

水泥混凝土

富文权 編著

人民铁道出版社

水 泥 混 凝 土

富文权 編 著

人 民 鐵 道 出 版 社 出 版

(北京市霞公府17号)

北京市書刊出版业营业許可証出字第010号

新 華 書 店 發 行

人 民 鐵 道 出 版 社 印 刷 廠 印

(北京市建国門外七聖廟)

書号1370 开本787×1092 $\frac{1}{2}$ 印張6 字數174千

1959年5月第1版

1959年5月第1版第1次印刷

印数 0,001—7,000 册

統一書号: 15043·043 定价(8) 0.53元

前 言

混凝土是各种建筑工程中的一项重要材料。

随着我国社会主义建设事业的飞跃发展，对于混凝土材料的需用量愈来愈多，对于混凝土品质的要求程度愈来愈高。因此，有必要广泛介绍这门科学技术知识，帮助有关工程技术人员进行深入了解，来很好的处理实际工作中的具体问题，使获得较好一些的技术经济效果。本书的编写，就试图在这些方面尽点力量。

本书内容，主要是依据我国，特别是苏联的现行标准、规范，结合近年来各有关单位的科学研究成果和工程实践经验写成。书中列举的试验研究资料，以及对某些理论问题的阐述解释，大多是摘自苏联文献；希望通过本书能起到一些介绍苏联先进经验的作用。

本书着重从理论上讨论了混凝土材料的技术性质、规格条件、混凝土成分配合等等，同时尽量联系一些工程实践中的具体问题；书中对混凝土灌注施工中的一般性问题，特别是与混凝土质量有关的施工控制问题等也略加讨论；并涉及铁路桥梁隧道类混凝土工程的若干特点，以供基本建设工程人员的参考。

目 录

第一篇 水泥	4
第一章 矽酸盐水泥	4
§ 1 矽酸盐水泥的生产过程.....	4
§ 2 矽酸盐水泥的化学成分及矿物成分.....	8
§ 3 矽酸盐水泥的凝結硬化过程.....	12
§ 4 矽酸盐水泥的化学腐蚀性.....	18
§ 5 矽酸盐水泥的主要技术性質.....	24
第二章 火山灰質矽酸盐水泥	40
§ 6 火山灰質混合材料及火山灰質矽酸盐水泥.....	40
§ 7 火山灰質水泥的凝結硬化.....	45
§ 8 火山灰質水泥的主要技术性質.....	46
第三章 矿渣矽酸盐水泥	50
§ 9 粒狀高炉矿渣及矿渣矽酸盐水泥.....	50
§ 10 矿渣水泥的硬化过程.....	54
§ 11 矿渣水泥的主要技术性質.....	58
第二篇 混凝土的骨料、摻合料及拌合用水	61
第一章 細骨料 (砂子)	61
§ 12 砂子的比重、容重、空隙率.....	62
§ 13 砂子的清潔程度.....	64
§ 14 砂子的顆粒級配.....	68
§ 15 当地砂子的合理使用.....	71
第二章 粗骨料 (卵石或碎石)	75
§ 16 粗骨料的比重、容重、空隙率.....	75
§ 17 粗骨料的清潔程度.....	76
§ 18 粗骨料的顆粒級配及最大粒徑.....	77
§ 19 粗骨料的顆粒形狀、强度、抗冻性及其它.....	82

第三章 摻合料及附加劑	85
§ 20 活性的及填充性的礦物質細粉摻合料.....	85
§ 21 促凝劑(快硬劑)及緩凝劑.....	87
§ 22 表面活性劑.....	90
第四章 混凝土拌合用水	99
§ 23 混凝土拌合用水.....	99
第三篇 混凝土的主要技術性質	100
第一章 混凝土的強度	101
§ 24 混凝土標號及混凝土強度.....	101
§ 25 影響混凝土強度的主要因素.....	107
§ 26 混凝土強度的增長速度.....	113
第二章 混凝土的耐久性	121
§ 27 混凝土的抗滲性.....	122
§ 28 混凝土的抗凍性.....	127
§ 29 混凝土的抗侵蝕性(抗水性).....	130
§ 30 提高混凝土耐久性的主要措施.....	133
第三章 混凝土拌合物的和易性	142
§ 31 和易性的意義及表示法.....	142
§ 32 影響和易性的主要因素.....	146
第四篇 混凝土的配合比	151
§ 33 混凝土配合比的意義.....	151
§ 34 混凝土配合比的選擇.....	154
§ 35 混凝土配合比的兩個特殊情況.....	167
第五篇 混凝土的灌筑施工	174
§ 36 混凝土材料品質的檢查控制.....	174
§ 37 混凝土的拌合及運送.....	176
§ 38 混凝土的灌筑及搗實.....	184
§ 39 混凝土的養護及拆模.....	187
§ 40 混凝土的質量檢查.....	190

第一篇 水 泥

水泥是混凝土里最重要的一項材料，决定着混凝土的各項技術性質。

目前，在普通混凝土工程中，使用量最多的是矽酸鹽水泥；其次是礦渣矽酸鹽水泥和火山灰質矽酸鹽水泥。礫土水泥在較個別的情況中使用；為了改進水泥性質或為了滿足某些特殊情況的需要，近年來還逐漸開始生產一些其它品種的水泥，如：抗硫酸鹽水泥，塑化水泥，防水水泥，加氣水泥，水工用低熱水泥，不收縮水泥，膨脹水泥等等。

以下僅分別研究一下幾種主要水泥的物理化學性質及其在應用上的若干問題。

第一章 矽酸鹽水泥^①

§1. 矽酸鹽水泥的生產過程

把適當成分的“生料”，在窯里煨燒至部分熔融，得以矽酸鈣鹽為主要成分的水泥“熟料”；再將水泥熟料同少量石膏一起磨成細粉，即成矽酸鹽水泥（簡稱普通水泥）。

(1) 水泥原料

在水泥原料中要求含有如下的幾種化學成分：氧化鈣（ CaO ），氧化矽（ SiO_2 ），氧化鋁（ Al_2O_3 ），氧化鐵（ Fe_2O_3 ）。

水泥原料，普通多以石灰質原料和粘土質原料適當配成。屬石灰

① 矽酸鹽水泥中的主要化合物成分是矽酸鈣，故而得名。根據新的化學命名原則，“矽”應改為“硅”（因矽與錫同音），所以這種水泥今後亦可能改稱為“硅酸鹽水泥”。

矽酸鹽水泥，應用普遍，一般常簡稱為“普通水泥”。在國外則多稱之為“波特蘭水泥”。

質原料的有石灰石、白堊、泥灰質石灰石等，其中應含有較多量的 CaCO_3 ，經煨燒分解後得 CaO ；屬粘土質原料的有粘土、泥灰質粘土等，其中應含有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等的氧化物。在個別情況下，如果泥灰石的化學成分能恰好適合配料的要求條件，當然也可以只使用此一種原料。除上列的幾種原料外，也時常需要摻入一些起調節作用的輔助性原料；如：鐵礦石，高爐礦渣，矽藻土等。

(2) 配料

配料有干式和濕式兩種方法。濕法配料是將原料和水一起磨細，調合成乳狀懸濁液的所謂“料漿”（約含水40%左右），隨後即可送入窯內煨燒（僅適用於迴轉窯）。濕法配料有許多優點，如：容易獲得質地均勻的料漿，可將粘土中的不良雜質淘洗出去，飛灰較少等（缺點是燃料費用稍高）；所以儘管濕法最適合於軟質原料（如以白堊與粘土配成的原料），但在近代水泥工業中即使使用硬質原料也常採用此種方法。

干法配料是先將原料烘干，經過粉碎，制成所謂“生料粉”，而後送入窯內進行煨燒。這種方法較適合於含水少的原料；所需燃料費用也比較少。

調配生料（生料漿或生料粉），要求充分混合均勻，要求有很高的研磨細度，而化學成分也要跳動很小，這才能够獲得質量均勻的水泥產品。

(3) 煨燒

煨燒水泥熟料用的窯有兩種型式：迴轉窯和立窯。

① 迴轉窯：近代水泥工業多採用迴轉窯。迴轉窯外用鋼板拼成，內襯以耐火材料。窯呈長圓筒形（長40~180公尺，直徑2.0~3.6公尺），稍與水平面傾斜（約傾斜2~5°），每分鐘約迴轉1~2轉左右。

將水泥生料（生料漿或生料粉）從窯上端均勻的連續喂入，並使其數量僅占窯內空間的很少一部份。隨着窯的不停迴轉，物料由窯上端向下端緩慢移動。煨燒用燃料（多為煤粉，有的也用液體燃料）則由窯下端經噴嘴噴進窯中，在靠近窯頭處燃燒；燃燒所得的熱煙氣在物料上面移向窯頂，而後從煙囪飛出。

生料入窑后，温度很快增高。到 100°C 后，游离水分蒸发，结成块；而后再碎成小块。物料继续向窑内移动，温度达 500°C 时，生料中的有机质被烧尽，粘土成分中的高岭土开始脱水，而物料则变成松散的粉状物质。温度达 800°C 以上后，石灰石（ CaCO_3 ）发生分解，析出的 CO_2 随烟气排出。温度继续升高至 $1000^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 以后，碱性氧化物（ CaO ）将与酸性氧化物（ SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ）发生固相反应，逐渐生成水泥熟料中的几种主要化合物成分：硅酸钙、铝酸钙、铁铝酸钙等。（见§2）在这些化合物的生成反应过程中，将放出大量的热（放热反应），使物料温度更加迅速提高。温度达 1300°C 后，部分物料开始熔融，出现液相。普通回转窑内的最高温度约为 1450°C ，再以后则逐渐下降。就在这 $1300^{\circ}\text{C} \sim 1450^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 的过程中，熟料煅烧完成；温度降至 1300°C 时，物料中的部分液相重新凝固，化学反应结束。温度再继续下降，最后即烧结成呈灰绿色的球粒状的（大者似胡桃）水泥熟料。熟料从窑下端排出，并使之迅速冷却。

② 立窑：近代化的机械化立窑，高可达 $8 \sim 14$ 公尺，直径 $2.5 \sim 3.5$ 公尺；窑顶设喂料口，窑底设卸料装置。如水泥原料仅是单一的天然泥灰岩，则只需将其破碎成一定尺寸的碎块，即可从窑顶喂料口喂入窑内煅烧（煤块也从此加入窑内）；若原料业经调配成“生料粉”，则还需将其稍加喷湿，压制成生料块，而后再喂入窑内煅烧。在近代化的立窑中，为获得高质量的水泥，常将生料粉同燃料（煤粉）一起磨细混匀，而后压制成所谓“黑料块”（掺煤的黑料块），或用水和成生料球，再喂入窑内煅烧。

修建立窑比较简单，投资也较少，可节省煅烧用燃料，也可节省磨细水泥熟料时的能量消耗；因此，立窑较适合于地方性的或建筑企业单位自建的小型水泥工业采用。由于立窑中的温度分布常不够均匀，煅烧过程难于检查控制，因此也难于获得较高的熟料质量，再加上立窑产量比较低些，所以在近代化的大型水泥工业中，一般多是采用回转窑。

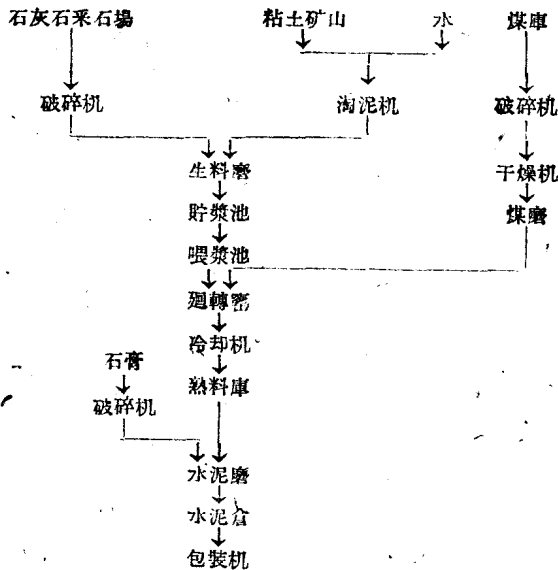
（4）破碎及磨细

从窑里煅烧出来的水泥熟料，尚需在熟料库里存放一些时间，以

使水泥熟料中可能含有的少量游离石灰，受空气中水气影响而发生消解，借以保证水泥的体积安定性（見§5）。熟料經适当存放后，能延緩一些水泥的凝結時間并便于熟料的破碎磨細。

磨細熟料时，需要掺入少量的天然石膏，以延緩水泥的凝結時間；否則，当水泥和水后，將迅速发生凝結作用，甚至无法进行正常施工（見§3）。

根据現行的水泥标准^①，在磨細水泥熟料时，允許掺入占水泥成品重量不超过15%的活性混合材料（火山灰質混合材料或粒狀高炉矿渣），或不超过10%的填充性混合材料；也可同时掺入上列两种混合材料（填充性者不超过10%，共計不超过15%）。掺混合材料后，可調节水泥活性，增加水泥产量，而活性混合材料还可改善水泥的某些技术性質。



① 我国的現行水泥标准，是前国家建設委员会在1956年7月4日批准的“矽酸鹽水泥、矿渣矽酸鹽水泥、火山灰質矽酸鹽水泥标准”（建筑材料标准101—56）。

水泥經磨成合乎要求的細粉之后，移入水泥倉中貯存，在这里一面使之冷卻，一面使殘余的游离石灰消解，并一直貯存到經試驗合格（体积安定性）时为止。

水泥包装有紙袋、麻袋或木桶等等；对于大量使用水泥的工程，最好利用密閉式車箱散裝运送。目前的国产水泥，多为紙袋包装，每袋淨重50±1公斤。

茲以湿式配料及迴轉窑煨燒的水泥为例，列表表示出其生产过程如前（7頁）。

§2. 矽酸鹽水泥的化学成分及矿物成分

(1) 水泥熟料的化学成分

在矽酸鹽水泥熟料中，一般含有如下的几种主要化学成分：

CaO	64~67%；	Fe ₂ O ₃	2~4%；
SiO ₂	21~24%；	MgO	} 2~3%。
Al ₂ O ₃	4~7%；	SO ₃	

另外也可能含有极少量的其它杂质。

氧化鈣 (CaO) 是水泥熟料 (或水泥原料) 里的最主要的一项成分。它和酸性氧化物 (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃等) 化合成为具有活性的化合物。但熟料中不得含有过多的游离CaO (即未与酸性氧化物相化合的CaO)，以免引起水泥石体积的不够安定 (見§5)。

氧化矽 (SiO₂) 也是很重要的一项成分。水泥中 SiO₂ 成分含量較多时，凝結時間較慢，初期硬化速度亦較慢；但后期强度較高，抗硫酸鹽性亦稍好。

氧化鋁 (Al₂O₃) 含量較多时，能加快水泥的凝結硬化过程，但后期强度发展較慢。

氧化鉄 (Fe₂O₃) 能降低熟料的燒結溫度。水泥中 Fe₂O₃ 較多而 Al₂O₃ 又較少时，將延緩水泥的凝結硬化速度，但卻可長时期的繼續进行硬化；而且还将比含 Fe₂O₃ 少、含 Al₂O₃ 多的水泥具有較好的抗硫酸鹽性 (見§4)。

硫酐 (SO₃) 仅少部分来自水泥熟料，大部分是磨細水泥熟料时掺入的石膏成分。适量的石膏，可在調節水泥凝結時間上起有利作

用；含量过多时，將破坏水泥的体积安定性（見§5）。

氧化鎂 (MgO) 是水泥原料中的不良杂质，在煨燒过程中呈游离状态。含量过多时亦將破坏水泥体积安定性（見§5）。

氧化鈦 (TiO₂) 一般含量很少，不超过0.3%。含很少量的TiO₂是有利的，可促进熟料矿物的很好結晶。

氧化錳一般含量很少，实际上不至于改变水泥的物理力学性質。

磷酐 (P₂O₅) 在水泥中含量一般亦極微少。但若含量达1~2%时，能显著地推迟水泥的硬化过程。

碱分 (K₂O, Na₂O) 是粘土原料中时常含有的不良成分。在熟料煨燒过程中，一部分的碱分挥发消失，另部分則常在熟料中残留下来（約0.5%甚至达1%，而且主要是K₂O）。碱分是有害成分，能导致水泥凝結時間变换不定，也能引起水泥石的表面风化（起霜）。在水工混凝土中，如骨料里含有矽質頁岩、蛋白石或其它各种无定形的矽酸时，碱分將和这些物質发生作用，在混凝土内引起膨脹。因此，对于水工混凝土用的水泥來說，特别是当使用这一类的粗細骨料时，常要求水泥中的碱分含量不超过0.6%。

(2) 水泥熟料的矿物成分

水泥熟料矿物的生成过程大致如下：

当水泥生料在窑中（以迴轉窑为例）煨燒至1000°C左右时，全部的Al₂O₃將与CaO化合成CaO·Al₂O₃，SiO₂也开始少量地吸收CaO并化合成2CaO·SiO₂。

温度升高到1200°C以后，CaO·Al₂O₃繼續吸收CaO，先化合成5CaO·3Al₂O₃，而后再轉变成3CaO·Al₂O₃。Fe₂O₃可能化合成2CaO·Fe₂O₃，而更主要地則是化合成4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃。SiO₂逐漸全部轉变成2CaO·SiO₂。

温度再升高到1300°C左右，上述固相反应結束，开始部分地出現液相（主要是4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃、3CaO·Al₂O₃等易熔物質）。在最后一段的高温煨燒过程中（1300°C→1450°C），2CaO·SiO₂將大量地吸收殘存的游离CaO，并化合成水泥熟料中的最主要的矿物成分—3CaO·SiO₂。待温度重新降至1300°C后，各种成分間的化学反应結束，熟料燒結完成。

經上述一系列的反應之後，最後生成的幾種主要化合物是：

矽酸三鈣 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (簡寫為 C_3S) ；

矽酸二鈣 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (簡寫為 C_2S) ；

鋁酸三鈣 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (簡寫為 C_3A) ；

鐵鋁酸四鈣 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (簡寫為 C_4AF) 。

固體水泥熟料，可看做是一種人造岩石；所以上列的幾種組成化合物，也常叫做水泥熟料的礦物成分。水泥在混凝土或砂漿中表現的各種物理化學性質，基本上就是決定於這幾種礦物成分的個別特性和它們在熟料組成中的相對含量。

水泥熟料中的 C_3S 和 C_2S ，常叫做矽酸鹽礦物質；含量較多，約達 75~82%。 C_3A 和 C_4AF 常叫做易熔（助熔）礦物質，含量約占 18~25%。

根據水泥熟料礦物成分的相對含量，蘇聯奧克洛索夫曾把普通水泥劃分為如下的幾種類型（表 1），借此可大概判斷水泥的某些特性。

表—1

水泥（熟料） 名 稱	矽酸鹽礦物質			易 熔 礦 物 質		
	$\text{C}_3\text{S}:\text{C}_2\text{S}$	大概含量%		$\text{C}_3\text{A}:\text{C}_4\text{AF}$	大概含量%	
		C_3S	C_2S		C_3A	C_4AF
正 常 的	4~1	60~37.5	15~37.5	1.5~0.4	15~7	10~18
阿利特型的	>4	>60	<15	”	”	”
貝利特型的	<1	<37.5	>37.5	”	”	”
高 鋁 型 的	4~1	60~37.5	15~37.5	>1.5	>15	<10
鋁 鐵 型 的	”	”	”	<0.4	<7	>18

注：本表是在假設 $(\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}):(\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF})=75:25$ 的基礎上製定的。

(3) 水泥熟料礦物成分的計算

根據水泥的化學成分①，通過計算，可以近似地求出水泥熟料的礦物成分含量。

① 這裡的化學成分，是指水泥熟料進行全分析時的化學成分。但需指出，在實際的商品水泥中，除熟料之外，還常含有一些在磨細水泥時摻入的少量石膏和某些活性的或填充性的混合材料。

苏联 B.A. 金德教授提出的近似方法如下。

计算时需要下列两项数据：

1. 石灰饱和系数 (KH) ①；
2. 硫酸盐的碱度 (CO) (指与1个SiO₂相化合的CaO的分子数)。

$$CO = 3KH$$

对于普通成分的熟料 ($\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ 分子数比大于1, 或 $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ 重量比大于0.64), 可按下列公式计算其矿物成分:

$$\%C_3S = 3.8 \times SiO_2 (CO - 2);$$

$$\%C_2S = 2.87 \times SiO_2 (3 - CO);$$

$$\%C_3A = 2.65 (Al_2O_3 - 0.64Fe_2O_3);$$

$$\%C_4AF = 3.04Fe_2O_3;$$

$$\%CaSO_4 = 1.7SO_3.$$

例: 水泥熟料的化学成分 (%) 如下:

$$CaO - 65.84; SiO_2 - 23.22; Al_2O_3 - 5.36; Fe_2O_3 - 3.16;$$

$$MgO - 0.42; SO_3 - 0.99; 烧失量 - 0.47; 不溶剩余物 - 0.35.$$

计算矿物成分:

$$KH = \frac{65.84 - (1.65 \times 5.36 + 0.35 \times 3.16 + 0.7 \times 0.99)}{2.8 \times 23.22} = 0.849;$$

- ① 在煅烧水泥过程中, 先生成C₂S, C₃A, C₄AF, CaSO₄等; 其次生成C₃S。当Al₂O₃、Fe₂O₃、SO₃等被CaO化合成为C₃A、C₄AF及CaSO₄之后, 其所剩余的全部CaO数量, 对于为使SiO₂在理论上完全化合成为C₃S所必需的CaO数量之比, 叫做“饱和系数(KH)”。

$$KH = \frac{(CaO_{总} - CaO_{游离}) - (1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3 + 0.7SO_3)}{2.8(SiO_2_{总} - SiO_2_{游离})}$$

KH常介于0.85~0.95之间。

注: 本公式中的一些系数是根据分子量间的比值求出的:

$$3CaO : SiO_2 = 168.21 : 60.6 = 2.8;$$

$$3CaO : Al_2O_3 = 168.21 : 101.92 = 1.65;$$

$$CaO : Fe_2O_3 = 56.07 : 159.68 = 0.35 \text{ (设 } C_4AF = C_3A + CF);$$

$$CaO : SO_3 = 56.07 : 80.06 = 0.7.$$

$$C_3S = 3.8 \times 23.22 (3 \times 0.849 - 2) = 48.25\%$$

$$C_2S = 2.87 \times 23.22 (3 - 3 \times 0.849) = 30.18\%$$

$$C_3A = 2.65 (5.36 - 0.64 \times 3.16) = 8.85\%$$

$$C_4AF = 3.04 \times 3.16 = 9.61\%$$

$$CaSO_4 = 1.7 \times 0.99 = 1.68\%$$

其它—1.43%。

§3. 矽酸盐水泥的凝結硬化过程

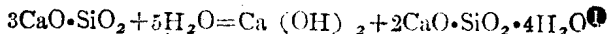
向水泥中注水拌成的水泥漿，初呈流动状态，具有一定程度的黏性和塑性，而后逐漸凝結变成固态，逐漸产生力学强度，形成坚固的水泥石。为了应用上的方便，一般常大致的把由流动状态轉变为固态的这个初期阶段，叫做“凝結”过程，而把此后的逐漸产生强度的阶段，叫做“硬化”过程。但严格来說，这两个阶段是无法截然划清的。

水泥加水后的凝結硬化作用，是一项很复杂的物理—化学过程。下面仅就与此有关的问题略加討論。

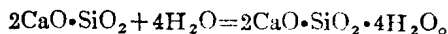
(1) 水泥的化学反应过程

水泥熟料中的几种主要矿物成分，就化学性質来說，都是弱酸的鈣鹽。这些鹽类容易与水相作用、即容易发生水解（为水分解）或水化（与水化合）作用。

矽酸三鈣与水作用后，析出一个CaO分子，并再結合若干个H₂O分子而轉变成水化矽酸二鈣：



矽酸二鈣与水作用后生成：



水化矽酸鈣能不能在水溶液中稳定存在，这和溶液中的石灰濃度有关。当石灰濃度达到或超过某一定值（所謂“极限石灰濃度”）后，两者之間建立化学平衡，水化矽酸鈣不再溶解。水化矽酸一鈣所

① 水泥水化后，在各种水化矽酸鈣或水化鋁酸鈣等化合物中化合的H₂O的分子数，暫还不很肯定，各种文献上的介紹資料也不很一致。

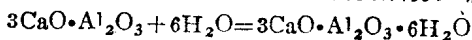
需的极限石灰浓度约为0.09克/升 (CaO) ^①，水化砷酸二钙约需 1.3 克/升 (即饱和石灰浓度)，水化砷酸三钙所需的石灰浓度远在石灰实际可能溶解的最大浓度 (饱和浓度 1.3 克/升 CaO) 以上。因此，水化砷酸三钙不能在水中存在。水泥和水后，由于 C₃S 水解作用可析出大量的 CaO，使溶液浓度很快达到饱和 (1.3 克/升 CaO)，所以 C₂S 实际上就不会发生分解并直接水化成 2CaO·SiO₂·4H₂O。

铝酸三钙与水作用时，将先同石膏 (主要是磨细水泥时掺入的石膏) 发生反应，生成：

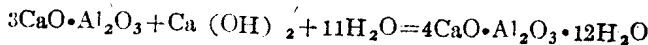
$$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 31\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$$

。反应生成的水化硫铝酸钙复盐，难溶于水，稳定性极高 (极限石灰浓度仅为 0.045 克/升 CaO)。

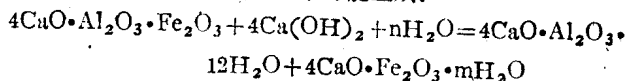
3CaO·Al₂O₃ 与 CaSO₄ 反应后的剩余部分，将再与水化合生成：



水化铝酸三钙所需的极限 CaO 浓度约为 0.56 克/升，因而容易生成；但在石灰饱和溶液中还将再吸收 CaO 而生成水化铝酸四钙 (极限 CaO 浓度约为 1.08 克/升)：



铁铝酸四钙在饱和石灰溶液中可能生成：



(水化铁酸四钙所需的极限 CaO 浓度约为 1.06 克/升)

水泥中的游离 CaO 和游离 MgO，与水作用时分别生成 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂，但反应速度极为缓慢；含量过多时，将在水泥石硬化定形后由于反应生成物的体积涨大而引起有害作用 (见 §5)。

关于水泥中含有的火山灰质混合材料或水淬粒状高炉矿渣等的水化作用，可分别参看火山灰质砷酸盐水泥部分 (第二章 §-7) 或矿渣砷酸盐水泥部分 (第三章 §10)；而惰性混合材料则只在水泥石中起填充作用。

① 各种水化砷酸盐 (或水化铝酸盐) 为在水溶液中稳定存在所需要的极限 CaO 浓度 (或极限 Al₂O₃ 浓度)，暂还不很肯定，各种文献上的介绍资料也不很一致。

綜上所述，假如暫不考慮矽酸鹽水泥中的混合材料以及少量的其他雜質的話，則在水泥水解、水化作用之後，將主要生成：

- 1) 氫氧化鈣 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$;
- 2) 水化矽酸鈣 $(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O})$;
- 3) 水化鋁酸鈣 $(4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O})$;
- 4) 水化鐵酸鈣 $(4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot m\text{H}_2\text{O})$;
- 5) 水化硫鋁酸鈣 $(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O})$ 等。而水泥在硬化後的混凝土（或砂漿）中所表現的若干技術特性（特別如耐侵蝕性等），也就主要地決定於這些生成物的性質及其相對含量。

(2) 水泥的物理變化過程

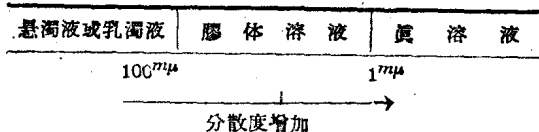
分散在水泥漿中的水泥微粒，首先是表層部分（周壁部分）與水接觸，為水潤濕並發生化學反應。

熟料礦物成分中 C_3S 與水作用後，生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ，前者溶於水中並很快地形成飽和溶液。熟料各種成分與水作用後的其它生成物，如水化矽酸鈣、水化鋁酸鈣、水化鐵酸鈣、水化硫鋁酸鈣以及以後繼續從 C_3S 析出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等等，都不會再在這種石灰飽和溶液中發生溶解，並呈極微細的固體微粒狀態分散在溶液之中；微粒聚集之後，形成膠體體系^①（凝膠）。

水泥漿中膠體微粒逐漸增加，固體顆粒的比表面積^②迅速增大，大量吸收周圍的游離水分；另一方面，水泥顆粒的內核部分也要從其周圍的凝膠包復膜中吸取水分（儘管很慢），繼續發生水解、水化作

① 在膠體化學中，為了研究和實用上的方便，特把懸濁液（或乳濁液）、膠體溶液和真溶液三者之間的界限，按分散相（如分散在液體中的固體微粒）顆粒尺寸的大小，大致地劃分如下：

液體的分散系



膠體溶液（或稱“溶膠”）在凝聚成（凝結成）較濃稠的物質之後，叫做“凝膠”（或“膠凍”）。

② 比表面積是單位重量中的各個固體顆粒表面積的總和。

用。所有这些，都使得水泥漿中的游离水分逐渐减少，凝膠愈稠，水泥漿的流动性和可塑性也將随着逐渐消失，然后再整个地凝聚成为固态（但初期还没有多少强度）。普通把这一阶段叫做水泥的“凝結过程”；实际上也就是熟料矿物水化作用后的新生成物（微粒分散相）的聚合过程。

在水泥顆粒周围生成的凝膠包复膜，將在一定程度上妨碍着外界水分的向內侵入，妨碍着水泥內核部分的迅速水化，因而也就將逐渐減慢水泥的凝結硬化过程。

在凝膠体生成和凝聚的过程中，一部分化合物（如氢氧化鈣和水化鋁酸鈣）的凝膠，將再开始結晶；而另一部分化合物（如水化矽酸鈣）則長时期地保持着无定形的膠体状态（或仅生成极微細的晶体）。晶态物質互相結合起来，形成結晶合生体的網狀結構，使水泥石在硬化初期就产生出一定的力学强度；而后再由于处在晶体骨架間的膠体物質的逐渐变濃、变硬，保证了水泥石强度的繼續增長。随着硬化時間的延長，水泥顆粒未水化部分將繼續发生水化作用，膠体生成物（凝膠）在脱水（为水泥內核部分吸收化合）之后更加密实起来，同时亦將部分地轉变成晶体。晶体逐渐成長，膠体逐渐密实，兩者錯綜結合起来，就使得水泥石在硬化后期获得了相当高的密度、强度和膠結能力。

如水泥中含有較多量的 C_3S 和 C_3A 时，在和水后的最初几天內，就可以产生很多的晶体物質，使水泥石获得較高的早期强度（水化热亦較高）；否則，如水泥中含 C_3S 和 C_3A 比較少、但含較多量的 C_2S 时，則因晶体生成得比較少和比較慢，从而推迟了水泥的硬化过程，初期强度增長緩慢（水化热亦較低），但卻可以長时期地繼續向上增長（随着 C_2S 水化物凝膠体的逐渐凝聚）。

从上述情形可以看出，經充分硬化后的水泥石結構，实际上是一个很不均匀的膠体—晶体系統。在这个系統里，除膠体物質和晶体物質之外，还分散着大小不等的尚未与水起作用的殘存的水泥微粒（主要是水泥顆粒的內核部分），也分散着未与水泥起作用的游离水分。总的看来，水泥石結構与普通混凝土結構甚为相似，因此也有人把它称做为“微晶混凝土”。