九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Al-Zn-Mgアルミニウム合金の動的水素分配および水素脆化挙動評価

藤原, 比呂

https://hdl.handle.net/2324/4496064

出版情報：Kyushu University, 2021, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

（様式２）

氏　　名　：　藤原比呂

論 文 名　：　Al-Zn-Mg アルミニウム合金の動的水素分配および水素脆化挙動評価

区　　分　：　甲

論　文　内　容　の　要　旨

アルミニウムは比強度が高く優れた加工性を有する金属材料として広い分野で使用される。その中で，7000 系（Al-Zn-Mg ないし Al-Zn-Mg-Cu）合金は，アルミニウム合金で最高強度を持つ合金として知られており，航空機や新幹線など高強度が必要とされる構造部材に使用されている。Al-Zn-Mg 合金は，高強度化に伴い応力腐食割れおよび水素脆化の感受性が増す。そのため，実用材料として利用するためには，水素脆化挙動を理解することが肝要である。

近年，第一原理計算により，$MgZn_2$ 析出物／アルミニウム界面で水素が濃化することで界面が剥離することが示された。そして，この界面剥離が擬へき開破壊発生の要因である可能性が示された。また，粒界も同様に水素が濃化することで剥離が生じることが示された。そして，この剥離挙動が粒界破壊の発生の要因であると考えられる。このことから，特定のトラップサイトへ水素が分配されることで水素脆化が生じると考えられる。一方で，これまでに報告された Al-Zn-Mg 合金の水素分配状態と界面剥離基準を比較すると，界面の剥離には，粒界で 10^7 倍，析出物で数倍水素が濃化する必要があることがわかる。このことから，変形中に局所的に水素が濃化することで水素脆化が生じると考えられる。以上のことから，水素脆化挙動を理解するためには，変形中の水素の濃化挙動および局所的な水素分配挙動を理解することが必要である。

本研究では，X 線イメージング技術を用い，材料内部のミクロ組織や破壊挙動を 3D/4D 可視化した。この観察結果を援用し，水素脆化挙動に対するミクロ組織の影響を水素分配の観点から評価することで，Al-Zn-Mg 合金における水素脆化発生の主因子を明らかにすることを目的とした。そして，近年報告された金属間化合物粒子添加による水素脆化防止法の有効性について，局所水素分配の観点から検討した。

第 1 章では，アルミニウム合金を主とした水素脆化現象に関する代表的なメカニズムや水素脆化挙動をはじめ，近年明らかになった知見を紹介し，本研究の目的について説明した。

第 2 章では，Al-Zn-Mg 合金中の 6 つのトラップサイト（空孔，転位，粒界，分散粒子，析出物，ミクロポア）の水素トラップ挙動を評価した。昇温脱離分析（TDA）と X 線トモグラフィーを用い，粒界とミクロポアの水素放出ピークを同定し，水素脱離エネルギーを求めた。一方で，TDA 中にトラップサイトから脱離した水素の一部は，試料内部に留まることを示した。そして，試料内に留まった水素がミクロポアを形成する様子を直接観察した。ミクロポアに限らず，空孔や転位などのトラップサイトが TDA 中に変化することで，脱離エネルギーが高く求められることが明らかとなった。そして，高精度に水素分配挙動を解析するためには，TDA から得られた結果ではなく，第一原理計算により得られた水素結合エネルギーを用いることが有効であると提案した。

第 3 章では，ケルビンフォース顕微鏡を引張負荷下での水素濃化挙動の直接観察に応用した。そして，結晶粒毎の変形のミスマッチにより生じる粒界での高静水圧応力場への水素拡散により，水

素が特定の粒界周辺で濃化することを明らかにした。

第 4 章では，変形中の水素の局所的な濃化挙動を定量的に評価するため，結晶塑性有限要素法と水素拡散解析を組み合わせたマルチモーダル解析を行った。まず，回折コントラストトモグラフィーと X 線トモグラフィーを用い，実際に引張試験を行う試料のミクロ組織を正確に取り込んだイメージベース 3D モデルを作成した。実験とシミュレーションの双方から得られた結果を比較し，水素脆化が発生した領域における水素の濃化および分配挙動を評価した。負荷により，亀裂先端付近で水素が濃化することで，$MgZn_2$ 析出物／アルミニウム界面の凝集エネルギーが顕著に低下することがわかった。これは，$MgZn_2$ 析出物界面が剥離し，これらが連結することで擬へき開亀裂が発生する水素脆化メカニズムと整合するものであった。以上のことから，水素濃化領域での $MgZn_2$ 析出物界面への水素分配が，水素脆化の発生の主要因であることが明らかとなった。さらに，これに基づき析出物界面への水素分配を抑制することで水素脆化を防止できる可能性が示された。

第 5 章では，水素脆化の防止に有効であると報告されている Al_7Cu_2Fe 粒子を添加した Al-Zn-Mg-Cu 合金の水素脆化挙動を解析し，水素脆化防止法の有効性について水素分配の観点から検討した。水素分配挙動の解析により，Al_7Cu_2Fe 粒子の添加量を増やすことで，水素濃度が高い場合でも析出物界面への水素分配を抑制できることを示した。しかし，粒子が粗大である場合や粒子内部の水素拡散が遅い場合，粒子内部まで水素が十分に分配されず，擬へき開破壊の発生を防止できないことが明らかになった。そのため，微細な Al_7Cu_2Fe 粒子を均一かつ高密度に分散させることが，水素脆化を防止する上で重要であることを示した。

第 6 章では，本研究で得られた結果を総括し，金属間化合物粒子添加による水素脆化防止法を実際に利用するための今後の課題について検討した。析出物界面より結合エネルギーが高くとも，粒子内部の水素拡散が遅い場合，水素脆化を防止できない可能性がある。そのため，粒子添加による水素脆化防止法の今後の課題として，粒子内部の水素拡散挙動の理解が挙げられる。水素との結合エネルギーが高く，粒子内部の水素拡散速度が速い粒子を選定することが，水素脆化を防止するために必要と考える。

〔作成要領〕

１．用紙はＡ４判上質紙を使用すること。
２．原則として，文字サイズ１０．５ポイントとする。
３．左右２センチ，上下２．５センチ程度をあけ，ページ数は記入しないこと。
４．要旨は２，０００字程度にまとめること。
（英文の場合は，２ページ以内にまとめること。）
５．図表・図式等は随意に使用のこと。
６．ワープロ浄書すること（手書きする場合は楷書体）。
この様式で提出された書類は，「九州大学博士学位論文内容の要旨及び審査結果の要旨」の原稿として写真印刷するので，鮮明な原稿をクリップ止めで提出すること。