実用講座

デジタル制御アーク溶接機

最近のデジタル制御アーク溶接機の進展*

原田 章二^{**}，上山 智之^{***}

原田 章二

上山 智之

Recent Development of Digital Controlled Power Source*

by HARADA Shoji^{**} and UYAMA Tomoyuki^{***}

キーワード

デジタル溶接機，マイコン，エンコーダ制御ワイヤ送給装置，インテリジェントフィルタ，パルスミグ・マグ溶接機，CO₂アーク・マグ溶接機，交流・直流両用ティグ溶接機

1. はじめに

最近では、デジタルカメラに代表されるように、身近な製品のデジタル化が急激に広まり、今やデジタル制御が主流となっている。アーク溶接機については、1980年代に溶接のシーケンス制御等にマイコンを使うようになり、デジタル化が始まったが、その後、溶接出力制御や複雑で高速の電流波形制御もマイコンで行うようになり本格化した¹⁾。その後も、デジタル化は進み、最近では、ワイヤ送給制御もデジタル化され、溶接機のパネルが、タッチパネルに置き換わり、溶接条件の記録・再生もできる溶接機も発売されるようになった。

各溶接機メーカーはここ2年～3年前から発売開始したデジタル制御溶接機についてはデジタル化の究極に近いものとして、それらの溶接機をフルデジタル制御溶接機あるいはツールデジタル制御溶接機と呼んで、従来のインバータ制御溶接機と区別してPRしている²⁻⁴⁾。

このため、一般のユーザより、デジタル制御溶接機とはどんなもので、今までの溶接機とどう違うかとの声も多く、ここではそれにいくらかは答えられればと考えている。

2. デジタル制御溶接機について

2.1 デジタル制御溶接機とは

非消耗電極のティグ溶接機はスタートボタンを押せば、ガスが溶接トーチから出て、その後に初期溶接電流が流れ、設定時間の後に本溶接電流で、溶接し、クレータ電

流で、クレータ処理を行い、溶接電流を遮断した後、アフターフローでガスを流し、その後にすべての動作を終了する。そういったシーケンス制御も溶接機では行う必要がある。また、溶接中の電流波形については、直流パルスティグ溶接であれば、パルス電流、ベース電流、パルス周波数、パルス時間比率などの設定に応じた電流波形を出力する必要がある。

消耗電極式マグ溶接ではこれに加えて、シーケンス制御では、初期ワイヤ送給（スローダウン制御）、と本電流に対応したワイヤ送給制御が行われる。また、電流波形制御では、パルスマグ・ミグ溶接、直流溶接など溶接方法に応じた適正電流波形制御が設定され制御される。

消耗電極式溶接機では、アーク長をいかに安定に制御し、スパッタを少なくするかが非常に重要な制御になる。また、溶接電流の設定値に応じて、最適な溶接電圧は異なるがこれを溶接機が自動的にほぼ適正電圧になるように自動設定するいわゆる一元調整機能や、その電流での溶接終了時のワイヤ先端の粒取り制御なども必要になる。

最新のデジタル制御溶接機では、前述したシーケンス制御、溶接電流波形制御、溶接終了時の粒取り制御など各種溶接開始時、終了時の制御などを、溶接中に同時に並行して、マイコンで制御している。さらにタッチパネルにより、ワイヤ材質、ワイヤ径、シールドガス組成、溶接法などを選択し、その情報に応じて各種の制御を適正に行うと同時に、溶接条件の記録・再生ができるようになっていて、さらにワイヤ送給速度制御もエンコーダでモータの回転数を計測し、デジタル制御を行いワイヤ送給の性能向上を図っている。

図1に最新のデジタル制御溶接機の制御内容を示したものであるが、電気制御の大部分がデジタル制御へ移行し、ロボットなどの外部制御装置や各種IT機器との接続も可能となってきた⁵⁾。

最新のデジタル制御溶接機ではパネルもタッチパネル

*原稿受付 平成17年8月2日

**正 員 ダイヘン溶接メカトロシステム(株) Member, DAIHEN Welding & Mechatronics System Corporation

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

とし、溶接機のデザインも一新しているが、インバータを主とした溶接電源の主回路も新開発し、制御速度を13kHzから40kHzまで、高速化し、性能向上をはかっている。

最新のデジタル溶接機の性能・機能が高まっているのは単に高性能マイコンの採用によるデジタル処理能力の増強や通信機能の強化だけでなく、基本的なインバータ溶接電源回路の性能向上を行ったこともベースとなっている。すなわち、インバータ主回路を高速化することにより、制御速度を高め、その上に、高速・大容量の高性能マイコンで最適な電流波形制御を行うことにより、溶接性能を飛躍的に向上させることができたわけである。

図1 溶接機のデジタル制御

図2は、最新のデジタル制御溶接機の主性能・特長について、その要因との関係で整理したものである。電源の小型軽量化は主回路のインバータ制御速度の高速化によるが、タッチパネルの実現や、溶接条件の記憶再生、各種モニター、良好な一元調整機能などは、マイコン制御のおかげである。スパッタが少ないとか高速溶接性に優れるなど溶接性能の向上は、主回路の開発とマイコン制御の両者の開発に加えて、アーク現象の解析から適正電流波形を行うことにより実現している。

図3に示すように、直流ティグ溶接機、交流・直流両用ティグ溶接機、一般汎用CO₂アーク・マグ溶接機（主として半自動溶接）、高性能CO₂アーク・マグ溶接機（主として自動・ロボット溶接用）、パルスミグ・マグ溶接機（CO₂アーク・マグ溶接兼用）、熱極性切替え機能付き低スパッタCO₂アーク・マグ溶接機と各種溶接法のデジタル溶接機が開発され品揃えがほぼ完了している。これらのデジタル制御溶接機では、共通のタッチパネルや電源デザイン及びワイヤ送給装置を統一しているが、それぞれの

図2 最新デジタル制御溶接機における開発内容と溶接性能・機能の関係

図3 デジタル制御溶接機の種類

溶接法に応じて、溶接品質が高まるようにそれぞれ電流波形制御には、工夫がされている。次に各種デジタル溶接機の制御方法とその特長について説明する。

2.2 最新のデジタル制御直流パルスミグ・マグ溶接機について

2.2.1 パルスミグ・マグ溶接の溶接性能の向上

図4に新開発の直流パルスミグ・マグ溶接機の構成を示す。電源主回路のインバータに新開発のソフトスイッチング式回路を適用して、IGBT（トランジスタの一種）のスイッチング損失を低減し、高周波トランスの交流周波数を従来インバータの13kHzから40kHzまで向上している。このため、トランス、直流リアクトルも従来に比べて非常に小さくすることができ、電源の応答性が格段に速くなり、アークスタート性および低電流アークの安定性が改善できた。低電流の安定性が良くなった理由のひとつにベース電流を30Aから10Aに下げることにより、低電流におけるパルス周波数を従来電源に比べて、高くできたことが上げられる。従来電源では、リップル

電流が大きく、ベース電流を25A以下にするとアーク切れが発生したが、新開発のデジタル溶接機ではインバータ制御周波数が3倍ほど高く、その分リップル電流が小さくなり、ベース電流を10Aと低く設定してもアーク切れが発生しない。図5に、低電流域でのパルス電流・電圧波形の一例を示すが、平均電流23Aでも、パルス周波数は40Hz程度であり、パルスに同期した1パルス1溶滴移行の安定した波形を示しているのが分かる⁹⁾。

また、インバータ制御速度が高まった分だけ変圧器（溶接機内）の変換効率が良くなり、変圧器が小さくできるし、直流リアクトルも小さくでき、溶接機の重量・容積も従来インバータ溶接機の1/2と小型軽量化に成功している。小型軽量化については、図3に示す新開発のデジタル制御溶接機のすべてに共通の特長である。

32ビットのマイコン制御部は、シーケンス制御、電流波形制御、インテリジェントフィルタによるアーク長に対応する電圧の抽出、パルス周波数可変によるアーク長制御などすべての制御機能を受け持っている。

図4 デジタル制御パルスミグ・マグ溶接機の構成

図5 小電流におけるパルス電流波形と溶滴移行

図6 デジタル制御溶接機のタッチパネルの例

溶接機のフロントパネルは図6に示すように、デジタル表示・設定式になっている。

視認性を重視して非階層式のキー操作で、溶接プロセス、ワイヤ材質とシールドガス、ワイヤ直径、表示および設定項目、シーケンス操作方法などを選択設定できる。また、溶接電流、アーク電圧、アーク特性などの設定は一つのツマミを用いてできる。この時、ワイヤ送給速度も確認できるようになっている。

設定された溶接条件をセットとして記憶でき、最大100セット記憶できる。記憶された溶接条件を読み出せば、溶接結果が忠実に再現され、誰が設定を行っても、同じ設定になるので溶接品質の向上につながり、非常に便利になる。また、デジタルリモコンを使えば使用頻度の高い設定項目を電源から最大20m離れたところで設定できる。なお、リモコンには2種類あり、従来と同じ溶接電流とアーク電圧をボリュームで設定する通常リモコンもあり安価で使い易いため、そちらの方が多く使用される。

さらに、新開発のデジタルタッチとの組合せにおいては、溶接中でも、溶接電流あるいはワイヤ送給速度、アーク電圧の調整と表示ができ、適正な溶接条件を簡単に見出せる。また、記憶した溶接条件を溶接工の手元で読み出すことが可能である。

最新のデジタル制御パルスミグ・マグ溶接機の電流波形制御は、パルス有・無、あるいは鉄・非鉄により、制御方法が異なる。パルスミグ・マグ溶接において、アーク長が適正であることは溶接品質に決定的な影響を及ぼす。パルスミグ・マグ溶接におけるアーク長制御は、アーク電圧がアーク長に対応していると考え、アーク電圧が設定値になるように、ユニットパルスを固定し、パルス周波数を変えることで制御している。アーク電圧が設定より高くなれば、アーク長が長くなったと判断して、パルス周波数を低くして、平均電流を低くする。そうするとワイヤ溶融量が減り、アーク長が短くなり、元のアーク長になるように制御している。

ただ、アーク電圧は、陰極降下電圧、アーク柱降下電圧、陽極降下電圧の3成分からなっており、このなかで

アーク長にほぼ比例するのは、アーク柱降下電圧のみである。

従って、今までは、アーク長に比例しない、陰極降下電圧の変化もアーク長情報電圧として、フィードバックされ、アーク長制御系はこの誤ったアーク長情報に应答し、かえってアーク長の変化をもたらししてしまうこともあった。大きな陰極電圧降下の変化によるアーク電圧の変動現象としては、短絡期間中の陰極点の消失に伴うアーク電圧の低減や短絡解除直後の異常なアーク電圧の上昇(約10V以上)などが挙げられる。従って、アークの安定性を向上させるために、アーク長変化に関係しない異常なアーク電圧変化成分を除去して正しいアーク長情報電圧の抽出が必要である。

図7に新開発のインテリジェントフィルタによるアーク長情報電圧の抽出結果を示す⁹⁾。短絡Aは時間の長い短絡であり、アーク電圧が正常なベース電圧より12V低くなっており、そのままアーク長制御に使えばパルス周期が大幅に短くなってワイヤ溶融速度が速くなりすぎてアーク長は過大に長くなってしまふ。このことを防ぐために、インテリジェントフィルタは正常なベース電圧より約2V低い電圧をアーク長情報電圧として抽出した。また、短絡Bは時間の短い短絡であり、短絡解除直後のベース期間中にアーク電圧がほぼパルス電圧まで以上に上昇し、パルス電圧と混在している。このアーク電圧をそのままアーク長制御に使えばパルス周期が大幅に長くなり、ワイヤ溶融速度が遅くなりすぎアーク長は過大に長くなる。インテリジェントフィルタはパルスの立ち上がり期間、パルス期間、パルスの立ち下がり期間に応じて異常なアーク電圧成分を分離し、正しいアーク長情報を抽出している。このインテリジェントフィルタはソフトウェアによって実現され、溶接中にアーク長の変化に応じて自動的にフィルタのパラメータを修正することによって、異常なアーク電圧を合理的に除去でき、正しいアーク長情報を抽出して、アーク安定性そして溶接品質安定性の向上に大いに寄与する。

このインテリジェントフィルタの採用により、陰極点が不安定になりやすい、純アルゴンガス気中のチタンやインコネルなどのミグ溶接においても、従来溶接機よりかなりアーク安定性が向上する⁷⁾。

なお、新デジタル溶接機のパルス無しモードにおいては、CO₂アーク・マグ溶接などが行われるが、従来パルス電源のCO₂アーク・マグ溶接に比べて、アークの安定性は格段に良くなっている。従来パルス電源では、パルス溶接におけるベース電流の安定化のために、100A程度以下の小電流では、大きなリアクトルとなるがそれ以上の電流域では小さなリアクトルとなる特殊な過飽和リアクトルを用いており、CO₂アーク・マグ溶接における短絡移行溶接において、短絡電流の立ち上がり速度が遅く、短絡時間が長くなりやすいため溶接の安定性が劣っていたが、デジタル溶接機では、インバータのスイッチング周波数が高く、パルスのベース電流の安定化のための過飽和リアクトルは不要で、リアクトルは極めて小さく、CO₂アーク・マグ溶接専用のデジタル制御溶接機と同じようなマイコン制御で電流波形制御を行っており、CO₂

図7 インテリジェントフィルタによるアーク長に対応する電圧の抽出

アーク・マグ溶接時の溶接性能は見劣りすることはない。

1 台の溶接機で、パルスマグ・ミグ溶接はもちろんパルス無しの CO₂ アーク・マグ溶接においても、優れた溶接性能を有しており、ロボット溶接では、パルスの有・無をティーチングで選択設定できるので、例えば比較的厚板で、トーチ角度も適正なところはパルスマグ溶接で溶接し、薄板や、トーチ角度がワークの干渉で悪くなる場所等では、パルスなしで、溶接するなどして全体的に、溶接品質を向上させることができる。

2.2 CO₂ アーク・マグ溶接機の溶接性能向上について

デジタル制御 CO₂ アーク・マグ溶接機については、図 3 に示すように、一般汎用 CO₂ アーク・マグ溶接機、高性能 CO₂ アーク・マグ溶接機、極性切り替え機能付き低スパッタ CO₂ アーク・マグ溶接機の 3 種類の溶接機が開発されており、用途により使い分けされている。一般汎用 CO₂ アーク・マグ溶接機と高性能 CO₂ アーク・マグ溶接機では、アークスタート性と高速溶接性で若干の性能差がある。高性能 CO₂ アーク・マグ溶接機では、前述したパルスミグ・マグ溶接機の直流モードと、ほぼ同様の溶接性能となっており、ロボット溶接などの自動溶接機として必要なアークスタート性や高速溶接性を配慮した高品位な溶接機である。

一般汎用 CO₂ アーク・マグ溶接機は、半自動溶接を中心として考えており、デジタル溶接機の中では、普及機と位置付けており、コンデンサ放電によるアークスタート時の電流立ち上がり速度を早める回路を省略するなどし、価格を少し低く設定している。

極性切り替え機能付き低スパッタ CO₂ アーク・マグ溶接機は、スパッタを現在の技術で極限まで低減した溶接機で、スパッタ低減のための特別な制御回路が組み込まれている⁹⁾。また、極性を電氣的に切り替える機能を組み込んでおり、薄板でギャップ裕度が要求される場合や溶接変形を小さくしたい場合に対応ができる溶接機である。図 8 は、低スパッタ・低入熱 CO₂ アーク・マグ溶接機のスパッタ発生量を従来インバータ溶接機と比較した図である。スパッタ発生量が、1/3～1/4 に低減されている。特に、150 A 以下の溶接電流では、スパッタの発生が極めて少なく、溶接後のスパッタ取り作業が不要になることが多い。

図 8 スパッタ低減機能付きデジタル溶接機によるスパッタ低減

スパッタ低減の制御回路として、短絡時の電圧波形から、アーク再生のタイミングを予知して、アーク再生時の溶接電流を数十アンペア程度まで低く抑えており、アーク再生時のスパッタ発生量を低下させている。

図 9 は、板厚 0.7 mm の薄板の重ね継ぎ手でギャップを 0～1.4 mm まで変化させたワークの溶接を、混合ガス (70%Ar+30%CO₂) を用いて、棒マイナス極性で溶接した例であるが、溶接条件は固定であるにも関わらず、ギャップ変化に影響されず、十分な溶け込みとギャップを埋めるのに十分な余盛量を与え、良好なビード外観と広いギャップ裕度を確保することができる。この場合の狙い裕度は上板側へ 0.5 mm、下板へ 1.5 mm の範囲であり、比較的広い。この溶接機では、棒マイナス極性においても、スパッタの発生量は少ない。

2.3 ワイヤ送給装置のデジタル制御⁵⁾

従来のワイヤ送給装置では図 10(a) に示すように、ワイヤ送給速度の指令電圧とワイヤ送給モータの再起電圧が一致するようにモータ駆動電圧をフィードバック制御していた。しかしこの方法では、必ずしもモータの回転数を制御していることとはならないため、モータへの周囲温度変化・1 次側電源電圧の変動によっては、ワイヤ送給速度が多少変化することもあった。

ワイヤ送給装置のデジタル制御はこのような問題を解決するために開発された方法で図 10(b) に示すように送給モータに取り付けたエンコーダで検出したモータの回転数とワイヤ送給速度の指令値から所定のモータ回転指令値を演算しモータ駆動電圧のフィードバック制御を行う。ワイヤ送給制御のデジタル化にともなう送給速度変動の安定化はアーク安定性に大きく影響し、CO₂ アーク溶接のスパッタ低減や高速溶接性、またパルスミグ・マグ溶接に置けるアーク長の安定化に大きく寄与する。

図 3 に示す新開発のデジタル溶接機シリーズでは、ワ

図 9 棒マイナス極性溶接によるギャップ裕度の拡大

ワイヤ送給速度の安定化のためにこのデジタル制御を採用するとともに4ロール方式を採用している。図11に送給装置の外観を示す。デジタル制御により一次側電圧の変動や周囲の温度、モータの温度の影響を受けずに、設定どおりのワイヤ送給速度が、フィードバック制御され、送給速度の変動幅をプラスマイナス1%以内に抑えることに成功している。また、ワイヤ送給用ロールは標準で4ロールとしており、加圧力が同じ場合、送給力は2ロールの場合の1.5倍と強くなる。実際の使用においては、2ロール方式に比べてワイヤ加圧力を小さくでき、ワイヤに傷がつきにくく、コンジット内にワイヤの切削粉がたまり、送給不良になることが生じにくい。コンジット内にワイヤの切削粉がたまり、ワイヤ送給不良が生じるとワイヤ送給モータの負荷電流は高くなるが、デジタル溶接機では、モータ負荷電流が設定より越えれば異常表示をすることもでき、コンジット清掃のタイミングを知らせることも可能である。

(a) ワイヤ送給モータのアナログ制御

(b) ワイヤ送給モータのデジタル制御

図10

2.4 デジタル制御ティグ溶接機の性能向上について

デジタル制御のティグ溶接機も、タッチパネルを採用し、溶接機の外観は、消耗電極方式のデジタル制御溶接機のそれとよく似ている。主な特長としては、デジタル設定なので再現性がよく、溶接の安定性が良いこととインバータの制御周波数が50kHz（1次側）と高く、アークスタートが良いことと溶接電源が小型軽量化していることである。この他に、デジタル制御溶接機ならではの機能もある。非常に好評なのは、溶接中に溶接電流をトーチスイッチの操作で容易に変えることができる機能である。図12に示すように、トーチスイッチをダブルクリックすれば、予め任意設定した電流変化量だけ溶接電流が高くなるし、シングルクリックすれば、任意設定した電流変化量だけ溶接電流が低くなる。ティグ溶接では、両手で溶接操作をすることが多いが、溶接中の溶接電流を簡単に変えられるので、溶接の状況に対応して良好な溶接結果が得られる⁹⁾。

また、デジタル制御交流ティグ溶接においては、交流の周波数を50～200Hzの広い範囲にわたって調整できる。交流周波数を高く設定すると棒プラス極性で、母材をクリーニング作用で、清掃するが、その時間が短く、陰極点は遠くまで行けず、アークの集中性は、向上し、入熱の分布範囲も狭くなる。図13に交流周波数50Hzと200Hzのビード外観を比較して示すが、50Hzでは溶接中にビードが広がりやすいが、交流周波数を200Hzまで上げればビードおよびクリーニング幅は均一で、やや狭くなるのが分かる。

従来の交流ティグ溶接機では交流周波数を変化させた時、電流波形は矩形で、ピーク電流は固定されているので、パルス周波数を高くするほどピークの電流通電時間

図12 トーチスイッチ操作による溶接中の溶接電流の変更

図11 4ロール方式エンコーダ制御ワイヤ送給装置

溶接電流：200A 溶接速度：40cm/min 母材：A5052 4mmt		
周波数	ビード外観	
50Hz		
200Hz		

図13 交流周波数可変による溶接性の改善例

図14 交流周波数調整にともなう出力電流低減の自動補正

が短くなり、結果として図14に示すように平均電流は低くなる。これに対して、最近のデジタル制御溶接機では、交流周波数の増加に連動してピーク電流を自動的に高く設定することにより出力電流の減少量を半分以下に抑えることができ、溶け込み深さはほぼ一定である⁹⁾。

交流の周波数を高めに設定すると上述のようにアーク集中が良く、隅肉やかど継手の作業性が向上するし、薄板の突合せ溶接などでは、ビード幅の広がり少なく、裏ビードのコントロールが容易になる特徴がある。

3. おわりに

最近のデジタル制御溶接機の特長について、紹介したが、デジタル制御溶接機の性能・機能は、高性能マイコンの採用による制御能力の向上とインバータ電源主回路

の高速化などに負うところが大きいと説明してきた。これは事実であると思うが、溶接機の性能・機能向上はこれらだけではなく、アーク現象を主とした溶接プロセスの物理現象の理解に基づく合理的な制御方法の開発なども不可欠な要素であったと思うし、今後のステップアップのための重要性はさらに増していくものと考えられる。

デジタル制御アーク溶接機の溶接法別の品揃えとしては、一段落した感があるが、ユーザニーズから較べるとまだまだ課題が残っており、ユーザニーズをしっかりと把握し、それに対応して、更なる溶接機の性能・機能の向上にチャレンジしたいと考えている。

参考文献

- 1) 原田, 上山: 最近のガスシールドアーク溶接電源について, 第7回溶接国際シンポジウム資料, 2001年11月。
- 2) 原田, 益城: アーク溶接ロボットシステムのデジタル化, 溶接技術, Vol. 50 (2002) No. 11, P. 101-111。
- 3) 三田: わが社のイナートガスアーク溶接機の現状と将来展望, 軽金属溶接構造協会誌, Vol. 43 (2005) No. 4, P. 29-36。
- 4) 濱本, 川本, 米森, 印南: デジタルアーク溶接機の開発, 溶接法ガイドブック 5 (2003)。
- 5) 三田: 溶接電源・機器, 溶接法ガイドブック 5, (2003), 113-122。
- 6) 全, 西坂, 上山: 新型パルス MIG/MAG 溶接機の開発, 溶接学会全国大会講演概要, 第71集 (2002)。
- 7) 上園, 全, 上山: 純 Ar ガスを用いたパルス MIG 溶接のステンレス鋼への適用, 溶接学会全国大会講演概要, 第75集 (2004)。
- 8) 恵良, 上園, 上山: 軟鋼の薄板溶接に適した低スパッタ GMA 溶接法の開発, 溶接学会全国大会講演概要, 75 (2004), 254。
- 9) 上山: マグネシウム合金のアーク溶接: 溶接技術, Vol. 53 (2005) No. 6, P.140-146。