

氏 名	たか 高	はし 槁	とし 利	お 夫
授与学位	博士（工学）			
学位授与年月日	平成7年3月15日			
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項			
最終学歴	昭和51年3月 東北大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程修了			
学位論文題目	Fe-C-Si系鑄造合金の強靱化等温変態処理に関する X線回折法による研究			
論文審査委員	東北大学教授 新山 英輔		東北大学教授 及川 洪	
	東北大学教授 石田 清仁			

論 文 内 容 要 旨

近年、原料が安価でしかも成形の自由度が高い Fe-C-Si 系鑄造合金を強靱化した材料として、球状黒鉛鑄鉄に等温変態処理（オーステンパ処理）を施したオーステンパ球状黒鉛鑄鉄（ADI）が注目されている。ADI の強度や靱性は鍛造鋼に匹敵する。ところが、ADI はヤング率が鋼より 20% も低いために薄肉の製品ではたわみ易い。そのため、等温変態処理による強靱化機構の解明と、それに基づいた高いヤング率を持つ強靱な鑄造合金の開発が求められている。

そこで、本論文では、ADI の基地組織を構成する微細なベイニティックフェライト（ α_B ）と残留オーステナイト（ γ ）の体積率や固溶炭素濃度の変化を精密な X 線回折法を用いて測定することにより、等温変態過程における炭素の拡散挙動を定量的に検討した。また、そこで得られた知見に基づき、ヤング率などの機械的性質を改善した新しい強靱な材料として、析出黒鉛量の少ない球状黒鉛鑄鋼を用いたオーステンパ球状黒鉛鑄鋼（AGS）を提案した。さらに、作製した新材料の機械的性質を従来の ADI と比較検討して、炭素やケイ素などの化学組成と等温変態における炭素の挙動が Fe-C-Si 系鑄造合金の強靱化に及ぼす影響を明らかにした。

本論文は、以下の全 7 章から構成される。

第 1 章 緒 論

ADI の特徴と問題点を挙げて、ADI の欠点であるヤング率を改善した新しい Fe-C-Si 系鑄造合金を開発するためには、等温変態と強靱化の関係を明確にすることが不可欠であることを述べ、本研

究の目的と概要を記した。

第2章 X線回折による炭素濃度測定の見直し

ADIの基体組織は微細な α_{Fe} と残留 γ で構成され、その構成比率はオーステンパ処理条件に依存する。X線回折法は、この体積比と各相の固溶炭素濃度を同時に測定できるので、Fe-C-Si系鋳造合金の等温変態における炭素の拡散挙動を知る有力な方法である。本章では、X線回折法によって炭素濃度を精密に測定するために必要な事項を見直した。

最初に、位置敏感比例計数管を備えたX線回折装置で測定した回折強度曲線の補正法を見直し、検出器の幾何学的形状のみに依存する補正式を新たに導いた。次に、擬似Voigt関数と非線形最小二乗法を用いて回折プロファイルの関数近似法を見直し、この手法を用いると、幅の広い回折プロファイルからでも、バックグラウンドや解析角度範囲の影響を受けずに正確な回折角度を求められることを明らかにした。

また、格子定数の回折角度依存性を補正する方法と格子定数に及ぼす残留応力の影響を見直した。さらに、フェライト相における格子定数のケイ素濃度依存性を調べ、この結果と剛球モデルを用いて、残留 γ における格子定数のケイ素濃度依存性を見直した。以下本研究では、これらの因子による影響を考慮することにより、炭素濃度を精密に測定した。

第3章 残留オーステナイトへの炭素濃化

本章では、第2章で見直した精密なX線回折法を用いて、残留 γ の量と炭素濃度の変化を調べた。また、X線回折波形の関数近似法を用いて、炭素濃度の低い γ と濃度の高い安定化 γ を定量的に分離し、等温変態における残留 γ への炭素濃化過程を詳細に見直した。その結果、以下のことが明らかとなった。

等温変態の初期段階では、炭素濃度が1.4mass%以下の低炭素 γ と、それよりも炭素濃度の高い安定化 γ が混在して残留する。つまり、変態反応の進行は一樣ではなく、場所によって異なる。高炭素の安定化 γ は約1.8mass%の炭素で飽和しているが、低炭素の γ は安定化 γ が出現すると炭素濃度が増加し、残留量もしだいに減少する。

等温変態の第1段階は、炭素過飽和のフェライトが析出する前半と、低炭素 γ にフェライトから炭素が拡散して安定化 γ になる後半に分けられる。第1段階が終了すると安定化 γ のみが残留し、その終了時点はオーステンパ温度が高いほど早い。また、安定化 γ 量はオーステンパ温度に依存し、648Kで処理した場合は約40vol%が残留するが、処理温度が低くなるにつれて直線的に減少する。

第4章 残留オーステナイトの機械加工安定性

本章では、研削や研磨および電解研磨を施した面の残留 γ 量を測定し、そのX線回折波形に第3章で開発した関数近似による分離法を適用して、残留 γ の加工誘起マルテンサイト変態に及ぼす炭素濃度の影響を見直した。その結果、以下のことを明らかにした。

研磨紙やバフによる研磨加工では、大きな圧縮応力が残留した加工面の残留 γ 量は減少し、残留

γ の減少量と圧縮残留応力の間には比例関係がある。また、等温変態の初期段階に存在する炭素濃度 1.4mass% 以下の残留 γ は、研磨加工でマルテンサイトに変態しやすい、しかし、高炭素濃度の残留 γ は研磨加工では変態しにくく、安定である。一方、平面研削加工では、残留 γ の加工誘起変態量は研磨加工より多く、高炭素の残留 γ では、変態量が増加すると圧縮残留応力が緩和する傾向がある。したがって、機械的性質の良好なオーステンパ処理材を得るには、安定化 γ のみが残留するように熱処理条件を選ぶ必要がある。

第 5 章 炭素量の相間分配

本章では、精密な X 線回折法を用いて α_{B} の格子定数を測定し、炭素原子が侵入する結晶格子間位置と格子定数の炭素濃度依存性との関係を検討した。この結果と第 3 章で得られた結果を併せて、オーステンパ処理後の α_{B} と残留 γ を含めた基地組織における炭素量の相間分配を検討し、等温変態における炭素の拡散挙動について以下の知見を得た。

第 2 章で導いた残留 γ における格子定数の固溶元素濃度依存性を用いて、残留 γ に濃化した炭素量を求め、これを Fe-C-Si 系平衡状態図の値と比較して、オーステンパ後の基地組織に含まれる炭素量はオーステナイト化処理で固溶した炭素量と一致することが判明した。なお、 α_{B} では、侵入炭素原子が体心立方格子の四面体位置を占めている可能性が高い。

また、上部ベイナイト温度域では、 α_{B} から残留 γ への炭素拡散が終了すると、基地組織は炭素をほとんど含まない α_{B} と炭素が飽和した安定化 γ で構成される。炭化物はこの安定化 γ が分解するまで析出しない。一方、下部ベイナイト温度域では、残留 γ への炭素の拡散と並行して炭素過飽和の α_{B} から炭化物が析出する。この場合、残留 γ への炭素濃化が終了しても、 α_{B} は炭素過飽和の状態にある。その固溶炭素量はオーステンパ温度が低下すると増加する。

第 6 章 強靱化のための組成と熱処理の検討

本章では、前章までに得られた知見に基づいて、ヤング率などの機械的性質を改善するために、オーステンパ球状黒鉛鋳鋼 (AGS) を新たに作製して、その機械的性質を ADI と比較検討した。また、炭素量やケイ素量などの化学組成と炭素の挙動が等温変態処理後の機械的性質に及ぼす影響を検討した。その結果、等温変態処理による Fe-C-Si 系鋳造合金の強靱化に関して、以下の知見が得られた。

(a) AGS の機械的性質

ADI のヤング率が低いのは、母材の球状黒鉛鋳鉄が多量の黒鉛を含むためであり、オーステンパ処理条件を変えてもヤング率は改善されない。ところが、黒鉛量の少ない球状黒鉛鋳鋼をオーステンパ処理した AGS は鋼材に匹敵する高いヤング率を確保することができる。オーステンパ処理後のヤング率は、この黒鉛量と残留 γ 量に影響され、残留 γ 量が増加するとヤング率は減少する。

AGS の引張強さは ADI に比べて約 200MPa 大きく、伸びや衝撃吸収エネルギーも大きい、したがって、AGS は ADI よりもさらに優れた強度や靱性を兼備し、高強度・高靱性材料の基準である引張強さが 1000GPa、伸びが 10% という条件を十分満たしている。

(b) 化学組成の影響

AGSの等温変態における炭素の挙動はADIと同じであり、炭素含有量が1 mass%以上あればADIと同量の安定化 γ が残留した混合組織が得られる。残留 γ の量と安定性は機械的性質に大きな影響を与え、特に韌性に関わる性質は残留 γ 量が増加すると向上する。また、ケイ素は、残留 γ へ炭素が濃化する過程にはあまり影響しないが、炭素が濃化して安定化した残留 γ の分解反応を抑制する効果がある。したがって、残留 γ の安定化を利用した鋳造材の強靱化では、1 mass%以上の炭素と2~3 mass%のケイ素が必要である。

(c) 等温変態過程の影響

残留 γ への炭素濃化が終了する以前は、低炭素の γ が残留するために、濃化終了後よりも機械的性質が劣る。オーステンパ温度が低いと変態反応の進行が遅く、その傾向が顕著に現れる。一方、等温変態反応がさらに進行し、高炭素の残留 γ が分解して炭化物が析出すると韌性は低下する。また、上部ベイナイト温度域でオーステンパ処理する場合、基地組織が炭素で飽和した残留 γ と炭素を固溶していないフェライトで構成される条件で処理すれば韌性が向上する。一方、下部ベイナイト温度域で処理するとフェライトは炭素過飽和となるので、強度は増加するが韌性は低下する。

第7章 総 括

本章では、以上に述べた各章をまとめ、本研究を総括した。

審査結果の要旨

球状黒鉛鋳鉄に等温変態処理を施した新材料であるオーステンパ球状黒鉛鋳鉄は鍛鋼に匹敵する強度と靱性をもち、しかも成形性にすぐれているので機械部品の小型化や製造工程の簡素化の観点から注目されている。しかし一方、変態機構が十分に解明されておらず、またヤング率が鋼よりも20%低いなどの問題点がある。本論文はこれを解決するためにX線回折による詳細な組織学的分析を行なって等温変態現象を解明し、さらに新しいFe-C-Si系鋳造合金開発の指針を明らかにしようとしたもので全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章ではX線回折法の精度を高めるための多くの工夫について述べ、とくに回折波形の関数近似法について検討し、予備実験により精度を確認している。

第3章では上記の方法を用いてオーステンパ球状黒鉛鋳鉄中の残留オーステナイトを分析し、これを低炭素部分と高炭素部分に分離定量することに成功し、これに基づき残留オーステナイトへの炭素濃化過程を明らかにしている。これは注目すべき基礎的成果である。

第4章では機械加工によって残留オーステナイトから生じる加工誘起マルテンサイト変態について調べ、残留応力および炭素濃度との関係を定量的に明らかにしている。

第5章では基地組織のもうひとつの構成相であるベイニティックフェライトにおける固溶炭素濃度を調べ、前記の残留オーステナイトについての結果とあわせて炭素量の相間分配関係を明らかにしている。

第6章では以上の基礎研究の応用として、黒鉛量の少ない鋼系の合金組成を提案し、そのヤング率、強度、靱性などが従来のオーステンパ球状黒鉛鋳鉄よりも優れていることを示している。さらに炭素やけい素などの化学組成や熱処理条件が機械的性質に及ぼす影響を検討して、新しい強靱性Fe-C-Si系鋳造合金であるオーステンパ球状黒鉛鋳鋼の開発の指針を明らかにしている。これは実用上注目すべき成果である。

第7章は総括である。

以上要するに、本論文はFe-C-Si系鋳造合金の等温変態処理過程における各相の挙動を詳細に分析し、化学組成や熱処理と機械的性質間の関係を明らかにし、これに基づいて新しい強靱性材料の可能性を示し、かつ今後の開発指針を明らかにしたもので、材料加工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。