以三維數值模擬及實驗探討具針狀電極之電液動流場及電場特性

The studies of electrical and flow characteristics of EHD channel flow with

needle electrode by numerical simulation and experiment

呂金生^{a*}、吳懿軒^b、張錦裕^b

Jin-Sheng Leu^{a*}, Yi-Hsuan Wu^b, Jiin-Yuh Jang^b

^a空軍航空技術學院機械工程科

^b成功大學機械工程研究所

^{a*}Department of Mechanical Engineering, Air Force Institute of Technology

^b Department of Mechanical Engineering, National Cheng-Kung University

摘要

本文利用三維數值模擬及實驗方法研究具針狀電極之電液動流場對平板表面水分蒸發速率的影響。在理論部份,以三維紊流流場及電場方程式分析在不同供電電壓下,針狀電極電場產生的電液動效應對濕水面的水蒸汽蒸發率及薛吾爾德數(Sh)的影響。並藉由對電極附近的流場、濃度場及電場特性的觀察,了解電液動效應對熱質傳效率提昇的機制。由結果顯示,隨著供電電壓的增加,薛吾爾德數增加。實驗結果亦與數值模擬比較並可得到一致性的趨勢,數值結果誤差約16%~26%。

關鍵字:電液動技術、針狀電極、質傳

Abstract

The paper studied the EHD effect with one needle electrode on the evaporating rate of the forced convection channel flow by numerical and experimental methods. Three-dimensional turbulent model and current continuity equation were used to analyze the flow field. Besides showed the EHD effect on the evaporating rate, the results emphatically studied the electrical and evaporating characteristics around the needle electrode. The numerical results showed the evaporating performance and Sherwood number were increased with increase of input voltage. In addition, the nonuniform electric field near the needle electrode induced the corona effect and disturbed strongly the flow field. At last, the numerical result got a good consistency with the experiment within a discrepancy of 16~26%.

Keywords: EHD, needle electrode, mass transfer

一、前言

電液動(EHD, Electrohydrodynamic)技術 之工作原理乃利用銅線或不銹鋼線之電極以 不同設置方式置入流場,提供高電壓使流場 產生一電場,驅動帶電離子或高介電係數流 體產生移動,使得邊界層受到更強的擾動, 大幅提昇熱傳效率。在單相之氣體中,高壓 電極在氣體中產生電離現象而產生電暈放電 (corona discharge),即一般所謂的離子風(ionic wind)。高壓電場對液體的影響則產生液體擷 取現象,加速液體的流動。

應用電液動技術時影響熱質傳效率的因 素有電場參數(如供應電壓、電極形狀及間 距、電場極性)、流場參數(流速、溫度及濕度) 及熱傳表面狀態(平滑管、鰭管形狀尺寸等)。 2007 年 Laohalertdecha et al. [1]曾對 EHD 在

熱傳增強的研究文獻做一完整的回顧,清楚 描述 EHD 應用在單相(空氣及液體)及具相變 化(凝結、沸騰)情況的熱傳增加效果。Shakouri 和 Esmaeilzadeh [2] 以實驗的方式探討不同 電極排列方式於水平通道內置放三維形狀熱 源之電液動增強效應。Huang et al. [3] 利用四 組針狀陣列電極以實驗探討有效的 EHD 熱 傳增強冷卻系統,發覺在電極使用負電時的 電暈效應較強,當電暈電流高於 1µA 時就會 產生明顯的熱傳增強效果。Chen et al. [4] 設 計一針狀電極(4~11kV),探討電極極性、傾斜 角度、電極高度及接地型式對 EHD 使用於 LED 散熱問題之效益,實驗發現 0 到 20 度 的電極傾斜角可使熱傳能力稍許增加;網格 式的接地電極產生較大的熱傳增強效益。Lin 和 Jang [5]探討三維 EHD 對板鰭式熱交換器 之流場及其熱增強效益。結果可得到 2 倍以 上的熱傳增強效果及 56% 的面積縮減率。

電液動技術應用在食品及生物製程乾燥 的研究中,Ashutosh et al. [6] 對其相關文獻做 一廣泛的介紹。Hashinaga et al. [7] 使用針狀 電極以交流電產生電暈效應應用於提昇蘋果 切片之乾燥速率,發現針狀電極所產生的離 子風可提供比一般常溫空冷高 4.5 倍的乾燥 效率。Lai et al. [8-9] 以實驗方法探討不同電 極對水膜蒸發及食品乾燥的問題,實驗結果 具 EHD 電場的薛吾爾德數(Sh)可提升 3-4 倍。Huang 和 Lai [10] 以數值方法探討線電極 二維水平通道之 EHD 強制對流水膜蒸發問 題,探討不同進口速度及供電電壓對水槽蒸 發速率的增強情況。

從以上之文獻回顧可看出目前在電液動 技術有關質傳性能之研究,主要以實驗及二 維之電液動數值分析來探討。本文利用實驗 及三維數值方法探討電液動效應對流場及蒸 發效率的影響,探討單一針狀電極在不同供 電電壓時之質傳增益。實驗數據將與數值模 擬互相比較,以驗證理論模式及數值方法之 準確性。

二、理論分析

本文探討通道內的空氣流動,空氣流經 一個溼水面(wetted surface),圖1為探討的物 理模型示意圖。進口空氣流速及水蒸汽濃度 分別為 u_{∞} 、 C_{∞} 。水面上方設置針狀電極,電 極距離水面高度為 H,水面長度與寬度分別 為 L_x 、 L_z ,風洞高度為 L_y 。由於電場、流場 及濃度場同時存在,需同時求解 Maxwell 電 場、連續、動量及濃度場方程式等,方能正 確描述流場及熱質傳特性受電場影響的情 況。

為簡化問題,吾人作以下合理之假設:

- (1)流體物理性質視為常數。
- (2)電場方程式與流場方程式是單向耦合問題,即電場參數會影響流場,但電場不受流場參數的影響。
- (3)流場中僅充滿中性原子及帶正電離子,電子並不會影響電場中之電位。



圖 1 物理模型示意圖

Maxwell 電場統御方程式如下:

Poisson 方程式:

- $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_c}{c} \tag{1}$

$$\nabla^2 \mathbf{V} = -\frac{\rho_c}{\varepsilon} \tag{3}$$

電流連續方程式:
$$\nabla \cdot i = 0$$
 (4)

電流定義方程式:
$$i = \rho_{c} b_{ion} E$$
 (5)

$$\frac{\rho_c^2}{\varepsilon_0} = \nabla \rho_c \bullet \nabla V \tag{7}$$

流場統御方程式如下:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \overline{u_{i}u_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(v \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} - \overline{u_{i}'u_{j}'} \right) + \frac{\rho_{c}}{\rho} E_{i}$$
(9)
$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \overline{u_{i}C} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_{j}} - \overline{u_{j}'C} \right)$$
(10)

其中 $ε_0$ 是介電常數($coul^2/_{N,m^2}$), E是電場強度 (V_m), $ρ_c$ 是單位體積正離子及負離子電荷的總 和,又稱為電荷密度($coul/_{m^3}$), D 為質傳擴散 係數($m^2/_s$),方程式(9)右邊之最後一項為庫倫 力。另外, $u_1 u_1'$,稱為雷諾應力項(Reynolds stress), $u_1' u_1'$,稱為雷諾度傳量(Reynolds mass flux)。 κ -ε 紊流方程式則使用於求解雷諾應力 項及雷諾質傳量。根據 Launder 和 Spalding[11] 所建議之值為, c_μ =0.09、 c_1 =1.44、 c_2 =1.92、 σ_k = 1.0、 σ_e = 1.3。至於質傳係數與薛吾爾德數的 計算方式採用下列方程式:

濕水面局部單位面積蒸發量為:

$$\mathbf{n} \mathbf{\hat{x}}_{WS} = -\mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{y}} \tag{11}$$

局部質傳係數hm 可定義為:

$$h_{\rm m} = \frac{n K_{\rm WS}}{C_{\rm water} - C_{\infty}} \tag{12}$$

平均質傳係數<u>hm</u>可定義為:

$$\overline{\mathbf{h}_{\mathrm{m}}} = \frac{1}{\mathbf{L}_{\mathrm{x}}\mathbf{L}_{\mathrm{Z}}} \int_{0}^{\mathbf{L}_{\mathrm{x}}} \int_{0}^{\mathbf{L}_{\mathrm{z}}} \mathbf{h}_{\mathrm{m}} \mathbf{d}_{\mathrm{x}} \mathbf{d}_{\mathrm{z}}$$
(13)

平均薛吾爾德數 Sh 可由下式求得:

$$Sh = \frac{h_m L_x}{R}$$
(14)

其中_{略ws}為水面水蒸發質量流率,C_{water}、C_∞ 分別為水面、無窮遠處的水蒸汽濃度。

邊界條件:

假設進口速度 $u_{in} = 1 \text{ m/s}$,進口濃度為相 對溼度 40%。出口邊界條件為所有物理量梯 度均為零, $\partial \phi / \partial n = 0$ 。固體表面邊界條件在風 洞內壁設定為非滑動性邊界條件,u=v=w=0, 電壓 $\partial V / \partial n = 0$,電荷密度 $\rho_c = 0$ 。電極側固定 電壓(V=14~20 kV),電荷密度在電極處假設 為 ρ_{co} 其值為未知,且會隨著電極的置放位置 不同而有所變化,濕水面固定電壓(V=0V), 電荷密度 $\rho_c = 0$,濕水面濃度為相對濕度 100% •

三、數值方法

本文數值模擬使用 CFD-RC 軟體。數值 求解步驟先假設初步的電壓值及電荷密度分 佈,再以電場 Poisson 方程式(3)式與電流連 續方程式(7)式求出非均勻電荷密度分佈 ρ_c及 電場 E。求得之電場所對應之庫倫力代入流場 動量方程式(9)再以流場 SIMPLEC 法求出壓 力場、速度場及濃度場。數值方法求解步驟 如參考文獻[12]所示,在此不再贅述。圖 2 為 本 文物 理模型之格點系統,網格數為 186,296。數值計算區域為入口區 200 mm,中 段濕水面區 550 mm,其中包含濕水面區 150 mm,出口區 200 mm。本文所選取之收斂條 件為以整個計算區域兩次疊代之殘值最大相 對誤差小於 10⁴為基準。



圖 2 格點示意圖

四、實驗測試

實驗設備將包括風洞、高電壓電源供應 器、電壓與電流量測,電子秤以及資料擷取 裝置等設備,圖 3 及圖 4 為實驗的系統圖及 完成圖。風洞為長方體,尺寸長×寬×高為 183 cm×23 cm×10 cm,鼓風機吹入空氣後,經 過填滿吸管的整流區整流流場。離風洞入口 140 cm處底部切割出一個邊長 16.5 cm 的正 方形,下方放置水槽,水面與空氣對流產生 蒸發。水槽底部放置一塊銅板作為電極系統 的接地處,水面上方則放置一根針狀電極, 探討的電極距水面距離為 25 mm。本系統 利用高電壓電源供應器建立高電壓電場,電 離空氣產生電暈效應。兩台多功能數位電錶 分別用於量測高壓電源供應器輸出之電壓與 電流值,並將所得量測資料(溫度,速度,電 壓,電流等)由資料擷取器記錄。本實驗量測 不同電壓下,固定實驗時間的水蒸發量,再 求無因次薛吾爾德數(Sh)。



圖 3 實驗系統配置圖



圖4 實驗系統完成圖

五、結果與討論

圖 5,圖 6 是數值模擬電極供電電壓 14 kV,電極高度 25 mm 時,針狀電極附近之電 壓及電場分佈。x-y 剖面位置在 z=0(中心剖 面), y-z 剖面位置在設置針狀電極之處。圖 5 可看出電壓分佈從針狀電極處的最高電壓以 橢圓球型漸次往外擴散至下方水面的接地 處附近更呈現劇烈的不均勻現象,因此產生 如圖 6 所示之不均勻電場分佈。圖 6 顯示針 狀電極附近形成較劇烈的電場分佈,最強的 電場則分佈在針狀電極的尖端處。

圖7至圖9為數值方法模擬電液動效應 存在時之速度、電荷密度及濃度場的分佈, 及與無電場存在之流場比較。流場進口條件 為進口速度1m/s,進口相對濕度40%。圖7-圖9的(a)、(b)圖位置為z=0(中心剖面),圖7(c) 及圖8(c)位置在設置針狀電極之處。圖9(c) 位置在接近出口處。從圖7可看出當無電場 存在時(圖 7(a))速度邊界層分布相當平滑, 當 V=14 kV時(圖 7(b),(c)),在針狀電極設 置處周圍會造成速度擾動的現象,並產生大 型的渦流。另外可看出流場 z 方向中心處由於 針狀電極產生電液動效應,空氣往下噴流, 然後往 z 方向兩側流動,





在靠近壁面時則往上流動。所以空氣在 通道中 y-z 平面的流動是由中央往下噴流到 濕水面並沿著 Z 方向正負兩側散開,最終沿著 Z=±75 mm 的壁面回升,在 Z 方向會形成一個 對稱的二次流。

圖 8 為電場存在時,電場電荷密度的分佈情況,當電極側施加 14 kV 時(圖 8(b),(c)), 可看出電荷密度依強弱在以電極線為中心往 四周擴散,由於目前電極為針狀電極,電荷 密度呈現三維之橢圓球型,距離電極線越近 的區域電荷密度越高。供電電壓愈大,電極 中心的電荷密度愈強。供電電極所形成的電 場吸引電離空氣往接地電極的平板區域移 動。

圖 9 為電液動效應對流場水蒸汽濃度影響,在沒有提供電場時(圖 9(a)),可看出水蒸 汽濃度在壁面附近呈現明顯的邊界層現象, 濃度值由濕水面側的高濃度向自由流區域遞 減。在施加電場後,如圖 9(b),(c)中可以看 出在施加電壓 14 kV 時在電極處和濕水面間 形成的渦流增加了空氣的對流程度,順勢提 高電極下游區域的水蒸汽濃度。因此增強空 氣側的水蒸汽蒸發能力。



(a) 無電場存在



(c) 14kV(y-z 剖面)

圖 9 電液動效應對流場水蒸汽濃度影響

為驗證數值與模擬結果準確性,實驗設 計針對一根針狀電極距水面高度 25 mm 的情 況,針狀電極提供正電壓,水槽內銅板接地, 在空氣進口速度 1 m/s 、供電電壓 14 kV 至 20 kV 的範圍,量測水槽內的水在實驗過程中 的蒸發量,換算得到薛吾爾德數(Sh),再與相 對應的數值結果作比較。實驗設備及步驟因 篇幅限制,不在此贅述。電液動實驗開始需 建立產生電暈效應的電流—電壓圖(如圖 10 所 示)。圖 10 縱座標表示特定的供電電壓,橫座 崩潰,電流會突然變大。實驗結果與數值模 擬的電流—電壓值最大誤差約為 16%。

水槽水面質傳能力的驗證則由實驗數據 及數值結果利用(11) 式至(14)式計算出薛吾 爾德數(Sh),圖 11 表示在不同的供電電壓下 (14



圖 10 電流—電壓曲線數值模擬與實驗比較圖



圖 11 Sh 對應電壓數值模擬與實驗比較圖 kV 至 20 kV), 薛吾爾德數的變化。數值模擬 與實驗結果得到一致性的趨勢,但實驗結果 大於數值結果,最大誤差約 26%。

六、結論

本文以數值及實驗方法分析電液動效應 在一強制對流通道流場中對濕水面的蒸發效 率的影響,數值部分以三維紊流流場求解相 關的電荷密度場、速度場以及濃度場。並藉 由對電極附近的流場、濃度場及電場特性的 觀察,了解EHD對熱質傳效率提昇的機制。 結果顯示當電場存在時,電極周圍區域產生 劇不規則形式的電壓、電場及電荷密度 分佈,所產生的庫倫力造成流場相當程度的 擾動。而當供給電壓增大,薛吾爾德數(Sh) 隨之增加。最後,本文建置之實驗系統獲得 的數據與數值模擬之誤差約 16%~26%。可驗 證數值方法的準確性。

誌謝

本 論 文 為 科 技 部 計 畫 編 號 MOST 104-2221- E-006-170-MY2 之計畫,由於科技 部的支持,使本計畫得以順利進行,特此致 上感謝之意。

參考文獻

[1] Laohalertdecha S., Naphon P., and Wongwises S., A review of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.11, pp.858-876, 2007.

- [2] Shakouri P. M., Esmaeilzadeh E., "Experimental investigation of convective heat transfer enhancement from 3D-shape heat sources by EHD actuator in duct flow", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.35, pp.1383-1391, 2011.
- [3] Huang R. T., Sheu W. J., and Wang C. C., "Heat transfer enhancement by needlearrayed electrodes - An EHD integrated cooling system", Energy Conversion and Management, Vol.52, pp.1789-1796, 2009.
- [4] Chen I. Y., Guo M. Z., Yang K. S., and Wang C. C., "Enhanced cooling for LED lighting using ionic wind", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 57, pp.285-291, 2013.
- [5] Lin C. W., and Jang J. Y., "3D Numerical heat transfer and fluid flow analysis in plate-fin and tube heat exchangers with electro- hydrodynamic enhancement", Heat Mass Transfer, Vol.41, pp.583-593, 2005.
- [6] Ashutosh S., Valerie O. and Vijaya R.,"A Comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bio-processing", Drying Technology, Vol. 30, No. 16,pp.1812-1820, 2012
- [7] Hashinaga F., Bajgai T. R., Isobe S., and Barthakur N. N., "Electrohydrodynamic (EHD) drying of apple slices", Drying Technology, Vol.17, No.3, pp.479-495, 1999.
- [8] Lai F. C., and Wong D. S., "EHD-Enhanced drying with needle electrode", Drying Technology, Vol.21, No.7, p.1291-1306, 2003.
- [9] Lai F. C., and Sharma R. K., "EHD-Enhanced drying with multiple needle electrode", Journal of Electrostatics, Vol.63, pp.223-237, 2005.
- [10] Huang M., and Lai F. C., "Numerical study of EHD-enhanced water evaporation", Journal of Electrostatics, Vol.68, pp.364-370, 2010.

Journal of Air Force Institute of Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 75-82, 2017

- [11] Launder, B.E., and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.
- [12] 呂金生、吳懿軒、張錦裕、黃育賢,"使 用針狀電極之電液動強制對流流場之質 傳性能分析",中華民國航太學會第58屆 學術研討會,No.03-13,高雄市,台灣, 2016。

航空技術學院學報 第十六卷 第一期(民國一〇六年)