

金属疲労強度と水素の関係について

九州大学大学院工学研究院
機械科学部門 教授

野口 博司
Hiroshi Noguchi



1. 緒言

水素は環境保全およびエネルギー安定供給などの観点から大きな期待が寄せられており、水素燃料は近い将来に様々な分野で利用されることが予想される。しかしながら現段階では、水素を安全に取り扱うための技術が十分確立しているとは言い難い。問題点の一つとして、水素が金属材料に固溶して、その強度を低下させる場合のあることが知られている。このことは古くから知られている現象ではあるが、そのメカニズムが十分に明らかになっていないこともあり、水素環境下の強度評価法は、十分に確立されていない。燃料電池車をはじめとする水素を充填した輸送機器の安全性を、長期間保証するためには、材料の疲労強度に及ぼす水素の影響を明らかにすることが不可欠である。

ところでオーステナイト系ステンレス鋼は、耐水素性に優れた材料として、水素を利用する装置や機器などに広く利用されてきた材料であるが、水素陰極チャージや高温高圧水素雰囲気での脆化が報告されるなど、水素環境下における強度の安全性が課題となってきた。本稿ではオーステナイト系ステンレス鋼の代表である SUS 304 鋼の水素雰囲気における疲労特性の調査を通じて、金属疲労特性に及ぼす水素の影響について考察したい。

2. 試験結果

2.1 疲労寿命

水素が材料の疲労寿命に及ぼす影響を調べるために、大気中および水素中において疲労試験を行った。図1に全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_t$ と破断寿命曲線 N_f の関係を示す。長寿命域では、水素中の方が大気中比べて寿命が長い傾向にあるが、水素の影響は明確には認められない。水素の影響を明確にするためには、さらに詳細な検討が必要と思われる。

2.2 疲労き裂の発生寿命と伝ば寿命

本節では、疲労過程を疲労き裂発生過程と、疲労き裂過程に分けて、水素雰囲気の影響を評価する。そのために大気中、水素中および窒素中において、その場の観察を行いながら、疲労試験を行った。図

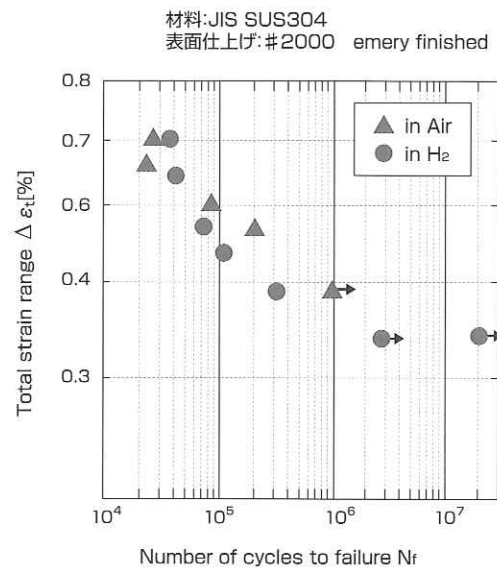


図1 大気中と水素中における全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_t$ と破断寿命 N_f の関係

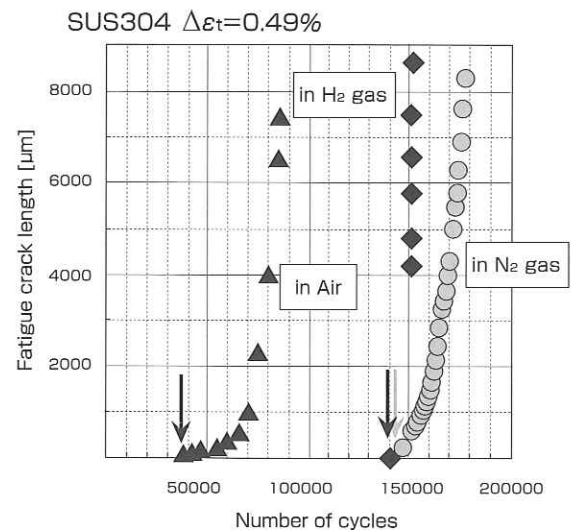


図2 負荷繰返し数と疲労き裂長さの関係の環境間相違

2は、疲労き裂発生までの繰返し数と、その後の伝ば過程を表すグラフである（負荷条件は3環境とも

に $\Delta \epsilon = 0.49\%$)。水素中における疲労き裂発生寿命は、大気中より長くて、窒素中と同程度であることから、水素中では大気中と比較して、無酸素・無水蒸気であることによって、疲労き裂発生寿命が長くなったことが分かる。

一方で、疲労き裂伝ば速度の環境間の違いは、図3より分かる。この図は塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p = 0.15\%$ の条件下における疲労き裂伝ば速度 dl/dN と、疲労き裂長さ l の関係を示している。大気中と窒素中における疲労き裂伝ば速度は同程度であり、水素中におけるそれらの環境と比較して、伝ば速度は高い。雰囲気中に存在する水素によって、疲労き裂伝ば速度が加速していることが分かる。また以上の結果より、疲労き裂発生と疲労き裂伝ばの過程では、異なる水素雰囲気の影響が存在するため、疲労特性に及ぼす水素ガス雰囲気の影響は、それぞれの過程に分けて考える必要のあることが分かる。

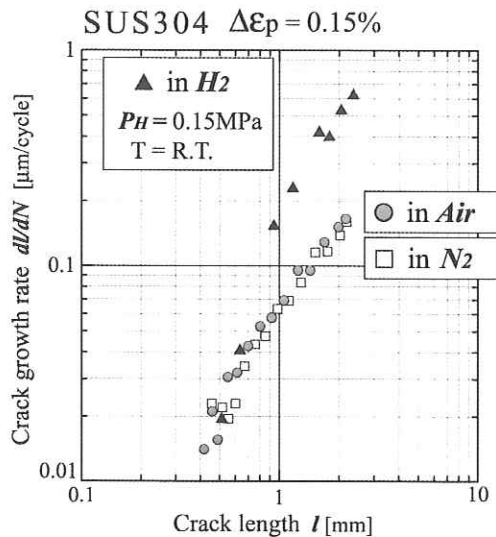


図3 環境間における疲労き裂伝ば速度 dl/dN の相違

2.3 疲労き裂伝ば加速のメカニズム

本節では、水素による疲労き裂伝ば加速のメカニズムについて述べる。図4は、大気中と水素中における疲労き裂伝ば速度が等しい条件下での両環境における1サイクル内の疲労き裂開口変位幅を示している。疲労き裂伝ば速度が等しいとき、疲労き裂先端での開口変位 (CTOD) は、両環境でほぼ等しいが、疲労き裂後方の開き方が異なっており、水素中では大気中と比較して、き裂後方での開口変位幅が小さい。このことは、水素により塑性変形が、疲労き裂先端近傍へ集中しやすくなることを示している。この変化は、水素が塑性変形量そのものが変化していることを示唆するものではない。

しかしながら、これは変形の総量のうち、疲労き裂伝ばに寄与する、き裂先端部での変形量の割合を大きくするために、疲労き裂伝ば速度を高める原因となる。なおこの議論は、疲労き裂伝ばのメカニズ

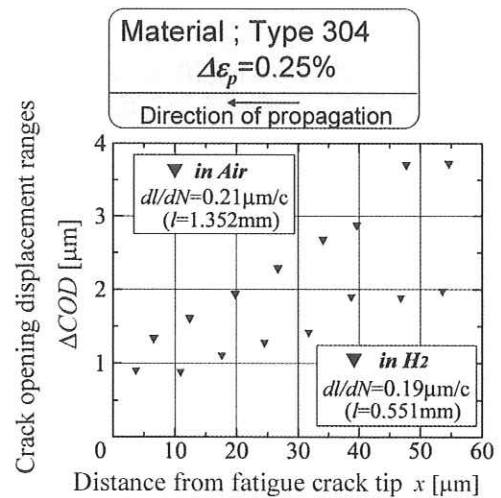
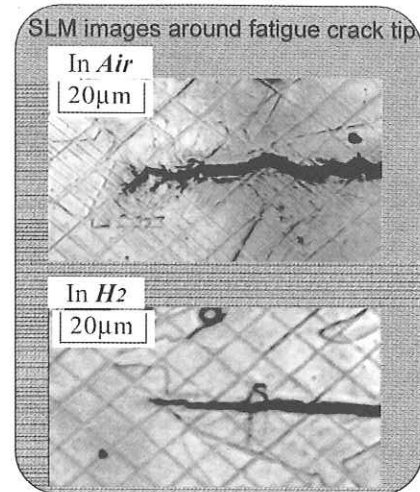


図4 大気中と水素中の疲労き裂開口形状の相違

ムそのものが、大気中と水素中で、ほぼ変わらないことを前提としたものであるが、通常の疲労き裂伝ば機構 (すべり面分離機構) が、水素中においても成立することについて、疲労き裂先端近傍のすべり挙動の詳細な観察により明らかにしている¹⁾。

最後に紙面の都合上、前節で述べた水素中で疲労き裂発生寿命が長くなった原因のメカニズムに関する記述は見送ったが、興味を持っていただけた方は、以下の文献を参照していただければ幸甚である²⁾。

1) Y. Oda and H. Noguchi, Observation of Hydrogen Effects on Fatigue Crack Growth Behaviour in an 18Cr-3Ni Austenitic Stainless Steel, International Journal of Fracture, 132 - 2 (2005), 99 - 113.

2) Y. Aoki, K. Kawamoto, Y. Oda, H. Noguchi and K. Higashida, Fatigue Characteristics of a Type 304 Austenitic Stainless Steel in Hydrogen Gas Environment, International Journal of Fracture, 133 - 3 (2005), 277 - 288.