繊維の軸に垂直方向熱伝導率測定

東京農工大学工学部 仲 三 郎 (会員)
 " 鎌 田 佳 伸 (")

Measurement of the Thermal Conductivity of Fiber Perpendicular to its Axis.

Saburo Naka and Yoshinobu Kamata,

*Department of Textiles and Polymer Science, Faculty of Technology,
 Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo.*

Abstract

An expression for the effective thermal conductivity of fiber assembly formed with many fibers placed in parallel with each other was derived on the basis of two simple models, constructed with fibers surrounded by air and vice versa.

Substituting the effective thermal conductivity measured on polyester fibers at air pressure 10^{-5} mm and 760 mm of Hg into the foregoing expression, we had the thermal conductivity of the fiber perpendicular to its axis.

The theoretical values of the effective thermal conductivity of polyester fabrics estimated by means of the thermal conductivity of the fiber obtained from this work agreed reasonably with that measured by the line heat source method, the results of the work in reference to this method is in contribution.

(Received March 14, 1972)

摘 要

目 的 円筒に密に巻いたマルチフィラメント糸の有効熱伝導率を常圧と低圧で測定し、それらの値を使用して繊維自身の軸に垂直方向熱伝導率をもとめる。

成 果 多数平行に並んだ繊維束の繊維に垂直方向の有効熱伝導率を、2つのモデル、すなわち繊維を気体を取り囲んでいるモデルと気体を繊維が取り囲んでいるモデルの有効熱伝導率で表わし、ポリエステル繊維について常圧と低圧で測定して得た有効熱伝導率を上式に適用して、繊維自身の軸に垂直方向熱伝導率をもとめた。

(昭和47年3月14日受理)

1. 緒 言

高分子の熱伝導率については多くの報告があり、結晶化度の大きいほど、また重合度の大きいほど熱伝導率が大きくなり、分子の配向がよい場合、その方向の熱伝導率は大きくなるが、それに垂直方向では逆に小さくなる^{1),2)}ことが知られている。

繊維も高分子であるから分子の配向からみて、軸に垂直方向、すなわち横方向の熱伝導率は長さ方向のそれより小さいことが予想される。しかし高分子の熱伝導率の測定はほとんど板状試料について行なわれており、繊維そのものを直接測定した例がない。

本研究においては、気体をなるべく排除するため、円柱状ヒーターに繊維を密に巻いてその横熱伝導率を測定した。

2. 理 論

円柱状ヒーターに繊維を密に巻付けた場合、繊維層内の輻射と対流が無視できると仮定すると、定常状態における円柱の単位長さ、単位時間当たりの発熱量を Q 、円柱軸から距離 r_1, r_2 の繊維層内の温度をそれぞれ v_1, v_2 とすると、円柱が充分長い場合、繊維層の見掛けの熱伝導率、すなわち有効熱伝導率 Ke はつぎの式で表わされる。

$$Ke = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi(v_1 - v_2)} \dots\dots\dots (1)$$

Ke は、繊維の横熱伝導率 $K_{\perp}$ 、空隙を満たす気体の熱伝導率 K_g 、繊維の容積比率 f および繊維の配列状態などによって決まる。したがってこれらの関係がわかれば Ke を測定して $K_{\perp}$ をもとめることができる。

繊維層に垂直に熱が流れる場合、繊維の容積比率 f が小さく、その接触が無視できるときは、気体が繊維を取巻いているから、第1図のモデルⅠにおいて熱の流れに垂直な等温面を平面と仮定することにより、その有効熱伝導率 Ke_I は輻射と対流が無視できる場合つぎの式で表わされる³⁾。

$$Ke_I = \left[\frac{1 - \sqrt{f}}{K_g} + \frac{1}{K_{\perp} + K_g \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 1 \right)} \right]^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

ただし

$$f = \frac{l^2}{L^2}$$

また繊維容積比率が大きくてその接触が無視できないときは、接触によって繊維が気体を取巻いているから第

(第1図) 繊維層の断面とそのモデル

1図モデルⅡにおいてその有効熱伝導率 Ke_{II} はつぎの式で表わされる。

$$Ke_{II} = \left[\frac{1 - \sqrt{1-f}}{K_{\perp}} + \frac{1}{K_g + K_{\perp} \left(\frac{1}{\sqrt{1-f}} - 1 \right)} \right]^{-1} \dots\dots (3)$$

ただし

$$f = 1 - \frac{l^2}{L^2}$$

Ke_I と Ke_{II} とは $f=0, f=1$ において同じ値を示し、 $0 < f < 1$ において Ke_{II} が Ke_I より大きい値を示す。第2図は $K_{\perp}/K_g=10$ と仮定した場合の f と Ke_I, Ke_{II} との関係を示したものである。

円柱に繊維を巻付ける場合は、第1(a)図に示すごとく繊維の密接した部分と空隙の大きい部分とができるから、モデルⅠとモデルⅡとが混在していると考え、後者の割合を n とすると、全体の有効熱伝導率 Ke はつぎ

(第2図) 繊維の容積比率と各モデルの有効熱伝導率との関係、 $K_{\perp}/K_g=10$

の式で表わすことができる。

$Ke=n Ke_I+(1-n)Ke_I\cdots\cdots(4)$

(2), (3) 式を (4) 式に代入すると,

$Ke=\frac{n}{\frac{1-\sqrt{P}}{K_{\perp}}+\frac{1}{Kg+K_{\perp}(\frac{1}{\sqrt{P}}-1)}}+\frac{1-n}{\frac{1-\sqrt{f}}{K_g}+\frac{1}{K_{\perp}+Kg(\frac{1}{\sqrt{f}}-1)}}\cdots\cdots(5)$

ただし

$P=1-f$

また繊維層内の空隙の大きさに比し気体分子の平均自由行程はるかに大きくなる低圧においては気体の熱伝導率を無視できるから、その場合の有効熱伝導率を Ke' とすると (5) 式から

$Ke'=\frac{n}{\frac{1-\sqrt{P}}{K_{\perp}}+\frac{1}{K_{\perp}(\frac{1}{\sqrt{P}}-1)}}\cdots\cdots(6)$

が得られる。(5), (6) 式から

$Ke=\frac{(1-\sqrt{P}+\frac{\sqrt{P}}{1-\sqrt{P}})Ke'}{1-\sqrt{P}+\frac{1}{\frac{Kg}{K_{\perp}}+\frac{1-\sqrt{P}}{\sqrt{P}}}}$

$\frac{1-(1-\sqrt{P}+\frac{\sqrt{P}}{1-\sqrt{P}})\frac{Ke'}{K_{\perp}}}{1-\sqrt{f}+\frac{1}{\frac{Kg}{K_{\perp}}+\frac{1-\sqrt{f}}{\sqrt{f}}}}\cdot Kg\cdots\cdots(7)$

したがって、熱伝導率既知の常圧気体中での有効熱伝導率 Ke と、熱伝導率が無視できる低圧気体中での有効熱伝導率 Ke' を (1) 式を用いて測定すれば、(7) 式により繊維の横熱伝導率 $K_{\perp}$ をもとめることができる。

3. 試料と実験装置

長さ30 cm, 直径2.5 mmのベークライト棒に0.18 m mのエナメル銅線を密巻きし、それを内径3 mm, 外径

- ① 試料
- ② ヒーター
- ③ クロメル・アルメル熱電対
- ④ ガラス管

(第3図) 繊維の横熱伝導率測定装置

(第1表) 実験結果

試料 No.	繊維の 容積比率 f	温度差 v_1-v_2 (°C)	平均温度 $\frac{v_1+v_2}{2}$ (°C)	有効熱 伝導率 Ke, Ke' (kcal/m·hr·°C)	繊維の 横熱伝導率 $K_{\perp}$ (kcal/m·hr·°C)	モデルの 割合 n	ヒーターの 発熱量 (kcal/m·hr)
1	0.71	2.8 4.8	27.4 33.9	0.083 0.037	0.13	0.46	1.60 1.23
2	0.76	3.2 3.4	29.0 28.8	0.099 0.066	0.14	0.72	1.91 1.34
3	0.76	3.0 2.8	30.3 34.0	0.101 0.066	0.14	0.70	2.03 1.22
4	0.77	3.4 3.6	26.9 30.8	0.098 0.057	0.13	0.61	2.07 1.26
5	0.78	3.0 2.8	30.6 33.2	0.101 0.070	0.13	0.76	2.03 1.33
6	0.78	2.9 2.4	29.0 30.0	0.108 0.082	0.14	0.83	2.00 1.27
7	0.79	3.3 2.9	28.5 31.4	0.108 0.078	0.14	0.78	2.05 1.28

注) 上段は常圧, 下段は 10^{-5} mmHg における値, v_1, v_2 はそれぞれ r_1, r_2 における温度

4 mmの銅パイプに挿入したものをヒーターとし、パイプの外側に繊維を巻付け、銅パイプの表面 $r_1 = 2 \text{ mm}$ と繊維層内の $r_2 = 5 \text{ mm}$ ぐらいの位置に、0.1 mmのクロメル・アルメル熱電対をセットする。それらを第3図に示すごとくガラス管の中に封入し、約12 hr 油拡散ポンプで圧力を 10^{-5} mm Hg に下げて後加熱を始め、7, 8 hr で温度が定常に達したとき有効熱伝導率 Ke' を測定し、引続き乾燥空気を入れ、3, 4 hr で定常に達したとき有効熱伝導率 Ke を測定した。

また試料としてはポリエステル 50 d/24 f を使用した。

4. 実験結果と考察

実験結果を第1表(前ページ)に示す。モデルの割合 n は、得られた $K_{\perp}$ を使用して(6)式で計算してもとめた。

4.1 繊維層内の気体の熱伝導率

繊維層内の気体の熱伝導率を Kg' 、自由気体のそれを Kg 、繊維層内で気体分子が繊維に衝突するときの平均自由行程を L_f 、自由気体のそれを L_g とするとつぎの式が成立する。

$$Kg' = Kg \frac{L_f}{L_f + L_g} \quad (8)$$

$$L_f = \frac{\pi d}{4f} \quad (9)$$

ただし d は繊維の直径である。本実験に使用した繊維の直径は約 0.015 mm であるから、 $L_f \approx 0.016 \text{ mm}$ となる。また L_g の値は圧力 10^{-5} mm Hg において約 $7 \times 10^3 \text{ mm}$ であるから Kg' の値は約 $2 \times 10^{-6} \cdot Kg$ となり、(6)式の成立することがわかる。常圧においては L_g の値が約 10^{-4} mm であるから L_f に比し無視でき、(8)式により $Kg' \approx Kg$ となる。

4.2 輻射による伝熱

2枚の平行平板の温度差が小さい場合、両平板間の輻射伝熱量 q_r と空気層を伝導で流れる熱量 q_c との比は、両平板を黒体とするとつぎの式で表わされる。

$$\frac{q_r}{q_c} = \frac{0.195}{Kg} \left(\frac{Tm}{100} \right)^3 d \quad (10)$$

ただし、

d : 両平板の距離 (m)

Tm : 両平板の平均温度 ($^{\circ}K$)

繊維層内の輻射面間の距離は繊維直径ぐらいと考えられるから、繊維を黒体と仮定して、繊維間の輻射熱を、間隔 0.015 mm の2枚の黒体の平行平板間の輻射伝熱で近似できると考えると、 $Tm = 300^{\circ}K$ の場合は $q_r/q_c \approx 3 \times 10^{-3}$ となり、輻射伝熱の無視できることがわかる。

4.3 対流の影響

空気中で測定する場合、周囲の空気の流れのためヒーター軸から同一距離の温度が一樣にならないことが考えられる。それを調べるために、繊維層内の $r = 4 \text{ mm}$ の位置において上下左右に4本の熱電対をセットし、その上にさらに繊維を厚さ約 2 mm 巻き、 90° ずつ回転して定常状態における各位置の温度を測定してその平均値としてつぎの値が得られた。

上: $21.7^{\circ}C$

下: $21.8^{\circ}C$

右: $21.7^{\circ}C$

左: $21.7^{\circ}C$

もし対流が起これば下の温度は低く、上の温度が高くなるはずであるからこの場合対流の影響のないことがわかる。またこのことは繊維層内の対流も無視できることがわかる。またこのことは繊維層内の対流も無視できることを示している。

4.4 モデルの妥当性

(2)式は熱の流れに垂直な等温面を平面と仮定して導いた式である。すなわち第1(d)図において、 AB , CD , EG , GH 面を等温面と仮定した。しかしもし AB 面と GH 面を等温面と仮定し、熱は繊維軸に垂直方向のみに流れ、それに直角方向に温度勾配があってもそれによる熱移動は無視できると仮定すると、直線 IM , JN を流線と考えることにより Ke_I は(2)式の代わりにつぎの式で表わされる。

$$Ke_I = Kg(1 - \sqrt{f}) + \frac{1}{\frac{1}{K_{\perp}} + \frac{1}{Kg} \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 1 \right)} \quad (11)$$

実際には、 $K_{\perp} > Kg$ の場合、流線と等温面は第1図 e に示すごとく曲線あるいは曲面になる。

渡辺は電気槽による実験結果と(2)式による計算結果を比較し、繊維の容積比率 0.451 の場合実験値は 0.074 kcal/m $\cdot$ hr $\cdot^{\circ}C$ 、計算値は 0.071 kcal/m $\cdot$ hr $\cdot^{\circ}C$ となったと報告している。この容積比率は筆者らの使用した値 0.7 ~ 0.8 に比して小さいから繊維の接触は少ないが、(2)式はそれを無視しているから計算値が実験値より小さくなるのは当然である。これを(11)式で計算すると 0.058 kcal/m $\cdot$ hr $\cdot^{\circ}C$ となり、実験値に比し非常に小さくなる。これらのことを考慮して本研究においては(2)式を採用した。

つぎに(2)、(3)式で表わされる1次元モデルの有効熱伝導率が(1)式に適用できるかどうかを考えてみる。

(第4図) 円筒状繊維層のモデル

第4図はヒーター軸 $X-X$ から半径 r_1 の位置に、断面が第1図モデルⅠと同じリング状のモデルが存在する場合を示している。半径 r_1, r_2, r_3, r_4 の位置の温度をそれぞれ v_1, v_2, v_3, v_4 とし、ヒーターの単位長さ、単位時間当りの発熱量を Q とすると、定常状態におけるこのモデルリングを通して単位時間に流れる熱量は式

$$\begin{aligned} Q \cdot L &= 2\pi K_g \frac{v_1 - v_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot L \\ &= 2\pi \{K_g(L-l) + K_{\perp} l\} \frac{v_2 - v_3}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \\ &= 2\pi K_g \frac{v_3 - v_4}{\ln \frac{r_4}{r_3}} \cdot L \end{aligned}$$

で表わされ、またリング全体の有効熱伝導率を Ke とすると $Q \cdot L$ はまた式

$$Q \cdot L = 2\pi Ke \frac{v_1 - v_4}{\ln \frac{r_4}{r_1}} \cdot L$$

で表わされるから、これらの式からつぎの式が得られる。

$$\frac{1}{Ke} = \frac{1}{K_g} + \left\{ \frac{L}{K_{\perp} l + K_g(L-l)} - \frac{1}{K_g} \right\} \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\ln \frac{r_4}{r_1}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

しかるに r_1, r_2 などに比し l, L は極めて小さいから式

$$\frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\ln \frac{r_4}{r_1}} = \frac{\ln \left(1 + \frac{l}{r_2} \right)}{\ln \left(1 + \frac{L}{r_1} \right)} = \frac{\frac{l}{r_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{r_2} \right)^2 + \dots}{\frac{L}{r_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{L}{r_1} \right)^2 + \dots} = \frac{l}{L}$$

が得られ、この式を (12) 式に代入して式

$$Ke = \left[\frac{1 - \sqrt{f}}{K_g} + \frac{1}{K_{\perp} + K_g \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 1 \right)} \right]^{-1}$$

すなわち (2) 式が得られる。(3) 式もまったく同様であって、繊維が細くて l, L が r_1 に比して小さいときは1次元モデルを適用できることがわかる。

4.5 実験結果の織物への適用

タフタのように糸のプリンプの小さい織物の熱伝導率は、繊維が一様に分布するたて糸とよこ糸の繊維層の熱伝導率で近似的に表わすことができると考えると、

(2) 式の Ke_I よりも大きく、(3) 式の Ke_I よりも小さくなるはずである。第5図は本実験に使用したポリ

(第5図) ポリエステル・タフタの有効熱伝導率 (20°C, 65% RH)

エステル マルチ フィラメント糸 50 d/24 f を たて糸とよこ糸に使用したタフタ (たて糸密度 40.5本/cm, よこ糸密度 36.5本/cm) について、線熱源法により測定した結果である。曲線①, ②はそれぞれ (2), (3) 式で計算した理論曲線で、いずれも $K_{\perp}$ の値として第1表から 0.14 kcal/m·hr·°C を使用した。繊維の容積比率 f の小さいときは、曲線①に近づき、 f が大きくなると曲線②に近い値を示すはずであるが、織物の場合密度を大きく変化させることが困難であるため f の範囲が狭く、実験値を用いて最小二乗法でもとめた2次曲線が示すごとくあまり明瞭ではない。しかし実験値は曲線①と②のあいだに分布し、理論値の計算に用いた $K_{\perp}$ の値がおおむね妥当であることを示している。

5. 結 論

繊維束の有効熱伝導率は、内部の気体の影響を受けることが大きく、繊維の容積比率が小さいときは、第2図の Ke_I の曲線でわかるごとく、気体の熱伝導率に近い

値を示し、繊維自身の熱伝導率はほとんど影響しなくなる。したがって繊維束を利用して繊維の横熱伝導率を測定するためには、繊維の容積比率 f をなるべく大きくすることが必要であり、本実験においては、円筒に巻くことにより f を0.8ぐらいにすることができた。また f が大きくなると繊維の接触部を流れる熱が多くなるが、これは低圧で測定することにより知ることができる。

このようにポリエステル繊維のような疎水性繊維の横熱伝導率はこの方法で測定することができるが、親水性繊維については、完全に乾燥して円筒に巻くことが困難であるため低圧において繊維の容積比率が変化するおそ

れがあり、この点についてさらに検討する必要がある。

おわりに本研究のため試料の提供をうけた東洋紡績株式会社に謝意を表する。

文 献

- 1) K. Eiermann ; Kolloid-Z., 180, 163(1962)
- 2) K. H. Hellwege, J. Hennig, W. Knappe ; Kolloid-Z., 188, 121(1963)
- 3) 渡辺 ; 衛生工業協会誌, 30, 77(1956)
- 4) J. D. Verschoor, P. Greebler, N. J. Manville ; Trans. of A.S.M.E., 961(1952-8)
- 5) 渡辺 ; 保温保冷工学, p. 134, 1960, 朝倉書店
- 6) 仲, 本村, 鎌田 ; 繊維誌, 26, T 34 (1973)