

討25 炭素鋼及びクロムモリブデン鋼鋼板の低サイクル疲労特性 におよぼす温度、ひずみ速度の効果

金属材料技術研究所 ○金澤健二, 山口弘二, 小林一夫, 金尾王雄

1. 緒言

高温用機械、構造物に用いられる構造材料は、装置起動、停止に伴う熱ひずみの拘束により熱疲労破壊を起すことがあるので、安全な設計及び保守管理に際しては、使用される材料の高温低サイクル疲労特性を十分に把握しておくことが必要である。炭素鋼やクロムモリブデン(Cr-Mo)鋼の高温低サイクル疲労に関しては、温度、ひずみ速度、ひずみ波形的影響について調べられているが、試験条件の範囲も狭く、最も基本的な温度及びひずみ速度の効果を広い条件範囲にわたって調べた研究は少ない。

金材技研では疲労データシート作成計画の一環として、高温用材料については高温低サイクル疲労特性を明らかにしようとしている。本報告は、炭素鋼板SB49とCr-Mo鋼板SCMV4について、低サイクル疲労における繰返し変形及び疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性を検討したものである。

2. 供試材及び試験方法

供試材はボイラ及び圧力容器用炭素鋼SB49(板厚8mm)と圧力容器用Cr-Mo鋼SCMV4(板厚60mm)で、化学成分を表1に、熱処理条件を表2に示す。熱処理後の高温引張試験の結果を図1に示す。疲労試験片は直径6mm、長さ15mmの平行部を有する平滑材で、軸を圧延方向とし、板厚の1/4, 3/4の位置から採取した。疲労試験は油圧サーボ式試験機を用い、軸方向ひずみ制御で行った。ひずみ波形は三角波で、ひずみ速度及び温度条件を表3に示す。加熱は電気抵抗加熱炉による。

3. 実験結果

3.1 繰返し変形挙動 繰返しひずみに伴う応力幅の変化の一例を図2に示す。SB49鋼では、室温、200℃でひずみレベルの小さい条件を除き、繰返しひずみに伴う応力幅は増加し、繰返し硬化する。一方SCMV4鋼では、初期の数サイクルの間に応力幅が増加することもあがるが、全体的には応力幅は減少し、繰返し軟化する。

表1 化学成分 (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SB 49	0.26	0.26	0.77	0.007	0.012		
SCMV 4	0.11	0.24	0.51	0.005	0.002	2.29	0.99

表2 熱処理条件

SB 49	900°C/4hAC → 620°C/3.5hAC
SCMV 4	930°C/1hAC → 700°C/1hAC → 640°C/30hAC

繰返し応力・ひずみ曲線を求め、単純引張りにおける応力・ひずみ曲線と比較した。図3に同一塑性ひずみ幅に対する応力幅の温度依存性をひずみ速度をパラメータとして、単純引張りにおける0.2%耐力と合せて示す。SB49鋼では300℃で応力幅は極大を示し、応力幅のひずみ速度依存性は、200, 300℃で負り、400, 500℃で

表3 試験条件

	ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	温度 (°C)	試験条件					
			RT	200	300	400	500	600
SB49	10^{-3}	○	○	○	○	○	○	
	10^{-4}		○	○	○	○	○	
	10^{-5}			○	○	○	○	
SCMV4	10^{-3}	○		○	○	○	○	
	10^{-4}			○	○	○	○	
	10^{-5}					○	○	

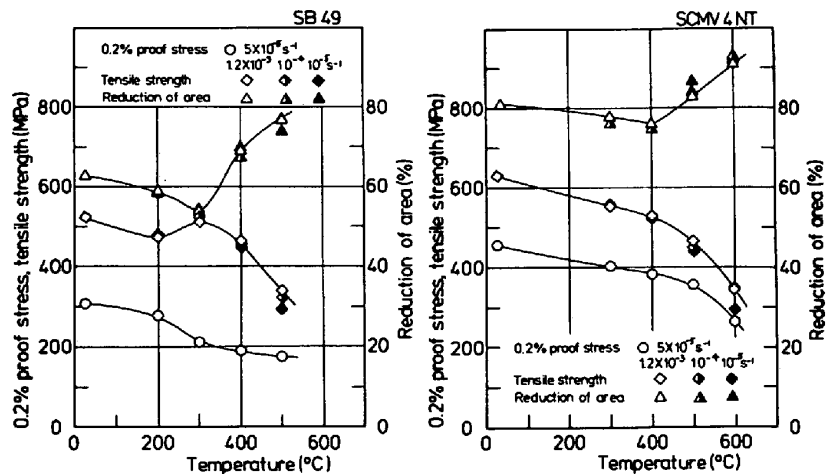


図1 高温引張特性

正となる。SCMV4鋼では、300~400℃における変化は小さいが、温度が高い程応力幅は低下する。また、300℃では負の、400℃以上では正の応力幅のひずみ速度依存性が見られる。両鋼種を比較すると、300℃を除きSCMV4鋼の方が応力幅は大きくなる。

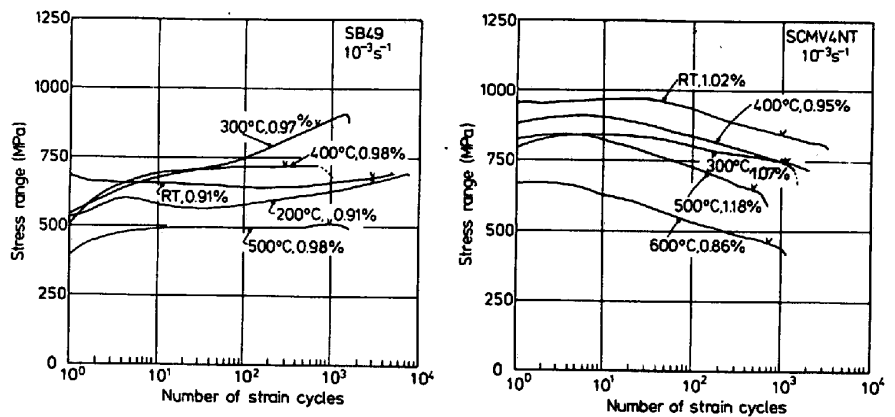


図2 繰返しひずみに伴う応力幅の変化

繰返し応力・ひずみ曲線を単純引張りにおける応力・ひずみ曲線と比較すると、SB49鋼では室温の低ひずみ域を除き高応力側に、SCMV4鋼では低応力側に位置した。0.2%耐力で比較すると、SB49鋼では300, 400℃において繰返し応力・ひずみ曲線の値が著しく大きくなり、SCMV4鋼では各温度において単引張りにおける耐力よりも小さくなっている。

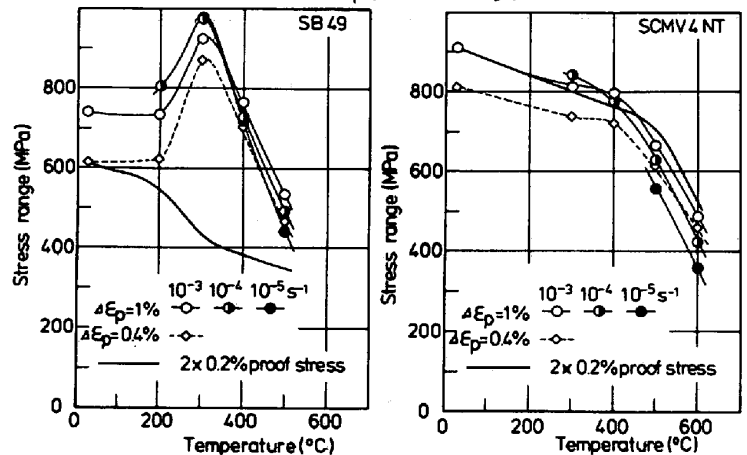


図3 応力幅の温度、ひずみ速度依存性

3.2 疲労寿命 塑性ひずみ幅 (ΔE_p) と疲労寿命 (N_{25})、弾性ひずみ幅 (ΔE_e) と N_{25} の関係を両対数グラフ上で直線であてはめ、 $\Delta E_p N_{25}^\alpha = C_1$ 、 $\Delta E_e N_{25}^\beta = C_2$ とし、全ひずみ幅 (ΔE_t) と N_{25} の関係はこれらを合成して $\Delta E_t = C_1 N_{25}^{-\alpha} + C_2 N_{25}^{-\beta}$ として表した。として $\Delta E_p = 1\%$ 、 $\Delta E_t = 1\%$ に対する疲労寿命をこれらの式より求め、温度に対してプロットしたのが図4である。

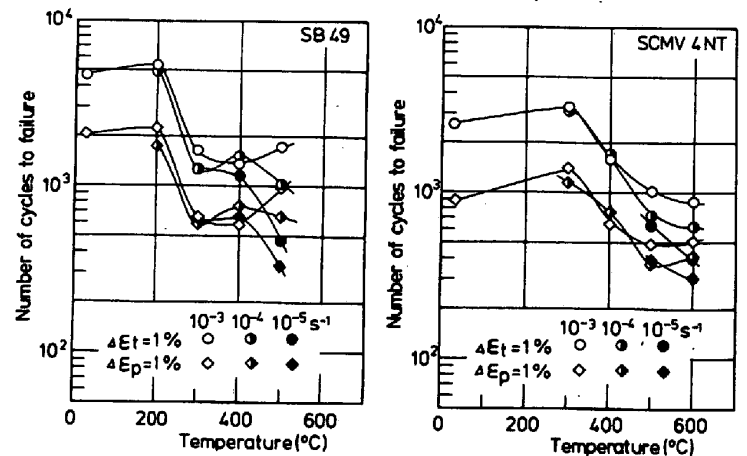


図4 疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性

疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性は鋼種によって異なる。SB49鋼では室温、200℃の疲労寿命に差は小さいが、300℃以上になると寿命は著しく低下する。500℃では、 $10^{-5} s^{-1}$ で400℃よりも疲労寿命は大きくなり、ひずみ速度依存性が顕著に現われる。SCMV4鋼では、300℃で室温より寿命はせめて大きくなる。300℃以上では温度が高くなるほど寿命は低下するが、500, 600℃では寿命の差は小さい。500℃以上ではひずみ速度が小さくなると寿命は低下する。

3.3 破面観察 疲労破面の走査電顕写真の一例を図5に示す。SCMV4鋼では条こんが観察された。500℃、 $10^{-5} s^{-1}$ の条件下でも条こんが比較的良く識別できるが(図5(a))、 $10^{-3} s^{-1}$ になると破面は厚く酸化物でおおわれるようになり破面は明瞭でなくなる。しかし部分的に酸化物をはく離した部分があり、そこでは(a)と同様に条こんが認められる(図5(b))。600℃、 $10^{-3} s^{-1}$ では(b)と同様に酸化物をはく離した領域に条こんが観察されたが、 $10^{-5} s^{-1}$ になると酸化物が一層厚くなるようであり、疲労破面

の特徴は明らかにできなかった。

SB49鋼でも茶こみが観察された(図5(c)). 500°Cにすると破面は厚く酸化物でおおわれるようになり, $10^{-5}s^{-1}$ では所々に酸化物をはく離した領域が見うれた. なお, SB49鋼の破面の特徴としては, 図5(d)に示すようにMnS界面のはく離によると思われる割れが破面に対して垂直方向に形成されていた.

4. 考察

炭素鋼SB49は繰返し硬化の挙動を示し, 特に300, 400°Cにおいて硬化が著しい. 炭素鋼では300°C付近の温度で, 固溶CとNと転位との相互作用による青熱せいの現象が現われるが, 繰返しひずみ下での著しい硬化も青熱せいの性に関連した動的ひずみ時効によるものと言えらる. SCM4相当の材料は焼存または熱処理を施すと繰返し硬化挙動を示すという結果が得られているが, 熱存らし, 焼もどし熱処理を施した本供試材では繰返し硬化挙動を示した. 本供試材については別途, 破断後の試験片から試料を切出し, 透過電顕で組織変化の状況を調べているが, 繰返し硬化の主な原因は, 熱処理過程において導入された転位が, 繰返し変形中に再配列を起すことによるものようである.

300°Cでは, SB49鋼の応力幅は動的ひずみ時効による硬化でSCM4鋼よりも大きくなっているが, その他の温度ではSCM4鋼の応力幅の方が大きい. これは, CrとMoが添加されることによる固溶強化と, CrとMoを添加することにより固溶C, N量が低下し, 300°C付近における動的ひずみ時効が抑えられる反面, 500°Cくらいの温度ではC, Nなどの侵入型元素とCrとMoなどの置換型元素の化学的相互作用に基づく強化機構が働くことによるものと思われる.

塑性ひずみ幅と疲労寿命の関係の材料, 試験条件による相違は, 各条件下における引張試験の破断延性(ϵ_f)と密接な関係があると古くから言われており, Mansonは

$$\Delta \epsilon_p N_{25}^{0.6} = \epsilon_f^{0.6} \left(\ln \frac{100}{100 - \psi} \right)^{0.6}$$

なる式を提唱している. ここで ψ は断面収縮率(%)である. 本供試材について $\Delta \epsilon_p / \epsilon_f^{0.6}$ に対して疲労寿命(N_{25})を7°ロットしたのが図6である.

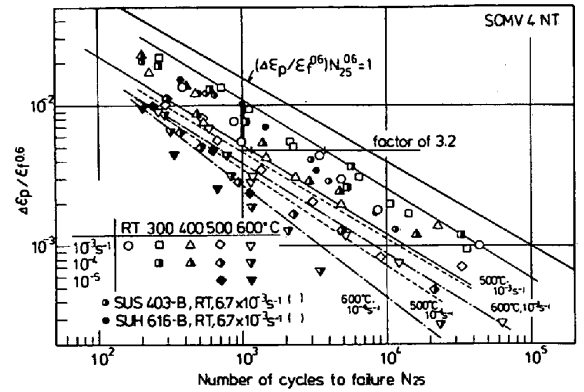
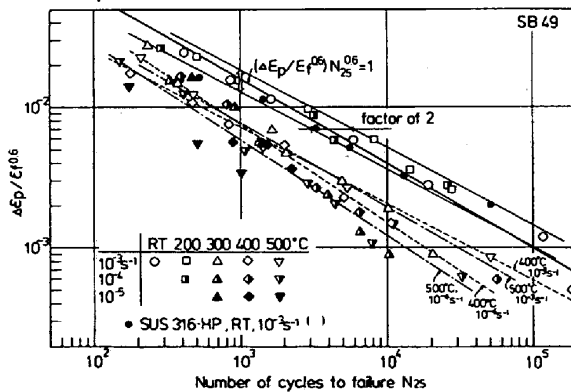


図6 $\Delta \epsilon_p / \epsilon_f^{0.6}$ と疲労寿命の関係

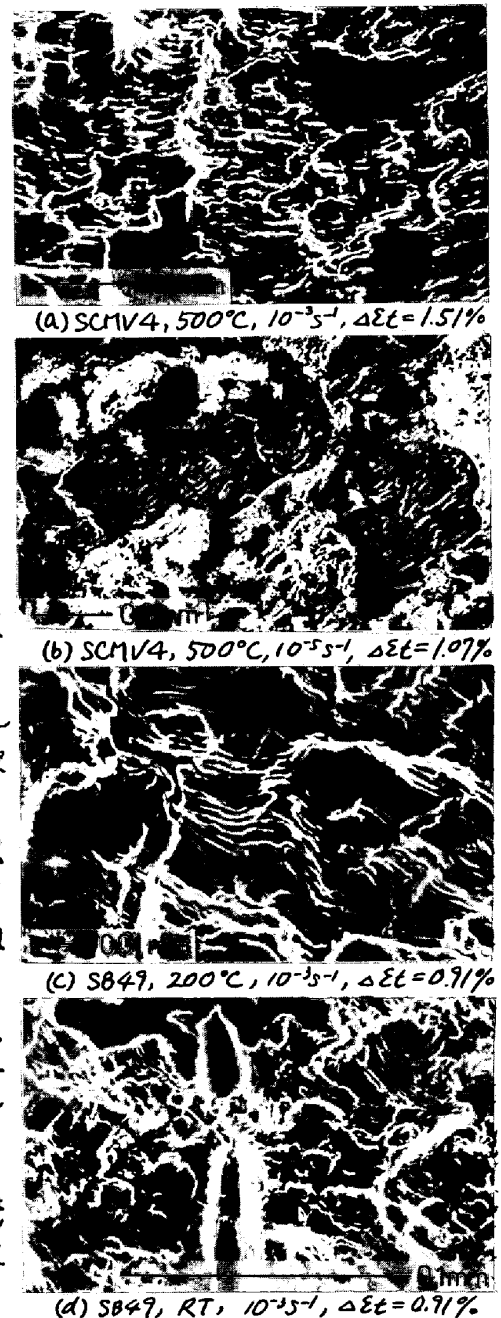


図5 疲労破面の走査電顕写真

SB49鋼では、室温、200℃のデー9は狭い範囲におさまり、ほぼ推定線上にある。300℃以上のデー9は推定線よりかなり低寿命側にある。一方SCMV4鋼では、室温~400℃のデー9をせよ幅は広いが一つのバンドで表してみると、それは推定線より寿命で1/2~1/5の位置にあり、明らかに合わない。より高温のデー9はさらに低寿命側になる。

室温における断面収縮率の値はSCMV4鋼の方がSB49鋼よりも大きいにもかかわらず、SCMV4鋼の疲労寿命の方が小さくなるのは、Mansonの式に相反する傾向にある。したがって室温のデー9を含むバンドで比較すると両鋼種は一致しない。しかし、図6のSB49鋼の図にSUS316-HP鋼(ψ=79%)のデー9を、SCMV4鋼の図にSUS403-B鋼(ψ=70%)、SUH616-B鋼(ψ=47%)のデー9をプロットすると、いずれも室温のデー9を含むバンドにほぼおさまっている。すなわち、室温を含めある程度高温域の疲労寿命に関しては、 $\Delta\epsilon_p/\epsilon_f^{0.6}$ でプロットするとMansonの推定式でほぼ表わされる場合、それよりも1/3程度低寿命側になる場合のあることがわかる。各々のグループの間では、断面収縮率の大きい材料の方が疲労寿命は大きくなる。このように鋼種によって低サイクル疲労寿命の ϵ_f 依存性が異なるのが向に起因するかは、今後の問題とするが、各グループの材料の特徴の一つは、前者の材料は繰返し硬化し、後者の材料は繰返し軟化することである。

SB49鋼では300℃以上、SCMV4鋼では500℃以上で $\Delta\epsilon_p/\epsilon_f^{0.6}-N_{25}$ 関係は低寿命側に傾き、温度、ひずみ速度の影響を強く受ける。そこでクリープ損傷の効果について検討する。各試験における応力振幅の代表値の応力に対するクリープ破断時間を求め、引張過程で塑性ひずみか手えられるのに相当する時間その応力条件にさらされていると見做して、破断時間比でクリープ損傷を求めた。なお、クリープ破断時間は本試料についてクリープ破断試験を行い、得られたデー9をLarson-Millerパラメータで整理し、内挿、外挿により求めた。結果の一例として塑性ひずみ幅1%に対する結果を表4に示す。クリープ損傷が1を超える場合もあり、評価方法に問題のあることは明らかである。しかし、一つの目安としてクリープ破断時間比でクリープ損傷を評価すると、SB49鋼では400、500℃で、SCMV4鋼では500、600℃で、温度が高く、ひずみ速度が小さい程クリープ損傷は大きくなる。これは、SB49鋼の300℃の結果を除き、図6に示す高温域での疲労寿命の低下傾向とほぼ一致しており、疲労寿命を支配する因子の一つとしてクリープ損傷を挙げることはできる。

一方破面観察により明らか存ように、これらの温度では酸化物の形成が著しくなり、き裂発生寿命、伝播速度にも影響を与えるものと考えられる。クリープ損傷の効果、酸化の効果いすれもより疲労寿命を支配するからについては、酸化効果のない雰囲気での試験などを通して明らかにしなければ存ない。なお、図5(b)に示すように、クリープ損傷の効果があると思われる条件下で形成された破面において、酸化物がはく離した所には条こんが観察されており、粒界破壊は確認されている。

SB49鋼の300℃における疲労寿命の低下は、断面収縮率が低下することを考慮しただけでは説明しきれない。一方この条件下ではクリープ損傷はほとんど無いと評価されており、また、破面には厚い酸化物が形成されておらず、酸化の効果による寿命の低下も考え難い。この温度では、動的ひずみ速度によって変形応力は著しく増大しており、このような効果が疲労寿命に対して重要な働きを存すものと考えられる。

表4 クリープ損傷($\Sigma\epsilon_c$)
 $\Delta\epsilon_p=1\%$

	°C	s ⁻¹	N ₂₅	$\Sigma\epsilon_c/t_c$
SB 49	300	10 ⁻⁵	625	0.00
		10 ⁻³	586	0.01
	400	10 ⁻⁴	768	0.04
		10 ⁻⁵	655	0.25
	500	10 ⁻³	992	1.26
		10 ⁻⁴	657	2.18
SCMV4	400	10 ⁻⁵	334	2.51
		10 ⁻⁴	767	0.00
	500	10 ⁻³	497	0.02
		10 ⁻⁴	363	0.08
	600	10 ⁻⁵	398	0.22
		10 ⁻³	512	0.35
	10 ⁻⁴	404	0.59	
	10 ⁻⁵	307	1.09	

結言、文献 省略