509 高分子材料の衝撃圧縮応力-ひずみ ヒステリシス・ループの決定

Determination of Impact Stress-Strain Hysteresis Loops of Several Polymers in Compression

正 横山 隆 (岡山理大) ○正 中井 賢治 (岡山理大)

Takashi YOKOYAMA, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005

Kenji NAKAI, Okayama University of Science

Stress-strain hysteresis loops of several engineering plastics in compression at strain rates of nearly 600/s are determined using the standard split Hopkinson pressure bar. Four plastics or typical thermoplastics PA-6, PA-66, PC and POM are tested at room temperature. Cylindrical specimens with slenderness ratio (= height/diameter) of 0.5 are used in the Hopkinson bar tests, and those with slenderness ratio of 1.5 as specified in the ASTM Standards are used in the static tests. The low and intermediate strain-rate stress-strain hysteresis loops in compression are measured in an Instron testing machine. The effects of strain rate on Young's (or secant) modulus, 2.5% flow stress and dissipation energy (energy loss due to damping) are examined. It is demonstrated that the area within the stress-strain hysteresis loop (or dissipation energy) increases with increasing strain rate as well as strain, that is, all plastics tested exhibit intrinsic dynamic viscoelasticity and a high elastic aftereffect following complete unloading.

Key Words : Compressive Properties, Dynamic Viscoelasticity, Elastic Aftereffect, Engineering Plastics, Hopkinson Bar, Strain Rate, Stress-Strain Hysteresis Loops

1. 緒 言

本報告では、高力アルミ合金製のホプキンソン棒を使用して、4種類の代表的な工業用プラスチック (PA-6, PA-66, PC, POM) の高ひずみ速度 (最大 $\dot{\epsilon} \approx 10^3$ /s) 下での圧縮応力-ひずみヒステリシスループを測定し、その関係から動的特性 (ヤング率, 流動応力, 散逸エネルギーなど) の決定を試みた。同時に、インストロン試験機により静的圧縮応力-ひずみヒステリシスループを決定し、両者を比較することにより、ひずみ速度が圧縮特性に及ぼす影響について明らかにした。

2. 供試材と試験片形状

供試材は、押出固化成形された4種類のプラスチック PA-6, PA-66, PC, POM の丸棒材である。

衝撃試験で使用するホプキンソン棒の直径を考慮して、直径 10 mm の供試材の丸棒から機械加工により直径 $d = 9$ mm の円柱状の静的および衝撃圧縮試験片を採取した。加工後の試験片の熱処理等は、特に行っていない。静的試験片の形状寸法については、ASTM E9-89a 規格で推奨されている細長比 (長さ l / 直径 d) = 1.5~2.0 となるように長さ ($l = 13.5$ mm) を決定した。一方、衝撃試験片については、等方均質材に対して圧

縮型ホプキンソン棒試験で理論的に最適とされている細長比 ($l/d = 0.5$ となるように長さ ($l = 4.5$ mm) を決定した。静的試験と衝撃試験において円柱状試験片の適切な細長比が異なるのは、主として負荷中に試験片の両端面に作用する摩擦の影響 (摩擦係数) の程度が異なるためである。

3. ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験

衝撃圧縮試験は、標準型ホプキンソン棒装置により室温で行なった。その装置の概略図および試験手順については、紙面の都合上、省略する。本装置は、主として入出力棒 (材質: アルミニウム合金 Al2024-T4, 直径 10.1 mm, 長さ 2000 mm), 銃身 (材質: S45C, 長さ 1000 mm) および測定系からなる。試験片の低音響インピーダンス特性を考慮して、入出力棒の材質として、鋼の音響インピーダンスの 1/3 程度のアルミニウム合金 Al2024-T4 ($E = 73$ GPa, $\rho = 2770$ kg/m³) を使用した。また、打出し棒 (直径 10.1 mm, 長さ 250 mm) もアルミニウム合金 Al2024-T4 である。

4. 試験結果および考察

ナイロン 6 (PA-6) のホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験から得られた入出力棒上のひずみゲージ出力

Sweep rate: 100 μ s/div
Vertical sensitivity:
Upper trace: 500mV/div (1255 μ ε/div)
Lower trace: 500mV/div (1267 μ ε/div)

Fig. 1 Oscilloscope traces from split Hopkinson pressure bar test on PA-6 ($V = 9.6$ m/s)

Fig. 2 Time histories of applied stresses on each face of PA-6 specimen

の代表的なオシロスコープ記録例を、Fig. 1に示す。この上部トレースが、入力棒上のひずみゲージ No. 1 からの出力波形を、下部トレースが出力棒上のひずみゲージ No. 2 からの出力波形を示している。各トレースの基準時間軸より下（上）向きの出力が圧縮（引張り）に対応している。これらのひずみパルスから、ナイロン 6（PA-6）試験片の両端面に作用する動的圧縮応力の時間的変化を求めると、Fig. 2 のようになる。この図より、立上り部を除いて両応力はよく一致しており、試験片両端での動的応力のつり合い条件（ $\sigma_1(t) = \sigma_2(t)$ ）の仮定が成立することが証明された。一次元弾性波伝ば理論より、入射ひずみパルス $\varepsilon_i(t)$ 、透過ひずみパルス $\varepsilon_t(t)$ から時間 t を消去して決定したナイロン 6（PA-6）の衝撃圧縮応力-ひずみヒステリシスループを、Fig. 3 に示す。衝撃圧縮試験後、試験片には約 0.9% の残留ひずみが生じているが、数分後にはひずみ 0 に回復することに注意されたい。また、負荷

Fig. 3 Impact stress-strain and strain rate-strain hysteresis loops in compression for PA-6

Fig. 4 Static and impact stress-strain hysteresis loops in compression for PA-6

過程でのひずみ速度（破線）はひずみの増加と共に上昇するが、塑性変形が進行して流動応力が徐々に上昇するにつれて、ひずみ速度は低下する。変形の最大値（ $\varepsilon \approx 4\%$ ）でひずみ速度は 0 になり、それ以降は除荷過程に入り負になる。このように変形中の試験片内のひずみ速度は一定ではないことから、最大圧縮ひずみ（ $\varepsilon \approx 4\%$ ）に至るまでのひずみ速度-ひずみ曲線を数値積分し、その値を最大ひずみで除して負荷過程での平均ひずみ速度を定義すると、 $\dot{\varepsilon} \approx 500$ /s となった。以下に示す衝撃圧縮応力-ひずみヒステリシスループにおいて表示したひずみ速度は、このようにして算出した負荷過程での平均ひずみ速度を示している。ひずみ速度が圧縮応力-ひずみ特性に及ぼす影響を調べるために、ナイロン 6（PA-6）の静的および衝撃圧縮応力-ひずみヒステリシスループを求め、その結果を Fig. 4 に示す。実線が高ひずみ速度試験、一点鎖線が中ひずみ速度試験、破線が 2 本の低ひずみ速度試験の結果を示している。ひずみ速度の上昇と共にヤング率、流動応力および散逸エネルギー（ヒステリシスループ内の面積に相当）は大きくなっていることがわかる。