

第一章 前 言

1.1 文獻回顧

流體通過多孔介質的流動稱為滲流。它是流體力學的一個分支，由流體力學與岩石力學、多孔介質理論、表面物理和物理化學等多種科學所組成。滲流力學的應用範圍越來越廣，逐漸成為多種工程技術的理論基礎。由於多孔介質廣泛存在自然界、工程材料和動植物體內，因而對滲流力學的應用範圍而言，大致可分為地下滲流、工程滲流和生物滲流三個方面。工程滲流問題一般都比較複雜，涉及多相流、非牛頓流體滲流、物理化學滲流和非等溫滲流等。這些問題的解決對國民經濟有重要作用，並反過來進一步促進滲流力學的發展。

近二十年來，多孔質流與熱傳問題由於應用範圍廣泛，已成為熱流學者及工程專家們一項重要研究領域。在理論分析與數值模擬方面，早期以 Darcy flow model 來描述流場，但因為達西模式僅適用於孔隙雷諾數很小之情況，且其不滿足 no-slip 邊界條件，因此描述 flow 的模式逐漸從達西模式擴大包括 Brinkman（即邊界摩擦），Forchheimer（即慣性效應），可變孔隙度（即 channeling effect）

等各種非達西效應，至於溫度場也包括熱逸散 (thermal dispersion) 效應。上述的各種非達西效應已逐漸為學界及工程界所採用，並納入多孔質流的數值模擬及分析之內。最近幾年來，由於電腦計算能力的大幅提高以及實驗設備的改良，研究多孔質流及熱傳的一項常用假設 - 局部熱平衡 (local thermal equilibrium) 也開始受到研究人員的質疑及檢測，所謂局部熱平衡是指在局部區域內，孔狀固體溫度與流體溫度間無溫差存在。此項假設經研究人員探討後發現，在孔狀固體與流體的熱傳導係數相差不大時近似成立，但隨兩者差距加大，非局部熱平衡就有必要考慮，Hwang and Chou [1] 和 Amiri and Vafai [2] 曾就非達西效應及非局部熱平衡有詳盡的說明及探討。

有關探討孔質渠管 (porous channel) 內流及熱傳的文獻很多，在此稍做回顧。Kaviany [3] 曾分析兩等溫平板間充填孔質之強制對流，他忽略 Forchheimer 慣性項得到近似解，Cheng and Zhu [4] 則分析 cylindrical packed tube 內強制對流，數種非達西效應包括 Brinkman、inertia、wall channeling 及 thermal dispersion 均列入考慮，Cheng and Vortmeyer [5] 也對非對稱加熱之 packed bed 內強制對流作解析，Poulikakos and Renken[6]則研究兩平行板及圓管內堆積圓球之強制對流，此文獻包含慣性，可變孔隙度（即

channeling effect)及 Brinkman 效應 稍後, Renken and Poulikakos [7] 則對兩平行板內堆積圓球之強制對流作實驗研究並輔以數值模擬, Hunt and Tien [8] 則考慮 cylindrical pack bed 內非達西強制對流, 以上文獻中, [3-5] 假設熱流場為 fully developed, [6-8] 則考慮 thermally developing 之情況。又 Chou et al. 以理論分析及實驗方法研究水平方管內堆積圓球非達西強制對流 [9] 及混合對流 [10], 以及圓管內充填圓球之強制和混合對流 [11], 此外, 也有研究人員探討導管內部充填多孔質強制對流, 如 Poulikakos and Kazmierczak [12], Tien [13] 及 Jang and Chen [14]。除了探討各種非達西效應外, 前面也提到近年來也有文獻採用非局部熱平衡之假設, 就孔質固體及流體的能量方程式分別列式, 即所謂的 two-equation model, 如文獻 [1,2,15-17], 此外文獻 [18-21] 更考慮流經孔質固體的氣體冷凝液化的情況。

就應用來說, 微型的電子-機械系統 (簡稱微機電系統) 是二十一世紀電機系統的重要研究方向, 其尺寸為微米量級。其顯而易見的應用領域有諸如基因工程、生物醫學工程, 包括體內手術、醫用注入器等。微機電系統中的管徑亦為微米量級或更細。其中比面很大, 表面現象很重要, 具有多孔質的明顯特徵。氣體在其中的流動一般為滑流領域, 有時還涉及熱傳問題, 將給滲流的研究帶來一些新的課

題。文獻[16]曾提到此類孔質材料 solid-air 接觸面積遠大於渠管的表面積，如此可以大量的增加熱傳量。在[22]討論孔質材料在高流速流體的應用中，使用非局部熱力平衡是較準確的。例如在核反應爐或核反應推進器中，冷卻劑與和固體桿的溫度是不同的且有決定性的影響。又有如太陽熱能轉換儲存器，利用流體擷取太陽的熱能儲存到孔質材料中，再轉換到系統其他的儲存系統中，這種構想已經被設計成太空中的能源供應器。

1.2 研究目的

文獻[22]乃就有限壁厚孔質渠管內強制對流進行研究，在非局部熱平衡的情況加以考慮，其 flow-model 採達西模式，以解析法求出紐賽數，並探討控制參數對紐賽數之效應。本論文就此一主題加以研究，但 flow-model 採非達西模式如 Brinkman 及 Forchheimer model，至於 channeling 及 thermal dispersion 則擬在後續研究中列入考慮。本文主要目的在針對此類共軛熱傳問題，建立數值求解程序及程式，除探討非達西模式對紐賽數之影響，也就文獻[22]中並未討論的溫度分佈作較詳盡之探討。

1.3 研究方法與步驟

本文擬用數值解析方法探討有限壁厚孔質渠管內強制對流，此管由兩平行板充填孔質組成，其示意圖如圖 1.1 所示。本研究考慮二維穩定流，管壁區的僅需考慮能量方程式，孔質區內則包括連續方程式、動量方程式、流體與孔質固體各自之能量方程式。流場方面假設為 fully developed，由於考慮較高速流且為滿足 no-slip 邊界條件，因此採用 Brinkman – Forchheimer – extended Darcy eq.。熱場方面，為與文獻[22]直接比較，在管壁、孔質固體及流體之能量方程式中均忽略 axial conduction 項，對孔質區的流體及孔質固體而言，在 Peclet 數較大的情況下，吾人知道軸向熱傳導可以忽略，但在管壁忽略此效應則基於與孔質區成一致性，當然後項假設在管壁熱傳導係數為非等向性(anisotropic) 時較易成立。有關此假設在文獻[22]有詳細之討論。

在邊界條件方面，除了在外管壁上採用等溫的邊界條件外，於管壁與孔質區的介面上必須採用適當的介面條件才能求解。

由於本文所探討的問題屬強制對流，因此可先解流場，於得到正確之流場後再解熱場。動量方程式求解步驟詳如[13]。至於熱場方面，須解管壁、孔質區內固體及流體共三個能量方程式，這些能量方程式加上適當的邊界條件及介面條件並引進入口條件，可構成完整的微分方程組，採用適當的差分法求解。