

氏 名	しら が てつ お 白 神 哲 夫
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3814 号
学位授与の日付	平 成 17 年 1 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	高強度構造用棒鋼の高性能化に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 牧 正 志	教 授 粟 倉 泰 弘	教 授 落 合 庄 治 郎
--------	--------------------	-------------	---------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高強度構造用棒鋼を対象に、その使用分野として、PC 鋼棒、ボルト、歯車を取り上げ、それぞれの高性能化を図ることを目的に、遅れ破壊特性、延性、靱性、疲労特性に及ぼす金属組織学的因子および表面状態の影響に関して検討した結果をまとめたものであり、7 章からなっている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景としての構造用棒鋼の位置付け、要求特性（製造性能、使用性能）に基づいて、構造用棒鋼に対する課題を整理し、その課題解決のために取り組んだ本研究の目的を述べている。そして、高強度構造用棒鋼の高性能化のための手段を整理し、課題解決のための金属組織学的な基本方針を述べている。

第 2 章では 1420 MPa 級高強度 PC 鋼棒の遅れ破壊特性向上について研究している。合金元素の影響を表面状態の影響と内部組織因子の影響に分離して調べることにより、遅れ破壊特性に優れた成分系の確立を目指した。熱処理時に発生するスケール直下に濃化する Ni および Si はいずれも遅れ破壊特性を向上させることを見出し、Ni はその表面濃化により水素侵入を抑制すること、Si は炭化物、旧オーステナイト粒界、格子歪等の水素トラップサイトを減少させて侵入水素を低減すること、によりそれぞれ遅れ破壊特性を向上させることを明らかにした。また、表面濃化を活用するためには熱処理ままの実製品での試験を行うことが必要であることを明らかにした。また、水素侵入と遅れ破壊特性という観点で昇温式水素分析法を用いて拡散性水素とトラップサイトの関係を明らかにした。これらの結果をもとに熱間圧延方法の最適化を検討し、遅れ破壊特性に優れた PC 鋼棒の実用化に成功した。

第 3 章では 1500 MPa 級高強度ボルトの遅れ破壊特性向上について研究している。4 鋼種の材料を用いて、素材としての遅れ破壊特性と、実際に締付けしたボルトとしての遅れ破壊特性を腐食電池作用によるボルトへの水素侵入に着目して調べることにより、高強度鋼の遅れ破壊特性の評価技術の確立を目指した。ボルト素材が高合金化されると接触腐食による水素侵入が増加し、遅れ破壊特性が劣化するため、接触腐食抑制により環境からの水素侵入を抑制するという従来にない新しい発想で遅れ破壊特性の向上が達成されることを明らかにした。また、素材での遅れ破壊試験だけでなく、ボルトでの遅れ破壊試験を行うか、接触腐食を考慮した試験も同時に行う必要があることを示した。これらの知見をもとに、1500MPa を超える強度のボルトを開発する場合の評価技術を提案した。

第 4 章では 1420 MPa 級高強度 PC 鋼棒の高延性化について研究している。一様伸びに及ぼす合金元素の影響を高周波による急速加熱・冷却プロセスを利用して製造した焼戻しマルテンサイト組織を主体とした PC 鋼棒を用いて調べることにより、高延性高強度 PC 鋼棒の成分系の確立を目指した。焼戻しマルテンサイトを主体とした 1420MPa 級 PC 鋼棒の延性（一様伸び）向上にはマルテンサイトマトリックスへの少量フェライトの存在、マルテンサイト中のセメンタイトの微細粒状化が有効であることを示し、Si の多量添加によって達成できることを明らかにした。これらの知見をもとに高強度鋼の高延性化への材料設計指針を確立した。

第 5 章では高強度浸炭歯車の高靱化について研究している。ショットピーニングの影響を計装化シャルピー試験を用いて亀裂発生エネルギーと亀裂伝播エネルギーに分離して調べることにより高強度浸炭歯車の製造技術確立を目指した。ショッ

トピーニングにより硬さと残留応力が同時に変化するが、その影響を分離するため、浸炭硬化層を模擬した0.9C-1.2Cr鋼の硬さを焼入れ焼戻しにより変化させて残留応力が非常に小さい状態で試験を行うことにより、硬さの影響のみを取り出し、両者の分離を目指した。その結果、亀裂発生エネルギーはショットピーニングに伴う表面硬さの上昇により低下するが、ショットピーニングによる圧縮残留応力の増大によりその低下が抑制され、亀裂伝播エネルギーに対しては圧縮残留応力の影響が大きく、亀裂伝播エネルギーはショットピーニングによる圧縮残留応力の増大に伴い増加することを明らかにした。これらの知見をもとに高強度歯車の製造指針を確立した。

第6章では高強度窒化歯車の疲労強度向上について研究している。ガス窒化特性に及ぼす窒化処理温度及び窒化処理温度プロファイルの影響を調べることにより、優れた硬化特性が得られる窒化技術の確立を目指した。また、窒化処理材の疲労強度に及ぼす合金元素、ショットピーニング等の影響を小野式回転曲げ疲労試験及び歯車実体疲労試験により調べることに、浸炭処理材と同程度の疲労強度を有する窒化歯車の成分系確立を目指した。窒素拡散層の透過電子顕微鏡観察の結果、SACM645の窒化処理材では面心立方構造の(Al, Cr)N複合窒化物が微細に析出し、これらの大きな整合歪による析出強化により大きな表面硬さが得られることを明らかにした。さらに、低温域(510℃)で窒化を開始し高温域(620℃)まで連続的に昇温することにより、表面硬さが高く、かつ、深い硬化層深さが得られる傾斜窒化法を確立した。この窒化法を用いた窒化材ではAl, VまたはMoの添加によって大きな曲げ疲労強度の向上を示すことを見出し、さらにその理由が拡散層での析出物の増加による表面硬さの上昇とそれに伴う圧縮残留応力の増大によることを明らかにした。また、窒化歯車の疲労特性向上にはショットピーニングが有効であることを示し、圧縮の残留応力が亀裂伝播抑制に有効なことを明らかにした。窒化歯車の疲労起点の解析を行い、窒化歯車でも歪制御が必要であることを明確にし、浸炭歯車並みの疲労強度を得るための手法を確立した。

第7章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高強度構造用棒鋼を対象とし、使用分野としてPC鋼棒、ボルトおよび歯車を取り上げ、その高性能化を図ることを目的に、使用性能である遅れ破壊特性、延性、靱性、疲労特性に及ぼす金属組織学的因子や表面状態の影響を検討した結果をまとめたもので、その概要は以下の通りである。

1. 1420 MPa級高強度PC鋼棒の遅れ破壊特性の評価には熱処理まの実製品を用いた遅れ破壊試験が必要なことを示し、熱処理時に発生したスケール直下でおこるNiやSiの濃化を活用すると環境からの水素の侵入を抑制出来るという現象を見出し、これを利用することにより遅れ破壊特性の向上が達成されることを明らかにした。さらに本知見を基にNi添加PC鋼において熱間圧延方法の最適化を図り、遅れ破壊特性に優れたPC鋼棒の実用化に成功した。

2. 1500 MPa級高強度ボルトに関し、ボルト素材が高合金化されると実際に締付けしたボルトでは腐食電池作用によるボルトへの水素侵入が増加し遅れ破壊特性が劣化すること、それゆえ接触腐食抑制により遅れ破壊特性の向上が計れることを示した。

3. 焼戻しマルテンサイトを主体とした1420 MPa級PC鋼棒の延性(一様伸び)向上には、少量のフェライトの存在およびセメンタイトの微細粒状化が有効であることを示し、Siの多量添加によって達成できることを明らかにした。

4. 浸炭歯車の靱性向上、窒化歯車の疲労特性向上にはショットピーニングが有効であることを示し、圧縮の残留応力が亀裂伝播抑制に有効なことを明らかにした。窒化歯車の疲労起点の解析を行い、窒化歯車でも歪制御が必要であることを明確にし、浸炭歯車並みの疲労強度を得るための手法を確立した。

以上、要するに本論文は、高強度構造用棒鋼の遅れ破壊特性、疲労強度および延性に及ぼす金属組織学的諸因子の影響とその制御法を解明し、優れた特性を有する高強度構造用棒鋼の開発に成功したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成16年11月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。