

討26 低合金鋼の高温低サイクル疲労寿命の推定

川崎製鉄(株) 技術研究所 ○成本朝雄 田中康浩
鎌田晃郎

1. 緒言

化学プラント、原子力プラントなどの高温圧力容器の設計には高温低サイクル疲労強度を考慮する必要がある。高温低サイクル疲労寿命の推定法としては、A S M E Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47にクリープと疲労の相互作用に基づく方法が示されており、またひずみ範囲分割法¹⁾などの推定法も提案されている。これらはいずれも疲労とクリープの相互作用を考慮したものであるが、高温低サイクル疲労破壊の機構は必ずしも明らかにはされていない。また、雰囲気の影響も重要な因子であり、疲労・クリープ・雰囲気の影響を考慮することの必要性が指摘されている²⁾。ここでは、低合金鋼について、温度・ひずみ速度・ひずみ波形を通じて上記3因子がどのように作用するかを調べるとともに、寿命推定を試みた。

2. 供試材および実験方法

供試材は4種のCr-Mo鋼であり、その化学組成と機械的性質を表1に示す。これらの鋼板から、試験片の長手方向が圧延方向と直角になるように図1に示す形状の試験片を採取し、表

表1. 供試材の化学組成と機械的性質

	Chemical composition (wt%)									Mech. prop.		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Y.S. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	El. %
A204B	0.25	0.24	0.73	0.010	0.008	0.01	0.03	0.04	0.49	352	52.7	33
A387-12	0.16	0.26	0.58	0.010	0.003	0.01	0.20	1.03	0.54	374	52.9	34
A387-22	0.13	0.08	0.51	0.009	0.008	0.12	0.12	2.41	1.01	479	59.9	28
A387-5	0.09	0.24	0.44	0.007	0.007	0.03	0.07	4.65	0.47	453	58.0	30

面をエメリー紙 # 400まで軸方向に研磨した。使用した試験機は容量5トンの電気油圧式疲労試験機である。高周波誘導加熱により所定の温度に昇温保持したのち、ゲージ長25mmのひずみ計を用いて軸ひずみ制御疲労試験を実施した。一部の試験は、雰囲気の影響を調べるために 1×10^{-5} torrの真空中で試験した。寿命の定義は、引張側荷重が安定状態から25%低下したときの繰返し数とした。

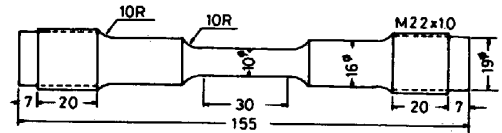


図1. 試験片形状および寸法 (mm)

3. 実験結果および考察

3.1 対称三角波試験

三角波による寿命 N_f と温度 T の関係をひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ をパラメータとして図2に示す。 N_f は塑性ひずみ振幅 ϵ_{PR} が1%のときの値に換算して示した。240℃以上で寿命が低下しはじめ、 $\dot{\epsilon}$ が小さいほど寿命の低下が著しい。図は省略したが、他の鋼種においても、また ϵ_{PR} が0.5%の場合も同様の結果が得られた。後述する真空中での試験結果では、対称三角波の場合は T 、 $\dot{\epsilon}$ の影響が現われないことから、この寿命の低下は雰囲気効果であると考えられ

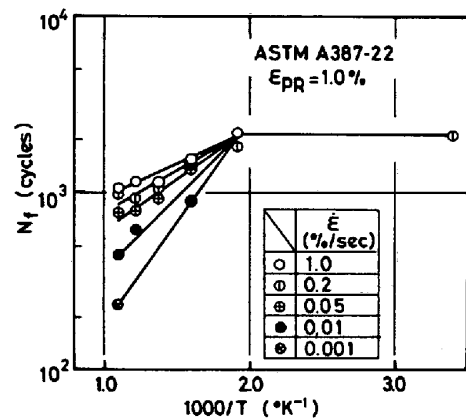


図2. 対称三角波における寿命と温度の関係

る。破断後の試験片の縦断面に見られる副き裂は、先端までほぼ同じ厚さに酸化されており、温度が高いほど、 $\dot{\epsilon}$ が小さいほどその厚さは増している。

き裂先端における酸化層の破壊と新生面の酸化が連続的に進行し、き裂の進展を促進していることがうかがえる。雰囲気による1サイクル当りの平均損傷量を ϕ_e とすると、 ϕ_e は次式で定義される。

$$\phi_e = 1/N_f - 1/N_o \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 N_o は室温での寿命である。 ϕ_e と温度の関係を図3に示す。A387-5の ϕ_e がやや小さい場合も見られるが、Cr-Mo含有量による ϕ_e の差は明確ではなく、むしろ化学組成による ϕ_e の差はないと見なすことができる。 ϵ_{PR} が0.5%の場合も同様の結果であり、 ϕ_e は鋼種によらず次式で近似できる。

$$\phi_e = 8.0 \times 10^{-3} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.27} \cdot \exp(-2500/T) : \epsilon_{PR} = 1.0\% \quad \dots\dots(2)$$

$$\phi_e = 4.0 \times 10^{-3} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.27} \cdot \exp(-2500/T) : \epsilon_{PR} = 0.5\% \quad \dots\dots(3)$$

(1)(2)(3)式より、室温における寿命を用いて任意の T , $\dot{\epsilon}$, ϵ_{PR} における寿命を推定することができる。図

5に寿命の推定値と実験値の比較を示したが両者はよく一致している。ちなみに、(1)式において ϕ_e が $1/N_o$ より十分大きい場合すなわち、高温で低ひずみ速度の場合は、Coffinらの周波数修正寿命の式³⁾と一致する。

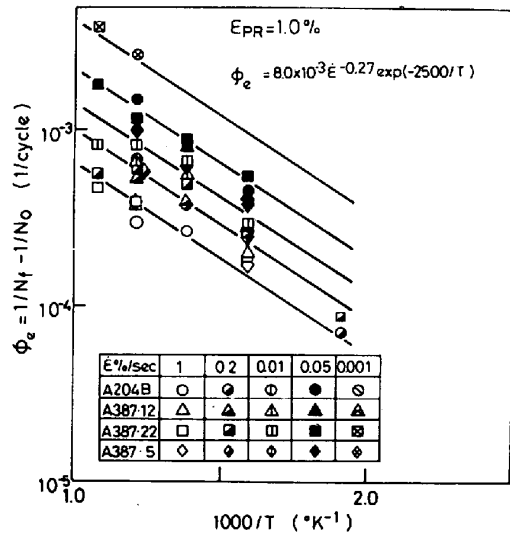


図3. 雰囲気による損傷量と温度の関係

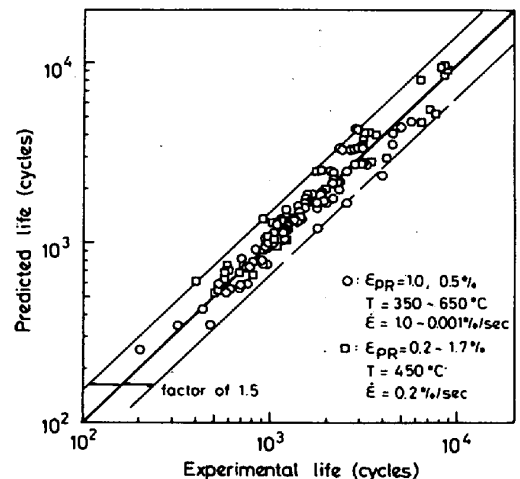


図4. 推定寿命と実験値の比較

3.2 鋸歯状波試験

引張側時間 τ_t と圧縮側時間 τ_c が異なる、いわゆる鋸歯状波における寿命の比較を図5に示す。同じ周期で比較すると、Fast-Slow波の寿命は対称三角波の寿命と一致しているが、Slow-Fast波の寿命はクリープ温度域で短寿命となっている。さらに τ_t を700秒と長くすると、寿命はより低下する。Fast-Slow波においては、対称三角波の場合と同様にき裂は表面から発生し、かつ酸化によって非常に太いき裂になっていることから、疲労+酸化損傷と考えられるのに対し、Slow-Fast波の場合は、表面き裂は比較的少ない。図6に破断した試験片の縦断面写真を示す。 τ_t が700秒に対し、 τ_c が7秒の場合は試験片表面に観察されるき裂は非常に微細なものであるが、 τ_c が長くなると表面き裂も長くなる。対称三角波における寿命、 N_e ,

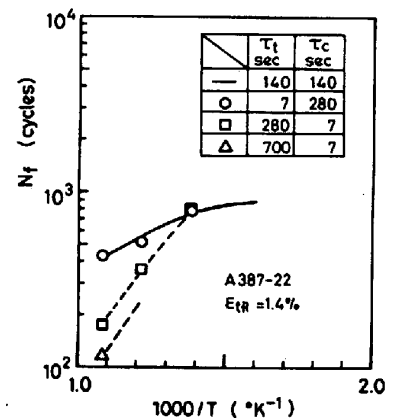
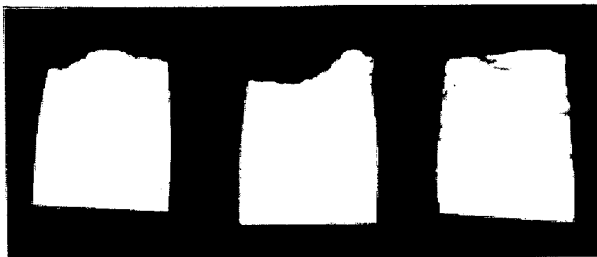


図5. 各種鋸歯状波における寿命の比較

に対する Slow-Fast 波の寿命, N_{SF} , の比と表面き裂の最大深さの関係を図7に示す。Slow-Fast 波では, 実際の寿命と関係なく (N_{SF}/N_e と a_{max} の間) により相関がみられる。 N_e を真の疲労寿命とみなせば, 試験片表面では疲労損傷がそれ独自の速度で進行しており, 表面における疲労損傷とは無関係に実際の寿命 N_{SF} が決定されている。

図8に疲労寿命とクリープ寿命の比較を示す。ここで, 疲労寿命に関しては, 安定状態のヒステリシスループの最大応力をクリープ応力とみなし, $(\tau_t - \tau_c) \times N_f$ をクリープ時間とみなした。疲労寿命とクリープ寿命はよく一致しており, Slow-Fast波における破壊形態はクリープ損傷によるものであることを示唆している。図9に τ_t を一定にしたときの τ_c と N_f の関係を示す。Slow-Fast波において τ_c が長くなると寿命が長くなり, やがて再び寿命が低下しはじめる。 τ_c が増加すると, クリープ損傷が軽減されて寿命が延びるが, さらに τ_c が増加すると破壊形態が疲労+酸化損傷型に変わり, $(\tau_t + \tau_c)$ が寿命決定因子になると考えて, それぞれ P_{LM} 値および(1)(2)(3)式から推定した寿命のいずれか短いほうを実線で示したが, 実験値の傾向とよく一致している。図10に τ_t が140秒の場合について, 大気中と真空中の寿命と τ_c の関係を比較して示した。クリープ破壊型と考えられる領域では, 大気中



$\tau_t/\tau_c=700/7$ 700 28 700 700
 $N_f=116(52.7\%)$ 172 (78.2%) 220 (100%)

図6. 破断後の試験片の縦断面写真
 (2.25Cr-1Mo, 650°C $\epsilon_{tR}=1.4\%$)

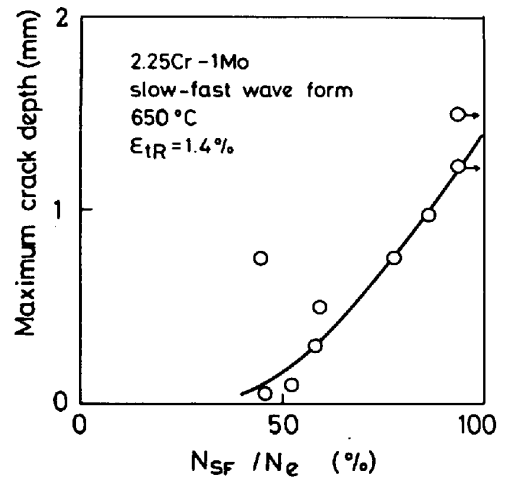


図7. N_{SF}/N_e と表面き裂の最大深さの関係

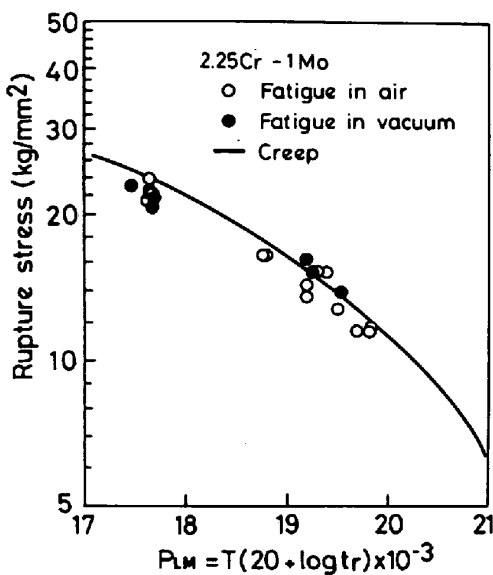


図8. 疲労寿命とクリープ寿命の比較

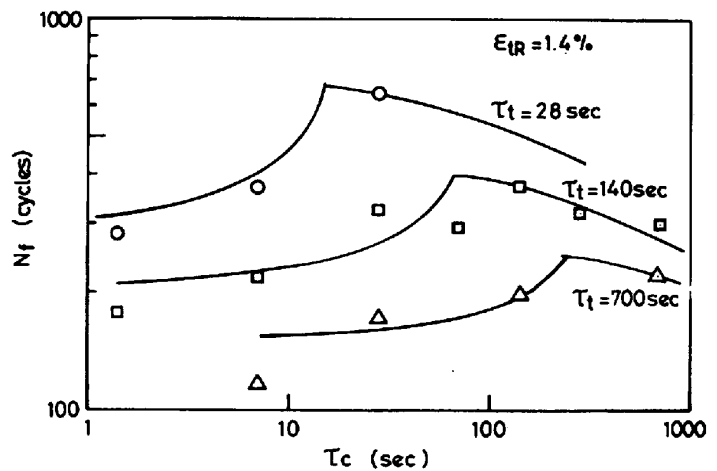


図9. 圧縮側時間と寿命の関係

と真空中で寿命に差はない。 τ_c が増加すると、大気中では疲労+酸化損傷型へ変わるのに対し、真空中では雰囲気による損傷が無いので、クリープ破壊型のまま寿命は増加しつづけ、ついには純粋な疲労である室温の疲労寿命と一致する。

図11にSlow-Fast波とSlow-Slow波における破面のSEM写真を示す。破面保護のため試験は真空中で行われた。Slow-Fast波の場合は試料内部に(a)に示した粒界らしき破面が見られるが、ほぼ全面がDimpleであり(b)クリープ破面と酷似している。Slow-Slow波における破面はやはりDimple状であるが1つのDimpleが異常に大きい。 τ_c の増加によってDimpleの核発生が抑えられたものと考えられる。

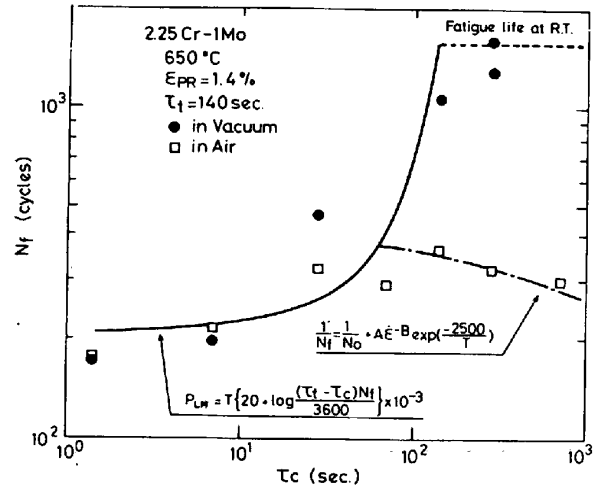
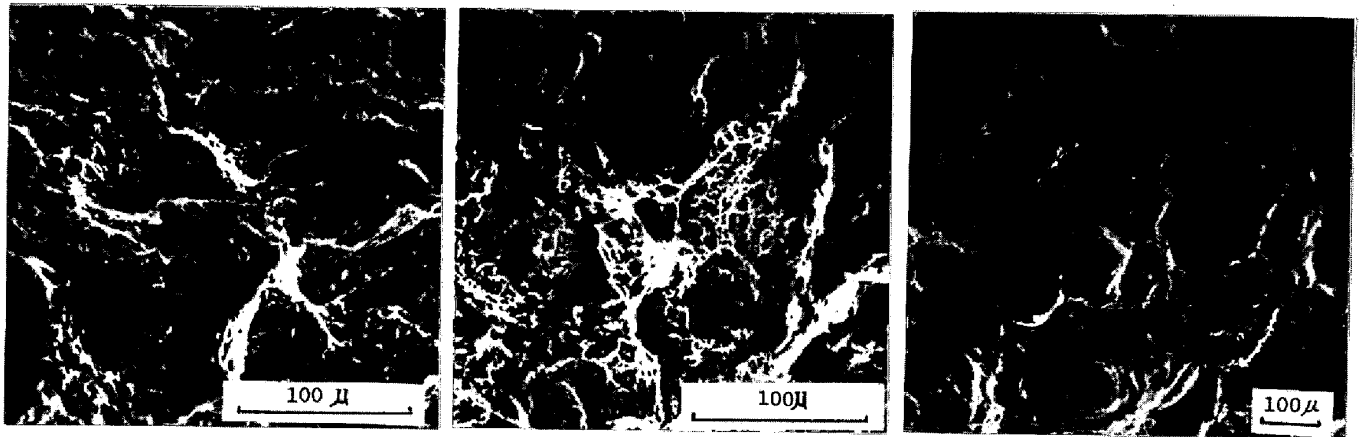


図10. 大気中と真空中の寿命と τ_c の関係



(a) Slow - Fast波

(b) Slow - Fast波

(c) Slow - Slow波

図11. Slow-Fast波およびSlow-Slow波における破面(650°C $\epsilon_{tR} = 1.4\%$)

4. 結言

2.25Cr-1Mo鋼他数種のCr-Mo鋼を用いて、クリープ、疲労、雰囲気の影響の相互作用について実験し、以下の結論を得た。

1. 大気中での破壊形態はクリープ型と疲労+酸化損傷型に大別されいずれか短寿命のほうが現われる。
2. クリープ型破壊は、クリープ温度におけるSlow-Fast波において現われ、 $(\tau_t - \tau_c)$ が寿命支配因子となる。また、この場合雰囲気の影響はない。
3. 疲労+酸化損傷型破壊は対称三角波あるいはFast-Slow波において現われ、この場合は $(\tau_t + \tau_c)$ が寿命支配因子となる。

参考文献

- 1) S. S. Manson. ; ASTM STP 520 (1973) 744
- 2) L. F. Coffin Jr. ; Proc. of Int. Conf. on Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure, (1972) 590
- 3) L. F. Coffin Jr. , Trans ASME 76 (1954) 931