HOP (Heat-treatment On-line Process) を 用いた炭化物自在制御技術による 高強度・高靱性厚鋼板の開発

長尾 彰英¹⁾ 大井 健次¹⁾ 三田尾 眞司¹⁾
梶田 恭之²⁾ 杉岡 正敏³⁾

1. はじめに

近年、建設・産業機械等の厚鋼板使用分野では、構造物の大型化を背景として、使用する鋼材の高張力化が指向されると共に、鋼材使用条件の苛酷化に伴い、母材靱性等の材料特性に対する要求は一層厳格化しつつある。また、タンクの分野では、近年の世界経済の回復基調を背景として、鋼板需要が急増しており、鋼板供給量の増大が求められている。

このような建産機およびタンクの分野で使用される高張力鋼は、主に焼入れ焼戻しプロセスによって製造されており、直接焼入れ技術⁽¹⁾やマイクロアロイング技術⁽²⁾等の確立を通じて、優れた性能を有する鋼板が開発されてきた。しかしながら、これらの従来技術では、靱性を確保したまま高強度化を達成することや、需要増に対応して生産能力を向上することには限界があった。

そこで、上記のニーズに対応するための手段として、ばね鋼線⁽³⁾やPC鋼棒⁽⁴⁾等の分野で報告例がある誘導加熱方式による焼戻し処理を世界で初めて厚鋼板に採用し(HOP: Heat-treatment On-line Process)、昇温速度の飛躍的な上昇によるセメンタイトの形状の自在な制御によって高靱性化を達成すると共に、生産性の高能率化を実現した。

2. 開発技術

(1) 焼戻し過程におけるセメンタイトの微細分散化技術

機械構造用鋼等のマルテンサイト組織を主体とする中・高

炭素鋼の分野では、焼入れ後の焼戻し時における昇温速度を大きくすると、セメンタイトの分散が均一微細になることが知られている⁽⁵⁾。しかしながら、マルテンサイトおよびベイナイトの混合組織またはベイナイト組織を主体とする低炭素鋼の分野では、昇温速度がセメンタイトの析出挙動に及ぼす影響に関する研究は少なく⁽⁶⁾、また、急速焼戻しによるセメンタイトの微細分散化メカニズムは明確になっていない。そこで、低合金鋼を用いて、昇温速度および昇温過程がセメンタイトの析出挙動に及ぼす影響を詳細に調べた。

図1にマルテンサイトおよびベイナイトの混合組織を呈する引張強度780 MPa級鋼を用いて、昇温速度がセメンタイトの析出形態に及ぼす影響を調べた結果を示す。これから、昇温速度を雰囲気炉焼戻しよりも大きくすると、約3 K/s程度まで徐々にセメンタイトが微細化していくことが分かる。

また、セメンタイトの析出状態を詳細に観察すると、従来の雰囲気炉焼戻し材は主としてラス界面において比較的粗大

図1 急速焼戻しによるセメンタイトの均一微細分散化効果(⇒: ラス界面, →: ラス内部).
(a) 昇温速度=0.3 K/s; (b) 昇温速度=100 K/s.

* JFE スチール株式会社

1) スチール研究所厚板・形鋼研究部主任研究員

2) 西日本製鉄所鋼材商品技術部主任部員

3) 西日本製鉄所厚板部主任部員

Development of High Strength Steel Plates with Excellent Toughness by Controlling Morphology of Carbides through HOP (Heat-treatment On-line Process); Akihide Nagao, Kenji Oi, Shinji Mitao, Yasuyuki Kajita, Masatoshi Sugioka (JFE Steel Corporation)

2004年10月29日受理

なセメンタイトが生成しているのに対して、急速焼戻し材は、ラス内部でのセメンタイトの生成量が大きく、均一微細分散している。

図2に昇温過程におけるセメンタイトの析出挙動を示す。霧田気炉焼戻しの場合には、主にラス界面にてセメンタイトの生成および成長が生じているのに対して、急速焼戻しの場合には、低温域では主にラス界面にてセメンタイトの生成が認められるが、加熱温度を上昇させるとラス内からのセメンタイトの析出も多く観察されるようになり、このような比較的高温域におけるラス内からの析出がセメンタイトの微細分散化をもたらしている。

図3に昇温速度がセメンタイトの析出過程に及ぼす影響を模式的に示す。昇温過程の低温側でセメンタイトは主にラス界面において優先的に析出を開始する(図2)。昇温速度が小さい場合、ラス界面のセメンタイトがそのまま成長する形で反応が進行するため、セメンタイトはラス界面に沿った粗大な形態となる。一方、昇温速度が大きい場合、ラス界面に生成したセメンタイトが成長する時間的余裕が無いまま、高温に到達する。その際、転位の回復も十分に進行しないため、ラス内の転位を核生成サイトとしてセメンタイトが生成することにより反応が進行する。その結果、昇温速度が大きい場合には、均一微細なセメンタイトが得られるものと考えられる。

このようにセメンタイトの微細分散化には、析出サイトとなる転位をいかに多く残存させ、かつ、ラス界面でのセメンタイトの成長を抑制して、ラス内部の固溶炭素量をいかに多く確保したまま、ラス内部で炭素原子の拡散が可能な温度まで到達させるかがポイントであり、特にラス界面からセメンタイトの析出を開始する温度とラス内部からセメンタイトの析出を開始する両温度域を急速に昇温させることが重要である。

本開発技術では、焼戻し時の昇温速度のみではなく、各種添加元素がセメンタイトの生成・成長過程に及ぼす影響を明

図2 昇温過程におけるセメンタイトの析出挙動(⇔: ラス界面, →: ラス内部)。
(a, b) 昇温速度 = 0.3 K/s (霧田気炉焼戻し相当) ; (c, d) 昇温速度 = 20 K/s ; (a, c) 573 K に昇温後急冷 ; (b, d) 773 K に昇温後急冷。

確にした上で⁽⁷⁾、昇温過程も含めた最適な焼戻しプロセスをHOPによって実現し、均一微細分散セメンタイトを有する高張力厚鋼板の製造を可能とした。

(2) 誘導加熱焼戻しが強度および靱性に及ぼす影響

従来の霧田気炉による焼戻し材の強度の予測には、一般的には式(1)に与えられる焼戻しパラメータ(T.P.)という指標が用いられている⁽⁸⁾。

$$T.P. = T \times (\log t + C) \quad (1)$$

(T : 焼戻し温度(K), t : 保持時間(h), C : 定数)

一方、誘導加熱装置を用いて加熱する場合には、保持時間 t が極めて短くなるため、昇温過程や冷却過程での焼戻し効果を無視できない。このような急速短時間焼戻し材の強度予測を可能とするため、昇温過程および冷却過程を考慮してT.P.を求め⁽⁹⁾、強度との関係を調べた。

図4にその結果を示す。強度に関しては、昇温過程と冷却過程を考慮したT.P.を用いることによって、昇温速度に依存せず一義的に整理できる。

一方、靱性に関しては、T.P.のみでは整理できず、昇温速度依存性が認められ、HOPを用いた本開発技術によるセメンタイトの均一微細分散化によって高靱性が達成できている。

3. 各種焼入れ焼戻し材へのHOPの適用例

HOPはタンクまたは建産機等に用いられる高張力鋼を製

図3 急速焼戻しによるセメンタイトの均一微細分散化メカニズム。

図4 焼戻しパラメータと強度・靱性の関係(引張強さ780 MPa級鋼, H_V : ビッカース硬さ, $vTrs$: 破面遷移温度)。

表1 610 MPa 級開発鋼の化学組成(mass%).

C	Si	Mn	P	S	その他
0.08	0.20	1.4	0.014	0.002	V 等

表2 610 MPa 級開発鋼の母材特性.

板厚	引張特性 (JIS1号, C方向)			シャルピー衝撃特性 (JIS4号, L方向)
(mm)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	vE-40 (J)
25	595	672	41	336

表3 780 MPa 級開発鋼の化学組成(mass%).

C	Si	Mn	P	S	その他
0.14	0.34	1.2	0.012	0.002	V, Ti 等

表4 780 MPa 級開発鋼の母材特性.

板厚	引張特性 (JIS1号, C方向)			シャルピー衝撃特性 (JIS4号, L方向)
(mm)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	vE-40 (J)
25	821	870	30	203

造する際の焼戻し処理に適用している. 材質的には従来鋼よりも高靱化を実現すると共に, 焼戻し処理を圧延および冷却と同一のライン上で連続的に行うことが可能となったため, 生産性が飛躍的に向上した.

HOP の適用例として, 表1~4に引張強さ610 MPa 級鋼および引張強さ780 MPa 級鋼の化学組成および母材特性を, 図5に開発鋼と従来鋼のセメンタイトの析出状態および靱性の比較を示す. 開発鋼であるHOPによる焼戻し材のセメンタイトは, 従来鋼である霧田気炉焼戻し材と比較して, 均一微細であり, 同一焼戻しパラメータにおいて大幅な靱性向上が得られた. すなわち, 本開発鋼の適用により, 構造部材としての安全性がより高まったと言える.

4. 実用化状況および特許

世界で初めて厚鋼板の焼戻し処理に誘導加熱方式を採用し, 焼戻し材の高生産性を達成すると共に, 急速加熱によるセメンタイトの微細分散析出のメカニズムを明らかにした上で, 昇温過程も含めた最適な焼戻しプロセスをHOPによって実現し, 高張力鋼の高靱化を達成した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

図5 開発鋼と従来鋼のセメンタイト析出状態および靱性の比較(引張強さ610 MPa 級鋼, T.P. = 16500).
(a) 従来鋼(霧田気炉焼戻し材), (b) 開発鋼(HOP 焼戻し材).

本技術を適用した厚鋼板は2003年度に実用化されて以来, 10000トン以上の製造実績を有しており, 各焼戻し材への適用を, 今後更に拡大していく予定である.

また, 本技術に関連して, 特開2004-218081等を含め, 国内特許35件を出願済みである.

文 献

- (1) 小指軍夫: 制御圧延・制御冷却, 地人書館, (1997), 47.
- (2) 東田幸四郎: 第104・105回西山記念技術講座, (日本鉄鋼協会編), (1985), 59.
- (3) 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼, **74**, No. 2(1988), 342.
- (4) 末廣邦夫, 山下英治, 池上由洋, 松原安宏: 熱処理, **28**, No. 5(1988), 293.
- (5) 古原 忠, 小林勝也, 牧 正志: CAMP-ISIJ, **15**(2002), 482.
- (6) 津村輝隆, 大谷泰夫: 熱処理, **28**, No. 4(1988), 207.
- (7) 谷野 満: まてりあ, **6**(1968), 118.
- (8) 井上 毅: 第131・132回西山記念技術講座, (日本鉄鋼協会編), (1998), 213.
- (9) 土山聡宏: 熱処理, **42**, No. 3(2002), 163.
- (10) T. Abe, M. Yuga, K. Hayashi, A. Nagao, S. Mitao, Y. Kajita and Y. Matsuda: Papers of Seminar on Construction of Petroleum Storage (in China), (2004), 183.
- (11) A. Fujibayashi, Y. Hino, T. Matsuoka, M. Sugioka and K. Omata: Papers of Seminar on Construction of Petroleum Storage (in China), (2004), 204.