

2019年8月27日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

耐摩耗性と耐食性を両立した鉄鋼材料を開発
— 需要が拡大するスーパーエンブラの射出成形をはじめ、幅広い応用が期待 —

【発表のポイント】

- 高硬度・高耐摩耗性かつ耐食性に優れた鉄鋼材料；炭化物強化マルテンサイト鋼^{※1}の開発に成功
- 炭化物強化マルテンサイト鋼の弱点であった耐食性を銅の微量添加により克服
- 本開発合金を用いたスーパーエンジニアリングプラスチックの製造装置部材において既存材の2倍以上の耐久性を実証、化学・エネルギー分野における幅広い応用にも期待

概要

東北大学金属材料研究所の山中謙太准教授、張宸大学院生（大学院工学研究科材料システム工学専攻博士課程後期3年の課程）、卞華康助教、千葉晶彦教授は、**高硬度・高耐摩耗性かつ優れた耐食性を有する鉄鋼材料の開発に成功しました。**

高速度鋼（ハイス鋼）に代表される炭化物強化マルテンサイト鋼は高硬度かつ耐摩耗性に優れるため、金型や工具等に幅広く用いられています。しかしながら、材料中に形成する炭化物により耐食性が低下するため、トレードオフの関係にある「硬度・耐摩耗性」と「耐食性」を両立した新材料やその材料設計の確立が強く求められていました。

本研究グループでは、近年需要が拡大しているスーパーエンジニアリングプラスチック（スーパーエンブラ）の製造方法の1つ：射出成形^{※2}の製造装置部材に応用できる鉄鋼材料の開発を目指し、炭化物強化マルテンサイト鋼の耐食性改善について研究を行ってきました。その結果、**微量の銅(Cu)を添加することにより当該材料の耐食性が著しく向上することを見出し、高硬度と高耐食性が両立した新材料の開発に成功、また、耐食性が向上するメカニズムも明らかにしました。**

さらに、株式会社エイワおよび岩手大学との共同研究として量産用の溶解炉・加工設備を用いた開発合金の試作と射出成形の実機試験を行いました。その結果、スーパーエンブラの中でも大きな市場規模を有するガラスフィラー（GF）を含むポリフェニレンサルファイド（GF-PPS）樹脂^{※3}の射出成形において、開発合金を用いたスクリューが既存のスクリュー素材に比べて2倍以上の耐久性を有することを実証しました。



写真：開発合金を用いて試作した射出成形用スクリュー

以上は、耐食性と耐摩耗性を兼ね備えた鉄鋼材料の新たな材料設計指針として有用な知見であり、射出成形機部材だけでなく、化学・エネルギー分野において幅広い応用が期待されます。

本研究成果は、科学技術振興機構（JST）研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）「ステージII（シーズ育成タイプ）」「GF-PPS樹脂成形用部品に適合した高耐食・耐摩耗新合金開発」を通して得られた成果であり、2019年8月27日（英国時間10:00）にnatureのパートナージャーナルであるnpj Materials Degradation誌にオンライン掲載されました。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して

東北大学金属材料研究所
加工プロセス工学研究部門
准教授 山中 謙太
TEL：022-215-2118 FAX:022-215-2116
Email：k_yamanaka@imr.tohoku.ac.jp

◆報道に関して

東北大学金属材料研究所
情報企画室広報班（富松）
TEL：022-215-2144 FAX:022-215-2482
Email：pro-adm@imr.tohoku.ac.jp

【詳細説明】

○研究背景

近年、自動車やエレクトロニクスの分野において、強度や耐熱性に優れるスーパーエンジニアリングプラスチック（以下スーパーエンブラ）の市場が急速に拡大しています。スーパーエンブラ製品の製造方法の一つとして射出成形が挙げられますが、樹脂の可塑化溶解時に腐食性ガスを生じるため、スクリー・シリンダー等の成形機部材の腐食が問題となっています。また、製品強度を向上するためのガラスフィラー（GF）等の硬質フィラーの添加量が増加傾向にあり、成形機部材の摩耗も深刻化しています。

射出成形機部材には耐食性の良いステンレス鋼が使用されてきましたが、耐摩耗性に課題がありました。一方、高速度鋼（ハイス鋼）に代表される高硬度鋼は、微細な炭化物により強化されたマルテンサイト組織により高硬度かつ耐摩耗性に優れるものの、炭化物の形成に起因して腐食が促進されるため、十分な耐食性が得られませんでした。したがって、トレードオフの関係にある硬度・耐摩耗性と耐食性を両立した新材料の開発が強く求められていました。

○研究の手法

本研究では、スーパーエンブラの中でも大きな市場規模を有する PPS（ポリフェニレンサルファイド）樹脂をターゲットに、PPS 樹脂の可塑化溶解時に生ずる亜硫酸ガスによる腐食と、樹脂の強化のために添加されたガラスフィラー（GF）によるアブレシブ摩耗に対して優れた耐久性を有し、低コストで製造可能な鉄鋼材料の開発に取り組みました。

具体的には、Cu を微量添加することにより、ナノサイズの炭化物が多量に析出したマルテンサイト鋼の耐食性を改善し、耐摩耗性と耐食性の両立について検討しました。また、これらの用途には粉末冶金法により製造された、炭化物が微細かつ均一に分布した鉄鋼材料が使用されていますが、本開発合金では合金組成を最適化することにより、通常の溶解法により量産可能な材料設計とすることで製造コストの低減を図りました。

○得られた成果

本研究にて開発した Fe-16Cr-3W-1C-2Cu (mass%) 合金はオーステナイトが安定となる温度域から焼入れることでマルテンサイト組織を得ることができます。また、マルテンサイト組織の内部にはナノスケールの炭化物が微細かつ均一に形成するため、既存材と同等以上の高硬度を得ることが可能です（図 1）。

一方、開発合金の耐食性を評価するため、PPS 樹脂の射出成形を模擬した硫酸水溶液中での浸漬試験を行いました（図 2）。浸漬後の表面観察により、炭化物強化鋼の腐食反応は炭化物とマトリックスがマイクロ腐食セル^{*4}を形成し、両相の電位差を駆動力としマトリックスが溶解することにより進行することが明らかになりました。したがって、比較のために作製した Cu 無添加合金ではマトリックスが著しく溶解し、特に焼入れ後には微細な炭化物が多量に形成するため、著しい耐食性の低下が観察されました。これに対し、Cu を添加した開発合金では一桁以上腐食速度が低く、焼入れ後も casting material と同等の優れた耐食性が維持されることが明らかになりました。この理由として、

Cu 添加合金では腐食環境において合金元素の選択的溶解が起こり、標準電極電位が他の合金元素に比べて高い Cu が表面に濃化することにより腐食反応の駆動力が減少するためと考えられます。

さらに、株式会社エイワ（代表取締役：佐々木強）および国立大学法人岩手大学（学長：岩渕明）の吉野泰弘准教授と共同で、量産用の溶解炉・加工設備を用いて試作した開発合金からスクリューを作製し（概要写真）、GF-PPS 樹脂射出成形の実機試験を行いました。その結果、開発合金製のスクリューが既存のスクリューに比べて2倍以上の耐久性を有することを実証しました。

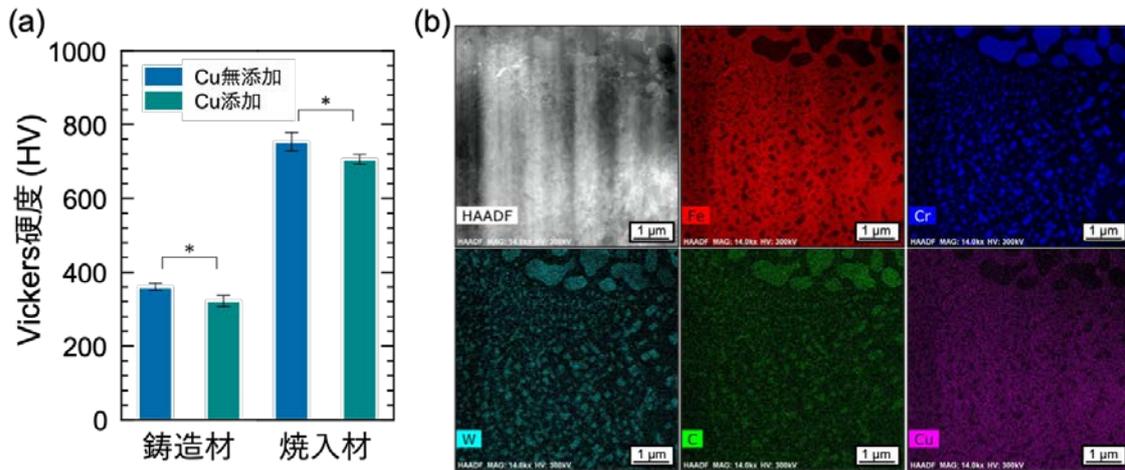


図 1 (a)焼入れ前後の Vickers 硬さと(b)STEM-EDS 分析による焼入れ後の元素分布。焼入れ後

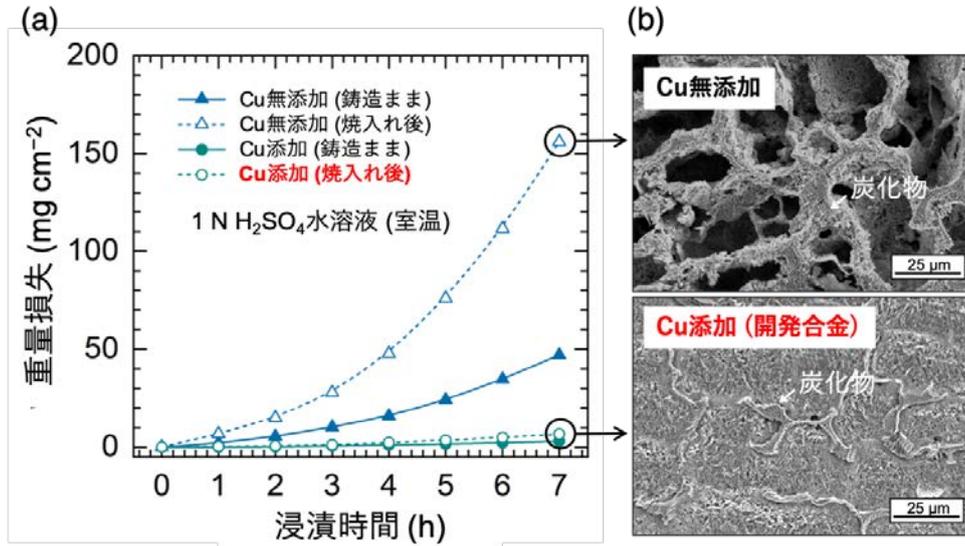


図 2 (a)開発合金 (Fe-16Cr-3W-1C-2Cu) の 1 N H₂SO₄水溶液 (室温) における重量損失の経時変化と(b)硫酸水溶液中での浸漬試験 (7 時間) を行った後の焼入れ材の表面観察結果。

○今後の展開

炭化物を利用した高硬度鋼ではステンレス鋼等の高耐食性鋼において一般的な Cr₂O₃ 皮膜による不動態化が十分に得られず、耐食性の改善が課題となっていました。また、Cu 添加による耐食

性の改善はステンレス鋼等において知られていましたが、炭化物強化鋼では実証されていませんでした。本研究では、高硬度鋼の耐食性に関する新たな材料設計指針を提案し、腐食反応の駆動力の面からメカニズムを解明することができました。今後はさらなる耐食性の改善に向け、速度論的な視点から、腐食メカニズムをより詳細に明らかにします。

実用的には、本研究では GF-PPS 樹脂の射出成形において、開発合金を用いたスクリュウの優位性を実証しました。開発合金の基本的な材料設計に関しては特許出願を行っており、現在、民間企業との共同研究を通して射出成形装置部材としての実用化に取り組んでいます。また、耐食性と高硬度を両立した鉄鋼材料は、化学プラント用装置部品や地下や海底の資源開発に用いる掘削機器等、様々な応用が期待でき、化学・エネルギー分野への展開も視野に入れながら研究開発を進めていきます。

○専門用語解説（注釈や補足説明など）

※1 炭化物強化マルテンサイト鋼

高温で安定なオーステナイト相を急冷（焼入れ）することにより形成する硬質なマルテンサイト相に微細な炭化物を分散させることでさらに強化した鉄鋼材料。高硬度かつ耐摩耗性に優れることから金型や切削工具等に用いられており、同様の組織を有する鉄鋼材料の代表例としては高速度鋼（ハイス鋼）が挙げられます。

※2 射出成形

加熱溶融した材料を金型内に射出注入し、冷却・固化することにより成形品を製造する方法。複雑形状の製品を大量生産するのに適していることから、樹脂成形加工に幅広く用いられています。ホッパーから導入された樹脂はスクリュウの回転によりシリンダー内を運搬されます。この際ヒーターにより可塑化溶融され、最終的にキャビティ内に充填されます。

※3 PPS（ポリフェニレンサルファイド）樹脂

ベンゼン環と硫黄からなる化学構造を持つ結晶性の耐熱性ポリマーです。ガラス繊維や無機質フィラーを 40%程度まで添加することにより優れた機械的性質を示し、自動車の燃費向上に必須の車体軽量化を目的に自動車部品への採用が進んでいます。また、優れた耐薬品性と寸法安定性を示すため、電装部品にも使用されています。

※4 マイクロ腐食セル

カソードとアノード電位差を駆動力として進行する腐食反応。炭化物強化マルテンサイト鋼では炭化物がカソード、マトリックスであるマルテンサイト相がアノードとなります。Cu 添加していない炭化物強化マルテンサイト鋼では電位の低いマトリックスの著しい溶解が起こります。

○発表論文

雑誌名	npj Materials Degradation
論文タイトル	Corrosion-resistant carbide-reinforced martensitic steel by Cu modification
著者	Chen Zhang, Kenta Yamanaka, Huakang Bian, Akihiko Chiba
DOI	10.1038/s41529-019-0092-3