



Title	低合金鋼の焼戻しマルテンサイトにおける耐水素脆性への影響因子に関する研究
Author(s)	吉田, 晋士
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98776
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名(吉田晋士)	
論文題名	低合金鋼の焼戻しマルテンサイトにおける耐水素脆性への影響因子に関する研究
論文内容の要旨	
<p>鉄鋼材料は、自動車用鋼板、ボルトや油井管などの多様な製品に用いられるが、軽量化や、より高負荷な使用環境へ対応するために高強度化が求められることが多い。しかしながら、強度の上昇に伴って水素脆化感受性が高まることが知られており、このことが高強度化の妨げとなっている。耐水素脆性に優れる材料として、組織が均一で強度を確保しやすい焼戻しマルテンサイト組織を有する低合金鋼が活用されることが多いが、いずれの製品でも耐水素脆性の限界の強度にまで到達している。また、水素脆化現象については、複数のモデルが提案されているが、金属組織としては転位や粒界との関わりが深い。ここから、転位密度の低減や粒界強度の増加が耐水素脆性の向上に有効と考えられるが、定量的な知見は十分でない。そこで、耐水素脆性に及ぼす転位密度や粒界強度の影響について定量的に調査した。</p> <p>第1章は序論であり、鉄鋼材料で高強度化が求められる背景について述べ、高強度化の妨げとなる水素脆化現象について、これまで提案されたモデルを概説した。また、耐水素脆性の高い鉄鋼材料とこれまでの開発アプローチについて説明し、転位密度や粒界強度の影響に関する定量的な研究が十分でない点について触れ、本研究の目的を述べた。</p> <p>第2章では、耐水素脆性について評価する前に、マルテンサイト鋼の転位密度が焼戻し中に減少する挙動と減少速度への影響因子について調査した。0.5C-1Cr-0.7Mo-0.1V鋼に高温(873 K)で焼戻しを施した場合、焼戻し中の転位密度の減少は、異符号の転位対の合体・消滅が支配的であること、ブロック径が小さいほどその減少速度が大きいことを明らかにした。したがって、耐水素脆性を高める目的で転位密度を低減するためには、マルテンサイトのブロック径の微細化が有効であることが明らかとなった。これらの知見により、焼戻し後の転位密度、さらには諸特性を精密に制御・予測することができ、ひいては、耐水素脆性の高い材料の開発も可能となる。</p> <p>第3章では、焼戻しマルテンサイト鋼の耐水素脆性と転位密度との関係について解明するため、焼戻し温度を変えることで系統的に転位密度を変えた材料を用いて調査した。このとき、旧オーステナイト粒径を変えずにブロック径を変化させるために、炭素含有量が異なる材料(xC-1Cr-0.7Mo-0.1V鋼(x=0.15, 0.25 or 0.5))も用意し、強度が同じで転位密度のみが異なる材料についても調査した。その結果、水素脆化割れが発生しない限界の強度は炭素含有量に依存して787~935 MPaと大きく異なったが、限界の転位密度は、炭素含有量によらず約$2.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$であった。また、転位密度が高いほど侵入水素量が多く、侵入水素量は転位密度で一義的に整理できた。これらの結果から、転位密度が高いほど鋼材の水素吸蔵能が高くなり、鋼材中の水素量が一定値(限界拡散性水素量)を超えた場合に水素脆化割れが生じることが示唆された。</p> <p>第4章では、焼戻しマルテンサイト鋼の耐水素脆性と粒界強度の関係について明らかとするため、粒界脆化元素であるMnの含有量を変化させた材料(0.3C-yMn-1Cr-1Ni-0.3Mo鋼(y=0.5, 1 or 1.5))について耐水素脆性を調査した。その結果、水素が多量(約2 mass ppm)に鋼中へ侵入する湿潤硫化水素環境では、Mn含有量の增加に伴って同鋼の破壊靭性値は低下し、旧オーステナイト粒界割れ率は上昇することがわかった。ここから、粒界脆化元素の増加による粒界強度の低下によって、旧オーステナイト粒界が割れやすくなり、耐水素脆性も低下したことが示唆された。さらに、この破壊靭性値の低下は、Mn含有量の増加による粒界へのMn偏析量と侵入水素量が増加したことが原因であることを、粒界凝集エネルギーの観点から定量的に説明することができた。</p> <p>第5章では、本研究で得られた成果を総括した。本研究により、焼戻しマルテンサイト組織を有する低合金鋼の耐水素脆性に及ぼす転位密度と粒界強度の影響について、重要な知見を得ることができた。これらの知見は、耐水素脆性のより高い材料の開発や水素脆化の機構解明に大いに役立つ情報である。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名	(吉田晋士)	
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	安田 弘行
	副査 教授	宇都宮 裕
	副査 教授	土谷 博昭

論文審査の結果の要旨

本論文は、焼戻しマルテンサイト組織を有する油井管用低合金鋼の耐水素脆性に及ぼす転位密度ならびに粒界強度の影響に関する研究であり、以下の 5 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、鉄鋼材料において高強度化が求められる背景について述べるとともに、高強度化の妨げとなる水素脆化のメカニズムについて、これまでに提案されたモデルを概説している。さらに、耐水素脆性に優れた鉄鋼材料の開発指針について説明するとともに、耐水素脆性に及ぼす転位密度や粒界強度の影響に関する定量的な議論が十分に行われていないことを指摘し、本研究の目的と意義について述べている。

第 2 章では、低合金鋼の耐水素脆性について調査する前に、同鋼の焼戻しに伴うマルテンサイト組織中の転位密度の減少挙動について調査している。具体的には、X 線回折のピークプロファイルから、修正 Williamson-Hall 法と修正 Warren-Averbach 法を用いて同鋼中の転位密度や転位配列等を評価することで、焼戻し中の転位密度の減少は異符号の転位対の合体・消滅が支配的であること、ブロック径が小さいほど転位密度は速く減少することを明らかにしている。このことから、耐水素脆性を向上する目的で転位密度を低減するためには、マルテンサイトのブロック径の微細化が有效であることを明らかにしている。

第 3 章では、焼戻しマルテンサイト組織を有する低合金鋼の耐水素脆性に及ぼす転位密度の影響について、焼戻し温度を変更することで転位密度を系統的に調整した試料を用いて調査を行っている。さらに、同鋼中の炭素含有量を変化させることで、強度が同じで転位密度のみが異なる試料の耐水素脆性についても調査している。その結果、水素脆化割れが発生しない限界の強度は炭素含有量に依存して 787~935 MPa と大きく異なったが、限界の転位密度は炭素含有量によらず約 $2.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ であることを明らかにしている。さらに、侵入水素量は転位密度の増加とともに増加するとともに、両者の相関は炭素含有量や強度に因らず一義的に整理できることを示している。以上の知見から、鋼中の転位密度が高いほど水素吸蔵能が高くなり、転位にトラップされた拡散性水素量が限界値を超えた場合に水素脆化割れが生じることを明らかにしている。

第 4 章では、低合金鋼の耐水素脆性に及ぼす粒界強度の影響について、粒界脆化元素であるマンガンの含有量を変化させることで粒界強度を調整した試料を用いて調査を行っている。その結果、約 2 mass ppm の水素が鋼中へ侵入する湿潤硫化水素環境では、マンガン含有量の増加に伴って同鋼の破壊靭性値は低下し、とりわけ旧オーステナイト粒界割れ率は増加することを明らかにしている。このことから、粒界脆化元素であるマンガンの粒界偏析により粒界強度が減少したことで、旧オーステナイト粒界における割れが促進されるとともに、耐水素脆性も低下したことを示している。さらに、破壊靭性値の低下の原因が、マンガン含有量の増加に伴うマンガンの粒界偏析量ならびに侵入水素量の増加であることを、粒界凝集エネルギーの観点から定量的に考察している。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括している。

以上のように、本論文は焼戻しマルテンサイト組織を有する低合金鋼の耐水素脆性に及ぼす転位密度や粒界強度といった影響因子について解明するとともに、鉄鋼材料の耐水素脆性向上のための指針を示しており、材料工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。