より、裏波制御溶接が可能となった。

終りに、本研究を遂行するにあたって終始御激励と適切な指導を賜った名古屋大学工学部、益本功教授に深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 小野英彦：「片面狭開先 MAG 溶接法の研究（第1報）—直流棒マインス極性における裏波ビード形状の観察—」，溶接学会論文集 Vol. 3 (1985)，No. 2

全姿勢プラズマキーホール溶接法の検討*

羽田光明**，今永昭慈**，荒谷 雄**，松本輝夫***

Study on All-position Plasma Keyhole Welding*

by Mitsuaki Haneda**, Shoji Imanaga**, Takeshi Araya** and Teruo Matsumoto***

In this study, a pulsed current plasma arc is applied to the keyhole operating mode to control solidification of the molten pool. Further, the pulse time, peak current, and plasma gas flow rate are especially investigated.

A one-pulse/one-keyhole range of pulse times by low frequency is obtained at each of four positions (Flat, Overhead, Vertical-up, and Vertical-down). As a result, suitable pulse times for some combinations of the plasma gas flow rate (Q) and the peak current (I_p) are the peak time (t_p)=0.2–0.4 sec and the background time (t_b)=0.4–0.6 sec at welding speed (v) of 120 mm/min in case of stainless steel pipe (JIS SUS304, 4 mm thickness).

Then fixed pipes are welded, and it is found that orbital welding is possible by starting from the 4:30 position and by control of the plasma gas flow rate, the peak current, and the welding speed according to the welding position at 6:00 or 7:30, 9:00, and 12:00 (o'clock) positions.

And effect of joint alignment error is studied, and it is found that permitted limits with cap pass welding are miss-matching=1.0 mm, root-gap=0.5 mm, arc-length= ± 1.0 mm, and arc-deviation=1.0 mm in case of mild steel pipe (JIS STPG38, 4 mm thickness).

Key Words: Plasma arc welding, Plasma keyhole welding, All-position welding, Orbital welding, Pipe welding, Pulsed current welding

1. 緒 言

プラズマキーホール溶接は I 形突合せ継手で安定した裏波が得られる片面溶接法として活用されているが、その適用姿勢は主として下向き姿勢に限定されている。プラズマキーホール溶接法による全姿勢溶接の検討は10数年前に始まり、溶融池の保持に関する基礎研究¹⁾が行われたが、当時は一定電流で検討されたため適正ビードの得られる溶接条件範囲が極めて狭く、最近まで実用に供された報告がなかった。

しかし、近年、TIG 溶接と同様にプラズマキーホール溶接でも、条件域の拡大や安定化を目的とした溶接電流制御の検討が行われており、パルス電流の応用に関する2～3の研究が報告されている^{2,3)}。また、昭和56年の溶接協会訪中記によると、固定管の自動パルスプラズマ溶接が実施されていることが分かる⁴⁾。

そこで、本研究では溶融池の溶融・半凝固現象を制御する目的で、低周波パルス電流を利用した場合のキーホール形成現象に注目し、全姿勢溶接条件を検討すると

ともに固定管の全周溶接に適用したときの溶接結果について考察した。

2. 実験方法及び装置

Fig. 1 に示す実験装置により、基礎的現象及び溶接条件を検討した。試験片は、最初に軟鋼よりキーホール溶接が容易であるステンレス鋼管（材質 SUS 304），を用いて、肉厚を TIG 溶接の場合の I 形突合せ継手の実用溶接限界の 4 mm とし、加熱の影響が少ない大径管（外径 216.3 mm）で検討した。まず、プラズマトーチを固定しパイプを回転して、下向き〔F〕，上向き〔OH〕，立向き上進〔V_u〕，立向き下進〔V_d〕での溶接条件を bead-on-plate 溶接で求め、次いで固定管の全周溶接の条件制御を検討した。同様の手法で、軟鋼管（材質 STPG-38，肉厚 4 mm，外径 59 mm に内外周を機械加工）についても溶接条件を決定した。

溶接電源はサイリスタ制御方式の直流定電流特性を、Fig. 2(1) の模式図に示す矩形波パルスの電流値 I_p ， I_b 及びパルス時間 t_p ， t_b が任意に設定できるようにしたが、電流波形記録(2)が示すように立上がり時に過剰電流を含む出力波形となった。また、溶接中に 20 A の非移行式のパイロットアークを常時併用して、低電流時のプラズマアークの安定化を図っているが、これは同時に母材への投入入熱の一部としても作用している。

プラズマガスは Ar を使用し、シールドガスはサーマ

*原稿受付 昭和60年4月17日 昭和59年度春季全国大会で発表
昭和58年11月溶接アーク物理研究委員会発表

**正 員 (株)日立製作所機械研究所 Member, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

***正 員 (株)日立製作所ソフトウェア工場 Member, Software Works, Hitachi, Ltd.

ルピンチ効果によりアークが絞られる $\text{Ar}+7\% \text{H}_2$ 混合ガスを使用した。全周溶接の場合は、パイプ内面のバックシールドガスとして Ar を使用したが、各姿勢での検

討はキーホルの観察に主眼を置きバックシールドをしない状態で溶接したので、ビード外観などの評価は加味していない。

Fig. 1 Experimental Equipment

Fig. 2 Wave of Output Current

Outside diam. : 30mm
 Length : 46mm

Fig. 3 All-position Orbital Welding Equipment

Fig. 4 Schematic Diagram of Orbital Welding Head for the Study of Joint Alignment Error

Fig. 5 Relation between Pulse Condition and Keyhole Formation

Line ※ I_p, I_b, t_p : fixed

Fig. 6 Relation between Heat Input and Arc Force

Fig. 7 Suitable Range of Pulse Times
(One-Pulse/One-Keyhole Condition)

するが、ここでは、電流×時間で表示の $I_p \cdot t_p$ が一定となる。一方、アーク圧力は電流の2乗に比例し⁵⁾、※印の条件上では I_p, t_p も一定であるので Q を固定したときには、キーホール形成力を一定として入熱を変化した実験と言うことができる。溶接結果より、低入熱側から順に「間欠的キーホール」、「パルスごとのキーホール」、「連続的キーホール」に分類した。「間欠的キーホール」では、 I_p 中にキーホールが開孔しない時があり、連続した裏波が得られない。また、「連続的キーホール」では、一定電流によるキーホール溶接で見られる現象と同様に、[OH] 及び [Vu] 姿勢において裏波のへこみが発生する。「パルスごとのキーホール」では、 I_p と t_b に同期してキーホールが開孔・閉止するので、溶融池の溶融・半凝固によるビードの安定化が促進されて良好なビードが得られる。以下、この適正条件範囲を One-pulse one-keyhole 領域と呼ぶ。

Fig. 7 は $Q-I_p$ を固定し Fig. 5 の方式により t_p-t_b の組合せを変えたときに、各姿勢にトーチを固定しパイプの方を回転して One-pulse one-keyhole 領域を求めた結果である。各姿勢で $Q-I_p$ の条件を制御することを前提とし、一定電流でのキーホール形成範囲を参考にして、 I_p はその範囲を中心に、また Q は [Vu] 姿勢で低く、[Vd] 姿勢で高く設定したいいくつかの組合せを検討した。ここでは紙面の都合で、適正範囲の広い代表的な条件及び特徴的な現象が観察される条件を記述した。また、 I_p が 180A 程度まではダブルアークが発生しないように、ノズル孔径を 3mm とした。このノズル孔径では、約 2~3mm のキーホールが形成されるので、1Hz 程度のパルス周波数で50%程度の重なり代の連続した裏波が得られる v として 120 mm/min を採用した。なお、 v は入熱及びアーク直下への溶融金属の挙動に関係する因子であり、溶融池形状が変化して、キーホール形成の難易に影響を与える。また、 I_b は最低設定値の 35 A にした。

この結果より、各姿勢とも Fig. 5 で述べた等入熱の条件を示す2本の直線で囲まれた範囲に、One-pulse one-keyhole 領域が存在することが分かる。さらに、[F] 姿勢では入熱が過多で、キーホール形成力が大きい条件では溶け落ちが発生する。例えば、 I_p が 140A では電流が過大であるため、極めて短い $t_b=0.1$ S においてわずかに適正範囲が存在し、それ以上の t_b では連続的キーホールあるいは溶け落ちとなる。[OH] 姿勢では溶融金属がキーホールをふさぐ作用をしてアーク圧力で溶融池が支えられるため、大入熱側にも適正範囲が拡大される。[Vu] 姿勢では溶融金属がアーク(ノズル孔)直下から直ぐに垂れ落ちるため、プラズマガスによるキーホール形成力は弱い方がよい。そして、アンダーカットのない平滑な表ビードを得るには、溶融池幅が広く形成されるワインカップ状の溶込み形状が必要であり、一定電流では切断になるような高電流の I_p にする方が適正範囲が拡大する。例えば、 I_p が一定電流でのキーホール形成条件である 80A では、 $t_b=0.1$ S のほとんど一定電流に近い条件で適正範囲が存在するが、 t_p は 0.3~0.4 S と極めて狭い。これが、高電流の I_p にして図示のように拡大する。[Vu] 姿勢では溶融金属がレズル孔直下に垂れ下ってキーホールを閉じるため、大きなキーホール形成力を必要とするが、 I_p を高電流にするとかえって溶融池が大きくなるので、 Q を高流量に設定する方がよい。しかし、キーホールが形成してもアーク圧力の変動で溶融池が吹き上げられ、溶融金属とトーチのノズル先端が接触する領域が存在する。本実験ではノズルとパイプ表面との距離(アーク長 l)を 3mm に設定しているので、TIG 溶接あるいはパルスプラズマ溶接で検討されている溶融池の共振周波数(20 Hz 付近)^{2,6)}とは異なり、キーホールの開閉に伴う振動の大きな振動が原因で、周波数はパルス周波数そのものである。また、 t_b が短くて溶融池が大きく成長する大入熱のパルス条件域で接触が発生しないことから、この接触現象は溶融池の大きさと、圧力変動、パルス周波数などの条件が合致したときに発生すると推察できる。また、 I_p の立ち上がりには発生する圧力変動の大きさは、オーバーシュートを含む電流波形に負うところが大きい。後半に使用したトランジスタ制御電源では、理想的な矩形波となっ

ているため圧力変動が小さくなり、接触の影響が少ない。

3.2 全姿勢溶接条件

パルス時間を各姿勢で制御することは技術的に容易であるが、各姿勢ごとにパルス時間 t_p - t_b を変えずに全姿勢溶接をするための適正範囲を求めた。

Fig. 8 の斜線部は、前図の結果をもとにした One-pulse one-keyhole の領域の共通範囲である。 Q と I_p は溶接結果より各姿勢の適正值を選定した。また、溶接速度が 120 mm/min では、前述のように 1 Hz 以上のパルス周波数のときに、50%以上の重なり代で連続的につながった裏波が形成した。この結果より、各姿勢に共通したパルス時間条件は、 $t_p = 0.2 \sim 0.4$ S, $t_b = 0.4 \sim 0.6$ S の範囲にあることが分かる。

Fig. 9 はパルス時間を $t_p = 0.3$ S, $t_b = 0.6$ S に固定し、 Q と I_p を変えたときの One-pulse one-keyhole 領域である。[F] 姿勢と比較して、[OH] 姿勢では Q の高流量側で裏波のへこみのために、[Vd] 姿勢では接触現象のために適正範囲が減少し、[Vu] 姿勢では Q に対する条件裕度が狭い。固定管の全周溶接の場合、全周にわたりの一様なビード形状を得るには、入熱やアーク特性が一定の状態では各姿勢を溶接することが望ましい。ここでは、 I_p を固定しても Q を各姿勢で制御すれば全姿勢溶接が可能であり、各姿勢で溶融池形状、熱効率の違いがあるが、入熱がほぼ一定の状態での全周溶接が可能であることを示している。

3.3 固定管の全周溶接条件

固定管の全周溶接では溶接開始点が再び終了点となるため、その位置(姿勢)と処理条件が重要である。プラ

Fig. 8 Common Area of Suitable Pulse Times

Fig. 9 Tolerance in Plasma Gas Flow Rate and Peak Current

ズマキーホール溶接では溶融池を貫通した穴が形成されているため、溶接終了時にその穴を閉じる操作(クレータ処理)が必要である。従来は[F]姿勢でクレータ処理法が検討されているが、重力が溶融池を押し下げるので過熱状態になれば溶け落ちや凝固後のへこみが発生する。また、小径管(径 100 mm 程度以下)では、後半部が予熱のために過熱するので、溶接電流を低下するなどの条件制御をする必要がある。一方、固定管の全周溶接では必ずしもクレータ処理を[F]姿勢で行う必要がないので、溶融金属が垂れ下がりてキーホールが閉じやすく、溶け落ちの発生し難い溶接姿勢を溶接終了点すなわち開始点とすることができる。ここでは時計表示で4時半位置のトーチ姿勢を溶接開始点とした(溶接は時計回りに進行)。

次に、溶接条件切替位置についての検討結果を述べる。Fig. 9 の結果に基づき、パルス時間を各姿勢とも共通とし、かつできるだけ I_p も固定条件で主として Q を制御することを前提に、各姿勢の溶接条件を選択した。そして、Fig. 10(1) のようにパイプ全周を4分割する位置に適用した結果から、次の現象が明らかになった。

[OH] 及び [Vu] 姿勢では裏波が凹状になり易い。小径管では6時位置がアンダーカットの発生起点となる。9時位置から [Vu] 条件では裏波が不足し、[F] 条件に移る10時半位置で Q の急増により裏波が過多となり、12時位置から [F] 条件では裏波が不足する。

これらの発生原因は、母材がパイプで曲率があるため、溶融池に作用する重力の方向を半径方向と接線方向に分けて考えた場合に、3, 6, 9, 12時の各位置で作用方向が反対方向に急変するためである。例えば6時の位置では、半径方向の分力は常にパイプ表面から外側に働いているが、接線方向の分力は6時を0として、溶融金属がノズル孔直下へ向う方向からノズル孔直下より後退する方向へと急変することが分かる。これが原因で、トーチの進行に伴ない溶融池の追従が悪くなり、6時以降のアンダーカットの発生起点となる。同様に、9時位置では半径方向の分力が9時を0として、パイプ表面から外側へ働いていた分力がパイプの中心へ向う方向へと変化するため、9時以降は溶融金属がキーホールを埋める方向に作用しキーホール形成力が不足する。また、12時位置では接線方向の分力が、溶融金属がノズル孔直下より後退する方向からノズル孔直下へ向う方向へと変化して、溶融池が垂れ下がる方向に作用するため、12時以降で裏波不足となる。

以上のように、トーチを固定し、パイプを母材として回転させて求めた溶接条件の有効範囲は、Fig. 10(2) の

Fig. 10 Position of Changing the Welding Conditions

ように45°ずれる(1時間半早く切替る)ことが分かった。さらに、曲率の影響が小さい大径管では、6時以降のアンダーカットの発生がないので〔OH〕条件で溶接可能である。また、9時位置で〔F〕条件にして Q を増加すると、裏波のへこみが防止でき、3時以降の溶接条件は〔V_d〕条件を採用して、予熱の影響の大きい小径管では I_p を減少する制御動作で溶接可能であることが分かった。

Fig. 11 はステンレス鋼大径管のビード断面で、Fig. 10の結果に基づき I_p を一定とし、 Q を各位置で切替えて溶接した。〔V_d〕条件の後半では v を速くして入熱を減少するとともに、ノズル孔直下への溶融金属の垂れ下がりがから逃れてキーホールが形成しやすくなった。各姿勢におけるビード幅、溶け込み形状はほぼ一様で、パルスに同期したリップルが形成される。

Fig. 12 は軟鋼小径管の溶接結果である。溶接条件は

Fig. 11 Cross Sections of Stainless Steel Pipe Joint

Fig. 12 Cross Sections of Mild Steel Pipe Joint

ステンレス鋼の場合と同様の手法で求めたが、主な相違点はビード形成状態を考慮して、ノズル孔径を2.4mm、標準の v を100 mm/minとした点である。さらに、〔V_w〕条件では v を遅くしてビード幅を広くするとともに、溶融池がトーチ進行に追従しやすくして、アンダーカットを抑制した。また、〔V_d〕条件の後半では I_p を低下して過熱を防止した。

3.4 開先精度・組立て誤差の影響

通常、TIG溶接による固定管の全周溶接では、ルートギャップを設定した精度の良いV開先を用いて、熱伝導による溶融現象で裏波を形成する。一方、プラズマキーホール溶接では、I形突合せ・ギャップ=0が基本であり、母材を貫通したアークで継手のルート部を直接溶融して裏波を形成するため、開先精度、組立て誤差、アーク変動の影響が少ない。しかし、ギャップに対してはキーホールの形成状態が大きく影響を受けると考えられるが、パルス電流を応用した本溶接法では溶融池の安定化が促進すると考えられる。そこで、これらの許容値について検討した。

Fig. 13 は〔m〕=1.0 mm, 〔g〕=0.65 mmの継手を溶接した一例で、目違いを設けた右側のパイプは〔l〕も±1 mm変動する誤差が複合されている。ここでは、初層の裏波に注目し、2層目は溶加材を送給して仕上げ溶接をする場合の各許容値を表示した。〔m〕, 〔l〕, 〔d〕は1 mm程度までの誤差でも裏波が平滑であり、裕度が狭いと考えられた〔g〕についても、0.5 mm程度までは〔g〕=0と同一条件で全周溶接が可能である。

4. 結 論

プラズマキーホール溶接に低周波パルス電流を応用し全姿勢溶接の検討を行い次の結論を得た。

- (1) One-pulse one-keyhole 形成現象に着目して適正パルス条件を把握し、プラズマキーホール溶接の全姿勢化の可能性を明らかにした。
- (2) 固定管の全周溶接における溶接条件切替制御法を検討し、ステンレス鋼管及び軟鋼管に適用して平滑な裏波で良好な溶け込み形状のビードを得た。

Fig. 13 Effect of Joint Alignment Error

(3) 開先精度, 組立て誤差の影響について検討し, その許容値を提示した。

参考文献

- 西口, 他2名: 全姿勢プラズマ溶接における溶融池の保持に関する基礎的検討, 溶接アーク物理研究委員会資料, 72-167 (1972).
- 丸尾, 他1名: パルスプラズマ溶接現象, 溶接アーク物理研究委員会資料, 85-579 (1985).
- C. D. Lundin, 他1名: Pulsed Current Plasma Arc Welding, Welding J., 54-1 (1974), 11-19.
- 新: 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会訪中記, 溶接技術, 29-8 (1981), 84-93.
- 岡田, 他2名: TIG パルスアークのアーク圧力測定, 溶接アーク物理研究委員会資料, 78-382 (1978).
- 丸尾, 他3名: パルス TIG 溶接における溶融池振動現象, 溶接アーク物理研究委員会資料, 82-485 (1982).

鋼管の磁気駆動アーク溶接におけるアーク回転現象*

高木健治**, 荒木田史穂**, 宮森英明**, 小澤幹男***

Arc Rotating Phenomena in Rotating Arc Butt Welding of Steel Pipes*

by Kenji Takagi**, Fumiho Arakida**, Hideaki Miyamori** and Mikio Ozawa***

Arc behavior of Rotating Arc Butt Welding were studied in order to extend the applicable pipe diameter and thickness ranges. Experiments were carried out for 216.3 mm O.D.×5.8 mm wall steel pipes by using design of experiment in which gap, arc current and exciting current were selected as important experimental factors. Main results are summarized as follows;

- (1) Arc rotating frequency is mainly affected by gap of pipes and arc rotating smoothness at the early stage of welding is affected by exciting current.
- (2) The period of melting process and arc rotating process is influenced by arc current.
- (3) Characteristic phenomena are observed by high speed photograph, such as showerlike spatter, small grain spatter, plural arc and dripping molten metal.
- (4) It was observed much small grain spatters were dispersed at the small gap than large gap of pipes. The good quality of welded joint was not obtained at small gap condition.

Key Words: Rotating Arc Butt Welding, Steel Pipe, Magnetic Field, Exciting Coil, Showerlike Spatter, Small Grain Spatter, Arc Rotating Frequency

1. 緒言

溶接の自動化が推し進められている中で, パイプ溶接に関しても TIG 法や MAG 法を中心として自動化の研究開発が盛んに行なわれている。磁気駆動アーク溶接法は, 2本のパイプ間ギャップにアークを発生させ, それに直交する磁場との相互作用により円周方向に高速で回転させ, その後圧接する方法である。TIG 法, MAG 法とは異り, トーチの位置やその動きを制御する機構が不要という簡単なシステムのため, 自動化に適している。溶接されるパイプ自身が電極となり高電流の使用が可能で非常に高能率であり, 自動化, 省力化に対するメリットは極めて大きい。

本溶接法はこれまでに管径 50 mmφ 程度の自動車用部品¹⁾や管径 90 mmφ までのガス導管の溶接に実用化²⁾されているが, 更に適用管径, 管厚を拡大するため溶接現象の解明実験を行った。

本研究では, 磁気駆動アーク溶接法のアークの挙動に及ぼす要因として, ギャップ, 溶接電流及び励磁電流の3因子を選定し, これらの因子のアーク挙動への影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試鋼管及び実験装置

実験に使用した鋼管は配管用炭素鋼鋼管 (SGP), 外径 216.3 mmφ, 管厚 5.8 mm である。

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。溶接用電源として直流垂下特性 (定格出力 1000 A, 50 V, 無負荷電圧 90 V) の電源を3台並列に接続して使用し, さらに同一の電源を磁界発生用として1台使用した。鋼管は互いに絶縁さ

1 D.C Welders for arc	5 Power supply shoe
2 D.C Source for magnetic excitation	6 Handle for clamping
3 Specimen	7 Cylinder
4 Exciting coil	8 Oil pressure unit
	9 Control unit

Fig. 1 Experimental equipment

*原稿受付 昭和59年7月4日 昭和56年度秋季全国大会で発表

**正 員 日本鋼管工事(株) Member, Nippon Kokan Koji K. K.

***正 員 日本鋼管工事(株) Nippon Kokan Koji K. K.