大電流 AC-MIG 溶接法の開発*

—AC-MIG 溶接技術の開発(第1報)—

都島 貞雄**, 藤田 治男**, 岩見 博志**

High-Current AC-MIG Welding Process*

—Development of AC-MIG Welding Process (Report 1)—

by Sadao Tsushima**, Haruo Fujita** and Hiroshi Iwami**

To prevent weld defects likely to occur in DC-MIG welding and to avoid arc-instability due to electromagnetic blow in DC-MIG welding, an AC-MIG welding has been developed which uses high voltage pulse from a pulse generator sympathized with industrial frequency.

This process enables to avoid the weld-defects caused by lower arc pressure exerting on the molten pool. Furthermore, this process can provide weld metal of a low oxygen content with high toughness.

Key Words: AC-MIG, Pulse, High-Current, arc pressure, low oxygen, high toughness, form of weld pool, lack of fusion

1. 緒 言

溶接継手への低温靱性の要求から大入熱サブマージアーク溶接法に代わって、マルチプル方式により、能率を低下させずに高品質で且つ低入熱化が可能な多パス直流 MIG 溶接法が検討されている¹⁾。しかし高電流域ではその強いアーク力の影響から、多層溶接に望ましくないフィンガー状の溶け込みを生じやすいことと、とくに高速溶接ではビード内部に融合不良欠陥が発生しやすいことから²⁾、使用できる溶接条件にも制約がある。また、大電流による従来の直流 MIG 溶接において高能率化のために多電極溶接する場合、アークは同相電流による磁気ブローを受けやすくアークの安定性に問題を生ずる場合がある。

これらの問題点を解決する方法として、MIG 溶接の交流化(AC-MIG)がある。しかしながら、MIG 溶接の交流化は技術的に困難な問題があった。一般的にシールドガス雰囲気では、手溶接(SMAW)やサブマージアーク溶接(SAW)のようにフラックスに由来しアーク放電を助けるアーク安定剤が無いため、数百V以上の高い再点弧尖頭電圧を超える溶接電源電圧が必要とされるが³⁾、安全上や電力効率などの問題のためこのような溶接電源を用いることはできない。SMAW や SAW 溶接電源ではその無負荷電圧が約80V³⁾と低いため、交流ガスシールドアークのワイヤ極性反転時に再点弧ミスを生じアーク切れおよびワイヤスティッキングのため溶接作業を持続できなくなる。従って、この再点弧特性を補償する手段が必要であり⁴⁾、アーク安定剤を含むフラックス入りワイヤを用いる方法⁵⁾や特殊なアーク安定成分を添加したソリッドワイヤを用いてアークを持続させる方法⁶⁾が報告されているが、いずれも特殊なワイヤを用いるものであり、その使用範囲も限定される。また、細径のソリッドワイヤを使用し電気的手段によりアークを持

続させる方法⁷⁾も報告されている。この方法は溶接電流が低くまた電気回路の詳細が不明であったが、本研究には相当参考になった。

本法は、実用化が容易なように通常の太径のソリッドワイヤを用い、SAW や SMAW に用いる汎用の垂下特性交流溶接電源に新規の試作パルス発生装置を付加して交流 MIG アークを安定に持続させる方法を検討することによって開発した大電流交流 MIG (AC-MIG) 溶接法⁸⁾である。本法によれば、通常使用されるステンレス鋼や低合金鋼を含めてあらゆる成分系あるいは線径のソリッドワイヤでも可能であり、かつ工業的に用いられている通常の交流 SAW 電源および溶接制御装置が利用できる等の利点がある。本報では、上述のソリッドワイヤ AC-MIG 溶接法の原理、AC-MIG 溶接法におけるアーク力、溶接欠陥の発生、高速性、溶接金属の低酸素特性および高靱性材質特性⁹⁾等の基本的特徴について、従来の直流 MIG (DC-MIG) と比較しながら検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 AC-MIG 溶接実験装置

AC-MIG 溶接には、汎用の1000A 交流 SAW 溶接機に試作パルス発生装置を付加した装置と水冷式二重シールド型トーチを使用した。装置の構成を Fig. 1 に、シールドカバーを装着したトーチの外観を Fig. 2 に示す。比較的低下熱または高速溶接時で二重シールド型トーチのみで溶融プールが保護できるときはシールドカバーを省略した。

Fig. 1 Components of AC-MIG Welding Apparatus.

*原稿受付 平成3年6月13日 昭和58年4月溶接法研究委員会で発表

**正 員 新日本製鐵㈱, 鉄鋼研究所, 接合研究部 Member, Joining Steel Research Lab., Nippon Steel Corp.

Fig. 2 Torch and Shield-Cover for High-Current AC-MIG Welding Process.

ワイヤ極性反転時の再点弧を容易に行わせるために印加するパルスは次のようにして与えられる。すなわち AC 溶接電源から取り出した商用交流 200 V をパルス発生装置に内蔵されている昇圧トランスで約 300 V とし、パルス発生用コンデンサに電荷が蓄積される。このコンデンサは交流溶接電源の 2 次コイル等と共に後述の L-C-R 回路を構成し、この L-C-R 回路をサイリスタでオン・オフさせることにより約 400 V のパルスを発生させる。パルス電圧とパルス幅については第 2 報に詳述する。パルス発生はワイヤ極性反転後としている。すなわちワイヤ(+)側と(-)側のそれぞれに交流アーク電圧がゼロ点を横切った直後に予め設定した基準電圧(約 10 V)に達した瞬間に同極性のパルスを発生させている。Fig. 3 にパルス発生装置回路の概要を示す。

2.2 AC-MIG 溶接現象の観測

アークおよびプールの観察には高速度カメラを用い、溶接電流・電圧、再点弧パルス電流・電圧の計測には電磁オシログラフおよびシンクロスコープを使用した。

2.3 アーク力の測定

AC-MIG アークのアーク力を従来の直流 (DC) MIG アークと比較しながら測定した。Fig. 4 にアーク力測定法の原理を示す。ビードオンプレート溶接前に試験片重量を天秤でバランスさせ、所定の MIG 溶接条件で溶接を行なったときの荷重の経時変化をレコーダで記録する。Fig. 4 のグラフに見られるように、溶接開始時にはアーク点弧の反力が大きく出るが、溶接が定常状態になるとこの荷重はほぼ直線的に増加する。これは、MIG 溶接金属の溶着速度が一定であるからアーク力が一定であることを示している。MIG アーク消弧後荷重は定値に減少する。このようにして MIG アーク溶接終了直前の最大荷重値と消弧後の定値の差を求めることによってアーク力を測定することができる¹⁰⁾。

Fig. 4 Measurement of arc force.

Fig. 3 Circuit of pulse generator.

2.4 溶融池の後退と融合不良欠陥の測定

溶融池の後退距離は、Fig. 5 に示すようにワイヤ中心から溶融池前面が母材表面に達するまでの長さとして定義し、溶融池の高速度写真から求めた。

また融合不良欠陥については、Fig. 6 に示すように母板表面を研削加工してから磁粉探傷法により欠陥長さを測定し、総欠陥長さの溶接長に対する割合として融合不良欠陥発生率を求めた。

2.5 溶接金属の材質試験

溶接金属の酸素量試験は、Si-Mn 系の 4 mmφ ソリッドワイヤと SM41B 鋼板を用いたビードオンプレート溶接により実施した。その AC-MIG および比較のための DC-MIG 溶接条件を Table 1 に示す。

Fig. 5 Bird eye View of Weld Pool and Moving Back of Molten Pool in the Longitudinal Section of Pool and Bead.

Fig. 6 Measurement of Lack of Fusion Percentage by Magnetic Particle Inspection.

Table 1 AC-MIG and DC-MIG Welding Condition.

Sample Wire	Mother Plate	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Remarks
4mmφ Solid	0.08C-0.75Si -1.8%Mn 25mm Thick.	800	30 (34)	13~15 (6.7)	Bead on Plate Weld

Table 2 AC-MIG Welding Condition.

Wire	Plate	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Heat Input (kJ/mm)
4mmφ Solid	Ti-B system 25mm Thick.	750~ 800	30	7.5	3.0

Fig. 7 Groove Shape and Location of Weld Metal Specimen.

溶接金属の切欠き靱性は Table 2 の AC-MIG 溶接条件による溶接金属から Fig. 7 に示す要領で試験片を採取し、試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 AC-MIG アークの安定性

ソリッドワイヤ AC-MIG アークの高速度写真の実例を Fig. 8 に、その溶接電流、電圧、印加パルス電圧波形を Fig. 9 に示す。Fig. 8, 9 から、アーク電圧に同期させた印加パルスによりワイヤ極性反転時の再点弧が容易に行われ、安定な AC-MIG アークが持続していることが分かる。このようにして汎用の交流 SAW 溶接電源にパルス発生装置を付加することにより太径ソリッドワイヤ使用の AC-MIG 溶接が実施できる。4 mmφ ワイヤ、800 A における AC-MIG 溶接ビードの断面のマクロ写真を

Fig. 8 Typical Arc Shape in High-Current AC-MIG Welding Process by High-Speed Photography of 3500 Frames/s.

Fig. 9 A change in welding current, voltage and injected pulse in High-Current AC-MIG Welding.

DC-MIG のそれと比較して Fig. 10 に示す。本研究では実用条件を DC-MIG と対比するため、AC-MIG の溶接電流は実効値を用いて検討した。DC-MIG ではフィンガー状の溶込み形状となり融合不良欠陥が生じ易いのに対し、AC-MIG 溶接では溶込み先端が丸みを帯びており欠陥防止に有利である。

3.2 AC-MIG アークのアーク力

4 mm ϕ ワイヤと 5 % CO₂-Ar シールドガスにより溶接電流を変化させて AC-MIG と従来 DC-MIG のアーク力を測定した結果を Fig. 11 に示す。アーク力は、AC、DC とともに溶接電流の 2 乗にほぼ比例して増加するが、AC の方が約 30 % も低い。これは Fig. 8 に示した様に、AC ア

Fig. 10 Comparison of weld bead shapes in AC-MIG and DC-MIG welding.

Fig. 11 Arc force in AC-MIG and DC-MIG welding.

Fig. 12 Moving Back of Molten Pool in High-Current AC-MIG and DC-MIG welding with respect to Welding Speed and Shielding Gas Composition.

ークではワイヤ(一)極性の半波でアークが這い上りアーク長が伸びることによりアーク力が低下すると考えられる¹¹⁾。アーク力が低いことは前述の丸みを帯びたボウル状の溶込み形状にする効果があり、AC-MIG 溶接の基本的特徴である低欠陥発生率の主因といえる。

3.3 AC-MIG 溶接における溶融池の後退と融合不良欠陥

溶融池の後退距離と溶接速度およびシールドガス組成との関係を Fig. 12 に示す。また、AC-MIG と従来 DC-MIG とを比較した融合不良欠陥発生率を Fig. 13 に示し、シールドガス組成と融合不良を発生しない速度限界の関係を Fig. 14 に示す。

高速度撮影による溶融池の観察から Fig. 5 に示したようにアーク下のガウジング面に発生する局部凝固壁の発生があり、これが後続する溶融池によって再溶融されずに残ることも考えられる。

溶融池の後退は、アーク力が増大する大電流ほどまた溶融池の先行を抑える高速ほど大きくなる。Fig. 12 から AC-MIG よりアーク力の大きい従来 DC-MIG においてより後退し、Ar シールドガス中の CO₂ % の減少は溶融池の後退に著しい影響を及ぼすことが分かる。これは CO₂ % を減少させるとアークがスプレー化することと関係があると思われる。後述の溶接金属の低酸素化による靱性向上に CO₂ % の減少が必要であるが、そのためにはアーク力が小さく溶融金属の後退が少ない AC-MIG が融合不良欠陥の発生を防止するのに有利であるとも考えられたので以下の検討を行なった。

Fig. 13 は Fig. 6 に示した試験要領の磁粉探傷法により求めた融合不良欠陥発生率と溶接速度の関係を示す。溶接速度を増大させると欠陥が発生するが、DC-MIG に比べ AC-MIG の方が高速溶接が可能となることを示している。しかしながら、Fig. 12 と Fig. 14 から融合不良の発生しない限界速度における溶融池の後退距離を AC-MIG と DC-MIG で比較すると前者では 11~12 mm、後者では 7~8 mm となるので、AC-MIG 溶接で融合不良が発生しにくい理由として溶融池の後退が小さくなるた

Fig. 13 Relation between Lack of Fusion Percentage and Welding Speed in High-Current AC-MIG and DC-MIG Welding.

Fig. 14 Maximum welding speed without causing lack of fusion in AC-MIG and DC-MIG Welding.

めだけではない。後述するように溶接金属の低酸素化による靱性向上に CO_2 %の減少が必要である。Fig. 14 から無欠陥の溶接速度限界が大きく、低 CO_2 %シールドガス組成で欠陥を生じ難い AC-MIG が有利である。

3.4 溶接金属の材質試験結果

3.4.1 溶接金属の酸素量

Table 1 に示す条件の AC-MIG ならびに DC-MIG 溶接でシールドガス中の CO_2 比率を変えたビードオンプレート溶接での溶接金属の酸素量を Fig. 15 に示す。AC-MIG 溶接金属の酸素量は DC-MIG より若干低く、両者とも CO_2 比率の平方根にほぼ比例する。AC-MIG 溶接金属の酸素量は次の実験式(1)で与えられる。

$$\log(\text{O})\text{ppm} = 0.47 \log \text{CO}_2 \% + 1.76 \quad \cdots \cdots (1)$$

(n=31, r=0.97)

融合不良欠陥防止条件を考慮すると AC-MIG は DC-MIG より格段に低酸素化が可能である。Fig. 14, 15 から、たとえば溶接速度 80 cm/min の場合、AC-MIG では 5 % CO_2 で無欠陥溶接が可能であり、溶接金属酸素量をほぼ 120 ppm とすることができ、一方、DC-MIG は 20 % CO_2 で酸素量は 300 ppm 止まりである。

3.4.2 溶接金属の低酸素化による靱性向上効果

500ないし 600 MPa 級低合金鋼の溶接金属の靱性向上についての多くの研究がなされておりマイクロ組織の微細化と低酸素化が重視されている。通常の Si-Mn 系溶接

Fig. 15 Oxygen Content in High-Current AC-MIG and DC-MIG Weld Metals.

Fig. 16 Relation between Oxygen Content and Notch Toughness of High-Current AC-MIG Weld Metal of Ti-B system.

金属では 250 ppm までは低酸素化により靱性向上効果がみられるが、さらに低酸素化すると組織が粗大化し靱性が低下する。一方、含 Ti 系溶接金属では 250 ppm 以下の低酸素域でも Ti 酸化物による粒内変態核生成効果が期待でき、針状で細粒のフェライト組織が得られる⁹⁾。Table 2 に示す溶接条件による溶接金属靱性の試験結果は Fig. 16 に示したように、酸素量 120 ppm 程度まではほぼ直線的にシャルピー試験遷移温度は低下し、低酸素化するほど靱性向上効果があった。

$$\text{vTrs}(^{\circ}\text{C}) = 0.32(\text{O})\text{ppm} - 137 \quad \cdots \cdots (2)$$

(n=12, r=0.93)

4. 結 論

(1) 汎用の垂下特性交流溶接電源を用いたパルス印加方式により安定したソリッドワイヤ AC-MIG 溶接が可能となる。

(2) 従来 DC-MIG に見られるフィンガー状溶け込み

とは異なり、AC-MIG では低アーク力特性によりボウル状溶け込みとなるので、融合不良欠陥が減少し高速溶接が可能となり、多層盛り溶接の欠陥防止に有利である。

(3) 融合不良欠陥防止特性の優れた AC-MIG では DC-MIG に比べて格段に溶接金属の低酸素化が可能である。

(4) 含 Ti 系 AC-MIG 溶接金属では酸素量 120 ppm 程度まで高靱性が得られる。

参 考 文 献

- 1) 田中ほか：大電流 MIG 溶接法と改良型アルミキルド鋼の LPG 船への適用，日本鋼管技報，(1979)，7 月，1～15。
- 2) 上垣ほか：MIG 溶接の融合不良発生現象，本会講概，No. 26 (1980)，148。
- 3) 安藤，溶接アーク現象，産報，1976 年，p. 129～135。

- 4) W. Lucas et al.: Why not AC MIG-welding, Welding Inst. Research Bull., 16 (3), 1975, 63～67.
- 5) 中西ほか：交流 MIG 溶接法の開発，住友金属 No. 2, 26～39。
- 6) Kazuo Agusa et al.: Stabilization of Pure-Argon-Shielded Metal-Arc by Rare Earth Addition to Electrode Wires, IIW Doc. X II B-287-80, IIW Doc. X II E-56-80.
- 7) W. Lucas et al.: Alternating current MIG - Welding, Advances in Welding Processes FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE, 9-11 May 1978, 117～126.
- 8) 都島ほか：大電流 AC-MIG 溶接法，溶接学会溶接アーク物理研究委員会第 81 回資料 (1985)。
- 9) 都島ほか：交流 MIG 溶接における溶接金属の酸素と靱性，本会講概，No. 29 (1981) 156。
- 10) 安藤，溶接アーク現象，産報，1976 年，p. 200。
- 11) 安藤，溶接アーク現象，産報，1976 年，p. 198。

大電流 AC-MIG 溶接用再点弧装置の開発*

—AC-MIG 溶接技術の開発 (第 2 報)—

都島 貞雄**，藤田 治男**

Pulse Generator for High-Current AC-MIG Welding Process*

—Development of AC-MIG Welding Process (Report 2)—

by Sadao Tsushima** and Haruo Fujita**

A pulse generator with a L-C-R circuit sympathized with the industrial frequency has been developed to facilitate the arc re-ignition in the high-current AC-MIG welding process.

Weld-defects can be avoided in this process because of lower arc pressure exerting on molten pools than in conventional DC-MIG. Furthermore, this process provides low oxygen weld metal with high toughness. Further improvement had been desired in the reliability of a Pulse Generator in order that this process can be used in practice.

It has been clarified that the most important parts in the pulse generator is thyristors as switches in the L-C-R circuit which need a considerable allowance against high pulse current and voltage.

Key Words: AC-MIG, Pulse, High-Current, L-C-R Circuit, Re-ignition.

1. 緒 言

手溶接 (SMAW)，サブマージアーク溶接 (SAW)，TIG 溶接には交流 (AC) が広く使用されているにもかかわらず，ソリッドワイヤによる MIG 溶接は専ら直流 (DC) の電極 (+) 極性に限られている¹⁾。

一方，MIG 溶接の交流化により従来の DC-MIG で問題であった融合不良欠陥や多電極化する場合のアークの相互干渉あるいは磁気ブローによるアーク不安定²⁾を防止できると期待される。前報³⁾では，ソリッドワイヤ大電流 AC-MIG 溶接プロセスの基本的特徴を実験室的に検討した結果を報告した。さらに工業的に実用化するに当たっては，非常に低い確率で発生する再点弧ミスによるアーク切れとそれに基づく融合不良欠陥発生の防止を計る必要があった。このアーク切れは，パルス発生装置の

容量増大により解決できることが判明した。それに伴ってパルス発生装置回路の構成素子の損傷が問題となったが，パルス電流・電圧の増加による充電トランス容量，主サイリスタの耐圧，許容電流などの検討により解決し，この大電流 AC-MIG 溶接プロセスの信頼性向上を計ることができたので本報ではその検討結果を報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 AC-MIG 溶接実験装置

AC-MIG 溶接実験装置には，前報と同様に汎用の 1000 A 交流 SAW 溶接電源に試作パルス発生装置を付加した溶接装置と水冷式二重シールド型トーチを使用した。装置の構成を Fig. 1 に，パルス発生装置の主要部を Fig. 2 に示す。ワイヤ極性反転時の再点弧を容易に行わせるために印加するパルスは次のようにして与えられる。すなわち AC 溶接電源から取り出した商用交流 200 V をパルス発生装置に内蔵されている充電トランスで約 300 V とし，パルス発生用コンデンサに電荷が蓄積される。このコンデンサは交流溶接電源の 2 次コイル等と共に後述

*原稿受付 平成 3 年 6 月 20 日

**正 員 新日本製鐵㈱，鉄鋼研究所，接合研究部 Member, Joining Steel Research Lab., Nippon Steel Corp.