(昭和48年9月4日受理)

エアージェットノズルによる高速紡糸について

東京工業大学工学部 清水 二郎
岐阜大学工業短期大学部 渡辺 明
東京工業大学工学部 島海浩一郎

THE HIGH SPEED SPINNING BY USING AN AIR JET NOZZLE

By Jiro Shimizu,* Akira Watanabe** and Koichiro Toriumi*

*(Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan)

**(Junior Technical College, Gifu University, Kakamigahara City, Gifu Prefecture, Japan)

This report deals with an experimental investigation on the drawing method of the molten polymer of P.P. by means of an air jet nozzle. Fig.1 is a structural diagram of the air jet nozzle, which was designed in such a way that the jet air may reach the sonic velocity at nozzle pressures above 2.18 kg/cm^2 . The air flow below the outlet of the jet nozzle was observed by schlieren method in the form of shock waves as shown in Fig.2. In the drawing process, considering the force balance on the running yarn at the point of jet nozzle, the fineness of the yarn should possess a limiting value. Fig.9 shows the calculated values of the limiting fineness at various positions of the jet nozzle from the spinneret and at various air pressures in the nozzle. Fig.10 shows the results obtained from the experimental values. These values are compared in Table 1. The load-elongation curves of the yarns are shown in Figs.13-16, and their birefringences (Δn) in Figs.17 and 18.

(Received September 8, 1973)

1. 緒 言

熔融ポリマーを細化すると同時に、その配向をも高めるために、高速紡糸の技術が検討開発されている。この手段としては、高速回転するローラにより延伸または巻取る方法と、高速空気を用い非接触の状態で延伸捕捉する方法とがある。とくに、後者に関しては、高速気流より発生する乱流状態を利用し、繊維をみだし捕捉する方法を工夫することにより、シートを形成し不織布をつくるダイレクト・ファブリケーション法(スパンボンド)などが開発されつつある。本報は、空気延伸紡糸に関する高速細化におけるものであり、高速細化時における張力の発生機構について、実験的に検討したものである。細化時における空気抵抗抗力に関しては、ポリプロピレンの熔融紡糸を対象として、走行速度 1000 m/min 以下で詳細な報告が佐野によって行なわれている¹⁾。ここでは、走行糸の相対速度が 800 m/min を越えると、巻取り点での張力の約50%が空気抵抗抗力によることを実験的に明らかにしている。紡糸時における複雑折的な配向と、張力の依存性に関してはすでに多くの報告があるが、ポリプロピレンの熔融紡糸については、著者によっても検討されている²⁾。また、高速紡糸に関しては金綱らにより、とくに急冷時の効果が報告されている³⁾。

本報では延伸細化機構に対する音速域での高速気流を

発生するジェット・ノズルとジェット流による張力の依存性についてまず検討した。現在までの研究により、亜音速域以下では、張力は空気速度により定まることが明らかにされているが、音速域での張力の依存性は明らかではない。本報ではまた、数 1000 m/min の紡糸速度による空気抵抗抗力を実験的に検討し、あわせてそれによる延伸機構と細化の限界およびその効果について言及する。

2. 音速域での張力依存性

ジェット・ノズルは、先細ノズルを取付けた高圧タンクより成り立っていて、その構造は Fig.1 に示すようである。圧力は、大型コンプレッサーによって連続的に 10 kg/cm^2 までかけられる。このジェット・ノズルは、紡糸孔の下方 $1 \sim 2 \text{ m}$ の間に設置され、繊維はノズル中央の 0.7 mm の細管より、ジェット流中に放出されるように設計されている。このようなリザーバーを有する先細ノズルの出口速度については、先細ノズルの理論式(1)式によって、つぎのように与えられている⁴⁾。

$$\frac{u_e}{a_0} = \sqrt{\frac{2}{K-1} \left\{ 1 - \left(\frac{P_b}{P_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right\}} \quad (1)$$

u_e : 出口速度 (m/s) a_0 : 音速 (m/s) K : 比熱比
 P_b : 大気圧 (kg/cm^2) P_0 : タンク内の圧力 (kg/cm^2)
出口速度が音速に達した場合、 $u_e/a_0 = 1$, $P_b = 1$, $K =$

Fig.1 The structure of the air jet nozzle (dim.: mm)

Fig.2 The photographs taken by schlieren method showing the air flow below the jet nozzle

1.4 とすると、 $P_0 = 2.18 \text{ kg/cm}^2$ となる。したがって、高圧源の圧力を 2.18 kg/cm^2 以上にした場合、ジェット流は音速に達する。このジェット流が音速域に達した場合、ノズル出口からジェット流中に衝撃綫が発生する。この状態をシュリーレン法によって可視化すると Fig.2 のような衝撃綫が観察された。この衝撃綫は、高圧源の圧力により変化する。すなわち、衝撃綫の長さは、圧力 6 kg/cm^2 で 3.2 cm 、 4 kg/cm^2 で 2.3 cm 、 2 kg/cm^2 で 1.8 cm であり、幅は圧力の増加にともなわずかにふくらむが、いずれも約 3 mm 前後でジェットの出口の径 ($3 \text{ mm} \phi$) にほぼ等しく、また綫間隔についてもわずかに増加せず約 $2.2 \sim 5.0 \text{ mm}$ の範囲である。

ジェット流による繊維に付与する張力を検討するために、ナイロン・テグス (534μ) をノズル中を通し、上端を μ ゲージに固定し、ジェットノズルの出口からの糸長 (l) と圧力 (P) を変化させて、その時発生する張力 (F) を測定した。その結果を Fig.3 に示す。張力の実測結果によると、試長数 cm のところに極大値があり、音速域

後に存在する乱流域でかなり高速の気流がなお数 10 cm のところまで流れる。しかしながら、張力 (F) は圧力 (P) の大きさに比例し、糸長 (l) に対してはある長さ (数 cm) 以上では変化しないことがわかった。シュリーレン法の観察結果とこの張力の結果より、張力の発生に寄与するのは衝撃綫の長さの範囲内であり、それ以後の乱流域中に介在する繊維長は張力に大きな影響を与えないものと思われる。

つぎに、繊維の太さ (R) と圧力を変えたときの張力の測定結果を Fig.4 に示す。これより、繊維の太さに対して、張力は直線的に増加することがわかる。一般に走行糸の張力が表面積により定まるところから、張力を表面積すなわち直径で割って、 $\log P$ に対してプロットすると Fig.5 のようになる。その関係式は、 $F/2R = \alpha \log P + \beta$ で表わされるが、張力が表面積により一義的に決まらないことを示している。すなわち、 α は太さにはあまり関係せず約 0.006 の一定値をとるが、 β は太さによって異なり、その値は図中に示すようである。

Fig.3 The relationship between the tension formed from the air jet nozzle on the yarn and the yarn length (l) below the jet nozzle

Fig.4 The relationship between the tension from the air jet nozzle on the yarn and the yarn diameters

Fig.5 The relationship between the tensional force (F) divided by the yarn diameter ($2R$) and the pressure (P) inside the jet nozzle

3. 延 伸 機 構

紡糸孔からジェット・ノズルまでにおいて、延伸は完了する。この際、繊維はポリマーの変形抗力、慣性力、自重および空気抵抗に対する送り出し張力（ジェット・ノズルによって発生する張力）との力平衡によって定まる。ジェット・ノズルの位置において、紡糸中の繊維に働く力の平衡について考えると、つぎのようになる。ジェット・ノズルによる張力 F^* によって、繊維は速度 v_f で送り出され、ポリマーの変形抗力を S 、紡糸孔からジェット・ノズルまでの空気抵抗力を f 、繊維の慣性力を T 、自重を g とすると、(2) 式の関係が成立する。

$$F^* = S + f - T - g \quad (2)$$

紡糸中の繊維に働く空気抵抗 (f) の大きさを、つぎのようにして求める。吐出量を Q (g/min)、ジェット・ノズルでの繊維の速度を v_f (m/sec)、繊維の半径を R (m)、ポリマーの比重を ρ とする。これより (3) 式の関係が成立する。

$$Q = 60\pi R^2 v_f \rho \quad (3)$$

ρ は温度によって定まるが、熔融時での温度を保つものとして、後述するポリプロピレンの平均比重を 0.8 とする。(3) 式を v_f についてまとめると (3)' 式となる。

$$v_f = 6.63 \times 10^{-9} Q / R^2 \quad (3)'$$

(3)' 式の Q に後述する実験条件の 0.485 g/min を代入して、 v_f と R の関係を求めると Fig. 6(a) のようになる。これより、紡糸速度と半径との間には 2 次的な関係があることがわかる。繊維は紡糸孔を出ると急激に細化する。そこで、紡糸孔とジェット・ノズルまでの長さ (L) の間のレイノルズ数 (Re_w) は、繊維の半径を一定と考えると、(4) 式で表わされる。

$$Re_w = 2R(v_f - v_a)\rho_a/\mu_a \quad (4)$$

空気密度 (ρ_a) を 0.83 kg/m³、剪断粘度 (μ_a) を 2.38 × 10⁻⁵ kg/m·sec、空気速度 (紡糸孔とジェット・ノズル間) (v_a) を 0 とし、 v_f に (3)' 式を代入して Re_w を表わすと (4)' 式となる。

$$Re_w = 4.62 \times 10^{-4} Q / R \quad (4)'$$

$Q = 0.485$ g/min として、(4)' 式を Fig. 6(b) に示す。

われわれの実験では、 R (m) が 8 ~ 20 × 10⁻⁶ の範囲で、 Re_w にすると約 30 ~ 10 となり、これは佐野の実験の範囲内である。そこで、空気抵抗係数 (C_f) について、佐野の実験式である (5) 式を用いる¹⁾。

$$C_f = 0.68 Re_w^{-0.8} \quad (5)$$

(5) 式に (4)' 式を代入して C_f を表わすと、(5)' 式となる。

$$C_f = 332 (R/Q)^{0.8} \quad (5)'$$

$Q = 0.485$ g/min として、(5)' 式を Fig. 6(c) に示す。

つぎに、紡糸孔とジェット・ノズル間の空気抵抗 (f) は (6) 式で表わされる。

$$f = 2\pi RL(v_f - v_a)^2 C_f 10^3 / 9.8 \quad (6)$$

$v_a = 0$ とし、 v_f と C_f にそれぞれ (3)' 式と (5)' 式を代入して、 f を表わすと (6)' 式となる。

$$f = 9.35 \times 10^{-12} L Q^{1/2} / R^{2.2} \quad (6)'$$

(6)' 式を Fig. 6(d) に示す。これより、紡糸速度が増加して、繊維度 (R) が小さくなるにもかかわらず、空気抵抗は 2 次曲線的に増加することがわかる。また、 L が小さいほど、すなわちジェット・ノズルを紡糸孔に近づけるほど、空気抵抗は小さくなることを示している。

つぎに、繊維が v_f (m/sec) の速度でジェット・ノズルを通過するときの慣性力 T (g) は、(7) 式によって与えられる。

$$T = Q \cdot v_f / 1.7 \times 10^{-8} \quad (7)$$

7 式で与えられる T の値は、空気抵抗 (f) に比べて小さく、Fig. 6(d) の破線は ($f - T$) の値をプロットしたものである。

つぎに、ジェット・ノズルによる送り出し張力 F^* について述べる。 F^* を正確に測定することは困難であるので、つぎの 2 つの場合について考察する。

(1) 前述の u ゲージによる張力の測定結果 F を用いる。この場合、繊維は静止しているので、 F^* に比べて小さいはずである。しかし、ジェット流の速度 (音速) は、繊維の速度 (v_f) よりはるかに大きい (4 ~ 5 倍) ので、 $F \neq F^*$ と考えられる。

(2) 紡糸孔からジェット・ノズルまでの距離を一定にして、ジェット・ノズルの上端において測定した紡糸中の張力 F^* を用いる。(測定器は、金井工機製: テンション・チェッカー) この場合、この張力 (F^*) は張力測定点とジェット・ノズル出口までの空気抵抗を含んだ

Fig. 6 The curves of yarn velocity (v_f) (a), Reynolds number (R_{ew}) (b), air drag coefficient (C_f) (c), and air drag force (f) plotted against fineness (R) (d)

Fig. 7 (a) Yarn tension (F) with the stationary yarn measured by a strain gauge as in Fig. 3
 (b) Yarn tension (F^*) with the running yarn measured by a yarn tension checker as shown in Fig. 7 (b)

値で測定されているので、 F^* よりわずかに大きいはずである。したがって、定性的には、 $F \geq F^* \geq F^{**}$ の関係があると推定される。

F , F^* の実験結果をそれぞれFig. 7(a)(b)に示す。 F , F^* の測定値は同様の傾向を示し、繊度の小さい所で F の方がわずかに大きくなっている。

さて、2式において、 g の値は T よりさらに小さいと考えられるので、 T と同様 $g=0$ とすると、2式は、 $F^* = S + f$ となる。変形抗力 S は、トルートン粘度と変形速度勾配で与えられる。いま、高温にして紡糸する場合、すなわちポリマーの変形抗力が無視されるほど小さくなった場合は、ジェット・ノズルによる張力と紡糸孔からジェット・ノズルまでの間の空気抵抗抗力がバランスし、 $F^* = f$ として、延伸細化が行なわれるようになる。このような場合には、 F^* の代りに F と f の曲線を重ね合わせた状態で紡糸が完了されると考えられる。Fig. 8の交点は、ポリマーの変形抗力を無視できるほどの高温紡糸した場合の繊度の値を示し、この交点以下の繊度は紡糸できないことを示している。この繊度を限界繊度とすると、その値は圧力(P)と紡糸孔からジェット・ノズルまでの距離(L)の関数である。限界繊度の値を L に対して、圧力のパラメータでプロットすると、Fig. 9のようになる。これより、距離 L と繊度は、ほぼ直線関係にあり、圧力が高い

Fig. 8 The plots of yarn tension (F) and air drag force (f) against yarn radius (R) in spinning. Each intersecting point shows the limiting value for the radius of the yarn which can be drawn.

Fig. 9 The limiting values of yarn fineness estimated from the distance (L) between the spinneret and the air jet nozzle at various pressures (P).

ほど、また距離 L が小さいほど織度は小さくなることがわかる。これらの傾向について、実験的に検討する。

4. 実験結果および考察

実験は、ポリプロピレン（チッソポリプロピレン，試料番号 1016，固有粘度から求めた分子量約 81,000）を試料として、紡糸温度を 220～312℃の範囲で、かなり高温の領域まで行なった。吐出量は、0.485 g/min，ジェット・ノズルの圧力は、2, 4, 6 kg/cm²，紡糸孔からジェット・ノズルまでの距離は、1.0, 1.5, 2.0 m である。

4.1 織 度

紡糸温度と紡糸された繊維の織度を Fig. 10 に示す。これより、紡糸温度を上げてポリマーの変形抗力が小さくなった場合、織度は小さくなるが、限界があることがわかる。また、圧力は高いほど織度は小さくなる。つぎに、圧力と紡糸速度の関係を Fig. 11 に示す。紡糸速度は、(3)'式に織度 (R) の実測値を代入して求めた。これ

より、速度は圧力によって増加するが、紡糸温度が低い場合には変形抗力が大きくなり、速度はわずかしかな増加していないことがわかる。

つぎに、紡糸温度 288℃と 267℃のときの距離 L と織度の関係を Fig. 12 (a) (b) に示す。これより、(a) (b) とともに距離 L と織度はほぼ直線関係にあり、圧力が高いほど、また L は小さいほど（ジェット・ノズルを紡糸孔に近づけるほど）織度は小さくなることがわかる。これらの傾向は、前述の推定と一致しており、推定値と実験値を表にまとめると、Table 1 のようになる。Table 1 の

Fig. 10 The diameters of the yarn spun at various spinning temperatures.

Fig. 11 The change of yarn velocity at different nozzle pressures and spinning temperatures

Table 1 The experimental values of yarn radii at various temperatures and the limiting values estimated from F and F^{**} .

L (m)	P (kg/cm ²)	Spinning Temp. (°C)				The Limit of Yarn Radii	
		267	288	300	312	F	F''
		Yarn Radii (μ)					
1.0	6	8.8	7.6			6.6 (7.5)	
	4	9.7	8.1			7.5 (8.2)	
	2	12.3	9.1			8.3 (8.8)	
1.5	6	10.3	8.3	8.1	7.6	7.6 (8.3)	
	4	11.5	9.2	9.0	8.8	8.5 (9.1)	
	2	14.2	10.8	10.3	10.0	9.5 (9.7)	
2.0	6	11.8	8.6			8.5 (9.5)	
	4	12.8	10.4			9.7 (10.5)	
	2	15.3	12.3			10.8 (11.1)	

As the spinning temperature increases, the values of the yarn radii approach to the limiting values.

Fig.12 The yarn diameters measured at various distance (L) between the spinneret and the jet nozzle with different nozzle pressures.

限界繊度の値は、 F と F^{**} の両方の測定結果より求めたもので、別々に記してある。また、300°C以上の紡糸温度のときの繊度も併せてある。これより、紡糸温度が高温になりポリマーの変形抗力が小さくなるにつれて、紡糸温度は限界繊度に近づき、紡糸温度300°C以上では、ほぼ限界値に達していることがわかる。

4.2 強 伸 度

Fig.13 Several examples showing the tensile load-elongation curves at different temperatures and nozzle pressures.

Fig.14 The strength (g/d) of yarn spun at various spinning temperatures with different nozzle pressures.

各紡糸温度で紡糸された試料の代表的な強伸度曲線をFig.13に示す。この結果より紡糸温度220°C、243°Cの試料では、ネッキングの現象がみられる。つぎに、紡

Fig. 15 The elongation (%) of each yarn.

糸温度と強度(g/d)を圧力のパラメータでFig. 14に示す。これより、圧力が高いほど強度は高く、紡糸温度に対しては、270~280°Cのとき、最も強度は高くなり、300°C以上では減少している。これは、分子量の低下に起因していると考えられるが、この点については、さらに詳細な検討が必要である。紡糸温度と伸度の関係をFig. 15に示す。これより、紡糸温度を上げるほど、また圧力が高いほど伸度は減少することがわかる。ジェット・ノズルの位置を変えたときの強伸度の結果をFig. 16に示す。紡糸温度は、267°Cと288°Cである。これより、強度(g/d)は、距離 L にほとんど関係しないが、伸度は距離 L が大きくなるとわずかに増加することがわかる。

4.3 複屈折

各試料の複屈折をFig. 17に示す。これより、圧力が高

Fig. 17 The birefringence (Δn) of each yarn.

いほど、また紡糸温度が高いほど複屈折は増加する傾向がみられ、これは同一試料により紡糸された3倍延伸糸の傾向と一致している。ジェット・ノズルによる延伸系の複屈折の値は、3倍延伸系の値よりも低い、未延伸系の値よりもはるかに大きいことがわかる。

紡糸温度267°Cと288°Cの試料について、織度と複屈折の関係を距離 L の関数で、Fig. 18(a)(b)に示す。

これより、距離 L が大きいかほど(ジェット・ノズルを下方にするほど)複屈折は大きくなることをわかる。これに関しては、詳細な検討を必要とし速断できないが、熔融点以後の結晶化の影響を受けるものと思われる。

5. 結 言

ジェット・ノズルを用いて、ポリプロピレンの熔融紡糸を行なった結果、つぎのことが明らかになった。

(1) ジェット・ノズルの圧力が、2.18 kg/cm²以上になると、ジェット気流は音速に達し、紡糸張力に寄与するのは、衝撃織の観察される長さの範囲内である。

(2) 紡糸速度は、ジェット圧や熔融温度をかなり上げて、ジェット気流の1/4~1/5程度である。

Fig. 16 The yarn strength and elongation plotted against the distance (L) at various pressures (P).

Fig.18 Plots of birefringence (Δn) against yarn diameter at spinning temperatures.
(a) 288°C (b) 267°C

(3) 当然のことながら、紡糸温度が高いほど、ポリマーの変形抗力が小さくなって、細い繊維を紡糸することができる。しかし、空気抵抗と送り出し張力とのバランスから、紡糸織度に限界がある。したがって、さらに織度を下げるためには、何らかの方法で空気抵抗を下げる必要がある。

(4) 紡糸温度の距離 L と圧力 P に対する傾向は、計算の傾向とよく一致する。

(5) ジェット・ノズルの位置が、紡糸孔に近いほど、紡糸される繊維の織度は小さくなるが、複屈折は遠いほど、大きくなる傾向がある。

(6) 強度 (g/d) は、紡糸温度が 270~280°C のとき、最高値をとり、伸度は紡糸温度が高いほど小さくなった。

(7) 複屈折は、紡糸温度が高いほど増加する傾向がみられ、最高で約 2.5×10^{-2} であった。

以上の実験を進めるために種々御協力を賜った、東京工業大学清水研究室島崎恒蔵氏ならびに試料につき御便宜を載いたチッソ株式会社に感謝します。

文 献

- 1) 繊維学会編；繊維の形成と構造の発見（化学同人，1969）
- 2) 清水，島崎；繊維誌，29，T205（1973）
- 3) 金網，栗田；繊維高研究発表会参考資料，153（1972）
- 4) 白倉，大倉；流体力学（2）（コロナ社）