

第二章 平板熱管原理簡介與回顧

2.1 平板熱管的工作原理

平板熱管主要包含三個構造：密閉容器(container)、毛細結構(wick structure)與工作流體(working fluid)；可分成三段不同的工作區域，蒸發區(evaporation zone)、絕熱區(adiabatic zone)和冷凝區(condensation zone)，如圖 2.1 所示。其工作原理相當簡單，蒸發區與發熱源接觸，利用工作流體溫藉由相變化將熱量帶走，由於蒸發區所形成的蒸汽壓力較高，所以蒸汽會向冷凝區移動且藉由某種冷凝熱儲(heat sink)將熱傳遞至熱管外部，蒸汽再度藉由相變化冷凝成液態且利用毛細結構之毛細力回到蒸發區，行成一個完整的封閉循環。

密閉容器最主要的目的就是隔絕內部工作流體與外界環境，並防止非凝結氣體的滲入，所以它必須擁有密閉、維持內外壓力差以及高熱傳導能力等功能。毛細結構有三個主要功能：(1)使工作流體能夠順暢的由冷凝區回到蒸發區；(2)能夠確保工作流體均勻分佈於蒸發區；(3)提供路徑讓熱能夠較迅速的由熱管內壁傳遞至工作流體。工作流體主要的功能為利用相變化來傳遞熱量且藉由毛細力回到蒸發區。

2.2 平板熱管之熱傳模式

對於熱管毛細結構之熱傳模式，Faghri [4]指出當輸入熱量較少或熱管剛啟動時，是以毛細結構之傳導與工作流體之對流為主要的熱傳模式，如圖 2.2(a)所示；當輸入熱量持續上升，大量的液體蒸發導致液汽介面向下退至毛細結構中且為了彌補因相變化所損失的工作流體，在液汽介面會形成半月膜(meniscus)以增強毛細力，如圖 2.2(b)所示，此時主要的熱傳模式是藉由液膜表面蒸發(surface evaporation)為主；當毛細結構之過熱度(temperature difference)達到某程度時，成核沸騰(nucleate boiling)便發生於毛細結構中，如圖 2.2(c)所示，這種熱傳模式通常發生於毛細結構厚度過厚的情況下，成核沸騰將於 2.4 節作詳細說明；當毛細結構的過熱度不斷上升時，數顆汽泡同時產生且在脫離前會聚集成較大的汽膜，此汽膜會阻擋工作流體回流導致液體無法與加熱面接觸進而使熱管乾化，如圖 2.2(d)所示。

Li and Peterson [5]對發生於燒結銅網毛細結構中的熱傳現象做了更進一步的論述，如圖 2.3 所示：A 為初始狀態；低輸入熱量時，有少量的大汽核於加熱面產生且在金屬網的表面上已經形成一層薄液膜，如 B 所示，在薄液膜區域具有極佳的蒸發率(關於薄液膜蒸發現象將於 2.3 節作說明)，此時核沸騰熱傳與薄液膜蒸發熱傳相伴發生。輸入熱量上升時，半月膜的曲率半徑會隨之減少以提供工作流體

回流之毛細力，此時汽核的產生頻率與薄液膜蒸發熱傳面積皆同時增加，如 C 所示。當輸入熱量持續上升，半月膜之液汽介面會後退至與加熱面貼合且在金屬網與加熱面接觸的角落形成極薄的液膜，此時由於液體與固體之間有極強的附著力存而抑制了汽核的產生，所以薄液膜蒸發為主要的熱傳模式，如 D 所示。若輸入熱量繼續上升，則會發生乾化的現象。

2.3 薄膜蒸發熱傳(thin film evaporation)

在熱管中，工作流體與毛細結構會形成許許多半月膜(menisci)，如圖 2.4 所示。在半月膜與固體邊界接觸的地方會形成極薄的液膜(thin liquid film)且具有強烈的蒸發熱傳效果，因此已經有許多學者對此領域做研究與探討。

Potash and Wayner [6]首先建構出微半月膜理論模型，如圖 2.5 所示，主要可分為五個區域：平衡薄膜區(equilibrium thin film region)、蒸發薄膜區(evaporating thin film region)、本體半月膜區(intrinsic meniscus region)、過渡區(transition region)以及主要液體區(bulk fluid region)。分別描述如下[7]：

(1)平衡薄膜區：位於半月膜與固體邊界完全接觸的地方，在此所形成的液膜極薄，具有極強的附著力(adhesion force)以致於液體很難

脫離液膜表面進行相變化，所以此區幾乎沒有熱傳發生。

(2)蒸發薄膜區：位在平衡薄膜區的下方，此區域的液膜厚度逐漸遞增且附著力逐漸減少，液體分子開始能夠脫離液體表面進行相變化。

(3)過渡區：介於蒸發薄膜區與本體半月液膜區之間，其附著力對液體分子的影響降到最低使得液體能夠更輕鬆的進行相變化，導致熱傳量急速增加，為蒸發熱傳主要發生之區域，亦稱為三相中線區 (triple interline region)。

(4)本體半月膜區：位在過渡區的下方，雖然其液體分子幾乎不受到附著力的影響，但由於液膜厚度隨著曲率半徑減少而增加，導致熱阻上升，所以藉由蒸發熱傳所傳遞的熱量逐漸減少。

(5)主要液體區：在本體半月膜區之後的所有區域皆為主要液體區。

由於液膜太厚，所以此區是藉由自然對流來傳遞熱量，故所佔的熱傳比例不高。

半月膜熱傳機制示意圖如圖 2.5 所示。超過 90%的熱幾乎都藉由蒸發薄膜區、過渡區以及本體半月膜區傳遞，其中又以過渡區所傳遞的熱量最多。大部分的研究，包括本研究，皆將蒸發薄膜區、過渡區以及本體半月膜區三區合稱為微液膜區(micro-film region)。根據 Potash and Wayner [6]的研究表示，在平衡薄膜區內的各種物理量，如壓力

梯度、平均徑向速度(radial velocity，即指二次流動速度)以及熱傳量等，皆趨近於零；但從蒸發薄膜區開始，這些物理量逐漸上升，至過渡區時，皆達到極大值，之後再由極大值逐漸下降，過了本體半月液膜區後趨於平緩，其趨勢圖如圖 2.6 所示。Holm and Goplen [7]藉由他們的計算結果表示，在平衡薄膜區內的液體分子雖然具有相當高的溫度(接近壁面溫度)以及表面壓力，但受到附著力(adhesion force)的影響太大，導致無法脫離液體表面進行相變化；液體分子進行相變化的條件為

$$\text{表面壓力}-\text{附著力}>\text{飽和蒸汽壓力}$$

通常在微液膜區內皆可滿足上述之條件。另外，他們表示在過渡區內熱傳量達到最大值且大約有 80%的熱量是藉由過渡區所傳遞出去，而只有 8%的熱量是藉由蒸發薄膜區傳遞出去。Stephan and Busse[25]利用理論計算來研究溝槽熱管蒸發區所形成半月膜之蒸發效應，他們表示液汽介面的溫度也是影響半月膜蒸發的重要因素，當液體從主要液體區進入微液膜區之後，液汽接觸的介面溫度會突然劇增，這是由於微液膜區曲率半徑變小而造成毛細力增加所致；液汽介面溫度持續隨著液膜變薄而增加，在此同時液體之表面壓力也隨著溫度上升而增加，當表面壓力大於蒸汽之飽和壓力時，液體分子便脫離液體表面進行相變化；這樣的物理現象會持續到液體進入平衡薄膜區為止，如圖

2.7 所示。Hohmann and Stephan [9]利用光學量測法來測量具有微液膜 (micro-film)之加熱面壁面的溫度分佈，發現在主要液體區(bulk fluid region)之壁面溫度趨近於某一定值，當進入微液膜區後，壁面溫度突然急劇下降，一直持續到進入平衡薄膜區之後，壁面溫度才不降反升。這樣的結果代表在微液膜區有較好的熱傳能力，趨勢如圖 2.8 所示。

2.4 成核沸騰熱傳(nucleate boiling)

基本的沸騰模式有三種，如圖 2.9 所示[10]：低壁面過熱度 (superheat)的核沸騰區(nucleate boiling)，高壁面過熱度的膜沸騰區 (film boiling)以及介於二者之間的過度沸騰區(transient boiling)。隨著熱通量逐漸增加，壁面過熱度會沿著沸騰曲線上升，當第一顆氣泡產生時，此為成核沸騰的起始點(onset nucleate boiling)，之後便進入了核沸騰機制；當熱通量持續上升，氣泡也會不斷的增加，直至曲線上的最高點，當熱通量再增加時，加熱面上的蒸氣產生率非常迅速且猛烈，會形成一層蒸氣層阻絕液體與加熱面接觸，此時便進入了膜沸騰機制。膜沸騰所對應的熱通量稱為臨界熱通量(critical heat flux, CHF)。

“成核”為形成各種沸騰模式的第一條件。成核與幾個主要的因素

有關，接觸角(contact angle)、表面粗糙度(surface roughness)以及氣核成長(nucleus grows)。如以下說明[10]：

A. 接觸角：接觸角的定義為從固液介面經由液體到氣液介面切線之夾角，如圖 2.10 所示。接觸角越小，表示液體容易與固體表面接觸，潤溼能力佳；反之，接觸角越大，顯示液體不容易固體表面接觸，潤溼能力差。接觸角是液-氣(σ_{lv})、固-液(σ_{sl})及氣-固(σ_{vs})三個介面張力抗衡的結果。由圖 2.11 可得三相接觸點力平衡之關係式為

$$\sigma_{lv} \cos\theta + \sigma_{sl} = \sigma_{vs}$$

此一方程式稱為楊氏方程式(Young's equation)，其中 θ 為接觸角，移項可得

$$\cos\theta = (\sigma_{vs} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lv}$$

因此，接觸角為固-液-氣三種物質狀態的函數。

B. 表面粗糙度：真實的表面並非平滑無瑕。微觀而言，真實表面都是凹凸不平的，只是程度不同而已。所謂平滑表面是只平均粗糙度較小的表面；反之，平均粗糙度較大的表面即為粗糙面。不論光滑面或是粗糙面，必然存在著或大或小的凹坑(cavity)。當加熱面灌滿工作流體後，有些凹坑可能會因為液體接觸角的限制而殘存工作流體的蒸氣或非凝結氣體。這些殘存的蒸氣或非凝結氣就成為成核所需要的胚胎；而真正影響成核現象的機制是氣核在凹坑內及凹坑口的成長是否

受到限制。Bankoff [11]提出了一套理論說明凹坑殘留氣體的機制。考慮加熱面上一個圓錐形的凹坑，其底部之夾角為 2β ，開口半徑為 r_c ，如圖 2.12 所示，且固體與液體間之接觸角為 θ 。若 $\theta > 2\beta$ ，則氣-液介面由凹坑的一邊前進到另一邊時，將在凹坑的底部殘留一些氣體，這一部分氣體很有可能成為加熱沸騰時成核沸騰開始的氣核胚胎。反之，若 $\theta < 2\beta$ ，則氣-液介面的前進，將導致凹坑內浸滿工作流體，不會有殘留的氣體。一個浸滿液體的凹坑，其成核仍需很大的自由能或者液體過熱度。

C. 氣核成長：如果加熱面溫度足夠高，凹坑裡形成的氣核將持續成長至凹坑口外。成長中的氣核此時能夠藉由本身一擴一縮的液氣介面強化周圍工作流體的對流熱傳。

不論是平板熱管內部的沸騰或是傳統的池沸騰(pooling boiling)，它們沸騰的理論皆是以成核理論作為依據；雖然如此，但也並不表示它們具有相同的性質與結果。下一節將針對池沸騰與平板熱管內部的沸騰做簡單的區別。

2.5 平板熱管內之成核沸騰

平板熱管內部發生的沸騰與池沸騰之差異如下所示：

	熱管內之沸騰	池沸騰
液面高度	1.約等於或小於毛細結構厚度(1 mm 以下)。	1.高出毛細結構許多。
回水方式	1.封閉式。 2.藉由毛細力回水。 3.液面高度隨輸入熱量多寡而不固定。	1.開放或半開放式。 2.藉由浮球閥等閥件控制液面高度。
汽核效應	1.汽核脫離時，周圍沒有充足的液體來進行遞補。 2.汽核成長不受周圍低溫液體與液面高度之影響，生命週期短。	1.氣核脫離時，周圍有充足的液體進行遞補。 2.氣核成長受周圍低溫流體之限制，生命週期較長。

池沸騰可歸納出以下幾個不同強化熱傳的方式：傳統的自然對流、強化的熱對流、蒸氣與液體的互換、氣核下微液膜之蒸發熱傳以及表面張力梯度導致的流動等。也是因為有這些機制的存在使得沸騰熱傳能

夠達到比一般熱傳機制更高的有效熱傳係數，如圖 2.13[12]所示。對於池沸騰而言，越是強烈的沸騰具有更佳的热傳效果，但這種結果並不完全適用在平板熱管內。當平板熱管內部發生沸騰，若只是輕微的沸騰則有可能幫助毛細結構中的工作流體進行強化對流；但若發生劇烈沸騰，則加熱面附近的液體有可能被脫離(或破裂)的氣泡挾帶開來，而減少液體與加熱面接觸的機會進而導致乾化(dry out)的現象發生。Faghri [4]指出在平板熱管中，過於強烈的沸騰是非必要的熱傳機制，除非氣泡能夠順利脫離加熱面而不受毛細結構之阻礙，若毛細結構過於緻密則有可能使汽核受困於毛細結構內而阻擋工作流體回流進而造成熱傳果不佳甚至於提早乾化等現象，此種現象即是一般所謂的沸騰極限(boiling limitation)。Wang and Peterson [13]指出在平板熱管中，金屬網毛細結構具有最佳的厚度存在，雖然增加厚度能夠提升毛細力也增加了熱傳能力，但當厚度超過某種程度時，其熱傳能力不升反降；雖然他們並沒有針對這種現象做任何說明，不過有可能是過厚的毛細結構形成劇烈的沸騰，造成沸騰極限的發生而降低其熱傳效果。

2.6 蒸發熱阻對平板熱管之重要性

由於蒸發區之熱傳面積遠小於冷凝區，便可得知蒸發熱阻會遠大

於冷凝熱阻。蒸發區為整個平板熱管中熱量傳遞最為激烈且複雜之區域，其熱傳效果會深深的影響整體平板熱管的運作，而影響蒸發熱阻值的主要因素為熱傳機制。Khrustalev and Faghri [14]針對自行設計的溝槽平板熱管進行理論分析計算，他們發現蒸發熱阻會隨著輸入熱量增加而遞減，這是因為蒸發區半月膜的曲率半徑逐漸變小使得薄膜蒸發增強所致；他們推測當在高熱量的情況下會有大量的工作流體進行相變化，此時若沒有足夠的毛細力提供所需的液體量，將會導致乾化現象的發生且限制了平板熱管的最大熱負載量(maximum heat capacity)，此現象即為熱管極限中的毛細極限(capillary limitation)；另外他們認為當毛細厚度增加時，容易引起沸騰，但他們並未確定其效應是好或壞，所以他們認為平板熱管的最大熱負載受限於毛細極限或沸騰極限。Li et al.[15]以金屬銅網作為毛細結構並探討毛細結構厚度對蒸發以及沸騰熱傳之影響，發現熱傳機制及有效熱傳係數與毛細結構和工作流體之間的暴露面積(exposed surfaces)有關；當固定一種金屬網目而改變毛細結構厚度時，有效熱傳係數並沒有明顯的改變，這是由於曝露面積沒有改變；臨界熱通量(critical heat flux, CHF)會隨著毛細厚度增厚而增加，這是由於較厚的毛細結構能夠降低工作流體在毛細結構中傳輸之阻抗，同時又能容納較多的工作流體以提高熱量傳輸之極限。Li and Peterson[5]觀察孔隙度(volumetric porosity)與金屬孔

隙尺寸(pore size)大小對蒸發與沸騰熱傳之影響。他們發現當增加金屬網目數(mesh number)，亦即減少金屬網線孔隙尺寸，能夠使有效熱傳係數上升，此因其能使液汽介面面積增加以致於提升熱傳效應；當孔隙度下降時能夠提升毛細結構與工作流體之間的熱傳效應，即鰭片效應有效地發生作用，能夠達到較高的有效熱傳係數；同時他們也觀察到，當毛細結構部分乾化(partial dry out)後，低孔隙度能夠比高孔隙度達到更高的熱通量，這是由於低孔隙度能夠提供較強的毛細力。Chang et al [17]指出平板熱管的總熱阻值會隨著輸入熱通量上升而下降，且其蒸發熱阻之趨勢也與總熱阻之趨勢相同，可見蒸發熱阻在整體平板熱管效能的重要性。他們推測：在蒸發區藉由鰭片效應(fin effect)所強化的熱傳導以及相變化的熱傳機制對蒸發熱阻值均極為重要。雖然這篇文獻有針對蒸發熱阻作一系列的研究，但其測量蒸發熱阻的方式是在平板熱管外側測量，並非將溫度點埋入熱管內；這樣的測量方式所得到的結果會與真實熱管內部溫度有很大的差異；但藉由這樣的趨勢確實可以突顯出蒸發熱阻對整體平板熱管熱阻的影響。

由以上研究結果可知，毛細結構與工作流體之間的互相作用對蒸發熱阻有極為重要的影響！對毛細結構而言，其主要影響的參數有三[4]：

(1)毛細半徑(capillary radius)：小的毛細半徑能夠提供較大的毛細壓力

差，能夠增加熱管的總熱傳量。

(2)滲透率(permeability)：高滲透率能夠降低流阻，使更多工作流體迅速回到蒸發區，能夠增加熱管之總熱傳量。

(3)有效熱傳導係數(effective thermal conductivity)：高熱傳導係數能夠降低熱管內壁與工作流體之間的溫差，同時降低蒸發熱阻。

對工作流體而言，其主要影響參數有三：

(1)蒸發潛熱(latent heat)，具有高潛熱的工作流體能夠藉由少量的相變化帶走大量的熱。

(2)接觸角(contact angle)，接觸角越小，工作流體在毛細結構中的接觸面積越多，能夠增強其回流所需的毛細力。

(3)沸點值(boiling point)：低沸點的工作流體能夠提早發生相變化，有利熱管於低輸入熱量時運作。

2.7 研究目的

熱管毛細結構的蒸發/沸騰現象一直是許多學者探索的課題。在過去，大部分的研究都是以測試性能為主軸進而藉由實驗結果推測內部的物理機制，或是以觀察現象為主軸進而預測實際運作的效能，雖然能夠大方向的掌握一些物理現象，但畢竟與真實的平板熱管有一些差距。有鑒於此，本研究為了提供重要進展，以下列兩點作為研究目

標：

- (1)建立一個可視化的平板熱管並以平板熱管的真實工作環境下進行實驗，並觀察其內部真實的物理現象，並直接測量內部工作流體溫度以計算真正的蒸發熱阻值，並配合觀察到的現象來分析蒸發熱阻與熱傳機制的關聯。
- (2)利用不同孔隙尺寸及厚度之相疊銅網，量測其在不同注水量及熱通量下的蒸發熱阻，找出上述各參數的影響。



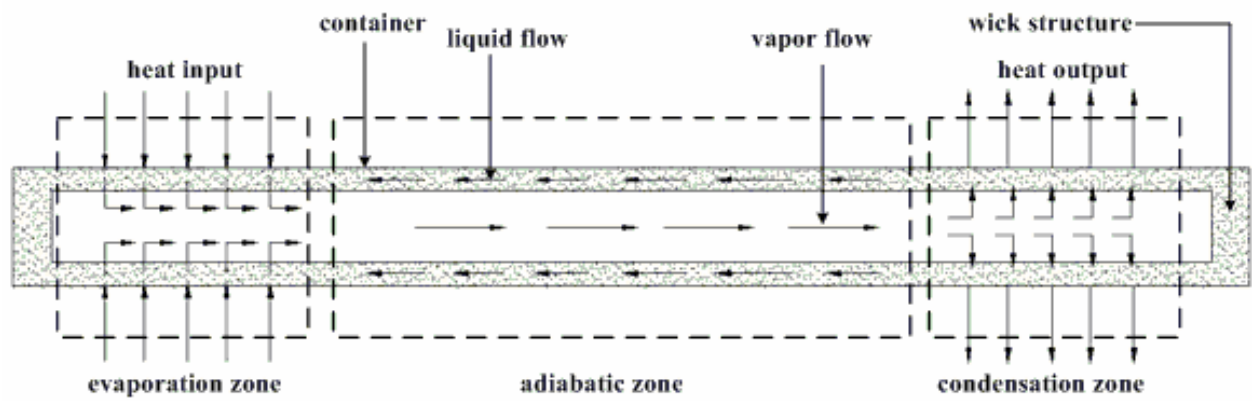


圖 2.1 平板熱管剖面圖

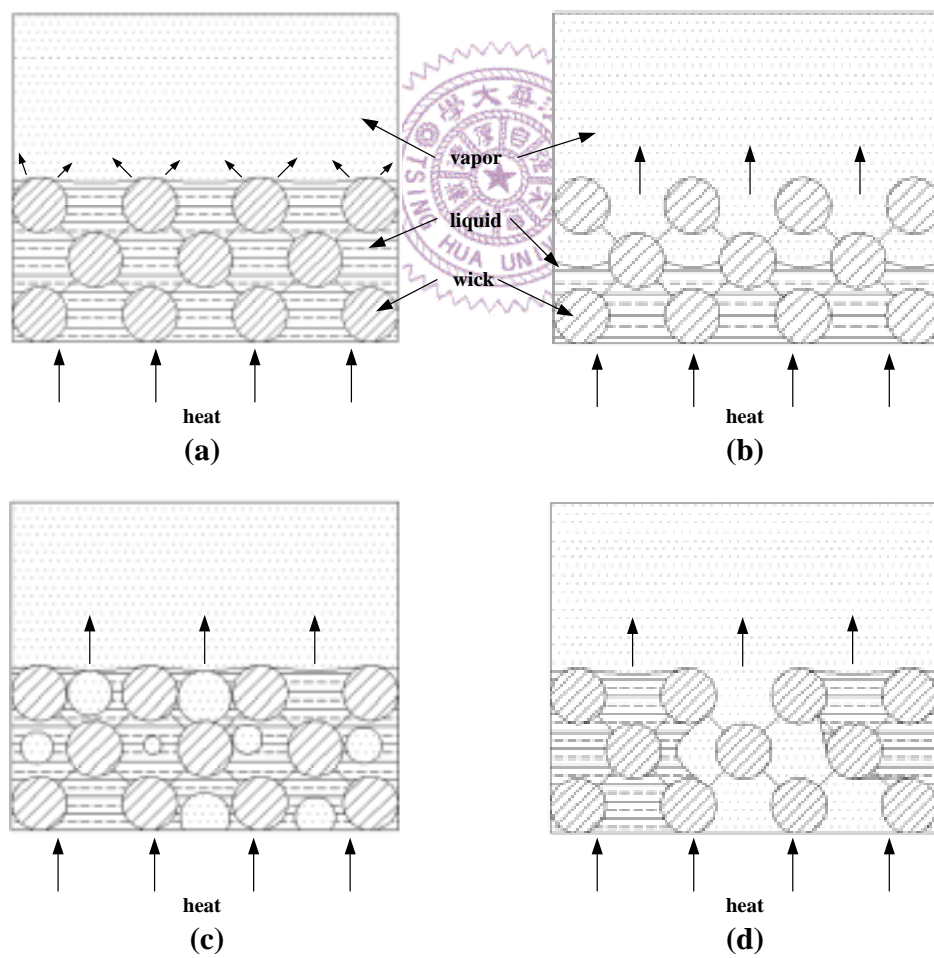


圖 2.2 平板熱管熱傳機制示意圖[4]

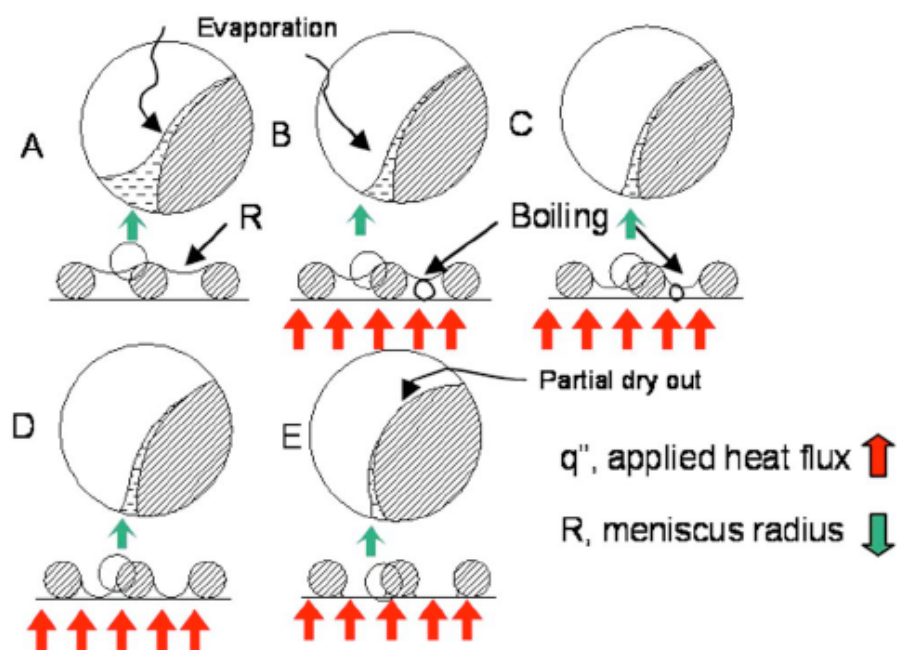


圖 2.3 金屬網之熱傳模式示意圖[17]

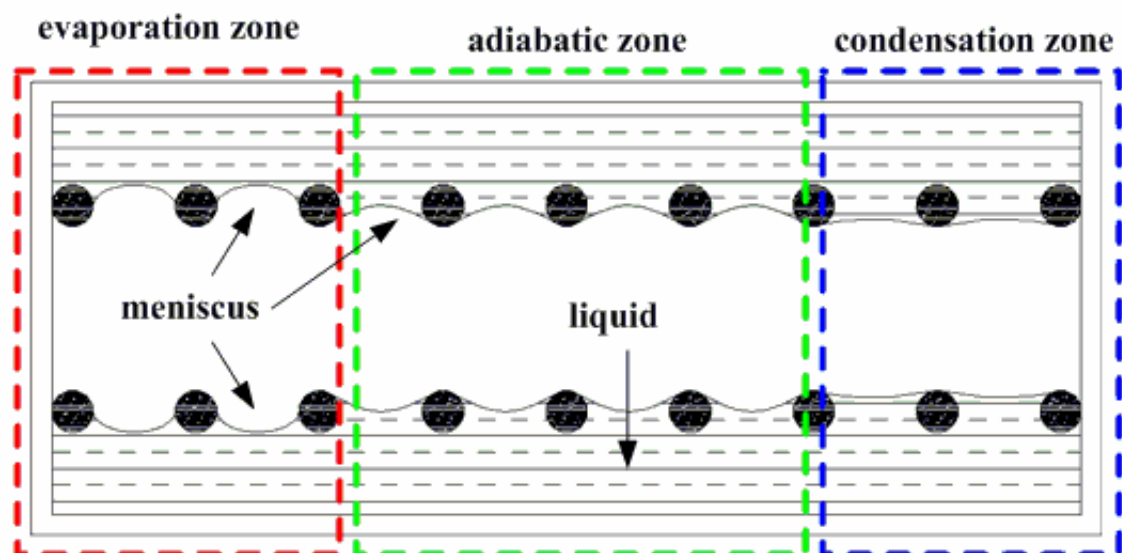


圖 2.4 毛細結構中的半月膜示意圖

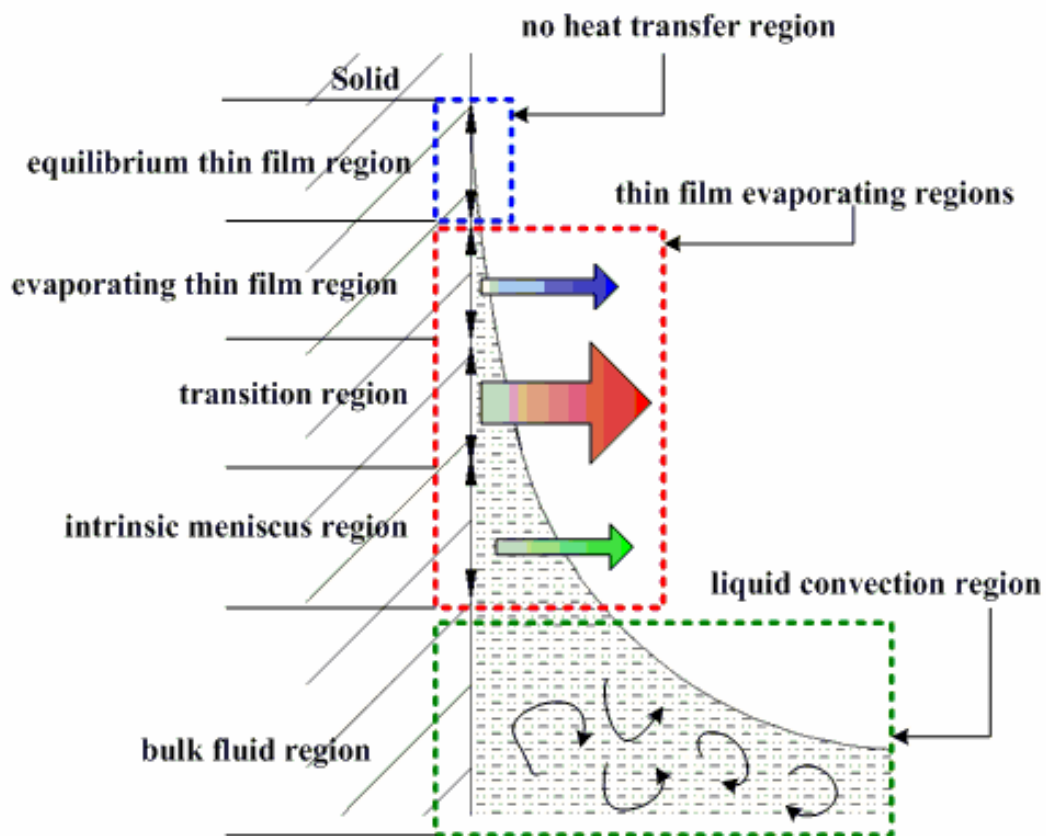


圖 2.5 半月液膜示意圖[6]

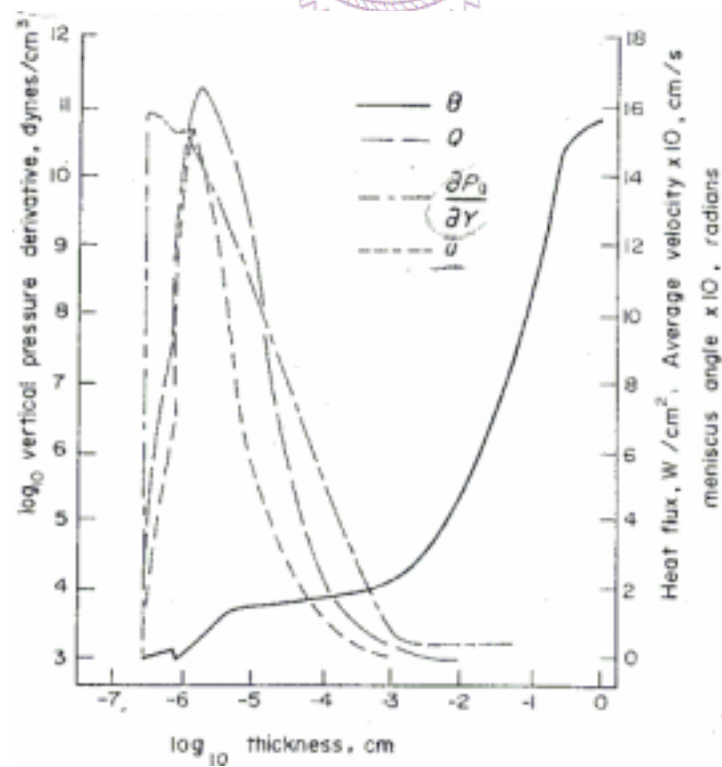


圖 2.6 半月膜及壓力梯度趨勢圖

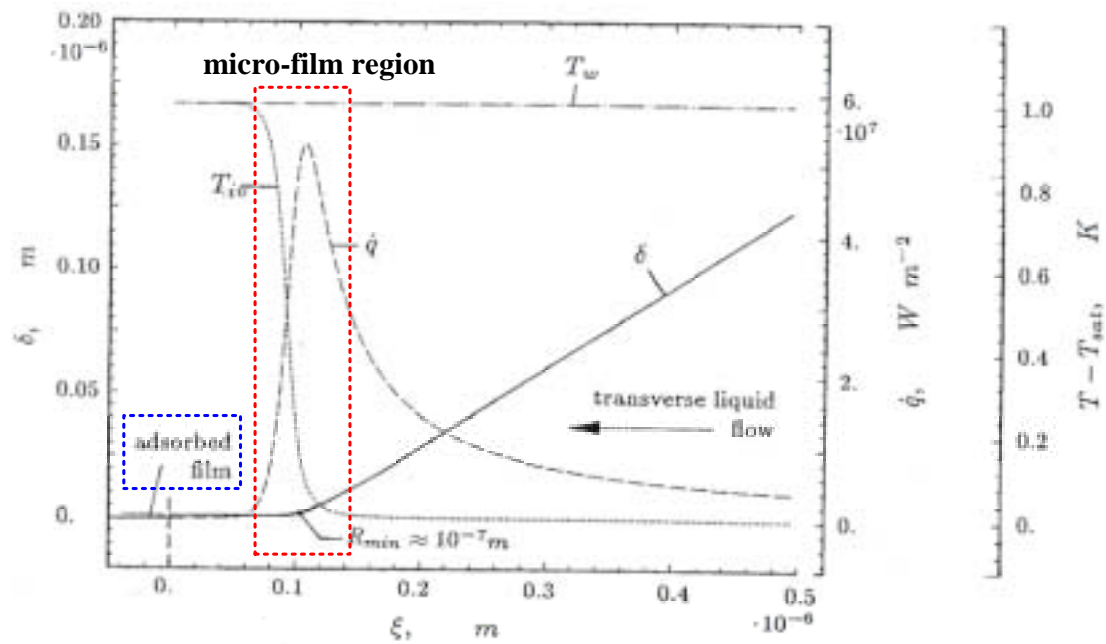


圖 2.7 金屬銅網所形成之半月膜

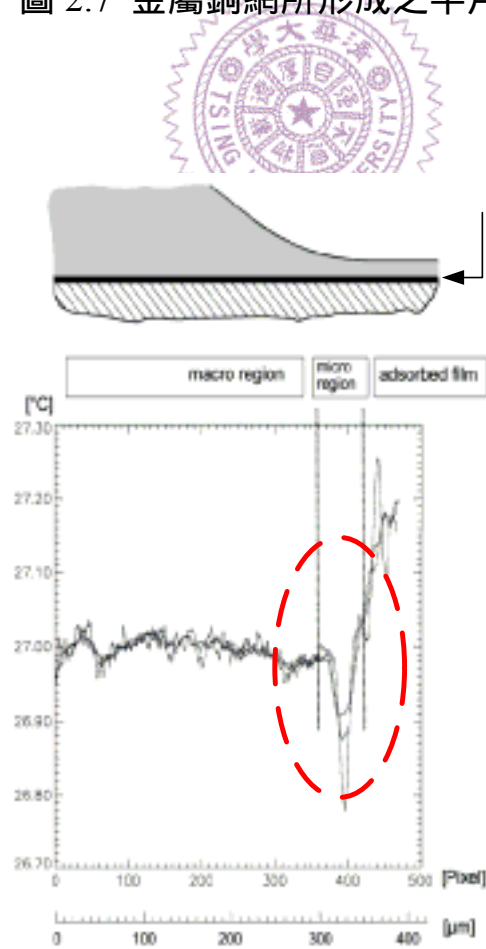


圖 2.8 半月液膜對壁面溫度分佈之影響

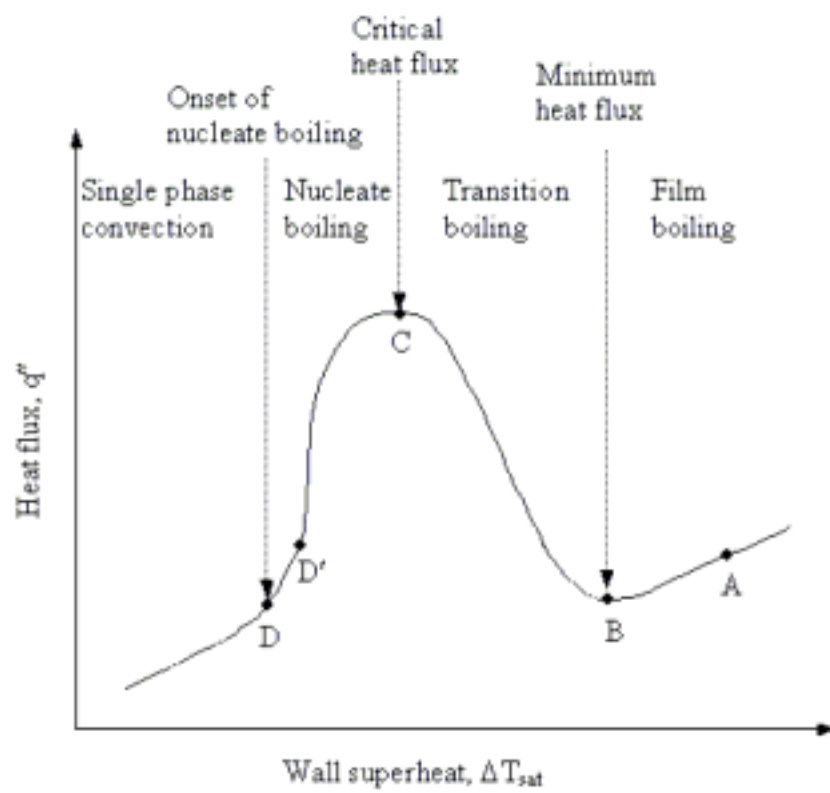


圖 2.9 基本沸騰曲線

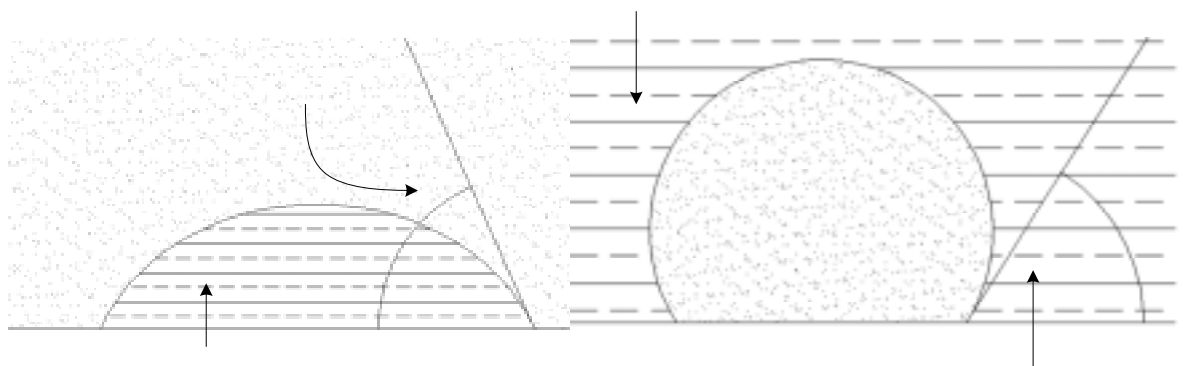


圖 2.10 接觸角示意圖

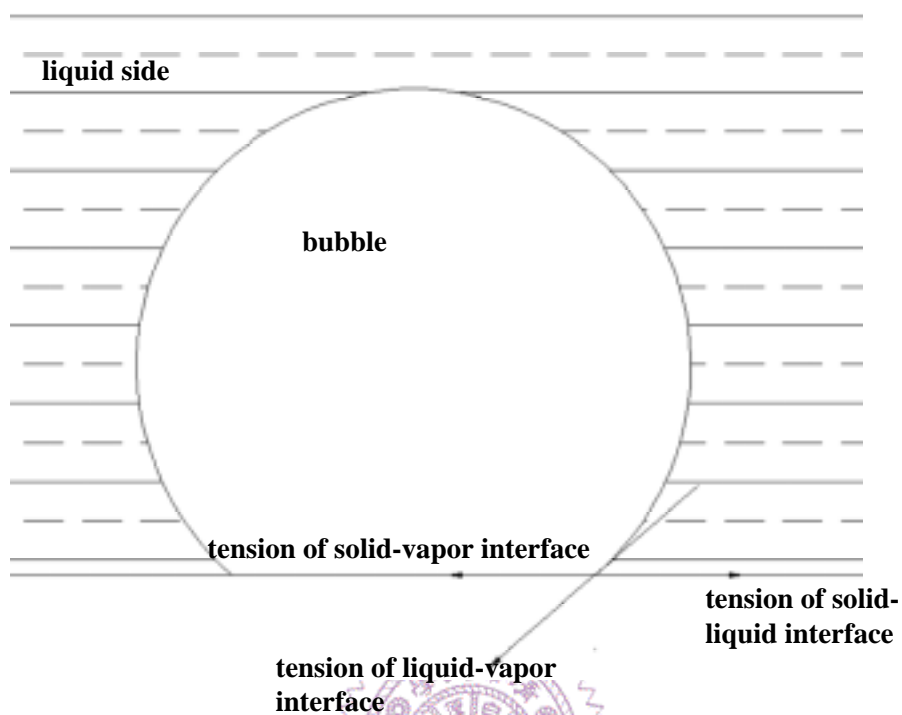


圖 2.11 三相接觸點力平衡

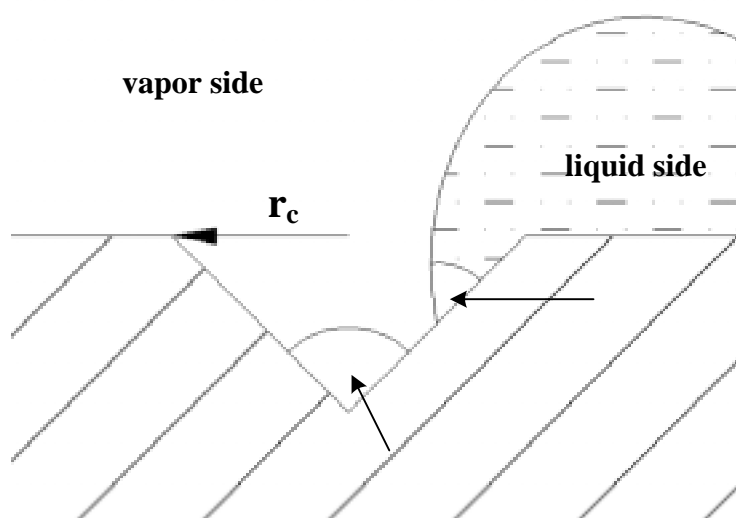


圖 2.12 氣體在凹坑內的滯留

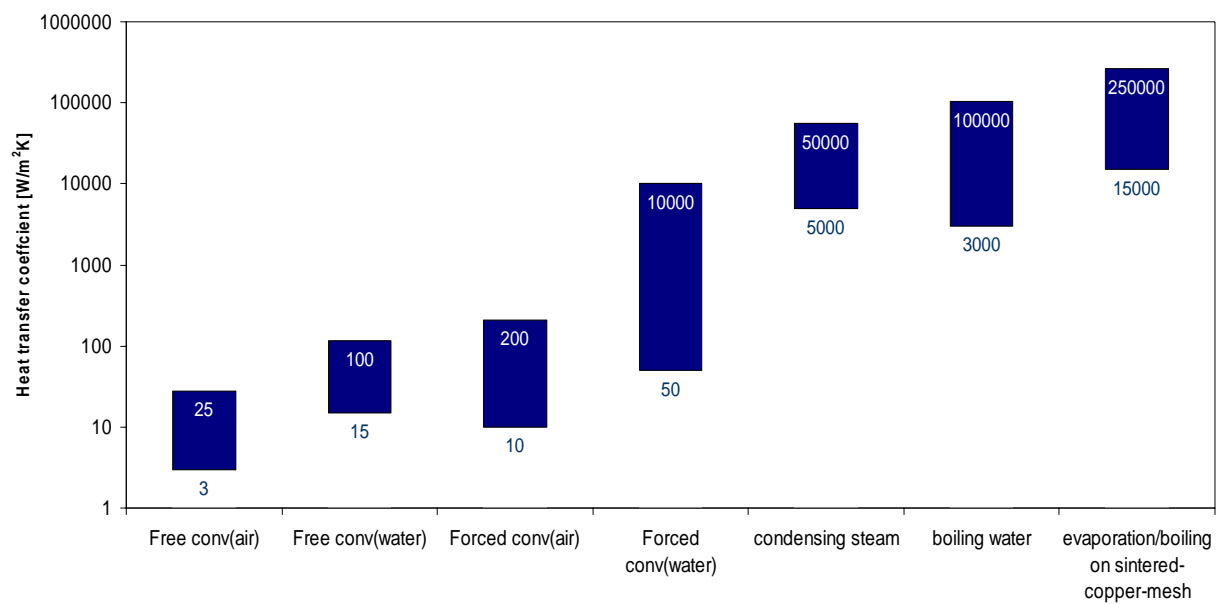


圖 2.13 各種熱傳效應之熱傳系數[12]

