

水分在非吸濕性多孔體表面蒸發研究

Study on the Evaporation of Water from a Nonhygroscopic Porous Medium

國立嘉義農專農業土木工程科副教授

李 茂 田
Maw-Tien Lee

摘 要

本文以水份在多孔體表面蒸發模擬土壤之微小顆粒表面蒸發現象。實驗選用 30 ~ 50 mesh 的石英砂與各種不同濃度的硫酸鈉溶液相混合，做為多孔體進行蒸發實驗。使用之水經逆滲透 (R.O.) 與去離子 (D.I.) 處理，其電阻大於 10M Ω 。為了解表面蒸發現象，實驗採恆溫與固定氣體流速之強制對流，以紅外線燈光為熱源。在蒸發過程紀錄多孔體中心與表面之溫度。此外，多孔體之重量亦加以記錄以計算蒸發速率。外界溫濕度亦在實驗中予以量測。本文利用離分壓理論，推導極薄水膜蒸發之機構。配合實驗結果，說明鹽份對多孔體表面蒸發之影響。實驗與理論均證實液膜蒸發 (Liquid Film Evaporation) 對多孔體表面蒸發極重要。而鹽類的存在，對蒸發的影響亦在文中討論。

關鍵詞：液膜蒸發，鹽。

ABSTRACT

The behavior of evaporation of water from the surface of a porous medium is investigated in this study. The porous medium was used to simulate the particle of soils. Quartz sand (30 ~ 50 mesh) was packed as the porous medium. Pure water with electric resistance greater than 10M Ω was used in the experiments. Force convection with constant air velocity and temperature was used in the experiments. Temperatures at the surface of the porous medium, in the center of the medium, above the surface of the medium and in the ambient air were measured. Weight of the porous medium with the liquid was also measured to get the rate of evaporation. A theoretic model was developed to describe the evaporation of the water film. The results of the experimental and theoretic analysis show that the addition of the salt has a great influence on the rate of evaporation from surface of a porous medium. The drop of vapor pressure by the addition of salt is considered to be one of the important factors in this system.

Another important mechanism may be the decrease of the evaporation of the liquid film, driven by the gradient of the disjoining pressure, as well as the the interface of liquid surface curvature due to meniscus effects.

Keywords : Liquid film evaporation, Salt.

一、前言

水份在土壤表面蒸發是農業上極重要的研究課題，文獻上大多由巨觀的觀點討論蒸發速率，如 Lockington(1994)與 Kumiaki Sato 等(1990)，對蒸發面的蒸發機構較少涉及。本研究即由蒸發機構研究，更進一步探討水中鹽份對蒸發速率之影響。因整個蒸發問題牽涉極複雜，故本文之理論分析僅探討純水在恒速期之情況，對減速期暫不討論。

對恒速期的蒸發機構，文獻上的理論探討可歸納為底下幾種：

- (1)毛細理論(Capillary Theory)，如 Peck 等(1977)，
- (2)蒸發面下降模式(Receding Meniscus Model)，如 Arzan and Morgan(1967)，
- (3)擴散控制模式(Diffusion Controlled Model)，如 Suzuki 等(1977)。

此外 Lee and Maa(1992)結合擴散控制模式與蒸發面下降模式，再導入界面蒸發區之影響，以探討恒速期的蒸發特性。界面蒸發區的觀念導源於離分壓對極薄液膜內液體流動的影響，此有別於考慮表面張力與曲率變化的 Young-Laplace Equation 所描述部份。對極薄液膜的蒸發提供另一考慮的空間。

離分壓的理論計算，至今仍是個未完全解決的問題。尤其對極性液體如水，由於有雙極矩(dipole moment)的存在，甚至有氫鍵或離子擴散層(ionic diffusion double layer)，故造成許多理論推導的困難；對水溶液之多成份系統更是複雜。Derjaguin(1987)等對離分壓曾做完整的描述。由於從理論計算離分壓不易，故欲由純理論分析以了解極薄液膜之分佈與蒸發等特性，有實際的困難，故在本研究以實驗的方法，求得多孔體表面

蒸發速率，再配合液膜存在的事實，探討液膜對此蒸發系統的重要性，並進一步了解鹽分對此系統的影響。實驗選強制對流，以符合實際操作情形。

二、理論分析

考慮多孔體表面蒸發的問題，在乾燥程序中，常被提及，尤其在恒速期階段，因多孔體表面僅部份被液體覆蓋，然其乾燥速率卻仍然維持如全溼表面時的乾燥速率，故多種的理論被用來解釋此種現象。其中液膜蒸發為一極合理的解釋。此項理論說明，在多孔體表面，由於極薄液膜的存在，又因其快速蒸發的特性，足以補充部分乾涸表面所減少的蒸發量，所以僅部分溼潤的多孔體表面，也能維持全溼表面的乾燥速率。在多孔體表面發生蒸發時，其對流熱質傳邊界條件可用下列二式說明：

$$\rho_1 V_1 + \rho_v V_v = k_m (\rho_v - \rho_{v\infty}) A_m \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} + h_{vap} \rho_1 V_1 = h(T_\infty - T) \dots\dots\dots (2)$$

式中 A_m 為進行蒸發的潤濕表面積，包括液膜與液體面積(如圖 1)。T：溫度， k_m ：質傳係數， h_{vap} ：蒸發熱， h ：對流熱傳係數； λ_{off} ：熱傳導係數， ρ_1 ， ρ_v 與 $\rho_{v\infty}$ 分別為液體，蒸氣與空氣中蒸氣之密度。在本文之理論分析中，最重要的是如何維持一極薄液膜的穩定存在與求的 A_m ，而離分壓正可說明此液膜存在的原因並可用以求得 A_m 。

離分壓為液膜之一重要熱力學性質，其產生乃因兩個界面區間(如固／液，氣／液)重疊所致。Derjaguin 等自 1930 年起即陸續發表此項理論分析與實驗結果。今為界面科學界所廣泛應用的 D.L.V.O. 理論，即為一有名的實例。

在固體面上維持一極薄液膜，且在此液膜表

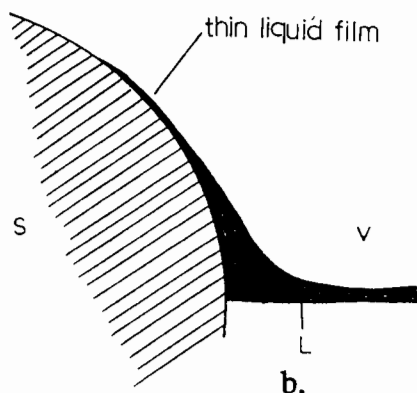
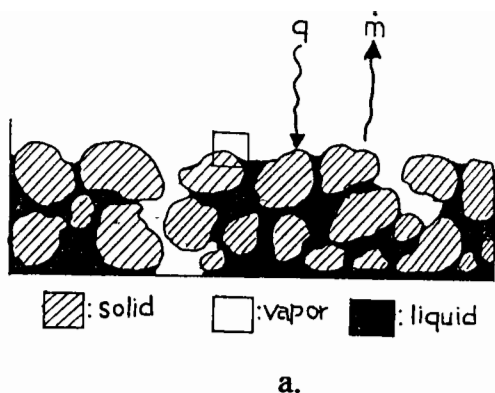


圖 1 a. 多孔體示意圖
b. 多孔體液膜示意圖

面進行熱質傳問題，文獻上有許多討論。Kaviany (1992) 將此類問題做了有系統的整理。然這類的討論，其重點均為非極性物質，對極性液體（如水）較少做分析，主要因離分壓的理論分析尚未完整，對極性液體的分析有所困難。在本研究中，因所處理的是多孔體表面水份蒸發的現象，且部份伴有鹽類存在，故嘗試以定性描述來探究此問題，並輔以實驗數據進一步說明。

如前述，離分壓的產生，乃因兩界面區重疊所產生，其大小受液膜厚度所影響。二界面區重疊之所以能生離分壓，其主要來源有五個：

- (1) 由二界面區的電雙層 (electric double layer) 重疊所產生 P_{de} 。
- (2) 因為凡得瓦力作用產生 P_{dm} 。

- (3) 由邊界層內結構重組（如 solvation interaction）所產生 P_{ds} 。
- (4) 由非極性溶質吸附所產生 P_{da} 。
- (5) 由介面活性劑或高份子物質吸附層之立體作用所產生 P_{dc} 。

因離分壓產生的來源不同，截至目前，尚無可靠之方法，可同時得到各成份之離分壓值。況且各成份之離分壓可否加成，頗值得懷疑。故由理論得到完整之離分壓關係，仍有困難。Teletzke 等 (1987) 分析認為 P_{de} 、 P_{dm} 、 P_{ds} 三者對極性液膜較重要，表 1 為此三者與厚度間之關係。

表 1. 離分壓來源與液膜厚度關係

成 分	來 源	與液膜厚度之關係
Molecular P_{dm}	London van der Waals force dispersion including electromagnetic retardation	A/h , small h B/h^4 , large h
Ionic-Electrostatic P_{de}	overlapping of double layer surface charge-dipole interaction	$Ee^{-\kappa h}$ A/h , water
Structural P_{ds}	short range forces Hydrogen bonding	A_0 A_1/h , water

Pashley(1980) 分析水在石英上吸附之實驗結果，發現以 BET 方程式來說明可得到十分合適的結果，如方程式(3)

$$P_d = \frac{3RT}{V_m} \frac{1}{h} \dots \dots \dots (3)$$

$$= \frac{-RT}{V_m} \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \dots \dots \dots (3-a)$$

式中 $\frac{P}{P_0}$ ：相對蒸氣壓，

V_m ：液體之莫耳體積，

h ：液膜厚度。

此結果與表 1 中 Hydrogen bonding 的效果一致。在 Pashley(1980) 之實驗及討論中說明，當 $h < 30$ nm，(3)式可適用，但當 $h > 150$ nm 則靜電效應所產生的離分壓最重要，即

$$P_d = \frac{A}{h^2} \dots \dots \dots (4)$$

本文為處理多孔體表面之蒸發，顆粒在 30 ~ 50mesh 之間，且為純水或水之電解質溶液，故暫時選用方程式(4)做理論分析。又因電解質對其影響如何，無法掌握，故本文分析純水之極薄液膜蒸發效應為主。先由理論證明在純水系統中的，

確有由離分壓效應所產生的液膜存在，再由實驗比較純水與電解質溶液在多孔體表面蒸發之不同，以了解電解質對多孔體表面蒸發的影響。

如圖 2，液膜內之壓力為 P_l ，氣相之壓力為 P_v ，根據 Derjaguin 等 (1987) 分析，液膜內之壓力梯度可表為

$$dP_l = -dP_d + d(k\sigma) \quad (5)$$

式中 k ：液膜之曲率 (curvature)

σ ：界面張力

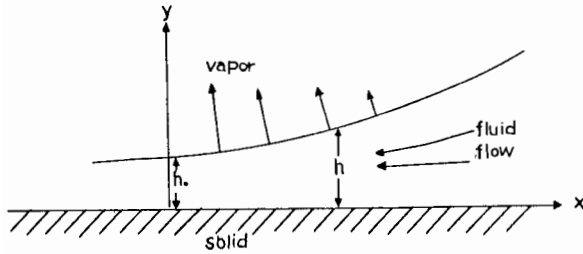


圖 2. 液膜流動、蒸發示意圖

Wayner 等 (1976) 分析認為，在這種問題，液膜的曲率效應可不予考慮，若界面張力 σ 亦為定值，則

$$dP_l = -dP_d \quad (6)$$

如前述，選用 (4) 式來描述離分壓：

$$\frac{dP_d}{dx} = -2Ah' h^{-3} \quad (7)$$

再考慮液膜內之液體流動，由動量平衡知：

$$\frac{dP_l}{dx} = \mu \frac{d^2 U}{dy^2} \quad (8)$$

式中 U 為液膜內之液體流速， μ 為液體之黏度。若在氣-液界面間無剪應力存在，固-液面無滑動情形，則積分 (8) 式得，

$$U(y) = \frac{1}{\mu} \left[\frac{dP_l}{dx} \right] \left[\frac{y^2}{2} - hy \right] \quad (9)$$

此時，單位寬度之流體質量流速為：

$$\Gamma = \rho \int_0^h U(y) dy = \frac{-h^3}{3\nu} \frac{dP_l}{dx} \quad (10)$$

由 (6)(7)(10) 三式得

$$\Gamma = \frac{-2A}{3\nu} h' \quad (11)$$

在穩定狀態下，蒸發量與液膜之流動量應達平衡，故

$$M_e = -\frac{d\Gamma'}{dx} = \frac{2A}{3\nu} h' \quad (12)$$

根據 Sukhatme 與 Rohsenow (1966) 分析界面蒸發流

通量，可由 (13) 式做估算

$$M_e = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{M}{2\pi R} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{vlv}}{T_{lv}^{\frac{1}{2}}} - \frac{P_v}{T_v^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (13)$$

式中 α 為常數 M ：液體分子量， P_{vlv} ：氣-液界面之蒸氣壓， T_{lv} ：氣-液界面之溫度， T_v ：氣-液界面之溫度， P_v ：為氣相之蒸氣壓， R ：理想氣體為常數。

當液體之過熱度 (Super heat) 不大時，(13) 式可簡化為

$$M_e = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} (P_{vlv} - P_v) \quad (14)$$

$$\text{式中 } T = \frac{T_{lv} + T_v}{2}$$

由 (12) 式與 (14) 式得

$$\frac{2A}{3\nu} h'' = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} (P_{vlv} - P_v) \quad (15)$$

利用 Wayner (1976) 推導之關係式知

$$P_{vlv} - P_v = P_v \left(\frac{M h_{fg}}{RT_v T_{lv}} \right) (T_{lv} - T_v) + \frac{V_l P_v (-P_d)}{RT_{lv}} \quad (16)$$

式中 h_{fg} 為液體之氣化熱， V_l 為液體之莫耳體積。

由 (15)(16) 式得

$$h'' = \frac{\nu}{A} \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{2\alpha}{2-\alpha} \right) \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \left(P_v \frac{M h_{fg}}{RT_v T_{lv}} (T_{lv} - T_v) - P_v \frac{V_l}{RT_{lv}} \frac{A}{h'} \right) \quad (17)$$

定義

$$G = \frac{3}{2} \frac{\nu}{A} \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_v M h_{fg}}{R} \right) \left(\frac{T_{lv} - T_v}{T_v T_{lv}} \right) \quad (18)$$

$$I = \frac{3}{2} \frac{\nu}{A} \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_l P_v}{RT_{lv}} \quad (19)$$

(17) 式可簡化為

$$h'' = G - \frac{I}{h^2} \quad (20)$$

液膜上任一點之熱傳係數 h_t 可以 (21) 式表示

$$h_t = \frac{h_{fg} A}{(T_{lv} - T_v)^{\frac{1}{2}}} \left(G - \frac{I}{h^2} \right) \quad (21)$$

在固-液-氣三相界面之液膜厚度 h_0 可由 (21) 式中令 $h_t = 0$ 得到，則

$$h_0 = \sqrt{\frac{I}{G}} = \sqrt{\frac{A V_l T_v}{M h_{fg} (T_{lv} - T_v)}} \quad (22)$$

理想之熱傳係數 h_t^d 為

$$h_i^{id} = \frac{h_{fg}AG}{(T_{lv} - T_v)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots(23)$$

任一點之熱傳係數與理想熱傳係數比為

$$\gamma = \frac{h_i}{h_i^{id}} = \frac{G - \frac{I}{h^2}}{G} = 1 - \frac{I}{G} \frac{1}{h^2} = 1 - \left[\frac{\delta_0}{\delta} \right]^2 \dots\dots\dots(24)$$

整個液膜之平均熱傳係數比為

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_{h_0}^h \gamma dh}{\int_{h_0}^h dh} = 1 - \frac{\delta_0}{\delta} \dots\dots\dots(25)$$

定義

$$\eta = \frac{\delta_0}{\delta} \text{ 則 } \bar{\gamma} = 1 - \frac{1}{\eta^2} \dots\dots\dots(26)$$

$$\zeta = -\frac{x}{\sqrt{\frac{h_0}{G}}} \text{ 則 } \bar{\gamma} = 1 - \frac{1}{\eta} \dots\dots\dots(27)$$

則(25)式可進一步簡化為

$$\frac{d^2 \eta}{d\zeta^2} = 1 - \frac{1}{\eta^2} \dots\dots\dots(28)$$

$$\zeta = 0 \quad \eta = 1 + \varepsilon \dots\dots\dots(28-1)$$

$$\zeta = 0 \quad \frac{d\eta}{d\zeta} = 0 \dots\dots\dots(28-2)$$

(28) 式為非線性常微分方程式，以 Runge-Kutta 方法求其數值解如圖 3。由上述推導可知極薄液膜的存在，對液膜蒸發，確有貢獻。

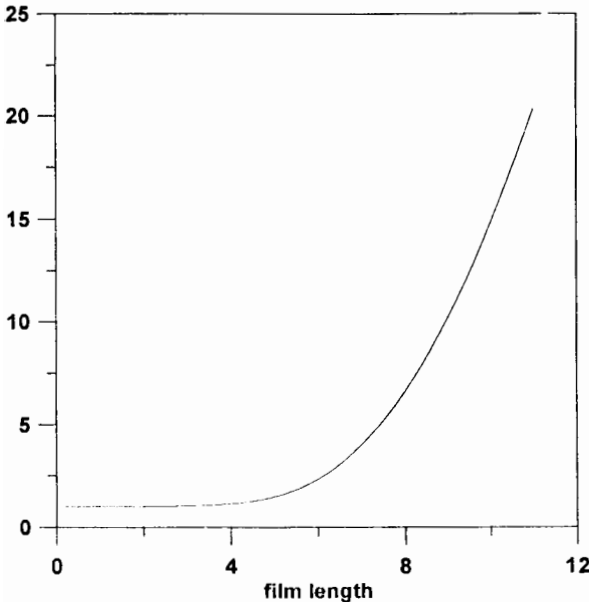


圖 3. 液膜分佈圖

為方便分析，將實驗之多孔體表面簡化如圖 4，中間空心部分相當於一半徑為 γ_e 的圓，由 Princen(1969)的分析得知：

$$\gamma_e = 0.1547 \gamma \dots\dots\dots(29)$$

由文獻分析 (Lee & Maa 1992) 得

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\gamma - \gamma_e}{\gamma_e} \right] \dots\dots\dots(30)$$

$$R_e = \gamma_e \csc \theta \dots\dots\dots(31)$$

$$R = \gamma \csc \theta \dots\dots\dots(32)$$

$$\varphi = 2 \pi \gamma / R = 2 \pi \sin \theta \dots\dots\dots(33)$$

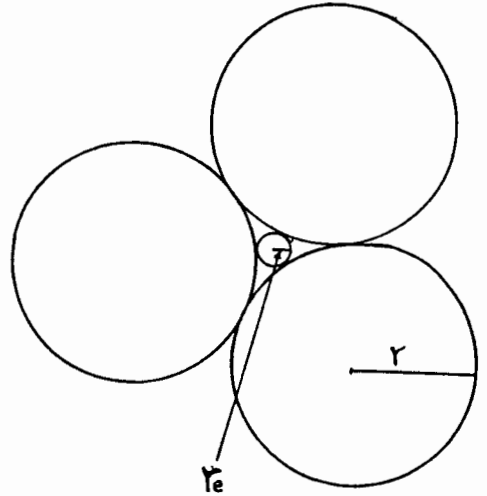


圖 4. 多孔體表面簡化模式

圖 5 為全濕表面蒸發之情況，則全濕表面之蒸發速率

$$J_0 = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left[\frac{M}{2\pi RT} \right] (P_s - P_v^*) \dots\dots\dots(34)$$

$$= D_{ab}(P_v^* - P_v) / l \dots\dots\dots(34-1)$$

$$D_{ab} = \frac{DM}{RT} \dots\dots\dots(34-2)$$

P_v^* ：固體表面附近之蒸氣壓

D ：蒸氣之 Diffusivity， l ：擴散邊界層厚度

定義

$$\frac{1}{R_e} = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left[\frac{M}{2\pi RT} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(35)$$

$$\frac{1}{R_d} = \frac{D_{ab}}{l} \dots\dots\dots(35-1)$$

則

$$Q_0 = P_s(1 - P_r)A_0 / (R_e + R_d) \dots\dots\dots(36)$$

對部分潤濕表面如圖6

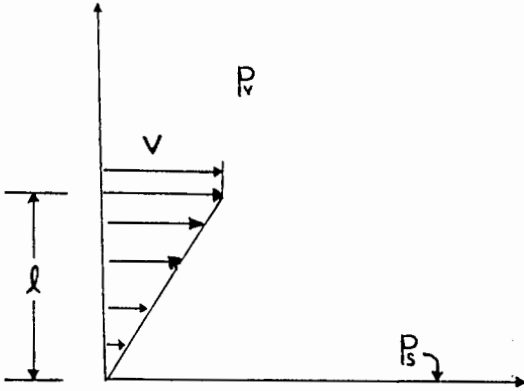


圖 5. 全濕表面質傳邊界層

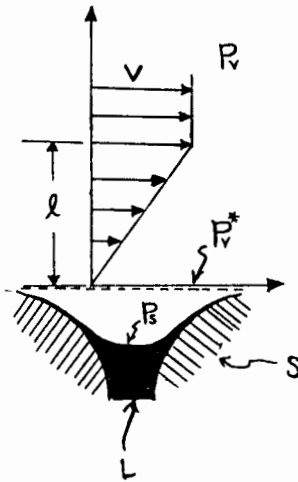


圖 6. 部份潤濕表面質傳邊界層

$$Q_t = Q_1 + Q_e = A_0 D_{ab} (P_v^* - P_v) / l \dots\dots\dots(37)$$

若不考慮多孔體內蒸氣之壓力變化則

$$Q_1 = u^2 A_0 (P_s - P_v^*) / R_e \dots\dots\dots(38)$$

Q_1 : 液面蒸發量

Q_e : 液膜蒸發量

u : 表面飽和度

因靜電力使液膜之蒸氣壓

$$P_v^* < P_{v1v} \leq P_s$$

又因

$$P_d = \frac{-RT_{1v}}{V_m} \ln \left(\frac{P_{v1v}}{P_s} \right) \dots\dots\dots(39)$$

且

$$\frac{P_{v1v}}{P_s} = e^{\frac{-v_w A}{\kappa m^2}} \dots\dots\dots(40)$$

由液膜蒸發之流通量為

$$J_e = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left\{ \frac{M}{2\pi RT} \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ P_s e^{\frac{-v_w A}{\kappa m^2}} - P_v^* \right\} \dots\dots\dots(41)$$

液膜蒸發可分表為

$$Q_e = \int J_e dA \dots\dots\dots(42)$$

其中 J_e 考表為

$$J_e = J_o \bar{\gamma} \dots\dots\dots(43)$$

$$Q_e = \bar{\gamma} A_e (P_s - P_v^*) / R_e \dots\dots\dots(44)$$

$\bar{\gamma}$ 如前述為 $1 - \frac{1}{\eta}$

A_e 為液膜之面積

(1) 式中 $A_m = A_e + uA_0$

故總蒸發量為

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_1 + Q_e = \frac{1}{R_e} u^2 A_0 (P_s - P_v^*) + \bar{\gamma} A_e (P_s - P_v^*) / R_e \\ &= A_0 \frac{D}{l} (P_v^* - P_v) = A_0 \frac{D}{l} P_s (P_r^* - P_r) \dots\dots\dots(45) \end{aligned}$$

若 $\bar{\gamma}$ 為常數且 $A_r = A_e / A_0$ 則

$$(1 - P_r^*) \left\{ \frac{1}{R_e} u^2 A_0 + R_e \bar{\gamma} A_e \right\} = \frac{D}{l} A_0 (P_r^* - P_r) \dots\dots\dots(46)$$

$$P_r^* = \frac{\frac{u^2}{R_e} + \frac{A_r}{R_e} + \frac{P_r}{R_d}}{\frac{1}{R_d} + \frac{u^2}{R_e} + \frac{\bar{\gamma}}{R_e} A_r} \dots\dots\dots(47)$$

$$Q_t = \frac{A_0}{R_d} (P_v^* - P_v) \frac{u^2 A_0 (P_s - P_v^*)}{R_e} + \frac{\bar{\gamma} A_e (P_s - P_v^*)}{R_e} \dots\dots\dots(48)$$

$$\frac{A_0}{R_d} (P_v^* - P_v) = \frac{1}{R_e} (u^2 A_0 + \bar{\gamma} A_e) (P_s - P_v^*) \dots\dots\dots(49)$$

$$\frac{R_e}{R_d} (P_v^* - P_v) = (u^2 + \bar{\gamma} A_r) (P_s - P_v^*) \dots\dots\dots(50)$$

$$\frac{P_s - P_v^*}{P_v^* - P_v} = \frac{R_e}{R_d} \frac{1}{(u^2 + \bar{\gamma} A_r)} \dots\dots\dots(51)$$

$$\frac{Q_e}{Q_t} = \frac{A_e \bar{\gamma} (P_s - P_v^*) / R_e}{\frac{A_0}{R_d} (P_v^* - P_v)} = \frac{R_d}{R_e} A_r \bar{\gamma} \frac{(P_s - P_v^*)}{(P_v^* - P_v)} \dots\dots\dots(52)$$

由(51)(52)得

$$\frac{Q_e}{Q_t} = \frac{\gamma A_r}{u^2 + \gamma A_r} \dots\dots\dots(53)$$

令 $k = \frac{x}{\gamma}$ ，則由文獻(Lee & Maa 1992)知

$$A_r = k^2 \sin \theta + 2ku \dots\dots\dots(54)$$

利用(54)(53)與(55)，可計算此極薄液膜對整個多孔體表面蒸發之貢獻如何。圖7繪出 $\gamma = 9$ ，不同 k 值在不同表面飽和度之 $\frac{Q_e}{Q_t}$ 之比值。

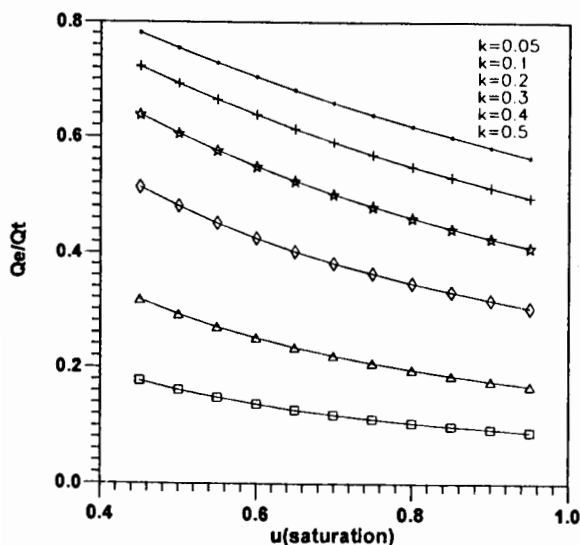


圖 7. 表面飽和度對液膜蒸發之影響

三、實驗

圖8為實驗裝置圖。空氣以抽風機送入以壓克力製成之方形管中。管之大小為14cm×16cm，長50cm。管外裝一抽風機，將空氣抽入管內。抽風機之送風速率由一控制器控制。實驗所用的水以逆滲透處理(R.O.)後，再經去離子過程(D.I.)其電阻達10MΩ以上，石英砂為Showa Chemical Inc.之產品，大小為30~50mesh，SiO₂含量達99.8%以上，其他雜質如Al₂O₃、Fe₂O₃等均小於0.05%以下。溶液以無水Na₂SO₄配製，Na₂SO₄為Hayashi Pure Chemical Industries Ltd.產品，Na₂SO₄之純度達99%以上。為使管內氣體流速維持均勻，抽入管內之空氣先經過二個高分子濾網，以使流速均勻

分佈。管內溫度以一K type熱電偶接一PID控制器，以控制系統之溫度；系統之濕度以濕度計(Hgrometer Model HD-8501H)量測，因濕度之變化極小，故在此次實驗中未做濕度控制。系統之風速以熱絲風速計(Swema Air 30)量測，準確可達0.01m/sec。乾燥樣品之溫度以0.05mm之T type之熱電偶量測。熱電偶之訊號經PCL-7115 A/D卡與PCLD-779COOL JUNCTION卡傳送至個人電腦，以Genies系統收集。樣品之重量由天平經RS-232傳至電腦，以計算乾燥速率。天平之精密度為0.1mg。本項實驗採用對流乾燥。氣體之溫濕度與流

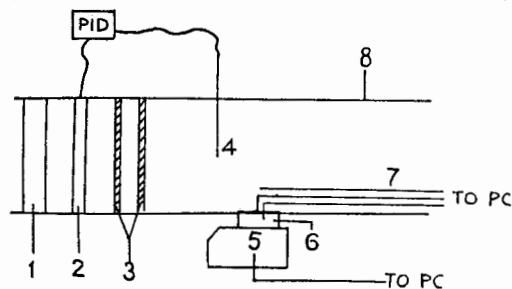


圖 8. 實驗裝置：

1. 抽風機 2. 紅外線燈管 3. 高分子多孔體
4. K-type 熱電偶 5. 天平 6. 試驗多孔體
7. T-type 熱電偶 8. 試驗外殼

速維持定值，以便探討固體表面蒸發現象。

四、結果與討論

在本研究之實驗中，配製不同濃度之硫酸鈉溶液，以對流方式進行蒸發。因實驗均維持相同的氣體流速與溫濕度故本文中暫未討論氣相之熱質傳阻力問題，而僅就多孔體表面蒸發機構做分析。

圖9為純水在多孔體表面蒸發之情況。圖中繪出多孔體表面、中心、及多孔體上方的溫度與蒸發速率。雖然樣品僅4公分深，且多孔體又是半透明的物質，但多孔體表面與中心仍維持2~3℃溫度差，此結果較以燈光為熱源之自由對流為高(Lee et al 1995)。表面溫度先被加熱到一穩定值，而後此溫度維持一頗長的時間，此即為恒速蒸發階段。而後溫度逐漸上升，即為減速期。本文主要探討恒速期的情況。純水在此情況下恒速期之蒸發速率約0.5kg/hr-m²。

圖 10 為 0.05M 硫酸鈉溶液之蒸發實驗結果。剛開始時，蒸發速率有急速升高的趨勢，此可能為系統穩定性問題。而後即維持在 0.4kg/hr-m^2 左右。但隨時間而稍有變化，且多孔體表面溫度略有上升，此與純水的情況不同。此乃因接近表面之水溶液有鹽類逐漸累積之故。

圖 11 為 0.1M 的實驗結果。其恒速期之蒸發速率也在 0.4kg/hr-m^2 左右。圖 12 為 0.5M 的情形，恒速期之蒸發速率約 0.35kg/hr-m^2 。圖 9 至圖 12 的實驗均控制在相同的氣流條件。比較此四組實驗發現，純水的恒速期蒸速率與含硫酸鈉之溶液有顯著的差異。亦即加入少量的硫酸鈉，即可大量的降低蒸發速率。但 0.05M 與 0.1M 之硫酸鈉溶液，其差異並不十分顯著。此結果顯示鹽類之影響對純水極大，然對低濃度之溶液差異極小，意即少量的鹽即可造成液膜蒸發之破壞，再加上的鹽影響較小。

此項結果可由蒸氣壓降低與液膜蒸發來說明。因溶液蒸氣壓下降所造成之蒸發趨動力下降可由方程式(4)得知。以 0.5M 之硫酸鈉而言，根據勞特定律 (Raoult's Law) 與依數性質 (colligative property)，其蒸氣壓降低量為 2.67%，然由實驗結果發現，在恒速期蒸發速率卻下降超過之百分之二十，顯然除蒸氣壓下降外，尚有其它因素影響此系統，而液膜的破壞可能是主因。因液膜存在主要由離分壓所造成。根據 Derjaguin 等 (1987) 的分析，水膜離分壓易受液膜中各種溶質的影響，尤其對含有離子之系統，因靜電關係會嚴重改變

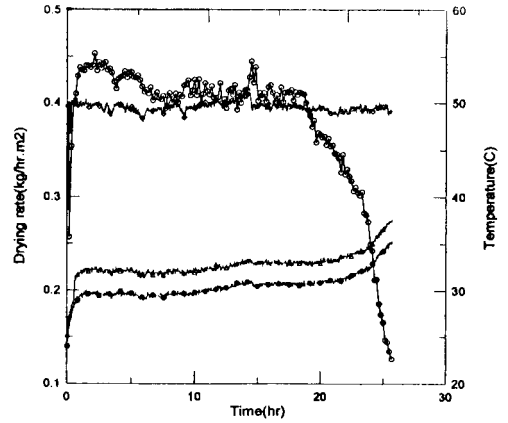


圖 10. 0.05M 溶液蒸發速率與溫度

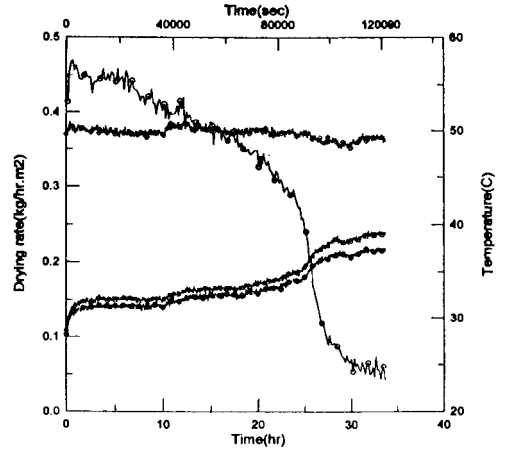


圖 11. 0.1M 溶液蒸發速率與溫度

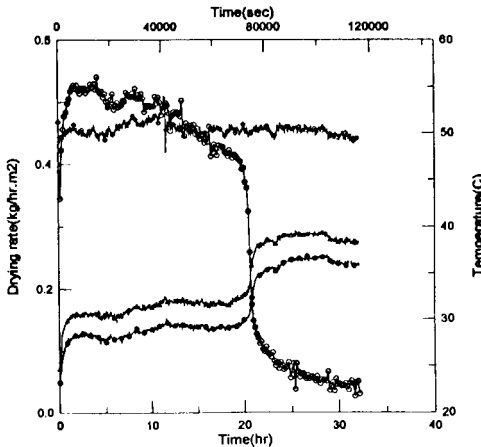


圖 9. 純水蒸發速率與溫度

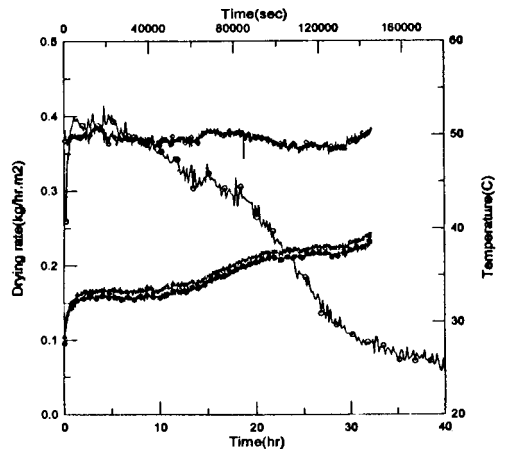


圖 12. 0.5M 溶液蒸發速率與溫度

離分壓而影響液膜的穩定性。比較圖7知，純水液膜蒸發量可佔全部蒸發量之百分之二十以上，此與本實驗結果相近，故可由此證實液膜蒸發的存在及其重要性。

五、結 論

1. 因理論推導中未考慮液膜之曲率變化與重力影響，且僅考慮靜電之離分壓效應，尙未能完整的描述此系統，故實驗結果與理論分析僅能用以做定性比較。
2. 鹽份對此系統之影響極複雜，由實驗結果發現稀薄溶液中鹽份對蒸發效應影響極大，此與液膜的破壞有關。
3. 溶液蒸發速率之降低量遠大於純水蒸氣壓降低所產生的效應，由理論分析知，此除因水溶液蒸氣壓降低外，可能與液膜蒸發受阻有關。

六、謝 誌

本研究計畫承蒙國科會經費補助。(計畫編號：NSC-83-0402-E-021-001)

七、參考文獻

1. van de Griend, A.A. and Owe, M., 1994. "Bail Soil Surface Resistance to Evaporation by Vapor Diffusion under Semiarid Conditions.", Water Resources Research, Vol.30, No.2, pp.181-188.
2. Arzan, A.A. and Morgan, R.P., 1967, "Transient Two-Region, Moving Boundary Analysis of Drying Process.", Chemical Engineering Progress Series, Vol. 63, No. 79, pp.24 ~ 33.
3. Derjaguin, B.V, Churaev, N.N, and Muller, V.M., 1987, "Surface Forces", Consultants Bureau, New York.
4. Kaviani, M., 1992, "Principles of Heat Transfer in Porous Media." Chapter11. Springer-verlag., New York.
5. Kumiaki Sato, Teruyuki Fukuhara and Serge Bories, 1990. "Dynamic Analysis of Heat Mass and Solute Transfer Due to Evaporation from a Soil Surface.", Heat Transfer Conference, pp.235 ~ 240.
6. Lee, M.T. and Maa, J.R, 1992, "On the Interline Evaporation Region of a Wetting Thin Film.", Drying Technology, Vol.10, No.1, pp.101 ~ 122.
7. Lee, M.T., Chou, L.H. and Huang, J.C., 1994, "The Effect of Salt on the Surface Evaporation of a Porous Medium.", Drying 94, pp.223-230.
8. Lockington, D.A., 1994 "Falling Rate Evaporation and Desorption Estimates.", Water Resources Research, Vol.30, No.4, pp.1071 ~ 1074.
9. Pashley, R.M., 1980, "Multilayer Adsorption of Water on Silica; An Analysis of Experimental Results." Journal of Colloid and Interface Science, Vol.78, No. 1, pp.246 ~ 248.
10. Peck, R.E., Vyas, K.C. and Toei, R., 1977, "Capillary Theory Applied to Drying.", AIChE. Symposium Series, Vol.73, No.160, pp.63 ~ 70.
11. Princen, H.M., 1969, "Capillary Phenomena in Assemblies of Parallel Cylinder2:Capillary Rise in System with More Than Two Cylinders.", J. Colloid Interface Science, Vol.10, No.3, pp.359 ~ 371.
12. Sukhatme, S.P. and Rohsenow, W.M., 1966, "Heat Transfer during Film Condensation of Liquid Metal Vapor", ASME Journal Heat Transfer, Vol.86, pp.19 ~ 28.
13. Suzuki, M., Keey, R.B, and Maeda, S., 1977, "On the Characteristics of Drying Curve", AIChE, Symposium Series, Vol.73, No.163, pp.43 ~ 62.
14. Teletzke, G.F. Davis, H.T. and Scriven, L.E., 1987, "How Liquid Spread on Solids", Chemical Engineering Communications, Vol.55, pp.41 ~ 81.
15. Wayner, P.C.Jr, Kao, Y.K. and La Croix, V., 1976, "The Interline Heat Transfer Coefficient of a Evaporating Wetting Film.", Int. Journal Heat Mass Transfer, Vol.19, pp.487 ~ 492.

收稿日期：85年3月12日

修正日期：85年5月1日

接受日期：85年5月15日