小中径継目無鋼管の誘導加熱熱処理技術

神崎文暁¹⁾ 黒川 熙²⁾ 滝谷敬一郎³⁾
西 博⁴⁾ 田上俊久⁵⁾

1. 開発の経緯

誘導加熱熱処理とは、交番電流が流れる誘導加熱コイルの中におかれた被加熱導体に磁界の変化が誘導電流を誘起し、主としてそのオーム損が導体を加熱させる熱処理方法である。鋼材の誘導加熱熱処理は、高周波による顕著な表皮効果を利用して機械部品の表面焼入、電気抵抗溶接鋼管の溶接部の焼なましなどいずれも部分加熱に多く応用されてきた。

しかし誘導加熱による鋼材の全体加熱熱処理方法の特徴として、

(1) 急速加熱が可能ため鋼の組織が微細化し、靱性などの品質が向上する。

(2) 短時間加熱のため鋼材のとくに鋼管の断面の熱間ひずみの発生がわずかで、熱処理後のサイジングや矯正作業が不要である。

(3) 製品表面の酸化皮膜の生成が少なく、歩止りと表面性状が改善される。

(4) ガス燃焼炉にみられる排ガスが発生しない。

(5) 操業および品質の管理にコンピュータの導入が容易である。

(6) 被熱処理鋼材の寸法または加熱温度の変更にともなう生産能力の低下が、従来のガス燃焼炉にくらべていちじるしく少ない。

(7) 需要動向に見合った設備能力の増強や間けつ操業が容易にできる。

(8) 設備のメンテナンスが簡単である。
などの利点があげられる。一方、従来、誘導加熱における鋼管の温度分布について理論的、実験的研究が不足しとくに均熱に関する技術的問題が未解決であったため、誘導加熱をハイグレードの継目無鋼管の熱処理方法として採用するには多くのリスクがともなうと考えられてきた。

当社は昭和49年4月に業界で初めて小径継目無鋼管用に誘導加熱熱処理設備を建設、企業化のための実験を経たのち小規模の生産を開始した。その後石油危機を契機とする油井用鋼管の需要の増大とコンピュータによる温度制御および品質管理システムなどの新技術の開発により、昭和51年12月に新たに小中径継目無鋼管用誘導加熱熱処理設備を完成させた。本設備の熱処理能力は、外径114.3 mm ($4\frac{1}{2}$ in) から339.7 mm ($13\frac{3}{8}$ in) までの鋼管に対し平均10 t/h (30 t/hに増強予定) で、継目無鋼管の焼入、焼もどしのほか焼ならし、焼なましおよび電気抵抗溶接鋼管の熱処理が可能である。

2. 設備の特徴

本設備の主な特徴は、鋼管の熱処理温度精度の向上、焼割れと熱処理ひずみの防止、電力原単位の低減およびコンピュータの導入による自動温度制御と品質管理に関する新技術の採用にある。

設備の概要を被熱処理鋼管のフローにそって説明すれば(図1)、小径マンドレルミルまたは中径プラグミルから送られてきた継目無鋼管は、装入テーブル上に貯えられたのち、コンピュータからの指令により1本ずつ焼入ラインの搬送ローラ上にキックインされ、スキュー角度45°で回転しながら加熱コイルに装入される。

一般に誘導加熱では加熱コイル中におかれた被加熱導体の端面部の磁束密度が中央部に比べて異なるため、導体が鋼管の場合にはその両管端付近の温度分布が目標温度から外れることがある。この端面効果は、被加熱体の温度、寸法、間隔および周波数などに依存し(図2)、本設備では搬送ラインにキャッチアップテーブルを配設し、先行管に後続管を加速、接合させ、管端間に間げきのない状態で誘導加熱し端面効果による温度不良を除去する方法を開発、採用した。管端接合技術にはマイクロコントローラ(MELMIC)が利用され、直流モータに直結されたパルスゼネレータの信号でトラッキングをおこない、ライン上の鋼管の先後端を追跡し、各セクションごとの最適搬送速度を計算、直流モータの回転数を制御している(図3)。管端間は衝撃なしにしかも完全に接触した状態で加熱コイルに装入される。

* 川崎製鉄株式会社

1) 知多工場第1造管部部長 2) 知多工場第2造管部課長 3) 技術研究所知多研究室主任研究員 4) 知多工場管理部技術管理室主査 5) 知多工場第2造管部小径シームレス管課
Induction Heating Process for Production of Small and Medium Diameter Seamless Tubular Goods; F. Kanzaki, H. Kurokawa, K. Takitani, H. Nishi, T. Taue (Kawasaki Steel Corp.)
1979年2月8日受理

図 1 鋼管用誘導加熱熱処理設備のレイアウト。

図 2 端面効果による管端の温度分布。

図 3 管端接合方法。

焼入ラインの加熱電源には主として電力原単位を低減する目的で2重周波数が採用され、鋼のキュリー点以下では中周波(180 Hz)、キュリー点から最終加熱温度までは高周波(1 kHz)が利用されている。ライン上には自重キャンセル用バランスシリンダ付きピンチロールを配置して加熱および焼入中に鋼管に発生する熱応力とマルテンサイト変態応力による変形を防止している。焼入冷却装置は高圧噴射ノズルをそなえた環状リングで構成され、焼入水が後続管の内面に逆流しないように十分な管端間距離をとるためマイクロコントローラから管端切り離し信号が与えられる。さらに管の後端では、焼入水が管体を内外面から冷却し、そのときの応力差が焼割れを誘起することがあるので応力緩和のための焼割れ防止シ

リンダを装備している。焼入を終えた鋼管は割れ感受性が高いのでドレインステーション上を静かに搬送、焼もどしラインに送られる。

焼もどしライン上で再び接合された鋼管は、円周方向に分布するへん肉による温度むらを低減する目的で、均熱のための最適周波数(180 Hz)および適正な電力密度配分のもとに加熱される。管の実体温度は、加熱コイル間に配設された2色光温度計により非接触的に測定、コンピュータ(MELCON M350-7)でデータ処理される。鋼管の長手方向の加熱温度は、理論値をもとにコンピュータ制御され、焼入および焼もどしラインの両方についてフィードフォワード、フィードバック制御が併用、さらに十分な制御時間と焼もどし定数を与えるために加熱ラインには均熱保持コイルが配置されている。焼もどしを受けた鋼管は空冷中のへん熱による変形防止を考慮して、特殊な回転機構をそなえた待機ローラとクーリングベッド上で放冷されたのちストックスキッドに集積される。

品質管理には最大の考慮がはられ、コンピュータでロギングされるデータは、ライン速度、搬送ローラ径の補正值、加熱温度の目標値とその許容範囲、鋼管1本ごとの最高温度、最低温度、平均温度、標準偏差、電力原単位、電力配分、焼入水量、水圧などで、それらはタイプアウトデータとパネルディスプレイで監視される。

3. 操業実績と成果

本設備は主として高張力油井用鋼管の製造に利用されており、製造可能な品種は油井用ケーシングおよびカプリングではAPI規格N-80、C-75、L-80、C-95、P-110、V-150、当社規格KO-80L(低温用)、KO-90S(耐酸性油井用)、KO-95C(高コラプス強度用)、KO-110H(高温用)など、ラインパイプではAPI規格X-52からX-100である。現在、4直3交代制でフル操業を続けており、製品の熱処理による不合格率は0.1%以下である。操炉の経済性についてみると電力原単位は外径139.7 mm、厚さ7.72 mmの鋼管を900°Cで焼入加熱するとき190 kWh/t、650°Cで焼もどし加熱するとき110 kWh/tとなり、従来ガス加熱炉にくらべてランニングコストが高いといわれた誘導加熱炉は、本設備に導入された管端接合システム、2重周波数および加熱コイル間のふく射損対策などによりいちじるしいコストダウンをはかることができ、さらに酸化スケールの減少による歩止り向上と間けつ操炉時の経済性を考慮すれば大幅に有利になることがたしかめられた。

表1 油井用ケーシング L-80 の機械的性質 (外径 244.5 mm×厚さ 11.99 mm)。

	化 学 成 分 (%)					引 張 試 験			コ ラ プ ス 試 験		CVN 衝 撃 試 験		SSC 試 験 (NACE)	
	C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強 さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	試験片 長さ (mm)	コ ラ プ ス 値 (psi)	試験 条件	吸収エ ネルギ ー (kgm)	試験条件	結果
API 規格	≤0.40	≤0.35	≤1.90	≤0.040	≤0.060	56.2/66.8	≥66.8	≥18.0	≥489	≥4.750	—	—	—	—
実績	0.29	0.26	1.31	0.017	0.008	63.6	74.8	31.1	1143	6710	L 方向 -60°C	5.8	60.0 kgf/mm ² 30 日間	破断 せず

写真1 油井用ケーシング L-80 のオーステナイト結晶粒 (ピクリン酸腐食 (×400×45))。

本設備で熱処理された油井用ケーシング API 規格 L-80 の品質についてその特徴をのべると、熱処理後の矯正が不要なので鋼管に残留応力や冷間ひずみがみとめられない。すなわちコラプス強度と耐硫化物応力腐食割れ

性質の向上をはかることができる (表1)。また短時間加熱による組織の微細化を通じて靱性の改善を可能にし、たとえば寒冷地向けの製品の品質向上に寄与している (写真1)。

4. 特 許 な ど

誘導加熱における管端接合、2重周波数、焼割れ防止、温度制御技術などに関する特許、実用新案および製品の化学成分に関する特許を多数出願中である。なお、本設備は工業技術院より新技術の企業化の認定を受け、日本開発銀行より国産技術振興資金が融資された。また日本アジャックス・マグネサーミック (株) および三菱電機 (株) と多数の共同研究を実施し、成果をあげた。

文 献

- (1) 滝谷敬一郎ほか：鉄と鋼，62 (1976)，S 686。
- (2) K. Takitani *et al.* : *Mechanical Working and Steel Processing*, ISS of AIME, XVI (1978)，166。