日本金屬學會誌

第20卷 第5號

技術論文

黒鉛鋼に関する研究(第2報)*

黒鉛鋼の黒鉛化に及ぼす W, Mo, Cr および Ni の影響

佐藤 知雄** 戸谷 三郎**

Tomo-o Sato and Saburo Toya : Study on Graphitic Steel (2nd Report). Effect of W, Mo, Cr and Ni on Graphitization of Graphitic Steel. In the 1st report, the standard composition of graphitic steel was determined as 1.5% C and 1.0~1.5% Si, but its graphitizing characteristics may be changed by adding other alloying elements to it. Therefore, the experimental researches were carried out on the forgeability of an ingot and the graphitization, the change of hardness and the micro-structured of the standard composition graphitic steel containing 0.4~2.1% W, 0.09~0.73% Mo, 0.10~1.02% Cr and 0.51~1.37% Ni separately, by annealing the samples at various temperatures. With an increase of the content of W, Mo and Cr in the graphitic steels the forgeability of them were improved, while addition of Ni made it poor. The power of graphitization in graphitic steel, just as in cast iron, was retarded slightly by W and Mo and strongly by Cr, and accelerated by Ni. The suitable composition of graphitic steels containing special elements separately was determined as follows; about 2.5% W, 1.5% Mo, 2% Ni and under 0.3% Cr (1.5% C and 1.5% Si being common to all).

(Received February 9, 1956)

I. 緒 言

第1報⁽¹⁾において黒鉛鋼におよぼす Si の影響について報告し、Fe-C-Si 系黒鉛鋼の組成は 1.3~1.5% C, 1.0~1.5% Si を適當と結論した。近年黒鉛鋼には種々の目的から各種合金元素を添加する傾向となつておる。

しかし合金元素が黒鉛鋼の諸性質、特に炭化物の黒鉛化に及ぼす影響に関する研究は殆んど見當らない。

黒鉛鋼に合金元素を添加した場合、黒鉛鋼は C および Si 量が高いため、その性質が一般の鋼の場合とやゝ異なり強力な炭化物生成元素を添加しても、炭化物の黒鉛化を必ずしも強力に阻止しない場合がある。また黒鉛の析出形状は合金元素に影響されるもののようである。

本研究においては、前記 Fe-C-Si 系黒鉛鋼に W (0.5~2.0%), Mo (0.1~0.8%), Cr (0.1~1.0%) および Ni (0.5~1.5%) を添加した鋼を熔製し、鍛造して試料を製作した。これらの試料を 600~1000° の各温度にて黒鉛化焼鈍を行い、黒鉛化量および硬度の測定並に顯微鏡組織よ

り上記合金元素が黒鉛鋼の鍛造性、黒鉛化におよぼす影響について實驗した。

II. 試料の製造および鍛造性

本實驗に用いた試料は 1.5% C, 1.0~1.5% Si の組成をもつ黒鉛鋼に各種の合金元素をそれぞれ單獨に添加したものであつて、これらは 1.3% C スエーデン鋼、各種合金鐵および豫め熔製した純白鉄を原料として高周波誘導電氣爐で塩基性熔解を行い、Mn, Si および Al で充分脱酸し

Table 1 Chemical composition and forgeability of Specimens. (max. Mn: 0.30%, S: 0.025%, P: 0.026%, forging temp. 1000~850°)

No. of Specimens	C (%)	Si (%)	Other (%)	Forgeability
2-1	1.51	1.58	W: 0.40	good
2-2	1.49	1.54	" 1.04	good
2-3	1.53	1.47	" 2.14	good
3-1	1.61	0.91	Mo: 0.09	poor
3-2	1.48	1.19	" 0.27	good
3-3	1.54	1.06	" 0.60	moderate
3-4	1.42	1.21	" 0.73	good
4-1	1.67	0.98	Cr: 0.10	moderate
4-2	1.61	0.95	" 0.21	good
4-3	1.54	1.09	" 0.89	good
4-4	1.58	1.00	" 1.02	good
5-1	1.68	0.85	Ni: 0.51	poor
5-2	1.44	0.99	" 1.37	good

** 東北大學工學部金屬工學科

* 1953 年 10 月本會仙臺大會に發表

(1) 本誌, 20 (1956), 5.

た後 40 mm ϕ $\times$ 200 mm の鋼塊に鑄造し、鍛造後 12 mm ϕ $\times$ 200 mm の試片に仕上げた。試料の鍛造性および化学分析結果を Table 1 に示す。なお鍛造性の良否は実際の鍛造の難易から認定したものである。なお鍛造中試料 No. 3-1 および No. 5-1 に龜裂を生じたが、これは C 量がやゝ高いためである。一般炭化物を作る合金元素を添加した試料は Fe-C-Si 系試料 (1.5% C, 1.5% Si) の鍛造性に比して向上しており、また Ni を添加した場合 Si 量を減ざると、その鍛造性は Si のみの黒鉛鋼よりも良好となる。この点 Si と Ni をある量比の関係で變化させることは黒鉛鋼の性質上有利と考えられる。

III. 黒鉛化焼鈍結果

黒鉛鋼における熱処理の第 1 段階である黒鉛化焼鈍については、第 1 報におけると同じく、0.6% 以上の球状黒鉛を析出させること、また機械加工性の點からブリネル硬度 220 以下とすることに目標をおいて、Fe-C-Si 系の標準黒鉛析出に對する W, Mo, Cr および Ni 量と焼鈍温度との関係を求めた。

鍛造成形した試片を 10°/min の加熱および冷却速度にて 600~1000° に 1 hr 焼鈍後、各試片について黒鉛分析試料を採取し、同時にブリネル硬変を測定、さらに顯微鏡下において黒鉛の析出状態を観察した。

1. W の影響

黒鉛鋼の基體 (1.5% C, 1.5% Si) に 0.40~2.14% W を含有する試料についての測定結果を Fig. 1 (A) および (B) に示す。(A) は焼鈍温度による硬度の變化、(E) は析出黒鉛量の變化である。(A) 圖お

よび (B) 圖の破線は第 1 報におけると同じく、それぞれ目標とする硬度 (ブリネル 220) および黒鉛析出量 (0.6%) を示す。

測定結果から明かなごとく、W 約 2% を含有しても黒鉛化焼鈍によつて硬度は 220 以下となり、黒鉛の析出量は 0.6% 以上であるが、W 量の増加により焼鈍硬度は上昇し、また黒鉛化阻止の傾向にある。特に A₁ 點以下の黒鉛化は Fe-C-Si 系と比較すると甚しく阻止されておる。W は鋼中においては強力な炭化物生成元素であるが、黒鉛鋼のごとく高 C, 高 Si 鋼では W を含有しても炭化物は比較的容易に黒鉛化することが以上の實驗結果から知られた。

顯微鏡組織を観察すると、試料 No. 2-1 および No. 2-2 においては鍛造中に黒鉛が少量析出しており、また焼鈍温度 700° より各試料ともセメントイトは球状化をはじめておる (Photo. 1)。

試料 No. 2-1 においては焼鈍温度が 750° 附近になるとセメントイトの分解が多くなり、フェライトの析出が特に著しい。

變態温度直上における黒鉛の析出は Fe-C-Si 系におけると同じく、その形状は細長い、温度の上昇と共に球形の黒鉛が析出する。しかし一般に黒鉛粒は Fe-C-Si 系に比較して小さい。黒鉛化は 900~950° で最もよく進行し、試料 No. 2-1 においてはパーライト量が非常に少い。しかし W 含有量の増加と共にパーライト量も多くなり、試料 No. 2-3 (2.14% W) では、いわゆるブルアイ組織となり、黒鉛鋼における目標黒鉛量の最低値となる。しかし W 含

Fig. 1 Change of graphite amount and hardness due to annealing at various temperature for one hour.

有量の多少に拘らず析出黒鉛は球状に近い。Photo. 2, 3 および 4 はこれらの組織である。

以上のごとく、焼鈍後の硬度、黒鉛化量および顕微鏡組織などを比較して、黒鉛鋼 1.5 % C, 1.5 % Si の基體に對し W を合金元素とするときは、約 2.5 % まで添加することが可能である。

2. Mo の影響

Fe-C-Si 系黒鉛鋼の基體 (1.5 % C, 1.0 % Si) に Mo を 0.1~0.8 % 添加して同様の測定を行つた結果を Fig. 2 (A) および (B) に示す。測定結果より黒鉛化に及ぼす

Fig. 2 Change of graphite amount and hardness due to annealing at various temperature for one hour.

Mo の影響を見ると、0.3 % までは Fe-C-Si 系の黒鉛化に餘り影響を與えないことが知られた。しかしそれ以上 Mo を含有すると黒鉛化は少しく阻害される。また Mo の比較的小さい試料では、Fe-C-Si 系と同様に A₁ 點以下の温度において黒鉛量に極大値を示す傾向があり、また 900° 附近において黒鉛量は最大である。本系における黒鉛化を前試料の W 含有黒鉛鋼の黒鉛化と比較すると、Mo および W ともに炭化物構成元素であるが、黒鉛化を阻止する力は Mo が W より少し弱いと考えられる。

しかし本系黒鉛鋼において Fe-C-Si 系黒鉛鋼と比較して特に注目される點は、黒鉛析出量に比して焼鈍硬度が高いことである。試料 No. 3-4 では焼鈍硬度ブリネル 220 以上となり、機械加工性が低下してゐる。また Fe-C-Si-W 系試料より焼鈍硬度は上昇してゐる。黒鉛の析出形状は Fe-C-Si 系よりも小粒であるが、一般にやゝ長くなる。

顕微鏡組織にて各温度焼鈍後の黒鉛化の變化を見ると、鍛造組織において試料 No. 3-1 および No. 3-2 に少量の

黒鉛の析出が認められ、その他は同程度の C 量の炭素鋼と異ならない。焼鈍温度 700° よりセメンタイトは球状化をはじめ、また Mo 量の少い試料 No. 3-1 および No. 3-2 では、この温度で細長い黒鉛の析出が見られる。なお同試料 750° 附近の焼鈍によつて黒鉛化が著しく進行し、フェライトの發生が顯著である。Photo. 5 は試料 No. 3-3 の球状セメンタイトと黒鉛の組織を示す。各試料とも 800° 焼鈍によつて球状セメンタイトの一部が層状パーライトに変化する。すなわち試料變態點以上に加熱されたためであるが、黒鉛析出量は 750° と殆ど差異がない。しかし 850°

Photo. 5 No. 3-3 (1.54 % C, 1.06 % Si, 0.6 % Mo) annealed 750°, 1 hr

Photo. 6 No. 3-2 (1.48 % C, 1.19 % Si, 0.27 % Mo) annealed 850°, 1 hr

Photo. 7 No. 3-3 annealed 850°, 1 hr.

Photo. 8 No. 3-2 annealed 900°, 1 hr.

Photo. 9 No. 3-4 (1.42 % C, 1.21 % Si, 0.73 % Mo) annealed 800°, 1 hr.

化量の變化を示してゐる。

以上の實驗結果から、黒鉛鋼の基體 (1.5 % C, 1.0 % Si) に Mo を合金元素として添加するときは、約 1.0 % までは黒鉛鋼の特性を失わないことが知られる。

ではパーライトは殆ど層状のみとなり、細長い黒鉛とフェライトおよびパーライトが見られ、黒鉛とパーライトは完全に分離してゐる (Photo. 6 および 7)。さらに焼鈍温度の上昇とともに黒鉛の析出量は多くなりやゝ球状となる。Photo. 8 および 9 は Mo 量による黒鉛

3. Cr の影響

Fe-C-Si 系の基體 (1.5% C, 1.0% Si) に Cr を 0.1~1.0% 添加した黒鉛鋼について実験した結果を Fig. 3 (A) および (B) に示す。

Fig. 3 Change of graphite amount and hardness due to annealing at various temperature for one hour.

にともない A_1 点以上の黒鉛化量が減少し、特に試料 No. 4-4 のごとく 1% 以上 Cr を含有すると、変態点以上にて 1 hr 程度の焼鈍では黒鉛の発生が無い。

顕微鏡組織は同程度に黒鉛化している Fe-C-Si 系黒鉛鋼のそれと大差がない。試料 No. 4-3 および No. 4-4 は 700~750° の焼鈍によってセメンタイトの完全球状化が見られる。

以上の実験結果から、黒鉛鋼中の Cr が黒鉛化を阻止する方は W および Mo よりも著しく強く、合金元素として添加することは不適當であつて、熔解原料からの混入をも注意すべきである。すなわち黒鉛鋼の基體を 1.5% C, 1.0% Si としたとき、約 0.3% Cr が限度である。

4. Ni の影響

Fe-C-Si 系の基體 (1.5% C, 1.0% Si) に Ni 0.5% および 1.4% を添加して実験した結果を Fig. 4 (A) および (B) に示した。

実験結果から明かなごとく、黒鉛鋼においては鋼および鑄鐵中におけると同様に、Ni は Si と共に黒鉛化を促進する。このため黒鉛化は殆どセメンタイトが存在しない程度まで進行し、また焼鈍硬度もこれにともなつて低下し、低炭素鋼の値に近づいておる。たゞし Fig. 4 (B) において Ni の少い試料 No. 5-1 の黒鉛量が多くなっているのは、全 C 量が多いためである。

Fe-C-Si-Ni 系焼鈍試料の顕微鏡組織にて特に注目される点は次の変化である。すなわち Fe-C-Si 系黒鉛鋼およびこれに炭化物形成元素の W, Mo, Cr を添加した場合には、まず A_1 点以下でセメンタイトの球状化が起り、その後黒鉛化が進行するが、Ni 含有黒鉛鋼では炭化物の球状化は殆ど起らず、球状化の温度以下においてすでに層状

Fig. 4 Change of graphite amount and hardness due to annealing at various temperature for one hour.

パーライトはくずれ黒鉛が発生する。

すなわち、鍛造中においてすでに 0.2% 程度の黒鉛が生じ、焼鈍温度 700° よりセメンタイトの分解が見られ、750° ではパーライトの層状組織は崩れて、フェライトの発生が顕著となる。これらの

×500

Photo. 10 No. 5-2 (1.44% C, 0.99% Si, 1.37% Ni) annealed 600°, 1 hr.

×500

Photo. 11 No. 5-2 annealed 750°, 1 hr.

×500

Photo. 12 No. 5-1 (1.68% C, 0.85% Si, 0.51% Ni) annealed 850°, 1 hr.

×500

Photo. 13 No. 5-1 annealed 1000°, 1 hr.

Photo. 14 No. 5-2 annealed
1000°, 1 hr.

組織が Photo. 10 およ
び 11 である。變態點直
上の温度における焼鈍
によつて、やゝ延びた
黒鉛が全面に析出し
(Photo. 12), 900° 以
上の焼鈍によつて、パ
ーライトは微かに残る
程度となる (Photo. 13
および 14)。即ち Ni
は炭化物の黒鉛化を促
進する爲、黒鉛鋼に於

ては Ni の添加により Si 量を減少する事が出来る。尚こ
れによつて鍛造性が影響を受ける事はないであらう。

Fig. 5 は 900~950° 焼鈍による黒鉛量と合金元素量と
の關係を示してゐる。これによつて明らかなように、黒鉛
鋼の黒鉛化を阻止する力は Cr が最も強く、W, Mo の順
位と次第に弱くなり、Ni は却つて黒鉛化を促進する。

IV. 結 言

Fe-C-Si 系黒鉛鋼の鍛造性、焼鈍温度と黒鉛量、硬度お
よび顯微鏡組織におよぼす W, Mo, Cr および Ni の影響
について實驗して次の如き結果を得た。

(1) 黒鉛鋼の鍛造性を向上させる合金元素; W および Cr

鍛造性に影響のない合金元素; Mo

鍛造性を低下させる合金元素; Ni

Fig. 5 Effect of alloying element
on graphite formation in
graphite steel (about 1.5
% C, 1% Si). Annealed at
950° for 1 hr.

たゞし Ni の添加によ
つて Si 量を減ずること
が可能であり、これ
によつて鍛造性を回復
することが出来る。

(2) W, Cr および
Mo などのごとく炭化
物生成元素を黒鉛鋼に
添加するときは、黒鉛
化が阻止されて焼鈍硬
度は高くなる。

(3) 黒鉛鋼における
これらの元素の黒鉛化
阻止力は Cr, W, Mo の
順位であり、Ni は黒鉛
化促進元素である。

(4) 黒鉛鋼の基體を
1.5% C, 1.5% Si としたとき適當なこれら合金元素量は
次の如くである。W 2.5%, Mo 1.0%, Cr 0.3%, Ni 2%
Ni を添加するときは Si 量を減ずることが望ましい。