Ⅱ 溶接・接合及び関連機器

1. アーク溶接

Arc Welding

恵 良 哲 生*

by ERA Tetsuo*

キーワード：アーク溶接，デジタルインバータ，低スパッタ，安定化，高速化，溶接品質

1.1 市場動向

アーク溶接機の生産台数と金額の推移を図1に示す。生産台数の推移によると，2002年が89,790台と景気の底であったが，2003年に90,987台（前年比101%）と回復基調に転じ，2004年は108,398台（前年比119%），2005年には124,071台（前年比114%）と着実に生産台数を伸ばしている。そして2006年は124,516台（前年比100%）と横ばいであったが，2007年は145,107台（前年比116%）と一時期の停滞を脱して好調機が続いている。しかし2008年に128,112台（前年比91%）と再び下降し始め，2009年には50,090台（前年比39%）と一気に半数以下へと急減している。

この減少は，2008年9月にリーマン・ブラザーズが破綻した事が世界的な金融危機を招き，これまで堅調であった自動車産業までもがそのあおりを受け，各業界ともに大幅な減産を強いられたことを示している。

このような状況下において，溶接施工現場における徹底したコストダウンは最優先課題であり，ランニングコストの低減策の一つである溶接の高速化に対する取り組みが行われてきている。また，近年では様々な業界においてECOをテーマに地球環境問題への取り組みが進んでおり，溶接業界においても高効率化・高溶着化による消費電力削減が課題の一つになっている。更に，地球環

境問題の一環として，輸送機器を中心に各種構造物や部品の軽量化を図るため，使用材料のアルミニウム化やステンレス・鉄鋼材料の薄板化の取り組みが行われている。特に自動車等の業界では，車体・フレームや各種部品へのアルミニウム材や高張力鋼板の適用及び，ステンレス鋼が多用されている排気系部品等の薄板化が急速に進められてきている。これらに加えて，更なる溶接品質の向上もやはり求められており，溶接の安定化やスパッタ低減なども課題の一つである。本稿では，以上の課題を克服するために開発された最近の技術動向についてまとめる。

1.2 MAG・MIG溶接法

MAG・MIG溶接法は高能率溶接法の代表であり，溶接品質の向上，安定化及び低スパッタ化を目的とした報告が数多くある。溶接電源の制御方式はデジタルインバータ制御が主流となっており，今日では，デジタル演算装置の高性能化により，2次側負荷変動などの外乱に対しても複雑な電流波形を再現性良く出力することが可能になり，溶接品質が飛躍的に向上している。初めに，電流波形制御の観点にたった新技術について紹介する。

軟鋼のパルスMAG溶接では，工場内のシールドガス配管設備に依存して溶接中にCO₂濃度が変動することがある。従来のパルス電流波形では，CO₂濃度が増加すると溶滴離脱が不安定になり，スパッタが増加し易い。そこで，CO₂濃度が変化しても安定した溶滴離脱を実現する図2に示すような新パルス電流波形が提案されている。新パルス電流波形では，CO₂濃度最大30%において

図1 過去10年間のアーク溶接機生産台数・金額

図2 軟鋼パルスMAG溶接の新パルス電流波形

原稿受付 平成22年4月14日

*正 員 (株)ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

も溶滴離脱に必要なワイヤ先端部の溶滴のくびれを形成させるため、パルス初期の電流値を高い値としている。更に、初期に生成した溶滴が離脱できる電磁ピンチ力を維持しつつ、溶滴が過度に大きくならない電流値までパルス電流値を下げる2段階パルス電流波形が採用しているのが特徴である。この結果、溶滴離脱時に生じるワイヤ最先端部の残留液滴の飛散による微小スパッタの発生を抑制しつつ、確実な溶滴移行を実現している。図3に、CO₂濃度を変化させた時のスパッタ発生量を、従来パルス電流波形と新パルス電流波形で比較した結果を示す。新パルス電流波形の場合、最大75%の抑制効果を得ている。同様に、ステンレス鋼及びアルミニウム合金のパルスMIG溶接においても、各々に最適な新パルス電流波形を採用することでスパッタの発生を低減し、高品質溶接を実現している²⁾。また、ワイヤ送給制御もデジタル化されたことで電流波形制御と精密に同期させることが可能になり、ワイヤ送給同期制御式低周波重畳パルスMAG/MIG溶接法が同時に開発されている。本溶接法では、出力電流・電圧の低周波切り替えに同期してワイヤ送給速度を切り替える手法を採用しており、亜鉛メッキ鋼板の溶接におけるブローホールの低減効果が報告されている³⁾。

電流波形制御によって低スパッタ化を実現させるその他の溶接法として、Controlled Bridge Transfer法（以下、CBT法）^{4, 5)}やcoldArc法⁶⁾が提案されている。とも

に、短絡移行時においてアーク再点弧時に発生するスパッタを抑制しており、それぞれ独自の手法によって低入熱化も実現している。CBT法がアーク再点弧以前に短絡電流を減少させるのに対して、coldArc法ではアーク再点弧直後から素早くアーク電流を減少させることでスパッタ低減を図っていることが最も大きな違いである。

その他の取り組みとして、新しい溶接材料の開発や、溶接プロセスを工夫することで高品質溶接を実現する手法について紹介する。極低スパッタCO₂アーク溶接法「J-STAR WELDING」⁷⁾は、適量のREMを添加したワイヤを用いて電極マイナス（EN：Electrode Negative）で溶接することで、図4に示すような中高電流域における大幅なスパッタ低減を実現している。「MX-MIG」プロセス⁸⁾は、各種構造物や部品の軽量化やコストダウンを目的として開発された手法であり、専用のメタル系フラックス入りワイヤを用いる純ArパルスMIG溶接法である。本手法は、薄鋼板、特にハイテン鋼板に適用する事で継ぎ手疲労強度を高める事ができ、その改善機構は、応力集中の緩和を主体に残留応力制御を加えた初のハイブリッド型手法である。本手法の適用により、鋼板のハイテン化と板厚減あるいは補強部材の削減につながり、軽量化の一つの手段として注目される。

一方、コンタクトチップ・母材間距離を長くすることで抵抗発熱を増加させ、単位溶着量あたりの溶接電流を下げることでスパッタ低減化を図るHEAT工法⁹⁾も報告されている。

1.3 TIG・プラズマ溶接法

TIG溶接法は溶接電源の性能が溶接性能や品質のほとんどを決めてしまうこともあり、電力事情の悪い諸外国を除けば、市場に出回っている最近の溶接電源の大勢がインバータ制御式、あるいはデジタルインバータ制御式溶接電源であり、国内では90%以上を占めている。一般的に、TIG溶接法は高品質な溶接部を得ることができるが、MAG・MIG溶接法に比べて単位時間当たりの溶着量が少なく、能率が劣る。最近では、TIG溶接の高能率化をテーマにハイブリッド化や施工方法を工夫した例が多数報告されている。

まず、2電極化やハイブリッド化の観点から高能率化を図った溶接法を紹介する。高レベル放射性廃棄物の地層処分施設のような完全遠隔操作による自動溶接を視野に入れた特殊環境下で、極厚板・狭開先に対して安定した施工と品質を確保することを目的としてSEDAR-TIG（Super Energetic Dual Arc-TIG）溶接法が開発されている。SEDAR-TIG溶接法の機器構成を図5に示す。この溶接法は1本の溶接トーチに2本の電極を組み込み、それぞれの電極に溶接電源を接続することで、アーク力を抑えながら大電流化及び高溶着速度化を可能にしており、開先深さ190mmを安定して溶接できることが報告されている¹⁰⁾。他にも、ワイヤ溶融と母材溶融とを基本的に独立に制御できるホットワイヤシステムの特徴を活かし、パルス通電加熱ホットワイヤシステムを用いた超高速TIG溶接法の適用により、高品質かつ高能率な隅肉継手を実現できることが報告されている^{11, 12)}。

続いて、施工方法の工夫による高能率化の例について紹介する。ボイラ過熱器管などの蛇管パネルの製作では、予め曲げられた小口径チューブを突合せて全姿勢TIG裏波溶接を行う工程がある。多関節型アーク溶接ロボットを搭載した全姿勢TIG溶接ロボットシステムが開

図3 スパッタ発生量の比較

図4 溶接電流とスパッタ発生量の関係

発されており、小口径チューブの固定、開先合せ及び全姿勢 TIG 裏波溶接等の溶接施工を全て自動化し、無監視化を実現している¹³⁾。また、前述した SEDAR-TIG を元に開発された高能率 TIG 溶接法を用いて、ルート面に突起を設けた開先形状を考案し、はめ込み溶接においても仮付け溶接や溶接線の分割・対称溶接なしで連続溶接が可能となること、更に 200℃ の予熱を実施することでルート部を起点とする低温割れが防止できることが報告されている¹⁴⁾。

最後に、磁場を利用した高能率化について紹介する。小型磁石により実現したカスプ型磁場を用いて、アーク形状を楕円形状に制御する方法が報告されている。図 6 にその原理図を示す。この磁氣的制御方法により溶接線方向にアークを集中させて溶け込み深さを大きくすることや、溶滴移行が不安定となりやすい大電流領域での安定化などが期待されている¹⁵⁾。

一方、TIG アークを特殊な拘束ノズルで緊縮させ、高いエネルギー密度のプラズマアーク熱源によって溶接するプラズマ溶接法は、TIG 溶接に比べてビード幅が狭く、深い溶け込み溶接が可能であり、高速溶接にも適している。新プラズマ溶接法として、電力関係のアルミ容器類、LNG 貯蔵設備などの中・厚板の溶接を対象に、開先加工を必要としない 1 パス溶接による高能率化について報告されている¹⁶⁾。板厚 15 mm の 1 パスキーホール溶接が可能であり、TIG、MIG 溶接法による複数パス溶接によって発生する角変形と比較すると、新プラズマ溶接法の角変形が 10% 以下に抑制されることも示されている。

図5 SEDAR-TIG の機器構成

図6 カスプ型磁場によるアークの楕円形状化の原理

1.4 新技術

ここでは、TIG 溶接法以外を対象に、ハイブリッド化やコールドあるいはホットワイヤの添加による高能率化について紹介する。

低スパッタ化を実現するとともに、パルス MAG 溶接法よりも高速・高溶着な溶接を可能にするコールドタンドム GMA 溶接法が報告されている¹⁷⁾。図 7 に開発システムの構成を示す。先行の溶接ワイヤでパルスアークを発生させ、後行の溶接ワイヤは通電せずに溶融池へ挿入することで、溶着量を増やすと同時に溶融池の凝固を速め、高速溶接時のアンダーカットやハンピングビードを抑制する効果を得ている。またフィラワイヤの挿入位置は溶融池の後方部としているため、アークの熱量がフィラワイヤの溶融に奪われることがなく、フィラワイヤ挿入による溶込み形状への影響はほとんど無い。更に先行溶接ワイヤのアークは、従来パルス MAG 溶接法と同様に、短絡の無い完全なスプレーアーク状態での溶接を行うことができるため、スパッタの発生も極めて少ないことも特徴である。

ハイブリッド溶接としては、プラズマ GMA 溶接法が提案されている。GMA 電極とプラズマ電極を同軸上に配置し、独自の電流波形制御の採用により、低ヒューム・低スパッタのクリーンな溶接を実現している。アルミニウム材の溶接に適用した場合、硬質ワイヤを用いてもクリーンでかつスマットレスな溶接を実現しており、また、プラズマアークの効果による溶接ビード形状の改善は、高張力鋼板の溶接への適用が期待される¹⁸⁾。

アーク以外の溶接法とのハイブリッド化による高能率化としては、ホローカソード TIG - YAG レーザ同軸ハイブリッド溶接法が報告されている。高ビーム品質で低出力の YAG レーザとホローカソード TIG 溶接を同軸化したハイブリッド溶接法であり、単なる補完効果を得るのではなく、相乗効果による深溶け込み化を実現している¹⁹⁾。

他の新技術として、磁場を利用した溶融池磁気制御アーク溶接法が開発されており、電磁力によるビード形状制御や凝固組織微細化効果について報告されている²⁰⁾。更に対向式磁極を用いることで、母材板厚方向の電磁力が溶融池内に発生することから、溶融金属の流動方向と溶込みを制御できる可能性が報告されている²¹⁾。

1.5 その他

サブマージアーク溶接法は、フラックスを使用する事から溶接姿勢が下向きや横向きに限定されることが知ら

図7 コールドタンデム GMA 溶接システムの構成

れている。地上式 LNG タンクの 9%Ni 鋼製内槽の縦継ぎ手にサブマージアーク溶接法を適用すべく、立向き姿勢サブマージアーク溶接法が開発されている^{22, 23)}。この立向き姿勢サブマージアーク溶接法は、従来のサブマージアーク溶接と比較し、溶着効率の向上によるアーク時間の短縮、クレータのグラインダ処理の不要化やスラグ剥離性の向上による溶接時間の短縮を実現している。更には、サブマージアーク溶接法においてデジタル制御式溶接電源を用いて電流波形の位相制御を行い、良好なスラグ剥離性を兼ね備えた 1 層 1 パス施工法についても報告されている²⁴⁾。

文 献

1) 経済産業省生産動態統計 2) 伊佐ら：ロボット・自動機専用パルス GMA 溶接電源の開発，溶接アーク物理研究委員会資料，ア

物-09-1388, (2009) 3) 高橋：パルスマグ/ミグ溶接電源の自動機・ロボットへの専用化，溶接技術，vol. 57 (2009) No.4, pp.87-92 4) 恵良ら：Controlled Bridge Transfer (CBT 法) の適用による薄鋼板の溶接，溶接学会論文集，Vol.27 (2009) No.3 p.189-194 5) 恵良ら：Controlled Bridge Transfer (CBT 法) によるステンレス鋼ミグ溶接のスパッタ低減，溶接学会論文集，Vol.27 (2009) No.3 pp.195-201 6) IIW Doc No. XII-1982-09 (2009), S F Goecke: Self Optimizing Control and Material Transfer in the Controlled Short-Arc Process COLDARC, p.222 7) 片岡ら：極低スパッタ CO₂ アーク溶接技術の開発，溶接技術，vol. 58 (2010) No.2, p.58-63 8) 鈴木ら：薄鋼板用疲労強度向上純 Ar・FCW プロセス「MX-MIG」，溶接技術，Vol.58 (2010) No.3, p.74-79 9) 藤原：最近のスパッタ低減溶接プロセス，溶接技術，vol. 57 No.1, p.86-92 10) 小林ら：極厚板高能率 TIG 溶接法の開発，溶接学会全国大会講演概要，(2009) No.84 p.100-101 11) 高柳ら：パルス通電加熱ホットワイヤ TIG 溶接法を用いた高能率すみ肉溶接技術の検討，溶接学会全国大会講演概要，(2009) No.85 p.296-297 12) 篠崎ら：パルス通電加熱ホットワイヤを用いた高能率 TIG 溶接技術の開発，第 208 回溶接法研究委員会 (2009) SW-3298-09 13) 池澤ら：ボイラチューブ全姿勢 TIG 溶接ロボットシステムの開発，溶接学会全国大会講演概要 (2008) No.83 p.210-213 14) 小林ら：極厚板高能率 TIG 溶接法の開発，溶接学会全国大会講演概要，(2009) No.85 p.292-293 15) 野村ら：溶接アークの磁氣的制御に関する研究 第 3 報，溶接学会全国大会講演概要，(2008) No.83 p.348-349 16) 田村ら：新プラズマ溶接技術の研究開発 (第 3 報)，溶接学会全国大会講演概要，(2009) No.85 p.302-303 17) 塩崎ら：コールドタンデム GMA 溶接システムの開発，溶接技術，vol. 57 (2009) vol. 5, p.58-63 18) 小野ら：プラズマ GMA 溶接システムの開発，軽金属溶接 (2008) vol.46, No.11 p.501-505 19) 土居：ホローカソード TIG-YAG レーザ同軸ハイブリッド溶接プロセスの検討，第 171 回溶接アーク物理研究委員会，ア物-08-1370, 第 203 回溶接法研究委員会，No.SW-3223-08 20) 棚原ら：電磁力を用いた溶け込み制御に関する研究 (第 1 法)，溶接学会全国大会講演概要 (2009) No.85 p.290-291 21) 棚原ら：溶融池磁氣制御アーク溶接法の適用拡大に関する研究，溶接法研究委員会，SW-3306-10 22) 飯島ら：立向き姿勢サブマージアーク溶接法の開発，溶接学会全国大会講演概要，第 82 集 (2008)，pp.46-47 23) 坂元ら：立向き姿勢サブマージアーク溶接法の開発，第 208 回溶接法研究委員会 No.SW-3293-09 24) 安藤ら：電流波形制御によるタンデム SAW 施工法の検討，溶接学会全国大会講演概要，第 86 集 (2010)，pp.146-147