

非磁性鋼の耐摩耗性向上に関する研究

高尾 清利, 斎藤 修

Study on Improve the Wear Resistace of Non-Magnetic High Manganese Steel

Kiyotoshi TAKAO and Osamu SAITOH

要 約

高Mn非磁性鋼 (Fe-Mn系) について, プラズマ浸炭処理による耐摩耗性の付加を試みた. その浸炭層の特性を, 透磁率試験, ビッカース微小硬さ試験, 金属顕微鏡観察, 電子プローブマイクロアナライザ解析, 及び摩耗試験を行い検討した. 以下に, 本研究で得られた結果を要約する.

- (1) 高Mn非磁性鋼の浸炭領域では, $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 等のCr炭化物や Fe_3C などの炭化物が形成され, このために処理領域では硬度が上昇する.
- (2) 浸炭処理により高Mn鋼は表面硬度Hv1100, ステンレス鋼ではHv730程度まで上昇する.
- (3) 硬化層深さは, 処理温度が高い方が深く, また処理時間の1/2乗に比例して深くなり, 放物線則に従う.
- (4) 炭化物は結晶粒界に沿って生成, 拡散し, Cr炭化物及びFe炭化物が生成される.
- (5) 生成されたCr炭化物は, 処理時間の経過とともにその組成が変化していく. $Cr_{23}C_6$ は浸炭初期に生成され, 処理の経過とともに減少していくのに対し, Cr_7C_3 は逆に増加していく.
- (6) 高Mn非磁性鋼の透磁率は, 浸炭処理前が1.0009, 処理後が1.01以下で, プラズマ浸炭による非磁性の低下は認められない.

1 はじめに

近年, 磁気記録・再生を行う電子機器材料として, 非磁性特性に優れた材料の必要性が高まっている. 従来, これらには, オーステナイト系ステンレス鋼やアルミニウム合金等の適用が図られてきた. しかし, オーステナイト系ステンレス鋼では完全な非磁性が得られにくく, またアルミニウム合金では必要とされる硬度, 強度が得られないのが現状である.

最近では, 発電機や変圧器, 核融合実験装置, リニアモーターカー実験線など, 電機関連や超伝導・リニア関連機器, 特殊プラント関連等への適用を目的として, 非磁性特性に優れたFe-Mn系合金鋼 (以後, 高Mn非磁性鋼という) が開発され, これら領域で使用され始めている. この材料は今後, さらに使用が拡大されていくものと期待されるが, 素材硬度がHv300程度と低く, 耐摩耗性の低い性質を有している.

そこで本研究では, 高Mn非磁性鋼のプラズマ浸炭処理による耐摩耗性の向上を目的として, 浸炭処理条件が摩耗特性や非磁性特性に及ぼす影響について, 従来より用いられてきたオーステナイト系ステンレス鋼との比較で検討を行った.

2 実験方法

2-1 素 材

使用した高Mn非磁性鋼の化学成分規格を表1に, また材料特性¹⁾を表2に示す.

表1 高Mn非磁性鋼の化学成分表

	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	V	P	S	Al	O _s
成分率	0.11	0.6	28.4	7.1	1.0	0.10	0.08	0.033	0.002	0.02	0.028

表2 高Mn非磁性鋼の材料特性

	室温	4 K
透磁率 (μ)	1.0009	1.001
熱膨張係数 (K^{-1})	7.5×10^{-6}	
0.2% 耐力 (MPa)	890	1500
引張強さ (MPa)	830	1720
シャルピー 衝撃値 (J)	800	1500
備 考	K: 絶対温度	

ステンレス鋼には、オーステナイト鋼として代表的なSUS304及びSUS316の市販品を用いた。

試料の形状は、直径40mm、厚さ10mmで、処理する面を研削加工した後、#1000のエメリーパーで仕上げた。

2-2 プラズマ浸炭処理

プラズマ浸炭は、ガス浸炭や真空浸炭に比べて、処理速度や処理後の表面性状など数多くの点で優れている。また、Cr当量が多く浸炭が困難であるステンレス鋼などの材料も処理が可能という利点がある。

プラズマ浸炭により炭素が素材へ取り込まれる現象²⁾には、

- (1) 熱的に活性化された炭素が鋼の触媒作用によって素材へ捕獲される
- (2) 炭素イオン(C⁺)が、陰極降下によって加速され、素材の表面に付着し拡散する
- (3) (2)と同様に、加速された炭素イオンが素材の表面に衝突した際に、炭素イオンが直接内部に打ち込まれたり、格子欠陥を引き起こす

の3通りがある。グロー放電プラズマの活性化による反応と上述の作用により、ほかの浸炭法とは本質的に異なっている。

2-3 浸炭処理条件

浸炭処理は、3種類の材料(高Mn非磁性鋼・SUS304・SUS316)について、それぞれ次の処理温度及び処理時間の条件で行った。

○処理温度：1273K・1373K

○処理時間：0.6ks・3.6ks・14.4ks・28.8ks

まず、処理炉を室温から処理温度まで3.6ksかけて徐々に上昇させた後、1.8ks均熱する。その後、50vol%Ar-H₂混合ガスを用いて雰囲気気圧53Pa、電流密度3.7A/m²、放電電圧300Vで1.8ksスパッタリングし、試料表面を清浄にした。

次に、反応ガスとしてC₂H₂及びH₂を、それぞれ1.7×10⁻⁵ m³/sの流量で炉内に導入し、雰囲気気圧93Pa、グロー放電電流密度0.8A/m²、放電電圧500Vでプラズマ浸炭した。

その後、107PaのN₂雰囲気中でファン冷却した。

図1に浸炭処理工程を示す。

2-4 浸炭層の評価

浸炭処理した材料について各種試験、分析を行い評価した。

まず、浸炭後の透磁率の変化をみるために、低透磁率測定用標準片を用いて測定を行った。

次に、X線回折試験により試料表面に生成した化合物の同定を行い、浸炭時間経過による炭化物の生成過程を解析した。また、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)を用い、処理層の元素分析を行った。

また、マイクロピッカース硬度計を用いて、処理層の表面硬度及び硬化層深さを測定した。

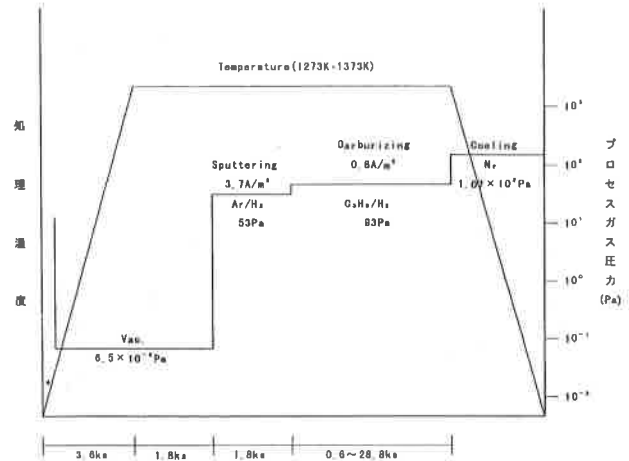


図1 プラズマ浸炭処理工程

さらに、耐摩耗性を測るために摩耗試験を行った。試験方法は、BALL ON DISK方式にて行い、摩耗深さにより評価した。

3 実験結果及び考察

3-1 非磁性の評価

未処理の高Mn非磁性鋼の透磁率は1.0009、ステンレス鋼では1.008以下で非磁性³⁾を示している。

浸炭処理した試料を、低透磁率測定用標準(パーマビリティインジケータ)を用い、透磁率測定を行った。これは、透磁率 μ の1.01~2.5の間を11段階に分割してある標準片で、それとの比較により透磁率を測定するものである。

非磁性材料の明確な定義は存在しないが、定性的、感性的には磁石に引きつけられない物質と考える。物理的には、常磁性と反磁性(強反磁性は除く)を、強磁性に対して弱磁性(非磁性)と呼んでいる。実用上は透磁率 μ が1.02~1.05以下の場合を非磁性³⁾と呼ぶことが多い。

測定の結果、1373Kで28.8ks処理した高Mn鋼では、透磁率が1.01以下であり、プラズマ浸炭処理後も低透磁率を保ち、非磁性であることを確認できた。

これと同じく1373Kで28.8ks処理したSUS304の試料では、透磁率1.8を示しており、非磁性が損なわれるという結果が出た。

3-2 炭化物の生成過程

プラズマ浸炭処理の時間経過による試料表面の生成物の変化をみるために、X線回折による定性分析を行った。測定にはCr管球を用い、管電圧30kV、管電流40mAの条件で行った。

図2は、処理温度1373Kにおける高Mn非磁性鋼の試料表面の化合物の生成過程である。未処理材(a)は、非磁性の組成であるオーステナイトのみが確認できる。0.6ks処理

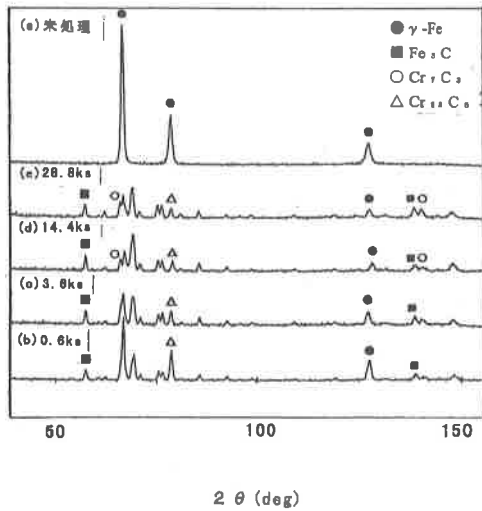


図2 処理層のX線回折結果
(高Mn非磁性鋼 1373K)

した試料では、(b)に示すようにオーステナイトのピークが小さくなり、 Fe_3C 及び $Cr_{23}C_6$ の生成が確認できる。3.6ks処理した試料では、(c)に示すようにオーステナイトのピークがさらに小さくなり、 Cr_7C_3 の生成が確認できる。(d)に示す14.4ks処理した試料では、 Cr_7C_3 のピークが大きく成長し、逆に $Cr_{23}C_6$ のピークは小さくなっている。28.8ks処理した試料では、(e)に示すように、 Cr_7C_3 のピークはさらに大きくなり、 $Cr_{23}C_6$ のピークはかなり小さくなっている。 Fe_3C のピークは、処理時間の増加に対し、初期段階と同様のピークで推移している。また、Mn炭化物のピークは小さく不明確で、特定の組成を同定することは困難であった。

このように、試料表面に生成したCr炭化物の組成は、処理の時間経過により変化した。本実験では、プロセスガス流量や放電電流密度は一定にして、処理時間のみを変化させたものであるから、このX線回折パターンの変化は、プラズマ浸炭時に試料表面に生成される炭化物の時間的経過を示すものと考えられる。

初期段階で生成した $Cr_{23}C_6$ は、その領域の炭素濃度の上昇とともに、より炭素量の多いCr炭化物(Cr_7C_3)へと変化する一方、鉄炭化物は Fe_3C が初期に生成された以降は、その組成に変化はなく、また絶対量の増加もみられない。

炭化物の標準生成自由エネルギーを比較すると、本研究における1373Kの場合の自由エネルギー G の値⁴⁾は、 $Cr_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 、 Fe_3C の順に大きく、この自由エネルギーのみの観点で考察すると、 $Cr_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 、 Fe_3C の順に生成が優先されると考えられる。本実験の結果では、初期段階で Fe_3C の生成もみられるが、その後は自由エネルギーの順に生成の優先が確認できる。

3-3 化合物の観察

処理層に生成した化合物について、金属顕微鏡、SEM

による観察及びEPMAによる元素分析を行い解析した。

写真1は、1373Kで28.8ks処理した高Mn非磁性鋼の処理層断面の金属顕微鏡による観察像である。オーステナイトの結晶粒界に沿って析出物が観察できる。

また、処理表面より0.1mmの深さ位置におけるSEM像を写真2に示す。これを、EPMAにより、写真中の線に沿ってライン分析を行った結果を図3に示す。析出物の範囲では、Crの強度が高くなり、Feのピークは低くなっている。逆にマトリックス部分では、Feの強度が高く、Crは小さい。この結果と、X線回折の解析結果を合わせると、プラズマ浸炭過程において素材に打ち込まれた炭素イオンは、結晶粒界に沿って拡散し、そこで母材中のCr及びFeと結合し、Cr炭化物や Fe_3C などを形成すると考えられる。

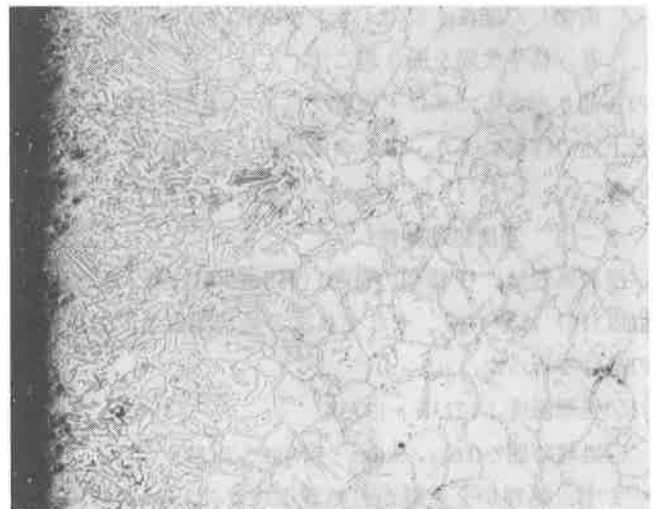


写真1 浸炭処理層の金属顕微鏡による観察結果
(高Mn非磁性鋼1373K・28.8ks)

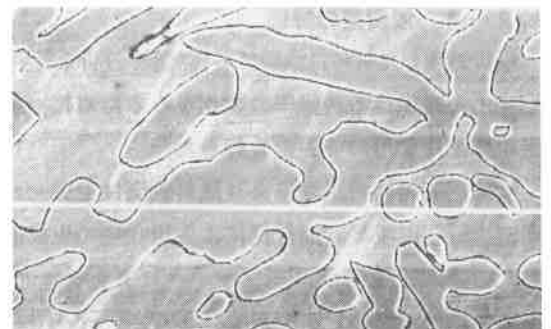
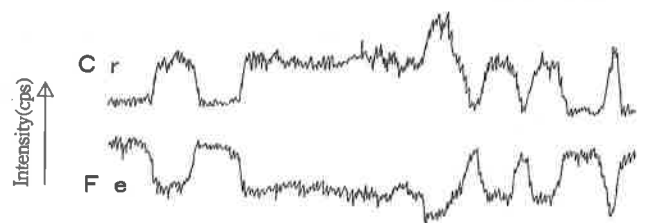


写真2 (図3) 浸炭処理層の電子顕微鏡観察像とEPMAライン分析結果
(高Mn非磁性鋼1373K・28.8ks)

3-4 処理層の硬度測定

マイクロビッカース硬度計を用い、炭化物の生成による硬化層の表面硬度及び有効硬化層 (JISG 0557) の測定を行った。測定荷重は0.49Nである。

表面からの深さ方向の硬度について、図4に高Mn非磁性鋼の測定結果、図5にステンレス鋼の測定結果を示す。

高Mn非磁性鋼では、1373K・28.8ks処理材では表面硬度がおおよそHv1100で非常に硬く、深くなるにつれて硬度が低下し、有効硬化層を示すHv550の位置は深さ0.40mmに達する。

それに対し、SUS304では、表面硬度がHv732、SUS316ではHv655、有効硬化層についてもそれぞれ0.20mm、0.35mmであり、ともに高Mn非磁性鋼よりも小さく、非磁性鋼の表面硬化にプラズマ浸炭が有効であることがわかった。

また、処理温度と処理時間が硬化層深さに及ぼす影響について図6に示す。これによると、処理温度が高い方が硬化層が深く、処理時間の1/2乗に比例して深くなり、その成長は放物線則に従うと考えられる。

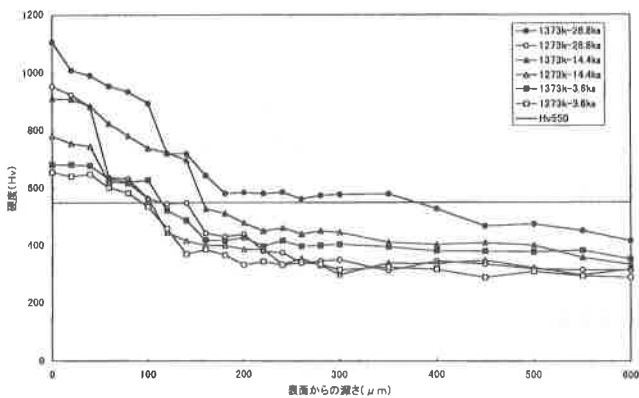


図4 硬化層の硬さ分布 (高Mn非磁性鋼)

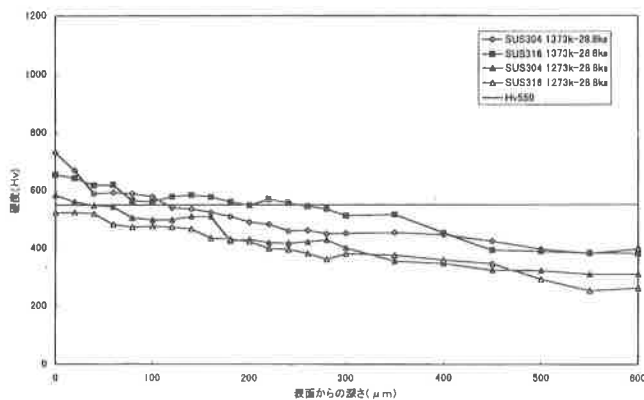


図5 硬化層の硬さ分布 (ステンレス鋼)

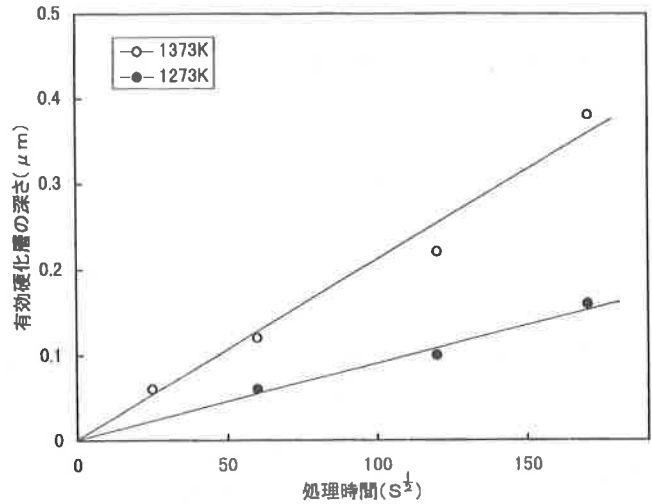


図6 処理時間と処理温度が硬化層の深さに及ぼす影響

3-5 耐摩耗性の評価

摩耗試験を行い、試料の耐摩耗性について検討した。

試験機は、写真3に示すようなBALL ON DISK型摩耗試験機 (CSEM製) を使用した。試験方法は、ディスク型の試験片を回転させ、摩耗球による一定荷重を垂直方向からかけて試験片を摩耗させる。耐摩耗性の評価は、摩耗溝を表面粗さ計で測定し、その深さから行った。



写真3 ball on disk式摩耗試験機

また、摩耗試験時の摩擦係数の変化を、ボールホルダーを保持する弾性アームの変形量より算出した。

摩耗球には摩耗試験用材料として代表的なSUJ2のベアリング鋼球を用い、表3に示すような条件で摩耗試験を行った。

その結果、図7に示すように、未処理材の摩耗量は数十μmに達し非常に深い摩耗溝ができた。それに対し、浸炭処理した高Mn非磁性鋼では、1μm程度の摩耗深さにとどまっており、耐摩耗性の向上が伺える。

また、高Mn非磁性鋼及びSUS304ともに、摩耗距離の増

表3 摩耗試験方法

荷重 (N)	摩耗球径 (mm)	ディスク 毎分回転数 (RPM)	摩耗位置 (mm)	回転数 (回)	摩耗距離 (m)	周速度 (mm/s)
10	8	500	φ30	10000	942.48	785.0
				5000	471.24	

加とともに摩耗深さが大きくなっているが、高Mn非磁性鋼に比べSUS304の摩耗深さは小さい。

高Mn非磁性鋼の摩耗試験時の摩擦係数はおよそ0.7であるのに対し、SUS304では0.8であった。クーロンの法則によると、すべり摩擦の主要因は粗さと凝着であり、表面粗さはそれぞれ一定であるので、摩擦係数の違いは凝着エネルギーによる影響が大きい。したがって、SUS304処理材の凝着エネルギーは大きいと考えられる。

摩耗面の観察結果から、SUS304の摩耗面は粗く、摩耗と凝着が繰り返され、見かけ上摩耗量が少なく観察されると考えられる。

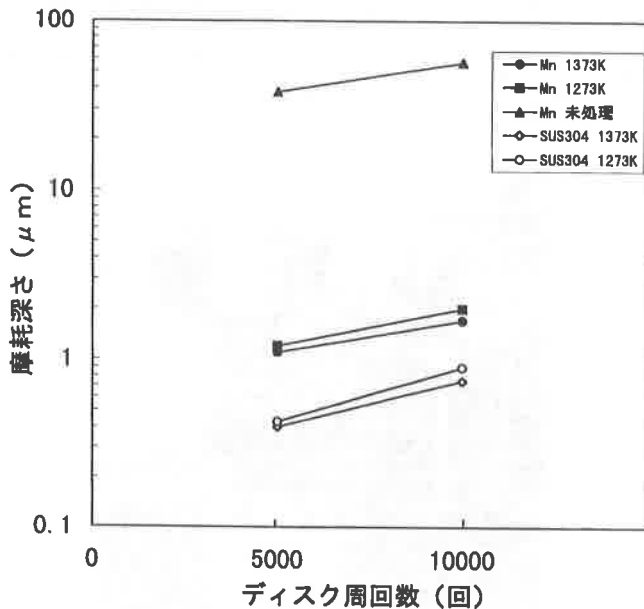


図7 摩耗試験結果

4 結 言

高Mn非磁性鋼の耐摩耗性を向上させるためにプラズマ浸炭処理を施し、浸炭層の材料特性を検討した。

- (1) 高Mn非磁性鋼の浸炭領域では、 $Cr_{23}C_6$ 、 Cr_7C_3 等のCr炭化物や Fe_3C などが生成され、このために処理領域で硬度が上昇する。
- (2) 炭化物は結晶粒界に沿って生成、拡散し、Cr炭化物及びFe炭化物が生成される。
- (3) 生成されたCr炭化物は、処理時間の経過とともにその組成が変化していく。 $Cr_{23}C_6$ は浸炭初期に生成され、処理の経過とともに減少していくのに対し、 Cr_7C_3 は逆に増加していく。
- (4) 浸炭温度1373K、28.8ks処理により表面硬度は高Mn非磁性鋼でHv1100、ステンレス鋼ではHv730程度まで上昇する。
- (5) 硬化層深さは、処理温度が高い方が深く、また処理時間の1/2乗に比例して深くなり、放物線則に従う。
- (6) 高Mn非磁性鋼の透磁率は、浸炭処理前が1.0009、処理後が1.01以下で、プラズマ浸炭による透磁率の上昇は認められない。

これらより、高Mn非磁性鋼の耐摩耗性向上を図るうえで、プラズマ浸炭による炭化物生成の有効性が確認でき、低透磁率を損なうことなく浸炭処理できることが確認できた。

参考文献

- 1) K.Nohara, K. Okumura, H. Sasaki; DEVELOPMENT OF NON-FERRO-MAGNETIC STEEL AND THEIR APPLICATION TO ACCELERATOR SUPERCONDUCTING MAGNETS, (1995)
- 2) 長田幸雄; 熱処理27, 6 (1987) 342
- 3) 高田寿; 特殊鋼28, 5 (1979) 8
- 4) 日本金属学会編; 金属データブック, 改訂3版 (1993) 99
- 5) 松原清; 「トライボロジ」, 産業図書 (1993) 40