

The analysis of forced convection along a vertical plate with liquid film evaporation in non-Darcian porous media

多孔性介質中存在液態薄膜蒸發之垂直板強制對流問題分析

呂金生

Jin-Sheng Leu

空軍航空技術學院飛機工程系 副教授

Department of Aircraft Engineering

Air Force Institute of Technology

摘要

本計畫擬以理論分析探討多孔性介質中液態薄膜蒸發強制對流問題。物理模型為多孔性介質中置入一垂直等溫加熱板，淋水從上方流下，空氣為與淋水同方向的強制對流流場。空氣側及水膜側流場均採用二維層流邊界層模式，多孔性流場考慮包含對流效應、慣性效應及邊界效應的非達西模式(non-Darcy model)，在水膜—空氣介面的熱質傳遞需同時滿足質量、動量、能量守恆條件，求解時並考慮水膜厚度沿流動方向的變化以便能正確描述介面質量、動量、能量傳遞的情況。

數值結果顯示潛熱熱傳是主要的熱傳機制，提高介面溫度和濃度可有效提高總熱傳量和總蒸發量。平板上游區域具有較強的薄膜蒸發現象，原因是上游的溫度差及濃度差較大。另外薄膜蒸發強度會隨空氣流速(Re 數)增大而增大，孔隙率越大時總熱傳量和總蒸發量也會越大。當進口淋水量大時，孔隙率的影響更明顯，孔隙率大的流場因為流體速度增快，會有較大的總熱傳量及總蒸發量，孔隙率小的流場因為水膜厚度增加，介面溫度及濕度明顯降低，所以總熱傳量及總蒸發量會降低。

關鍵字：液膜蒸發、強制對流、多孔性介質

ABSTRACT

The objective of the proposal is to analyze theoretically the forced convection along a vertical heated plate with liquid film evaporation in non-Darcian (convective, inertia and boundary effects) porous medium. The water film falls down along the plate and is exposed to a co-current forced moist air stream. The axial-momentum, energy and concentration equations for the air and water flows are developed based on the steady 2-D laminar boundary layer model. The heat and mass transfer at the water-air interface must be matched by satisfying the conservations of mass, momentum and energy. The numerical solution is obtained by utilizing an implicit finite difference method. The effect of water film thickness variation along the plate is rigorously treated in order to predict an accurate heat and mass transfer at the water-air interface.

The numerical results show the latent heat transfer is the dominant heat transfer role in liquid film evaporation. The increase of interface temperature and humidity can effectively enhance the heat and mass transfer performances. In addition, the liquid film evaporation possesses the higher heat transfer and evaporating rates for larger Re and porosity ε , and concentrates on the leading region of vertical plate. Furthermore, the porosity plays a more important role on the influences of heat and mass transfer for larger inlet liquid flow rate cases.

Keywords : liquid film evaporation, forced convection, porous medium

1. 簡介

隨著經濟多元化、精緻化的發展，能源消耗量逐年提高，能源使用方式及衍生的問題漸趨複雜，熱傳工程面臨的挑戰趨向於解決局部高發熱問題及能源使用效率的改善以達到節約能源的目的。多孔性材料因內部具有許多孔隙，能提供較多之流道及熱傳面積，因此可有效提高熱傳量及能源使用效率。流體在多孔性介質中的熱傳應用常見於各種工程領域，如地熱流動現象(fluid flow in geothermal reservoir)，電子熱傳(heat transfer in electric system)，電子多孔性散熱器(electronic porous heat sink)，建築物隔熱(building thermal insulation)，及粉末冶金(powder metallurgy)等。這些問題近年來已引起許多研究人員的探討，不論在達西或非達西定律上均有一些文獻。

多孔性介質的對流邊界層問題文獻中，Cheng & Chang[1] 和 Cheng & Minkowycz [2] 分別使用達西定律探討水平板與垂直板自然對流問題並得到相似解(similarity solution)。Jang & Chang[3,4]進一步分析沒有忽略垂直於板面的浮力分量的傾斜板自然對流熱質傳問題，以有限差分法求得相關的流場及熱質場。非達西效應的文獻有以合適的相似轉換參數推導出常微分或偏微分方程組，再以 Runge-Kutta 方法 [5]和有限差分法[6]來求解關慣性效應(inertia effect)的研究。也有以 matched asymptotic expansion 方法(Kim and Vafai [7])和 perturbation method 方法(Hong and Tien

[8])探討邊界效應的文獻(boundary effect)。另外 Hong et al. [9]同時考慮慣性效應、邊界效應和對流效應(developing effect)，利用相似轉換理論推導出新的相似轉換參數，使用有限差分法(Box method)模擬各項非達西效應對垂直板自然對流熱流場的影響，結果並與 matched asymptotic expansion 方法及局部非相似法(local non-similarity method)比較，是探討邊界效應相當完整的論文。Chen et al. [10] 利用類似的理論探討慣性、邊界及變孔隙率等非達西效應對垂直板混合對流熱流場的影響。近期 Seddeek [11]包括了變黏度效應探討上述非達西效應的多孔性介質流場的垂直板混合對流問題。

液態薄膜蒸發(liquid film evaporation)是潛熱熱傳的一種，常應用於太陽熱能利用、化工蒸餾、乾燥、海水淡化、冷凍、冷卻水塔系統、蒸發式熱交換器等場合，主要是因為它具備高熱傳係數，低淋水量的特性。液態薄膜蒸發應用上常以空氣及冷淋水為冷卻劑，高溫工作流體在熱交換器一側流動，冷淋水噴灑在熱交換器另一側形成水薄膜，空氣作為冷工作流體流經水薄膜表面。液膜蒸發問題由於在液體—空氣介面同時存在熱傳、質傳現象，因此理論分析較為複雜，文獻研究多以一維與二維之數值來加以模擬分析。Wassel & Mills [12]年以一維的方法探討空氣側通道寬度的改變對於液膜蒸發及空氣壓降的影響。Schroppel & Thiele [13]、Chow & Chung [14]假設液膜非常薄(忽略液膜效應)的情況，分析沿一平板的空氣熱質傳流場。而後 Haji & Chow [15]的實

驗證了[13-14]的分析結果當包括洩水的熱損失後是與實驗結果吻合的。

近期文獻 Tsay [16,17]以數值方法分析薄膜流經一多重流道濕面式熱交換器之耦合熱質傳問題，邊界條件為等溫[16]及等熱通量[17]情況。理論架構以二維模式分析水薄膜側及濕空氣側的耦合方程組，並考慮水薄膜厚度的變化，嚴謹地處理水薄膜—空氣介面的邊界條件。結果顯示穿越液膜的熱量，大部份被液膜之蒸發潛熱所吸收，並提出液氣交界面的紐塞數(Nusselt number)與希吾德數(Sherwood number)之經驗公式以供參考。Yan [18]探討垂直通道液膜蒸發紊流混合對流問題在針對進口條件(進口淋水量)及傾斜角度對流場的影響的研究中 Yan & Soong [19]以數值方法模擬傾斜板空氣—淋水同向的液膜蒸發紊流流場，結果顯示傾斜角度(與水平方向之夾角)小時可提高介面及薄膜表面溫度，使潛熱熱傳量提高。液態薄膜蒸發問題同時對水薄膜及空氣兩流場採用二維模式(即水薄膜側的動量方程式保留慣性項)的完整理論分析由 Mezaache & Daguenet [20]提出，他們並考慮熱物理性質的變化，探討空氣速度、淋水量及傾斜板角度等參數對薄膜蒸發熱傳性能的影響。

應用多孔性材料於液膜蒸發冷凝熱傳的文獻中，Char and Chen [21]以數值方法探討多孔性介質中垂直板的非達西混合對流液膜冷凝問題，並考慮共軛熱傳效應(考慮壁面熱傳導)。結果顯示壁面熱傳導效應對液膜冷凝有明顯的影響，會降低局部熱傳率。當共軛熱傳參數 A 增加時，介面溫度及局部熱傳率都會增加。Zhao [22]探討加置一層多孔性材料後的液膜蒸發衝擊流問題，不過為了簡化問題，將空氣側的流場理想化為停滯流(stagnation point flow)流場，再處理多孔性介質中水膜流場。多孔性介質動量方程式則以達西定律(Darcy's law)來描述。所獲得的解析解顯示空氣低相對濕度、高進口溫度及高 Peclet 數可使熱傳率增加，當 $Le > 1$ 時，蒸發率隨著熱傳率的降低而增

加。Shih et al.[23]探討垂直板非達西混合對流流場之液態蒸發問題，假設液膜非常薄而視為邊界條件，進而探討對流效應、邊界效應對蒸發率及熱傳量的影響。

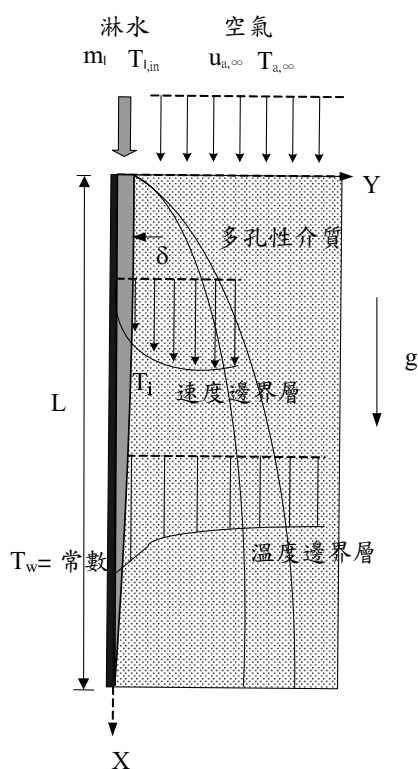
由前段的文獻回顧，多孔性材料置入薄膜熱傳機構對熱傳效率有正面的幫助，主要理由是可提供較多之熱傳面積及強制對流效果，而且可增強毛細引力，提高熱傳表面的濕潤度。以往研究很少探討在多孔性介質中強制或混合對流薄膜蒸發問題[23]，尤其以完整二維模式同時考慮水膜及空氣兩側之耦合熱質傳問題至今尚無人探討過，因此引起作者研究的動機。作者[24]針對一垂直等溫板液態薄膜強制對流問題，在平板面上覆蓋一多孔性材質薄層，探討多孔性介質厚度及孔隙率、流體進口條件等系統參數對液膜蒸發的熱傳效率及蒸發量的影響。結果發覺多孔性介質厚度及孔隙率越小，熱傳效率及蒸發能力越高。不過在理論分析上假設此一多孔性材料很薄，因此結論並不適用於淋水量大及多孔性材料厚度大的情況。

本計畫以理論分析探討一充滿多孔性介質之垂直板液膜蒸發強制對流問題，淋水及空氣同向從上往下流動。水薄膜側及空氣側流場均採用二維邊界層假設，並考慮濃度差對熱傳的效應，同時處理水膜側及空氣側兩耦合方程組。多孔性介質動量方程式採用對流、慣性及邊界效應的非達西模式。數值方法利用有限差分法離散水薄膜側及空氣側方程組及介面邊界條件，差分方程式形成一三條子矩陣的對角線矩陣，採用 block elimination method 求解。本文研究重點將針對空氣進口流速、進口淋水量及多孔性介質孔隙率等參數對熱傳效率及蒸發量的影響作探討。藉此了解多孔性介質的物理性質(孔隙率、滲透率)與液膜蒸發問題操作參數(液體進口流量、氣體進口速度)之間的關聯。

2 數學分析

本計畫探討多孔性介質中液膜蒸發強制對流問題，物理模型如圖一所示。在多孔性

介質中置放一等溫垂直加熱板，淋水從上方流下，空氣以同向向下的方式沿著水薄膜流動。熱量從平板傳向水薄膜，水薄膜受熱後溫度升高，再利用顯熱及潛熱的方式，將熱量傳至空氣。理論分析分別以二維層流邊界層理論描述水薄膜及空氣兩區域，並嚴謹處理水——空氣介面質傳、動量、能量傳遞。此外並作以下假設：(1)多孔性介質處於局部熱平衡(local thermal equilibrium)。(2)多孔性介質流場考慮對流、慣性、邊界等非達西效應，忽略熱逸散效應。(3)流體物理性質視為常數。(4)忽略表面張力、黏滯逸散力(viscous dissipation)、Soret 及 Dufour 力所造成的影響。



圖一 本計畫探討之物理模型

推導出的水薄膜側及空氣側的方程式如下：

◎ 水薄膜側統御方程式如下：

連續性方程式(Continuity equation)

$$\frac{\partial u_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

動量守恒方程式(momentum equation)

$$0 = \frac{v_l}{K}(u_i - u_l) + C(u_i^2 - u_l^2) + \frac{v_l}{\varepsilon} \frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2} \quad (2)$$

能量守恒方程式(Energy equation)

$$u_l \frac{\partial T_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial T_l}{\partial y} = \alpha_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2} \quad (3)$$

◎ 空氣側統御方程式如下：

連續性方程式(Continuity equation)

$$\frac{\partial u_a}{\partial x} + \frac{\partial v_a}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

動量守恒方程式(Momentum equation)

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(u_a \frac{\partial u_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) = \frac{v_a}{K} (u_{a,\infty} - u_a) + C(u_{a,\infty}^2 - u_a^2) + \frac{v_a}{\varepsilon} \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} \quad (5)$$

能量守恒方程式(Energy equation)

$$u_a \frac{\partial T_a}{\partial x} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial y} = \alpha_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} \quad (6)$$

濃度守恒方程式(Concentration equation)

$$u_a \frac{\partial \omega}{\partial x} + v_a \frac{\partial \omega}{\partial y} = D \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \quad (7)$$

方程式下標 a、l 分別代表空氣側及水薄膜側， ω 是濕空氣的濕度比(humidity ratio)， ρ 、 ν 、 α 、 C_p 及 D 分別是密度、運動黏度、熱擴散係數、定壓比熱及質量擴散係數。 ε 、 K 、 C 是多孔性介質的孔隙率、滲透率及慣性係數， K 及 C 與多孔性介質的特性有關，可表示成孔隙率 ε 及顆粒直徑 d_p 的函數，最常用的是 Ergun 模式[25]：

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2}, \quad C = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (8)$$

邊界條件如下：

(1)進口條件

$$\begin{aligned} \text{在 } x=0, \quad T_a &= T_{a,\infty}, \quad u_a = u_{a,\infty}, \quad \omega = \omega_{\infty}, \quad (9) \\ u_l &= u_{l,in}, \quad T_l = T_{l,in} \end{aligned}$$

(2) y 方向邊界條件

$$\text{在 } y=0, u_1=0, v_1=0, T_1=T_w \quad (10)$$

$$\text{在 } y=\infty, T_a=T_{a,\infty}, u_a=u_{a,\infty}, \omega=\omega_\infty$$

(3) 薄膜介面條件($y=\delta$)

$$\text{在 } y=\delta, T_l = T_a = T_i, v_{a,i} = -\frac{D}{1-\omega_i} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_i$$

$$\left(\mu_l \frac{\partial u_l}{\partial y} \right)_i = \left(\mu_a \frac{\partial u_a}{\partial y} \right)_i = \tau_i \quad (11)$$

$$-k_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial y} \right)_i = -k_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial y} \right)_i + m_{v,i}'' h_{fg} \quad (12)$$

在計算過程中，每個截面的薄膜蒸發量可由下式求得：

$$m_{v,i}'' = \rho_a v_a = -\frac{\rho_a D}{1-\omega_i} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_i \quad (13)$$

而濕度比 ω_i 可表示成

$$\omega_i = \frac{M_v P_{v,i}}{M_a (p_a - p_{v,i})} \quad (14)$$

由於在流動方向水薄膜側每個截面需滿足質量守恆條件，所以進口淋水量 m_l

$$m_l = \int_0^x m_{v,i}'' dx + \int_0^\delta \rho_l u_l dy \quad (15)$$

利用適當的無因次參數，可將(1)-(7)式統御方程式及邊界條件(8)-(15)式無因次化，而後對無因次統御方程式進行有限差分。因篇幅有限，不在此贅述。

3. 數值方法

因為流場統御方程式(1)-(7)式是拋物線型的偏微分方程組，因此數值方法可沿著流體流動方向(x 方向)作漸進的動作配合質量守恆的條件求得完整的二維差分解。解題步驟首先對(1)-(7)式推導差分式，整理後之差分方程式是一完全隱藏式(fully implicit)差分架構，x 方向的對流項用上游法(upstream)差分，y 方向的對流項及擴散項則用中央差分法(central difference)。非線

性項以牛頓線性化過程處理。所得數值差分式會形成一組三條對角線的矩陣(Block Tridiagonal Matrix)，利用 Block elimination method 求解。依序從 $x=0$ 到 L 漸進求出水薄膜側及空氣側速度、溫度及濕度比。相關解題步驟流程圖如附錄一所示，並分述如下：

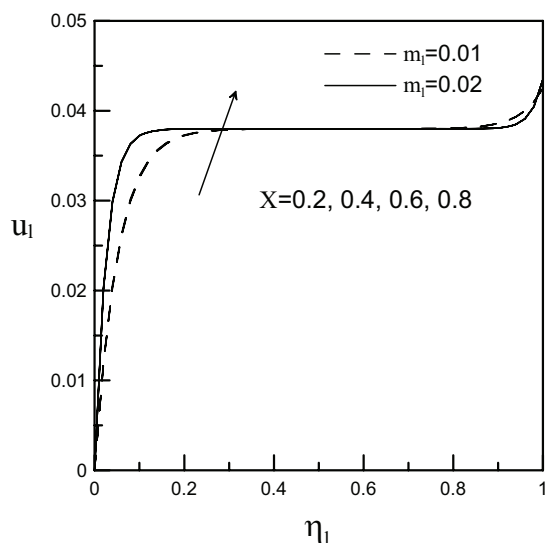
1. 假設進口狀態($x=0$)的水膜厚度 δ 、液薄膜—氣體介面的剪應力 τ_i 、介面溫度 T_i 。
2. 求解(1)-(3)式水薄膜側的差分方程組，獲得 u_l 、 v_l 、 T_l 。
3. 核對步驟 2 求得之水薄膜側流場是否滿足質量守恆條件(15)？若未達到收斂標準($<10^{-4}$)則修正水膜厚度 δ 。重覆步驟 2~3。
4. 若滿足(15)式，求解(4)-(7)式空氣側的差分方程組，獲得 u_a 、 v_a 、 T_a 、 ω 。
5. 核對介面之水薄膜側及空氣側的剪應力是否滿足(11)式？若未達到收斂標準($<10^{-4}$)則修正 τ_i 重覆步驟 2~5。
6. 若滿足兩側剪應力相等，核對是否滿足能量守恆條件(12)式？若未達到收斂標準($<10^{-4}$)則修正 T_i 猜值，重覆步驟 2~6。
7. 若滿足介面能量守恆條件(12)式，則沿 x 方向漸進求解。以前一截面流場為猜值，進行步驟 2~6，直到 $x=L$ 的位置。

4. 結果與討論

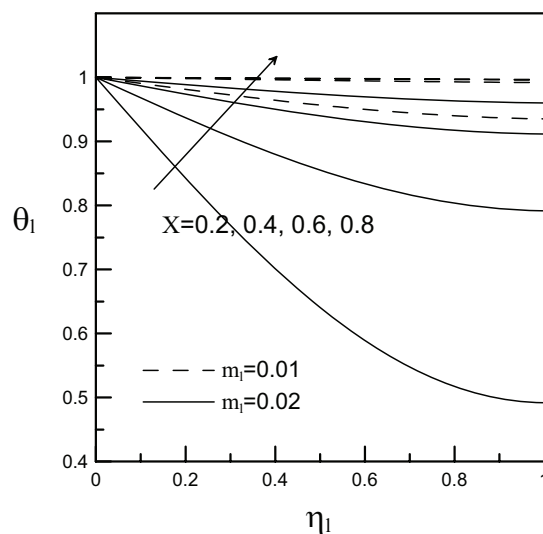
本文探討非達西多孔性介質流場，置入一垂直等溫加熱板時的液態薄膜蒸發問題。在結果討論部分將針對多孔性介質之孔隙率($\varepsilon=0.4, 0.8$)、進口淋水量($m_l=0.01, 0.05 \text{ kg/m.s}$)及空氣側流動條件($Re_a=2500 \sim 10000$)等參數來探討其對熱流場特性的影響，進一步探討空氣側的顯熱值、潛熱值、水膜蒸發量隨探討參數改變產生的巨觀及微觀的變化。相關的無因次參數及特定數據如下：平板溫度(T_w) 60°C ，薄膜入口溫($T_{l,in}$) 27°C ，空氣入口溫度($T_{a,in}$) 27°C ，環境相對溼度(ϕ_∞) 70% 。板長 $L=0.5\text{m}$ 、 $X=x/L$ 、 $U_l=u_l/u_{a,\infty}$ 、 $U_a=u_a/u_{a,\infty}$ 、

$\eta = y/L \sqrt{Re_a}$ 、 $\theta_l = (T_l - T_\infty)/(T_w - T_\infty)$ 、
 $\theta_a = (T_a - T_\infty)/(T_w - T_\infty)$ 、
 $\lambda_a = (\omega - \omega_\infty)/(\omega_{w,i} - \omega_\infty)$ ，各截面位置的熱傳
 量定義為等溫壁面 $Q_i = h_{l,i} \cdot (T_w - T_l)$ ，空氣側
 所帶走的潛熱 $Q_l = m''_{v,i} \cdot h_{f,g}$ ，而顯熱
 $Q_s = h_a \cdot (T_l - T_a)$ ，根據能量平衡條件 $Q_i = Q_l + Q_s$ 。

圖二及圖三為孔隙率 $\varepsilon=0.4$ ，
 $Re_a=10000$ 時，不同 $m_l(m_l=0.01、0.02$
 $kg/m.s)$ 及截面 X 的水膜速度及溫度的邊界
 層分佈圖，由圖二可看出水膜沿下游流動的
 速度分佈很快就發展完成，幾乎不再隨 X
 方向改變。另外淋水量越大，因為重力的關
 係流動速度會增快，尤其是靠近壁面及介面
 處。水膜在各個截面的溫度變化情形描述於
 圖三，由於壁面持續傳遞熱量給水膜，所以
 越往下游水膜溫度會越高。當淋水量越大，
 水膜厚度越厚，沿下游水膜溫度上昇的速度
 會越慢。

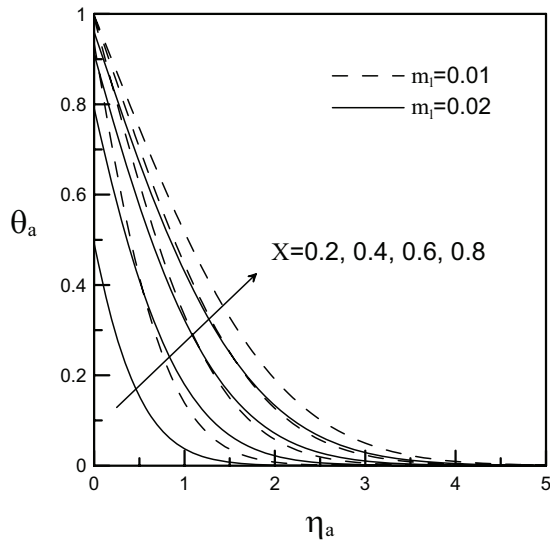


圖二 在孔隙率 $\varepsilon=0.4$ ， $Re_a=10000$ 時，不同
 m_l 及截面 X 的水膜速度邊界層分佈圖

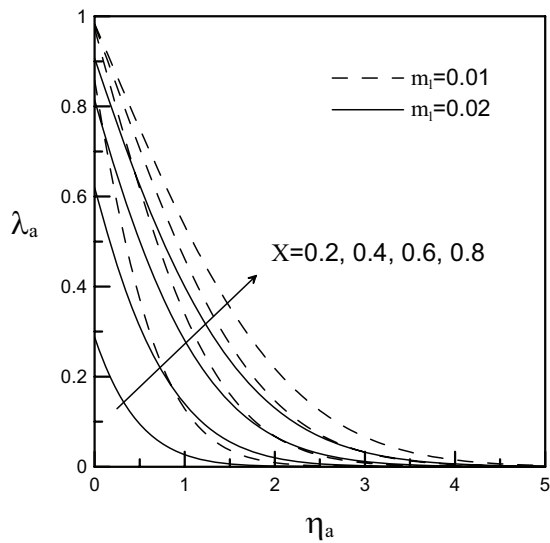


圖三 在孔隙率 $\varepsilon=0.4$ ， $Re_a=10000$ 時，不同
 m_l 及截面 X 的水膜溫度邊界層分佈圖

圖四及圖五為孔隙率 $\varepsilon=0.4$ ，
 $Re_a=10000$ 時，不同 $m_l(m_l=0.01、0.02$
 $kg/m.s)$ 及截面 X 的空氣溫度及濃度的邊界
 層分佈圖，薄膜蒸發機制是使熱量由高溫工
 作流體經壁面傳至水薄膜，使得薄膜溫度升
 高，再藉著與空氣間之蒸發潛熱與溫差所造
 成之顯熱，而將熱量傳遞至冷空氣中，因此
 圖四可看出淋水量較低的情況會得到較高的
 水—空氣介面溫度，而得到較高的空氣溫度
 分佈。當然越往下游，傳遞至空氣的熱量越
 多，溫度會越高。圖五是相關的濃度分佈，
 由於蒸發速率與水膜溫度有密切關係，所以
 溫度越高，濃度也會越高，因此圖五的濃度
 分佈情況與圖四溫度分佈情況類似，不過濃
 度的變化情況比溫度還劇烈。



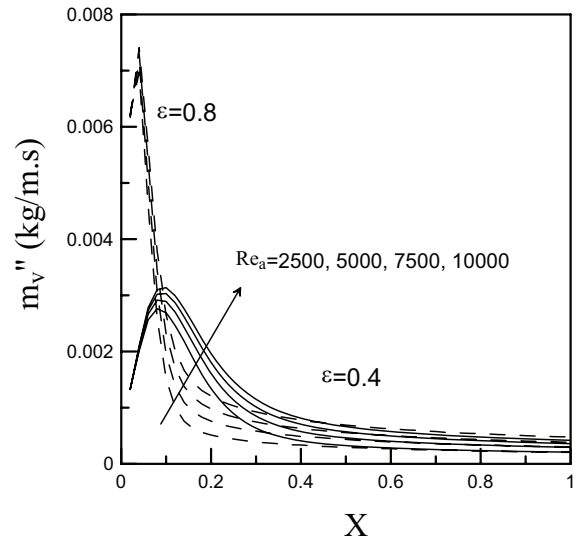
圖四 在孔隙率 $\epsilon=0.4$ ， $Re_a=10000$ 時，不同 m_l 及截面 X 的空氣溫度邊界層分佈圖



圖五 在孔隙率 $\epsilon=0.4$ ， $Re_a=10000$ 時，不同 m_l 及截面 X 的空氣濃度邊界層分佈圖

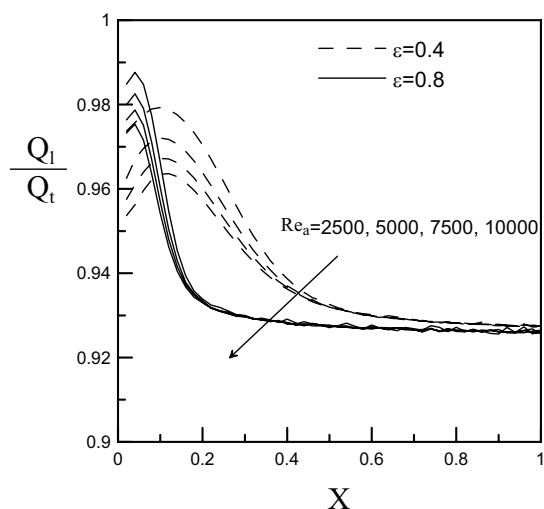
圖六描述在進口淋水量 $m_l=0.01$ kg/m.s、不同 Re_a 及 ϵ 下，截面蒸發率 m_v'' 隨 X 的分佈圖，由於介面溫度隨著下游方向快速增大，介面濕度與環境濕度差值變大，因此在空氣入口處會產生很大的蒸發量。當漸往下游，空氣的環境濕度提高，因此濕度差減少，所以截面蒸發量也隨之下降。另外，當雷諾數增加時，空氣側動量能量傳遞能力強，截面蒸發量大。孔隙率大小會影響到流場流速及熱量傳遞，圖中顯示孔隙率大者

($\epsilon=0.8$) 在入口區域有較高的蒸發能力，所以累積的蒸發量也會較大。 $\epsilon=0.4$ 的情況於入口區域也有較大的截面蒸發量，不過明顯低於高孔隙率的流場。相對地，累積的蒸發量也會較小。

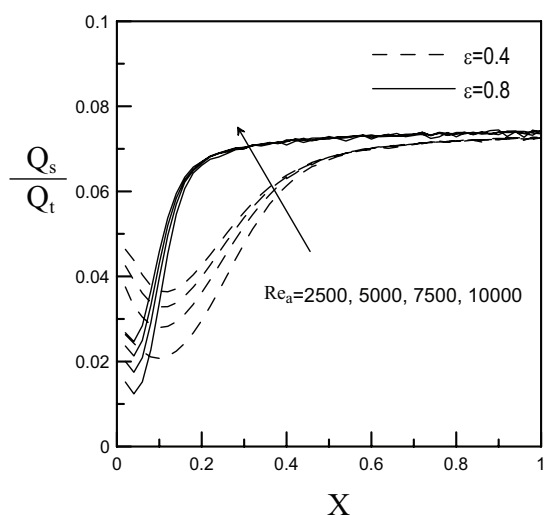


圖六 在 $m_l=0.01$ kg/m.s、不同 Re_a 及 ϵ 下，截面蒸發率 m_v'' 隨 X 的分佈圖

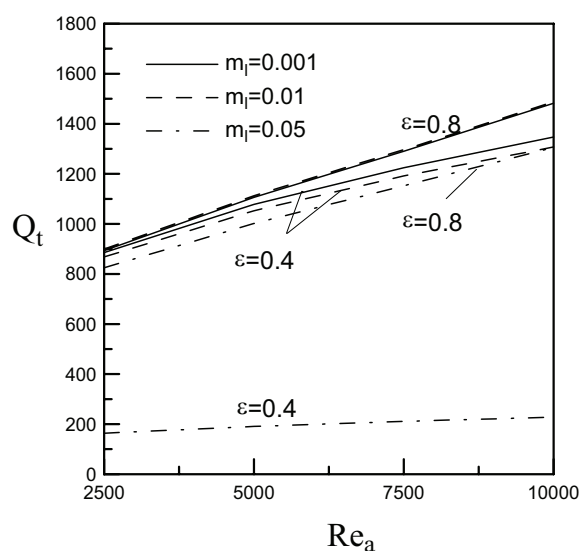
圖七、圖八分別代表不同雷諾數 Re_a 及孔隙率 ϵ 下，不同截面的潛熱與顯熱佔總熱傳比例之分佈圖，圖中可看出潛熱熱傳仍是主要的傳熱模式，約佔總熱傳量的 90% 以上。原因為潛熱熱傳量主要受到截面水膜蒸發量的影響，在入口處蒸發量大，因此潛熱佔該截面總熱傳比例較大。由圖可知整個平板的截面，潛熱佔總熱傳約 92%~99%。孔隙率的影響可以預期地，因為高孔隙率的介面溫度和水膜蒸發量都較大，所以孔隙率高的流場潛熱所佔比例較高，而且集中在入口區域。雷諾數高會直接提高空氣側的熱傳係數，顯熱熱傳能力會明顯提升，所以顯熱熱傳的比例會提高，相對的潛熱熱傳的比例會降低。



圖七 $m_l=0.01 \text{ kg/m.s}$ 時，不同 Re_a 及飲下
潛熱隨 X 的分佈圖



圖八 $m_l=0.01 \text{ kg/m.s}$ 時，不同 Re_a 及飲下
顯熱比隨 X 的分佈圖



圖九 在不同 m_l 和飲下， Re_a 對總熱傳量
 Q_t 數的影響

圖九說明在不同進口淋水量 m_l 和孔隙率 ε 下， Re_a 對總熱傳量 Q_t 的影響。圖中可看出空氣側速度快時 (Re_a 大)，總熱傳量會增加。另外進口淋水量 m_l 小時，液氣介面存在較高的溫度和濕度，使得液膜蒸發的驅動力增強而提昇熱質傳能力。由圖中也可看出，進口淋水量對孔隙率小的流場影響較明顯。孔隙率對整體熱質傳能力的影響如圖所示，孔隙率大有較強的熱質傳能力，當進口淋水量高的情況更明顯。原因為多孔性介質孔隙變大，流體流動速度加快，總熱傳量 Q_t 會提高。但是孔隙率小的流場卻會因為進口淋水量大導致水膜厚度增厚，而使熱質傳能力明顯下降，所以圖中可看出在 $m_l=0.05 \text{ kg/m.s}$ 時， $\varepsilon=0.8$ 的總熱傳量會比 $\varepsilon=0.4$ 時來得大很多。

5. 結論

本文以二維數值模擬分析多孔性介質中垂直加熱板的薄膜蒸發現象，並以非達西定律分析熱質傳遞產生之效應，研究結果清楚地描述出不同的雷諾數 Re_a 、孔隙率 (ε) 及進口淋水量 (m_l) 下的介面溫度、介面濕度、截面蒸發量、截面顯熱比及潛熱比、之總熱傳量分佈情況。數值結果顯示潛熱熱通量在整

個熱傳機構下具有較重要的角色。在入口上游區域的熱質傳現象最為激烈，若能提高介面的溫度和濕度則可有效的提高總熱傳量和總蒸發量。當進口淋水量低時，高孔隙率有較高的介面溫度及濕度，因而增強介面熱質傳遞能力，但與低孔隙率的情況差異不大。但是當進口淋水量增大時，此差異性由於低孔隙率的介面溫度、濕度普遍降低，及高孔隙率的流體流速增快的因素，會產生明顯的差距。

6. 參考文獻

- [1] Cheng P. and Minkowycz W. J., Free convection about a vertical flat plate embedded in a porous medium with application to heat transfer from a disk, *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, pp.2040-2044 (1977).
- [2] Cheng P. and Chang I-Dee, Buoyancy induced flows in a saturated porous medium adjacent to impermeable horizontal surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.19, pp.1267-1272 (1976)
- [3] Jang J. Y. and Chang W. J., Buoyancy-induced inclined boundary layer flow in a saturated porous medium, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 68, 333-344 (1988).
- [4] Jang J. Y. and Chang W. J., Buoyancy-induced inclined boundary layer flow in a porous medium resulting from combined heat and mass buoyancy effects, *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 15, 17-30 (1988).
- [5] Vhen K. S., and Ho J. R., "Effects of flow inertia on vertical, natural convection in saturated porous media", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.29, No.5, pp.753-759 (1986).
- [6] Kumari M., I. Pop, and Nath G., "Non-darcy natural convection from a heated vertical plate in saturated porous media with mass transfer", *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No.3, pp.337-346 (1985)
- [7] Kim S. J., and Vafai K., "Analysis of natural convection about a vertical plate embedded in a porous medium", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.32, No. 4, pp.665-677, 1989.
- [8] Hong J. T., and Tien C. L., "Analysis of thermal dispersion effect on vertical-plate natural convection in porous media", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.30, No. 1, pp.143-150, 1987.
- [9] Hong J. T., Tien C. L., and Kaviany M., "Non-Darcian effects on vertical-plate natural convection in porous media with high porosities", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.28, No. 11, pp.2149-2157, 1985.
- [10] Chen C. H., Chen T. S., and Chen C. K., "Non-Darcian mixed convection along nonisothermal vertical surfaces in porous media", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.39, No. 6, pp.1157-1164, 1996.
- [11] Seddeek M A., "Effects of non-Darcian on forced convection heat transfer over a flat plate in a porous medium-with temperature dependent viscosity", *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.32, No. 1-2, pp.258-265, 2005.
- [12] Wassel, A. T., and Mills, A. F., "Design Methodology for a Counter-current Falling Film Evaporative Condenser". *ASME J. of Heat*

- Transfer, Vol. 109, pp.784-787, 1987.
- [13] Schroppel J., and Thiele F., "On the Calculation of Momentum, Heat and Mass Transfer in Laminar and Turbulent Boundary layer Flow along a Vaporizing Liquid Film", Numerical Heat Transfer, Vol.6, pp.475-496, 1983.
- [14] Chow, L. C., and Chung, J. N., "Evaporation of Water into a Laminar Stream of Air and Superheated Steam", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.26, pp.373-380, 1983.
- [15] Haji, M., and Chow, L. C., "Experimental Measurement of Water Evaporation Rates into Air and Superheated Steam", ASME J. Heat Transfer, Vol.110, pp.237-242, 1988.
- [16] Tsay, Y. L., "Analysis of Heat and Mass Transfer in a Countercurrent-flow Wet Surface Heat Exchanger", Int. J. Heat and Fluid Transfer, Vol.15, pp.149-156, 1994.
- [17]. Tsay, Y. L., "Heat Transfer Enhancement through Liquid Film Evaporation into Countercurrent Moist Air Flow in a Vertical Plate Channel", Heat and Mass Transfer, Vol.30, pp.473-480, 1995.
- [18] Yan, W. M., "Evaporative Cooling of Liquid Film in Turbulent Mixed Convection Channel Flows", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, pp.3719-3729, 1998.
- [19] Yan, W. M., Soong, C. Y., "Convective Heat and Mass Transfer along an Inclined Heated Plate with Film Evaporation", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.38, pp.1261-1269, 1995.
- [20] Mezaache, E., and Daguenet, M., "Effects of Inlet Conditions on Film Evaporation along an Inclined Plate", Solar Energy, Vol. 78, pp.535-542, 2005.
- [21] Char, M. I., Lin, J. D., Chen H. T., "Conjugate Mixed Convection Laminar non-Darcy Film Condensation along a Vertical Plate in a Porous Medium", Int. J. of Engineering Science, Vol.39, pp. 897-912, 2001.
- [22] Zhao, T. S., "Coupled Heat and Mass Transfer of a Stagnation Point Flow in a Heated Porous Bed with Liquid Film Evaporation", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.42, pp.861-872, 1999.
- [23] Shih, M. H., Huang, M. J., and Chen, C. K., "A study of liquid evaporation with Darcian resistance effect on mixed convection in porous media", Int. Comm. in Heat Mass Transfer, Vol.32, pp.685-694, 2005.
- [24]. Leu, J. S., Jang, J. Y., and Chou, Y., "Heat and mass transfer for liquid film evaporation along a vertical plate covered with a thin porous layer", International Journal Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.1937-1945, 2006.
- [25] Ergun, Fluid flow through packed columns, Chem. Engng. Progress, Vol.48, pp. 89-94 (1952).