

玻璃門冷藏展示櫃氣流量化分析

Airflow Quantization Analysis of Glass Door Refrigerated Display Cabinets

摘要：

隨著國人生活型態轉變，商用冷櫃年銷量大幅增長。既有玻璃門冷櫃硬體設計長年被國內製造商所忽略，未針對櫃內氣流分布進行分析。實驗發現現有冷櫃選配風扇與流場設計並無法讓氣流穩定流至最下層，易在上方形成短循環，且氣流左中右明顯不均勻。本文透過不同實驗分析並量化玻璃門冷藏櫃內部氣流狀況以及開門時熱氣入侵量，作為後續改善內部流場與降低外界熱氣入侵影響之評估指標。

關鍵字：玻璃門冷藏展示櫃、熱氣侵入、氣流、短循環

Abstract

With the changing lifestyle of the people in the country, the annual sales of commercial refrigerated cabinet have seen a significant increase. The hardware design of existing glass door refrigerated display cabinet has long been overlooked by domestic manufacturers, and analysis of the internal airflow distribution has not been carried out. Experiments have revealed that the current refrigerator configurations with fans and flow designs fail to ensure a stable flow of air to the lowest level, leading to the formation of short circulation at the top and significant non-uniformity in the airflow from left to right. This paper utilizes various experimental analyses to quantify the internal airflow conditions of glass-door refrigerated display cabinet and the extent

of heat infiltration when the door is opened. These findings serve as assessment indicators for subsequent improvements in internal flow patterns and the mitigation of the impact of external heat infiltration.

Keywords : Glass door refrigerated display cabinet, infiltration, airflow, short circulation.

一、前言

隨著國人生活型態轉變，商用冷櫃年銷量大幅增長，較五年前增長近 50%[1]。其中以玻璃門冷藏櫃數量最多，於各式餐廳或超商超市等食品零售業中都可以見到。既有玻璃門冷櫃硬體設計長年被國內製造商所忽略，未針對櫃內氣流分布進行分析，因此耗電與溫度表現皆不佳。本文透過不同實驗分析並量化玻璃門冷藏櫃內部氣流狀況以及開門時熱氣入侵量，作為後續改善內部流場與降低外界熱氣入侵影響之參考。

二、研究標的

本文針對採用泰勒式設計之玻璃門冷藏櫃探討其氣流狀況，高度 2,065 mm、寬度 1,260 mm、深度 830 mm，其構造如圖 1 所示。此為國內最常見的类型，風扇置於蒸發器後，吸入氣流由前方(玻璃門側)往後方(背板側)移動，途中流經鰭管式熱交換器進行冷卻，再沿著壁面向下至每層棚架。理想上氣流若能流至最下層棚架，並均勻分布到每一層層棚架，將可達到良好的櫃體均溫性。但實際量測發現氣流易於上方區域形成短循環(short circulation)，冷氣流高度集中於第一、二層，導致下層貨品溫度偏高。



圖 1、泰勒式玻璃門冷藏櫃

三、量測結果

(a) 內部氣流分布量測

本文使用手持式風速計(Testo 440 風速計)量測各層氣流，分成左側、中間與右側，各自又有三個量測點做平均，量測結果如圖 2 與圖 3。第一層之垂直風速最快，可達 1 m/s 左右，但風速自第二層開始便大幅度衰減，前三層中間位置風速仍保有 0.6 m/s 以上，但至最下方第六層甚至不到 0.1 m/s ，代表現有冷櫃選配風扇與流場設計並無法讓氣流穩定流至最下層，易在上方形成短循環。此外，氣流左中右明顯不均勻，各層都是中間風速最快，左右兩側幾乎沒有氣流。水平方向風速同樣也出現氣流集中在上層的趨勢，且氣流左中右不均勻的現象更嚴重。各層均為右側風速最高，第五、六層下甚至幾乎沒有量測到左側風量。據上述量測結果可以發現，冷氣流難以抵達冷櫃之下層區域，且左右不均勻，需要氣流設計讓氣流吹出後能均勻分布並抵達最下層。

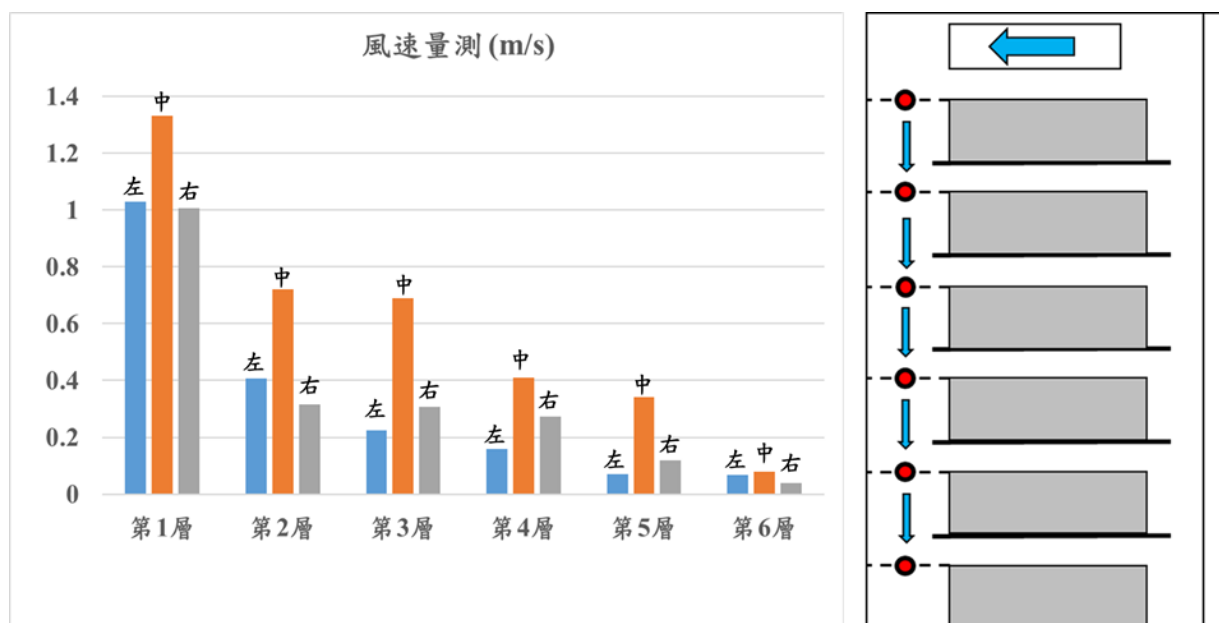


圖 2、玻璃門冷藏櫃垂直風速量測

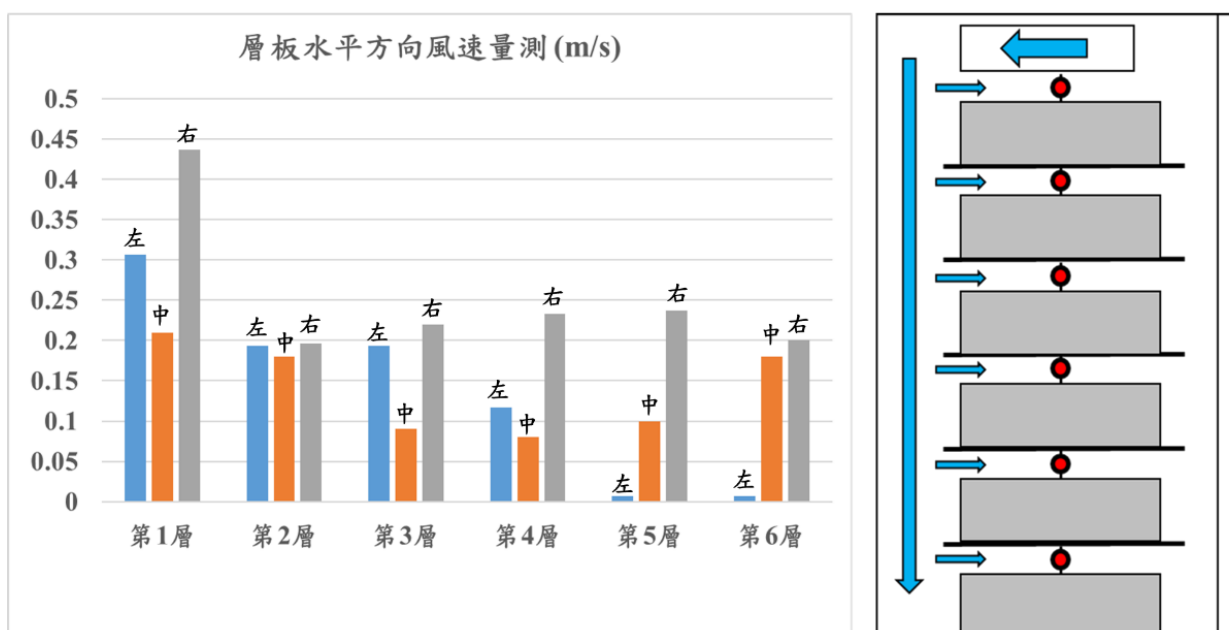


圖 3、玻璃門冷藏櫃水平風速量測

(b) 外氣侵入量量測

本文參考研究文獻[2]在冷櫃內部加裝一發熱源(Q_{supply})，加熱櫃內空氣溫度高於櫃外環境溫度。此時櫃內高溫空氣主要會有兩種散熱方式，分別為透過櫃體熱

傳導流出(Q_{env})與外部冷空氣侵入所降溫(Q_{inf})，能量守恆方程式可以寫成：

$$Q_{supply} = Q_{env} + m_{inf} C_p (T_{RDC} - T_{amb}) \quad (1)$$

其中 m_{inf} 則代表外部空氣入侵量(kg/s)， C_p 表示空氣比熱(J/kg·°C)， T_{amb} 表示環境溫度(°C)， T_{RDC} 表示櫃內空氣溫度(°C)，而 Q_{env} 又能表示成：

$$Q_{env} = K_{env} (T_{RDC} - T_{amb}) \quad (2)$$

其中 K_{env} 為櫃體庫板之熱傳導係數(W/°C)，此值越大代表透過櫃體的熱洩漏越多，後續將由實驗求出櫃體之 K_{env} 數值。

當開啟玻璃門時，外側相對較低溫的空氣將進入櫃內，櫃內溫降越多代表外部流入氣流量越多。因此，根據式(1)與(2)的移項整理，即可得出外氣入侵量如下：

$$m_{inf} = [(Q_{supply} - K_{env} (T_{RDC} - T_{amb})) / [C_p (T_{RDC} - T_{amb})] \quad (3)$$

實驗系統架設如圖 4，本計畫使用 175W 電熱棒作為櫃內加熱源 Q_{supply} ，量測 3 點櫃內溫度取平均值作為 T_{RDC} ，並維持環境溫度 T_{amb} 在 23°C。將進行 3 種實驗，以釐清開門過程中所侵入的空氣量，詳細介紹如下：

1. 實驗 A-玻璃門關閉(門縫全封閉)

當玻璃門關閉時，外氣仍可透過玻璃門縫少量滲透到櫃內，因此需將門縫使用膠條封死，如圖 5(a)，以確保不會有外氣進入櫃內。如此一來，熱傳途徑僅剩下透過櫃體庫板的熱傳導，根據式(4)即可以求出庫板熱傳導係數 K_{env} 。

$$K_{env} = (Q_{supply}) / (T_{RDC} - T_{amb}) \quad (4)$$

2. 實驗 B-玻璃門關閉

玻璃門維持關閉，如圖 5(b)，然而部分外氣仍可透過玻璃門門縫滲透至櫃內，因此可以透過公式(3)計算由門縫進入之外氣入侵量。

3. 實驗 C-玻璃門週期開門

根據 CNS 10798 測試標準每 6 分鐘開門 15 秒(第 0 分鐘開左門，第 3 分鐘開

右門，第 6 分鐘開左門，依此類推[3])，反覆執行直到櫃內溫度呈現穩態，如圖 5(c)。同樣可根據公式(3)取得開門期間的外氣入侵量，但此外氣入侵量包含閉門時期的門縫洩漏量與開門時期的入侵量，若想取得開門動作所導致的外氣入侵量，需由實驗 C 計算所之外氣入侵量扣除實驗 B 所得之門縫洩漏量。



圖 4、外氣入侵量量測實驗



圖 5、(a) 實驗 A-門縫封閉門關閉、(b)實驗 B-門關閉、(c)實驗 C-週期開門

實驗結果總整理如表 1，透過上述實驗可量化玻璃門冷藏展示櫃之外氣入侵量，作為後續改善措施之評估指標。

表 1、外氣入侵分析總整理

	實驗 A	實驗 B	實驗 C
實驗目的	櫃體熱傳導係數	關門時門縫侵入量	開門時入侵量
環境溫度(°C)	23		
櫃內溫度(°C)	50.94	50.90	38.36
總外氣入侵量(kg/s)	-	0.0002	0.1224
開門外氣入侵量(kg/s)	-	-	0.1222

四、結論

本文透過實際量測發現既有玻璃門冷藏櫃存在氣流短循環之問題，並無法讓氣流穩定流至最下層，且氣流左中右不均勻。需要氣流設計讓氣流吹出後能左右均勻分布並抵達最下層，以提升櫃內均溫性。此外，透過簡易能量守恆定律量化每次開門時之外氣入侵量，可做為後續改善櫃體氣流設計之評估指標。

五、參考文獻

- [1] 工業產銷存動態調查，經濟部統計處
- [2] Månsson, T., Kalagasidis, A. S., & Ostermeyer, Y. (2021). Co-Heating method for thermal performance evaluation of closed refrigerated display cabinets. *International Journal of Refrigeration*, 121, 51-60.
- [3] CNS 10798，冷凍冷藏展示櫃—分類、要求及試驗條件，2014