

现代混凝土技术应用 研究

Study on Application Technology of
Modern Concrete

李迁 著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

现代混凝土技术应用 研究

Study on Application Technology of
Modern Concrete

李迁 著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

现代混凝土技术应用研究/李迁著. —北京: 经济管理出版社, 2016.3
ISBN 978-7-5096-4236-8

I. ①现… II. ①李… III. ①混凝土—研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 022654 号

组稿编辑: 张永美
责任编辑: 杨国强 张瑞军
责任印制: 黄章平
责任校对: 王 森

出版发行: 经济管理出版社
(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn
电 话: (010) 51915602
印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司
经 销: 新华书店
开 本: 720mm×1000mm/16
印 张: 19
字 数: 330 千字
版 次: 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5096-4236-8
定 价: 69.00 元

·版权所有 翻印必究·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

目 录

第一章 水泥	001
第一节 水泥强度的形成机理	001
第二节 通用硅酸盐水泥的国家标准	015
第三节 硅酸盐水泥的性能	021
第二章 掺合料	047
第一节 掺合料的作用	047
第二节 粉煤灰	048
第三节 磨细矿渣粉	052
第四节 沸石粉	058
第五节 超细硅灰	063
第六节 磨细矿渣粉在高性能混凝土中的应用研究	066
第三章 集料	077
第一节 集料的技术要求	077
第二节 砂石含泥量对外加剂适应性的影响	086
第三节 机制砂对混凝土质量的影响	089
第四章 外加剂	095
第一节 外加剂的分类与性能	095
第二节 聚羧酸减水剂的生产与应用	106
第三节 脂肪族高效减水剂的复配性能	113

第五章 多组分混凝土理论与配合比设计	129
第一节 多组分混凝土强度理论	129
第二节 多组分混凝土配合比的设计	138
第六章 多组分混凝土施工常见问题	147
第一节 混凝土施工中的裂缝原因与防治	147
第二节 混凝土冬期施工问题及施工方法	159
第三节 混凝土泵送施工堵管现象的处理	170
第四节 混凝土常见外观问题及处理办法	179
第七章 C100 高性能混凝土的研究及工程应用	185
第一节 高性能混凝土研制的技术途径	185
第二节 原材料的选择及配合比的确定	186
第三节 混凝土拌合物性能试验	193
第四节 C100 高性能混凝土的应用实例	200
第八章 纤维抗裂混凝土的研究及工程应用	203
第一节 混凝土抗裂的方法及原理	203
第二节 纤维抗裂混凝土中纤维的选择	208
第三节 聚丙烯纤维混凝土原材料的选择	214
第四节 聚丙烯纤维抗渗防裂混凝土试验研究	217
第五节 纤维抗裂混凝土的应用实例	224
第九章 高强度透水混凝土的研究及工程应用	227
第一节 研制的技术路线及参数确定	227
第二节 高强度透水混凝土试验研究	237
第三节 高强度透水混凝土的应用实例	248
第十章 碱矿渣水泥混凝土的研究及工程应用	257
第一节 碱矿渣水泥的组成及配比试验	257

第二节 碱矿渣水泥混凝土性能研究	264
第三节 碱矿渣水泥混凝土的应用实例	268
第十一章 大体积及防辐射混凝土的研究应用	271
第一节 大体积混凝土的研究应用	271
第二节 核电站防辐射混凝土的研究应用	287
参考文献	297

第一章 水 泥

第一节 水泥强度的形成机理^①

水泥加一定量的水拌合,形成能胶结砂石集料的可塑性浆体,并逐渐失去塑性而凝结硬化成为具有相当强度的石状物体,同时还伴随着水泥浆的放热、水泥石的体积变化及机械强度的增长等。这说明水泥加水拌合后产生了复杂的物理、化学变化,这些变化决定着水泥的建筑性能,如凝结时间、强度、安定性、耐久性等。研究水泥的水化、硬化过程,水化产物及硬化水泥浆体的结构,对进一步控制和改善水泥的使用性能是十分有意义的。

一、熟料矿物的水化

水泥煅烧过程中生成的硅酸三钙 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、硅酸二钙 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、铝酸三钙 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 、铁铝酸四钙 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 统称为硅酸盐水泥熟料矿物。其中, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的总含量在 66% 以上,氧化钙和氧化硅质量比不小于 2.0,故称为硅酸盐水泥熟料。 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 中常固溶有少量的 MgO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,此固溶体称为阿里特 (Alite),简称为 A 矿; $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 中常固溶有 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等,此固溶体称为贝里特 (Belite),简称为 B 矿。

除以上主要的熟料矿物外,硅酸盐水泥中还含有游离氧化钙 ($f\text{-CaO}$)、游离氧化镁 ($f\text{-MgO}$) 和碱金属氧化物 (K_2O 、 Na_2O) 等次要组分。

硅酸盐水泥熟料主要矿物的含量范围、水化特性见表 1-1。

^① 李坚利,周惠群. 水泥生产工艺 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2009.

表 1-1 硅酸盐水泥熟料矿物组成、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	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
简写式	C3S	C2S	C3A	C4AF
矿物含量	37%~60%	15%~37%	7%~15%	10%~18%
硬化速度	快	慢	很快	快
早期强度	高	低	低	高
后期强度	高	高	低	高
水化热	大	小	很大	中
水化放热速度	快	慢	很快	快
抗硫酸盐腐蚀	差	好	很差	中
干缩	大	小	很大	小

一种物质从无水状态变成含水状态叫作水化作用；物质加水分解的作用叫作水解作用。一般水泥熟料的水化作用包括水解作用。

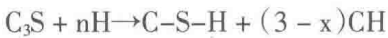
（一）硅酸三钙的水化

硅酸三钙是硅酸盐水泥熟料中的主要矿物，约占 50%，高的可达 60% 以上。因此，水泥的水化主要取决于 C_3S 的水化。 C_3S 的水化速率较快，大量的水化在 28d 以内进行，约 1 年后，水化过程基本完成。

C_3S 在常温下的水化反应可近似用下列方程式表示：



简写为：



式中， x 表示钙硅比 (C/S)； n 表示结合水量。

从以上的反应可以看出， C_3S 的水化产物是 C-S-H 凝胶和氢氧化钙。 C-S-H 也称为水化硅酸钙，这种物质组成不定，在不同温度、水胶比以及不同浓度的氢氧化钙溶液中，其生成水化产物的 C/S 都不相同。

通过在室温下对 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ 系统进行研究发现，在水化过程中，溶液中氢氧化钙的浓度不同时，生成的水化硅酸钙的组成也不相同。当溶液中 CaO 浓度小于 $1 \sim 2\text{mmol/L}$ ，即 $0.06 \sim 0.112\text{g/L}$ 时，水化产物为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和硅酸凝胶；当溶液中 CaO 浓度为 $2 \sim 20\text{mmol/L}$ ，即 $0.112 \sim 1.12\text{g/L}$ 时，水化产物为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C/S 比为 $0.8 \sim 1.5$ 的水化硅酸钙，其组成可用 $(0.8 \sim 1.5)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0.5 \sim 2.5)\text{H}_2\text{O}$ 表示，称为 C-S-H(I) ；当溶液中 CaO 浓度饱和即 CaO 浓度大于 1.12g/L 时，则生成更高碱性的、 C/S 比为 $1.5 \sim 2.0$ 的水化硅酸钙，一般用 $(1.5 \sim 2.0)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1 \sim 4)$

H_2O 来表示, 称为 C-S-H (II)。

研究表明, 硅酸三钙的水化产物与相应浓度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液达到固液平衡的状态有关。若在溶液中加入石灰, 则会和水化产物相结合, 提高其 C/S 比。若将平衡溶液加水稀释, 则水化物固相将析出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 而降低 C/S 比。也就是说, 水化产物的 C/S 比与液相中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的平衡一旦被破坏以后, 必然会相互调整, 以获得新的固液平衡。若继续加水, 水化物固相将形成 C/S 比更低的水化硅酸钙, 在无限加水稀释的情况下, 水化产物最终会分解成氢氧化钙和硅酸凝胶。大量研究证明, 水化硅酸钙的 C/S 比随水胶比减小而提高, 随水化龄期延长而下降。所以说, 硅酸三钙的水化生成产物 C-S-H 是一种组成不断变化的不定型物质。

硅酸三钙的水化是放热反应, 其水化速率很快。通过对 C_3S 在不同时期的水化放热速率的研究, 得到 C_3S 的水化放热速率—时间曲线, 可将 C_3S 的水化过程划分成五个阶段, 如图 1-1 所示。

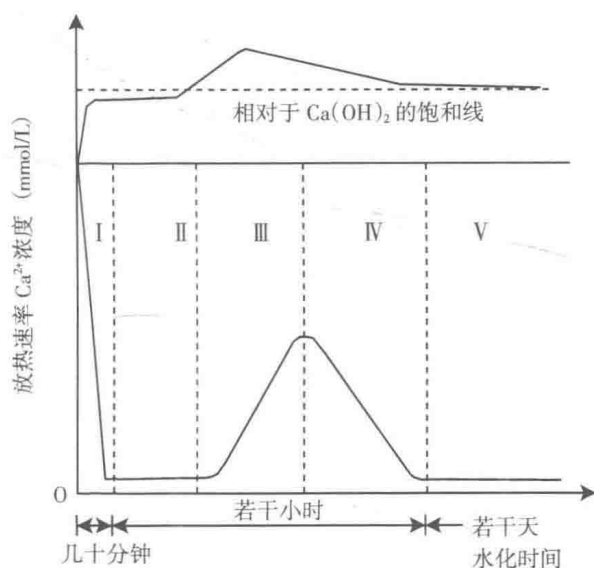


图 1-1 C_3S 水化放热速率和 Ca^{2+} 浓度变化曲线

(1) 初始期。加水后立即发生急剧反应并迅速放热。 Ca^{2+} 离子和 OH^- 离子迅速进入溶液, 该阶段持续时间很短, 一般在十几分钟到几十分钟即结束。它又被称为诱导前期。

(2) 诱导期。这一阶段反应速率极其缓慢, 又称为静止期或潜伏期, 一般持续 2~4 小时 (后面简写为 h), 硅酸盐水泥浆体此时保持塑性, 其 Ca^{2+} 离子和 OH^- 离子浓度缓慢增长, 在诱导期结束前达到过饱和状态, 诱导期结束即达到初凝。

(3) 加速期。反应重新加快,水化速率随时间延长而增大,出现第二个放热峰,在峰顶达到最大反应速率时本阶段即告结束,持续时间为 4~8h,此时终凝已过, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶出来, C-S-H 沉淀在水填充的孔隙中,开始早期硬化。

(4) 衰退期。反应速率随时间延长而下降,又称减速期,持续时间为 12~24h。由于水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 不断结晶沉淀出来而在 C_3S 表面形成包裹层,故水化作用逐渐受扩散速率控制而减慢。

(5) 稳定期。在本阶段速率很低,基本处于稳定,水化完全受扩散速率控制,直到水化结束。

从以上研究结果可知,在水化初期,反应非常迅速,但反应速率逐渐由很快变得相当缓慢,从而进入诱导期,在诱导期结束时水化重新加速,生成较多的水化产物,然后,水化速率随时间延长而逐渐下降,一直到水化结束。

大多数研究者认为,诱导期的本质影响着以后的水化过程以及硬化水泥浆体的某些性能,诱导期的长短受 C_3S 的晶体形态、尺寸大小、水固比、水化温度和外加剂等因素影响,诱导期的结束与初凝时间有一定的关系。

(二) 硅酸二钙的水化

硅酸二钙也是硅酸盐水泥熟料中的主要矿物组分之一,约占 20%,常以 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 形式存在。 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化过程和水化产物与 C_3S 极为相似,也有诱导期、加速期等。但其水化速率比 C_3S 要慢得多,约为 C_3S 的 1/20。在几十小时后才达到加速期,即使几个星期也只在表面形成一薄层无定形的 C-S-H,大部分水化反应在 28d 以后进行,1 年以后仍然有明显的水化反应。

与 C_3S 一样, $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化反应可近似用下列方程式表示:



简写为:



由于 C_2S 水化缓慢,水化放热较少,故一般不能用放热速率研究其水化。通过电子显微镜观测到 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化产物 C-S-H 与 C_3S 水化形成的 C-S-H 相差不大,但生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体较大且较少。

(三) 铝酸三钙的水化

铝酸三钙的水化反应迅速,且放热量大,通常在加水后几分钟内开始快速反应,石膏含量较少时,几小时可基本水化完全。其水化产物的组成与结构受溶液中氧化钙、氧化铝浓度反应温度的影响很大。

其化学反应式如下:



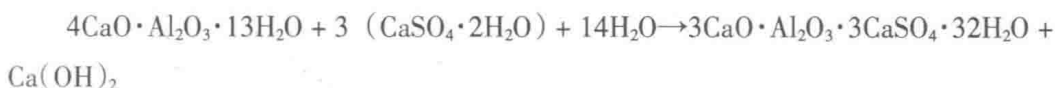
简写为:



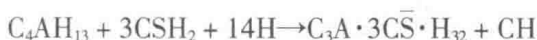
C_4AH_{13} 和 C_2AH_8 在常温下处于介稳状态, 随时间延长会逐渐转变为更稳定的等轴立方晶体 C_3AH_6 , 该反应随温度升高而加速进行, 由于 C_3A 本身水化热很高, 所以极易发生反应。当温度升高到 $25^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 甚至以上时, 会直接生成 C_3AH_6 晶体。当高于 80°C 时, 几乎立即生成 C_3AH_6 (水石榴子石)。

为防止水泥的急凝或瞬凝, 在水泥粉磨时需掺进一定量的石膏, 以保证正常凝结时间, 防止急凝的发生。

当石膏和氧化钙同时存在时, 虽然 C_3A 也会快速水化生成 C_4AH_{13} , 但 C_4AH_{13} 也会与石膏反应, 其反应方程式如下:

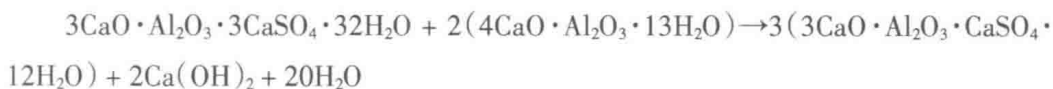


简写为:

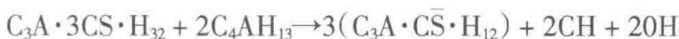


上述反应产物三硫型水化硫铝酸钙 ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\overline{\text{CS}} \cdot \text{H}_{32}$) 称为钙矾石。由于其中的铝可被铁置换而成为含铝、铁的三硫酸盐相, 故常用 AFt 表示。钙矾石不溶于碱溶液而在 C_3A 表面沉淀形成致密的保护层, 阻碍了水与 C_3A 进一步反应, 因此降低了水化速度, 避免了急凝。

当 C_3A 尚未完全水化而反应剩余的石膏不足以形成钙矾石时, 则 C_3A 水化所形成的 C_4AH_{13} 又能与先前形成的钙矾石继续反应生成单硫型水化硫铝酸钙, 以 AFm 表示。反应方程式如下:



简写为:



当石膏剩余极少, 在所有的钙矾石都转化成单硫型水化硫铝酸钙后, 剩下尚未水化的 C_3A 将会继续反应生成 C_4AH_{13} 及 $\text{C}_4\overline{\text{AS}} \cdot \text{H}_{12}$ 和 C_3AH_6 的固溶体。

由上文可知, C_3A 水化产物的组成和结构与实际参加反应的石膏量有重要关系。

当 C_3A 单独与水拌合后, 几分钟内就开始快速反应, 数小时后即完全水化。在掺有石膏时, 反应则能延缓几小时后再加速水化, 这是因为石膏降低了铝酸盐的溶解度, 而石膏和氢氧化钙同时存在时则会更进一步使其溶解度减小到几乎接近于零。

(四) 铁铝酸钙的水化

铁铝酸钙也是硅酸盐水泥熟料中的主要矿物之一, 实际上它是硅酸盐水泥熟料中一系列铁相的固溶体, 成分接近于 C_4AF , 故常用 C_4AF 表示。

C_4AF 的水化速率比 C_3A 要慢, 水化热较低, 即使单独水化也不会产生急凝。 C_4AF 的水化反应与 C_3A 极其相似。 Fe_2O_3 基本上起着与 Al_2O_3 相同的作用, 也就是水化产物中 Fe 置换部分 Al , 形成水化铝酸钙和水化铁酸钙的固溶体, 或者水化硫铝酸钙和水化硫铁酸钙的固溶体。

当没有石膏存在时, C_4AF 与 $Ca(OH)_2$ 和水在常温下反应生成 $C_4(A \cdot F)H_{13}$ 。同 C_3AH_{13} 一样, $C_4(A \cdot F)H_{13}$ 在常温下呈六方形, 随温度升高 ($>20^\circ C$ 时), 也会逐渐转化为立方状的 $C_3(A \cdot F)H_6$, 其转化速率比 C_3A 水化时晶型转化要慢, 有 $Ca(OH)_2$ 存在时也会延缓其转化速率。当反应温度高于 $50^\circ C$ 时, C_4AF 则会直接形成 $C_3(A \cdot F)H_6$ 。

在有足够的石膏存在时, 则会生成被铁置换的钙矾石固溶体; 当石膏量不足时, 则先生成 $C_4(A \cdot F)H_{13}$, 然后与被铁置换的钙矾石反应生成单硫型固溶体。

二、硅酸盐水泥的水化

(一) 水化过程

硅酸盐水泥主要由四种熟料矿物组成, 所以其水化主要取决于四种熟料矿物的水化。但是, 由于硅酸盐水泥矿物的组成相当复杂, 没有一种熟料矿物是纯净物, 每种熟料矿物都是以固溶体形式存在, 而且由于原料成分和煅烧条件等许多因素的影响, 其中还夹杂有许多可能影响其水化的杂质离子, 它们在水化时会产生极其复杂的相互作用。因此, 硅酸盐水泥的水化又不单纯是以上四种单矿物水化的综合, 而是更为复杂的一个过程。同时, 硅酸盐水泥水化所生成的水化产物水化硅酸钙、钙矾石、单硫相、氢氧化钙等也不是纯净的。通过电子显微镜对硬化水泥浆体的观察发现, $C-S-H$ 中夹杂有部分 Al 、 Fe 、 S , 钙矾石和单硫相固溶体中有 Fe 的取代物和很多 Si , 甚至 $Ca(OH)_2$ 中也含有少量外来离子。当水泥加水拌合后, 就立即发生化学反应, 水泥中各组分开始迅速溶解进入溶液, 经过极

短的时间，填充在颗粒之间的液相已经不再是纯水，而是含有各种离子的溶液。水泥的水化作用开始后基本上是在含碱的氢氧化钙和硫酸钙的饱和溶液中进行。在水泥的水化过程中，固相组成与液相之间处于一个随时间不断变化的动态平衡之中。

硅酸盐水泥的水化过程如图 1-2 所示。水泥加水后， C_3A 立即发生反应， C_3S 和 C_4AF 也很快水化，而 C_2S 则较慢。在电子显微镜下观测几分钟后可见，在水泥颗粒表面生成钙矾石针状晶体，由于钙矾石的不断生成，液相中 SO_4^{2-} 逐渐减少，并在耗尽时产生单硫型水化硫铝铁酸钙。若石膏不足，则会生成单硫型水化物和 $C_4(A \cdot F)H_{13}$ 的溶体，甚至生成单独的 $C_3(A \cdot F)H_6$ ，而后者将逐渐转变成稳定的等轴晶体 $C_3(A \cdot F)H_6$ 。

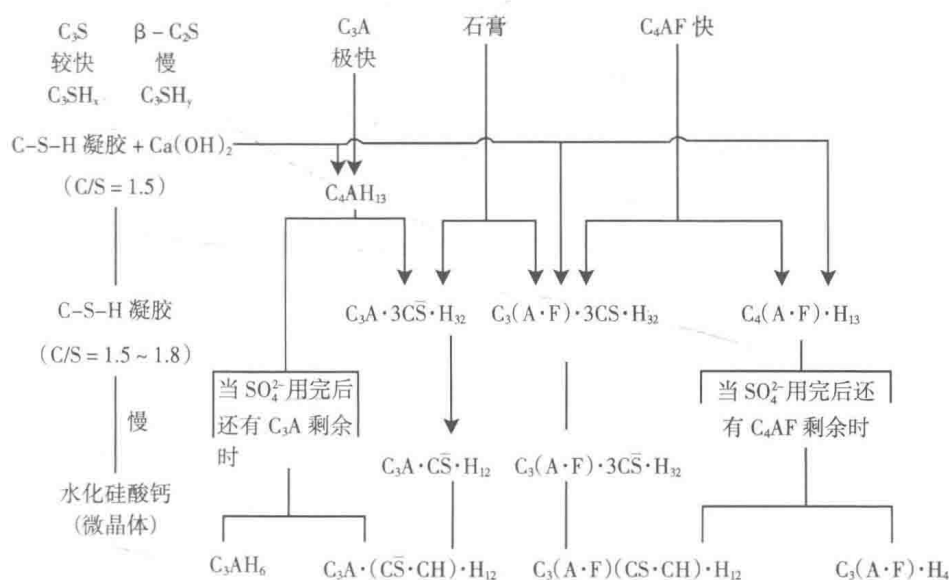


图 1-2 硅酸盐水泥的水化过程

由于水泥是多矿物、多组分的体系，各种熟料矿物并不是单独水化，它们之间的相互作用对水化过程有一定的影响。

通过对硅酸盐水泥水化放热曲线的研究可以看出，硅酸盐水泥的放热速率与 C_3S 的放热速率十分相似，也可分为五个阶段，见图 1-3。

一般认为，图 1-3 中第一个峰主要是 AFt 相的形成；第二个峰相当于 C_3S 的水化。由于水泥中硫酸盐含量一般不足以将全部 C_3A 转化为 AFt 相，因而剩余的 C_3A 及 AFt 相将转化为 AFm 即单硫酸盐相，所以在放热曲线上出现了第三个峰。

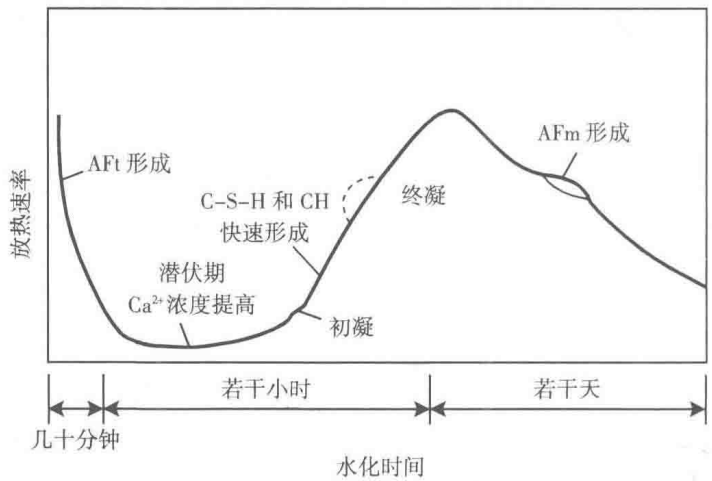


图 1-3 硅酸盐水泥的水化放热曲线

在实际施工过程中，水泥浆体的拌合用水量通常并不多，并在水化的过程中不断减少，故其水化是在浓度不断变化的情况下进行的。而且，由于水化放热又会使水化体系的温度发生变化，因此水泥的水化不可能在较短的时间内就反应完结，而是从表面开始，然后在浓度和温度不断变化的条件下，通过扩散作用，缓慢地向中心深入，即使在充分硬化的浆体中，也并非处于平衡状态。在熟料颗粒的中心，至少是大颗粒的中心，水化作用往往已经暂时停止，以后当温度、湿度条件适当时，才能使水化作用以极慢的速度继续进行。所以，绝不能将水化过程作为一般的化学反应对待，对其长期处于不平衡的情况以及与周围环境条件的关系，也需充分注意。实际上，应用一般的方程式是很难真实地表现水泥的水化过程的。

(二) 水化速度

水泥的水化速度主要取决于各熟料矿物的水化速度，研究熟料矿物和水泥的水化速度，对于了解和研究水泥的水化过程、水泥的性能及开发水泥品种等有着重要的意义。

熟料矿物或水泥的水化速度通常以单位时间内的水化程度或水化深度来表示。水化程度是指在一定时间内发生水化作用的量与可以完全水化量的比值，以百分率表示。水化深度是指水泥颗粒已经水化的水化层厚度。

水泥和熟料矿物的水化速度主要与其组成和结构有关，同时水泥细度、水胶比、水化温度及外加剂等对水泥的水化速度也有一定的影响。

测定水化速度的方法有直接法和间接法两类。直接法主要有岩相分析、X 射

线分析、电子探针法及扫描电子显微镜等方法，可以定量地测出已水化和未水化部分的数量。间接法主要有测定结合水量、水化热、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量、水泥石比表面积及水泥石的体积减缩等。其中以测定结合水量法较为简便，将所测定各龄期化学结合水量与完全水化时的结合水量相比，即可计算出不同龄期的水化程度。

各熟料矿物单独水化时所测定的水化深度如表 1-2 所示（结合水量法测得）。

表 1-2 单矿物的水化深度 (μm , $d_m = 50\mu\text{m}$)

矿物	3d	7d	28d	3 个月	6 个月
C_3S	3.1	4.2	7.5	14.3	14.7
C_2S	0.6	0.8	0.9	2.5	2.8
C_3A	9.9	9.6	10.3	12.8	13.7
C_4AF	7.3	7.6	8.0	12.2	13.2

由表 1-2 可知，直径为 $50\mu\text{m}$ 的 C_3S 、 C_3A 、 C_4AF 颗粒经过 6 个月的水化，水化深度都已达到半径的一半以上，而 C_2S 的水化部分还未到其深度的 $1/5$ 。同样大小的颗粒经 28 天水化后， C_3S 的水化深度为其半径的 $3/10$ ， C_3A 约为其 $2/5$ ， C_4AF 比 C_3S 的水化深度略大，而 C_2S 还不到半径的 $1/25$ 。因此，比较四种单矿物 28 天（后面简写为 d）以前的水化速度为： $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_2\text{S}$ 。

（三）影响水泥水化的因素

由上述水泥的水化过程可以看出，影响硅酸盐水泥水化的因素主要有硅酸盐水泥熟料矿物以及各种矿物的晶体结构、水泥细度、水胶比、水化温度、外加剂等。

1. 水泥矿物组成和晶体结构

硅酸盐水泥由各种矿物组成，其水化取决于各矿物种类及其比例。 C_3A 和 C_3S 含量高的水泥，其水化过程要快得多，尤其是 C_3A ，若超过 11%，则可能会引起急凝的不正常现象。若 C_3S 过多，则水泥水化过程缓慢。但即使化学成分或者矿物组成相同的水泥，它们的水化速度也可能有明显的不同。

大量的研究结果证明，各种矿物的水化速度之所以不同，与其晶体结构的缺陷有关。晶体形成条件越复杂，配位越不规则，则其内部缺陷越多，在晶格中造成许多空腔，水化速度就会越快。 C_3A 之所以水化快，就是因为其晶体配位极不规则而在晶格中造成很大的空腔，使水迅速进入晶体内部而产生剧烈反应，当 C_3A 中有碱金属氧化物 (Na_2O) 等杂质时， Na_2O 等就会将其空腔填充，增大结构密实度，使水难以透过，活性降低。而且填充越多、越密实，水化速度越慢。

2. 水泥细度和水胶比

在水泥水化过程中，水泥粉磨得越细，表面积就越大，与水接触的面积也就越大。在其他条件相同的情况下，水化反应就会越快。此外，细磨时还会使水泥内晶体产生扭曲、错位等缺陷而加速水化。但是增大细度后，迅速水化生成的产物层又会阻碍水化作用的进一步深入，所以增加水泥细度只能提高早期水化速度，对后期的强度和水化作用不明显，而对较粗的颗粒而言，各阶段的反应都较慢。

水胶比在一定范围内变化时，适当增大水胶比，可以增大水化反应的接触面积，使水化速度加快，如图 1-4 所示。若水泥水化时水胶比过小，水化反应所需水量不足，会延缓反应进程。同时，水胶比小，则没有足够孔隙来容纳水化产物而使未水化部分进一步水化，也会降低水化速度。但水胶比过大，会使水泥石结构中的孔隙太多，从而降低其强度，故水胶比也不宜太大。

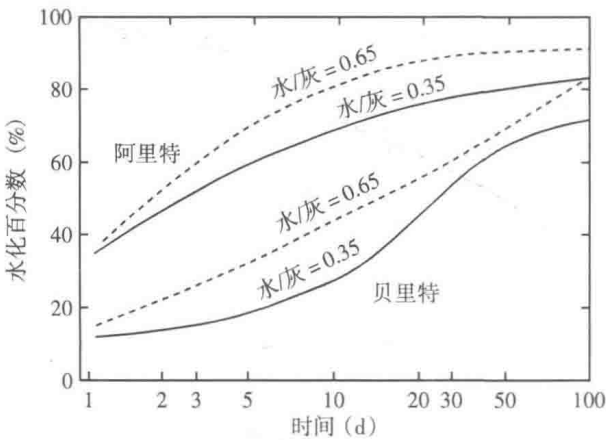


图 1-4 水胶比与水化速度

3. 温度

一般化学反应在温度升高时反应速度会加快。水泥的水化也是如此。当水化温度升高时，可使 C_3S 诱导期缩短，第二放热峰提高，加速期和衰退期也相应提前结束。图 1-5 是不同温度对水泥水化速度的影响。

由图 1-5 可知，温度越高，结合水量越多，表明水化越快。硅酸盐水泥熟料矿物在低温时，水化机理与常温时并无明显差异。实验证明，硅酸盐水泥在 $-5^{\circ}C$ 时仍能水化，到 $-10^{\circ}C$ 时水化就基本停止，尤其是 $\beta-C_2S$ 受到的影响最大，此时已基本没有活性。

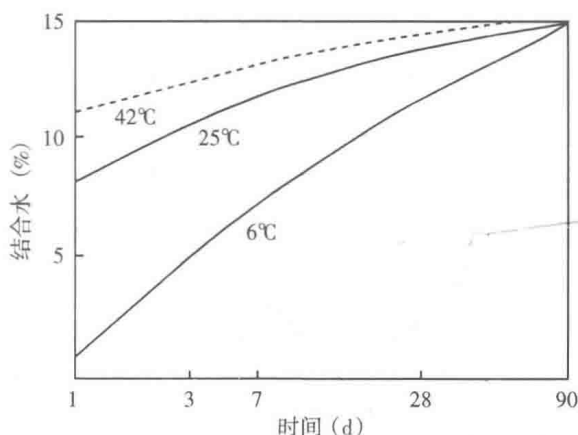


图 1-5 温度对水泥水化速度的影响

当温度升高并保持在 100°C 以内时, 硅酸盐水泥、 C_3S 、 C_2S 的水化与常温时基本相同, 水化产物与常温下也相同。但当温度升至更高时, 则有部分水化产物会分解脱去结晶水, 形成相当复杂的无定型相甚至其他产物。

4. 外加剂

为了改善水泥浆体及混凝土的某些性能, 通常要加入少量的添加物质, 称为外加剂。常用促凝剂、早强剂和缓凝剂三种来调节水泥的水化速度。不同的外加剂对水泥的水化速度和水化过程有不同的影响。

三、硬化水泥浆体

(一) 整体结构的形成和发展

水泥加水拌合后, 很快发生水化, 开始具有流动性和可塑性。随着水化反应的不断进行, 浆体逐渐失去流动性和可塑性而凝结硬化。由于水化反应的逐渐深入, 硬化的水泥浆体不断发展变化, 结构变得更加致密, 最终形成具有一定机械强度的稳定的水泥石结构。所以, 水泥浆体结构的形成是经过一定时间的凝结和硬化过程之后才形成并稳定的, 凝结和硬化是同一过程中的不同阶段, 凝结标志着水泥浆体失去流动性而具有一定的塑性强度。硬化则表示水泥浆体固化后所形成的结构具有一定的机械强度。

有关硅酸盐水泥凝结和硬化的过程, 许多专家通过大量的实验和研究提出了各种不同的理论和看法。现主要介绍洛赫尔 (F、W、Locher) 等从水化产物形成和发展的角度, 将水泥的凝结硬化过程划分为三个阶段, 如图 1-6 所示。