# 法政大学学術機関リポジトリ

### HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-05-10

## マグネシウム合金の低温域における降温プロ セス

松野, 克大 / MATSUNO, Katsuhiro

(出版者 / Publisher) 法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要.理工学・工 学研究科編

(巻 / Volume)
55
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
5
(発行年 / Year)
2014-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00010374

#### DECLINING PROCESS TEMPERATURE OF MAGNESIUM ALLOYS AT LOW TEMPERATURE RANGE

松野克大

Katsuhiro MATSUNO 指導教員 大澤泰明

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

Recently increasing amount of light metal sheet is being involved into various structural constructions and functional components. On the other hand, there exist some processing difficulties such as less stable deformation and poor forming limit. Investigations with respect to the improvement of formability by temperature descent during working consciously in uniaxial tensile test have been reported. In this study, uniaxial tensile test using LA141 specimen is performed. On the basis of result in high temperature range and two constitutive equations, effect of declining process temperature at low temperature range is discussed. *Key words: Declining temperature process, Material Constants, Constitutive Equations, LA141* 

#### 1. 緒論

近年,自動車や航空機などの輸送機を中心にアルミニウ ム合金やマグネシウム合金などの非鉄軽量金属に対する 需要の増加や用途の拡大に期待が高まっている.しかしそ れらは一般的に板材のプレス加工分野においては難加工 性材料として分類され,鉄鋼材に比べて成形性は確実に劣 るものと認識されている.一般にプレス成形性を向上さ せるため,加工温度を上昇させた状態で加工を行うことが 考えられる.これは,一定の温度状態で行われるのが一般 的であるが,加工中に温度低下を意識的に与える降温プロ セスが成形性を向上させることが構成方程式と塑性不安 定論より導かれる(1)(2).

本研究では、LA141 (Mg-14Li-1Al) を用いて様々な 温度と速度で定常温度場、非定常温度場において単軸引張 試験を行った.高温域における、降温プロセスの実験結果 も踏まえ、低温域における降温プロセスについて、掛け算 型構成方程式と足し算型構成方程式に着目し、その定数値 の妥当性、また降温プロセスの影響について主として実験 的に考察する.

#### 2. 構成方程式

引張試験において最高荷重点までの変形が安定変形で あるとして不安定条件は,

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \tag{1}$$

一般に金属の流動応力は、ひずみ、ひずみ速度、温度、 平均結晶粒径など、様々な関数として扱うことができるが、 本実験ではひずみ、ひずみ速度、温度に着目し、掛け算型 と足し算型の2種類の構成方程式を扱う.

ひずみ,ひずみ速度を含む構成方程式を(2),(3)式に, 温度も考慮した構成方程式を(4),(5)式に示す. *έ*'<sub>0</sub>は基準 ひずみ速度である.

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n \tag{2}$$

$$\sigma = K \left\{ \varepsilon^n + m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0'} \right) \right\}$$
(3)

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n \exp\left(\frac{A}{T}\right) \tag{4}$$

$$\sigma = K \left\{ \varepsilon^n + m \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}'_0}\right) \right\} \exp\left(\frac{A}{T}\right)$$
(5)

3. 降温プロセスによる安定変形域の増加

材料定数の同定が問題となる1例として,加工中の温 度を意識的に降下させることにより一様変形能の増加が 生ずるとする大澤らの研究<sup>1),2)</sup>を取りあげる.

温度関数を考慮した式(4), (5)における K, n, m, A

は材料定数であって、設定されたひずみ、ひずみ速度、 温度の範囲内で一定値として、引張試験データから回帰 計算により算定されるものである.式(1)と式(4)を組み 合わせると、不安定ひずみ  $\varepsilon_u$ は以下のように与えられる.

$$\varepsilon_u = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \varepsilon} = n' = n + \bar{\gamma} m_1 + A \,\delta \tag{6}$$

式(1)と(5)を組み合わせると、 $\epsilon_u$ は代数方程式(5)の実根として与えられる.

$$\varepsilon_u^n - (n + A \ \delta)\varepsilon_u^{n-1} + m_2\gamma\varepsilon_u - (1 + A \ \delta)m_2\gamma = 0 \tag{7}$$

ここで,

$$n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \varepsilon}, m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}, A = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)}$$
$$\gamma = \frac{d \ln \dot{\varepsilon}}{d \varepsilon}, \bar{\gamma} = \frac{d \ln \dot{\varepsilon}}{d \ln \varepsilon}, \delta = \frac{d(1/T)}{d \ln \varepsilon}$$

は工程変数であって、それぞれ工程中のひずみ速度と温度の変化を定義する.式(6)と(7)の結果から、変形中にひずみ速度を加速するかまたは温度を意識的に低下させることにより εuを増加することがわかる.

3. 回帰計算

(1). 重回帰法

(2)式の両辺の対数をとると(8)式を得られ, Fig.1 のよう な,  $\ln \sigma$ ,  $\ln \varepsilon$ ,  $\ln \varepsilon$  を軸に持つ直行座標空間に, それぞれの 面に対し傾き n, m の平面を考えることができる. したが って, データ群( $\ln \sigma$ ,  $\ln \varepsilon$ ,  $\ln \varepsilon$ )は, 平面として近似できる. 測定データを(8)式に代入し, 最小二乗法で n, m, lnK を 算出した.

$$\ln \sigma = n \ln \varepsilon + m \ln \dot{\varepsilon} + \ln K \tag{8}$$

(2).超重回帰法

重回帰法と同様に, (9)式が得られ, n, m, A, lnKを 求める.

$$\ln \sigma = n \ln \varepsilon + m \ln \dot{\varepsilon} + A(1/T) + \ln K \tag{9}$$

測定データを(3),(5)式に代入し,最小二乗法で材料定数 を算出した.

(9)式は、直角方向に4つの軸をもつ仮想空間を表しているので、可視化するため、Zener-HollomonのパラメータZ

Z = έ e<sup>〒</sup> (A =Bm) (10) を導入すれば応力,ひずみ,Zの3変数間の議論に簡略化 できる.ここで式(6)の定数 B は式(2)の A と A=Bm の関 係がある.この場合,式(6)を式(2)と組み合わせることに より,

$$\sigma = K\varepsilon^n Z^m \tag{11}$$

となる.

計算はすべて数式処理ソフト mathematica を使用した.

#### 4. 実験

材料定数を算出するために単軸引張試験を行い,供試 材には LA141 の板厚 1mm 材を用いた(Fig.2). 試験片表 面には, ひずみ測定用の正方格子(各 2mm)をスタンプ する. チャック間距離は 60mm である. 試験条件は, クロスヘッドスピード(C.H.S.)が, 1,2, 5, 10, 20mm/min で,試験温度は 233,253,273,298(R.T.), 323,348,373, 473, 573K 変化させた. 試験方法は,以 下の二種類である.

1) 定常試験(Isothermal Test)

炉内を試験温度まで上昇させ, 試験片を挟み, 一定温 度を保持してから試験を開始する. その際, 炉前面の 窓から試験片を観察する.

2) 非定常試験(Cooling Test)

初期温度 573,373,295(R.T.)K で試験片を一定温度に 保持した状態から,試験開始と同時に温度低下を与え ながら試験を行う.

また,温度勾配を近づけるため初期温度 573K におい ては炉の開放による自然冷却, 373,295(R.T.)K にお いては炭酸ガスを炉内に流入させることにより,冷却 を行った.



Fig1  $\sigma = K\dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n$ -plane in rectangular Cartesian Coordinates having  $\ln \sigma , \ln \dot{\varepsilon}$  and  $\ln \varepsilon$  axes.



Fig.2 Geometries of specimen.

#### 5. 実験結果および考察

5-1. 公称応力-公称ひずみ線図

Fig.3,4に298K,233KにおけるC.H.S.ごとの公称応力 -公称ひずみ線図を,Fig.5に初期温度293K(R.T.)の降温 プロセスを含む非定常温度場におけるC.H.S.ごとの公称 応力-公称ひずみ線図を示す.図中の×点はあるひずみ範 囲を数分割もののそれぞれの中央の点で,材料定数算出に 用いた点である. Fig.3,4より温度低下によって剛性が増加し、延性が減 少することがわかる.これにより,最大荷重は大きくなるが, 安定変形領域が減少する.また同様に C.H.S.が早くなるに つれて最大荷重が増加するが,ひずみも減少する.



Fig.3 Nominal stress-nominal strain of Isothermal Test (T=298K,LA141).





#### 5-2. 材料定数の算出

掛け算型方程式において、定常引張試験で測定されたデ ータを Fig.1 のようにプロットし、重回帰法によって、材 料定数が傾きとなる近似平面が得られ、Fig.6.7.8 にそれら を示した.足し算型方程式を計算する際、基準ひずみ速度 は $0.01s^{-1}$ とする.m値は $\ln \sigma - \ln \epsilon$ 面における傾きを意 味しており、温度の上昇とともに傾きが増加している.同 様に、n値は $\ln \sigma - \ln \epsilon$ 面における傾きであり、温度が上昇 するにつれ、減少している.そして、全ての各温度での材 料定数において、m値は足し算型方程式よりも掛け算型方 程式の値のほうが大きくなっており,足し算型方程式より も掛け算方程式の方が,ひずみ速度変化に敏感であるとい うことを意味している.

また、rはプロットした実験値と近似面の相関性を示す 重相関係数であり、1に近いほど、相関性が強いことを表 している.掛け算型方程式の重相関係数はどの温度でも高 い相関性を示し,r≈0.99~0.83となったが、応力、ひずみ、 ひずみ速度の対数をとることで、データのばらつき自体が 緩和されることも影響していると考えられる.一方、足し 算型方程式は、掛け算型に比べ重相関係数が低くなり、温 度が上昇するにつれて、減少している.



Fig.6  $\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n$ -plane.



Fig.7  $\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n$ -plane.



Fig.8 
$$\sigma = K \varepsilon^m Z^m$$
-plane.

#### 5-3. 材料定数の評価

上記の方法で求めた材料定数を掛け算型,足し算型構成

方程式(1),(2),(3,),(4)に代入し実験値と対比する. Fig.8,9,10は298(R.T.),573,323Kにおいて定常引張試 験により算出された材料定数と実験値を用いて描かれた 公称応力-真ひずみ線図である.青線は掛け算型,赤線は 足し算型,黒線が実験値である.

定常温度場では、298,233Kではそれぞれ2種類の方程 式と実験のグラフはやや近似傾向が見られた.しかし, 323Kよりも高音域においては全てのグラフに差が生じて おり,373K以降からは足し算型方程式におけるグラフが 反転してしまっている.これはn値が負の値をとっている ことが起因していると思われる.373Kより高温のグラフ においては,算定値よりも実測値が大きい値をとった.こ の差は温度が高くなるにつれより大きな誤差を生じてし まった。573Kでは掛け算型方程式のグラフも反転してし まった.これは,式(2.68)中のn+myが負の値をとってし まう,つまりmyよりも負の値であるnの方が大きくなっ てしまったためであると思われる.

Fig.10,11,12 は非定常温度試験の応力--ひずみ線図を 描いたものである.

定常温度の高温域における結果と同様に、それぞれにおい て2種類の方程式と実験のグラフは近似傾向があまり見 られなかった.また、高温域、温度勾配が大きいほど実験 でのグラフ、両方程式のグラフにより大きな差が出てしま った.その理由として、温度勾配の大きい高温域において は算出した含む材料定数では、実際に試験を行ったときの 温度範囲を補えていなかったことが理由であると考えら れる。





#### 5-3. 降温プロセスの影響

Fig.14,15,16 は 573,373,298(R.T.)K においての定常温 度場に,非定常温度場における公称応力-公称ひずみ線図で ある.

それぞれの温度場においても一様ひずみの増加が見られ、安定変形能の増加が確認できた. 298Kでは $\varepsilon_0$ =0.34、373Kでは $\varepsilon_0$ =0.38、573Kでは $\varepsilon_0$ =0.17のひずみ増加が見られた、降温プロセスを含む非定常温度試験における一様ひずみ増分は温度場によらず温度勾配の大小に依存すると考えられる.

どの温度域においても、最大荷重点でのひずみは、定常 温度場におけるどのひずみよりも増加していることがわ かる、温度を降下させながらの変形が成形性の向上をもた らすという理論的結果が、高、低温域においても実験的に も確認できた、また一様ひずみの増分は温度域にかかわら ず、温度変化量に依存することが実験的にも確認すること が出来た.



#### 6. 結論

本実験では、構成方程式において、力、ひずみ、ひずみ速度、温度の4つの変数を考慮していたが、温度においても 区分けした $\sigma = K \epsilon^m \epsilon^n$ -面においても、Zener-Hollomonの パラメータZを使用したパラメータにおいても、高、低温 域どちらにおいても、平面として扱い可視化できることが 出来、広範囲に温度域、ひずみ速度領域で重、超回帰法が 望ましいことが分かった.

実験から得られたデータ,また足し算型・掛け算型方 程式から表した応カーひずみ線図では,低温域においてや や近似傾向が見られたが,高温域においては大きく差異が 生じてしまった.また,降温プロセスを含む非定常温度場 では低,高温域においても,近似傾向が見られなかったが 特に温度勾配の大きい実験においては大きく差が出てし まった.これらの理由として,温度勾配の大きい高温域に おいては算出した材料定数では,実際に試験を行ったとき の温度範囲を補えていなかったことが理由であると考え られる.

降温プロセスを含む非定常温度試験では、どの温度域においても、最大荷重点でのひずみは、定常温度場におけるどのひずみよりも増加していることがわかる、温度を降下させながらの変形が成形性の向上をもたらすという理論的結果が、高、低温域においても実験的にも確認できた.また一様ひずみの増分は温度域にかかわらず、温度変化量に依存することが実験的にも確認することが出来た.

より広範囲にわたるひずみ速度領域での材料定数の算出 を行う必要がある,または材料によって適した構成方程式 があることも考えられる.

高温,または広範囲にわたる温度域ではそれぞれのグラフ の差が大きいため、現在の構成方程式中に,結晶粒径など を考慮した式を組み合わせることも検討するべきである.

#### 参考文献

- 1) 後藤學: 塑性学, コロナ社, 104-109, 1982
- 吉澤宗晴・大澤泰明:ひずみ速度依存性材料の引張延性とひずみ速度変化の関係,日本機械学会,60,575, 111-117,1994
- 3)小岩井一実: AZ31 板材の温度プロセスに基づく加工性 改善,法政大学,修士論文,2006
- 4) 茂木寛:金属板材の成形性に及ぼす降温プロセスの効果,法政大学,修士論文,2007
- 5) 宮武康,ひずみ速度と温度を含む構成方程式中の材料 定数の算定,法政大学,修士論文,2011
- 6)飯島利彦、マグネシウム合金の構成方程式における材料定数の算定、法政大学、卒業論文、2012