溶接缶向け新 Nb-B 複合添加極低炭素鋼板の開発

多田 雅毅^{*1)} 小島 克己^{*1)} 岩佐 浩樹^{*2)}
梅本 雅資^{*3)} 堀田 英輔^{*4)}

1. はじめに

缶用鋼板には、連続焼鈍ライン(CAL: Continuous Annealing Line)を用いた焼鈍か、バッチ焼鈍炉(BAF: Batch Annealing Furnace)による焼鈍が施されている。2004年の当社西日本製鉄所(福山地区)錫鍍金工場の缶用鋼板のCAL比率は78%⁽¹⁾と低いのが現状であった。BAF材をCAL化すると、(i)製造コストが削減でき、(ii)CAL稼働率が向上し、(iii)リードタイムを平均10日短縮することによる在庫削減効果が期待できる。このため、錫鍍金工場のCAL比率向上を推進している。

缶用鋼板の強度は、JIS G 3303にあるロックウェルスーパーフィシャル硬さ(HR30T)に対応した調質度という指標で示される。一回圧延製品の調質度はT-1からT-5まで規定されていて、数字が大きくなるにしたがって強度が高くなっている。錫鍍金工場で製造されている缶用鋼板の焼鈍方法の内訳は、T-4以上の硬質材ではCAL材がほぼ100%であるのに対して、T-3以下の軟質材ではBAF材が50%以上となっている。この中では、T-2からT-2.5の大型溶接缶(ペール缶等)と、T-3の食油溶接缶が多数を占めている。

本報告では、大型溶接缶の必要特性を満たす、CALで焼鈍された新Nb-B複合添加極低炭素鋼板を世界で初めて開発し、あわせて製造上の課題も解決したので、その概要を紹介する。

2. 大型溶接缶の必要特性

大型溶接缶に必要な特性として、(a)鋼板強度、(b)エキスパンド加工後の周方向缶高さ変化の抑制、(c)非時効性、(d)高溶接強度の4つが挙げられる。

(a) 鋼板強度

鋼板強度がT-2、T-3の目標値であること(HR30TでT-2: 53前後、T-3: 57前後)が必要である。

(b) エキスパンド加工後の周方向缶高さ変化の抑制

図1にエキスパンド加工後の周方向缶高さ変化の抑制の模式図を示す。缶高さ変化の抑制はランクフォード値(r 値)と相関があり、低 r 値材は高 r 値材と比べて、加工前後での缶高さ変化が小さい。これは、 r 値($r = \epsilon w / \epsilon t$, w : 幅方向真ひずみ, ϵt : 厚さ方向真ひずみ)が低下すると、板厚の変化量が増加し、板幅方向(缶の高さ方向に相当)の変化量が減少するためである。缶高さ変化量が大きい場合、硬くて伸びが小さい溶接部が出っ張るために、天地板の巻締め不良の原因となる。

特に、圧延方向(L方向)に対して90°の方向(C方向)の r 値(r_c 値)が重要である。その理由は、缶胴の周方向はC方向である場合が多いためである。よって、エキスパンド加工後の周方向缶高さ変化の抑制のためには r_c 値を現行のBAF材並に留めることが必要である。

(c) 非時効性

エキスパンド加工後に缶胴部でストレッチャーストレインが発生しないことが必要である。ストレッチャーストレインの発生は降伏点伸び(YP-EI)と相関があり、YP-EIの発生を抑制することが必要である。

(d) 高溶接強度

溶接強度は図2に示すテアリング試験で評価を行う。

図1 エキスパンド加工後の周方向缶高さ変化の抑制模式図。

* JFE スチール株式会社

スチール研究所 缶・ラミネート材料研究部:

1)主任研究員 2)部長

3)西日本製鉄所錫鍍金部錫鍍金技術室主任部員

4)東日本製鉄所第1冷延部冷延技術室主任部員

Development of New Nb and B-added Extra Low-carbon Steel Sheets for Pail Cans; Masaki Tada, Katsumi Kojima, Hiroki Iwasa, Masashi Umemoto, Eisuke Hotta (JFE Steel Corporation)

2009年10月30日受理

図2 テアリング試験方法.

テアリング試験とは溶接部を引き裂くことによって溶接部の強度を評価する試験法である。評価が簡易に行えるため、製缶メーカーでは広く用いられている方法である。溶接強度が十分であると判断されるためには、溶接部が途中で切れずに全て引き裂ける必要がある。連続焼鈍されたNb添加極低炭素鋼板(以降、現行CAL材)では溶接部が途中で切れる場合があった。

3. 新Nb-B複合添加極低炭素鋼板の開発

上記の必要特性を満たすために、極低炭素鋼にNb, Bを複合添加した新規連続焼鈍鋼板(以降、開発CAL材)を開発した。以下にその特徴を述べる。

(1) 機械的特性

表1に開発CAL材の機械的特性を現行CAL材、BAF材と比較して示す。開発CAL材はBAF材並みの鋼板強度(調質度)と低 rc 値を有している。これには、Bのドラッグ効果によるフェライト結晶粒の細粒化⁽²⁾⁻⁽⁴⁾が影響していると考えられる。図3に開発CAL材と現行CAL材の組織写真を示す。Bを添加することによって結晶粒の成長が抑制されている様子が観察された。焼鈍時の粒成長が抑えられていることから、圧延安定方位{001}<110>がそのまま残存しやすいために rc 値が低下した⁽⁵⁾と考えられる。

さらに、開発CAL材はNbによって固溶CがNbCとして固定されるためYP-EIは観察されず、非時効性が確保されている。

開発CAL材は大型溶接缶の必要特性の(a)鋼板強度、(b)エキスパンド加工後の周方向缶高さ変化の抑制、(c)非時効性を満たしている。

(2) 溶接性

テアリング試験時の溶接部破断を回避するためには、溶接部および熱影響部の硬度を上昇させることが必要である。図4にNb添加極低炭素鋼板へBを添加したときの母材に対する溶接部硬度上昇量 ΔHv を調査した結果を示す。B含有量を増やすことで、テアリング試験合格となる溶接部強度に到達すると考えられる。B添加で溶接部の硬度が上昇したのは、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態遅延による核発生頻度の増加、およびBの偏析⁽⁴⁾によって結晶粒が微細化し、強度が上昇したためと考えられる。

図5に実機でシーム溶接を実施したサンプルの溶接部硬度分布を示す。開発CAL材は現行CAL材と比較して、BAF材並に溶接部硬度が上昇し、テアリング試験も合格となった。

表1 開発CAL材(調質度T-2)の機械特性値の例.

	板厚 (mm)	YP (MPa)	YP-EI (%)	TS (MPa)	EI (%)	rc 値	HR30T
開発CAL材	0.4	260	0.0	350	40	1.8	51
現行CAL材	0.4	240	0.0	350	41	2.0	51
BAF材	0.4	240	0.0	350	40	1.8	51

(a) 開発CAL材

(b) 現行CAL材

図3 開発材CAL材と現行CAL材の組織写真.

図4 B含有量と溶接部硬度上昇量の関係.

4. 製造上の課題解決のための成分最適化

(1) 再結晶温度上昇の抑制

図6に開発CAL材のB/N原子比と再結晶温度の関係を示す。

B/N原子比が大きくなると再結晶温度が大幅に上昇して未再結晶組織が残存する。再結晶温度が上昇するのはBNとして析出しない固溶Bが粒界偏析することによって、粒界移動を抑制するためと考えられる。B/N原子比を低下させることでCALの操業条件を変更せずに焼鈍することが可能となった。

(2) 熱間延性低下の抑制

図7に開発CAL材で連続铸造時に発生したスラブ上面のコーナー割れ写真を示す。現行CAL材では起こらない熱間延性の低下が観察された。

図8に高温引張試験後の該当材の破面をSEM観察した結果を示す。高温引張試験は高周波誘導方式の熱間加工再現試験機で、平行部直径8mm、平行部長さ15mmの丸棒を用いて真空中で実施した。熱履歴は1420℃で60秒均熱後、 -5°C/s で急冷して、試験温度950℃で60秒保持し引張試験を行った。ひずみ速度は、連続铸造の曲げ曲げ戻しの変形に対応した低ひずみ速度($2 \times 10^{-3}/\text{s}$)で実施した。熱間延性の評価には、破断後の破断面の絞り値(断面減少率)を用いた。

破断面よりMnSを核としたBNの複合析出物が γ 粒界

図5 シーム溶接部硬度分布.

図6 開発 CAL 材の B/N 原子比と再結晶温度の関係.

図7 スラブ上面に発生したスラブ割れ写真.

に、また、粒内に Nb(C, N) の析出物が観察された。これより、MnS + BN が γ 粒界に析出し粒界延性破壊を、Nb(C, N) が γ 粒内に析出し粒を硬化させ粒内脆性破壊する相乗効果で熱間延性が低下したと考えられる。

よって、核となる MnS または BN, Nb(C, N) の析出量を抑えることで熱間延性の低下を抑制することができると考えられる。この中で、S 量低減は脱硫コスト上昇、B 量低減は溶接性低下、Nb 量低減は固溶 C 量が増加し YP-El が大きくなりストレッチャーストレインが発生するため変更することができない。従って、N 量の低減を検討した。

図 9 に N 含有量と絞り値の関係を示す。N 含有量を低減させると断面減少率が増加し、熱間延性は向上するため、スラブ割れを回避することができると考えられる。以上より、図 10 に示す開発 CAL 材の成分設計を行うことで連続鋳造条件を変更することなくスラブ割れを回避することが可能となった。

5. ま と め

大型溶接缶の必要特性を満たし、製造上の課題を解決した CAL 材の新 Nb-B 複合添加極低炭素鋼板を開発した。これにあたり、①溶接性向上、②再結晶温度上昇抑制、③熱間延

図8 ラボ高温引張試験後の破断面の SEM 写真.

図9 N 含有量と絞り値の関係.

図10 開発 CAL 材の成分設計.

性低下抑制のため、B, N 量の最適の成分設計を行った。溶接性を要求される BAF 材が開発 CAL 材に順次切り替えられ、錫鍍金工場の CAL 比率は78%から95%へ飛躍的に向上し、BAF 設備休止も実現可能であると考えられる。さらに開発 CAL 材はアジアをはじめ海外へも供給されている。

6. 特 許

国内では特開2005-307350等が公開され、国外にも出願している。

文 献

- (1) 堀田英輔, 保久光男, 川瀬幸夫: JFE 技報, **12**(2006), 34.
- (2) 伊藤 庸, 中沢正敏, 中里嘉夫, 大橋延夫: 川崎製鉄技報, **5**(1973), 224.
- (3) 苗村 博, 野副 修, 実川正治, 下村隆良, 小野 賢: 鉄と鋼, **67**(1981), S1178.
- (4) 細谷佳弘, 橋本 哲, 西本昭彦: 極低炭素鋼板の金属学, 日本鉄鋼協会, (1993), pp. 179-190.
- (5) 安原英子, 坂田 敬, 古君 修: 鉄と鋼, **85**(1999), 350.