



Title	高強度鋼の摩擦攪拌接合とHAZ軟化抑制のための基本原理
Author(s)	伍, 沢西
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/91931
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

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 (伍 沢西)

論文題名 高強度鋼の摩擦攪拌接合とHAZ軟化抑制のための基本原理

論文内容の要旨

本研究では、超高強度鋼AHSSに匹敵する強度・延性バランスを有するFSW専用鋼を合金設計に基づき開発することを最終目標に、鉄鋼材料を高強度化させる合金元素の添加が母材およびFSW継手と攪拌部の組織と機械的性質に及ぼす影響を体系的に解明することを目的とした。本研究で得られた主な知見を以下に総括する。

第一章では、研究背景として、まず鉄鋼材料の高強度化のための五つの機構とこれらの機構を実現するための合金元素の基本的な役割についてまとめて述べた。次に各種高強度鋼の現状と高強度鋼の溶接に関わる問題について述べた。最後に、高強度鋼の接合に対するFSW適用の有効性と課題および研究の動機について述べた。

第二章では、まず本研究で用いた供試材の設計思想、および作製方法について述べた。次に、独自に作製した鋼材に対するFSWの条件と得られた母材および継手の微細組織および機械的特性の評価方法を述べた。

第三章では、鉄鋼材料の高強度化に重要な役割を果たすMnに注目し、C量を0.2 mass%、Si量を2 mass%に固定した炭素鋼に0～4 mass% Mnを添加した母材およびFSW継手を作製し、これらの微細組織と機械的性質を調査した。その結果、母材では、Mn量の増加にともない焼入れ性が向上し、ベイナイトやマルテンサイトが生成した。3Mn、4Mn材では、マルテンサイトが主組織であり、小型引張試験片を用いた評価では約1400 MPaの強度と23 %の全伸びを有し比較的優れた強度・延性バランスを示した。 A_3 点以上の高温FSWを施すと、3Mn、4Mn材においては微細なマルテンサイト組織から成る攪拌部が得られ、攪拌部の引張特性は母材より優れた強度・延性バランス（強度1700 MPa、伸び30 %）を示した。しかし、著しいHAZ軟化を示す課題がある。

第四章では、Mnと同様に焼入れ性を向上させるCrに注目し、母材およびFSW継手に及ぼすCrの影響を明らかにすることに取り組んだ。Cr量を0から4 mass%まで変化させた0.2C-2Si鋼に対して、攪拌部の最高到達温度が A_3 点以上のFSWを施し、母材と攪拌部における組織と機械的性質を調べた。その結果、母材および攪拌部ともにCr添加量の増加にしたがい、フェライトとパーライトで構成される組織からベイナイト+ラスマルテンサイト組織に移行した。また、攪拌部では、Cr量の増加に伴い微細な動的再結晶オーステナイトから変態した微細ラスマルテンサイト組織が形成され、高い強度とともに優れた延性を示した。

第五章では、0.2C-2Si-3Mnマルテンサイト鋼にMoを添加し、FSWのような短時間のプロセスにおいてもマルテンサイトの焼戻し二次硬化を利用することで、非常に微細かつ密に分散した Mo_2C の析出強化によりFSW継手のHAZ軟化の抑制に初めて成功した。

第六章では、マルテンサイト鋼のFSW継手のHAZ軟化抑制に及ぼすV添加の効果、およびHAZ軟化抑制に及ぼす A_1 点の影響を調査した。3Mn-0.5V材の A_1 点は638℃であり、V炭化物による二次硬化のピーク温度（約600℃）とほぼ一致するため、VCによる析出強化は、 A_1 点付近の最軟化部で最大の効果を発揮し、HAZ軟化が大幅に改善された。4Mn-1V材では、析出強化が A_1 点付近の最軟化部で最大限に発揮するため、硬度ピークは A_1 位置の付近で生じ、最低硬度も著しく向上した。しかしながら、 A_1 点が極めて低いため、 A_1 点での焼戻し軟化の程度は小さく、高い最低硬度を示した。一方では、1 mass% Vを添加したFSW継手の引張実験では、HAZにおいて旧オーステナイト粒界に沿った脆性破壊が生じる問題が発生した。FSW中にHAZ部においてはマルテンサイトが焼戻されるが、Vの添加量が多いため旧オーステナイト粒界に多量のV炭化物が析出した。さらに、旧オーステナイト粒界へのMn偏析も生じた。このような旧オーステナイト粒界で生じたMn偏析とVC析出の複合的な作用により、FSW継手の引張実験で粒界脆性破壊が発生したと推察した。

第七章では、3Mn-0.5V材よりもさらにHAZ軟化を抑制し、かつHAZで生じた粒界脆性破壊を防止することを目的に、多量のVを添加する代わりに、3Mn-0.5Vを基本組成にNb、Tiを単独添加およびNb-Tiを複合添加した材料を作製した。その結果、V以外にNbやTiを複合添加することにより、HAZ軟化がさらに抑制された上で、FSW継手のHAZにおける粒界脆性破壊を防止することが実現できた。

第八章では、本研究で得られた主な結果について総括した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (伍 沢 西)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	藤井 英俊
	副 査	教授	安田 弘行
	副 査	教授	平田 弘征

論文審査の結果の要旨

鉄鋼材料の高強度化のためには、合金元素の添加や組織制御が行われているが、合金元素を添加した高強度鋼は溶融溶接が困難である。摩擦攪拌接合（FSW）は材料流動を利用した固相接合法の一種で、溶接が困難な鉄鋼材料も接合可能である。加えて、接合条件により、接合温度の制御が可能のため、接合部に形成される微細組織を制御できる。このような背景のもと、本研究では、超高強度鋼に匹敵する強度・延性バランスを有する FSW 専用鋼の合金設計指針を提案することを最終目標として、合金元素の添加が母材、FSW 継手とその攪拌部の微細組織および機械的性質に及ぼす影響を体系的に解明している。主要な成果は以下の通りである。

- (1) 鉄鋼材料の高強度化に重要な役割を果たす Mn または Cr を 0～4 mass% 添加した母材および FSW 継手を作製し、その微細組織と機械的性質を調査した。Mn 量または Cr 量と焼入れ性の関係、変態誘起塑性効果の発現、Mn 量または Cr 量と強度－延性バランスの関係を検討している。特に 3 mass% 以上の Mn を添加した母材では優れた強度・延性バランスを示す鋼が得られている。 A_3 点以上の高温 FSW では 3 mass% 以上の Mn を添加した試料において母材より優れた強度・延性バランスを示す攪拌部が得られることを明らかにしているが、著しい HAZ 軟化が課題であることを指摘している。
- (2) 著しい HAZ 軟化を抑制するために、FSW においてマルテンサイトの焼戻し二次硬化を活用することを試みている。その結果、Mo の添加により大幅な HAZ 軟化の抑制に成功している。加えて、HAZ 軟化の抑制に対して焼戻し二次硬化を最大限活用するためには、溶体化処理温度の最適化が重要であることを強化機構の理論に基づいて明確化している。
- (3) マルテンサイト鋼に対して V を添加し、FSW 継手の HAZ 軟化抑制に対する V 添加の効果とマルテンサイト鋼の A_1 点の影響を調査している。その結果、V 添加量を増加させると硬度ピークが生じること、V 炭化物による二次硬化が最大となる温度が A_1 点付近の温度となると、最も HAZ 軟化が抑制されることを明らかにした。しかし、そのような FSW 継手の HAZ では Mn の偏析と V 炭化物の析出による脆性破壊が課題となることを指摘している。この課題を解決するために、V に加えて Nb および Ti を単独または複合添加することで、HAZ 軟化のさらなる抑制と粒界脆性破壊の防止に成功している。

以上のように、本論文では、母材および FSW 継手の微細組織と機械的特性に対する Mn および Cr の影響とマルテンサイトの焼戻し二次硬化により FSW 継手において HAZ 軟化を抑制できることを明確化している。これらの結果をもとに、FSW の活用を前提とした超高強度鋼の合金設計に対する基本指針を提案している。本論文で得られた成果は、マルテンサイトの微細組織と強度の関係の理解に対する重要な知見であり、次世代の超高強度鋼の創製においても意義のある結果であることから、材料科学の発展に寄与することが期待される。

よって本論文は、博士論文として価値あるものと認める。