フイルムの多軸引張衝撃特性*

土 井 浩** 坂 上 守***

Multiaxial Tensile Impact Behaviors of Films

by

Hiroshi DOI and Mamoru SAKAGAMI

(Research Laboratory, Sekisui Chemical Ind. Co., Ltd., Kyoto)

The testing methods of characterizing the impact behavior of film materials can be classified into two types; the uniaxial tensile impact tests and those multiaxial. The former are of theoretical interest on account of their analytical simplicity, but are often open to question regarding their practical use. The conventional standard tests which fall on the latter category, on the other hand, are widely used because of their good correspondence to the actual impact situations encountered, yet very few results of their analytical studies have so far been announced.

In this paper the authors report a newly designed impact test of more practical significance, and propose some approaches to the analysis of the experimental data.

The feature of this apparatus is that the films are tested by allowing a membrane-shaped specimen attached to the ram to fall on the semispherically edged mandrel, and thereby to be pierced and fractured, and that the load-deflection curves can be provided by the synchroscope through the load-cell connected to the mandrel.

In an attempt to determine the impact characteristics from the diagrams obtained, the authors set up two approximate expressions for the stresses from the different standpoints, by which the ultimate impact strengths were calculated; one deduced from the deflection pattern and the other on the analogy of the thin plate with large deflection problem in the theory of elasticity.

The static penetration tests with the same jig and the static tensile tests on an Instron type tester were also conducted to compare the applicability of the two equations above mentioned.

The results show that, for the film materials such as polyethylene and polypropylene which show large ultimate elongation, the stress equation based on the scheme provides a good basis for the analysis, while to polystyrene and cellophane which exhibit only little elongation at break, the stress equation based on the elastic membrane analogy can be applied more successfully.

(Received Dec. 2, 1967)

1 緒 言

高分子フィルムの衝撃による破損は、全破損件数の30%にも達するといわれ、用途によっては、衝撃強度は高分子フィルムの最も重要な性質の一つである。高分子フィルムの衝撃強度を測定する目的は、一つに耐衝撃性を知ることによって製造工程に反映させ、品質向上に役立たせるためであるが、フィルムが高速度のストレスを受けた場合の挙動を解明するためには、高速度のストレスや、フィルムの伸びを正確に追跡できる装置が要求される。実用との相関の高い多軸引張衝撃試験機でこのようなものは、まだ市販されていない。

参考のために現在一般的に用いられているフィルム衝撃試験機をあげる。

(1) ダート衝撃試験機 (ASTM D1709-59T)

これは半球状のアルミニウムまたはフェノール樹脂製の先端をもつ重錘を、円形に支持されたフィルム面に落下させ、フィルムが50%破損するための重錘の重量を計算により推算する方法。

(2) 落球式衝撃試験機 (JIS K6717-1958)

これは鋼球を落下させて衝撃破壊を調べるもので、フィルム用ではないが、落下距離、鋼球重量を変えることによって、フィルムにも適用できる。

(3) 振子式衝撃試験機 (ASTM D781-59T)

アイゾットやシャルピー試験機と同じ原理で、振子の先端に衝撃頭を付け、フィルムを打ち、衝撃破壊に費やされたエネルギーを直読する。

われわれの試作した試験機は、原理的には(1)のダート衝撃試験機に従うものである。

2 試作試験機

* 原稿受理 昭和42年12月2日

** 正 会 員 積水化学工業(株)研究所 京都市南区上鳥羽

*** 積水化学工業(株)研究所 京都市南区上鳥羽

フィルムの多軸引張衝撃試験時の衝撃力、衝撃強度、破断エネルギー、破断伸びなどを測定できる Fig. 1 に示すような試験機を試作した。この装置は落錘式とは逆に、試料フィルムが衝撃頭の上に落下するようになっている。衝撃頭の下にはロードセルを取り付け、衝撃時にフィルムに加えられた荷重の時間変化をシンクロスコープに記録できるようにした。これは K. Richard の装置と類似のものである。

Fig. 1. Instrumented apparatus for multiaxial tensile impact test of films.

円形状のフィルム①を装てんした試料保持部②を、マグネット③によって適当な衝撃速度に応じた高さに保持し、2本の摺動棒④に沿って自由落下させる。下方にはロードセル⑤に堅固に固定された直径 20 mm の半球状の衝撃頭⑥が置かれ、この上に試料フィルムが落下して衝撃破壊される。フィルムの実用上の衝撃速度は、3~8 m/sec といわれている。そのためには 0.5~3 m の落下距離が必要であるが、この試験機は最高落下距離が 2 m である。試料の形状は、直径約 80 mm (実荷重面直径 60 mm) である。Fig. 2 に測定装置のブロックダイアグラムを示す。ロードセルは、中央に力を受けるリン青銅製の四方たわみはりで、電気抵抗線ひずみゲージ 4 枚によるブリッジの出力を増幅して、シンクロスコープに導き測定する。現象の同期には Photo-Reley を用いた。

3 実 験

実験に用いた試料は Table I に示した 10 種類のフィルムで、その静的な一軸引張特性を Table II に掲げた。静的な測定の試験片は JIS 1 号ダンベルで、

*1 本実験に用いたロードセルの衝撃頭をも含めた固有振動数は約 1 kc である。J. W. Ballou ら²⁾や上野ら³⁾も指摘しているように、衝撃速度に比べて力の検出系の固有振動数が低い場合や増幅器の増幅特性が広帯域ではない場合、実際の力と観測される力は一致しない。われわれの場合、増幅器の増幅特性については充分広帯域であり問題はないが、検出系の固有振動数は充分高いとはいえず、この点少し問題はあるが、力の立上り部分を除いては忠実に現象を観察しうるものと考えている。

Fig. 2. Schematic diagram of the apparatus.

引張速度は 200 mm/min で行なった。測定温度は 20 °C である。

衝撃実験は室温 (約 25 °C) で行ない、その衝撃速度は 2.8 m/sec (40 cm 高さに相当) である。

実験によって得られる実際の衝撃荷重-時間曲線の例を Fig. 3 に示す。縦軸は荷重で 1.14 kg/div. であるが No. 7, No. 10 のみ 2.28 kg/div. である。時間軸 (横軸) はすべて 2 m sec/div. である。

Table I. Materials evaluated.

Sample No.	Material	Trade name, etc.	Nominal thickness (10~2mm)
1	Polyethylene	Low density	6
2	Polyethylene	S-tron S (Irradiated)	2
3	Polyvinylchloride	Orientation unplasticized	2
4	Polyvinylchloride	Plasticized	3
5	Polypropylene	Non-orientation	3
6	Polypropylene	Abisan	3 5
7	Polyethylene-terephthalate	Mylar	2.5
8	Polystyrene	Tenter method	5
9	Polyvinyliden chloride	Saran	2
10	Cellophan		3 5

Table II. Static tensile properties.

No.	Flow direction (F D)			Transvers direction (I. D)		
	Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Absorption energy (kg-cm/cm ³)	Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Absorption energy (kg-cm/cm ³)
1	1.70	770	700	1.88	880	855
2	5.87	68	276	8.13	63	262
3	7.90	48	210	5.69	25	98
4	3.62	100	330	3.40	96	276
5	2.24	640	982	4.00	600	1340
6	3.31	770	1730	2.62	680	1330
7	11.8	35	343	10.9	38	375
8	5.35	8	18	4.52	5	14
9	4.47	20	58	4.03	23	40
10	10.1	10	125	6.51	22	71

Fig. 3. Characteristic load-time oscillographs.

4. 解析方法

多軸引張衝撃試験は、実用面からはより合目的であるが、解析に関しては一軸の場合に比べて複雑である。簡単のために以下のように単純化して考える。試料フィルムが衝撃破断される状態のとき、試料に働く最大応力の方向を Fig. 4 に模式的に示す。

4・1 応力と伸張率の計算

試料が破断される場合の最大応力 σ_{Br} は Fig. 4 の A, A' 点に生ずる。したがって σ_r は次の式より近似計算することができる。すなわち

Fig. 4. Schematic diagram of multiaxial tensile impact process.

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi r_0 d \cos \alpha} \quad (1)$$

ここに d はフィルムの厚みである。したがって、フィルムと衝撃頭の接触点に対応する半径 r_0 、 σ_r と P のなす角 α が求まれば、計算によって σ_r を P より求めることができる。

次にフィルムの見掛けの平均伸長率 $\bar{\epsilon}_r$ を (2) 式で定義する。

$$\bar{\epsilon}_r = \frac{l+t-R}{R} \times 100 \quad (2)$$

さて、(1)、(2) 式中の t 、 r_0 、 l 、 α を測定できる量 R 、 ΔS で表わす。Fig. 4 を参照して

$$t^2 + a^2 = R^2 + q^2 \quad \text{i. e.} \quad t = \sqrt{R^2 + q^2 - a^2} \quad (3)$$

ここに $q = \Delta S - a$ であり、 a は衝撃頭の半径である。

$$r_0 = a \cos \alpha \quad (4)$$

$$l = a \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = a\gamma \quad (5)$$

となる。また $t \sin \alpha = R - r_0$ であるから、これと (4) 式から

$$\cos \alpha = \frac{Ra + qt}{t^2 + a^2} \quad (6)$$

が得られる。

Fig. 4 に示した破断の様子は、単純化した理想的な場合であるが、実際は多少なりとも Fig. 5 のように、ひずみが不均一に分布する。この影響は、上述の解析結果に対して、たわみ ΔS の小さい場合に、特に大きな誤差を与えるが、その誤差の程度を評価することは困難である。本実験では、応力、見掛け伸長率が (1)、(2) 式に従うものとし、(3)~(6) 式を用いて解析した。

Fig. 5. Schematic diagram of actual cases of impact process.

4・2 垂直変位 ΔS と時間 T の関係

破断時の垂直変位 ΔS_B と破断時間 T_m とは、試料フィルムの落下速度 V が一定であれば (7) 式になりたつ。

$$\Delta S_B = VT_m \quad (7)$$

しかし、落下体の速度は試料フィルムの破断仕事のために減少し、その割合は試料の吸収エネルギーが大きいものほど大である。したがって、落下体のエネルギーに対する試料の吸収エネルギーの割合が無視できない場合は、速度 V を適当に補正しなければならない。補正した平均速度 V_{avg} が、初期速度 V_i と $V_{avg} = \beta V_i$ の関係にあるとして、この補正係数 β を評価した。そ

の結果 No. 7, No. 10 の試料については $\beta=0.98$,
 その他は $\beta=1$ として充分であることが確かめられた.

4・3 吸収エネルギー U の計算

4・2 で述べた平均速度 V_{avg} を用いると, (7) 式の
 関係を用いて, Fig. 3 に示した荷重-時間曲線の面積
 からただちに試料の吸収したエネルギーを計算すること
 ができる. このようにして求めた全吸収エネルギーを試
 料の体積で割って, 単位体積あたりの平均吸収エネル
 ギを計算した.

Table III. Numerical evaluations of parameters.

ΔS (mm)	t (mm)	$\cos \alpha$	$\sigma_r d/P$ (1/mm)	l (mm)	$\bar{\epsilon}_r$ (%)
5	28.7	0.169	0.5567	1.7	1.3
10	28.3	0.333	0.1433	3.4	5.6
15	28.7	0.480	0.0692	5.0	12.4
20	30.0	0.600	0.0442	6.4	21.4
25	32.0	0.693	0.0331	7.7	32.2
30	34.6	0.764	0.0273	8.7	44.4
35	37.8	0.816	0.0239	9.5	57.5
40	41.2	0.854	0.0218	10.2	71.4
45	45.0	0.882	0.0205	10.8	85.8
50	49.0	0.904	0.0195	11.3	100.8

Fig. 6. Diagram of $\sigma_r d/P$ vs. ΔS .

Fig. 7. Diagram of $\bar{\epsilon}_r$ vs. ΔS .

4・4 $\epsilon_r \sim \Delta S$ および $\sigma_r \sim \Delta S$ の関係

解析の便宜のため, 諸式によって得られる各パラメータを Table III に掲げる. Fig. 6, 7 にはこれより得られる $\bar{\epsilon}_r \sim \Delta S$, $\sigma_r d/P = 1/2\pi r_0 \cos \alpha \sim \Delta S$ の関係をグラフで示した.

5 実験結果の解析

4で述べた方法に従って実験結果を解析した結果を Table IV に示す.

Table IV. Multiaxial tensile impact properties.

No.	ΔS (mm)	P (kg)	$\sigma_r d/P$ (1/mm) ($\times 10^{-2}$)	$\bar{\epsilon}_r$ (%)	σ_r (kg/mm ²)	U (kg-cm/cm ³)
1	19.0	3.2	4.8	18	2.6	20
2	19.6	8.7	4.6	20	20.0	128
3	14.6	7.3	7.8	12	28.4	111
4	18.5	6.2	5.0	19	10.2	91
5	35.3	3.7	2.4	58	2.9	114
6	17.4	3.5	5.3	17	5.4	44
7	14.8	15.4	7.2	12	44.4	164
8	5.6	4.2	42.0	2	35.4	7
9	11.1	4.8	12.5	7	29.9	51
10	9.6	12.7	15.5	5	56.2	58

6 考 察

6・1 静的突刺し試験

多軸引張衝撃試験の解析方法を検討するときの参考のためにインストロン型引張試験機に試作装置を取り付け, 静的突刺し試験を行なった. さきと同じような解析方法で求めた結果を Table V に示す. また荷重変位曲線の例を Fig. 8 に示す.

6・2 材料力学的検討

中心に集中荷重を受ける円板の力学の特別な場合として中心変位が試料の厚みに対して充分大きい場合を考える. Nadai や Timoshenko⁴⁾によれば, 半径 R , 厚み d の円板の中心に荷重 P が加わるとき, 円板の中

Table V. Multiaxial static tensile properties.

No.	ΔS (mm)	P (kg)	$\sigma_r d/P$ (1/mm) ($\times 10^{-2}$)	$\bar{\epsilon}_r$ (%)	σ_r (kg/mm ²)	U (kg-cm/cm ³)
1	40	3.4	2.2	72	1.3	50
2	18	5.8	5.2	18	14.9	84
3	20	8.5	4.4	21	18.8	186
4	26	6.1	3.2	35	6.5	102
5	46	3.1	2.1	89	2.1	142
6	52	3.7	1.9	107	2.0	129
7	20	17.5	4.4	21	30.7	236
8	9	4.3	18.0	5	15.4	12
9	15	3.7	7.4	12	13.5	35
10	12	8.1	10.5	8	24.2	40

Fig. 8. Characteristic load-deflection curves.

Table VI. Comparison Eq. (1) with Eq. (11).

No.	Static tensile strength				Tensile impact strength	
	Uniaxial		Multiaxial		Multiaxial	
	F. D	T. D	Eq. (1)	Eq. (11)	Eq. (1)	Eq. (11)
1	1.70	1.88	1.3	0.9	2.6	1.7
2	5.87	8.13	14.9	9.7	20.0	13.4
3	7.90	5.69	18.8	12.9	28.4	15.1
4	3.62	3.40	6.5	4.7	10.2	6.7
5	2.24	4.00	2.1	1.3	2.9	2.1
6	3.31	2.62	2.0	1.2	5.4	3.5
7	11.8	10.9	30.7	21.2	44.4	25.2
8	5.35	4.52	15.4	5.7	35.4	9.1
9	4.47	4.03	13.5	7.6	29.9	13.2
10	10.1	6.51	24.2	11.6	56.2	22.9

心のたわみ ΔS との関係は

$$\frac{\Delta S}{d} + A \left(\frac{\Delta S}{d} \right)^3 = B \frac{PR^2}{Ed^4} \quad (8)$$

で与えられる。またこのとき、円板の中心に働く半径方向の応力 σ_r は

$$\sigma_r = \alpha_r E \frac{\Delta S^2}{R^2} \quad (9)$$

である。ここに E はヤング率、 A 、 B 、 α_r は境界条件などによって決まる係数で、ここではそれぞれ 0.443, 0.217, 1.232 とした。

試料厚み d に対して、たわみ ΔS が大きい場合は、

(8)式の左辺第一項は他の項に比べて無視できるので、(10)式を得る。

$$A \left(\frac{\Delta S}{d} \right)^3 = B \frac{PR^2}{Ed^4} \quad (10)$$

(10)式を(9)式に代入すれば次式となる。

$$\sigma_r = \alpha_r B \frac{P}{A} \frac{P}{\Delta S d} = 0.605 \frac{P}{\Delta S d} \quad (11)$$

(11)式により、最大荷重 P 、最大たわみ ΔS を測定すれば、中心の応力 σ_r を求めることができる。実験結果に(11)式を適用した結果を、さきの結果と比較して Table VI に示した。

6・3 (1)式と(11)式の比較

Table VI において、(1)式より求めた強度と、(11)式によるそれとを比較すれば、全体的に後者のほうが低い値を示している。ことに(1)式の結果のうち試料 No. 7~10 などの異常な衝撃強度は大幅に減少して、(11)式では充分予想される値が得られている。これらの試料は、いずれも ΔS が小さく、直観的な(1)式の結果は、Fig. 5 に示したようなひずみの不均一分布の影響を大きく受けると思われる。したがって、 ΔS の小さい試料に対しては(11)式のほうが合理的な値を与えると考えられる。

しかし、No. 1, 5, 6 などの試料に対しては、(11)式の結果はいずれも一軸引張強度より低い値を示している。この原因は明らかに、ここで用いた材料力学的取り扱いが Fook の法則に基づいているのに反して、No. 1, 5, 6 などの試料はいずれも顕著な塑性伸張を示していることによるもので、これらに対しては(11)式が単純に適用しえないと結論できる。すなわち ΔS の大きい試料に対しては(1)式より得られた値のほうが真の値に近いと思われる。

いずれにしてもこの実験におけるフィルムの引張衝撃様式は、複雑な多軸引張衝撃と考えられ、その応力-ひずみ関係を正確に表現しうる定式化は困難である。ここで述べた二つの単純な試みは、それに対する一つのアプローチにすぎず、得られた値は物質の属性を表わすと考えより、相対的な指標であると考えねばならない。

6・4 吸収エネルギーと平均伸張率

静的な一軸および多軸引張試験の吸収エネルギーについて Table II と V を比較する。試料 No. 1, 5, 6 は一軸の場合に比べて多軸の場合の吸収エネルギーの低下の割合が著しく大きい。これらの試料は一軸引張りにおいて著しいコールドフロー（塑性伸張）を示すが、多軸引張りにおいてはそれが極端に抑制されることを示唆している。これに対して、No. 3, 7, 8, 9 の吸収エネルギーの低下は顕著ではなく、ことに No. 3 は

逆に上昇していることは興味がある。また、No. 7 は一軸引張りにおいて比較的大きな塑性伸張を示すにもかかわらず、多軸引張りの吸収エネルギーがあまり低下しないことは注目すべきである。平均伸張率についてもほぼ上と同じような傾向を示すが、No. 3 は多軸引張平均伸張率の低下が比較的大きいにもかかわらず、吸収エネルギーが増加しており、多軸引張りにおいて強度が著しく増大することを示している。

次に、Table IV と V を比較して耐衝撃性を評価する。吸収エネルギーについてみると、No. 1, 3, 6, 8 は耐衝撃性が悪く、No. 4, 5, 7 がこれに次ぐ。No. 2, 9, 10 はむしろ速い応力の場合に吸収エネルギーが増加する傾向を示し、耐衝撃性のよいことを示している。これらの平均伸張率をみると、No. 2 は衝撃の場合にも平均伸張率が低下していない。No. 9, 10 は衝撃の場合に平均伸張率が約 4 割低下しているが、吸収エネルギーは増加している。このことは衝撃の場合の強度の上昇割合が大きいことを示している。

総合的にみると、多軸引張衝撃の吸収エネルギーの絶対値は、No. 7 が最も大きく、No. 2, 3, 4, 5 がこれに次いですぐれている。No. 1 が意外に悪いことは注目すべきである。

7 結 言

高分子フィルムの衝撃特性は、温度、衝撃速度、湿度などによって異なることは言うに及ばないが、単純な一軸引張衝撃と異なり、このような複雑な多軸引張衝撃においては、落下体の形状、材質にも大きく依存する。このことは規格化されている Falling Dart Impact Test の結果からも伺える。したがって、本実験から得られた衝撃特性がただちにその物質の“衝撃強度”とは言えない。それにもかかわらず試作フィルム用衝撃試験機と、提案した解析方法によって、高分子フィルムの実際の衝撃荷重に対する抵抗性に関して有益な知見が得られると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Richard, K., *et al*, *Kunststoffe*, **49**, 671 (1959).
- 2) Ballou, J. W., and J. A. Roetling, *Tex. Res. J.*, **28**, 631 (1958).
- 3) 上野 弥, 石川 稔, *材料*, **14**, 257 (1965).
- 4) Timoshenko, S. P., and S. Woinowsky-krieger, "Theory of plates and Shells", chap. 13 (1959) McGraw-Hill Book Co.