プラスチックの引張破壊および圧縮破壊に及ぼす 変形速度と環境温度の影響*

松 居 國 夫** 清 隆 行*** 阪 本 有 右****

Effects of Strain-Rate and Temperature on Stress-Strain Behavior of Some Solid Polymers

by

Kunio MATSUI, Takayuki SEI

(Faculty of Engineering, University of Tokushima, Tokushima)

and Yūsuke SAKAMOTO

(Osaka Gas Co., Osaka)

The effect of deep freezing on the fracture behaviors of solid polymers has been investigated experimentally as a fundamental study of industrial cryogenic crushing operation.

The mechanical properties of polymethyl methacrylate (PMMA) and polyvinyl chloride (PVC) are found to be critically dependent on the temperature ($-180\sim+120^{\circ}\text{C}$) at which they are deformed, as shown by the following equations (1)~(3), but are independent of the strain-rate at which they are deformed, in the range of crosshead speed about 0.5 to 500 mm/min. The values of true breaking stress σ_{Be} , and breaking strain ε_{Be} at the ductile-brittle fracture transition temperature T_e are the material-constants.

$$\sigma_B/\sigma_{Be} = \{1 - e^{-(T_e/T)^2}\} / (1 - e^{-1}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Be}/\varepsilon_B = \{1 - e^{-(T_e/T)^3}\} / (1 - e^{-1}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{B0} = (1 - e^{-1}) \cdot \varepsilon_{Be} = 0.6321 \varepsilon_{Be} \quad (3)$$

. (Received Oct. 12, 1976)

1 緒 言

筆者らは、前報¹⁾で変形速度 4.0 mm/min 一定の下、異なる環境温度における、プラスチック材料の応力、ひずみ曲線ならびに破壊挙動についての実験結果を報告した。本報では 0.5, 4, 5, 20, 50, 120, 500 mm/min の異なる変形速度の下、 $-180\sim+120^{\circ}\text{C}$ の異なる環境温度における、プラスチックの引張応力-ひずみ曲線、圧縮応力-ひずみ曲線、真破壊応力、破壊ひずみ、縦弾性係数の変化を調べた実験結果について述べる。

プラスチックは同一品種のものでも、その成形法、可塑剤の添加量などによって著しく異なる性質を示す。また使用条件、環境条件によってその材料特性が著しく変化する。高温より低温にわたる材料特性の変化については前報¹⁾でも述べたが、変形速度によってもかなり影響されるとするのが通説である。衝撃圧縮の範囲に属する、極端に大きい変形速度の影響については別

報²⁾で述べることにし、本報では、万能材料試験機による、クロスヘッド速度変化 0.5~500 mm/min の範囲内での実験結果について述べる。

2 実験装置と実験方法

島津電子計測制御式万能材料試験機 オートグラフ IS 5000 と恒温槽を併用した。液体窒素またはドライアイス低温冷媒として用い、高温熱源としては電熱方式を用いた。温度調節範囲は $-180\sim+250^{\circ}\text{C}$ である。試験片に対する負荷は、サーボモータからクロスヘッド送りネジを介して機械的に加える。試験片の変形速度が負荷の大小にかかわらず、常に一定であるようにサーボ機構で制御を行う。

本報で主として用いた実験試料はポリメチルメタクリレート PMMA である。KYOWA GAS CHEMICAL 製 CAST ACRYLIC SHEET, P-408, 透明, PARAGLAS, KYOWALITE, $2000\times1000\times8\text{ mm}$ の一枚の平板より、ダンベル型引張試験片および柱体圧縮試験片の両者を、それぞれ負荷方向が一樣となるように切り出し、研磨布で成形仕上げした。引張試験片

* 原稿受理 昭和51年10月12日

** 正 会 員 徳島大学工学部 徳島市南常三島町

*** 徳島大学工学部 徳島市南常三島町

**** 大阪瓦斯(株)総合研究所 大阪市此花区西島町

平行部の最初の長さおよび柱体圧縮試験片の最初の高さを l_0 , 断面積をいずれも f_0 で表した。

実験開始より終了まで, 所定温度に保ち, 液体窒素気化ガスふん囲気中, またはドライアイス気化ガスふん囲気中, あるいは加熱空気ふん囲気中のそれぞれに試験片を曝露した。これら3種のふん囲気ガス性質による影響の差は, 本報実験範囲内では, ほとんど認められない。そのほかの実験装置と実験方法は前報で述べたとおりである。

3 実験結果と考察

(1) 一定変形速度, 一定温度における荷重-変形量曲線を XY レコーダに自動記録する。一方, 降伏, ネッキング現象出現時および破断時の試料断面積を測定する。両者より真応力-ひずみ曲線を作図する。

延性破壊よりぜい性破壊への遷移温度 $T_c(^{\circ}\text{K})$ における真破壊応力 $\sigma_{Bc}(\text{kg/cm}^2)$, 破壊ひずみ $\varepsilon_{Bc}(-)$ を用いて, 任意温度 $T(^{\circ}\text{K})$ における真破壊応力 σ_B , 破壊ひずみ ε_B はプラスチックの材料に無関係に次式

$$\sigma_B/\sigma_{Bc} = \{1 - e^{-(T_c/T)^2}\} / (1 - e^{-1}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Bc}/\varepsilon_B = \{1 - e^{-(T_c/T)^3}\} / (1 - e^{-1}) \quad (2)$$

で表され, また降伏ひずみ ε_y は温度に無関係に次式 $\varepsilon_y = \varepsilon_{B0} = (1 - e^{-1}) \cdot \varepsilon_{Bc} = 0.6321 \varepsilon_{Bc}$ (3) で表されると前報で仮定した。 ε_{B0} は $T=0^{\circ}\text{K}$ における破壊ひずみを表す。

$T_c/T = 0.42, 0.45, 0.50, 0.70, 1.0, \infty$ の場合についての真応力 σ の σ_{Bc} に対する比 σ/σ_{Bc} , 公称応力 σ_n の σ_{Bc} に対する比 σ_n/σ_{Bc} , ひずみ ε の ε_{Bc} に対する比 $\varepsilon/\varepsilon_{Bc}$ の関係曲線は, (1)~(3) 式を用いれば Fig. 1, Fig. 2 で表すことができる。引張りの場合は前報で示した。引張破壊荷重は低温になるほど増大する。しかし圧縮破壊荷重は, $T \geq 2T_c$ の比較的高温領域では, 低温になるほど減少し, $T \leq T_c/0.70$ の低温領域では低温になるほど増大する。 $T = T_c/0.60$ 付近

Fig. 1. True tensile stress-strain curves for some solid polymers at several temperature levels.

Fig. 2. Nominal compressive stress-strain curves for some solid polymers at several temperature levels.

の温度で最低値をとることが Fig. 2 で認められる。破壊までの所要仕事量は変形量を考慮して前報で示したとおり, 引張り, 圧縮いずれも $T \leq T_c/1.5$ で最低値をとる。

(2) 変形速度 $v(\text{mm/min})$ と真破壊応力 σ_B との関係線図を, 引張りについて Fig. 3 に, 圧縮について Fig. 4 に示す。同一のデータを用いて, 環境温度 $T(^{\circ}\text{K})$ と真破壊応力との関係線図を Fig. 5 に示す。当初, 変形速度の増加とともに材料はよりぜい性を示し, 低温にすることと変形速度の増加とはぜい性破壊に対して同様な効果をもつであろうと期待していた。Fig. 3 の引張りの場合, この期待に一致する傾向も認められるが, 逆の傾向も認められる。

Fig. 4 の圧縮の場合, 比較的高温で真破壊応力が変形速度の増加とともに減少する傾向が認められる。これは, 前掲 Fig. 2 にて, 比較的高温領域では, 公称圧縮破壊応力が温度低下とともに減少することを示したが, 真応力を示す Fig. 4 においても, このことが影響しているのかもしれない。

Fig. 5 に示すとおり, 環境温度の変化が真破壊応力

Fig. 3. Dependence of the true tensile breaking stress on the rate of tensile strain.

Fig. 4. Dependence of the true compressive breaking stress on the rate of compressive strain.

Fig. 5. Relation between true breaking stress and absolute temperature.

に及ぼす影響は著しいものであり、参考までに(1)式による曲線を図中に描いた。Fig. 3~5によれば0.5~500 mm/minの実験範囲内では、速度変化の影響は微弱である。PMMAの場合、延性破壊よりぜい性破壊への遷移温度 T_c は、圧縮時において200°Kであり、引張りの場合の250°Kよりもより低温に移る。遷移温度における真破壊応力は、圧縮時において、引張りの場合よりも、著しく大きい値を示す。図示のPM-

Fig. 6. Tensile breaking strain vs. rate of tensile strain.

Fig. 7. Compressive breaking strain vs. rate of compressive strain.

Fig. 8. Breaking strain vs. absolute temperature.

MAでは3倍であり、鋳鉄の場合の比に近い。

(3) 変形速度と破壊ひずみ ϵ_B との関係線図を、引張りについてFig. 6に、圧縮についてFig. 7に示す。同一のデータを用いて、環境温度に対する関係線図に書き直したものをFig. 8に示す。変形速度の増加とともに破壊ひずみが減少するであろうとの当初予想に一致する傾向が認められる場合があるが、それと逆の傾向を示す場合も認められる。 T_c はFig. 5で用いた値をそのまま用いている。環境温度の変化が破壊ひずみに及ぼす影響は著しいものであり、これに比べ、速度変化の影響は微弱である。参考までに前述の(2)式による曲線をFig. 8の図中に描いた。引張りの場合、(2)式中の冪指数を3から8に変更したものも描いた。

(4) 引張り、圧縮降伏点におけるひずみ ϵ_y は、変形速度の0.5~500 mm/minの変化にほとんど影響されず、前述の(3)式がほぼ成立する。縦弾性係数 E の変形速度による影響を引張りの場合Fig. 9に、圧縮の場合Fig. 10に示す。温度変化の E に及ぼす影響が著しいのに比べ、速度変化の影響は微弱である。

Fig. 9. Modulus of longitudinal elasticity vs. rate of tensile strain.

Fig. 10. Modulus of longitudinal elasticity vs. rate of compressive strain.

(5) 最大引張荷重 P_{max} (kg) に対する引張破壊荷重 P_B (kg) と, P_{max} に対する破断面積 f_B (cm²) との関係線図を, ポリカーボネート PCA の場合 Fig. 11 にナイロン 6, ナイロン 66 の場合を Fig. 12 に示す. $T_c/T \leq 1.0$ の比較的高温では, 降伏現象, ネッキング現象を認め, 荷重一定, 断面積一定, 真応力一定で破壊にいたり, 延性破壊を示す. この場合, 次式が成

$$P_B/P_{max} = P_{Bch}/P_{Bcl} = f_{Bch}/f_{Bcl} \quad (4)$$

Fig. 11. Comparison between tensile breaking strength or true cross sectional area at breaking point and ultimate tensile strength for the polycarbonate PCA at several temperature levels.

Fig. 12. Tensile breaking strength vs. ultimate tensile strength, true cross sectional area at breaking point vs. ultimate tensile strength for the nylon 6, 66 at several temperature levels.

立する. 上式の値が前報の PVC では 0.60, 本報のナイロン 6, ナイロン 66 では 0.70, PCA では 0.8 である. 材料特有の値であるとする.

延性・ぜい性破壊の遷移温度 T_c は前の 3 者では $-70+273^\circ\text{K}$, PCA では $-98+273^\circ\text{K}$ であり, 遷移温度における真破壊応力 $\sigma_{Bc} = P_{Bch}/f_{Bch} = P_{Bcl}/f_{Bcl}$ は材料特有の値を示す.

$T_c/T \leq 1.0$ の延性破壊範囲では, 低温になるほど, 真破壊応力の値は(1式)に従って増大する.

$T_c/T > 1.0$ のぜい性破壊範囲では, 低温になるほど, 真破壊応力の値が(1式)に従って増大する場合が多いことを前報で示した. しかし本報のナイロン 6, 66 では, 引張破壊荷重, 真破壊応力いずれも, 低温にて著しく減少する場合があることが認められる. このような場合, (1式)は適用しがたい. Fig. 12 は $v=4$ mm/min 一定の場合の実験結果である. 環境温度, 変形速度の両者以外の原因で, 真破壊応力が変化したものであろう. 低温で破壊荷重が(1式)で表す値よりさらに減少する場合があることは, 低温粉碎の有利性が前報で述べた場合よりもさらに著しい場合があることを示している.

4 結 言

(1) 変形速度 0.5~500 mm/min, 環境温度 $-180 \sim +120^\circ\text{C}$ の実験範囲内では, 変形速度の変化は PMMA, PVC の引張り, あるいは圧縮真破壊応力, 破壊ひずみ, 縦弾性係数, 降伏ひずみのいずれにも, ほとんど影響を及ぼさない.

環境温度の変化は, 真破壊応力, 破壊ひずみ, 縦弾

性係数のいずれにも著しい影響を及ぼす。(1), (2)式を適用して差支えない場合がある。しかし遷移温度以下の低温ぜい性破壊範囲ではナイロン 6, 66 の場合, 破壊応力が著しく減少して(1)式を適用することができない。

(2) 延性破壊よりぜい性破壊への遷移温度およびこの温度における真破壊応力, 破壊ひずみは材料による定数であり, 同一材料でも, 引張りと圧縮とでは著しく異なる値をとる場合がある。

最後に, 実験装置の一部を貸与していただいた大阪瓦斯株式会社総合研究所所長, ご協力をいただいた同

社 LNG 班, 当時卒業研究学生礎良博, 三木寿夫, 林輝, 村尾久司, 小西博, 丸子修, 佐伯敏雄, 山田康夫, 幸久良, 宮本敏治, 森保久, 田中良治, 隣良平, 松岡義孝の皆さんにお礼申し上げて結びとする。

(昭和48年10月15日 化学工学協会第7回秋季大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 松居國夫, 清 隆行, 礎 良博, 岡田信彦, 材料, **24**, 1057 (1975).
- 2) 松居國夫, 礎 良博, 清 隆行, 中井利明, 材料, **26**, 779 (1977).