

氏名	谷口裕一
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博第3917号
学位授与の日付	平成18年11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	低炭素鋼板の時効特性に及ぼす添加元素の影響に関する研究

論文調査委員	(主査) 教授 牧 正志	教授 落合庄治郎	教授 乾 晴行
--------	--------------	----------	---------

論文内容の要旨

本論文は、自動車のフードやドアに使用されているBH(焼付け硬化)鋼板で問題であった室温での時効劣化を抑制するために行われた研究についてまとめている。室温で遅時効であり、かつ170°Cでの塗装焼付け時の時効特性であるBH量が低下しない鋼板を実現するために、Cとゆるやかな相互作用を持つ元素の添加という考え方を発案し、その元素としてMoとMnを選択し、鋼への添加による時効特性への影響について研究を行っており、7章より構成されている。

第1章は序論であり、自動車の抱える課題とこれに対応した各種鋼板とBH鋼板の位置づけを述べている。またBH鋼板において重要な要素である時効現象についてのこれまでの研究例と現状のBH鋼板の問題点をまとめ、本研究の目的を述べている。

第2章では、極低炭素鋼板の時効速度に及ぼすMoの影響について研究を行っている。固溶C濃度10ppmの極低炭素鋼にMoを0.025%添加した場合の時効速度を測定し、Mo添加によって40°C時効では降伏点伸びの発生開始時間が遅くなり降伏強度の上昇量も抑制されること、100°Cの時効でも時効初期では時効速度は抑制されること、しかし、170°CでのBH量はMo添加によっても低下しない、という興味ある現象を見出している。鋼中のMoは、常温ではCと結合して転位への移動を抑制するが、170°CのBH処理温度ではCとの結合程度が弱いと考えられる。原子レベルでの弱い相互作用を持ったMo-Cペアを仮定し、2順位系モデルによるCのトラップ率を計算し、実験結果を解析している。

第3章では、Mo添加による遅時効BH鋼板を連続焼鈍ラインで工業的に製造するための過時効条件を決定することを目的として、低炭素鋼の過時効後のBH特性および強度に及ぼすMoの影響について研究を行っている。過時効帯では、固溶Cをセメントイトとして固定して低減するためCの拡散速度が重要となるが、Cの拡散はMoの影響を受けると考えられる。Moを添加した低炭素鋼板に過時効処理を施し、その後の機械特性値、BH量および固溶C量を測定した結果、過時効初期の降伏強度と引張強度が非添加鋼より高く、またBH量が過時効時間に対して単純に低減せず一度上昇して低下する特異な挙動を示すことを見出している。Mo添加鋼では、過時効初期には均一伸びが低下していることや内部摩擦でサブピークが存在することから、過時効初期にCクラスターが存在することを推察している。Cクラスターの核生成サイトとしてMo-Cペアを仮定し、急冷中でのペア形成挙動をモデル計算により考察している。その結果、Mo-Cペアは急冷直後に多数形成されることがわかり、Cクラスターの核生成サイトと成り得る可能性を示している。これらの知見を基に、時効後の降伏伸びが低くBH量が最大となる最適な過時効条件を明らかにした。

第4章では、第3章までに得られたMo添加BH鋼板の実験結果を説明するために、低炭素鋼の時効中の炭化物形成のモデル計算を行い、理論的検討を行っている。炭化物としてセメントイトに加えCクラスターを考慮して連立させた計算を行い、時効中のそれぞれの個数、粒径の推移やそれらによる強度上昇量をMo有無の両条件について求めている。Moが添加された系では、常温での3日間の時効によりCクラスターが多数形成され、強度が50MPa上昇する。その後200°Cに昇温した条件では、Cクラスターは数10秒で分解するという結果を得ている。この結果よりMo添加BH鋼板は、過時効前の引張強度が高く、十分な過時効時間後には非添加鋼と同じ強度になると解析している。また、170°Cの処理中にCク

ラスタが分解するために強度低下が起こり BH 量を下押し下げ、過時効が短い場合この効果が大きいため、過時効時間に対する BH は最大値を持つと考えられるとし、第 3 章までの実験結果に対し理論的説明を与えている。

第 5 章では、Mo と同様、C と緩やかな相互作用を持つと考えられる Mn に注目し、極低炭素鋼板の時効特性に与える Mn の影響について研究を行っている。C 濃度が 20~50ppm の極低炭素鋼板に Mn を 1.0% 添加した試料の時効処理を行った結果、Mn 添加により室温での時効が抑制されるが、同時に 170°C での BH 量も低下することを見出し、工業的な意味で Mn 添加のメリットは少ない事を明らかにしている。Mn と C の相互作用エネルギーは Mo の場合より小さいため、常温での時効抑制効果と BH 量の低減割合の差が Mo の場合より小さくなることを明らかにしている。

第 6 章では、自動車用鋼板で使用されるレーザー溶接での HAZ 部（熱影響部）の軟化及び成形性に対する Mo の影響についての研究を行っている。このため BH 処理温度よりも高温の時効特性に与える Mo の影響を調べ、0.3% の Mo 添加により 200°C ~ 450°C のいわゆる中温域の時効後の強度が上昇することを明らかにした。また、溶接を行った試料では、Mo 添加鋼では非添加鋼に比べて HAZ 軟化部の幅は小さくなり、強度の低下量も少なくなっており、溶接速度が 4.0 m/min の場合、HAZ 部の軟化はほとんど見られないことを示している。また、エリクセン試験では、Mo 添加により成形性が改善されることがわかった。炭化物の析出モデルを用いてクラスタやセメントタイトの形成挙動と強度を計算した結果、Mo 添加鋼では、中温域でセメントタイトが多数形成され強度が上昇する結果となり、C クラスタではなくセメントタイトの析出が強度上昇の主因であることを明らかにした。

第 7 章は、総括であり、本論文で得られた研究成果および工業的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、自動車のフードやドアに使用される高強度鋼板の一種である BH (Bake Hardenable) 鋼板を対象とし、室温で遅時効であり、かつ 170°C での塗装焼付け時の BH 量が低下しない新しい BH 鋼板の開発を目的に、室温および 200~450°C での炭素 (C) による歪時効現象に及ぼす合金元素の影響に関し、特に Mo と Mn に着目して系統的に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. 極低炭素鋼および低炭素鋼に 0.05~0.1% 程度の Mo を添加すると、室温での C による時効を大きく遅らせるが 170°C (塗装焼付けの温度) での時効は Mo 無添加鋼と同様であり、大きな BH を示す事を初めて見出した。Mo 添加により室温で遅時効になる理由として Mo—C ダイポールモデルを提案し、その妥当性を理論的解析により示した。

2. Mo と同様に C とゆるやかな相互作用を持つ Mn を 1% 程度添加すると、室温時効は遅滞化するが同時に 170°C での時効も遅らされ BH 量が低下することから、工業的意味でのメリットは少ないことを明らかにした。

3. 0.3% Mo 添加鋼は、レーザー溶接での HAZ 部（熱影響部）の軟化が Mo 無添加鋼に比べて小さく、レーザー溶接材の成形性が向上することを見出した。Mo 添加により HAZ 部の軟化が低下する理由として、200~450°C 時効でのセメントタイトによる析出強化が Mo 添加により促進されることを明らかにした。

4. 本研究結果から得られた開発指針に基づき、室温での時効劣化のない Mo 添加遅時効性高強度 BH 鋼を開発し、自動車車体への適用実用化に成功した。本鋼を使用することにより鋼板重量を 10% 軽減することが可能になり、自動車の軽量化、ひいては省エネルギーに大きく貢献した。

以上、要するに本論文は、低炭素鋼および極低炭素鋼を対象に、広範な温度領域での C 原子による歪時効挙動とそれにおよぼす合金元素の影響を実験的、理論的に解明すると共に、その制御法を明らかにし、優れた特性を有する新しいタイプの BH 鋼板の開発、実用化に成功したもので、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 18 年 10 月 11 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。