温間テンプフォーミング処理を施した超微細粒鋼のギガサイクル疲労特性

長島伸夫^{*1}, 古谷佳之, 木村勇次, 井上忠信

Gigacycle Fatigue properties of an Ultrafine-Grained Steel Processed by Warm Tempforming

Nobuo NAGASHIMA^{*1}, Yoshiyuki FURUYA, Yuji KIMURA and Tadanobu INOUE

^{*1} National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047 Japan

Giga-cycle fatigue properties were investigated for an ultrafine-grained steel processed by warm tempforming. The fatigue properties were compared with conventional tempered martensite steel. Fatigue tests were carried out at frequencies of 30Hz and 20kHz, using servo-hydraulic and ultrasonic fatigue testing machines, respectively. Both tempformed and conventional steels showed surface fracture in short life regions and fish-eye fracture in long life regions. The fatigue strength at 10^7 cycles was higher in the tempformed steel than in the conventional, while it was not in case of the 10^{10} cycles fatigue strength. The fish-eye fracture origins showed different aspects between the two types of the steel. In case of the conventional steel, Al_2O_3 inclusions caused the fish-eye fracture, while in case of the tempformed steel, Mo carbides surrounded by Mo-rich layers were observed at the origins. Sizes of the Mo carbides were smaller, while those of the Mo-rich layers were identical to the Al_2O_3 inclusions of the conventional steel. Therefore, the Mo-rich layers, as well as the carbides, would probably cause the fish-eye fracture. This means that suppression of the Mo-rich layers could lead to more improvement of the giga-cycle fatigue strength of the tempformed steel.

Key Words : Ultrafine-grained steel, Warm tempformig, Giga-cycle fatigue, fish-eye fracture, inclusion

1. 結 言

温間テンプフォーミング (以下 TF とする) 処理を施して得られる超微細粒鋼は 1500MPa 以上の引張強度でも優れた衝撃靱性¹⁾, 遅れ破壊特性²⁾を有する。前報³⁾では TF 処理を施した 0.6C-2Si-1Cr 鋼 ($\sigma_B=1540MPa$) について疲労特性を調べた。その結果, 耐久比 (疲労限/引張強度) は, 10^{10} 回疲労強度では 0.50 程度が得られたが, ギガサイクル域で Al_2O_3 介在物を起点とした内部破壊が生じた。本研究では, Mo 添加によって 1800 MPa の引張強度が得られるように合金設計した鋼に温間テンプフォーミング処理を施して得られた超微細粒鋼について 10^{10} 回までのギガサイクル疲労特性を調べた。

2. 実験方法

供試材は, 100 kg 真空溶解により作製した高純度の鋼 (0.4%C-2%Si-1%Mo-1%Cr) である。まず試料は 1473K/1h の溶体化処理後に溝ロール圧延により断面減少率 55% の熱間加工を施して水冷した。ついで, 得られたマルテンサイト組織は 773K/1h の焼戻処理後に焼戻温度域で累積断面率 76% の多パス溝ロール圧延を施し空冷した。この材料を TF 材と呼ぶ。比較のため

めに通常の焼入れ・焼戻しを行った試料 (QT 材) も作製した。QT 材は, TF 材を 1263K で焼準した後, 1223K/0.5h の溶体化処理後・油焼入れ, 773K/1h の焼戻し処理・水冷を施して作製した。これらの材料の機械的性質を表 1 に示す。TF 材では上降伏現象が生じたため TS より YS が高い。

疲労試験は, 主に表面破壊となる高応力・低寿命域を油圧サーボ式疲労試験機により繰り返し速度 30Hz で実施し, 主に内部破壊となる低応力・長寿命域を超音波疲労試験機により 20kHz で実施した。超音波疲労試験は繰り返し速度が極端に速いが, 内部破壊では妥当な結果が得られることが過去の研究で明らかになっている⁴⁾。また, 超音波疲労試験の場合には試験片の発熱を抑えるために試験片を空冷すると同時に, 必要に応じて間欠試験も行った。試験片形状は共通とし, 最小部直径が 3mm, 試験部の R が 31mm の砂時計型で試験部の最終仕上げは軸方向に 1200 番のペーパー仕上げとした。これらの疲労試験は室温大気中, 応力比 $R=1$ で実施した。

疲労試験後の破面は光学顕微鏡と FE-SEM を用いて観察し, 内部破壊の場合には, 起点を FE-SEM に付属している EDAX で分析した。

Table 1 Tensile properties of the QT and TF samples

	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
QT	1532	1791	9.7
TF	1898	1864	13.6

^{*1} 正員, 長島伸夫 (〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)

E-mail: NAGASHIMA.Nobuo@nims.go.jp

また、内部破壊した TF 材の一部の試験片について破面を切断し、起点部断面を EPMA で分析した。

3. 実験結果と考察

図 1 に疲労試験結果を示す。内部破壊した結果にはダッシュマーク (—) を付している。油圧サーボ試験の結果は、QT 材、TF 材ともに表面破壊、 10^7 回疲労限は QT 材 (Δ) が 850MPa、TF 材 ($\circ$) が 1050MPa である。 10^7 回の耐久比 (疲労強度/引張強度) を求めると、QT 材で 0.48 に対して TF 材では 0.55 程度であり、疲労強度が優れている。超音波試験の結果は、QT 材、TF 材ともに内部破壊であり、 10^{10} 回疲労限は QT 材 ($\blacktriangle$) が 800MPa、TF 材 ($\bullet$) が 725MPa であり、TF 材のほうが多少低かった。ただし、内部破壊した起点部は下記に示す様に両者で異なった。

図 2 と 3 に内部破壊した疲労試験片破面の SEM 観察の結果を示す。図 2 の QT 材は $10\mu\text{m}$ 程度の Al_2O_3 介在物が起点であり、内部破壊した他の 2 本の試験片破壊起点部にもほぼ同じ大きさの介在物が観察された。これに対し、TF 材では 8 本の試験片で内部破壊が生じたが、全ての試験片で図 3 の SEM 像に示す様に Al_2O_3 介在物は認められず、破面分析の結果、起点部に 2、 $3\mu\text{m}$ の Mo 炭化物が検出された。起点部を切断し縦断面を観察した結果、図 4 のように断面には起点部から圧延方向に沿って $2\mu\text{m}$ 程度の Mo 炭化物が連なって観察された。EPMA 分析した結果、Mo 炭化物周囲には Mo が濃化しており、通常部の Mo 含有量が 0.7atom% であるのに対し、濃化部では約 2.0atom% であり、濃化部の幅は Mo 炭化物を挟んで $10\mu\text{m}$ 程度であった。

TF 材の内部破壊起点部を詳細に観察すると、全ての試験片で $10\mu\text{m}$ 程度の凹凸の激しい部分が観察され Mo 濃化部のサイズと一致した。この凹凸の激しい部分が TF 材の起点とすると、QT 材と TF 材の起点部の欠陥寸法が同程度となる。すなわち、Mo 炭化物のみでなく、周囲の Mo 濃化部を含めた領域を起点とみなすと TF 材の 10^{10} 回疲労限が低くなったことを説明できる。TF 材の表面破壊の疲労限に対応する 10^7 回疲労限は QT 材より 200MPa 高い。したがって、Mo 濃化層を駆逐することにより、TF 材の 10^{10} 回疲労限を大きく改善できる可能性がある。

文献

- (1) Kimura, Y., Bull. Iron Steel Inst. Jpn., 14(2009), 154.
- (2) Y. Nie et al., CAMP-ISIJ, 22 (2009), 524
- (3) Nagashima, N., Furuya, Y., Kimura, Y. and Inoue, T. M&M2010(2010),1115
- (4) Furuya, Y., Matsuoka, S., Abe, T. and Yamaguchi, K., Scri. Mater. 46(2002), 157.

Fig.1 S-N diagram

Fig.2 SEM image of fatigue fracture surface of QT sample.
($\sigma_a=825\text{MPa}$, 3.37×10^7 cycle)

Fig.3 SEM image of fatigue fracture surface of TF sample.
($\sigma_a=800\text{MPa}$, 1.62×10^9 cycle)

Fig.4 SEM image (45° tilt observation). Fatigue test condition, $\sigma_a=750\text{MPa}$, $N_f=2.944 \times 10^9$ cycle