

模具表面快速溫控設備應用於精密微結構成型

Application of Rapid Mold Surface Temperature Control System on High Precise Micro-Featured Injection Molding

陳夏宗、張仁安

Shia-Chung Chen, Jen-An Chung

具微結構與微特徵尺寸產品的射出成型製程中，模具溫度控制會直接影響產品的收縮、翹曲與殘留應力。高模溫的應用除了有助於熔膠在微特徵模穴內的流動，還可降低成型壓力、增加產品微特徵轉寫精度。然而高模溫所造成長成型時間，影響生產成本甚巨。因此如何快速控制模具加熱與冷卻來達成微成型的品質，是當今微成型技術發展的重要課題之一。本文主要是介紹利用高週波電磁感應作為模具表面快速溫控的原理以及設備建置，並以應用於具雙面微特徵導光板與高深寬比微結構成型的案例來說明成效。

In the micro-featured injection molding process, mold temperature would directly affect the shrinkage, warpage and residual stress. Although high mold temperature could assist melt-flow within micro-featured cavity, reduce molding pressure and improve the replication accuracy, the long cycle time also leads to high production cost. Therefore, rapid mold temperature control to achieve micro molding quality without significant increase in cycle time is one of the important concerns. In this paper, the principle and usage of electromagnetic induction to achieve the rapid mold surface temperature control including system establishment is introduced. Its successful applications to molding light guide plate with micro-feature design on both sides and high aspect ratio micro molding are also illustrated.

一、前言

隨著科技與資訊的進步，成型技術亦日新月異的精進，持續突破尺寸的限制。產品的輕量化、薄型化、精密化與微型化，使得塑膠產品廣泛應用在各個不同領域的產業上。在各種塑膠加工製程中，射出成型由於具有可以快速廉價量產並適合

精密成型的優點，成為高分子加工最重要的技術之一。尤其近年來在 3C (computer, communication & consumer electronics) 產業、微機電技術 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 和生物科技的發展下，射出成型產品必須擁有高量產能、低成本、高精密度、高良率，甚至綠色環保與多功能性等特點。



圖 1. 各類薄殼與微小／微特徵成型及光學元件。(資料來源：IKV, Aachen, Germany)

近年來，薄型化與微小／微特徵成型、新型光學產品等需求日益增加，因此射出成型的技術層次也藉由微機電技術與超精密加工技術向上提升至微特徵、微尺寸的成型，並應用於生物晶片科技、平面光波導之分光器、液晶顯示器之導光板與 DVD 光碟片等產品的大量生產，如圖 1 所示。在射出成型製程中，壓力與溫度對於具有微結構、微特徵的成型品有直接與關鍵性的影響，如圖 2 所示。隨著壓力與模溫的提升，微特徵尺寸的轉寫精度也隨之增加。在一般成型的低模具溫度下，當熔膠以高溫狀態充填模穴時與模具表面接觸的瞬間熔膠產生固化。固化現象在微特徵結構模穴處特別明顯，導致流動阻力和所需成型壓力的升高，如圖 3 所示，一旦在充填過程中流動不佳，則容易形成短射與充填不足並對於後段保壓形成困難，產品因而有收縮凹陷而達不到預期精度的問題。

壓力的因素雖可改善轉寫性的精度，例如使用射出壓縮成型突破壓力在模穴中不均勻的分布，在小深寬比 (aspect ratio, AR) 的產品可得到不同程度的改善，但在大的深寬比 (AR 大於 2) 的微結構，其效益並不顯著，如圖 4 說明。若模具溫度於射出充填階段能保持在玻璃轉化點 (glass transition temperature, T_g) 以上，則熔膠在充填微結構時可保持融態不致於凝固，只要配合適當壓力即可達成高轉寫性的成型。然而高模溫終須冷卻至撓曲溫度 (deflection temperature) 以下才能開模頂出，而冷卻時間往往佔整個成型週期的 2/3。因此模溫加熱與

冷卻時間的長短影響成型週期乃至於生產速度與成本甚大。快速變模溫技術與設備的發展成為今微成型技術發展的重要課題之一。所以在 2000 年針對變化模溫成型，德國 IKV 提出變模溫概念⁽¹⁾，如圖 5 所示。在塑膠射出充填開始前將模具表面溫度從頂出溫度 (ejection temperature, T_e) 以下提升至玻璃轉化溫度 T_g 以上，充填完成後配合冷卻過程將模溫很快降至頂出溫度以下。至於如何達到快速模具加熱與冷卻，則在近十年有不同技術的發展⁽²⁻¹²⁾。

本文將針對模具快速溫度控制設備與原理作說

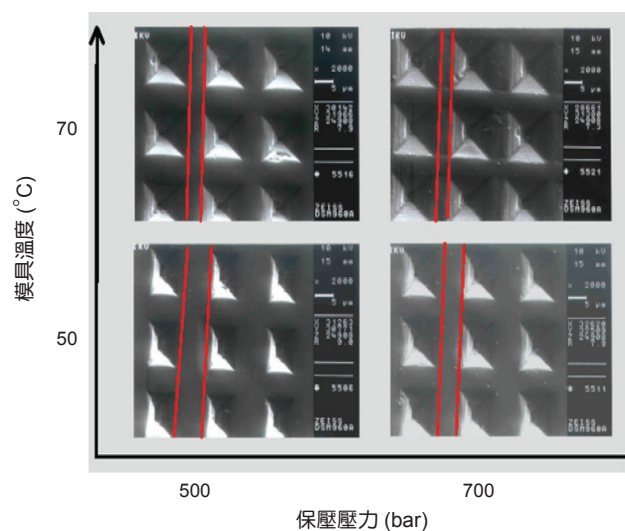


圖 2. 傳統射出成型參數模溫與保壓壓力對微結構轉寫性的影響。(資料來源：IKV, Aachen, Germany)

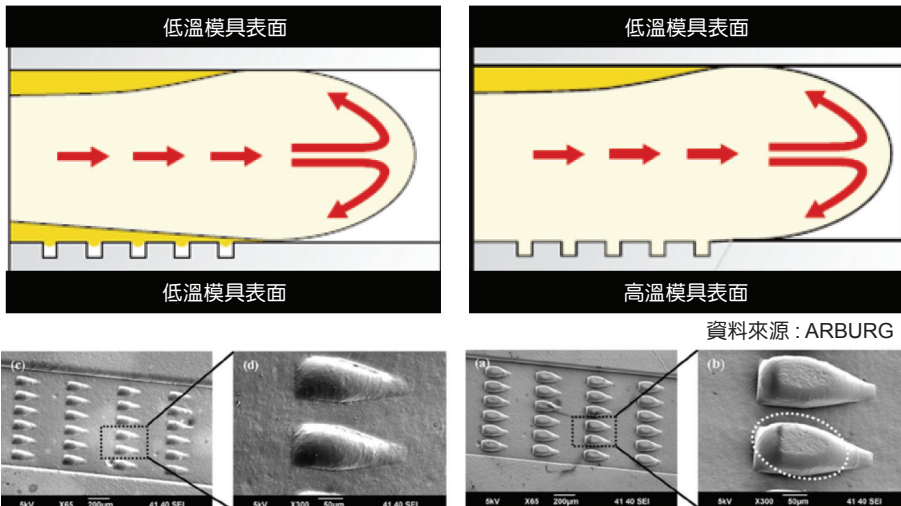


圖 3. 微結構在不同模溫下充填情況。

資料來源：Replication Quality of Flow-Through Micro filters in Micro fluidic Lab-on-a-Chip for Blood Typing by Microinjection Molding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008

明，並舉出其相關的應用，包含具雙面微結構之導光板與高深寬比微結構成型研究。

二、模具表面快速溫控設備與原理

近十年來有諸多關於變化模溫控技術研究與報告，其目的是使模具表面獲得均勻的快速加熱及冷卻同時兼具合理的成型週期。這些技術大致可以分成兩大類：(1) 加熱源與冷卻源均在模具內部，(2) 加熱源從模具外部的模穴表面來加熱而冷卻源均

在模具內部。前者使用的加熱源包含蒸氣、高溫高壓水或是電加熱片。因為加熱過程一定比例的模座會同時升溫，在冷卻過程也需同時降溫，因而較為耗能耗時，能夠達到模具表面溫升的速度大約是 7°C 左右。在使用外部加熱源作模具表面加熱，包括表面鍍層通電、紅外線加熱、鹵素燈加熱、高溫氣體加熱與電磁波加熱，其中紅外線和鹵素燈的輻射式加熱對於金屬質的模具加熱效率低；鍍層通電需配合隔熱層來降低熱源快速傳散至模座。高溫氣體加熱與電磁波加熱具有快速加熱與低耗能的特

不同深寬比微結構	傳統射出成型	射出壓縮成型
	<p>轉寫率：36%</p>	<p>轉寫率：48%</p>
	<p>轉寫率：88%</p>	<p>轉寫率：100%</p>
	<p>轉寫率：69%</p>	<p>轉寫率：100%</p>

圖 4. 傳統射出成型與射出壓縮成型在不同深寬比微結構轉寫性的影響。(資料來源：JSW, Japan)

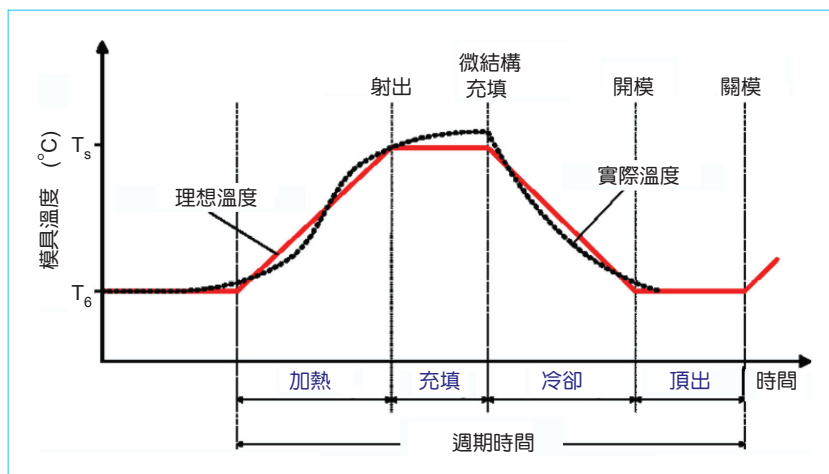


圖 5. 理想動態模具溫度控制歷程。(資料來源：IKV, Aachen, Germany)

性，其模具表面溫升的速度可達 30°C 以上，是最具符合產業界低成型週期需求的期待。

電磁感應式模具表面快速加熱／冷卻之應用原理主要在充填階段維持高模溫及充填結束後快速冷卻降溫以取出成型品之特性。傳統模具溫度於動態平衡時，其平均溫度仍然低於頂出溫度，而模具表面快速溫度控制方式則是利用額外加熱方式，在熔膠充填模穴之前對模具表面進行加熱，使模具表面溫度升高，且能在進入冷卻階段後快速降低模具溫度，令其溫度控制範圍介於玻璃轉換點 (T_g) 與頂出點上下之動態變化。此技術突破點在於如何能獲得最短升溫時間 (T_h) 以及最短冷卻時間 (T_c)，以達成最短週期內完成一個升降溫週期 (T_{ct}) 為目的。下文中將針對電磁感應的快速變化模溫原理、設備、溫控製程以及在微結構產品的成型應用作更詳細的介紹。

1. 感應式模具表面快速加熱 (IHTC) 製程原理

電磁感應加熱原理起始於西元 1831 年法拉第所發現的電磁感應定理 (Faraday's law)，以及後來的楞次定律 (Lenz's law)，此定律應用最為廣泛乃在於變壓器，通常可以用變壓器原理來解釋電磁感應現象。變壓器一般總是由兩個放置得很近的線圈組成。當電壓加在其中一個線圈上，我們稱它為初級繞組或簡稱「初級側」，在另一個線圈上我們稱為「次級側」也感應到一個交變電壓。在感應加熱過程中，電源為感應線圈提供高頻的交流電壓，

感應線圈相當於初級側，被加熱工件相當於次級側。其應用方式基本是將頻率為 60 Hz 之直電引入系統，先利用變壓器使其轉變成不同頻率的交流電源，並提供給負載部分之感應線圈，使感應線圈產生高頻交變磁場。於此時再將一具有磁性的導電性加工物件置於加熱線圈所產生的交變磁場內，則由於磁力線的切割，導致在不同深淺的加工物件面上產生感應電流 (即渦電流)，並且因為加工物件材料的阻抗特性及所感應之渦電流於加工物件上的流動所產生之焦耳熱，而使加工物件溫度升高，以達到加熱之目的，此即感應加熱的基本工作原理。

導體的導電機構主要是自由電子。當導體上提供一電壓，這些電子便按照同一方向從一原子移到另一個原子形行電流。電子在移動中會受到阻力，阻力越大電流越小，一般用電阻率 Ω 來表示導體的導電性能。由於電阻的存在，當電流流過導體時會引起導體發熱，根據焦耳－楞次定理可得：

$$Q = I^2 \Omega t \quad (1)$$

其中， Q 為導體發熱量， I^2 為通過導體的電流強度， Ω 為導體電阻， t 為電流通過導體的時間。

2. 感應加熱特性－電流與滲透 (集膚) 深度

當電磁場穿透導電的加熱工件，其電磁場強度因與導電工件內部自由電子的交互作用關係，會引起指數的衰減，因而感應的渦電流會集中在加熱

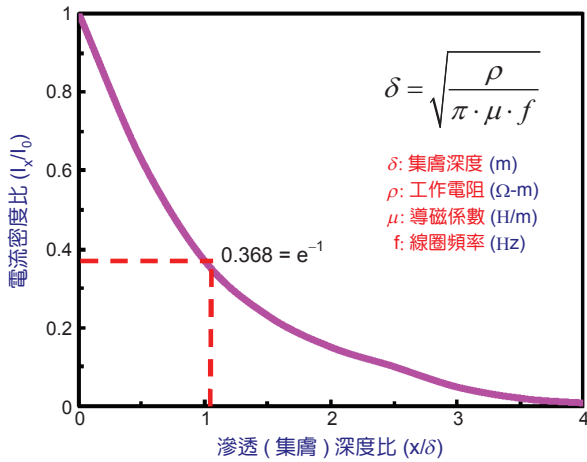


圖 6. 感應加熱滲透(集膚)深度計算^(13, 14)。

工件表面一定厚度的範圍，這稱為集膚效應 (skin effect)。集膚效應對應的加熱深度稱為滲透深度 (penetration depth) 或集膚深度 (skin depth)，其定義為當線圈通一高頻之電流時，在加工物件表面上所生成之感應渦流，當其深入至工件內部的距離使得感應渦流衰減至表面強度的 $1/e$ (即 36.8%)，如圖 6 所示。滲透深度可以下列公式表示：

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (2)$$

其中， δ 為滲透深度， ρ 為材料的電阻係數， μ 為材料的導磁係數， f 為使用的工作頻率。 δ 滲透深度是渦電流密度降為表面電流的 $1/e$ (即 36.8%) 處

的深度。在實際應用的感應加熱的效率因素甚為廣泛，包括系統電源功率、頻率的選用、感應線圈 (induction coil) 的設計、線圈與加工件距離以及感應線圈與變壓器的匹配性等影響。

3. 感應式加熱製程設備

感應式變模溫加熱製程有別傳統射出成型的動作在於合模作熔膠射出充填階段前，先使用感應線圈在靠近模具表面後進行加熱，然後關模、充填，並使用模溫控制機切換冷水循環進行冷卻。感應加熱系統的基本組成包括感應線圈、交流電源和工件，根據加熱對象不同，將線圈製作成不同的形狀，流過線圈的交變電流產生一個通過工件的交變磁場，該磁場使工件產生渦電流來加熱。感應加熱設備的組成如圖 7(a) 所示，其配備有高週波主機控制器及加熱線圈、水冷式冷卻系統，與射出成型機之間可以利用感測器訊號的傳遞來達到全自動化的動作。圖 7(b) 為採用溫度監控系統的成型週期記錄圖，藉由溫度感測器監控每一射出週期模面目標溫度，同時穩定產品品質，達到精密成型目的。

三、模具表面快速溫控之成型應用

1. 高深寬比微結構

一般微結構成型轉寫性不易達成，可藉由提升射出壓力或射出壓縮製程改善微結構成型轉寫性，但其提升的程度仍有一定極限；因此，利用高模溫

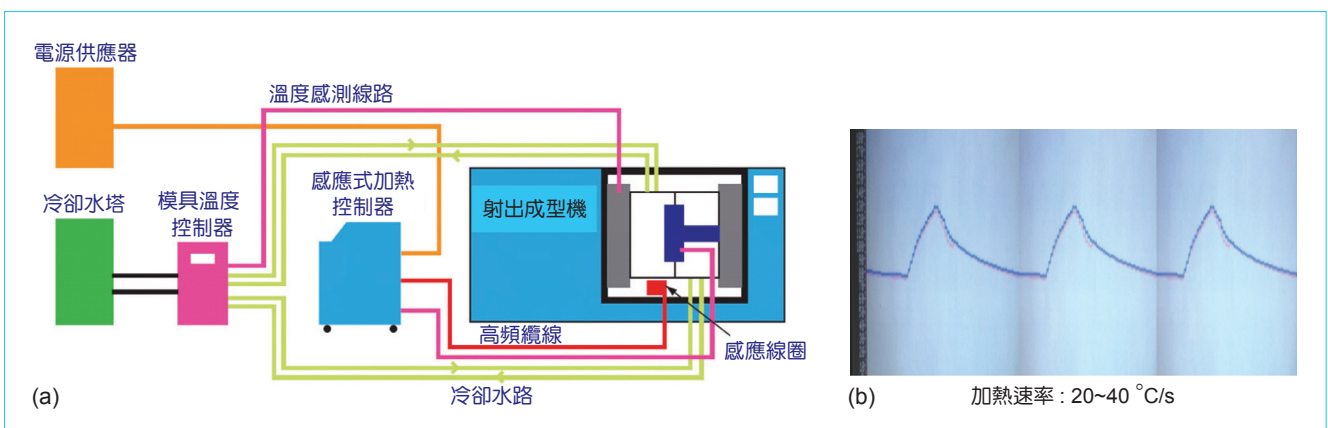
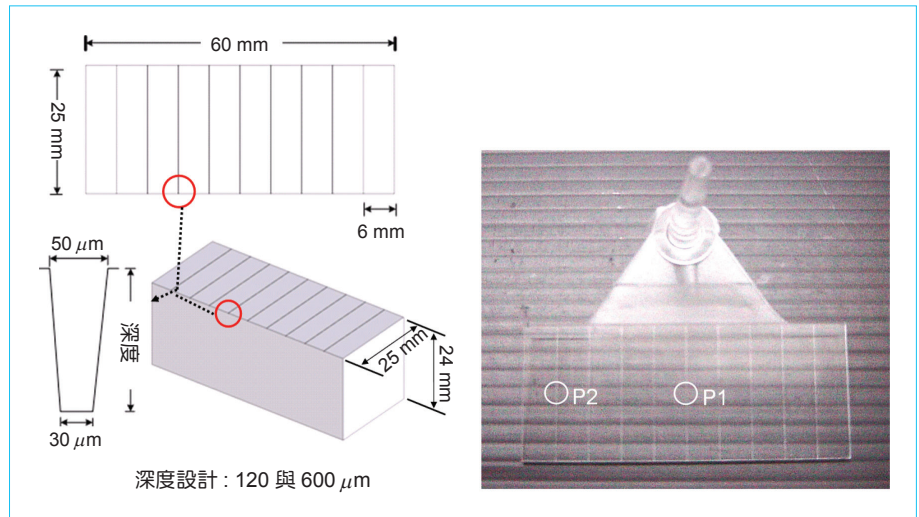


圖 7. (a) 感應加熱相關設備，(b) 感應加熱製程監控模溫曲線圖。

圖 8. 高深寬比微結構模仁尺寸及轉寫性量測位置圖，成品厚度為 1.2 mm。



成型是一項非常有效的應用技術。感應加熱技術應用於實際成型案例中，利用與模仁長寬接近的線圈尺寸對具微結構模仁表面進行加熱，模仁的大小為長 60 mm、寬 25 mm 及高 24 mm，微流道的設計上，設計一脫模斜度寬 30–50 μm ，微結構尺寸深寬比例設計，兩組深度分別為 120 μm 及 600 μm ，其深寬比分別為 2.4 與 12，微結構轉寫性量測比較點為 P1 和 P2 位置，如圖 8 所示。實驗中將線圈移至模具表面加熱約 4 秒，而加熱溫度會高於目標溫度。之後再將線圈移開模具表面，進行關模與充填。這階段動作時間約 4 秒，可利用來協助溫度達成均勻化。圖 9 為微結構之類比溫度分布，在 P1 和 P2 位置，其中 ΔT 是模具表面及微結構的溫度

差， ΔT 的溫差很小，顯示出電磁波能深入微結構底部作加熱。對感應加熱而言，只需 2–3 秒就可以將模具溫度從 60 $^{\circ}\text{C}$ 加熱至 140 $^{\circ}\text{C}$ ，主要原因在於感應加熱僅加熱模具表面層很薄的部分（約 0.1 mm）。

圖 10 為成型完成後之微結構量測結果，P1 和 P2 的轉寫率可分別達到 96.7%、95.3%。在超高深寬比 12、微結構深 600 μm 的成型實驗中，同樣顯示感應加熱 4 秒後之類比溫度，電磁波同樣能深入微流道底部作加熱，加熱瞬間的溫差較大，經過均勻化後的溫度其表面即微結構底部的溫差明顯變小，呈現均勻的溫度分布。圖 11 為成型高度與變化模具溫度之關係在抽真空與無抽真空兩種情況，當模具溫度在充填時高於材料的玻璃轉化溫度，成型的轉寫性可以明顯被提升，在最高模溫的成型條

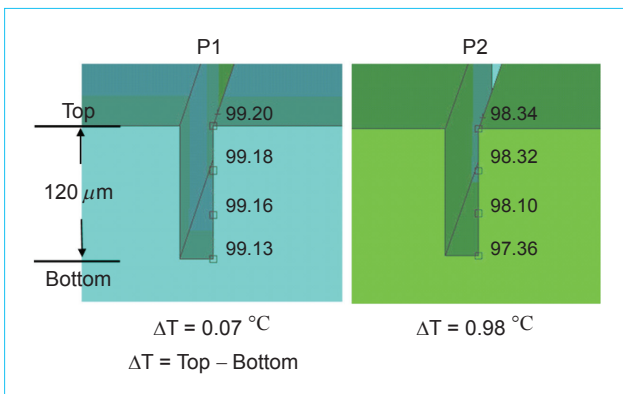


圖 9. 當達到目標溫度 100 $^{\circ}\text{C}$ 時微結構位置 P1 及 P2 之類比溫度分布圖，流道深度為 120 μm 。

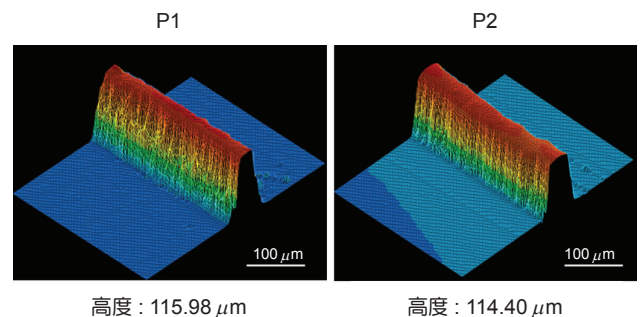


圖 10. 3D 雷射顯微鏡量測成型結果圖，量測位置 P1 及 P2，流道深度為 120 μm 。

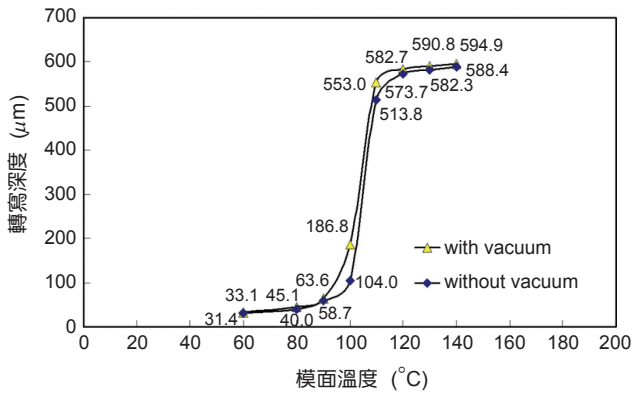


圖 11. 微結構成型高度量測結果，轉寫高度隨模溫提升及抽真空而有效提升，模仁微結構設計深度為 600 μm。

件下的平均轉寫性可達 99.2%。在使用真空的條件下，協助幫助排氣改善充填，相同具有增進微結構轉寫性的效果。本高深寬比的案例中，利用感應加熱搭配冷卻水達成模具快速加熱冷卻控制並運用於微結構射出成型製程，同時以 CAE 模擬分析掌握高深寬比微結構模具溫度變化，並與實驗達成驗證，由於感應加熱只於集膚深度內加熱，分析顯示電磁波能深入微流道底部，同時對微結構的側壁產生加熱效果，實驗中，模具表面與微流道底部的溫度差可小於 2 °C。利用此技術可達成快速模具溫度控制，有效地提高模面溫度並成功地改善微結構成型的轉寫性。

2. 具雙面微結構導光板

雙面微結構導光板的成型案例，使用一個長 64 mm、寬 45 mm、厚 1 mm、材質為 PC 的雙面

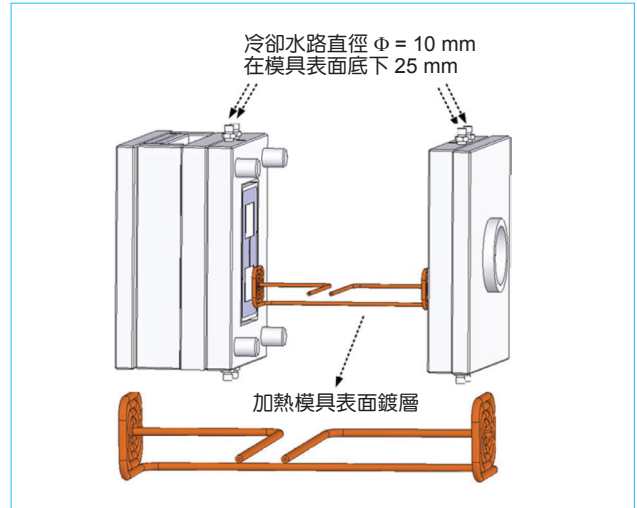


圖 12. 雙面導光板之感應加熱示意圖。

微結構的導光板進行射出成型實驗，微結構的設計上，出光面為 V 形溝槽，反射面為漸層 V 形溝槽。採用雙邊線圈設計的目標模具溫度為 100 °C 和 140 °C，實驗所使用的 PC 玻璃轉化溫度為 130 °C，圖 12 為雙面導光板之感應加熱示意圖。在搭配動態模具表面溫度控制技術的過程上，模具會先預熱至 85 °C，然後將線圈移至模具表面進行加熱，然後將線圈移開模具表面，此時模面加熱溫度達到 155 °C，經過合模的作動時間內，模具表面溫度會均溫至 140 °C。圖 13 為模仁、傳統射出成型及搭配感應加熱溫控技術，在出光面及反射面使用 3D 雷射顯微鏡對微結構的量測圖，藉由感應加熱提升模具溫度，能明顯改善微結構轉寫性，量測結果如表 1 所列，顯示導光板出光面微結構的轉寫性在成型高度和間距分別可以增加約

表 1. 導光板微結構成型高度量測結果。

量測位置		微結構模仁	傳統射出成型製程		傳統射出成型 + 感應加熱		改善率 (%)
		量測值 (μm)	量測值 (μm)	轉寫率 (%)	量測值 (μm)	轉寫率 (%)	
間距 (μm)	出光面	52.15	49.15	94.24	51.17	98.12	3.88
	反射面	78.80	73.01	92.65	75.99	96.43	3.78
高度 (μm)	出光面	17.38	14.98	86.19	17.07	98.22	12.03
	反射面	27.43	23.86	86.99	25.97	94.68	7.69

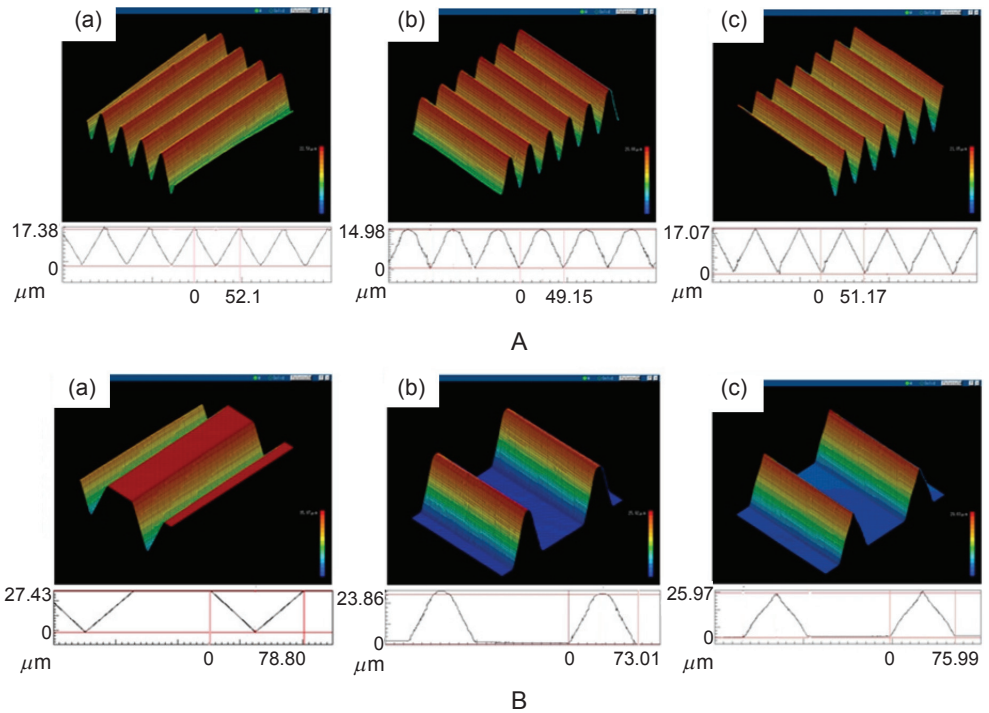


圖 13. 3D 雷射顯微鏡之微結構量測結果圖，(A) 出光面微結構，(B) 反射面微結構，其中 (a) 模仁、(b) 傳統射出成型和 (c) 搭配感應加熱技術。

2.03 μm (+12.0%) 和 2.02 μm (+3.9%)，反射面微結構的轉寫性在成型高度和間距可以增加約 2.11 μm (+7.7%) 和 2.98 μm (+3.8%)，可以發現當模具溫度超過 140 $^{\circ}\text{C}$ ，微結構轉寫性就可以大幅度增加，從原來的 86.2% – 94.2% 增加至約 94.7% – 98.2%，流動造成的殘留應力也能有效降低。

四、結論

模具表面快速溫控設備的應用是先進射出成型領域一項重要技術，應用高週波電磁感應加熱使被加熱的材料內部產生感應渦電流，並依靠渦電流產生能量達到加熱效果，由於僅對於工件表面至集膚深度範圍加熱，因此加熱體積少、升溫速度快，若搭配良好之加熱線圈設計，升溫速度更可提升至 25 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上。使用感應加熱應用於實際成型當中，達成快速模具表面加熱及快速冷卻動態變化，成功將高深寬比微結構與具微結構導光板之轉寫性提升，產品品質明顯提升。發展此動態模具溫度控制技術，可加大成型視窗，有效達成高良率與良好表面品質，減少產品表面二次加工所產生之能源消耗，更可視為有效節約能源的綠色製造技術。

參考文獻

1. Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Principle of Variothermal Processing, 中原大學模具中心微成型與微特徵模具加工技術研討會 (2002).
2. Ono Sangyo Co., Japan, 小野朱氏會社發表技術報告 (2004).
3. D. H. Kim, M. H. Kan, and Y. H. Chun, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 3347 (2001).
4. D. Yao, M. Chen, and B. Kim, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 704 (2001).
5. D. Yao and B. Kim, *Polymer Engineering and Science*, **42**, 2471 (2001).
6. W. Schinkoethe and T. Walther, *Kunststoffe Plast Europe*, **90**, 62 (2000).
7. Y. C. Chen, PhD Thesis, Chung Yuan University, Taiwan (2005).
8. D. Hatch, D. Kazmer, and B. Fan, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 428 (2001).
9. P. Ambady and D. Kazmer, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 530 (2001).
10. D. Yao and B. Kim, *J. Injection Molding Technol.*, **6**, 11 (2002).
11. S. C. Chen, H. S. Peng, J. A. Chang, and W. R. Jong, *Inter. Comm. Heat & Mass Trans.*, **31**, 971 (2003).
12. S. C. Chen, J. A. Chang, Y. J. Chang, and S. W. Chau, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 556 (2005).
13. S. Zinn and S. L. Semiatin, *Element of induction heating-design, control and application*, Electric Power Research Institute, Inc. Palo Alto, USA (1997).
14. E. J. Davies, *Depth of penetration in electro-heating*, *Elektrowarme International*, **46** (B1), 29 (1998).



陳夏宗先生為美國西北大學材料科學博士，現任中原大學機械系教授暨工學院院長。

Shia-Chung Chen received his Ph.D. in materials science and engineering from University of Northwestern. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering and Dean of Engineering at Chung Yuan Christian University.



張仁安先生為中原大學機械工程博士，現任中原大學機械系兼任助理教授暨中原大學薄膜中心博士後研究員。

Jen-An Chung received his Ph.D. in mechanical engineering from Chung Yuan Christian University. He is currently a part-time assistant professor in the Department of Mechanical Engineering and postdoctoral researcher of R&D Center for Membrane Technology at Chung Yuan Christian University.