212 7475系高力Al合金の変形機構と強度に及ぼす時効の影響

Influence of Artificial Aging on Deformation Mechanism and Strength in 7475 High Strength Alloys

○ 学 松下 大輔 (崇城大院) 正 小野 長門 (崇城大)
正 三浦 精 (崇城大)

Daisuke MATSUSHITA, Nagato ONO and Sei MIURA
Sojo University, 4-22-1, Ikeda, Kumamoto

Key words: 7475 High Strength Alloy, Artificial Aging, Precipitate

1. 緒 言

車両・航空機材料として実用化されている 7000 系 Al-Zn-Mg-Cu 合金は、溶体化処理後の人工時効 T6 処理による析出強化で非常に高い強度が得られることが一般に知られている。しかし、この合金系の降伏挙動における強化機構の定量的解釈は現在も未解決のままといえ、さらに系統的な実験事実の蓄積が必要である。

本研究では、溶体化処理した 7475 合金を用いて 393K で 86.4ks の T6 時効とその後 433K で 108ks の過時効処理を施して 2 種類の試料を作製し、293K で引張試験とビッカース硬さ試験をした。この結果から、まず各時効試料の Hall-Petch 関係の妥当性やその傾きと切片応力について検討した。さらに、歪量増加に伴う表面結晶粒でのすべり様相の観察、歪速度急変試験と導電率の測定から析出強化における転位の律速機構についても追求した。

2. 実験方法

本研究では、スカイアルミニウム(株)から提供された Table 1 に示す 7475 合金圧延板を用いて、まず平行部寸法が 1mm×5mm×50mm の板状試験片を切り出した。まず、753K で 1.1ks および 7.2ks の溶体化処理で、平均粒径 27~283μm の範囲にある試料を作製した。次に 393K で 86.4ks の T6 時効処理とその後 433K で 108ks の過時効処理を行い、また、導電率の測定用の試料では過時効を 3.6ks から 216ks 行った。引張試験とビッカース硬さ試験は、293K で行い、歪速度 $1.7 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ で行った。すべり様相の観察は、粒界が確認できる程度に試料を電解研磨した後に塑性歪 2.0%程度まで引張り、微分干渉顕微鏡を用いて行った。また、293K の歪速度急変試験での歪速度の比は 1:10 とした。

Table 1 Chemical compositions of 7475 alloys (mass%).

No.	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
1	5.35	2.18	1.45	0.05	0.04	Tr.	Tr.	Tr.	Bal.
2	5.39	2.19	1.46	0.05	0.04	Tr.	0.05	Tr.	Bal.
3	5.39	2.21	1.46	0.06	0.04	Tr.	Tr.	Tr.	Bal.

3. 実験結果および考察

3.1 Hall-Petch 関係の検討

多結晶金属の降伏応力と平均粒径の間には、軟鋼の降伏応力に関して提唱された Hall-Petch 関係¹⁾が成立すると考えら

れている。Fig 1 は、過時効試料の 293K、0.1~1.0%歪量での変形応力と $d^{-1/2}$ 乗した平均粒径との関係を示したものである。図中のプロット点は 3 回測定したときの平均値を示す。変形応力と粒径はすべての歪量でほぼ直線関係が認められ、Hall-Petch 関係を満足する。各直線の傾き k_p 値には歪量依存性が認められないが、切片応力 σ_0 値は歪増加に伴って加工硬化により大きくなる。

Fig 1 Relation between the flow stress and the inverse square root of the average grain size in overaged specimens.

Fig 2 Relation between the 0.2% proof stress and the inverse square root of the average grain size in as-quenched, T6 aged and overaged specimens.

溶体化および2種類の時効試料における293Kでの0.2%耐力と $1/2$ 乗した平均粒径との関係をまとめてFig2に示す。また、Table2はFig2での各直線から求めた k_y 値と σ_0 値を表したものである。溶体化試料の k_y 値はT6時効でわずかに増加するが³⁾、過時効状態では逆に低下することがわかる。これは、Al母相中に析出する準安定相の影響で k_y 値は小さくなると考えられる。また、ピッカース硬さ試験でも同様の結果が得られた。

Table 2 The k_y and σ_0 values in as-quenched, T6 aged and overaged specimens.

Specimens	k_y (MPa $\cdot$ mm ^{-1/2})	σ_0 (MPa)
As-quenched	9.6	98
T6 aged	10.6	397
Overaged	8.3	358

3.2 析出強化における転位の律速機構の検討

析出粒子と転位の相互作用については転位が析出粒子を切断する機構と迂回する機構に大別される⁴⁾。7475合金の時効試料での律速機構については、析出粒子が小さい範囲では転位の切断機構が支配的であり、析出粒子が大きく成長するとOrowan機構が変形を律速すると報告されている³⁾⁵⁾。本研究では、すべり様相を観察してこの機構を検討した。

Fig.3は、T6時効および過時効試料での粒内すべり帯の特徴を表す顕微鏡写真である。T6時効試料では塑性歪 $\epsilon_p=0.2\%$ で粗大結晶粒内にすべり帯が出現し始めるが、過時効試料では $\epsilon_p=0.4\%$ の変形ですべり帯が現れる。歪増加に伴ってT6時効試料での粒内すべり帯は太くて直線的な形態となるが、過時効試料ではFig.3のように波状のすべり帯が出現する。この結果、時効の進行で析出粒子が大きく成長すると、交差すべりを生ずるものと考えられる。このことから、過時効試料の変形は主にOrowan機構によるものと思われる。

Fig.3 Differential interferometry micrographs of slipped surface grains.
($\epsilon_p=1.4\%$, $\sigma_E=412$ MPa).

次に、293Kの歪速度急変試験での変形応力と歪速度の関係より求めた活性化体積⁶⁾から、同様に変形の律速機構を検討する。この活性化体積 v^* は次の式で表される。

$$v^* = b d^* l_p$$

ここで、 b はバーガスベクトル、 d^* は活性化距離、 l_p は平均粒子間距離である。ここでX線小角散乱法で求めた長村ら⁹⁾の結果と比較するために、 Z を粒子断面の平均半径とすると $d^* = 2Z$ になると仮定し、歪速度急変試験の結果と長村らの結果を比較する。Table3は、T6時効および過時効試料の活性化体積 v^* と Zl_p の値を比較したものである。本実験で求めたT6時効試料の Zl_p の平均値は、長村らの値におよそ矛盾しない。また、過時効試料の v^* 値は、T6時効試料に比べて大きくなる。これは、過時効試料では析出粒子の成長で粒子間距離 l_p が大きくなることに起因すると考えられる。以上の結果から、T6時効後の過時効処理した7475合金の降伏変形挙動は、主に転位が析出粒子を迂回するOrowan機構が支配すると考えられる。

Table 4 Comparison of the activation volumes for T6 aged and overaged specimens.

Specimen		Activation volume v^* (nm ³)	$\bar{\mu} l_p$ (nm ²)
T6 aged	This study	6.44	11.1
	Osamura et al.	—	15.4
Overaged		7.77	13.4

4. 結 言

- (1) 過時効試料の293K、0.1~1.0%歪量での変形応力と粒径の間には、すべてHall-Petch関係が成立する。この直線の傾き k_y 値には歪量依存性が認められないが、切片応力 σ_0 値は歪増加で加工硬化により大きくなる。
- (2) 溶体化試料の k_y 値はT6時効でわずかに増加するが、過時効状態では逆に低下する。これは、Al母相中に析出する準安定相の影響で、 k_y 値は小さくなることを意味する。
- (3) 歪増加でT6時効試料での粒内すべり帯は太くて直線的な形態となるが、過時効試料では波状のすべり帯が多く出現する。これは、時効の進行で析出粒子が大きく成長すると、交差すべりによる粒子の乗りこえがおこると考えられる。また、過時効試料の活性化体積はT6時効試料に比べて大きくなる。これは、析出粒子の成長で粒子間距離が大きくなることに起因すると考えられる。これらの結果から、過時効処理した7475合金の変形機構は、主にOrowan機構が支配すると考えられる。

参考文献

- 1) E.O.Hall, Proc.Phys.Soc.London, **64B** (1951), 747.
- 2) N.J.Petch, J.Iron Steel Inst., **174** (1953), 25.
- 3) 小野長門, 合谷 仁, 三浦 精, 日本機械学会論文集, **68-671** (2001), 1136.
- 4) 幸田成康, 松浦圭助, 転位論, 日本金属学会編(丸善), (1971), 323.
- 5) 長村光造, 落合庄治郎, 上原利弘, 軽金属, **34-9** (1984), 517.
- 6) H.Conrad, Journal of metals, (1964), 582.
- 7) 加藤雅治, 入門転位論, 裳華房, (1999), 109.