

# 粘度測定作為絕對法測定高聚物的分子量

K. Edelmann

[英譯載 *Rubber Chemistry and Technology*, 30, 470 (1957)]\*

高聚物的使用價值在很多應用場合依賴於它的平均分子量。通常情況下，機械強度、彈性和在突加應力下的抗撕裂性等隨分子量的增加而增加。反之，加工成型和溶解度隨分子量的增加而降低。從質量和經濟觀點兩個相反的要求來看，就必須儘可能準確地知道分子量的數值，以便肯定產品的分子量在某一應用上是否合適。

一般情況下，去敘述某一產品的品質規範，通過一個簡單的粘度測定就夠了。當有可能將不同試樣列成一個正確的序列時，就沒有必要去知道分子量的絕對數值。然而在許多情況下，希望知道分子量的數值。例如在纖維素的反應中，常需確定在什麼地方發生裂解。在這情況下簡單的粘度測定就不夠了，因為它還必須以其他絕對方法加以訂正，而這樣的訂正隨取代度和溶劑的類型而異。此外，研究綫型高分子溶液呈現結構粘度的原因，也有必要測定這些高聚物的分子量。

分子量或聚合度的意義，只有當所有的分子同樣大小時才是明確的。事實上，所有的高聚物包含分子量大小不同的分子，有時候還包含不同組成的分子。因此，只有平均分子量或平均聚合度有實用的意義。

分子量測定中主要的困難在於不同的方法得出不同種類的平均分子量。這情況同時帶來了困難和便利，其困難在於我們不可能對同一樣品利用不同方法測得其分子量作一個直接的比較。反之，其便利在於可以幫助描述分子量的多分散性而不必進行操作繁複的分級工作。但是由於現有的分子量測定方法隨多分散性的增加而變得更不準確，這可能性還沒有利用。

除了端基化學測定法以外，其他各種分子量的測定方法都基於稀溶液物理性質的測定，並將

\* 原文係作者在 1954 年 5 月 5—8 日在第四次德國流變學學會會議上的論文報告，其後發表在 *Kautschuk und Gummi*, 8, No. 1, 15—24(1955); 中譯係根據英譯稿譯出——譯者註。

這些測定值向無限稀釋外推。由於滲透壓法、光散射法和在超速離心機裏沉降平衡的測定都基於溶液熱力學理論，這樣的外推是必要的。其他的方法如粘度法和沉降速度測定法也需要這樣的外推，以便消除分子間相互作用的影響。在很多情況下，必須作其他形式的外推，以便儘可能地接近絕對的測定。

通常已知的分子量測定方法都是選擇一個物理性質，這個物理性質隨鏈長的改變而改變。同時在測定這個物理量後就作某種形式的外推，以使儘可能將未知因素所能引起的複雜性減至最小，並且還希望通過外推在計算分子量的絕對值時可以儘可能少引入任何假定。

應用熱力學基礎的方法如滲透壓法、冰點降低法、沸點升高法和一些依賴蒸氣壓變化的方法時常會不很準確。這不但是由於測定量非常小，技術上有困難，而且因為所測定的量強烈地受一系列流變效應的影響，例如縮合、和解縮合、界面效應和透過效應的發生等，使這些測量遇到基本的困難。

Staudinger 首先建立分子量與粘度間的經驗關係式<sup>[2]</sup>。即同一種高聚物在相同濃度時的增比粘度正比於分子量。這粘度定律如下：

$$\frac{\eta_{sp}}{c} = K_m \cdot M,$$

從此式只要知道  $K_m$  就可以計算分子量。由於在稀溶液中  $\eta_{sp}/c$  並不恆定，所以用向  $C \rightarrow 0$  外推的極限值。但是現在我們知道<sup>[3]</sup>，這樣的外推並不符合粘度-濃度曲線的真實情況。

根據 Umstätter 的理論基礎，本文在實驗測定的基礎上介紹一種可以不作形態、剛性度和溶劑化的假設而單從純粹粘度測定得到分子量絕對值的方法。由於高聚物溶液的粘度是分子大小、形狀和剛性度(與溶劑的相互作用)的函數，我們必須處理一個有三個未知數的方程式。這些可以從流變曲線的形狀得到解決，所需要知道的是下列三個獨立函數(1) 粘度-溫度函數(2) 粘度-濃度函數和(3) 粘度-切變速度函數。

### 用流變測量測定分子量

液體的流動可以看作許多不同速度的薄層相互滑過，這種薄層最小的厚度被液體的結構單元的大小所決定。

Umstätter 的計算<sup>[4]</sup>指出，在滑動運動中並不是各個分子之間的相互滑過而總是比分子要大的單位叫做膠束之間的相互滑動。在滑動運動中，這些結構單元作為剛性結構相互易位，在這過程中它們還呈現活潑的熱運動。這一行為提供了測定這些結構單元(膠束或分子綫團)的大小的可能性。

速度梯度有着頻率的單位，因此，它表示在單位時間內相互滑過的分子綫團數。速度梯度不大時，切變應力與速度梯度間存在着比例關係，液體在靜止態粘度  $\eta_0$  的範圍內。隨着速度梯度的增大，綫團愈快地被流動推向另一綫團剛離開的地點，於是對流動的干擾減小而粘度下降。當速度梯度變得如此之大，以致在一個綫團剛離開時，另一個新綫團立即被流動帶來這地點；在這種情況下，由於易位的頻率與高分子綫團的特徵頻率相等。這樣的易位引起最小可能的干擾，粘度的降低在這個速度梯度表現得最厲害。這時候在流變曲線上呈現出一個反曲點<sup>[5]</sup>。當速度梯度超過易位的頻率時，干擾重新變大，粘度下降也變小，直接切變應力和速度梯度間的比例關係重新建立，因之重新到達了流動態粘度  $\eta_0$  的區域。

流變曲線上的反曲點是一個臨界點，它表示易位頻率與高分子綫團的特徵頻率在這點上相等。這時候溶液粘度只是這些分子綫團在溶液裏的大小和溶劑粘度的函數。因之它與溶解的高分子的形狀和彈性無關，即與溶劑的相互作用無關。在圖上，所有濃度的流變曲線的反曲點都落在一根平行於橫軸的直線上，說明了這個臨界速度梯度  $G$  與濃度無關，它將是物質的一個常數，它

的位置決定於被溶解的高聚物的分子量。同時，相同濃度時所有同系高聚物溶液流變曲綫的反曲點落在一根平行於縱軸的直線上<sup>[6]</sup>。因此，在反曲點的切變應力，臨界切變應力  $\dot{P}$  與分子量無關。

高分子溶液的這種流動行為提供了從結構粘度的測定來得到純粹用粘度法測定分子量絕對值的可能性。Umstätter 早已提出過這樣的假設，他的方程式的最後形式是：

$$M = \frac{K \cdot \check{c}}{\dot{G}}$$

式中常數  $K$  有下列意義：

$$K = \frac{3RT}{\mu} \cdot \frac{d \ln \eta}{dT}$$

非常稀的溶液的粘度一般與溶劑的粘度相差無幾。因此，在常數  $K$  中可以應用溶劑的粘度不致引致誤差。 $\check{c}$  是粘度-濃度曲綫中最小值。代表等值濃度，在這時溶解的高分子與溶劑分子間平衡，可以假定當濃度超過  $\check{c}$  時曲綫開始向上彎，部分溶劑被凍結。這些溶劑分子被凍結後構成一個所謂“溶劑化層”。但是非溶劑化的和溶劑化的分子間的轉化是逐漸的，因而等值濃度在粘度-濃度的曲綫中並不表現為一個突然的折點，而多少是一個比較寬的區域，取決於分子量\*。分子量愈大，這區域愈狹，同時更移向零濃度。在極稀的區域裏， $\eta_{sp}/c$  的值重新增加，這一事實只能解釋為由於大量溶劑分子的存在使自由旋轉的基團變得更活動，使綫型高分子綫團逐漸鬆解。然而，如果沒有這種鬆解發生時， $\eta_{sp}/c$  值在過了平衡區域後很快地減小，以後就達到溶劑的數值。在這種情況下，曲綫並不經過一個最小值，而卻經過了一個最大值，就用這數值代入計算分子量的方程式中。這現像與締合方程並不矛盾，因為它祇要求一個奇異點的出現，也就是在粘度-濃度曲綫中一個最小值或一個最大值。這樣  $\check{c}$  確定分子量測定中所需要的粘度-濃度的函數，必須用一個仔細的粘度滴定來測定。

常數  $K$  中包含粘度-溫度函數。此外  $\dot{G}$  是臨界速度梯度，與濃度無關，表示粘度-速度梯度函數。

應該指出，這裏所用的濃度  $\check{c}$  是重量濃度克/克，而  $\mu$  是比密粘度；如果濃度用克/毫升，那末就得用動粘度  $\eta$ 。

在用粘度法作絕對分子量測定時，當溶劑的常數  $K$  一經測定後，必須從溶液的粘度滴定測定  $\check{c}$ ，同時必須畫出在任何指定濃度時的流變曲綫，以便測定臨界速度梯度  $\dot{G}$ 。由於高分子溶液的粘度受分子大小、形狀和剛性度的影響，在知道三個相互獨立的粘度函數後，就有可能單從流變測定來得到分子量的絕對值。

這個絕對測定與 Staudinger 粘度法測定分子量並不矛盾，兩者的差別在於 Staudinger 方程式中的常數  $K_m$  現在為一個物質常數所代替，這個物質常數是從流變曲綫的形狀和溶劑的粘度-溫度函數中得到。此外，原來用不很可靠的接近似公式向  $C \rightarrow 0$  外推得到的特性粘數，現在改由仔細的粘度滴定得到的等值濃度。因而這裏所敘述的是第一個可以應用的純粹從粘度來測定分子量絕對值的方法。下面用幾個例子說明用這個方法來得到分子量。

## 實 驗 部 分

用上述方法測定高分子的分子量，必須進行下列步驟：

1. 測定溶劑的粘度-溫度函數。
2. 溶液的粘度滴定 ( $\eta_{sp}$  作為濃度的函數)。
3. 從溶液結構粘度作出流變曲綫。

\*  $\check{c}$  值不但難於決定，且在極稀濃度下，溶液的增比粘度值的誤差極大。同時也必須考慮高分子在毛細管壁的吸附等問題，這裏所取用的  $\check{c}$  值的真實意義，頗可懷疑——譯者註。

這些測定的進行可以下列高分子-溶劑系統說明：幾種硝化纖維素乙酸丁酯、天然橡膠-甲苯，幾種聚內烯腈試樣-二甲基甲酰胺。

**粘度-溫度函數。**——以乙酸丁酯作溶劑為例，測定  $d \ln \eta / d \ln T$ 。當  $\eta$  的自然對數和絕對

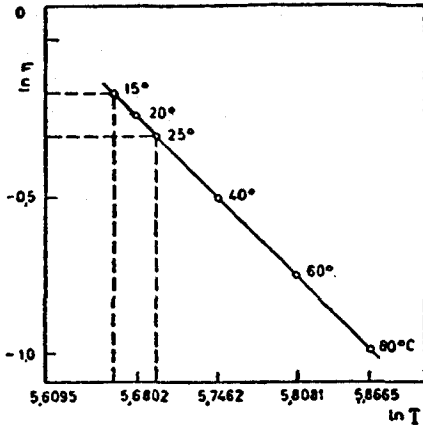


圖 1. 乙酸丁酯的粘度-溫度函數

溫度的自然對數作圖時(圖 1)，幾乎可以得到一條直綫。在 15° 和 25°C 的溫度範圍內，將圖中直綫微分可以得到乙酸丁酯的  $d \ln \eta / d \ln T = 4.32$ 。表 1 例舉各種溶劑的  $d \ln \eta / d \ln T$  值以及常數  $K$  的計算值。這些  $K$  的數值可以引入分子量計算的方程式中去。

**粘度-濃度函數。**——上面已經談到等值濃度(指形態而言)  $\bar{c}$  是必要的，即粘度-濃度曲綫中的最大或最小值。這數值應該從仔細的粘

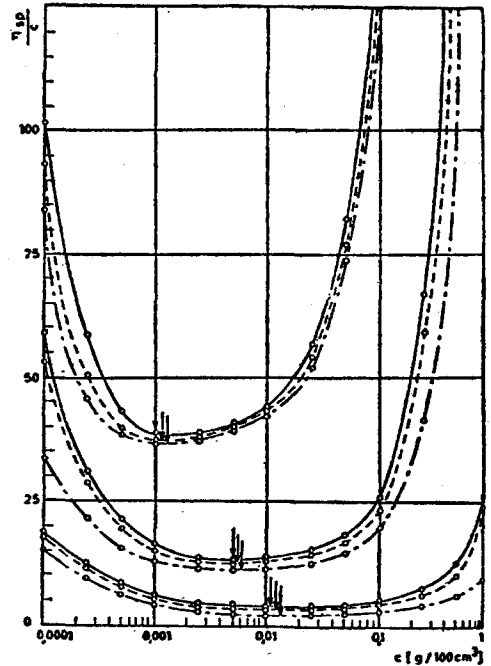


圖 2. 硝化纖維素在乙酸丁酯中的粘度測定，自上而下  $[\eta]$  值為 37.3, 35.9, 34.4, 11.72, 11.25, 9.80, 4.04, 3.72, 2.98

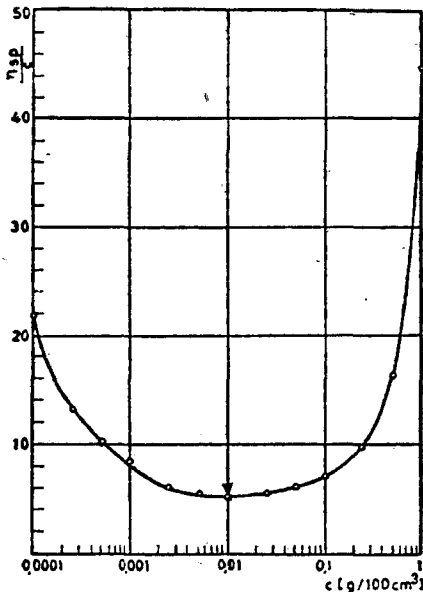


圖 3. 天然橡膠  $[\eta] = 6.40$  在甲苯中的粘度測定

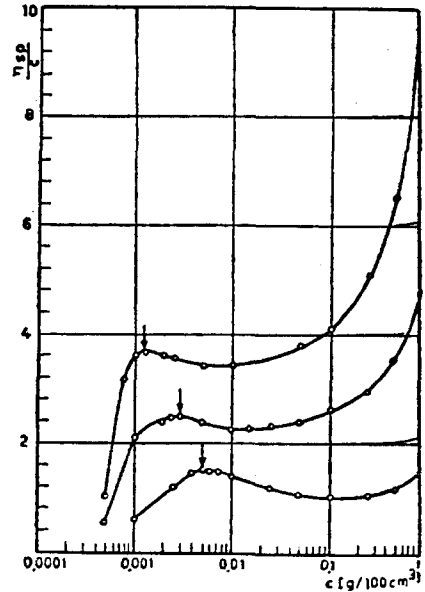


圖 4. 聚丙烯腈在二甲基甲酰胺中的粘度測定。  $[\eta]$  各為 2.95, 2.29, 1.04

度滴定得到。應用 Umstätter 自由流動型粘度計<sup>[8]</sup>來測定最為合適。圖 2 為各種硝化纖維素在乙酸丁酯中滴定的結果，最小值以箭頭表示。同樣，天然橡膠在甲苯中的粘度滴定曲線列於圖 3，曲線的形狀完全相同，在極稀濃度時  $\eta_{sp}/c$  的數值增加。與此相反，圖 4 所列的粘度-濃度曲線中  $\eta_{sp}/c$  的數值在極稀濃度時並不達到一個最小值，却表現有一個最大值。表 2 列舉從粘度滴定所得到的不同物質的  $\check{c}$  值，這些  $\check{c}$  值在分子量測定時將引入方程式中去。

表 1

溶 劑	$d \ln \eta / d \ln T$	$K$
乙酸丁酯	4.32	$3.05 \times 10^{13}$
甲苯	3.92	$3.67 \times 10^{13}$
二甲基酰胺	3.08	$2.41 \times 10^{13}$

很不幸，特徵濃度在粘度-濃度的曲線中並不表現得很明顯，而往往表現為一個寬長的區域。因此，利用與橫軸平行的直線來決定最小值並不十分準確。如果用數學計算可以得到較準確的最小值。

**粘度-速度梯度函數。**——圖 5—7 列舉了 0.25% 棉花溶液，0.5% 纖維素溶液和 1% 人造絲溶液的流變曲線。曲線上的反曲點和臨界速度梯度都被指出。顯然，用切綫的方法來決定正確的反曲點是有困難的，特別在分子量很高的情況下，那時流變曲線在臨界區的  $10^2$  範圍內，幾呈直綫狀。因此，Umstätter 的作圖法有很大的幫助，他找到將  $(\ln \eta / \eta_{\infty} / \ln \eta_0 / \eta_{\infty})$  對  $\ln G$  按高斯幾率積分作圖，流變曲線在  $10^6$  的範圍內還是直綫。其中  $\eta$  是在結構粘度區的任一點的粘度， $\eta_0$  是靜態粘度區的粘度也就是低速度梯度區的粘度，而  $\eta_{\infty}$  是流運態粘度區也就是高速度梯度區的粘度。圖 5—7 中的流變曲線可以相應地在圖 8—10 中以直綫繪出。這樣臨界速度梯度在 50% 處與平行於橫軸的直綫相交，因而可以很準確地找到。

流變曲線以直綫形式繪出，帶來了很大的好處，大約從五個測定我們就可以得到整個流變曲綫。在  $\eta_0$  區域的測定可以很可靠地應用 Umstätter 的自由流下粘度計。此外，還需要在  $\eta_{\infty}$  區域測定一個點和在結構粘度區域測定幾個點，這樣流變曲綫就可以從這些數值繪出，沒有必要去測定整個曲綫。

圖 11 表示不同濃度天然橡膠-甲苯溶液的流變曲綫。圖中可以看出臨界速度梯度與濃度無

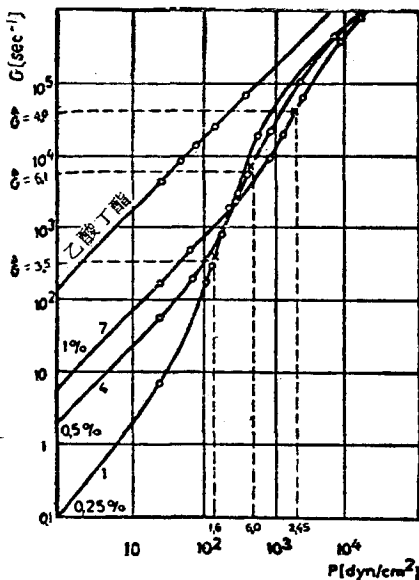


圖 5. 棉花(1)，纖維素(4)和人造絲(7)的流變曲綫

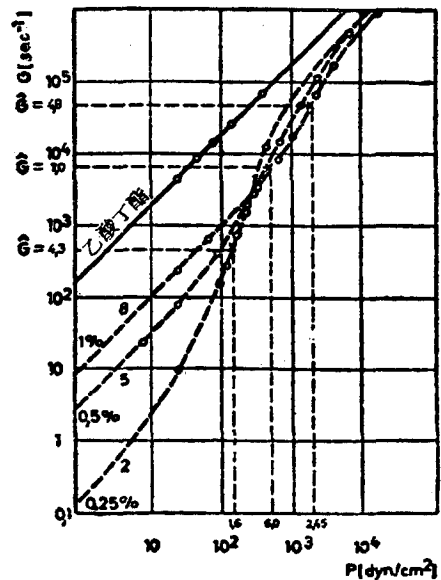


圖 6. 棉花(2)，纖維素(5)和人造絲(8)的流變曲綫

關。如果同一高聚物的各流變曲線按直線作圖(圖 12)，可以證實所有流變曲線則可以拿一條曲線來表示<sup>[10]</sup>。

圖 13 中列舉在測定分子量時三個不同聚丙烯腈樣品在二甲基甲酰胺中的流變曲線。對不同分子量同一

表 2 各物質的溶液粘度-濃度曲線的最小值

物 質	溶 劑	$\bar{c}$ , 克/克
棉花 1	乙酸丁酯	$1.15 \times 10^{-5}$
棉花 2	乙酸丁酯	$1.26 \times 10^{-5}$
棉花 3	乙酸丁酯	$1.38 \times 10^{-5}$
纖維素 4	乙酸丁酯	$5.74 \times 10^{-5}$
纖維素 5	乙酸丁酯	$6.31 \times 10^{-5}$
纖維素 6	乙酸丁酯	$6.89 \times 10^{-5}$
人造絲 7	乙酸丁酯	$1.26 \times 10^{-4}$
人造絲 8	乙酸丁酯	$1.38 \times 10^{-4}$
人造絲 9	乙酸丁酯	$1.49 \times 10^{-4}$
天然橡膠	甲苯	$1.16 \times 10^{-4}$
聚丙烯腈 1	二甲基甲酰胺	$1.2 \times 10^{-5}$
聚丙烯腈 2	二甲基甲酰胺	$3.1 \times 10^{-5}$
聚丙烯腈 3	二甲基甲酰胺	$5.17 \times 10^{-5}$

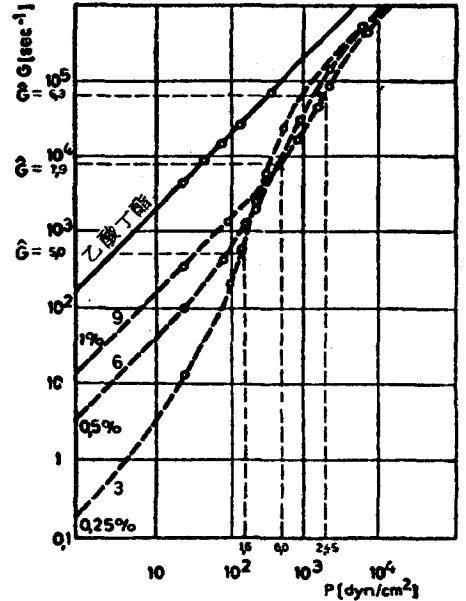


圖 7. 棉花(3),纖維素(6)和人造絲(9)的流變曲線

高聚物溶液,其濃度相同時,反曲點落在與縱軸平行的一條直線上。因此,臨界切變應力與分子量無關,祇有臨界速度梯度是分子量的函數。從這些曲線中很明顯可以看出流變曲線的結構粘

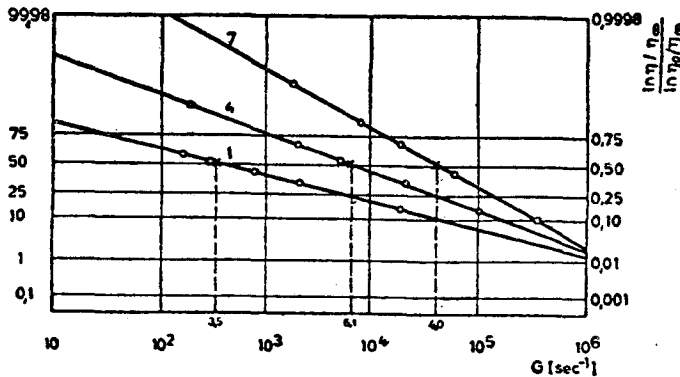


圖 8. 棉花(1),纖維素(4)和人造絲(7)的伸直流變曲線。縱軸為累積幾率

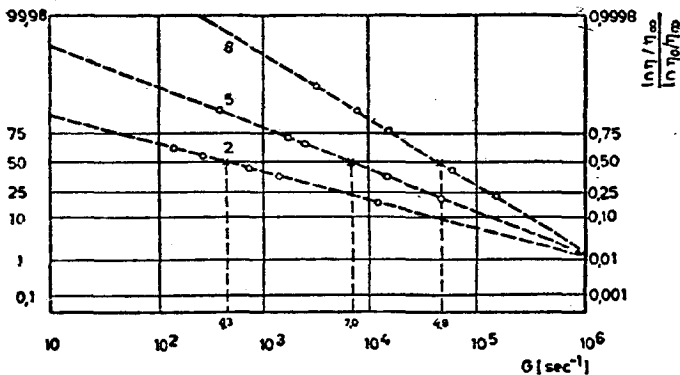


圖 9. 棉花(2),纖維素(5)和人造絲(8)的伸直流變曲線。縱軸為累積幾率

度部分較不均勻性大的試樣為短。圖 14 是這些聚丙烯腈試樣的直綫化後的流變曲綫，這些直綫與橫軸的斜度較一般試樣為大，表明它有較大的均勻性。如此得到的  $G$  值可以直接引入測定分子量的公式中去。

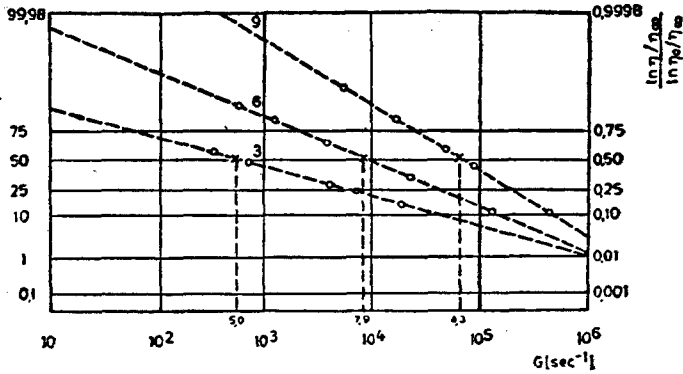


圖 10. 棉花(3),纖維素(6)和人造絲(9)的伸直流變曲綫. 縱軸為累積幾率

**分子量及多分散性的計算。**——從這三個粘度函數來計算分子量是簡單的。我們知道對高聚物的描述，單知道分子量是不夠的，還應該知道分子量的分佈。從上面已經說到的多分散性可以從流變曲綫中得到反映，現在由於流變曲綫的直綫作圖法的實現，提供了很好的便利。在高斯

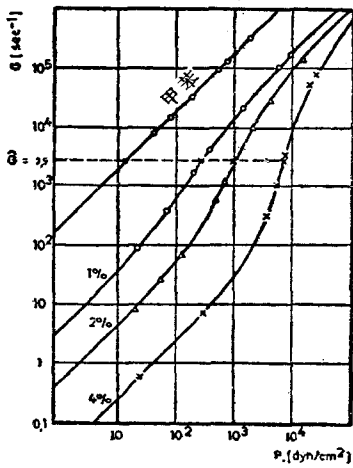


圖 11. 天然橡膠在甲苯中不同濃度的流變曲綫

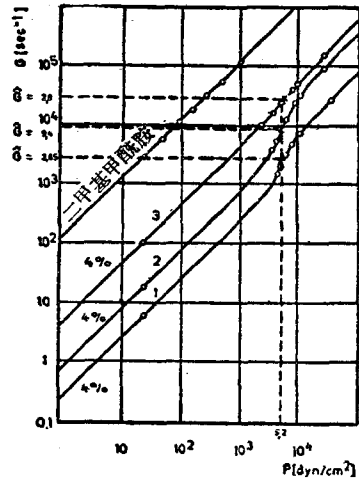


圖 13. 聚丙烯腈在二甲基甲酰胺中的流變曲綫

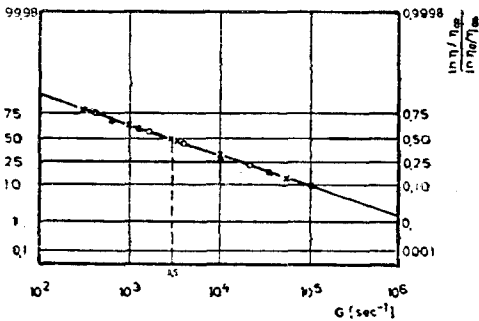


圖 12. 天然橡膠在甲苯中的伸直流變曲綫. 縱軸為累積幾率

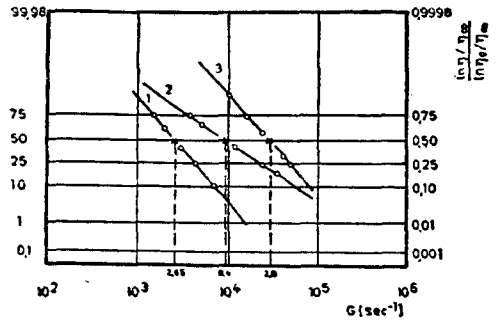


圖 14. 聚丙烯腈在二甲基甲酰胺中的伸直流變曲綫. 縱軸為累積幾率

幾率積分作圖中，直線的斜率是多分散性的直接量度。按照 Umstätter 的提議將直線化的流變曲線與 25% 和 75% 兩水平線交點的水平距離稱為分貝(decibel)，這樣可以用數字來表示多分散性而不需進行費時的分級工作。

為了證實不同的分子量多分散性可以從直線化的流變曲線的斜度來表示，一個纖維素的工業試樣(DP = 1070)經過分級為二個級份，再測定這兩個級份的流變曲線。圖 15 表示這個未分級試樣不同濃度時的流變曲線。在圖 16 中，流變曲線在幾率積分圖中表示出來，在這種情況下，各濃度的直線相互重合，因此，可以用一條直線來表示。其多分散性為 15 分貝(db)。圖 17 為含有 80.7% 低分子量(DP=760)和 19.3% 高分子量(DP=2050)級份的直線。圖 18 則為含有 59.2% 低分子量(DP = 580)和 40.8% 高分子量(DP = 1870)級份的直線。此外，圖 19 表示含有 28.3% 低分子量(DP=190)和 71.7% 高分子量(DP=1440)級份的直線。每一條直線的斜率不一樣，因而也有着不同的多分散性數值。這些不同的數值列於

表 3 各纖維素級份的聚合度及多分散度

纖維素	DP	多分散度(db)
未分級的	1070	15.0
含有 80.7% 低分子量的	760	11.5
含有 59.2% 低分子量的	580	10.3
含有 28.3% 低分子量的	190	10.1
含有 71.7% 低分子量的	1440	18.3
含有 40.8% 低分子量的	1870	17.8
含有 19.3% 低分子量的	2050	17.5

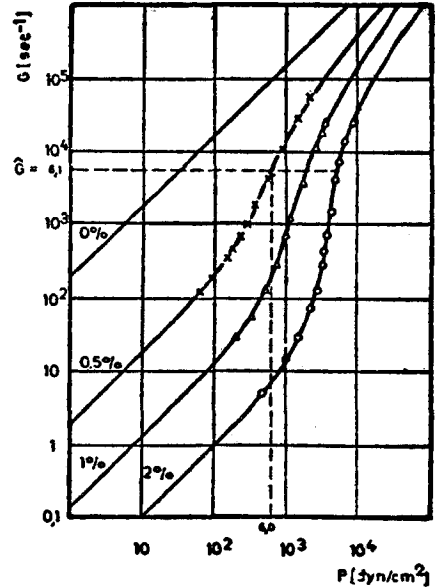


圖 15. 硝化纖維素(DP = 1070)在乙酸丁酯中不同濃度時的流變曲線

表 3 中。從這些數值也可以證實早已週知的事實，那就是高分子量級份的分子量分佈較低分子量級份為不均勻\*。這樣，以直線形式來表示的流變曲線能以數字來表示分子量的多分散性。

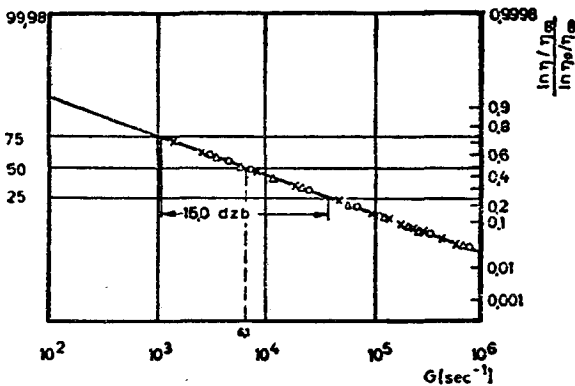


圖 16. 硝化纖維素(DP = 1070)的伸直流變曲線。縱軸為累積幾率

表 4 分子量和它的多分散度綜合表

物質	M <sub>staudinger</sub>	M <sub>流變學的</sub>	U <sub>流變學的</sub>
棉花 1	95.0 × 10 <sup>4</sup>	100 × 10 <sup>4</sup>	21.1 db
棉花 2	91.4 × 10 <sup>4</sup>	89.5 × 10 <sup>4</sup>	20.75 db
棉花 3	87.6 × 10 <sup>4</sup>	84.4 × 10 <sup>4</sup>	19.45 db
維纖素 4	29.8 × 10 <sup>4</sup>	28.4 × 10 <sup>4</sup>	15.0 db
維纖素 5	28.7 × 10 <sup>4</sup>	27.5 × 10 <sup>4</sup>	14.78 db
維纖素 6	24.9 × 10 <sup>4</sup>	26.6 × 10 <sup>4</sup>	13.1 db
人造絲 7	10.2 × 10 <sup>4</sup>	96.3 × 10 <sup>3</sup>	9.7 db
人造絲 8	95.0 × 10 <sup>3</sup>	87.5 × 10 <sup>3</sup>	9.22 db
人造絲 9	75.6 × 10 <sup>3</sup>	72.1 × 10 <sup>3</sup>	8.82 db
天然橡膠	14.13 × 10 <sup>5</sup>	16.92 × 10 <sup>5</sup>	15.84 db
聚丙烯腈 1	10.4 × 10 <sup>4</sup>	11.3 × 10 <sup>4</sup>	4.67 db
聚丙烯腈 2	80.8 × 10 <sup>3</sup>	79.5 × 10 <sup>3</sup>	8.05 db
聚丙烯腈 3	36.7 × 10 <sup>3</sup>	44.4 × 10 <sup>3</sup>	4.78 db

表 4 中比較了各高聚物按 Staudinger 法測得的分子量(M<sub>staudinger</sub>)和按這個粘度絕對法測得的 M<sub>流變學的</sub> 以及計算得到的多分散度。可以看出，對纖維素來說兩種方法測得的分子量很好

。可以看出，對纖維素來說兩種方法測得的分子量很好

\* 英譯誤為“均勻”，已作更正——譯者註。

地相符,即使在天然橡膠中,數值也是同數量級的。至於在聚丙烯腈的情況下,只有當粘度-濃度曲線中的最大值作為  $\delta$  值引入公式後,其結果才能與 Staudinger 法相符合。

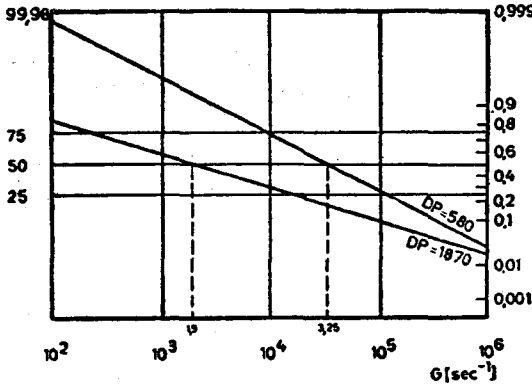


圖 17. 含有 80.7% 低分子量和 19.3% 高分子量的纖維素級份的伸直流變曲線(DP = 1070). 縱軸累積幾率

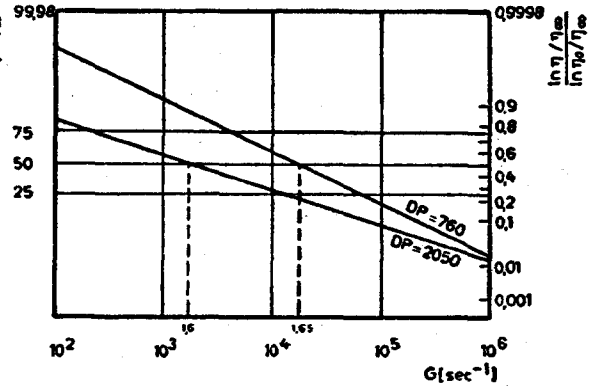


圖 18. 含有 59.2% 低分子量和 40.8% 高分子量纖維素級份的伸直流變曲線 (DP = 1070). 縱軸為累積幾率

從直線化的流變曲線中所得到的分子量多分散度的數值(用 db 來表示)列於表 4。棉花的直線的斜率特別小,因而其多分散度的數值也最大。而成份較均勻的纖維素,其多分散度的數值也較小。理所當然,人造絲的多分散度數值更小。多分散度對流變行為的影響在聚丙烯腈試樣中表現得特別明顯。與試樣 2 不同,試樣 1 和 3 的流變曲線的結構粘度部分很短,相應地在高斯幾率積分作圖中的直線的斜率都很大\*,得到的多分散度數值就很小。

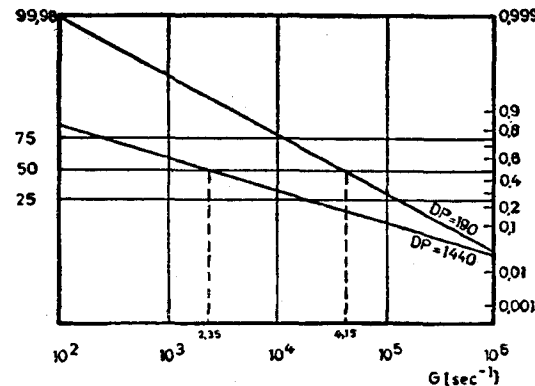


圖 19. 含有 28.3% 低分子量和 71.7% 高分子量纖維素級份的伸直流變曲線(DP = 1070). 縱軸為累積幾率

由此,這用實驗說明的方法,可以說是,第一個可用的純粹從流變學測量的粘度法分子量絕對測定。它需要知道三個獨立的粘度函數。雖然在工業上或實用上測定分子量絕對值並不如此重要,但是,從直線化的流變曲線來鑑定高聚物是很有意義的。因為這直線

與 50% 處的橫軸平行綫的交點得到表徵分子量的數值,而同時從直線的斜度可以得到表徵多分散度的數值。

### 參 考 文 獻

- [1] H. Staudinger, Ber., **59**, 3031 (1926).
- [2] H. Staudinger, u. W. Heuer, Ber., **63**, 222 (1930).
- [3] K. Edelmann, Faserforsch u. Textiltech., **5**, 139 (1954).
- [4] H. Umstätter, Z. Elektrochem., **54**, 374 (1950).
- [5] K. Edelmann, Faserforsch u. Textiltech., **3**, 341 (1952).
- [6] K. Edelmann, Faserforsch u. Textiltech., **3**, 344 (1952).
- [7] H. Umstätter, 1954 年 5 月在柏林召開的第四次德國流變學會議中的報告。
- [8] H. Umstätter, "Einführung in die Viskosimetrie" Berlin 1952 第 87 頁。
- [9] K. Edelmann, Kautschuk u. Gummi, **5**, 120 (1952), 並參閱文獻 [8] 第 25 頁。
- [10] K. Edelmann, Faserforsch u. Textiltech., **5**, 59 (1954).
- [11] H. Umstätter, 私人通訊。

[施良和譯]

\* 英譯此處有誤,已作更正——譯者註。