溶接電源・機器による高効率化*

三田 常夫**

Improvement of Welding Process Efficiency with Welding Power Source and Equipment*

by MITA Tsuneo**

キーワード 溶接電源, GMAW, GTAW, 波形制御, デジタル制御

1. はじめに

パワーエレクトロニクス技術・電子制御技術の著しい進展を背景に、溶接電源・機器も目覚ましい進歩を遂げ、作業性向上・高能率化・適用範囲拡大など溶接作業の高効率化を目的とした種々な溶接プロセス制御・出力波形制御方法が開発されてきた。ここでは、近年の溶接電源・機器に採用されている主な制御方法の概要ならびに特徴について述べる。

2. CO₂・マグ溶接の電流波形制御2.1 CO₂溶接の電流波形制御

CO₂溶接は高能率で経済性も比較的良好であることから、自動・半自動溶接を問わず、広範囲な産業分野で使われている。しかし、スパッタ低減や高速溶接でのアーク安定性向上などについての要望も強い。

CO₂・マグ溶接の特性改良を目的とした出力制御方法には、図1に示すようなものがあり、短絡期間・アーク期間それぞれのタイミングで電流・電圧波形を制御する。短絡電流増加遅延制御は、短絡初期の所定時間中は電流の増加を抑制して溶滴と溶融池の接触を確実にし、主に瞬間的短絡の発生を防止する。電流増加速度制御、短絡電流増加抑制制御は短絡時に通電される電流を必要最小値に抑え、アーク再生電流制御は短絡解放直前の電流値を低下させることによって、アーク再生にともなうスパッタの発生を抑制する。短絡強制解放制御は、異常短絡発生時に最大エネルギーを供給して、アーク切れなどの不安定現象を防止する。また電流減少速度制御、短絡促進制御は異常な溶滴の形成を阻止する¹⁾。

これらの制御をいくつか組合せることによって、スパッタを従来制御の1/10程度まで低減することができる。その一例を図2に示す。またアークの安定性向上を図ると、図3のように溶接速度3~4m/分での溶接も可能となる²⁾。

2.2 低周波交流マグ溶接

薄板のアーク溶接では母材の熱容量が小さいため、溶接箇所穴明きや溶落ちを生じ易いが、交流波形を適用することによって作業性を大幅に改善することができる。EN極性のマグ溶接ではワイヤ溶融量が増大するため、交流溶接での電流値は、図4に示すように、通常(DCEP)のマグ溶接より10~20%程度低くできる。

このような溶接電流の低下は、母材への入熱を低減し、

図1 CO₂アーク溶接における電流波形制御

(a) di / dt 制御

(b) 電流波形制御

図2 スパッタ発生状況の比較

*原稿受付 平成14年12月11日

**正 員 日立アビメカニクス(株) Member, Hitachi Via Mechanics, Ltd.

重ねすみ肉継手などにおける溶接ビードのブリッジ性を大きく改善する。図5はその一例を示したもので、過大なギャップを有する極薄板の重ね継手（板厚0.6mm・ギャップ2mm）であるにも拘らず、低周波交流マグ溶接で

は良好な溶接結果が得られる。なお低周波で極性を切替える交流マグ溶接では、極性によるワイヤ溶融速度のアンバランスに起因したアーク長の変動が発生するため、極性変化に応じて出力を増減させるなどの工夫が必要である³⁾。

3. パルスマグ・ミグ溶接の電流波形制御

3.1 直流パルス溶接

現在実用化されているパルスマグ・ミグ溶接は、表1に示す小電流パルス、標準パルスおよび大電流パルスの3種類に大別される。標準パルスは最も広範囲に使用されているパルスマグ・ミグ溶接方法で、ワイヤ送給量に同期したパルス電流制御を行うことによって、パルス周期毎に1個の溶滴をワイヤから離脱させて溶融池へ移行

溶接電流：370A、アーク電圧：23V、
溶接速度：4m/min、
母材：下板・SPCC2.3mmt×上板・SPCC1.6mmt

(a) CO₂重ねすみ肉溶接のビード外観

溶接電流：235A、アーク電圧：27V、
溶接速度：3m/min、
母材：下板・SPCC1.0mmt×上板・SPCC1.0mmt

(b) マグ重ねすみ肉溶接の断面マクロ

図3 高速溶接結果の一例

【ビード外観】

【断面マクロ】

(a) 直流マグ溶接

【ビード外観】

【断面マクロ】

(b) 低周波交流マグ溶接

[交流周波数：3.3Hz、EN極性比率：50%]

試験片：亜鉛めっき鋼板（目付量60g/m²）
板厚0.6mmt、ルートギャップ2mm
ワイヤ：YGW12・φ0.6mm、
ワイヤ送給速度：7.6m/min、溶接速度：180mm/min
シールドガス：Ar+20%CO₂

図5 極薄板の重ねすみ肉溶接

図4 交流マグ溶接の電流波形

表1 パルスの種類とその特性

パルスの種類	小電流パルス	標準パルス	大電流パルス
電流波形			
溶滴移行			
溶滴移行の駆動力	パルス電流×2回	パルス電流	ベース電流
パルスの特徴	幅狭・高ピーク・極小ベース	幅狭・高ピーク・小ベース	幅狭・高ピーク・大ベース
パルス周波数	アーク電圧によって変化	アーク電圧によって変化	可変・固定
出力調整	パルス周波数(ベース時間)	パルス周波数(ベース時間)	ベース電圧(パルス波形、周波数は一定)
適用電流範囲	φ1.2アルミワイヤ・小電流域	ワイヤ、材質制限なし・小～大電流域	鉄、SUS・大電流域(臨界電流値以上)
用途	・アルミ薄板の小電流溶接 ・ティグ溶接の置き換え など	・アルミの一般的な溶接 ・亜鉛めっき鋼板の高速溶接 など	・狭開先溶接、SUS大電流溶接 ・薄板の高速パルス溶接 など

させ、いわゆる1パルス1溶滴移行が行われる。

小電流パルスは比較的新しいパルス制御であり、パルスパラメータを標準パルスより小さい値に設定し、下限溶接電流値の大幅な低減を図るものである。パルスエネルギーが小さいため1パルス1溶滴移行は実現できないが、2個のパルスで1個の溶滴がワイヤ端から離脱して溶融池へ移行し、2パルス1溶滴移行が規則的に行われる。図6はその適用例であり、φ1.2mmアルミニウム合金ワイヤを用いた板厚1mmのすみ肉継手のパルスミグ溶接であるが、平均溶接電流を数十A以下まで低減できるため、穴明きなどのない良好な溶接結果が得られている⁹⁾。

大電流パルスは上記2種類のパルスとは異なり、ベース電流（電圧）が主体となるパルス電流制御で、ベース電圧の増減によって出力を調整する。パルス周波数は固定されるため、その周期に同期した溶滴移行は行われないうが、アークの硬直性・指向性改善効果があり、アーク長を極力短くすることが必要な狭間先溶接や高速パルスマグ溶接などに適用されている。

図6 小電流パルスミグ溶接の適用例

3.2 交流パルス溶接

交流パルス溶接は直流パルス溶接のベース期間に相当する部分の一部あるいは全体をEN極性とする溶接方法で、図7に示すように、対象期間の後半部をEN極性にする後半ENタイプ、前半部をEN極性とする前半ENタイプ、ほぼ全体をEN極性とする全期間ENタイプの3種類が実用化されている。

交流パルスのEP期間中には、直流パルスの場合とほぼ同様の電流が通電されるため、EP電流の電磁ピンチ力による規則的な溶滴の離脱・移行が行われ、交流周期

図7 交流パルスミグ溶接の電流波形

表2 パルスマグ・ミグ溶接の電流波形波形制御

パルスの種類		電 流 波 形	制 御 対 象			主な特徴・効果
			溶滴移行	溶融池	母材入熱	
標準パルス制御	直 流		◎			・ 1パルス1溶滴移行 ・ スパッタレス溶接 ・ 汎用性大
	交 流		○		◎	・ 1サイクル1溶滴移行 ・ 極性効果で溶込み減少 ・ ワイヤ溶融速度増大
低周波パルス重畳制御	直 流		○	◎		・ 波形切替で溶融池制御 ・ 溶融池振動で欠陥防止 ・ ビード波の明瞭化
	交 流		○	◎	○	・ 波形切替で溶融池制御 ・ 耐溶落ち性大幅改善 ・ 入熱制御効果あり
交流/直流複合パルス			○	◎	◎	・ 交流/直流時間比率制御 ・ 溶融池制御+入熱制御 ・ 広範な溶込み制御可能 ・ ビード波の明瞭化作用大

◎：制御の主目的 ○：効果あり

に同期した溶滴移行（1 サイクル 1 溶滴移行）が繰返される。EN 期間中に通電される電流は数十 A 程度であるが、ワイヤ溶融に対する EN 極性効果は大きく、交流パルスでのワイヤ溶融速度は直流パルスの場合より増大し、溶込みが浅く余盛の高い溶接ビードが得られる⁵⁾。また、ヒューム発生量が低減されるといった効果もある⁶⁾。

このような交流パルスミグ溶接は、自動車部品などへのアルミニウム材の適用拡大にともない、近年その採用が増加しつつある。

3.3 パルス溶接の電流波形制御

パルスマグ・ミグ溶接では、上述した単純なパルス電流制御の他に、パルス波形の複合制御方法もいくつか開発されており、その概要と特徴をまとめると表 2 のようである。

低周波パルス重畳制御は、2 種類のパルス電流波形を所定の周期で交互に切替える方法であり、直流・交流いずれのパルスマグ・ミグ溶接にも適用されている。パルス波形を切替えることによって溶融池に対する制御作用が発生し、溶融池振動による気孔の抑制⁷⁾、溶込み制御による耐溶落ち性の改善⁸⁾、あるいはビード波の明瞭化⁹⁾などの効果が得られる。

交流／直流複合パルス制御は、直流パルスの適正パルス電流と交流パルスの適正 EP 電流がほぼ同様であることを利用して、両者を所定の周期で交互に切替える制御方法である。この方法では、それぞれの時間比率の変化によって両者の特性を部分的に選択することができるため、溶融池や母材入熱に対する広範囲な制御が可能となる²⁾。ビード波の明瞭化を目的として、二輪車のアルミニウム部材に適用した一例を図 8 に示す。

なお上記 2 種類の複合パルス電流制御では、周波数が全く異なる中周波パルスと低周波パルスを組合せた制御となるため、低周波パルスの切替え時期によっては規則的な溶滴移行が乱されることとなる。そこで、低周波パルス周期を中周波パルス周期の整数倍となるように自動補正して、パルス電流波形の切替えは必ずベース（EN）期間からパルス（EP）期間への移行時に行うようにする低周波パルス周期の整数化処理制御も開発されている¹⁰⁾。

図8 交流／直流複合パルスミグ溶接の適用例

4. ティグ溶接の電流波形制御

ティグ溶接においても種々な電流波形制御方法が開発されており、その概要と特徴を表 3 に示す。パルス電流制御は 3 種類に大別され、直流・交流いずれの溶接においてもほぼ同様の特性・効果が得られる。

パルス周波数 10 Hz 以下の低周波パルスは入熱制御が主目的であり、姿勢溶接や差厚継手の溶接などに効果がある。パルス周波数 100 Hz 以上の中周波パルスはアークの指向性・硬直性改善に効果があり、小電流を用いる薄板の溶接や高速溶接などに有効である。低周波パルス重畳中周波パルスは、前述のパルスマグ・ミグ溶接の場合と同様に、溶込み制御やビード波の明瞭化などを目的として適用される¹¹⁾。

交流ティグ溶接特有の制御には、極性時間比率制御および交流周波数制御がある。極性時間比率制御は、クリーニング幅制御として良く知られているように、クリーニング幅・ビード幅・溶込み深さの制御に有効である¹¹⁾。交流周波数制御は比較的新しい制御方法であり、交流ティグアークの短所であるアークの集中性不足を改善し、直流ティグアークに近い特性をもたらす¹²⁾。表 4 はその効果を示す一例で、差異を明瞭化するためにシールドガス流量を過大に設定しているが、交流周波数の増加にともなって溶込み深さが増大し、クリーニング幅が減少しており、アークの集中性が改善されることを示している。

図 9 は、交流周波数制御と低周波パルス制御を組合せた溶接結果の一例である。アルミニウム薄板の角継手に対する交流ティグ溶接であるが、交流周波数制御によるアークの集中性改善効果と低周波パルス制御による入熱

表3 ティグ溶接の電流波形制御

制御の名称		電 流 波 形	制御対象・効果
パルス電流波形制御	低周波パルス	直流	アーク 溶融池 入熱 ● ○ ◎
		交流	・ 母材への入熱制御 ・ 溶融と凝固促進の繰返し ・ 姿勢溶接・差厚継手の溶接
	中周波パルス	直流	アーク 溶融池 入熱 ● ◎ ○
		交流	・ 小電流アークの指向性改善 ・ 薄板・異種金属の溶接
	低周波パルス重畳中周波パルス	直流	アーク 溶融池 入熱 ◎ ○ ●
		交流	・ 入熱制御＋溶融池制御 ・ ビード波の明瞭化
交流波形制御	極性時間比率制御		アーク 溶融池 入熱 ◎ ○ ● ・ クリーニング幅制御、電極消耗抑制
	交流周波数制御		アーク 溶融池 入熱 ● ◎ ○ ・ アークの集中性改善、溶込み増加
	交流／直流複合制御		アーク 溶融池 入熱 ◎ ○ ● ・ 作業性の改善、溶込み制御効果あり ◎：主制御目的 ○：効果あり

表4 交流周波数制御の効果

交流周波数 (Hz)	ビード外観	断面マクロ
25		
50		
100		
200		
250		

AC100A, dep=30%, シールドガス: Ar・20l/min
平ビード溶接, 母材: A5052・3mm t

図9 交流低周波パルスティグ溶接の適用例

制御効果で、肩垂れをほとんど生じない美しいビード外観が得られている。

交流／直流複合制御は、上述したパルスミグ溶接の場合と同様に、溶融池制御や溶込み制御を目的として用いられ、差厚継手の溶接などに効果がある。

5. 溶接電源・機器のデジタル制御化

5.1 ワイヤ送給制御

ワイヤ送給制御は、通常、送給速度指令電圧と送給モータの再起電圧が一致するように、送給モータ駆動電圧をアナログ回路でフィードバック制御することによって行われる。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、場合によっては送給速度の変動を生じることがある。

(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 ワイヤ送給制御方式の比較

図11 アーク溶接電源のデジタル制御

このような問題を解決するために開発された手法がワイヤ送給のデジタル制御化で、図10 (b) に示すように、送給モータに付加したエンコーダで検出した回転数と送給速度指令に基づいて演算した回転数が一致するように、デジタル回路で送給モータをサーボ制御あるいはフィードバック制御する。

ワイヤ送給制御のデジタル化によってもたらされる送給速度変動の抑制は、アークの安定性向上に大きく寄与し、スパッタ低減などの効果も得られることが報告され

図12 デジタル制御溶接電源の構成

ている¹³⁾。

5.2 溶接電源の出力制御

出力制御を始めとして、各種動作のシーケンス制御、パネル表示あるいは電流検出・短絡検出・異常検出等のセンサ信号処理など、溶接電源には多種多様な制御が要求される。そのため溶接電源のデジタル制御化は、従来から部分的に進められていたが、近年その進展は特に著しく、電源制御の大部分がデジタル制御へ移行し、図11に示すようにロボット制御装置や各種IT機器との接続にも十分対応できるようになってきた。

さらに最近では、DSP (Digital signal Processor) を採用し、図12のような構成のフルデジタル溶接電源も開発されるようになった¹⁴⁾。この電源ではアナログ回路の大部分を省略できるため、電源個々の個体差や条件設定のばらつきを大幅に抑制でき、溶接施工条件等の再現性を格段に改善できる。また出力制御速度の大幅な向上も可能であり、 μ 秒オーダーでの出力制御にも対応できる能力を持つ。

6. おわりに

電子制御技術の進歩にともなって溶接電源・機器の特性や機能も著しく改善され、高効率化を目指した新しい

アーク溶接プロセス・機器が次々に開発されてきた。そして最近では、DSPを採用したフルデジタル制御溶接電源なども出現し、より一層高速・高精度な出力制御にも対応可能な状況となっている。しかし残念ながら、現状ではその特性が十分活かされた手法の開発には至っておらず、もう一步踏み込んだ溶接プロセスの解析・開発が、今後の高効率化を進める重要な課題になるであろうと思われる。

参考文献

- 1) 山本：インバータ制御によるアーク溶接機の進歩と自動化への適応，本誌，58-4 (1989)，56-63
- 2) 三田：アーク溶接技術の進展，本誌，69-3 (2000)，6-12
- 3) 三田他：薄板用交流マグ溶接電源の開発とその適用，溶接法研究委員会資料，SW-2638-99 (1999)
- 4) 三田：アルミニウムの定電圧パルスミグ溶接，軽金属溶接，39-8 (2001)，1-11
- 5) 三田他：交流ミグ溶接の基礎検討，溶接法研究委員会資料，SW-2638-99 (1999)
- 6) USHIO 他：Fume Generation in Al-Mg Alloy Welding with AC-pulsed GMA Welding Method, Trans. of JWRI, 23-1 (1994)，21-26
- 7) 松井他：亜鉛めっき鋼板のアーク溶接における溶融池振動による気孔の低減，本会論文集，16-1 (1998)，45-50
- 8) 松井：薄板溶接施工における溶接品質向上への取り組み，溶接接合工学振興会，第10回セミナー資料 (1999)
- 9) 山本他：アルミニウムおよびその合金の低周波パルスMIG溶接法の開発，溶接法研究委員会資料，SW-2034-90 (1990)
- 10) 三田他：定電圧パルスマグ溶接電源の特徴とその知能化，溶接法研究委員会資料，SW-2476-96 (1996)
- 11) 鹿島他：ティグ溶接電源の実践的選り方，溶接技術，1998-2，72-79
- 12) 三田：アルミニウム溶接における新交流波形制御，軽金属溶接，37-5 (1999)，11-20
- 13) 濱本他：アーク溶接におけるデジタルへの移行，溶接法研究委員会資料，SW-2804-01 (2001)
- 14) ハックル他：デジタル制御技術の自動車製造におけるアルミニウム溶接への適用，溶接技術，2002-11，96-10