SCr420 鋼の制御ガス浸炭プロセスの開発

室 賀 啓* 新 美 格**
恒 川 好 樹** 奥 宮 正 洋**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 52, No. 5 (1988), pp. 495-501

Controlled Gas Carburizing Process for SCr420 Steel

Akira Muroga*, Itaru Niimi**, Yoshiki Tsunekawa**
and Masahiro Okumiya**

A new gas carburizing process which is capable of easily determining a suitable parameter has been developed using an explicit finite-difference method and a direct-search method of optimization. In this process, a weighting factor was introduced into this process for optimizing the carbon profile and time. Increasing the weighting factor made the difference between the calculated and target carbon profiles smaller but the treating time longer. Calculated carbon profiles of SCr420 steel were compared with experimental results by a atmosphere-control system using a zirconia oxygen-sensor. Agreement between the calculated and measured profiles was very good.

The dependence of the diffusion coefficient on carbon concentration in SCr420 steel is expressed experimentally as follows:

$$D(C) = 3.569 \times 10^{-5} \exp(-1.613 \times C) \exp(-15.76 + 2.966 \times C)$$

where C was the carbon concentration (mass%).

The influence of the carburizing parameter on a variety of the initial conditions in the calculation process was also discussed in relation to the carbon profiles.

(Received November 24, 1987)

Keywords: chromium steel, carburizing, diffusion coefficient, explicit finite-difference method, direct-search method of optimization, simulation, carbon concentration profile, zirconia oxygen-sensor

I. 緒 言

浸炭処理部品の表面硬化特性は、一般に表面硬さと有効硬化深さで規定されている。炭素濃度以外の焼入れ硬さを決める因子としては、合金元素、冷却方法および形状などが挙げられる。しかしながら上記の因子は、実際の操業において被処理部品およびその工程が決まれば、余り変化することはないと考えられる。従って、表面からの硬さ勾配を与える主な因子が炭素濃度勾配であると言える。さらに、現状では炭素濃度勾配を表面炭素濃度と有効浸炭深さで規定することが多い。その結果、表面炭素濃度と有効浸炭深さが同一であれば途中の炭素濃度がどのような値であっても同一のものとして扱うことになり、この規定方法に従えば、製品の機械的性質特に疲れ強さの変動に影響を及ぼし、安定した性質の製品を作るという意味から不十分と言わざるを得ない。さらに一步進めて製品の負荷応力分

布にもっとも適した特定の炭素濃度プロファイルを再現性よく得る方法が必要となる。

一方、計算機による浸炭処理のシミュレーションおよび浸炭炉のプロセス制御に関する幾つかの研究は従来より報告されている^{(1)~(6)}。しかしながら、これらの研究は濃度勾配として表面炭素濃度および有効浸炭深さの2点のみを目標とし、「浸炭期」「拡散期」で代表される2ステップの処理しか考慮していないため、目標通りの炭素濃度プロファイルを作製することは困難である。

本研究では、表面炭素濃度と有効浸炭深さの2点のみでなく、表面から内部にわたる炭素濃度プロファイルを目標として狙うことが可能な浸炭プロセスを作成することを目的とし、さらに処理の経済性を考慮して濃度プロファイルの精度の許容範囲内で処理時間の短縮を図る方法を検討した。処理温度は1203 K一定とし、数ステップからなるカーボンポテンシャルと時間の組合せを処理パラメータとした。また、求められた処理パラメータを実行できる制御系を作

* 愛知製鋼株式会社 (Aichi Steel Works Ltd., Tokai)

** 豊田工業大学工学部 (Faculty of Engineering, Toyota Technological Institute, Nagoya)

製し、計算および実際の浸炭処理によって得られた炭素濃度プロファイルと比較検討した。

II. 処理パラメータを決定する計算プロセス

1. 拡散方程式の差分化

浸炭処理は、炭素原子を鋼表面から拡散浸透させる処理である。ここでは計算を簡略にするため1次元半無限固体を想定すると、Fickの第2法則は式(1)のように表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで C は炭素濃度、 x は表面からの距離、 t は時間、 D は炭素原子の濃度依存を考慮した炭素の拡散係数をそれぞれ表す。拡散係数の濃度依存を考慮したまま Fig.1 のようなメッシュを考えて離散化し、陽解法⁽⁷⁾で解くことによって式(2)のような差分式が得られる。

$$C_i^{t+\Delta t} - C_i^t = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \{ D_i (C_{i+1}^t - C_i^t) + D_{i-1} (C_{i-1}^t - C_i^t) \} \quad (2)$$

式(2)を浸炭開始時刻 $t=0$ から浸炭停止時刻 $t=t_e$ まで Δt 時間毎に繰り返し計算することにより、浸炭処理のシミュレーションを行うことが可能になる。なお、 Δt , Δx は計算途中に発散が起きない値を選んだ。

Fig.1 Schematic illustration of mesh points for one-dimensional diffusion in (x, t) coordinates.

Fig.2 Schematic illustration of residue between the target carbon concentration profile and the calculated profile at a certain parameter.

さて、作製しようとする目標の炭素濃度プロファイルを Fig.2 の実線のように仮定する。一方、ある処理パラメータの際に得られる炭素濃度プロファイルが同 Fig.2 の一点鎖線に示されるものとする。これら二つの炭素濃度プロファイルは形状が全く同一な場合を除いて差が生じる。そこで Fig.1 の離散化の際に用いたメッシュ上の各点における二つの炭素濃度プロファイルの差 Z_i の2乗の和を炭素濃度ファイルの残差 Z_p と定義する。

$$Z_p = \sum_{i=1}^n (Z_i)^2 \quad (3)$$

ここで、 n は目標炭素濃度プロファイルに近づける必要のある最低炭素濃度(以下、最低炭素濃度と呼ぶ)の深さまでのメッシュの数を表す。 Z_p が小さくなるほど上記二つの炭素濃度プロファイルにおける差が小さくなることを意味する。すなわち、目標に近い炭素濃度プロファイルが得られる処理パラメータになる。

式(2)を繰り返し計算することによって浸炭処理をシミュレーションし、処理パラメータを順次変更させながら Z_p を最小にすることによって、目標に近い炭素濃度プロファイルの得られる処理パラメータを求めることが可能となる。

2. 処理時間を短縮する因子についての考慮

炭素濃度プロファイルを目標に近づけることは考慮したが、処理時間の短縮については以上の計算プロセスに含まれていない。処理時間は直接生産コストに跳ね返ってくるので短縮することが望ましく、処理時間を短縮できる因子を取り入れる必要がある。

処理時間は炭素濃度プロファイルの残差 Z_p と同様小さいほど良いので、処理時間自身も残差と考え、 Z_p と処理時間の残差 Z_t の和を式(4)のように全残差 Z_a と定義する。

$$Z_a = f \cdot Z_p + (1-f) \cdot Z_t \quad (4)$$

ここで f は重み係数であり、濃度プロファイルを目標へ近づけることに重点を置く程度を表す値で、 $0 < f \leq 1$ の範囲を持つ。

この Z_a を Z_p の代わりに用いて重み係数を選択し、 Z_a が最小になるように処理パラメータを計算することにより、目標に近い炭素濃度プロファイルを作製でき、しかも処理時間の短縮も可能になる。

一方、同じ重み係数で異なる目標炭素濃度プロファイルを計算させる場合、全浸炭深さの大きい物は小さい物に比べて長い処理時間が必要となるため、 Z_t は大きくなる。そのため、濃度プロファイルの目標への近づき具合が同程度で Z_p の大きさが等しい場合でも、全浸炭深さによって Z_t は大きく異なり、その結果 Z_a も影響を受ける。全浸炭深さが大きい場合は Z_a に占める Z_t の割合が大きくなるため、 Z_t を小さくしようとする方向に働き、目標濃度プロファイルへの近づき方は低下する。すなわち、式(4)は同じ重み係数でも、全浸炭深さによって濃度プロファイ

ルを合わせることに重点を置く程度が変化することになり、 Z_t の補正が必要となる。

そこで近似的に拡散係数 D の炭素濃度依存を考慮しない場合の距離と時間に関する関係式 (5) を採上げる。

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

これより式 (6) のように変形することが出来る。

$$t = \frac{1}{k^2} x^2 \propto A_x \quad (6)$$

式 (6) は、全浸炭深さの 2 乗に比例して処理時間が長くなることを意味している。この A_x を用いて Z_a を式 (7) のように変更する。

$$Z_a = f \cdot Z_p + (1-f) \cdot Z_t / A_x \quad (7)$$

式 (7) が最小になるように処理パラメータを計算すれば、 Z_p によって目標に近い炭素濃度プロファイルが得られ、しかも全浸炭深さが大きいほど A_x は大きな値になるため、全浸炭深さが大きい炭素濃度プロファイルを計算する場合にも、 Z_t を過大に評価することがなくなり、 Z_t の Z_p への影響は小さくなる。

以上より初めに目標炭素濃度プロファイルを決定し、ガス浸炭炉の性能等により、重み係数、ステップ数、最低炭素濃度、カーボンポテンシャルの上・下限値を選択した後、浸炭処理のシミュレーションを繰り返しながら、直接探索法⁽⁸⁾によって最も目標炭素濃度プロファイルに近い濃度プロファイルの得られる処理パラメータを決定することが可能となる。

なお、プログラムは FORTRAN77 で作成し、豊田工業大学計算機センターの FACOM M-380 にて計算を行った。

III. 拡散係数の決定

本計算プロセスで行うシミュレーションには、拡散係数の炭素濃度依存式が必要となる。拡散係数は以前から種々求められているが⁽²⁾⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾、拡散係数が合金元素によって変化することから新規に依存式を求めた。

本研究ではガス浸炭処理材として一般的に多用される鋼種として、Table 1 で示される化学組成のクロム合金鋼 SCr 420 を採上げた。実験としては $\phi 30 \times 100$ mm の試料を一定カーボンポテンシャルで 10.8 ks 浸炭した。得られた炭素濃度プロファイルより、その実験と同一処理パラメータでシミュレーションした場合に同じ炭素濃度プロファイルが得られるような拡散係数の濃度依存式を求めた。濃度依存式の計算方法は、一般の方程式のように解析的に求めるこ

とができないため、先の計算プロセスと同様に直接探索法を用いて計算を行った。得られた炭素濃度依存式 (8) に示す。

$$D(C) = 3.569 \times 10^{-5} \exp(-1.613 \times C) \exp(-15.76 + 2.966 \times C) \quad (8)$$

ここで、 C は炭素濃度 (mass%) を表し、拡散係数の単位は m^2/s である。

IV. 浸炭シミュレーションの実験による確認方法

用いた試料は拡散係数を求める際と同一の組成および形状とした。

浸炭処理を施した試料の炭素濃度プロファイルの測定は、浸炭処理後 773 K, 5.4 ks Ar 雰囲気中で焼鈍し、その後試料表面から 50~200 μm ずつ粉末状に旋削し、その切削粉を燃焼法で分析することによって得た。

Fig.3 に浸炭処理を行う実験装置の概略を示す。使用する浸炭雰囲気は、プロパン分解吸熱型炉気をキャリアガスとし、固体電解質ジルコニア酸素センサによって炉気の酸素濃度を連続的に測定し、キャリアガスよりも高いカーボンポテンシャルにはプロパンを、逆に低いカーボンポテンシャルは空気を添加することにより、得られた処理パラメータ通りになるよう炉気の時間管理制御を行った。

浸炭処理を行う炉はビット型で、試料を出し入れする際に浸炭雰囲気が外気によって乱されることを避けるため、上部に別室を設けた。

試料の焼入れは、旋削時の試料の歪みによって分析誤差が大きくなるように、333 K の攪拌した焼入れ用油中に注意深く行った。

Fig.3 Block diagram of the apparatus for controlling of carburizing atmosphere.

V. 結果および考察

1. 実処理と計算結果との比較

本計算プロセスの評価は、目標濃度プロファイルに対して計算より処理パラメータを求め、実際に処理を行うことが必要がある。

Table 1 Chemical compositions of steel (mass%).

Mark	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
SCr 420	0.20	0.22	0.79	0.023	0.015	0.21	0.09	1.04	bal.

Table 2 Calculated results of carburizing parameter.

Target carbon concentration profile		Fig.4		Fig.5	
Distance from surface to 0.4 mass%C-point		0.60		0.40	
Weighting factor		0.99			
Range of carbon potential	Lower limit	0.40			
	Upper limit	1.10		1.00	
Minimum C% for calculating Z_p		0.40			
Step number		C.P.	time	C.P.	time
No.1		1.10	2475	1.00	2250
No.2		0.87	2775	0.71	1475
No.3		0.80	6700	0.80	2000
Total		—	11950	—	5725

そこで、表面炭素濃度が 0.8% とし、炭素濃度が 0.4% の深さ、いわゆる有効浸炭深さを 0.6, 0.4 mm と変化させて計算を行った。重み係数は濃度プロファイルの実験との差を見るため 0.99 とし、他の設定値としてステップ数は 3、最低炭素濃度は 0.4% とした。Table 2 にその計算

結果を示す。

また、Table 2 の処理パラメータで処理を行った結果得られた炭素濃度プロファイルを Fig.4, 5 にそれぞれ示す。これらの結果は単純な炭素濃度プロファイルであるが、それぞれ目標通りに得られていることが分かる。

Fig.4 Comparison between the target and measured carbon concentration profiles: distance from the surface to 0.40 mass%C-point = 0.60 mm.

Fig.5 Comparison between the target and measured carbon concentration profiles: distance from the surface to 0.40 mass%C-point = 0.40 mm.

Table 3 Comparison of the carburizing parameter for varying weighting factors.

Distance from surface to 0.4 mass%C-point		0.60							
Weighting factor		0.10		0.30		0.50		0.90	
Range of carbon potential	Lower limit	0.40							
	Upper limit	1.10							
Minimum C% for calculating Z_p		0.40							
Step number		C.P.	time	C.P.	time	C.P.	time	C.P.	time
No.1		1.10	2025	1.10	2475	1.10	2625	1.10	1475
No.2		1.10	1975	1.10	1975	1.03	2375	1.00	3675
No.3		0.80	1500	0.80	2350	0.80	3000	0.80	5100
Total		—	5500	—	6800	—	8000	—	10250

2. 重み係数が処理パラメータに及ぼす影響

目標炭素濃度プロファイルを Fig.4 の形状にし、重み係数を 0.1, 0.3, 0.5, 0.9 と変化させて計算した結果を Table 3 に示す。また、計算によって得られた濃度プロファイルを Fig.6 に示す。

重み係数は、濃度プロファイルを目標に近づけることに重点を置く程度を表す値であり、1 に近い値ほど処理時間が長くなるが目標に濃度プロファイルを近づけるように働く。Fig.6 より計算結果は重み係数が大きくなるにつれ、濃度プロファイルは目標に近いものになることがわかる。しかしながら、目標に近づいている分だけ全体として内部まで浸炭しており、そのため処理時間は長いものになっている。

Fig.6 Comparison of the calculated carbon concentration profiles for varying weighting factors: $f = 0.10, 0.30, 0.50, 0.90$.

ここではステップ数を3として計算させているが、重み係数が小さい場合は第1, 2ステップが同じカーボンポテンシャルになり、ステップ数が2に減少してしまう。このことは、濃度プロファイルの全体の形状は比較的近いが処理時間は短い処理を行うため、初期には高いカーボンポテンシャルで処理し、最終的に表面を合わせるといった「浸炭期」「拡散期」に代表される2ステップ処理が処理時間を短縮するためには効果的であることを示しているものと考えられる。しかしながら、濃度プロファイルの表面近くでは目標より高い値になり、内部では処理時間の短縮の結果として目標よりも低い濃度になっていることが分かる。

3. 上限および下限カーボンポテンシャルが処理時間に及ぼす影響

本プロセスでは各ステップ終了時に瞬間的に次ステップのカーボンポテンシャルが得られるものと仮定して計算を行っている。しかしながら、低いカーボンポテンシャルになるほど酸素センサの変化が僅かになるため、実際の処理において瞬間的な到達は不可能であり、低いカーボンポテンシャルにならないよう下限値を設定している。本論文では0.4 mass% としたが、本論文中に掲載している濃度プロファイルの場合、カーボンポテンシャルを非常に低くする必要が生じなかったため下限値まで到達していない。もし下限値を低くし計算結果がその下限値付近まで来るような炭素濃度プロファイルを考え、実際に処理を行って比較した場合、結果はカーボンポテンシャルが計算結果通りに実行できないため若干異なる炭素濃度プロファイルが得られるものと思われる。

一般に上限カーボンポテンシャルが高くなれば、処理時間を短縮することが可能であると言われている。Table 4 に、その最大のカーボンポテンシャルのみを変化させた場合の計算結果を示す。得られる濃度プロファイルは、どの上限カーボンポテンシャルでも殆ど区別できずカーボンポテンシャルを高くまで可能にする方が処理時間は明らかに短くなる。Fig.4 の実線を目標とした例ではカーボンポ

Table 4 Comparison of the carburizing parameters for varying upper limits of carbon potential.

Distance from surface to 0.4 mass% C-point		0.60					
Weighting factor		0.90					
Range of carbon potential	Lower limit	0.40					
	Upper limit	0.90		1.00		1.10	
Minimum C% for calculating Z_p		0.40					
Step number		C.P.	time	C.P.	time	C.P.	time
No.1		0.90	3425	1.00	2375	1.10	2475
No.2		0.86	4175	0.92	3125	0.87	2775
No.3		0.80	5800	0.80	6900	0.80	6700
Total		—	13400	—	12400	—	11950

テンシャルが 0.9% と 1.1% では約 1.5 ks 異なり, 1.1% における処理は 0.9% の場合の約 10% の処理時間短縮が可能になることが分かる。

4. 最低炭素濃度が処理パラメータに及ぼす影響

濃度プロファイルは鋼中の初期炭素濃度に近づくほど勾配は緩やかになり, 分析では判別でき難くなる。また, 表面部のみ規定して内部の方は特に規定がない場合, 内部の方は極力処理時間が短くなるようにするべきである。そのため, 初期炭素濃度まですべてを考慮する必要がない場合もあり得る。Table 5 に, 最低炭素濃度を 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 と変化させた場合に得られる処理パラメータを示す。

Fig.7 Comparison between the calculated carbon concentration profiles for varying minimum carbon contents which exert residues of carbon concentration profile.

Table 5 Comparison of the carburizing parameters for varying minimum carbon contents optimizing carbon concentration profile.

Distance from surface to 0.4 mass% C-point		0.60									
Weighting factor		0.99									
Range of carbon potential	Lower limit	0.40									
	Upper limit	1.00									
Minimum C% for calculating Z_p		0.70		0.60		0.50		0.40		0.30	
Step number		C.P.	time	C.P.	time	C.P.	time	C.P.	time	C.P.	time
No.1		1.00	2025	1.00	2500	1.00	2275	1.00	2375	1.00	4725
No.2		0.90	2475	1.00	2500	0.99	2775	0.92	3125	0.68	6025
No.3		0.80	725	0.80	4000	0.80	6000	0.80	6900	0.80	4950
Total		—	5225	—	9000	—	11050	—	12400	—	15700

す。Fig.7 にその処理パラメータによって得られる濃度プロファイルを示す。

最低炭素濃度を高くすると, 最低炭素濃度以上の部分は重み係数に応じて目標に近づけることが可能となるが, 最低炭素濃度以下の部分では処理時間を短くするように動くため一般には目標よりも低いものになる。

従って, 全浸炭深さは問題とせず表面付近のみを考慮すれば良い場合は, 最低炭素濃度を大きな値にすれば表面付近は目標通りで, しかも最低炭素濃度が低いため全体を狙う場合よりも処理時間を短縮することが可能となる。

5. 他鋼種への展開

本研究では一例として SCr 420 鋼を使用した, 合金元素を変数とした拡散係数の濃度依存式を作成することにより, 合金元素およびその量の異なる種々の鋼種への適用も可能である。

VI. 結 言

Fick の第 2 法則を差分化した式の繰り返し計算を行うことによって得られる浸炭処理のシミュレーション, およびその確認浸炭実験によって, 以下の結論を得た。

(1) 目標通りの炭素濃度プロファイル, ステップ数, 上限カーボンポテンシャル, 下限カーボンポテンシャル, 最低炭素濃度をガス浸炭炉の性能等に応じて決定することにより, 処理パラメータを簡単に求めることが可能になった。また, 重み係数を任意に設定することにより, 処理時間を短縮することに重きを置くことも炭素濃度プロファイルを目標に近づけることに重きを置くことも自由に選択することができた。

(2) クロム合金鋼 SCr 420 中の炭素原子の拡散係数濃度依存式は温度 1203 K において

$$D(C) = 3.569 \times 10^{-5} \exp(-1.613 \times C) \exp(-15.76 + 2.966 \times C)$$

と決定した。

(3) ガス浸炭処理の確認実験を行うことによって、得られた処理パラメータが正しいことを確認した。

(4) 表面の重要性に着目し、ある一定以上の炭素濃度のみを目標濃度プロファイルに近づけることも可能である。

最後に、ジルコニア酸素センサを貸与して戴いた中外炉工業株式会社に深く感謝いたします。

文 献

- (1) J.I.Goldstein and A.E.Moren : Metall. Trans. A, 9A(1978), 1515.
- (2) R.Collin, S.Gunnarson and D.Thulin : J. Iron Steel Inst., 210(1972), 785.
- (3) I.Montevecchi : *HEAT TREATMENT '79*, The Metals Society, London, (1972), 1.
- (4) D.Grassl and B.Edenhofer : *HEAT TREATMENT '84*, The Metals Society, London, (1984), 12. 1.
- (5) A.Knierem and H.Pfau : *ibid.*, The Metals Society, London, (1984), 13. 1.
- (6) A.D.Tullett, N.F.Smith and A.C.Wakeman : *Metals Technology*, 5(1978), 320.
- (7) 水谷幸夫, 香月正司訳 : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, (1985), 56.
- (8) 武藤三郎, 杉江日出澄, 岡崎明彦 : *FORTRAN と数値計算法*, 培風館, (1977), 126.
- (9) Eric A.Brandes : *Smithells Metals Reference Book*, 6th ed., Butterworths, (1983), 13. 17.
- (10) イ. エス. コズロフスキー : 歯車の化学熱処理, 日ソ通信社, (1971), 77.
- (11) J.Wünning : *HEAT TREATMENT Shanghai '83*, The Metals Society, London, (1984), 1. 50.
- (12) Gary G. Tibbetts : *J. Appl. Phys.*, 51(1980), 4813.
- (13) A. M. Staines, T. Bell and H. W. Bergmann : *HEAT TREATMENT '84*, The Metals Society, London, (1984), 48. 1.