

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中精簡報告

振動物體對渠道內熱流場影響之理論與實驗研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2212-E-009-052-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程研究所

計畫主持人：傅武雄

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 6 日

執行期間：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

計畫主持人：傅武雄 教授

☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學機械工程學系

中華民國 92 年 8 月 1 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

振動物體對渠道內熱流場影響之理論與實驗研究

計畫編號：NSC91-2212-E-009-052

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：傅武雄 教授 國立交通大學機械工程學系

計畫參與人員：童寶鴻、廖英皓 國立交通大學機械工程學系

一、中文摘要

本研究利用數值方法分析管道內裝置往復運動的圓柱之後，對圓柱以及管道壁面附近速度以及溫度場的影響；並利用流場可視化技術以及熱傳量測實驗，驗證數值計算的結果，且進一步探討往復振盪運動的圓柱對管道內壁面以及當管道內加裝凸塊時熱傳的增益。在數值方面，本研究採用 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 座標描述系統，配合葛拉金有限元素法，處理此種流體與固體介面間相互影響的問題。由研究結果得知，在流場中圓柱進行往復式的振盪運動，受到圓柱牽引的效應，使管道內的流體呈現上下振盪的現象，引導流體像壁面衝擊，擾亂在圓柱後方壁面的流場，為提高熱傳效率的主要機制。此外，當圓柱振盪的頻率接近流場的自然振盪頻率時，會與管道內的流體產生共振的現象，此現象能夠大幅的增加流體的擾動，並且擾亂管道內的流場以及溫度場，產生較佳的熱傳增益。

關鍵詞：震動圓柱、流場可視化、電子元件散熱

Abstract

The study investigates the heat transfer enhancement by a reciprocated oscillating cylinder in a channel flow. The characteristics of flow and thermal fields are analyzed both numerically and experimentally. In the numerical analysis, a Galerkin finite element formulation with arbitrary Lagrangian-Eulerian method is adopted to solve the flow and thermal fields. The heat transfer rate is estimated by measuring the temperature of the heat plate, and the flow structure is observed by flow visualization technique. The results show that the oscillating cylinder induces the flow vibration. This phenomenon would disturb the flow and thermal fields in the channel flow, and the heat transfer rate in the channel would be enhanced. Furthermore, as the oscillating frequency of the cylinder approach the natural vortex shedding frequency, because of the phenomenon of resonance in the channel flow, and the heat transfer rate is enhanced more remarkably.

Keywords: Oscillating cylinder, Flow visualization, Electronic cooling

二、緣由與目的

高溫壁面的熱傳問題在工業界中十分常見，空氣強制對流具有結構簡單、冷卻劑容易取得、成本低等特性，因而被廣泛的應用在電子設備的散熱。然而，近年來隨著工業技術的進步與半導體元件的快速發展，現今電子元件的發熱量已經達到每平方公分數十瓦的等級[1]，此時熱傳量已經達到空氣強制對流的極限，因此如何提升空氣強制對流的熱傳效能成為研究的主要課題之一。

提升熱傳的方法可分為主動式與被動式兩類[2]。Yeh[3]與 Sathe[4]將近年來有關電子元件和產品散熱方法的文獻加以整理比較，舉凡現有增加熱傳效率的方法，對熱傳的增益均受到限制。因此，本研究主要的目的在於探討在水平管道內，流體流過振動圓柱時對管道內流場以及溫度場的影響；本研究在水平管道內裝置一個振盪圓柱，利用流體流過振動圓柱時所導致渦流剝離的現象以及流場受到圓柱振盪引導產生流場振盪的現象，破壞溫度邊界層以及流場中產生的回流區域，有效的增加高溫壁面的熱傳效率。此流體與移動物體間相互影響的問題，被歸類於動態的移動邊界問題(moving boundary problem)。

本研究分兩年執行。第一年進行數值模擬，第二年計劃則以實驗方法探討振盪圓柱對管道

流場的影響。數值模擬，以 Arbitrary Lagrangian- Eulerian 法配合葛拉金有限元素法計算振盪圓柱對管道內流場與溫度場的影響，並分析振盪圓柱對管道內高溫壁面熱傳的增益。由數值計算結果得知，圓柱振盪會帶動流場產生震動的現象，擾亂流場增加熱傳效益。

三、物理模式

本研究所採用的物理模式如圖 1 所示，一個高為 h_e ，寬為 w 的二維管道用來進行本研究的模擬。管道內放置一個直徑為 d 的絕熱圓柱體。渠道的入口和出口距離加熱區域的距離分別為 w_1 和 w_4 ，管道進出口到圓心的距離分別是 $w_1 + w_2$ 以及 $w_3 + w_4$ 。溫度 T_0 的冷卻空氣以等速度 u_0 由進口處流入。高溫凸塊的表面溫度保持等溫 T_H ，且 $T_H > T_0$ 。管道的表面以及圓柱表面是絕熱壁面。當時間為零時，圓柱靜止於管道內，距離管道的底部壁面距離為 h_c ；待流場穩定後，開始計算時間，同時圓柱開始以週期 f_c 、振幅 I_c 垂直進口流場的方向進行反覆振盪運動，圓柱的振盪速度 $v_c = 2I_c \cos(2\pi f_c t)$

四、統御方程式與邊界條件

本研究利用以下的假設條件簡化問題。

1. 流場為二維的層流流場。
2. 流體為不可壓縮之牛頓流體。
3. 流體的各種性質為常數。

根據以下無因次參數，將 ALE 統馭方程式簡化如下：

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{W}, & Y &= \frac{y}{W}, & U &= \frac{u}{v_0}, & V &= \frac{v}{v_0}, \\ \hat{U} &= \frac{\hat{u}}{v_0}, & U_b &= \frac{u_b}{v_0}, & P &= \frac{p - p_\infty}{\rho v_0^2}, & t &= \frac{t v_0}{W}, \\ \hat{e} &= \frac{T - T_0}{T_H - T_0}, & Re_j &= \frac{v_0 W}{\epsilon}, & Pr &= \frac{\epsilon}{\rho}. \end{aligned} \quad (1)$$

連續方程式

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0; \quad (2)$$

動量方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + (U - \hat{U}) \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re_j} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial t} + (U - \hat{U}) \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re_j} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \end{aligned}$$

與能量方程式

$$\frac{\partial \hat{e}}{\partial t} + (U - \hat{U}) \frac{\partial \hat{e}}{\partial X} + V \frac{\partial \hat{e}}{\partial Y} = \frac{1}{Pr Re_j} \left(\frac{\partial^2 \hat{e}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \hat{e}}{\partial Y^2} \right) \quad (5)$$

初始條件：

以圓柱靜止在高溫壁面中央之穩態速度與溫度場為初始條件。

邊界條件：

入口條件 AB

$$U = 1, \quad V = 0, \quad \frac{\partial \hat{e}}{\partial Y} = 0,$$

絕熱壁面條件 AG, HD, BE and FC

$$U = 0, \quad V = 0, \quad \frac{\partial \hat{e}}{\partial Y} = 0,$$

加熱壁面條件 EF and GH

$$U = 0, \quad V = 0, \quad \hat{e} = 1,$$

出口條件 CD

$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \hat{e}}{\partial X} = 0,$$

移動邊界條件（圓柱表面）

$$U=0, \quad V=V_c, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial n}=0.$$

五、結果與討論

本研究所採用的工作流體為空氣，其普朗特常數為 $Pr = 0.71$ 。研究參數的組合情形如表 1 所示。

由於管道內的熱邊界層會沿著下流方向逐漸發展，為了能更真實的表現管道壁面的熱傳效應，本研究定義平均溫度做為流體的環境溫度

$$T_{mx} = \frac{1}{u\delta} \int_0^\delta uT \, dy;$$

圖 2 比較本研究數值模擬空管中的局部紐塞數與之前的文獻結果，發現兩者結果十分吻合。圖 3 顯示高溫壁面上的局部紐塞數的分佈情形，分別表示當圓柱靜止於渠道中以及振盪圓柱在五分之一週期、五分之二週期、五分之三週期、五分之四週期以及完成一個週期後的局部紐塞數分佈圖。當圓柱固定於管道中，流體通過圓柱時，會被圓柱均勻分成兩氣流，並且加速通過，流體擾動較為激烈，而此效應造成在圓柱附近區域的高溫壁面之熱傳效率明顯的提升，然而當流體流過圓柱之後，流場逐漸恢復與無圓柱置入相似，也因此當 $X > 3$ 時高溫壁面的紐塞數的變化已經與空管時的變化相似，並且呈現單調遞減的趨勢。當圓柱開始振盪時，圓柱隨著時間變化在管道內的位置也隨之變化，同時也造成在高溫壁面的紐塞數分佈有不同的變化。圓柱週期性的壓縮與壁面之間的空間，造成圓柱附近高溫面的紐塞數呈現較大的值。在圓柱後方，由於圓柱振盪以及渦流剝離的產生，流體流動呈現波浪形狀，並且週期性的衝擊壁面區域，擾亂高溫壁面上的溫度邊界層，造成在圓柱後方的高溫壁面之紐塞數比靜止圓柱明顯增加許多，並呈現週期性變化。直到當 $X > 6$ 時，紐塞數的變化幅度才呈現叫平緩的趨勢，然而其紐塞數仍然大於管道內無圓柱以及固定圓柱的狀況。

表 2 比較管道內有圓柱以及無圓柱在一個振盪週期時間內固定區域內的平均紐塞數，當高溫區域逐漸遠離圓柱體，受到圓柱的影響效應也逐漸降低，也因此紐塞數值也隨之逐漸接近管道內沒有圓柱的狀況，平均紐塞數的增益也隨之降低，然而除了在圓柱附近區域之外，振盪圓柱的紐塞數增益均大於固定圓柱，同時也可以發現平均紐塞數降低的幅度與速度均遠小於固定圓柱的情況。此表可以推斷出圓柱有效的影響區域。

圖 4 顯示當 $Re = 500$ 以及 $L_c = 0.1$ 的情況下，不同的圓柱振盪頻率對熱傳的影響。由圖發現，不同振盪頻率的狀況下，對紐塞數變化並沒有太大的影響，探討其理由，可能是振幅太小。當振幅提升到 0.2 時，如圖 5 所示，紐塞數隨著振盪頻率變化而產生變化。當高頻率運動時，由於在相同的振幅下，圓柱振盪的速度會更快，導致圓柱後方的氣流振盪更激烈，並且大幅增加圓柱後方區域的熱傳效果。

圖 6 顯示當 $Re = 500$ 以及 $f_c = 0.2$ 的情況下，不同的圓柱振盪頻率對熱傳的影響。由於振幅的增加會增加流體的擾動，同時也增加其熱傳的效果。由圖亦可以發現，當振幅小於 0.1 時，則紐塞數對振幅的變化並不明顯。

圖 7 顯示當 $L_c = 0.1$ 以及 $f_c = 0.2$ 的情況下，不同的圓柱振盪頻率對熱傳的影響。圓柱表面的熱傳效率明顯的隨著雷諾數的增加而增加。當低雷諾數時 ($Re = 100$)，由於渦流剝離現象不易形成，因此熱傳效率與固定圓柱的狀況十分相近。

圖 8 顯示在 $L_c = 0.1$ 、 $f_c = 0.2$ 、 $Re = 0.2$ 、 $ER = 0.0$ 以及 $BR = 0.25$ 的情況下，當流場呈現穩定週期性振盪時，沿著高溫壁面在同一週期不同時間的平均紐塞數的分佈圖。圖 11a 顯示沿著頂板的紐塞數分佈圖，由於圓柱距離頂板的位置較遠，因此振盪圓柱對於頂板在圓柱附近區域的高溫壁面影響比較小，並且熱傳量隨時間的變化情形也不明顯。儘管如此，流體受到圓柱往復振盪的影響，對圓柱後方的高溫壁面產生週期性的噴擊，因此造成在圓柱後方的高溫壁面上，紐塞數分佈呈現劇烈的週期性變化，同時有效的提升此區域的熱傳效率。圖 11b 顯示沿著底板的紐塞數分佈圖，相對於頂板，圓柱比較靠近底板，因此對於底板的影響也較為明顯，由圖可以觀察到底版在圓柱附近區域的高溫區域的紐塞數變化隨著圓柱位於不同位置而有十分劇烈的變化。當圓柱靜止於流場時，雖然由於圓柱靠近底板，造成流過此間隙的流體產生高速，大幅度的提升熱傳效率，但是也由於如此，圓柱與底板之間區域流阻大幅增加，流過此區域的流體減少，造成底板在圓柱後方高溫壁面的紐塞數值劇烈地減少。當圓柱週期振盪之後，受到剝離的渦

流推擠，擾亂底板附近區域的流場以及溫度場，因此導致底板在圓柱後方高溫壁面的熱傳效率有效的提升。

圖 12 顯示當 $Re=500$ 、 $L_c=0.5$ 、 $F_c=0.2$ 以及 $BR=0.25$ 的情況下，不同的偏心率對熱傳的影響。當圓柱靠近高溫壁面時，在圓柱附近區域的熱傳量會產生比較大的提升，但是對於圓柱後方區域加熱壁面的熱傳效率並不如當圓柱比較遠離加熱壁面時的熱傳效率。

圖 13 顯示當 $Re=500$ 、 $L_c=0.5$ 、 $F_c=0.2$ 以及 $ER=0.0$ 的情況下，不同的圓柱障礙比對熱傳的影響。當圓柱障礙比較高時，對於通過圓柱以及管道間區域時會加快流體流動的速度，同時對於流場擾動也會比較劇烈，因此造成熱傳效率明顯的提升，也增加圓柱影響的區域範圍。

六、結論

本研究採用數值分法模擬流場中垂直振盪的圓柱對高溫壁面熱傳的影響，結果可歸納如下：

1. 在強制對流的管道流中，加裝圓柱於管道內可以有效的提升管壁的熱傳效率，而圓柱振盪所造成的流場振動，可以有效的改善圓柱後方區域高溫壁面的熱傳效率。
2. 當振幅過小的情況下，圓柱振盪頻率對於高溫壁面紐塞數的影響並不明顯；當振盪頻率增加時，在圓柱附近的紐塞數會降低而圓柱後方的紐塞數會大幅增加。
3. 圓柱表面的熱傳效率會隨著圓柱的振幅以及流體進口雷諾數的增加而增加。
4. 相同圓柱障礙比的情況下，當圓柱靠近高溫壁面時，在圓柱附近區域的熱傳量會產生比較大的提升，但是對於圓柱後方區域加熱壁面的熱傳效率並不如當圓柱比較遠離加熱壁面時的熱傳效率。
5. 圓柱障礙比較高時，會造成熱傳效率明顯的提升，也增加圓柱影響的區域範圍。

七、參考文獻

1. K. Ogiso, "Recent Trends in Electronic Equipment Cooling," Heat Transfer in High Technology and Power Engineering, W.J. Yang and Y. Mori, Hemisphere, Washington D.C., 1987.
2. K.C. Cheng and G.J. Hwang, "Forced and Mixed Convection Cooling in Computers," Cooling Techniques for Computers, Win Aung, Hemisphere, Washington D.C., 1991.
3. A.E. Bergles, "Recent Development in Convective Heat-transfer Augmentation," Applied Mechanics Reviews, vol.26, pp.675-682, 1973.
4. A.E. Bergles, "Survey and Evaluation of Techniques to Augment Convective Heat and Mass Transfer," Heat and Mass Transfer, vol.1, pp.331-424, 1969.

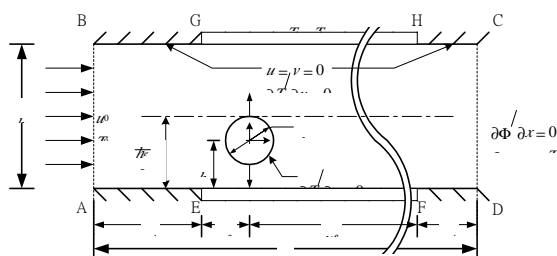


圖 1 物理模視圖

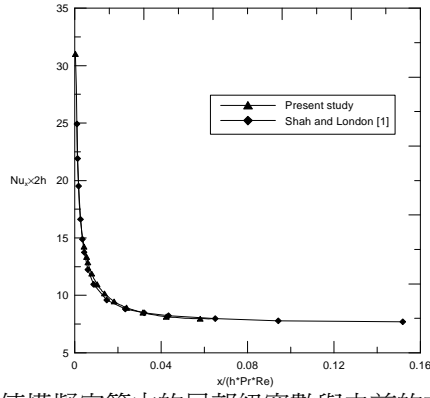


圖 5 本研究數值模擬空管中的局部紐塞數與之前的文獻比較結果圖

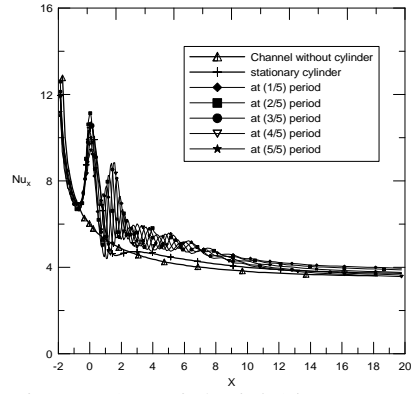


圖 6 高溫壁面上局部紐塞數隨時間變化分佈

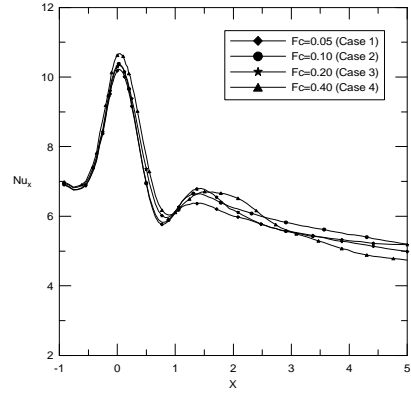


圖 7 $Re = 500$ 以及 $L_c = 0.1$ 的情況下，不同的圓柱振盪頻率對壁面時間平均紐塞數隨距離變化圖

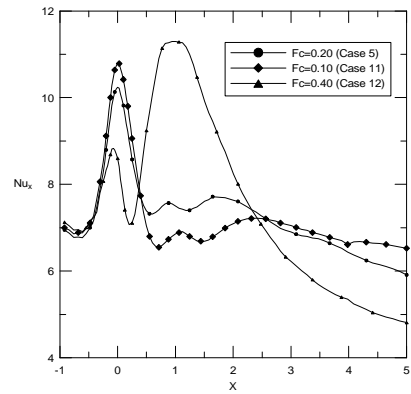


圖 8 當 $Re=500$ $L_c=0.2$ 的情況下，不同的圓柱振盪頻率對壁面時間平均紐塞數隨距離變化圖

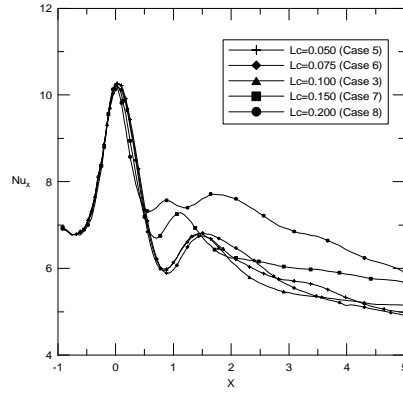


圖 9 當 $Re=500$ and $F_c=0.2$ 的情況下，不同的圓柱振幅對壁面時間平均紐塞數隨距離變化圖

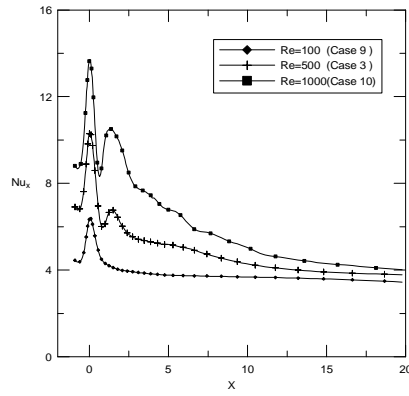
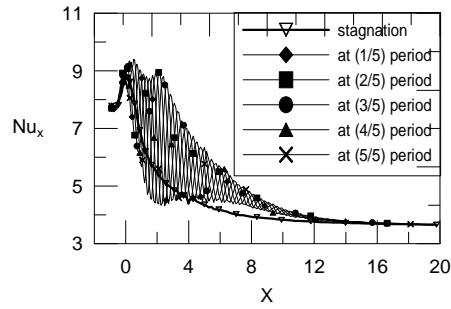
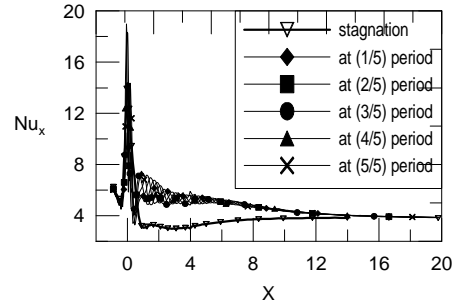


圖 10 $F_c=0.2$ and $L_c=0.1$ 的情況下，不同的雷諾數對壁面時間平均紐塞數隨距離變化圖



(a) 底板高溫壁面



(b) 底板高溫壁面

圖 11 隨時間變化沿著加熱表面的紐塞數分佈圖

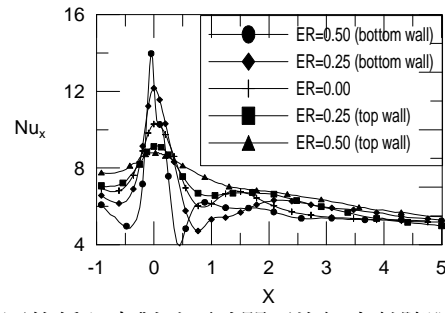


圖 12 不同的偏心率對壁面時間平均紐塞數隨距離變化圖

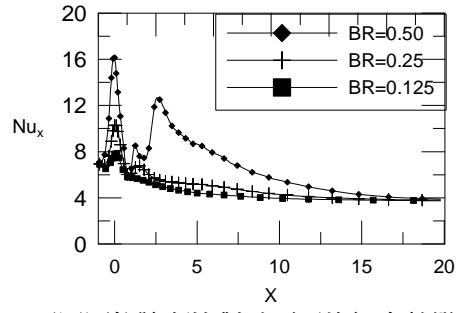


圖 13 不同圓柱障礙比對壁面平均紐塞數變化圖