第Ⅱ部 産業界の最近の動向と溶接工学

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，高効率，デジタルインバータ，スパッタ，ヒューム，複合化

1.1 市場動向

アーク溶接機の生産台数と金額の推移¹⁾を図1に示す。生産台数の推移は、図示されていない2001年以前が減少傾向にあり、2002年が89,790台と景気の底であった。2004年から一時期の停滞を脱して好調期が続き、2007年には145,107台に達した。しかし、2008年9月のリーマン・ショックによる世界的な金融危機を契機に、各業界ともに大幅な減産を強いられた結果、2009年には45,869台（前年比36%）と一気に急減した。その後2010年から回復基調を示し、2011年は87,749（前年比142%）であり、2002年の景気の底と同程度まで回復している。

溶接作業の自動化に目を向けると、全業種において自動化が進められているが、建築・橋梁及び産業機械・電気機械の業種では自動化率が増加すると考えられている。溶接ロボットで使用する溶接材料に求められる品質は「低スパッタ」や「ワイヤ送給性」である²⁾。特に後者は、高効率溶接を実現するため、安定した高速送給性能が求められていると考えられる。また、近年では様々な業界において地球環境問題への取り組みが進んでおり、特に自動車業界にお

いて2010年は電気自動車元年と言われ、素材をはじめ、様々な技術変革も進められている。

以上のような背景のもと、高効率化を支える低スパッタ技術を中心に、アーク溶接の応用化技術に関する最近の動向について紹介する。

1.2 GMA 溶接法

高効率な溶接法の代表であるガスメタルアーク溶接法（以下、GMA溶接法）の性能向上は目覚ましく、溶接電源のデジタルインバータ制御化等の制御技術の進歩がGMA溶接法の技術革新を支えている。一方、これら技術のほとんどは1960-70年代に研究レベルで既に実現・提案されたものが多いという見方もある³⁾。GMA溶接法は、既に低電流域での低スパッタ化が進んでおり、高効率化を更に進めるためにも、中高電流域での低スパッタ化が課題である。

A) 炭酸ガスアーク溶接法

ランニングコスト低減の観点から、シールドガスに炭酸ガスを用いる溶接法が数多くの業種で採用されており、炭酸ガスアーク溶接法においては低ヒューム化も課題である。最初に、マグ・ミグ溶接法にも適用できるが、炭酸ガスアーク溶接における低スパッタ化を特徴としている溶接法について紹介する。

溶接専用LSI「Welbee (Welding best electronic engine)」が開発され⁴⁾、その高速演算機能を用いてグローバル移行となる電流域でのスパッタ低減を可能にする、Controlled Bridge Transfer - Expanded 法（以下、CBT-EX法）が開発されている^{5,6)}。炭酸ガスアーク溶接においては、アーク反力を防止しつつ安定した溶滴を形成するため、アーク期間の初期に三角波を重畳しているのが特徴である。これにより溶滴移行が安定化し、アーク再点弧時のスパッタ抑制効果を高めている。また、短絡を積極的に活用することで溶滴過熱によるスパッタ発生も抑制可能である。以上の効果により、短いアーク長の維持が必要な高速溶接において、CBT-EX法は低スパッタ化を実現している。アクティブワイヤ溶接法は、溶接電源融合型アーク溶接ロボット「TAWERS」に搭載されている溶接法⁷⁾を更に進化させたものであり、スパッタ発生要因として微小短絡とアーク反力に着目し、溶接波形制御に加えてワイヤ送給制御を組み合わせていることが特徴である。短絡期間はワイヤ送給を正送から逆送へ減速し、アーク期間は逆送から正送するこ

図1 過去10年間のアーク溶接機生産台数・金額

原稿受付 平成24年4月16日

*正 員 株式会社ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

とで、短絡周期をより安定化させてアークを安定化し、アーク反力や微小短絡によるスパッタの発生を抑制している⁸⁾。

次に、炭酸ガスアーク溶接専用の溶接法について紹介する。REGARC™ プロセス⁹⁾とこのプロセスを搭載した新しい鉄骨溶接システムが開発されている。建築・橋梁における自動化率が高くなってきているが、炭酸ガスアーク溶接法が用いられており、スパッタの削減が求められている。REGARC™ は、炭酸ガスアーク溶接において 1) 低スパッタな溶接、2) 高溶着で低入熱な溶接、3) 良好な溶け込み形状、4) 低ヒュームな溶接を実現するプロセスであるのが特徴である。REGARC™ を搭載した溶接ロボットシステムにより、従来システムと比べて、1) 生産性の向上、2) 溶接品質の向上、3) 後工程の軽減、4) 省エネルギーな溶接といった効果を発揮する¹⁰⁾。次に、スプレー移行型 CO₂ アーク溶接法¹¹⁾を、造船における適用事例を紹介する。JIS Z 3312 における YGW18 に該当する微量の Mo, B 及び適量の REM を添加したワイヤが開発され、船級を取得している。長尺継ぎ手となるインナーボトムとアッパーデッキのシーム及びバット継ぎ手への実船適用例が紹介されており、スパッタの粒子が小さく、発生量も極めて少ないことが確認されている。狭開先化と高電流域での施工が可能になったことで、施工時間がおよそ 3 分の 2 になったことが報告されている¹²⁾。

最後に、ホットワイヤ（通電加熱フィラーワイヤ）を炭酸ガスアーク溶接法に組み合わせた溶接法¹³⁻¹⁵⁾について紹介する。最近の報告によると、4.0~5.5 kJ/mm の入熱条件下で、 $\geq 620 \text{ N/mm}^2$ の引張強さ、 $\geq 490 \text{ N/mm}^2$ の 0.2% 耐力が得られる。一方、ホットワイヤを用いることで吸収エネルギーが通常の炭酸ガスアーク溶接法より低下するが、一般的な要求値である $E_0 \geq 70 \text{ J}$ を満足するという知見が得られている¹⁵⁾。

B) マグ・ミグ溶接法

まず、パルスマグ溶接法に関する報告例から紹介する。鋼製橋梁部材である鋼床版 U リブの溶接において安定した溶込み量を確保するため、最適パルス波形が検討されている。特にベース電流を高くすることで、溶込み量がより深くなることが報告されている¹⁶⁾。他に、中高炭素鋼のパルスマグ溶接で高温割れが発生する条件において、先行ワイヤでパルスアークを発生させ、後行ワイヤを通电せずに溶融池へ挿入するコールドタンデム GMA 溶接法を適用することで、高温割れ防止効果があることが報告されている¹⁷⁾。

ミグ溶接法については、まず、アルミニウム合金の溶接の高効率化例について紹介する。高品質なアルミニウム合金の溶接には、ティグ溶接が一般的に用いられるが、生産性が低いというのが課題である。そこで、溶接ロボットと溶接電源の制御を協調させ、交流パルスミグ溶接法を適用したサイクルパルス溶接法が開発されている¹⁸⁾。本溶接法は、パルスミグ化による高効率化と、意匠性の良いウロコビードが同時に得られるのが特徴である。

高品質溶接を行う観点からは、鋼やステンレスの溶接においても純 Ar シールドガスを用いることが望ましい。一方、Ar リッチのシールドガス雰囲気では、陰極点の不規則

図2 二段給電式ミグ溶接法のシステム構成

な挙動及びワイヤ端液柱のふらつきにより、アークが不安定になり易い。この課題に対して、溶接材料を開発してパルス溶接法と組み合わせたり、電極となるワイヤへの給電方法に工夫したりすることで、アークを安定化させる手法が開発されている。

薄鋼板、特に高張力鋼板の溶接における継ぎ手疲労強度を高めるため、応力集中の緩和を主体に残留応力制御を目的とした専用のメタル系フラックス入りワイヤを開発し、純 Ar シールドのパルスミグ溶接法に適用する「MX-MIG」プロセスが開発されている¹⁹⁾。肉盛溶接においても、希釈率とヒューム低減の観点から、純 Ar シールドガスの使用が望ましい。そこで、新開発フラックス入りワイヤ（以下、FCW）を純 Ar のパルスミグ溶接に適用することで、スパッタとヒュームの低減と低希釈率化を実現する純 Ar-MIG 溶接法²⁰⁾が開発されている。更に、この溶接法を高Cの硬化肉盛溶接材料に適用すると、大幅なスパッタとヒュームの低減が可能である²¹⁾。同じく肉盛溶接を対象とした一例として、デジタルミグ溶接電源を採用した自動肉盛溶接装置を紹介する。本開発装置をごみ焼却場のボイラ水管の肉盛溶接に適用することで、ステンレス鋼、Ni 基合金を低希釈で施工でき、溶射、耐火材ライニングに比較して、耐食性・耐久性の向上が期待できる²²⁾。

最後に、二段給電式ミグ溶接法について紹介する。本溶接法のシステム構成は図2に示すとおりであり、2台の溶接電源を用いて第一給電点から直流パルス電流を通电し、第二給電点から直流定電流を通电する手法である。二段給電式溶接法の場合、従来のミグ溶接法と比較して温度上昇により溶融池の表面張力が低下していると考えられ、溶け込みが深く、ぬれ性が格段に向上するのが特徴である²³⁾。

1.3 GTA、プラズマ溶接法

ティグ溶接法は高品質溶接の代表例であるが、マグ・ミグ溶接法と比べて単位時間当たりの溶着量が少なく、高効率化が求められている。ティグ溶接法の高効率化例として、パルス通電加熱ホットワイヤティグ溶接法を紹介する。低入熱性を用いて WC 粒子を含んだ材料の硬化肉盛溶接への適用が検討されており、従来法ではビード上部に耐磨耗性の低い領域が形成される場合があるが、本溶接法では、溶着金属の凝固速度が遅くなり WC 粒子が沈降する前

図3 二重シールドプラズマトーチの構造

に凝固するため、耐摩耗性の高い硬化肉盛溶接が可能である²⁴⁾。

一方、プラズマ溶接法は、ティグ溶接法に比べてビード幅が狭く、深い溶込み溶接が可能であり、高速溶接にも適しているため、薄板分野を中心に導入が進んでいる。溶接性能が溶接トーチの構造に大きく依存していることから、二重構造ノズル方式のトーチを適用したプラズマ溶接性能の調査結果が報告されている。二重ノズルトーチの構造は図3に示すとおりであり、タングステン電極を二重のノズルで囲った構造になっている。パイロットアーク発生後は、タングステン電極とカソードスリーブノズル間にガスを流さない（ほぼ無気流）ので、Arガス中の不純物、気流によるタングステン電極の消耗及び変形が極端に少なくなる。この効果により長時間の溶接でも電極先端部の形状変化はほとんど見られず、ビード外観及びマクロ断面も安定するという結果が得られる²⁵⁾。

1.4 複合プロセスによる高効率化

2つ以上の溶接プロセスを組み合わせること（以下、ハイブリッド溶接プロセス）で、各プロセスが互いに短所を補完し、長所を相乗効果で高めることが期待でき、レーザーアークハイブリッド溶接法がその代表である。高出力ファイバーレーザーは発振効率が高く、ビーム品質が優れるため、厚板鋼板における高速、高効率溶接への適用と実用化が期待されている。10kWファイバーレーザーとマグ溶接を組み合わせたハイブリッド溶接をT継手の水平隅肉溶接に適用する場合、レーザー先行の場合に滑らかな表面形状でピットなどの欠陥がないビードが形成でき、適切なマグ溶接条件を選択することで板厚12mmの1パス貫通溶接が可能であることが示されている²⁶⁾。一方、板厚12mmのI形突合せ継手に対しては、アーク先行／レーザー後行の場合に滑らかで安定な裏波ビードが得られる条件範囲が存在することが示され²⁷⁾、ともに高速ビデオカメラによる観察で、ビード形成メカニズムが考察されている。更に、橋梁及び産業機械などに使用される高張力鋼板（HT780鋼）にレーザーアークハイブリッド溶接を適用した場合において、最適な施工条件及び溶接材料についても検討されている²⁸⁾。

一方、高密度エネルギーな熱源としてレーザーよりも安価

図4 ティグ-ミグ複合溶接法の概略図

なプラズマと、アークを組み合わせたプラズマGMA溶接法も提案されている。鉄鋼材料に対しては、プラズマ電流によりマグ・ミグ溶接法より溶込み深さが浅くなる傾向にあるが、フランク角の制御が可能でフラットなビードを得ることができる。この特性を利用して低希釈率で、かつ高溶着な肉盛り溶接への適用可能性が報告されている。アルミニウム合金の溶接においては、プラズマの効果でMgの蒸気の発生が抑制され、また、スパッタの発生が極めて少ない美しいビード外観が得ることができる。このように良好な溶接特性により、オートバイフレームや鉄道車両の溶接部への適用が提案されている²⁹⁾。このプラズマGMA溶接法を純Arシールドで厚板の鉄鋼材料に適用し、パルス化したプラズマ電流が開先内のアークを安定化することで、ビード形成が改善されることも報告されている³⁰⁾。

最後に、ティグ溶接法とミグ溶接の複合化による、両溶接法の長所を両立することができる溶接プロセスを紹介する。本溶接法の概略構成図は図4に示すとおりである。適当な電極間距離と電極角度、電流バランスをとることで、先行ティグアークによる余熱効果で後行ミグアークを安定化し、純Arシールドでも安定なミグ溶接が可能となることが報告されている。この結果、安定な溶滴移行になりスパッタのない高効率ミグ溶接が可能であり、表面酸化がなく、かつ30ppm未満という溶存酸素量を実現している。また、本複合溶接プロセスは、ティグ電流がミグ電流以上の場合にミグアークが安定し、ティグ電流と溶込み深さの増加割合がほぼ一致するという知見が得られている³¹⁾。

1.5 その他

サブマージアーク溶接法に関して、デジタル電源を使用して電流波位相制御を行い、1層1パス施工法におけるスラグ剥離性に関する検討が行われ、2電極の電流波形制御、電極配置、及びEN比率を適性に選定することで良好なスラグ剥離性を兼ね備える可能性が報告されている³²⁾。

アーク溶接関連機器として、溶接技能者の確保と育成という課題に対して、近年の各種センサ技術とユーザインタフェースを実現するソフトウェアの性能向上により、溶接シミュレータが開発されている³³⁻³⁵⁾。実アークを出さない仮想的な訓練装置は、トーチの動き、アークの挙動等が保

護面内部のモニタに表示されるのが特徴であり、モニタ上に表示された最適トーチ角度及び溶接速度と訓練時の状況をリアルタイムで比較したり、訓練後に評価パラメータ毎に得点表示されたりする等、自分が実施した溶接結果を客観的に評価することが可能である。国内の訓練装置は、訓練者が実際にアークを出し、4台の小形カメラが撮影した溶接の様子を、外部モニタと溶接保護面内部に取り付けた小型モニタに表示し、リアルタイムに得られる映像をもとに、指導者が直接指導するタイプとなっている。

その他の溶接法としては、固定したパイプの突合せ裏波溶接を自動で行う MIAB 溶接法が開発されている。パイプ両側に定電流特性の直流溶接電源を接続し、両端部に永久磁石を配置して回転磁界を与え、片側のパイプを近づけて接触させて 1.5 mm～2.0 mm のアークを点弧し、アークを磁界により高速で回転させて加熱、熔融させ、片方のパイプを圧接する方法である³⁶⁾。

最後に、2010年版の ASME Sec. IX QW-409.1 の規格化に対応する新しい入熱管理方法として「True Energy™」を紹介する³⁷⁾。より真の入熱に近い値を求める新しい手法であり、瞬時電流・瞬時電圧を計測して乗じた値を用いて溶接入熱を求めている。デジタル溶接電源ならではの高速演算

性能を活用した計算手法であり、対応溶接電源が増えてきている。

文 献

- 1) 経済産業省生産動態統計 2) 日本溶接協会, 溶接技術 59-10 (2011), pp.80-88 3) 上山ら, 溶接学会誌, 81-1 (2012), pp.5-15 4) 恵良, 溶接学会誌, 79-6 (2010), pp.20-23 5) 西坂ら, 講演概要, 87 (2010), pp.54-55 6) 小野ら, 講演概要, 89 (2011), pp.348-349 7) 藤原, 溶接技術, 58-1 (2009), pp.86-92 8) 藤原, 溶接技術, 59-2 (2011), pp.51-56 9) 山崎ら, 溶接技術, 58-5 (2010), pp.80-84 10) 松村, 溶接技術, 59-9 (2011), pp.90-96 11) 片岡ら, 溶接技術, 58-2, pp.58-63 12) 草場ら, 講演概要, 89 (2011), pp.356-357 13) 津山, 講演概要, 86 (2010), pp.65-66 14) 津山, 講演概要, 87 (2010), pp.71-72 15) 津山, 講演概要, 88 (2011), pp.170-171 16) 鷹羽ら, 講演概要, 88 (2011), pp.48-49 17) 松下ら, 講演概要, 88 (2011), pp.43-44 18) 劉ら, 溶接技術, 59-1 (2010), pp.63-67 19) 鈴木ら, 溶接技術, 58-3 (2010), pp.74-79 20) 泉谷ら, 講演概要, 87 (2010), pp.69-70 21) 泉谷ら, 講演概要, 88 (2011), pp.41-42 22) 中谷ら, 講演概要, 89 (2011), pp.172-173 23) 片山ら, 講演概要, 89 (2011), pp.161-162 24) 篠崎ら, 講演概要, 89 (2011), pp.42-43 25) 劉ら, 講演概要, 88 (2011), pp.42-43 26) 申ら, 論文集, 29-3 (2011), pp.174-180 27) 申ら, 論文集, 29-3 (2011), pp.181-186 28) 菅ら, 論文集, 29-4 (2011), pp.248-257 29) 上山ら 30) 田代ら, 講演概要, 88 (2011), pp.40-41 31) 金丸ら, 論文集, 30-1 (2012), pp.29-34 32) 安藤ら, 講演概要, 86 (2010), pp.146-147 33) リンカーンエレクトリックジャパン(株), 溶接技術, 60-4 (2012) pp.64, 34) 愛知産業(株), 溶接技術, 60-4 (2012), pp.65, 35) 四国化工機(株), 溶接技術, 60-4 (2012) pp.66, 36) Vladimir Kachinskiy ら, 溶接技術, 60-4 (2012) pp.68-73 37) 宮田, 溶接技術, 59-2 (2011) pp.63-66