

第二章 塑膠射出成型方法與塑膠材料特性

2.1 塑膠射出成型的方法與原理

射出成型的原理[1]，就是利用塑膠原料的熱可塑性，先將塑膠原料加熱融化成為流體狀態，再經過高壓注入模具的模穴內，待冷卻後取出而得到各種特殊的形狀，以用於各種特殊之用途。大部分的塑膠在受熱之後，分子的小型鏈結開始運動，隨著溫度上升，終致大型鏈結也開始運動，而成為流動狀態。此時，如果加以外力則可以改變形狀，等待冷卻後定形。這樣的過程可以一再的反覆進行，即所謂的『塑膠的熱可塑性』。而分子鏈以互相交鏈成為網狀結構的塑膠，受熱時卻沒有軟化而成為流體的狀況發生，這類的塑膠為熱固性塑膠；因此擁有可塑性的塑膠稱為熱可塑性塑膠。

A. 射出成型製程簡介

射出成型技術[2]，是屬於高分子成型中大量生產，且最常使用的方法之一；其射出成型的基本原理為聚合物加熱塑化→高壓射入模穴→幾何形狀限制高分子流動分佈→冷卻凝固。整個射出成型循環過程可分為五階段，如下列說明所示：

(1) 塑膠原料烘乾及熔融和模具加熱：射出成型加工製作前需先將塑膠原料預熱化，並加熱模具，一般是將塑膠原料倒入料筒內，依不同塑膠原料會設定料筒溫度及加熱時間，如果料筒內塑膠原料不及二分之一且工作時間不長，塑膠原料在料筒加熱時間也可相對縮短。料筒加熱動作最主要是去除塑膠原料的殘留水分，稱為烘乾動作；塑膠原料在料筒中完成烘乾後，即流入料管內加熱融化，主要使用油壓馬達帶動螺桿轉動使塑膠原料流入料管，再由料管周圍包覆的加熱片加熱，提供足夠的熱量使塑膠保持熔融狀態。

(2) 鎖模階段：熔融高分子聚合物以高射出壓力射入模具中，為使模具不產生被頂開的狀況，所以需要極高壓力使模具不被頂開，此力量稱為鎖模力，其循環為在成品頂出後開始至一新成品完成時再次啟動。

(3) 充填階段：熔融高分子聚合物在料管內，利用油壓馬達轉動螺桿向前推進，將熔融塑膠原料射入模具中，此時熔融塑膠原料，經由料管中流過噴嘴、澆道、流道、澆口、進入模穴中充填整個模具。

(4) 保壓階段：充填結束後施以一壓力維持住螺桿不後退，直到澆口冷卻凝固所費的時間，此稱為保壓時間。此動作主要為了彌補因冷卻，造成高分子的體積收縮，使成品更加緻密，所以施以一壓力保持，也被稱為後充填時間。

- (1)冷卻(塑化計量)階段：充填及澆口冷卻後，直到成品固化強度足以頂出，主要避免脫模時因強度不足而產生變形，此階段同時射出機也對高分子聚合物，作加熱及計量動作，因此計量是以螺桿後退之距離算得。
- (2)開模階段：成品固化至足以頂出時，射出機進行離模動作，使可動側模板與固定側模板分離，成品因冷卻收縮的關係，附著於可動側模板，配合頂出機構將成品頂出。

B. 射出成型三大要素

有關射出成型的三大要素包括了：塑膠材料含樹脂的成型收縮性質、流動性質、熱敏性質、耐候性質、機械性質等。機械設備含射出壓力、射出量、射出速率、可塑化能力、合模力、安裝板尺寸等。成型模具含模穴尺寸精度及表面處理、流道系統設計、頂出機構系統設計、冷卻系統設計、倒陷部處理、模具材質等。

C. 射出成型機介紹

選擇射出成型機時，要注意的項目包括射出量、合模力、機盤尺寸、開模行程、射壓、速率等。一般是以射出量及合模力，來表示機台大小。如圖(2.1)所示，射出成型機共分以下構造：

射出單元—螺桿、料缸、噴嘴、螺桿旋轉驅動馬達、進料漏斗、加熱器。

挾模單元—可動側模盤、固定側模盤、繫桿、頂出機構、合模機構、合模油壓缸、模具厚度調整機構、安全裝置。

油壓驅動控制單元—油壓汞、控制閥、濾油器、冷卻器、油箱、油壓缸。

電器控制單元—動作控制系統、溫度控制系統、動力控制系統。

機架及床台—機器骨架、機器床台。

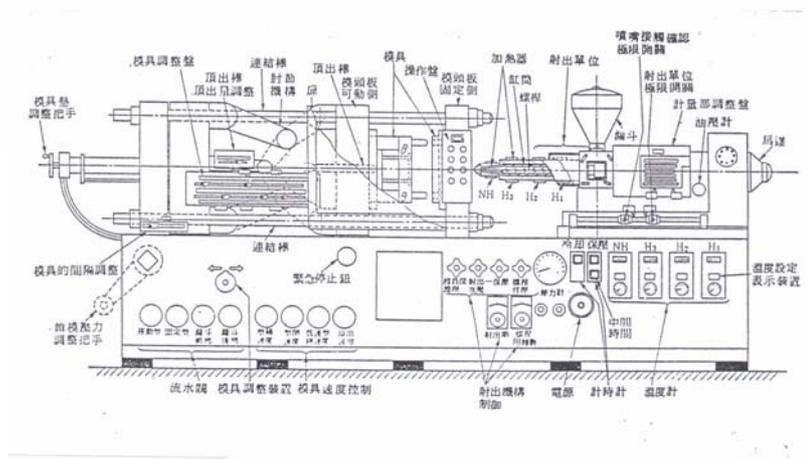


圖 2.1 射出成型機結構[3]

2.2 塑膠材料的基本物性

由於塑膠分子是相互糾纏的狀態，當塑膠分子流動時，流速快慢會影響其糾纏的程度，慢速流動其糾纏的程度較大，速流快則其糾纏的程度將逐漸鬆開，糾纏的程度可視為塑膠熔融狀態的黏度；此物理量可由剪切率及剪應力來定義，對大部份熔融高分子而言，黏度為剪切率及溫度的函數，隨著剪切率增加及溫度升高，黏度會下降，黏度主要分為剪切黏度(shear viscosity) 及延伸黏度(elongation viscosity) [4]。

塑膠的定義(依據美國塑膠工業協會)[5]:『主要由碳、氫、氧、氮及其他有機及無機元素所構成，在成品階段為固體，在製造過程中常是熔融狀的液體，因此可藉加熱使其熔化、加壓力使其流動、冷卻使其固化，而形成各種型狀，符合此敘述之材料族類中的任何一種，均可稱為塑膠』。

塑膠的優點有重量輕、耐用性佳、電絕緣性優異、耐蝕性強、成型容易、價格低廉與著色容易。塑膠的比重大約在 0.9~2.0 之間，一般皆有長久的耐用性，尤其是玻璃纖維強化塑膠(FRP)更是強韌無比。另外塑膠為電之不良導體，耐水、耐油、耐酸、耐化學藥品，而且不生銹。它具有加熱軟化及易成形的性質，且成形法簡單並可做大量生產，大部份的塑膠的加工溫度約在 200~300 °C 之間。由於原料豐富、原料取得容易，大部份的塑膠價格約在 20~100 元/KG 之內。適當加入著色劑，可改變其色澤。塑膠的缺點則有耐熱性差(大部份的塑膠耐熱溫度約在 150 °C 以下)、機械強度差(承受負荷，易生變形)、低溫時易變脆性、且大都為易燃物，且燃燒有毒性氣體產生。

塑膠依溫度效應，可分為熱塑性塑膠與熱固性塑膠二大類，前者加熱熔化，冷卻固化，可反覆為之。後者則一旦加熱產生交鏈反應硬化後，即不再因再度加熱而熔化。影響塑膠材料特性包括了：

- (1)加工溫度:每種塑料有其適當的加工溫度，溫度太低則流動困難，溫度太高則可能造成熱劣解。
- (2)流動速度:流動時會因速度梯度而產生剪切率，剪切率太低則靠近模壁附近的塑料易造成滯流，剪切率太高則會造成剪切應力的增加，將使分子過度拉伸甚至被扯斷，或產生過度摩擦熱(黏滯熱效應)而造成塑料的熱劣解。
- (3)體積收縮:在相變化產生的比容變化，將使塑料產生體積的改變。
- (4)冷卻速率:塑料冷卻應有適當的模溫，低模溫雖可縮短成型週期，但過冷卻太快將降低結晶程度，且易產生應力殘留。
- (3)應力殘留:流動時的分子拉伸，保壓時的壓力過剩，冷卻時因冷卻不均所造成的熱應力。
- (4)頂出溫度:每種塑料有其適當的頂出溫度，而頂出溫度是指其肉厚中心溫度，必須冷卻到使塑料具有足夠的剛性，才不會在頂出時造成變形或頂白，一般在塑料的熱變

形溫度以下約 10~20 °C。

選擇適當的塑膠材料，一般應考慮產品本身的設計與機能要求、塑料的成本、塑料成型的難易程度。

2.3 塑膠的成型特性—黏度

由於塑膠分子是互相糾纏的狀態，當塑膠分子流動時，流速快慢會影響其糾纏的程度，慢速流動其糾纏的程度較大(此時黏度高)，速流快則其糾纏的程度將逐漸鬆開(此時黏度低)。糾纏的程度可視為塑膠熔融狀態的黏度，此物理量可由剪切率及剪應力來定義。對大部份熔融高分子而言，黏度為剪切率及溫度的函數，且受分子量大小及分佈所影響[6]。

黏度是反映流體流動黏性阻力大小的指標，影響黏度的主要因素有溫度及剪切率[7]，溫度愈高則黏度愈低，而剪切率愈高則黏度愈低。因此黏度與壓力和溫度都有絕對的關係，一般分為動力黏度、運動黏度、與條件黏度：

(1) 動力黏度：流體流動的剪切阻力與速度梯度/關係式中的比例常數。如用 F 代表力， L 代表長度、 t 代表時間，則由牛頓內摩擦定律可求得動力黏度的量綱為

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{\partial u}{\partial y}} = \frac{\left(\frac{F}{L^2}\right)}{\frac{(L/t)}{L}} = \frac{F \cdot t}{L^2}$$

動力黏度的單位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)。動力黏度曾用 P (泊) 作單位， $1\text{P}=0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$

(2) 運動黏度：流體的動力黏度與同溫度下該流體密度的比值為

$$\nu = \eta / \rho$$

由上式可求得運動黏度的量綱為 $\nu = L^2 / t$

運動黏度的單位為 m^2/s (米²/秒)。運動黏度曾用 St (斯托克斯) 作單位

$$1\text{St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

(3) 條件黏度：用各種標定黏度計測得的黏度。習用的條件黏度單位有恩氏度(°E)、賽氏通用秒(SUS)和雷氏秒(R)等。

黏度與壓力的關係：一般液體的動力黏度隨壓力的升高而增大，黏度與壓力的關係可近似表達為

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha P}$$

式中 η_0 為大氣壓力下液體的動力黏度； α 為黏度壓力指數，取決於液體的性質， e 為自然對數的底。此式一般用於計算油膜厚度，若用以計算油膜的摩擦阻力，其結果與實際出入較大，因後者必須進一步考慮油的流變性質，即從應力、應變、溫度和時間等，幾方面研究物質變形和流動的物理性質。式中 A 、 B 為取決於液體的常數。

黏度與溫度關係：液體的動力黏度一般隨溫度的升高而降低， η 與絕對溫度 T (K) 的關係通常可用以下經驗公式表達


$$\log \eta = A + B / T$$

式中 A 、 B 為取決於液體的常數。

2.4 塑膠高分子流變學

聚物流變學 (polymer rheology) [8][9][10][11]，研究聚物流動和變形的科學，是介於力學、化學和工程科學之間的邊緣科學，是現代流變學的重要分支；研究聚物流變學對聚合物的合成、加工、加工機械和模具的設計等，均具有重要意義。流變學是在 20 世紀 20 年代隨著土木建築工程、機械、化學工業的發展需要而形成的，一些新材料的開發和應用，使傳統的彈性力學和黏性理論，已不能完全表徵它們的特性。

1928 年，美國物理化學家 E.C. 賓漢，把對非牛頓流體的研究，正式命名為流變學，並倡議成立流變學會，創刊了《流變學雜誌》[12]。此後，流變學逐漸為世界各國所承認並得到發展。聚物流變學是隨高分子材料的合成、加工和應用的需要，於 50 年代發展起來的。在聚合物的聚合階段，流變學與化學結合在一起；而在以後的階段，主要是與聚合物加工相結合。聚物流變學 70 年代發展較快，在 1984 年第九屆國際流變學會議上總結了最近的研究成果，B. 米納等主編了《流變學進展》一書[13]。故影響

聚合物加工的主要流變性能，主要有聚合物的流動性、彈性和斷裂特性。

(1) 流動性

以黏度的倒數表示流動性。按作用方式的不同，流動可分為剪切流動和拉伸流動，相應地有剪切黏度和拉伸黏度。前者為切應力與切變速率之比；後者為拉伸應力與拉伸應變速度之比。聚合物的結構不同，流動性(或黏度)就不同。對於聚合物熔體，大多數是屬於假塑性液體，其剪切黏度隨剪切應力的增加而降低，同時測試條件(溫度、壓力)、分子參數(分子量及其分布、支化度等)和添加劑(填料、增塑劑、潤滑劑等)等因素對剪切黏度-剪切應力曲線的移動方向，均有影響(如圖 2.2 所示;聚合物熔體的剪切黏度-剪切應力曲線)。對於拉伸黏度，當應變速率很低時，單向拉伸的拉伸黏度約為剪切黏度的 3 倍，而雙向相等的拉伸，其拉伸黏度約為剪切黏度的 6 倍。拉伸黏度隨拉伸應力增大而增大，即使在某些情況下有所下降，其下降的幅度遠較剪切黏度的小。因此，在大的應力作用下，拉伸黏度往往要比剪切黏度大一二個數量級，這可使化學纖維紡絲過程更為容易和穩定。

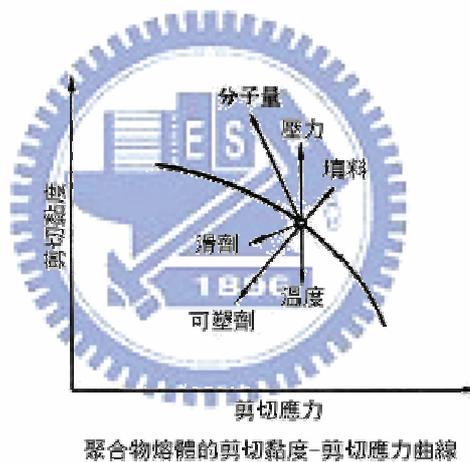


圖 2.2 聚合物熔體的剪切黏度-應力曲線[13]

(2) 彈性

由於聚物流體流動時，伴隨有高彈形變的產生和貯存，故外力除去後會發生回縮等現象。例如；塑料、橡膠擠出後和纖維紡絲後會發生斷面尺寸增大，而長度縮短的離模膨脹現象，或稱彈性記憶效應；攪動時流體會沿杆上昇，這種爬杆現象稱韋森堡效應或法向應力效應。此外；聚合物加工時，半成品或成品表面不光滑，出現『橘子皮』和『鯊魚皮』，出現波浪、竹節、直徑有規律的脈動、螺旋形畸變甚至支離破碎等，影響製品質量的熔體破裂和不穩定流動等現象，這些現象主要與熔體彈性有關。

(3) 斷裂特性

是影響聚合物(尤其是橡膠)加工的又一流變特性，它主要是指生膠的扯斷伸長率、以及彈性與塑性之比。扯斷伸長率與彈塑熔融塑膠的高黏滯性，和低熱傳導性是塑膠成型的一大特徵，當高溫高壓快速流動的熔膠接觸到低溫的模壁時，聚合物在模具表面立刻產生一快速冷卻的薄層。

在不等向及不均勻的快速冷卻變化中，材料的最終性質及組織將成為非等向性，這樣不等向的冷卻和收縮，最後使得成型品產生殘留應力(residual stress)，因而發生翹曲、變形(warpage)，這是塑膠製品產生缺陷的主要原因之一，對塑膠品質的影響十分重要。

2.5 塑膠射出成型之流變學探討

於西元 1920 年，德國化學家史滔丁格(Hermann Staudinger)，清楚地證明聚合物，是由無數分子以長鏈狀態連結而成的。在此之前，人類並不清楚其材料特；典型的流體如水，其幾何形狀改變的行為稱為流動。而典型的固體如金屬，其幾何形狀的改變，稱為變形。

對於一般聚合物熔融液而言，其變形流量亦即流量，行為並不遵守牛頓黏度定理(即黏度 μ 為定值)，屬於非牛頓流體的一種。這類流體尚包含了人體的血液、日常用品中的牙膏等。而有關非牛頓流體的探討，則包含於流變學之研究領域中，流變學是研究物質之流動與變形的科學，並不針對於何種材料，然而在科學上最大的貢獻卻是在聚合物的應用上。於西元 1840 年，德國工程師海根(G. Hagen)由觀察中發現，流體流動大致可分為兩種形式—層流(laminar)與紊流(turbulent)。西元 1883 年，英國科學家雷諾(Osborne Reynold)由實驗證實了層流與紊流的基本特性，同時也證明，流體由層流轉換成紊流完全取決於下列的式子[14]：

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \text{-----(1)}$$

其中 ρ 為流體密度， v 為平均速度， L 為特性長(characteristic length)，

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla \bar{v} \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \text{-----(2)}$$

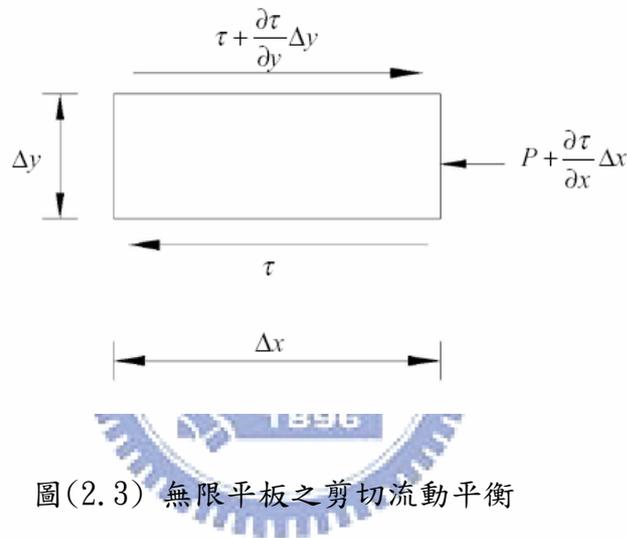
其中 ρ 為密度、 t 為時間、 v 為速度向量、 p 為壓力、 τ 為剪切應力張量，而 g 為重

力加速度。左邊兩項為慣性力 (inertia force)，右邊第一項為壓力項，第聚合物在高壓流動下，可以忽略慣性力與重力所造成之影響，因而上述方程式可進一步演變成一剪切應力與壓力變化之平衡方程式：

$$0 = -\nabla p + \nabla \tau \text{ -----(3)}$$

其中 τ 為剪切應力張量

當討論一流體於板內的流動情形時，可以假設壁面向 Z 軸方向無限延伸，因而得以忽略調應力在 Z 軸方向之影響。如此一來，動力分析討論範圍將限定在二維流體平面流體，則如圖(2.3) 之力平衡圖。



$$P\Delta y\Delta z - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\Delta z = \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y}\Delta y\right)\Delta y\Delta z - \tau\Delta x\Delta z = 0 \text{ -----(4)}$$

簡化之後成為

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \text{ -----(5)}$$

換言之，在單純剪切流體中，其中流動模式是流體壓力梯度與反方向剪切應力之平衡關係。其中 τ_{xy} 在一般非牛頓流體中為：

$$\tau_{xy} = \eta \dot{\gamma}; \eta = (\dot{\gamma}) \text{-----}(6)$$

η ：黏度， $\dot{\gamma}$ ：剪應變率

然而，對於大多數的聚合物材料而言，都同時具有黏性與彈性兩種特性，因此這些純黏性的構成式並無法表示大部分聚合物之流動情形。西元 1867 年，Maxwell 首先嘗試將兩種特性以一黏彈性模式表現出來，提出了 Maxwell equation：

$$\tau_{xy} + \frac{\mu}{G} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} = \mu \dot{\gamma} \text{-----}(7)$$

G：彈性係數， μ ；流體黏度

其後，流變學在經歷了一百多年的發展後，各種不同的模式陸續地被提出來用以解釋不同聚合物之流變特性，如 Jeffreys Model、Kelvin Model、Four Element Viscoelastic Model 等。然而聚合物的流動情形相當複雜，對於不同材料就會有不同的流動模式，而在不同的溫度與壓力下，其流變行為亦不盡相同。目前對於已經提出的流動模式而言，往往只能在某一應變率或溫度範圍內才能符合其流變特性，若要提出一個能完全符合材料流變特性之模式，是相當困難的。

另一方面，這些流動模式之實驗驗證亦只針對於一般尺寸之聚物流體，並未考慮到其在薄流路狀況下之成形特性。在 1990 年初期，開始有人嘗試以電腦模擬微細射出成型之特性，然而微細流路模擬所需之構成式卻極為缺乏，大都仍延用一般流變模式來加以推演，因此所得到的結果和微細流路內之聚合物真正的流動情形相比較，並不太吻合。

2.6 本章小結論

有關塑膠射出成型的技術與能力的培養，除瞭解基本的成型方法與原理外，更要熟悉各種成型作業方法與成型製程過程，並應更深入瞭解塑膠材料與成型特性的研究，才是每一位工程人員與產品設計者，應要知道的基本知識與具備的技術能力。