「インターヒート」処理による球状黒鉛鑄鉄の 複合組織化と疲労強度特性の診断*

鈴木 秀 人^{*1}, 西野 創一郎^{*1}, 伊 藤 金 彌^{*2}
山 田 壮 一^{*3}, 森 谷 光 孝^{*4}

On Improving Dual Structure of Spherical Graphite Iron by “Inter-Heat” Treatment and Examining the Fatigue Strength Property

Hideto SUZUKI, Soichiro NISHINO, Kinya ITO,
Soichi YAMADA and Mitsutaka MORIYA

The effect of “Inter-Heat” treatment, that is composed with different two types of “bainitic heat treatment” and “micropulse induction heating”, on the fatigue reliability of spherical graphite iron was studied. The main results obtained were as follows, (1) A martensite structure of higher hardness on the surface layer and A bainite structure of higher toughness in the interior of SGI specimens were produced by “Inter-Heat” treatment. (2) The fatigue strength of “Inter-Heat” treated SGI was intermediate between the fatigue strength of martensitic SGI and bainitic SGI. (3) Fatigue cracks initiated at the micro-porosity in the internal bainite structure. The fatigue crack propagation was controlled by means of the residual stress induced by “micropulse induction heating”.

Key Words: Inter-Heat Treatment, ADI, Fatigue, Reliability, Crack Propagation, Residual Stress

1. 結 言

近年、多様化するニーズに合致したハイブリッドな多機能材料の開発が材料システムの分野における重要な研究課題となってきた。このような観点から、著者らは耐熱性、耐摩耗性、さらに軽量化やマテリアルサイクル化に対応しつつ、優れた疲労信頼性を発現させる一連の研究を実施している^{(1)~(8)}。特に、耐摩耗性と疲労信頼性の最適制御を意図した熱処理とハードショットピーニング処理を複合させたハイブリッド表面改質材の研究を系統的に進めている⁽⁵⁾⁽⁸⁾。

このように関連技術の急速な進歩に伴って、いくつかの従来の表面改質処理を複合させて、材料に多くの優れた機能を発現させることが注目されている。そこで、本研究ではこれまでのハイブリッド表面改質処理の範ちゅうに属するものではあるが、異なる熱処理操作を複合させる「インターヒート」処理の有効性について検討を加える。

一方、これまでに、オーステンパ処理した球状黒鉛

鑄鉄の優れた特性を活かして高精度の歯車に応用する試みが盛んである。さらに、これに耐摩耗性の改善を意図して表面処理の適用が検討されている。特に、機器の軽量化や高性能化に伴い歯車の小形化が進んでおり、このようなモジュールの小さい歯車の表面改質は、至難の業とされてきた。幸いなことに、最近、超急速高周波焼入れ処理が川岸ら⁽⁹⁾により展開され、歯車輪郭に沿った理想的な焼入れパターンが低ひずみで実現されている。しかしながら、新しいプロセス技術の導入にはリエンジニアリングというべき大規模な改革を製造フィールドに迫ることが多く、実用的応用にはほとんど至らない。特に、その最大の障害となるのは信頼性の保証である。

以上の状況をかながみて、本研究では、図1に示すようなオーステンパ化熱処理と超急速高周波焼入れ処理を複合させた「インターヒート」処理をSGIに施し、その疲労信頼性の診断についてき裂発生・進展機構の解明まで掘り下げて、実証的検討を加えた。特に、「インターヒート」処理の効果とそれを構成する個々の熱処理による効果との関係に焦点を合わせた。

2. 実験方法およびインターヒート処理

2.1 供試材 供試材の化学成分を表1に示す。

* 原稿受付 1995 年 12 月 20 日。

*¹ 正員、茨城大学工学部(〒316 日立市中成沢町 4-12-1)。

*² 正員、茨城大学大学院。

*³ 学生員、茨城大学大学院。

*⁴ 茨城大学学部生。

この材料は 100 kg 高周波炉で溶製されたものであり、置き注ぎ法(サンドイッチプロセス)にて黒鉛球状化処理後 1380°C で Y ブロック型に 鋳込み、その後、900°C・2 時間保持のフェライト化焼なましを行った。なお、Y ブロック型は通常の JIS に準拠した 25 mm 厚のものとした。

2・2 インターヒート処理

2・2・1 オーステンパ処理 Y ブロック型に 鋳込まれた SGI から丸棒を荒加工後、オーステンパ熱処理を施した。オーステンパ熱処理方法を図 2 に示す。この丸棒を図 3 に示す形状の試験片に機械加工した。

2・2・2 マイクロパルスシステムによる高周波焼入れ マイクロパルスシステムによる高周波焼入れの熱処理サイクルを図 4 に示す。図中には参考のため通常の高周波焼入れにおける熱処理サイクルを点線で示した。図 4 より、マイクロパルス焼入れではわずか 0.18 秒で 950°C に達しており、通常の高周波焼入れに比べて非常に短時間で焼入れが終了することがわかる。このシステムによって表面のごく近傍のみマルテンサイト組織に変態させることが可能である。

Table 1 Chemical compositions [wt.%]

C	Si	Mn	P	S
3.52	2.44	0.22	0.055	0.009
Cr	Mo	Cu	Ni	Mg
0.04	0.15	0.69	0.04	0.044

Fig. 1 Inter Heat treatment

Fig. 2 Austemper treatment

2・2・3 インターヒート処理によるメゾ材料化

以上の熱処理によって得られた試験材を総括したフローチャートを図 5 に示す。SGI 材にオーステンパ処理を施し、マトリックスをベイナイトに変態させた材料を ADI (以下、ADI 材) とする。ADI 材の顕微鏡組織の解析結果を表 2 に、機械的性質を表 3 にそれぞれ示す。

さらにこの ADI 材にマイクロパルス焼入れを施し、表面のみマルテンサイト組織で、内部は ADI 材と同様のベイナイト組織である材料を Inter-Heat 材 (以下、Int. 材) を得た。また、SGI 材に従来の高周波焼入れを施し、マトリックスをすべてマルテンサイト組織に変態させた材料である Martensite 材 (以下、M 材)

Fig. 3 Specimen geometry

Fig. 4 Micropulse induction heating treatment

Fig. 5 Flow chart of Inter-Heat treatment

も併せて準備した。

図6に示したInt.材の試験片の縦断面において、表面近傍で一定深さの焼入れ層が認められ、輪郭焼入れの状態は非常に良好である。表面から内部への硬度分布を調査した結果を図7に示す。図7より、マイクロパルス焼入れによる硬化層は約800 μm であることがわかる。Int.材の表面近傍および内部の顕微鏡組織写真を図8、9に示す。図8、9の組織解析結果より、表面近傍ではマルテンサイト組織、内部は従来のベイナイト組織であることが確認できる。

2・3 疲労信頼性評価 疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機(繰返し周波数50 Hz)を用い、常温・

大気中で行った。破面解析は試験片の破断面をSEMで観察することによって行った。

3. 実験結果

ADI材、Int.材およびM材の疲労試験結果をS-N線図に整理したものを図10に示す。

図10より、Int.材の疲労強度はADI材とM材の中間程度であることがわかる。また、図10より 10^6

Table 2 Microstructural parameter of ADI

graphite				matrix
D _a	n _g	h _g	V _f	γ_R
μm	/mm ²	%	%	%
20	295	80	12	29

*D_a:Average Diameter, *n_g:Nodule Count,
*h_g:Nodularity, *V_f:Volume Frac.,
* γ_R :Retained Austenite

Table 3 Mechanical Properties of ADI

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϕ (%)	R. A. (%)	H _B (HB)
780	1040	16	13	301

Fig. 6 Hardening pattern

Fig. 7 Hardness distribution

Fig. 8 Microstructure near the surface

Fig. 9 Inside microstructure

Fig. 10 Results of fatigue test

および 10^7 耐久限度について求めたものが表 4 である。表 4 より、 10^6 耐久限度において M 材は ADI 材より大幅に低下しているが、Int. 材は ADI 材とほぼ同等である。したがって、ADI 材にインターヒート処理を施すことによって耐摩耗性と耐疲労性の両方の特性を兼ね備えたメゾ材料を作製することが可能となった。

しかしながら、 10^7 耐久限度においては、ADI 材と比較すると低下が認められる。これらの疲労特性の要因について検討するために疲労破面を詳細に観察し、破壊解析を行った。

4. 考 察

4.1 Int. 材の疲労き裂発生挙動 疲労挙動に及ぼすインターヒート処理の影響を明らかにするために、破壊起点に焦点を合わせて破面解析を行った。そ

Table 4 10^6 and 10^7 endurance limit

	A material	Int. material	M material
$10^6 \sigma$	3 8 0	3 6 7	3 3 0
$10^7 \sigma$	3 8 0	3 0 0	2 6 0

(a) Inter-Heat material
($S=400$ MPa, $N=6.36 \times 10^5$)

(b) ADI material
($S=480$ MPa, $N=1.57 \times 10^5$)

Fig. 11 Morphology of fractured surface

の典型的な一例を図 11(a) に示す。図 11(b) は比較のため ADI 材の疲労破面を示した。図 11 より ADI 材では破壊起点はすべて表面近傍のポロシティであったが、Int. 材の破壊起点は、ADI 材に比べて非常に内部の奥深い部分に位置している。このことについてさらに詳しく検討するために、疲労試験を行ったすべての試験片の破面観察を行い、破壊起点部の表面からの深さを測定した。その結果が図 12 である。図 12 より、ADI 材および M 材の起点部は、ほぼ試験片表面であることに対して、Int. 材の起点部はいずれの応力値においても非常に深く、起点部深さは約 1 mm であった。

以上の結果より、インターヒート処理によって、疲労破壊の起点部が試験片内部へ移動し、内部に存在する鑄造欠陥(ポロシティ)からき裂が生成することが明らかとなった。この事実と疲労寿命の関連についてさらに検討するために硬度および残留応力について調べた。

4.2 き裂発生を支配するメゾ構造因子 図 7 に示した硬度分布より、焼入れ処理によって、表面硬度が著しく上昇していることが認められる。さらに、試験片表面における圧縮残留応力を測定した結果、583 MPa であった。したがって、マイクロパルス焼入れによる表面層の硬化および圧縮残留応力の付加によって、破壊起点部つまり疲労き裂の発生部が内部へ移動したものとえよう。

硬度分布図より、深さ約 800 μm において硬度が従来の値へと飽和している。この部分における組織を調査したところ、ベイナイト組織であった。

疲労き裂は焼入れの影響が消失する深さにおいて生成していることがわかった。したがって、Int. 材と

Fig. 12 Crack initiation site depth from the surface

ADI 材において疲労き裂は同じベイナイト組織から発生しており、き裂発生機構に相違はないと考えられる。一方、図 13 は、硬度分布図から得られた硬化層厚さとき裂発生深さについて模式的に示したものであるが、き裂発生深さと硬化層厚さは一致しておらず、き裂は硬化層よりも深い部分において発生している。

前述したように、Int. 材と ADI 材の耐久限度を比較すると 10^6 耐久限度は同程度であるが、 10^7 耐久限度は Int. 材において低下傾向を示している。この要因の一つとして試験片内部における引張残留応力の存在が考えられる。一般に、高周波焼入れした材料の表面には圧縮残留応力が存在するが、内部にはこれと釣合う引張残留応力が存在する。 10^7 耐久限度における試験片は未破断であることから、 10^7 耐久限度はき裂発生応力と同等であると考え、Int. 材の内部には引張残留応力が存在し、この部分からき裂が容易に発生するために、ADI 材と比べて 10^7 耐久限度が低下したことが理解される。

一方、高応力側では疲労き裂は必ず発生し、破壊に至ることから 10^6 耐久限度はき裂発生と進展の双方の挙動の影響を受けると考えられる。Int. 材のき裂発生は内部の引張残留応力部分から早期に発生するが、表面硬化層によって表面への進展が妨げられるため進展寿命が ADI 材に比べて伸延される。その結果、両者

Fig. 13 Schematic Ellustration of crack initiation site

Fig. 14 $K_{\max}$ - N diagram

の疲労寿命は同程度となり、 10^6 耐久限度が同等になると考えられる。

以上の結果より、Int. 材の疲労信頼性を支配するメゾ構造因子は表面硬化層によるき裂発生深さの増大、硬化層によるき裂進展の阻止、および内部の引張残留応力によるき裂発生の助長であると考えられる。

4.3 き裂発生に関する「メゾ破壊力学」的解析

疲労き裂発生源である鑄造欠陥の寸法と疲労強度の関係について「メゾ破壊力学」的解析⁽³⁾⁽⁷⁾を行った。破面解析より M 材および ADI 材のき裂発生因子はどちらもポロシティであることより、試験片の表面に存在するポロシティについては式(1)、内部に存在するポロシティについては式(2)で欠陥評価を行った。

$$K_{\max \text{ out}} = S\sqrt{\pi\sqrt{2}A} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_{\max \text{ in}} = \frac{\sqrt{2}}{2} S\sqrt{\pi\sqrt{2}A} \dots\dots\dots (2)$$

ここで S は負荷応力、 A はポロシティの面積である。以上のメゾ破壊力学的評価に基づいて S - N 線図を、き裂発生時での $K_{\max}$ により整理したものが図 14 である。図 14 より Int. 材の $K_{\max}$ - N 線図は ADI 材と比べて低下しており、欠陥に対する感受性が高いことがわかる。しかしながら、前述したように、Int. 材と ADI 材の疲労き裂発生部は同等のベイナイト組織であり、欠陥感受性に相違が生じることはない。したがって、Int. 材ではき裂発生部において付加応力に加えて引張残留応力が作用しているため、見掛け上の $K_{\max}$ 値が低下したものと考えられる。

そこで、先の $K_{\max}$ - N 線図から得られた Int. 材の $K_{\max}$ 値と ADI 材の $K_{\max}$ 値との差を求め、その値をメゾ破壊力学的評価パラメータに代入し、逆算することによって、Int. 材の内部に存在する引張残留応力を

Fig. 15 Estimation of residual stress

推定した。その評価方法を式(3)に示す。

$$\sigma_u = \sqrt{2} \frac{\Delta K_{\max}}{\sqrt{\pi \sqrt{2} A}} \dots\dots\dots (3)$$

σ_u : 推定残留応力

$\Delta K_{\max}$: ADI 材の $K_{\max}$ -Int. 材の $K_{\max}$

A : き裂発生因子の面積

以上のメゾ破壊力学的評価に基づいて、き裂発生時の $K_{\max}$ の差により算出された推定残留応力を整理したものを図 15 に示す。図 15 より内部方向へ引張残留応力が高くなっていることがわかる。よって、以上の結果より、Int. 材の内部における引張残留応力の存在が示唆された。

5. 結 言

球状黒鉛鋳鉄の SGI 製の高機能歯車の耐摩耗性と疲労信頼性を最適に制御し得るハイブリッドな表面改質の創製システムについて実証的研究を実施し、以下の結果を得た。

(1) オーステンパ化熱処理と超急速高周波焼入れ処理を複合させた、本研究で提唱する「インターヒート」処理によって、表面が硬いマルテンサイトと内部が靱性の高いベイナイトのいわゆるメゾ構造を具備とする SGI を創製し得た。

(2) この「インターヒート」処理によって、メゾ材料化した SGI の疲労強度は、表面のマルテンサイトと内部のベイナイトの中間の水準を呈する。すなわち、異なる熱処理操作を複合した「インターヒート」

処理の有効性が実現できた。

(3) 「インターヒート」処理によるメゾ構造化に起因して疲労き裂発生・進展機構は、極めて特徴的なそれぞれの熱処理による複合効果が現れている。すなわち、①疲労き裂発生は、表面から 1 mm も内部のベイナイト中に存在する微小な鑄巣であった。②き裂の進展に超急速高周波焼入れによる残留応力の効果が認められる。

したがって、「インターヒート」処理は、熱処理プロセスでこれまで蓄積されてきた知識(ソフト)を有効に活用できるハイブリッドな表面改質システムであり、材料設計・製品設計さらに信頼性診断も容易であることが示唆される。

マイクロパルスシステムによる高周波焼入れ処理を行うに当たって多大なご協力をいただいた高周波熱錬(株)の川岸一博氏ならびに三阪佳孝氏に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 鈴木秀人, 軽金属, **45**-11(1995), 597-609.
- (2) 鈴木秀人・ほか 5 名, 機論, **60**-585, A(1995), 894-899.
- (3) 鈴木秀人, 機論, **60**-585, A(1995), 906-912.
- (4) 鈴木秀人, ほか 3 名, 機論, **60**-586, A(1995), 1165-1171.
- (5) 鈴木秀人・ほか 3 名, 機論, **61**-591, A(1995), 2349-2354.
- (6) 鈴木秀人・ほか 4 名, 機論, **62**-593, A(1996), 68-73.
- (7) 鈴木秀人・ほか 4 名, 機論, **62**-595, A(1996), 621-626.
- (8) 鈴木秀人・ほか 4 名, 機論, **62**-595, A(1996), 627-631.
- (9) 三阪佳孝・ほか 4 名, 茨城講演会論文集, (1995-9), 187-188.