

## IV. 鋼の高温低サイクル疲労

座長 金属材料技術研究所  
金尾正雄

原子炉，発電プラント，化学工業プラント等における各種高温機器，構造物は安全性の追求と最適設計が強く要求される。これらに用いられる構造材料は装置の起動，停止に伴う熱ひずみの拘束により，熱疲労破壊を起こすことがある。このような破壊を防止するために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。さらには使用温度において繰り返される外力による切り欠き部のき裂発生寿命を予測するためにも，最近この方面の研究が，とくに安全な設計及び保守管理を行う必要上から，にわかに活発になってきた。この時点をとらえて，今回鋼の高温低サイクル疲労に関する討論会が開催され，熱心な討論が行われた。以下当日行われた5件の講演とそれに対する討論の主要点について述べる。なお，多数の討論があつたので，発言者の氏名は省略させていただいた。

討 24  $(\alpha+\gamma)$  相ステンレス鋼の高温繰り返し変形下の  $\alpha \rightarrow \sigma + \gamma^*$  変態挙動

京都大学大学院 津崎兼彰

この研究は  $(\alpha+\gamma)$  相ステンレス鋼の引張圧縮繰り返し変形下における  $\alpha \rightarrow \sigma + \gamma$  受態挙動を静的な場合と比較検討し，これらと疲労特性との関連を明らかにしたもので，次のことが示された。(1)  $(\sigma+\gamma)$  受態域の  $700^\circ\text{C}$  で繰り返し変形を行うと， $\sigma$  相生成により応力が急激に増加し，疲労寿命は短くなつた。(2)  $700^\circ\text{C}$  で 50% 変態率に達するまでの時間は，静的な場合約 600 min なのに対し，繰り返し変形の場合(全ひずみ幅  $\Delta\epsilon_f = 1\%$ ，ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 9 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ) 約 65 min と加速され，その程度は  $\Delta\epsilon_t$ ， $\dot{\epsilon}$  が大きいほど著しかつた。(3) 繰り返し変形下での  $(\sigma+\gamma)$  変態は，静的な場合と同様の Johnson-Mehl 型の速度式で表され， $\dot{\epsilon}$ ， $\Delta\epsilon_t$  を考慮した速度式を提案し，それに基づいた疲労寿命を検討した。

金属学的因子を考慮した研究とくに繰り返し変形下で生じる金属学的現象に関する研究は従来からさほど多くなく，疲労特性との関係などもさほど明らかにされていない。討論としては，破壊がある変態率の時に脆性的に起こることが示されているが，疲労破壊現象としてとらえるのではなく，破壊靱性などの問題として取り扱つたらどうかとの意見が出されたほか，破壊の状況，提案された速度式の適用性，組織の定量的評価のあり方等について多くの討論がなされた。

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及ぼす温度，ひずみ速度の効果

金属材料技術研究所 金澤健二

SB 49 鋼と SCMV 4 鋼の低サイクル疲労特性に及ぼす温度，ひずみ速度効果について広範囲の条件で検討し

た結果を示したものである。繰り返しひずみに対する変形応力は鋼種，温度，ひずみ速度に著しく依存したが，SB 49 鋼では青熱脆性，SCMV 4 鋼では Mo の固溶強化と青熱脆性における IS 効果などで説明できる。疲労寿命は試験温度に対して必ずしも単調に減少せず，高温度域において， $10^{-5} \text{s}^{-1}$  では試験温度の上昇に対して寿命は低下するが， $10^{-3} \text{s}^{-1}$  では逆に増加した。すなわち，ひずみ速度依存性は高温度で大きくなつた。これらの温度依存性を引張りやクリープ破断試験における破断絞りの温度依存性や低ひずみ速度条件下におけるき裂面での酸化物の形成効果等で説明した。

これに対して，この研究でも検討されているように Manson の関係と一致しない場合が多いが，クリープ温度域以下の場合では加工硬化あるいは軟化状態での引張延性の値を用いれば比較的合うのではないかと指摘があり，硬化材では定性的にはその傾向にある。しかし，軟化材では逆になり，き裂先端にひずみが集中しやすくなつたことが寿命を低下させるのではないかと回答があつた。また，高ひずみ速度条件下で高温度の方が寿命が長くなる理由についての質問に対して，酸化，クリープ損傷の効果が少ないと思われる高ひずみ速度条件下では，寿命は引張破断延性の温度依存性に支配されるのではないかと考えが示された。

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

この研究は 2.25Cr-1Mo 鋼等数種の Cr-Mo 鋼について，温度，ひずみ速度，波形の効果を通じて，疲労，クリープ，雰囲気の相互作用を検討したもので，次の結果が示された。(1) 大気中での破壊形態はクリープ型と疲労+酸化損傷に大別され，いずれか短寿命の方が現れる。(2) クリープ型破壊はクリープ温度における slow-fast 波で生じ，(引張側時間  $\tau_t$ +圧縮側時間  $\tau_c$ ) が寿命支配因子となり，雰囲気の影響はなかつた。(3) 疲労+酸化損傷型破壊は対称三角波または fast-slow 波で生じ， $(\tau_t+\tau_c)$  が寿命支配因子となつた。

大気中の対称三角波試験で生ずる寿命の温度，ひずみ速度依存性は雰囲気効果であるとしているが，討論において，酸化により寿命の低下する機構について，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てき裂の進展が促進されるという考え方の提示があり，酸化物が形成されることによりき裂先端部分の延性が低下すること，引張過程で形成された新生面が，酸化物の形成により，圧縮過程で再溶着しないことによるなどの意見の交換があつた。また，Larson-Miller パラメータによる整理の限界，破壊機構の相違による破面観察結果その他について討論が行われた。

討 27 ひずみ範囲分割法による高温疲労特性評価

住友金属工業(株)中央研究所 時政勝行

ひずみ範囲分割法による高温低サイクル疲労特性評価

の実際を示し、繰り返し変形特性と寿命、破壊形態及び雰囲気効果の関係を検討したもので、次の結果を示した。(1) 主要な 12 種の高温材料の  $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$  特性を紹介した。(2) 繰り返される非弾性ひずみ範囲の種類により破壊形態が異なつた。(3) Cr-Mo 鋼とオーステナイト鋼のき裂の発生と成長過程は若干異なる傾向にあつた。(4) SUS 304 鋼の  $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ ,  $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$  特性は雰囲気気に敏感であり、 $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ ,  $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$  特性は鈍感であり、これはき裂の発生、成長過程と密接に関係した。

これに対して、ひずみ時効温度域ではひずみ範囲の分割が困難になるがそのような場合の取り扱い方、 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$  関係を求める試験のひずみ波形の選び方、 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$  関係の温度、ひずみ速度、雰囲気依存性、設計に適用するさいの具体的方法などについて活発な討論が行われ、ひずみ範囲分割法に関し今後に残された問題が明らかになつた。

討 25, 26, 27 の討論を通じて、大気中試験における雰囲気効果に対する考え方に 2 とおりあり、討 25, 26 では温度が高くなるほど雰囲気の影響を大きく受けて寿命は低下すると考え、討 27 では高温であればいずれも酸化されるので雰囲気の効果は一様になると考えているようである。時間の関係で総合的に討論することはできなかった。クリープ損傷も重畳することになるので、それらを分離して扱うのは困難な点もあるが、酸化により疲労寿命が低下する機構と合わせ、今後明らかにすべき点と考える。

#### 討 28 鋼の高温低サイクル疲労き裂伝ば

京都大学工学部 大谷隆一

この研究では、低炭素鋼やオーステナイトステンレス鋼について、き裂伝ば挙動がクリープ支配型時間依存の

ものと、非クリープ支配の繰り返し数依存のものに大別できることを示した。そして、両者に関して非線型破壊力学的検討を行い、pp, cc, pc, 及び cp 型の波形で行われた高温低サイクル疲労のき裂伝ば速度が、 $dl/dN$  と疲労 J 積分範囲  $\Delta J_f$  あるいはクリープ J 積分範囲  $\Delta J_c$  のいずれかでよく整理できることを示した。また疲労とクリープの相互作用に関し、線形累積損傷則のように線形和で表される程度の相互作用すらないとは断言できない。しかし、動クリープ及びサイクリッククリープにおけるき裂発生、伝ばの破壊力学的考察等から、疲労とクリープの間に相互作用がないことを示唆するような結果も得られた。

この発表に対して、繰り返し応力下のき裂伝ば速度が負荷条件により  $\Delta J_c$  支配、 $\Delta J_f$  支郷に分かれる場合の破壊機構について質疑が行われ、また、き裂伝ばに及ぼす圧縮側変形の寄与、サイクリッククリープから動クリープへ遷移する場合の支配因子、 $\Delta J_c$  の求め方等について討論がなされた。

上述のように興味深い報告と極めて活発な討論が長時間にわたつて行われ、有意義に討論会を終えることができた。しかし、材質、温度、雰囲気、力学的条件など多くの因子が複雑にからみあう高温低サイクル疲労現象に対して、その本質を確かめようとする金属学的立場からの研究は、高温機器、構造物の安全性、信頼性をより高めるためにも必要なことであるが、現在は必ずしも多くない。とくに鉄鋼協会の場において金属学的立場からの研究がより一層活発になることが期待される。

終わりに、多くの熱心な討論があり、時間の関係でせつかくの発言を途中で打ち切つたり、抑制せざるを得なかつたことについて深く参加者各位におわびする。