321

Al-Zn-Mg-Cu 合金多結晶の機械的性質と強化機構

崇城大学 小野長門 三浦 精

| 景城大学 [院] ○合谷 | 仁|

1. 緒言

航空機材料として実用化されている Al-Zn-Mg-Cu 系(7000 系)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を得られることが一 般に知られている。しかし、この合金の強化機構なら びに析出挙動と力学的性質の関係についての定量的な 解釈は、未解決のままである。

本研究では、溶体化処理および時効処理を施した Al-Zn-Mg-Cu(7475)合金多結晶を用いて引張試験と微 小硬度試験を行い、まず時効時間に伴う機械的性質の 変化を確認した。次に、変形応力と結晶粒径の関係を 明らかにし、0.2%耐力 σ0.2 での Hall-Petch 関係式の 妥当性やその傾きと切片について検討した。この結果 から、σ0.2 に対する結晶粒微細化強化、固溶強化およ び析出強化の各強化量を実験的に決定し、さらに析出 強化の律速機構について検討した。

2. 試料および実験方法

本研究では、スカイアルミニウム(株)から提供され た表1に示す7475合金多結晶の圧延板を用いて、平行 部寸法1mm×5mm×50mmの板状試験片を最初に切り出 した。これを753Kの溶体化処理および393Kの時効処 理により平均粒径25µm~280µmの試料に調整し、粒 界が確認できる程度にJacquet液で電解研磨後、引張 試験と硬度試験に供した。引張試験は島津製作所製オ ートグラフAGS-500Bを用いて室温で行い、引張速度 を常に0.5mm/minとした。硬度測定はアカシ製ビッカ ース硬度計MVK-G2を用いて荷重500g、保持時間30s の条件で行った。

Table 1 Chemical composition of specimens.

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. 実験結果および考察

3・1 硬度と降伏応力 溶体化処理およびその後 0.6ks~172.8ksの時効処理を施した試料の硬度を図1 に示す。図2は0ks、0.6ks、3.6ks、86.4ks時効試料 の各降伏応力を0.2%耐力として求め、これと時効時 間の関係を表したものである。両図には比較のため三 浦ら¹⁾の7475合金単結晶と長村ら²⁾の7475合金多結 晶の結果も同時に示す。硬度と降伏応力は時効時間が 長くなるほど大きくなり、その割合は時効時間の増加 に伴い減少する。このときの多結晶と単結晶の硬度は ほぼ等しいが、多結晶の降伏応力は単結晶の値より大 きくなる。これは粒界の影響によるものといえる。



Fig.1 Aging time dependence of Vickers hardness in Al-Zn-Mg-Cu quaternary alloys.



Al-Zn-Mg-Cu quaternary alloys.

3・2 Hall-Petch 関係の検討 多結晶金属の降伏 応力と平均結晶粒径の間には、α鉄で導出された次の Hall-Petch 関係式が一般に成り立つと考えられている。

 $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ (1) ここで σ_0 は転位がすべり面上を運動するときの摩擦 応力、 k_y は定数であるが、合金では溶質原子と転位の 相互作用などにより変化する値、dは平均粒径である。

溶体化処理した試料の変形応力と平均粒径の関係を 図3に示す。両者の間には、全ての歪で(1)式の直線関 係が成立する。この直線の傾き ムは、歪に係わらずほ ぼ同じ値となる。切片 σ₀は歪増加に伴い大きくなるが、 これは加工硬化によるものである。0.6ks、3.6ks、 86.4ks時効試料の場合もこれと同様の結果が得られる。 図4は上述した4種類の溶体化および時効試料の 0.2%耐力と平均粒径の関係をまとめたものであり、同 時に純 Al の結果³⁾も破線で示す。溶体化試料の ムと σ₀は、純 Al に比べ固溶強化によりともに増大する。 溶体化および時効試料の結果を比較すると、ムに大差 は見られないが、σ₀は時効時間の増加に伴い大きくな る。これは固溶強化に析出強化が加わるためである。



Fig.3 Relation between the flow stress and the inverse square root of the average grain size in as quenched specimens.



Fig.4 Relation between the 0.2% proof stress and the inverse square root of the average grain size in aged, as quenched specimens.

 3・3 強化機構の実験的決定 本合金の σ_{0.2} は、 次の式に示す各強化機構の一次加算式で近似できる⁴⁾。
σ_{0.2} = Δ σ_{HP} + Δ σ_S + Δ σ_P (2)
ここで Δ σ_{HP}は結晶粒微細化強化量、Δ σ_Sは固溶強化 量、Δ σ_Pは析出強化量である。

図 4 の直線の切片を用いて 86.4ks 時効試料の $\sigma_{0.2}$ に寄与する各強化量を求める。まず、純 Al は結晶粒微 細化のみで強化されるため、 $\Delta \sigma_{HP}$ は 5MPa となる。次 に、溶体化試料の強化は結晶粒微細化および固溶強化 で成されており、各強化量は $\Delta \sigma_{HP}$ が 5MPa、 $\Delta \sigma_{S}$ が 109MPa となる。しかし、時効試料では折出物が存在す るため、このときの $\Delta \sigma_{S}$ の算出には時効析出量を考慮 する必要がある。つまり、86.4ks 時効試料での固溶強 化量 $\Delta \sigma_{S}$ は溶体化試料の $\Delta \sigma_{S}$ 値 109MPa の 88%に相 当し⁵⁾、96MPa となる。この試料の σ_{0} は 410MPa である から、 $\Delta \sigma_{P}$ は 309MPa となる。

3・4 析出強化におよぼす律速機構の検討 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 切断する機構と粒子を迂回する機構に大別さる。切断 する機構の化学硬化説に関し、Brown と Ham⁶⁾ は次 の式を提唱した。

$$\Delta \sigma_{y} = \frac{2\sqrt{2}\Gamma^{3/2}M}{G^{1/2}b^{2}} \frac{\overline{\mu}^{-3/2}}{(lp-2\overline{\mu})}$$
(3)

 $\mu^{322}/(lp2\mu)$ を横軸にして $\Delta \sigma_y$ をプロットしたものを 長村ら²⁾の結果とともに図5に示す。図中の直線は、 析出粒子が小さい範囲で(3)式の関係が成立するとして 引いたものである。 $\Delta \sigma_y$ の小さい短時間時効試料の実 測値は、この直線上の値に近い値となる。

次に、迂回する機構の Orowan 機構に関し、Hirsch と Humphreys⁷⁾ は次の式を導出した。

$$\Delta \sigma_{y} = \frac{0.81 GbM}{2\pi (1-\upsilon)^{1/2}} \frac{\ln(2\,\overline{\mu}/r_{0})}{(1p-2\overline{\mu})} \tag{4}$$

ln(2µ/ ro)/(*lp*-2µ)を横軸にして Δσyをプロットしたものを長村ら²⁾の結果とともに図6に示す。図中の直線は、(4)式の計算結果を表したものである。Δσyの大きい 86.4ks 時効試料の実測値は、この直線上の値とよく一致する。以上の結果から、7475 合金の析出強化機構において、析出粒子が小さい範囲では転位が粒子を切断する機構が支配的であり、粒子が大きく成長するとOrowan 機構が支配的になる。



Fig.5 Verification of the cut-through mechanism proposed by Brown and Ham^{6} .



Fig.6 Verification of the Orowan mechanism proposed by Hirsch and Humphreys $^{7)}$.

参考文献

- 三浦,森脇,御牧,尾中,日本材料学会第38期講演 概要,(1989).
- 2) 長村, 落合, 上原, 軽金属, 34, 517(1984).
- 3) H.Nagahama, K.Ohtera, K.Higasi, A.Inoue and T.Masumoto, Philos. Mag. Letters, 67, 225(1993).
- 4) 松岡, 広瀬, 岸, 東, 材料, 46, 665(1997).
- 5) 吉田, 京都大学学位論文, (1991).
- 6) L.M.Brown and R.K.Ham, Strengthening Methods in Crystals, ed.by A.Kelly and R.B.Nicholson, 9(Elsevier Book Co., 1971).
- 7) P.B.Hirsch and F.J.Humphreys, Physics of Strength and Plasticity, 189(MIT Press, 1969).