

高 Cr フェライト系ステンレス鋼の疲労挙動に及ぼす σ 相ぜい性の影響

岐阜大学 ○秋田正之 豊田高専 中島正貴
岐阜大学 植松美彦 岐阜大学 戸梶恵郎

Effect of σ -Phase Embrittlement on Fatigue Behaviour in High-Chromium Ferritic Stainless Steels

Masayuki AKITA, Masaki NAKAJIMA, Yoshihiko UEMATSU and Keiro TOKAJI

1. 緒 言

フェライト系ステンレス鋼は、線膨張係数が小さく熱変形が小さいため、自動車用排気系部材や暖房用燃焼機器に用途が広がりつつある。しかし、フェライト系ステンレス鋼を高温度域に加熱すると 475°C ぜい性や σ 相ぜい性など実用上大きな問題となる挙動が存在する。後者の σ 相ぜい性は、700~800°C の温度域で長時間曝されると Cr および Mo など固溶する金属間化合物 (σ 相) が析出し、じん性および耐食性が低下する現象である。一般に、Cr 含有量が多い材料ほど σ 相は析出し易いとされている。 σ 相は硬くてろいため、 σ 相の析出が機械的特性はもとより、疲労き裂の発生や成長挙動に影響を与えることが予想される。そこで、本研究では高 Cr フェライト系ステンレス鋼 SUS447 の疲労挙動に及ぼす σ 相の影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 材料は高 Cr フェライト系ステンレス鋼 SUS447 である。また、比較材として SUS444 を用いた。化学成分を Table 1 に示す。両材間で材料の Cr 含有量が大きく異なり、SUS447 と SUS444 でそれぞれ 30.66%, 18.72% である。

疲労試験には中央部に応力集中係数 $K_t=1.06$ の浅い切欠きを有する板状試験片を用いた。試験片表面をエメリー紙で 2000 番まで順次研磨し、その後バフ研磨を施し実験に供した。

2.2 実験方法 疲労試験には容量 49kN の電気油圧式サーボ疲労試験機を用い、室温大気中で実験を行った。荷重波形は繰返し速度 $f=10\text{Hz}$ 、応力比 $R=-1$ の正弦波である。硬さ測定にはマイクロビッカース硬さ計を用いた。試料の組織観察や試験後の破面解析には EDX 付き走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

3. 実験結果

3.1 時効硬化挙動 SUS447 および SUS444 を電気炉中 750°C で 50~500h、また 800°C で 50~300h 時効し、空冷後に硬さを測定した。時効曲線を Fig.1 に示す。SUS447 では明瞭な σ 相ぜい性を生じ、時効温度が高い場合、より短い時効時間で硬化する。しかし、時効時間 300h 程

度で両温度での硬さはほぼ一致する。一方、SUS444 では時効時間に伴う硬さの変化は認められない。以上の時効硬化挙動に基づいて、機械加工した試験片に 750°C・300h の時効処理を施し、疲労試験に用いた。

3.2 組織解析 Fig.2(a)および(b)に SUS447 における非時効材と時効材の組織写真をそれぞれ示す。SUS444 では時効による組織変化は認められなかったが、SUS447 では粒界および粒内に析出物が見られる (Fig.2(b))。SUS447 時効材の EDX による線分析結果を Fig.3 に示す。 σ 相部分において Cr, Mo の濃度が高く、Fe の濃度が低い。すなわち、 σ 相は Fe-Cr-Mo からなる金属間化合物であると考えられる。Fig.2(b)中の σ 相と母地の硬さを荷重 0.98N で個別に測定したところ、それぞれ HV704, HV233 であった。非時効材は HV201 であったから、 σ 相の析出によって硬さが上昇したことがわかる。

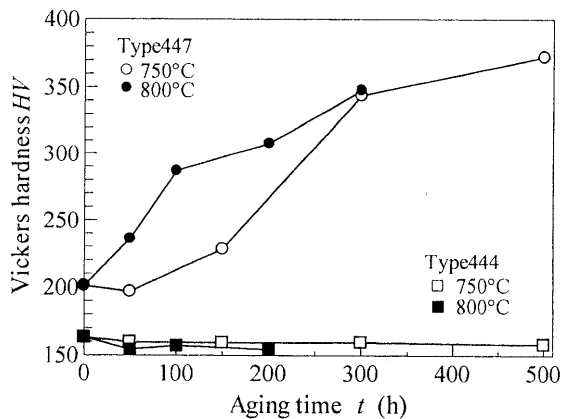


Fig.1 Vickers hardness as a function of aging time.

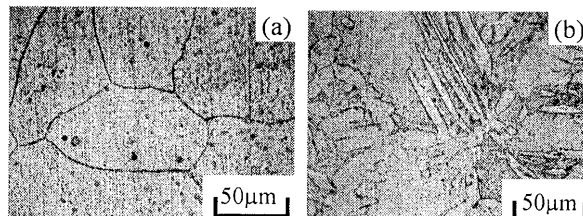


Fig.2 Microstructures of Type 447: (a) unaged, (b) aged at 750°C for 300h.

Table 1 Chemical compositions of materials (wt.%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Nb	Cr	Mo	V	N	Fe
Type447	0.002	0.29	0.31	<0.001	0.002	—	—	30.66	2.2	—	0.001	Bal.
Type444	0.004	0.06	0.1	0.024	0.006	0.11	0.17	18.72	1.81	0.06	0.068	Bal.

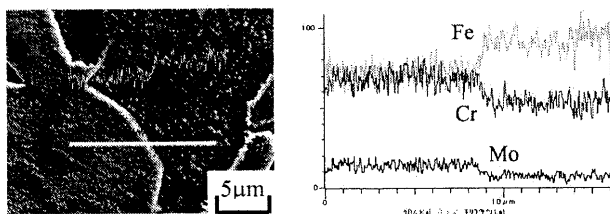


Fig.3 Line analysis by EDX for aged Type447.

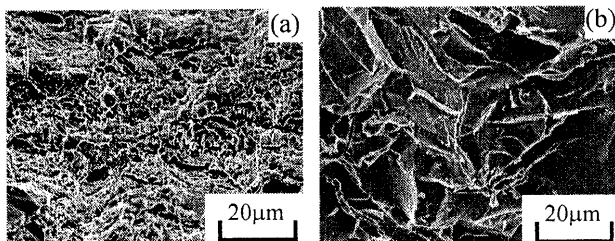


Fig.4 SEM images of tensile fracture surfaces in Type 447: (a) unaged, (b) aged at 750°C for 300h.

Table 2 Mechanical properties of Type 447.

Heat treatment	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Reduction of area ϕ (%)
Unaged	343	522	33	75
Aged	345	353	0.3	-

3.3 機械的性質 SUS447 の引張試験後の SEM による破面写真を Fig.4 に示す. 非時効材(Fig.4(a))ではディンプルからなる延性的破面, 時効材(Fig.4(b))ではへき開破壊を伴うぜい性的破面である. SUS447 の引張試験結果を Table 2 に示す. $\sigma_{0.2}$ は時効材と非時効材ではほぼ同程度であるが, 時効材では σ_B は大きく低下する. また, 時効材の伸び δ は 0.3% であり, 著しくぜい化している.

3.4 疲労試験 SUS447 の非時効材と時効材の $S-N$ 曲線を Fig.5 に示す. 時効材の疲労強度は大きく低下し, 疲労限度は非時効材では 270MPa であるのに対して, 時効材では 140MPa である. Fig.6 は時効材のき裂発生起点近傍の破面様相である. σ 相部分では平坦なへき開破面が認められ, 非常にぜい性的である. 一方, それを囲む母地部分は延性的な破面である. 破面観察では時効材のき裂発生起点を特定できなかったが, 非時効材ではすべり変形によりき裂が発生した.

4. 考 察

SUS447 では 750°C での時効によって σ 相が析出し, ぜい化した. 一方 SUS444 では, 同条件の時効ではぜい化しなかった. σ 相は Fe と Cr が主成分であり, σ 相ぜい性が発現するにはある一定量以上の Cr 含有量が必要であるため, Cr の含有量 18.72% の SUS444 ではぜい化が生じなかったと考えられる. また一般に, Si, Mn, Mo などの成分は σ 相の析出を促進することが知られている. SUS447 ではそれらの成分が SUS444 よりも若干多いために, σ 相ぜい性が発現し易かったと考えられる.

SUS447 のように σ 相が析出してぜい化した場合, 疲労強度は大きく低下した. Fig.7 は破断した試験片表面の副

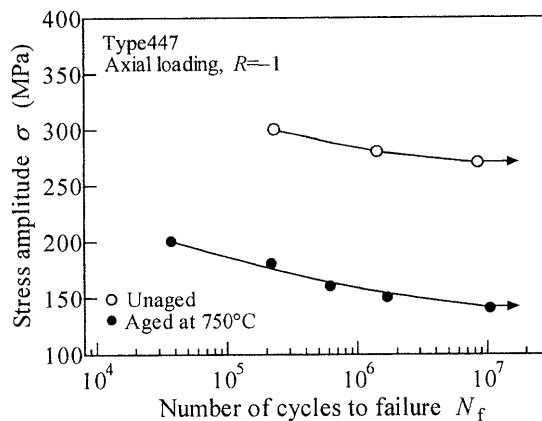


Fig.5 $S-N$ diagram.

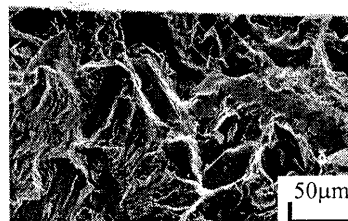


Fig.6 SEM image showing fatigue fracture surface of aged Type 447 ($\sigma=180\text{MPa}$, $N_f=2.2 \times 10^5$).

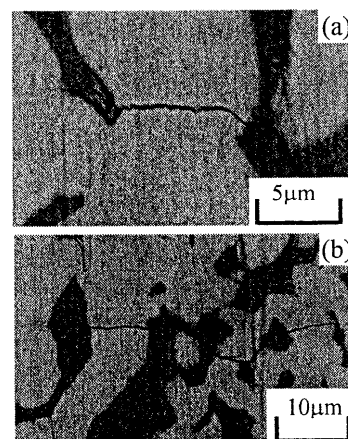


Fig.7 SEM images showing crack initiation and crack growth path in aged Type 447 ($\sigma=180\text{MPa}$, $N_f=2.2 \times 10^5$).

き裂を反射電子像 (BEI) で観察したものである. 図中白く見える部分が σ 相である. き裂は硬くてもろい σ 相部分から発生 (Fig.7(a)) した後, σ 相を割って成長 (Fig.7(b)) しており, Fig.6 の破面様相と一致する. すなわち, 硬くてもろい σ 相で優先的にき裂が発生し, その後き裂が σ 相の中を成長するため, 疲労き裂発生と成長抵抗のいずれもが低下し, 非時効材よりも著しく疲労強度が低下したものと考えられる.

5. 結 言

本研究では, 750°C で 300h 時効した高 Cr フェライト系ステンレス鋼 SUS447 を用いて疲労試験を行った. その結果, 時効によって結晶粒界および粒内に σ 相が析出してぜい化すること, ぜい化によって疲労強度が著しく低下することなどを明らかにした.

(参考文献省略)