

第一章 干燥方法分類

熱干燥過程是被干燥物料內部的液體轉變為汽態隨後將蒸汽排入四周介質的過程。

要使液體變為汽態，就需要熱量；這熱量可由外部熱源從外面送向物料，或由其他各種形態的能（例如電能）在物料本身轉變成熱能。

因此，在任何情況下，制品熱干燥的必須條件是具有能把熱能或其他形態能授予被干燥物料的外源。

蒸汽自被干燥物料向四周介質的排出（蒸汽的外部擴散），是由於物料表面所排出液體的蒸汽與四周介質中蒸汽的濃度差引起的；在這種情況下，以蒸發液體的蒸汽分壓作為濃度。物料溫度愈高，濕物料表面液體的蒸汽分壓就愈大。

為加速干燥過程，必須提高物料的溫度，增加其熱含量。如前所述，此過程與自外源獲得熱能或轉變為熱能的其他形態能有關。

最簡單形式的熱干燥是自然干燥，即靠太陽的熱能使水分自物料中蒸發。

除了熱干燥以外還有許多減少物料水分的其他方法，例如用吸收劑吸濕、壓濕、離心分離等方法；然而在耐火材料工業中不應用非熱干燥方法，因此，對它我們也不作研討。

干燥的物理過程可以敘述如下。物料自外源獲得熱能，其溫度昇高，熱含量增加，液體就轉變為汽態，即液體蒸發。濕物料表面的液體首先蒸發，而此後物料內部的液體也蒸發，液體或其蒸汽由物料內層向表面擴散。由於物料表面及四周介質中的蒸汽濃度差，蒸汽自物料表面排向四周介質。這個過程只有當物料表面的蒸汽濃度大於四周介質中同一蒸汽的濃度時才有可能。

依據氣體在四周介質中運動性質的不同，熱干燥可在自由氣流或強制氣流中進行。

在自由氣流中，氣體僅在物料表面及四周介質中本身重度差的作用下運動，不參與人工鼓風。

在強制氣流中，氣體在人工鼓風造成的壓力差的作用下運動。在此情形下，一般也產生氣體的自由氣流，但其流速較強制氣流小得多。

在流體動力學中，強制氣流的特征是無因次的複數群——雷諾准數 Re ，且

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (1)$$

式中 v ——氣體速度 (公尺/秒)；
 d ——計算尺度 (公尺)；
 ν ——動粘度係數 (公尺²/秒)。

根據 Re 准數的不同，氣體的流動區分為層流或湍流。

氣體由層流轉為湍流時的 Re 准數值稱為臨界雷諾數，其值 $Re_{kp} = 2200$ 。

當 $Re < 2200$ 時，氣體的運動為層流。

當 $Re > 2200$ 時，氣體的運動為湍流。

由傳熱理論可知，固體與氣體間熱交換的主要阻力是邊界氣體層，其厚度對自由流與強制流不同。關於被干燥物料與四周介質間濕交換過程也同樣可以這樣認為。因此，氣體運動的性質決定介質與物料間熱交換及濕交換過程的強度。

應當指出，在其他條件相同的情況下，強制氣流中的熱交換及濕交換過程常較自由氣流中強烈。

在強制氣流或自由氣流中的干燥過程可在物料的內部加熱或外部加熱的情況下進行。

外部加熱時，被干燥物料受熱面的溫度常較其內部溫度為高。

相反，在內部加熱時，物料的內部溫度高於其表面溫度。

外部加熱時，物料可由外源以對流、熱傳導及輻射的方式獲得熱量；實際上，干燥時熱交換的所有方式都存在，只是其中之一是主要的、決定性的，而其餘的則是次要的。

對流熱交換方式的干燥，一般稱為熱干燥，它在工業中得到廣泛應用。

由熱傳導供熱方式的干燥在干燥炕、窖中進行或用其他方法進行，而在所有的情況下，被干燥物料都要接觸比本身溫度高的表面。這種干燥方法在工業上的應用有限。按輻射方式獲得熱量的干燥（紅外線干燥）是自外源向被干燥物料投射輻射能。所採用的輻射熱源是特殊的燈、電熱螺絲、加熱面。

投射在被干燥物料上的輻射能，在物料的表面層變成熱能，並藉物料的導熱性來加熱物料的內層。

這個方法在耐火材料工業中未得到推廣，因為實驗室的試驗已指出實際上它不適宜於耐火製品的干燥，但在某些制品及材料（絕緣帶、砂布、漆塗層等）的干燥工業中獲得廣泛的應用。

近來，為干燥制品開始採用基於物料內部加熱的新干燥方法。

根據 K. Γ. 庫馬寧及 B. H. 齊明的提議，曾利用電加熱法，即所謂電干燥或接觸電干燥的方法干燥熔煉玻璃的坩堝。

採用此法時，被干燥物料接入交流電路中作為電阻，當電路中有電流時，制品即被加熱。

從物理觀點出發，接觸電干燥法非常合理，有繼續發展的前途。這個方法的廣泛應用受到必須接觸每個制品的限制，這給大量生產造成很大的困難。但是這個方法在工業中干燥生產量有限的特複雜異形磚、大型磚及貴重的異形制品（例如熔煉玻璃的坩堝、玻璃熔窖用大磚等）時被廣泛應用。

接觸電干燥的特點及有益的優點是有可能調節制品各部分的乾燥制度。接觸電干燥過程的技術指標（干燥速度及干燥時間）較熱干燥優越得多。

最後，我們談一下應用高頻率電流加熱制品的干燥方法。

高頻率電流的干燥方法首先在蘇聯得到應用。

從物理觀點出發，此法與接觸電干燥法有許多共同之處，但不需要接觸制品。

在耐火材料工業中，高頻率電流干燥方法目前還沒有推廣，用此法在實驗室情況下干燥細陶瓷制品時已獲得良好的結果。

儘管上述干燥方法中某些尚未在工業上得到推廣，但是了解這些干燥方法的現有資料是有益的，因為今後的研究是必須繼續進行的，而不應重複這方面已完成的大量工作。

第二章 耐火材料的水分

1. 耐火材料的示意構造

任何耐火材料的泥料都由固體顆粒（粘土、粘土熟料、砂等）組成，在顆粒之間的空隙（氣孔）內充滿水及空氣。

可塑壓制的制品的氣孔在干燥的第一個階段主要被水填充；這種制品的氣孔在干燥的後一階段，以及其他所有最初水分不高的制品的氣孔均被水、水蒸汽及空氣所填充。

在干燥的末期，如果物料溫度升高到 100°C 以上，所有氣孔僅被空氣及水蒸汽所填充。

物料固體顆粒之間的空隙（氣孔），其斷面很小，不管其斷面的形狀如何（窄溝[●]、毛細管等），均可視為毛細管。

耐火制品的示意斷面如圖1所示。

毛細管中液體彎月面上的壓力可用下式計算：

$$P_r = P \pm \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

式中 P_r ——液體彎月面上的壓力；

P ——液體水平面上的壓力；

α ——液體的表面張力；

R_1 及 R_2 ——毛細管中彎月面每主垂直切面的曲率半徑。

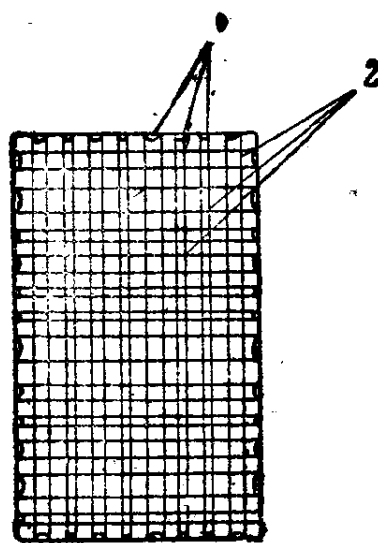


圖 1 制品的示意斷面

1—彎月面； 2—毛細管

● 距離極近的兩個面之間所成的一種毛細管，——校者。

公式 2 的符號與彎月面的性質有關：凸彎月面取正號，凹彎月面取負號。

現討論幾種常見的情況：

(1) 平液面：

$$R_1 = R_2 = \infty; \frac{1}{R_1} = 0; \frac{1}{R_2} = 0; P_r = P$$

(2) 毛細“窄溝”：

$$R_1 = R; R_2 = \infty; \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R}; P_r = P \pm \frac{\alpha}{R}$$

(3) 圓筒形毛細管：

$$R_1 = R_2 = R; \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{2}{R}; P_r = P \pm \frac{2\alpha}{R}$$

或用通式表示為

$$P_r = P \pm \frac{n\alpha}{R} \quad (3)$$

當 $n=0$ 時，由等式 3 可得到平液面的方程式；當 $n=1$ 時，可得到毛細“窄溝”的方程式；當 $n=2$ 時可得到圓筒形毛細管的方程式。

不潤濕毛細管的液體（例如水銀）形成凸彎月面；在這種情況下，公式 3 具有下面的形式：

$$P_r = P + \frac{n\alpha}{R} \quad (3a)$$

因為 n 、 α 及 R 為正值，則 $\frac{n\alpha}{R} > 0$ ，因此 $P_r > P$ ，亦即毛細管中凸彎月面上的壓力大於平面上的壓力（大氣壓力）。

在這種情況下，制品將向各方面作體積膨脹，因此利用不潤濕液體成型制品是不可能的。

潤濕毛細管的液體（例如水）形成凹彎月面。在這種情況下，由公式 3 可得：

$$P_r = P - \frac{n\alpha}{R}$$

因為 $\frac{\sigma}{R} > 0$ ，則 $P_r < P$ ，亦即毛細管凹彎月面上的壓力小於大氣壓力，所以用潤濕液體成型的制品將經受各方面的體積壓縮，從而促使這種制品保持一定的外形。如果制品的表面被超出毛細管的水所遮蓋，即如果表面張力 $\sigma = 0$ ，則根據公式 3 得： $P_r = P$ 。

干燥耐火制品，當載熱體中的水分在制品的表面凝結時就出現這種情況，在這時制品的表面被水膜遮蓋；在這種情況下，彎月面消失，毛細管中的表面張力失去作用，制品的結合性變得極弱，制品的形狀時常損壞。

2. 水分的計算

在耐火材料工業中，用下面的方法計算材料的水分。

知道濕材料的稱樣的重量 G_1 及在 $t > 100^\circ\text{C}$ 溫度下干燥到恒重的稱樣的重量 G_2 後，由干燥前後材料的重量差可求出蒸發掉的水量：

$$\Delta G = G_1 - G_2$$

從材料中排出的水量 ΔG 對濕材料原重量之比乘以 100，即得用百分數表示的材料的所謂相對水分：

$$W^0 = \frac{\Delta G}{G_1} \times 100 = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100 \quad (4)$$

在實際計算中利用相對水分是不適當的，因為降低同一百分數的水分 ΔW^0 將相當於不同數量的蒸發水，這和最初 (W_1^0) 及最終 (W_2^0) 相對水分的數值大小有關。

茲舉例說明。

第 1 種情況

$G_1 = 1.0$ 公斤； $W_1^0 = 30\%$ ； $G_2 = 0.8235$ 公斤； $W_2^0 = 15\%$ ，
則 $\Delta W^0 = 30 - 15 = 15\%$ 。

排出水分的重量等於

$$\Delta G = \frac{W_1^0 G_1 - W_2^0 G_2}{100} = \frac{30 \times 1.0 - 15 \times 0.8235}{100} = 0.1765 \text{ 公斤}$$

在這種情況下，降低百分之一的相對水分相當於排出水的重量 $0.1765 \div 15 = 0.0118$ 公斤。

第2種情況

$$W_1^0 = 15\%; G_1 = 1.0 \text{ 公斤}; W_2^0 = 0; G_2 = 0.85,$$

則 $\Delta W^0 = 15.0 - 0.0 = 15\%$ ，即排出水的百分數與前種情況相同。

排出水分的重量等於：

$$\Delta G = \frac{W_1^0 G_1 - W_2^0 G_2}{100} = \frac{15 \times 1.0 - 0 \times 0.85}{100} = 0.15 \text{ 公斤}$$

在這種情況下，降低百分之一的相對水分，相當於排出水的重量 $0.15 \div 15 = 0.01$ 公斤，即少於第一種情況。

可見，在第一種情況及第二種情況中同一百分數的蒸發水相當於不同公斤數的蒸發水。

這些計算說明，不同數值的 W_1^0 及 W_2^0 的差 $\Delta W^0 = W_1^0 - W_2^0$ ，不能正確地表示材料的蒸發水量，因為百分之一相對水分的重量當量與 W_1^0 及 W_2^0 的絕對值有關。

因此在干燥技術中應用的不是相對水分的概念，而是絕對水分 W ；絕對水分是材料中所含水量對材料的絕對干重之比。

絕對水分根據下式計算：

$$W = \frac{G - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \times 100 \quad (5)$$

式中 W ——絕對水分 (%)；

G ——在某瞬間材料的重量；

$G_{a.c.}$ ——材料的絕對干重。

在這種情況下， $\Delta W = W_1 - W_2$ ，恒與蒸發水量成正比，而且降低百分之一的絕對水分，在 W_1 及 W_2 為任何值時都總是相當於同樣重量的蒸發水。

相對水分與絕對水分之間具有以下的關係：

$$W^0 = \frac{W \cdot 100}{100 + W} \quad (6)$$

及

$$W = \frac{W^0 100}{100 - W^0} \quad (6a)$$

必須指出，當材料的水分不大時， W 與 W^0 值之間的差不大；反之，當水分高時， W 與 W^0 值的差就相當大。

設 $W^0 = 5\%$ ，則 $W = \frac{5 \times 100}{100 - 5} \approx 5.3\%$ ，即在這種情況下絕對水分與相對水分的差不太大。

當 $W^0 = 50\%$ 時， $W = \frac{50 \times 100}{100 - 50} = 100\%$ ，即在這種情況下絕對水分比相對水分大一倍。

爲了互相換算相對水分與絕對水分引用圖 2 的圖表。

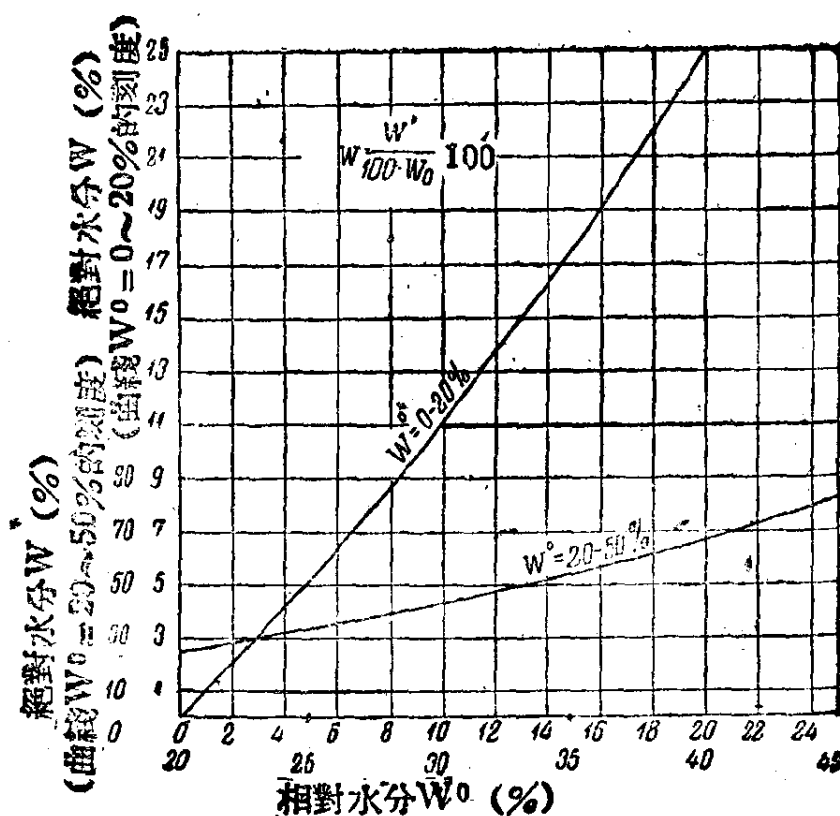


圖 2 相對水分與絕對水分的相互換算圖表

材料水分的測定方法參看“控制測量儀器及自動裝置”一章。

3. 水的物理特性

因爲制品在干燥時材料的溫度有改變，應當確定在不同溫度下存在於材料中水的特性的變化。

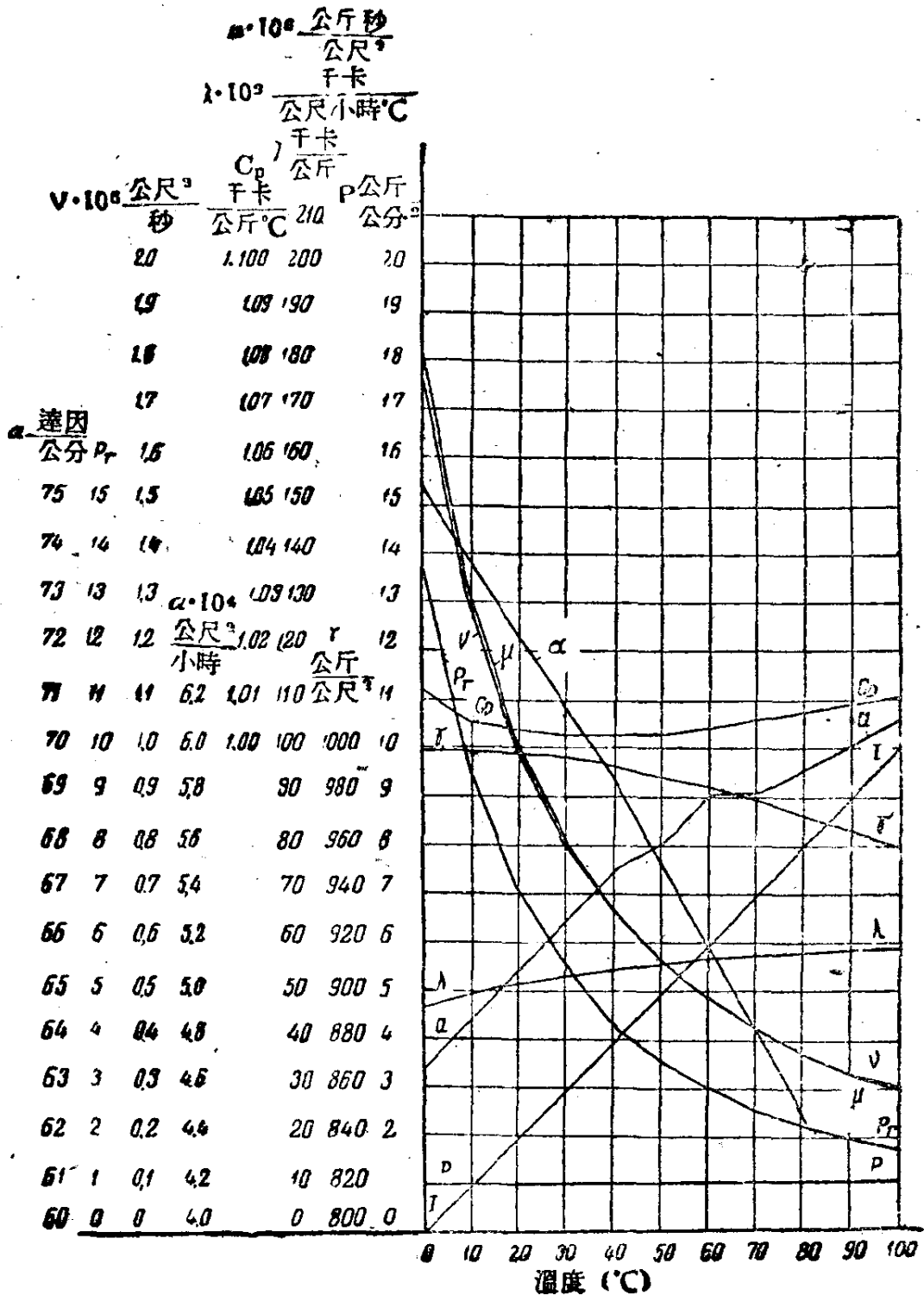


圖 3 隨溫度的改變，水的物理特性的變化

圖 3 表示隨溫度改變的水的各種特性的變化（根據 M. A. 米赫耶夫 [М. А. Михеев] 的資料）。利用圖 3 可以確定出水溫由 0°C 升高到 100°C 時其特性的變化情況，其方法如後。

在恒定的大氣壓下，重度 γ 減少不大——由 1000 到 958 公斤/公尺³。

粘度係數由 $\mu \times 10^6 = 182.5$ 減少到 $\mu \times 10^6 = 29$ 公斤秒/公尺²，或約減少到 $1/6.3$ ，亦即水的粘度隨溫度增高而激劇減少。

動粘度係數 ν 由 1.79 減少到 0.29 公尺²/秒，或約減少到 $1/6.3$ ，亦即與粘度係數的減少相同。

溫度傳導係數 α 由 4.7×10^{-4} 增大到 6.1×10^{-4} 公尺²/小時，亦即增加 30%。

熱傳導係數 λ 由 0.48 增加到 0.585，亦即增加 22%。

水的定壓比熱 C_p 首先由 1.012 (0°C 時) 減少到 1.003 (40°C 時)，然後增加到 1.010 (100°C 時)。一般比熱變化不大，因此在干燥技術中水的比熱視為常數，即 $C_p = 1.0$ 仟卡/公斤 $^{\circ}\text{C}$ 。

水的熱含量按直綫定律增高，由 $I=0$ (0°C 時) 增高到 $I=100$ 仟克/公斤 (100°C 時)。

水的表面張力隨溫度升高而由 75.5 (0°C 時) 減少到 62.3 (80°C 時)，亦即減少 17.5%。

4. 耐火材料中水的技術分類

制造耐火材料時水是必需的成分。例如在制造粘土磚時，水使配料具有成型性質，並為可塑壓制及半乾壓制品的成型創造必要的條件。制造矽磚時，為制備結合磚中石英顆粒的石灰乳，水是不可缺少的。制造鎂磚時，材料的物理水轉變為化學結合水，為鎂磚的成型性及結合性創造必要的條件。配料中的水使制品及材料具有各種不同的物理性質。

在耐火材料與制品中水可能以各種狀態而存在。

圖 4 表示耐火材料中水的技術分類。

耐火材料中的水，分為物理水及化學結合（水化）水。

與配料中個別成分化合的水稱為化學結合水。

粘土耐火材料及鎂質耐火材料的配料中所含化合物 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (高嶺石), $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (氫氧化鎂) 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (氫氧化鈣) 的水化物部分就是化學結合水的例子。

化學結合水在干燥過程的一般溫度下不可能自材料中排出, 因此在干燥過程中化學結合水的量不減少。

相反, 在干燥某些耐火材料 (例如鎂磚) 時, 化學結合水的量可由於物理水轉變為化學結合水而增加。

在燒成過程中, 當溫度高於干燥溫度時, 化學結合水即從材料中排出。

材料在排出化學結合水以後, 永遠失去可塑性質。特別是可塑粘土質材料, 在排出化學結合水後變成非可塑狀態——粘土熟料。

7. 成型水

為使干材料具有成型的性質, 向其加入若干量的水。

成型制品的水分叫作成型水分。成型水分的概念僅適用於可塑壓制的粘土磚, 不適用於矸磚及鎂磚。

各種材料的成型水分也各不相同, 與配料中粘土和粘土熟料的配合比、配料的溫度及顆粒組成有關。同一粘土的成型水分隨配料溫度增高而減少。

用可塑粘土制造的粘土磚正常的成型水分為: 絕對水分 $W = 19 \sim 25\%$, 相對水分 $W^0 = 16 \sim 20\%$; 機壓制品的水分較低, 手工成型的制品較高。

在溫度為 10°C 時, 恰索夫雅爾粘土的成型水分與配料組成的關係如圖 5 所示。

利用圖 5 的曲線可以解決某些實際問題。

[例] 配料中粘土含量 $n = 50\%$ 時, 則成型水分 $W_1 = 20.0\%$ 。
若配料中粘土量減少到 45% 時, 試求所必需的成型水分。

由圖 5 的曲線查得: $W_2 = 19\%$ 。

若配料中粘土量增加到60%時，試求所必需的成型水分。

由同一曲綫查得： $W_0 = 21.5\%$ 。

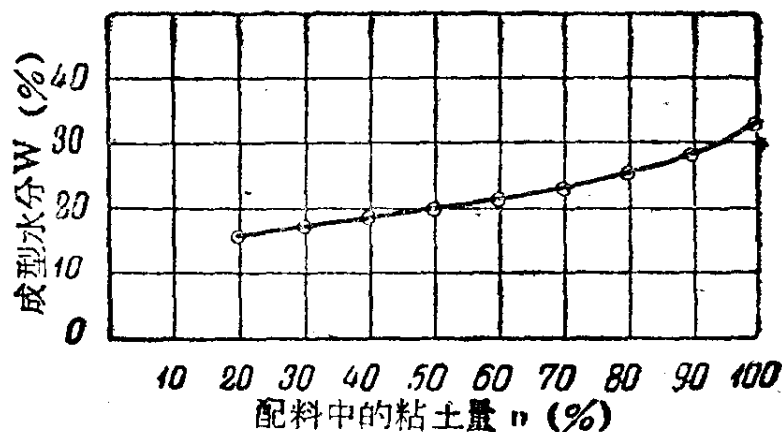


圖 5 成型水分與配料中粘土量的關係
(恰索夫雅爾粘土, $\theta = 10^\circ\text{C}$)

8. 游離水

在恒溫制度下 ($t' < 100^\circ\text{C}$) 排出的部分物理水稱為游離水，而且濕材料表面的水蒸汽壓力 (P_v) 此時等於濕球溫度的飽和水蒸汽壓力。

游離水一般在干燥的初期階段排出。游離水是成型水的一部分。在排出游離水的階段，材料及制品會收縮。

實際上游離水的下限是吸濕水分。游離水分的範圍等於：

$$\Delta W_{\text{自由}} = W_0 - W_r$$

式中 W_0 ——成型水分 (%)；

W_r ——吸濕水分 (%)。

同一配料的成型水分接近於定值，而吸濕水分與干燥制度有關；因而游離水的量 $\Delta W_{\text{自由}}$ 也與干燥制度有關。

9. 收縮水

制品發生收縮，即綫尺寸改變時自材料中排出的部分水稱為收縮水。各種材料的收縮水分不同，且與干燥制度有關。

收縮水分的變化範圍決定於最初水分 W_H 與收縮終了水分 $W_{r.yc}$ 之差，即是

$$\Delta W_{yc} = W_H - W_{r.yc}$$

同一泥料的收縮終了水分與干燥制度有關，因此收縮水的量也與干燥制度有關。

綫收縮與材料水分的關係如圖6所示。由圖6的各曲綫可見，綫收縮大致與材料水分的減少成比例地增大；當 $W = W_{r.yc}$ 時，綫尺寸的變化停止。

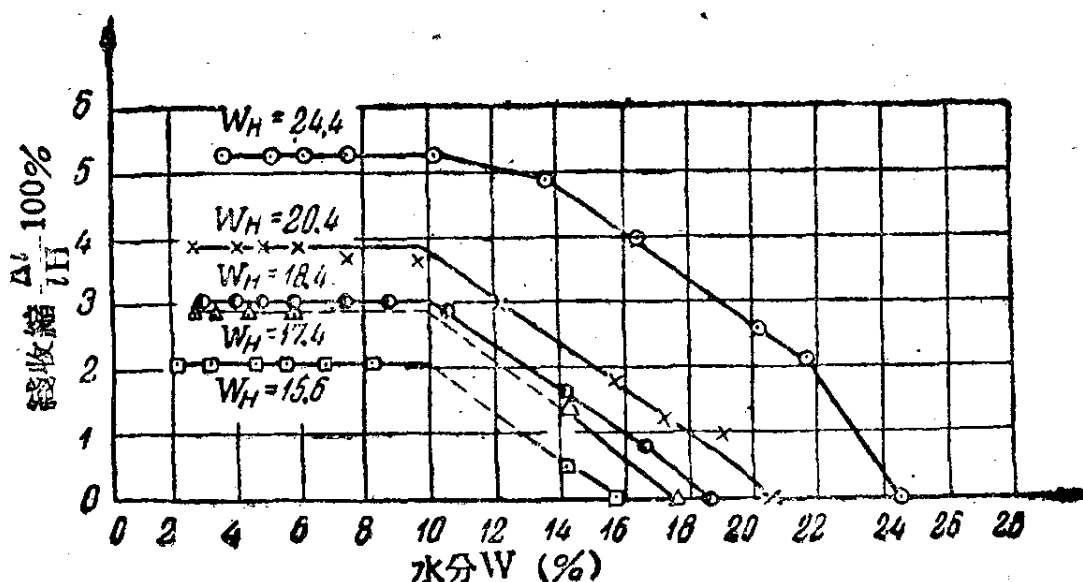


圖 6 干燥過程中，綫收縮與材料最初水分的關係

在恒定制度下，對 $W > W_{r.yc}$ 的任何值而言

$$\left(\frac{dl}{d\tau} \right) = a = \text{常數}$$

亦即在恒定制度下，當 $W > W_{r.yc}$ 時，收縮速度為定值。收縮量與最初水分及收縮水分的關係如圖7所示；由圖7可見，綫收縮與收縮水分成正比。對薄的制品來說這種關係完全正確；對厚壁制品來說在干燥初期有時與直綫關係有出入。

為正確選擇干燥制度，必須測定各種制品的收縮終了水分，因為在排出收縮水階段 ($\Delta W_{yc} = W_H - W_{r.yc}$) 必須小心地進行干

燥。在收縮終了階段必須特別小心地進行干燥，因為制品表面的收縮已經完畢，而內層的收縮尚在繼續進行。相反，如果制品的水分 $W < W_{K.YC}$ 制品的干燥可以快速進行，而不怕收縮產生廢品。

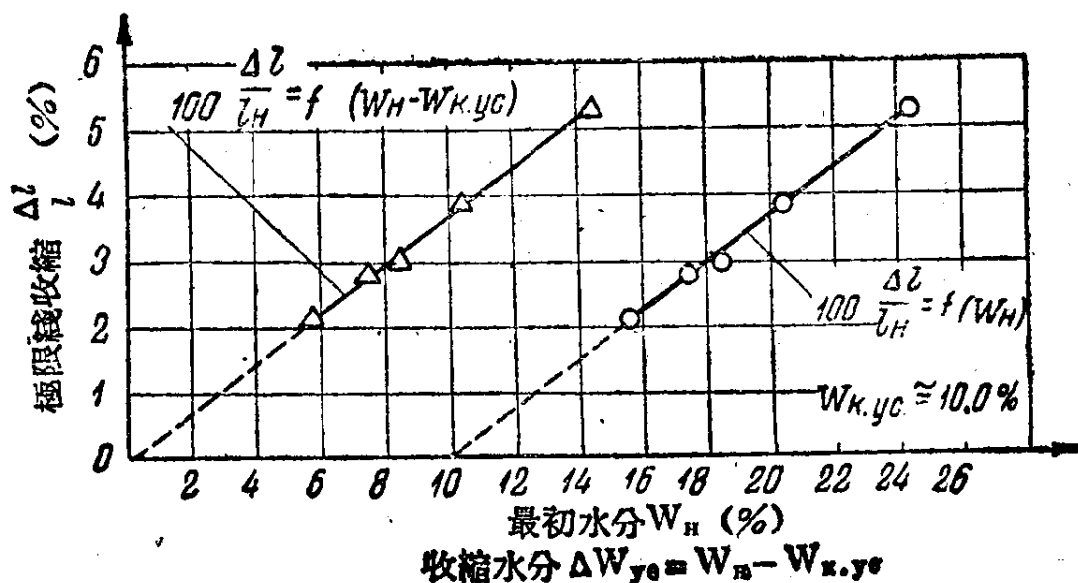


圖 7 總收縮與收縮水的關係

10. 吸濕水

當材料表面的水蒸汽分壓 P'_s 小於濕球溫度的飽和水蒸汽壓力 P'' ($P'_s < P''$) 時，材料的水分稱為吸濕水分。

各種材料的吸濕水分不同，且與干燥制度有關。

只有在 $t' > 100^\circ\text{C}$ 的條件下，吸濕水才可能全完排出。

如果 $t' < 100^\circ\text{C}$ ，則在干燥過程中僅排出一部分吸濕水（由最初吸濕水分 W_r 到平衡水分 W_p ），即所排出的吸濕水的範圍等於：

$$\Delta W_r = W_r - W_p$$

如果 $t' > 100^\circ\text{C}$ ，則 $W_p = 0$ ， $\Delta W_r = W_r$ 。

如果 $t' < 100^\circ\text{C}$ ，則 $W_p \neq 0$ ， $\Delta W_r = W_r - W_p$ 。

所排出的吸濕水的量 ΔW_r 與干燥制度有關，而且對不同的

材料來說也不相同。

在排出吸濕水階段，制品不發生收縮。因此這一干燥階段是不難進行的，在此階段也不可能由於不均勻收縮造成廢品。

11. 平衡水或穩定水

材料表面的水蒸汽壓力等於四周介質中水蒸汽的分壓時材料的水分稱為平衡水分或穩定水分。

這樣，材料平衡水分的特征為等式

$$P'_* = P'$$

式中 P'_* ——材料表面的水蒸汽壓力；

P' ——四周介質中水蒸汽的分壓。

各種材料的平衡水分不同，對所指材料而言，平衡水分與干燥制度有關。

在一般的情況下，可寫成

$$W_p = F(P')$$

因 P' 決定於空氣的干球溫度及相對濕度，所以可寫成

$$W_p = F(P') = F(t', \varphi)$$

圖 8, 9 及 10 為某些耐火材料的平衡水分與空氣溫度及相對濕度的關係（根據 A. A 舒米林的資料）。所列的圖表指明在指定的干燥制度下可能的制品最終水分。

在指定的干燥制度及材料的最終水分 W_* 下，可以按圖表確定下列情況：

1) 如果 $W_* > W_p$ ，則在該制度下得到指定的 W_* 值是可能的；

2) 如果 $W_* < W_p$ ，則在該制度下得到指定的 W_* 值是不可能的；

3) 如果 $W_* = W_p$ ，則在該制度下可能得到所指定的最終水分 W_* 值，但為此需很長的時間。