

混凝土工程施工技术与质量控制

宋功业 邵界立 编著

HUNNINGTUGONGCHENGSHIGONGJISHU

YUZHILIANGKONGZHI

中国建材工业出版社

混凝土工程施工技术与质量控制

宋功业 邵界立 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土工程施工技术与质量控制/宋功业,邵界立编著.

—北京:中国建材工业出版社,2003.1

ISBN 7-80159-372-3

I.混... II.①宋...②邵... III.①混凝土施工—施工技术
②混凝土施工—质量控制 IV.TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 103554 号

混凝土工程施工技术与质量控制

宋功业 邵界立 编著

*

中国建材工业出版社出版(北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京鑫正大印刷有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:18.625 字数:464 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—5000 册 定价:36 元

ISBN 7-80159-372-3/TU·175

参编人员：

柳振河	柯羊义	管英书	宋功伟
张为友	查全能	李安华	宰多寿
张铭言	王仕定	王安奎	黄泽栋
陶方正	张光能	张明震	徐国方
宋功祁	肖娟	许光国	张世俊
沈承艮	宋功业	邵界立	

前 言

加入 WTO 后,我国混凝土施工技术已经进入了一个新时期。其标志主要有两点,一是技术标准与国际接轨,二是高性能混凝土的广泛研究与应用。

世界贸易组织 WTO 的《贸易技术壁垒 TBT 协议》,对技术法规、技术标准、合格评定的制定和执行不应造成贸易障碍作出了规定,同时对标准化程序、制度也提出了要求。2002 年 3 月 1 日起,我国已全面施行建筑工程施工质量验收 14 项系列规范,与此相应的“施工及验收规范”和“质量检验评定标准”同时废止。这套规范的推行,标志着我国面向新世纪、适应市场经济的施工规范全面实施。它不仅影响工程建设标准化的发展方向,而且也影响我国建设工程的施工组织方式和质量监管等工作。

我国新的工程质量施工标准规范体系包括“施工质量验收规范”、“施工工艺指南”和“评优标准”三部分。其中“施工质量验收规范”是整个标准规范中的基础。“施工工艺指南”是施工企业进行具体操作的方法,是企业的内控标准,它是企业在统一“验收规范”尺度下进行竞争的法宝,把企业的竞争机制引入到拼实力、拼技术上来,真正体现市场经济下企业的主导地位。本书的目的是为了帮助企业能适应这一转变。

20 世纪 80 年代我国改革开放以来,特别是在 90 年代,我国推行大规模的经济建设、基础设施建设和住宅建设,从而使水泥和混凝土的产量飞速发展;而在同一时期,发达国家的建设相对处于萎缩阶段。因此可以说我国水泥和混凝土的发展在世界上一枝独秀,举世瞩目。因此 20 世纪 90 年代是我国混凝土技术的发展处于历史上最快的时期。

20 世纪 80 年代末西方发达国家在总结混凝土技术发展的基础上提出了“高性能混凝土”的概念。美国、英国、法国、瑞典、日本等国相继大力进行了研究。高性能混凝土没有确切的定义,各国根据本国的工程需要和自己的理解提出了对混凝土的高性能要求:高耐久性、高工作性、高强度、高抗渗、高体积稳定性等,后来总结为高强度、高耐久性和高工作性。我国从 90 年代初也掀起了高性能混凝土的热潮,清华大学陈肇元等率先把列为国家自然科学基金重点项目之一的高强混凝土进行研究。当时许多省市都列项研究,将重点放在高强上,取得了一批研究成果,得到了高强混凝土的完整的技术指标,并制定了高强混凝土的设计标准,许多省市完成了 C80 以上(甚至 C100)的工程试点项目,积累了制作、施工的实际经验。应该说,我国在高强度、高工作性混凝土的生产和施工方向上取得了突破性的进展。

在高性能混凝土的发展中,结合我国的工程实际,人们逐渐体会到不应局限于高强度。我国 C60 以上的混凝土占混凝土总量的比率毕竟非常有限,大量使用的是 C25~C40 的混凝土。一般来说,混凝土强度越高,密实性越高,耐久性也较好,但应该着重指出,在严酷的使用环境下,高强度混凝土未必是耐久的,这已被许多实际工程所证实。因此高性能混凝土的性能要求重点逐渐向高耐久性转移。

高性能混凝土的研究大大推动了我国外加剂、矿物细掺料的发展。外加剂行业生产由小到大,由土到洋,产品包括高效减水剂、缓凝剂、泵送剂、引气剂等系列产品,质量也有所提高,

基本上满足了工程需要。矿物细掺料除了粉煤灰外,还成功研制了矿渣微粉、硅灰、沸石粉等,其中矿渣微粉已大批量生产。

我国较大规模的商品混凝土生产是从 20 世纪 80 年代初上海宝钢建设开始的,至今已有 20 年的历史。90 年代以来,随着沿海地区大规模高层建筑的建设,使得商品混凝土发展很快,上海、北京等沿海大城市已普遍使用商品混凝土,上海商品混凝土的使用量已占混凝土总量的 85% 以上,商品混凝土的优越性也得到了充分体现。但从全国看,商品混凝土的发展还很不平衡,如上海 2001 年商品混凝土的年产量达到了 2100 万 m^3 ,估计占全国总产量的 1/4 左右,而一些欠发达省(区),商品混凝土还刚刚起步。

商品混凝土与泵送混凝土的发展是相互促进的。我国泵送混凝土的技术从材料配制、泵送设备的使用到现场组织管理,都积累了丰富的经验。1997 年上海金茂大厦混凝土施工,创造了一阶段泵送高度 382m 的记录,可以毫不夸张地说,我国泵送混凝土的技术已达到了很高的水平。

商品混凝土的发展提高了混凝土的质量和均匀性水平,同时大大提高了对外加剂质量的要求,促进了粉煤灰、矿渣微粉的推广使用。上海的商品混凝土中几乎都掺粉煤灰。

自 20 世纪 90 年代以来,重大建筑工程的耐久性问题开始引起国家和技术界的重视。重大混凝土工程的耐久性问题被列为国家重点技术攻关项目,并已于 2000 年完成,取得了一批成果。

21 世纪第一个十年,我国经济还将继续快速发展,特别在中国中西部,还将继续进行大规模建设。

本书突出了混凝土工程施工技术与质量控制这一主题,共分三大部分。第一部分主要结合现行国家材料标准对混凝土常用材料的品种、性能、主要矿物成分等进行了阐述,希望能帮助工程技术人员对这些材料有较为深刻的认识,以便工程中结合具体条件选用。第二部分着重介绍混凝土施工技术,按照从一般到特殊的原则既介绍常规施工技术也介绍特殊条件下的混凝土施工技术和特殊混凝土施工技术。第三部分主要介绍混凝土质量控制技术。实际上,混凝土施工质量是本书的主线,在第一、二部分已有了充分的体现。第三部分主要结合现行施工质量验收规范和检验标准介绍如何控制检验与控制混凝土质量。

由于我们对新的标准学习不深,理解不够,本书的内容挂一漏万在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 混凝土的组成材料	1
第一节 水泥的品种及主要性能	2
一、常用水泥的主要品种	2
二、硅酸盐水泥的主要矿物成分	7
三、水泥的水化产物	9
四、水泥的物理性质	10
五、水泥的强度	13
第二节 拌合用水	15
第三节 集 料	15
一、粗集料	16
二、细集料	19
三、用高炉重矿渣作集料	21
四、轻集料	22
第四节 外 加 剂	28
一、普通减水剂	31
二、高效减水剂	34
三、引气剂	40
四、调凝剂	41
五、流化剂	44
六、膨胀剂	44
七、防冻剂	45
八、早强剂	45
九、加气剂	46
十、阻锈剂	46
十一、防水剂	46
十二、养护剂	46
第五节 掺 合 料	46
一、磨细矿渣	48
二、粉煤灰	51
三、火山灰质混合材料	52
四、硅粉形态对混凝土性能的影响	55
第二章 混凝土施工技术	57
第一节 混凝土分类	57

第二节 混凝土配合比设计	58
一、配合比设计的要求	58
二、配合比设计方法	58
三、混凝土配制强度的确定	59
四、用水量的确定	59
五、砂率的确定	60
六、外加剂和掺合料的确定	60
七、最大水灰比与最小水泥用量	61
八、引气剂的掺量	61
九、混凝土配合比计算	61
十、混凝土配合比的试配、调整与确定	63
十一、有特殊要求的混凝土配合比设计	65
第三节 混凝土施工	69
一、混凝土的配料与拌制	69
二、混凝土运输	74
三、混凝土浇筑	79
四、混凝土的养护	83
五、拆模	89
六、混凝土真空吸水技术	89
第四节 特殊施工	91
一、冬期混凝土施工	91
二、暑期混凝土施工	110
三、高强混凝土施工	118
四、碾压混凝土施工	139
五、泡沫混凝土施工	169
六、耐低温混凝土施工	171
七、耐热混凝土施工	172
八、抗油渗混凝土施工	176
九、防辐射混凝土施工	177
十、轻集料混凝土施工	180
十一、纤维混凝土施工	189
十二、特细砂混凝土施工	199
十三、无砂大孔混凝土施工	201
十四、补偿收缩混凝土	202
第三章 混凝土质量控制	204
第一节 原材料质量控制	204
第二节 施工质量控制	205
一、混凝土拌合物的技术性能	205
二、混凝土物理力学性能	207
三、混凝土长期性能和耐久性能	215

四、混凝土施工控制	227
五、现浇结构分项工程控制	228
六、装配式结构分项工程控制	231
七、混凝土结构子分部工程控制	236
八、附录	237
第三节 混凝土拌合物试验方法	241
一、一般要求	242
二、试验方法	243
第四节 混凝土力学性能试验方法	250
一、一般规定	251
二、试验方法	252
第五节 混凝土长期性能和耐久性能试验	259
一、试件的制作及养护	260
二、试验方法	260
第六节 混凝土无损检测技术	277
一、概述	277
二、回弹法	278
三、超声法	281
四、“超声-回弹”综合法	285
五、取芯法	286

第一章 混凝土的组成材料

现代混凝土技术的高性能要求,使得人们不得不采用多种综合手段来达到此目的,其中选用合适的材料是重要手段之一。

按目前的使用状况,混凝土有六大组分,即胶凝材料、砂、石、水、化学添加剂和矿物掺合料。

胶凝材料通常为水泥,尤其硅酸盐水泥及其变种。其作用主要是在与水的作用下水化,经水化产物的硬化、固化、胶结作用把其它散粒料胶结成具有强度的整体。硅酸盐水泥通常主要有硅酸三钙、硅酸二钙、铁铝酸四钙和铝酸三钙四大矿物组成,水化后产生 C—S—H 凝胶及其结晶相。结晶相既有强度和微集(骨)料的作用也有大界面的低胶结性。C—S—H 凝胶根据其纤维状、针棒状、网状和内核状的多少又有不同的固结能力。同时,水泥的水化程度也是一个影响强度的重要因素。通常,总有一部分水泥没有水化完毕,以微集料的形式存在,这尤其在低水灰比高密实度混凝土中更为明显。此外,水化产物属高碱度矿物,当外界物质如碳酸、硫酸盐等物质侵蚀或脱水后,又会形成其他矿物而使其分解,膨胀或收缩,产生极其不良的后果。

砂石在混凝土中主要起骨架作用及其相应的经济性。由于集料的矿物成分不同,直接影响到混凝土的强度及其结构稳定性,如蛋白石等含活性硅的集料,会与水泥中的苛性碱产生碱-集料反应而产生膨胀破坏,还会因集料所含矿物不同,在高温下产生相变而破坏结构的稳定性。此外,集料还有低的界面粘结力,不同的温度变形系数,而在混凝土中形成界面弱区,成为混凝土内的裂纹生成源,影响混凝土的强度和耐久性。

水的作用,既提供水化的物质需要,又提供成型的必需的流动性。水分少不足以完全水化和不能成型密实,水分多又形成离析和泌水通道,这都会成为裂纹源和有害物质侵入的通道而产生极坏的影响。同时,水分在结构中以不同的形态存在,会在不同的温度下脱去和在外力下流动,这又是混凝土收缩变形收缩裂纹的根源和蠕变变形的根源。无疑这都是混凝土破坏和体积不稳定性的重要原因。

化学添加剂,赋予混凝土拌合料和其水化硬化过程以不同的性能(如:抗冻性、流动性、膨胀性等),但其后期基本作用不大,有些甚至是有害的。因此化学外加剂,应是在能满足设计要求下尽量不用或少用。同时,它也会提高混凝土的成本。

第六组分矿物掺合料不仅有减少水泥用量、降低成本、利废以利环境、提高混凝土工作性以利施工的作用,还有改善提高混凝土的物理、化学、力学性能,并赋予混凝土以新的功能如防水、补缩、屏蔽、导电等,还为智能混凝土(如导航、自诊断、调湿、温度自控、自修复、自伸缩等智能)的生产提供了可能。其主要原因就是其替代部分水泥而减少了水泥的晶相水化物,充分水化并充分发挥水泥作用,细粉的增加提高了密实度,以及其本身的其它功能而带来的相关功能。第六组分是有极高的使用价值和研究余地的。但应看到,第六组分也带来相关的施工工艺复杂性和其本身部分物质的有害性以及与水泥材料的适配性,也需进行深入研究。

第一节 水泥的品种及主要性能

一、常用水泥的主要品种

我国目前经常使用的水泥品种有硅酸盐水泥(国外称波特兰水泥)、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥等六大类。此外还有快硬硅酸盐水泥、白色硅酸盐水泥、大坝水泥、高铝水泥等六十多个品种。

水泥品种是以水泥的性能为依据划分的。是为了达到合理有效地使用为目的的。

我国常用的六大水泥种类,硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥都是硅酸盐系列水泥,主要是通过调整硅酸盐水泥熟料含量,合理掺入不同品种、不用数量的混合材料而划分的。因此在性能上这六个水泥品种之间既有区别又有联系,很难截然区分。

(一)硅酸盐水泥

泛指以硅酸钙为主要成分的水泥。硅酸盐水泥分两种类型。在水泥熟料中不掺加混合料的称Ⅰ类硅酸盐水泥,代号P·I。在硅酸盐水泥熟料粉磨时掺加不超过水泥质量5%石灰石或粒化高炉矿渣混合材的硅酸盐水泥称Ⅱ型硅酸盐水泥,代号P·II。按现行国标GB 175-1999要求,硅酸盐水泥的组分材料中的石膏应为天然石膏。天然石膏应符合GB/T 5483中规定的G类或A类二级(含)以上的石膏或硬石膏。如果采用工业副产石膏时必须经过试验证明对水泥性能无害方可使用。活性材料用粒化高炉矿渣,必须符合GB/T 203的要求。非活性材料用石灰石,石灰石中的氧化铝含量不得超过2.5%。Ⅰ型硅酸盐水泥中的不溶物不得超过0.25%,烧失量不得大于3.0%;Ⅱ型硅酸盐水泥中的不溶物不得超过1.5%,烧失量不得大于3.5%。

硅酸盐水泥中氧化镁含量不宜超过5.0%。如果经压蒸安定性试验合格,则水泥中氧化镁的含量允许放宽到6.0%。但三氧化硫含量不得超过3.5%。

硅酸盐水泥比表面积应大于 $300\text{m}^2/\text{kg}$ 。初凝不得早于45min,终凝不得迟于6.5h。安定性用沸煮法检验必须合格。

硅酸盐水泥的强度等级分为42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R(带“R”的为早强型硅酸盐水泥)。

硅酸盐水泥强度等级按规定(龄期)的抗压强度和抗折强度来划分。各强度等级水泥的各龄期强度,不得低于表1-1中的数值。

硅酸盐水泥强度等级表

表 1-1

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

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

(二)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。

普通水泥中掺活性材料时,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% 的非活性混合材料来代替。掺用的活性材料必须为符合 GB/T 203 的粒化高炉矿渣、符合 GB/T 1596 的粉煤灰、符合 GB/T 2847 的火山灰质混合材料。

掺非活性混合材料时,最大掺量不得超过水泥质量 10%。非活性材料是指活性指标低于 GB/T 203、GB/T 1596、GB/T 2847 标准要求的粒化高炉矿渣、粉煤灰、火山灰质混合材料以及石灰石和砂岩。石灰石中的三氧化二铝含量不得超过 2.5%。普通水泥中掺加的窑灰应符合 JC/T 472 中的规定。

普通水泥粉磨时允许加入助磨剂,其加入量不得超过水泥质量的 1%,助磨剂须符合 JC/T 667 中的规定。

普通水泥的强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R。

普通水泥强度等级按规定龄期的抗压强度和抗折强度来划分,各强度等级水泥的各龄期强度不得低于表 1-2 中的数值。

普通硅酸盐水泥强度等级表

表 1-2

强 度 等 级	抗 压 强 度(MPa)		抗 折 强 度(MPa)	
	3d	28d	3d	28d
32.5	11.0	32.5	2.5	5.5
32.5R	16.0	32.5	3.5	5.5
42.5	16.0	42.5	3.5	6.5
42.5R	21.0	42.5	4.0	6.5
52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
52.5R	26.0	52.5	5.0	7.0

普通水泥中的烧失量不得大于 5.0%。水泥中氧化镁的含量不宜超过 5.0%。如果水泥经压蒸安定性试验合格,则水泥中氧化镁的含量允许放宽到 6.0%。普通水泥中的三氧化硫的含量不得超过 3.5%。

普通水泥的细度要求为,通过 $80\mu\text{m}$ 方孔筛的筛余量不得超过 10.0%。

普通水泥初凝不得早于 45min,终凝不得迟于 10h。安定性用沸煮法检验必须合格。水泥中碱含量按 $\text{NaO} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值来表示。若使用活性集料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中含碱量不得大于 0.60% 或由供需双方商定。

(三)矿渣硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料和粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为矿渣硅酸盐水泥,简称矿渣水泥。代号 P·S。水泥中粒化高炉矿渣掺加量按 GB 1344-1999 中的要求,按质量百分比计为 20%~30%。粒化高炉矿渣必须符合 GB/T 203 中的要求。允许用石灰石、窑灰、粉煤灰和火山灰质混合材料中的一种材料替代矿渣,但石灰石中的三氧化二铝含量不得超过 2.5%;窑灰应符合 JC/T 742 中的规定;粉煤灰要符合 GB/T 1596 中的要求;火山

灰质混合材料要符合 GB/T 2847 中的要求。代替数量不得超过水泥质量的 8%，替代后水泥中粒化高炉矿渣不得少于 20%。

矿渣水泥的强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R。水泥强度等级按规定龄期的抗压强度和抗折强度来划分，各强度等级水泥的各龄期强度不得低于表 1-3 中的数值。

矿渣水泥、粉煤灰水泥、火山灰水泥强度等级表

表 1-3

强 度 等 级	抗 压 强 度(MPa)		抗 折 强 度(MPa)	
	3d	28d	3d	28d
32.5	10.0	32.5	2.5	5.5
32.5R	15.0	32.5	3.5	5.5
42.5	15.0	42.5	3.5	6.5
42.5R	19.0	42.5	4.0	6.5
52.5	21.0	52.5	4.0	7.0
52.5R	23.0	52.5	4.5	7.0

矿渣水泥中三氧化硫的含量不得超过 4.0%；熟料中的氧化镁的含量不宜超过 5.0%。如果水泥经压蒸安定性试验合格，则熟料中的氧化镁含量允许放宽到 6.0%。当熟料中氧化镁的含量为 5.0%~6.0%时，根据 GB 1344-1999 规定，如矿渣水泥中混合材料总掺量不大于 40%，制成的水泥可不作蒸压试验。

矿渣水泥的细度为：通过 80 μ m 方孔筛的筛余量不得超过 10.0%。矿渣水泥的初凝时间不得早于 45min，终凝不得迟于 10h。其安定性用沸煮法检验必须合格。水泥中含碱量按 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值来表示。若混合料为活性掺合料时要限制水泥中的碱含量。

(四)粉煤灰硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料和粉煤灰、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为粉煤灰硅酸盐水泥，简称粉煤灰水泥，代号 P·F。所掺用的粉煤灰必须符合 GB/T 1596 中的规定。水泥中粉煤灰的掺量按质量百分比计为 20%~40%。所掺石膏可以是天然石膏也可以是工业副产品石膏。采用天然石膏时应为 GB/T 5483 中规定的 G 类或 A 类二级(含)以上的石膏或硬石膏。工业副产品石膏为工业生产中以硫酸钙为主要成份的副产品。工业副产品石膏必须经过试验确证对水泥性能无害方可使用。

粉煤灰水泥的强度等级划分以及各强度等级水泥的各龄期强度要求见表 1-3。

粉煤灰水泥中三氧化硫的含量不得超过 3.5%，熟料中氧化镁的含量不宜超过 5.0%。如果水泥经压蒸安定性试验后为合格，则熟料中氧化镁的含量允许放宽到 6.0%。按 GB 1344-1999 规定，当熟料中氧化镁的含量为 5.0%~6.0%时，如果粉煤灰水泥中的混合材料掺加量大于 30%，制成的水泥可不作蒸压试验。

粉煤灰水泥的细度为，通过 80 μ m 方孔筛，且筛余量不得超过 10.0%。

粉煤灰水泥的初凝不得早于 45min，终凝不得迟于 10h。安定性用沸煮法检验必须合格。水泥中的碱含量按 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值来表示。若混凝土使用活性骨料时要限制水泥中的碱含量。

(五)火山灰质硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料和火山灰质混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为火山灰质硅酸盐水泥，简称火山灰水泥，代号 P·P。掺用的火山灰质混合材料必须符合 GB/T 2847 中的要

求。水泥中火山灰质混合材料掺量按质量百分比计为 20%~50%。掺用的石膏可采用天然石膏,也可采用工业副产品石膏。天然石膏应符合 GB/T 5483 中规定的 G 类或 A 类二级(含)以上的石膏或硬石膏。采用工业副产品石膏时,必须经过试验,以确证对水泥性能无害方可使用。

火山灰水泥的强度等级划分以及各强度等级水泥的各龄期强度要求见表 1-3。

火山灰水泥中三氧化硫的含量不得超过 3.5%。熟料中氧化镁的含量不宜超过 5.0%。如果水泥经压蒸安定性试验合格,则熟料中氧化镁的含量允许放宽到 6.0%。按 GB 1344-1999 要求,当熟料中氧化镁的含量为 5.0%~6.0%时,如果火山灰水泥中混合材料的掺加量大于 30%,制成的水泥可不作蒸压试验。

火山灰水泥的细度为,通过 80 μ m 方孔筛的筛余量不得超过 10.0%。水泥初凝不得早于 45min,终凝不得迟于 10h。其安定性用沸煮法检查必须合格。水泥中的碱含量按 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值来表示。若使用活性材料作混凝土骨料时,要限制水泥中的碱含量。

(六)复合硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、两种或两种以上规定的混合材料、适量的石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,称为复合硅酸盐水泥,简称复合水泥,代号 P·C。掺用的混合材料分活性混合材料和非活性混合材料。活性材料可用粒化高炉矿渣、粉煤灰、火山灰质混合材料、粒化精炼铬铁渣、粒化增钙液态渣以及按 GB 12958-1999 附录 A 要求新开辟的活性混合材料。粒化高炉矿渣必须符合 GB/T 203 的要求;粉煤灰必须符合 GB/T 1596 的要求;火山灰质混合材料必须符合 GB/T 2847 的要求;粒化精炼铬铁渣必须符合 JC/T 417 的要求;粒化增钙液态渣必须符合 JC/T 454 的要求。如果启用新开辟的混合材料必须符合下列规定:

1. 水泥胶砂 28d 抗压强度比大于和等于 75%的为活性混合材料;小于 75%的为非活性混合材料。混合材料的活性按 GB/T 12957 进行评定。

2. 启用新开辟的混合材料生产复合水泥时,必须经过国家水泥质量监督机构充分试验和鉴定,证明它对人体无害,其中放射性物质须符合 GB 6763 的规定。还要证明它对水泥性能无害,并制订其相应的技术标准,经省、市、自治区以上建材主管部门批准。投产后应定期进行质量检验。

3. 审批新开辟的混合材料需提供的资料:①新开辟的混合材料作水泥混合材料的可行性研究报告,其内容应包括混合材料的化学成分、矿物组成、活性状态、对人体的有害成分含量,用该复合材料制备的复合水泥短期和长期的物理力学性能、特殊性能及混凝土性能等试验研究。②水泥试产、试用总结报告。③新开辟的混合材料技术标准及编制说明。

掺用的非活性混合材料可以是活性指标低于 GB/T 203、GB/T 1596、GB/T 2847、JC/T 417 和 JC/T 454 标准的粒化高炉矿渣、粉煤灰、火山灰质混合材料、粒化精炼铬铁渣、粒化增钙液态渣,符合 JC/T 417 的粒化炭素铬铁渣,符合 JC/T 418 的粒化高炉钛矿渣,石灰石和砂岩以及按照 GB 12958-1999 附录 A 要求新开辟的非活性混合材料。石灰石中的三氧化二铝含量不得超过 2.5%。

复合水泥中允许用不超过 8%的窑灰代替部分混合材料。窑灰应符合 JC/T 742 的规定。掺矿渣时混合材料掺量不得与矿渣硅酸盐水泥重复。

复合水泥粉磨时允许加入助磨剂,其加入量不得超过水泥质量的 1%。助磨剂需符合 JC/T 667 的规定。

复合水泥的强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R。

复合水泥强度等级按规定的龄期的抗压强度和抗折强度来划分。各强度等级水泥的各龄期强度不得低于表 1-4 中的数值。

复合水泥强度等级表

表 1-4

强 度 等 级	抗 压 强 度(MPa)		抗 折 强 度(MPa)	
	3d	28d	3d	28d
32.5	11.0	32.5	2.5	5.5
32.5R	16.0	32.5	3.5	5.5
42.5	16.0	42.5	3.5	6.5
42.5R	21.0	42.5	4.0	6.5
52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
52.5R	26.0	52.5	5.0	7.0

复合水泥中三氧化硫的含量不得超过 3.5%。熟料中氧化镁的含量不宜超过 5.0%。如水泥经压蒸安定性试验合格,则熟料中氧化镁的含量允许放宽到 6.0%。

复合水泥的细度为,通过 80 μ m 方孔筛的筛余不得超过 10.0%。初凝不得早于 45min,终凝不得迟于 10h。安定性用沸煮法检验必须合格。水泥中碱含量按 $\text{NaO} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值来表示。当混凝土集料为活性时,必须控制含碱量。

(七)快硬硅酸盐水泥

快硬硅酸盐水泥是一种早期强度增进率较高的硅酸盐水泥。它的 1d 胶砂抗压强度可达到 28d 强度的 30% 以上,3d 可达 60% 以上。它的强度检验与硅酸盐水泥一样。只是快硬硅酸盐水泥在养护箱中的养护温度规定为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 。是以 1d、3d 的抗压强度与抗折强度来确定强度等级的。

(八)白色硅酸盐水泥

白色硅酸盐水泥,简称白水泥。它是由一种铁质含量少的硅酸盐熟料加适量石膏磨细制成的白色水硬性胶凝材料。在粉磨时允许加入不超过水泥重量 5% 的石灰石。它的性质除颜色外,和硅酸盐水泥,普通水泥没有任何区别。它是一种装饰材料,在粉磨时掺入矿物颜料可以制成各种颜色水泥,用作各种制品或建筑物的装饰材料。

白色水泥强度检验方法与硅酸盐水泥相同,强度指标与普通水泥完全一致。白度分为四个等级,它是以纯 Mg 粉的光谱反射率为 98% 作为白度基准来分等级的。

等级	一级	二级	三级	四级
白度(%)	≥ 84	≥ 80	≥ 75	≥ 70

细度与水泥的白度有密切的关系,水泥愈细,白度愈好。现行标准规定细度用 80 μ m 方孔筛,筛余不得大于 10%。熟料中的 MgO 的含量规定不得超过 4.5%。

(九)大坝水泥

硅酸盐大坝水泥、普通硅酸盐大坝水泥、矿渣硅酸大坝水泥总称为大坝水泥。在国际上属于中低热水泥。简单地说这三种水泥就是具有低水化热和低含碱量的硅酸盐水泥、普通水泥和矿渣水泥。

硅酸盐水泥熟料中各矿物成分的水化热差别甚大,详见表 1-5。

硅酸盐水泥熟料成分水化热表

表 1-5

矿 物	C_3A	C_3S	C_4AF	$\beta\text{-C}_2\text{S}$	CaO	MgO	备 注
水化热 (J/g)	866	502	419	260	1170	850	

由上表可知,矿物中的 CaO 、 C_3A 、 MgO 的水化热为最大,但以 C_3A 和 C_3S 的放热速率为最快。游离 CaO 放热速率却视其形态而导。因此,为了达到低水化热的目的,在生产大坝水泥熟料时应尽可能降低生料中 Al_2O_3 含量和适当减少石灰饱和系数。

碱含量是大坝水泥熟料中的另一个重要质量指标。因为水泥中碱的存在,可以极大地提高水泥石中液相的 OH^- 平衡浓度,而 OH^- 浓度的增加,将加剧 OH^- 对集料中活性 SiO_2 的侵蚀,造成通常称之为碱-硅酸的反应。这种反应形成的产物其体积将比原有的固相体积大。因此必须控制水泥中的碱含量。

(十)高铝水泥

高铝水泥即钒土水泥。它是由 Al_2O_3 含量为 50%,并以铝酸钙(CA , CA_2)为主要矿物组成的熟料磨制所得的。高铝水泥熟料与硅酸盐水泥熟料有很大的不同。它所用的原料主要是钒土和石灰石。

高铝水泥是一种硬化很快,但凝结正常的水泥。3d 抗压强度就可达到最大强度的 90% 左右,因此用 3d 的抗压强度来表示强度等级。

高铝水泥在常温下水化时生成低碱性的水化铝酸钙(CAH_{10})和氧化铝($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)凝胶。这一过程进行得很快,反应也很激烈,同时放出大量的热。因此常被用来抢建、抢修和冬期施工。但是常温下开始形成的水化物是处在亚稳状态,他们要向形成稳定的水化物方向转化,最终形成 C_3AH_6 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 晶体。由于这种转化的存在使得内部结构产生变动,因此高铝水泥的后期强度将出现下降并达到最低值,然后再有回升。影响这一过程的因素主要有温度、湿度和水灰比。温度越高,湿度和水灰比越大则转化的速度越快。但不管早期养护条件如何,其最低强度将基本不变。因此使用高铝水泥作结构混凝土时应按最低强度来设计。最低强度一般是用在 50°C 下的蒸汽养护来测得的。

此外,高铝水泥水化物在高温下分解后可以生成瓷质的材料,因而可用作配制不定形耐火材料。

高铝水泥水化相的碱度比较低,因而可用于抗硫酸盐侵蚀工程或和其它材料配合,配制多种特殊用途的水泥。

应当指出,高铝水泥不得与碱性溶液相接触或采用含有可溶碱的集料或水。否则混凝土将遭到彻底破坏。因为碱(K_2O , Na_2O)一方面直接和水化铝酸盐、含水氧化铝作用生成没有胶凝性的碱性铝酸盐从而使高铝水泥石分解;另一方面碱又极容易吸收 CO_2 形成碱的碳酸盐,它们又和水化铝酸盐反应生成 CaCO_3 和没有胶凝性的碱性铝酸盐及碱的氢氧化物。这种氢氧化物又吸收空气中的 CO_2 再重复上述作用。因此少量的碱就可反复作用,使得高铝水泥石瓦解。这就是高铝水泥用作结构混凝土时禁止在潮湿环境中与硅酸盐水泥接触使用的主要原因。

二、硅酸盐水泥的主要矿物成分

水泥之所以具有许多建筑技术性能,主要是由于水泥熟料中几种主要矿物水化作用的结果。所以,水泥熟料实际上是多种矿物的集合体。硅酸盐水泥熟料中主要矿物有硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 简写成 C_3S)、硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 简写为 C_2S)、铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 简写成 C_3A)和铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 简写为 C_4AF)四种。

C_3S 是由氧化钙、二氧化硅化合而成的,加水后与水反应的速度快,凝结硬化也快。硅酸三钙水化生成物所表现的早期与后期强度较高,一般 C_3S 颗粒在 28d 内就可以水化 70% 左

右,因此它能迅速发挥强度作用。一般要制造高标号水泥,可采用适当提高 C_3S 的含量的方法来实现。但是 C_3S 是矿物中最难形成的物质。如无液相存在,需要在 1800°C 的高温下才能生成。由此可见,要求熟料中 C_3S 含量过高,会给熟料煅烧带来困难,而且同时往往使熟料中 $f\text{CaO}$ 增高,对水泥的安定性和水泥强度都会带来不利的影响。

硅酸二钙(C_2S)也是由氧化钙和二氧化硅化合成的。它与水反应的速度比硅酸三钙要慢得多,凝结硬化也慢。表现出的早期强度比较低,28d 内水化 11% 左右,但后期强度增进相当高,甚至在水化多年后,强度还在增长。

C_2S 形成比较容易,但水泥熟料生产中当 C_2S 含量过高时,如果冷却不迅速,由于晶体转化就可能出现粉化现象,即熟料变成粉状。粉化的熟料与水作用基本不产生强度,使水泥强度显著降低。

硅酸三钙和硅酸二钙统称为硅酸盐矿物,其含量直接影响水泥强度。硅酸盐矿物在硅酸盐水泥熟料中一般约为 70%~74% 左右,其中硅酸三钙约为 40%~55% 左右。

铝酸三钙由氧化钙和三氧化二铝化合而成。它与水的反应相当快,而且凝结硬化也快。其强度绝对值并不很大,但加水后短期内几乎全部发挥出来。铝酸三钙是影响水泥早期强度及凝结快慢的主要矿物。

另外,铝酸三钙在煅烧熟料过程中熔为液体,对生成硅酸三钙有一定影响。在水泥中加入石膏主要是为了抑制铝酸三钙的快速水化。铝酸三钙水化时产生的热量大,抗腐蚀性能也较差。

铁铝酸四钙(C_4AF)是由氧化钙、三氧化二铝、三氧化二铁化合而成的。在煅烧熟料过程中,铁铝酸四钙能降低熟料的熔融温度和液相粘度,有利于硅酸三钙的生成。

铁铝酸四钙和水反应也比较迅速,早期强度略低于 C_3A ,但后期强度要大于 C_3A 。

C_3A 和 C_4AF 在硅酸盐水泥熟料中统称为熔剂矿物,它的总含量约占 20%~24%,其中 C_3A 一般在 5%~9%。回转窑生产的熟料 C_3A 含量有的略高。

以硅酸矿物为主的水泥熟料主要由氧化钙(CaO)、氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)及氧化铁(Fe_2O_3)四种氧化物组成。它们在水泥熟料中都是以矿物形式存在,只有极少量的氧化物是以游离状态存在的。四种氧化物含量通常在 95% 以上。一般在下列范围内波动(%):

CaO	62~67	Al_2O_3	4~7
SiO_2	20~24	Fe_2O_3	2~5

在个别情况下,根据原料性质不同,生产设备的特点不同,氧化物含量可超出上属范围。从氧化物的含量,可以大致推测水泥的性质。

氧化钙(CaO):是熟料中最主要的化学成分。它是生成硅酸三钙(简称 C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)、铁铝酸钙(C_4AF)等矿物的必不可少的组份。

如果适当提高 CaO 的含量,可使熟料的 C_3S 含量增加,能增加水泥的强度,加速水泥的硬化过程。但 CaO 含量过高,则生料过粗且混合不匀,加上操作不当,会使一部份 CaO 呈游离状态存在于熟料中,而游离氧化钙($f\text{CaO}$)会影响水泥的安定性。

二氧化硅(SiO_2):也是熟料中的主要成分之一。它能保证水泥熟料中的氧化钙成矿物化合状态存在。含量增加时,形成较多的 C_2S ,凝结速度及早期强度增长变慢,后期强度显著增高,并能提高水泥的抗腐蚀性能。但若 SiO_2 含量过高,使熟料中的 CaO 含量相对不足时,就会大量生成 C_2S ,水泥熟料出窑后由于 C_2S 的晶体转变,将大量粉化,水泥熟料的质量将大大降低。

氧化铝(Al_2O_3):它与 CaO 和 Fe_2O_3 生成 CA 和 C_4AF ,在熟料煅烧过程中起到助熔作用。当含量增加时,生成较多的 C_3A ,容易引起水泥较快凝结及硬化,早期强度高,但后期强度增长