高力 Al 合金のカップ アンド コーン破壊と環境疲労強度*

岡 田 庸 敬** 岩 井 善 郎** 佐 山 茂***

Cup and Cone Fracture and Environmental Fatigue Strength of High Tensile-Strength Aluminum Alloys

by

Tsunenori OKADA, Yoshiro IWAI

(Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui)

and Shigeru SAYAMA

(Urase Godo Senko, Co., Sabae)

Rotating bending fatigue tests were performed on three high tensile-strength aluminum alloys, i. e. ZK41-T6 extruded, 2024-T6 extruded, and drawn Al alloy in various environments in order to investigate cup and cone fracture. Cup and cone fracture was only observed on ZK41-T6 extruded Al alloy tested in the environments of argon gas, nitrogen gas, or mineral oil. It is thus concluded that environment is one of the factors that control the cup and cone fracture of high tensile-strength Al alloys.

In argon or nitrogen gas, fatigue strength was smaller than in air, due to the occurrence of cup and cone fracture. In the oil environment, fatigue strength also decreased below that in air, because oil wedge action against fatigue crack growth cannot be expected for cup and cone fracture. From the air-oil two stage fatigue tests, it was observed that the mechanism of rupture changed from tear to sliding rupture when the environment was changed, and that small cup and cone fracture appeared. However, the fatigue life increased as compared with that calculated from Miner's law.

(Received June 5, 1981)

キー・ワード：高力 Al 合金，カップ アンド コーン破壊，環境疲労強度

1 緒 言

高力 Al 合金の切欠き材で回転曲げ疲労試験を行うと、材質、加工法、応力条件などの組合せによってはカップ アンド コーン破壊と称する円すい形の破面を呈することがある。例えば、J. M. Finney は 2024-T4 押出し材で、竹内らは熱処理型 Al 合金 7N01-T6 押出し材で、いずれも S-N 曲線の高応力域でカップ アンド コーン破壊を観察し、低応力域の垂直形破面との間に著しい強度差が生じて S-N 曲線 も不連続になると報告している。また清原も展伸用 Al 合金 2011-T8 引抜き材、2017-T4 押出し材、2024-T4 押出し材の切欠き回転曲げ疲労試験を行ったとき、2011 材はすべて軸方向に直角に破壊するが、2017 材と 2024 材はある応力段階のときカップ アンド コーン破壊となり、S-N 曲線 も上方に凸の鞍状になると報告している。小寺沢らはこのようなカップ アンド コーン破

壊の破面を電子顕微鏡観察して考察しているが、まだ根本的な機構の解明にまで至っていない。

また筆者らが行った ZK41-T6 押出し材 (ZK41 は旧記号で現在の 7N01 に相当する) の切欠き回転曲げ疲労試験では、大気中、水中の疲労破壊がすべて軸に垂直であるのに対し、油中とアルゴンガス中ではすべてカップ アンド コーン破壊になることを見出した。これはこれまで報告されているように、カップ アンド コーン破壊が特定の応力段階や材質、熱処理などの組合せによってのみ出現するのではなく、特定の環境に変わったときでも出現することを意味していて、材料の疲労破壊に対する環境の影響を論ずるうえからも興味ある問題である。しかし、カップ アンド コーン破壊の生成機構はこれまでほとんど明らかにされなかったように、非常に困難な課題である。

本研究では、このような破壊機構の解明の一助とするために、数種の高力 Al 合金について、種々の環境下で疲労試験を行い、カップ アンド コーン破壊の生成、更にそれが生じた場合の疲労強度への影響につい

* 原稿受理 昭和56年6月5日

** 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京

*** ウラセ合同染工(株) 鯖江市神中

Table I. Chemical composition of materials tested.

Material	Chemical composition (wt.%)									
	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zu	Cr	Ti	Zr	Al
ZK41-BE	<0.01	0.06	0.19	0.32	2.0	4.0	<0.01	0.01	0.13	R
2024-BE	4.6	0.17	0.21	0.6	1.5	0.04	0.01	—	—	R
2024-BD	4.8	0.17	0.23	0.6	1.6	0.04	0.01	—	—	R

て検討を加えた。

2 試験片および試験方法

2・1 試験片

供試材料は ZK 41-T6 押出し (BE) 材, 2024-T4 押出し (BE) 材, 2024-T4 引抜き (BD) 材で, これらの材料の化学成分を Table I に, 機械的性質を Table II に示す。試験片の形状は Fig.1 に示すとおりである。試験片の切欠き底は, 投影機で拡大して正確に曲率をつけた工具で規定の形状に仕上げた。ただし, 加工ひずみ除去のための熱処理や切欠き底の研磨は一切行っていない。

Table II. Mechanical properties of materials tested.

Material	Yield strength σ_{ys} (kgf/mm ²)	Tensile strength σ_B (kgf/mm ²)	Elongation ϕ (%)
ZK41-BE	45	49	14
2024-BE	36	52	16
2024-BD	36	50	21

Fig. 1. Dimension of specimen.

2・2 試験機および試験方法

試験機は小野式回転曲げ疲労試験機 (10 kgf-m) を使用した。応力繰返し速度は 1800 cpm である。切欠き部周辺には Fig.2 に示すような環境槽を設け, 液体環境あるいは気体環境を制御した。液体環境では試験片をどぶづけできるように液体を循環させた。気体環境では加圧された試験気体で槽内が充分置換されるように試験開始 3 時間ぐらい前から大量の試験気体を槽内へ放出し, 所定の環境を作成した。更に試験中も少量ずつ槽内へ追加放出して外気の侵入するのを防いだ。槽内の含有酸素量, 含有水分量は環境槽の出口に溶存酸素分析計, 露点湿度計および簡易形温湿度計を設けて測定した。使用したアルゴンガス, 窒素ガス,

Fig. 2. Shape of enviromental chamber.

Table III. Composition of gas used.

Ar	99.99%	O ₂ , 10 ppm	H ₂ O, 10 ppm
N ₂	99.99%	O ₂ , 10 ppm	H ₂ O, 13 ppm
O ₂	99.6 %		H ₂ O, 10 ppm

酸素ガスの成分を Table III に示す。

水中および油中の試験では環境槽に熱電対を入れて切欠き底付近の液温を 20℃ に制御した。使用した油はパラフィン系ハイホワイト油で, #350 の高粘度油と #70 の低粘度油である。20℃ における粘度は高粘度油で 250 cSt, 低粘度油で 20 cSt である。含有水分量は直接測定していないが, 製造業者の測定によると 80~100 ppm 程度である。

3 実験結果および考察

3・1 破面形状と環境

Fig.3 は大気中 (室温 ~10℃, 相対湿度 ~70%), アルゴンガス中 (含有水分量 ~10 ppm), 窒素ガス中 (含有水分量 ~13 ppm), 酸素ガス中 (含有水分量 ~10 ppm) の気体環境とイオン交換水中, 水道水中, ハイホワイト油中の液体環境で回転曲げ疲労試験を行った際の試験片の巨視的な破壊形状を示したものである。ZK41-BE 材の破面はアルゴンガス中, 窒素ガス中, 油中で, 頂角が 60°, その先端は最終ぜい性破壊のために少し平になった円すい台状のカップアンドコーン破壊を形成する。しかし同じ環境でも 2024-BE 材では円すい形にはならないで, 巨視的には軸に垂直な凹凸の激しい破面になる。また 2024-BD 材では破面は軸に垂直であるが非常に滑らかになる。酸素ガス中では ZK 41 と 2024 の BE 材はともに軸に垂直の凹凸の激しい破面になるが, 2024-BD 材はやはり滑らかな破面である。大気中, イオン交換水中, 水道水中ではいずれの材料も軸に垂直で滑らかな破面になる。ZK 41 や 2024 の BE 材は大気中でもカップアンド

	Air	Ar	N ₂	O ₂	Ion-Exch- anged Water	Tap Water	L.V. Oil	H.V. Oil
ZK41-BE
σ_a (Kgf/mm ²)	11	11	11	11	10	8.5	11	11
N	8.9×10^5	4.5×10^5	3.6×10^5	5.0×10^6	1.6×10^5	2.6×10^5	2.4×10^5	1.9×10^5
2024-BE
σ_a (Kgf/mm ²)	11	11	11	11	9	9	11	11
N	1.0×10^5	2.6×10^6	5.6×10^5	1.0×10^6	2.3×10^5	1.5×10^5	1.6×10^6	2.5×10^6
2024-BD
σ_a (Kgf/mm ²)	9.5	10	10	10	9	8	11	10
N	4.4×10^5	8.0×10^5	2.0×10^5	5.6×10^5	1.2×10^5	8.3×10^4	2.6×10^5	3.6×10^6

Fig. 3. Macroscopic appearances of fracture under various environments.

コーン破壊が生じたと報告されている材料であるが、本研究では、両材料とも大気中ではカップ アンド コーン破壊は生じないで、アルゴンガス中と窒素ガス中および油中で、しかも ZK41-BE 材にだけ生じている。

上述のような相違の原因を見出すため、まず走査電子顕微鏡による破面観察を行った。Fig. 4 は大気中と低粘度油中の破面の観察結果の一例である。写真の矢印方向がき裂の進展方向である。カップ アンド コーン破壊の生じた油中の ZK41-BE 材の破面は、軸方向(矢印方向)に多くの条痕が観察され、その条痕の間の破面は非常に滑らかで、軸方向に 30° の傾きをもってすべり破壊している様子がわかる。また油中の 2024-BE 材は ZK41-BE 材と巨視的には全く異った破面形態であるが、微視的には軸方向に多くの条痕が観察され、ZK41-BE 材と同じようにすべり破壊していると考えられる。すなわち 2024-BE 材では完全なカップ アンド コーン破壊は形成されないが、30° 方向のすべり破壊が分枝して連結されるために凹凸の激しい破面を形成したものと考えることができる。一方大気中の両材料の破面はき裂の進展方向に直角にストライエーションが観察される。両材料とも大気中から油中に環境が変わることによって引裂き破壊からすべり破壊に変化したことが考えられる。なお 2024-BD 材では油中も大気中もき裂の進展方向に明りょうなス

トライエーションが観察され、いずれも引裂き破壊していることがわかる。

3・2 カップ アンド コーン破壊と水分・酸素の関係

カップ アンド コーン破壊の生じた環境を比較してみると、気体環境、液体環境の区別なく水分が非常に少ないことが特徴である。しかしカップ アンド コーン破壊の生じやすい ZK41-BE 材でも水分の少ない酸素ガス中では凹凸の激しい破面しか形成しないことを考え合せるとカップ アンド コーン破壊は単なる水分の影響だけでなく、酸素との相乗効果として考える必要がある。

Fig.5~7 はアルゴンガス中へ脱気した水を蒸発させて、ガス中の水分量を増加させたときの疲労寿命の変化と破面形状の変化を示したものである。切欠き底の称呼応力は $\sigma_a = 11.0 \text{ kgf/mm}^2$ または 10.0 kgf/mm^2 一定である。ZK41-BE 材では水分量の増加に伴って、カップ アンド コーン破壊から凹凸の激しい軸に垂直な破面へ、更に滑らかな破面へと変化する。またそれに伴って寿命も凹凸の激しい破面のとき極大値を示し、その後次第に減少して大気中の値よりもやや低い値を示すようになる。2024-BE 材では最少の水分含有時(アルゴンガスのみの状態で水分含有量は 8 ppm)に面の凹凸は最も著しく、寿命も一番長い。そ

Fig. 4. Fractographs of fracture surface in air and oil environments.

Fig. 5. Relation between number of stress cycles to failure and water content for ZK41-BE.

Fig. 7. Relation between number of stress cycles to failure and water content for 2024-BD.

Fig. 6. Relation between number of stress cycles to failure and water content for 2024-BE.

して水分量の増加とともに破面は次第に滑らかになり、寿命も減少してわずかであるが大気中よりも低い値を示すようになる。一方 Fig. 8~10 はアルゴンガス中に酸素ガスを加えてガス中の酸素分圧を増加させたときの疲労寿命の変化と破面形状の変化を示したものである。ZK41-BE 材では僅かな酸素量の増加によって破面は凹凸の激しい垂直破面になり寿命も増加する。2024-BE 材では破面の凹凸は次第に小さくなり寿命はやや減少する。2024-BD 材では破面の状態も寿命もほとんど変化しない。また水分が存在しないために、

Fig. 8. Relation between number of stress cycles to failure and oxygen content for ZK41-BE.

Fig. 9. Relation between number of stress cycles to failure and oxygen content for 2024-BE.

Fig. 10. Relation between number of stress cycles to failure and oxygen content for 2024-BD.

どの材料も酸素分圧が増加しても大気中の寿命より大きい値を示している。

以上の結果から、カップ アンド コーン破壊は酸化膜が形成されにくい状態で水分が極めて少いとき、BE 材のようなすべりやすい Al 合金内でせん断型のすべりが優先したために形成したものと考えられる。

Fig. 12. S-N curves for ZK41-BE in air and low viscosity oil environments.

Fig. 13. S-N curves for 2024-BE in air and low viscosity oil environments.

Fig. 14. S-N curves for 2024-BD in air and low viscosity oil environments.

Fig. 11. Cracks observed at rough fractured surface.

また ZK41や2024-BE 材でよく観察される凹凸の激しい垂直破面は、大気中の滑らかな破面からカップ アンド コーン破壊への移行時の不完全な形状としてとらえることができる。実際に凹凸の激しい破面の断面を観察すると、Fig. 11 のごとく凹凸の谷底から分枝したき裂が観察される。したがって寿命は水分の減少とともに増加するが、カップ アンド コーン破壊になるとすべり破壊のために逆に寿命は低下するので、結局分枝のためにき裂が停留する影響も加わる凹凸の激しい破面のときに寿命が最大になると考えられる。酸素分圧の増加は寿命にほとんど影響を与えないが、Fig. 5～7 のアルゴンガス中で水分量を増加させたとき、酸化膜がないと大気中の寿命以下に低下するように、酸素（酸化膜）は水分の影響をある程度防止するいわゆる水分遮断効果の役目のあることがわかる。いずれにしてもカップ アンド コーン破壊による寿命の低下は大気圏外や油中で使用される高力 Al 合金の疲労強度でとくに注意を要する問題である。

3・3 油中におけるカップ アンド コーン破壊と強度

Fig. 12～14 は各 Al 合金の大気中と低粘度油中における S-N 線図である。また Table IV は別個にステアケース法によって求めた $N=1 \times 10^6$ における時間強度である。なお高粘度油中、アルゴンガス中の結果

Table IV. Fatigue strength at 1×10^6 cycles obtained by the staircase method (kgf/mm²).

	H. V. Oil	L. V. Oil	Ar	Air
ZK41-BE	9.5	9.5	9.5	11.0
2024-BE	12.5	12.0	11.5	8.5
2024-BD	11.0	10.5	10.0	8.5

も示してある。応力階差は 0.5 kg/mm^2 で、未破断率は75%である。ZK41-BE 材は高粘度油中、低粘度油中、アルゴンガス中ですべてカップ アンド コーン破壊となり、いずれも同じ時間強度を示し、大気中より約14%低下している。2024-BE 材は油中で凹凸の激しい破面となり、逆に高粘度油中では約47%、低粘度油中では約41%、また同じ破面形状を示すアルゴンガス中では約35%時間強度が増加している。2024-BD 材は油中でも大気中とほとんど変らない滑らかな破面となるが、大気中よりも高粘度油中で約29%、低粘度中で約24%、アルゴンガス中で約17%時間強度が増加している。

一般に油中には多量の溶存空気が含まれているにもかかわらず ZK41-BE 材ではアルゴンガス中と同様に完全なカップ アンド コーン破壊となるのは、油の吸着によって金属表面に水分や酸素の接近を防ぐためと考えられる。したがってこのようなすべり破壊のために、すでに著者ら^{6,7)}によって明らかにされている油の粘性によるくさび作用も期待できなくなり、油中でもカップ アンド コーン破壊のために大気中よりも強度

低下をきたしている。また油中とアルゴンガス中の強度が等しいように粘性の影響も認められない。反対に2024-BD 材では油による水分や酸素の遮断効果と粘性によるくさび作用のために大気中よりも、とくに高粘度油中で一層の強度増加がみられる。2024-BE 材は不完全なカップ アンド コーン破壊のために直接油のくさび作用は考えにくい、破面の凹凸による油のどじ込みが一種のくさび作用と同じような働きをして、BD 材と同じように高粘度油中で一層の強度増加がみられるものと考えられる。

3・4 大気中と油中の二段環境試験

カップ アンド コーン破壊の形成に及ぼす環境の影響を一層明確にするために、試験の途中で大気中から高粘度油中に切替える二段環境試験を行った。大気中の寿命を N_1 、高粘度油中の寿命を N_2 、一段目の大気中の繰返し数を n_1 、二段目の油中の繰返し数を n_2 とする。 n_1/N_1 の変化に伴う破壊形状の変化を Fig. 15 に示す。ZK41 では、 n_1/N_1 が60%付近まで切欠き底が垂直な破面でも、油中に切替えるとその時点からせん断すべりが始まってカップ アンド コーン破壊を形成している。それ以上の n_1/N_1 では大気中から油中に切替えても最早カップ アンド コーン破壊は形成されない。しかしその断面を観察すると、切替えたと推定されるき裂深さの位置でせん断方向に分枝しているき裂や切欠き底からせん断方向に進展した数本のき裂が観察される。2024-BE 材では n_1/N_1 が20%付近から徐々に滑らかな垂直破面に変化する。2024-BD 材では破面から二段環境の影響は見出せない。

Fig. 15. Macroscopic appearance of fracture under air-oil two stage fatigue test.

Fig. 16 はこのような二段環境試験の全寿命 N_f と n_1/N_1 の関係を示したものである。ZK41-BE 材では、 n_1/N_1 の増加に伴って寿命は増加するが、70%付近で最大値を示したのち減少して大気中の寿命に至る。これは破面形状の観察からも明らかのように、き裂の分枝によってき裂進展に停滞が生じたためと考えられる。

Fig. 16. Relation between number of stress cycles of failure and n_1/N_1 under air-oil two stage fatigue test.

ZK41-BE, $\sigma_a=11.0 \text{ kgf/mm}^2$.

2024-BE, $\sigma_a=11.0 \text{ kgf/mm}^2$.

2024-BD, $\sigma_a=10.0 \text{ kgf/mm}^2$.

2024-BE 材では n_1/N_1 が 20% 付近までに急速に寿命は減少して、それ以上になると大気中の寿命とあまり変わらない。破面形状の変化とよく対応していることがわかる。反対に 2024-BD 材は n_1/N_1 が 70% 付近になるまで寿命はわずかしき減少しない。これは大気中で進展したき裂にも油が侵入して充分に油のくさび作用が働いたためと考えられる。結局 BE 材はき裂の分枝によるき裂進展の停滞や油のとじ込みによって油中寿命を増加するのに対し、BD 材は油のくさび作用のために油中寿命を増加させている。この相違が二段環境試験における両者の傾向を大きく違えているもの

Fig. 17. Relation between $(1-n_2/N_2)$ and n_1/N_1 under air-oil two stage fatigue test.

と考えられる。

Fig. 16 を n_1/N_1 と $1-n_2/N_2$ の関係に書き改めると、Fig. 17 のようになる。マイナー則よりはずれて ZK41-BE 材と 2024-BD 材では寿命増加につながるが、2024-BE 材では寿命減少になるので注意を要する。

4 結 論

高力 Al 合金の疲労破壊時に形成されるカップ アンド コーン破壊の原因を明らかにするために、ZK41-T6 押出し材、2024-T4 押出し材と引抜き材について種々の環境下で回転曲げ疲労試験を行って次の結論を得た。

(1) ZK41-BE 材では水分と酸素が極端に少ないアルゴンガスの気体環境中と油中でカップ アンド コーン破壊が発生するが大気中や純酸素ガス中では発生しない。またカップ アンド コーン破壊が発生すると大気中よりも寿命が低下する。2024-BE 材では同じ環境中でも完全なカップ アンド コーン破壊にはならないが、凹凸の激しい垂直破面となり、逆に大気中よりも寿命は増加する。2024-BD 材はいずれの環境中でもカップ アンド コーン破壊は生じない。

(2) 油中で ZK41-BE 材はカップ アンド コーン破壊になるために油の粘性効果（くさび作用）は期待できず大気中よりも強度が低下するが、2024-BE 材や BD 材では油の粘性効果も加わるので大気中より強度が一層増加する。

(3) 大気中から油中への二段環境試験でも ZK41-BE 材は油中に切換ええた時点からすべり破壊が始まりカップ アンド コーン破壊を形成する。しかし、切換時点でのき裂進展の停滞のために寿命は増加する。2024-BD 材では大気中で発生したき裂にも油が侵入してくさび作用が有効に作用するのでマイナー則で算出される寿命よりも増加するが、2024-BE 材では油の粘性効果はき裂の初期段階にしか影響を与えないのでマイナー則で算出される寿命よりも減少する。

(昭和53年10月11日 日本機械学会第56期全国大会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Finney, J. M., J. of the Institute of Metals, **92**, 31 (1963).
- 2) 竹内勝治, 田中英司, 村松克己, 日本材料学会疲労部門委員会資料, JSMS-F, 46-3 (1971); 村松克己, 田中英司, 竹内勝治, 軽金属, **23**, 317 (1973).
- 3) 清原隆徳, 日本機械学会講演論文集, No. 730-12, 51 (1973).
- 4) 小寺沢良一, 志茂大治郎, 材料, **27**, 327 (1978).
- 5) 岡田庸敬, 石田良太郎, 日本機械学会講演論文集, No. 720-9, 241 (1972).
- 6) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 針谷俊明, 日本機械学会論文集, **37**, 1497 (1971).
- 7) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 駒井謙治郎, 清田守男, 日本機械学会論文集, **38**, 452 (1972).