

微奈流中介面現象之物理觀點

Physical Aspects of Interfacial Phenomena in Micro- and Nanofluidics

宋齊有 (Chyi-Yeou Soong)

逢甲大學航太與系統工程學系特聘教授

e-mail: cysong@fcu.edu.tw; Tel: 04-24516246

摘要 — 微奈尺度流動中有許多有趣的物理議題，尤其是在介面區發生的一些現象。本文並非全面回顧性的綜論文章，僅依個人研究興趣介紹出現於微奈流中幾項重要介面現象，著重於物理機制解說及對微流之影響，其中也包括多物理耦合之案例。最後附錄筆者最近十年在微奈流介面現象領域相關之研究著作供讀者查閱與參考。

一、引言

科技發展隨時代演進，廿世紀中葉起，資訊科技、半導體/微電子、微機電系統、奈米科技、生物科技、能源科技等依序登場。此一演進明顯有趨向輕、薄、短、小之勢；而半導體製程所發展之先進微製造技術使得配合此趨勢之微奈系統 (Micro-/Nanosystems) 科技發展甚為迅速，應用端已滲透至如機電、材料、生醫、能源等各科技領域。支撐此一快速蓬勃發展的是相關基礎科學之深入探討，尤其是習見系統技術相關之物理中常被忽略的因素，此時重新受到重視。再則，近年發展蓬勃之微奈米科技、生物科技、能源科技領域中，微流元件 (Microfluidic Devices) 應用頗廣，致使微/奈流成為現今工程科技之重要領域之一，而其相關之基礎理論自然也成為研究重點。

由於在一般慣用的巨觀系統中，許多不明顯、可忽略的物理現象與效應在系統微小化後，具有舉足輕重的地位，因此必須重視，尤其是介面現象 (Interfacial Phenomena)。所謂介面 (Interface) 係指介於兩相物質間之區域，例如：固—固、固—液、固—氣、液—液(不互溶)、液—氣交界面等。一般而言，此介面區內之物理化學性質與連續相不同。介面區尺度(厚度)雖很小，但在微奈流中其影響可甚鉅。至於何謂微奈流？以微通道流 (Microchannel Flow) 為例，粗略地分野如下：若通道特徵尺度 L_c (一般係指流道高或水力直徑) 大於 $100\mu\text{m}$ ，流體行為與巨觀尺度相較，其差異極微，可視為習見之巨觀流； L_c 落在 $100\mu\text{m}$ 與 100nm 間，則屬微流 (Microfluidics)； $L_c < 100\text{nm}$ 可歸類為奈流 (Nanofluidics)。此外， L_c 量階為 10nm 至 100nm (即數十至數百奈米)，此範圍恰介於微、奈尺度之交，又可稱為介觀尺度 (Mesoscale)。當系統尺寸降到微尺度或更小時，微奈流中的介面現象如介面張力 (Interfacial Tension)、流體滑移 (Fluid Slippage)、介面電現象 (Interfacial Electrical Phenomena) 等會突顯、增強，且對流體流動物理以及微流元件性能產生主導性的影響。

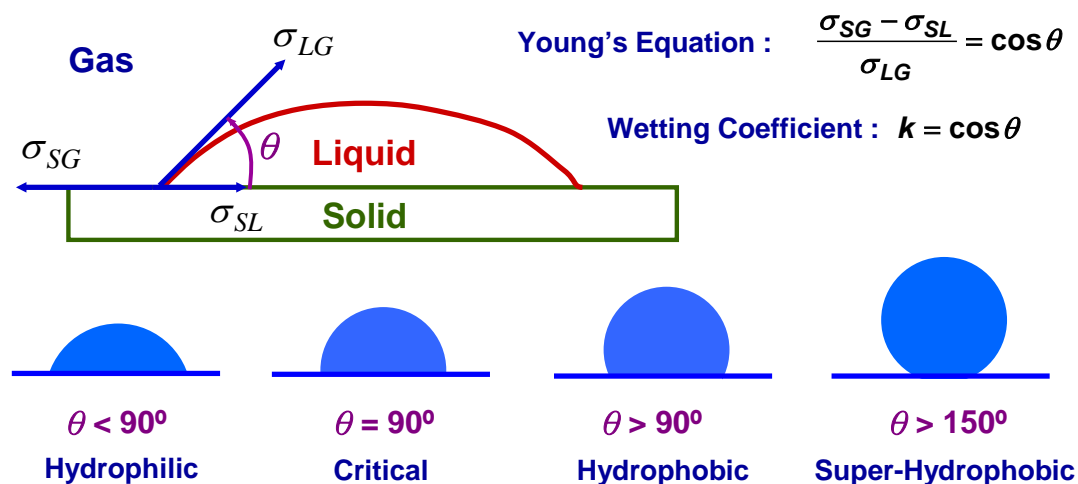
二、固一流介面現象舉隅

固一流介面現象頗多樣，如：介面張力、潤濕、流體滑移、介面電現象、附着、

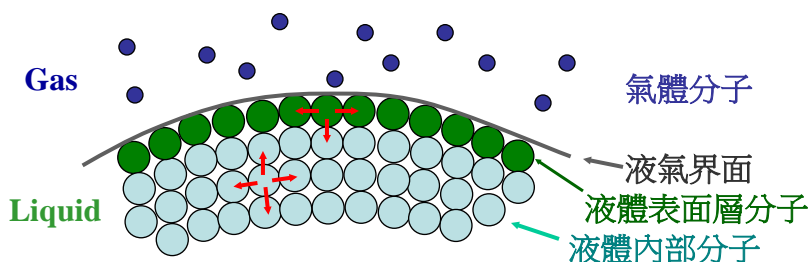
空蝕、凝結...等等。以下本文將以個人研究所及，選擇潤濕性與接觸角、流體滑移、介面電現象等項目介紹相關之物理機制。

2.1 潤濕性與接觸角 (Wettability and Contact Angle)

固體表面之親水或疏水性 (Hydrophilicity/Hydrophobicity) 係以測量固-液接觸角 (Contact Angle) 大小來判定。所謂接觸角是當液體滴在固體表面上時，固體表面和液滴切線的夾角，如圖一所示。當接觸角小於 90° 則稱為親水性(Hydrophilic)材料，如防污玻璃、防霧鏡面接觸角為 $0\sim 5^\circ$ ；若接觸角大於 90° 則稱為疏水性(Hydrophobic)材料，如石蠟接觸角為 108° 。若接觸角大於 150° 則為超疏水性(Superhydrophobic)材料，如蓮葉表面接觸角可高達 160° 。「蓮花效應」主要是指超疏水以及自潔的特性。接觸角大小與固、液相材料性質，表面條件，甚至環境壓力、溫度都有關係。此外，電場作用亦會改變接觸角與潤濕性，稱之為電潤濕性 (Electrowetting)。



圖一、親水性、疏水性接觸角示意圖 (Soong, Lecture Notes, 2007)



圖二、表面張力物理詮釋之液-氣介面模型 (Soong, Lecture Notes, 2007)

提及固-液介面潤濕性以及接觸角，無可避免的，必須要談液-氣表面(介面)張力 (Surface Tension)與表面能(Surface Energy)。依圖二之液-氣介面示意圖中所呈現，對介面上之液體分子而言，氣體密度較小，氣體分子對液體分子的作用力極小，可忽略不計，液-氣介面上之液體分子受到鄰近同類分子作用力之總合為一垂直介面且指向流

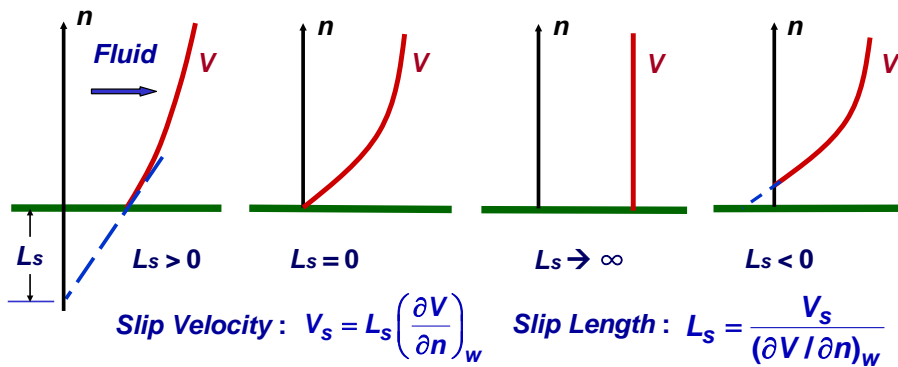
體內部之合力。然而，液體內部分子受鄰近分子的作用力而達平衡，欲將一液體內部分子移到介面處需要作功(付出代價)以抗拒四周分子之作用力，增加了此一分子之位能。表面分子所具有之位能稱為表面能或表面自由能(Surface Free Energy)，亦即表面分子具有較內部分子高的位能。一系統處於穩定平衡時應有最小位能，故液體表面分子(高位能)有擠入內部(低位能)之趨勢；而液面愈小，位能愈小。故液面似有緊繃的張力，此即表面張力，也因此液-氣介面有近乎球面之形狀。

1805年 Yang and Laplace 提出：兩物質間之介面能量與其介面的表面積成正比。此一概念為介面潤濕性質之理論基礎，此一性質關係到液滴在固體表面的成型，與固-液間的親疏水性有關，長期以來受到紡織科學、觸媒反應等領域的重視。目前已有自潔表面、微電子、薄膜塗裝...等廣泛應用。一般認為固體的表面化學成分以及表面結構決定了固-液間的介面性質。

近年來，前人文獻顯示，在原本低接觸角的固-液介面上，將平滑的固體表面改為凹凸微結構，可產生類似蓮花效應的「超疏水性」，會造成接觸角的大幅增加。也開啟了微液滴更大的可能應用範圍。

2.2 流體滑移現象

在微奈流中，流體滑移 (Fluid Slippage) 現象對流體動力特性之影響甚鉅。流體滑移可減低流阻，增強微奈米通道中流體之傳輸，故而可以降低驅動力。不考慮其它副作用，僅由流體傳輸論之，滑移是有利的效應。滑移效應尤其在流動構形之特徵尺度漸縮至微奈米尺度時益發明顯。



圖三、介面滑移現象與滑移長度之定義 (Soong, Lecture Notes, 2007)

一般巨觀條件下，流體動力分析常見之無滑移條件 (Non-Slip Condition)，在微流分析中必須謹慎，宜以滑移條件代之。其實滑移一直存在，只是滑移速度量階極低，對習見之距關係統而言，是可忽略之微。有關固體界面上流體滑移，Navier 關係式給出滑移速度 V_s 與應變率 (Shear Rate) 之關係，即 $V_s = L_s (\partial V / \partial n)_w$ ，其中 L_s 為滑移長度 (Slip Length) 或稱為滑移係數 (Slip Coefficient)。當 $L_s = 0$ 即為無滑移條件； $L_s > 0$ 時即為部份滑移 (Partial Slip)； $L_s \rightarrow \infty$ 對應於無黏性流；而 $L_s < 0$ 則為一多層粘黏 (Multi-Layer Sticking) 之特例。滑移長度之大小與流體、固體界面之物理參數有關。邊界滑移現象可

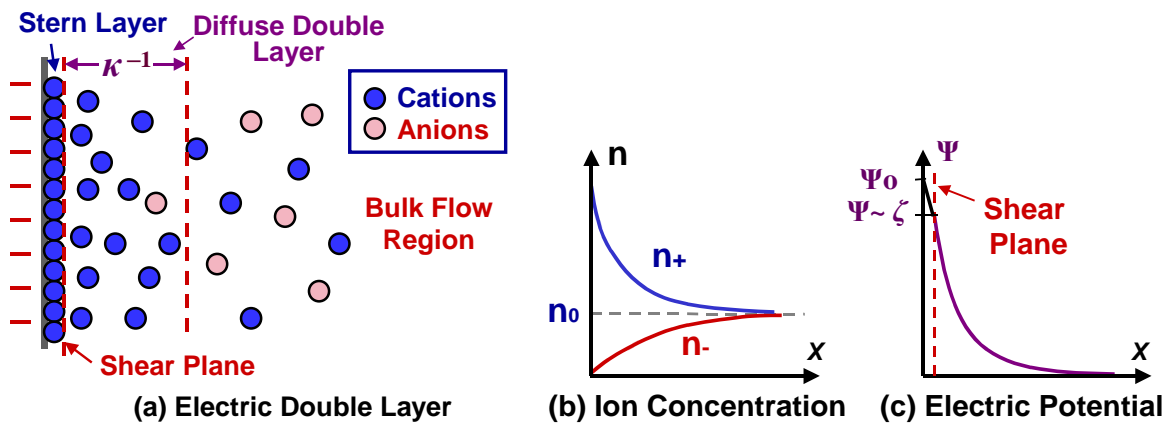
改變速度分布，對通道流直接之影響為近壁速度增加、法向速度梯度降低，致使表面摩擦減低，流量增加。滑移長度或滑移速度均可作為滑移效應強弱之量化指標，但個人以為以滑移長度作為介面滑移之表徵是較適宜的。以上與滑移相關之定義、術語與關係是可藉圖三說明之。

2.3 介面電現象(Interfacial Electrical Phenomena)

在慣見之巨觀尺度下，表面靜電對流道中流動之影響微乎其微，一般均不予考慮；但在微奈米尺度通道流中，表面靜電效應相對變強，因而成為影響流動物理重要而不可忽略的因素。

電雙層(Electrical Double Layer, EDL)

微奈通道中含電解質或離子之液體在固-液介面上會出現電雙層如圖四。此種介面電現象會導致電動力效應(Electrokinetic Effects)，影響微奈通道中之熱流特性。



圖四、介面電現象：(a) Gouy-Chapman-Stern 電雙層模式；(b) 正負離子濃度(n_{\pm})與 (c) 靜電位(Ψ)分布 (Soong, Lecture Notes, 2007)

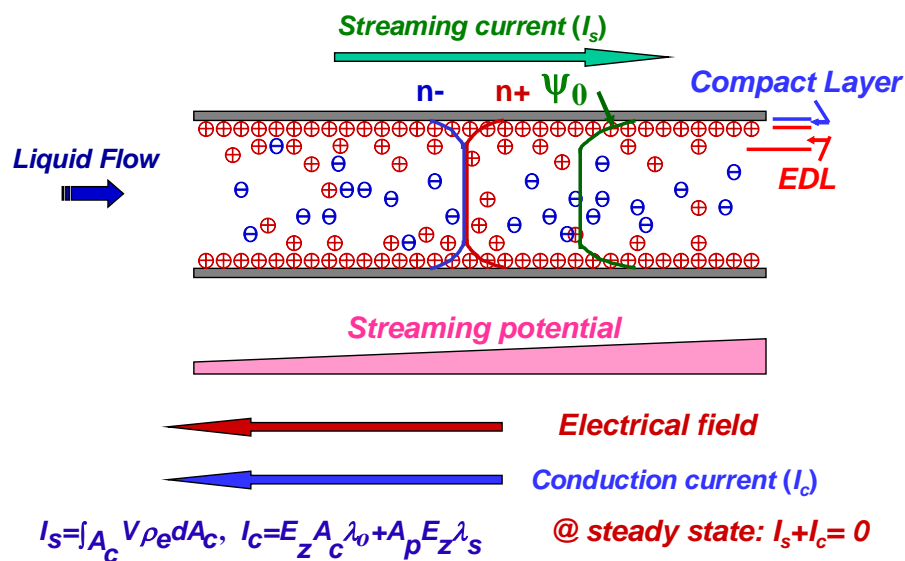
一般固體表面帶有靜電荷，當液體中含有微量離子，固體表面靜電荷會吸引液體中之反離子(Counterions)，排斥同號離子(Coions)。以壁面帶負電荷為例，壁面吸引正離子，而排斥負離子，形成電雙層。近壁區正離子聚集，濃度高；而負離子則濃度極低，遠離壁面，此正(負)離子濃度呈指數型降低(增高)之擴散分布。電雙層模型早先有Gouy-Chapman 模型，後經 Stern 考慮離子尺寸與近壁行為，修正為目前最常用之Gouy-Chapman-Stern 電雙層模式，如圖四(a)所示。此一模型中，假設緊鄰帶靜電之壁面有一緊緻層或稱 Stern 層(Compact Layer or Stern Layer)，約為 0.5nm 厚，且此層之反號離子被靜電吸引力鎖定，無法活動。稍外之擴散雙層(Diffuse Double Layer)中，離子受表面靜電場影響較小，相對地離子較具活動性，其濃度分布如圖四(b)。在此模型假設下，離子運動與否的界限即為緊緻層的邊緣，又稱剪切面 (Shear Plane)或滑移面(Slip Plane)。由壁面電位及離子濃度條件之不同，此一擴散雙層厚度之量階約在 1nm ~ 1 μ m 之譜。由於電雙層內有正負離子濃度差，由圖四(b)可知其差值在近壁面最大，而後隨壁面距離而漸減，故有靜電位分布如圖四(c)。

Zeta 電位 (Zeta Potential)

在靜電位分布曲線上，表面電位標示為 Ψ_0 ；而在剪切面上，靜電位之值較 Ψ_0 稍低，稱為 zeta 電位。由於表面電位不易得知，而 zeta 電位可以由電滲流(Electroosmotic Flow)原理設計儀器測量之，故目前表徵表面電性多用 zeta 電位。一般常用材料與各種電解液接觸時之 zeta 電位，可於一些物理化學手冊(Handbook)中查得，無法查知者，可以 zeta 電位計量測。目前數據顯示 zeta 電位隨液體 pH 值、電解質濃度、溫度等參數而變。

電動力效應(Electrokinetic Effects)

由於電雙層的出現，可產生電泳(Electrophoresis)、電滲(Electroosmosis)、流動電位(Streaming Potential)與沉積(Sedimentation Potential) 電位四種電動力效應。其中電泳、電滲、流動電位常應用於微流元件中。流道中靜止流體上、下游加一電場，致使液流中帶電荷粒子被吸引而向相反號電極移動，此一粒子泳動稱為電泳；原靜止流體加電場後導致電雙層中超量之反號離子(Excess Counterions)向下游移動，且帶動流體分子運動而產生「電生流」效果，此為電滲效應。



圖五、電動力效應－壓力驅動流中之電動力效應與流動電位；其中 Ψ_0 為表面電位 (Soong, Lecture Notes, 2007)

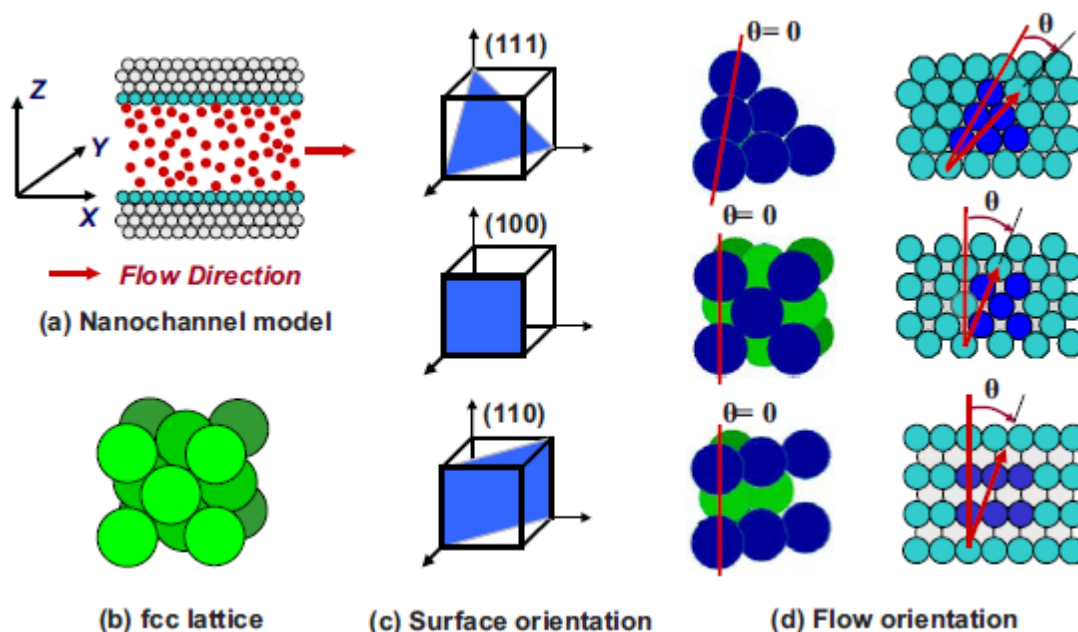
圖五說明微通道流常見之流動電位，此為壓力驅動流中之電動力效應，與電滲相反，此為一「流生電」現象。當流體流過微通道近壁區，帶動擴散雙層內具活動力之離子移動形成電流，稱為流動電流(Streaming Current)。反號離子聚集在下游建立一電場及電位，稱為流動電位(Streaming Potential)，此一電場引起之反向流動之電流稱為傳導電流(Conduction Current)。當傳導電流與流動電流相等時，則達平衡定常態。

三、具多物理耦合效應之介面現象

介面現象常因不同之物理交互作用而複雜、有趣。本節中介紹幾項大家一般不太注意的案例。

3.1 固體材料晶格對奈流之影響

購買矽晶圓時，商家會問欲採購之規格為(111)、(110)或是(100)？此一三碼標示為米勒指標 (Miller Index)，指明切面屬何晶面。同樣的材料，為何還要區分晶面呢？切面晶格排列雖是小至分子等級，理應微不足道；但當所涉及之元件屬微奈尺寸時，晶面方位有可能會產生重大影響，必須考慮。



圖六、晶面方位與流動相對方向對奈米通道流之影響。(a) 奈米流道模型；(b) 面心立方晶格單元；(c)晶面方位；(d)流動方向 (Soong et al, *Phys. Rev. E*, 2007)

圖六(a)為分子動力模擬之奈米流道模型，此一流道以三層固體原子作微流道壁面，固體壁假設為如(b)圖之面心立方晶格單元。切面之晶面方位有(c)圖中三種，其各晶面之表面原子排列如圖所示。流動方向相對於；(d)相對於晶面方位之流角定義。僅由(b)(c)圖中固一流介面之晶格排列之形貌應可預期流體流過時之差異。分子動力研究發現：果然晶面方位與流角效應對奈米流道之流動特性如邊界流體滑移、流量、速度梯度與摩阻有極為明顯之影響。

3.2 接觸角與滑移之相關性研究

固-液介面之疏水性質易導致介面上液流之滑移，尤其在流動構形之特徵尺度降至微奈米尺度時益發明顯，滑移邊界條件必須考慮。液體在疏水性表面之滑移長度大小或摩擦阻力降低若干，一般實驗方法不易量測，主要因為所需儀器昂貴、尺度極微小以及滑移現象之微觀特性。此現象與表面力有關，因此許多實驗著重於不同液體中疏水化表

面力—距離關係之直接量測。由於固體材質、表面物理化學性質以及液體條件如溫度、濃度、電解質型態、極性等之影響，導致研究結論亦不一致。雖然已有許多滑移長度的實驗證據及解說滑移機制之各種理論模型，但是由於所知尚有限，目前研究仍未能發展出通用之分析方法或定則可預測流—固介面滑移之發生、滑移長度之大小等性質。

一般都能接受以下的事實：一組 A 固體與 B 液體組合而成的系統若是疏水性，此 B 液體之液滴在此 A 固體壁面上接觸角是高的；若將此 A 固體製成流道，B 液體流在其中會有明顯滑移；反之，在親水系統中，接觸角較低，滑移也較弱。此一事實意味著接觸角與滑移長度或許有某種關連性。接觸角量測較易，不似微奈米流道中滑移流量測之困難。若能建立兩者之關係，可以量測接觸角推算出滑移長度之量，則對於微奈流之預測分析極有助益。但此一領域未知之物理機制尚多，有待持續之研究。

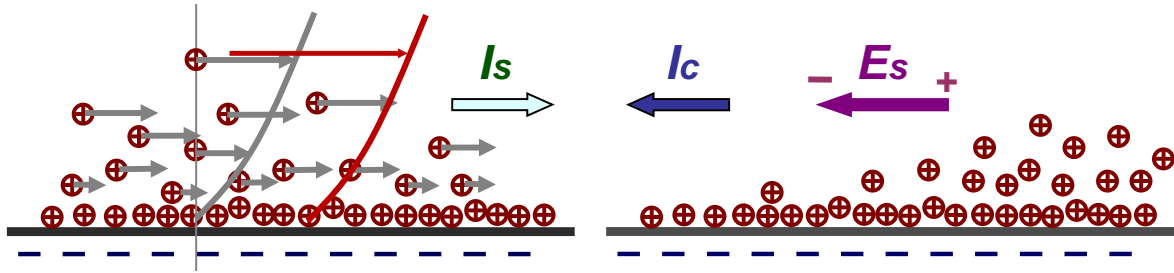
3.3 Zeta 電位與滑移之耦合效應

Zeta 電位一般是以電滲、電泳或流動電位等電動力效應原理設計儀器來量測。當 Zeta 電位與滑移長度具相互影響之耦合作用時，同時量測微流道之 Zeta 電位與滑移長度相當困難。有一些研究團隊正致力於發展如何同時決定 Zeta 電位與滑移長度的方法。但目前這些研究僅將 Zeta 電位與滑移長度是為待決訂之二參數，研究中均未討論 Zeta 電位與滑移現象間之關係及耦合機制，尚待深入研究。

對於受邊界滑移影響下，電動力流分析中，Zeta 電位作為一個靜電位邊界條件，應該如何給是一個議題。若將本質 Zeta 電位以 ζ 表示，具滑移影響之 Zeta 電位稱之為顯性 Zeta 電位 (Apparent Zeta Potential) ζ_a ，目前文獻上可以找到的顯性 Zeta 電位與滑移長度之關係式有 $\zeta_a^* = \zeta^* (1 + K \cdot L_S^*)$ 、 $\zeta_a^* = \zeta^* (1 + K \cdot L_S^*) / f_m$ 以及由

Poisson-Boltzmann 方程式之 \sinh 項聯想所提出之 $\zeta_a^* = \zeta^* + L_S^* \cdot K \cdot \sinh \zeta^*$ ，三者均為無理論基礎之經驗/半經驗公式【加星號*者為無因次化參數，詳見(Soong et al., 2010; Wang et al., 2010)】。最近，本團隊曾以上述既有之 Zeta 電位—滑移長度關係式分析微通道內壓力驅動之電動力流 (Soong et al., 2010; Wang et al., 2010)。但對於此類 Zeta 電位—滑移長度關係式僅止於取而引用，尚未有深入探討。此類經驗/半經驗公式目前在電動力流研究中引用不多，但因具理論基礎、更理想之關係式尚未出現，故仍可被接受。

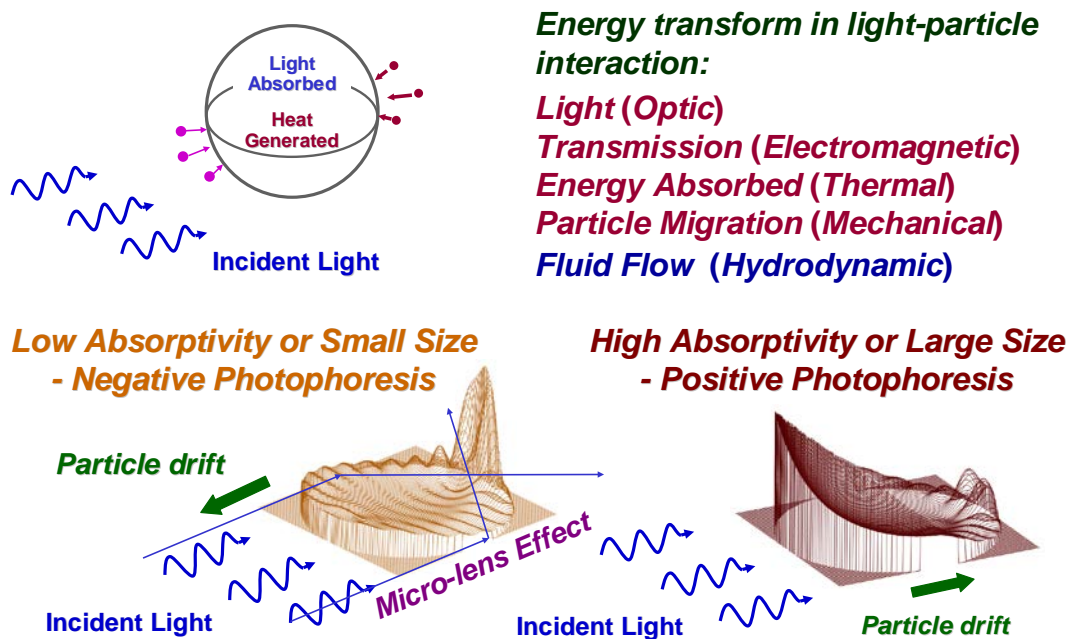
研究結果揭示：在壓力驅動電動力流中，固—液介面上流體滑移對流體傳輸有順、逆兩種效應。一方面滑移使得流率增高；但另一方面，滑移增高 zeta 電位，強化了電動力效應，且流率增高致使下游堆積較多反號離子，後二者均強化電動力阻滯效應 (Electrokinetic Retardation)，阻擋來流，減低流率，物理解釋圖說參考圖七。由滑移-Zeta 電位之複雜流-電耦合作用以及上述兩種反向效應之競爭造成疏水通道內大滑移長度條件下之流體速度、流動電位與流率之非單調性變化。此一新觀點對瞭解電動力流之基本特性以及微流元件之設計均有助益。



圖七、滑移-zeta 電位耦合效應對流體傳輸之影響 (Wang et al., J. CSME, 2010)

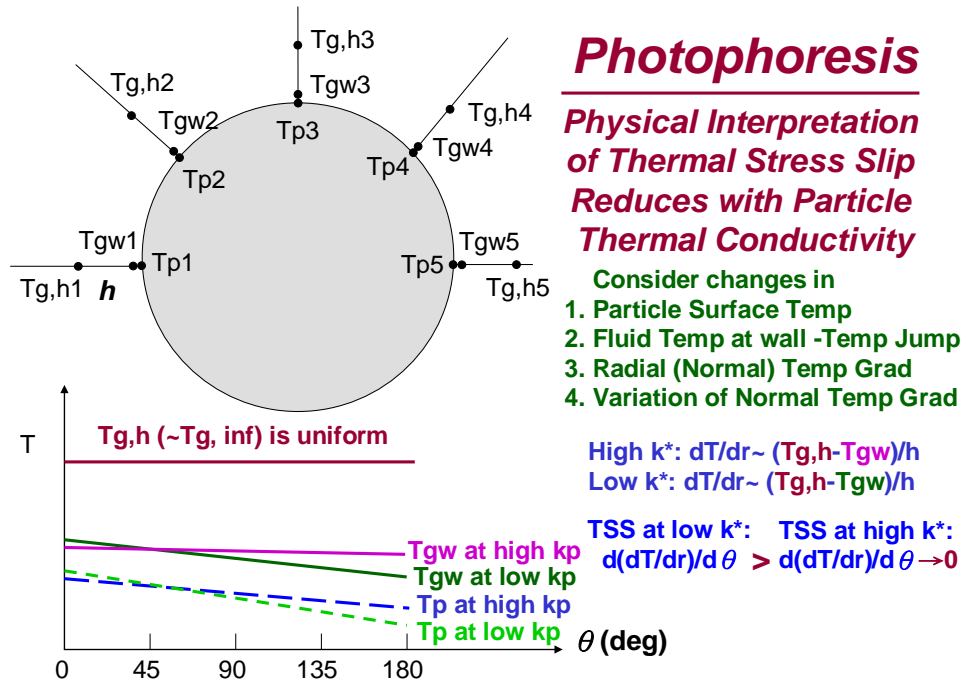
3.4 微粒光泳—多重物理耦合效應範例

流體中微粒光泳(Microparticle Photophoresis)是多重物理、複雜耦合效應典型之現象。以氣體中之微粒光泳為例，如圖八，微粒受光照射，光能以電磁波形式傳至微粒迎光面，微粒吸收能量轉化為熱。若微粒之光吸收率高、折射率低，迎光面吸收能量較多，則微粒向光側溫度較高，該處 Knudsen 層中之氣體分子與微粒碰撞較背光側頻繁，因而產生之淨力使得微粒背光而行，此為正光泳 (Positive Photophoresis)現象。反之，



圖八、流體中微粒光泳現象物理機制說明 (Soong, 2010)

若微粒對光吸收率低、折射率高，甚至粒徑小，有透鏡效應，吸收的能量會聚焦於微粒之背光側，則微粒就會迎光而行，此為負光泳 (Negative Photophoresis)現象。光泳涉及光、電(磁)、熱、流、力各種能量形式連續轉換，為多物理耦合效應之典型案例。此外，固-氣介面區之 Knudsen 層中熱應力滑移 (Thermal Stress Slip) 效應對光泳有極顯著之影響力。由於微粒與流體之熱傳導係數比 k^* 影響微粒壁面法向與切向溫度梯度(圖九)，因此，不同 k^* 條件下，熱應力滑移效應亦有所差異。



圖九、熱傳導係數比與熱應力滑移效應對介面溫度分布與溫度梯度之影響 (Soong, 2010)

四、結語

微、奈流研究之蓬勃發展史於近廿年，至今依然有方興未艾之勢。顯然發展已然成熟之巨觀流體力學理論對於微觀尺度的問題仍有未到之處。個人認為在微米甚至奈米尺度下，複雜且具挑戰之介面現象絕對是微奈流研究的重點。本文限於篇幅無法全面論述，僅依個人研究興趣所在，挑選數項微奈流中重要之介面現象為標的，闡述其中蘊含之物理機制，其中也包括數例有趣的多物理耦合案例。本文旨在以物理觀點解說現象，並未討論研究方法與研究結果。若有對此領域有興趣的先進，文後附錄為筆者最近十年在微、奈流介面現象領域相關之研究著作列表，供讀者查閱參考，若有疑問，歡迎指教。

致謝 — 國科會長年研究經費補助，使研究得以順利進行，在此致謝。感謝下列研究夥伴多年來的合作研究，鼎力相助：曾培元教授（國防大學中正理工學院機航系）、劉中和教授（元培科技大學醫學工程系）、黃柏文副教授（逢甲大學航太與系統工程系），以及曾參與工作之博士生（括號內為畢業年）：王勝弘博士（2003）（國防大學中正理工學院國防科學博士班，分子動力模擬、電動力流）、陳炳炫博士（2004）（國防大學中正理工學院國防科學博士，DSMC）、劉明和博士（2005）（國防大學中正理工學院國防科學博士班，DSMC）、嚴祖煦博士（2006）（國防大學中正理工學院國防科學博士班，分子動力模擬、多尺度計算）、李文墾博士（2010）（國防大學中正理工學院國防科學博士班，微粒光泳、熱泳）、王建忠博士（2011）（逢甲大學機械與航空工程博士學程，電動力流、微通道流理論與實驗）。

附錄：作者與本團隊相關研究

期刊論文

- Hwang, P.W. and **Soong, C.Y.**, 2008, "Numerical Study of Variable-Property Electro-Thermal Flow Transport Phenomena in Microchannels at Constant Pressure Gradient/Constant Flow Rate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 1-2, pp. 210-223 (SCI Impact Factor= 1.892, Engineering, Mechanical: 9/105)
- Li, W.K., **Soong, C.Y.**, Liu, C.H. and Tzeng, P.Y., 2010a, "Thermophoresis of a Micro-Particle in Gas Media with Effect of Thermal Stress Slip," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 44, pp. 1077-1082 (SCI Impact Factor = 2.340, Engineering, Chemical:23/135).
- Li, W.K., **Soong, C.Y.**, Liu, C.H. and Tzeng, P.Y., 2010b, "Parametric Analysis of Energy Absorption in Micro Particle Photophoresis in Absorbing Gaseous Media," *Defense Science Journal*, Vol. 60, No. 3, pp. 233-237. (SCI Impact Factor =0.118).
- Li, W.K., **Soong, C.Y.**, Liu, C.H., Tzeng, P.Y., 2011, "Analysis of Transition and Mobility of Microparticle Photophoresis with Slip-Flow Model," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 10, Issue 1, pp. 199-209 (SCI Impact Factor = 3.314, Fluids, Physics and Plasma: 2/26).
- Liu, C.H., Li, W.K., **Soong, C.Y.** and Tzeng, P.Y., 2010, "Theoretical Analysis of Micro-Particle Photophoresis in Low-Kn Gaseous Flows," (in Chinese) *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation B*, Vol. 42, No. 2, pp. 107-114 (EI).
- Liu, C.H., **Soong, C.Y.**, Li, W.K. and Tzeng, P.Y., 2009, "Internal Electric Field Distribution within a Micro Cylinder-Shaped Particle Suspended in an Absorbing Gaseous Medium," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 111, pp. 483-491. (SCI IF=1.635).
- Soong, C.Y.**, Hwang, P.W. and Wang, J.C., 2010, "Analysis of Pressure-Driven Electrokinetic Flows in Hydrophobic Microchannels with Slip-Dependent Zeta Potential," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 9, No. 2, pp. 211-223. (SCI Impact Factor= 3.314, Fluids, Physics and Plasma: 2/26).
- Soong, C.Y.**, Li, W. K., Liu, C. H., and Tzeng, P. Y., 2010, "Effect of Thermal Stress Slip on Micro-Particle Photophoresis in Gaseous Media," *Optics Letters*, Vol. 35, pp. 625-627. (SCI Impact Factor = 3.772, Optics: 4/64)
- Soong, C.Y.**, Li, W. K., Liu, C. H., and Tzeng, P. Y., 2010, "Theoretical Analysis for Photophoresis of a Microscale Hydrophobic Particle in Liquids," *Optics Express*, Vol. 18, pp. 2168-2182, 2010. (SCI Impact Factor = 3.88, Optics: 3/64); also, selected in *Virtual Journal for Biomedical Optics*, Vol. 5, Issue 4, Feb. 26, 2010.

- Soong, C.Y.** and Wang, S.H., 2003, "Theoretical Analysis of Electrokinetic Flow and Heat Transfer in a Flat Microchannel under Asymmetric Boundary Conditions," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 265, No. 1, pp. 202-213 (SCI Impact Factor = 1.784)
- Soong, C.Y.** and Wang, S.H., 2004, "Analysis of Rotation-Driven Electrokinetic Flow in Microscale Gap Regions of Rotating Disk Systems," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 269, No. 2, pp. 484-498 (SCI Impact Factor = 1.784)
- Soong, C.Y.**, Wang, S.H. and P.Y. Tzeng, 2004a, "Molecular Dynamics Simulation of Rotating Fluids in a Cylindrical Container," *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 8, pp. 2814-2827. (SCI Impact Factor = 1.761)
- Soong, C.Y.**, Wang, S.H. and P.Y. Tzeng, 2004b, "Analysis of Fully-Developed Forced Convection of Electrokinetic Flow in Flat Microchannels at Prescribed Wall Temperatures or Wall Heat Fluxes," *Transactions of Aeronautical and Astronautical Society, ROC*, Vol. 36, No. 1, pp. 29-44. (EI)
- Soong, C.Y.**, Yen, T.H. and Tzeng, P.Y., 2007, "Molecular Dynamics Simulation of Nanochannel Flows with Effects of Wall Lattice-Fluid Interactions," *Physical Review E*, Vol. 76, No. 3, 036303 (SCI Impact Factor= 2.438, Physics, Mathematical: 2/41). Also; the paper was selected by American Physics Society for Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology at <http://www.vjbio.org>, issue September 24, 2007.
- Tzeng, P.Y., Chen, P.H., Liu, M.H. and **Soong, C.Y.**, 2005, "Continuum and DSMC Modeling of Microscale Plane Poiseuille Gas Flow," *Transactions of Aeronautical and Astronautical Society, ROC*, Vol. 37, No. 1, pp. 55-66. (EI)
- Tzeng, P.Y., Li, W.K., Liu, C.H. and **Soong, C.Y.**, 2011, "Theoretical Analysis of Cylindrical Microparticle Photophoresis in a Perpendicular Optical Field with Thermal Stress Slip Model," *Journal of Mechanics* (SCI Impact Factor = 0.408, Mechanics: 113/133).
- Tzeng, P.Y., Liu, M.H., Chen, P.H. and **Soong, C.Y.** 2006, "Influence of Cell Size on DSMC Modeling of Microscale Rayleigh-Benard Flows," *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A* (Formerly Transactions of Aeronautical and Astronautical Society, ROC), Vol. 38, No. 2, pp. 89-96 (EI)
- Tzeng, P.Y., **Soong, C.Y.**, Liu, M.H. and Yen, T.H., 2008, "A Novel Wall-Fluid Collision Rule for Adiabatic Condition of Solid-Wall in Atomistic Simulation of Micro Thermal Fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 3-4, pp. 445-456. (SCI Impact Factor = 1.892, Engineering, Mechanical: 9/105)
- Wang, J.C., **Soong, C.Y.**, and Hwang, P.W., 2010, "Analytic Solutions and Model Assessment for Electrokinetic Flow in Hydrophobic Microchannels with Various Boundary Conditions of Interfacial Electric and Slippage Phenomena," *Journal of*

Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol. 31, No. 3, pp. 209-220 (SCI Impact Factor = 0.548).

Yen, T.H., **Soong, C.Y.** and Tzeng, P.Y., 2007a, "Hybrid Molecular Dynamics-Continuum Simulation for Nano/Mesoscale Channel Flows," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 3, No. 6, pp. 665-675. (SCI Impact Factor = 2.615, Instruments & Instrumentations: 2/53)

Yen, T.H., **Soong, C.Y.** and Tzeng, P.Y., 2007b, "Investigation of Temperature-Dependence of Zeta Potential with Molecular Dynamics Simulation of Nanoscale Flows of a Model Electrolyte," *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation A*, Vol. 39, No. 4, pp.251-264. (EI).

Yen, T.H., **Soong, C.Y.** and Tzeng, P.Y., 2009, "Pressure-Driven Electrokinetic Flow of a Model Electrolyte in Nanochannels with Various Wall Lattice Planes," *Journal of Mechanics*, Vol. 25, No. 4, pp. 279-294. (SCI Impact Factor =0.644).

其他

Soong, C.Y., 2004, "Electro-Thermo-Hydrodynamic Interactions in Micro Liquid Flows," **Keynote Lecture** at the *6th International Symposium on Heat Transfer*, June 15-19, Beijing, China.

Soong, C.Y., 2007, 2009, *Lecture Notes on Microscale Thermal-Fluids*.