

昭和 59 年度石原・浅田研究助成金による研究報告

クリープ条件下における特異な下限
界疲労き裂伝播挙動に関する非線形
破壊力学的研究

久保 司郎 (大阪大学工学部)

1. 研究の目的

高温設備機器の設計および保守管理の必要性から、各種耐熱鋼におけるクリープ・疲労重畳下のき裂挙動の解明と寿命推定法の確立が急務となっており、非線形破壊力学的手法を用いた研究が数多くなされている。著者らは最近、実用上重要でありながら従来ほとんど行われていない、低速度域におけるき裂伝播実験を、SUS304 鋼に対し 650°C で行つた。その結果、クリープ条件下においても繰返し数依存型（疲労型）き裂伝播に下限界が存在し、下限界領域では時間依存型（クリープ型）き裂伝播が現れ、このため見掛上疲労き裂伝播の下限界が消失することが明らかとなつた。この現象は、上記のような特定の鋼種、特定の温度に限らないものであれば、高温設備機器の安全評価のうえで重要である。

本研究の目的は、実用上重要でありながら、いままで気付かれていなかったこの問題に焦点を絞り、このような現象が特殊なものではなく普遍性をもつものであるか否かを、条件を変えた実験により明らかにすることにある。

2. 実験方法

供試材として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を使用した。用いた試験片は中央き裂試験片である。試験は 550°C、600°C、650°C および 700°C、大気中で行つた。荷重の負荷には電気油圧式サーボ試験機を用いた。実験はすべて定荷重制御下で行い、荷重波形として正弦波を用いた。

3. 実験結果

応力振幅が大きい、あるいは応力繰返し速度が速いため、疲労の影響を強くうけると考えられる条件下では、 $\Delta J_f > 0.2 \text{ kJ/m}^2$ の範囲で応力繰返し 1 回当たりのき裂伝播速度 da/dN と J 積分範囲 ΔJ_f の間にべき乗則が成立した。この範囲では、破面は疲労型き裂伝播に対応する粒内型であつた。 $\Delta J_f < 0.2 \text{ kJ/m}^2$ では、いずれの温度条件下でも da/dN が急激に小さくなり、疲労き裂伝播の下限界挙動が現れた。さらに、繰返し数依存型き裂伝播の下限界値 $(\Delta J_f)_{th}$ より ΔJ_f が小さい領域でも、下限界と類似の挙動が現れた。このような繰返し数依存型 $da/dN - \Delta J_f$ 特性には温度の影響はほとんどなかつた。

これに対し、応力繰返し速度を遅くしたため応力繰返し 1 回当たりのクリープの影響が強くなる条件下では、単位時間当たりのき裂伝播速度 da/dt は修正 J 積分 J' でよく整理でき、整理結果は静クリープき裂伝播実験により求められた時間依存型き裂伝播の特性線と一致した。 ΔJ_f が繰返し数依存型き裂伝播の下限界値 $(\Delta J_f)_{th}$ を下回る領域で、下限界と類似の挙動を示した実験点のき裂伝播速度 da/dt は J' で整理でき、時間依存型き裂伝播が現れていた。したがって、温度を変えた実験においても、 $(\Delta J_f)_{th}$ 以下の領域において現れた下限界挙動に類似した挙動は、時間依存型き裂伝播によるものであることがわかつた。これらの時間依存型き裂伝播が現れた範囲では、クリープき裂伝播と同様の粒界破面が認められた。この時間依存型き裂伝播速度 da/dt と J' の関係においても温度の影響は小さかつた。

650°C および 700°C の時間依存型き裂伝播では、荷重繰返しによる J' の加速はほとんどなかつた。これに対し、550°C および 600°C では、荷重繰返しがあるときの J' 値が静的負荷のもとにおける値よりもかなり高くなつた。

き裂伝播速度が繰返し数依存型になるか、あるいは時間依存型になるかを、繰返し数依存型および時間依存型き裂伝播特性を用いて、 $\Delta J_c - \Delta J_f$ 線図上にマップ状に表示すると図 1 のようになる。ここに、 ΔJ_c は負荷 1 サイクル中の J' の積分値である。図には 550°C における実験結果も記されている。このき裂伝播依存モード・マップを用いることにより、550°C から 700°C の温度範囲で繰返し数依存型き裂伝播領域にある実験点と時間依存型き裂伝播領域にある実験点とが合理的に分離でき

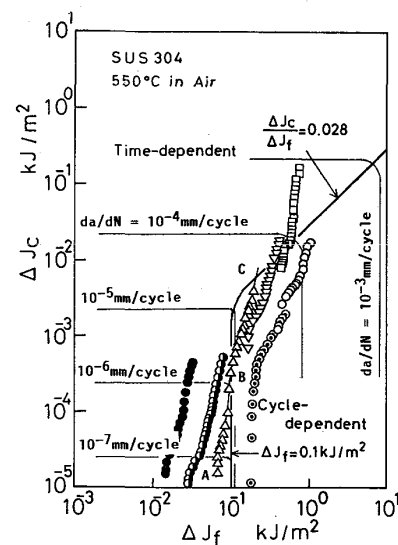


図 1 クリープ・疲労条件下のき裂伝ば依存モード・マップ

た。図のように、繰返し数依存型き裂伝播の下限界の存在のため、下限界領域では時間依存型き裂伝播が現れる。このことより、応力拡大係数範囲 ΔK あるいは J 積分範囲 ΔJ_I が疲労き裂伝播の下限界値より低い値であつても、時間依存型成分の存在により、たとえ遅くはあつてもき裂は伝播することになる。したがつて、時間が経過すると ΔK (または ΔJ_I) がそれらの下限界値を上回り (たとえば図中 B 点)、このため比較的急速な繰返し数依存型き裂伝播が現れると予想される。このように、高温クリープ条件下では時間依存型き裂伝播速度成分の存在によりき裂伝播が生じる。このため下限界が事実上消失し、これがその後の急激なき裂伝播の引金となる可能性がある。したがつて、クリープ条件下では時間依存型き裂伝播の寄与を評価しておく必要があるものと考えられる。

“鉄鋼中の水素同位体の固溶状態と拡散係数”に関する研究報告

羽木 秀樹 (九州大学工学部)

本研究では (1) 純鉄中における水素同位体 (水素, 重水素, トリチウム) の拡散係数の測定, (2) 純鉄中の水素同位体の拡散挙動に影響を与える格子欠陥の決定, (3) その格子欠陥と水素同位体との結合エネルギーを求めること, (4) 純鉄中の水素同位体の拡散係数に対する侵入型不純物の影響を調べること, (5) 純鉄と炭素鋼における電解水素吸収による微小クラックの発生過程の解明を行つた。

(1) は、電気化学的透過法によつて測定が行われた。硫酸水溶液、重硫酸重水溶液、硫酸トリチウム水溶液を用いて測定された十分に焼鈍した純鉄中の水素と重水素の拡散係数の温度依存性は、 $D_H(m^2/s) = ((0.6-2.1) \times 10^{-7}) \exp(-(4.9-8.0) (kJ/mol)/RT)$, $D_D(m^2/s) = ((0.5-1.9) \times 10^{-7}) \exp(-(5.6-9.0) (kJ/mol)/RT)$ で表され、286 K におけるトリチウムの拡散係数は $D_T = 9 \times 10^{-10} m^2/s$ であつた。冷間加工した場合には、それらの温度依存性は単一のアレニウス式では表すことができない。284 K における 9% 冷間加工試料では $D_H = 4 \times 10^{-9} m^2/s$, $D_D = 2 \times 10^{-10} m^2/s$, $D_T = 3 \times 10^{-10} m^2/s$ であつた。これらの拡散係数における同位元素依存性は、焼鈍試料では $D_H > D_D > D_T$ であり、従来他の bcc 金属で知られている順序と一致する。しかし冷間加工試料ではその順序と異なる。この原因については今後検討する。

さらにアルコール溶液を用いた電気化学的透過法によつて 273 K 以下での測定を行つた。このような低温では、高温で焼鈍した試料であつても、拡散係数の測定値は格子欠陥の影響を受けて高温での測定値からの外挿値

よりも小さくなる。

(2) においては、種々の冷間加工と熱処理を施した鉄試料中の水素と重水素の拡散係数を電気化学的透過法によつて測定した。冷間加工によつてこれらの拡散係数は著しく減少し、再結晶温度以上での熱処理によつて回復することから、これらの拡散係数に最も大きな影響を持つ格子欠陥は、転位であることがわかつた。拡散係数の温度依存性をトラップモデルで解析してトラップサイトの数を算出し、転位密度の実測値と比較したところ、これらは比例することが確かめられた。

(3) においては、水素と重水素の拡散係数の温度依存性をトラップモデルで解析して、格子欠陥 (転位) との結合エネルギーを算出するとともに、従来報告されているその値を検討した。その結果、結合エネルギーは水素と重水素とで同じ値であり、約 27 kJ/mol であることがわかつた。また転位のトラップ効果に対する同位元素効果はないことがわかつた。

(4) では、侵入型不純物量の異なる鉄試料を冷間加工した後、種々の熱処理を施して、水素の拡散係数の変化を調べた。転位密度の小さな試料では、従来報告されている高純度鉄中での値とほぼ同じであり、転位の影響を受けていない水素の拡散係数に対しては、侵入型不純物の影響は認められなかつた。しかし侵入型不純物量の多い試料では、冷間加工後侵入型不純物の拡散の起こる温度に長時間放置すると、転位密度が変化しなくても水素の拡散係数はわずかに回復する。このことから、転位のトラップ効果は侵入型不純物によつて弱められることがわかつた。

(5) においては、純鉄および組織の異なる各種の炭素鋼にカソード電解法で水素を吸収させた場合に認められる微小クラックの発生過程を、試料の透過電顕観察、走査電顕観察、アコースティックエミッションの検出、水素吸収量の測定などから次のように推定した: (i) 水素のトラップ位置である析出物界面や結晶粒界に偏析した水素が析出して、大きな内部応力を発生し、転位を放出する。(ii) この内部応力は長範囲にはおよばないので、転位の運動は短範囲に限られる。(iii) 発生した転位は発生源の近傍で面状に集積して、その転位が転位壁を形成し、そこに水素が偏析する。(iv) 転位壁に偏析した水素の析出による内部応力の発生によつて、転位壁の場所に微小クラックが生じる。

高純度鉄の変形および破壊に対する極微量酸素の影響

丸山 公一 (東北大学工学部)

目的: 侵入型元素が鉄の機械的性質に大きな影響を及