

新型水泥与混凝土

[日] 森 茂 二 郎 编

王幼云 王家治 刘全章 杨瑞珊 译



中国建筑工程工业出版社

新型水泥与混凝土

[日] 森 茂二郎 编

王幼云 王家治 刘全章 杨瑞珊 译

中国建筑工业出版社

本书着重在综合近年来国际上有关文献(包括著者自己的成果)的基础上,系统地论述了水泥熟料化学、水泥水化化学和水泥石结构方面的最新研究成果,并立足此见地具体地介绍了新近开发的白色、彩色、特快硬、喷射、膨胀、自应力和补偿收缩等新型特种水泥的生产方法、化学与物理性质和混凝土性能及其应用。同时,还专辟一章以介绍目前各国致力研究的轻质、高强、聚合物、纤维增强和耐酸、耐海水、各种饰面等特种混凝土的制造、性能与应用,并兼论混凝土施工时可供选用的各种新技术和用水泥固化处理工业废料的技术等。

全书共分三章,第一章水泥化学由王家治翻译,第二章新品种水泥及其混凝土由王幼云翻译,第三章混凝土新技术由刘全章和杨瑞珊合译,最后由王家治和王幼云统一校对。

本书可供水泥工业、建筑工程界的广大科技人员阅读,也是大专院校水泥与混凝土等有关专业师生的良好的参考书。

新しいセメントとコンクリート

森 茂二郎 编

株式
會社

建設綜合資料社—1975

新型水泥与混凝土

王幼云 王家治 刘全章 杨瑞珊 译

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 10 $\frac{1}{8}$ 字数: 291 千字

1982年10月第一版, 1982年10月第一次印刷

印数: 1—11,900册 定价: 1.40元

统一书号: 15040·4253

序

当前，在历史悠久的水泥工业中也掀起了技术革新的浪潮，生产技术的迅速改革、新品种水泥的开发和混凝土新技术的发展都是十分惊人的。

特别是从1969年秋，即特快硬波特兰水泥问世以来，由于喷射水泥、膨胀水泥等新品种水泥的相继出现和高强混凝土、热拌混凝土生产技术的发展，将使水泥和混凝土工业跨入一个崭新的技术时代。

本书对现有书刊所涉猎的普通波特兰水泥未予置论，而对最新的水泥化学，特别是有关熟料矿物的最新研究成果，以及构成混凝土工艺基础的水泥水化化学，则刻意做了详细的论述。全面运用这些成果，便能为今后研究水泥的生产技术和使用方法获得很大的启示。

书中引用大量实验数据和施工实例，论述了新品种水泥及其混凝土，其中包括白水泥和彩色水泥的新的使用方法，以及特快硬波特兰水泥、喷射水泥的各种性能与混凝土的特性，对比了膨胀水泥所用的各种膨胀性混合材料的特点，相信这对研究今后可望获得迅速发展的无收缩混凝土和自应力混凝土有所裨益。

同时，对混凝土的新技术，还详细地论述了配制硬化更快、强度更高、质量更轻的混凝土的最新技术，并叙述了在日本已很快获得应用的高强混凝土的工程实例、混凝土制品工业中的快速养护方法、压蒸轻质混凝土及其它轻质混凝土的特性。书中还对混凝土至关重要的耐久性，以及用水泥固化处理工业废料以消除公害等都做了介绍。

如前所述，本书的编纂为避免与现有书刊重复而多所割爱，

但为便于读者理解，对实际应用所必需的各种资料又尽力多做记载。本书可供水泥行业及土木建筑有关部门的技术人员直接参考。

本书由内川浩、河野俊夫、斎藤鹤義执笔，宫岛信夫负责编辑。此外，承蒙小野田水泥中央研究所同人的大力帮助。

最后，值此出版之际，谨向曾给我们以帮助的山本廣保先生和公司建设综合资料社的高濑昇社长顺致深切的谢意。

小野田水泥公司

常务董事、中央研究所所长 森 茂二郎

1975年5月

目 录

1. 水泥化学	1
1-1 水泥的发展史和种类	2
1-1-1 水泥的定义	2
1-1-2 水泥的发展史	2
1-1-3 水泥的分类	3
1-2 水泥熟料化学	7
1-2-1 水泥原料	7
1-2-2 各种率值与矿物组成	9
1-2-3 生料制备	11
1-2-4 水泥熟料的形成过程	11
1-2-5 水泥熟料矿物的相平衡	17
1-2-6 水泥熟料矿物	25
1-3 水泥水化化学	47
1-3-1 硅酸钙的水化	47
1-3-2 铝酸钙及其有关化合物的水化	63
1-3-3 波特兰水泥的水化	89
1-3-4 水泥石的各种性能	94
1-3-5 水泥的凝结硬化	108
1-3-6 水化水泥的强度	111
1-3-7 养护条件与水化水泥的物理性能	119
2. 新品种水泥及其混凝土	127
2-1 白水泥和彩色水泥	128
2-1-1 生产方法	128
2-1-2 化学性质	131
2-1-3 物理性能	132
2-1-4 使用注意事项	139

2-1-5 用途和工程实例	141
2-2 特快硬波特兰水泥	145
2-2-1 生产方法	145
2-2-2 化学成分	147
2-2-3 物理性能	147
2-2-4 特快硬水泥混凝土的性能	148
2-2-5 注意事项	160
2-2-6 用途和工程实例	161
2-3 喷射水泥	165
2-3-1 喷射水泥熟料的化学	166
2-3-2 生产方法	174
2-3-3 水化	181
2-3-4 硬化前混凝土的性质	186
2-3-5 硬化混凝土的性能	189
2-4 膨胀水泥	199
2-4-1 种类及其生产方法	202
2-4-2 化学性质	204
2-4-3 物理性能	210
2-4-4 使用注意事项	224
2-4-5 用途和工程实例	225
2-5 其它新品种水泥	231
3. 混凝土新技术	234
3-1 高强混凝土	235
3-1-1 混凝土的组成材料和高强混凝土	237
3-1-2 搅拌、成型方法及高强混凝土	244
3-1-3 压蒸养护的高强混凝土	249
3-1-4 特种高强混凝土的制造方法	253
3-1-5 纤维增强混凝土	255
3-2 混凝土的加速硬化	259
3-2-1 常压蒸汽养护	260
3-2-2 热拌混凝土	264
3-2-3 压蒸养护	275

3-2-4	特殊养护方法	278
3-2-5	混凝土的快速施工法	283
3-3	轻质混凝土	284
3-3-1	人工轻集料混凝土	286
3-3-2	ALC	291
3-3-3	高强度加气混凝土	296
3-3-4	加气混凝土	298
3-3-5	其它轻质混凝土	300
3-3-6	轻质混凝土的物理性能	301
3-4	混凝土的耐久性	304
3-4-1	耐海水混凝土	306
3-4-2	耐酸混凝土	307
3-4-3	聚合物水泥砂浆和混凝土	310
3-4-4	聚合物浸渍混凝土 (PIC)	313
3-4-5	树脂混凝土	316
3-4-6	其它	319
3-5	饰面混凝土	321
3-5-1	混凝土幕墙饰面	322
3-5-2	白色预拌混凝土建筑物的施工	325
3-5-3	各种饰面混凝土制品	328
3-6	废料固化混凝土	334
3-6-1	废料种类和来源	334
3-6-2	水泥固化法	337
3-6-3	水泥固化法实例	338

1. 水 泥 化 学

日本的水泥产量，近十年来增长甚为迅速，1966年超过西德，仅次于苏联、美国而名列世界第三位，1972年达到6750万吨，正在接近世界第二位美国的产量。为能不断吸收新的投资来积极竞相开展技术革新，以适应这种迅速增长的需要，并能稳定地提供以价格适当的优质水泥，水泥工业正在设备制造的大型化、高效能和低消耗方面取得迅速进展。

另一方面，为了适应现代社会对多样化、个性化和高速化发展的要求，除改进现有水泥的性能外，还在开发新品种水泥。以小时计快硬高强的喷射水泥、不收缩的补偿收缩水泥、通过膨胀赋与水泥石以应力的膨胀水泥、抗海水和硫酸盐性能良好的抗硫酸盐水泥、复合材料、其中特别是玻璃纤维增强混凝土用的低碱水泥等具有发展前途的水泥，已在逐步获得应用，这不仅弥补了以往水泥的弱点，并预示了未来技术开发的广阔前景。

此外，水泥的使用技术也正在扎扎实实地发展。高强混凝土、轻质混凝土、纤维增强混凝土的开发，耐磨混凝土技术的形成，混凝土制品工场的自动化，以及随着土木、建筑施工的流水化，结合施工工艺和施工方法对新材料的研制，或结合原材料对新的施工工艺和施工方法的研究，将会满足不断增长的需要和高速发展的要求。

开展以水泥化学为基础的理论研究，灵活地应用水泥化学的研究成果并加以发展，是正确解决上述各种社会需要和进一步发展水泥工业的推动力量。

基于上述这一观点，在本书第一章中继水泥发展史和分类法的简要说明后，便论述了作为水泥制造技术基础的熟料化学，并

对水泥应用的必备知识即水泥的水化化学做了概要的阐述。

科学技术的发展，确系日新月异，水泥化学亦无例外。笔者虽力求根据新的研究成果进行论述，然而由于新，人们也往往会对其持有异议。书中仍决定用大量篇幅阐述水泥化学，想必会得到一般读者的理解。

1-1 水泥的发展史和种类

1-1-1 水泥的定义

水泥在英语中称 cement、德语称 Zement、法语称 ciment、拉丁语则称做含有石材或碎石意义的 caedere，一度曾转称 caedimentum、cementum 后，复又称 cement^①。这种称呼已同语源稍有转义，而是对调以水或盐类溶液即能硬化的无机材料的总称。如下所述，水泥有许多品种，作为基本品种的波特兰水泥，在日本工业标准(JIS R5210—1973)中被规定为：“波特兰水泥，是在熟料中加入适量石膏，磨细制成的。熟料则是以石灰质和粘土质为主的原料，以适当比例配合，并充分混匀，烧至部分熔融所得之产物。”

1-1-2 水泥的发展史

从遗存至今的水泥建筑物，即埃及的金字塔来看，水泥至少已有五千余年的历史。当时的水泥，乃为生石灰和煅烧石膏。在希腊、罗马时代，用消石灰掺以砂子混合制成的砂浆，曾被广泛用于砌筑石材和砖块。他们发现，若在该种砂浆中掺以火山灰，则可改善其水硬性，而桑托林岛和维苏威火山附近的火山灰最受欢迎。如今，已成为著名的桑托林土(Santorin earth)和火山灰。

1756年，英国的约翰·司梅顿(J. Smeaton)发现，煅烧

① 各语种中的所谓水泥，均系指胶结材料。——译者注

粘土质含量高的石灰石，可以制得优质的水硬性石灰，并将其用于建造爱迭斯顿（Eddystone）灯塔。此后，1796年，英国的约瑟夫·派克（Joseph Parker）用同样的方法制成了罗马水泥，1878年法国的L·J·维卡（L.J.Vicat）又发明了天然水泥。L·J·维卡的方法，是把石灰石和粘土质岩石加以混合烧制的，可以说这就是今日波特兰水泥的肇始。

1824年，英国的J·阿斯普丁（Josepb Aspdin）发明了一种把石灰石和粘土混合后加以煅烧来制造水泥的方法，并获得了专利权。这种水泥同英国波特兰（Portland）岛产的石材颜色相似，因此，被称为波特兰水泥。此后，欧洲各地不断对水泥生产方法进行了改进，1856年德国建起了水泥工厂，并普及到美国。

1872年（明治5年），日本在东京深川建起了国营水泥厂，1881年在山口县小野田建起了第一家私营水泥公司。此后，其生产方法和质量几经改进，而发展成今日的波特兰水泥。

此间，德国于1862年制成了掺有矿渣的矿渣水泥，成为今日掺混合材料水泥的萌芽。1907年前后，法国和美国制出了矾土水泥。为了弥补当今水泥在硬化时产生的收缩和早期强度低这两个缺点，法国于1936年发明了膨胀水泥，1968年美国又发明了其强度可按小时计的可调凝水泥（Regulated Set Cement），日本又对其进行了各种改进，随后于1971年作为喷射水泥出售使用。

今天，日本的水泥产量已是继苏联、美国之后名列世界第三位，而跃居世界第一位可以说已为时不远。1972年末日本已有23家水泥公司，67家工厂和232台窑。

1-1-3 水泥的分类

水泥品种繁多，并无固定分类方法。现将一般所采用的分类法列于表1-1。

在表列的水泥中，波特兰水泥、掺混合材料水泥、喷射水泥和矾土水泥等是被广泛使用的几种水泥。现将日本工业标准

(JIS. Japan Industrial Standard) 和美国工业标准 (ASTM. American Society for Testing and Materials) 规定的波特兰水泥和掺混合材料水泥的性质与用途等分别列于表 1-2 和表 1-3。

水泥 的 分 类

表 1-1

[A] 气硬性水泥(只在空气中硬化者)

1. 石灰(消石灰)与镁质石灰(白云石灰泥粉)
 2. 石膏(烧石膏)与基恩干固水泥(Keen's Cement)
 3. 镁氧水泥
-

[B] 水硬性水泥(在空气中和水中硬化者)

a. 纯水泥

1. 水硬性石灰
2. 罗马水泥
3. 天然水泥
4. 波特兰水泥
 - 1) 普通波特兰水泥
 - 2) 中热波特兰水泥
 - 3) 快硬波特兰水泥
 - 4) 特快硬波特兰水泥
 - 5) 低热波特兰水泥
 - 6) 抗硫酸盐波特兰水泥
 - 7) 高铁波特兰水泥(铁矿水泥、库尔[Kühl]水泥等)
 - 8) 白色波特兰水泥

5. 喷射水泥

6. 矾土水泥

b. 掺混合材料水泥

1. 矿渣水泥(用粒化高炉矿渣作混合材料)
 2. 火山灰质水泥(用火山灰、硅藻土等硅质物料作混合材料)
 3. 粉煤灰水泥(用粉煤灰作混合材料)
 4. 砌筑水泥(用石灰石、白云石作混合材料)
 5. 膨胀水泥(用矿渣、石膏等作混合材料)
 6. 彩色水泥(以白水泥为主掺用各种着色剂)
-

[C] 特种水泥

1. 耐酸水泥
 2. 补牙水泥
-

主要几种波特兰水泥的分类 (日本JIS. 美国ASTM) 表 1-2

水泥品种(型)	标 准	性 能	主 要 用 途
普通波特兰水泥(日) I 型波特兰水泥(美) (General-use Cement)	JIS:R 5210 (1)(1964) ASTM C-150 I 型(1959)	对MgO、SO ₃ 的含 量、烧失量的大小,以 及细度、凝结时间和强 度等分别做了规定,具 有水泥普遍具有的各种 性能	作为一种全能水泥, 在各种土建工程中广泛 应用
中热波特兰水泥(日) II型水泥(美) (Moderate he- at of Harden- ing Cement)	JIS:R 5210 (3)(1960) ASTM C-150 (1959) II 型	C ₃ S<50%, C ₃ A< 8%。水化热适中, 7 天<70卡/克, 28天<80 卡/克。后期强度能继 续增长	一般为“大体积混凝 土用水泥”。用于水坝 和大桥等大型构筑物的 基础工程
快硬波特兰水泥(日) III型水泥(美) (High Early Strength Cement)	JIS:R 5210 (2)(1960) ASTM C-150 (1959) III 型	尽量提高C ₃ S的含 量, 掺以适量石膏, 以 调节凝结时间。1、3 天早期强度特别高。1 天抗压40公斤/厘米 ² 以 上, 3天抗压90公斤/厘 米 ² 以上	代替普通水泥用于紧 急工程。适于冬季施 工。建筑道路、水泥制 品
低热波特兰水泥(日) IV型水泥(美) (Low Heat Cement)	— ASTM C-150 (1959) IV 型	水化热比中热水泥低 10卡/克, 7天水化热< 60卡/克, 28天水化热< 70卡/克。(ASTM)用作 大坝水泥, 水化热最低	同 II 型水泥
抗硫酸盐波特兰水泥 (日) V型水泥(美) (Sulfate-Resi- sting Cement)	— ASTM C-150 (1959) V 型	C ₃ S<50%, C ₃ A< 5%。(ASTM)尽量 压低C ₃ A的含量, 以提 高抗硫酸盐性	用于配制同含有大量 硫酸盐的土壤和地下水 接触的混凝土。 隧道、水渠内衬、涵 洞

掺混合材料水泥的分类 (日本JIS)

表 1-3

水 泥 品 种	标 准	品 种 性 能	主、要 用 途
矿渣水泥(日) 矿渣水泥(美) I.S与IS-A型 (Portland Blast-Furnace Slag Cement)	JIS:R 5211 (1964) ASTM C205-58T	根据矿渣掺量(%)不同,分为三种:矿渣掺量A)低于30%; B)30~低于60%和C)60~低于70%。A类水泥无异于普通水泥,特别是耐水性好,后期强度高。B、C类亦为低热水泥	用于普通工程、大坝和大体积混凝土
火山灰质水泥(日) 波特兰火山灰质水泥(美) IP及IP-A型 (Portland-pozzolan Cement)	JIS:R 5212 (1964) ASTM C340-58T	根据硅质混合材掺量不同,分为三种:掺量A)低于10%; B)10~低于20%和C)20~低于30%。一般,无异于矿渣水泥,耐水性强,后期强度增进率好。混合材掺量高者水化热低	用于普通工程、大坝、水道的大体积混凝土
粉煤灰水泥(日)	JIS:R 5213 (1964)	根据粉煤灰掺量不同,分为三种:掺量A)低于10%; B)10~低于20%和C)20~低于30%。一般说来,无异于上述两种水泥,但单位用水量低,和易性好	用于普通工程,最近被广泛用于堤坝工程

此外,在美国标准中还规定有:矿渣水泥 ASTM, C358-58

天然水泥 ASTM, C10-54

·砌筑水泥 ASTM, C91-58等

1-2 水 泥 熟 料 化 学

把水泥的各种原料加以混合、粉磨后制备成具有既定成分的
生料粉，置于既定温度下烧至部分熔融所得之烧结物料，称为水
泥熟料，以下简称熟料。在熟料中加入石膏等调凝剂和高炉矿
渣、粉煤灰等混合材料所得之产品即为水泥。而熟料矿物的形成
过程、组成、形貌、大小和晶体结构等，均会影响水泥的质量。
因此，必须将其作为水泥化学的基础加以全面掌握。本章将对上
述各项问题给予梗概论述。

1-2-1 水 泥 原 料

如表 1-4 所示，波特兰水泥、喷射水泥、矾土水泥等，是以
 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 SO_3 等为其主要成分，并采用石
灰石、粘土、硅石、铜矿渣和石膏等作为原料的。矿渣水泥、高
硫酸盐矿渣水泥、粉煤灰水泥，是分别在熟料中掺以粒化高炉矿
渣和石膏，以及粉煤灰等配制成的。这些原料的化学成分列于表
1-5。

各种水泥的化学成分

表 1-4

	化 学 成 分 (%)								
	烧失量	不溶质	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	合计
普通波特兰水泥	0.6	0.1	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	1.6	99.3
快硬波特兰水泥	0.9	0.2	21.0	4.9	2.8	66.2	1.1	2.5	99.6
特快硬波特兰水泥	0.8	0.4	20.4	5.0	2.6	65.5	1.4	3.3	99.4
喷射水泥	0.6	0.1	13.8	11.4	1.5	59.1	0.9	10.2	97.6
矾土水泥	0.1	—	2.7	58.4	2.7	33.4	0.5	—	97.8

石灰石有晶质和非晶质之分，非晶质的反应活性强，易磨性
亦好。作为水泥原料， MgO 含量宜低。粘土是风化充分的低碱高
硅质的原料，从反应活性和易磨性来看，其高岭土、多水高岭土
和蒙脱石等微细粘土矿物含量多，而石英含量少的粘土最为适

表 1-5

主要原料的化学成分

	化 学 成 分											(%)
	烧失量	不溶质	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaF ₂	FeO	TiO ₂	
石灰石	43.56	—	0.22	0.07	0.19	55.68	0.45	—	—	—	—	100.17
粘土	8.34	—	60.94	16.94	7.39	2.48	2.90	—	—	—	—	98.99
硅石	1.84	—	87.97	5.27	2.75	0.40	0.49	—	—	—	—	99.39
铜矿渣	—	—	33.27	6.29	42.60	10.65	1.24	—	—	—	—	94.05
矾土	0.21	—	6.34	88.63	1.85	0.27	0.44	—	—	—	2.81	100.55
萤石	6.02	—	23.24	4.11	1.62	2.05	1.23	—	60.07	—	—	98.34
石膏	20.91	—	0.60	1.79		31.53	3.06	45.10	—	—	—	99.95
高炉矿渣	0.36	0.57	32.76	16.99	0.04	43.88		2.95	—	0.23	—	100.84
粉煤灰	7.44	—	56.25	28.23	3.57	2.14	1.28	0.63	—	—	—	99.54

宜。硅石也是以经过风化的软质硅石和蛋白石质为好。铜矿渣和黄铁矿渣等含铁原料，要选用Cr、Mn、Zn和As等有害微量成分低的。铝质原料常常是采用铝矾土。石膏是用以调节水泥的凝结时间和促使水泥强度的发挥，其掺用量以SO₃计，波特兰水泥为2~3%，喷射水泥为9~11%，高硫酸盐矿渣水泥为5~8%，而矾土水泥是不掺用石膏的。石膏有二水、半水和无水石膏三种类型，兼有不同变体，其作用也很复杂。波特兰水泥是采用二水和半水石膏，喷射水泥一般是采用无水石膏⁽¹⁾。从前一般都是采用天然石膏，现在则是把化学工业的副产品加以处理，除掉有害于水泥水化的微量成分或者予以改变性质使用之。高炉矿渣虽有时也用作粘土质原料，但大部分都是加以粒化用作混合材料。

作为混合材料的粒化高炉矿渣，通常是采用下述的碱度系数作为评定其质量的指标。近来，碱度系数有明显的下降。

$$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1.4$$

(JIS R5211 1960)

$$(\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \frac{3}{8}\text{Al}_2\text{O}_3) > 1.0$$

(ASTM C205-58T)

$$(\text{CaO} + \text{CaS} + \frac{1}{2}\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{MnO}) > 1.5$$

(Keil)

粉煤灰乃为细煤粉燃烧时，其灰分经过熔融和凝聚成球而形成的粉状颗粒。它具有可改善混凝土和易性等特性。其细度、MgO和SO₃含量适当者，可作为混合材料用。

1-2-2 各种率值与矿物组成

根据生料化学成分的比例，便能比较准确地推测出水泥的性质，水泥工业就是基于这一经验法则，制定了水硬率、硅酸率、铁率等率值和限定同粘土组分化合的氧化钙或氧化镁含量的石灰饱和度、以及水泥系数等，并将其作为配制生料和控制水泥质量的工艺指标。现加以归纳整理列于表1-6。

(1) 内川 浩，松崎安宏：セラミックス，1[4] (1972)