

# 膠凝物質工藝學原理

下 冊

B. H. 容 克 著

重工業部建築材料工業管理局編譯科 譯

重 工 業 出 版 社

# 膠凝物質工藝學原理

重工業部建築材料工業管理局編譯科 譯

重工業出版社

【膠凝物質工藝學原理】一書，是蘇聯最著名的工學博士之一B. H. 容克敘漫的一部巨著。作者在這本書中總結了他在實際工作中、在莫斯科門捷列夫化工學院以及在水泥科學研究院長時期的工作經驗和研究心得。作者完全立足於化學與化工的見地對所有的無機膠凝建築材料（尤其着重於水泥）的理論、性能、製造及應用等都作了極為詳盡與深入地論述。本書對無機膠凝建築材料的工業生產、理論研究及應用等具有指導性。

本書係根據蘇聯**建築工業出版社**（Промстройиздат）1951年的版本譯出。

本書係重工業部**建築材料工業管理局編譯科**集體譯校。

В. Н. ЮНГ  
ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ  
Промстройиздат (Москва 1951)

\* \* \*

**膠凝物質工藝學原理**

（下 冊）

重工業部建築材料工業管理局編譯科 譯  
重工業出版社（北京市燈市口甲45號）出版  
北京市書刊出版業營業許可證出字第〇一五號

\* \* \*

重工業出版社印刷廠印

一九五六年四月第一版

一九五六年四月北京第一次印刷（1—2,541）

$787 \times 1092 \cdot \frac{1}{25} \cdot 280,000 \text{字} \cdot 13 \frac{17}{25} \text{印張} \cdot \text{定價 (10)} 2.10 \text{元}$

書號 0370

\* \* \*

發行者 新華書店

## 下 冊 目 錄

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第七章 水泥熟料</b> .....          | 6   |
| 概論與平衡圖.....                    | 6   |
| 三種氧化物熔融體中熟料化合物的結晶作用.....       | 12  |
| 水泥熟料在三成分系和四成分系中的位置.....        | 18  |
| <b>第八章 水泥熟料的形成過程</b> .....     | 24  |
| 熟料的燒結和水泥窖中的溫度.....             | 24  |
| 迴轉窯中的煨燒.....                   | 31  |
| 礦化劑的應用.....                    | 46  |
| 立窖中的煨燒.....                    | 53  |
| 改進立窖的途徑.....                   | 70  |
| <b>第九章 迴轉窯的熱工特性</b> .....      | 75  |
| <b>第十章 熟料對襯料的作用</b> .....      | 94  |
| 溫度的作用.....                     | 94  |
| 化學作用和物理作用.....                 | 96  |
| 形成窖皮的條件.....                   | 97  |
| <b>第十一章 生產水泥時副產品的利用</b> .....  | 109 |
| <b>第十二章 熟料成分的計算和顯微結構</b> ..... | 113 |
| 總 論.....                       | 113 |
| B. A. 金德敦教授的計算方法.....          | 118 |
| 熟料的顯微結構.....                   | 122 |
| <b>第十三章 水泥的凝結和硬化</b> .....     | 138 |
| 水泥水化和水解的產物.....                | 138 |
| 凝結速度.....                      | 150 |
| 水泥凝結時的結構.....                  | 161 |
| 蓄水性能.....                      | 165 |
| <b>第十四章 硬化水泥的結構</b> .....      | 171 |
| 微混凝土.....                      | 171 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 硬化當中的體積變化·····                    | 177 |
| 硬化熱·····                          | 184 |
| <b>第十五章 水泥砂漿的損壞</b> ·····         | 189 |
| 砂漿在淡水和含硫酸鹽水中損壞的原因·····            | 189 |
| 鎂的侵蝕作用和海中構築物用的水泥·····             | 195 |
| 火山灰質矽酸鹽水泥·····                    | 204 |
| <b>第十六章 高鋁水泥</b> ·····            | 208 |
| 概 述·····                          | 208 |
| 高鋁水泥的成分和硬化·····                   | 212 |
| <b>第十七章 石膏在硬化過程中的作用</b> ·····     | 217 |
| 複 鹽·····                          | 217 |
| 石膏在各種膠凝材料中的作用·····                | 220 |
| <b>第十八章 高爐礦渣和礦渣矽酸鹽水泥</b> ·····    | 224 |
| 高爐礦渣的名稱和分類·····                   | 224 |
| 高爐礦渣的成分和性質·····                   | 232 |
| 礦渣矽酸鹽水泥的凝結和硬化·····                | 237 |
| <b>第十九章 石灰火山灰質水泥和石灰礦渣水泥</b> ····· | 242 |
| 石灰火山灰質水泥·····                     | 244 |
| 石灰礦渣水泥·····                       | 256 |
| 新品種礦渣膠凝物質·····                    | 257 |
| 石灰火山灰質水泥的硬化理論·····                | 260 |
| <b>第二十章 水工建築用的水泥</b> ·····        | 274 |
| <b>第二十一章 由某些岩石製造的水泥</b> ·····     | 293 |
| <b>第二十二章 提高新技術的途徑</b> ·····       | 303 |
| 俄中名詞對照表·····                      | 321 |
| 俄中人名對照表·····                      | 339 |

技術校訂——

工學博士 К. Д. 溫克拉索夫

## 作者的話

在建築膠凝材料工業前擺着重大的任務，要求這個工業的工作者要不斷地提高技術知識，掌握水泥及其他膠凝材料生產的理論基礎。

作者力求在這本著作中，總結自己多年來在實際工作中以及後來在莫斯科門捷列夫化工學院膠凝物質教研室和專門研究院的研究工作中所積累的經驗，並將這些經驗介紹給生產操作人員和研究工作者。

因此，大多數的工藝現象和工藝過程，是以直接的實際工作和研究工作為基礎來討論的。

當然，我們專業中的實際問題和理論問題是極其多種多樣的，而在作者的經驗範圍內不能一一概括，因此在本書中很可能還有問題存在。

作者力求自己的觀點敘述得能引起讀者的批評和提出讀者本身的改正意見，同時，主要的是要使讀者能進一步去發現和研究生產中的問題。

## 第七章 水泥熟料

### 概論與平衡圖

水泥熟料是用適當成分的生料在高溫下煅燒到燒結，也就是部分熔融而得到的產品。

燒結是製造水泥熟料中最主要的過程。當物料燒結時，也就是部分熔融時，形成熟料化合物的過程就結束了。

對於一般成分的熟料來講，物料（熟料）在煅燒過程中所具有的最高溫度介於  $1450^{\circ}$  左右狹小的範圍內。

所以說，質量優良的熟料的生產條件，將決定着最後形成熟料化合物的反應過程。這些條件如下：在燒成帶內，在  $1300^{\circ} \rightarrow 1450^{\circ} \rightarrow 1300^{\circ}$  的溫度範圍內，除了有固體物質以外，還有液相。除此以外，在上述溫度範圍（只有生產力高的現代化迴轉窯才能達到這個溫度）的燒成帶的物料停留的時間很少超過 30 分鐘，所以說在有液相的條件下完成反應過程的時間是有限制的。因此，如何使物料在到達燒成帶以前，在固體狀態的反應中就能生成一系列的化合物，這是很重要的。有了這樣的準備條件之後，就能使燒成帶內的反應進行得更為完善。

因為在碳酸鈣分解結束以後，水泥生料中氧化鈣的總含量是 62—68%，所以說燒成帶以前所煅燒的物料是含有很多氧化鈣的。

當煅燒物料的溫度接近於物料開始熔融的溫度（約  $1300^{\circ}$ ）時，可以認為生料是由下列化合物所組成的：1) 矽酸二鈣，2) 鋁酸三鈣及 3) 氧化鈣、氧化鋁和氧化鐵的三成分化合物，一般稱為鋁鐵酸四鈣— $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。然而在燒結開始的時候，不是所有的氧化鐵都來得及變成鋁鐵酸四鈣，而可能有一部分會變成鐵酸二鈣（ $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）。除開這些化合物之外，還會有過剩的氧化鈣以及生料中存在的一些不可避免的夾雜物摻到熟料中。這些夾雜物裡面有一些對熟料化合物的形成是沒有很大影響的，其中如鹼、硫酸鈣和

二氧化鈦等等。另外一些夾雜物（如氧化鎂）如果其含量未超過標準所允許的數量時，甚至是有益的，因為它們會降低液相熔融的溫度；因此是一種能促進熟料礦物形成的「礦化劑」。

單獨取出三成分化合物（ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）來分析，其主要性質如下：在  $1415^\circ$  時能熔融，但不分解；慢慢冷卻下來之後，即形成一種很規則的、並且具有一定光學常數的晶體。很值得提起注意的是：鋁鐵酸四鈣和氧化鈣能形成一種共熔體，它含 56% 的石灰、17% 的氧化鋁和 27% 的氧化鐵，而熔點為  $1395^\circ$ ，也就是說比純鋁鐵酸四鈣要低。

三成分化合物也能與鋁酸鈣組成共熔體，例如與 5—3 鋁酸鈣（ $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ），其組成是石灰 47%；氧化鋁 43% 和氧化鐵 10%，熔點為  $1335^\circ$ ，比純化合物低得多。上面所研究的三成分化合物也可以和鐵酸二鈣化合成為一組熔點之間區別很小的固態溶液。這些問題對於測定所謂「鐵水泥」的性質上來講是很重要的。鐵水泥由增添了鐵礦的生料所製成，因而富有氧化鐵和缺乏氧化鋁。

值得指出：在比熔點溫度還低的溫度下，也就是在固態反應下，如果將磨細了的三成分化合物中所含的氧化物的混合物加熱，也很容易形成這種三成分化合物。門捷列夫化工學院水泥製造教研室所屬實驗室所作過的研究，完全可以證明上面所說的。這裡的  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  是由純氧化物在  $1350^\circ$  的溫度下燒結兩小時而得。製成的試驗標本經過化學分析及岩相學的研究證明：在該情形下，三成分化合物可以完全形成一種很規則的結晶體，而產物中完全沒有游離石灰。

H. A. 托洛勃夫（會同 Л. Д. 邁爾科夫及 H. A. 施什科夫）曾在  $\text{C}_4\text{AF} - \text{C}_5\text{A}_3$  成分系中作了很出色的研究。他們所發表的結果（1937）與其它的資料，例如美國科學家們的資料有很大的區別。托洛勃夫、邁爾科夫和施什科夫採用了熱化學法、結晶法和  $x$ -光分析的研究方法，並指出： $\text{C}_5\text{A}_3$  的溶解度達到很高的極限，同時固態溶液的最大濃度相當於 30 個分子百分率的  $\text{C}_5\text{A}_3$  和 70 個分子百分率的  $\text{C}_4\text{AF}$ 。托洛勃夫及其同事們所得到的資料就是在國外也不得不承認是正確的。

鋁酸鹽和  $C_4AF$  的互溶性以及形成固態溶液的性能，對於瞭解所製成熟料的工藝過程和熟料的性質具有重大的意義。充填於水泥熟料顯微磨片上  $C_3S$  和  $C_2S$  結晶微粒之間的所謂黑色玻璃相的結構和成分，只有利用由  $C_4AF$  和鋁酸鹽所組成的部分系才能對它們進行研究。

前面曾提到：由鋁鐵酸四鈣和一些 5—3 鋁酸鹽所組成的混合物，其熔融溫度為  $1335^\circ$ 。在天然原料中，除含有氧化鋁和氧化鐵之外，還含有另外一些能够大大降低液相熔融溫度的組成部分，其中有氧化鎂和鹼。因此煅燒普通水泥熟料的生料時，液相的熔融溫度一般介於不超過  $1280^\circ$ — $1300^\circ$  的範圍內。

至於熟料中，或者是熟料燒結過程中所生成的固相，在燒結開始時最主要的固體組成部分就是矽酸二鈣。而在燒成帶又生成新的矽酸鹽化合物，叫做阿利特（алит）。

雷沙節利認為這種化合物就是矽酸三鈣— $3CaO \cdot SiO_2$ 。它是這樣得出這個結論的：他在放大鏡下仔細地由水硬石灰中選擇含有新型矽酸鹽結晶的水泥顆粒，這樣，雷沙節利就得到主要由所要研究的物質組成的試樣。在經過化學分析之後，他確認這樣所選擇的「水泥」顆粒幾乎全部是由二氧化矽和氧化鈣所組成，而且 1 個當量的二氧化矽需要 2.8 到 3 個當量的氧化鈣（表 16）。因此這種重新形成的、並具有微弱雙折射現象的矽酸鹽結晶體，就是矽酸三鈣。根據顯微鏡下的研究也證明了在水泥熟料中同樣也有這種結晶體，當然這種結晶體不能從熟料中分離出來，但是在顯微磨片上根據結晶特性是可以看出來的。由此就得出下面的一個結論：無論是磨細的熟料，或者是「水泥」顆粒，其所以具有很強烈的水硬性能，正是由於有這種化合物，即所謂矽酸三鈣的存在。

從水泥顆粒（1）和水泥熟料（2）的顯微照片（圖 31）上，可以很清楚地看到矽酸三鈣結晶體的輪廓。還應注意：在這些晶體的周圍有黑色玻璃狀的物質包圍着。不論從分析資料，或者是顯微照片中都可以看到：三氧化二物在由水硬石灰所得的「水泥」顆粒中的含量比在水泥熟料中少得多。實際在顯微照片（1）上，矽酸三鈣晶體周圍

由凝固了的熔融體（主要是鋁酸鹽和鐵酸鈣）所組成的薄膜比含有很多熔劑的水泥熟料標本（2）上的薄膜要薄得多。

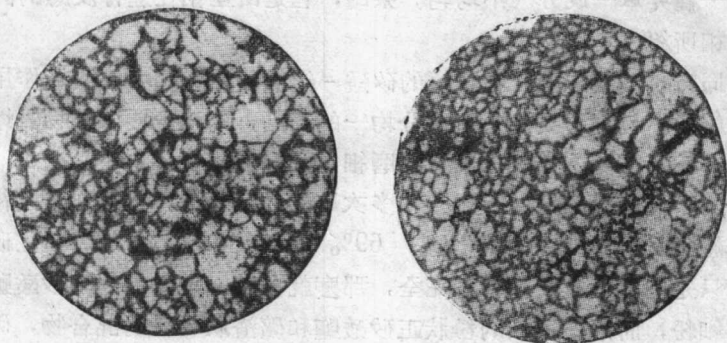


圖 31 顯微鏡下〔水泥〕顆粒和熟料的顯微磨片圖

$\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  三成分系圖。

研究二成分系圖和三成分系圖，對於水泥的生產技術是很重要的\*。

由上面所談到的情況可以看到：當煅燒石灰——矽酸鹽膠凝物質時，固體狀態下所進行的反應具有何等重大的意義。同時，水泥熟料在煅燒時也只是經過燒結，亦即僅部分熔融的產品。一些外國的研究家們認為：三成分系圖是一把了解水泥熟料煅燒時燒結階段中所有物理化學現象的鑰匙；這裡所說的燒結過程就是指熟料中不但有固體物質，而且還有液相存在的那一段從開始到終結的時間而言。這種看法是完全不正確的。

首先必須指出：**三成分溫度—濃度圖乃是根據完全熔融物中（也就是從最初原為單一成分的液體中）在極慢冷卻的條件下析出固相時的研究結果而製成的圖示說明圖。**單從這一點就可以看出慢慢冷卻單一成分（均勻）熔融物（即液體）時所發生的各種反應的物理化學條件和水泥熟料煅燒制度之間的原則性區別。在實際的生產條件下，並

\*參看蘭金著  $[\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2]$  三成分系〔列寧格勒重工業人民委員會學術調查部出版社1935年出版

不是所有的物質都能熔融，也就是說不能生成為完全均勻的熔融物，而熔融的只是煅燒物料的一部分。熟料從燒結剛剛開始到終結，都是一種非單一成分（不均勻）系的，它是由互相在進行反應的固相和液相所組成。

同時也不要忘記：在膠質的矽酸—鋁酸鹽熔融體中，擴散作用是非常慢的。例如：要想得到成分均一的產品，則至少要將該物質熔融三次，並且在各次熔融之間還要磨細，並重新混合。

為了說明仔細地進行混合和多次熔融的必要性，可以取下列組成的熔融體為例：8 % 的氧化鋁、69 % 的石灰和 23 % 的二氧化矽。如果只是全部物質反應得不完全，那麼就會有一定數量的正矽酸鹽潰裂為細粉，而形成很細的粉狀正矽酸鹽和礦渣狀物料的混合物，礦渣狀物料的氧化鋁較原來產品的氧化鋁多。經過三次或四次熔融以及重新粉碎而製成的物質，經過冷卻之後並不會潰裂而實際上也是均勻的物質。這就是說，**在矽酸鹽熔融體中擴散作用是很慢的。**順便還應當指出：上面這種熔融體的組成同不含氧化鐵的熟料的組成很近似。 $\text{CaO}$  含量對  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  二者含量之和的比（水硬率）實際上為 2.22，而  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之比（矽酸率）為 2.78。

當回頭討論關於在「水泥顆粒」中形成  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  的問題時，應該記得，根據  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$  系的資料，這種化合物（在二成分系中）只能在固態反應中由石灰與矽酸二鈣形成。在沒有液相的情況下，能夠發生這些反應的溫度為  $1400-1800^\circ$ ，也就是說比煅燒水硬石灰時的溫度要高得多。因此用這種方法煅燒水硬石灰來形成矽酸三鈣顯然是不可能的。

研究在固體狀態下加熱氧化物的化合物時所發生的反應，證明：在用化學計量法配成的相當於矽酸三鈣的混合物中，在  $1450^\circ$  的溫度下加熱一小時之後，只能發現個別矽酸三鈣的晶體；試驗試樣的主要物質是由石灰和矽酸二鈣組成的。當混合物在  $1600^\circ$  下加熱 20 分鐘之後，則試驗試樣中已有  $2/3$  是矽酸三鈣，而其餘部分則是石灰和矽酸二鈣。當溫度為  $1800^\circ$  時，則在幾分鐘內就可以形成矽酸三鈣。只有在  $1600-1800^\circ$  溫度範圍之內，矽酸三鈣的形成速度才適合於生

產的速度。

在三成分系中，矽酸三鈣作為第一相由熔融體中析出的溫度，比煅燒熟料時所需要的溫度要高得多。然後讓我們來研究三成分（ $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ）熔融物的結晶過程；這三個成分中間所取的比例正好相當於水泥熟料（不含氧化鐵）的組成。就三成分系的溫度資料看來，在進行試驗的條件下，化合物晶體的析出，在 $1455^\circ$ 時，也就是在熟料的最高燒結溫度下即終結。而在水泥窖中，在這樣的溫度下煅燒物料的加熱時間大約不會超過10分鐘。在燒成帶的前後兩端，物料的溫度比 $1455^\circ$ 要低得多。同時，若從迴轉窖溫度最高的燒成帶內取熟料試樣來研究時，就會發現熟料中還含有相當多的游離石灰，因此證明在燒成帶中部反應並未結束。所有這些資料都證明：煅燒熟料時，矽酸三鈣形成的過程是在其他一些溫度下進行完全的，而不是在研究三成分系的條件下矽酸三鈣由整個完全熔融物中析出來的溫度下進行完全的。同時，該條件與二成分系（ $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ ）中形成矽酸三鈣反應的條件也不相同。

在過去，化合物  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  的存在曾不止一次地被人否認過。例如曾經提出過：在煅燒水硬石灰的溫度下（甚至在煅燒水泥熟料的溫度下）來加熱磨細的、並且又經過仔細混合的石灰和二氧化矽的混合物時，不能生成與「水泥顆粒」或者是水泥熟料的性質多少有些相似的成品。所得到的產品在磨成細粉並和水之後，放出了大量的熱，同時很快地硬化。但後來就潰裂了，並失去了強度，也完全不具有安定性了。因此有許多研究家們認為：像  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  的這種結晶體，它並不是矽酸三鈣，因為這種化合物與水泥不相似。

現在大家都知道：要想用純的氧化物製造出純的矽酸三鈣，只有按着化學計量法配合成的原料再經過多次仔細處理之後才能得到。要想使氧化物完全變成矽酸三鈣，必須首先製成矽酸二鈣（將氧化物配合成適當的混合物在 $1200^\circ$ 左右加熱就容易得到矽酸二鈣），然後再摻入少量的石灰，將這種混合物磨細並在 $1500^\circ$ 左右煅燒大約兩小時，得出的試樣還要重新粉碎，再加入石灰總需要量的 $\frac{1}{3}$ 左右的石灰，再以同樣的溫度重新進行煅燒。最後，將試樣磨細加入使  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。

能完全變成爲  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  所需的石灰，再在上述溫度下進行第三次煅燒。只有經過這樣的煅燒處理，才能在固體狀態反應下用石灰與矽酸二鈣製成純的矽酸三鈣。所得到的試樣經磨細並和水之後，具有很高的膠凝性質，凝結正常，同時硬化後，即具有高級水泥的強度。

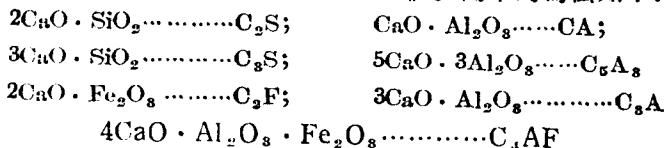
這樣說來，前面的意見分歧是出於誤解的。這些研究家們所製成的試樣主要是矽酸二鈣和游離石灰所組成，而只有部分是矽酸三鈣。

另外還有其它不同的意見，認爲這種所謂的矽酸三鈣並不是二成分化合物，而是氧化鈣、二氧化矽及氧化鋁所組成的三成分化合物。

在高倍數顯微鏡下進行研究，可以發現這種三成分化合物的結晶構造是不均一的。這種原來得到的不是均一的晶體是纖維狀的結構；在低倍數顯微鏡下觀察，只是晶體的外面好像是均一的。

x-光的分析也具有充分說服力地證明了這個說法。已經確定這種在急速加熱和冷卻之下製造試樣的方法是不正確的：因爲急速加熱和冷卻使形成結晶體困難，所以在這種情況下所形成的個別化合物，不是三成分化合物，而是矽酸三鈣、矽酸二鈣和鋁酸三鈣的混合體。所以就可以最終地認爲：煅燒時有高鹼性的矽酸三鈣存在和生成這是肯定的。

在以後的敘述中，我們將用簡單的符號來代表各種矽酸鹽和鋁酸鹽化合物。氧化物將用分子式的第一個字母代表；氧化鈣用 C 代表；氧化鋁用 A 代表；二氧化矽和氧化鐵則用 S 和 F 代表。字母右下角的數字代表該化合物中各氧化物的當量值。簡單的寫法如下：



### 三種氧化物熔融體中熟料化合物的結晶作用

爲了瞭解晶體的析出過程（圖 32）和伴隨這個過程液相成分發生變化的情況，我們將對  $2000^\circ$  左右溫度下形成的熔融物質 M（22%  $\text{SiO}_2$ ，70%  $\text{CaO}$ ，8%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）進行研究。將此均一的熔融體由高

於我們所取的混合體的熔點溫度 ( $2000^{\circ}$ ) 慢慢地冷卻到完全熔融點之前，並沒有任何固相析出。物質的成分仍然為  $M$ 。原有熔融體的成分、固相的成分、以及液相的變化成分，都用直線上的點來表示，而該直線又通過相當於初生固相 ( $\text{CaO}$ ) 成分和熔融體  $M$  成分的點。再繼續冷卻，由於這個成分是在  $\text{CaO}$  區域內，所以有  $\text{CaO}$  以固相的狀態開始析出。由於有固相析出，餘留下的液相的成分也就發生了變化，因而不能再以  $M$  點來表示。全部物質總的成分，即液相與析出固相 ( $\text{CaO}$ ) 混合物的成分仍為由原有熔融體的成分來表示，但餘留下來的液相成分已發生了變化：其中氧化鈣減少了，因為氧化鈣漸漸由熔融體中析出的緣故。液相成分點在  $\text{CaO}$  開始析出後將位於直線  $AM$  上，其距離頂點  $A$  (即  $\text{CaO}$ ) 的距離比投影上  $M$  點所代表的原有成分遠一些。 $AP$  線是  $\text{CaO}$  和所取成分液相之間平衡直線的投影，就如  $AB$  線是  $\text{CaO}$  和  $\text{SiO}_2$  系的平衡線一樣。我們假設：隨着熔融體被冷卻和氧化鈣的析出，液相就達到相當於  $P$  點的成分。如果取  $AP$  線為 100，那麼混合物總量 ( $100\%$ ) 中液相的含量即將是  $AM : 100 \approx 94.2\%$ ，其成分相當於  $P$  點所示。析出的氧化鈣的數量則為  $MP : 100 \approx 5.8\%$

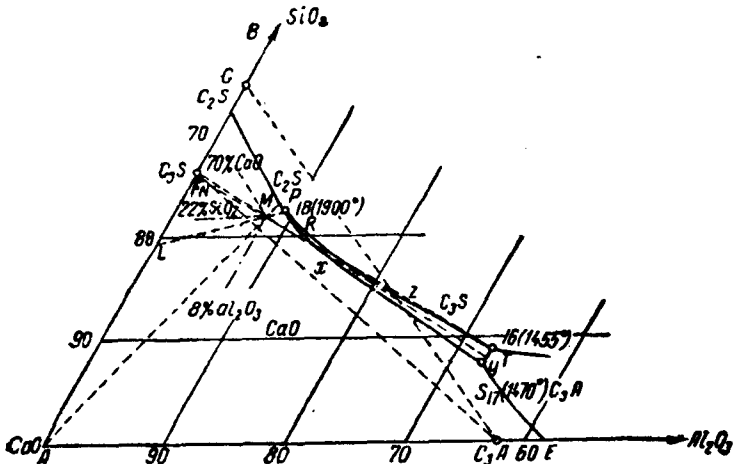


圖 32 熟料化合物由三成分熔融體中析出的過程圖

由溫度圖中可以看出，液相在  $P$  點比  $M$  成分具有較低的熔融溫度。如果長久保持混合物  $P$  點的溫度相當於熔點，則相當於原來成分  $M$  的總成分系統也長久的保持着 94.2% 的  $P$  成分的液相和 5.8% 的  $\text{CaO}$  固相。這種狀態也是平衡。在初生固相  $\text{CaO}$  區域內，任何一點都決定着相當於此點的液相成分，當  $\text{CaO}$  不變時在適當溫度下此液相也不變。

點  $P$  作為初生固相位於  $\text{CaO}$  和  $\text{C}_2\text{S}$  相區的分界線上。所以  $P$  成分的熔融混合物可以和  $\text{CaO}$  平衡，如果該混合物中含有  $\text{C}_2\text{S}$  也可以和  $\text{C}_2\text{S}$  平衡。

該系繼續冷卻時則固定在液相熔融溫度下降的  $TR$  線上。在  $R$  點上，整個系的總成分仍然為  $M$  成分，但在  $R$  點上的系除液相外，還有兩個固相（ $\text{CaO}$  和  $\text{C}_2\text{S}$ ）。

因此在  $R$  位置上有兩個固相（ $\text{CaO}$  和  $\text{C}_2\text{S}$ ）和一個  $R$  成分的液相。該系在此新位置上的總成分和  $R$  液相成分就位於  $RM$  直線上， $RM$  與  $AG$  線（ $\text{CaO}-2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）相交於  $L$  點，所以該系在  $R$  位置上由  $\overline{LM} : \overline{LR} = \overline{LM} : 100$  百分數的液相和  $\overline{MR} : 100$  百分數的固相，即 85.3% 的液相和 14.7% 的固相所組成的。固相乃是  $\text{CaO}$  與  $\text{C}_2\text{S}$ ， $\text{CaO}-\text{C}_2\text{S}$  系同樣也用  $AG$  線段表示。根據  $AG$  和  $LR$  線的公用點  $L$ ，可以求出固相（ $\text{CaO}$  和  $\text{C}_2\text{S}$ ）是由  $\overline{AL} : \overline{AG} = \overline{AL} : 100$  百分數的  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\overline{LG} : 100$  百分數的  $\text{CaO}$  組成的，即大約是 43.5%  $\text{CaO}$  和 56.5%  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。這樣，全部系冷卻到  $R$  點，即由 6.4%  $\text{CaO}$ 、8.3%  $\text{C}_2\text{S}$  和 85.3% 的液相組成。

所得到的兩個固相和一個液相的成分可以和相當於原來熔融體  $M$  成分全部系的總成分對照。正如圖 32 所示  $R$  點的成分和三成分（ $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ）系的溫度成分圖上的五相點（18）是一致的。各個不同點的成分列入表 23 中。

已知上述系中有 85.3%（按重量）的液相就可求出在該系中也有 8.3% 的  $\text{C}_2\text{S}$ 。

由數字計算的結果得到：

|                             | CaO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|-----------------------------|------|------------------|--------------------------------|
| 固相中氧化鈣 .....                | 6.4  | —                | —                              |
| 8.3%的C <sub>2</sub> S ..... | 5.4  | 2.9              | —                              |
| 85.3%的 R 成分的液相 .....        | 58.2 | 19.1             | 7.9                            |
| 合 計                         | 70.0 | 22.0             | 7.9                            |

表 23

各點的液相成分 (%)

| 圖形上的點 | 三成分圖上的點 | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | 備 註      |
|-------|---------|------|--------------------------------|------------------|----------|
| M     | —       | 70.0 | 8.0                            | 22.0             | 矽酸率為 2.3 |
| P     | —       | 68.4 | 8.2                            | 23.2             |          |
| R     | 18      | 68.4 | 9.2                            | 22.4             |          |
| X     | —       | 66.7 | 15.5                           | 17.8             |          |
| S     | 17      | 59.7 | 32.8                           | 7.5              |          |
| T     | 16      | 59.3 | 33.0                           | 8.7              |          |

當溫度為 1900° 時，在此點上有三個固相 (CaO, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S) 與液體平衡，R 點與三成分系的五相不共熔點 (18) 是一致的。如果該系漸漸冷卻到 1900° 以下，則液體成分的曲線將沿三成分圖上溫度降低的方向移動。

一般說來在該系中，從 (18) 點也可以沿溫度降低線 R—S (17) 繼續移動，也可以沿 R—T (16) 線繼續移動，因此必須解決這樣一個問題：當繼續冷卻時，該系究竟沿那條線變化。

點 (18) 和 (16) 之間的 RT 曲線就是 C<sub>3</sub>S 和 C<sub>2</sub>S 之間的平衡分界線，因此，在該系的固體部分中只可能有二種化合物存在，也就是說固體部分的成分應該處在相當於 F (C<sub>3</sub>S) 和 G (C<sub>2</sub>S) 點之間。然而，這是不可能的，因為在 R 點上，該系的固體部分是由 CaO 和 C<sub>2</sub>S 所組成的，並用在 FG 綫段外的 L 點表示，因此該系不可能進一步沿 RT 線變化。

如果該系沿 $RS$ 線冷却，則固體部分的成分將被  $A$  和  $F$  點之間、也就是在  $\text{CaO}-\text{C}_2\text{S}$  線上的點所決定。由此可以看出該系由  $R$  點變化時，必然是沿  $RS$  線。該系由原來位置移近  $R$  點的過程中，固相是  $\text{CaO}$  和  $\text{C}_2\text{S}$ ，但是  $R$  點以後的固相就是  $\text{CaO}$  和  $\text{C}_3\text{S}$  了，因為  $RS$  線（三成分系上點（17）和（18）之間的）正是這兩個固體化合物邊界曲線的投影。所以當該系剛剛經過  $R$  點而沿  $RS$  線繼續冷却時， $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  隨即消失了。

液相成分沿  $RS$  線變化到  $x$  點， $x$  點係  $RS$  線與通過  $F$  點（ $\text{C}_3\text{S}$ ）和  $M$  點（原成分位置）虛線的交點。繼續冷却，也就是移動  $R$  點時，該點在通過點（18）後， $RL$  線始終與  $M$  點相交，而  $L$  點就向  $\text{C}_3\text{S}$ ，即向  $F$  點的方向移動，但不會超過  $F$  點。如果  $L$  點超過了  $F$  點，則在固相成分中應該出現  $\text{C}_2\text{S}$ ，然而在這個階段中，這樣的變化是不會發生的。

$FM$  直線和  $RS$  線相交於  $x$  點；當該系處於  $x$  點時，其固體部分中就只有  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，這樣在由  $R$  到  $x$  途徑中，固體部分中的  $\text{CaO}$  就消失了，而  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  數量就增加了。根據  $FM$  和  $Mx$  線段對  $Fx$  整個線段的比例可以求出在  $x$  點上該成分系是由 51.2 重量份數的  $\text{C}_3\text{S}$  和 48.8 重量份數的液相組成的，液相的成分：67.7%  $\text{CaO}$ 、15.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 17.8%  $\text{SiO}_2$ 。該成分系的總成分，根據研究  $R$  點的類似計算，相當於  $M$  的原來成分，這證明了在圖上計算的準確性。

當冷却的成分系到達  $x$  點時，它就不能沿  $RS$  線繼續變化，因為假若從  $xS$  線上任一點通過  $M$  點引一直線，則此直線不再與  $\text{CaO}$  和  $\text{C}_3\text{S}$  間的  $AF$  線段相交。繼續冷却時該成分系即通過  $kS$  線並沿着  $\text{C}_3\text{S}$  相區內的  $FMx$  虛線向  $y$  點前進。

在此階段只有  $\text{C}_3\text{S}$  是該系的固體部分，因為在  $RS$ 、 $RT$  和  $ST$  線的區域內只有  $\text{C}_3\text{S}$  與液相保持着平衡。

$xy$  線與  $GH$  線（即  $\text{C}_2\text{S}-\text{C}_3\text{A}$  線）相交於  $Z$  點。值得注意的是該系在  $Z$  點上含有析出的  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，其數量相當於計算的數量。