

高強混凝土

И. Н. 阿赫維尔多夫著

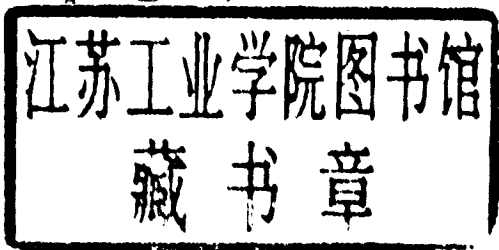
傅 增 玉 譯

~~第二版~~ 混凝土

(混凝土工艺的實驗与理論研究)

И. Н. 阿赫維爾多夫著

傅 增 玉 譯



中国工业出版社

本书詳述了在混凝土工艺的各个环节中提高混凝土强度的理論問題。作者在实验資料的基础上，闡述了高强混凝土的物理力学性能产生的原因，分析了水泥、集料及密实方法对混凝土强度的影响，最后提出了高强混凝土配合比設計的理論原則。

本书主要供水泥及混凝土制品方面的科学研究人員及有关的工程技术人員参考。

И. Н. Ахвердов

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН

Госстройиздат Москва—1961

* * *

高 强 混 凝 土

(混凝土工艺的实验与理論研究)

傅 增 玉 譯

*

建筑工程部編輯部編輯 (北京西郊百万庄)

中国工业出版社出版 (北京佟麟閣路丙 10 号)

(北京市書刊出版事业許可証出字第 110 号)

北京市印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{2}$ · 印张 4 $\frac{1}{2}$ · 插頁 6 · 字数 134,000

1963 年 8 月北京第一版 · 1963 年 8 月北京第一次印刷

印数 0001—2020 · 定价 (10-7) 1.05 元

*

統一書号: 15165 · 2238(建工-320)

序 言

装配式钢筋混凝土产量的大量增加，是与工业及民用建筑中广泛应用快硬高强混凝土分不开的。

采用这种可充分发挥水泥胶结性能的高强混凝土，由于可减小构件的截面尺寸、自重及扩大其所复盖的跨度，除了能降低构筑物的造价之外，还有助于发挥它在建筑及结构处理上的潜力。

苏联及国外研究者的大量研究表明，高强混凝土问题可以靠采用高活性的快硬水泥、分级的优质集料和含水量低的干硬性混凝土来解决。拟定制备和密实混凝土混合物的方法，有着重要的意义，这些方法应该保证混合物应有的均匀性和水泥石结构形成过程的强化。

考虑到高强混凝土问题在理论方面的特殊意义，作者对它给予了极大的注意，并且试图用新的观点来阐明水泥石密实和硬化的某些问题；所有这些新观点均以研究水泥浆和混凝土中在离心、振动、振动压实、超声作用等影响下所发生的过程为基础。

本书表明，当混凝土混合物受到不同形式的外作用时所发生的水泥浆的密实过程，乃是凝聚过程强化的结果。在这里，水泥石随着时间而强化的机理，可以看成是在水泥颗粒表面的溶剂化水层的范围内所产生的扩散过程。

由于这些原理在一定程度上和已经建立的关于水泥石密实和硬化过程的概念不同，所以它们还可能是争论性的问题。然而作者认为，只有在解决这些争论性的问题中，才能决定出混凝土科学今后的发展方向。

作者对苏联建筑科学院通讯院士、技术科学博士 Ю. А. 尼林德尔教授，苏联建筑科学院院士、技术科学博士 H. A. 波波夫教授，物理—数学科学博士 B. H. 伏拉罗维奇教授和技术科学博士 A. E. 杰索夫教授等为本书原稿提出了宝贵的意见，深表谢意。

书中主要符号的意义*

- B/U ——水灰比;
 $(B/U)_T$ ——水泥浆的水灰比;
 $(B/U)_{p\tau}$ ——砂浆的水灰比;
 $(B/U)_d$ ——混凝土的水灰比;
 $K_{H.T}$ ——标准稠度水泥浆的水灰比;
 $K_{M.B}$ ——水泥的最高含水量,或形成凝聚结构所必需的最低 B/U ($K_{M.B} = 0.876 K_{H.T}$);
 K_H ——水泥在静状态时的最大保水能力 ($K_H = 1.65 K_{H.T}$);
 κ ——水泥浆 B/U 对 $K_{H.T}$ 之比值;
 R_H ——水泥标号;
 R_d ——混凝土标号;
 B_d ——混凝土的需水量;
 B_T ——水泥浆的需水量;
 B_d ——集料的需水量;
 B_{aA} ——集料表面的吸附水量;
 $B_{порA}$ ——集料的吸水量;
 ε' ——水泥浆的孔隙率系数;
 ε'_0 ——水泥浆在无外压力作用时的孔隙率系数(或原始孔隙率系数);
 ε'_H ——水泥浆在 $B/U = K_{H.T}$ 时的孔隙率;
 ε ——变形;
 ε_y ——总相对变形;
 ε_0 ——弹性变形;
 $\varepsilon_K(\varepsilon_t)$ ——后效变形;
 δ_c ——溶剂层水的平均密度;
 δ_{aA} ——吸附层水的密度;
 δ_x ——水泥浆在外正压力(包括自重压力)作用下的相对压缩变形;
 $U_K(V_K)$ ——水泥石的体积;

* 由译者整理,与书中不符之处应以书中为准。

γ_n ——水泥的視比重，見公式(5)；

$U_{a\delta}$ ——水泥的原始絕對体积；

V_T ——水泥漿的体积；

$V_{T,p}$ ——砂漿中水泥漿的体积；

$V_{T,\delta}$ ——混凝土中水泥漿的体积；

V_n, V_{rp}, V_m ——一米³混凝土的砂、礫石、碎石的体积；

V_3 ——第一次計算時得到一米³混凝土的集料混合物体积，或称出料系数，亦称修正系数；

Q_n, Q_{rp}, Q_m ——第一次計算時得到一米³混凝土的砂、礫石、碎石重量；

Q'_n (或 Π)、 Q'_{rp} (或 Γ_p)、 Q'_m (或 Π)——按系数 V_3 修正以后的砂、礫石、碎石的重量；

U_n, U_{rp}, U_m, U_c ——砂、礫石、碎石、集料混合物的表面积。

目 录

序言	1
书中主要符号的意义	3
第一章 水泥与水泥浆	1
1. 高强混凝土用水泥的性质	1
2. 水泥浆结构的形成	5
3. 水泥浆凝聚结构的物理力学性质	12
4. 水泥浆的压缩性	22
5. 水泥浆凝聚结构的自密实与强化(凝結)	35
第二章 集料与混凝土混合物	44
1. 集料的物理性质	44
2. 集料构造对混凝土混合物的水泥用量与需水量的影响	52
3. 混凝土水灰比的物理意义	55
4. 混凝土混合物的流动性	62
第三章 混凝土混合物密实的工艺特性	69
1. 混凝土混合物的离心	69
2. 混凝土混合物的振动密实	77
3. 水泥石在超声振动作用下密实与强化的机理	101
4. 混凝土混合物的振动压实	111
第四章 混凝土强度的结构与工艺因素	118
1. 混凝土强度与水泥质量及水灰比的关系	118
2. 混凝土强度的一般公式及其特殊形式	122
3. 集料级配与粒度对混凝土强度的影响	135
4. 高强混凝土的定义	142
第五章 混凝土配合比的设计	145
1. 混凝土配合比的设计方法	145
2. 混凝土配合比设计举例	149
結語	157
参考文献	158

第一章 水泥与水泥浆

1. 高强混凝土用水泥的性质

波特兰水泥和以这种水泥熟料制成的其他水泥，均为磨细的、多矿物成分的粉末——分散系统。在熟料的冷却与粉磨过程中，由于温度作用产生巨大的体积应力，致分散系统中的颗粒产生了許多微裂缝和其他缺陷。

水泥粒子是以阿里特（硅酸三钙 C_3S ，其中溶有固态的 C_3A 达 6—7%、 MgO 达 1.5% 及熟料中的几种其他组分）和貝里特（介稳的 β -硅酸二钙，系由溶于其中的 B_2O_3 、 GaO 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 等来稳定的）为主所组成的。阿里特和貝里特的总含量一般为 75—80%。除此以外，铝酸三钙 C_3A ，以及铁相（ C_2F 、 C_4AF 和 C_3A_2F ）、碱相和玻璃质，也是波特兰水泥熟料中的重要组分。

在不同的水泥中，熟料的相和矿物组成是不相同的，这一点对水泥石结构的形成和强化有着很大的影响。当水泥拌水以后，铝酸三钙与水的反应，较波特兰水泥熟料中的其他相，特别是硅酸二钙，要迅速得多。根据水化值可以说明这一点。例如，一克分子 C_3A 在前三昼夜的水化过程中放出的热量为 46000 卡/克分子，完全水化时放出的热量为 69000 卡/克分子；而硅酸二钙在前三天放出的热量为 3300 卡/克分子，完全水化时放出的热量为 14500 卡/克分子。铝酸三钙三天内放出了总水化热的 $\frac{2}{3}$ （个别情况可达 80% 以上），而硅酸二钙三天内仅放出了总水化热的 $\frac{1}{3}$ 。因此， C_2S 水化的进展比 C_3A 水化的进展要缓慢得多。

上述情况可以或多或少地说明，水泥粒子吸附值的增加与其比表面积的变化不成比例的这种与一般吸附规律不符的现象。铝酸盐化合物含量较高的水泥粒子所以能够比较迅速地破坏，是因为在水化过程中由于化学分散作用而使细度增大了。因此，水泥

的比表面积不能作为其吸附能力的特性指标。

在波特兰水泥熟料的所有相中，阿里特对水泥强度及其增长速度的影响最大。人工制造的单矿物胶凝物质 C_3S 硬化得很快，在龄期 28 天时就可获得不低于 400—500 公斤/厘米² 的强度，硬化 3 个月后——約 600 公斤/厘米²。 C_3S 的强度在后期增长不大。

貝里特($\beta-C_2S$)則相反，硬化很緩慢。其强度在龄期 28 天时还达不到 100 公斤/厘米²，但在硬化一年时却能达到 400 公斤/厘米²。

鋁酸三鈣硬化很快，但其强度小(小于 100 公斤/厘米²)。不过 C_3A 的强度并不令人感兴趣。这个矿物的珍貴之处，在于它可做为硅酸盐矿物(特别是 C_3S)硬化的触媒剂。褐針鐳矿(C_4AF)則相反，它本身虽具有相当高的强度(3 昼夜內可达到 250 公斤/厘米²)和硬化速度，有时却使波特兰水泥的硬化速度减低。

水泥的細度对其性能有很大的影响。細度增大时，水泥的化学組成实际上保持不变(表 1)，但在此时，水泥与水相互作用的物理化学过程却加强了。

对不同厂生产的水泥在烘干至恒重时的顆粒組成的研究表明，粒度小于 60 微米的顆粒占有顆粒組分的 50% 以上(表 2)。

表 1 不同顆粒組分的水泥的化学分析

篩 分 分 析	含 量, %							
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	其他	总计
未篩分水泥	21.74	3.44	7.56	61.66	3.64	0.58	1.68	100.3
4900 孔/厘米 ² 的篩余	21.58	3.58	7.72	62.13	3.64	0.61	1.04	100.3
10000 孔/厘米 ² 的篩余	21.76	3.58	7.02	61.91	3.6	0.61	1.22	99.7
10000 孔/厘米 ² 的篩过	21.6	3.51	6.99	61.56	3.64	0.58	2.6	100.48

当在显微镜下在蔡式室中确定通过 10000 孔/厘米² 筛的各顆粒組分的百分比含量时，确定出 0.5 微米的顆粒組分平均占 32%，由 6.3 到 8.3 微米的組分占 41%，由 16 到 25 微米的組分

表 2 水泥的顆粒組成

水 泥 种 类	1 厘米 ² 上有下列孔数的篩余量, %				10000孔/ 厘米 ² 的篩 过量, %	篩分損失 %
	900	4900	8100	10000		
波特兰水泥	0.66	10.81	17.45	15.46	55.4	0.22
同 上	0.52	11.39	20.52	13.25	53.46	0.86
火山灰波特兰水泥	0	12.75	21.73	5.13	60.1	0.29
同 上	1.02	11.47	23.81	20.92	42.2	0.58
矾土波特兰水泥	1.83	15.03	11.68	13.38	57.62	0.46

占 21.5%，由 50 到 60 微米的组分占 5.5%。

在細磨时固体将获得一些独特的性质，由此，水泥粒子将从空气中吸附水汽，并在分子聚合（范德华）力作用下，形成聚合体——絮凝团。如果把未烘干的水泥粉試剂放到显微镜下，則可容易地看到，最微細的组分不能够分散地存在，而将結合成为一些单独的聚合体，其尺寸达 50—60 微米或更大，也就是說，这些顆粒正在凝聚。因此，水泥粉碎得愈細^①，凝聚过程就愈加强烈，水泥石在其各硬化龄期中的密度和强度也就愈高（表 3）。

表 3 水泥細度对水泥石强度的影响

通过下列各种篩的 波 特 兰 水 泥	試件的抗压强度, 公斤/厘米 ²			
	7 天	14 天	28 天	80 天
10000孔/厘米 ² 篩	155	336	406	432
4900 " "	38	139	186	220
900 " "	16	39	57	62

用通过 10000 孔/厘米²篩的水泥所制造的水泥石，其 28 天强度比用通过 900 孔/厘米²篩的水泥制造的水泥石要高 6 倍，而比用通过 4900 孔/厘米²篩的水泥制造的水泥石强度要大 1 倍以上。

① 在本书中将要说明，当水泥磨得太細时，将产生质量突变，即水泥石的强度将显著降低。

由此可見，水泥的相組成和細度，对決定水泥石和混凝土物理力学性质形成的物理化学过程，有很大的影响。

装配式鋼筋混凝土結構的生产工艺，不仅需要高强的混凝土，而且还需要快硬的混凝土，即在 24 小时自然条件下（温度 20—25°）硬化后，应获取 40—60% R_{28} 的强度。

为了制造快硬混凝土，建議采用这样的波特兰水泥，其硬化一天以后的抗压强度不应低于 200 公斤/厘米²，三天的抗压强度不应低于 300 公斤/厘米²。

在苏联进行的大量研究确定，用含有 50—60% 硅酸三鈣和 8—15% 鋁酸三鈣的熟料生产的水泥就具有这样的性能。水泥的比表面积應該接近于 4000 厘米²/克。

正如 B. Г. 斯克拉姆泰也夫[1]、C. A. 米罗諾夫与 Г. A. 阿洛伯利哲[2]、A. E. 杰索夫[3]等人的研究所得出的，根据鋁酸三鈣含量的不同，在波特兰水泥中加入 8% 以内的半水石膏，对加速混凝土的硬化会发生显著的影响。但是为了防止在已結硬的水泥石中生成的水化硫鋁酸鈣的有害作用，石膏掺量不应太多，水化硫鋁酸鈣在某些情況下，尤其当水泥不够細时，会降低水泥石的强度。

在水泥磨細时，石膏与鋁酸鈣較快地进入反应，因此，水化硫鋁酸鈣主要是在水泥浆結硬以前形成的。C. B. 歇斯篤彼洛夫[4]的研究表明，在不增加水泥磨細度的条件下，采用向水泥中掺加亚硫酸酒精废液(CCB)的办法，可以加入較多的石膏。外加剂 CCB 能促进水泥絮凝团的胶化作用，并使石灰在水泥—水系統的液相中的浓度显著降低。因此，按着作用物质定律，水中的氧化鋁含量将增加，而水化硫鋁酸鈣主要是在液相中形成的。

依据 B. Г. 斯克拉姆泰也夫的資料，采用高鋁水泥，同时加入石膏与氯化鈣外加剂，并經短時間的蒸气养护之后，混凝土的强度可以加速增长。

上述措施，在許多情況下，会促进混凝土的早期强度大大提高。

目前在建筑工程中采用的氯化钙掺量，在不配筋混凝土中为2—3%（水泥重量）；在钢筋混凝土中为1.5—2%。如能保证混凝土具有足够的密实度， CaCl_2 的上述掺量，从普通钢筋腐蚀的角度来看，尤其在干燥空气条件下使用的结构中，并不会带来严重的危害。

但是在制造钢弦混凝土构件时，则不应在水泥中掺氯化钙，这是因为高强钢丝易受腐蚀作用。预应力钢筋表面上的轻微腐蚀，就能引起它的断裂，从而使结构失去其承载能力。

在制取高强混凝土时，许多工艺因素以及首先是在水泥石形成的各个阶段中形成水泥石结构的条件，都具有重要意义。

2. 水泥浆结构的形成

关于水泥石形成和硬化机理的现代观点，是在 A. A. 巴依柯夫[5]把吕—查得理的结晶理论和米哈爱里斯的胶体理论巧妙地结合起来以后而提出的胶凝物质硬化的一般理论的基础上，以及在这方面进行的最新研究工作的基础上建立起来的。

在波特兰水泥硬化时，对其结构的研究表明（B. H. 容克、B. A. 金德、B. Ф. 茹拉夫辽夫、П. П. 布德尼可夫、A. E. 谢依金、Ю. М. 布特、С. Д. 奥柯洛柯夫等人），在凝结期间和硬化开始阶段，水化产物主要由胶体物质组成，以后则发现有数量愈来愈多的晶体形成，这些晶体互相连生并穿入还来不及再结晶的胶体物质中。

正如 P. 列尔米特[6]所报导的，用衍射法对水泥石结构的最新研究和在电子显微镜下观察的结果发现，水化后的胶凝物质的活性部分是由尺寸为 50 至 200 Å 的最微细晶体所形成的，这些晶体互相化学结合，并且晶体外面均裹着一层水壳——吸附薄膜^①。在这里，在硅酸盐和铝酸盐粒子的结构中，含有游离水的分子，而水的多少则取决于周围介质的湿度。

① 微觀顆粒与水组成的系统称做凝胶。

根据对波特兰水泥硬化过程一般公认的概念，认为首先发生的是波特兰水泥中最易溶解的组分——石灰和水化铝酸钙——的再结晶，然后是溶解度低的水化硅酸钙向结晶状态过渡，而水化硅酸钙亦可能长时间地停留在凝胶状态中。由于化学胶化作用而产生的胶体粒子，将形成凝聚结构；而这种凝聚结构，在水泥浆凝结过程中，由于正在水化的水泥的单位体积中胶体粒子数及其聚合的接触点数的不断增加，而逐渐硬化。如果凝聚过程在以后无平行进展的不可逆硬化过程——新生成物（硅酸盐矿物的水化物）的再结晶并生成水泥石微细结晶结构，那么，凝结过程便有可能成为一个可逆（触变）过程。

П. А. 列宾捷尔[7]、Н. В. 米哈依洛夫[8]、С. В. 歇斯篤彼洛夫[9]、И. Н. 阿赫越尔多夫[10]等人的研究表明，在水泥石结构的形成过程中，形成水泥浆凝聚结构的阶段起着主要的作用。

如果吸附剂粒子中的分子、原子和离子互相结合的能量不大，则吸附力就可能使得粒子离解，也就是说能够破坏这些力。因此，如果粒子在周围的液体中具有某种溶解度，那末，脱离粒子的离子的位置，将被相应的反离子和水的偶极子所占据。脱开的离子，如与粒子同号，便被排斥于总体以外而跑至溶液中；在溶液内，这些离子将穿上由其所吸附的水分子构成的“外衣”。在粒子周围形成的溶剂化壳是由吸附层和扩散层组成。使吸附水形成的电分子力，在水分子向粒子表面吸引的时候，对水分子产生很大的压力。紧靠粒子表面的第一层水分子将受到大于10000大气压的压力。因此，处于这种压力下的吸附水，就其实质来讲，不同于一般的液态水，而按其物理力学性质来讲倒与固体相近。

吸附水不仅把粒子“可见的”表面包裹起来，而且还主要地沿着接触地方和尚未完全展开的细裂缝，浸入表面层的深处。不同的研究者曾求出吸附水的密度在1.2—2之间，并且它跟厚度一样，取决于粒子的矿物成分、大小和形状，同时也取决于吸附水的成分（溶在水中的物质浓度）和外界条件（压力和温度）。吸附水具有很大的粘性、弹性和抗切强度，并且还能承受拉力。

扩散层水的主要特征，是它在分子力作用下具有从一个粒子转移到另一个粒子的能力，而与重力影响无关。扩散层水是从较厚的水壳朝较薄的水壳方向移动，直到分子受到各粒子的吸力相同时为止。

在距粒子表面一定距离之处，当电分子吸力等于引起离子作热运动的力时，会产生两种浓度的平衡状态。这个距离决定着扩散层的厚度，而溶剂化层包裹固体粒子表面所需要的水量，相当于分散系统的最大含水量。

由于上述现象，当溶剂化的高分散粒子互相作用时，便产生一个连系的系统(связная система)——所有粒子通过液态分散介质的薄层而聚合起来。这种系统称为凝聚系统，它具有一系列的物理力学特性。

水泥浆凝聚结构的形成过程，在水泥拌水以后立即开始，并且将延续一定的时间，在这一时间范围内，水泥浆(弹—塑—粘性系统)便准备向固态的晶体过渡。形成水泥浆凝聚结构所需的水量，取决于水泥的吸附能力，并与其矿物组成、细度、掺于其

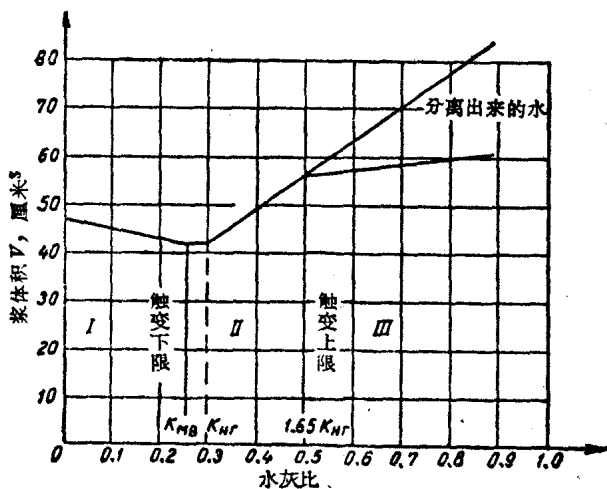


图 1 水泥—水系统的体积随着 $\frac{B}{U}$ 值的变化关系
 I—松散区；II—可逆触变的连系区；III—沉降区

中的外加剂种类和数量有关。凝聚结构的密实度取决于制备与密实水泥浆的工艺特性及剩余之 $\frac{B}{U}$ 值。为形成凝聚结构所必需的最低水量，相当于水泥的最大容水量 $K_{M.B}$ ， $K_{M.B}$ 可用实验方法根据不同 B/U 时的水泥—水系统的体积变化确定(图1)。

$K_{M.B}$ 值可以通过标准稠度的水泥浆的 $\frac{B}{U}—K_{H.T}$ 按下面的经验关系式表示：

$$K_{M.B} = 0.876 K_{H.T}. \quad (1)$$

对这种关系可以这样解释：对于 $K_{M.B}$ 和 $K_{H.T}$ 两种情况（在第一种情况中，振动密实持续到小团粘合时为止），水泥粒子的空间排列都是一样的；但是在 $K_{M.B}$ 的情况下，在水泥的溶剂化的水泥粒子之间的孔隙填充着空气，而在 $K_{H.T}$ 的情况下，孔隙中则含有水。

水泥浆保留一定体积的水的能力，取决于粒子间相互作用力的大小。粒子排得愈紧，其结构的空网就愈小，保留住的水分也就愈多。如果把粒子相互拨开，使其不再能相互作用，则结构网将被破坏，水泥浆便把水分离析出来。分开的粒子，在处于悬浮状态过程中，又逐渐地下沉，于是在沉淀物上面形成一个水层；而当水泥浆中原有的水量超过某一定数量愈多时，这个水层也就愈厚。按绝对值来说，对于最大容水量高的水泥，水泥浆的保水能力亦高。

表示水泥保水能力（在其静止状态中）的最大 $\frac{B}{U}$ ，对于不同品种的水泥可用下式表示：

$$K_H = 1.65 K_{H.T}. \quad (2)$$

在机械作用下，例如在离心、振动、真空处理等作用下，水泥浆的保水能力将显著地降低。在水泥浆凝聚结构的形成过程中，由于水的重新分布和被压出，伴随着水泥—水系统的压缩(收缩)。

水泥—水系统的压缩会导致其体积的收缩变化，而这种压缩既是结构形成早期阶段的吸附过程，也是硬化期的结晶过程所造成的。

根据各种不同的实验资料，水泥—水系统的收缩机理可用下列的物理化学过程来解释：

1) 粒子达到完全湿化，从其表面排出吸附空气；
2) 由于被浸湿的粒子的表面及内部孔隙吸附水分，此时，在薄膜中的水的定向分子将排列得更加紧密；

3) 水泥粒子和新生成的含水分子结晶体之密度发生变化。

迄今为止，水泥—水系统体积的收缩变化，是用水泥和水的绝对体积之和表示的：

$$V_r = \frac{U}{\gamma} + B. \quad (3)$$

水泥—水系统体积的这种简单表示法，不能反映出收缩作用对水泥浆结构形成的影响。

因此，我们可根据分析方法，把水泥浆的收缩体积表示为下面的形式：

$$V_r = K_B \left[\frac{U}{\gamma} + \frac{V_r}{\delta_{ad}} + \frac{V_{ad}}{\delta_c} + V_a \right], \quad (4)$$

式中 $K_B = 1.02$ ——考虑到水泥浆中含有空气的系数；

U ——水泥用量，公斤；

γ ——水泥比重；

$\frac{V_r}{\delta_{ad}}$ ——在水泥粒子内部孔隙中吸附的湿存水的体积；

$\frac{V_{ad}}{\delta_c}$ ——溶剂化壳内的水的体积；

V_a ——保留在结构网格内的水的体积；

δ_{ad} 和 δ_c ——分别为：吸附层内水的密度，等于 2；和溶剂化层内水的平均密度，等于 1.5；若水泥浆中掺入塑化剂时 (CCB)，则 δ_c 将减小。

在公式 (4) 中，把 U 搬出括号，并代入 $\frac{V_{ad}}{U} = 0.876 K_{h.r.}$ ，
 $\frac{V_a}{U} = K_{h.r.} (x - 0.876)$ ，其中 $x = \frac{B/U}{K_{h.r.}}$ ，另外再采用下面的

* 这里的 B/U ——水泥浆凝聚自密实时 (初凝) 的剩余水灰比。

符号

$$\frac{1}{\frac{1}{\gamma} + \frac{V_r}{2U}} = \gamma_n^*, \quad (5)$$

則得到最后形式

$$V_r = 1.02 \left\{ \frac{1}{\gamma_n} + \frac{K_{n,r}}{\delta_c} [0.876 + \delta_c (x - 0.876)] \right\}. \quad (6)$$

γ_n 代表水泥的視比重。根据上式(5) 及对不同品种水泥的实驗資料得出,

$$\text{当 } K_{n,r} = 0.24 \quad \gamma = 3.2 \quad \frac{V_r}{U} = 0.1 \quad \gamma_n = 2.76;$$

$$\text{当 } K_{n,r} = 0.25 \quad \gamma = 3.15 \quad \frac{V_r}{U} = 0.11 \quad \gamma_n = 2.69;$$

$$\text{当 } K_{n,r} = 0.27 \quad \gamma = 3.1 \quad \frac{V_r}{U} = 0.12 \quad \gamma_n = 2.62;$$

$$\text{当 } K_{n,r} = 0.3 \quad \gamma = 2.95 \quad \frac{V_r}{U} = 0.133 \quad \gamma_n = 2.48.$$

在分析方程式(6)时不难看出, 水泥—水系統的收縮, 是由于在水泥粒子与水結合的过程中固相和液态介质的密度发生变化而引起的。

如果假定, 水泥—水系統受有无限大的正向力的压縮作用, 使得全部結合水都可能被挤出, 那么在这种情况下, 方程式(6)又变回原来的形式(3)。因此, 在其他条件相同时, 两个公式应该給出相同的結果。

P. 菲列[11]及其他研究者曾确定, 水泥石中的水泥体积, 在龄期为28天时, 跟水泥的原始绝对体积比起来, 約增长至1.55倍, 即 $U_x = 1.55U_{a0}$ 。利用方程式(6)可以表明, 水泥体积这种增长的原因, 乃是在凝胶状壳的結晶过程中, 在水泥粒子的周围形成一薄层, 从而使其密度发生变化。

假定方程式(6)中 $x = 0.876$, $K_n = 1$ 和新生物的比重或密度

* 原书为 $\frac{1}{\frac{1}{\gamma} + \frac{V_{an}}{2U_{an}}} = \gamma_n$ 恐印刷有誤。——譯者