。熟料磨是将生料粉在高温窑中煅烧，制成熟料。水泥磨是将熟料、石膏、外加剂等按一定比例配合，经粉磨后，制成水泥。水泥的生产工艺复杂，设备投资大，能耗高，对环境保护要求严格。

水泥的检验：水泥的检验包括物理检验和化学检验。物理检验包括抗压强度、抗折强度、安定性等。化学检验包括烧失量、氯离子含量等。

第一章 混凝土原材料的质量要求 及其检验方法

第一节 水 泥

一、概述

1. 水泥的定义与分类

水泥是混凝土的重要组成部分之一。按《水泥的命名原则和术语》(GB/T 4131—2014)给出的定义:水泥是一种细磨材料,与水混合形成塑性浆体后,能在空气中水化硬化,并能在水中继续硬化保持强度和体积稳定性的无机水硬性胶凝材料。

该标准将水泥按用途和性能分为如下两类。

1) 通用水泥 一般土木建筑工程通常采用的水泥,如硅酸盐水泥、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等。

2) 特种水泥 具有特殊性能或用途的水泥,如铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥、低热水泥、砌筑水泥、油井水泥等。

该标准将水泥按水硬性矿物名称主要分为如下几类:

1) 硅酸盐水泥 主要水硬性矿物为硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙。

2) 铝酸盐水泥 主要水硬性矿物为铝酸钙。

3) 硫铝酸盐水泥 主要水硬性矿物为无水硫铝酸钙和硅酸二钙。

4) 铁铝酸盐水泥 主要水硬性矿物为无水硫铝酸钙、铁铝酸钙和硅酸二钙。

5) 氟铝酸盐水泥 主要水硬性矿物为氟铝酸钙和硅酸二钙。

可见,水泥品种繁多,组成及性能不同,应用范围及领域也不同。而产量最大、使用最多的则为通用硅酸盐水泥,在国外多被称为波特兰水泥。

2. 水泥的生产工艺简介

水泥的生产基本上可概括为“两磨一烧”,即生料的粉磨、熟料的煅烧和水泥的粉磨。水泥原料包括石灰石、粘土及校正原料。其中石灰质原料主要提供 CaO , 粘土质原料主要提供 SiO_2 、 Al_2O_3 以及少量 Fe_2O_3 , 校正原料主要是为了补充某些成分的不足,如硅质校正原料、铝质校正原料、铁质校正原料。实际生产过程中,根据具体情况有时还需加入一些辅助材料,如矿化剂、助熔剂、晶种等。

水泥的生产工序包括原料的开采、破碎、预均化,生料的配料、粉磨、均化,水泥熟料

的煅烧、冷却，水泥的粉磨、发送等工艺。

经开采后的原料首先应进行破碎，以减小其颗粒尺寸。

当颗粒粒径降低到 25mm 以下时，即可进行粉磨处理。生料的粉磨是要保证其具有适宜的易烧性，一般要求其 200 μm 筛余不超过 1%、90 μm 筛余不超过 12%。

在水泥生料制备过程中会有一系列均化作用，这对于生产均匀的生料、保证熟料的正常煅烧及水泥质量非常重要。实际上，原料在预均化场就开始进行均化处理，通过采用平铺直取的方法，可减少输出原料的不均匀性。在粉磨过程中，虽然生料会得到进一步的均化，但仍需在均化库进行均化，才能获得满足质量要求的生料。

水泥熟料的煅烧是水泥生产中的关键过程，是将适当成分的生料在窑内经高温煅烧至部分熔融，得到以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料的工艺过程。在煅烧过程中生料经过干燥、脱水、碳酸盐分解、固相反应、烧成和冷却一系列物理化学变化，最终形成熟料。水泥熟料的烧成温度在 1350~1450 $^{\circ}\text{C}$ 之间，煅烧设备一般为回转窑。

现代水泥生产常采用窑外分解技术，即在回转窑外设有悬浮预热器和分解炉，用于生料的预热和碳酸盐的分解。由于入窑生料中碳酸盐已接近完全分解，生料在窑中仅需要进行固相反应和烧结两个过程，故回转窑的长度或长径比可大大缩小，这可使熟料迅速生成，而不会产生重结晶现象，生产的水泥熟料也会有很高的水硬活性。另外，回转窑的缩短还可以简化工艺布置，减少辐射热损失。

经高温煅烧的熟料，在粉磨前还需要进行冷却，冷却的目的不仅是为了热量回收，还可改进熟料质量，提高熟料的易磨性，降低熟料温度，便于熟料的运输、储存和粉磨。熟料冷却的好坏及冷却速度，对熟料质量影响较大，因为部分熔融的熟料，其中的液相在冷却时，往往还和固相进行反应。在水泥熟料中掺入少量的石膏、混合材，经粉磨到一定细度后即成为水泥成品，粉磨细度不同可使水泥产生不同的水化活性。

水泥熟料的主要化学成分为：CaO 60%~70%，SiO₂ 18%~22%，Al₂O₃ 4%~6%，Fe₂O₃ 2%~4%，另外也存在一些微量组分，包括 MgO、Na₂O、K₂O、SO₃ 等。水泥熟料的矿物组分为 C₃S、C₂S、C₃A 和 C₄AF，其中 C₃S 和 C₂S 为硅酸盐矿物，可提供水泥的正常凝结和强度发展，而 C₃A 和 C₄AF 为熔剂型矿物，有助于硅酸盐矿物的形成。

3. 水泥的水化和凝结

水泥的水化是水泥熟料组分、石膏和水等之间一系列化学反应的叠加，最终导致凝结和硬化。水泥水化历程可分为四个阶段，见表 1-1。

表 1-1 水泥水化的四个阶段

过程 (在混凝土中)	化学过程	物理过程	混凝土的物理性质
最初几分钟 (湿润和搅拌)	游离石灰、石膏和铝酸盐相迅速溶解，立即形成钙矾石；C ₃ S 表面水化	由铝酸盐相、C ₃ S 和 CaO 溶解产生的迅速放热	迅速形成的铝酸盐水化产物等会影响流变性及其随后的浆体微结构
诱导期 (搅拌、运输、浇筑、抹面等)	产生 C—S—H 晶核；SiO ₂ 和 Al ₂ O ₃ 浓度迅速降低到很低的水平；CH 变得过饱和，并且有其晶核产生；R ⁺ 、SO ₄ ²⁻ 浓度基本不变	低放热速率，缓慢形成 C—S—H 和较多的 AFt，导致粘度继续增加	不断形成的 AFt 会影响工作性；由于 C—S—H 的形成开始有正常的凝结

续表

过程 (在混凝土中)	化学过程	物理过程	混凝土的物理性质
加速期 (凝结和早期硬化)	C_3S 水化加速,并达最大值; CH 饱和度下降; R^+ 、 SO_4^{2-} 浓度基本不变	迅速形成的水化产物导致浆体密实,孔隙减少;有较高的放热速率	由弹性状态变成刚性状态(初凝和终凝);早期强度发展
后加速期 (脱模、继续硬化)	由 C_3S 和 C_2S 产生的 $C-S-H$ 和 CH 的速率下降, R^+ 和 OH^- 增加,但 SO_4^{2-} 浓度下降到很低的水平;铝酸盐水化产生 AFm 相;钙矾石可能会溶解、再结晶	放热速率下降;孔隙率减少;浆体与骨料粘结为整体	由于孔隙率减少,强度继续增长,但增长速率较慢;在有水分供给时,水化会持续多年,干燥时易收缩

水泥与水反应的结果导致水泥浆体从可工作的塑性状态转变成坚硬、脆性材料。水泥水化产物发生胶结、密实的过程称为凝结。凝结可分为初凝和终凝,虽然没有精确定义的物理意义,但可通过标准方法进行测定和比较。初凝是水泥加水拌合时至标准稠度净浆失去可塑性所需时间;终凝是水泥加水拌合时至标准稠度净浆完全失去可塑性并开始产生强度所需的时间。初凝一般对应于诱导期的结束,而终凝多发生在加速期的中间。水泥的凝结时间对施工具有较大意义,若初凝时间过短,施工时没有足够的时间完成混凝土的搅拌、运输、浇捣等操作;但水泥终凝时间过长,则会拖延施工工期。因此,要求水泥应有合适的凝结时间。

不正常的凝结包括铝酸盐(C_3A 和 C_4AF) 和硫酸盐(硫酸钙和碱式硫酸盐)的化学反应,高活性的 C_3S 导致的不正常凝结,一些外加剂的掺入也可能导致不正常的凝结。另外,当硫酸盐含量不足时会导致大量 AFm 相生成,使水泥产生急凝。而过多的硫酸盐进入液相中,则会产生次生石膏,使水泥产生假凝。

- 除上述异常凝结的产生原因外,影响水泥凝结时间的因素很多,主要有:
- 1) 水泥熟料中的 C_3A 含量较高而石膏掺量不足时,凝结时间会加快。
 - 2) 水泥细度越细,水化作用越快,凝结时间会越快。
 - 3) 水灰比越低,凝结时间会越快。
 - 4) 水化温度越高,凝结时间会越快。
 - 5) 同品种混合材掺量越多,凝结时间会越慢。

硬化水泥浆体由水化产物、未水化的水泥颗粒和孔隙组成,水化产物主要包括 $C-S-H$ 凝胶、氢氧化钙、硫铝酸钙水化产物 AFt 相和 AFm 相,未水化的水泥可视为填料,孔隙中则含有一定量的自由水分。

4. 水泥强度和安定性的主要影响因素

影响水泥硬化浆体强度的主要有以下因素。

(1) 水泥熟料的矿物组成

水泥熟料的矿物组成决定了水化产物的固有粘结特性。水泥熟料中各矿物水化活性排列如下: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$, 这些矿物组分含量的不同,直接影响水泥硬化体强度。如表 1-2 所示,为水泥主要组成矿物的性质,而水泥的强度主要取决于这四种单矿物的性质。

(2) 水泥的碱含量

水泥中的碱(K_2O 、 Na_2O)会促进水泥的凝结,因此,碱含量越高,水泥凝结硬化越快,早期强度提高,后期强度增长率下降。

表 1-2 四种水泥矿物的性质

矿物组成	硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙
反应速度	快	慢	最快	中
28d 水化放热	多	少	最多	中
早期强度	高	低	高	低
后期强度	较高	高	低	低

(3) 石膏掺量和品种

水泥中石膏的主要作用是调控水泥的凝结时间，不同掺量、类型的石膏，在水中的溶解度和溶解速率不同，一般三氧化硫含量高、溶解度大、溶解速度快的石膏调控凝结时间的效果较好，但溶解度大、溶解速率慢的无水石膏不及溶解度相对较小而溶解速率快的二水石膏。石膏除调节水泥的凝结时间外，还可生成钙矾石，使水泥具有密实的孔结构而赋予水泥较高的强度，但过量时会存在潜在危害。

(4) 熟料煅烧和水泥粉磨的工艺因素

煅烧过程中急烧、慢冷的熟料会使凝结时间加快。水泥粉磨过程中磨内通风不好，二水石膏将全部或部分脱水成半水石膏，导致水泥假凝。

(5) 水灰比

水灰比影响水泥的水化程度，也决定了水泥硬化体的孔隙率。在相同水化程度下，水泥强度会随水灰比降低而提高。

(6) 水泥细度

水泥细度是决定水化过程动力学的因素，进而影响强度发展的速率。一般情况下，早期强度随细度增加而提高。有国外学者指出：水泥中 $3\sim30\mu\text{m}$ 粒径范围的颗粒对强度起主要作用，其质量比例应占到 65% 以上，尤其是 $16\sim24\mu\text{m}$ 粒径范围内的颗粒应该更多些，而小于 $3\mu\text{m}$ 粒径范围的颗粒应在 10% 以下。

(7) 水化龄期

在不同的水化龄期，因水化程度及产生的水化产物数量不同，必然影响水泥硬化体强度。

(8) 温度和湿度

水化温度既影响水化速率，又影响浆体结构及水化产物固有的粘结特性。温度、湿度越高，水泥水化越快，强度越高；但太高的温度可能对水泥后期强度产生不利影响。

(9) 混合材品种、质量及数量

一般掺混合材的比不掺混合材的凝结时间慢，混合材掺量多的凝结时间慢，掺非活性混合材比掺活性混合材的凝结时间慢，进而影响早期强度。

(10) 贮存时间

水泥贮存期间，由于吸收空气中的水分和二氧化碳，强度会逐渐下降并出现结块形象。强度下降的大小，除与贮存时间长短、贮存处的温度、湿度和通风条件有关外，也与水泥包装的气密程度以及水泥细度等有关。因此，水泥贮存超过一定期限时，需要复检。

水泥安定性不合格主要是由水泥熟料中的 f-CaO 、 f-MgO 和 SO_3 造成的。水泥熟料中最主要的化学成分是 CaO ，它与 SiO_2 生成硅酸钙，与 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 生成铝酸盐和铁铝酸盐。要生产出高品位的优质水泥，就需要有足量的碱性氧化物来满足酸性氧化物的需要。但在生产过程中，由于配料比例不当或煅烧温度低以及熟料冷却方式不当，其中一部分 CaO 就不能完

全与酸性氧化物化合或是已形成的 C_3S 发生分解，从而以 $f-CaO$ 的形式存在于水泥熟料中。这种经高温烧成的晶体颗粒呈死烧状，结构比较致密，遇水后水化速度极慢。在水泥水化、硬化过程中， $f-CaO$ 在水泥具有一定的强度后才开始水化，水化生成物氢氧化钙体积膨胀是水化前的 1.98 倍，当膨胀应力超过水泥石的极限抗拉强度时，就会引起开裂和损坏。熟料煅烧时生成少量的氧化镁有助于熟料的形成，多余的氧化镁则结晶出来以游离状态的方镁石存在，正常情况下其含量小于 5%。但方镁石的水化比游离氧化钙更为缓慢，要几个月甚至几年才发生，水化生成氢氧化镁时，体积膨胀是水化前的 2.19 倍。三氧化硫对水泥安定性的影响是由石膏过量掺入而造成的，水泥中加入石膏，水化初期生成钙矾石可调节水泥的凝结时间，当石膏过多时在已硬化的水泥石中还存有较多的剩余石膏，它与铝酸盐继续发生水化反应，不适时地生成了过量粗针状的三硫型水化硫铝酸钙，即钙矾石晶体，引起水泥石膨胀，其膨胀体积为反应前固相总体积的 2.29 倍，从而导致安定性不良。尽管由三氧化硫、氧化镁引起安定性不良的水泥很少见到，但这种可能性是存在的，应引起重视。

二、质量要求

依据《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007) 及下发的修改单，对水泥质量要求如下。

1. 组分与化学指标

通用硅酸盐水泥的代号和组分应符合表 1-3 的规定。

表 1-3 通用硅酸盐水泥的代号和组分

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	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 ^①			
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	≥50 且 <80	>20 且 ≤50 ^②	—	—	—
	P·S·B	≥30 且 <50	>50 且 ≤70 ^②	—	—	—
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	≥60 且 <80	—	>20 且 ≤40 ^③	—	—
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	≥60 且 <80	—	—	>20 且 ≤40 ^④	—
复合硅酸盐水泥	P·C	≥50 且 <80	>20 且 ≤50 ^⑤			

① 本组分材料为符合要求的活性混合材，其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合要求的非活性混合材或不超过水泥质量 5% 且符合要求的窑灰代替。

② 本组分材料为符合 GB/T 203 或 GB/T 18046 的活性混合材，其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合要求的活性混合材或非活性混合材或窑灰中的任一种材料代替。

③ 本组分材料为符合 GB/T 2847 的活性混合材。

④ 本组分材料为符合 GB/T 1596 的活性混合材。

⑤ 本组分材料为由两种（含）以上符合要求的活性混合材或与符合要求的非活性混合材组成的材料，其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合要求的窑灰代替。掺矿渣时混合材掺量不得与矿渣硅酸盐水泥重复。

注：1. 活性混合材：应符合《用于水泥中的粒化高炉矿渣》(GB/T 203)、《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046)、《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596)、《用于水泥中的火山灰质混合材》(GB/T 2847) 标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料。

2. 非活性混合材：活性指标分别低于 GB/T 203、GB/T 18046、GB/T 1596、GB/T 2847 标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材；石灰石和砂岩，其中石灰石中的三氧化二铝含量（质量分数）应不大于 2.5%。

3. 窑灰：应符合《掺入水泥中的回转窑窑灰》(JC/T 742) 的规定。

通用硅酸盐水泥的化学指标应符合表 1-4 的规定（以质量分数计）。

表 1-4 通用硅酸盐水泥的化学指标 单位：%

品 种	代号	不溶物	烧失量	三氧化硫	氧化镁	氯离子
硅酸盐水泥	P·I	≤0.75	≤3.0	≤3.5	≤5.0 ^①	≤0.06 ^②
	P·II	≤1.5	≤3.5			
普通硅酸盐水泥	P·O	—	≤5.0	≤4.0	≤6.0 ^②	
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 ^②	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	—	—			
复合硅酸盐水泥	P·C	—	—			

- ① 如果水泥压蒸试验合格，则水泥中氧化镁的含量（质量分数）允许放宽至 6.0%。
- ② 如果水泥氧化镁的含量（质量分数）大于 6.0% 时，需进行水泥压蒸安定性试验并合格。
- ③ 当有更低要求时，该指标由买卖双方确定。

硅酸盐水泥化学指标包括不溶物、烧失量、三氧化硫、氧化镁、氯离子和碱含量等。化学指标主要是控制水泥中有害物质不能超过规定限量，若超过最大允许限量，即对水泥性能产生有害或潜在有害影响。不溶物是指水泥经酸和碱处理后不能被溶解的残余物，是水泥中非活性组分的反映，主要由生料、混合材和石膏中的杂质产生，主要成分为 SiO₂、R₂O₃。烧失量是指水泥经高温灼烧处理后的质量损失率，主要由水泥中未煅烧组分产生，如未烧透的生料、石膏带入的杂质、混合材及存放过程中的风化等。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。水泥中不溶物和烧失量主要是为了控制水泥生产过程中熟料煅烧质量及限制某些组分材料的影响。三氧化硫和氧化镁含量过高，有可能造成水泥安定性不良，氯离子超标则可能导致钢筋锈蚀，所以对这些有害物质要加以控制。

2. 物理指标

(1) 强度

不同品种、不同强度等级的通用硅酸盐水泥，其不同龄期的强度应符合表 1-5 的规定。

表 1-5 通用硅酸盐水泥的强度指标

品 种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3d	28d	3d	28d
硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	
	62.5	≥28.0	≥62.5	≥5.0	≥8.0
	62.5R	≥32.0		≥5.5	
普通硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	

续表

品 种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3d	28d	3d	28d
矿渣硅酸盐水泥、 火山灰质硅酸盐水泥、 粉煤灰硅酸盐水泥	32.5	≥ 10.0	≥ 32.5	≥ 2.5	≥ 5.5
	32.5R	≥ 15.0		≥ 3.5	
	42.5	≥ 15.0	≥ 42.5	≥ 3.5	≥ 6.5
	42.5R	≥ 19.0		≥ 4.0	
	52.5	≥ 21.0	≥ 52.5	≥ 4.0	≥ 7.0
	52.5R	≥ 23.0		≥ 4.5	
复合硅酸盐水泥	32.5R	≥ 15.0	≥ 32.5	≥ 3.5	≥ 5.5
	42.5	≥ 15.0	≥ 42.5	≥ 3.5	≥ 6.5
	42.5R	≥ 19.0		≥ 4.0	
	52.5	≥ 21.0	≥ 52.5	≥ 4.0	≥ 7.0
	52.5R	≥ 23.0		≥ 4.5	

水泥强度主要来自于早期强度 (C_3S) 及后期强度 (C_2S)，而且这些影响贯穿于混凝土中。用 C_3S 含量较高的水泥制作混凝土，其强度增长较快，但后期可能强度并不高。水泥以较慢的速率水化，可获得较高的最终强度。因此选用水泥时，应考虑合理的早期、后期和长期强度。

(2) 细度 (选择性指标)

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 $300m^2/kg$ ；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 $80\mu m$ 方孔筛筛余不大于 10% 或 $45\mu m$ 方孔筛筛余不大于 30%。

在我国目前大多数水泥粉磨工艺条件下，水泥磨得普遍较细，其中的细颗粒含量较多。增加水泥的比表面积可提高水泥的水化速率，即提高早期强度，但粒径在 $1\mu m$ 以下的颗粒不到一天就完全水化，几乎对后期强度没有任何贡献，反而增加水泥早期水化热、加大硬化体的自收缩和干燥收缩。同时，粗颗粒含量的下降，减少了稳定硬化体体积的未水化颗粒，对抑制收缩不利。随水泥比表面积的增加，与高效减水剂的适应性会变差，为减小流动度损失需要更多用量的高效减水剂，这会增加施工费用。

(3) 凝结时间

硅酸盐水泥初凝时间不小于 45min，终凝时间不大于 390min。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初凝时间不小于 45min，终凝时间不大于 600min。

凝结时间是水泥的重要技术指标，其实质上反映了水泥的水化速度。国家标准对不同品种水泥的凝结时间都有明确规定。这种规定一是基于水泥使用时若凝结时间太快，会导致来不及施工，而凝结时间过慢，会导致施工周期延长而影响施工进度；二是基于不同地域的水泥生产企业和水泥用户需要有一个根据具体生产条件和使用情况选择水泥凝结时间的范围。

(4) 安定性

对水泥安定性的要求是沸煮法合格。

水泥浆硬化后体积变化的均匀性称为水泥体积安定性，即在水泥加水逐渐水化硬化后，

硬化浆体能保持一定形状,具有不开裂、不变形、不溃散的性质。一般来说,除了膨胀水泥在凝结硬化过程中体积稍有膨胀外,大多数水泥在此过程中体积稍有收缩,但这些膨胀和收缩都是硬化之前完成的。因此水泥石的体积变化均匀,即安定性良好。如果水泥中某些成分的化学反应不在硬化前完成而在硬化后发生,并伴随有体积变化,这时便会在已经硬化的水泥石内部产生有害的内应力。如果这种内应力大到足以使水泥石的强度明显降低,甚至开裂,导致水泥制品破坏,则水泥安定性不合格。

水泥安定性不良会使水泥硬化体开裂,强度下降,甚至引起结构破坏。导致水泥安定性不良的有害成分主要是熟料中的游离氧化钙($f\text{-CaO}$)、游离氧化镁($f\text{-MgO}$)及石膏(SO_3)的过量造成的,因此,应严格限制其含量。

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% 或由买卖双方协商确定。

水泥中的碱主要由生产水泥的原料粘土和燃料煤引入。水泥中的碱一部分以硫酸盐(K_2SO_4 , Na_2SO_4 , $3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$, $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$)及碳酸盐(K_2CO_3 , Na_2CO_3)的形式存在,一部分则固溶在熟料矿物中。当水泥加水后,硫酸盐及碳酸盐形式的碱很快溶入水中,固溶在熟料中的碱则随着矿物水化的进行而慢慢地溶入水中,同时溶入水中的碱又有部分被水化产物所吸收。高含碱量的水泥会生成抗裂性能差的凝胶,加剧硬化体的干燥收缩,所以不论骨料是否有活性,都应当限制其碱含量。低碱水泥有内在的抵抗开裂的能力,当含碱量低于 0.60% 时,水泥的抗裂性明显增加。

4. 放射性

依据《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566),水泥的内、外照射指数限量均不超过 1.0。

三、试验方法

(一) 执行标准

1. 物理指标

- 1) 强度 按《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671)的规定进行。
- 2) 细度 比表面积按《水泥比表面积测定方法勃氏法》(GB/T 8074)进行;筛余按《水泥细度检验方法筛析法》(GB/T 1345)的规定进行。
- 3) 水泥标准稠度用水量、凝结时间和安定性 按《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346)的规定进行,压蒸安定性按《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T 750)的规定进行。

2. 化学指标

不溶物、烧失量、氧化镁、三氧化硫和氯离子按《水泥化学分析方法》(GB/T 176)的规定进行。

3. 碱含量

碱含量按《水泥化学分析方法》(GB/T 176)的规定进行。