

射出成形高模溫加熱製程技術能耗分析

黃榮丞^{1*} 王祥安¹ 張志良¹ 陳志豪¹

摘要

隨著塑橡膠製品精度要求越來越高，為了使塑料在充填階段有更好的流動性，透過模具溫度的提升，來達到精密成形的要求，因此高模溫成形製程技術儼然成為產業關鍵成形技術之一。有鑒於此，本研究透過協助塑橡膠成形加工業者導入感應加熱製程技術，完成感應式加熱節能技術產業應用案例，並評估分析傳統熱媒式與感應式加熱製程之能耗差異性。結果顯示，感應加熱製程技術與熱媒式模溫機加熱比較下，可讓射出機單機能耗從17.5萬度/年減少至12.2萬度/年，能源節省達20%以上，並縮短成形週期，加工時間由50秒降至35秒，提升射出機產線產率。

關鍵詞：感應加熱、射出成形、能耗

1. 前言

隨著塑橡膠製品精度要求越來越高，為了使塑料在充填階段有更好的流動性，以達到精密成形的要求，高模溫成形製程技術儼然成為關鍵製程技術[Yao & Kim, 2001]。高模溫成形製程技術原理是透過模具溫度的變化，間接控制熔膠在模具內流動的情形。傳統的高模溫成形製程技術包含使用電熱、水蒸汽、熱油與熱水進行模具溫度的增加，目前新興創新高模溫加熱技術的應用，則包含火焰加熱裝置、紅外線加熱裝置、以及感應式加熱裝置等。

塑橡膠射出成形製程屬於週期性生產模式，熱量在材料塑化階段和熔膠充填階段時需求最大，故相當耗能[林龍杰，2013]，之後熔膠冷卻固化成形階段，由模具的熱傳導與熱對流將熱量帶走，就此而言，射出成形製程是一種週期性的熱交換製程。而理論上加快模具升溫速度可有效縮短成形週期，進而減少成形製

程能耗[李育芸，2002][林良澤等，2006]。在塑橡膠成形產業高模溫熱源的選擇上，考量的因素包含能耗、加熱溫度、加熱速度與加熱均勻性等。近年來全球在塑橡膠高模溫成形製程技術發展趨勢，已逐步收斂至感應式加熱裝置的應用。相較於傳統加熱製程技術，感應式加熱製程技術具有加熱速度快、節省能源，以及良率高和產能效率提升等優勢[Horoszko, 1975]。惟感應加熱製程技術在金屬熱處理部分，因工件外形簡單，且變化不大，故感應加熱線圈樣式簡單，跨領域應用於塑膠射出成形高模溫成形製程技術時，感應加熱線圈設計需隨模穴外形與負載特性(如材質、熱傳係數、電阻率與導磁係數)而變化，並同時考慮電/磁/熱耦合效率，才能達到有效加熱、均勻加熱，以及控制加熱。

感應式加熱製程技術的應用須考慮感應加熱之電氣特性，包含電阻值、電感值與電容值等，以符合感應加熱電源主機匹配參數與設

¹財團法人精密機械研究發展中心 工程師

*通訊作者, 電話: 04-23595968# 613, E-mail: e10017@mail.pmc.org.tw

收到日期: 2015年06月04日

修正日期: 2015年11月09日

接受日期: 2015年12月25日

定，使感應加熱電源主機可於諧振頻率範圍內有效輸出，進而提高感應加熱主機、線圈與模具之間的電/磁/熱耦合效率，來達成節能之效益。另外，考慮射出成形製程模內之溫度分布需求，需透過模具形狀與感應加熱線圈磁場分布情形等因素，設計出符合製程需求的適型感應加熱線圈，以增加成形產業對感應加熱製程技術之應用效益。

有鑒於此，研究過程中協助塑橡膠成形加工業者導入感應加熱製程技術，突破塑橡膠成形加工業者與感應加熱電源主機業者技術整合瓶頸，完成感應式加熱節能關鍵技術產業應用案例，藉此驗證技術可有效降低能源使用量，並縮短生產週期。

2. 感應式加熱成形製程技術

在工業界電磁感應加熱於金屬熱處理、焊接、以及鍛造，其工作時間和精準性都較傳統的熱源為快，因此目前廣為應用。電磁感應加熱運作主要是利用三種能量之間的轉換關係，首先是電源供應器提供的電流經由線圈產生交變磁場，金屬表面經由磁力線的變化而產生渦電流，再藉由渦電流和金屬的阻抗關係，產生熱量[Tavakoli *et al.*, 2011][Kranjc *et al.*, 2010]。

感應加熱成形製程技術原理是透過電磁感應加熱效應，將重要區域的模仁表面溫度提

高，間接控制熔膠在模具內流動的情形，並非提高整體模具溫度，因此其感應加熱製程技術輸出於模具內的熱量並不多，相對的在模具冷卻階段可縮短冷卻時間，對模具加熱而言，縮短生產週期時間(Cycle time)與節省能源是相當重要的。而感應加熱速度快(溫升速度 $15^{\circ}\text{C}/\text{sec} \sim 20^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)，可在很短的時間內將射出成形模仁表面瞬間提高到要求之成形製程溫度。相較於一般傳統方法，以模具水路為通道，使用高溫熱水與熱油進行熱交換，間接加熱整副模具之方式，更能節省能源的消耗，進而達到節能之效果。

3. 高模溫成形製程加熱測試與能耗驗證

本研究導入感應式加熱成形製程技術於高模溫成形製程，實際應用至PP塑料射出LED燈罩射出成型產線，取代舊有熱媒式(熱水)加熱方式。過程首先透過電磁熱耦合分析軟體技術，以模擬分析輔助線圈設計，製作加工一款可符合產線成形模具加熱溫度需求之感應線圈，並進行熱媒式加熱與感應式加熱模具之能耗分析，相關前後製程參數如圖1所示。

3.1 測試平台

為瞭解高模溫成形製程加熱，採用傳統熱



圖1 熱媒式(模溫機)加熱與感應加熱製程參數

媒式加熱技術與感應式加熱成形製程技術之差異性，透過兩種測試平台進行加熱測試與能耗驗證，驗證平台設定如下，未加熱之模具溫度介於32~35°C：

- 熱媒式加熱：使用模溫機加熱，水溫控制至90°C，並以模具水路循環加熱整副模具，射出機調機試射成品，鎖定成形製程，執行一標準工單生產量，評估模溫機能耗。
- 感應式加熱：利用XYZ軸線圈移載平台，配合射出機開關模動作，將線圈移動至加熱位置，啟動感應線圈加熱公母模面至90°C，透過紅外線溫度感測器量測模面溫度，待加熱至目標溫度後，即退出線圈，進行合模射出，射出機調機試射成品，鎖定成形製程，執行一標準工單生產量，評估感應加熱電源主機能耗。

產線驗證測試平台如圖2所示，包含熱媒

式模溫機、電磁感應線圈、鋼製模具、線圈移載平台，以及感應加熱電源主機。熱媒式模溫機規格如表1，主要為傳統高模溫模具之媒體式加熱器，感應加熱電源主機規格如表2，為感應加熱的驅動源，主機功能為透過高頻產生器將輸入電流頻率轉換成20 k~50 kHz，並輸出至感應線圈；其中電磁感應線圈為銅製中空管，中空管之目的是利用水進行冷卻線圈因本體銅損

表1 熱媒式模溫機規格

項目	規格
溫控範圍	40~120°C
加熱功率	10 kW
泵浦馬力	3 HP
傳熱媒體	水
系統壓力	4.5 Kg/cm ²
泵浦流量	250 L/min



鋼製模具



感應線圈加熱模具



熱媒式模溫機



電磁感應線圈移載平台



感應加熱電源主機

圖2 產線驗證測試平台

表2 感應加熱電源主機規格

項目	規格
輸入電壓	380 V
輸入功率	35 kW
頻 率	20 k~50 kHz
輸出電壓AC	AC 1,200 V最大
冷卻水	8 L/min, 2.5 Kg/cm ²
面板功能	九段加熱模式 設定儲存功能 數位溫度控制

而產生的熱量，保持線圈的作業溫度，避免影響加熱效率或設備功能異常。

測試過程中使用紅外線熱顯像儀(圖3)做為溫度量測工具，取得感應加熱後模面溫度分布實際狀況，紅外線熱顯像儀可以同時量測整個加熱區域的溫度分布，並使用接觸式熱電偶測量模面溫度，再以該溫度校正熱顯像儀準確性。熱顯像儀除了可透過LCD顯示器得知即時的溫度分布外，並可連接至電腦，以儲存熱顯像圖形檔案，所儲存的圖形檔案可透過後處理軟體FLIR Tools獲取溫度數據，其功能為區域放射率修改、定點測溫與區域溫度分布圖等，圖4所示即為FLIR Tools的軟體介面。而上述提到的熱顯像儀之型號為FLIR E6，其規格如表3所示，檢測波長7.5-13 μm ，溫度精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，溫度感測範圍-20~250 $^\circ\text{C}$ 。

能耗分析評估部分，則經由量測傳統熱媒式加熱與感應加熱兩種方式實際於射出成形產線應用之能耗，量測方式則是使用HIOKI 9625功率計(圖5)安裝於機台設備供電端，並進行即



圖3 FLIR E6熱影像儀

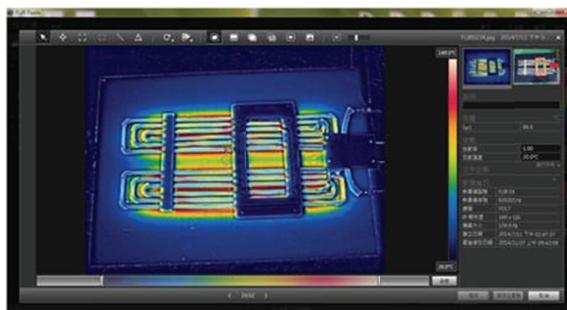


圖4 FLIR TOOL分析軟體

表3 紅外線熱顯像儀規格

項 目	規 格
檢測波長	7.5-13 μm
視 場	45 $^\circ$ × 34 $^\circ$
拍攝頻率	9 Hz
檢測溫度範圍	-20~250 $^\circ\text{C}$
精確度	$\pm 2^\circ\text{C}$ 或讀取值 $\pm 2\%$ 中較高的數值
解析度	160 × 120 pixels
檢測機能	中心點、最高點/最低點
影像顯示	3吋 320 × 240 color LCD
焦距範圍	0.5 m ~ ∞



圖5 HIOKI 9625功率計

時用電能耗數值記錄，待完成一標準產品工單生產後，將功率計擷取之數值，利用9625電力量測分析軟體(圖6)進行分析。而上述提到的HIOKI 9625功率計，其規格如表4所示。

3.2 實驗步驟與驗證流程

(1) 為瞭解感應加熱技術之節能效果，產線驗證以熱媒式加熱為對照組，感應式加熱為實驗組進行測試比較，模具分別透過熱媒式(熱水)與感應式(線圈)加熱，模具目標加熱溫



圖6 9625電力量測分析軟體

- 度90度。
- (2) 熱媒式加熱保持原產線製程設定操作，而感應式加熱在感應線圈進入產線進行模具加熱前，由於模具表面特性與現場光線，模面反射率有所差異，故影響溫度量測值，使熱顯像儀無法精確測得溫度分布，因此為驗證感應加熱模具溫度分布，本研究透過一鋼製模板噴塗紅外線歸零塗料(放射率為1.0)進行感應加熱測試，使得模面反射率具均一性，可提供線圈加熱後，準確量測模面溫度分布結果。
 - (3) 確認感應線圈之加熱結果後，依據產線射出成形設備需求，將感應線圈架設於線圈移栽平台配合模具開合模動作，以利線圈移動進行模具加熱動作，並同時將感應線圈串聯至感應加熱電源主機。

- (4) 完成電氣電路配接與感應線圈冷卻水循環系統。啟動感應加熱主機，進行感應線圈加熱模具製程，測試中分別以功率計記錄感應加熱電源主機，以及熱媒式模溫機之能耗狀況。
- (5) 產線兩項加熱技術能耗驗證，以生產一標準工單量(1,000件)完畢後，讀取功率計擷取之數值，進行統計分析，比較模具熱媒式加熱與感應式加熱之差異。

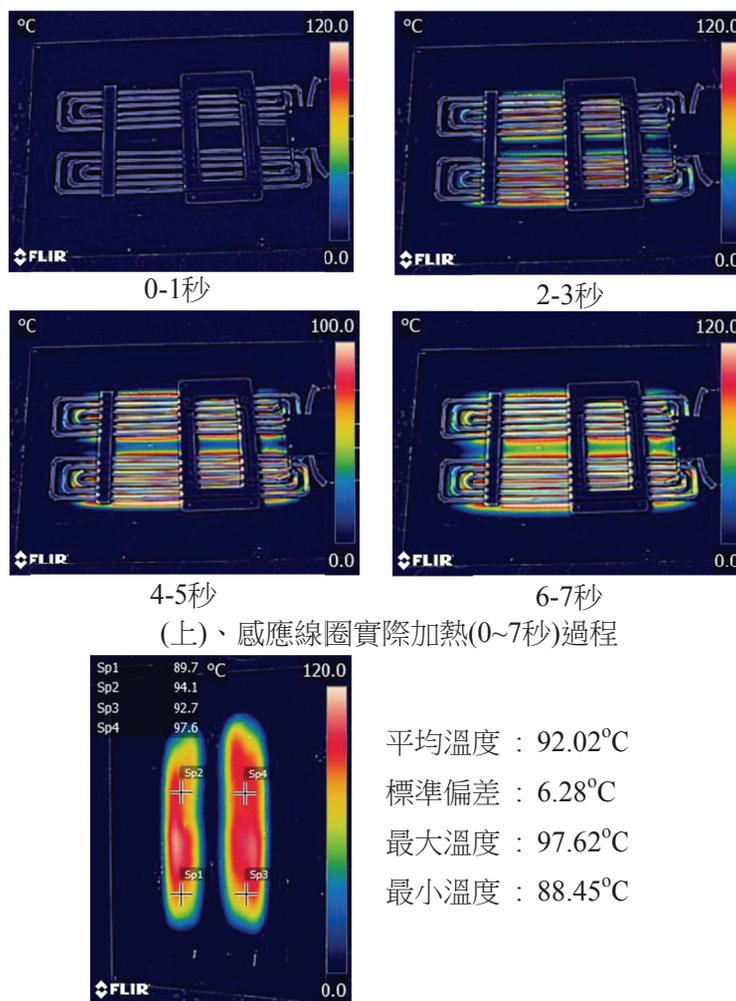
3.3 實驗結果

3.3.1 感應線圈加熱溫度分布場形分析

圖7(上)為透過感應線圈加熱模面0~7秒，每秒以紅外線熱顯像儀拍攝溫度分布情形，由圖可看出隨著加熱時間的增加，感應線圈所覆蓋的模面部分溫度亦隨之上升。待加熱完畢後，立即移開感應線圈，並以紅外線熱顯像儀拍攝代表模面加熱完成後之狀況，如圖7(下)所示。之後使用FLIR TOOL分析軟體，將模面目標加熱之區域進行溫度數值擷取，分析結果為最大溫度97.62°C，最小溫度88.45°C，平均溫度92.02°C，標準偏差為6.28°C，大致符合射出成形製程模面加熱規格需求，以及模溫機加熱與感應加熱兩者之加熱曲線示意圖，如圖8所示，模溫機加熱至目標溫度90度約25分鐘，感應加

表4 功率計規格

項目	規格
電壓範圍	150~600 V \pm 0.2% rdg. \pm 0.1% f.s.
電流範圍	0.5 ~5,000 A \pm 0.2% rdg. \pm 0.1% f.s.
接線方式	單相二線、單相三線、三相三線、三相四線、(50/60 Hz)
頻率特性	基本波至第50次 \pm 3% f.s. + 量測精度(45~66 Hz基本波形)
表示更新率	約0.5秒
其他	符合節能驗證ISO14001量測儀器 PC卡插槽，可長時間儲存資料 可記錄每個週期的RMS值(16.66 ms) 可同時記錄需量值及1~40次的電壓電流諧波值 可記錄各獨立電力波形 提供9625電力量測分析軟體



(下)、感應線圈實際加熱結束溫度數值

圖7 感應線圈加熱溫度分布場形

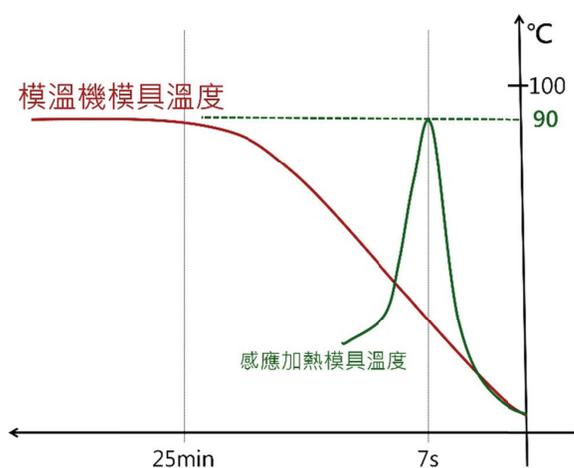


圖8 模溫機加熱與感應線圈加熱溫度曲線示意圖

熱僅需7秒，後續以此線圈構形與感應加熱電源主機設定參數作為能耗分析線上作業依據。

3.3.2 製程能耗分析

如圖9所示，經由將功率計與機台設備供電端連接，廠內以實際射出機進行高模溫成形製程生產，分析熱媒式與感應式兩種模具加熱方式的能源使用狀況。檢視熱媒式模溫機每單位時間的用電能耗後，由結果可知熱媒式模溫機可分為預熱段與射出作業加熱段，數值分析結果如圖10(上)顯示兩種不同的能源使用狀況。而如圖10(下)所示，感應加熱則為單純加熱段之能源使用狀況。

依據功率計擷取數值進行統計分析，結果如圖10(上)所示，模溫機加熱段(左)平均輸出功率7.6 kW，加熱時間25分鐘；射出成形作業段(右)平均輸出功率3.47 kW，每成形工件周期

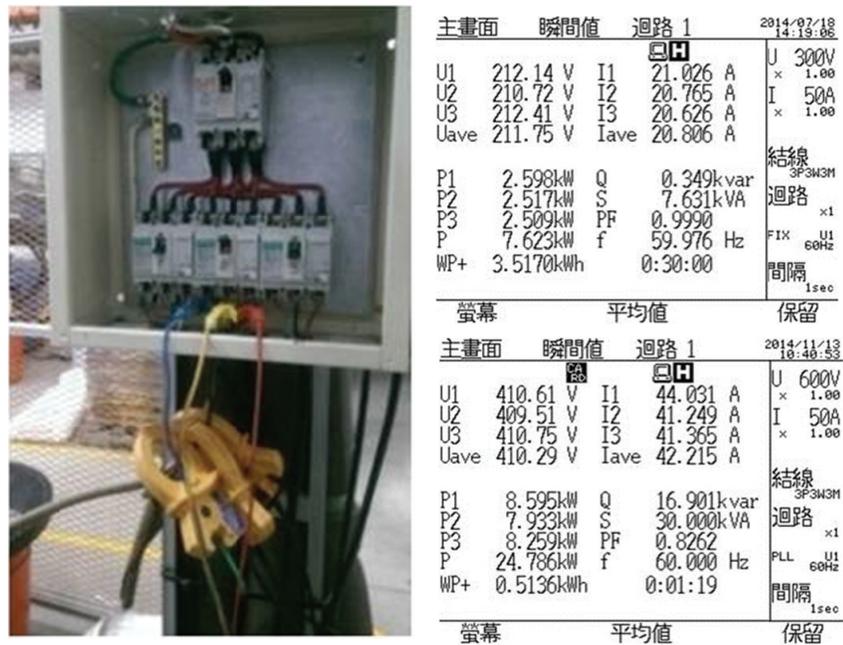
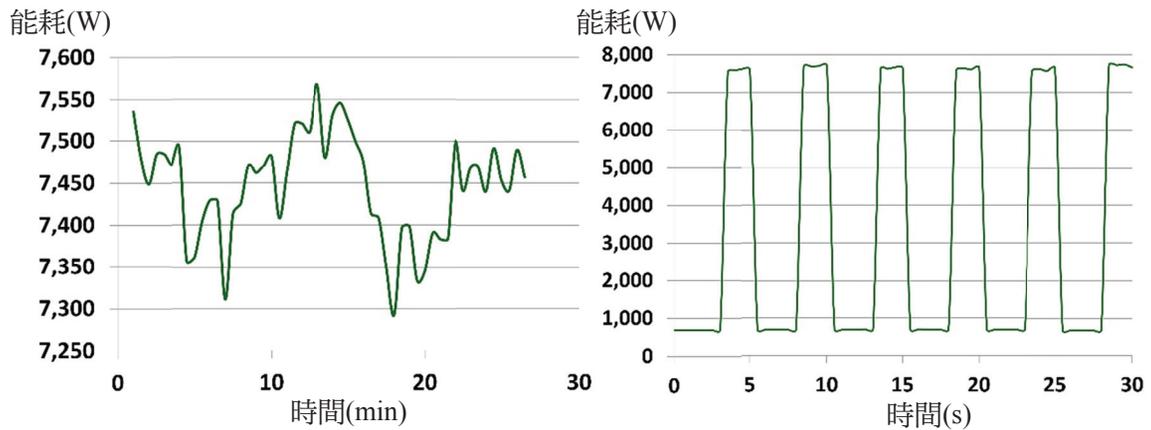
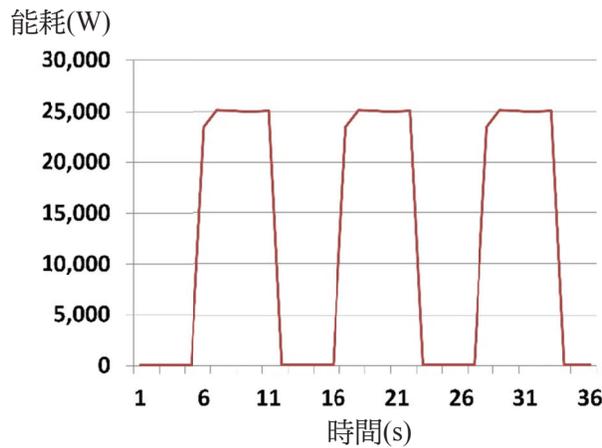


圖9 功率計連接機台電源與擷取之數值報表



(上) 模溫機能耗分析: 加熱段(左)、射出作業段(右)



(下) 感應加熱設備能耗分析

圖10 不同加熱方式之製程能耗分析

時間為60秒，按照以下算式計算依標準工單量1,000件工件，總能源使用量為61 kWh，計算式如式(1)所示。

$$7.6 \text{ kW} \times 25/60 \text{ (hr)} + 3.47 \text{ kW} \times (60 \times 1000) / 3600 \text{ (hr)} = 61 \text{ (kWh)} \text{ ----- (1)}$$

而感應加熱電源主機平均輸出功率為24.8 kW，每成形工件感應加熱作用時間為7秒，按照以下算式計算依標準工單量1,000件工件，總能源使用量為48.2 kWh，計算式如式(2)所示。

$$24.8 \text{ kW} \times (7 \times 1000) / 3600 \text{ (hr)} = 48.2 \text{ (kWh)} \text{ ----- (2)}$$

經式(3)計算後，可發現透過感應加熱製程技術加熱模具，與傳統熱媒式(熱水)加熱可節省能源20.98%。

$$(61 - 48.2) / 61 \times 100\% = 20.98\% \text{ ----- (3)}$$

4. 結 論

因應成形產業需求所出現的高模溫成形製程技術，為了增加產品良率與品質，卻間接提高了能源的消耗。為有效強化產業應用高模溫成形製程生產的能源效益，本研究導入了常見於熱處理產業之電磁感應加熱製程技術，結果顯示與傳統利用熱媒式模溫機加熱比較下，模具加熱採用感應加熱製程技術，除降低加熱製程耗能外，感應加熱製程加熱時間7秒，即合模射出，待冷卻頂出後，降低產品生產週期至35秒，其產出產業效益如下：

- 射出機單機能耗從17.5萬度/年減少至12.2萬度/年，能源節省達20%以上。
- 縮短成形週期，加熱時間由50秒降至35秒，提升產率30%。

謝 誌

本研究計畫承蒙經濟部能源局提供經費補助(計畫編號104-E0209)，特此致謝。

參考文獻

- 李育芸，2002，“感應加熱應用於模具快速加熱之研究”，中原大學機械工程學系，碩士論文。
- 林良澤，吳昌修，黃榮堂，2006，“嵌入式高週波感應加熱模具開發”，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，NSC95-2622-E-027-037-CC3，國立臺北科技大學機電整合研究所。
- 林龍杰，2013，“射出機料管保溫材料改善之節能效益分析”，綠色科技工程與應用研討會(GTEA)。
- Horoszko, E., Kraków, Polen, “Induction Heating of Flat Objects”, Arch. f. Elektrotechn., Bd.57, H 3, 1975.
- Kranjc, M., A. Zupanic, D. Miklavcic and T. Jarm, “Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating“, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.53, pp.3585-3591, 2010.
- Tavakoli, M. H., H. Karbaschi and F. Samavat, “Influence of workpiece height on the induction heating process”, Mathematical and Computer Modelling Vol. , pp.50-58, 2011.
- Yao, D. and B. Kim, 2001, “Development of Rapid Heating and Cooling System for Injection Molding Applications”, Polymer Engineering and Science, Vol. 42, No. 12, pp. 2471-2481.

Analysis of Energy Consumption in High Mold Temperature Injection Molding Process Technology

Rong-Cheng Huang^{1*} Siang-An Wang¹ Chih-Liang Chang¹ Chih-Hau Chen¹

ABSTRACT

With quality requirements of plastics and rubber products have become increasingly demanding. By increasing the mold temperature, plastics have better fluidity in the filling stage, which could achieve requirements in precision forming. So high mold temperature injection molding process technology has become one of the key technologies in the industry. In view of this, the study through the assistance to import induction heating process technology for plastics and rubber forming industry. To establish industrial application cases about induction heating energy-saving forming technology. And to assess the energy consumption of the conventional heat medium and induction heating process. The results show that comparison with conventional heat medium, the induction heating process technology in addition to improving warpage, bonding wires, poor micro structure and other defect, it also let energy consumption of stand-alone injection molding machine reduce from 175,000 kWh/year to 122,000kWh/year, shorten the cycle time, the processing time from 50 seconds down to 35 seconds.

Keywords: induction heating, energy consumption, injection molding

¹ Engineer, Precision Machinery Research Development Center

* Corresponding Author, Phone: +886-4-23595968# 613, E-mail: e10017@mail.pmc.org.tw

Received Date: June 4, 2015

Revised Date: November 9, 2015

Accepted Date: December 25, 2015