技術資料

鉄鋼新素材, TMCP 鋼の溶接材料*

奥 田 直 樹**

Welding Consumables for Steel Plates Produced by Thermo-Mechanical Control Process*

by Naoki Okuda**

キーワード: TMCP 鋼, ワンパス隅肉溶接, 大入熱溶接, 溶接金属の強度・靱性

1. はじめに

TMCP 鋼 (Thermo-Mechanical Control Process) の適用分野, 母材特性, 溶接割れ感受性について前号まで述べられて来た。本報では, TMCP 鋼用溶接材料の観点から現状について述べることにする。

前号の表 1¹⁾に “TMCP 鋼の特性および施行上の改善点と問題点” が記されているが, この中で溶接材料として直接関係するのは

① 耐溶接冷間割れの向上に基づく

“非低水素系溶接棒の採用”

② 母材の希釈による溶接金属の強度および靱性の低下に基づく。

“自動溶接フラックス, ワイヤ成分中の合金元素の増大”

の 2 点が挙げられる。

2. 1 パスすみ肉溶接用非低水素系溶接棒

前号でも一部その採用について報告されているが, ここでは溶接棒の設計面から述べることにする。

2.1 拡散性水素量の狙い

前号の表 2¹⁾に示されているように, SR 193 研究会の適用基準では 1 パスすみ肉溶接において耐割れ性の面から, 非低水素系の溶接棒であっても拡散性水素量の上限を 25 ml/100g と規制されている。一方図 1²⁾に示すように, 耐ピット性の点から水素量は, 領域 I または領域 III に入る必要がある。領域 I に入るものは, いわゆる

図 1 拡散性水素量とピット発生数

る低水素系と呼ばれる溶接棒であり, 耐ピット性が優れているが領域 III の非低水素系のものに比べアングラットが出易い, ビード形状が凸状となる, 運棒比が小さく能率的でないなどの問題点があり, 使い易さの点では領域 III より劣る傾向がある。したがって領域 III に入り, 前述の適用基準を満たす拡散性水素量 20~25 ml/100g を目標とした TMCP 鋼用非低水素すみ肉溶接棒が開発され, 使用されている。

2.2 溶着金属の強度目標

溶着金属の強度と 1 パスすみ肉溶接の割れについても調査が行なわれており³⁾, 溶着金属の強度が高い方が割れを生じ易いことが示唆されている。一般的に強度が高くなるに従い熱影響部及び溶接金属の割れが生じ易くなる。一方図 2⁴⁾に示すように, すみ肉溶接金属の引張強さは通常溶着金属の強度として用いられる多層溶接金属の引張強さより約 30% 高いことが明らかにされている。これらのことより, 多層盛りで得られる溶着金属の強度は 50 kgf/mm² に出来るだけ近い値が得られる非低水

*原稿受付 昭和 61 年 3 月 7 日

**正 員 (株)神戸製鋼所溶接事業部技術部 Member Technical Dept. Welding Div. Kobe Steel, Ltd.

図2 多層盛溶着金属とすみ肉溶着金属の強度比較

素系すみ肉溶接棒が使用されている。

3. 大入熱溶接材料

TMCP 鋼は、従来鋼に比べ炭素当量 (Ceq.) が低く、熱影響部 (HAZ) の靱性が優れ、低温割れも生じ難いことは本シリーズで既に述べられたとおりである。また、このような TMCP 鋼に Nb, V, Tiなどを微量添加することにより一層靱性の改善や強度の向上が図られ、種々の用途に適した鋼材が開発されていることも既に述べられたとおりである。

入熱量の大きい溶接では、母材からの希釈*により溶接金属の化学成分が変化し、その機械的性質が変化することは良く知られているところである。以下に TMCP 鋼に対し大入熱溶接を行なった時、鋼材中の各種元素が溶接金属の機械的性能に及ぼす影響について述べる。

3.1 鋼材中の各種元素の影響

3.1.1 Ceq. の影響

図 3⁵⁾ は Ceq. の異なる 3 種の鋼板を、従来鋼用の、サブマージアーク溶接材料により 243 kJ/cm で片面溶接した結果である。Ceq.=0.30% では靱性が劣化しており、従来鋼用溶接材料では Ceq. が 0.30% 未満の鋼板には適当でない場合もあることを示唆している。

*希釈率は通常サブマージアーク溶接 (両面) で 35~50%, サブマージアーク溶接 (片面) で 40~55%, エレクトロスラグ及びエレクトロガス溶接で 30~45% である。

図3 溶接金属の性能に及ぼす母材 Ceq. (WES) の影響

3.1.2 Nb, V の影響

図 4⁶⁾ は板厚 25 mm のサブマージ片面溶接による Nb の影響を示したものであり、溶接金属の強度が向上するのに対し靱性は低下している。しかしながら図 5⁶⁾ に示すように Nb が鋼板に含有 (0.020%) していても溶接材料から Ti-B が添加されているとそれらが添加されていない従来タイプの溶接材料と異なり靱性の低下は認められない。また多層溶接では再熱部が脆化し易いこと及び V も Nb とほぼ同様な影響を及ぼすことが報告されている。

3.1.3 O の影響

図 6⁷⁾ に示すように一般的に酸素は、低い方が良好な靱性を示すと言われている。一方図 7⁸⁾ に示すように、酸素のほとんどが Al_2O_3 となるような極低酸素域では、逆に靱性が著しく低下することが報告されている。これは図 8⁹⁾ に示すように、極低酸素域では Ti, B 系介入物が急減し、大半がアルミナ系酸化物によるためと考え

図 4 Si-Mn 系溶接金属の機械的性能に及ぼす Nb の影響

図 6 溶接金属の酸素含有量とシャルピー衝撃特性の関係

供 試 溶 材		バス	ワイヤ径 mm	電 流 A	電 圧 V	速 度 cm/min	入 熱 KJ/cm	開先形状・積層法
ワイヤ	フラックス							
低 Mn 系 (US-43)	従来タイプ 塩基性 焼結型 (PFH-60A)	B	4.8(L) 4.8(T)	1100 1050	34 40	50	95
		F	4.8(L) 4.8(T)	1200 1100	35 42	55	97	
	AC-AC スコット結線 極 間 100 mm							
	Ti-B系塩 基性焼結型 (PFH-55)

図 5 造船用鋼板の両面一層サブマージアーク溶接条件及び溶接継手の衝撃性能

図7 靱性と $[O]-[O]$ as Al_2O_3 との関係

図8 溶接金属の酸素量と Ti, B 系化合物との関係

られている。

3.1.4 N の影響

図9⁵⁾に示すようにNの増加は靱性を劣化するため、極力低くすることが望ましい。しかしながら、母材のボンド及びHAZの靱性向上の目的で鋼材中にNが適量添加されることがある。図10⁵⁾に示すように母材のN

図9 Ti-B系溶接金属の機械的性質に及ぼすNの影響

図10 母材のNと溶接金属のNの関係

量に比例して溶接金属中のNは増加するので、N添加鋼に対し使用される溶接材料はNを固定する元素、たとえばTiなどの添加が行なわれる。

3.2 溶接材料設計上の考え方

前述のように希釈率の大きい大入熱溶接では、鋼材の成分の影響により溶接金属の性能が変化するため、鋼材に適合した溶接材料の開発が要求される。以下に造船用50 kgf/mm²高張力鋼用溶接材料及び低温鋼用溶接材料を例に設計上の考え方を述べる。

3.2.1 造船用 50 kgf/mm² 高張力鋼用溶接材料

各船級協会の溶接材料承認試験の規格値（たとえばNK Grade 3のY.P. ≤ 38 kgf/mm², T.S 50~67 kgf/mm², vE-20 ≤ 3.5 kgf·m）を満す、片面サブマージアーク溶接材料について紹介する。

(1) 溶接金属の化学成分目標の設定

TMCP鋼の化学成分は、その製造条件の違いなどによりメーカー毎に若干ずつ異なっている。しかし一つの溶接材料（ワイヤとフラックスの組合せ）により、できるだけ広範囲の化学成分の鋼板に適用できることを前提とした。したがってNb, Vなどの微量成分が添加されている鋼板に適用しても、良好な靱性が得られるよう、Ti

-B系の溶接材料を採用した、Ti-B系の場合においても靱性を確保するためには、他の焼入れ⁵⁾性元素をコントロールすることが重要である。例えば図11は溶接金属の炭素当量 $Ceq_{WM} = C + 1/6 Mn + 1/24 Si + 1/4 Mo$ と靱性の関係を示すものであるが、当初の規格値を満たすためには靱性面から Ceq_{WM} は0.34~0.40であることが必要である。また強度の点からC-Si-Mn-Mo-Ti-B系の方が適している。これらの結果から Ceq_{WM} の狙いを0.37%にした場合、規格値を満足できる Ceq_{WM} の巾は $\pm 0.03\%$ であり、これはたとえばMnのみが変化すると考えた場合、溶接金属で約 $\pm 0.2\%$ 、母材で希釈率50%とすると $\pm 0.4\%$ となり、前提とした同一溶接材料で広範囲の化学成分の鋼板に適用できるところとなる。

図11 Ti-B系溶接金属の Ceq と性能の関係

(2) 合金成分の添加方法

従来鋼に対し片面サブマージーク溶接などの大入熱溶接では、従来低Mnワイヤが一般的に使用され、合金元素の主要部分をフラックスから添加する方式がとられて来た。しかしTMCP鋼のように低 Ceq の鋼板に対し、 $Ceq_{WM}=0.37\%$ を得るのに低Mnワイヤを用いると、合金元素をフラックス中により多量に添加する必要が生じ、フラックス消費率が溶接条件によって変るサブマージーク溶接では溶接金属の性能が変化し易くなってしまう。そのために合金元素はワイヤから添加する高Mn系のワイヤを採用している。

フラックスは、TiやBの歩留りが安定し易い低酸素系の溶接金属が得られ、あつ耐割れ性の優れた高塩基性ボンドフラックスが適している。またこの場合ワイヤのN量も低くしておくことが必要である。

さらに多層溶接を行なった場合でも溶接金属の化学成分が大きく変動しないことも必要なことであり、図12⁵⁾はその確認結果であるが、溶接条件の変化に対し影響は比較的少ないことが判る。

3.2.2 低温用鋼用溶接材料

TMCP鋼は Ceq が低いためにHAZの脆化が少なく、従来鋼に比べて大巾に大入熱での溶接が可能となった。そのため低温用鋼でも片面サブマージーク溶接による1パス溶接が行なわれることがある。 -60°C での靱性が片面サブマージーク溶接金接に要求される場合について紹介する。

(1) 溶接金属の化学成分目標の設定

前述の 50 kgf/mm^2 高張力鋼と基本的には同じ考えであるが、靱性面では大入熱であることから一層の工夫が必要となる。そこで低温靱性を確保するためには図13⁵⁾に示すように1%Ni-0.2%Mo-Ti-B系が最も優れていることがわかった。

(2) 母材成分の影響調査

前述の溶接材料を使用して Ceq の異なるより厚板の鋼板への適用性を確認し、図14に示すように $vE_{-60} \leq 3.5\text{ kgf}\cdot\text{m}$ の値を満足できる結果を得た。さらにTi, Nb, Cu, Niなどが添加されている鋼板でも靱性が確保できると及び通常使用される12~30mmの板厚に対し、溶接入熱量56~175kJ/cmでも微細なマイクロ組織を有し、良好な低温靱性の溶接金属が得られることを確認した。

4. おわりに

TMCP鋼の特性を生かすためにはそれに合致した最適な溶接材料が要求される。TMCP鋼の特徴を良く知っ

図12 高 Mn ワイヤと塩基性フラックスによる溶接金属の化学成分と溶接条件の関係

図13 各種成分系の溶接金属の靱性

図14 各種 Ceq. (WES)鋼板による溶接金属の靱性

た上でさらに溶接施工及び管理面での負担が少なくなること念頭に、優れた機械的性能、使用性、能率性などを備えた溶接材料が提供されなければならない。TMCP

鋼用溶接材料についてそれらの現状と具体的な例で紹介した。さらに高強度の TMCP 鋼の開発、実用化など新しい研究が進められており、それらの特性が発揮できる溶接材料の開発は今後も継続していくことが必要である。

参 考 文 献

- 1) 小溝：鉄鋼新素材，TMCP 鋼の溶接部割れ感受性，本誌，55-4 (1986)
- 2) 神戸製鋼所：溶接棒だより技術がいと，1977，No. 12，P.9
- 3) 日本造船研究協会第 193 研究部会報告書，1984，3 月
- 4) 日本溶接協会溶接棒部会技術委員会 昭和59年度
- 5) 奥田，和田，田中，信田：TMCP 鋼用大入熱溶接材料，溶接冶金研究委員会「TMCP 鋼の溶接冶金」シンポジウム，昭和60年5月，200-209
- 6) 神戸製鋼所：特殊制御圧延鋼の溶接について，第59回溶接施工委員会資料，昭和56年12月
- 7) 中西，勝本，加藤：TMCP 鋼用高靱性溶接材料について，溶接冶金研究委員会「TMCP 鋼の溶接冶金」シンポジウム，昭和60年5月，P.212
- 8) 堀井，若林，大北，永野，加藤，名村，藤山：低温用 TMCP 鋼の大入熱溶接金属の高靱化，同上，P.195
- 9) 国定，鈴木，渡辺：溶接金属の靱性におよぼす微量合金元素およびガス成分の影響，同上，P.236

溶接に関する国際行事の御案内 (1986以降)

1986年

1. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams June 8-12 Kobe (Japan) Institute of Laser Engineering of Japan
2. Int. Conf. and Exhibition on "Powder Metallurgy" July 7-11 Düsseldorf(FRG) Ausschuss für Pulvermetallurgie
3. IIW Com. XII Discussion Meeting in Nagoya July 10-11 Nagoya (Japan) Japanese Organizing Committee of Discussion Meeting
4. International Symposium "Resistance" Welding & Related Welding Processes- Osaka July 10-12 Osaka (Japan) Japanese Institute of Welding No.3 Commission
5. 39th International Institute of Welding (IIW) July 12-19 Tokyo (Japan) Japanese Organizing Committee
6. Int. Conf. on EB & Laser Beam Welding July 14-15 Tokyo (Japan) Int. Conf. Organizing Committee
7. Japan Int. Welding Show '86 July 16-20 Tokyo (Japan) JWES & Sanpo
8. Pacific Structural Steel Conf. Aug. Auckland (New Zealand) N. Z. Heavy Engineering Research Association (HERA)
9. 11th Int. Congress on Electron Microscopy Aug. 31-Sep. 7 Kyoto (Japan) Japanese Society of Electron Microscopy
10. Metallurgical Plant Sep. 1-5 Birmingham (UK) Int. Symposia & Exhibitions Ltd.
11. Int. Thermal Spraying Conf. 1986 Sep. 7-12 Montreal (Canada) ITSC '86 Committee
12. Int. Conf. & Exhibition on Engineering Ceramics Fall Denver (USA) ASM(American Society for Metals)
13. Int. Conf. on Residual Stresses Origins-Calculations-Measurements-Evaluation Oct. 15-17 Garmisch-Partenkirchen (FRG) Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V
14. 1st Conf. France-Germany on Welding Oct. 2-3 Karlsruhe (FRG) Institut de Soudure
15. Int. Conf. "JOM-3" on Joining of Metals" Dec. 19-22 Helsingor (Denmark) The Danish Organizing Committee

(34頁につづく)