

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高強度ばね鋼の水素脆化機構に関する研究
Title(English)	Study on hydrogen embrittlement mechanism of high strength spring steel
著者(和文)	砂子真魅
Author(English)	Manami Sunako
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第296号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:多田 英司,藤居 俊之,林 幸,村石 信二,小林 寛
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第296号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名		砂子 真魅	
論文審査 審査員		氏 名		職 名		氏 名	職 名
	主査	多田 英司		教授	審査員	小林 覚	准教授
	審査員	林 幸		教授			
		藤居 俊之		教授			
		村石 信二		教授			

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は、「高強度ばね鋼の水素脆化機構に関する研究」と題し、次の 6 章から構成されている。

第 1 章「緒論」では、自動車用懸架ばねの概要および懸架ばねに求められる材料特性を整理し、高強度・軽量化の要請のためばね鋼の引張強度が 2000 MPa へ至る状況では、耐水素脆化特性の向上が最も重要であると述べている。そこで、鋼の水素脆化対策技術について概括することで耐水素脆化特性向上にかかる課題を整理し、低合金高強度ばね鋼において、鉄炭化物の微細化やその分布状態の制御が重要であることを指摘している。さらに、鉄炭化物の組織制御において想定される課題についても考察し、Si 添加と急速焼戻し処理によって鉄炭化物の微細化が可能であることに着目した上で、鉄炭化物と残留オーステナイト (γ) が耐水素脆化特性に及ぼす影響の明確化と水素脆化機構の理解、さらにばね製造工程が材料組織や水素脆化特性に及ぼす影響の把握が、高強度ばね鋼の耐水素脆化特性の向上には必須であることを述べ、本研究の目的と本論文の構成を説明している。

第 2 章「高 Si 急速焼戻し鋼の水素脆化特性および炭化物と残留オーステナイトの影響」では、Si 添加量と誘導加熱 (Induction Heating, IH) および炉加熱 (Furnace Heating, FH) により焼戻し速度を変えてばね鋼を作製し、透過型電子顕微鏡と走査型電子顕微鏡による組織観察、放射光による小角 X 線散乱分析から、鉄炭化物および残留 γ の分布状態を定量評価するとともに、それらの鋼とサブゼロ処理によって残留 γ を減少させた鋼について、複合腐食サイクル試験下における 4 点曲げ試験により耐水素脆化特性を評価している。その結果、Si 量が最も多く、IH により焼戻し速度を大きくした 2mass%Si 鋼 (2.0Si-IH 鋼) では、微細な ϵ 鉄炭化物 ($\text{Fe}_{2.3}\text{C}(\epsilon)$) が、ラス内に多く分散することで、耐水素脆化特性に優れることを明らかにしている。また、2.0Si-IH 鋼は残留 γ を最も多く含有していたが、残留 γ は耐水素脆化特性を低下させると示唆している。

第 3 章「高 Si 急速焼戻し鋼の水素トラップ特性および炭化物と残留オーステナイトの影響」では、昇温脱離水素分析法 (TDA) によって、高 Si 急速焼戻し鋼の水素トラップ挙動とそれに及ぼす $\text{Fe}_{2.3}\text{C}(\epsilon)$ や残留 γ の影響を調査している。 $\text{Fe}_{2.3}\text{C}(\epsilon)$ や残留 γ の水素放出温度を推定するため

に、2.0Si 鋼を種々の焼戻し温度で処理したばね鋼の TDA 分析を行い、その結果 2.0Si 鋼では、焼戻し温度が 400°C のときに $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ 量および水素トラップ量が最大となることから、水素トラップに対して $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ の影響が大きいことを指摘している。また、2.0Si-IH 鋼では、破断寿命が長く水素脆化感受性が低い、これは、低 Si 鋼や低速焼戻し鋼よりも水素を多く含有しているが、2.0Si-IH 鋼に多く含まれる $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ や残留 γ が水素をトラップし、転位や粒界などへの水素トラップ量を低減する、あるいは、それら欠陥への水素の集積を遅延させることが原因であると述べている。また、残留 γ にトラップされる水素量は、水素脆化評価試験の時間経過によって大きく減少することを明らかにし、この要因として、残留 γ に水素や転位が集積することによって、マルテンサイト変態した可能性を指摘している。

第 4 章「高 Si 急速焼戻し鋼の水素脆化によるき裂の発生と進展機構」では、Si 量と焼戻し速度の異なるばね鋼に対して、陰極水素チャージ下において 4 点曲げ試験を実施し、破断面観察から高 Si 急速焼戻し鋼の水素脆化機構を調査している。その結果、残留 γ を含む IH 焼戻し鋼の破壊起点には、ファセットが生じる傾向があり、このファセットは体心立方晶のすべり面である $\{112\}$ 面と対応することを明らかにしている。このことから、残留 γ が、加工誘起あるいは水素誘起変態によってマルテンサイトとなり、同時に過飽和になった水素が $\{112\}$ 面での転位すべりを促進したと推察している。また、2.0Si-IH 鋼のき裂進展域の破面形態は擬へき開破面であり、一方、低 Si 鋼や低速焼戻し鋼では粒界破面を含む傾向であったことから、2.0Si-IH 鋼ではラス内に分散した微細な $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ に転位や水素が集積することで、 $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ がき裂の進展経路となり、相対的に粒界などの応力集中部への転位や水素の集積が抑制され、き裂の発生や進展が遅延したと考察している。また、2.0Si-IH 鋼は、残留 γ の増加によるき裂の発生よりも、 $\text{Fe}_{2-3}\text{C}(\epsilon)$ の粒内微細分散によるき裂発生・進展に対する抑制効果の方が水素脆化による破断寿命に大きく影響すると述べている。

第 5 章「ばねの製造工程が組織および水素脆化特性に及ぼす影響」では、懸架ばねの製造工程であるひずみ取り焼鈍とショットピーニングが、高 Si 急速焼戻しばね鋼の組織および水素脆化特性に及ぼす影響を調査している。その結果、ひずみ取り焼鈍処理は、300°C 付近の温度で残留 γ を分解し、かつ鉄炭化物の粗大化を抑制する条件で実施することが適切であることを明らかにしている。また、ショットピーニングによって耐水素脆化特性を向上させるためには、圧縮残留応力場の深化による水素侵入の抑制が重要であることを述べている。

第 6 章「総括」では、第 1 章から第 5 章を総括し、高強度懸架ばね鋼の耐水素脆化特性を向上させるための組織設計や製造条件の指針について提案している。

以上を要するに、本論文は、自動車用高強度ばね鋼の水素脆化特性について、Si 添加と急速焼戻し処理により微細鉄炭化物のサイズや分布状態、残留 γ 量から検討し、水素脆化機構を解明するとともに、高強度ばね鋼の耐水素脆化特性向上のための組織設計や製造条件に対して重要な指針を与えるもので、工学上ならびに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。