



混凝土的物理和化学

郭成举 著

HUNNINGTU DE
WULI HE HUAXUE



中国铁道出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

混凝土的物理和化学

郭成举 著



中国铁道出版社

2004年·北京

图书在版编目(CIP)数据

混凝土的物理和化学/郭成举著. —北京: 中国铁道出版社,
2004.5
ISBN 7-113-05771-3

I.混… II.郭… III.①混凝土-物理性能 ②混凝土-化学
性能 IV.TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 018250 号

书 名:混凝土的物理和化学

著作责任者:郭成举

出版·发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策 划 编 辑:傅希刚

责 任 编 辑:傅希刚 编辑部电话:(010)51873142

封 面 设 计:石碧容

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:15.5 字数:409 千字

版 本:2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2 000 册

书 号:ISBN 7-113-05771-3/TU·767

定 价:45.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:(010)63545969

题混凝土 五首

其一

女娲未许补残天，弃置荒丘寂壑间，
一自寻来灵兔药，湖山行见换容颜。

其二

玉筑崇楼连碧霄，千家闾里集香巢，
笙歌不绝繁灯艳，仙境亦无如此娇。

其三

高衢萦绕半悬空，铁马长车处处通，
天险飞腾习见事，芳踪直欲上珠峰。

其四

天赐甘霖不定期，一时澎湃一时稀，
若因石壁围长岸，蓄水宣洪两得宜。

其五

人工造石费周章，事系成功与祸殃，
此道原无玄秘在，且从学理说端详。

著者注：混凝土之为物，出自寒微而功业奇伟，顾其性质则犹有未明其究竟者，爰作小诗，略事歌颂，并抒作书用意，聊博同好一粲。

前 言

人类最早以岩穴为居,利用岩土作为材料修整洞窟是最原始的建筑活动。无如石性坚硬,采集为难,这才兼用草木,营造庐舍宫室。然而经过数千年的探索,人们终于找到一些方法,可以集腋成裘,将散碎的砂砾胶结起来,成为不拘形状尺寸,随人意愿的人造岩石,这就是今天重新睥睨一切的建筑材料——混凝土。今天世界各地所筑大小楼宇、道路、桥梁、堤坝、矿井,少有不用上混凝土的,每年投入的体积总量以千亿吨计。有人说,凡有文明之处,必有混凝土的踪迹,这绝不是夸张之词。

同一切科学的发展一样,关于混凝土的知识也是人们在劳动中领悟到一些事理,经过检验确凿,然后与已有的知识融会贯通,反复推敲后确定下来的。毫无疑问,混凝土之所以得到今天的蓬勃发展,是同许多理论工作者的努力分不开的。他们的工作加上广大混凝土生产者的实践在一起,已经形成了一门崭新的科学——混凝土学。

混凝土学的形成应从何时算起,无可考证。不过人们一直铭记着的是 19 世纪开始以来,一批杰出科学家的名字和他们所作的辉煌贡献。是他们:L. J. Vicat、H. Le Chatelier 和 W. Michaelis,不但对水泥的性质和功能提出了精辟的见解,并且还创造出许多用于实验的方法和仪器。进入 20 世纪以后,D. A. Abrams、T. C. Powers 等一大批先驱工作者继续和发扬了他们的研究事业,为混凝土成为具有独特性质的材料奠定了牢固基础。今天,由于经济建设飞速发展,人们对于混凝土量和质的需求不断扩大,而新生事物和新增的问题也日见其多。从每年盈千累万地出版的关于混凝土的专著和论述来看,理论工作的兴盛可见一斑,其发展前景不可限量。

然而混凝土学毕竟还是一门新生的学科。人们对于混凝土的认识远不及对于金属那样深透完备,关于一些基础理论问题还处于探寻摸索的状态,由此而在工程实践中引起误解和误导是不可胜数的。譬如说:

——硬化混凝土究竟是什么样的物体?弹性体?弹塑性体?弹塑黏性体?

——新拌混凝土的塑性应当如何理解?塑性拌合物和干硬性的及流动性的拌合物在本质上有些什么区别?

——混凝土体内的空气是从外界引入的吗?为什么空气的存在会使混凝土的力学性质降低,但是却能对混凝土的冻害起抑制作用?如此等等。

本书的宗旨是想把现时已知的关于混凝土的本质和机制、各种因素对于它们的影响以及试验的方法作一个概略的叙述,同时也就个人所看到的一些问题提出自己的看法和建议,与读者研究切磋,共为混凝土知识宝库的修建增添只砖片瓦。

关于混凝土的一般应用,除了施工制造以外,本应包括材料的选配和质量的监理控制。关于混凝土的扩大应用,尚应包括轻重混凝土、聚合物混凝土和纤维增强混凝土,但因篇幅有限,只能仁待贤者了。

本书涉及的问题虽然比较广泛,头绪比较纷繁,但是读者需有的预备知识并不很多。一般具有大专以上物理化学和力学基础的学生和专业工作者,必能明辨其中的是与非。因此,本书不但可以作为教学和科研人员所需的辅助材料,也可备作广大工程人员工作中的参考。

大凡一本科技书籍的问世,作者常将所引用的资料一一开列其出处,以备查证。不过作者觉得本书借鉴的材料大多是人所熟悉的,须要查对之处不多。因此对于此类材料,仅提示原作者的姓名,致以崇敬之意,而其出处则一律略去。如果读者以为不妥,当在今后补正。

书中所用计量单位一律采用法定计量单位。物质的数量已正

名为质量,热量已改称为热,不过有一些约定俗成的术语,如名词“比重”、“容重”、“自重”、“净重”,动词“称重”等等,暂时仍旧。

本书的写作是在作者亡妻李梅女士鼓励和支持之下完成的。脱稿后,又由他们的子女们协助加工整理:郭晓民和郭晓黎担任全文的打印,郭晓丹作了多次校对,周岳对全部插图作了录制和修改。如果没有他们的爱心和支持,本书的出版是不可能的。

本书承蒙国家科学技术学术著作出版基金委员会审批,给予资助,谨向该委员会领导和专家致以深切的感谢。

作 者

2003 年 12 月于北京

目 录

第一章 水 泥	1
第一节 水泥生产应用沿革	1
第二节 水泥的原料和制造	2
第三节 水泥的品种	4
第四节 水泥试验方法和质量要求	15
第五节 水泥的水化	24
第六节 水泥浆的硬化	40
第七节 水泥浆硬化的初始阶段——凝结	48
第二章 集 料	58
第一节 集料的意义	58
第二节 集料的种类	58
第三节 集料单粒属性和试验	64
第四节 集料中异常颗粒和有害物质的检验	75
第五节 集料的群体属性(I)	79
第六节 集料的群体属性(II)	88
第三章 混凝土拌合物的和易性和施工制造	106
第一节 和易性的定义	106
第二节 水泥浆的和易性	108
第三节 砂浆的和易性	115
第四节 混凝土拌合物的和易性	120
第五节 影响和易性的因素	123
第六节 拌合物和易性试验方法	129
第七节 材料的储存和搬运	141
第八节 配 料	144
第九节 搅 拌	145

第十节 运 输	148
第十一节 浇 灌	154
第十二节 预填灌浆混凝土	161
第十三节 振动碾压混凝土	163
第十四节 真空处理混凝土	165
第十五节 喷射混凝土	167
第四章 强 度	169
第一节 基本概念	169
第二节 其他强度破坏理论	180
第三节 混凝土抗压强度试验	182
第四节 混凝土直接抗拉强度试验	190
第五节 混凝土抗折强度试验	191
第六节 混凝土劈裂抗拉强度试验	196
第七节 混凝土冲剪及拔出试验	200
第八节 混凝土与钢筋的粘结	205
第九节 水泥与混凝土强度的关系	208
第十节 集料与混凝土强度的关系	218
第十一节 水灰比对强度的影响	225
第十二节 湿度对强度的影响	232
第十三节 养护温度对强度增长的影响	237
第十四节 温度对硬化混凝土强度的影响	247
第十五节 荷载速率和持续时间对混凝土强度的影响	256
第十六节 重复荷载对混凝土强度的影响	259
第十七节 尺寸效应	264
第五章 混凝土的变形和徐变	268
第一节 应力—应变关系	268
第二节 混凝土变形性质剖析	271
第三节 混凝土变形性质试验	279
第四节 混凝土弹性模量的推算公式	282
第五节 各种因素对混凝土变形性质的影响	283

第六节 混凝土的徐变·····	291
第七节 徐变的试验测定·····	294
第八节 影响混凝土徐变的因素·····	297
第六章 体积变化·····	304
第一节 混凝土体积变化的不同形态·····	304
第二节 沉 缩·····	305
第三节 水泥的合缩·····	306
第四节 水泥浆的隆胀·····	309
第五节 干 缩·····	315
第六节 干缩试验方法·····	318
第七节 影响混凝土(水泥浆)干缩的因素·····	320
第八节 湿 胀·····	330
第九节 自生体积变化·····	334
第十节 水泥浆体积变化及碎裂的机制·····	335
第十一节 碳化收缩·····	337
第十二节 温度变形·····	343
第七章 耐 久 性·····	348
第一节 混凝土的渗透性·····	348
第二节 混凝土的冻害·····	353
第三节 混凝土的腐蚀·····	372
第四节 钢筋的锈蚀·····	382
第五节 碱集料反应膨胀祸害·····	389
第六节 磨损和气蚀·····	404
第八章 掺加物质·····	410
第一节 掺加物质综述·····	410
第二节 矿物掺合料的类别·····	411
第三节 矿物掺合料的功能·····	415
第四节 矿物掺合料试验和技术要求·····	422
第五节 化学掺加剂的类别·····	424
第六节 缓 硬 剂·····	426

第七节	促硬剂	434
第八节	减水剂	446
第九节	引气剂和泡沫剂	456
第十节	其他掺加剂	468
附录 I	水泥浆流动度试验方法(推荐稿)	473
附录 II	混凝土引气剂检验方法(推荐稿)	475
附录 III	水泥浆料劈裂抗拉强度试验方法(推荐稿)	477
附录 IV	水泥水化发热简易试验方法(推荐稿)	480

第一章 水 泥

第一节 水泥生产应用沿革

天然岩石材料是人类最早用于建筑物的材料之一。用胶凝材料将岩石碎片胶结起来成为建筑物的部件是建筑技术自古以来不断发展的一项重要标志。已知的无机胶凝材料按其开始问世的先后可以分为下列几个类别：

(1)天然的或经过加工的细粉状岩石材料,主要是黏土加水调成浆料,经增实和干燥后即成有胶粘性的材料。这是一种着水即失去胶粘能力的材料。

(2)有些经过脱水加工的岩石材料(主要是石灰和石膏),能够与水化合,生成有胶粘性的物质。由于水化物质能够溶解于水,这种材料只能在空气中使用。但是水化物质的溶液能与其他同时存在的某些活性岩石材料发生作用,产生在水中稳定存在的胶粘物质。

(3)一种或多种岩石材料经过煅烧成为熟料,经过磨细后能够与水化合,生成有胶凝作用的含水化合物。由于水化物质能够稳定地存在于水中,这种烧成后经过磨细的材料可在与水接触的条件下使用。

作为现代化建筑工程中主要材料的混凝土,绝大多数是用第三类胶凝材料制成的。由于能在水中凝结和硬化,这些一类胶凝材料被称为水硬性胶泥,简称水泥。第二类材料和适当的活性材料的混合物虽然只能在空气中凝结,但是在获得相当强度后能够在水中稳定存在,所以也仍在一定范围内得到应用,被称为无熟料水泥。

要对各种胶凝材料的创始和发展作出准确和详细的考证是困难的,现时已有许多专门著作叙述,此处只能极其简单地提一提。黏土作为胶凝材料的应用肯定起自远远早于烧制陶器的年代,无从考证。早在公元前 30 世纪~公元前 20 世纪,巴比伦人和亚述人曾用过含有石膏和沥青的胶凝材料,古埃及人建造大金字塔所用的砂浆也是以石膏作为胶凝材料的。石灰的应用比石膏稍晚,因为石灰石的分解温度比石膏的脱水温度高得多,需要在窑内烧制。许多埃及的学者认为,建造金字塔所用的砂浆就是煅烧石灰砂浆,然而后来的考古分析证明,埃及人所用的砂浆并不含有足够的碳酸钙,不能认为它是以石灰作为胶凝材料的。最早使用消解石灰作砂浆,后来又在砂浆中掺入火山灰材料以增加其耐水性的大概是希腊人。到了古罗马时代,石灰的使用得到了很大的发展。人们不但利用当地盛产的天然火山灰建造了许多质量优良的水中建筑物,而且已经知道将某些含有黏土杂质的石灰石煅烧而成的石灰具有优异的水硬性。用碎石与石灰混合制成的混凝土也在此时开始得到应用。

现代水泥是一种脱胎于罗马人的水硬性石灰(或称天然水泥)的胶凝材料。它是 18 世纪工业革命以后的产物。由于有了动力和建窑的材料,有可能将石灰石和黏土材料磨细后煅烧到很高的温度,并且可以大量生产。水泥的生产技术和应用是经过无数先驱工作者的研究试验、尝试和改进方才趋于成熟的。这方面的工作现时仍有许多人孜孜以求地进行着。

第二节 水泥的原料和制造

一、水泥的原料

水泥熟料一般由两类含有不同元素的岩石材料烧制而成。一类是富含钙、镁或是其他碱土金属元素的材料,另一类是富含硅、铝、铁、钛、硫等元素的材料。在表达这些元素在原料和熟料中的

存在及其相对数量时,一般都用它们的氧化物为代表。在烧制熟料的过程中,根据配料比例以及温度的不同,两类材料中的氧化物进入反应,生成各种复杂的无水化合物。

熟料化合物及其水化产物的化学式都很复杂,现时通用简单的符号代表它们所含的氧化物: $H = H_2O$ 、 $C = CaO$ 、 $M = MgO$ 、 $K = K_2O$ 、 $N = Na_2O$ 、 $S = SiO_2$ 、 $A = Al_2O_3$ 、 $F = Fe_2O_3$ 、 $\bar{S} = SO_3$ 、 $T = TiO_2$ 等等。这样,若干重要的水泥、无水化合物以及它们水化物质可以书写如下:

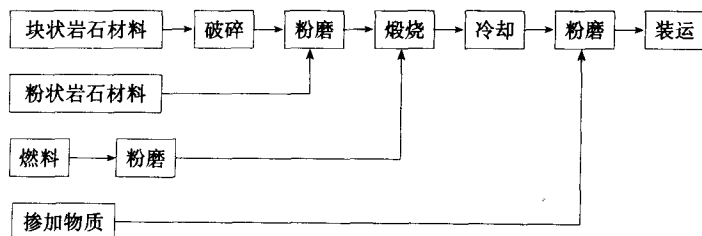
水泥化合物	化 学 式	简写式
硅酸三钙	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
硅酸二钙	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
铝酸一钙	$CaO \cdot Al_2O_3$	CA
铝酸二钙	$2CaO \cdot Al_2O_3$	C_2A
铝酸三钙	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
铝铁酸四钙	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
无水硫铝酸钙	$3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$	$C_4A_3\bar{S}$
氢氧化钙	$Ca(OH)_2$	CH
二水硫酸钙	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$\bar{C}\bar{S}H_2$
水化硅酸钙	$nCaO \cdot SiO_2 \cdot xH_2O$	C_nSH_x
水化硅酸三钙	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	$C_3S_2H_3$
水化铝酸一钙	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$	CAH_{10}
水化铝酸三钙	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	C_3AH_6
水化单硫铝酸钙	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 18H_2O$	$C_4A\bar{S}H_{18}$
水化三硫铝酸钙	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	$C_6A\bar{S}_3H_{32}$

二、水泥的制造

水泥的制造主要包括破碎—粉磨和煅烧两项作业。

原料经过破碎和粉磨后制成生料。粉磨可以采用干磨或湿磨两种方法。生料干燥后喂入窑内煅烧即成熟料,熟料冷却后与掺合物质共同粉磨或者单独粉磨后与粉状的掺合物质混合即成为水

泥,包装后发运。水泥的简单生产流程如下列方块图所示:



现代化波特兰水泥的生产方法,按照生料的配制分为干法和湿法两种。现将干法生产的布置举例图示于此(图 1—1)。

第三节 水泥的品种

一、波特兰水泥(硅酸盐水泥)

波特兰水泥,在中国也称为硅酸盐水泥,是一种应用最广的水泥。当今世界上每年浇筑的数以 10 亿 t 计的混凝土绝大部分是用波特兰水泥配制的。因此如果没有专门的注明,一般所说的水泥即是波特兰水泥。

波特兰水泥的原料:一种是以碳酸钙为主的石灰石或其他含钙材料,另一种是含硅、铝和铁的黏土。原料采集后经过破碎按比例配合,并用干法或湿法粉磨,制成生料。然后喂入回转窑或立窑,在 $1300^{\circ}\text{C} \sim 1400^{\circ}\text{C}$ 的温度下煅烧成熟料。熟料冷却后与适量石膏或硬石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 或 CaSO_4)共同粉磨至一定细度,即是波特兰水泥。

波特兰水泥的组成是根据原料的化学分析结果来决定的。现时世界各地生产的波特兰水泥的化学组成大致都在下列范围内变化:

CaO	60% ~ 67%
SiO ₂	17% ~ 25%
Al ₂ O ₃	3% ~ 8%

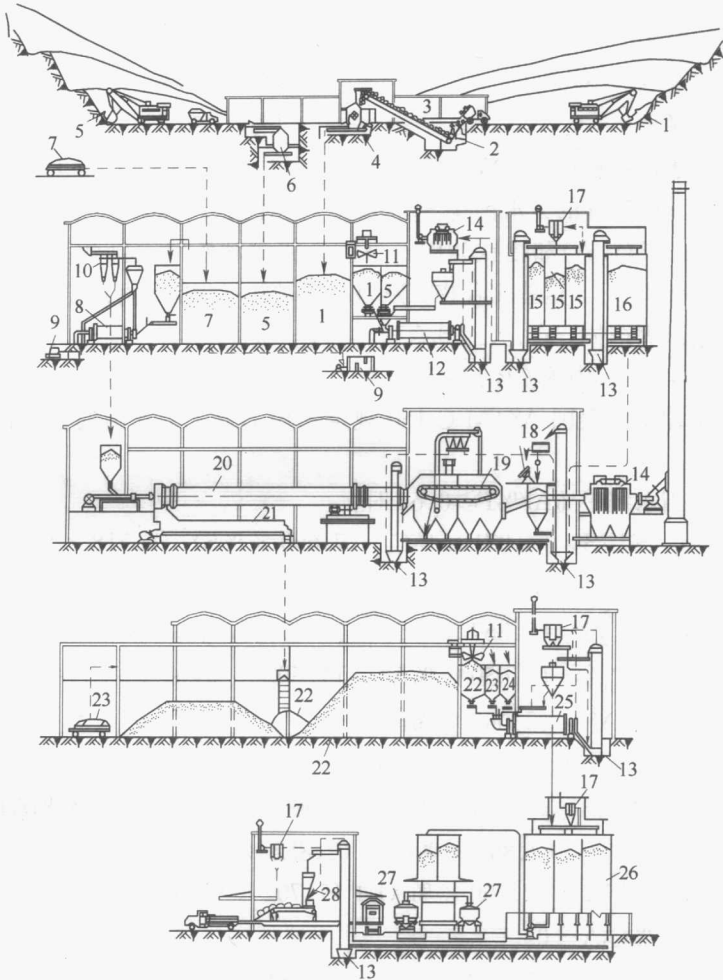


图 1—1 现代化水泥生产(干法)工厂

1—石灰石；2—颚式破碎机；3—铁板传送带；4—锤式破碎机；5—黏土；6—滚轮破碎机；7—煤；8—磨煤机；9—送料机；10—旋风分离器；11—抓斗吊车；12—生料粉磨机；13—斗式提升机；14—电气集尘器；15—混合储料仓；16—入炉喂料仓；17—管式滤尘器；18—盘式成球机；19—加热传送带；20—回转窑；21—炉篦式冷却器；22—熟料；23—石膏；24—水硬性掺合料；25—离心式球磨机；26—水泥储仓；27—散装水泥罐；28—包装机

Fe_2O_3	0.5% ~ 6%
MgO	0.1% ~ 5.5%
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5% ~ 1.3%
SO_3	1% ~ 3%

水泥熟料烧成和冷却后含有形形色色的化合物,其中主要的是几种高碱性的无水钙盐,包括硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)和铝铁酸四钙(C_4AF 或它和铁酸二钙的固溶体 $\text{ssC}_4\text{AF}-\text{C}_2\text{F}$)。这些化合物在熟料冷却时并不都能很好地结晶,有些还以固溶体存在,因而其含量很难通过观察测定。通常只是根据化学分析(中国 GB 176, ASTM C 114)结果按照公认的假定公式来计算。美国 ASTM C 150 规定采用 Bogue 所提出的公式计算:

当水泥中 $\%A/\%F \geq 0.64$ 时,

$$\%C_3\text{S} = (4.071 \times \%C) - (7.600 \times \%S) - (6.718 \times \%A) - (1.430 \times \%F) - (2.582\bar{S}\text{O}_3)$$

$$\%C_2\text{S} = (2.867 \times \%S) - (0.7544\%C_3\text{S})$$

$$\%C_3\text{A} = (2.650 \times \%A) - (1.692 \times \%F)$$

$$\%C_4\text{AF} = (3.043 \times \%F)$$

当水泥中 $\%A/\%F < 0.64$ 时,

$$\%C_3\text{S} = (4.071 \times \%C) - (7.600 \times \%S) - (4.479 \times \%A) - (2.859 \times \%F) - (2.852 \times \bar{S})$$

$$\%(\text{C}_4\text{AF}-\text{C}_2\text{F}) = (2.100 \times \%A) + (1.702 \times \%F)$$

$$\%C_2\text{A} = 0$$

$$\%C_2\text{S} = (2.867 \times \%S) - (0.7544 \times \%C_3\text{S})$$

这些化合物的性质各不相同。其中 C_3S 和 C_3A 水化很快,水化时发热较多,对于水泥的凝结和硬化的意义较大,其他两种化合物的作用则比较和缓。因此,水泥的使用效果是随着这些化合物的组成而变化的。ASTM C 150 将波特兰水泥分为下列五种类型: