

塑料冷卻階段之暫態數值模擬與分析

詹德勝

黎明技術學院 資訊科技系

Email:lit00441@mail.lit.edu.tw

摘要

塑料冷卻階段在整個成型的過程影響塑料產品品質。良好的冷卻設計可以縮短成型時間及提高產量；反之，冷卻不適當則會導致塑料收縮不均勻而產生形變，增加不良率。在加熱階段，因為熔膠的熱量經由熱傳導傳遞到模具內壁，使模具逐步溫度上升。在冷卻階段，模具冷卻過程中，以對流動方式穩

定地將熱量除去。塑料加熱與冷卻階段模具溫度呈動態變化。模具的熱傳導使得模具的溫度下降，冷卻過程將持續到整個產品生產結束。因此，模具之電腦模擬與溫度控制系統設計就顯得格外重要。以暫態冷卻的方法（Transient cool approach）將助於模具的冷卻行為的了解，電腦模擬分析利於塑料冷卻階段熱分析並提高塑料翹曲分析。

關鍵詞：冷卻階段、塑料模具、電腦模擬

率，應盡量減少冷卻時間，同時為了產品的品質必須進行均勻的冷卻。

1、前言

近年國內經濟成長快速，國民生活水準提昇。電腦模擬分析隨電腦科技日益提昇，已廣泛應用於各產業，產業的競爭力與實際試誤的成本息息相關。電腦模擬分析可縮短產品開發時程，使業者邁向更快速的生產流程。因此電腦模擬與相關熱分析做為開模前模擬與測試，以達到提高研發、製造、生產的效率及降低其成本。冷卻系統設計對於射出成型的塑料產品工業非常重要，因為它不僅對縮短成型週期至關重要，而且還顯著影響最終產品的產率和品質。冷卻通道的塑料零件進行電腦模擬並使用數值分析進行循環暫態冷卻分析。模具冷卻研究的目的是確定沿內腔壁的溫度分佈，以改進冷卻系統設計。研究冷卻通道的形式及其位置對模具溫度分佈和塑料凝固程度的影響。為了提高過程的產

塑料工業是世界上發展最快的工業之一，被列為少數幾個十億美元的工業之一。射出成型零件的需求每年都在不斷增加，因為眾所周知，射出成型技術是最有效的製造技術，可以以低成本、經濟地生產具有各種形狀和複雜幾何形狀的精密塑料零件[1]。塑料射出成型技術是一個循環過程，其中塑料被注入模具內腔，並固化形成塑料零件。每個週期有三個重要階段。第一階段是在射出溫度下用熔融的熱塑料填充內腔（填充和後填充階段）。隨後將塑料的熱量帶走到冷卻通道（冷卻階段），最後將固化的部分排出（排出階段）。冷卻階段最為重要，因為它會顯著影響最終產品的產率和品質。眾所周知，射出成型過程中超過 70% 的周期時間都花在充分冷卻熱塑料熔體上，以便零件可以在沒有任何顯著變

形的情況下被頂出 [2]。

縮短循環時間的冷卻通道的高效冷卻系統設計必須最大限度地減少不希望有的缺陷，如縮痕、收縮差、熱殘餘應力積聚和零件翹曲。在射出成型的後填充和冷卻階段，熱的熔融塑料接觸冷的模具壁，並在壁上形成固體層。隨著材料冷卻，固體表皮開始隨著時間的增加而生長，直至整個材料凝固為止。

多年來，許多研究對射出成型冷卻系統的最適化和成型過程的相變問題進行了許多研究，重點在於的系統設計和驗證[3-7]。本文的主要目的是研究冷卻通道位置及其橫截面形狀對模具和塑料溫度分佈的影響，進而研究它們對塑料固化度的影響。熔融塑料的熱量通過與通過冷卻通道的冷卻劑的強制對流以及與模具外表面周圍空氣的自然對流而帶走。冷卻劑以給定的流速和給定的溫度流過通道，該溫度在通道的整個長度上被認為是恆定的。本研究暫態的二維模型，它由內腔、模具和冷卻通道表面的整個計算區域。通過求解暫態能量方程可以得到模具和塑料的循環瞬態溫度分佈。

2、研究方法

塑料模具模擬分析的研究及開發，具有實際而且重要的運用價值。溫度模擬理論包括非線性溫度場、塑料模具材料性質等方程式及建立計算網格系統[8-9]。研究方法分為(1) 塑料模具幾何模型建立與計算網格及 (2) 塑料模具熱模擬分析三大類，分別敘述如下：

2.1 塑料模具幾何模型建立與計算網格

建立塑料模具結構模型，完成模具計算模型。確定所有網格都相連接，網格安排、數值方法建立及程式除錯等工作項目。

2.2 塑料模具溫度模擬分析

採用有限元素法離散溫度場方程式。熱源項則以高階的數值方法來處理。本計畫將藉由不同對流係數的改變，探討溫度場分佈及熱分析特性[10-12]。

3、數學模式

塑料冷卻能量控制方程式，如方程式(1)

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

塑料冷卻能量控制方程式如下，此模擬幾何為對稱，只需設定四分之一幾何形狀模擬，其邊界條件設定如圖 1。

邊界條件：

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_{\text{env}} - T)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_{\text{env}} - T)$$

$$T = 25^\circ C$$

圖 1 邊界條件

控制物理系統行為的數學模型的數值解是透過有限元素分析與計算及對方程組離散來求解。初始條件 120 °C，邊界條件如圖一，外部溫度假設為 25°C。在進行數值模擬計算分析前，必須先建置網格以分析溫度分布，模擬網格共 1922 個三角網格如圖 2。

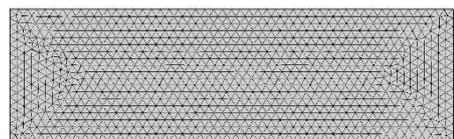


圖 2 網格建置

本模擬計算使用的數值方法為有限元素法 (finite element method)。首先評估具有對流條件 $h=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 基礎，進行中心點、表面及整體平均溫度之預測分析，模擬結果如圖 3。在冷卻 2 hr 塑料中心點溫度為 57°C，表面溫度為 40 °C，塑料整體平均溫度 50°C，塑料中心點與表面溫度差高達 17°C。



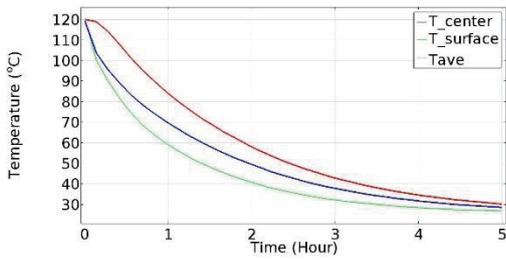


圖 3 表面溫度中心點及平均溫度($h=10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

4、結果與討論

本研究模擬在不同風速下(不同的對流係數)塑料冷卻的溫度分布。其中對流係數 $0.01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 表示風速為 0 的操作狀況。風速愈高表示其對流係數愈高。為了評估及提升塑料冷卻階段熱分析並提高塑料冷卻效率，設計不同風扇的風速是常用的方法。本研究模擬不同對流係數(0.01、5、10、20 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)模擬分析，模擬結果如圖 4 至圖 7。冷卻 3 hr 在不同對流係數下，塑料內部最高溫度分別為 75°C 、 50°C 、 42°C 及 36°C 。塑料最高溫度隨對流係數增加而降低，換言之，塑料最高溫度隨風速增加降低、快速空氣流動使塑料內部溫度能快速下降，以提高塑料散熱效果。

不同對流係數(0.01、5、10、20 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)中心點、表面及整體平均溫度隨時間的變化之預測分析，如圖 8 至圖 10。中心點、表面及整體平均溫度隨時間增加而下降。圖八在冷卻 5 hr 在不同對流係數下，中心點的溫度分別為 45°C 、 32.5°C 、 30°C 及 27°C ，除對流係數 $0.01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 操作外，中心點均低於 37°C (人體溫度)。圖 10 為冷卻 5 hr 在不同對流係數下，塑料的表面溫度分別為 45°C 、 28°C 、 26°C 及 25°C ，對流係數 10 及 20 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 的操作，塑料的表面溫度已極接近 25°C 的室內溫度。綜合此電腦模擬與相關熱分析，可預測塑料所需的冷卻時間。

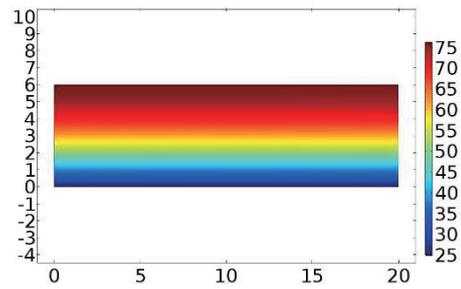


圖 4 溫度分布($h=0.01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

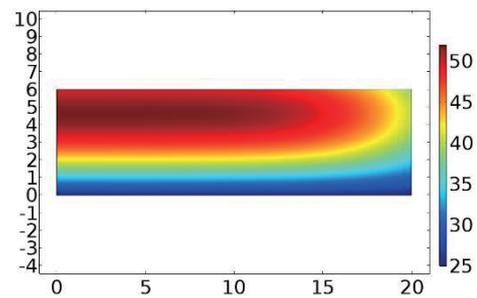


圖 5 溫度分布($h=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

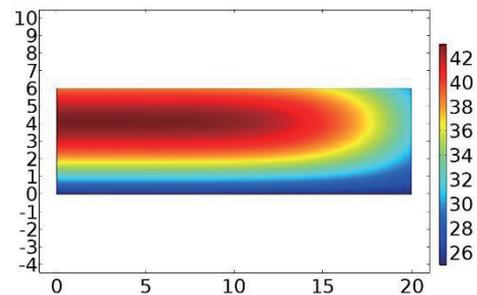


圖 6 溫度分布($h=10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

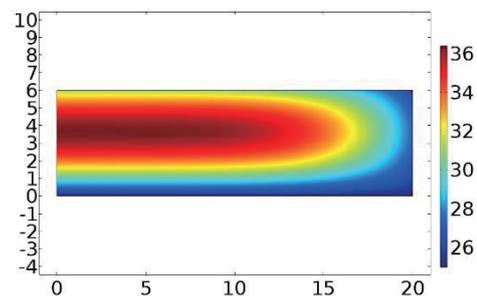


圖 7 溫度分布($h=20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

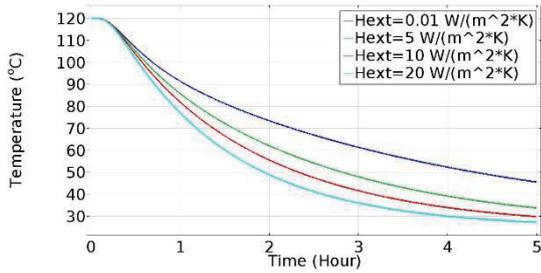


圖 8 中心點溫度分布 ($h=0.01-20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

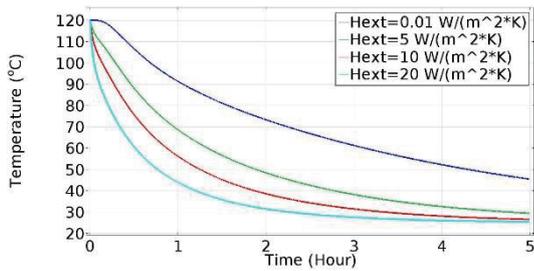


圖 9 表面溫度分布 ($h=0.01-20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

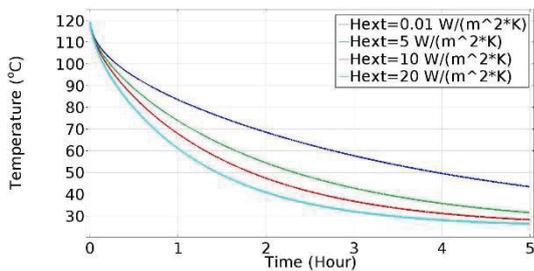


圖 10 整體平均溫度分布 ($h=0.01-20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

5、結論

塑料冷卻階段在整個成型的過程影響塑料產品品質。良好的冷卻設計可以縮短成型時間及提高產量。建立塑料數值分析的數學模式及透過數值模擬與計算為塑料冷卻階段相當重要的工作項目。此工作項目的完成有利於分析塑料模具特性及塑料模具開發。綜合此溫度電腦模擬與相關熱分析，可預測塑料所需的冷卻時間及助於溫度控制的系統設計。

6、誌謝

本研究為三銘模型開發有限公司與黎明技術學院產學合作計畫，承蒙三銘模型開發有限公司提供經費，致上最高的感謝。

7、參考文獻

1. S.H. Tang, Y.M. Kong, and S.M. Sapuan, "Design and Thermal Analysis of Plastic Injection Mould, J. of Materials Processing Technology", vol. 171, P. 259-267(2006).
2. Li Q. Tang, C. Chassapis, and S. Manoochehri, "Optimum Cooling System Design for Multi-Cavity injection Molding", Finite Elements in Analysis and Design vol.26. P.229- 251(1997).
- 3.M.R. Barone and, D.A. Caulk, "Special boundary integral equations for approximate solution of Laplace's equation in two-dimensional regions with circular holes", Q. J. Mech. Appl. Math. 34(3),P.265-286(1981).
4. J.C.Lin, "Optimum Cooling System Design of a Free-Form Injection Mold Using an Abductive Network", J. of Materials Processing Technology. Vol.120, P.226-236(2002).
5. H. Qiao, "Transient Mold Cooling Analysis Using the BEM with the Time- Dependent Fundamental Solution", Int. Com. in Heat and Mass Transfer, vol. 32, P. 315-322(2005).
7. C. S. Li, C.F.Hung, and Y.K; Shen, "Finite Element Analysis for Phase Change problem in Polymer processing", Int. Com. in Heat and Mass Transfer, vol.22, P. 167-177(1995).
8. Geankoplis CH. 2003. "Transport processes and separation process principles" (includes unit operations) 4th edition. Prentice Hall Press Upper Saddle River, NJ, USA.
9. Jay Shormaker, "Moldflow Design Guide", Hanser Publisher, 2006.
10. W. F. Ames, "Numerical methods for partial differential equations", Academic Press, New York,

1977.

11. S. C. Chen, N. T. Cheng and S. Y. Hu, "Simulations of primary and secondary gas penetration for a gas-assisted injection-molded thin part with gas channel", *Journal of Applied Polymer Science*, 67(9), 1553–1564, 1998.
12. J. H. Ferziger and M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, New York, 1996.

Keywords: cooling stage, plastic mold, computer simulation

Numerical simulation and analysis of plastic in cooling stage

Der-Sheng Chan

Department of Information Technology, Lee-Ming
Institute of Technology,

Email:lit00441@mail.lit.edu.tw

Abstract

The cooling stage affects plastic deformation during the entire molding process. Good cooling condition can shorten the molding time. Improper cooling will cause uneven shrinkage of the plastic and increase the defect rate. In the heating stage, the heat of the melt is transferred to the mold wall through thermal conduction. In the cooling stage the heat is removed in a counter-flow manner. The mold temperature changes dynamically during the plastic heating and cooling stages. Therefore, the computer simulation and temperature control system are extremely important. The transient cooling approach will be suitable for simulating the cooling behavior of the mold. Computer simulation facilitates the thermal analysis of the plastic in cooling stage and improves the predictive analysis of plastic warpage.