

耐热混凝土性能研究

Б. Д. 涅克拉索夫主編

徐俊培譯

中国工业出版社

目 录

波特兰水泥耐热砂浆和耐热混凝土中发生的物理化学

过程Ф.И.密里尼科夫(1)

波特兰水泥耐热砂浆的性质Ф.И.密里尼科夫(32)

水玻璃砂浆与波特兰水泥砂浆的某些性质的比较

研究Ф.И.密里尼科夫(63)

高温对波特兰水泥中各个水化矿物的影响... В.В.庫尔多諾娃(70)

加热对各种矿物組成不同的水泥强度的

影响.....В.В.庫尔多諾娃(123)

波特兰水泥中的游离氧化鈣在高温下固相状态时为銘鉄矿

所結合的程度的确定.....Г.Д.薩尔曼諾夫(138)

水玻璃耐热混凝土的显微研究及差热曲綫的

研究З.М.拉琳諾娃、А.П.塔拉索娃(157)

掺有磨細菱鎂矿及銘鉄矿的波特兰水泥耐热混凝土粘合剂

的显微研究Г.Д.薩尔曼諾夫、З.М.拉琳諾娃(175)

波特兰水泥耐热砂浆和耐热混凝土中 发生的物理化学过程

科学技术碩士 Ф.И.密里尼可夫

用波特兰水泥或高鋁水泥作为胶結物质和用粘土熟料作为集料所制成的混凝土，尽管它們在加热后，其强度較之干燥状态时損失很多，但仍得到了普遍的推广。

加热时强度降低的主要原因如下：

- a) 水泥石矿物的脱水；
- б) 由于温度变形的不同，在水泥石与集料之間发生了应力；
- в) 水泥石中的石灰在冷却之后，受到空气中的水份的作用而发生水化。

某些研究者认为，水泥石在加热时强度降低的原因中也包括硅酸二鈣的晶形轉变在內。

本文不仅探討了导致强度降低的过程，而且也探討了使其强度提高的过程。这些过程中包括固相反应，首先是石灰与氧化硅之間的反应。

为了查明用波特兰水泥制成的耐热混凝土的强度降低的原因，必須知道自加水拌和时起直至受高温作用时止在混凝土中发生的过程。

显然，为此必須知道在开始阶段及以后的各个阶段时的混凝土或砂浆的矿物組成。

因此，本文对下述問題进行了探討：

a) 依水泥的矿物組成及硬化过程为轉移的水泥水化部分的矿物組成的变动；

б) 在加热至 $100 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 时，机械結合水的排除所引起的过程；

в) 在加热超过 $100 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 时所发生的过程及由水泥石矿物脱

水所引起的过程；

в) 温度变形对耐热砂浆和耐热混凝土水泥石强度的影响，亦即水泥石的热膨胀和收缩及集料的热膨胀对水泥石强度的影响；

д) 石灰和氧化硅间的固相反应；

е) 受温度作用后石灰的再水化的影响。

1. 水泥石的矿物组成

粘土熟料水泥砂浆的最终产物的组成决定于水泥胶结物质和集料的矿物组成。

大家都知道，波特兰水泥熟料由下列矿物组成：硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等。

根据水泥科学研究院的资料，苏联波特兰水泥的矿物组成如下(表1)。

表1 波特兰水泥的矿物组成

水泥 编号	水泥特性	含量, %					
		C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	MgO 及其他
1	貝里特最少, 阿里特最多	14.48	59.8	12.53	8.91	2.38	1.9
2	阿里特最少, 貝里特最多	35.01	40.5	13.38	8.6	0.32	2.19
3	通常使用的	23.09	47.87	10.03	13.74	0.93	3.64

由表1可见，通常所用的水泥中的阿里特和貝里特的含量，分别约为前两种水泥中该矿物含量的平均值。

无疑地，对于耐热混凝土和耐热砂浆说来，与熟料矿物的水化和水解过程*有关的硬化过程，直到使用时止，并未结束。水泥水化的程度可以用直接的方法或间接的方法进行测定。我们这里不仅必须确定水化程度，而且需要确定依其初始矿物组成为轉移

* 以后凡水化和水解的过程一概统称为水化。——原作者注

的水泥的水化部分与未水化部分的矿物組成。为此我們采用分析的方法計算水化的程度。这个方法可以計算水泥顆粒的結構和各个熟料矿物的水化程度和深度。Ю.М. 布特〔1〕曾对这些矿物的水化程度和深度进行过詳細的研究。这些研究結果见图 1。各个水泥顆粒的水化机理如下。

大家都知道，水泥熟料中的 C_4AF 和 C_3A 是一种玻璃状物质，它們密实地包圍着阿里特和貝里特的晶体。水泥顆粒和水后经过 3 天，这些矿物的水化深度就几乎达到相当于硬化 28 天时的水化深度(见图 1)。因此，在这一深度範圍內的阿里特和貝里特晶体为水化物质所包圍，水化所需的水份得以进入，从而阿里特和貝里特的水化程度有很大的增长。

图 2 中为和水后水泥顆粒結構的情况。

按照这种結構，和水后的水泥顆粒可以分成五个区域，它們彼此之間在水化程度上以及水化部分和未水化部分的組成上均有很大的区别。知道了水泥顆粒的大小，就可以計算其在每一区域中的相对含量(图 2 及表 2)。此时所得的某些水泥顆粒的各部分的量与篩分水水泥所得的結果相符。由水泥顆粒的結構可以推出，在 2、3 及 4 区域内将要經過矿物的补加水化过程。在 2、3 及 4 区域内，小于 2 微米

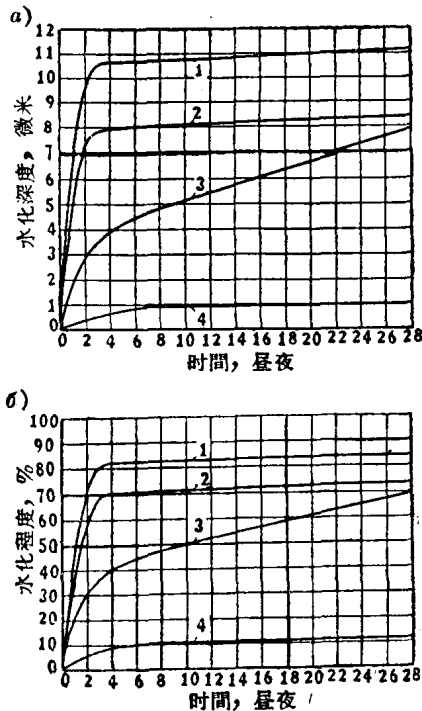


图 1 熟料矿物的水化深度(a)和水化程度(b)

(据 Ю.М. 布特的数据)

1— $3CaO \cdot Al_2O_3$; 2— $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$;
3— $3CaO \cdot SiO_2$; 4— $2CaO \cdot SiO_2$

的貝里特晶体全部水化，而大于 2 微米的則沿徑向的水化深度达 1 微米。在 3 及 4 区域內，小于 15.8 微米的阿里特晶体也全部水化，而大于 15.8 微米的則部分水化深度达 7.9 微米。根据这一資料可以推想，处在 2、3、4 区域內的貝里特晶体一定是小于 30~55 微米，所以其水化程度将比这类矿物的各个顆粒要高。这里沒有提出有关用計算方法确定水化程度所必須的晶体大小的数据，而是采用了 Ю.М. 布特所提出的各个矿物的数据(見图 1)，根据这些数据和水泥的顆粒結構(見图 2)，在表 2 中列出了水泥顆粒的各个区域各个矿物的水化程度的計算結果。

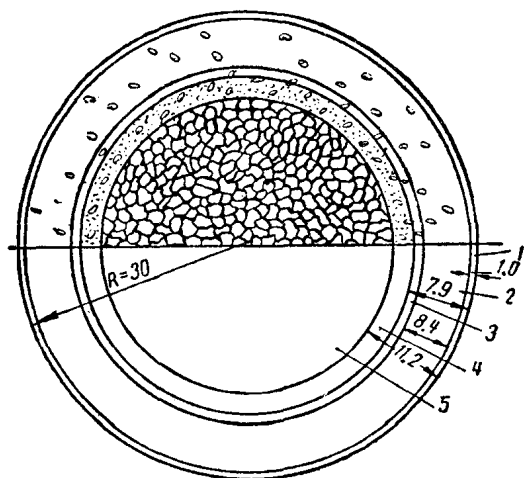


图 2 28天期龄时水泥的水化顆粒图解

1—所有矿物完全水化的区域；2— C_3S 、 C_3A 、 C_4AF 完全水化及 C_2S 部分水化的区域；3— C_3A 、 C_4AF 完全水化及 C_2S 和 C_3S 部分水化的区域；4— C_3A 完全水化及其他各个矿物部分水化的区域。顆粒大小和半徑用微米表示

知道了各区域各个矿物的水化程度，并进一步知道了整个水泥的水化程度，就可以很容易地确定任一矿物組成的水泥的水化程度。表 3 中所列为三种不同矿物組成的水泥的水化程度，計算是根据表 2 的数据进行的。

表 2 28天期龄的水泥颗粒各个区域及整个水泥颗粒各个矿物的水化程度

区 域	各个区域中的 水泥相对含量	矿 物 的 含 量, %												
		未 水 化 的 矿 物						水 化 的 矿 物						
		C ₂ S	C ₃ S	C ₄ AF	C ₃ A	CaSO ₄	MgO	总 和	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ AF	C ₃ A	CaSO ₄	总和
1	12.27	—	—	—	—	—	0.45	0.45	2.83	5.88	1.69	1.31	0.11	11.82
2	56.98	11.65	—	—	—	—	2.07	13.72	1.50	27.25	7.84	6.13	0.54	43.26
3	2.58	0.53	0.39	—	—	—	0.09	1.01	0.07	0.85	0.35	0.28	0.02	1.57
4	11.01	2.25	1.65	0.17	—	—	0.40	4.47	0.29	3.62	1.35	1.18	0.10	6.54
5	17.16	3.96	8.2	2.36	1.85	0.16	0.63	17.16	—	—	—	—	—	—
	100	18.39	10.24	2.53	1.85	0.16	3.64	36.81	4.69	37.6	11.23	8.9	0.77	63.19
	占水泥中各种 矿物含量的%	79.7	21.5	18.5	16	17.2	100	—	20.3	78.5	81.5	84.0	82.8	—

由上述資料可見，有关水化程度的数据与 Ю.М.布特〔1〕所得的数据頗为一致。我們測定的 3 号水泥（見表 3）的水化程度为 63.19%，而对矿物組成与此类似的水泥，Ю.М.布特用測定結合水的方法測得的水化程度为 54%，用測定游离石灰的方法所得的水化程度为 69%。

表 3 水泥矿物組成对水化程度的影响

矿 物	在下列编号水泥中 的矿物总含量，%			和水后水泥中的矿物含量					
				水化的矿物№			未水化的矿物№		
1	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C_2S	14.48	35.01	23.09	2.94	7.12	4.69	11.54	27.89	18.4
C_3S	59.8	40.5	47.87	46.9	31.8	37.6	12.9	8.7	10.27
C_4AF	8.91	8.6	13.74	7.25	7.0	11.23	1.66	1.6	2.51
C_3A	12.53	13.38	10.73	10.5	11.25	8.9	2.03	2.13	1.83
$CaSO_4$	2.38	0.32	0.93	1.97	0.26	0.77	0.41	0.06	0.16
MgO等	1.9	2.19	3.64	—	—	—	1.9	2.19	3.64
合 計	100	100	100	69.56	57.43	63.19	30.44	42.57	36.81

由表 3 的数据也可以确定水泥石的組成。如所周知，在硬化过程中，一份重量的每种矿物水化所得的产物如下：

C_3S —生成 0.245 份重量氢氧化鈣和 0.755 份水化硅酸二鈣；
 C_2S —生成一份硅酸二鈣水化物； C_3A —生成一份重量鋁酸三鈣水化物（但如有石膏存在，則部分水化鋁酸鈣即与石膏作用生成硫酸鋁鈣；一份重量石膏与 0.66 份 C_3A 結合，生成 1.66 份重量的硫酸鋁鈣）；由一份重量的 C_4AF 和 0.23 份的石灰一起，即生成 0.56 份的 C_3A 的水化物和 0.67 份的 C_3F 的水化物。

按照这些过程及水泥的矿物組成，水泥石的組成可以用表 4 中所列的数据表示。由这些数据可知，水泥水化部分的組成依水泥的矿物組成仅有較小的变化。如貝里特和阿里特的含量变动很大时（表 1），硅酸二鈣凝胶体的数量仅由 31% 变至 38%，石灰則由 6% 变至 10%。因此，水泥石的主要成份为：未水化的矿物

(30%~43%)及硅酸二鈣的凝膠體(31%至38%)。

在粘土熟料水泥砂漿中使用粘土熟料作為集料，其主要結晶物質為鋁方柱石。粘土熟料中鋁方柱石的數量決定於粘土中氧化鋁的含量，在粘土煅燒時氧化鋁幾乎全部變成鋁方柱石。

根據Д.И. 普羅波那林諾夫〔2〕的資料，沒有結合成鋁方柱石的氧化鋁和氧化硅不呈結晶狀態，而與其他氧化物（CaO、MgO、礆等）一起形成玻璃相。

在主要的耐火粘土中，氧化鋁的含量為30%至45%，與此相應的粘土熟料中的鋁方柱石的含量為40%至60%。未進入鋁方柱石、處於無定形狀態的氧化硅的含量為32%至54%。

2.100~110°C的加熱過程對混凝土和砂漿強度的影響

如上所述，水泥石硬化過程進行的時間很長，直到砂漿加熱時，這一過程肯定還沒有結束。當砂漿加熱至100~110°C時，如其中含有水份，則在水泥石中即發生獨特的自蒸現象（Самозапарка），因此加速了硬化過程，同時強度即得到增長。當機械結合水完全逸出以後，硬化過程即停止，因此強度的增長也就停止。

這一階段水泥石強度的增長不單是與硬化過程的強化有關。如所周知，石狀材料中機械結合水的逸出也同時提高了強度。在材料中的水份，由於其濕潤性，能滲入材料的所有微裂縫中形成一層吸附層，這一吸附層對物料起着分裂作用〔3〕。這一分裂作用會削弱材料的強度，而當材料加熱時，由於發生了應力，該作用尤為加劇，因而出現了新的微裂縫。

在微裂縫中能形成真空，這就促進水份滲入裂縫中，從而加劇了分裂作用。

機械結合水的排除不僅提高了水泥石的強度，而且也提高了集料的強度。因此，砂漿和混凝土依其硬化的條件不同（環境的濕度和溫度），在100~110°C干燥以後，其強度能提高150~180%。

3. 超过 100°C 的加热过程及与水泥石矿物脱水有关的 过程对混凝土和砂浆强度的影响

水泥石矿物的脱水过程，被认为是波特兰水泥耐热混凝土加热时强度降低的主要原因之一。

Г.Б.庫科列夫〔4〕引用了B.索巴列夫所拟訂的晶体中水份类型的結晶化学分类法。根据这一分类法，含水矿物按照与水結合的性态可分为三类：1类——矿物中含有以离子状态存在的結構水；2类——矿物中含有以分子状态存在的水；3类——矿物中含有以吸附水存在的，也是以分子状态存在的水。

如Г.Б.庫科列夫所指出的，含有結構水的硅酸盐的脱水不同于結晶水化物的脱水，首先，在較高温度时前者具有吸热停頓；其次，結晶水的逸出要較化合水的逸出为容易。在大多数情况下，在水份逸出的同时，結晶格子即告破坏。而沸石水、面間水和吸附水的逸出，則并不破坏結晶格子。因为面間水和吸附水主要在 110°C 以前逸出。属于結晶水之一的沸石水，則在很大的温度范围内逸出。

各个研究者所确定的水泥石中的矿物水化物的吸热停頓列于表5。

由表5的資料可見，氫氧化鈣、鋁酸三鈣和硫鋁酸鈣的水化物均具有吸热停頓，因此在其脫水的同时，发生了結晶格子的破坏。但是，在加热时这些矿物的結晶格子的破坏，反映在水泥石的强度上究竟是什么样的程度，則还没有人研究过，不过大家都知道，在这些矿物的脱水温度时，并未发现混凝土强度的急剧降低。如表4的資料所示，波特兰水泥石中这些矿物的总含量不超过25%。当其加热时，这些矿物对水泥石的强度没有什么重要的意义，因为水泥石的强度，主要决定于硅酸二鈣的凝胶体。

鉄酸鈣和硅酸二鈣的水化物，在脫水时对結晶格子不起破坏作用。

因为硅酸二鈣的水化物是波特兰水泥石的基础，因此有必要

表 4 水泥矿物组成对水泥石组成的影响

水	含 量, % (按无水物质计)																
	矿 物 质							水 化 物									
	无 水 物 质							其 中 包 括									
	其 中 包 括							其 中 包 括									
	总	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ AF	C ₃ A	CaSO ₄	MgO及其他	总	CaO·aq	C ₂ S·aq		C ₃ A·aq		3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·aq			
和							和		总	其中包括	总	其中包括	C ₃ F·aq				
№										C ₂ S	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ S	G ₃ A	G ₄ AF		
1	30.44	11.54	12.9	1.66	2.03	0.41	1.90	69.56	9.84	38.34	2.94	35.4	12.66	9.2	4.06	4.85	3.27
2	42.57	27.89	8.7	1.6	2.13	0.06	2.19	57.43	6.19	31.13	7.12	24.01	14.36	11.08	3.92	4.68	0.43
3	36.81	18.4	10.27	2.51	1.83	0.16	3.64	63.19	6.61	33.09	4.69	28.4	13.9	8.39	6.3	7.54	1.28

表 5 加热时水泥水化矿物的吸热停顿

水 化 矿 物	停 顿 温 度 范 围	研 究 者
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	900°C以前的熔融曲线	金德, 奥科罗科夫, 高其克里[5]
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	800°C以前的熔融曲线	茹拉夫辽夫[6]
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	1000°C以前的熔融曲线, 85%重量的水份在350~800°C的范围内逸出	薩尔曼諾夫[7]
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	与氢氧化钙脱水有关的第一个停顿500~540°C, 第二个停顿(研究者尚未确定其原因)	金德等[5]
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	石灰脱水出现的第一个停顿480~540°C, 第二个停顿800°C左右——原因不明	茹拉夫辽夫等[6]
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{aq}$	相应于脱水的第一个停顿280~330°C; 第二个停顿—540~570°C— $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 分解成 $5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 CaO	金德等[5]
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{aq}$	第一个停顿—241~313°C—脱水, 第二个停顿—473~521°C—分解成 $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 CaO	茹拉夫辽夫[6]
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	560~590°C	L.卡洛西克等[8]
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{aq}$	与 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{aq}$ 相类似	金德等[5]
$2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{aq}$	510~530°C时略有停顿的熔融曲线, 此时发现分离出少量однечетвёрт石灰	金德等[5]
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{aq}$	110~160°C—发生很大的停顿, 在270~300°C时有较小的停顿	L.卡洛西克等[8]

对其脱水过程作较详细的讨论。

硅酸二钙的水化物, 已为许多研究者所证实, 它是一种微晶(半晶)物质, 但其性态却与凝胶体一样。大家都知道, 凝胶体在脱水的同时就变得致密起来, 因此强度也就提高。而当致密至一定程度时, 即发生凝胶体结构的破坏——形成裂缝或其他缺陷, 从而凝胶体的强度即显著降低。

当凝胶体的脱水进行得很慢时, 特别是当其厚度很小时, 则结构的破坏即可避免。

所以, 硅酸二钙凝胶体的脱水虽然不会破坏结晶格子, 但却能引起凝胶体物质的开裂而削弱水泥石的强度。

Г.Д. 薩爾曼諾夫〔7〕研究了加熱對水化貝里特強度的影響。他得出，水化貝里特的試件在加熱至 400°C 以後，其強度較之未經加熱的試件強度增長280%。由 400°C 加熱至 600°C ，其強度大約保持不變。當繼續提高溫度時，強度即開始降低，當加熱至 1000°C 時，其強度為檢查試件強度的200%。

Г.Д. 薩爾曼諾夫研究了水化程度很小的，凝膠體含量也很少的試件（其期齡為35晝夜）。如所周知，貝里特的水化速度是很小的，如果根據結合水量來判定（根據 Г.Д. 薩爾曼諾夫對該批試件21天期齡時進行的測定結果，結合水量為1.35%），其水化程度在該期齡時約為9~10%，而當35晝夜期齡時，最大的水化程度為12~15%。所以，Г.Д. 薩爾曼諾夫所研究的試件，實際上就是含有12~15%的水化貝里特的貝里特熟料礦物粉（未水化的）。由於未水化部分和水化部分的比例如此之大，因此凝膠體脫水時，包圍着未水化的貝里特顆粒的薄層結構即使發生破壞作用，對試件的強度也並無多大影響。這首先也就說明了，在 Г.Д. 薩爾曼諾夫的研究中，為什麼發現在加熱以後強度有這樣大的提高（達280%），其次也說明了，為什麼即使當加熱至 1000°C 時，其強度與檢查試件相比，也並無降低。

圖3中所示的К.Д. 涅克拉索夫〔9〕及 И.Е. 古爾維契〔10，11〕所得的研究結果，証實了上述的假設。И.Е. 古爾維契研究了加熱溫度對高強度水泥的水泥石的強度的影響。很顯然，高強度波特蘭水泥含有大量的微細顆粒及大量的阿里特，因此，在水泥石中即含有許多硅酸二鈣的凝膠體。

К.Д. 涅克拉索夫對一般的波特蘭水泥進行了研究，水泥石中的硅酸二鈣凝膠體較 И.Е. 古爾維契的試件中為少。最後，Г.Д. 薩爾曼諾夫對純貝里特進行了研究，由於貝里特的水化速度很小，因此硅酸二鈣凝膠體的含量較之 К.Д. 涅克拉索夫的試件要少得多。

圖3中的研究結果完全証實了上述推測，在 И.Е. 古爾維契所研究的水泥石中，硅酸二鈣的凝膠體較其他研究者的試件為

多，因此在其脫水时就发生比較强烈的結構破坏作用，因而当凝胶体变得致密时强度的提高較小，而当繼續加热时，强度即有很大的降低。

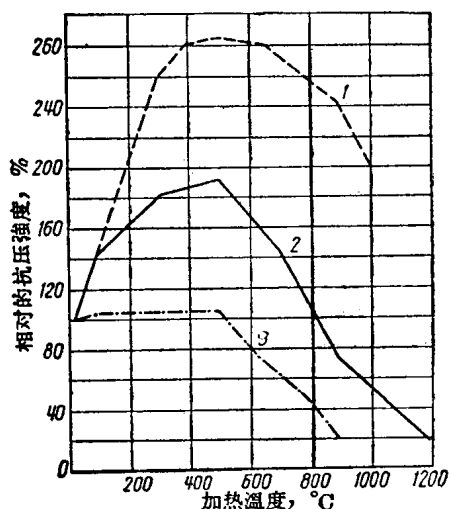


图3 温度对水泥石强度的影响

1—35天期龄的貝里特水泥石(根据Г.Д.薩尔曼諾夫的資料); 2—28天期龄的一般波特兰水泥的水泥石(根据К.Д.涅克拉索夫的資料); 3—28天期龄时的高强度波特兰水泥的水泥石(根据И.Е.古尔維契的資料)

在Г.Д.薩尔曼諾夫所研究的試件中，硅酸二鈣的凝胶体很少，因此，水份的逸出很容易，因为在致密的同时并不发生显著的結構破坏，这就使得它在加热最初阶段强度有較大的提高，而在后来强度又降低較小。

此时，水泥石中不含有其他矿物的水化物，而后者在脫水时也会对水泥石的强度发生影响。由于所有这些因素的关系，貝里特石与一般的水泥石一样，它不仅在加热至500°C以前强度有提高，而在更

高的温度时，强度仍有提高。

此时强度降低的程度与在其他情况下不同。

К.Д.涅克拉索夫所研究的水泥中的硅酸二鈣凝胶体的数量介于И.Е.古尔維契及Г.Д.薩尔曼諾夫所研究的試件之間。研究結果也具有中間值。

总结上述水泥石矿物脫水的影响，可归纳如下：

1. 氢氧化鈣、鋁酸三鈣水化物和硫鋁酸三鈣水化物脫水时，发生結晶格子的破坏，从而降低水泥石的强度。所以，如果在水泥石中仅含有少量上述物质，則它們对水泥石强度并没有什么很大的影响。

2. 硅酸二鈣水化物的脫水在很大的溫度範圍內（由 100°C 至 1000°C ）均勻地進行。當接近 500°C 時，在脫水的同時發生了凝膠體的致密作用，從而強度有很大的提高。當繼續增高溫度時（超過 500°C ），凝膠體結構發生破壞，故引起強度的降低。

水泥石的強度主要決定於硅酸二鈣的水化物。任一礦物組成的波特蘭水泥石中的主要物質也就是硅酸二鈣凝膠體，因此，加熱時水泥石強度的降低都是由於這類礦物的強度的損失所引起的。

3. 在水泥石加熱時，由於組成水泥石的礦物的脫水所引起的水泥石強度的降低，與水泥的種類（阿里特水泥或貝里特水泥）無關，而是決定於硅酸二鈣凝膠體的數量，而後者首先主要決定於水泥的水化程度的大小。水泥石中硅酸二鈣凝膠體愈多，瘠化物質愈少，則在加熱的前一階段（ 500°C 以前）強度的提高愈小，而當後來提高溫度時，強度的降低愈大。

4. 普通波特蘭水泥的標準期齡（28天）的水泥石，當加熱至 500°C 左右時，強度即提高；當繼續加熱時，強度即降低；當 800°C 時，其強度則大致與未受溫度作用的水泥石的強度相等；當加熱超過 800°C 時，其強度即降至最初強度的 20%。

4. 溫度變形對混凝土和砂漿強度的影響

粘土熟料水泥砂漿（混凝土）是一種各類礦物的聚集體，其中每一種礦物各有其自己的溫度膨脹係數或溫度變形。當砂漿受熱時，這些礦物的每一個顆粒均依其各自的線性尺寸，及溫度膨脹係數而有不同的絕對變形。因此在砂漿中的各礦物之間，在其接觸表面上產生了應力，應力的大小決定於相對溫度變形及顆粒大小的差別。各個顆粒間的接觸面積愈大，則單位應力愈小。

為了弄清楚這些應力的質的影響，首先必須分別對粘土熟料集料及水泥石各自發生的應力進行分析，然後再分析水泥石和集料之間的應力。

如前所述，粘土熟料集料主要由結晶鋁方柱石和包括少量熔