

高 聚 物 之 內 耗

漆 宗 能

(中国科学院化学研究所)

I. 緒 言

从弹性理論可知, 当一个可以发生形变的物体在应力場中能将弹性能作为內能的形式而貯于該物体中, 然而实验指出, 在形变过程中不管是任何物体, 总有一部分弹性能消耗为不可逆之热能, 此种現象称为“內耗”。如一块自由振动的板即使很好的与周围环境隔离起来, 其振动的振幅会逐渐衰减下去而終至停止。又如反复的对一块橡皮施加拉伸压缩应力, 則可觉察橡皮会发热。这些現象都是由于固体中的內耗所引起的。

产生內耗現象的原因是由于在固体中組成該物質的原子或分子是在其平衡位置作振动, 在未受外力时其振动的机率各向相等, 当施以外力时其振动机率沿应力的方向大于其它方向, 这种效应称为: 原子或分子在应力場內的从优分布, 其所引起的宏观后果是将一部分弹性能消耗为使原子或分子在应力場內从优分布所需的热能^[1,2]。由于此种能量系消耗于分子内部的热运动上, 故称为“內耗”。

既然內耗的产生是与分子内部的热运动有关, 因而对內耗現象的研究就能給予我們有关分子内部的结构及运动的知識^[3]。此种物理力学的研究方法过去对金属物理方面的研究工作做得很多, 不管在理論方面, 或对內耗机构的解释, 及內耗的量度方面都有很多的研究論文及系統性的总结文章发表^[4-7]。但是, 对高聚物內耗的研究, 也只是近年来由于测量技术的进步以及对高聚物作为材料的使用上的要求才有了很快的发展^[8-11]。本文仅就高聚物內耗方面作简单介绍。

II. 关于內耗的定义

从定量方面来看, 对內耗可以通过不同的方法来予以定义, 其中最重要而最基本的概念, 将

內耗定义为比值 $\Delta E/E$, 式中 E 为固体在形变过程中总弹性能的贮存, ΔE 为其在形变过程中能量的耗損, 故 $\Delta E/E$ 称損耗比, 可由应力循环中測量出来而不需对內耗的性质作任何假定. 在应用中常以 $1/Q(Q^{-1})$ 来量度內耗, 对綫性粘弹体系; 并假定損耗力正比于速度, 恢复力正比于振幅則量 Q 与 $\Delta E/E$ 之关系为^[12]

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

固体在振动过程中 E 与每一振动周期中能量的儲存有关, 而 ΔE 則与每一振动周期中能量之消耗有关, 由于粘弹性的关系, 在交变应力作用下之固体应变将滞后于应力, 設其滞后相角为 ϕ , 則可以証明^[13]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} \quad (2)$$

因而从定义式(2)可知: 內耗亦可以用应力应变間滞后相角的正切来定义.

給內耗下定义还有几种間接的方法, 它們依賴于下列假定: 即恢复力正比于振动之振幅, 而損耗力正比于速度, 这样在自由振动中, 相繼二自由振动的振幅之比值为常数, 而該比值的自然对数, 我們称之为对数衰減 Δ , 可作內耗的一个量度, 对阻尼不大的綫性粘弹体而言, 对数衰減与損耗比之間的关系为^[13]:

$$\Delta = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} \quad (3)$$

內耗的另一种間接的量度, 可由受迫振动下的共振曲的綫銳度給出. 当試件受振幅固定, 但頻率可变的簡諧力作用时, 試件的振动能量作为頻率的函数在共振頻率 f_r 处有最大值, 在共振頻率的兩旁, 将各有一頻率对应振动能量极大值的一半, 称此二頻率之差 Δf 为半寬度頻率, 則比值 $\Delta f/f_r$ 亦可作为內耗的一个量度, 对阻尼不大的綫性系統, 下式即成立^[13]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta f}{f_r} \quad (4)$$

III. 內 耗 的 机 构

固体的內耗可由数种不同的机构所产生, 虽然最后它們都使机械能变为热能, 一般來說它包含两种耗散过程^[13].

最早从理論上来討論內耗的是从固体的滯弹性質出发由 Hook 定律的普遍化而发展起来的. 其論点的基本要点是: 在真实固体中由于滯弹性質因而在一定应力作用下应变将滞后于应力, 其应力-应变曲綫对振动一个周期則形成一滞后迴綫, 此迴綫所包的面积就代表耗散为热能的机械能. 对于此类物体若其平均松弛時間为 τ , 則联系內耗 Q^{-1} , 平均松弛時間 τ , 及外力作用頻率 ω 的关系式为^[7]:

$$Q^{-1} = K \cdot \frac{\omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \quad (5)$$

上式中 K 为一无因次常数. 式(5)描素了內耗 Q^{-1} 作为参量 $\omega \tau$ 的函数而变化的情形; (图 1), 当 $\omega \tau = 1$ 时, 即外力作用頻率等于平均松弛時間时內耗出現极大值, 称內耗峯, 这是由于当外力頻率等于平均松弛時間时引起強烈的弛豫所至. 因此我們可以从出現內耗峯的頻率而推算出該物質的平均松弛時間.

不同物質具有各不相同的平均松弛時間, 对于同一物質, Кобеко 等^[14]曾指出; 其平均松

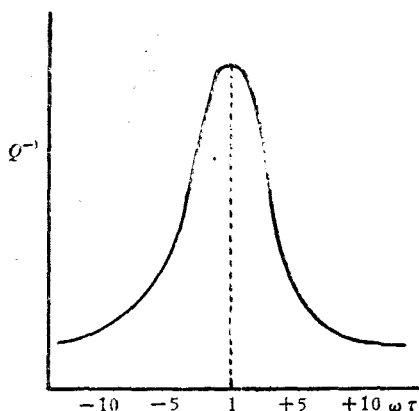


图 1

弛時間強烈的依賴于測定時的溫度，而 Гуревич^[15]，Дагадкин^[16] 等進一步指出其平均弛時間與溫度之間的关系为：

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{U_0/KT} \quad (6)$$

上式中， K 为 Boltzmann 常数， T 为绝对温度， U_0 为弛活化能，这样就能将内耗与温度联系起来。

但是实验指出：对很多高聚物的内耗峰是在很广的温度或频率范围分布，因而引入平均弛时间的概念只是对复杂问题的简化，而在实际的运用中应将内耗表示成对温度或频率的分布则更能结合实际并且还能将内耗现象与微观的分子过程联系起来^[17]。从这种观点出发来研究内耗的是由 Boltzmann 迭加原理导出了表示线性粘弹体应力-应变间的基本关系式为^[18]：

$$\sigma(\epsilon, t) = F(\epsilon) - \int_{-\infty}^t \epsilon(t) f(t-T) dT \quad (7)$$

上式表示若试件在时间 T 的瞬时 δT 中获得应变 $\epsilon(T)$ ，则在时间 t ($t > T$) 该试件的应力应为两项应力的总和；一部分是在时间 t 的应变 ϵ 所对应的应力 $F(\epsilon)$ ，一部分是在时间 t 以前所产生的残余应力之和 $\int_{-\infty}^t \epsilon(t) f(t-T) dT$ 。 $f(t-T)$ 称记忆函数，表示材料粘弹性能的一切特征，Taylor^[19]，Volterra^[20] 及 Kolsky^[21] 等曾研究了聚乙烯，天然橡胶，及有机玻璃等的记忆函数认为记忆函数与平均弛时间为指数关系，而 Laplace 则将记忆函数取为下列积分的形式称 Laplace 积分^[22]。

$$f(t-T) = \int_0^{\infty} A(\tau) e^{-T/\tau} d\tau \quad (8)$$

经变换后立可得到表示内耗随频率分布的基本关系式为^[22]：

$$Q^{-1} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A(\tau)}{H(\omega\tau)^2} d(\ln \tau) \quad (9)$$

上式中 $A(\tau)$ 是弛时间的分布函数，它确定了粘弹体的一切力学行为，Gross^[23] 曾讨论过当已知 $f(t-T)$ 时为了求得 $A(\tau)$ 所需的数学变换。式(9)较式(7)能更好的描述线性粘弹体的内耗随频率或温度的分布情形。

很多作者曾从分布函数出发来研究高聚物的内耗与微观分子过程的联系^[24-28]，但对于建立高聚物内耗的完整理论尚需大量的研究结果。

除了由于上述的静力滞后而产生内耗以外，许多高聚物的内耗与振动的速度梯度有关，产生此种内耗的力可视为具有内在粘性的性质。Tobolsky^[1]，Alfrey^[2] 等将高聚物的粘性流动视为一速率过程，并假定每一分子链在其周围分子所构成的能阱中作热振动，在无外力作用下各方向扩散的可能性是一样的，若受单向拉伸，在拉伸方向能阱高度比其它方向低些，因此分子在平行拉伸方向的运动也就容易些，这样分子链的运动将沿应力方向离开能阱——分子在应力场中从优分布，这种流动将贮于固体中的弹性能变为热能，其宏观的效果则引起内耗。Alfrey^[29] 并认为沿应力方向的流动速率与分子链的长度有关，并引用 Flory 粘度公式得弛时间 τ 与链长 n 的关系式为：

$$\tau = A e^{b\sqrt{n}} \cdot e^{\Delta E/RT} \quad (10)$$

而分布函数的形式为

$$A(\tau)d\tau = \frac{2}{5b^2\rho KT} \left(\frac{\ln\tau - \ln A - \Delta E/RT}{\tau} \right) d\tau \quad (11)$$

式中 $\alpha < \ln\tau < \beta$, $\alpha = \ln A + \Delta E/RT$, $\beta = \ln A + \Delta E/RT + b\sqrt{n}$

这种处理方法将温度与内耗的关系强调起来,并可从它导出内耗的热力学关系。而然将此种理论在真实固体上的应用,其主要的困难是固体位能阱的性质还是一种假想,且经常可有数种过程同时作用,虽然如此,但目前还是较严正的用分子理论解释观察结果的方法,并可作将来发展的基础^[13]。

IV. 分子结构与内耗的关系

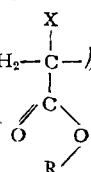
近年来关于高聚物内耗与分子结构关系的研究工作做得很多。其研究方法是用具有不同结构的高聚物在广泛的温度及频率范围内测定其内耗,用观察内耗峰出现的位置及锐度来解释其与结构的关系。

对非晶态线型高聚物而言,从玻璃态温度以下至粘流温度范围内一般都出现三个内耗峰^[30,31],分别称为 α , β , γ , 内耗峰(图 2),图上每一内耗峰对应于某一运动方式的分子过程被解冻贡献出相应的形变机构而参加到形变过程中去,由于各转变过程需要一定的弛豫时间,因而在图上出现峰值^[32]。 α 峰与大分子整个链节之粘滞流动有关,故 α 峰出现在熔点附近,而 β 峰及 γ 峰则与 C—C 链的自由旋转及侧基的振动有关^[33]。因而对内耗峰的观察研究就能得到有关高聚物分子链节的结构及运动的知識。在这方面的研究工作有: Saure^[34] 等曾用观察内耗峰的方法研究高聚物结晶度与内耗的关系。

他们用聚苯乙烯、聚乙烯及聚四氟乙烯三种试样分别在 80°K 至室温及 200—4000c/s 范围内观察各试样的内耗峰,并与 Wilson 等用核磁共振方法测定的结果相对照认为: 由于聚四氟乙烯有高的结晶度对应了高而锐的 β 峰,而完全非晶态的聚苯乙烯则在 80°K—380°K 范围内不显示内耗峰。Saure, Kline^[35] 等又曾合成了具有不同支化程度的聚乙烯来研究支化效应对内耗的关系。

关于增塑剂对内耗关系的研究工作研究得较多^[36-38], 研究的结果指出: 由于增塑剂的加入使内耗峰移向低温,降低的温度与加入增塑剂的克分子数成正比,其解释为增塑剂的加入降低了弛豫过程的活化能,其关系符合于式(6)。

关于具有不同化学结构的高聚物与内耗的关系, Hoff^[39,40] 等曾对不同结构的丙烯酸酯类的内耗进行了系统的研究,他们用具有 $-\text{CH}_2-\text{C}-$ 从复单位的高聚物作研究,其中 $X = \text{CH}_3$,



Cl, 而 R 则用 $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{Cl}$, $-\text{CH}-\begin{array}{l} \text{CH}_3 \\ \text{CH}_3 \end{array}$ 等十六种不同的酯基,

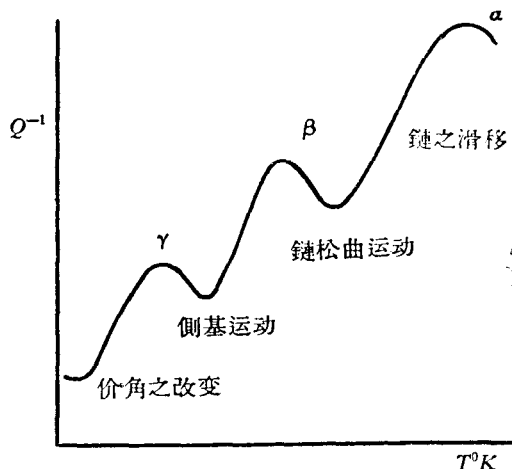


图 2

并对結果进行了討論。

近年来由于高分子輻射化学的发展,^[41]故亦有人用內耗的方法来研究受輻射后高聚物結構与性能变化的关系^[41],并根据其与温度的关系近似計算受輻射后交联百分数^[42]。

关于高聚物內耗与結構的关系以上所述仅对一些代表性工作的簡單介紹,关于这方面的文献还有待系統性的总结工作,不过应指出的是:在这方面的研究工作尚只是方兴未艾,可以預期此种物理力学的研究方法不管在理論上或实用上对高聚物結構与性能的研究都有十分重要的意义。

V. 內 耗 的 量 度

随着对高聚物內耗的研究,高聚物內耗的量度亦得到了很快的发展,测量的頻率范围从 10^{-2} 至 10^8 c/s,而测量的温度可从 $4.2-600^\circ\text{K}$ ^[43-47] 这些已采用过的实验方法可以分为下面几类:

1. 直接量度法($10^{-1} - 10^{+2}$ c/s)
2. 自由振动法($10^{-2} - 10^{+2}$ c/s)
3. 受迫振动非共振法($10^{-3} - 10^{+3}$ c/s)
4. 受迫振动共振法($10^1 - 10^5$ c/s)
5. 波传播法($10^5 - 10^8$ c/s)

1. 直接量度法 由前面所討論內耗定义看出,我們可以用各种方法来测量試件的內耗。由定义式(1)可知,我們可以用测量試件在应力循环中所产生的热能来决定該試件的內耗。Hopkinson 及 Williams^[48] 等曾对鋼鉄作过研究,当試件作应力循环时测量試件温度稳定时試件中心与端点之温度差,而該温度差又正比于試件在試驗中所产生热量的速度,亦正比于能量的消耗 ΔE ,而 E 則用应力顛值算出。最近(1958) Engelter^[49] 等用特殊的气体量热器研究了高聚物在机械应变时之热效应。此法的优点由于是直接的量度因而不必对內耗的性質作若干假定,其缺点则为因于方法不身限制了测量的頻率不高,并且設備也較為复杂。

2. 自由振动法 若所研究的材料是綫性的,当其作弯曲或扭轉振动时其周期及对数衰減将决定材料的力学性質,貯藏于試件中的弹性能正比于振幅的平方,因而若 A_1 和 A_2 是在平衡位置同一边的两繼两个振幅,則損耗比值 $\Delta E/E$ 为 $(A_1^2 - A_2^2)/A_1^2$,若其比一要小得多可取下列近似得:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2} \approx \frac{2(A_1 - A_2)}{A_2} \approx 2 \ln \frac{A_1}{A_2} = 2\Delta \quad (12)$$

此种测量的实验技术是簡單的,对很慢的振动周期与对数衰減都可以直接测量,在頻率較高时可用照相或光学方法記錄,为了要包括一个頻率范围,可以采用不同尺寸的試件,亦可采用附加質量使振动周期得以改变。

Weber^[50] 是最早利用这种方法来量度內耗的,近年来 Lethersick^[51], Ballou^[52], Schmieder^[53] 等采用簡單扭摆及振簧等自由振动的方法来测量高聚物的內耗是值得推荐的。Nielsen^[54], Künzle^[55], 時田^[56], 河合^[57] 及 Rorden^[58] 等曾采用了各种不同的复合振子来测定橡胶,纖維,及塑料的內耗,其缺点是比較复杂,且恆溫控制不易。

3. 受迫振动非共振法 此种方法的基本原理是基于对內耗定义式(2)的直接采用,对受試样品施扭轉或拉伸壓縮的交变应力,观察应力应变間之相位差,然后用 $\tan \phi = \frac{1}{Q}$ 的关系来量度試样的內耗。Lethersick^[59] 曾采用光点照象記錄的方法直接記錄其相位差,而 Wakeham^[60] 及河合^[61] 等則用观察应力与应变所組成的 Lissajous 曲綫来测量相位差。

4. 受迫振动共振法 对于一断面均匀并具有內耗的阻尼板作自橫振动时其运动的基本方

程为^[62,63]:

$$\varphi \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + E_1 K^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \eta' K^2 \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial t} = 0 \quad (13)$$

式中 φ 为材料的密度, E_1 为实数弹性模量, K 为 dx 对垂直于振动平面的軸軸的迴轉半径, η' 为法向粘滯系数。

Morio^[64] 及 Bland^[65] 等曾討論了(13)式的并在有限长度的細棒的振动求解, 并认为对于阻尼不大的綫性粘弹体在各种固定的情况之下可取下面近似:

$$\tan \phi \approx \frac{\Delta f}{f_r} \quad (14)$$

上式中 Δf 为半寬度頻率, f_r 为共振頻率, ϕ 为应变滞后于应力之相角, 故可利用量

度在受迫振动下試件的共振頻率及半寬度頻率而計算該試件的內耗。Robinson^[66], Hilferink^[67] 及岡田廉^[68] 等曾用一端固定一端自由的振簧来测定高聚物的內耗, Robinson 是采用光电的方法来测定自由端的振幅, 而岡田廉等則用靜电感应的方法測量自由端的振幅。Heyboer^[69] 曾介紹了用两端自由作橫振动的試样分別用頻率响应及混响時間法测定其內耗, Kiline^[70] 曾將此法改进为自动記錄其頻率响应曲綫及混响時間曲綫的一套完整的測試仪器。

5. 波传播法 对于小振幅的平面諧波通过粘弹体时可以发现衰减是指数的, 因而若在原点的压力幅度为 P_0 , 則传到距原点力处时, 其幅度为 $P_0 \cdot e^{-\alpha x}$, α 称衰减常数是材料內耗的一种量度。联系內耗 Q^{-1} 及衰减常数 α 的方程为^[71]

$$\alpha = \frac{\pi f}{C} \cdot \frac{1}{Q} \quad (15)$$

Silverman^[72], Noll^[73], Ballou 及 Smith^[74], Guth^[75] 等曾用过此种方法来研究纖維橡胶等高分子化合物的內耗。

波传播方法的主要缺点首先是仪器装置較共振法及自由振动法更为复杂, 其次不能保証所发生的波型一定是所需要的波型。

近来有人利用脉冲衰减法来測量內耗^[76-80], 頻率有高达每秒一兆週至 100 兆週, 測量装置更加复杂, 优点是实验設備一經裝置, 測量迅速而簡單并能給出很高的精密度。

参 考 文 献

- [1] A. Tobolsky, R. E. Powell, H. Eyring, "The Chemistry of Large Molecules", N.Y. (1943).
- [2] T. Alfrey, "Mechanical Behaviour of High Polymers", N.Y. (1948).
- [3] J. A. Saure, J. Appl. Phys. **29**, 1385 (1958).
- [4] Bennewitz K. Innere Dämpfung der Feste Körper (1947).
- [5] C. Zener, "Elasticity and Anelasticity of Metals", (1948).
- [6] A. S. Nowick, Internal Friction in Metals, Progress in Metal Physics p. 1—71 (1953).
- [7] B. C. Постников, Успехи физических наук **53**, 87 (1954).
- [8] M. Horio, J. Appl. Phys. **22**, 966 (1951).
- [9] Hoff, J. Poly. Sci. **18**, 161 (1955).
- [10] Y. Maeda, J. Poly. Sci. **18**, 87 (1955).
- [11] R. M. Davies, "Internal Friction of Solids".

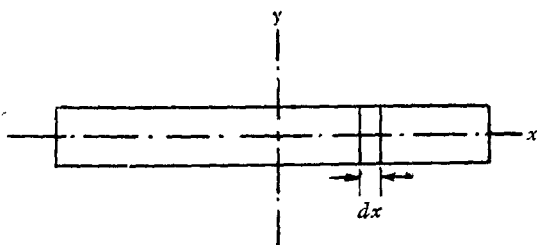


图 3

- [12] C. Zener, "Elasticity and Anelasticity of Metals", 1948, p. 60.
- [13] H. Kolsky, "Stress Wave in Solids", Oxford, (1953).
- [14] П. П. Кобек, Е. В. Кувшинский и Г. И. Гуревич Издв. АН СССР, Сер. Физ. **6**, 329 (1937).
- [15] Г. И. Гуревич, ЖТФ, **17**, 1491, (1947).
- [16] Б. А. Догадкин, Г. М. Бартенев и М. Резниковский, "В области высокомолекулярных соединений", Изд. АН СССР, 1949, стр. 227.
- [17] B. Gross, J. Appl. Phys. **18**, 212 (1947).
- [18] L. Boltzmann, Pogg. Ann. Erg., **7**, 624 (1876).
- [19] G. I. Taylor, J. Instn. Civ. Engrs. **26**, 486 (1946).
- [20] E. Volterra, Nuovo Cim. **4**, 1 (1948).
- [21] H. Kolsky, Proc. Phys. Soc. London B. **62**, 676 (1949).
- [22] Gross, Mathematical Structure of The Theories of Viscoelasticity, Hermann & Cie, Éditeure (1953).
- [23] B. Gross, J. Appl. Phys., **18**, 212 (1947).
- [24] Wiechert., Wied. Ann. Phys. **50**, 335 (1893).
- [25] Kirkwood. J. Chem. Phys. **14**, 51 (1946).
- [26] Kuhn, Künzle. & Preissmann, Ibid, **30**, 307 (1947).
- [27] Brenschede, Kolloidzshr. **104**, 1 (1943).
- [28] Kuhn. & Künzle. Ibid, **30**, 839 (1947).
- [29] Alfrey. J. Chem. Phys. **12**, 374 (1944).
- [30] K. Deutsch, E.A.W. Hoff and W. Riddish, J. Poly. Sci. **13**, 565 (1954).
- [31] W. G. Oakes and D. W. Robinson, J. Poly. Sci. **14**, 505 (1954).
- [32] 岡小天, 高分子の物性 p. 1—20 (昭和 33 年, 共立出版).
- [33] J. A. Sauer, J. Appl. Phys. **29**, 1385 (1958).
- [34] J. A. Sauer, & D. E. Kline, J. Poly. Sci. **18**, 491 (1955).
- [35] J. A. Sauer, & Kline J. Poly. Sci. **22**, 455 (1956).
- [36] Schmieder & Wolf, Kollid Z, **134** № 2/4 149 (1954).
- [37] W. G. Oakes, J. Poly. Sci., **14**, 507 (1954).
- [38] Y. Maeda, J. Poly. Sci., **18**, 87 (1955).
- [39] E.A.W. Hoff, J. Poly. Sci., **13**, 565 (1954).
- [40] E.A.W. Hoff, J. Poly. Sci., **18**, 161 (1955).
- [41] C. W. Deeley, J. Appl. Phys., **28**, 1124 (1957).
- [42] A. Charbeshy & M. Ross, Proc. Roy. Soc. (London) A. **217**, 122 (1953).
- [43] A. W. Noll, J. Appl. Phys., **19**, 753, (1948).
- [44] J. D. Ferry, J. Colloied Sci., **8**, 1 (1953).
- [45] D. W. Robinson, J. Sci. Inst. Vol. **32**, Jounary (1955).
- [46] D. E. Kiline, J. Poly. Sci., **22**, 449, (1956).
- [47] K. M. Sinnott, J. Appl. Phys. **29**, 1433 (1958).
- [48] B. Hopkinson, G. T. Williams, Proc. Roy. Soc., A. **87**, 502 (1912).
- [49] Engelter, Kolloid Z, **157**, № 2, (1958).
- [50] W. Weber, Pogg. Ann. Erg., **34**, 247, (1837).
- [51] W. Lethersich, Brit. J. Appl. Phys., **1**, 294 (1950).
- [52] J. W. Ballou, J. Appl. Phys., **20**, 493 (1949).
- [53] K. Schmieder, K. Wolf, Koll. Z., **127**, 1 (1952).
- [54] L. E. Nielsen, Rev. Sci. Inst., **22**, 690 (1951).
- [55] O. Künzle. Helv. Chim. Acta., **30**, 839 (1947).
- [56] N. Tokita, J. Poly. Sci., **20**, 515 (1956).
- [57] 藤野, 河合, 中野, 高分子化学, **12**, 487 (1955).
- [58] H. C. Rorden, A. Grieco, J. Appl. Phys., **22**, 842 (1951).
- [59] W. Lethersich, J. Sci. Instr., **27**, 303 (1950).
- [60] H. Wakeham, J. Appl. Phys., **16**, 388 (1945). **17**, 698 (1946), Text. Res. J., **21**, 1 (1951).
- [61] S. Onogi, Mem. Fac. Eng. Kyoto University, **17**, 44 (1955).
- [62] K. Sezawa, Bull. Earthquake Res. Inst. Japan, **1**, 50 (1927).
- [63] K. Suyehiro, Proc. Imp. Acad (Tokyo), **4**, 263 (1928).
- [64] M. Horio, S. Onogi, J. Appl. Phys., **22**, 977 (1951).
- [65] D. R. Bland, E. H. Lee, J. Appl. Phys., **26**, 1497 (1955).
- [66] D. W. Robinson, J. Sci. Instr., **32**, 2 (1955).
- [67] G. H. Hilferink, Rayon Revue (Holland), **10** (1956—1).
- [68] 岡田廉, 应用物理, **25**, 125 (1956).
- [69] J. Heyboer, P. Dekking, A. J. Staverman, "Proc. 2nd Intern. Congr. Rheology", p. 123 London (1954).
- [70] D. E. Killine, J. Poly. Sci., **22**, 449 (1956).
- [71] Kittel, "Ultrasonic research and the properties of matter", 1948, p. 229.
- [72] J. W. Ballou, S. Silverman, J. Acoust. Soc. Amer. **16**, 113 (1944).
- [73] A. W. Nolle, J. Appl. Phys., **19**, 753 (1948).
- [74] J. W. Ballou, J. C. Smith, J. Appl. Phys., **20**, 493 (1949).
- [75] R. S. Witte, B. A. Mrowca, E. Guth, J. Appl. Phys., **20**, 481 (1949).
- [76] W. P. Mason, H. J. McSkimin, J. Acoust. Soc. Amer., **19**, 464 (1947).
- [77] W. P. Mason, H. J. McSkimin, J. Appl. Phys., **19**, 940 (1948).
- [78] D. G. Ivey, B. A. Mrowka, E. J. Guth, J. Appl. Phys. **20**, 486 (1949).
- [79] W. P. Mason, Trans. A.S.M.E., **69**, 359 (1947).
- [80] W. Roth, J. Appl. Phys., **19**, 901 (1948).