

# 塑膠光學元件射出成型之殘留應力與光彈分析

張元榕、楊文賢、許嘉翔

Yuan-Jung Chang, Wen-Hsien Yang and Chia-Hsiang Hsu

科盛科技股份有限公司

(CoreTech System (Moldex3D) Co., Ltd.)

## 摘要

近來流動導致之殘餘應力在塑膠射出成型的製程中已經成為相當重要的課題。流動殘餘應力主要受到在塑膠充填流動的過程中高剪切率所導致，而在充填之後的冷卻與脫模階段持續被釋放或凍結。流動殘餘應力影響成�件的許多物理性質，如翹曲行為與光學性質等。如塑膠光學透明元件的雙折射問題，需要流動殘餘應力的導入，才能被更正確的掌握。本篇論文將整合黏彈性模型與三維數值模擬技術來預測射出成型中流動殘餘應力，並將進一步以流動殘餘應力之結果應用至雙折射的預測。

**關鍵字：**三維實體、流動殘餘應力、模穴充填、黏彈性

## 一、前言

射出成型產品中存在的殘餘應力主要由兩個原因所導致，一為充填階段之由流動殘餘應力所引發之分子排向，二為冷卻階段不均勻收縮所產生之熱殘餘應力。流動殘餘應力主要受到在塑膠充填流動的過程中高剪切率所導致，而在充填之後的冷卻與脫模階段持續被釋放或凍結。熱殘餘應力則由高溫的塑膠材料冷卻到玻璃轉移溫度( $T_g$ )後的不均勻的體積收縮與密度變化所生成。

分子排向與流動殘餘應力在充填階段與保壓階段是屬於高分子黏彈性的行為。在溫度高於玻璃轉移溫度之下，塑料處於液態的階段，高分子鏈將依據流動方向產生相應對的配向。而射出成型過程中高冷卻率下的快速固化將使得這些應力與分子排向無法被完全的鬆弛及釋放。

流動殘餘應力一般認為比熱殘餘應力小，然

而流動殘餘應力與高分子的凍結排向息息相關，在現今的技術中利用流動殘餘應力提供與分子排向的關聯是較為可行的方案。而高分子凍結排向影響了非等向性的機械性質、熱性質與光學性質，並影響了之後的尺寸穩定度，因此流動殘餘應力之重要性是無法忽略。

流動殘餘應力在薄件成型中相對於熱殘餘應力更是扮演主導性的角色，因為薄件的冷卻太快使得分子排向不完全鬆弛的量增加，而薄件也將產生比較少的體積收縮率及較小的熱殘餘應力。模穴表面的固化層將成為熱的不良導體，使得在模穴核心的溫度可以維持高溫，使得分子排向在這區域可以被鬆弛釋放。然而在薄件中整個產品在很短的週期下冷卻與凍結，因此流動殘餘應力在薄件中佔有主導的地位，而熱殘餘應力則在厚件中佔有主導的地位。

本文整合真實三維熱流求解核心與Giesekus黏彈性模型後，用來模擬熔膠在射出成型製程中的流動。本文以一薄板產品的模穴充填

分析與預測流動殘餘應力作為探討，最後再以一工業界的產品之實驗與模擬的比較作為現有數值方法的可信度的展示，並進一步以流動殘餘應力之結果應用至光學性質的預測。

## 二、數值模型

假設高分子熔膠行為為黏彈性流體，非恆溫的三維流動之數學方程式可以表示如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \boldsymbol{\sigma}) = \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = -p \mathbf{I} + \tau, \quad (3)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \frac{1}{2} \tau : (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (4)$$

其中， $\mathbf{u}$  為速度向量、 $T$  為溫度、 $t$  為時間、 $p$  為壓力、 $\boldsymbol{\sigma}$  為總應力張量、 $\rho$  為密度、 $\tau$  為額外應力張量、 $k$  為熱傳導係數、 $C_p$  為比熱。在本文中， $\tau$  由 Giesekus 模型的本質方程式可得：

$$\tau + \lambda \tau^\top = -\frac{\alpha \lambda}{\eta_0} \tau \cdot \tau + \eta_0 (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (5)$$

其中， $\lambda$  為鬆弛時間、 $\alpha$  為模型參數、 $\eta_0$  為零剪切率下之黏度。

位移因子為  $a_T$ ，用來描述高分子熔膠的黏度與鬆弛時間對於溫度的變化，表示如下：

$$a(T) = a_T(T) a(T_0), \quad (6)$$

$$\eta_0(T) = a_T(T) \eta_0(T_0), \quad (7)$$

其中， $\eta_0(T_0)$  與  $a_T(T_0)$  分別代表在參考溫度  $T_0$  下之黏度與鬆弛時間，且位移因子遵守 WLF 方程式：

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0}, \quad (8)$$

$C_1$  與  $C_2$  為 WLF 的參數。

體積分率函數  $f$ ，用來追蹤波前的移動。

$f = 0$  代表為空氣， $f = 1$  代表為高分子熔膠，而波前的位置就是落在格點中體積分率為  $0 < f < 1$  的區域。體積分率隨著時間的推進可以表示為下列的傳輸方程式：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} f) = 0. \quad (9)$$

在模穴入口處之進膠面給定充填流率或者射出壓力，在模壁給定無滑移邊界條件，而特別需要注意的是，在體積分率的傳輸方程式中，由於是雙曲線式之方程式，只需給定入口邊界條件。

本文，利用有限體積法(Finite Volume Method)求解各統馭方程式，而數值核心在文獻[2]已經被驗證可以成功的應用在射出成型充填模擬，許多實驗與測試也確認了此數值核心在可靠度上與效率上的表現。

## 三、結果與討論

本文採用一典型薄板作於在射中成型中流動殘餘應力分析之案例，幾何外觀分別為 1.8 mm (厚度) x 127 mm (長度) x 64 mm (寬度)。材料選定為 PS Styron 678U，料溫與模溫分別設定為 218°C and 60°C，充填時間為 0.72 秒。相關材料與加工條件之資訊整理如表 1。而圖 1 顯示出本案例之網格，如同圖片中所強調的，在厚度方向上有 10 層的立方體元素。

圖 2(a) 及(b) 為波前時間位置與壓力分佈之數值模擬結果，兩者均展示出符合預計之合理分佈，展現出本數值模擬方法在這典型的薄板成型中是效果良好的。

圖 3 呈現出 Von Mises stress ( $\sigma_v$ ) 的分佈， $\sigma_v$  主要用衡量應力矩陣的量值大小， $\sigma_v$  之數學方程式可以表示如下：

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, \quad (10)$$

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 與 $\sigma_3$ 為分別為三個主軸應力。根據此定義，本文所得到的 $\sigma_v$ 數值結果，最大值在靠近澆口的地方。而如同預期的，流動殘餘應力在靠近模壁的地方由於摩擦較多，會有較大的剪切應力，故此區域的應力也會較中心的部分高。

本文所採用3D模擬的與傳統的射出成型模擬常用的2.5D近似不同，求解未經簡化的變數，包含速度、壓力與應力。因此，可以從模擬結果中得到更多精確的與各種形式的資訊。如圖4所顯示，可以在產品的任意方向上得到各切面流動殘餘應力結果，利用三維的結果而得細部上的資訊。

另外，圖5乃利用一工業界的實際產品作為分析案例，以驗證本文目前所整合數值演算方法的延伸性。圖5(a)是一個ABS的按鍵產品，在經過沉進於冰醋酸一段時間後，表面的殘餘應力受到鬆弛，分子將會改變區域表面的顏色，而呈現白色。因此，圖5(a)的白色區域可以說是高殘餘應力的區域。而數值模擬所得到的結果如圖5(b)，顯示出與實驗觀察有相當程度的吻合。

我們可以延伸應用流動殘餘應力的結果至雙折射的預測。透明性的塑膠材料，受到應力與分子排向不同時，會產生非等向性的折射率變化，稱之為雙折射。雙折射率的大小會與應力的施加呈現正比的關係，稱之為光學一應力定律，以光穿透一平面而言，可以表示如下：

$$n_1 - n_2 = C_B(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (11)$$

其中，來看 $n_1$ 與 $n_2$ 代表折射率， $\sigma_1$ 與 $\sigma_2$ 則代表主軸應力， $C_B$ 為光學應力常數。光穿透材料時，因為雙折射現象而衍生出有快慢差異的兩條光線，在不同的雙折射與厚度方向的累計後，會產生光程差，而各光線相互的消長，而產生明暗相間的光彈條紋。本文薄板案例的流動殘餘應力結

果在經過光學雙折射的預測後，經計算可以得到光彈條紋如圖6所示，與一般實驗觀察與文獻結果有高度的吻合。

本文並以一凸透鏡為例子，進一步展示目前的模擬方法的對於光學展品的適用性。鏡片幾何如圖7所示，外徑為20mm與厚度為4.5mm。以側面方向觀察凸透鏡之雙折射分佈，如圖8(a)(b)所顯示。可以觀察出由流動殘餘應力所導致的雙折射集中在澆口附近。而到流動後端由於幾何外形上的收縮，流動殘餘應力因而升高，而使得雙折射在這區域也可以被觀察出來。目前這些結果，已初步證實，流動殘餘應力可以延伸應用至光學特性的預測，定性上已可以掌握良好。

#### 四、結論

流動殘餘應力一般認為比熱殘餘應力小，然而流動殘餘應力與高分子的凍結將影響非等向性的機械性質、熱性質與光學性質，並影響了脫模之後的尺寸穩定度，因此流動殘餘應力之重要性是無法忽略。但是由於缺乏足夠了解塑膠材料在射出成型製程的充填、保壓、冷卻、脫模階段中的複雜行為，要預測複雜的三維流動並不容易。

本文整合真實三維熱流求解核心與Giesekus黏彈性模型後，用來預測熔膠在射出成型製程中的流動殘餘應力。本文利用求解熱流的統馭方程式與黏彈性的本質方程式後，可以正確出預測流動殘餘應力，而此殘餘應力可以用來預測與多物理性質，本文已成功應用於光學產品的雙折射預測上，值得期待本文的成果可以進一步延伸至翹曲變形預測精確性的提升。

## 五、參考文獻

1. R. Y. Chang and S. Y. Chiou, *Polymer Engineering and Science*, 1995, 35: 1733-47.
2. R. Y. Chang and W. H. Yang, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2001, 37: 125-48.
3. L. Liu, W. H. Yang, D. Hsu, and V. Yang, *ANTEC proceeding*, 2002: 621-6.
4. R. B. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassager, "Dynamics Of Polymeric Liquids", Wiley, Vol.1, 1987.
5. Y. B. Lee, T. H. Kwon, and K. Yoon, *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42:2246-2272
6. A. I. Isayev, G. D. Shyu, C. T. Li, *Part B: Polymer Physics*, 2006, 44:622-639

## 六、圖表彙整

表1 加工條件與實驗參數

Resin	Filling time	Melt Temp.	Mold Temp.
Ps-Styron 678U	0.72 sec	218.3 °C	60 °C
Stress-optical const.		Wavelength of light	
$4.8 \cdot 10^{-9} m^2/N$		500 nm	

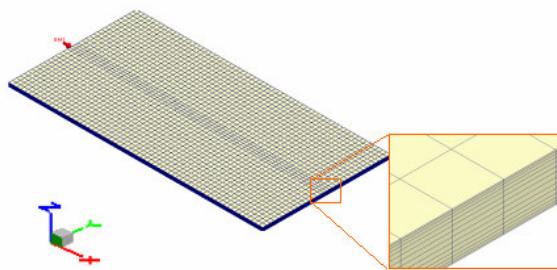
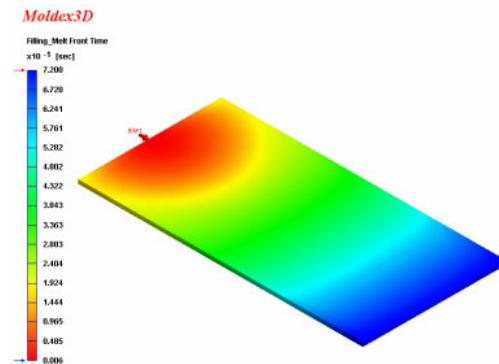
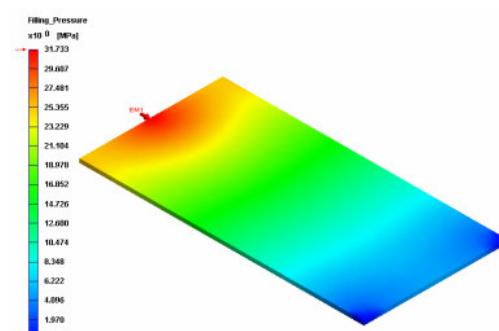


圖1 網格- 厚度方向10層



(a)



(b)

圖2 (a) 波前時間變化 (b) 壓力分佈

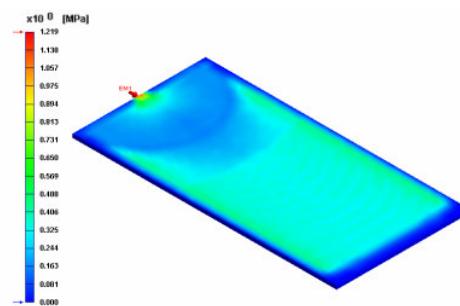


圖3 Von Mises stress 分布

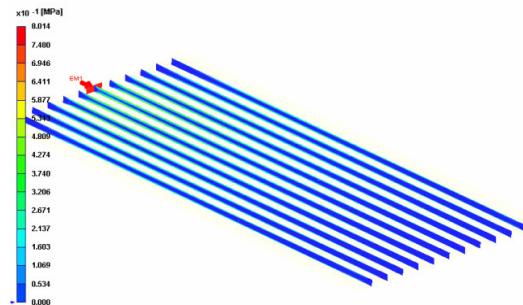
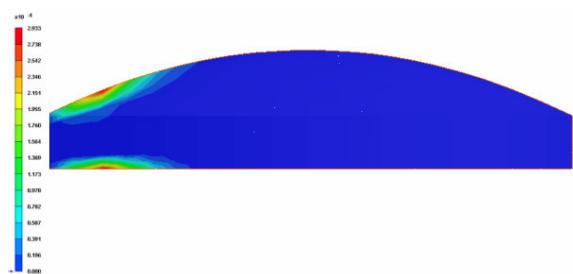


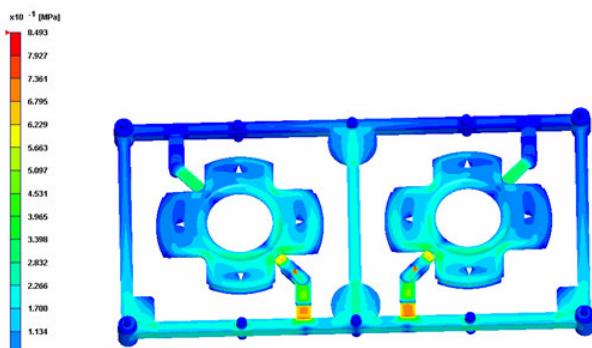
圖4 不同切面下之流動殘餘應力結果



(a)

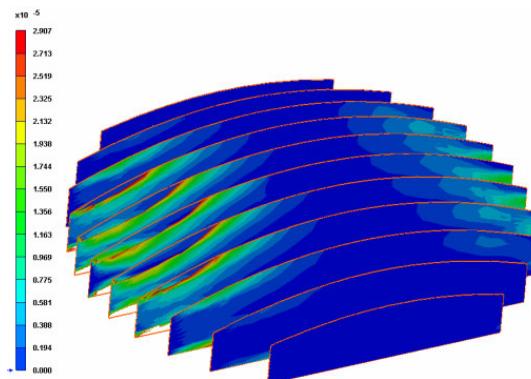


(a)



(b)

圖5 按鍵的殘餘應力分布 (a)沉浸冰醋酸實驗 (b)模擬結果



(b)

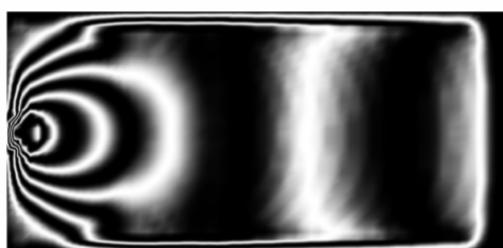


圖6 光彈條紋之模擬結果

圖8 側面觀察凸透鏡之雙折射分佈 (a)中心切面 (b)三維切面

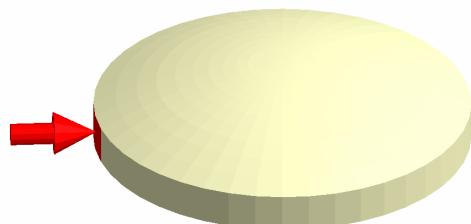


圖7 鏡片模型外觀