

投稿類別：物理類

篇名：鋁箔紙包覆面積對保溫效果的影響

作者：

顏新原 私立光仁高中 二年級 忠班
董庭亨 私立光仁高中 二年級 忠班
李韋辰 私立光仁高中 二年級 忠班

指導老師：

陳信誠

壹、前言

一、研究動機

熱咖啡往往是早上通勤族群青睞的提神飲品。根據相關研究，熱黑咖啡的最佳飲用溫度介於54攝氏度到71攝氏度之間(Borchgrevink et al., 1999)，熱咖啡溫度的快速流失會使得咖啡發酸變苦，因此咖啡店家常使用全包裹式的鋁箔保溫袋以確保飲品品質。但這也引發我們的思考：是否有更環保的包裝方式，可以在使用最少材料的前提下達成相近的保溫效果？鋁箔紙很常被視為保溫材質，但是鋁箔紙是否會因為包覆大小而有所變化尚無確切的證據，因此我們想要藉由實際測量水溫變化，更清楚瞭解鋁箔包覆程度與保溫效能是否呈正相關。立足環境部推動的「資源循環零廢棄」與聯合國SDGs第十二項「責任消費與永續發展」，我們希望基於兼顧經濟效益與環境保護的角度，來探討飲品包裝材料的未來應用。

二、研究目的

- (一) 探討鋁箔紙面積對保溫效果之影響
- (二) 探討鋁箔紙面積保溫效果之極限
- (三) 探討如何在最少包覆面積之下達到最大效益

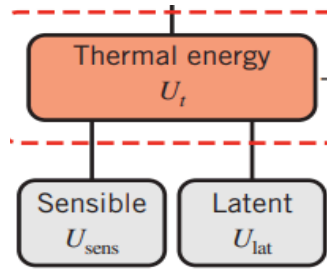
貳、文獻探討

咖啡降溫是一個複雜的多路徑的能量流失過程。因此文獻探討將從散熱系統的熱量平衡與散熱途徑、鋁箔自身的材料特性、並聯熱阻效應與邊際效益的遞減等四方面進行介紹與探討。

一、散熱系統的熱量平衡與散熱途徑

在研究容器的保溫效果時，我們首先要理解的是散熱系統的原理。熱能可分成顯熱（Sensible Heat）與潛熱（Latent Heat)(Incropera,2017)。感熱是指物質在吸熱或放熱過程中，不發生相變但會導致溫度升高或降低的熱量（如水加熱）；潛熱則指物質在吸熱或放熱過程中，發生相變但溫度不變的熱量（如冰融化）。

圖一：熱能類型分類



圖一資料來源：Bergman, T. L., Lavine, A. S., & Incropera, F. P. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.

根據熱傳學基本原理，當熱水置於無蓋容器，放置在靜止空氣定溫空間中散熱時，熱量的散失由三個主要的途徑同時運作。第一途徑體現在熱水溫度的下降過程中，屬於感熱的流失；第二途徑是容器表面對周邊環境（空氣、桌面等）的熱輻射、熱傳導之作用；第三途徑則是開放頁面液體蒸發帶走的大量潛熱。因此我們對於熱水散熱系統的分析基於評估與涉及對這三種散熱路徑的阻隔。

二、鋁箔自身的材料特性

在眾多不同的保溫材料中，鋁箔材料介入的阻隔點在於對熱輻射路徑的屏蔽。根據斯凡特-波茲曼定律：

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

其中 q_{rad} 指熱水表面的總輻射散熱量（ q_{rad} 越大保溫效果越差）， ϵ 代表材料的放射率， σ 為斯凡特-波茲曼常數($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$)， A 是包覆材料部分的表面積， T_s 為液體溫度，而 T_{sur} 則是指液體散熱環境的環境溫度。其中散熱量與材料表面的放射率（Emissivity）成正比。

圖二：常見材料的放射率數據

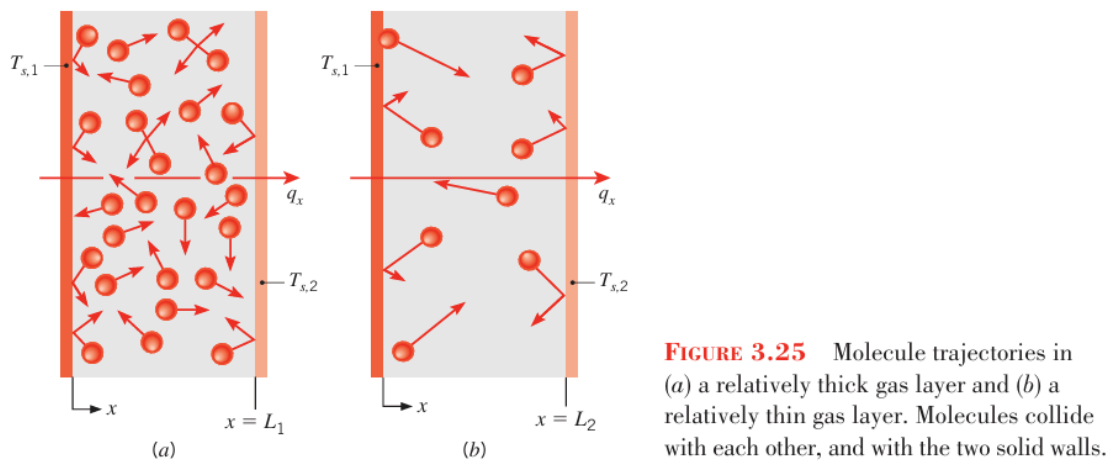
Surface Material	Emissivity Coefficient - ϵ -
Alloy 24ST Polished	0.09
Alumina, Flame sprayed	0.8
Aluminum Commercial sheet	0.09
Aluminum Foil	0.04
Aluminum Commercial Sheet	0.09
Aluminum Heavily Oxidized	0.2 - 0.31
Aluminum Highly Polished	0.039 - 0.057
Aluminum Anodized	0.77
Aluminum Rough	0.07
Aluminum paint	0.27 - 0.67
Paper	0.93
Plaster, rough	0.91
Plastics	0.90 - 0.97

圖二資料來源：Emissivity Coefficients of Common Materials: Data & Reference Guide.March 13,2026

通過查詢表格可以發現一般我們用作液體盛放容器材料如陶瓷與紙材，其 ϵ 值高達0.90以上，散熱能力極強，是理想的散熱用容器。但用於保溫上時，由於鋁箔的 ϵ 值僅有約0.04。這意味著如果將鋁箔緊貼於容器外側，能近乎完全消除該覆蓋區域的輻射熱損失，實務上達成極低的散熱量，達成極高的保溫作用效果。

此外，包裹在杯器上的鋁箔會不可避免地在包裹縫隙間造成微小的靜止空氣隔層，由於空氣的熱傳導係數（k）極低，此靜止空氣隙額外提供了優異的傳導熱阻，使鋁箔成為兼具阻絕輻射與傳導的有效介面。

圖三：靜止空氣層保溫效果原理的示意圖

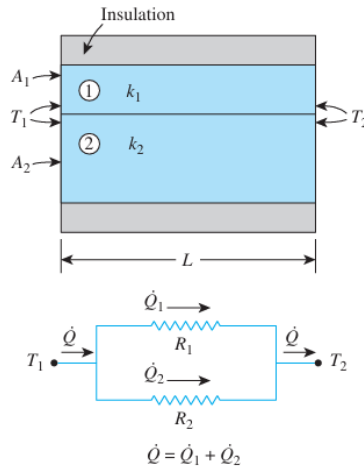


圖三資料來源：《Fundamentals of Heat and Mass Transfer》(P175)

三、並聯熱阻效應

除了要點二所言鋁箔自身在保溫效果的優勢，為分析與比較整體散熱效果，仍應結合對散熱網路(Thermal Resistance Network)系統的分析。

圖四：並聯熱阻效應示意圖（以兩個並聯層的熱阻網絡為例）



圖四資料來源：《Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications》（P158）

根據Incropera等人對複合牆體熱傳的探討結論，我們可以結合熱傳學基本原理類推，將一個部分包裹的容器視為一個多支路的並聯熱傳系統：系統的總熱阻 (R_{tot}) 是由已包覆鋁箔區 ($R_{wrapped}$)、未包覆之裸露區 ($R_{unwrapped}$)，以及頂部開口處 ($R_{opening}$) 三者的熱阻並聯所構成，其數學關係可表示為：

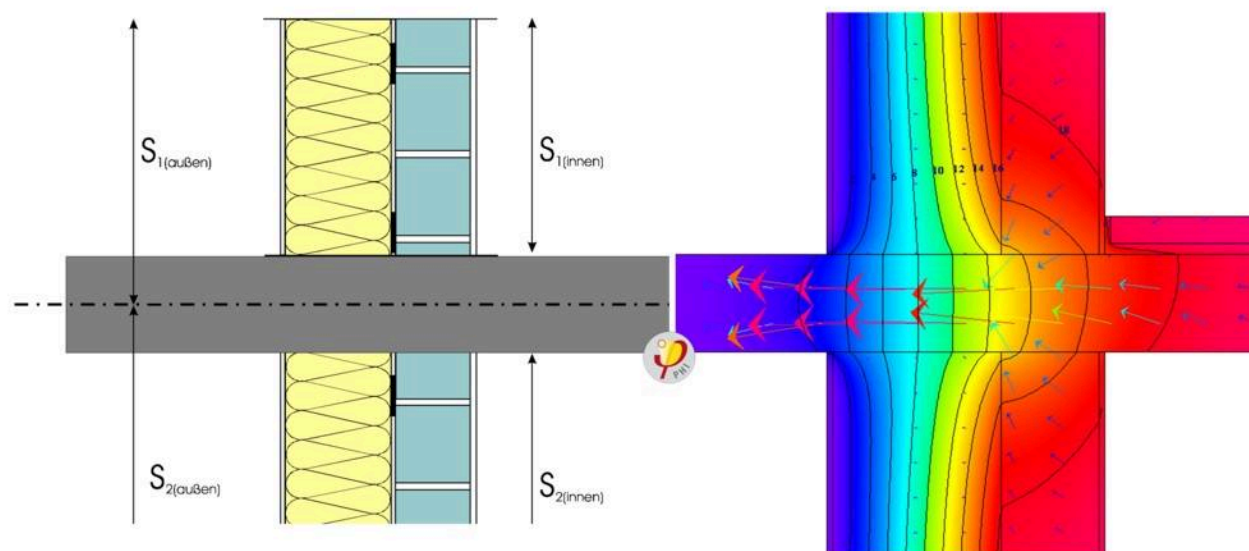
$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{wrapped}} + \frac{1}{R_{unwrapped}} + \frac{1}{R_{opening}}$$

由於本系統將熱傳系統類推為電路系統（散熱量近似等同於電流，熱阻近似等同於電阻）(Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J., 2015)，因而根據歐姆定律，在這個模型中，熱量應會傾向從熱阻最小、散熱最快的「捷徑」流失。

四、邊際效益的遞減

結合要點三所言之並聯熱阻效應，我們可以適切的推論出”邊際效應”的出現。當容器進行初步的局部包裹（例如包裹杯身底部與 1/4 面積）時，該區域的輻射與傳導散熱能力被大幅削弱，使得 $R_{wrapped}$ 急遽增大，這會直接導致系統總熱阻 (R_{tot}) 產生第一次顯著的提升。

圖五：熱橋效應示意圖



圖五資料來源：Facebook: BWK沃科綠建築設計顧問（2015年10月5日）熱橋現象(Thermal Bridging)

然隨著包裹面積持續增大，整體系統的散熱會進入「控制熱阻(Controlling resistance)」階段，當大部分杯身都被包裹後，以並聯熱阻之理論，熱阻極小的開口處（伴隨劇烈的蒸發與對流）與剩餘的未包裹處，會成為整個系統熱量流失的主要途徑，進而出現以保溫材料的表面積增加這一途徑中，使保溫能力進一步增加的瓶頸，此即為熱橋效應在液體散熱上的一種體現。因此可合理推斷若對容器進行更大面積的包裹（例如包裹杯身1/2甚至杯身全包），對散熱能力的提升貢獻也已微乎其微，故而可結合文獻中的物理模型預測，在未封閉開口的前提下，盲目增加杯身的絕熱面積，其保溫效益將迅速飽和，並無法獲得與初步包裹時同等的提升幅度，不具備更高的實用效益。

參、研究方法

一、文獻分析法：

通過《Science Direct》等科學月刊雜誌了解咖啡口感的最佳區間立定探究方向，將研究方向確定在探討鋁箔包裹面積與液體保溫效果的關係，以熱傳學經典教材《Fundamentals of Heat and Mass Transfer》(Bergman, T. L., Lavine, A. S., & Incropera, F. P, 2017).與《Heat and mass transfer: fundamentals and applications》(Yunus Cengel, & Afshin J. Ghajar, 2020)作為理論依據，從感熱與潛熱，熱阻并聯模型與散熱瓶頸效應，鋁箔與水本身的材料特性，靜止空氣層的附加效應等方面剖析包裹材料面積的優化極限，配合對企業與政府環保政策的解讀，得到最具綜合效益的具有商業價值的結論。

二、實驗研究方法：

透過自己擬定實驗，將實驗分五組：包裹面積 0cm^2 、 73cm^2 、包裹面積 102cm^2 、包裹面積 131cm^2 和包裹面積 160cm^2 ，並在相同環境下測量從初始溫度 70 攝氏度，每三分鐘記錄一次水溫，直到放置時間到 30 分鐘共做 3 次實驗並取平均值，最後分析保溫效果。

三、研究架構

圖六：研究架構



圖六資料來源：研究者自行繪製

四、設計實驗



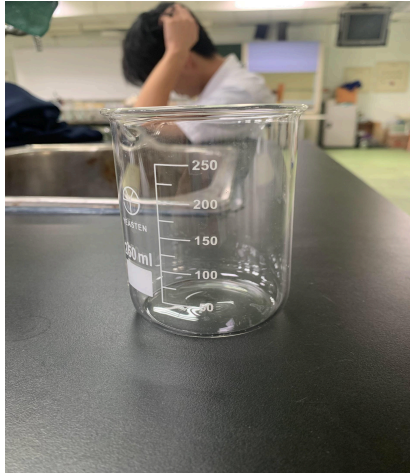


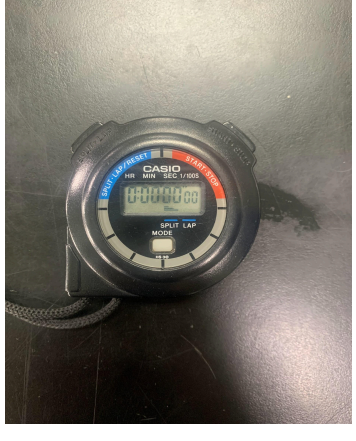
(一) 實驗變因

- 1.控制變因：水的體積（ 200 毫升）、初始溫度（ 70°C ）、燒杯規格（容積 250 毫升）、箔紙亮面朝內、溫度計位置（固定於水面下 3cm 且位於燒杯中心）
- 2.操作變因：鋁箔紙包覆面積（包裹面積 0cm^2 、包裹面積 73cm^2 包裹面積、 102cm^2 、包裹面積 131cm^2 和包裹面積 160cm^2 ）
- 3.應變變因：每三分鐘測量的水溫

(二) 實驗器材

溫度計架、溫度計、鋁箔紙、 250 毫升燒杯、加熱版、碼表

圖七：實驗器材表格

溫度計架	鋁箔紙	250ml燒杯
		
溫度計	加溫板	碼表
		

圖七資料來源：研究者自行整理

(三) 鋁箔紙的製作與包覆

在開始實驗前，先測量其直徑（7.5cm）與高度（9.5cm）以做為推算包覆面積的依據，通過計算得知無包覆、包覆面積1/2、1/4、3/4、全部包覆，實際面積依序為0cm²、73cm²、102cm²、131cm²、160cm。在製作包覆面積1/2、1/4、3/4中，將鋁箔紙圍繞在燒杯四周，再使用剪刀沿著標線裁剪，讓鋁箔紙能完美地環繞燒杯，避免因重疊過多或空隙過大而影響熱傳導的測量結果，最終連同底部一同包覆。而在完全無包覆鋁箔紙的狀態下，底部也沒有包覆。

(四) 步驟：

- 1.將四杯相同的250毫升燒杯裝滿200毫升的水。
- 2.將其使用加熱板統一加熱至70°C。

鋁箔紙包覆面積對保溫效果的影響

3.將燒杯以亮面朝內包覆不同面積（ 0cm^2 、 73cm^2 、 102cm^2 、 131cm^2 、 160cm^2 ）的鋁箔紙。

4.將其置於相同環境之下，利用碼表計時每三分鐘，用溫度計測其溫度（溫度計於燒杯底正中間向上 2cm ）並記錄下來。

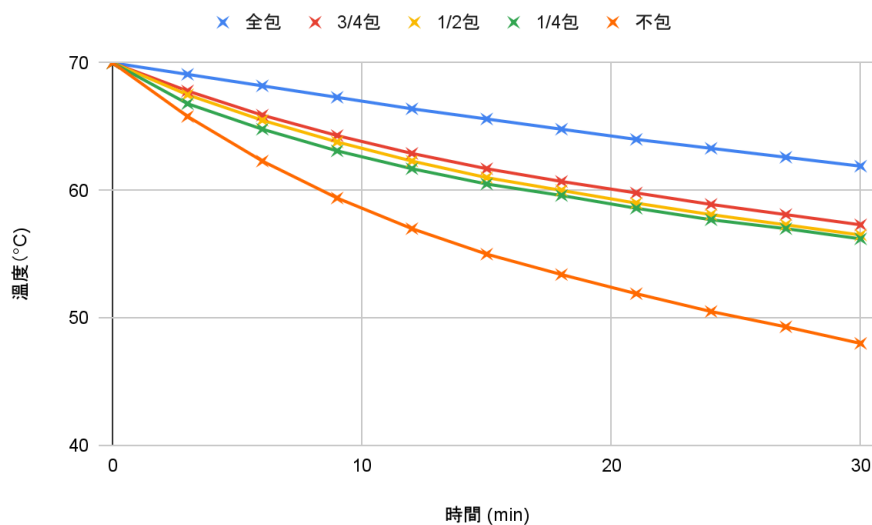
肆、研究分析與結果

圖八：不同包覆面積每三分鐘水溫記錄圖表

包覆面積 160cm^2	0分鐘	3分鐘	6分鐘	9分鐘	12分鐘	15分鐘	18分鐘	21分鐘	24分鐘	27分鐘	30分鐘
溫度($^{\circ}\text{C}$)	70.0°C	68.5°C	67.5°C	66.3°C	65.0°C	64.2°C	63.1°C	64.0°C	63.3°C	62.6°C	61.9°C
包覆面積 131cm^2	0分鐘	3分鐘	6分鐘	9分鐘	12分鐘	15分鐘	18分鐘	21分鐘	24分鐘	27分鐘	30分鐘
溫度($^{\circ}\text{C}$)	70.0°C	67.8°C	65.9°C	64.3°C	62.9°C	61.7°C	60.7°C	59.8°C	58.9°C	58.1°C	57.3°C
包覆面積 102cm^2	0分鐘	3分鐘	6分鐘	9分鐘	12分鐘	15分鐘	18分鐘	21分鐘	24分鐘	27分鐘	30分鐘
溫度($^{\circ}\text{C}$)	70.0°C	67.5	65.5	63.8	62.3	61.0	60.0	59.0	58.1	57.3	56.5
包覆面積 73cm^2	0分鐘	3分鐘	6分鐘	9分鐘	12分鐘	15分鐘	18分鐘	21分鐘	24分鐘	27分鐘	30分鐘
溫度($^{\circ}\text{C}$)	70.0°C	66.8	64.8	63.1	61.7	60.5	59.6	58.6	57.7	57.0	56.2
包覆面積 0cm^2	0分鐘	3分鐘	6分鐘	9分鐘	12分鐘	15分鐘	18分鐘	21分鐘	24分鐘	27分鐘	30分鐘
溫度($^{\circ}\text{C}$)	70.0°C	65.8	62.3	59.4	57.0	55.0	53.4	51.9	50.5	49.3	48.0

圖八來源：研究者自行整理

圖九：不同包覆面積每三分鐘水溫記錄折線圖



圖九資料來源：研究者自行整理

根據圖8圖和圖9，能看出包覆面積 $1/2$ (102cm^2)、 $1/4$ (73cm^2)、 $3/4$ (131cm^2) 的折線十分相近，可知其三種包覆面積保溫效果相近，完全未包覆鋁箔面積的溫度明顯低於包覆面積為 160cm^2 ，顯示鋁箔紙確實具有保溫效果，雖鋁箔屬金屬材質，其熱傳導係數較大，但由於其表面放射率(High Emissivity)極低之特性，能有效反射熱輻射，補償並抵消了因傳導與對流所散失的熱量，證實鋁箔在液體保溫上具有實質貢獻。此外，我們認為包覆面積 102cm^2 和 131cm^2 面積的燒杯，其最終水溫差異不大，依據實驗結果推測鋁箔紙主要透過反射熱輻射以降低水的熱量散失。環境在一定條件之下且鋁箔包覆面積達到一定情況下，其保溫效果的差異不明顯。當包覆面積達到 102cm^2 至 131cm^2 之後，增加面積所帶來的溫度降幅減緩會變得非常明顯，鋁箔紙主要的保溫機制是阻擋熱輻射。當你包覆了大部分的側面與底部時，主要的輻射路徑已經被切斷。

伍、研究結論與建議

一、研究結論

根據研究結果顯示，因為包覆面積 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 的保溫效果相近，所以依照經濟層面考量，能夠選擇包覆面積 $1/4$ 做為最佳方案。此做法不僅能顯著降低材料成本、減少資源浪費，更落實了前言所述「兼顧經濟效益與環境保護」之研究初衷。此外，該方案能確保咖啡在30分鐘內維持於最佳飲用風味區間，成功達成實驗預期之研究目的。

二、研究建議

根據研究結果分析和實驗過程中發現的問題，我們經過反思對本實驗提出以下建議：

- (一)、因實驗環境溫度等外在條件之下，可能影響其實驗結果，故在下次實驗應保持在相同的環境，能夠確保實驗結果更加精確。
- (二)、在實驗中操作器材有限，所以無法那麼準確的控制起始溫度，所以在日後實驗能使用恆溫板維持其初始溫度。

三、研究展望

由實驗數據發現，鋁箔紙覆蓋面積保溫效果在 102cm^2 至 131cm^2 無明顯的差異且與全部包覆相差溫度不足以影響咖啡風味。由此我們得到的結論是，想要達到最好的效果不需要包覆那麼多鋁箔紙，故在考量經濟層面與環境保護的角度

之下，我們採取使用鋁箔紙包覆面積 $1/4$ (73cm^2) 作為最佳方案，同時兼顧成本與效益，又能將咖啡維持在最佳風味區間，達到先前動機所述的目的。

陸、參考文獻

- 一、Emissivity Coefficients of Common Materials: Data & Reference Guide. March 13, 2026, https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html
- 二、Bergman, T. L., Lavine, A. S., & Incropera, F. P. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- 三、Yunus Cengel, & Afshin J. Ghajar (2020). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Education.
- 四、BWK 沃科綠建築設計顧問 (2015年10月5日)。熱橋現象(Thermal Bridging) [圖片]。Facebook。 <https://reurl.cc/np0W6d>
- 五、Borchgrevink, C. P., Susskind, A. M., & Tarras, J. M. (1999). Consumer preferred hot beverage temperatures. *Food Quality and Preference*, 10(2), P121. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950329398000536?via%3Dihub>