特集

世界に視る溶接・接合科学技術のフロントライン

第Ⅲ部 溶接・接合技術のフロントライン

原子力機器の製造における最新溶接プロセス技術 — デジタル制御サブマージアーク溶接 電源と高塩基・低水素フラックス/ Ni-0.5Mo 系ソリッドワイヤ *

テリーザ・メルフィ **, ベン・シェファー ***

テリーザ・メルフィ

ベン・シェファー

The Latest Trend of Welding Material in USA *

by Teresa Melfi ** and Ben Schaeffer ***

キーワード

原子力機器, サブマージアーク溶接, デジタル制御, 電源, ソリッドワイヤ, フラックス, 低水素, 高塩基, Ni-0.5Mo

1. はじめに

原子力容器および構成部品の製造においては、溶接の品質に対する確固たる信頼性が求められる。一方、企業としての製造においては、コストおよび生産スケジュールの管理が重要視される。溶接生産性の改善は、AC 波形制御による高度技術を駆使した溶接電源を使用することによって可能である。溶接生産性を改善するために、溶着速度を上げ各パスのビードを厚くする（単位長さ当たりの溶着量を増やす）ことがよく行われる。そのためには、厚肉の溶接ビードが十分な機械的性能を有するミクロ組織となりかつ耐水素遅れ割れ性のある溶接金属が得られる溶接材料を選ぶ必要がある。

2. 溶接電源

図1に示すように、AC 波形制御を使用することによって、ワイヤ溶着速度および単位長さ当たりの溶着量を著しく高め、その結果、同じ平均入熱で溶接生産性を改善することができる。

3. 溶接材料

溶接のままの溶接金属は、後続パスの溶接熱の影響を

受けて組織が微細化し（図2参照）、多くの合金系で靱性が向上する。溶着速度を上げて溶接ビードを厚くした場合、溶接のまま（組織が微細化されていない）の溶接金属量が多くなり、機械的性能に影響することがある。Mn-Si 及び Mn-Si-Ni 合金系では溶接のままの微細化されていない溶接金属の組織は粗粒で、靱性が低い。この

図1 デジタル制御サブマージアーク溶接電源で AC 波形制御した時の電流とワイヤ送給速度の関係
(2.4 mmφソリッドワイヤ, コンタクトチップ・母材間距離: 25.4 mm)

図2 サブマージアーク溶接部の溶接金属組織の微細化

*原稿受付 平成22年10月22日
** リンカーンエレクトリック社 サブマージ溶接材料研究開発マネジャー
米国オハイオ州クリーブランド市
*** リンカーンエレクトリック社 溶接材料研究開発設計エンジニア
米国オハイオ州クリーブランド市

	As-Welded	3 hr PWHT		25 hr PWHT	
Test Temperature (°C)	22 °C	22 °C	360 °C	22 °C	360 °C
Yield Strength (MPa)	652	619	505	589	481
Tensile Strength (MPa)	723	690	619	663	593
% Elongation	27	26	24	27	25

図3 高塩基・低水素フラックスと Ni-0.5Mo 系ソリッドワイヤの組合せおよび ASTM A204 Gr. A 鋼母材を使用した多層溶接金属の強度 (PWHT 温度: 607°C)

図4 高塩基・低水素フラックスと Ni-0.5Mo 系ソリッドワイヤの組合せおよび ASTM A204 Gr. A 鋼母材を使用した多層溶接金属の衝撃靱性

場合には、モリブデンを添加することによって、溶接のままの溶接金属組織の微細化と靱性の改善が促進される。たとえば Ni-0.5Mo 系ソリッドワイヤを使用することによって、厚肉溶接ビードに適した低炭素-Mn-Si-Ni-Mo 系 (~1%Ni, 0.5%Mo) 溶接金属を得ることができる。また、高塩基・低水素フラックス (ボニスゼウスキー塩基度指数: 3 超え) は溶接金属中の窒素と酸素の含有量を低下させるので、原子力分野などの靱性要求が厳しい溶接に適している。これら高塩基・低水素フラックスと Ni-0.5Mo 系ソリッドワイヤを組み合わせることによって、原子力仕様に適した性能の溶接金属を得ることができる (図3 及び図4 参照)。

4. 溶接部の特徴

近年の原子力機器は、高強度鋼および厚肉の剛性に富んだ部材を使用して設計されている。材料特性および高い負荷応力と溶接残留応力のために、水素割れが原子力機器の溶接で考慮すべき重要な課題となることがある。

欠陥の発生頻度、重大性および検出難易度を考慮して、破壊モードのランク付けを行い、リスク等級が決定される。入念に施工するファブリケーターは、水素割れ発生頻度は低いと考えるかもしれない。しかし、原子力容器あるいは構成部品の溶接部の割れは潜在的に危険な欠陥である。水素割れの検出における難しさが破壊リスクを増大させる。水素割れは、溶接直後あるいは数日後に発生する可能性がある。図5に示すように、多層溶接において層を重ねるにつれて水素量は増加するが、溶接金属の水素量 (溶着金属 100g 当たりの水素量) は多層溶接継手の初層に最も集中している。このような場合には、水素割れは溶接継手の深い部分で発生する可能性が

図5 多層溶接部における各層の拡散性水素量

図6 高強度の多層溶接部の水素割れの例

図7 単層溶接部の拡散性水素量の時間経過による減少

あり、それを検出するためには高度の非破壊検査技術が必要とする。高強度溶接部の水素割れ断面 (図6a) は、そのような割れが溶接直後に起こる可能性を示している。この割れは、多層溶接部の初層で発生していた。割れ破面 (図6b) を観察した結果、初層域に熱変色が認められたので、溶接直後の割れであると判断した。水素割れの重大性と検出性が、原子力溶接部の高いリスクにつながる。

図7に示すように、拡散性水素量を低減するには、パス間の (特にパス間温度での) 保持時間を長くすることが有効である。予熱・パス間温度を上げれば、水素割れのリスクは軽減されるが、強度は下がる。水素の拡散を促進するその他の方法 (パス間保持時間の調整と加熱脱水素) は、溶接生産性を低下させる。このような方法を避ける場合、溶接材料の選定とその取り扱いが特に重要になる。

全てのフラックス (ボンド型および溶融型) には、含

図8 各種フラックスの水素量レベル

有水分量と拡散性水素量との間に固有の相関関係がある（図8参照）。フラックス使用前のベイキングまたは乾燥に関係なく、水分量が低いレベルであっても、フラックスが特定されれば、この相関関係によってフラックスの最低到達可能水素量が決まる。前処理が不要なフラックスを使用できればコストは下がり、煩雑さも少なくな

る。したがって水分量の拡散性水素量に及ぼす影響が少なく、拡散性水素量も低い溶接フラックスは、原子力用途に最適である。サブマージアーク溶接用フラックスのISO規格では、拡散性水素量の分類でH5（溶着金属100g当たり5mLの拡散性水素量）を最低としているので、それより低い水素レベルでフラックスを識別することは困難である。SFA規格では、フラックスとワイヤの組合せをH4またはH2で分類することができる。H2レベルのフラックスは、包装が適切であれば、使用前のベイキングまたは前処理をしないで使用できる可能性がある。

5. 結 論

高塩基・低水素フラックス、Ni-0.5Mo系ソリッドワイヤ、およびAC波形制御のデジタル制御サブマージアーク溶接電源を使用すれば、高い生産性、優れた機械的性能、および原子力用途としてリスクの低い溶接を行うことができる。

（訳：(有)テクノインター 山本茂昭）