

射出成型能耗分析

Energy Consumption Analysis of Injection Molding

李忻叡*、杜齊彬、鄒濠亘、黃俊欽

國立高雄科技大學模具工程系

*f110147104@nkust.edu.tw

摘要

射出成型機在射出過程中，開模、鎖模、射出頂出等都需使用到液壓或伺服馬達等驅動系統，以及塑化熔膠的加熱系統，甚至是穩定模具溫度的模溫機等等。這些系統或設備都須消耗大量的能量使產品生產，進而產生大量碳排，因此不同廠牌射出機也漸漸推出不同種組合的節能射出機，這些不同種形式的射出機不僅僅是追求產品精確性，同時也是為了節能衍生出的機型。但對於中小企業來說，更換射出機的組件，或更換整台射出機，可能較為困難，畢竟可能需要長期才會打平成本。因此利用現有機台來進行能耗分析及制定優化策略會是有效的方法。

本研究的主要探討射出成型過程中各部分所產生的能耗，進行更深入的分析。透過射出成型過程中各個部分的能耗進行擷取和分析，可以更清楚地了解不同設備所產生的能耗以及其對整個射出成型過程的影響，並透過單因子實驗，觀察製程參數對於能耗產生的影響。

研究結果顯示，射出成型過程中，液壓能耗在入料階段會消耗大量能量，而透過調整背壓和螺桿轉速能降低能耗的效果有限。然而單因子實驗顯示冷卻時間的增加對於能耗影響非常大，原因在於冷卻階段，加熱器和水溫機會持續運作，進而造成能耗的增加。因此，有效降低能耗的方法應該從冷卻時間入手，但需要注意減少冷卻時間可能會對產品品質造成影響，需進一步評估產品品質。

關鍵詞：節能減碳、能耗監測、射出成型



Abstract

During the injection molding process, hydraulic or servo motor drive systems are used for actions such as mold opening, mold locking, and injection ejection. Additionally, there are heating systems for melting the plastic and temperature control systems to stabilize the mold temperature. These systems and equipment consume a significant amount of energy in order to produce the products, resulting in substantial carbon emissions. As a result, various injection molding machine brands have gradually introduced energy-saving models with different combinations of components. These different types of machines not only pursue product accuracy but also derive from the goal of energy conservation. However, for small and medium-sized enterprises, it may be challenging to replace components or the entire injection molding machine, as it may take a long time to offset the cost. Therefore, conducting energy consumption analysis and developing optimization strategies using existing machinery can be an effective approach.

The main focus of this study is to analyze the energy consumption generated by different parts of the injection molding process in greater depth. By capturing and analyzing the energy consumption of each part during the injection molding process, we can gain a clearer understanding of the energy consumption generated by different equipment and their impact on the entire injection molding process. Through single-factor experiments, we can observe the influence of process parameters on energy consumption.

The research findings indicate that hydraulic energy consumption accounts for a significant portion of the energy consumption during the feeding stage, and the effect of reducing energy consumption through adjusting back pressure and screw speed is limited. However, the single-factor experiments show that increasing the cooling time has a significant impact on energy consumption. This is because during the cooling stage, the heaters and water temperature control units continue to operate, resulting in increased energy consumption. Therefore, effective energy consumption reduction should start with the cooling time, but it is important to evaluate the potential impact on product quality when reducing the cooling time.

Keywords: Energy-saving and carbon reduction , energy consumption monitoring , injection molding

1. 前言

能源效率是製造業面臨的重要問題之一。隨著能源成本的上升以及環境影響的加劇，降低能源消耗不僅關乎生產成本，也涉及產品製造對環境友善的程度。近年來，低碳發展的趨勢逐漸增強。歐盟積極規劃淨零排碳政策，目標是在2050年實現碳中和，將碳排放量比1990年下降80%至90%。同時，在2023年後，歐盟將對所有進口產品徵收碳邊境調整機制(CBAM)，生產者需支付排碳成本，這也代表企業必須降低產品生產時的排碳量，以減少碳稅成本。在台灣，能源局要求800KW以上用戶提報大耗能設備能源號碼，並要求用電5000KW以上的大戶在2025年前建置10%的綠電，因此企業需開始監測能耗，提供耗電數據，並努力降低能源消耗。

射出過程中會產生大量能耗，在總能耗中可在將其分為四個部分，分別是加熱系統、驅動系統、控制系統以及周邊模溫機，透過能耗的擷取可有效得知製程中各部分能耗產生，進一步可得知製程參數對於耗電量影響[1,2]，並藉由了解耗電產生原因進行進一步評估。以往在能耗評估採用計的方式進行[3,4]，但發現透過計算進行評估與實際射出時實際數據往往有誤差存在，原因在於使用計算方式缺少考慮到機台使用，在不同機台中有不同的驅動配置，而這些不同的配置往往能耗表現都不同[5]，因此透過實際射出成形能較準確評估。

本文將透過實際成形擷取的耗電數據，判讀能耗可能產生原因。將耗電分為三大部分，分別為加熱系統、液壓系統及周邊模溫機，並將三者分別擷取耗電數據，後續透過單子實驗規劃進行實驗，並觀察改變製程參數，對其能耗的影響。

2. 研究方法

2.1 研究流程

本研究將擷取耗電數據，並透過數據了解可能產生能耗源因，詳細過程如下。

- (1)研究載具：研究採用盒狀產品作為實驗載具。
- (2)能耗監測：將能耗分為三個部分做監測，並透過交流互感器擷取其耗電數據。
- (3)製程參數：選擇可能影響品質及耗電的製程參數。
- (4)單因子實驗規劃：透過單因子實驗方法，觀察製程參數對能耗影響。

2.2 研究載具

本文將以 128mmx63mmx45mm 盒狀產品作為此次研究載具，如圖 1(a)所示。母模側水路採用貫穿水路，公模側採用隔板水路的方式作為冷卻系統，如圖 1(b)所示，材料採用 ABS。

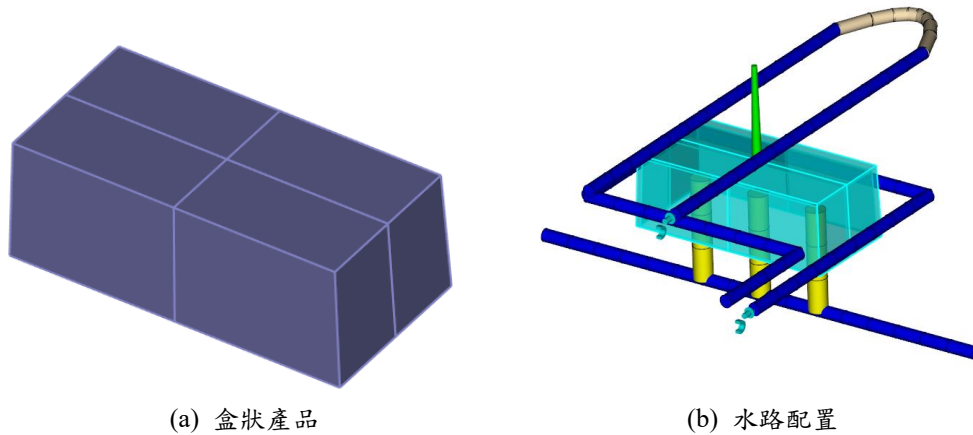


圖1 實驗載具

2.3 射出成形能耗

射出成形產生能耗可分為四大部分，分別為驅動系統、加熱系統、控制系統以及模溫機，射出機台採用台中精機vs-50k，此在機台上可分為三大系統能耗分別為加熱系統能耗、液壓系統能耗、控制系統能耗，以及周邊模溫機能耗，但控制系統能耗佔約6%其優化的幅度有限，因此本文將針對加熱系統能耗、液壓系統能耗以及模溫機能耗進行深入探討。

2.3.1 耗電訊號擷取

機台為台中精機vs-50k，液壓能耗擷取方面，透過液壓幫浦變頻器前安裝電流互感器擷取耗電資訊，液壓幫浦三相電源的負載為平衡負載，因此電流互感器安裝其中一相位即可，如圖2(a)所示。加熱器因在加熱過程中三相電源中為不平衡得負載，因此將電流互感器安裝於4個加熱控制器前，並且後續利用三相不平衡方法進行耗電量計算，如圖2(b)所示。模溫機中的加熱系統及幫浦皆為三相平衡負載安裝方式，因此在其中一相安裝電流互感器，如圖2(c)所示。



(a)液壓變頻器



(b)加熱器



(c)模溫機

圖2 電流互感器安裝位置

安裝電流互感器完成後，需擷取其訊號，此時電流互感器訊號輸出為交流訊號，因此將其訊號由交流訊號轉為直流電壓訊號，並將微小訊號以等比例方式進行放大。

將直流電壓訊號輸入至DAQ進行擷取，並傳至電腦中，最後透過軟體進行資料紀錄以及即時顯示耗電資訊，如圖3所示。。

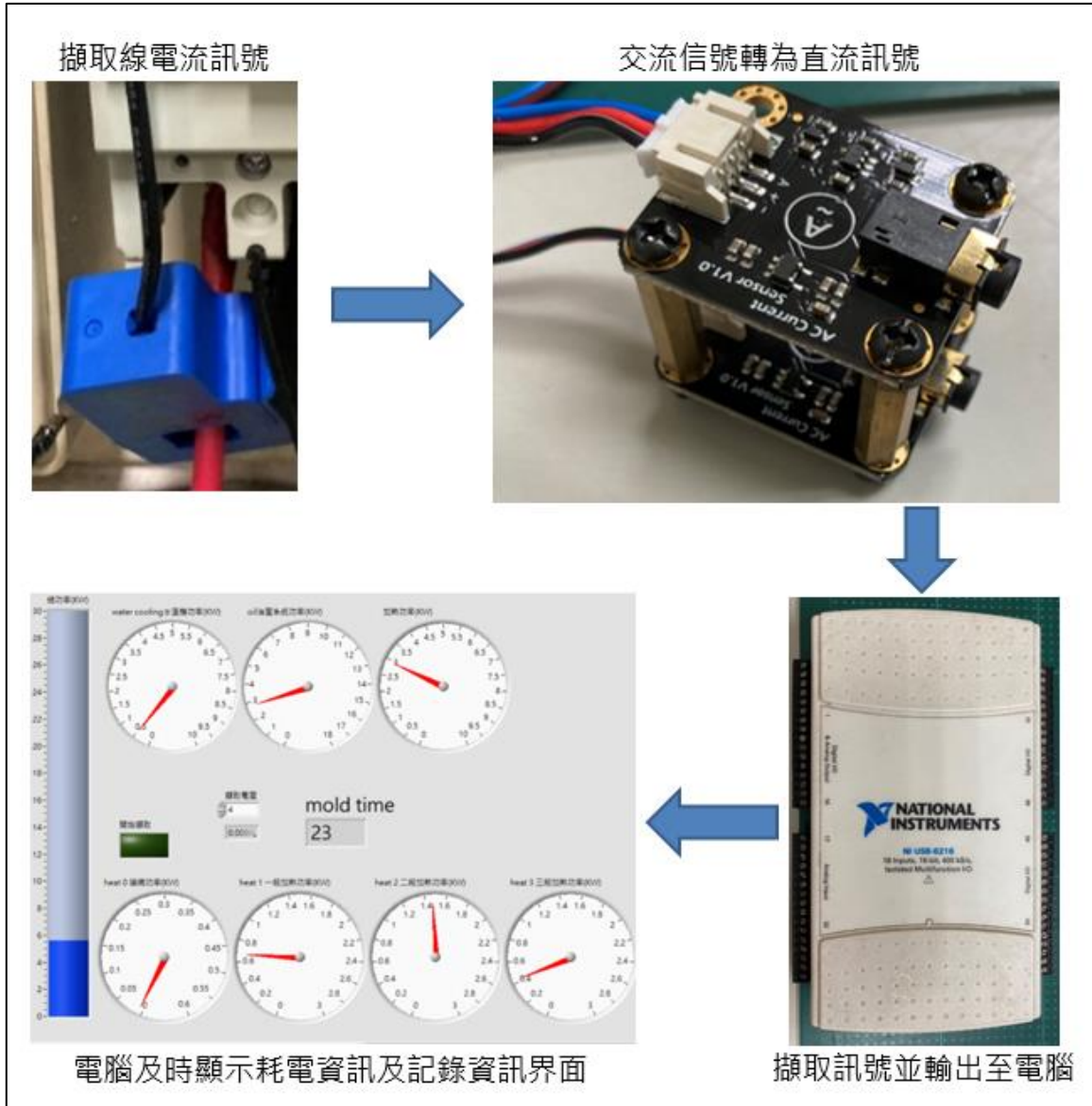


圖3 耗電資訊擷取流程圖

2.3.2 設備及機台耗電資訊

射出機台採用台中精機vs-50k，驅動系統則採用液壓系統變頻式系統，此系統運作時根據液壓大小需求輸出功率，因此在無需使用狀況下功率較低。鎖模系統則是採用肘節式鎖模系統，因此鎖模系統只在開關模時會產生較大能耗。液壓能耗在每個階段都會有不同能耗表現。

模溫機採用水方式進行加熱及冷卻，在控制系統中，當模具水路出口溫度高於入口溫度，此時對模具進行降溫，冷卻入水控制閥開啟，冷卻水塔水較低溫，經由外部幫浦加壓送入至加熱器中，將進入模溫機較高溫的水降至設定出口溫度，此時因模具出水口管路壓力差關係，使得部分較高溫得水流入水塔進行冷卻。當模具水路出口溫度低於入口溫度，此時對模具進行加熱，模溫機加熱系統啟動，將流出模具較低溫水加熱至設定溫度，如圖4所示。

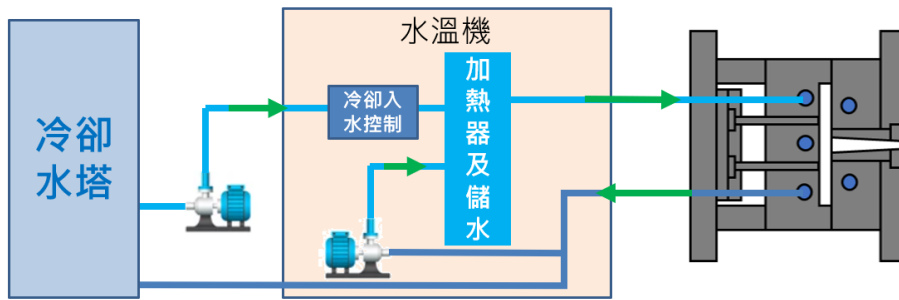


圖4 模溫機管線配置(示意圖)

此處將能耗產生可分成兩個方向觀察，如圖5所示，X軸為周期時間，Y軸為機台設備，由Y軸方向觀察可看到個階段所產生的總能耗，以X軸方向觀察則可看出各個設備系統的能耗。因此由此圖可直接觀察各個設備系統中各階段所產生能耗，由液壓曲線可看到當材料進行入料時可能產生能耗較高，在加熱系統中入料時因較低溫材料進入，因次需更多能量將材料加熱至加工溫，值得一提的是，在每模加熱中，開始產生能耗曲線的位置也不同，在這樣的狀況下也可能使每模的能耗有所差異，在模溫機的能耗上，也有可能會有這樣的狀況。模溫機在加熱時，較無週期性變化，當水溫不足時才會啟動加熱器進行加熱，因此在加熱器以及模溫機能耗擷取上，須採用多模次的方式，在模次充足情況下在將能耗平均。

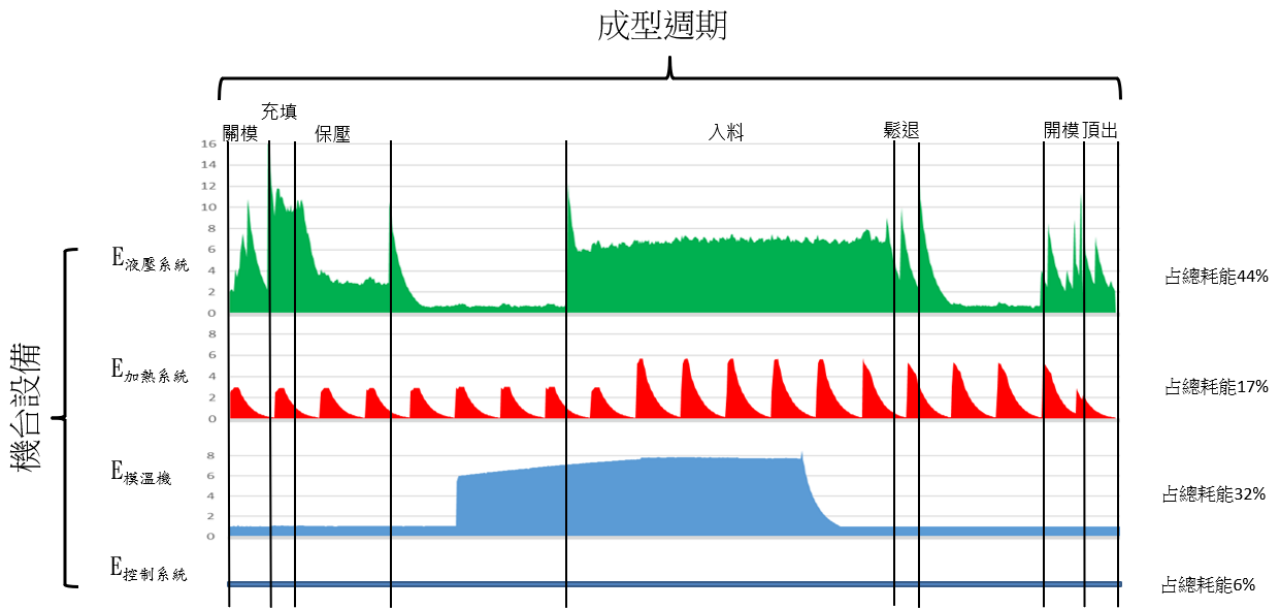


圖5 單一模次總能耗各設備階段能耗曲線圖

2.4 製程參數選用

射出過程不同的製程參數往往會影像到品質變化及能耗差異，如表1所示，射出過程中產品厚度方向中心及表面溫度不同，因此會產生收縮不一致，當公母模側表面溫度相同時，收縮會呈現兩側對稱，因此不容易產生翹曲，因此當公母模側表面溫度相不同時，兩側不會呈現對稱的收縮，進一步造成翹曲。因此在容易積熱的盒狀產品中，熔膠溫度、冷卻時間及模具溫度都有可能造成翹曲產生。造成產品收縮，主要影響為壓力，當壓力大時熔膠會壓縮較緊實使整體收縮降低，而較直接影響壓力大小製程參數為保壓壓力及保壓時間，而熔膠溫度、模具溫度及冷卻時間，也可能進一步影響壓力。

耗電部分分別可分為三大系統或設備，液壓系統只要是機台區動作動時的製程參數都會影響到其能耗表現，因此保壓壓力、保壓時間、射出速度、V/P切換點、入料背壓、入料螺桿轉速都會影響到能耗表現。在射出過程中膠溫較高、模溫較高使流動性較好，在充填階段能耗也有可能因此較低，入料階段時也可能因膠溫較高，使流動性較好，入料時螺桿轉動時液壓阻力相對較少能耗也較低，因此熔膠溫度、模溫也會間接影響能耗表現。在加熱系統中熔膠溫度影響最大，當熔膠溫度上升時能量損失也隨之增加，週期時間增加，能量損失也就越多，更進一步了解當螺桿轉速較高時，熔膠產生剪切升溫，因此也可能降低加熱器能耗需求。水溫系統中溫度須維持模具溫度，因此當溫度越高時就需加熱更多，使模具維持一定的溫度。

表 1 製程參數影響品質的因素

| 品質 | 影響因素 | 製程參數 |
|---------------|---|---|
| 長邊側壁內凹及短邊側壁內凹 | 兩側溫度不同，導致兩側呈現不對稱的收縮，進一步造成翹曲。壓力影響產品收縮，進一步導致翹曲產生 | 熔膠溫度、冷卻時間、 模具溫度、保壓壓力、 保壓時間 |
| 長邊收縮及短邊收縮 | 壓力大時熔膠會壓縮較緊實使整體收縮降低，反之，壓力小時使體收縮增加 | 熔膠溫度、冷卻時間、 模具溫度、保壓壓力、 保壓時間、射出速度 |
| 重量 | 壓力大時熔膠會壓縮較緊實使熔膠較多進入模穴使重量上升，反之，壓力小時使重量下降 | 熔膠溫度、冷卻時間、 模具溫度、保壓壓力、 保壓時間、射出速度 |
| 液壓能耗 | 壓系統只要是機台驅動作動時的製程參數都會影響到其能耗表現 | 保壓壓力、保壓時間、 射出速度、V/P切換點、 入料背壓、入料螺桿轉速 |
| 加熱能耗 | 1. 當熔膠溫度上升時能量損失增加 2. 材料需加熱到較高溫時所需能量隨之提升 3. 桿轉速較高，產生剪切升溫，降低加熱器能耗需求 | 熔膠溫度、冷卻時間、 入料螺桿轉速 |
| 模溫機能耗 | 模具溫度越高時就需加熱更多，使模具維持一定的溫度 | 冷卻時間、模具溫度 |

2.5 單因子實驗設計

單因子實驗方法是一種統計分析方法，用於比較三個或更多組之間的差異。透過改變不同製程條件下，觀察每個因子對產品品質的影響，將上述製程參數進行單因子實驗設計，如表2所示。



表 2 單因子實驗規劃

| Exp. | 模具溫度 (°C) | 熔膠溫度 (°C) | 保壓壓力 (bar) | 保壓時間 (s) | 冷卻時間 (s) | 射出速度 (mm/s) | V/P 切換 (mm) | 背壓 (bar) | 螺桿轉速 (mm/s) |
|------|--------------|--------------|---------------|-------------|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
| 1 | 30 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 2 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 3 | 60 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 4 | 75 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 5 | 45 | 190 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 6 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 7 | 45 | 216 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 8 | 45 | 230 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 9 | 45 | 203 | 30 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 11 | 45 | 203 | 40 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 10 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 12 | 45 | 203 | 60 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 13 | 45 | 203 | 50 | 4 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 14 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 15 | 45 | 203 | 50 | 8 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 16 | 45 | 203 | 50 | 10 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 17 | 45 | 203 | 50 | 6 | 20 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 18 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 19 | 45 | 203 | 50 | 6 | 40 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 20 | 45 | 203 | 50 | 6 | 50 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 21 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 40 | 68 | 3 | 20 |
| 22 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 23 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 60 | 68 | 3 | 20 |
| 24 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 70 | 68 | 3 | 20 |
| 25 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 66 | 3 | 20 |
| 26 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 27 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 70 | 3 | 20 |
| 28 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 72 | 3 | 20 |
| 29 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 1 | 20 |
| 30 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 31 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 5 | 20 |
| 32 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 7 | 20 |
| 33 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 15 |
| 34 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 20 |
| 35 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 25 |
| 36 | 45 | 203 | 50 | 6 | 30 | 50 | 68 | 3 | 30 |

3. 結果與討論

射出成形週期中，各階段都會產生不同的能耗表現，透過擷取隨時間變化的能耗(kW)，並透過曲線方式呈現，能夠清楚得知各階段的能耗表現。將曲線下面積進行積分，可初步得射出過程中液壓能耗(J)、加熱器能耗(J)及模溫機能耗(J)表現。液壓能耗可拆分為個部分所產生之能耗，分別為關模、充填、保壓、冷卻1(保壓結束至入料開始之間)、入料、鬆退、冷卻2(鬆退結束至開模階段)、開模、頂出，如圖6所示，將曲線下面積進行積分，可直接看出液壓在各階段能耗表現，並將其與水溫機及加熱器能耗繪製成圓餅圖，如圖7所示，可看到液壓整體能耗佔約44%左右，其中以入料時所產生的能耗最高約為97227J，其次是保壓、充填。以設備上而言水溫機32%能耗，加熱器占17%能耗。(此測試為單一模次能耗，水溫機能耗與加熱器能耗在溫度足夠的模次中加熱較少或是不會加熱，導致會有誤差存在，因此需透過多模次連續累計擷取耗電資訊，並平均於每模次中)

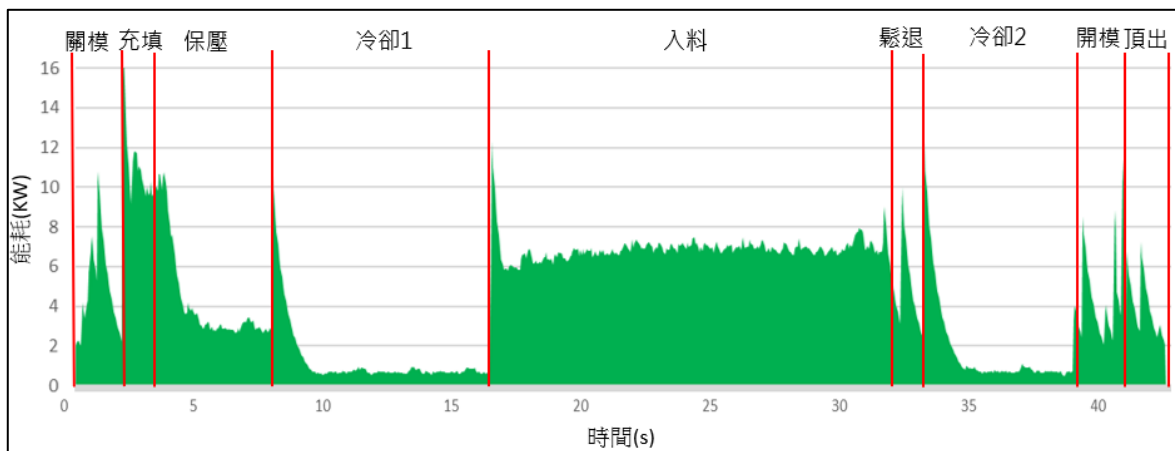


圖6 射出過程中液壓各階段所產生能耗

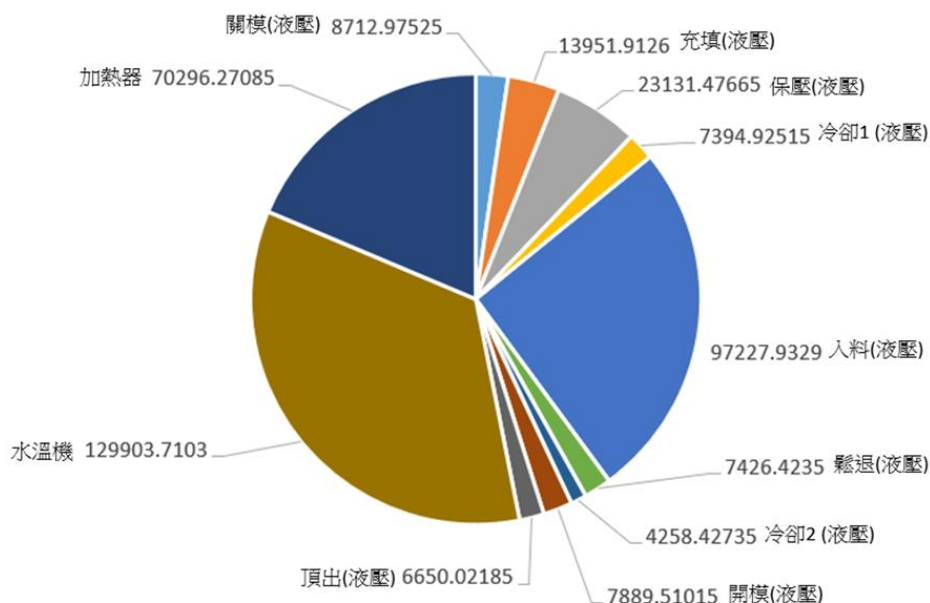


圖7 單一模次射出各階段所產生能耗(單位：J)

3.1 單因子實驗結果

透過單因子實品質特性因子反應圖以利觀察，特定條件下變動其一製程參數對能耗影響關係。由圖8可看出模溫增加影響水溫機能耗較高，當模溫設定較高時，模溫機就必須更頻繁的加熱來維持模具溫度，但在模溫30~45度時能耗相差很少，可初步推估30度時，模溫機在替模具進行冷卻，而45度時則是有些微的加熱。其次影響模溫機能耗為冷卻時間，當冷卻時間增加時，模溫機加熱器及水幫浦運做時間增加，因此耗電量會隨時間提升。

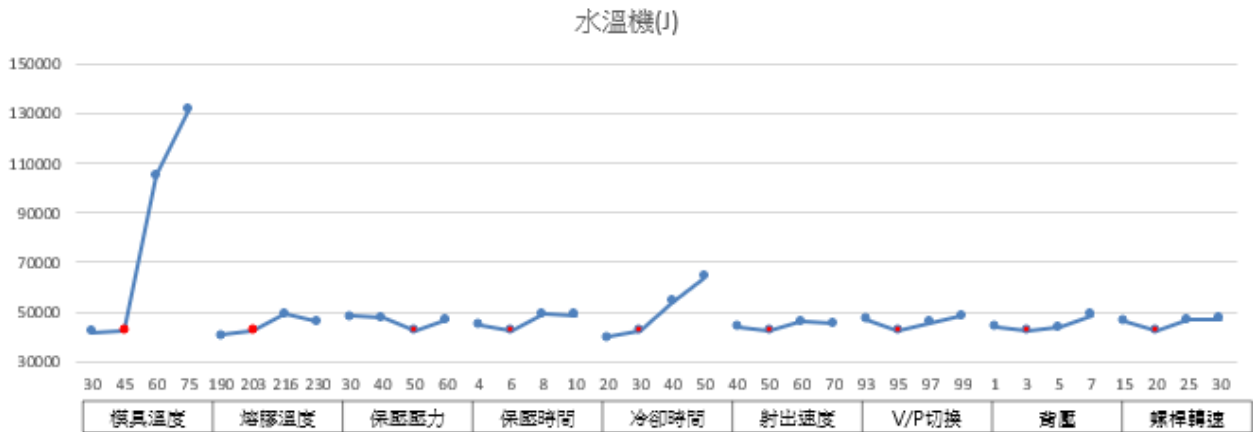


圖8 製程參數對模溫機能耗的影響

在加熱器的能耗中，冷卻時間及熔膠溫度兩個製程參數影響加蒸能耗較為大，如圖9所示，可看到當熔膠溫度增加時能耗也隨之上升，當材料溫度越高時，就必須使用更多能量使熔膠升溫。加熱器在運作過程中會有熱量散失至空氣中，因此須一定熱量加入以維持料缸的溫度，隨著熔膠溫度增加與空氣的溫差越大，熱傳越劇烈使得熱量損失隨之增加，導致須增加更多熱量維持溫度，造成能耗的增加。而冷卻時間增加，熱量損失也隨之增加。因此在較低熔膠溫度及較短冷卻時間可有效降低能耗。

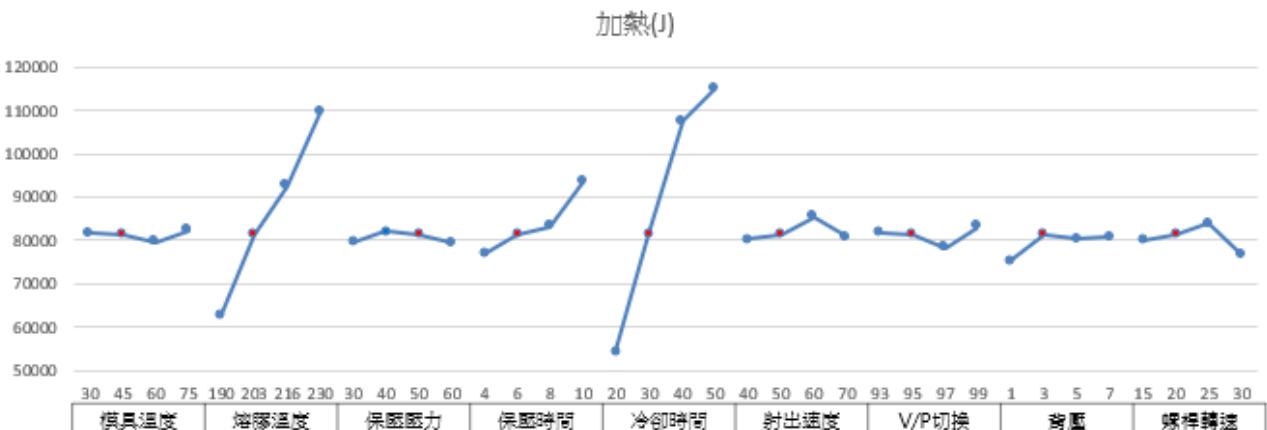


圖9製程參數對加熱器能耗的影響

在射出過程中，只要會使用液壓驅動，都會影響到其能耗表現，並由圖10可發現，能耗製程參數中保壓壓力、保壓時間、射出速度、背壓，這些會使用到液壓的製程參數都會影響到能耗表現，但可發現熔膠溫度與冷卻時間製也會影像到液壓能耗。因此將針對各製程參數影響能耗關係詳細解釋。

1. 保壓壓力：保壓壓力增加時，液壓幫浦就必須增加功率，來保持較高壓力。
2. 保壓時間：保壓時間增加，就必須加長液壓幫浦作動時間，能耗也會隨之增加。
3. 冷卻時間：冷卻過程中液壓系統是不做驅動的，但液壓系統再不做驅動時會保持約780W 進行待機狀態，因此當時間增加時能耗也會有所增加。
4. 射出速度：可以發現當射出速度越快時能耗也會有些微降低，當射出速度較慢時，因熔膠溫度下降造成射出壓力增加，因此也需較大的輸出功率，同時射出時間也較長。而當速度增加時射出壓力不見得會降低，但可以確定的是射出時間會縮短，使得能耗降低。
5. 背壓：背壓增加時螺桿在加料期間時間會增加，使得能耗也會增加。
6. 螺桿轉速：螺桿轉速增加時雖然縮短加料時間，始能耗降低，但同時因轉速較高，需增加功率達到一定的轉速，因此螺桿轉速在增加同時減少時間，但同時增加功率產生，因此使得能耗影響性不明顯。
7. 熔膠溫度：熔膠溫度此製程參數對於液壓驅動沒有直接關係，但在液壓能耗中熔膠溫度影響性最高，由圖11可發現，當熔膠溫度增加時出時的能耗明顯下將，在入料時的能耗也明顯下降，入料時間也有減少趨勢。在熔膠溫度較高時，熔膠黏度下降其流動性增加，因此在射出階段所需壓力相對較低，液壓幫浦輸出功率減少，使得能耗較低。在入料階段時因流動性較好，在相同螺桿轉速下降低螺桿運作時的阻力，使液壓幫浦輸出功率降低能耗降低。

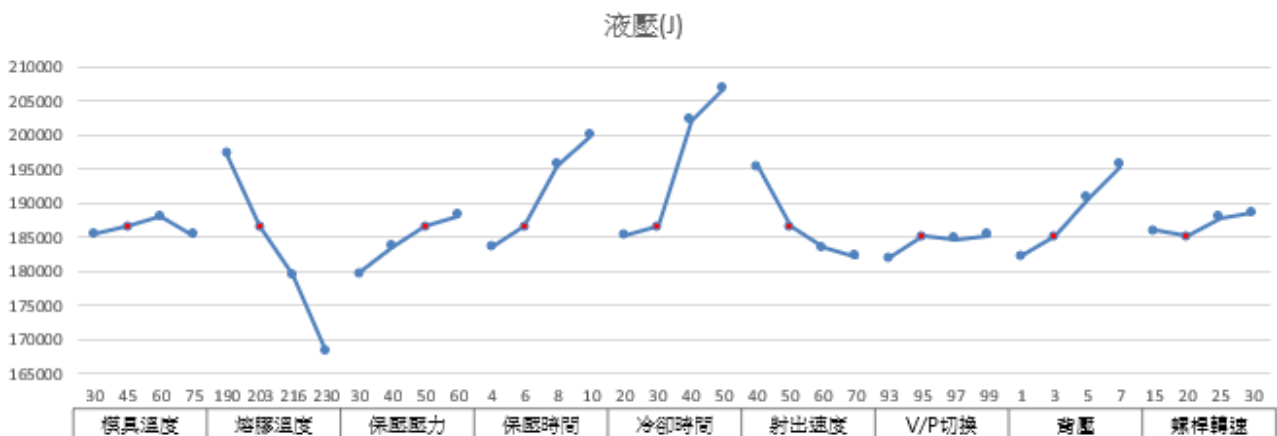


圖10 製程參數對液壓能耗的影響

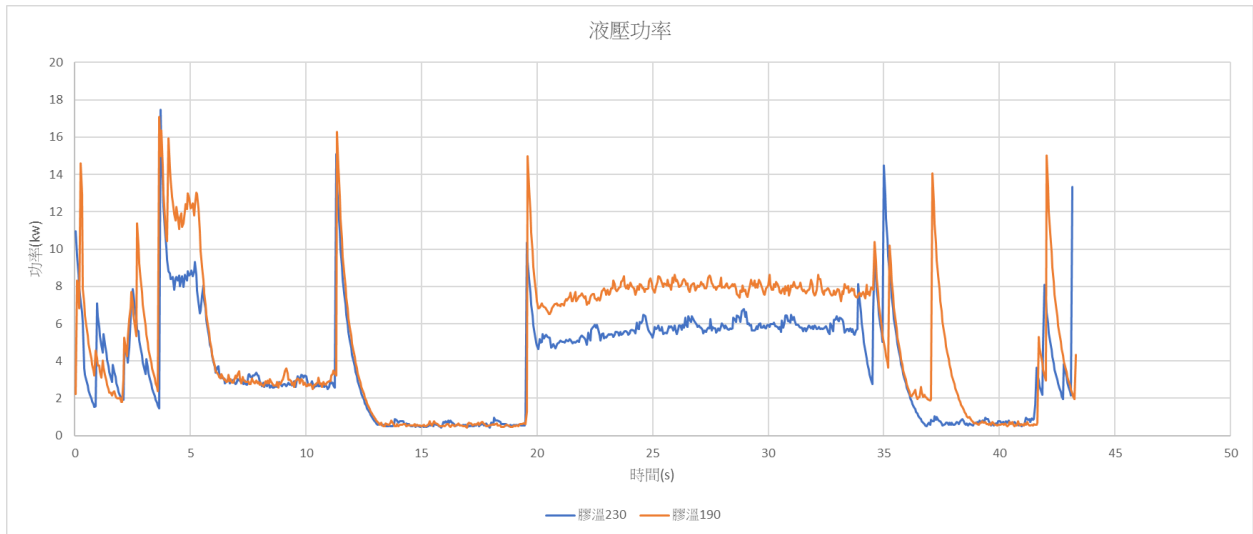


圖11 不同熔膠溫度下液壓能耗曲線圖

總能耗為加熱器能耗、液壓能耗以及模溫機能耗加總，由圖12可看出總能耗的因子響應。製程參數中，模具溫度、冷卻時間、保壓時間、熔膠溫度以及背壓都有明顯的趨勢，值得一提的是熔膠溫度上升加熱器也隨之上升，但在液壓系統則是下降，兩者相加後熔膠溫度整體影響性也就沒特別明顯，但還是有一定趨勢存在。保壓壓力因加熱器及模溫機量測誤差，導致保壓壓力在加總後趨勢不明顯，但可由液壓能耗可明顯看出趨勢。

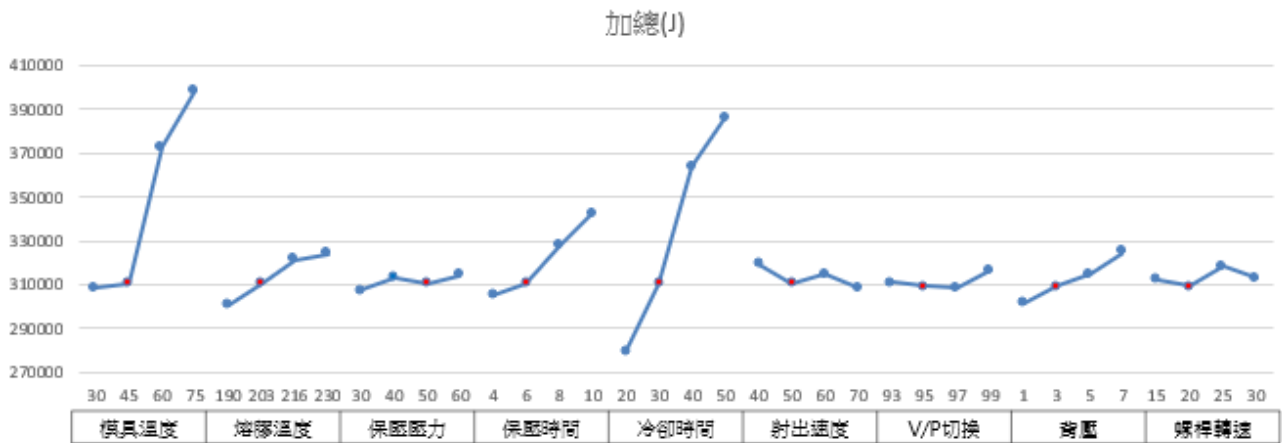


圖12 加總能耗因子反應圖



4. 結論

本研究將能耗分為三大部分，進行能耗即時監測，採用單因子實驗設計進行實驗，並藉由量測耗電數據進行能耗探討。針對此研究提出以下結論：

1. 透過單因實驗配合其能耗曲線能的判讀，能夠更仔細判斷能耗產生原因，更能了解能耗是如何產生，並且找出其可能影響能耗方式
2. 入料時液壓幫浦消耗相當大的能量，透過調整螺桿轉速或背壓，能耗的降低效果並不明顯。而當熔膠溫度上升時，入料時的液壓幫浦能耗明顯下降。然而同時提高熔膠溫度也會增加加熱器的能耗。因此，儘管入料時所使用的液壓幫浦能耗相當大，但優化的範圍卻有限。
3. 在目前水路冷卻配置中，冷卻是透過水塔自然冷卻，此時不產生能耗，因此模具溫度較低時，模溫機有較低的能耗。但同時須注意水塔用自然冷卻方式，設定模具溫度過低時(接近或低於室溫)，則無法達到其溫度，造成溫度不穩定。
4. 減縮短冷卻時間可以有效降低能耗，但需考慮可能對產品品質產生影響。在這種情況下，需要進一步評估產品品質，並在品質和能耗之間取得平衡。

5. 參考文獻

1. Isaac Meekers, Paul Refalo, Arif Rochman,2018,Analysis of Process Parameters affecting Energy Consumption in Plastic Injection Moulding, 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference,vol.69, pp.342-347
2. M.Sc. Iwko J. PhD.1, M.Sc. Wróblewski R. PhD,2019,Experimental study on energy consumption in the plasticizing unit of the injection molding machine, Industry 4.0,Vol. 4, Issue 5, pp.241-243
3. Ines, Ribeiro,Peças, Paulo,Henriques, Elsa,2012, Assessment of Energy Consumption in Injection Moulding Process, Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley,Berkeley, USA
4. 龐建民，2011，射出成型品質與節能製程研究，大華技術學院碩士論文，新竹，台灣
5. He Liu, Xiaogang Zhang, Long Quan, Hongjuan Zhang,2020, Research on energy consumption of injection molding machine driven by five different types of electro-hydraulic power units,Journal of Cleaner Production ,vol.242