高硬度マルテンサイト系ステンレス鋼の 冷間加工性と耐食性

岡部道生*, 飯久保知人**

Cold Workability and Corrosion Resistance of High Strength Martensitic Stainless Steels

Michio Okabe and Tomohito Iikubo

Synopsis

Cold workability and corrosion resistance of high strength martensitic stainless steels were investigated for the purpose of application to cold forged parts. Cold workability of high carbon stainless steels can be improved by lowering C, Cr and Si contents and by refining carbides. Corrosion resistances in mild atmosphere increase with Cr content. Steels with medium Cr content ranged from 5 to 11 wt% show equivalent corrosion resistances to commercial Ni plating.

1. はじめに

SUS 440Cのような、高硬度のマルテンサイト系ステンレス鋼は、冷間加工性が著しく劣るため、通常、熱間加工一切削加工などの組合せにより部品が製造されている。しかし、近年ますます厳しくなる製造コスト削減、生産性の向上の要求から、ステンレス鋼が使用される部品でも、冷間鍛造などの高能率な加工法により生産したいとのニーズが強まっている。一方、従来炭素鋼など低合金鋼が使用されていたOA機器部品、精密機器部品などが、信頼性の向上、メンテナンス・フリーなどを目的に、ステンレス鋼に置き換えられつつある。そのような部品で比較的腐食環境が厳しい場

合には、合金鋼の部品にニッケルメッキが施され使用されていたが、ニッケルメッキの処理コスト、環境対策からメッキが省略できるステンレス鋼の採用が広がりつつある。

以上のような観点から、今後ますます要求が強まるものと考えられる高硬度マルテンサイトステンレス鋼の冷鍛化、精密機器部品への適用を考慮し、冷間加工性、耐食性に及ぼす合金元素、炭化物などの影響を詳細に調査する目的で本研究を実施した。

2. 実験方法

実験にもちいた供試材の化学成分を Table 1 に示す。いずれも真空誘導炉で溶解し、50kgのインゴットに鑄造した後、直径20mmの棒材に鍛造し球状化焼鈍を施して供試材とした。

冷間加工性は主に静的圧縮試験で評価した。試験片の寸法は直径6mm、高さ11.5mmで、二硫化

1993年2月17日受付

*大同特殊鋼(株)星崎工場, 工博

**大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博

Table 1. Chemical composition of experimental steels.

Steel	(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
A	0.43	0.20	0.20	0.025	0.002	3.02	0.50	—
B	0.45	<0.01	0.20	0.026	0.002	4.99	<0.01	—
C	0.46	0.20	0.20	0.028	0.002	4.96	<0.01	—
D	0.43	1.80	0.20	0.026	0.003	5.00	<0.01	—
E	0.45	0.20	0.20	0.026	0.001	4.97	0.50	—
F	0.54	0.19	0.20	0.027	0.002	7.99	0.30	—
G	0.59	0.21	0.20	0.027	0.002	8.00	0.30	—
H	0.59	0.20	0.20	0.022	0.002	9.93	0.30	—
I	0.56	0.20	0.19	0.028	0.001	13.10	0.20	—
J	0.52	0.15	0.14	0.003	0.002	15.80	1.10	0.10
SUS 420J2	0.36	0.25	0.58	0.028	0.012	13.36	0.06	—
DINX 90	0.84	0.15	0.15	0.005	0.002	18.09	1.10	0.11
SUS 440C	1.01	0.27	0.34	0.019	0.001	16.43	0.37	—

Table 2. Test conditions of spray tests.

Test	Condition
Humidity test	50°C, 98%RH, 48h
Cyclic spray test	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> Dry (70°C, 30%RH, 2h) ↓ Wet (50°C, 98%RH, 4h) </div> <div style="margin-left: 10px;"> ← 8 cycles → </div> </div>

RH: Relative humidity

モリブデンを端面潤滑材として使用している。さらに、靱性に及ぼす炭化物寸法の影響を調査する目的で、鋼Jでは溝付きダイスを用いた高速圧縮試験も実施している。

マイルドな環境下の耐食性を評価するため、湿潤試験、乾湿サイクル試験を実施した。試験条件はTable 2にまとめて示す。円柱状の試験片を鍛造丸棒の長手方向から採取し、1000~1050°C×30 min 油冷-150°C×2hの熱処理を施した。試験片表面は1000番のエメリー紙で研磨され、試験雰囲気には暴露された面積は幅12mm、長さ106mmである。直径0.5mm以上の腐食ピットの数に腐食試験後測定した。また、人工海水中での孔食電位も測

定した。

3. 実験結果と考察

3.1 冷間加工性

供試材の硬さ、引張特性をTable 3に示す。すべて試験片は球状化焼きなましした状態にある。Fig. 1は静的圧縮試験の代表的な変形応力-歪み曲線を示す。試験材の加工硬化挙動はほぼ類似している。球状化焼きなましした試料の変形応力は炭素量に依存し増大する。Fig. 1の応力-歪み曲線で、 $\sigma = Fe^n$ の関係を満足すると仮定しデータの解析を実施した。Fig. 2はF値、n値に及ぼすC量の影響を示す。C増量はF値を増加させるが、n値は変化させない。添加された炭素の大部分はCr炭化物を形成するので、この影響は炭化物の量を介してきくものと思われる。F値、n値に及ぼすCr量の影響をFig. 3に示す。F、n値はCr量の影響をほとんど受けない。Fig. 4、Fig. 5は加工硬化挙動に対するSi量の顕著な影響を示したものである。Si添加は変形応力を増加させ、1wt%添加あたりのF値の増加は14kgf/mm²である。この硬化量は球状化組織のフェライトマトリックスへの固溶強化でほぼ説明できる。

Table 3. Mechanical properties of experimental steels.

Steel	Hardness (HRB)	0.2P.S.	U.T.S.	El.	R.A.	F	n
		(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)	(%)	(%)	(kgf/mm ²)	
A	83	34.8	57.9	37.2	72.2	103.0	0.192
B	77	20.9	53.1	40.7	81.3	95.5	0.207
C	82	24.4	56.1	38.8	75.7	100.4	0.194
D	95	47.3	74.4	30.8	63.3	123.6	0.152
E	85	31.2	60.7	37.6	75.6	104.7	0.189
I	88	24.1	65.0	32.1	59.4	119.0	0.194
J	85	46.2	65.8	32.3	63.6	110.0	0.203
SUS 420J2	93	31.2	72.9	30.1	62.6	120.0	0.183
DINX 90	91	53.9	68.3	28.4	47.9	118.9	0.200
SUS 440C	93	30.4	70.3	22.4	36.8	131.1	0.149

Fig. 1. Examples of flow stress-strain curves in compression tests.

Pickering¹⁾によれば、低Cフェライト鋼における、1wt% Si添加あたりの降伏応力の増加は9 kgf/mm²で、本実験結果の値とほぼ一致している。

冷間加工性の議論で、しばしば硬さが要因として上げられる。Fig. 6は硬さとF値の関係を見たものである。若干のパラッキはあるがF値は硬さとともに増加しており、冷間変形に対する抵抗性

の指標として、硬さも有効であると考えられる。

Fig. 7に示されるとおり、静的圧縮試験における割れ発生の臨界歪みは含有C量に依存する。共晶反応により生成するCr₇C₃型的大型炭化物が存在するような0.7wt%以上のC量で、臨界歪みは急速に低下する。このような高Cステンレス鋼では、50μm以上の大きさの粗大炭化物がしばしば観察される。このような大型炭化物は冷間加工時

Fig. 2. Effect of C content on cold workability.

Fig. 3. Effect of Cr content on cold workability.

Fig. 4. Flow stress-strain curves of steels with various Si content.

に、割れ発生の起点となる。Photo. 1は SUS 440 C 試験片の冷間加工後の組織を SEM 観察したものであるが、圧縮試験で炭化物自身が破損しているのがわかる。

Fig. 7で、C量を0.7wt%以下にすることにより大型炭化物はほとんど消え、小形で粒状の Cr_{23}C_6 炭化物が分散するミクロ組織となるが、臨界歪み量はかなりバラツキていることがわかる。この原因は炭化物のサイズに起因するものと考えてい

る。靱性に及ぼす炭化物サイズの影響を明らかにする目的で、異なる炭化物寸法の試験材の高速圧縮試験を実施した。製造方法を変えることにより、最大炭化物 $16\mu\text{m}$ と $24\mu\text{m}$ の2種類の試験片を試作した。本実験においては溝付きダイスにより試験片の変形が拘束されるため、自由表面の割れが助長される。Fig. 8は本実験における歪み量と破損の割合を示したものである。試験片の50%が割れる臨界歪み量は小さい炭化物の材料で1.4、大き

Fig. 5. Effect of Si content on cold workability

Fig. 7. Influence of C content on critical strain for cracking.

い炭化物の材料で1.1である。この実験結果は炭化物の微細化が靱性向上に有効であることを示している。

これらの実験結果から、高硬度マルテンサイトステンレス鋼の冷間加工性の向上にはC、Siの低減と炭化物の微細化が有効な手段であるといえ

Fig. 6. Relation between hardness and F -value.

Fig. 8. Effect of carbide size on cold workability [high speed compression test with grooved dies]

る。

3.2 耐 食 性

Fig. 9は湿潤試験、乾湿サイクル試験結果を示す。耐食性を単位面積あたりの腐食ピットの数で評価しているが、耐食性はCr濃度にとまない上昇しているのがわかる。図から、湿潤試験におけ

Fig. 9. Effects of Cr content on corrosion resistance in mild corrosive atmosphere.
(Heat treatment: 1 000~1 050°C/30min/OQ → 150°C/2h/AC)

Photo. 1. Fracture of large carbide in compression specimen of SUS 440C.

Reduction in height: 40%

る耐食性はCr含有量により3領域に分けられる。第一領域は5wt%Cr以下で耐食性は非常に悪く、Cr量にしたがって急速に改善される。第二領域は5~11wt%Crで試験片は若干腐食する。第三領域は11wt%Cr以上で、湿潤試験では全く腐食

しない。第二領域のCr量の鉄鋼材料はオフィスのような環境で使用される機器の部品には使用が可能ではないかと考えられる。この領域の鋼では、熱処理のオーステナイト化で炭化物は容易にマトリックスに固溶するため、添加したCr量はほぼ全量マトリックスに入り、地の耐食性の確保に作用すると考えられる。第三領域の材料は十分な耐食性を有するため、機械工場や屋外のような腐食環境の厳しい場所でも使用することができる。本研究で得られた腐食挙動は海岸地区で暴露されたサンプルの挙動とよく一致している²⁾。

第二領域の材料の腐食特性をさらに検討するため、Niメッキ品の耐食性評価を実施した。Fig. 10は湿潤試験結果を示したものである。腐食ピットの数にNiメッキの厚みが増すと減少することがわかる。Fig. 9との比較から、第二領域の材料の耐食性は5μm厚みのNiメッキ品とほぼ同等である。この結果から、5μmのNiメッキが施される部品が使用できる環境では、第二領域の耐食性の鋼も使用が可能であると思われる。

Photo. 2は鋼JとSUS 440Cの塩水噴霧試験後の外観写真である。第二領域の鋼JはSUS 440Cより低いCr量であるにもかかわらず、はるかに優れた耐食性を持つことがわかる。SUS 440CではCr含有量の大部分が大型の共晶炭化物とし

Fig.10. Effect of thickness of nickel plating on corrosion resistance.

て消費されるため、地のCr量が欠乏し結果として不十分な耐食性となる。また鋼Jの優れた耐食性はMo含有に起因していると考えられる。

4. 結 論

精密部品などへの冷間加工の適用を検討するため、高硬度マルテンサイトステンレス鋼の冷間加工性、耐食性を調査した結果、以下の結論を得た。

(1) 高Cステンレス鋼の冷間加工性はC、Siの低減、炭化物の微細化により改善される。

Photo.2 Appearance of specimens after salt spray test [35°C, 5%NaCl aq., 96h]
Specimens were tempered for 2h at 150°C.

(2) マイルドな環境下の耐食性はCr含有量で変化する。5～11wt%のCr量を持つ鋼の耐食性は通常のNiメッキ品の耐食性と同等である。

(文 献)

- 1) F.B.Pickering and T.Gladman; Iron and Steel Inst.Spec.Rep., 81 (1963)
- 2) R.J.Schmitt and C.X.Mullen; ASTM STP, 454 (1969), 124