高温高サイクル疲労における fish-eye 破壊†

金 澤 健 二* 佐 藤 守 夫**
木 村 恵** 西 島 敏*

Fish-Eye Fracture in High-Cycle Fatigue at Elevated Temperatures

by

Kenji KANAZAWA*, Morio SATO**

Megumi KIMURA** and Satoshi NISHIJIMA*

Fish-eye fracture is observed on the smooth specimens of carbon and low alloy steels fatigued under rotating bending at temperatures from 200 to 500 °C. The mechanism of the fish-eye fracture and the effect of oxidation on high-cycle fatigue behavior were discussed here.

In the relationship between σ_a/σ_b and N_f , where σ_a is the stress amplitude, σ_b the tensile strength at each test temperature and N_f the number of cycles to failure, stepwise curves were obtained at 200 to 300°C and curves with an inflection point at above 400°C. At lower stress levels than the stress level of the stepwise or the inflection point, the fish-eye was observed at the fracture surface. At above 400°C, a region covered with thick oxide was observed independently of stress levels, shape of which looks like the cross section of a convex lens.

A surface crack is not easy to initiate at elevated temperatures under low stress levels, as oxide at the specimen surface prevents dislocations from slipping off from the surface. During this period, the fish-eye fracture occurs from an inclusion in the interior of specimen. The stepwise curve comes from the difference in crack initiation site. At 400 and 500°C, the crack propagation process at the early stage is prolonged by oxide formed at the crack surface.

Key words : High-cycle fatigue, Elevated-temperature, Steels, Fish-eye fracture, Oxide effect

1 緒 言

大気中の高温における疲労強度の低下の原因の一つとして、古くは、その詳細な機構は明らかではないが、高温雰囲気における酸化の効果が指摘されていた¹⁾。一方、高温大気中での疲労き裂伝ばに関する研究によると²⁾、き裂面に形成される酸化物によってき裂閉口が起こりやすくなり、き裂開口に有効な応力拡大係数範囲が低下し、き裂伝ば速度は低下したり、伝ばの下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は見かけ上高くなることが明らかにされている。

金属疲労におけるき裂の発生機構は材料、応力条件、環境条件などによって大きく依存するが、(1)繰返し応力により表面に形成されるすべり帯からの発生³⁾、(2)介在物の割れや介在物とマトリックスとの界面のはく離を起点とした発生⁴⁾、(3)粒界面にそっての発生⁵⁾、等がある。高温高サイクル疲労では、疲労寿命の大半を占める疲労き裂の発生過程と、発生したき裂の初期の伝ば過程に及ぼす酸化の影響など明らかでない点が多い。

金材技研では国産実用材料の疲れデータシート計画の一貫として、高温高サイクル疲労データの蓄積を図り⁶⁾、得られた結果をデータシートとして公表してきた。そこで得られた平滑試験片の破面の様相を調べたところ、fish-eye 破壊が観察されることがあった。浸炭やショットピーニング等の処理により表面を強化した材料では、内部の介在物などを起点として fish-eye 破壊の起こることが知られている⁷⁾。特に表面処理など行っていない材料において、高温下で fish-eye 破壊が起こるのは興味ある現象である。

本報告は高温高サイクル疲労条件下で起こる fish-eye 破壊を中心に、その形成原因と、高サイクル疲労における酸化の影響について検討したものである。

2 対象材料および試験条件範囲

金材技研疲れデータシートにおいて既に公表した高温高サイクル疲労データの供試材は、炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼および耐熱鋼の計9鋼種あるが、ここでは先ず、焼入れ、焼戻しの処理を施した炭素鋼 S45C (C : 0.44, Si : 0.24, Mn : 0.82, P : 0.024, S :

† 原稿受理 昭和63年3月11日 Received Mar. 11, 1988

* 正会員 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒, National Research Institute for Metals, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

** 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒, National Research Institute for Metals, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

0.021%)⁶⁾と低合金鋼 SCM435 (C:0.35, Si:0.30, Mn:0.70, P:0.019, S:0.012, Cr:1.03, Mo:0.15%)⁸⁾について述べる。これらの供試材料の疲労強度の温度依存性と切欠き効果および疲労き裂伝ば挙動については既に詳細に報告されている。

検討の対象とした試験片は、直径 8 mm の平行部を有する平滑材で、表面の最終仕上げは 600 番紙やすりで軸方向に研磨されて試験に供されたものである。疲労試験は 100N・m の回転曲げ疲労試験機により、回転周波数は 125Hz で行われたものである。試験温度は室温、200, 300, 400, 500°C で、試験片の加熱は 2kW の傍熱形の電気抵抗加熱炉によって行っている。

3 結果および考察

3・1 σ_a/σ_b-N_f 曲線

応力振幅 σ_a を各試験温度における引張強度 σ_b で無次元化して表した σ_a/σ_b-N_f 曲線を Fig. 1 に示す。曲線はプロビット法に基づいて求めた平均値を滑らかに結んだものである。図中の黒のプロットは後述する破面形態に関する区別で、破面に fish-eye が認められたものである。

各試験温度において、繰返し数 10^7 回から 10^8 回の範囲で破壊する試験片があり、明りょうな疲労限は 10^8 回までの試験では認められなかった。しかし、室温、200°C では、 10^6 回から 10^8 回にかけての疲労強度の低下は小さく、引張強度比でほぼ 0.5 前後の値になっている。300°C では 10^6 回付近で段を有する曲線になり、 10^6 回から 10^7 , 10^8 回にかけての疲労強度の

Fig. 1. σ_a/σ_b-N_f curves.

低下は大きい。室温から 300°C の範囲では σ_a/σ_b-N_f 曲線に鋼種による差はほとんどない。

400, 500°C では段を有する曲線と言うよりは変曲点を有する σ_a/σ_b-N_f 曲線になる。鋼種による相違があり、S45C 鋼の方が σ_a/σ_b の高い側に位置し、その傾向は 500°C における方が顕著である。

繰返し数 10^6 , 10^7 , 10^8 回に対する σ_a/σ_b の値、すなわち各時間強度の引張強度に対する比 σ_w/σ_b を温度に対してプロットしたのが Fig. 2 である。 10^8 回疲労強度の引張強度に対する比は、データシートで扱った 9 鋼種、各 5 温度条件の結果を一括して見ると 0.4 から 0.6 の間に分布しているが、ここで扱う S45C, SCM435 鋼については、詳細に見ると室温~300°C では 0.5 ないしそれより小さく、400~500°C で 0.55 位の値になり、温度により変化する傾向が認められる。 10^7 , 10^6 回疲労強度の引張強度に対する比は、室温、200°C では 10^8 回のそれと大差ないが、300°C 以上では 10^8 回の結果よりも大きくなり、また、温度が高くなるほど急激に大きくなる。鋼種による差も 300°C 以上で認められ、S45C 鋼の方が大きな値になることは、Fig. 1 の結果においても述べたことである。

Fig. 2. Temperature dependence of tensile strength ratio of fatigue strength at 10^6 , 10^7 and 10^8 cycles.

種々の鋼の常温における疲労強度は引張強度と良い相関があり、特に強度の高い材料は別として、一般に引張強度の高い材料ほど、疲労強度も高い値を示すことは良く知られている¹²⁾。炭素鋼や低合金鋼における引張強度は青熱ぜい性温度域における上昇、それより高温温度域における急激な低下などの温度依存性を示すが、疲労強度も同様な温度依存性を示している。したがって引張強度で無次元化した応力振幅で疲労強度を見ることは、材料の強度の温度依存性の疲労強度に及ぼす

効果を取り除き、疲労強度に及ぼすその他の効果を際立たせる上で有効である。この様な意味で、Fig. 2 の結果は、300°C 以上において 10^8 回疲労強度あるいは 10^7 回、 10^6 回といった時間強度を高める何らかの因子が作用していることを示唆している。

3・2 破面観察結果

破壊した試験片の破面において、き裂の起点になったと思われるところを実態顕微鏡で観察したところ、試験温度、応力条件のレベルによって fish-eye が形成されていた。Fig. 1 における黒のプロットは、破面に fish-eye の認められたものである。

S45C 鋼では 300°C 以上で、SCM435 鋼では 200°C 以上の温度で、段を有する σ_a/σ_b-N_f 曲線の場合はその段よりも、また変曲点を有する σ_a/σ_b-N_f 曲線の場合は変曲点よりも、それぞれ低応力側の高サイクル疲労領域で fish-eye 破壊が起こっていた。Fig. 3 はマクロに観察された fish-eye の典型的な接写写真である。温度条件などによっては明りょうでない fish-eye もある。

Fig. 4 は S45C 鋼の 400°C における結果で、

SCM435, 200°C, 455 N/mm², 3.37×10^7 cycles

Fig. 3. Example of fish-eye fracture under high-cycle fatigue at elevated-temperature.

fish-eye は明りょうでないが、表面から 0.15 mm 程内部の起点から同心円的に成長した痕跡があり、表面とは多少のステップを形成してつながっている。その起点部は粒界面のようで、X 線マイクロアナライザーによる Al, Mn, S の分析でも特に介在物は認められなかった。また、Fig. 5 は SCM435 鋼の 300°C における例で、表面から 0.3 mm の深さの介在物を起点として fish-eye が形成されている。この場合の介在物はアルミナ系であった。

500°C のような高温になると表面近傍の破面に、凸レンズの断面のような形状をした平坦で、光沢を帯びた領域が形成されているのが認められた。これは、fish-eye が表面とつながった後、表面に沿った初期のき裂成長過程において、破面に酸化物が形成されてきたものと思われる。fish-eye はその領域の中でかすかな痕跡を残していた。Fig. 6 は S45C 鋼の 500°C における例である。なお、fish-eye 破壊を起さない高応力側の場合でも、表面き裂発生近傍には同様な領域が認められた。

3・3 Fish-eye の形成

浸炭やショットピーニング等の処理を施した材料の回転曲げ疲労では、fish-eye 破壊が起こりやすい⁷⁾。これは表面部が強化され、表面が最も高くなる曲げ応力の分布を考慮しても、表面でなく内部の強化されていない部分でき裂が発生することがあるからである。また、表面処理の過程で表面に圧縮の残留応力が形成される場合には、その傾向がさらに強められることになる。すなわち、fish-eye が形成されるのは、表面でのき裂発生が抑えられることが必要で、(1) 表面部が内部よりも強度が高いこと、(2) 表面に圧縮の残留応力が存在すること、等がそれに対して効果がある。

本供試材の場合、特に試験片表面を強化させる処理は施していない。試験片の加工に際しては削り代を段階的に小さくして行うなど注意を払っており、加工ひ

S45C, 400°C, 335 N/mm², 7.74×10^7 cycles

Fig. 4. Example of fish-eye fracture from a grain boundary facet.

Fig. 5. Example of fish-eye fracture from a nonmetallic inclusion.

S45C, 500°C, 225N/mm², 4.1×10^7 cycles

Fig. 6. Example of fish-eye fracture covered with thick oxide.

ずみにより表面が強化される可能性は小さいものと思われる。また仮に加工により表面が強化されたとしても、それだけでは室温では観察されず、高温においてのみ観察される fish-eye の形成原因を説明することはできない。

また、高温での試験において、試験片表面に圧縮応力の発生する可能性については、傍熱形の電気抵抗炉により試験片を加熱するため、加熱の初期においては試験片表面の方が内部よりも高い温度になることがあり、その時点では試験片表面に圧縮の熱応力が発生することになる。しかし、所定の試験温度に到達後均熱のため2時間経過してから疲労試験を開始しており、

鋼の熱伝導率などを考慮すると、直径8mmの平行部を有する試験片の半径方向に生ずる温度分布は非常に小さくなっており、それによる熱応力は無視できるものと思われる。したがって、表面を強化した材料などで見られる fish-eye の形成原因を本結果の場合にあてはめることはできない。

本供試材料のような焼戻しマルテンサイト鋼においても、表面におけるき裂の発生には表面に突き出るすべり変形の繰返しが必要である。しかし、高温環境において、表面に酸化皮膜が形成され、その強度が繰返し応力に対して相対的に強ければ、転位は酸化物とマトリックス界面において堆積し、表面に突き出るすべり変形は阻止されることになる。この様子を Fig. 7 に示す。この様な状況のもとでは、表面におけるき裂の発生は抑制されることになる。その間に、内部の介在

Fig. 7. Schematic illustration of effect of oxide on fatigue crack initiation at specimen surface.

物や粒界などを起点としてき裂が発生し、表面に出るまで成長して最終的な破壊に至るならば、そこには fish-eye が形成されることになる。この様に、き裂の発生の状況が応力レベルによって不連続に変わることが、段を有する $\sigma_a/\sigma_B - N_f$ 曲線になる理由になっているものと思われる。なお、低合金鋼の高温低サイクル疲労においては、酸化物の割れが表面き裂の発生を加速させるとの指摘もある¹³⁾。しかし、それは塑性変形を伴う大きな繰返し応力条件下であるため、疲労限近くの高サイクル域では、表面の酸化物にはき裂の発生を抑制させる効果があるものと思われる。

3・4 高温高サイクル疲労に及ぼす酸化の影響

き裂面に形成される酸化物は、き裂閉口を起こしやすく、き裂伝ば速度を低下させたり、 ΔK_{th} を見かけ上高くする。本供試材の形状係数 Kt が3の切欠き試験片の結果でも、400°C 以上の試験では 10^8 回の繰返し応力に耐えた試験片に厚い酸化物で覆われた長い停留き裂が認められている。平滑材においても、表面に発生したき裂の初期の成長過程においては、同様な酸化の影響を受けるものと思われる。

400, 500°C で、特に 10^7 , 10^6 回といった時間強度域において、 σ_w/σ_B の値が温度と共に急激に大きくなるのは、き裂伝ば速度が酸化の影響により低下し、その過程の期間が長くなることによるものと考えられる。このことは、 $\sigma_a/\sigma_B - N_f$ 曲線の形にも反映している。すなわち、前節において、fish-eye 破壊を起こすか否かによって、その境で $\sigma_a/\sigma_B - N_f$ 曲線は段を持つと述べたが、実際に明りょうな段をなすのは S45C 鋼では 300°C、SCM435 鋼では 200°C と 300°C だけで、400°C 以上では変曲点を有する曲線になる。変曲点よりも高応力側では表面からき裂は発生し、また低応力側では fish-eye 破壊を起こしており、曲線は本来明りょうな段を形成すべきところであった。しかし、高応力レベルにおいても、き裂面に形成される酸化物によりき裂発生後のき裂成長過程が長く、疲労寿命に対して支配的になったため、段は不明りょうになり、そのなごりとして変曲点のある曲線になったものと思われる。

一方 200, 300°C では、 $Kt=3$ の切欠き材において 10^8 回の繰返しに耐えた試験片に停留き裂は認められていない。このことは、発生したき裂面に形成される酸化物にはき裂伝ば速度を大幅に低下させるほどの効果が無いことを示している。Fig. 2 において、 10^8 回に対する σ_w/σ_B の値に比べれば段のレベルである 10^6 回に対する σ_w/σ_B の値が大きくなっているのは、表面からのき裂発生を抑制する表面の酸化の影響によるものといえる。この様に高温高サイクル疲労に及ぼす酸化の影響は、き裂発生過程に対するものと、き裂伝ば

(a) Intermediate temperature, high stress

(b) Intermediate temperature, low stress

(c) High temperature, high stress

(d) High temperature, low stress

○ Fish-eye — oxide

Fig. 8. Effects of oxide on fatigue crack initiation and propagation processes.

過程に対するものがあり、いずれがより支配的であるかは温度条件によっても異なっている。その模式図を Fig. 8 に示す。

鋼種の相違は形成される酸化物の特性の相違にもつながるので、これらの酸化物の各疲労過程に及ぼす影響にも相違が生じることが予想される。Fig. 2 において、主にき裂の発生過程が表面の酸化物によって影響を受ける 300°C では、鋼種による差は小さく、伝ば過程がき裂面の酸化物によって影響を受ける 400, 500°C では鋼種による差があり、S45C 鋼の方が影響を強くうける傾向にある。この様な傾向の定量的な議論は、酸化物の特性をはっきりとらえた上で初めて行えるので、今後の課題としたい。

4 結 言

室温から 500°C で試験された炭素鋼 S45C と低合金鋼 SCM435 の回転曲げ平滑試験片の疲労破面の様相を調べたところ、fish-eye が観察されることがあった。fish-eye 破壊の形成原因と、高サイクル疲労におよぼす酸化の影響について検討した結果以下のことが明らかになった。

(1) 応力振幅 σ_a を各試験温度における引張強度 σ_B

で無次元化して表した σ_a/σ_B-N_f 曲線において, 200, 300°C では 10^6 回付近で段を有する曲線になり, 400°C 以上では変曲点を有する曲線になった。

(2) σ_a/σ_B-N_f 曲線の段, あるいは変曲点よりも, それぞれ低応力側の高サイクル疲労領域で fish-eye 破壊が起こった。400°C 以上では, fish-eye の有無にかかわらず, 表面に沿って, 凸レンズの断面のような形状をした, 厚い酸化物でおおわれた領域が形成されているのが観察された。

(3) 高温環境下の低応力, 高サイクル疲労においては, 表面に形成される酸化皮膜によって, き裂発生に必要な表面に突き出るすべり変形は阻止され, 表面からはき裂は発生しにくくなる。その間に, 内部の介在物などを起点としてき裂が発生し, fish-eye が形成される。段を有する σ_a/σ_B-N_f 曲線になるのはき裂発生位置の相違に起因する。

(4) 400, 500°C では, き裂発生後の初期成長過程は, き裂面に形成される酸化物により影響を受ける。

(昭和62年12月17日 第25回高温強度シンポジウム講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば日本材料学会編, “金属の疲労”, p. 347 (1964) 丸善。

- 2) J. R. Haigh, Eng. Fract. Mech., **7**, 271 (1975).
- 3) W. A. Wood, Phil. Mag., **3**, 692 (1958).
- 4) J. Lankford and F. N. Kusenberger, Metall. Trans., **4**, 553 (1973).
- 5) S. S. Manson, Proc. 1st Int. Conf. Fracture, **3**, 1387 (1965).
- 6) 金属材料技術研究所, “金材技研疲れデータシート” No. 14, (1979).
- 7) 喜多 清, 清重正典, 高瀬孝夫, 中村康彦, 鉄と鋼, **59**, 1550 (1973).
- 8) 金属材料技術研究所, “金材技研疲れデータシート” No. 23, (1980).
- 9) 金澤健二, 山口弘二, 佐藤守夫, 鈴木直之, 金尾正雄, 材料, **30**, 454 (1981).
- 10) 金澤健二, 山口弘二, 鈴木直之, 佐藤守夫, 金尾正雄, 材料, **32**, 640 (1983).
- 11) 金澤健二, 山口弘二, 佐藤守夫, 西島 敏, 材料, **37**, 254 (1988).
- 12) 西島 敏, “金材技研疲れデータシート資料1” (1981) 金属材料技術研究所。
- 13) H. Teranishi and A. J. McEvily, Proc. Int. Symp. Low-Cycle Fatigue Strength and Elasto-plastic Behavior of Materials, **25** (1979).