

旋轉圓柱體於側面衝擊噴流下之熱傳特性研究

鄭澤明¹、曾憲中^{1,*}、徐睿²

¹建國科技大學機械工程系暨製造科技研究所

²江蘇大學能源與動力工程學院

*tsc@ctu.edu.tw

摘要

本研究係以實驗方法探討衝擊噴流對垂直旋轉圓柱體側面冷卻之熱傳特性，並針對川源運動護具有限公司生產管條之圓筒針織管條專用機進行冷卻方案診斷，提出高效且經濟的氣體衝擊冷卻系統，並以紅外線熱像儀全面量測確認冷卻改良成效，成功解決機台的積熱問題。本研究討論不同噴嘴直徑（1.9mm、3.7mm、5.8mm）、不同空氣流量（60、100 與 140 liter/min）與不同圓柱轉速（100、200、300rpm）對垂直旋轉圓柱體之衝擊冷卻的影響，圓柱體為鋁合金製成，其直徑為 40mm、高度為 100mm，實驗結果發現圓柱轉速對熱傳影響並不大，冷卻空氣流量增加與噴嘴直徑減少都可增大熱傳效果。但相同條件下，減小噴嘴直徑比增加空氣流量能有更好的冷卻效果，從而得到經濟的冷卻效果。本實驗亦總結出紐塞數對應雷諾數的經驗公式，可做為相關系統冷卻設計之參考。

關鍵字：衝擊噴流、旋轉圓柱體、熱傳。

1.前言

大多數的機械都以旋轉的方式來達成動力的轉換，由於這種傳動過程主要靠旋轉動作來完成，造成損壞的原因往往是由於熱傳導不良所引起的。本案係川源公司其生產管條之圓筒針織管條專用機在長時間運轉操作下將使針織圓筒產生高溫，會減低針織圓筒使用壽限，甚至導致機臺運轉不順，影響產品品質與出貨期程，極須有效而經濟的冷卻方案改善過熱運轉的問題。衝擊冷卻是目前冷卻技術運用最為廣泛且有效率之方法，由於其設計上較為簡單，且冷卻流體能夠直接且充分的衝擊機械零件上，將零件局部高溫之熱能帶離，並能夠大幅提升熱傳率等性質。衝擊冷卻能為眾多工業應用提供強大的局部冷卻效果，比如金屬退火，鋼化玻璃，紙製品和紡織品的乾燥，燃氣渦輪冷卻和電子裝備冷卻等，因此，將衝擊冷卻技術做為針織圓筒過熱運轉的改善方法應是可行的方案之一。

關於衝擊噴流的熱流性質有大量試驗和理論研究[1 - 8]。有關衝擊噴流對固體表面冷卻之熱流研究，Polat 等人[3]、Jambunathan 等人[5]、與 Martin[8]都曾做過相當仔細的回顧性文章，他們指出紐塞數的增益可以藉由縮短噴口與加熱面之間的距離、增大雷諾數、以及利用拋物線噴流出口速度分佈等方法達成。在一個衝擊冷卻系統中，流體的流動極大地影響熱傳性質。因此，影響熱傳的因素大致總結為：噴流的雷諾數 (Re)，普朗特數 (Pr)，無因次的噴口到冷卻物距離(H/d)，噴管的幾何尺寸，流動範圍，噴口出口處的速度分佈，噴流的湍流強度等。

很多研究討論了衝擊噴流對加热的靜止物體的熱傳性質影響[5、9 - 13]。D. Lytle 等人[10]利用紅外線熱像儀對噴口至冷卻物距離小於噴口直徑情況下之衝擊噴流的局部熱傳特性進行了實驗研究。J.Y. San[11] 等人利用實驗量測了平板在受限衝擊噴流下的局部紐塞數。實驗分別研究了四種不同噴口直徑（3,4,6 和 9mm），且雷諾數 (Re) 範圍為 30,000-67,000，發現噴口直徑 (d) 強烈影響紐塞數大小，即在相同雷諾

數下，減小噴口直徑將導致紐塞數 (Nu) 降低，但當噴口直徑大於 6mm 時，噴口直徑對紐塞數的影響將逐漸減小。M. Behnia 等人[12]用 v^2 - f 湍流模型模擬了受限與非受限之衝擊噴流。研究發現只有當噴口距冷卻物很近的情況下，噴流是否受限才對紐塞數 (Nu) 大小有所影響。相比之下，噴口中流體的速度分佈及湍流強度對紐塞數 (Nu) 的分佈有較強影響。

衝擊冷卻技術不僅用在靜止的系統，且能應用於旋轉裝置，包括化學氣相沉積 (CVD) 的旋轉底盤，渦輪葉片及電機，旋轉熱交換器和高速氣體軸承。因此，也存在許多對旋轉盤的衝擊冷卻之熱流特性研究[14 - 17]。其中大多情況為衝擊噴流方向與旋轉軸方向平行，垂直衝擊於旋轉平面，從而需考慮由旋轉引起的周向速度對提高發熱物體對流熱傳的影響。

而本實驗衝擊噴流方向與圓柱旋轉軸方向垂直，系為了避免衝擊冷卻氣源干擾機心上方勾針與線的運作。因為圓筒針織管條專用機操作時期機心會快速旋轉，所以噴射空氣固定從側面噴向旋轉圓柱體機心即可達到冷卻機心全周的功能，而同時可避免噴射空氣過度擴散而干擾到勾針與線的運作。目前相關研究較少有關注衝擊噴流流向與發熱物體旋轉軸垂直之情形，因此本研究先以紅外線熱像儀(如圖 2)全面量測「圓筒針織管條專用機」操作狀態下的溫度變化，瞭解積熱位置與分析積熱原因，提出安裝一溝槽式噴嘴，以空壓機提供壓縮空氣進行積熱部位的局部衝擊冷卻，其中冷卻空氣垂直噴射於旋轉圓柱體側面，並通過實驗提出最適切的噴嘴構型、安裝位置、與空氣流量，以達最經濟有效的冷卻方案，並以紅外線熱像儀全面量測確認冷卻改良成效。再者，通過穩態試驗方法，在實驗室中模擬實際情況中衝擊噴流對垂直旋轉圓柱體的冷卻情形，探討不同旋轉雷諾數 Re_r 下不同冷卻方案的熱流熱特性。

2. 實驗設備

本研究實驗分為現場機台冷卻量測試與實驗室穩態熱傳試驗。現場量測示意圖如圖 1 所示。實驗室穩態熱傳試驗設備 (如圖 2 所示) 主要之架設基本上可由：(1) 實驗測試段、(2) 空氣供應系統、(3) 旋轉機台本體、(4) 數據資料擷取記錄器與紅外線全平面、(5) 熱供應系統等五大系統組合架構而成。

測試段採用布質電木塊為本實驗測試段之材料，其拖盤為直徑 176 mm 厚度為 50 mm 之圓柱體(如圖 3 所示)。且為了抓取測試段之壁面局部溫度，則必須在拖盤壁面上鑽孔，T-T-30SLE 型 T-Type 熱電偶之結球部份先焊接在均溫小銅片上，並埋設於托盤之鑽孔中，最後利用 Ω 型兩劑式導熱膠將熱電偶膠著於托盤壁面上，並確保測試段之氣密性。其中測試段托盤底部壁面共埋設 9 點測溫點。而本實驗測試段之圓柱直徑為 $D=40\text{mm}$ 、高度 $H=100\text{mm}$ 之鋁合金圓柱體 (如圖 3)。空氣供應系統乃是提供冷卻氣體至噴嘴之來源，本系統主要是由 10 馬力之空氣壓縮機、高壓儲氣筒、壓縮式冷凍乾燥機、氣動式排水幫浦、電子式流量計以及三組可拆換式圓形衝擊噴嘴所組成。為了避免冷卻空氣之氣源無法長時間有效穩定的供應，因此壓縮空氣必須經由兩組高壓儲氣筒維持相當之壓力，並經由冷凍式乾燥機及四組空氣水裝置過濾壓縮空氣中大量殘留之水分及油氣，壓縮空氣在經過濾後會經由流量計微調控制，將衝擊測試段之冷卻氣體維持於一定之空氣流量 (liter/min)，壓縮空氣會流經噴嘴，衝擊於測試段之旋轉圓柱側壁上，其中本實驗噴嘴分別裝設口徑 1.9、3.7 及 5.8mm 三種噴嘴口徑。機台主體內部之系統結構主要由式高速旋轉主軸及測試段高速旋轉實驗區域 大部分所架構成，其主軸之傳動是由 220V 之 1 HP 之高速馬達所傳動，並配合變頻器控制，而實驗中之轉速則可藉由裝置於迴轉軸間之轉速計測得其轉速。

數據資料擷取記錄器是採用 YOKOGAWA MX-100 型之暫態溫度記錄擷取器，同步監控及擷取 9 點暫態之溫度點，每 1 秒擷取一次數據，量測誤差值為 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，並與電腦同步監控連線，並將數據傳送於電腦建檔。而本實驗之溫度訊號必須經由旋轉軸下之 9 點訊號滑環 (Slip ring for signal) 將電位差之訊號

傳送至數據暫態資料擷取記錄器。實驗測試段內部槽道之壁面上之加熱源，是由0.02 mm 厚及加熱片尺寸為d=4cm圓形鎳鉻不鏽鋼片。並於加熱片之正反面黏貼具耐熱性質之鐵氟龍包覆絕緣，最後使用 Ω 型劑式導熱膠將加熱片黏貼於測試段之托盤壁面上，而加熱電源的傳輸則是透過旋轉軸上之電力滑環經碳棒傳輸，並連接至 110V 之DC 電源供應器，以得到所需之加熱溫度。

全平面溫度量測系統主要是利用 NEC 紅外線熱影像儀，接收發熱物所放出之紅外線波長進行熱影像拍攝，再將攝影機所拍攝之彩色影像檔進行熱影像分析。

3. 數據整理與不確定性分析

本實驗之目標參數為底座平均鈕塞數 Nu_w ，表面平均鈕塞數 Nu_s ，變動參數包括噴射雷諾數(Re_j)、旋轉雷諾數(Re_r)、噴嘴直徑 d ，藉由整體參數無因次化後，探討圓形衝擊噴流衝擊旋轉圓柱之熱傳特性。而上述之重要無因次化參數之方程式如下：

$$Re_j = \frac{\rho_f U_j d}{\mu} \quad (1)$$

$$Re_r = \frac{\rho_f \pi \Omega d^2}{120 \mu} \quad (2)$$

$$Nu_w = \frac{h_w D}{k_{air}} = \frac{q_c D}{(T_w - T_j) k_{air}} \quad (3)$$

$$Nu_s = \frac{h_s D}{k_{air}} = \frac{q_c D}{(T_s - T_j) k_{air}} \quad (4)$$

其中， U_j 為噴嘴空氣流速、 Ω 為圓柱體轉速、 T_w 為圓柱底部加熱面平均溫度、 T_s 為圓柱側表面平均溫度、 T_j 為噴射空氣溫度、 q_c 代表對流熱通量、 d 為噴嘴直徑、 D 為圓柱體底部加熱面直徑。據 Moffat [18] 的 確定性分析方法，本實驗的噴流 (Re_j)，旋轉雷諾數 (Re_r) 和鈕塞數 Nu 之 確定性在 95%的置信度下分別為 2.0%，2.3%與 6.7%。

4. 結果與討論

針對川源運動護具有限公司生產管條之圓筒針織管條專用機現場溫度觀測可得如下結論：圖 4 為無衝擊噴流冷卻時之紅外線熱像儀全面溫度量測結果，隨著操作時間的延長，機心處的溫度也不斷的提升，值得注意的是目前量測的僅是機心的金屬外殼，10 分鐘後已將屆 40℃，其內部的溫度必然更高，長期運轉必會影響機心壽命與可靠度，增加維修成本；圖 4 也可以清楚的觀察到具有衝擊噴流冷卻時確實能有效散熱，達到保護機心與降低過熱損壞的風險，而且實測時也證實目前設計的噴流冷卻系統不會對原紡織機台的操作產生干擾；圖 5 是將各種形式噴嘴之冷卻效能做一比較，結果顯示適中的噴嘴口徑(3.7mm) 搭配完全的噴嘴開度其冷卻效能最好，與無衝擊噴流冷卻時比較，在運轉 10 分鐘後能有 10.4℃的溫度下降，而最大的噴嘴口徑(5.8mm)搭配一半的噴嘴開度時其冷卻效能較差，但在運轉 10 分鐘後也能有 7.8℃的溫度下降。

實驗室中穩態熱傳試驗結果與討論如下：圖 6 通過紅外線熱像儀顯示三個不同參數：噴嘴直徑 d 、旋轉雷諾數 Re_r 、空氣流量 Q_{flow} 對冷去卻效果的影響的示意圖。由圖可知，增加空氣流量 Q_{flow} 能增強冷卻效果，這符合強制對流特性；而旋轉雷諾數 Re_r 對冷卻效果的影響不顯著，在本實驗 200~400rpm轉速範圍內基本可忽略，這可能係旋轉雷諾數遠小於噴射雷諾數，所以相較於噴射衝擊

冷卻效應，旋轉所造成的強制對流效應可忽略；而噴口直徑對衝擊冷卻效果有顯著的影響，噴嘴直徑愈小則衝擊冷卻效果愈好，這是因為噴嘴縮小會增大流速，使得對流效應增強。圖 7 顯示了無因次冷卻空氣流量 $Re_j \times (d/D)$ 對衝擊冷卻效果的影響，圖中可發現 Re_r 對冷卻效果的影響基本可以忽略，且相同空氣流量下，噴嘴直徑越小 Nu_w 與 Nu_s 越大，在本研究中最小噴口直徑($d=1.9\text{mm}$)之 Nu_s 約為最大噴口直徑($d=5.8\text{mm}$)之 Nu_s 的 1.7 倍，且冷卻空氣流量越大冷卻效果越好，圖 7 結論與紅外線熱像儀觀測得出結論完全符合，定量的說明噴嘴直徑對冷卻效果的影響比冷卻空氣流量更加顯著。圖 8 為不同 Re_r 與 Re_j 下的 Nu_w 與 Nu_s 關係其擬合公式分別為：

$$Nu_s = 2.215Re_j^{0.537} \quad (5)$$

$$Nu_w = 4.681Re_j^{0.206} \quad (6)$$

方程式(5)與(6)的預測值與實驗值的平均偏差在 5% 以內。

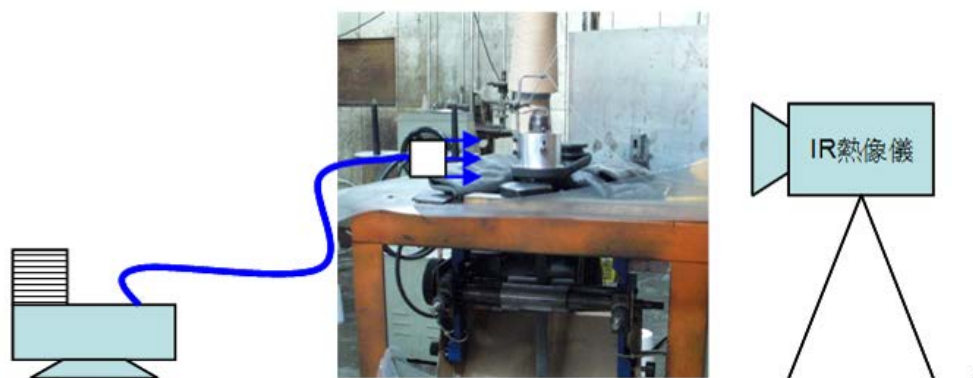


圖 1 圓筒針織管條專用機現場量測示意圖

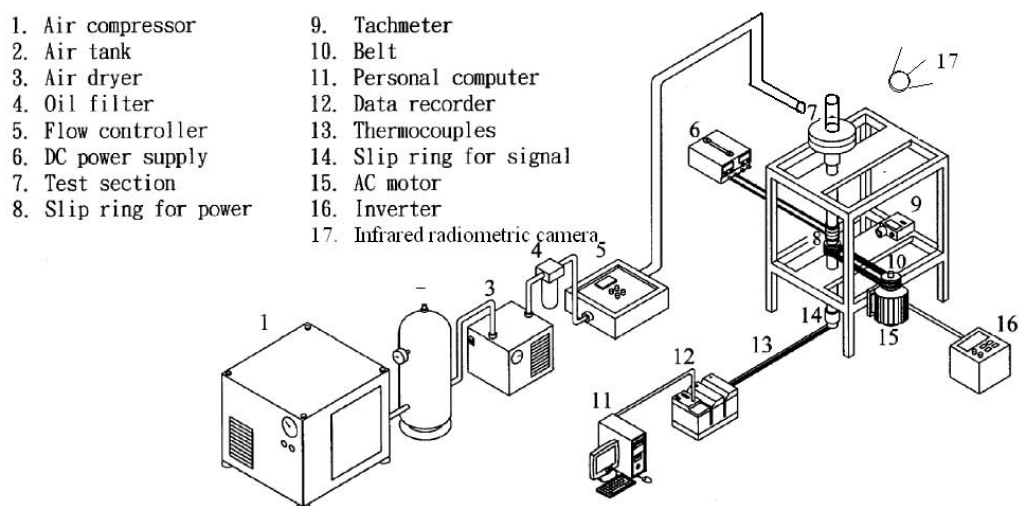


圖 2 試驗設備圖

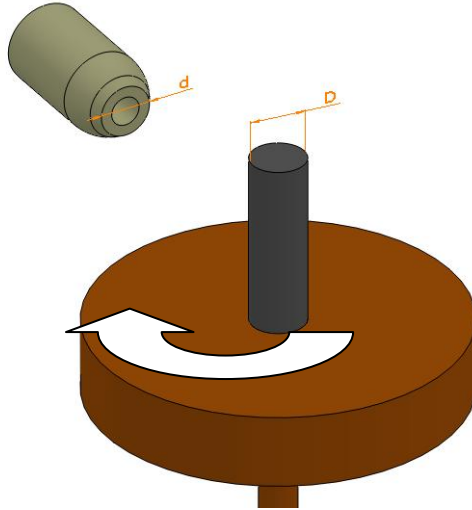
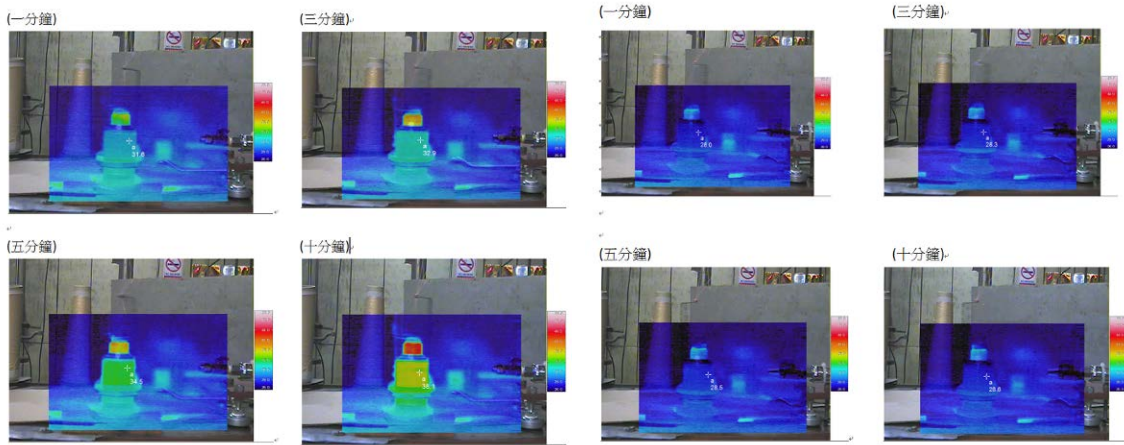


圖 3 測試段示意圖



(a) 無衝擊噴流冷卻

(b) 噴嘴孔徑 1.9 mm 與開關閥半開

圖 4 紅外線熱像儀全面溫度量測結果

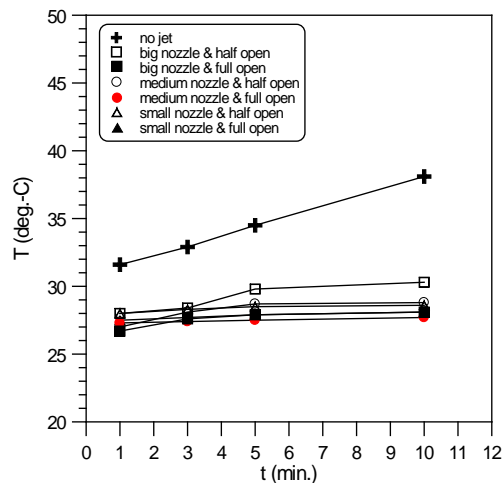
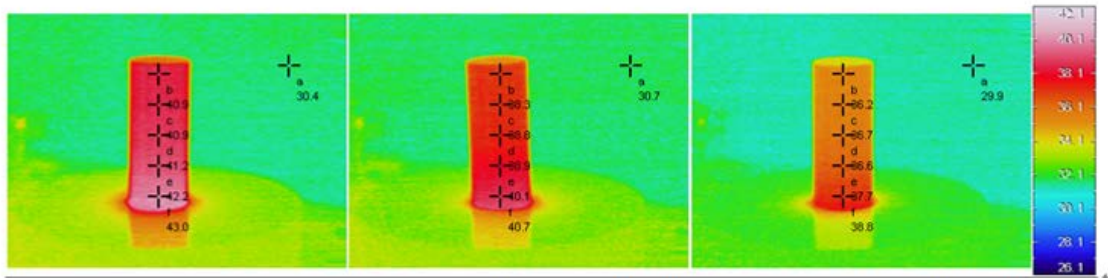
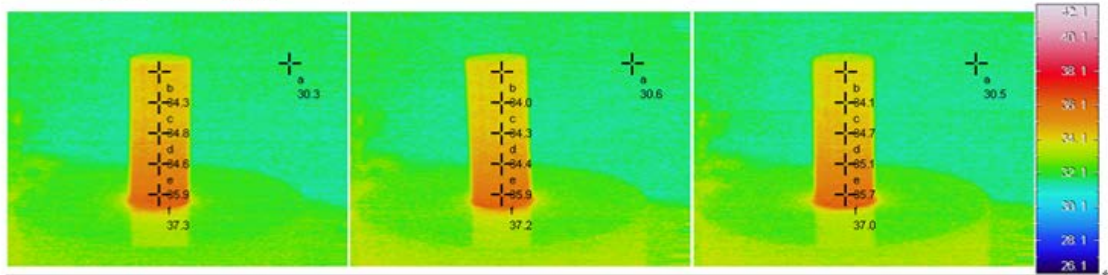


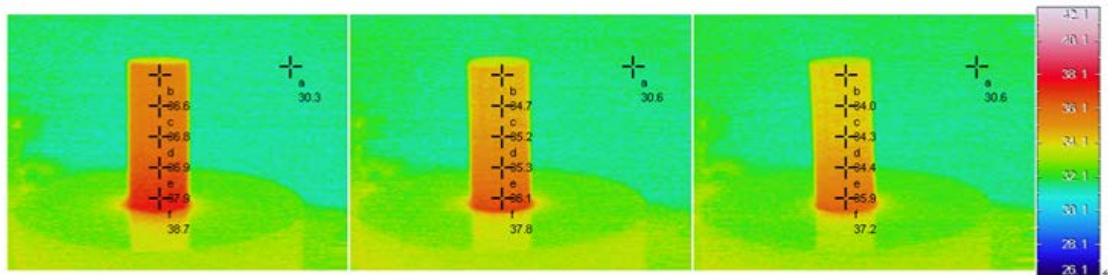
圖 5 各種形式噴嘴之冷卻效能比較



(a) $Re_r=570$, $Q_{flow}=60$ liter/min 下噴嘴直徑 d 分別為 5.8、3.7、1.9mm 之冷卻效果圖

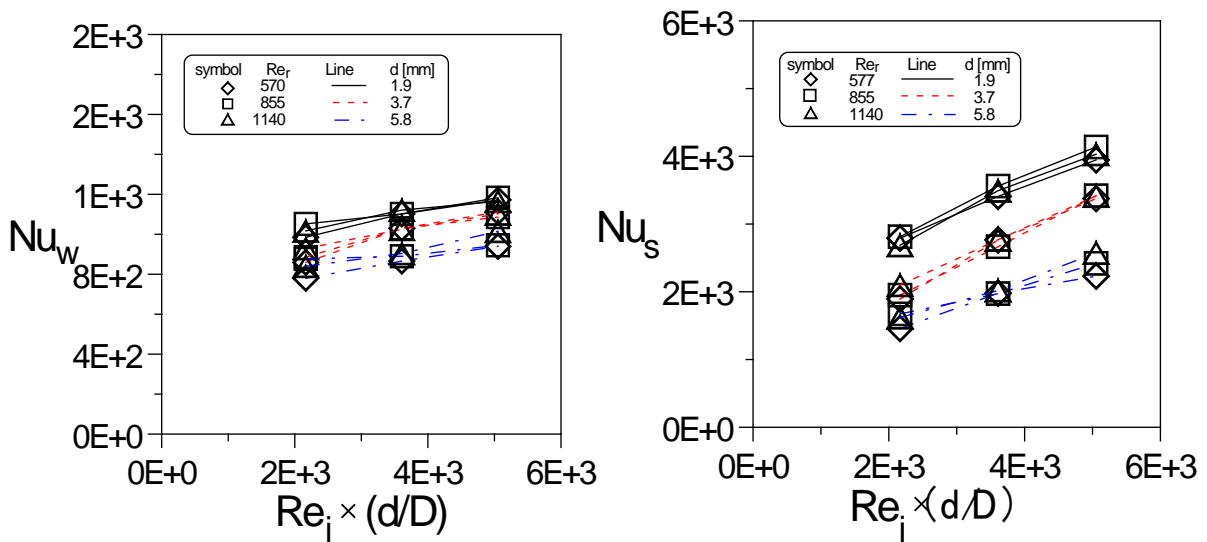


(b) $Q_{flow}=140$ liter/min, $d=1.9$ mm 下 Re_r 分別為 570、855、1140 之冷卻效果圖



(c) $Re_r=855$, $d=1.9$ mm 下空氣流量 Q_{flow} 分別為 60、100、140 liter/min 之冷卻效果圖

圖 6 通過紅外線熱像儀顯示不同噴嘴直徑 d 、旋轉雷諾數 Re_r 、空氣流量 Q_{flow} 之冷卻效果



(a) 底面 Nu_w

(b) 壁面 Nu_s

圖 7 無因次冷卻空氣流量 $Re_j \times (d/D)$ 對 Nu 的影響

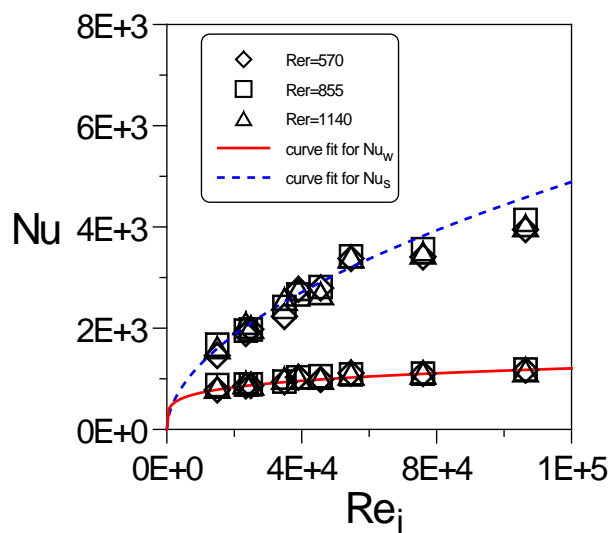


圖 8 不同 Re_j 與 Re_r 下 Nu_w 與 Nu_s 值分佈

5. 結論

本研究成功以實驗方法探討衝擊噴流對垂直旋轉圓柱體側面冷卻之熱傳遞，針對川源運動護具有限公司生產管條之圓筒針織管條專用機進行冷卻方案診斷，並於實驗室內建構測試機台進行嚴謹的實驗量測探討，實驗結果發現旋轉雷諾數 Re_r 對冷卻效果(Nu_w 與 Nu_s)的影響基本可以忽略，而噴嘴直徑越小則 Nu_w 與 Nu_s 越大，且噴射雷諾數 Re_j 越大則冷卻效果越好，本研究並根據所有實驗數據歸納出 Nu_w 與 Nu_s 對應 Re_j 的經驗公式，可做為相關垂直旋轉圓柱體側面接受衝擊噴流冷卻設計之參考。

誌謝

本研究感謝國科會經費補助(計畫編號 NSC 100-2221-E-270-014-MY3 與 NSC 100-2632-E-270-001-MY3)，謹此致謝。

參考文獻

- [1] R. Gardon, J. Cobonpue, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it, in: Proceedings of 2nd International Heat Transfer Conference on Int. Developments in Heat Transfer, ASME, New York, 1962, pp. 454–460.
- [2] S.J. Downs, E.H. James, Jet impingement heat transfer, in: Proceedings of the National Heat Transfer Conference, ASME, Pennsylvania, PA, 1987, 87-HT-35.
- [3] S. Polat, Heat and mass transfer in impinging drying, Drying Technol. 11 (1993) 1147–1176.
- [4] J.W. Baughn, S. Shimizu, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, J. Heat Transfer 111 (1989) 1096–1098.
- [5] K. Jambunathan, E. Lai, M.A. Moss, B.L. Button, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, Int. J. Heat Fluid Flow 13 (1992) 106–115.
- [6] R. Viskanta, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, Exp. Therm. Fluid Sci. 6 (1993) 111–134.

- [7] B.W. Webb, C.-F. Ma, Single-phase liquid jet impingement heat transfer, *Adv. Heat Transfer* 26 (1995) 105–107.
- [8] H. Martin, Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, *Adv. Heat Transfer* 13 (1977) 1–60.
- [8] Tzer-Ming Jeng, Sheng-Chung Tzeng, Hong-Ru Liao, Flow visualizations and heat transfer measurements for a rotating pin-fin heat sink with a circular impinging jet, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 2119–2131.
- [9] D.J. Womac, S. Ramadhyani, F.P. Incropera, Correlating equations for impingement cooling of small heat sources with single circular liquid jets, *ASME J. Heat Transfer* 115 (1993) 106–115.
- [10] D. Lytle, B.W. Webb, Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings, *Int. J. Heat Mass Transfer* 37 (12) (1994) 1687–1697.
- [11] J.Y. San, C.H. Huang, M.H. Shu, Impingement cooling of a confined circular air jet, *Int. J. Heat Mass Transfer* 40 (6) (1997) 1355–1364.
- [12] M. Behnia, S. Parneix, Y. Shabany, P.A. Durbin, Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets, *Int. J. Heat Fluid Flow* 20 (1999) 1–9.
- [13] A.H. Beitelmal, M.A. Saad, C.D. Patel, Effects of surface roughness on the average heat transfer of an impinging air jet, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 27 (1) (2000) 1–12.
- [14] M. Itoh, M. Okada, An experimental study of the radial wall jet on a rotating disk, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 17 (1998) 49–56.
- [15] Y.R. Shieh, C.J. Li, Y.H. Hung, Heat transfer from a horizontal wafer-based disk of multi-chip modules, *Int. J. Heat Mass Transfer* 42 (1999) 1007–1022.
- [16] M.M. Rahman, Analysis of simultaneous gas absorption and chemical reaction to a thin liquid film over a spinning disk, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 27 (2000) 303–314.
- [17] Y. Minagawa, S. Obi, Development of turbulent impinging jet on a rotating disk, *Int. J. Heat Fluid Flow* 25 (2004) 759–766.
- [18] Moffat, R.J., “Contributions to the theory of single sample uncertainty analysis,” *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp. 250–260, 1986.

Heat transfer characteristics of a rotating cylinder with a side impinging jet

Tzer-Ming Jeng¹, Sheng-Chung Tzeng^{1,*}, Rui Xu²

¹ Department of Mechanical Engineering, Chienkuo Technology University

² School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University

*tsc@ctu.edu.tw

Abstract

This work experimentally explored the heat transfer characteristics of a vertical rotating cylinder with a side impinging jet. The purpose is to solve the over-heat problem of the cylindrical knitting machine in the Chuan Yuan Sports Protection Co., Ltd. This work provided a high-performance and economical impinging cooling system to dissipate the heat of the knitting machine. The cooling performance is validated by the overall temperature measurement of the IR thermal imager. The study discussed the effects of the nozzle diameter (1.9, 3.7 and 5.8mm), the air flow rate (60, 100 and 140 liter/min) and the rotational speed (100, 200 and 300 rpm) on the vertical rotating cylinder with a side impinging jet. The cylinder, with 40mm in diameter and 100mm in height, is made of aluminum alloy. The experimental results indicate that the influence of the rotational speed could be ignored; while increasing the air flow rate or decreasing the nozzle diameter could promote the cooling performance. The sensitivity of the nozzle-diameter effect on the heat transfer is higher than that of the air-flow-rate effect. Therefore, the nozzle diameter would be the critical influence factor in the present issue. This study also proposes the empirical formula of the Nusselt number in terms of the Reynolds number, providing the cooling design base for the relevant rotating system.

Keywords: Impinging jet, rotating cylinder, heat transfer.