Al 合金溶湯鍛造材の回転曲げ疲労における切欠感度*

皮籠石 紀雄^{*1}, 西谷 弘信^{*2}, 都野 徹^{*3}Notch Sensitivity of Squeeze Cast Aluminum Alloy
in Rotating Bending Fatigue

Norio KAWAGOISHI, Hironobu NISITANI, and Tohru TSUNO

The effect of heat treatments (as cast, T4, and T6) on the notch sensitivity of a squeeze-cast Al alloy, AC4CH, is investigated using specimens with a circumferential notch subjected to rotating bending. Although the increases in static strength by heat treatment contribute to the improvement of σ_{w2} , they hardly contribute to the increase in σ_{w1} , where σ_{w1} and σ_{w2} are the crack initiation and propagation limits in notched specimens, respectively. The notch factor $K_{f2}(\sigma_{w0}/\sigma_{w2}, \sigma_{w0}$: fatigue limit of plain specimen) of a squeeze-cast Al alloy is larger than that of a gravity-cast Al alloy, and is smaller than that of a wrought Al alloy.

Key Words: Fatigue, Rotating Bending, Squeeze Cast Al Alloy, Fatigue Limit Notch Sensitivity, Heat Treatment, Surface Defect

1. 緒 言

一般に、鋳鉄や Al 合金鋳物の場合、平滑材と切欠材における疲労強度の差異は少なく、とくに鋭い切欠材の破断限界に対する切欠係数 $K_{f2} (= \sigma_{w0}/\sigma_{w2}, \sigma_{w0}$: 平滑材の疲労限度, σ_{w2} : 切欠材のき裂伝ば限界に対する疲労限度) は、鋼や展伸用 Al 合金よりかなり小さいことが知られている。これは、鋳物では、鋳物特有の欠陥が存在するため、平滑材がすでに一種の切欠材に相当し、平滑材本来の強度を示さないからである⁽¹⁾⁽²⁾。

ところで、Al 合金鋳物の場合、上記のような鋳造欠陥を抑制する方法として、近年、HIP(熱間等方加圧)処理や溶湯鍛造法(スクイズ・キャスト)が注目されている^{(3)~(7)}。溶湯鍛造材の場合、従来の低圧鋳造材やダイカスト鋳物に比べ、ひけ巣やポロシティが抑制されると同時に組織も微細化されるため、引張強さや延性などの静的強度特性だけでなく、衝撃や疲労などの動的強度もかなり改善されることが明らかにされている^{(8)~(13)}。このような効果は、溶湯鍛造材の切欠

材の強度にも影響を与えることが考えられる。したがって、その切欠感度を調べることは、溶湯鍛造材を各種部材に適用する上で重要なことである。

本論文は、溶湯鍛造法により鋳造した Al-Si-Mg 系合金 AC4CH に熱処理を施し、環状切欠材の回転曲げ疲労試験を行い、溶湯鍛造材の切欠感度に及ぼす熱処理の影響を調べたものである。

2. 材料、試験片および実験方法

用いた材料は、鋳造用 Al-Si-Mg 系合金 AC4CH をたて形加圧鋳造機で溶湯鍛造したものである。鋳造条件、鋳物形状および試験片採取方法は前報⁽¹³⁾と同様である。表 1 に化学成分を示す。

溶湯鍛造した素材から、鋳放し材および 2 種類の熱処理材 [T4 処理材: 530°C, 2 h 保持後水冷の溶体化処理, T6 処理材: T4 処理後, 180°C, 4 h の時効処理] の合計 3 種類の試験片を準備した。以下では、鋳放

表 1 化学成分

(wt %)			
Si	Mg	Fe	Al
700	035	012	Bal.

* 平成元年 10 月 14 日 第 67 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年 3 月 13 日。

^{*1} 正員、鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

^{*2} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*3} 正員、宇部興産(株) (〒755 宇部市大字小串 1978-5)。

図 1 各材の組織写真

表 2 各材の機械的性質

Material	σ_0 MPa	σ_B MPa	σ_T MPa	δ %	Hv
F	144	253	271	90	80
T4	147	279	338	195	84
T6	241	318	397	130	110

 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力, σ_B : 引張強さ σ_T : 真破断強さ, δ : 伸び H_V : ピッカース硬さ (9.8 N)

し材を F 材, 2 種類の熱処理材をそれぞれ T4 処理材, T6 処理材と呼ぶ。

図 1, 表 2 に, 各材の組織写真および機械的性質をそれぞれ示す。

試験片は, 図 2 に示す形状, 寸法に機械加工の後, 加工影響層を除去するため表面を直径当り平滑材で約 40 μ m, 切欠材で約 20 μ m 電解研磨してから実験に供した。

疲労限度の決定は, 10^7 回の応力繰返し数を基準とし, 応力レベルのきざみを 5 MPa として行った。

用いた試験機は, 小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 15 N $\cdot$ m, 回転数約 3 000 rpm) である。

3. 実験結果および考察

3.1 各材の疲労限度 切欠感度を検討する場合, 平滑材の疲労限度 σ_{w0} が基準となる。

図 3 は, 前回報告した各材の平滑材における S-N 曲線を引張強さ σ_B で基準化した結果⁽¹³⁾ である。各材間の破断寿命を等しい σ_a/σ_B (σ_a : 応力振幅) で比較すれば, 高応力下ではほとんど差異が認められないのに対し, 低応力になると多少強度差が生じ, 疲労限度比 (σ_{w0}/σ_B) は, F 材, T4 処理材, T6 処理材でそれぞれ, 0.42, 0.39, 0.36 と静強度の上昇とともに小さくなる。

なお, 同図には, T6 処理材とほぼ等しい静強度 ($\sigma_{0.2}=250$ MPa, $\sigma_B=309$ MPa) をもつ展伸用 Al 合金

(a) 平滑試験片

(b) 切欠試験片

 $(\rho=0.1, 0.3, 1.0\text{ mm})$

図 2 試験片の形状, 寸法 (mm)

図 3 相対応力 σ_a/σ_B と破断寿命 N_f の関係

6061-T6 の結果⁽¹⁴⁾ も併記したが, 溶湯鍛造材は, 展伸用材とほぼ同等の相対疲労強度を有していることがわかる。

表 3 に各材の疲労試験結果を示す。表中, σ_{w1} は, き裂発生に基づく疲労限度であり, σ_{w2} は, 停留き裂が存在する範囲での破断に基づく疲労限度である。

図 4 は, σ_{w1} , σ_{w2} と応力集中係数 K_t ⁽¹⁵⁾ の関係である。

表 3 試験片の主要寸法と実験結果

Material	d _{mm}	t _{mm}	ρ_{mm}	K_t	σ_{w1}/σ_B	σ_{w2}/σ_B	$K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$	$K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$	σ_{w1}/σ_{w0}	σ_{w2}/σ_{w0}	K_{f1}	K_{f2}	K_{f1}/K_t	K_{f2}/K_t
F	5	0	∞	1	105	—	105	—	1	—	1	—	1	—
		10	141	85	—	120	—	0.81	—	1.23	—	0.87	—	—
		0.1	0.3	189	65	75	123	142	0.62	0.71	1.61	1.41	0.85	0.75
		0.1	0.3	272	45	70	122	190	0.43	0.67	2.33	1.49	0.86	0.55
T4	5	0	∞	1	110	—	110	—	1	—	1	—	1	—
		10	141	90	—	127	—	0.82	—	1.22	—	0.87	—	—
		0.1	0.3	189	65	85	123	161	0.59	0.77	1.69	1.30	0.89	0.69
		0.1	0.3	272	45	80	122	218	0.41	0.73	2.44	1.37	0.90	0.50
T6	5	0	∞	1	115	—	115	—	1	—	1	—	1	—
		10	141	95	—	134	—	0.83	—	1.20	—	0.85	—	—
		0.1	0.3	189	70	90	132	170	0.61	0.78	1.64	1.28	0.87	0.68
		0.1	0.3	272	50	90	136	245	0.43	0.78	2.33	1.28	0.86	0.47

図 4 疲労限度 σ_{w1}, σ_{w2} と応力集中係数 K_t の関係 図 5 $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}, K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$ と $1/\rho$ の関係

表 3 および図 4 からわかることを列挙すると次のようになる。

(1) 各材料間で、静強度は異なるにもかかわらず σ_{w1} はほぼ等しい。

(2) σ_{w2} は、T6 処理材が最も高く、T4 処理材、F 材の順に低くなるが、 σ_{w2} と引張強さ σ_B の比 σ_{w2}/σ_B で比較すれば各材とも約 0.3 とほぼ等しい。このことから、 σ_{w0} が、熱処理による静強度の上昇の割には改善されない (図 3) のに対し、 σ_{w2} には静強度の上昇がほぼそのまま反映されることがわかる。

(3) (1), (2) に関連して、分岐点における切欠き半径 ρ_0 は、鑄造材より熱処理材で大きい。

(4) き裂発生に対する切欠係数 $K_{f1}(=\sigma_{w0}/\sigma_{w1})$ は 3 種の材料間で大差なく、応力集中係数 K_t にほぼ等しい。

(5) き裂伝ば限界に対する切欠係数 K_{f2} は、いずれの材料でも 1.3~1.5 となり、2 前後となる展伸用 Al 合金のそれ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾より小さい。この主な原因は、分岐点の切欠半径 ρ_0 の値の相違によるものである。

著者の一人は、切欠材の疲労強度を規定するクライテリオンとして、線形切欠力学を提唱し⁽¹⁸⁾、切欠材の疲労強度の推定や切欠感度の材質依存性の検討に有効であることを示した^{(19)~(23)}。

図 5 は、この考え方にに基づき、溶湯鍛造材の結果を $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}, K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$ と $1/\rho$ の関係で整理し、展伸用 Al 合金 (時効硬化 Al 合金 6061-T6, 2017-T4 および 7075-T6 で試験片はすべて、溶湯鍛造材と同一形状、寸法である) の切欠感度⁽¹⁷⁾と比較したものである。図からわかるように、溶湯鍛造材の切欠感度は熱処理により異なり、破断限界に対する切欠感度は切欠きが鈍い場合、3 種の材料でほぼ等しいが、切欠きが鋭くなると、F 材が最も敏感で、T4 処理材、T6 処理材の順に鈍感になる。また溶湯鍛造材の切欠感度は、展伸材のそれと比べ、き裂発生に対してはほぼ同等で、伝ば限界に対しては鈍感である。

3・2 考察 以下では、溶湯鍛造材の切欠感度に及ぼす熱処理の影響をき裂の表面および断面観察を通じて考察する。

図6は、平滑材表面で観察したき裂発生および伝ば形態を示す写真である。例示したF材の場合、き裂はすべり帯から点発生的⁽²⁴⁾に生じ、その後軸に直角方向へ成長している。一方、T4処理材およびT6処理材では、共晶Siを起点としたき裂である。このように溶湯鍛造材では多くの場合、き裂はすべり帯や数 μm 以下の共晶Si(あるいはその集合)から発生しており、従来の鑄造法でみられるポロシティ等の鑄造欠陥を起点としたき裂⁽²⁵⁾はほとんど観察されなかった。

図7は、各材の切欠底で観察した停留き裂の写真である。図7(a)の表面写真をみると、F材のき裂は、切欠底を軸に直角方向へほぼまっすぐに引張形で成長しているのに対し、T4処理材、T6処理材のそれは、切欠底をジグザグにせん断形で成長している。このようなき裂形態の材質による差異は、表面だけでなく内部方向へも同様に認められる[図7(b)。なお、T4処理材におけるき裂の断面形態はT6処理材と同様であった]。

以上のき裂発生および伝ば形態の観察結果に基づき各材の切欠感度について考察すれば次のようになる。

(1) き裂発生に対する切欠係数 K_{f1} が3種の材料とも応力集中係数 K_t にほぼ等しくなったのは、溶湯鍛造法により、ひけ巣やポロシティ等の巨視的欠陥が抑制されたことを反映して、き裂のほとんどは、そのような鑄造欠陥以外から発生しており、しかもそれは点発生的であることに起因している⁽²²⁾⁽²⁶⁾(例えば、鑄鉄等にみられるように、遊離黒鉛や巣等の鑄造欠陥により σ_{w0} が支配される場合、平滑材であっても一種の切欠材となる。そのため、欠陥が影響しない場合に比べ $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$ は大きくなる⁽²⁾が、表3、図5からわかるように、溶湯鍛造材の $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$ は展伸材のそれと同等かもしくは小さい)。破断限界に対する切欠係数 K_{f2} が重力鑄造法によるAl鑄物より溶湯鍛造材のほうが大きくなった⁽¹²⁾のも上記と同じ理由から理解される。

(2) σ_{w2} が静強度の上昇とともに増加したのは、 σ_{w2} は欠陥の影響を受けにくいこと⁽²⁷⁾および σ_{w2} にはき裂伝ば抵抗の差異が反映され、それは、静強度の上昇とともに増加すること⁽¹³⁾から理解される。また、熱処理によるき裂伝ば抵抗の増大には、基地組織の変形抵抗の増大に加え、き裂形態がジグザグになることも関係している。き裂形態の差異は、分岐点における切欠半径 ρ_0 が鑄放し材より熱処理材で大きくなった理由でもある。

4. 結 論

溶湯鍛造したAl合金鑄物AC4CHに数種の熱処理を施し、環状切欠材の回転曲げ疲労試験を行い、切欠感度に及ぼす熱処理の影響について検討した。

(a-1) $N=1 \times 10^4$ cycles (a-2) $N=8 \times 10^4$ cycles
(a) F材($\sigma_a=160$ MPa, $N_f=1.42 \times 10^5$ cycles)

(b-1) $N=1.25 \times 10^4$ cycles (b-2) $N=7 \times 10^4$ cycles
(b) T4処理材($\sigma_a=200$ MPa, $N_f=2.5 \times 10^5$ cycles)

(c-1) $N=5.5 \times 10^4$ cycles (c-2) $N=6.9 \times 10^4$ cycles
(c) T6処理材($\sigma_a=160$ MPa, $N_f=1.1 \times 10^5$ cycles)

図6 各材の平滑材表面で観察したき裂写真(←→軸方向、矢印→はき裂先端を示している)

図 7 切欠底における停留き裂の写真
($\rho=0.1$ mm, $N=10^7$ cycles)

得られた結論を要約すると次のようになる。

(1) 各材料間で、静強度は異なるにもかかわらず、 σ_{w1} はほぼ等しい。

(2) σ_{w2} は、T 6 処理材が最も高く、T 4 処理材、F 材の順に低くなり、熱処理による静強度の差異がほぼそのまま反映される。

(3) (1), (2)に関連して、分岐点における切欠

半径 ρ_0 は、F 材が最も小さく、T 4 処理材、T 6 処理材の順に大きくなる。

(4) 破断限界に対する切欠係数 K_{f2} は、いずれの材料でも、1.3~1.5 となり、低圧鋳造 Al 合金のそれより大きい、展伸用 Al 合金のそれより小さい。

終わりに、本実験を行う上でご助力いただいた宇部興産(株)西正氏、山本直道氏、小川恭弘氏に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) 西谷・村上, 機械の研究, 25-4(1973), 543.
- (2) 西谷・大井, 機講論, No. 790-2, (1979-4), 128.
- (3) 原田・ほか 2 名, 鋳物, 55-1(1983), 3.
- (4) 原田・ほか 2 名, 鋳物, 55-2(1983), 80.
- (5) 鈴木・白柳, 機誌, 81-714(1978), 470.
- (6) 松原・村上, 自動車技術, 34-7(1980), 749.
- (7) 西田・ほか 3 名, 金属報, 19-12(1980), 895.
- (8) Kaneko, Y., ほか 3 名, *Foundry Trade J.*, 28(1980-2), 397.
- (9) 徳井・ほか 5 名, トヨタ技術, 33-1(1983), 71.
- (10) Williams, G., *Foundry Trade J.*, 2(1984-2), 66.
- (11) Inguanti, D. C., *17th National SAMPE Tech. Conference*, (1985), 61.
- (12) 斉藤・竹内, 住友軽金属技報, 28-4, (1987), 37.
- (13) 皮籠石・ほか 2 名, 機論, 55-516, A(1989), 1733.
- (14) 西谷・ほか 2 名, 機論, 51-464, (1985), 1017.
- (15) 村上・ほか 2 名, 機論, 48-430, A(1982), 800.
- (16) 竹内, 軽金属溶接, 25-8(1983), 366.
- (17) 西谷・皮籠石, 機論, 51-462, A(1985), 530.
- (18) 西谷, 機論, 49-447, A(1983), 1353.
- (19) 西谷・遠藤, 機論, 51-463, A(1985), 784.
- (20) 百武・西谷, 機論, 51-465, A(1985), 1494.
- (21) 西谷・野口, 機論, 52-477, A(1986), 1286.
- (22) 高尾・西谷, 材料, 36-409(1987), 1060.
- (23) 西谷・ほか 3 名, 機論, 54-503, A(1988), 1293.
- (24) 西谷・高尾, 機論, 40-340(1974), 3254.
- (25) 鈴木・ほか 3 名, 機論, 51-468, A(1985), 1977.
- (26) 西谷・後藤, 機論, 42-361(1976), 2660.
- (27) 河野・西谷, 機論, 40-333(1974), 1255.