

第三章 結果與討論

3-1 玻璃管實驗觀察

針對管內水蒸汽凝結和毛細結構輸送凝結水的情況作可視化的觀察，我們先針對外徑 6mm、壁厚 0.5mm、長 300mm 平滑透明玻璃管及在透明玻璃管內壁加入銅網毛細結構來作實驗。

實驗開始時先在玻璃管內持續通入水蒸汽，將空氣都排出管中，之後接上具有毛細結構的收集瓶，並將水套打開，此時可以發現凝結水開始產生並在開始在管壁上累積，由於一開始凝結水量並不多，凝結液膜在受到重力的影響下累積在管壁下方，經由水蒸汽推動下流至毛細結構再導入收集瓶中。然而隨著凝結水量的增加，管壁下方的凝結液膜漸漸變厚，並在蒸氣剪應力的推動下，表面開始有波浪產生形成波浪流(wavy flow)，而大部分這些波浪在被蒸汽推動至毛細結構之前，因為吸收管壁下方的凝結液膜使得波浪的振幅愈來愈大，最後因為內聚力形成液柱佔滿整個玻璃管截面，並將前端的水蒸汽包覆形成蒸汽泡，整個過程如圖 3.1 所示，圖中玻璃管內被推動的水柱長度約為 1.0~1.2cm。另外，在收集端負壓較小(L 型玻璃管 2cm 水柱壓力)的情況下，凝結水容易在玻璃管尾端累積，如圖 3.2 所示。其中圖 3.2(a)由於凝結水收集的速度較慢，所以容易在玻璃管尾端累積，圖 3.2(b)

可以看到由凝結水柱聚合包覆形成的蒸汽泡慢慢的愈聚愈多，圖 3.2(c) 為蒸汽泡在受到浮力的影響下，飄浮在管壁上方並隨著凝結水流彼此碰撞成長，形成較大較長的蒸汽泡。最後，圖 3.2(d)中的蒸汽泡不斷愈聚愈大，當其佔滿整個玻璃管截面形成蒸汽柱時，會將凝結水柱完全的隔開，收集瓶的毛細結構將會受到這些蒸汽柱的阻隔，使得輸送毛細力中斷，凝結水無法順利帶走開始在管中累積，實驗也因此中止。

為了了解蒸汽泡中是否含有管路中殘存的非凝結氣體，我們在水套溫度為 30°C 的玻璃管實驗中，對玻璃管尾端聚合成的蒸汽泡使用冰浴進行冷卻，為此將尾端覆蓋在玻璃管上的絕熱棉移除，其冷卻過程如圖 3.3 所示，圖 3.3(a)是在冷卻前，此時玻璃管壁經由熱電偶量測的溫度約在 $60\sim 50^{\circ}\text{C}$ 之間，在與室溫大氣的自然對流下，蒸汽泡會隨著時間慢慢的縮小而維持在一定的大小。圖 3.3(b)是在使用冰浴冷卻玻璃管壁 20 秒後的情況，可以發現蒸汽泡明顯快速的縮小，其大小也較為一致。圖 3.3(c)為冷卻 60 秒後的情況，蒸汽泡縮小的趨勢減緩，其直徑大小約為冷卻前四分之一倍。

從壓力上的觀點來看，由於負壓收集區的負壓很小，蒸汽泡周圍的壓力約略小於一大氣壓，因此為了克服氣液界面的表面張力及大氣壓力，裡面氣體的蒸氣壓應約為一大氣壓，汽泡才能存在。一般而言，水蒸氣分子凝結成小液滴胚核時，若沒有足夠的過飽和度，其形成的

小液滴再蒸發的機會遠大於長成大液滴的機會，亦即成核機率很低。然而實驗中蒸汽泡在冰浴的冷卻下，使其過飽和度增大，但蒸汽泡仍未完全消失，推測由於蒸汽泡被凝結水所包覆，沒有辦法以管壁或微粒為胚核，此時呈現為均勻成核的情況，而要均勻相成核所需的過飽和蒸汽壓較非均勻相成核高很多，在均勻相成核凝發生前，非均勻相核凝早已發生，過飽和蒸汽隨著凝結而減少，使過飽和度下降，亦使得均勻相核凝的產生更為不易，因此一般水蒸氣的凝結都以非均勻相成核為主。本實驗已極力避免不可凝結氣體進入管路中，但不能保證汽泡中完全不含非凝結氣體，經由上述的冰浴冷卻測試，可以證明汽泡中的成份絕大部分為水蒸汽。

實驗中為了解決蒸汽泡阻塞問題，做了二個方向的改進，第一個方向為降低冷卻量的大小，讓凝結水生成的速度減慢，因此將水套冷凝區大小由原本的 12cm 改為 6cm，並提升水套的溫度，由原本的 30 °C 升為 50 °C。此時凝結液膜的生成速率減慢，雖然凝結液膜在水蒸汽推動和尾端的凝結水聚合時，仍然會有一些蒸汽泡產生，但由於凝結水生成的時間較慢且形成的液柱長度較短，毛細結構有較充裕的時間將凝結水帶走，避免汽泡累積碰撞成長。第二個方向為增加收集瓶的負壓，將 L 型玻璃管水柱高度差由 4cm 改為 7cm，使輸送凝結水的速度加快，避免凝結水在玻璃管尾端累積形成汽泡流，使得汽泡互

相碰撞形成蒸汽柱的情況不會發生，確保凝結水能順利的輸送。圖 3.4 為在 7cm 的水柱負壓情況下，可以看到尾端的水柱會很快速的被毛細結構所帶走，在尾端沒有凝結水殘留的情況下，蒸汽泡聚合的情況也不容易發生。

圖 3.5 是在水套溫度 30°C 的情形下平滑玻璃管與銅網玻璃管在 4cm 水柱負壓和 7cm 水柱負壓的凝結水收集量和時間的關係圖，可以發現平滑玻璃管在 4cm 水柱負壓的情形下，凝結水在收集不到 20ml 時便被蒸汽柱所阻擋而中止，雖然在一開始收集的速率穩定，但隨著凝結水在玻璃管尾端累積，其凝結水流會因為汽泡阻隔而忽然停止，其中斷的時間每次實驗並不相同，端看汽泡碰撞的情況而定。而平滑玻璃管在 7cm 水柱負壓的情況下，由於液柱在接觸到尾端的毛細結構時，便會快速的被帶走，不會有汽泡流的產生，因此的收集的情況很穩定重復性也良好，20ml 的凝結水花費了 931 秒，約有 48W 的散熱功率。

3-2 內壁具銅網之玻璃管實驗觀察

當整個玻璃管內加上一圈銅網毛細結構時，在背後架設光源的照射下，可以隱約觀察到管內銅網下凝結水柱的影子，與平滑玻璃管實驗結果比較下，可以發現此時被水蒸汽推動凝結水柱長度明顯較短，約為 0.3~0.5cm 且移動的速度較快。而銅網在燈光的照射下時，可以觀察出其明暗的變化，在凝結水柱被蒸汽所推動時，銅網被經過的凝結水柱所潤溼，管壁上的液膜增厚，因此燈光無法穿透玻璃管，此時看到的銅網較暗。等到水柱被毛細結構帶走後，可以看到銅網由尾端漸漸的明亮起來，代表銅網的上液膜也隨著凝結水柱被毛細結構拉走而漸漸變薄，燈光可以穿透玻璃管，此時看到的銅網較明亮。然而在收集負壓較小的情況下，銅網毛細力輸送的速度較慢，凝結水柱會在管內累積，但在銅網的作用下，凝結水柱彼此聚合產生出蒸汽泡的情形較少，因為在凝結水柱在水蒸汽推動下要與前端的凝結水柱聚合的時候，銅網提供了另一個疏導水流的通道，使得凝結水柱不易聚合而隔離出蒸汽泡，而是形成許多大大小小的凝結水柱被水蒸汽所隔開，在由水蒸汽的推動下由銅網吸收輸送到收集瓶，與平滑玻璃管的收集狀況大不相同。圖 3.6 為水套溫度 30°C 時，在收集負壓較小(L 型玻璃管水柱高度差為 4cm)的情況下，由於銅網毛細力輸送的速度較慢，此時可以看到銅網內許多凝結水柱來不及被帶走而形成水柱和蒸

汽柱交錯的情況。而在收集負壓較大的情形下(L 型玻璃管水柱高度差 7cm)，銅網毛細力輸送的速度較快，在水蒸汽的推動下凝結水柱漸漸的變短，還沒到達玻璃管尾端的毛細結構前便由銅網所吸收帶走，而不會在管內累積。由圖 3.5 中可以發現銅網玻璃管在 4cm 水柱負壓下，仍能順利的輸送凝結水而不會中斷，且收集 20ml 凝結水的時間與平滑玻璃管 7cm 水柱負壓情況下時間差不多，帶走約 48W 的熱量，而銅網玻璃管在 7cm 水柱負壓下，凝結水的收集更加的快速，20ml 的凝結水花費了 837 秒，換算成散熱功率約為 54W。



3-3 內壁具銅網之玻璃管重力實驗

傳統式熱管在蒸發端高度比冷凝端高的情況下稱之為逆重力，此時重力所造成的壓降，必須藉由縮小毛細結構的有效孔徑來增加毛細大來克服，然而有效孔徑的縮小卻又造成滲透度的降低，使得毛細結構內的流阻大幅的提昇，使得克服重力壓降的效果大打折扣。為了解熱管在逆重力時凝結水輸送的情況，我們將實驗中的平滑玻璃管做角度 15°的調整，分別觀察其在順重力和逆重力時，水蒸汽凝結和凝結水輸送的情況，之後將平滑玻璃管換成內壁具銅網之玻璃管，收

集凝結水的輸送量並和水平時銅網玻璃管的收集量做比較。

一開始在進行逆重力實驗的情況時，發現在 4cm 水柱負壓時，平滑玻璃管和銅網玻璃管都無法克服重力，而無法將凝結水輸送至收集瓶，量筒內的水反而被管內的凝結水柱往重力方向所帶走。之後，將水柱負壓提升至 7cm 後，才能克服重力開始將凝結水柱導入收集瓶，圖 3.7 為平滑玻璃管在逆重力情況下，凝結水輸送的情況，可以看到一開始水蒸汽雖然能將凝結水柱推至毛細結構，但凝結水柱在管內聚合時所產生的蒸汽泡，受到浮力的影響下，紛紛往高處的毛細結構聚集，無形中使得在水平情況下蒸汽泡碰撞成長的問題加速產生，一下便形成大型蒸汽泡將凝結水柱和毛細結構隔開，使得輸送毛細力中斷。而內壁具銅網之玻璃管在逆重力的情況下則和水平 4cm 的水柱負壓的情況類似，在管內形成許多不同大小的凝結水柱，再經由銅網輸送至收集瓶。

而在順重力的情況下，平滑玻璃管凝結所產生的液膜在管壁下方累積，在重力和水蒸汽的推動下，快速沿著管壁流至毛細結構，而不會內聚形成水柱。此時內壁具銅網之玻璃管和平滑玻璃管的情況很相似，管內都看不到凝結水柱，內壁具銅網之玻璃管管壁上多了一圈銅網，凝結液膜不單受到重力影響只經由管壁下方流至毛細結構，還會經由管壁上銅網毛細力來輸送，因此凝結水收集的速度也較快。

圖 3.8 為內壁具銅網之玻璃管在水套 30°C 時，在水平、逆重力 15°和順重力 15°時，凝結水收集量和時間的關係圖，在順重力 4cm 的水柱負壓下，凝結水收集速度與水平情況時 7cm 的水柱負壓時差不多，其散熱效率約為 53W；在逆重力 7cm 的水柱負壓下凝結水的收集速度則與水平時 4cm 的水柱負壓的情況差不多，其散熱效率約為 47W。而整體散熱功率變動幅度不大，在最快的 54W 與最慢的 47W 之間。另外，圖中可以發現在逆重力 15°C 時，並沒有 4cm 水柱負壓時凝結水的收集情況；在順重力 15°C 時，並沒有水柱負壓 7cm 凝結水的收集情況。這是因為在逆重力的情況下，4cm 的水柱負壓並不足以克服重力的影響，無法將凝結水柱導入收集瓶中。而在順重力的情況下，水蒸汽推動的力量較強，加上 7cm 的水柱負壓會使得毛細結構無法抵擋住水蒸汽，會使得飄浮在管中的蒸汽泡進入 L 型玻璃管而影響到負壓區的穩定性，造成凝結水收集量的不準確。

3-4 銅管實驗觀察

由於銅的熱傳導係數 $k = 401 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$ 大於玻璃的熱傳導係數 $k = 1.8 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$ ，實驗中使用的平滑銅管管壁為 0.3 mm 也較玻璃管

管壁 0.5 mm 薄，從直觀上來看，在水套溫度維持 30°C 時，平滑銅管冷凝水的收集量應該遠大於玻璃管的凝結水收集量。然而在實驗進行時，卻發生很不穩定的現象。在低負壓情況下(L 型玻璃管 4cm 水柱壓力)發現凝結水似乎受到阻塞而沒有輸送的跡象，在高負壓的情況下(L 型玻璃管 7cm 水柱壓力)則是會不時有長型蒸汽柱突破收集瓶的毛細結構，進入到 L 型玻璃管，破壞負壓區的穩定性，造成量測的不準確。這些長型的蒸汽柱長度從 1cm ~ 5cm 之間都有，與平滑玻璃管觀察到由蒸汽泡慢慢碰撞併合成的蒸汽柱(約 1cm)明顯不同。這些長型蒸汽柱形成的原因，推測與在使用長型水套(12cm)時，平滑玻璃管凝結水收集實驗時觀察到情況類似，此時凝結液膜產生的快且多，在水蒸汽還沒推動前，凝結液膜便聚合形成水柱，且同時在玻璃管中聚合的水柱不只有一個地方，因此聚合而成的水柱和水柱之間便會形成長型的蒸汽柱。另外，由於銅管的熱傳導係數高，水蒸汽凝結速度較快，在水蒸汽經過水套區時，會將大部分的水蒸汽凝結，可能會造成水蒸汽在推動水套區之後的凝結水柱時較為緩慢，擠壓前端的蒸汽時也較為困難，因此無法與前端的水柱聚合形成蒸汽泡，最後便以長型蒸汽柱的形式阻擋在尾端的毛細結構前，造成輸送毛細力中斷。此外，平滑銅管在實驗開始時的作動也比玻璃管時不穩定，實驗開始進行前，要將 L 型玻璃管保持滿水的狀態來製造負壓，因此會將燒瓶中

的另一端蒸汽出口擋住，使燒瓶內的壓力上升，驅使管內的凝結水能通過毛細結構，慢慢地充滿 L 型玻璃管，然而可能由於銅管內的水柱和蒸汽柱累積太快，又有長型蒸汽柱會阻塞在毛細結構前，造成蒸汽推動不易，此時加熱瓶的壓力會一直累積，直到長型蒸汽柱突破毛細結構後，壓力在一瞬間釋放，凝結水柱會瞬間快速衝入 L 型玻璃管中到收集瓶，之後可能因為凝結水大量被帶走後，銅管內又瞬間凝結了大量的水柱產生壓降，將部分凝結水又從收集瓶中回吸至 L 型玻璃管中，因此實驗在一開始作動時，可以觀察到 L 型玻璃管中凝結水快速的下降和上升，造成平滑銅管實驗一開始作動的困難。



3-5 溝槽銅管與內壁具銅網之銅管實驗觀察

在有了內壁具銅網之玻璃管的經驗後，我們期待能利用銅網和溝槽來改善平滑銅管的收集情況，並將水套溫度從 30°C 升至 50°C 來減緩冷凝的速度。然而，實驗卻發現溝槽銅管在水套溫度 30°C 和 50°C 時，仍然和平滑銅管的收集情況類似，凝結水受到長型蒸汽柱的阻隔而無法穩定的收集，溝槽似乎沒發揮出銅網般的效果。而在平滑銅管內加上一圈銅網後，發現在實驗開始作動時較為穩定，凝結水經

由銅網輸送至毛細結構而不受到長型蒸汽柱的阻擋而中斷。此外，在實驗中發現在相同的水柱負壓下(4cm 與 7cm)，水套溫度維持在 30°C 與 50°C 時所得到的凝結水的收集量速度是差不多的，這可能是凝結水產生的速度太快一下便累積在管中，而銅網在蒸汽的推動下，將凝結水送往毛細結構的速度有限，一旦凝結水柱累積佔據至水套冷凝區時，由於實驗所提供的水蒸汽是開放式，其壓力約保持在一大氣壓，會造成水蒸汽由另一端出口逸走，而不會強行推動累積在水套區的凝結水柱，這會使得蒸汽的凝結量減少，暫緩了凝結水產生，最後演變為取決於銅網輸送凝結水的能力，來決定水蒸汽凝結的量，其帶走水套冷凝區多少凝結水便會有足量水蒸汽進入凝結區補充，因此在水套溫度在 30°C 與 50°C 時才會有相似的凝結水收集量，要改善這種狀況則需要更大的蒸汽推力、輸送毛細力或水柱負壓。

由於在平滑銅管中加上銅網後，可以改善凝結水的收集情況，因此我們在溝槽銅管內加上一層銅網，觀察凝結水收集量與平滑銅管內加上銅網時有何不同，其結果如圖 3.9 所示，可以發現在水套溫度為 50°C 時，相同水柱負壓情況下，溝槽銅管加上銅網有較佳的輸送速度，在 7cm 水柱負壓時，約可以帶走 86W 的熱量，此時平滑銅管加上銅網約帶走 61W 的熱量。

3-6 內壁具銅網之溝槽銅管與平滑銅管的 重力實驗

我們在平滑銅管和溝槽銅管內壁加上銅網後，進行逆重力和順重力的測試，分別將測試管做角度逆時針 15° 和順時針 15° 的調整。圖 3.10 為水套溫度 50°C 時，平滑銅管內壁加上銅網後在水平、逆重力、順重力時，凝結水的收集狀況，其情況與銅網玻璃管大致相同。在逆時針 15° 時，4cm 的水柱負壓無法提供足夠的壓力將凝結水導入收集瓶中，在順時針 15° 時，7cm 的水柱負壓時，長型蒸汽柱在蒸汽的推動下會突破毛細結構進入 L 型玻璃管，影響收集的穩定性。圖中最快凝結水收集情況為水平 7cm 水柱負壓(約 61W)，而最慢凝結水收集情況為水平 4cm 水柱負壓(約 50W)，因此在有重力影響下，整體散熱能力不至有太大的變動。(銅網玻璃管在水套溫度 30°C 、重力影響下，其散熱功率變動區間更小，在 54W~47W 之間。)然而，圖中在逆重力的情形下，凝結水收集情況明顯與銅網玻璃管的情況不同，平滑銅管在加上銅網後表現出良好的抗重力能力，7cm 水柱負壓不但克服了角度 15° 的重力，其凝結水收集速度比水平、4cm 水柱負壓的情況下還快，且與順時針時 4cm 水柱負壓的情況收集速度差不多，約帶走 54W 的熱量。

圖 3.11 為水套溫度 50°C 時，溝槽銅管內壁加上銅網後在水平、

逆重力、順重力時，凝結水的收集狀況，由圖上四條不同狀況下的曲線來看，其散熱能力由快到慢分別為 86W、60W、55W、44W，可以看出變動的幅度很大，對於重力影響較為敏感，而其中最慢的 44W 為逆重力、7cm 水柱負壓的情形，其抗重力的表現不如平滑銅管內壁加上銅網的情況來的良好。我們排除水平時凝結水收集情況的結果，單獨比較平滑銅管內壁和溝槽銅管內壁加上銅網時，在順重力和逆重力時凝結水的收集情況，其結果整理如圖 3.12 所示，可以發現在順重力情況時，內壁具銅網之溝槽銅管有較佳的散熱功率，而在逆重力的情況時，則是內壁具銅網之平滑銅管有較佳的散熱功率。



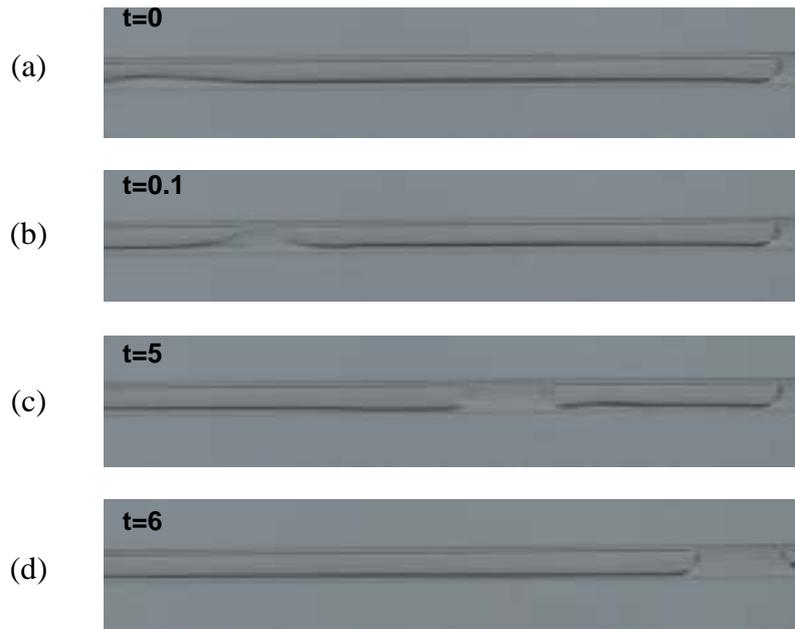


圖 3.1 玻璃管中液柱和蒸汽泡的形
成過程

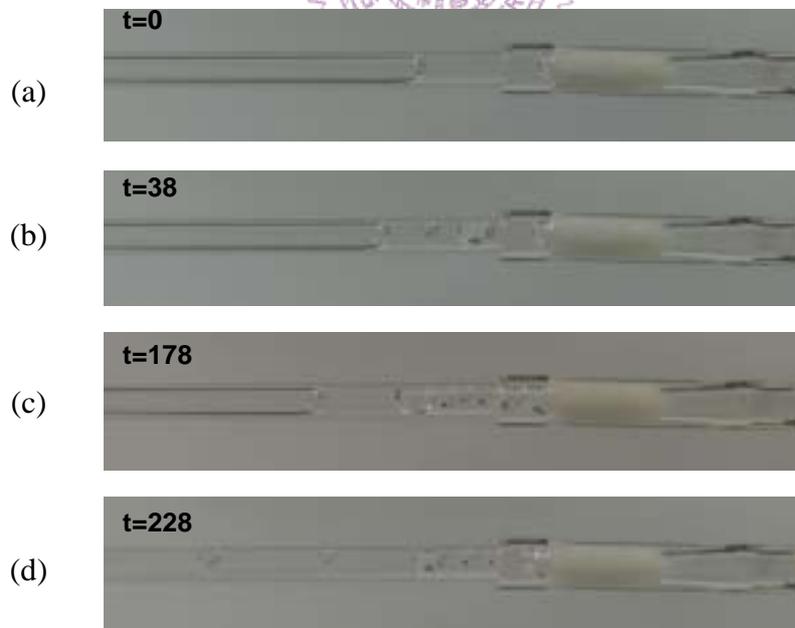


圖 3.2 玻璃管中汽泡流的形成與蒸汽柱
的阻塞



圖 3.3 蒸汽泡的冷卻測試：(a)室溫自然對流的情況 (b)使用冰浴冷卻 20 秒 (c)使用冰浴冷卻 60 秒

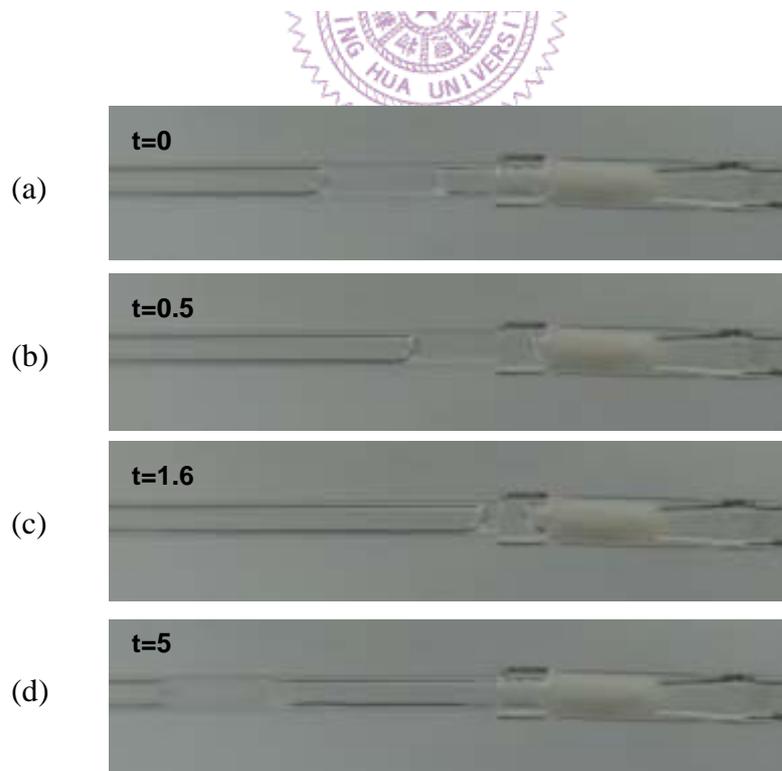


圖 3.4 在 7cm 水柱負壓情況下，玻璃管中凝結水輸送過程

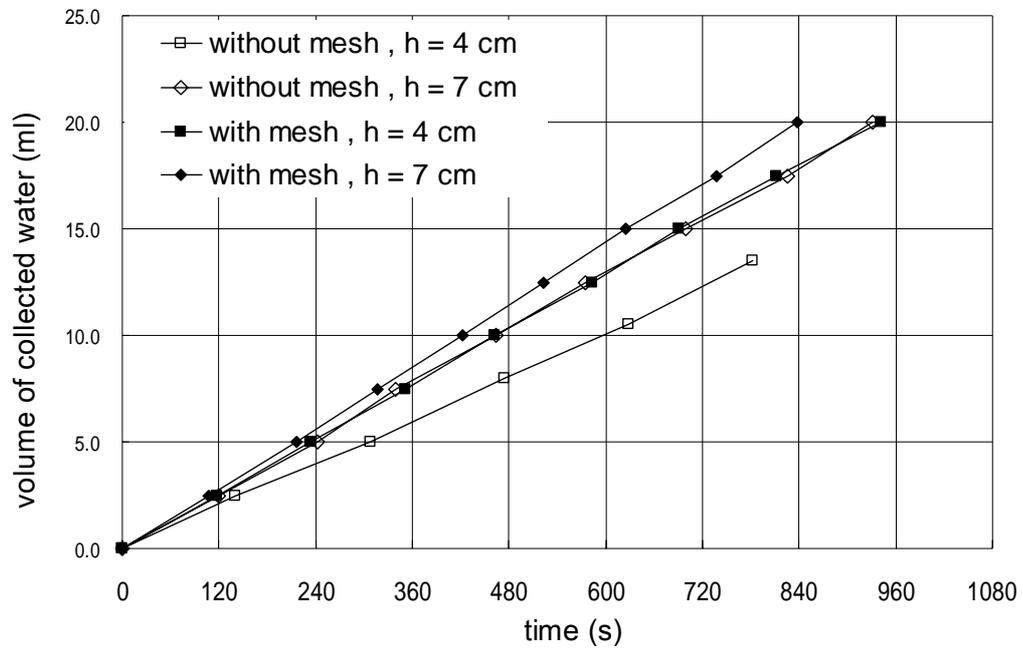


圖 3.5 玻璃管與內壁具銅網之玻璃管凝結水
收集狀況



圖 3.6 內壁具銅網之玻璃管內凝結水柱
和蒸汽柱的分佈情形

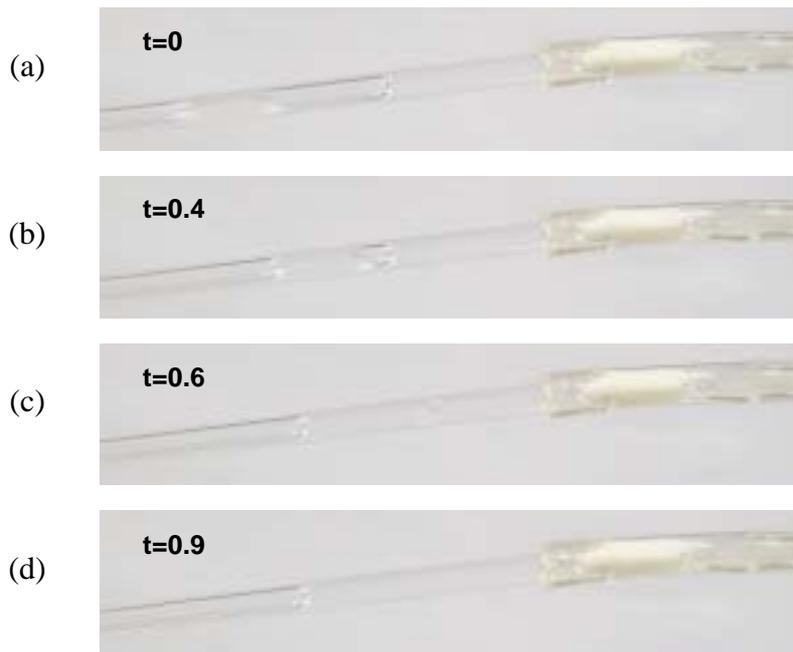


圖 3.7 平滑玻璃管在逆重力時, 蒸汽泡的聚合過程

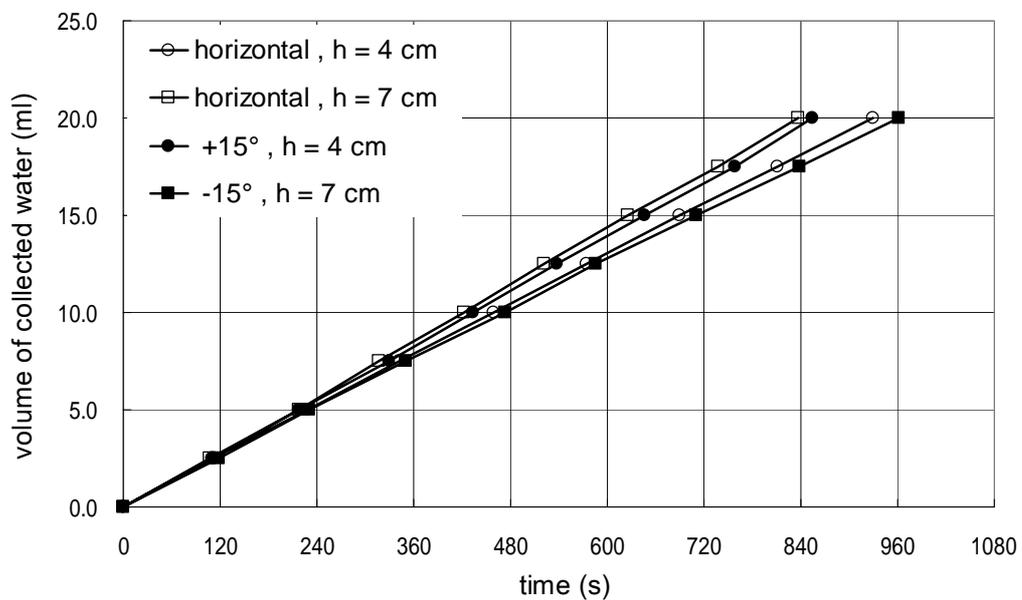


圖 3.8 內壁具銅網之玻璃管在水平、逆重力和順重力時凝結水的收集狀況

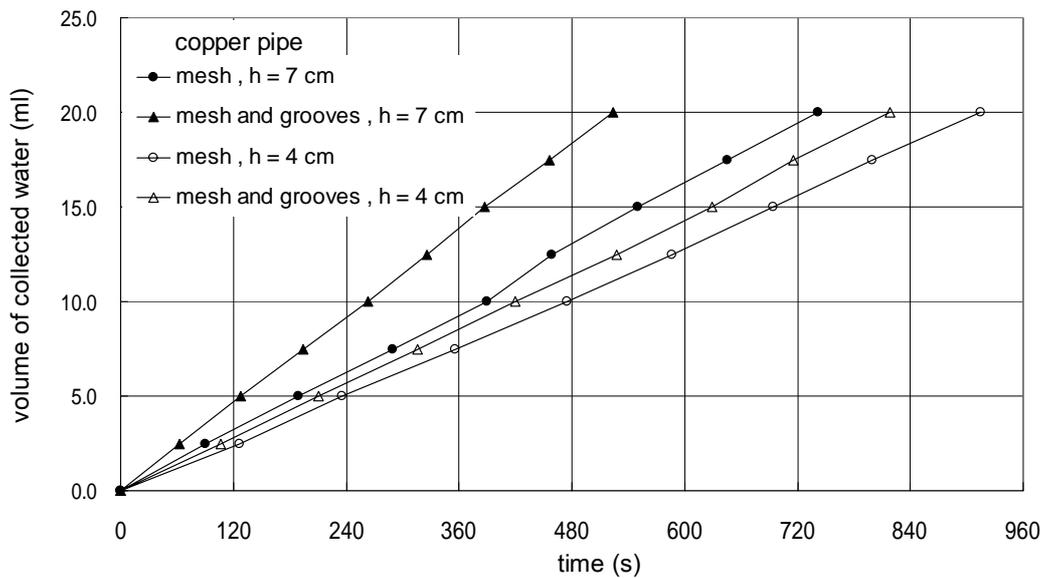


圖 3.9 內壁具銅網之平滑銅管與溝槽銅管凝結水的收集狀況

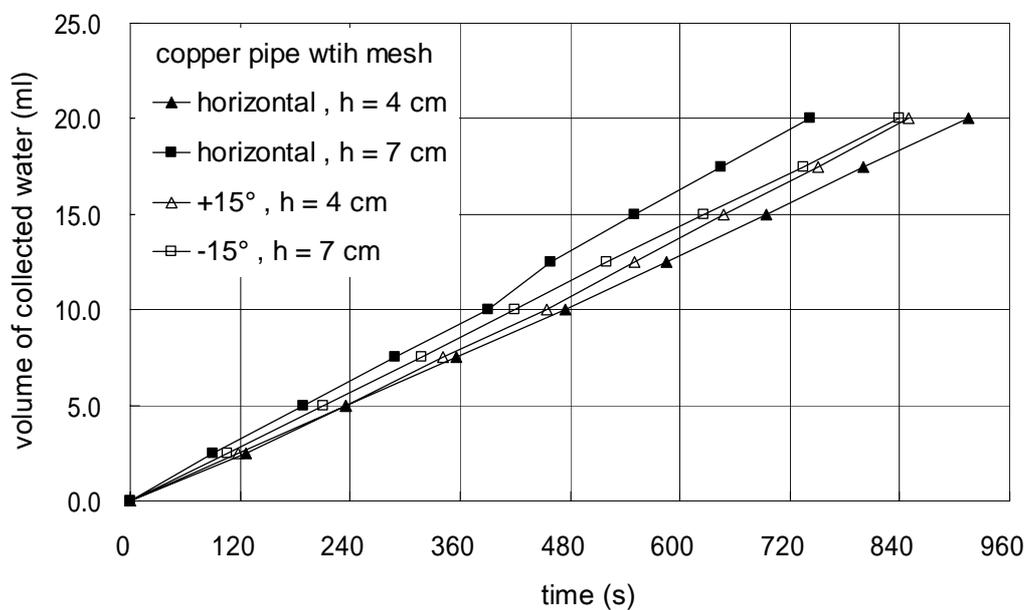


圖 3.10 內壁具銅網之平滑銅管在水平、逆重力和順重力時凝結水的收集狀況

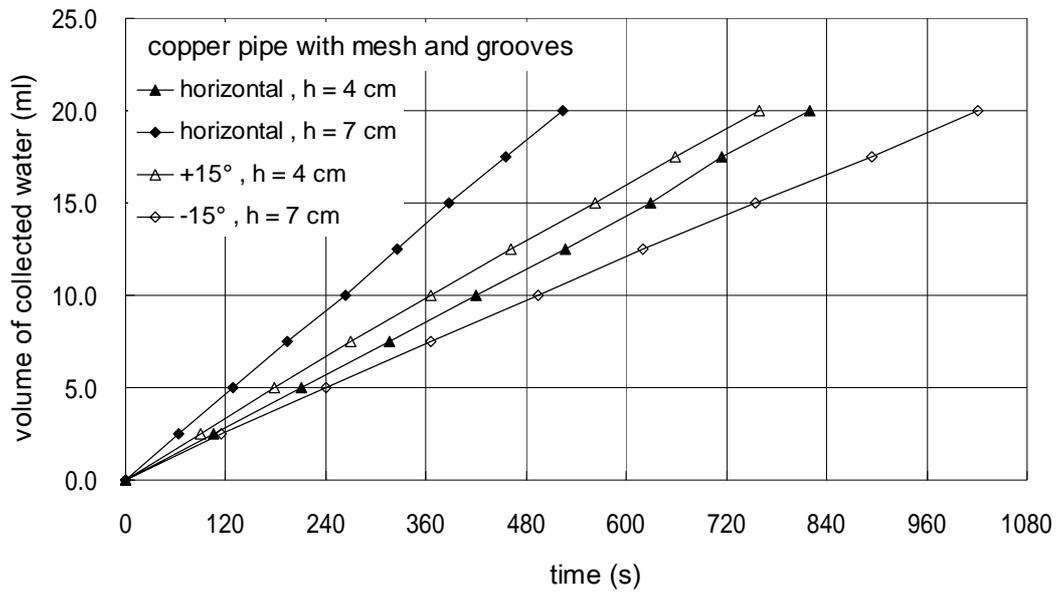


圖 3.11 內壁具銅網之溝槽銅管在水平、逆重力和順重力時凝結水的收集狀況

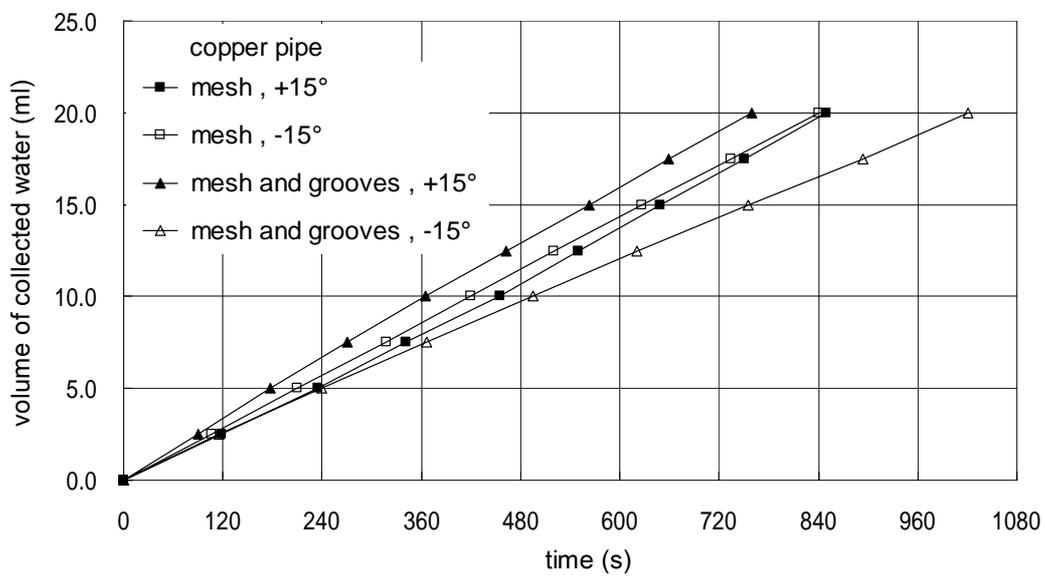


圖 3.12 內壁具銅網之平滑銅管和溝槽銅管在逆重力和順重力時凝結水的收集狀況