研究報告

6061 合金の加工熱処理

金子 純一*

Thermomechanical treatment of 6061 aluminum alloy

UDC 669.715'721'782'26 : 621.771 : 621.785.7

KANEKO Junichi*

Thermomechanical treatment (TMT) which consists of preaging, cold-rolling and final aging was applied to sheet specimens of 6061 alloy, and mechanical properties of the TMT materials treated under various conditions were examined and compared with those of the T6 materials. The maximum hardness of the TMT materials in final aging is higher by 10% at the best than the two-step aged materials. It also increases more rapidly with rising the preaging temperature than in two-step aging. When final-aged to the maximum hardness at 170°C, both 0.2% proof stress and tensile strength can be increased by the amount as high as 6 kg/mm² by applying TMT. Both elongation and reduction of area in tensile tests are decreased by TMT. The energy value for impact fracture is also decreased appreciably by TMT. When such ductility as 10% elongation and 20% reduction of area is required, this type of TMT would have some practical significance in improving the mechanical properties of 6061 alloy.

(Received July 21, 1976)

1. 結 言

時効性アルミニウム合金に対する加工熱処理としては、焼入後に冷間加工してから人工時効する T 8 処理が一般に知られており、Al-Cu-Mg 系の合金にしばしば用いられ、T 6 材よりも高強度の材料を得ることができる。しかし、この T 8 処理は Al-Zn-Mg や Al-Zn-Mg-Cu 系の合金には効果がないことが知られている¹⁾。

Al-Zn-Mg-Cu 系の合金に対しては、予備時効と最終時効との間に塑性変形を加える方式の加工熱処理が強度の上昇に有効であると報告されている^{2), 3)}。この方式の加工熱処理の特長は予備時効によつて微細な GP ゾーンや析出物を形成させた上に、塑性変形を冷間または温間で加えることにより比較的均一で安定した加工硬化組織を導入し、さらに最終時効によつて望みの強度にまで時効硬化させることである。このようにして、T 6 材よりも高い強度の材料を得ることができるばかりでなく、耐応力腐食割れ性⁴⁾、疲労強度^{5), 13)}破壊靱性^{6), 7)}なども改善することが可能であると報告されている。

著者は、予備時効と最終時効との間に塑性変形を加える方式の加工熱処理を 6061 合金を含むいくつかの Al-Mg-Si 系の合金に応用したときの最終時効における時

効硬化挙動について調べたが、その結果、高純度合金に比べて工業用合金である 6061 合金ではこの加工熱処理によつてある程度の強度上昇が達成されることを示した⁸⁾。しかし、Al-Mg-Si 系の合金は押出材として用いられることが圧倒的に多い。押出材では押出加工性などに材料に要求される特性の重点がおかれることが多く、加工熱処理によつて強度の増加をはかるような要求はほとんどないばかりでなく、加工熱処理を適用すること自体も製造工程上困難である。しかし、6061 合金はこの系の合金としては高い強度を示し、しかも圧延材としての用途もあるので、加工熱処理によつて強靱化をはかることは工業的にも意義のあることと考えられる。なお、Al-Mg-Si 系合金の加工熱処理に関してはこれまでにいくつかの報告があるが^{9)~11)}、加工熱処理材の性質についてくわしく調べたものはない。加工熱処理によつて材料を強化したとき、その強化の一部が加工硬化によつて得られているので、いくぶんかの延性その他の破壊特性の低下を伴うことも考えられよう。本報告は、6061 合金の加工熱処理による強靱化の可能性を調べることを目的として、種々の条件で加工熱処理した試料について機械的性質の変化を調べたものである。

* 科学技術庁金属材料技術研究所 (東京都)。National Research Institute for Metals (Tokyo).

2. 試料および実験方法

市販の6061合金の厚さ12 mmの板材を素材とし、これを中間焼鈍を入れながら、厚さ1.2 mmまで冷間圧延したものを試料とした。試料の組成は Mg 0.81, Si 0.56, Fe 0.26, Cu 0.28 および Cr 0.20 wt% であった。加工熱処理条件としては、予備時効条件として 20, 60, 100 および 120°C で 24 hr 加熱したものと予備時効しなかつたものの5種類、次の塑性変形として約20%の圧下率で冷間圧延したものとし、最後に 170, 200 および 230°C でそれぞれ最終時効した。したがって、30通りの異なる加工熱処理および単なる二段時効処理をした試料について調べたことになる。まず、これら試料の最終時効における時効硬化曲線を求め、ついで最高硬さに達した試料についてそれぞれの機械的性質を主として引張試験により調べた。

溶体化処理としては、±5°C以内にコントロールされた電熱炉中で大気中で550°Cにおいて30 minの加熱を行ない、ただちに氷水中に焼入れた。予備時効と最終時効は±2°C以内にコントロールされたシリコンオイルの中で行なつた。塑性加工としては、冷間圧延を室温において一回のパスで20%程度の圧延率で行ない、厚さ1.2 mmから約0.96 mmにまで圧延した。実際の試料の圧延率は17~22%の間に分布していたが、同一試料をこの範囲内のいくつかの圧延率で圧延して硬さを調べてみたが、その差はほとんど認められなかつた。圧延率を20%としたのは、30%以上の圧延では強加工となつて材料の延性などの破壊特性の低下が大きくなると考えたからであり、一方10%以下では加工硬化が比較的小さくて加工熱処理の効果も7075系の合金では小さいと報告されているから

である²⁾。

Al-Mg-Si系の合金は室温ではほとんど時効硬化を示さないが、室温での予備時効が最終時効に影響を及ぼすことが知られている。したがって、加工熱処理中の中断時の試料を室温で放置することによる最終時効への何らかの影響が考えられるので、これを排除するために試料は液体窒素中に保存した。

引張試験に用いた試験片は平行部の幅4 mmで長さ15 mmのものを加工熱処理や単なる熱処理をした板材から打抜いて製作したものである。引張試験は同一条件につき3本の試験片について行ない、その平均値をもつて実験結果としての0.2%耐力、抗張力、伸びおよび断面収縮率を示した。このような板材の引張試験片においては断面収縮率を直接精度よく測定することは困難なので次式：

$$\phi = \frac{\sigma_B - \sigma_F}{\sigma_B} + \frac{\epsilon_B}{1 + \epsilon_B}$$

を用いて応力-歪曲線から計算した。ここで、 σ_B : 抗張力、 σ_F : 破断応力、 ϵ_B : 均一伸びすなわち σ_B を与えるときの伸びである。なお、試料の平均的な結晶粒度は板面上では約120 μ で、板厚方向には約40 μ であつた。

また、いくつかの加工熱処理条件をえらんで加工熱処理による動的破壊特性の変化を計装化シャルピー試験によつて調べた。この場合には厚さ12 mmの板材を加工熱処理して試料とし、塑性変形としては厚さ10 mmにまで冷間圧延した。試験片として用いたのは JIS 4号の衝撃試験片で、試験片の長手方向を圧延方向にとり、破壊の進行方向が板の横幅方向になるようにノッチを入れた。用いた試験機は容量30 kg・mのシャルピー衝撃試験機に Dynatup 社製の計測装置を取り付けたもので、付属の予

Fig. 1 Age-hardening curves in final aging at 170°C for 6061 alloy specimens pre-treated in various conditions.

Fig. 2 Age-hardening curves in final aging at 200°C for 6061 alloy specimens pre-treated in various conditions.

Fig. 3 Age-hardening curves in final aging at 230°C for 6061 alloy specimens pre-treated in various conditions.

亀裂導入装置により試験片のノッチ先端から1～3 mm程度まで疲労クラックを入れてから衝撃試験を行ない、破断に至るまでの荷重とエネルギー量の変化を二現象オシロスコープに記録させた。一条件につき7本の試験片を用い、その平均値によって試験結果を示した。

3. 実験結果と考察

3.1 加工熱処理材の時効硬化挙動

加工熱処理材の170, 200および230°Cにおける最終時効での硬化曲線をFig. 1～3に示す。図中には塑性変形

を加えない、いわゆる二段時効材についての時効硬化曲線も比較のために示されている。加工熱処理材では、加工硬化によって最終時効処理の開始時点での硬さは高い値を示しているが、それに反してその後の時効硬化量はかなり減少しているのがわかる。たとえば、120°Cで24 hrの予備時効後に冷間圧延した試料では、図に示されるように、いずれの最終時効温度においてもわずかな硬化しか示していない。一方、最高硬さに達するまでの時効時間は予備時効条件に関係なく二段時効の場合よりもほぼ一桁ばかり加工熱処理材では短時間側にきてい

る。

Al-Mg-Si 系合金の二段時効において、0.9%Mg₂Si 以上では室温の予備時効は最終時効での硬化量を減少させることが知られている¹²⁾。しかし、本実験に用いた 6061 合金は約 1.3%もの Mg₂Si を含有しているにもかかわらず、室温の予備時効が最終時効での硬化をほとんど減少させていない。この点に関しては、Al-Mg₂Si 高純度合金と工業用 6061 合金との金属組織的な差異に基づくものと解釈される⁸⁾。すなわち、6061 合金では結晶粒界や遷移金属の化合物粒子などの金属組織的な不均一性が高純度合金と比べてはるかに多量に存在しており、これらが不均一析出のためのサイトとして働くであろう。不均一析出粒子の周辺には PFZ が形成され、その部分は時効硬化に寄与しないことになる。PFZ の幅は一般に二段時効することによつて減少するから^{14), 15)}、このような金属組織的な不均一性は二段時効効果をプラスの方向に変化させる作用を及ぼすものと考えられる。

最終時効における最高硬さの値を、予備時効と最終時効の間に塑性変形を加えたものと加えなかつたものを同一の予備時効条件で比較させながら、予備時効条件によつてどのように変化するかを示したのが Fig. 4 である。この図から、予備時効を行なわない場合は、170 および 200℃での最終時効において塑性変形を加えることの効果が全然みられない。すなわち、最終時効中に多少の加工硬化の回復が起こっているものとは考えられるが、加工硬化による硬さの増加と塑性変形によるその後の時効硬化量の低下とがちょうど打消し合っていることになる。一方、予備時効によつてあらかじめ G P ゾーンを形成させてから塑性変形を加えた場合は最高硬さの増加がみられる。予備時効温度を高くしてゾーンを発達させる

ほど、加工熱処理の効果が大きくなつており、二段時効材での最高硬さの上昇をいくぶん上廻っている。したがつて、6061 合金においては塑性変形前の予備時効は、最終時効での最高硬さを増加させる効果がいずれの条件においても発揮されるばかりでなく、二段時効におけるその効果を上廻っていることがわかる。

なお、120℃で 24 hr の予備時効後に 20%の冷間圧延を行なうと、最終時効における時効硬化はほとんど起こらなくなつており、そのため最高硬さの最終時効温度による変化はみかけ上ほとんどなくなつていく。したがつて、予備時効処理の時間を 24 hr に限れば、予備時効温度を 120℃以上にさらに上昇させることは、最終時効において開始時点の硬さが最高値でそれ以降単に減少を示すだけになると考えられ、本実験のような予備時効→塑性変形→最終時効から成る加工熱処理によつて強度上昇をはかるための条件範囲の対象外になる。

3.2 引張り特性

それぞれの加工熱処理条件のもとに最高硬さまで最終時効処理したものについて引張り試験を行なつたが、0.2%耐力と抗張力の測定値を Fig. 5 に、伸びおよび断面収縮率の結果を Fig. 6 に示した。耐力と抗張力は先に示した硬さについての実験結果 (Fig. 4) とほぼ同じ変化を示している。170℃での最終時効では、二段時効材で耐力は 30 kg/mm² 前後であつたものが、120℃で予備時効後に冷間圧延してから最終時効することにより 36 kg/mm² にまで増加しており、抗張力も 36 kg/mm² より 40 kg/mm² と上昇している。一般に 6061 合金の工業的な時効処理条件としては、予備時効は行なわずに焼入後に室温で放置してから最終時効を行なう方式がとられている。そのような場合と本方式の加工熱処理による場合とでは、耐力

Fig. 4 The values of the maximum hardness in final aging plotted against preaging temperature for TMT and two-step aged specimens.

Fig. 5 0.2% proof stress and tensile strength plotted against preaging temperature for TMT and two-step aged specimens.

Fig. 6 Elongation and reduction of area plotted against preaging temperature for TMT and two-step aged specimens which were final-aged to the maximum hardness.

および抗張力の増加は170°C最終時効では5~6 kg/mm²以上、200°C最終時効では8 kg/mm²程度になる。しかし、それらの強度上昇の一部は単に二段時効処理を行なうことによつて達せられる。

伸びは、加工熱処理材では約10%であり、二段時効材では15%付近であるので加工熱処理によりかなり低下している。一方、断面収縮率については、予備時効を行わない場合と室温で24 hrした場合は加工熱処理材の方がむしろ高い値を示しているが、予備時効温度が高くなるにつれて加工熱処理材の断面収縮率の低下が大きい。しかし、断面収縮率に関しては、二段時効材と加工熱処理材とでは高々25から20%への低下であり、加工の影響は伸びについてよりは小さい。また、Fig. 6に示されているように、加工熱処理材では予備時効と最終時効の加

熱温度に関係なく9~10%付近の伸びをすべて示している。一方、二段時効材では予備時効温度の上昇に伴つて伸びがいくぶん増加する傾向をいずれの最終時効温度においても示しており、6061合金においては二段時効によつて強度の上昇が得られる際に伸びも増加することになる。断面収縮率に関しては、二段時効材と加工熱処理材の差は伸びについてほど顕著でないが、両者とも予備時効温度の上昇とともに減少を示し、とくに加工熱処理材ではその低下が著しい。なお、引張破断面を走査電顕により観察した結果、二段時効材と加工熱処理材とでは本質的な差異は認められなかった。

以上の結果から、加工熱処理によつて強さの上昇が得られるような処理条件のもとでは、一般に伸びや断面収縮率の低下は避けられないことがわかる。しかし、伸び

で10%，断面収縮率で20%程度でも延性が十分あると考えられるような用途に対しては，二段時効材に比べても耐力で20%程度と抗張力で10%以上の上昇をはかることが可能であることから，この方式の加工熱処理は6061合金に対して工業的にも有効であると考えられる。

3.3 動的破壊特性

加工熱処理材と二段時効材についていくつかの処理条件を選んで，試料の動的破壊特性を計装化シャルピー衝撃試験により調べ，加工熱処理材の評価を試みた。

Photo 1 は二段時効材とそれに対応する加工熱処理材についての衝撃試験における荷重とエネルギー量の時間変化の記録の一例を示したものである。加工熱処理材の方が高い最大荷重を示しているが，その後の荷重の低下が急激で，その結果二段時効材よりもエネルギー量として低い値を示している。このような結果の平均値をいくつかの処理条件について示したのが **Table 1** である。ここに用いた試料はVノッチ試験片にくり返し曲げ疲労試験機にかけてプレクラックを導入したもので，破断面の面積はプレクラックの部分衝撃試験の後，実測してそれを差引いて求めたものである。この結果より，加工熱処理材では前述の静的強度は対応して衝撃試験においても最大荷重は二段時効材よりも高い値を示している。しかし，二段時効材では予備時効温度の上昇とともに最大荷重が減少する傾向を示すなど，必ずしも静的な強度とよい対応を示していない。一方，破断面の単位面積当りのエネルギー量に関しては，加工熱処理材は二段時効材と比べてかなり低い値を示している。また，加工熱処理材でも二段時効材でも，予備時効を行なうことによりエネルギー量は増加している。したがって，二段時効によって静的強度の増加をはかることにより衝撃破断のためのエネルギー量も増加することになる。このことは先に示したように，二段時効による静的強度の上昇に伴い，伸びもむしろ増加していることによく対応していると考えられる。一方，加工熱処理における塑性変形による加工硬化は破断エネルギー量の低下をもたらすことがわかる。

(a)

(b)

Photo 1 Oscilloscope recordings in precracked Charpy impact test. (a) specimen preaged at 100°C for 24 hr and final-aged at 170°C for 5 hr, (b) specimen preaged at 100°C for 24 hr, cold-rolled and final-aged at 170°C for 2 hr.

Photo 2 および **3** は加工熱処理材と二段時効材の衝撃破断面の形状を比較させながら示したもので，いずれもプレクラックからかなり離れた断面の中央付近の破面である。Photo 3 に示した加工熱処理材でもディンプルパターンを示しているが，各ディンプルは小さく未発達のように観察されると同時に，高倍率の Photo 3 (b) に示されるようにディンプルの存在しない領域がところどころにみられ，インターナルネッキングをあまり起こさない

Table 1 Impact fracture properties of 6061 alloy treated in different thermal and mechanical conditions.

specimen			energy/f.a.*	max. load/f.a.*
preaging	cold-rolling	final aging	kg-m/mm ²	kg/mm ²
—	—	170°C/800 min	3.91	12.1
60°C/24 hr	—	170°C/800 min	4.26	11.3
100°C/24 hr	—	170°C/800 min	5.12	10.8
—	20%	170°C/300 min	2.62	11.0
100°C/24 hr	20%	170°C/120 min	3.30	12.7

* fractured area

Photo 2 Fractograph in precracked Charpy impact testing of a two-step aged specimen, preaged at 60 °C for 24 hr and final-aged at 170 °C for 5 hr.

(a)

(b)

Photo 3 Fractographs in precracked Charpy impact testing of a TMT specimen, preaged at 100 °C for 24 hr, cold-rolled and final-aged at 170 °C for 2 hr, (a) lower magnification and (b) higher magnification.

まま破壊が進行すると思われる。これに対して Photo 2 の二段時効材では完全に発達したディンプルパターンを示しており、このような動的な破壊条件においてもボイドの形成とインターナルネッキング後のそれらの合体による完全な延性破壊を起こしていることが認められる。また、二段時効材では断面近くで試料がかなり

の曲げ変形を起こしてから破断することが衝撃試験後の試料の形状から明らかであった。このことは、Photo 1 に示したように、衝撃試験での荷重開始から終了までに要した時間が二段時効材では加工熱処理材の約 2 倍近く長くなっていることと対応している。

以上の結果から、このような動的な破壊条件のもとでは、加工熱処理材は二段時効材に比べてかなり低い破断エネルギー量で破壊が進行することが示される。6061 合金の加工熱処理は静的な破壊特性をある程度低下させることを先に示したが、それ以上に動的破壊特性の低下が大きいことがわかった。

4. 結 論

(1) 予備時効と最終時効との間に塑性変形を加える方式の加工熱処理を 6061 合金に適用した結果、最終時効における最高硬さは二段時効材より 10% 程度までの上昇が得られ、最高硬さは加工を加えることにより短時間側にあらわれた。また、加工熱処理材の最高硬さは予備時効温度の上昇によつて、二段時効材についてよりも急激に増加した。

(2) 加工熱処理材は 120 °C までの範囲では予備時効温度が高くなるほど高い強度を示した。170 °C で最終時効を行なった場合、T 6 材と比較して 0.2% 耐力で 6 kg/mm²、抗張力でも 6 kg/mm² 程度の強度上昇が得られた。また、最終時効温度の上昇とともに、強さの絶対値は減少したが、二段時効材との比較においての強度増加量はさらに大きくなった。

(3) 加工熱処理材では破壊特性は一般に低下した。加工熱処理材では、引張試験における伸びは一般に 10% 近くまで低下した。また断面収縮率は予備時効温度の上昇とともに低下する傾向を示した。これに対して、シャルピー衝撃試験における破断のためのエネルギー量は著しい低下を示した。

(4) 伸びで 10%、断面収縮率で 20% 程度の延性で十分であると考えられるような用途に対しては、二段時効材に比べて耐力で 20% 程度、抗張力で 10% 以上の増加が得られることから、この方式の加工熱処理に 6061 合金に対して工業的にも有効であると考えられる。

おわりに、本実験に協力された工学院大学学生の前田 穰、額川 恭一の両氏に感謝の意を表します。また、本論文の図面を作製された林雅士氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) K. R. Van Horn, ed.: Aluminum, vol. 1, ASM (1967), 151.
- 2) M. Conserva, M. Buratti, E. Di Russo and F. Gatto: Mater. Sci. Eng., **11** (1973), 103.

- 3) E. Di Russo, M. Conserva, F. Gatto and H. Marcus: *Met. Trans.*, **4** (1973), 1133.
- 4) N. E. Paton and A. W. Sommer: *Proc. 3rd Interntl. Conf. Strength of Metals and Alloys*, (1973), 101.
- 5) F. Ostermann: *Met. Trans.* **2** (1971), 2897.
- 6) W. H. Reimann and A. W. Brisbane: *Eng., Frac. Mech.*, **5** (1973), 67.
- 7) D. S. Thompson, S. A. Levy and D. K. Benson: *Proc. 3rd Interntl. Conf. Strength of Metals and Alloys*, (1973), 119.
- 8) 金子: to be published.
- 9) 五弓, 橋本: *軽金属*, **17** (1967), 282.
- 10) J. C. Benedyk: *Light Metal Age*, April, (1968), 4.
- 11) M. M. Shteyunberg et al: *Light Metal Age*, August (1974), 13.
- 12) H. Zoller and A. Ried: *Aluminium*, **41** (1965), 626.
- 13) F. Mehrpay, D. L. Kudsine and W. L. Hawarth: *Met. Trans.*, **7A** (1976), 761.
- 14) P. N. T. Unwin, G. W. Lorimer and R. B. Nicholson: *Acta Met.*, **17** (1969) 1363.
- 15) M. H. Jacobs and P. W. Pashley: *The Mechanisms of Phase Transformation in Crystalline Solid*, Inst. of Metals, London, (1969) 43.