

乾燥簡化理論

馮丁樹

影響設計與機械性能之因素

化學工程師較關心乾燥工廠之選擇或特殊廠之設計，以符合不同之乾燥條件。下述為考慮的因素，其中計有 34 項，可供參考。由這些因素可以確立特定的產品，而且因問題的內容而具不同之重要性。在乾燥過程中，有些因素是互為因果的，有些在恆率乾燥期較顯著，有些則在減率期較為重要。

在所列之因素中，有些是牽涉到乾燥設備之基本資料，可經由實驗數據加以預測或公式化。例如針對某些材料如石英，一般可以準確預測其過程，但有些材料如泥土等則不然。故即使有些參數可以公式量化，但要增加一個新參數於模式中時，仍需要漫長的試驗，比利用實驗方法或以小規模的實驗來決定乾燥特性的方法，其所需之代價也高。但這並不是說，未來研究工作不應該朝向發展精確的模式方式進行，有關乾燥過程中，瞭解更多被乾燥體相互間之機制仍然甚為重要。因為這類研究工作，其結果對於操作成本之降低及產品之改善仍有相當大的影響空間。

乾燥過程中之參數

一、熱傳遞

1. 加熱媒介至液體表面之熱傳遞。
2. 連繫膜之熱傳遞。
3. 固體直接至液體之熱傳遞。
4. 固體至液體在交界面(空泡)透過表面膜之熱傳遞。
5. 加熱媒至近乎全乾物體間之熱傳遞。
6. 液體之熱導係數。
7. 濕固體之熱導係數。
8. 完全乾固體之熱導係數。
9. 液體之潛熱。
10. 在乾燥期後段當結合水移除時之液化熱。
11. 有些乾燥機在液體蒸發前提供之溶解熱與濕材料液化與溫度間之關係
12. 液體中所存電解質對物質乾燥之影響，例如泥土。

二、乾燥環境因素

13. 乾燥環境之壓力與溫度
14. 乾燥空氣之成分，包括乾燥過程中液體分壓之變化。

15. 乾燥空氣通過乾燥表面之相對速度。
16. 液體之有效蒸汽壓，包括在乾燥過程中沸點之變化等，例如 NaOH。
17. 在固體床中，乾燥鑿氣之飽和度。

三、固液系統中之一般物理特性

18. 固液內表面張力。
19. 固液間之黏結膜(Bond film)之厚度。
20. 氣孔中之表面積與液體體積之比。
21. 蒸汽在氣孔間之擴散係數。
22. 氣孔內部液體之毛細管吸引現象。
23. 氣孔內液體之梯度濃度。
24. 在固態體積內，纖維質或氣孔之存在程度。
25. 液體分子之大小—與一些有機液體相關的分子。
26. 在濕材料中，剩餘液體雜質之最大容許含量—例如在過濾器殘存之物質，其雜質有可能會吸附已乾燥之物質。

四、固體之特性

27. 顆粒大小。
28. 固體之有效面積。
29. 孔隙度。亦即氣孔之大小及伸入分支之長度。
30. 固體在液體中之溶解度。液體為濕固體結構之一部份。
31. 泥漿乾燥之表面硬化度，其表面接近無氣孔狀態，其導致之效應是乾燥速度降低。
32. 在乾燥期間粉末硬化之情形，其團粒形成後之強度。
33. 已乾物質之抗研磨能力。
34. 已乾物質中所能容許之液體最大含量，例如為防止在儲藏期間形成硬塊，或在大宗物質搬運期間之自由流動程度等。

蒸餾、蒸發及各種氣體之吸附等現象，在乾燥作業過程中，扮演相當重要的角色。乾燥係以固體或固粒物為作業對象，其間尚需觀察水分子之轉移。固粒乾燥有如下之特性：

(1)形態之多樣性

需採用乾燥作業程序之材料，其涵蓋範圍相當廣泛，諸如穀類等有機體之顆粒狀、陶瓷高壓?子特殊構造、木材成品之板狀或塊狀、布質材料之纖維狀、衛生食品如奶品之粉粒狀，以及濃度甚高之泥漿或豬糞尿液等。由於處理對象之外在特性多樣，故其所需之乾燥設備相差很大。

(2) 乾燥本身之差異性

即使前項在同一形狀下進行乾燥，其乾燥特性差異亦相當大。主要原因是各種材料之保水性質均不相同，材料本身之親水性及非親水性、毛孔之構造與大小均會影響乾燥時程，以及水分出入之難易度。當然同一材料若改變其形態時，其乾燥特性亦會隨之改變。

(3) 工程技術之應用

乾燥作業仍受制於機械設備之性能。由於對象複雜，材料之供應、輸送及儲存等作業均必須搭配進行。工程上之考慮更會造成差異甚大的機型出現。有些機型重點在乾燥效率，有些則在於產品之品級。例如茶葉或菸葉的乾燥，其目的不只在於將水分脫離產品而已，必須讓它有時間進行癒合的功能，使其能維持原有之香味，而有些未來要作為種子之穀類乾燥，則必須在乾燥過程中仍能維持其發芽率。

這些因素是由各方面加以整合，達到最佳化。工業之技術雖與生物不同，但由於其處理對象之不同，利用工程觀點所設計之設備亦會有很大的差異。例如泥漿之乾燥濃縮處理，必須經由輸送、噴霧技術、乾燥塔之通風等過程，而熱風之來源則必須考慮重油爐之使用，其過程亦必須考慮灰塵之收集，以及噪音之防制等工作，這些有時是超過純乾燥為目的而考慮的問題。

(4) 乾燥設備大小之選擇

適當的設備才能發揮其應有的功效。過大或過小，在運作上均無法達到經濟規模，更無法做到最佳化之要求，故如何在設計或規模之前，考慮設備之需求及其所提供的性能，至為重要。

(5) 設置土地條件之考慮

乾燥設備之建立除經濟因素外，尚需由環境之要求所衍生之技術問題。乾燥需要大量之能源，故廢熱之污染與利用問題，對環境而言亦是重要的課題。而乾燥過程中，所產生之廢氣、細塵及噪音等，常易造成環境污染、困擾居家環境。因而必須利用污染防制技術克服此一項缺點，以消除環保人士之疑慮。

處理範圍

乾燥固粒所採用之方法與程序，理論上跟固體本身所產生之傳導、對流與輻射等之熱傳遞機制有關。在直火的應用中，實際上仍以對流與傳導兩作用較為顯著。前者係藉熱空氣通過被乾燥之固粒表面；而後者則藉由壁面的加熱作用達成。當然兩者中亦會參雜著輻射作用，或者在對流旺盛的乾燥倉中亦有部份經由牆壁加熱。但是，除了部份烤箱外，很少乾燥機完全藉熱輻射作用來達成乾燥之目的者。

故在實際之應用上，為簡便起見，很多人常僅考慮熱對流對乾燥之影響，然後再利用誤差原理修正因其他兩項作用所導致之偏差。無論如何，要將濕固體之乾燥過程做理論研究時，常必須瞭解在特定熱條件之下，影響固體中水分及水蒸氣移動之各項因子。其間因而必須能合理說明固粒之內部結構，依其物理特性分析液體及蒸氣之移動速率。前面所提到的 34 種可能因素是構成這方面分析之複雜性，尤其若固體本身在乾燥過程中，其結構也可能變化時，將更趨複雜。目前有些可以解釋的理論與現象有時仍有相當的前提與假設，其應用上也需有所保留。

另一方面，對某些特定的材料而言，其外在乾燥環境與乾燥速率之變化關係仍然有一定的規律可循。我們以後所談論的，大概也僅能以這樣的心情及這種情況下之理解程度進行各種細節討論。這也意味著有些應用仍有其限制，故即使有些相關乾燥速之討論，最後仍需針對該特定物質之實驗資料進行比對，才能真正定案。而且，由某一情況演繹而來的結果，亦並不一定能應用到其他不同的狀況。

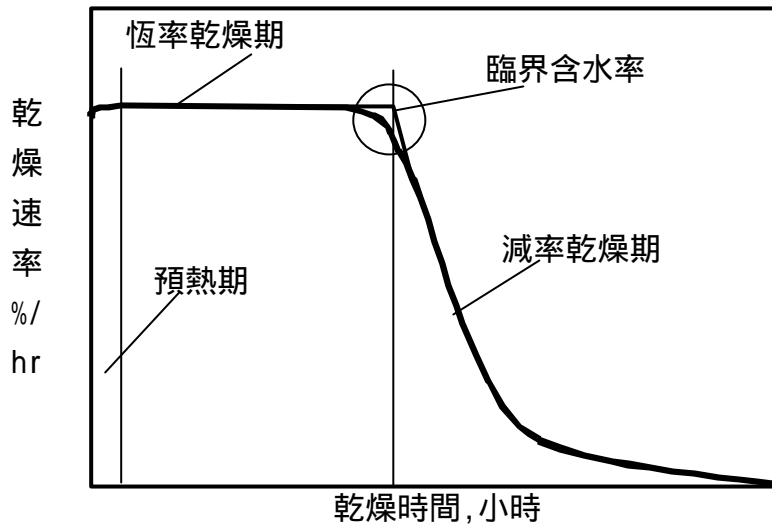
特別注意的是一台乾燥機之實際性能常受限於機械特性與被乾材料本身之乾燥特性。這些材料特性差異極大，故亦會造成不同的乾燥結果。例如有些乾燥系統，因為穀物作為種子用途，故在整個設計上，其進料或輸送之裝置可能佔更重要的地位，有時反而比乾燥機本身之考慮更為複雜。因此在這裡所討論的理論公式，可以說僅能對乾燥現象之瞭解有所幫助，但在整個系統之設計上，則可能更需要實際的試驗資料，才能獲得較佳的成果。

熱對流作用

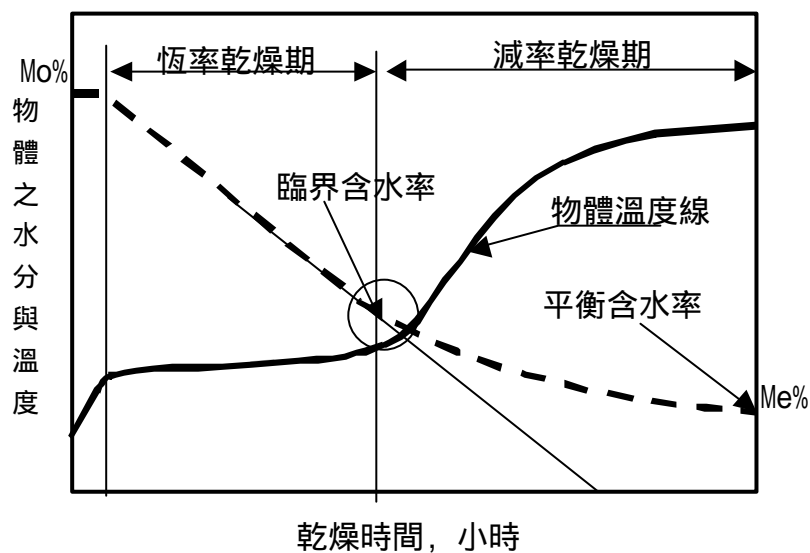
簡介

如前所言，熱對流之作用係將加熱過的空氣通過待乾燥的物體表面。熱空氣可以藉對流之作用將熱傳遞給待乾之物體，然後將蒸發之水氣帶走。假如熱空氣之溫、濕度維持穩定狀態，則乾燥過程將可以分出兩階段。最初乾燥速率維持恆定，待物體水分下降至某一程度後，乾燥速率乃開始下降，前階段稱為恆率乾燥期；而後段則稱為減率乾燥期。後者之過程持續進行，直到物體被乾到完全沒有水分為止。物體在乾燥速率開始下降時之水分稱為臨界含水率。但實際上，這個臨界含水率並不一定停留在一點，而是仍然維持一個變化範圍，如圖 1。

就實際的情況言，在乾燥過程中，最初仍有一段短時間之材料預熱期。因為乾燥之初，材料溫並未達到平衡狀態，故熱空氣在初期對材料會有加溫作用，故此時之水分減少量無法依恆率乾燥期計算。在充分濕潤的材料表面上，水分等於自由水平面之蒸發，此時之溫度應為濕球溫度。圖中 b 所示為材料水分含量與溫度隨經歷之乾燥過程所發生的變化。在恆率乾燥期間，水分以直線的斜率下降，但材料溫度仍然維持一個定數，即為所謂之濕球溫度。經過臨界水分點後，材料之水分減少量變為緩慢，是為減率乾燥期，此時溫度開始上升，當材料水分達到其應有之平衡含水率時，其溫度則趨近於熱空氣之溫度。此時乾燥效率漸近零。



a) 乾燥速率與乾燥時間之關係



b) 乾燥速率與待乾物含水率變化之關係

有些情況是物體之初始含水率可能低於其原有之臨界含水率，故在乾燥伊始，整個乾燥過程即進入減率乾燥階段，無法經歷恆乾燥過程。減率乾燥過程中，水分之變化依待乾物之種類乾燥期間之物理變化而定，有些會略呈上凸或下凹，或以直線下降。有些物質在乾燥過程中，會產生收縮、龜裂或形成一種表層在乾燥物之表面上，這些都是造成上述減率乾燥期，水分含量不同變化之原因。

恆率乾燥期通常發生在待乾物表面完全被淋濕的情況。如稻穀本身很難達到臨界含水率，故乾燥時均處於減率乾燥狀況。但若在雨中收割，有如在水中浸泡過一樣，即有明顯的恆率乾燥期。菸草葉之水分通常高達 75% 以上，故具有明顯

的恆率乾燥期。

在恆率乾燥期間，乾燥速率完全由乾燥條件所控制，亦即處於純對流狀態，故應與乾燥空氣通過待乾物時之速度、溫度及相對濕度有關。只要這些條件固定，則乾燥速率亦維持恆定。亦即由待乾物中流出之液體水分能流分供應外界水面之蒸發速率；若進入減率乾燥期時，液體水分脫離待乾燥物內部之速率減低，因而限制外面對流作用之效率。此時表面水分已不如以往的多，可以蒸發之水分因而大為缺乏，故乾燥速率僅能視內部水分外移之速率而定。臨界水分含量代表內部水分外移量等於表面蒸發之水分量，一般仍然以一種變動範圍表示，其值常受外界氣溫之影響。

恆率乾燥有時會造成誤解，以為材料乾燥期間，經過恆率乾燥期時之乾燥速率就維持常數。但這種說法並不儼然正確，因為恆率值仍然受外界因素所控制，一旦風速變動，或環境條件變化，其值也會跟著變化。故最好的表示方式仍以濕球溫度恆定的觀念較為妥當。雖然如此，由於恆率乾燥的名詞散見各文獻，故仍以此稱呼之。

在乾燥期間，材料所含水分之變化係由初始含水率至平衡含水率。後者因環境條件及材料之性質而有不同，但實際上是一種水分平衡狀態。此時材料內部之水分移動，流出及流入之速率應為相等。任意水分含量與平衡含水率間之差又稱為自由水分，即為材料所可能經由乾燥而釋放至外界之水分量。

熱質傳遞之平衡問題

一般乾燥過程中，所牽涉的因素分為內部因素與外部因素。外部因素係指熱量流入及水分釋出後之蒸發狀況；內部則為材料之內部水分因受熱而產生之流動情形，其影響之特性包括其成分、形狀、含水率及平衡含水率等。無論內部及外部，所談及的水分流動應是同一觀念。乾燥速率若同樣以 R 表示，則因內部與外部參數之差異，會有兩種不同之表示方式。其一為每單位材料乾燥表面積中，每小時流過之水分量，或 $(R, \text{Kg/hr.m}^2)$ ；另一為每單位乾質每小時乾燥之水分量，或為 $(R_w, \text{Kg/hr.kg})$ 。則

$$R = R_w (W / A)$$

式中, W 為材料乾質 (kg)

A 為乾燥面積(m^2)