技術論文

真空浸炭の利用技術開発

Development of Application Technology for Vacuum Carburizing

藤堂尚二* 末野秀和 今高秀樹 Shoji TODO Hidekazu SUENO Hideki IMATAKA

抄 録

近年, 浸炭処理における CO₂ 排出量低減のために, ガス浸炭から真空浸炭への置き換えが検討されて いる。真空浸炭ではガス浸炭のように浸炭雰囲気を調整することが困難なため, 炭素濃度を精度よく制御 できていなかった。そこで, 炭素の拡散駆動力を厳密に取り扱うことで, 炭素濃度分布の予測精度を向上 させた。また, 歯車等の機械構造部品の多くに存在する角部では, 拡散場がぶつかり合うため過剰浸炭 が起こり, 粗大なセメンタイトが析出する。炭素濃度を精緻に制御し, 高温浸炭, 再加熱焼入れを施すと, 過剰浸炭部にセメンタイトが微細分散し, 粗大なセメンタイトが析出している場合より, 曲げ疲労強度が 高くなることを確認した。

Abstract

Contrary to benefits of vacuum carburization, such as less carbon dioxide emission due to higher processing temperature and efficiency, none of the control system for gas carburizing was adapted to vacuum carburizing. To control carbon concentration profile, it was suitable for calculating the carbon flux from the gradient of chemical potential. Excess carburizing which occurs at the edge of machine parts decrease the fatigue property due to increase of the residual austenite and formation of coarse carbides. For the remedy of this disadvantage, new vacuum carburizing process was developed. We confirmed the fine carbide dispersed in the case the carburizing followed by gas cooling, reheating and oil quenching is carried out at high temperature. Edge shape parts carburized by such process performed high fatigue property.

1. 緒 言

歯車や CVT プーリー等の変速機械部品には高い耐摩耗 性,面圧疲労および曲げ疲労強度が求められ,一般的に浸 炭焼入れ処理が施される。古くは固体浸炭が用いられてい たが,文字通り木炭の粉末に浸して高温に加熱する処理で, 作業環境と生産性が悪かった。1950 年以降は,CO 雰囲気 を精緻に制御して浸炭するガス浸炭が広まり,現在も主流 である。しかし,近年の地球環境保全のため,浸炭処理に おける CO₂ 排出量低減も求められており,より効率の良い 真空浸炭が注目を浴びている。

真空浸炭は、鋼材部品を真空下で加熱し、炭化水素系の ガスを低圧で導入する"浸炭期"と、真空保持して、鋼材 内部でのみ拡散させる"拡散期"をそれぞれ一度以上行な う処理である¹⁾。真空浸炭では1000℃以上の高温浸炭が可 能で、950℃程度が上限とされているガス浸炭よりも、拡散 係数の高い状態に保持できる。また、炭化水素ガスは熱的 に不安定であるため、煤やタールになるのを抑制するため 低圧で処理が行なわれ、鋼材に効率よく侵入する。表面付 近の炭素濃度はしばしばその固溶限(以下 A_{cm}線)を超え、 鋼成分、温度によってはセメンタイト(以下 θ)が析出する。 すると、オーステナイト(以下 γ)中の炭素濃度勾配が非 常に大きくなるため、拡散流束が大きくなり短時間で深く 浸炭できる²⁾。さらに、雰囲気に酸化成分を含まないため、 処理品の表層に不完全焼入れ層が無く、ガス浸炭に対し高 強度化が見込めるといった利点もある。

しかし,真空浸炭では処理品のエッジ部において,過剰 浸炭が起こるという問題がある。過剰浸炭が起こると,粗 大な θ が粒界に生成して強度が低下する。また,セメンタ イトが析出しなくとも,過剰浸炭によって残留 y が多くな ると,強度が低下する ³。つまり,不完全焼入れ層を無く しても,エッジ部の強度が低いと部品としての耐久性が低 いことになる。そこで,エッジ部に起こる過剰浸炭を防ぐ のではなく,無害化することを検討した。本報告では,過



図 1 真空浸炭条件の設定方法 Setting method for vacuum carburizing condition

剰浸炭部に微細なθを析出させる手法について述べる。

2. 炭素濃度制御方法

多くの浸炭部品には、曲げやねじりに対する疲労強度と 耐摩耗性が求められるため、所定の深さまで硬化させるこ とと、適切な表面炭素濃度が必要である。そこで、部品毎 に浸炭条件を最適化し、炭素濃度を精緻に制御する方法が 求められている。

森田ら⁴によると,真空浸炭における浸炭期には表面が 黒鉛と平衡するまで炭素濃度が上昇する。その後の拡散期 に表面からの炭素の供給が無くなり,深さ方向に炭素が拡 散することで,表面側の炭素濃度が低下する。よって,浸 炭期と拡散期の時間によって炭素濃度を制御することにな るが,部品によって必要な浸炭深さが異なる。

図1に浸炭条件調整の考え方を示す。まず狙いの炭素濃 度を表面と任意の深さにおいて設定する。そして、ある浸 炭期と拡散期のヒートパターンで炭素濃度を調査し、狙い に対するずれによって浸炭期と拡散期の時間を調整する。 表面と任意の深さにおいての炭素濃度が高い場合は浸炭期 を短くし、炭素濃度が低い場合は浸炭期を長くする。表面 と任意の深さで狙いに対する炭素濃度の高低が異なる場 合、拡散期の時間を変更して調整する。拡散期を長くする と表面の炭素濃度が低下し、短くすると表面の炭素濃度は 増加する。任意の深さにおける炭素濃度の変化は深さに よって異なるため、最適な浸炭条件を設定するには2つの プロセスパラメータを繰返し変更して、都度評価する必要 がある。これを、浸炭処理と分析によって実験的に設定す るには、多大な労力と期間が必要となる。そこで、これを シミュレーションで行なうことが求められる。

前述の通り、真空浸炭では表層に θ が析出し、 θ と γ 間 で合金元素の分配が起こる。 γ/θ 間の炭素の深さ方向への 拡散は γ 中で起こるため、 γ 中の合金元素の影響を強く受 ける。例えば、Si は θ に固溶せず、Cr は θ に濃化する⁵。



図 2 SCR420 を浸炭した際の 1223K における炭素の活 量係数(黒鉛基準)

Activity coefficient of carbon referred to graphite in carburized steel SCR420 at 1223K

Siは炭素の活量を上げ、Crは炭素の活量を下げる元素で あるため、θ析出量が増大してθとγ間で合金元素が分配 するとともに炭素の活量が増大する。図2にSCR420を 950℃で浸炭した場合の炭素の活量係数を示す。熱力学計 算ソフトウェア Pandat 8.2、データベースには PanFe 2014 を用いた^{6,7)}(以下、熱力学計算には Pandat を用いた)。γ 単相域よりもγ/θ二相域の方が活量係数の勾配が大きく なっている。拡散粒束は厳密には以下の(1)式で表わさ れ⁵、活量係数の組成微分の項が存在している。

$$J = -mx \frac{\partial \mu}{\partial z} = -mRT \left\{ 1 + x \frac{\partial (\ln \gamma)}{\partial x} \right\} \frac{\partial x}{\partial z}$$
(1)

ここで,mは炭素の易動度,xは炭素のモル濃度である。 一般的なガス浸炭では浸炭による析出は起こらないか無視 できるほど微量であるため,拡散流束を炭素濃度の勾配か ら計算する。それに対し,θの析出の多い真空浸炭では活 量係数の変化を無視できない。以上のことから,真空浸炭 シミュレーションを行なう際には,拡散の駆動力は化学ポ テンシャルμの勾配であるとし,(1)式を差分化して計算



図3 1223K における SCR20 の y 中炭素濃度 Carbon concentration in y-SCR420 at 1223K



図 4 SCR420 を浸炭した際の 1223K における炭素の化 学ポテンシャル

Chemical potential of carbon referred to graphite in SCR420 at 1223K

する。そして,物質量保存則が成り立つとして,炭素濃度 分布を求める。

この際,平衡状態は予め熱力学計算ソフトウェアで求め た結果に対し,図3および図4のように回帰式を作成して, 拡散の計算ステップ毎に求めた。こうすることで,拡散の 計算を行なう際に熱力学平衡計算を行なう必要が無くな り,計算負荷を小さくすることができた。

図5にSCR420の直径26mmの丸棒に浸炭期1時間で, 図6に浸炭期1時間拡散期1時間で真空浸炭処理した際の 炭素濃度分布を,シミュレーションと合わせて示す。炭素 濃度の分析は,機械加工で表層から0.05mmずつ切粉を採 取し分析した。浸炭期1時間で表層0.05mmの炭素濃度が 2.0mass%程度に達し,y+0二相組織に,また,浸炭期1 時間,拡散期1時間では,炭素濃度が1.0mass%程度になっ ており,y単相組織になっていた。どちらの浸炭条件でも, 化学ポテンシャルの勾配から拡散流束を求めた計算の方 が,測定値に近い結果となっている。浸炭1時間では極表 層しか差異が見られないことから,拡散後の炭素濃度分布 には,浸炭期の0析出量が大きな影響を与えており,これ



図 5 SCR420 を 1223K において 1 時間浸炭した際の炭 素濃度分布

Carbon profile of SCR420 carburized for 1h at 1223K



図6 SCR420 を1223K において1時間浸炭, 拡散1時 間処理した際の炭素濃度分布

Carbon profile of SCR420 diffused 1h after 1h carburizing at 1223K

を精度よく予測することが重要であると考えられる。

3. 過剰浸炭無害化処理

3.1 過剰浸炭組織制御指針

前述の手法を用いて、90°の角度のエッジ部を持つ断面 に対しシミュレーションした結果を図7に示す。浸炭条件 は、温度が950℃で、浸炭期28分、拡散期40分、860℃ まで0.05℃/sで冷却し、均熱30分後に焼入れるものとした。 浸炭28分後には表面から均一に炭素が侵入しているのに 対し、拡散40分後にはエッジ部(図中左上)の炭素濃度 が平坦部表面の炭素濃度より高く、A_{cm}線以上になってい る。焼入れ温度の860℃では平坦部の炭素濃度が0.8 mass% になっているのに対し、エッジ部では1.8 mass%程度になっ ていた。そもそも真空浸炭では、浸炭期には黒鉛と平衡す る程度まで炭素濃度が上昇し、拡散期に深さ方向に拡散す ることで表面炭素濃度が低減する。しかし、エッジ部では 拡散場が衝突して炭素濃度が下がりきらない。この現象は、 浸炭期の表面炭素濃度が狙いの炭素濃度よりも高い場合に 起こるため、800℃以上の温度で処理する限り、エッジ部

-15 -

の過剰浸炭は避けられない。

過剰浸炭は避けられないので、その無害化について検討 する。拡散後にエッジ部の炭素濃度が A_{cm} 線を超えている と、粗大な θ が析出し、疲労特性を悪化させると考えられる。 そこで、微細な θ を分散させ疲労特性の悪化を抑制するこ とを考えた。一般に高温での析出物は粗大になる傾向があ る。そのため、浸炭温度では γ 単相組織とすることが好ま しい。

図8に炭素濃度を変数とした SCR420 の計算状態図を示 す。高温ではA_{cm}線が高炭素側にあり,過剰浸炭部の炭素 濃度が1.5mass%を超える場合, y単相にするには浸炭温 度を1000℃以上にする必要があることが分かる。過剰浸 炭が起こったエッジ部においても y単相となると考えられ る。ただし、このまま焼入れると高炭素濃度のため、残留 yが多量に生成し硬度が低く強度も低い。そこで、浸炭、 拡散後に y単相にした後、急速冷却を行ない、0の析出を 抑制しつつパーライト変態させる。その後、焼入れ温度に 加熱すると、過剰浸炭部はパーライト中の0の一部が溶解 しながら、フェライト (α) が γ に変態し、 $\gamma+\theta$ 二相組織に なる。これを焼入れると、微細な θ が分散した焼入れ組織 を得ることができる。

3.2 過剰浸炭無害化品の強度特性

過剰浸炭部に微細な θ を分散させた場合の疲労強度を調 査した。バッチ型の真空浸炭炉を用い,浸炭ガスにはアセ チレンを用いた。図9にヒートパターンを示す。950℃での 一般的な真空浸炭処理と,1040℃で浸炭しガス冷却を行 なった後 860℃に再加熱焼入れを行なう過剰浸炭無害化処 理である。通常処理では SCM420 材を 950℃で,過剰浸炭 無害化処理ではセメンタイト微細化のため高 Cr 化した鋼 を 1040℃で真空浸炭を施した。過剰浸炭無害化処理は高 温での処理であるため,合計の処理時間が 40%程度短く なっている。

焼入れ温度は860℃とし、500hPaで120℃の油に焼入れ、 170℃で2時間の焼戻し処理を施した。強度評価には 13mm×13mmの角柱の中央部に半径2mmの半円切欠きを



図 7 SCR420 を 1223K において浸炭し, 1133K で均熱した際の炭素濃度分布 Carbon distribution of carburized SCR420 at 1223K and soaked at 1133K







図 9 真空浸炭のヒートパターン(単位は分) Heat pattern of vacuum carburizing test (times in minute)



図 10 四点曲げ疲労試験模式図

Shape of notched specimen and schematic illustration of four point bending test

a) Conventional vacuum b) Developed vacuum carburizing carburizing



10µm



設けた試験片を用い,図10に示す四点曲げ疲労試験を, 荷重制御,応力比0.1の片振り,試験周波数10Hzで行なっ た。半円切欠き底に試験片幅方向13mmに亘って応力が集 中するため,実際の歯車の歯底のように,平坦部とエッジ 部の両方に対し同時に負荷がかかる。エッジ部は幅方向に 拘束されないため,実際には平坦部より破壊しにくい。よっ て,エッジ部の強度が特に低下しない限り,平坦部が疲労 破壊の起点になると考えられる。

図 11 に浸炭品エッジ部の組織写真を示す。a)の通常浸 炭では長さが 10µm を超える粗大な θ が析出しているのに 対し, b)の過剰浸炭無害化品では粗大な θ は無く微細な θ が析出している。

図12に四点曲げ疲労強度を、図13に代表的な疲労破 面を、図14に疲労破壊起点の模式的図を示す。過剰浸炭 無害化処理品の方が通常真空浸炭品よりも強度が高かっ た。また、通常真空浸炭品ではエッジ部が破壊起点となっ ているのに対し、過剰浸炭無害化処理品では平坦部が破壊 起点となっていた。過剰浸炭部のθが微細化するとその部 位の疲労強度が向上するため、平坦部が疲労破壊の起点と なる。

4. 結 言

環境負荷を低減可能な真空浸炭処理は、炭素濃度分布



図 12 真空浸炭品の曲げ疲労強度 Fatigue strength of vacuum carburized steel



500µm





図 14 疲労破壊起点の模式図 Schematic illustration of crack starting area

を精緻に予測することと,過剰浸炭による強度低下を抑制 することが課題であった。これらの課題に対し,鋼材の特 性に着目して,処理方法の最適化を行なった。

(1) 炭素濃度制御

真空浸炭では炭素濃度を精度よく予測する方法が確立さ れていなかった。特に浸炭期の θ 析出量が拡散期後の炭素 濃度分布に大きな影響を与えることと, θ 析出有無で炭素 の活量が大きく変化することに着目して,シミュレーショ ン手法を改善した。θ 析出下での炭素の拡散駆動力を厳密 に取り扱うことで,炭素濃度分布を精度よく求めることが できるようになった。その結果,浸炭条件を精度よく設定 できるようになった。 (2) エッジ部の過剰浸炭

シミュレーションを用いて、エッジ部の過剰浸炭の原因 が拡散場の衝突であることを確認した。A_{cm}線が必要な表 面炭素濃度よりも高い温度で処理する限り、エッジ部の過 剰浸炭は避けられない。高温で浸炭した後、ガス冷却、再 加熱焼入れを行なうことで、過剰浸炭部に微細な θを分散 させることができ、曲げ疲労強度が向上することが分かっ た。 参照文献

- 1) 杉山道生: 熱処理. 37 (3), 154 (1997)
- 2) Ureshino, Y. et al.: SAE Technical Paper. 2002 (01), 2000 (2002)
- 3) Pacheco, J.L. et al.: J. Heat Treat. 7, 77 (1989)
- 4) 森田敏之 ほか:鉄と鋼. 92 (4), 268 (2006)
- 5) 西澤泰二:日本金属学会報. 12, 401 (1973)
- 6) Chen, S.L. et al.: CALPHAD. 26, 175 (2002)
- 7) 橋本清:ふぇらむ. 11, 715 (2006)



藤堂尚二 Shoji TODO 八幡技術研究部 主幹研究員 福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501



末野秀和 Hidekazu SUENO 八幡製鉄所 棒線部 棒線管理第一室 主幹



今高秀樹 Hideki IMATAKA 八幡製鉄所 棒線部 棒線管理第一室 主幹