

Fatigue Behaviour of Type 444 Stainless Steel at Elevated Temperatures

Masayuki AKITA, Masaki NAKAJIMA, Yoshihiko UEMATSU and Keiro TOKAJI

1 緒 言

近年、自動車用エンジンには排気ガス清浄化、CO₂削減のため、燃焼温度を上げて熱効率を高めることが求められている。そのため、排気系部材には優れた高温強度や耐食性が求められる。フェライト系ステンレス鋼は熱伝導率に優れ、熱膨張率が小さいため、排気系部材として使用が広がりつつある。しかしながら、フェライト系ステンレス鋼の高温域における疲労挙動について詳細に検討した研究はほとんど見られない。

本研究では、高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS444 の平滑試験片を用いて、室温および高温で軸荷重疲労試験を行い、疲労挙動に及ぼす温度の影響について検討した。

2 供試材および実験方法

供試材は、高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS444 (18Cr-2Mo 鋼) であり、その化学成分 (mass.%) は C: 0.004, Si: 0.06, Mn: 0.1, P: 0.024, S: 0.006, Ni: 0.11, Nb: 0.17, Cr: 18.72, Mo: 1.81, V: 0.06, N: 0.068, Fe: bal. である。また室温の機械的性質は、 $\sigma_{0.2}$: 293MPa, σ_B : 445MPa, δ : 34%, φ : 83% である。材料は納入状態で使用した。疲労試験片は、圧延方向に対して平行に切り出した板厚 6mm, 平行部長さ 20mm の板状試験片である。試験片中央部には、き裂発生箇所を限定するために浅い切欠きを有しており、その応力集中係数 α は約 1.06 である。

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た。試験温度は室温、400°C, 500°C, 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。き裂発生および微小き裂成長の観察は、所定の繰返し数ごとに試験を中断し、レプリカを採取する方法によった。

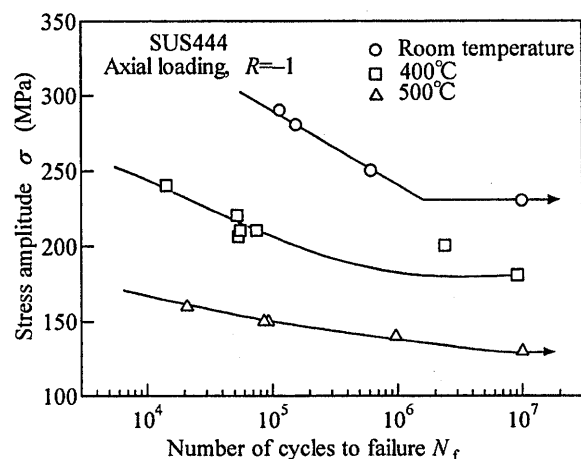


Fig. 1. S-N diagram.

3 実験結果および考察

3.1 疲労試験 疲労試験に先立ち、各温度において引張試験を行った。その結果、400°C および 500°C の σ_B はそれぞれ 354MPa および 258MPa であった。

Fig.1 に各温度における S-N 曲線を示す。疲労強度および疲労限度は試験温度の上昇に伴って低下している。Fig.2 に疲労比 (σ/σ_B) で表した疲労強度を示す。各試験温度における結果は接近する傾向にあるが、疲労比で表しても疲労強度は温度上昇とともに低下している。

3.2 き裂発生挙動 Fig.3(a)および(b)に、400°C, 500°C におけるき裂発生点近傍の SEM 写真を示す。室温を含む全ての温度で、き裂は試験片の表面で発生した。また、き裂発生箇所にはファセットが認められることから、いずれの温度においてもき裂はすべり変形によって発生したと考えられる。しかし、400°C および 500°C の破面では、室温と異なり、き裂発生点近傍にはリバーパターンのようなぜい性的な破面様相が認められた。また、このような平坦でぜい性的な破面様相は、500°C においてより広範囲に見られた。

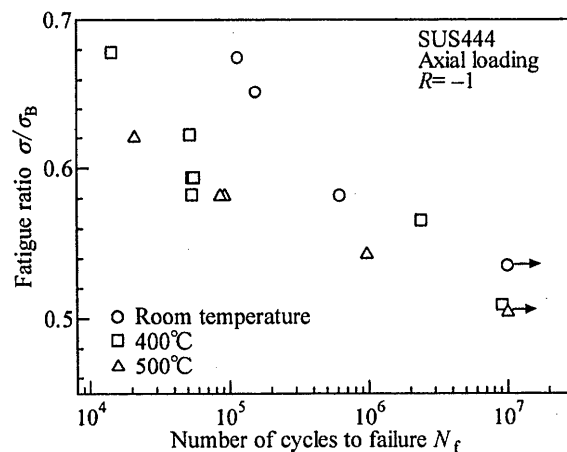


Fig. 2. S-N diagram characterized in terms of fatigue ratio.

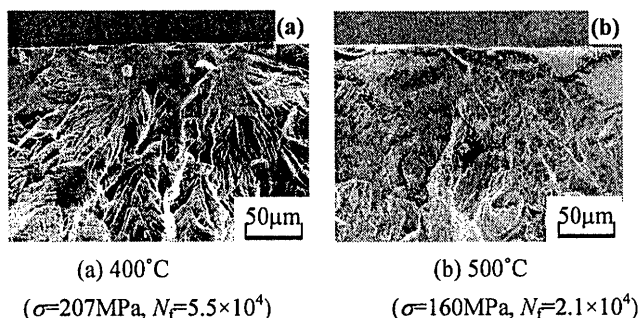


Fig. 3 SEM micrographs showing crack initiation site on fracture surface.

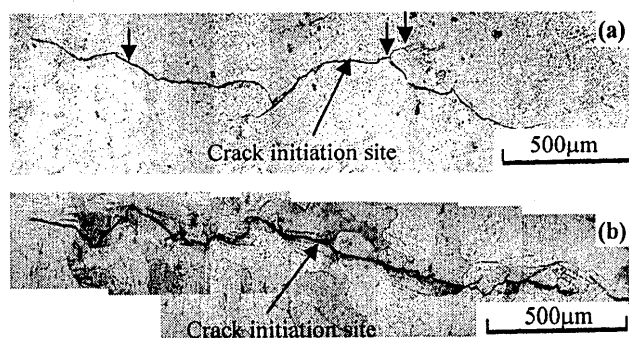


Fig.4 Crack growth paths on specimen surface: (a) 400°C, $\sigma=210\text{MPa}$, (b) 500°C, $\sigma=150\text{MPa}$. Arrow indicates crack coalescence site. The specimen axis is the vertical direction.

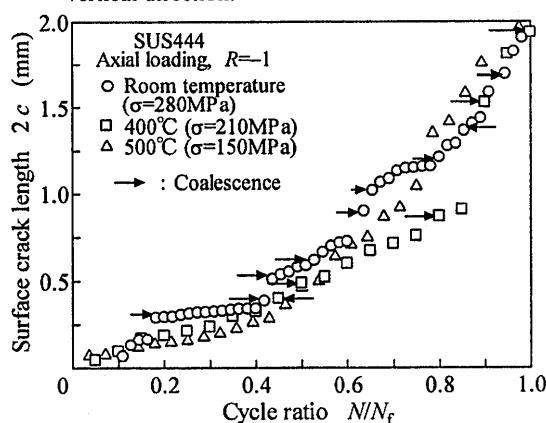


Fig.5. Relationship between surface crack length and cycle ratio.

3.3 微小き裂成長挙動 400°C ($\sigma=210\text{MPa}$) および 500°C ($\sigma=150\text{MPa}$) においてレプリカ法を用いて観察したき裂成長様相をそれぞれ Fig.4(a)および(b)に示す。いずれの温度においても、き裂は粒内で発生し、屈曲を伴いつつ結晶粒内を成長することが確認された。

Fig.5 は表面き裂全長 $2c$ と繰返し数比 N/N_f (N_f : 疲労寿命) の関係である。400°C および 500°C では繰返しの開始直後にき裂が発生しており、室温に比べて若干き裂の発生が相対的に早くなっている。また室温と 400°C では、き裂の合体が見られた。しかし、主き裂が比較的大きなき裂と合体するのは $N/N_f > 0.8$ の寿命後期のみであった。一方 500°C では、き裂の合体は生じなかった。したがって、 $N/N_f \leq 0.8$ ではき裂の合体がき裂成長に及ぼす影響は小さいと考えられる。

き裂成長速度 da/dN と最大応力拡大係数 $K_{\max}$ の関係を Fig.6 に示す。温度上昇とともに da/dN は上昇しており、400°C より 500°C のほうが若干高速度側にある。Fig.7 は da/dN と $K_{\max}$ を縦弾性係数 E で正規化した $K_{\max}/E$ の関係である。なお、 E として文献から引用した値を用いた。 $K_{\max}$ を E で正規化することにより、Fig.6 に比べて da/dN の差は小さくなるが、依然として一致しない。すなわち、 da/dN の温度依存性は E の変化によって説明できず、き裂成長機構に本質的な相違があると考えられる。

フェライト系ステンレス鋼では、ある温度以上に加熱されると 475°C ぜい性を生じることが知られている。Fig.

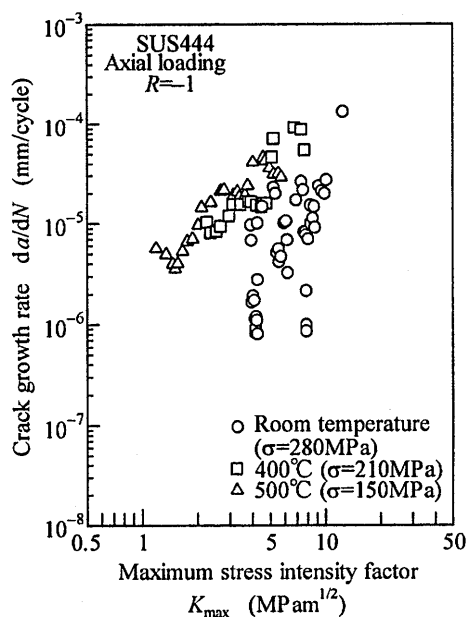


Fig.6 Relationship between da/dN and $K_{\max}$.

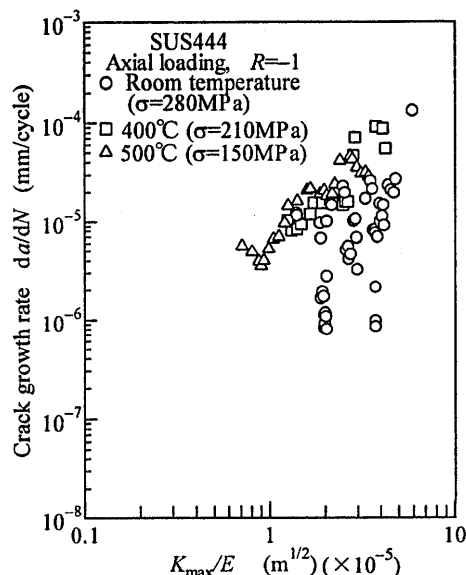


Fig.7 Relationship between da/dN and $K_{\max}/E$.

3 の破面では、温度上昇とともにリバーパターンを伴う平坦でぜい性的な破面が認められるようになり、この様相はき裂発生点のみでなく成長領域でも見られた。さらに、ぜい性的な破面の領域は 400°C より 500°C において広範囲に生じていた。すなわち、温度上昇とともに 475°C ぜい性によるぜい化が顕著になるためにき裂成長機構が変化し、Fig.7 に見られるように da/dN に差が生じたと考えられる。さらに、Fig.2 における $\sigma/\sigma_B - N_f$ 関係が一致しないことも、475°C ぜい性によってき裂発生や成長機構が異なったためと考えられる。

4 結 言

高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS444 を用いて、室温、400°C、500°C にて疲労試験を行い、疲労挙動に及ぼす温度の影響について検討した。その結果、温度の上昇に伴って疲労強度は低下するとともに、き裂成長抵抗も低下することが明らかとなった。(参考文献省略)