(昭和45年6月5日受理)

ポリエステル繊維のネッキング現象*

東洋紡績株式会社堅田研究所 小林 重 夫

NECKING BEHAVIOR OF POLYESTER FIBERS

By Shigeo Kobayashi

(Katata Research Institute, Toyobo Co., Ltd., Honkata,
Ohtsu City, Shiga Prefecture, Japan)

This paper describes the necking phenomena of undrawn polyester fibers in stretching under various conditions in the vicinity of glass transition temperature. Neck angle is used as a parameter which expresses the characteristics of the necking geometry. This parameter means the angle between the direction of the necking shoulder and the fiber axis. The neck angle is very sensitive to the temperature and propagation rate. The plots of necking angle against the propagation rate obtained at different temperatures can be superimposed to a master curve by shifting the plot along the rate axis. The shift factor $\log a_T$ -temperature relationship agrees quite well with the WLF equation, with exception at temperatures lower than the apparent T_g under external force.

The necking phenomena are characterized by the necking draw ratio, the necking tension and the birefringence of the necking region. These factors depend *a priori* on the neck angle irrespective of the drawing condition.

Finally, it must be recognized that the necking is a relaxation phenomena within a large scale of temperature and therefore the necking always occurs at temperatures lower than T_g even in the very low rate of stretching.

(Received June 5, 1970)

1. 緒 言

繊維の延伸に関する研究は非常に多く報告されている。またそれらの延伸に関する研究は多方面にわたり、延伸に伴う配向度変化やヤング率の変化などの物性測定^{1,2,3)}の他に実際の延伸挙動を現象論的に検討を加え、種々の温度での一定荷重下における伸長曲線の解析も行なわれている^{4,5)}。これらの研究はいずれも繊維の延伸挙動に関する多くの知見を与えている。また繊維の延伸ではネッキング現象を伴う場合が多い。このようなネッキング現象を伴う延伸挙動の解析にはネッキング挙動を現象論的にせよ解明することが必要である。そのためにはネッキング延伸挙動を記述する適切な方法を見出すことが必要である。一方ポリエステル繊維の延伸は工業的にも重要であり、さらに非晶性の未延伸糸を延伸することによって一気に結晶化させるという点で他の繊維と比較して延伸機構が特徴的である。さらに延伸過程は典型的なネ

ッキング現象を伴っている。以上のようにポリエステル繊維の延伸機構の解析にはネッキング現象について十分な検討を加えることが必要である。

本報告はポリエステル繊維の延伸機構を解析するためにポリエステル繊維のネッキング現象に着目し、まずネッキング挙動を記述するために1つのパラメータを導入して系統的なネッキング挙動の把握整理を行なった。さらにネッキング形態変化に関して簡単な考察を加えた。

2. 試料および実験

2.1 試 料

実験に供した試料はポリエチレンアレフタレート、イソフタレートの組成比9/1の共重合体で熔融紡糸法により室温空气中に紡糸し急冷した Table 1 に示すような未延伸繊維試料を使用した。これらの試料はいずれもほぼ非晶性で比重がいずれも 1.3470 g/cm^3 以下である。しかし複屈折度は $0.7 \sim 10 \times 10^{-3}$ まで大きく変化している試料である。

2.2 実 験

モデル的なネッキング延伸は加熱装置つきテンシロン、

* この報文を「ポリエステル繊維の延伸機構に関する研究 (I) The Drawing Mechanism of Polyester Fibers Part I」とする。

Table 1. Specimens of undrawn fibers

No.	birefringence	density	denier
1	$0.74 \cdot 10^{-3}$	1.3445 g/cm ³	40.8
2	4.18	1.3454	8.6
3	5.14	1.3456	7.9
4	8.33	1.3463	6.4
5	10.13	1.3463	5.5

The specimens used are the polyethylene terephthalate-isophthalate (9/1) copolymers.

引張試験機（東洋測器製）で行なった。実験は試料長を4cmとして、種々の温度および引張速度（クロスヘッドスピード）で試料長の50%に相当する2cmだけ延伸を行ない、ただちにテンシロンから試料を取り出した。このような特殊な延伸を行なうとネッキングが試料中を伝播する途中の段階で試料が取り出される。すなわちこれらのモデル延伸試料ではネッキングが起こって延伸されている部分とまだ延伸されていない未延伸部分とが試料中に共存している。

一方このようにして作成したモデル延伸糸のネッキング形態の観察は日本光学製投影機 Model 6C を用い、ネッキング部分を拡大して、パラメータ“ネック角度”（3・1項で定義する）の測定を行なった。さらにこれらの試料は複屈折度やその他必要な測定を行なった。

3. ネッキング延伸現象とその考察

3・1 ネッキング形態とネッキングに関連した諸特性の変化

一般にポリエステル未延伸繊維を常温または T_g 以下の温度で延伸するとき張力—伸び曲線は3つの領域に分けることができ、Fig. 1 にはポリエステル未延伸繊維の典型的な張力—伸び曲線を示したものである。Fig. 1 は T_g 近傍で温度および延伸速度を変えて測定しているが、いずれも延伸の初期には張力が直線的に上昇し、降伏点を過ぎると張力は一定値まで低下し、ここでネッキングが形成される。さらに延伸すると局所的に形成されたネッキングは未延伸部分に伝播する。このとき張力はほぼ一定値を保ち伸度のみ増大する。そしてネッキングが試料全体に伝播すると、次には試料全体が均一に伸びて切断に至る。降伏点で形成されたネッキングの形態は延伸条件、温度および速度によって著しく変化し、また一度形成されたネッキングはさらに同一条件で延伸を続行しても伝播するネッキング形態はほとんど変化しない。Fig. 2 は 2, 3 の延伸条件で得られたネッキング形態を示した。Fig. 2 から定性的に次の点が指摘される。延伸条件のうち温度が高いときおよび延伸速度が遅いときにはネッキングの形態がブロードになり、逆に温度が低いときおよび延伸速度が速いときにはネッキングの形態がシャープになっている。

このようなネッキングの形態の変化を表わす1つのパラメータを導入した。Fig. 3 に模式的に示したように繊維の長さ方向に沿ったネッキングショルダーの角度を“ネック角度”と定義する。このパラメータ“ネック角度”はネッキングの形態を表わし、このネック角度が大きいうことはネッキングがシャープに起こっていることを示し、またネック角度が小さいうことはネッキングがブロードに起こっていることを示している。

このネッキング形態を表わすパラメータ“ネック角度”はすでに S. W. Allison, R. D. Andrew⁶⁾ らが PMMA のネッキング現象に導入した neck slope と同様な意味をもつものである。

一方ネッキングが試料中を伝播するとき張力はほぼ一定値を保つが、このネッキングが移動するときの張

Fig. 1. Load-Elongation curve of undrawn polyester fibers which was stretched at various condition.

Fig.2. The necking geometry of undrawn polyester fibers which was stretched at various condition.

	Draw temperature	Draw speed
a	50°C	500 mm/min
b	60	500
c	69	500

d	70	500
e	50	1000
f	60	1000
g	69	1000
h	70	1000

θ : neck angle

Fig. 3. Neck angle is used as a parameter which express the characteristics of the necking geometry. This parameter means the angle θ between the directions of the neck shoulder and fiber axis.

Fig. 4. The relationship between the neck angle and the necking tension which was stretched at various conditions for No. 1 specimen.

Fig. 5. The relationship between the neck angle and the necking draw ratio which was stretched at various condition for No. 1 specimen.

Fig. 6. The relationship between the neck angle and the birefringence of the necking region which was stretched at various condition for No. 1 specimen.

Fig. 7. Plot of neck angle as a function of neck propagation rate and temperature for No. 1 specimen

力（ネッキング張力と呼ぶことにする）は延伸条件によって変化する。たとえば Fig. 1 に示したように温度が高くなるに従いネッキング張力は減少し、延伸速度が速くなるに従いネッキング張力は増大する。しかしこのような延伸条件によるネッキング張力の変化をネック角度に対してプロットするとネッキング張力とネック角度との間には非常に相関関係が見出される。Fig. 4 には No. 1 の試料について、多くの延伸条件で得られたネッキング張力とネック角度の関係を示したものである。Fig. 4 から明らかなように、ネッキング張力はネック角度の増大と共に飽和型の曲線が増加する。

さらにネッキングを起こしている断面積 A_2 と未延伸部分の断面積 A_1 とすれば、その比、 $A_1/A_2=n$ をネッキング延伸倍率とし (A. B. Thompson⁷⁾ らによって定義された自然延伸比 natural draw ratio と同意である。) また、ネッキング延伸の起こっている部分の複屈折度 (Δn_{neck}) などを種々の延伸条件で測定し、Fig. 5, Fig. 6 に示した。横軸はいずれもネック角度である。ネッキング延伸倍率やネッキング延伸部分の複屈折度はともにネック角度と一義的な関係を示している。

以上のような結果から、ネック角度の測定によってネッキング状態を表わす特性値と考えられるネッキング張力、ネッキング延伸倍率およびネッキング延伸部分の複屈折度などを予測することができる。これらはネック角度がネッキングの状態を表わす効果的なパラメータであることを示唆している。

3.2 ネック角度の温度-速度依存性

モデル的なネック延伸実験において延伸速度はテンシロンのクロスヘッドスピードで表わされるが、実際のネッキングの移動速度はそれと一致しない。そしてネック角度はこのネッキング移動速度と温度に依存する。

ここでネッキング移動速度を v_x とし、未延伸部分の速度を v_1 、断面積を A_1 、密度を ρ_1 とし、またネッキング延伸部分の速度を v_2 、断面積を A_2 、密度を ρ_2 とすると質量保存法則から次のようになる。

$$(A_1\rho_1 - A_2\rho_2) v_x = v_1 A_1 \rho_1 - v_2 A_2 \rho_2$$

$$v_x = \frac{v_1 A_1 \rho_1 - v_2 A_2 \rho_2}{(A_1 \rho_1 - A_2 \rho_2)} \quad (1)$$

ネッキング変形の前後での比重変化を無視すると

$$\frac{A_1 \rho_1}{A_2 \rho_2} \div \frac{A_1}{A_2} = n \quad (2)$$

となる。またテンシロンのモデル延伸では $v_1=0$ 、であり、 v_2 はクロスヘッドスピードを表わしている。

以上のようなとき、ネッキング移動速度 v_x は次式で表わされる。

$$v_x = \frac{-v_2}{(n-1)} \quad (3)$$

上式はネッキング移動速度 v_x とテンシロンでのクロスヘッドスピード v_2 との関係を表わすもので、 $n=1$ の場合はネッキングは起こらず、したがって上式は成立しない。

Fig. 7 は No. 1 の試料について種々の温度およびネッキング移動速度におけるネック角度の変化を示した。前述したように、温度が低いときにはネック角度が大きく、温度が高くなるにしたがいネック角度は小さくなっていく。一方、同一温度では、ネッキング移動速度が大きいとネック角度も大きく、ネッキング移動速度が小さ

Fig. 8. The master curve obtained by plotting the data of Fig. 7 shifting along the log time scale.

Fig. 9. Temperature dependence of the shift factor obtained by composing the master curve in Fig. 8. The solid line is WLF equation employing T_g value of 385°K.

くなるにしたがいネック角度も小さくなる。すなわちネック角度も小さくなるすなわちネック角度の変化に関しては温度を高くすることと、ネッキング移動速度を遅くすることが同じ効果をもつことになる。この温度、速度の等価性は温度または速度を適当に移動させることにより、1つの換算合成曲線が得られることを示唆してい

るでは, Fig. 8 にお Fig. 7 ける測定温度のうち $T_0=66^\circ\text{C}$ を基準温度とし, 他の測定値をネッキング移動速度軸に沿って移動させた換算合成曲線を示した。この合成曲線は多少のパラッキはあるが, 全般的にみてよく1つの合成曲線となっている。

ところでこの合成曲線を得るための各測定温度における移動幅, いわゆる移動因子 (shift factor) の温度変化を Fig. 9 に示した。また Fig. 9 における実線は次式で示すような WLF 式から与えられたものである。

$$\log a_T = \log R + \frac{-8.86(T-T_s)}{101.6 + (T-T_s)} \quad (4)$$

$$T_s = 385^\circ\text{K}$$

Fig. 9 での移動因子の実測温度範囲は比較的に狭い範囲であるが, 実線で与えられた WLF 曲線とよく一致している。しかしながら温度が低くなり No. 1 試料では 64°C 以下になると, 徐々に WLF 曲線から離れてゆく傾向を示している。このように特定温度以上で, ネック角度が見掛け上 WLF 式にしたがって変化することはネッキングにおける形態変化が緩和現象であることを示唆しているものと考えられる。しかしこの点に関しては後でさらに検討を加える。

3.3 未延伸試料の配向性がネッキング延伸挙動に およぼす影響

これまで No. 1 の試料について, 延伸条件を変えたときのネック角度および他のネッキング特性値の変化について検討を加えてきた。ところで未延伸糸の糸質, 特に配向性が変わった場合にネッキング延伸も著しく変化する。ここでは Table 1 に示したような種々の複屈折度をもった未延伸糸について検討した。

Fig. 10. The master curve of neck angle for the undrawn fiber specimens of various kinds of birefringence.

Fig. 11. Relationship between the neck angle and necking draw ratio for the undrawn fiber specimens of various kinds of birefringence.

Fig. 12. Relationship between necking draw ratio and birefringence of undrawn fiber specimens.

a) 未延伸試料の複屈折度とネック角度

未延伸試料の複屈折度 (以後 Δn_{un} とする) に対するネック角度の変化を測定すると, いずれの Δn_{un} においてもネック角度は温度およびネッキング移動速度に対して1つの換算合成曲線を得ることができる。Fig. 10 にはおのの未延伸試料について, 種々の測定温度およびネッキング移動速度で得られたネック角度を $T_0=60^\circ\text{C}$ を基準温度とした換算合成曲線を示した。またおのの未延伸試料についての移動因子 (shift factor) の温度変化はいずれも特定温度以上で WLF 式にしたがうことは No. 1 試料の場合と同様である。

Fig. 10 においては、 $\Delta\eta_{un}$ が大きくなるにしたがって、ネック角度の合成曲線はネッキング移動速度が大きくなる方向に移動していくことを示している。これを同一の延伸条件で比較するならば、 $\Delta\eta_{un}$ の小さい試料のネック角度は大きく、 $\Delta\eta_{un}$ が大きくなるにしたがい、ネック角度が小さくなっていくことを表わしている。

b) 未延伸試料の複屈折度とネッキング延伸倍率

Fig. 11 では $\Delta\eta_{un}$ に対するネッキング延伸倍率の変化を図示した。すでに Fig. 5 において、ネック角度とネッキング延伸倍率の間には一義的関係が見い出されることを明らかにしたが、 $\Delta\eta_{un}$ 変わっても、おのおのの試料についてこの関係は成立している。Fig. 11 では各試料の合成曲線を示したのであるが、いずれの試料でもネッキング延伸倍率の変化は飽和型の曲線を示し、 $\Delta\eta_{un}$ が大きくなるにしたがってあらゆるネック角度でネッキング延伸倍率は系統的に小さくなっている。すなわち $\Delta\eta_{un}$ が大きくなると、一般的にネッキング延伸倍率が小さくなる。この間の関係をさらに明確にするために、Fig. 12 ではネック角度、1°, 5°, 20° での $\Delta\eta_{un}$ とネッキング延伸倍率の関係を図示した。

c) 未延伸試料の複屈折度とネッキング張力およびネッキング延伸部分の複屈折度

$\Delta\eta_{un}$ に対するネッキング張力 (応力) の変化を Fig. 13 に示した。またネッキング延伸部分の複屈折度 ($\Delta\eta_{neck}$) の $\Delta\eta_{un}$ に対する変化を Fig. 14 に示した。同一ネック角度で比較すると、 $\Delta\eta_{un}$ が大きくなるとネッキング応力は大きくなり、 $\Delta\eta_{neck}$ は逆に小さくなる。

以上のように、未延伸試料の複屈折度によってネッキングの特性値は著しく変化する。以上をまとめると定性的に次のようになる。

Fig. 13. Relationship between the neck angle and necking stress for the undrawn fiber specimens of various kinds of birefringence.

Fig. 14. Relationship between the neck angle and the birefringence of the necking region for the undrawn fiber specimens of various kinds of birefringence.

a

b

Fig. 15. Crack phenomena
a ...50°C b ...60°C

$\Delta\eta_{un} \uparrow$ に対して相対的にネック角度 ↓

ネッキング延伸倍率 ↓

ネッキング張力 ↑

$\Delta\eta_{neck} \downarrow$

3-4 ネッキング形態に関する考察

ネッキングの機構についてはこれまで多くの諸説が提出されている。古くから最もよく知られているものに発熱軟化説^{7,8)}がある。これは延伸に伴うエネルギーがネッキングと隣接した部分の加熱のために費されて、次々とネッキングが伝播していくとする考え方である。さらにネッキングに関する現象論的な研究は次の2つの考え方が見られる。その1つは Eyring のモデルによって応力が加わったとき初期の粘性が減少してゆき、フローが起きると考えるモデル^{9,10,11,12)}と、他は、応力によって自由体積が増大して、降伏現象が起こると考えている^{13,14,15)}。

一方ポリエステル繊維ではネッキングの初期段階として、応力を加えることにより、試料の長さ方向に対してほぼ直角に多数の亀裂が発生する。この亀裂は一種の“crazing”と考えられる。そしてその発生はランダムに起こっている。Fig. 15. にはこの亀裂を示した。Fig. 15 から明らかなように、この亀裂の発生は低温で非常に多く起こり、高温になるにしたがいその数は徐々に減少する。さらに延伸を行なうとネッキングが発生するがネッキングはこの亀裂のつから起こっている。そして他の亀裂はネッキングが伝播した後にも延伸部分にそのまま残ることはすでに松尾⁹⁾らも報告している。

ところで一度形成されたネッキングはさらに延伸を続行することにより、一定のネック角度をもったまま未延伸部分に伝播する。そしてこの定常状態で伝播しているネッキングはネック角度でその特性値の変化を一義的に表わすことができることはすでに明らかにした。一方ネッキングの形態を表わすネック角度の温度、速度変化が見掛け上 WLF 式にしたがって変化することから、ネッキングの形態変化があたかも緩和現象であるかのように考えられてしまうが、しかしある特定温度、たとえば No. 1 試料では 64°C、以下では移動変化が WLF 式からはずれてくることから、体積緩和現象と同じように、本質的には非線型の緩和現象であると予想される。Table 2 は各試料の WLF 式の基準温度 T_s 、移動因子が WLF 式からはずれる温度 T_i 、および DTA によって測定したガラス転移温度 T_g を示した。 T_g および T_i は各試料ではほぼ一定の値が得られているが、 T_g は試料の複屈折度が大きくなるにしたがい、徐々に減少する傾向を示している。ところで T_g は外力が作用した場合、直線的に低下することが知られている¹⁶⁾。Fig. 16 では種々の温度で 10³mm/min の延伸速度で延伸したときのネッキング張力を示したものである。このネッキング張力（応力）の温度変化はある特定温度し折れ曲りが見られる。この屈曲点温度は外力下での実質的なガラス転移温度と

Table 2.

Specimen No.	T_s	T_g	T_i
1	385°K	73°C	64°C
2	384	72	62
3	384	72	62
4	384	72	62
5	384	72	62

T_s : reference temperature of WLF equation.

T_g : glass transition temperature by DTA method.

T_i : the temperature at which the values of the experimental shift factor begin to deviate from the WLF curve with decreasing temperature.

考えられるそしてこの屈曲点温度は試料の複屈折度が大きくなるにしたがい徐々に減少して、 T_i とよく対応している。すなわち各試料の実質的な T_g は WLF 式からはずれる温度 T_i と考えられる。

Fig. 16. The necking stress which was stretched at various temperature and constant draw rate ($V=10^3$ mm/min).

The lending temperature of the necking stress

No. 1 64.0°C No. 2 63.5°C

3 63.0 4 61.0

5 60.0

ところで一般に緩和時間は T_g 近傍で急激に変化して、より低温で長くなることが知られているが、ここで次のようなスプリングと、ダッシュポットが並列に並んだ Voight model を考える。緩和時間 τ_n とすると次式のようなになる。

$$\tau_n \frac{d\tau_n}{dt} = \left(-\frac{1}{G_n} F - r_n \right) \quad (5)$$

Fig. 17. The necking draw ratio which was stretched at various temperature and drawing rate for No. 1 specimen.

一方延伸速度 v とすると

$$\frac{dr_n}{dt} = \frac{dr_n}{dv} \cdot \frac{dv}{dt}$$

(5)式に代入すると

$$\tau_n \frac{dr_n}{dv} \cdot \frac{dv}{dt} = \left(\frac{1}{G_n} F - r_n \right) \quad (6)$$

(I) ここで T_g より充分高温で、緩和時間 τ_n が非常に短かく、 $\left| \tau_n \cdot \frac{dv}{dt} \right| \approx 0$ が成立すれば(6)式は次のようになる。

$$F \doteq G_n r_n$$

これは力 F と共に、一様に変形 r_n が起こっていることを示している。すなわち均一延伸である。

(II) T_g より充分に低温で、緩和時間 τ_n が非常に長くなり、 $\left| \tau_n \cdot \frac{dv}{dt} \right| \gg 1$ が成立すれば、(6)式は次のようになる。

$$\frac{dr_n}{dv} \doteq 0$$

ゆえに $r_n = \text{constant}$

これは変形 r_n が延伸速度 v に関係なく一定値になることを示している。この関係は温度に関しても同様であり、 T_g より充分低温では r_n が温度変化によらず一定値をもつことを示唆している。すなわちこのような条件では、分子のセグメント運動が凍結されている状態であり、温度および延伸速度に関係なく、一定の変形が行なわれている。Fig. 16 は No. 1 の試料を温度および延伸速度を変えて得られたネッキング延伸倍率を示したものであり、 $T_g = 70^\circ\text{C}$ より充分低温になるとネッキング延伸倍率は温度および延伸速度によらずほぼ一定値に近ず

いている。

一方ある適当な実験条件で $\left| \tau_n \cdot \frac{dv}{dt} \right| = 1$ が成立すると分子鎖が凍結されて、その状態で延伸を行なうと局所的な延伸、いわゆるネッキングが発生すると考えられる。ところで緩和時間には分布があるから、試料の緩和時間分布のうち、実験条件によってネッキングが起こる critical な緩和時間 τ_c よりも短いものは均一延伸となり、長いものは凍結された状態で延伸されると分子鎖の緩和が起こらず局所的な延伸、ネッキングが発生すると考えられる。そしてネッキングの形態を表わすネック角度は試料の緩和時間分布のうち τ_c より長いものと、短いものとの割合をマクロ的に表わしていると推察できる。

4. 結 語

ポリエステル繊維のネッキング延伸について、系統的な測定を行ない、次のような結果を得た。

1. 延伸条件によってネッキング形態が大幅に変化する。温度が高いときおよび延伸速度が遅いときはネッキング形態がブロードとなり、低温および延伸速度が速いときはシャープとなる。

2. ネッキング延伸の特性値であるネッキング延伸倍率、ネッキング張力およびネッキング部分の複屈度などはあらゆる実験条件において、ネッキングの形態変化を表わすパラメータ「ネック角度」によって一義的に表わすことができる。

3. ネック角度の温度速度変化は、見掛け上 WLF 式によって重ね合わせることができる。

4. 未延伸繊維の複屈折度の増大によって、ネック角度の換算合成曲線は高速度側に移動する。すなわち同一延伸条件でもネック角度は小さくなる。

5. 未延伸繊維の複屈折度の増大によって、同一ネック角度で比較した場合、ネッキング延伸倍率は小さくなり、ネッキング張力は大きくなりそしてネッキング部分の複屈折度は小さくなる。

6. ネック角度の温度、延伸速度変化は本質的には非線型の緩和現象である。したがって、 T_g より充分に低温では温度、延伸速度に関係なく、一定値となる。

付記 数々の助言をたまわった当研究所、八星研究室長ならびに松尾主任研究員に感謝いたします。本研究の一部は昭和44年11月、第5回繊維連合研究会で発表された。

文 献

- 1) 近田, 藤野, 我妻; 繊維学誌, 21, 246, 253(1965)
- 2) " " 度辺, 小野, 我妻; 繊維学誌, 22, 435 (1966)

- 3) 近田, 藤野, 我妻; 織学誌, 23, 164, 511(1967)
24, 1 (1967)
 - 4) A. B. Thompson; *J. Polymer Sci.*, 34, 741(1959)
 - 5) 松尾; 織学誌, 24, 366 (1959)
 - 6) S. W. Allison and R. D. Andrews; *J. Appl. Phys.*,
38, 4168 (1967)
 - 7) I. Marshall and A. B. Thompson; *Proc. Roy.
Soc.*, (London) 221A, 541 (1954)
 - 8) F. H. Müller and K. Jänkel; *Kolloid-Z.*, 179,
145 (1952)
 - 9) R. E. Robertson; *J. Appl. Polymer Sci.*, 7, 443
(1964)
 - 10) R. E. Robertson; *J. Chem. Phys.*, 44, 3950(1966)
 - 11) S. W. Allison and I. M. Ward; *Brit. J. Appl.
Phys.*, 18, 1151 (1967)
 - 12) J. S. Lazurkin; *J. Polymer Sci.*, 30, 595 (1958)
 - 13) P. I. Vincent; *Polymer*, 1, 7 (1960)
 - 14) M. H. Litt and P. Koch; *J. Polymer Sci.*, P-B
5, 251 (1967)
 - 15) D. H. Ender; *J. Appl. Phys.*, 39, 4878 (1968)
 - 16) F. T. Wall and D. G. Miller; *J. Polymer Sci.*,
13, 157 (1954)
R. F. Boyer and R. S. Spencer; *J. Appl. Phys.*,
15, 398 (1944)
-