高速引張加工されたアルミニウムおよびアルミニウム- マグネシウム合金の機械的性質*

山 田 巖** 小 寺 沢 啓 司**

Mechanical Properties of Rapidly Stretched Aluminium and Aluminium-Magnesium Alloy

by

Iwao YAMADA and Keiji KOTERAZAWA

(Himeji Institute of Technology, Himeji)

This investigation has been conducted to make clear the effect of strain rate on the internal structure and the mechanical properties of rapidly stretched aluminium and aluminium-magnesium alloy. Pure aluminium (99.99% Al) and aluminium-magnesium alloy (4.65% Mg) specimens have been used in this study. The main results obtained are as follows ;

(1) The yield strength and the tensile strength of pure aluminium in rapid tensile testing are larger than that in static tensile testing. The strain rate gives a remarkable effect on the resistance in deformation of pure aluminium.

(2) The yield strength of aluminium-magnesium alloy in rapid tensile testing is larger than that in static tensile testing, but the tensile strength in rapid tensile testing is smaller than in static tensile testing.

(3) The yield strength, the tensile strength and the hardness of rapidly pre-stretched pure aluminium are larger than those of statically pre-stretched sort. It is recognized that this fact is mainly due more to the promoted recovery by static pre-stretching at room temperature than to rapid one.

(4) An interesting observation worth mentioning in the static tensile testing of the aluminium-magnesium alloy is that after a certain strain is reached the load starts to oscillate, but in the rapid tensile testing, it is not recognized.

(5) The yield strength of rapidly pre-stretched aluminium-magnesium alloy is smaller than that of statically pre-stretched sort, and the tensile strength of the rapidly pre-stretched is almost the same as that statically pre-stretched.

(Received Jan. 11, 1966)

1 緒 言

高速変形に関する研究は多いが、そのほとんどは衝撃荷重下の応力-ひずみ線図の測定に関するもので、次の点に関する研究はきわめて少ないように思われる。

(a) 高速変形を与えた場合には静的変形の場合と異なった内部構造変化が起こるかどうか。

(b) (a)のような変化が起こるとすれば、それが高速加工材の機械的性質にどのような影響を与えるか。

強度のみならず、上述の点を追求することによって高速変形の全ぼうがより明らかにされるものと考えられ、作井博士もその必要性を強調されるとともに、研究を進められている。筆者らはこのような観点から、一連の研究を実施しており、炭素鋼およびステンレス

鋼⁴⁾についてはすでに報告し、前加工速度の大小によって内部構造に相違を生じ、それが前加工材の変形抵抗に寄与していることを明らかにした。

衝撃荷重下における純アルミニウムおよびアルミニウム合金の挙動に関する研究には、Manjoine⁵⁾、Clark⁶⁾とWood⁷⁾、Taylor⁸⁾、Austin⁹⁾、Bell¹⁰⁾、Ormerod¹¹⁾、Hardwick¹²⁾、Baron¹³⁾、河田¹⁴⁾、作井¹⁵⁾、田中¹⁶⁾、吉田¹⁷⁾らなど多数の報告があるが、大部分は衝撃荷重下の強度や伸びの測定を主としており、筆者らと同様の観点から研究されたものとしては、わずかに吉田¹⁸⁾ら、および作井¹⁹⁾らのものがあるだけのように思われる。筆者らは前述の立場から、炭素鋼やステンレス鋼⁴⁾について行なったと同様の実験を純アルミニウムおよびアルミニウム-マグネシウム合金について実施したので、その結果について述べる。

2 試料および実験方法

実験に用いた試料は純アルミニウム (99.99%) およ

* 本報を「高速引張加工材の機械的性質 (第3報)」(Mechanical Properties of Rapidly Stretched Materials, III) とする

原稿受理 昭和41年1月11日

** 正 会 員 姫路工業大学 姫路市伊伝居

びアルミニウム-マグネシウム合金 (5056) で, Table I はそれらの化学成分である. 試験片の寸法は Fig. 1 のとおりで, いずれも旋削成形後焼なましを施した.

Table I. Chemical compositions of specimens (%).

Materials	Fe	Cu	Si	Mg	Mn	Cr	Ti
Pure aluminium	0.006	0.001	0.001	0.001	/	/	/
Al-Mg alloy	0.20	0.02	0.06	4.65	0.08	0.06	0.03

Fig. 1. Specimens.

Al-Mg 合金の場合は前に報告した炭素鋼などと同じ寸法であるが, 純アルミニウムの場合 Fig. 1 (a) のような l/d の非常に小さなものを用いた. このような形状の試験片を引張試験に用いることは好ましくないが, 強度, 硬度ともに低いので, l/d を大きくすると実験装置に装着の際, 変形する心配があるからである. したがって, 純アルミニウムの場合の伸びに関しては結果があまり信用できない. 焼なましした標準試料の機械的性質は Table II のとおりである. なお, 高速

Table II. Mechanical properties.

Materials	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (D.P.N.)
Pure aluminium	2.7	5.3	/	17
Al-Mg alloy	10.5	29.2	33.0	75

引張試験装置はこれまでと同様火薬による高圧ガスを直接ピストンに加える方式のもので, 詳細については第1報³⁾を参照されたい. 実験の順序は,

(1) 標準材 (焼なまし材) の静的引張試験 S および高速引張試験 D

(2) 静的引張前加工材⑤の静的引張試験 S および高速引張試験 D

(3) 高速引張前加工材⑥の静的引張試験 S および高速引張試験 D

これらの各場合について求めた 荷重-伸び線図 から, 耐力, 引張強度, 伸びなどを求め, 前加工材についてはさらに硬度の測定とすべり帯発生の様相を顕微鏡で調べた. なお, 静的引張前加工および静的引張試験にはインストロン型の引張試験機を用いた. Fig. 2 は純ア

Fig. 2. Load-elongation diagram (Stress-strain diagram) for pure aluminium.

ルミニウムの焼なまし材について得られた荷重-伸び線図の一例であるが, このほか荷重-時間, 伸び-時間線図を求め, これらの線図とあらかじめ求めた荷重および伸びの検定線図を用いて, ひずみ速度, 耐力, 引張強度などを求めた.

3 実験結果

3・1 純アルミニウムの場合

Fig. 3 は純アルミニウムを低速 (5mm/min $\dot{\epsilon}=2.4 \times 10^{-3} \text{ 1/sec}$) および高速 (2.8m/sec $\dot{\epsilon}=100 \text{ 1/sec}$) で

Fig. 3. Stress-strain diagrams for pure aluminium in various strain rates.

引張試験した場合の応力-ひずみ線図を示す. これから, ひずみ速度が大きいほうが耐力, 引張強度が大きくなることわかる. Fig. 4 は静的⑤あるいは高速引張前加工⑥を与えた純アルミニウムをふたたび静的 S

Fig. 4. Stress-strain diagrams in static and rapid tension test for statically and rapidly stretched specimens ($\epsilon=20\%$).

あるいは高速引張試験Dした場合の応力-ひずみ線図である（ただし、前加工度はいずれも20%である）。なお、前加工材の引張試験は前加工完了後1日経過してから行なったものである。Fig. 4 から ①-D の線図は前加工線図①とほぼ連続しているが、②-D、②-S、②-S はいずれも前加工線図②または②と不連続であること、前加工速度のいかにかわらず、引き続き引張試験速度の早いほうが、 σ - ϵ 線図のレベルが高いことがわかる。なお、②-S が②と不連続であること、および ②-S の線図が標準材の S 線図（②の延長したもの）よりもやや高くなっていること、また ②-S において、いわゆる yield drop を示していることなどは大変興味深い。Fig. 5 は耐力の結果を前加工度につ

Fig. 5. Variation of yield strength with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension for pure aluminium.

いて整理したもので、同じ前加工速度のものでも、引き続き行なう引張試験速度が大きい場合のほうが高いレベルを占めていることが明らかである。また引き続き行なう引張試験速度が同一のものに注目すると、前加工度が同じであっても、静的な前加工材②よりも高速前加工材①のほうが高い値を示していることがわかる。Fig. 6 は高速あるいは静的引張前加工による引張強度の変化を示したもので、耐力の場合と同様の傾向を示

Fig. 6. Variation of tensile strength with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension for pure aluminium.

Fig. 7. Variation of hardness with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension for pure aluminium.

Fig. 8. Stress-strain diagrams for Al-Mg alloy in various strain rates.

している。Fig. 7 は高速および静的引張前加工に伴う硬度の変化を求めた結果で、これから同一前加工度でも高速引張前加工材①よりも静的引張前加工材②のほうが硬度が小さく、加工硬化が少ないことがわかる。このような前加工速度の大小による純アルミニウムの硬度の相違は、耐力、引張強度の各曲線に関して認められた相違と定性的によく対応している。

3・2 アルミニウム-マグネシウム合金の場合

Fig. 8 は低速 (5mm/min $\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-3}$ 1/sec) および高速 (2.5m/sec $\dot{\epsilon} = 50$ 1/sec) で引張試験した場合の応力-ひずみ線図を示す。降伏点はひずみ速度の大きいほうがやや高くなっているが、引張強度は前に報告した炭素鋼、不銹鋼および前述の純アルミニウムの結

Fig. 9. Variation of mechanical properties for Al-Mg alloy caused by strain rates.

果とはまったく逆にひずみ速度が大きいくほうが小さくなっている。Fig. 9 はこれらの傾向をより明らかにするため、引張速度 0.5, 100, 500mm/min で引張試験した結果もあわせてプロットしたものである。伸びはひずみ速度が大きくなるにつれて、わずかに増加する傾向にある。なお本材料は静的にひばると塑性領域において Fig. 8 のような多重降伏を示すが、高速引張試験では多重降伏はほとんど認められなかった。このことは前加工材についても同様であった。Fig. 10は

Fig. 10. Stress-strain diagrams by static and rapid tension test for statically and rapidly stretched specimen ($\epsilon=18\%$).

静的な前加工⑤あるいは高速前加工⑥を与えた Al-Mg 合金を 1 日経過後ふたたび静的 S あるいは高速引張試験 D した場合の応力-ひずみ線図である (ただし、前加工度はいずれも 18% である)。Fig. 10 から前加工速度のいかんにかかわらず、引き続く引張試験速度の早いほうが σ - ϵ 線図のレベルが低いことがわかる。これらの結果も純アルミニウムなどとはまったく逆の関係にある。Fig. 11 は耐力の結果を前加工度について整理したもので、これから静的引張前加工を与えたもののほうが、高速引張前加工を与えたものよりも高いレベルを示している。引張強度の結果は Fig. 12 に示すとおりで前加工速度にあまり関係なく、引き続く引張試験速度が早いもののほうが、遅いものよりも低いレベルを示している。しかし、⑤-D においては前加

Fig. 11. Variation of yield strength with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension for Al-Mg alloy.

Fig. 12. Variation of tensile strength with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension for Al-Mg alloy.

Fig. 13. Variation of total elongation with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension for Al-Mg alloy.

工度が大きくなると耐力と引張強度の値が同じ程度になるため、⑤-D は ⑤-S のレベルに近づく傾向にある。Fig. 13 は伸びを前加工度について整理した結果で、前加工速度のいかんにかかわらず、引き続く引張試験速度が早いもののほうが、遅いものよりも伸びが増している。前加工に伴う硬度の変化を測定したが、高速前加工材、静的な前加工材とも、前加工度が同じであ

れば、ほぼ同程度の硬度が得られた。

4 考 察

上述の実験から認められるおもな点を整理すると、純アルミニウムに関しては、

(1) 焼なまし材、前加工材とも耐力、引張強度などにひずみ速度依存性が認められ、ひずみ速度が大きいほうが高い値を示す。

(2) 引き続き行なう引張試験速度が同一の場合、静的引張前加工材に比べて、高速引張前加工材のほうが、高い耐力、引張強度を示す。また前加工度が同じであれば、高速引張前加工材の硬度のほうが静的引張前加工材よりも高い値を示す。

(3) 高速引張前加工材を引き続き静的に引張試験する場合にはいわゆる **yield drop** が認められる。

アルミニウム-マグネシウム合金に関しては、

(1) 静的引張試験においては多重降伏が明りように現われるが、高速引張試験ではほとんど認められない。

(2) Al-Mg 合金の焼なまし材では、耐力はひずみ速度の増加に伴いわずかに増加の傾向にあるが、引張強度はひずみ速度が増すと減少し、伸びはひずみ速度の増加に伴い増加する。

(3) 前加工材の耐力は、高速前加工材のほうが静的前加工材よりも低い値を示し、引張強度は引き続き引張試験速度が速いもののほうが、おそいものより低いレベルを示す。伸びは前加工速度に関係なく、引き続き引張試験速度が早いもののほうが、おそいものよりよく伸びる。また硬度は静的引張前加工材、高速引張前加工材のいずれにおいてもほぼ同程度の硬度を示す。

4・1 純アルミニウムの場合

(1)については、炭素鋼、不銹鋼についても認められたことであり、純アルミニウムについても多くの研究者によって報告されている。

(2)については、前加工速度の大小によって生じた材料の内部構造の相違に原因するのではないかと考えられる。そこで、高速引張前加工材と静的引張前加工材のすべり帯発生状態を比較するために顕微鏡観察を行なったが、高速引張前加工材のほうがすべりがやや微細である程度の相違しか認められなかった。しかし、Al に関する電子顕微鏡直接観察による報告^{21,22)}では、ひずみ速度が早いもののほうが転位密度が高く、セルの大きさが小さくて、前加工速度の大小によって微細内部構造には相違点のあることが指摘されている。

次に Fig. 4 に示したように、静的引張前加工を与えると標準材よりも強度が弱くなることから、前加工材に常温で回復が起こったのではないかと推定されるので、Fig. 14 のような実験を行なった。すなわち、同じ静的引張前加工を20%与えた試料を2本作り、一方は前加工の応力除荷と同時に引き続いて静的引張試

1-curve; Statically pre-stretched ($\epsilon=20\%$) and immediately stretched
2-curve; Statically pre-stretched ($\epsilon=20\%$) and stretched after one day at room temperature

Fig. 14. Variation of stress-strain diagram for pure aluminium with testing condition.

Fig. 15. Effect of elapsed time on the hardness for stretched pure aluminium.

験を行なった。その結果同図の(1)の線図のようになり、すでに耐力の低下が起こり、やや不連続となっている。他の1本は前加工完了後、24時間室温に放置し、ふたたび静的引張試験を行なった。それが(2)の線図で線図(1)の場合よりも耐力の低下が大きく、明らかに不連続となっている。Fig. 15 は高速①および静的引張加工材⑤を常温に放置中の硬度変化を示したもので、前加工度はいずれも9%である。高速引張前加工材に比べて、静的引張前加工材のほうが、はるかに早くから軟化が認められる。

このように前加工速度の大小によって生じた内部構造の相違や、それに起因すると思われる回復の遅速などが純アルミニウムの前加工材の耐力、引張強度、硬度に大きな影響を与えたものと考えられる。

(3)については低温で静的引張前加工したものを、それよりも高い温度で引き続き静的引張試験した場合に認められるものに対応していると考えられ、この点でも高速引張試験が低温での静的引張試験に類似していると言えよう。なお、高速引張前加工材を長時間常温に放置し、硬度の軟化がほぼ完了したものをふたたび静的引張試験を行なった結果、**yield drop** は全然認められないことがわかった。

4・2 Al-Mg 合金の場合

(1)の静的引張試験の際現われる多重降伏は、軟鋼の青熱ぜい性域での引張試験で認められるものと同様の現象であり、Al-Mg 合金においては、室温付近にこの現象が現われるもので、作井らも同様の結果を報告している。また、軟鋼の200℃での応力-ひずみ曲線に及ぼすひずみ速度の影響については、A. Nadai により報告されている。筆者らもこの結果と比較する意味で、0.5, 5, 100, 500mm/min, 2.5m/sec の速度で標準材を引張試験し、同様の整理を行なった。その結果が Fig. 16 で Nadai の結果と大変よく類似している。

Fig. 16. Stress-strain curves for Al-Mg alloy at various strain rates. Room temperature tests.

すなわち、ひずみ速度の増加に伴い、多重降伏がしだいに不明瞭となり、2.5m/sec においてはほとんど認められない。一方、降伏点はひずみ速度が増すと、わずかに増加するが、引張強度は減少する。したがって、ひずみ速度がさらに増加していくと、Nadai の結果のように引張強度がふたたび増すことも考えられる。Fig. 16 に低温(−78℃)での静的引張試験の結果も併記しているが、低温では多重降伏が全然認められず、ここでも高速引張試験が低温での静的引張試験に類似していることがわかる。

このような多重降伏はひずみ速度の大小すなわち転位の移動速度の大小と Mg 溶質原子の拡散速度のかねあいによって起こり、低速では転位の固着作用が起こりやすく、高速ではそれが起こりがたいたことが原因して、標準材、前加工材の機械的性質に大きな影響を与えるため、(2)、(3)のような結果が得られたものと考えられる。

なお本材料においても顕微鏡によりすべり帯の発生状態を比較したが、高速引張前加工材と静的引張前加工材との相違はあまり明りょうには認められなかった。

5 結 言

純アルミニウムおよびアルミニウム-マグネシウム合金について、前加工速度の大小によって材料の内部構造に相違が起こるかどうかが、それが起こるとすれば、高速引張前加工材の機械的性質にいかなる影響を与えるかについて検討した。

得られた結果を総括すると、次のようである。

純アルミニウムについては、

(1) 標準材、前加工材のいずれにおいても、耐力、引張強度は静的引張試験の場合に比較して、高速引張試験の場合のほうが高い値を示し、ひずみ速度依存性が認められた。

(2) 高速引張前加工材に比較して静的引張前加工材のほうが、耐力、引張強度、硬度は低い値を示した。これは主として、前加工速度の大小による内部構造の相違に加えて、常温における回復が高速引張前加工材よりも静的引張前加工材のほうが進行しやすいためと考えられる。

(3) 高速引張前加工材を引き続いて静的引張試験すると加工軟化現象と同様の yield drop が現われた。しかし前加工後、長時間経過したものではこれが認められなかった。

アルミニウム-マグネシウム合金については、

(1) 静的引張試験においては多重降伏が明りょうに現われたが、高速引張試験においてはほとんど認められなかった。

(2) 標準材において、降伏応力はひずみ速度の増加に伴い、わずかに増すが、引張強度は減少する。また伸びはひずみ速度の増加に伴い増していく傾向にある。

(3) 前加工材において、耐力は高速前加工材のほうが静的前加工材よりも低い値を示した。また引張強度は引き続き引張試験速度が早いもののほうが、おそいものより低いレベルを示した。伸びは前加工速度に関係なく、引き続き引張試験速度が早いもののほうがおそいものよりもよく伸びる。

(4) アルミニウム-マグネシウム合金においては常温付近に軟鋼の青熱ぜい性と同様の現象が存在するため、静的引張試験において多重降伏を示す。そして、転位の移動速度と Mg 溶質原子の拡散速度との大小によって標準材、前加工材の機械的性質に大きく影響したものと考えられる。

最後に、本実験に材料を提供し、適切な助言をいただいた住友軽金属工業(株)畑栄一研究部長および馬場義雄氏、ならびに火薬を提供していただいた日本化薬(株)仁豊野作業所、沢田継男博士のご好意に深謝する。

なお、本研究の一部は昭和40年度文部省科学研究費の援助によるもので、ここに記して感謝の意を表する。

(昭和40年11月19日 第16回塑性加工連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 作井誠太, 森 勉, 日本金属学会会報, **3**, 303, 358, 405 (1964).
- 2) 作井誠太, 森 勉, 角間孜, 日本金属学会講演概要 (第57回), p. 185 (1965).
- 3) 山田 巖, 杉田忠彰, 小寺沢啓司, 材料, **14**, 192 (1965).
- 4) 山田 巖, 小寺沢啓司, 杉田忠彰, 材料, **14**, 813 (1965).
- 5) Manjoine, M.J., and A. Nadai, Trans. ASME, **63**, A-77 (1941)
- 6) Clark, D.S., and D.S. Wood, Trans. ASM, **42**, 45 (1950).
- 7) Taylor, D.B.C., and A.Z. Tadros, Proc. Inst. Mech. Engrs., **170**, 1 039 (1956).
- 8) Austin, L., and R.F. Steidel, Proc. ASTM, **59**, 1 292, (1959).
- 9) Bell, J.F., J. Appl. Phys., **31**, 2 188 (1960).
- 10) Ormerod, H., and W.J. McG. Tegart, J. Inst. Metals, **89**, 94 (1960-61).
- 11) Hardwick, D., and W.J. McG. Tegart, J. Inst. Metals, **90**, 17 (1961-62).
- 12) Baron, H.G., Sheet Metal Ind., **39**, 257 (1962).
- 13) 河田幸三, 福井伸二, 清野次郎, 応用物理, **32**, 742 (1963).
- 14) 作井誠太, 森 勉, 金属学会誌, **26**, 545 (1962).
- 15) 作井誠太, 森 勉, 金属学会誌, **26**, 549 (1962).
- 16) 作井誠太, 森 勉, 角間孜, 金属学会誌, **28**, 439 (1964).
- 17) 作井誠太, 森 勉, 角間孜, 金属学会誌, **28**, 325 (1964).
- 18) 田中吉之助, 木下元洋, 材料, **13**, 197 (1964).
- 19) 吉田 進, 永田徳雄, 金属学会誌, **29**, 811 (1965).
- 20) 宮田忠治, 松本浩之, 雑賀喜規, 材料, **13**, 92 (1964).
- 21) 作井誠太, 角間孜, 森 勉, 金属学会誌, **29**, 665 (1965).
- 22) 鈴木 平, 井村 徹, 精密機械, **31**, 533 (1965).
- 23) Cottrell, A.H., and R.I. Stokes, Proc. Roy. Soc., **A233**, 17 (1955).
- 24) Nadai, A., "Theory of Flow and Fracture of Solid," 313 (1950) McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, and London.