

TiNi 形状記憶合金細線の水素劣化挙動に 及ぼす細線径の影響

神戸大学[院] ○川西翔 神戸大学 田中拓 村田製作所 北川知世
神戸大学[院] 宮部成央 神戸大学 中井善一

Size Effect on Hydrogen Embrittlement Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Wire
Tsubasa KAWANISHI, Hiroshi TANAKA, Tomoyo KITAGAWA, Naruo MIYABE and Yoshikazu NAKAI

1 緒 言

形状記憶合金(SMA)アクチュエータは単純な機構のため小型化が可能で、特に TiNi 合金は回復力、疲労強度に優れており、マイクロアクチュエータへの利用が期待されている。しかし TiNi 合金は水素吸収により劣化することが知られているが、従来の研究はバルク材を対象としたものに限定されている。そこで本研究では、直径が異なる 2 種類の TiNi 形状記憶合金細線を用い、水素吸収による強度への影響を検討した。

2 水素チャージおよび SEM 観察

試料として直径 1.0mm および直径 0.1mm の TiNi 系 SMA 細線 (Ti: 45%, Ni: 55%) を用いた。水素チャージには陰極電解チャージ法を用い、電解液は 1mol/L の NaOH、電流密度 127mA/mm²、室温で行った。

水素チャージ後の試料断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。10.8ks、および 54ks 水素チャージした後の直径 1.0mm の試料断面を Fig. 1(a)(b) に示す。これより表面付近に変質層ができていることが確認でき、これは水素拡散により脆化した層と考えられる。また、直径 0.1mm でも同様の層が確認できた。さらにチャージ時間と脆化層厚さの関係を Fig. 1(c) に示す。直径 1.0mm、0.1mm ともにチャージ時間が長くなれば脆化層厚さが増加する傾向が見られた。また、脆化層の増加速度は試料径に依存しないことが分かる。

3 引張試験

引張試験片は全長90mmとし、中央部10mmのみに水素チャージを行えるように、中央部以外にゴム状弾性接着剤を塗ることでマスキングし、水素チャージを行った。直径1.0mmの試験では負荷速度は 8.33×10^{-4} mm/sec、あるいは0.1mm/secとし室温で試験を行った。直径0.1mmの試験では負荷速度は0.1mm/secとし、室温で試験を行った。

得られた水素チャージ時間と引張強さの関係を Fig. 2 に示す。この結果よりチャージ時間が長くなれば、引張強さが低下することがわかった。さらに、直径0.1mmの引張強さの低下は直径1.0mmよりも著しいことが分かる。

Fig. 3(a)(b)に、3.6ks、および 54ks 水素チャージ後の破断試験片の SEM 写真を示す。破断部以外にも多くのき裂が表面脆化層に発生している。このき裂は概ね等間隔で発生しており、チャージ時間が長い場合ほど、つまり脆化層が厚いものほど間隔が広がる傾向にあった。この観察結果から、脆化層に発生したき裂のため、破断時において脆化層は応力を支えていないものと考えられる。

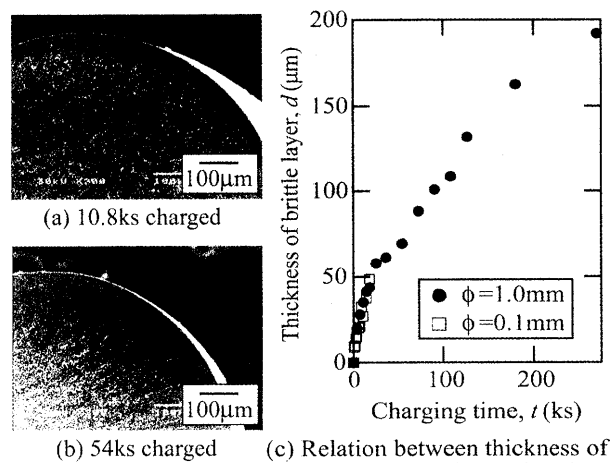


Fig. 1 Formation of surface brittle layer.

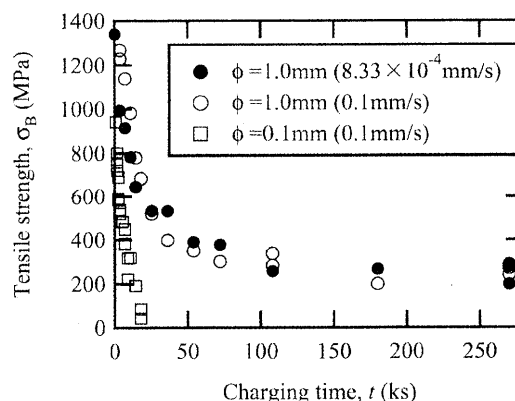


Fig. 2 Relationship between tensile strength and charging time.

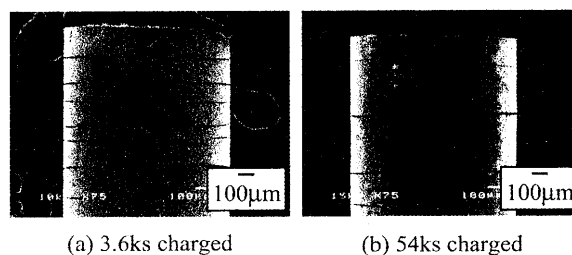


Fig. 3 SEM images of specimen surface ($\phi=1.0\text{mm}$).

4 強度評価

前項までの結果から、水素を吸収した TiNi 形状記憶合金細線の引張破壊に対しては、表面に形成された脆化層

が大きく影響していることは明らかである。ここでは、観察された引張破壊メカニズムに基づき、水素チャージ材の強度評価法について検討する。

まず、脆化層に発生したき裂のため、破断時において脆化層は引張応力を支えていないものと考え、破断試験力を脆化していない部分の面積で除した破断時正味応力 σ_{net} を求めて、水素チャージ時間に対してプロットしたのが Fig. 4 である。破断時正味応力は一定とならずに、 $\phi = 0.1\text{mm}$ で未脆化部分の面積が 0 に近づいた数点のデータを除けば、水素チャージ時間が長くなるにつれて、つまり脆化層き裂が深くなるにつれて減少傾向にある。この結果から、TiNi 細線の引張強さの低下を解析するためには、脆化層が応力を支えないことによる有効断面積の減少だけでなく、脆化層き裂を考慮した破壊力学的取り扱いが必要と考えられる。

そこで、引張破断前に脆化層が割れ、Fig. 5 で示すように脆化層厚さに等しい深さ d の環状き裂が等間隔 h で生じているものとし、限界応力拡大係数 K_c を算出し、水素チャージ時間との関係を Fig. 6 にまとめた。 $\phi = 0.1\text{mm}$ では K_c が $10 \text{ MPam}^{1/2}$ を超えるデータが 3 点あるが、これは断面の大半が脆化層となっており、き裂発生後のリガメント寸法が非常に小さいため、小規模降伏状態から逸脱した結果と考えられる。これらの点を除いては、ほぼ $K_c = 5 \sim 8 \text{ MPam}^{1/2}$ の間に収まっていることから、強度を支配するパラメータとしては、Fig. 4 に示した正味応力 σ_{net} よりも、き裂の存在を考慮した K_c がより妥当と考えられる。しかし詳細に見ると、チャージ時間が 10 ks 以下と非常に短い領域では、 $\phi = 0.1\text{mm}$ に比べて $\phi = 1.0\text{mm}$ の K_c が大きくなる細線径依存性が認められ、破壊力学の適用にも問題が残る。

それを検討するため、この K_c の値を脆化層厚さ、つまり仮定したき裂深さに対してプロットしたものを Fig. 7 に示す。図中の曲線は、破壊力学に基づく破壊規準ではなく、試験力を未脆化部分の断面積で除した正味応力 σ_{net} が未チャージ材の引張強さ 1340 MPa に達したとき破壊するとして、そのときの限界応力拡大係数を求めたものである。 $\phi = 1.0\text{mm}$ の場合は、正味応力規準に基づく曲線よりも実験で得られた K_c が小さく、正味応力が限界に達する前に破壊力学規準を満たして破壊していると考えられることができる。一方、 $\phi = 0.1\text{mm}$ の場合は、リガメント寸法が非常に小さくなる 3 つのデータ点を除けば、正味応力規準に基づく曲線と実験結果が比較的良好に一致しており、応力拡大係数が TiNi 本来の限界値に達する前に正味応力が限界に達して破壊していると解釈できる。このような $\phi = 1.0\text{mm}$ と $\phi = 0.1\text{mm}$ の破壊条件の違いが、チャージ時間が短い領域、つまり脆化層が非常に薄い領域における K_c の細線径依存性の原因と考えられる。したがって、破壊力学による予測と正味応力規準による予測を組み合わせることによって、幅広い線径に対して強度の予測が可能になると期待される。

(参考文献は省略)

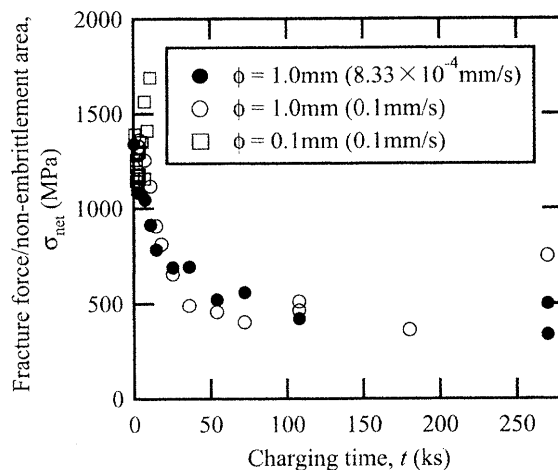


Fig. 4 Relationship between fracture force/non-embrittlement area and charging time.

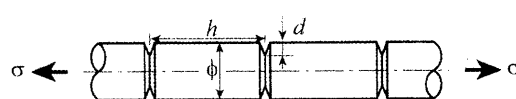


Fig. 5 Round bar with a periodic array of circumferential cracks

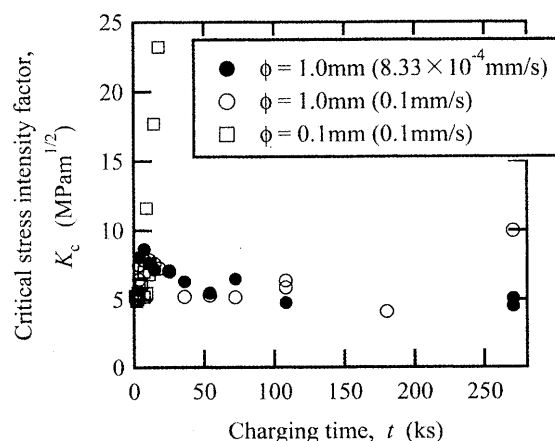


Fig. 6 Relationship between critical stress intensity factor and charging time.

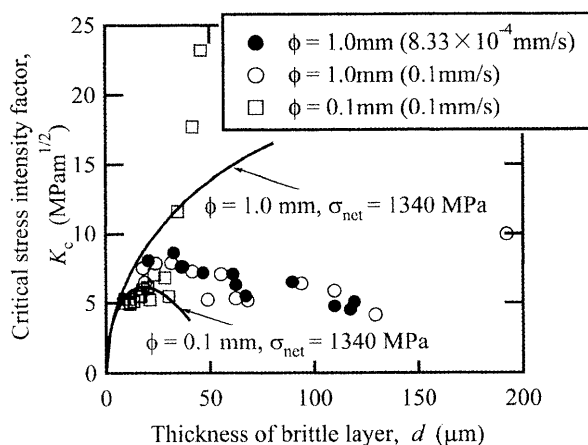


Fig. 7 Relationship between critical stress intensity factor and thickness of brittle layer.