

超臨界流體顆粒發泡監測控制系統研發

The Design and Development of a Supercritical Flow Particle Foaming Monitoring Control System

胡明森

Ming-Sen Hu

航空通訊電子系副教授 空軍航空技術學院

Department of Aviation Communication & Electronics

Air Force Institute of Technology

摘 要

超臨界流體微孔發泡成型技術是將氮氣 (N_2) 或二氧化碳 (CO_2) 等惰性氣體，加熱並壓縮使其成為高溫高壓之超臨界流體，再將其注入含橡膠或塑膠原料之發泡槽中，透過急速降壓可使超臨界流體氣化並快速排出，如此可在塑料內部長成均勻微細氣泡，達到微孔發泡之目的，此種發泡成型技術具有成本低、安全性高及無污染等諸多優點，為目前極受矚目的新一代綠色環保製程。本文提出一種可快速進行超臨界流體微孔發泡的製備程序，並在此製備程序中透過流體攪拌作業為發泡槽建立一個均溫環境，藉此提高發泡效率和發泡品質，本研究同時研發一套可執行超臨界流體顆粒發泡之自動化監控系統，用以驗證所提出之製備程序。

關鍵字：超臨界流體、微孔發泡、成型製程、流體攪拌、自動控制。

Abstract

The supercritical fluid microcellular foaming technique has the advantages of low cost, high safety and without pollution. It is an important and new green process. This paper proposed a fast supercritical fluid microcellular foaming process. In this process, a uniform temperature environment can be built in the foaming tank by stirring operation, which may promote the foaming efficiency and product quality. This study also develops an automatic control system of supercritical fluid particle foaming for validating the proposed process.

Keywords: supercritical fluid, microcellular foam, molding process, fluid stirring, automatic control

一、前言

工業上以往對於橡膠或塑膠原料之發泡，主要是將原料預先混和發泡劑，再進行熱壓或純加熱方式，致使發泡劑產生氣體，造成橡膠或塑膠原料內部產生孔隙，而達到膨脹發泡之效果[1]。然而，一方面因發泡劑之價格昂貴，使發泡成本居高不下；另一方面因發泡劑的成份不僅會對人體造成危害，亦很容易對環境造成污染[2]。

有鑑於此，遂有研究者將丙烷、丁烷、…等有機溶劑與橡膠或塑膠原料混合同置於一定的溫度和壓力之下，然後迅速解壓，即可使橡膠或塑膠原料膨脹發泡。由於烷類等有機溶劑於常溫常壓下為液體狀態，因此很容易建壓，而且此類有機溶劑與橡膠或塑膠原料有很好的溶合性，可以得到良好的發泡效果[3-5]。但此種作法的缺點，在於解壓時排出之廢氣容易造成工作人員肺部、皮膚及生態環境之汙染，並且此類有機溶劑很容易因燃燒而爆炸，尤其在發泡之後容易有自燃現象，具有高度的危險性。

為解決上述之問題，遂有超臨界流體(supercritical fluid)微孔發泡成型技術[6-10]之引入，超臨界流體之黏著度接近於氣體，密度接近於液體，具有高質傳效率、低表面張力以及溶解度可隨溫度、壓力調控等特性。超臨界流體微孔發泡成型技術是將氮氣(N_2)或二氧化碳(CO_2)等惰性氣體，加熱增壓使其成為超臨界流體，再將其注入含橡膠或塑膠原料之發泡槽中，藉由其良好的超臨界流體擴散效應，可讓流體與熔融塑料混合成均勻單相體，然後透過急速降壓可使超臨界流體氣化並快速排出，如此可在塑料內部長成均勻微細氣泡，達到微孔發泡之效果，相對於傳統發泡劑或烷類有機溶劑，超臨界流體微孔發泡成型技術具有經濟、安全及環保方面之諸多優點，為目前極受矚目的新一代綠色環保製程[10-13]。

然而目前工業上所使用的超臨界流體微孔發泡設備，雖已可透過加熱升壓產生二氧化碳超臨界流體，以進行橡膠或塑膠原料之微孔發泡，惟在發泡成型後，必須開啟發泡槽以將發泡成品取出，此時發泡槽內之溫度與壓力皆會散失，當需再進行發泡作業時，必須重新對發泡槽進行加熱與升壓，如此不僅耗費時間，且發泡槽在加熱時，離熱源越近溫度越高，離熱源越遠則溫度越低，因此發泡槽內

會出現溫度不均勻現象，致使處在不同位置的原料，易因溫度不同，而造成發泡的成品會有大小和品質不一之缺點[13]。為改善上述缺失，本文提出一種可快速進行超臨界流體微孔發泡之製備程序[14]，其可在發泡槽中進行流體攪拌以提供均溫環境，藉此提高發泡效率和發泡品質，本研究同時研發一套可自動化執行超臨界流體發泡作業之顆粒發泡監控系統，用以驗證所提出之製備程序。

二、超臨界流體微孔發泡製備程序

本研究所提出的超臨界流體微孔發泡製備程序，其作業流程如圖 1 所示。

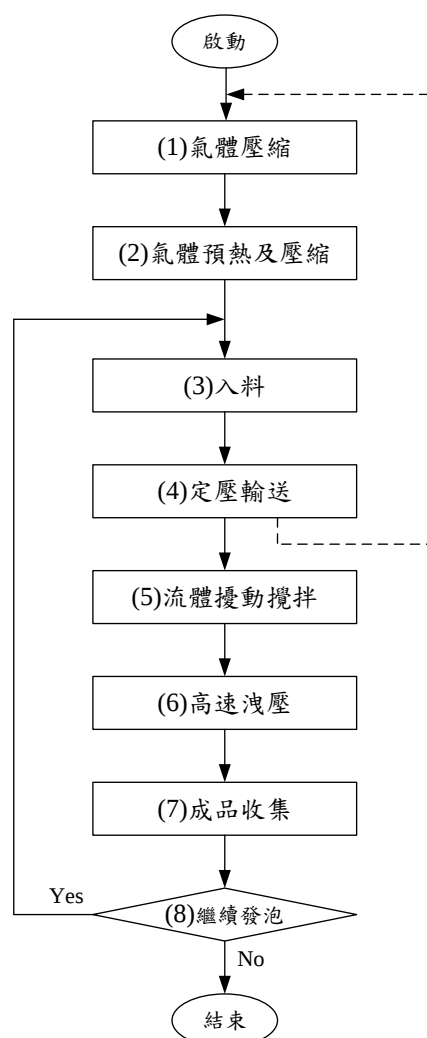


圖 1. 發泡作業流程

此發泡作業流程中各步驟分述如下：

- (1) 氣體壓縮：將待用氣體預先壓縮，使氣體達一定壓力。
- (2) 氣體預熱及壓縮：將已預先壓縮之氣體再次壓

縮並進行加熱，使氣體形成高壓高溫之超臨界流體。

- (3) 入料：輸入定量的待發泡橡膠或塑膠原料，以準備進行發泡作業。
- (4) 定壓輸送：將預先壓縮及加熱後所產生之超臨界流體定壓輸送至發泡槽，與定量之待發泡原料混合，並使高壓高溫之流體壓力成為定值。定壓輸送後可同時回到步驟(1)進行氣體壓縮並加熱成流體之作業(如圖 1 虛線所示)。
- (5) 流體擾動攪拌：擾動攪拌混合後之高溫高壓流體與待發泡原料，使其成為均溫、均壓狀態。
- (6) 高速洩壓：高速洩除超臨界流體與待發泡原料之壓力，致使流體氣化離開待發泡原料，待發泡原料將發泡膨脹，成為發泡成品。
- (7) 成品收集：將發泡膨脹之成品收集集中。
- (8) 當發泡成品收集完成後，若須繼續發泡作業，可再將待發泡原料定量輸入發泡槽，然後將已預先加熱及加壓之超臨界流體定壓輸入混合，即可再次進行發泡作業。

三、系統架構

本研究中我們研發一套超臨界流體顆粒微孔發泡監控系統，此監控系統之架構如圖 2 所示，其所包含的組成元件與功能分述如下：

1. 氣源：產生超臨界流體之氣體來源，可為二氧化碳 (CO_2) 或氮氣 (N_2) 等惰性氣體鋼瓶。
2. 冷凍裝置：用於先將氣源輸出的惰性氣體降溫，以利進行氣體壓縮作業。
3. 冷凍溫度偵測單元：用於偵測冷凍降溫後之氣體溫度，所偵測之溫度訊號可經訊號轉換單元傳送至監控主機進行顯示。
4. 氣體壓縮單元：為一空氣壓縮機，用來壓縮降溫後之惰性氣體，提升氣體壓力後存入預備槽中。
5. 加壓控制單元：可接受監控主機之命令，以啟動氣體壓縮單元，對預備槽增加氣體壓力。
6. 預備槽加熱器：用來對預備槽加熱，以提升槽內氣體或流體溫度。
7. 預備槽加熱控制單元：可接受監控主機之命令，以啟動預備槽加熱器，進行加熱工作。
8. 預備槽：可透過其加熱器與氣體壓縮單元預先產生高溫高壓超臨界流體之儲存槽，以提供發泡槽進行微孔發泡作業。
9. 預備槽溫度偵測單元：用來偵測預備槽中之溫度，所偵測之溫度訊號可經訊號轉換單元傳送至監控主機，藉以判斷預備槽溫度是否已達設定值。
10. 預備槽壓力偵測單元：用來偵測預備槽中之壓力，所偵測之壓力訊號可經訊號轉換單元傳送至監控主機，藉以判斷預備槽壓力是否已達設定值。
11. 定壓輸入控制單元：可接受監控主機之命令，用來將預備槽中的超臨界流體定壓輸入發泡槽中，以供進行微孔發泡之用。
12. 發泡槽：用來混合原料與超臨界流體並進行微孔發泡之空間，其內裝置一攪拌機，透過攪拌機之轉動，可讓發泡槽中各處皆處於均溫狀態。
13. 攪拌機控制單元：可接受監控主機之命令，用來控制發泡槽中攪拌機之轉速。
14. 轉速偵測單元：用來偵測發泡槽中攪拌機之轉速，所偵測之轉速訊號可經訊號轉換單元傳送至監控主機，藉以判斷攪拌機轉速是否已達設定值。
15. 發泡槽壓力偵測單元：用來偵測發泡槽中之壓力，所偵測之壓力訊號可經訊號轉換單元傳送至監控主機，藉以判斷發泡槽壓力是否已達設定值。
16. 發泡槽溫度偵測單元：計有上、中、下三組溫度偵測單元，分別用來偵測發泡槽之上層、中層與下層溫度，所偵測之溫度訊號皆可經訊號轉換單元傳送至監控主機，藉以判斷發泡槽各層溫度是否已達設定值。
17. 原料槽：用於存放欲進行微孔發泡之橡膠或塑膠原料。
18. 入料控制單元：可手動控制之入料控制閥，用來將原料槽中的原料定量輸入發泡槽中。
19. 發泡槽加熱器：計有上、中、下三組加熱器，分別用來增加發泡槽之上層、中層與下層溫度。
20. 發泡槽加熱控制單元：計有上、中、下三組加熱控制單元，皆可接受監控主機之命令，分別用來控制發泡槽之上、中、下三組加熱器。
21. 洩壓控制單元：為一組高速洩壓閥，可接受監控主機之命令，進行發泡槽之快速洩壓爆破工作，在洩壓之後即可完成顆粒發泡作業，以產生發泡成品。透過此高速洩壓閥可直接將發泡後之成品收集至收集槽中。

- 22.成品收集槽：為一個消音收集槽，用來收集發泡後之成品。
- 23.訊號轉換單元：為一組 Advantech USB-4711A 多功能資料擷取控制卡[15]，可將各偵測單元所量測之訊號傳送至監控主機，亦可將監控主機所下之命令傳送至各控制單元。
- 24.監控主機：為一部個人電腦，可執行 LabVIEW

監控軟體，此監控軟體可提供使用者進行相關發泡監控參數之設定，並依據所設定之參數，自動擷取所有偵測單元所量測之訊號，再依據其處理結果下命令啟動各相關控制元件進行控制工作，藉以執行超臨界流體微孔發泡之控制程序。

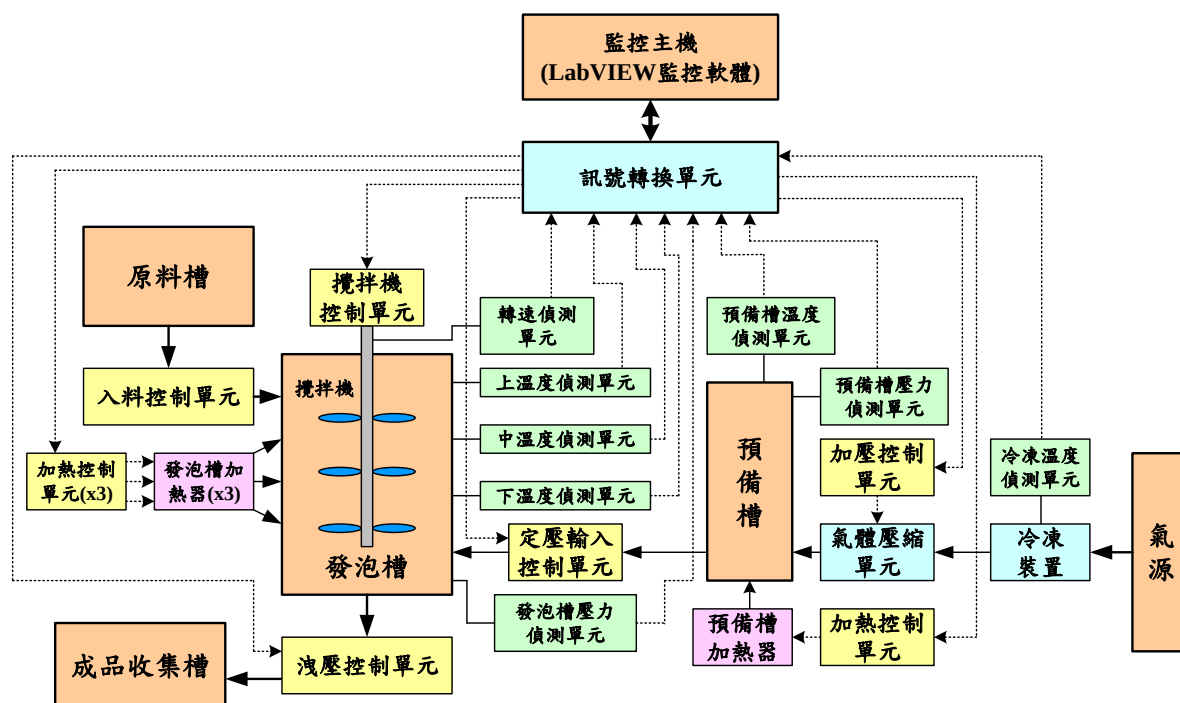


圖 2. 超臨界流體顆粒發泡成型監控系統架構

依據圖 2 之系統架構所研製的顆粒發泡成型監控系統實體如圖 3 所示。

(a) 發泡槽與控制模組



(b) 全系統實體

圖 3. 超臨界流體顆粒發泡成型監控系統實體

四、自動監控軟體開發

為進行超臨界流體顆粒微孔發泡作業之控制，本文中利用 LabVIEW 圖控式語言[16,17]開發一套顆粒發泡監控軟體，此監控軟體可提供使用者進行相關監控參數之設定，並依據所設定之參數，自動執行超臨界流體微孔發泡之控制程序。

4.1 控制參數與儀表參數設定

在進行超臨界流體微孔發泡作業之前，使用者可先執行監控參數與儀表參數之設定。圖 4 所示為監控參數之設定畫面，此畫面中可供使用者設定之參數包括：預備槽之設定壓力 $P1_{set}$ (180 kg/cm^2)與設定溫度(90 $^{\circ}\text{C}$)、發泡槽之設定壓力 $P2_{set}$ (160 kg/cm^2)與設定溫度(80 $^{\circ}\text{C}$)、攪拌機之最初轉速 S_{low} (100 RPM)與最高轉速 S_{high} (800 RPM)、發泡準備時間 T (70 Sec)、攪拌機初速到高速時間 $T1$ (20 Sec)與高速回到初速時間 $T2$ (20 Sec)、到達發泡前入壓閥關閉時間 $T3$ (10 Sec)以及壓縮機出口壓力上限差值 ΔP (3 kg/cm^2)，其中括號內為設定值。

監控參數設定

1. 預備槽設定壓力($P1_{set}$): kg/cm^2
2. 預備槽設定溫度($T1_{set}$): $^{\circ}\text{C}$
3. 發泡槽設定壓力($P2_{set}$): kg/cm^2
4. 發泡槽設定溫度($T2_{set}$): $^{\circ}\text{C}$
5. 發泡準備時間(T): Sec
6. 攪拌機設定初速(S_{low}): RPM
7. 攪拌機初速到達高速時間($T1$): Sec
8. 攪拌機設定高速(S_{high}): RPM
9. 攪拌機高速回到初速時間($T2$): Sec
10. 發泡前倒數計時的時間($T3$): Sec
11. 壓縮機出口壓力上限差值: kg/cm^2

進入儀表參數設定
設定完成返回

圖 4. 監控參數設定畫面

本系統另提供給系統設計者彈性使用不同範圍之感測儀錶功能，讓設計者可依據所選用感測器

之量測範圍進行儀表參數之設定。點選圖 4 左下方之「進入儀表參數設定」按鈕，即可進入圖 5 所示之儀表參數設定畫面，此畫面左方列出本系統所使用之感測儀表，設計者可設定其感測範圍，包括：攪拌機轉速感測器、預備槽與發泡槽之壓力感測器、壓縮機出口壓力感測器、預備槽溫度感測器、發泡槽之上/中/下層溫度感測器及冷凍裝置溫度感測器等之感測範圍。畫面右方則列出每一個儀表對應的類比輸入接腳(AI0~AI8)，設計者可決定其輸入信號之電壓位準，目前皆設定為 0~10V。

儀表參數設定

攪拌機轉速感測範圍: 0 ~ 1000 RPM	AI8信號位準	0 ~ 10
預備槽壓力感測範圍: 0 ~ 500 kg/cm^2	AI9信號位準	0 ~ 10
發泡槽壓力感測範圍: 0 ~ 500 kg/cm^2	AI1信號位準	0 ~ 10
攪拌機出口壓力感測範圍: 0 ~ 500 kg/cm^2	AI2信號位準	0 ~ 10
預備槽溫度感測範圍: 0 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	AI3信號位準	0 ~ 10
發泡槽上方溫度感測範圍: 0 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	AI4信號位準	0 ~ 10
發泡槽中間溫度感測範圍: 0 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	AI5信號位準	0 ~ 10
發泡槽下方溫度感測範圍: 0 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	AI6信號位準	0 ~ 10
冷凍裝置溫度感測範圍: 0 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$	AI7信號位準	0 ~ 10

設定完成返回

圖 5. 儀表參數之設定畫面

4.2 啟動發泡監控軟體

在完成各項監控參數之設定後，使用者可進入圖 6 所示之顆粒發泡監控程序畫面。在此畫面上方的「訊息」欄位用來顯示系統正在執行之工作內容，畫面右上方為可供使用者操控之命令區，畫面最下方顯示系統之取樣頻率、開始後所經過之時間以及已記錄的資料筆數。

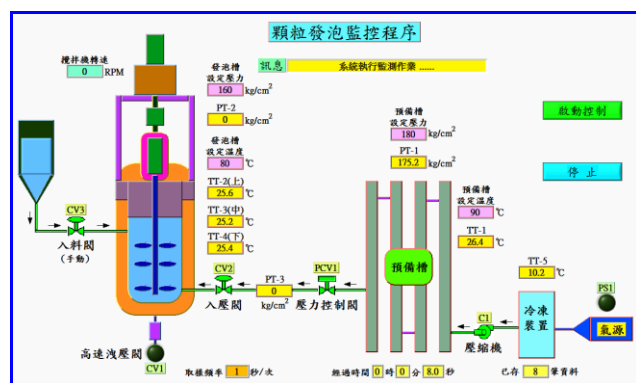


圖 6. 顆粒發泡監控程序畫面

畫面的中間部分為發泡監控作業區，系統會顯示預備槽與發泡槽之設定壓力與設定溫度(粉紅色

文字框)，作為其壓力控制與溫度控制之目標值，各壓力感測器與各溫度感測器所監測之壓力值與溫度值，皆顯示在黃色文字框中，如 PT-1 與 TT-1 分別為預備槽之壓力與溫度監測值，PT-2 為發泡槽之壓力量測值，TT-2、TT-3、TT-4 分別代表發泡槽之上、中、下層溫度量測值，TT-5 為冷凍降溫之氣體溫度。PS1 為氣源壓力指示燈號，PS1 亮時表示氣源壓力不足，暗時表示壓力充足。圖 2 系統架構中可將預備槽中流體定壓輸入發泡槽的「定壓輸入控制單元」，在圖 6 畫面中是由一個可調控氣體壓力大小之壓力控制閥與一個可做開關控制之入壓閥所組成，所輸入之流體壓力是由

PT-3 顯示。攪拌機轉速用來顯示所量測之攪拌機旋轉速度，手動入料閥會顯示使用者是否開啟入料控制閥進行入料作業之狀態，高速洩壓閥可由系統直接啟動，以進行發泡槽快速洩壓作業。

五、超臨界顆粒發泡監控程序

5.1 即時監控程序

為述明本系統所執行的超臨界流體顆粒發泡監控流程，本文將以圖 7 所示之狀態變化圖(state transition diagram)[18]來表示其即時監控程序。

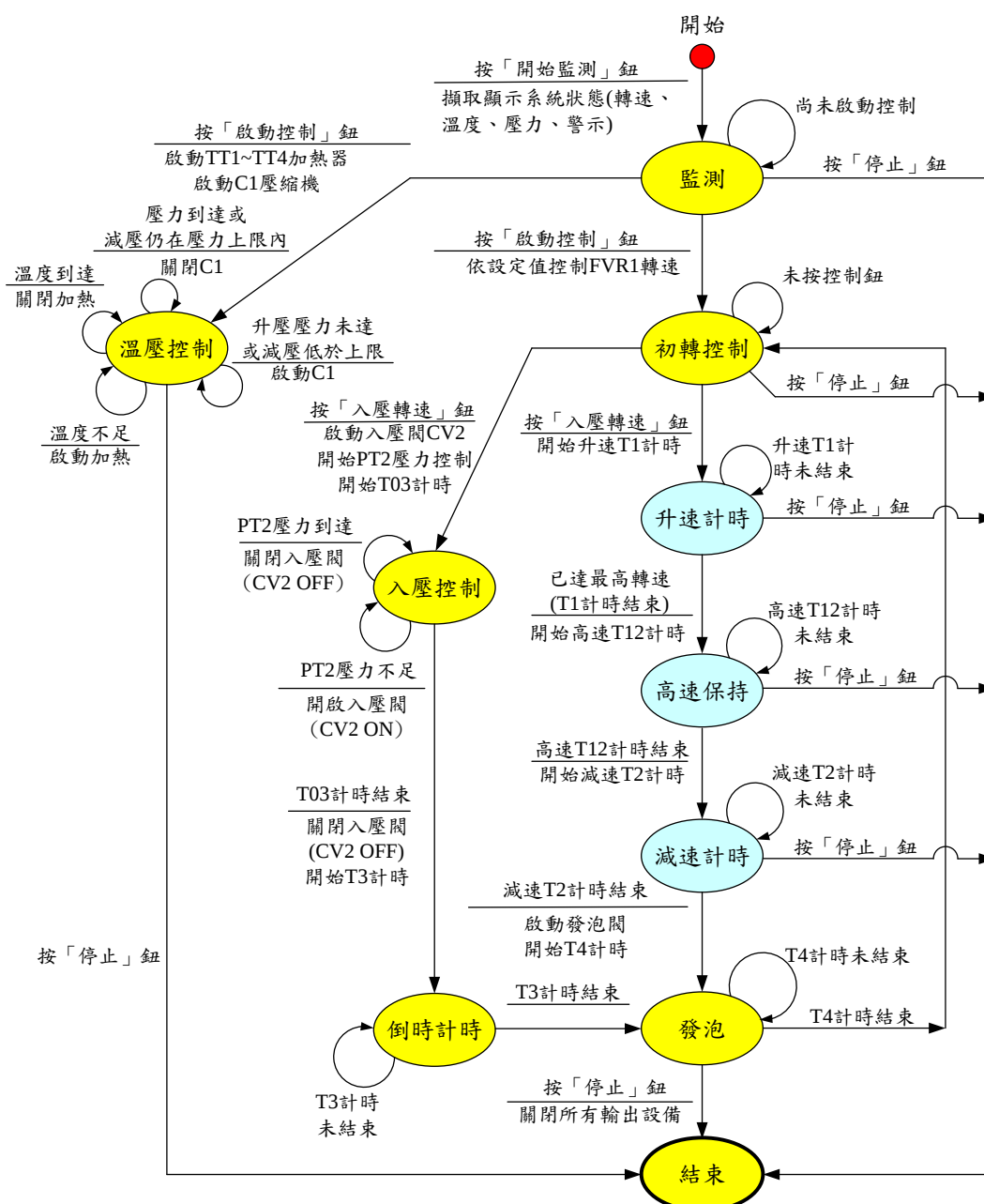


圖 7. 顆粒發泡即時監控程序之狀態變化圖

在此種狀態變化圖中，橢圓形代表狀態(state)，粗線橢圓代表結束狀態(final state)，箭頭連線代表狀態到狀態之轉移(或變化)(transition)，每一條箭頭連線皆伴隨一組事件(event)與動作(action)，格式如下式(1)：

$$\frac{\text{event}}{\text{action}} \quad (1)$$

其意義為因發生了該事件所以系統從一個狀態轉移至另一個狀態(亦可轉移至相同狀態)，並且執行事件下方之動作。

在圖 7 的狀態變化圖中，共包括監測、溫壓控制、初轉控制、入壓控制、升速計時、高速保持、減速計時、倒數計時、發泡及結束等 10 個狀態(狀態名稱以粗體底線字表示)。本文將以各種狀態之變化情況說明系統的即時監控程序。

5.2 監測與控制

在系統開始後，使用者可點選「開始監測」按鈕進入監測狀態。在此狀態中，系統會自動擷取各溫度、壓力、轉速及 PS1 指示等之監測值，並在畫面中顯示，其執行畫面如圖 6 所示。接著使用者可點選「啟動控制」按鈕，系統將同時進入溫壓控制狀態與初轉控制狀態，其執行畫面如圖 8 所示。

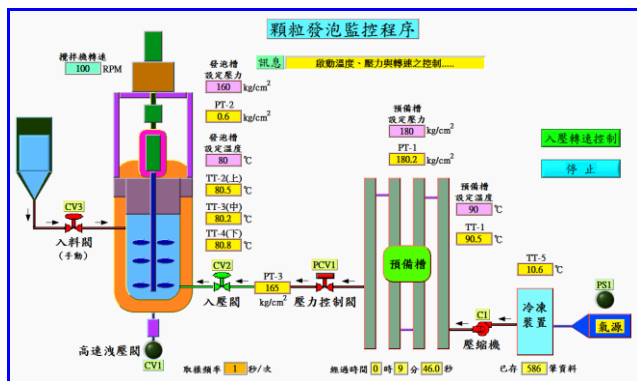


圖 8. 執行溫度壓力控制之畫面

在溫壓控制狀態中，系統會啟動預備槽的加熱器與 C1 壓縮機，進行溫度與壓力之自動控制，其中對於 C1 壓縮機之控制方面，將控制 PT-1 壓力值與其設定值 $P1_{set}$ 之誤差低於其上限差值 ΔP ，亦即

$$|PT-1 - P1_{set}| < \Delta P \quad (2)$$

且此種溫度與壓力之自動控制在系統結束前都將持續進行；另外系統也將啟動發泡槽的上、中、下層加熱器，並進行 TT-2、TT-3、TT-4 溫度之自動控制，此項控制是因加熱較耗費時間，須預先完成發泡槽之加熱作業。而在初轉控制狀態中，系統將啟動攪拌機 FVR，使其達到設定之初速值 S_{low} 。

當預備槽的溫度及壓力皆已達到設定值(槽內已成為高溫高壓超臨界流體)，且發泡槽之 TT-2(上)、TT-3(中)、TT-4(下)溫度皆已達其設定值(預熱完成)，使用者即可手動開啟入料閥，以將原料定量輸入發泡槽中，如圖 8 畫面中入料閥 CV3 通道變成紅色，表示目前入料閥正開啟以輸入原料中，若顯示綠色通道表示處於關閉狀態。

5.3 入壓與攪拌機轉速控制

當完成入料工作後，即可開始進行發泡準備作業，此時使用者可點選「入壓轉速」按鈕，此時系統將同時進入入壓控制狀態與升速計時狀態。在進入入壓控制狀態時，系統會一方面啟動入壓閥 CV2，將預備槽中流體定壓輸入發泡槽中，並檢查 PT-2 壓力量測值以進行壓力控制，另一方面則啟動 T03 之計時，其中 T03 為發泡準備時間(T)減去倒數計時的時間(T3)，代表入壓控制狀態所持續之時間，即

$$T03 = T - T3 \quad (3)$$

而在進入升速計時狀態時，系統會以 T1 時間逐步將攪拌機轉速 S 由設定之初速 S_{low} 遞增至設定之最高速 S_{high} ，開始將發泡槽中的原料與高溫高壓流體進行擾動攪拌，其執行畫面如圖 9 所示，在此畫面中會另顯示升速階段之設定時間(粉紅色框)與目前轉速計時經過時間(藍色框)。本系統對於攪拌機轉速主要採用 0 ~ 10V 類比輸出(analog output)之控制，例如在升速計時階段，時間 t 之轉速 $S(t)$ 與類比輸出電壓 $V_{out}(t)$ 可計算如下式(4)與式(5)：

$$S(t) = S_{low} + \frac{t - t_0}{T1} \cdot (S_{high} - S_{low}) \quad (4)$$

$$V_{out}(t) = \frac{t-t_0}{T1} \cdot V_{max} \quad (5)$$

其中 t_0 為按下「入壓轉速」鈕之時間， $V_{max}=10V$ 。

為了描述如何透過參數設定方式進行攪拌機轉速之控制，我們定義攪拌機轉速與計時控制圖如圖 10 所示。在此圖中，藍色曲線為攪拌機轉速之設定曲線，紅色箭頭所指代表使用者操作之時間。

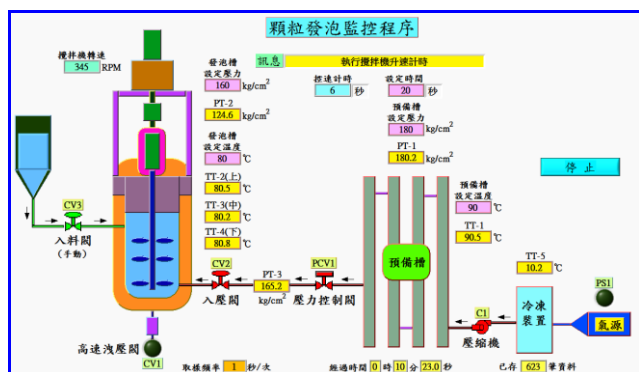


圖 9. 升速計時之執行畫面

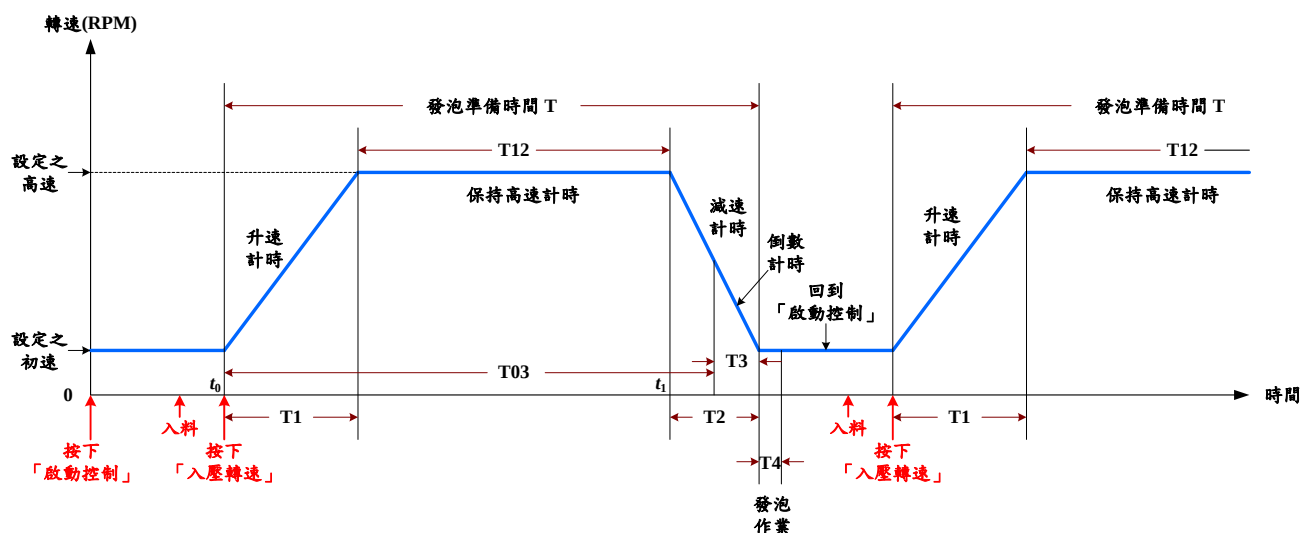


圖 10. 攪拌機轉速與計時控制圖

5.4 發泡作業與重新發泡準備

在攪拌機進行 T2 減速計時過程中，系統會同步檢查入壓控制狀態的持續時間 T03 是否已經結束，當 T03 到達時，系統將進入發泡前的倒數計時階段，倒數計時的時間為 T3，如圖 10 之計時控制圖所示。而當 T3 時間的倒數計時結束時，T2

在 T1 時間的升速計時結束後，系統將自動進入高速保持狀態，並開始 T12 時間之高速保持計時，其中

$$T12 = T - T1 - T2 \quad (6)$$

攪拌機將以最高速度對發泡槽中的原料與流體擾動攪拌 T12 時間，以使發泡槽各處之原料能處於均溫狀態。而在 T12 時間的高速保持計時結束後，系統將自動進入減速計時狀態，並開始 T2 時間之減速計時，系統會以 T2 時間逐步將攪拌機轉速 S 由最高速度 S_{high} 遞減至最低之初速 S_{low} 。在減速計時階段，時間 t 之轉速 $S(t)$ 與類比輸出電壓 $V_{out}(t)$ 可計算如下式(7)與式(8)：

$$S(t) = S_{low} + (1 - \frac{t-t_1}{T2}) \cdot (S_{high} - S_{low}) \quad (7)$$

$$V_{out}(t) = V_{max} - \frac{t-t_1}{T2} \cdot V_{max} \quad (8)$$

其中 t_1 為開始減速計時之時間，即 $t_1 = t_0 + T1 + T12$ 。

時間之減速計時亦將同時結束，此時系統將進入發泡狀態，直接啟動發泡作業並進行 T4 計時(T4 設定為發泡與成品收集時間，約 4 Sec)，此時會開啟高速洩壓閥 CV1 進行快速洩壓作業，在完成洩壓後即可產生發泡之成品，並且此發泡成品可經由高速洩壓閥直接輸送至成品收集槽中，發泡與成品收即可在 T4 時間中完成。如圖 11 左方所示為發泡

前之熱塑性聚氨酯(Thermoplastic polyurethanes, TPU) 塑膠原料，右方則為發泡後之成品，其體積約膨脹放大 10 ~ 20 倍。

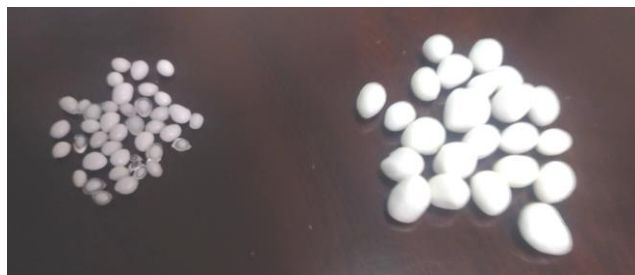


圖 11. TPU 塑膠原料與發泡成品

在完成 T4 時間之計時後，系統將關閉高速洩壓閥並直接回到圖 7 中按下「啟動控制」鈕後之狀態，此時將同時進入溫壓控制狀態與初轉控制狀態，重新開始下一次的發泡準備作業。

六、結論

有鑑於傳統上運用發泡劑或烷類有機溶劑進行橡膠或塑膠原料之發泡，除會對人體造成危害，亦容易造成環境之污染。超臨界流體微孔發泡成型技術因具有成本低、安全性高及無污染等諸多優點，已成為解決上述發泡問題的重要途徑，惟目前工業上使用的超臨界流體發泡設備，仍存在發泡後須開啟發泡槽取出成品，造成溫度與壓力散失，必須重新耗費長時間加熱才能再進行發泡作業，嚴重影響其發泡效率；再者因發泡槽內部各處存有溫度差異，會造成發泡成品之大小與品質不一之缺點。

為解決上述缺點，本文研發一套高效率之超臨界流體顆粒發泡監控系統，本監控系統可提供使用者進行監控參數與儀表參數之設定，系統將依據所設定之參數自動執行超臨界流體微孔發泡的製備程序。在此種製程中，系統可持續建立預備槽之高壓高溫超臨界流體，自動提供發泡槽進行發泡之用，如此可大為提高整體發泡效率；另一方面，本製程可透過自動計時控制之流體攪拌作業，為發泡槽建立一個均溫環境，進而提升發泡成品之品質。

參考文獻

1. 吳舜英、徐敬一，塑膠發泡成型技術，台灣，復文書局，1997，ISBN-10: 9579931127。
2. Klempner, D., Sendijarevic, V., Polymeric Foams and Foam Technology 2E., Hanser, 2004, ISBN: 9781569903360.
3. Okamoto, K., Microcellular Processing, Hanser, 2003, ISBN: 9781569903445.
4. Lee, S.T., Park, C.B., Ramesh, N.S., Polymeric foams – science and technology, Taylor & Francis, 2006, ISBN 9780849330759.
5. 何繼敏，新型聚合物發泡材料及技術，中國，化學工業出版社，2007。
6. 葉樹開、朱建嘉、康庭璋、陳澄如、康宗恩、芮祥鵬、郭文正，以二氧化碳發泡法製備熱塑性聚氨酯高分子奈米泡孔材料，化工，第 62 卷地 2 期，第 55-69 頁，2015。
7. 黃世欣、李政謙，奈米高分子複材微細發泡射出成型，化學，第七十卷第一期，第1-12 頁，2012。
8. 王維達，超臨界流體微細發泡射出成型製程之聚丙烯複合材料機械性質研究，清雲科技大學機械工程研究所碩士論文，2007。
9. 鐘明修、陳夏宗，超臨界微細發泡射出成型製程特性之研究，中原大學機械工程研究所博士論文，桃園，台灣，17- 40，2006。
10. 李貴琪、余岱螢、游輝仁、邱永和，超臨界流體製作聚乙烯塑膠發泡粒之研究，華岡紡織期刊，第十八卷，第一期，第48-52頁，2012。
11. 梁明在，超臨界二氧化碳在橡塑膠的最新發展與應用，2012年機械論壇，2012年8月31日。
12. Costeux, S. CO₂-blown Nanocellular Foams, J. Appl. Polym. Sci., 2014, 131, 41293.
13. 林龍太郎，超臨界非活性氣體的微細發泡技術，環保輕量化超臨界發泡材料與應用研討會，2018年3月29日。
14. 蘇榮華、蘇柏豪、蘇棕然、蘇子銓、胡明森、潘建亮，一種橡膠及塑膠原料氣體發泡製備方法及其系統，中華民國發明專利，證書號數：I620773，專利期間：自 2018 年 4 月 11 日至 2036 年 12 月 27 日止。
15. USB-4711A User Manual, 150 KS/s, 12-bit Multifunction USB Data Acquisition Module, Advantech.
16. 蕭子鍵、王智昱、儲昭偉，虛擬儀控程式設計 LabVIEW 8X，高立圖書（2007）。
17. 謝勝治、陳璋琪，LabVIEW 應用篇(含自動量測、遠端監控)，全華圖書（2002）。
18. Yourdon, 2006, State-Transition Diagram Just Enough Structured Analysis, Laws of Motion, I, 1687 Chapter 13, ©2006 Ed Yourdon - rev. 051406.