高温におけるアルミニウムの高ひずみ速度圧縮試験*

田中吉之助** 木下元洋**

High Strain Rate Compression Tests on Aluminium at High Temperatures

by

Kichinosuke TANAKA and Motohiro KINOSHITA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

The studies in metallic and non-metallic materials have made considerable progress in recent years. Still they have some problems concerning their properties which have not been made clear. In particular, it has become increasingly important to clarify the behaviour of the materials when they deform at high strain rates.

The high strain rate compression testing apparatus which is manufactured for trial, and the experimental results which are obtained by using the apparatus to clarify the effect of the temperature and the strain rate on the strength of aluminium, are described in this paper.

The principle of the experimental method is as follows. The mechanical parts consist of a projectile apparatus, a striking bar, an input bar, an output bar and a throw-off bar. The specimen is mounted between the input bar and the output bar. The impact load is provided with the striking bar which is projected from the projectile apparatus. A pulse of compression caused by impact, travels into the input bar, compresses the specimen, and is transmitted to the output bar and finally to the throw-off bar. The throw-off bar absorbs the surplus energy.

The striking bar, the input bar and the output bar are all steel bars of 17 mm diameter and 500 mm length.

The stress and strain to be produced in the specimen can be obtained from the analysis of the stress-time patterns in the input and the output bars. The patterns are drawn on the screen of the two-elements synchroscope by the strain gauges cemented at the midpoints of the input bar and the output bar.

The specimens are machined to 17 mm diameter and 17 mm length from the 99.997% purity polycrystalline drawn aluminium bar.

The velocities of the striking bar are 2.5 m/sec, 3.3 m/sec and 4.2 m/sec for this experiment. The testing temperatures are room temperature, 220°C, 290°C and 360°C. The temperature of the specimen is measured by two Chromel-Alumel thermocouples fastened to the specimen's surface.

In each impact test, a specimen is impacted repeatedly with the same velocity of the striking bar.

The following results are obtained within the range of strain rate of 50~200/sec.

(1) The compressive flow stress of aluminium becomes higher with the increase of the strain rate, and becomes lower with the elevation of the temperature.

(2) The static flow stress is more sensitive to temperature compared with the dynamic flow stress.

(3) The ratio of the compressive flow stress to cause a certain amount of strain at elevated temperature to the flow stress at room temperature is adopted as a parameter to represent the temperature sensitivity on the compressive strength. The ratio for the static load is far smaller than the ratio for the dynamic load.

(4) Comparing the dynamic flow stress with the static one at the same temperature and at the fixed strains, it is concluded that the ratio, $\sigma_{\text{dynamic}}/\sigma_{\text{static}}$, has the higher value with the rise of temperature. But the value has the tendency to approach 1 rapidly with the increase of strain.

(Received Dec. 10, 1963)

* 原稿受理 昭和38年12月10日

** 正員 京都大学工学部航空 京都市左京区吉田本町

1 緒 言

金属, 非金属材料の諸性質に関する研究は, 近年ますます発展し, また, 加工法の進歩も著しいものがあるが, 一部においてはそれら材料の性質には明白ならざる部分がある. 特に, 高ひずみ速度下における材料の挙動に関する研究は, その一部分がかなり古くから行なわれてきたにもかかわらず, 爆発加工法の実用化, あるいは飛行体の高速化等に伴って, さらに高ひずみ速度下における材料の挙動を明らかにすることは, 最近に至りきわめて重要な研究分野となって来た. ここに, このような高ひずみ速度下における応力-ひずみの関係並びに強度を求めることを目的として試作した高ひずみ速度圧縮試験機を用いて得られた高温下におけるアルミニウムの圧縮強度に関する結果を述べる.

2 試験装置および試験方法

試験片に衝撃的荷重を負荷する方法には種々の方式が考えられるが, ここに試作した高ひずみ速度圧縮試験機の概略は Fig. 1 に示す方式のものである. すなわち, 荷重装置本体としては, 棒発射装置A, 打出棒B, 入力伝達棒C, 出力伝達棒D, および出力吸収棒Eより成っており, 試験片Fは入力伝達棒Cと出力伝達棒Dとの間に置かれる. 本報告に示す結果は棒発射装置Aとしてコイルスプリングを2本用いて得られたものであるが, 火薬式のものも用意している. この棒発射装置Aのスプリングまたは火薬の力によって打出棒Bが棒発射装置から飛び出し入力伝達棒Cを撃つ. これによって入力伝達棒C内に弾性波が伝わり試験片Fに急激な力を与え, 余分のエネルギーは出力伝達棒Dに伝えられ, さらに出力吸収棒Eに伝わり, この棒がそのエネルギーを吸収して Fig. 1 において左方に飛び出す. これがその負荷方式の概略である.

入力伝達棒Cおよび出力伝達棒Dに伝えられる応力-時間波形はおのの棒の中央対称二点にはり付けられたひずみゲージGによってシンクロスコープのスクリーン上に同時にひずみ-時間波形としてかかる. 試験片内の応力およびひずみはこれらの波形から決定できる.

打出棒Bの速度測定は次の方式によった. すなわち, 入力伝達棒Cの直前にあらかじめ決めた距離だけ離して二本の細い銅線を張り, 打出棒Bがこの二本の銅線を次々に切ってゆくようにしたもので, 始めの線を切断したときにシンクロスコープのスクリーン上のX軸方向にビームをスイープさせ始め, 次の線を切断したときにそのビームの位置をY軸方向にずらせるようにしたものである. この間にX軸方向にスイープした長さより時間を決定し, 二本の線の距離とによって打出棒Bの速度を知るものである.

Fig. 1. Experimental test setup

打出棒B, 入力伝達棒C, および出力伝達棒Dは全て, 直径17mm, 長さ500mmの鋼棒である. この実験における打出棒の速度は 2.5m/sec, 3.3m/sec 並びに 4.2 m/sec である.

試験片は純度99.997%の多結晶引抜きアルミニウム棒から, 直径17mm, 長さ17mmに加工したものである. 試験片の加熱には内径25mm, 長さ60mmの筒形電気炉Hを用い, 温度は試験片表面に取り付けた二本のクロメル・アルメル熱電対によって測定される. この実験における試験温度は, 室温, 220°C, 290°C並びに360°Cである.

3 応力波形の解析

入力伝達棒, 試験片および出力伝達棒を並べ, 打出棒を入力伝達棒に撃ち当てたときに生ずる入力伝達棒および出力伝達棒内の応力波形をFig. 2 に示す. ここで, 棒の長さ, 質量, 縦弾性係数, 弾性波速度をおのの l, ρ, E, c とし, 試験片の長さ, ひずみ, 応力波

Fig. 2. Stress-time diagrams

速度をおおの a , ϵ , ϵ' とする。おおのの棒内の応力波伝播方向を次の記号で示す。すなわち、打出棒の進行方向と同方向に伝播する応力波に対して ($\rightarrow$)、その逆方向に伝播する応力波に対して ($\leftarrow$) の符号を付ける。衝撃持続時間は圧縮弾性応力波 $\overrightarrow{\sigma_A}$ が打出棒内を一往復する時間 $\frac{2l}{c}$ である。この図の上に示した波形が

入力伝達棒のひずみゲージの位置における応力波形で、図の下に示した波形が出力伝達棒のひずみゲージの位置における応力波形である。先ず、入力伝達棒について考えると、衝突してから $\frac{l}{2c}$ 時間後図中一点鎖線で示した入力伝達棒のひずみゲージの位置に応力波 $\overrightarrow{\sigma_A}$ が到達し、これから後ひずみゲージによって応力波形が観測できる。この応力波 $\overrightarrow{\sigma_A}$ は一定の値で持続し、さらに

衝突してから $\frac{l}{c}$ 時間後試験片との接触面に到達し、ここで応力波 $\overrightarrow{\sigma_A}$ は試験片に伝えられる応力波と入力伝達棒内に反射される応力波 $\overleftarrow{\sigma_R}$ とにわかれる。反射して入力伝達棒内を返ってくる応力波 $\overleftarrow{\sigma_R}$ は最初に伝えられる応力波 $\overrightarrow{\sigma_A}$ に対して逆の符号を持ち、その絶対値は時間と共に変化する。この反射した応力波 $\overleftarrow{\sigma_R}$ は衝突してから $\frac{3l}{2c}$ 時間後に再びひずみゲージの位置に到達し、これから後に観測される応力波形は $\overrightarrow{\sigma_A}$ と $\overleftarrow{\sigma_R}$ の合成波形 ($\overrightarrow{\sigma_A} - \overleftarrow{\sigma_R}$) である。試験片に伝えられた応力波は衝突してから $\frac{l}{c} + \frac{a}{c}$ 時間後に試験片の出力伝達棒との接触面に到達し、ここでまた試験片内に反射される応力波と出力伝達棒に伝えられる応力波 $\overrightarrow{\sigma_T}$ とにわかれる。

次に出力伝達棒について考えると、試験片から出力伝達棒に伝えられる応力波 $\overrightarrow{\sigma_T}$ は衝突してから $\frac{3l}{2c} + \frac{a}{c}$ 時間後に図中二点鎖線で示した出力伝達棒のひずみゲージの位置に到達し、これから後出力伝達棒における応力波形が観測できる。なお、出力伝達棒の他端が自由端であるときは、応力波 $\overrightarrow{\sigma_T}$ はその端面ですべて反射し、最初の応力波 $\overrightarrow{\sigma_T}$ と逆の符号を持つ応力波 $\overleftarrow{\sigma_T}$ として出力伝達棒内を伝播し、衝突してから $\frac{5l}{2c} + \frac{a}{c}$ 時間後に出力伝達棒のひずみゲージの位置に到達し、これからあとに観測される応力波形は応力波 $\overrightarrow{\sigma_T}$ とその反射波 $\overleftarrow{\sigma_T}$ とが合成された応力波 ($\overrightarrow{\sigma_T} - \overleftarrow{\sigma_T}$) となる。

このようにして観測したおおのの応力波形より衝撃持続中のひずみは次式のように表わされる。今、入力伝達棒と出力伝達棒のそれぞれ試験片に接触している端面の速度を v_G および v_D とすれば、ひずみ ϵ は、

$$\epsilon = \frac{1}{a} \int (v_G - v_D) dt \quad (1)$$

として与えられる。そして、それぞれの端面の速度 v_G , v_D と応力との関係は次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} v_G &= \frac{c}{E} (\overrightarrow{\sigma_A} + \overleftarrow{\sigma_R}) \\ v_D &= \frac{c}{E} \overrightarrow{\sigma_T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

であるから、(2), (3)式を(1)式に代入して²⁾

$$\epsilon = \frac{1}{\rho c a} \int (\overrightarrow{\sigma_A} + \overleftarrow{\sigma_R} - \overrightarrow{\sigma_T}) dt \quad (4)$$

また、そのひずみに対応する試験片内における応力 σ は

$$\sigma = \frac{\overrightarrow{\sigma_A} - \overleftarrow{\sigma_R} + \overrightarrow{\sigma_T}}{2} \quad (5)$$

で与えられる。

以上の式によって応力—時間曲線とひずみ—時間曲線が得られ、これから比較的容易に応力—ひずみの関係を得ることができる。

4 試験結果および考察

実験は荷重速度および温度を変えて行なった。荷重は静的荷重および打出棒速度がおおの 2.5, 3.3, 4.2 m/sec の衝撃荷重であり、以下の図においておおのの記号 S, 2, 3 および 4 として示している。試験温度は室温, 220°, 290°, および 360°C であるが、これも同様に図中においておおのの記号 R, 220, 290, および 360 として示されている。また、ひずみ ϵ は対数ひずみを用いている。

おおのの衝撃荷重においては、同一試験片に同一打出棒速度の衝撃荷重を繰り返し負荷したものである。この場合 50~200/sec の範囲のひずみ速度が得られた。

入力伝達棒および出力伝達棒内を伝わる応力波を解析することによって試験片のひずみ—時間の関係や応力—時間の関係が得られ、これから試験片の応力—ひずみ曲線が得られることは前にも述べたが、Fig. 3に打出棒速度を 4.2m/sec, 試験温度を 360°C としたときにこのような方法で得られた最初の三回の衝撃におけ

Fig. 3. Stress-strain curves analyzed (velocity of striking bar: 4.2m/sec and temperature: 360°C)

る応力—ひずみ曲線を示している。4点における最高応力はB点における塑性変形開始応力よりも高い。この相違は室温では見られないが、高温において見られるのは、次に述べるように、続けて衝撃を行なうために準備時間を必要とし、この時間中に試験片が焼鈍の影響を受けるためである。すなわち、高温度下における衝撃試験で、各衝撃ごとに室温から試験温度まで加熱するのに準備時間として約20分を必要とする。以下の図においては、おのおのの衝撃によって得た最高応力をその衝撃後に得られたひずみに対応して採っている。なお、290℃においてひずみが0.4%になるまで静的荷重を加え、その後荷重を除き15分間放置し、次いでひずみが5.8%になるまで静的荷重を加え、除荷して30分間放置し、さらに静的荷重を負荷してひずみを与えた実験を行なったが、除荷前の最高応力は、再負荷時の塑性変形開始応力よりかなり高い。これは明らかに高温中に置かれていることによる焼鈍し効果が現われているものである。

各温度におけるひずみ—衝撃回数 n 曲線を Fig. 4, 5 に示す。この図は、衝撃荷重によって生ずるひずみは温度が上昇するにつれて、あるいは打出棒速度が増加するにつれて増大するが、各温度において、平均ひずみ速度はひずみの増加に伴って次第に減少することを示している。そしてまた、この図は1回の衝撃試験における荷重持続時間が一定であるからひずみ—時間曲線でもある。

静的および衝撃圧縮試験における応力—ひずみ曲線を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。この図は試験片に同一ひずみを生ぜしめる応力が打出棒速度の増加、すなわ

Fig. 4. Strain versus n (numbers of impact) curves at room temperature and at 220°C

Fig. 5. Strain versus n (numbers of impact) curves at 290°C and at 360°C

Fig. 6. Stress-strain curves under the static and dynamic loads at room temperature and at 220°C

Fig. 7. Stress-strain curves under the static and dynamic loads at 290°C and at 360°C

ちひずみ速度の増加に伴って増加し、温度の上昇に伴って低下することを示している。

Fig. 8 は、ひずみをパラメーターとして、一定ひずみを生ぜしめる圧縮強さに及ぼす温度の影響を、試

Fig. 8. Stress versus $1/T$ (reciprocal of temperature) curves

験片に同一ひずみを生ぜしめる応力と試験絶対温度の逆数の関係によって示したものである。これらの曲線のこう配により、温度の影響はひずみ速度が増すにつれてしだいに小さくなることがわかる。

Fig. 9 は、圧縮強さに及ぼす温度の影響を α —ひずみ曲線として示したものである。 α は一定ひずみに対する高温下における応力と室温における応力の比である。その比 α は静的荷重の場合に比べて衝撃荷重の場合の方が 1 に近くなり、また、その値は衝撃荷重下ではひずみ量に依存することが大である。

Fig. 9. The ratio of the flow stress at elevated temperature to the stress at room temperature

おのおの試験温度において、一定ひずみに対する静的応力と衝撃応力の比を Fig. 10 に示す。この図は、

Fig. 10. The ratio of the dynamic flow stress to the static flow stress

その比が温度の上昇、あるいは衝撃荷重におけるひずみ速度の増加と共に増加するが、おのおの場合において、ひずみが増すにつれてその比は著しく減少することを示している。

最近、J. L. Chiddister と L.E. Malvern は同様な試験方法で、室温から 550°C の範囲において 1100°F で焼鈍したアルミニウムの圧縮強さとひずみ速度の関係を示している。

5 結 論

以上の研究結果より、アルミニウムの挙動が温度やひずみ速度によって如何に変化するかを明らかにしたが、これらをまとめてみるとおおよ次のとおりである。

- (1) アルミニウムの圧縮強さは、ひずみ速度の増加と共に高くなり、温度の上昇に伴って低くなる。
- (2) 動的応力と比較して静的応力は温度によって著しく影響される。
- (3) 圧縮強さに及ぼす温度の影響を示すパラメーターとして、試験片に一定のひずみを生ぜしめる、室温における圧縮応力と高温下における圧縮応力の比を採ったが、静的荷重におけるその比は動的荷重における比よりも小さい。
- (4) 同一温度と同一ひずみにおける動的応力と静的応力を比較すると、比 $\sigma_{\text{dynamic}}/\sigma_{\text{static}}$ は温度の上昇によってより高い値を持つことが言える。しかしその値はひずみの増加に伴って急速に 1 に近づく。

以上の結論は、ひずみ速度が 50~200/sec, ひずみが10%までの範囲で得られたものである。

なお、この試作した高ひずみ速度圧縮試験機はきわめて良好な応力波形が得られ、高ひずみ速度下における材料の挙動を明らかにするためには非常に有効であることを付記しておく。

(昭和38年10月8日, 当学会第6回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 田中吉之助, 木下元洋, 松尾俊三, 伊沢宏祐,
日本機械学会関西支部第38期定時総会講演会前

刷, p. 57 (1963).

- 2) Hauser, F.E., J.A. Simmons, and J.E. Dorn,
"Strain Rate Effect in Plastic Wave Propagation" in P.G. Shewmon and V.F. Zackey, eds.
"Response of Metals to High Velocity Deformation" Interscience Pub., New York. p. 93
(1961).
- 3) Chiddister, J.L., and L.E. Malvern, Exp. Stress
Anal., 20, 1, p. 81 (1963).

(196頁より)

ニッケル合金の熱応力負荷による耐久限について
(Über die Zeitfestigkeit von Nimonic 80A bei Beanspruchung durch Wärmespannungen) von Erhard Krempel, Materialprüf S274/83. 5, Nr 7 (1963)

Nimonic 80A の熱疲労強度について、筆者が Coffin type の熱疲労試験機を改良した試験機を用いて行なった実験結果を報告したものである。この試験機の特徴は実験中自動的に一定間隔で X-Y レコーダーによりヒステリシス・ループを描かせられることである。

試験片は標点距離20mm, 径5mmの円柱型で1080°C×8hr空冷: 700°C×16hr空冷の熱処理を施してある。加熱は直接通電方式により、冷却は放冷で温度サイクルは最低温度200°C一定で、最高温度を710~925°Cに変化させた。実験は低温側で拘束したものと、高温側で拘束したものと2つのシリーズについて行ない、両者を種々のパラメーターで比較している。

ヒステリシス・ループから得られる応力-ひずみの関係を見ると、最大応力および塑性ひずみはサイクル数と共に変化するので、破壊繰返数に対して比較する際には、第1サイクルにおけるループを選んだ。このうち周期的塑性ひずみだけが、破壊繰返数に対してプロットしたとき、全実験結果に対して一つの曲線を与え、他の変数、たとえば、最高温度、応力振幅等では、高温側拘束と低温側拘束の場合とで違った曲線を与える。

また、これらの変数がサイクル数と共に変化する様子から、あらゆる実験は2つのグループにわけられる。その境界は温度に依存し、最高温度で約830°Cのところである。この温度以下では定ひずみ疲労試験との間にある関連性がみられる。この温度以上では粒界にそっての viscous slip によって起こる他の現象が現われる。
(安江彰治)