

【論述】

紙成形時之比過濾阻抗測定及應用

The Measurement of Specific Filtration Resistance and Its Application during Sheet Formation

郭蘭生¹ 方專任² 張有義³

一、前言

紙料於網部成形時，纖維層之均勻分佈交織，端賴漿料之脫水特性而定，紙料之纖維物之含量、纖維長度與帶化程度 (degree of fibrillation) 等特性為脫水性之函數。同時，脫水性亦會受到化學添加物 (chemical additives) 的影響，如成形助劑 (formation aid) 與保留助劑 (retention aid)。大多數研究紙料之脫水性雖藉游離度與測量脫水時間來探討影響脫水作用之因子，但往往這些方法會因儀器本身之幾何性質而有所變動。因此，過濾阻抗提供不受儀器幾何結構影響之基本性質，且因真空的抽吸作用，使其對漿料脫水特性之詮釋變得更完整。

最初過濾阻抗理論之發展主要是針對非壓縮性介質 (noncompressible media)，在 1952 年 Ingmanson 利用 Kozeny-Carman 方程式之微分式求出其壓縮性，並在適當的邊界條件 (boundary condition) 下積分，如此便可明確求得紙漿纖維層之平均比過濾阻抗 (average specific filtration resistance)，並更進一步證實了流體在多孔隙介質 (porous media) 之流動可藉 Darcy 定律來求得可壓縮性纖維層之過濾阻抗。不久，等速下過濾之數學模式亦被建立。由 Kozeny-Carman 方程式可知纖維層之比過濾阻抗為纖維之比表面積、纖維層之空隙率 (porosity) 與固形份之密度的函數。

比過濾阻抗之發展最初是由 Burkhard 與

Wrist 於 1956 年在紙機上所發現。並在 1957 年由 Ingmanson 成功地測得長網紙機上之比過濾阻抗。第一筆者於 1978 年在美国紐約州立大學造紙工程系進修時，曾目睹 Britt 與 Unbehend 氏利用在實驗室中動力脫水瓶來探討在紙張成形時之脫水現象。Ingmanson 氏可壓縮性纖維層所使用之過濾公式 (Darcy 定律)，可知比過濾阻抗是由 Darcy 定律所延伸出來。利用器 DVRT (D: drainage, V: vacumm, R: resistance, T: test) 儀器為模擬紙機脫水動力狀態來測得紙料之脫水速率。

二、理論背景

(一)過濾公式

總過濾阻抗以流動參數與漿料組成爲自變數，爲纖維層過濾阻抗與過濾網 (wire) 阻抗之總和。因此過濾方程式可以下式表之：

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{Adp}{\mu(R_f + R_w)} \quad (1)$$

$\frac{dv}{d\theta}$: 脫水速率, $\frac{m^3}{s}$ A: 流體流過之面積, m^2

dp: 壓力降, pa μ : 濾液黏度, pa·s

R_f : 纖維層之過濾阻抗, m^{-1}

R_w : 過濾網之過濾阻抗, m^{-1}

纖維層之過濾阻抗可以單位面積上纖維之沈積重量與 SFR 來表示：

1 中興大學森林系教授

2 中興大學森林所研究生

3 東海大學化工系教授

$$R_f = \left[\frac{W}{A} \right] SFR \quad (2)$$

W : 纖維層之重量, kg 。 A : 沉降纖維之面積, m^2 。

SFR : 比過濾阻抗, $\frac{m}{kg}$ 。

在一極短時間內(θ), 纖維層上之纖維重為:

$$W = CV \quad (3)$$

C : 漿料中纖維之濃度, $\frac{kg}{m^3}$ 。 V : 以脫水之漿料體積, m^3 。

因此可將方程式(1)、(2)及(3)合併簡化可得(4)式:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta V} = \frac{\mu CV \times SFR}{(A^2 \Delta P)} + \frac{\mu R_w}{A \Delta P} \quad (4)$$

$\Delta\theta$: 極短時間, s 。 ΔV : 濾液體積, m^3 。 A : 纖維層之面積, m^2 。

ΔP : 通過纖維層及過濾網之壓差, Pa 。 v : 濾液累積之體積, m^3 。

C : 漿料中之纖維濃度, $\frac{kg}{m^3}$ 。 μ : 液體黏度, $Pa \cdot s$ 。

若方程式(4)適用於漿流流過纖維層與過濾網之情況, 則可說明與 V 為直線關係。吾人可利用此種線性關係來描述測量點之斜率及截距, 並可藉以計算 SFR 值與過濾網之阻抗(見證圖 1)。

假設總過濾阻抗會與纖維層之基重成線性增加, 即總過濾阻抗可以下式表示之:

$$R_t = SFR \times BW + R_w \quad (5)$$

R_t : 總過濾阻抗, m^3 。 BW : 纖維層之基重, $\frac{kg}{m^2}$ 。

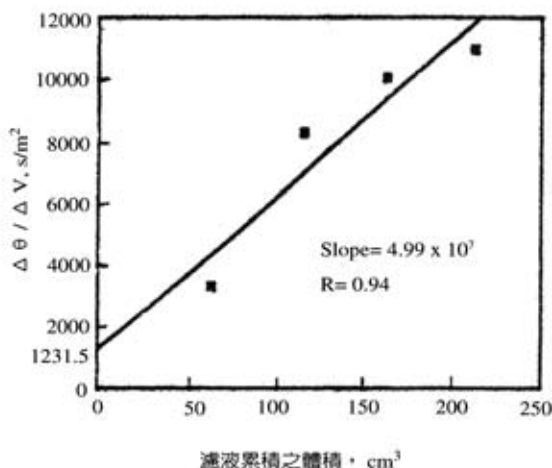


圖 1. 計算 SFR 之例子

(二) 模式上之限制 (Limitation of models)

由於本實驗採用 Darcy's 定律做為理論之探討, 使得方程式(4)在使用上受到下列限制:

1. 假設流體的流動為層流(laminar flow)。
2. 因漿流流過纖維層會有壓力降的產生, 因此 SFR 值必須為定值。

然而這些假設有些並未被證實, 所以方程式(5)所得之值只能說是個近似值。若以 V 為自變數所得的 $\frac{\Delta\theta}{\Delta V}$ 值其回歸係數愈接近 1, 則在計算 SFR 值與過濾網之阻抗上更能接近正確值。

如圖 2 所述, 起初先將漿料置於大氣壓力下, 當閥打開時, 壓力快速降低直至適當之壓力。通常脫水速率之測量為 1-3 秒內, 此段時間已有一半的水被脫除。一旦漿料通過最低限, 便停止測量時間。大約 5-10 秒內, 大部分的水已被脫除, 此時之壓力由於空氣之介入開始上升。

在方程式(1)中, 纖維層之阻抗與過濾網之阻抗被視為簡單之加法。有文獻已指出二者在較低基重下, 需藉另法來說明此關係。同時過濾網之阻抗 (R_w) 是否受此影響亦應慮及。此關係亦有可能造成如圖 1 中起始之部分, 且僅在 V 為較大值 (纖維層較厚) 時方呈線性化。但由圖 1 之典型經驗圖看來, 似乎此種影響非常小。

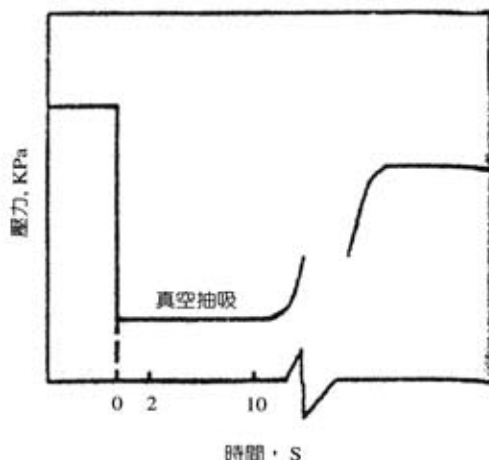


圖 2. 壓力降隨時間之變化情形

三、結果與討論

設定壓力(11.8–32.2)及濃度(0.1–0.5%)為自變數來測定四種漿料 - 漂白針葉漿、未漂針葉漿、漂白闊葉漿與磨木漿在網上之脫水速率。為瞭解紊流對脫水速率之影響，吾人選用三種不同轉速(500、750、1000rpm)之動態流動下來測試 SFR 值。

往昔，SFR值為利用回歸分析來建立紙料通過纖維層之壓力降與漿料濃度為自變數之二次方程式，如下表示：

$$SFR = A\Delta P - B\Delta P^2 + C\text{cons} + D\text{cons}^2 + E\Delta P\text{cons} + F \quad (6)$$

ΔP : 通過纖維層之壓力降, Pa. cons: 漿料之起始濃度, $\frac{\text{kg fiber}}{\text{m}^2}$

表1列出各種漿料之A~F及相關係數。由於轉速大小對SFR值之影響不大，因此所有測量值皆被代入方程式(6)中，以求得 SFR 值。

表 1. SFR 相關方程式之係數

係數	漂白針葉漿	未漂針葉漿	漂白闊葉漿	磨木漿
A ^a	3.14×10^6	-3.1×10^7	-2.33×10^7	-3.83×10^7
B	.....	7.42×10^5	5.95×10^5	9.05×10^5
C ^a	-6.85×10^6	3.61×10^7	-7.58×10^7	-6.69×10^7
D	4.95×10^6	.....	1.41×10^7	1.68×10^7
E	8.1×10^6	.....	1.61×10^6	3.19×10^6
F	-3.2×10^5	2.81×10^8	2.95×10^8	4.03×10^8
R ^b	0.97	0.69	0.94	0.98

a: 在本模式中施予一強制力。b: 相關係數

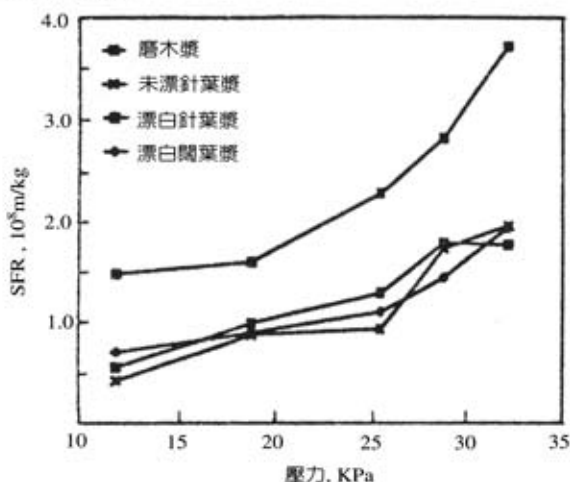


圖 3. 不同漿料之 SFR 值比較

(一) 漿料對 SFR 之影響

SFR值深受纖維層之結構性質：纖維之比表面積、剛度及長度之影響。纖維層緊密結構之形成有賴於漿料的均勻分散及較高的細纖維物含量，結果對流體的流動產生較高的阻力。測定漂白闊葉漿、漂白針葉漿及未漂針葉漿之SFR值時，雖然漿料的結構不同，但差別不大。由圖3可知，由於磨木漿含有較高之細纖維物含量與較短及剛度較高之纖維，使其產生一較大之 SFR 值。由 Kozeny-Carman 方程式可得過濾組抗與比表面積的 2 次方成正比。

(二) 壓力降對 SFR 之影響

SFR值會隨壓力降而呈連續性的增加。此現象被解釋為纖維層之高度壓縮應力與因壓力降增加之結果使孔隙度漸減所造成(如圖 3)。由圖 2 及圖 3 所示，吾人判斷假若脫水速率會因壓力降

的增加而增大，則SFR值將會呈一定值。但此結果在本實驗中並未能獲得。因此，隨壓力降增大而使SFR值增大之現象，並不是導致較大脫水速率之原因。在本實驗中由圖4-7可證當壓力在25-30kPa時，SFR值會突然增加。此乃因纖維層之形成至某一程度使脫水速率下降之故。每一測定數據皆為在500、750及1000rpm轉速下之平均值。

(三)濃度對 SFR 值之影響

由圖8可知濃度與SFR值之關係，可由級數定律(power law)來闡釋。查諸文獻知針葉漿之次方為0.7，而磨木漿為1.3。

(四)紊流對 SFR 之影響

流動中若有紊流存在，將會使SFR值有漸減

之趨勢，但卻無法建立其在剪切速率與 SFR 值間之關係（見圖9）。為要避免此種因纖維噴濺到動力拖水瓶中電極上所造成之不一致現象，當開始測量脫水速率時便要停止攪拌棒轉動。特別是在高濃度時更應注意。

為要估計紊流對 SFR 值之影響，吾人針對攪拌棒在運轉操作下做測試。由實驗結果發現 SFR 值在無攪拌棒之運轉操作下其值約降低10%~15%。雖然此結果無法求得SFR與剪切速率間之定量關係，但可證明紊流的重要性及似乎與實驗參數相關。

(五)溫度對 SFR 之影響

本實驗控制溫度的變化範圍為15-45°C，由

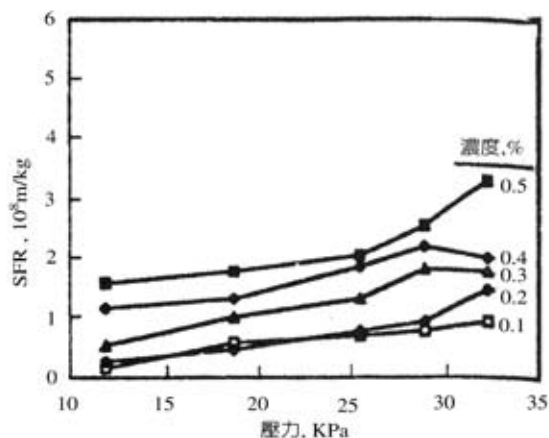


圖 4.漂白針葉漿之 SFR 值

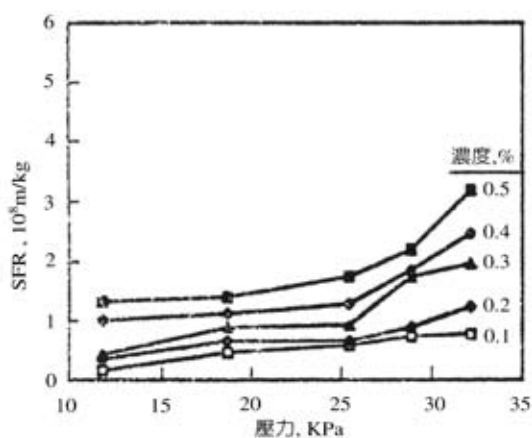


圖 5.漂白闊葉漿之 SFR 值

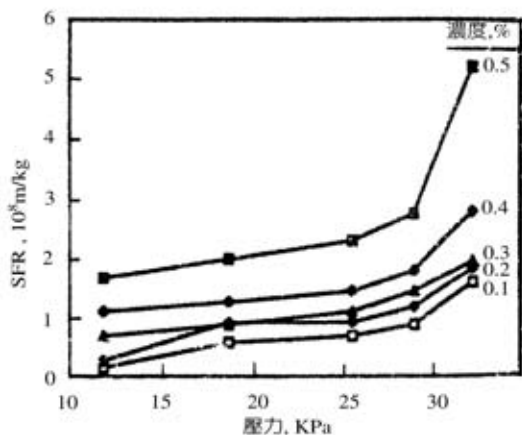


圖 6.漂白闊葉漿之 SFR 值

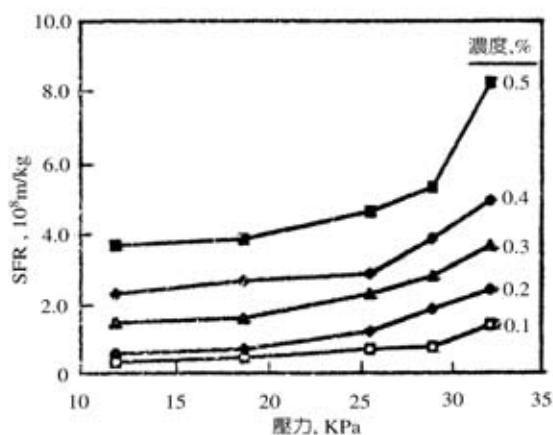


圖 7.磨木漿之 SFR 值

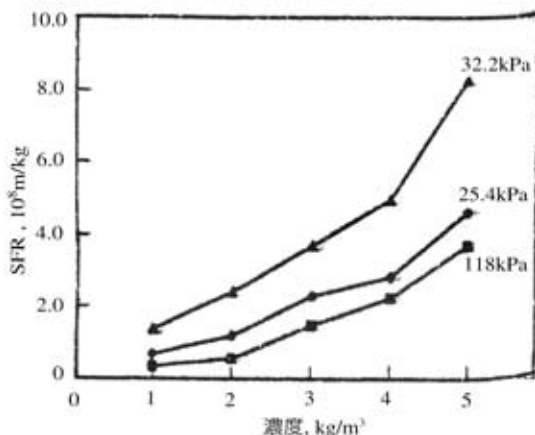


圖 8. 濃度對 SFR 值之影響

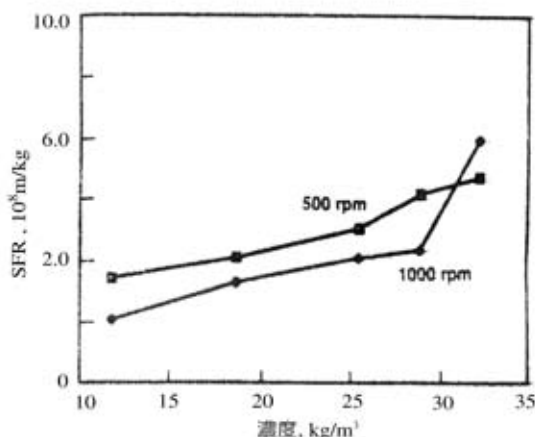


圖 9. 紊流對 SFR 之影響

實驗的結果知水的黏度並不影響 SFR 值：

18°C : 1.84 x 10⁸ m/kg

27°C : 1.90 x 10⁸ m/kg

43°C : 1.87 x 10⁸ m/kg

此乃因在此範圍，SFR 值端賴纖維層之結構特性而定，以及由於脫水速率的增加造成液溫上升及黏度降低。若不考慮此二者之影響，則 SFR 值為一定值。

(六) 游離度對 SFR 之影響

為瞭解 SFR 值與游離度之關係，吾人選用游離度在 100-740 mL CSF 之漂白針業漿為試材。並將壓力保持在 12kPa，濃度為 0.34% 下測量 SFR 值。如圖 10 所示，可知 SFR 值會因游離度的減少而呈指數增加。以 740 mL CSF 為例，其 SFR 值為 4.9 x 10⁷ m/kg。一旦降至 130 mL CSF，則 SFR 值將增加至 3.0 x 10¹⁰ m/kg (為 740 mL CSF 的 600 倍)。此意謂著打漿程度為影響 SFR 值之重要參數。

四、實驗裝置與步驟

(一) 實驗裝置

以 Britt's 脫水瓶為架構主體，再經改良後且加裝 6 個電極來監測漿料之脫水速率 (見圖 11)，並連接電腦使與電極測定之數據能藉電腦輸出與輸入。介面卡則扮演著將類比轉換成數位之角色，並經程式之運作設定初始條件來監控脫水時間。在測量期間，電極間之高度差始終保持一定

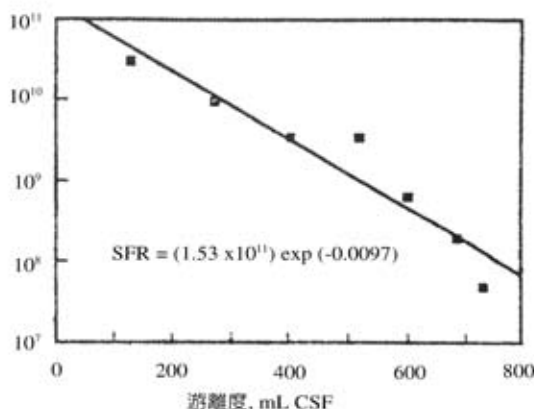


圖 10. 游離度對 SFR 之影響

值，正因如此，自變數得以建立。

由真空幫浦控制壓力在 11.8 ~ 33.0 kPa 範圍內。為要攪動所產生的紊流，所有測量上皆以有 3 片葉片之攪動器為之。並利用紙機上所使用之已知值之過濾網，將其裝在 DVRT 上，以模擬紙機抄紙網之脫水情況。

(二) 實驗步驟

為充分瞭解漿料之特性，吾人選用五種不同之漿料濃度 (0.1、0.2、0.3、0.4、0.5%)；五種不同壓差 (11.9、18.6、25.4、28.8、32.2 kPa) 以及三種不同剪切速率 (500、750、1000 rpm) 來操作實驗。並將所有漿料以實驗室打漿機打漿至游離度為 350 mL CSF。

為對流體提供一連續介質，必須要先在閥與

過濾網之間充滿水，以及將攪拌器與真空抽吸調整至所需之值。再倒入 400mL 之漿料至 DDJ 脫水瓶，俟 30 秒後，將閥打開且令電腦程式開始擷取數據。而脫水速率經由方程式(4)之定義轉換之，以求得比過濾阻抗(SFR 值)。為求精確，對於每一種濃度及壓差必須重複實驗三次，且求比過濾阻抗之平均值。

五、應用

1. 在動態條件下測定 SFR 值之發展由來已久，大多藉將 Britt's 脫水瓶改良，使流體在壓力與剪切率存在下發生流動。此種設計不僅可模擬紙機上之紙成形情形，更能利用方程式(4)來計算 SFR 值，並評估與之線性關係。
2. 根據對化學漿與磨木漿所做的脫水特性實驗結果，可發現不同化學漿有相近的 SFR 值，而磨木漿之 SFR 值則較化學漿高約 2~4 倍之多。這些數據相較 Ingmanson 與 Whitney 氏所做之實驗結果，仍低了 3~5 倍。造成此種差異之原因可能為本實驗係在紊流之狀態下測定之。
3. 由於在纖維層上施加壓力將會造成 SFR 值上升，所以在調整紙機中之真空度時，必須考慮此種影響。

4. 一般來說，SFR 值會隨紙漿濃度的增加而增加，且其間的關係可用 power law 來闡釋。在水溫變化為 15-45°C 範圍內所造成的黏度差異對 SFR 值之影響，幾乎可完全忽略。
5. 漿料之游離度對 SFR 值之影響甚鉅。5.7 倍的游離度變化將使 SFR 值有 600 倍之差距。而這些特性可用一個指數方程式來表示。
6. 雖然紊流能降低 SFR 值，但由於實驗中的變異性，吾人無法明確定義剪切率與 SFR 值間之關係。若採用本試驗之條件，維持攪拌之連續運轉時，SFR 值較在層流狀態降低約 10-15%。

六、參考文獻

- Ingmanson, W. L.(1952)Tappi 35(10)439.
- Ingmanson, W. L., and Whitney, R. P.(1954) Tappi 37 (11)532.
- Pires, E.C., A. M. Springer and V. Kuma (1989) Tappi Journal 72(7)149-154.
- Burkhard, G. and Wrist, P. E.(1956) Pulp Paper Mag. Can. 57(4)100.
- Britt, K. W. and Unbehend, J. E.(1985) Tappi J 68 (4) 104,