

熱力学計算を利用した真空浸炭材の 炭素濃度分布予測および合金設計

石倉 亮 平*

1. はじめに

浸炭焼入れは代表的な鋼の表面処理方法として、自動車用の歯車やシャフト等、高い疲労強度・耐摩耗性が必要とされる動力伝達部品に幅広く適用されている。近年、環境対策、コスト削減、高性能化等を目的として、従来の変成ガスを用い、ブロードア平衡反応を利用して鋼中に炭素を侵入させる、いわゆるガス浸炭法に代わり、500~2000 Pa程度の炭化水素ガスを炭素の供給源とする真空浸炭法の実用化が加速している。真空浸炭の長所として、操業中のCO₂排出量が少ない、浸炭時間が短くランニングコストが安い、粒界酸化がなく高強度な品質を得ることができる等が挙げられる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

一方、真空浸炭には以下2点の短所があったため、真空浸炭普及への障壁となっていた。1点目として、これまで真空浸炭の浸炭機構が不明⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾であったことから、真空浸炭の条件は経験や勘に基づいて行われることが多く、鋼材成分や部品形状が変化した場合にはあらためて条件を見直す必要があった。2点目として、実部品において真空浸炭では表面炭素濃度が形状の影響を受け、歯車の歯端などのエッジ部の表面炭素濃度は平面部と比べて高くなることが知られており⁽⁸⁾、過度な残留オーステナイトの生成、粒界への網目状炭化物の析出(以後、エッジ部の過剰浸炭の生成と称す)により疲労強度が低下するという問題があった。

これらの真空浸炭の本格的な普及への課題を解決するためには、真空浸炭中の鋼材表面の状態と炭素濃度侵入の機構およびエッジ部の過剰浸炭生成機構の解明が必要不可欠である。

本稿では、当社において解明した真空浸炭機構の概要について説明するとともに、真空浸炭の機構と熱力学計算に基づいて構築した真空浸炭材の炭素濃度分布予測技術ならびに真空浸炭材の合金設計について解説する。

2. 真空浸炭中の炭素侵入機構

真空浸炭では、炭化水素ガス雰囲気中に保持し炭素を侵入させる浸炭期と、真空にして炭素を鋼材内部へ拡散させる拡散期に分かれる。そのため、真空浸炭中の炭素侵入機構を理解するためには、①浸炭中の鋼材表面の反応と②炭素の鋼材内部の拡散について、処理温度や鋼材成分・組織の影響を考慮して検討する必要がある。本章では、真空浸炭中の炭素侵入機構をはじめ、熱力学計算を活用して確立した炭素濃度分布の予測に関する研究成果について述べる。

(1) 浸炭期の表面炭素濃度と炭化物量

まず、上述の①浸炭中の鋼材表面の反応について述べる。前章にも述べたとおり、真空浸炭後の鋼材の表面炭素濃度や析出炭化物については種々の説⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾があり、処理温度や鋼材成分の影響も不明であったため、真空浸炭中の鋼材の表面炭素濃度を予測することが困難であった。しかし、当社の研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾により、Si, Crを変化させた鋼種で浸炭層表面を模擬するために用いた厚さ0.1 mmの薄板による実験と熱力学計算の結果から真空浸炭の浸炭期における表面の炭素濃度と炭化物量を決定する機構を以下のとおり解明している。

図1に熱力学計算ソフト Thermo-Calc を用い、データベースとして SGTE Solution Database ver.2 を用いて計算した各成分の Fe-C 系状態図(図中の●は各温度での黒鉛が析出する炭素濃度の計算値を、△は浸炭を行った薄板の実測値を表す)を、図2に厚さ0.1 mmの薄板への真空浸炭処理材および黒鉛を密着させた状態での真空熱処理材の組織観察(写真右下の数字は炭化物面積率の実測値)を示す。図1, 2のとおり、黒鉛との平衡を仮定した熱力学計算による表面炭素濃度の値と実測値はほぼ一致しており、真空浸炭材の組織と黒鉛と接触させた状態での真空熱処理材の組織も一致している。このことから、鋼材表面は浸炭ガス(炭化水素)の分解により生成した黒鉛との局所平衡が成立していると結論づけ

* 大同特殊鋼株式会社 技術開発研究所 構造材料第一研究室; 室長(〒457-8545 名古屋市南区大同町 2-30)
Prediction of Carbon Profiles and Alloy Design in Vacuum Carburizing Steels Based on Thermodynamic Calculation; Ryohei Ishikura (Automotive Steel Research Sect. No.1, Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd., Nagoya)
Keywords: low alloy steels, case hardening steels, vacuum-carburizing, carburizing mechanism, prediction of carbon profiles, edge over carburizing, fatigue strength
2018年5月7日受理[doi:10.2320/materia.57.439]

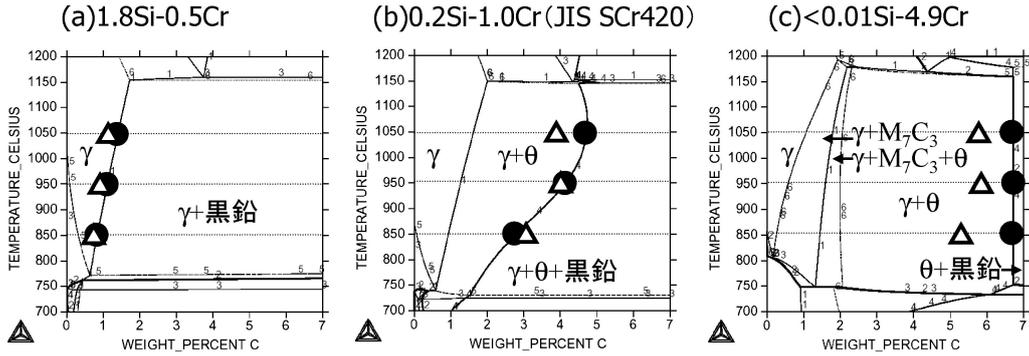


図1 Fe-C系状態図による表面炭素濃度の計算値と実測値.

| | 1.8Si-0.5Cr | 0.2Si-1.0Cr | 0.01Si-4.9Cr |
|-------|-------------|-------------|--------------|
| 黒鉛と接触 | 0% | 52% | 98% |
| 真空浸炭 | 0% | 49% | 89% |

0.1mm

図2 各鋼種の黒鉛に接触させた状態の真空熱処理材と真空浸炭材の組織比較.

られる。また、鋼材成分によって表面の炭化物量は0～約100%まで変化することから、表面炭素濃度や炭化物量は鋼材成分の影響を受けることを意味し、炭化物生成元素であるCr、Moの添加とともに上昇し、炭化物生成阻害元素であるSi、Niの添加とともに減少する。

これらの成果により、浸炭期の鋼材表面が黒鉛と平衡する状態にあるものとするので、表面炭素濃度や炭化物量は鋼材成分と浸炭温度から熱力学的に求めることが可能となった。

(2) 炭素濃度分布の予測

次に、上述の②炭素の鋼材内部の拡散について述べる。2・(1)節で紹介した知見を応用し、浸炭・拡散後の炭素濃度分布に与える浸炭条件および鋼材成分の影響について検討することで、炭素濃度分布を予測するシミュレーションを確立している⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。

炭素濃度分布に及ぼす鋼材成分の影響は、浸炭期の鋼材表面の炭化物生成量を変化させ、拡散期の炭化物の溶解に伴う炭素供給量を変化させることによるものである。つまり、浸炭期に生成した炭化物は拡散後の炭素濃度分布に影響を与えることを意味する。このことから、炭素濃度分布は、浸炭期の表面が黒鉛と平衡する状態にあるものとし、炭化物の存在を考慮して拡散方程式を解くことで精度よく予測できることを明らかにした(図3)。詳しい計算方法とその過程については参考文献(9)をお読みいただきたい。

以上のことから、鋼材成分、浸炭条件(処理温度、浸炭時間、拡散時間)および次章で解説する部品形状の情報があれば、平面ならびにエッジ部の炭素濃度分布を精度よく予測可能であり、この予測シミュレーション手法を用いることで客先の要求に対して鋼材成分や処理条件の設計提案が容易になった。

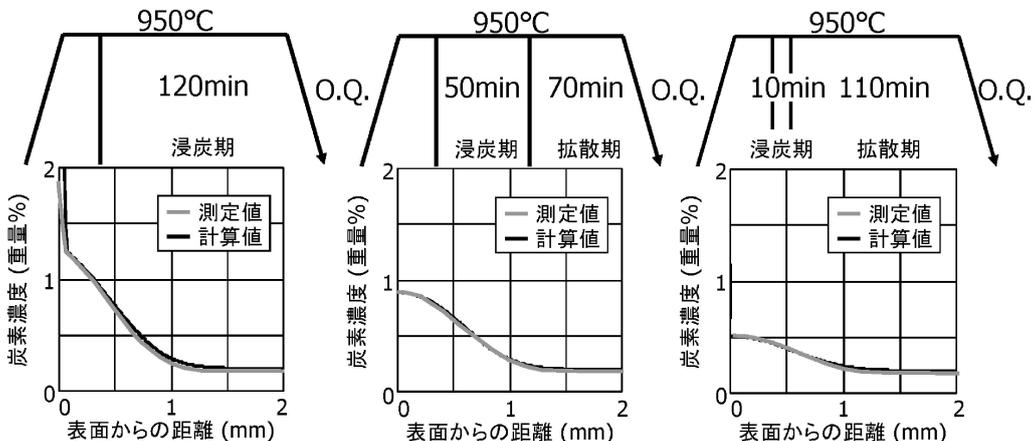


図3 複数の浸炭条件によるSCr420の炭素濃度分布の計算値と実測値の比較.

3. エッジ部過剰浸炭の生成機構

本章では、真空浸炭のもう一つの短所であるエッジ部の過剰浸炭に関して述べる。第2章で紹介した真空浸炭における平面に対する炭素濃度分布予測手法を応用し、エッジを有する試験片を用いた実験結果と比較することで真空浸炭時のエッジ部過剰浸炭の原因を解明している⁽¹²⁾。

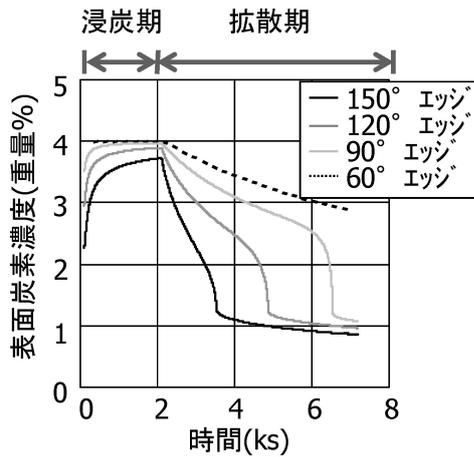


図4 エッジ部表面炭素濃度の時間変化予測。

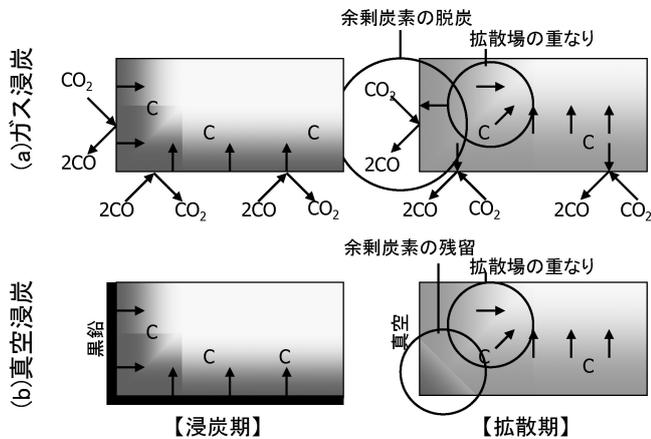


図5 エッジ部の過剰浸炭生成機構の概略図。

図4にシミュレーションを用いて求めた真空浸炭材のエッジ先端の炭素濃度の時間変化を示す。浸炭期の表面炭素濃度は形状が平面での機構と同様に黒鉛と平衡する値となり、エッジ角に対する依存性は小さい。しかし、拡散期にはエッジ角度が鋭くなるに従い炭素濃度の低下が遅く、拡散期終了時の炭素濃度が高くなっているのが分かる。このエッジ部過剰浸炭は、図5の概略図に示されるように、真空浸炭に必須な拡散期においてエッジ部では両辺からの炭素拡散場の重なりが発生し、表面炭素濃度の低下が平面部よりも遅くなっているため起こっている。一方、ガス浸炭では表面炭素濃度が雰囲気との平衡から決定されるために起こらない。

4. 真空浸炭材の合金設計

真空浸炭時のエッジ部の過剰浸炭を克服するための対策として、浸炭条件を最適化(例えば平面部の表面炭素濃度を低下させる方向に変更)が挙げられる⁽¹³⁾が、歯車の平面部である歯面部においては強度低下が懸念されるため、本方策には限界がある。本章では、エッジ部過剰浸炭とその疲労強度に及ぼす合金元素の影響に関する研究事例⁽¹⁴⁾をはじめ、エッジ部の過剰浸炭を克服する合金設計について紹介する。

図6にSi-Cr変化させた3鋼種のFe-C系状態図を、図7にエッジ部の炭素濃度分布計算結果を、図8には代表としてエッジ角度60°を有する試験片の組織観察結果を示す。ちなみに、浸炭処理は平面部の表面炭素濃度が0.75%となるように鋼材成分に応じて条件を変化させている。JIS-SCr420相当材である低Si-高Cr鋼では、エッジ角度が鋭くなるに従い表面炭素濃度が高くなり、鋭角部では炭素の過剰導入により炭化物が生成している。一方、高Si-低Cr鋼では、表面炭素濃度のエッジ角度依存性が小さく、鋭角部においても炭化物が生成しないことが分かる。図9に示すように、SCr420の場合、エッジ角度の鋭角化に伴い、炭素の過剰導入により生成した炭化物量が多くなるため強度低下を招く。したがって、エッジ部においても高強度を得るためには、エッジ部の炭化物生成量を減少させること、すなわち、Fe-C系状態図上で浸炭期の導入される炭素量が少ない、高Si-低Cr系の合金設計が有効である。

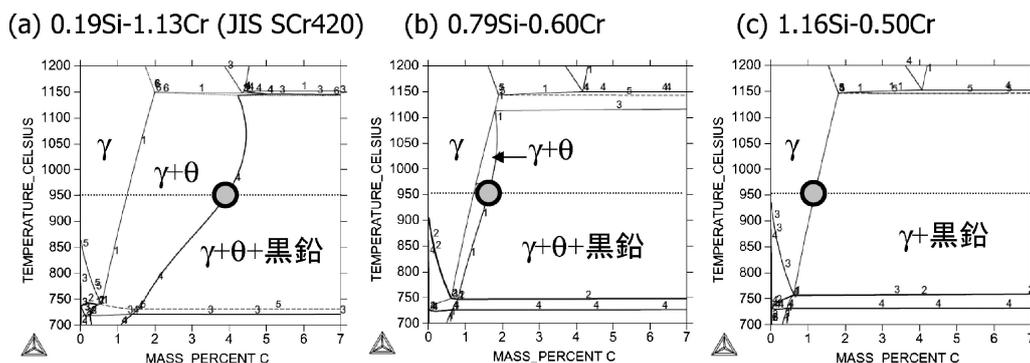


図6 各鋼種のFe-C系計算状態図。

