大気中および腐食環境下における アルミニウム合金鋳物の疲労特性に及ぼす鋳肌面の影響†

小 林 志 好* 何 雪 宏** 原 田 昭 治*** 吉 沢 亮****

Effect of As-Cast Surface on Fatigue Properties of Cast Aluminum Alloy in Air and Corrosion Environment

by

Yukiyoshi KOBAYASHI*, He XUEHONG**,
Shoji HARADA*** and Akira YOSHIKAWA****

In order to study the effect of as-cast surface on the fatigue properties of cast aluminum alloy, 4 point bending fatigue tests were carried out in air and sprayed 3.5vol% salt water. As the results, no effect of the as-cast surface on the fatigue properties was found both in air and corrosion environment. This was mainly caused by the effect of shrinkage cavity in surface layer, which was responsible as a fatigue crack initiation site: The very thin surface layer hardly showed resistance to fatigue crack initiation. That means that the presence of the as-cast surface brought no improvement of the fatigue strength.

Key words: Fatigue, Corrosion fatigue, $\sqrt{\text{area}}$, ΔK , As-cast surface

1 緒 言

自動車業界ではエネルギー効率向上を目的として、部材の軽量化が図られている。¹⁾例えば、自動車足廻り部品へのアルミニウム合金鋳物の利用が挙げられる。その際、強度信頼性を確保するため、様々な研究が実施されている。^{2)~11)}

周知のように、鋳造部品の表面には鋳肌面が形成されている。多くの場合、この鋳肌面を有したままで実用に供される。しかし、装飾や美観が問題となる場合には鋳肌面を研削除去して用いることがある。その際、鋳肌面の有無によって疲労強度が変化することが考えられるので、注意が必要である。

さらに、アルミニウム合金鋳物の鋳肌面は、一般に緻密な酸化皮膜であることを考慮すると、単純にはそれをセラミックコーティング膜と等価な被膜と見なすことができる。すると、鋳肌面の存在は、

(1) 荷重分担効果による疲労強度改善

(2) 疲労中の耐食性向上

等の理由により、機械的性質改善効果の発現を期待させる。しかし、一方では、鋳肌面はもろく、粗いことから、疲労き裂の発生を促進し、疲労強度に負の影響を及ぼすことも考えられる。したがって、前者の強度改善要因の影響がより強く作用すれば、鋳肌面を有するアルミニウム合金鋳物を安価で特別な行程を必要としない表面処理

材として利用することができる。また、鋳肌面の存在による疲労強度の改善効果が見いだせれば、それは同時に表面仕上げ行程不要という一石二鳥の効果をもたらす。

上述の点を考慮して、アルミニウム合金鋳物の強度評価に関して行われた研究例を概観すると、これまでのアルミニウム合金鋳物に関する報告は、鋳肌面を除去した試験片を用いて検討した例が多いことが分かる。鋳肌面の機械的性質に及ぼす影響について検討した例は、金沢らの報告例がみられる程度で少ない。^{9)~10)}

そこで、大気中と腐食環境下において、鋳肌面付きアルミニウム合金鋳物に繰返し曲げ応力を与えることにより疲労試験を実施した。ここでは、両環境下における疲労強度の差異の有無を調べるとともに、アルミニウム合金鋳物をき裂材として捉えた疲労試験結果の整理を $\sqrt{\text{area}}$ 法を用いて行った。¹²⁾

2 供試材料と実験方法

2・1 供試材料

供試材料は、Al-Si-Mg系合金のAC4CH材である。その製造は金型鋳造法（注湯温度973~983K）による。製造された板材の厚さは8mmで、鋳造時にできる鋳肌面の厚さは5 μm 程度であった。

実験には、T6処理として、803K×2h水冷、453K×4h空冷を施した後、鋳肌面を有するものと除去したもの

† 原稿受理 平成13年11月21日 Received Nov. 21, 2001

* 正 会 員 武蔵工業大学工学部機械工学科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤, Dept. of Mech. Eng., Musashi Inst. of Tech., Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557

** 九州工業大学工学部機械知能工学科 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町, Dept. of Mech. Eng., Kyushu Inst. of Tech., Tobata-ku, Kitakyushu, 804-8550

*** 正 会 員 九州工業大学工学部機械知能工学科 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町, Dept. of Mech. Eng., Kyushu Inst. of Tech., Tobata-ku, Kitakyushu, 804-8550

**** 日立金属(株)素材研究所 〒321-4367 真岡市鬼怒ヶ丘, Casting Tech. Res. Lab., Hitachi Metals, Ltd., Kinugaoka, Moka, 321-4367

を用意した。このとき、鋳肌面を有するものは片面から4mm、鋳肌面を除去したものは両表面からそれぞれ2mmずつ研削除去した。Table I, IIに母材部の化学成分と機械的性質をそれぞれ示す。また、Fig. 1に試験片の形状・寸法を示す。なお、試験片切欠き部における応力集中係数は $\alpha=1.06$ である。

2.2 実験方法

疲労試験には容量90kNの電気油圧式サーボ疲労試験機を用いた。荷重様式は外スパン100mm、内スパン80mmの4点曲げである。打ち切り繰返し数を 10^7 回、応力比を $R=0.1$ 、周波数を10Hz、荷重波形を正弦波とした。なお、鋳肌面を有する試験片は、鋳肌面が引張面になるように取り付けた。実験環境は、大気中と3.5%塩水の噴霧による腐食環境下である。塩水の噴霧は、流速330ml/minとし、試験片の引張面に噴射させることによ

Table I. Chemical compositions of the material test.
(wt.%)

Material	Si	Mg	Ti	Fe	Al
AC4CH	7.2	0.35	0.15	0.11	Bal.

Table II. Mechanical properties of the material test.

0.2% proof strength $\sigma_{0.2}$, MPa	Tensile strength σ_B , MPa	Elongation ϵ , %
211	298	8

Fig. 1. Specimen.

り実施した。

また、画像処理解析装置を利用して破壊起点となった欠陥寸法の面積を測定した。

3 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果

Table III～VIに、大気中および3.5%塩水の噴霧による腐食環境下における鋳肌面を有する試験片と除去した試験片の疲労試験結果を示す。ただし、破断した試験片を観察したところ、破壊起点は、引け果あるいは介在物であり、それらはほとんど表面に顔を出しているか、あるいは表面の鋳肌面のところに接していた。そこで、表中には、応力振幅 σ_a 、破断繰返し数 N_f 、破壊起点となった欠陥の面積Area、それを元に算出した欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}}$ 、き裂長さa、き裂深さc、アスペクト比c/a、および応力拡大係数幅 ΔK を、それぞれ示した。ここで、欠陥の面積Area、き裂長さa、き裂深さcに関しては、破壊起点となった欠陥がほとんど表面に顔を出していた場合と表面の鋳肌面のところに接していた場合で、それぞれFig. 2 (a), (b)に示す寸法である。

また、応力拡大係数幅の算出に際しては $\sqrt{\text{area}}$ 法¹²⁾によった。先に述べたように、破壊起点が表面近傍に存在する引け果あるいは介在物であったので、応力拡大係数幅 ΔK は次式により算出した。

$$\Delta K = 0.65 \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \sigma$ は応力幅である。なお、表中の値は機械的に計算して求めた値である。また、破断繰返し数 N_f に $10^7 \uparrow$ と記入されているものは、打ち切り繰返し数になっても破断しなかったことを意味する。

Fig. 3に、大気中および3.5%塩水の噴霧による腐食環境下における鋳肌面を有する試験片と除去した試験片の疲労試験結果を示す。大気中における両材料の疲労試験結果は、鋳肌有の実験結果を示す○印のほうが鋳肌無の実験結果を示す●印より幾分上側にあるように見える。しかし、詳細にみると、○印のデータは、低応力側で非常に大きくばらつき、このばらつきの中に●印が含まれている。したがって、本実験の範囲内においては、両材料の時間強度の差異は明らかでない。

腐食環境下においても、両材料の時間強度(□印と■

Table III. Results of fatigue tests on specimens with as-cast surface in air.

Stress amplitude σ_a , MPa	Number of cycles to failure N_f	Area mm ²	$\sqrt{\text{Area}}$ mm	Crack length a mm	Crack depth c mm	c/a	Stress intensity factor range ΔK , MPa $\sqrt{\text{m}}$
100	$10^7 \uparrow$	—	—	—	—	—	—
100	6.7×10^6	0.733	0.856	1.318	0.625	0.474	6.74
110	2.2×10^5	2.635	1.623	1.864	1.568	0.841	10.21
110	1.5×10^6	0.785	0.886	1.705	0.455	0.267	7.54
120	3.9×10^5	1.157	1.076	1.573	1.040	0.662	9.07
120	6.6×10^5	0.277	0.527	1.211	0.243	0.201	6.34
130	3.8×10^5	1.103	1.050	1.887	0.717	0.380	9.71
140	2.3×10^5	0.664	0.815	1.875	0.517	0.276	9.21

Table IV. Results of fatigue tests on specimens without as-cast surface in air.

Stress amplitude σ_a , MPa	Number of cycles to failure N_f	Area mm^2	$\sqrt{\text{Area}}$ mm	Crack length a mm	Crack depth c mm	c/a	Stress intensity factor range ΔK , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
90	$10^7 \uparrow$	—	—	—	—	—	—
90	3.8×10^6	1.081	1.040	0.784	2.500	3.188	6.69
100	1.0×10^6	0.882	0.939	0.939	0.645	2.481	7.06
100	6.8×10^5	1.428	1.195	1.676	1.068	0.637	7.96
110	3.8×10^5	0.859	0.927	0.972	1.000	0.972	7.72
120	3.0×10^5	0.293	0.541	0.908	0.511	0.562	6.43
130	3.1×10^5	0.258	0.508	0.454	0.608	1.339	6.75
130	2.9×10^5	0.186	0.431	0.729	0.295	0.404	6.22
140	2.2×10^5	0.867	0.931	1.988	0.740	0.372	9.84

Table V. Results of fatigue tests on specimens with as-cast surface in sprayed 3.5vol% salt water.

Stress amplitude σ_a , MPa	Number of cycles to failure N_f	Area mm^2	$\sqrt{\text{Area}}$ mm	Crack length a mm	Crack depth c mm	c/a	Stress intensity factor range ΔK , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
40	$10^7 \uparrow$	—	—	—	—	—	—
60	1.0×10^6	0.308	0.555	1.222	0.399	0.267	3.26
70	9.2×10^5	1.024	1.012	1.318	1.074	0.815	5.13
80	6.1×10^5	0.933	0.966	1.017	0.830	0.816	5.73
90	2.5×10^5	0.955	0.977	1.818	0.580	0.319	6.48
100	1.3×10^5	0.447	0.668	1.331	0.427	0.321	5.96
110	1.7×10^5	0.475	0.689	1.190	0.500	0.420	6.65
120	1.2×10^5	0.292	0.541	1.077	0.327	0.303	6.43
130	2.4×10^5	0.166	0.407	0.876	0.254	0.290	6.04

Table VI. Results of fatigue tests on specimens without as-cast surface in sprayed 3.5vol% salt water.

Stress amplitude σ_a , MPa	Number of cycles to failure N_f	Area mm^2	$\sqrt{\text{Area}}$ mm	Crack length a mm	Crack depth c mm	c/a	Stress intensity factor range ΔK , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
40	$10^7 \uparrow$	—	—	—	—	—	—
60	7.5×10^5	1.075	1.307	0.909	1.210	1.331	4.45
70	6.4×10^5	0.936	0.967	1.210	0.966	0.798	5.02
80	4.3×10^5	0.825	0.909	1.409	1.074	0.762	5.55
90	4.3×10^5	0.558	0.747	1.464	0.520	0.355	5.67
100	3.9×10^5	0.112	0.334	0.841	0.219	0.260	4.21
110	3.6×10^5	0.211	0.460	0.576	0.432	0.751	5.43
120	1.1×10^5	0.229	0.479	0.556	0.448	0.806	6.05
130	8.4×10^4	0.677	0.823	1.574	0.392	0.249	8.59

印) に差は認められない。しかし、疲労寿命のばらつきの程度は大気中の結果の半分程度である。

両環境下の時間強度を比較してみると、短寿命域 ($1 \sim 3) \times 10^5$ 回) の時間強度では両環境下にほとんど差はない。しかし、長寿命域 (10^6 回以上) になると、腐食環境下の時間強度は大気中のその半分以上に低下する。

3・2 破壊起点の欠陥寸法に注目した S-N 曲線

Fig. 3 では、疲労寿命のばらつきが両環境下ともに大

きいため、両材料の時間強度の正確な比較ができなかった。一般に、アルミニウム合金鋳造材料は、大きな引け巣を内在しているので、それが疲労破壊起点となることはよく知られている。そのため、破壊起点となる欠陥寸法の大小により疲労寿命が大きくばらつくことが予想される。

そこで、疲労寿命のばらつきに及ぼす力学因子の影響を調べるため、応力拡大係数幅 ΔK を用いてデータの整

Fig. 2. Shapes and sizes of crack initiation sites.

理を試みた。Fig. 4にFig. 3を再整理した結果を示す。図より、両環境下ともに疲労強度に及ぼす鋳肌面の影響は認められない。

以上より、Fig. 3、4ともに両環境下の疲労強度に及ぼす鋳肌面の影響は認められなかった。その理由として、(1) き裂発生起点が鋳肌面の存在の有無によらず、引け巣あるいは介在物といった欠陥となっていたこと、および(2) 5 μ m程度の厚さの鋳肌面は、Table III～VIに示した鋳造欠陥寸法と比較して小さいこと、といった要因を考慮すると、鋳肌面がき裂進展抵抗にほとんど寄与しなかったものと考えられる。

また、Fig. 3、4ともに腐食環境下の疲労強度に及ぼす鋳肌面の影響が認められなかったことと上述の(1)、(2)から、腐食環境下における疲労強度の低下は、腐食疲労き裂進展速度の加速によるものと考えられる。¹³⁾

4 結 言

鋳造アルミニウム合金の鋳肌面による疲労強度の改善効果と腐食環境下における耐食性向上効果に関して調べた結果、以下の知見を得た。

(1) 鋳造アルミニウム合金の鋳肌面の存在による疲労

Fig. 3. S-N data in air and in sprayed 3.5vol% salt water.

Fig. 4. Relationships between ΔK and N_f in air and in sprayed 3.5vol% salt water.

強度の改善効果と腐食環境下における耐食性向上効果は認められなかった。また、本実験の範囲内においては、鋳肌面の存在は疲労強度に害を及ぼさないことが分かった。

(2) 鋳肌面の存在による疲労強度と耐食性向上効果が認められなかった理由は、鋳肌面の厚さと比較して非常に大きい鋳造欠陥を破壊起点としていたため、鋳肌面がき裂の発生および進展にほとんど寄与しなかったからである。

参 考 文 献

- 1) 社自動車技術会, “自動車の材料技術”, p.42 (1996) 朝倉書店。
- 2) 金子純一, 大塚正久訳, “機械設計のための材料選定”, p.343 (1997) 内田老鶴園。
- 3) 蛭川 寿, 松岡三郎, 竹内悦男, 西島 敏, 日本機械学会論文集, A-62, 1966 (1996)。
- 4) 小林幹和, 松井利治, 日本機械学会論文集, A-62, 341 (1996)。
- 5) 小林裕和, 池田勇人, 村上敬宜, 日本機械学会論文集, A-62, 347 (1996)。
- 6) 森野数博, 西村太志, 山本慎一, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-64, 1443 (1998)。
- 7) 佐々木克彦, 高橋 剛, 小池朝夫, 日本機械学会論文集, A-64, 58 (1998)。
- 8) Haftirman, 服部修次, 岡田庸敬, 日本機械学会論文集, A-62, 1140 (1996)。
- 9) 金沢憲一, 久保田一, 中村和久, 平野一美, 日本機械学会論文集, A-62, 379 (1996)。
- 10) 金沢憲一, 岡安光博, 日本機械学会論文集, A-64, 1956 (1998)。
- 11) 金沢憲一, 柴山宏司, 日本機械学会論文集, A-63, 478 (1997)。
- 12) 村上敬宜, “金属疲労 微小欠陥と介在物の影響”, p.15 (1993) 養賢堂。
- 13) 小林俊郎編著, “アルミニウム合金の強度” p.185, (2001) 内田老鶴園。