7 mass%Cr 系二ハード鑄鉄の破壊靱性と疲労き裂伝ば特性に及ぼす 黒鉛の影響*

久保 修^{*1}, 田中 拓^{*1}, 橋本光生^{*2}
本田義興^{*3}, 松原安宏^{*3}

Influence of Graphite on Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation Property in 7 mass% Chromium Ni-Hard Cast Iron

Osamu KUBO, Taku TANAKA, Mitsuo HASHIMOTO^{*4},
Yoshioki HONDA and Yasuhiro MATSUBARA

^{*1} Plant & Machinery Division, Nippon Steel Corporation,
46-59 Nakabaru, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8505 Japan

The influence of graphite volume on fracture toughness and fatigue crack propagation had been studied in 7 mass% chromium Ni-hard cast iron with 0.57~4.52% graphite for the purpose of improving the wear and crack resistance as steel rolling mill roll materials. The main experimental results are shown as follows; (1) Fracture toughness (K_{IC}) increases with an increase in graphite volume and shows the maximum K_{IC} value of 25.7 MPa $\cdot m^{0.5}$ at 1.90% graphite, and then it decreases as the graphite volume rises over 1.90%. (2) Threshold stress intensity factor range for fatigue crack propagation (ΔK_{th}) varies in the same manner as fracture toughness and it shows the maximum ΔK_{th} value of 8.5 MPa $\cdot m^{0.5}$ at 1.90% graphite. (3) Paris-Erdogan equation $da/dN = C(\Delta K_I)^m$ holds good between crack propagation rate and stress intensity factor range, and there is a constant relation of $C = 3.89 \times 10^{-4}/15.8^m$. (4) Existence of adequate graphite volume restrains crack propagation and improves K_{IC} and ΔK_{th} . (5) Heat treatment of hardening-tempering deteriorates ΔK_{th} and hastens crack propagation.

Key Words: Fracture Toughness, Fatigue Crack Propagation, Rolling Mill Roll, Ni-Hard Cast Iron, Graphite

1. 緒言

鉄鋼圧延においては、圧延用ロール（以下ロールと称す）を介して鋼材を塑性変形させ種々の形状及び寸法の鉄鋼製品に成形する。熱間圧延においてロールは高温の鋼材との接触加熱と水冷の繰返しを受けてその表面には熱き裂が発生し、さらに回転のたびに大きな機械的負荷が繰返し加わる。そこで、ロール材はその負荷条件により化学成分、熱処理等の適切な条件が選択されて製造され使用に供される。代表的な鉄鋼製品である薄板を製造する連続熱間圧延工程の仕上圧延機用ロール材としては、二ハード鑄鉄（高合金グレン鑄鉄とも呼ぶ）が定着している。

二ハード鑄鉄は Ni を 4~5mass%(以下%と略す)を含有し、さらに Cr,Mo を添加して黒鉛(以下 G と記す)の晶出を少量に抑え、基地をベイナイトもしくはマルテンサイトとした耐摩耗性に優れた白鑄鉄である^{1,2)}。近年では耐摩耗性の強い求めにより、いわゆる高クロム鑄鉄や多元合金系白鑄鉄の研究も多く行われている^{3,4)}。しかし、耐摩耗性の観点から Cr 含有量を高くしたクロム系二ハード鑄鉄で、潤滑作用を有し耐焼付き性を向上させる黒鉛を少量有するとともに靱性が向上すればその意義は大きいと考えられる。

そこで本研究では、Cr が高い ASTM 規格の I-D 型 (INCO では IV 型) に相当する Fe-3.2%C-2.5%Si-4.0%Ni-7.0%Cr-1.6%Mo の化学組成を有する二ハード鑄鉄で、接種方法にて黒鉛晶出量を変化させた試料を溶製し、ロール材の設計において重要な具備特性の一つである破壊靱性値ならびにき裂伝ば特性と黒鉛量との関係を調査した。すでに著者らは鍛造白鑄鉄材においてき裂伝ば特性に及ぼす炭化物の影響について調査しており

* 原稿受付 2000年9月1日。

^{*1} 新日本製鐵(株)プラント事業部(〒804 8505 北九州市「畑」区大字中原 46-59)。

^{*2} 正員、新日本製鐵(株)プラント事業部。

^{*3} 久留米工業高等専門学校(〒830-8555 久留米市小森野町 1-1-1)。

E-mail: hashimoto.mitsuo@eng.nsc.co.jp

⁵⁾、本報告は白鋳鉄におけるき裂の伝ばに対し、ストップホール的な役割を有すると経験的に言われている黒鉛の影響に関する系統的な研究の一環である。

2. 実験方法

2.1 供試材 中間合金、合金鉄、純金属および高純度銑鉄を原料とし、接種 Si 量を差し引いて目標の化学成分になるように配合した原材料を高周波誘導炉を用いて 1733K に溶解し、出湯時には鑄込み直前に黒鉛晶出量を変化させる目的で Ca-Si 接種剤(50%Si)を 0~10g/kg の範囲で添加し、鑄造温度 1603K から ϕ 110mm x 350mm の予熱 CO₂ 鑄型に注湯した。その後 723K x 54ks の安定化熱処理(SR)を 3 回施し、試験片に加工した。また、熱処理の影響を調査する目的で、

No.7 試料については 1173K x 36ks より空冷により焼入れ後、引き続き 773K x 36ks の焼戻しを 3 回施した。供試材の化学成分と、画像処理により求めた黒鉛面積率を表 1 に示す。各供試材における黒鉛の晶出状況を示すマイクロ組織を図 1 に示す。また、代表的な試料に

Table 1. Chemical composition (mass %) and volume fraction of graphite(%).

Specimen	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Graphite
No.1	3.15	2.69	1.13	4.05	7.01	1.60	0.57
No.2	3.28	2.45	1.11	3.99	7.00	1.62	1.27
No.3	3.19	2.47	1.14	4.10	6.89	1.59	1.90
No.4	3.13	2.42	1.13	4.00	6.97	1.60	3.12
No.5	3.25	2.49	1.09	4.00	6.91	1.61	4.03
No.6	3.25	2.64	1.13	4.06	6.94	1.60	4.52
No.7	3.29	2.45	1.11	3.98	6.95	1.57	3.47

Heat treatment: Stabilizing(No.1~6), Hardening-tempering(No.7).

Fig.1 Shape and distribution of graphite in specimens

Fig.2 Microstructure in specimens.

ついて、炭化物及び基地組織を観察するために腐食し、ミクロ組織を図2に示す。図1より明らかなように、鑄込み前の接種条件を変えることにより、黒鉛量を0.57~4.52%の範囲に変化させることができた。いずれの試料においても晶出黒鉛は塊状もしくは芋虫状である。また、共晶炭化物はクロム系の M_7C_3 が主体であるが、共晶 M_7C_3 に続いて M_3C 炭化物も晶出し両者が混在している。一方、基地はベイナイトを主体に一部マルテンサイト化しており、黒鉛量の違いを除いては各試料とも金属組織的には差がないことが図2より明らかである。

2.2 試験片および実験方法 まず鑄塊を厚さ25mmに切断し、図3に示すCT試験片($W=50\text{mm}$, $B=25\text{mm}$)を作製した。破壊靱性値は引張試験機を用いて、ASTM規格(E399-90)に準拠して試験を行い求めた。一方、疲労き裂の伝ば試験はハイドロパルス疲労試験機を用いて、応力比 $R(P_{\min}/P_{\max})=0.2$ 、繰返し速度 $f=40\text{Hz}$ とした部分片振り引張の交番荷重を負荷し、き裂長さは光学顕微鏡により 0.001mm の精度で測定して行った。なお、予め負荷荷重を変えて試験を繰返し、き裂伝ばの有無を確認することにより疲労き裂伝ば下限界応力拡大係数幅(ΔK_{th})の概略値を求めたうえで試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊靱性値 供試材の破壊靱性値(K_{IC})を黒鉛量との関係で図4に示す。いずれの試料も ASTM-E399規格で示された Type I の荷重-変位関係にて破断に至り、 $P_{\max}/P_Q(=P_S) \leq 1.1$ および $B, a \geq 2.5(K_Q/\sigma_{\text{YS}})^2$ の条件を満足したため、 K_Q を K_{IC} として採用した。 K_{IC} は黒鉛の少ない 0.57%G 試料では $21.3\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ と低い、黒鉛量の増加とともに高くなり 1.90%G 試料で最大値($K_{\text{IC}} = 25.7\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)を示す。それ以上に黒鉛量が増加すると破壊靱性値は漸次低下し、黒鉛量のもっとも多い 4.52%G 試料では K_{IC} は $21.9\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ となる。本実験範囲では、2%前後の黒鉛量が最適であるとの結果を得る。この黒鉛量は、現在熱延の後段圧延機に使用されている Cr を 2%程度含有したニハード鉄中に晶出させている黒鉛量 1~3%と一致する。

3.2 疲労き裂伝ば特性 疲労試験では、予め決めた繰返し数(N)毎に試験片を取りはずし、鏡面に仕上げた両端面でき裂長さを測定した。SR 熱処理を施した試料について、両面のき裂長さの平均値(a)と N からき裂伝ば速度 da/dN を求め応力拡大係数幅(ΔK_I)との関係で整理した結果を図5に、また比較しやすいように全試料をまとめて図6に示す。いずれの試料に

Fig.3 Shape and dimension of CT specimen (Unit: mm).

Fig.4 Influence of graphite volume on K_{IC} and ΔK_{th}

においても、それぞれ絶対値は異なるものの、 ΔK_I がある値以上でき裂が伝ばし始め、その速度は ΔK_I との間で強い相関関係を有し、 ΔK_I が増加するとともに伝ば速度は大きくなる。疲労き裂伝ば特性曲線($da/dN - \Delta K_I$)より求められる下限界応力拡大係数幅(ΔK_{th})と黒鉛量との関係を図4に併記して示す。 ΔK_{th} の厳密な断定は難しいため、ここでは実用的な数値としてき裂伝ば速度が 1×10^{-7} および $1 \times 10^{-8} \text{mm/N}$ に相当する応力拡大係数幅と定義した。 ΔK_{th} と黒鉛量との関係は K_{IC} と黒鉛量との関係と類似した傾向を示すことがわかる。すなわち、 ΔK_{th} は黒鉛の少ない試料では低く、黒鉛量の増加とともに高くなり、やはり 1.90%G で最大値($8.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)をとり、さらに黒鉛量が増加すると漸次低下する。

両対数軸で表わされるき裂伝ば曲線において、き裂伝ば速度 da/dN と ΔK_I は ΔK_{th} より大きなかなり広い範囲にわたって直線関係にあることが多く、その場合

Fig.5 Relation of ΔK_I vs. da/dN in specimens.

Paris-Erdogan の関係式(1)の成り立つ⁶⁾ことが一般に知られており、本実験においても各供試材でその関係式が成り立つと考えられる。

$$da/dN = C(\Delta K_I)^m \quad (1)$$

そこで、き裂伝ば速度 da/dN を黒鉛量との関係で考察する。 ΔK_I の大きな範囲では伝ば速度は 4.03%G 試料でもっとも小さく、黒鉛量をもっとも少ない 0.57%G 試料でもっとも大きく、黒鉛量をもっとも多い 4.52%G 試料がこれに続いて大きい。なお、 $\Delta K_I < 11$ MPa $\cdot m^{0.5}$ と ΔK_{th} との間の範囲では、 ΔK_{th} 値の大小の影響を受けてき裂伝ば速度は 1.27%G もしくは 1.90%G 試料で小さい。

Paris-Erdogan の式における定数 C と m との間には $C = A/B^m$ の関係が成立することもよく知られており、越賀らは構造用鋼について $A = 5 \times 10^{-5}$, $B = 55$ (工学単位

Fig.6 Influence of graphite volume on relation of ΔK_I vs. da/dN in 7mass% chromium Ni-hard cast iron.

系表示) となることを報告している⁷⁾. そこで, 試料の実験結果から(1)式を求め, 定数 C と m の関係を図 7 に示す. 図から分かるように本供試材における結果も前記関係式を満足し, 次式(2)で表わされた.

$$C = 3.89 \times 10^{-4} / 15.8^m \quad (2)$$

なお, 図 7 中には熱延仕上圧延の前方圧延機でこれまで使用されている代表的なロール材である 2.8%C-

Fig.7 Relationship between constant m and $\log C$ in Paris-Erdogan equation of 7mass% chromium Ni-hard cast iron.

17%Cr系鋳鉄の安定化熱処理 (SR) 材と調質 (HT) 材について同様な実験を行った結果を破線で示した. これより本供試材は高クロム鋳鉄と類似する材質であることが明らかである.

黒鉛量が 1.90%およびもっとも多い 4.52%の試験材について, き裂の伝ばを光学顕微鏡で観察し, 図 8(a) 及び(b)に示す. 図中の白い部分は炭化物, 粒状あるいは芋虫状の黒い部分は黒鉛で灰色の部分が基地である. き裂はいずれも図中左の切り欠き部から右へ進展している. 黒鉛量が 1.90%の試料(a)では, き裂は基本的に凝固方向に細長く成長した共晶炭化物, また共晶の成長が凝固方向と大きく異なるときには共晶セル境界に沿って進行しているが, 方向を変えながら黒鉛を通過していることが確認できる. このことよりき裂は脆弱な炭化物に沿って優先的に進展するが, 実質的には強度を有せず微小空孔とみなせる黒鉛がき裂の先端近傍にあると, き裂は方向を変えてこの黒鉛を通過するものと考えられる. したがって, 適量の黒鉛が存在することによりき裂の進展が停留し, 伝ばの速度を小さくするとともに破壊靱性値を高める.

一方, 黒鉛量が 4.52%の試料(b)では, き裂は黒鉛を通過しながらほぼ直線的に進展している. これは黒鉛が多いため黒鉛同士が接近しており, この状態では

Fig.8 Crack propagation in microstructure of 7mass% chromium Ni-hard cast iron, (a)Specimen No.3(1.90%G),(b)SpecimenNo.6(4.52%G).

き裂が進展する方向近傍に黒鉛が常に存在するため、き裂は方向を変えることなく優先的に黒鉛を伝って進んだものと推定される。その結果、き裂の伝ばは促進され破壊靱性値は低下したものと考えられる。したがって、適度の黒鉛量はき裂の進展を抑制するとともに破壊靱性値を高めるが、過度の黒鉛はかえってき裂の進展を促進して破壊靱性値を低下させるといえる。また、写真は省略するが、黒鉛量が極めて少ない試料では、き裂は大きい共晶炭化物あるいは共晶セル境界にある炭化物（厳密には炭化物自身ではなく、炭化物と基地の境界）を伝わって進んでいることが確認されており、破壊靱性値が低いことと対応している。

次に黒鉛量が 3.47% 晶出した試料に焼入れ-焼戻し熱処理(HT)を施して材料強化を検討した。HT 試料及び前記安定化熱処理(SR)を施した各種試料のき裂伝ば曲線を図 9 に示す。HT 試料のき裂伝ば特性は黒鉛量が約 1% 多い No.6 試料の SR 試料の特性とほぼ一致した。すなわち同等の黒鉛量を有するものに比べ下限界応力拡大係数幅 (ΔK_{th}) は低下し、き裂伝ば速度は大きくなった。HT 試料でき裂の伝ばが促進されることは図 7 に示した高クロム鑄鉄の場合と同じ傾向であり、これは基地が均一なマルテンサイトになり硬化したことによるものと推定される。すなわち、SR 試料の基地は鑄放し組織およびそれが SR 処理により安定化した靱性のある組織であるために、き裂の伝ばに対しては抑制効果を有するものと考えるのが妥当である。

Fig.9 Influence of heat treatment on relation of ΔK_I vs. da/dN in 7mass% chromium Ni-hard cast iron, HT;Hardening-tempering,SR;Stabilizing.

4. 結論

基本の化学成分を Fe-3.2%C-2.5%Si-4.0%Ni-7.0%Cr-1.6%Mo とし、Si の接種方法を制御することにより黒鉛量を 0.57~4.52% の範囲に変化させたクロム系ニハード鑄鉄ロール材の破壊靱性およびき裂伝ば特性について研究した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 破壊靱性値(K_{IC})と黒鉛量との関係では、最適黒鉛量が存在する。すなわち、 K_{IC} 値は黒鉛の少ない試料では低く、黒鉛量約 1.90% で最大 K_{IC} 値 $25.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ をとり、それ以上黒鉛量が増大すると漸次低下する。

(2) 下限界応力拡大係数幅 (ΔK_{th}) も K_{IC} 値と同様の傾向を示し、黒鉛量 1.90% で ΔK_{th} が $8.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ の最大値となる。

(3) き裂伝ば速度 da/dN の対数と ΔK_I の対数の間には直線関係があり、Paris-Erdogan の関係式 $da/dN = C(\Delta K_I)^m$ が成り立ち、定数 C と m との間には $C = 3.89 \times 10^{-4} / 15.8^m$ の関係がある。

(4) き裂は、基本的には凝固時の熱流方向に依存して成長した共晶炭化物に沿って優先的に進展する。しかし、き裂の先端近傍に黒鉛があるとこれを経由することがあり、黒鉛はき裂の停留作用を有する。黒鉛量が増加し、黒鉛同士が接近すると優先的に黒鉛を伝わって進展する。したがって、適量の黒鉛はき裂の進展を抑制して破壊靱性値をも向上させるが、過度の黒鉛はかえってき裂の進展を促進するとともに破壊靱性値を低下させる。

(5) 焼入れ-焼戻し熱処理を施して基地を硬化した試料は、安定化熱処理材に比べ下限界応力拡大係数幅 (ΔK_{th}) は低下し、き裂伝ば速度は大きくなる。

文 献

- (1) ASTM Standard A 532/A 532-93a.
- (2) NI-HARD Production, INCO.(1949), New York.
- (3) 橋本・ほか6名:新日鉄技報,345(1992),59-66.
- (4) 佐野:第 148,149 回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会), (1993),193-226.
- (5) 滝川・ほか3名:機論,67-658,A(2001),106-111.
- (6) P.C.Paris,F.Erdogan:Trans.ASME,Ser.D,85-4(1963),528.
- (7) 越賀,川原:日本造船学会論文集,133(1973),249-256.