18%Cr 系ステンレス鋳鋼の海水中での耐エロージョン性

小野修二* 斎藤正洋** 松尾信太郎**

*三菱重工業(株)基盤技術研究所

**三菱重工業(株)長崎研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 57, No. 3 (1993), pp. 307-311

Erosion Resistance of 18%Cr Cast Stainless Steel in Sea Water

Shuji Ono*, Masahiro Saito** and Shintaro Matsuo**

*Advanced Technology Research Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD, Yokohama

**Nagasaki Research & Development Center Mitsubishi Heavy Industries, LTD, Nagasaki

Recently, a new high strength 18%Cr cast stainless steel ($C \leq 0.04\%$, Cr: 16~18%, Ni: 5~7%, Mo: 1%) has been put into practical use for marine propellers. The erosion resistance of this steel was compared with that of other cast stainless steels such as martensitic cast stainless steel and nickel aluminum bronze. The results are summarized as follows:

(1) Pitting potential of the steel, which consists of martensitic, austenitic and ferritic phases, is 0.27~0.33 V(vs Ag/AgCl/KCl) in sea water. This result shows the corrosion resistance of the steel is better than that of SUS304 and martensitic cast stainless steels.

(2) The hardness of the steel was lower than that of martensitic cast stainless steel. The erosion resistance of the steel was, however, higher than that of other cast stainless steels. This was due to hardening of the surface of the erosion test specimen caused by the stress induced martensitic transformation of the residual austenitic phase.

(3) The erosion resistance of the steel was about two times higher than that of nickel aluminum bronze.

(Received July 17, 1992)

Keywords: 18% Chromium cast stainless steel, marine propeller, erosion resistance, cavitation erosion, hardness, pitting potential, stress induced martensite, nickel aluminum bronze

I. 緒 言

ステンレス鋳鋼の船舶用推進器への適用はかなり古く、昭和20年代からであるが、いずれも材質は12~13%Cr系ステンレス鋳鋼で、しかも砕氷船等の特殊用途が主体であった⁽¹⁾⁻⁽³⁾。ところが、昭和61年頃から高強度18%Cr系ステンレス鋳鋼が従来のニッケルアルミニウム青銅に代わって大形船舶の推進器の一部としても実用されるようになった。そこで、ここではこの高強度18%Cr系ステンレス鋳鋼の船舶用推進器として最も重要な性質の一つである海水中での耐エロージョン性について、マルテンサイト系ステンレス鋳鋼等のステンレス鋳鋼およびニッケルアルミニウム青銅と比較検討した結果を報告する。

II. 供試材料と試験方法

1. 供試材料

供試材料は、高強度18%Cr系ステンレス鋳鋼の基本成分で

ある低C($\leq 0.04 \text{ mass}\%$)-16~18 mass%Cr-5~7 mass%Ni-1 mass%MoのC量およびMo量を固定して、Cr量を12~25 mass%、Ni量を0~7 mass%の範囲で変化させ、高周波溶解炉で溶解・鋳造して製作した(以降massを省略し%のみの表示とする)。供試材料の化学成分をTable 1に示す。また、高強度18%Cr系ステンレス鋳鋼と海水中での耐エロージョン性を比較したニッケルアルミニウム青銅(AIBC 3)の化学成分をTable 2に示す。

2. 試験方法

供試材料の耐エロージョン性は、超音波エロージョン試験機により下記の要領で試験・評価した。なお、耐エロージョン性の評価に当たっては供試材料の金属組織、硬さおよび海水中での耐孔食性の目安を示す孔食電位も測定し、考察した。硬さおよび孔食電位の測定法は次のとおりである。

(1) 硬 さ

試験片母材の硬さとしては荷重3000 kgでブリネル硬さを測定した。また、試験片断面の硬さは荷重0.2 kgでマイクロビッカース硬さとして測定した。

Table 1 Chemical composition of test specimens (mass%).

Sample code	C	Cr	Ni	Mo	Fe	Remarks
A	0.021	12.02	3.20	0.96	Bal	12%Cr stainless steel
B	0.024	11.94	5.06	0.95	Bal	
C	0.034	16.07	5.11	0.98	Bal	
D	0.038	16.12	6.02	0.96	Bal	16%Cr stainless steel
E	0.032	16.05	7.01	0.94	Bal	
F	0.037	17.67	0.36	0.92	Bal	
G	0.033	17.56	3.09	0.95	Bal	18%Cr stainless steel
H	0.036	17.65	5.00	0.94	Bal	
I	0.035	17.49	5.95	0.94	Bal	
J	0.036	17.41	6.92	0.97	Bal	
K	0.033	19.82	5.11	0.94	Bal	20%Cr stainless steel
L	0.031	19.86	6.98	0.94	Bal	
M	0.035	23.79	5.19	0.97	Bal	25%Cr stainless steel

Table 2 Chemical composition of erosion test specimens (mass%).

18%Cr stainless steel	C	Cr	Ni	Mo	Fe
	0.038	17.93	5.96	1.06	Bal
Nickel aluminum bronze (AIBC 3)	Al	Ni	Fe	Mn	Residual
	9.00	4.55	4.77	0.95	0.31

(2) 孔食電位

海中の耐食性の目安となる耐孔食性を評価するため、全自動分極測定装置を用いて孔食電位を測定した。

孔食電位は、30°Cの自然海水中で自然電位から0.02 V/60 sの掃引速度で陽分極し、1 A/m²の電流密度に対応する電位とした。

(3) エロージョン試験

まず、高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の耐エロージョン性を他のステンレス鋼と比較した。耐エロージョン性は超音波

Fig. 1 Testing method for magnetostriction-type erosion.

エロージョン試験機を用い、室温(25±1°C)の自然海水中で振動数 6.5 kHz、振幅 90 μm の条件でエロージョン試験を行い、120 min 間の重量減から評価した。超音波エロージョン試験方法を Fig. 1 に示す。

次に、18%Cr 系ステンレス鋼の耐エロージョン性をニッケルアルミニウム青銅と比較した。比較に当たっては、前記の超音波エロージョン試験機を用いて振幅 95 μm および 110 μm で試験した。

試験後の評価は、試験片のエロージョン体積減量、最大深さおよび表面粗さの比較により行った。

III. 試験結果と考察

1. 硬 さ

供試材料の硬さを、硬さに及ぼす Cr 当量および Ni 当量の影響として Fig. 2 に示す。硬さは、マルテンサイト相が比較的多い試料 A、試料 B、試料 C および試料 D で H_B 300 を越えたが、フェライト量および残留オーステナイト量が 50% を越えると著しく低下し、 H_B 160~205 を示した。

Fig. 2 Relationship between Brinell hardness and chemical composition.

Fig. 3 Influence of Cr equivalent and Ni equivalent on pitting potentials in sea water.

2. 孔食電位

海水中の孔食電位の測定結果を Fig. 3 に示す。フェライト単相および 12%Cr 系ステンレス鋼試料の孔食電位は、それぞれ 0.09 V (vs Ag/AgCl/3.3 kmol·mol⁻³ KCl: 以下省略) および 0.18~0.2 V で、同時に試験した SUS304 (0.19 V) と同程度かそれ以下であった。これに対して 16~18%Cr 系のマルテンサイト+オーステナイト+フェライト三相組織の鋼試料(以降高強度 18%Cr 系ステンレス鋼と呼称)の孔食電位は 0.27~0.33 V で、二相系の試料 L および M、あるいは同時に試験した SUS316L (0.36 V) よりもやや孔食電位は低いものの、SUS304 および 12%Cr のマルテンサイト系ステンレス鋼よりも良好な耐食性を示した。

3. 耐エロージョン性

(1) 高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の耐エロージョン性(1) —他のステンレス鋼との比較

高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の海中での耐エロージョン性を他のステンレス鋼と比較・検討した。供試材料の耐エロージョン性をエロージョン減量に及ぼす母材硬さの影響として整理した結果を Fig. 4 に示す。

フェライト量の多い試料 F (フェライト量 100%) および M (フェライト量 77.9%) の重量減量が大きかったのは、何れもエロージョン減量は 50~115 g/m² で、耐エロージョン性に及ぼす母材の硬さの影響は比較的小さい結果となった。しかし、マルテンサイト+オーステナイト+フェライト三相組織の鋼試料の間では、エロージョン減量はオーステナイト量が多く硬さが低い試料 E, I, J および K の方が、オーステナイト量が少なく硬さの高い試料 C, D および H より少ない傾向にあった。

そこで、マルテンサイト+オーステナイト+フェライト三相組織の鋼の耐エロージョン性を更に詳しく調べるために、試料 J のエロージョン損傷部の顕微鏡組織および硬さについて検討した。

エロージョン損傷部近傍の硬さと顕微鏡組織を Fig. 5 に示す。

Fig. 4 Influence of hardness on mass loss by cavitation erosion.

Fig. 5 Microvickers hardness and microstructure at the surface of the eroded test specimen.

エロージョン損傷を受けた表面近傍では表面から約 0.2 mm の範囲に硬化層が認められ、最表層部では硬さが Hv 350 以上に達していた。これはキャビテーションの衝撃により試料表面が叩かれ表層部の残留オーステナイト相が加工誘起マルテンサイトに変態し⁽⁴⁾、硬化するためである。この点は顕微鏡組織から焼入れ組織のマルテンサイト相中に新たに加工に伴うマルテンサイト相が形成されていることからわかる。また、X 線回折法による残留オーステナイトの測定によれば、表層部では残留オーステナイトが観察されなかった事からも裏付けられる。

Fig. 5 に示したエロージョン試験結果を、エロージョン減量に及ぼす試験後の試験片の表面硬さの影響として整理し直した結果を Fig. 6 に示す。その結果、残留オーステナイト量が当初多く、しかも表面硬さが高くなっている試料 (E, I, J および K) ほどエロージョン減量が小さい傾向にあることが明らかになった。このように、マルテンサイト+オーステナイト+フェライト三相組織の高強度 18%Cr 系ステンレス鋼試料では、母材の硬さはマルテンサイト系鋼試料よりも低いものの、耐エロージョン性は、キャビテーションによりオーステナイトが加工マルテンサイトへ変態するため、表面硬化が起こり良好であることが確認された。

なお、耐エロージョン性に及ぼす孔食電位の影響は、試験し

Fig. 6 Influence of surface hardness on mass loss by cavitation erosion.

た試料の範囲では母材の硬さに比較して小さいと言える。すなわち、孔食電位が 0.38 V と試料中最も高かった試料 M のエロージョン減量は、試料 F に次いで大きかった。これは試料 M のフェライト量が前記のとおり試料 F に次いで多いためと思われる。

(2) 高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の耐エロージョン性(2) —ニッケルアルミニウム青銅との比較

優れた耐エロージョン性を示したマルテンサイト+オーステナイト+フェライト三相組織の高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の耐エロージョン性を、現在一般に船舶用推進器材料として使用されているニッケルアルミニウム青銅(AIBC 3)と比較・検討した。

エロージョンの進行過程は、Canavelis⁽⁵⁾によると Fig. 7 に示すように 3 段階に区分される。すなわち、初期の段階(時間 t_0)では気泡の衝撃により材料の表面粗さは増すが、まだピット発生、重量減少には到らず、ある一定の潜伏期間を示す段階。第 2 段階(時間 t_1)は、初期ピットが発生し進行するが、エロージョン量は小さく、ピットも浅い段階。第三段階(時間

Fig. 7 Schematic drawing for the progress of cavitation erosion.

t_2)では、ピットの深さ、面積が増し、エロージョン量が増大するとされている。初期の期間は、材料固有の初期抵抗期間と考えられ、材料の耐エロージョン性を判定するには、これらの初期抵抗期間が重要であると言われている⁽⁶⁾。

そこで、最初の潜伏期とエロージョンの小さい段階(時間 t_0 + 時間 t_1)を合わせた軽微なエロージョン期を①と表示して、エロージョンによる体積減量の時間的変化を Fig. 8 に、エロージョンによる最大深さの時間的変化を Fig. 9 に示す。また、エロージョン面の表面粗さの代表例を Fig. 10 に示す。なお、Fig. 8 および Fig. 9 における軽微なエロージョン期①は、エロージョン減量 0.5 mm³ 以下と、エロージョン最大深さ 30 μm 以下の試験時間に相当する。

Fig. 8 の振幅 110 μm に注目すると、ニッケルアルミニウム青銅のエロージョン潜伏期(表面粗さは増すがエロージョン量が零の期間)がほとんどないのに対して、高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の潜伏期は 15 min 間もあることが分かる。

高強度 18%Cr 系ステンレス鋼とニッケルアルミニウム青銅を比較した場合、エロージョン減量およびエロージョン最大深さともに前者は後者の約半分の値であり、前者の耐エロージ

Fig. 8 Change in erosion volume reduction with the lapse of time.

Fig. 9 Change in erosion maximum depth with the lapse of time.

Fig. 10 Roughness of the eroded surface (testing time: 60 min).

エロージョン性は、後者の約 2 倍であることが分かる。これは、高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の硬さが、 H_B 190 程度とニッケルアルミニウム青銅の硬さ H_B 160 程度に比較して高いことおよび前記のようにエロージョンを受け、オーステナイト相が加工マルテンサイト相へ変態し表面硬さが上昇するためと考えられる。

IV. ま と め

近年、大形船舶用推進器材料として実用されている高強度

18%Cr 系ステンレス鋼 ($C \leq 0.04\%$, Cr: 16~18%, Ni: 5~7%, Mo: 1%) の海中での耐エロージョン性について、マルテンサイト系ステンレス鋼等のステンレス鋼およびニッケルアルミニウム青銅と比較・検討した。

結果の概要は、次の通りである。

(1) マルテンサイト+オーステナイト+フェライト三相組織で構成される高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の孔食電位は 0.27~0.33 V で、SUS304 およびマルテンサイト系ステンレス鋼よりも良好な耐食性を示した。なお、孔食電位の耐エロージョン性に及ぼす影響は小さかった。

(2) 高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の硬さはマルテンサイト系の試料より低い、耐エロージョン性はキャビテーションによる加工誘起マルテンサイトの生成に伴う表面硬化のため極めて良好である。

(3) 高強度 18%Cr 系ステンレス鋼の耐エロージョン性は、船舶用推進器材料として一般に実用されているニッケルアルミニウム青銅の約 2 倍と優れている。

文 献

- (1) 植田靖夫：日本船舶機関学会誌，12(1977)，No. 11，789.
- (2) 今村輔之，寺本 靖：日本鋼管技報，No. 91 (1981)，109.
- (3) 徳田洋一，畠中俊彦，辻本信幸：R & D 神戸製鋼技報，27(1977)，No. 4，30.
- (4) 宇佐見賢一，尾崎敏範，小沼 勉：鉄と鋼，75(1989)，790.
- (5) R. Canavellis: Trans. ASME, J of Basic Engrg, 90(1968)，355.
- (6) 日刊工業新聞社：金属防食技術便覧，(昭47)，141.