

外殼玻璃天窗及側窗日射透過量與耗能之研究

*陳海曙 (Chen, Hai-Shu)

中國科技大學建築系所副教授

陳文進(Chen, Wen -Jin)

中國科技大學建築研究所碩士生

摘要

台灣位在低緯度亞熱帶，近年來因為地球暖化，建築節能減碳成為重要設計目標，然而有些建築設計卻取經高緯度地區歐美先進國家的外殼設計，常採取開設大面積天窗及大片垂直側窗，企圖增加全年自然採光以降低照明使用來達到節能目的。但到了夏季也易讓太陽輻射熱穿透玻璃到達室內，反而增加空調之用電量。於是為了降低空調耗電，又引進所謂的節能玻璃，像是微反射玻璃、吸熱玻璃、LOW-E玻璃、霧面玻璃、網目玻璃等設計。然而這對台灣亞熱帶氣候高量太陽輻射，到底效果如何，目前尚欠缺實驗證據來比較，成為建築節能設計上的盲點與弱點。因此外殼節能玻璃窗之實際太陽熱負荷影響大小，以及對建築空調節能效果等之本土資料，是亟須去研究的。本研究將各玻璃白天之透過日射量進行實測，再逐時相加總得到白天玻璃透過日射熱能量。實驗結果得知，玻璃水平面一日之透過日射熱能量最高，可達太陽輻射熱量的84%，其次為東向的55%，北向最少僅9%。Low-e雙層玻璃與微反射吸熱玻璃之一日透過日射熱能量為太陽輻射熱的26~3%，皆為最低者，故其太陽輻射之遮蔽性能在各方位皆較佳。

Study of Solar Heat Gain and Energy Consumption of Skylight and Wall Window with Various Glasses

Abstract

Although Taiwan locates at low latitude of the subtropical area, many building energy saving design responding to the global warming by using skylight and large size of glass window to low down lighting energy as high latitude countries does. However glass window attempt to gain more solar heat than daylight in this area, so that low energy glasses, such as reflected glass, tinted glass, non-transparent glass, printed glass, and low-e glass are eventually introduced to reduce the solar heat gain indoor. In this study, the solar heat gains of the glasses in the skylight and wall window are measured and their energy consumption for air-conditioning are converted. The study results show that the solar heat gain of horizontal skylight glass reaches 84% of outdoor solar radiation, and the east side window is 55%, and the north side window is only 9%. However, both the low-e glass and the reflected/tinted glass have the lowest solar heat gain at skylight and all four side windows.

Keywords : window glass, energy consumption, solar heat gain, skylight

一、 研究動機

台灣位在亞熱帶，每年夏天炎熱高溫長達四個月，室內熱舒適情況不佳，所以一直都是空調使用時間最多的季節。此時白天太陽多在建築物之正東、正西、正頂部上方，因此外殼東西牆面、屋頂受照射之太陽輻射熱量高，很容易增加室內熱負荷及讓室內氣溫更增大，因而增加空調負荷量，長期下來造成空調之耗能及碳排增大。因此為達建築節能的設計要求，必須先從建築外殼開窗玻璃的太陽熱量控制著手。

近年來因為地球暖化，建築節能減碳成為重要設計目標，然而有些建築設計卻取經高緯度地區歐美先進國家的外殼設計，常採取開設大面積玻璃天窗，以及大片垂直側窗，企圖增加全年自然採光以降低照明使用來達到節能目的。但往往這種建築設計，在台灣到了夏季長達四、五個月時間，也易讓太陽輻射熱穿透玻璃到達室內，反而增加空調之用電量。於是為了降低空調耗電，又引進所謂的節能玻璃，像是微反射玻璃、吸熱玻璃、LOW-E 玻璃、霧面玻璃、網目玻璃等設計。然而這對台灣亞熱帶氣候高量太陽輻射，到底效果如何目前尚欠缺實體之實驗證據來比較，所以玻璃開窗設計手法之取捨，成為建築節能設計上的盲點與弱點。因此外殼節能玻璃窗之實際太陽熱負荷影響大小，以及對建築空調節能效果等之本土資料，是亟須去研究建立的。

二、 玻璃熱性能與空調耗能理論

建築外殼的熱負荷，主要是經由實牆、屋頂、玻璃窗進入室內，成為空調系統的熱負荷，其中玻璃窗部位的熱傳包括玻璃輻射熱與傳導熱兩種，而玻璃之輻射熱比傳導熱高出多達二十倍，因此玻璃窗日射透過量才是造成空調耗電大的關鍵因素。低緯度地區太陽輻射約 $115\text{W}/\text{m}^2$ ，中緯度約為 $75\text{W}/\text{m}^2$ ，高緯度只有約 $30\text{W}/\text{m}^2$ ，因此玻璃窗在低緯度影響空調耗能應該會最大。

太陽的輻射熱，主要是由可見光近紅外線光及紫外線所形成，其中可見光及近紅外線熱量占 95% 以上。當太陽光照射在清玻璃時，因為可見光及短波近紅外線光都可以穿透玻璃直接進到室內，當近紅外線光進到室內被物體吸收後，就成為長波遠紅外線，無法再穿透玻璃出去而成為室內之熱負荷。

普通玻璃成分是二氧化矽(即石英砂的成份)，對可見光透明是玻璃最大的特點，如果玻璃製造時加進了碳酸鈉，對波長低於 400nm 的紫外線不易透過，純玻璃對紅外線則是容易透過。玻璃加入其他成分，會讓折射係數增加，或改變其熱性能，若要玻璃吸收紅外線則可加入鐵，加入鈷則會吸收紫外線。在玻璃中加入各種金屬或金屬氧化物，亦可改變玻璃顏色，如加入錳可成為淡綠色，加入鈷可成為藍色。加入錫氧化物或砷氧化物可成為不透明玻璃，加入鈷可成為黑色玻璃。基本上玻璃普遍用做建築窗戶上是近五十年來的事，而有關玻璃對可見光、近紅外線、紫外線、遠紅外線的穿透性質，則是近十年來才較受到建築界重視。

普通玻璃讓太陽光直射透過的同時，也讓短波近紅外線透過，只是因為近紅

外線人眼無法看見而不注意，但照射到身體時則會有感到其熱量，但一般人以為是可見光的熱量，所以一般人會利用室內窗簾將可見光遮擋住來減輕身體的熱感覺，但是其實太陽光的可見光與近紅外線的輻射熱仍已進入室內，而成為室內熱負荷，讓室內空氣加溫而氣溫上升。當室內氣溫高到人體舒適感不滿意的 28°C 左右時，就必須開啟空調冷氣機來供冷以降溫。因此玻璃的日射遮蔽係數(Shading Coefficient)及太陽日射取得性能，與空調機的啟用與耗電有直接的關係，所以空調機的節能，不能只靠提高空調主機的性能績效(COP)，仍應著重在建築窗玻璃的日射熱性能及面積大小設計，才是最根本的關鍵點。

空調機每提供 1 冷凍噸冷氣，須耗電功率約 0.9KW。而一般清玻璃日射透過熱量在夏季白天，最高約 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，因此一棟空調大樓，玻璃窗面積如有 100m^2 則會增加 72KW 的耗電功率，所以降低玻璃的日射透過量，乃是亞熱帶或熱帶地區建築外殼節能的首要。最佳的設計是降低玻璃易受日曬總面積，或是在易受日曬的玻璃窗外加設外遮陽，降低玻璃窗的日射取得量，另外一種較簡單節能設計則是選用日射透過率低的節能玻璃。然而節能玻璃種類多，其熱性能如何判斷，亞熱帶節能玻璃窗設計最佳對策為何，對空調節能效果如何目前尚未完全瞭解，因此應對所謂的節能玻璃，在夏季進行較完整的測試，以掌握其節能設計之正確手法。

三、 節能玻璃之實驗與結果整理

本實驗之窗玻璃，分成一般清玻璃，以及節能玻璃兩大類，清玻璃是做為比較之參考基準，須同時量測其太陽輻射熱性能。一般清玻璃，選取 2mm 厚清玻璃(A)、5mm 厚清玻璃(B)等共兩種為實測對象。節能玻璃選取 5mm 厚吸熱玻璃(C)、5mm 厚網目玻璃(D)、5mm 厚霧面玻璃(E)、20mm 厚 Low-e 雙層玻璃(F)、5mm 厚微反射吸熱玻璃(G)等共五種為測量對象。

實驗之時間選擇夏季白天，實際量測日期為 8 月 30 日，當天氣溫早上九時至下午六時皆在 $35.6^{\circ}\text{C}\sim 31^{\circ}\text{C}$ 之間，天氣狀況是晴天，室外直接日射量 $700\text{W}/\text{m}^2\sim 895\text{W}/\text{m}^2$ ，這是建築必須使用冷氣空調的典型氣候狀態。

本實驗測量之窗玻璃形式，分為水平天窗模式之玻璃透過日射量，以及垂直側窗模式之玻璃透過日射量；垂直側窗模式，細分為東向側窗、西向側窗、北向側窗、南向側窗四個模式(如圖 1)。玻璃透過日射量逐時測量結果，整理如圖 2 的水平面天窗之玻璃透過日射量變化，以及圖 3、圖 4、圖 5、圖 6 分別為垂直面東向、西向、南向、北向等側窗之玻璃透過日射量變化。

由圖 2 顯示，2mm 厚清玻璃、5mm 厚清玻璃、5mm 厚吸熱玻璃、5mm 厚網目玻璃，5mm 厚霧面玻璃的水平透過日射量相當接近，介於 $510\text{W}/\text{m}^2\sim 750\text{W}/\text{m}^2$ 之間；而 5mm 厚微反射吸熱玻璃、20mm 厚 Low-e 雙層玻璃則較低，介於 $120\text{W}/\text{m}^2\sim 250\text{W}/\text{m}^2$ 之間，其透過日射量也相當接近。



圖 1 玻璃窗實驗量測裝置實體

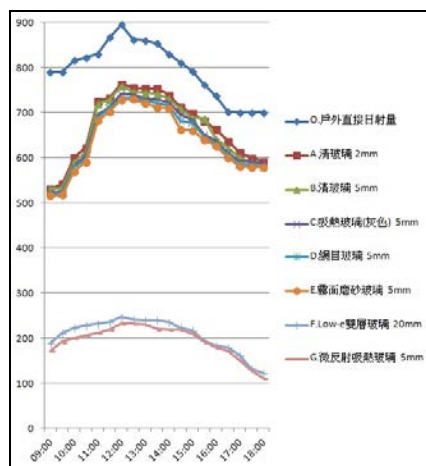


圖 2 水平面玻璃透過日射量(W/m²)

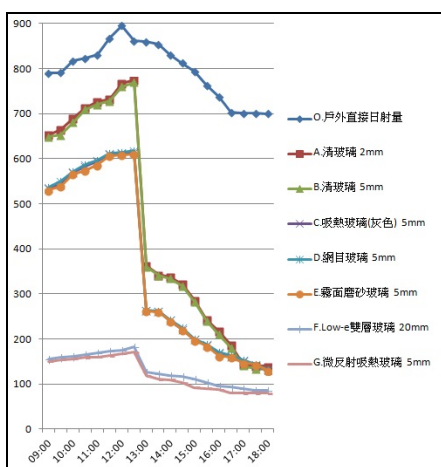


圖 3 東向面玻璃透過日射量(W/m²)

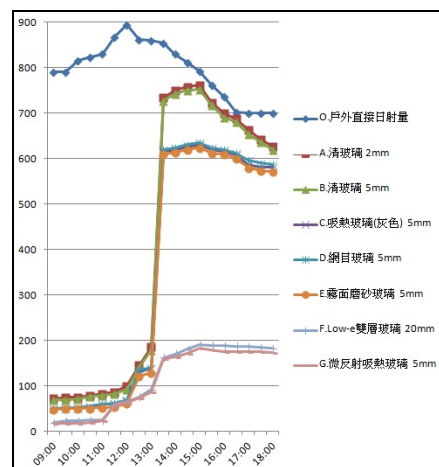


圖 4 西向面玻璃透過日射量(W/m²)

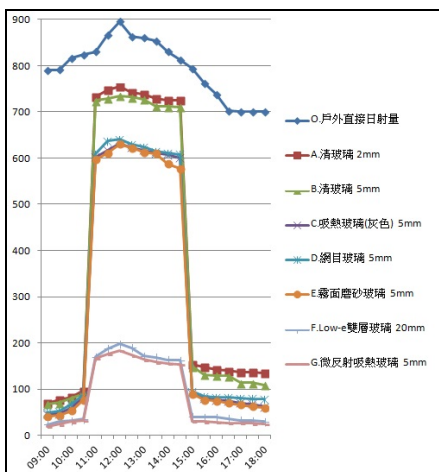


圖 5 南向面玻璃透過日射量(W/m²)

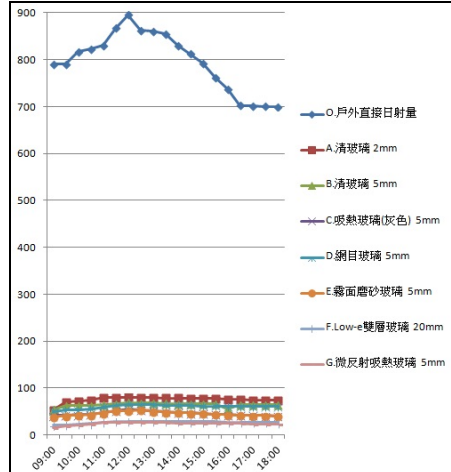


圖 6 北面之玻璃透過日射量(W/m²)

圖 3 顯示所有玻璃上午東向透過日射量較高，其中 2mm 厚清玻璃與 5mm 厚清玻璃的透過日射量為最高，介於 620 W/m²~780 W/m²；5mm 厚吸熱玻璃、5mm 厚網目玻璃、5mm 厚霧面玻璃的透過日射量次高，介於 520 W/m²~610 W/m²；而 5mm 厚微反射吸熱玻璃與 20mm 厚 Low-e 雙層玻璃的透過日射量最低，介於 150

$W/m^2 \sim 180 W/m^2$ 。

圖 4 顯示，所有玻璃下午西向透過日射量較高，其中 2mm 厚清玻璃與 5mm 厚清玻璃的透過日射量為最高，介於 $620 W/m^2 \sim 760 W/m^2$ ；5mm 厚吸熱玻璃、5mm 厚網目玻璃、5mm 厚霧面玻璃的透過日射量次高，介於 $590 W/m^2 \sim 620 W/m^2$ ；而 5mm 厚微反射吸熱玻璃與 20mm 厚 Low-e 雙層玻璃的透過日射量最低，介於 $160 W/m^2 \sim 190 W/m^2$ 。

圖 5 顯示，所有玻璃中午 11 時至 14 時南向的透過日射量較高，其中 2mm 厚清玻璃與 5mm 厚清玻璃的透過日射量為最高，介於 $720 W/m^2 \sim 760 W/m^2$ ；而 5mm 厚吸熱玻璃、5mm 厚網目玻璃、5mm 厚霧面玻璃的透過日射量次高，介於 $580 W/m^2 \sim 630 W/m^2$ ；5mm 厚微反射吸熱玻璃與 20mm 厚 Low-e 雙層玻璃的透過日射量最低，介於 $160 W/m^2 \sim 200 W/m^2$ 。

圖 6 顯示，所有玻璃在上午到下午北向透過日射量皆很低且相近，全部低於 $90 W/m^2$ ，其中 5mm 厚微反射吸熱玻璃與 20mm 厚 Low-e 雙層玻璃皆低於 $40 W/m^2$ ，為最低的兩類玻璃。

四、玻璃透過日射熱與空調耗能分析比數

由前面實驗結果，已得知不同玻璃間之透過日射量有極大的差異，且相同的玻璃在不同的方位也有極不同的透過日射量結果。這對室內熱負荷大小影響有明顯差異，對空調耗能必有極大的影響，因此須再做耗能量分析。

將各玻璃白天之透過日射量，逐時相加總，就可以得到白天玻璃透過日射熱能量，亦即所形成之室內總熱負荷。再與室外直接日射熱能量 $7964 Wh/m^2 \cdot 日$ 相比較，以得出其透過能量比例(見表 1)。

表 1 各類玻璃不同方位白天透過日射熱能量($Wh/m^2 \cdot 日$)及其透過能量比例(%)

玻璃種類	水平向	東向	西向	南向	北向	可見光透過比	表面溫度(°C)
A. 2mm 厚清玻璃	6695 (84%)	4442 (55%)	4183 (52%)	3796 (47%)	754 (9%)	0.91	47.2
B. 5mm 厚清玻璃	6613 (83%)	4390 (55%)	4124 (51%)	3668 (46%)	647 (8%)	0.88	43.4
C. 5mm 厚吸熱玻璃	6503 (82%)	3569 (45%)	3551 (44%)	2984 (37%)	463 (6%)	0.56	65.6
D. 5mm 厚網目玻璃	6444 (81%)	3595 (45%)	3590 (45%)	3061 (38%)	603 (8%)	0.62	63.6
E. 5mm 厚霧面玻璃	6375 (80%)	3542 (44%)	3493 (44%)	2926 (37%)	454 (6%)	0.76	58.5
F. 20mm 厚 Low-e 雙層玻璃	2078 (26%)	1307 (16%)	1175 (15%)	938 (12%)	268 (3%)	0.71	52.3
G. 5mm 厚微反射 吸熱玻璃	1952 (25%)	1217 (15%)	1112 (14%)	860 (11%)	243 (3%)	0.30	55.4
註：戶外直接日射熱能量為 $7964 Wh/m^2 \cdot 日$ 。							

(資料來源：本研究整理)

由表 1 顯示，玻璃水平面一日之透過日射熱能量最高，可達太陽輻射熱量的 84%，其次為東向的 55%，北向最少僅 9%。另外顯示，Low-e 雙層玻璃與微反射吸熱玻璃之一日透過日射熱能量為太陽輻射熱的 26~3%，皆為最低者，故其太陽輻射之遮蔽性能在各方位皆較佳。

再應用公式將玻璃日射透過熱能量，求出空調單位之耗能量。該公式為 $E = Q / COP * 0.92$ (式中，Q: 日射熱能量；COP: 主機性能績效；0.92 為主機容量功率比)。將各類玻璃日射透過熱能量轉換為空調耗電量 E，計算結果之統計，如表 2 及圖 7 所示。

表 2 各類玻璃不同方位晴天一日透過日射熱能量之空調單位耗電量(kWh/m²·日)

玻璃種類	水平向	東向	西向	南向	北向
A. 2mm 厚清玻璃	2.68	1.78	1.69	1.52	0.30
B. 5mm 厚清玻璃	2.64	1.76	1.65	1.47	0.26
C. 5mm 厚吸熱玻璃	2.60	1.43	1.42	1.19	0.19
D. 5mm 厚網目玻璃	2.58	1.44	1.44	1.22	0.24
E. 5mm 厚霧面玻璃	2.55	1.42	1.40	1.17	0.18
F. 20mm 厚 Low-e 雙層玻璃	0.83	0.52	0.47	0.98	0.11
G. 5mm 厚微反射吸熱玻璃	0.78	0.49	0.44	0.34	0.09

(資料來源: 本研究整理)

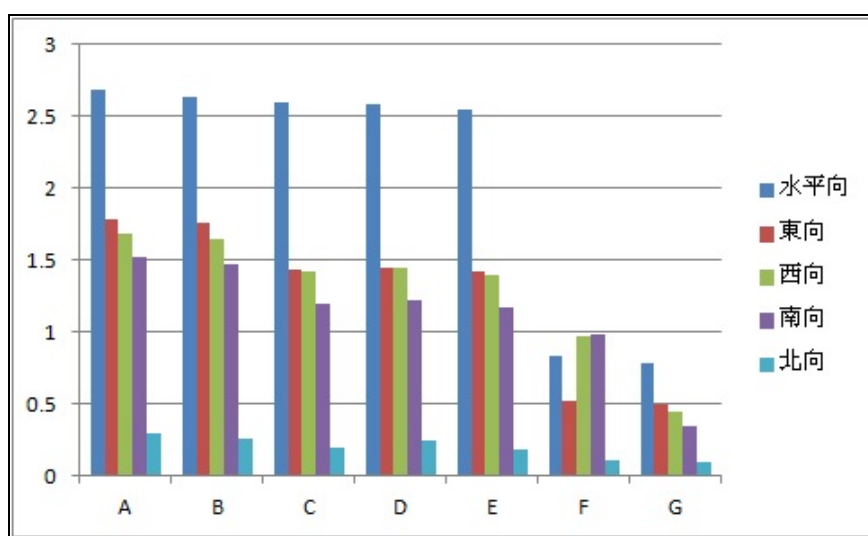


圖 7 各類玻璃不同方位之單位空調耗電量(kWh/m²·日)

由表 2 顯示，水平向屋面玻璃造成之空調耗能，皆比其他向牆面側窗玻璃為高，其中 2mm 厚清玻璃為 2.68 kWh/m²，5mm 厚清玻璃為 2.64 kWh/m²，5mm 厚吸熱玻璃為 2.60 kWh/m²，5mm 厚網目玻璃為 2.58 kWh/m²，5mm 厚霧面玻璃為 2.55 kWh/m²，20mm 厚 Low-e 雙層玻璃為 0.83 kWh/m²，5mm 厚微反射吸熱玻璃為 0.78 kWh/m²。因此採用 F、G 兩類節能玻璃，其單位面積節能率可達 67%；而建築物採用 F、G 兩類節能玻璃之整體節能效率可達 24%(以外殼占空調系統總負荷 35%比例

來計算)。採用 C、D、E 三類節能玻璃，其單位面積節能率只有 5%；而建築整體節能率為 2%，節能效果不佳。

而東向牆面玻璃造成之空調單位耗電，2mm 厚清玻璃為 1.68 kWh/m²，5mm 厚清玻璃為 1.76 kWh/m²，5mm 厚吸熱玻璃為 1.43 kWh/m²，5mm 厚網目玻璃為 1.44 kWh/m²，5mm 厚霧面玻璃為 1.42 kWh/m²，20mm 厚 Low-e 雙層玻璃為 0.52 kWh/m²，5mm 厚微反射吸熱玻璃為 0.49 kWh/m²。因此採用 C、D、E 三類玻璃，其單位面積節能率約有 18%；而建築物整體節能率可達 6%。如採用 F、G 兩類玻璃，其單位節能率約有 70%，建築物整體節能率可達 25%（以外殼負荷占空調系統總負荷 35% 比例來計算）。而西向牆面窗採用 F、G 兩類玻璃，其建築物整體節能效率約可達 26%。

當建築外殼玻璃窗採用清玻璃或低節能玻璃時，南向牆面側窗比東向牆面側窗建築整體節能效率會高出 6%；於北向牆面側窗比東向牆面側窗節能效率會高出 30% 之。

由此得知，改變選用玻璃本身日射熱遮蔽性能較佳時，會降低建築空調耗電 25%（東曬窗）及 26%（西曬窗），但改變玻璃窗設置之方位，則能夠降低建築空調耗電高達 32%（水平窗改為北向窗）；或達 30%（東向窗改為北向窗）；或達 16%（水平向窗改為南向窗），其節能成效反而更為顯著。由於玻璃種類與設置方位，皆能影響空調耗電，因此同樣設置採光窗時，選取正確的開窗方位（如採北向窗），其節能效果比選用日射熱遮蔽性能規格高等級之玻璃，有更佳之節能表現。

綜合以上可知，許多大型建築常為了想增加利用自然採光來節省室內照明燈具之能源，而將屋頂設計為大片水平玻璃採光天窗，結果依表 2 可知，就算使用 F 或 G 較高性能節能玻璃，仍將造成白天空調單位耗能增加 780Wh/m²，這比白天 10 小時所節省的照明單位耗能（20W*10h=200Wh/m²）相比，還遠高出 580 Wh/m²。因此，對位居亞熱帶氣候之台灣建築，這種利用天窗採光設計以節能之方法，顯然是完全不適當的，反而會更增加建築整體耗電。

五、結論與建議

（一）結論

本研究針對台灣建築開窗常用之 2mm 厚清玻璃、5mm 厚清玻璃等兩種，以及 5mm 厚吸熱玻璃、5mm 厚網目玻璃、5mm 厚霧面玻璃、20mm 厚 Low-e 雙層玻璃、5mm 厚微反射吸熱玻璃等五種節能玻璃，進行透過日射熱之實測比較，以及其對建築空調節能效果之分析。得到結果如下：

1. 5mm 厚清玻璃夏季一日透過日射量為 6503 Wh/m²·日；5mm 厚有色吸熱玻璃為 6503 Wh/m²·日；5mm 厚網目玻璃為 6444 Wh/m²·日；5mm 厚霧面玻璃為 6375 Wh/m²·日；20mm 厚 Low-e 雙層玻璃為 2078 Wh/m²·日；5mm 厚微反射吸熱玻璃為 1952 Wh/m²·日是最低者。但是微反射吸熱玻璃之可見光透過比只有 0.3，其他玻璃則介於 0.56~0.91 之間要差，故不利自然採光。
2. 吸熱、網目、霧面玻璃設置在水平向，對單位面積透過日射熱之降低效果有 20% 左右；設置在東向或西向時降低效果則有 55%。而 Low-e 雙層玻璃、微反射吸熱

玻璃設置在水平向，其單位面積透過日射熱之降低效果為 74%；設置在東向或西向時則有 84%。因此水平天窗玻璃須採用 Low-e 雙層玻璃或微反射玻璃較能減低大量之日射熱。

3. 在水平向屋頂天窗設置吸熱、網目、霧面玻璃時，只比設置清玻璃之建築空調整體耗電節省 2%，節能效果不佳；而 Low-e 雙層玻璃、微反射吸熱玻璃，比設置清玻璃之建築其空調整體耗電節省達 24%，但耗電節省都不比垂直面開窗佳，故水平天窗不宜過大面積設計。

4. 建築採用清玻璃時，其設於南向開窗時比設於東向開窗之空調整體耗電節省 6%。設於北向開窗時比設於東向開窗之空調整體耗電節省 30%。因此開窗方位設計要比玻璃種類設計選取，有更佳的節省機會，所以單靠玻璃本身遮陽性能來節能省空調耗電，並不完全恰當與正確。

(二)建議

1. 本研究分析結果顯示，台灣建築水平天窗清玻璃造成之一日空調單位耗電為 2.64 KWh/m²，比東向側窗的 1.76 KWh/m²，或比西向側窗的 1.65 KWh/m²，或比南向的 1.52KWh/m²，以及北向的 0.3 KWh/m²皆高。同時與天窗自然採光所節省下來的照明耗電 0.2 KWh/m²相比高出 12~0.5 倍多。因此本研究成果對建築減少玻璃天窗設計之節能效益提供明確的佐證，值得廣為推展，可避免較耗能開窗設計情況的發生，符合節能減碳之世界趨勢。

2. 本研究並未測量到九月、十月、十一月之秋季，分析所得出玻璃之空調單位耗電量以夏季為主，事實上許多建築在秋季仍有使用冷氣，因此未來針對秋季的日射熱節能也可以另外做測量分析，並做比較研究，以強化節能研究成果。

3. 本研究所分析出之各種玻璃之空調耗電彼此間之差異結果，是以簡算法求出，未來可以利用電腦模擬軟體方式計算以對比，可提高本研究節能效果之精確度。

六、參考文獻

1. 林耿禾(黃士賓指導)，建築物單層玻璃採光及熱傳綜合效能之研究，高苑科技大學建築研究所碩士論文，2009。
2. 林世雄(黃士賓指導)，建築物雙層窗隔熱效能模擬分析之初探，高苑科技大學建築研究所碩士論文，2014。
3. 郭為中(周鼎金指導)，電腦輔助建築熱環境分析之研究-以 Ecotect 操作為例，台北科技大學建築與都市設計研究所碩士論文，2010。
4. 陳海曙，亞熱帶綠建築節能窗降低輻射熱及影響晝光照度之研究，台灣建築學會二十四屆發表會論文集，2012。
5. 網站 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%8E%BB%E7%92%83>，玻璃，2014。