



## 射出發泡視覺化設備建立與發泡視覺化 Foaming Injection Molding Visualization Device Construction and Foam Visualization

洪艾琳<sup>1</sup>、邱俊洋<sup>2</sup>、高丞毅<sup>1</sup>、方晨譽<sup>1</sup>、Kiday Fiseha Gebremedhin<sup>1</sup>、葉樹開<sup>1\*</sup>、楊申語<sup>2</sup>、Chul B. Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣科技大學 材料科學與工程學系

<sup>2</sup> 國立臺灣大學 機械工程學系

<sup>3</sup> 多倫多大學 機械與工業工程學系 微孔塑膠製造實驗室

\*E-mail: skyeh@mail.ntust.edu.tw

### 摘要

由於模具的不透明性阻礙了發泡射出成型 (Foam Injection Molding, FIM) 中發泡動力學的直接觀察，長期以來主要依賴經驗操作。本研究建立了用於系統性調查FIM製程的可視化平台，為未來跨不同高分子系統的研究奠定基礎。基於既有的研究方法，本研究成功重現並驗證了先前的發現，同時將調查範圍延伸至未探索的參數區間。本研究採用客製化設計的模具，整合光學系統與壓力感測器，以聚苯乙烯與CO<sub>2</sub>為系統，實現發泡過程的同步視覺與壓力監測。系統性實驗調查了高壓發泡射出成型 (High Pressure Foam Injection Molding, HPFIM) 搭配抽芯技術，展現此平台捕捉基礎製程-結構關係的能力。

本研究發現了關鍵的質性原理：在HPFIM搭配抽芯製程中，於0.8 mm抽芯距離處觀察到關鍵轉變，引發泡孔密度從小於60增加至大於4,500 cells/cm<sup>3</sup>。同時識別出最佳抽芯速度為33 mm/s，較高速度會造成壓力反彈而抑制成核。這些發現為製程最佳化提供質性指導，建立了穩健的研究平台，為未來跨不同高分子-發泡劑系統的研究奠定基礎。

**關鍵詞：**射出成型、發泡、高分子加工視覺化、抽芯、超臨界流體、二氧化碳

(本論文部分內容已以英文於SPE Foams 2024國際研討會發表)

### Abstract

Foam injection molding (FIM) has long relied on empirical operations due to mold opacity hindering direct observation of foaming dynamics. This study establishes a visualization platform for systematic FIM investigation, providing a foundation for future research across diverse polymer systems. Using a custom-designed mold with integrated optics and pressure sensors, polystyrene and CO<sub>2</sub> were employed to achieve simultaneous visual and pressure monitoring. Systematic experiments investigated high-pressure FIM (HPFIM) with core-back technology, demonstrating the platform's capability to capture fundamental process-structure relationships.

Key qualitative principles were established: In HPFIM with core-back processing, a critical transition at 0.8 mm core-back distance triggered cell density increases from <60 to >4,500 cells/cm<sup>3</sup>. An optimal core-back velocity of 33 mm/s was identified, with higher velocities causing pressure rebound that suppressed nucleation. These findings provide qualitative guidance for process optimization while establishing a robust research platform for future investigations across different polymer-blowing agent systems.



Keywords: injection molding, foaming, polymer processing visualization, core back, supercritical fluid, carbon dioxide

## 1. 前言

發泡高分子材料是具有優異特性的先進材料，如輕量化、隔熱及吸音等特性，使其成為建築、汽車及包裝等各種應用的理想選擇。隨著對永續發展重視程度的提升，發泡高分子材料因其能夠減少塑膠廢料及能源消耗的能力，需求正快速成長。超臨界二氧化碳(SC-CO<sub>2</sub>)發泡製程是最具前景的技術，因為它能顯著減輕重量並降低射出成型過程中的能源消耗，同時延長模具使用壽命。Okolieocha針對發泡射出成型設備及製程提供了全面性的概述，強調了其優點，如較低的射出壓力及減少材料消耗等[1]。

發泡射出成型不僅能達到產品輕量化的目的，亦能提供顯著的節能效益、材料減量超過5%，以及環境效益，有助於降低能源消耗及減少原料使用[2]。然而，如同傳統射出成型，模具的不透明特性使研究人員無法直接觀察發泡動態，阻礙了泡孔結構的進一步最佳化及射出成型參數的調整。視覺化技術為發泡射出成型中複雜、快速且瞬態的現象提供了關鍵性的洞察，這些現象無法僅透過其他實驗技術或建模獲得，也有助於促進製程的基礎理解與最佳化。

Villamizar與Han使用具有玻璃視窗的模具來觀察泡體動態，建立了製程參數對成核及成長速率影響的關聯性[3]。Yamada等人[4]及Mahmoodi等人[5]專注於充填過程中的發泡行為以及保壓壓力的影響。Mahmoodi等人[5]採用高速攝影機研究非等溫環境下的發泡行為，展現了系統壓力及保壓時間如何影響最終發泡體的泡孔尺寸。Ishikawa等人進一步研究了抽芯製程，比較N<sub>2</sub>與CO<sub>2</sub>作為發泡劑的差異，並注意到兩者在成核及成長行為上的顯著差異[6, 7]。Shaayegan等人開發了創新的視覺化模具。其設計具有固定部及可動部並配備高透明度視窗，能夠進行即時觀察及製程調整。運用此先進設備，研究人員觀察了模內泡體動態，並探索如氣體反壓(GCP)等技術以提升泡孔密度及均勻性[8]。

在本研究中，我們展示了自製視覺化系統的功能，並利用此系統研究以聚苯乙烯(PS)作為模型高分子的高壓發泡射出成型。透過控制如射出速度、充填比例、開模量及開模速度等製程參數，並觀察其對最終發泡結構的影響，成功藉由視覺化技術捕捉並分析了發泡射出成型的複雜動態。

在高壓發泡射出成型中，抽芯距離對發泡行為具有顯著影響，當抽芯距離及抽芯速度達到特定數值時，泡孔密度會顯著增加。這些研究發現有助於更深入理解製程-結構-性質之間的關係，使得能夠針對所需的發泡特性進行製程條件最佳化。

## 2. 實驗

### 2.1 材料

本研究使用聚苯乙烯(POLYREX® PG-33，由奇美實業股份有限公司供應)，熔融指數為8.0 g/10 min。純度99%的二氧化碳由豐明氣體公司供應，作為發泡劑使用。

### 2.2 射出成型機

實驗採用全電式120噸射出成型機(FCS CT-120e)。主要規格包括最大射出速度300 mm/s、螺桿直徑35 mm，以及最大射出量158 cm<sup>3</sup>。Trexel T-100超臨界流體供應系統提供13.8至200 bar的CO<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>發泡劑。模具溫度由晏邦 YBMD-180-10-Q模溫控制器控制，工作溫度範圍為50°C至180°C。

### 2.3 視覺化模具與設備

模具設計概念係基於參考文獻[9]。模穴側組件包含鏡面嵌件、稜鏡、玻璃視窗及保護性金屬罩，如圖1所示。光線透過視窗後經稜鏡折射、嵌件反射，並投射供攝影機拍攝。模具尺寸

為420 mm × 400 mm。

模穴尺寸為 $120 \times 100 \times 3.2 \text{ mm}^3$ ，如圖2所示，可生產具有扇形澆口的矩形試片。攝影機設置及模具如圖3所示。四個Futaba SSB200N壓力感測器用於監測即時模穴壓力。壓力感測器分別置於澆口處頂針後方以及模穴內三個等距點(A、B及C)，以偵測壓力變化。壓力曲線資料透過Futaba MPSO8放大器輸出至筆記型電腦。發泡過程由高靈敏度及高速攝影機記錄，兩者皆使用相同的單眼顯微鏡鏡頭。照明係由閃光燈及LED系統提供，最大光通量為420,000流明。

## 2.4 實驗方法

PS粒料使用料斗乾燥機在80°C下預乾燥2-3小時以去除水分。料管溫度在各區間均設定為230°C，模具溫度設定為70°C，以確保每個製程具有相同的邊界條件。

表1列出了微泡發泡射出成型的控制變數。發泡劑含量固定為2 wt%。背壓17 MPa及螺桿轉速80 rpm/min可確保氣體-熔膠的適當混合[10, 11]。實驗將在五至十個生產週期後開始，以達到穩定狀態。之後，每個操作參數將進行至少三次重複實驗。每次實驗中模穴壓力量測持續20秒，取樣間隔為20 ms。攝影機架設於模具附近，如圖3所示。

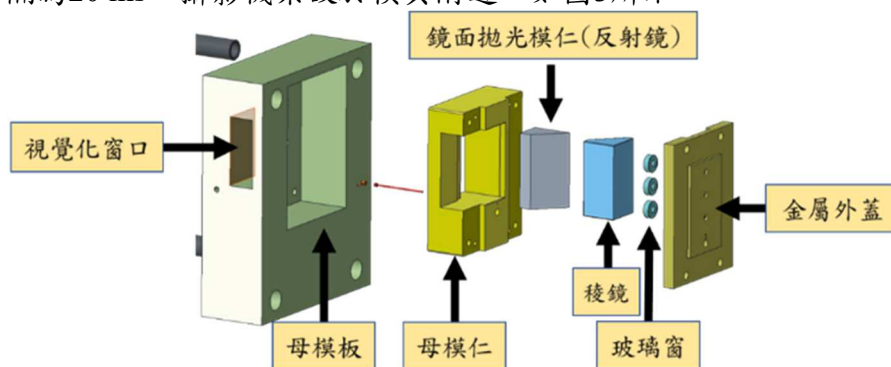


圖1 母模爆炸圖

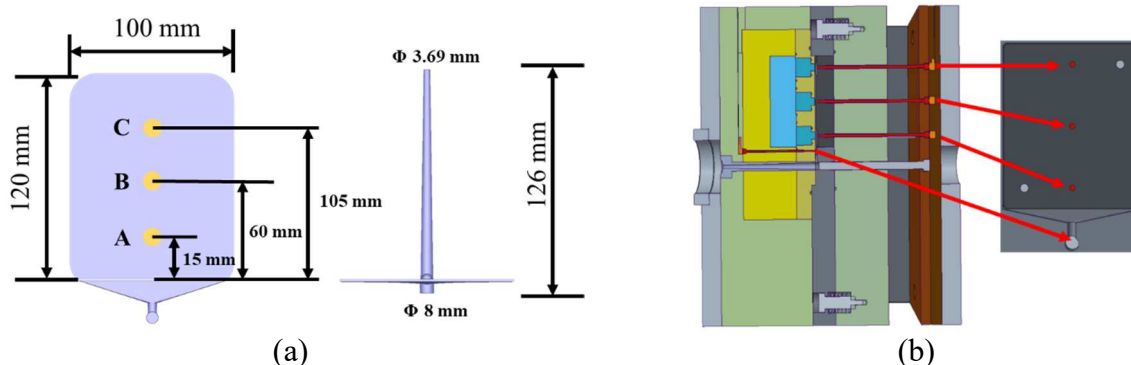
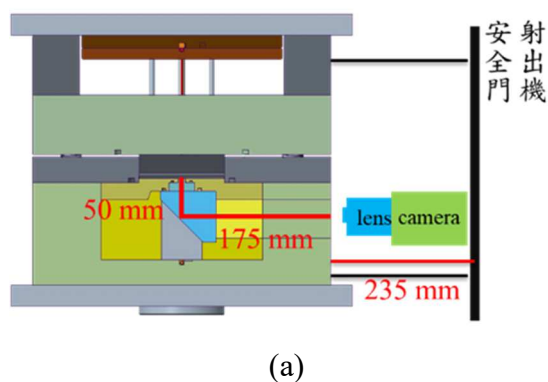
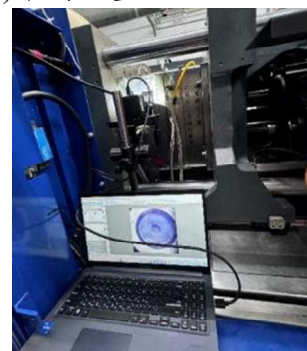


圖2 壓力感測器在樣品中(a)與在模具(b)中的位置



(a)



(b)

圖 3 攝影機的架設示意圖(a)與實際架設圖(b)

表 1 微發泡射出成型的加工參數表

| 加工參數        | 設定值 |
|-------------|-----|
| 螺桿轉速 (rpm)  | 80  |
| 扭力 (%)      | 100 |
| 模溫 (°C)     | 70  |
| 背壓 (MPa)    | 17  |
| 射出行程 (mm)   | 51  |
| 發泡劑含量 (wt%) | 2   |
| 冷卻時間 (s)    | 80  |

## 2.5 型態學分析

本實驗使用SG view數位影像軟體(SAGE Vision, 台灣)捕捉發泡成長的動態過程。錄影完成後，從影片中擷取截圖。簡要的實驗步驟說明如下。將已知長度的載物台測微尺置於視野範圍內。調整焦距後，將螢幕上顯示的實際長度(以mm為單位)輸入軟體中，使像素能夠轉換為實際長度，進而用於量測泡孔尺寸。本研究使用的放大倍率為5倍。接著使用影像辨識功能對泡體進行分割及計數，獲得各泡孔的數量及面積。透過假設泡孔為圓形，可估算泡孔尺寸。發泡體的數量泡孔密度使用下列公式估算[12]：

$$N_f = \left(\frac{n}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

其中 $N_f$ 為泡孔密度(cells/cm<sup>3</sup>)，A為顯微影像的面積(cm<sup>2</sup>)而n是顯微影像中的泡孔數量。

## 3. 結果與討論

儘管發泡射出成型視覺化的先驅研究使用化學發泡劑進行低壓發泡射出[13]，近期研究主要專注於高壓發泡射出成型及氣體反壓製程的視覺化[7, 9, 14, 15]。此研究不平衡的現象係因設備與技術的限制所致。在低壓射出實驗中，許多泡體同時產生，使得在影片中觀察單一泡體的成長行為變得困難，且難以與數值模擬模型進行驗證[4, 5, 8, 16]。因此，本文主要呈現高壓發泡射出成型的結果。低壓射出成型的研究發現將納入未來的發表中。

高壓抽芯實驗允許氣體在壓力下溶解於高分子中，然後透過抽芯發泡進行成核，有效地將發泡與流動製程分離。具有抽芯製程的高壓射出成型可視為類似於批次發泡[6, 11, 17]。本研究對抽芯製程進行視覺化，檢視參數調整如何影響泡孔尺寸及泡孔密度。Taki等人開發了批次發泡的視覺化裝置，以模擬抽芯發泡射出成型製程中的壓力變化[17]。結果顯示泡體最初克服能量障礙並開始成核及成長，直到壓力達到9.87 MPa時，泡體重新溶解回熔融高分子中。隨後的開模造成壓力瞬間下降，導致泡體的重新成核及成長。

### 3.1 抽芯距離的影響

抽芯距離是高壓發泡射出成型中的關鍵參數。實驗設置經特別設計以減輕同時形成多個泡體的影像困難。先前研究顯示，約為模穴厚度25%的抽芯距離可能是泡孔成核及成長觀察的最佳條件[11]。相當大的抽芯距離可能導致許多泡孔的快速成核。泡孔密度的突然增加會顯著降低試片透明度及泡體影像的重疊。因此，取得清晰影像變得具有挑戰性。在模穴厚度25%的抽芯距離下，泡孔密度會顯著降低，使得捕捉個別泡孔的成長變得更加容易。本研究中，抽芯距離設定為模穴尺寸的0.5-1.0 mm(16-31%)。其他製程參數列於表1，每項實驗重複三次以確保重現性。

使用壓力感測器記錄模穴內B點(中點)的壓力變化，如圖4(a)所示。壓力-時間曲線顯示開

模製程約在六秒時完成。本研究所檢視的壓力下降速率係指開模瞬間的快速壓力下降。圖4(b)顯示不同抽芯距離下的壓力下降速率為2.5~3.5 MPa/s。

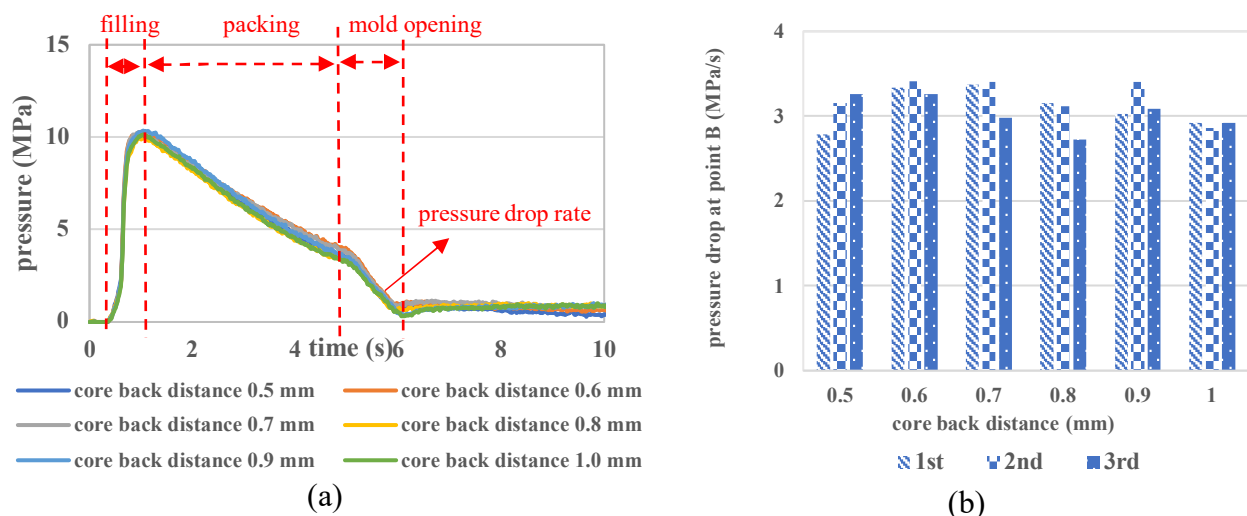


圖4 不同抽芯距離下抽芯製程中的模穴壓力曲線

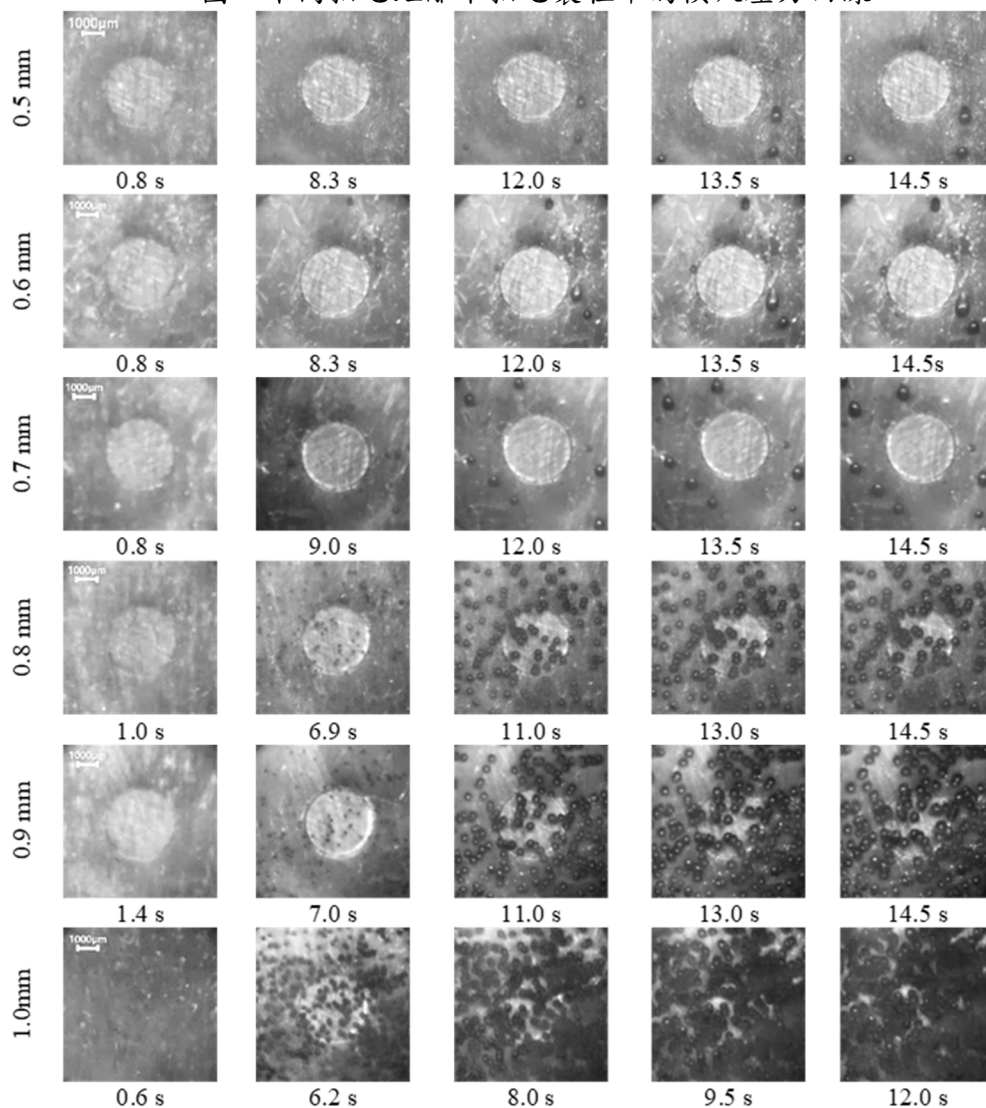


圖5 不同抽芯距離下的泡孔形成觀察。照片拍攝於位置(B)

抽芯距離從0.5 mm至1.0 mm的發泡射出成型影片截圖如圖5所示。圖片中的圓形區域為頂針。量測壓力變化以研究抽芯距離對發泡成型的影响。如圖5中定性觀察所示，當抽芯距離小於0.8 mm時，產生的泡體很少，且泡孔成核直到抽芯完成後2-3秒(六秒)才發生。然而，當抽芯距離達到0.8 mm時，觀察到泡孔數量顯著增加，且成核在抽芯完成後一秒內開始。此外，泡孔密度亦明顯較高。這些發現表明在不同抽芯距離下，發泡機制可能有顯著差異。

圖4顯示B點的壓力曲線相似，表明壓力下降速率並非主導抽芯距離對泡孔密度影響的因素。圖5說明泡孔密度與抽芯距離呈正相關，特別是當退芯距離超過0.8 mm時。泡孔密度的增加可能帶來額外的效益。圖6為圖4(a)的放大圖，顯示隨著抽芯距離及泡孔密度增加，模穴壓力出現明顯的回升，這可能歸因於快速的泡孔成核及成長。

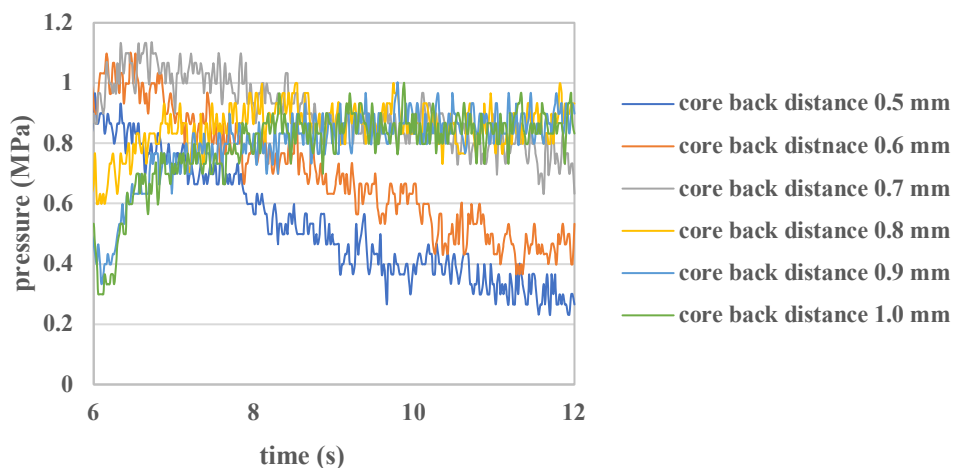


圖6 開模瞬間的放大壓力曲線

為進一步瞭解發泡結構、抽芯距離及時間之間的關係，將平均泡孔密度及泡孔尺寸對抽芯距離及時間繪製成3D曲面圖，顯示了明顯的臨界效應。如圖7(a)所示，在關鍵抽芯距離(0.5 mm - 0.7 mm)以下時，泡孔密度維持在低於  $60 \text{ cells/cm}^3$  的水準，然而一旦超越此臨界值，泡孔密度大幅激增至  $4500 \text{ cells/cm}^3$  -  $6000 \text{ cells/cm}^3$ ，呈現一至兩個數量級的顯著增加。值得注意的是，1 mm抽芯距離的泡孔密度比0.5 mm抽芯距離高出542倍，而當抽芯距離超過0.8 mm後，密度增加速率明顯趨緩。

圖7(b)顯示泡孔尺寸隨抽芯距離從0.5 mm增加至0.7 mm時，尺寸從約  $488 \mu\text{m}$  輕微增加至  $620 \mu\text{m}$ 。在14.5秒時，抽芯距離0.5 mm的泡孔尺寸為  $489 \mu\text{m}$ ，而同一時間點抽芯距離0.7 mm的泡孔尺寸為  $622 \mu\text{m}$ 。在抽芯距離0.7 mm時觀察到泡體的拉長變形，導致泡孔尺寸輕微增加。然而，當超越0.8 mm的關鍵抽芯距離後，由於泡孔密度劇增造成氣泡重疊，精確的泡孔尺寸測量變得困難。有限的數據顯示泡孔尺寸穩定在約  $620 \mu\text{m}$  左右，這可能是由於高泡孔密度與發泡劑的高消耗速率所致。

Ohshima等人[18]使用PP進行發泡射出成型實驗，研究抽芯距離對泡孔密度及泡孔尺寸的影響。在其研究中，抽芯距離逐漸從2 mm增加至4 mm及8 mm，分別對應2、3及5倍的膨脹比。結果顯示抽芯距離的變化對泡孔密度及泡孔尺寸的影響相對較小。此結果與我們在抽芯距離0.8 mm至1.0 mm範圍內觀察到的現象相似，如圖7(a)所示。

Wang等人研究了四種抽芯距離：0 mm、1 mm、2 mm及3 mm[19]。他們得出結論，抽芯距離主要影響泡孔縱橫比，隨著抽芯距離增加，泡孔尺寸增加，但泡孔密度保持不變。Zhao[20]也提出了類似觀點，指出當抽芯距離從8 mm增加至41 mm時，泡孔密度及尺寸並未顯著改變。這與我們在實際抽芯製程範圍0.8 mm至1.0 mm內觀察到的現象一致，其中泡孔密

度及泡孔尺寸並未顯著改變，如圖7所示。

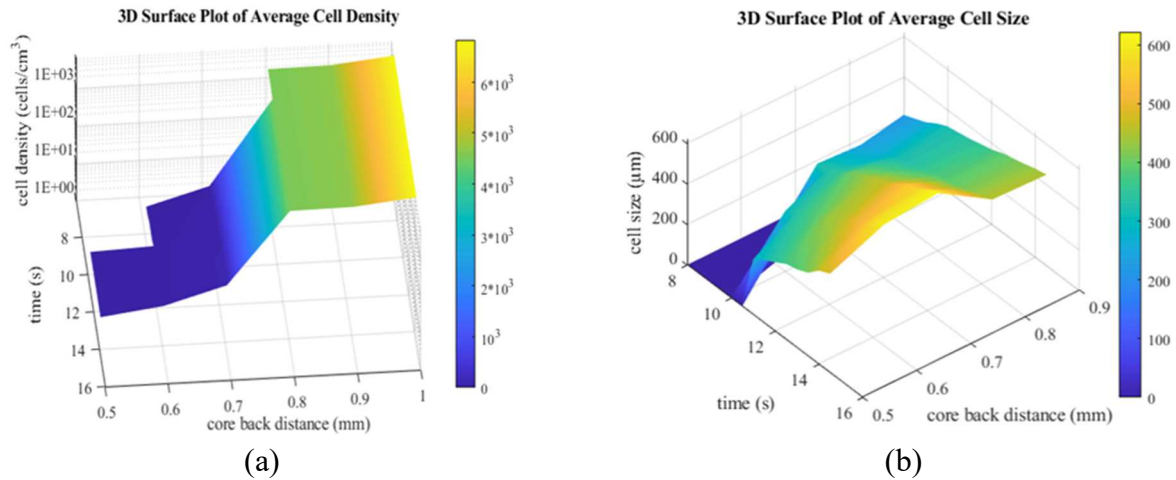


圖7 平均泡孔密度(a)及尺寸(b)對時間及抽芯距離的3D曲面圖

### 3.2 抽芯速度的影響

抽芯速度是能顯著影響壓力下降速率的關鍵參數。本研究採用五種不同的抽芯速度：6.7 mm/s、20 mm/s、33 mm/s、50 mm/s及67 mm/s，以研究抽芯速度對泡孔形成的影響。考量圖5所呈現的實驗結果，本研究選擇0.8 mm的抽芯距離以達到最佳觀察品質。其他製程參數列於表1。

圖8顯示不同抽芯速度實驗所得的影片截圖。如圖8所示，泡孔數量最初隨抽芯速度增加。然而，一旦抽芯速度達到33 mm/s，泡孔數量即趨於穩定，不論速度進一步增加與否。另一方面，圖8顯示抽芯速度可能不影響泡孔尺寸。在14.5秒影片拍攝結束時，泡孔尺寸保持相對恆定在約400  $\mu\text{m}$ ，不論抽芯速度為何。這些發現亦表明成核時間的差異不影響最終泡孔尺寸。

在抽芯過程中，模穴體積的突然增加導致壓力急遽下降，進而造成泡孔成核。這些泡孔的快速成長及膨脹產生壓力，使模穴壓力回升。本研究探討抽芯速度如何影響發泡射出成型製程中的模穴壓力，並進一步檢視這些壓力變化對泡孔密度及泡孔尺寸的影響。模穴壓力曲線及壓力下降速率對抽芯速度的關係如圖9所示。值得注意的是，壓力回升現象隨不同抽芯速度而有所變化。如圖9(a)所示，在抽芯速度高於33 mm/s時，壓力回升較為明顯，而在較低速度6.7及20 mm/s時則較不顯著。這可能歸因於較快抽芯速度造成的更劇烈瞬間壓力下降。如圖9(b)所示，壓力下降速率從最慢抽芯速度6.7 mm/s的約1 MPa/s大幅增加至最快抽芯速度67 mm/s的超過4 MPa/s。高抽芯速度造成的快速壓力下降加速泡孔成核，由於模穴內增加的泡孔生成而導致更明顯的壓力回升。

建構三維曲面圖以視覺化泡孔密度、泡孔尺寸、抽芯速度及時間之間的關係。圖10說明抽芯速度、泡孔密度及泡孔尺寸之間的相關性。圖10(a)顯示泡孔密度隨較高抽芯速度顯著增加。在抽芯速度33 mm/s時，泡孔密度在14.5秒達到 $6 \times 10^3$  cells/cm<sup>3</sup>的峰值，然後逐漸趨於平緩，維持在 $10^3$  cells/cm<sup>3</sup>的量級。同時，透過觀察模穴壓力下降速率(圖9(b))，可看出在抽芯速度33 mm/s以下時，抽芯速度與壓力下降速率之間有較明顯的相關性。超過此臨界值後，相關性變得較不明顯。此觀察部分解釋了在較高抽芯速度時泡孔密度增加較不顯著的現象。

如圖10(b)所示，在抽芯速度範圍33至67 mm/s內，抽芯速度的增加對泡孔尺寸沒有顯著影響。雖然當抽芯速度從33增加至67 mm/s時泡孔密度略有增加，但仍維持在 $10^3$  cells/cm<sup>3</sup>的量級，意味著每個泡孔可用於成長的氣體量並無顯著差異。因此，在此範圍內隨著抽芯速度增

加，泡孔尺寸並無減小。

我們的發現與先前文獻[6, 7, 21]有所不同。雖然其他研究顯示改變抽芯速度會導致泡孔密度的大幅變化並進而影響泡孔成長，我們的結果顯示泡孔密度保持相對恆定。

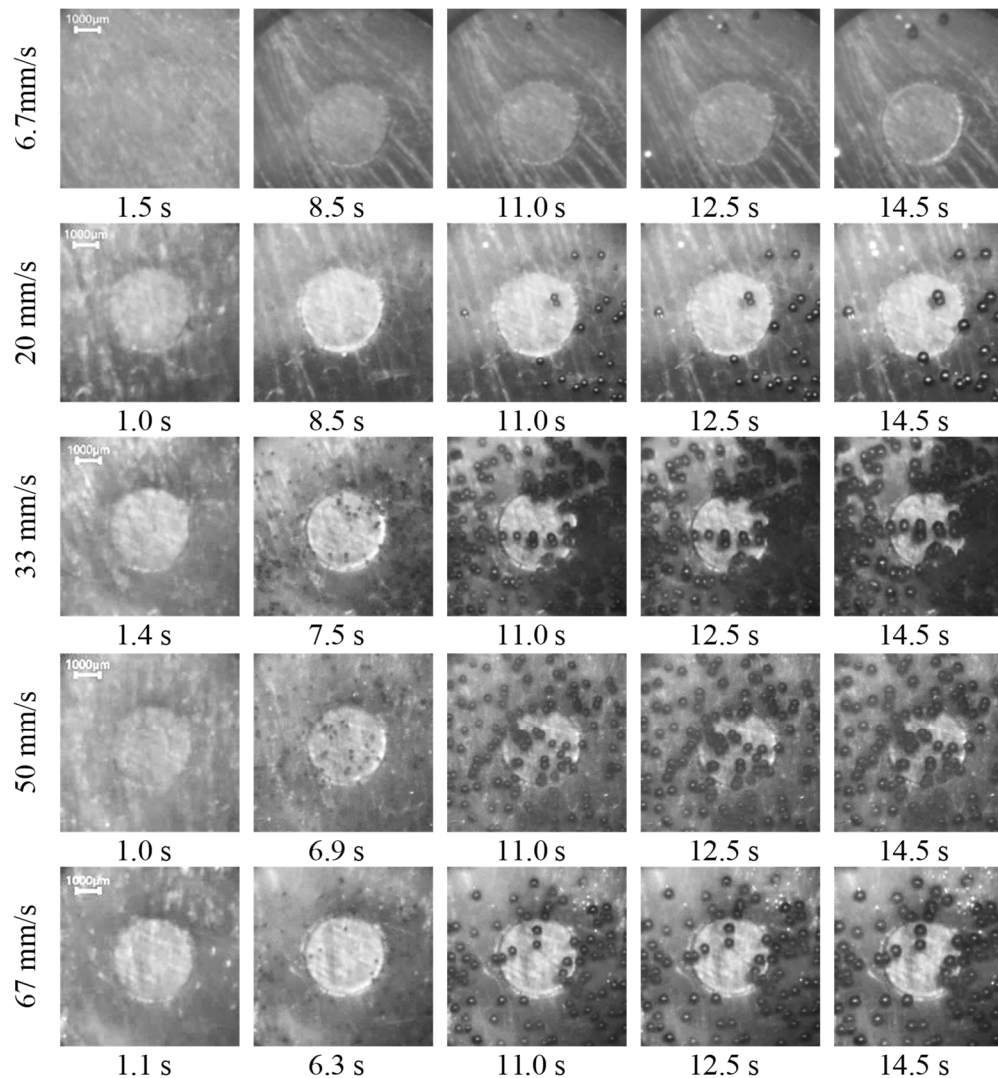
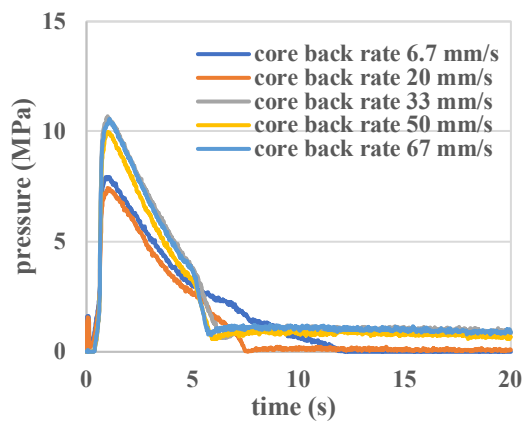
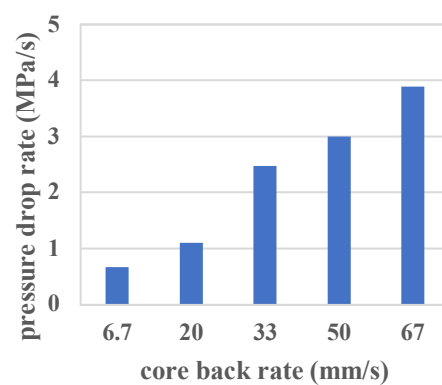


圖8 不同抽芯速度下的泡孔形成觀察。照片拍攝於位置(B)



(a)



(b)

圖9 不同抽芯速度下的模穴壓力曲線(a)及壓力下降速率(b)

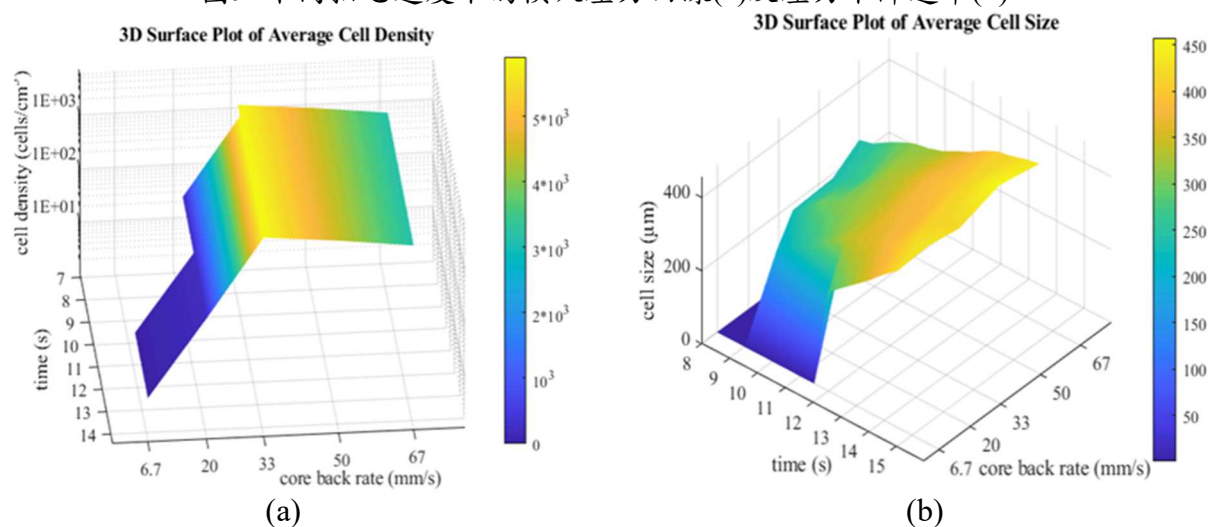


圖10 平均泡孔密度(a)及尺寸(b)對時間及抽芯速度的3D曲面圖

#### 4. 結論

本研究基於既有的研究方法，成功建立驗證了發泡射出成型可視化平台，展現其系統性調查氣泡成核與成長動力學的能力。此平台能夠進行可再現性的研究，同時將調查範圍延伸至先前未探索的參數範疇。

透過系統性可視化，本研究鑑別出控制發泡結構的製程關鍵臨界值。例如，發現關鍵的模具開啟距離會造成劇烈的結構轉變，使泡體密度從低於  $60 \text{ cells/cm}^3$  激增至超過  $4,500 \text{ cells/cm}^3$ 。可視化可觀察此轉變造成的爆炸性成核。直接觀察成核動力學識別出最佳模具開啟速度為  $33 \text{ mm/s}$ 。同時也透過壓力感測數據驗證較慢的速度無法提供足夠的壓降速率來誘發熱力學不穩定性，而較高的速度則會造成壓力反彈，抑制進一步成核。經由同步壓力與視覺數據驗證，可為製程最佳化提供更進一步的參數設計建議。

這些發現突顯了即時可視化的價值。觀察臨界行為、量化動力學參數以及捕捉競爭機制的的能力，將發泡射出成型從經驗驅動的技藝提升為基於科學的製程。此方法不僅揭示了先前未知的現象，也為理解複雜的製程-結構關係提供了視覺基礎。總結而言，本研究成功建立了一個系統性、可重現的可視化平台，作為未來高分子發泡研究的基礎。經驗證的方法學使研究人員能夠系統性地探索各種高分子-發泡劑組合，而此處識別出的質性原理為製程最佳化提供了直接的指導方針。藉由將發泡射出成型從經驗製程轉變為有系統性的研究，此一發泡射出視覺化平台促進了跨不同材料系統的射出發泡科學試模方法之發展。

#### 5. 誌謝

本研究由國科會及科盛科技以下計畫支持:合約編號:MOST 110-2622-E-011-027、NSTC-113-2622-E-011-013、MOST 111-2622-8-011-004-TE4及NSTC 112-2622-8-011-013-TE4，及教育部產學合作計畫(合約編號1112302411G)。作者謹向瑞皇精密工業股份有限公司總經理林順福先生在模具開發期間提供的建議及討論表達誠摯謝意。本研究論文主要內容與實驗部分全部為作者自行撰寫，惟文字編輯，部分採用Claude AI工具協助文字潤稿與修飾。

#### 6. 參考文獻

1. C. Okolieocha, D. Raps, K. Subramaniam, and V. Altstädt, 2015. European Polymer Journal, vol.73, pp.500-519.



2. J. Xu, 2010. Microcellular injection molding, Wiley, Hoboken, N.J..
3. C.A. Villamizar and C.D. Han, 1978. Polymer Engineering & Science, vol.18, no.9, pp.699-710.
4. T. Yamada, Y. Murata, and H. Yokoi, 2012. Int. Polym. Process., vol.27, no.3, pp.299-309.
5. M. Mahmoodi, A.H. Behraves, S.A.M. Rezavand, and M. Golzar, 2010. Polymer Engineering & Science, vol.50, no.3, pp.561-569.
6. T. Ishikawa and M. Ohshima, 2011. Polymer Engineering & Science, vol.51, no.8, pp.1617-1625.
7. T. Ishikawa, K. Taki, and M. Ohshima, 2012. Polymer Engineering & Science, vol.52, no.4, pp.875-883.
8. V. Shaayegan, L.H. Mark, C.B. Park, and G. Wang, 2016. AIChE Journal, vol.62, no.11, pp.4035-4046.
9. V. Shaayegan, L.H. Mark, A. Tabatabaei, and C.B. Park, 2016. Express Polymer Letters, vol.10, no.6, pp.462-469.
10. M.J. Wingert, S. Shukla, K.W. Koelling, D.L. Tomasko, and L.J. Lee, 2009. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol.48, no.11, pp.5460-5471.
11. V. Shaayegan, C. Wang, F. Costa, S. Han, and C.B. Park, 2017. European Polymer Journal, vol.92, pp.314-325.
12. V. Kumar and N.P. Suh, 1990. Polymer Engineering and Science, vol.30, no.20, pp.1323-1329.
13. C.D. Han and H.J. Yoo, 1981. Polymer Engineering & Science, vol.21, no.9, pp.518-533.
14. C. Wang, V. Shaayegan, M. Ataei, F. Costa, S. Han, M. Bussmann, and C.B. Park, 2019. European Polymer Journal, vol.119, pp.189-199.
15. J. Xing, B. Liu, T. Jiang, Y. You, X. Zeng, J. Yang, C. Zhang, W. Gong, and L. He, 2023. RSC Advances, vol.13, no.5, pp.2746-2755.
16. M. Mahmoodi, A.H. Behraves, S.A.M. Rezavand, and A. Pashaei, 2010. Journal of Applied Polymer Science, vol.116, no.6, pp.3346-3355.
17. K. Taki, M. Menale, G. Pisante, and E. Di Maio, 2022. Journal of Applied Polymer Science, vol.139, no.45.
18. R. Miyamoto, S. Yasuhara, H. Shikuma, and M. Ohshima, 2013. Polymer Engineering & Science, vol.54, no.9, pp.2075-2085.
19. G. Wang, G. Zhao, G. Dong, L. Song, and C.B. Park, 2018. Journal of Materials Chemistry C.
20. J. Zhao, Q. Zhao, L. Wang, C. Wang, B. Guo, C.B. Park, and G. Wang, 2018. European Polymer Journal, vol.98, pp.1-10.
21. P. Xie, G. Wu, Z. Cao, Z. Han, Y. Zhang, Y. An, and W. Yang, 2018. Polymers, vol.10, no.5, p.554.