磁気特性および耐食性に優れた TiS 快削電磁ステンレス鋼の開発

高田 揚大^{*1)} 柳谷 彰彦^{*3)} 田中 義和^{*2)}
馬 明 満^{*4)} 伊藤 永勝^{*5)}

1. 緒 言

一般に電磁弁などの鉄心材料に要求される特性は、①高磁束密度・低保磁力、②高固有抵抗、③高硬度、④良好な被削性などである。著者らはCr, Si, Al, Pbなどを添加し、磁気特性、被削性に優れた電磁ステンレス鋼を開発してきた(1)~(5)。

従来、電磁ステンレス鋼を含め鉄鋼材料においては、被削性を改善するためにS, Pb, Bi, Te, Seなどの快削元素を添加していた。しかしながら、従来のS快削鋼はMnSを形成させて被削性を向上させているが、MnSは水溶性であるため耐食性を劣化させるという問題点があった。一方、Pbなどの低融点金属を快削元素として使用した場合には、耐食性については大きな劣化はみられないものの、安全性の点から食品用途関連への使用には制約をさけることができなかった。また、環境問題の観点からこれらの金属を快削元素として使用するの望ましくない。そこで、低融点金属を用いることなく磁気特性、耐食性、被削性に優れた電磁ステンレス鋼の開発が強く望まれていた。

これに対して、著者らは種々の検討を行い、S快削電磁ステンレス鋼の耐食性および磁気特性向上についての指針を得、SをTiで固定したTiSを形成させることにより、磁気特性、耐食性、被削性に優れた電磁ステンレス鋼を開発したので紹介する。

2. 開 発 指 針

磁気特性に及ぼす元素の影響を図1に示す。一般に、被削性を改善するためにはSを添加すれば良いことが知られているが、図1のようにS添加は磁気特性のうち保磁力 H_c を増加させる。また、耐食性を高めるためにCr量を増加させると、磁束密度 B が低下する(5)。そこで著者らは耐食性劣化の主因となる介在物であるMnSに着目し、磁束密度を高く、保磁力を低く抑え、かつ耐食性を向上させる方策について検討した。その中で硫化物系介在物としてMnSを形成させず、耐食性のよい介在物であるTiS主体とすることにより耐食性を向上させ、同時に磁気特性の向上も達成することを目的として実験を行った結果を以下に示す。

3. 実 験 方 法

(1) 供試材の作製

本実験に用いた供試材化学成分を表1に示す。13Crをベースに、S量を0~0.05 mass%, Ti量を0~0.4 mass%に変化させた電磁ステンレス鋼を100 kg VIMで溶製し、 $\phi 20$

図1 磁気特性に及ぼす添加元素の影響。

* 山陽特殊製鋼株式会社
技術研究所：1)係員 2)部長
粉末事業部：3)グループ長

** CKD 株式会社
開発部：4)主任
コントロールズ事業部：5)部長
Development of Free-cutting Electromagnetic Stainless Steel Bearing TiS; Akihiro Takata*, Akihiko Yanagitani*, Yoshikazu Tanaka*, Mitsuru Mamyo**, Nagakatsu Ito**
(*Sanyo Special Steel Co., Ltd. **CKD Corporation)
1998年1月31日受理

表1 供試材化学成分.

(mass%)								
C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Al	Ti	N
<0.01	1.5~2.0	0.3	0~0.05	13	0.4	0~0.2	0~0.4	<0.01

mm に熱間鍛造し、870°C熱処理を行った後に機械加工により試験片を作製して各種試験を行った。

(2) 被削性

被削性はSKH51 $\phi 5$ mm のドリルを用い、回転数 900 rpm でドリルの刃先に一定の荷重 414 N を負荷し、深さ 10 mm を穿孔するのに所要する時間で評価を行った。

(3) 直流磁気特性

直流磁気特性は、 $\phi 10$ mm/ $\phi 6$ mm $\times$ 5 mm のリング状試験片を作製し、850°C-4 h の真空熱処理を施した後に巻線を施し、直流 B - H トレーサにて測定した。保磁力 H_c は、最大印加磁場 796 A/m における B - H ループから求めた。

(4) 耐食性

耐食性は孔食電位および腐食減量を測定することにより評価した。孔食電位は JIS に準拠した方法により、35°C の 3.5% NaCl 水溶液中で電流密度が 100 μ A/cm² に達したときの電位 (V_{c100}) を測定した。参照電極には飽和カロメル電極を用いた。腐食減量は試験片を 25°C の 5% HNO₃ 中に 24 h 浸漬を 2 回繰り返し、試験後の腐食減量を測定した。

(5) 非金属介在物の分析

Ti/S が低いものと高いもので EPMA により非金属介在物の定性分析を行い、介在物の同定を行った。

4. 実験結果および考察

各種特性は Ti 量と S 量の比 (Ti/S) で整理を行い、耐食性が必要な電磁弁に使用される 17Cr フェライト系ステンレス鋼 SUS430 と比較を行った。

(1) 被削性

従来の知見より、電磁ステンレス鋼においても S 量が増加するに従い被削性が向上することが知られている⁽⁴⁾。表 1 で示した供試材について被削性に及ぼす S の影響を調べた結果を図 2 に示す。深さ 10 mm 穿孔所要時間は、S 量が増加するに従い短くなる傾向がみられ、本実験においても S 量増加により被削性が改善されることを確認した。また、従来材である SUS430 よりも被削性を向上させるためには、0.02 mass% 以上の S 添加が必要であることがわかる。

(2) 直流磁気特性

直流磁気特性のうち、保磁力に及ぼす Ti/S の影響を図 3 に示す。保磁力 H_c は Ti/S が大きくなるに従い低下し、Ti/

図2 被削性に及ぼす S 量の影響.

図3 保磁力 H_c に及ぼす Ti/S の影響.

S が 6 付近で極小値を示し、Ti/S が 6 をこえると逆に保磁力が増加する傾向がみられた。磁気特性の点からは Ti/S が 4~6 付近が最も適していると考えられる。また、Ti 無添加材については S 量が多くなるに従い保磁力が増加するが、Ti 添加材は Ti/S=6 と設定することにより、S を 0.03 mass% 添加しているにも関わらず S 添加量 0.01 mass% 水準の優れた保磁力を満足することを見出した。

(3) 耐食性

孔食電位に及ぼす Ti/S の影響を図 4 に示す。孔食電位は Ti/S が増加するに従い向上する傾向がみられた。Ti/S が 6~9 付近で極大値を示し、最も良好な耐食性を示すことがわかった。逆に Ti/S が 9 をこえると逆に孔食電位は低下する傾向がみられた。また、SUS430 と比較すると、Ti/S を 4 以上とすることで SUS430 以上の耐食性を示すことがわかる。

5% HNO₃ 中の腐食減量に及ぼす Ti/S の影響を図 5 に示す。腐食減量は Ti/S が増加するに従い減少する傾向がみられ、Ti/S が 6~9 で極小値を示し、最も耐食性が向上することがわかった。また、Ti/S が 9 をこえると逆に腐食減量が増加し、耐食性が低下する傾向がみられた。

孔食電位および腐食減量の結果より、耐食性の観点からは

図4 孔食電位に及ぼす Ti/S の影響.

図5 5% HNO_3 中の腐食減量に及ぼす Ti/S の影響.

Ti/S : 6~9 が最適であると考えられる.

(4) 非金属介在物の分析

耐食性向上の要因を検討するため, Ti/S が異なる場合の非金属介在物組成を EPMA により同定した結果を図 6 に示す. Ti/S が 2.8 と低い組成については TiN および MnS がみられたが, Ti/S が 7.0 と高い組成は TiN と TiS がみられ, MnS はみられなかった.

従来から, ステンレス鋼に Ti を添加することにより耐食性が向上することが知られているが, これは粒界に析出して Cr 欠乏層を形成し腐食の原因となるクロム炭窒化物を TiC や TiN に置換することにより, Cr 欠乏層の形成を抑え耐食性を向上させるというものである⁽⁶⁾.

本合金の開発においては, TiS が増加するに従い, 水溶性で耐食性劣化の原因となる MnS が, 酸にも安定な TiS に置換されることにより耐食性が向上すると考えられる. その際に Ti/S : 6~9 付近で MnS が完全に TiS に置換され, 最も良好な耐食性示すと考えられる.

5. 実用性および将来性

以上の結果をもとに, 磁気特性, 耐食性に優れた TiS 快

図6 EPMA による非金属介在物の同定.

表2 開発鋼の代表組成.

(mass%)								
C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Al	Ti	N
<0.01	2.0	0.3	0.03	13	0.4	0.2	0.15	<0.01

表3 開発鋼の特性.

鋼 種	固有抵抗 ρ ($\mu\Omega\cdot\text{m}$)	硬 さ (HRB)	磁束密度 B_{25} (T)	保磁力 H_c (A/m)	孔食電位 V_{C100} (mV)	被削性 (s)
開発鋼	0.89	87	1.29	73	203	17
SUS430	0.60	80	1.25	300	83	22

削電磁ステンレス鋼を開発した. 開発鋼の化学成分および特性をそれぞれ表 2, 3 に示す.

本開発鋼は, 少量の Ti 添加により MnS を TiS に置換し, 磁束密度を著しく低下させる Cr 量を増加させることなく, 従来の MnS 快削鋼の欠点であった耐食性および磁気特性を改善したもので, 適正 Ti/S において耐食性と同時に保磁力が改善されることを見出し, 高磁束密度, 低保磁力を実現できた. また, 低融点金属を用いないで被削性改善を実現し, 今後の環境対策に対応したものである. なお, 本開発鋼は現在 CKD (株)の電磁弁鉄心材料として使用されており, 電磁弁の特性向上に寄与している.

本件に関する特許は出願済みである.

文 献

- (1) 柳谷彰彦, 田中義和: 鉄と鋼, **69**(1983), S1286.
- (2) 中里弘昭, 柳谷彰彦, 田中義和: 鉄と鋼, **71**(1985), S1470.
- (3) 中里弘昭, 田中義和: 鉄と鋼, **72**(1985), S1442.
- (4) 中里弘昭, 田中義和: CAMP-ISIJ, **1**(1988), 1910.
- (5) 柳谷彰彦, 梶田哲智, 高田揚大, 中里弘昭, 田中義和: まてりあ, **34**(1995), 632.
- (6) 長谷川正義: ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社, (1973), p. 227.