パルスマグ溶接における溶滴移行現象

殖栗成夫*, 小村宏次*, 水野孝治**

Droplet Transfer Phenomena in Pulsed MAG Welding

Shigeo Ueguri, Hirotugu Komura
and Takaji Mizuno

Synopsis

The droplet transfer phenomena in the pulsed MAG welding and the principle of the transistor-controlled pulsed MAG welder are discussed.

The droplet transfer phenomena are classified into four modes, and in only one mode of them, the droplet is minimized and transferred to the base metal without much spatter. The transistor-controlled pulsed MAG welder can control the current waveform so fine that the optimum transfer mode can always be realized and the stable arc and the sound weld can easily be obtained.

1. 結 言

パルスアーク溶接法は、ティグ(TIG)溶接、ミグ(MIG)あるいはマグ(MAG)溶接において、溶接の安定化、高品質化を目的として検討されてきている。特に、ミグあるいはマグ溶接においては、溶接の自動化、高品質化というニーズの中で、スパッタの発生軽減、ビード外観の改善、溶け込み形状の制御などに対するパルス電流波形形状の効果について、実験・検討がなされてきており¹⁻⁵⁾、最近の電力用半導体の進歩と相まって、溶接機電源としても、汎用のトランジスタ式パルス電源が開発され、その施工技術も徐々に定着しつつある^{6),7)}。

パルスミグあるいはマグ溶接においては、溶接

電流の波形は、アーク維持のための小電流(ベース電流)に大電流パルスを重畳させており、その大電流パルス通電時にワイヤ端の溶滴に母材方向に電磁力を働かせて溶滴を細粒化し、低い平均電流値においても溶滴移行およびアークを安定化させようというものである。しかし、従来はパルス電流の発生方法は、その簡便さから、商用周波数(50Hzまたは60Hz)に等しいか、その2倍の周波数の正弦波そのものを用いるものであったため、電流の高速制御ができず、急峻なパルス波形が得られなかった。そのため、軟鋼の溶接に対しても、シールドガスはArに極く近いものを選択せざるを得ず、スパッタは少ないが、アークが拡がってアンダーカットが生じやすく、溶接速度も上げられない状況であり、高級機のイメージを拭き切れなかった。しかしながら、パワートランジスタが汎用電源に採用されて、電流波形の制御性が良くなり、電源特性と溶接アーク現象との整合性がとれるようになった。そのため、軟鋼の溶接

昭和58年10月23日 受付

*三菱電機㈱応用機器研究所

**三菱電機㈱名古屋製作所

に対して市販の Ar/CO₂混合ガスを利用することも可能となってアークの集中性が増し、アンダーカットも生じにくくなり、溶接速度を上げることもできるなどのさまざまな効果が得られるようになった。

本報告は、最近研究・開発が進みつつあるパルスマグ溶接について、その溶滴移行現象およびトランジスタを用いたパルス電源の基本動作、特徴に関して述べたものである。

2. パルス電流通電時の溶接移行現象

パルス電流波形は、概略 Fig. 1 に示す通りであり、波形のパラメータとして、ピーク電流値 I_p 、ベース電流値 I_b 、パルス幅 τ 、パルス周期 T がある。溶滴移行現象を検討する際には、最終的にはパルス電流波形の適正形状を求めていく意味から、各波形形状に対する移行形態、およびパルス1周期あたりの溶滴移行量に着目する必要がある。

以下に示すパルス溶接に関する実験の条件は、ワイヤは直径1.2mmの混合ガス用軟鋼ワイヤ (AWS ER70S-G に準拠、たとえば大同特殊鋼製 DD50S)、シールドガスは Ar/CO₂=8/2 の混合ガス、母材は軟鋼(SS-41)、 $I_b=50A$ 、溶接は下向きビードオンプレートで、自動で行った。溶滴移行現象を高速度写真撮影する際には、被写体の背後からキセノンランプ光を入射させてシルエット写真を取り、撮影コマ数は3000コマ/秒である。

2.1 溶滴移行形態の分類

Fig. 2 は、 I_p と τ とを変数にとり、ワイヤ送給速度 $V_w=5m/min$ 、突き出し長15mmのときの溶滴移行形態を分類したものである。なお、Fig. 2 の特性はワイヤ送給速度が変化してもほぼ同様である。

(1) 領域 I ($I_p < 380A$)

この領域では、ピーク電流値が低くてアークが溶滴を充分包み切れず、溶滴に働く電磁ピンチ力が母材方向に作用しないため、パルス幅を少々長くしても溶滴が細粒化されない。溶滴移行は数パルスに1回となり、大粒のスパッタも出やすい。Fig. 3(a)はこの領域での溶滴移行の様子を高速度写真撮影した結果である。

(2) 領域 II ($I_p \geq 380A$, $\tau < \tau_{min}$)

この領域では、ピーク電流値はアークが溶滴を

Fig. 1. Pulsed current waveform.

Fig. 2. Classified regions of droplet transfer modes.

包み母材方向の電磁ピンチ力を及ぼすのに必要な値以上はあるが、その通電時間が短いため、溶滴が細粒化されない領域である。溶滴移行は数パルスに1回生じる程度であり、溶滴径も大きくなりやすく、スパッタも出やすい。(Fig. 3(b)参照)

(3) 領域 III ($I_p \geq 380A$, $\tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max}$)

この領域ではパルス電流が適正な時間幅にわたって加わり、電磁ピンチ力によって細粒化された小溶滴が、Fig. 3(c)に示すように、1パルスに対して1個ずつ規則正しく移行していく。このように1パルスに対して1溶滴ずつ移行させることは、溶滴移行が電流によって制御できるという意味で重要である。溶滴が細粒化できるため、アーク長を短くしてもワイヤ端は母材に接触せず、短絡電

Fig. 3. Droplet transfer phenomena.

流によるスパッタ発生も抑えられ、かつ局部加熱ができて溶接速度を上げることできる。

(4) 領域IV ($I_p \geq 380A$, $\tau > \tau_{max}$)

この領域では、パルス電流が通電される時間が長くなって、1つの溶滴が移行したあと、ワイヤ

端の熔融金属部が長く伸び、引き続き数個の溶滴が移行していく。そのため、ワイヤ・母材間は接触しやすく、短絡電流によってスパッタが発生することもある。また、それを避けようとするれば、アーク長が長くなってアンダーカットが生じてし

まう。さらに、この領域では、ワイヤ送給速度が同じであれば、パルス幅が長くなる結果として、パルス周波数は必然的に低下して周期が長くなり、そのためワイヤからの溶滴の離脱前後のアーク長の変動も大きくなってアークが不安定となる。Fig. 3(d)は、この領域での溶滴移行状況を示す。

以上のように、パルス電流波形によって溶滴移行形態は大きく分けて4つの領域に分類できるが、(i)スパッタの発生を抑えるとともにアーク長を短くし、母材への局所加熱をすること、(ii)同一ワイヤ送給速度で考えたとき、溶滴の移行回数をできる限り多くしてビード形式をより均一にすること、(iii)溶滴移行前後のアーク長変動を少なくすること、という実用的な要件を考えれば、パルス波形形状は、上記の領域III内で、しかも領域IIとの境界近くに設定するのが望ましい。これは、1パルス周期当りの移行溶滴重量をどの程度まで小さくできるかという問題と関連してくる。

2.2 移行溶滴重量

パルス波形を印加した場合、1パルスあたりにワイヤ端からどの程度の大きさの溶滴が移行していくかを知ること、パルス周波数の上限・下限を決める上で重要な事柄となる。

ワイヤ送給速度を設定し、 I_p , I_b を定めてしまえば、ワイヤ送給量に見合った入熱を電流によって供給せねばならないことから、 τ の決定と同時にパルス周波数も実験的に求められる。ワイヤ送給速度5m/minのとき、Fig. 2の4つの領域に対応した I_p とパルス周波数との関係および I_p と1パルスあたりの移行溶滴重量 M (mg/パルス)との関係をFig. 4に示す⁵⁾。ここで M の値は、ワイヤ送給量をパルス周波数で割って求めた。Fig. 4の特性は突き出し長が10~25mmの間で変化してもほぼ同一である。図からわかるように、380~550Aの程度の電流が流れている場合、1パルスあたりに移行する溶滴重量は最小約6mgである。このような最小溶滴重量 M_{min} は、ワイヤ送給速度(平均電流値)によって若干変化する。Fig. 5は、 $I_p=450A$ としてワイヤ送給速度を変化させたときの、領域IIIでの M_{min} および最大周波数 f_{max} を実験的に求めたもので、ワイヤ送給速度が上昇し、パルス周波数も大きくなって電流波形が純直流に近くなると、 M_{min} は減少して純直流における M の

Fig. 4. Classified regions of droplet transfer modes.

Fig. 5. Variations of M_{min} and f_{max} with wire feeding rate.

値に近づく。純直流で M_{min} が減少するのは、ワイヤ先端部に常にピンチ力が働き、先端の溶融部が尖ってくるからである。

ワイヤ端に生じる静止溶滴の形状は、表面張力、重力、電磁ピンチ力によって決まるが、電流値380Aのもとで、静的なつりあいの条件から溶滴重量を計算すると、約7.3mgとなる。したがってFig. 5に示した M_{min} は、物理的に可能な溶滴重量の最小限度に近いと考えられる。

トランジスタ式パルス溶接機の利点の一つは、パルス周波数を電源周波数に無関係に変化させることができる点であり、パルス周波数の設定に際しては、ワイヤ送給速度の増減に応じて常にパルス形状が Fig. 2 または Fig. 4 の領域Ⅲに入るように、同期して増減させることができる。従来のパルス溶接機は、周波数がほぼ固定であるので、上記のようなパルス周波数とワイヤ送給速度との対応関係をとることができないため、溶滴移行形態は必ずしも適正であるとは限らない。

3. 突き出し長変動に対する補償

ミグあるいはマグ溶接においては、トーチ・母材間距離が変化すると突き出し長が変化するため、電流値を一定に保てばワイヤ溶融速度が変化し、結果としてアーク長が変化する。電流値、電圧値とともに一定値に保つには、トーチ・母材間距離を一定に保つ必要があるが、半自動溶接において手振れが発生したときの補償法として、パルス波形のパラメータを変化させてアーク長をほぼ一定に保つことが必要になる。波形パラメータとしては I_p , I_b , τ , T があり、現在のところ電圧を検出して目標アーク電圧と比較し、パルス幅を微調させる方式とパルス周波数を微調させる方式とがある。Fig. 2 または Fig. 4 の領域Ⅲの条件を満たしている限りは、ワイヤからの 1 パルスあたりの移行溶滴重量を均一にする意味で、ワイヤ送給速度が決まればパルス周波数が決まるようにし、突き出し長の変動に対する補償をパルス幅の微調

にて行う方が好ましい。突き出し長の補償手段により、たとえば、突き出し長が 10mm のとき 200A, 27V であったのが、突き出し長 30mm のとき 160A, 28.2V となり、実用上のアーク長はほぼ一定に固定される。ちなみに、従来のパルス電源では、突き出し長 10mm のとき 200A, 28V であり、突き出し長 30mm のときは 160A, 32V で電圧、電流ボリウムを再調整しなければ、アーク長が大きく変化する。

4. 主回路構成

トランジスタを用いたパルスマグ溶接機の主回路構成を Fig. 6 に示す。3 相交流入力はトランスで降圧され、ダイオードブリッジを通して平滑な直流電圧になる。この直流電圧はトランジスタのスイッチング作用によってパルス状に整形され、リアクトルを経てアーク負荷へ供給される。この例では、ベース電流用として、トランジスタのスイッチング作用によってほぼ平坦な 50A の直流電流が供給されている。このように 3 相交流を一旦平滑・直流化しているため、3 相平衡負荷状態で運転できるので、従来のパルス溶接機より定格入力が 40% (31KVA → 18KVA) 低下し、従来の CO₂ 溶接機並みの契約電力料となる。

パルス周波数とワイヤ送給速度との関係、目標アーク電圧とワイヤ送給速度との関係は、ワイヤ材質・径によって変化するが、それらはいずれも制御回路内に記憶され、作業者はワイヤ材質・径をスイッチで選び、継手に応じた電流値を設定す

Fig. 6. Schematic diagram of pulsed current supply.

るだけで、ワイヤ送給速度およびそれに対応したパルス周波数、目標アーク電圧が決まり、もうこれで Fig. 2 または Fig. 4 の領域Ⅲの条件範囲内に入る。このあとは継手に応じてアーク長を微調整するためのポリウムだけを調整すればよく、従来のパルス溶接機のようなたくさんのポリウム調整は不必要である。

5. 溶接施工上の特徴

5.1 スパッタ発生量の低減

小電流域から大電流域まで、パルス電流のピンチ力によって溶滴が細粒化されるため、スパッタの発生は極端に減少し、スパッタ除去に大きな労力を要していた部門では著しい作業時間の削減が

図られる。**Photo. 1** は溶接電流 250A、溶接速度 400mm/min の条件での軟鋼材の溶接ビードの外観を示すもので、(a)はパルス溶接機を用いた場合、(b)は従来の CO₂アーク溶接機を用いた場合である。パルス溶接機の場合、スパッタの母材への付着はほとんど見られない。

5.2 溶接の高速化

トランジスタ式のパルス溶接機では、パルス電流の通電に同期して溶滴の移行が規則正しく行われ、かつ電流波形も、突き出し長の変化に伴い若干変化するもののほとんど一定であるため、母材への入熱、ビード形成が均一になされる。そのため、特に薄板で高速溶接を行ってもビードが途切れにくく、安定な溶接結果が得られる。**Photo. 2**

(a) Pulsed arc welding.

(b) CO₂ arc welding.

Photo. 1. Bead appearance (Current : 250A, Welding speed : 400mm/min) .

Photo. 2. Bead appearance at high welding speed (Current: 220A, Voltage: 22V, Welding speed: 2 500mm/min) .

は、一例として、溶接速度を2 500mm/minとした場合の溶接ビード外観を示したもので、(a)がパルス溶接機、(b)がCO₂アーク溶接機の場合である。CO₂アーク溶接機の場合、ビードの途切れが見られる。

5.3 溶着量の増加

パルス溶接機では、電流波形がFig.1のようになっているため、従来のCO₂アーク溶接機の場合と比べ、同じ平均電流値に対しても、実効電流値(電流の2乗の平均値)が大きくなり、ワイヤ突き出し部分のジュール熱が増加してワイヤ溶融量が増加する。Fig.7は各溶接電流に対するワイヤ溶融速度の実測結果を示したものである。

6. 結 言

以上のように、トランジスタ式パルスマグ溶接機は、溶滴移行現象の解析を基礎に、電流波形制御技術を付加した画期的な溶接機である。巨視的な電流、電圧の特性でしか溶接現象を捉えきっていなかった従来の溶接機に比べると、電子制御技術、電力半導体素子の進歩および溶接の自動化、高品質化の流れの中で、今後の溶接機の新しい展開方向を示す好例であるといえる。特にスパッタが少なく、高速溶接が可能であることは、ロボッ

Fig. 7. Comparison of wire melting rate between pulsed arc welding and CO₂ arc welding.

トと組み合わせた場合にさらに効果が発揮される。汎用のトランジスタ式パルス溶接機は発売後約3年経過するが、その溶接適用例も増加していくことと思われる。

(文 献)

- 1) 殖栗他：第61回溶接アーク物理研究委員会資料 No.80-446(1980-11), 第81回溶接法研究委員会資料 No. SW-1252-81 (1981-2), 溶接学会全国大会講演概要 第28集 319 (1981-4)
- 2) 荒谷他：溶接学会誌, 50 (1981) 2, 201
- 3) 岡田他：第60回溶接アーク物理研究委員会資料 No.80-437(1980-7), 第64回溶接アーク物理研究委員会資料 No.81-467(1981-7), 第86回溶接法研究委員会資料 No. SW-1322-82 (1982-2)
- 4) 丸尾他：第60回溶接アーク物理研究委員会資料 No.80-436 (1980-7)
- 5) 殖栗他：第67回溶接アーク物理研究委員会資料 No.82-491 (1982-7)
- 6) 竹内他：電気製鋼, 53 (1982) 3, 189
- 7) 平本他：第83回溶接法研究委員会資料 No. SW-1293-81 (1981-7)