

水泥工业 专著

上册

水 泥 工 業 窖

(上 册)

E. И
趙 繼



重 工 業 出 版 社

Е. И. ХОДОРОВ
ПЕЧИ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Промстройизд т (Москва 1950)

* * *

水泥工業窯

趙維彭 尹翔 譯

重工業出版社 (北京西直門內三官廟11號) 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字〇一九號

* * *

重工業出版社印刷廠印

一九五四年十二月第一版

一九五四年十二月北京第一次印刷 (1—1,930)

787×1092 • $\frac{1}{32}$ • 296,000字 • 印張 14 $\frac{1}{4}$ • 定價23,300元

* * *

發行者 新華書店

目 錄(上册)

譯者序	(1)
原 序	(2)
第一章 水泥熟料的形成	(3)
第一節 熟料的形成	(3)
第二節 熟料生成的熱效應	(7)
第三節 熟料形成過程的速度	(12)
第二章 立 窯	(19)
第一節 沿革 簡述	(19)
第二節 立窯的流體阻力	(21)
第三節 立窯中的專熱	(27)
第四節 燃料在立窯中的燃燒	(30)
第五節 自動式立窯的構造	(37)
一、 窯身	(37)
二、 裝料裝置	(41)
三、 卸料裝置	(46)
四、 閘門	(49)
第六節 自動式立窯操作的經驗數據	(51)
第三章 迴轉窯	(56)
第一節 沿革 簡述	(56)
第二節 迴轉窯內的熟料形成	(59)
第三節 物料在迴轉窯內的運動	(69)
第四節 氣體在迴轉窯內的運動	(73)
第五節 迴轉窯內的專熱	(76)
一、 迴轉窯中空部分的傳熱	(76)
二、 迴轉窯鏈條帶內的傳熱	(95)
三、 迴轉窯內格子式熱交換板的傳熱	(99)
第六節 燃料在迴轉窯內的燃燒	(100)
一、 燃料在迴轉窯內燃燒的一般情況	(101)

二、粉狀固體燃料在迴轉窯內的燃燒	(108)
三、液體燃料在迴轉窯內的燃燒	(124)
四、氣體燃料在迴轉窯內的燃燒	(132)
第七節 迴轉窯的結構	(137)
一、窯體	(138)
二、托輪滾圈裝置	(142)
三、窯的傳動裝置	(147)
四、窯頭	(151)
五、密閉裝置	(152)
六、熱交換裝置	(156)
七、襯料與隔熱層	(161)
八、喂料機	(168)
第八節 迴轉窯操作的經驗資料	(173)
第九節 迴轉窯廢氣餘熱利用裝置	(193)
一、餘熱鍋爐和料漿過濾機	(193)
二、料漿噴射裝置	(221)
三、蒸發機與預熱機	(230)
四、煅燒機	(246)
第十節 迴轉窯廢氣的收塵設備	(263)
一、收塵室	(266)
二、旋風式收塵器	(267)
三、電氣收塵器	(270)
第十一節 迴轉窯的冷卻機	(270)
一、單筒式冷卻機	(270)
二、多筒式冷卻機	(275)
三、爐篦式冷卻機	(278)
第四章 爐篦子機	(294)
窯的熱工效應	(305)
參考文獻	(309)
中俄文名詞對照表	(310)

譯 者 序

我國水泥工業雖然隨着人民政權的建立一日千里地發展着，但在水泥製造和水泥窖結構方面，國內却沒有一本很完整而且有理論基礎的書籍可供參考。爲了滿足我國水泥工業中技術人員學習蘇聯先進經驗的迫切需要，因此譯者將蘇聯 E. И. 郝道勞夫著的水泥窖（*Печи цементной промышленности, промстройиздат, 1950*）一書譯就，以便對我們水泥工業的發展有所裨益。

譯者藉本書與讀者見面的機會，有幾個問題需要向大家說明如下：

一、本書有關水泥熱工方面的理論比較高深，因此在翻譯過程中遇到很多困難問題。這些問題雖然在一些同志中間經過研究和討論，但限於能力和時間，所以仍然未能徹底理解，因此錯誤自屬難免，希望讀者在生產、設計、研究和教學的實踐中不斷指正，以便再版時加以修改；

二、原書所引用的公式，在翻譯過程中經我們的演算結果認爲有幾處恐係原文印刷上的錯誤，故譯者在有關方面的蘇聯專家的同意下已作了必要的註解，希望讀者特別加以注意，如有不對之處，請隨時函告爲盼；

三、關於術語譯名方面，熱工部分多以大連工學院所譯《化工原理》一書中的名詞爲依據，而水泥專業方面的名詞，是根據生產中的常用名詞而定。但是，也有一部分是出於譯者杜撰，不妥之處，望讀者指正；

四、全書譯就後，曾經王進甲、楊德驥、高世雄和陸純煊等四位同志校對過，提出很多修正性的意見，譯者藉此機會謹致謝意。

趙維彭 一九五四年十月一日於北京

原 序

十九世紀二十年代，伊格爾·切利也夫首先發明水泥。其後，A. P. 舒良千考、H. A. 別列留布斯基、H. H. 梁敏等人在水泥科學方面又作了很大的貢獻。雖然水泥的發明權及其工藝學的創立是屬於俄國的工程師和科學家們，但是，在革命前工業落後的俄國，水泥工業却是十分薄弱的，並且也不能製造水泥工業的裝備。

偉大的十月社會主義革命之後，在斯大林五年計劃的年代裡，蘇聯建立了水泥工業機械設備的製造業，而且水泥工業的規模也比革命前擴大了好幾倍。水泥工業的成長，乃是水泥科學發展的先決條件。

如果說在資本主義國度內，工業技術問題是屬於某些私人公司的管轄範圍，那麼他們就必然會阻礙理論研究工作的發展，因為這項工作是超出了他們那狹小的興趣圈子。而在我們的國家裡，國家本身就有計劃地為建立水泥製造工業的科學理論創造了條件。從而說明一個事實：在水泥製造方面所獲得的科學成就，確實應當歸功於蘇聯的科學家們，如С. И. 德魯日寧、A. A. 巴依考夫、B. И. 容克、П. П. 布德尼科夫、B. A. 金得、B. Ф. 符拉弗涅夫和П. A. 隆勞包夫。

水泥製造當中的熱工學，是水泥工業中最年輕的一門科學，它是根據蘇聯在水泥製造方面和熱工學的物理原理方面的研究工作而建立起來的。在發展熱工學的物理原理方面，M. B. 奇爾必切夫和Г. Ф. 克諾爾曾作了很大的供獻。在煨燒水泥熟料的熱工學方面取得了成果之後，不僅可以根據一般的經驗數據，而且還可以根據理論來設計和管理水泥煨燒窯。

全書共分上下兩冊。第一冊中所講的是水泥煨燒窯中主要的反應過程的分析：熟料的形成、物料和氣體的運動、燃料的燃燒以及傳熱等等。在本冊內又介紹了國產水泥窯的構造及其操作當中的詳細經驗數據。

第二冊中將討論熱工計算和熱工控制的方法以及窯的自動化和操作原理方面的問題。

本書為水泥製造系熱工學專業大學生的教材，但亦適用於生產人員、設計人員和研究人員。

我們預計讀者對於普通熱工學方面的問題已很熟悉，因此在某些情況下，作者在引用計算資料的同時並沒有敘述其來源，而只是給讀者提出了某些方程式的一般概念。

書中並總括了蘇聯水泥科學研究院熱工試驗室和國立水泥設計院十五年來研究工作的資料。有蘇煨燒水泥熟料的熱工研究工作，還是第一次，故難免沒有缺點，望讀者不吝指正，作者必深感激的心情接受。

第一章 水泥熟料的形成

第一節 熟料的形成

製造水泥熟料用的原料，絕大多數是經過粉碎的石灰石或白堊以及粘土或粘土質頁岩。有時也使用泥灰岩。泥灰岩乃是石灰石和粘土在不同比例下的天然混合物，其中有的本身就相當於水泥的成份（如天然泥灰岩）。在某些情況下，可以用粒狀的高爐礦渣代替粘土。

石灰石和白堊，主要是由碳酸鈣（ CaCO_3 ）組成。粘土和粘土質頁岩的主要組成部分是高嶺土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）。粒狀高爐礦渣約含有50%的氧化鈣（ CaO ），它分佈在礦渣的玻璃質部分及其晶狀化合物（矽酸鹽、鋁矽酸鹽等）的中間。

有時，配合原料中要加入少量的矽砂或矽藻土（用以提高 SiO_2 的含量）、鐵礬土礦（用以提高 Al_2O_3 的含量）、黃鐵礦渣、鐵黃或煉鐵爐渣（用以提高 Fe_2O_3 的含量）。倘若使用固體燃料進行煅燒，則熟料中也將含有該燃料的灰分。

水泥熟料的生產過程，是一個將配合原料（生料）連續加熱，將燒成的熟料連續冷卻的過程；在過程中發生有下面一系列物理化學變化：

(1) 高嶺土脫水：在大氣壓力下，高嶺土在 170° 左右開始脫水，同時吸收熱量。在脫水當中，高嶺土的分子分裂成游離的無定形氧化鋁及氧化矽。

(2) 碳酸鎂分解：碳酸鎂是原料中的夾雜物，在 370° 左右開始分解。在 402° 時， CO_2 的壓力達到一個大氣壓。到 500° 時，分解方行結束。此反應為吸熱反應。

(3) 碳酸鈣分解：約在 770°C 時開始。當 907°C 時， CO_2 的壓力達到一個大氣壓；在 950°C 時，此吸熱的分解反應結束。

(4) 偏高嶺土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）形成：是在 950°C 左右由游離的無定形 Al_2O_3 和 SiO_2 化合而成。該反應為放熱反應。

(5) 熟料礦物形成：據 В. П. 容克 (В. П. Юнг)、П. П. 布得尼考夫 (П. П. Будников)、В. А. 金得 (В. А. Кипл)、В. Ф. 茹拉乎夫 (В. Ф. Журавлев) 和 П. А. 濤勞包夫 (П. А. Торопов) 等人的研究，認為在固體狀態下，約在 500° 左右，石灰與三氧化物的反應開始顯著。當溫度達到 900°C 時，反應則加速進行。反應的初期生成物是 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。由於在反應後還存在着過量的石灰，所以 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 很容易變成 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，而 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 會變成 $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

由於矽酸鹽的結晶格子構造很堅固，因此石灰同矽酸的化合速度，約在 1000°

時方才顯著。反應的結果，立刻形成 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。同時，石灰還消耗在與 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 的化合及形成 $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 上，並消耗在將剩餘的 $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 飽和成 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的反應中。這些反應，在 $1200—1300^\circ$ 的溫度範圍內結束。

一般的生料，在溫度約為 1300°C 時，就會出現液相，即一部分物料熔融。而此時， $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 CaO 仍然為固體狀態，其它的化合物則變成液相。石灰同 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 逐漸地溶解於液相中，並且互相化合，結果形成 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。液相的出現，有助於 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的形成，因為要達到同樣的反應速度，在液態中所要求的溫度較在固態下要求的溫度為低。

燒成的最高溫度，決定於原料的物理化學特性；一般成份的生料，接近於 1400° 。在最高溫度下，液相數量可達到 $20—30\%$ 。

由游離氧化物形成初期生成物的反應，是放熱反應；而由初期生成物再同石灰形成 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 及 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的反應則是吸熱反應。

當熟料冷卻到將近 1200°C 時，液相固化。由於在矽酸鹽系中常常出現液相過冷的現象，故液相出現及消失的溫度常不相同。

由於上述反應結果而形成的水泥熟料為不均成份系，主要是由下列礦物成份所組成：阿利特、貝利特、才利特、黑色晶狀間隙物、成份不定的玻璃質、方鎂石 (MgO)、無水石膏 (CaSO_4) 及氧化鈣 (CaO)。

阿利特是 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ；其結晶格子內含有某些其它的化合物，並成固溶體狀態。其中已確知阿利特中可能含有 7% 以內的 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。

貝利特是 β 型矽酸二鈣 ($\beta-2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)；它在 1420° 時會變成 α 型， 675° 時變成 γ 型。後一變化會引起體積的膨脹 (約 10%)，結果致使熟料粉散。高溫燒成並急速冷卻，能使熟料中的 β 型 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 保持為過冷狀態。 α 型 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 與亞鐵酸鈉和鋁酸鈉能組成固溶體。在這種情況下， α 型在 1180° 變成 β 型，同時生成能使 α 型穩定的氧化物。

才利特是 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (鐵鋁酸四鈣)；它同 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 MgO 形成固溶體，而 H. A. 濤勞包夫、H. A. 石沙考夫和 J. D. 米勒可夫認為，它也能和 $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 形成固溶體。才利特中 MgO 的含量可達到 2% 。

黑色晶狀間隙物似乎是由 $8\text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 組成。因此可以認為它是一種由氧化鈉代替了部分 ($1/3$) 氧化鈣的鋁酸三鈣。

若熟料中含有氧化鉀，則必存在於化合物 $\text{K}_2\text{O} \cdot 23\text{CaO} \cdot 12\text{SiO}_2$ 中。貝利特中也含有鹼類，它在 α 型 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 組成的固溶體內成分解物狀態存在。最後，還有一部分鹼類，在急速的冷卻下，變成為玻璃成份。

玻璃成份中並含有一部分氧化鎂。大部分的氧化鎂為游離狀態的方鎂石，其它一部分則含於才利特中。

當計算熟料中主要化合物的含量時，需要考慮它們形成的順序，並且要假設熟料能全部結晶，並在冷卻終了時會達到化學平衡。

熟料中各化合物的含量如下列公式所示：

$$C_4AF = 3.04F, \dots\dots\dots (1)$$

$$C_3A = 2.65A - 1.69F, \dots\dots\dots (2)$$

$$C_3S = 4.07C - 7.6S - 6.72A - 1.43F, \dots\dots\dots (3)$$

$$C_2S = 3.6S - 3.07C + 5.1A + 1.63F, \dots\dots\dots (4)$$

式中之 C_4AF 、 C_3A 、 C_3S 、 C_2S 、 C 、 S 、 A 和 F 是代表熟料中 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 、 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 、 $3CaO \cdot SiO_2$ 、 $2CaO \cdot SiO_2$ 、 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的百分含量。但其中的 C ，是扣除了同 SO_3 ($0.75SO_3$) 結合的 CaO 及游離 CaO 後所剩餘的 CaO 的百分含量。 S 是扣除了不溶物中所含 SiO_2 後所餘 SiO_2 的百分含量。

而實際上，由於冷卻很迅速，所以在得到的熟料中不能有化學平衡，並且其中一部分化合物會呈玻璃狀態存在。在計算熟料的成份時，是可以把這些情況估計進去的。根據在一定澆成溫度下所達到的而又在冷卻過程中所固定下來的平衡，並且根據液相是單獨結晶或者是形成玻璃，可對計算加以適當的修正。

第一種情況，當液相不依賴固相而單獨結晶時，對於 $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ 之比在 0.9—1.7 範圍內的熟料說來，利用公式 (1) — (4) 是完全準確的。假若該比值是在 1.7 到 6.1 的範圍內變化時，則要作下列的修正，對：

$$C_3S \text{——} + (1.3A - 2.8F), \dots\dots\dots (5)$$

$$C_2S \text{——} + (2.1F - 1.4A), \dots\dots\dots (6)$$

$$C_3A \text{——} + (2.5F - 1.6A), \dots\dots\dots (7)$$

$$C_4AF \text{——} 0. \dots\dots\dots (8)$$

第二種情況，當液相形成玻璃時， $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ 之比在 0.9—6.1 範圍內的熟料，

其修正值等於：

$$C_3S \text{——} + (1.8A - 2.8F), \dots\dots\dots (5)$$

$$C_2S \text{——} + (1.2F - 2.1A), \dots\dots\dots (9)$$

鉍酸鈣和鐵鉍酸鈣並不呈游離狀態單獨存在，而成爲玻璃質，其百分含量 (C_T) 與熟料中氧化鉍和氧化鐵的含量有關，並且也與熟料的溫度有關。

在出現液相的溫度下，在 $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} > 1.53$ 的熟料中：

$$C_T = 6.1F, \dots\dots\dots (10)$$

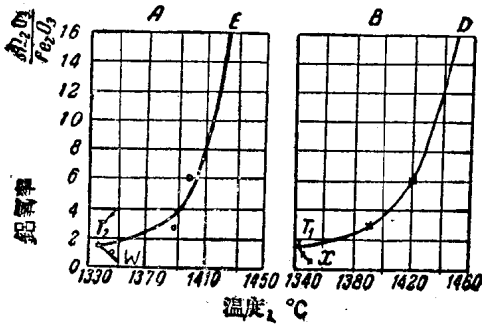
在 $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} < 1.33$ 的熟料中:

$$C_T = 3.2A - 5.22F \dots\dots\dots (11)$$

在 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 完全變成了熔融物的溫度下:

$$C_T = 3.03A + 1.75F \dots\dots\dots (12)$$

完全熔融的溫度，係根據 $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ 之比值而定；對於大部分的熟料，均符合於曲線 A，而石灰含量等於或超過 $C = 2.8S + 1.18A + 0.65F$ 的熟料，則符合於曲線 B（第 1 圖）。



第 1 圖 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 完全變成爲熔融物的溫度與鐵率的關係

溫度在五相綫上的分佈情況:

A 線: $WT_2E \quad C_3S - C_2S - \begin{cases} C_3A \\ C_4AF \end{cases}$

B 線: $XT_1D \quad CaO - C_3S - \begin{cases} C_3A \\ C_4AF \end{cases}$

當溫度爲 1400° 時，根據第 1 圖曲綫確定出的溫度不高於 1400° 的熟料中:

$$C_T = 2.95A + 2.2F \dots\dots\dots (13)$$

高於 1400° 時，液相生成量的增加速度很慢。當溫度爲 1450° 時，根據第 1 圖曲綫所確定出的溫度不高於 1450° 的熟料中:

$$C_T = 3.0A + 2.25F \dots\dots\dots (14)$$

鐵和 MgO 同樣要變成爲液相。因此增加的液相含量，大致可以認爲等於熟

料中鹼和 MgO 的含量。計算水泥熟料中玻璃含量的各公式，均應據此作適當的修正。

然而應當注意到：直到現在為止還未明確，當熟料冷卻後確實有多少液相會結晶，有多少將變成玻璃質。此外，修正值中並未考慮到熟料中會有固溶體形成。因此熟料中化合物的含量，總是與計算值不完全符合。

水泥熟料中主要化合物的含量及其石灰飽和係數，可以比較正確地說明水泥熟料的成份。石灰飽和係數乃是氧化鐵和氧化鋁完全飽和後所剩餘的 CaO 同氧化矽全部飽和成 $3CaO \cdot SiO_2$ 時所需 CaO 量的比值。當熟料的石灰飽和係數等於 1 時，則相當於石灰的最高含量。 $3CaO \cdot SiO_2$ 的形成是 $2CaO \cdot SiO_2$ 和 CaO 作用的結果，但隨着液相中反應物質濃度的降低而漸趨緩慢。因此，如果要使矽酸二鈣全部變成矽酸三鈣，必需要有較高的溫度和足夠的時間。這一點說明了飽和係數實際上最高也不會超過 0.95—0.97，以及說明石灰飽和係數高的生料，會使出窯熟料中多少帶些游離石灰。

對 $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} > 0.64$ 的一般水泥，其飽和係數可以用下列公式表示：

$$KH = \frac{C - (1.65A + 0.35F)}{2.8S} \dots\dots\dots (15)$$

或者，當考慮到修正值時：

$$KH = \frac{C - (1.19A + 0.65F)}{2.8S} \dots\dots\dots (16)$$

在實際應用中，還有一些按照熟料中主要氧化物]的含量估計熟料成份的方法。常用者有以下三種：

(1) 水硬率 $n = \frac{C}{S + A + F} \dots\dots\dots (17)$

(2) 矽酸率 $n = \frac{S}{A + F} \dots\dots\dots (18)$

(3) 鋁氧率 $t = \frac{A}{F} \dots\dots\dots (19)$

第二節 熟料生成的熱效應

水泥熟料的形成，是一個複雜的物理化學反應過程。熟料生成熱效應，就是指由 0° 的乾燥原料，在沒有任何物料或熱量損失的條件下，製成一公斤溫度仍為 0° 的熟料所需要的熱量而言。

計算熟料形成熱效應的根據是：熱效應數值同原始物質變成最終物質當中所採用的方法無關，同時在過程中所有各個部分的熱效應之總和必須等於零。

茲將計算熟料生成熱效應當中有關的物質的單位熱容量和反應熱列於 1 和 2 兩表中。

第 1 表
參與熟料形成過程之物質的平均單位熱容量
(千卡/公斤·°C)

物 質 名 稱	溫 度, °C				
	0-400	450-900	900-1400	0-900	0-1400
CaCO ₃	0.243	0.236	—	0.266	—
SiO ₂	0.240	—	0.283	0.263	0.270
CaO.....	—	—	0.256	0.213	0.218
Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O.....	0.280	—	—	—	—
Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	0.238	0.277	0.281	0.258	0.270
熟料.....	—	—	0.305	0.256	0.261
CO ₂	—	—	—	0.256	—
水蒸汽.....	0.47	—	—	—	—
原料粉(粘土+石灰石).....	0.253	0.233	0.247	—	—

第 2 表所示為在 20° 和在反應溫度下之水泥熟料中主要礦物形成的熱效應。反應溫度下的熱效應，是根據反應物質和反應生成物質在由 20° 到反應溫度的範圍內熱容量的不同而求出。例如：CaCO₃ 分解時吸熱的熱效應，在 20° 時等於 425 千卡/公斤，當 900° 時為 350 千卡/公斤。

第 2 表
水泥熟料形成時的反應熱

原 始 物 質	最 終 生 成 物	熱 效 應, 卡/克		反 應 溫 度 °
		20° 時	反 應 溫 度 下	
CaCO ₃	CaO + CO ₂	425	356 ± 3	907
MgCO ₃	MgO + CO.....	315	195 ± 8	—
Al ₂ O ₃ + 2SiO ₂	Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	72 ± 10	72 ± 10	960
Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · 2H ₂ O	Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ + 2H ₂ O	135-145	213-223	450
SiO ₂ 石英 + 3CaO	C ₃ S.....	156.2	107.3	1500
SiO ₂ 石英 + 2CaO	C ₂ S.....	171.0	144.0	1500
α-Al ₂ O ₃ + 3CaO	C ₃ A.....	14.1	9.1	1500
4CaO + γ-Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	C ₄ AF.....	26.0	—	1500
β-C ₂ S	γ-C ₂ S.....	6.0	8.8	675

按照第 2 表中的數據，可根據熟料的最終礦物組成求出熟料形成時放出的總熱量。礦物組成應按第一節中所提出的方法計算。按照修正公式校正熟料的礦物組成，對於計算放熱熱效應總值的影響並不顯著，可是會使計算非常複雜。

計算出來的放熱熱效應的總值與試驗測定的數值彼此符合。普通原料（粘土和石灰石），在形成熟料時，其放熱熱效應為 100—120 千卡/公斤熟料；對無鐵原料，放熱熱效應降低到 70—80 千卡/公斤熟料。由礦渣和石灰石所製成的熟料，放熱熱效應等於 50—70 千卡/公斤熟料，這是由於礦渣中含有已製成的矽酸鹽的原故。上述數值，是指熟料形成溫度下而言。若昇高溫度，則矽酸鈣與鋁酸三鈣的生成熱即將下降。所以，在熟料形成溫度下的放熱熱效應，較 20° 時為低。

在一般工業的冷卻速度下，熟料中大部分的液相將固化為玻璃體。但由於玻璃體具有很高的熱容量，所以在固化時，只有一部分熔融時所消耗的熱量可以收回，其餘的熔融熱將保留在熟料中。因此，急速冷卻的熟料比緩慢冷卻的熟料具有較高的潛在能力（Запас энергии）。無鐵熟料，液相形成的放熱熱效應約為 60 千卡/公斤，而含鐵的熟料約為 70 千卡/公斤。

形成水泥熟料的整個過程，可看作為由下列步驟所合成。

熱量的消耗

1. 乾燥原料由 0° 加熱到 450° 時的熱量消耗：

$$\left[G_c^c \right] \cdot (450 - 0) \times 0.253 \text{ 千卡/公斤熟料} \dots\dots\dots (20)$$

式中：[G_c^c] — 乾燥原料的理論消耗量，公斤/公斤熟料；

0.253 — 乾燥原料在 0—450°C 範圍內的平均熱容量，千卡/公斤·°C。

$$\text{而 } \left[G_c^c \right] = \frac{100 - (mm)^k - 0.01 a G^m A_n^p}{100 - (mm)^c} \dots\dots\dots (21)$$

式中：G^m — 燃料的消耗量，公斤/公斤熟料；

a — 摻入熟料中的灰分，%；

A_n^p — 燃料中灰分的含量，%；

(mm)^k — 熟料的熱損失量，%；

(mm)^c — 乾燥原料的熱損失量，%；

2. 當 450°C 時，原料中高嶺土脫水的熱量消耗：

$$\left[G_{H_2O}^c \right] \cdot 1600 \text{ 千卡/公斤熟料} \dots\dots\dots (22)$$

式中：[G_{H₂O}^c] — 原料中化合水的理論含量，公斤/公斤熟料；

1600—高嶺土脫水的熱效應，千卡/公斤化合水。

$$\text{而 } \left[G_{\text{H}_2\text{O}}^c \right] = \frac{\left[G_c^c \right] \left[(\text{MM})^c - \text{CO}_2^c \right]}{100} \dots\dots\dots (23)$$

式中： CO_2^c —乾燥原料中 CO_2 的含量，%。

3. 脫水原料由 450° 加熱到 900° 時的熱量消耗：

$$\left\{ \left[G_c^c \right] - \left[G_{\text{H}_2\text{O}}^c \right] \right\} \times (900 - 450) \times 0.283 \text{ 千卡/公斤熟料} \dots\dots (24)$$

式中：0.283—脫水原料在 $450-900^\circ$ 的範圍內的平均熱容量，千卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ 。

4. 在 900° 時，原料中 CaCO_3 和 MgCO_3 分解的熱量消耗：

$$\left[G_{\text{CaCO}_3}^c \right] \times 396 + \left[G_{\text{MgCO}_3}^c \right] \times 195 \text{ 千卡/公斤熟料} \dots\dots (25)$$

式中： $\left[G_{\text{CaCO}_3}^c \right]$ —原料中 CaCO_3 的理論消耗量，公斤/公斤熟料；

$\left[G_{\text{MgCO}_3}^c \right]$ —原料中 MgCO_3 的理論消耗量，公斤/公斤熟料；

396— CaCO_3 的分解熱，千卡/公斤 CaCO_3 ；

195— MgCO_3 的分解熱，千卡/公斤 MgCO_3 。

$$\text{其中：} \left[G_{\text{CaCO}_3}^c \right] = \frac{\left[G_c^c \right] \text{CaO}^c}{56} \dots\dots\dots (26)$$

$$\left[G_{\text{MgCO}_3}^c \right] = \frac{\left[G_c^c \right] \left(\text{CO}_2^c - \frac{\text{CaO}^c \times 44}{56} \right) 84.32}{100 \times 44} \dots\dots (27)$$

式中： CaO^c —乾燥原料中碳酸鹽中的 CaO 的含量，%。

5. 碳酸鹽分解後，原料由 900° 加熱到 1400° 時的熱量消耗：

$$\left\{ \left[G_c^c \right] - \left[G_{\text{H}_2\text{O}}^c \right] - \left[G_{\text{CO}_2}^c \right] \right\} \times (1400 - 900) \times 0.247 \text{ 千卡/公斤熟料} \dots\dots\dots (28)$$

式中： $\left[G_{\text{CO}_2}^c \right]$ —原料中 CO_2 的理論消耗量，公斤/公斤熟料；

0.247—碳酸鹽分解後的原料在 $900-1400^\circ\text{C}$ 的範圍內的平均熱容量，千卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ 。

$$\text{而 } \left[G_{\text{CO}_2}^c \right] = \frac{\left[G_c^c \right] \text{CO}_2^c}{100} \dots\dots\dots (29)$$

6. 在 1400° 時，液相形成的熱量消耗—50千卡/公斤熟料。

熱量的收入

1. 在1000—1400°的溫度範圍內，由於熟料礦物的形成而放出的熱量：

$$\frac{1}{100} (C_3S \times 107 + C_2S \times 144 + C_3A \times 9 + C_4AF \times 26) \text{千卡/公斤熟料} \cdot (30)$$

式中：C₄AF、C₃A、C₂S 和 C₃S 按公式 (1, 2, 3 和 4) 求算；

107—3CaO · SiO₂ 的生成熱，千卡/公斤C₃S；

144—2CaO · SiO₂ 的生成熱，千卡/公斤C₂S；

9—3CaO · Al₂O₃ 的生成熱，千卡/公斤C₃A；

26—4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃ 的生成熱，千卡/公斤C₄AF*

2. 當 950°C 時，生成偏高嶺土所放出的熱量：

$$0.0217 \times A \times 72 \text{千卡/公斤熟料} \dots \dots \dots (31)$$

式中：A—熟料中 Al₂O₃ 的含量，%；

72—偏高嶺土的生成熱，千卡/公斤偏高嶺土。

3. 熟料由 1400° 冷卻到 0° 時所放出的熱量：

$$(1400 - 0) \times 0.261 \text{千卡/公斤熟料} \dots \dots \dots (32)$$

式中：0.261—熟料在 1400—0° 的範圍內的平均熱容量，千卡/公斤 · °C。

4. 原料中之 CO₂ 由 900° 冷卻到 0° 所放出的熱量：

$$\left[C_{CO_2}^c \right] (900 - 0) \times 0.256 \text{千卡/公斤熟料} \dots \dots \dots (33)$$

式中：0.256—CO₂ 在 900°—0° 範圍內的平均熱容量，千卡/公斤 · °C。

5. 原料中的化合水由 450° 冷卻到 0° 並凝結而放出的熱量：

$$\left[C_{H_2O}^c \right] \{ (450 - 0) \times 0.47 + 595 \} \text{千卡/公斤熟料} \dots \dots \dots (34)$$

式中：0.47—水蒸汽在 450°—0° 範圍內的平均熱容量，千卡/公斤 · °C；

595—0°C 時，水蒸汽的凝結潛熱，千卡/公斤水蒸汽。

熟料形成過程中的形成熱效應 (千卡/公斤熟料)，乃是熱的消耗量與收入量之差。

消耗項目之和，就是實際上必須送入窯內再傳遞予絕對乾燥的物料用以製成熟料的熱量。其中有一部分熱，在熟料、碳酸氣和水蒸汽等物質冷卻時可以收回。

普通的生料 (石灰石和粘土)，其生成熱效應約為 400 千卡/公斤熟料，而用石灰石和礦渣所配成的生料，由於已含有已製成的碳酸鈣，因此，其生成熱僅約為 250 千卡/公斤熟料。

* 由於缺乏有關 4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃ 之熱容量的試驗數據，故其生成熱是指 20° 而言。這樣所造成之誤差是極微小的。

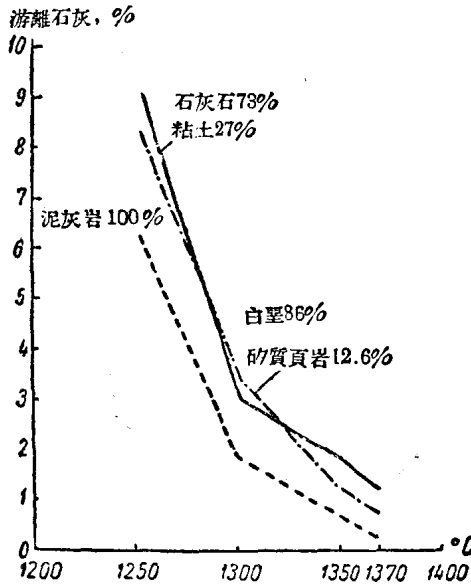
第三節 熟料形成過程的速度

因為生料中的各個成份，在固體狀態下即已開始反應，故反應速度不僅決定於生料的化學成份，同時也決定於生料的均勻性、粉碎細度和生料的礦物組成。

H. A. 濤勞包夫和 Ф. И. 瓦西寧〔6〕會將物料平穩地加熱到1500°，而研究了生料中酸性成份對礦物組成與石灰化合過程的影響。他們認為被研究過的這些酸性原料，若按照其反應能力的降低次序來排列，則會得出下列順序：(1) 矽岩，(2) 泥灰岩，(3) 粘土質頁岩，(4) 黃土，(5) 角礫岩，(6) 凝灰岩，(7) 砂質粘土(塘母)，(8) 黑雲母質粘土，(9) 花崗岩。

當溫度加熱到1250°時，由前六種酸性原料所配成的生料，開始形成矽酸三鈣。而用後三種配成的生料，其開始形成矽酸三鈣的溫度高於1250°。

第2圖也指出了生料的礦物組成對熟料形成速度的影響數據。試驗時，用了三種不同的原料。第一種原料是天然泥灰岩；第二種是硬質結晶的石灰石(78%)和粘土(27%)的混合物；第三種是白堊(6%)和以夾雜物的狀態含於白堊中的矽質頁岩(12.6%)再加上1.4%的鐵礬土礦(Al_2O_3 74%， Fe_2O_3 20%)所配成的混合物。第二和第三種配合原料的化學成份和天然泥灰岩相同 ($m=1.12$,



第2圖 當碾磨時間為五分鐘時，礦物組成不同的生料 ($m=3.9$, $n=9.6$, $p=1.8$) 對熟料形成速度的影響。