



熱処理における省エネルギー対策

大 和 久 重 雄

Energy Conservation in Heat-treating

Shigeo OWAKU

1. 省エネルギー熱処理の大前提

熱処理は加熱と冷却のプロセスであるから、莫大な熱エネルギーを消費することはいうまでもない。熱処理における熱エネルギーコストは売上高の12~18%といわれている。そこで省エネルギー時代の熱処理設計が強く叫ばれるゆえんである。省エネルギー熱処理の大前提としてはつぎの3点が挙げられる。

1.1 熱処理炉の連続使用

一般に熱処理炉は加熱時に大きな熱エネルギーを必要とするもので、保温にはそつたいした熱エネルギーはいらない。そこでいつたん熱処理炉を処理温度に加熱したら、この温度を下げることなく、連続使用の形にすべきである。これを1日の終業時に炉温を下げ、翌朝、冷めたい炉を昇温するようなサイクルにするから、昇温のために莫大な熱エネルギーを使うことになるのである。したがって、これを連続使用の形にすれば、保温用のエネルギーだけですむから、エネルギーの節約は莫大となる。熱処理炉を連続使用のスタイルにするには、連続化、自動化、機械化、コンピュータ化、無人化にすることが必要である。

1.2 不良品を作らないこと

熱処理で不良品を作ると、熱処理をやり直さなければならぬ。熱処理をやり直すと大ざつばにいつて熱エネルギーを2倍使うことになる。これは大変なエネルギーの無駄である。熱処理の不良品を作らないためには、熱処理のルールを確実に守ることが大切である。

1.3 無意識の追放

とかく、人間は従来の習慣を無意識に踏襲したり、なんとかなしに慣れつこになつて、そのまま実行しているようなことが多い。無意識に行つていることも、なぜかという眼をもつて検討してみると、案外熱エネルギーを無駄使いしていることに気付くことが多い。原点にもどつて再検討する必要がある。その一例が加熱保持時間の

問題であり、硬化層深さの再検討である。

2. 省エネルギー熱処理の3対策

熱処理技術の省エネルギーを図るには、3つの対策が考えられる。それは(1)設備的対策、(2)技術的対策、(3)材質的対策の3つである。

2.1 設備的対策

2.1.1 断熱材、保温機の活用

従来の熱処理炉は一種の暖房装置とも考えられるくらい、冬は暖かくてよいが、夏は熱くて作業環境を悪くしていたのである。一般に熱処理炉の熱効率は悪く、20%内外のものが多かつた。すなわち、熱処理炉の外壁は熱く、いわゆる hot wall であつた。これは断熱と保温が悪く、熱放散が多い証拠である。これを断熱と保温をよくして、cold wall の炉にすることが必要である。それにはセミックファイバーを使用することが先決である。セミックファイバーは優れた断熱と保温性があるので、熱エネルギーの節約は大きい。最近の報告によると、セラミックファイバーの使用によつて、熱エネルギーが20~30%節約できたということである。

2.1.2 廃熱の利用

加熱炉から逸散する熱を、従来はそのまま放熱していたのであるが、この廃熱をレキュペレータやヒートパイプを利用して、リサイクリングすることが大切である。このリサイクルした熱で処理物やジグ、トレーなどを予熱したり、燃焼用空気や油を暖めるのに利用することによつて燃料費を25%節約できたという報告がある。また雰囲気調整炉にラジアントチューブを活用して燃料を15~20%、最高30%節約したというアメリカの報告¹⁾もある。省エネルギー対策の1つとして考えるべきであろう。

2.1.3 計測器類の正しい使用

計測器類は正しいものを、正しく使つてこそ、計測器の価値があるというものである。流量計や温度計が正し

昭和56年7月7日受付 (Recived July 7, 1981) (依頼解説)

* 日本熱処理技術協会 工博 (The Japan Society for Heat Treatment, 8-2 Shinsen-cho Shibuya-ku, 150)

くないと、エネルギーの無駄使いになるのはいうまでもない。マイクロプロセッサや各種のセンサーなどの活用も省エネルギーの一環として大切である。

2.2 技術的対策

熱処理技術的に省エネルギーを図るのは一番確実で、手取り早く、またその戦果も大きい。これには(1)従来技術の適性化と転換、(2)新技術の適用の2つが考えられる。

2.2.1 熱処理技術の適正化と転換

(1) 加熱保持時間の短縮

熱処理のための加熱には、温度と加熱時間の2つが大切である。加熱時間は昇温時間と保持時間の和である。つまり、加熱時間=昇温時間+保持時間=在炉時間となる。従来、保持時間の目安は25mm角30minというのが慣習になつており、これが一般的ルールでもある。しかし、大物が保持時間が長く、小物が短いというのは保持時間のことではなくて、昇温時間のことである。処理物の内外が同一温度になつてからの保持時間は、大物でも小物でも同じであつてしかるべきである。保持時間、つまり、オーステナイト化保持時間は均一なオーステナイトにするための所要時間であるから、これは鋼質に関係する。

昇温時間=f(処理物の大きさ)

保持時間=f(鋼質)

機械構造用合金鋼はパーライト系であるから、オーステナイト化保持時間は短かくてよく、工具用鋼はカーバイド系であるから、カーバイドをオーステナイトに50~70%固溶させるために保持時間が長くなる。工具鋼に対する保持時間はカーバイドの種類、粒の大きさ、分布状態などによつて変わってくるのである。このために工具鋼のカーバイドは粒度や分布状態をあらかじめそろえておくことが必要なのである。これが工具鋼に対する球状化焼なましであり、重要な事前処理とされているゆえんでもある。

このように、加熱保持時間を従来の25mm角30minなどという神話にとらわれることなく、昇温時間と保持時間をしつかり区別して加熱時間を決定するならば、熱エネルギーの節約は即座に行われることになる。

なお、オーステナイト化保持時間は加熱温度(オーステナイト化温度)をあげることによつても短縮することができる。最近の実例によると、焼ならし温度を900°Cから925°Cにあげることによつて、焼ならし時間を2hから0.5hに短縮することができたという報告がある。また、球状化焼なましの保持時間を2h短縮し、冷却時間を3h短縮しても従来と同じ球状化結果が得られたというアメリカの報告もある。

以上はオーステナイト化保持時間の場合であるが、焼もどし保持時間の場合も同じような考え方が必要である。焼もどしの処理は一種の時効処理であるから、その

効果は温度と時間によつて変わってくる。焼もどし温度が高ければ時間は短く、焼もどし温度が低ければ時間が長くなる。しかも焼もどし効果に対しては焼もどし温度の影響のほうが焼もどし時間よりもはるかに大きい。したがつて、焼もどしの温度を一寸あげるだけで焼もどしの時間は大幅に短縮される。この間の事情を物語るものがマスター・テンパリングカーブ(焼もどし母曲線)である。このカーブによれば、同じ焼もどし硬さを得るのに温度と時間をいかに変えたらよいかを教えてくれるのである。つまり、パラメータをベースにしての考え方である。このマスター・テンパリングカーブを活用することによつて、焼もどしの加熱時間を大いに短縮することができ、ひいては熱エネルギーを節約することができる。

また、浸炭の加熱時間も浸炭温度をあげるることによつて、大幅に短縮することができる。これが最近、盛んに活用されている高温浸炭であり、省エネ浸炭の花形でもある。

以上のように、熱処理は温度と時間のファンクションであるから、これをうまくコンバインして、従来の無意識のヒートサイクルを変えて省エネルギーを図ることが大切である。

(2) 硬化層深さの軽減

硬化層深さには、浸炭硬化層深さと高周波焼入硬化層深さの2種類があるが、今までの硬化層は深きに失した感がないでもない。従来、決められていた硬化層深さは確たる根拠がなく、ただ経験的に決められた深さをそのまま踏襲してきたにすぎないものが大部分である。というのは昔はストレスの分布を測定する器具がなかつたから、計算とか当てずっぽで決めていたのにすぎない。それがたまたま事故なしてきたものであるから、そのまま採用しているだけである。現在ではワイヤストレーンゲージなど、ストレスを実測できる道具があるので、これらを使つてストレスを測定すれば、必要な硬化層深さは合理的にこれを求めることができる。

それにしても、現在採用している硬化層深さは深すぎるきらいがある。深ければ安全だという気休めから深くなつているとしか思えない。したがつて、従来の硬化層深さはこれを浅くするのがよいのであつて、その目安は大体70%(30%減)である。この硬化層深さの70%キャンペーンは既に日、米で実施されつつあり、実用上差し支えないという結果が発表されている。硬化層深さを70%にすることによつて熱エネルギーを約30%節約することができる。

自動車工業関係で使用する電力は年間約59億kWhで、その約10%の5.9億kWhが熱処理に消費され、その約2/1、つまり、3億kWhが浸炭用といわれている。そこで、この浸炭作業を省エネルギー的にすれば、その効果は顕著である。それには、浸炭硬化層深さを浅

くすることはもちろん、高温浸炭やジカ焼入れなどを採用するのがよい。

(3) ダイレクト・クエンチの採用

鍛造や圧延は熱間で行う成形加工であるが、この作業の終わりに、残熱を利用してその間に焼入れするのが、鍛造焼入れや圧延焼入れである。従来は成形加工後、空冷してから、再加熱焼入れしていたのであるが、鍛造や圧延の残熱を利用して焼入れすると、高温熱間加工によつて焼入れ性がよくなると同時に加工焼入れ (thermo-mechanical-treatment 加工処理) になるので、強度の高い焼入れ部品が得られる。そのうえ、熱エネルギーが節約になるので、一石二鳥である。

浸炭焼入れも従来は浸炭後1次焼入れ、2次焼入れを行うように規定 (JIS) されていたが、浸炭後、そのまま温度を $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ に下げてから焼入れするというジカ焼入れ (ダイレクト・クエンチ) が採用されるようになったし、新しい JIS (1979年8月) でもこれがよいことになった。しかも、 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ に $15\sim 20$ min 保持して焼入れしていたものを、浸炭温度から炉冷で $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ に下げるため、処理物の内外の温度が同じになるので、 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ に保つ時間はゼロ時間でよいということも明らかとなった。このジカ焼入れとゼロ時間を採用することによつて、浸炭焼入れに要した熱エネルギーは大幅に節約されるようになり、省エネ熱処理の実を挙げている。

また、浸炭温度を従来の 930°C から $950\sim 1000^{\circ}\text{C}$ にあげて高温浸炭すると、浸炭時間が短縮され、約20%の省エネルギーになったという報告²⁾もある。米国では8620鋼 (重量1100kgf) の浸炭を 1010°C の高温で行つたため、2.5hで1.1~1.3mmの浸炭硬化層深さが得られ、1h当たりの生産量が増しただけではなく、ガスが50%も節約されたというし、またキャタピラー会社では従来の浸炭を 980°C から 1010°C にあげたために、有効硬化層深さが2.6mmのとき浸炭時間40hが21hに短縮され、3年間の実績では高温浸炭により20%もガスの節約が図れたという。高温浸炭になると消費ガス量は $925^{\circ}\text{C}\cdots 6.66\text{ m}^3/\text{h}$, $980^{\circ}\text{C}\cdots 7.50\text{ m}^3/\text{h}$, $1040^{\circ}\text{C}\cdots 7.79\sim 7.93\text{ m}^3/\text{h}$ となるが、加熱時間が短くなり、生産性が増すので、結局は省エネルギーになるのである。

(4) 焼もどしの省略

一般に焼入れ後は必ず焼もどしすることが必要条件である。しかし、焼入れ冷却の途中、処理物の持っている熱で自己焼もどしする方法、つまりセルフテンパーを利用するならば、わざわざ焼もどしをする必要はない。Ms点の高い低C鋼 (含 Mn, B) を焼入れすると、Ms点が高いため ($Ms > 300^{\circ}\text{C}$)、冷却途中でマルテンサイトがセルフテンパーされて焼もどしが無用となる。Ms点が高い鋼でなくても、冷却途中の引上焼入れで自己保有熱によるセルフテンパーを図るのもよい方法である。

硬化層深さの浅い焼入れ部品や高周波焼入れ部品 (特に耐疲労性を重視する部品) などは焼もどししないでもよいといわれている。従来は低温焼もどしが常識になっていたが、この焼もどしを省略するのも省エネルギーの一法である。

またオーステンパによるベイナイト処理は焼もどし無用の熱処理であるから、これを活用するのもよい方法である。ベイナイトは HRC 45~50 のとき強靱性を発揮するので、この硬さで使用する部品にはオーステンパが省エネ熱処理として有望である。しかし、オーステンパには泣き所が1つある。それはマス・エフェクトであつて、大型部品には適用しにくいことである。これは鋼の焼入れ性が関係するのであつて、大型部品をオーステンパするにはサイズに見合う適当な焼入れ性をもつ鋼種を選ばなければならない。最近では省エネルギーと省資源の目的でダクタイル鋳鉄 (FCD) 製クランクシャフトのオーステンパが盛んに行われている。これは FCD を 900°C から 240°C の熱油に焼入れして約2h等温保持後、空冷するのである。これによつて、表面硬さは HRC 50~57、心部硬さは HRC 37~40 となり、耐摩、強靱性が得られると同時に省エネルギーになるという。

2.2.2 新技術の適用

(1) 高周波焼入れ

高周波焼入れは別段新技術というわけではないが、省エネ用熱処理技術としては誠にうつつけである。すなわち、必要な部分だけを局部加熱したり、所要の深さだけ加熱することができるので、無駄の加熱がないばかりでなく、熱効率が高いからである。しかも、電氣的コントロールや自動化が容易であるから、省エネ用熱処理として、これから大いに活用されるものと思われる。目下、浸炭硬化や浸炭窒化などの表面硬化処理の代用として賞用されている。

また高周波は省エネ用加熱源として最適なので、高周波焼入れのみならず、鋼線の焼なましやロータリーレトルト炉の加熱源に採用され、省エネ効果を発揮している。最近ではマルチ周波数の高周波焼入れ装置によつて中空軸類の内外径を同時に焼入れしたり、大型ギヤを水中に浸漬して一歯ずつ焼入れして無歪硬化を行つている。これらも省エネルギーに関連しているものである。その他、従来行われていたズブ焼き品も炉加熱をやめて、高周波加熱に移行し、大いに省エネの効果をあげつつある。

(2) N_2 ベースの雰囲気の利用

雰囲気熱処理用の炉気に N_2 ガスをベースにしたものが炉気ガスの節約用として盛んに賞用されている。 N_2 は空気中に多量に存在し、資源的に豊富であるから大いに活用すべきである。 N_2 ベースの炉気は浸炭用や浸炭窒化用として天然ガス節約の目的に合致するものである。また N_2 ベースのガス浸炭は中断浸炭 (suspended

carburizing) を安全に行うことができるので、省エネルギー用ガス浸炭法として注目されており、今後ますます活用されることと思われる。

(3) 真空浸炭

真空浸炭は 1000~1100°C で行う一種の高温浸炭であるから、浸炭時間が短くなり、省エネルギー用浸炭プロセスとしては誠に合理的である。浸炭用ガスの消費も少なくなるので、省資源的でもある。これからの浸炭はこの真空浸炭ということになる。

(4) プラズマ窒化

窒化は表面硬化処理として優れた特性をもっているが、ただ1つの泣き所は処理時間の長いことである。これを解決するためのプロセスがプラズマ窒化で、イオン窒化ともいわれている。プラズマ窒化によれば、加熱用熱源を外に求めることなく、自熱でよいこととなり、しかも窒化時間が数分の一から数十分の一というように短縮されるので、省エネ用窒化処理として非常に有望である。

グロー放電によるプラズマ処理は窒化だけではなく、現在は浸炭にも応用されており、イオン浸炭の名のもとに賞用されつつある。イオン窒化もイオン浸炭も共に省エネルギー用表面硬化処理として今後ますます多用されることと思われる。

(5) 電子ビーム、レーザービーム熱処理

電子ビーム (E. B.) やレーザービーム (L. B.) を使つて所要の部分のみを表面硬化する方法で、熱エネルギーの消費が少なく、いわば省エネ用表面硬化法として将来有望である。目下、レーザー熱処理はダクタイル鋳鉄やパーライト鋳鉄製品の表面硬化に適用されつつある。いずれも自己焼入れされるので、特に外部から焼入液をかける必要はない。

(6) 水溶性焼入液

焼入油は大気汚染、水質汚濁、火災などの熱処理公害源となるので、忌避されつつある。この焼入油に代わつて登場したのが水溶性焼入液 (ポリマーの焼入液) である。これは 5~30% (残り水) の水溶液の形で使用する。その冷却能力は塩水から油にわたつて広く変化するので、多目的に使用でき、しかも公害がないので便利である。省エネ用というよりは省資源用というべきであろう。

2.3 材質的対策

熱処理の対象となる鋼材の質的転換によつて省エネを図ろうとするもので、これにはつぎの数種が考えられる。

(1) 迅速浸炭用鋼

浸炭を迅速に行うことは、省エネ用熱処理として最も効果的である。設備やプロセス的に浸炭の迅速化を図ることは大切であるが、肌焼用鋼の面からも検討する必要がある。従来、Cr の多い肌焼鋼は浸炭されやすく、とか

く過浸炭になりがちで困つていたのである。このために緩和浸炭を行つたり、Ni を添加した肌焼鋼を使用したものである。この過浸炭になりやすい鋼を逆用して、迅速浸炭用鋼として活用するのである。迅速浸炭用鋼は Cr, Si, Mn 量を調整したもので、省エネルギー用鋼材のトップクラスである。また浸炭は細粒炭よりも粗粒炭のほうが迅速に行われる特性を利用して、浸炭用整粗粒鋼が開発され、利用されている。この整粗粒鋼によると細粒鋼にくらべて浸炭温度を約 50°C 低くすることができるので、省エネルギーの目的に合致する。なお、この鋼種は焼入性も向上するので、合金元素の節減にも役立ち、省資源型ともなる。まさに一石二鳥である。

(2) カーバイド微粒鋼

工具鋼の熱処理においては、カーバイドが大きな役割を果たしている。すなわち、オーステナイト化温度においてカーバイドをオーステナイト中に固溶させなければならず、この固溶に対してはカーバイドの大きさ、分布などが重要な因子となる。そこで、このカーバイドを微粒にすれば固溶化速度が早くなるので、焼入れの時間を短縮することができ、省エネにつながるのである。これがカーバイド微粒鋼である。同様にカーバイドを均一、微粒 (粒径約 0.5~1.0 μ) にした工具鋼が P/M 鋼で、いずれも省エネ用工具鋼として有望である。

(3) オーステンパ用鋼

オーステンパは焼もどしが無用であるから、省エネ用熱処理となる。したがつて、このオーステンパに適する鋼は省エネ用鋼材ということになる。それには焼入性をコントロールした鋼が必要で、大型部品でもオーステンパできるようにしなければならない。つまり、S 曲線の鼻を長時間側にずらせ、ベイナイト温度範囲を広くするように合金設計することが必要である。

(4) プレ・プロセス鋼

プレ・プロセス鋼 (pre-processed) 鋼は熱処理済みの鋼のことで、鋼材のメーカーサイドで熱処理を行つて、ユーザーサイドに供給するものである。したがつて、ユーザーは改めて熱処理を施すことなく、熱エネルギーは不要ということになる。鋼メーカーが圧延や鍛造の残熱を利用してプレ・プロセスするので、これまた省エネルギーとなる。プレ・ハードンド鋼 (SKD 61, HRC 40~45 に処理済み) やベイナイト鋼板はユーザーサイドの熱処理不要鋼として既に活用されている。

また、常温加工硬化鋼や高温引拔鋼 (ETD, Elevated Temperature Drawing) と称するものも、プレ・プロセス鋼として、ドライブシャフト、カムシャフト、ピストンシャフト、ボルト、バネなどに賞用されている。これらはいずれも調質鋼の代替鋼として使用されるのであつて、省エネ用鋼材の花形である。

(5) 熱処理不要鋼

鋼に熱処理は不可欠のプロセスであるが、鋼材を鍛造

または圧延するまで、焼ならし、焼なまし、焼入れ、焼もどし(調質)などを施さなくても十分強度を満足するような鋼材を熱処理不要鋼という。鍛造用非調質鋼というのは従来、調質して使っていた鍛造用鋼(中炭素鋼)を鍛造のまま、調質なしで使おうという鋼である。S45Cに Nb, Vなどを添加した鋼で、クランクシャフトなどに適用されつつある。非調質であるから、省エネ用鋼材としては正に適材である。

2番手は焼ならし不要鋼(NN, Non-Normalizing)である。従来の圧延鋼材は圧延のままでは機械的性質のばらつきが大きく、機械加工性も良好ではないので、焼ならしを施すことが必要であった。焼ならし不要鋼は圧延後の焼ならしを必要としない鋼材で、圧延工程における加熱温度や冷却速度などをきめ細かくコントロールして製造したものである。現在、S-C材ならば径100mm以下、低合金肌焼鋼ならば径50mm以下のものに適用されている。

3番手は焼なまし不要鋼である。一般に冷間加工用材料は加工性向上の目的で、軟化焼なましまたは球状化焼なましが施される。この後加工を不要にして省エネルギーを図る目的で開発されたのが、焼なまし不要鋼で、こ

れにはB鋼, Ca処理鋼, 低C, AlキルドCr添加鋼などがある。

いずれも省エネルギー用鋼材として、今後ますます多用されることになると思われる。

(6) Hバンドの上限鋼

熱処理結果と狭い範囲内で規正するために、H鋼が使用されているが、省エネルギーの点から考えると、Hバンドの上限鋼を使うのが有利である。これは所定の浸炭硬化層深さを得るのに浸炭時間を短くすることができるし、また焼入硬化層深さに対しても焼入温度を低めにすることができるので、省エネルギーにつながるからである。

む す び

以上、省エネルギー用熱処理として3つの大前提をふまえて、この上に立つて3つの戦略を解説した次第である。資源は有限、知識は無限である。知識と智恵を引き出して省エネルギーを図ることが大切である。

文 献

- 1) Metal Prog. 117 (1979) 1, p. 77
- 2) Metal Prog. 117 (1980) 5, p. 27